ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z. 104 Nr kol. 1695

Jacek SOKOŁOWSKI*
Politechnika Gdańska

ELEMENTY CZĘŚCIOWO SPRĘŻONE CIĘGNAMI BEZ PRZYCZEPNOŚCI

Streszczenie. Artykuł dotyczy badań belek częściowo sprężonych. Zaprezentowano program badań – geometrię elementów, sposób obciążenia, materiały, parametry zmienne. Przedstawiono wstępne wyniki badań elementów sprężanych cięgnami bez przyczepności.

PARTIALLY PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WITH UNBANDED STRANDS

Summary. This article relate the tests of partially prestressed concrete beams. There is presented the research programme - geometry of elements, method of loading, the materials and variables. There have been shown preliminary test results of prestressed concrete elements with unbanded strands, and compared to the test results of R.C. beam.

1. Wprowadzenie

Konstrukcje częściowo sprężone są to elementy, w których dopuszcza się pod działaniem krótkotrwałej kombinacji obciążeń powstanie rys o dopuszczalnym rozwarciu $w_{lim} = 0,2$ mm. Występuje w nich, oprócz zbrojenia sprężającego (aktywnego), dodatkowo zbrojenie zwykłe (pasywne). Elementy sprężane cięgnami bez przyczepności nie wymagają iniekcji kanałów, w których umieszczone jest zbrojenie sprężające, przez co zmniejsza się pracochłonność ich wykonania.

Częściowe sprężanie stosujemy w tych elementach betonowych, w których część obciążenia stałego i obciążenia zmienne zostają wprowadzone po montażu konstrukcji. W takich przypadkach większa część ciężaru własnego przychodzi wraz z postępującą budową. Dopuszczenie elementów częściowo sprężonych w stanie użytkowym pozwala uniknąć

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Godycki-Ćwirko

niedogodności sprężania etapowego. Dopuszczenie powstania rys w przejściowych warunkach obciążenia prowadzi do znacznej oszczędności stali sprężającej.

Początkowy etap pracy poświecony został zapoznaniu się z elementami sprężonymi cięgnami bez przyczepności.

2. Omówienie problemu

Zagadnienie ścinania w elementach częściowo sprężonych nie zostało do końca wyjaśnione. Brak jednoznacznych sposobów projektowania strefy przypodporowej można zauważyć chociażby na przykładzie zmieniającego się podejścia do tego tematu w ujęciu normowym. Ten stan rzeczy wynika z mnogości czynników wpływających na stan wytężenia strefy przypodporowej, zwłaszcza po zarysowaniu. Badania przeprowadzane w różnych krajach i ośrodkach badawczych różnią się od siebie parametrami wyjściowymi, toteż nie są one najczęściej ze sobą porównywalne, co z kolei prowadzi do różnych wniosków.

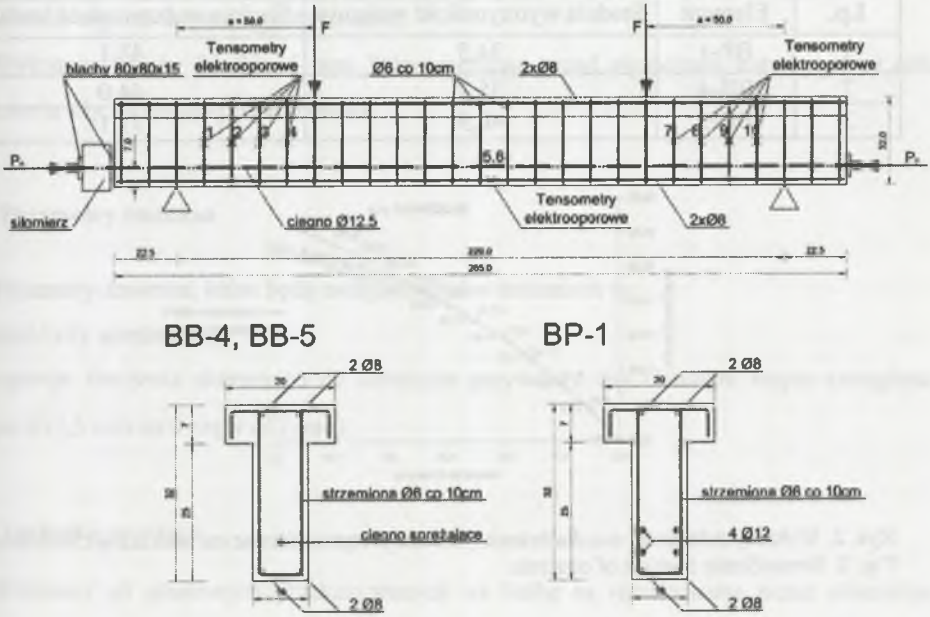
Na konferencji w Krynicy w 2003 r. Godycki-Ćwirko T. i Wesołowski M. [7] przedstawili duże różnice w przyjmowaniu minimalnego zbrojenia poprzecznego w zależności od współczynnika skali k dla wybranych norm europejskich i amerykańskich. Stopień zbrojenia podłużnego na tak zwaną nośność ścinania w znacznej mierze naświetlony został w badaniach Kani [9]. W wypadku elementów częściowo sprężonych problem ścinania nie został dotychczas należycie rozpoznany. Zróżnicowane parametry, takie jak cechy materiałowe, smukłość ścinania, efekt skali, sposób ukształtowania prętów zbrojenia podłużnego, przyczepność stali do betonu i wiele innych zmiennych różnie eksponowanych w badaniach utrudniają konfrontację wyników i weryfikację modeli obliczeniowych stosowanych w praktyce projektowej.

Wyczerpanie nośności na ścinanie określane jest przez wielu badaczy niszczącym momentem ścinania M_{ns} [3], [5]. Prawidłowe rozpoznanie rodzaju zniszczenia pozwala na sformułowanie równań równowagi przekroju i wyznaczenie tego momentu. Elementy częściowo sprężone mogą być ciekawym obiektem do szeroko zakrojonych studiów teoretycznych, lecz ich zakres przydatny do praktycznego wykorzystania wymaga przed wdrożeniem weryfikacji eksperymentalnej.

3. Program badań

3.1. Geometria badanych elementów belkowych oraz schemat obciążenia

Przyjęto przekrój teowy o wysokości h = 320 mm, b = 200 mm, b_w = 100 mm.



Rys. 1. Geometria, zbrojenie i obciążenie badanych belek sprężonych
Fig. 1. Geometry, reinforcement and load tested beams

3.2. Materiały

Wykonane belki zaprojektowano na średnią wytrzymałość kostkową 15x15x15 cm na ściskanie f_{cm} = 45 MPa. Przygotowano recepturę, kruszywo i cement do wykonania elementów. Skład wagowy poszczególnych składników na 1m^3 betonu wynosi:

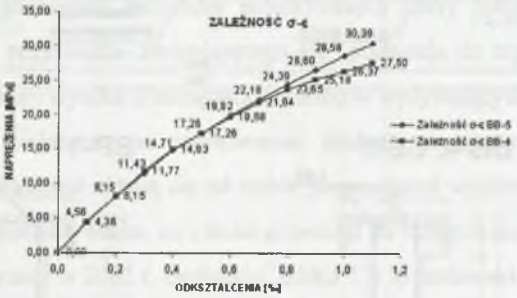
- cement portlandzki 450 kg,
- piasek o uziarnieniu 0/2 790 kg,
- kruszywo granitowe 2/8 1010 kg,
- superplastyfikator FK44 6,75 kg.

Dla każdego elementu wykonano po 4 próbki walcowe ϕ150x300 mm. Jedna próbka służyła do określenia zależności σ-ε dla betonu, pozostałe 3 służyły do określenia średniej walcowej wytrzymałości betonu.

Tablica 1

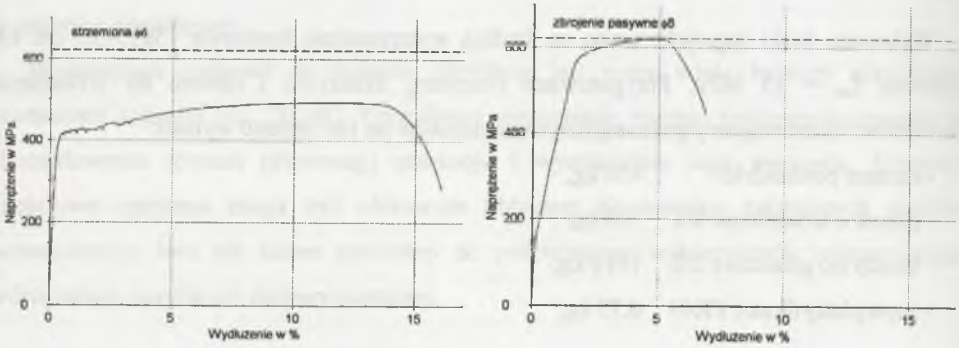
Średnie wytrzymałości betonu f_{cm} [MPa]

Lp.	Element	Średnia wytrzymałość walcowa	Średnia wytrzymałość kostkowa
1	BP-1	34,5	43,1
2	BB-4	35,2	44,0
3	BB-5	40,9	51,1



Rys. 2. Wykresy zależności σ-ε dla betonu (badania przeprowadzone na walcach ϕ150x300 mm)
Fig. 2. Stress-Strain relation of concrete.

W badaniach jako zbrojenie pasywne ściskane i rozciągane przyjęto po dwa pręty ϕ8 mm ze stali o charakterystyce σ–ε przedstawionej na rys.3. Strzemiona stanowią pręty ϕ6 mm rozłożone na całej długości belek co 10 cm. Granica plastyczności i moduł sprężystości dla poszczególnych rodzajów prętów określony został po badaniach wytrzymałościowych stali.



Rys. 3. Wykresy zależności σ_s - ε_s dla strzemion i stali zbrojenia pasywnego
Fig. 3. Stress-Strain relation of stirrups and passive reinforcement

Zbrojenie sprężające elementów BB-4, BB-5 stanowił splot siedmiodrutowy ϕ12,5 mm Y1860S7 o średniej wytrzymałości na zrywanie f_p = 1860 MPa, oraz charakterystycznej sile zrywającej F_{pk} = 173 kN wg PN-B-03264 grudzień 2002. Badania eksperymentalne wykazały ze średnia wytrzymałość na zrywanie badanych cięgien wynosi 182 kN.

W belce porównawczej BP-1 splot został zastąpiony czterema prętami ϕ12 mm ze stali A-III 34GS wg PN-B-03264 grudzień 2002.

Wykonano blachy 80x80x15 mm, które założono przed elementem kotwiącym w celu rozłożenia siły sprężającej o czoło belki.

3.3. Parametry zmienne

Parametry zmienne, które będą uwzględniane w badaniach to:

- wartość siły sprężającej,
- proporcje zbrojenia aktywnego do zbrojenia pasywnego (na obecnym etapie zastąpiono cięgno ϕ12,5 mm na 4 pręty ϕ12 mm).

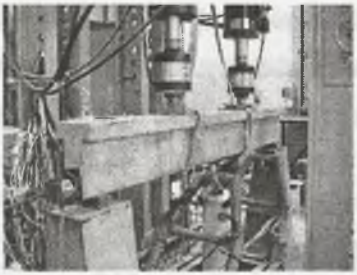
3.4. Technika pomiaru

Wielkości sił pionowych przekazywanych na belkę są rejestrowane przez siłomierze elektrooporowe wbudowane w siłowniki hydrauliczne firmy INSTRON. Obciążenie w początkowym okresie badania zadawane jest przez regulację siły w tłokach, po przekroczeniu ¾ spodziewanej siły niszczącej regulowane jest przemieszczenie tłoków. Siła sprężająca pierwotna odczytywana jest z siłomierza elektrooporowego o zakresie pomiarowym do 200 kN, umieszczonego pomiędzy elementem kotwiącym a prasą naciągową. W elementach sprężanych siłomierz umieszczony jest pomiędzy czołem belki a zakotwieniem, co umożliwiało ciągłą kontrolę siły sprężającej oraz dokładny pomiar strat sprężania w zakotwieniu.

Podczas badań mierzone są następujące wielkości:

- odkształcenia stali zbrojenia pasywnego przy użyciu tensometrii elektrooporowej,
- odkształcenia na powierzchni betonowej przy wykorzystaniu tensometrii mechanicznej - ekstensometr o bazie pomiarowej 100 mm,
- ugięcia belki.

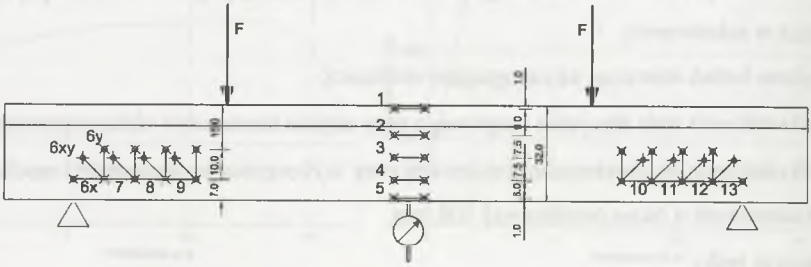
W trakcie badań wykonywany jest szkic zarysowania.



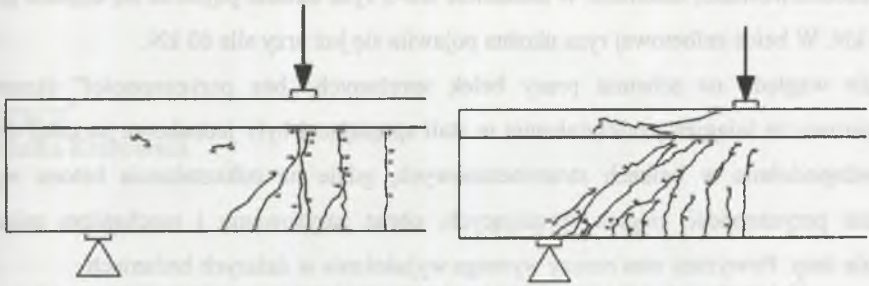
Rys. 4. Widok belki na stanowisku badawczym
Fig. 4. The view of beam on test stand

4. Wyniki badań wstępnych

Zbadano dwie belki BB-4, BB-5 sprężone „bez przyczepności" cięgnem ϕ12,5 mm oraz jedną belkę BP-1 zbrojoną 4 prętami ϕ12 mm, których środek ciężkości znajdował się na wysokości cięgna sprężającego występującego w poprzednich elementach. Tensometry elektrooporowe naklejone zostały (zgodnie z rys.1) za pomocą dwuskładnikowego kleju X60 na zeszlifowaną i odtłuszczoną powierzchnię. Przy użyciu tego samego kleju zabezpieczano tensometry przed uszkodzeniami mechanicznymi. W każdym z tensometrów po podłączeniu przewodów oraz po zabezpieczeniu sprawdzano oporność oraz jego izolację. Bazy ekstensometru mechanicznego rozmieszczone zostały zgodnie z rys. 5. Czujnik do pomiaru ugięć umieszczony został w środku przęsła belki opartej na przegubach, umożliwiających swobodę przemieszczeń poziomych. Siły obciążające przyłożone zostały w odległości 50 cm od podpór. Sterowanie siłownikami hydraulicznymi przeprowadzane było poprzez zadawanie poszczególnych stopni obciążenia co 10 kN.



Rys. 5. Bazy pomiarowe na betonie belek do badań ekstensometrycznych
Fig. 5. Measuring bases



Rys. 6. Propagacja rys (BB-5, BP-1)
Fig. 6. Cracks pattern (BB-5, BP-1)

W trakcie badania rejestrowany był obraz zarysowania.

Siły sprężające, rysujące i niszczące przedstawiono w tablicy 1. Zerwanie prętów zbrojenia pasywnego przyjęto jako zniszczenie i badanie zakończono. Belki sprężane bez przyczepności niszczyły się przez zginanie, następowało zerwanie zbrojenia pasywnego. Element BP-1 zniszczył się poprzez zarysowanie strefy przypodporowej.

Tablica 2

Zestawienie sił sprężających, rysujących i niszczących [kN]

Lp.	Element	Siła naciągu P_n	Siła sprężająca po zakotwieniu $P_{n,0}$	Siła rysująca F_{crac}	Siła niszcząca F_u	Zniszczenie przez
1	BP-1	-	-	30	145	Ścinanie
2	BB-4	167	146	85	125	Zginanie
3	BB-5	166	149	90	145	Zginanie

5. Uwagi końcowe

Badania przeprowadzone na dwóch opisanych tu belkach sprężonych i jednej niesprężonej (przy założonej stałej smukłości ścinania $\eta = a/d = 2{,}0$) umożliwiały śledzenie wytężenia i odkształceń stali cięgna sprężającego oraz też zbrojenia pasywnego.

Morfologię rys w wypadku elementów sprężonych „bez przyczepności" można było obserwować głównie w aspekcie naprężeń normalnych σ_x. Zgodnie z oczekiwaniami elementy sprężone wykazały znacznie większą odporność na zarysowanie oraz samo pojawienie się rysy ukośnej niż w wypadku belki żelbetowej. W elemencie BB-4 rysy ukośnej

nie zaobserwowano, natomiast w elemencie BB-5 rysa ukośna pojawiła się dopiero przy sile 120 kN. W belce żelbetowej rysa ukośna pojawiła się już przy sile 60 kN.

Ze względu na schemat pracy belek sprężanych „bez przyczepności" (konstrukcja rozporowa ze ściągiem) odkształcenia w stali sprężającej były jednakowe na całej długości. Prawdopodobnie w belkach strunobetonowych, gdzie na odkształcenia betonu wpływać będzie przyczepność cięgien sprężających, obraz zarysowania i mechanizm zniszczenia będzie inny. Powyższy stan rzeczy wymaga wyjaśnienia w dalszych badaniach.

LITERATURA

1. Ajdukiewicz A., Mames J.: Konstrukcje z betonu sprężonego, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2004.
2. Czkwianianc A., Kamińska M.: Analiza wytężenia zginanych elementów żelbetowych i częściowo sprężonych, Archiwum Inżynierii Lądowej, tom XXXV Z.1/1989.
3. Diab Mohamed Amed: Shear strength of partially prestressed reinforced concrete beams, Technical University of Łódź, 1986.
4. Dyduch K.: Reologiczne straty sprężania i zarysowanie elementów zbrojonych częściowo sprężonych, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków 1976.
5. Godycki-Ćwirko T.: Stan wytężenia strefy ścinania żelbetowych belek częściowo sprężonych w świetle hipotezy Mohra, XXXI Konferencja Naukowa „Krynica 88".
6. Godycki-Ćwirko T.: Morfologia rys w konstrukcjach z betonu, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1992.
7. Godycki-Ćwirko T., Wesolowski M.: O minimalnym zbrojeniu poprzecznym elementów żelbetowych, XLIX Konferencja Naukowa „Krynica 2003", Warszawa-Krynica, wrzesień 2003, t. III, s. 33-40.
8. Godycki-Ćwirko T., Wesolowski M.: Maksymalny stopień zbrojenia poprzecznego elementów żelbetowych wg zasad wymiarowania przyjętych w EC:2002, DIN:2001, PN:2002, L Konferencja Naukowa „Krynica 2004", Warszawa-Krynica, wrzesień 2003, t. III, s. 35-42.
9. Kani G. N. J.: The Riddle of Shear Faiulere and Its solution. ACI Journ. 4/1964.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Dyduch