

DAMIAN BĘBEN¹⁾
ARKADIUSZ MORDAK²⁾
WOJCIECH ANIGACZ³⁾

ZASTOSOWANIE TECHNIKI GEORADAROWEJ DO USTALENIA PARAMETRÓW BELEK MOSTOWYCH

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono zastosowanie techniki georadarowej do ustalenia parametrów belek mostowych. Metoda georadarowa wykorzystuje zasadę rozpraszania fal elektromagnetycznych. Przedmiotem tej pracy jest trójprzęsłowy wiadukt drogowy położony nad torami kolejowymi. Dzięki zastosowaniu techniki georadarowej ustalono nieznane parametry geometryczne belek mostowych i zlokalizowano położenie zbrojenia stalowego.

SŁOWA KLUCZOWE: badanie doświadczalne, belka mostowa, fala elektromagnetyczna, georadar, wiadukt, zbrojenie

1. WPROWADZENIE

Georadar (ang. *Ground Penetrating Radar* – GPR) jest techniką elektromagnetyczną o wysokiej rozdzielczości, która przede wszystkim jest przeznaczona do badania płytko zalegających warstw pod powierzchnią gruntu, elementów konstrukcji, dróg, a także mostów. Początki stosowania techniki GPR sięgają lat 70. XX wieku [1 - 4].

Metoda GPR wykorzystuje zasadę rozpraszania fal elektromagnetycznych (EM), aby zlokalizować poszukiwany obiekt lub element. Główne zasady i teoria działania GPR ewoluowały na przestrzeni lat w wyniku rozwoju dziedzin elektrotechniki, geofizyki

¹⁾ dr inż. – Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej

²⁾ dr inż. – Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej

³⁾ dr hab. inż. – profesor Politechniki Opolskiej, Wydział Budownictwa

i badań sejsmicznych. Podstawowa zasada działania georadaru jest taka sama, jak w przypadku radarów wykorzystywanych, np. do wykrywania samolotów. W technice GPR, anteny pomiarowe są przesuwane po analizowanej powierzchni, a nie obracają się wokół jednego stałego punktu – jak w przypadku radarów do wykrywania samolotów.

W sprzyjających warunkach, technika GPR może dostarczyć dokładnych informacji na temat charakteru obiektów podziemnych, głębokości ich zalegania, występujących anomalii konstrukcyjnych, np. występujących pustek w badanym obiekcie, itp.

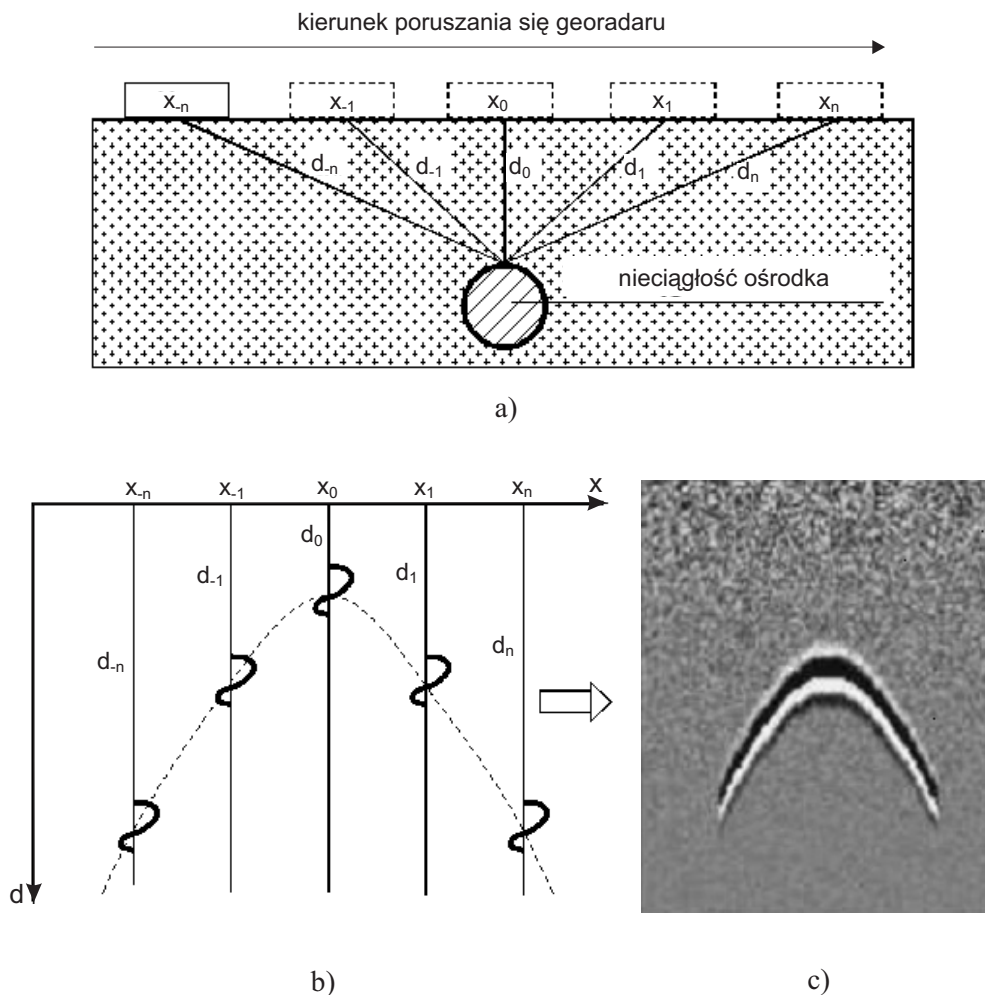
Metodę GPR wykorzystuje się we wszelkich pracach mających na celu nieinwazyjne zlokalizowanie dowolnego obiektu (elementu) w innym materiale. Jest ona powszechnie stosowana m.in. w ochronie środowiska, geologii, budownictwie i archeologii. Jest ona szeroko wykorzystywana do lokalizowania infrastruktury podziemnej, np. rur, kabli, oraz może być stosowana w płytkich badaniach geotechnicznych i geologicznych (np. wyznaczanie warstw podbudowy, kształtu i wymiarów fundamentów, warstw geologicznych, pustek i kawern). Technikę GPR można również wykorzystywać do bardzo dokładnego prześwietlania (skanowania) ścian i fundamentów w celu poszukiwania prętów zbrojeniowych, rur, kabli i lokalnych wewnętrznych nieciągłości [5 - 10].

Przedmiotem artykułu jest trójprzęsłowy wiadukt drogowy położony nad torami kolejowymi, który poddany został remontowi. W związku z przyjętą techniką wzmocnienia tego wiaduktu oraz brakiem dokumentacji projektowej istniejącego obiektu, należało uzyskać podstawowe informacje na temat występujących w nim belek mostowych. Głównym celem badań doświadczalnych z wykorzystaniem techniki georadarowej było ustalenie parametrów geometrycznych belek mostowych i występującego w nich zbrojenia. Badania doświadczalne obejmowały dwie żelbetowe belki mostowe usytuowane w przeszle środkowym i skrajnym.

2. ZASADA DZIAŁANIA I PODSTAWY TEORETYCZNE TECHNIKI GPR

Do badań wykorzystano georadar Aladdin produkcji włoskiej firmy IDS. Podstawowym mechanizmem działania georadaru jest wysyłanie pojedynczych krótkich impulsów fal elektromagnetycznych (EM), $t \leq 1$ ns, realizowane przez nadajnik oraz odbieranie sygnałów odbitych (poprzez odbiornik). Każdy element znajdujący się w badanym podłożu (materiale) może powodować odbicie fali EM, jeżeli jego parametry elektryczne (stała dielektryczna i przewodność elektryczna) będą się różnić od otoczenia. Z teoretycznego punktu widzenia różnica jednej jednostki stałej dielektrycznej powinna pozwolić już na odbicie fali. Do prawidłowej interpretacji wyników GPR konieczne jest porównanie fal emitowanych i odebranych. Różnice między nimi zależą od właściwości elektromagnetycznych danego ośrodka. Prędkość fali jest cechą sygnału, która jest również silnie uzależniona od właściwości elektromagnetycznych materiału, przez który przechodzi. Odnosi się to także do amplitudy i częstotliwości fali odbitej [11].

W wyniku zbliżania się georadaru (anteny) do jakiegoś obiektu (elementu) będącego nieciągłością ośrodka, maleje odległość d_n , d_{n-1} , itd. (rys. 1a). Zatem zmniejsza się także czas powrotu fali odbitej od obiektu (elementu) do odbiornika. Z połączenia punktów będących informacją o odległości (czasie) od obiektu w poszczególnych punktach x_n , x_{n-1} , itd. powstaje hiperbola będąca odzwierciedleniem obiektu na mapie radarowej (rys. 1b,c).



Rys. 1. Schemat prezentujący ogólną zasadę działania georadaru: a) pomiar, b) interpretacja graficzna pomiaru, c) finalna mapa georadarowa

Fig. 1. Scheme of the general principle of operation of the GPR: a) measurement, b) graphic interpretation of measurement, c) final map of the GPR

Z teoretycznego punktu widzenia, sygnał GPR przechodzący przez obiekt (element) składający się z kilku warstw, może być analizowany jako suma odbić sygnału od poszczególnych warstw zgodnie z równaniem (1):

$$f(k) = \sum_i A_i x(k - t_i) + n(k) , \quad (1)$$

gdzie: A_i jest współczynnikiem osłabienia sygnału, t_i jest czasem przejścia przez daną warstwę, a $n(k)$ jest szumem pomiarowym. Współczynniki A_i i t_i są uzależnione głównie od właściwości dielektrycznych materiałów i grubości poszczególnych warstw [12].

Pierwiastek błędu średnio kwadratowego pomiędzy oryginalnym sygnałem GPR $f(k)$ i odszumionym sygnałem $r(k)$ można obliczyć ze wzoru (2):

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{[f(k) - r(k)]^2}{[f(k) - \mu_f]^2}} , \quad (2)$$

gdzie μ_f jest średnią wartością sygnału GPR $f(k)$.

Podczas propagacji fal EM przez beton, dochodzi do ich modyfikacji w stosunku do właściwości elektromagnetycznych materiału, tj. przewodności elektrycznej σ , przenikalności dielektrycznej ε , przenikalności magnetycznej μ . Należy zauważyć, że beton jest materiałem o właściwościach niemagnetycznych, tak więc wykazuje przenikalność magnetyczną podobną do tej, którą można zaobserwować w próżni ($\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) [8], [13]. Ważnym czynnikiem wpływającym na przenikalność dielektryczną betonu jest zawartość wilgoci w porach betonowych. Przeważnie wilgotność betonu zmienia się na głębokości badanego elementu. Względna przenikalność dielektryczna betonu zazwyczaj waha się od wartości około 6 w przypadku betonu w stanie naturalnie suchym do 12 w przypadku betonu wilgotnego [13].

W pracy [11] autorzy wprowadzili zależność bazującą na równaniach Maxwella z uwzględnieniem warunków brzegowych:

$$\sigma + j\omega\varepsilon = \sigma' + \omega\varepsilon'' + j\omega\left(\varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega}\right) , \quad (3)$$

gdzie σ jest przewodnością elektryczną ogólną, ω jest prędkością kątową fali, σ' i σ'' są odpowiednio częściami rzeczywistymi i urojonymi przewodności elektrycznej, natomiast ε jest przewodnością dielektryczną ogólną, a ε' i ε'' są częściami rzeczywistymi i urojonymi przewodności dielektrycznej.

Stała dielektryczna ε'_r i współczynnik strat ε''_r wpływają na prędkość przechodzenia fali v przez dany materiał. Dlatego można wprowadzić równanie wyrażające prędkość przechodzenia fali jako funkcję uzależnioną od ε'_r , ε''_r i c (prędkość fal EM w przestrzeni swobodnej) [8]:

$$v(\omega) = \frac{c\sqrt{2}}{\sqrt{\varepsilon'_r(\omega)^2 + \varepsilon''_r(\omega)^2 + \varepsilon'_r(\omega)}} . \quad (4)$$

W ośrodkach materialnych z niewielkimi stratami, np. takimi jak beton, równanie (4) można zapisać w formie:

$$v(\omega) = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'_r(\omega)}} . \quad (5)$$

Wzór (5) jednoznacznie pokazuje, że prędkość fali EM w betonie zależy tylko od stałej dielektrycznej ε'_r .

Głębokość penetracji, rozdzielczość pionowa i pozioma to główne ograniczenia w stosowaniu techniki GPR. Głębokość penetracji jest określana jako głębokość, na której amplituda zostaje osłabiona przez współczynnik e^{-1} , oraz wskazuje na możliwości przenikania sygnału radarowego przez badane elementy. Zależy to w głównej mierze od współczynnika osłabienia oraz od zmian fal EM. Rozdzielczość pozioma wskazuje na możliwości georadaru do wykrywania dwóch różnych elementów w kierunku przesuwania się anteny pomiarowej. W praktyce uzyskuje się informacje o dwóch różnych nieprawidłowościach w zapisie wyniku georadarowego. Zależy to od częstotliwości anteny, głębokości penetracji i elektromagnetycznych właściwości badanego obiektu (materiału). Natomiast rozdzielczość w pionie jest tzw. rozdzielczością w czasie, i definiuje się ją jako zdolność anteny do wykrywania dwóch poziomych nieciągłości jako odrębnych anomalii. Ten parametr zależy także od prędkości fali i od jej długości [14].

Odbicie emitowanej energii (fali) następuje w momencie gwałtownych zmian parametrów dielektrycznych materiału. Współczynnik odbicia jest ściśle związany ze stałą dielektryczną danego materiału (elementu). Suma współczynników odbicia i przenikania jest równa jeden, można zatem wprowadzić zależność [11]:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}} , \quad (6)$$

gdzie: ε_{r1} i ε_{r2} są odpowiednio względnymi przenikalnościami elektrycznymi dwóch ośrodków materialnych. Zależność (6) wskazuje, że wielkość fali odbitej na styku dwóch ośrodków zależy od wielkości ich przenikalności elektrycznej.

3. OPIS ZASTOSOWANEGO SPRZĘTU

Najważniejszym elementem georadaru jest jednostka sterująca. Podstawowe zadania jednostki to sterowanie pracą anten, odbieranie i przetwarzanie sygnału (z analogowego na cyfrowy) oraz współpraca z podłączonym komputerem pomiarowym. Drugim elementem wchodzącym w skład konfiguracji georadarowej, szczególnie ważnym z punktu widzenia użytkownika jest antena. Anteny georadarowe są zbudowane z odpowiednio przygotowanych metalowych płytek zwanych dipolami. Anteny różnią się między sobą przede wszystkim częstotliwością pracy. Różnice w częstotliwości pociągają za sobą także zmiany wymiarów anteny. Z praktycznego punktu widzenia, częstotliwość anteny świadczy o fizycznych parametrach fali EM, a to z kolei bezpośrednio ma wpływ na dokładność pomiaru i co najważniejsze, na głębokość penetracji.

Zakres częstotliwości anten georadarowych znajduje się w przedziale od kilkunastu do około 2000 MHz. Anteny o niskiej częstotliwości mają zazwyczaj duże rozmiary i pozwalają na głęboką penetrację, ale z małą dokładnością (rozdzielczością). Z kolei, anteny o najwyższych częstotliwościach pracy (około 2000 MHz) mają znacznie mniejsze rozmiary (mieszczą się zazwyczaj w dłoni) i pozwalają na badanie z dużą dokładnością, ale tylko na niewielkiej głębokości. Anteny o częstotliwościach pośrednich (100 MHz - 1000 MHz) są najbardziej uniwersalne i wykorzystywane, m.in. do wykrywania infrastruktury podziemnej.

W skład zastosowanego w przedmiotowych badaniach zestawu georadarowego wchodzi następujące elementy:

- jednostka sterująca „Fast Wave” o częstotliwości powtarzania impulsów EM 400 kHz,
- antena ekranowana o częstotliwości pracy 2000 MHz będącą anteną bipolarną, tj. posiadającą dwie pary nadajnik-odbiornik o częstotliwości 2000 MHz umieszczone prostopadle względem siebie,
- uchwyt do anteny z kołem pomiaru odległości,
- komputer pomiarowy z oprogramowaniem do zbierania danych oraz akumulator i niezbędne kable połączeniowe.

4. OPIS BADANEJ KONSTRUKCJI

Ustrój nośny wiaduktu stanowi trójprzęsłowa konstrukcja belkowa swobodnie podparta wykonana z 25 belek o nieznanach parametrach geometrycznych i wytrzymałościowych. Rozpiętość poszczególnych przęseł wiaduktu jest jednakowa i wynosi około 11,50 m, z kolei całkowita długość obiektu wynosi ponad 39,00 m, a szerokość 13,00 m. Kąt skrzyżowania obiektu względem osi przeszkody, jaką jest linia kolejowa wynosi około 70°. Układ statyczny obiektu stanowi konstrukcja trójprzęsłowa swobodnie podparta. Belki ułożone są bezpośrednio na dwóch podporach (z jednej strony na przyczółkach, a z drugiej na podporach pośrednich – filarach) i prawdopodobnie przymocowane są za pomocą kotew do podpór.

Projekt remontu wiaduktu przewidywał zmianę schematu statycznego poprzez uciągnięcie ustroju za pomocą żelbetowej płyty, co miało umożliwić dopuszczenie poruszania się po wiadukcie pojazdów o łącznej masie 150 kN. Jednakże inwestor postanowił zwiększyć nośność tego wiaduktu do 300 kN, co wiązało się z koniecznością wykonania dokładnych badań istniejących belek. W trakcie prac remontowych usunięto z wiaduktu warstwy asfaltu oraz betonu wyrównawczego w celu odsłonięcia górnej powierzchni istniejących belek. Wykonano to w celu zminimalizowania wpływu innych elementów mogących zakłócić pomiar georadarem. Badane podłoże było suche, a warunki atmosferyczne bardzo dobre, niewpływające na dokładność wyników.

Badanie miało na celu zebranie podstawowych informacji o geometrii belek, a także o występującym w nich zbrojeniu (strzemiona i główne pręty zbrojeniowe), a w szczególności o rozstawie pomiędzy poszczególnymi prętami zbrojeniowymi oraz głębokości ich zalegania.

5. METODYKA WYKONANYCH BADAŃ I WYNIKI POMIARÓW

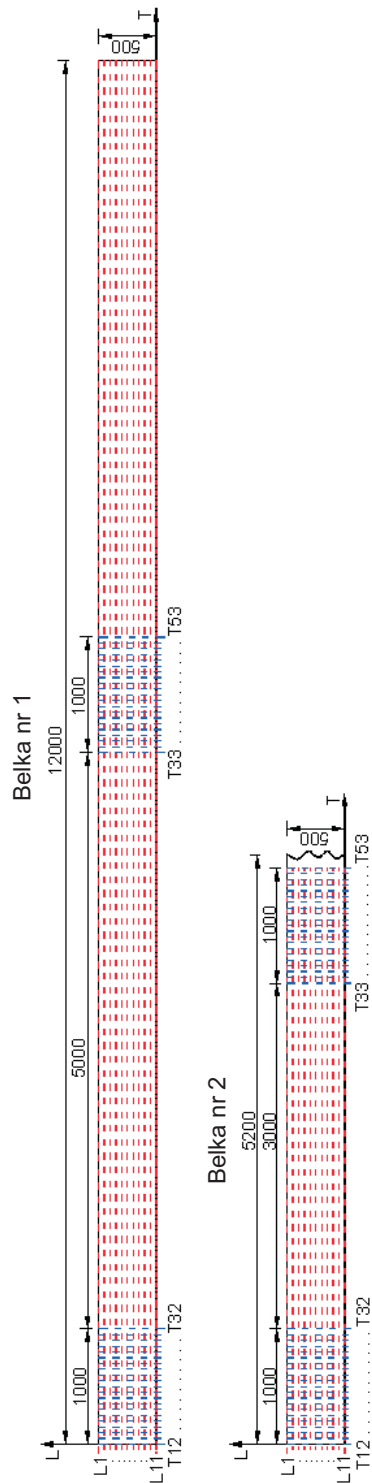
5.1. OPIS BADAŃ

Normy techniczne, określające sposób badania konstrukcji żelbetowych za pomocą georadaru nie zostały jeszcze opracowane. Można wykorzystać fragmenty amerykańskiej metody ASTM D 4748 [15], która odnosi się do ustalania grubości warstw nawierzchni drogowej. Jednakże w większości przypadków należy podchodzić indywidualnie do każdej konstrukcji.

Przed przystąpieniem do badań, bardzo ważną kwestią jest ustalenie prędkości rozchodzenia się fal EM w analizowanym ośrodku materialnym. Można tego dokonać doświadczalnie, mierząc czas przepływu fali w elemencie o znanej grubości, zmierzonej z dokładnością do ± 5 mm. Takie badanie powinno być przeprowadzone na niezbrojonym elemencie konstrukcji. Na podstawie określonego czasu przejścia fali EM, można obliczyć prędkość propagacji fali w badanym ośrodku. Należy także nadmienić, że prędkość rozchodzenia się fal EM w betonie zależy od jego porowatości, wilgotności i składu. Innym sposobem pomiaru prędkości fali EM jest metoda, tzw. wspólnego środkowego punktu. Można ją wykorzystywać w przypadku, kiedy stosuje się w pomiarach dwie niezależne anteny (nadawczą i odbiorczą). Metoda ta polega na wielokrotnym pomiarze czasu przejścia impulsu przy różnych położeniach anten wokół znanego punktu. Podobną metodą wyznaczania prędkości fali EM jest metoda szerokiego kąta odbicia, w której antena nadawcza ustawiona jest w jednym punkcie, a antena odbiorcza przemieszcza się. Dokładny opis metod wyznaczania prędkości rozchodzenia się fal EM można także znaleźć w pracy [16]. W rozpatrywanym przypadku ze względu na trudności w dostępie do niezazbrojonego elementu belki, nie przeprowadzono badań wstępnych kalibrujących prędkość rozchodzenia się fal EM. Nieznane były także parametry fizyczne betonu. W związku z tym prędkość fali w betonie $0,10$ m/ns przyjęto na podstawie danych literaturowych [16].

Do badań wytypowano dwie belki położone w osi podłużnej wiaduktu, jedną z przęsła skrajnego a drugą ze środkowego. Każda z belek stanowiła dla radaru osobną dodatkową ćwiartkę układu współrzędnych, w którym jej dłuższy bok stanowił oś T, a krótszy oś L. Równoległe do osi T prowadzono skany podłużne (L), natomiast równoległe do osi L wykonywano skany poprzeczne (T) (rys. 2).

Po odsłonięciu górnej części belek okazało się, że ich szerokość wynosi około $0,45$ m, a długość około $11,50$ m. Dlatego w badaniach postanowiono poddać skanowaniu pas o szerokości $0,50$ m i długości $12,00$ m. Wynikało to z faktu, że trudno było dokładnie określić początek i koniec poszczególnych belek, a także z powodu braku informacji na temat kształtu przekroju poprzecznego belki.



Rys. 2. Schemat ułożenia skanów na badanych belkach
 Fig. 2. Scheme of the scans arrangement on the tested beams

W celu uzyskania jak najlepszej dokładności wyników skany prowadzono możliwie blisko siebie, w odległości 0,05 m. Dla pierwszego pomiaru wykonano 11 profili podłużnych (L1 – L11) o długości około 12,00 m, które stanowiły pełne pokrycie belki mostowej nr 1. Dodatkowo wybrano dwa odcinki o długości 1,00 m, w których poprowadzono 42 skany poprzeczne (T), również z krokiem co 0,05 m. Wybrane odcinki znajdują się pomiędzy 0,00 i 1,00 m (T12 – T32), oraz pomiędzy 6,00 m i 7,00 m belki (T33 – T53). Na rys. 3 pokazano przebieg wykonywania skanów poprzecznych (T) i podłużnych (L). Pomiar belki nr 2 ze względu na tylko częściowe jej odsłonięcie został skrócony do długości około 6,00 m. Ponownie wykonano 11 profili podłużnych (L1 – L11) o długości 6 m z krokiem co 0,05 m. Podobnie jak w pierwszym przypadku także dla drugiej belki wybrano dwa odcinki o długości 1 m (pomiędzy 0,00 m i 1,00 m oraz 4,00 m i 5,00 m belki), które zostały poddane skanowaniu poprzecznemu (T12 – T53) z krokiem co 0,05 m (rys. 2).

Skany podłużne (L) miały na celu zlokalizowanie prętów zbrojeniowych (strzemion) biegnących w poprzek belki oraz ewentualne wykrycie innych anomalii. Natomiast skany poprzeczne (T) miały na celu zlokalizowanie głównych podłużnych prętów zbrojeniowych a także ewentualnych anomalii.



Rys. 3. Widok na wykonywanie skanów belki mostowej: a) poprzecznych (T), b) podłużnych (L)
 Fig. 3. View on executed scans of the bridge beam: a) transverse (T), b) longitudinal (L)

5.2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

5.2.1. Uwagi ogólne

Uzyskane wyniki georadarowe zostały przetworzone przy użyciu oprogramowania GRED 3D Utilities. Przetwarzanie danych odbywało się przy użyciu odpowiednich filtrów i wzmocnień. Wszystkie skany zostały przetworzone zestawem następujących filtrów:

- 1) *Move start time* – filtr przesuwający cały skan do poziomu 0,
- 2) *Background removal* – filtr usuwający niepotrzebne tło (zakłócenia) w postaci poziomych linii,
- 3) *Vertical bandpass filter* (TD) – filtr przepustowy dla wybranych częstotliwości (od 1600 MHz do 2400 MHz),
- 4) *Linear gain* – wzmocnienie liniowe, poprawiające jakość prezentacji wyników,
- 5) *Smoothed gain* – wzmocnienie wygładzające, poprawiające ostrość mapy georadarowej.

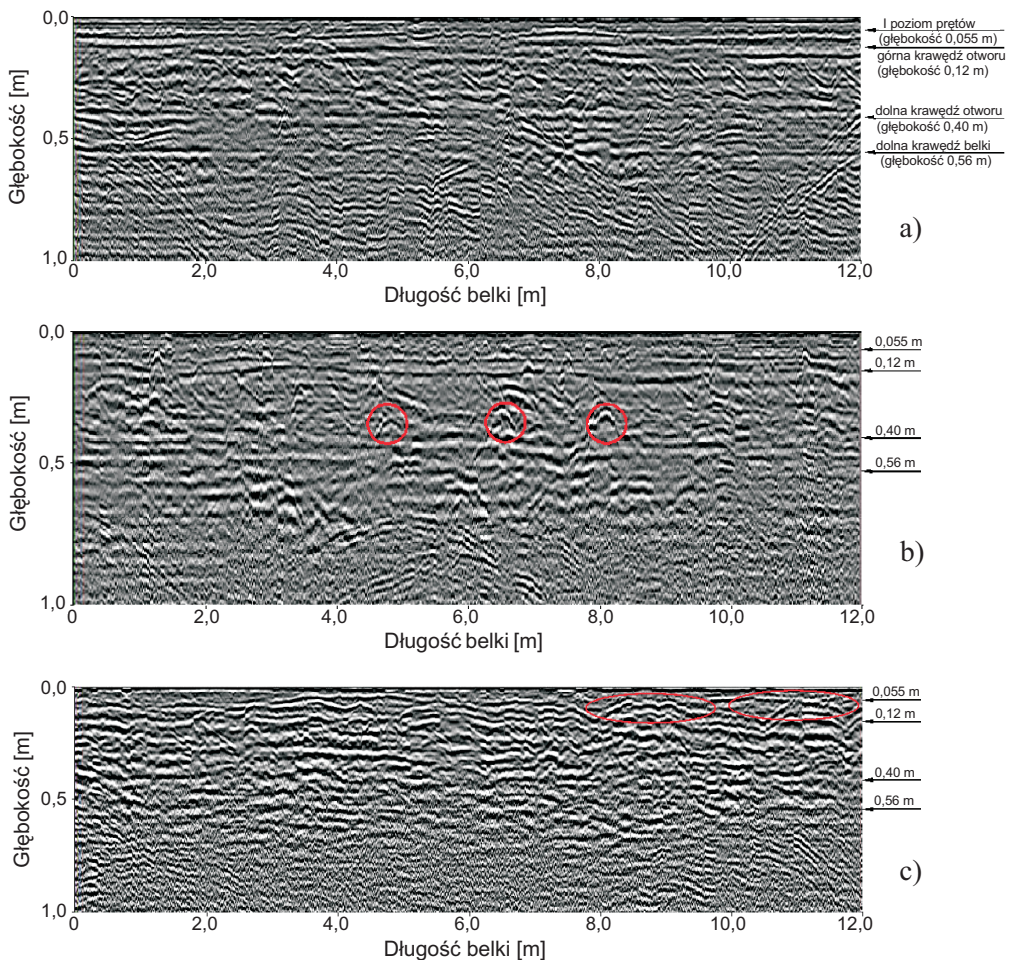
5.2.2. Belka nr 1

Na rys. 4 przedstawiono wybrane wyniki map georadarowych dla skanów podłużnych (L). Na wszystkich skanach podłużnych (L), pierwszy poziom prętów zbrojeniowych (strzemion) widoczny jest na podobnej głębokości, tj. 0,055 m od górnej krawędzi belki. Ewentualne różnice mogą wynikać z nierówności podłoża (obecności pozostałości betonowej wylewki). W tych miejscach pręty zbrojeniowe są położone nieco głębiej. Do ostatecznego określenia poziomu prętów zbrojeniowych przyjęto początkowe fragmenty każdego skanu. W tych miejscach belki były całkowicie odsłonięte a pręty są dobrze zobrazowane na mapie georadarowej. Dodatkowo na rys. 4 wyraźnie widać zaznaczającą się warstwę na głębokości około 0,12 m, jak się później okazało była to górna krawędź otworu znajdującego się wewnątrz belki. Na tych samych rysunkach na głębokości około 0,40 m jest widoczna kolejna warstwa – najprawdopodobniej jest to dolna granica otworu w belce. Na wszystkich mapach dobrze widoczna jest ponadto warstwa na głębokości około 0,56 m będąca dolną krawędzią całej belki.

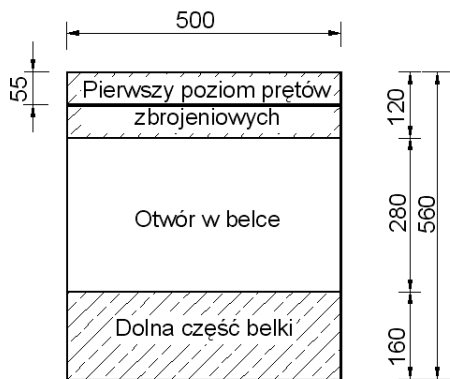
Dodatkowo wykryto kilka anomalii, tj. odbić od niezidentyfikowanego obiektu (elementu) widocznego na głębokości około 0,30 m (zaznaczono kółkami). Ten rodzaj anomalii jest najprawdopodobniej związany z występującym otworem w belce. Mogły one być spowodowane przez odbicia fal EM od krawędzi lub załamania w otworze.

Zauważono także cztery większe, podłużne anomalie (zaznaczone elipsami) widoczne na głębokości 0,07 m. Z kolei te anomalie są prawdopodobnie spowodowane przez główne górne zbrojenie podłużne występujące w belkach. W oparciu o uzyskane wyniki ustalono wstępny przekrój poprzeczny przez belkę mostową (rys. 5).

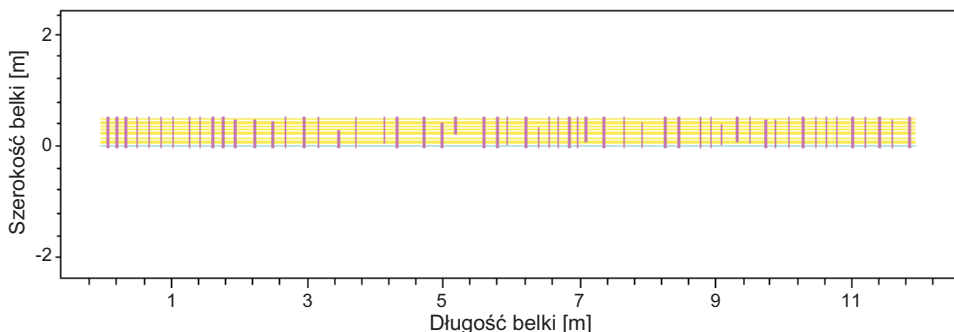
Odległości pomiędzy prętami zbrojeniowymi (strzemionami) zostały oszacowane na podstawie fragmentu mapy georadarowej, gdzie są one najlepiej widoczne, tj. na pierwszych 2 m każdego skanu, gdzie belka była całkowicie odsłonięta (rys. 4c). Na pozostałej części belki pojedyncze pręty są widoczne tylko miejscami i trudno znaleźć powtarzający się na wszystkich skanach obszar, gdzie widoczny jest szereg odbić od prętów zbrojeniowych. Średnia odległość pomiędzy prętami to 0,17 m, przy czym największa znaleziona na poniższym rysunku odległość wynosiła 0,20 m (w środkowej części belki), a najmniejsza 0,13 m (na obu końcach belki). Na rys. 6 pokazano rozmieszczenie strzemion w belce w widoku z góry.



Rys. 4. Przetworzone skany: a) L1, b) L6 oraz c) L11
 Fig. 4. The processed scans: a) L1, b) L6 and c) L11



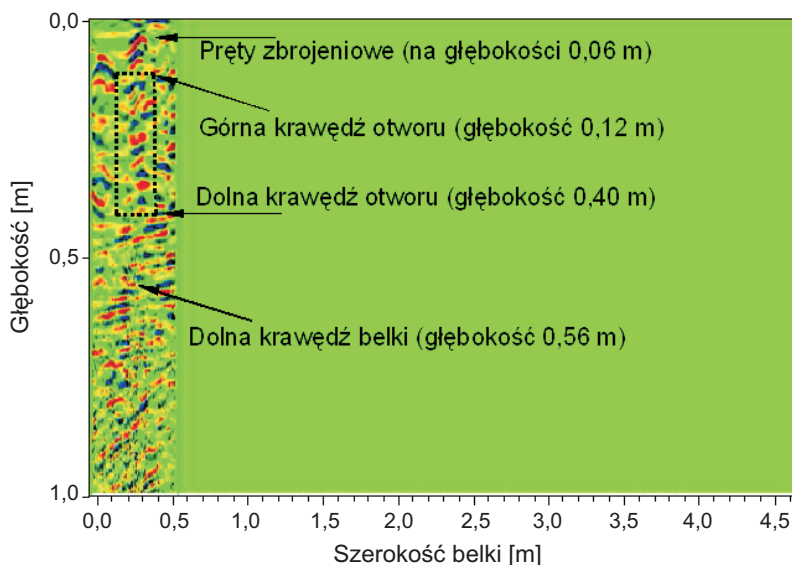
Rys. 5. Przekrój przez belkę mostową sporządzony w oparciu o wyniki georadarowe (skany podłużne)
 Fig. 5. The cross-section of the beam bridge prepared based on the GPR results (longitudinal scans)



Rys. 6. Widok z góry na belkę z zaznaczonymi skanami podłużnymi (na żółto) oraz prętami zbrojeniowymi - strzemionami (na czerwono)

Fig. 6. Top view of the beam with marked of the longitudinal scans (yellow) and the reinforcing bars - stirrups (red)

Jak wspomniano wcześniej, wykonano także skany poprzeczne (T), które potwierdzają I poziom prętów i lokalizację otworu na głębokości belki, podobną jak przy skanach podłużnych (L). Ponadto skany poprzeczne pozwoliły na określenie zasięgu występowania otworu w belce na jej szerokości. Przykładowy skan poprzeczny belki przedstawiono na rys. 7.

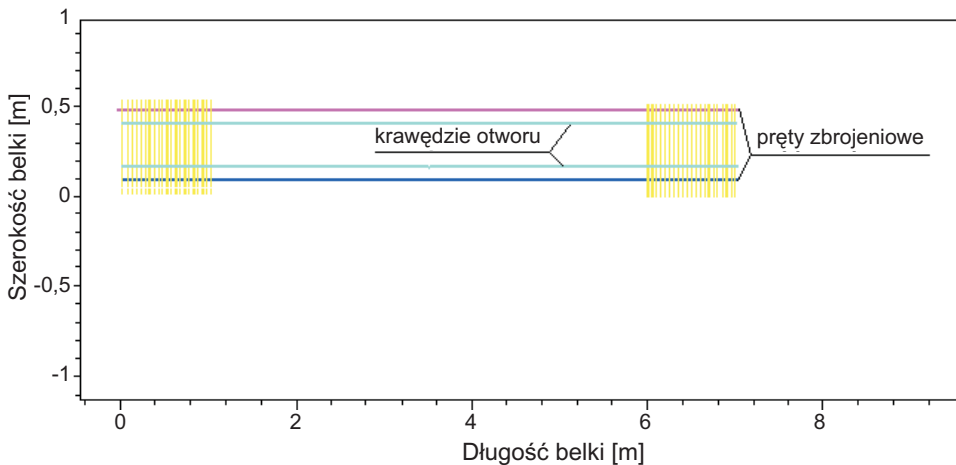


Rys. 7. Przetworzony skan poprzeczny T22

Fig. 7. The processed transverse scan T22

Na skanach poprzecznych (T) wykryto 2 pręty zbrojeniowe w górnej części belki, znajdujące się na głębokości 0,06 m. Występowały one w narożach belki. Ponadto na wszystkich skanach widoczne są krawędzie pustki wewnątrz belki: górna na głębokości około 0,12 m, dolna 0,40 m. Z kolei początek otworu jest widoczny około 0,18 m

od początku skanu, a kończy się na 0,37 m szerokości skanu. Na większości skanów widoczne są jeszcze odbicia na samym początku belki na głębokości około 0,055 m. Są to najprawdopodobniej strzemiiona usytuowane na podobnej głębokości co główne pręty zbrojeniowe. Nie udało się dokładnie zlokalizować dolnego poziomu głównych prętów zbrojeniowych, jednakże na głębokości około 0,50 m są widoczne pewne odbicia fal EM, które najprawdopodobniej są związane z występowaniem tam dolnego zbrojenia belki. Na rys. 8 pokazano rozmieszczenie górnych prętów zbrojeniowych oraz krawędzie otworu w belce nr 1.



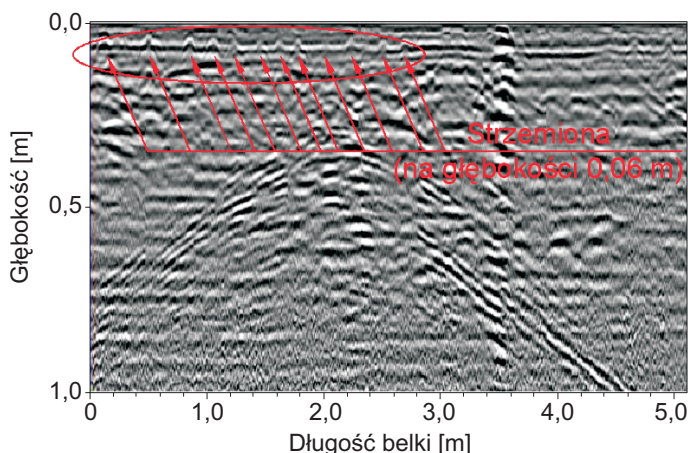
Rys. 8. Widok z góry na główne pręty podłużne i krawędzie otworu uzyskane ze skanów poprzecznych (T) dla belki nr 1

Fig. 8. Top view on the main longitudinal bars and the edges of hole received from the transverse scans (T) for beam no. 1

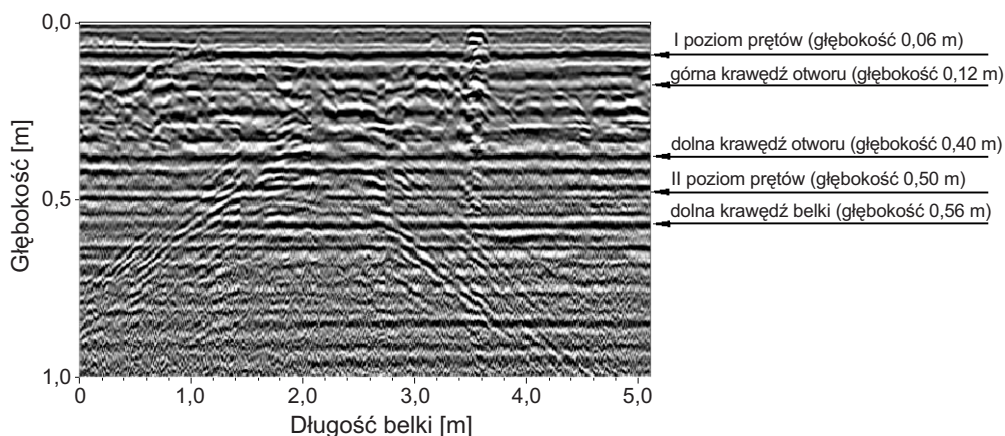
5.2.3. Belka nr 2

Wyniki uzyskane dla belki nr 2 potwierdzają w większości rezultaty otrzymane podczas badania belki nr 1. Rozstaw pomiędzy prętami oszacowano na podstawie analizy skanu L4 (rys. 9), na którym najlepiej widoczny jest fragment szeregu prętów zbrojeniowych. Średnia odległość pomiędzy prętami wynosi 0,18 m. Większy rozstaw występuje w środkowej części belki, a mniejszy na jej końcach. Poza strzemiionami występującymi na głębokości około 0,055 m zlokalizowano także anomalię na głębokości około 0,07 m (opadająca lekko w dół). Są to najprawdopodobniej podłużne pręty zbrojeniowe.

Na podstawie przedstawianych skanów trudno było określić głębokość warstw stanowiących krawędzie wewnętrznego otworu w belce. Dlatego w celu ich lepszej identyfikacji skany poddano przetworzeniu pomijając filtr *Background removal* usuwający poziome, ciągłe linie. W efekcie uzyskano dość dobry obraz, na którym oprócz dokładnego usytuowania otworu, można także zauważyć II poziom zbrojenia (rys. 10).

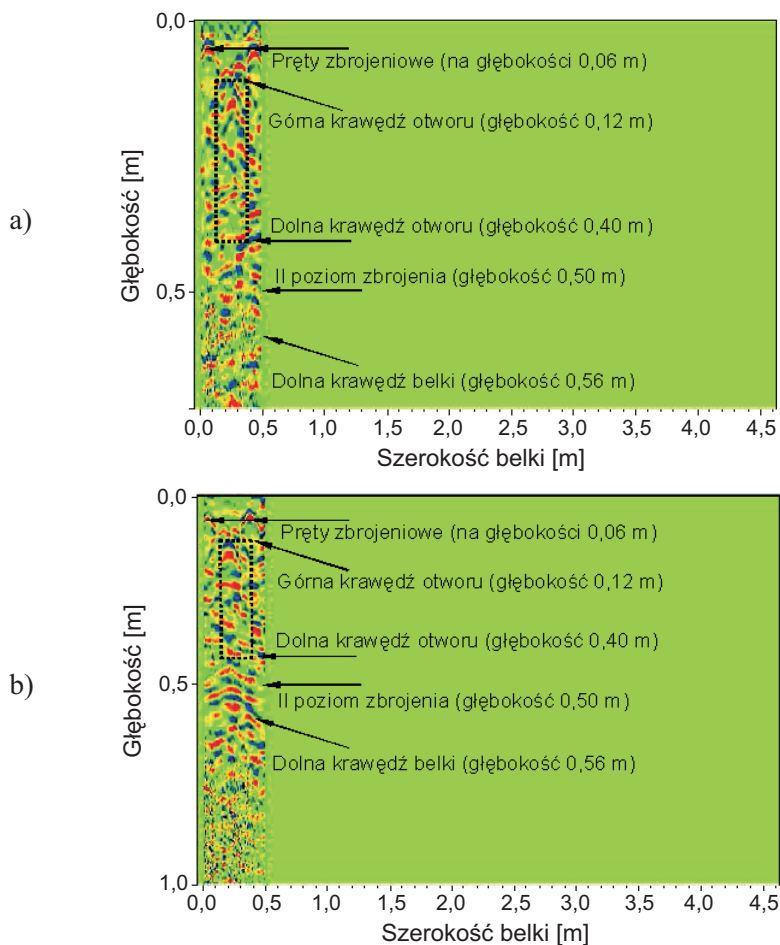


Rys. 9. Skan podłużny L4 z dobrze widocznymi prętami zbrojowymi (strzemionami)
 Fig. 9. The longitudinal scan of L4 with a well visible reinforcing bars (stirrups)

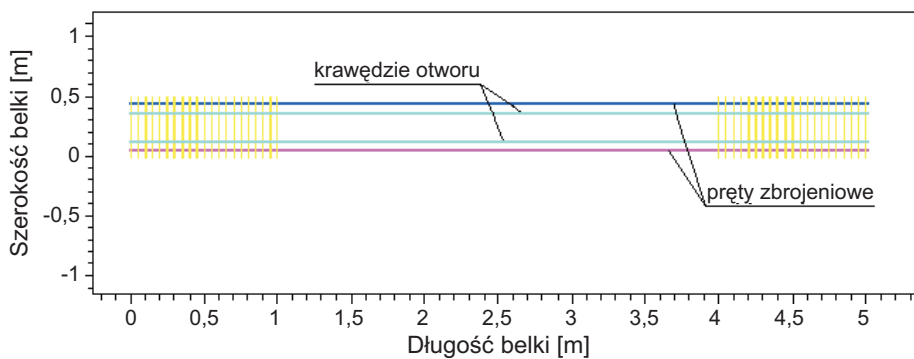


Rys. 10. Skan podłużny L3 przetworzony bez filtra usuwającego tło
 Fig. 10. The longitudinal scan of L3 processed without the filter of *background removal*

W przypadku drugiej belki poziom prętów zbrojowych oraz krawędzie wewnętrznej pustki są lepiej widoczne na skanach poprzecznych (T). Także dla tej belki znaleziono 2 pręty zbrojowe na głębokości około 0,06 m. Pierwszy w odległości około 0,06 m od początku skanu, drugi w odległości około 0,40 m. Ponadto bardzo dobrze widoczna jest wewnętrzna pustka na głębokości około 0,12 m. Ciągnie się ona aż do głębokości około 0,40 m, gdzie zauważalnie zmienia się struktura obrazu. Następnie widoczny jest II poziom zbrojenia (niestety bez rozróżnienia ilości prętów, prawdopodobnie z powodu dużej ich ilości - zlewanie się obrazu). Widać także wyraźnie zarysowującą się krawędź dolną belki na głębokości 0,56 m (rys. 11). Z kolei na rys. 12 pokazano rozmieszczenie górnych prętów zbrojowych oraz krawędzie otworu w belce nr 2.

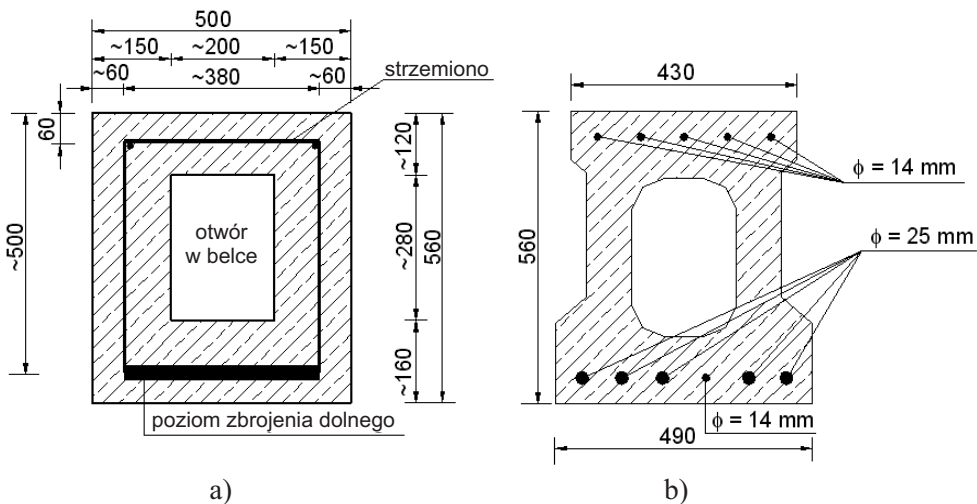


Rys. 11. Przetworzone skany poprzeczne: a) T20 i b) T45
 Fig. 11. The processed transverse scans: a) T20 and b) T45



Rys. 12. Widok z góry na pręty podłużne i krawędzie otworu otrzymane ze skanów poprzecznych (T) dla belki nr 2
 Fig. 12. Top view on the longitudinal bars and the edges of hole received from the transverse scans (T) for beam no. 2

Po przeanalizowaniu wszystkich wyników badań dla obu belek mostowych przy wykorzystaniu techniki georadarowej stwierdzono, że w analizowanym wiadukcie zastosowano belki typu Gromnik. Na rys. 13 porównano katalogową belkę typu Gromnik z wynikami badań georadarowych. Jednakże stwierdzono pewne różnice, np. w ilości górnego zbrojenia. Dlatego w celu potwierdzenia ilości tego zbrojenia postanowiono odkuć górną powierzchnię jednej z uszkodzonych belek. Okazało się, że faktycznie występują w niej tylko 2 podłużne pręty zbrojeniowe. Niniejszy fakt, potwierdza konieczność przeprowadzania tego typu badań, zwłaszcza na starych żelbetonowych mostach, gdzie mogą występować pewne odstępstwa od założeń projektowych, co z kolei należy uwzględniać w projektach remontów tych obiektów. Ze względu na dość skomplikowaną budowę geometryczną belki (m.in. otwór w belce i liczne boczne załamania) nie udało się dokładnie określić ilości dolnego zbrojenia. Geometria badanych belek wpływała na szereg odbić fal EM od poszczególnych warstw występujących na głębokości belki.



Rys. 13. Porównanie przekrojów poprzecznych uzyskanych: a) z badań georadarowych, b) z katalogu typowych belek typu Gromnik

Fig. 13. The comparison of cross-sections received from: a) the GPR testing, b) the catalogue of typical beams of Gromnik type

6. WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku przeprowadzonych badań belek mostowych z wykorzystaniem techniki GPR ustalono, że:

1. Główne górne pręty zbrojeniowe znajdują się na głębokości około 0,06 m od górnej krawędzi belek. Ewentualne różnice w ich położeniu mogły powstawać z nierówności badanego podłoża, po którym poruszała się antena pomiarowa.

2. Rozstaw głównych górnych prętów podłużnych został określony dość dokładnie. Po analizie przekrojów w obydwu rozpatrywanych belkach należy przyjąć tylko 2 podłużne pręty zbrojeniowe, usytuowane w górnej części belki w obydwu narożach – około 0,06 m od początku (i końcu) skanów. Odległość między nimi wynosi od 0,36 do 0,38 m.
3. Rozstaw prętów poprzecznych (strzemion) jest w przybliżeniu stały, jednakże na końcach belek ich rozmieszczenie jest zagęszczone (co 0,13 m), a w środkowej części zmniejsza się (co 0,20 m). Położenie górnej części strzemion znajduje się na głębokości około 0,055 m.
4. Główne dolne pręty zbrojeniowe są położone na poziomie około 0,50 m od górnej krawędzi belek. Nie udało się dokładnie ustalić rozstawu tych prętów, a także ich ilości z powodu skomplikowanego przekroju poprzecznego belek.
5. W każdej z belek występuje wewnętrzny otwór. Górna jego krawędź znajduje się na głębokości około 0,12 m, a dolna na około 0,40 m. W kierunku poprzecznym belki, otwór rozpoczyna się około 0,18 m, a kończy na 0,37 m od początku skanu.
6. Uzyskano dość dobrą zgodność wyników z katalogową belką typu Gromnik. Wynikłe rozbieżności są spowodowane przez stosunkowo złożony przekrój poprzeczny belki (liczne warstwy i załamania powodujące odbicie fal EM), który negatywnie wpływał na możliwość efektywnego przeskanowania belki na całej głębokości.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Annan A.P.*: Ground Penetrating Radar. Workshop Notes Sensors & Software Inc., September 2001
- [2] *Cianciara A.*: Metoda GPR w badaniach nawierzchni drogowych i mostowych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* nr 6/2009, 56
- [3] *Hugenschmidt J.*: Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*, **16**, 2002, 147 - 154
- [4] *Topczewski Ł.*: Praktyczne zastosowanie georadaru do inspekcji obiektów mostowych. *Mosty* nr 2/2008, 38 - 45
- [5] *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*, **38**, 2005, 171 - 179
- [6] *Hugenschmidt J., Kalogeropoulos A.*: The inspection of retaining walls using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, **67**, 2009, 335 - 344
- [7] *Hugenschmidt J., Mastrangelo R.*: GPR inspection of concrete bridges. *Cement & Concrete Composites*, **28**, 2006, 384 - 392
- [8] *Kłysz G., Balayssac J.P., Laurens S.*: Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete. *NDT&E International*, **37**, 2004, 221 - 227

- [9] *Orlando L., Pezone A., Colucci A.*: Modeling and testing of high frequency GPR data for evaluation of structural deformation. *NDT&E International*, **43**, 2010, 216 - 230
- [10] *Wciślik W.*: Badania georadarowe zespolonego mostu z belkami z betonu sprężonego. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. *Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa*, Kielce - Krynica 19 - 24 września 2010 r., 459 - 465
- [11] *Perez-Gracia V., Garcia Garcia F., Rodriguez Abad I.*: GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study. *NDT&E International*, **41**, 2008, 341 - 353
- [12] *Baili J., Lahouar S., Hergli M., Al-Qadi I.L., Besbes K.*: GPR signal de-noising by discrete wavelet transform. *NDT&E International*, **42**, 2009, 696 - 703
- [13] *Davis J., Huang Y., Millard S.G., Bungey J.H.*: Determination of dielectric properties of in-situ concrete at radar frequencies. *International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, 16 - 19 September 2003
- [14] *Daniels J.J.*: *Ground Penetrating Radar Fundamentals*. Prepared as an appendix to a Report to the U.S.EPA, Region V. Nov. 25, 2000 (Ohio State University, Columbus, 2000), 1 - 21
- [15] ASTM D 4748. Standard test method for determining the thickness of bound pavement layers using short-pulse radar. *American Testing and Material Standards*, West Conshohocken, PA. 2006
- [16] *Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.*: *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych*. Tom. 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010, 658

PODZIĘKOWANIE

Autorzy artykułu składają serdeczne podziękowanie firmie INŻBUD z Opola za współfinansowanie badań.

APPLICATION OF THE GPR TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF BRIDGE BEAMS PARAMETERS

Abstract

The paper presents the application of the GPR technique for determination of the parameters of bridge beams. The GPR method uses the principle of electromagnetic waves dispersion. The subject of this study is a three spans road viaduct located over the railway line. The main objective of experimental tests was to determine the geometric parameters of bridge beams and establish the localization of steel reinforcements. Conclusions drawn from the conducted tests can be helpful in the measurements using the GPR technique, especially for the reinforced concrete bridges.

Keywords

Bridge beam, electromagnetic wave, experimental test, georadar, reinforcements, viaduct