

dr inż. Grzegorz Adamczewski*
 dr hab. inż. Andrzej Garbacz, prof. PW*
 dr inż. Tomasz Piotrowski*
 mgr inż. Kamil Załęgowski*

Zastosowanie komplementarnych metod NDT w diagnostyce konstrukcji betonowych

Application of combined NDT methods for assessment of concrete structures

Zgodnie z normą PN-EN 1504-9, diagnostyka konstrukcji jest niezbędnym elementem strategii ogólnie rozumianych działań naprawczych [1]. Przeprowadzone obserwacje i badania mają na celu ustalenie i zarejestrowanie natury i przyczyny wad, ocenę przybliżonego stopnia i prawdopodobnej szybkości rozwoju uszkodzeń oraz oszacowanie, jak długo element lub konstrukcja betonowa zachowa przewidzianą użyteczność bez dodatkowej ochrony lub naprawy (poza konserwacją istniejących systemów).

Badania diagnostyczne dzielą się na dwie zasadnicze grupy: **strukturalne i materiałowe** [2, 3]. Do oceny stanu materiału najczęściej stosowane są metody małoniszczące i nieniszczące [4–6]. Ich zalety, to możliwość prowadzenia badań bezpośrednio na obiekcie, szybkiego uzyskiwania wyników oraz wielokrotnego powtarzania pomiarów w tym samym miejscu, również w trakcie użytkowania obiektu (monitorowanie stanu obiektu). W ostatnich latach notuje się wzrost zainteresowania stosowaniem metod nieniszczących zarówno do oceny stanu technicznego konstrukcji istniejących, jak i kontroli skuteczności przeprowadzonej naprawy [7, 8].

Metody komplementarne (kombinowane)

Ograniczenia w stosowaniu poszczególnych metod sprawiają, że w celu zwiększenia wiarygodności badań metodami nieniszczącymi coraz częściej stosuje się jednocześnie kilka metod, tzw. metody kombinowane. Można wyróżnić kilka wariantów tego rodzaju badań [8–10]:

- wykorzystanie różnych parametrów wyznaczonych daną metodą, np. prędkość i amplituda fali ultradźwiękowej;
- stosowanie dwóch lub więcej metod NDT (np. sklerometryczna, ultradźwiękowa, pull-out), ale ocena stanu betonu w konstrukcji prowadzona jest niezależnie na podstawie zależności empirycznych wyznaczonych dla danej metody;
- stosowanie dwóch lub więcej metod NDT, ale wyniki poszczególnych badań analizowane są łącznie, wyznaczając związki statystyczne wielu zmiennych.

W celu zwiększenia precyzji wnioskowania stosuje się również sztuczne sieci neuronowe [11]. Aktualne trendy rozwoju nieniszczących metod badania betonu skoncentrowane są na zautomatyzowaniu badań prowadzonych poszczególnymi metodami. Obecnie kilka ośrodków w Niemczech prowadzi prace nad skonstruowaniem skanera, który umożliwiłby wykonywanie badań kilkoma metodami [12].

W artykule zaprezentowano wyniki badań nieniszczących modelowych elementów betonowych za pomocą prototypu skanera UIR zaprojektowanego i wykonanego na Politechnice Warszawskiej.

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Badania elementów betonowych skanerem UIR

Zintegrowany system pomiarowy „UIR-skaner” przewidziano do kompleksowej oceny jakości posadzek przemysłowych, płyt mostowych, nawierzchni drogowych oraz innych betonowych elementów płytowych, za pomocą trzech komplementarnych metod nieniszczących: ultradźwiękowej (U), impact-echo (IE) i ground penetrating radar (GPR).

Metoda GPR jest metodą bezkontaktową, której zasada działania jest bardzo zbliżona do najczęściej stosowanej w defektoskopii ultradźwiękowej metody echa, lecz zamiast fal sprężystych wykorzystuje się fale elektromagnetyczne [4]. Sygnały elektromagnetyczne emitowane są z poruszającego się bezpośrednio po badanej powierzchni zestawu anten i propagują się w badanym ośrodku. Następnie odbijają się od granic pomiędzy obszarami o różnej stałej dielektrycznej. Różnica właściwości dielektrycznych dwóch materiałów determinuje ilość odbitej energii fali, która jest rejestrowana przez antenę. W budownictwie radar wykorzystywany jest do wykrywania rozwarstwień i wad, lokalizacji prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych, pomiaru grubości nawierzchni drogowych, określania zawartości wilgoci i zawartości chlorków.

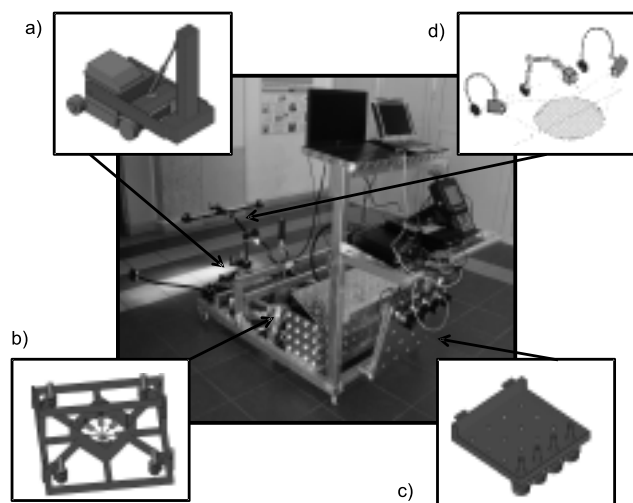
Metoda Impact-echo (IE) wykorzystuje fale sprężyste generowane w wyniku uderzenia stalową kulką w badaną powierzchnię. Wytworzone w ten sposób fale o stosunkowo dużej długości są mniej wrażliwe na naturalną niejednorodność betonu. Fale sprężyste rozchodzą się w elemencie i ulegają odbiciu od zewnętrznych powierzchni ograniczających lub od wewnętrznych wad struktury betonu. Odbite fale są rejestrowane przez głowicę odbiorczą, umieszczoną w sąsiedztwie miejsca uderzenia. Interpretacja wyników polega na jednoczesnej analizie sygnału oraz widma częstotliwości. Metoda IE stosowana jest do wykrywania defektów w elementach betonowych (np. rozwarstwień, wad, pęknięć, odspojień), szacowania grubości płyt betonowych, kontroli jakości zespolenia w układach wielowarstwowych, określania głębokości pęknięć powierzchniowych. Metodą tą można wykrywać wady ulokowane stosunkowo głęboko. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod ultradźwiękowych nie wymaga ona stosowania akustycznych środków sprzęgających.

Ultradźwiękowa metoda pomiaru czasu przejścia przez podłużną falę ultradźwiękową znanej odległości w badanym ośrodku należy do najstarszych i najprostszych metod badania materiałów. W przypadku betonów najczęściej stosuje się bezpośrednią metodę przepuszczania podłużnych fal ultradźwiękowych, w której głowica nadawcza i odbiorcza umiejscowione są na przeciwnych powierzchniach badanego elementu. W przypadku skanera UIR można jedynie rozważać przydatność metody pośredniej,

gdzie obie głowice usytuowane są po tej samej stronie badanego elementu. Ze względu na trudność dokładnego określenia drogi fali, zgodnie z PN-EN 12504-4, wskazane jest prowadzenie pomiarów przy zmiennym rozstawie głowic.

Opis skanera UIR

Opracowany na Politechnice Warszawskiej zintegrowany mobilny system pomiarowy (fotografia) wykorzystuje trzy komplementarne metody podczas jednego cyklu skanującego. Moduł UIR skanera do badań GPR umożliwia podnoszenie i opuszczanie anteny w zależności od potrzeb diagnostycznych, a także odpowiedni docisk wózka anteny do podłoża. Moduł GPR pozwala na ciągłą rejestrację sygnału, na podstawie którego operator może zwrócić uwagę na elementy charakterystyczne dla wybranych defektów.



Prototyp skanera UIR: a) moduł GPR; b) moduł IE; c) moduł UP-V; d) moduł rejestracji obrazu

Moduł skanera do badań impact-echo składa się ze zlokalizowanego centralnie układu wzbudzającego falę sprężystą przez uderzenie stalowej kulki o powierzchnię badanego elementu oraz czterech piezoelektrycznych odbiorników, pozwalających na rejestrację sygnału w czterech punktach. Taki układ pomiarowy zaprezentowano na podstawie symulacji komputerowej MES. Układ wzbudzający falę sprężystą zapewnia możliwość stosowania różnych średnic impaktora (kulki) w zależności od układu geometrycznego badanego obiektu. Uderzenie generowane jest automatycznie z poziomu panelu sterowania skanera. Cały moduł IE opuszczany jest z poziomu zerowego do poziomu badawczego za pomocą dźwigni zlokalizowanej przy panelu sterowania skanerem.

Moduł do badań ultradźwiękowych zapewnia możliwość pomiaru w danym punkcie za pomocą minimum czterech głowic o częstotliwości 100 kHz, z możliwością rozszerzenia układu o kolejne głowice. W zaprojektowanym układzie jedna głowica jest głowicą nadawczą, a pozostałe to głowice odbiorcze zlokalizowane w linii prostej w stałej odległości od siebie. Na podstawie analizy danych literaturowych oraz na podstawie badań własnych zaproponowano odległość między osiami głowic równą 10 cm. Platforma do umieszczania głowic zapewnia możliwość pomiaru zarówno w kierunku przemieszczania się UIR skanera prostopadłe do kierunku ruchu, a także w linii po kątem 45° w stosunku do kierunku ruchu skanera.

Konstrukcja urządzenia pozwala na niezależny montaż poszczególnych modułów diagnostycznych, a maksymalne wymiary ska-

nera w planie wynoszą 800 mm x 1500 mm, co umożliwia swobodny jego przejazd przez typowe drzwi wewnętrzne. Prototyp wyposażono w jednostkę komputerowego wspomaganie prowadzenia badań i rejestracji uzyskanych wyników oraz ich analizy i wizualizacji. Dodatkowym wyposażeniem skanera jest moduł do rejestracji obrazu badanej powierzchni i lokalizacji punktów pomiarowych.

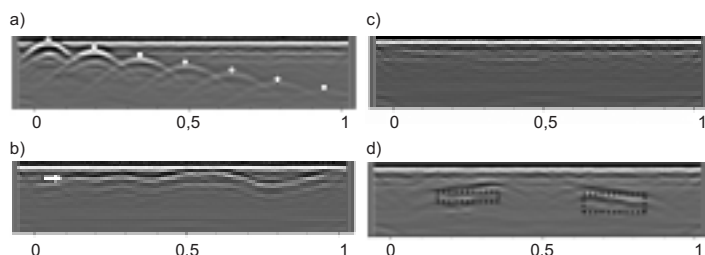
Wyniki badań betonowych elementów modelowych

Jako elementy modelowe do badań przygotowano 13 płyt z betonu (o wymiarach 1200 x 800 x 200 mm), zawierających pręty zbrojeniowe zróżnicowane pod względem średnicy, rozstawu oraz grubości otuliny, a także celowo umieszczone elementy symulujące typowe wady betonu, takie jak delaminacje i wady zagęszczenia (tabela, rysunek 1).

W badaniach metodą GPR wykorzystano radar wyposażony w antenę o częstotliwości 1,6 GHz. Zastosowanie tego typu wysokoczęstotliwościowej anteny ułatwia uzyskanie czytelnych falogramów, dzięki czemu pręty zbrojeniowe zlokalizowane w przypowierzchniowej strefie elementów modelowych są łatwe w identyfikacji. Wraz ze wzrostem zagłębienia obiektów ich lokalizowanie dość szybko ulega jednak utrudnieniu (rysunek 1a). W przypadku elementów zbrojonych siatką górną i dolną, siatka dolna zbrojenia pozostaje niewidoczna ze względu na obecność zbrojenia znajdującego się wyżej. Zastosowanie metody radarowej do wykrywania delaminacji było możliwe w przypadku, kiedy delaminację stanowi warstwa wykonana z folii bąbelkowej (rysunek 1b). W przypadku folii gładkiej nie jest ona bowiem wyraźnie widoczna na falogramach (rysunek 1c), które przedstawiają obraz podobny do elementu referencyjnego. Wady w postaci braku zagęszczenia są wyraźnie widoczne, jednak w przypadku wady umiejscowionej na większej głębokości można zaobserwować osłabienie sygnału (rysunek 1d).

Charakterystyka elementów modelowych

Nr	Rodzaj zbrojenia / symulowana wada	Wymiary [mm]	Głębokość od powierzchni [mm]
1	Zbrojenie (siatka 15 x 15 cm)	górne \varnothing 8 dolne \varnothing 12	30
2	Zbrojenie (siatka 15 x 15 cm)	górne \varnothing 8 dolne \varnothing 12	50
3	Zbrojenie (siatka 15 x 15 cm)	górne \varnothing 16 dolne \varnothing 12	30
4	Zbrojenie (siatka 15 x 15 cm)	górne \varnothing 16 dolne \varnothing 12	50
5	Zróżnicowana otulina prętów zbrojeniowych	\varnothing 12	25, 50, 75, 100, 125, 150, 175
6	Zróżnicowana otulina oraz rozstaw prętów zbrojeniowych	\varnothing 12	50, 150 Rozstaw: 20,40,70,100
7	Delaminacja (2 x folia gładka)	1000 x 600	50
8	Delaminacja (2 x folia gładka)	1000 x 600	100
9	Delaminacja (2 x folia bąbelkowa)	1000 x 600	50
10	Delaminacja (2 x folia bąbelkowa)	1000 x 600	100
11	Brak zagęszczenia (karton wypełniony kruszywem grubym)	300 x 200 x 20 300 x 200 x 50	50
12	Brak zagęszczenia (karton wypełniony kruszywem grubym)	300 x 200 x 20 300 x 200 x 50	100
13	Element porównawczy	–	–

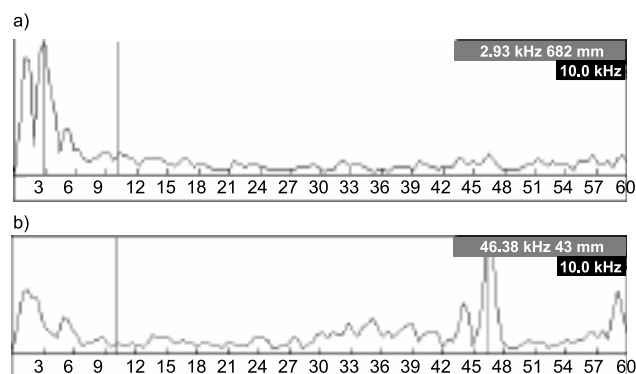


Rys. 1. Przykładowe falogramy uzyskane metodą GPR: a) płyta nr 5 ze zróżnicowaną grubością; b) płyta nr 7 – z folią gładką; c) płyta nr 9 z folią bąbelkową; d) płyta nr 12 z kartonami wypełnionymi kruszywem grubym (symulacją niezagęszczenia betonu)

Przeprowadzono badania metodą IE następujących płyt betonowych: płyty z dwiema warstwami gładkiej folii (płyta 7); płyty z dwiema warstwami z folii bąbelkowej (płyta 9) na głębokości 5 cm od powierzchni płyty. Przeprowadzono także badanie płyty zawierającej pudełka wypełnione luźnym kruszywem, imitującej lokalne niezagęszczenie mieszanki betonowej (płyta 12). Pik odpowiadający odbiciu od dna (spodu próbki) na głębokości 20 cm dla prędkości fali $c_p = 4000$ m/s wynosił 10 kHz.

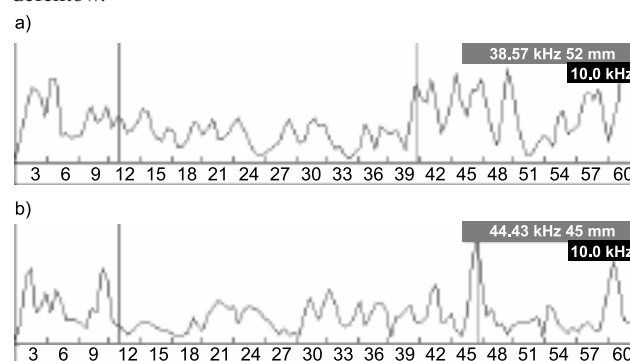
Analiza wyników badań płyt 7 i 9 może zostać przeprowadzona łącznie, gdyż ich geometria jest taka sama. Pierwsza z nich imituje płytką delaminację o zerowej grubości (rozwarstwienie), a druga płytką delaminację grubości 2 – 4 mm. Jeżeli delaminacja jest zlokalizowana blisko powierzchni, uderzenie stalowej kulki w metodzie IE generuje falę sprężystą, która wzbudza vibracje w warstwie przypowierzchniowej. W konsekwencji sygnał zawiera wyraźny pik o bardzo niskiej częstotliwości, który ma bardzo dużą amplitudę w porównaniu z zarejestrowanymi odkształceniami dla fali podłużnej P. W obu przypadkach w 90% zarejestrowanych sygnałów taki pik był widoczny (rysunek 2a), natomiast ok. 10% z nich dla płyty 7 zawierało także wyraźny pik odpowiadający odbiciu fali od delaminacji na głębokości ok. 5 cm (rysunek 2b). Uzyskane rezultaty potwierdzają skuteczność metody IE w detekcji płytkich delaminacji i świadczą o tym, iż metoda IE może być komplementarna do metody GPR, która nie pozwala na wykrycie tego typu defektów.

Obszar niezagęszczonego betonu zazwyczaj powoduje pojawienie się kilku pików o podwyższonej amplitudzie w obszarze odpowiadającym głębokości jego występowania. Ponadto w takim spektrum, obok typowego pików od wibracji, może występować przesunięty pik głębokości, który jest pikiem o dużej amplitudzie i częstotliwości mniejszej niż częstotliwość odpowiadająca odbiciu od dna. W takim spektrum często występuje też jeden lub kil-



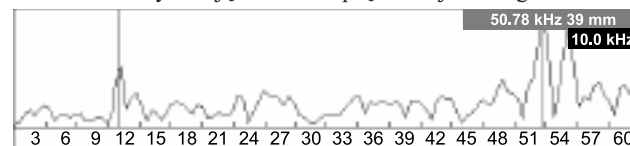
Rys. 2. Przykłady spektrum częstotliwości dla płyt 7 i 9: a) typowe spektrum dla płytkich delaminacji; b) spektrum z pikiem 46 kHz wskazującym na głębokość delaminacji – ok. 5 cm

ka pików odpowiadających odbiciu fali podłużnej P od powierzchni rozdziału głębokości odpowiadającej zakresowi głębokości występowania niezagęszczonego betonu (rysunek 3a). Jeżeli obszar ten jest odpowiednich rozmiarów, a jego granice dają się łatwo wyodrębnić, to może być brak pików od dna, a zidentyfikować można pik od jednej lub obu powierzchni rozdziału (rysunek 3b) między betonem niezagęszczonym i zagęszczonym. Uzyskane wyniki wskazują na skuteczność metody IE w wykrywaniu tego typu defektów.



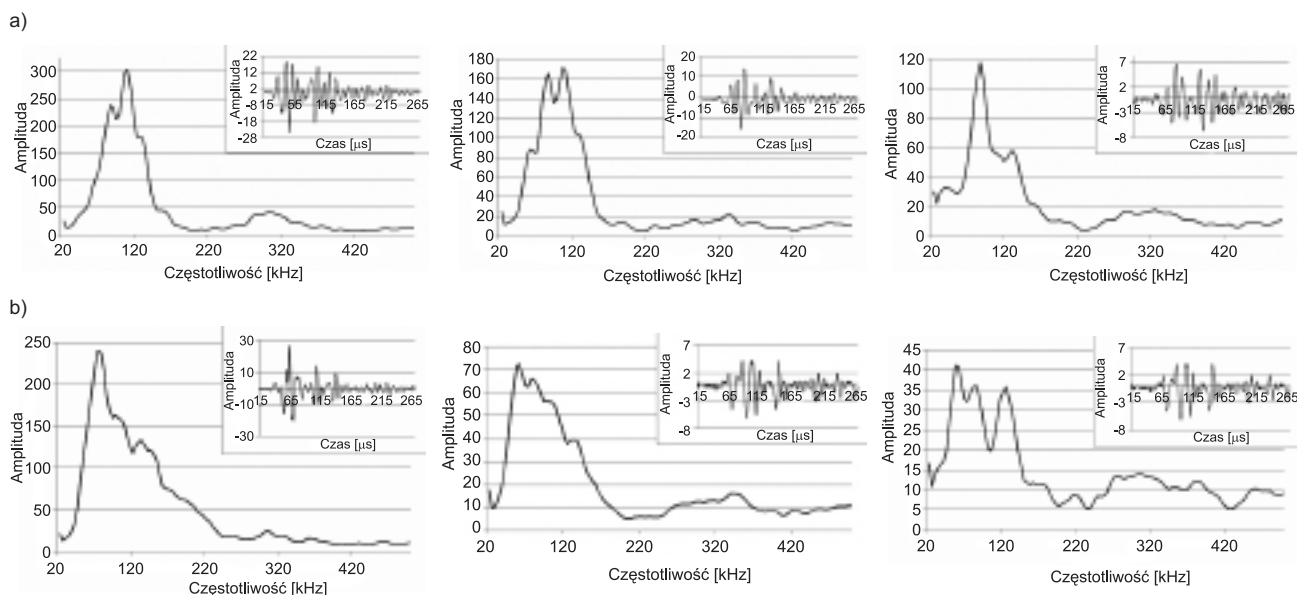
Rys. 3. Przykłady spektrum częstotliwości w przypadku płyty 12 (beton niezagęszczony): a) grupa pików w zakresie odpowiadającym głębokości występowania niezagęszczonego betonu; b) dwa pików odpowiadające powierzchni rozdziału między betonem niezagęszczonym i zagęszczonym

Pomimo że lokalizacja prętów zbrojeniowych nie jest podstawowym zakresem stosowania metody IE, to jest ona wrażliwa na ich obecność w betonie i należy to uwzględnić w analizie wyników. Detekcja prętów zbrojeniowych jest możliwa dla $D/t > 0,3$ (D – średnica pręta zbrojeniowego; t – grubość otuliny) i częstotliwość pików odbicia od takiego pręta f_{bar} można obliczyć ze wzoru $f_{bar} = \alpha c_p / 4t$ (c_p – prędkość fali podłużnej P [m/s]; t – grubość otuliny [mm]; α – współczynnik empiryczny zależny od stosunku D/t). Aby zweryfikować zdolność detekcji zbrojenia, przeprowadzono badania płyt 1 i 3 za pomocą kulki średnicy 2 mm. Ponieważ D/t dla układu zbrojenia tych płyt wynosi 0,3 i 0,5, to w spektrum częstotliwości zaobserwowano pik lub grupę pików w okolicy częstotliwości $f_{bar} \approx 50$ kHz (rysunek 4). Potwierdzono zatem konieczność uwzględnienia w analizie obecności zbrojenia, tak aby zaobserwowane pików nie zostały zakwalifikowane jako odpowiadające jakiemś defektowi. Zastosowanie metody GPR umożliwiłoby weryfikację obecności pręta zbrojeniowego.



Rys. 4. Przykład spektrum częstotliwości dla płyty 1 (wpływ zbrojenia): linia po lewej – pik od dna f_r , linia po prawej – pików od zbrojenia – f_{bar}

W badaniach metodą ultradźwiękową zastosowano metodę pośrednią, wykorzystując piezoelektryczne transmitery o częstotliwości 100 kHz, w obecności środków sprężających. Odległość między głowicami odbiorczymi i nadawczymi wynosiła 10, 15 lub 20 cm. Spektra częstotliwości uzyskane za pomocą szybkiej transformaty Fouriera są zróżnicowane (rysunek 5) i obecnie trudno jest podać ich jednoznaczną interpretację dla poszczególnych elementów modelowych. Wskazuje to na potrzebę dalszego udoskonalenia zarówno metody pomiarowej, jak i metod analizy sygnału.



Rys. 5. Przykłady sygnałów i widm częstotliwości zarejestrowane przy różnej odległości pomiędzy głowicami ultradźwiękowymi (odpowiednio 10, 15, 20 cm) w przypadku: a) płyty nr 7 z folią gładką oraz (b) płyty nr 13 – bez zbrojenia i defektów

Podsumowanie i wnioski

Mając na uwadze korzyści i ograniczenia wynikające z charakterystyki poszczególnych diagnostycznych metod nieniszczących, kluczowa staje się decyzja o odpowiednim doborze metod do przewidywanego zastosowania. W przypadku platformy komplementarnych metod nieniszczących, jaką jest skaner UIR, możliwe jest automatyczne eliminowanie ograniczeń danej metody diagnostycznej, stosując inną metodę.

Stosowanie metodyki wykorzystującej jednocześnie kilka metod diagnostyki nieniszczącej jest rozwiązaniem, które umożliwi obniżenie całkowitych kosztów prowadzenia badań diagnostycznych i pozwoli jednocześnie zwiększyć wiarygodność oceny stanu obiektów budowlanych i będącego wynikiem tej oceny doboru metody naprawy. Ograniczy to nie tylko koszty materiałowo-technologiczne naprawy, ale również koszty społeczne związane z wyłączeniem obiektu z użytkowania.

Pracę wykonano w ramach projektu rozwojowego NCBiR nr NR04-0024-10

Streszczenie

Trzy nieniszczące metody: pośrednia metoda pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej, impact-echo i georadar, zaimplementowane w skanerze UIR, zostały wykorzystane do badania płyt betonowych z dobrze zdefiniowanym zbrojeniem oraz sztucznymi wadami. Uzyskane wyniki potwierdziły duży potencjał metod komplementarnych w wykrywaniu wad konstrukcji betonowych.

Słowa kluczowe: nieniszczące badania betonu, metoda ultradźwiękowa, impact-echo, radar, metody komplementarne.

Abstract

The three non-destructive testing methods: the indirect ultrasonic pulse velocity, impact-echo and ground-penetrating radar, implemented in the scanner UIR, were used to study the concrete slabs reinforced with well-defined and artificial defects. The results confirmed the high potential of combined methods for detecting defects in concrete structures.

Literatura

- [1] Czarnecki L., Łukowski P.: Wdrażanie normy PN-EN 1504-9 do stosowania w Polsce. Materiały Budowlane, 2 (2010), 2 – 5.
- [2] Runkiewicz L.: Application of non-destructive testing methods to assess properties of construction materials in building diagnostics, Architecture. Civil Engineering. Environment, 2 (2009), 79 – 86.
- [3] Courard L., Garbacz A., Wolff L.: Evaluation and quality assessment, RILEM Report no. 33, Industrial Floors (ed. P. Seidler), RILEM Publications S.A.R.L., 2006, 59 – 89.
- [4] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Tom 1, PWN, 2010.
- [5] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T.: Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Tom 2, PWN, 2011.
- [6] 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 – 18.
- [7] Piotrowski T., Garbacz A., van der Wielen A., Courard L., Nguyen F.: On the relation between bond quality and impact-echo frequency spectrum, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments 16 (4) 2010, 303 – 14,
- [8] Garbacz A.: Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw, Prace Naukowe, Budownictwo, z. 147, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2007, 208.
- [9] Proceedings of the 7th International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, 2009, Nantes, France.
- [10] Hoła J., Schabowicz K.: New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence, NDT & E International, vol. 38 (2005), 251 – 259.
- [11] Lim M. K., Cao H.: Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness, Const. Build. Mater., 38 (2013), 1310 – 1315.
- [12] Reichling K., Raupach M., Wiggenshauser H., Stoppel M., Dobmann G., Kurz J.: BETOSCAN-Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks, 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering 2009, Nantes, France. www.ndt.net.