MICHAŁ A. GLINICKI ¹⁾

OCENA I PROJEKTOWANIE FIBROBETONÓW NA PODSTAWIE WYTRZYMAŁOŚCI RÓWNOWAŻNEJ²⁾

STRESZCZENIE. W artykule zamieszczono przegląd metod oceny właściwości betonów ze zbrojeniem rozproszonym (fibrobetonów) i projektowania elementów konstrukcji z fibrobetonów. Przeanalizowano podstawowe koncepcje charakteryzowania struktury zbrojenia rozproszonego oraz opisu właściwości fibrobetonu po zarysowaniu. Na podstawie norm omówiono metody określania odporności na pękanie przy zginaniu, w tym wytrzymałości równoważnej na zginanie.

Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych odporności na pękanie przy zginaniu fibrobetonów z włóknami stalowymi o rozmaitych wymiarach i o różnej zawartości włókien. Skład mieszanek betonowych B 30 odpowiadał zwykle stosowanym w nawierzchniach przemysłowych. Stwierdzono wzrost wytrzymałości równoważnej na zginanie ze wzrostem smukłości i zawartości włókien. Omówiono sposób wykorzystania wytrzymałości równoważnej do projektowania fibrobetonowych nawierzchni na podłożu gruntowym. Przedstawiono nowe propozycje obliczania nośności i rozwarcia rys w elementach konstrukcyjnych z żelbetu wykonanego z dodatkiem zbrojenia rozproszonego.

1. WSTĘP

Stan normalizacji w zakresie stosowania fibrobetonów w budownictwie jest niezadowolający. Brak norm krajowych i ogólnoeuropejskich znacznie ogranicza rozwój zastosowań tych materiałów ze szkodą dla trwałości elementów i konstrukcji z betonu. Obecność zbrojenia rozproszonego w betonie zmienia dość radykalnie niektóre jego

¹⁾ dr hab. inż. - Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz redaktor Kwartalnika "Drogi i Mosty"- Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

²⁾ rozszerzona wersja referatu przedstawionego na XVII Ogólnopolskiej Konferencji "Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji" w Ustroniu, 20-23.02.2002

właściwości i to w sposób wymykający się z zakresu stosowania metod badań i projektowania konstrukcji betonowych. Dlatego nierazko zbrojenie rozproszone jest używane niewłaściwie, bądź w sposób odległy od optymalnego.

Zbrojenie rozproszone w postaci włókien, najczęściej stalowych, stosuje się w betonach zwykłych, a także w betonach zbrojonych prętami stalowymi, siatkami oraz w betonach sprężonych. Największe znaczenie ma wpływ włókien na hamowanie powstawania i rozwoju zarysowań w betonie oraz znaczne podwyższenie energii zniszczenia. Stosowanie włókien we właściwy sposób pozwala uzyskać wzrost wytrzymałości na rozciąganie i ścinanie, wzrost przyczepności prętów zbrojenia do betonu, odporność zmęczeniową i udarność [1, 2].

Dotychczasowy zasięg zastosowań fibrobetonów w budownictwie komunikacyjnym obejmuje przede wszystkim nawierzchnie silnie obciążone (parkingi, lotniska, nabrzeża portowe), płyty pomostów, warstwy naprawcze konstrukcji, wylewane lub natryskiwane oraz prefabrykaty cienkościenne. Przykłady zastosowań przedstawiają monografie [1, 2] czy też raport ACI [3], natomiast krajowe zastosowania dotyczyły przede wszystkim nawierzchni przemysłowych, nawierzchni placów składowych i parkingów, a także prototypowo podtorza na szlaku metra, nawierzchni heliportu na szczycie budynku wysokiego w Warszawie, płyt pomostów i natryskiwanych warstw naprawczych na obiektach inżynierskich. W pracy [4] omówiono przykłady zastosowania fibrobetonu na warstwę ochronno-spadkową w mostach kolejowych oraz do produkcji prefabrykatów zagęszczanych metodą wibrowania lub próżnioprasowania.

Krajowe zastosowania zbrojenia rozproszonego w betonach są dopuszczone na podstawie aprobat technicznych, wydawanych na wnioski producentów lub importerów włókien do betonu, przeważnie włókien stalowych. W badaniach aprobacyjnych pomija się jednak podstawową właściwość fibrobetonu, jaką jest odporność fibrobetonu na zarysowanie i pękanie. Wymagania techniczne GDDP [5], dotyczące fibrobetonów do napraw obiektów mostowych, zawierają konkretne wskazówki do realizacji i kontroli jakości robót. Zalecana zawartość włókien stalowych w fibrobetonie wynosi od 0,5% do 1% objętościowo, założono powiększoną odporność na pękanie, ale wymagane właściwości fibrobetonu nie różnią się od wymagań na beton bez włókien. Jedynie w instrukcji [6] znalazły się zalecenia, aby ocenę efektywności włókien w betonie przeprowadzać na podstawie odporności fibrobetonu na pękanie przy zginaniu i na podstawie wytrzymałości na uderzenie. Jednakże ta instrukcja ma znaczenie tylko informacyjne. Brak innych dokumentów krajowych o charakterze normalizacyjnym znacznie ogranicza wykorzystanie fibrobetonów w budownictwie.

W artykule przedstawiono podstawowe koncepcje i metody oceny właściwości fibrobetonów oraz metody projektowania elementów konstrukcji z fibrobetonów na podstawie wytrzymałości równoważnej na zginanie. Zamieszczono też wyniki badań doświadczalnych, przeprowadzonych w IPPT PAN, dotyczących wpływu zawartości i rozmiarów włókien stalowych na wytrzymałość równoważną fibrobetonu. W pracy uwzględniono typowe fibrobetony, zawierające nie więcej niż 1,5% włókien objęto-

ściowo. Zagadnienia fibrobetonów wysokowartościowych oraz wykorzystania włókien niemetalowych i mikrowłókien pozostawiono poza zakresem tego artykułu. Pominęte tu zagadnienia technologii wykonania fibrobetonów i projektowania mieszanki betonowej są omówione w opracowaniach monograficznych [1-3].

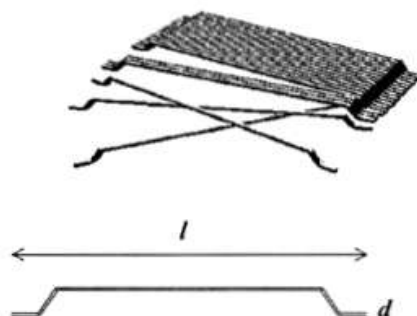
2. STRUKTURA ZBROJENIA ROZPROSZONEGO

Metalowe włókna do betonu stosuje się w formie włókien krótkich (pojedynczych, w pakietach, w postaci mat) lub włókien ciągłych (druły, siatki). Zbrojenie rozproszone w postaci włókien krótkich charakteryzuje się następującymi parametrami:

- a) materiał włókien (tutaj ograniczony tylko do różnych gatunków stali),
- b) wymiary włókien, tj. długość l , średnica d oraz smukłość l/d ,
- c) kształt włókien, np. o przekroju okrągłym - proste, faliste, zakończone haczykami, z zakończeniami stożkowymi, o przekroju prostokątnym, o przekroju nieregularnym etc. (klasyfikację kształtów włókien podaje norma amerykańska ASTM A820-01),
- d) przestrzenny rozkład włókien (przypadkowy lub regularny),
- e) zawartość włókien V_f (objętościowy udział włókien w kompozycie).

Wśród włókien stalowych dostępnych w kraju, najczęściej stosowane są włókna z drutu o przekroju okrągłym, zakończone haczykami, jak na rysunku 1. Ilustracja przedstawia jeden z wariantów konfekcjonowania włókien w postaci pakietów po 20-30 sztuk, sklejonych klejem wodorozpuszczalnym, w celu ułatwienia ich dozowania do mieszanki betonowej.

Parametry zbrojenia rozproszonego przyjmuje projektant, mając na uwadze uzyskanie żądanych właściwości fibrobetonu. W odróżnieniu od zbrojenia w żelbecie, którego położenie jest dokładnie określone w przekroju elementu konstrukcji, zbro-



Rys. 1. Widok włókien stalowych zakończonych haczykami
Fig. 1. Hooked-end steel fibres

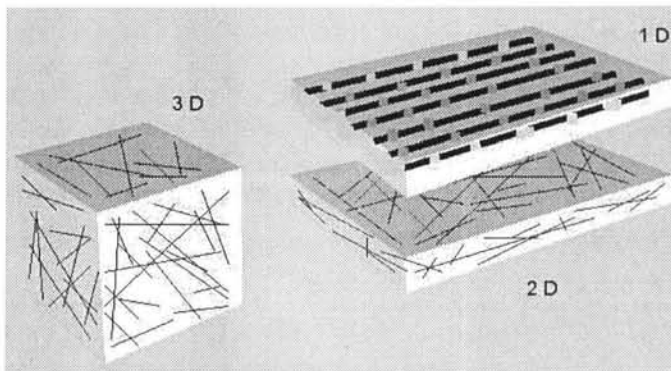
jenie włóknami krótkimi jest z natury rozmieszczone przypadkowo. Niepotrzebna jest znajomość rozmieszczenia poszczególnych włókien, wystarczy określenie średniej zawartości włókien w jednostce objętości oraz uśrednionej orientacji włókien. Nominalną zawartość włókien stalowych V_f w fibrobetonie określa wzór:

$$V_f = \frac{W_f}{\rho_f} = \frac{W_f [\text{kg} / \text{m}^3]}{7850} \quad (1)$$

w którym W_f - zawartość włókien w jednostkach masy w 1 m^3 oraz ρ_f - gęstość stali w kg/m^3 . Zatem $V_f = 0,005$ czyli 0,5% odpowiada dozowaniu około 39 kg włókien do 1 m^3 mieszanki betonowej.

Opis przestrzennego rozkładu włókien przeprowadza się na podstawie odniesienia do wyidealizowanych struktur zbrojenia (rys.2):

- układ włókien zlinearyzowanych (ozn. 1 D),
- układ włókien rozmieszczonych przypadkowo w płaszczyźnie (ozn. 2 D),
- układ włókien rozmieszczonych przypadkowo w przestrzeni (ozn. 3 D).



Rys.2. Schematy wyidealizowanych rozkładów włókien : 1 D, 2 D i 3 D
Fig.2. Ideal distribution of fibres : 1 D, 2 D and 3 D

Rzeczywisty rozkład włókien w elementach z fibrobetonu, jak też rzeczywistą zawartość włókien, można sprawdzić na podstawie zdjęć rentgenowskich lub przekrojów tych elementów, analizowanych metodami stereologii; rozkład włókien jest na ogół mniej lub więcej niejednorodny. Do opisu wyidealizowanych i rzeczywistych rozkładów włókien w fibrobetonach często wykorzystywano pojęcie rozstawu włókien s (ang. *spacing*), definiowanego jako średnia odległość między środkami ciężkości włókien. Przy założeniu równomiernego rozkładu środków ciężkości włókien można przyjąć, że objętość elementu fibrobetonowego dzieli się na tyle kostek sześciennych o objętości s^3 , ile w danej objętości jest pojedynczych włókien. Wymiar krawędzi kostki, tj. rozstaw s , określa następujący wzór:

$$s = \sqrt[3]{\frac{\pi l d^2}{4V_f}} \quad (2)$$

Na podstawie rozstawu włókien można ocenić współdziałanie pojedynczych włókien: przy dużym rozstawie włókien, analogicznie jak przy dużym rozstawie prętów zbrojenia, ocena tego współdziałania jest negatywna. Znane są wymagania na minimalny rozstaw włókien zapewniający ich współdziałanie w fibrobetonie, np.:

$$\frac{s}{l} \leq 0,45 \quad (3)$$

Powyższy warunek można traktować jako konieczny, ale nie wystarczający do hamowania zarysowań betonu.

Na podstawie teoretycznego rozstawu włókien według wzoru (2) można eliminować mało efektywne układy włókien, posługując się kryterium (3). Na podstawie obliczenia parametru s/l można stwierdzić przykładowo, że w przypadku włókien o długości $l = 50$ mm i średnicy $d = 1$ mm (smukłość 50), minimalna zawartość włókien zapewniająca ich współdziałanie wynosi 0,32%, co odpowiada dozowaniu 25 kg/m³. Pojęcie rozstawu włókien dotyczy także włókien dozowanych do mieszanki betonowej w postaci pakietów, bowiem w wyniku mieszania pakiety ulegają separacji na pojedyncze włókna.

Weryfikacja wzoru (2) okazała się niemożliwa na podstawie obserwacji rzeczywistych rozkładów włókien w fibrobetonach, a przecież celem opisu struktury zbrojenia rozproszonego jest określenie jej wpływu na właściwości mechaniczne fibrobetonu w sposób sprawdzalny doświadczalnie. Studia nad rzeczywistym rozkładem włókien doprowadziły do określenia w [7] następujących wzorów na powierzchnię przekroju poprzecznego elementu fibrobetonowego α^{iD} ($i = 1,2,3$) przypadającej na jedno włókno:

$$\alpha^{1D} = \frac{\pi d^2}{4 V_f} \quad ; \quad \alpha^{2D} = \frac{\pi^2 d^2}{8 V_f} \quad ; \quad \alpha^{3D} = \frac{\pi d^2}{2 V_f} \quad (4)$$

gdzie 1D, 2D i 3D są oznaczeniami idealnych struktur zbrojenia. Pierwiastek kwadratowy z (α^{iD}) określa bok kwadratowego pola elementarnego, przypadającego na pojedyncze włókno w przekroju, tj. rozstaw włókien na płaszczyźnie. Znaczenie przestrzennego rozkładu włókien w fibrobetonie ujmują dodatkowo tzw. współczynniki efektywności kierunkowej włókien η^{iD} ($i = 1,2,3$), określone następującymi wzorami:

$$\eta^{1D} = 1 ; \eta^{2D} = \frac{2}{\pi} = 0,637 ; \eta^{3D} = \frac{1}{2} \quad (5)$$

Posługując się pojęciami mechaniki pęknięcia można przewidywać zależność odwrotnie proporcjonalną między rozstawem włókien i wytrzymałością fibrobetonu na rozciąganie. Na podstawie α^{iD} oraz η^{iD} , uwzględniając także przenoszenie obciążeń na powierzchni bocznej włókna, otrzymuje się następujący parametr opisujący teoretyczną efektywność mechaniczną zbrojenia rozproszonego χ^{iD} :

$$\chi^{iD} = \begin{cases} \frac{4}{\pi} V_f \frac{l}{d} & i=1 \\ \frac{16}{\pi^3} V_f \frac{l}{d} & i=2 \\ \frac{1}{\pi} V_f \frac{l}{d} & i=3 \end{cases} \quad (6)$$

Teoretycznie więc efektywność mechaniczna zbrojenia rozproszonego jest proporcjonalna do iloczynu ($V_f l/d$), który jest nazywany stopniem zbrojenia włóknistego.

Analiza struktury zbrojenia w fibrobetonach obejmuje również obserwacje obszarów styku włókien z zaczynem cementowym, np. [8]. Natura i wymiary strefy stykowej zależą zarówno od kształtu i właściwości powierzchni włókien, od składu mieszanki betonowej i technologii wykonania fibrobetonu. Jak zaobserwowano, przy wykonaniu fibrobetonu wokół włókien tworzą się pustki wypełnione wodą. Są to efekty wydzielania mleczka cementowego i zatrzymania pewnej ilości wody pod powierzchnią włókna, a także nieefektywnego upakowania ziaren cementu w obszarze do około 40 μm wokół włókien. W takim obszarze wokół włókna istnieje więc strefa "przejściowa", słabsza i bardziej porowata niż pozostałe obszary zaczynu cementowego. Właściwości strefy przejściowej należy traktować jako uzupełniający parametr struktury zbrojenia rozproszonego, ale identyfikacja tych właściwości i sformułowanie wymagań nastroczają pewnych trudności.

EFEKTYWNOŚĆ WŁÓKIEŃ W FIBROBETONIE NA ODSZTAŁCENIU

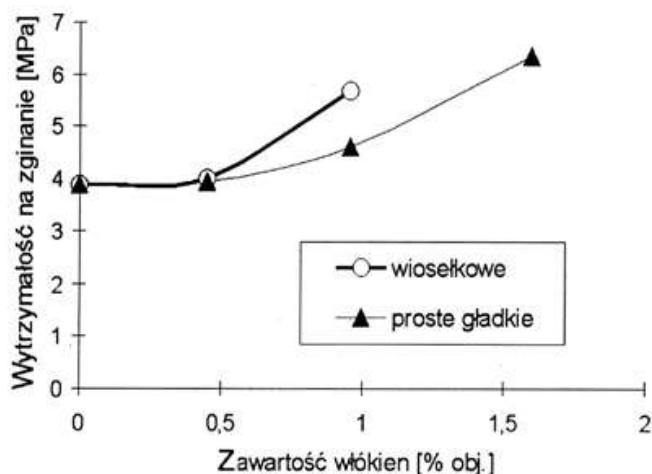
Z definicji zbrojenie włóknami powinno wywoływać wzrost wytrzymałości lub sztywności materiału kompozytowego, toteż badania fibrobetonów u początku ich rozwoju dotyczyły zagadnień wytrzymałości rozumianej w sposób konwencjonalny, taki jak w przypadku betonu zwykłego. Od dawna znane są wyniki badań wskazujące na brak istotnego wpływu zbrojenia rozproszonego na współczynnik odkształcalności liniowej czy na wytrzymałość na ściskanie, natomiast stwierdzono podwyższenie

wytrzymałości na rozciąganie (określanej różnymi sposobami). Znane są też rozmaite zależności empiryczne i teoretyczne ujmujące wpływ struktury zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość betonu na rozciąganie, np. poniższy wzór na wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie przy zginaniu f_{fl} w zależności od stopnia zbrojenia włóknistego ($V_f \cdot l/d$), opracowany w 1974 roku przez R.N. Swamy'ego i P.S.Mangata:

$$f_{fl} = 0,97(1 - V_f) f_{fl}^m + 3,41 V_f \frac{l}{d} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

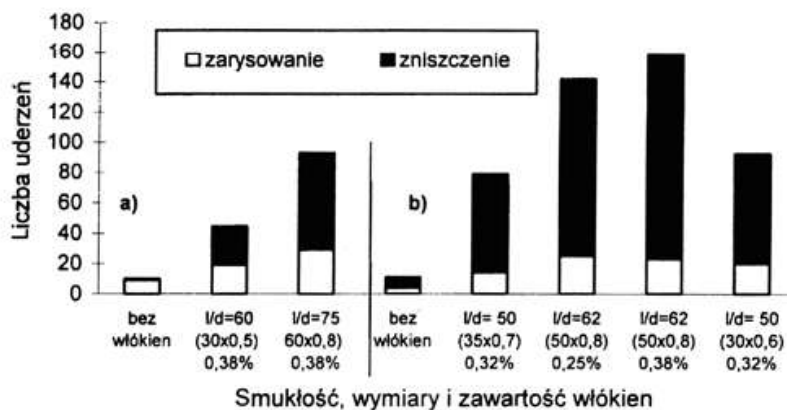
gdzie f_{fl}^m oznacza wytrzymałość na zginanie betonu bez włókien. Wyniki badań doświadczalnych [9, 10] w różnym stopniu potwierdzają powyższą zależność, wskazują wszakże na wzrost tej wytrzymałości dopiero przy przekroczeniu pewnej minimalnej zawartości włókien. Rysunek 3 pokazuje przykładowy wpływ zawartości i kształtu włókien na wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu [10]. Stosowane w tych badaniach włókna stalowe charakteryzowały się podobną smukłością ($l/d = 45-50$), natomiast różniły się kształtem, tj. jedne były włóknami prostymi, gładkimi, natomiast drugie miały zakotwienia na końcach w postaci "wiosełek". Jak można zauważyć, przy $V_f \leq 0,5\%$ wpływ włókien na wytrzymałość fibrobetonu na zginanie jest nieznaczny, natomiast przy V_f około 1% obserwuje się przyrosty wytrzymałości do 30-46%, a przy zawartości włókien 1,6% wzrost wytrzymałości sięga 60-90%. W przypadku stosowania włókien z deformacjami (haczykami, wiosełkami itp.) w celu polepszenia mechanicznego zakotwienia w matrycy, efektywność zbrojenia rozproszonego jest znacznie większa niż w przypadku włókien prostych. Spostrzeżenie odnośnie minimalnej zawartości włókien potwierdzono w licznych badaniach, m.in. w [11], z których wynikało, że zawartość co najmniej 0,5% włókien o wymiarach $l = 50$ mm, $d = 1$ mm z zakończeniami haczykowatymi ($V_f \cdot l/d = 0,26$) zapewnia poprawę właściwości betonu. Uwzględniając różnice rozkładu przestrzennego włókien przy grubości belek 40 mm [11] i 150 mm [10], które mogą wywoływać różnice efektywności włókien teoretycznie według wzoru (6) nawet do 62%, można zauważyć również liczbową zgodność wyników cytowanych badań.

Wpływ wymiarów włókien stalowych haczykowatych na wytrzymałość fibrobetonu na uderzenia przedstawiono np. w [12] i [13] na podstawie badań przeprowadzonych według zaleceń Amerykańskiego Komitetu Betonu ACI. Wytrzymałość na uderzenie określono jako liczbę uderzeń do określonego stanu uszkodzenia próbnego elementu fibrobetonowego, tj. do pierwszego widocznego zarysowania próbki oraz do umownego zniszczenia próbki. W obu przypadkach włókna o większej smukłości były bardziej efektywne; dodatek tych włókien w niewielkiej ilości, tj. 0,38%, spowodował zwiększenie liczby uderzeń do zarysowania o 100-800% oraz 4-13-krotny wzrost liczby uderzeń do zniszczenia (rys.4.). W przeciwieństwie do badania wytrzymałości na zginanie, badanie udarności wykazuje znaczące efekty obecności zbrojenia rozproszonego nawet przy niewielkich zawartościach włókien, już od stopnia zbrojenia włóknistego ($V_f \cdot l/d$) $> 0,15$ przy przestrzennym rozkładzie włókien.



Rys.3. Wpływ zawartości i kształtu włókien stalowych na wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie przy zginaniu wg [10]

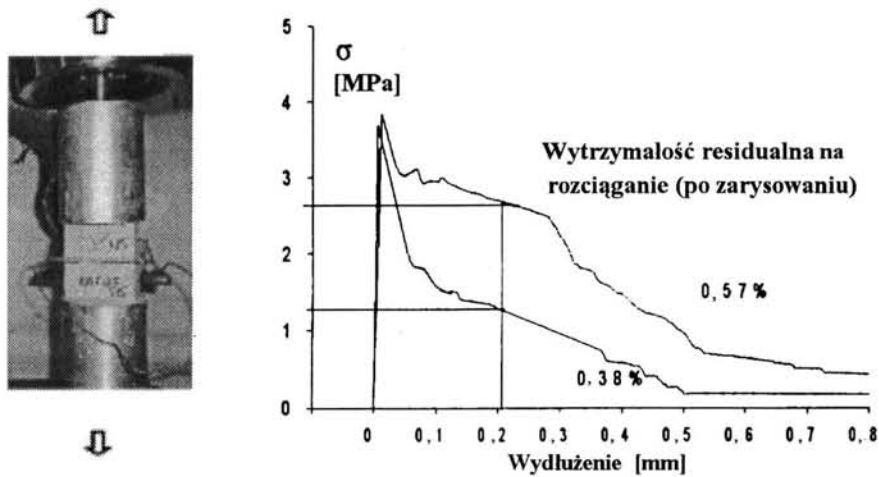
Fig.3. The influence of fibre shape and content on the flexural strength of fibre concrete [10]



Rys.4. Wpływ zawartości i wymiarów włókien stalowych zakończonych haczykami na wytrzymałość na uderzenie określoną metodą ACI: a - wg [12], b - wg [13]

Fig.4. The influence of fibre size and content of hooked-end steel fibres on the impact resistance of fibre concrete: a - after [12], b - after [13]

Zasadnicza funkcja zbrojenia rozproszonego polega na hamowaniu pojawiania się rys w betonie oraz hamowaniu ich rozprzestrzeniania czyli pękania. Dlatego właściwy opis efektywności zbrojenia rozproszonego w betonie uzyskuje się sięgając do pojęć mechaniki pękania. Na podstawie badań próbek pryzmatycznych ze szczeliną wstępną, poddanych rozciąganiu bezpośredniemu, uzyskano wykresy siły rozciągającej w funkcji wydłużenia próbki, pokazane przykładowo na rysunku 5 [14]. W



Rys.5. Widok próbki fibrobetonowej poddanej rozciąganiu bezpośredniemu i przykładowe wykresy siły rozciągającej w funkcji wydłużenia próbek o różnej zawartości włókien stalowych (na podstawie [14])

Fig.5. Notched fibre concrete specimen in direct tension and examples of load-extension diagrams for varying steel fibre content, after [14]

odróżnieniu od liniowo-sprężysto-kruchego zachowania się betonu, fibrobeton z włóknami stalowymi wykazuje zniszczenie kohezyjne. Po osiągnięciu maksymalnej siły rozciągającej i powstaniu rysy próbka zachowuje zdolność przenoszenia obciążenia rozciągającego, która to zmniejsza się wraz ze wzrostem szerokości rozwarcia rysy. Opis właściwości fibrobetonu na podstawie modelu materiału z osłabieniem, tzw. modelu rysy fikcyjnej (ang. *fictional crack model*), podał A. Hillerborg w roku 1980 [15].

Na podstawie wyników badań fibrobetonu zilustrowanych na rysunku 5 można dobrze charakteryzować efektywność zbrojenia rozproszonego w betonie i klasyfikować właściwości fibrobetonu. Na podstawie wykresu siły rozciągającej w funkcji rozwarcia rysy (tj. po powstaniu rysy) można określić tzw. wytrzymałość residualną przy rozciąganiu f_{ir} . Umownie przyjmuje się, że jest to fikcyjne naprężenie rozciągające, działające przez rysę, przy rozwarciu rysy 0,2 mm. O ile wytrzymałość fibrobetonu na rozciąganie głównie zależy od właściwości samej matrycy betonowej, to wytrzymałość residualna f_{ir} zależy przede wszystkim od struktury zbrojenia rozproszonego, określonej parametrami włókien, oraz od właściwości strefy przejściowej między włóknami i zaczynem. Stwierdzono, że f_{ir} proporcjonalnie rośnie ze wzrostem stopnia zbrojenia włóknistego ($V_f \cdot l/d$) [16]:

$$f_{ir} = \Lambda \tau V_f \frac{l}{d} \quad (8)$$

w którym τ - przyczepność włókien do zaczynu, a współczynnik Λ uwzględnia jednocześnie orientację układu włókien względem kierunku naprężeń głównych, długość zakotwienia włókien i inne właściwości struktury zbrojenia włóknistego.

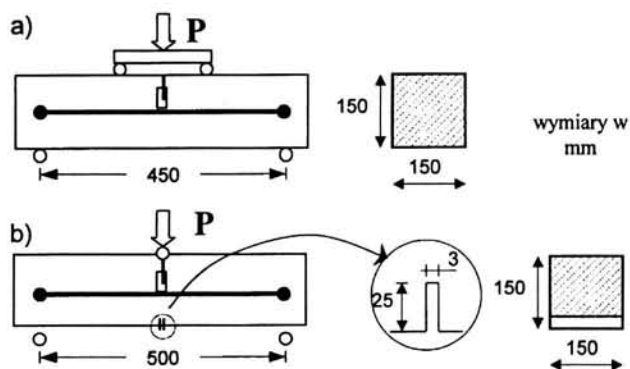
Ważną funkcją zbrojenia rozproszonego w betonie jest hamowanie powstawania zarysowań wskutek skurczu plastycznego czy skurczu w wyniku wysychania. W tym celu stosuje się najczęściej włókna niemetalowe. Wyniki badań przywołane w pracach [1, 2, 3] wskazują, że wzrost zawartości włókien wywołuje redukcję maksymalnej rozwartości rys skurczowych. Znane są też wyniki badań [12, 13] wskazujące na zmniejszenie o około 20-30% wielkości skurczu swobodnego wskutek obecności włókien stalowych.

4. NORMOWE METODY BADAŃ ODPORNOŚCI NA PĘKANIE

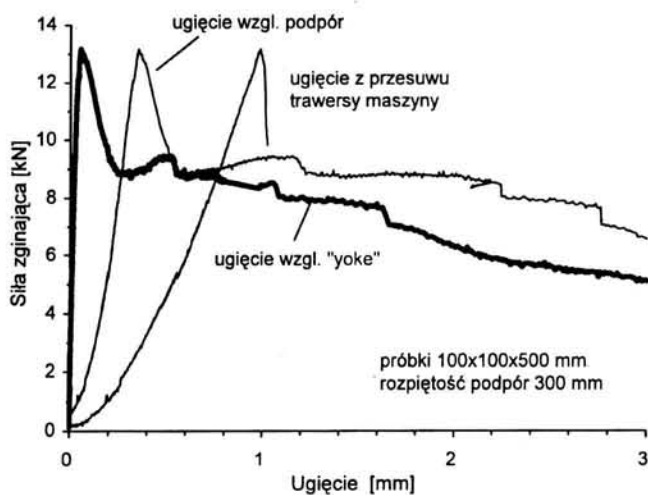
Pomimo braku jednolitych ogólnoeuropejskich lub krajowych norm na badanie właściwości fibrobetonu, kilka metod badawczych jest powszechnie stosowanych i ujętych w dokumentach normalizacyjnych o zasięgu lokalnym. Znane są rozmaite miary odporności fibrobetonu na pękanie, które określa się w badaniach elementów zginanych, belek lub płyt, albo w badaniach elementów poddanych rozciąganiu bezpośredniemu, np. [12, 17]. Podstawowym kryterium wyboru metody określania właściwości fibrobetonu jest adekwatność do sposobu wykorzystania materiału w konstrukcji, przy czym chodzi tu głównie o rozkład zbrojenia rozproszonego. Jak podano w rozdziale 2, efektywność zbrojenia rozproszonego może różnić się aż 4-krotnie w zależności od rozkładu włókien w przestrzeni - wzór (6).

Istniejące normy zalecają określanie właściwości fibrobetonu na podstawie zginania próbek materiału w postaci belek o przekroju 150 x 150 mm, ewentualnie 100 x 100 mm według normy ASTM C1018 [18]. Przyjmuje się, że przekrój próbek 150 x 150 mm jest właściwy do badań fibrobetonów z włóknami o długości ≤ 60 mm. Mniejsze przekroje stosuje się przy wycinaniu elementów próbnych z większych płyt albo w przypadku natryskiwania fibrobetonu do form. Na rysunku 6 a i b pokazano schematy badania próbek fibrobetonowych na zginanie, umożliwiające określenie odporności na pękanie przy zginaniu w postaci tzw. równoważnej wytrzymałości na zginanie (ang. *equivalent flexural strength*) lub tzw. wskaźników odporności na pękanie przy zginaniu (ang. *flexural toughness indices*). W obu przypadkach wymaga się zastosowania maszyny wytrzymałościowej o dużej sztywności sterowanej kinematycznie. Zginanie według norm [19] i [20] wykonuje się dwiema siłami (w 1/3 rozpiętości działa stały moment zginający), z jednoczesnym pomiarem siły i ugięcia belki, przy czym rozpiętość wynosi 450 mm. Według zaleceń niemieckich rozpiętość jest nieco większa i wynosi 600 mm.

Wymagana dokładność pomiaru obciążenia nie odbiega od standardowych wymagań stawianych maszynom wytrzymałościowym, natomiast niezbędna dokładność pomiaru ugięcia belki bywa czasem niesłusznie ignorowana. Przy badaniu odporności



Rys.6. Schemat badania wytrzymałości równoważnej na zginanie: a - według norm JCI SF-4 [19], NBN B15-238 [20]; b- według zaleceń RILEM TC 162 TDF [21]
 Fig.6. Testing of equivalent flexural strength: a - according to Japanese standard [19] and Belgian standard [20]; b - according to RILEM recommendation [21]



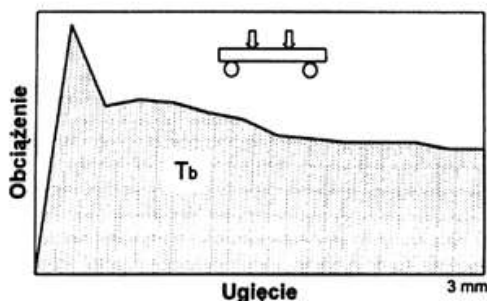
Rys.7. Wpływ sposobu pomiaru ugięcia na wykresy zginania próbek fibrobetonowych (na podstawie badań w IPPT PAN)
 Fig.7. Effects of deflection measurement system on the shape of load-deflection diagrams of FRC specimens (based on IFTR PAS research)

na pękanie przy zginaniu na belkach o dosyć dużej sztywności powstaje bowiem konieczność oddzielenia wpływu ugięcia podpór i elementów obciążających na faktyczne ugięcie belki. Na rysunku 7 zilustrowano wpływ sposobu zamocowania miernika przemieszczeń liniowych na rejestrowane "ugięcia", których różnice sięgają rzędu wielkości. Miarodajne badania odporności na pękanie przy zginaniu wymagają więc

dużej precyzji pomiaru ugięć m.in. poprzez zastosowanie zamocowania miernika ugięcia w linii wyjściowego położenia osi obojętnej belki, czyli tzw. "yoke", jak określa to norma [19].

Rys. 8. Schemat wykresu zginania belki fibrobetonowej do określenia wytrzymałości równoważnej na zginanie

Fig.8. Calculation of equivalent flexural strength using the flexural load-deflection diagram



Odporność na pękanie przy zginaniu określana jest jako ilość energii (wyrażonej np. w [Nm]) potrzebna, aby doprowadzić standardową próbkę do założonego ugięcia w środku rozpiętości, według normy [19] przyjmowanego jako 1/150 część rozpiętości belki w świetle podpór. Na podstawie wykresu siły zginającej w funkcji ugięcia, jaki schematycznie pokazano na rysunku 8, określa się równoważną wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{eq} , zdefiniowaną następującym wzorem:

$$f_{eq} = T_b \frac{L}{\delta_{L/150} bh} \quad (9)$$

w którym:

- T_b – praca zginania określona na podstawie pola powierzchni pod wykresem, mierzonego do ugięcia $\delta_{L/150}$ ($= L/150$),
- b i h – wymiary przekroju poprzecznego belki,
- L – rozpiętość belki.

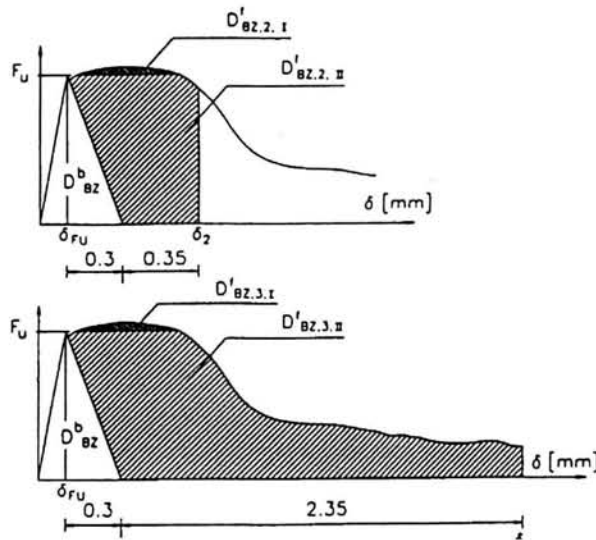
W tym samym badaniu określana jest wartość wytrzymałości fibrobetonu na rozciąganie przy zginaniu f_{fl} - wartość naprężenia odpowiadającego maksymalnej sile zginającej.

W badaniach na zginanie według schematu przedstawionego na rysunku 6 b zniszczenie próbki w środku rozpiętości jest wymuszone przez wstępne nacięcie na głębokość 25 mm [21]. Na podstawie zmierzonych wartości siły zginającej i ugięcia próbki uzyskuje się wykresy jak na rysunku 9. Energia zniszczenia próbki fibrobetonowej określona polem powierzchni pod wykresem do wartości ugięcia δ_2 lub δ_3 oznacza się odpowiednio $D_{BZ,2}^f$ lub $D_{BZ,3}^f$ (rys.9), przy czym $\delta_2 = \delta_{FU} + 0,65$ mm, natomiast $\delta_3 = \delta_{FU} + 2,65$ mm (δ_{FU} – ugięcie odpowiadające maksymalnej sile zginającej). Równoważną wytrzymałość na zginanie $f_{eq,2}$ i $f_{eq,3}$ definiuje się następująco:

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,2,I}^f}{0,65} + \frac{D_{BZ,2,II}^f}{0,50} \right) \frac{L}{b h_{sp}^2} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,3,I}^f}{2,65} + \frac{D_{BZ,3,II}^f}{2,50} \right) \frac{L}{b h_{sp}^2} \quad [\text{MPa}]$$

gdzie: b – szerokość belki, h_{sp} – wysokość netto próbki.



Rys.9. Schemat określania wytrzymałości równoważnej według RILEM [21] na podstawie wykresu zginania belek fibrobetonowych

Fig.9. Calculation of equivalent flexural strength of fibre concrete according to RILEM recommendation [21]

Obok pojęcia wytrzymałości równoważnej na zginanie stosowane bywa pojęcie wytrzymałości residualnej (ang. *residual strength*, *post-cracking strength*) przy zginaniu, które definiuje się analogicznie jak na rysunku 5, jako umowne maksymalne naprężenie rozciągające w przekroju belki przy założonym arbitralnie ugięciu belki już po zarysowaniu. Norma ASTM C1018 podaje definicje wskaźników wytrzymałości residualnej przy zginaniu. Według zaleceń szwedzkich [22] wytrzymałość fibrobetonu określa się w badaniach elementów zginanych według schematu pokazanego na rysunku 6a, z tym że zalecane wymiary próbek wynoszą $h = 75$ mm, $b = 125$ mm, natomiast rozpiętość $L = 6h = 450$ mm. Z wykresów zginania belek odczytuje się wartości naprężeń zginających w środku rozpiętości belki oraz

odpowiadające ugięcie belki δ , aby określić wytrzymałość residualną przy zginaniu definiowaną w sposób następujący:

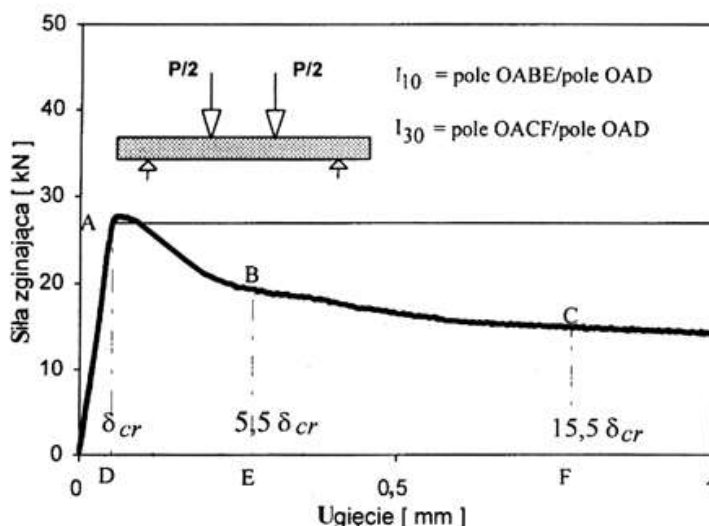
$$f_{fres} = f_{flcr} \frac{R_{10,x}}{100} \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

gdzie: f_{flcr} - granica sprężystości przy zginaniu, $R_{10,x}$ - wskaźnik wytrzymałości residualnej przy zginaniu określony w % na podstawie zależności:

$$R_{10,x} = 100 \cdot \frac{(I_x - I_{10})}{(X - 10)} \quad (12)$$

przy czym $X = 20$ lub 30 , natomiast I_{10} , I_{20} i I_{30} oznaczają wskaźniki odporności na pękanie określone według [18], jak pokazano na rysunku 10.

Wytrzymałość residualna przy zginaniu odpowiada średniemu naprężeniu zginającemu w zakresie ugięć elementu próbnego od $\delta = 5,5 \delta_{cr}$ do $(X + 1) \delta_{cr}/2$, przy czym δ_{cr} oznacza ugięcie odpowiadające granicy sprężystości. Parametr X określa wymaganą ciągliwość elementu konstrukcyjnego (dokładniejsze wyjaśnienie w [22]).



Rys.10. Sposób określania wskaźników odporności na pękanie przy zginaniu wg ASTM [18] do wyznaczenia residualnej wytrzymałości na zginanie według zaleceń szwedzkich [22]

Fig.10. Calculation of ASTM [18] flexural toughness indices for determination of residual flexural strength according to Swedish recommendation [22]

Omówione koncepcje określania odporności fibrobetonu na pękanie przy zginaniu przypisują istotne znaczenie charakterystyce zginania próbek w zakresie pozasprężystym, do określonej normami wartości ugięcia. Na podstawie energii zniszczenia znormalizowanych elementów próbnych określa się równoważną wytrzymałość na zginanie albo na podstawie siły przenoszonej po zarysowaniu określa się wytrzymałość residualną przy zginaniu. Pojęcia wytrzymałości równoważnej i wytrzymałości residualnej czasem występują wymiennie; sposób określania właściwości fibrobetonu jest ściśle związany z metodą wykorzystania wyników w projektowaniu konstrukcji.

5. DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE WYTRZYMAŁOŚCI RÓWNOWAŻNEJ

5.1 WPŁYW KSZTAŁTU I ZAWARTOŚCI WŁÓKIEŃ

W pracy [23] omówiono wpływ kształtu włókien stalowych na wskaźniki odporności na pękanie i na wytrzymałość równoważną przy jednakowej zawartości włókien stalowych 0,5% (tj. 40 kg/m³). Stwierdzono największą efektywność włókien z końcami haczykowatymi, tj. najwyższą wytrzymałość równoważną na zginanie, nawet o 100% przewyższającą wytrzymałość fibrobetonu z włóknami falistymi. Zaobserwowany wpływ klasy betonu, od 40 MPa do 85 MPa, nie był związany z kształtem włókien; przy wzroście klasy betonu obserwuje się zmniejszenie efektów obecności zbrojenia rozproszonego

Wyniki badania wytrzymałości równoważnej fibrobetonów uzyskane w badaniach [24] przedstawiono w tablicy 1. Stosowano włókna stalowe o długości 36 mm i smukłości równej 53. Otrzymane wartości f_{eq} na podstawie normy [19] wykazują dobrą korelację z zawartością włókien, chociaż rozrzuty wyników są dosyć duże. Uzyskano następujące empiryczne zależności typu wykładniczego:

$$f_{eq} = \frac{a_1}{a_2^{(0,1W_f)^{-0,5}}} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

przy $a_1 = 7,02$, $a_2 = 8,25$ oraz $r^2 = 0,979$ w przypadku betonu o wytrzymałości na ściskanie 20 MPa, przy $a_1 = 8,27$, $a_2 = 9,87$ oraz $r^2 = 0,886$ w przypadku 30 MPa, przy $a_1 = 9,77$, $a_2 = 11,03$ oraz $r^2 = 0,979$ w przypadku 40 MPa (W_f - oznacza dozowanie włókien w kg/m³, r^2 - współczynnik korelacji). Wzrostowi klasy betonu odpowiadał wzrost f_{eq} , który można uzasadnić polepszeniem przyczepności włókien do zaczynu cementowego.

Tablica 1. Wyniki badania wytrzymałości równoważnej na zginanie f_{eq} według [24]
 Table 1. Results of tests of equivalent flexural strength f_{eq} according to [24]

Projektowana wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa]	Zawartość włókien V_f [kg/m ³]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość równoważna na zginanie	
				średnia \pm odchylenia standard. [MPa]	współczynnik zmienności [%]
20	0	25,7	4,7	-	-
	20	24,7	5,3	1,6 \pm 0,3	19
	30	22,1	4,4	2,0 \pm 0,3	15
	40	25,4	5,2	2,5 \pm 0,4	16
30	0	27,0	4,3	-	-
	20	32,5	5,2	1,7 \pm 0,2	12
	30	37,5	5,9	2,0 \pm 0,4	20
	40	38,7	6,8	2,8 \pm 0,6	21
40 MPa	0	43,6	6,3	-	-
	20	45,2	7,2	1,7 \pm 0,4	24
	30	39,7	6,4	2,8 \pm 0,2	7
	40	45,5	7,1	2,7 \pm 0,2	7

Wcześniejsze badania wytrzymałości i odkształcalności fibrobetonów [7], wykazały istotny wpływ struktury zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość, aczkolwiek zakres badań objął objętości włókien V_f co najmniej 1%. Niemniej wynika stąd wskazanie, że właściwe określenie odporności na pękanie przy zginaniu wymaga takiego przygotowania próbek, aby uzyskać kontrolowany rozkład włókien w objętości kompozytu i reprezentatywny dla rozpatrywanych aplikacji.

WYNIKI BADAŃ PRZEPROWADZONYCH W IPPT PAN

Opis badań

Stosując dostępne na krajowym rynku, pochodzące od trzech producentów włókna stalowe z drutów o wytrzymałości 1000-1300 MPa (tabl. 2) z haczykami na końcach, wykonano kilka serii próbek fibrobetonowych o zmiennej zawartości objętościowej włókien w granicach $V_f = 0,19 - 0,51\%$ (czyli 15 - 40 kg/m³). Skład zaprojektowanych mieszanek betonowych B 30 odpowiadał zwykle stosowanym w nawierzchniach przemysłowych, przy założeniu transportu mieszanki w betonowozach i dalej przy użyciu pomp, zagęszczania łątami wibracyjnymi i mechanicznego zacierania powierzchni. Do sporządzenia mieszanek zastosowano surowce:

- cement portlandzki CEM I 32,5: zawartość od 330 do 350 kg/m³,
- piasek naturalny do 2 mm: zawartość od 570-600 kg/m³ lub 650-680 kg/m³,

- żwir od 2 do 8 mm: od 560 do 620 kg/m³,
- żwir od 8 do 16 mm: od 660 do 720 kg/m³ lub około 550 kg/m³,
- domieszki: superplastyfikator 1% lub plastyfikator 0,5% masy cementu,
- woda w ilości odpowiadającej w/c = 0,48 do w/c = 0,55,
- włókna stalowe : zawartość od 15 do 40 kg/m³ lub bez włókien (beton wzorcowy), kształt włókien - jak na rysunku 1.

Tablica 2. Wymiary badanych włókien stalowych o przekroju okrągłym
Table 2. Dimensions of tested steel fibres of round cross section

Oznaczenie włókien	Długość [mm]	Średnica [mm]	Smukłość [-]
<i>A</i>	60	1,0	60
<i>B</i>	50	1,0	50
<i>C</i>	60	0,8	75
<i>D</i> ^{p)}	60	0,8	75

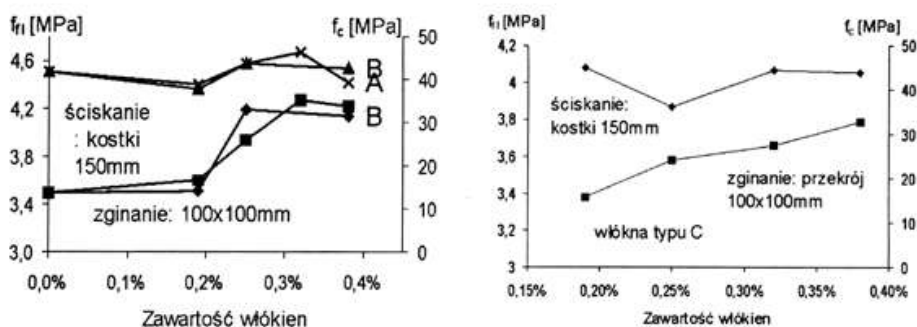
^{p)} włókna klejone w pakiety po około 20-30 sztuk lub więcej

Betony wykonano przy jednakowej konsystencji mieszanki: opad stożka od 60 do 100 mm. Wykonano dwa rodzaje próbek: płyty grubości 100 mm i wymiarach w płanie 350 x 700 mm albo 1000 x 1000 mm oraz belki o wymiarach 150 x 150 x 550 mm. Po odrzuceniu skrajnych fragmentów wykonanych płyt zostały one przecięte na belki o przekroju 100 x 100 mm i długości 350 mm, po 5-6 bądź 12 sztuk z każdego rodzaju betonu. Dodatkowo wykonane zostały próbki sześciennie o boku 150 mm do określania wytrzymałości betonu na ściskanie.

Badania odporności na pęknięcie przy zginaniu wykonano zgodnie z normami [18] i [19], stosując rozstaw podpór 300 mm (próbki o przekroju 100 x 100 mm) lub 450 mm (próbki o przekroju 150 x 150 mm). Stosowano specjalny uchwyt mocujący mierniki ugięcia w wyjściowym położeniu osi obojętnej belki. Bardziej szczegółowy opis badań przedstawiono w pracy [25].

Wyniki badań i dyskusja

Wpływ zawartości włókien na wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu zilustrowano na rysunku 11 (podano średnie wartości wytrzymałości). Jak można było oczekiwać, wpływ zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość na ściskanie był nieznaczny i mieścił się w granicach rozrzutu wyników. Przy wzrastającej zawartości włókien obserwuje się pewien systematyczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, ale nie przekraczający 1MPa przy największych stosowanych zawartościach włókien. W zakresie $V_f < 0,5\%$ zaobser-

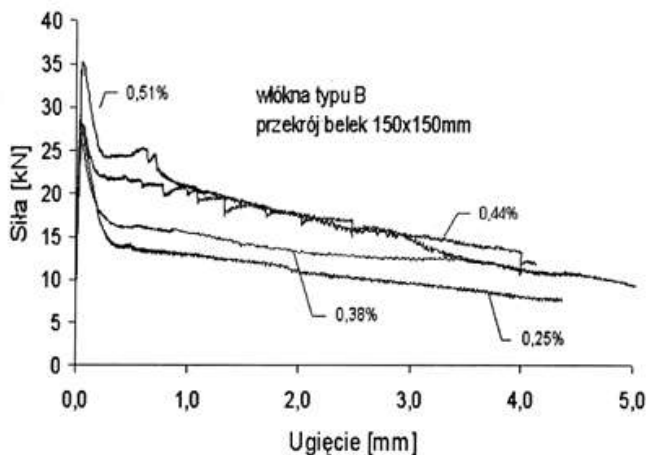


Rys. 11. Wpływ zawartości włókien stalowych na wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (typy włókien według tabl.2)

Fig.11. Influence of steel fibre content on the cube compressive strength and the flexural strength (the fibre type as in table 2)

wowany niewielki wpływ włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu nie uzasadnia potrzeby stosowania zbrojenia rozproszonego.

Przykładowe wykresy zginania próbek fibrobetonowych o przekroju 150 x150 mm przedstawiono na rysunku 12. Pomimo niewielkich różnic zawartości włókien przedstawione wykresy wyraźnie ilustrują wpływ wzrostu V_f na zdolność przenoszenia obciążeń po zarysowaniu materiału.

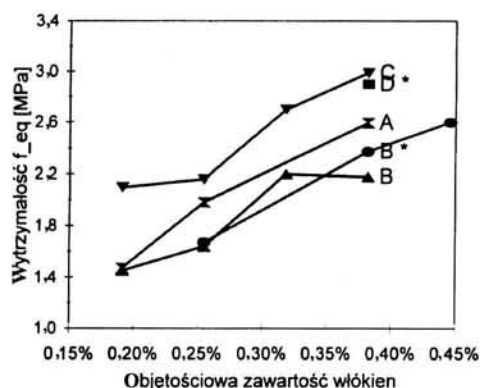


Rys.12. Wykresy siły zginającej w funkcji ugięcia belek przy rozpiętości 450 mm

Fig.12. Flexural load – deflection diagrams for beams tested at 450 mm span

stawione wykresy wyraźnie ilustrują wpływ wzrostu V_f na zdolność przenoszenia obciążeń po zarysowaniu materiału.

Na podstawie wyznaczonego pola powierzchni pod uzyskanymi wykresami obciążenia zginającego w funkcji ugięcia obliczono wg wzoru (9) umowne naprężenie rozciągające w zginanych próbkach fibrobetonowych, tzw. równoważną wytrzymałość na zginanie f_{eq} . Rysunek 13 ilustruje wpływ zawartości włókien stalowych na średnie wartości f_{eq} , określone na belkach o przekroju 150 x150 mm (ozn.*), jak też o przekroju 100 x100 mm. Wzrost f_{eq} w badanym zakresie zmienności V_f przekraczał 1 MPa, natomiast nie zauważono istotnego wpływu wymiarów przekroju elementów próbnych. Rozrzut wartości f_{eq} w seriach był większy niż rozrzut wytrzymałości na zginanie, na ogół w granicach 16-26%; nie stwierdzono wpływu wymiarów pró-



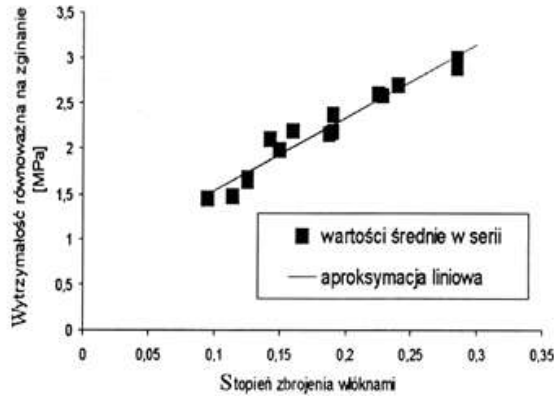
Rys. 13. Wpływ zawartości włókien stalowych na wytrzymałość równoważną na zginanie f_{eq} (typy włókien wg tabl.2, * ozn. przekrój belki 150 x150 mm, pozostałe 100 x100 mm)
 Fig.13. Influence of steel fibre content on the equivalent flexural strength f_{eq} (the fibre type as in Table 2, * denotes the cross-section 150x150mm, the rest- the cross-section 100x100 mm)

bek na rozrzut wyników. Stosunkowo duży rozrzut wytrzymałości równoważnej na zginanie jest charakterystyczną cechą fibrobetonów, którą można wiązać z niejednorodnością rozkładu włókien.

Wyższe wartości wytrzymałości równoważnej uzyskano przy wzroście smukłości włókien. Stwierdzono następującą liniową korelację średnich wartości f_{eq} ze wzrostem stopnia zbrojenia włóknistego ($V_f l/d$) :

$$f_{eq} = 0,73 + 8,06 V_f \frac{l}{d} \quad (14)$$

przy czym współczynnik korelacji $r^2 = 0,95$ (rys.14).



Rys. 14. Liniowa aproksymacja zależności wytrzymałości równoważnej na zginanie od stopnia zbrojenia włóknami ($V_f l/d$) na podstawie rysunku 13

Fig. 14. Linear approximation of relationship between the equivalent flexural strength and degree of fibrous reinforcement ($V_f l/d$) based on data from Fig. 13

nające maksymalne (wytrzymałość na zginanie f_{fl}) w betonie bez włókien były raczej niskie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie; średnie wartości f_{flcr} i f_{fl} mieściły się w zakresie 3,34-3,76 MPa. Znane zależności empiryczne [26] uzależniające wytrzymałość na zginanie betonów bez włókien f_{fl} od charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie f_{ck} mają postać:

$$f_{fl} = \lambda \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad [\text{MPa}] \quad (15)$$

przy czym współczynnik liczbowy λ mieści się na ogół w granicach 0,35-0,65, średnio wynosi 0,50. Obniżenie średniej wartości współczynników λ poniżej 0,50 stwierdza się w przypadku próbek dojrzewających w warunkach połowych [26]. W analizowanych tu badaniach współczynnik λ wynosił średnio od 0,39 do 0,44, co było raczej wynikiem przyjętego wskaźnika w/c i rodzaju kruszywa.

Przedstawiona ocena właściwości fibrobetonów z włóknami stalowymi na podstawie jednego parametru f_{eq} nie jest uniwersalna; znane są ograniczenia tej koncepcji wynikające np. z tego że:

- końcowy poziom ugięcia $L/150$ przyjętego do wyznaczenia f_{eq} jest znacznie większy niż ugięcia elementów z fibrobetonu przy eksploatacji,
- procedura uśredniania nie pozwala odróżnić wpływu zbrojenia rozproszonego w zakresie przed zarysowaniem i po pojawieniu się zarysowań.

Mniejsze zastrzeżenia budzi posługiwanie się dwoma parametrami f_{eq} , jak we wzorze (10). W praktyce, natomiast, ten sposób oceny fibrobetonu okazuje się skuteczny przy typowych klasach betonu od B 25 do B 50 i wystarczający do projektowania nawierzchni. Na podstawie wyników badania wytrzymałości równoważnej na zginanie

można też dokonać klasyfikacji typowych fibrobetonów, tj. określić odpowiednią klasę odporności na pęknięcie (and. *toughness class*). Definicja pięciu klas odporności na pęknięcie podana w zaleceniach [27] umożliwia sformułowanie specyficznych wymagań na właściwości fibrobetonu w uzupełnieniu wymagań formułowanych, jak na właściwości betonu zwykłego. Wdrożenie takiej klasyfikacji do praktycznego stosowania powinno uporządkować jakość fibrobetonów, zastępując wymagania dotyczące zawartości włókien wymaganiami wytrzymałości równoważnej na zginanie.

6. PODSTAWY WYMIAROWANIA NAWIERZCHNI Z FIBROBETONU

Skuteczne zastosowania fibrobetonów z włóknami stalowymi w nawierzchniach, zarówno w warstwowych konstrukcjach drogowych, jak i płytach układanych bezpośrednio na podłożu gruntowym, obejmują następujące rodzaje konstrukcji:

- nawierzchnie lekko obciążone, np. parkingi samochodowe, twarde korty tenisowe,
- nawierzchnie średnio obciążone, np. posadzki w halach przemysłowych i magazynach, przystanki autobusowe, drogi dojazdowe i podjazdy,
- nawierzchnie silnie obciążone, np. posadzki fabryczne w halach montażowych i na składowiskach ciężkich towarów, parkingi czołgowe, płyty lotniskowe.

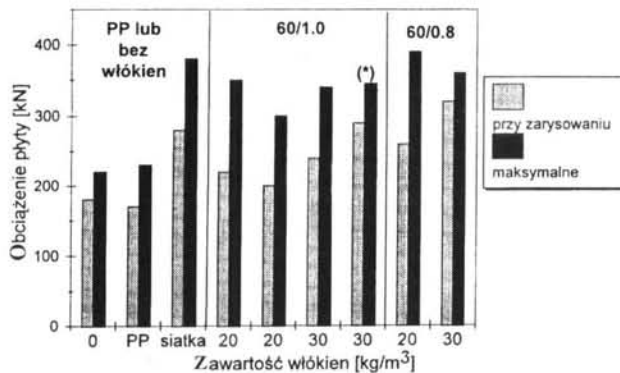
Nawierzchniom fibrobetonowym stawia się liczne wymagania, m.in. dostatecznej sztywności, sprężystości, wytrzymałości, odporności na zmęczenie pod wpływem zmiennych obciążeń kół pojazdów lub maszyn, odporności na ścieranie. W przypadku nawierzchni na zewnątrz budynków wymaga się też odporności na oddziaływania klimatyczne. Obciążenia są zarówno skupione, jak i rozłożone; trzeba przewidywać również lokalne uderzenia, wysychanie i zmiany wymiarowe wskutek dziennych i sezonowych zmian temperatury. Zasadnicze powody zniszczenia nawierzchni fibrobetonowych są takie same jak zniszczenia nawierzchni z betonu, dlatego omówienie podstaw projektowania jest tu ograniczone jedynie do specyfiki uwarunkowanej obecnością zbrojenia rozproszonego. W odróżnieniu od betonu zwykłego, fibrobeton przenosi obciążenia nawet po zarysowaniu – w konstrukcjach hiperstatycznych właściwość ta zapewnia redystrybucję sił wewnętrznych przy pojawieniu się rys.

Aby zapewnić wymagania stawiane nawierzchni fibrobetonowej trzeba przy projektowaniu m.in. dokonać sprawdzenia, czy siły wewnętrzne w płycie nawierzchni nie przekraczają jej nośności, określonej w stanie niezarysowanym lub w stanie zarysowanym [22]. W pierwszym przypadku projektant odwołuje się do wartości naprężeń rysujących w fibrobetonie, natomiast do określenia nośności nawierzchni w stanie zarysowanym wykorzystuje się pojęcie wytrzymałości równoważnej na zginanie (ewentualnie wytrzymałości residualnej). Obie metody wymiarowania prowadzą do odmiennych rozwiązań technicznych nawierzchni z fibrobetonu, które rekomendują producenci różnych włókien. Wymiarowanie na podstawie wartości naprężeń ry-

sujących prowadzi na ogół do stosowania zawartości włókien co najmniej 60 kg/m^3 . Przy wymiarowaniu w stanie zarysowanym w zależności od rodzaju włókien, przykłady obejmują ich stosowanie w ilości $50 - 75 \text{ kg/m}^3$ w przypadku włókien o rozszerzonych końcach, albo w ilości $20 - 40 \text{ kg/m}^3$ w przypadku włókien o długości $50 - 60 \text{ mm}$, haczykowatych lub nagniatanych, o dużej smukłości.

Wieloletnie obserwacje odcinków nawierzchni drogowych z fibrobetonu wykonanych na ruchliwych ulicach miast amerykańskich i kanadyjskich przedstawiono w pracach [28-29]. Stwierdzono m.in., że zastosowanie fibrobetonu pozwala na zmniejszenie grubości nawierzchni nawet o $1/3$ w porównaniu z nawierzchnią z betonu zwykłego (grubości 190 mm wg [28] przy wytrzymałość betonu na ściskanie $36-38 \text{ MPa}$). W empirycznych specyfikacjach na fibrobeton nawierzchniowy podaje się wymaganą minimalną zawartość włókien stalowych $0,43-0,5\%$ objętościowo, lecz brak sformułowanych wymagań dotyczących efektywności włókien.

Koncepcja wymiarowania nawierzchni fibrobetonowych na podstawie wytrzymałości równoważnej zyskała uzasadnienie na podstawie badań w skali naturalnej płyt fibrobetonowych na podłożu gruntowym oraz obserwacji wykonanych nawierzchni. W badaniach płyt fibrobetonowych o wymiarach $3 \times 3 \text{ m}$ na podłożu gruntowym [30], określono obciążenia przy pojawieniu się pierwszego zarysowania oraz obciążenia niszczące. Obciążenie skupione w środku płyty przekazywane było na powierzchnię $100 \times 100 \text{ mm}$. Na rysunku 15 przedstawiono wartości obciążenia przy zarysowaniu i obciążenia niszczące płyt o grubości 150 mm wykonanych z betonu zwykłego (bez zbrojenia, ozn. 0), z betonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w ilości $0,9 \text{ kg/m}^3$ (ozn. PP), z betonu zbrojonego 2 warstwami siatki stalowej ($200 \times 200 \times 6 \text{ mm}$, otulina z góry i z dołu po 25 mm , ozn. siatka) oraz fibrobetonu z włóknami stalowymi. Stosowano włókna z zakończeniami haczykowymi w



Rys. 15. Wpływ zbrojenia rozproszonego na nośność płyt o grubości 150 mm na podłożu gruntowym na podstawie [30], (*) oznacza przekroczenie zakresu pomiarowego siłownika - wynik oszacowany z dołu

Fig. 15. Influence of dispersed fibre reinforcement on the bearing capacity of slabs on ground after [30], (*) denotes a lower-bound estimation (out of measuring range)

ilościach 20 kg/m^3 lub 30 kg/m^3 ; wymiary włókien $l = 60 \text{ mm}$, $d = 1,0 \text{ mm}$ oraz $l = 60 \text{ mm}$, $d = 0,8 \text{ mm}$. Stwierdzono większą o 36 - 77% nośność płyt fibrobetonowych w porównaniu z betonem zwykłym, przy czym wzrost powyżej 60% zaobserwowano przy stopniu zbrojenia włóknistego co najmniej 0,19. Zbrojenie rozproszone w postaci włókien stalowym wywołało również pewne podwyższenie wartości obciążenia przy pojawieniu się zarysowania; wzrost przekraczał 50% przy $(V_f \cdot l/d) \geq 0,19$.

W badaniach płyt o wymiarach $3 \times 3 \text{ m}$ [31] stwierdzono wielkości sił niszczących w płytach fibrobetonowych o 33 - 73% większe niż w płytach z betonu bez włókien, przy czym stopień zbrojenia włóknistego nie przekraczał 0,19. Jak zauważono, zasadniczymi parametrami, od których zależała wielkość siły niszczącej w płytach była podatność podłoża oraz rodzaj i zawartość zbrojenia rozproszonego.

Tablica 3. Wzory na siłę niszczącą P_0 i moment graniczny M_0 w płycie pod obciążeniem skupionym w zastosowaniu do płyt z betonu zwykłego i fibrobetonu [32]

Table 3. Formulas for the ultimate load P_0 and the ultimate moment M_0 in a concrete or fibre concrete slab loaded by single load [32]

Usytuowanie obciążenia skupionego na powierzchni płyty	Siła niszcząca P_0	Wzór na moment graniczny M_0 płyty:	
		z betonu zwykłego	z fibrobetonu
W środku	$6[1 + \frac{2a}{L_p}] M_0$	$f_{jt} \frac{b h^2}{6}$	$[f_{jt} + f_{eq}] \frac{b h^2}{6}$
Na brzegu	$3,5[1 + \frac{3a}{L_p}] M_0$		$[f_{jt} + f_{eq}] \frac{b h^2}{6}$
W narożu	$2[1 + \frac{4a}{L_p}] M_0$		$f_{jt} \frac{b h^2}{6}$ *)

*) według [33] stosuje się taki sam wzór, jak przy obciążeniu w środku i na brzegu

Na podstawie wyników tych doświadczeń zaproponowano [32, 33], aby do przewidywania nośności płyt fibrobetonowych na podłożu sprężystym stosować metodę linii załomów, znaną w Polsce jako metoda Johansena-Olszaka. Wzory na nośność graniczną płyt podane w 1962 roku przez G.G.Meyerhoffa zostały przystosowane do wymiarowania nawierzchni fibrobetonowych. Do obliczenia siły niszczącej stosuje się sztywno-plastyczny model materiału, pod obciążeniem skupionym zakłada się zniszczenie płyty poprzez powstanie promieniowych i obwodowych przegubów plastycznych. Wartość siły niszczącej P_0 przy zginaniu płyty fibrobetonowej na podłożu sprężystym w przypadku pojedynczego obciążenia skupionego oblicza się na podsta-

wie wzorów podanych w tabelicy 3. W przypadku kombinacji obciążeń punktowych czy od kół pojazdów należy uwzględnić ich interakcję.

W tabelicy 3 przyjęto następujące oznaczenia:

- a – promień powierzchni obciążenia,
- h – grubość płyty,
- b – jednostkowa szerokość płyty,
- L_p – promień względnej sztywności płyty

$$L_p = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k_p}} \quad (16)$$

gdzie:

- k_p – współczynnik podatności Winklera, pu Winklera,
- f_{jt} – wytrzymałość betonu przy zginaniu przy zginaniu na podstawie wzoru (15) przy λ lub na podstawie badań doświadczalnych,
- E – liniowy współczynnik sprężystości betonu,
- ν – współczynnik Poissona betonu.

Znane są trudności uproszczonego opisu właściwości podłoża gruntowego przy użyciu jednego parametru k_p . Różne empiryczne zależności k_p od parametrów podłoża gruntowego pochodzą z badań geotechnicznych. W praktyce [33] stosuje się empiryczną zależność

$$k_p = \frac{E_2}{550 I_0} \quad [\text{N} / \text{mm}^3] \quad (17)$$

w której E_1, E_2 – pierwotny i wtórny moduł odkształcenia podłoża w $[\text{N}/\text{mm}^2]$ na podstawie badania płytą naciskową, wskaźnik odkształcenia $I_0 = E_2/E_1$, przy czym wymaga się $I_0 < 2,5$.

Zasadnicza różnica we wzorach na moment graniczny M_0 w przypadku fibrobetonu i betonu bez włókien wynika z ciągłości materiału, umożliwiającej powstanie przegubów plastycznych w miejscach rys i redystrybucję momentów zginających. Według [33] wymiarowanie nawierzchni fibrobetonowych metodą linii załomów jest możliwe przy zapewnieniu minimalnego stopnia zbrojenia włóknistego, zapewniającego wytrzymałość równoważną na zginanie $f_{eq} > 0,30 f_{jt}$. W przeciwnym razie, przy mniejszej efektywności zbrojenia rozproszonego, może nie powstać zakładany

mechanizm zniszczenia, toteż wymiarowanie należy przeprowadzić na podstawie wzorów teorii sprężystości.

7. PODSTAWY WYMIAROWANIA ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

Metoda obliczeń przedstawiona w [34] jest przeznaczona do takich przypadków, w których zbrojenie rozproszone stosuje w celach konstrukcyjnych. Wymiarowanie fibrobetonu metodą $\sigma - \epsilon$ odbywa się na podobnych zasadach, co wymiarowanie żelbetu. Klasyfikację fibrobetonu przeprowadza się na podstawie charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie f_{fk} (próbki walcowe) lub $f_{fk,cube}$ (próbki sześciennie), jak w Eurokodzie 2. Na tej podstawie określa się odpowiadające średnie i charakterystyczne wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz średnie wartości współczynnika sprężystości fibrobetonu. Oprócz podanych parametrów fibrobeton charakteryzuje się równoważną wytrzymałością na zginanie, określoną dwiema wielkościami: $f_{eq,2}$ oraz $f_{eq,3}$, według opisu w punkcie 4.

Wymiarowanie przekroju elementów zginanych i ściskanych w stanach granicznych odbywa się przy założeniu płaskich przekrojów (zasada Bernoulliego) oraz następujących założeniach szczególnych wynikających z zastosowania zbrojenia rozproszonego:

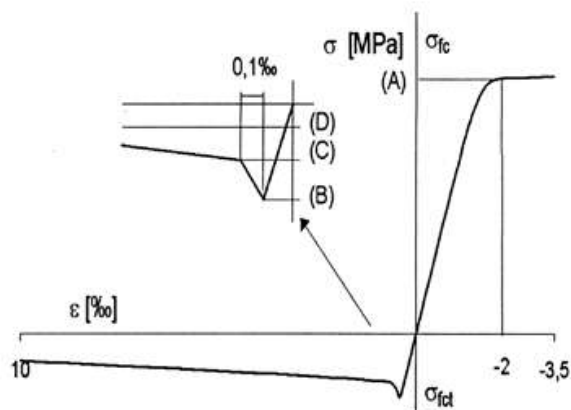
- 1) naprężenia w przekroju elementu fibrobetonowego poddanego rozciąganiu i ściskaniu określa się na podstawie charakterystyki konstytutywnej materiału w postaci wykresu $\sigma - \epsilon$ pokazanego na rysunku 16,
- 2) w przypadku żelbetu z dodatkiem zbrojenia rozproszonego odkształcenie w przekroju na wysokości prętów zbrojenia ogranicza się do 10‰ (rys.17),
- 3) rozwarście rys ogranicza się maksymalnie do 1,5 mm, aby zapewnić dostateczne zakotwienie włókien,
- 4) w zależności od klasy ekspozycji, gdy rozwarście rys w stanach granicznych użytkowania przekracza 0,2 mm, pomija się obecność włókien w warstwie przypowierzchniowej o wysokości 15 mm.

Obliczanie szerokości rozwarścia rys jest wymagane w przypadku każdej konstrukcji. W konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych bez zbrojenia prętami, pod warunkiem istnienia strefy ściskanej w każdym przekroju, szerokość rozwarścia rys można obliczyć jak pokazano na rysunku 18. Po określeniu położenia osi obojętnej i wyznaczeniu maksymalnego odkształcenia w strefie ściskanej $\epsilon_{fc, \max}$ oblicza się fikcyjne odkształcenie rozciągające $\epsilon_{fc,t}$ przy wykorzystaniu założenia Bernoulliego i następnie szerokość rozwarścia rys w :

$$\epsilon_{fc,t} = \epsilon_{fc, \max} \frac{h - x}{x}, \quad w \approx \epsilon_{fc,t} (h - x) \quad (18)$$

Rys. 16. Wykres naprężenia σ w funkcji odkształcenia ε przyjęty jako zależność konstytutywna fibrobetonu według [34]

Fig. 16. Stress-strain diagram assumed as the constitutive relation for FRC [34]



Na rysunku 16 przyjęto następujące oznaczenia:

$$(A) \frac{0,85 f_{fck}}{\gamma_c} \quad (B) \frac{f_{fctk,ax}}{\gamma_{ct}} \text{ siła osiowa,}$$

$$(B) \frac{f_{fctk,ax} (1,6 - h_e)}{\gamma_{ct}} \text{ siła osiowa i moment zginający,}$$

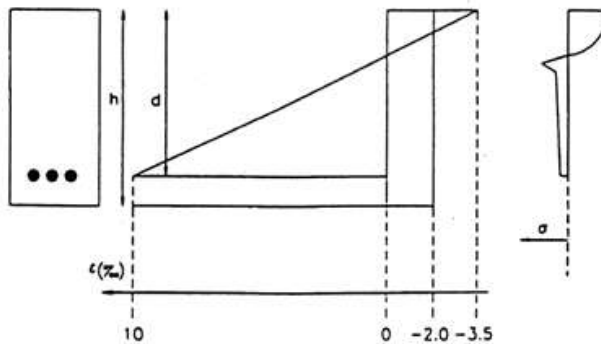
$$(C) \frac{0,45}{\gamma_{ct}} f_{eq,2} \quad (D) \frac{0,37}{\gamma_{ct}} f_{eq,3}$$

gdzie γ_c - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla fibrobetonu przy ściskaniu, γ_{ct} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla fibrobetonu przy rozciąganiu, h_e - efektywna wysokość przekroju [m].

W konstrukcjach statycznie wyznaczalnych poddanych działaniom sił zginających lub rozciągających kontrola zarysowań wymaga zastosowania znacznej zawartości włókien lub łącznego stosowania włókien i prętów zbrojeniowych.

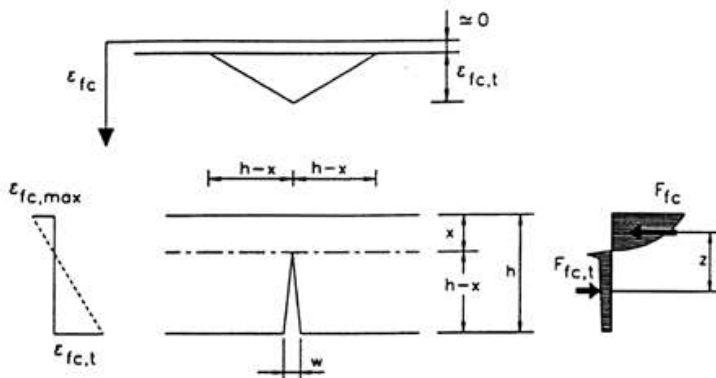
Obliczanie szerokości rozwarcia rys w konstrukcjach zbrojonych prętami oraz włóknami przeprowadza się tak jak w żelbecie. Przy wyznaczaniu naprężeń w prętach stalowych należy uwzględnić korzystny wpływ zbrojenia rozproszonego, część siły rozciągającej w przekroju jest przejęta przez włókna.

W stanach granicznych użytkowania analizując przekroje niezarysowane przyjmuje się liniowo-sprężysty model materiału przy ściskaniu i przy rozciąganiu zarówno dla prętów stalowych jak i dla fibrobetonu. Przy analizie przekrojów z rysami przyjmuje się, że fibrobeton jest liniowo-sprężysty przy ściskaniu oraz może przenosić stałe naprężenia rozciągające równe $0,45 \cdot f_{eq,2}$. Obliczenie szerokości rozwarcia rys prowa-

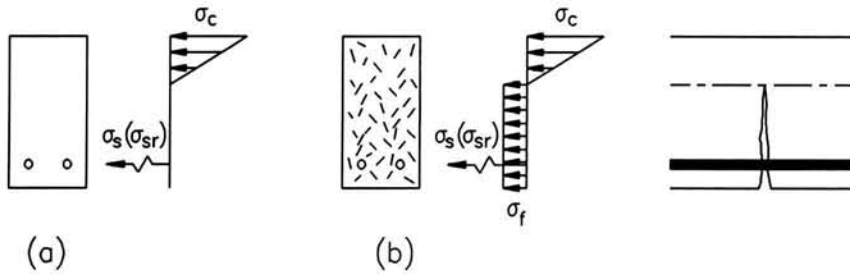


Rys.17. Rozkład odkształcenia i naprężenia w zginanym przekroju żelbetowym z dodatkiem zbrojenia rozproszonego według [34]
 Fig.17. Distribution of strain and stress in a cross-section of a beam of reinforced concrete with fibres [34]

dzi się podobnie jak w przypadku żelbetu; wzory podane w dokumencie RILEM [34] są identyczne jak w Eurokodzie 2. Korzystanie z tych wzorów wymaga uwzględnienia, że naprężenie rozciągające przenoszone przez fibrobeton po zarysowaniu nie są zerowe, lecz wynoszą $0,45 \cdot f_{eq,2}$ i tym samym wpływają na zmniejszenie siły przenoszonej przez pręty stalowe. Na rysunku 19 przedstawiono rozkłady naprężeń w zarysowanym przekroju żelbetowym (a) i żelbetowym z dodatkiem zbrojenia rozproszonego (b). Wyniki badań doświadczalnych przedstawionych w [35] wskazują, że zbrojenie rozproszone w belkach żelbetowych wywołuje znaczną redukcję szerokości rozwarcia rys (około 40%) oraz redukcję rozstawu rys. Autorzy zapropono-



Rys.18. Schemat obliczenia szerokości rozwarcia rys w elemencie fibrobetonowym (bez zbrojenia prętami) według [34]
 Fig.18. Calculation of crack width in a FRC element [34]



Rys.19. Rozkład naprężeń w zarysowanym przekroju: a - żelbetowym, b - żelbetowym z dodatkiem zbrojenia rozproszonego według [35]

Fig.19. Distribution of stress in a cracked cross-section of a beam: a - of reinforced concrete, b - of reinforced concrete with fibres [35]

wali więc empiryczną poprawkę do wzoru RILEM na średni rozstaw rys s_{rm} w elementach poddanych zginaniu lub skręcaniu:

$$s_{rm} \sim \frac{50}{l/d} \quad (19)$$

słuszną przy smukłości włókien $l/d \geq 50$. Obliczenie średniej szerokości rozwarcia rys w_m wymaga zastosowania następującego wzoru:

$$w_m = s_{rm} \epsilon_{sm} \quad (20)$$

w którym ϵ_{sm} – średnie naprężenie rozciągające w prętach stalowych określa wzór:

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (21)$$

gdzie:

- σ_s – naprężenie w zbrojeniu rozciągającym obliczone w przekroju zarysowanym według schematu na rysunku 19,
- σ_{sr} – naprężenie w zbrojeniu rozciągającym obliczone w przekroju zarysowanym przy obciążeniu rysującym według schematu na rysunku 19,
- β_1 – współczynnik uwzględniający przyczepność prętów zbrojeniowych,
- β_2 – współczynnik uwzględniający długotrwałość obciążenia lub jego powtarzalność,
- E_s – moduł Younga dla stali.

Porównanie wyników badań belek żelbetonowych wykonanych z dodatkiem włókien stalowych o zakończeniach haczykowatych i wyników obliczeń szerokości rozwarcia rys według wzoru RILEM pozwala stwierdzić poprawność wzoru poprawionego przez L. Vandewalle [35] w badanym zakresie parametrów zbrojenia rozproszonego.

Opracowanie metody σ - ε przez Komitet Techniczny RILEM stanowi poważny krok ku powstaniu norm europejskich, niezbędnych do racjonalnego projektowania fibrobetonów. W kolejnej, nowej edycji normy amerykańskiej ACI 318 (podstawowej normy konstrukcyjnej w USA) zapowiedziane jest wprowadzenie rozdziału dotyczącego fibrobetonu. Metody projektowania elementów i konstrukcji z fibrobetonów są nadal intensywnie rozwijane i stosownie ulepszone są metody badań normowych; metoda badania fibrobetonu na rozciąganie osiowe jak na rysunku 5, stanowi podstawę projektowania metodą σ - w , opisaną w nowym raporcie RILEM z 2002 roku.

8. WNIOSKI

Przedstawione podstawowe właściwości fibrobetonów z włóknami stalowymi wyjaśniają specyfikę tych materiałów w porównaniu z betonem zwykłym. Nowym pojęciem jest struktura zbrojenia rozproszonego, która istotnie wpływa na właściwości kompozytu i powinna być kontrolowana. Funkcja zbrojenia rozproszonego zasadniczo pozytywnie ujawnia się po powstaniu zarysowań w matrycy betonowej; obecność włókien zapewnia odporność na zarysowanie i pękanie. Stosując znormalizowane metody określania odporności na pękanie właściwości fibrobetonu ocenia się na podstawie badań zginania belek, w których wyznacza się wytrzymałość zastępczą na podstawie energii zniszczenia próbek. Przeprowadzone badania wykazały, że tak określona wytrzymałość równoważna na zginanie jest proporcjonalna do stopnia zbrojenia włóknistego i jest właściwym parametrem oceny właściwości materiału nawet w zakresie niskich zawartości włókien.

Wytrzymałość równoważna na zginanie f_{eq} jest podstawowym parametrem fibrobetonu stosowanym do projektowania nawierzchni na podłożu gruntowym metodą linii załomów. Taka metoda wymiarowania nawierzchni jest właściwa przede wszystkim do nawierzchni średnio i silnie obciążonych, takich jak nawierzchnie przemysłowe, magazynowe, parkingi, terminale celne i przeładunkowe. Zastosowanie metody wymaga zapewnienia wytrzymałości równoważnej na zginanie co najmniej 30% wytrzymałości na zginanie.

W nowej metodzie oceny fibrobetonów, opracowanej przez RILEM, równoważna wytrzymałość fibrobetonu na zginanie określona jest na podstawie badań znormalizowanych próbek ze szczeliną wstępną. Wytrzymałość równoważna $f_{eq,2}$ i $f_{eq,3}$ jest kluczowym parametrem fibrobetonu przy projektowaniu konstrukcji metodą σ - ε uwzględniającej zastosowanie zbrojenia rozproszonego w celach konstrukcyjnych. Uzyskanie zakładanych przez projektanta właściwości fibrobetonu wymaga zastosowania właściwego składu mieszanki, technologii wykonania oraz pielęgnacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Bentur A., Mindess S.*: Fibre reinforced cementitious composites. Elsevier Applied Science, London and New York, 1990
- [2] *Brandt A.M.*: Cement based composites: materials, mechanical properties and performance. E & FN SPON, London 1995
- [3] ACI Committee 544: Fiber Reinforced Concrete. ACI 544.1R-96, ACI, Farmington Hills, 1996
- [4] *Jamroży Z.*: Betony ze zbrojeniem rozproszonym (co projektant konstrukcji wiedzieć powinien). Materiały XVII Ogólnopolskiej Konferencji "Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji", Tom I, Ustroń 2002
- [5] Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych: Wymagania techniczne wykonania i odbioru fibrobetonu z włóknami stalowymi do naprawy obiektów mostowych. WTW nr 5 M/91, Warszawa 1991
- [6] *Brandt A.M., Kasperkiewicz J., Glinicki M.A.*: Instrukcja do badań atestacyjnych włókien metalowych do betonu. IPPT PAN, Warszawa 1996
- [7] *Kasperkiewicz J.*: Struktura uzbrojenia w kompozytach z włóknami rozproszonymi, Mechanika kompozytów betonopodobnych. Konferencja naukowa- Jabłonna 1979. Ossolineum, Wrocław 1982
- [8] *Śliwiński J., Zych T.*: Contact zone between cement paste and fibre and its influence on the water permeability of fibre reinforced concrete. Brittle Matrix Composites-5, Eds. A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall, Bigraf & Woodhead, Warsaw 1997
- [9] *Casanova P.*: Bétons renforcés de fibres métalliques: du matériau á la structure. Praca doktorska, LCPC, série OA, no 20, Paris 1996
- [10] *Glinicki M.A.*: Badanie właściwości fibrobetonu z włóknami stalowymi z odpadów przemysłowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 4/1984
- [11] *Jamroży Z.*: Analiza doboru składu drutobetonu do nawierzchni. Konferencja naukowo-techniczna MATBUD 2000, Kraków 2000
- [12] *Brandt A.M., Glinicki M.A.*: Investigation of the flexural toughness of fibre reinforced composites (FRC). Archives of Civil Engineering, Vol. XLV, 3/1999
- [13] *Ładyżyński K., Nowowiejski G.*: Wyniki badań betonu zbrojonego włóknem stalowym. Hydrobudowa-1 Bet.-Lab., Warszawa 2001
- [14] *Glinicki M.A., Wysokowski A., Żurawicka A.*: Mechanical properties of fibre-reinforced concrete for thin repairs of concrete pavements. Brittle Matrix Composites-6, Eds. A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall, ZTUREK RSI & Woodhead, Warsaw 2000
- [15] *Hillerborg A.*: Analysis of fracture by means of fictitious crack model. Int. Journal of Cement Composites, 2 (4), 1980

- [16] *Naaman A.E., Guerrero P.*: A new methodology to determine bond of micro-fibers with cement composites. *Brittle Matrix Composites-6*, Eds. A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall, ZTUREK RSI & Woodhead, Warsaw 2000
- [17] *Marti P., Pyfl T., Sigrist V., Ulaga T.*: Harmonized test procedures for steel - fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, V.96, No.6, 1999
- [18] Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber/Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM C1018-97, ASTM International, 01-Nov-1997
- [19] Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete, SF-4 - Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete. Concrete Library No.50, Japan Society of Civil Engineers, 1984
- [20] Essais des bétons renforcés de fibres - Essai de flexion sur éprouvettes prismatiques. Norme Belge NBN B 15-238, INB 1992
- [21] RILEM TC162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Recommendations: Bending test. *Materials and Structures*, 33, Jan.-Feb. 2000
- [22] Swedish Concrete Association, Steel Fibre Reinforced Concrete –Recommendations for Design, Construction and Testing. Concrete Report No.4, Stockholm 1997 (w języku szwedzkim)
- [23] *Banthia N., Trottier J.F.*: Concrete reinforced with deformed steel fibres. Part II. Toughness characterization. *ACI Materials Journal*, 92, 2, 1995
- [24] *de Figueiredo A.D., Nunes N.L., Tanesi J.*: Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete. *Fibre Reinforced Concretes (FRC) BEFIB'2000*, Eds. P.Rossi and G.Chanvillard, RILEM Publ., Cachan 2000
- [25] *Glinicki M.A., Litorowicz A., Zieliński M.*: Interpretacja badań odporności fibrobetonów na pękanie przy zginaniu. XLVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2001, Tom 1
- [26] *Legeron F., Paultre P.*: Prediction of modulus of rupture of concrete. *ACI Materials Journal*, 97, 2, 2000
- [27] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik : Richtlinie Faserbeton. Wien, März 2002
- [28] *Ramakrishnan V.*: Construction and performance evaluation of steel fiber reinforced concrete pavement. *Fiber Reinforced Concrete – Modern Developments*, University of British Columbia, Vancouver 1995
- [29] *Johnston C.D.*: Fiber reinforced concrete applications in Alberta. *Fiber Reinforced Concrete – Modern Developments*, University of British Columbia, Vancouver 1995
- [30] *Beckett D.*: Thickness design of concrete industrial ground floors. *Concrete*, July/August 1995
- [31] *Falkner H., Huang Z., Teutsch M.*: Comparative study of plain and steel fiber reinforced concrete ground slabs. *Concrete International*, January 1995

- [32] Concrete Society : Concrete Industrial Ground Floors – A guide to their Design and Construction. Concrete Society Technical Report No 34, Slough 1994
- [33] Steel fibre reinforced industrial floor design in accordance with the Concrete Society TR 34. N.V. Bekaert S.A., Zvevegem –Belgium, 2001
- [34] RILEM TC162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Recommendations: σ - ϵ design method. Materials and Structures, 33, March 2000
- [35] *Vandewalle L., Dupont D.*: Prediction of crack widths in ordinary reinforced concrete elements containing steel fibres. Brittle Matrix Composites-6, Eds. A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall, ZTUREK RSI & Woodhead, Warsaw 2000

EVALUATION AND DESIGN OF FIBRE REINFORCED CONCRETE USING THE EQUIVALENT FLEXURAL STRENGTH

Abstract

A review of properties of fibre reinforced concrete (FRC) is presented. Fundamentals of evaluation and design of fibre concrete are explained, particularly appropriate for steel fibre reinforcement. The basic concepts of characterization of structure of fibrous reinforcement are analysed and principles of characterization of FRC after cracking are given. Standard methods of toughness testing of FRC in flexure are described and definitions of the equivalent flexural strength and the residual strength in flexure are given.

An experimental investigation of the flexural toughness of fibre reinforced concrete using four types of hook-end steel fibres is reported. Effects of fibre content, fibre size and the size of beams were tested for concrete characteristic compressive strength of 30 MPa designed for use in industrial pavements. The specimens 100mm thick were cut out of larger plates so as to avoid non-uniformity of fibre distribution. The results show a significant increase in the equivalent flexural strength with an increase of fibre content and fibre aspect ratio.

The use of the equivalent flexural strength in design of FRC slabs on ground is presented. New concepts for calculation of the bearing capacity and the crack width in structural elements are presented for reinforced concrete with fibre reinforcement.

**Artykuł opracowano w ramach Projektu Badawczego KBN
nr 7 TO7E O33 15**