

o  $w/s \leq 0,38$ , bez względu na rodzaj i ilość dodatku popiołu spełniają kryteria mrozoodporności na poziomie F150.

– Wpływ wielkości strat prażenia zaznacza się w nienapowietrzonych betonach z dodatkiem popiołu C, które wykazały najmniejszą odporność na działanie mrozu.

#### BIBLIOGRAFIA

[1] Bastian S., Dobrowolski S., „Wpływ domieszek i dodatków na mrozoodporność betonów”, *Cement Wapno Beton* 5/2000, s. 203–207  
 [2] Bouzouba N., Fournier B., Malhotra V. M., Golden D. M., „Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cement produced in cement plant”, *ACI Materials Journal*, No. 6, 2002, pp. 560–567

[3] Fagerlund G., „Trwałość konstrukcji betonowych”, Arkady, Warszawa 1997  
 [4] Nasser K. W., Lai P. S. H., „Resistance of Fly Ash Concrete to Freezing and Thawing”, SP 132-12, Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey – May 1992, pp. 205–226  
 [5] Rusin Z., „Technologia betonów mrozoodpornych”, Wydawnictwo Polski Cement 2002  
 [6] Wesche K., „Fly Ash in concrete, Properties and Performance”, E&FN SPON, RILEM 1991  
 [7] Sturup V. R., Hooton R. D., Clendenning T. G., „Durability of fly ash concrete”, SP 79, First International Conference on the use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, Montebello, Canada – August 1983, pp. 71–86  
 [8] Szwabowski J., Łażniewska B., „Mrozoodporność a jakość napowietżenia samozagęszczalnego betonu”, V Konferencja

Naukowo-Techniczna „Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej MATBUD”, Kraków 2007, s. 503–510

[9] Giergiczny Z., Sokołowski M., „Mrozoodporność betonu na cementach z dodatkami mineralnymi”, VIII Sympozjum naukowo-techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice 2006, s. 19–30  
 [10] Luehr H. P., „Zur Verwendung von Steinkohlenflugasche (Elektrofilterstaub) als Betonzusatzstoff”, *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, No. 7, 1972, pp. 511–517  
 [11] Nowak-Michta A., „Kompatybilność popiołu lotnego z domieszkami” – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo z. 112, Gliwice 2007  
 [12] Nowak-Michta A., „Struktura porowatości betonów napowietrzonych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego”, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2008

# Odkształcalność konstrukcyjnych betonów lekkich z dodatkiem włókien stalowych poddanych jednoosiowemu ściskaniu

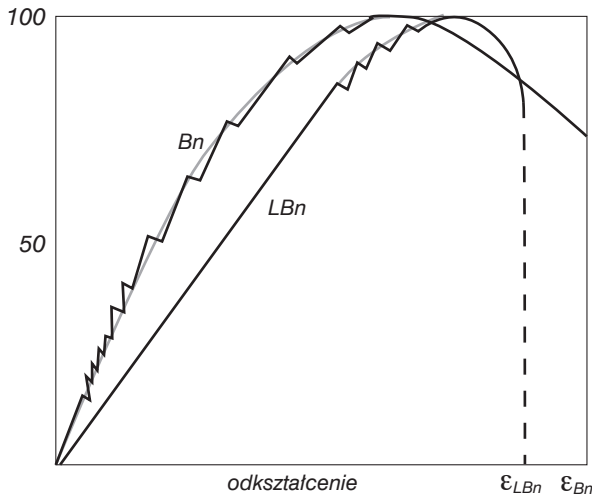
Dr inż. Lucyna Domagała, Politechnika Krakowska

## 1. Wprowadzenie

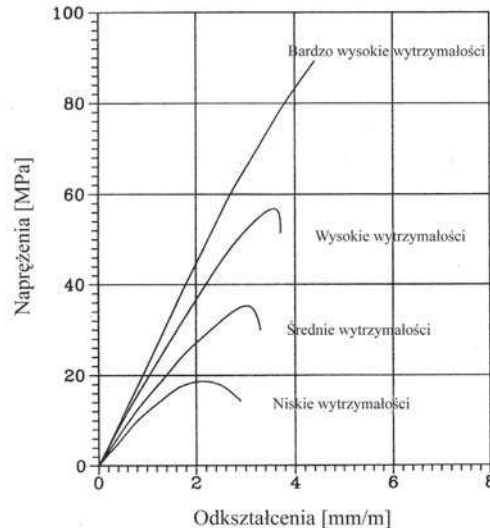
W porównaniu do betonów konstrukcyjnych o normalnej gęstości, konstrukcyjne betony lekkie ( $D \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ) tej samej klasy wytrzymałości charakteryzują się obniżonymi parametrami mechanicznymi. Do najistotniejszych charakterystyk mechanicznych betonów, które ulegają obniżeniu w wyniku zastąpienia kruszywa naturalnego wypełniaczem o strukturze silnie porowatej, należy zaliczyć: wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i zginaniu, wytrzymałość na ścinanie, moduł sprężystości

oraz parametry mechaniki pęknięcia. Z uwagi na zdecydowanie niższy moduł sprężystości samego kruszywa lekkiego, odkształcalność tych betonów, wynikająca zarówno ze zmian wilgotnościowych, termicznych, jak również obciążenia, jest zdecydowanie wyższa. Stąd istotnej zmianie w stosunku do betonów zwykłych ulega również zależność naprężenie – odkształcenie. Niższy moduł sprężystości kruszyw lekkich, w sposób oczywisty przyczynia się do obniżenia modułu sprężystości całego kompozytu (nawet do 50%), w rezultacie

czego odkształcalność betonu przy danym poziomie naprężeń wzrasta. Porównywalne moduły sprężystości obu faz (matrycy cementowej i kruszywa lekkiego), ich doskonała przyczepność oraz większa jednorodność kształtu i rozmiaru ziaren kruszywa, wpływają na większą jednorodność strukturalną betonu. W rezultacie, w strefie stykowej będącej najmocniejszym ogniwem wytrzymałościowym betonu lekkiego, nie dochodzi do koncentracji naprężeń, która powodowałaby ich wczesne zarysowanie. To właśnie zdecydowanie bardziej równo-



**Rys. 1.** Zależność  $\sigma - \epsilon$  dla betonu lekkiego (LBn) i zwykłego (Bn) [1]



**Rys. 2.** Zależność  $\sigma - \epsilon$  dla betonów lekkich różnych wytrzymałości [2]

mierny rozkład naprężeń w betonie lekkim odpowiada za bardziej liniowy charakter zależności  $\sigma - \epsilon$ . Dopiero przy poziomie wyężenia wynoszącym około 85–90% [1, 2, 3] wykres naprężenie – odkształcenie staje się krzywoliniowy. W betonach zwykłych, o bardzo zróżnicowanych charakterystykach mechanicznych obu faz i słabej strefie stykowej, zakrzywienie to obserwuje się już na poziomie około 30–40%. Z uwagi na relatywnie późny okres pojawienia się mikrorys, betony lekkie charakteryzują się szybką propagacją rys na skutek znacznej porcji zmagazynowanej energii sprężystej, co w rezultacie prowadzi do bardziej kruche go zachowania się tych betonów przy zniszczeniu. Zatem, po osiągnięciu naprężeń maksymalnych, kompozyt ten w bardzo ograniczonym zakresie ma zdolność do dalszego przenoszenia naprężeń i odkształcania się. W rezultacie, pole powierzchni pod krzywą  $\sigma - \epsilon$  w fazie pokrytycznej, będące miarą kruchości materiału, jest istotnie mniejsze, a przy wysokich wytrzymałościach może mieć charakter szczytkowy w porównaniu z betonami zwykłymi (rys.1, 2). Wprowadzenie dodatku włókien stalowych do betonów konstrukcyjnych, mające na celu: opóź-

nienie momentu pojawienia się pierwszych mikrorys wynikających z obciążenia kompozytu, mostkowanie pojawiających się rys oraz ograniczenie ich propagacji, może korzystnie wpłynąć na modyfikację parametrów mechanicznych kompozytów. W efekcie zastosowania zbrojenia rozproszonego, poprawie ulegają charakterystyki pęknięcia, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu czy zginaniu, wytrzymałość na ścinanie, skręcanie, zmęczenie, odporność na uderzenia oraz mrozoodporność. Ilościowo zmiany podanych właściwości zależą zarówno od geometrii włókien, jak i ich zawartości. Dodatek włókien stalowych modyfikuje również odkształcalność betonu w próbie ściskania. Generalnie, zastosowanie włókien powoduje wzrost odkształcalności betonu w fazie pokrytycznej, a zatem wpływa na obniżenie jego kruchości. Wpływ włókien stalowych na przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  może się również ujawnić w części wznoszącej się krzywej. Związany jest zatem z wpływem tego dodatku zarówno na moduł sprężystości, jak i na wytrzymałość na ściskanie. Niestety, analiza literatury dotycząca wpływu zbrojenia rozproszonego, stosowanego z reguły przy zawartościach nieprzekraczających 2%

objętościowo, na oba parametry, nie tylko pod względem ilościowym, ale i jakościowym, nie jest tak jednoznaczna jak w przypadku pozostałych charakterystyk związanych ze wzrostem wytrzymałości na rozciąganie matrycy cementowej. Z większości publikacji (np. [4, 5, 6, 7]) wynika, iż faza włóknista nie wywiera istotnego wpływu zarówno na moduł sprężystości, jak i na wytrzymałość na ściskanie. Istnieją jednak liczne przykłady literatury kwestionujące brak takiego wpływu. Przykładowo: w [8] wskazano na wzrost wytrzymałości na ściskanie do 15% i spadek modułu sprężystości do 25%. W [9, 10] zaobserwowano natomiast obniżenie obu parametrów. Spadek ten należy prawdopodobnie wiązać jednak z możliwym pogorszeniem się urabialności mieszanek z dodatkiem włókien. Istnieją również przykłady wzrostu modułu sprężystości (do 22%) i wytrzymałości na ściskanie (do 30%) w wyniku zastosowania włókien stalowych [11, 12, 13]. W tych przypadkach tendencje wzrostowe tłumaczy się wprowadzeniem do struktury kompozytu składnika o nieporównywalnie wyższym module Younga (około 210 GPa) i wytrzymałości na rozciąganie (do około 2000 MPa). Fakt ten

może mieć zatem szczególne znaczenie dla lekkich betonów kruszywowych. Przy czym, istotny jest w tym przypadku nie tylko poziom wytrzymałości betonu niezbrojonego włóknami, ale struktura samego kruszywa lekkiego. Stąd w [12] przyrost wytrzymałości na ściskanie betonów tej samej klasy wytrzymałości obserwowano wyłącznie w przypadku betonów na kruszynie ze spiekanych glin pęczniejących, których powłoka o zwartej strukturze nie gwarantowała tak korzystnej strefy kontaktowej jak pumeks łamany. Generalnie jednak należy zaznaczyć, że w odróżnieniu od betonów zwykłych, informacji na temat wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości betonów lekkich jest stosunkowo niewiele. Jednoznaczłą ocenę tego wpływu dodatkowo komplikuje szeroki asortyment stosowanych kruszyw lekkich o bardzo zróżnicowanych charakterystykach materiałowych.

## 2. Badania własne

Celem podjętych badań była ocena wpływu dodatku włókien stalowych na odkształcalność konstrukcyjnych betonów lekkich z krajowym kruszywem popiołoporytowym w próbie jednoosiowego ściskania.

W ramach zrealizowanego programu badawczego wykonano dwie serie betonów o zróżnicowanych poziomach gęstości, zakładanych jako 1600 oraz 1700 kg/m<sup>3</sup>, oraz wytrzymałości w zakresie 35–40 MPa i 45–50 MPa. Składy oraz parametry charakteryzujące wykonane betony lekkie podano w tabeli 1. Jako zbrojenie rozproszone zastosowano włókna stalowe o haczykowatych zakończeniach. Zawartość włókien ograniczono do ilości racjonalnych pod względem ekonomicznym i technologicznym, tj.: 0; 0,4; 0,6 oraz 0,8% objętości betonu.

Z przygotowanych mieszanek betonowych zaformowano próbki sześciennie o boku 150 mm

**Tabela 1.** Składy oraz parametry charakteryzujące wykonane betony

Seria	Ozn.	Składniki [kg/m <sup>3</sup> ]						Parametry		
		S*	C*	Sp*	K*	P*	W*	W/C*	P/C*	k/m*
I	IS0	0	345	0,0	765	414	190	0,55	1,20	1,34
	IS1	30		0,0						
	IS2	45		0,7						
	IS3	60		1,4						
II	IIS0	0	446	3,6	700	458	164	0,37	1,03	1,16
	IIS1	30		3,6						
	IIS2	45		4,0						
	IIS3	60		4,5						

\* S – włókna stalowe, C – CEM I 42,5R, Sp – superplastyfikator, K – pollytag 4–8 mm, P – piasek naturalny, W – woda, k/m – stosunek objętościowy kruszywa lekkiego i zaprawy cementowej.

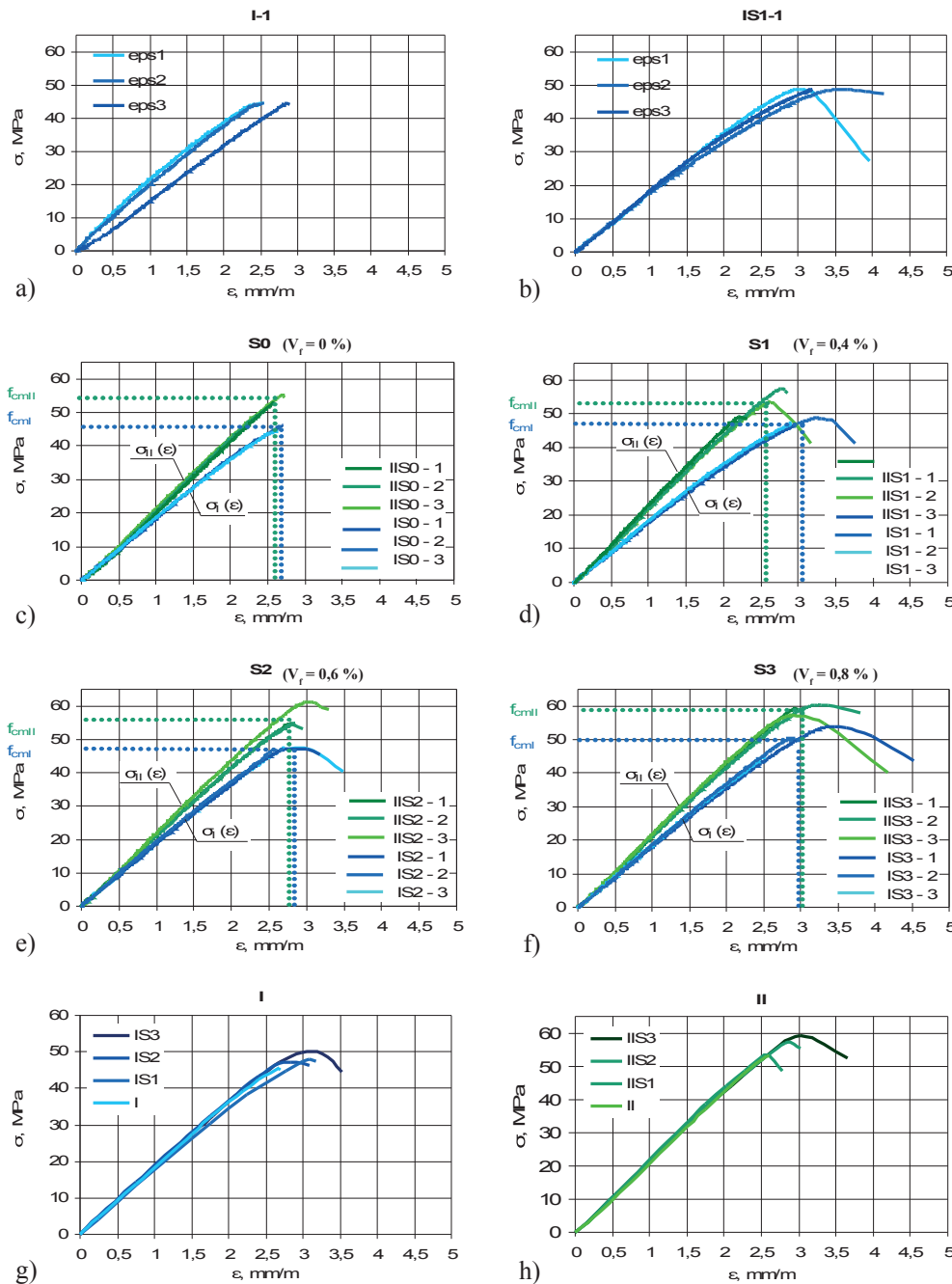
**Tabela 2.** Średnie wartości gęstości, wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości

Seria	Ozn.	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{cm,cube\ 28}$ [MPa]	$f_{cm,cube\ 365}$ [MPa]	$f_{cm,cyl\ 365}$ [MPa]	$E_{m,365}$ (ITB) [GPa]	$E_{m,365}$ ( $\sigma-\epsilon$ ) [GPa]
I	IS0	1580	39,0	45,5	45,7	19,1	18,6
	IS1	1610	38,0	44,0	47,9	18,5	18,3
	IS2	1620	38,5	41,5	47,1	19,4	19,3
	IS3	1640	39,0	46,0	49,9	19,0	19,0
II	IIS0	1710	47,5	53,0	53,2	22,6	22,1
	IIS1	1740	47,5	49,5	53,4	24,4	23,2
	IIS2	1750	49,0	55,5	56,9	23,1	22,5
	IIS3	1770	48,0	54,0	59,1	22,9	22,4

do badań wytrzymałości na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu, belki o wymiarach 100 x 100 x 500 mm do badań wytrzymałości na zginanie oraz próbki walcowe 150/300 mm do oznaczenia modułu sprężystości, badania zależności naprężenia – odkształcenia oraz wytrzymałości na ściskanie. Do każdego rodzaju badań w poszczególnych terminach przewidziano po 4 próbki. Badania prowadzono po 28 oraz 365 dniach dojrzewania. Krzywe  $\sigma - \epsilon$  oraz moduły sprężystości, oznaczane wg procedury ITB 194 oraz na podstawie zależności naprężenie – odkształcenie w niszczącej próbie ściskania, badano jedynie po 365 dniach. Do oznaczenia modułu sprężystości oraz zależności  $\sigma - \epsilon$  zastosowano zestaw pomiarowy składający się z trzech ekstensometrycznych czujników przemieszczeń o bazie pomiarowej 150 mm oraz czujnika siły i jej wzmacniacza, podłączonych do 4-kanalowego układu pomiarowego wraz

z modułem pomiarowym i wyjściem USB. Dane rejestrowane z częstotliwością 5 Hz w komputerze typu PC, w trakcie badania były przetwarzane za pomocą odpowiedniego oprogramowania, dając możliwość bieżącej kontroli poziomu naprężeń i odkształceń z poszczególnych czujników oraz ich wartości średnich, jak również generowania wartości modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie.

Analiza wyników badań wytrzymałościowych, zgodnie z przewidywaniami, wskazała na istotny, proporcjonalny do zawartości, wpływ dodatku włókien stalowych na wytrzymałość na rozciąganie. Przy maksymalnej zawartości włókien ( $V_f = 0,8\%$ ) zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu o 49% (z 5,1 do 7,6 MPa) i 61% (z 6,2 do 10,0 MPa) odpowiednio dla serii I i II. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie, przy rozłupywaniu analogiczne przyrosty wynosiły 16% (z 3,05 do 3,55 MPa) dla betonów



**Rys. 3.**  
 Zależności  $\sigma - \epsilon$  w próbie jednoosiowego ściskania.  
 a), b): Przykładowe zależności  $\sigma - \epsilon$  dla pojedynczej próbki (I-1 oraz IS1-1) ze wskazaniem z poszczególnych czujników przemieszczeń (eps1, eps2, eps3).  
 c), d), e), f) Uśrednione zależności  $\sigma - \epsilon$  dla poszczególnych próbek serii (S0, S1, S2 i S3),  
 g), h): Uśrednione zależności  $\sigma - \epsilon$  dla poszczególnych serii betonów (I, II)

serii I i 19% (z 3,35 do 4,00 MPa) dla betonów serii II. Nie zaobserwowano istotnych zmian w oznaczonych charakterystykach pomiędzy 28 a 365 dniem badania. Podkreślić należy, iż z uwagi na wysoką kruchość badanych betonów lekkich, uzyskane przyrosty wytrzymałości przy danej zawartości włókien stalowych, okazały się większe w porównaniu z betonami zwykłymi porównywalnych klas wytrzymałości. Ocena wpływu badanej fazy włóknistej na wytrzymałość na ściskanie nie jest już tak jednoznaczna

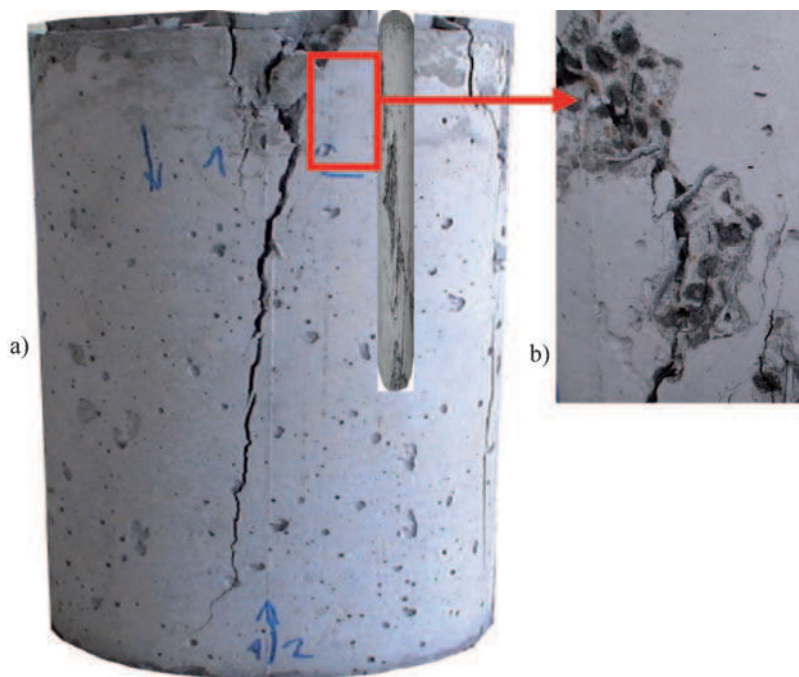
(tabela 2). O ile nie obserwuje się istotnych zmian w wynikach oznaczanych na próbkach sześciennych zarówno w terminie 28, jak i 365 dni, o tyle przy próbkach walcowych widoczny jest nieznaczny wzrost wytrzymałości (o 9 i 11% dla serii I i II) wraz ze zwiększaniem się zawartości włókien. Przyczyna takiego stanu rzeczy być może leży w odmiennym sposobie zniszczenia tych dwóch typów próbek, wynikającym z różnego wpływu tarcia pomiędzy płytą dociskową a próbką. Może

też być spowodowana różnym kierunkiem obciążenia w stosunku do kierunku formowania. W przypadku próbek sześciennych, kierunek obciążenia jest prostopadły do kierunku formowania, a zatem z reguły równoległy do płaszczyzn orientacji włókien, częściej wymuszanych sposobem formowania. W próbkach walcowych obciążonych zgodnie z kierunkiem formowania, układ włókien częściej jest prostopadły do kierunku tworzenia się i propagacji rys. Dzięki temu korzystny efekt hamowania

powstawania i rozwoju rys, bardziej widoczny jest w przypadku próbek walcowych. Hipotezę taką w pewnym stopniu potwierdza również rozrzut wyników, z reguły mniejszy w przypadku serii betonów niezbrojonych ( $s_{\max} = 2,0$  MPa) w porównaniu do serii zbrojonych ( $s_{\max} = 4,3$  MPa). Dla próbek z włóknami, o pozytywnym efekcie ich oddziaływania na wzrost wytrzymałości betonu decyduje prawdopodobieństwo lokalizacji włókna na trasie rys konstrukcyjnych, determinujących zniszczenie próbki, w pozycji umożliwiającej jeszcze ich mostkowanie (fot. 1). Stąd, w ogólnym przypadku zwiększenie zawartości fazy włóknistej z 30 do 60 kg/m<sup>3</sup> sprzyja zwiększeniu tego prawdopodobieństwa, a więc wzrostowi wytrzymałości i jednocześnie redukcji jej rozrzutu.

### 2.1. Odształcalność w fazie przedkrytycznej

W fazie przedkrytycznej na odształcalność badanych betonów niezbrojonych wpływ ma zarówno ich wytrzymałość, jak i gęstość. Stąd, dla betonów serii I kąt nachylenia krzywej, obrazujący ich moduł sprężystości, jest wyraźnie mniejszy w porównaniu z betonami serii II. Moduły sprężystości badanych betonów ( $E_{mI} = 19,1$  GPa i  $E_{mII} = 22,6$  GPa) okazały się być niższe średnio o około 45% w stosunku do przewidywanych przez PN-B-03264:2002 dla betonów zwykłych tych samych klas wytrzymałości i nieco wyższe (o 8%) niż szacowane przez PN-B-03263:2000 dla betonów lekkich tych samych klas wytrzymałości i gęstości. W przypadku większości badanych próbek betonów lekkich, w początkowym okresie fazy przedkrytycznej, obejmującym naprężenia rzędu kilku procent ich wartości maksymalnej, zależność  $\sigma - \epsilon$  ma charakter krzywej wklęsłej, będącej świadectwem kompresji nieciągłości strukturalnych. Efekt ten nie jest widoczny na rysunkach 1a – h, z uwagi na ich



**Fot. 1.** Typowy przebieg rys w badanych betonach lekkich: a) bez włókien, b) z dodatkiem włókien – o trasie rysy decyduje dystrybucja włókien

skalę. Po tym początkowym etapie relacja ma przebieg praktycznie idealnie liniowy dla obu serii betonów. Dopiero przy naprężeniach około 95% ich wartości maksymalnych obserwuje się zwiększenie odształcalności kompozytu, objawiające się nieznacznym zakrzywieniem wykresu. Średnia wartość odształcenia liniowego odpowiadającego maksymalnemu naprężeniu w przypadkach obu serii wynosi 2,7 mm/m, zatem jest istotnie wyższa w porównaniu z betonami zwykłymi porównywalnych wytrzymałości (2,0 mm/m). Analiza zależności  $\sigma - \epsilon$  w przypadku próbek z dodatkiem włókien stalowych, wskazuje na brak istotnego wpływu fazy włóknistej na przebieg tej relacji w fazie przedkrytycznej w jej zasadniczej części, co obrazuje jednakowy kąt nachylenia krzywych poszczególnych serii (rys. 1g i h). Jedynie w przypadku serii IS1 zauważalna jest niższa wartość modułu w stosunku do pozostałych betonów serii I. Wyjątek ten należy prawdopodobnie jednak tłumaczyć nieprawidłowościami w skła-

dzie betonu. Ogólny brak wpływu włókien na moduł sprężystości badanych betonów lekkich, wydaje się oczywisty wobec idealnie liniowego przebiegu relacji dla betonów niezbrojonych w zakresie naprężeń rozważanych podczas badania, wskazujący na brak rys w strukturze betonu spowodowanych obciążeniem. W efekcie włókna nie mogą odgrywać swojej najbardziej efektywnej roli mostkowania rys, a pełnią jedynie funkcję wypełniacza o znacznym module sprężystości, ale z uwagi na ich niewielką zawartość objętościową, nie wpływają na moduł samego kompozytu.

Niemniej jednak, w związku z zaobserwowanym wzrostem wytrzymałości badanych betonów w wyniku zwiększenia zawartości włókien stalowych, zmianie ulega zasięg liniowości wykresu  $\sigma - \epsilon$ . Dla betonów z włóknami, liniowość ta jest ograniczona w zakresie proporcjonalnym do zawartości włókien. W rezultacie, przy największej zawartości fazy włóknistej liniowość jest zachowana jedynie do około 85%

wytrzymałości. Utrata liniowości wykresu powyżej tego poziomu naprężeń świadczy o pojawianiu się rys, a fakt dalszej zdolności betonów z włóknami do przeniesienia naprężeń, o mostkowaniu tych rys przez włókna i ich udziale w dystrybucji naprężeń. W efekcie wzrostu wytrzymałości, wpływ dodatku fazy włóknistej na przebieg zależności w fazie przedkrytycznej dla obu serii betonów manifestuje się również wzrostem odkształceń betonu odpowiadających naprężeniu maksymalnym (do 3 mm/m).

## 2.2. Odształcalność w fazie pokrytycznej

Betony niezbrojone, bez względu na ich wytrzymałość, charakteryzowały się eksplozywnym, klasycznie kruchym sposobem zniszczenia. W rezultacie, nie obserwowano praktycznie ich zdolności do przenoszenia naprężeń w fazie pokrytycznej. Otrzymane wykresy (rys. 1c) wykazują całkowity brak opadającej części krzywej. W tym aspekcie za znamienne należy uznać fakt, iż normy do projektowania konstrukcji żelbetonowych (PN-B-03263:2000 i PN-B-03264:2002) nie różnicują rozkładów naprężeń w ściskanej strefie betonu zwykłego oraz lekkiego, w obu przypadkach przyjmując paraboliczno-prostokątny wykres  $\sigma - \epsilon$ . W przypadku badanych betonów, takie założenie trudno uznać za właściwe.

Dodatek włókien stalowych w sposób wyraźny modyfikuje przebieg zależności  $\sigma - \epsilon$  w fazie pokrytycznej, zwiększając zdolność badanych betonów lekkich do przeniesienia naprężeń po osiągnięciu ich wartości maksymalnych. Już najmniejsza zastosowana zawartość włókien ( $V_f = 0,4\%$ ) eliminowała eksplozywny charakter pęknięcia betonu. Zwiększona odształcalność badanych betonów w tej fazie, manifestująca się pojawieniem się opadającej części krzywej, w ogólnym przypadku była proporcjonalna do zawartości włó-

kien. W rezultacie przy największej ich zawartości ( $V_f = 0,8\%$ ) średnie maksymalne odkształcenia liniowe osiągają wartość około 3,5 mm/m i 3,7 mm/m odpowiednio dla serii I i II (rys. 1g i h). Maksymalne wartości średnich odkształceń dla pojedynczych próbek nie przekraczały 4,5 mm/m. Należy jednak zaznaczyć, że przy analizie maksymalnych rejestrowanych odkształceń dla poszczególnych próbek w fazie pokrytycznej niekiedy większe znaczenie ma dystrybucja włókien w objętości próbki niż ich zawartość. Czynnikiem losowego ułożenia włókna na trasie przebiegu rysy oraz losowego ułożenia rysy względem czujników pomiarowych okazał się tu bowiem decydujący. Stąd w niektórych przypadkach próbki z najmniejszą zawartością zbrojenia (np. IS1-2 – rys. 1d) mogły charakteryzować się większą odształcalnością w fazie pokrytycznej w porównaniu z próbkami zawierającymi więcej włókien (np. IS3-2, IS3-3 – rys. 1f).

## 3. Podsumowanie

Zrealizowany program badawczy oraz przeprowadzona analiza uzyskanych wyników wykazała, iż dodatek zastosowanych włókien stalowych korzystnie wpływa na podwyższenie wytrzymałości na rozciąganie zarówno przy rozłupywaniu, jak i zginaniu. Jakościowa ocena efektu zastosowania włókien na wytrzymałość na ściskanie badanych betonów lekkich okazała się zależna od typu próbek do badania.

Z uwagi na wysoką jednorodność strukturalną badanych betonów lekkich, gwarantującą równomierny rozkład naprężeń, zależność  $\sigma - \epsilon$  w fazie przedkrytycznej ma charakter silnie liniowy (do poziomu około 95% naprężeń maksymalnych). Ze względu na istotnie niższy w porównaniu z betonami zwykłymi moduł sprężystości, badane betony lekkie charakteryzują się więk-

szą odształcalnością w tej fazie. Wprowadzenie dodatku włókien stalowych nie zaburza przebiegu tej relacji do momentu pojawienia się pierwszych rys. Wówczas udział fazy włóknistej w dystrybucji naprężeń może przyczynić się do zwiększenia zdolności kompozytu betonowego do przenoszenia większych naprężeń, objawiając się wzrostem jego wytrzymałości, a w fazie pokrytycznej wpływa na wzrost odształcalności betonu i wyeliminowanie jego eksplozywnego charakteru zniszczenia.

## BOBLOGRAFIA

- [1] Lusche M., Własności mechaniczne i struktura kompozytów betonowych. The fracture mechanism of ordinary and lightweight concrete under uniaxial compression, PAN 1974
- [2] Zhang M., Gjorv O., Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. ACI Materials Journal, V. 88, No. 3, 1991, s. 240–247
- [3] Chandra S., Berntsson L., Lightweight aggregate concrete, New York 2003
- [4] Brandt A., Cement-based composites, Routledge, London and New Your 2009
- [5] Balaguru P., Shah S., Fiber-Reinforced Cement Composite, McGraw-Hill 1992
- [6] Domański T., Czkwianianc A., Wpływ zbrojenia rozproszonego na parametry mechaniczne betonu, Przegląd Budowlany, 2006/6, s. 32–36
- [7] Balendran R., Zhou F., Nadjem A., Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete, B&E 2002/37, s. 1361–1367
- [8] Jamróży Z., Beton i jego technologie, Arkady 2005
- [9] Kayali O., Haque M., Zhu. B., Some characteristic of high strength fiber reinforcement lightweight aggregate concrete, C&CC 2003/25, s. 207–213
- [10] Kurugol S., Tanacan L., Ersoy H., Young's modulus of fiber-reinforced and polymer-modified lightweight concrete composites, C&BM, 2008/22, s. 1019–1028
- [11] Gao J., Sun W., Morino K., Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, C&CC 1997/19, s. 307–313
- [12] Campione G., Miraglia N., Mechanical properties of steel fibre reinforced lightweight concrete with pumice stone or expanded clay aggregates, M&S 2001/34, s. 201–210
- [13] Altun F., Haktanir T., Ari K., Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, Construction and Building Materials, 2007/21, s. 654–661