

Sylwester LEWANDOWSKI*
Politechnika Łódzka

ODKSZTAŁCALNOŚĆ BETONÓW WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI W ŻELBETOWYCH ELEMENTACH ZGINANYCH

Streszczenie. Praca dotyczy problemu różnej odkształcalności betonu wysokiej wytrzymałości (BWW), w osiowo ściskanych próbkach i w zbrojonych elementach zginanych. Rozważono wpływ prędkości przykładania obciążenia i efekt skali. Przytoczono wyniki już wykonanych badań doświadczalnych, określono zakres dalszych badań.

DUCTILITY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE OF RC BEAMS

Summary. This work concerns a problem of different high-strength concrete (HSC) deformability in axially compressed samples and in bending of reinforced beams. The influence of the load application speed and of the effect of scale was considered. The results of previously performed analysis of experimental research were also quoted.

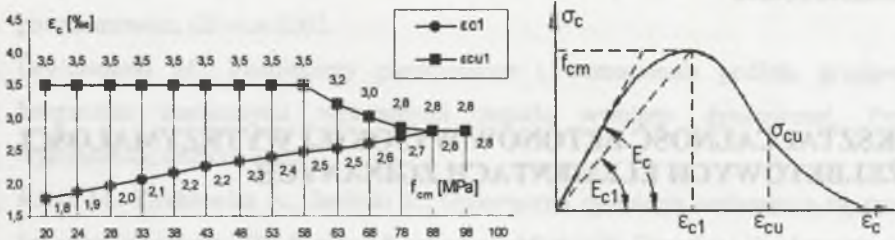
1. Wprowadzenie

Wyniki badań próbek kostkowych i walcowych wykonanych z betonu wysokiej wytrzymałości (BWW), tj. betonu o wytrzymałości na ściskanie $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$, wskazują, że jest to materiał kruchy. Próbki niszczą się w sposób gwałtowny, wręcz eksplozywny, najczęściej nie rejestruje się opadającej części krzywej wykresu $\sigma_c - \varepsilon_c$. Ta kruchość może powodować małą graniczną odkształcalność betonu ściskanego i małe graniczne krzywizny przekroju, co może budzić obawy projektantów o zachowanie się elementów konstrukcyjnych wykonanych z BWW w stanie granicznym nośności. Mniejsze krzywizny graniczne oznaczają bowiem zmniejszenie możliwości redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcji, niekorzystne z punktu widzenia jej bezpieczeństwa.

Według Eurocode 2 [1] odkształcenia ε_{cl} i odkształcenia graniczne ε_{cu1} przyjmowane przy analizie konstrukcji wyraźnie zależą od wytrzymałości betonu (rys. 1). Według [1] im wyższa

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Maria E. Kamińska

wytrzymałość betonu na ściskanie, tym odkształcenia graniczne betonu są mniejsze, a przy najwyższych klasach betonu są one nawet sobie równe, co oznacza brak opadającej części wykresu.



Rys. 1. Charakterystyka naprężeń i odkształceń betonu [1]

Fig. 1. Stress and deformation characteristics for concrete [1]

Badania elementów konstrukcyjnych wykonanych z BWW, opisywane w literaturze [2,3,4], a także wykonanych w Laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego PŁ [5], dostarczają jednak odmiennych danych na temat odkształcalności betonu wysokiej wytrzymałości w elementach. Wykazują bowiem, iż odkształcalność betonu wysokiej wytrzymałości w strefie ściskanej jest nawet do trzech razy większa niż odkształcalność próbek, a graniczne krzywizny przekroju są również bardzo duże.

Przyczyny tych rozbieżności między odkształcalnością próbek a elementów wykonanych z BWW będą tematem poniższego artykułu. Przyjęto, że powodem takiego zachowania może być: czas przykładania obciążenia (prędkość obciążenia), efekt skali, kształt wykresu odkształcenia.

2. Wpływ prędkości obciążania

Próbki badane na ściskanie, zgodnie z normą PN-EN [6], obciąża się z prędkością przyrostu naprężenia 0,1 MPa/s. Oznacza to, że całe badanie próbki BWW trwa kilkanaście minut. Badanie belki na ogół trwa kilka godzin, gdyż z reguły obserwuje się rozwój rys i mierzy ich szerokość, co przedłuża badanie. Można zatem przypuszczać, że właśnie taka wyraźna różnica w prędkości obciążania jest powodem różnic w odkształcalności próbek i elementów.

Rozważanie tego wpływu potraktowano dwuetapowo - w odniesieniu do próbek i do zginanych belek. Zbadano zatem próbki betonu obciążane z trzema wyraźnie różniącymi się

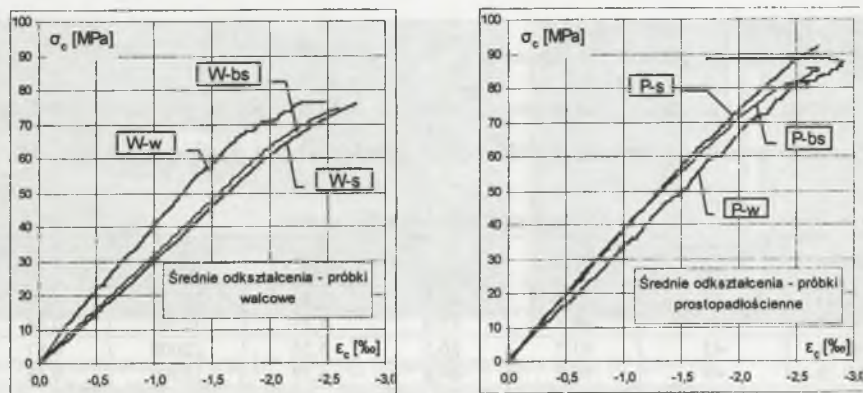
prędkościami obciążenia oraz belki obciążane bardzo szybko, bo obciążenie zaplanowano na około 10 minut. Belki były odpowiednikiem elementów wcześniej zbadanych w Laboratorium Katedry [5].

Zastosowano beton o składzie podanym w tabelicy 1. Po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych beton uzyskał średnią wytrzymałość $f_{c.cube}=93\text{MPa}$.

Skład mieszanki betonowej			Tablica 1
cement portlandzki 32,5	480 kg/m^3	żwir 8/16 z kopalni Mietków	366 kg/m^3
woda	145 kg/m^3	superplastyfikator FM 34	10 kg/m^3
piasek z kopalni Rydwan	682 kg/m^3	krzemionka (7% masy cementu)	34 kg/m^3
żwir 2/8 z kopalni Mietków	692 kg/m^3	w / (c + krzemionka)	0,28

Badaniom poddano próbki walcowe $\phi 150/300$ mm – (W) i próbki prostopadłościenne $105 \times 200 \times 200$ mm – (P). Obciążano je w prasie FORM-TEST o zakresie 4000 kN, stosując trzy różne prędkości obciążania: „bardzo szybko”(bs) – 10kN/s, czas badania od 2,2 do 3 minut, „szybko”(s) – 2,5kN/s, czas badania od 10 do 13 minut, „wolno”(w) – 1,0kN/s, (z zatrzymywaniem przyrostu siły), czas trwania obciążania ok. 6h.

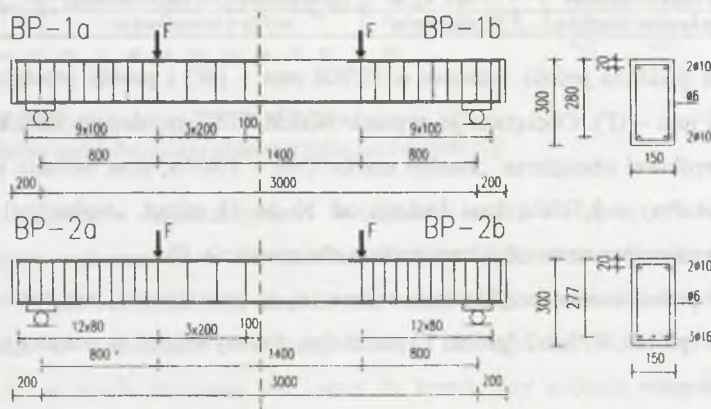
Na rys. 2 przedstawiono przykładowe wykresy $\sigma_c - \epsilon_c$, przy czym ϵ_c jest wartością średnią określaną z 3 (próbki W) lub 2 (próbki P) pomiarów, dokonywanych za pomocą tensometrów elektrooporowych.



Rys. 2. Odształcenia próbek obciążanych z różną prędkością
Fig. 2. Specimens strain for different load increment

Jak można zauważyć, prędkość obciążania w pomijalnym stopniu wpływa na maksymalne odkształcenia, wynoszą one około 2,7%. Trzeba wyjaśnić, że różne wytrzymałości, widoczne na rys. 2, są przypadkowe, gdyż poszczególne próbki były obciążane po różnym czasie dojrzewania.

Przedmiotem kolejnego badania były cztery belki o przekroju prostokątnym 150x300 mm i rozpiętości w osiach podpór 3000 mm (rys. 3). Przyjęto dwa stopnie podłużnego zbrojenia rozciąganego $\rho=0,0038$ i $\rho=0,0146$. W belkach oznaczonych literą „a” podłużne zbrojenie ściskane jest stałe ($2\varnothing 10$ mm ze stali klasy A-III), litera „b” w symbolu belki oznacza, że na odcinku czystego zginania ściskana strefa przekroju nie jest zbrojona. Zbrojenie podłużne belek zostało wykonane ze stali żebrowanej 34GS o nominalnej średnicy 10 i 16 mm, a strzemiona ze stali żebrowanej $\varnothing 6$ mm.



Rys. 3. Przekrój i wymiary belek

Fig. 3. Beams cross-section and dimensions

Zastosowano mieszankę betonową o składzie takim jak w próbkach (tablica 1). Wytrzymałościowe cechy betonu, określane w dniu badania belki, zestawiono w tablicy 2.

Wytrzymałościowe cechy betonu

Tablica 2

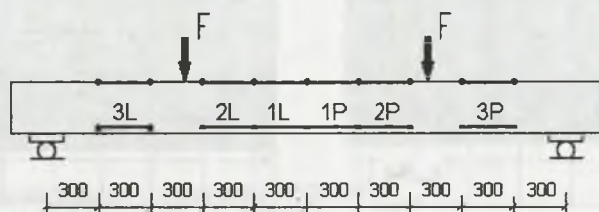
Belka	Wiek betonu [dni]	$f_{c,cube}$ [MPa]	f_c [MPa]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	E_c [MPa]	$f_c/f_{c,cube}$
BP-1a	35	98,6	85,4	5,80	33100	0,86
BP-1b	35	96,4	81,0	5,33	32500	0,84
BP-2a	43	91,7	80,5	5,56	32000	0,87
BP-2b	49	95,8	84,8	5,57	33100	0,88

Belki były obciążane za pomocą jednego obciążnika o nośności 400 kN, klasy 1.0 i stalowego trawersu. Siły były przykładane według wskazań urządzenia zasilającego obciążnik i kontrolowane za pomocą czujnika ciśnieniowego umieszczonego w układzie hydraulicznym urządzenia.

Pomiary były dokonywane za pomocą przetworników przemieszczeń liniowych, których wskazania rejestrowano i przetwarzano komputerowo wraz z zapisem ciśnienia w układzie

hydraulicznym. Odczyty były wykonywane co 1 sekundę aż do zniszczenia lub przerwania obciążenia.

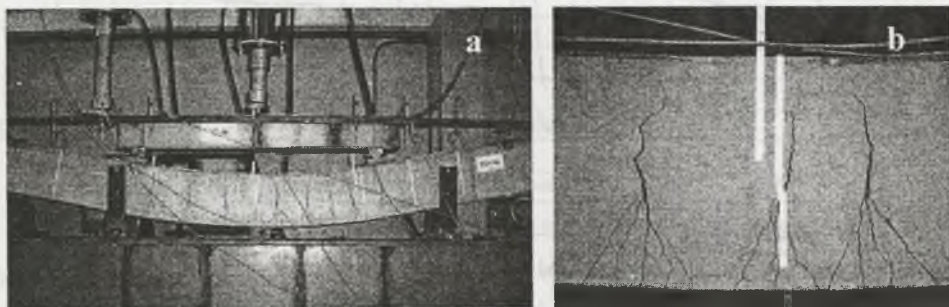
W toku obciążania rejestrowano przemieszczenia osi belki i odkształcenia betonu na jej powierzchni. Te drugie mierzone były w dwóch poziomach: na górnej krawędzi belki i w odległości 30 mm od jej dolnej krawędzi (rys. 4). Przyjęto długość baz pomiarowych 300 mm. W strefie ściskanej zastosowano przetworniki PSx10 (zakres $\pm 5\text{mm}$), a w strefie rozciąganej PSx20 (zakres $\pm 10\text{mm}$).



Rys. 4. Rozmieszczenie baz do pomiaru odkształceń

Fig. 4. Location of the bases for strains measurements

Bazy były wyznaczone przez stalowe bolce i osadzone na nich aluminiowe listwy z przetwornikami. Listwy mają możliwość swobodnego obrotu na jednym z bolców i obrotu z przesuwem na drugim.



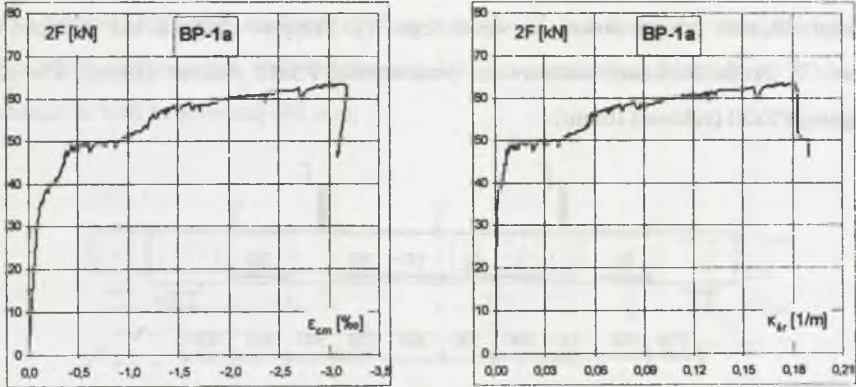
Rys. 5. Przemieszczenia belki BP-1b – (a), obraz zarysowania belki BP-1b – (b)

Fig. 5. Deformations of BP-1b beam – (a), crack pattern of BP-1b beam – (b)

Odształcenia poszczególnych baz otrzymano dzieląc zmiany ich długości przez długość początkową, tj. 300 mm i na podstawie odkształceń obliczono średnią krzywiznę na odcinku czystego zginania.

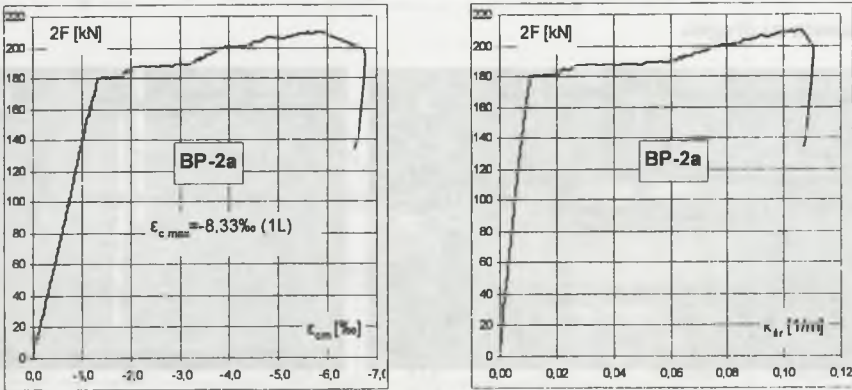
Belki BP-1 o niższym stopniu zbrojenia nie uległy zniszczeniu materiałowemu. Przy bardzo dużych przemieszczeniach, rzędu 200 mm w środku rozpiętości (rys. 5), obciążanie przerywano ze względu na możliwości stanowiska badawczego.

W obu belkach BP-1 zarejestrowano bardzo duże krzywizny przy odkształceniach w strefie ściskanej rzędu 3,1‰ (rys. 6.). Na wykresach widoczny jest przyrost nośności spowodowany wzmocnieniem zbrojenia rozciąganego przy dużych odkształceniach.



Rys. 6. Średnia krzywizna i średnie odkształcenia skrajnego włókna strefy ściskanej na odcinku czystego zginania belki BP-1a

Fig. 6. Mean curvature and mean strains of extreme compressive fibre in the pure bending region BP-1a beam

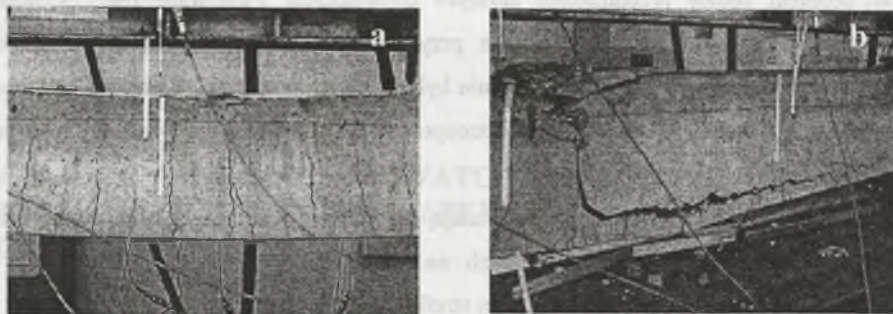


Rys. 7. Średnia krzywizna i średnie odkształcenia skrajnego włókna strefy ściskanej na odcinku czystego zginania belki BP-2a

Fig. 7. Mean curvature and mean strains of extreme compressive fibre in the pure bending region BP-2a beam

Belki BP-2, o wyższym stopniu zbrojenia, zniszczyły się zgodnie z oczekiwaniami przez zmiężdżenia betonu w strefie ściskanej. Na rys. 7 przedstawiono wykresy średniej krzywizny i średnich odkształceń skrajnego włókna strefy ściskanej belki BP-2a oraz dodatkowo podano wartość maksymalną odkształcenia w bazie, w obrębie której doszło do zmiężdżenia betonu.

W belce BP-2b zarejestrowano $\varepsilon_{c,max}=3,73\%$, jednak było to zniszczenie przedwczesne w obszarze przyłożenia siły skupionej. Obraz zniszczenia belek BP-2 jest przedstawiony na rys. 8.



Rys. 8. Zniszczenie belki BP-2a (a) i belki BP-2b (b)
Fig. 8. Failure of BP-2a beam (a) and of BP-2b beam (b)

W poprzednich badaniach identycznych, ale wolno obciążanych belek [5] zarejestrowano analogiczne mechanizmy zniszczenia oraz maksymalne odkształcenia skrajnego włókna strefy ściskanej $\varepsilon_{c,max}=6,55\%$ (BP-2a) i $\varepsilon_{c,max}=5,99\%$ (BP-2b). Maksymalne krzywizny belek są także zbliżone w obu rozważanych badaniach.

Można zatem stwierdzić, że prędkość narastania obciążenia nie jest czynnikiem wpływającym na odkształcalność BWW.

3. Efekt skali i wpływ kształtu wykresu odkształcenia

Ten problem rozważono na podstawie wyników badań zaczerpniętych z literatury [7,8,9].

Badania przedstawione w pracy [7] wykazały, że wpływ wymiarów próbek i kierunku ich betonowania na odkształcenia jest pomijalnie mały w odniesieniu do wznoszącej się części krzywej wykresu $\sigma_c-\varepsilon_c$ i bardzo niewielki w odniesieniu do części opadającej.

Autorzy pracy [8] zajmowali się problemem wpływu długości i wysokości belki na wytrzymałość betonu w strefie ściskanej. Wykazali, że te czynniki mają wpływ na wytrzymałość, lecz w niewielkim stopniu na odkształcenia graniczne.

Praca [9] dotyczyła wpływu wymiarów próbek na nośność przy ściskaniu. Rozważano próbki o wymiarach od 50 do 800 mm, o kształcie przekroju: kołowym i kwadratowym. Badania wykazały, że wymiar próbki wpływa na wytrzymałość, ale jest mało istotny w odniesieniu do odkształcalności.

Te badania upoważniają do stwierdzenia, że efekt skali nie może być czynnikiem wyjaśniającym zaobserwowane różnice odkształceń betonu w próbkach i elementach zginanych.

Ten problem będzie przedmiotem dalszych doświadczeń. Planowane jest obciążanie próbek walcowych i prostopadłościennych przy obciążeniu mimośrodowym. Mimośród będzie tak dobrany, aby wykres odkształcenia był zbliżony do trójkąta. Odkształcenia będą mierzone za pomocą tensometrów elektrooporowych, naklejanych wzdłuż bocznych powierzchni próbek.

Wyniki dotychczasowych obserwacji zdają się wskazywać, że właśnie zmienność odkształceń betonu w kolejnych włóknach na wysokości strefy ściskanej decyduje o możliwościach odkształcania się betonu w tej strefie.

LITERATURA

1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings prEN 1992-1-1:2003 (E).
2. Pendyala R., Mendis P., Patnaikuni I.: Full-Range Behavior of High-Strength Concrete Flexural Members: Comparison of Ductility Parameters of High and Normal-Strength Concrete Members. *ACI Structural Journal*, V.93, No.1, January-February 1996, 30-35.
3. Chien-Hung L., Feng-Sheng L.: Ductility of High-Performance Concrete Beams with High-Strength Lateral Reinforcement. *ACI Structural Journal*, V.98, No.4, July-August 2001, 600-608.
4. Bernardo L. F. A., Lopes S. M. R.: Flexural ductility of high-strength concrete beams. *Structural Concrete* V.4, No 3, Sept. 2003, 135-154.
5. Kamińska M. E.: Doświadczalne badania żelbetonowych elementów prętowych z betonu wysokiej wytrzymałości. Zeszyt nr 8, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999.
6. PN-EN 12390-2:2001 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
7. Chin M. S., Mansur M. A., Wee T. H.: Effects of Shape, Size, and Casting Direction of Specimens on Stress-Strain Curves of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, V.94, No.3, May-June 1997, 209-219.
8. Jin-Keun K., Seong-Tae Y., Jang-Ho K.: Effect of Specimen Sizes on Flexural Compressive Strength of Concrete. *ACI Structural Journal*, V.98, No.3, May-June 2001, 416-424.
9. Burtcher S.L., Kollegger J.: Size-effekt experiments on concrete in compression. *Structural Concrete* V.4, No.4, Dec. 2003, 163-173.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Michał Knauff