Nr kol. 1514

200

Wioletta RACZKIEWICZ^{*} Politechnika Świętokrzyska

ANALIZA ZALEŻNOŚCI σ – ε FIBROBETONOWYCH PRÓBEK PODDANYCH DORAŹNYM OBCIĄŻENIOM ZMIENNYM

Streszczenie. Za podstawę referatu posłużyły wyniki otrzymane z badań doświadczalnych próbek fibrobetonowych. Próbki poddane były doraźnym obciążeniom zmiennym, w stałych przedziałach odkształceń. Do opisów procesów niszczenia i uplastycznienia, wywołanych zmianami odkształcenia, wykorzystano stochastyczny model betonu w odniesieniu do przekroju traktowanego jako nieskończony zbiór wycinków elementarnych.

Analiza otrzymanych wyników pozwoliła na obserwację funkcji $\sigma - \varepsilon$ oraz $E - \varepsilon$ dla procesów obciążania i odciążania przy różnych górnych granicach odkształceń (ε_{max}). Na jej podstawie wyciągnięto wnioski, że w procesie odciążania zdecydowanie przeważa niszczenie i uplastycznienie rozciąganiem, a podczas obciążania początkowo przeważa uplastycznienie ściskaniem, a dałej pseudoregeneracja struktury. Skokowa zmiana modułu sprężystości przy zmianie kierunku odkształcenia związana jest z wielkością uplastycznienia przekroju. Ze wzrostem ε_{max} stopień uplastycznienia ściskaniem maleje, natomiast stopień uplastycznienia rozciąganiem rośnie.

STUDY OF $\sigma - \epsilon$ RELATIONSHIPS THE FIBRE – REINFORCED CONCRETE SAMPLES SUBJECTED TO THE SHORT – TIME CHANGING LOADSENT

Summary. The basis of the paper were the results an experimental studies of fibre-reinforced concrete samples, which were subjected to short - time changing loads in constant intervals of strain. Processes of failure and plasticity depending on changing of strain are described by stochastic model of concrete where section is an infinite set of slices.

The analysis of the results allowed to observe functions $\sigma - \varepsilon$ and $E - \varepsilon$ for processes of loading and unloading by different top limits of strain (ε_{max}). The interval of strain was constant for each series. The conclusion was drown that in the process of unloading failure and plasticity by tension dominates. In the loading dominates plasticity by compression in the beginning, and then pseudo – regeneration of structure. Sudden change of elasticity modulus value by the change of the direction of strain is connected with the degree of plasticity by tension. With the increase of ε_{max} the degree of plasticity by compression decreases, while the degree of plasticity by tension increases.

1. Wprowadzenie

Celem badań było znalezienie zależności $\sigma - \varepsilon$ próbek fibrobetonowych poddanych doraźnym obciążeniom zmiennym zgodnie z zasadami probabilistyki. Stochastyczny model betonu przedstawiony w pracach [1, 2] może być wykorzystany do opisu zależności σ - ε dla

Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Stefan Goszczyński, prof. PSk.

każdego materiału i dowolnej historii obciążeń zmiennych. Model taki, w odniesieniu do przekroju traktowanego jako nieskończony zbiór wycinków elementarnych, sprowadza się do opisu procesów niszczenia i uplastycznienia wywołanych zmianami odkształcenia. W pracy przedstawiono wyniki badań próbek fibrobetonowych poddanych doraźnym obciążeniom zmiennym w stałych podziałach odkształceń oraz jakościową analizę przebiegu tych procesów.

2. Badania eksperymentalne

2.1. Dane materialowe

Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach 100 x 100 x 300 mm uzyskanych z belki fibrobetonowej o wymiarach przekroju 120 x 300 mm i długości 3.3 m (uprzednio poddanej badaniu wytrzymałości na zginanie). Belka wykonana była z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie równej 31,24 MPa, konsystencji K – 4. Do wykonania mieszanki betonowej użyto cementu P – 35 N, kruszywa I – piasku kopalnianego, kruszywa II – żwiru 2/16 mm, kruszywa III – żwiru 2/8 mm, wody oraz superplastyfikatora – arpoment P. Jako mikrozbrojenia użyto włókna stalowego typu DRAMIX o symbolu ZC 50/.50 w ilości 30 kg/m^{3*}. Ze zniszczonej belki, z miejsc najmniej narażonych na naprężenia wynikające z poprzedniego badania, wycięto 12 technicznie identycznych próbek. Próbki przechowywane były w hali laboratoryjnej w stałych warunkach temperatury i wilgotności. Wiek próbek w chwili badania wynosił 18 miesięcy.

2.2. Program badań

Badania przeprowadzono na 4 seriach próbek fibrobetonowych poddanych odkształceniom niskocyklicznym o różnych górnych granicach odkształceń wg poniższego programu:

Liczba cykli n była różna (~ 10 ÷ ~ 30), zależna od tempa stabilizacji pętli.

^{*} Badanie belki stanowiło oddzielny, wykonywany przez inny zespół, eksperyment badawczy.

2.3. Stanowisko badawcze

Badania, wg zaplanowanego programu badawczego, zostały przeprowadzone w maszynie prób wytrzymałościowych ZD – 100 o klasie dokładności 0.1%, tj. \pm 0.001 MN, produkcji VEB werkstoffprufmaschinen Leipzig, sterowanej komputerowo przez jeden z czujników indukcyjnych. Bazę pomiarową przemieszczeń stanowiła ramka stalowa mocująca czujniki oraz cztery stalowe, kątownikowe podstawki przyklejane do próbek (rys. 1). Pomiaru przemieszczeń dokonano przy użyciu czujników indukcyjnych PHILIPS PR 93114/10 o zakresie \pm 5 mm i klasie dokładności 0.1%, tj. \pm 0.005 mm połączonych z komputerem z zainstalowanym programem obsługi pomiarów CAT MAN 2.0. Wyniki pomiarów zarejestrowano w komputerowej bazie danych.



Rys. 1. Zdjęcie fragmentu stanowiska badawczego Fig. 1. The picture of the part of test stand

3. Wyniki doświadczalne

Efektem przeprowadzonych badań były wyniki pomiarów siły i przemieszczeń skrajnych punktów baz pomiarowych, przekształconych następnie w zbiory zawierające wartości naprężeń i odkształceń czterech boków próbek dla poszczególnych gałęzi obciążenia bądź odciążenia. Dokładność pomiaru naprężeń wynosiła 0.1 MPa, a odkształceń 0.05‰. Duża liczebność wyników (kilkaset) dla każdej gałęzi umożliwiała ich obróbkę statystyczną mającą na celu wyeliminowanie błędów kwantowania i znalezienie ciągłego opisu zależności σ - ϵ . 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 dla próbki FIB80930, tj. dla 30 cyklu próbki nr 8, obciążonej do $\varepsilon_{max}=0.9\%$, uzyskany z programu narzędziowego powstałego w SZKŻiBP PŚk.



Rys. 2. Wynik aproksymacji dla próbki FIB80930, ε_{max} =0.9%, cykl 30 Fig. 2. The result of approximation for sample FIB80930, ε_{max} =0.9%, cycle 30

Na rysunku, oprócz graficznego przedstawienia przebiegu funkcji $\sigma - \varepsilon$, $E - \varepsilon$ i histogramu rozkładu błędów aproksymacji, podano: stopień wielomianu {3} i wynikającą z aproksymacji wielkość naprężenia na końcu przedziału wraz z odpowiednikiem doświadczalnym, szerokość przedziałów dla histogramu, średni błąd aproksymacji DELTA oraz średni błąd kwadratowy SIGMA.

Rysunek 3 przedstawia zmiany modułu stycznego dla czterech różnych pętli histerez odkształceniowych (ε_{max} , $\varepsilon_{min.}$ = const), zarejestrowanych na wszystkich próbkach poszczególnych serii. Gałęzie obciążeniowe oznaczono literą A, gałęzie odciążeniowe – B.



a) wykresy dla próbek serii 1 ($\varepsilon_{max} = 0.3\%$)



a)



b) wykresy dla próbek serii 2 ($\varepsilon_{max} = 0.6\%_0$)

IP.

64.00





Rys. 3. Wykresy zmian modułu stycznego dla pętli histerez odkształceniowych przy różnych górnych granicach odkształceń

Fig. 3. Diagrams of the changes of tangent modulus for hysteresis loops by different top limits of strain

4. Teoretyczny moduł sprężystości

Analizując odpowiedź przekroju próbki na przyrost odkształcenia można przyjąć, wg stochastycznego modelu betonu, że dowolny, elementarny jego wycinek może nie przenosić żadnych naprężeń. Prawdopodobieństwo wystąpienia takiego elementu oznaczymy przez R. Z prawdopodobieństwem R' = 1 - R wycinek elementarny przenosi naprężenia, przy czym może zachowywać się sprężyście z prawdopodobieństwem E lub plastycznie z prawdopodobieństwem P = 1 - E. W takim ujeciu stan przekroju jest opisany relacją:

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

Średnie naprężenie w przekroju wywołane odkształceniem ɛ można obliczyć ze wzoru:

$$\sigma = R' \left(\varepsilon E_0 E + P \sigma_p\right) + R \cdot 0 \tag{2}$$

gdzie:

E0 - średni moduł sprężystości wycinka elementarnego,

 σ_p – średnia wielkość naprężeń w elementach uplastycznionych.

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

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

gdzie:

 $(\varepsilon + \omega \Delta \varepsilon) E_0$ – średnia granica plastyczności w przedziale ($\varepsilon, \varepsilon + \Delta \varepsilon$),

$$) < \omega < 1.$$

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

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

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

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \, \mathbf{R}' \, \mathbf{E} - \frac{\sigma}{\mathbf{R}'} \, \frac{\mathrm{d}\mathbf{R}}{\mathrm{d}\varepsilon} \tag{5}$$

Ustabilizowanie się pętli histerezy wskazuje na to, że procesy uplastycznienia i niszczenia stały się odwracalne. Jeśli przyjmiemy brak niszczenia i regeneracji ($\Delta R = 0$), to w skrajnych punktach pętli, po zmianie kierunku odkształcania, niezniszczona część przekroju pracuje sprężyście: E = 1. Ze wzoru (5) wynika więc równość początkowych modułów sprężystości przekroju dla gałęzi obciążenia i odciążenia. W przeprowadzanych badaniach hipoteza taka nie znalazła potwierdzenia. Początkowy moduł sprężystości przekroju podczas odciążenia jest wyraźnie większy. Powstaje więc pytanie o odwracalny mechanizm niszczenia i regeneracji struktury materiału. Wywołany skurczem i odkształceniami cyklicznymi układ mikrorys "zszytych" częściowo włóknami stalowymi pozostaje niezmieniony. 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 ten fragment przekroju staje się zdolny do przenoszenia naprężeń. Może więc wystąpić pseudoregeneracja struktury zarówno na ścieżce obciążenia jak i odciążenia.

5. Analiza wyników i wnioski

Proces obciążania charakteryzuje początkowy spadek modułu sprężystości, wywołany przewagą niszczenia i uplastycznienia ściskaniem nad regeneracją struktury zniszczonej rozciąganiem. Przewaga ta maleje ze wzrostem górnej granicy pętli tak, że przy $\varepsilon_{max} = 1,5\%$ obserwujemy już tylko wzrost modułu w całym przedziale zmienności odkształceń. Wraz ze wzrostem ε_{max} , zauważyć można znaczy spadek wielkości początkowego modułu sprężystości od ~ 40 GPa do ~ 24 GPa. Świadczy to o dużej intensywności niszczenia rozciąganiem.

W procesie odciążania zasadniczo przeważa niszczenie i uplastycznienie rozciąganiem. Jedynie przy małych wielkościach ε_{max} obserwuje się nieznaczny wzrost modułu. Początkowe wielkości modułów również maleją od ~ 49 GPa do ~ 40 GPa. Niszczenie ściskaniem jest jednak mniej intensywne niż rozciąganiem.

Skokowa zmiana modułu sprężystości, przy zmianie kierunku odkształcenia, jest związana z wielkością uplastycznienia przekroju. Szacunkowe przeliczenia wskazują, że stopień uplastycznienia ściskaniem maleje ze wzrostem ε_{max} od ~ 0.31 do ~ 0.20, natomiast stopień uplastycznienia rozciąganiem wzrasta od ~ 0.20 do ~ 0.33.

LITERATURA

- Goszczyński S.: Teoria kontynualnych zmian sztywności w ujęciu stochastycznego modelu żelbetu. Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Budownictwo z. 23, Kielce 1986.
- Ślusarczyk J.: Doświadczalna i teoretyczna nieliniowa analiza pracy hiperstatycznych belek żelbetowych w procesie obciążeń zmiennych. Praca doktorska, Samodzielny Zakład Konstrukcji Żelbetowych i Budownictwa Przemysłowego Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Artem Czkwianianc, prof. PŁ

Abstract

The paper presents:

- the results an experimental studies of fibre reinforced concrete samples, which were subjected to short – time changing loads in constant intervals of strain;
- the analysis of the results described by stochastic model of concrete;
- the conclusions about functions σ ε and E ε for processes of loading and unloading by different top limits of strain (ε_{max}).