

Zastosowanie metody georadarowej w badaniach konstrukcji podłogi posadowionej na gruncie

Dr hab. inż. Magdalena Rucka, mgr inż. Jacek Lachowicz
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Zmiana sposobu użytkowania konstrukcji najczęściej wiąże się ze zmianą charakteru i wartości obciążeń, co może prowadzić do jej przeciążenia. W przypadku konstrukcji, do której nie ma dokumentacji technicznej i projektowej, ocena bieżącego stanu technicznego może być wykonana w procesie diagnostyki. W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój diagnostyki konstrukcji za pomocą badań nieniszczących NDT (ang. *non-destructive testing*). Jedną z takich metod, szczególnie przy-

datnych w diagnostyce konstrukcji żelbetowych, jest metoda georadarowa, zwana także metodą GPR (ang. *ground penetrating radar*). Metoda georadarowa należy do grupy technik elektromagnetycznych. Dzięki temu, że badanie techniką GPR jest nieinwazyjne, georadar można wykorzystywać w badaniach wałów przeciwpowodziowych [9], obiektów zabytkowych [3, 5], mostów [2], identyfikacji infrastruktury podziemnej [8], czy też lokalizacji prętów zbrojeniowych [1, 4, 10].

Celem niniejszego artykułu jest diagnostyka konstrukcji podłogi posadowionej na gruncie za pomocą techniki georadarowej. Diagnostykę wykonano w związku ze zmianą funkcji pomieszczenia laboratoryjnego. Badania doświadczalne obejmowały skanowanie obszaru podłogi pod usuniętą suwnicą warsztatową. Przeanalizowano dwa rodzaje badań. W pierwszym z nich wykorzystano matę badawczą do prowadzenia jedynie pomiarów podłużnych. W drugim badaniu wykonano pomiary podłużne i poprzeczne. W pracy porównano wpływ przyjętej metodologii badań na uzyskane wyniki.

PODSTAWY TEORETYCZNE TECHNIKI GEORADAROWEJ

Metoda GPR polega na emitowaniu do konstrukcji fal elektromagnetycznych. Antena nadawcza wysyła impuls sinusoidalny, który przenika przez badany ośrodek, przechodząc przez granicę kolejnych materiałów różniących się właściwościami elektrycznymi (przewodnością elektryczną oraz przenikalnością elektryczną). Część fali przechodzi w głąb ośrodka, natomiast pozostała część ulega odbiciu bądź rozproszeniu. Sygnał odbity jest rejestrowany przez antenę odbiorczą (rys. 1a). W trakcie pomiarów georadar jest przesuwany wzdłuż badanej powierzchni (rys. 1b), i dla każdej pozycji jest dokonywany pomiar pojedynczej trasy georadarowej (tzw. A-scan), jak pokazano na rys. 1c. Podstawowym zobrazowaniem używanym w metodzie georadarowej jest mapa georadarowa zwana także echogramem (tzw. B-scan), składająca się z poszczególnych sygnałów czasowych zarejestrowanych w kolejnych punktach przestrzeni tworzących plan czasowo-przestrzenny (rys. 1d). Wraz ze zbliżaniem się georadaru do elementu różniącego się właściwościami elektrycznymi od właściwości otaczającego ośrodka maleje czas powrotu fali do anteny odbiorczej. W wyniku połączenia punktów zawierających dane o odległości od elementu w poszczególnych położeniach georadaru powstaje parabola (rys. 1d), która odzwierciedla poszukiwany element na mapie georadarowej [8].

Istotną rolę w działaniu georadaru odgrywa prędkość fali elektromagnetycznej. Jest ona uzależniona od przenikalności elektrycznej danego ośrodka. Przyjmuje się, że prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w powietrzu jest równa prędkości

światła $c = 30 \text{ cm/ns}$. W materiałach homogenicznych izotropowych prędkość fali elektromagnetycznej można obliczyć z wzoru [6]:

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

gdzie:

ϵ_r – przenikalność elektryczna ośrodka.

Przenikalność elektryczna powietrza wynosi $\epsilon_r = 1$, zaś w betonie przyjmuje się $\epsilon_r = 9$, co pozwala obliczyć prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie jako $v = 10 \text{ cm/ns}$. Długość fali elektromagnetycznej λ zależy od częstotliwości emitowanej fali f oraz od prędkości jej rozchodzenia:

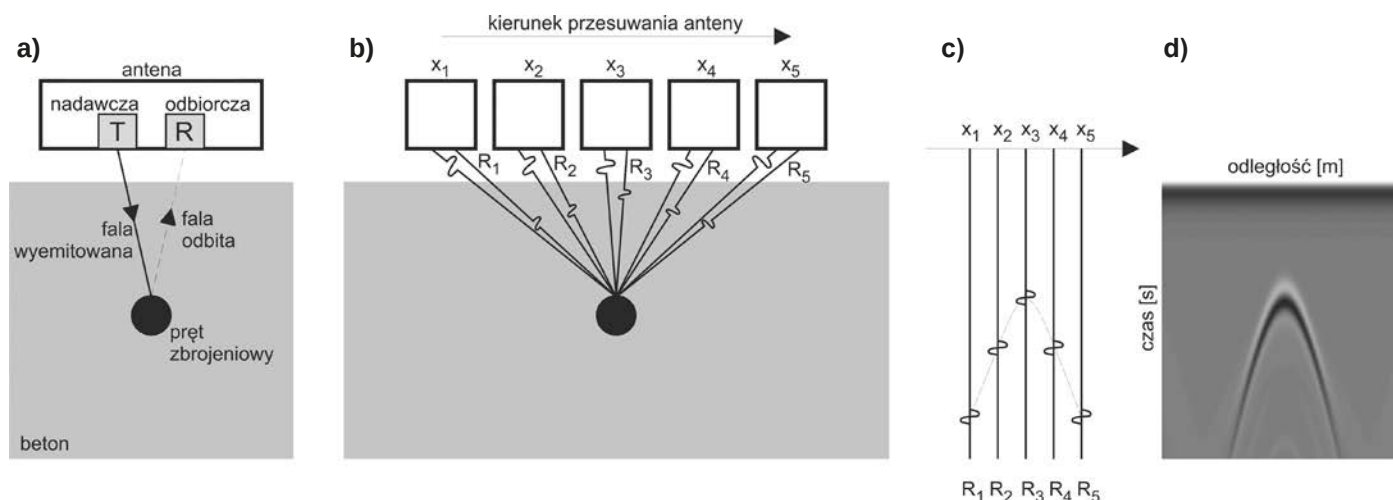
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Długości fali rozchodzące się w betonie wynoszą zatem od 1 m (dla anteny o częstotliwości 100 MHz) do 5 cm (dla anteny o częstotliwości 2 GHz). Należy także podkreślić, że częstotliwość pracy anteny ma duży wpływ na dokładność metody georadarowej. Im wyższa częstotliwość fali, tym mniejsze obiekty można zidentyfikować na mapie georadarowej. Przyjmuje się, że rozdzielczość pionowa jest równa $\frac{1}{4}$ długości fali [8].

BADANIA EKSPERYMENTALNE TECHNIKĄ GPR

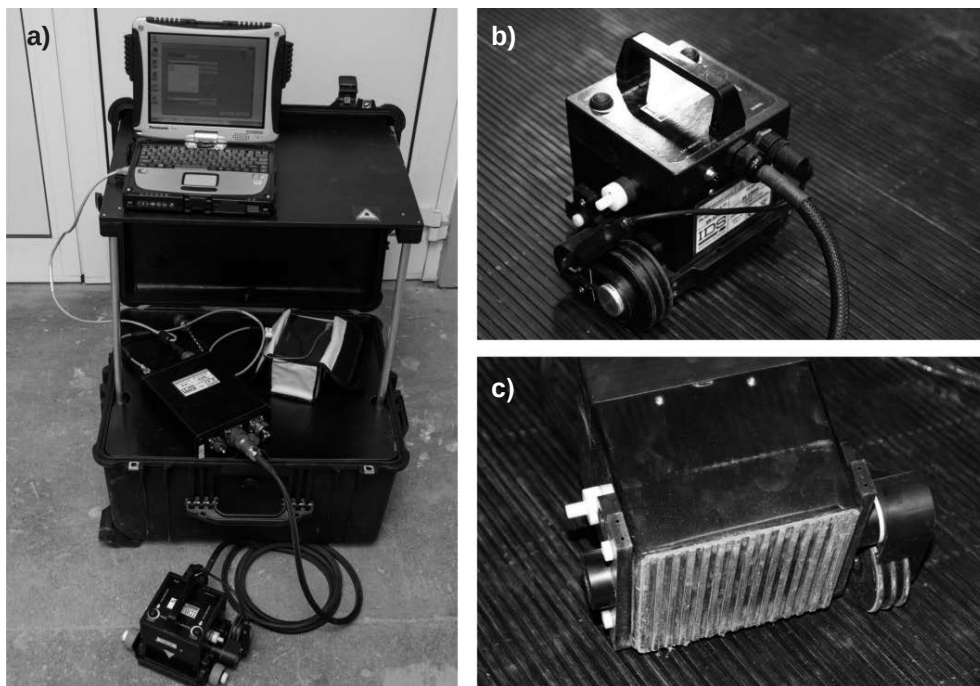
Opis sprzętu pomiarowego

Badania posadzki wykonano za pomocą georadaru Aladdin (rys. 2a). W skład użytego zestawu wchodzi: antena, jednostka sterująca, akumulator oraz przenośny komputer. Ekranowana antena o częstotliwości pracy równej 2 GHz jest anteną bipolarną, mającą dwie pary nadajnik – odbiornik ustawione prostopadle względem siebie, umożliwiającą wykonywanie pomiarów jednocześnie w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Antena o takiej częstotliwości pracy pozwala na wykrycie obiektów nie mniejszych niż 1,25 cm. Jednostka sterująca o częstotliwości powtarzania impulsów równej 400 kHz odpowiada za sterowanie anteną oraz digitalizację danych pomiarowych. Dodatkowym wyposażeniem jest podkładka (mata) badawcza PSG (*Pad Survey Guide*) o wymiarach $200 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ umożliwiająca



Rys. 1. Schemat działania metody georadarowej

a) pojedynczy pomiar, b) pomiary podczas przesuwania anteny, c) poszczególne zapisy zarejestrowane przez georadar, d) mapa georadarowa



Rys. 2. Georadar Aladdin

a) antena, jednostka sterująca, akumulator oraz przenośny komputer; b) antena na macie badawczej PSG; c) widok spodu anteny w trybie pracy na macie PSG

równolegle prowadzenie skanów dzięki szeregowi rowków rozmieszczonych w odległości 0,78 cm (rys. 2b). W trybie pracy na macie PSG z anteny zdejmowana jest osłona chroniąca gumową podstawę zintegrowaną z matą PSG (por. rys. 2c). Do akwizycji danych pomiarowych służy oprogramowanie K2 FAST WAVE, zaś interpretacja i wizualizacja danych pomiarowych jest wykonywana za pomocą oprogramowania GRED HD.

Przedmiot badań

Badaniom metodą georadarową poddano konstrukcję podłogi posadowionej na gruncie (rys. 3) w pomieszczeniu laboratoryjnym (sala nr 10, budynek Żelbet, Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Gdańska). Badanie wykonano w związku ze zmianą sposobu użytkowania laborato-

rium. Pierwotnie, w pomieszczeniu była zamocowana suwnica warsztatowa. Ze względu na planowany remont sali i wymianę sprzętu laboratoryjnego suwnicę usunięto. Badanie metodą georadarową wykonywano na obszarze podłogi znajdującej się bezpośrednio pod usuniętą suwnicą w celu diagnostyki układu warstw rozpatrywanej konstrukcji podłogi, w szczególności w celu określenia ilości i rozkładu zbrojenia oraz występowania potencjalnych uszkodzeń betonu.

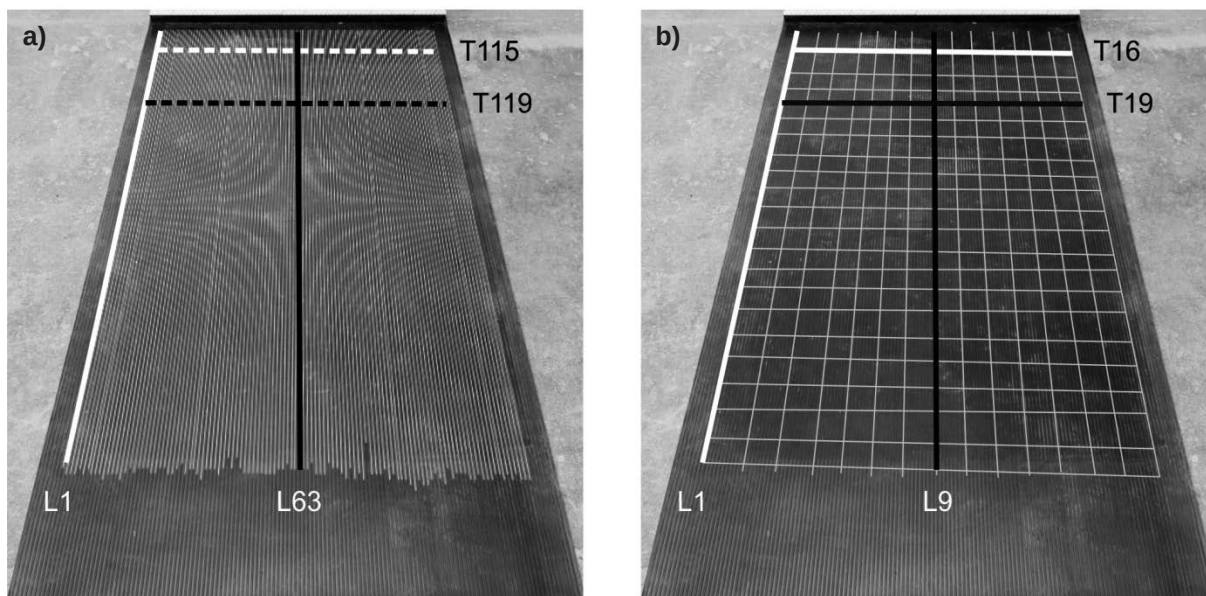
Metodyka badań

Badania za pomocą metody GPR wymagają odpowiedniego przygotowania i ustalenia parametrów pomiarowych. Jednym z istotnych parametrów jest prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w badanym ośrodku. Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie zależy od wielu czynników, m.in. od jego składu, wilgotności i porowatości [6]. W przeprowadzonych badaniach prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie przyjęto jako 10 cm/ns. Kolejnym ważnym parametrem jest liczba próbek rejestrowanego sygnału, która odpowiada za rozdzielczość pojedynczej trasy w mapie georadarowej. Mierzono 512 próbek na skan, co odpowiadało sygnałowi o długości 32 ns. Przy założonej prędkości rozchodzenia się fali maksymalna głębokość penetracji wynosiła zatem 160 cm.

Na obszarze badawczym (rys. 3) wykonano dwa rodzaje pomiarów. W badaniu nr 1 (rys. 4a) wykorzystano matę PSG, wykonując 111 równoległych skanów wzdłużnych co 0,78 cm. Dzięki tak gęstemu pomiarowi było możliwe wygenerowanie skanów poprzecznych przez oprogramowanie georadaru w wyniku interpolacji danych z anteny bipolarnej. W badaniu nr 2 (rys. 4b) zrezygnowano z maty PSG i wykonano pomiary zarówno podłużne (15 skanów co 6 cm), jak i poprzeczne (23 skany co 6 cm).



Rys. 3. Badanie konstrukcji podłogi w pomieszczeniu laboratoryjnym (sala nr 10, budynek Żelbet, Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Gdańska) za pomocą metody georadarowej z użyciem maty PSG



Rys. 4. Trasy wykonywanych skanów: a) badanie nr 1: skany podłużne z użyciem maty PSG; b) badanie nr 2: skany podłużne i poprzeczne bez użycia maty PSG

ANALIZA I INTERPRETACJA DANYCH POMIAROWYCH

Wyniki uzyskane z badań eksperymentalnych przetworzono za pomocą oprogramowania GRED HD. Przetwarzanie danych pomiarowych miało na celu poprawę stosunku sygnału użytecznego do szumu, eliminację fal zakłócających oraz wzmocnienie sygnału według charakterystyki zmiennej w czasie. Do wszystkich pomierzonych tras georadarowych zastosowano następujące filtry i wzmocnienia [7]:

- *move start time* – algorytm używany do dostosowywania głębokości mapy georadarowej do faktycznego poziomu terenu,
- *background removal* – filtr wykorzystujący algorytm Clear-X, który usuwa ciągle składowe wzdłuż osi X,
- *smoothed gain* – wzmocnienie wygładzające.

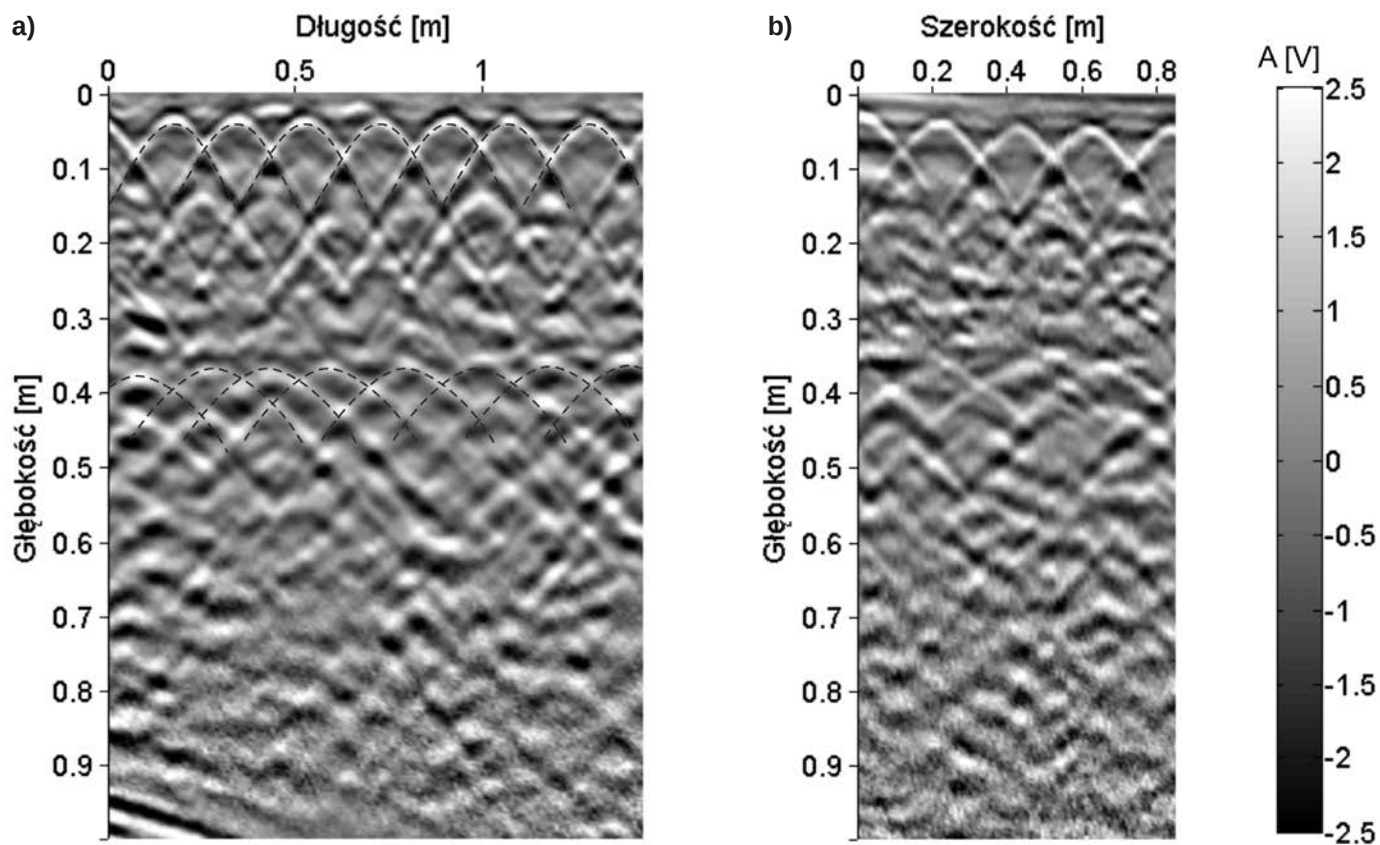
Na rys. 5 ÷ 8 przedstawiono wyniki wybranych map georadarowych zarejestrowanych na profilach z rys. 4. W badaniu nr 1 są to skany podłużne L1 i L63 (linia ciągła na rys. 4a) oraz skany poprzeczne T115 i T119 (linia przerywana na rys. 4a) wygenerowane przez oprogramowanie georadaru. W badaniu nr 2 (rys. 4b) interpretację wyników pokazano na przykładzie profili podłużnych L1 i L9, jako odpowiedników profili L1 i L63 z badania nr 1 oraz na przykładzie profili poprzecznych T16 i T19, jako odpowiedników profili T115 i T119 z badania nr 1.

Na rys. 5 przedstawiono mapy georadarowe w badaniu nr 1: wzdłużną (L1) i poprzeczną (T115). Inkluzje w postaci prętów zbrojeniowych powodują powstanie na mapie georadarowej dwóch rzędów parabol. Na obu profilach widoczne są dwa rzędy prętów (znajdujące się w wierzchołkach parabol) na głębokości 4 cm i 37 cm (skan podłużny) oraz 6 cm i 35 cm (skan poprzeczny). Profil podłużny umożliwia identyfikację 7 prętów w rozstawie 20 cm (górny rząd) oraz 8 prętów w rozstawie 20 cm (dolny rząd). Na wygenerowanym profilu poprzecznym (rys. 5b) wykryto 5 prętów w rozstawie 20 cm (górny rząd) oraz 4 pręty w rozstawie 20 cm (dolny rząd). Pręty zbrojeniowe z dolnego rzędu są przesunięte w stosunku do prętów zbrojeniowych rzę-

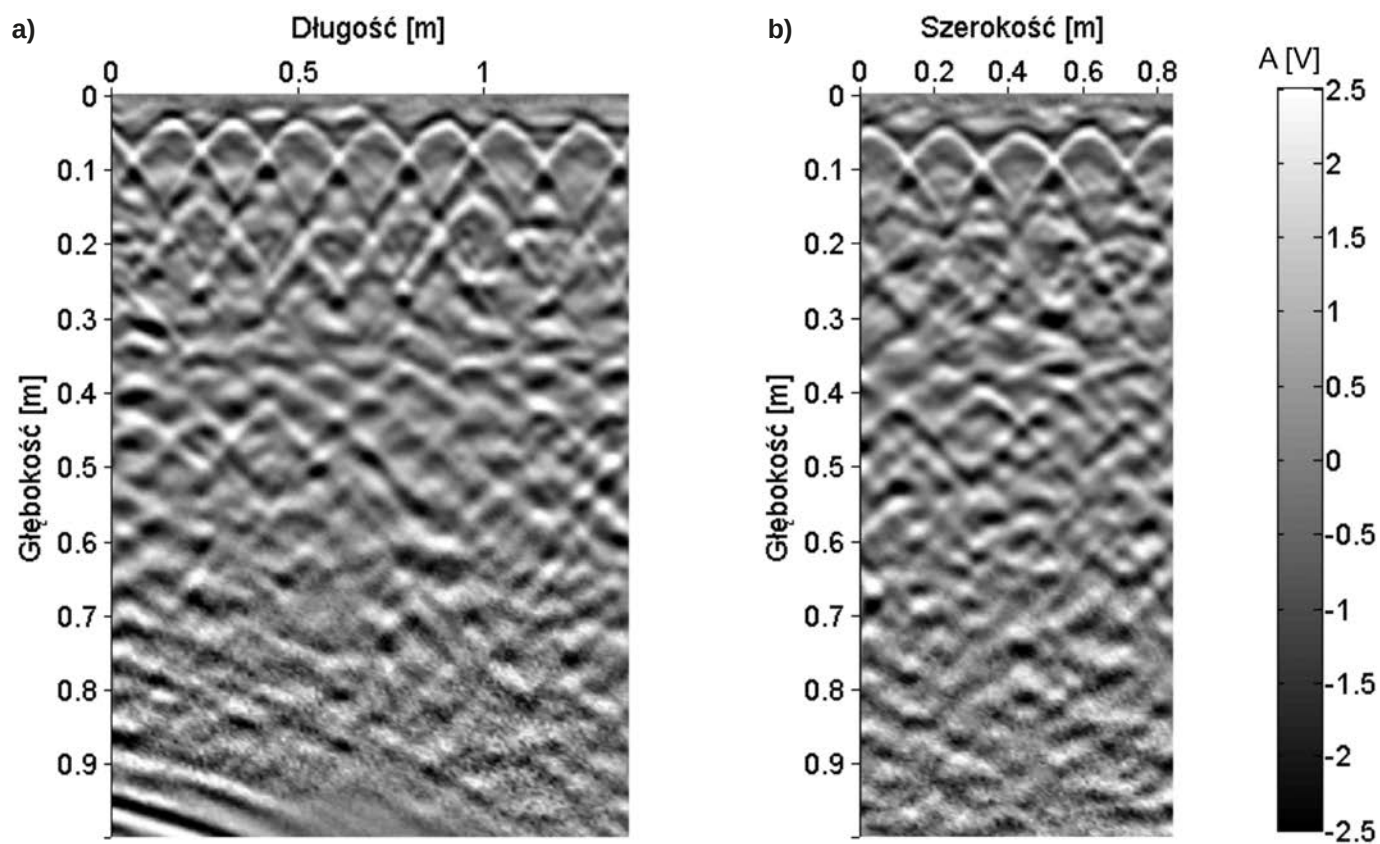
du górnego o około 10 cm. Odpowiedniki skanów L1 i T115 w badaniu nr 2 (L1 i T16) potwierdzają wcześniej zaobserwowaną siatkę zbrojeniową (rys. 6), przy czym wykonany skan poprzeczny (T16) charakteryzuje się lepszą jakością od wygenerowanego odpowiednika z badania nr 1 (T115), w szczególności dużo wyraźniej widoczny jest dolny rząd prętów.

Na rys. 7 pokazano mapy georadarowe profili znajdujących się w środkowej części badanego obszaru. Skan podłużny L63 oraz wygenerowany skan poprzeczny T119 z badania nr 1 (rys. 7) wraz z ich odpowiednikami z badania nr 2, skanem podłużnym L9 oraz skanem poprzecznym T19 (rys. 8), potwierdzają jednoznacznie ustaloną siatkę prętów zbrojeniowych. W przeprowadzonym badaniu efektywna głębokość penetracji fali elektromagnetycznej w głąb konstrukcji podłogi wynosiła około 50 cm. Poniżej tej głębokości mapy georadarowe nie wykazują odbić od poszczególnych warstw podłogi. W badanym obszarze nie wykryto anomalii w formie punktowych odbić fali, które mogłyby świadczyć o uszkodzeniu betonu w postaci szczelin czy też pustek powietrznych. Ze względu na częstotliwość pracy anteny równą 2 GHz, uszkodzenia mniejsze niż 1,25 cm mogły być pominięte na podstawie interpretacji uzyskanych map georadarowych.

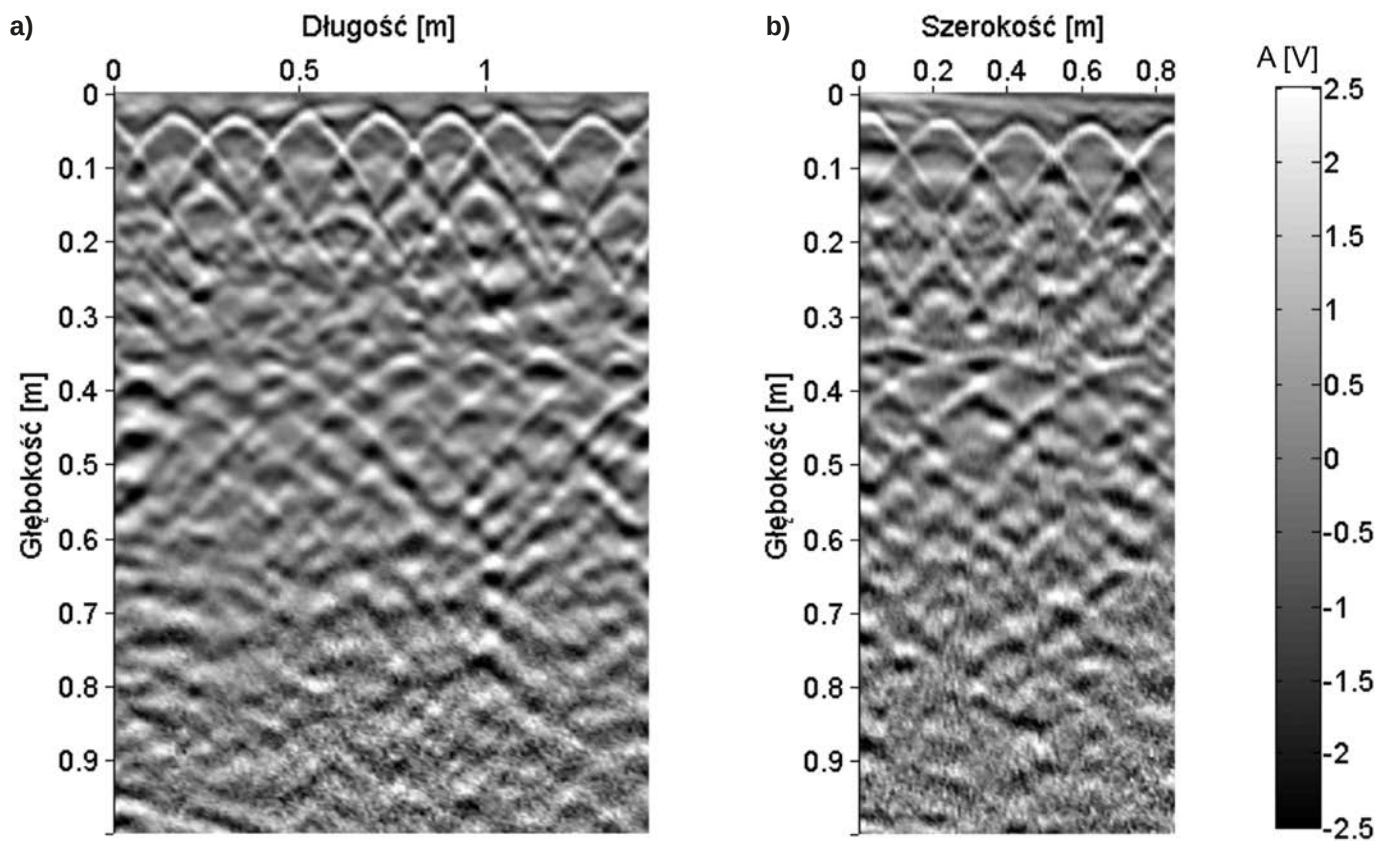
Oprogramowanie GRED HD umożliwia wrysowanie wkładki zbrojeniowych w widoczne parabole na georadarowych mapach poprzecznych i podłużnych. Po wrysowaniu wkładki w ich odwzorowania na mapie utworzono wizualizację siatki zbrojeniowej w trójwymiarze (rys. 9). Dzięki takiemu zobrazowaniu można zauważyć, że w górnej warstwie zbrojenia pręty poprzeczne są usytuowane pod prętami podłużnymi, zaś w dolnej warstwie zbrojenia pręty poprzeczne są ułożone nad prętami podłużnymi. Taką wizualizację można wykonać zarówno w badaniach z gęstym profilowaniem, jak i w badaniach z rzadką siatką skanów poprzecznych i podłużnych. Należy jednak zwrócić uwagę, że jedynie badanie z gęstym profilowaniem umożliwia utworzenie tomografii (tzw. C-scan) skanowanego obszaru na żądanej głębokości. Staje się to możliwe dzięki zastosowaniu danych pomiarowych zarejestrowanych przez antenę bipolarną. W celu pokazania ortogonalnego układu prętów zbrojeniowych w konstrukcji pod-



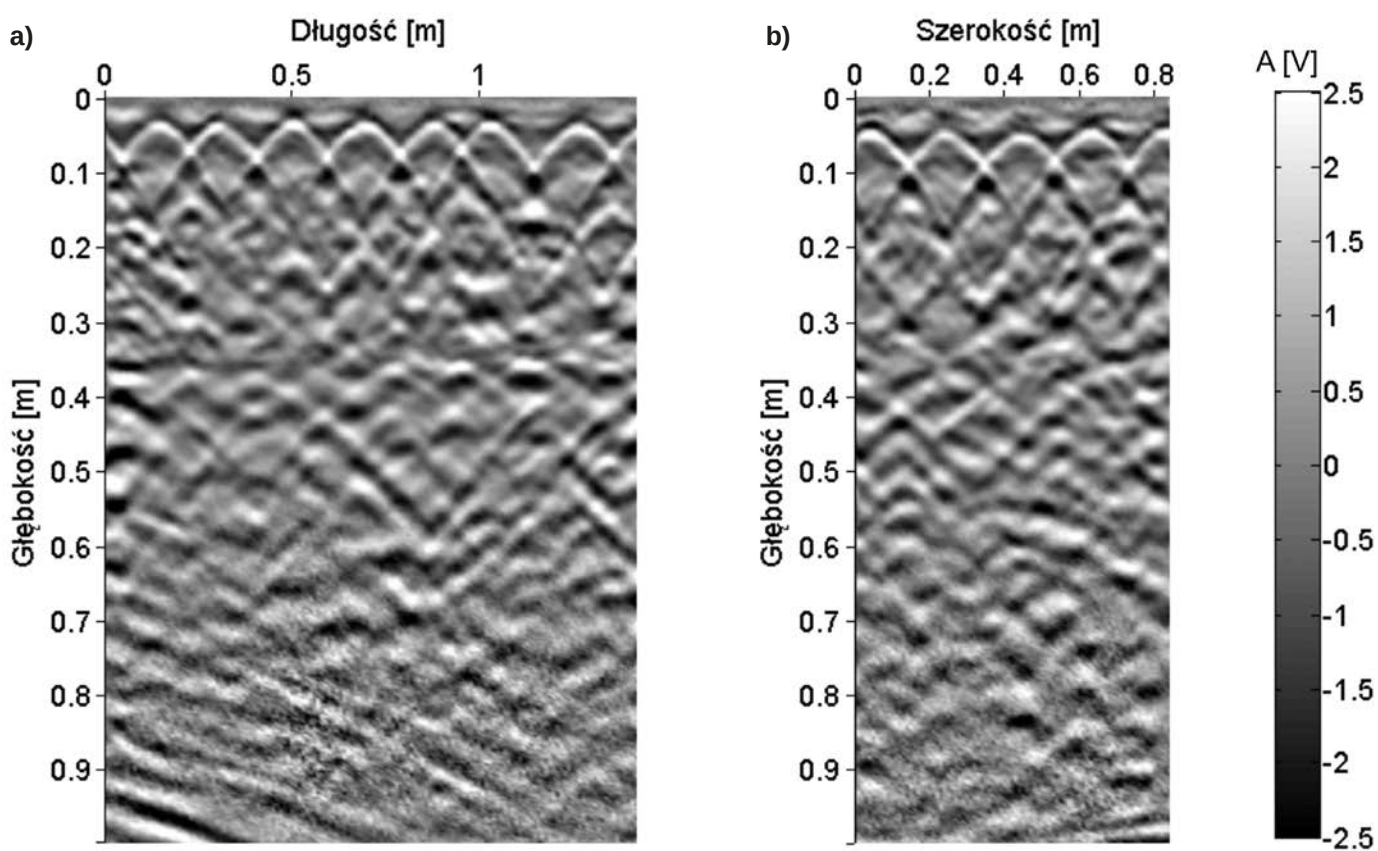
Rys. 5. Mapa georadarowa w badaniu nr 1 (tylko skanowanie podłużne)
a) skan podłużny (L1); b) skan poprzeczny wygenerowany przez oprogramowanie georadaru (T115)



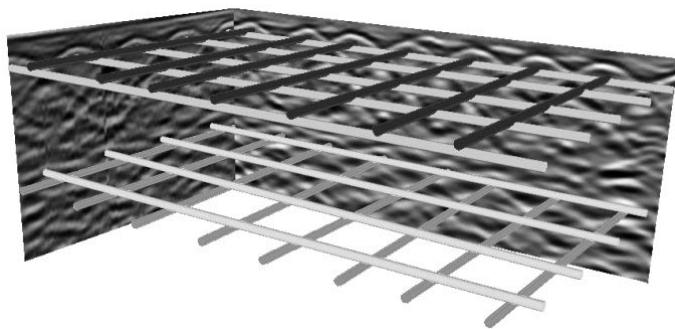
Rys. 6. Mapa georadarowa w badaniu nr 2 (skanowanie podłużne i poprzeczne)
a) skan podłużny (L1); b) skan poprzeczny (T16)



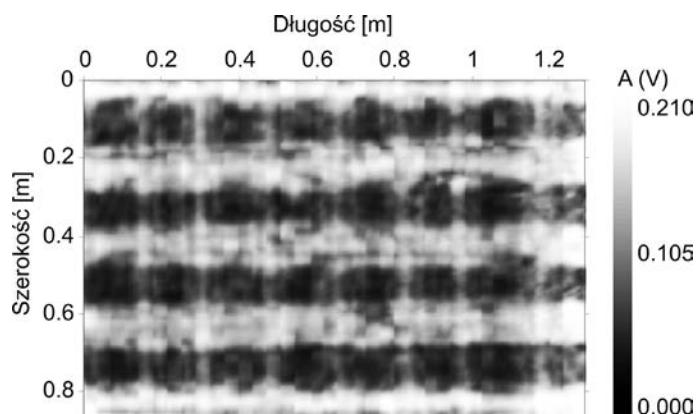
Rys. 7. Mapa georadarowa w badaniu nr 1 (tylko skanowanie podłużne)
a) skan podłużny (L63); b) skan poprzeczny wygenerowany przez oprogramowanie georadaru (T119)



Rys. 8. Mapa georadarowa w badaniu nr 2 (skanowanie podłużne i poprzeczne)
a) skan podłużny (L9); b) skan poprzeczny (T19)



Rys. 9. Model 3D siatki zbrojeniowej posadzki



Rys. 10. Tomografia przeskanowanego obszaru na poziomie górnych prętów zbrojeniowych w badaniu posadzki w przypadku wykonania skanów jedynie podłużnych (badanie nr 1)

łogi do analizy przyjęto dane georadarowe z przeskanowanego obszaru w badaniu nr 1. Na ich podstawie wykonano tomografię na głębokości górnych prętów zbrojeniowych (rys. 10).

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych konstrukcji podłogi posadowionej na gruncie. Badania diagnostyczne miały na celu ocenę stanu technicznego podłogi, w szczególności określenie ilości i rozkładu zbrojenia oraz występowania potencjalnych uszkodzeń betonu. Do badań wykorzystano antenę bipolarną o częstotliwości 2 GHz. Na obszarze badawczym wykonano dwa rodzaje pomiarów. W pierwszym z nich wykorzystano matę badawczą do prowadzenia jedynie pomiarów podłużnych (111 skanów co 0,78 cm). Dzięki tak gęstej siatce po-

miarowej możliwe było wygenerowanie skanów poprzecznych przez oprogramowanie georadaru w wyniku interpolacji danych z anteny bipolarnej. Podejście to umożliwiło również wykonanie tomografii przeskanowanego obszaru na głębokości prętów zbrojeniowych oraz trójwymiarową wizualizację prętów zbrojeniowych. W drugim badaniu wykonano zarówno pomiary podłużne (15 skanów co 6 cm), jak i poprzeczne (23 skany co 6 cm). Zaletą tego rodzaju badania jest czas realizacji, ponieważ skanując ten sam obszar podłogi, wykonano łącznie jedynie 38 profili, zamiast 111. Jednakże, przy tak rozrzedzonej siatce pomiarowej nie było możliwe uzyskanie prawidłowej tomografii prętów zbrojeniowych. W wyniku przeprowadzonych badań techniką georadarową w przeskanowanym obszarze zidentyfikowano dwa rzędy prętów zbrojeniowych. Badania nie wykazały uszkodzeń betonu w postaci szczelin czy też pustek powietrznych.

LITERATURA

1. Barrile V., Pucinotti R.: Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study. *NDT&E International*, Vol. 38, 2005, 596-604.
2. Bęben D., Mordak A., Anigacz W.: Zastosowanie techniki georadarowej do ustalenia parametrów belek mostowych. *Drogi i Mosty*, nr 3, 2011, 5-22.
3. Binda L., Zanzi L., Lualdi M., Condoleo P.: The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy. *NDT&E International*, Vol. 38, 2005, 171-179.
4. Cassidy N.J., Eddies R., Dods S.: Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 74, 2011, 263-276.
5. Courard L., Gillard A., Darimont A., Bleus J. M., Paquet P.: Pathologies of concrete in Saint-Vincent Neo-Byzantine Church and Pauchot reinforced artificial stone, *Construction and Building Materials*, 34 (2012), 201-210.
6. Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010.
7. GRED HD Software. GPR High Definition Data Post Processing. User Manual. Pisa, 2013.
8. Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M.: Zarys metody georadarowej, Wydawnictwo AGH, Kraków 2011.
9. Marcak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S.: Analiza możliwości wykorzystania georadarowych fal refrakcyjnych do lokalizacji zmian w budowie wałów przeciwpowodziowych, *Geologia* 2005, Tom 31. Zeszyt 3-4, 259-274.
10. 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.