

Analiza numeryczna i doświadczalna propagacji pola elektromagnetycznego w badaniach metodą georadarową

Magdalena Rucka¹, Jacek Lachowicz²

^{1,2} Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: ¹magdalena.rucka@pg.gda.pl, ²jaclacho@student.pg.gda.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono badania doświadczalne metodą georadarową oraz analizę numeryczną propagacji pola elektromagnetycznego. Przedmiotem badań eksperymentalnych była konstrukcja podłogi. Pomiarów wykonano za pomocą georadaru o częstotliwości emitowanej fali równej 2 GHz. W artykule opisano także sposób numerycznego modelowania elektromagnetycznego pola falowego za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Przedstawiono wyniki propagacji fali elektromagnetycznej w próbce żelbetonowej dla przypadku jednowymiarowego.

Słowa kluczowe: fale elektromagnetyczne, georadar, badania doświadczalne, metoda różnic skończonych.

1. Wprowadzenie

Metoda georadarowa (ang. GPR – *ground penetrating radar*) jest techniką elektromagnetyczną. Polega ona na emitowaniu fal elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych do badanego ośrodka i rejestracji fal odbitych od obiektów charakteryzujących się zmiennymi właściwościami dielektrycznymi [1]. Metoda georadarowa znajduje zastosowanie do badań geologicznych, geotechnicznych, archeologicznych jak również badań w inżynierii lądowej. Za pomocą metody georadarowej możliwe jest lokalizowanie stref zanieczyszczeń migrujących w ośrodkach geologicznych, monitorowanie stref rozluźnień w gruncie i spękań w górotworze, wykrywanie i inwentaryzacja podziemnej infrastruktury czy też identyfikowanie grubości warstw konstrukcji jezdni [2, 3]. W inżynierii lądowej georadar znajduje zastosowanie szczególnie w lokalizacji prętów zbrojeniowych czy też poszukiwaniu pustek, rys, uszkodzeń [4, 5, 6]. Zaletą tej techniki jest fakt, iż umożliwia ona wykonywanie pomiarów nieniszczących.

W metodzie georadarowej stosuje się anteny o różnych częstotliwościach, z zakresu 10 MHz do 2 GHz. Dobór częstotliwości zależy od rozmiarów poszukiwanych obiektów oraz głębokości, na jakiej są położone. Niska częstotliwość anteny umożliwia głębszą penetrację, ale z mniejszą rozdzielczością. Zastosowanie anteny o wyższej częstotliwości powoduje wzrost rozdzielczości, ale jednocześnie spadek głębokości penetracji. Anteny o częstotliwości 10 MHz znajdują zastosowanie w geologii i umożliwiają penetrację na głębokość nawet do 30 m. Do precyzyjnej diagnostyki konstrukcji betonowych (głębokość penetracji do ok. 1 m) stosuje się anteny o częstotliwości 2 GHz.

Niniejsza praca poświęcona jest badaniom eksperymentalnym propagacji fal elektromagnetycznych w konstrukcji podłogi za pomocą techniki georadarowej. W artykule przedstawiono także wstępne wyniki symulacji numerycznych pola georadarowego dla przypadku jednowymiarowego.

2. Podstawy teoretyczne propagacji fal elektromagnetycznych

Fala elektromagnetyczna jest zaburzeniem pola elektrycznego i magnetycznego rozchodzącym się w ośrodku materialnym lub w próżni. Propagację fal elektromagnetycznych opisują równania Maxwella [3, 7]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}, \quad (4)$$

gdzie \mathbf{E} oznacza wektor natężenia pola elektrycznego, \mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, ε – przenikalność elektryczną, μ – przenikalność magnetyczną, σ – przewodność (konduktywność). Równania (1)÷(4) zdefiniowano przy założeniach, że rozważany ośrodek jest nieograniczony, liniowy, izotropowy oraz, że w ośrodku nie ma ładunków ani prądów [3]. Dodatkową grupą równań są tzw. równania materiałowe (konstrytutywne):

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (7)$$

wiążące wektor natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} i wektor natężenia pola magnetycznego \mathbf{H} z wektorem indukcji elektrycznej \mathbf{D} , wektorem indukcji magnetycznej \mathbf{B} oraz wektorem gęstości prądu \mathbf{J} .

Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej zależy od przenikalności elektrycznej danego ośrodka. Zakłada się, że prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w powietrzu równa jest prędkości światła i wynosi $c = 30 \text{ cm/ns}$. Natomiast prędkość propagacji fali elektromagnetycznej dla materiałów homogenicznych i izotropowych można wyznaczyć według wzoru:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (8)$$

gdzie ε_r jest względną przenikalnością elektryczną ośrodka zdefiniowaną jako:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}. \quad (9)$$

zaś ε_0 jest przenikalnością elektryczną próżni.

Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie zależy od wielu czynników, między innymi od jego składu, wilgotności i porowatości [1]. Zazwyczaj dla betonu przyjmuje się wartość względnej przenikalności elektrycznej jako $\varepsilon_r = 9$, co pozwala obliczyć prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie jako $v_b = 10 \text{ cm/ns}$.



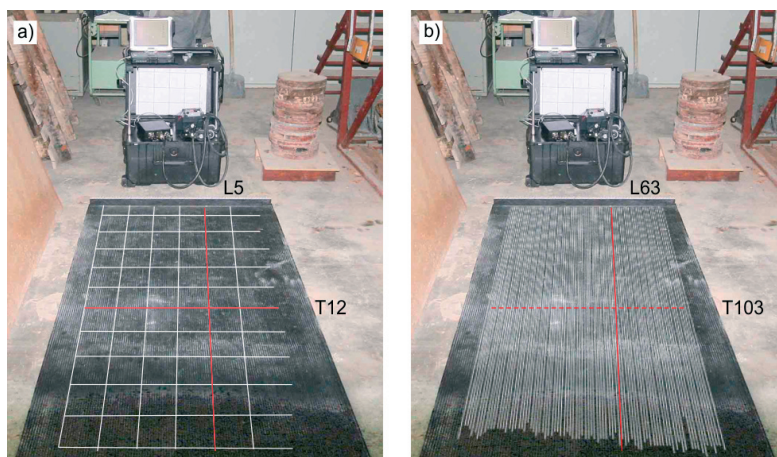
3. Badania eksperymentalne

Badania metodą georadarową przeprowadzono na konstrukcji żelbetowej podłogi w Regionalnym Laboratorium Budownictwa przy Katedrze Konstrukcji Betonowych (rys. 1). Pomiary wykonano na obszarze podłogi będącej posadowieniem konstrukcji maszyny wytrzymałościowej w celu diagnostyki układu warstw, w szczególności określenia rozkładu i ilości zbrojenia.



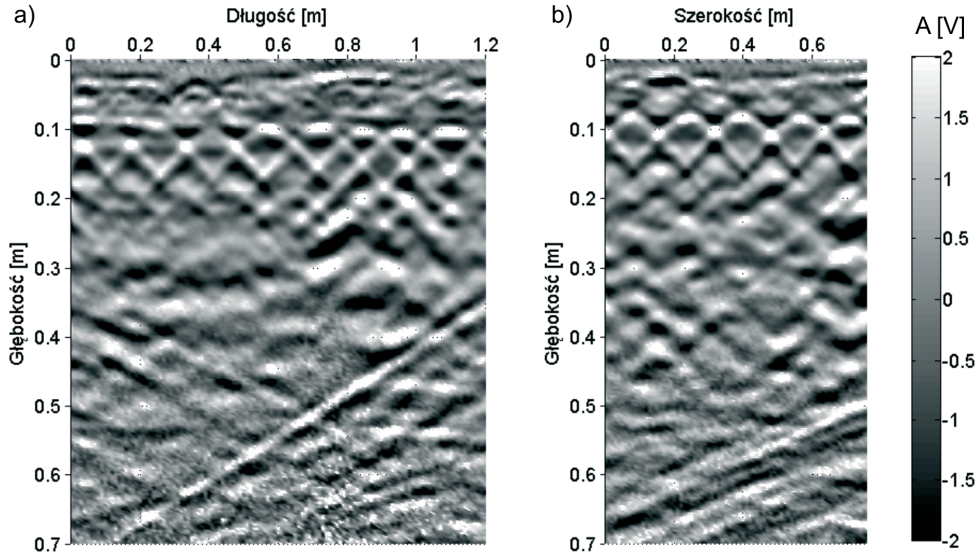
Rys. 1. Badanie konstrukcji podłogi w Regionalnym Laboratorium Budownictwa (Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska) za pomocą metody georadarowej z użyciem maty PSG

Do badań wykorzystano georadar Alladin składający się z jednostki sterującej, anteny, akumulatora oraz komputera osobistego. Ekranowana antena jest anteną bipolarną, co oznacza, że ze względu na wbudowane dwie pary nadajnik-odbiornik może wykonywać pomiary jednocześnie w kierunku podłużnym jak i poprzecznym. Częstotliwość pracy anteny wynosi 2 GHz. Dodatkowo wyposażenie stanowi mata badawcza PSG (Pad Survey Guide), która umożliwia prowadzenie równoległych pomiarów (skanów) w rozstawie 0,78 cm. Do akwizycji danych georadarowych wykorzystano oprogramowanie K2 FAST WAVE, zaś do ich dalszej obróbki oprogramowanie GRED HD. Prędkość rozchodzenia się fali w betonie przyjęto na podstawie danych literaturowych równą 10 cm/ns, zaś liczba rejestrowanych próbek w pojedynczym przebiegu czasowym (tzw. trasie) wynosiła 512.

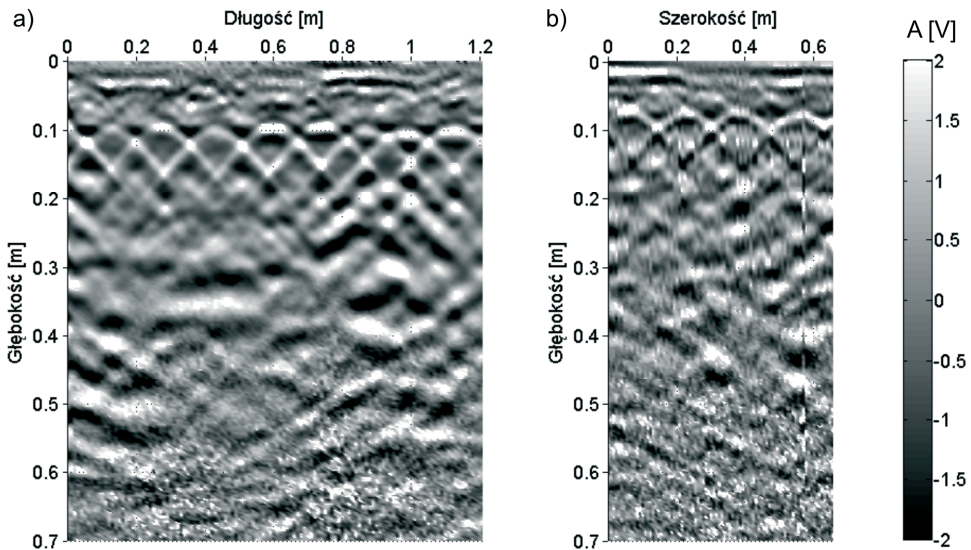


Rys. 2. Trasy wykonywanych skanów: a) badanie nr 1: skany podłużne i poprzeczne bez użycia maty PSG; b) badanie nr 2: skany podłużne z użyciem maty PSG

Na wybranym obszarze badawczym wykonano pomiary na dwa sposoby. Dla badania nr 1 (rys. 2a) wykonano pomiary podłużne (6 profili co 12 cm) oraz pomiary poprzeczne (11 profili co 12 cm). Natomiast w badaniu nr 2 (rys. 2b) wykorzystano matę PSG, co umożliwiło wykonanie 86 profili podłużnych w rozstawie 0,78 cm. Takie zagęszczenie pomiarów w kierunku podłużnym, umożliwiło wygenerowanie profili poprzecznych na podstawie danych zarejestrowanych przez antenę bipolarną.



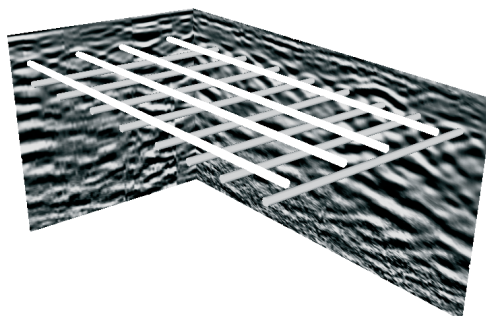
Rys. 3. Mapa georadarowa w badaniu nr 1 (profile podłużne i poprzeczne): a) skan podłużny (L5); b) skan poprzeczny (T12)



Rys. 4. Mapa georadarowa w badaniu nr 2 (tylko profile podłużne): a) skan podłużny (L63); b) skan poprzeczny wygenerowany przez oprogramowanie georadaru (T103)



Rysunki 3 oraz 4 przedstawiają wybrane mapy georadarowe. Dla badania nr 1 jest to skan podłużny L5 oraz skan poprzeczny T12. Porównano je z ich odpowiednikami z badania nr 2, tj. skanem podłużnym L63 oraz skanem poprzecznym T103 (linia przerywana na rys. 2b oznacza skan wygenerowany przez oprogramowanie georadaru). Na rys. 3 zobrazowano mapę georadarową wzdłużną i poprzeczną dla badania nr 1. Na obu skanach widoczne są pręty zbrojeniowe powodujące na mapach georadarowych powstanie charakterystycznych parabol. Skan podłużny L5 umożliwia identyfikację 8 prętów na głębokości 10 cm w rozstawie 17 cm, zaś skan poprzeczny T12 umożliwia identyfikację 5 prętów na głębokości 8 cm w rozstawie 17 cm. Wyniki z badania nr 2 potwierdzają ustaloną siatkę prętów zbrojeniowych, z wyjątkiem skanu poprzecznego T103, który został wygenerowany na mniejszym obszarze, przez co nie widać piątego pręta zbrojeniowego. Na rys. 4b można zauważyć, iż skan wygenerowany przez oprogramowanie georadaru jest znacznie gorszej jakości niż jego odpowiednik z rys. 3b. Na rys. 3 i rys. 4 można ponadto zaobserwować odbicia od konstrukcji maszyny wytrzymałościowej w postaci ukośnych pasów w dolnej części map georadarowych, a także poziome odbicia na głębokości ok. 3 cm mogące świadczyć o rozwarstwieniu konstrukcji podłogi. Rysunek 5 przedstawia trójwymiarowe zobrazowanie siatki zbrojeniowej na podstawie parabol widocznych na skanach podłużnych i poprzecznych. Na rys. 5 widoczne jest, iż w badanym obszarze pręty poprzeczne usytuowane są pod prętami podłużnymi.



Rys. 5. Model 3D siatki zbrojeniowej badanego obszaru

4. Symulacje numeryczne propagacji pola elektromagnetycznego

4.1. Modelowanie numeryczne metodą różnic skończonych

Symulacje numeryczne przeprowadzono za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. FDTD – *finite difference time domain*). Algorytm zaproponowany przez Yee [8] w 1966 r. jest rdzeniem wielu programów używanych do rozwiązywania tego typu problemów. Algorytm ten numerycznie rozwiązuje równania Maxwella, uwzględniając zależność pola elektromagnetycznego od współrzędnych czasu i przestrzeni. Podstawowe założenia algorytmu Yee są następujące [9]:

- algorytm Yee oblicza wektory pól elektrycznych i magnetycznych w czasie i przestrzeni za pomocą sprzężonych równań Maxwella;
- w rozwiązaniu używane są centralne ilorazy różnicowe o dokładności drugiego rzędu, zarówno dla pochodnych cząstkowych względem czasu, jak i przestrzeni;
- modelowanie parametrów materiałowych (ϵ , μ , σ) polega na zdefiniowaniu ich wartości w każdym punkcie siatki Yee;

- składowe pola elektrycznego oblicza się na zmianę ze składowymi pola magnetycznego. Na podstawie wartości pola elektrycznego z poprzedniego kroku oblicza się wartości pola magnetycznego, które następnie służą do obliczenia wartości pola elektrycznego w kroku następnym. Taki mechanizm został nazwany „skok przez plecy” (ang. *leapfrog*).

W oparciu o algorytm Yee utworzono program w środowisku MATLAB[®] implementując równania (1) do (4) rozwinięte za pomocą centralnego ilorazu różnicowego. Ponieważ fala elektromagnetyczna w próżni nie może poruszać się szybciej od prędkości światła, minimalny czas potrzebny na przebycie jednego oczka siatki o wymiarze Δx wynosi $\Delta t = \Delta x / c$ [10]. Warunek stabilności dla metody FDTD w jednym wymiarze można zatem zapisać jako $\Delta t \leq \Delta x / c$. W dalszych rozważaniach przyjęto krok czasowy $\Delta t = \Delta x / 2c$.

Źródło promieniowania (rys. 6) zadano, jako źródło miękkie opisane wzorem:

$$E_z|_{i_s}^n = E_z|_{i_s}^n + A_0 \sin(2\pi f n \Delta t) e^{-\left[\frac{n-n_0}{n_s}\right]^2}, \quad (10)$$

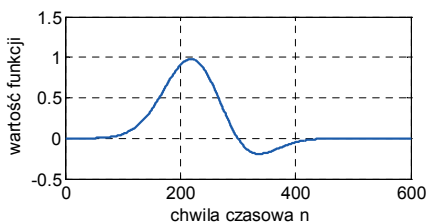
gdzie $E_z|_{i_s}^n$ jest wektorem pola elektrycznego w chwili n w punkcie i_s , A_0 – amplitudą sygnału, f – częstotliwością, n – chwilą czasową, n_s – czasem zaniku. Obwiednia funkcji opisanej wzorem (10) osiąga swoje maksimum w chwili n_0 . Zaletą tego typu źródła jest fakt, że powracająca do źródła fala nie ulega odbiciu i może propagować dalej.

Jednym z ważniejszych czynników w modelowaniu propagacji fali elektromagnetycznej za pomocą metody FDTD są warunki brzegowe. Głównym celem warunków brzegowych jest zasymulowanie rozciągnięcia obszaru obliczeniowego w nieskończoność. W dalszych rozważaniach przyjęto absorbujące warunki brzegowe opracowane przez Mur'a [11] w 1981 r. jako najprostsze w zastosowaniu do analiz jednowymiarowych. Na podstawie przyjętego kroku czasowego widać, że front fali elektromagnetycznej potrzebuje dwóch kroków czasowych, żeby przebyć jeden krok przestrzenny. Ze względu na tę zależność wartości wektorów pola magnetycznego lub elektrycznego na brzegach obszaru obliczeniowego można zdefiniować na podstawie wzoru:

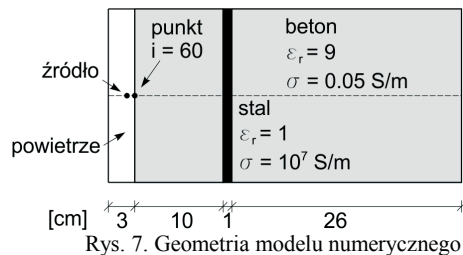
$$E_z|_1^{n+2} = E_z|_2^n. \quad (11)$$

4.2. Przykład obliczeniowy

Przykład obliczeniowy przyjęto jako jednowymiarową próbkę żelbetową o rozkładzie warstw zbliżonym do przebadanej konstrukcji podłogi. Całkowity rozmiar analizowanej próbki wynosi 40 cm. Model (rys. 7) składa się z warstwy powietrza grubości 3 cm oraz warstwy betonu grubości 37 cm. W betonie na głębokości 10 cm znajduje się stalowy pręt średnicy 10 mm.



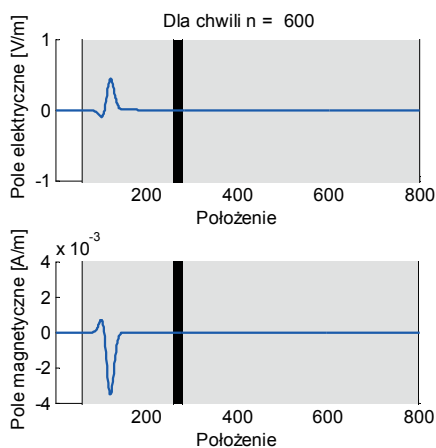
Rys. 6. Fala wejściowa



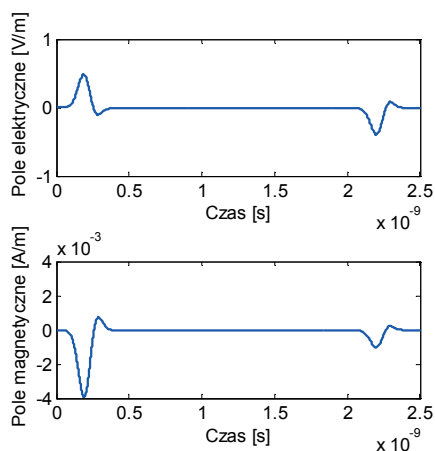
Rys. 7. Geometria modelu numerycznego



Źródło promieniowania zdefiniowano zgodnie z zależnością (10) w punkcie siatki $i = 55$. Częstotliwość źródła f przyjęto równą 2 GHz zgodnie z częstotliwością pracy anteny użytej do badania, amplitudę przyjęto jako $A_0 = 1,5$; maksimum funkcji eksponentialnej przyjęto w chwili $n_0 = 250$, zaś czas zaniku wyniósł $n_\delta = 84$ zgodnie z warunkiem $n_0 > 3n_\delta$. W rezultacie przyjęcia powyższych danych częstość kołowa wyniosła $\omega = 2\pi f = 1,26 \cdot 10^{10}$ rad/s, zaś długość fali $\lambda = v_b / f = 5 \cdot 10^{-2}$ m. W analizie przyjęto 100 punktów siatki przypadającej na jedną długość fali. Wartość kroku przestrzennego wynosiła zatem $\Delta x = 5 \cdot 10^{-4}$ m, a wartość kroku czasowego ze względu na warunek stabilności metody wynosiła $\Delta t = 8,34 \cdot 10^{-13}$ s.



Rys. 8. Fala elektromagnetyczna propagująca przez model próbki żelbetowej dla $n = 600$



Rys. 9. Sygnał zarejestrowany w punkcie $i = 60$

Rysunek 8 pokazuje propagację fali elektromagnetycznej w analizowanej próbce żelbetowej w chwili czasowej $n = 600$. Wygenerowany w źródle impuls propaguje przez kolejne warstwy w głąb analizowanego modelu. Ze względu na stratność ośrodka (zdefiniowanie przewodności) amplituda impulsu maleje wraz z propagacją w głąb ośrodka. W celu zarejestrowania odbitego sygnału od granicy warstw różniących się właściwościami elektrycznymi zapisywano wartości wektorów pól magnetycznych i elektrycznych w punkcie $i = 60$ w kolejnych krokach czasowych. Na rys. 9 widać falę wejściową oraz falę odbitą od pręta. Początek odbicia sygnału wystąpił dla czasu $t = 2$ ns. Aby obliczyć z otrzymanego opóźnienia czasowego odległość do obiektu (pręta stalowego) należy czas ten podzielić przez dwa (zarejestrowano sygnał od momentu wyemitowania aż do momentu odbicia) oraz wymnożyć przez ustaloną prędkość propagacji fali. W ten sposób zidentyfikowano głębokość położenia pręta zbrojeniowego otrzymując wartość równą 10 cm, zgodną z rzeczywistym położeniem pręta (por. rys. 7).

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych konstrukcji podłogi posadzonej na gruncie oraz wyniki symulacji numerycznych jednowymiarowej próbki żelbetowej. Badania eksperymentalne miały na celu określenie ilości i rozkładu zbrojenia, identyfikację układu warstw oraz wykrycie potencjalnych uszkodzeń betonu. Wykonano

dwa typy pomiarów: badanie o gęstej siatce profili jedynie podłużnych (86 skanów co 0,78 cm) oraz badanie w którym wykonano skanowania zarówno podłużne jak i poprzeczne. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych zidentyfikowano siatkę prętów zbrojeniowych na głębokości ok. 10 cm. Zaobserwowano także anomalie na głębokości ok. 3 cm mogące świadczyć o rozwarstwieniu podłogi. Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Przeprowadzono symulacje na modelu próbki żelbetowej o rozkładzie warstw zbliżonym do przebadanej konstrukcji podłogi. Otrzymane wyniki stanowią wstępny etap prac ukierunkowanych na modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych w ośrodkach dwu i trójwymiarowych.

Literatura

- 1 Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A. Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
- 2 Gołębiowski T. Zastosowanie metody georadarowej do detekcji i monitoringu obiektów o stochastycznym rozkładzie w ośrodku geologicznym. Wydawnictwa AGH, 2012.
- 3 Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M. Zarys metody georadarowej. Wydawnictwa AGH, 2011.
- 4 Shaw M.R., Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Taylor M.J., Bungey J.H. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks, *NDT&E International* 38 (2005) 203–212.
- 5 Barrile V., Pucinotti R. Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study, *NDT&E International* 38 (2005) 596–604.
- 6 Bęben D., Mordak A., Anigacz W.: Zastosowanie techniki georadarowej do ustalenia parametrów belek mostowych, *Drogi i Mosty* 3 (2011) 5–22.
- 7 Szóstka J. Fale i anteny. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001.
- 8 Yee K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14 (1966) 585–589.
- 9 Taflove A. Computation electrodynamics: the finite-difference time-domain method. MA: Artech House, 1995.
- 10 Sullivan D. M. Electromagnetic simulation using the FDTD method. IEEE Press, 2000.
- 11 Mur G.: Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 23 (1981) 377–384.

Numerical and experimental analysis of electromagnetic field propagation for ground penetrating radar inspection

Magdalena Rucka¹, Jacek Lachowicz²

¹ *Department of Structural Mechanics and Bridge Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology,*
e-mail: ¹magdalena.rucka@pg.gda.pl, ²jaclacho@student.pg.gda.pl

Abstract: This paper presents experimental tests by using the GPR method and numerical analysis of electromagnetic field propagation. The object of the experimental research was a ground floor structure. An antenna of frequency of emitted waves equal to 2 GHz was used for measurements. The paper also describes the numerical modelling of electromagnetic field with the use of the finite difference time domain method. Results of propagation of electromagnetic waves in a one-dimensional reinforced concrete specimen were presented.

Keywords: electromagnetic waves, ground penetrating radar, experimental investigations, finite differences time domain method

