

Tomasz DOMAŃSKI*
Politechnika Łódzka

BADANIA STREFY PRZYPODPOROWEJ ZE ZBROJENIEM ROZPROSZONYM W BELKACH DWUPRZĘSŁOWYCH

Streszczenie. Zbadano trzy belki dwuprzęsłowe o rozpiętości przęsła 2,5 m. Jako zbrojenie rozproszone zastosowano włókna stalowe karbowane o długości 50 mm i średnicy 1,0 mm w ilości 30 kg/m^3 , oraz włókna polipropylenowe o długości 12 mm 3 dtex w ilości 4 kg/m^3 . W tym artykule przeanalizowano odkształcenia zbrojenia rozciąganego i odkształcenia ε_x na wysokości belki w strefie usytuowania sił skupionych.

INVESTIGATIONS OF SUPPORT REGION OF TWO SPAN BEAMS WITH FIBER REINFORCEMENT

Summary. Three two-span reinforcement beams with 2.5 m long span were tested. Crimped steel fiber reinforcement 50 mm long and 1.0 mm in diameter at the amount of 30 kg/m^3 as well as polypropylene fiber reinforcement 3 dtex 12 mm long at the amount of 4 kg/m^3 were used. Tensile longitudinal reinforcement strains and ε_x strains of the acting force region on the height of beam were analysed in this paper.

1. Wstęp

Badanie przeprowadzono w laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej.

W programie badawczym założono, że beton ze zbrojeniem rozproszonym ma stanowić alternatywę tradycyjnego zbrojenia strefy przy podporowej. Przyjęto, że strzemiona będą miały na całej długości belki rozstaw zbliżony do maksymalnego. Przy takim założeniu strzemiona przejmą jedynie część siły od ścinania, natomiast pozostałą część siły poprzecznej przejmie beton zbrojony włóknem rozproszonym. Zabieg taki pozwoli na zmniejszenie pracochłonności przy wykonywaniu zbrojenia, a być może spowoduje także zmniejszenie szerokości rozwarcia rys ukośnych.

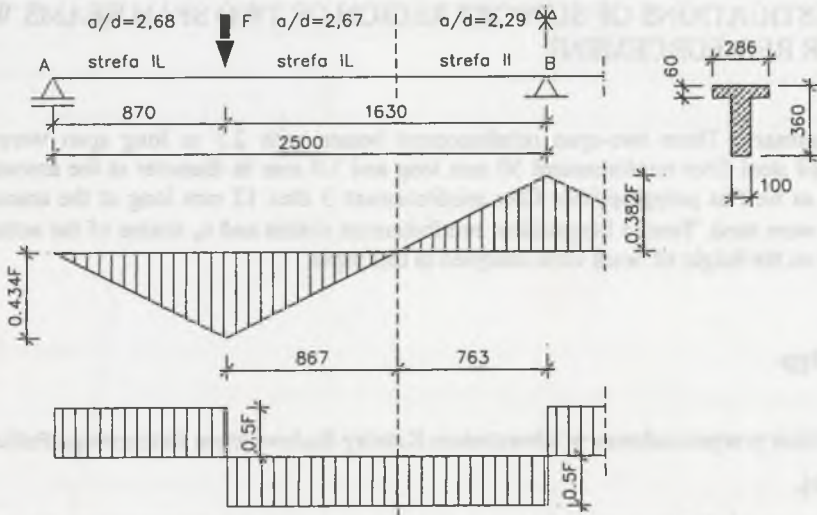
* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Artem Czkwianianc, prof. Pol. Łódzkiej

Włókna stalowe wpływają pozytywnie na wytrzymałość na rozciąganie betonu. Wykazano to między innymi w [1]. Włókna polipropylenowe zwiększają zaś odkształcalność betonu przy rozciąganiu [2]. Badania wykazały zasadność łączenia zbrojenia stalowego z polipropylenowym [3] z powodu wystąpienia efektu synergetycznego.

2. Program badań

2.1. Elementy badawcze

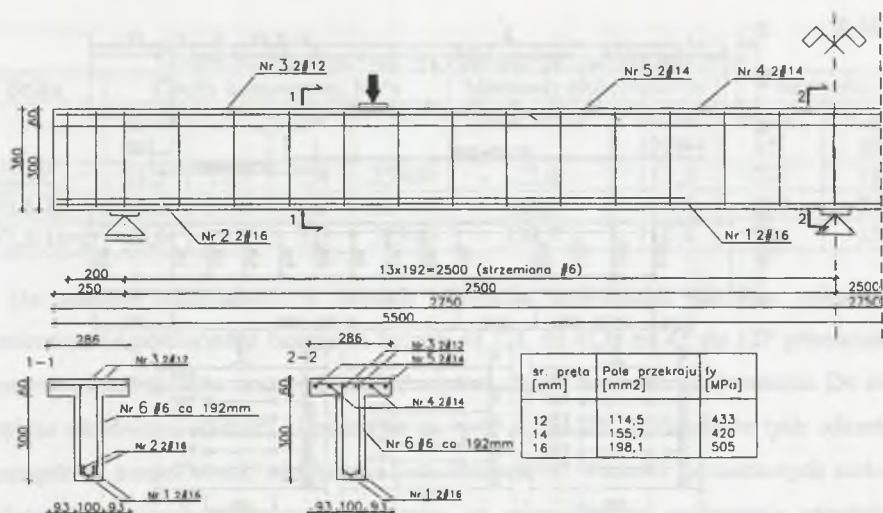
Jako schemat badawczy zastosowano belkę dwuprzęsłową z jedną siłą skupioną usytuowaną w każdym przęśle (rys. 1.). Usytuowanie siły przyjęto z warunku $V=\text{const}$, a dodatkowo uzyskano zbliżone smukłości ścinania a/d , wynoszące w strefie I $a/d=2,68$, natomiast w strefie II-2,29. Przyjęto przekrój dwuteowy o wysokości $h=360$ mm. Przyjęta wysokość belki 360 mm pozwala na uniknięcie wpływu efektu skali.



Rys. 1. Wymiary, schemat statyczny, obciążenie, wykresy momentów i sił poprzecznych
Fig. 1. Dimensions, load configuration, moment and vertical force distribution

Pola momentów i sił poprzecznych dla rozkładu sprężystego przedstawiono na rys. 1.

Wszystkie belki miały jednakowy układ zbrojenia podłużnego i strzemion (rys. 2.). Taki układ zbrojenia podłużnego jest bliski sprężystemu rozkładowi momentów.



Rys. 2. Zbrojenie belki

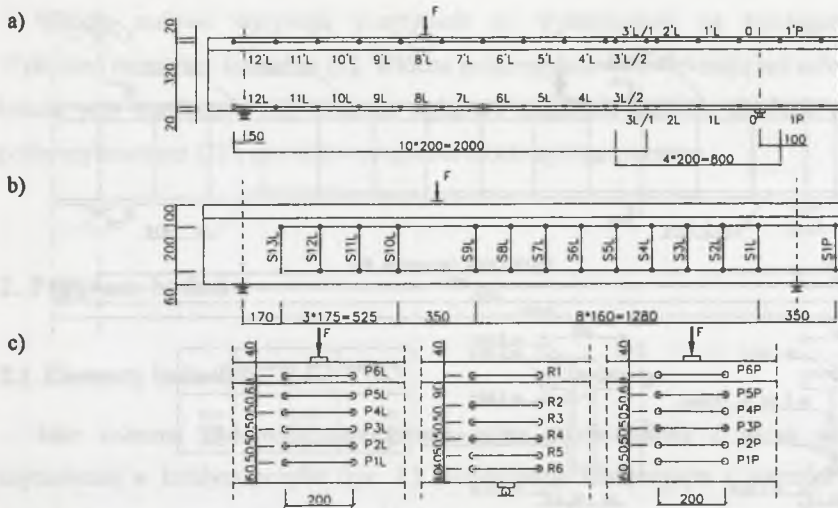
Fig. 2. Reinforcement of the beam

Zbadano 3 belki. Wszystkie wykonano z betonu o projektowanej wytrzymałości $f_{c,cube} = 30$ MPa, przy czym w jednej (30/2,5/1 s) zastosowano beton ze zbrojeniem rozproszonym (włókna stalowe karbowane o długości 50 mm i średnicy 1,0 mm w ilości 30 kg/m^3), a w drugiej (30/2,5/1s+p) dodatkowo z włóknami polipropylenowymi o długości 12 mm 3 dtex w ilości 4 kg/m^3 .

2.2. Sposób pomiaru

Belki obciążono w sposób doraźny za pomocą siłowników hydraulicznych o zakresie do 400 kN każdy, podłączonych do tego samego układu hydraulicznego. Obciążenie realizowano skokowo aż do zniszczenia. Przy każdym poziomie obciążenia mierzono przemieszczenia geometrycznej osi belki (czujniki indukcyjne), reakcje pionowe na podporach skrajnych (siłomierze tensometryczne) oraz odkształcenia na powierzchni betonu, układ i szerokość rozwarcia rys.

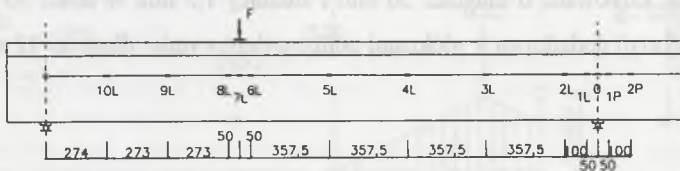
Rozmieszczenie baz do pomiaru odkształceń na powierzchni betonu pokazano na rys. 3. Pomiar tych odkształceń realizowano mechanicznymi tensometrami nasadowymi firmy Mayes & Son o bazie 200 mm i rozdzielczości $1,0 \times 10^{-5}$ oraz $0,8 \times 10^{-5}$.



Rys. 3. Rozmieszczenie baz pomiarowych na powierzchni betonu: a) wzdłuż osi X, b) wzdłuż osi Y, c) w strefach sił skupionych

Fig. 3. Test setup on the surface of concrete: a) along axis X, b) along axis Y, c) in the acting forces region

Rozmieszczenie czujników indukcyjnych do pomiaru linii ugięcia przedstawiono na rys 4.



Rys. 4. Rozmieszczenie czujników indukcyjnych do pomiaru ugięcia

Fig. 4. Test setup of LVDT transducers

Przy każdym poziomie obciążenia dokonywano inwentaryzacji rys i mierzono ich szerokość rozwarcia w poziomie zbrojenia rozciąganego, a dla rys ukośnych w połowie wysokości belki.

3. Analiza wyników badań

W tablicy 1 podano uzyskane wytrzymałości betonu, obliczeniowe momenty przekrojowe oraz obliczeniową i doświadczalną siłę niszczącą. Momenty przekrojowe obliczono według [4], przyjmując maksymalne odkształcenia w skrajnym włóknie strefy ściskanej równe 3,5‰.

Tablica 1

Charakterystyczne wartości obliczeniowe i doświadczalne

Belka	Cechy kompozytu, MPa				Momenty obliczeniowe		Nośności	
	$f_{c,cube}$	f_c	f_{ct}	E_c	M_{spa} , kNm	M_{sup} , kNm	$F_{u,cal}$, kN	$F_{u,exp}$, kN
30/2,5/0	31,5	31,7	2,4	25400	122,0	111,2	286	198
30/2,5/1s	33,2	34,0	2,8	26400	122,3	111,4	287	248
30/2,5/1s+p	26,0	24,7	2,7	22500	120,7	110,9	284	258

Do analizy odkształceń w prętach zbrojenia podłużnego przyjęto odkształcenia pomierzone na powierzchni betonu na bazach od 12L do 4L, i od 4P do 12P odpowiadające momentowi dodatniemu, oraz od 3L do 3P odpowiadające momentowi ujemnemu. Do analizy przyjęto uśrednione wartości pomierzone na tych odcinkach. Uśrednienie tych odkształceń wymagało w konsekwencji uśrednienia pola momentów. Wartości pomierzonych reakcji na podporach skrajnych były bardzo zbliżone, co pozwoliło na porównanie uśrednionych wartości pomierzonych z lewej i prawej strony belek.

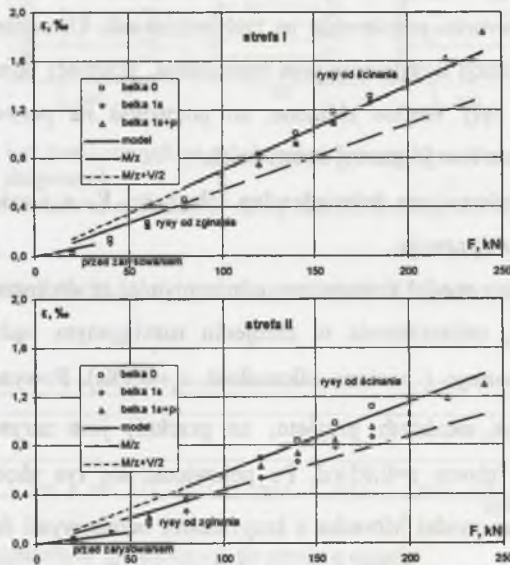
Na rysunku 5 przedstawiono doświadczalne zależności $F - \varepsilon$ i zależności wynikające z założonego modelu teoretycznego.

Przyjęto uproszczony model teoretyczny, a mianowicie, że do momentu zarysowania ze względu na zginanie, odkształcenia w zbrojeniu rozciągającym będą określone jak dla przekroju nie zarysowanego (poziom odkształceń $\varepsilon_s = 0,1\%$). Powyżej tego poziomu, ale przed powstaniem rys ukośnych przyjęto, że przekrój jest zarysowany, a ramię sił wewnętrznych będzie równe $z = 0,85 \times d$. Po pojawieniu się rys ukośnych ($\tau_{rys} = 1,3 \text{ MPa}$) założono kratownicowy model Mörscha z krzyżulcami betonowymi ściskanymi pod kątem 45° i strzemionami pionowymi. Wartość τ_{rys} jednakową dla wszystkich belek przyjęto na podstawie [5].

We wszystkich belkach zaobserwowano jednakowy przebieg odkształcenia. W początkowym etapie obciążenia, do momentu zarysowania, przyrost odkształceń był niewielki. Kolejne obciążenia – po pojawieniu się rys od zginania i później rys ukośnych – spowodowały nieliniowy przyrost odkształceń w zbrojeniu. Przy obciążeniach niszczących zniszczenie nastąpiło wskutek ścinania, średnie odkształcenia w zbrojeniu nie przekroczyły odkształceń odpowiadających granicy plastyczności.

Przyjęty prosty model teoretyczny jest zgodny z wynikami badań, choć oczywiście w badaniach nie obserwujemy skokowych zmian odkształceń spowodowanych zarysowaniem. Zarysowanie jest bowiem procesem ciągłym. Zbrojenie rozproszone ma niewielki wpływ na odkształcenia w zbrojeniu rozciągającym w strefie momentu dodatniego. Wpływ ten daje się

zaobserwować jedynie w niewielkim zakresie obciążeń, bezpośrednio po zarysowaniu ukośnym, do około $0,5F_{u,cal}$. Wpływ zbrojenia rozproszonego na ε_s jest zdecydowanie większy w strefie momentu ujemnego. Także i w tym wypadku zbrojenie rozproszone wpływa na zmniejszenie odkształceń w poziomie zbrojenia rozciąganego dopiero po zarysowaniu ukośnym, przy czym korzystny wpływ obserwujemy aż do zniszczenia belek. Jest to efekt trzykrotnie większej szerokości strefy rozciąganej niż w strefie momentu dodatniego, a tym samym proporcjonalnie większym udziałem zbrojenia rozproszonego w przenoszeniu sił rozciągających.



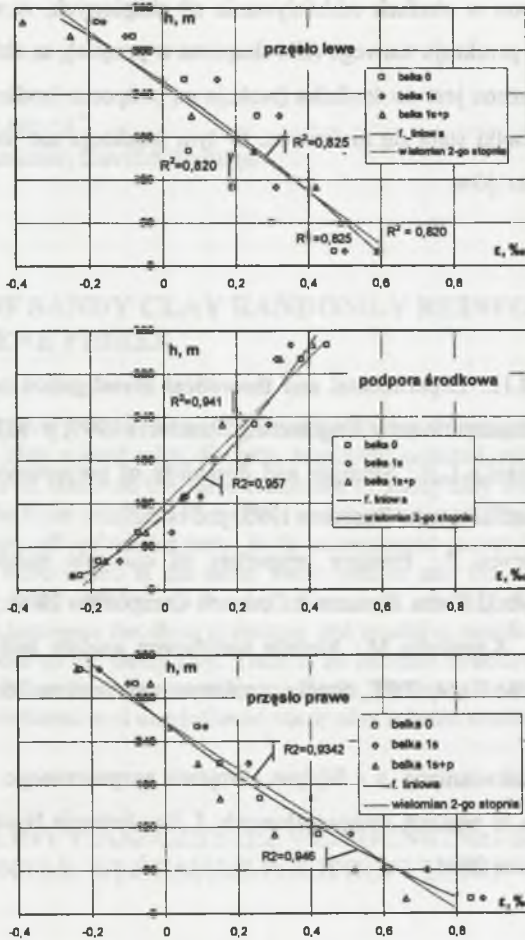
Rys. 5. Zależność $F - \varepsilon$

Fig. 5. Force-strain relationship

Na rysunku 6 przedstawiono odkształcenia betonu w strefach oddziaływania sił skupionych w przęśle (porównaj rys. 3c).

Odształcenia naniesiono dla obciążenia $F=60$ kN. Przy wyższych poziomach obciążenia wystąpiła ingerencja rys ukośnych w strefę pomiarową, co uniemożliwiło interpretację wyników badań.

Do analizy rozkładu odkształceń na wysokości belki przyjęto funkcję liniową i wielomian drugiego stopnia. Rozkład odkształceń w strefie oddziaływania sił skupionych w przęśle można uznać za liniowy, o czym świadczą wskaźniki korelacji. Nad podporą środkową uzyskano trochę lepszą korelację dla funkcji kwadratowej.



Rys. 6. Zależność $\epsilon - h$
 Fig. 6. Strain-height of beam relationship

4. Wnioski

Przedstawiony model obliczeniowy może być przydatny do oceny odkształceń prętów zbrojenia podłużnego. Zgodnie z oczekiwaniami wpływ siły poprzecznej na odkształcenia w zbrojeniu staje się zauważalny dopiero po zarysowaniu ukośnym. Zbrojenie rozproszone wpływa na odkształcenia podłużne. W belce o przekroju teowym wpływ ten jest niewielki w strefie momentu dodatniego, większy w strefie momentu ujemnego. Wynika to z większej szerokości strefy rozciąganej.

Odształcenia betonu w strefach oddziaływania sił skupionych, w wypadku obciążenia przyłożonego do półki przekroju teowego (siła skupiona w przęśle), są zbliżone do liniowych. Gdy obciążenie przyłożone jest do środka (reakcja na podporze środkowej), odształcenia betonu na wysokości belki stają się nieliniowe. W tym przekroju nie jest zatem zachowana hipoteza płaskich przekrojów.

LITERATURA

1. Lim D.H., Oh B.H.: Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams. *Engineering Structures* 1999, p. 937 – 944.
2. Allan M.L., Kukacka L.E.: Strength and durability of polypropylene fibre reinforced grouts. *Cement and Concrete Research* 1995, p. 511-521.
3. Qian Ch., Stroeven P.: Fracture properties of concrete reinforced with steel – polypropylene hybrid fibres. *Cement & Concrete Composites* 2000, p. 343 – 351.
4. Czkwianiec A., Kamińska M.: Metoda nieliniowej analizy żelbetowych elementów prętowych. KILiW PAN, IPPT, *Studia z zakresu inżynierii* nr 36, Warszawa 1993, s. 117.
5. Domański T., Czkwianiec A.: Wpływ zbrojenia rozproszonego na odształcenia w strefach ścinania w belkach dwuprzęsłowych. L Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2004.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko