IZABELA HAGER, *ihager@pk.edu.pl*
KATARZYNA KRZEMIEŃ
Politechnika Krakowska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych

METODA IMPACT-ECHO I WSTĘPNA PRÓBA JEJ ZASTOSOWANIA DO OCENY STOPNIA USZKODZEŃ BETONU PODDANEGO DZIAŁANIU WYSOKIEJ TEMPERATURY

THE IMPACT-ECHO METHOD AND PRELIMINARY ASSESSMENT OF ITS USEFULNESS FOR DIAGNOSIS THE DEGREE OF DAMAGE OF CONCRETE SUBJECTED TO THE HIGH TEMPERATURE

Streszczenie Referat stanowi w głównej mierze przegląd literaturowy, w którym omówiono dotychczasowe zastosowania metody impact-echo w diagnostyce uszkodzeń konstrukcji żelbetowych. Przedstawiono w niej teoretyczne podstawy metody oraz dotychczasowe standardowe jej zastosowania. Praca prezentuje również zrealizowane badania wstępne, które miały na celu weryfikację, czy za pomocą metody impact-echo możliwe jest identyfikowanie skutków poddania betonu działaniu wysokiej temperatury.

Abstract The paper is mainly the state-of-the-art which discusses the current use of impact-echo method in the diagnosis of damage to reinforced concrete structures. It also presents the theoretical basis of the method and summarizes its standard applications reported in publications. Additionally, paper presents the results of a preliminary study, aimed at verifying the usefulness of the impact-echo method for diagnosis the effects of high temperature on concrete.

1. Wprowadzenie

Wyniki badań betonu w konstrukcji, uzyskane za pomocą metod niszczących (statyczna próba ściskania, próba rozciągania itp.) oraz częściowo-niszczących (pull-out, pull-off, CAPO test itp.), pozwalają na lokalną ocenę stanu betonu w miejscu, w którym realizuje się badanie.

Naprzeciw ograniczeniom metod semi-niszczących i niszczących wychodzą metody badań stanu konstrukcji oparte na pomiarach nieniszczących. Wśród nieniszczących metod badań wykorzystuje się między innymi metody impulsowe. W nieniszczących badaniach diagnostycznych obiektów betonowych wykorzystuje się dwie ich odmiany od wielu lat znaną metodę ultradźwiękową, oraz stosunkowo słabo rozpowszechnioną w Polsce metodę młoteczkową, zwaną metodą impact-echo (IE) [1, 2, 3, 4].

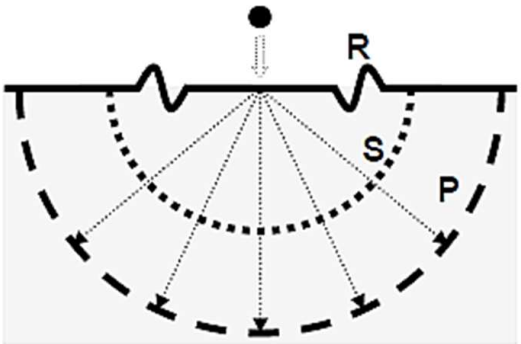
2. Podstawy teoretyczne metody impact-echo

Podstawę teoretyczną metody impact-echo stanowi zasada, że propagacja sprężystych fal mechanicznych w ciele stałym ma miejsce tylko wtedy, gdy siła działająca na ciało wywołuje w nim tylko sprężyste odkształcenia, a impuls wywołujący te odkształcenia jest możliwie krótkotrwały lub gwałtowny [5]. Metoda IE opiera się na zjawisku propagacji fali w ciele stałym, które pochodzą od krótkich impulsów wywołanych przez uderzenie mechaniczne [2]. Impuls wywoływany jest przez uderzenie stalowej kulki o średnicy od 3÷20 mm. Różne

średnice kulek (wzbudników) pozwalają osiągnąć odpowiedni czas impulsu oraz potrzebną niską jego częstotliwość (19-145 kHz) [5, 6]. Czas kontaktu t_c (rys. 2a) z powierzchnią betonu wynosi od 15÷100 μs [5], a zależność t_c od średnicy kulki ϕ w milimetrach jest wg [7] następująca:

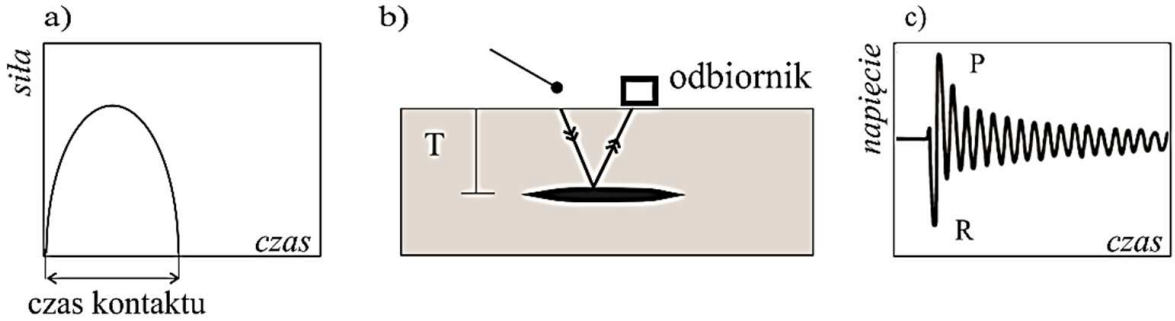
$$t_c = 4{,}3 \cdot \phi \tag{1}$$

Impuls mechaniczny generuje fale płaskie podłużne (P), fale poprzeczne (S) wnikające w głąb przekroju i rozchodzące się promieniście od punktu wzbudzenia oraz fale powierzchniowe Rayleigha (R), które rozchodzą się powierzchniowo (rys. 1).



Rys. 1. Fale zagęszczeniowe typu R, P i S wywołane impulsem na powierzchni płyty [8]

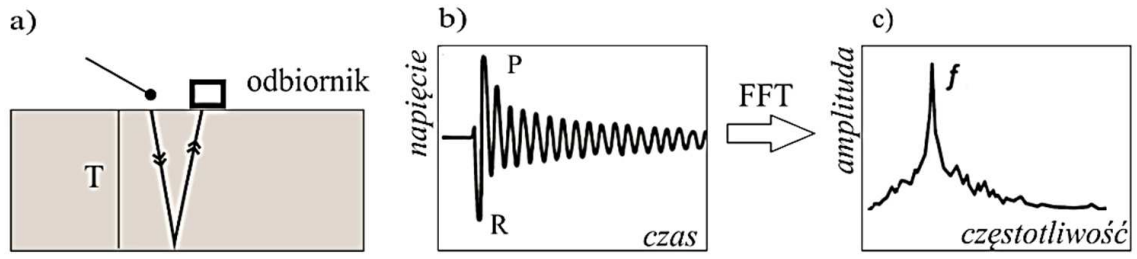
W pobliżu miejsca wywoływania impulsu umieszczony jest przetwornik, który rejestruje przemieszczenia powierzchni płyty wywołane dotarciem do powierzchni fal odbitych. Fale P i S wykorzystywane są do lokalizowania wad (pustek) ukrytych wewnątrz elementu, a także do określenia jego grubości. Fale typu P mają zasadnicze znaczenie w badaniach betonowych konstrukcji płytowych, ponieważ przemieszenia przez nie wywołane są znacznie większe niż te, spowodowane falami typu S, znajdującymi się w pobliżu miejsca impulsu [9]. Rys. 2 przedstawia przykład przebiegu badania metodą impact-echo płyty betonowej z dużą pustką powietrzną znajdującą się na głębokości T od powierzchni.



Rys. 2. Przebieg badania metodą impact-echo: a) impuls wywołany uderzeniem stalowej kulki o powierzchnię płyty, b) odbicie propagującej w materiale fali sprężystej od pustki powietrznej znajdującej się na głębokości T, c) rejestrowany przebieg sygnału w czasie

W lokalizacji wad w elemencie betonowym wykorzystuje się zjawisko zachodzące na granicy ośrodków charakteryzujących się zróżnicowaną gęstością, a więc i prędkością, z jaką rozchodzi się fala w tych ośrodkach. Ośrodki te można charakteryzować impedancją akustyczną Z (opornością falową). Kiedy fala sprężysta pada na granicę ośrodków beton-powietrze, gdzie impedancja betonu (Z_1 = 7÷10· 106 kg· m^{-2}· s^{-1} [10]) jest znacząco większa od impedancji

akustycznej powietrza (Z_2 = 0,4 kg·m^{-2}·s^{-1} [10]), wówczas energia wygenerowanej na powierzchni betonu fali podłużnej, wywołująca w materiale naprężenia ściskające, natrafiając na granicę ośrodków beton-powietrze, ulega niemal całkowitemu odbiciu, zmieniając fazę drgań. Odbita fala powraca do powierzchni w postaci fali, która teraz wywołuje w materiale naprężenia rozciągające (fala rozgęszczeniowa) [5]. Fale ulegają wielokrotnemu odbiciu od innych powierzchni elementu jak i od wad strukturalnych mających inne impedancje akustyczne (rys. 3a).



Rys. 3. Zasada analizy częstotliwości: a) schemat odbicia fali od dna elementu o grubości T, b) przebieg napięcia (amplitudy) w czasie, c) wykres spektrum częstotliwościowego.

Częstotliwość fali P docierająca do przetwornika jest określona przez przekształcenie z zapisanego w funkcji czasu sygnału (wykres 3b) w dziedzinę częstotliwości (rys. 3c) stosując matematyczną analizę sygnału Otrzymanie informacji o częstotliwości fali wymaga przekształcenia sygnału przedstawionego w funkcji czasu do dziedziny częstotliwości. Standardowo w większości programów, w które wyposażone są komercyjne urządzenia impact-echo dokonuje się transformacji na drodze analizy Fouriera (FFT). W publikacjach znaleźć można również alternatywne sposoby analizy sygnału przy użyciu analizy falkowej [11, 12, 13].

Częstotliwości odpowiadające pikowi amplitudy na wykresie spektrum odpowiadają dominującym częstotliwościom w całym przebiegu impulsu. Jeśli prędkość C_p fali P w badanym obiekcie jest znana, a częstotliwość odbicia fali od wewnętrznego defektu lub dolnej powierzchni oznaczymy jako f, to głębokość wewnętrznej wady lub grubość płyty T można wyznaczyć jako:

$$T = \frac{C_p}{2f} \tag{2}$$

Częstotliwość fal odbitych f jest zatem równa:

$$f = \frac{C_p}{2T} \tag{3}$$

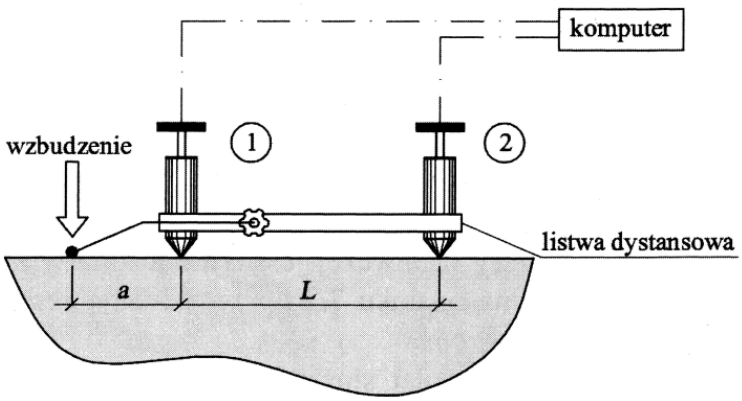
Według [7] częstotliwość f jest zależna od geometrii elementu, co można uwzględnić mnożąc wartość otrzymaną ze wzoru (3) przez współczynnik β, który zmienia się w zależności od kształtu przekroju badanego elementu (tab. 1).

Tabela 1. Wartości współczynnika β w zależności od geometrii elementu [7]

Płyty	0,96
przekroje kwadratowe	0,87
przekroje prostokątne o proporcji boków 0,6÷0,2	0,75

Do prawidłowej diagnostyki konieczne jest określenie prędkości propagacji fal sprężystych P w badanym materiale. W [5] podano metody pomiaru prędkości fali. Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest bezpośredni pomiar powierzchniowy przejścia czoła fali [5] (rys. 4). Według tej metody mierzy się czas przejścia fali pomiędzy dwoma piezoelektrycznymi czujnikami umieszczonymi od siebie w znanej odległości L (najczęściej 300 mm). Odległość źródła impulsu od najbliższego czujnika musi być wystarczająco duża, aby oddzielić fale Rayleigha, których prędkości są mniejsze. Wystarczające jest zwykle stosowanie dystansu a =150 mm. Prędkość C_p ustala się jako iloraz drogi do czasu przejścia fali pomiędzy dwoma czujnikami:

$$f = \frac{C_p}{2T} \tag{4}$$



Rys. 4. Bezpośredni sposób pomiaru prędkości fali podłużnej C_p [5]

Innym sposobem jest określenie prędkości fali C_p na podstawie przekształcenia wzoru (2). Potrzebną do obliczenia prędkości wartość częstotliwości f należy odczytać jako odpowiadającą maksymalnej amplitudzie drgań na wykresie spektrum. Badanie częstotliwości należy przeprowadzić na elemencie o znanej grubości T. Prędkość C_p ustala się następująco:

$$C_p = \frac{2fT}{\beta} \tag{5}$$

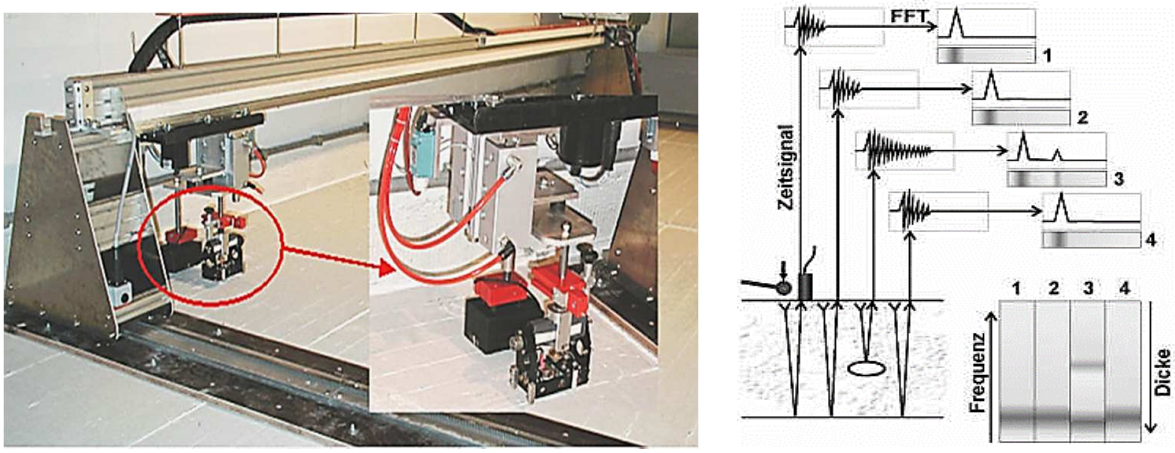
gdzie β jest wspomnianym współczynnikiem kształtu (tabl. 2).

3. Stosowany sprzęt i dotychczasowe zastosowania metody impact-echo

Dostępne na rynku podstawowe zestawy aparatury do badań metodą impact-echo (Impact-echo Instruments [14], NDT James Instruments [15] oraz DOCter Germann Instruments [16]) składają się zwykle z kompletu stalowych kulek o zróżnicowanych średnicach (3÷20 mm). Kulki są zwykle zamocowane na krótkim ramieniu lub na specjalnym uchwycie typu Spider (rys. 5a), który gwarantuje odpowiedni dystans od impulsu do odbiornika. Nieodłącznym elementem zestawu są cylindryczne czujniki piezoelektryczne, które odbierają sygnały w postaci drgań powierzchni i zamieniają je na prąd elektryczny o napięciu proporcjonalnym do amplitudy drgań (rys. 5b). Pomiar prędkości propagacji fali umożliwia dołączana do aparatury listwa dystansowa, w której umieszcza się dwa czujniki piezoelektryczne w odległości 300 mm od siebie. Dodatkowo aparatura do badań metodą IE posiada niezależny, pojedynczy czujnik umożliwiający rejestrację powracających fal odbitych. Urządzenie wyposażone jest w odpowiednie oprogramowanie, zwykle dostarczane na dołączonym do zestawu laptopie pozwalające na analizę wyników oraz ich archiwizację.

Rys. 5. Dostępne na rynku zestawy Impact-echo: a) uchwyt na czujnik i dystansowniki dla kulek typu Spider [16], b) urządzenie NDT James Instruments [15], c) kompaktowy zestaw. Elektroniczny impactor DAI-I, urządzenie sterujące i rejestrujące wyniki Impact-Echo [17]

Prototypowe, kompaktowe urządzenie impact-echo powstało w 2003 roku. System pomiarowy opracowany został przez zespół badaczy z Uniwersytetu w Stuttgarcie [17]. System pozwala na dokładny pomiar czasu wystąpienia impulsu wzbudzającego, dzięki czemu system pomiaru prędkości przy użyciu dwóch czujników jest zbędny. Do wzbudzania impulsów zastosowano generator sterowany przez komputer zapewniając użytkownikowi możliwość realizacji powtarzalnych pomiarów. Sterowanie badaniem i rejestracja wyników odbywa się poprzez oprogramowanie, w które wyposażony jest komputer przenośny. Całkowity ciężar tego kompaktowego systemu nie przekracza 3 kg (rys. 5c) [17].



Rys. 6. System umożliwiający realizację pomiarów impact-echo w sposób zautomatyzowany, BAM Berlin [18]

W badaniach realizowanych w BAM Berlin (Federal Institute for Material Research and Testing) zmodyfikowano sposób realizacji pomiarów oraz zbierania wyników. Pomiary impact-echo odbywają się punkt po punkcie, w sposób zautomatyzowany stosując urządzenie o napędzie pneumatycznym (rys. 6). Taka metoda zbierania informacji umożliwia zeskanowanie całej powierzchni elementu i uzyskanie echogramów prezentujących w skali koloru obrazu 3D przedstawiającego badany element betonowy wraz z lokalizacją uszkodzeń i nieciągłości.

Prekursorami metody impact-echo był zespół Sansalone i Carino z Cornell University w USA, który w 1986 roku zrealizował program badawczy mający na celu rozpoznanie możliwości wykorzystania w diagnostyce betonu fal o niskiej częstotliwości i zjawiska odbicia impulsowo wzbudzonej fali sprężystej [1, 9].W 1998 r. zespół Sansalone et al. [19]

na podstawie czasu przejścia fali sprężystej i naprężeń generowanych przez impuls, opracował metodę określania głębokości rys powierzchniowych. Wynikiem prowadzonych badań było stworzenie metody i aparatury badawczej (Impact-Echo Instruments, LLC [20]) pozwalających na wskazanie obecności wad i pustek w badanym elemencie na podstawie analizy rejestrowanej fali sprężystej. Jak dotąd prowadzone badania wykazały przydatność metody do:

– pomiaru grubości elementu betonowego [4, 9, 21, 22];
– lokalizacji delaminacji w elementach betonowych [4, 7, 9, 21, 22];
– określenia stopnia zagęszczenia betonu [1, 23];
– określania głębokości rys powierzchniowych w płytach betonowych [19];
– oceny jakości zespolenia w układach naprawczych [8];
– detekcji odspojenia betonu od zbrojenia, spowodowanej np. korozją stali [24, 25];
– oceny jakości wypełnienia kanałów zaczynem cementowym w elementach kablobetonowych [3, 4, 22, 26, 27];
– pośredniej oceny wytrzymałości mechanicznej betonów cementowych we wczesnym okresie dojrzewania [14, 28];
– oceny stopnia uszkodzenia betonów działaniem pożaru [13].

Większość raportów i publikacji poświęconych metodzie impact-echo dotyczy zastosowania metody IE do określenia głębokości, na której zlokalizowana jest nieciągłość, lub grubości warstwy materiału przy jednostronnym dostępie do elementu [1, 3, 19, 23]. W przedstawionej powyżej liście zastosowań metody impact-echo dwie ostatnie pozycje dotyczą oceny wytrzymałości betonu [28] lub prób określenia stopnia degradacji materiału w wyniku działania wysokiej temperatury [13]. W publikacji [28] oraz w [14] autorzy zajęli się określeniem zależności pomiędzy prędkością rozchodzenia się fali sprężystej i wytrzymałością betonu w początkowym okresie dojrzewania. Zaobserwowano wyraźne różnice w prędkości rozchodzenia się fali w zależności od czasu tężenia mieszanki betonowej. Zrealizowane badania [14] pozwoliły na wyznaczenie zależności między wytrzymałością a prędkością fali C_p.

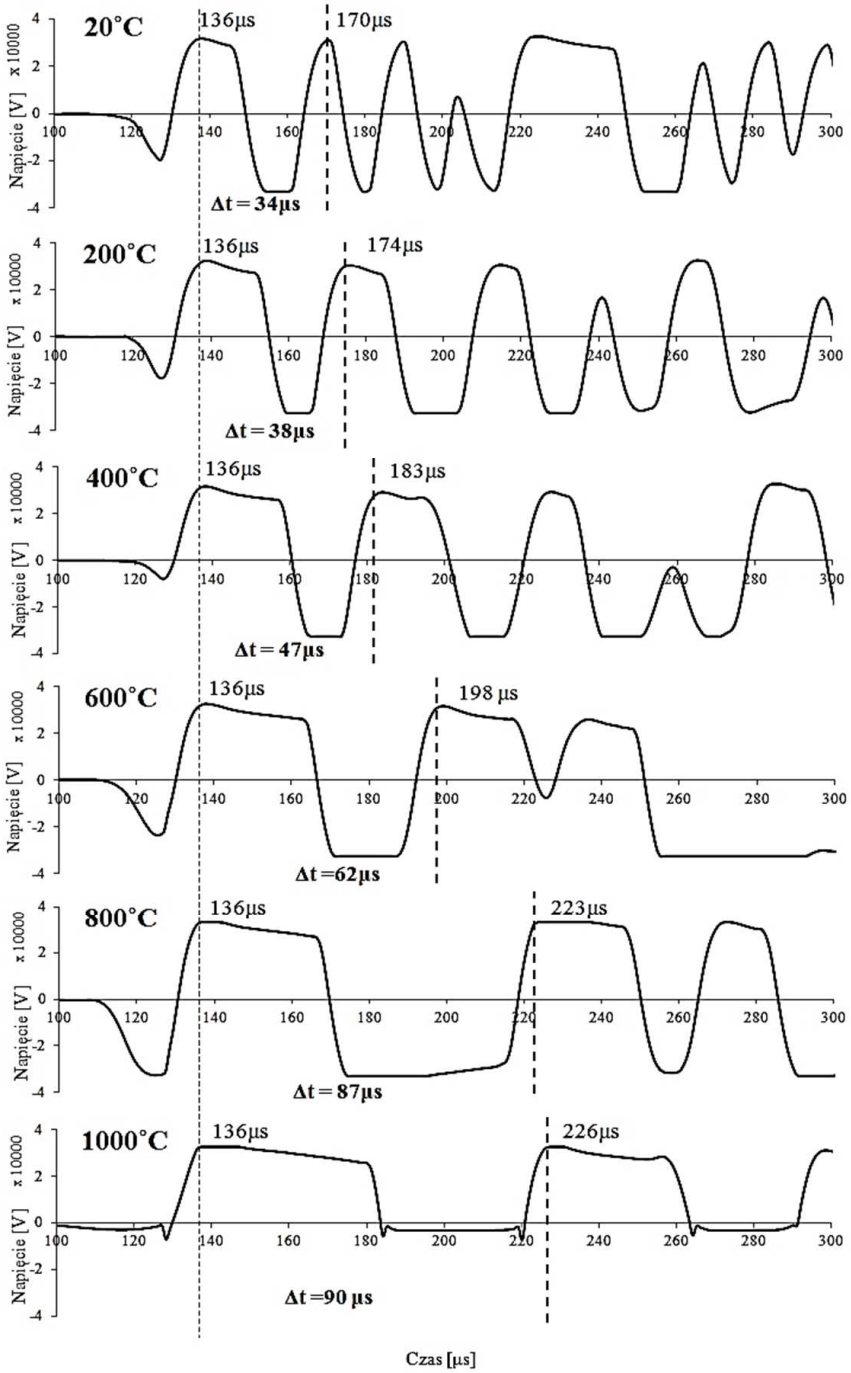
Próbę zastosowania metody impact-echo w diagnostyce betonów uszkodzonych działaniem pożaru podjęto w [13]. Badano cztery słupy, o różnym stopniu uszkodzenia działaniem wysokiej temperatury. Jak można było się spodziewać, prędkość propagacji fali spada wraz ze wzrostem stopnia destrukcji materiału. Innym parametrami, których wartości są proporcjonalne do stopnia zniszczenia konstrukcji jest wartość maksymalnej częstotliwości drgań oraz czas przejścia fali sprężystej.

Powyższe zestawienie wskazuje na szeroki i nadal rozwijający się zakres zastosowań metody impact-echo w diagnostyce konstrukcji żelbetowych.

4. Wstępna ocena przydatności metody impact-echo do diagnozowania efektów działania na beton wysokiej temperatury

Przeprowadzone badania dotyczyły betonu wysokowartościowego wykonanego z cementu CEM III/A 42,5 N Małogoszcz, piasku rzecznego 0/2 mm i grysu bazaltowego 2/16 mm. Skład betonu charakteryzował wskaźnik wodno-cementowy w/c = 0,30. Dla uzyskania odpowiedniej konsystencji stosowano domieszkę superplastyfikatora na bazie eterów karboksylowych.

Wykonane próbki kostkowe o boku 15 cm ogrzewano do temperatury z zakresu 200÷1000°C ze stałą prędkością ogrzewania 0,5°C/min. Po osiągnięciu temperatury docelowej i izotermicznym wygrzewaniu w czasie 3 godziny, prowadzonym w celu ustabilizowania temperatury w całej objętości, próbki swobodnie wystudzono do temperatury pokojowej. Badania metodą impact-echo prowadzono przy użyciu urządzenia Vu-Con. Badania wykonano używając wzbudnika o średnicy 4 mm.



Rys. 7. Przebiegi zmian napięcia (amplitudy) w czasie dla betonu nieuszkodzonego 20°C i uszkodzonego działaniem temperatury 200, 400, 600, 800 i 1000°C

Wyniki pomiarów, w postaci przebiegów zmian napięcia (amplitudy) przedstawiono na rys 7. Jak widać, na skutek poddania materiału działaniu wysokiej temperatury i powstałych w nim uszkodzeń (dehydratacja zaczynu cementowego, powstanie mikrorys [29]) następuje wyraźna zmiana charakteru sygnału fali mechanicznej, rejestrowanej w postaci zależności napięcie – czas.

Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania wyraźnie maleje zdolność materiału do propagacji fali mechanicznej, która dociera do dna próbki i ulega odbiciu. Jest to oczywiście związane z uszkodzeniami powstającymi w materiale. Parametrem reagującym na wywołane

ogrzewaniem zmiany w materiale, jest odległość między dwoma kolejnymi czasami dotarcia fali P do czujnika, oznaczona na rys. 7 jako Δt. Odległość ta wynosi 34 μs dla materiału niewygrzewanego (nieuszkodzonego) i wzrasta wraz z temperaturą ogrzewania osiągając wartości 87 μs i 90 μs odpowiednio dla temperatury 800°C i 1000°C.

5. Podsumowanie

Pomiar metodą impact-echo pozwala na rejestrację sygnału fali mechanicznej wywołanej uderzeniem stalowej kulki oraz jej echa. Dzięki odpowiedniej analizie sygnału z wykorzystaniem analizy Fouriera lub analizy falkowej możliwe jest określenie grubości elementu jak również stwierdzenie obecności wad i nieciągłości w nim obecnych. Analizy numeryczne, pomimo zaawansowanych podstaw teoretycznych, są przyjazne w zastosowaniu przez użytkownika, dzięki programom dołączanym w zestawie urządzenia.

Metoda IE jest szeroko stosowana w USA, posiada zamocowanie normatywne ASTM [30] i często stosowana jest do lokalizacji wad w betonie, ocenie jakości zespolenia czy określeniu grubości elementów konstrukcyjnych. Wciąż jednak trwają prace badawcze mające na celu zwiększenie efektywności realizowanych badań poprzez zautomatyzowanie pomiarów (roboty skanujące) jak również usprawnienie sposobów interpretacji wyników. Na uwagę zasługuje między innymi zastosowanie metody zbierania pomiarów z powierzchni poprzez zastosowanie automatu pozwalającej na realizację pomiarów punkt po punkcie, a w konsekwencji na uzyskanie obrazu przedstawiającego badany element betonowy w 3D, uwidaczniającego obecność nieciągłości w postaci rozwarstwień i pustek.

Dokonany przegląd literaturowy wskazuje na szeroką i nadal rozwijającą się gamę zastosowań metody impact-echo jak również metod analizy sygnału impact-echo. Warto podkreślić, że w porównaniu z metodą ultradźwiękową, w metodzie impact-echo obecność stali zbrojeniowej nie wpływa na przebieg i wyniki badania konstrukcji żelbetowych. Dodatkowo, metoda może być stosowana w każdej płaszczyźnie konstrukcji, także przy jednostronnym do niej dostępie. Duża łatwość realizacji pomiarów oraz całkowicie nieniszczący charakter tej metody są jej najważniejszymi zaletami.

Jak pokazały wyniki przedstawionych w referacie badań, na skutek ogrzewania materiału i powstałych uszkodzeń następuje wyraźna zmiana charakteru sygnału fali mechanicznej, rejestrowanej w postaci zależności natężenie-czas. Potwierdza to przypuszczenie, że metoda impact-echo stanowić może efektywne narzędzie diagnostyczne pozwalające na ocenę stopnia degradacji materiału. Uzyskane wyniki uzasadniają celowość kontynuacji badań, których celem byłoby określenie na drodze doświadczalnej wzajemnych relacji pomiędzy parametrami sygnału (amplituda, częstotliwość, czas przejścia fali, prędkość fali odbitej) i parametrami mechanicznymi badanego materiału. Takie „wyskalowanie” metody istotnie rozszerzyłoby możliwości jej stosowania i wykorzystania w popożarowej diagnostyce betonu w konstrukcji.

Podziękowania

W referacie wykorzystano wyniki badań realizowanych w ramach projektu badawczego N N506 045040, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Literatura

1. Sansalone M., Carino N.: „Detecting delaminations in reinforced concrete slab with and without asphalt overlays using impact-echo method,” ACI Materials J., tom 86, pp. 175-184, 1989.

2. Carino N.: „The impact-echo methos: an overview," National Institute of Standards and Technology, USA, 2001.
3. Moczko A., Moczko M.: „Możliwości wykorzystania metody impact-echo do lokalizacji wad w kablobetonowych konstrukcjach mostowych," w 30 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących CD, Szczyrk, 2001.
4. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: „Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda młoteczkowa (cz. II)," Przegląd Budowlany, 10 2007.
5. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka Konsktrukcji Żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali. Tom I, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
6. Goldsmith W.: „Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids," Edward Arnold Press, pp. 24-50, 1965.
7. Sansalone M., Streett W.: „Impact-echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry," Bullbrier Press, Ithaca, 1997.
8. Piotrowski T.: „Zastosowanie analizy sygnału impact-echo do oceny zespolenia w układach naprawczych betonu," Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa, 2009.
9. Sansalone M., Carino N.: „Impact-echo: a method for flaw detection in concrete using transient stress waves.," NBSIR 86-3452, Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, 1986.
10. Sansalone M., Carino N.: „Stress Wave Propagation Methods," w Handbook on Nondestructive Testing of Concrete,, Boca Raton, FL, Ed. V.M. Malhotra and N.J. Carino, CRC Press,, 1991, pp. 275-304.
11. Białasiewicz J.T.: Falki i aproksymacje, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
12. Yeh P.-L., Liu P.-L.: „Application of the wavelet transform and the enhanced Fourier spectrum in the impact echo test," NDT&E International, tom 2008, nr 41, pp. 382-394, 2008.
13. Epasto G., Proverbio E., Venturi V.: „Evaluation of fire-damaged concrete using impact-echo method," Materials and Structures, nr 43, pp. 235-245, 2012.
14. Pessiki S., Johnson M.: „ondestructive Evaluation of Early-Age Concrete Strength in Plate Structures by the Impact-Echo Method," Materials Journal, American Concrete Institute, tom 93, pp. 260-271, May-June 1996.
15. NDT James Instruments, 11 October 2012. [Online]. Available: http://www.ndtjames.com/.
16. Germann Instruments, 18 December 2012. [Online]. Available: http://www.germann.org/.
17. Motz M., Kruger M., Grosse C., Haller P., Beutel R.: „Impact-Echo: New Developments Regarding Hardware and Software," w Intern. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Proceedings BB 85-CD, Berlin, 2003, [Available Online]: www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v042/v042.htm.
18. Wiggenhauser H.: „Advanced NDT methods for the assessment of concrete structures," Concrete Repair, Rehabilitation and Refrofitting II - Alexander et al. (eds), 2009.
19. Sansalone M., Lin J.-M., Streett W.B.: „Determining the Depth of Surface-Opening Cracks Using Impact-Generated Stress Waves and Time-of-Flight Techniques," ACI Materials Journal, tom 95, nr 2, pp. 168-177, 1989.
20. Impact-Echo Instruments, 2012 10 18. [Online]. Available: http://www.impact-echo.com/.
21. Aktas C.B.: „Determining the thickness od concrete pavements using impact-echo test method," Graduate School of Natural and Applied Sciences, 2007.
22. Breysse D.: Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques: State-Of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR, 2012.

23. Garbacz A.: „Evaluation of industrial floor qualitywith impact-echo," Theoretical Foundation of Civil Engineering, Polish-Lithanian Transactions, tom 16, pp. 413-420, 2008.
24. Cheng C., Sansalone M.: „The effects of steel bars and cracking around bars on impact-echo signals," ACI Materials J., tom 90, pp. 421-434, 1993.
25. Liang M., Su P.: „Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using impact-echo method," Cement and Concrete Research, pp. 1427-1436, 2001.
26. Krause M., Barmann M., Frielinghaus R. i in:, „Comparison of pulse-echo methods for testing concrete," NDT&E International, tom 30, nr 4, pp. 135-204, 1997.
27. Ohtsu M., Alver N.: „Development of non-contact SIBIE procedure for identifying ungrouted tendon duct," NDT & E International, tom 42, nr 2, pp. 120-127, 2009.
28. Lee H.-K., Yim H., Lee K.-M.: „Velocity-Strength Relationship of Concrete by Impact-Echo Method," ACI Materials Journal, tom 100, nr 1, pp. 49-54, 2003.
29. Hager I.: „Behaviour of cement concrete at high temperature," Bulletin of The Polish Academy of Sciences, 2013 (in press).
30. ASTM C1383-04,, „Standard test method for measuring the p-wave speed and the thickness of concrete plates using the impact-echo method," ASTM International, West Conshohocken, USA.