

SYMPOZJON "MODELOWANIE W MECHANICE"

POLSKIE TOWARZYSTWO MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

Beskid Śląski, 1990

Dariusz Styś, Maciej Minch

Instytut Budownictwa

Politechnika Wrocławska

CHARAKTERYSTYKI SPRĘŻYSTE BETONU W OBSZARACH GEOMETRYCZNYCH
OSOBLIWOŚCI

Streszczenie. W pracy omówiono zagadnienia związane z określaniem charakterystyk sprężystych kompozytu betonowego, w obszarach koncentracji naprężeń przy wierzchołku szczeliny. Przedstawiono metody wyznaczania "pozornego" współczynnika sprężystości betonu E_b , uwzględniającego degradację sprężystą materiału w strefie mikrozarysowania. Analizowano wpływ E_b i ν_b na parametr pęknięcia K_I .

1. Wstęp

Szybki postęp inżynierii materiałowej spowodował wzrost zainteresowania problemami mechaniki stosowanej ciał anizotropowych. Do istotnych zagadnień należą efekty koncentracji naprężeń wywołane obecnością szczelin. Kompozyty betonowe uważa się za materiały "kłopotliwe" zarówno z punktu widzenia badań eksperymentalnych, jak i opisu matematycznego. W betonie, przy wierzchołku szczeliny, istnieje strefa fizycznej nieliniowości, odpowiadająca obszarem strefie intensywnego mikrozarysowania. Istnieje stosunkowo niewiele technik eksperymentalnych, pozwalających analizować obszary wierzchołków szczelin w kompozytach betonowych [1]. Do efektywnych metod służących badaniom problemów rys w konstrukcjach w makroskali należy metoda warstwy powierzchniowej, jakkolwiek w odniesieniu do betonu

istotną przeszkodą jest wyznaczenie charakterystyk sprężystych materiału w obszarach mikrozarzysowania. Podstawowe równanie metody zapisane w naprężeniach zawiera charakterystyki sprężyste materiału warstwy i badanego elementu :

$$f_k = (\sigma_y - \sigma_x)^2 + (2\tau_{xy})^2 - [Nf_{\sigma} E_b (1 + \nu_w)]^2 [2E_w (1 + \nu_b)]^{-2}. \quad (1)$$

Konieczna jest więc znajomość zarówno współczynników sprężystości warstwy powierzchniowej E_w , ν_w , jak i betonu E_b^* , ν_b^* . Postępująca w obszarze strefy mikrozarzysowania degradacja sprężysta materiału zmienia w znacznym stopniu jego własności. Ze względu na powstałe pole mikrorys, tworzące lokalne nieciągłości, można w tym przypadku mówić o pewnych "pozornych" wartościach współczynników sprężystości. Wprowadzając tego rodzaju założenie model ciała charakteryzowany "pozornymi" współczynnikami E_b^* i ν_b^* można uznać za wariant teorii "efektywnego modułu", której zależ. jest przedstawienie odrębnego charakteru ośrodka kompozytowego w ramach ośrodka jednorodnego.

2. Pozorny współczynnik sprężystości betonu E_b^* w strefie mikrorys

Wielkość E_b^* reprezentuje pewien ciągły, sprężysty materiał o cechach zależnych od stopnia rozwoju mikroszczelin w rzeczywistym kompozycie betonowym. W ogólności wartość tego współczynnika można wyznaczyć analitycznie [2.3]. Konieczne jest w tym przypadku wprowadzenie następujących założeń : a - materiał niezarysowany uważa się za lokalnie izotropowy, b - statystyczny rozkład wymiarów, kształtów, lokalizacji i orientacji rys jest na tyle przypadkowy, że ciało można uważać za jednorodne w makroskali. Makroskopowa zależność $\sigma - \epsilon$ jest więc w tym przypadku liniowa. W ograniczonym zakresie możliwe jest również uwzględnianie interakcji pomiędzy rysami.

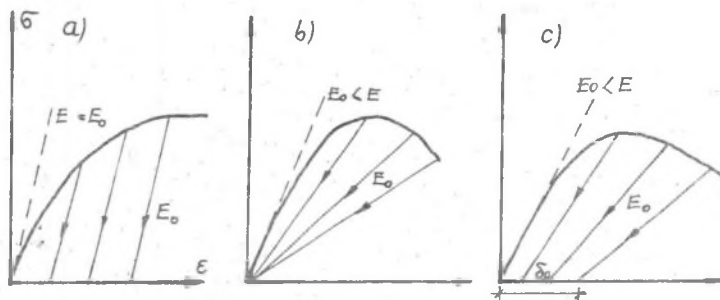
Jedną z prostszych analitycznych relacji określających E^* jest zależność (2) sformułowana dla dowolnego rozkładu rys eliptycznych w materiale [2] :

$$E^*(E)^{-1} = 1 - 2Na^3(\alpha)^{-1} [3f(\nu^*) + 2g(\nu^*, \beta)] \quad (2)$$

przy oznaczeniach : E - współczynnik sprężystości ciała bez szczelin, N - ilość mikrorys w jednostce objętości, a - charakterystyczny, liniowy wymiar rysy, $\alpha = 15$ (współczynnik bezwymiarowy), $f(\nu^*)$ - bezwymiarowy współczynnik kształtu zależny od pozornego współczynnika Poissona ν^* oraz geometrii szczelin, $g(\nu^*, \beta)$ - bezwymiarowy parametr kształtu zależny od ν^* oraz kąta β

orientującego szczelinę w stosunku do wektora naprężeń stycznych. Omawiany sposób wyznaczania E^* jest w odniesieniu do betonu mało przydatny ze względu na konieczność empirycznego wyznaczania ilości mikrorys w jednostce objętości czy też charakterystycznego, liniowego wymiaru szczeliny. Pomocne są w tym przypadku badania stereologiczne betonu [4], pozwalające określić statystyczne wskaźniki mikrodefektów w kompozycie o danych zawartościach zróżnicowanych frakcji zwirowych. Wynikające z nich wartości $E_D^*(E)^{-1}$ wahają się w szerokim zakresie (0.3 - 0.8) i zależą zarówno od składu kompozytu, jak i od rodzaju i kierunku działania obciążenia (rozciąganie - ściskanie, obciążenia działające równoległe bądź prostopadle do kierunku betonowania).

Alternatywna, prostsza metoda jest określenie E_D^* na podstawie wykresu odkształceń w strefie mikrozarzysowania [5]. W tym celu należy przyjąć model fenomenologiczny betonu. Pełne krzywe $\sigma - \epsilon$, uzyskiwane na próbkach rozciąganych w sztywnych maszynach wytrzymałościowych, cechuje opadająca gałąź wykresu. Nie wykazują one jednocześnie wyraźnego, poziomego odcinka, charakterystycznego dla uplastycznienia (rys. 1-a). Parametrem odróżniającym zjawiska plastyczności i pęknięcia w betonie jest nachylenie wykresu $\sigma - \epsilon$ przy odciążeniu - uplastycznienie nie zmienia odciażeniowego modułu sprężystości E_0 (rys. 1-a), podczas gdy proces pęknięcia powoduje postępującą degradację sprężystą materiału przejawiającą się zmniejszaniem E_0 (rys. 1-b). Najbliższy rzeczywistości jest model plastyczno - kruchy, który szczególnie w przypadku próbek ścisanych dobrze odzwierciedla charakter procesu zniszczenia betonu (rys. 1-c).



Rys. 1. Modele betonu : a - plastyczny, b - sprężysto-kruchy, c - plastyczno-kruchy

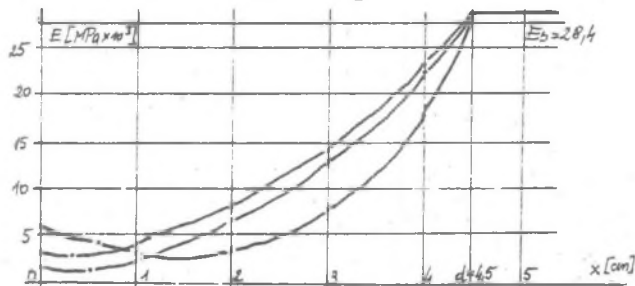
Właściwe kompozytom betonowym mikrozarzysowanie, powstające w rozciąganych obszarach obejmujących sąsiedztwo szczelin, można opisać za pomocą modelu sprężysto - kruchego.

3. Procedura wyznaczania E^*

Podstawę empiryczną stanowią badania zginanych belek betonowych o wymiarach 0.10 x 0.20 x 0.80 m ze sztucznie wytworzonymi szczelinami o wysokości względnej $a/h = 0.3$. W części środkowej belek naklejano po jednej stronie elastooptyczną warstwę powierzchniową, po drugiej natomiast układ tensometrów elektrooporowych. Na ich podstawie uzyskano wykresy odkształceń względnych w przekrojach środkowych belek zawierających szczelinę. Dla każdego poziomego obciążenia możliwe jest sformułowanie warunków równowagi sił w przekroju betonowym [5]. Występująca w nich funkcję naprężeń $\sigma(x)$ można w każdym punkcie opisać poprzez iloczyn funkcji odkształceń $\varepsilon(x)$ - wyznaczonej eksperymentalnie - oraz funkcji współczynnika sprężystości betonu $E_b(x)$. Wszystkie te funkcje zależą od współrzędnej x , czyli od położenia na wysokości przekroju :

$$\sigma(x) = \varepsilon(x) E_b(x) \quad (3)$$

Doświadczalne krzywe $\varepsilon(x)$ aproksymowano wielomianem 7 stopnia. Założono, że do poziomego odkształceń $\varepsilon = 8 \times 10^{-5}$ (rozciąganie) współczynnik $E_b = \text{const.}$, co w połączeniu z warunkami równowagi pozwoliło opisać funkcję $E_b(x)$ wielomianem 2 stopnia. Na rys. 2 przedstawiono 3 przykładowe krzywe $E_b(x)$.



Rys. 2. Krzywe $E_b(x)$ oraz wartości E^*

W następnej kolejności wyznaczono wielkości E_b^* jako wartości średnie funkcji $E_b(x)$ w przedziale zmienności d :

$$E_b^* = (d)^{-1} \int_0^d E_b(x) dx \quad (4)$$

Uzyskane w ten sposób wielkości podano na rys. 2. Są one rzędu $8-9 \times 10^3$ MPa, co w porównaniu z początkową wartością $E_b = 30 \times 10^3$ MPa wskazuje na znaczną degradację sprężystą materiału w tym obszarze.

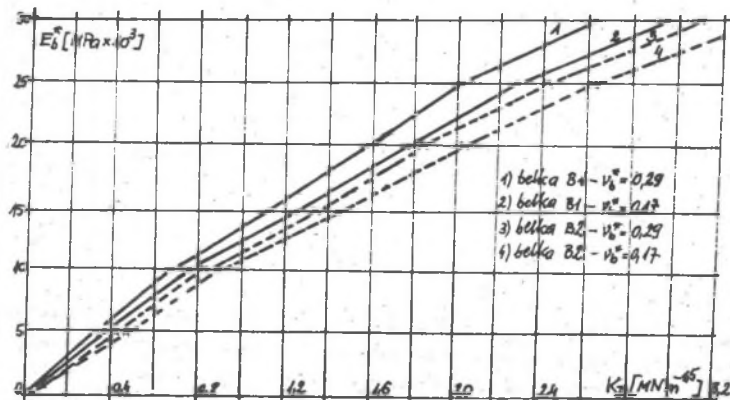
4. Związek $K_I - E_b^* - \nu_b^*$

Dla wyznaczenia parametrów charakteryzujących pole naprężeń przy wierzchołku szczeliny w betonie, zbudowano procedurę numeryczną wykorzystującą dane fotoelastoptyczne. Zastosowano procedurę Newtona w połączeniu z procesem minimalizacji metodą najmniejszych kwadratów [6]. Równaniem opisującym linie izochrom jest funkcja f_k ,

$$f_k(K_I, K_{II}, \beta_1, \beta_2, \sigma_{ox}, E_b^*, \nu_b^*) = 0, \quad (5)$$

w której K_I, K_{II} - są współczynnikami intensywności naprężeń, β_1, β_2 - wyższymi wyrazami rozwinięcia funkcji naprężeń, σ_{ox} - polem jednorodnych naprężeń równoległych do kierunku szczeliny.

Ilościowe oszacowanie zależności $K_I - E_b^*$ uzyskano na podstawie serii obliczeń numerycznych przeprowadzonych dla zmieniających się wartości E_b^* . Na rys. 3 przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych wykonanych dla 2 zbiorów danych fotoelastoptycznych. Ponadto, pokazano krzywe prezentujące wpływ zmiany współczynnika Poissona ν_b^* na wartości K_I . Uzyskano je w opisany wyżej sposób, przeprowadzając każdorazowo serię obliczeń dla wartości $\nu_b^* = 0.17$ oraz $\nu_b^* = 0.29$.



Rys. 3. Zależności $K_I - E_b^*$ oraz wpływ zmienności ν_b^* na ich położenie

Prezentowane wyniki wykazują decydujący wpływ współczynnika sprężystości E_b^* na wartości parametrów pęknięcia betonu. Przyrost E_b^* w granicach $10-30 \times 10^3$ MPa zwiększa kilkakrotnie wartości K_I . Wartości parametru K_I wyznaczone dla końcowych stadiów obciążenia ($P = 0.9P_{II}$) wynoszą $0.99-1.19 \text{ MNm}^{-1.5}$ i są zbliżone do krytycznej wartości K_{IC} dla betonu przyjmowanej w granicach $1.0-1.6 \text{ MNm}^{-1.5}$. Wskazuje to na możliwość stosowania E_b^* jako charakterystyki sprężystej materiału w strefie mikrozarzysowania. Wielkości ν_b^* nie mają tak wielkiego wpływu na stan naprężeń. Ewentualna zmiana ν_b^* z 0.17 na 0.29 powoduje 8-11% różnice w wartościach parametrów opisujących naprężenia.

LITERATURA

- [1] Jankowski L., Styś D.; Strefa mikrozarzysowania w otoczeniu szczeliny w elementach betonowych badanych metoda warstwy powierzchniowej. Arch. Inż. Ład., tom XXXII, 2/1986, 263-276.
- [2] Budiansky B., O'Connell R.J.; Elastic moduli of a crack solid. Int. J. of Solids and Struct., vol.12, 1976, 81-97.
- [3] Smith E.; The effect of material inhomogeneity on the fracture toughness of brittle material. J. of Material Science Letters, vol.3, No.1, 1984, 77-78.
- [4] Stroeven P.; Stereological analysis of structural features of concrete. Własności mechaniczne i struktura kompozytów betonowych, PAN-Ossolineum 1974, 337-366.
- [5] Styś D.; Statyczny i energetyczny parametr pęknięcia betonu. XXXI Konf. Nauk. KILiW PAN, Krynica 1985, tom II, 67-72.
- [6] Styś D.; Numerical analysis of the stress field parameters in the fracture process zone in concrete. BMC-II, Poland 1988.

УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА В РАЙОНЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Резюме

В работе обсуждались проблемы определения упругих характеристик бетонного композита в районе концентрации напряжения в верхней части трещины. Представлен метод определения "мнимого" коэффициента упругости бетона E_b^* , который учитывает упругую деградацию материала в зоне микротрещин. Проанализировано влияние E_b^* и ν_b^* на параметр растрескивания K_I .

ELASTIC CHARACTERISTICS OF CONCRETE IN THE AREAS
OF GEOMETRICAL SINGULARITIES

Summary

Paper deals with the problem of elastic characteristics of concrete in the stress concentration region at the vicinity of a crack tip. Methods of derivation of "apparent" coefficients of elasticity E_b^* for concrete, taking into account material's elastic degradation in microcracking zone are presented. Applying photoelastic data, stress field characteristics were calculated numerically. It was possible to find $K_I-E_b^*$ relation and to qualify the influence of Poisson ratio ν_b^* on $K_I-E_b^*$ curve localization.