



mgr inż. Bernard Kotala

# **B**ADANIA WŁAŚCIWOŚCI I EFEKTYWNOŚCI ELEMENTÓW BETONOWYCH ZBROJONYCH TEKSTYLIAMI WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI

Praca doktorska

Promotor:

Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz

#### Podziękowania

Serdeczne podziękowania składam promotorowi Panu Profesorowi ANDRZEJOWI AJDUKIEWICZOWI za udzieloną pomoc i życzliwe rady.

Dziękuję Pracownikom Katedry Inżynierii Budowlanej za życzliwość, wyrozumiałość i cenne uwagi, w szczególności zaś Panu Doktorowi MARKOWI WĘGLORZOWI za wsparcie na każdym etapie pisania pracy, Panu Doktorowi LESZKOWI SZOJDZIE za pomoc w przysłaniu z Niemiec materiału do badań oraz Panu Doktorowi GRZEGORZOWI WANDZIKOWI za konsultacje dotyczące systemu *MAFEM3D*. Dziękuję również Pani Doktor BEACIE ŁAźNIEWSKIEJ-PIEKARCZYK z Katedry Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych za konsultacje przy opracowaniu receptury betonu drobnoziarnistego.

Za pomoc w technicznym przeprowadzeniu badań Panu Mgr inż. HENRYKOWI WÓJCIKOWI i Panu Inż. WŁODZIMIERZOWI MARCHACZOWI – Serdecznie dziękuję.

Pracę tę dedykuję mojej Rodzinie

# **S**PIS TREŚCI

WYKAZ	WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	9
ROZDZIA	۸Ł 1	11
WPROW	ADZENIE	11
1.1. Te	ksbet – nowy materiał konstrukcyjny	14
1.2. Ist	ota podjętego problemu i ogólny cel pracy	15
ROZDZIA	NL 2	18
TEKSBE	т јако Комроzyt	18
2.1. Wł	ókna w betonie – przeglad	19
211		10
2.1.1.	Włókna azbestowe	19 20
213	Włókna PVA	20 20
2.1.4.	Włókna PAN	21
2.1.5.	Włókna weglowe	21
2.1.6.	Włókna PP	21
2.1.7.	Włókna aramidowe	21
2.1.8.	Włókna PE	22
2.1.9.	Włókna ceramiczne	22
2.2. Wł	aściwości włókien	22
2.2.1.	Pole przekroju	26
2.2.2.	Gęstość	27
2.2.3.	Wytrzymałość na rozciąganie	27
2.2.4.	Uszkodzenia włókien	28
2.2.5.	Średnica i długość a wytrzymałość na rozciąganie włókna	29
2.2.6.	Wilgotność, temperatura a wytrzymałość na rozciąganie włókna	31
2.3. Oc	l przędzy do tekstyliów	33
2.3.1.	Charakterystyka przędzy	35
2.3.2.	Charakterystyka siatki tekstylnej	36
2.4. Be	ton drobnoziarnisty	38
2.4.1	Definicia	38
2.4.2.	Wytyczne przyjęte do ustalenia składu mieszanki betonu drobnoziarnistego	
2.4.3.	Mieszanki na potrzeby teksbetu	39
2.4.4.	Właściwości mechaniczne betonu drobnoziarnistego	40

ROZDZI BADANI	AŁ 3 A WŁASNE – PROGRAM	42 42
3.1. Ce	el badań	42
3.2. Za	kres badań	42
3.3. W	ybór modelu badawczego	43
ROZDZI	۹Ł 4	45
ZBROJE	NIE – BADANIA KONTROLNE	45
4.1. W	aściwości dostępnych siatek tekstylnych przydatnych w teksbecie	45
4.1.1. 4.1.2.	Siatka z włókien szklanych odpornych na alkalia – <i>AR-Glass</i> (A) Siatka z poli-winylo-alkoholu ( <i>PVA</i> ) w osnowie z termoplastycznego <i>PVC</i> –	45
112	(P)	45
4.1.3.	Slatka hybrydowa z włokien węgiowych (CARBON) i szkianych – (C)	40
4.2. Ba	adania kontrolne wytrzymałości i odkształcalności zbrojenia	47
4.2.1.	Metodologia badań	47
4.2.2.	Przędza z włókien szklanych odpornych na alkalia (A)	49
4.2.3.	Przędza z włókien z PVA (P)	51
4.2.4.	Przędza z włókien węglowych (C)	53
4.2.5.	Pręty stalowe – (S)	54
4.2.6.	Podsumowanie	56
ROZDZI <i>I</i> Badani	ΔŁ 5 Α DORAŹNE	60 60
5.1. Ba	adania przygotowawcze	60
5.1.1.	Badania przyczepności	60
5.1.2.	Badania próbne elementów płytowych	67
5.2. Ba	adania doraźne elementów płytowych	70
5.2.1.	Przygotowanie elementów w seriach do badań	70
5.2.2.	Badania towarzyszące betonu	72
5.2.3.	Stanowisko do badań podstawowych	75
5.2.4.	Przebieg badań	76
5.2.5.	Wyniki badań dla płyt zbrojonych prętami stalowymi (S)	78
5.2.6.	Wyniki badań dla płyt zbrojonych siatką z włókien szklanych (A)	79
5.2.7.	Wyniki badań płyt zbrojonych siatką z włókien PVA (P)	81
5.2.8.	Wyniki badań płyt zbrojonych siatką hybrydową z włóknami węglowymi (C)	83
5.2.9.	Porównanie wyników i wnioski z badań doraźnych	85

ROZDZIA	ላሂ 6	
BADANI	A DŁUGOTRWAŁE	93
C 4 D.		00
6.1. Pr	zygotowanie elementow	
6.2. Pla	anowany przebieg i sposob obciążenia płyt	
6.3. Sta	anowisko badawcze, wielkości mierzone	
6.4. Wy	yniki dla poszczególnych płyt	
6.4.1.	Płyta zbrojona prętami stalowymi (SR)	98
6.4.2.	Płyta zbrojona siatką z włókna szklanego odpornego na alkalia (AR)	101
6.4.3.	Płyta zbrojona siatką z włókien z PVA ( <i>PR</i> )	104
6.4.4.	Płyta zbrojona siatka z włókien węglowych ( <i>CR</i> )	106
6.5. Po	prównanie wyników i wnioski	109
ROZDZIA	۵ł 7	
BADANI	A CYKLICZNE	
7.1. Pr	zygotowanie elementów w seriach do badań	115
7.2. Sta	anowisko badawcze	116
7.3. Pla	anowany przebieg badań	117
7.4. Wy	yniki z badań cyklicznych dla poszczególnych pasm płyty	118
7.4.1.	Pasma płytowe zbrojone prętami stalowymi (SR)	118
7.4.2.	Pasma płytowe zbrojone siatką z włókien szklanych (AR)	120
7.4.3.	Pasma płytowe zbrojone siatką z włókien PVA (PR)	121
7.4.4.	Pasma płytowe zbrojone siatką hybrydową z włókna węglowego (CR)	123
7.5. Po	prównanie wyników i wnioski	124
		400
RUZUZIA		
DADANI	A UZUFELNIAJĄCE	
8.1. Za	kres wyrywkowych badań fizykochemicznych	132
8.2. Ba	adania mrozoodporności	133
8.2.1.	Elementy badawcze	133
8.2.2.	Stanowisko badawcze i sposób przeprowadzenia badań	133
8.2.3.	Wyniki i wnioski z badań mrozoodporności	134
8.3. Ba	adania w wodnym roztworze chlorku sodu ( <i>NaCl</i> )	137
8.3.1.	Elementy badawcze	137
8.3.2.	Stanowisko i sposób przeprowadzenia badań	137
8.3.3.	Wyniki i wnioski z badań	138

ROZDZIAŁ 9 Analiza numeryczna				
9.1. <i>MAFEM3D</i> – ogoina charakterystyka	141 141			
9.2.1. Beton – Kryterium zniszczenia	141			
9.2.3. Betonowy element zbroiony	145			
9.3. Model numeryczny	146			
9.3.1. Idealizacja przekroju zbrojenia	147			
9.3.2. Modele MES wybranych elementów badawczych	148			
9.3.3. Parametry wytrzymałościowe wybranych modeli	149			
9.4. Wyniki i wnioski	150			
9.5. Uwagi do modelu	154			
ROZDZIAŁ 10 Uproszczona metoda obi iczania	155 155			
10.1.Założenia i zasady ogólne	155			
10.2.Współczynnik materiałowy dla zbrojenia tekstylnego yr	157			
10.3.Nośność obliczeniowa na zginanie	157			
10.4. Wyniki i wnioski z obliczeń weryfikujących	158			
10.5.Proponowana procedura obliczeniowa				
10.6.Uwagi ogoine	162			
ROZDZIAŁ 11	163			
PODSUMOWANIE I WNIOSKI	163			
ROZDZIAŁ 12	168			
PERSPEKTYWY BADAWCZE	168			
12.1.Kierunki dalszych badań	168			
12.2. Przykłady zastosowań	169			
	170			
SPIS ILUSTRACJI	173			
SPIS TABLIC				
SPIS LITERATURY	181			

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- $A_c$  efektywne pole ściskanej strefy przekroju betonu o wysokości  $\lambda x$  i szerokości b [m<sup>2</sup>]
- $A_f$  pole przekroju zbrojenia tekstylnego [m<sup>2</sup>]
- $A_{f1}$  sumaryczne pole przekroju rozciąganego zbrojenia tekstylnego o środku ciężkości oddalonym o  $a_1$  od krawędzi rozciąganej [m<sup>2</sup>]
  - E moduł sprężystości podłużnej (moduł Younga) [GPa]
- Ecm średnia wartość siecznego modułu sprężystości betonu [GPa]
  - E<sub>f</sub> wartość modułu sprężystości dla włókna lub przędzy [GPa]
  - Es wartość modułu sprężystości dla stali [GPa]
  - F siła [kN]
  - $F_c$  siła w betonie o polu przekroju  $A_c$  [kN]
- $F_{f1}$  siła w zbrojeniu o polu przekroju  $A_{f1}$  [kN], [kN/mb]
- F<sub>n</sub> siła zrywająca pasmo siatki [kN]
- Fmax siła maksymalna [kN]
- Frys siła wywołująca zarysowanie [kN]
- Fzr-siła zrywająca [kN/m]
- L rozpiętość między podporami [m]
- M<sub>Rd</sub> nośność obliczeniowa przekroju na zginanie [kNm]
- M<sub>Ed</sub> moment zginający wywołany obciążeniem obliczeniowym [kNm]
  - $a_t$  pole przekroju pojedynczej przędzy siatki [m<sup>2</sup>]
  - $a_{f1}$  zastępcze pole przekroju pojedynczej przędzy siatki o średnicy  $\mathcal{D}_f$  o środku ciężkości oddalonym o  $a_1$  od krawędzi rozciąganej [m<sup>2</sup>]
  - a1 odległość środka ciężkości zbrojenia Af1 do krawędzi rozciąganej [m]
  - b szerokość przekroju [m]
  - bn szerokość pasma siatki [m]
  - c grubość otuliny [m]
  - d użyteczna wysokość przekroju [m]
  - fbd wartość graniczna naprężeń przyczepności [MPa]
  - f<sub>cd</sub> wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie [MPa]
  - $f_{ck}$  wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie [MPa]
  - $f_{cm}$  wytrzymałość średnia betonu na ściskanie oznaczona na próbkach walcowych [MPa]
  - $f_{ct}$  wytrzymałość betonu na rozciąganie [MPa]
  - f<sub>ctk</sub> wytrzymałość charakterystyczna betonu na rozciąganie [MPa]
  - f<sub>f</sub> wytrzymałość włókna (przędzy) [MPa]
  - f<sub>fyd</sub> wytrzymałość obliczeniowa przędzy na rozciąganie [MPa]
- f<sub>tyk</sub> wytrzymałość charakterystyczna przędzy na rozciąganie [MPa]
- h wysokość przekroju [m]
- n liczba wiązek lub splotów na 1mb siatki [1/mb]
- u ugięcie lub przemieszczenie [mm]
- umax ugięcie lub przemieszczenie odpowiadające sile maksymalnej [mm]
- $u_{rys}$  ugięcie lub przemieszczenie odpowiadające sile zarysowania [mm]
  - q obciążenie równomiernie [kN/m]
- q<sub>rvs</sub> obciążenie równomiernie rozłożone rysujące [kN/m]

- x położenie osi obojętnej (charakterystyczna wysokość strefy ściskanej) [m]
- $x_{lim}$  wartość graniczna x [m]
  - z ramię sił wewnętrznych [m]
  - $_{\mathcal{E}}$  odkształcenia [‰]
  - <sub>*Ec*</sub> odkształcenia w ściskanym betonie [‰]
- Ecu3 graniczne odkształcenia w ściskanym betonie [‰]
  - <sub>*Et</sub> odkształcenia rozciąganego zbrojenia tekstylnego* [‰]</sub>
  - $_{\mathcal{E}_{S}}$  odkształcenia rozciąganego zbrojenia stalowego [‰]
- <sub>Efvd</sub> obliczeniowe odkształcenia graniczne rozciąganego zbrojenia [‰]
  - $\eta$  współczynnik określający efektywną wytrzymałość betonu
  - $\lambda$  współczynnik określający efektywną wysokość strefy ściskanej
  - $\nu$  współczynnik Poissona
  - $\rho$  gęstość [kg/m<sup>3</sup>]
  - $\sigma$  naprężenia [MPa]
  - $\phi$  średnica [m]

Rozdział 1

# **W**PROWADZENIE

Najstarszą formę betonu (piasek, żwir, muszle i połamane kamienie połączone przez naturalne spoiwo zmieszane z wodą) znaleziono na Bliskim Wschodzie i datuje się ją na 5600 lat p.n.e. W Chinach piramidy w prowincji Shaanxi zbudowane z mieszaniny wapna i gliny wulkanicznej datowane są na 4000 lat p.n.e. Jednak najbardziej znany nam przykład najwcześniejszej myśli budowlanej odnajdujemy w Biblii w II Księdze Mojżeszowej [6], gdzie zacytowano faraona, który rozkazał naganiaczom i nadzorcom mówiąc:

"Nie dawajcie odtąd ludowi słomy do wyrabiania cegieł tak jak poprzednio."

Z tego czasu, tzn. z około 1950 r. p.n.e. pochodzi rycina (rys.1.1), która pokazuje Egipcjan przy budowie, w tym przy formowaniu cegieł. Wiedzieli oni, że glinę i słomę (włókno naturalne) należy połączyć ze sobą by cegły nie pękały przy schnięciu.



Rys. 1.1. Starożytni Egipcjanie przy formowaniu cegieł i ich stosowaniu na budowie (~1950 r. p.n.e.) [5]

Niektórzy badacze twierdzą, że bloki w piramidach w Gizie są różnego pochodzenia – jedne naturalne, inne stworzone przez człowieka – co oznaczałoby, że Egipcjanie przed Rzymianami znali i stosowali beton. Jednak to właśnie Rzymian uznajemy za

twórców pierwszego betonu (II w. p.n.e.) na bazie naturalnego cementu pucolanowego (*opus caementicium*). Te i wiele innych znanych i nieznanych odkryć stanowiły podstawy dawnej sztuki budowlanej.

Podstawą współczesnej branży budowlanej stał się cement naturalny, czyli *Cement Rzymski*, który opatentował Anglik, JAMES PARKER w 1796 r. Sposób produkcji tego samego cementu odkrył w 1818 r. Amerykanin CANNAVAS WHITE i rozpoczął produkcję w fabryce w pobliżu Nowego Jorku. Z kolei w 1824 r., również Anglik – JOSEPH ASPDIN, wynalazł i opatentował dobrze nam znany cement portlandzki (rys. 1.2 i rys. 1.3).



Artificial Stone.

ASPDIN'S SPECIFICATION.

- TO ALL TO WHOM THESE PRESENTS SHALL COME, I, JOSEPH ASPDIN, of Loeds, in the County of York, Bricklayer, send greeting WHEREAS His present most Excellent Majesty King George the Fourth, by His Lotters Patent under the Great Scal of Great Britain, bearing date at 5 Westminster, the Twenty-first day of October, in the fifth year of His reign, did, for Himself, His heirs and successors, give and grant unto me, the said Joseph Aspdin, His especial licence, that I, the said Joseph Aspdin, my exors, aditions, and assigns, or such others as I, the said Joseph Aspdin, my exors, aditions, and assigns, should at any time agree with, and no others, from time 10 to time and at all times during the term of years therein expressed, should and lawfully might make, use, exercise, and vend, within England, Wales, and the Town of Berwick-upon-Tweed, my Invention of "An Invavances IN THE MODES OF PRODUCING AN ARTIFICIAL STORE;" in which said Letters Patent there is contained a proviso obliging me, the said Joseph Aspdin, by an instru-15 ment in writing under my hand and seal, particularly to describe and ascertain the nature of my said Invention, and in what manner the same is to be performed, and to cause the same to be inrolled in His Majesty's High Court
- of the said in part recited Letters Patent (as in and by the same), reference 20 being thereanto had, will more fully and at large appear. NOW ENOW YE, that in compliance with the said proviso, I, the said Joseph Aspdin, do hereby declare the nature of my said Invention, and the manner in which the same is to be performed, are particularly described and ascertained in the following description thereof (that is to say) :---

of Chancery within two calendar months next and immediately after the date

Rys. 1.2. Patent JOSEPHA ASPDINA



Rys. 1.3. Piec JOSEPHA ASPDINA

W roku 1849, Francuz, JOSEPH-LOUIS LAMBOT (1814–1887) zbudował oryginalną łódź (rys. 1.4). W 1855 r. zaprezentował kopię tej łodzi na Światowej Wystawie w Paryżu. Łódź ta była zbudowana z siatki żelaznej i zaprawy cementowej. Swój patent (rys. 1.5) zgłosił w 1851 r.





Rys. 1.4. Siatkobetonowa łódź LAMBOTA (1849 r.) [9]

Rys. 1.5. Fragment patentu JOSEPHA-LOUISA LAMBOTA (1851r.) [9]

W 1867 r. francuski ogrodnik JOSEPH MONIER opatentował donice betonowe zbrojone siatką, następnie w 1868r. rury i pojemniki na wodę, a w rok później złożył patent na płyty. Dalej kolejno w 1873 opatentował elementy mostowe, a w 1875 dodatkowy patent złożył na schody [32]. Prawo patentowe chroniło metody wytwarzania danego elementu, ale nie dotyczyło ogólne koncepcji materiałowej.

Dlatego FRANÇIS COIGNET mógł w 1861 r. wydać swoją książkę "*Betons agglomerés appliqués á l'art. de construire*", która zawierała zbiór produktów ze zbrojonego betonu, opisujących sztukę konstruowania, bez łamania praw patentowych.

Od 1855 r. THADDEUS HYATT, amerykański prawnik, prowadził badania w głównej mierze nad ognioodpornością zbrojonego betonu. W ich trakcie zapisał: "...Wytrzymałość metalu na rozciąganie jest wykorzystana zależnie od położenia, w jakim jest on ułożony w płytach, belkach...". Ten i inne wnioski spisał i wydał w 1877 r. w swojej książce "An account of some experiments with Portland-cement-concrete combined with iron, as a building material, with reference to economy of metal in construction, and for security against fire in the making of roofs, floors, and walking surfaces" ("Uwagi o niektórych eksperymentach z betonem na bazie cementu portlandzkiego w połączeniu z żelazem, jako materiału budowlanego,

z uwzględnieniem ekonomiczności zastosowania metalu w konstrukcji oraz bezpieczeństwa przeciwpożarowego dachów, stropów i chodników").

Od tamtych lat wielu naukowców pracowało i pracuje nieprzerwanie nad udoskonaleniem betonu zbrojonego, rozszerzeniem jego pola zastosowań i pogłębianiem wiedzy o właściwościach materiału zwanego w Europie kolejno ferrocementem<sup>1</sup>, żelazobetonem, a od 80 lat w naszym kraju – żelbetem.

W niniejszej pracy zaprezentowano możliwość poszerzenia zakresu zastosowania betonu zbrojonego, którą daje zmiana materiału z jakiego wykonane jest zbrojenie.

Na początku lat 1990-tych nastąpił postęp w metodach produkcji niemetalicznych krótkich włókien, które dodane do mieszanki betonowej poprawiały właściwości betonu. W ostatnich latach powstały innowacyjne metody produkcji ciągłych włókien szklanych, aramidowych, węglowych i innych, o wysokich wytrzymałościach i korzystnych innych właściwościach mechanicznych.

Z setek, a nawet tysięcy powiązanych ze sobą takich włókien, o średnicy kilku mikrometrów, powstają tekstylia stanowiące struktury zbrojeniowe. Olbrzymią zaletą takiego zbrojenia jest odporność korozyjna.

Łódź LAMBOTA nie butwiała w wodzie, a donica MONIERA nie pękała na mrozie, ale dziś wiemy, że nie jest tak zawsze z trwałością elementów betonowych ze zbrojeniem metalicznym.

### 1.1. Teksbet – nowy materiał konstrukcyjny

*Teksbet<sup>2</sup>,* w analogii do żelbetu jest to beton zbrojony tekstyliami (ang. *TextiLe REINFORCED CONCRETE – TRC*). Pojęcie to mieści się w rozszerzonej definicji ferrocementu, podanej przez *ACI-COMMITTEE 549* w raporcie z 1980r. [49]:

"Ferrocement is a type of thin-wall reinforced concrete commonly constructed out of cement mortar, reinforced with closely spaced layers of continuous and relatively small diameter mesh. The mesh may be metallic or made of other suitable materials." ("Ferocement jest typem cienkościennego zbrojonego betonu, przeważnie zbudowanego z zaprawy cementowej, zbrojonej blisko położonymi warstwami ciągłych siatek o relatywnie małych wymiarach oczek. Siatka może być metalowa lub wykonana z innego odpowiedniego materiału.)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> W Polsce obecnie rzadko stosowane określenie; *Ferrocement* – beton lub zaprawa na bazie cementu zbrojona siatkami ze stali w postacie tkanej, cięto-ciągnionej, zgrzewanej i innej.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Nazwa zaproponowana przez prof. Andrzeja Ajdukiewicza (2003)

NAAMAN [49], badający od wielu lat elementy cienkościenne twierdzi, że różnice między ferrocementem, a żelbetem wynikają przede wszystkim z różnic uziarnienia kruszywa grubego. Kruszywo w ferrocemencie ma znacznie mniejszą średnicę, która umożliwia przejście przez małe oczka siatki i zapewnia odpowiednie otulenie zbrojenia z drutów o małych przekrojach.

Nowoczesne elementy z ferrocementu mają grubość najczęściej od 25 do 50 mm. W przypadku zbrojenia z ciągłych włókien niemetalicznych można realizować jeszcze mniejsze grubości elementów, jako że włókna szklane, węglowe lub inne, mają wyższe wytrzymałości na rozciąganie niż stal, a ochrona zbrojenia przed korozją przez otulinę staje się zbędna. Minimalna grubość elementów żelbetowych (prefabrykowanych), zgodnie z dotychczasowymi polskimi przepisami PN-B-03264:2002 [71], przy nieagresywnym środowisku wynosi 40 mm. Eurokod 2 [74] nie precyzuje minimalnej grubości, ale wymagania dotyczące otuliny prowadzą do większej grubości.

W odróżnieniu od zbrojenia ze stali, zbrojenie tekstylne może być usytuowane w niemal dowolnym kierunku (siatki dwukierunkowe, wielokierunkowe i skośne – nieortogonalne), co skutkuje możliwością lepszego dopasowania układu zbrojenia do rozkładu sił w elemencie.

Różnorodność dostępnych włókien na rynku, znacząco różniących się między sobą właściwościami mechanicznymi, daje niemal nieograniczone możliwości ich kombinacji w różnego rodzaju produkty. Są to przede wszystkim wyroby z włókien:

- szklanych, odpornych na alkalia (ALKALI RESISTANT GLASS AR Glass),
- z poliwinyl-alkoholu (POLYVINYL-ALKOHOL PVA),
- węglowych (CARBON).

Kilkaset, a czasem tysiące włókien luźno połączonych ze sobą lub zupełnie nie połączonych, tworzy wiązki (sploty, nici, przędzę), z których następnie wykonuje się tekstylia w postaci siatek.

Trzeba już na wstępie nadmienić, że teksbet nie zastąpi żelbetu, wydaje się jednak, że stanowi uzupełnienie i rozszerza możliwości zastosowania betonu tam, gdzie wymagane są cieńsze i lżejsze elementy z betonu zbrojonego, o zwiększonej trwałości.

# 1.2. Istota podjętego problemu i ogólny cel pracy

Teksbet jest kompozytem. Składa się z dwóch komponentów: niemetalicznego zbrojenia i betonowej matrycy (rys. 1.6).

Jako matrycę stosuje się mieszankę betonową o określonych właściwościach zarówno początkowych (cechy reologiczne mieszanki), jak i ostatecznych (właściwości stwardniałego betonu – doraźne i opóźnione).



Rys. 1.6. Zasada budowy teksbetu

Z kolei jako zbrojenie mogą być zastosowane struktury płaskie lub przestrzenne, w postaci siatek wykonanych z wiązek ciągłych włókien niemetalicznych, połączonych ze sobą przez zastosowanie technik znanych z przemysłu tekstylnego. Setki, a nawet tysiące włókien w wiązkach, połączone są wzajemnie między sobą i z matrycą przez siły przyczepności oddziałujące na powierzchniach kontaktu włókien oraz poszczególnych materiałów składowych (rys. 1.7).



Rys. 1.7. Zdjęcie wiązki włókien w betonie

Nie jesteśmy w stanie określić sposobu zachowania się kompozytu na podstawie znajomości zależności naprężenie-odkształcenie komponentów, lub innych podstawowych cech. W porównaniu z innymi kompozytami teksbet jest bardzo złożonym materiałem. Zachowanie się teksbetu jest zależne od mechanicznych właściwości (wytrzymałości, odkształcalności) betonu i włókien, ale w głównej mierze od właściwości strefy kontaktu pomiędzy nimi. Przez zastosowanie różnego typu zbrojenia tekstylnego, nie tylko różniącego się materiałem z jakiego jest wykonane, ale również budową, czy sposobem łączenia włókien w wiązki, a ostatecznie w struktury (siatki), otrzymujemy szeroki przedział właściwości teksbetu i jego zachowania się w elementach.

Z badań wewnętrznej (atomowej) budowy betonu oraz niemetalicznych włókien wynika, że obydwa materiały bazowe charakteryzują się niewielką, w porównaniu z tradycyjną stalą, odkształcalnością. Mimo to, możemy z tych kruchych materiałów, o sprężystej charakterystyce w pewnym przedziale naprężeń, zbudować kompozyt, którego wyidealizowana charakterystyka będzie odpowiadała materiałowi pseudo-plastycznemu. Lepiej oddającym charakter pracy określeniem jest angielskie *Pseudo-Strain Hardening – PSH*, które oznacza model sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem (rys. 1.8).



Podstawowym celem pracy jest doświadczalne określenie zachowania się cienkościennych elementów z teksbetu w wybranych sytuacjach. Obok badań elementów, konieczne było rozpoznanie możliwie największej liczby czynników decydujących o zachowaniu kompozytu. To stanowi podstawę do określenia przydatności różnych typów siatek do stosowania w praktyce, jak również zaproponowania rozwiązań, które mają na celu poprawę właściwości oraz usprawnienie technologii produkcji elementów z takim rodzajem zbrojenia.

Wyniki doświadczeń stanowią podstawę propozycji prostego modelu obliczeniowego. Obecnie, na podstawie zebranych informacji opisanie wszystkich zmiennych i uwzględnienie ich w modelu jest skomplikowane. Uznano zatem, że podstawą możliwości rozpowszechnienia teksbetu w praktyce jest proste narzędzie obliczeniowe.

## Rozdział 2

# TEKSBET JAKO KOMPOZYT

Według BRAUTMANA i KROCKA [11] kompozyt jest materiałem wytworzonym przez człowieka, który składa się z co najmniej dwóch różnych materiałów z wyraźnie zaznaczonymi granicami między nimi; składniki kompozytu tworzą go przez udział w całej objętości, a jego właściwości są różne od właściwości składników.

Teksbet jest materiałem wytworzonym przez człowieka, który składa się z betonu, który pełni rolę matrycy (osnowy) oraz tekstyliów w postaci struktur z ciągłych włókien niemetalicznych – stanowiących zbrojenie. Beton zajmuje nie mniej niż 90% objętości, najczęściej jest to 95% do 99%. Wyraźna granice pomiędzy składnikami kompozytu możemy zauważyć już w skali makroskopowej (rys. 1.7). Idea teksbetu, jak wspomniano we wstępie, wywodzi się z żelbetu, a dokładniej z siatkobetonu. W elementach zginanych beton przenosi naprężenia ściskające, a powstałe siły rozciągające są przenoszone przez tekstylia na niezarysowany beton przez siły przyczepności. Łącznie więc ten kompozyt, ma odmienne właściwości od właściwości materiałów składowych. W latach 1990-tych siatkobeton ze zbrojeniem siatkami z cienkich drutów stalowych przeżywał swój renesans, głównie w wyniku dostępności upłynnionego domieszkami drobnoziarnistego betonu. Bvłv kompozyty o nazwach SIFCON (SLURRY INFILTRATED FIBRE CONCRETE - NAAMAN [48]) i SIMCON (SLURRY INFILTRATED MAT CONCRETE - KRSULOVIC-OPARA [39]), czy obecnie DUCON (DUCTILE CONCRETE - SCHNEIDER, REYMENDT [58]). Jednak dopiero od niedawna nowy, szczególny rodzaj siatkobetonu jakim jest teksbet, stał się przedmiotem badań. Stało się to odkąd mamy do dyspozycji wysokowartościowe często przewyższające pod wieloma względami stal – włókna i siatki z tych włókien.

Teksbet, czyli *TRC* (*TEXTILE REINFORCED CONCRETE*) jest badany i eksperymentalnie stosowany w rozwiązaniach technicznych od niespełna 10 lat. Najobszerniejsze prace badawcze są prowadzone w Niemczech, w dwóch współpracujących ośrodkach: *RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN* (W. BRAMESHUBER, J. HEGGER i inni [10]), oraz *TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN* (M. CURBACH i inni [18]).

W pierwszym z tych ośrodków szczególną uwagę poświęca się badaniom nad nowymi elementami konstrukcyjnymi, a w drugim – badaniom podlega zastosowanie *TRC* jako wzmocnienia i modernizacji istniejącej konstrukcji. Ponadto, *TRC* badany był dotąd przyczynkowo w Belgii (*VRIJE UNIVERSITEIT BRUSSEL* -

H. CUYPERS i inni [19]), w Wielkiej Brytanii (*UNIVERSITY OF WARWICK* - P. PURNELL i J. BEDDOWS [56]), w Izraelu (*BEN GURION UNIVERSITY* - A. PELED [55]), w Grecji (*UNIVERSITY OF PATRAS* - G. C. PAPANICOLAOU i inni [53]), w Stanach Zjednoczonych (*UNITED STATES GYPSUM CORPORATION* - A. DUBEY [21]) i w Kanadzie (C.-M. ALDEA i inni [4]).

Pierwsze polskie opracowanie na temat teksbetu to informacyjne artykuły [36], [37]. Pierwsze badania z roku 2007 zostały zaprezentowane na Sympozjum FIB w Londynie, w roku 2009 [3].

# 2.1. Włókna w betonie - przegląd

Postęp w produkcji materiałów syntetycznych jest tak szybki, że niemożliwe jest określenie liczby tworzyw, z których można produkować włókna przydatne jako szeroko rozumiane zbrojenie. W minionym półwieczu włókna syntetyczne zaistniały we wszystkich dziedzinach działalności ludzkiej (rys.2.1).



Sport i Rekreacja

Rys. 2.1. Włókna we współczesnej działalności ludzkiej

Zestawienie różnorakich dostępnych tworzyw wraz z ich fizycznymi oraz technologicznymi właściwościami można znaleźć u BOBETHA [8]. Włókna, które nadają się jako zbrojenie matrycy na bazie spoiwa cementowego zostały dokładnie opisane przez CURBACHA z zespołem [15], a także przez HEARLEGO z zespołem [27].

# 2.1.1. Włókna szklane

Terminem "szkło" określa się wiele materiałów, które mogą być używane w różnych celach. Włókna szklane są szeroko stosowane w przemyśle samochodowym, elektronice i elektrotechnice, a także w budownictwie przemysłowym i w wielu innych branżach. Na rynku dostępne są trzy podstawowe

typy – *S*, *E* i *AR*. Włókna szklane typu *S* posiadają najlepsze właściwości mechaniczne z wymienionych, jednak ze względu na ich cenę zastosowanie znalazły głównie w branży militarnej. Włókna typu *E* są w chwili obecnej najczęściej stosowanymi włóknami, co jest konsekwencją stosunkowo niskiej ceny w zamian za obniżone parametry wytrzymałościowe. Włókna szklane typu *E* wykazują silny spadek przyczepności w alkaicznym środowisku betonu, co wyklucza ich zastosowanie jako zbrojenia. Dzięki intensywnym badaniom, pod koniec lat 1960-tych, powstały włókna szklane zwane włóknami szklanymi odpornymi na alkalia – *AR* (*ALKALI RESISTANT*). Rynek światowy jest obecnie zdominowany przez dwóch producentów: japońskego NIPPON ELECTRIC GLASS (NEG) i francuskiego VETROTEX (nazwa produktu CEM-FIL) z koncernu SAINT GOBAIN.

#### 2.1.2. Włókna azbestowe

Są to – poza roślinnymi – najstarsze włókna, które już Rzymianie wykorzystywali do wyrobu płótna zwanego *"LINUM VIVUM*" czyli *"*żyjące płótno". Na podstawie wykopalisk dokonanych w Finlandii stwierdzono stosowanie azbestu już ok. 4500 lat temu. W Europie Południowej znany jest od ponad 2500 lat. Wzmianki w różnego rodzaju kronikach potwierdzają użycie azbestu do wytwarzania m.in. knotów do świec, niepalnego papieru, tkanin na płaszcze żołnierskie i wreszcie płótna, które można było sterylizować w ogniu. Materiał ten posiada unikalne właściwości – jest odporny na działanie bardzo wysokich temperatur, odporny na działanie chemikaliów (kwasów, zasad i wody morskiej), charakteryzuje się dużą wytrzymałością i modułem sprężystości, a w dodatku był tani. Dlatego też jego właściwości wykorzystywano aż do końca XX w. W tym czasie znalazł zastosowanie w ponad 1000 opisanych w literaturze technologii. Już w 1910r. francuskie badania potwierdziły szkodliwy wpływ azbestu na organizm człowieka, jednak dopiero znacznie później wprowadzono ograniczenia, a w 1997r. zostało zakazane stosowanie azbestu w Polsce.

Tak zakończyła się "kariera" bardzo popularnego materiału budowlanego – azbestocementu.

#### 2.1.3. Włókna PVA

Włókna z poliwinyl-alkoholu są włóknami syntetycznymi, wytwarzanymi w procesie przędzenia z roztworu polimerów. Włókna PVA nie ulegają korozji w normalnym środowisku, są odporne na alkaiczne działanie betonu, a wchodząc w reakcje z cementem tworzą z nim bardzo dobre połączenie, co opisali m.in. KANDA i LI [33, 34]. Włókna te charakteryzują się dużą wytrzymałością i modułem sprężystości niższym od modułu stali. Zależność naprężenie – odkształcenie ukazuje częściowo nieliniowe zachowanie, z zakresem wzmocnienia materiału. Obecnie włókna PVA są głównie stosowane jako zbrojenie rozproszone i stanowią zamiennik włókien azbestowych.

#### 2.1.4. Włókna PAN

Włókna poliakrylonitrylowe wytwarza się z syntetycznych polimerów. Bezpośrednio nie stosuje się ich jako zbrojenia, stanowią jednak budulec wyjściowy do produkcji włókien węglowych.

## 2.1.5. Włókna węglowe

Włókna węglowe powstają w wyniku kontrolowanej pirolizy włókien poliakrylonitrylu (włókien PAN). Zapewnienie odpowiednich warunków w czasie utleniania się włókien PAN prowadzi do uzyskania włókien węglowych o różnych właściwościach mechanicznych. W wyniku grafityzacji powstają włókna o dużej wytrzymałości i wysokim module sprężystości [7, 57]. Odznaczają się również odpornością na alkalia, wysoką wytrzymałością zmęczeniową, trwałością i – co jest wyjątkowe – ujemnym współczynnikiem termicznym.

## 2.1.6. Włókna PP

Włókna polipropylenowe zaliczają się do włókien z syntetycznych prostych polimerów. Ich wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości w porównaniu do włókien szklanych są mniejsze o rząd wielkości. Charakteryzuje je niewielka nieliniowość wykresu naprężenie-odkształcenie. Z powodu niskiego modułu sprężystości nie nadają się jako zbrojenie w zrozumieniu niniejszej pracy, mogą jednak spełniać drugorzędną funkcję zbrojenia przeciwskurczowego. Z powodu znacznego wydłużenia włókien PP przy rozciąganiu w osnowie betonowej powstałyby rysy, których rozwarcie znacznie przekraczałoby dopuszczalne wartości użytkowalności elementu. Dotychczas stosowano krótkie włókna fibrylowane<sup>3</sup> z polipropylenu jako zbrojenie rozproszone w cementowych płytach falistych [25].

## 2.1.7. Włókna aramidowe

Włókna aramidowe należą do włókien chemicznych wytworzonych z syntetycznych polimerów. Lepiej znane w branży budowlanej pod ich nazwami handlowymi jako: KEVLAR® (Du Pont), TWARON® (Enka), NOMEX® (Du Pont), TECHNORA® (Teijin Twaron). Są włóknami o wysokiej wytrzymałości i znacznym module sprężystości. Ich wadą jest wrażliwość na środowisko wilgotne, jednocześnie są odporne na działanie wysokich temperatur i charakteryzuje je ujemny współczynnik termiczny.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Fibrylacja – etap procesu produkcji krótkich włókien polegający na wiązaniu i cięciu włókien wzdłuż osi wiązki

#### 2.1.8. Włókna PE

Włókna polietylenowe są również wytwarzane z syntetycznych polimerów. Są odporne na działanie chemikaliów, jednak ze względu na bardzo niski moduł sprężystości (poniżej 1000 MPa) nie znajdują obecnie zastosowania w zbrojeniu betonu.

### 2.1.9. Włókna ceramiczne

Włókna ceramiczne powstają w wyniku spiekania proszku z ciekłym spoiwem (np. tlenek aluminium, azotek krzemu, ceramika cyrkonowa czy karborundowa), w wyniku czego powstają monokryształy o średnicy rzędu 1 µm. Charakteryzują się całkowicie liniową zależnością naprężenie-odkształcenie i są bardzo kruchym materiałem. Wykazują wytrzymałość na rozciąganie do 20.000 MPa, przy module sprężystości 700 GPa, są żaroodporne, zachowują właściwości mechaniczne w podwyższonych temperaturach i są odporne na działanie korozji. Są jednak drogie i obecnie znajdują zastosowanie w przemyśle kosmicznym i wojskowym.

## 2.2. Właściwości włókien

Właściwości włókien kształtuje przede wszystkim proces produkcji, który w zależności od ich rodzaju składa się z wielu różnych etapów (rys. 2.2; 2.3).



Rys. 2.2. Etapy procesu produkcji włókien szklanych



Rys. 2.3. Etapy procesu produkcji włókien węglowych

W procesach tych powstaje najmniejsza jednostka, którą jest *wŁóκNO PODSTAWOWE*, czyli tzw. *FILAMENT*. Rozróżniamy włókna *MONOFILAMENTOWE* (rys. 2.4), czyli takie, których przekrój składa się z przekroju jednego homogenicznego włókna podstawowego oraz *FIBRYLE* (rys. 2.5), czyli włókna, które składają się z wielu włókien podstawowych, rozgałęziających się i ponownie łączących się ze sobą; struktura taka może być cechą naturalną lub celowo wykonaną poprzez nacinanie włókna monofilamentowego (zbrojenie rozproszone).



Rys. 2.4. Filament



Rys. 2.5. Fibryl naturalny

Włókna monofilamentowe są podstawową jednostką produkcji tekstyliów, a ich właściwości mechaniczne i cechy fizyczne nie zależą tylko od materiału z jakiego są wykonane, lecz i od czynników technologicznych ściśle kontrolowanych w procesie produkcji, tj. temperatury topnienia, rozpuszczania, czasów schładzania, prędkości snucia i wielu innych. Niewielkie odchyłki prowadzą do znacznych zmian właściwości włókna podstawowego (tab. 2-1), a tym samym charakterystyki pracy monofilamentów (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Typowa charakterystyka i zakres niektórych krzywych naprężenie–odkształcenie dla włókien

W tabeli 2-1 zostały podane literaturowe dane właściwości mechanicznych i fizycznych wybranych włókien<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> W dalszych etapach pracy przez termin wŁÓKNO rozumie się MONOFILAMENT, czyli włókno którego przekrój składa się z przekroju jednego homogenicznego włókna podstawowego

Typ włókna	Gęstość [g/cm³]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Odkształcenie przy zerwaniu [%]	Współczynnik wydłużalności termicznej [10 <sup>-6</sup> / °C]	Współczynnik Poissona	Max. temperatura stosowania [°C]
E-glass	E-glass		72,4	2,4-5,0	5,0		380 /1725/
S-glass	64-2,8	2550-4500	85,5	2,9-5,5	2,9	0,22	450 /1725/
AR-glass	2,5	1800-3500	70-76	2,0-3,0	7,5		400 /1725/
Carbon wysokomodułowy		2800	370	0,5-0,9	(-1.2)-(-0.1)		
Carbon ultra wysokomodułowy	1,90	1000-1300	530-650	0,2-0,4	( ',_) ( ', ')	0.20	750
Carbon wysokiej wytrzymałości	1,70-	2450-4800	215-240	1,1-20	(-0.6)-(-0.2)	0,20	/3700/
Carbon ultra wysokiej wytrzymałości		3500-6000	215-235	1,5-2,3	(0,0)(0,2)		
Aramid niskomodułowy	1,44	3500-4100	70-80	4,3-5,0	-2,0 (osiowo)	0.35	250
Aramid wysokomodułowy	1,20-	3500-4000	115-200	1,8-3,5	60 (radialnie)	0,00	/500/
PVA	1,26	1620-1900	31,0-43,0	6,0-15,0	-	-	230 /500/
PAN	1,2-2,0	850-1000	17,0-18,0	10,0-20,0	163-270	-	200
PP	0,91	200-700	0,5-9,8	10,0-15,0	146-180	-	130
PE	0,95	250-700	1,4-4,0	10,0-15,0	-	-	120
HP-PE	0,97	2700	80-120	5,0	106-198	-	-
Bazalt	2,67	2800-3200	85-90	3,1	3,5-8,0	-	650
Azbest	2,5-3,2	600-3600	69-160	0,3-0,6	-	-	-
Stal zwykła niskostopowa	7 85	210-420	200	25(0,2)*	12.0	0.30	450
Stal wysokowęglowa	Stal vysokowęglowa		185-210	>4,0**	.2,0	0,00	100

Tab. 2-1. Właściwości włókien [7, 25, 41, 57, 61, 63, 70,]

\* W nawiasie podano wartość odkształceń dla początku pełzania

\*\* Dla drutów zimnociągnionych wg normy PN-B-03264:2002 [71]

//W ukośnikach podano temperaturę topnienia

Producenci włókien często nie podają metod, którymi określili daną wielkość, a nad uogólnieniem metod ciągle trwają badania. W związku z tym ważne jest przytoczenie istotnych definicji dotyczących właściwości włókien w oparciu o wybrane przykłady literaturowe.

#### 2.2.1. Pole przekroju

Aby określić wytrzymałość włókna konieczna jest znajomość jego pola przekroju. Znane metody pomiaru pola zawodzą, gdy mierzone wielkości mają wymiar kilkunastu  $\mu$ m (1  $\mu$ m = 10<sup>-6</sup> m) (rys. 2.7), co prowadzi do metody pośredniej.

1 – drut ø0,50 mm, 2 – włos ø0,08 mm, 3 – włókno szklane ø0,03 mm,



Rys. 2.7. Drut – włos – włókno

W branży tekstylnej określana jest "delikatność" materiału w jednostkach masy liniowej tj. w [tex] (*TEKSACH*), co w odniesieniu do układu jednostek SI wynosi:

$$1 \text{ tex} = 1 \frac{g}{1000 \text{ m}}$$
 (2.1)

Masę liniową jednego włókna można określić ważąc włókno o znanej długości. Długość włókna zależy od dokładności zastosowanej wagi, zgodnie z [22] długość włókna poniżej kilkunastu centymetrów jest niewystarczająca. W przypadku krótkich odcinków stosuje się pomiar w VIBROMACIE<sup>5</sup>, który akustycznie wprawia włókna w drgania, określając w ten sposób jego częstotliwość własną. Optoelektroniczny pomiar amplitudy umożliwia obliczenie delikatności włókna. Po określeniu gęstości  $\rho$  można określić pole przekroju włókna:

$$A_f = \frac{\text{tex}}{\rho}; \ [10^{-6} \text{m}^2] \tag{2.2}$$

<sup>5</sup> Vibromat ME: http://www.tx.ncsu.edu/departments/texlabs/

## 2.2.2. Gęstość

Gęstość włókien w przemyśle tekstylnym jest równie ważną wielkością fizyczną jak ich delikatność. Jej wartość jest różna w zależności od wyników jakimi dysponowali autorzy publikacji lub producenci. Aby to zobrazować przeprowadzono analizę gęstości włókien na przykładzie włókna szklanego odpornego na alkalia (tab. 2.2).

włókna produkcji:	Cem-FIL				NEG			
według:	CEM-FIL	Majumdar	ABDKADER	NEG	NOVACRET	ABDKADER		
weakag.	[14]	[45]	[1]	[50]	[26]	[1]		
gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	2,680	2,680	2,740	2,772/2,700	2,700	2,817		

Tab. 2-2. Gęstość włókna szklanego odpornego na alkalia

Według MAJUMDARA i LAWSA [45] różnice w wartości gęstości włókien są spowodowane różnicami w składzie recepturowym. Niemniej informacje zawarte w w/w publikacjach są niepełne, bowiem autorzy nie podali budowy włókien i nie opisali metod badań. Gęstości włókien szklanych odpornych na alkalia, które określił ABDKADER różnią się od tych podanych przez producenta. Różnica między wartością podaną przez producenta dla włókien Cem-FIL, a wyznaczoną przez ABDKADER'A wynosi +2,2%, dla włókien NEG wynosi odpowiednio +1,6% i 4,2%. W dalszej części pracy przyjmowano wyższą wartość gęstości włókien podawaną przez ABDKADERA.

Gęstość włókien z wystarczającą dokładnością może zostać określona przy zastosowaniu analizy gęstości ciał stałych w piknometrze gazowym, np. ACCUPYC 1330<sup>6</sup>, w temperaturze 20°C. W urządzeniu określana jest objętość próbki; jest to ta część objętości wycechowanej komory, która nie została zajęta przez gaz (hel), a masa automatycznie zważonej próbki wprowadzana jest do pamięci urządzenia.

# 2.2.3. Wytrzymałość na rozciąganie

Podstawową właściwość materiału (również włókna), jaką jest wytrzymałość na rozciąganie  $f_f$ , mierzy się siłą F potrzebną do zniszczenia elementu z danego tworzywa, o określonym polu przekroju  $A_f$ .

$$f_f = \frac{F}{A_f}; \text{ [MPa]}$$
(2.3)

W przypadku materiałów wykazujących plastyczne cechy pole przekroju zmniejsza się wraz ze wzrostem siły. Efekt ten zauważamy np. przy badaniu prętów stalowych (szyjka przewężenia). W większości włókna zalicza się do materiałów sprężystych i kruchych, w których przewężenie przekroju jest pomijalne, dlatego w dalszych rozważaniach przyjęto stałe pole przekroju pojedynczego włókna.

Doświadczalnie określona wytrzymałość na rozciąganie jest znacznie mniejsza od wytrzymałości teoretycznej włókna (rys. 2.8), którą określa siła potrzebna do zerwania wiązań pomiędzy atomami, czy molekułami [59, 66].



W praktyce wytrzymałość teoretyczna jest nieosiągalna ze względu na różnego rodzaju uszkodzenia włókna powstające w czasie produkcji.

## 2.2.4. Uszkodzenia włókien

W każdym materiale występują makroskopowe defekty takie jak: pory, szczeliny, wady na powierzchni (rys. 2.9). Według GRIFFITHA [24] prowadzą one do koncentracji naprężeń, w których prawdopodobnie nastąpi zniszczenie.



a) zadzior włókna szklanego





c) rozwarstwiające się włókno aramidowe



d) powierzchnia włókna PVA

e) skręcenie włókna

Rys. 2.9. Przykłady uszkodzeń włókien

Uszkodzenia takie są przypadkowe, ich ilość może zostać ograniczona do minimum, lecz zawsze będą występować. Powierzchnia włókien jest mała, dlatego powierzchnia zniszczeń jest również stosunkowo mała bezwzględnie, ale procentowo znacząca.

#### 2.2.5. Średnica i długość a wytrzymałość na rozciąganie włókna

Teoretycznie średnica lub długość nie powinny mieć wpływu na wytrzymałość na rozciąganie  $f_f$  włókna. Stosunek uzyskanej  $f_f$  do średnicy włókna  $d_f$ , czy do jego długości  $L_f$  powinien być wartością stałą, tzn. efekt skali powinien przyjmować zależność liniową. Wprawdzie włókna są wytworzone z tego samego materiału, jednak eksperymenty przeprowadzone przez WATTA (rys. 2.10; 2.11), BOJARA, MAYERA (rys. 2.12), FRANZKE (rys. 2.13) ukazują nieliniowy charakter wpływu średnicy lub długości włókien na ich wytrzymałość na rozciąganie.



Wyjaśnienie tego zjawiska sprowadza się do przebiegu procesu produkcji włókien. O wytrzymałości decyduje bowiem ilość uszkodzeń powierzchniowych włókien i temperatury ich nagrzewania lub schładzania. Włókna małych średnic wykazują zwykle większe wytrzymałości, gdyż zniszczenia ich powierzchni są stosunkowo małe (w stosunku do średnicy) i występują w mniejszych ilościach. Uważa się także, że małe średnice włókien mają większą wytrzymałość, gdyż można je przy produkcji szybciej schłodzić, zgodnie z WENDE, MOEBESEM i MARTENEM [67].

Wartości wytrzymałości na rozciąganie przy średnicach powyżej 15  $\mu$ m (dla włókien szklanych) i 20  $\mu$ m (dla włókien *PVA*), zbliżają się asymptotyczne do minimalnej wartości dla danego typu włókien (rys. 2.12). Dla włókien węglowych wyniki badań nie potwierdzają tej zależności (nie badano włókien o średnicach większych niż 8  $\mu$ m).



Rys. 2.12. Wpływ średnicy na wytrzymałość włókna węglowego [69], szklanego [46] i PVA [52]

Długość badanego włókna w podobny sposób wpływa na uzyskaną wytrzymałość co jego średnica. W przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie włókien szklanych *NEG* (rys. 2.13) zaobserwowano spadek wytrzymałość wraz ze wzrostem długości. Przy długościach większych od 80 mm wytrzymałość dąży do prostej odpowiadającej wytrzymałości minimalnej włókna [22]. Nasuwa się wniosek, iż badane włókna powinny mieć znaczną długość, np. co najmniej 80 mm.



Podane wartości zależą jednak od rodzaju włókna, a przy obecnym materiale doświadczalnym i różnorodności włókien należy je uogólniać bardzo ostrożnie.

#### 2.2.6. Wilgotność, temperatura a wytrzymałość na rozciąganie włókna

Włókna narażone na bezpośrednie działanie wilgoci zawartej w powietrzu wykazują spadek wytrzymałości na rozciąganie. Na rysunku 2.14 pokazano zależność dla włókien szklanych typu *E* bez warstwy powierzchniowej, przechowywanych w środowisku suchym oraz w środowisku o wilgotności względnej równej 100%. Włókna narażone na wilgoć po 120 dniach wykazywały stałą wartość wytrzymałości na rozciąganie wynoszącą ok. 70% wytrzymałości początkowej. Jeżeli uwzględnić, że włókna tego typu mają wytrzymałość 1750÷3800 MPa, to wytrzymałość tych włókien po tym okresie wynosiłaby 1225÷2660 MPa.



w skrajnych atmosferach [38]

Na podstawie tabeli 2.1 można stwierdzić, że wszystkie wymienione włókna zachowują praktycznie pełną wytrzymałość na rozciąganie w temperaturach niższych od 100°C. Włókna należące do najczęściej stosowanych, tj. szklane, węglowe, aramidowe, poliwinylo-alkoholowe (PVA) czy poliakrylonitrylowe (PAN), mogą być poddawane znacząco wyższym temperaturom.



Rys. 2.15. Wpływ temperatury na włókna [20, 35, 42,]

Właściwości termiczne włókien przy wysokich temperaturach zależą nie tylko od samego materiału, lecz i od rodzaju danego włókna (rys. 2.15).

Przy wzroście temperatury ponad 100<sup>°</sup>C dla włókien szklanych i ponad 200<sup>°</sup>C dla włókien węglowych 2 (o wyższej wytrzymałości, module sprężystości) obserwuje się utratę wytrzymałości na rozciąganie. Zwykłe włókna węglowe 1 dopiero w temperaturze 900<sup>°</sup>C wykazują minimalny jej spadek (rys. 2.15).

Utrata wytrzymałości następuje z różnych powodów. Włókna szklane topnieją pod wpływem wysokich temperatur. W momencie osiągnięcia temperatury odszklenia<sup>7</sup> (rys. 2.16. a), zachodzi także zmiana sposobu pracy ze sprężystego w plastyczny (rys 2.16. b i c) wiążąca się ze zmianą stanu skupienia. Przy wyższej temperaturze następuje zmiana lepkości, aż do osiągnięcia temperatury topnienia co jest równoznaczne z całkowitą destrukcją włókna. W przypadku włókien węglowych, aramidowych i innych polimerowych w wysokich temperaturach następuje ich rozkład (dekarbonizacja).

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Temperatura odszklenia T<sub>g</sub> (witryfikacji) to temperatura, w której dochodzi do zmiany stanu ze stałego w plastyczny



Rys. 2.16. Zależność objętości, modułu sprężystości i naprężenia polimerów od temperatury

Podsumowując omówienie właściwości włókien syntetycznych można stwierdzić, że wiele czynników decyduje o ich właściwościach fizycznych i mechanicznych, począwszy od doboru tworzywa, przez proces produkcji, składowania, aż do sposobu użytkowania. Na różnice podawanych wartości wpływają również metody, którymi włókna były badane, a raczej brak ich standaryzacji, chociażby np. ustalenia minimalnej długości badanej próbki w odniesieniu do jej przeznaczenia.

Włókna produkuje się z najmniejszą możliwą średnicą, co ogranicza jej wpływ na wytrzymałość oraz powierzchnię, na której mogą występować uszkodzenia. Obróbka powierzchniowa zabezpiecza włókna przed wilgocią i innymi czynnikami atmosferycznymi. Większość stosowanych włókien jest niepalna, ale nie jest odporna na działanie wysokiej temperatury, chociaż może przez znaczny czas ją znosić, a przy niewielkim nawet otuleniu betonem czas ten wydłuża się, nawet do 75 min [40, 68]. Zauważyć jednak należy, że również w przypadku prętów stalowych mamy do czynienia z podobnymi zachowaniami i również tutaj liczymy na ochronne działanie betonu. Podkreślić trzeba, że dla obiektów narażonych na działanie bardzo wysokich temperatur stosuje się włókna odporne na ich działanie (włókna ceramiczne, zwykłe włókna węglowe), a prace badawcze nad zwiększeniem ognioodporności samych włókien ciągle trwają.

Omówione czynniki wpływają oczywiście także na parametry tekstyliów formowanych z tych włókien.

#### 2.3. Od przędzy do tekstyliów

Z połączenia wielu filamentów powstaje *PRZĘDZA* (ang. *YARN*). Każde włókno podstawowe w końcowym etapie produkcji przechodzi obróbkę powierzchniową (rys. 2.2; 2.3). Jeżeli obróbka powierzchniowa następuje po połączeniu włókien w przędzę, to powstaje tzw. *DIRECT ROVING* (włókna podstawowe skleja wysychająca warstwa powierzchniowa), a jeżeli włókna łączone są w przędzę po wyschnięciu warstwy powierzchniowej powstaje tzw. *ROVING*.

Przędze dzielimy na *SPLOTY (NIĆ)* – przędza o skręconych względem siebie włóknach, oraz *WIĄZKI (WŁÓCZKA)* – przędza o równoległych względem siebie włóknach.

Wiązki i sploty można łączyć ze sobą; powstaje w ten sposób szeroka gama tekstyliów, poniżej przedstawiono podstawowy podział ze względu na:

materiał:





z włókna szklanego strukturę:







mata (włókno węglowe i szklane)

b) wielo-materiałowe (hybrydowe)



z włókien szklanych i węglowych



siatki z włókna szklanego łączone włóknem węglowym



struktura cylindryczna

sposób ułożenia przędzy względem siebie w płaszczyźnie:



prostopadłe ułożenie przędzy względem siebie

- połączenia
  - a) przeplatane



włókno szklane



b) wielokierunkowe



przędza ułożona w różnych kierunkach



## 2.3.1. Charakterystyka przędzy

Nośność wiązki bądź splotu nie jest wprost sumą nośności poszczególnych włókien, lecz wynika z budowy strukturalnej wiązki (bądź splotu) definiowanej jako "efekt przędzy" określony:

- Rozproszoną wytrzymałością filamentów: każde z setek i tysięcy włókien różni się wytrzymałością, przez to jedne z nich niszczą się szybciej, a drugie później. Zachodzi to zarówno w wiązkach, jak i w splotach.
- Nierównoległym przebiegiem włókien: w czasie łączenia w wiązkę włókna nie są równomiernie naciągnięte. Przy obciążaniu prowadzi to do nierównomiernych wydłużeń poszczególnych włókien i nierównomiernej pracy całej wiązki. Bardziej obciążone włókna niszczą się szybciej. W przypadku splotów inne długości i wydłużenia poszczególnych włókien spowodowane są budową takiej przędzy, czyli w wyniku splecenia.

Efekt ten na wykresie naprężenie – odkształcenie dla przędzy uwidacznia się w postaci "ząbków" w początkowej fazie obciążenia (wciągnięcie do pracy wszystkich włókien) i nieliniowości w końcowej fazie, w szczególności przy wyższych naprężeniach w poszczególnych włóknach (zrywanie kolejnych włókien w przędzy) oraz w różnicach w wytrzymałości na rozciąganie (rys. 2.17).



Rys. 2.17. Krzywa naprężenie – odkształcenie przędzy [51]

Na wytrzymałość przędzy nie tylko wpływa materiał i budowa wiązki czy splotu, lecz również zmierzona długość. Wpływ długości został zaobserwowany już w przypadku pojedynczego włókna (p. 2.2.5). Dla przędzy wpływ ten ma charakter odwrotny (rys. 2.18) tzn., że im dłuższy odcinek badany, tym wyższą wytrzymałość otrzymujemy. Zależność ta jest również ograniczona asymptotą, jak to miało miejsce w przypadku filamentu (Rys. 2.12). Badana próbka przędzy powinna mieć długość co najmniej 80 mm. Od tej długości różnice w uzyskiwanych wytrzymałościach są

pomijalne. W literaturze brak pełnego wytłumaczenia tych zagadnień, a zachowanie to jest tłumaczone "efektem przędzy".



Rys. 2.18. Długość próbki a wytrzymałość przędzy w stosunku do wytrzymałości pojedynczego włókna [22]

#### 2.3.2. Charakterystyka siatki tekstylnej

Charakter pracy włókna zmienia się wraz ze złożonością struktury. Zachowanie się pojedynczego włókna – w znacznej większości przypadków – odpowiada modelowi liniowo-sprężystemu, zaś charakterystyka  $\sigma$ - $\varepsilon$  przędzy może mieć charakter nieliniowy. Z kolei najprostsza ze struktur, jaką jest płaska siatka ortogonalna również wykazuje nieliniowy przebieg krzywej naprężenie – odkształcenie, w szczególności w końcowej fazie pracy (rys. 2.19). Dodatkowo, złożoność struktury wpływa na spadek wytrzymałości.



Rys. 2.19. Krzywa naprężenie – odkształcenie siatki w porównaniu z przędzą i włóknem [51]
Główny czynnik kształtujący sposób zachowania siatki stanowią połączenia, co przedstawiono na przykładzie dwukierunkowej siatki z włókien szklanych, w której zróżnicowano sposób wiązania siatki (rys. 2.20).



Rys. 2.20. Widok różnych sposobów wiązań siatki szklanej [51]:

OFFREMANN z zespołem [51], poddał siatki o różnych wiązaniach (rys. 2.20) próbie rozciągania. Wytrzymałości otrzymane z badania siatek z prostymi włóknami były zbliżone do siebie. Z kolei zachowanie siatki wiązanej sposobem *TRYKOT*<sup>9</sup> naprzeciwległym odbiegało od pozostałych, w szczególności w początkowej fazie (rys. 2.21). OFFREMANN tłumaczy to naprężeniem włókna wiążącego oraz relaksacją struktury.



Rys. 2.21. Naprężenie – odkształcenie dwukierunkowej siatki szklanej o zróżnicowanych wiązaniach [51]

2.4. Beton drobnoziarnisty

### 2.4.1. Definicja

Beton to powszechnie stosowany materiał konstrukcyjny, którego skład mieszanki w swojej podstawowej formie jest pozornie prosty, w postaci: cementu, wody i kruszywa. Przy obecnym zaawansowaniu technologicznym receptura betonu jest złożona, a procesy technologiczne obejmują nie tylko przygotowanie mieszanki, jej układanie i zagęszczanie. To zróżnicowanie technologiczne spowodowało dużą różnorodność w mieszankach betonowych, których skład zależy od przeznaczenia, pożądanych cech reologicznych i właściwości mechanicznych.

W badaniach nad *TRC* [12, 13, 29, 31] spotykamy się z pojęciem "*FINE-GRAINED CONCRETE*", opisującym beton o drobnoziarnistych składnikach, który zawiera kruszywo wyłącznie w postaci frakcji piaskowych i pylastych, o maksymalnej średnicy ziarna nie przekraczającej 1 mm (tab. 2-3). W swoim wyglądzie mieszanka taka przypomina zaprawę, jednak "beton" opisuje ją dokładniej ze względu na jej właściwości wytrzymałościowe oraz konstrukcyjne przeznaczenie. W potocznym użyciu jest określenie piaskobetonu.

	Ciężary objętościowe [kg/m <sup>3</sup> ]								Wytrzy-
Mieszanka betonowa	Cement	Popiół lotny	Krze- mionka	Piasek 0÷1mm	Żwir 2÷4mm	Woda	SP/ST(*)	Stosu- nek W/C	małość na ściskanie <i>fc</i> [MPa]
M1 [31]	942 (a)	628,0	50,2	263,8	-	313,7	12,2/-	0,33	76,3
M2 [12]	490 (b)	175,0	35,0	1214,0	-	280,0	2,8/-	0,57	74,2
M3 [13]	622 (c)	280,0	62,0	933,0	-	280,0	-/-	0,45	-
M4 [29]	980 (b)	210,0	210,0	286,0	_	350,0	24,0	0,36	99,0
(*) SP – superplastyfikator / ST – stabilizator; (a) CEM III/B 32,5; (b) CEM I 52,5; (c) CEM I 32,5									

Tab. 2-3. Przykładowe składy mieszanki betonu drobnoziarnistego (mieszanki badane przez autora pod katem zastosować w przygotowaniu elementów cienkościennych)

Krajowe przepisy, np. PN-EN 206-1:2003/A2:2006 [75] nie precyzują granulacji betonu drobnoziarnistego. Zgodnie z definicją *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE*, beton drobnoziarnisty zawiera ziarna, które w całości przechodzą przez sito 9,5 mm, częściowo 4,75 mm, a reszta zostaje na sicie o oczku 75 µm [2]. Dla celów teksbetu tak zdefiniowane kruszywo jest zdecydowanie zbyt grube.

2.4.2. Wytyczne przyjęte do ustalenia składu mieszanki betonu drobnoziarnistego

Receptura została ustalona na postawie wymagań stawianych świeżej mieszance betonowej i mieszance po związaniu (betonowi) z uwzględnieniem zastosowania tekstyliów. W takim wypadku mamy do czynienia z betonem recepturowym z uwzględnieniem podstawowych wytycznych:

- świeża mieszanka powinna mieć konsystencję plastyczną lub płynną tak by wypełniała przestrzenie między zbrojeniem i przesączała tekstylia, zapewniając w ten sposób dobrą przyczepność zbrojenia do matrycy,
- szybkość wiązania mieszanki umiarkowana, zapewniająca nieznaczny (mały) skurcz i pełzanie, a jednocześnie ograniczenie czasu potrzebnego do rozformowania do minimum,
- beton (mieszanka po związaniu) musi posiadać odpowiednie cechy wytrzymałościowe.

Te ogólne wytyczne zawierają szereg innych ograniczeń i obostrzeń, które mają swoje uzasadnienie w technologii wykonania elementu teksbetowego i jego przeznaczeniu.

# 2.4.3. Mieszanki na potrzeby teksbetu

.

. .

Ustalono, że beton drobnoziarnisty dla elementów z teksbetu ma być betonem zwykłym o niezłożonej recepturze mieszanki betonowej. Wymaganie to spełnia mieszanka R1 (tab. 2-4) tzw. *3-COMPONENT-SYSTEM*. Mieszanka R2 jest bardziej złożoną, gdyż w jej skład wchodzą domieszki w postaci superplastyfikatora i stabilizatora (5-*COMPONENT-SYSTEM*).

(mieszanki wykonane przez autora na potrzeby teksdetu do cienkościennych elementów płytowych)									
Recentura				Stocu					
mieszanki betonowa	Cement CEM I 32,5R	Popiół lotny	Krze- mionka	Piasek 0÷1mm	Żwir 2÷4mm	Woda	SP/ST(*)	nek W/C	Konsy- stencja
R1	363,3	-	-	485,8	1334,2	196,1	-/-	0,54	S3
R2	485,0	-	-	859,8	771,9	227,9	4,8/1,1	0,47	S4
*) SP – superplastyfikator / ST – stabilizator									

Tab. 2-4. Składy mieszanki betonu drobnoziarnistego

Receptury R1 i R2 nie zawierają dodatków w postaci popiołu lotnego i krzemionki, czym zasadniczo różnią się od mieszanek M1-M4 (tab. 2-3), zawierają jednak frakcję żwiru o średnicy 2-4 mm. Różnice pomiędzy mieszankami R1 i R2 wynikają z technologii układania. W pierwszej przewidziano możliwość mechanicznego lub ręcznego zagęszczenia mieszanki, co umożliwiała mieszanka o konsystencji plastycznej S3 (opad stożka 100-150 mm). Druga z wymienionych jest mieszanką quasi-samozagęszczalną (ang. *ASCC – ALMOST-SELF-COMPACTING CONCERTE*) o płynnej konsystencji S4 (opad stożka 160-200mm).

Główną uwagę zwrócono na urabialność mieszanki w określonym czasie, z zachowaniem stabilności (brak wydzielania mleczka, segregacji i sedymentacji mieszanki). Płynność quasi-samozagęszczalnej mieszanki R2 uzyskano przez zastosowanie superplastyfikatora, a jej stabilność przez dodanie stabilizatora.

Obie receptury bazują na cemencie CEM I 32,5R, który charakteryzuje się umiarkowanym rozwojem wytrzymałość, a w swoim składzie zawiera regulator czasu wiązania (zgodnie z danymi producenta wiązanie następuje po min. 75 min). Mała ilość cementu (w porównaniu do M1, M3, M4), brak frakcji pylastych ma na celu zminimalizowanie skurczu, na co również ma wpływ kruszywo i wskaźnik wodno-cementowy.

Przyjęta frakcja kruszywa drobnego 2÷4 mm (żwiru), została dobrana na podstawie parametrów geometrycznych zbrojenia (p. 4.1) oraz spełnia wytyczne *ACI* [2].

## 2.4.4. Właściwości mechaniczne betonu drobnoziarnistego

Podstawowymi cechami stwardniałego betonu są zazwyczaj jego parametry wytrzymałościowe, tzn. charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{ck}$  i średni sieczny moduł sprężystości betonu  $E_{cm}$ . W przypadku teksbetu nie są to zwykle najważniejsze wymagania, wymaga się jednak, aby minimalna wytrzymałość pozwalała klasyfikować beton co najmniej jako C20/25. Beton o niższej wytrzymałości charakteryzuje się bardziej "sprężysto-plastyczną" pracą (rys. 2.22). W przypadku betonu drobnoziarnistego o podanych recepturach (R1, R2) nie stwierdzono odmienności charakterystyki naprężenie-odkształcenie.



Rys. 2.22. Wykres przykładowych linii naprężenie – odkształcenie próbek betonu [60]



Rys. 2.23. Wykresy  $\sigma_c - \varepsilon_c$  przyjmowane w obliczeniach przekrojów betonowych [71, 74]

W analizie teoretycznej zachowanie betonu drobnoziarnistego opisano według obowiązujących przepisów PN-B-03264:2002 [71] i PN-EN 1992-1-2:2008 [74] wykresem paraboliczno-prostokątnym, którego dopuszczalną aproksymacją jest model bilinearny, czyli liniowo-sprężysty/idealnie-plastyczny (rys. 2.23).

Zwykle pomija się wytrzymałość na rozciąganie w obliczeniach przekrojów betonowych. Względy za tym przemawiające to wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_{ctk}$  wynosi zaledwie 6÷10% wytrzymałości na ściskanie  $f_{ck}$  oraz duże rozrzuty wartości w badaniach  $f_{ct}$ . W niniejszej pracy wytrzymałości na rozciąganie oszacowano na podstawie ostrożnych zaleceń normowych [71, 74].

### 2.4. Podsumowanie

Przedstawione powyżej omówienie, bazujące na rozpoznaniu literaturowym tematu betonów zbrojonych ciągłymi włóknami niemetalicznymi w postaci siatek tekstylnych ukazało z jednej strony duże możliwości ich stosowania, ale także zwróciło uwagę na wiele problemów nowych, znacznie bardziej złożonych niż te znane z żelbetu. Różnorodność nie tylko geometryczna, lecz również materiałowa tekstyliów przysparza wiele problemów wymagających badań, którymi od niedawna zajmują się badacze w kilku ośrodkach.

Nowy kompozyt jakim jest teksbet nie jest rozwiązaniem uniwersalnym. Jego komponenty – zarówno matryca (beton drobnoziarnisty), jak i zbrojenie (tekstylia w postaci siatek z ciągłych włókien) powinny zostać tak dobrane, by element mógł najlepiej spełniać wymagania mu postawione. Dostępność różnorodnych materiałów tekstylnych stwarza szerokie możliwości dostosowania cech elementów z teksbetu do konkretnych zastosowań.

# Rozdział 3

## BADANIA WŁASNE – PROGRAM

## 3.1. Cel badań

Beton zbrojony tekstyliami (teksbet) jest w stosunku do żelbetu mało rozpoznanym kompozytem w świecie, prawie nieznanym w naszym kraju.

Badania doświadczalne pozwoliły stwierdzić przydatność siatek niemetalicznych do zbrojenia betonu. Wyniki tych badań były podstawą do opracowania i sprawdzenia prostych modeli obliczeniowych, pozwalających na uogólnienie metod obliczeń przy zastosowaniu niemetalicznego zbrojenia w betonie.

# 3.2. Zakres badań

Badania zaplanowano tak, aby uzyskane wyniki mogły stanowić podstawę jakościowej oceny przydatności zbrojenia niemetalicznego w odniesieniu do tradycyjnego zbrojenia stalowego. Zakres badań obejmował:

- badania materiałowe zbrojenia,
- badania doraźne, w grupie której znalazły się badania pilotażowe (tj. przyczepności siatki niemetalicznej do betonu i badania próbne) oraz badania pod obciążeniem doraźnym,
- badania pod obciążeniem długotrwałym,
- badania pod obciążeniem cyklicznym,
- badania uzupełniające, do grupy których zaliczono badania elementów narażonych na wpływ wybranych czynników destrukcyjnych.

Badania materiałowe w próbie rozciągania służyły ocenie zachowania przędzy w odniesieniu do charakterystyki pracy prętów stalowych i rozpoznaniu właściwości wytrzymałościowych stosowanego zbrojenia.

Właściwe badania modeli próbnych poprzedzono badaniami pilotażowymi w celu opracowania szeregu zabiegów technologicznych, w tym zwłaszcza: doboru receptury mieszanki betonowej, metod stabilizacji wiotkiego zbrojenia w deskowaniu i sposobu układania mieszanki betonowej.

Badania prowadzono zarówno pod obciążeniem doraźnym, jak i długotrwałym. Podstawowym zadaniem badań doraźnych było określenie charakterystyki pracy elementów teksbetowych, w oparciu o którą wykonano kalibrację modelu obliczeniowego. Znając nośność elementów próbnych pod obciążeniem doraźnym o charakterze statycznym, podobne elementy poddano również obciążeniom długotrwałym o założonej, wysokiej intensywności. Uzupełnieniem badań zachowania się teksbetu były – w ograniczonym zakresie – badania pod obciążeniem cyklicznym.

Obok badań parametrów wytrzymałościowych, przeprowadzono również, choć już w mniejszym zakresie, ocenę trwałości cienkościennych prefabrykatów teksbetowych.

## 3.3. Wybór modelu badawczego

W dążeniu do przeprowadzenia rzetelnego wnioskowania postawiono na prostotę elementu badawczego i schematu. Dlatego wybrano prostą strukturę tekstyliów zbrojeniowych w postaci powierzchniowej (płaskiej) siatki ortogonalnej. Tak przyjęte zbrojenie określiło również prosty model badawczy, jakim jest płyta.

Dla celów porównawczych zaplanowano wykonanie modelu żelbetowego o tych samych wymiarach, w tym z zachowaniem takiej samej grubości płyty. Zgodnie z PN-B-03264:2002 [71] minimalna grubość płyty prefabrykowanej zbrojonej prętami stalowymi wynosi 40 mm, z dodatkowym ograniczeniem w postaci minimalnej otuliny prętów o wartości 10 mm (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Szkic płyty – model badawczy

W czasie rozpoczynania prac nad teksbetem na terenie Polski nie można było pozyskać siatek spełniających wymagania przyjęte dla celów zbrojenia betonu, czyli cechujących się znaczącą wytrzymałością na rozciąganie i dostatecznym wydłużeniem przy zerwaniu. Z tego powodu podjęto współpracę z Technicznym Uniwersytetem w Dreźnie, mających doświadczenie w zastosowaniu tekstyliów szklanychj oraz zainteresowano tym tematem producentów siatek służących do wzmacniania gruntu w Republice Czeskiej (firma Kordarna). Ostatecznie, w badaniach wykorzystano siatki wykonane z następujących typów włókien niemetalicznych:

- (A) szklanych, odpornych na alkalia AR-GLASS,
- (P) poli-winylo-alkoholowych PVA,
- (C) węglowych CARBON.

Wszystkie siatki charakteryzowały się, zgodnie z danymi producentów, wiotkimi połączeniami pomiędzy prostopadłymi przędzami. Wiązki (sploty) w kierunku głównym miały wyższą nośność niż w kierunku poprzecznym, co odpowiadało założeniu zbrojenia jednokierunkowego płyty.

Założono, że podstawowa ocena zachowania się teksbetu będzie oparta na analizie pracy zgięciowej elementów płytowych.

Teksbetowe elementy i porównawcze elementy żelbetowe badane były w schemacie płyty wolnopodpartej, obciążonej w sposób liniowy (rys. 3.2). Schemat obciążenia zapewnił jednokierunkową pracę modelu (płyta walcowo zginana). Prosty schemat badania pozwolił zminimalizować błędy modelu oraz umożliwił analizę porównawczą przez wariantowanie zbrojenia.

W modelach badawczych szczególną uwagę poświęcono prawidłowej stabilizacji zbrojenia, dla zachowania identycznych wymiarów geometrycznych porównywanych modeli materiałowych.



Rys. 3.2. Schemat statyczny

# Rozdział 4

# ZBROJENIE – BADANIA KONTROLNE

- 4.1. Właściwości dostępnych siatek tekstylnych przydatnych w teksbecie
- 4.1.1. Siatka z włókien szklanych odpornych na alkalia AR-Glass (A)

Siatka typu NWM3-002-05P (rys. 4.1) wykonana jest z włókien szklanych typu VET-ARG2400-02 firmy *SAINT-GOBAIN VETROTEX DEUTSCHLAND GMBH*, powstałych ze szkła odpornego na alkalia. Poszczególne wiązki siatki zawierają ok. 1600 włókien, połączonych sposobem "trykotu naprzeciwległego" o masie liniowej 2356 tex. Każde włókno ma średnicę ok. 26,20 µm, przy ciężarze objętościowym 2,74 g/cm<sup>3</sup> i wytrzymałości na rozciąganie 1710 MPa oraz module sprężystości w granicach 70÷80 GPa. Przegubowo-przesuwnie łączone ze sobą wiązki tworzą siatkę o wymiarach oczek, w osiach splotów 10,7÷10,9 mm. Siatka jest dostarczana w rolkach o długości 50 m i szerokości 1,1 m. Siatka została udostępniona dla celów badań przez TECHNICZNY UNIWERSYTET W DREŹNIE.



Rys. 4.1. Siatka z włókien szklanych odpornych na alkalia (A)

4.1.2. Siatka z poli-winylo-alkoholu (PVA) w osnowie z termoplastycznego PVC – (P)

Zastosowana siatka *PVA* (rys. 4.2) jest nie w pełni odpowiednią, jeśli chodzi o zastosowanie jej jako zbrojenie betonu, gdyż jej rzeczywistym przeznaczeniem jest zbrojenie podłoży gruntowych i dlatego ma powłokę ochronną *PVC*. Podstawowymi elementami siatki są wiązki, które składają się z czterech splotów (nici), a każdy splot zawiera ok. 1500 włókien z *PVA*. Średnica włókna wynosi ok. 14,00 µm, gęstość

1,30 g/cm<sup>3</sup>, a wytrzymałość na rozciąganie ok. 1500 MPa. Brak danych producenta o module sprężystości siatki, wydłużalność siatki powyżej 5%.

Powłoka (*PVC*) pełni rolę ochrony i stabilizacji połączeń siatki. Przegubowy węzeł tworzony jest przez oplecenie wiązki głównej prostopadłymi splotami. Siatka o oczkach 20,0÷25,0 mm dostępna jest w postaci rolki o szerokości 5 m i długości 50 m. Uzyskana do badań siatka *ARMATEX*<sup>®</sup> *M* wyprodukowana została zgodnie z Europejską Normą EN 13249: 2002 na bazie japońskich włókien *PVA*. Siatka została udostępniona dla celów badań przez producenta, czeską firmę KORDARNA.





Rys. 4.2. Siatka z włókien PVA w osnowie PVC (P)

### 4.1.3. Siatka hybrydowa z włókien węglowych (CARBON) i szklanych – (C)

Siatka hybrydowa zbudowana jest z dwóch rodzajów wiązek: z włókien węglowych oraz z włókien szklanych (rys. 4.3). Wiązki włókien węglowych stanowią główne elementy nośne, a poprzeczne wiązki włókna szklanego służą stabilizacji całej struktury, o znacznie niższej nośności. Poszczególne wiązki zbudowane są z równoległych, luźno uporządkowanych włókien węglowych. Średnica pojedynczego włókna węglowego wynosi 5,00 µm, ciężar objętościowy 1,70 g/cm<sup>3</sup>, a wytrzymałość nominalna (pojedynczego włókna) 4000 MPa. Pojedyncza wiązka nośna siatki jest zbudowana z ok. 4500 włókien węglowych. Siatka o oczkach 35,0÷40,0 mm, wykonana jako luźno pleciona, jest dostarczana w rolkach o szerokości 1,95 m i długości 50,0 m.



Rys. 4.3. Siatka hybrydowa z włókien węglowych (Carbon) i szklanych bez osnowy (C)

Podobnie jak w przypadku siatki z PVA producent nie podaje modułu sprężystości, w zamian podaje wydłużalność w kierunku wiązek węglowych na poziomie 1,2%, a w kierunku włókien szklanych 3%

W handlu siatka ta (rys. 4.3) jest dostępna pod nazwą *S&P CARBOPHALT G* i produkowana jako wstępnie nasączona powłoką asfaltu. Dla celów badań dostarczona została przez producenta (S&P MALBORK) siatka wykonana bez warstwy asfaltowej, w celu poprawy przyczepności siatki do betonu.

# 4.2. Badania kontrolne wytrzymałości i odkształcalności zbrojenia

Procedura standardowa badania wytrzymałości na rozciąganie siatek tekstylnych została opisana w normie ISO 10319: 1996 [76] i dotyczy badania geotekstyliów. Badanie przewiduje uchwycenie końców siatki w szczękach, co powoduje natychmiastowe częściowe uszkodzenie próbki. Dodatkowo wymagany jest wstępny naciąg próbki w celu prostoliniowego ułożenia włókien, realizowany poprzez 2-procentowe wydłużenie. W wypadku włókien o dużej ciągliwości nie stanowi to problemu (np. włókna poliestrowe), niestety dla włókien szklanych, czy węglowych o wysokich modułach sprężystości ta wartość wydłużenia oznacza już częściowe zniszczenie próbki. Pierwszy z problemów rozwiązano przez wykonanie głowic z żywicy, umożliwiających uchwycenie przędzy. Drugi warunek wspomnianej normy, dotyczący wstępnego naciągu, musiał być pominięty – prostowanie uzyskiwano przy niewielkiej sile, nie zagrażającej niszczeniem włókien.

# 4.2.1. Metodologia badań

Badanie wytrzymałości przędzy włókien przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej (zrywarce) typu ZD-40 (rys. 4.4). Wyposażona w metalowe szczęki maszyna jest przystosowana do badań głównie prętów stalowych, co wymagało skonstruowania uchwytów na próbkach przędzy.

a) widok



b) próbka w szczękach



Rys. 4.4. Maszyna wytrzymałościowa typu ZD-40

Próbki wiązek poszczególnych siatek zostały wyposażone w uchwyty wykonane z rurki miedzianej, zapewniające możliwe zaciśnięcie szczęk maszyny na próbce (rys. 4.5). Siła przekazywana była na przędzę przez wypełniającą rurkę żywicę epoksydową. Wykonanie drugiego uchwytu następowało po wyrównaniu włókien w przędzy, z tymczasowym naciągiem włókien. Końcówki miedzianych rurek zostały spłaszczone, celem uformowania bloku, którego zadaniem było wyeliminowanie wyślizgiwania się żywicznego bloku z rurki.

Badania kontrolne wytrzymałości na rozciąganie oraz charakterystyki siłaodkształcenie przeprowadzono na 15-stu próbkach z wybranych losowo wiązek, dla każdego z rodzajów zbrojenia. Do czasu badania wszystkie próbki przechowywano w takich samych warunkach, przy wilgotności względnej powietrza 50÷65% i temperaturze 20÷25°C.



Rys. 4.5. Sposób wykonania próbki do badań kontrolnych wytrzymałości przędzy

Podczas badania mierzona była siła i przemieszczenie głowicy maszyny wytrzymałościowej. Pomiaru przemieszczenia dokonywano za pomoca przymocowanego do głowicy czujnika indukcyjnego, a siłę mierzono przez wbudowany siłomierz (rys. 4.6). Czujniki podłączono do centralnej jednostki rejestrującej dane w przedziale czasowym 0,5 s. Z uwagi na ograniczenia próbkę badano przykładając przemieszczenie ze stanowiska, sterowaniem manualnym. Założono czas badania jednej próbki od 30+60 s, co dało prędkość przyrostu siły na poziomie 0,01÷0,02 kN/s. Nie wykluczyło to jednak całkowicie pewnych pulsacji przekazywanego przemieszczenia.



Rys. 4.6. Szkic stanowiska

### 4.2.2. Przędza z włókien szklanych odpornych na alkalia (A)

Badania wytrzymałości na rozciąganie przędzy z grupy *A* przeprowadzono w temperaturze 20°C i wilgotności względnej powietrza wynoszącej 61%. W badaniach uzyskano znaczne rozbieżności wytrzymałości (rys. 4.7). Z piętnastu próbek, trzy wykazały podobne wartości siły niszczącej przy porównywalnych odkształceniach. Charakter pracy tych próbek został przedstawiony na rysunku 4.8, pole przekroju i cechy wytrzymałościowe zestawiono w tablicy 4-2.



Na wykresie  $\sigma$ - $\varepsilon$  można wyróżnić trzy podstawowe fazy pracy przędzy. W fazie pierwszej następuje wyrównanie naprężeń we wszystkich włóknach przędzy (wykres jest wklęsły). W fazie drugiej, charakteryzującej się przebiegiem prostoliniowym wykresu, wiązka zachowuje się liniowo-sprężyście. W fazie trzeciej pojawia się niewielkie uplastycznienie, a w końcowym etapie następuje zniszczenie.

W momencie zniszczenia włókna zamieniają się z przezroczystych na mleczno białe, co jest wynikiem powstawania rys w ich strukturze.



Rys. 4.8. Wykres naprężenie – odkształcenie dla przędzy siatki z włókien szklanych (A)

Zniszczenie wiązki włókna szklanego następowało gwałtownie, było poprzedzone dźwiękiem zrywanych włókien (charakterystyczne "trzeszczenie") i wspomnianą zmianą barwy w miejscu zniszczenia. Objawy zniszczenia pojawiały się w różnych przekrojach badanych wiązek (rys. 4.9).



Rys. 4.9. Element próbny i obraz zniszczenia wiązki włókien szklanych

### 4.2.3. Przędza z włókien z PVA (P)

Badania wytrzymałości na rozciąganie przędzy z grupy *P* przeprowadzono w temperaturze 19°C i wilgotności względnej powietrza wynoszącej 65%.



Próbki wiązek z włókien *PVA* charakteryzuje ustabilizowana wartość siły niszczącej, przy zachowaniu podobnych wartości odkształceń przy zerwaniu (rys. 4.10). W przypadku elementów, w których odkształcenia znacznie odbiegają od przeciętnych (powyżej 65 ‰) zaobserwowano przesunięcie bloku żywicznego względem miedzianej rurki. Równomierność wyników spowodowana jest, z dużym prawdopodobieństwem, budową wiązki, która składa się z czterech splotów (nici) włókien. Splecenie powoduje znaczne wyrównanie długości poszczególnych włókien w splocie.

Do dalszej analizy wybrano trzy wiązki, które osiągnęły największą siłę niszczącą. Wykres naprężenie – odkształcenie przedstawiono na rysunku 4.11, a główne parametry przędzy zamieszczono w tablicy 4-2.

W przypadku włókien PVA już w pierwszej fazie pracy następuje wyraźne uplastycznienie materiału – wzrost naprężeń przy niewielkim przyroście odkształceń (wypukłość na wykresie) – spowodowane zacieśnianiem włókien w poszczególnych splotach. Następnie, w krótkim przedziale, wiązka pracuje sprężyście (krótki odcinek prostoliniowy), po czym – przed zniszczeniem – następuje wzmocnienie materiału. Siatki z wiązek splotów PVA charakteryzują się największą spośród badanych wydłużalnością i najniższym modułem sprężystości. Jednocześnie, siatki te stosunkowo dobrze absorbują energię niszczącą.



Rys. 4.11. Wykres naprężenie – odkształcenie dla przędzy siatki z włókien PVA (P)

Zniszczenie następuje gwałtownie, bez ostrzeżenia. W analogii do przędzy z włókien szklanych końcówki splotów po zniszczeniu są również postrzępione (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Element próbny i obraz zniszczenia wiązki splotów z PVA

#### 4.2.4. Przędza z włókien węglowych (C)

Warunki badania wiązek z włókien węglowych były podobne do pozostałych badań. Próbki przędzy badano w temperaturze 23°C przy wilgotności ok. 68 %.



Wiązki włókien węglowych w grupie niszczyły się przy znacznych różnicach wartości siły niszczącej i odkształceń (rys. 4.13). Wynika to głównie z "efektu wiązki" (wyrównania wszystkich włókien w wiązce) i przekłada się na uzyskaną wytrzymałość poszczególnych splotów. Należy dodać, że włókna węglowe, posiadające bardzo dużą wytrzymałość na rozciąganie, jednocześnie są bardzo wrażliwe na przegięcia, które prowadzą do złamań w strukturze włókien i osłabienia wiązki.

Również i w tym przypadku wybrano trzy próbki, które charakteryzowała duża siła niszcząca przy porównywalnych odkształceniach. Przędza włókien węglowych zachowuje się liniowo-sprężyście w pełnym zakresie (rys. 4.14, tab. 4-2). Wiązki osiągają siłę niszczącą przy bardzo małych odkształceniach.



Rys. 4.14. Wykres naprężenie – odkształcenie dla przędzy siatki z włókien węglowych (C)

Ze względu na małe odkształcenie przy zniszczeniu i sprężystą pracę – moment zniszczenia jest niesygnalizowany, aż do stopniowanego zerwania. Obraz zniszczenia jest podobny do zniszczenia splotu z włókien szklanych, tzn. poszczególne włókna pękają stopniowo, na dość znacznej długości (rys. 4.15).



Rys. 4.15. Element próbny i obraz zniszczenia wiązki z włókien węglowych

## 4.2.5. Pręty stalowe – (S)

Dla 3 badanych siatek niemetalicznych – zgodnie z deklaracjami producentów – siła zrywająca siatki wynosiła około 55 kN/mb. Na tej podstawie dobrano zbrojenie płyty żelbetowej, zakładając zbrojenie prętami ze stali A-0 o charakterystycznej wytrzymałości 220 MPa. Dla stalowej siatki złożonej z 19 prętów o średnicy 4 mm siła zrywająca wynosiła około 52,5 kN/mb. Pręty poddano próbie rozciągania zgodnie z PN-EN 10002-1:1998 [72] w temperaturze otoczenia (20°C) – rysunek 4.16.



Na rysunku 4.17 przedstawiono wykres naprężenie – odkształcenie dla trzech próbek, które na tle grupy wykazały największą siłę zrywającą przy podobnym odkształceniu. Główne parametry prętów zestawiono w tablicy 4-2. Typowy, i powszechnie znany, wykres  $\sigma$ - $\varepsilon$  dla stali zbrojeniowej zwykłej wykazuje trzy podstawowe fazy pracy. W pierwszej fazie stal zachowuje się sprężyście, potem występuje zjawisko plastycznego płynięcia, ostatecznie następuje wzmocnienie i faza plastyczna, aż do rozpoczęcia przewężania się próbki i zerwania.



Rys. 4.17. Wykres naprężenie – odkształcenie dla prętów stalowych ø4 mm (S)

Typowy obraz zniszczenia pręta to przewężenie próbki, z przerwaniem w jednym przekroju i przeważnie nierównymi krawędziami (rys. 4.18).



Rys. 4.18. Element próbny i obraz zniszczenia pręta stalowego ø4 mm

#### 4.2.6. Podsumowanie

W każdej z grup badanego zbrojenia otrzymano rozbieżności w uzyskanej wartości siły niszczącej oraz odpowiadającego jej odkształcenia, za co odpowiedzialne jest wiele czynników, których możemy się doszukać zarówno w samym materiale, w budowie zbrojenia, a także w sposobie przeprowadzenia badania.



Rys. 4.19. Siła niszcząca – odpowiadające odkształcenie

Kryterium oceny jakościowej uzyskanych wyników dla poszczególnych rodzajów wiązek siatek tekstylnych w odniesieniu do prętów stalowych (rys. 4.19),

stanowi odchylenie standardowe siły niszczącej oraz odpowiadającego jej odkształcenia w grupie 15-stu próbek (tab. 4-1).

Lp.		Rodzaj zbrojenia	Odch. standardowe siły <i>F</i> [kN]	Odch. standardowe odkształcenia <i>ε</i> [‰]	
1.	A –	wiązka z siatki z włókna szklanego odpornego na alkalia	0,1456	7,0099	
2.	P –	wiązka splotów z siatki z włókna PVA	0,0290	5,7188	
3.	C –	wiązka z włókien węglowych w siatce hybrydowej	0,3300	4,2732	
4.	S –	pręty ze stali zwykłej	0,1270	5,6083	

Tab. 4-1. Odchylenie standardowe siły i odkształcenia dla poszczególnych rodzajów zbrojenia

Wiązka włókien węglowych wykazała najwyższe rozbieżności w uzyskanej sile niszczącej, co było skutkiem "efektu wiązki", kiedy włączenie do współpracy wszystkich włókien w wiązce (ok. 4500 włókien) jest niemożliwe bez zniszczenia niektórych z nich. Dodatkowo, kruche włókna węglowe, luźno połączone między sobą, są wrażliwe na zginanie, do którego mogło dochodzić podczas przygotowania próbki do badania.

Wiązka włókien szklanych, które połączone są ze sobą wiązaniem i warstwą powierzchniową, wykazała mniejszy rozrzut siły, ale znaczne rozrzuty odkształcenia. Z tego można wnioskować o dobrym wyrównaniu włókien w splocie, a dzięki połączeniu włókien w ścisłą wiązkę uzyskano strukturę odporniejszą na zginanie. Tym samym znacznie mniej włókien zostało uszkodzonych w czasie przygotowania Rozbieżności odkształceniu świadczyć próbki. w moga 0 minimalnych przesunięciach bloku żywicznego w rurce miedzianej. Włókna szklane osiągneły najwyższe naprężenia i miało na to wpływ zachowanie się połączenia: rurka miedziana – blok żywiczny – włókno. Próbki te zrywały się w pobliżu zakotwienia.

Kolejnym rodzajem zbrojenia co do wartości odchylenia standardowego w grupie 15-stu próbek są pręty stalowe. Siła niszcząca w stali, w zależności od stanu fizycznego próbki (początkowe przewężenia przekroju powstałe na etapie produkcji, karby na próbce, prostoliniowość próbki), może być różna, stąd jako wartość wytrzymałości stali dla celów obliczeniowych jest przyjmowana granica plastyczności.

Zaskakującą zbieżność wartości siły zrywającej uzyskały wiązki ze splotów włókien *PVA*. Na taki wynik wpłynęły dwa podstawowe czynniki. Pierwszy to wyrównanie włókien w wiązce, która składa się ze czterech splotów po 1500 włókien poli-winylu-alkoholu każdy. Drugi czynnik to współpraca wszystkich włókien, osiągnięta przez możliwość uzyskania znacznego wydłużenia przed początkiem fazy zniszczenia – wynik niskiego modułu sprężystości *E*.

W tabeli 4-2 zostały zebrane wartości sił zrywających oraz odpowiadające im odkształcenia, wyznaczone wartości modułu sprężystości i średnie naprężenia niszczące dla trzech wybranych próbek z każdego rodzaju zbrojenia.

Lp.	Rodzaj zbrojenia	Ozn. próbki	Pole przekroju <i>a*</i> [m <sup>2</sup> ]	Siła zrywająca <i>F<sub>max</sub></i> [kN]	Naprężenia przy sile zrywającej $\sigma_{max}$ [MPa]	σ <sup>śr</sup> <sub>max</sub> [MPa]	Moduł Younga <i>E</i> [GPa]	E <sup>śr</sup> [GPa]	Max. odkształcenia podłużne <i>ɛ<sub>max</sub></i> [‰]	3 <sup>\$r</sup> <sub>max</sub> [%ه
	A – wiązka z siatki	WA-1	0.500	0,6080	1215,9882	534	80,3618	33	15,1314	14,7289
1.	z włókna	WA-2	0,500 ×10 <sup>-6</sup>	0,6044	1208,7984	<b>06,1</b> {	81,7393	1,923	14,7885	
	szkianego	WA-3		0,5968	1193,6736	12(	83,6687	ò	14,2667	
	<b>_</b> · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	WP-1	0,900 ×10 <sup>-6</sup>	0,5366	581,3729	08	10,5785	10,3411	54,9581	56,9380
2.	z włókna PVA	WP-2		0,5226	566,1905	1,21	10,5442		58,6800	
		WP-3		0,5225	566,0690	57	9,9005		57,1760	
	C – wiązka z siatki z włókna węglowego	WC-1	3,500 ×10 <sup>-6</sup>	1,7482	499,4874	5,9961	69,7209	67,0931	7,1641	7,0957
3.		WC-2		1,6316	466,1733		64,3886		7,2400	
		WC-3		1,6181	462,3277	47	67,1697		6,8830	
		pr1-S		4,7260	376,0831 (244,0151)	,1925]	220,2451	10	267,5679	~
4. <sup>S ·</sup>	S – pręty stalowe ø4 mm	pr2-S	12,566 ×10 <sup>-6</sup>	4,6860	372,9000 (240,9012)	714 [241	218,3169	215,663	267,0528	267,0688
		pr3-S		4,6600	370,8310 (238,6612)	373,27	208,4284		266,5857	

Tab. 4-2. Właściwości materiałowe dla trzech wybranych próbek z każdego rodzaju zbrojenia

\* – pole przekroju oznaczono jako:  $a_{f}$  – dla wiązek z włókien,  $a_{s}$  – dla pręta stalowego

() – w nawiasach podano charakterystyczną granicę plastyczność stali  $f_{yk}$ 

[] – w nawiasach podano średnią charakterystyczną granicę plastyczność stali  $f_{yk}^{sr}$ 

Wiązki siatek tekstylnych wykazały wyższe wartości naprężenia niszczącego w porównaniu do prętów stalowych. Uzyskane moduły sprężystości dla stali i włókna szklanego są na poziomie wartości typowych dla tych materiałów (tab. 2-1). Z kolei wiązki z włókien PVA i włókien węglowych wykazują niskie moduły, co jest typowe dla siatek geotekstylnych.

Różnorodność charakterystyk pracy zastosowanych materiałów pokazano na rysunku 4.20, na którym zestawiono zależność  $\sigma$ - $\epsilon$  dla przędzy siatek tekstylnych i pręta ze stali zbrojeniowej.



Rys. 4.20. Porównanie wykresów naprężenie – odkształcenie dla zastosowanych rodzajów zbrojenia

Uwagi w odniesieniu do przeprowadzonych badań:

- w żadnej z badanych wiązek siatek tekstylnych nie uzyskano charakterystycznych skokowych zmian wartości (rys. 2.17) na wykresie naprężenie – odkształcenie przy wyrównywaniu czy zrywaniu włókien w wiązce, na co miały wpływ ograniczenia techniczne aparatury (brak płynnej regulacji przemieszczenia oraz niedostatecznie mały interwał pomiaru),
- przy wykonywaniu próbek konieczne jest staranne wyrównanie włókien w splocie i ograniczenie przeginania – ma to szczególne znaczenie wtedy, gdy mamy do czynienia z wiązkami luźno połączonych między sobą włókien,
- przy przędzy o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, z włókien o małej ciągliwości, zastosowane w badaniach rozwiązanie uchwytów, pomimo staranności, nie jest w pełni efektywne.

Rozdział 5

# **BADANIA DORAŹNE**

# 5.1. Badania przygotowawcze

Badania główne wykonano na podstawie obserwacji wynikających z badań przygotowawczych. Wyniki tych wstępnych obserwacji przedstawiono w formie skróconej.

# 5.1.1. Badania przyczepności

Podstawowym celem badań było zapewnienie współpracy siatek z mieszanką betonową. Zbrojenie w postaci siatek niemetalicznych ma bowiem przejąć rolę tradycyjnego zbrojenia ze stali, czyli dzięki przyczepności przenosić naprężenia rozciągające.

Przeprowadzone badania przyczepności siatek niemetalicznych do betonu miały charakter poglądowy i potwierdziły istnienie mechanizmu przyczepności. Niemniej, szczegółowa analiza jakościowa sił przyczepności zbrojenia do betonu, z uwagi na ograniczenia stanowiska badawczego, nie była prowadzona.

5.1.1.1 Przygotowanie elementów próbnych



Rys. 5.1. Próbka do badań przyczepności

Elementy próbne zbudowane były z bloku betonowego o przekroju 25 × 25 cm i wysokości równej długości zakotwienia, tj. od 5 do 20 cm (ze stopniowaniem co 5 cm) oraz z pasma siatki tekstylnej szerokości 10 cm i długości od 70 do 85 cm. Jeden z końców pasma zabetonowano w bloku kotwiącym, a drugi mocowany w szczękach maszyny wytrzymałościowej ZD-40, wyposażono w uchwyt z żywicy epoksydowej, zabezpieczający włókna siatki przed zniszczeniem przy zaciskaniu szczęk maszyny (rys. 5.1). Pojedynczą serię elementów próbnych stanowiły trzy elementy dla każdej długości zakotwienia i każdego rodzaju siatki. W sumie przebadano 36 elementów próbnych.



Rys. 5.2. Etapy wykonania elementów próbnych do badań przyczepności: a) forma do betonowania z pasmem siatki, b) elementy próbne po zabetonowaniu

Do wykonania bloku betonowego zastosowano drobnoziarnistą mieszankę betonową R1 (tab. 2-4) o konsystencji plastycznej, którą zagęszczono ręcznie przy układaniu w formie (rys. 5.2). W czasie betonowania pasmo u dołu zabezpieczono tymczasowo osłoną poliuretanową, dla ochrony przed przypadkowym uszkodzeniem siatki podczas zagęszczania. Z każdego zarobu przygotowano po trzy próbki walcowe dla określenia wytrzymałości betonu na ściskanie.

Próbki walcowe i próbki do sprawdzenia przyczepności dojrzewały w tych samych warunkach, przy wilgotności otoczenia ok. 50÷65% i temperaturze 18÷25°C.

# 5.1.1.2 Stanowisko i przebieg badania

a) schemat stanowiska

Badanie polegało na próbie wyciągnięcia pasma siatki z bloku betonowego, siłą działającą wzdłuż płaszczyzny zakotwienia (schemat na rys. 5.3.a).

Głowica stała Próbka Głowica ruchoma Głowica ruchoma Manualna jednostka sterująca

b) widok elementu próbnego przed badaniem



Rys. 5.3. Stanowisko do badań przyczepności

Przeprowadzono je w maszynie wytrzymałościowej ZD-40, której górna głowica stanowiła podporę bloku betonowego, a dolna, ruchoma, powodowała wyciąganie siatki zamocowanej w szczękach (rys. 5.3).

W badaniu mierzono siłę wywołującą wysuwanie się siatki (siłomierzem wbudowanym w maszynie wytrzymałościowej) lub jej zerwanie. W przypadku zerwania, elektronicznym czujnikiem zegarowym określano końcowe wydłużenie. Oznaczano również miejsce zerwania pasma siatki. Spodziewano się, iż, dla wystarczającego zakotwienia, pasmo siatki zostanie zerwane przy sile o wartości odpowiadającej wytrzymałości na rozciąganie (tab. 5-1) i wystąpi w obrębie pasma siatki, poza blokiem betonowym.

Lp.	Rodzaj siatki	Teoretyczna wartość siły zrywającej F <sub>n</sub> [kN]				
1.	z włókna szklanego	60,308 kN/m × 0,1m = <b>6,031 kN</b>				
2.	z włókna PVA	25,710 kN/m × 0,1m = <b>2,571 kN</b>				
3.	z włókna węglowego	41,650 kN/m × 0,1m = <b>4,165 kN</b>				
ΟZ	NACZENIA:	Sposób wyliczenia:				
F <sub>zr</sub>	– siła zrywająca [kN/m]					
F <sub>n</sub> -	– siła zrywająca pasmo siatki [kN]	$F_{rr} = \sigma_{max}^{sr} \times 10^3 \times a_{\epsilon} \times n \text{ [kN/m]} $ (5.1)				
$\sigma^{sr}$	<sub>nax</sub> – średnie naprężenie zrywające [MPa] (tab. 4-2)					
a,-	- pole powierzchni pojedynczej przędzy [m <sup>2</sup> ] (tab. 4-2)	$F_n = F_{zr} \times b_n  [\text{kN}] \tag{5.2}$				
n –	liczba wiązek (splotów) na 1 mb siatki [1/m]					
b <sub>n</sub> -	- szerokość pasma siatki [m]					

Tab. 5-1. Teoretyczna wartość siły zrywającej

Wartości siły zrywającej pasmo siatki szerokości 10,0 cm (wyliczone w tabeli 5-1), podane są orientacyjnie w celu umożliwienia oceny zakotwienia.

### 5.1.1.3 Wyniki i wnioski z badań przyczepności

Elementy badawcze zostały poddane badaniu po 28 dniach od wykonania. Próbki walcowe betonu po 28 dniach dojrzewania wykazały średnią (z 9 próbek) wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm}$  = 36,6 MPa.

Wyniki badań przyczepności dla poszczególnych elementów przedstawiono w tabeli 5-2 w sposób opisowy zawierający siłę, przy której następowało wysnuwanie lub zrywanie siatki oraz wydłużenie towarzyszące sile zrywającej.

Przedstawione wyniki (tab. 5-2) wskazują, że wszystkie siatki mają wystarczającą przyczepność przy długości zakotwienia min. 15,0 cm. W przewadze zerwanie siatek następowało przy sile porównywalnej do maksymalnej siły zrywającej, w środku pasma.

١n	Ozn.	Długość zakotwienia							
<u>-</u> р.	próbki	5,0 cm	10,0 cm	15,0 cm	20,0 cm				
1.	A-1		siatka wysnuwa się przy sile 3,80 kN	siatka niszczy się w środku paska, przy sile 4,60 kN, a wydłużenie przy zniszczeniu wynosiło 14,20 mm	zniszczenie siatki przy bloku kotwiącym, siła wyniosła 4,20 kN, a wydłużenie 14,10 mm				
	A-2		siatka ulega zniszczeniu przy bloku kotwiącym; siła 3,60 kN wydłużenie 12,50 mm	zniszczenie siatki przy bloku kotwiącym, siła wyniosła 3,95 kN, a wydłużenie 12,60 mm	siatka niszczy się w środku paska, przy sile 5,16 kN, wydłużenie przy zniszczeniu wynosiło 15,37 mm				
	A-3	długość zakotwienia	siatka wysnuwa się przy sile 3,50 kN	siatka niszczy się w środku paska, przy sile 4,90 kN, a wydłużenie przy zniszczeniu wynosiło 15,50 mm	zniszczenie siatki się w środku paska, przy sile 6,02 kN, a wydłużenie przy zniszczeniu wynosiło 15,58 mm				
	P-1	niewystarczająca siatki wyciągane są z bloku betonowego, średnia siła powodująca wyciąganie siatki wynosiła 1,8 kN (fot. 2-4)	długość zakotwienia niewystarczająca, wyciąganie siatki z bloku betonowego następuje przy średniej sile 2,1 kN	siatka ulega zniszczeniu przy bloku kotwiącym, siła 1,80 kN a wydłużenie 14,76 mm	siatka ulega zniszczeniu w środku paska, siła 2,10 kN, a wydłużenie 19,40 mm siatka ulega zniszczeniu w środku paska, siła 2,32 kN a wydłużenie 17,80 mm				
2.	P-2			siatka ulega zniszczeniu w środku przy sile 2,10 kN i wydłużeniu 16.90 mm					
	P-3			siatka ulega zniszczeniu w środku przy sile 2,30 kN i wydłużeniu 17,60 mm	siatka zniszczyła się przy sile 1,59 kN przy bloku, wydłużenie wynosiło 13,89 mm				
	C-1		długość zakotwienia niewystarczająca, wyciąganie siatki z bloku betonowego następuje przy średniej sile 2,8 kN	siatka niszczy się przy bloku kotwiącym, siłą 1,53 kN, a wydłużenie 1,60 mm	zniszczenie siatki w środku pasma przy sile 3,9 kN, wydłużenie 2,30 mm				
3.	C-2			zniszczenie siatki przy sile 3,9 kN, wydłużenie 2,60 mm	zniszczenie siatki przy sile 1,89 kN, wydłużenie 1,70 mm				
	C-3			zniszczenie siatki przy sile 3,60 kN, wydłużenie 2,20 mm	zniszczenie siatki przy sile 4,00 kN przy bloku betonowym, wydłużenie wynosiło 2,50 mm				
OZ	NACZE	NIA:							
Ozi A	naczenie siatka -	e literowo-cyfrowe (m z włókien szklanych o	ateriał-nr próbki) dpornych na alkalia						
A – siatka z włokien szkianych odpornych na alkalia P – siatka z włókien poli-winylo-alkoholu									
C – siatka z włókien węglowych i szklanych									

Tab. 5-2. Opisowe zestawienie wyników badań

Niektóre z siatek niszczyły się na samym początku przy bloku kotwiącym lub przy uchwycie z żywicy epoksydowej (rys. 5.4). Siła niszcząca nie przekraczała 60% wartości teoretycznej siły zrywającej (tab. 5-1), co wskazywało na mechaniczne uszkodzenie włókien przy wykonywaniu próbki, w trakcie ręcznego zagęszczania

mieszanki betonowej, przez przeginanie siatki w trakcie jej pozycjonowania w formie, przy transporcie lub instalowaniu jej w maszynie wytrzymałościowej. Wskazuje to na wrażliwość siatek na wstępne uszkodzenia mechaniczne.

a) przy bloku kotwiącym



Rys. 5.4. Zniszczenie siatki

Przy zakotwieniu 5,0 cm następowało wyciąganie wszystkich siatek z bloku. Siła przy której dochodziło do wyciągania wynosiła 10÷60% wartości teoretycznej siły zrywającej (w zależności od rodzaju siatki) – zakotwienie było niewystarczające (rys. 5.5). Zakotwienie o długości 10,0 cm okazało się skuteczne dla siatek z włókna szklanego, a przy siatkach z włókien PVA i węglowych zawodziło.

a) przed badaniem



b) po badaniu



Rys. 5.5. Wysnuwanie się siatki z betonowego bloku kotwiącego (widok góry bloku betonowego )

W przypadku siatek PVA zewnętrzna powłoka z termoplastycznego PVC mogła spowodować osłabienie przyczepności do betonu, jako że samo włókno PVA wykazuje dobre walory przyczepnościowe [33, 34] (p. 2.1.3).

Włókna węglowe charakteryzują się gładką, szczelną powierzchnią, która powoduje trudności we współpracy z matrycą cementową. Dlatego też należałoby zmodyfikować sploty węglowe przez dodanie warstwy ochronnej, zwiększającej przyczepność i stabilizującej całą strukturę siatki (p. 12.3).

b) przy uchwycie

Przełom bloku kotwiącego (rys. 5.6) dla próbek, w których zniszczeniu uległa środkowa strefa pasma siatki wskazuje na dobre otulenie włókien przez mieszankę betonową, co stanowi podstawę współpracy włókna i matrycy.

a) siatka z włókien szklanych b) siatka z włókien PVA c) siatka z włókien weglowych



Rys. 5.6. Rozłupane próbki po badaniu w celu oceny otulenia siatek betonem

Analizując powyższe wyniki sformułować można następujące wnioski częściowe:

- mechanizm przyczepności włókno niemetaliczne matryca cementowa ma miejsce w przypadku wszystkich siatek,
- dla badanych siatek długość zakotwienia 15,0 cm jest wystarczająca,
- długość zakotwienia zależy od wytrzymałości siatki na rozciąganie,
- długość zakotwienia zależy od powierzchni zewnętrznej (warstwy ochronnej) przędzy,
- dobra współpraca jest zapewniona przez dobre otulenie siatki betonem.

Dodatkowo, w analogii do żelbetu, przyczepność zależy od następujących czynników:

- wytrzymałości betonu na ściskanie,
- względnej powierzchni pobocznicy włókna,
- względnej grubości otuliny betonowej.

W związku z powyższym, model pracy otuliny betonowej w fazie plastycznej przedstawiony na rysunku 5.7 określa wartość granicznych naprężeń przyczepności  $f_{bd}$  (5.3) jako iloczyn wytrzymałości betonu na rozciąganie  $f_{ct}$  i podwojonej względnej grubości otuliny c/ø:

$$f_{bd} = f_{ct} \frac{2c}{\phi}$$
(5.3)



Rys. 5.7. Model pracy otuliny żelbetowej [64]

Stąd wniosek: im mniejsza średnica przędzy, tym skuteczniejsza przyczepność do betonu (podobnie jak to ma miejsce w zbrojeniu stalowym).

Dodatkowo, dla przędzy z włókien, ważną rolę stanowi przesycanie zaczynem cementowym (rys. 5.8), zwiększające przyczepność i zapewniające współpracę poszczególnych włókien w splocie. Wzajemne powiązanie włókien w przędzy zależy od powierzchni styku zaczynu z włóknami i kształtu przekroju przędzy (rys. 5.9).



Przędza bardziej wypełniona zaczynem 🔪

Rys. 5.8. Wypełnienie przestrzeni między włóknami w przędz



Rys. 5.9. Idealizacja kształtu przekroju przędzy z włókien

# 5.1.2. Badania próbne elementów płytowych

# 5.1.2.1 Receptura mieszanki

W badaniach próbnych sprawdzono mieszankę o tradycyjnym składzie R1 (tab. 2-4). Mieszanka o konsystencji plastycznej pozbawiona jest dodatków oraz domieszek i różni się od tradycyjnej mieszanki wielkością uziarnienia, na które w szczególności miała wpływ budowa siatki o najgęstszych oczkach, tj. siatka z włókna szklanego odpornego na alkalia (p. 4.1.1). Najmniejszy wymiar oczka siatki w świetle wiązek wynosił 6,0÷8,5 mm, co narzuciło ograniczenie ziarna kruszywa do 4 mm (najmniejszy wymiar oczka siatki pomniejszony o ok. 25%).

# 5.1.2.2 Przygotowanie elementów próbnych

Na bazie mieszanki R1 wykonano 4 próbne płyty zbrojone:

- siatką z włókien szklanych odpornych na alkalia (AR),
- siatką z włókien PVA w osnowie PVC (PR),
- siatką hybrydową z włókien węglowych i szklanych (CR),
- prętami stalowymi (SR) ø 4 mm (w liczbie 19 szt.).

Z każdego zarobu formowano jedną płytę próbną i minimum trzy próbki walcowe do badań towarzyszących wytrzymałości betonu na ściskanie. Specyfika zastosowanej mieszanki i zbrojenia tekstylnego wymusiła wieloetapowość wykonania płyty. W pierwszym etapie była układana jedno-centymetrowa warstwa betonu, jako otulina zbrojenia, po czym następowało wstępne zagęszczenie na wibratorze stolikowym i ułożenie zbrojenia tekstylnego. Po ustabilizowaniu zbrojenia w ściankach formy, poprzez poddanie siatek wstępnemu naciągowi, przystępowano do zabetonowania drugiej warstwy płyty grubości 3 cm (rys. 5.10).

a) układanie mieszanki – druga warstwa



Rys. 5.10. Betonowanie serii próbnej

b) płyta po ułożeniu betonu



c) widok płyty po rozdeskowaniu



Płyty i próbki dojrzewały w normalnych warunkach panujących w hali laboratorium, w zakresie temperatur 15÷25°C i przy wilgotności otoczenia 55÷65%. W pierwszym tygodniu płyty były poddawane tradycyjnym zabiegom pielęgnacyjnym przez spryskanie wodą górnej powierzchni i przykrycie folią zabezpieczającą przed gwałtowną utratą wilgoci, co dla cienkich elementów było szczególnie niebezpieczne.

## 5.1.2.3 Wyniki i wnioski z badań próbnych

Płyty i próbki walcowe poddano badaniu po osiągnięciu pełnej wytrzymałości, w wieku 28 dni. W dniu badania próbki walcowe wykazały średnią wytrzymałość betonu na ściskanie  $f_{cm}$  = 37,9 MPa (średnia z 12-stu próbek walcowych).

Pierwszą, próbną serię płyt zbadano na stanowisku badawczym (rys. 5.11), które zapewniało pracę płyty w wolnopodpartym schemacie statycznym. Prowadzono pomiar ugięcia płyt elektronicznymi czujnikami zegarowymi w środku rozpiętości, przy obu krawędziach. Liniowo rozłożone obciążenie zadawane było przez sztywną belkę stalową obciążaną 25-cio kilogramowymi ciężarkami. Zniszczenie, w szczególności płyt zbrojonych siatką z włókien szklanych, następowało gwałtownie, co pokazano na rysunku 5.12.



Rys. 5.11. Stanowisko do badań próbnych



Rys. 5.12. Zniszczenie płyty – badania próbne

Charakter pracy płyt przedstawiono na wykresie zależności siły i przemieszczenia (rys. 5.13). W początkowej fazie płyty zachowują się w sposób zbliżony, a osiągane wartości przemieszczeń są porównywalne, co świadczy o dobrym doborze stopnia zbrojenia dla poszczególnych typów siatek.



Uwaga:



Wnioski z badań próbnych:

- Mieszanka R1 nadaje się do stosowania w płytowych elementach teksbetowych, ale z racji małej ciekłości wymaga układania betonu warstwami; w toku badania nie zaobserwowano rozwarstwiania się płyty w płaszczyźnie styku warstw.
- Wymóg wysokiej dokładności wykonania płyty znacznie wpłynął na wydłużenie czasu trwania układania betonu (wieloetapowość). Sposób zagęszczenia wykluczał również możliwość pasmowego wykonania kilku płyt na raz. Dlatego, z przyczyn technologicznych, zdecydowano o zmianie zwykłej mieszanki betonowej R1 na drobnoziarnistą mieszankę R2 (tab. 2-4) betonu quasi-samozagęszczalnego (ang. ASCC ALMOST-SELF-COMPACTING CONCERTE).
- Eliminując wieloetapowość wykonania elementu, należy zadbać o utrzymanie stałej geometrii wszystkich płyt, w tym również niezmiennej otuliny zbrojenia. Konieczne jest wprowadzenie wstępnego naciągu siatki przed betonowaniem, aby układająca się mieszanka betonowa nie spowodowała zniekształcenia zbrojenia.

Na podstawie wniosków z wykonania elementów próbnych i ich badań pilotażowych, po niewielkich modyfikacjach składu mieszanki betonowej, podjęto badania właściwe – doraźne i długotrwałe.

## 5.2. Badania doraźne elementów płytowych

Badania doraźne przeprowadzono na czterech seriach elementów płytowych (rys. 3.1). Każda seria składała się z 3 zbrojonych płyt, więc w sumie badaniu poddano 12 elementów płytowych. Jednorazowo wykonywano po trzy płyty jednej serii, co zapewniało jednorodność mieszanki betonowej (R2, tab. 2-4). Do każdej z serii pobrano minimum 3 towarzyszące próbki walcowe w celu określenia wytrzymałości na ściskanie oraz modułów Younga i współczynnika Poissona.

# 5.2.1. Przygotowanie elementów w seriach do badań

Betonowanie przeprowadzono w formie bateryjnej, która nie tylko dawała możliwość wykonania trzech płyt jednocześnie, ale dodatkowo jej konstrukcja umożliwiała ustabilizowanie zbrojenia z zachowaniem równej wartości otuliny dla wszystkich płyt. Forma dla płyt zbrojonych prętami stalowymi (rys. 5.14) została wykonana z możliwością stabilizacji prętów głównych i montażowych na zadanych wysokościach w przekroju.



Rys. 5.14. Widok formy ze zbrojeniem tradycyjnym

W przypadku płyt zbrojonych siatkami niemetalicznymi, ściany formy zostały podzielone na dwie części: dystansową, o wysokości 1 cm – dla zachowania otuliny zbrojenia oraz drugą, o wysokości 3 cm – nadającą pełną wysokość płycie i zapewniającą prawidłowe mocowanie siatki. Dla utrzymania 1-centymetrowej otuliny na całej powierzchni płyty, zdecydowano się na wstępny naciąg siatki, który przeciwdziałał zdeformowaniu wiotkiego zbrojenia podczas betonowania. Naciąg zrealizowano jednostronnie za pomocą wałka kotwiącego i śruby rzymskiej (rys. 5.15).



Rys. 5.15. Widok formy ze zbrojeniem z siatki tekstylnej

Naciąg, którego wartość nie przekraczała 0,5 kN/m, zwalniano po zabetonowaniu siatek.

Po wymieszaniu składników mieszanki, bezpośrednio przed przystąpieniem do betonowania (rys. 5.16), przeprowadzano badania konsystencji mieszanki betonowej. Badania prowadzono metodą opadu stożka, zgodnie z PN-EN 12350-2:2001 [73]. Konsystencja odpowiadała klasie S5 (opad stożka powyżej 220 mm), a średnica rozpływu po 3 s wahała się w granicach 65÷71 cm. Zauważalne było samoodpowietrzanie mieszanki i nie występowała segregacja składników betonu. Ze względu na specyfikę mieszanki wymagane było zachowanie szczególnej ostrożności w trakcie jej transportu, aby uniknąć efektu zagęszczenia czy sedymentacji kruszywa.



Rys. 5.16. Widok płyty w trakcie i tuż po betonowaniu

Tak zabetonowane płyty (rys. 5.16) pozostawały w formie przez 4 dni. W tym czasie prowadzono intensywną pielęgnację betonu przez polewanie wodą i utrzymywanie elementów pod przykryciem z folii. Płyty i towarzyszące próbki walcowe składowano w temperaturze 20÷25°C, przy wilgotności otoczenia w zakresie ok. 60÷70%. Po czterech dniach brzegi płyt rozdeskowano, kontynuując pielęgnację przez kolejne 3 dni. Wszystkie płyty (rys. 5.17) i towarzyszące próbki walcowe dojrzewały przez 28 dni w tych samych warunkach.



Rys. 5.17. Widok stanowiska betonowania i składowania płyt

5.2.2. Badania towarzyszące betonu

Z każdej partii betonu pobrano towarzyszące próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Próbki przechowywano w tych samych warunkach, co płyty wykonane z danego zarobu. W sumie wykonano i badano 12 próbek walcowych dla wszystkich serii płyt.

Wytrzymałości na ściskanie betonu określono na próbkach w wieku odpowiadającym wiekowi badanych płyt, czyli po 28 dniach dojrzewania. Odkształcenia próbek badano za pomocą 6 tensometrów elektrooporowych typu RL 285/75, rozmieszczonych w trzech parach w środku wysokości próbki po obwodzie, w równomiernych odstępach (rys. 5.18). Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej typu DRBM nr 265/1 (rys. 5.19), dokonując pomiaru siły oraz odkształceń pionowych i poziomych.



Rys. 5.18. Szkic próbki



Rys. 5.19. Widok próbki umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej typu DRBM nr 265/1

W tabeli 5-3 przedstawiono otrzymane wartości maksymalne siły  $F_{max}$  i naprężeń ściskających  $\sigma_{max}$  w próbkach oraz, uśrednione dla trzech próbek, wartości wytrzymałości betonu na ściskanie, modułu odkształcalności podłużnej i współczynnika odkształcalności poprzecznej.
L n	Oznaczenie i opis serii		F <sub>max</sub>	$\sigma_{max}$	Wytrzymałość Średni średnia betonu sieczny moduł		Średnia wartość wsp.
∟р.			[kN]	[MPa]	na ściskanie	sprężystości	Poissona
					f <sub>cm</sub> [MPa]	E <sub>cm</sub> [GPa]	vc
	A – beton płyt zbrojonych siatką	W1	712,0691	40,2949			
1.	z włókna szklanego odpornego	W2	751,4483	42,5233	41,88	35,55	0,1871
	na alkalia (rys. 3.33)	W3	756,9330	42,8336			
	P– beton płyt zbrojonych siatką	W1	744,8540	42,1501	45,90	36,38	0,1811
2.	z włókna z poli-winylu-alkoholu	W2	854,5010	48,3549			
	(rys. 3.34)	W3	834,2542	47,2091			
	C boton phyt zbrojonych siatka	W1	705,0461	39,8974			
3.	z włókna woglowogo (rys. 3.35)	W2	487,4510	44,3908	42,56 3	35,69	0,1877
		W3	766,9411	43,4015			
	S boton plut zbrojonych protami	W1	948,3671	53,6667			
4.	stalowymi (rys. 3.36)	W2	798,1490	45,1660	49,87	37,17	0,1962
		W3	897,5490	50,7909			

Tab. 5-3. Właściwości betonu dla próbek walcowych z każdej serii płyt

Na rysunkach 5.20÷5.23 przedstawiono charakterystykę pracy betonu z mieszanki drobnoziarnistej *R2*, zastosowanej do wykonania poszczególnych serii płyt. Uzyskany beton można zakwalifikować w przybliżeniu do klasy C35/45 (wg EC2). Jak widać, nie udało się uniknąć różnic w zarobach mieszanek betonowych, lecz różnice wytrzymałości betonu z poszczególnych partii są niewielkie.



Rys. 5.20. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla betonu serii A



Rys. 5.21. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla betonu serii P



Rys. 5.22. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla betonu serii C



Rys. 5.23. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla betonu serii S

#### 5.2.3. Stanowisko do badań podstawowych

Stanowisko badawcze składało się ze sztywnej ramy stalowej do przekazania obciążenia na model badawczy (rys. 5.24). Do rygla ramy zamocowanej w płycie wielkich sił został podwieszony siłownik śrubowy o nominalnej sile nacisku 20 kN, przekazujący obciążenie na sztywną belkę, równomiernie rozkładającą je na szerokości płyty. Pomiar siły był dokonywany siłomierzem.



Rys. 5.24. Stanowisko do badań podstawowych

Badaną płytę oprzyrządowano w 10 czujników indukcyjnych do pomiaru przemieszczeń oraz w 22 tensometry elektrooporowe typu RL 285/75 do pomiaru odkształceń na powierzchni górnej oraz na wysokości płyty (rys. 5.25). W punktach



oparcia czujników indukcyjnych zostały naklejone szkiełka dla wyrównania powierzchni przyłożenia trzpienia czujnika do płyty.

Rys. 5.25. Schemat rozmieszczenie punktów pomiarowych

### 5.2.4. Przebieg badań

Dla zwiększenia precyzji pomiarów, a zwłaszcza dla uchwycenia poziomów obciążenia, co jest utrudnione w przypadku siły wywoływanej manualnie przez siłownik śrubowy, ustalono minimalny interwał czasu trwania odczytu i rejestracji danych na 0,5 s. Przed przyłożeniem właściwego obciążenia przeprowadzono kontrolę stanowiska badawczego poprzez trzykrotne obciążenie i odciążenie płyty ciężarem poprzecznej belki stalowej wynoszącym 0,53 kN. Widok płyty przed przystąpieniem do badania pokazano na rysunku 5.26.



Rys. 5.26. Widok stanowiska z oprzyrządowaną płytą

Oznaczenia:

- 1 rygiel ramy
- 2 siłownik śrubowy
- 3 siłomierz
- 4 sztywna belka
- 5 element próbny
- 6 ramki z czujnikami indukcyjnymi
- 7 czujniki indukcyjne
- 8 tensometry elektrooporowe

Dzięki wstępnym obciążeniom następowało dopasowanie oparcia płyty na podporach oraz sprawdzenie odczytu czujników. Po wyzerowaniu układu przystępowano do stopniowego, statycznego obciążania płyty. W czasie badania można było wyróżnić trzy fazy przebiegu obciążenia (rys. 5.27). W fazie I miało miejsce ostateczne dopasowanie modelu, w fazie II następował wzrost siły w czasie, aż do osiągnięcia siły maksymalnej  $F_{max}$ . Po osiągnięciu tego ekstremum następował łagodny spadek siły, który wskazywał na wystąpienie fazy III – wzrostu przemieszczenia, przy niemal niezmiennej wartości siły lub, jak to miało miejsce w przypadku płyty zbrojonej włóknem szklanym, następowało gwałtowne zniszczenie.



Rys. 5.27. Przykładowe wykresy zmienności wartości obciążenia w czasie badania płyt zbrojonych prętami stalowymi (SR) i statkami z włókien szklanych (AR)



Charakter pracy płyt zbrojonych prętami stalowymi był zbliżony dla trzech płyt w serii. Wszystkie płyty w serii wskazują podobną wartość siły rysującej (rys. 5.28).



Rys. 5.28. Wykres siła – przemieszczenie

Charakterystyczną cechą wspólną zniszczenia płyt zbrojonych prętami stalowymi były dwie równoległe rysy przebiegające przez całą szerokość (rys. 5.29). W żadnym z elementów nie nastąpiło zerwanie prętów zbrojeniowych. Badanie zostało przerwane, gdy zniszczeniu, przez zmiażdżenie, uległa strefa ściskana, a w wyniku dociążania postępowało przemieszczenie bez widocznego wzrostu siły.

a) złamania płyty – widok po badaniu



Rys. 5.29. Obraz zarysowania i zniszczenia

b) pęknięcie przez całą wysokość płyty



Rysunki 5.30 i 5.31 przedstawiają, odpowiednio, ugięcia płyt i odkształcenia poziome na wysokości płyt w czasie badania dla poziomu sił 3,5 kN i 5,0 kN. Płyty w czasie badania pracowały równomiernie na co wskazują niewielkie różnice w ugięciach (rys. 5.30), a po zarysowaniu następował równy spadek wysokości strefy ściskanej we wszystkich elementach serii (rys. 5.31.b).



Rys. 5.31. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku rozpiętości przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

### 5.2.6. Wyniki badań dla płyt zbrojonych siatką z włókien szklanych (A)

Płyty zbrojone siatkami z włókien szklanych zasadniczo pracują w dwóch fazach. Fazę I możemy podzielić na dwa odcinki składowe, to jest: stan sprężysty niezarysowany (wykres liniowy) i stan quasi-sprężysty, kiedy tworzą się mikrorysy, które powodują zachwianie liniowości. W fazie II, po zarysowaniu, które sięga wiązki włókien, dochodzi do stopniowego ich uszkodzenia, co obrazują nieciągłości wykresu (rys. 5.32). Tak postępujący proces zniszczenia prowadzi do gwałtownego zerwania wszystkich splotów i złamania płyty (rys. 5.33).



Rys. 5.32. Wykres siła – przemieszczenie



Rys. 5.33. Obraz zarysowania i zniszczenia

Płyty w serii w trakcie badania pracowały równomiernie, na co wskazują porównywalne wartości ugięć (rys. 5.34) i odkształcenia poziomego na wysokości płyty (rys. 5.35).



Rys. 5.35. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku rozpiętości przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

### 5.2.7. Wyniki badań płyt zbrojonych siatką z włókien PVA (P)

W przypadku płyt zbrojonych PVA obserwujemy również dwie podstawowe fazy (rys. 5.36). W fazie I płyty zachowują się liniowo-sprężyście. W chwili pęknięcia płyt dochodzi do gwałtownego, jednak nie całkowitego, spadku ich nośności. Z tą chwilą płyty zaczynają pracować jak membrana. W fazie II, która ma miejsce dla płyt o znacznie zdegradowanej sztywności, następuje ponownie sprężyste wzmocnienie, spadek nośności po zerwaniu pierwszych splotów, a następnie płynięcie przekroju aż do zniszczenia. Połączenie dwóch głównych faz pracy płyt gwałtownym spadkiem siły pozwala stwierdzić, że druga faza jest swoistą "fazą opóźnionego bezpieczeństwa" płyt zbrojonych PVA.



Rys. 5.36. Wykres siła – przemieszczenie

Płyty zniszczyły się podobnie jak płyty zbrojone siatką z włókien szklanych, czyli w postaci pojedynczej rysy na całej szerokości płyty, która postępowała na wysokości, aż do złamania (rys. 5.37). Zaobserwowano jednak różnice w charakterze procesu zniszczenia, a mianowicie: płyta zbrojona siatką z włókien szklanych niszczyła się gwałtownie bez pojawienia się rys widocznych gołym okiem, a płyta zbrojona siatką PVA, mimo powstałej rysy, umożliwiała przeniesienie dodatkowo ok. 70% obciążenia rysującego, zanim nastąpiło zerwanie splotów siatki.



Rys. 5.37. Obraz zarysowania i zniszczenia

b) pęknięcie przez całą wysokość płyty





Wartości ugięć (rys. 5.38) i odkształceń poziomych na wysokości płyty (rys. 5.39) świadczą o równomiernej pracy płyt w serii, aż do momentu zarysowania.



Rys. 5.39. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku rozpiętości przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

### 5.2.8. Wyniki badań płyt zbrojonych siatką hybrydową z włóknami węglowymi (C)

Płyty zbrojone siatką hybrydową z nośnymi wiązkami z włókien węglowych wykazały podobny charakter pracy do płyt zbrojonych siatkami PVA. W fazie I płyty te pracowały liniowo-sprężyście, aż do chwili zarysowania i natychmiastowego spadku nośności. W fazie II miała już miejsce praca membranowa włókien węglowych, które po fazie quasi-sprężystej ulegają uplastycznieniu przerywanemu zerwaniami kolejnych włókien w wiązce (rys. 5.40). Płyty niszczyły się również pojedynczą rysą na całej szerokości, ale sam przebieg zniszczenia był łagodny (rys. 5.41).



Rys. 5.40. Wykres siła – przemieszczenie



Rys. 5.41. Obraz zarysowania i zniszczenia

b) pęknięcie przez całą wysokość płyty



Podobnie jak w poprzednich przypadkach, również i ta seria płyt cechowała się porównywalnymi wartościami ugięć (rys. 5.42) i odkształceń poziomych na wysokości płyty (rys. 5.43).



Rys. 5.42. Porównanie ugięć przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN



Rys. 5.43. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku rozpiętości przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

#### 5.2.9. Porównanie wyników i wnioski z badań doraźnych

Porównanie charakteru pracy płyt, przy zachowaniu stałych wymiarów geometrycznych, pozwala uchwycić różnice w pracy poszczególnych siatek użytych do zbrojenia. Oceny jakościowej dokonano na podstawie wybranych elementów próbnych, które w swojej grupie wykazały się najwyższą wartością siły niszczącej  $F_{max}$ , podanej w tabeli 5-4, która oprócz nich zawiera wartości sił rysujących  $F_{rys}$  i odpowiadające im przemieszczenia ( $u_{max}$ ,  $u_{rys}$ ) uzyskane z badań.

١n	Oznaczenie i opis	Ozn.	F <sub>max</sub>	U <sub>max</sub>	F <sub>rys</sub>	U <sub>rys</sub>
цр.	serii	płyt	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
	A – płyty zbrojone siatka z włókien	AR1	8,845	15,520	5,547	0,883
1.	szklanych odnornych na alkalia	AR2	7,203	5,800	5,942	0,863
		AR3	8,102	15,908	5,514	0,945
	P phyty zbroione sigtka z włókien z	PR1	5,216	0,608	5,216	0,608
2.	n – pryty zbrojone slatką z wokien z	PR2	5,019	0,622	5,019	0,622
	poli-wityld-alkonold	PR3	4,533	0,572	4,533	0,572
	C phyty zbroione sigtka hybrydowa	CR1	5,880	0,745	5,880	0,745
3.	z włókien węglowych i szklanych	CR2	5,629	0,631	5,629	0,631
		CR3	5,299	0,723	5,299	0,723
		SR1	6,075	4,653	3,530	0,490
4.	S– płyty zbrojone prętami stalowymi	SR2	6,445	5,079	3,605	0,458
		SR3	7,272	4,291	3,707	0,461

Tab. 5-4. Główne wyniki uzyskane z doraźnych badań płyt

We wszystkich płytach, niezależnie od rodzaju zbrojenia, można wyznaczyć dwie podstawowe fazy pracy. W fazie I każdy z badanych elementów pracował liniowo-sprężyście, natomiast po zarysowaniu, w fazie II wystąpiły już różnice oddające charakter pracy zastosowanych siatek (rys. 5.44).



Rys. 5.44. Porównanie zależności siła – przemieszczenie dla wybranych płyt

Do momentu zarysowania płyty pracowały porównywalnie na co wskazują zbliżone wartości ugięć i odkształceń poziomych przy sile 3,5 kN (rys. 5.45.a i 5.46.a). Płyta zbrojona stalą (element *SR3*) przy sile 5,0 kN była już zarysowana, a jej ugięcia i odkształcenia wzrosły niemal trzykrotnie w porównaniu do płyt zbrojonych tekstyliami (rys. 5.45.b i 5.46.b).



Rys. 5.45. Porównanie ugięć dla wybranych płyt przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN



Rys. 5.46. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku rozpiętości dla wybranych płyt przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

Z zależności przyrostu siły w funkcji przemieszczenia w badanym zbrojeniu rozciąganym (rys. 5.44) wynika, że zbrojenie stalą (*SR3*) oraz zbrojenie w postaci siatki z włókien szklanych (*AR1*) jest zbrojeniem efektywnym, gdyż występuje ciągły wzrost wartości siły, nawet po zarysowaniu. W tym względzie, zbrojenie siatką z włókien PVA (*PR1*) i siatką z włókien węglowych (*CR1*) jest nieefektywne po zarysowaniu, ze względu na znaczny wzrost wydłużenia przy gwałtownym spadku wartości siły po przejściu w II fazę pracy. Niemniej jednak rolą zbrojenia w elementach jest przede wszystkim przeniesienie naprężeń rozciągających, a tym samym zapobieganie powstawaniu rys i ich propagacji. Mając na uwadze to zasadnicze zadanie zbrojenia w elementach zginanych, opisano pracę płyt przed utratą sztywności spowodowaną zarysowaniem (rys. 5.47).

Punktami od 1÷4 (rys. 5.47) oznaczone zostały miejsca, w których powstała widoczna rysa (wartości wg tab. 5-5). Do tego punktu płyty pracowały w fazie I, o czym świadczy liniowa lub quasi-liniowa zależność przemieszczenia *u* i odpowiadającej mu siły *F*. Najszybciej zarysowaniu ulegały płyty zbrojone tradycyjnie – stalą, w pozostałych zarysowanie poprzedzane było powstawaniem mikrorys.

Należy również zwrócić uwagę na to, że w elementach badanych *PR1* i *CR1* w momencie zarysowania dochodziło do raptownego złamania płyty bez zerwania siatki, a siła rysująca  $F_{rys}$  była równoznaczna z siłą niszczącą  $F_{max}$  (tab. 5-4). Po wytworzeniu pełnego przegubu zbrojenie przeniosło obciążenie, aż do momentu zerwania przędzy siatki.



Rys. 5.47. Pierwsza rysa, a siła i przemieszczenie (wartości w tab. 5-5)

	5115	ART	PR1	CR1
F <sub>rys</sub> [kN]	3,707	5,547	5,216	5,880
u <sub>rys</sub> [mm]	0,461	0,883	0,608	0,745

Wartości sił rysujących oraz stowarzyszonych ugięć dla płyt ze zbrojeniem niemetalicznym były wyraźnie wyższe w stosunku do wartości płyt zbrojonych stalą (rys. 5.48 i 5.49). Ta efektywność zbrojenia tekstylnego wynika z równomiernego rozłożenia sił rozciągających na matrycę.



Dodatkową zaletą zbrojenia tekstylnego, w mechanizmie powstawania rys, jest jego wiotkość i bardzo mały przekrój w stosunku do zbrojenia tradycyjnego, przy

porównywalnej sile zrywającej 1 mb zbrojenia. Mała sztywność zbrojenia tekstylnego znacznie ogranicza powstawanie sił rozciągających w otulinie od zginania samego zbrojenia, tym samym rozwartość rys w początkowej fazie jest adekwatnie mała.

W II fazie pracy (po zarysowaniu) każda z płyt wykazuje odmienność zachowania, co jest skutkiem zastosowanego rodzaju zbrojenia. Po tej fazie następuje faza III – zniszczenia elementu. Na rysunku 5.50 porównano te kolejne fazy pracy wybranych elementów i wyróżniono zakres ich trwania.



Rys. 5.50. Charakterystyka pracy płyt po zarysowaniu

W elemencie żelbetowym *SR3* (rys. 5.50.a) po zarysowaniu występuje charakterystyczny dla stali odcinek sprężysty, po którym następuje płynięcie i wzmocnienie prowadzące do łagodnego zniszczenia elementu. Długotrwała sygnalizacja zniszczenia jest wynikiem ciągliwości stali w jej końcowej fazie pracy (rys. 4.17).

Płyta zbrojona siatką z włókien szklanych *AR1* (rys. 5.50.b), w porównaniu z płytą *SR3* zbrojoną stalą, wykazuje znacznie dłuższą fazę pracy przekroju zarysowanego. Charakterystyczne skoki przemieszczenia i siły obrazują powstawanie rys i dalszy rozwój mikrozarysowań wraz z wciąganiem do współpracy kolejnych włókien w przędzy. Zerwanie włókien w wiązce prowadzi do zainicjowania III fazy – zniszczenia. Pojawienie się widocznej rysy na pełnej wysokości elementu

prowadzi do gwałtownego zniszczenia płyt obejmującego całą jej szerokość. W porównaniu z innymi elementami próbnymi faza ta w płycie zbrojonej włóknem szklanym trwa najkrócej.

Elementy *PR1* i *CR1* silnie różnią się od poprzednich swoim zachowaniem po zarysowaniu. W momencie powstania rysy, która przechodzi przez całą wysokość elementu, dochodzi do gwałtownego spadku siły i wzrostu przemieszczenia, co jest równoznaczne z utratą nośności elementu (rys. 5.50.c,d). Zbrojenie jednak nie ulega zerwaniu i po zarysowaniu następuje znaczne wydłużenie przędzy siatek i wciągnięcie do współpracy wszystkich włókien w przędzy. W fazie II' pracy elementów *PR1* i *CR1* rozciągane jest samo zbrojenie, zgodnie ze schematem zaprezentowanym na rysunku 5.51. Zniszczenie następuje w wyniku przekroczenia wytrzymałości siatki na rozciąganie.



Rys. 5.51. Schemat pracy elementów PR1 i CR1 po zarysowaniu

Dzięki znacznej odkształcalności siatek tekstylnych, zarysowanie elementów *PR1* i *CR1* w sposób wyjątkowo wyraźny sygnalizuje stan awaryjny konstrukcji. Zarysowanie elementu zbrojonego świadczy o przekroczeniu stanu granicznego użytkowalności. W badaniach ujawniło się wyraźne podobieństwo zachowania się w fazie zniszczenia – w przypadku elementów próbnych *PR1* i *CR1*. Po przekroczeniu stanu granicznego nośności elementy przechodziły w stan awarii, a pozostała rezerwa nośności jest swoistą rezerwą bezpieczeństwa (rys. 5.52).



Rys. 5.52. Stany graniczne i strefa "bezpiecznej" awarii

Oceniając zachowanie się elementów teksbetowych pod kątem rezerwy bezpieczeństwa po wystąpieniu awarii, można stwierdzić, że w przypadku tak zbrojonych elementów, to właśnie płyta zbrojona prętami stalowymi wykazuje najdłuższą fazę niszczącą przy zachowaniu znacznego poziomu nośności. Każdy z elementów zbrojonych tekstyliami wykazał w końcowej fazie tendencję do kruchego pęknięcia.

W badaniach doraźnych pod obciążeniem statycznym wykazano, że praca płyt zbrojonych siatkami PVA i z włókien węglowych (*PR1*, *CR1*) ogranicza się wyłącznie do fazy liniowo-sprężystej lub quasi-sprężystej (w której powstają mikrozarysowania). Po zarysowaniu następuje gwałtowny spadek sztywności tych elementów.

Idealizację zachowania się płyty *AR1* odzwierciedla model sprężystoplastyczny ze wzmocnieniem (*PSH – PSEUDO-STRAIN HARDENING*) (rys. 5.53). Jest to uogólnienie modelu pracy płyty zbrojonej siatką z włókna szklanego uwzględniające sposób wywołania obciążenia, w którym każde mikrozarysowanie i dalsze rozwarcie rys powodowało mierzalny spadek siły, który w rzeczywistości (przy obciążeniach grawitacyjnych) nie występuje. Przedstawiony na rysunku 5.53 wyidealizowany model aproksymuje prostą łamaną punkty kolejnych maksymalnych wartości siły obciążającej, po których następował spadek siły.



Rys. 5.53. Idealizacja zachowania się płyty AR1

W badaniach doraźnych teksbetowych elementów płytowych stwierdzono wysoką efektywność zbrojenia tekstylnego w odniesieniu do tego samego elementu zbrojonego prętami stalowymi. Zarysowanie w elementach teksbetowych występowało przy sile ok. 30% wyższej niż w przypadku płyty żelbetowej.

W prowadzonej w pracy analizie porównawczej elementów próbnych o podobnej intensywności zbrojenia nie wykorzystano w pełni możliwości znacznego zagęszczenia siatki zbrojenia tekstylnego przy zapewnieniu ciągle bardzo dobrych warunków przyczepności (elementy warstwowo zbrojone – p. 12.2) co prowadzi do dalszego zwiększenia nośności ponad nośność elementu żelbetowego, gdzie możliwość gęstego rozmieszczenia tradycyjnego zbrojenia prętowego w przekroju jest zwykle ograniczona.

# Rozdział 6

# **BADANIA DŁUGOTRWAŁE**

Wnioski z badań doraźnych o zasadności użycia siatek tekstylnych do zbrojenia elementów betonowych dały podstawę do przeprowadzenia badań długotrwałych, celem których było porównanie, w stosunku do płyty tradycyjnie zbrojonej stalą, zachowania się płyt ze zbrojeniem niemetalicznym pozostających pod obciążeniem.

# 6.1. Przygotowanie elementów

Wykonano serię płyt, w skład której wchodziły trzy płyty zbrojone siatkami niemetalicznymi i jedna, porównawcza, zbrojona prętami stalowymi. W sumie badaniu podlegała grupa składająca się z 4 elementów. Płyty wykonano identycznie jak płyty do badań doraźnych (p. 5.3.1). Z partii betonu, z której wykonano płyty, pobrano po trzy próbki walcowe, w celu potwierdzenia parametrów wytrzymałościowych. Z jednego zarobu wykonano po dwie płyty (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Widok formy przygotowanej do betonowania płyt do badań długotrwałych

# 6.2. Planowany przebieg i sposób obciążenia płyt

Założono utrzymywanie obciążenia na płytach przez okres od 3 do 6 miesięcy. Obciążenie płyt przebiegało wieloetapowo. Pierwszy etap obciążenia został zainicjowany po 28 dniach od chwili zabetonowania płyt. Kolejne etapy obciążenia następowały w momencie stabilizacji wartości ugięcia, lecz nie wcześniej niż wynikało to z harmonogramu (rys. 6.2). Ustalono, że etap I (dopasowanie modeli) będzie trwać 14 dni i będzie składać się z dwóch części. W części pierwszej, trwającej 7 dni, płyty pozostawały pod obciążeniem wynoszącym ok. 25% obciążenia rysującego, po czym nastąpiło odciążenie i zwiększenie obciążenia – do 50% obciążenia rysującego. Po kolejnych siedmiu dniach płyty dociążono do 70% obciążenia rysującego, co zapoczątkowało II etap trwający trzy miesiące (92dni). W etapie III dociążono płyty do 95% obciążenia rysującego i taki stan trwał kolejne 3 miesiące (91dni). Jeżeli w tym czasie nie wystąpiło zarysowanie płyty, a wartość ugięcia ustabilizowała się, zwiększano obciążenie w IV etapie przez okres kolejnych 3 miesięcy – maksymalnie do wartości 125% obciążenia rysującego.



Rys. 6.2. Harmonogram planowanego obciążenia płyt w badaniach długotrwałych

Płyty były obciążane w sposób zgodny z harmonogramem obciążenia przedstawionym na rysunku 6.2. Po zakończeniu III etapu obciążenia przeprowadzono całkowite odciążenie płyt. Po krótkim okresie ponownego dopasowania pod obciążeniem etapu I, dociążono płyty do poziomu etapu IV.

Zabieg odciążenia płyt i dopasowania trwał w sumie 3÷4 dni. W tym czasie prowadzono pomiar ugięcia. Wartości ugięć odczytywano z czujników zegarowych, co najmniej trzykrotnie w każdym etapie obciążenia i odciążenia.

Poziom obciążenia w poszczególnych etapach przyjęto jednakowy dla wszystkich płyt, a ustalono go na podstawie wartości momentu rysującego dla średniej siły  $F_{rys}$  płyt żelbetowych (tab. 5-4). Przyjęto wartość obciążenia  $q_{rys}$  obliczoną z równania momentów (6.1), sposób obliczenia przedstawia rysunek 6.3 (w obliczeniach pominięty został ciężar własny płyty).



Rys. 6.3. Wyznaczenie wartości obciążenia długotrwałego

Lp.	q <sub>rys</sub> [kN/m]	Etap obciążenia	Intensywność obciążenia *	Obliczona wartość obciążenia [kN/m]	Przyjęte obciążenie [kN/m <sup>2</sup> ]	Czas trwania jednakowego obciążenia <i>t</i> [dn.]		
1.		l cz.1	25 %	1,822	2,0 = 8×0,25	7		
2.		l cz.2	50 %	3,644	4,0 = 16×0,25	7		
3.	7 228	II	65 %	4,737	5,0 = 20×0,25	92		
4.	1,220	III	95 %	6,924	7,0 = 28×0,25	91		
5.		IV cz.1	> 100 %	> 7,228	8,0 = 32×0,25	21		
6.		IV cz.2	< 125 %	< 9,035	9,0 = 36×0,25	różny		
* –	* – procentowa wartość obciążenia q <sub>rys</sub>							

Tab. 6-1. Wartość i czas trwania obciążenia długotrwałego

W tabeli 6-1 przedstawione zostały wartości przyjętych obciążeń dla poszczególnych etapów. Do obciążenia wykorzystano obciążniki 25-cio kilogramowe, których gabaryty narzuciły geometrię obciążenia. Założono obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni płyt, zgodnie ze schematami pokazanymi na rysunku 6.4. Szczególną uwagę zwrócono na rozmieszczenie ciężarków, z zapewnieniem co najmniej 5 mm przerwy między nimi tak, aby uniknąć możliwości powstania przesklepienia w przypadku znacznego ugięcia płyty.



Rys. 6.4. Szkic rozmieszczenia obciążników w kolejnych etapach obciążenia: a) Etap I cz.1, b) Etap I cz.2, c) Etap II, d) Etap III, e) Etap IV cz.1, f) Etap IV cz.2

# 6.3. Stanowisko badawcze, wielkości mierzone

W badaniach długotrwałych zastosowano ten sam schemat statyczny co w badaniach doraźnych, tzn. płyty wolnopodpartej (rys. 3.2). Dla każdej z płyt wykonano niezależne stanowisko, w tradycyjnym układzie podpór przegubowych: przesuwnych i nieprzesuwnych. Na podporach została zamocowana sztywna belka stanowiąca bazę dla zegarowych czujników przemieszczenia (rys. 6.5, 6.6).



Rys. 6.5. Szkic stanowiska do badań długotrwałych



Rys. 6.6. Widok stanowiska badawczego (etap I, cz.2 obciążenia)

Każda z płyt została wyposażona w 6 czujników zegarowych do pomiaru przemieszczenia, rozmieszczonych na rozpiętości płyty oraz w tensometry elektrooporowe typu RL 285/75, mierzące odkształcenia w środku rozpiętości, w strefie ściskanej płyty (rys. 6.7, 6.8). Bardziej wnikliwą rejestrację zarysowania zaplanowano w etapach III lub IV obciążenia, w których spodziewano się zarysowania płyt.

W przypadku badań długotrwałych istotny wpływ na wynik mają zmienne warunki środowiskowe, stąd potrzeba ciągłej rejestracji temperatury i wilgotności otoczenia w bezpośrednim sąsiedztwie badanych elementów.



Rys. 6.7. Rozmieszczenie oprzyrządowania Rys. 6.8. Widok oprzyrządowanej i obciążonej płyty

W pierwszym tygodniu odczyt wartości ugięć według czujników zegarowych prowadzono dwa razy w ciągu doby, w odstępie 8-godzinnym (w godzinach porannych i popołudniowych). W dalszych dniach ugięcia odczytywano jednokrotnie w ciągu doby, w godzinach popołudniowych. Rejestracja danych tensometrycznych prowadzona była od I do III etapu, raz w tygodniu, oraz przed i po zainicjowaniu kolejnego etapu obciążenia.

# 6.4. Wyniki dla poszczególnych płyt

Badania towarzyszące wytrzymałości betonu przeprowadzono z chwilą obciążenia płyt tzn. po 28 dniach, w sposób przedstawiony w p. 5.3.2. Wyniki zamieszczono w tabeli 6-2.

Lp.	Oznaczenie i opis serii	Ozn. próbki	F <sub>max</sub> [kN]	σ <sub>max</sub> [MPa]	Wytrzymałość średnia betonu na ściskanie	Średni sieczny moduł sprężystości	Średnia wartość wsp. Poissona
					f <sub>cm</sub> [MPa]	<i>E<sub>cm</sub></i> [GPa]	vc
	S; A – beton płyty zbrojonej stalą i	W1	798,3842	45,1793			
1.	płyty zbrojonej włóknem	W2	832,5284	47,1115	46,08 36,4	36,42	0,1971
	szklanym AR	W3	812,0646	45,9535			
	P; C – beton płyty zbrojonej siatką	W1	739,1685	41,8284			
2.	PVA i płyty zbrojnej siatką z	W2	802,5262	45,4137	43,70	35,93	0,1898
	włókna węglowego	W3	775,2943	43,8727			

Tab. 6-2. Właściwości betonu płyt

W czasie trwania badania płyt pod obciążeniem długotrwałym temperatura i wilgotność w bezpośrednim otoczeniu wahały się w granicach wartości: 13,0÷22,5°C oraz 34÷95 %. Zapis ich zmienności przedstawiono na rysunku 6.9.



Rys. 6.9. Histogram temperatury i wilgotności powietrza w czasie trwania badania

W punktach 6.4.1÷6.4.4 przedstawiono główne wyniki badań poszczególnych płyt dla każdego etapu obciążenia: na początku, w środku i na końcu jego trwania.

### 6.4.1. Płyta zbrojona prętami stalowymi (SR)

Płyta zbrojona tradycyjnie stalą (*SR*) w każdym etapie obciążenia wykazywała początkowy wzrost ugięcia, po czym następowała stabilizacja ugięcia na jednym poziomie, co było sygnałem do zapoczątkowania kolejnego etapu obciążenia.

Wyniki I etapu obciążenia przedstawiono na rysunku 6.10. Obciążenie przyłożono w dwóch wartościach: pierwszej – do 2 kN/m<sup>2</sup> (rys. 6.10.a) i drugiej – do 4 kN/m<sup>2</sup> (rys. 6.10.b). W pierwszym etapie obciążenia zaobserwowano nieznaczne różnice w mierzonych wielkościach ugięcia w miejscach pomiaru, tj. w odległościach 0,15/ i 0,85/ (gdzie: / – rozpiętość efektywna w osiach podpór). Różnice te zmalały już przy zainicjowaniu drugiego etapu obciążenia, toteż przyczyn ich powstania należy dopatrywać się głównie w dopasowaniu modelu. Nie wyklucza się również niewielkich błędów odczytu pomiaru i zmienności warunków klimatycznych otoczenia.

Pomiary tensometryczne wskazywały znaczny przyrost odkształceń poziomych w ściskanej strefie płyty, w chwili jej dociążania (rys. 6.12.a,b). Przez pozostały czas trwania eksperymentu odkształcenie poziome nieznacznie wzrastało, równomiernie z ugięciem płyty.



a)  $t=7 \text{ dni} (2kN/m^2 \rightarrow 4kN/m^2)$  b)  $t=106 \text{ dni} (5kN/m^2 \rightarrow 7kN/m^2)$  c)  $t=197 \text{ dni} (7kN/m^2 \rightarrow 4kN/m^2)$ 



Po 200 dniach płytę obciążono równomiernie do wartości 8 kN/m<sup>2</sup>, co odpowiadało teoretycznemu obciążeniu rysującemu. Zarysowanie płyt w tym momencie jednak nie nastąpiło. Po dalszych 21 dniach zaobserwowano stabilizację wartości ugięcia (rys. 6.13.a), w efekcie czego dociążono płytę do 9 kN/m<sup>2</sup>. Przy wzroście ugięcia, nie doszło do zarysowania płyty.

Po 294 dniach obciążenia, ugięcie niezarysowanej płyty wyniosło 5,646 mm, co stanowi ok. 1/177 rozpiętości płyty.





Rys. 6.14. Płyta SR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu do etapów I i III współrzędna rozpiętości płyty x [cm]



-	<b>-</b> <u>≭</u> – t = 14 dni
-	<b>→</b> t = 197 dni
-	<u> </u>
-	<b>o</b> — t = 199 dni
-	- <b>□</b> t = 200 dni

x	0,000	0,150	0,500	0,850	1,000	Opis
	0,000	0,596	0,955	0,655	0,000	obciążenie 4 kN/m <sup>2</sup> ; etap I: t = 14 dni
	0,000	1,602	3,177	1,605	0,000	obciążenie 7 kN/m2; etap III: t = 197dni
	0,000	1,219	2,103	1,153	0,000	odciążenie do 4 kN/m²; t = 198 dni
	0,000	0,922	1,652	0,682	0,000	odciążenie do 0 kN/m²; t = 199 dni
	0,000	0,988	1,851	0,902	0,000	obciążenie do 4 kN/m²; t = 200 dni

Na rysunku 6.14 przedstawiono ugięcia, które powstały w wyniku odciążenia płyty w etapie przejściowym, które porównano do uzyskanych ugieć końcowych etapów: I i III. W 197 dniu (etap III) obciążenia nastąpiło odciążenie płyty do wartości 4 kN/m<sup>2</sup>. Krótko po odciążeniu tensometry wskazały ok. 12% spadek odkształcenia poziomego w ściskanej strefie płyty (rys. 6.12.c). Po jednym dniu nastąpił spadek ugięcia o ok. 30 %, po czym płyta została całkowicie odciażona. Po odciążeniu ugięcie spadło do 50% ugięcia maksymalnego. Jednocześnie odczytane wartości ugięcia były o 40 % wyższe od ugięcia, które wystąpiło w 14-tym dniu badania, kiedy to płyta była poddana etapowi pierwszemu obciążenia o wartości 4 kN/m<sup>2</sup>. Po krótkim, dwudniowym odciążeniu, w płycie zbrojonej prętami stalowymi pozostającej pod obciążeniem długotrwałym stwierdzono wartość resztkową ugięcia.

Po ponownym obciążeniu płyty obciążeniem etapu pierwszego (4 kN/m<sup>2</sup>) płyta ugięła się o ok. 10 % mniej niż wcześniej, po odciążeniu do 4 kN/m<sup>2</sup>.

6.4.2. Płyta zbrojona siatka z włókna szklanego odpornego na alkalia (AR)

W poszczególnych etapach obciążenia płyta zbrojona siatką z włókna szklanego (AR) wykazywała równomierną pracę na długości (rys. 6.15, 6.16).



Rys. 6.15. Płyta AR – Etap I (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])

W ostatnich dniach III-go etapu obciażenia (rys. 6.16.b) zaobserwowano przyrost ugięcia w środku rozpiętości bez proporcjonalnego przyrostu ugięć na długości (na podstawie pomiaru w odległościach 0,15/ i 0,85/). Wskazywałoby to na powstanie rys, których jednak nie zaobserwowano na powierzchniach płyt. Świadczy to więc niewątpliwie o mikrozarysowaniu w przekroju płyt. Wartość ugięcia ustabilizowała się na poziomie maksymalnej wartości zmierzonej przed odciążeniem.



Rys. 6.16. Płyta AR – Etap II i III (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])

Odkształcenia poziome w ściskanej strefie płyty wzrastały równomiernie. Skokową zmianę odkształceń odnotowywano tylko w chwili dociążenia płyty (rys. 6.17.a,b).

Rys. 6.17. Płyta AR – wskazania tensometrów ("-" oznacza skrócenie) a) t=7 dni  $(2kN/m^2 \rightarrow 4kN/m^2)$  b) t=106 dni  $(5kN/m^2 \rightarrow 7kN/m^2)$  c) t=197 dni  $(7kN/m^2 \rightarrow 4kN/m^2)$ 



W części pierwszej etapu IV-go, obciążenie o wartości 8 kN/m<sup>2</sup> nie wywołało znacznego zwiększenia ugięcia, które przez cały czas trwania fazy wynosiło ok. 3 mm w środku rozpiętości płyty (rys. 6.18.a). Po dociążeniu płyty do 9 kN/m<sup>2</sup> ugięcie proporcjonalnie wzrastało na całej rozpiętości płyty – do 245 dnia – do wartości 4,490 mm (rys. 6.18.b). W 246 dniu pojawiła się rysa na całej szerokości płyty (mierzona na dwu przeciwległych krawędziach) sięgająca na wysokość 33 mm od dolnej krawędzi, o rozwarciu w poziomie zbrojenia ok. 0,1 mm (rys. 6.19). Do 294 dnia nie zaobserwowano tworzenia się nowych rys, czy powiększenia rysy istniejącej.

Zarysowanie nastąpiło między 245 a 246 dniem, płyta ugięła się 4,490 mm co stanowi ok. 1/223 rozpiętości płyty. W dniu 294 ugięcie wynosiło 6,774 mm to jest ok. 1/148 rozpiętości płyty, przy stałej szerokości rysy.





Rys. 6.19. Widok zarysowania płyty w 246 dniu

Po odciążeniu płyty do 4 kN/m<sup>2</sup> ugięcie spadło o 37% w porównaniu do wartości ugięcia etapu III-go przy obciążeniu o wartości 7 kN/m<sup>2</sup> (rys. 6.20).

Z kolei całkowite odciążenie płyty spowodowało zmniejszenie ugięcia o 60%. Po jednym dniu całkowitego odciążenia płyty, jej ugięcie było większe o ok. 20% od ugięcia płyty w etapie I obciążenia, w 14 dniu (obciążenie 4 kN/m<sup>2</sup>). Znaczny spadek ugięcia po odciążeniu płyty świadczy o sprężystej pracy płyty, co potwierdza odczyty tensometryczne, wskazujące 50% spadek odkształcenia w strefie ściskanej płyty tuż

współrzędna rozpiętości płyty x [cm] 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,9 1,0 0,0 0,1 0,7 0,8 0,0 -**x**- t = 14 dni ugięcie w [mm] 1,0 ← t = 197 dni <u>-</u>\_\_\_\_t = 198 dni 2,0 ------ t = 199 dni 3,0 -□-- t = 200 dni 4,0 0,000 0,150 0,500 1,000 0,850 Opis х obciażenie 4 kN/m<sup>2</sup>; etap I: t = 14 dni 0.000 0,591 0.000 0.918 0.544 0,000 1,482 3,054 1,482 0,000 obciażenie 7 kN/m2; etap III: t = 197dni odciążenie do 4 kN/m²; t = 198 dni 0,000 1,132 1,927 1,049 0,000 odciążenie do 0 kN/m²; t = 199 dni 0.000 1,158 0.000 0,602 0,653 obciążenie do 4 kN/m²; t = 200 dni 0,000 1,210 0,623 0,635 0,000

Rys. 6.20. Płyta AR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu do etapów I i III

po odciążeniu do 4 kN/m<sup>2</sup> (rys. 6.17.c). Dodatnie wartości ugięć po krótkotrwałym odciążeniu świadczą o pozostałych, resztkowych wartościach odkształceniach płyty.

#### 6.4.3. Płyta zbrojona siatką z włókien z PVA (PR)

Stwierdzono równomierną pracę płyty zbrojonej siatką z włókien PVA (PR) na całej rozpiętości w czasie badania (rys. 6.21, 6.22 i 6.23). Dociążeniu płyty towarzyszył skokowy wzrost ugięcia i odkształcenia w górnej strefie ściskanej (rys. 6.24.a,b). Stwierdzono brak widocznych zarysowań oraz równomierny przyrost ugięć, co świadczy o braku wczesnych uszkodzeń w przekroju.



Rys. 6.21. Płyta PR – Etap I (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])

W ostatnim dniu badania (294 dzień; rys. 6.23.b) zanotowano ugięcie 2,508 mm co stanowi ok.1/399 rozpiętości płyty.







------t = 200 dni ------t = 210 dni ------t = 221 dni

<sup>→</sup> t = 222 dni → t = 246 dni → t = 270 dni → t = 294 dni



Rys. 6.24. Płyta PR – wskazania tensometrów ("-" oznacza skrócenie) a) t=7 dni (2kN/m<sup>2</sup> $\rightarrow$ 4kN/m<sup>2</sup>)

Na rysunku 6.25 przedstawiono ugięcia powstałe w fazie przejściowej, gdy odciążono płytę z 7 kN/m<sup>2</sup> do 4 kN/m<sup>2</sup>. Po jednym dniu odprężenia płyta wykazała 36% spadek ugiecia. Po dalszym, jednodniowym, całkowitym odciażeniu zmierzono spadek ugięcia płyty do poziomu z 14-tego dnia trwania eksperymentu. Po ponownym obciążeniu płyty obciążeniem 4 kN/m<sup>2</sup>, ugięcia po jednym dniu były mniejsze w stosunku do ugięć w fazie przejściowej odciążenia o ok. 12%.

Płyta zbrojona siatką z włókna PVA charakteryzowała się zachowaniem sprężystym, na co wskazują spadki ugięcia po odciążeniu oraz 42% odprężenie, które wskazały dane tensometryczne tuż po odciażeniu płyty (rys. 6.24.c).

Rys. 6.25. Płyta PR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu do etapów I i III współrzędna rozpiętości płyty x [cm]



# 6.4.4. Płyta zbrojona siatka z włókien węglowych (CR)

Płyta zbrojona siatka z włókien węglowych (CR) doznawała równomiernych ugięć w każdym z etapów obciążenia (rys. 6.26, 6.27). Jednakowym przyrostom ugięć towarzyszył wzrost odkształceń poziomych, stabilizujących się pod koniec trwania etapu obciążenia. Przy dociążeniu płyty następowała skokowa zmiana wartości ugiecia i odkształcenia poziomego (rys. 6.28.a, b).

0,000

0,000

0,000

0,753

0,862

0,946





Rys. 6.28. Płyta CR – wskazania tensometrów ("-" oznacza skrócenie)

0,723

0,827

0,909

0,000

0,000

0,000

1,175

1,377

1,531

-**→**t = 15 dni -<u>→</u>t = 40 dni

\_t = 65 dni \_\_\_\_t = 106 dni



0,000

0,000

0,000

1,223

1,429

1,778

2,016

2,382

3,003

-**↓** t = 107 dni -<u>↓</u> t = 140 dni

-o----t = 165 dni -------t = 197 dni

1,184

1,405

1,778

0,000

0,000

0,000

W ciągu dwudziestu jeden dni trwania pierwszej części etapu IV (obciążenia 8 kN/m<sup>2</sup>) przyrost ugięcia był nieznaczny (rys. 6.29.a). Po dociążeniu do 9 kN/m<sup>2</sup> nastąpił niewielki skok ugięcia, a w 294 dniu eksperymentu maksymalne ugięcie wynosiło 3,619 mm (rys. 6.29. b) co stanowi ok. 1/276 rozpiętości płyty. Niewielkie przyrosty ugięcia w części drugiej fazy IV mogą świadczyć o zbliżaniu się do granicy zarysowania płyty.



Tuż po odciążeniu do 4 kN/m<sup>2</sup> (rys. 6.30) w płycie *CR* zarejestrowano spadek odkształcenia poziomego o 8% (rys. 6.28.c). Przy tym zmniejszonym obciążeniu nastąpił 26% spadek ugięcia. Po całkowitym obciążeniu w następnym dniu odczytano spadek ugięcia o 52%. Jednocześnie ugięcie to było większe o 39% w stosunku do ugięcia odnotowanego w 14-stym dniu, kiedy płyta była obciążona do wartości 4 kN/m<sup>2</sup>. Pozostawiając płytę nieobciążoną przez krótki czas 1-ego dnia odczytano jej odkształcenia resztkowe.


Rys. 6.30. Płyta CR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu	ı do etapów I i III
współrzedna rozpietości płyty x [cm]	

x	0,000	0,150	0,500	0,850	1,000	Opis
	0,000	0,595	0,883	0,570	0,000	obciążenie 4 kN/m²; etap I: t = 14 dni
	0,000	1,778	3,003	1,778	0,000	obciążenie 7 kN/m2; etap III: t = 197dni
	0,000	0,212	2,231	1,234	0,000	odciążenie do 4 kN/m²; t = 198 dni
	0,000	0,762	1,454	0,836	0,000	odciążenie do 0 kN/m²; t = 199 dni
	0,000	1,285	2,354	1,251	0,000	obciążenie do 4 kN/m²; t = 200 dni

#### 6.5. Porównanie wyników i wnioski

Poniżej porównano ugięcia płyt w poszczególnych fazach obciążenia długotrwałego, w ostatnich dniach trwania faz.

Rys. 6.31. Porównanie ugięcia płyt w ostatnim dniu trwania etapu I



Przez cały czas trwania obciążenia (za wyjątkiem części drugiej etapu IV), płyty zbrojone siatkami tekstylnymi (*AR, PR, CR*) wykazywały mniejsze wartości ugięć niż płyta zbrojona tradycyjnie (*SR*) (rys. 6.31). Wśród płyt teksbetowych

największe ugięcia wykazywała płyta zbrojona siatką z włókien szklanych (*AR*). Nieco mniejsze wartości ugięć odczytano w płycie zbrojonej siatką z włókien węglowych (*CR*). Najmniejsze wartości ugięć zmierzono w płycie zbrojonej siatką z włókien PVA (*PR*). Na rysunkach 6.32. (a, b), 6.34 (a, b) i 6.36.a przedstawiono procentową wartość maksymalnych wartości ugięć płyt w poszczególnych fazach obciążenia w odniesieniu do porównawczej płyty zbrojonej prętami stalowymi (*SR*).

Rys. 6.32. Ugięcie płyty w środku rozpiętości (w [%]) w odniesieniu do płyty zbrojonej tradycyjnie a) etap I; t = 7 dni b) etap I; t = 14 dni



									- CIX. ( - 197	un
x	0,000	0,150	0,500	0,850	1,000	0,000	0,150	0,500	0,850	1,000
SR	0,000	0,894	1,665	0,893	0,000	0,000	1,602	3,177	1,605	0,000
AR	0,000	0,855	1,553	0,874	0,000	0,000	1,482	3,054	1,482	0,000
PR	0,000	0,673	1,136	0,731	0,000	0,000	1,356	2,107	1,353	0,000
CR	0,000	0,946	1,531	0,909	0,000	0,000	1,778	3,003	1,778	0,000

Rys. 6.34. Ugięcie płyty w środku rozpiętości (w [%]) w odniesieniu do płyty zbrojonej tradycyjnie a) etap II; t = 106 dni b) etap III; t = 197 dni









Rys. 6.36. Ugięcie płyty w środku rozpiętości (w [%]) w odniesieniu do płyty zbrojonej tradycyjnie a) etap IV; t = 221 dni b) etap I; t = 294 dni



W części drugiej etapu IV-go nastąpiło zarysowanie płyty zbrojonej siatką z włókien szklanych (*AR*). Wielkość ugięcia i zarysowania w 294 dniu osiągnęła stały poziom (rys. 6.35.b). Ugięcie płyty *AR* było o 35,5% większe w stosunku do płyty zbrojonej tradycyjnie (*SR*) (rys. 6.36.b).

Na rysunku 6.37 przedstawiono wartości odkształcenia poziomego w strefie ściskanej. Obrazuja one prace poszczególnych płyty w danych etapach obciażenia.



Rys. 6.37. Porównanie odkształcenia poziomego płyt ("-" oznacza skrócenie)

Aż do etapu IV-ego obciążenia, płyty nie uległy zarysowaniu. O sprężystym charakterze pracy świadczą wartości odkształceń, które po odciążeniu (rys. 6.37.d) uległy zmniejszeniu w stosunku do wartości odkształceń zmierzonych tego samego dnia przed odciążeniem płyty (rys. 6.37.c). Spadek odkształceń wyniósł odpowiednio dla płyt: *SR* – 12,3%; *AR* – 53,0%; *PR* – 42,3% i *CR* – 8,1%.

Stwierdzono również równomierny spadek ugięć poszczególnych płyt w etapie przejściowym (rys. 6.14, 6.20, 6.25, 6.30). Po jednodniowym odciążeniu płyt do wartości ok. 4 kN/m<sup>2</sup>, stwierdzono wzrost ugięć w płytach w stosunku do ugięcia końcowego etapu I-go (rys. 6.38). Świadczy to o wartości resztkowej ugięcia przy krótkotrwałym odprężeniu płyty.



Rys. 6.38. Porównanie ugięć płyt w etapie przejściowym (4 kN/m<sup>2</sup>; t = 198 dni) z etapem pierwszym (4 kN/m<sup>2</sup>; t = 14 dni) – wartości podano tabeli poniżej

Wnioski z badań długotrwałych:

- W pierwszych trzech etapach obciążenia elementy z teksbetu pod obciążeniem o dużej intensywności ok. 7 kN/m<sup>2</sup> charakteryzowały się mniejszą wartością ugięć w stosunku do płyty żelbetowej. W tym zakresie obciążeń w płytach nie stwierdzono zarysowań.
- W IV etapie obciążenia nastąpiło zarysowanie płyty zbrojonej siatką z włókna szklanego, jednak rozwartość rysy nie przekroczyła 0,1 mm, co świadczy o dobrej współpracy betonu z takim rodzajem zbrojenia.
- Płyta zbrojona siatką z włókien PVA (*PR*) przez cały okres badania wykazywała mniejsze ugięcie w środku rozpiętości od pozostałych płyt. Wskazywałoby to na wartkie włączenie siatki do współpracy z betonem w fazie niezarysowanej (lub dla mikrorys), co znajduje potwierdzenie również w większej wartości nachylenia krzywej siła – przemieszczenie uzyskanej w badaniach doraźnych (rys. 5.47).
- Płyta zbrojona siatką hybrydową z włókna węglowego (CR) wskazuje wyższe wartości ugięcia od płyty zbrojonej siatką z włókien PVA (PR). Jednak

podobieństwo w zachowaniu się płyty *CR* do płyty *PR* świadczy o równie dobrej współpracy siatki z betonem.

- Wszystkie płyty pozostające pod obciążeniem długotrwałym charakteryzowały się sprężystym charakterem pracy.
- W badaniach elementów zbrojonych siatkami z włókien niemetalicznych pod obciążeniem długotrwałym, stwierdzono znaczną efektywność tego zbrojenia, co najmniej na poziomie zbrojenia tradycyjnego.

#### Rozdział 7

# **BADANIA CYKLICZNE**

Elementy konstrukcji często poddawane są cyklicznemu działaniu obciążenia, które może prowadzić do zmian o charakterze zmęczeniowym w nośności elementu. Między innymi, elementy elewacyjne i ekrany osłonowe (na co kierunkowane są badania cienkich płyt) poddane są cyklicznym obciążeniom wiatrowym.

Celem rozpoznania wpływu obciążeń cyklicznych na elementy cienkościenne zbrojone siatkami z włókien niemetalicznych, w porównaniu do tradycyjnych elementów żelbetowych, zaplanowano badania pod obciążeniem cyklicznie zmiennym. Badania te mają charakter poglądowy.

Badania obejmowały cztery serie po trzy elementy próbne. W sumie przebadano 12 pasm płytowych o wymiarach 1200×200 mm i grubości 40 mm. Każda seria składała się z pasm wykonanych z płyt zbrojonych siatkami niemetalicznymi i płyty porównawczej tradycyjnie zbrojonej prętami stalowymi. Pojedyncze pasmo płyty zostało poddane 10-ciu cyklom obciążenia, po czym, w 11-tym cyklu następowało dociążenie w sposób statyczny do zniszczenia. Każdy, pełny cykl obciążenia składał się z fazy obciążenia do poziomu 0,5 kN w czasie 60 s i fazy całkowitego odciążenia, również trwającej 60 s. Obciążenie przykładano i zdejmowano z prędkością 0,1 kN/s.

# 7.1. Przygotowanie elementów w seriach do badań

Elementy próbne do badań pod obciążeniem cyklicznie zmiennym wykonano w analogii do elementów z badań pod obciążeniem długotrwałym (p. 6.1), z betonu na podstawie receptury R2 podanej w tabeli 2-4. W celu kontroli parametrów wytrzymałościowych betonu wykonano 4 płyty wraz z towarzyszącymi próbkami walcowymi (min. po 3 z każdej partii mieszanki betonowej).

Wymiary płyt były ograniczone charakterystyką geometryczną maszyny wytrzymałościowej, w związku z czym zostały one pocięte na pasma szerokości 200 mm. Przecięcie zostało wykonane po upływie 28 dni, w czasie których elementy były składowane w warunkach powietrzno-suchych, w temperaturze 20÷25°C przy wilgotności otoczenia w zakresie ok. 60÷70% (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Wymiary geometryczne elementów pasmowych do badań cyklicznych

#### 7.2. Stanowisko badawcze

Badania prowadzono w maszynie wytrzymałościowej typu *MEGA* 3 3000-100S niemieckiej firmy *FORM+TEST*, wyposażonej w stanowisko do badań elementów pasmowych w schemacie wolnopodpartym (dla max. rozstawu podpór 1 m) z możliwością przyłożenia obciążenia liniowo rozłożonego w środku rozpiętości (rys. 7.2).



Rys. 7.2. Stanowisko badawcze

Pasmo płytowe zostało oprzyrządowane dwoma czujnikami indukcyjnymi (rys. 7.3), które wraz z siłomierzem zostały podpięte do jednostki centralnej zapewniającą w trybie ciągłym (co 0,5 s) odczyt i zapis danych.



Rys. 7.3. Oprzyrządowanie pasma płyty

## 7.3. Planowany przebieg badań

Badania cykliczne przebiegały zgodnie ze schematem obciążenia i odciążenia pokazanym na rysunku 7.4. Wartość siły *F* (obciążenia cyklicznego) ustalono jako 1/5 wartości najmniejszej siły rysującej  $F_{rys}$  (tab. 5-4) pomniejszoną o 20%, w celu uwzględnienia niedokładności przekazania obciążenia (rys.7.5). Przy tych założeniach, dla płyty żelbetowej *SR1* (tab. 5-4) ustalono siłę obciążenia cyklicznego *F* na poziomie 0,5 kN.



Rys. 7.4. Planowany przebieg obciążenia badań cyklicznych

Charakterystyka pracy (rys. 7.5) maszyny wytrzymałościowej typu *MEGA* 3 3000-100*S* powoduje osiąganie wartości siły  $F_1$  obciążenia, przewyższającego zadany poziom  $F_2$ , po czym natychmiastowe obniżenie i utrzymywanie siły na poziomie  $F_2$ .



Przedstawiony na rysunkach 7.5 i 7.6 przebieg obciążenia uniemożliwił wykonanie badań cyklicznych dla płyt zbrojonych siatką z PVA. Poziom siły  $F_1$  (przewyższenia) odpowiadał bowiem sile  $F_{max}$  niszczącej pasmo.

W związku z powyższym, wyjątkowo dla pojedynczego pasma płytowego zbrojonego siatką PVA, badanie cykliczne przeprowadzono w inny sposób. Pasmo zbadano obciążając i odciążając płytę żeliwnym obciążnikiem 25-cio kilogramowym (rys. 7.7). Z uwagi na odmienny sposób obciążania, przedstawione wyniki dla tego pasma nie zostały ujęte we wnioskach.



Rys. 7.7. Schemat badania cyklicznego pasma zbrojonego siatką PVA

7.4. Wyniki z badań cyklicznych dla poszczególnych pasm płyty

Wyniki badań próbek towarzyszących zostały przedstawione w tablicy 7-1. Uzyskane średnie wartości wytrzymałości odpowiadają wartościom dla betonów płyt badanych pod obciążeniem doraźnym.

Lp.	Oznaczenie i opis serii	Ozn. próbki	F <sub>max</sub> [kN]	σ <sub>max</sub> [MPa]	Śr. wartość <i>f<sub>cm</sub></i> [MPa]	Śr. moduł <i>E</i> [GPa]	Sr. wsp. Poissona v
	S; A – beton płyty zbrojonej stalą i	W1	709,5924	40,1547			
1.	płyty zbrojonej włóknem	W2	789,2108	44,6602	43,61	35,91	0,1851
	szklanym odpornym na alkalia	W3	812,9564	46,0039			
	P; C – beton płyty zbrojonej siatką	W1	725,3618	41,0471			
2.	PVA i płyty zbrojnej siatką z	W2	698,9267	39,5512	41,07	35,37	0,1796
	włókna węglowego	W3	753,2679	42,6262			

Tab. 7-1. Właściwości betonu płyt poddanych badaniom pod obciążeniem cyklicznym

Spostrzeżenia i wyniki z badań cyklicznych dla poszczególnych pasm płytowych zostały przedstawione w punktach 7.4.1÷7.4.4.

# 7.4.1. Pasma płytowe zbrojone prętami stalowymi (SR)

Wykres zależności "siła – przemieszczenie" (rys. 7.8) płyt zbrojonych prętami stalowymi (SR) wskazuje na podobny charakter pracy elementów w pełnym zakresie obciążeń (przez obciążenia cykliczne aż do zniszczenia). Płyty serii *SR* zachowywały się podobnie również w zakresie obciążenia cyklicznego (rys. 7.9), z tą różnicą, że w płytach *SR 1* i *SR 3* zmierzono większą wartość przemieszczenia już przy pierwszym obciążeniu (dopasowanie stanowiska i modelu).



Rys. 7.8. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii SR



# Rys. 7.9. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia cyklicznego dla serii SR





Pasma płytowe zbrojone siatką z włókien szklanych (AR) wskazują podobny charakter pracy elementów w pełnym zakresie obciążeń – pod obciążeniem cyklicznie zmiennym i następnie pod obciążeniem statycznym – do zniszczenia, co pokazuje zależności "siła – przemieszczenie" przedstawiona na rysunku 7.10. Jednak w zakresie obciążeń cyklicznych pasma *AR* zachowywały się odmiennie (rys. 7.11). Pasmo płytowe *AR 3* (rys. 7.11.b) wykazuje wzrost przemieszczeń i mniejsze nachylenie wykresu w porównaniu z pasmem płytowym *AR 1* o większej sztywności (rys. 7.12.a). Wyniki dla pasma *AR 2* pominięto, z uwagi na awarię rejestratora.



Rys. 7.10. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii AR



Rys. 7.11. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia cyklicznego dla serii AR a) AR 1

#### 7.4.3. Pasma płytowe zbrojone siatką z włókien PVA (PR)

Element *PR 1* został zniszczony w czasie obciążania w pierwszym cyklu. Pomimo znacznego zmniejszenia siły obciążenia cyklicznego w elemencie *PR 2* (do wartości 0,3 kN), zniszczenie również nastąpiło niespodziewanie wcześnie – w drugim cyklu obciążenia – wskutek impulsywnego charakteru przekazania obciążenia w maszynie wytrzymałościowej. Wobec powyższego zdecydowano o zmianie sposobu obciążenia w trzecim elemencie *PR 3* (p. 7.3.). Wyniki zostały przedstawione dla wszystkich elementów serii na rysunku 7.12.



Z uzyskanych wyników pojedynczego cyklu dla pasma *PR 2* (rys. 7.13.b), oraz dla pasma *PR 3* (rys. 7.13.c) można wnioskować o podobnym charakterze pracy. Również w tej serii największe przemieszczenie zmierzono w pierwszym cyklu obciążenia.



Rys. 7.13. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia cyklicznego dla serii PR a) PR 1 – pasmo zniszczone przy pierwszym cyklu

#### 7.4.4. Pasma płytowe zbrojone siatką hybrydową z włókna węglowego (CR)

Pasma zbrojone siatka z włókna węglowego (*CR*) wskazują podobny charakter pracy w pełnym zakresie obciążenia (rys. 7.14). Widoczne różnice w sile niszczącej były spowodowane (mimo dbałości o jednakowość elementów) zróżnicowaną ilością zbrojenia w paśmie. Związana z tym różna sztywność elementu ukazała się również w zakresie obciążeń cyklicznych (rys. 7.15), w postaci różnic nachylenia wykresów "siła – przemieszczenie".



Rys. 7.14. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii CR

Rys. 7.15. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia cyklicznego dla serii CR a) CR 1





#### 7.5. Porównanie wyników i wnioski

Wobec ograniczonej liczby elementów próbnych, wnioskowanie przeprowadzono w oparciu o najbardziej reprezentatywne wyniki z badań wybranych elementów w każdej z serii. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla wybranych elementów z serii, w pełnym zakresie obciążeń – pod obciążeniem cyklicznie zmiennym i następnie pod obciążeniem statycznym – do zniszczenia, przedstawiono na rysunku 7.16.



Rys. 7.16. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla wybranych elementów z serii

W ciągu dziesięciu cykli obciążenia nie wystąpiło uszkodzenie płyt. Elementy nie uległy zarysowaniu, a charakter ich pracy był jednakowy przez cały czas trwania badania.

Zaobserwowano, przedstawiony na rysunku 7.17, schemat pracy, w której można wyróżnić cztery podstawowe fazy (gdzie *n* oznacza kolejny cykl): fazę  $A_n$ - $B_n$  przyrostu obciążenia i proporcjonalnego przyrostu przemieszczenia, fazę drugą  $B_n$ - $C_n$  przyrostu przemieszczenia pod stałym obciążeniem, trzecią fazę  $C_n$ - $D_n$  odciążenia i proporcjonalnego spadku przemieszczenia oraz fazę czwartą  $D_n$ - $A_n$  – spadku przemieszczeń sprężystych. Odcinek  $A_1A_2$ , będący różnicą wartości przemieszczenia początkowego kolejnych cyklów, odpowiada stałej wartości przemieszczenia, pozostającego po każdym cyklu.

Ostatnią fazą badania cyklicznego była faza A<sub>max</sub>-F osiągnięcia wartości siły niszczącej. Odcinek ten obrazuje różnorodną charakterystykę pracy betonowych pasm płytowych w zależności od typu zbrojenia (rys. 7.16).



Rys. 7.17. Schemat pracy płyt pod obciążeniem cyklicznym

Na podstawie schematu pracy płyt pod obciążeniem cyklicznym (rys. 7.17) porównano wartości przemieszczeń punktów A, B, C, D przy kolejnych cyklach *n* dla wybranych elementów.

W elementach próbnych *SR 1* (rys. 7.18) oraz *AR 1* (rys. 7.19) w każdym cyklu obciążenia następował równomierny przyrost odkształcenia resztkowego (faza  $D_n$ - $A_n$ ). Z kolei w punktach  $B_n$ ,  $C_n$  (tego samego cyklu), kiedy element był obciążony, zmierzono nieznaczne różnice miedzy wartościami przemieszczeń. Brak "płynięcia" pod stałym krótkotrwałym obciążeniem wskazuje na zachowanie sprężyste elementu. Wzrastające w kolejnych cyklach przemieszczenie jest związane głównie z sumowaniem odkształceń trwałych.



5

6

Cykl n

7

8

9

10

Rys. 7.18. Pasmo płytowe SR 1 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych fazach cyklów



Oznaczenia dla rysunku 7.18 i 7.19

1

2

3

4

- → A<sub>n</sub> początek cyklu; przemieszczenie tuż przed obciążeniem (siła 0,0 kN)
- -0- B  $_n$  przemieszczenie tuż po obciążeniu (siła 0,5 kN)
- D<sub>n</sub> koniec cyklu; przemieszczenie tuż po odciążeniu (siła 0,0 kN)

Zestawienie wielkości przemieszczenia poszczególnych punktów faz zostało również wykonane dla pasma *PR* 3 (rys. 7.20). Jednak wyników, ze względu na odmienny sposób obciążenia, nie uwzględniono w dalszych wnioskach.



Rys. 7.20. Pasmo płytowe PR 3 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych fazach cyklów

Oznaczenia:

→ A<sub>n</sub> – początek cyklu; przemieszczenie tuż przed obciążeniem (siła 0,0 kN)

-O- B n - przemieszczenie tuż po obciążeniu (siła 0,25 kN)

- C n – przemieszczenie tuż przed odciążeniem (siła 0,25 kN)

- D<sub>n</sub> – koniec cyklu; przemieszczenie tuż po odciążeniu (siła 0,0 kN)

Niemal stałe różnice wartości przemieszczeń w kolejnych fazach obciążenia A<sub>n</sub>, B<sub>n</sub>, C<sub>n</sub>, D<sub>n</sub> (rys. 7.20) pasma *PR* 3 świadczą o zachowaniu sprężystej pracy w poszczególnych cyklach. Największe przemieszczenie nastąpiło w momencie obciążenia – punkty B<sub>n</sub>, po czym przemieszczenie malało (punkty C<sub>n</sub>). Jedynie w pierwszym cyklu doszło do trwałego przemieszczenia, które utrzymywało się na stałym poziomie przez cały okres badania.

Pasmo zbrojone siatką z włókna węglowego *CR* 2 charakteryzuje niewielki, lecz stały wzrost przemieszczeń trwałych, zilustrowany różnicami wartości przemieszczeń opisanych krzywymi wyznaczonymi dla punktów  $D_n$  i  $A_n$  (rys. 7.21). W przypadku początku (punkt  $B_n$ ) i końca (punkt  $C_n$ ) fazy stałego obciążenia, przemieszczenia tych punktów są równe, z nieznacznymi spadkami w punktach końcowych ( $C_n$ ) fazy .

Również w tym elemencie można zauważyć sprężystą pracę pasma, oraz sumowanie się trwałego odkształcenia z cyklu na cykl.



Rys. 7.21. Pasmo płytowe CR 2 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych fazach cyklów

Oznaczenia:

- → A<sub>n</sub> początek cyklu; przemieszczenie tuż przed obciążeniem (siła 0,0 kN)
- -O- B n przemieszczenie tuż po obciążeniu (siła 0,5 kN)
- $-\Delta D_n koniec cyklu; przemieszczenie tuż po odciążeniu (siła 0,0 kN)$

Z porównania wartości ugięć pasm płytowych w punktach fazy odciążenia (rys. 7.22, 7.25) wynika, że pasma zbrojone siatkami tekstylnymi (*AR 1, CR 2*) wykazują niższe wartości przemieszczeń trwałych w porównaniu do elementu żelbetowego (*SR 1*). Na etapie obciążenia (rys. 7.23, 7.24), przemieszczenia pasma (*AR 1*) zbrojonego siatką z włókna szklanego są porównywalne z przemieszczeniami pasma zbrojonego tradycyjnie (*SR 1*), z kolei pasmo zbrojone siatką z włókna węglowego wykazało niższe wartości przemieszczeń.



Rys. 7.22. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie An poszczególnych cyklów



Rys. 7.23. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie B<sub>n</sub> poszczególnych cyklów



Rys. 7.24. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie C<sub>n</sub> poszczególnych cyklów



Rys. 7.25. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie D<sub>n</sub> poszczególnych cyklów



*Rys.* 7.26. Wartości ugięć trwałych – różnica przemieszczeń początkowych kolejnych cyklów (punkty  $A_n$ ) – dla wybranych pasm płytowych

Wybrane pasma płytowe wykazały typowe zachowanie, zmniejszającą się wartość ugięcia trwałego (rys. 7.26) przy powtarzalnym cyklu o małej intensywności obciążenia.





gdzie: *F* – siła w badaniach cyklicznych [kN], *L* – rozpiętość między podporami [m], *u*<sub>n</sub> – ugięcie początkowe w każdym kolejnym cyklu [m], *I* – moment bezwładności przekroju pasma [m<sup>4</sup>], *E* – moduł sprężystości podłużnej [MPa]

W przeprowadzonym badaniu pod obciążeniem cyklicznym (przy sile cyklicznej *F*=0,5 kN) pasma wykazały w każdym kolejnym cyklu mniejszą wartość

przemieszczeń początkowych  $u_n$  (różnica przemieszczeń punktów B<sub>n</sub> i A<sub>n</sub>) co wskazuje na wyższą sztywność zgięciową elementu *EI* (rys. 7.27). Przy stałym momencie bezwładności *I* elementu oznacz to wzrost modułu sprężystości *E*.

Reasumując, można stwierdzić, że pasma płytowe zbrojone siatkami niemetalicznymi oraz prętami stalowymi, na poziomie wartości przyjętego obciążenia cyklicznego, pracują sprężyście.

Pasma zbrojone siatkami tekstylnymi wykazują wyższy zakres pracy sprężystej, co wskazywałoby na dobrą przyczepność i dobre zespolenie zbrojenia w niezarysowanym elemencie. Badania potwierdziły więc efektywność zbrojenia tekstylnego pod działaniem obciążenia cyklicznego.

# Rozdział 8

# BADANIA UZUPEŁNIAJĄCE

Elementy betonowe i żelbetowe narażone są na działanie czynników niszczących, w tym zmian temperaturowych i wilgotnościowych, co przy jednoczesnym wpływie substancji agresywnych, np. zawierających jony chlorkowe (wody opadowe, substancje odladzające itp.), stanowi poważne zagrożenie korozyjne (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Oddziaływania korozyjne

W pracy problematykę tę potraktowano jedynie wyrywkowo i wykonano badania, w których jedną grupę elementów poddano działaniu zmian temperatury, a drugą – działaniu wodnego roztworu chlorku sodu (*NaCl*).

# 8.1. Zakres wyrywkowych badań fizykochemicznych

Do badań mrozoodporności wykonano cztery serie po sześć pasm płytowych o wymiarach 200×400 i grubości 40 mm. Z kolei w badaniach oddziaływania jonów chlorkowych (*Cl*) użyto w każdej z serii trzech pasm płytowych o wymiarach 200×1200×40 mm. W sumie badania mrozoodporności wykonano na 24 elementach, a badania oddziaływania jonów chlorkowych na 12 elementach. Z uwagi na małą

liczebność próbek, badania odporności korozyjnej miały charakter poglądowy, a ocenę stopnia zniszczenia przeprowadzono w głównej mierze makroskopowo.

- 8.2. Badania mrozoodporności
- 8.2.1. Elementy badawcze

Do badań mrozoodporności wykorzystano materiał, który pozostał po badaniach doraźnych (p. 5.2). Płyty w tych badaniach uległy zarysowaniu i zniszczeniu w otoczeniu środka rozpiętości, co umożliwiło wycięcie z nich krótszych, niezarysowanych części. W ten sposób uzyskano 4 serie po 6 elementów próbnych o wymiarach 200×400×40 mm i średniej masie pojedynczego pasma ok. 7,3 kg. Boczne powierzchnie płytek zabezpieczono przed nasiąkaniem żywicą epoksydową (rys. 8.2).



Rys. 8.2. Elementy do badań mrozoodporności

# 8.2.2. Stanowisko badawcze i sposób przeprowadzenia badań

Badania mrozoodporności przeprowadzono w zamrażarce firmy *"TOROPOL"* (rys. 8.3), w której zaprogramowano 12-godzinny cykl zamrażania i odmrażania, odpowiednio do temperatur  $T_{min}$  = -25°C i  $T_{max}$  = +25°C.



Rys. 8.3. Widok zamrażalki firmy "TOROPOL"

Każda z serii została podzielona na trzy części. Cztery elementy próbne, które zamrażano w warunkach suchych (rys. 8.4.a), były poddane działaniu naprzemiennych temperatur. Odmrażanie prowadzono w wodzie (rys. 8.4.b). Dwa pasma przechowywano jako próbki-świadki, z których jedno składowano w warunkach powietrzno-suchych (w temperaturze +18÷20°C i wilgotności 55÷70%), a drugie w wodzie o temperaturze +18°C ( $\pm 2^{\circ}$ C).

a) widok elementów w trakcie zamrażania



Rys. 8.4. Widok próbki w komorze badawczej





Po pojawieniu się pierwszych oznak destrukcji próbki, przeprowadzono badanie na zginanie pasm w maszynie wytrzymałościowej typu *MEGA* 3 3000-100*S*. Porównano pracę serii próbek przechowywanych w warunkach powietrzno-suchych z tymi seriami próbek, które w ocenie makroskopowej wskazywały znaczne uszkodzenia wskutek działania zmiennych warunków temperaturowych.

#### 8.2.3. Wyniki i wnioski z badań mrozoodporności

Badanie mrozoodporności obejmowało 86 cykli zamrażania i odmrażania. W ostatnim cyklu nastąpił częściowy rozpad próbek i dalsze badanie było bezcelowe.

Wyniki po 34, 52 i 86 cyklach przedstawiono w tabeli 8-1. W tabeli 8-2 zostały przedstawione wyniki testu zginania próbek po 34 cyklach, oraz próbek, które przez ten okres przebywały w warunkach powietrzno-suchych.

	Ozn.		Widok	próbki			
Lр.	próbki	34	52	86	w cyklu 34	w cyklu 86	
1.	S1		- rozpad w głab próbki		No. of Concession, Name of		
2.	S2	<ul> <li>nieregularna siatka</li> <li>rys na powierzchni</li> </ul>	<ul> <li>rzadkie zarysowanie dolnej powierzchni</li> </ul>	- odspajanie kawałków, - łuszczenie betonu	1 miles	+++	
3.	S3	górnej - brak utraty masy	elementu (w miejscach położenia prętów zew.)	- wypadanie prętów			
4.	S4	, ,	- 25% ubytek masy	- 50% ubytku masy	1		
5.	S5	brok zaobaonyowany	voh zmion w trokojo hodor		S1		
6.	S6	Drak zaobserwowany		lla			
7.	A1	<ul> <li>gęste zarysowania na powierzchni</li> </ul>		- łuszczenie betonu		And the second second	
8.	A2	górnej,	<ul> <li>wybrzuszenie próbki ku górze</li> </ul>	- 35% ubytku masy	A	1	
9.	A3	górnej powierzchni	- rozpad w głąb próbki - 15% ubvtek masv	odspojenia betonu		1. 4	
10.	A4	(2% ubytku masy)	od siatki				
11.	A5	brak zaobaonyowany	Part of the second	1			
12.	A6	DIAK ZAODSEIWOWAIIY		lla			
13.	P1		adkie rysowania na wierzchni górnej, - lekkie wybrzuszenie próbki ku górze - rozpad w głąb próbki - 20% ubytek masy	- łuszczenie betonu		- HAN	
14.	P2	- rzadkie zarvsowania na		<ul> <li>- 35% ubytku masy</li> <li>- nie zaobserwowano odspojenia betonu</li> </ul>		THE REAL	
15.	P3	powierzchni górnej,				· Ę	
16.	P4			139			
17.	P5	brak zaobserwowany	nia	P1	Ē		
18.	P6	brak zaobscrwowarry				10000011	
19.	C1			- łuszczenie betonu			
20.	C2	- rzadkie zarysowania na	- rozpad w głąb próbki	- 40% ubytku masy	C1		
21.	C3	powierzchni górnej,	- 25% ubytek masy	odspojenia betonu		¢	
22.	C4			od siatki			
23.	C5	hrak zaobsenwowan	ych zmian w trakcie badar	hia		777	
24.	4. C5						
OZN S – P – 1÷4 w w	OZNACZENIA: S – próbka zbrojona prętami stalowymi; A – próbka zbrojona siatka z włókna szklanego odpornego na alkalia (AR Glass); P – próbka zbrojona siatką z włókien PVA; C – próbka zbrojona siatką hybrydową z włóknami węglowymi (Carbon); 1÷ 4 – próbki poddane zamrażaniu i odmrażaniu; 5 – próbki przechowywane w wodzie; 6 – próbki przechowywane w warunkach powietrzno-suchych:						

Tab.	8-1.	Wvniki	badań	mrozood	porności
	• • •	•••••	<i>baaan</i>		

١n	Symbol Siła w [kN] przeniesiona przez		Siła w [kN] przeniesiona	przez	Spadek siły	
∟р	próbki	е	lement nr 6	element nr 1 (po 34 cy	w [%]	
1.	S		5,49	4,62	19%	
2.	Α		5,65	5,05	12%	
3.	Р		5,61	4,87		15%
4.	С		5,47	4,79		14%
			Widok próbki	w czasie badania		
	S	1	A1	P1		C1
OZNACZENIA: S – próbka zbrojona prętami stalowymi; A – próbka zbrojona siatka z włókna szklanego odpornego na alkalia (AR Glass); P – próbka zbrojona siatką z włókien PVA; C – próbka zbrojona siatką hybrydową z włóknami węglowymi (Carbon); 1 – próbki poddane zamrażaniu i odmrażaniu; 6 – próbki przechowywane w warunkach powietrzno-suchych;						

Tab.	8-2.	Wvniki zginania	próbek z badal	ń mrozoodporności
run.	0 2.	vvynna zginana	prober 2 budu	11110200000011100001

Najniższy spadek nośności spowodowany destrukcją betonu uzyskano w przypadku elementów zbrojonych siatkami szklanymi (*A*) (tab. 8-2). W tych elementach, po 34. cyklach, wystąpiły odkształcenia wywołujące odwrotną strzałką ugięcia.

Elementy zbrojone siatkami niemetalicznymi (*A*, *P*, *C*) poddane oddziaływaniu zmiennych temperatur nie uległy znaczącej destrukcji dzięki rozproszeniu zbrojenia w betonie. W przypadku elementu żelbetowego (*S*) następowało odspajanie betonu od prętów, co nie miało miejsca w elementach zbrojonych siatkami z włókien.

Poglądowe badanie mrozoodporności nie wykazało destrukcji siatek niemetalicznych. Badanie wykazało jednak potrzebę poprawy mrozoodporności i szczelności drobnoziarnistych mieszanek betonowych (lub konieczność stosowania powłok), jeśli takie elementy miałyby być wystawione na pełne działanie czynników atmosferycznych. 8.3. Badania w wodnym roztworze chlorku sodu (*NaCl*)

### 8.3.1. Elementy badawcze

Do badań oddziaływania jonów chlorkowych przygotowano pasmowe elementy płytowe, w analogii do próbek wykorzystywanych w badaniach cyklicznych (p. 5.). Dodatkowo, powierzchnie boczne pasm zabezpieczono powłoką z żywicy epoksydowej, umożliwiając penetrację chlorków wyłącznie przez dolną i górną powierzchnię płyty (rys. 8.5). Z czterech płyt zbrojonych różnymi materiałami wykonano po trzy elementy o wymiarach 200×1200×40 mm.



Rys. 8.5. Elementy do badań oddziaływania chlorków

# 8.3.2. Stanowisko i sposób przeprowadzenia badań

Do badań oddziaływania jonów chlorkowych po dwa elementy z serii zostały zanurzone w 3% roztworze chlorku sodu (*NaCl*), a trzeci, jako świadek, przechowywano w wodzie wodociągowej (rys. 8.6). Elementy zostały całkowicie zanurzone w cieczach, których stan i stężenie przez okres badania był stały. Wszystkie elementy były składowane w jednakowej temperaturze  $+20^{\circ}C$  ( $\pm 2^{\circ}C$ ).



Rys. 8.6. Pasma płytowe umieszczone w roztworze NaCl (nr 1,2) i wodzie (nr 3)

Przez 6 miesięcy elementy znajdywały się pod stałym oddziaływaniem mediów korozyjnych. Ocenę wizualną i akustyczną przeprowadzono po pierwszym i trzecim miesiącu trwania eksperymentu. Po szóstym miesiącu, w uzupełnieniu oceny makroskopowej, elementy zostały zbadane do zniszczenia, w celu oceny stopnia korozji zbrojenia.

Badanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej typu *MEGA* 3 3000-100*S*, w schemacie statycznym płyty wolnopodpartej, obciążonej siłą skupioną równomiernie rozłożoną na szerokości pasma. Element oprzyrządowano w taki sam sposób jak w przypadku badania pod obciążeniem cyklicznym (p. 7.2).

#### 8.3.3. Wyniki i wnioski z badań

Ocena wizualna i akustyczna płyt pozwoliła na oszacowanie stanu badanych próbek. Ocenę przeprowadzono na próbkach nasyconych roztworami. Wydawany dźwięk przy stukaniu młotkiem był czysty i metaliczny, a beton na skraju elementu odłupywał się płatami, pozostawiając ostre krawędzie. W wyniku oznaczenia przecinakiem powstawał słaby ślad. W ten sposób stwierdzono dobrą jakość betonu płyt. W pierwszym miesiącu nie zaobserwowano rdzawych przebarwień na odłupywanych kawałkach elementu. Z kolei, po trzecim miesiącu w elementach zbrojonych tradycyjnie (*SR*) pojawił się rdzawy nalot na prętach odsłoniętych przy pierwszych oględzinach. W miejscach, gdzie otulina była w dobrym stanie, po odsłonięciu zaobserwowano czarny nalot. W przypadku elementów zbrojonych siatkami z włókien niemetalicznych w całym 6-miesięcznym okresie badania nie nastąpiły niepokojące zjawiska, które mogły świadczyć o rozpoczęciu degradacji elementu.

Po 6-ciu miesiącach pasma płytowe poddano badaniu na zginanie do zniszczenia, a wyniki przedstawiono na rysunkach 8.7÷8.10. Próbki nr 1 i 2 były wcześniej przechowywane w 3% roztworze *NaCI*, a próbki nr 3 były zanurzone w wodzie wodociągowej.



Rys. 8.7. Pasma zbrojone prętami stalowymi (SR)



Rys. 8.8. Pasma zbrojone siatka z włókien szklanych (AR)



Rys. 8.9. Pasma zbrojone siatka z włókien PVA (PR)



Rys. 8.10. Pasma zbrojone siatką hybrydową z włóknami węglowymi (CR)

We wszystkich przypadkach (rys. 8.7÷8.10) większą nośność osiągnęły płyty nr 3, które przez okres 6-ciu miesięcy były zanurzone w wodzie. Charakterystyka pracy pasm płytowych po zarysowaniu jest już podobna, co świadczy o tym, że nie nastąpiła degradacja zbrojenia, a wyłącznie obniżenie parametrów wytrzymałościowych betonu.

### Rozdział 9

### **ANALIZA NUMERYCZNA**

Badania laboratoryjne uzupełniono o analizę numeryczną wybranych elementów. Obliczenia wykonano w opracowanym i rozwijanym w Katedrze Inżynierii Budowlanej systemie *MAFEM3D* (autorstwa STANISŁAWA MAJEWSKIEGO i GRZEGORZA WANDZIKA).

### 9.1. MAFEM3D – ogólna charakterystyka

System obliczeniowy *MAFEM3D* składa się z kilku modułów: preprocesora, głównego programu liczącego i postprocesora. Główny program liczący opiera się na iteracyjno-przyrostowej odmianie nieliniowej wersji metody elementów skończonych. Definiowanie modelu numerycznego bazuje na 8-węzłowych prostopadłościennych elementach skończonych o 24 stopniach swobody.

Zbrojenie zamodelowano jako materiał sprężysto – idealnie plastyczny. W tej wersji systemu 43 zbrojenie modelowane jest zdyskretyzowanymi elementami prętowymi. Z kolei dla betonu obowiązuje sprężysto-plastyczny model ze stowarzyszonym izotropowym prawem wzmocnienia-osłabienia.

W systemie zaimplementowano model materiałowy betonu z kryterium zniszczenia przyjętym przez S. MAJEWSKIEGO [44].

#### 9.2. Modele materiałowe

#### 9.2.1. Beton - kryterium zniszczenia

Beton opisano przez sprężysto-plastyczny model materiałowy ze stowarzyszonym izotropowym prawem wzmocnienia-osłabienia, który w miarę realistycznie opisuje jego zachowanie.

Powierzchnię graniczną zdefiniowano w przestrzeni naprężeń przez trzy zmienne, związane z niezmiennikami stanu naprężenia następującymi zależnościami:

$$\sigma_m = \frac{J_1}{3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}, \qquad (9.1)$$

którego

naprężeń.

(rys. 9.2.b).

$$\overline{\sigma} = \sqrt{J_2^D} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_m)^2 + (\sigma_y - \sigma_m)^2 + (\sigma_z - \sigma_m)^2 \right]} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 , \qquad (9.2)$$

$$\cos 3\Theta = \frac{3\sqrt{3}J_3^D}{2\overline{\sigma}^3}, \qquad (9.3)$$

$$\overline{\sigma} = (\sigma_x - \sigma_m) \times (\sigma_y - \sigma_m) \times (\sigma_z - \sigma_m) + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \tau_{yz}^2(\sigma_x - \sigma_m) - \tau_{zx}^2(\sigma_y - \sigma_m) - \tau_{xy}^2(\sigma_z - \sigma_m), \quad (9.4)$$

gdzie:  $J_1$  – pierwszy niezmiennik staniu naprężenia,  $J_2^{D_2}$  i  $J_3^{D_3}$  – odpowiednio: drugi i trzeci niezmiennik dewiatora staniu naprężeń.

dewiatorowym

krawędzie

przekroju



Rys. 9.1. Powierzchnia graniczna (3D)





Rys. 9.2. Przekroje powierzchni zniszczenia

Powierzchnia graniczna jest zdefiniowana poprzez charakterystykę wytrzymałościową materiału. Dla betonu jest to wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie  $f_t$  oraz jedno- i dwuosiowe ściskanie (odpowiednio:  $f_c$  i  $f_{cc}$ ).

W obszarze średnich naprężeń ściskających powierzchnia zniszczenia opisana jest równaniem:

b) przekrój południkowy



Powierzchnią zniszczenia (rys. 9.1)

rys. 9.2.a),

południki

jest ostrosłup o podstawie nieregularnego

sześcioboku COULOMBA-MOHRA (w przekroju

Obszar średnich naprężeń rozciągających powierzchni granicznej (przy wierzchołku ostrosłupa) zamyka nasadka, o kształcie wielomianu drugiego stopnia w każdym południkowym

Uzyskuje się w ten sposób powierzchnię ciągłą, gładką i wypukłą w każdym punkcie.

wg

tworzą

$$F_{1} = \sigma - (\beta - 3\alpha\sigma_{m})Y\rho_{\Theta} = 0, \qquad (9.5)$$

gdzie:

$$\rho_{\Theta} = \frac{\rho_i \sqrt{3}}{\sqrt{3}\cos\Theta + (2\rho_i - 1)\sin\Theta}, \qquad (9.6) \qquad \qquad \rho_i = \frac{r_t}{r_c}, \qquad (9.7)$$

 $r_t$  – promień na południku rozciągania dla  $\Theta$  = 0° (rys. 9.2.a),

 $r_c$  – promień na południku ściskania dla  $\Theta$  = 60° (rys. 9.2.a),

 α i β – współczynniki ustalone na podstawie ogólnie znanych właściwości wytrzymałościowych betonu,

 $\Theta$  – kat LODEGO,

Y – funkcja osłabienia materiałowego, opisana niżej.

W przekroju dewiatorowym powierzchnia graniczna nie jest powierzchnią obrotową, stąd konieczne jest zdefiniowanie współczynników  $\alpha$  i  $\beta$  dla dwóch skrajnych południków niezależnie.

Kąt nachylenia południka rozciągania można ustalić na podstawie wytrzymałości jednoosiowego rozciągania  $f_t$  i dwuosiowego ściskania  $f_{cc}$ , które leżą na tym samym południku. Dla południka rozciągania otrzymuje się następujące wartości współczynników  $\alpha$  i  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{m_{cc} - m_t}{2m_{cc} + m_t} \frac{\sqrt{3}}{3}, \qquad (9.8) \qquad \beta = \frac{m_{cc} \times m_t \times \sqrt{3}}{2m_{cc} + m_t} f_c, \qquad (9.9)$$

$$m_t = \frac{f_t}{f_c}$$
, (9.10)  $m_{cc} = \frac{f_{cc}}{f_c}$ , (9.11)

gdzie:  $f_c$ ,  $f_{cc}$ ,  $f_t$  – odpowiadają wytrzymałości betonu w stanie jedno- i dwuosiowego ściskania oraz jednoosiowego rozciągania.

Dla południka ściskania współczynniki  $\alpha_c$  i  $\beta_c$  są równe:

$$\alpha_c = \frac{\alpha}{\rho_i},$$
(9.12)
 $\beta_c = \frac{\beta}{\rho_i}.$ 
(9.13)

Zniszczenie materiału wiąże się z jego zmianami strukturalnymi, co w modelu materiałowym uwzględnia się poprzez wprowadzenie osłabienia.

Jeśli wejście ścieżki naprężenia na powierzchnią graniczną nastąpiło w strefie naprężeń rozciągających ( $\sigma_m > 0$ ), wówczas pojawia się anizotropia betonu, a objawem zniszczenia jest powstanie rysy rozdzielającej.

W modelu przyjęto stowarzyszone, dwuparametrowe prawo anizotropowego osłabienia. Pierwszy z parametrów ( $\kappa_1$ ) określa plastyczną część odkształcenia objętościowego:

$$\kappa_1 = \varepsilon_v^{pl} = \varepsilon_x^{pl} + \varepsilon_y^{pl} + \varepsilon_z^{pl}, \qquad (9.14)$$

Funkcja plastyczności Y jest wtedy dana wzorem:

$$Y = C_4 + (C_3 - C_2) exp(-C_2 \kappa_1), \qquad (9.15)$$

gdzie: C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> i C<sub>4</sub> są stałymi materiałowymi.

Funkcja plastyczności wynosi Y = 1 dla  $\kappa_1$  = 0 i maleje do C<sub>4</sub> po pojawieniu się nieodwracalnych odkształceń objętościowych. Powoduje to zmniejszenie kątów nachylenia południków powierzchni zniszczenia.

Drugi parametr ( $\kappa_2$ ) jest określony jako parametr osłabienia dewiatorowego, gdyż określa on plastyczną część odkształcenia postaciowego, obliczonego jako pierwiastek kwadratowy z drugiego niezmiennika dewiatorowego stanu odkształcenia:

$$\kappa_2 = \sqrt{\left(J_2^D\right)^{\rho/}}, \qquad (9.16)$$

$$\left(J_{2}^{D}\right)^{pl} = \frac{1}{3} \left[ \left(\varepsilon_{x}^{pl} - \varepsilon_{y}^{pl}\right)^{2} + \left(\varepsilon_{y}^{pl} - \varepsilon_{z}^{pl}\right)^{2} + \left(\varepsilon_{z}^{pl} - \varepsilon_{x}^{pl}\right)^{2} \right] + \frac{1}{2} \left[ \left(\gamma_{xy}^{pl}\right)^{2} + \left(\gamma_{yz}^{pl}\right)^{2} + \left(\gamma_{zx}^{pl}\right)^{2} \right].$$
(9.17)

W zależności od poziomu wytężenia wewnątrz przestrzeni ograniczonej powierzchnią zniszczenia, wyróżnia się obszar liniowej sprężystości oraz, przy wyższych poziomach wytężenia, obszar sprężystości nieliniowej.

Poziom wytężenia  $s_{lev}$  w jednoosiowym stanie naprężenia można zdefiniować jako stosunek naprężenia do wytrzymałości, co dla przestrzeni naprężeń  $(\sigma_m, \overline{\sigma})$  przekłada się na wartość stosunku:

$$\mathbf{S}_{lev} = \frac{\sigma}{\overline{\sigma}_{lim}},\tag{9.18}$$

gdzie:  $\overline{\sigma}$  – naprężenie w przestrzeni ograniczonej powierzchnią zniszczenia (9.2),

 $\sigma_{lim}$  – wartość naprężenia na powierzchni granicznej (rys. 9.2.b).

Granica liniowej sprężystości oraz liniowe i nieliniowe związki konstytutywne zostały zdefiniowane w monografii S. MAJEWSKIEGO [44].

Przed zarysowaniem, czyli w przestrzeni ograniczonej powierzchnią zniszczenia, zarówno w obszarze liniowej jaki i nieliniowej sprężystości, beton traktuje się jako materiał izotropowy. Po zarysowaniu pojawia się anizotropia i następuje redukcja modułów sprężystości, ścinania i współczynnika Poissona.

Właściwości betonu w modelu materiałowym są zdefiniowane poprzez 9 parametrów, tj.:

- parametry określające kryterium zniszczenia:
  - wytrzymałość w stanie jednoosiowego ściskania f<sub>c</sub>,
  - wytrzymałość w stanie dwuosiowego ściskania f<sub>cc</sub>,
  - o wytrzymałość w stanie jednoosiowego rozciągania  $f_t$ ,
- parametry określające odkształcalność w stadium sprężystym:
  - o początkowy moduł sprężystości podłużnej *E*<sub>i</sub> przy jednoosiowym ściskaniu,
  - o początkowy współczynnik Poissona  $v_i$  przy jednoosiowym ściskaniu,
  - o maksymalne odkształcenie w jednoosiowym stanie naprężenia  $\varepsilon_c$ ,
- parametry określające przebieg osłabienia materiałowego:
- początkowa wartość współczynnika osłabienia C<sub>3</sub>,
- końcowa wartość współczynnika osłabienia C<sub>4</sub>,
- współczynnik określający tempo osłabienia C<sub>2</sub>.
Dzięki określeniu wszystkich parametrów wytrzymałościowych przez wytrzymałość w jednoosiowym stanie naprężenia  $f_c$  ilość parametrów redukuje się do ośmiu. Większość z tych parametrów można wyznaczyć podczas prostych testów laboratoryjnych w jednoosiowym i trójosiowym stanie naprężenia.

W przypadku, gdy nie ma możliwości przeprowadzenia badań trójosiowych oraz dokładnych badań odkształcalności, konieczna jest znajomość przynajmniej wytrzymałości średniej na ściskanie osiowe dojrzałego betonu, wyznaczona na próbkach walcowych Ø150×300 mm. Pozostałe parametry w modelu materiałowym betonu można przyjmować według zależności podanych w tablicy 9-1.

		,
Lp.	Rodzaj parametru	Wzór lub wartość
1.	f <sub>c</sub> – wytrzymałość na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia [MPa]	wartość średnia uzyskana na walcach ∅ 150×300 mm
2.	<ul> <li>f<sub>t</sub> – wytrzymałość na rozciąganie w jednoosiowym stanie naprężenia [MPa]</li> </ul>	(0,08÷0,11) <i>f<sub>c</sub></i>
3.	f <sub>cc</sub> – wytrzymałość na ściskanie w dwuosiowym stanie naprężenia [MPa]	(1,25÷1,50) <i>f<sub>c</sub></i>
4.	<i>E<sub>i</sub></i> – początkowa wartość modułu sprężystości [MPa]	$(4000\div5000)\sqrt{f_c}$
5.	v <sub>i</sub> – początkowa wartość współczynnika Poissona	0,20
6.	C <sub>2</sub> – współczynnik tempa osłabienia	$4,0f_{c}^{2}$
7.	C <sub>3</sub> – początkowa wartość osłabienia	0,5÷1,0
8.	C <sub>4</sub> – końcowa wartość osłabienia	0,05÷0,3

Tab. 9-1. Parametry przyjmowane w modelu materiałowym betonu

# 9.2.2. Zbrojenie – model materiałowy

Z reguły zbrojenie konstrukcji betonowych jest wykonywane w postaci prętów prostych. Dzięki takiej geometrii, możliwe jest skorzystanie w modelu materiałowym stali z wartości wyznaczonych dla jednoosiowego stanu naprężenia. W systemie *MAFEM3D* wprowadzono sprężysto – idealnie plastyczny model materiałowy stali (rys. 9.3).



Rys. 9.3. Model materiałowy zbrojenia



Zbrojenie zamodelowano w postaci przestrzennych elementów prętowych (rys. 9.4), posiadających dwa punkty węzłowe o trzech stopniach swobody każdy.

W systemie *MAFEM3D* elementy prętowe są opisane wartościami podanymi w tablicy 9-2.

Lp.	Rodzaj parametru	Wzór lub wartość
1.	E <sub>s</sub> – moduł sprężystości [MPa]	
2.	f <sub>yk</sub> – charakterystyczna granica sprężystości stali zbrojeniowej [MPa]	wartość z badać lub pormowa
3.	f <sub>tk</sub> – wytrzymałość charakterystyczna stali zbrojeniowej na rozciąganie [MPa]	waltose 2 badan lub hormowa
4.	$arepsilon_{\it uk}$ – odkształcenie charakterystyczne stali dla $\sigma_s=f_{\it tk}$ [MPa]	

Tab. 9-2. Parametry przyjmowane w modelu dla elementów prętowych

#### 9.2.3. Betonowy element zbrojony

Zbrojenie w modelu poprowadzono łącząc węzły przestrzennej siatki elementów skończonych z betonu (rys. 9.5).



Rys. 9.5. Połączenie elementów skończonych betonu i zbrojenia

W modelu założono doskonałą przyczepność betonu i zbrojenia (brak poślizgu), co prowadzi do wynikającej z tego faktu zgodności odkształceń betonu i zbrojenia w poszczególnych przekrojach.

#### 9.3. Model numeryczny

Analizę przeprowadzono dla dwóch elementów badawczych, różniących się zastosowanym zbrojeniem, tj.: dla płyty zbrojonej stalą (model badawczy *SR 3*) oraz dla płyty ze zbrojeniem niemetalicznym w postaci siatki z włókien szklanych odpornych na alkalia (model badawczy *AR 1*). Wybór tego typu zbrojenia w modelu został podyktowany jego dobrą charakterystyką pracy po zarysowaniu. W badaniach pozostałych siatek niemetalicznych, tj. z włókien PVA oraz z włókien węglowych,

zaobserwowano zjawisko rozsnuwania się przędzy, czego opisanie w modelu numerycznym było na tym etapie prac niemożliwe i skąd wynika rezygnacja z analizy numerycznej tych modeli badawczych.

## 9.3.1. Idealizacja przekroju zbrojenia

Zbrojenie w postaci prętów stalowych jest jednorodne, w przeciwieństwie do zbrojenia w formie siatek tekstylnych wykonanych z przędzy, która składa się z kilku tysięcy pojedynczych włókien. Opisane zjawisko powoduje niejednorodny rozkład naprężeń w przekroju włókien, wskutek czego zniszczenie pojedynczych włókien następuje przy zróżnicowanym poziomie wytężenia (tzw. "efekt wiązki", rys. 9.6).



W modelu założono jednorodny przekrój zastępczy zbrojenia tekstylnego (rys. 9.7.b), przez co uproszczono mechanizm zniszczenia wiązki. Rzeczywisty, nieregularny kształt przekroju zastąpiono przekrojem koła o tożsamym polu przekroju poprzecznego  $A_f$  (rys. 9.7.c).



Rys. 9.7. Idealizacja przekroju przędzy

Przędza charakteryzuje się zwykle zachowaniem sprężystym do zniszczenia, co wiąże się dodatkowo z rodzajem włókien i sposobem jej wykonania. Z kolei, charakterystyka pracy przędzy jako elementu struktury zamienia się w nieliniową, jednak wciąż z dominującym zakresem pracy sprężystej (patrz rys. 2.19).

W związku z powyższym, model materiałowy zbrojenia opisano takimi parametrami z badań (rys. 9.8, tab. 9-2), które oddają charakter materiału sprężystego lub sprężysto – idealnie plastycznego o bardzo krótkim odcinku uplastycznienia i jednocześnie materiału sprężysto – idealnie plastycznego z szybko postępującym osłabieniem.



Rys. 9.8. Propozycja modelu materiałowego zbrojenia w postaci siatek z przędzy

W modelu, przez założenie równości wartości odkształceń charakterystycznych przędzy przy zerwaniu  $\mathcal{E}_{fuk}$  i charakterystycznych odkształceń granicznych  $\mathcal{E}_{fyk}$ , oraz wytrzymałości charakterystycznej przędzy  $f_{fyk}$  i wytrzymałości końcowej  $f_{ftk}$  (rys. 9.8), określono w pełni sprężysty, aż do zniszczenia, model zachowania się przędzy z włókien szklanych.

Przyjęty model pracy zbrojenia tekstylnego dobrze odpowiada ich rzeczywistej charakterystyce otrzymanej w badaniach (p. 4.2.2).

#### 9.3.2. Modele MES wybranych elementów badawczych

W modelu numerycznym *MES* odwzorowano układ statyczny z badań głównych (p. 3.3). Z uwagi na symetrię układu, analizie poddano odpowiednio podpartą ćwiartkę elementu (rys. 9.9).



Rys. 9.9. Geometria modelu numerycznego

Wymiary elementów skończonych przyjęte w modelu wynikały z rozmieszczenia zbrojenia, oraz ograniczenia (do 10 tys.) liczby węzłów w systemie *MAFEM3D*.

Obciążenie wprowadzano poprzez wymuszenie przemieszczeń. Przemieszczenia przykładano punktowo, w miejscu podparcia prętów o bardzo dużej sztywności i zwiększano sukcesywnie, w 50 krokach, do pełnego wyczerpania nośności przekroju. Obciążenie przemieszczeniami wybrano z uwagi na jego analogię do metody obciążania podczas rzeczywistego testu laboratoryjnego (badania doraźne p. 5.2), w którym właściwym obciążeniem jest wydłużenie śruby siłownika, a pomiar siły odbywa się na podstawie zmian ciśnienia w siłomierzu.

Na rysunku 9.10 pokazano schemat statyczny z przyjętym podziałem modelu na elementy skończone.

Rys. 9.10. Model numeryczny płyty – podział na elementy skończone bryłowe i prętowe: a) przekrój podłużny w płaszczyźnie zbrojenia



# 9.3.3. Parametry wytrzymałościowe wybranych modeli

Do weryfikacji modelu wybrano płytę zbrojoną prętami stalowymi (*SR 3*) i płytę zbrojoną siatką z włókna szklanego (*AR 1*). Cechy wytrzymałościowe zbrojenia i betonu zostały ustalone w badaniach materiałowych i towarzyszących. W modelu zadano następujące, zgodne z wynikami badań (tab. 4-2 i tab. 5-3), średnie parametry wytrzymałościowe:

<ul> <li>dla betonu</li> </ul>	
o dla serii <i>RC</i> :	o <b>dla serii <i>AR</i>:</b>
⊳ <i>f<sub>cm</sub></i> = 49,87 MPa	⊳ <i>f<sub>cm</sub></i> = 41,88 MPa
⊳ <i>f<sub>ctm</sub></i> = 3,62 MPa	⊳ <i>f<sub>ctm</sub></i> = 3,14 MPa
⊳ <i>E<sub>cm</sub></i> = 37,17 ×10 <sup>3</sup> MPa	⊳ <i>E<sub>cm</sub></i> = 35,55 ×10 <sup>3</sup> MPa
⊳ <i>v</i> = 0,20	⊳ <i>v</i> = 0,19
<ul> <li>dla zbrojenia</li> </ul>	
o dla serii <i>RC</i> :	o <b>dla serii <i>AR</i>:</b>
⊳ <i>E</i> <sub>s</sub> = 215,66 ×10 <sup>3</sup> MPa	⊳ <i>E</i> <sub>f</sub> = 82,08 ×10 <sup>3</sup> MPa
⊳ <i>f<sub>yk</sub></i> = 243,91 MPa	⊳ <i>f<sub>fyk</sub></i> = 1206,15 MPa
⊳ <i>f<sub>tk</sub></i> = 373,99 MPa	$rightarrow f_{ftk} = f_{fvk} = 1206,15 \text{ MPa}$

9.4. Wyniki i wnioski

Wyniki analizy numerycznej porównano z wynikami badań doraźnych (p. 5.2). W analizie porównano zależności wartości sił i przemieszczeń w środku rozpiętości płyt, oraz ugięć dla dwóch poziomów siły *F*, tj. dla: 3,5 kN i 5,0 kN.

Model numeryczny płyty żelbetowej (*SR-NA*) wykazał dobrą zgodność z wynikami testu laboratoryjnego wybranego elementu (*SR 3*), co oddaje wykres zależności siły i przemieszczenia (rys. 9.11). Zarysowanie w modelu *SR-NA* wystąpiło przy sile o ok. 28% niższej niż to miało miejsce w modelu rzeczywistym (SR 3) i różnicy odpowiadających przemieszczeń wynoszącej ok. 14%. W każdym kroku obciążenia model *SR-NA* wykazywał większe przemieszczenia od elementu *SR 3*.



Rys. 9.11. Krzywa siła – przemieszczenie dla elementu zbrojonego prętami stalowymi (SR)

Przy obciążeniu 3,5 kN ugięcie w środku rozpiętości płyty *SR-NA* było większe o 40% (rys. 9.12.a) od ugięcia elementu *SR* 3, a przy sile 5,0 kN różnica ta wynosiła ok. 20% (rys. 9.12.b).



Rys. 9.12. Porównanie ugięć przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

Przy porównaniu krzywych siły i przemieszczenia wybranego elementu płytowego zbrojonego siatką z włókien szklanych (*AR 1*) z modelem numerycznym (*AR-NA*) uzyskano dostateczną zbieżność wyników (rys. 9.13). Siła rysująca z obliczeń numerycznych była o ok. 23% niższa w stosunku do siły rysującej modelu laboratoryjnego, przy wartości przemieszczenia większej o ok. 26%.



Rys. 9.13. Krzywa siła – przemieszczenie dla elementu zbrojonego siatką z włókien szklanych (AR)

Obliczenia numeryczne wykazywały wyższe wartości ugięcia w stosunku do badań laboratoryjnych, w każdym kroku obliczeniowym. Przy sile 3,5 kN różnica ugięcia w środku rozpiętości płyty wynosiła 50% (rys. 9.14.a). Natomiast przy sile 5,0 kN (rys. 9.14.b) ugięcia modelu *AR-NA* były ok. 7,5 razy wyższe od ugięć elementu rzeczywistego *AR 1*. Jednocześnie, element *AR-NA* w tym momencie został już zarysowany, podczas gdy element *AR 1* znajdował się jeszcze w fazie przed zarysowaniem (przy ujawnieniu się mikrorys).

a)		wsp	ółrzęc	ina ro	zpięto	ści pły	ty x [0	cm]		b)	wsp	ółrzęc	lna ro	zpięto	ści pł	yty x	[cm]	
ugięcie w [mm]	0,00 0,20 0,40 0,60 0,80 1,00			5 37,; 		62,5	75	87,5	100 	0,00 1,00 2,00 3,00 4,00 5,00 6,00 7,00		2,5 2			62,5	75	87,5	100
х	0	12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	87,5	100	0	12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	87,5	100
	0	0,176	0,334	0,459	0,477	0,484	0,347	0,184	0	0	0,274	0,501	0,691	0,730	0,700	0,524	0,275	0
	0	0,322	0,619	0,857	0,958	0,857	0,619	0,322	0	0	2,153	4,271	5,761	6,246	5,761	4,271	2,153	0

Rys. 9.14. Porównanie ugięć przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN

W analizie numerycznej uzyskano spodziewany charakter przebiegu naprężeń w przekroju. Przykładowe obrazy naprężeń w przekroju podano w postaci map naprężeń na rysunku 9.15. Z kolei obrazy wytężenia przekroju pokazano na rysunku 9.16.

W chwili zniszczenia uzyskano podobne mapy naprężeń w elemencie zbrojonym tradycyjnie (*SR-NA*) oraz w modelu zbrojonym siatką z włókna szklanego (*AR-NA*) (rys. 9.15).

Rys. 9.15. Mapa naprężeń głównych w chwili zniszczenia (w osi symetrii elementu) [MPa] a) model SR-NA





Nośność modelu *AR-NA* (rys. 9.16.b) w chwili zniszczenia była wyższa niż w modelu *SR-NA* (rys. 9.16.a). Świadczy to o wysokim wykorzystaniu przekroju wskutek dobrej współpracy zbrojenia z betonem, co potwierdza wnioski płynące z badań doraźnych elementów teksbetowych.

Rys. 9.16. Wytężenie betonu w osi symetrii elementu w chwili zniszczenia [× 100%] a) model SR-NA



W analizie numerycznej uzyskano zadowalającą korelację wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań dla obu serii płyt, z tradycyjnym zbrojeniem ze stali oraz ze zbrojeniem niemetalicznym. W obu przypadkach w modelu numerycznym uzyskano większe wartości ugięć, co oznacza ich bezpieczne oszacowanie.

Analiza numeryczna potwierdziła jakościowy charakter pracy płyt zbrojonych siatką z włókien szklanych. Jednak przy obecnym poziomie zaawansowania prac

nad teksbetem i rozmaitością zbrojeniowych materiałów tekstylnych trudno jest ustalić ogólne, jednoznaczne reguły określające ilościowy wpływ zbrojenia tekstylnego w elementach betonowych.

#### 9.5. Uwagi do modelu

Model i analiza numeryczna to pewnego rodzaju idealizacja rzeczywistości. W modelu numerycznym uproszczono budowę przekroju przędzy. Dyskretyzacja zbrojenia nie uwzględnia rzeczywistej budowy warstwy kontaktowej, która w przypadku zbrojenia tekstylnego, ma dwie warstwy styku: zaczyn – włókno i włókno – włókno. Powyższe powoduje wyłączenie możliwości stopniowego włączania włókien do pełnej współpracy.

Idealizacja ta pomija również pewne lokalne geometryczne zmiany wymiarów płyty, czy położenia zbrojenia. W wypadku cienkościennych elementów o bardzo małym przekroju zbrojenia tekstylnego (w odniesieniu do zbrojenia tradycyjnego) ma to wpływ na charakter pracy elementu.

Zatem, aby móc wykorzystać w pełni możliwości zbrojenia tekstylnego w bezpiecznych i ekonomicznych granicach, niezbędne jest przede wszystkim prowadzenie badań laboratoryjnych. Dopiero na podstawie wyników tych badań możliwe jest rozwijanie bardziej zaawansowanych modeli materiałowych.

## Rozdział 10

## UPROSZCZONA METODA OBLICZANIA

Projektowanie konstrukcji inżynierskich obecnie powszechnie wspomagane jest analizami numerycznymi z wykorzystaniem udoskonalanych modeli materiałowych. Do prostej weryfikacji obliczeń wykonywanych metodą elementów skończonych, lub ewentualnie innymi metodami obliczeniowymi, np. metodą bazującą na sztucznych sieciach neuronowych, służą proste formuły, opierające się na zależnościach sformułowanych w normach.

W pracy zaproponowano prostą metodę obliczania pozwalającą ocenić nośność zginanych elementów z teksbetu, jako materiału niejednorodnego. Propozycję obliczania cienkościennych elementów płytowych sformułowano w nawiązaniu do aktualnych przepisów normowych.

## 10.1. Założenia i zasady ogólne

Przy określaniu nośności zgięciowej płyt według *Eurokodu* 2 przyjęto następujące założenia [74] :

- przekroje płaskie pozostają płaskimi przed i po odkształceniu,
- odkształcenia zbrojenia są takie same jak otaczającego je betonu (przy rozciąganiu i przy ściskaniu),
- pomija się wytrzymałość betonu na rozciąganie,
- naprężenia w ściskanej strefie betonu  $\sigma_c$  ustala się zgodnie z obliczeniowym wykresem zależności  $\sigma_c \varepsilon_c$  przedstawionym na rysunku 10.1,
- naprężenia w zbrojeniu,  $\sigma_s$  dla stali i  $\sigma_f$  dla zbrojenia z włókien niemetalicznych, ustala się zgodnie z obliczeniowymi wykresami zależności  $\sigma_s \varepsilon_s$  lub  $\sigma_f \varepsilon_f$ , przedstawionymi na rysunkach 10.2. i 10.3,
- zniszczenie następuje, gdy wartość odkształceń betonu  $\varepsilon_{cu}$  przekracza 3,5‰ (dla betonów klas nie wyższych niż C50/60),

Dla zbrojenia tekstylnego dodatkowo założono brak udziału tego zbrojenia w przenoszeniu naprężeń ściskających.



Rys. 10.1. Wykres  $\sigma_c - \varepsilon_c$  dla betonu o  $f_{ck} = (12 \div 50)MPa$  [74]



Rys. 10.2. Wykres  $\sigma_s - \varepsilon_s$  dla stali [74]



U)MPa [74] b) z poziomym odcinkiem uplastycznienia  $f_{tx}$  $f_{ya}=f_{yx}/\gamma_s$  $E_s=200GPa$  $\varepsilon_{xd}=f_{yx}/E_s$ 

Ustalenie ogólnego modelu zależności całego asortymentu  $\sigma_f - \varepsilon_f$  dla zbroienia tekstylnego jest na chwilę obecną niemożliwe. Charakterystyka pracy zbrojenia tekstylnego bowiem od złożoności zależv budowy strukturalnej. Dlatego, przed zastosowaniem zbrojenia, konkretnego rodzaju należy każdorazowo określić właściwości jego wytrzymałościowe w badaniach.

Na podstawie przeprowadzonych badań kontrolnych (rozdział 4) założono liniowosprężystą charakterystykę pracy zbrojenia tekstylnego (rys. 10.3).

Rys. 10.3. Wykres  $\sigma_f - \varepsilon_f$  dla przędzy

Przedstawiona na rysunku 10.3 charakterystyka pracy przędzy dobrze oddaje charakter zachowania przędzy z włókna szklanego (p. 4.2.2) oraz przędzy z włókna węglowego (p. 4.2.4). W przypadku przędzy z włókna PVA (p. 4.2.3) otrzymano nieliniowości, które w początkowej fazie wskazywały na uplastycznienie,

a w końcowej na wzmocnienie, dlatego aproksymacja do wyłącznie liniowej zależności  $\sigma_f - \varepsilon_f$  jest w przypadku tego zbrojenia obarczona pewnym błędem.

10.2. Współczynnik materiałowy dla zbrojenia tekstylnego yr

Współczynnik materiałowy *γ* zbrojenia tekstylnego, według zaleceń w raporcie [67], należy zakładać w wartości pośredniej między współczynnikami materiałowymi dla stali zbrojeniowej i betonu. Można więc zakładać wartości podane w tabeli 10-1.

١n	Opis sytuacii obliczeniowej	Beton [74]	Zbrojenie tradycyjne [74]	Zbrojenie tekstylne
∟р.		γc	γs	γ <sub>f</sub>
1.	trwała; przejściowa	1,40	1,15	1,28
2.	wyjątkowa	1,20	1,00	1,10

Tab. 10-1. Wartości współczynników materiałowych

W raporcie [23] przyjęto współczynnik  $\gamma_f$  dla zbrojenia tekstylnego w postaci wykonanych ze zbrojonych włóknami polimerów (*FiBRE REINFORCED POLYMER*) na poziomie 1,25. W proponowanej dalej procedurze założono  $\gamma_f$  = 1,3.

#### 10.3. Nośność obliczeniowa na zginanie

Nośność zgięciową płytowego elementu cienkościennego opracowano na podstawie metody uproszczonej wg EC2, dla betonu klasy nie wyższej niż C50/60. Procedurę podano dla płyt pojedynczo zbrojonych, zginanych jednokierunkowo, zgodnie z procedurą badawczą. Uproszczony model odkształceń i naprężeń przedstawiono na rysunku 10.4. Przyjęte oznaczenia zdefiniowano w tablicy 10-2.



Rys. 10.4. Rozkład sił w pojedynczo zbrojonym, prostokątnym przekroju zginanym, przy założeniu:  $X \le X_{lim}$ 

Przy założeniu:

gdzie:

$$X \le X_{lim}, \qquad (10.1)$$

$$\mathbf{X} = \frac{f_{fyd} \times A_{f1}}{f_{cd}b}, \qquad (10.2) \qquad \mathbf{X}_{lim} = \frac{\left|\varepsilon_{cu3}\right|}{\left|\varepsilon_{cu3}\right| + \varepsilon_{fyd}} \times \mathbf{d}. \qquad (10.3)$$

Z równań równowagi w przekroju pojedynczo zbrojonym, w stanie granicznym nośności wynika:

$$F_{c} = F_{f_{1}} \Longrightarrow \eta f_{cd} \times b \times \lambda x - f_{fyd} \times A_{f_{1}} = 0, \qquad (10.4)$$

oraz:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = F_c \times z = \eta f_{cd} \times b \times \lambda x (d - 0.5\lambda x).$$
(10.5)

Lp.	Oznaczenie	Opis oznaczenia
1.	Ac	– efektywne pole ściskanej strefy przekroju betonu o wysokości $\lambda x$ i szerokości b [m <sup>2</sup> ]
2.	A <sub>f1</sub>	<ul> <li>– sumaryczne pole przekroju rozciąganego zbrojenia tekstylnego o środku ciężkości oddalonym o a₁ od krawędzi rozciąganej [m²]</li> </ul>
3.	F <sub>c</sub>	– siła w betonie o polu przekroju A <sub>c</sub> [kN]
4.	F <sub>f1</sub>	– siła w zbrojeniu o polu przekroju A <sub>f1</sub> [kN], [kN/mb]
5.	M <sub>Rd</sub>	<ul> <li>nośność obliczeniowa przekroju na zginanie [kNm]</li> </ul>
6.	M <sub>Ed</sub>	<ul> <li>moment zginający wywołany obciążeniem obliczeniowym [kNm]</li> </ul>
7.	a <sub>f1</sub>	<ul> <li>zastępcze pole przekroju pojedynczej przędzy siatki o średnicy Ør o środku ciężkości oddalonym o a₁ od krawędzi rozciąganej [m²]</li> </ul>
8.	<b>a</b> 1	<ul> <li>– odległość środka ciężkości zbrojenia A<sub>f1</sub> do krawędzi rozciąganej [m]</li> </ul>
9.	b	<ul> <li>– szerokość przekroju (dla płyty b = 1,0 m) [m]</li> </ul>
10.	d	<ul> <li>użyteczna wysokość przekroju [m]</li> </ul>
11.	f <sub>cd</sub>	<ul> <li>wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie [MPa]</li> </ul>
12.	f <sub>fyd</sub>	<ul> <li>wytrzymałość obliczeniowa przędzy na rozciąganie [MPa]</li> </ul>
13.	h	– wysokość przekroju [m]
14.	n	<ul> <li>liczba wiązek lub splotów na 1mb [1/mb]</li> </ul>
15.	Х	<ul> <li>położenie osi obojętnej (charakterystyczna wysokość strefy ściskanej) [m]</li> </ul>
16.	X <sub>lim</sub>	– wartość graniczna x [m]
17.	Ζ	<ul> <li>ramię sił wewnętrznych [m]</li> </ul>
18.	E <sub>cu3</sub>	<ul> <li>graniczne odkształcenia w ściskanym betonie (rys. 10.1.b) [‰]</li> </ul>
19.	$\mathcal{E}_{fyd}$	<ul> <li>– obliczeniowe odkształcenia graniczne rozciąganego zbrojenia (rys. 10.3) [‰]</li> </ul>
20.	η	– współczynnik określający efektywną wytrzymałość betonu (dla betonów klas nie wyższych niż C50/60 $\eta$ = 1,0)
	λ	– współczynnik określający efektywną wysokość strefy ściskanej (dla betonów klas nie wyższych niż C50/60 $\lambda$ = 0,8)

#### Tab. 10-2. Opis stosowanych oznaczeń

#### 10.4. Wyniki i wnioski z obliczeń weryfikujących

Weryfikację wzorów obliczeniowych przeprowadzono dla aktualnych w chwili badania, średnich wartości parametrów wytrzymałościowych materiałów i rzeczywistych wymiarów geometrycznych elementów poddanych badaniom doraźnym.

Wyniki obliczeń teoretycznych zestawiono z wartościami uzyskanymi w badaniach doraźnych w tablicy 10-3.

W obliczeniach sprawdzających przyjęto następujące parametry:

- dla betonu:
  - o  $f_{cd} = f_{cm} \text{wytrzymałość średnia betonu na ściskanie (tab. 5-3),}$
  - $\varepsilon_{cu3} = 3,5\%$  (zgodnie z [74] rys. 10.1.b),
- dla zbrojenia:
  - o  $f_{fyd} = \sigma^{sr}_{max} srednie naprężenia zrywające włókna (tab. 4-2),$
  - o  $f_{fyd} = f^{sr}_{yk}$  średnia granica plastyczności stali (tab. 4-2),
  - $\varepsilon_{fyd} = f_{fyd}/E_f$  odkształcenia dla włókien, zgodnie z rysunkiem 10.3,
  - $\varepsilon_{fyd} = \varepsilon_{uk} = 25\%$  dla stali o dużej ciągliwości (zgodnie z [74] przy stosowaniu zależności  $\sigma_s \varepsilon_s$  z poziomym odcinkiem wg rys. 10.2.b),
  - $E_f = E^{\$r}$  sredni moduł Younga dla włókien (tab. 4-2),
  - $E_s = E^{sr}$  –sredni moduł Younga dla stali (tab. 4-2),
  - $A_{f1}$  sumaryczne pole przekroju zbrojenia tekstylnego (dla  $a_f^{10}$  z tab. 4-2) o środku ciężkości oddalonym od krawędzi rozciąganej o  $a_1$ ,
  - A<sub>s1</sub> sumaryczne pole przekroju prętów stalowych (dla a<sub>s</sub> z tablicy 4-2) o środku ciężkości oddalonym od krawędzi rozciąganej o a<sub>1</sub>,
- dane geometryczne<sup>11</sup> przyjęto na podstawie inwentaryzacji płyt wykonanej po przeprowadzonych badaniach doraźnych; wymiary charakterystyczne przekroju zmierzono w linii załomu płyty w trzech miejscach na szerokości i określono średnie wartości:
  - $h \text{wysokości płyty} (h_f = 40,4 \text{ mm}; h_s = 40,6 \text{ mm}),$
  - o d wysokości użytecznej przekroju ( $d_f$  = 34,0 mm;  $d_s$  = 31,5 mm),
  - o c grubości otuliny (c<sub>f</sub> = 6,2 mm; c<sub>s</sub> = 7,1 mm),
  - $\circ$  szerokości płyty  $b \cong 1,0$  m,
  - rozpiętości między podporami  $L \cong 1,0$  m.
- całkowity moment zginający *M*<sub>Ed</sub> określono przez superpozycję momentów:
  - od obciążenia własnego *q* [kN/m<sup>2</sup>] płyty:  $M_{Ed}^{q} = \frac{q \times L^{2}}{8}$  [kNm], (10.6)
  - od wartości siły niszczącej  $F_{max}$  (tab.5-4):  $M_{Ed}^{F} = \frac{F_{max} \times L}{4}$  [kNm]. (10.7)
  - założono ciężar objętościowy płyty równy 24 kN/m<sup>3</sup>, co odpowiadało płytom ze zbrojeniem tekstylnym.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>  $a_f$  – zastępcze pole przekroju pojedynczej przędzy siatki o średnicy  $\mathcal{Q}_f$  [m<sup>2</sup>],

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> () – w nawiasach podano średnie (orientacyjne) wartości, z indeksem: f – dla płyty ze zbrojeniem tekstylnym, s – dla płyty ze zbrojeniem tradycyjnym,

Lp.	Oznaczenie i opis serii	Ozn. płyty	<i>M<sub>Ed</sub></i> [kNm]	<i>M<sub>Rd</sub></i> [kNm]	<i>x</i> [10⁻³m]	<i>x<sub>lim</sub></i> [10 <sup>-3</sup> m]
1.	AR – płyty zbrojone siatką	AR 1	2,333	1,995		< 6,349
2.	z włókien szklanych	AR 2	1,923	1,895	1,440	< 6,153
3.	odpornych na alkalia	AR 3	2,146	1,917		< 6,402
4.	PR – płyty zbrojone siatką	PR 1	1,426	0,916		< 2,149
5.	z włókien z poli-winylo-	PR 2	1,377	0,925	0,560	< 2,218
6.	alkoholu	PR 3	1,254	0,917		< 2,071
7.	CR – płyty zbrojone siatką	CR 1	1,591	1,394		< 11,143
8.	hybrydową z włókien	CR 2	1,529	1,325	0,979	< 10,526
9.	węglowych i szklanych	CR 3	1,446	1,379		< 11,326
10.	SD shith threight protomi	SR 1	1,640	1,631		< 3,549
11.	stalowymi	SR 2	1,733	1,671	1,155	< 3,635
12.	Statowynn	SR 3	1,940	1,715		< 3,727

Tab. 10-3. Porównanie wartości momentów M<sub>Ed</sub> i M<sub>Rd</sub>

Nośności teoretyczne przekrojów  $M_{Rd}$  są niższe od wartości momentów niszczących  $M_{Ed}$  z badań. Nośności teoretyczne elementów teksbetowych, obliczone na podstawie zaproponowanych zależności (p. 10.3) dla rzeczywistych wartości materiałowych oraz obciążeń z badań, są niedoszacowane (rys. 10.5). Świadczy o istniejącym zapasie bezpieczeństwa przy posługiwaniu się proponowaną metpodą.

W przypadku płyt zbrojonych siatką z włókien PVA (*PR*), średnia nośność płyt jest niedoszacowana o niemal 50%, co w dużej mierze jest skutkiem przyjęcia linowo-sprężystej charakterystyki materiału.



Rys. 10.5. Porównanie średnich wartości M<sub>Ed</sub> i M<sub>Rd</sub> oraz wartość średnia niedoszacowania w [%]

Obliczenia weryfikujące wykazały dla dwóch typów płyt dobrą zgodność (z niewielkimi zapasami bezpieczeństwa) teoretycznych nośności płyt teksbetowych w stosunku do momentów niszczących uzyskanych w badaniach. Na tej podstawie zaproponowano uproszczoną procedurę obliczeniową pojedynczo zbrojonych tekstyliami płyt jednokierunkowo zginanych.

## 10.5. Proponowana procedura obliczeniowa

W pracy zaproponowano prosty algorytm obliczenia i przyjęcia potrzebnego zbrojenia w postaci siatki. W praktyce, projektant ma zwykle do dyspozycji serię siatek, które różnią się liczbą *n* wiązek lub splotów (o tym samym polu przekroju  $a_f$ ) na 1 mb siatki (w ten sposób producent różnicuje wytrzymałość siatki na 1 mb). Dobór intensywności siatki polega na wyznaczeniu siły rozciągającej w zbrojeniu i dobranie odpowiedniej siatki zdolnej do przejęcia tej siły zrywającej. Procedurę zgodną z zaleceniami uproszczonymi EC2 przedstawiono w tabeli 10-4.

Tab. 10-4. Procedura obliczenia potrzebnej siły zbrojenia zgodnie z EC2 i [74]

	Procedura dotyczy cienkich płyt pojedynczo zbrojonych, zginanych jednokierunkowo							
KROK 1	<ul> <li>Dane początkowe:</li> <li>rozpiętość płyty <i>L</i> [m] (sugerowana rozpiętość do 3,5 m – za [62]),</li> <li>wysokość przekroju płyty <i>h</i> [m] (sugerowana grubość płyty w granicach: 10÷60 mm),</li> <li>szerokość obliczanego pasma płyty <i>b</i> = 1,0 m;</li> <li>minimalna grubość otuliny <i>c</i> [m] (proponuje się zachowanie minimalnej otuliny <i>c</i> = 5 mm),</li> </ul>							
KROK 2	<ul> <li>Charakterystyki wytrzymałościowe materiałów:</li> <li>dla betonu:</li> <li>wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie f<sub>ck</sub> = (12÷50) MPa;</li> <li>współczynnik materiałowy γ<sub>c</sub> = 1,4;</li> <li>współczynnik uwzględniający efekty długotrwałe obciążenia α<sub>cc</sub> = 1,0;</li> <li>dla siatki zbrojenia tekstylnego:</li> <li>wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie f<sub>fyk</sub> [MPa] (wg danych producenta lub z badań),</li> <li>UWAGA: Niektórzy producenci podają bezpośrednio siłę przypadającą na 1mb siatki potrzebną do zerwania F<sup>zr</sup><sub>fyk</sub> [kN/mb],</li> <li>cechy geometryczne siatki, w szczególności odległość między wiązkami (splotami) nośnymi lub liczba <i>n</i> przędz na 1 mb siatki (wg danych producenta lub na podstawie inwentaryzacji zbrojenia),</li> <li>a<sub>f</sub> [10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>] – pole przekroju pojedynczej wiązki lub splotu (wg danych producenta lub z badań),</li> <li>proponowany współczynnik materiałowy γ<sub>f</sub> = 1,3,</li> </ul>							
KROK 3	<ul> <li>Wyznaczenie obliczeniowych wartości momentów gnących:</li> <li>określenie schematu statycznego,</li> <li>zestawienie obciążeń i kombinacji obliczeniowych,</li> <li>obliczenie wielkości statycznych,</li> <li>określenie maksymalnych obliczeniowych momentów zginających M<sub>Ed</sub> [kNm] na 1mb płyty,</li> </ul>							
	Sprawdzenie warunku <i>K ≤ K':</i>							
KROK 4	• jeżeli $K \le K'$ to obliczyć potrzebną siłę w zbrojeniu według KROKU 5 $K = \frac{M_{Ed}}{bd^2 f_{cd} \times 10^3}, \qquad (10.8)$ • jeżeli $K > K'$ to zwiększyć wysokość $h$ i powrót do KROKU 1 <u>WYJAŚNIENIE:</u> W przypadku konstrukcji żelbetowych oprócz zwiększenia wysokości $h$ można zastosować zbrojenie ściskane ( $A_{s2}$ ), dla zbrojenia tekstylnego brak badań weryfikujących możliwość uwzględnienia takiego zbrojenia w przenoszeniu naprężeń ściskających.							
	▷ dla $\delta \leq$ 1,0 → $\delta =$ 1,0 (brak redystrybucji) → $K' =$ 0,294 ;							
	$b d = h - a_1 [m] - użyteczna wysokość przekroju,  (10.10)$							

	Tab. 10-4. Procedura obliczenia potrzebnej siły zbrojenia zgodnie z EC2 i [74] – cd.						
KROK 4 – cd.	$\mathbf{P} \mathbf{a}_1 = \mathbf{C} + \frac{\phi_f}{2}$ [m] – odległość środka ciężkości zbrojenia do krawędzi rozciąganej,						
	$\phi_f = 2\sqrt{rac{m{a}_f}{\pi}}$ [m] – średnica wiązki (splotu) dla zastępczego kołowego pola przekroju $m{a}_f$ ,	(10.12)					
	Obliczenie potrzebnego zbrojenia:						
10	• $F_{f1} = \frac{M_{Ed}}{z}$ [kN/mb] w zależności od $M_{Ed}$ (patrz. inf. KROK 3),	(10.13)					
N N	gdzie:						
KRO	$rac{z} = d\left[0.5 + 0.5\sqrt{1 - 2.8K}\right] \le 0.95d$ [m] – ramię sił wewnętrznych,	(10.14)					
	⊳ jeżeli $z > 0,95d$ to zmniejszyć <i>h</i> i powrót do KROKU 1						
	Sprawdzenie:						
	$F_{f1} \leq rac{F_{fyk}^{zr}}{\gamma_f}$ [kN/mb] lub $F_{f1}  imes \gamma_f \leq F_{fyk}^{zr}$ [kN/mb],	(10.15)					
X	gdzie:						
KRO	$\triangleright \boldsymbol{F}_{fyk}^{zr} = \boldsymbol{f}_{fyk} \times 10^3 \times \boldsymbol{a}_f \times \boldsymbol{n}  [\text{kN/mb}],$	(10.16)					
	jeżeli warunek (10.15) nie jest spełniony wystarczy dobrać siatkę z tej samej serii o gęstszym rozstawie wiązek lub splotów nośnych, bez konieczności powtarzania obliczeń, jako że średnica Ør nie uległa zmianie, a zwiększony ciężar siatki nie wpłynie na obliczeniowe wartości momentu zginającego M <sub>Ed</sub> .						

#### 10.6. Uwagi ogólne

Instrukcja obliczania podana w tabeli 10-4 obejmuje wąski przedział zbrojonych elementów betonowych, a mianowicie płyty zbrojone pojedynczą warstwą zbrojenia tekstylnego, jednokierunkowo zginane.

Zastosowane w obliczeniu nośności wzory inżynierskie dają wyniki niższe od wartości uzyskanych z badań. Związane jest to z zapasem bezpieczeństwa, powstałym w wyniku dokonanych, koniecznych na tym etapie badań, uproszczeń.

Dobrą zbieżność wyników otrzymano w przypadku materiałów o liniowosprężystej charakterystyce (przędza z włókna szklanego lub węglowego), które odzwierciedlają założenia poczynione w EC2 [74]. W przypadku nieliniowej charakterystyki pracy zbrojenia, w przypadku zbrojenia z włókien PVA, uzyskano znacznie zaniżoną nośność elementu.

Przedstawione rozwiązanie ma charakter uproszczony, stąd wymaga dalszych badań (tak laboratoryjnych, jak i numerycznych) i konsultacji z producentami zbrojenia tekstylnego. Zasadne jest stworzenie jednolitych standardów metodologii badań tego typu zbrojenia w celu ustalenia jednolitych parametrów wytrzymałościowych.

## Rozdział 11

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Głównym celem pracy było doświadczalne określenie zachowania się cienkościennych zginanych elementów z teksbetu. Takie elementy przewiduje się do stosowania jako prefabrykaty elewacyjne, osłonowe lub tzw. tracone deskowania.

Teksbet, czyli beton drobnoziarnisty zbrojony tekstyliami, jest nowym kompozytem, który bazuje na idei żelbetu. Jest on alternatywnym materiałem do wykonania lekkich, powłokowych elementów z betonu zbrojonego. W celach poznawczych, w pracy wykonano badania porównawcze zginanych elementów teksbetowych i elementów zbrojonych klasycznie stalą.

Z uwagi na ograniczoną na razie dostępność tekstyliów z włókien o wysokiej wytrzymałości, z konieczności zastosowano jako zbrojenie tekstylne jedynie trzy rodzaje siatek: prowadzenia dalszych badań i obserwacji w zakresie:

- z włókien szklanych, odpornych na alkalia,
- z włókien PVA (poli-winyl-alkohol),
- z w włókien węglowych (siatki hybrydowe włókna węglowe w głównym kierunku i włókna szklane w prostopadłym).

Jako element badawczy wybrano płytę o wymiarach 1200×1000×40 mm, swobodnie podpartą na dwóch przeciwległych krawędziach. Prosty model stanowił podstawę do analizy. Płyty zazbrojono wymienionymi wyżej trzema rodzajami siatek tekstylnych oraz prętami stalowymi (elementy porównawcze). Zbrojenie dobrano tak, aby we wszystkich elementach miało w przybliżeniu jednakową nośność na rozciąganie na jednostkę szerokości płyty.

Przed przystąpieniem do badań głównych, przeprowadzono badania wstępne w celu określenia właściwości mechanicznych zbrojenia tekstylnego. W tym celu zaprojektowano odpowiednie próbki, które umożliwiały uchwycenie i rozciąganie przędz, wrażliwych na uszkodzenia mechaniczne. W wyniku tych prób otrzymano wartości sił i odpowiadających im wydłużeń, określając tym samym charakterystykę pracy poszczególnych rodzajów włókien w porównaniu ze zbrojeniem stalowym. Na tej podstawie zestawiono właściwości materiałowe, w których przędza wykazała wyższe wartości naprężeń zrywających oraz niższe poziomy odkształceń przy zerwaniu w stosunku do prętów stalowych o odpowiadających przekrojach. To jednak nie przekłada się na prosty wniosek o wyższym module sprężystości w odniesieniu do umownego modułu Younga dla stali. Charakterystyka przędzy zależy bowiem od rodzaju materiału osnowy (włókien) oraz złożoności struktury i odbiega od linowo-sprężystego zachowania włókna, z którego jest zbudowana. W badaniach, w zmiennych wartościach siły zrywającej i odpowiadającego jej wydłużenia, ujawnił się tzw. "efekt przędzy". Zjawisko to określa nierównomierną współpracę włókien oraz jej wpływ na nośność i zachowanie się wiązki równoległej lub splotu włókien.

Po określeniu cech podstawowych (wytrzymałość, odkształcalność), warunkujących przydatność siatek niemetalicznych jako zbrojenia, konieczne było zbadanie istnienia współpracy włókien z matrycą cementową w próbie przyczepności. W badaniach tych zastosowano próbki specjalnego kształtu. Uzyskane wyniki potwierdziły istnienie mechanizmu przyczepności włókna niemetalicznego z matrycą cementową. Jednocześnie zauważono zależność długości zakotwienia stosowanych siatek od ich wytrzymałości i grubości otuliny. Ustalono, że długość ta dla stosowanych siatek powinna wynosić około 150 mm.

Pozytywny wynik badań przyczepności pozwolił wykonać w pierwszej kolejności badania pilotażowe elementów płytowych, po czym, po niewielkich modyfikacjach składu mieszanki betonowej, przystąpić do badań właściwych – doraźnych i długotrwałych.

W badaniach doraźnych, realizowanych pod obciążeniem statycznym do zniszczenia, została potwierdzona efektywność zbrojenia tekstylnego. Elementy teksbetowe zarysowały się przy sile minimum o 30% wyższej niż element żelbetowy. Liniowa charakterystyka wykresu wartości siły w funkcji przemieszczeń, aż do zarysowania wszystkich elementów, świadczy o pracy sprężystej materiału. Przed zarysowaniem, płyty teksbetowe przechodziły w fazę quasi-sprężystą, w której zaburzenia liniowej-sprężystości świadczyły o mikrozarysowaniach elementu. W fazie zarysowanej ujawnił się specyficzny sposób pracy różnych typów zbrojenia. Wykazano, że w przypadku elementów pojedynczo zbrojonych elementy teksbetowe mają tendencję do niesygnalizowanego, kruchego pękania przy zniszczeniu, w odróżnieniu od płyt zbrojonych stalą, które charakteryzują się bezpieczną, długą fazą zniszczenia.

Spośród wszystkich zbadanych serii płyty teksbetowych pod obciążeniem statycznym tylko płyty zbrojone siatkami z włókna szklanego wykazywały ciągłą zdolność do przenoszenia obciążenia, również po zarysowaniu. Rzeczywisty model ich pracy opowiadał więc założonemu, wyidealizowanemu modelowi sprężysto-plastycznemu ze wzmocnieniem. Z kolei płyty zbrojone siatkami z PVA i z włókien węglowych przenosiły obciążenia wyłącznie w fazie sprężystej. Po zarysowaniu następował gwałtowny spadek ich sztywności. W efekcie, płyty te po zarysowaniu pracowały jak membrana, charakteryzując się znacznymi przyrostami ugięć i wydłużeń zbrojenia, a w końcowej fazie pracy – zrywaniem i wysnuwaniem się poszczególnych włókien z przędzy.

Wysoka efektywność zbrojenia teksbetowego została uzyskana już przy wykorzystaniu zaledwie 0,25% stopnia zbrojenia, w stosunku do 0,75% dla płyty

żelbetowej. Niski stopień zbrojenia siatek tekstylnych w przekroju betonowym uzyskano dzięki możliwości znacznej koncentracji włókien w przędzy.

Dla dalszej oceny pracy teksbetu w wyniku oddziaływań długotrwałych, badane płyty poddano działaniu równomiernie rozłożonego obciążenia, przyłożonego przez okres 9 miesięcy. W tym czasie rejestrowano ugięcia i obserwowano rozwój rys. W ciągu pierwszych sześciu miesięcy działania obciążenia o wartości około od 25÷95% obciążenia rysującego, płyty teksbetowe charakteryzowały się niższymi wartościami ugięć w stosunku do porównawczych płyt ze zbrojeniem stalowym. Po tym okresie płyty chwilowo odciążono, co wywołało zmniejszenie ugięć i ujawniło w sprężystą charakterystykę pracy elementów, wobec stwierdzenia zasadzie niewielkich wartości ugięć nieodwracalnych. Po ponownym obciążeniu płyt w krótkim czasie osiągnięto stabilizację wartości ugięć, co było warunkiem rozpoczęcia końcowego etapu obciażenia długotrwałego o intensywności 9 kN/m<sup>2</sup> (czyli ~125% obciażenia rysującego). Stwierdzono proporcjonalny wzrost ugięcia płyt na całej rozpiętości, a w płycie zbrojonej siatką z włókna szklanego - po 25-ciu dniach trwania obciążenia - powstanie rys, jednak bez tendencji do wyraźnego zwiększania rozwartości w przeciągu kolejnych dni stałego obciążania.

Najmniejsze ugięcia przez cały okres badania wykazywała płyta zbrojona siatką z włókien PVA, co świadczy o dobrej współpracy siatki z betonem od momentu przekazania obciążenia, co potwierdza również większe nachylenie krzywej zależności wartości siły i stowarzyszonych przemieszczeń w zakresie pracy sprężystej płyty, w badaniach doraźnych pod obciążeniem statycznym.

Podobne wyniki uzyskano dla płyty zbrojonej siatką z włókien węglowych, co również świadczy o dobrej współpracy betonu i siatki tekstylnej.

W badaniach długotrwałych potwierdzono wysoką efektywność zbrojenia tekstylnego – co najmniej na poziomie zbrojenia tradycyjnego.

Dodatkowo przeprowadzono przyczynkowe badania pod obciążeniem cyklicznym, których celem było rozpoznanie zmian o charakterze zmęczeniowym w płytach teksbetowych w porównaniu do płyt żelbetowych. Badane były pasma płytowe o wymiarach 1200×200×40 mm, w schemacie płyty wolnopodpartej. Obciażenie cykliczne przez dziesięć cykli przykładano w odstępach co 120 s. Na pełny cykl składały się cztery etapy: etap przyrostu oddziaływania z prędkościa 0,1 kN/s do wartości siły 0,5 kN; utrzymywanie stałego poziomu obciążenia przez 60 s; etap odciążenia (z prędkością 0,1 kN/s do wartości siły 0,0 kN) i etap odprężenia (utrzymywanie zerowej wartości siły) trwająca również około 60 s.

Przy obciążeniu cyklicznie zmiennym pasma płytowe z każdej serii wykazały się sprężystym charakterem zależności siły i przemieszczenia. W elementach teksbetowych uzyskano niższe wartości nieodwracalnych ugięć resztkowych po każdym cyklu obciążenia. Niższe wartości ugięć wskazują na wzrost sztywności giętnej elementów, co przy niezmiennym przekroju oznacza wzrost modułu

sprężystości. Jednocześnie, wyniki z badań cyklicznych potwierdzają stwierdzoną dobrą przyczepność i współpracę zbrojenia tekstylnego przed zarysowaniem.

Badania uzupełniające odporności korozyjnej cienkich płyt w roztworze chlorku sodu oraz badania mrozoodporności pokazały dobrą odporność elementów ze zbrojeniem tekstylnym na działanie tych wybranych czynników destrukcyjnych.

Do badań mrozoodporności użyto materiału pozostałego po badaniach doraźnych, z którego wykonano próbki o wymiarach 200×200×40 mm. Elementy zamrażano i odmrażano w 12-sto godzinnych cyklach. Po 34 cyklach na górnych powierzchniach próbek pojawiły się rysy. Badanie siły niszczącej przy zginaniu elementu wykazały spadek nośności, średnio o 5% niższy dla modeli teksbetowych w porównaniu do tradycyjnej próbki żelbetowej. W kolejnych cyklach (cykle nr 52 i 86) nastąpiła znaczna degradacja próbek polegająca na złuszczeniu powierzchni betonu. W próbkach zbrojonych siatką z włókien nie występowało jednak odspajanie betonu otuliny od zbrojenia, jak to miało miejsce w elementach zbrojonych tradycyjnej.

W badaniach dotyczących oddziaływania jonów chlorkowych użyto pasm płytowych o wymiarach takich jak w badaniach cyklicznych. Przez okres pół roku elementy próbne przechowywano w 3% roztworze chlorku sodu, a próbki "świadki" – w wodzie wodociągowej. W pierwszym i trzecim miesiącu badań przeprowadzona była ocena wizualna i akustyczna próbek. Po upływie sześciu miesięcy, elementy zbadano na zginanie do zniszczenia.

Ocena wizualna i akustyczna stanu pasm płytowych nasyconych roztworami wykazała każdorazowo dobrą jakość betonu. Po pierwszym miesiącu nie zaobserwowano objawów korozji na odsłoniętym zbrojeniu. Po trzech miesiącach na zbrojeniu stalowym pokazał się czarny nalot, a na powierzchniach prętów wystawionych na działanie atmosfery wystąpiła rdza. Zbrojenie tekstylne przez cały czas trwania badania wykazywało brak oznak korozji. W badaniu niszczącym, po sześciu miesiącach, we wszystkich przypadkach największą nośność osiągnęły pasma zanurzone przez sześć miesięcy w wodzie. Podobna charakterystyka pracy pasm płytowych po zarysowaniu świadczy, że nie nastąpiła degradacja zbrojenia, a wyłącznie spadek parametrów wytrzymałościowych betonu.

Elementy płytowe zbadane pod obciążeniem doraźnym były także przedmiotem analizy teoretycznej, przeprowadzonej z wykorzystaniem analizy MES dla teoretycznego modelu materiałowego w programie *MAFEM3D*. Model betonu przyjęto bez modyfikacji, zgodnie z charakterystyką sprężysto-plastyczną ze stowarzyszonym izotropowym prawem wzmocnienia-osłabienia, opisaną w modelu podstawowym przez S. MAJEWSKIEGO i G. WANDZIKA. Zadano rzeczywiste wartości charakterystycznych cech mechanicznych stosowanych betonów, uzyskane w badaniach towarzyszących na próbkach. Jako zbrojenie, opisane w modelu charakterystyką materiału sprężysto – idealnie plastycznego, przyjęto właściwości siatek tekstylnych, uzyskane w towarzyszących badaniach wytrzymałościowych.

Analizę numeryczną przeprowadzono dla dwu modeli, Z zadanymi parametrami prętów stalowych oraz siatki z włókna szklanego, jako zbrojenia. Analizie poddano wycinek płyty o wymiarach odpowiadających jednej czwartej wymiarów całkowitych płyty rzeczywistej. W modelu oddziaływania przyłożono w odpowiednich węzłach, w formie przemieszczeń o wartościach narastających, zadanych w 50-ciu krokach obliczeniowych. W analizie numerycznej uzyskano dobra zgodność pracy płyt z wynikami badań w pierwszej części procesu obciążania, do zarysowania. Dalej, wobec niemożności uchwycenia pewnych szczególnych efektów pracy zbrojenia tekstylnego, w tym rozsnuwania się poszczególnych włókien w przędzy i wcześniejszego zrywania niektórych włókien, niemożliwe było uzyskanie dobrej zgodności obliczeń teoretycznych z badaniami w całym procesie obciążenia aż do zniszczenia. Z tego względu, z wykorzystaniem nabytych doświadczeń w pracy z nowym materiałem, niezbędne jest prowadzenie dalszych testów laboratoryjnych i na ich podstawie rozwijanie bardziej zaawansowanych modeli materiałowych zbrojenia tekstylnego.

W oparciu o wyniki badań i analizy numerycznej z wykorzystaniem MES, w pracy została zaproponowana prosta instrukcja obliczenia jednokierunkowo zginanych płyt zbrojonych tekstyliami. Sposób obliczenia potrzebnej siły zbrojenia oparto na uproszczonej metodzie obliczeniowej elementów zginanych według EC2. Zaproponowana procedura obliczeniowa daje bezpieczną możliwość oszacowania potrzebnej ilości tego zbrojenia tekstylnego, którego charakterystyka pracy w znacznej części jest linowo-sprężysta (tj. dla siatek: z włókien szklanych i z włókien węglowych). W przypadku zbrojenia o charakterystyce nieliniowej (tj. dla siatki z włókien PVA) otrzymano znacznie zaniżone, niezgodne z wynikami badań laboratoryjnych, wartości nośności.

W przeprowadzonych w pracy badaniach stwierdzono, że charakterystyka pracy płytowych elementów teksbetowych w fazie niezarysowanej nie różni się od pracy tradycyjnych elementów żelbetowych. Zarysowanie elementów z teksbetu występuje nieco później niż w elementach żelbetowych.

Różnice we właściwościach materiałów zastosowanych do zbrojenia betonu ujawniły się w drugiej fazie pracy, tzn. po wystąpieniu pierwszych zarysowań w elementach. Po zarysowaniu stwierdzono istotnie różne przebiegi zależności obciążenie-ugięcie, w zależności od stosowanego typu zbrojenia. Ujawniły się dodatkowe efekty, związane z budową strukturalną włókien w przędzy.

Przeprowadzone badania pozwoliły określić właściwości teksbetu w aspekcie jego przydatności i efektywności w zastosowaniu do cienkościennych elementów zginanych.

Różnorodność zastosowanych typów siatek zbrojenia tekstylnego pozwoliła na wytypowanie tych materiałów, których parametry są najwłaściwsze do wykorzystania w zbrojeniu konstrukcji betonowych o określonych wymaganiach użytkowych.

## Rozdział 12

## PERSPEKTYWY BADAWCZE

12.1. Kierunki dalszych badań

Szeroki zakres przeprowadzonych badań stanowi w istocie wstęp do prowadzenia dalszych badań i obserwacji w zakresie:

- badań materiałowych, których celem jest:
  - poszukiwanie nowych i klasyfikacja materiałów tekstylnych do zbrojenia elementów betonowych,
  - udoskonalenie receptury samozagęszczalnej, drobnoziarnistej mieszanki betonowej do teksbetu, dostosowanej do geometrii siatek,
  - opracowanie receptur bardzo drobnoziarnistych mieszanek betonowych (piaskobetonów), umożliwiających wykonanie lekkich elementów cienkościennych,
- dalszych badań aplikacyjnych, pod kątem:
  - szczegółowej oceny mechanizmu przyczepnościowego (wpływu obróbki powierzchniowej przędzy na właściwości powierzchni kontaktu beton – włókno i włókno – włókno), w celu określenia wymaganej długości zakotwienia,
  - wpływu stopnia przesycenia przędzy zaczynem oraz wpływu kształtu przekroju zbrojenia tekstylnego na siły przyczepności,
  - o zmian reologicznych (w tym zwłaszcza relaksacji) zbrojenia tekstylnego,
  - wpływu podwyższonej temperatury na nośność elementów z teksbetu,
  - trwałości elementów zbrojonych tekstyliami, przy różnych ekspozycjach,
  - nośności elementów teksbetowych zbrojonych wielowarstwowo, wielokierunkowo, czy sprężonych,
  - nośności elementów konstrukcyjnych (belek, słupów, dźwigarów kratowych etc.) o zminimalizowanych wymiarach, w prostych (ściskanie, rozciąganie, zginanie, ścinanie i skręcanie) i w złożonych stanach naprężeń,
  - o wykorzystania teksbetu do wzmacniania konstrukcji,
  - o oceny stopnia zespolenia w połączeniach typu teksbet-beton.

W obszarze głównych zainteresowań autora znajdują się badania elementów teksbetowych zbrojonych wielowarstwowo i wielokierunkowo, w celu oceny naprężeń rozwarstwiających występujących na styku warstw zbrojenia i, m.in. na tej podstawie,

określenia minimalnej odległości pomiędzy kolejnymi warstwami. Badania elementów ze zbrojeniem tekstylnym w kilku rzędach pozwolą również na określenie maksymalnego możliwego stopnia zbrojenia tekstylnego, co jest ważne z punktu widzenia wytycznych zastosowań, a w dalszej perspektywie – normalizacji.

Odrębnym zagadnieniem jest problem wzmacniania elementów uszkodzonych z użyciem teksbetu.

# 12.2. Przykłady zastosowań

Teksbet znajduje dziś, lub w bliskiej przyszłości zastosowanie:

a) do wykonywania elementów drugorzędnych, takich jak:

- cienkie, lekkie i trwałe ekrany osłonowe i bariery przydrożne,
- płyty elewacyjne z powierzchnią "architektoniczną",
- deskowania tracone, które po zespoleniu biorą udział w przenoszeniu obciążeń [54],

b) w produkcji elementów nośnych, w postaci:

- płyt warstwowych, ściennych i stropowych [28],
- prefabrykowanych belek, słupów i struktur przestrzennych,
- prefabrykatów wstępnie sprężonych,

c) ponadto:

- jako zastąpienie zbrojenia przypowierzchniowego w prefabrykatach,
- do wzmacniania konstrukcji,
- w naprawach konstrukcji, w tym do szczelnego zabezpieczenia przed wodą i innymi czynnikami [47],
- jako materiał do elementów małej architektury i szczegółów architektonicznych o możliwości dowolnego kształtowania ich formy.

Elementy teksbetowe wykonywane są w przewadze z piaskobetonu i zbrojone wielowarstwowo siatkami tekstylnymi. Wybrane przykłady przedstawiono na rysunkach 12.1÷12.4.



b) widok kładki w dzień otwarcia wystawy ogrodowej



Rys. 12.1. Segmentowa kładka dla pieszych w Oschatz [16] zbrojona siatkami szklanymi (AR-Glass)

#### a) widok obiektu

b) układanie teksbetu na dachu



Rys. 12.2. Naprawa dachu w Schweinfurt o kształcie wyciętej powierzchni siodłowej [17]



Rys. 12.3. Własne badania pilotażowe autora n/t wzmacniania słupów żelbetowych (2009)



Rys. 12.4. Konstrukcje wykonane przez studentów Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie [http://www.betonboot.de/]

## 12.3. Sposoby poprawy efektywności zbrojenia tekstylnego

Właściwości teksbetu są zależne od wielu czynników, w tym: od właściwości mechanicznych i reologicznych mieszanki betonowej, parametrów wytrzymałościowych i budowy zbrojenia tekstylnego, a w konsekwencji od wzajemnej współpracy tych materiałów.

Duży rozrzut wytrzymałości przędzy w badaniach został przypisany tzw. efektowi przędzy, czyli nierównomiernemu naciągowi włókien w przędzy prowadzącemu do zróżnicowanych wydłużeń i nierównomiernej pracy wiązki (splotu). W zastosowaniach należy dążyć do takiego przygotowania zbrojenia tekstylnego, aby wpływ tego efektu na wytrzymałość ograniczyć do minimum (np. przez odpowiednie splecenie wiązek przędzy – jak dla prezentowanych w pracy splotów PVA). W badanej siatce hybrydowej z głównymi włóknami węglowymi "efekt przędzy" nie został w żaden sposób ograniczony. Prowadziło to nie tylko do rozrzutów w nośności przędzy, lecz również do rozsnuwania się struktury siatki z luźno połączonych włókien. Jednym ze sposobów poprawy parametrów siatki byłoby powleczenie przędzy powierzchniową warstwą na bazie żywicznej.

Stabilizację struktury z włókien można również uzyskać przez oplecenie lub owinięcie przędzy dodatkową nitką (rys. 12.5.a). Inny sposobem zwiększenia stabilności siatki jest zbrojenie montażowe ze znacznie sztywniejszych włókien polipropylenowych, które przez zgrzanie stabilizują poszczególne przędze w siatce (rys. 12.5.b).



Rys. 12.5. Możliwe sposoby stabilizacji siatki

Obok potrzeby eliminacji "efektu przędzy", należy podejmować zabiegi prowadzące do zmniejszenia potrzebnej długości zakotwienia zbrojenia tekstylnego. Modyfikację długości zakotwienia można uzyskać przez zastosowanie powierzchniowej obróbki na bazie żywicznej w połączeniu z otoczką drobnego piasku (rys. 12.6.a) lub przez wplecenie w przędzę krótkich włókien poprzecznych (można zastosować w tym celu włókna z inteligentnych polimerów<sup>12</sup> np. z pamięcią kształtu) (rys.12.6.b).

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Inteligentne polimery – materiały, które zmieniają swoje właściwości pod wpływem bodźców zewnętrznych w sposób przewidywalny, lub wręcz zaprogramowany.



Rys. 12.6. Propozycje zwiększenia przyczepności

Jednocześnie należy mieć na uwadze, że spowoduje to zwiększenie sztywności zbrojenia, co pozbawi je tekstylnego (wiotkiego) charakteru. Dlatego należy przyjmować wyważony kompromis modyfikacji tak, aby ze zbrojenia tekstylnego nie stworzyć sztywnego pręta polimerowego zbrojonego ciągłymi włóknami.

Przedstawione obszernie "perspektywy badawcze" są wynikiem obserwacji przy podstawowych badaniach wykonanych dla celów prezentowanej pracy, a także są wynikiem śledzenia najświeższych publikacji z tego zakresu.

# **S**PIS ILUSTRACJI

Rys. 1.1. Starożytni Egipcjanie przy formowaniu cegieł i ich stosowaniu na	
budowie (~1950 r. p.n.e.) [5]	11
Rys. 1.2. Patent JOSEPHA ASPDINA	12
Rys. 1.3. Piec JOSEPHA ASPDINA	12
Rys. 1.4. Siatkobetonowa łódź LAMBOTA (1849 r.) [9]	13
Rys. 1.5. Fragment patentu JOSEPHA-LOUISA LAMBOTA (1851r.) [9]	13
Rys. 1.6. Zasada budowy teksbetu	16
Rys. 1.7. Zdjęcie wiązki włókien w betonie	16
Rys. 1.8. Szkic wykresów $\delta - \epsilon$	17
Rys. 2.1. Włókna we współczesnej działalności ludzkiej	19
Rys. 2.2. Etapy procesu produkcji włókien szklanych	22
Rys. 2.3. Etapy procesu produkcji włókien węglowych	23
Rys. 2.4. Filament	23
Rys. 2.5. Fibryl naturalny	23
Rys. 2.6. Typowa charakterystyka i zakres niektórych krzywych naprężenie- odkształcenie dla włókien	24
Rys. 2.7. Drut – włos – włókno	26
Rys. 2.8. Zależność wytrzymałości na rozciąganie (teoretycznej i rzeczywistej) od	
średnicy włókna [65]	28
Rys. 2.9. Przykłady uszkodzeń włókien	28
Rys. 2.10. Ogólna zależność wytrzymałości włókna od średnicy [65]	29
Rys. 2.11. Ogólna zależność wytrzymałości włókna od badanej długości [65]	29
Rys. 2.12. Wpływ średnicy na wytrzymałość włókna węglowego [69], szklanego	
[46] i PVA [52]	30
Rys. 2.13. Długość próbki a wytrzymałość włókna szklanego NEG [22]	30
Rys. 2.14. Zmniejszenie wytrzymałości włókien szklanych przechowywanych w	
skrajnych atmosferach [38]	31
Rys. 2.15. Wpływ temperatury na włókna [20, 35, 42,]	32
Rys. 2.16. Zależność objętości, modułu sprężystości i naprężenia polimerów od	
temperatury	33
Rys. 2.17. Krzywa naprężenie – odkształcenie przędzy [51]	35
Rys. 2.18. Długość próbki a wytrzymałość przędzy w stosunku do wytrzymałości	
pojedynczego włókna [22]	36
Rys. 2.19. Krzywa naprężenie – odkształcenie siatki w porównaniu z przędzą i	
włóknem [51]	36
Rys. 2.20. Widok różnych sposobów wiązań siatki szklanej [51]:	37
Rys. 2.21. Naprężenie – odkształcenie dwukierunkowej siatki szklanej o	
zróżnicowanych wiązaniach [51]	38
Rys. 2.22. Wykres przykładowych linii naprężenie – odkształcenie próbek betonu	
[60]	41
Rys. 2.23. Wykresy $\sigma_c - \epsilon_c$ przyjmowane w obliczeniach przekrojów betonowych	
[71, 74]	41

Rys. 3.1. Szkic płyty – model badawczy	43
Rys. 3.2. Schemat statyczny	44
Rys. 4.1. Siatka z włókien szklanych odpornych na alkalia (A)	45
Rys. 4.2. Siatka z włókien PVA w osnowie PVC (P)	46
Rys. 4.3. Siatka hybrydowa z włókien węglowych (Carbon) i szklanych bez	
osnowy (C)	46
Rys. 4.4. Maszyna wytrzymałościowa typu ZD-40	47
Rys. 4.5. Sposób wykonania próbki do badań kontrolnych wytrzymałości przędzy	48
Rys. 4.6. Szkic stanowiska	49
Rys. 4.7. Siła niszcząca i odpowiadające odkształcenie dla 15 próbek przędzy z	
włókna szklanego odpornego na alkalia (w tabelce wartości ułożono	
według malejącej siły niszczącej)	49
Rys. 4.8. Wykres naprężenie – odkształcenie dla przędzy siatki z włókien	
szklanych (A)	50
Rys. 4.9. Element próbny i obraz zniszczenia wiązki włókien szklanych	50
Rys. 4.10. Siła niszcząca i odpowiadające odkształcenie dla 15 próbek przędzy z	
włókna z PVA (w tabelce wartości ułożono według malejącej siły	
niszczącej)	51
Rys. 4.11. Wykres naprężenie – odkształcenie dla przędzy siatki z włókien PVA	
(P)	52
Rys. 4.12. Element próbny i obraz zniszczenia wiązki splotów z PVA	52
Rys. 4.13. Siła niszcząca i odpowiadające odkształcenie dla 15 próbek przędzy z	
włókna z węglowego (w tabelce wartości ułożono według malejącej siły	
niszczącej)	53
Rys. 4.14. Wykres naprężenie – odkształcenie dla przędzy siatki z włókien	
węglowych (C)	54
Rys. 4.15. Element próbny i obraz zniszczenia wiązki z włókien węglowych	54
Rys. 4.16. Siła niszcząca i odpowiadające odkształcenie dla 15 próbek z pręta	
stalowego ø4 mm (w tabelce wartości ułożono według malejącej siły	
niszczącej)	55
Rys. 4.17. Wykres naprężenie – odkształcenie dla prętów stalowych ø4 mm (S)	55
Rys. 4.18. Element próbny i obraz zniszczenia pręta stalowego ø4 mm	56
Rys. 4.19. Siła niszcząca – odpowiadające odkształcenie	56
Rys. 4.20. Porównanie wykresów naprężenie – odkształcenie dla zastosowanych	
rodzajów zbrojenia	59
Rys. 5.1. Próbka do badań przyczepności	60
Rys. 5.2. Etapy wykonania elementów próbnych do badań przyczepności: a)	
forma do betonowania z pasmem siatki, b) elementy próbne po	
zabetonowaniu	61
Rys. 5.3. Stanowisko do badań przyczepności	61
Rys. 5.4. Zniszczenie siatki	64
Rys. 5.5. Wysnuwanie się siatki z betonowego bloku kotwiącego (widok góry	
bloku betonowego)	64
Rys. 5.6. Rozłupane próbki po badaniu w celu oceny otulenia siatek betonem	65
Rys. 5.7. Model pracy otuliny żelbetowej [64]	66
Rys. 5.8. Wypełnienie przestrzeni między włóknami w przędz	66

Rys. 5.9. Idealizacja kształtu przekroju przędzy z włókien	66
Rys. 5.10. Betonowanie serii próbnej	67
Rys. 5.11. Stanowisko do badań próbnych	68
Rys. 5.12. Zniszczenie płyty – badania próbne	68
Rys. 5.13. Wykres siła-przemieszczenie: badania próbne	69
Rys. 5.14. Widok formy ze zbrojeniem tradycyjnym	70
Rys. 5.15. Widok formy ze zbrojeniem z siatki tekstylnej	71
Rys. 5.16. Widok płyty w trakcie i tuż po betonowaniu	71
Rys. 5.17. Widok stanowiska betonowania i składowania płyt	72
Rys. 5.18. Szkic próbki	72
Rys. 5.19. Widok próbki umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej typu	
DRBM nr 265/1	72
Rys. 5.20. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla	
betonu serii A	73
Rys. 5.21. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla	
betonu serii P	74
Rys. 5.22. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla	
betonu serii C	74
Rys. 5.23. Wykres naprężenie – odkształcenie pionowe (V) i poziome (H) dla	
betonu serii S	75
Rys. 5.24. Stanowisko do badań podstawowych	75
Rys. 5.25. Schemat rozmieszczenie punktów pomiarowych	76
Rys. 5.26. Widok stanowiska z oprzyrządowaną płytą	76
Rys. 5.27. Przykładowe wykresy zmienności wartości obciążenia w czasie	
badania płyt zbrojonych prętami stalowymi (SR) i statkami z włókien	
szklanych (AR)	77
Rys. 5.28. Wykres siła – przemieszczenie	78
Rys. 5.29. Obraz zarysowania i zniszczenia	78
Rys. 5.30. Porównanie ugięć przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	79
Rys. 5.31. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku	
rozpiętości przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	79
Rys. 5.32. Wykres siła – przemieszczenie	80
Rys. 5.33. Obraz zarysowania i zniszczenia	80
Rys. 5.34. Porównanie ugięć przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	81
Rys. 5.35. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku	
rozpietości przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	81
Rvs. 5.36. Wykres siła – przemieszczenie	82
Rys. 5.37. Obraz zarysowania i zniszczenia	82
Rvs. 5.38. Porównanie ugieć przy sile: a) 3.5 kN: b) 5.0 kN	83
Rys. 5.39. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku	
rozpietości przy sile: a) 3.5 kN: b) 5.0 kN	83
Rvs. 5.40. Wykres siła – przemieszczenie	
Rvs. 5.41. Obraz zarvsowania i zniszczenia	
Rvs. 5.42. Porównanie ugieć przv sile: a) 3.5 kN: b) 5.0 kN	
Rys. 5.43. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku	
rozpietości przy sile: a) 3.5 kN: b) 5.0 kN	85
- r t···· r j ·/-,- ···, -/-,- ····	

Rys. 5.44. Porównanie zależności siła – przemieszczenie dla wybranych płyt	86
Rys. 5.45. Porównanie ugięć dla wybranych płyt przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	86
Rys. 5.46. Wartość odkształceń poziomych na wysokości płyty w środku	
rozpiętości dla wybranych płyt przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	87
Rys. 5.47. Pierwsza rysa, a siła i przemieszczenie (wartości w tab. 5-5)	
Rys. 5.48. Wartości (w [%]) sił rysujacych w poszczególnych płytach w	
odniesieniu do płyty żelbetowei	
Rvs. 5.49. Wartości (w [%]) przemieszczenia w chwili zarysowania w	
poszczególnych płytach w odniesieniu do płyty żelbetowej	88
Rvs 5.50 Charakterystyka pracy płyt po zarysowaniu	89
Rys 5.51 Schemat pracy elementów PR1 i CR1 po zarysowaniu	90
Rys 5.52 Stany graniczne i strefa, bezniecznej" awarij	۵۵
$R_{VS} = 5.52$ . Idealizaçia zachowania sie pluty AR1	
Pys. 6.1 Widek formy przygotowana do botopowania plyt do badać	
dugotawaheb	03
Dva 6.2. Harmonagram planowanaga obsistanja plut w badanjash diugatrwakich	93
Rys. 6.2. Harmonogram planowanego obciążenia płyt w badaniach długoti wałych	
Rys. 6.3. Wyznaczenie wartości obciążenia długotrwałego	94
Rys. 6.4. Szkic rozmieszczenia obciązników w kolejnych etapach obciązenia:	
Rys. 6.5. Szkic stanowiska do badan długotrwałych	
Rys. 6.6. Widok stanowiska badawczego (etap I, cz.2 obciązenia)	
Rys. 6.7. Rozmieszczenie oprzyrządowania	97
Rys. 6.8. Widok oprzyrządowanej i obciążonej płyty	97
Rys. 6.9. Histogram temperatury i wilgotności powietrza w czasie trwania badania	98
Rys. 6.10. Płyta SR – Etap I (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	99
Rys. 6.11. Płyta SR – Etap II i III (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	99
Rys. 6.12. Płyta SR – wskazania tensometrów ("-" oznacza skrócenie)	99
Rys. 6.13. Płyta SR – Etap IV (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	100
Rys. 6.14. Płyta SR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu do	
etapów I i III	100
Rys. 6.15. Płyta AR – Etap I (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	101
Rys. 6.16. Płyta AR - Etap II i III (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	102
Rys. 6.17. Płyta AR – wskazania tensometrów ("-" oznacza skrócenie)	102
Rys. 6.18. Płyta AR - Etap IV (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	103
Rys. 6.19. Widok zarysowania płyty w 246 dniu	103
Rys. 6.20. Płyta AR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu do	
etapów I i III	
Rys. 6.21. Płyta PR – Etap I (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	104
Rys. 6.22. Płyta PR – Etap II i III (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	105
Rys. 6.23. Płyta PR – Etap IV (w tabeli podano wartości w ugięć w [mm])	105
Rys. 6.24. Płyta PR – wskazania tensometrów ("-" oznacza skrócenie)	106
Rys. 6.25. Płyta PR – okres przejściowy miedzy etapami III a IV w porównaniu do	
etapów I i III	
Rvs. 6.26. Płyta CR – Etap I (w tabeli podano wartości w udieć w Immi)	
Rvs. 6.27. Płyta CR – Etap II i III (w tabeli podano wartości w udieć w [mm])	
Rys 6 28 Płyta CR – wskazania tensometrów ( -" oznacza skrócenie)	107
Rys 6 29 Plyta CR – Etap IV (w tabeli podano wartości w ugieć w [mm])	108

Rys. 6.30. Płyta CR – okres przejściowy między etapami III a IV w porównaniu do	
etapów I i III	109
Rys. 6.31. Porównanie ugięcia płyt w ostatnim dniu trwania etapu I	109
Rys. 6.32. Ugięcie płyty w środku rozpiętości (w [%]) w odniesieniu do płyty	
zbrojonej tradycyjnie	110
Rys. 6.33. Porównanie ugięcia płyt w ostatnim dniu trwania etapu II i III	110
Rys. 6.34. Ugięcie płyty w środku rozpiętości (w [%]) w odniesieniu do płyty	
zbrojonej tradycyjnie	111
Rys. 6.35. Porównanie ugięcia płyt w ostatnim dniu trwania etapu IV	111
Rys. 6.36. Ugięcie płyty w środku rozpiętości (w [%]) w odniesieniu do płyty zbrojonej tradycyjnie	111
Rys. 6.37. Porównanie odkształcenia poziomego płyt ("-" oznacza skrócenie)	112
Rys. 6.38. Porównanie ugięć płyt w etapie przejściowym (4 kN/m <sup>2</sup> ; t = 198 dni) z	
etapem pierwszym (4 kN/m <sup>2</sup> ; t = 14 dni) – wartości podano tabeli	
poniżej	113
Rys. 7.1. Wymiary geometryczne elementów pasmowych do badań cyklicznych	116
Rys. 7.2. Stanowisko badawcze	116
Rys. 7.3. Oprzyrządowanie pasma płyty	116
Rys. 7.4. Planowany przebieg obciążenia badań cyklicznych	117
Rys. 7.5. Porównanie planowanego i rzeczywistego przebiegu obciążenia w badaniach cyklicznych	117
Rvs 76 Przykładowy przebieg obciażenia w czasie badania pod obciażeniem	
cyklicznym	117
Rys. 7.7. Schemat badania cyklicznego pasma zbroionego siatka PVA	
Rys. 7.8. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii SR	119
Rvs. 7.9. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciażenia	-
cyklicznego dla serii SR	119
Rys. 7.10. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii AR	120
Rys. 7.11. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia	
cyklicznego dla serii AR	121
Rys. 7.12. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii PR	121
Rys. 7.13. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia	
cyklicznego dla serii PR	122
Rys. 7.14. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla płyt serii CR	123
Rys. 7.15. Wykres zależności: siła – przemieszczenie w zakresie obciążenia	
cyklicznego dla serii CR	123
Rys. 7.16. Wykres zależności: siła – przemieszczenie dla wybranych elementów	
z serii	125
Rys. 7.17. Schemat pracy płyt pod obciążeniem cyklicznym	125
Rys. 7.18. Pasmo płytowe SR 1 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych	
fazach cyklów	126
Rys. 7.19. Pasmo płytowe AR 1 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych	
fazach cyklów	126
Rys. 7.20. Pasmo płytowe PR 3 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych	
fazach cyklów	127

Rys. 7.21. Pasmo płytowe CR 2 – wartości ugięcia pasma w poszczególnych	
fazach cyklów	128
Rys. 7.22. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie An	
poszczególnych cyklów	128
Rys. 7.23. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie Bn	
poszczególnych cyklów	129
Rys. 7.24. Wartości ugięć dla wybranych elementów płytowych w punkcie $C_n$	
poszczególnych cyklów	129
Rvs. 7.25. Wartości ugieć dla wybranych elementów płytowych w punkcie D <sub>n</sub>	
poszczególnych cyklów	129
Rys 7.26 Wartości ugieć trwałych – różnica przemieszczeń początkowych	
koleinych cyklów (nunkty A.) – dla wybranych nasm płytowych	130
$R_{VS} = 7.27$ Uniecie początkowe a sztywność zginania EL w kolejnych cyklach n	
(dla nasma)	130
Dve 81 Oddziahwania korozvino	122
Rys. 8.1. Oduziaływania kolożyjne	102
Rys. 6.2. Elementy do badan milozooupomosci	133
	133
Rys. 8.4. Widok probki w komorze badawczej	134
Rys. 8.5. Elementy do badan oddziaływania chlorkow	137
Rys. 8.6. Pasma płytowe umieszczone w roztworze NaCl (nr 1,2) i wodzie (nr 3)	137
Rys. 8.7. Pasma zbrojone prętami stalowymi (SR)	138
Rys. 8.8. Pasma zbrojone siatka z włókien szklanych (AR)	139
Rys. 8.9. Pasma zbrojone siatka z włókien PVA (PR)	139
Rys. 8.10. Pasma zbrojone siatką hybrydową z włóknami węglowymi (CR)	140
Rys. 9.1. Powierzchnia graniczna (3D)	142
Rys. 9.2. Przekroje powierzchni zniszczenia	142
Rys. 9.3. Model materiałowy zbrojenia	145
Rys. 9.4. Element skończony zbrojenia	145
Rys. 9.5. Połączenie elementów skończonych betonu i zbrojenia	146
Rys. 9.6. Etapy pracy przędzy	147
Rys. 9.7. Idealizacja przekroju przędzy	147
Rys. 9.8. Propozycja modelu materiałowego zbrojenia w postaci siatek z przędzy	148
Rvs. 9.9. Geometria modelu numervcznego	148
Rys. 9.10. Model numeryczny płyty – podział na elementy skończone bryłowe i	_
pretowe.	149
Rvs 9.11 Krzywa siła – przemieszczenie dla elementu zbrojonego pretami	
stalowymi (SR)	150
$P_{VS} = 0.12$ Porównanie ugieć przy sile: a) 3.5 kN; b) 5.0 kN	151
Dvo 0.12. Krzywa ciła przemioszczonia dla elementu zbrojonogo ciętka z	131
Rys. 9.15. Rizywa siła – przemieszczenie ula elementu zbrojonego słatką z	454
Włokień szkianych (AR)	151
Rys. 9.14. Porownanie ugięc przy sile: a) 3,5 kN; b) 5,0 kN	
kys. 9.15. wapa naprężen głównych w chwili zniszczenia (w osi symetrii	
elementu) [MPa]	152
Rys. 9.16. Wytężenie betonu w osi symetrii elementu w chwili zniszczenia [×	
100%]	153
Rys. 10.1. Wykres $\sigma_c - \epsilon_c$ dla betonu o f <sub>ck</sub> = (12÷50)MPa [74]	156

Rys. 10.2. Wykres $\sigma_s - \epsilon_s$ dla stali [74]	
Rys. 10.3. Wykres $\sigma_f - \varepsilon_f$ dla przędzy	
Rys. 10.4. Rozkład sił w pojedynczo zbrojonym, prostokątnym przekroju	
zginanym, przy założeniu: $x \le x_{lim}$	157
Rys. 10.5. Porównanie średnich wartości M <sub>Ed</sub> i M <sub>Rd</sub> oraz wartość średnia	
niedoszacowania w [%]	
Rys. 12.1. Segmentowa kładka dla pieszych w Oschatz [16] zbrojona siatkami	
szklanymi (AR-Glass)	
Rys. 12.2. Naprawa dachu w Schweinfurt o kształcie wyciętej powierzchni	
siodłowej [17]	170
Rys. 12.3. Własne badania pilotażowe autora n/t wzmacniania słupów	
żelbetowych (2009)	
Rys. 12.4. Konstrukcje wykonane przez studentów Uniwersytetu Technicznego w	
Dreźnie [http://www.betonboot.de/]	
Rys. 12.5. Możliwe sposoby stabilizacji siatki	
Rys. 12.6. Propozycje zwiększenia przyczepności	172

# SPIS TABLIC

Tab. 2-1. Właściwości włókien [7, 25, 41, 57, 61, 63, 70,]	25
Tab. 2-2. Gęstość włókna szklanego odpornego na alkalia	27
Tab. 2-3. Przykładowe składy mieszanki betonu drobnoziarnistego (mieszanki	
badane przez autora pod kątem zastosowań w przygotowaniu	
elementów cienkościennych)	38
Tab. 2-4. Składy mieszanki betonu drobnoziarnistego (mieszanki wykonane	
przez autora na potrzeby teksbetu do cienkościennych elementów	
płytowych)	
Tab. 4-1. Odchylenie standardowe siły i odkształcenia dla poszczególnych	
rodzajów zbrojenia	57
Tab. 4-2. Właściwości materiałowe dla trzech wybranych próbek z każdego	
rodzaju zbrojenia	58
Tab. 5-1. Teoretyczna wartość siły zrywającej	62
Tab. 5-2. Opisowe zestawienie wyników badań	63
Tab. 5-3. Właściwości betonu dla próbek walcowych z każdej serii płyt	73
Tab. 5-4. Główne wyniki uzyskane z doraźnych badań płyt	85
Tab. 5-5. Wartości siły rysującej i przemieszczenia	88
Tab. 6-1. Wartość i czas trwania obciążenia długotrwałego	95
Tab. 6-2. Właściwości betonu płyt	97
Tab. 7-1. Właściwości betonu płyt poddanych badaniom pod obciążeniem	
cyklicznym	118
Tab. 8-1. Wyniki badań mrozoodporności	135
Tab. 8-2. Wyniki zginania próbek z badań mrozoodporności	136
Tab. 9-1. Parametry przyjmowane w modelu materiałowym betonu	145
Tab. 9-2. Parametry przyjmowane w modelu dla elementów prętowych	146
Tab. 10-1. Wartości współczynników materiałowych	157
Tab. 10-2. Opis stosowanych oznaczeń	158
Tab. 10-3. Porównanie wartości momentów M <sub>Ed</sub> i M <sub>Rd</sub>	160
Tab. 10-4. Procedura obliczenia potrzebnej siły zbrojenia zgodnie z EC2 i [74]	161
## **S**PIS LITERATURY

- [1] Abdkader A. Offermann P.: Textile Werkstoffe und Flächengebilde zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung. Technische Textilien 43 (2000) str. 265-270.
- [2] Aggregates for Concrete. ACI Committee E-701, Materials for Concrete Construction.
- [3] AJDUKIEWICZ A., KLISZCZEWICZ A., KOTALA B., WĘGLORZ M.: Tests on Thin-Walled Concrete Members Reinforced With Non-metallic Fabrics. Proceedings of the 11<sup>th</sup> Annual International FIB Symposium: CONCRETE: 21<sup>st</sup> Century Superhero – Building a Sustainable Future. 2009 London. Volume of Abstracts and CD. Session C3 – Materials, 8p.
- [4] ALDEA C.-M., MOBASHER B., JAIN N., SORANAKOM C.: Mechanical properties of alkali resistant glass fabric composites for retrofitting unreinforced masonry walls. American Concrete Institute, Special Publication, vol. 244, No. 8, May 2007, str. 125-140.
- [5] BARBISAN U., GUARDINI M.: *Reinforced Concrete: A Short History.* Stampa Tipografia TEMI Trento, Venice, Italy 2007.
- [6] *Biblia. Pismo Święte Starego i Nowego Testamentu.* Brytyjskie i Zagraniczne Towarzystwo Biblijne w Warszawie, Warszawa 1975.
- [7] BLUMBERG H., HILLERMERIER K., SCHOLTEN E.: Carbon fiber state and development. Chemical Fibers International 50(2), 2000.
- [8] BOBETH W.: *Textile Faserstoffe. Beschaffenheit und Eigenschaften.* Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York 1993.
- [9] Bosc J.-L.: *Joseph Monier et la naissance du ciment armé.* Éditions du Linteaum, Paris, France 2001.
- [10] BRAMESHUBER W., MOTT R., HEGGER J., VOSS S., GRIES T., BARLÉ M., BÖHM S., HARTUNG I.: Serielle Stückfertigung von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau, vol. 103, No. 2, Jan 2008, str. 64-72.
- [11] BRAUTMAN L.J., KROCK R.H.: *Composite Materials*. Academic Press, New York 1975.
- [12] BROCKMANN T.: Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for textile reinforced composites. Doct. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen 2005.

- [13] BUTLER M., HEMPEL R., SCHIEKEL M.: The Influence of short glass fibres on the working capacity of textile reinforced concrete. Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International RILEM Conference. Editors: Brameshuber W., Hegger J., Curbach M., Aachen, September 2006, str. 45-54.
- [14] *Cem-FIL GRC Technical Data.* Dane producenta wydane przez cem-FIL International Limited 2001.
- [15] CURBACH M., FUCHS H., HEGGER J., OFFERMANN P.: Sachstandbericht zum Einsatz von Textilen im Massivbau. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin 1999.
- [16] CURBACH M., GRAF W., JESSE D., SICKERT J.-U., WEILAND S.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 102, 6/2007, str. 342-352.
- [17] CURBACH M., HAUPTENBUCHNER B., ORTLEPP R., WEILAND S.: Textilbewehrte Beton zur Verstarkubg eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. Beton- und Stahlbetonbau 102, 6/2007, str. 353-361.
- [18] CURBACH M., JESSE F.: *Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton*. Betonund Stahlbetonbau, vol. 104, No. 1, Jan 2009, str. 9-16.
- [19] CUYPERS H., WASTIELS J., VAN ITTERBEEK P., DE BOLSTER E., ORLOWSKY J., RAUPACH M.: Durability of glass fibre reinforced composites experimental methods and results. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 37, No. 2, Feb 2006, str. 207-215.
- [20] DONNET J.-B., REBOUILLAT S., WANG T.K., PENG J.C.M.: Carbon fibers. Marcel Dekker, Inc. New York 1998.
- [21] DUBEY A. (editor) i inni: *Textile reinforced concrete*. American Concrete Institute 2008.
- [22] FRANZKE G., OFFERMANN P., ENGLER TH., ABDKADER A., SCHIERZ M.: Erkenntnisse zur textilen Kennwertermittlung, geometrischen Modellierung und Fertigung textiler Bewehrungsstrukturen. 1. Fachkolloquium Textilbeton, RWTH Aachen 2001, str. 71-82.
- [23] *FRP reinforcement in RC structures.* Technical report by a working party of Task Group 9.3 FIB, Ghent 2007.
- [24] GRIFFITH A. A.: *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids.* Philosophical Transactions of Royal Society of London, Series 221, London 1921.
- [25] GUODONG X., HANNANT D.J.: Synergistic Interaction Between Fibrillated Polypropylene Networks and Glass Fibers in a Cement-Based Composite. Cement & Concrete Composites. vol. 13, No. 2, England 1991, str. 95-106.
- [26] HARDMEIER S.: AR-Glasfasern als Mikrobewehrung zur Rissbreitenbeschrankung und Festigkeitssteigerung von Estrich und Beton. T.S. Lok, Novacret AG Zurich, Schweiz 1997.

- 183
- [27] HEARLE J.W.S. (editor) i inni: *High-performance fibers.* Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England 2001.
- [28] HEGGER J., ZELL M., HORSTMANN M.: Textile Reinforced Concrete Realization in applications. Tailor made concrete structures. CRC Press/Balkema, Netherlands 2008, str. 357-362.
- [29] HINZEN M., BRAMESHUBER W.: Hybrid short fibres in fine grained concrete. Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International RILEM Conference. Editors: Brameshuber W., Hegger J., Curbach M., Aachen, September 2006, str. 35-44.
- [30] HOLLAWAY L.C., TENG J.G.: Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fiber-reinforced polymer (FRP) composites. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England 2008.
- [31] JESSE F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix.* Doct. Dissertation, Technische Universität Dresden 2004.
- [32] JÜRGES T.: *Die entwicklung der Bige-, Schub- und Verformungsbemessung im Stahlbetonbau und ihre Anwendung in der Tragewerklehre.* Doct. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen 2000.
- [33] KANDA T., LI V.C.: Effect of fiber strength and fiber-matrix interface on crack bridging in cement composites. Journal of Engineering Mechanics, vol. 125, No. 3, March 1999, str. 290-299.
- [34] KANDA T., LI V.C.: New micromechanics design theory for pseudo strain hardening Cementitious Composites. American Society of Civil Engineers, Journal of Engineering Mechanics, vol. 125 No. 4, April 1999, str. 373-381.
- [35] KLEINEBERG M., HERBECK L., BROSINGER, A.: CFRP APU INTAKE DUCT for MEGALINER. Sampe Europe Conference & Exhibition 2004.
- [36] KOTALA B.: Zbrojenie siatkami niemetalicznymi lekkich elementów betonowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, zeszyt 112, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, str. 113-120.
- [37] KOTALA B.: Badania cienkich płyt betonowych z betonu samozagęszczalnego zbrojonych siatkami tekstylnymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Budownictwo, zeszyt 113, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008, str. 125-132.
- [38] KRÓLIKOWSKI W.: *Tworzywa wzmacniane i włókna wzmacniające*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988.
- [39] KRSTULOVIC-OPARA N., MALAK S.: Tensile Behavior of Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON). ACI Materials Journal, vol. 94, No. 1, Jan.-Feb. 1997, str. 39-46.

- [40] KRÜGER M., RAUPACH M., REINHARDT H.W., ORLOWSKY J.: Textilbewehrter Beton unter Brandbeanspruchung. Untersuchungen zum Tragverhalten im Brandfall. Beton und Fertigteile – Technik 71, No. 10, 2005, str. 38-48.
- [41] KUDER K.G., SHAH S.P.: Nailable Extruded HPFRCC for Use in Residential Building Applications. American Concrete Institute, Special Publication, vol. 260, No. 3, June 2009, str. 29-44.
- [42] LEDA H.: Szklane czy węglowe włókna w kompozytach polimerowych. Kompozyty 3/2003.
- [43] MAJEWSKI S., WANDZIK G.: MAFEM3D system komputerowy do analizy elementów żelbetowych w trójosiowym stanie naprężenia i odkształcenia. Instrukcja obsługi, Gliwice 1999.
- [44] Majewski S.: Mechanika betonu konstrukcyjnego w ujęciu sprężystoplastycznym. Seria Monografie Nr 45, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [45] MAJUMDAR A.J., LAWS V.: *Glass Fibre Reinforced Cement.* BSP Professional Books, London, Edinburgh 1991.
- [46] MAYER P. KACZMAR J.W.: *Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych.* Tworzywa sztuczne i chemia 6/2008.
- [47] MOTT R., BRAMESHUBER W.: Subsequent sealing of buildings made of textile reinforced concrete. Tailor made concrete structures. CRC Press/Balkema, Netherlands 2008, str. 363-368.
- [48] NAAMAN A.E., HOMRICH, J.R.: Tensile Stress Strain Properties of SIFCON. ACI Materials Journal, vol. 86, No. 3, May-June 1989, str. 244-251.
- [49] NAAMAN A.E.: *Ferocement and laminated cementitious composites.* Techno Press 3000, Ann Arbor, USA 2000.
- [50] *NEG AR-Glass Fiber*. Dane producenta wydane przez Nippon Electric Glass America, Inc., Concrete Plant International 2006.
- [51] OFFERMANN P., ABDKADER A., ENGLER TH., SCHIERZ M.: Grundlagen textiler Bewehrungsstrukturen zur Verstärkung bestehender Bauwerke. Curbach M. (Hrsg.): Arbeitsbericht des Sonderforschungsbereiches 528. Technische Universität Dresden, Dresden 2001, str. 25-73.
- [52] OGAWA A., HORIKOSHI T., HOSHIRO H.: Polyvinylalcohol Fiber Reinforced Cement-based Composites. Restoration of Buildings and Monuments, vol. 12, No. 2 (2006), str. 101-108.

- [53] PAPANICOLAOU G.C., TRIANTAFILLOU T.C., BOURNAS D., LONTOU P.V.: TRM as strengthening and seismic retrofitting material of concrete structures. Textile Reinforced Structures. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International RILEM Conference. Editors: Brameshuber W., Hegger J., Curbach M., Aachen, September 2006, str. 331-340.
- [54] PAPANTONIOU I.C., PAPANICOLAOU C.G.: *Textile Reinforced Concrete (TRC) for precast Stay-in-Place formwork elements.* Tailor made concrete structures. CRC Press/Balkema, Netherlands 2008, str. 475-481.
- [55] PELED A., JONES J., SHAH S.P.: Effect of matrix modification on durability of glass fiber reinforced cement composites. Materials and Structures, vol. 38, No. 2, March 2005, str.163-171.
- [56] PURNELL P.: Advances in Modelling GRC Durabillity. Textile Reinforced Structures. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Editor: Curbach M., Dresden 2003, str.145-160.
- [57] SAKURADA I.: *Polyvinyl Alcohol Fibers.* International Fiber Science and Technology, Marcel Dekker Inc., Now York and Basel 1985.
- [58] SCHNEIDER J., REYMENDT J.: Properties and applications of DUCKON® A microreinforced ultra-high-performance concrete. Proceedings International FIB-Symposium: Tailor Made Concrete Structures, Amsterdam 2008, str. 399-403.
- [59] SEDLACEK G., BLANK K. LAUFS W., GUESGEN J.: *Glas im Konstruktiven Ingenieurbau – Grundlagen und Benessung.* Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1999.
- [60] SEKCJA KONSTRUKCJI BETONOWYCH KILIW PAN: Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2. Redaktor: Knauff M. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 2006.
- [61] SHOKRI MAJOLAN A., NAURIVAND A., ABBASI S.: Impact Resistance of Single-span Concrete Frames Reinforced by Polypropylene Fibers, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International FIB-Congress, Naples, Italy, June 2006.
- [62] STAROSOLSKI W.: *Konstrukcje żelbetowe według PN-B-03264:2002 i Eurokodu* 2. Tom I, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- [63] TAERWE L.(editor) i inni: Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures. Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), E&FN Spon, England, London 1995.
- [64] TEPFERS R.: *Lapped tensile reinforcement splices.* Journal of structural Division, vol.108, No. ST1, Jan 1982, str. 283-301.
- [65] WATT O.H., DEW-HUGHES D.: *Wprowadzenie do inżynierii materiałowej.* Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [66] WEGNER T.: Metody energetyczne w wytrzymałości materiałów, Hipoteza wytrzymałościowa stateczności równowagi wewnętrznej. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.

- [67] WENDE A., MOEBES W., MARTEN H.: *Glasfaserverstärkte Plaste.* Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969.
- [68] YOSHITAKE I., BABA K., ITO T., NAKAGAWA K.: Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature. International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications 2005.
- [69] ZARAŃSKI Z., ŁOSIK I., BOJAR Z.: Badania właściwości włókien węglowych po modyfikacji powierzchni. Kompozyty 2/2002.
- [70] ZWEBEN C., Hamn M.T., Chou T.W.: Mechanical Behavior and Properties of Composites Materials. Delaware Composites Design Encyclopedia vol. 1, Technomic Publishing Company Books 1989.

## NORMY

- [71] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowe. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
- [72] PN-EN 10002-1+AC:1998 Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia.
- [73] PN-EN 12350-2:2001 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka.
- [74] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- [75] PN-EN 206-1:2003/A2:2006 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [76] PN-ISO 10319:1996 Geotekstylia. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek.