

Wioletta RACZKIEWICZ*
Politechnika Świętokrzyska

ZALEŻNOŚĆ $\sigma - \varepsilon$ PRÓBEK FIBROBETONOWYCH PRZY RÓŻNYCH ILOŚCIACH MIKROZBROJENIA

Streszczenie. Podstawę referatu stanowią wyniki badań betonowych i fibrobetonowych próbek poddanych doraźnym obciążeniom zmiennym przy różnych górnych granicach odkształceń. Do opisu procesów niszczenia i uplastycznienia wywołanych zmianami odkształcenia wykorzystano stochastyczny model betonu. Analiza otrzymanych wyników pozwoliła na obserwację funkcji $\sigma - \varepsilon$ i $E - \varepsilon$ oraz oszacowanie wpływu ilości mikrobrojenia na powyższe zależności.

THE $\sigma - \varepsilon$ FUNCTION OF THE FIBRE REINFORCED CONCRETE SPECIMENS BY THE DIFFERENT MICROREINFORCEMENT NUMBER

Summary. The basis of the paper are the results of an experimental studies of concrete and fibre-reinforced concrete specimens, which were subjected to short - time changing loads by different top limits of strain. The analysis of the results (described by stochastic model of concrete) allowed to observe $\sigma - \varepsilon$ and $E - \varepsilon$ functions and to observe the effect of the microreinforcement number.

1. Cel i zakres badań

Celem badań było określenie wpływu ilości mikrobrojenia na przebieg zależności $\sigma - \varepsilon$ dla fibrobetonu ze zbrojeniem DRAMIX, poddanego doraźnym obciążeniom zmiennym [1], [2]. Analizę uzyskanych wyników badań przeprowadzono w oparciu o zasady probabilistyki ([3], [4], [5]), mając na uwadze możliwość stworzenia stochastycznego modelu fibrobetonu.

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Stefan Goszczyński.

2. Badania eksperymentalne

2.1. Metodyka badań


Badania wykonano na próbkach prostopadłościennych o wymiarach 100x100x300 mm różniących się ilością zastosowanego mikrozbrojenia. Poza grupą kontrolną z 0,0% zawartością włókien rozpatrywano 1,0% i 1,5% zawartość włókien w stosunku do objętości betonu. Próbki wykonano z betonu klasy B – 30, konsystencji K–4. Skład mieszanki betonowej przedstawia tabela 1.

Tabela 1

Składniki mieszanki betonowej dla betonu B–30, konsystencji K–4

SKŁADNIKI	IŁOSC
Cement portlandzki 42,5 R	420 [kg/m ³]
Grys bazaltowy 5+11 mm (kopalnia Górażdże)	769 [kg/m ³]
Grys bazaltowy 11+16 mm (kopalnia Górażdże)	319 [kg/m ³]
Piasek kopalniany (kopalnia Suków)	788 [kg/m ³]
Woda – wodociąg	145 [l]
Superplastyfikator – Kamafluid	~ 1% wagi cementu

Jako mikrozbrojenie zastosowano cięte włókno stalowe typu DRAMIX o smukłości $l/d = 80$ produkcji Bekaert o następujących parametrach:

- stal (wg informacji od wytwórcy): $f_{yD}^{Dr} = 1100$ MPa,
- długość włókna $l_w = 60$ mm
- średnica włókna $\varnothing 0,75$ mm,
- kształt włókien: 

Każdą grupę próbek badano według identycznego programu badawczego:

- a) badanie próbek poddanych odkształceniom rosnącym do zniszczenia:

$$\text{seria P0 (3 szt. każdej grupy): } \varepsilon = 0.0\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_n$$

- b) badanie 9 serii próbek poddanych oddziaływaniu pojedynczych pętli histerezy odkształceniowych o różnych górnych granicach odkształceń:

$$\text{seria P1 : } \varepsilon = 0.0\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_{\max} = 0.3\% \xleftarrow{n} \varepsilon = 0.1\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_n$$

$$\text{seria P2 : } \varepsilon = 0.0\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_{\max} = 0.5\% \xleftarrow{n} \varepsilon = 0.1\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_n$$

$$\text{seria P3 : } \varepsilon = 0.0\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_{\max} = 0.7\% \xleftarrow{n} \varepsilon = 0.1\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_n$$

$$\text{seria P4 : } \varepsilon = 0.0\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_{\max} = 0.9\% \xleftarrow{n} \varepsilon = 0.1\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_n$$

$$\text{seria P5 : } \varepsilon = 0.0\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_{\max} = 1.1\% \xleftarrow{n} \varepsilon = 0.1\% \xrightarrow{\varepsilon} \varepsilon_n$$

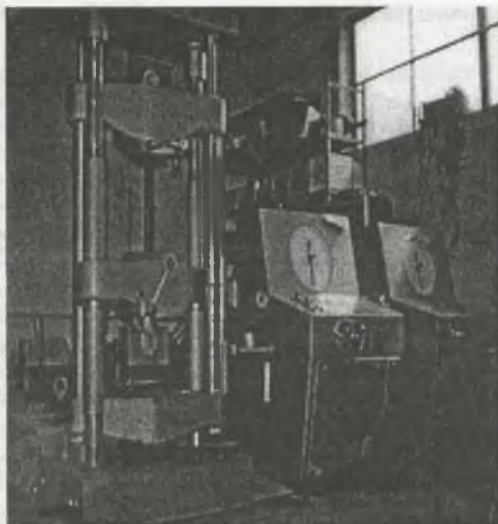
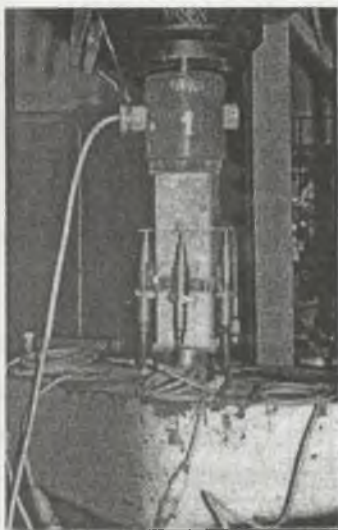
seria P6 : $\epsilon = 0.0\% \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_{\max} = 1.3\% \xleftarrow{n} \epsilon = 0.1\% \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_n$

seria P7 : $\epsilon = 0.0\% \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_{\max} = 1.5\% \xleftarrow{n} \epsilon = 0.1\% \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_n$

seria P8 : $\epsilon = 0.0\% \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_{\max} = 1.7\% \xleftarrow{n} \epsilon = 0.1\% \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_n$

c) badania dodatkowe obejmujące badanie skurczu na trzech grupach próbek 100x100x300 mm oraz badanie wytrzymałości na ściskanie na trzech grupach próbek 150x150x150 mm.

Badania zasadnicze wykonano w maszynie wytrzymałościowej ZD-100 o klasie dokładności 0.1%, tj. $\pm 0.001\text{MN}$ sterowanej komputerowo przez jeden z czujników indukcyjnych. Bazę pomiarową przemieszczeń stanowiła ramka stalowa mocująca czujniki oraz cztery stalowe podstawki przyklejane do próbek (rys. 1).



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego

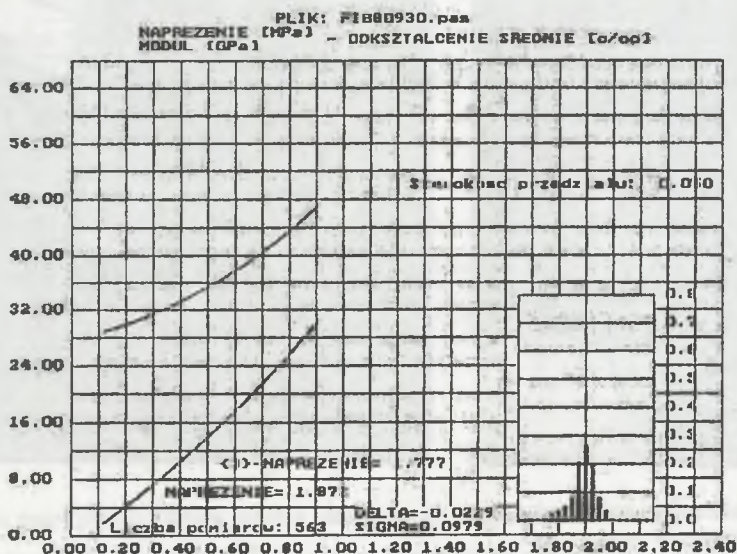
Fig. 1. The picture of the test stand

Przemieszczenia mierzono czujnikami indukcyjnymi PHILIPS PR 93114/10 o zakresie ± 5 mm i klasie dokładności 0.1%, tj. ± 0.005 mm. Wyniki pomiarów zarejestrowano w komputerowej bazie danych przy wykorzystaniu programu CAT MAN 2.0.

2.2. Wyniki badań doświadczalnych

Efektom przeprowadzonych badań były wyniki pomiarów siły i przemieszczeń skrajnych punktów baz pomiarowych rejestrowanych na czterech bokach próbek. Wyniki pomiarów

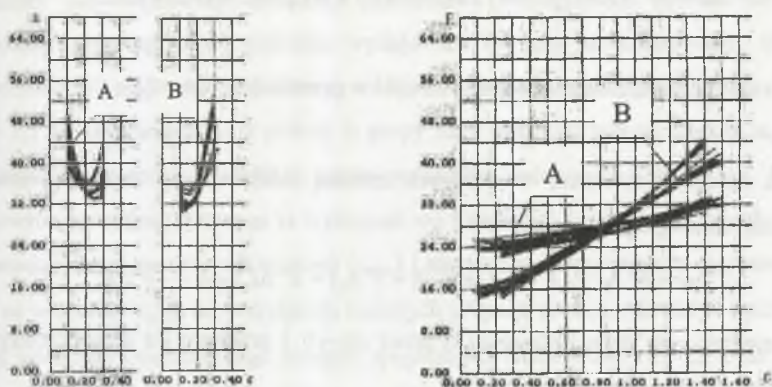
przekształcono na zbiory, zawierające wielkości naprężeń i odkształceń, tworząc oddzielne pliki dla poszczególnych gałęzi obciążenia bądź odciążenia. Uzyskane wyniki poddano obróbce statystycznej, mającej na celu wyeliminowanie błędów kwantowania i uzyskanie ciągłego opisu funkcji $\sigma - \epsilon$. Do aproksymacji badanych funkcji wykorzystano wielomiany o najwyższym stopniu, przy którym jednak pochodna (styczny moduł sprężystości) miała co najwyżej jedno ekstremum. Rysunek 2 przedstawia przykładowy wynik aproksymacji, uzyskany z programu narzędziowego opracowanego w Zakładzie Konstrukcji Żelbetowych Pol. Świętokrzyskiej, na którym widoczne są: przebiegi funkcji $\sigma - \epsilon$, $E - \epsilon$, histogram rozkładu błędów aproksymacji, stopień wielomianu, wynikająca z aproksymacji wielkość naprężenia na końcu przedziału, jej odpowiednik doświadczalny, szerokość przedziałów dla histogramu, średni błąd aproksymacji DELTA oraz średni błąd kwadratowy SIGMA.



Rys. 2. Przykładowy wynik aproksymacji funkcji $\sigma - \epsilon$ dla jednej z badanych próbek; $\epsilon_{\max}=0.9\%$, cykl 30-odciążeniowy

Fig. 2. The result of the approximation of function $\sigma - \epsilon$ for exempld specimen; $\epsilon_{\max}=0.9\%$, cycle 30-unloading

Rysunek 3 przedstawia przykładowe wykresy zmian modułu sprężystości dla dwóch różnych pętli histerez odkształceniowych zarejestrowanych na wszystkich próbkach danej serii. A oznacza gałęzie obciążeniowe, B – odciążeniowe.

a) dla próbek serii P1 ($\epsilon_{\max} = 0,3\%$)b) dla próbek serii P7 ($\epsilon_{\max} = 1,5\%$)

Rys. 3. Przykładowe wykresy zmian stycznego modułu sprężystości dla pętli histerezy odkształceniowych przy różnych górnych granicach odkształceń

Fig. 3. The exampled graphs of the changes of tangent modulus of elasticity for hysteresis loops by different top limits of strain

3. Analiza teoretyczna

Stochastyczny model betonu odniesiony do przekroju jako zbioru wycinków elementarnych [1] zakłada, że w miarę wzrostu odkształcenia wycinek przekroju nie przenosi żadnych naprężeń (prawdopodobieństwo R) lub przenosi naprężenia (prawdopodobieństwo $R' = 1 - R$), przy czym może zachowywać się sprężysto (prawdopodobieństwo E) lub plastycznie (prawdopodobieństwo $P = 1 - E$). Otrzymujemy więc:

$$R'(E + P) + R = 1 \quad (1)$$

Średnie naprężenie w przekroju wywołane odkształceniem ϵ obliczymy:

$$\sigma = R'(\epsilon E_0 E + P \sigma_p) + R \cdot 0 \quad (2)$$

gdzie:

E_0 – średni moduł sprężystości wycinka elementarnego,

σ_p – średnia wielkość naprężeń w elementach uplastycznionych.

Przyrost odkształcenia $\Delta\epsilon$ zmienia stan przekroju o przyrost zniszczenia ΔR i przyrost uplastycznienia ΔP . Średnie naprężenie odpowiadające odkształceniu $\epsilon + \Delta\epsilon$ wyraża wzór:

$$\sigma + \Delta\sigma = (R' - \Delta R) [(\varepsilon + \Delta\varepsilon) E_0 (E - \Delta P) + P \sigma_p + (\varepsilon + \omega \Delta\varepsilon) E_0 \Delta P] \quad (3)$$

gdzie:

$$(\varepsilon + \omega \Delta\varepsilon) E_0 - \text{średnia granica plastyczności w przedziale } \langle \varepsilon, \varepsilon + \Delta\varepsilon \rangle,$$

$$0 < \omega < 1.$$

Przyrost naprężeń średnich, wywołanych zmianą odkształcenia $\Delta\varepsilon$, po pominięciu wielkości małych drugiego rzędu, wynosi:

$$\Delta\sigma = R' \Delta\varepsilon E_0 E - \Delta R (\varepsilon E_0 E + P \sigma_p) = R' \Delta\varepsilon E_0 E - \frac{\sigma}{R'} \Delta R \quad (4)$$

Po podzieleniu obu stron równania (4) przez $\Delta\varepsilon \rightarrow 0$ i przejściu do granicy otrzymamy styczny moduł sprężystości przekroju:

$$E = E_0 R' E - \frac{\sigma}{R'} \frac{dR}{d\varepsilon} \quad (5)$$

4. Analiza wyników i wnioski

Z analizy teoretycznej modelu wynika, że po ustabilizowaniu się pętli histerezy procesy uplastycznienia i niszczenia powinny być odwracalne. Przy założeniu braku niszczenia i regeneracji ($\Delta R = 0$) w skrajnych punktach pętli, po zmianie kierunku odkształcania, niezniszczona część przekroju powinna pracować sprężysto ($E = 1$) i wg wzoru (5) początkowe moduły sprężystości przekroju dla gałęzi obciążenia i odciążenia powinny być równe. W przeprowadzanych badaniach hipoteza ta nie została potwierdzona. Początkowy moduł sprężystości przekroju podczas odciążenia jest wyraźnie większy, co świadczy o niecałkowitej odwracalności procesów niszczenia i regeneracji struktury materiału. Wywołany skurczem i odkształceniami cyklicznymi układ mikrorys, „zszytych” częściowo włóknami stalowymi, pozostaje niezmienny. W zależności od kierunku spękania podczas ściskania rozwarcie pewnej liczby rys ulega zmniejszaniu, a innych zwiększaniu. Po zmianie kierunku odkształcenia ulega również zmianie znak przyrostów rozwarcia rys. Z chwilą zamknięcia się rysy dany fragment przekroju staje się zdolny do przenoszenia naprężeń. Może więc wystąpić pseudoregeneracja struktury zarówno na ścieżce obciążenia, jak i odciążenia.

Z porównania wyników uzyskanych dla próbek fibrobetonowych, jak i betonowych można wnioskować, że zastosowanie włókien mikrobrojenia w niewielkim stopniu zmienia obraz badanej funkcji. Niezależnie od ilości mikrobrojenia proces obciążania charakteryzuje początkowy spadek modułu sprężystości, wywołany przewagą niszczenia i uplastycznienia

ściskaniem nad regeneracją struktury zniszczonej rozciąganiem. Jednak w przypadku fibrobetonu przebieg tego zjawiska wydaje się bardziej ustabilizowany. Dla próbek fibrobetonowych wspomniana przewaga maleje ze wzrostem górnej granicy pętli, tak że przy $\epsilon_{\max} = 1,5\%$ obserwujemy dla próbek II grupy stały niewielki wzrost modułu, a dla próbek III grupy stałą wartość modułu w całym przedziale zmienności odkształceń. Dla próbek betonowych natomiast przewaga ta występuje we wszystkich badanych próbkach niezależnie od wartości górnej granicy odkształceń (ϵ_{\max}) i również w miarę wzrostu ϵ_{\max} zmniejsza się. Wraz ze wzrostem ϵ_{\max} , we wszystkich badanych grupach próbek, zauważyć można znaczny spadek wielkości początkowego modułu sprężystości średnio od ~ 70 GPa do ~ 30 GPa. Świadczy to o dużej intensywności niszczenia rozciąganiem.

W procesie odciążania tak próbek fibrobetonowych, jak i betonowych przeważa niszczenie i uplastycznienie rozciąganiem. Jednak dla próbek betonowych wzrost modułu pod koniec procesów odciążania widoczny jest nie tylko przy małych wartościach ϵ_{\max} , co wskazuje na większą intensywność niszczenia ściskaniem niż w przypadku próbek fibrobetonowych. Początkowe wielkości modułów próbek każdej grupy również maleją, osiągając wartości od ~ 76 GPa do ~ 48 GPa.

LITERATURA

1. Redon C., Chermant J.L.: Damage mechanics to concrete reinforced with amorphous cast iron fibers, concrete subjected to compression. *Cement and Concrete Composites* 21, 1999, p. 197 – 204.
2. Glinicki M. A.: Ocena i projektowanie fibrobetonów na podstawie wytrzymałości równoważnej. IBDiM Warszawa, Drogi i Mosty 3, 2002, s. 5-36.
3. Goszczyński S.: Teoria kontynualnych zmian sztywności w ujęciu stochastycznego modelu żelbetu. *ZN Politechniki Świętokrzyskiej, Budownictwo* 23/1986.
4. Ślusarczyk J.: Doświadczalna i teoretyczna nieliniowa analiza pracy hiperstatycznych belek żelbetowych w procesie obciążeń zmiennych. Praca doktorska, SZKŻiBP Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1999.

5. Raczkiewicz W.: Analiza zależności $\sigma - \varepsilon$ fibrobetonowych próbek poddanych doraźnym obciążeniom zmiennym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo 2001.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Janina Bogucka

Abstract

The basis of the paper are the results of an experimental studies of concrete and fibre-reinforced concrete specimens, which were subjected to short – time changing loads by different top limits of strain. The analysis of the results (described by stochastic model of concrete) allowed to observe $\sigma - \varepsilon$ and $E - \varepsilon$ functions and to observe the effect of the microreinforcement number.