

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK*
mgr inż. Janusz Kobaka**

Zastosowanie metod nieniszczących do oceny właściwości fibropiaskobetonu

Application of non-destructive methods to assess the properties of steel fibre reinforced fine aggregate concrete

Obecnie fibropiaskobeton z wartością różnych domieszek i dodatków, ze względu na zadowalające właściwości mechaniczno-fizyczne, znajdują coraz szersze zastosowanie w budownictwie. Stosowane są m.in. do wytwarzania konstrukcyjnych elementów cienkościennych, cienkich płyt okładzin budynków, posadzek przemysłowych, elementów cienkich powłok, jako przekryć budynków, do budowy nawierzchni mostów, tuneli, wzmocnienia wyrobisk kopalnianych, a także do wznoszenia obiektów obciążonych dynamicznie. Przy tak szerokim spektrum zastosowania fibropiaskobetonu odczuwa się brak szybkiej, bezinwazyjnej i skutecznej metody oceny jego właściwości po wbudowaniu w konstrukcję. Ponadto stosowane metody oceny właściwości fibropiaskobetonu na normowych próbkach nie pozwalają na dokładną ocenę rozkładu wartości jego cech w elementach i konstrukcji. Prawidłowa kontrola jakości materiału w konstrukcji polega na ocenie jego właściwości i jednorodności metodami niepowodującymi uszkodzenia badanego elementu [1].

W artykule zaproponowano sposób określania właściwości fibropiaskobetonu metodami nieniszczącymi. Na podstawie studiów literaturowych [1 ÷ 4], do zidentyfikowania cech takiego kompozytu wytypowano dwie metody. Jedną z nich wykorzystuje indukcję elektromagnetyczną w celu oszacowania stopnia nasycenia kompozytu zbrojeniem rozproszonym, drugą bazuje na ustaleniu prędkości propagacji fali ultra-

dźwiękowej w przestrzeni kompozytu. Korelacja wyników uzyskanych metodami nieniszczącymi z odpowiednimi wartościami cech kompozytu, ustalonymi na drodze doświadczalnej, pozwoliła na określenie równań regresji, w których zmiennymi niezależnymi są natężenie indukowanego prądu (I) oraz prędkość propagacji fali ultradźwiękowej (V). Zmienną zależną jest właściwość fibropiaskobetonu.

Materiały i elementy próbne

Celem badań doświadczalnych i analiz teoretycznych było opracowanie sposobu określenia właściwości fibropiaskobetonu z zastosowaniem dwóch metod nieniszczących oraz praktyczna jego weryfikacja. Założono, że właściwości fibropiaskobetonu powinny spełniać wymagania stawiane betonowi zwykłemu [5], dlatego też badaniami objęto te cechy kompozytu, które wynikają z kryteriów wytrzymałościowych i użytkowych betonu zwykłego.

Do wykonania elementów próbnych zastosowano piasek pochodzenia polodowcowego pozyskany po procesie hydroklastyfikacji z regionu Pomorza Zachodniego [6], cement portlandzki CEM II/A-V 42,5R, pył krzemionkowy oraz superplastyfikator zawierający pucolanę. Zbrojenie rozproszone stanowiły włókna stalowe w kształcie haczykowatym o smukłości $\lambda = l/d = 62,5$ ($l = 50$ mm, $d = 0,8$ mm). Skład matrycy zmodyfikowano przez zastosowanie dodatku pyłów krzemionkowych oraz superplastyfikatora pozwalającego na uzyskanie stosunku $w/c = 0,38$. Jako zmienną składową kompozytu przyjęto zawartość włókien stalowych (V_f), które dozowano co 0,5% do 2,5% w stosunku do objętości kompozytu. Włókna w mieszance kompozytu rozmieszczono były w sposób przypadkowy.

Badania wytrzymałości na ściskanie ($f_{c, cube}$), rozciąganie przy rozłupywaniu (f_{ct}), gęstości pozornej (ρ) oraz dynamicznego

modułu sprężystości (E_d) kompozytu drobnokruszywowego wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 mm. Skurcz (ε_s) oznaczano na belkach o wymiarach 100 x 100 x 400 mm, a odporność na ścieranie (S) kompozytu zbadano na próbkach sześciennych o boku 71 mm. Liczbę próbek, niezbędną do określenia średniej wartości statystycznej badanej cechy, wyznaczono na podstawie statystycznej analizy wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta przy tolerancji $\nu = 10\%$ i poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Metodyka badań

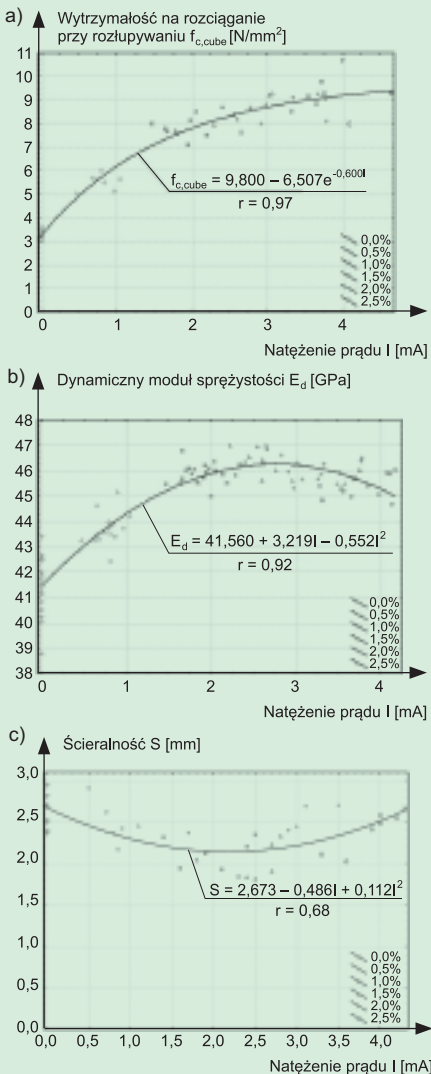
Wytrzymałość $f_{c, cube}$ określono wg normy PN-EN 12390-3, natomiast wytrzymałość f_{ct} wg metodyki przedstawionej w PN-EN 12390-6. Gęstość pozorną ρ oznaczono wg PN-EN 12390-7, odporność na ścieranie kompozytu S określono wg PN-84/B-04111, a dynamiczny moduł sprężystości E_d zdefiniowany został na podstawie analizy prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej wg [1, 5, 7]. Przebieg skurczu ε_s kompozytu w czasie t wyznaczono zgodnie z instrukcją ITB 194 *Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach*. Badania nieniszczące przeprowadzono dwiema metodami za pomocą detektora zbrojenia Femetr 2E2 oraz betonoskopu ultradźwiękowego o częstotliwości pomiarowej 54 kHz. Pierwsza z metod bazująca na indukcji elektromagnetycznej została użyta do oszacowania w badanym kompozycie zawartości zbrojenia rozproszonego oraz wyznaczenia zależności wybranych jego cech od natężenia indukowanego prądu I . Drugą z metod zastosowano w celu określenia zależności cech kompozytu od prędkości fali ultradźwiękowej V . Badania nieniszczące wykonano na próbkach przeznaczonych do badań doraźnych oraz reologicznych po ustabilizowaniu odkształceń wywołanych skurczem.

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

** Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Laboratorium Techniki Budowlanej

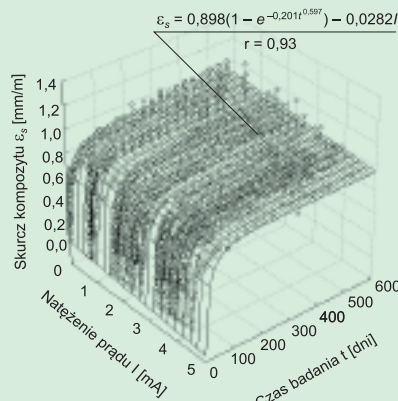
Analiza wyników badań

Badania nieniszczące, towarzyszące wszystkim niszczącym badaniom doraźnym oraz reologicznym, pozwoliły na określenie ich wzajemnych relacji. Na rysunku 1 przedstawiono tylko wybrane zależności właściwości fibropiaskobetonu od natężenia prądu I . Analiza wyników badań wykazała, że wytrzymałości $f_{c, cube}$ i f_{ct} zwiększają się wraz ze wzrostem natężenia prądu indukcyjnego I , nie jest to zależność prostoliniowa. W przypadku dużych wartości natężenia prądu ($I > 3$ mA), co odpowiada zawartości zbrojenia rozproszonego $V_f > 1,5\%$ w stosunku do objętości kompozytu, przyrost wytrzymałości $f_{c, cube}$ i f_{ct} jest niewielki. Wartość modułu E_d rośnie wraz ze wzrostem natężenia prądu I , ale powyżej wartości $I = 2,9$ mA, co odpowiada 1,5% zbrojenia rozproszonego, wartość modułu maleje (rysunek 1b).



Rys. 1. Przebieg zależności: a) wytrzymałości $f_{c, cube}$; b) modułu E_d ; c) ścieralności S od natężenia prądu I

Spowodowane jest to napowietrzeniem mieszanki kompozytu, w trakcie mieszania, przez dużą zawartość włókien stalowych [8]. Najmniejszą ścieralność kompozyt wykazuje przy natężeniu prądu $I = 2,2$ mA (rysunek 1c). W przypadku skurczu ϵ_s wzrostowi wartości natężenia prądu I , co odpowiada zwiększającej się zawartości włókien w kompozycie, towarzyszy ograniczenie odkształceń wywołanych skurczem (rysunek 2).



Rys. 2. Przebieg zależności skurczu ϵ_s fibropiaskobetonu od natężenia prądu I

Analizy teoretyczne wykazały, że funkcje opisujące zależność wytrzymałości $f_{c, cube}$ od zawartości włókien V_f ($f_{c, cube} = 62,77 - 19,22e^{-1,61V}$) w kompozycie oraz od natężenia prądu I ($f_{c, cube} = 62,98 - 19,39e^{-0,938I}$) są bardzo podobne; wytrzymałość $f_{c, cube}$ wzrasta nieliniowo wraz z zawartością włókien V_f i natężeniem prądu I . Wynika stąd zależność, że **zawartość włókien w kompozycie do $V_f = 1,5\%$ wyraźnie wpływa na wzrost wytrzymałości $f_{c, cube}$** . Powyżej tej ilości włókien obserwuje się już nieznaczny przyrost wytrzymałości kompozytu. Ponadto zgodność przebiegu omawianych funkcji świadczy o możliwości zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w kompozycie. Podobną zależność uzyskano także dla pozostałych właściwości kompozytu objętych badaniami.

Do opisu zależności wytrzymałości $f_{c, cube}$ i f_{ct} , a także modułu E_d od prędkości fali V użyto dwóch krzywych (rysunek 3). W tych przypadkach analiza statystyczna wykazała, że wyniki badań nie należą do tej samej populacji. Z rysunku 3 wynika, że wraz ze wzrostem zawartości włókien do 1,5% następuje znaczny przyrost wytrzymałości $f_{c, cube}$, f_{ct} , modułu E_d kompozytu oraz wzrost prędkości fali V . Powyżej 1,5% zawartości włókien w kompozycie obserwuje się już nieznaczny przyrost wytrzymałości $f_{c, cube}$ i f_{ct} oraz spadek wartości modułu E_d przy zmniejszającej się prędkości fali V . Stwierdzono ponadto, że

ścieralność S kompozytu zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości fali V .

Mając zdefiniowane zależności cech fibropiaskobetonu od parametrów badań niszczących (V i I), w wyniku analizy korelacyjnej wyznaczono równania regresji (cecha kompozytu) względem x i z (natężenie prądu I oraz prędkość fali V). Ostatecznie przyjęto taką postać równania regresji, dla której uzyskano największą wartość współczynnika korelacji.

$$f_{c, cube} = -164,93 + 53,29e^{-0,0493V(1,792 + I)} \quad r = 0,93 \quad (1)$$

$$f_{ct} = 2,24V - 6,527e^{-0,544I} \quad r = 0,97 \quad (2)$$

$$E_d = -664,3 + 300,1V - 31,74V^2 + I(1,936 - 0,259I) \quad r = 0,98 \quad (3)$$

$$S = -0,299I + 0,071I^2 + 2,854V - 0,0527V^2 \quad r = 0,77 \quad (4)$$

$$\epsilon_s = 9,554(1 - e^{-2,264I^{0,98}}) - 4,171V + 0,510V^2 - 0,029I \quad r = 0,96 \quad (5)$$

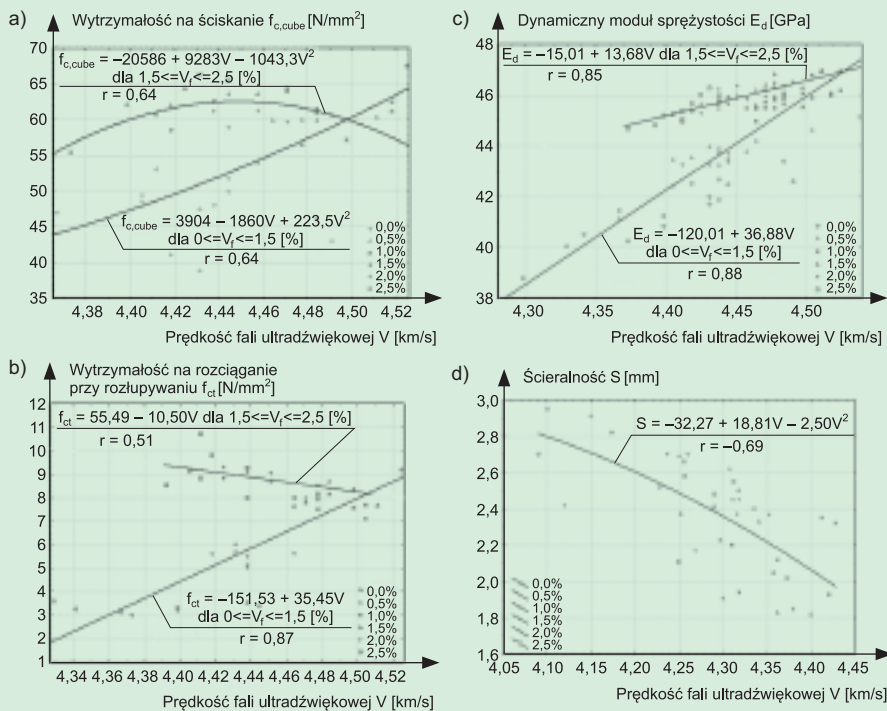
$$\rho = -26,03 + 12,83V - 1,45V^2 - 0,210e^{-0,603I} \quad r = 0,97 \quad (6)$$

Znając prędkość fali V i natężenie prądu I można z równań 1 + 6 określić właściwości fibropiaskobetonu objętego badaniami oraz innych materiałów podobnych pod względem składu mieszanki i rodzaju włókna.

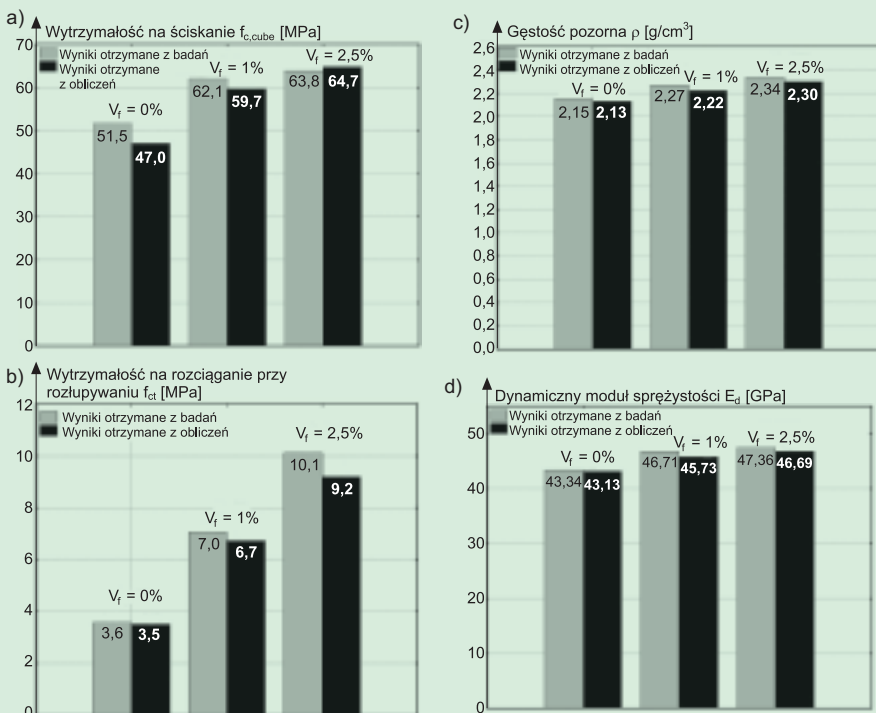
Praktyczna weryfikacja

W celu zweryfikowania przedstawionego układu równań (1 + 6) wykonano w terenie trzy płyty grubości 15 cm o różnej zawartości włókien stalowych, a mianowicie 0%, 1% i 2,5%. Po trzech latach przechowywania elementów próbnych w warunkach naturalnych poddano je badaniom. Badania nieniszczące wykazały, że w przypadku zawartości włókien stalowych 0%, 1% i 2,5% średnie natężenie indukowanego prądu wyniosło odpowiednio: 0 mA; 1,2 mA oraz 2,8 mA, natomiast średni czas przebiegu fali ultradźwiękowej: 4,48 km/s; 4,54 km/s i 4,50 km/s.

Na rysunku 4 zestawiono przykładowe wyniki badań cech fibropiaskobetonu uzyskane metodą niszczącą oraz obliczone na podstawie równań (1 + 6). Analiza uzyskanych wyników wykazała, że różnice między wartościami cech fibropiaskobetonu uzyskanymi z badań i obliczonymi wynoszą od 2% dla dynamicznego modułu sprężystości do 9% w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i są statystycznie nieistotne. Na tej podstawie moż-



Rys. 3. Przebieg zależności: a) wytrzymałości $f_{c,cube}$; b) wytrzymałości f_{ct} ; c) modułu E_d ; d) ścieralności S badanego kompozytu od prędkości fali V



Rys. 4. Zestawienie uzyskanych w badaniach i w obliczeniach wartości: a) wytrzymałości $f_{c,cube}$; b) wytrzymałości na rozciąganie f_{ct} ; c) gęstości ρ fibropiaskobetonu; d) dynamicznego modułu E_d

na stwierdzić dobrą zgodność między eksperymentem a obliczeniami, co wskazuje na poprawność sformułowanych równań.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analiza uzyskanych wyników wykazały, że metoda indukcji elektromagnetycznej wraz z metodą bazującą

na prędkości propagacji fali ultradźwiękowej mogą być stosowane do określania właściwości drobnokruszywowego betonu zbrojonego włóknami stalowymi. Zaproponowane równania regresji umożliwią nieniszczącą identyfikację cech fibropiaskobetonu. Wnioski z badań odnoszą się do użytego rodzaju włókna stalowego i składu mieszanki kompozytu, a

więc nie można ich uogólniać, dlatego też zależności te mogą być przydatne do określania cech materiałów podobnych do badanych.

Streszczenie

Prawidłowa kontrola jakości materiału w konstrukcji polega na ocenie jego właściwości i jednorodności metodami niepowodującymi uszkodzenia badanego elementu. Obecnie przy szerokim spektrum zastosowań fibropiaskobetonu odczuwa się brak szybkiej i bezinwazyjnej metody oceny jego właściwości. W artykule zaproponowano więc sposób oznaczania właściwości fibropiaskobetonu dwiema metodami nieniszczącymi: ultradźwiękową oraz indukcji elektromagnetycznej. Ustalono zależności, w których zmiennymi niezależnymi są natężenie indukowanego prądu oraz prędkość propagacji fali ultradźwiękowej. Zmienną zależną jest właściwość fibropiaskobetonu. Równania poddano weryfikacji praktycznej. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników otrzymanych na drodze eksperymentalnej oraz analitycznej.

Słowa kluczowe: metody nieniszczące, właściwości, fibropiaskobeton.

Abstract

The correct quality control of the material in the structure involves the assessment of its properties and uniformity using methods that cause no damage to the tested structural element. Currently, with a wide range of applications of steel fibre reinforced fine aggregate concrete (SFRFAC) there is lack of quick and non-invasive method for assessing its properties. This paper proposes a process for determining the properties of SFRFAC with two non-destructive methods: ultrasound method and electromagnetic induction method. The relationships were found, in which the independent variables were the intensity of the induced current and the propagation speed of the ultrasound wave. The dependent variable was a property of tested SFRFAC. The equations were verified in practice. The compatibility of the results obtained experimentally and analytically was satisfactory.

Literatura

- [1] Runkiewicz L.: Badania konstrukcji żelbetowych. Diagnostyka techniczna, Biuro GAMMA, Warszawa 2002.
- [2] Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001.
- [3] Śliwiński A.: Ultradźwięki i ich zastosowania; WNT, Warszawa 2001.
- [4] Hola J., Schabowicz K.: Nondestructive elastic-wave tests of post-tensioned concrete girders in road bridge; 17th WorldConference on Nondestructive Testing, e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, vol. 13, nr. 11., Shanghai 2008.
- [5] Neville A.: Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
- [6] Głodkowska W., Kobaka J.: Zastosowanie piasków odpadowych do wykonywania posadzek przemysłowych, Rocznik Ochrony Środowiska, 2009 (tom 11).
- [7] Maidl B.R.: Steel Fibre Reinforced Concrete, Ernst & Sohn, 1995, Berlin, Germany.