

Fibrokompozyt z kruszywem odpadowym jako pełnowartościowy materiał konstrukcyjny

Dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. uczelni,
dr inż. Janusz Kobaka, dr inż. Joanna Laskowska-Bury, Politechnika Koszalińska

1. Wprowadzenie

Beton to współcześnie najpowszechniej stosowany materiał budowlany, a przez ostatnie lata obserwuje się dość dynamiczny rozwój budownictwa betonowego na całym świecie. Ze względu na takie zalety, jak ogólna dostępność i stosunkowo niskie koszty produkcji, znajduje szerokie zastosowanie w sektorze budownictwa mieszkaniowego i przemysłowego.

Współczesne konstrukcje stawiają przed inżynierami trudne zadania związane ze spełnieniem wymagań stanów granicznych w bardzo zróżnicowanych warunkach oddziaływań statycznych oraz dynamicznych. Niestety beton jest materiałem kruchym, którego łamliwość wzrasta wraz z obciążeniem. Jego niska wytrzymałość na rozciąganie i podatność na propagację rys zmusza badaczy do poszukiwania nowych rodzajów betonów, których parametry fizykomechaniczne sprostają aktualnym wymogom. Jednym ze sposobów polepszenia właściwości kruchego betonu jest stosowanie dodatku w postaci włókien. Obecnie popularność betonów ze zbrojeniem rozproszonym, ogólnie nazywanych fibrokompozytami, nieustannie wzrasta zarówno w kraju, jak i na świecie. Stanowią one w pewnych zastosowaniach alternatywę dla betonu zwykłego. Do najważniejszych zalet fibrokompozytów można zaliczyć: większą w porównaniu z betonem zwykłym wytrzymałość na ściskanie we wczesnych stadiach dojrzewania [6], większą wytrzymałość na osiowe rozciąganie [20, 38] oraz rozciąganie przy zginaniu [26] czy

też rozciąganie przy rozłupywaniu, dużą odporność dynamiczną [34, 39], ograniczenie propagacji rys w elementach konstrukcyjnych [35], lepsze zachowanie podczas zniszczenia [36] (zniszczenie nie przebiega gwałtownie), możliwość redukcji tradycyjnego zbrojenia [7], czy też odporność na działanie wysokich temperatur [33]. Podstawowymi wadami fibrokompozytów są głównie: stosunkowo wysoki koszt włókien, pogorszenie urabialności mieszanki wraz ze wzrostem ich zawartości oraz brak wytycznych do projektowania elementów wykonanych z fibrokompozytów [2]. Ze względu na dobre parametry fizykomechaniczne fibrokompozyty stosowane są obecnie do wytwarzania różnorodnych elementów konstrukcyjnych, takich jak płyty stropowe, belki, elementy cienkich powłok, posadzki przemysłowe, elementy mostów, tuneli, elementy do wzmocnień wyrobisk kopalnianych [3, 4, 5, 11, 23, 25, 27], a nawet w konstrukcjach narażonych na wpływy sejsmiczne [29] oraz do wykonywania elementów konstrukcji elektrowni nuklearnych [31]. Prowadzone przez pracowników Katedry Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu Politechniki Koszalińskiej badania drobnokruszywowych kompozytów z dodatkiem włókien stalowych wykonanych na bazie kruszywa odpadowego potwierdzają możliwość uzyskania materiału o lepszych niż beton zwykły parametrach fizykomechanicznych (np. większa wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie, ścinanie, większa odporność na ścieranie i obciążenia dynamiczne) [8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Kompozyt charakteryzujący się takimi właściwościami może w niektórych przypadkach stanowić alternatywę dla betonu zwykłego. Zastąpienie betonu zwykłego drobnokruszywowym fibrokompozytem o tych samych bądź lepszych właściwościach jest rozsądnym, z punktu widzenia ekonomii i ekologii, rozwiązaniem dla regionów, w których brakuje naturalnych złóż kruszywa grubego. Takim regionem w Polsce niewątpliwie jest obszar Pomorza [21].

2. Cel i znaczenie badań doświadczalnych

Kruszywa naturalne są materiałem powszechnie stosowanym w przemyśle budowlanym. Jak wynika z danych Europejskiego Stowarzyszenia Kruszywa UEPG (Union Européenne des Producteurs de Granulats, European Aggregates



Rys. 1. Widok hałd piasków odpadowych na Pomorzu (gmina Białogard)

Association), obecnie w krajach europejskich ogólnie wytwarza się około 2,5 mld ton kruszyw rocznie [1]. W Polsce obserwuje się wyraźne zróżnicowanie występowania kruszyw piaskowo-żwirowych pod względem jakościowym, jak i ilościowym, które wynika z uwarunkowań geologicznych [32]. Na terenie Pomorza złoża kruszyw występują głównie w postaci mieszaniny kruszywa drobnego i grubego. Szacuje się, że około 90% złóż kruszyw grubych znajduje się w regionie południowym Polski, 6% w regionie środkowym i tylko 4% w regionie północnym [21]. Zapotrzebowanie na kruszywo grube stało się powodem opracowania technologii pozyskiwania tego kruszywa przez jego wyplukiwanie ze złóż, którą nazwano hydroklasyfikacją. Efektem jej stosowania jest pozostawienie hałd wyplukanego kruszywa w postaci piasku pozbawionego frakcji grubych (rys. 1).

Stale zwiększająca się świadomość współczesnego człowieka odnośnie ochrony środowiska naturalnego oraz wprowadzone w tym zakresie regulacje prawne zobowiązują do podjęcia działań mających na celu przywrócenie wartości użytkowych i przyrodniczych zdegradowanym w ten sposób terenom. Alternatywą dla kosztownej rekultywacji byłych wyrobisk może być możliwość wykorzystania piasku odpadowego jako pełnowartościowego surowca budowlanego. Opracowanie więc składu fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych, który byłby w niektórych zastosowaniach alternatywą dla betonu zwykłego, daje możliwość zagospodarowania zalegających w rejonie Pomorza hałd. Ponadto taki kompozyt wyróżnia dość niska cena jednostkowa ze względu na użyte kruszywo, jak również aspekt ekologiczny. Wskazane rozwiązanie jest dobre dla regionów, w których brakuje naturalnych złóż kruszywa grubego. Takim regionem jest nie tylko region Pomorza w Polsce (występuje tylko 4% złóż kruszyw grubych), ale także Bliski Wschód czy też północna Afryka.

Celem badań doświadczalnych było więc określenie wpływu dodatku rozproszonych włókien stalowych na wybrane właściwości kompozytu drobnokruszywowego wykonanego na bazie lokalnego kruszywa odpadowego. Kolejnym zadaniem było wskazanie takiej zawartości włókien stalowych, przy której kompozyt drobnokruszywowy wykazuje najlepsze właściwości, lepsze niż beton zwykły, oraz spełnia wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym.

3. Wykonanie i pielęgnacja elementów próbnych

Do badań użyto mieszanki kompozytu wykonanej na bazie piasku odpadowego z Kopalni Kruszyw Naturalnych w Lepinie, cementu portlandzkiego CEM II/AV 42,5R, wody z wodociągu miejskiego, plastyfikatora BETOCRETE 406 FM, pyłów krzemionkowych oraz włókien stalowych EKOMET 50x0,8 mm, o kształcie haczykowatym i smukłości $\lambda=62,5$, mających Aprobację Techniczną ITB nr AT-15-2095/1999 (tab.1).

Matrycę kompozytu zaprojektowano metodą doświadczalno-analityczną. Zastosowanie domieszki uplastyczniającej

Tabela 1. Charakterystyka techniczna włókien stalowych użytych w badaniach

Cecha	Wartość
Grupa konstrukcyjna [-]	I
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1160±7
Moduł sprężystości [GPa]	210
Konsystencja (Ve-Be) przy zawartości włókien 14–15 kg/m ³ [s]	4
Wpływ na wytrzymałość betonu przy $CMOD^*=0,5$ mm [MPa]	1,5
Wpływ na wytrzymałość betonu przy $CMOD^*=3,5$ mm [MPa]	1,5

* rozwarcie naciętej szczeliny wg metody przedstawionej w PN-EN 14651

oraz dodatku pyłu krzemionkowego pozwoliło na uzyskanie stosunku $w/c=0,38$. Jako zmienną składową fibrokompozytu przyjęto zawartość włókien stalowych, które dozowano co 0,5%, do 2,5%, w stosunku do objętości kompozytu. Włókna w mieszance rozmieszczone były w sposób przypadkowy.

W badaniach wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, gęstości oraz dynamicznego modułu sprężystości wykorzystano próbki sześciennie o boku 150 mm. Próbki cylindryczne o wymiarach 150x300 mm użyto przy określaniu statycznego modułu sprężystości. Badanie odporności na ścieranie wykonano na próbkach sześciennych o boku 71 mm. Skurcz określono na próbkach o wymiarach 40x40x500 mm. Wytrzymałość resztkową wyznaczono na próbkach w kształcie beleczek o wymiarach 150x150x700 mm, których połówki użyto do badania wytrzymałości na ścinanie.

Wszystkie elementy próbne wykonano zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12390-2. Każdorazowo przed rozpoczęciem formowania próbek przeprowadzano badanie gęstości oraz konsystencji mieszanki fibrokompozytu metodą Ve-Be.

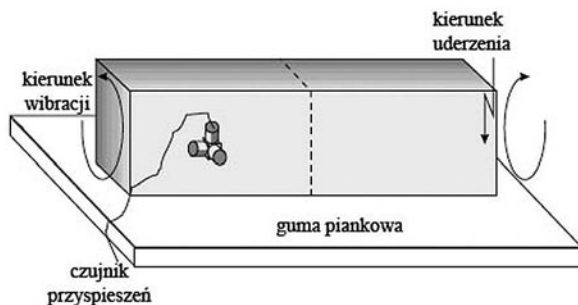
Po zaformowaniu próbki przez 24 godziny przechowywano w formach w warunkach laboratoryjnych przy średniej dobowej temperaturze $20\pm 2^\circ\text{C}$, chroniąc je przed utratą wilgoci przez szczelne przykrycie folią. Po upływie doby rozformowane próbki przez kolejne 27 dni poddawano pielęgnacji w wodzie, w temperaturze $20\pm 2^\circ\text{C}$. Próbki obciążano po upływie 30 dni od momentu ich zaformowania.

Niezbędną liczbę próbek do określenia średniej wartości statystycznej badanej cechy wyznaczono na podstawie analizy statystycznej wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta przy tolerancji $v=10\%$ i poziomie istotności $\alpha=0,05$. Liczba próbek w poszczególnych badaniach wynosiła od 6 przy określaniu ścieralności do 16 przy gęstości i dynamicznym module sprężystości, dla każdego rodzaju fibrokompozytu.

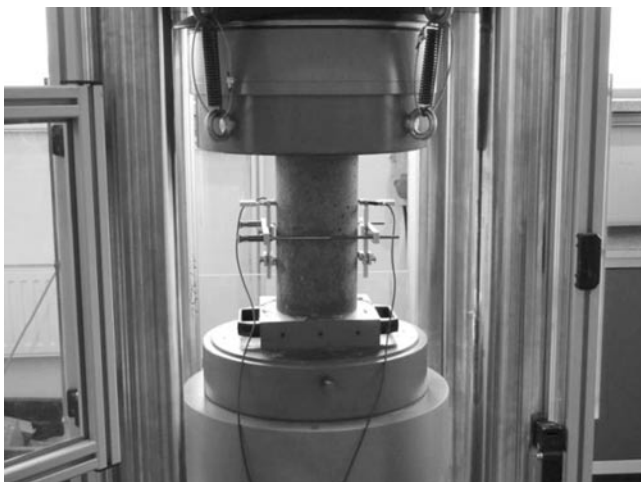
Dla fibrokompozytu o ustalonej, z uwagi na najlepsze właściwości mechaniczno-fizyczne, zawartości włókien stalowych, przeprowadzono badania poszczególnych właściwości na 30 próbkach, dla każdej cechy.

4. Metodyka badań

Badanie gęstości nasypowej oraz jamistości kruszywa odpadowego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1097-3. Skład ziarnowy określono według PN-EN 933-1. Badania cementu przeprowadzono po 2, 14 i 28 dniach dojrzewania zgodnie z PN-EN 196-1, wykorzystując próbki o normowych wymiarach 40x40 x160 mm. Wytrzymałość na ściskanie f_c określono według PN-EN 12390-3, natomiast na rozciąganie przy rozłupywaniu f_{ct} przy wykorzystaniu metodyki przedstawionej w PN-EN 12390-6. Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego G_d wyznaczono, badając częstotliwość drgań własnych belek (rys. 2).



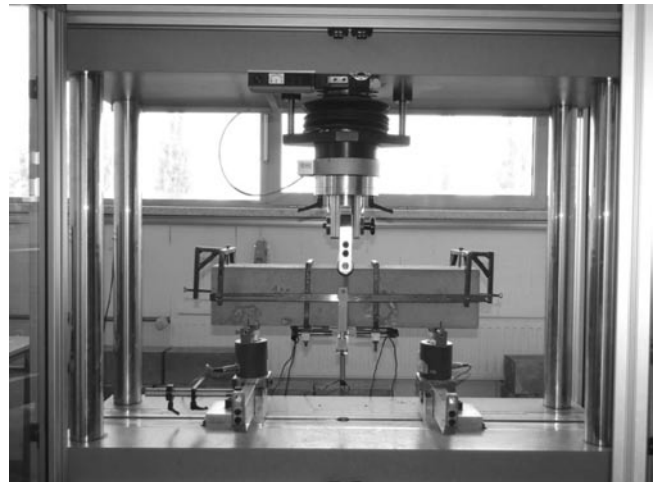
Rys. 2. Schemat badania częstotliwości drgań własnych [37]



Rys. 3. Ogólny widok stanowiska do badania statycznego modułu sprężystości

Przebiegi czasowe wywoływanych drgań skrętnych były poddawane transformacji Fourier'a. Statyczny moduł sprężystości E_c wyznaczono zgodnie z PN-EN 12390-13 (rys. 3), pomiar skurczu fibrokompozytu ε_s wykonano według instrukcji ITB 194/98. Gęstość pozorną ρ oznaczono według zaleceń PN-EN 12390-7, a dynamiczny moduł sprężystości E_d zdefiniowany został na podstawie analizy prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej [30].

Badanie resztkowych wytrzymałości na zginanie f_{Rj} wykonano w badaniu trzypunktowego zginania według PN-EN 14651 (rys. 4).



Rys. 4. Ogólny widok stanowiska do badania wytrzymałości resztkowej

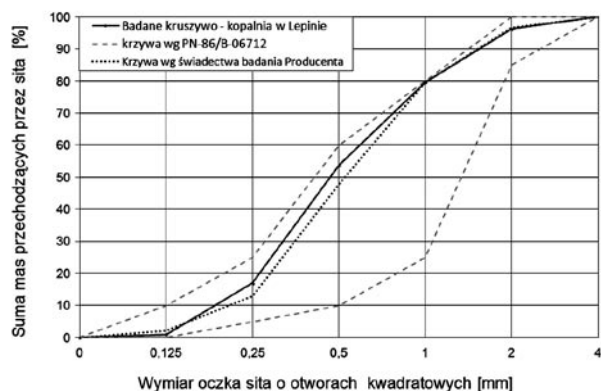
Po określeniu resztkowych wytrzymałości na zginanie połówek belek wykorzystano do określenia wytrzymałości na ścinanie τ według normy JCI-SF6 Method of Test for Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete. Mrozoodporność fibrokompozytu oznaczono zgodnie z PN-88/06250, przyjmując w badaniu 50 cykli zamrażania-odmrażania. Badanie przeprowadzono według zasad metody zwykłej, która stwarza możliwość określenia jednocześnie wewnętrznego zniszczenia materiału, charakteryzowanego poprzez wytrzymałość na ściskanie, jak i zewnętrznego, określonego wizualnie oraz ubytkiem masy. Do określenia odporności na ścieranie A fibrokompozytu wykorzystano zasady przedstawione w PN-EN 13892-3.

5. Wyniki badań i ich analiza

W celu sprawdzenia, czy wyniki poszczególnych serii próbek należą do jednej populacji, wykorzystano rozkład t-Studenta. Do odrzucenia wyników obarczonych systematycznym błędem grubym posłużono się testem Grubbs'a [22].

Tabela 2. Podstawowe właściwości kruszywa użytego do badań

Właściwość	Wartości uzyskane z badań	Wartości zalecane
Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m ³]	1634	-
Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym [kg/m ³]	1802	≤ 1850
Gęstość ziarn [kg/m ³]	2632	1800–3000
Zawartość pyłów mineralnych [%]	1,3	-
Jamistość w stanie luźnym [%]	38	-
Jamistość w stanie zagęszczonym [%]	32	20–28
Ziarno mediana [mm] 0,46		0,4–0,7
Wskaźnik uziarnienia wg Kuczyńskiego	5,55	-
Zawartość ciał obcych [%]	brak	0,5



Rys. 5. Krzywa uziarnienia kruszywa użytego w badaniach

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że przyjęta liczba próbek, użytych w badaniach, była wystarczająca. Wartości wskaźników zmienności badanych właściwości, zawierające się w przedziale od 3% w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie do 8% dla wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wskazują na bardzo dobrą jakość zaprojektowanego o różnej zawartości włókien kompozytu drobnokruszywowego na bazie piasku odpadowego.

Użyte kruszywo odpadowe, jak wykazała analiza wyników badań, spełnia wymagania stawiane kruszywom mineralnym do betonu zwykłego (tab. 2).

Krzywa uziarnienia kruszywa odpadowego zawiera się w przedziale krzywych dla piasku uszlachetnionego według PN-86/B-06712 (rys. 5).

Tabela 3. Parametry statystyczne wytrzymałości na ściskanie użytego cementu

Parametr analizy statystycznej	Wiek w chwili badania [dni]	
	2	28
Wartość średnia f_c [MPa]	21,1 (>20)*	42,9 (>42,5)*
Odchylenie standardowe s_{f_c} [MPa]	2,8	2,2
Wskaźnik zmienności v_{f_c} [%]	13	5
Przedział ufności [MPa]	18,1÷24,0	40,6÷45,2
Wartość minimalna f_{cmin} [MPa]	17,4	39,4
Współczynnik jednorodności k [-]	0,83	0,92

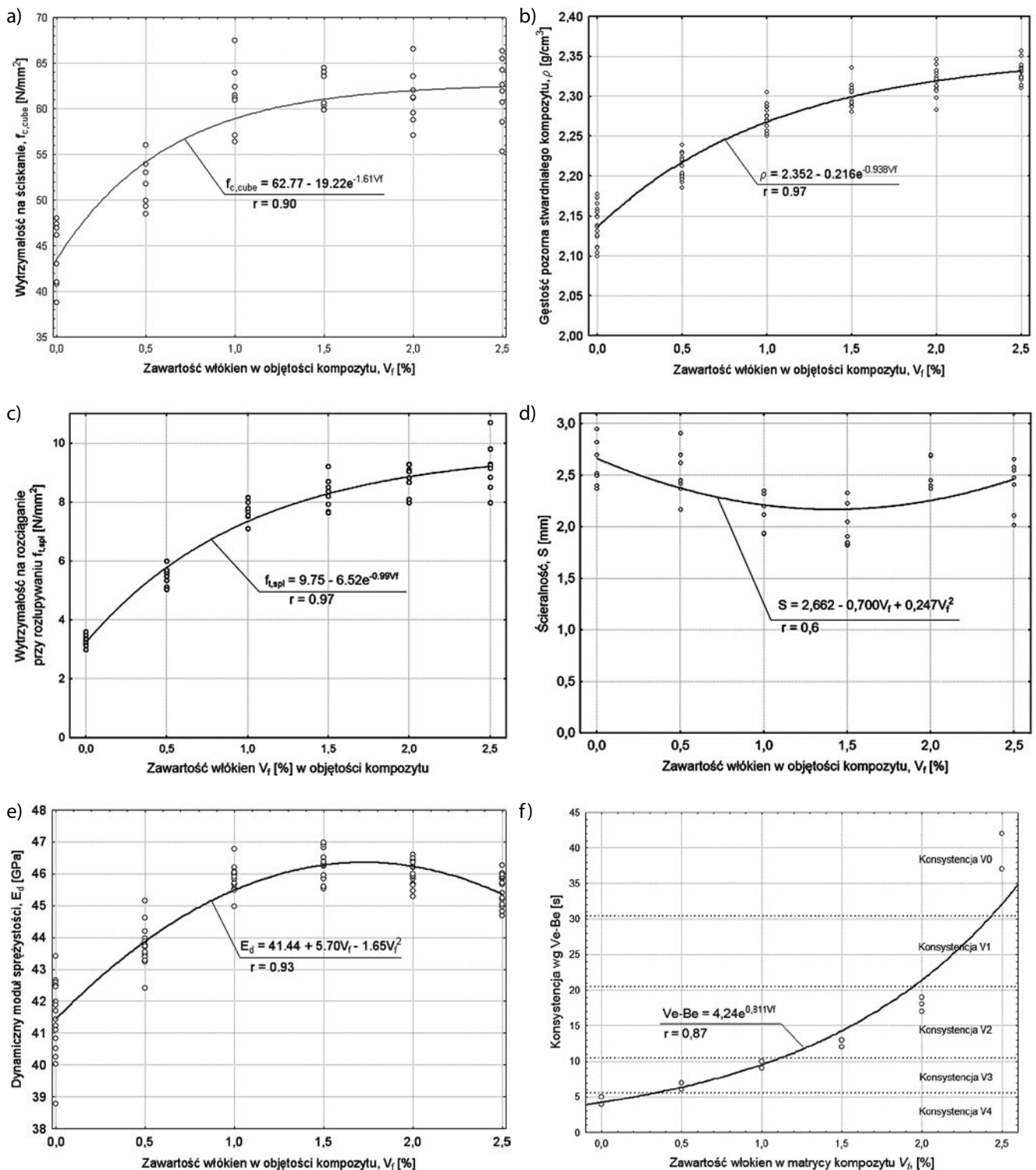
* wymagania wg PN-EN 197-1:2002

Użyty w badaniach cement portlandzki popiołowy o wysokiej wczesnej wytrzymałości CEM II/A-V 42,5R spełnia wymagania normy PN-EN 197-1. Uzyskane wyniki (tab. 3) charakteryzują się małym wskaźnikiem zmienności oraz dużym współczynnikiem jednorodności, co wskazuje na wysoką jakość użytego cementu.

Przeprowadzone badania fibrokompozytu wykazały korzystny wpływ dodatku włókien stalowych na jego właściwości mechaniczno-fizyczne (tab. 4). Analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że wraz ze wzrostem ilości włókien w kompozycie następuje ciągły przyrost wartości wytrzymałości na ściskanie (rys. 6a) i rozciąganie (rys. 6c). Wzrost ten nie jest jednak proporcjonalny do objętości użytego zbrojenia rozproszonego. Wykazano, że zawartość włókien w kompozycie

Tabela 4. Właściwości fibrokompozytu przy różnej zawartości włókien stalowych

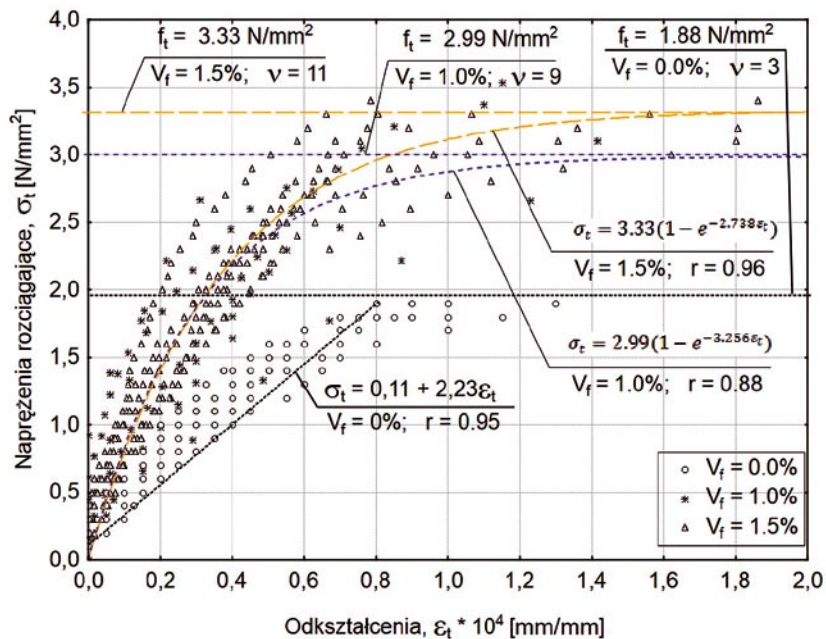
Właściwość/postać funkcji, współczynnik korelacji	Zawartość włókien w kompozycie [%]					
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Gęstość pozorna [g/cm ³]						
$\rho = 2,352 - 0,216e^{-0,938V_f}$, $r = 0,97$	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]						
$f_c = 62,77 - 19,22e^{-1,61V_f}$, $r = 0,90$	44	51,8	61,4	61,6	61,3	61,9
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]						
$f_{ct} = 9,75 - 6,52e^{-0,99V_f}$, $r = 0,97$	3,3	5,5	7,7	8,3	8,8	9,2
Ścieralność [mm]						
$A = 2,66 - 0,7V_f + 0,247V_f^2$, $r = 0,6$	2,6	2,5	2,1	2,0	2,5	2,4
Dynamiczny moduł sprężystości [GPa]						
$E_d = 41,44 + 5,7V_f - 1,65V_f^2$, $r = 0,93$	41,5	43,7	45,8	46,3	46	45,5
Statyczny moduł sprężystości [GPa]						
$E_c = 32,7 + 2,35V_f - 0,76V_f^2$, $r = 0,88$	32,9	33,3	34,5	34,7	34,0	33,9
Skurcz [mm/m]						
$\epsilon_s = 0,898(1 - e^{-0,21V_f}) - 0,048V_f$, $r = 0,93$	0,91	0,89	0,85	0,84	0,78	0,75
Konsystencja Ve-Be [s]						
$K = 4,24e^{0,8V_f}$, $r = 0,87$	4,2	6,4	9,5	14,3	21,5	32,2
Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego G_d [GPa]						
$G_d = 17,83 + 1,81V_f - 0,391V_f^2$, $r = 0,79$	17,8	18,5	18,3	18,8	18,6	18,2



Rys. 6. Zależności wybranych cech kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

powyżej 1,5% dla ściskania i 2% dla rozciągania przy rozluźnianiu nie powoduje już znaczącego przyrostu wartości tych wytrzymałości. Ponadto wraz ze wzrostem ilości włókien w kompozycie znacznie pogarsza się urabialność mieszanki. Zbyt duża ilość włókien stalowych powoduje pogorszenie jego odporności na ścieranie (rys. 6d). Badania dowodzą, że fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych wykazuje najmniejszą ścieralność przy zawartości włókien

stalowych w przedziale od 1% do 1,5%, przy czym maksimum osiąga przy zawartości włókien równej 1,3%. Pogorszenie tej właściwości ma związek ze zwiększającą się wraz ze wzrostem zawartości włókien porowatością matrycy, wynikającą ze zdolności włókien do jej napowietrzania [24]. Wpływa to również na gęstość pozorną fibrokompozytu (rys. 6b). Wzrasta ona wraz z dodatkiem włókien stalowych, jednak po przekroczeniu objętości włókien w mieszance



Rys. 7. Zależność $\sigma_t-\varepsilon_t$ kompozytu drobnokruszywowego o różnej zawartości włókien

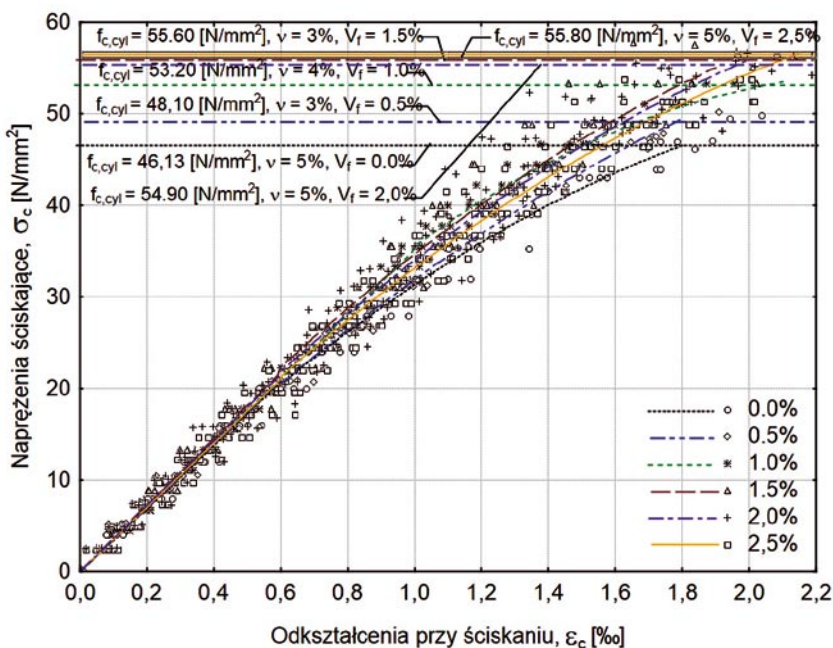
kompozytu równej 1,5%, obserwuje się bardzo powolny wzrost jego gęstości.

Z analizy krzywej regresji dynamicznego modułu sprężystości (rys. 6e) wynika, że korzystny wpływ dodatku włókien stalowych ma miejsce przy ich zawartości w kompozycie drobnokruszywowym do 1,7%. Po przekroczeniu tej wartości następuje znaczne napowietrzenie mieszanki spowodowane zawartością włókien i wartość dynamicznego modułu sprężystości ulega pogorszeniu.

Badania wytrzymałości na osiowe rozciąganie pozwoliły na ustalenie związków konstytutywnych naprężenie-odkształcenie kompozytu z $V_f=0\%$, $1,0\%$ i $1,5\%$ zawartością włókien stalowych. Zależność naprężenie-odkształcenie $\sigma_t-\varepsilon_t$, przy rozciąganiu (rys.7) wykazuje, że przy niewielkich naprężeniach nie występują różnice w przyroście odkształceń

niz z $V_f=1\%$. W porównaniu z kompozytem bez włókien cechuje go o 65% większa wytrzymałość.

Zależność naprężenie-odkształcenie przy ścisnieniu $\sigma_c-\varepsilon_c$ kompozytu o różnej zawartości włókien stalowych V_f przedstawiono na rysunku 8. Pokazano także średnią wytrzymałość na ścisnienie $f_{c,cyl}$ kompozytu oraz współczynniki zmienności wytrzymałości na ścisnienie $f_{c,cyl}$. Do opisu zależności $\sigma_c-\varepsilon_c$ zastosowano regresję w postaci „krzywej sklepanej”, co pozwoliło na najlepszy opis zjawiska przy współczynniku korelacji równym 0,99. Duża wartość współczynnika korelacji świadczy o tym, że przyjęte funkcje dobrze opisują zależność $\sigma_c-\varepsilon_c$ (tab. 5). Na podstawie korelacji zależności $\sigma_c-\varepsilon_c$ 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 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.

Ponadto stwierdzono, że skurcz kompozytu drobnokruszywowego o zawartości włókien od 0,5% do 2,5% (rys. 9) określony w warunkach stałej wilgotności względnej powietrza ($50\pm 5\%$) i temperaturze ($20\pm 2^\circ\text{C}$) jest prawie dwukrotnie większy niż skurcz

Rys. 8. Zależność $\sigma_c-\varepsilon_c$ fibrokompozytu różnej zawartości włókien stalowych

Tabela 5. Zestawienie zależności σ_c - ε_c fibrokompozytu o różnej zawartości włókien stalowych

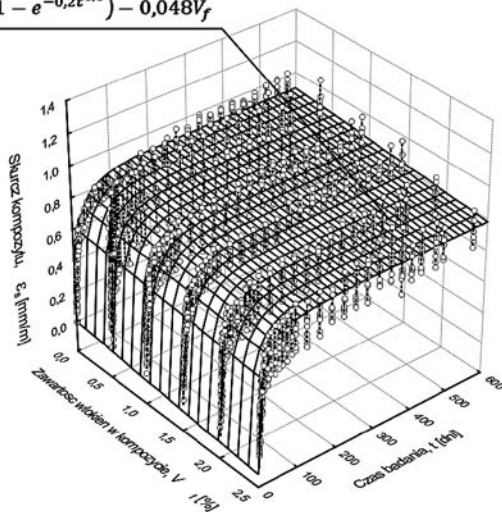
Funkcja zależności naprężenie - odkształcenie	Współczynnik korelacji r [-]	Zawartość włókien V_f [%]
$\sigma_c = 34,50e_c$, gdy $e_c \leq 0,6 \text{ ‰}$ $\sigma_c = 38,16e_c - 6,83e_c^2$, gdy $e_c > 0,6 \text{ ‰}$	0,99	0,0
$\sigma_c = 34,71e_c$, gdy $e_c \leq 0,6 \text{ ‰}$ $\sigma_c = 37,40e_c - 5,53e_c^2$, gdy $e_c > 0,6 \text{ ‰}$	0,99	0,5
$\sigma_c = 35,10e_c$, gdy $e_c \leq 1 \text{ ‰}$ $\sigma_c = 44,75e_c - 9,18e_c^2$, gdy $e_c > 1 \text{ ‰}$	0,99	1,0
$\sigma_c = 36,25e_c$, gdy $e_c \leq 0,6 \text{ ‰}$ $\sigma_c = 41,03e_c - 6,35e_c^2$, gdy $e_c > 0,6 \text{ ‰}$	0,99	1,5
$\sigma_c = 35,84e_c$, gdy $e_c \leq 0,6 \text{ ‰}$ $\sigma_c = 40,02e_c - 6,03e_c^2$, gdy $e_c > 0,6 \text{ ‰}$	0,99	2,0
$\sigma_c = 34,99e_c$, gdy $e_c \leq 0,6 \text{ ‰}$ $\sigma_c = 39,06e_c - 5,92e_c^2$, gdy $e_c > 0,6 \text{ ‰}$	0,99	2,5

betonu zwykłego [20]. Stabilizacja odkształceń skurczowych fibrokompozytu nastąpiła po 600 dniach od chwili rozpoczęcia badań. Większy w porównaniu do betonu zwykłego skurcz fibrokompozytu wynika z zastosowania, jako wypełniacza, kruszywa drobnego [10, 30].

Przeprowadzone badania dowodzą, że zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w kompozycie ponad wartość 1,5% może mieć negatywny wpływ na niektóre jego właściwości (np. na dynamiczny moduł sprężystości, ścieralność). Właściwe jest więc określenie takiej zawartości włókien stalowych w kompozycie, która pozwoli na uzyskanie materiału o właściwościach mechaniczno-fizycznych odpowiadających właściwościom betonu zwykłego, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej konsystencji mieszanki (por. rys. 6f).

$$\varepsilon_s = 0,898(1 - e^{-0,2t^{0,6}}) - 0,048V_f$$

$r = 0,93$



Rys. 9. Zależność skurczu kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

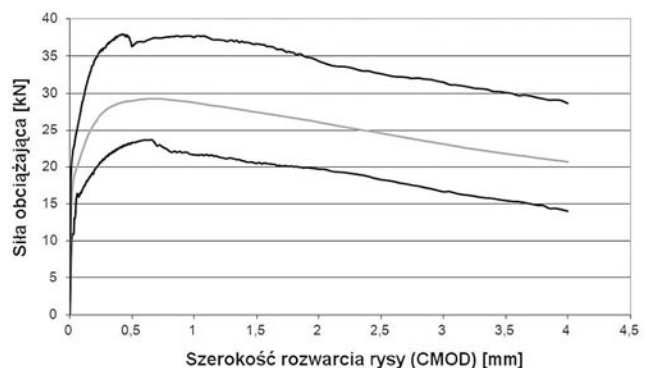
Analizując krzywe regresji (por. tab. 4) wyznaczono taką zawartość włókien stalowych w kompozycie drobnokruszywowym, przy której spełnione są wymagania stawiane betonowi zwykłemu.

W związku z tym, iż wartości wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu utrzymują ciągłą tendencję wzrostową w zakresie przyjętych procentowych zawartości włókien stalowych, do wyznaczenia poszukiwanej wielkości posłużono się funkcjami regresji cech, które ulegały pogorszeniu wraz ze wzrostem ilości włókien. Takimi cechami są: ścieralność, dynamiczny moduł sprężystości i konsystencja mieszanki. Wyznaczono więc maksymalną zawartość dodatku włókien stalowych (ekstrema funkcji regresji przedstawionych w tabeli 4), po przekroczeniu których następował spadek wartości rozważanych cech. Ustalono, że pod względem najkorzystniejszych właściwości oraz ekonomicznym, maksymalna zawartość włókien stalowych w drobnokruszywowym kompozycie wykonanym na bazie piasku odpadowego wynosi 1,2%. Dla fibrokompozytu o zawartości włókien 1,2% wykonano serię kolejnych badań (tab. 6).

Przeprowadzone badania wykazały wzrost wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu o zawartości włókien 1,2% o ok. 50% oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu o ok. 120% w stosunku do kompozytu bez włókien.

Wyniki badania odporności na działanie mrozu pozwalają określić stopień mrozoodporności kompozytu drobnokruszywowego na poziomie F50. Próbkę nie wykazywały pęknięć, a średni ubytek masy próbek wyniósł 0,22%. Nie nastąpił również znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek niezamrażanych. Analizy dowodzą, że przy zawartości włókien w ilości 1,2% badany fibrokompozyt wykazuje również większą, w porównaniu do betonu zwykłego, odporność na ścieranie, spełniając wymagania normy PN-83/B-06256 „Beton odporny na ścieranie”.

Wyniki badań resztkowych wytrzymałości na zginanie wyraźnie wskazują na ciągliwy charakter materiału. Ponieważ włókna w dużym stopniu hamują powstawanie i rozwój zarysowań w betonie, ich dodatek pozwala uzyskać duży wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego powoduje, że kompozyt nie ulega nagłemu zniszczeniu, jak ma to miejsce w przypadku betonu



Rys. 10. Zależność siły obciążającej do szerokości rozwarcia rysy

Tabela 6. Właściwości kompozytu drobnokruszywowego przy zawartości włókien stalowych 1,2%

Badana cecha	Parametry analizy statystycznej					
	Wartość średnia	Wartość minimalna	Odchylenie standardowe	Wskaźnik zmienności [%]	Współczynnik jednorodności [-]	Przedział ufności
ρ [g/cm ³]	2,3 (2,0–2,6)	2,26	0,02	1	0,98	2,28–2,30
f_c [MPa]	62,9 (12–50)	56,2	4,1	6	0,89	65,9–8,0
$f_{c,cube}$ [MPa]	67,6 (15–60)	64,0	2,2	3	0,95	66,8–68,5
f_{ct} [MPa]	7,3 (1,6–4,1)	5,9	0,6	8	0,81	7,0–7,6
E_c [GPa]	36,7 (27–37)	32,7	2,8	8	0,90	35,3–38,1
$f_{c,cube}^{50\text{ cykli}}$ [MPa]	65,9	56,1	4,5	7	0,85	63,9–67,8
τ [MPa]	12,9	10,9	1,1	8	0,85	12,3–13,5
A [cm ³ /50cm ²]	9,0 (£12,2)	7,1	0,6	7	0,84	8,7–9,3
$\varepsilon_s^{300\text{ dni}}$ [‰]	0,86 (0,54)*	0,80	0,03	4	0,80	0,84–0,88

Konsystencja wg Ve-Be: 11–14,5 s

W nawiasach podano właściwości betonu zwykłego wg: PN-EN 1992-1-1:2008 oraz PN-83/B06256

* końcowa wartość skurczu dla betonu klasy C35/45

zwykłego. Wykresy zależności siły obciążającej od szerokości rozwarcia rysy CMOD przedstawiono na rysunku 10. W celu łatwiejszej interpretacji wyników badań pokazane zostały obwiednie wykresów (linie czarne) oraz średnia zależność siły od CMOD (linia szara). Kształt wykresu pokazany na rysunku 10 wskazuje, że belki o zawartości włókien 1,2% wykazują cechę *pcs*, tj. powolny spadek siły niszczącej wraz ze wzrostem wartości CMOD po pojawieniu się rysy. Zniszczenie elementów próbnych następuje na skutek wyciągnięcia włókna z matrycy betonowej, a nie ich zrywania.


Rys. 11. Przykładowy obraz zniszczenia belki z włóknami stalowymi

Pierwsze rysy nie powodują zniszczenia elementu (rys. 11). Wyznaczone wartości granicy proporcjonalności oraz wytrzymałości resztkowych badanych belek przedstawiono w tabeli 7. Duża liczba próbek (30 szt.), na których określono wytrzymałości resztkowe, pozwoliła na wyznaczenie wartości charakterystycznych.

Wielkości $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ i $f_{R,4}$ zamieszczone w tabeli 7 oznaczają wartości naprężeń rozciągających w przekroju elementu dla danych szerokości rozwarcia rysy CMOD, równych odpowiednio: 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm.

Klasyfikacja 7b według fib Model Code [28] definiuje badany materiał jako kompozyt o bardzo wysokiej wartości $f_{R,1}$ (zakres od 1–8), litera „b” oznacza, że badany fibrokompozyt wykonany na bazie piasków odpadowych charakteryzuje się cechą *pcs*, którą wyznaczono z zależności $f_{R,3}/f_{R,1}$ (wg [28] „a” i „b” – cecha *pcs*, „d” i „e” – cecha *psh*). Wartości wytrzymałości podane w tabeli mogą posłużyć do projektowania elementów konstrukcyjnych wykonanych z fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych.

W celu dalszej identyfikacji właściwości fibrokompozytu wykonanego na bazie piasku odpadowego, jako materiału konstrukcyjnego, prowadzone są badania pełzania oraz pełnowymiarowych elementów konstrukcyjnych, takich jak płyty i belki.

Tabela 7. Wartości charakterystyczne granicy proporcjonalności $f_{ct,L,k}^f$ oraz wytrzymałości resztkowych $f_{R,j}$ dla drobnokruszywowego kompozytu na bazie piasku odpadowego o zawartości włókien 1,2%

Cecha badana	Wartość [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Współczynnik zmienności u [%]	Klasyfikacja materiału wg fib Model Code [28]
$f_{ct,L,k}^f$	5,24	0,67	11	7b
$f_{R,1,k}$	7,30	1,20	13	
$f_{R,2,k}$	6,68	1,29	15	
$f_{R,3,k}$	5,82	1,25	15	
$f_{R,4,k}$	5,07	1,16	17	

6. Podsumowanie

Fibrokompozyt na bazie piasku odpadowego o zawartości włókien stalowych w przedziale 1–1,5% cechuje się najlepszymi właściwościami fizykomechanicznymi. Powyżej 1,5% następuje spadek niektórych z badanych cech materiału, bądź nieznaczna ich poprawa. Tak więc dodatek włókien powyżej 1,5% z uwagi na urabialność, właściwości mechaniczno-fizyczne i koszt staje się mało przydatny. Zawartość włókien stalowych równa 1,2% wydaje się więc wartością optymalną z uwagi na podstawowe właściwości, jakimi powinien charakteryzować się kompozyt konstrukcyjny. Dzięki swoim właściwościom materiał ten może, w niektórych przypadkach, stanowić alternatywę dla betonu zwykłego. Otwiera także możliwości użycia tego materiału do wykonywania elementów konstrukcyjnych, takich, jak: płyty stropowe, belki, do obudowy tuneli, posadzki przemysłowe czy powłoki, a tym samym stwarza perspektywę na wykorzystanie lokalnego kruszywa odpadowego. Wykorzystanie piasków odpadowych jako pełnowartościowego kruszywa do wytwarzania materiału konstrukcyjnego w skali przemysłowej rozwiązałoby w dużej mierze problem zagospodarowania zalegających hałd w rejonie Pomorza Zachodniego i w podobnych regionach na świecie. Duże zasoby kruszyw drobnych występujące w postaci odpadów poprodukcyjnych mogłyby stać się bogactwem dla tych regionów, a tym samym podstawowym składnikiem materiałów przeznaczonych do wytwarzania elementów konstrukcyjnych.

W świetle przeprowadzonych analiz oraz studiów literaturowych nasuwają się następujące zalety oraz wady drobnokruszywowych kompozytów ze zbrojeniem rozproszonym:

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 kompozytu. Wskazuje to na dalsze kierunki badań i analiz teoretycznych.

Artykuł był opublikowany w monografii jubileuszowej „Nowoczesne rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne oraz problemy eksploatacyjne dotyczące budownictwa ogólnego i hydrotechnicznego” z okazji jubileuszu 70-lecia urodzin prof. dr. hab. inż. Wiesława Buczkowskiego. Praca zbiorowa pod redakcją dr inż. Anny Szymczak-Graczyk wydana przez: Instytut Budownictwa i Geoinżynierii, Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 2016 rok.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Annual Review 2013-2014. A Sustainable Industry for a Sustainable Europe. European Aggregates Association, 2013–2014
- [2] Beñoa J., Hilara M., Steel fibre reinforced concrete for tunnel lining – verification by extensive laboratory testing and numerical modeling, Acta Polytechnica 53(4)2013, str. 329–337
- [3] Błaszczński T., Przybylska-Fałek M., Fibrobeton jako materiał konstrukcyjny, Izolacje 11-12/2012, str. 44–50
- [4] Bonaszewska-Wyszomirska T., Beton (nie)zwykły Inżynier Budownictwa 10/2007, str. 79–82
- [5] Brandt A. M., Cement based composites: materials, mechanical, properties and performance. Wyd. 2, Taylor&Francis, 2009
- [6] Ding Y., Kusterle W., Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age. Cement and Concrete Research 30/2000, str. 1573–1579
- [7] Dobashi H. i inni, Development of Steel Fiber Reinforced Highly Flowable Concrete Segments and Application to Construction. Proceedings of the World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly, April 22–27, 2006, Seoul
- [8] Domski J., Long-term Study on Fibre Reinforced Fine Aggregate Concrete Beams Based on Waste Sand, Annual Set The Environmental Protection, 17/2015, str. 188–199
- [9] Domski J., Ugięcie belek fibropiaskobetonowych wykonanych na bazie piasku odpadowego, Przegląd Budowlany 3/2012, str. 32–37
- [10] Dondelowski H., Marcinkowski S., Badanie sprężystości, skurczu i pełzania betonów drobnokruszywowych, Archiwum Inżynierii Lądowej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1980
- [11] Dymidziuk B., Posadzki przemysłowe z wibrobetonu, Inżynier Budownictwa 7-8/2006, str. 46–48
- [12] Glinicki M. A., Beton ze zbrojeniem strukturalnym, XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk, 2010, str. 279–306
- [13] Głodkowska W., Kobaka J., Laskowska-Bury J., Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego, Materiały Budowlane 10/2013, str. 28–30
- [14] Głodkowska W., Kobaka J., The Model of Brittle Matrix Composites for Distribution of Steel Fibers, Journal of Civil Engineering and Management 1/2012, str. 145–150

- [15] Głodkowska W., Kobaka J., Modelling of properties and distribution of steel fibres with in a fine aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 44/2013, str. 646–653
- [16] Głodkowska W., Ziarkiewicz M., Wpływ włókien stalowych na nośność na przebiecie płyt wibrobetonowych. Wybrane zagadnienia rewitalizacji obiektów budowlanych, Płock, 2014, str. 193–202
- [17] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Fibrokompozyty na bazie piasków odpadowych jako materiał do wytwarzania posadzek przemysłowych, *Materiały Budowlane* 2/2015, str. 36–39
- [18] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Waste sands as a valuable aggregates to produce fibre-composites, *Annual Set The Environmental Protection*, 17/2015, str. 507–525
- [19] Głodkowska W., Lehmann M., Ziarkiewicz M., Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych, *Materiały Budowlane* 5/2015, str. 75–77
- [20] Kobaka J., Model kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi, Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2014
- [21] Kondratowicz W., Jednorodność udziału piasku w krajowych kruszywach naturalnych przeznaczonych do betonu, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 1978
- [22] Kukielka L., Podstawy badań inżynierskich, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002
- [23] Li V. C., Large volume, high-performance applications of fiber in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3)2002, str. 660–686
- [24] Maidl B. R., Steel fiber reinforced concrete, Ernsr & Sohn, Berlin, 1995
- [25] Mehmet Özcan D., Bayraktar A., Sahin A., Haktanir T., Türker T., Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior, *Construction and Building Materials* 23/2009, str. 1064–1077
- [26] Mertola H. C., Baranb E., Bello H.J., Flexural behavior of lightly and heavily reinforced steel fiber concrete beams, *Construction and Building Materials* 98/2015, str. 185–193
- [27] Mobasher B., Shah S. P., Test parameters for evaluating toughness of glass fiber reinforced concrete panels, *ACI Materials Journal*, 86(5)1989, str. 448–458
- [28] Model Code 2010, Pre-norma Konstrukcji Betonowych, tom 1, Polska Grupa Narodowa fib Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2014
- [29] Naaman A. E., Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, tom 1, 3/2003, str. 241–252
- [30] Neville A., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków, 2000
- [31] Schimmelpfennig K., Borgerhoff M., Development and application of a material law for steel-fiber-reinforced concrete with regard to its use for pre-stressed concrete reactor vessels, *Nuclear Engineering and Design* 156/1995, str. 181–188
- [32] Smakowski T. J., Perspektywy rynku kruszyw mineralnych w Polsce, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* 132/2011, str. 259–276
- [33] Sukontasukkul P. i inni, Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature, *Construction and Building Materials* 24/2010, str. 1967–1974
- [34] Tso-Liang T. i inni, Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact, *Computational Materials Science* 42/2008, str. 90–99
- [35] Uygunoglu T., Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete, *Materials and Structures* 41/2008, str. 1441–1449
- [36] 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* 24/2010, str. 1358–1363
- [37] Weiler B., Grosse C. U., Elastic constants – their dynamic measurement and calculation. *Otto Graf Journal*, 1995
- [38] 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* 21/2007, str. 1250–1253
- [39] Zhi-Liang Wang i inni, Stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression. *Construction and Building Materials* 22 200, str. 811–819



**66. Konferencja Naukowa
Komitetu Inżynierii Lądowej
i Wodnej PAN
oraz Komitetu Nauki PZITB
Krynica Zdrój, 20-24.09.2020 r.**



66. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB odbędzie się w dniach 20-24 września 2020 roku, w hotelu Activa, w Muszynie – Złockie. Podobnie, jak przed rokiem, zaszczyt pełnienia funkcji bezpośredniego jej organizatora przypadł Wydziałowi Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.

Tradycyjnie konferencja składa się z dwóch części: problemowej i ogólnej. Myślą przewodnią części problemowej 66. edycji konferencji są: *Wyzwania budownictwa podziemnego*.

Przedmiotem części ogólnej natomiast problemy naukowe z zakresu:

- budownictwa ogólnego
- fizyki budowli
- geotechniki
- inżynierii komunikacyjnej
- inżynierii materiałów budowlanych
- inżynierii przedsięwzięć budowlanych
- konstrukcji betonowych
- konstrukcji metalowych
- mechaniki konstrukcji i materiałów
- budownictwa hydrotechnicznego

W ramach konferencji odbędą się zebrania: Komitetu Nauki PZITB, Sekcji Konstrukcji Metalowych, Sekcji Konstrukcji Betonowych, a także zebranie Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN.

Dziękujemy za wsparcie i promocję konferencji. Życzymy owocnych obrad, wspólnego pogłębiania wiedzy oraz korzystnej wymiany doświadczeń!

Do miłego spotkania!