



fol. Michał Braszczyski

Efektywność mechaniczna makrowłókien syntetycznych w betonie

1. Wprowadzenie

O stosowaniu włókien stalowych w betonie wiadomo dość dużo, chociaż nadal sporadycznie zdarzają się niepowodzenia na budowach, wynikające z niedostatecznej efektywności włókien bądź innych błędów technologii fibrobetonu. O stosowaniu włókien syntetycznych, a w szczególności tzw. makrowłókien polimerowych, zdefiniowanych w normie PN-EN 14889-2:2007 wiadomo dużo mniej. Przyjęty podział na mikrowłókna i makrowłókna polimerowe na podstawie średnicy włókien, mniejszej lub większej od 30 μm , jest stricte umowny. Ważniejszy jest podział funkcjonalny: przedmiotowa norma przewiduje tzw. konstrukcyjne zastosowanie makrowłókien polimerowych, ujawniające się wpływem na nośność elementu betonowego (wpływem pozytywnym, jak można domniemywać). Surowcem do wytwarzania takich włókien są przede wszystkim poliolefiny, takie jak np. polipropylen, polietylen, poliakryl

itd., czyli materiały charakteryzowane względnie niskim współczynnikiem sprężystości, znacznie mniejszym od współczynnika sprężystości betonu. W związku z tym, na podstawie tzw. reguły mieszania, nie można oczekiwać znaczącego wzrostu współczynnika sprężystości betonu z włóknami czy wzrostu wytrzymałości wskutek zastosowania włókien z takiego materiału. Jak więc można wykazać tzw. konstrukcyjną efektywność makrowłókien polimerowych w fibrobetonie? Raczej nie na podstawie testów wytrzymałości na ściskanie czy wytrzymałości na rozciąganie (rozciąganie przy zginaniu), ale na podstawie badania odporności fibrobetonu na pękanie. Według przedmiotowej normy, właściwym sposobem badania odporności na pękanie fibrobetonu z makrowłóknami polimerowymi jest określanie wytrzymałości resztkowej na zginanie, przy umownym rozwarciu szczeliny wstępnej według procedury badawczej opisanej w normie EN 14845-2. Znane i stosowane są też inne sposoby określania odporności fibrobetonu na pękanie, takie jak badanie wytrzymałości równoważnej przy

Rys. 1. Przykładowe makrowłókna polimerowe przeznaczone do stosowania w betonie (długość 50 mm)



Tablica 1. Typowe właściwości inżynierskie makrowłókien syntetycznych

| Materiał | wiązka polipropylenu i polietylenu |
|--|------------------------------------|
| Gęstość | 0,91-0,97 g/cm ³ |
| Długość | od 40 do 54 mm |
| Smukłość (stosunek długości do średnicy) | od 50 do 90 |
| Wytrzymałość na rozciąganie | od 600 do 750 MPa |
| Moduł sprężystości | od 5,0 do 9,5 GPa |
| Temperatura topnienia wg ASTM D1929 | od 160 do 330°C |
| Absorpcja wody | pomijalnie mała |
| Kwasoodporność, ługoodporność | doskonała |
| Kolor | biały, szary |

zginaniu, wskaźników odporności na pękanie przy zginaniu, wytrzymałości resztkowej przy rozciąganiu. Wszystkie te metody badawcze dają ilościową miarę wzmocnienia betonu włóknami w zakresie pozasprężystych odkształceń elementu betonowego, tj. wtedy gdy naprężenia wywołane obciążeniem elementu przekroczą wytrzymałość i lokalnie nastąpi osłabienie materiału, ujawniające się zmniejszeniem przenoszonego obciążenia i sztywności elementu. W tej właśnie sytuacji można wyodrębnić funkcję wzmacniającą makrowłókien polimerowych o niskim module sprężystości.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badania odporności na pękanie przy zginaniu fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, wprowadzonymi niedawno do stosowania w betonie. Podstawę stanowią badania przeprowadzone w IPPT PAN w roku 2008, sfinansowane przez Chryso Polska Sp. z o.o., opisane w artykule w „Cement, Wapno, Beton” nr 4/2008. Zakres przeprowadzonych badań został ograniczony do zastosowań fibrobetonu w podłogach przemysłowych na podłożu gruntowym.

2. Typowe właściwości makrowłókien polimerowych

Na rynku budowlanym pojawiają się liczne nowe włókna przeznaczone do stosowania w betonie, w tym makrowłókna polimerowe, pokazane przykładowo na rys.1. Można wymienić co najmniej kilka nazw handlowych takich włókien dostępnych na polskim rynku materiałów budowlanych (celowo pominięto tu konkretne nazwy produktów, na ogół zastrzeżone przez producentów). Do miana makrowłókien polimerowych często aspirują włókna wytworzone z mieszaniny polipropylenu i polietyleny o typowych właściwościach według tablicy 1. W tych przypadkach w języku angielskim często używa się określenia „włókna konstrukcyjne” (structural fibers). Nieraz w internetowych materiałach informacyjnych można też znaleźć określenia następujące: „...macro-fiber successfully used to replace steel fibers, welded wire mesh and conventional reinforcing bars in a wide variety of applications”, a zatem sugestie o możliwości zastąpienia tymi włóknami zbrojenia stalą. Niestety, dowody tych stwierdzeń nie są łatwo dostępne.

Typowy zakres dozowania makrowłókien syntetycznych do mieszanki betonowej mieści się w granicach od 2 do 7 kg/m³, a nawet do 12 kg/m³, według instrukcji niektórych producentów, co odpowiada zakresowi zawartości objętościowych włókien w betonie od 0,2% do 1,2%.

Przy stosowaniu makrowłókien syntetycznych w mieszance betonowej należy oczekiwać pogorszenia urabialności. Orientacyjnie, przy zawartości makrowłókien 2-3 kg/m³ oczekiwać można zmniejszenia opadu stożka o około 50 mm, przy zawartości makrowłókien od 4 do 7 kg/m³ zmniejszenia opadu stożka o około 75-125 mm. Według informacji producentów taki negatywny wpływ na konsystencję mieszanki dotyczy typowego betonu towarowego, nie bardzo wszakże wiadomo, co znaczy typowy beton towarowy. Konieczność stosowania domieszek uplastyczniających w celu uzyskania pożądanej konsystencji mieszanki jest oczywista. Równie oczywiste jest unikanie dodawania włókien do mieszanek wilgotnych, gęstopla-

Tablica 2. Składniki mieszanki betonowej [kg/m³]

| Składniki mieszanki betonowej | Oznaczenie mieszanki i serii próbek | | | | | |
|--|-------------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| | REF | CH2 | CH3 | CH4 | ST 15 | ST 25 |
| Cement CEM II/B-S 32,5 | 284 | 283 | 285 | 279 | 282 | 281 |
| Piasek 0 – 2 mm | 668 | 665 | 672 | 664 | 665 | 666 |
| Grys granitowy 2 – 8 mm | 658 | 655 | 656 | 652 | 653 | 654 |
| Grys granitowy 8 – 16 mm | 560 | 558 | 563 | 553 | 557 | 556 |
| Domieszka uplastyczniająca ChrysoPlast 580 | 1,43 | 1,42 | 1,43 | 1,41 | 1,41 | 1,41 |
| Woda | 153 | 156 | 165 | 165 | 153 | 146 |
| Makrowłókna syntetyczne 50x1mm | - | 2 | 3 | 3,9 | - | - |
| Włókna stalowe 50 x 1,0mm | - | - | - | - | 14,9 | 25 |

Tablica 3. Właściwości mieszanki betonowej

| Właściwości mieszanki | Oznaczenie mieszanki | | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|------|------|
| | REF | CH2 | CH3 | CH4 | ST15 | ST25 |
| Gęstość objętościowa [kg/m ³] | 2324 | 2320 | 2345 | 2318 | 2326 | 2330 |
| Opad stożka [mm] | 40 | 40 | 40 | 40 | 50 | 50 |
| Temperatura mieszanki [°C] | 9 | 10 | 14 | 15 | 15 | 15 |
| Zawartość powietrza [%] | 3,3 | 3,6 | 2,8 | 3,4 | 3,7 | 4,3 |

stycznych; znane jest wymaganie opadu stożka co najmniej 80 mm mieszanki betonowej przed dodaniem makrowłókien syntetycznych.

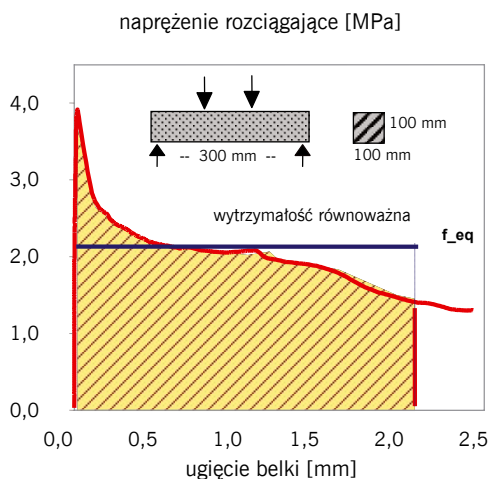
Wpływ makrowłókien syntetycznych na właściwości mechaniczne betonu jest poznany fragmentarycznie, a wyników systematycznych badań krajowych nie ma prawie wcale.

3. Wpływ makrowłókien syntetycznych na wytrzymałość równoważną na zginanie

3.1. Opis badań doświadczalnych

Przeprowadzono badania doświadczalne wpływu zawartości makrowłókien syntetycznych na wytrzymałość równoważną na zginanie fibrobetonu zaprojektowanego ze składników podanych w tablicy 2. Zastosowano makrowłókna syntetyczne o długości 50 mm i średnicy 1 mm (właściwości włókien deklarowane przez producenta: gęstość 0,92 g/cm³, moduł Younga 5 GPa, wytrzymałość na rozciąganie 650 MPa, odporność chemiczna: pełna). W celach porównawczych zastosowano włókna stalowe o długości 50 mm z drutu o przekroju okrągłym o średnicy 1 mm, z haczykowatymi zakończeniami po obu stronach.

Wykonano 6 mieszanek, określając właściwości mieszanki metodami normowymi (tablica 3).



Rys. 2. Schemat wyznaczenia wytrzymałości równoważnej na zginanie

Tablica 4. Wyniki określenia wytrzymałości na ściskanie f_c , gęstości objętościowej betonu w próbkach po 28 dniach dojrzewania (wartości średnie z 3 próbek), wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i wytrzymałości równoważnej na zginanie fibrobetonu i betonu bez włókien (wartości średnie i odchylenie standardowe w serii liczącej 6 próbek)

| Ozn. serii | Wskaźnik w/c | Gęstość obj. próbek [kg/m ³] | Wytrzym. na ściskanie [MPa] | Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu f_{ft} [MPa] | Wytrzymałość równoważna na zginanie f_{eq} [MPa] |
|------------|--------------|--|-----------------------------|--|--|
| REF | 0,539 | 2400 | 44,2 | 3,95 | – |
| | | | | 0,51 | – |
| CH_2 | 0,551 | 2380 | 41,1 | 3,77 | 1,30 |
| | | | | 0,40 | 0,10 |
| CH_3 | 0,579 | 2365 | 35,3 | 3,94 | 1,87 |
| | | | | 0,35 | 0,26 |
| CH_4 | 0,591 | 2335 | 27,8 | 3,88 | 2,18 |
| | | | | 0,39 | 0,57 |
| ST_15 | 0,542 | 2405 | 40,3 | 4,73 | 1,70 |
| | | | | 0,41 | 0,70 |
| ST_25 | 0,520 | 2385 | 37,5 | 3,82 | 1,95 |
| | | | | 0,51 | 0,80 |

Uformowano próbki do badań na zginanie (płyty o grubości 100 mm i wymiarach w planie 450 x 800 mm) oraz do normowych badań wytrzymałości na ściskanie. Zagęszczanie betonu wykonano na stole wibracyjnym. Próbkę przechowywano przez 28 dni w komorze klimatycznej, w warunkach wysokiej wilgotności i kontrolowanej temperatury określonych normowo. Z płyt o grubości 100 mm zostały wycięte próbki do badań na zginanie – belki o długości 450 mm i przekroju 100 x 100 mm.

Po 28 dniach próbki betonowe zostały poddane badaniom wytrzymałościowym. Badania wytrzymałości na ściskanie na próbkach sześciennych o boku 150 mm przeprowadzono przy użyciu prasy Controls o nośności 300 kN. Badanie wy-

trzymałości równoważnej na zginanie wykonano w laboratorium IPPT PAN przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Lloyd EZ 50 o nośności 50 kN, sterowanej mikroprocesorowo. Próby 4-punktowego zginania wykonano, stosując rozstaw podpór 300 mm (rys. 2). Proces obciążania sterowany był przemieszczeniowo, mierzono zarówno obciążenie zginające, jak i ugięcie próbki, oraz rejestrowano te wielkości przy użyciu komputerowego systemu zbierania danych. Interpretację wyników badań przeprowadzono zgodnie z normą japońską JSCE SF-4 i amerykańską ASTM C-1018.

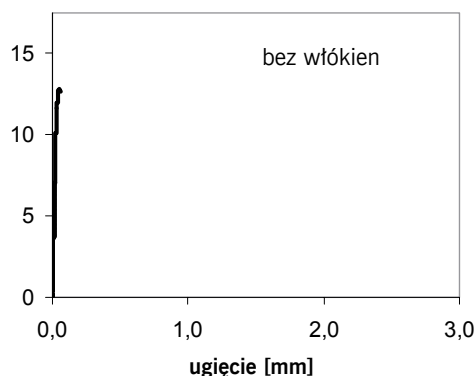
3.2. Wyniki badań

Na przykładowych wykresach obciążenia zginającego w funkcji ugięcia belek fibrobetonowych i betonu porównawczego bez włókien (rys. 3) wyraźnie zilustrowany jest znaczący wpływ zawartości włókien na ciągliwość fibrobetonu: w porównaniu do kruchego zniszczenia betonu bez włókien ze wzrostem zawartości włókien obserwuje się wzrost obciążenia przenoszonego po zarysowaniu. Obserwacje postaci zniszczenia próbek wykazały, że nawet przy znaczących ugięciach belek, powyżej 1/100 rozpiętości, próbki zachowywały integralność. Po ich wymuszonym rozerwaniu stwierdzono, że całkowite zniszczenie było związane z wyciąganiem włókien z zaczynu cementowego matrycy, nie zaobserwowano zrywania włókien. Pokazany widok powierzchni przetomu zginanych próbek fibrobetonowych ilustruje przypadkowe rozmieszczenie makrowłókien, ale dość równomierne, na całej powierzchni (rys. 4).

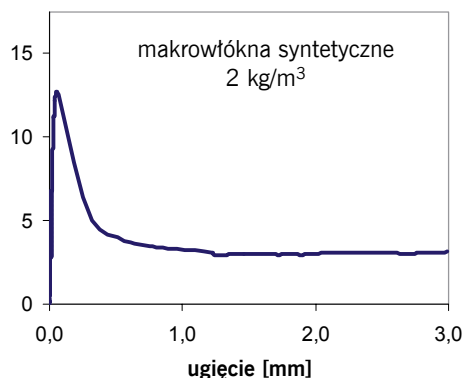
Dane liczbowe charakteryzujące fibrobeton poddany ściskaniu i zginaniu podano w tablicy 4. Wartości średnie wytrzymałości na ściskanie po 28

Rys. 3. Przykładowe wykresy zginania próbek betonu bez włókien oraz fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi i włóknami stalowymi, ilustrujące wpływ zbrojenia rozproszonego na wzrost odporności na pękanie przy zginaniu

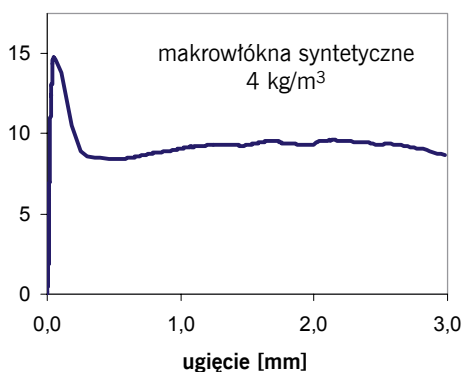
obciążenie zginające [kN]



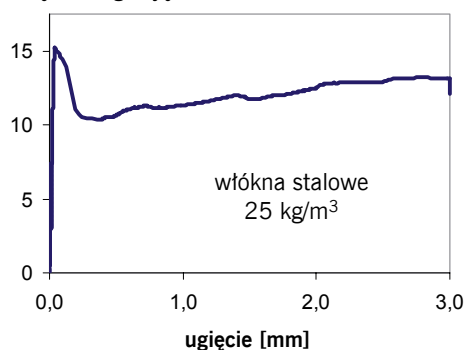
obciążenie zginające [kN]



obciążenie zginające [kN]



obciążenie zginające [kN]



dniach dojrzewania mieściły się w zakresie od 28 MPa do 44 MPa, a zatem orientacyjnie odpowiadały klasie wytrzymałości co najmniej C20/25. Ze wzrostem zawartości włókien stwierdzono spadek wytrzymałości na ściskanie, który można bezpośrednio skorelować ze wzrostem wskaźnika wodno-cementowego od 0,542 do 0,595.

Nie stwierdzono systematycznego i znaczącego wpływu zawartości włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu; w porównaniu do średniej wartości f_{ft} w przypadku betonu bez włókien, wartości f_{ft} dla fibrobetonów zmieniały się w zakresie $\pm 5\%$, z wyjątkiem fibrobetonu serii CH4 wykazującego spadek f_{ft} o ok. 15%. Należy to przypisać gorszemu zagęszczeniu betonu z włóknami w ilości 4 kg/m^3 , co zresztą jest skorelowane z mniejszą gęstością betonu i mniejszą wytrzymałością na ściskanie.

Zaobserwowano znaczący wzrost wytrzymałości równoważnej na zginanie ze wzrostem zawartości makrowłókien syntetycznych. Wprowadzając pojęcie tzw. wskaźnika wytrzymałości równoważnej R_e w formie stosunku wytrzymałości równoważnej na zginanie do wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, uzyskano liniową korelację wskaźnika wytrzymałości równoważnej i zawartości makrowłókien według następującego wzoru:

$$R_e = 0,13 + 0,109 \cdot W_f, R^2 = 0,98$$

przy czym W_f oznacza masę makrowłókien syntetycznych, wyrażoną w kg/m^3 .

Pojęcie wskaźnika wytrzymałości równoważnej jest znane: wskaźnik jest uzależniony od rodzaju i zawartości włókien w fibrobetonie oraz ich współpracy z matrycą, toteż jest uznawany za jeden z najważniejszych parametrów, świadczących o efektywności zbrojenia rozproszonego w betonie.

Stwierdzony spadek wytrzymałości na ściskanie wymaga dodatkowego komentarza na podstawie składu mieszanki betonowej. Przy wzrastającej zawartości włókien, aby utrzymać pożądaną konsystencję mieszanki, zwiększona została zawartość wody. Wzrost wskaźnika wodno-cementowego od 0,542 do 0,595 miał zasadniczy wpływ na zarejestrowany spadek wytrzymałości. Dodatkowo, negatywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie betonu miała większa porowatość wynikająca z utrudnień w prawidłowym zagęszczeniu mieszanki przy wysokich zawartościach włókien. Zaleca się, aby negatywny efekt włókien na urabialność mieszanki betonowej był rekompensowany zwiększoną dawką domieszki uplastyczniającej, lub zastosowaniem superplastyfikatora o silniejszym działaniu upłynniającym, zamiast podwyższania zawartości wody.

4. Wnioski i uwagi końcowe

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski.

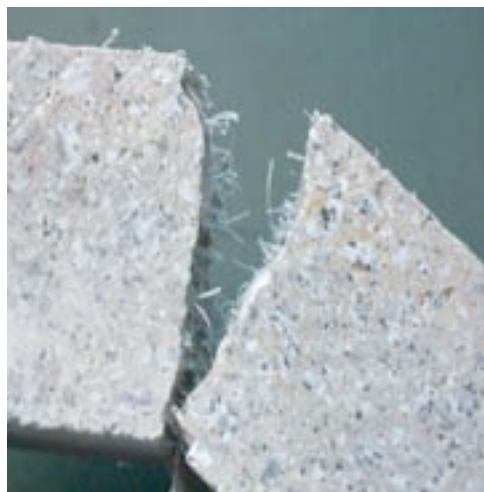
1. W badaniach zginania charakterystyka mechaniczna fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi oraz z włóknami stalowymi była jakościowo podobna: w obu przypadkach włókien stwierdzono ciągliwość materiału, ujawniającą się jako zdolność do przenoszenia znaczących obciążeń rozciągających po powstaniu rysowań, oraz radykalny wzrost odporności na pęknięcie w porównaniu z betonem bez włókien.

2. Stwierdzono wzrost wytrzymałości równoważnej na zginanie fibrobetonu ze wzrostem zawartości makrowłókien, podobnie wzrastał wskaźnik wytrzymałości równoważnej na zginanie i wynosił średnio od 0,34 do 0,56 w badanym zakresie rodzajów i zawartości włókien. Nie stwierdzono istotnego wpływu makrowłókien syntetycznych na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz współczynnik sprężystości przy zginaniu.

3. Stosowanie wysokich zawartości $\geq 4 \text{ kg/m}^3$ makrowłókien syntetycznych w betonie wymaga odpowiednio silnego upłynnienia mieszanki przy użyciu domieszek chemicznych.

Warto dodać, że na podstawie analogicznych badań wytrzymałości równoważnej przy zginaniu przeprowadzonych w IPPT PAN znana jest charakterystyka betonu z dodatkiem mikrowłókien polipropylenowych, stosowanych w ilości ok. 1 kg/m^3 . Wykresy zginania mają charakter identyczny jak wykresy zginania betonu bez włókien: po przekroczeniu liniowo-sprężystego zakresu odkształceń następuje gwałtowne kruche zniszczenie (jak na pierwszym z wykresów na rys. 3). Taka ewidentna manifestacja różnicy właściwości betonu z mikrowłóknami i makrowłóknami polimerowymi wskazuje, że tylko makrowłóknom można przypisywać mierzalne wzmocnienie betonu stwardniałego. A zatem, w odróżnieniu od mikrowłókien polimerowych stosowanych właściwie jako domieszka do betonu, zbrojenie rozproszone w postaci makrowłókien polimerowych może być uwzględnione przy wymiarowaniu przekrojów zginanych elementów fibrobetonowych. Potrzeba jednak więcej badań, aby nabrać pewności w stosowaniu nowego rodzaju włókien do betonu.

prof. Michał A. Glinicki, IPPT PAN Warszawa
www.ippt.gov.pl/~mglinic



Rys. 4. Widok makrowłókien syntetycznych na powierzchni przelomu próbek

