

Zastosowanie metody ultradźwiękowej do oceny właściwości mechanicznych betonów osłonowych

Application of ultrasonic method for assessment of shielding concrete mechanical properties

Streszczenie

Zgodnie z EN 12504-4 oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej może być wykorzystywane w szeregu zastosowań, w tym w szczególności do szacowania wytrzymałości. Możliwość jej zastosowania do oceny właściwości fizycznych i mechanicznych uwarunkowana jest dysponowaniem odpowiednich związków korelacyjnych. Wyznacza się je na podstawie analizy regresyjnej danych doświadczalnych zależności między prędkością fali a wybranymi cechami technicznymi betonu wyznaczonymi w badaniach niszczących. Zastosowanie metod ultradźwiękowych do szacowania wytrzymałości betonów specjalnych, np. betonów wysokowartościowych czy betonów osłonowych jest mniej rozpoznane. W artykule przeanalizowano możliwość zastosowania procedury wg EN 13791 do oceny wytrzymałości na ściskanie betonu zwykłego i ciężkiego na podstawie oznaczenia prędkości fali ultradźwiękowej metodą bezpośrednią wg EN 12504-4.

Słowa kluczowe: betony osłonowe, szacowanie wytrzymałości, metoda ultradźwiękowa

Abstract

According to EN 12504-4, determination of the velocity of propagation of pulses of ultrasonic longitudinal waves in hardened concrete can be used for a number of applications, especially for estimation of strength. The possibility of its use to assess the physical and mechanical properties of concrete is determined by the disposition of the relevant correlations. They are determined based on regression analysis of experimental data relationship between ultrasonic pulse velocity and selected technical features of concrete set out in destructive tests. The use of ultrasonic methods for estimating the strength of special concrete, e.g. high performance concrete or shielding concrete is less recognized. In the paper the application of a procedure according to EN 13791 to evaluate the compressive strength of ordinary and heavy weight concretes by determining the velocity of ultrasonic waves using the direct method in accordance with EN 12504-4 was analyzed.

Keywords: shielding concretes, estimation of strength, ultrasonic method

Wstęp

W praktyce inżynierskiej wśród nieniszczących badań służących do oceny właściwości mechanicznych betonu stosowana jest metoda sklerometryczna i metoda ultradźwiękowa. Zgodnie z PN-EN 12504-4 oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej może być wykorzystywane w szeregu zastosowań, w tym w szczególności do szacowania wytrzymałości i monitorowania jej zmian w czasie [1÷3], a w mniejszym stopniu do lokalizacji wad [4÷6]. Możliwość jej zastosowania do oceny właściwości fizycznych i mechanicznych uwarunkowana jest dysponowaniem odpowiednich związków korelacyjnych. Wyznacza się je na podstawie analizy regresyjnej danych doświadczalnych zależności między prędkością fali a wybranymi cechami technicznymi betonu wyznaczonymi w badaniach niszczących. Literatura w tym zakresie jest niezwykle obszerna w odniesieniu do ba-

dań betonów zwykłych. Zastosowanie metod ultradźwiękowych do szacowania wytrzymałości betonów specjalnych, np. betonów wysokowartościowych czy betonów osłonowych jest mniej rozpoznane. Również w wytycznych dotyczących budowy elektrowni jądrowych brak jest informacji o możliwości zastosowania metod znanych z diagnostyki betonu zwykłego do elementów konstrukcji wykonanych z tzw. betonów specjalnych [7].

Celem artykułu jest analiza możliwości zastosowania tej procedury opracowanej na podstawie empirycznych wyników dla betonów zwykłych do szacowania wytrzymałości na ściskanie betonów ciężkich stosowanych jako osłony przed promieniowaniem jonizującym. W artykule przedstawiono wynik zastosowania procedury wg PN-EN 13791 do oceny wytrzymałości na ściskanie betonu zwykłego i ciężkiego na podstawie oznaczenia prędkości fali ultradźwiękowej metodą bezpośrednią wg PN-EN 12504-4.

Prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz – Instytut Techniki Budowlanej; dr inż. Tomasz Piotrowski; mgr inż. Kamil Załęgowski; dr hab. inż. Andrzej Garbacz, prof. PW – Politechnika Warszawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: lrunkiewicz@itb.pl

Szacowanie wytrzymałości betonów zwykłych i wysokowartościowych

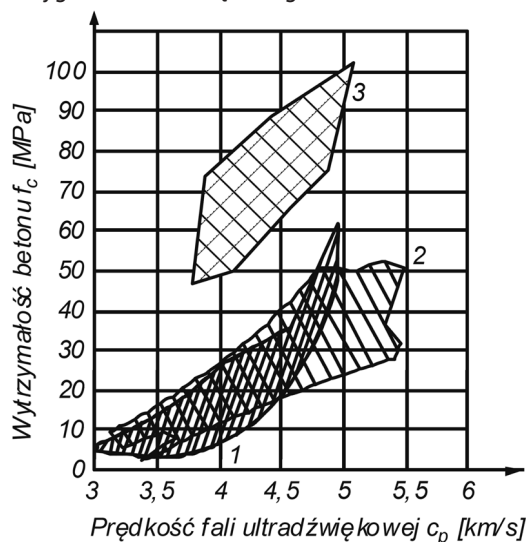
Na podstawie analizy regresyjnej danych doświadczalnych zależności między prędkością fali a wybranymi cechami technicznymi betonu, oznaczonymi w badaniach niszczących sporządza się krzywe referencyjne [8,9]. Do szacowania wytrzymałości betonu na ściskanie metodą ultradźwiękową konieczne jest określenie wiarygodnej zależności wytrzymałości (f_c) – prędkość fali (c_p). Dotychczasowa praktyka wykazała, że zależności empiryczne (korelacyjne) są bardzo zróżnicowane, zaś ich błędne stosowanie obniża dokładność oceny nawet do ok. 50-100% [10]. Na podstawie rozważań teoretycznych dla jednorodnego ośrodka nieograniczonego, zależność między wytrzymałością f_c , a prędkością fali c_p , powinna spełniać równanie [11]:

$$f_c = a c_p^4$$

Możliwość zastosowania tej formuły nie została jednakże potwierdzona w dotychczasowych badaniach elementów betonowych, nawet w badaniach laboratoryjnych. W celu opisanie relacji $f_c - c_p$ stosuje się inne postacie zależności funkcyjnych, co potwierdza zarówno literatura krajowa [12,13], jak i zagraniczna [2,14]. Statystyczną zależność wytrzymałość-prędkość fali można otrzymać dwoma sposobami: (1) metodą dokładnego wyznaczania związku empirycznego między prędkością fali a wybranym parametrem wytrzymałościowym na podstawie statystycznej analizy regresji, np. krzywa skalowania wg Instrukcji ITB 209 [15] lub krzywa korelacyjna wg PN-EN 12504-4:2005, (2) metodą dobierania hipotetycznej krzywej regresji odpowiednio do składu, technologii wykonania, wilgotności i wieku betonu.

W PN-EN 12504-4:2005 (Załącznik C) nie podano sposobu doboru krzywych referencyjnych, określa tylko ogólne zasady wyznaczania związków statystycznych, wskazując trzy możliwości: (1) korelację z wykorzystaniem próbek wykonanych w formach, (2) korelację z wykorzystaniem odwiertów rdzeniowych, (3) korelację z wytrzymałością betonu w elementach prefabrykowanych. Nie zdefiniowano również sposobu różnicowania wartości wytrzymałości wymaganego do wyznaczenia krzywej skalującej. Beton referencyjny do kreślenia krzywych skalowania jest zdefiniowany przez: typ i klasę cementu, zawartość cementu, typ kruszywa i jego uziarnienie, obecność domieszek. PN-EN 12504-4:2005 zaleca, aby podczas konstruowania krzywych korelacyjnych różnicowane wytrzymałości uzyskać poprzez zmianę stosunku wodno-cementowego. Wykorzystanie próbek o zróżnicowanym wieku jest zasadne jedynie w przypadku kontrolowania narastania wytrzymałości. Analiza norm i wytycznych krajowych określających zasady prowadzenia pomiarów ultradźwiękowych metodą pomiaru prędkości fali, pozwala stwierdzić, że w większości przypadków do opisu relacji między właściwościami betonu a prędkością fali ultradźwiękowej zalecana jest funkcja liniowa i wykładnicza [2]. Poprzednia polska norma PN-74/B-06261, podobnie jak i Instrukcja ITB 209 [15] zalecają stosowanie wielomianu drugiego stopnia, ale dopuszczają też użycie innych funkcji. Warto zaznaczyć, że wyznaczone związki nie są uniwersalne, tylko odnoszą się do konkretnego typu betonu. Rysunek 1 przedstawia wyniki szacowania wytrzymałości na ściskanie na podstawie pomiaru prędkości fali, zebrane przez różnych autorów. Widoczny rozrzut wytrzymałości na ściskanie jest wynikiem badania różnych typów betonów i w efekcie korzystania z różnych krzywych skalujących. Na uwagę zasługuje zbieżność wyników uzyskanych w kraju i za granicą dla tzw. betonów zwykłych. Natomiast w odniesieniu do betonów wysokowartościowych, wzrostowi wytrzymałości towarzyszy znacznie mniejszy wzrost prędkości fali.

Komlos i in. [2] bazując na literaturze, stwierdzili, że kierunki zastosowania fal podłużnych do oceny właściwości betonu można uszeregować wg malejącej precyzji pomiarów następująco: (1) monitorowanie zmian właściwości betonu w czasie użytkowania, (2) kontrola jednorodności struktury betonu, (3) szacowanie wytrzymałości na ściskanie, (4) określanie stałych sprężystości, (5) wykrywanie defektów. Autorzy sformułowali również listę aspektów ultradźwiękowych technik pomiarowych, które konieczne wymagają ulepszenia – wykorzystanie fal innych niż podłużne np. fal powierzchniowych, czy fal płytowych Lamba, stosowanie parametrów fali innych niż prędkość fali oraz stosowanie zaawansowanych technik obróbki sygnału ultradźwiękowego.



Rys. 1. Zakres zależności wytrzymałości na ściskanie od prędkości fali podłużnej dla betonów zwykłych i wysokowartościowych (na podstawie danych: 1 - L. Runkiewicz [12], 2 - J. Popovics [14], 3 - dotyczących betonów wysokowartościowych [16-18])

Fig. 1. The range of relationship of compressive strength and UPV for ordinary concrete, high strength concrete (on the basis of: 1 - L. Runkiewicz [12], 2 - J. Popovics [14], 3 - involving high strength concrete [16-18])

Procedury szacowania wytrzymałości betonu

Wyznaczenie zależności korelacyjnej wg PN-EN 13791 w pierwszej kolejności sprowadza się do dopasowania prostej lub krzywej, za pomocą analizy metodą regresji par wyników uzyskanych w ramach programu badania, czyli par wyniku badania próbki – wyniku pomiaru przeprowadzonego metodą pośrednią. Wynik pomiaru metodą pośrednią jest rozpatrywany jako wartość zmienna, natomiast wyznaczona wytrzymałość betonu na ściskanie jako funkcja tej zmiennej. Kolejnym krokiem jest obliczenie błędu standardowego oszacowania, określenie granic ufności dla dopasowania prostej lub krzywej oraz granic tolerancji dla pojedynczego wyniku. Należy zaznaczyć, że zależność korelacyjna jest wyznaczana przy założeniu 10% zaniżenia wytrzymałości. Charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie jest mniejszą z wartości:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1,48 \cdot s$$

$$f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4$$

gdzie:

$f_{ck, is}$ – wytrzymałość charakterystyczna betonu,

$f_{m(n), is}$ – najmniejsza z oznaczonych wartości wytrzymałości betonu na ściskanie,

s – odchylenie standardowe wyników.

Pomiary prędkości ultradźwiękowej są wykorzystywane do oceny wytrzymałości betonu na ściskanie, przy zastosowaniu podstawowej krzywej regresji:

$$f_v = 6,25 \cdot v^2 - 497,5 \cdot v + 990$$

gdzie: $4 \leq v \leq 4,8$

która jest przesuwana do właściwego poziomu, określonego na podstawie badania próbek betonowych. Wartość przesunięcia Δf , niezbędną dla uzyskania zależności korelacyjnej między pośrednią metodą badawczą i wytrzymałością betonu na ściskanie dla danego rodzaju betonu, wylicza się przy wykorzystaniu co najmniej 9 par wyników wytrzymałość – prędkość fali ze wzoru (rys. 3):

$$\Delta f = \delta f_{m(n)} - k_1 \cdot x_s$$

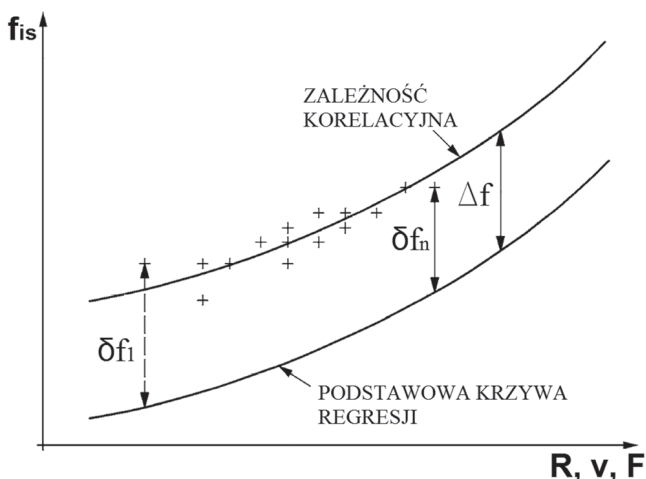
gdzie:

Δf – przesunięcie,

$\delta f_{m(n)}$ – wartość średnia z n wartości δf ,

k – współczynnik zależny od ilości n -par wyników (od 1,67 dla $n=9$ do 1,48 dla $n \geq 15$).

Norma PN-EN 13791:2007 stanowi, że wyznaczone zależności korelacyjne mogą być wykorzystane w zakresie $\pm 0,05$ km/s poza zakresem wyników pomiaru prędkości, który jest wykorzystywany do określania przesunięcia podstawowej krzywej regresji.



Rys. 2. Zasada wyznaczania zależności korelacyjnej między wytrzymałością betonu na ściskanie i wynikami badań metodami pośrednimi (1 – podstawowa krzywa regresji, 2 – przesunięcie podstawowej krzywej, $\delta f_{1...n}$ – różnica między jednostkową wytrzymałością betonu i wartością wytrzymałości wynikającą z podstawowej krzywej regresji, R – liczba odbicia zgodnie z EN 12504-2, F – siła wyrwijająca zgodnie z EN 12504-3, v – prędkość fali ultradźwiękowej zgodnie z EN 12504-4)

Fig. 2. Determination of correlation between compressive strength of concrete and results of indirect methods (1 – basic regression curve, 2 – reallocation of basic curve, $\delta f_{1...n}$ – difference between individual strength of concrete resulting from basic regression curve, R – number of reflections according to EN 12504-2, F – ripping force according to EN 12504-3, v – ultrasonic pulse velocity according to EN 12504-4)

Zgodnie z instrukcją ITB nr 209 [15] określenie zależności między wynikami badań nieniszczących a właściwościami technicznymi przeprowadza przy użyciu dwóch metod: (1) metodą skalowania, którą wyznacz się dokładne związki empiryczne na podstawie statystycznej analizy korelacyjnej wyników badania próbek betonowych oraz (2) metody doboru hipotetycznej krzywej regresji na próbkach wykonanych wg tej samej receptury i technologii. Po wieloletnich pracach badawczych i wdrożeniowych w ITB na odwiertach rdzeniowych z betonów klas wytrzymałości od B37 do B120 (C30/37 – C110/120), sformułowano współczynniki korygu-

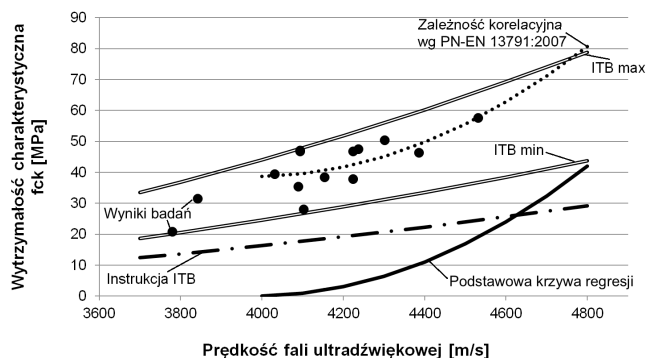
jące zależności z instrukcji ITB dla metody ultradźwiękowej wg równania:

$$f_c = (1,5 - 2,7) \cdot (2,75v^2 - 8,12v + 4,8), \text{ MPa}$$

Zastosowanie tak skorygowanej zależności wg jej autorów umożliwia zwiększenie dokładności oceny wytrzymałości betonu

Szacowanie wytrzymałości betonów osłonowych

W niniejszej pracy analizie statystycznej poddano zbiór wyników badań nieniszczących i niszczących wykonanych w ramach projektu NCBR pt. „Nowej generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym”, na trzynastu betonach osłonowych zawierających dodatki poprawiające zdolność pochłaniania promieniowania jonizującego i promieniowania gamma (tabl. I). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z odpowiednimi wytycznymi na próbkach o wymiarach 10x10x10 cm. Pomiary nieniszczące przeprowadzono metodą ultradźwiękową bezpośrednią przy użyciu głowic piezoelektrycznych o częstotliwości 100 kHz i żelu sprzęgającego firmy Panametrics. Podsumowanie wyników badań nieniszczących oraz badań próbek beleczkowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność wytrzymałości na ściskanie i prędkości fali ultradźwiękowej dla betonów osłonowych naniesionymi krzywymi skalującymi wg ITB i korelacyjnymi wg EN-PN

Fig. 3. The relationship of the compressive strength and the ultrasonic wave velocity for shielding concrete

PN-EN 1504-4 zawiera stwierdzenie, że korelacja pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej i wytrzymałością betonu z fizycznego punktu widzenia nie jest bezpośrednia i powinna być ustalona dla określonej receptury betonu. Słabe dopasowanie zależności korelacyjnej wg PN-EN 13791:2007 wskazuje, że betony nie należą do jednego rodzaju betonu (jednej receptury). W związku z tym dla wiarygodnej oceny właściwości betonów osłonowych należy zastosować indywidualne przesunięcie krzywej regresji dla każdego odrębnego rodzaju betonu. Niemniej można zauważyć, że wszystkie uzyskane wyniki mieszczą się w granicach ustalonych dla skorygowanych zależności ITB. Można je zatem zastosować jako krzywe skalujące do szacowania wytrzymałości betonów specjalnych w tym betonów osłonowych. Podsumowując można stwierdzić, że przy właściwym doborze parametrów badań i zależności korelacyjnych możliwe jest wystarczająco dokładne oszacowanie wytrzymałości betonów zwykłych i ciężkich z dodatkami, wykorzystywanych jako osłony przeciw promieniowaniu jonizującemu i gamma.

Tablica I. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i badań ultradźwiękowych betonów osłonowych
Table I. Compressive strength and upv of shielding concretes

Rodzaj betonu	f_{cm} [MPa]	f_{ck} [MPa]	Klasa wytrzymałości betonu	UPV [m/s]
Zwykły z CEM III	51,7	46,7	C45/55	4225
Ciężki z CEM III	42,7	37,7	C35/45	4225
Ciężki z CEM I	36,4	31,4	C30/37	3842
Zwykły z 0,5% Gd ₂ O ₃	55,3	50,3	C45/55	4302
Zwykły z 1,0% Gd ₂ O ₃	62,6	57,6	C55/67	4532
Ciężki 0,5% Gd ₂ O ₃	51,7	46,7	C45/55	4094
Ciężki 1,0% Gd ₂ O ₃	52,4	47,4	C45/55	4237
Ciężki PCC z dyspersją polimerową	43,4	38,4	C35/45	4154
Ciężki PCC z żywicą epoksydową	51,3	46,3	C40/50	4386
Ciężki PCC z dyspersją polimerową i 1,0% Gd ₂ O ₃	40,3	35,3	C30/37	4090
Ciężki z 1,0% NaBH ₄	32,9	27,9	C25/30	4102
Ciężki z włóknami polimerowymi	44,3	39,3	C35/45	4032
Ciężki z włóknami polipropylenowymi	52,1	47,1	C45/55	4094
Ciężki z włóknami polipropylenowymi i włóknami polimerowymi	25,7	20,7	C20/25	3780

Podsumowanie

Norma EN 12504-4 stanowi, że oznaczenie prędkości fali ultradźwiękowej może być wykorzystywane w szczególności do szacowania wytrzymałości betonu. Dostępna literatura odnosi się praktycznie tylko do betonów zwykłych, natomiast słabo rozpoznane jest szacowanie wytrzymałości za pomocą pomiarów ultradźwiękowych w przypadku betonów osłonowych, czy nawet betonów wysokowartościowych. Zależności korelacyjnej wg PN-EN 137 wyznaczone dla betonów osłonowych przygotowanych według różnych receptur charakteryzowały się słabym dopasowaniem. Potwierdza to konieczność opracowania tego rodzaju zależności indywidualnie dla danej receptury betonu. Niemniej wykazano, że wszystkie uzyskane wyniki mieszczą się w granicach ustalonych dla skorygowanych zależności ITB.

Reasumując, właściwy dobór parametrów badań i zależności korelacyjnych pozwala na odpowiednio dokładne oszacowanie wytrzymałości betonów zwykłych i ciężkich z dodatkami, wykorzystywanych jako osłony przeciw promieniowaniu jonizującemu i gamma.

Podziękowanie

Badania wykonano w ramach grantu NCBR LIDER/033/639/L-4/12/NCBR/2013 pt. „Nowej generacji beton osłonowy przed promieniowaniem jonizującym”.

Literatura

- [1] Stawiski B.: Zastosowanie metody ultradźwiękowej do badania wytrzymałości betonu na rozciąganie, 31 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2002, s. 115-118
- [2] Komlos K. i in.: Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards, Cement and Concrete Composites, vol. 18, 1996, s. 357-364.
- [3] Malhorta i in.: Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, 2004.
- [4] Hoła J., Schabowicz K.: State of the art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10 (3), 2010.
- [5] Lorenzi A. i in.: Ultrasonic pulse velocity analysis in concrete specimens, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires 2007.
- [6] Załęgowski K., Piotrowski K., Garbac A.: Diagnostyka konstrukcji betonowych metodą ultradźwiękową pośrednią, Przegląd Spawalnictwa (Welding Technology Review) 11 (86) 2014, 7-10.
- [7] Piotrowski T.: Wymagania dotyczące betonu w elektrowni jądrowej typu EPR wg ETC-C a normalizacja w Polsce, Materiały Budowlane, 5 (489) 2013, 35-38.
- [8] Brunarski L. i in.: Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu, Wyd. ITB, Warszawa, 1983.
- [9] Czarnecki i in.: Influence of polymer admixtures and additives on durability of concrete, Cement Wapno Beton, 2004, nr 1, s. 38-47.
- [10] Runkiewicz L.: Diagnostyka oraz monitoring budynków znajdujących się w sąsiedztwie realizowanych obiektów plombowych w miastach, Awaria Budowlane, 2008, s. 32-39.
- [11] Deputat J.: Ocena rodzaju wad w ręcznych badaniach ultradźwiękowych, IX seminarium Nieniszczące badania materiałów, IPPT PAN i Biuro Gamma, Zakopane 2003, s. 23-36.
- [12] Runkiewicz L.: Badania konstrukcji żelbetowych, Wyd. Biuro Gamma, 2002.
- [13] Runkiewicz L.: Stosowanie metod nieniszczących do oceny bezpieczeństwa, trwałości i niezawodności konstrukcji budowlanych, 35 KKBN Szczyrk 2006, s. 79-88.
- [14] Popovics S. i in.: The behavior of ultrasonic pulses in concrete, Cement and Concrete Research, vol. 20, 1990, s. 259-270.
- [15] Instrukcja ITB nr 194: „Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach, ITB, Warszawa 1998.
- [16] Hoła J. i in.: Badania przydatności metody ultradźwiękowej do szybkiej oceny jakości konstrukcji wykonanych z betonu, 32 KKBN, Międzyzdroje 2003, s. 111-114.
- [17] Kukier Z.: O ocenie wytrzymałości betonu wyższych klas metodą ultradźwiękową, Inżynieria i Budownictwo, 1995, nr 5, s. 224-225.
- [18] Pascale G. i in.: Evaluation of actual compressive strength of high strength concrete by NDT, CD Proc. Of 15th World Conference on Non-destructive Testing, Roma 2000.