

DIAGNOSTYKA ŻELBETOWEJ KŁADKI DLA PIESZYCH Z ZASTOSOWANIEM METODY GEORADAROWEJ

JACEK LACHOWICZ, e-mail: jaclacho@pg.gda.pl

MAGDALENA RUCKA

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

Streszczenie: Met georadarowa, jako jedna z technik nieniszczących, znalazła szerokie zastosowanie w diagnostyce obiektów budowlanych. Z powodzeniem wykorzystuje się ją do oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych określając rozkład i liczbę prętów zbrojeniowych, a także możliwe uszkodzenia. W pracy przedstawiono badania doświadczalne przeprowadzone na żelbetowej kładce dla pieszych z wykorzystaniem metody georadarowej. W celu poprawnej interpretacji uzyskanych danych wykonano analizy numeryczne propagacji fali elektromagnetycznej przy pomocy metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Wykonano model numeryczny przekroju poprzecznego kładki na podstawie projektu wykonawczego. Przeanalizowano trzy modele z różnymi defektami. Elementem nowatorskim pracy jest uwzględnienie w betonie zawartości wody, rozłożonej w sposób pseudo-losowy, korzystając z autorskiego algorytmu. Używając dyspersyjnego modelu wody wykonano dodatkowe trzy modele numeryczne dla różnych obszarów zawilgocenia konstrukcji.

Słowa kluczowe: metoda georadarowa, diagnostyka konstrukcji, analizy numeryczne, konstrukcje żelbetowe

1. Wprowadzenie

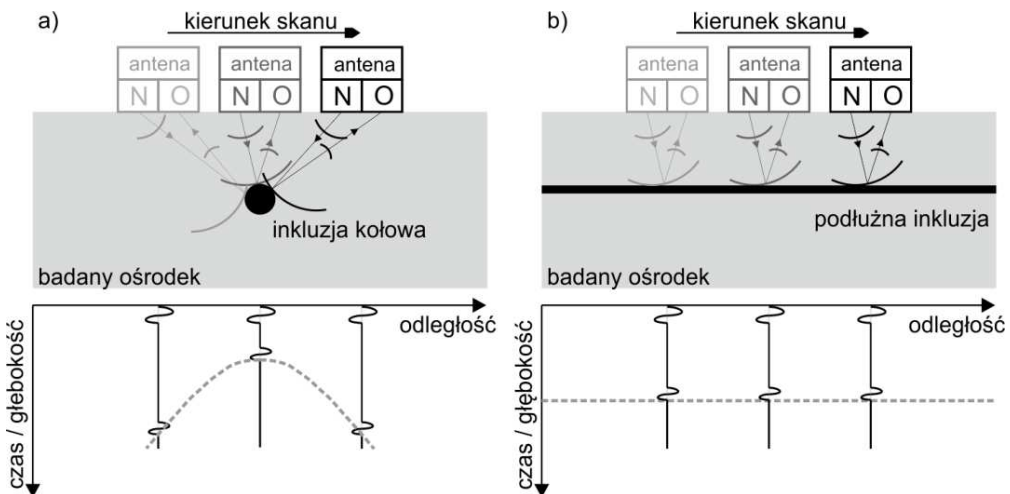
Metoda georadarowa (GPR – ang. *Ground Penetrating Radar*) jest jedną z wielu metod należących do grupy technik nieniszczących (NDT – ang. *Non-Destructive Testing*) stosowanych w diagnostyce konstrukcji. Dzięki temu, że badanie nie powoduje ingerencji w stan obiektu, georadar jest chętnie wykorzystywany w geologii, archeologii czy też budownictwie. Istnieje wiele publikacji na tematy związane z badaniem obiektów zabytkowych [6], konstrukcji żelbetowych [1, 4, 7], mostów [2], dróg, itp. Największą trudnością w wykorzystywaniu metody georadarowej jest analiza wyników badań. Narzędziem pomocnym przy interpretacji i planowaniu badań są obliczenia propagacji fal elektromagnetycznych. Przed badaniami pozwalają one na rozpoznanie ograniczeń w detekcji uszkodzeń, natomiast po wykonaniu pomiarów doświadczalnych umożliwiają efektywną interpretację poszczególnych odbić i ugięć fali elektromagnetycznej.

W pracy przedstawiono badania georadarowe przeprowadzone na żelbetowej kładce dla pieszych. W celu poprawnej interpretacji otrzymanych wyników i rozpoznania ograniczeń metody wykonano obliczenia numeryczne przy pomocy metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Przeanalizowano trzy modele numeryczne z różnymi defektami. Elementem nowatorskim pracy jest uwzględnienie w modelu numerycznym wody rozłożonej w sposób pseudo-losowy. Używając dyspersyjnego modelu wody wykonano dodatkowe trzy modele numeryczne dla różnych obszarów zawilgocenia konstrukcji.

2. Metoda georadarowa

Metoda georadarowa bazuje na zjawisku propagacji fali elektromagnetycznej. Antena nadawcza wchodząca w skład głowicy georadarowej nadaje krótki impuls sinusoidalny, który przenika przez badany ośrodek. Spektrum częstotliwościowe danego sygnału charakteryzuje główny parametr głowicy georadarowej jakim jest częstotliwość centralna anteny. Gdy fala elektromagnetyczna dochodzi do materiału o właściwościach elektrycznych (przewodność elektryczna oraz przenikalność elektryczna) różnych od badanego ośrodka to ulega ona odbiciu, dyfrakcji bądź rozproszeniu, jednakże część fali propaguje dalej w głąb ośrodka. Minimalna wielkość inkluzji, przy której następuje załamanie fali bądź jej odbicie zależy od częstotliwości środkowej anteny georadaru. Im wyższa częstotliwość, tym mniejsze obiekty są wykrywalne przy większej rozdzielczości obrazu.

Podstawowym zobrazowaniem używanym w metodzie georadarowej jest mapa georadarowa (tzw. B-scan), w skład której wchodzi poszczególne sygnały czasowe zarejestrowane w kolejnych punktach przestrzeni wzdłuż linii skanowania tworząc w ten sposób plan czasowo-przestrzenny (rys. 1). Gdy w badanym ośrodku występuje podłużna inkluzja w każdym położeniu anteny czas powrotu fali jest taki sam, w związku z czym odwzorowaniem takiego obiektu jest podłużne odbicie na mapie georadarowej (rys. 1b). W przypadku kołowej inkluzji wraz ze zbliżaniem się georadaru maleje czas powrotu fali do anteny odbiorczej w wyniku czego odwzorowaniem takiego obiektu jest hiperbola dyfrakcyjna (rys. 1a), która odzwierciedla poszukiwany element na mapie georadarowej.



Rys. 1. Mapa georadarowa uzyskana w przypadku: a) inkluzji kołowej, b) inkluzji podłużnej

Najważniejszym parametrem metody, dzięki któremu jest możliwe oszacowanie głębokości poszukiwanej inkluzji, jest prędkość propagacji fali elektromagnetycznej. Prędkość ta jest ściśle powiązana z przenikalnością elektryczną. Dla materiałów homogenicznych izotropowych można obliczyć ją ze wzoru:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

gdzie: ϵ_r jest przenikalnością elektryczną ośrodka, natomiast c jest prędkością światła w próżni.

3. Modelowanie pola elektromagnetycznego

U podstaw teoretycznych elektromagnetyzmu i propagacji fali elektromagnetycznej stoją równania Maxwella, które dla ośrodka stratnego i anizotropowego przybierają postać [3]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

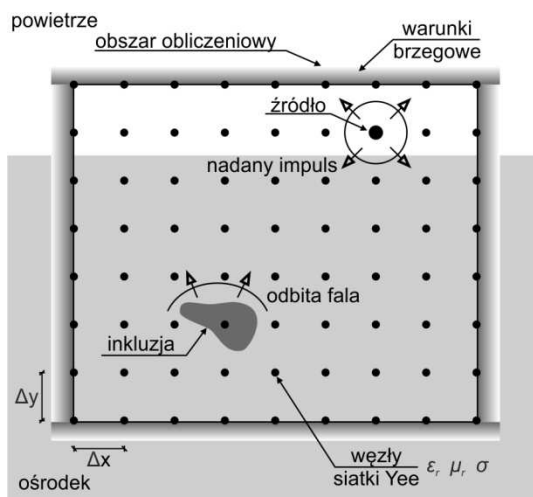
$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_s, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q_v, \quad (5)$$

gdzie: $\mathbf{B}$ – wektor indukcji magnetycznej, $\mathbf{E}$ – wektor natężenia pola elektrycznego, $\mathbf{D}$ – wektor indukcji elektrycznej, $\mathbf{H}$ – wektor natężenia pola magnetycznego, $\mathbf{J}_c$ – wektor gęstości prądu przewodzenia, $\mathbf{J}_s$ – wektor gęstości prądu w źródle, t – czas, q_v – gęstość ładunku.

W celu przeprowadzenia obliczeń propagacji pola elektromagnetycznego należy rozwiązać równania Maxwella dla danych stałych materiałowych, przy założonych warunkach brzegowych. Rozwiązanie analityczne tego problemu nie jest trywialne, dlatego z pomocą przychodzą metody numeryczne, które pozwalają na szybkie rozwiązanie równań. Najpopularniejszą metodą numeryczną do tego typu zagadnień jest metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD – ang. *Finite Difference Time Domain*). Algorytm rozwiązywania równań Maxwella uzależniający pole elektromagnetyczne od współrzędnych czasu i przestrzeni opracował Yee [9] w 1966 r. W tym podejściu model ciągły zamieniany jest w dyskretną siatkę obliczeniową składającą się z tzw. węzłów siatki Yee, w których to przypisane są stałe materiałowe (rys. 2). Metoda ta jest w pełni jawna, dzięki czemu nie pojawia się problem odwracania macierzy i równoczesnego rozwiązywania układu równań.



Rys. 2. Schemat modelu obliczeniowego w metodzie różnic skończonych w dziedzinie czasu

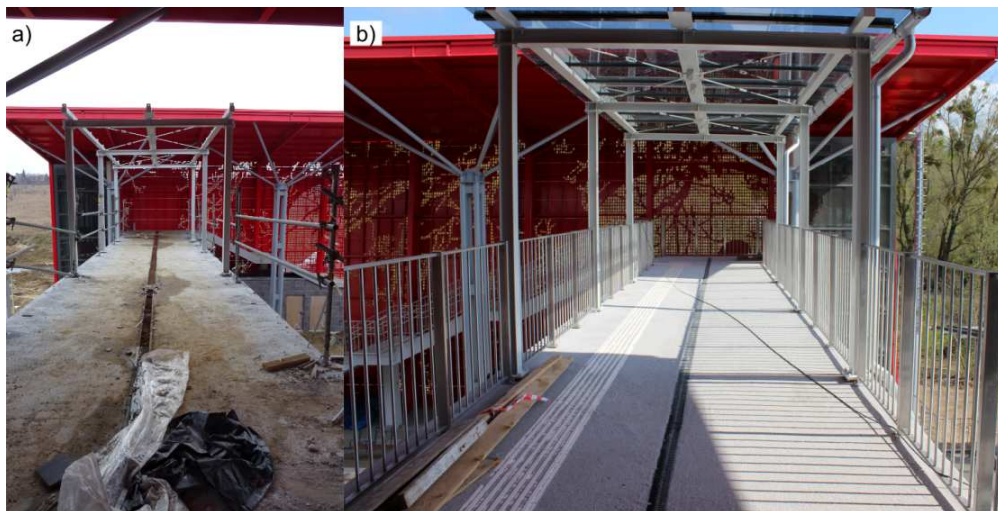
4. Przykład

Pomiary metodą georadarową przeprowadzono na żelbetowej kładce dla pieszych będącą częścią przystanku PKM „Kiełpinek” w Gdańsku (rys. 3). Ramową konstrukcję nośną tworzy żelbetowa płyta o grubości 50 cm i szerokości 371 cm monolitycznie połączona z układem słupów. Schody oraz szyby windowe zostały doprowadzone do przewieszów kładki z obu peronów. Odwodnienie zostało zaprojektowane jako ściek liniowy w osi konstrukcji.



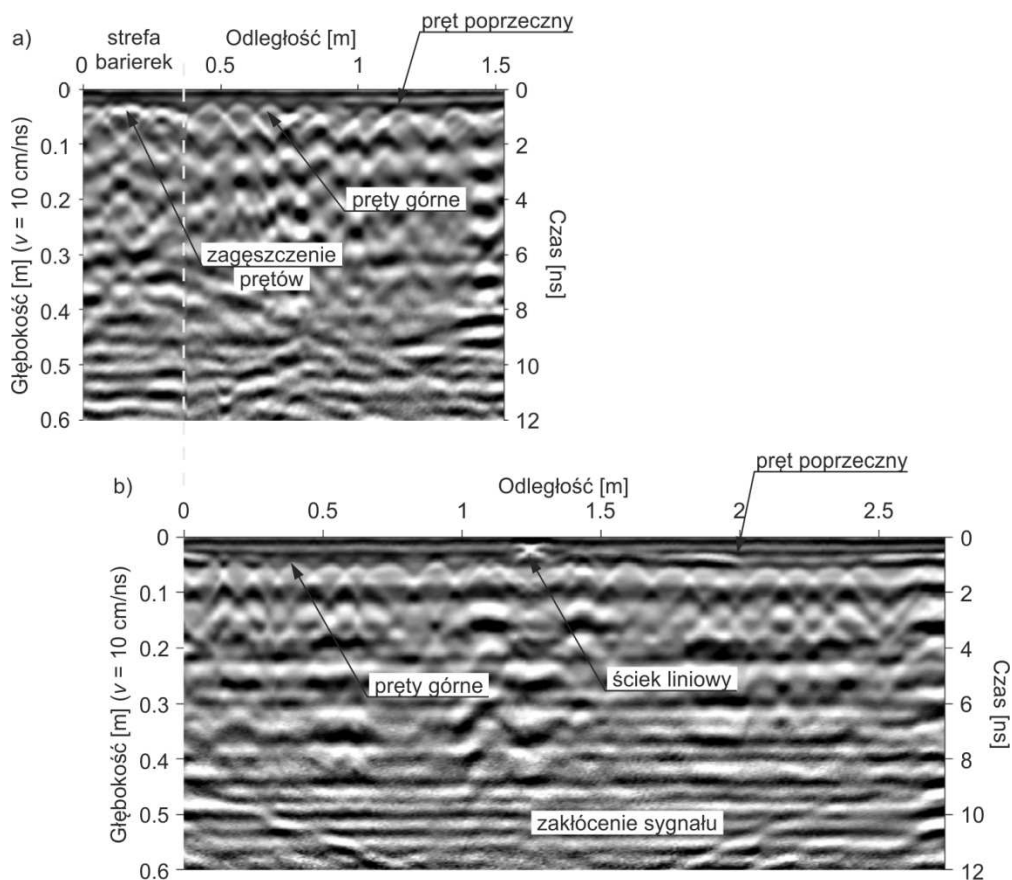
Rys. 3. Widok konstrukcji przystanku PKM „Kiełpinek” w Gdańsku

Do pomiarów wykorzystano zestaw georadarowy Alladin, w skład którego wchodzi bipolarna ekranowana antena o częstotliwości środkowej równej 2 GHz. Pozwala ona na wykonanie wysokiej rozdzielczości skanów przy niskiej głębokości penetracji fali elektromagnetycznej. Badania przeprowadzono dwukrotnie, po raz pierwszy (rys. 4a) w niedługim czasie po wybudowaniu konstrukcji (bezpośrednio przed tymi badaniami wystąpiły duże opady atmosferyczne) oraz po raz drugi dwa miesiące później (rys. 4b).



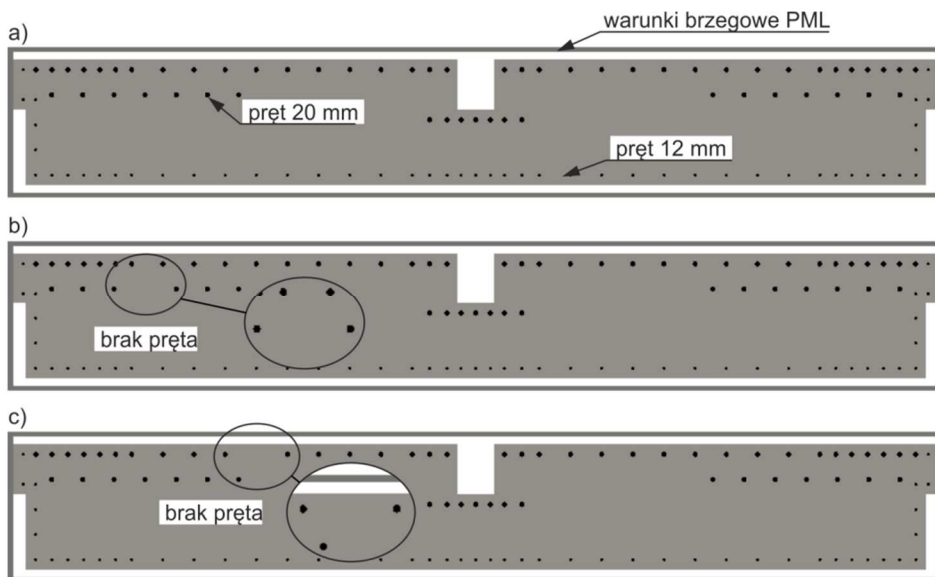
Rys. 4. Pomiary georadarowe kładki dla pieszych: a) po wybudowaniu, b) dwa miesiące później

W pierwszym terminie prowadzono profile poprzeczne bezpośrednio na warstwie konstrukcyjnej mając dostęp jedynie do części konstrukcji (bez ścieku liniowego). W drugim terminie, pomiary wykonano również nad ściekiem liniowym, jednak bez stref przy barierkach, z uwagi na prowadzone w ich pobliżu prace wykończeniowe. Uzyskane z pomiarów mapy georadarowe przetworzono i przedstawiono na rys. 5. W obu przypadkach zidentyfikowano średni rozstaw górnego zbrojenia jako ok. 13 cm. Dla obu pomiarów efektywna głębokość penetracji fali wyniosła ok. 30 cm. Tak silne tłumienie fali elektromagnetycznej można tłumaczyć silnym zawilgoceniem betonu bądź zakłóceniami od konstrukcji stalowej wokół kładki. Ponadto dla mapy uzyskanej w pierwszym terminie (rys. 5a) zaobserwowano zagęszczenie zbrojenia w obszarze barierek ochronnych. Na długości między 1 a 1,5 m widoczne jest także podłużne odbicie, które prawdopodobnie oznacza zbrojenie poprzeczne. Na echogramie po całej szerokości kładki (rys. 5b) widoczne jest zagęszczenie zbrojenia przy ścieku liniowym. Poza tym w obszarze wypełnionego wodą ścieku liniowego mapa pozostaje bardzo słabo czytelna. Podobnie widoczne są podłużne odbicia sygnalizujące obecność zbrojenia poprzecznego.



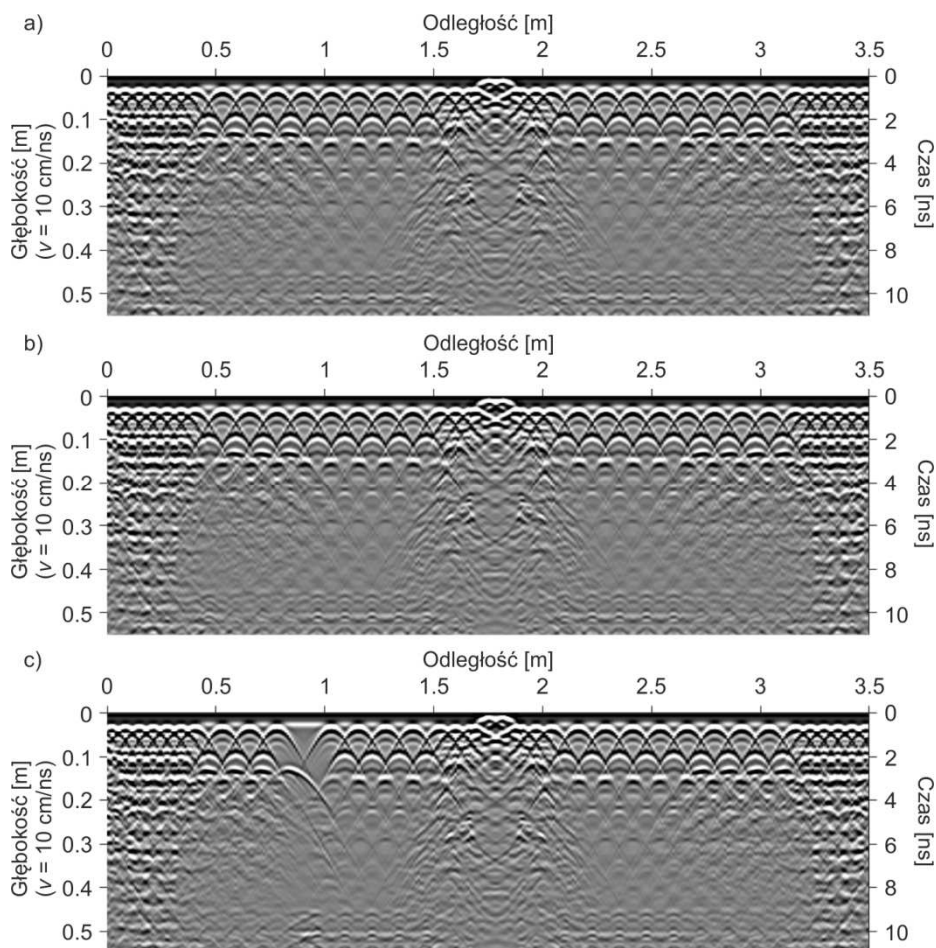
Rys. 5. Przetworzona mapa georadarowa z profilowania poprzecznego dla badania:
a) po wybudowaniu, b) dwa miesiące później

Modelowanie numeryczne propagacji fali elektromagnetycznej umożliwia rozpoznanie ograniczeń metody georadarowej i może pomóc w identyfikacji poszczególnych odbić i ugięć. Często w konstrukcjach żelbetowych o skomplikowanym systemie zbrojeniowym zdarza się, że niektóre pręty pozostają niewidoczne dla georadaru. W pierwszym etapie analiz numerycznych skupiono uwagę na możliwości wykrywania zbrojenia i uszkodzeń w analizowanej kładce. Wykonano model obliczeniowy przekroju poprzecznego kładki na podstawie projektu wykonawczego, z dokładnym odwzorowaniem zbrojenia bez żadnych uszkodzeń. Na jego podstawie wykonano dwa kolejne modele, w których usunięto wybrany pręt zbrojeniowy w górnej i środkowej warstwie (rys. 6). Całkowity obszar obliczeniowy o wymiarach 375×60 cm został podzielony siatką o wymiarach 2×2 mm. Płyta pomostu o szerokości 371 cm i wysokości 50 cm została wymodelowana jako materiał homogeniczny o wartości przenikalności równej 9 oraz przewodności 0.01 S/m. Pręty zostały przyjęte jako materiał o idealnej przewodności elektrycznej. Analizy numeryczne przeprowadzono za pomocą programu GprMax [8] w dwóch wymiarach. Do wzbudzenia fali elektromagnetycznej użyto funkcji Rickera o centralnej częstotliwości 2 GHz.



Rys. 6. Modele numeryczne kładki dla pieszych: a) bez uszkodzeń, b) bez pręta w środkowej warstwie, c) bez pręta w górnej warstwie

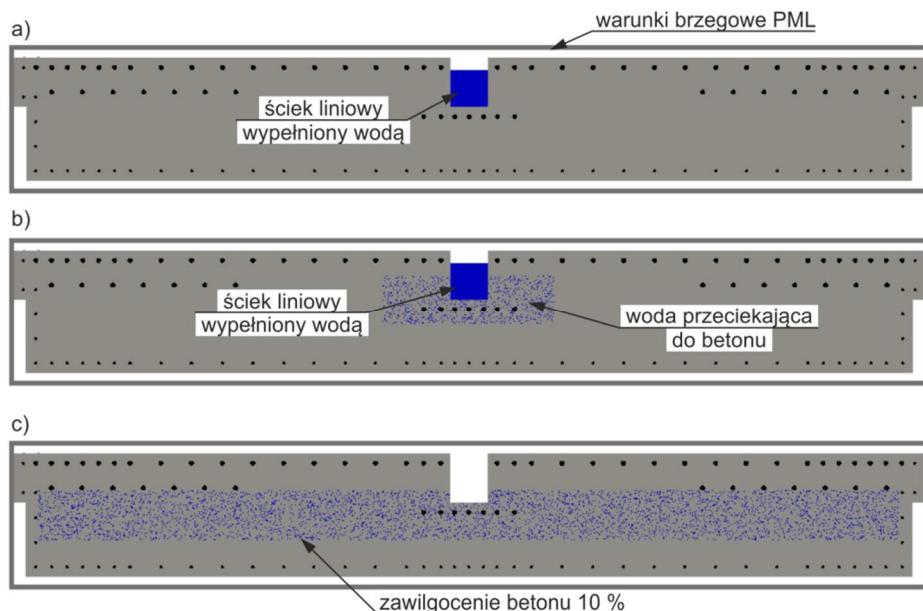
Rysunek 7 przedstawia obliczone mapy georadarowe dla trzech modeli numerycznych. Echogram obliczony dla modelu bez żadnych uszkodzeń (rys. 7a) pokazuje wyraźne i mocne odbicia dla górnej warstwy prętów. Przy gęstszym ułożeniu prętów (strefa barierek) większa część energii jest zatrzymywana na zbrojeniu i nie jest przepuszczana dalej w głąb konstrukcji. Zbrojenie dolne jest bardzo słabo widoczne ze względu na stratność betonu, która została wprowadzona do modelu poprzez określenie przewodności. Warto zauważyć, że okolice ścieku liniowego ze względu na liczne ugięcia i odbicia fali pozostają nieczytelne. W przypadku modelu, w którym usunięto pręt w górnej warstwie zbrojenia (rys. 7c), brak jednej z hiperbol dyfrakcyjnych jest wyraźnie zauważalny. Natomiast w modelu bez jednego z prętów w warstwie środkowej (rys. 7b), brak hiperboli jest bardzo słabo zauważalny z uwagi na nakładające się odbicia od warstwy górnej.



Rys. 7. Obliczone mapy georadarowej dla modelu: a) bez uszkodzeń, b) bez pręta w środkowej warstwie, c) bez pręta w górnej warstwie

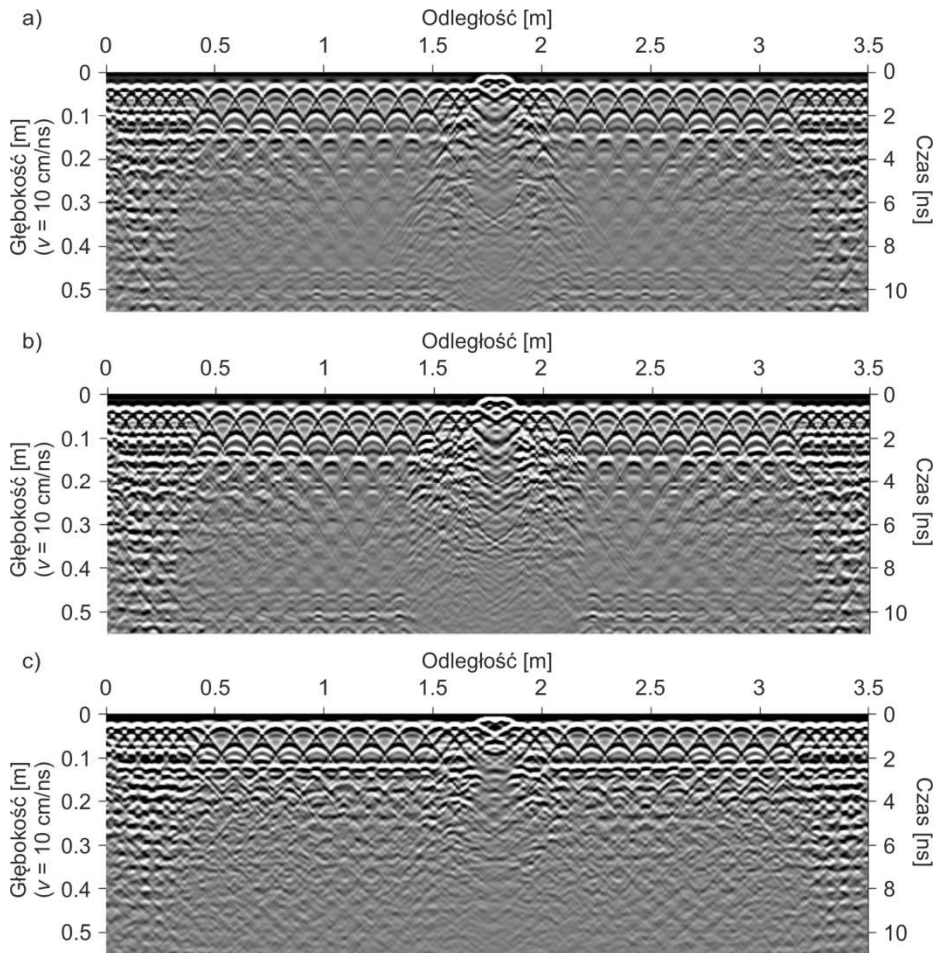
W kolejnym etapie analiz numerycznych skupiono uwagę na wpływie zawilgocenia na jakość i czytelność map georadarowych. Beton składa się z trzech faz ciekłej, gazowej i stałej, co czyni go materiałem heterogenicznym. Najczęściej jest on upraszczany w modelu numerycznym do modelu homogenicznego. Jednakże takie uproszczenie nie pozwala przeanalizować wpływu wody i zawilgocenia na mapy georadarowe. Ponadto woda jest materiałem dyspersyjnym, wpływając w ten sposób również na dyspersyjność betonu [7]. W celu dokładniejszego odwzorowania rzeczywistości napisano skrypt w języku Python do generowania pseudo-losowego położenia wody w porach betonu w wybranym obszarze. Wykorzystano także wbudowany w program dyspersyjny model Debye'a dla wody. Wykonano trzy modele numeryczne (rys. 8), które mogą pomóc w analizie wpływu wody na wyniki pomiarów georadarowych. W pierwszym modelu założono, że woda znajduje się wyłącznie w ścieku liniowym (rys. 8a), a izolacja zabezpiecza przed wsiąkaniem wody do betonu. Drugi model ilustruje niesprawny system odwodnienia, przez który woda wsiąka do konstrukcji (rys. 8b). Założono, że woda w obszarze wsiąkania zajmuje 10% objętości betonu. Ostatni model skupia się na wpływie

wody w całej konstrukcji (rys. 8c). Założono, że woda odparowuje z zewnętrznych warstw konstrukcji i pozostaje tylko w środkowej części zajmując 10% objętości betonu.



Rys. 8. Modele numeryczne kładki dla pieszych: a) woda w ścieku liniowym, b) woda przesiąkająca ze ścieku liniowego, c) woda w wewnętrznej warstwie konstrukcji

Obliczone mapy georadarowe dla modeli uwzględniających wodę w betonie zostały pokazane na rys. 9. Echogram dla modelu, w którym woda zalega w ścieku liniowym, a izolacja nie przepuszcza wody do wnętrza konstrukcji (rys. 9a) nie wykazuje większych różnic z mapą georadarową dla modelu bez uszkodzeń (por. rys. 7a). Liczne ugięcia i odbicia fali w okolicach ścieku liniowego tworzą obraz nieczytelnych również w modelu bez wody. Jednakże dla modelu, w którym woda dostaje się przez nieszczelną izolację ścieku liniowego do wnętrza konstrukcji (rys. 9b) wyraźnie widać, iż na obszarze zawilgocenia występuje pewnego rodzaju odcięcie sygnału. Poniżej obszaru zawilgoconego nie widać żadnych istotnych odbić. Najbardziej zbliżoną mapą numeryczną do map eksperymentalnych pozostaje model, w którym uwzględniono wodę w całej konstrukcji (rys. 9c). Widoczne są jedynie górne pręty, a wykrywalność środkowych zależy od poziomu zawilgocenia betonu. Ciekawym zjawiskiem jest również odbicie na głębokości około 12 cm, które ilustruje odbicie od warstwy wody ze względu na jej regularny kształt w modelu numerycznym (por. rys. 8c).



Rys. 9. Obliczone mapy georadarowej dla modelu: a) woda w ścieku liniowym, b) woda przesiąkająca ze ścieku liniowego, c) woda w wewnętrznej warstwie konstrukcji

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono badania diagnostyczne żelbetowej kładki dla pieszych za pomocą metody georadarowej. Do pomiarów użyto georadaru z anteną o częstotliwości 2 GHz. Przeprowadzone badania in-situ umożliwiły identyfikację rozkładu i liczby prętów zbrojeniowych w górnych warstwach konstrukcji, jednakże ze względu na silne zawilgocenie kładki nie wykryto pozostałych prętów zbrojeniowych.

W celu pogłębionej interpretacji otrzymanych doświadczalnie echogramów, przeprowadzono analizy numeryczne za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Diagnostyka na modelach numerycznych została ukierunkowana na dwa aspekty: identyfikację braku pojedynczych prętów zbrojeniowych oraz wpływu zawilgocenia betonu. Wyniki obliczeń dla modelu poprzecznego kładki pokazały, że brak jednej z hiperbol dyfrakcyjnych był możliwy do zaobserwowania jedynie w modelu, w którym usunięto pręt w górnej warstwie zbrojenia. Natomiast w modelu bez jednego z prętów w warstwie środkowej brak hiperboli był bardzo słabo zauważalny z uwagi na nakładające się odbicia od warstwy górnej. Wyniki

obliczeń dla modelu z uwzględnieniem zawilgocenia betonu umożliwiły uzyskanie echogramów zbliżonych do wyników doświadczalnych, na podstawie których zidentyfikowano jedynie górną warstwę prętów.

Literatura

1. Barrile, V., Pucinotti, R.: Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study. *NDT E Int.* 38, 7, 596–604, 2005.
2. Beben, D. et al.: Identification of viaduct beam parameters using the Ground Penetrating Radar (GPR) technique. *NDT E Int.* 49, 18–26, 2012.
3. Giannopoulos, A.: Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Constr. Build. Mater.* 19, 10, 755–762, 2005.
4. Lachowicz, J., Rucka, M.: Application of GPR method in diagnostics of reinforced concrete structures. *Diagnostyka.* 16, 2, 31–36, 2015.
5. Laurens, S. et al.: Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling. *Mater. Struct.* 38, 283, 827–832, 2005.
6. Rucka, M. et al.: GPR investigation of the strengthening system of a historic masonry tower. *J. Appl. Geophys.* 131, 131, 94–102, 2016.
7. Shaw, M.R. et al.: Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks. *NDT E Int.* 38, 3, 203–212, 2005.
8. Warren, C. et al.: gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Comput. Phys. Commun.* 209, 163–170, 2016.
9. Yee, K.S.: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 14, 3, 302–307, 1966.

DIAGNOSTICS OF REINFORCED CONCRETE PEDESTRIAN BRIDGE USING GROUND PENETRATING RADAR METHOD

Abstract: Ground penetrating radar (GPR) method has recently been widely used in the diagnostics as one of the non-destructive techniques. It has been successfully used to evaluate the technical state of reinforced concrete structures identifying the distribution and the number of reinforcement, as well as possible defects. The paper presents experimental studies conducted on a concrete pedestrian bridge using the GPR method. For the correct interpretation of the GPR data, numerical analyses of electromagnetic wave propagation using the finite difference time domain method were carried out. A numerical model of the cross-section of the pedestrian bridge was created on the basis of the executive project. We analyzed three numerical models with different defects. An innovative element of the work is taking into account the water in concrete, distributed in a pseudo-random way. Using the water dispersion model, additional three numerical models for different areas of moisture.

Keywords: ground penetrating radar method, diagnostics of structures, numerical analyses, reinforced concrete structures