

Porównanie właściwości fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych do wymagań normowych dotyczących betonu zwykłego

Dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK, dr inż. Janusz Kobaka, Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

1. Wprowadzenie

Beton należy do materiałów kruchych i mało odkształcalnych, jest więc podatny na zarysowania i pęknięcia. Dla takich materiałów dodatek włókien, np. stalowych, pozwala na uzyskanie właściwości o podwyższonej plastyczności i odporności na zarysowania [1]. Początki zastosowania fibrobetonu miały miejsce już 140 lat temu, kiedy w roku 1874 A. Bernard zgłosił pierwszy patent betonu zbrojonego włóknami stalowymi. Od tego czasu podejmowane są próby zarówno oceny wpływu włókien na jego właściwości [2], jak również rozkładu włókien w przestrzeni fibrobetonu [3]. Fibrobeton stał się więc pewną alternatywą dla betonu zwykłego. Do najważniejszych zalet fibrobetonu można zaliczyć: większą wytrzymałość na ściskanie we wczesnych stadiach dojrzewania niż beton zwykły [4], większą wytrzymałość na rozciąganie [2] oraz rozciąganie przy zginaniu [1] i rozciąganie przy rozłupywaniu, dużą odporność dynamiczną [5, 6], ograniczenie propagacji rys w elementach konstrukcyjnych [7], lepsze zachowanie podczas zniszczenia [8] (zniszczenie nie przebiega gwałtownie), możliwość redukcji tradycyjnego zbrojenia [9], czy też odporność na działanie wysokich temperatur [10]. Kompozyty te mają także dużą odporność na ścieranie i charakteryzują się trwałością nie gorszą niż beton zwykły. Wadą fibrobetonu jest pogorszenie urabialności mieszanki wraz ze wzrostem zawartości włókien w mieszance, brak wytycznych do projektowania konstrukcyjnych elementów wykonanych z fibrobetonów [11], a także stosunkowo wysoki koszt włókien stalowych, który przy 1% zawartości włókien stanowi około 90% ceny betonu zwykłego klasy C25/30. Koszt ten częściowo jednak rekompensuje zastąpienie drogiego żwiru odpadowym piaskiem płukanym, co obniża cenę o około 30% (oszacowano na podstawie [42]). Zakres stosowania fibrobetonów w budownictwie jest różnorodny. Można tu wymienić szereg przykładów, a mianowicie: wytwarzanie konstrukcyjnych elementów cienkościennych, powłok, przekryć budynków. Włókna stalowe stosowane są także do wykonywania elementów żelbetowych zbrojonych tradycyjnie jako uzupełnienie zbrojenia [12]. Z fibrobetonów wytwarza się elementy

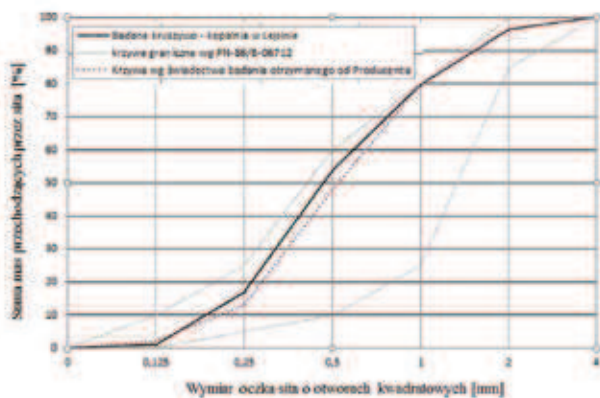
mostów [13, 14, 15], rury [16, 17], płyty [18], kolumny [19, 20] oraz pale [21]. Najczęściej metodą natryskową wykonywane są tunele podziemne [22, 23, 24, 25] i wzmocnienia wyrobisk kopalnianych. Materiały te stosuje się także w konstrukcjach narażonych na wpływy sejsmiczne [26] oraz do wykonywania elementów konstrukcji elektrowni nuklearnych [27], kiedy zachodzi konieczność zapewnienia wysokiego stopnia bezpieczeństwa, np. podczas ataku terrorystycznego lub trzęsienia ziemi. W szczególności znajdują one zastosowanie w elementach poddawanych dużym obciążeniom dynamicznym [27].

2. Znaczenie i cel badań doświadczalnych

Na terenie Pomorza w Polsce złoża kruszyw występują w postaci mieszaniny kruszywa drobnego i grubego. Duże zapotrzebowanie na kruszywo grube przyczyniło się do opracowania technologii pozyskiwania tego kruszywa przez jego wyłukiwanie ze złóż. Technologię tę nazwano hydroklasyfikacją. Efektem stosowania hydroklasyfikacji kruszyw naturalnych jest pozostawienie hałd wyłukanego kruszywa w postaci piasku pozbawionego frakcji grubych (rys. 1). Powstałe w ten sposób wyrobiska powinny być poddane kosztownej rekultywacji. Alternatywą dla rekultywacji



Rys. 1. Widok hałd piasków odpadowych na Pomorzu (Polska)



Rys. 2. Krzywa uziarnienia kruszywa użytego w badaniach

byłych wyrobisk może być możliwość wykorzystania piasku odpadowego jako pełnowartościowego surowca budowlanego [28]. Częściowe zastąpienie betonu zwykłego fibrokompozytem na bazie piasków odpadowych może znacznie ograniczyć dalszą degradację środowiska. Pozwoli to na zrównoważone wykorzystanie regionalnych surowców kruszywa. Działania te przyczynią się również do stopniowego zmniejszenia hałd piasku.

Częściowe zastąpienie betonu fibrokompozytem o tych samych bądź lepszych właściwościach jest wspieranym rozwiązaniem dla regionów, w których brakuje naturalnych złóż kruszywa grubego. Takim regionem niewątpliwie jest region Pomorza w Polsce (występuje tylko 4% złóż kruszyw grubych), Bliski Wschód czy też północna Afryka.

Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu dodatku włókien stalowych na właściwości mechaniczno-fizyczne fibrokompozytów wytworzonych na bazie piasków odpadowych. Kolejnym zadaniem było wyselekcjonowanie takiego fibrokompozytu, którego właściwości spełniłyby wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym i były lepsze niż betonu zwykłego.

3. Materiały i elementy próbne

Do wykonania próbnich elementów użyto piasku pozyskanego po procesie hydroklasyfikacji z Kopalni Surowców Mineralnych w Lepinie, gm. Stawoborze (1570 kg/m^3), cementu portlandzkiego CEM II/A-V 42,5R (420 kg/m^3), pyłu krzemionkowego (21 kg/m^3), superplastyfikatora Betocrete 406 ($16,8 \text{ kg/m}^3$) oraz wodę z wodociągu miejskiego (160 kg/m^3). Kruszywo cechowało się dużą jednorodnością uziarnienia i ciągłością krzywej uziarnienia (rys. 2). Zbrojenie rozproszone stanowiły włókna stalowe EKOMET o kształcie haczykowatym i smukłości $\lambda=l/d=62,5$ ($l=50 \text{ mm}$, $d=0,8 \text{ mm}$) (tabela 1). Matrycę fibrokompozytu zaprojektowano metodą analityczno-doświadczalną. Zmodyfikowanie jej składu poprzez zastosowanie dodatku pyłów krzemionkowych oraz domieszki

Tabela 1. Charakterystyka techniczna włókien stalowych użytych w badaniach oraz wpływ na parametry mieszanki betonowej i betonu

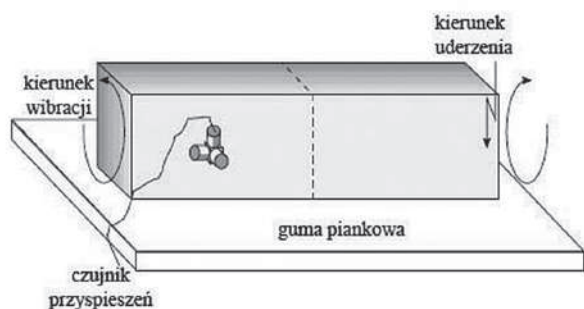
L.p.	Cecha	Wartość	Jednostka
1	Grupa konstrukcyjna	I	[-]
2	Wytrzymałość na rozciąganie	1160 ± 7	[N/mm ²]
3	Moduł Younga	210000	[N/mm ²]
4	Konsystencja przy zawartości włókien 14–15 kg/m ³ mierzona metodą Vebe	4	[s]
5	Wpływ na wytrzymałość betonu przy $\text{CMOD}^*=0,5 \text{ mm}$	1,5	[N/mm ²]
6	Wpływ na wytrzymałość betonu przy $\text{CMOD}^*=3,5 \text{ mm}$	1,5	[N/mm ²]

* – rozwarcie naciętej szczeliny wg metody zawartej w PN-EN 14651 [29]

uplastyczniająco-upłynniającej pozwoliło na uzyskanie stosunku $w/c=0,38$. Jako zmienną składową fibrokompozytu przyjęto zawartość włókien stalowych, które dozwolano co 0,5% w stosunku do objętości fibrokompozytu, do 2,5%. Włókna w mieszance fibrokompozytu rozmieszczone były w sposób przypadkowy.

4. Metodyka badań

Badania wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu, gęstości oraz dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 mm. Wytrzymałość na ściskanie określono wg PN-EN 12390–3 [30], natomiast na rozciąganie przy rozłupywaniu wg metodyki przedstawionej w PN-EN 12390–6 [31]. Gęstość pozorną oznaczono zgodnie z zaleceniami PN-EN 12390–7 [32], a dynamiczny moduł sprężystości zdefiniowany został na podstawie analizy prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej. Statyczny moduł sprężystości określono wg ISO 6784:1982 [33] na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Badania dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego oznaczano na podstawie drgań własnych belki pryzmatycznej o wymiarach $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ (rys. 3). Otrzymane przebiegi czasowe drgań własnych belek poddano analizie Fouriera [34], wyznaczając częstotliwość skrajnych drgań własnych. Odporność na ścieranie fibrokompozytu określono wg zasad przedstawionych w PN-EN 14157:2005 [35] na próbkach sześciennych o boku 71 mm. Badanie konsystencji mieszanki fibrokompozytu przeprowadzono metodą Vebe zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 12350–3 [36]. Przebieg skurczu fibrokompozytu w czasie wyznaczono zgodnie z instrukcją ITB 194/98 [37] na belkach o wymiarach $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$. Badania dynamicznego modułu sprężystości oraz gęstości pozornej przeprowadzono na 96 próbkach: po



Rys. 3. Schemat badania częstotliwości drgań własnych [34]

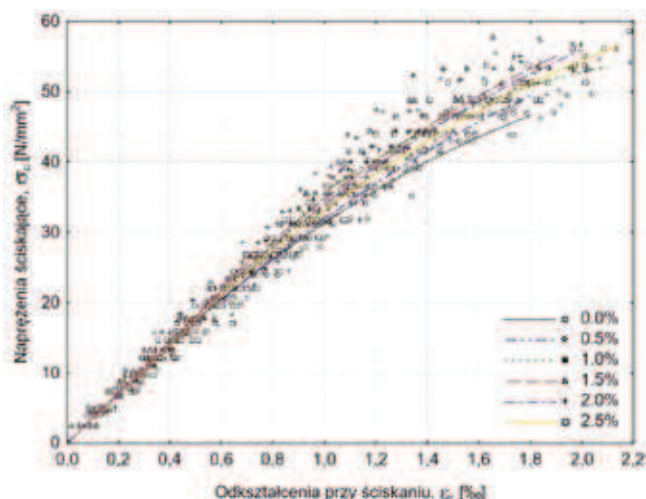
16 próbek dla każdego fibrokompozytu o różnej zawartości włókien. Wytrzymałość fibrokompozytu w warunkach ściskania i rozciągania przy rozłupywaniu, a także statyczny moduł sprężystości określono na 48 próbkach, po 8 próbek dla każdego fibrokompozytu o różnej zawartości włókien. Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego badano na 36 próbkach: 6 próbek dla każdej zawartości włókien stalowych. Ścieralność badano na 6 próbkach, dla każdego rodzaju fibrokompozytu. Dla każdej badanej cechy fibrokompozytu wykonano po 8 próbek kontrolnych (bez włókien), które do czasu obciążenia przechowywano w tych samych warunkach cieplno-wilgotnościowych (temp. $20 \pm 2^\circ\text{C}$, wilgotność względna powietrza 100%), jak próbki z włóknami stalowymi.

5. Wyniki i analiza badań

Wartości wskaźników zmienności (v) badanych właściwości, zawierające się w przedziale od 5% dla wytrzymałości na ściskanie do 9% w przypadku wytrzymałości na rozciąganie, wskazują na bardzo dobrą jakość zaprojektowanego fibrokompozytu.

Z analizy wyników badań wytrzymałości na ściskanie wynika, że włókna stalowe dodawane do fibrokompozytu w ilości do 1,5% w stosunku do jej objętości efektywnie zwiększają tę wytrzymałość. Powyżej tego poziomu nie następuje już istotny wzrost jego wytrzymałości na ściskanie. Dodatek włókien stalowych w ilości 1% zwiększa wytrzymałość na ściskanie o ok. 33% w stosunku do materiału bez włókien, natomiast wytrzymałość fibrokompozytu zawierającego 2,5% włókien jest większa jedynie o 2% w stosunku do fibrokompozytu zawierającego 1,5% włókien (tabela 2). Uzyskane wyniki badań wskazują, że pod względem ekonomicznym maksymalna zawartość włókien stalowych z uwagi na wytrzymałość przy ściskaniu fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych wynosi 1,5%.

Na podstawie korelacji zależności naprężenie-odkształcenie ($\sigma_c - \varepsilon_c$) (rys. 4) można stwierdzić, że kompozyt o zawartości włókien 1,5% charakteryzuje się największym tangensem nachylenia prostej korelacyjnej równym 36 w zakresie odkształceń 0–0,6‰ (co odpowiada 1/3 wartości siły niszczącej). Duża wartość tangensa nachylenia



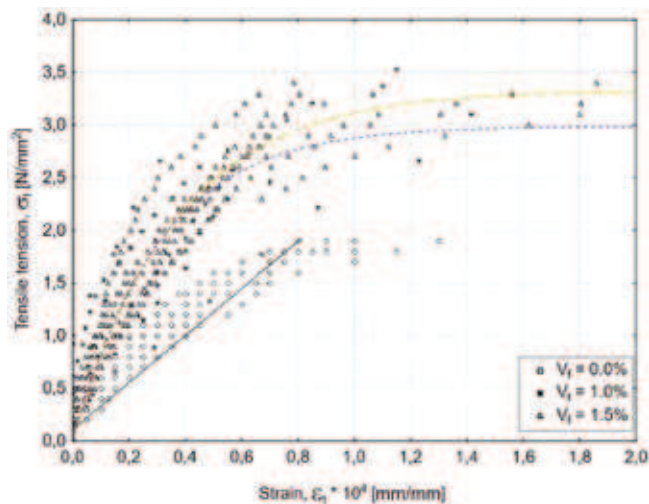
Rys. 4. Zależność naprężenie-odkształcenie przy osiowym ściskaniu fibrokompozytu o różnej zawartości włókien

prostej korelacyjnej świadczy o dużej wartości modułu sprężystości fibrokompozytu. Natomiast kompozyt nie zawierający włókien charakteryzuje się najmniejszą wartością tangensa nachylenia tej prostej, moduł sprężystości ma więc wartość najmniejszą. Potwierdziły to badania modułu sprężystości przy ściskaniu.

Badania wytrzymałości na osiowe rozciąganie wykazały, że fibrokompozyt z zawartością $V_f = 1,5\%$ włókien charakteryzuje się o 10% większą wytrzymałością niż z $V_f = 1\%$. Natomiast w porównaniu z fibrokompozytem bez włókien cechuje go o 65% większa wytrzymałość. Na podstawie wyników badań ustalono związki konstytutywne naprężenie-odkształcenie fibrokompozytu z $V_f = 0\%$, 1,0% i 1,5% zawartością włókien stalowych. Zależność naprężenie-odkształcenie przedstawiona na rysunku 5 wskazuje, że przy niewielkich naprężeniach nie występują różnice w przyroście odkształceń fibrokompozytu z zawartością włókien stalowych $V_f = 1\%$ i $V_f = 1,5\%$. Po przekroczeniu naprężeń granicznych wytrzymałości na rozciąganie matrycy, siły rozciągające przenoszone zostają stopniowo na włókna stalowe. Nachylenie krzywej naprężenie-odkształcenie jest tym bardziej „stromie”, im większa jest zawartość włókien. Włókna przenosząc część naprężeń matrycy, zmniejszają wartości odkształceń liniowych fibrokompozytu wywołanych siłami rozciągającymi.

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu wykazały również korzystny wpływ dodatku włókien stalowych. Na podstawie krzywej regresji (tabela 2) można stwierdzić, że włókna stalowe o objętości do 2% wpływają znacząco na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Przy wysokiej zawartości włókien rzędu 2% wzrost wytrzymałości nie rekompensuje nakładów kosztu wykonania takiego fibrokompozytu. Koszt wzrasta wprost proporcjonalnie do objętości użytego zbrojenia rozproszonego.

Włókna stalowe o objętości do 1,5% także wpływają znacząco na wzrost dynamicznego modułu sprężystości



Rys. 5. Zależność naprężenie-odkształcenie przy osiowym rozciąganiu fibrokompozytu o różnej zawartości włókien (Tensile tension, σ_i [N/mm²], Strain, $\epsilon \cdot 10^4$ [mm])

(tabela 2). Z analizy krzywej regresji (tabela 2) wynika, że zawartość włókien, przy której wartość dynamicznego modułu sprężystości osiąga maksimum, wynosi 1,7%. Powyżej tej granicy następuje pogorszenie badanej cechy. Można przypuszczać, że przyczyną zaobserwowanych zmian jest powiększające się, wraz z zawartością włókien stalowych w mieszance, jej napowietrzenie [39]. Powyższe przypuszczenia autorów potwierdzają także wyniki badań gęstości pozornej fibrokompozytu. Z analizy wyników badań gęstości pozornej (r) wynika naturalna zależność: wzrost gęstości wraz z dodatkiem włókien stalowych. Przyczyną zaobserwowanej relacji jest kilkakrotnie większa gęstość stali w stosunku do gęstości matrycy fibrokompozytu. Zależność ta nie przebiega jednak prostoliniowo, jak można by się spodziewać z rachunku zastępowania matrycy włóknami stalowymi. Po przekroczeniu zawartości włókien w mieszance fibrokompozytu równej 1,5% obserwuje się bardzo powolny wzrost jego gęstości. Zjawisko to należy tłumaczyć tym, że włókna mają zdolność do napowietrzania mieszanki [39], a następstwem jest zwiększona porowatość stwardniałej matrycy i w konsekwencji mniejszy

przyrost jej gęstości. Powierzchnia zespolenia pojedynczego włókna z matrycą maleje wraz ze wzrostem ilości pustych przestrzeni w postaci porów lub kawern w mieszance, osłabiając tym samym przyczepność włókien do matrycy. Zaobserwowane zjawisko wydaje się być kluczem do wyjaśnienia przyczyn pogarszania się niektórych właściwości mechanicznych takich fibrokompozytów i ma zasadnicze znaczenie dla mechanizmu działania i niszczenia się ustroju oraz jego trwałości.

Badania dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego (G_d) fibrokompozytu wykazały korzystny wpływ dodatku włókien stalowych w przedziale $V_f = 0-1,5\%$ na jej wartości (tabela 2). Powyżej 1,5% zawartości włókien następuje obniżenie wartości dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego. Fibrokompozyt zawierający 2,5% włókien stalowych charakteryzuje się około 3% mniejszą wartością dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego niż fibrokompozyt zawierający 1,5% włókien. Fibrokompozyt nie zawierający włókien ma wartość modułu odkształcenia postaciowego (G_d) o około 5% mniejszą niż fibrokompozyt o zawartości włókien $V_f = 1,5\%$ (tabela 2). Na podstawie wykonanego testu t-Studenta stwierdzono na poziomie istotności 0,05, że średnie wartości dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego dla fibrokompozytu z 1,5% zawartością włókien oraz bez włókien nie należą do tej samej populacji wyników. Stąd wniosek, że zawartość włókien stalowych wpływa na tę właściwość.

Zależność skurczu fibrokompozytu od czasu może być aproksymowana funkcją wykładniczą (tabela 3). Włókna stalowe ograniczają skurcz, który w fibrokompozycie o zawartości włókien 0–2,5% wynosi zgodnie z krzywymi regresji odpowiednio: 0,91–0,75‰. Tak więc fibrokompozyt o zawartości włókien 2,5% charakteryzuje się skurczem o 18% mniejszym niż fibrokompozyt bez dodatku włókien.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że skurcz fibrokompozytu objętego badaniami był około dwukrotnie większy niż skurcz betonu zwykłego. Wynika to z zastosowania w badanym fibrokompozycie drobnego kruszywa w postaci piasku odpadowego.

Tabela 2. Wybrane właściwości fibrokompozytu w zależności od zawartości włókien stalowych [38]

Właściwość fibrokompozytu	Zawartość włókien w fibrokompozycie, V_f [%]						Funkcja regresji/ współczynnik korelacji
	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ [N/mm ²]	44,0	51,8	61,4	61,6	61,3	61,9	$f_{c,cube} = 62,77 - 19,22e^{-1,61V_f}$ $r = 0,90$
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{t,spl}$ [N/mm ²]	3,3	5,5	7,7	8,3	8,8	9,2	$f_{t,spl} = 9,75 - 6,52e^{-0,99V_f}$ $r = 0,97$
Dynamiczny moduł sprężystości E_d [GPa]	41,46	43,69	45,82	46,25	45,95	45,50	$E_d = 41,44 + 5,70V_f - 1,65V_f^2$ $r = 0,93$
Ścieralność S [mm]	2,61	2,52	2,14	2,00	2,50	2,40	$S = 2,662 - 0,700V_f + 0,247V_f^2$ $r = 0,60$
Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego G_d [GPa]	17,78	18,54	18,33	18,81	18,60	18,23	$G_d = 17,83 + 1,146V_f - 0,391V_f^2$ $r = 0,79$

Tabela 3. Wpływ czasu dojrzewania i zawartości włókien na skurcz fibrokompozytu

Zawartość włókien V_f [%]	Wartość średnia skurczu ε_s [‰]	Współczynnik korelacji r_{cs} [-]	Funkcja opisująca przebieg w czasie skurczu
0,0	0,91	0,98	$\varepsilon_s = 0,910(1 - e^{-0,148t^{0,681}})$
0,5	0,89	0,85	$\varepsilon_s = 0,887(1 - e^{-0,169t^{0,699}})$
1,0	0,85	0,93	$\varepsilon_s = 0,851(1 - e^{-0,178t^{0,616}})$
1,5	0,84	0,97	$\varepsilon_s = 0,842(1 - e^{-0,147t^{0,657}})$
2,0	0,78	0,92	$\varepsilon_s = 0,780(1 - e^{-0,164t^{0,692}})$
2,5	0,75	0,92	$\varepsilon_s = 0,749(1 - e^{-0,167t^{0,685}})$

Jednak zaletą takiego wypełniacza jest to, że można znacznie polepszyć właściwości mechaniczne fibrokompozytu, stosując większą objętość włókien stalowych niż w przypadku tradycyjnych fibrobetonów o wypełniaczach żwirowo-piaskowych.

Wyniki badań odporności na ścieranie fibrokompozytu (tabela 2) wykazują pozytywny wpływ włókien stalowych na tę właściwość. Na podstawie analizy wyników badań można stwierdzić, że przy objętości włókien równej $V_f = 1,3\%$ fibrokompozyt wykazuje najmniejszą ścieralność.

Różnica między największą ścieralnością fibrokompozytu, odpowiadającą zerowej objętości włókien stalowych a ścieralnością uznaną na podstawie analizy wyników

badań za najmniejszą – przekracza 20%. Powyżej objętości włókien równej 1,3% obserwuje się spadek odporności na ścieranie fibrokompozytu. Pogorszenie tej właściwości ma związek, podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości oraz gęstości pozornej fibrokompozytu, ze zwiększającą się wraz ze wzrostem zawartości włókien porowatością matrycy.

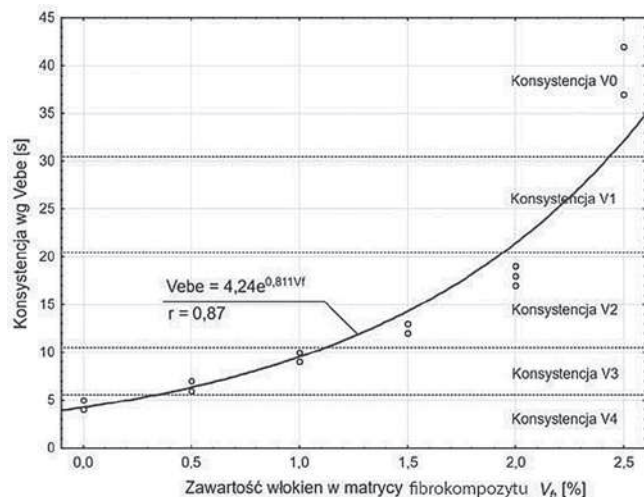
Zgodnie z normą PN-83/B-06256 [40] ścieralność materiału nie powinna być większa niż 2,5 mm dla betonu użytkowanego w warunkach dużego i ciężkiego obciążenia ruchem. Fibrokompozyt z zawartością włókien od 0,5 do 2% spełnia te wymagania.

Analiza wyników badań zwróciła uwagę na fakt, że zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w fibrokompozycie ponad wartość $V_f = 1,5\%$ może mieć negatywny wpływ na niektóre jego właściwości. Właściwym jest więc określenie takiej zawartości włókien w fibrokompozycie, która pozwoli na uzyskanie materiału o właściwościach mechaniczno-fizycznych zbliżonych do właściwości betonu zwykłego, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej konsystencji mieszanki (rys. 6).

Analizując funkcje krzywych regresji przedstawione w tabeli 2, wyznaczono maksymalną zawartość włókien stalowych w fibrokompozycie na bazie piasków odpadowych, przy której spełnione są wymagania stawiane betonowi zwykłemu. Funkcje opisujące wytrzymałość na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu nie dały konkretnej odpowiedzi na stawiane pytanie. Wartości tych wielkości utrzymują bowiem tendencję

Tabela 4. Wybrane właściwości fibrokompozytu przy zawartości włókien stalowych równej 1,2%

Właściwość	Materiał		Metodyka oznaczania
	Drobnokruszowy kompozyt	Beton zwykły	
Gęstość pozorna w stanie suchym: ρ , [kg/m ³]:	2290	2000–2600	PN-EN 12390–7
Wytrzymałość na ściskanie: $f_{c,cyl}$, [MPa]	64,4	12–50 (PN-EN 1992–1-1)	PN-EN 12390–3
Wytrzymałość na ściskanie: $f_{c,cube}$, [MPa]	67,6	15–60 (PN-EN 1992–1-1)	
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu: $f_{t,sp}$, [MPa]	7,3	3,0–3,7	PN-EN 12390–6 (beton nawierzchniowy)
Statyczny moduł sprężystości: E_{cm} , [GPa]	36,7	29–37	PN-EN 12390–13
Dynamiczny moduł sprężystości: E_d , [GPa]	45,9	$E_{cm} = 0,83 E_d$	Neville A.M., „Właściwości betonu”, Polski Cement, Kraków 2000.
Pełzanie: ε_p , [‰]	0,26	0,1–1,0	Instrukcja ITB 194/98
Skurcz: ε_{cs} , [‰]	0,88	0,2–0,6	
Odporność na ścieranie: A , [cm ³ /50 cm ²]	9,0	1,5–22	PN-EN-13892–3 (podkłady podłogowe)
Wytrzymałość resztkowa: [MPa]	$f_{R1} = 9,3$	Nie dotyczy	PN-EN 14651
	$f_{R2} = 8,8$		
	$f_{R3} = 7,9$		
	$f_{R4} = 7,0$		
Wytrzymałość na ścinanie: τ [MPa]	12,9	–	JCI –SF6



Rys. 6. Zależność konsystencji fibrokompozytu od zawartości włókien stalowych

wzrostową w zakresie przyjętych w badaniach procentowych zawartości włókien stalowych. Posłużono się więc funkcjami regresji tych cech, które ulegały pogorszeniu wraz ze wzrostem ilości włókien stalowych w fibrokompozycie, a mianowicie: ścieralnością, dynamicznym modułem sprężystości i dynamicznym modułem odkształcenia postaciowego.

Wyznaczono maksymalną zawartość dodatku włókien stalowych (ekstrema funkcji regresji tabela 2), po przekroczeniu których następował spadek wartości rozważanych cech. Ostatecznie ustalono, że pod względem najkorzystniejszych właściwości oraz ekonomicznym maksymalna zawartość włókien stalowych w fibrokompozycie na bazie piasków odpadowych wynosi 1,2%. Przy tej ilości włókien wartość wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu zwiększa się o ok. 37% w stosunku do kompozytu bez włókien. Dozowanie włókien w większej ilości nie powoduje już znacznego wzrostu wytrzymałości na ściskanie, jak i rozciąganie. Przyrost wytrzymałości fibrokompozytu przy ilości włókien stalowych równej 2%, to zaledwie poziom rzędu kilku MPa w stosunku do fibrokompozytu z dodatkiem włókien w ilości 1,2%. Ponadto zwiększenie zawartości włókien do 2% bardzo niekorzystnie wpływa na konsystencję i urabialność mieszanki.

Jako optymalną objętościową zawartość włókien stalowych przyjęto zatem wartość 1,2% i wykonano elementy próbne do kolejnych badań. Uzyskane wyniki badań zamieszczono w tabeli 4.

Badania wykazały, że fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych z zawartością włókien stalowych w ilości 1,2% charakteryzuje się właściwościami korzystniejszymi niż beton zwykły, głównie z uwagi na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu. Na podstawie wyznaczonych wskaźników zmienności (v) stwierdzono bardzo dobrą jakość fibrokompozytu objętego badaniami.

Badania właściwości fibrokompozytu, takich jak: wytrzymałość na ścinanie i pełzanie są w fazie realizacji. Celem dalszej identyfikacji zaproponowanego fibrokompozytu jako materiału alternatywnego dla betonu zwykłego, planuje się wykonać badania elementów konstrukcyjnych.

6. Podsumowanie

W świetle uzyskanych wyników badań i analiz nasuwają się następujące wnioski ogólne:

1. Właściwości fibrokompozytu wytworzonego na bazie piasków odpadowych o zawartości włókien stalowych 1,2% odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom konstrukcyjnym i są korzystniejsze niż betonu zwykłego. Włókna stalowe wpływają na ograniczenie skurczu takiego fibrokompozytu do kilkunastu procent w stosunku do kompozytu bez włókien.
2. Duże zasoby kruszywa drobnego w regionie północnej Polski i w podobnych regionach na świecie mogą stać się bogactwem, a tym samym podstawowym składnikiem materiałów przeznaczonych do wytwarzania, w szczególności, cienkościennych elementów konstrukcyjnych.
3. Na podstawie przeprowadzanych badań nasuwają się następujące zalety oraz wady fibrokompozytu:

Zalety:

- korzystniejsze niż dla betonu zwykłego właściwości mechaniczne,
- możliwość redukcji lub w niektórych przypadkach (np. płyty) całkowitego wyeliminowania zbrojenia konwencjonalnego,
- stworzenie perspektyw na wykorzystanie odpadowego kruszywa drobnego.

Wady:

- gorsza urabialność w stosunku do kompozytu bez włókien,
- brak dopracowanych metod wymiarowania elementów konstrukcyjnych wykonanych z takiego fibrokompozytu. Wskazuje to na dalsze kierunki badań i analiz teoretycznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Leung H.Y., Flexural capacity of concrete beams reinforced with steel and fibre—reinforced polymer (FRP) bars. *Journal of Civil Engineering and Management*, nr 10 (3): 209-215/2004
- [2] Yazıcı S., Inan G., Tabak V., Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, nr 21: 1250-1253/2007
- [3] Głodkowska W., Kobaka J., The Model of Brittle Matrix Composites for Distribution of Steel Fibres. *Journal of Civil Engineering and Management*, nr 18(1): 145-150/ 2012
- [4] Ding Y., Kusterle W., Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age. *Cement and Concrete Research*, nr 30: 1573-1579/2000
- [5] Tso-Liang T. et al., Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact. *Computational Materials Science*, nr 42: 90-99/2008

- [6] Zhi-Liang W. et al., Stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression. *Construction and Building Materials*, nr 22: 811-819/2008
- [7] Uygunoğlu T., Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, nr 41: 1441-1449/2008
- [8] Wang Z.L., Wu L.P., Wang J.G., A study of constitutive relation and dynamic failure for SFRC in compression. *Construction and Building Materials*, nr 24: 1358-1363/2010
- [9] Dobashi H. et al., Development of Steel Fiber Reinforced Highly Flowable Concrete Segments and Application to Construction. In *Proceedings of the World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly, Seoul 2006*
- [10] Sukontasukkul P. et al, Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*, nr 24: 1967-1974/2010
- [11] Beñoa J., Hilara M., Steel fibre reinforced concrete for tunnel lining – verification by extensive laboratory testing and numerical modelling. *Acta Polytechnica*, nr 53(4): 329-337/2013
- [12] Gribniak V. et al., Deriving stress-strain relationships for steel fibre concrete in tension from tests of beams with ordinary reinforcement. *Engineering Structures*, nr 42: 387-395/2012
- [13] Bank L.C., A model specification for fiber reinforced non-participating permanent formwork panels for concrete bridge deck construction. *Construction and Building Materials*, nr 23: 2664-2677/2009
- [14] Shakya K. et al., Application of steel fibers in beam-column joints of rigid-framed railway bridges to reduce longitudinal and shear rebars. *Construction and Building Materials*, nr 27: 482-489/2012
- [15] Zhang Y. et al., Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced concrete. *Engineering Structures*, nr 48: 255-265/2013
- [16] Zollo R.F., Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, nr 19(2): 107-122/1997
- [17] Fuente A. et al., A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*, nr 30: 547-555/2012
- [18] Salehian H., Barros J.A.O., Assessment of the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs. *Cement and Concrete Composites*, nr 55: 268-280/2015
- [19] Tao Z. et al., Strength and ductility of stiffened thin-walled hollow steel structural stub columns filled with concrete. *Thin-Walled Structures*, nr 46: 1113-1128/2008
- [20] Szmągiera E., Influence of concrete and fibre concrete on the load-carrying capacity and deformability of composite steel-concrete columns. *Journal of Civil Engineering and Management*, nr 13(1): 55-61/2007
- [21] Sukontasukkul P., Jamsawang P., Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column. *Construction and Building Materials*, nr 29: 201-205/2012
- [22] Arnau O., Molins C., Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, nr 26: 778-788/2011
- [23] Arnau O., Molins C., Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution. *Tunnelling and Underground Space Technology*, nr 26: 764-777/2011
- [24] Chiaia B. et al., Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings. *Engineering Structures*, nr 31: 1600-1606/2009
- [25] Kasper T., Edvardson C., Wittenben G., Neumann D., Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with steel fibre reinforced concrete segments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, nr 23(5): 574-587/2008
- [26] Sevil T., Baran M., Bilir T., Canbay E., Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening. *Construction and Building Materials*, nr 25(2): 892-899/2011
- [27] Schimmelpfennig K., Borgerhoff M., Development and application of a material law for steel-fibre-reinforced concrete with regard to its use for pre-stressed concrete reactor vessels. *Nuclear Engineering and Design*, nr 156: 181-188/1995
- [28] Głodkowska W., Kobaka J., Application of Waste Sands for Making Industrial Floors. *Rocznik Ochrony Srodowiska*, nr 11 (1): 193-206/2009
- [29] PN-EN 14651+A1:2007. Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)
- [30] PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [31] PN-EN 12390-6:2011. Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [32] PN-EN 12390-7:2011. Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu
- [33] ISO 6784. Concrete – Determination of static modulus of elasticity in compression
- [34] Weiler B., Grosse C.U., Elastic constants their dynamic measurement and calculation, *Otto Graf Journal*, 1995
- [35] PN-EN 14157:2005. Kamień naturalny – Oznaczenie odporności na ścieranie
- [36] PN-EN 12350-3:2011. Badania mieszanki betonowej – Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe
- [37] ITB 194/98 Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1998
- [38] Głodkowska W., Kobaka J., Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, nr 44: 645-653/2013
- [39] Maidl B.R., *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Ernst & Sohn, Berlin 1995
- [40] PN-83/B-06256. Beton odporny na ścieranie
- [41] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [42] www.cennik-budowlany.pl
- [43] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Piaski odpadowe jako wartościowe kruszywo do wytwarzania fibrokompozytów. *Annual Set The Environmental Protection*, nr 17: 507-525/2015

Politechnika
Warszawska

III Konferencja Naukowa Doktorantów i Młodych Naukowców

MŁODZI DLA TECHNIKI 2017

Płock, 7-8 września 2017 roku