



fot. Michał Graczyński

Nie wszystkie włókna są równe: o efektywności włókien w betonie – odcinek 1

Często o zastosowaniu włókien do betonu decydują wyłącznie koszty włókien. Przy takim podejściu technolog jest zmuszony do minimalizacji tych kosztów i stąd wynikają spotykane zamiany włókien na inne niż uwzględnione w projekcie. Domniemanie o takiej samej skuteczności zbrojenia rozproszonego opiera się wówczas na zachowaniu projektowanego dozowania włókien do betonu. Cóż, sprawdza się to na ogół wtedy, gdy włókna nie są potrzebne wcale. Ilustracją powyższych spostrzeżeń niech będzie przykład debaty z inżynierem z pewnej firmy wykonawczej, poszukującym właściwego rozwiązania materiałowego do wykonania tzw. warstw spadkowych w garażach wielopiętrowych. Warstwy o grubości zmiennej, w przybliżeniu od 5 do 12 cm, układa się na stropach żelbetowych, profilując w taki sposób wymagane nachylenie nawierzchni. Rozwiązanie polegające na zastosowaniu włókien stalowych i włókien polipropylenowych, odpowiednio w ilości 20 kg/m³ i 0,9 kg/m³, było rutynowo stosowane na licznych budowach tej firmy. Na którejś z budów po prostu zabrakło włókien i warstwy dokończono bez zbrojenia rozproszonego. Mimo tego braku nie było zastrzeżeń jakościowych do wykonanych warstw. Zatem pojawiły się pytania: czy koszt stosowania włókien jest uzasadniony, czy w ogóle włókna są tu potrzebne? Nie da się udzielić ogólnej odpowiedzi bez odniesienia się do szczegółowych warunków aplikacji betonu. Widać wszakże, że w tym przypadku stosowanie włókien miało raczej charakter „psychologiczny” – włókna miały jakoś polepszyć beton, ale jakie właściwości, o ile i dlaczego, to już nie było wiadome. Warstwy spadkowe położone na stropie żelbetowym przypuszczalnie projektuje się wyłącznie na podstawie wytrzymałości na ściskanie, a jak dobrze wiadomo, włókna nie podwyższają wytrzymałości na ściskanie. Skądinąd znane są przypadki spękań i odspojeń nawierzchni w garażach wielopiętrowych, przez spękania przesącza się woda spływająca z pojazdów, skapuje piętro niżej na czarne mercedesy... To wszystko powoduje reklamacje i bardzo kosztowne

naprawy. Zatem hamowanie powstawania spękań poprzez zastosowanie zbrojenia rozproszonego ma sens, ale trzeba przynajmniej próbować oszacować naprężenia powstające w betonie w warstwie spadkowej i wyspecyfikować żądane parametry materiałowe, aby efektywnie wykorzystać fibrobeton. Sprawia to pewne kłopoty z powodu sprzężenia oddziaływań termicznych, wilgotnościowych i mechanicznych. Jest też kłopot z modelowaniem mechanicznych właściwości fibrobetonu i doświadczalną identyfikacją parametrów przy niewielkich zawartościach włókien. Zatem nie ma tu prostych i gotowych rozwiązań.

Znane są podstawy mikromechaniki kompozytów wzmocnianych włóknami. Warto je przypomnieć tu skrótowo, aby ułatwić inżynierską ocenę rozmaitych rodzajów włókien przeznaczonych do betonu. Na rynku dominują włókna z drutu ze stali, często o nieznannej wytrzymałości, proste, z haczykami lub innymi deformacjami na obu końcach, albo pofalowane bądź nagniatane na całej długości. Efektywność takich włókien jako zbrojenia rozproszonego betonu można wyznaczyć ilościowo. Powstawaniu i propagacji rys w fibrobetonie towarzyszą zjawiska, które można sprowadzić do następujących mechanizmów elementarnych:

- odkształcenie sprężyste betonu
- wytworzenie nowej powierzchni w postaci rysy
- odspojenie włókien od matrycy cementowej
- wywlekanie włókien z matrycy wzdłuż ich osi
- przewlekanie przez rysę włókien ułożonych względem niej ukośnie.

Praca sił wewnętrznych, związanych z powstaniem i rozwarciem rys w elemencie fibrobetonowym, obliczana jest przez superpozycję składowych odpowiadających wymienionym mechanizmom. Pomijając składowe pracy o mniejszym znaczeniu, związane z mechanizmami (a), (b) i (c), uzyskuje się następujący przybliżony wzór na pracę sił wewnętrznych W :

$$W = \frac{1}{4} \eta V_f \left(\frac{1}{d} \tau_r + \theta \tau_p \right) h s_r$$

w którym przyjęto następujące oznaczenia:

η – współczynnik efektywności kierunkowej włókien (bezwymiarowy),

V_f – zawartość objętościowa włókien w betonie (%),

l, d – długość i średnica włókna (mm),

τ_f – średnia przyczepność włókien do matrycy cementowej (N/mm²),

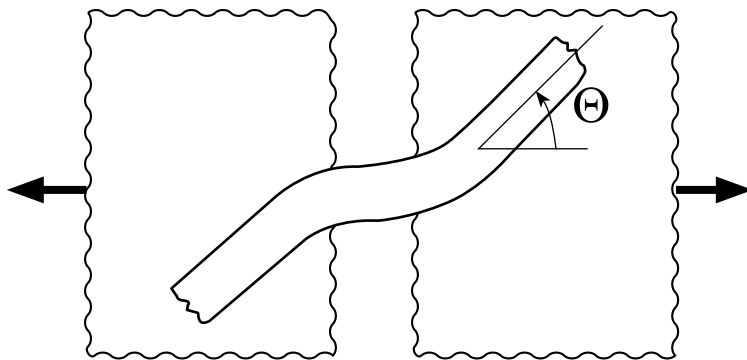
Θ – średni kąt nachylenia włókna względem osi prostopadłej do krawędzi rysy (-),

τ_{pl} – granica plastyczności stali przy ścinaniu (N/mm²),

h – grubość elementu z fibrobetonu (mm),

S_f – powierzchnia zarysowania elementu z fibrobetonu (mm²).

Ilustrację do powyższego wzoru pokazano na rys. 1. Im większa jest praca sił wewnętrznych W , tym bardziej charakterystyka mechaniczna fibrobetonu odbiega od charakterystyki materiału kruchego i przybliża się do materiału plastycznego. Oczywiście praca W zwiększa się ze zwiększeniem zawartości włókien V_f . Znaczący wpływ ma przestrzenne rozproszenie włókien (współczynnik efektywności η). Z definicji współczynnika efektywności kierunkowej wynika, że włókna są najbardziej efektywne, jeśli są ułożone równolegle w kierunku działania naprężeń rozciągających. Ale wtedy znika drugi składnik sumy w nawiasie, bowiem średni kąt nachylenia włókna względem rysy Θ jest równy zero. Oczywiście przypadek jednokierunkowego ułożenia włókien w betonie jest zupełnie szczególny, można to osiągnąć wskutek oddziaływania silnego pola magnetycznego, ale praktycznie nie ma wielkiego sensu. W przypadku ukośnego ułożenia włókien względem rysy nabiera znaczenia granica plastyczności stali włókien: im jest większa, tym większa jest praca sił wewnętrznych, związana z lokalnym uplastycznieniem niezbędnym do przeciągania włókna ułożonego ukośnie przez rysę. Zakładając przestrzenne, ide-



alnie równomierne rozproszenie włókien w betonie, efektywność pojedynczych włókien będzie zróżnicowana w zależności od kąta Θ .

Znane są wyniki licznych badań (przede wszystkim A. M. Brandta) wskazujące na korelację pracy W z wielkością pola powierzchni pod wykresem obciążenia w funkcji ugięcia w normowym badaniu zginanych belek fibrobetonowych. Zatem wytrzymałość równoważna fibrobetonu na zginanie i wytrzymałość resztkowa będą skorelowane z pracą sił wewnętrznych W . Stąd należy oczekiwać, że skuteczność zbrojenia rozproszonego w betonie znacząco zwiększa się ze wzrostem dwóch parametrów charakteryzujących włókna: smukłości l/d oraz granicy plastyczności stali. Przyczepność włókien do matrycy cementowej nie jest cechą zależną tylko od właściwości włókien, lecz zależy także od właściwości mechanicznych matrycy w warstwie kontaktowej. Podany wzór na pracę sił wewnętrznych odpowiada przypadkowi włókien stalowych prostych. W przypadku deformacji na końcach włókien pojawia się dodatkowy składnik pracy sił wewnętrznych i powstaje pewien konflikt wytrzymałości włókien i wytrzymałości matrycy. O tej subtelności napiszę w kolejnym odcinku.

prof. Michał Glinicki

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Rys. 1. Schemat przechodzenia przez rysę ułożonego ukośnie włókna stalowego (pojawia się lokalne zginanie i plastyczna deformacja włókna)



Instytut Materiałów Budowlanych i Technologii Betonu

jest jednostką naukowo-badawczą oraz prowadzącą działalność certyfikacyjną.

IMBiTB jest europejską jednostką notyfikowaną nr 2311.

Działalność IMBiTB obejmuje:



AC 157

Akredytowana Jednostka Certyfikująca
Certyfikat akredytacji nr AC 157

Certyfikat

Zakładowej Kontroli Produkcji Betonu Towarowego
wraz z oceną zgodności z PN-EN 206-1
nr 006/B/D

Zatwierdza się, że:

BETON TOWAROWY

Certyfikację wyrobów budowlanych

w obszarze regulowanym prawnie i w obszarze dobrowolnym,
w tym ZKP Betonu towarowego wg PN-EN 206-1

Badania i ekspertyzy budowlane

Szkolenia

w zakresie materiałów budowlanych, technologii i projektowania betonu

Instytut Materiałów Budowlanych i Technologii Betonu Sp. z o.o.

03-236 Warszawa, ul. Annopol 3

tel. +48-22-519-01-19, fax: +48-22-519-01-18

sekretariat@imbitb.pl, www.imbitb.pl