

dział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2000.

[4] Staszewski M.: Nośność, zarysowanie i ugięcia zginanych elementów żelbetonowych wzmocnionych taśmami węglowymi. Rozprawa doktorska. Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2012.

[5] Głodkowska W., Staszewski M.: Zarysowanie belek żelbetonowych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych. Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Krynica, 2008, tom VI, s. 171 – 178.

[6] Głodkowska W., Staszewski M.: Ugięcia i zarysowanie belek żelbetonowych wzmocnionych taśmami z włókien węglowych. Inżynieria i Budownictwo, tom 64, s. 313 – 316, 2008.

[7] Valivonis J., Skuturna T.: Cracking and strength of reinforced concrete structures in flexure

strengthened with carbon fibre laminates. Journal of Civil Engineering and Management, vol. 13, no. 4, pp. 317 – 323, 2007.

[8] Khowman N., Foster S.J., and Smith S.T.: Debonding failure in CFRP flexurally strengthened reinforced concrete beams. The University of New South Wales, New South Wales, R-400, Sep. 2005.

[9] Miller B., Nanni A.: Bond Between CFRP Sheets and Concrete. Presented at the ASCE 5th Materials Congress, Cincinnati, OH, 1999, pp. 240 – 247.

[10] Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., and Jiang J.J.: Bond-slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. Engineering Structures, vol. 27, no. 6, pp. 920–937, May 2005.

[11] Górski M., Krzywoń R.: Sztywność zginanych belek żelbetonowych wzmocnionych nakładkami FRPR – referat z konferencji: Problemy naukowo-badawcze budownictwa, Krynica, 2008, tom VI, s. 179 – 186.

ukowo-badawcze budownictwa, Krynica, 2008, tom VI, s. 179 – 186.

[12] Korentz J.: Metoda obliczania ugięcia belek żelbetonowych wzmocnionych materiałem kompozytowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, tom z. 58, nr 3/II, s. 143 – 150, 2011.

[13] Externally bonded FRP reinforcement for RC structures: technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures. Fib Bulletin No. 14. Lausanne. fib, 2001.

[14] ACI Committee 440 and American Concrete Institute, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2008.

dr inż. Jacek Domski\*

## Wybrane cechy wytrzymałościowe betonów drobnokruszywowych modyfikowanych włóknami stalowymi

*Chosen mechanical properties of fine aggregate concretes modified by steel fibre*

Celem prezentowanych badań jest wykorzystanie piasku odpadowego zalegającego na hałdach Pomorza Środkowego, jako podstawowego składnika mieszanki betonowej [1]. Piasek będący pozostałością po hydroklasyfikacji pospółki jest obecnie wykorzystywany przede wszystkim na betonowe posadzki przemysłowe [2], ale trwają prace nad stosowaniem go do produkcji elementów konstrukcyjnych, obciążanych statycznie i/lub dynamicznie [3, 4, 5, 6]. Należy podkreślić, że aby móc zaprojektować betonowy element konstrukcyjny z dodatkiem włókien stalowych, należy uwzględnić jego specyficzne cechy, które determinują nieco inne badania w porównaniu z badaniami wykonywanymi w przypadku tzw. betonów zwykłych. Przykładem jest proponowany w PN-EN 14651:2007 po-

miar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP) [7, 8, 9]. Dzięki niemu możliwe jest zaprojektowanie elementów wykonanych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego.

### Opis badań

Zaprojektowano dwie mieszanki fibropiaskobetonowe ze stosowanymi zamiennie włóknami stalowymi o smukłości 54,5 i 62,5. Użyte haczykowane włókna, o wymiarach (długość/średnica) 50/0,8 i 30/0,55 mm, charakteryzowały się właściwościami określonymi w [10]. Ilość użytych włókien uwarunkowana była zaplanowaną klasą betonu, co najmniej C20/25 i urabialnością mieszanki dostosowaną do możliwości produkcji w tradycyjnych wytwórniach betonu. W tabeli przedstawiono skład mieszanek betonowych oraz serie elementów próbnych wykonanych w sezonie jesienno-zimowym w pomieszczeniu, w którym temperatura powietrza wynosiła ok. +22 °C. We wszystkich seriach

utrzymywano jednakowy reżim technologiczny. Przez pierwsze 24 h (do chwili rozformowania) oraz przez kolejne 6 dni próbki dojrzewały w warunkach podwyższonej wilgotności, tj. były szczelnie przykryte folią. Po siedmiu dniach dojrzewania przetransportowano je do hali laboratoryjnej, gdzie znajdowały się do czasu zakończenia badań. Temperatura powietrza w hali wynosiła 18 – 22 °C, natomiast wilgotność 50 – 75%. Pomiar wilgotności i temperatury w obu pomieszczeniach wykonywano przy użyciu rejestratorów EBI-2, zaprogramowanych na zapis co 30 min.

Elementy próbne wykonywano seriami, przy czym każda składała się z trzech belek (15 x 15 x 55 cm), trzech walców (15 x 30 cm) oraz sześciu kostek (o boku 15 cm). Elementy belkowe przygotowano do badań przez ich nacięcie w środku rozpiętości (po 24 h od betonowania) na głębokość 25 mm. Próbkę typu B posłużyły do określenia wytrzymałości na ściskanie, na walcach określono

\* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu

**Skład mieszanek betonowych**

Serie <sup>1)</sup>	Beton	Składniki					
		Piasek <sup>2)</sup> [kg]	Cement <sup>3)</sup> [kg]	Woda [dm <sup>3</sup> ]	FM 34 [dm <sup>3</sup> ]	Włókna stalowe [kg]	
						30/0,55	50/0,8
E1, E7, E14, E28, E90, E180		1835	374	150	3,47	–	33
D1, D7, D14, D28, D90, D180		1855	378	140	3,51	34	–

<sup>1)</sup> Liczba przy literze oznacza termin badania od zabetonowania.  
<sup>2)</sup> Piasek odpadowy frakcji 0-4 mm (pozostałość po hydroklasyfikacji pospółki).  
<sup>3)</sup> Cement CEM II/B-V 32,5 R.

zależność pomiędzy naprężeniami a odkształceniami ( $\sigma - \epsilon$ ) i wytrzymałość na ściskanie, a na belkach wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz zależność ugięcia ( $\delta$ ) – obciążenie ( $F$ ). Połówki belek wykorzystano do przygotowania kostek o boku 15 cm i przeprowadzenia dodatkowego badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu.

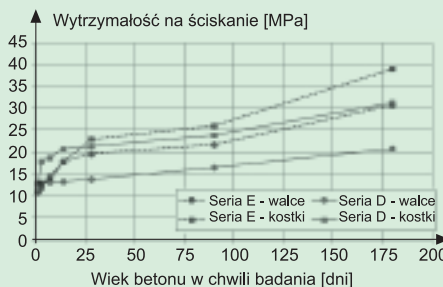
W pierwszej kolejności określono konsystencję świeżej mieszanki betonowej metodą Ve-Be. Badania stwardniałego betonu przeprowadzono po 1, 3, 7, 14, 28, 90 i 180 dniach dojrzewania. Na ogół realizowano je zgodnie z zaleceniami dotyczącymi betonu zwykłego. Jedynie wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz zależność  $F - \delta$  określano zgodnie z PN-EN 14651:2007. Do wyznaczenia zależności  $\sigma - \epsilon$  zastosowano siłomierz tensometryczny oraz zestaw trzech ekstensometrów (rozmontowanych co 120° na pobocznicę próbek walcowej). Urządzenia te współpracowały z komputerowym systemem akwizycji danych SAD-256 i umożliwiały rejestrację mierzonych wielkości do chwili zniszczenia próbki [4].

**Wyniki badań i ich analiza**

Wszystkie mieszanki miały konsystencję plastyczną. Gęstość zaprojektowanych kompozytów wynosiła średnio 1980 kg/m<sup>3</sup> – seria E i 2025 kg/m<sup>3</sup> – seria D. Większy ciężar objętościowy próbek z serii D wynikał prawdopodobnie z mniejszej długości zastosowanych włókien, co spowodowało, że mieszanka betonowa miała lepszą urabialność, a przez to mniejszą porowatość.

**Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie** przeprowadzono łącznie na 144 próbkach. Każdorazowo badano po 6 kostek sześciennych oraz po 3 próbki walcowe. Otrzymane

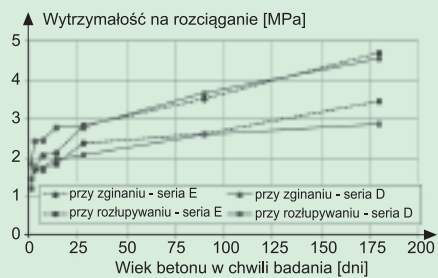
wyniki wytrzymałości uśredniono i sporządzono wykresy zmiany wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu (rysunek 1). Wynika z nich, że przyrost wytrzymałości nie jest regularny i wystarczający. O ile w przypadku serii E założona klasa wytrzymałości została prawie osiągnięta po 28 dniach, to w przypadku serii D (z krótszymi włóknami) można po tym okresie przyjąć klasę C15/20. W dalszym okresie wytrzymałość ta wzrasta i po 180 dniach osiąga klasę C20/25.



**Rys. 1. Przyrost wytrzymałości na ściskanie w czasie**

**Badanie wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu** przeprowadzono łącznie na 48 belkach długości 550 mm i przekroju poprzecznym 150 x 150 mm (w miejscu nacięcia 150 x 125 mm). Każdorazowo badano po 3 belki. Po zakończeniu badania wycięto z poówek belek po dwie kostki o boku 15 cm, na których określono **wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu**. Łącznie badanie przeprowadzono na 96 próbkach sześciennych (w seriach po 6 szt.). Uśrednione wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przedstawiono na rysunku 2. Przyrost obu wytrzymałości był dość regularny, co świadczy o pozytywnym wpływie zastosowanego zbrojenia rozproszonego.

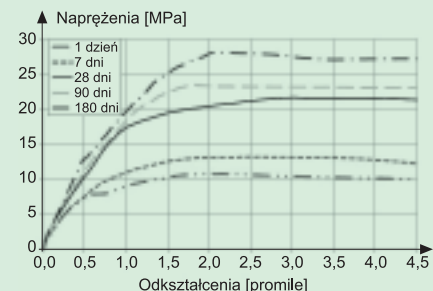
Kolejnym istotnym parametrem opisującym beton jest **zależność naprężenie – odkształcenie**, którą określa-



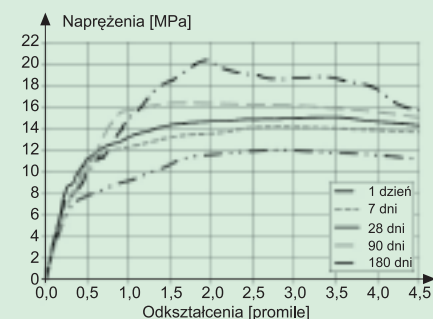
**Rys. 2. Przyrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w czasie**

no na walcach średnicy 15 cm i wysokości 30 cm. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wybrane zależności  $\sigma - \epsilon$  w przypadku dwóch fibropiaskobetonów (seria E i D). Można zauważyć, że kształt wykresów jest bardzo zbliżony do zaproponowanych w PN-EN 1992-1-1:2008. Wraz ze wzrostem wieku betonów zwiększa się kąt nachylenia krzywych w ich początkowym stadium, co świadczy o przyroście modułu sprężystości. Wzrasta w czasie również wytrzymałość na ściskanie analizowanych kompozytów. Elementy z dodatkiem zbrojenia rozproszonego charakteryzują się zwiększoną odkształcalnością, która sprawia, że mogą być stosowane np. w elementach obciążonych dynamicznie [11, 12].

Jednym z podstawowych badań związanych z określeniem wspomnianej wcześniej odkształcalności

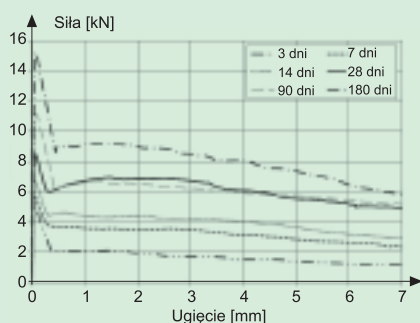


**Rys. 3. Zależności naprężenia – odkształcenia w przypadku kompozytu serii E**

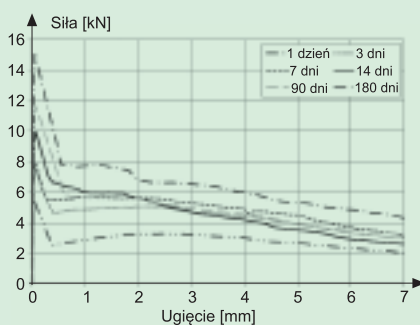


**Rys. 4. Zależności naprężenia – odkształcenia w przypadku kompozytu serii D**

jest test trójpunktowego zginania wg normy PN-EN 14651:2007. Badania to przeprowadzono na belkach (15 x 15 x 55 cm) ze szczeliną naciętą w środku rozpiętości. Osiowy rozstaw podpór wynosił 50 cm. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono zależności pomiędzy obciążeniem a ugięciem w środku rozpiętości belki. Wy-



Rys. 5. Zależność obciążenie – ugięcie w przypadku kompozytu serii E



Rys. 6. Zależność obciążenie – ugięcie w przypadku kompozytu serii D

kresy te są charakterystyczne dla kompozytów betonowych z niewielką zawartością włókien stalowych. Stwierdzono wzrost naprężenia aż do chwili zarysowania elementu (maksymalne obciążenie odpowiadające wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu), a następnie współpracę włókien przez przyrost ugięcia (odkształceń), któremu towarzyszy powolny spadek obciążenia. Zgodnie z normą PN-EN 14651:2007 ugięcie rejestruje się do wartości 3,44 mm, co nie oznacza, że element ulega wówczas zniszczeniu. Jest on w stanie dalej przenosić obciążenie do wartości dwu-, a nawet trzykrotnej w stosunku do poziomu określonego w normie. Jest to bardzo korzystna cecha, którą można z powodzeniem wykorzystać w elementach konstrukcyjnych jako zabezpieczenie przed skutkami nagłych obciążeń [11, 12].

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że nawet niewielka ilość włókien (ok. 0,43% objętościowo) wpływa korzystnie na właściwości kompozytu betonowego. Szczególnie uwiadcza się to w wytrzymałości na rozciąganie, a przede wszystkim przy próbie zginania, gdzie odkształcalność kompozytu jest niepomijalna i należy ją uwzględniać w obliczeniach elementów konstrukcyjnych. W przeprowadzonych badaniach nie odnotowano żadnych negatywnych skutków, spowodowanych zastosowaniem piasku odpadowego w zaprojektowanych kompozytach, które mogłyby dyskwalifikować piaskobeton modyfikowane włóknami stalowymi.

Stosowanie materiałów kompozytowych w elementach konstrukcyjnych staje się zjawiskiem coraz powszechniejszym [13], a koncepcja wykorzystania włókien stalowych w mieszance piaskobetonowej wydaje się słusznym rozwiązaniem [4], wpisującym się w tzw. Zrównoważony Rozwój Środowiska [14].

*Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST8/06579*

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wybranych piaskobetonów z dodatkiem włókien stalowych. Badania realizowano zgodnie z aktualnie obowiązującymi normami przez 180 dni. Określono wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, zależność pomiędzy naprężeniami i odkształceniami oraz siłą i przemieszczeniem. Na podstawie przeprowadzonych analiz można przyjąć, że piasek odpadowy stosowany do produkcji betonów z dodatkiem włókien stalowych może być traktowany jako pełnowartościowy składnik betonów konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** zbrojenie rozproszone, materiały odpadowe, badania długotrwałe.

## Abstract

The results of the research programme focused on chosen fine aggregate concretes are presented in the paper. The tests were conducted during a period of 180 days and according to current codes. The compressive and tensile strength were assessed. The stress-strain and force-displacement relations were obtained. On the basis of the achieved results it can be stated that waste

sand (utilised for fibre concrete) can be utilised for production of ordinary structural concrete.

## Literatura

- [1] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Kobaka J.: Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego. *Materiały Budowlane* 9/2013.
- [2] Głodkowska W., Kobaka J.: Zastosowanie piasków odpadowych do wykonywania posadzek przemysłowych. *Annual Set – The Environmental Protection*, Vol. 11, 2009, 193 – 206.
- [3] Domski J.: Cracking moment in steel fibre reinforced concrete beams based on waste sand. „OVIDIUS” *University Annals – Constantza, Series Civil Engineering*, Year XIII (2011), Issue 13, 29 – 34.
- [4] Domski J.: Skurcz i pęcznienie piaskobetonu zbrojonego włóknami stalowymi. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”. MATDUB '2011, 83 – 91, Kraków 20 – 22 czerwca 2011 r.
- [5] Domski J.: Ugięcie belek fibropiaskobetonowych wykonanych na bazie piasku odpadowego. *Przegląd Budowlany* 3/2012, pp. 32 – 37.
- [6] Katzer J.: Properties of Precast SFRCC Beams under Harmonic Load. *Science and Engineering of Composite Materials* 15 (2) 2008, pp. 107 – 120.
- [7] Domski J., Katzer J.: Load-deflection characteristic of fibre concrete based on waste ceramic aggregate. *Annual Set – The Environmental Protection*, Vol. 15, 2013, 213 – 230.
- [8] Katzer J., Domski J.: Optimization of fibre reinforcement for waste aggregate cement composite. *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 2013, pp. 790 – 795.
- [9] Domski J., Katzer J., Fajto D.: Load-CMOD characteristics of FRCC based on waste ceramic aggregate. *Annual Set – The Environmental Protection*, Vol. 14, 2012, 69 – 80.
- [10] Katzer J., Domski J.: Quality and mechanical properties of engineered steel fibres used as reinforcement for concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 34, 2012, 243 – 248.
- [11] Cichocki K., Ruchwa M.: Propagacja zniszczenia w konstrukcji obciążonej wybuchem. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Z. 58, nr 3/III (276), 2011, 17 – 24.
- [12] Cichocki K., Ruchwa M.: Przestrzenne konstrukcje żelbetowe obciążone wybuchem. *Poliptymalizacja i komputerowe wspomaganie projektowania* (red. Kiczowski T., Tarnowski W.), tom X, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2012, 7 – 19.
- [13] Karwowska J., Łapko A.: Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 2011, Vol. 2, No. 1, 41 – 46.
- [14] Piecuch I., Piecuch T.: Environmental Education and Its Social Effects. *Annual Set – The Environment Protection*, Vol. 15, 2013, 192 – 212.