

mgr inż. Hydayatullah Bayat*
mgr inż. Agnieszka Rogoża*
dr hab. inż. Andrzej Ubysz prof. PWr *

Doświadczalne wyznaczanie trwałych i sprężystych deformacji w zginanych belkach z betonów wysokiej wytrzymałości

Experimental studies on residual and elastic deformations in high strength concrete beams subjected to bending

Streszczenie. W artykule przedstawiono własne badania, których celem jest odpowiedź, jaką część odkształceń i przemieszczeń stanowią deformacje sprężyste w konstrukcjach wykonanych z betonów wysokiej wytrzymałości. Informacje o udziale odkształceń sprężystych pozwalają łatwiej określić zakres deformacji konstrukcji przy obciążeniach cyklicznych oraz mogą być pomocne przy obliczaniu ugięć elementów żelbetowych na podstawie rozwiązań otrzymanych dla konstrukcji wykonanej z materiału idealnie sprężystego. Ma to miejsce np. przy wykorzystywaniu zamkniętych rozwiązań dla schematów statycznych konstrukcji wykonanych z materiału idealnie sprężystego, a także przy stosowaniu tablic inżynierskich lub mniej zaawansowanych rozwiązań numerycznych.
Słowa kluczowe: belka żelbetowa, przegub plastyczny, ugięcie belki.

Abstract. In this paper the own investigations are presented. The purpose of this investigations is to answer which part of strains and displacements is constituted by elastic deformations in structures executed of high-strength concrete. The information concerning the participation of elastic strains enables an easier assessment of the deformations range of a structure subjected to cyclic loads and can be useful in deflection calculations on the basis of the solutions resulted for a structure made of ideally elastic material. It takes place e.g. in applying the closed solutions for static schemes of the structures made of ideally elastic material and using engineering tables or less advanced numerical solutions.

Keywords: RC beam, plastic hinge, deflection of beam.

Wymagania konstrukcyjne i postęp technologiczny sprawiają, że badacze i projektanci coraz częściej stosują materiały o bardzo dużej wytrzymałości [1 ÷ 4]. Pomimo już dość bogatej wiedzy o tych materiałach, pozostają jeszcze obszary, których uzupełnienie pozwoliłoby efektywniej projektować konstrukcje budowlane. Jednym z nich jest umiejętność wyznaczania trwałych deformacji przy cyklicznych i długotrwałych obciążeniach.

Projektowanie konstrukcji żelbetowych zakłada możliwość ich pracy w granicznych stanach nośności i użytkowości. Cechą charakterystyczną obciążanych i odciążanych elementów betonowych jest tylko częściowa odwracalność odkształceń i przemieszczeń. Projektant powinien mieć zatem świadomość, że całkowite odkształcenia oraz przemieszczenia konstrukcji żelbetowych i sprężonych są większe od tych, które wynikają ze sprężystych cech materiału. W praktyce problem ten jest z reguły rozstrzygany przez stosowanie nor-

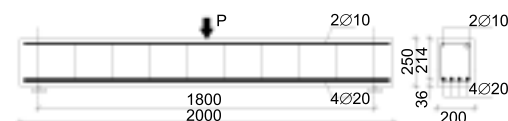
mowych wzorów (najczęściej przy obliczaniu ugięć krótko- i długotrwałych), które dotyczą głównie betonów tradycyjnych. Przyjmowanie tych wzorów do obliczeń elementów konstrukcyjnych wykonanych z betonów wysokiej wytrzymałości może w niektórych przypadkach okazać się mało precyzyjne.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki własnych badań wykorzystywane do analizy deformacji trwałych i sprężystych w zginanych belkach żelbetowych z betonów wysokiej wytrzymałości (C50/60 i wyższe). Zadanie jest sformułowane w kontekście teorii konstrukcji betonowych opracowanej przez Borcza [5], w której stosunek obciążeń trwałych do sprężystych pozwala wykorzystać rozwiązania z teorii sprężystości do kontroli stanów granicznych użytkowości konstrukcji żelbetowych. Badania były prowadzone w fazie przed zarysowaniem, po zarysowaniu i w fazie rozwoju przegubu plastycznego. Zmierzone parametry dotyczące bezpośrednio stanów granicznych użytkowości (ugięcia i rysy prostopadłe) oraz parametry pomocnicze weryfikujące te badania (wydłużenia trwałe i sprężyste prętów zbrojenio-

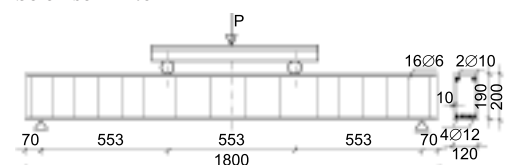
wych w strefie ściskanej i rozciąganej). Dodatkowo zmierzono wydłużenie w charakterystycznych punktach na wysokości i długości belki. Pomiarzy przeprowadzono za pomocą tensometrów, czujników indukcyjnych i zegarówych.

Badania

Badania przeprowadzono na zginanych belkach żelbetowych z betonów o wytrzymałości $f_{ck, cube} = 66,5$ MPa (średnia wytrzymałość gwarantowana na ściskanie określona na normowych kostkach serii B.6) oraz $f_{ck, cube} = 77,5$ MPa (na kostkach serii IV). Na rysunkach 1 ÷ 2 pokazano schema-



Rys. 1. Schematy statyczne i geometria belek serii B.6



Rys. 2. Schematy statyczne i geometria belek serii IV

* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

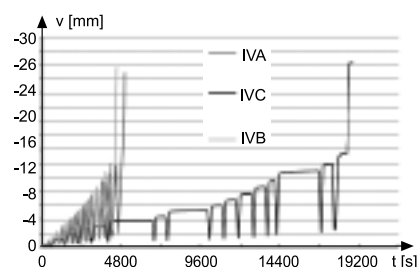
ty statyczne belek i przekroje z opisanymi prętami zbrojowymi.

W celu opisanego strefy rozwoju przegubu plastycznego belki serii B.6 były obciążane w sposób ciągły, z krótkotrwałymi przerwami (do 5 min) na różnych poziomach obciążeń, do osiągnięcia obciążeń niszczących.

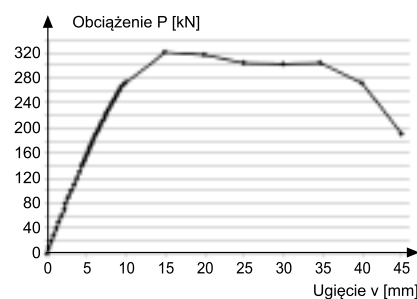
W serii IV badania realizowano w cyklach obciążenie-odciążenie. Na niektórych poziomach obciążenia obserwowano przyrosty trwałych przemieszczeń przez 10 ÷ 40 min. Sposób obciążania pokazano na rysunku 3. Rysunki 4 i 5 przedstawiają doświadczalną relację między obciążeniami i ugięciami w przypadku belek serii B.6 i IV, a rysunek 6 stosunek ugięć trwałych do sprężystych w zależności od poziomu obciążenia w belkach serii IV.

Z badań wynika, że w całym cyklu obciążeń można wyróżnić 3 charakterystyczne fazy:

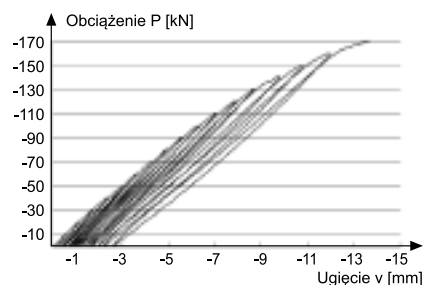
■ I faza: przed osiągnięciem przez zginaną belkę momentu rysującego;



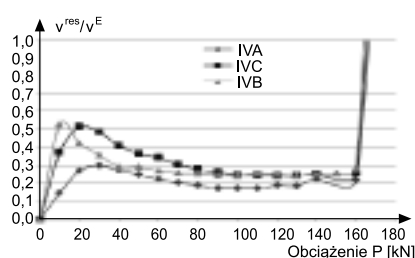
Rys. 3. Sposób obciążenia belki serii IV



Rys. 4. Doświadczalna relacja między obciążeniem i ugięciem w belce B.6.3 – serii B. 6



Rys. 5. Doświadczalna relacja między obciążeniem i ugięciem w belce IV-B



Rys. 6. Przykładowy wykres pokazujący stosunek ugięć trwałych do sprężystych (v^{res}/v^E) w zależności od poziomu obciążenia dla serii IV

wówczas stosunek przemieszczeń trwałych do sprężystych rośnie quasi-proportjonalnie do przyrostu obciążenia;

■ II faza: po osiągnięciu momentu rysującego; obserwuje się wtedy największy względny udział przemieszczeń trwałych podczas kształtowania się pierwszych rys oraz pewnej stabilizacji przy dalszym ich rozwoju;

■ III faza: bezpośrednio przed osiągnięciem momentu niszczącego; gwałtowny względny wzrost przemieszczeń trwałych informuje o tym, że dalsze przemieszczenia mają praktycznie charakter tylko plastyczny (nieodwracalny).

Podsumowanie

Obliczanie ugięć całkowitych opiera się na wyjściowym założeniu Borcza [5]:

$$v^{tot} = v^{res} + v^E \quad (1)$$

gdzie:

v^{tot} – ugięcie całkowite;

v^{res} – ugięcie trwałe, zawierające m.in. trwałe odkształcenia belki, odkształcenia reologiczne i trwałe odkształcenia w rysie;

v^E – ugięcie sprężyste (przy obciążeniach doraźnych).

Z analizy badań wynika stosunkowo regularny obraz stosunku deformacji trwałych do sprężystych w zginanych belkach żelbetowych. W I fazie (przed zarysowaniem), analizowana zależność jest wprost proporcjonalna do wartości obciążenia, co świadczy o tym, że w trakcie wzrostu obciążenia wzrasta udział odkształceń trwałych. Po przekroczeniu wartości momentu rysującego (II faza) nie obserwuje się dalszego przyrostu relacji v^{res}/v^E , a nawet relacja ta ulega zmniejszeniu. W fazie III, po osiągnięciu obciążenia niszczącego, obserwuje się gwałtowny wzrost nieodwracalnych ugięć, co pośrednio świadczy o nieodwracalnych deformacjach betonu. Podobne fazy otrzymano wcześniej

w przypadku belek żelbetowych z betonów niższych klas [6]. Obecnie prowadzone badania zmierzają do wykazania, w jakim przedziale można oczekiwać stosunku v^{res}/v^E i jaka jest wrażliwość tego stosunku na zmienne parametry wymienione na początku artykułu, a także – na obciążenia długotrwałe.

Znając doświadczalną zależność odkształceń trwałych od sprężystych i przewidując poziom maksymalnego obciążenia konstrukcji – $v^{res}/v^E = f(P/P_{cr}, t)$, gdzie $f(P/P_{cr}, t)$ jest doświadczalną funkcją opisującą poziom doraźnego i długotrwałego przeciążenia elementu, można określić całkowite ugięcie belki na podstawie wyników doświadczalnych:

$$v^{tot} = [1 + f(P/P_{cr}, t)] v^E \quad (2)$$

Znajomość funkcji $f(P/P_{cr}, t)$, która obecnie jest przedmiotem badań, pozwoli wyznaczyć ugięcie całkowite na podstawie obliczeń wykonanych zgodnie z teorią sprężystości.

Przedstawione wyniki stanowią część programu badawczego, którego celem jest pokazanie praktycznych wniosków stanowiących pomoc przy szybkim oszacowaniu ugięć konstrukcji żelbetowych. Doświadczalna wiedza dotycząca udziału ugięć trwałych w ugięciach całkowitych może mieć zastosowanie do obciążeń doraźnych i długotrwałych, jednak w tym drugim przypadku należy mieć na uwadze większą złożoność zagadnienia wynikającą z wprowadzenia parametru czasu.

Literatura

- [1] Kamińska M. E. 1999: *Doświadczalne badania żelbetowych elementów prętowych z betonu wysokiej wytrzymałości*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999.
- [2] Fields K. and Bischoff P. H.: *Tension Stiffening and Cracking of High-Strength Reinforced Concrete Tension Members*, ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 4, 2004, pp. 447 – 456.
- [3] Łapko A., Sadowska-Buraczewska B.: *Improvement of serviceability parameters of RC beams using high strength concrete*. W: Proc. of the European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures: ESCS'2006, 365 – 370.
- [4] Smarzewski P.: *Analiza numeryczna niesprężystych belek żelbetowych z betonu wysokiej wytrzymałości o niskim stopniu zbrojenia*, Budownictwo i Architektura 4 (2009), 5 – 30.
- [5] Borcz A.: *Teoria konstrukcji żelbetowych, wybrane badania wrocławskie, t. 2*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [6] Ubysz A.: *Plastic strains and self-stresses in reinforced concrete, bar construction*. Edit. TU Wrocław. Wrocław 1999.