

mgr inż. Bismellah Naziri¹⁾
 dr inż. Marek Maj¹⁾
 dr hab. inż. Andrzej Ubysz, prof. PWr.^{1)*}

Odształcenia sprężyste i trwałe w żelbetowej belce wspornikowej z betonu o wysokiej wytrzymałości

Elastic and residual strains in high strength concrete in brackets beam

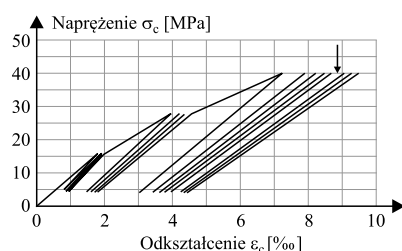
DOI: 10.15199/33.2015.06.28

(Artykuł przeglądowy)

Streszczenie. W belkach żelbetowych z betonu o wysokiej wytrzymałości przy cyklicznych obciążeniach obserwuje się odkształcenia sprężyste i trwałe. Istniejące wyniki badań takich belek w większości dotyczyły stanu naprężeń tylko od momentu zginającego. Badania, które wykonaliśmy, pozwoliły doświadczalnie wyznaczyć sprężystą i trwałą część odkształceń w belce wspornikowej w złożonym stanie naprężeń, tzn. od momentów zginających i sił tnących.
Słowa kluczowe: beton wysokiej wytrzymałości, odkształcenia sprężyste i trwałe, badania.

Abstract. Elastic deformations and permanent deformations under cyclic loads for reinforced concrete beams made of concrete with high strength is observed. Existing results of research of such beams were mostly done for the state of stress caused by bending moment. Research made for the bracket beam experimentally determined the elastic and permanent deformation in the beam in a complex stress state, i.e. bending moments and shear forces.
Keywords: concrete of high strength, elastic and residual strains, researches.

W przypadku zginanej belki żelbetowej najczęściej przyjmowanym do obliczeń modelem dla strefy ściskanej betonu jest parabola. Zakłada się również, że cykl obciążenie – odciążenie przebiega po tej samej linii (model nieliniowo-sprężysty). Założenie to nie uwzględnia jednak historii obciążenia elementu żelbetowego przy cyklicznych obciążeniach. Taki prosty model pomija także wpływ obciążenia długotrwałego na późniejsze, trwałe deformacje konstrukcji. Borcz [1] zaproponował do analizy konstrukcji model betonu, w którym oprócz cech sprężystych przy cyklicznym obciążaniu konstrukcji i plastycznych po osiągnięciu wartości granicznych, uwzględnia się deformacje trwałe towarzyszące obciążeniom cyklicznym i długotrwałym. Wykres zależności $\sigma - \epsilon$ dla próbek żelbetowych wykonanych z betonu średniej wytrzymałości [1] obrazuje rysunek 1. Zgodnie z Eurokodem 2 [2] wpływ obciążeń długotrwałych na ugięcia belek żelbetowych uwzględnia się pośrednio przez zmniejszenie sztywności elementu. Rzeczywiste relacje między naprężeniami a odkształceniami można jednak opisać takim modelem, który uwzględnia charakterystyczne dla betonu cechy sprężyste i nie-



Rys. 1. Zależność $\sigma_c - \epsilon_c$ podczas wielokrotnych obciążeń przy ściskaniu [1]
 Fig. 1. Dependence $\sigma_c - \epsilon_c$ for repeated loads during compression [1]

sprężyste, w których są doraźne i długotrwałe odkształcenia plastyczne uwzględniające czynnik czasu.

Poprawność modelu Borcza [1] została zweryfikowana doświadczalnie na żelbetowych belkach wspornikowych wykonanych z betonu o wytrzymałości $f_{c, cube} = 70$ MPa. W artykule przedstawiono wyniki tych badań, a także możliwość ich aplikacji do projektowania konstrukcji żelbetowych.

Zależność $\sigma - \epsilon$ dla betonu

Doświadczalna zależność $\sigma_c - \epsilon_c$ dla betonu jest funkcją nieliniową. Przedstawiona w normie Eurokod 2 [2] zależność $\sigma_c = f(\epsilon_c)$ jest funkcją paraboliczno-liniową (składa się z funkcji parabolicznej, tzw. paraboli madryckiej i liniowej – rysunek 2a). Granicznymi wartościami odkształceń są: ϵ_{c2} – odkształcenie dla naprężeń, przy których beton osiąga wytrzymałość charakte-

rystyczną na ściskanie f_{ck} (lub obliczeniową f_{cd} w SGN) oraz ϵ_{cu2} – odkształcenie graniczne betonu ściskanego. W przypadku projektowania elementów zginanych względnie praktyczne pozwalają na korzystanie z uproszczonej zależności bilinearnej (rysunek 2b), wprowadzając graniczne odkształcenia w betonie ϵ_{c3} i ϵ_{cu3} , zamiast ϵ_{c2} i ϵ_{cu2} . Flaga [3] przedstawił sposób obliczania wartości odkształceń ϵ_{c2} , ϵ_{cu2} , ϵ_{c3} i ϵ_{cu3} , w przypadku betonów o wytrzymałości wyższej od $f_{ck} = 50$ MPa.

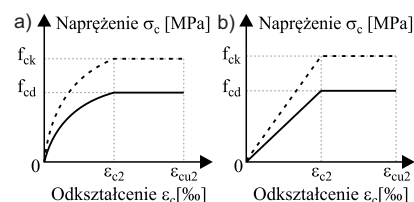
$$\epsilon_{c2} = 2,0 + 0,085 (f_{ck} - 50)^{0,53} \quad (1)$$

$$\epsilon_{cu2} = 2,6 + 35 [90 - f_{ck}/100]^4 \quad (2)$$

$$\epsilon_{c3} = 1,75 + 0,55 [(f_{ck} - 50)/40] \quad (3)$$

$$\epsilon_{cu3} = 2,6 + 35 [90 - f_{ck}/100]^4 \quad (4)$$

Z zależności tych wynika, że dla betonów o wytrzymałości charakterystycznej



Rys. 2. Zależność $\sigma_c = f(\epsilon_c)$ dla betonu ściskanego [2]: a) funkcja paraboliczno-liniowa $\sigma_c = f_{cd} [1 - (1 - \epsilon_c/\epsilon_{c2})^n]$ dla SGN ($n = 2$ wg EC2), b) uproszczona zależność $\sigma_c = f(\epsilon_c)$ z wykresem bilinearnym

Fig. 2. Dependence $\sigma_c = f(\epsilon_c)$ for compressed concrete [2]: a) a parabolic function $\sigma_c = f_{cd} [1 - (1 - \epsilon_c/\epsilon_{c2})^n]$ for the ULS ($n = 2$ according to EC2), b) simplified relationship $\sigma_c = f(\epsilon_c)$ with a bilinear graph

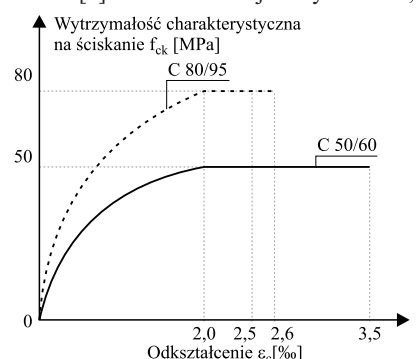
¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

*) Autor do korespondencji:

e-mail: andrzej.ubysz@pwr.edu.pl

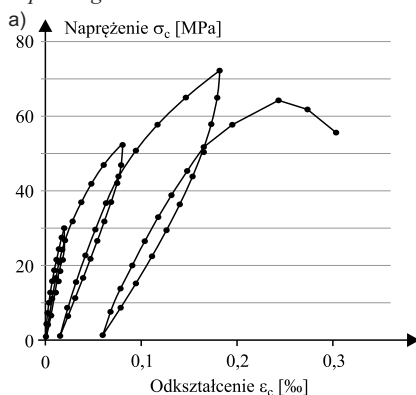
większej niż $f_{ck} = 50$ MPa rosną również odkształcenia betonu ściskanego ϵ_{cu2} , przy których osiąga on graniczną wytrzymałość f_{ck} . Równocześnie dla betonów BWW maleją odkształcenia graniczne ϵ_{cu2} , z czego m.in. wynika bardzo gwałtowny proces niszczenia się ściskanych próbek (wykonanych z betonu BWW).

Przedstawione modele zachowania się betonów BWW (rysunek 3) nie podają zachowania się betonu podczas odciążania. Badania doświadczalne pokazują, że cykl obciążenie – odciążenie nie przebiega po tej samej linii. Pierwszy cykl obciążenie – odciążenie wykreśla histerezę. Zaobserwowano, że im wolniej przebiega ten cykl, tym bardziej histereza zbiega do linii prostej (rysunek 4a, b). Podobny wpływ na kształt histerezy ma wzrost wytrzymałości betonu. Im większa wytrzymałość, tym materiał jest bardziej sprężysty. Także wielokrotne obciążanie próbki pozwala uzyskać efekt quasi-liniowej pracy elementu. Wyniki doświadczalne Naziri przedstawione na rysunku 4a potwierdzają m.in. założenia Borcza [1]. Przedstawiono je na rysunku 4b,



Rys. 3. Strefa uplastycznienia betonu BWW w zależności od jego klasy

Rys. 3. Plasticizing zone of concrete BWW depending on its class



Rys. 4. Zależność $\sigma_c - \epsilon_c$ dla ściskanej próbki betonowej: a) badania własne Naziri (cykl obciążenie – odciążenie trwał 10 ÷ 30 min); b) badania Borcza (cykl obciążenie – odciążenie trwał 18 ÷ 36 h)

Rys. 4. The relationship $\sigma_c - \epsilon_c$ for compression of the concrete sample: a) research of Naziri (cycle of the load – unload lasting 10 ÷ 30 min); b) research of Borcz (cycle of the load – unload lasting 18 ÷ 36 h)

zgodnie z którym odkształcenia całkowite można rozpatrywać jako superpozycję odkształceń sprężystych i trwałych:

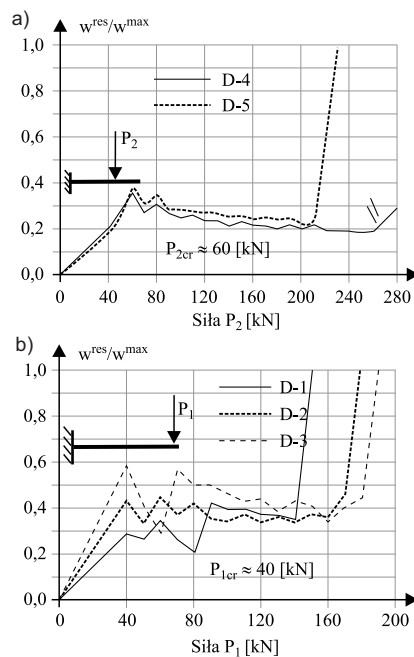
$$\epsilon^t = \epsilon^E + \epsilon^R \quad (5)$$

Wyniki badań laboratoryjnych

Jednym z celów badań laboratoryjnych było ustalenie, jaki jest udział odkształceń trwałych w stosunku do odkształceń całkowitych w elementach zginanych z istotnym udziałem ścinania. W tym celu przeprowadzono badania na próbnym elemencie betonowym, pozwalających ustalić zależność $\sigma_c - \epsilon_c$ (rysunek 4), oraz na elementach zginanych i ścinanych, z których wynika również udział trwałych ugięć zginanego elementu w stosunku do ugięć całkowitych przy obciążeniu doraźnym (rysunek 5). Podobne wyniki przedstawiono jako reprezentatywne dla cyklu badań, w których zmieniano wybrane parametry zginanego przekroju (stopień i rodzaj zbrojenia, rozstaw strzemion).

Wnioski

Przeprowadzone badania wspornikowej belki żelbetowej pozwoliły wyznaczyć udział odkształceń trwałych przy cyklicznym obciążaniu i odciążaniu. Z badań wynika, że można wyróżnić trzy główne fazy pracy takiej belki. Pierwsza dotyczy obciążenia do wartości siły rysującej, podczas której element żelbetowy wykazuje cechy zbliżone do materiału sprężystego. W tej fazie nie występuje wyraźne naruszenie współpracy betonu i zbrojenia, jednak udział odkształceń trwałych regularnie wzrasta. W fazie II po zarysowaniu następuje wyraźny wzrost udziału odkształceń trwałych. Efekt ten obserwuje się pomimo faktu, że proces rozwierania się rysy przebiegał łagodnie (bez gwałtownych pęknięć).



Rys. 5. Stosunek ugięć resztkowych w^{res} do całkowitych w^{max} , przy cyklicznym obciążeniu i odciążaniu. Siła rysująca wynosi odpowiednio $P_{2cr} = 60$ kN, $P_{1cr} = 40$ kN (badania własne Naziri); D-1 ÷ D-5 – badane elementy

Fig. 5 Ratio of residual deflections to the total deflections, under cyclic loading and unloading. The value of scratched force is $P_{2cr} = 60$ kN, $P_{1cr} = 40$ kN (research of Naziri)

W tej fazie podczas dalszego obciążania następował łagodny spadek udziału deformacji trwałych do całkowitych. Faza III to stan bezpośrednio poprzedzający zniszczenie belki. W tej fazie zniszczenia struktury betonu są już praktycznie nieodwracalne.

Z badań tych wynikają także pewne aspekty praktyczne. Znajomość stosunku odkształceń trwałych do całkowitych pozwala prognozować odkształcenia konstrukcji żelbetowych na podstawie obliczeń statycznych wykonanych dla wyidealizowanego, sprężystego modelu obliczeniowego. Doświadczalne zależności dla belek znajdują potwierdzenie także przy obserwacjach bardziej złożonych schematów konstrukcji żelbetowych.

Literatura

- [1] Borcz A.: Teoria konstrukcji żelbetowych cz. II. Wyd. Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1986.
- [2] PN-EN 1990:2004. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [3] Flaga K.: Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2. Sekcja Konstrukcji Betonowych KILiW PAN. Rozdział 4, Właściwości betonu. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2006.
- [4] PN-EN 12390-3:2002. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.

Otrzymano 19.04.2015 r.