

Magdalena RUCKA¹

Beata ZIMA²

DETEKCJA STANU ZAKOTWIENIA PRĘTA ZA POMOCĄ FAL SPRĘŻYSTYCH

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych mających na celu określenie możliwości oceny stanu zakotwienia pręta stalowego w materiale kompozytowym typu zaprawa. Badanym obiektem był pręt stalowy osadzony w zaprawie o kształcie prostopadłościanu. Analizie poddano pręt stalowy otoczony zaprawą na trzech różnych długościach oraz pręt stalowy swobodny. W jednym z modeli na pewnym odcinku dokonano uszkodzenia w postaci braku współpracy między zaprawą a stalowym prętem. Do detekcji stanu zakotwienia wykorzystano zjawisko propagacji fal sprężystych. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych fala została wzbudzona za pomocą wzbudnika piezoelektrycznego przymocowanego do jednego z końców pręta stalowego, natomiast odpowiedź układu została zarejestrowana bezstykowo za pomocą wibrometru laserowego. Jako wzbudzenie zastosowano ultradźwiękową paczkę falową modulowaną oknem Hanninga. Obliczenia numeryczne propagacji fal przeprowadzono metodą elementów skończonych w środowisku Abaqus/Explicit z zastosowaniem elementów bryłowych. W wyniku obliczeń wykazano zmianę charakteru zarejestrowanego sygnału propagującej fali wraz ze zmianą modułu sprężystości zaprawy. Zjawisko wycieku fali do otaczającej bryły zaprawy zwiększało intensywność wraz ze wzrostem wartości modułu sprężystości zaprawy. Identyfikację długości zakotwienia pręta przeprowadzono na podstawie analizy czasów odbić w zarejestrowanych sygnałach fali ultradźwiękowej oraz prędkości jej propagacji.

Słowa kluczowe: propagacja fal sprężystych, pręt stalowy, długość zakotwienia, diagnostyka nieniszcząca

1. Wprowadzenie

Zbrojone elementy betonowe są powszechnie stosowanymi elementami konstrukcyjnymi w budownictwie. Do zbrojenia stosuje się wkładki w postaci prętów, lin, strun, kabli i siatek. Właściwa praca elementu żelbetowego możliwa

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Magdalena Rucka, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. +48 583472497, e-mail: magdalena.rucka@pg.gda.pl

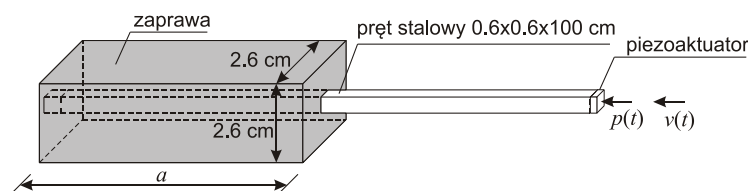
² Beata Zima, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, e-mail: beazima@student.pg.gda.pl

jest dzięki przyczepności betonu do stali. Pomimo stosunkowo dobrej wytrzymałości konstrukcji żelbetowych często ulegają one uszkodzeniom na skutek nadmiernych obciążeń, korozji czy też oddziaływań atmosferycznych. W ostatnich latach opracowano wiele metod diagnostyki konstrukcji żelbetowych, np. [1-4]. Obiecującą techniką jest wykorzystanie zjawiska propagacji fal, używanego powszechnie w diagnostyce konstrukcji stalowych, np. [5, 6]. Metody oparte na propagacji fal ultradźwiękowych są również stosowane do oceny stopnia korozji elementów stalowych otoczonych betonem [7, 8] czy detekcji miejsc, w których wystąpiła delaminacja na granicy beton-stal [9].

Niniejsza publikacja jest poświęcona analizie możliwości oceny stanu zakotwienia pręta stalowego w materiale kompozytowym typu zaprawa z wykorzystaniem propagacji fal sprężystych. Praca stanowi kontynuację poprzednich badań [10]. Analizy eksperymentalne i numeryczne zostały wykonane dla pręta swobodnego, nieotoczonego materiałem kompozytowym oraz dla trzech prętów w zaprawie o różnych długościach zakotwienia.

2. Model pręta stalowego osadzonego w zaprawie

Badanym obiektem był pręt stalowy o długości 1 m i wymiarach przekroju poprzecznego 6×6 mm, osadzony w zaprawie o kształcie prostopadłościennym. Grubość otuliny pręta wynosiła 1 cm. Geometria badanego modelu jest widoczna na rys. 1. Badania przeprowadzono dla 4 prętów z różną długością zaprawy otaczającej pręt, wynoszącą $a = 48$ cm, 24 cm, 12 cm oraz 0 cm (pręt swobodny). Jako materiał otaczający zastosowano zaprawę tynkarską. Wykonane modele pokazano na rys. 2. W modelu o długości zakotwienia 48 cm wystąpił widoczny defekt w formie szczeliny o długości 4 cm (rys. 2.).



Rys. 1. Geometria pręta stalowego osadzonego w zaprawie

Fig. 1. Geometry of the rod embedded in mortar

3. Badania eksperymentalne propagacji fal sprężystych

Testy laboratoryjne propagujących fal ultradźwiękowych wykonano za pomocą wibrometru laserowego Polytec PSV-3D-400-M (rys. 3.). Fale wzbudzono za pomocą piezoaktuatora Noliac CMAP11, który przymocowano do jednego z końców pręta. Do wygenerowania wymuszenia zastosowano generator funkcji Tektronix AFG 3022 wraz ze wzmacniaczem wysokonapięciowym EC Electro-

nics PPA 2000. Wzbudzenie $p(t)$ stanowiła paczka falowa o 5 cyklach sinusoidy i częstotliwości 150 kHz zmodulowana oknem Hanninga. Prędkość drgań $v(t)$ była mierzona bezkontaktowo na powierzchni piezoaktuatora (por. rys. 1.).



Rys. 2. Modele prętów osadzonych w zaprawie o różnej długości zakotwienia

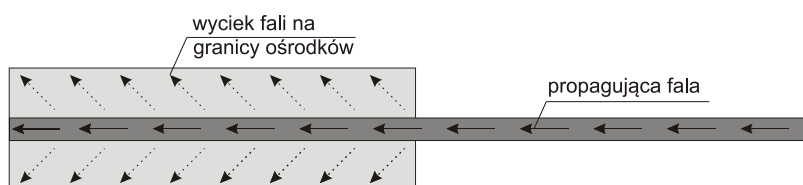
Fig. 2. Models of rods embedded in mortar of different anchorage lengths



Rys. 3. Stanowisko eksperymentalne do pomiaru propagacji fal

Fig. 3. Experimental setup for wave propagation measurements

Każdy ośrodek, w którym propaguje fala, może być scharakteryzowany przez pewną wartość falowej oporności akustycznej (impedancji), jaką stawia tej propagacji. Jeżeli dwa sąsiadujące ośrodki mają zbliżoną wartość impedancji, to na granicy ośrodków oprócz odbicia fali nastąpi jej przenikanie, które w pewnych warunkach może stać się zjawiskiem dominującym. W pręcie swobodnym fala propaguje wzdłuż pręta, a następnie odbija się od jego końców, aż do momentu wytłumienia sygnału. Jeżeli pręt zostanie osadzony w zaprawie, to we fragmentach pręta stykających się z zaprawą dochodzi do zjawiska wycieku fali do otaczającego ośrodka (rys. 4.).

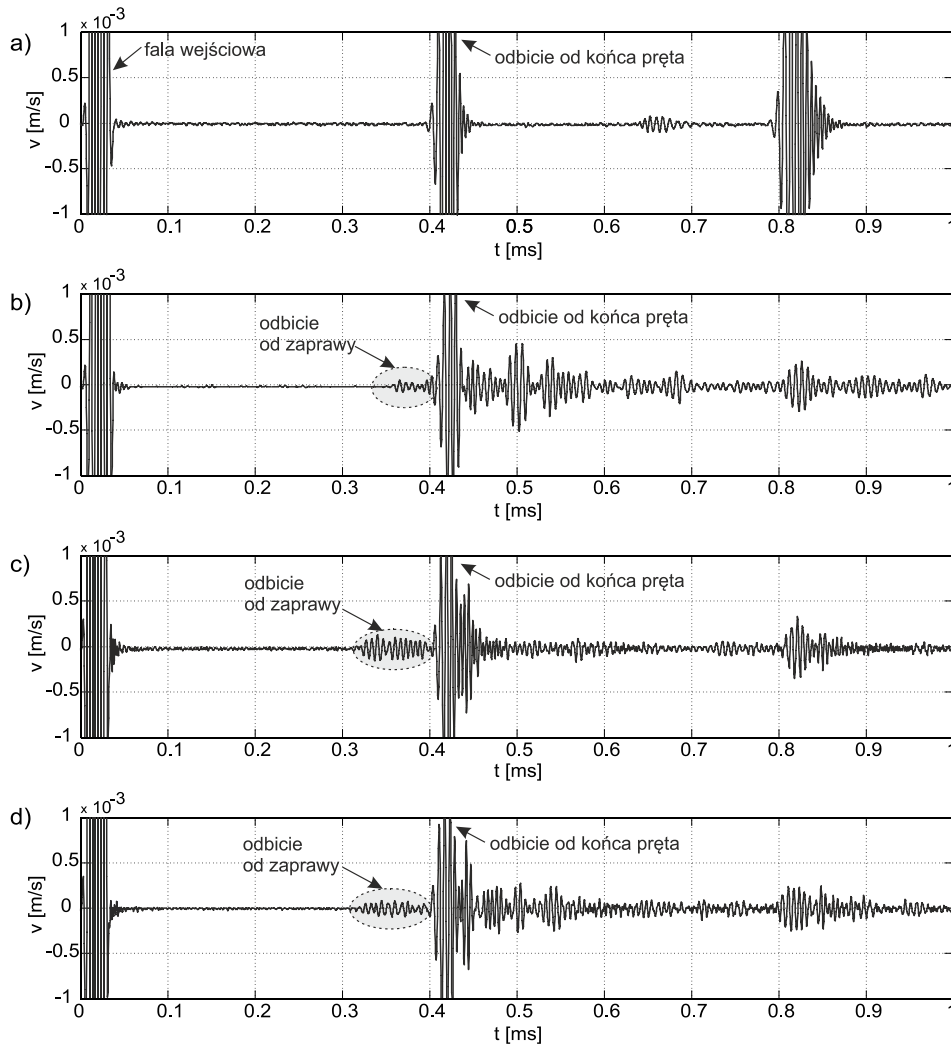


Rys. 4. Wyciek fali na granicy ośrodków stal-zaprawa

Fig. 4. Wave leakage on steel-concrete interface

Na rysunku 5. zestawiono przebiegi czasowe fal propagujących w badanych prętach o różnych długościach zakotwienia. W przypadku pręta otoczonego zaprawą na długości 12 cm odbicie od miejsca zakotwienia pojawia się w 0,35 ms, tuż przed odbiciem od końca pręta (rys. 5b). Znając prędkość propagacji fali podłużnej w badanym pręcie równą 4974 m/s, możliwa jest identyfikacja długości swobodnego odcinka pręta jako 87 cm. Różnica pomiędzy rzeczywistą wartością długości tego odcinka wynoszącą 86 cm a zidentyfikowaną z użyciem zjawiska propagacji fal sprężystych wynosi 1,2%. W pręcie o długości zakotwienia równej 24 cm (odcinek nieotoczony zaprawą długości 74 cm) do odbicia od zaprawy dochodzi w 0,32 ms (rys. 5c). W wyniku analizy odbicia w zarejestrowanym sygnale propagującej fali jest możliwa detekcja długości odcinka nieotoczonego zaprawą. Różnica pomiędzy wartością zidentyfikowaną równą 79 cm a wartością rzeczywistą wynosi 6,8%. W sygnale zarejestrowanym w pręcie otoczonego zaprawą na długości 48 cm (odcinek nieotoczony zaprawą długości 50 cm) odbicie pojawia się w 0,32 ms po dotarciu fali do części zaprawy związanej ze stalą, znajdującej się za uszkodzeniem obecnym w zaprawie (por. rys. 2.). Oznacza to, że w modelu z długością zakotwienia równą 48 cm imperfekcja w postaci braku współpracy między stalą a zaprawą sięga znacznie dalej niż możliwe do identyfikacji wizualnej uszkodzenie w otulinie (rys. 2), a rzeczywista długość odcinka, na którym pręt nie współpracuje z zaprawą, wynosi 79 cm.

Na rysunku 6. przedstawiono obwiednie zarejestrowanych sygnałów dla pręta swobodnego i trzech próbek osadzonych w zaprawie o długości zakotwienia 12 cm, 24 cm oraz 48 cm. Obwiednie uzyskano za pomocą transformaty Hil-

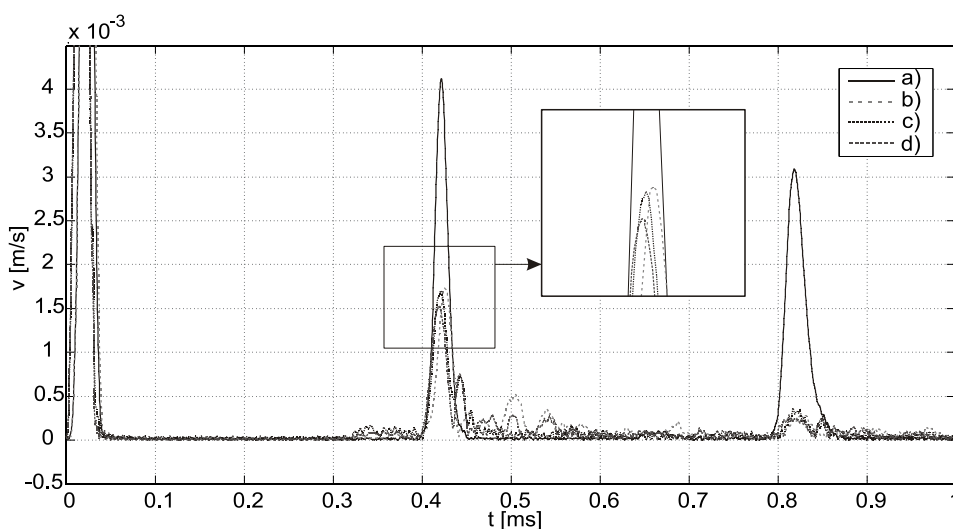


Rys. 5. Wyniki eksperymentalne przebiegów propagujących fal w pręcie: a) swobodnym, b) z zaprawą długości 12 cm, c) z zaprawą długości 24 cm, d) z zaprawą długości 48 cm

Fig. 5. Experimental results of wave propagation signals in: a) free rod, b) rod with mortar of length 12 cm, c) rod with mortar of length 24 cm, d) rod with mortar of length 48 cm

berta. Odbicie od końca pręta dla wszystkich badanych przypadków pojawia się po około 0,39 ms, przy czym czas ten maleje wraz ze wzrostem długości odcinka otoczonego zaprawą, co pokazuje zbliżenie na paczkę falową odbitą od końca pręta na rys. 6. Wraz ze wzrostem długości odcinka otoczonego zaprawą nieznacznie spada wartość amplitudy fali odbitej od końca pręta. Znacząca jest jednak różnica pomiędzy amplitudą odbicia od końca pręta swobodnego a amplitudą odbicia od końca jakiegokolwiek z trzech prętów osadzonych w zaprawie.

wie. W przypadku pręta swobodnego ośrodkiem graniczącym ze stalą jest powietrze. Różnica impedancji ośrodków stal-zaprawa jest dużo mniejsza od różnicy impedancji na granicy ośrodków stal-powietrze. Konsekwencją tego jest znaczący wyciek fali w przypadku prętów osadzonych w zaprawie. Spadek wartości amplitudy odbicia jest też związany ze zwiększaniem długości odcinka pręta otoczonego zaprawą. Wynika to z faktu przebycia przez propagującą falę coraz dłuższej drogi na odcinku, gdzie postępuje wyciek, co powoduje utratę jej energii.



Rys. 6. Obwiednie eksperymentalnych sygnałów fal propagujących w pręcie: a) swobodnym, b) z zaprawą długości 12 cm, c) z zaprawą długości 24 cm, d) z zaprawą długości 48 cm

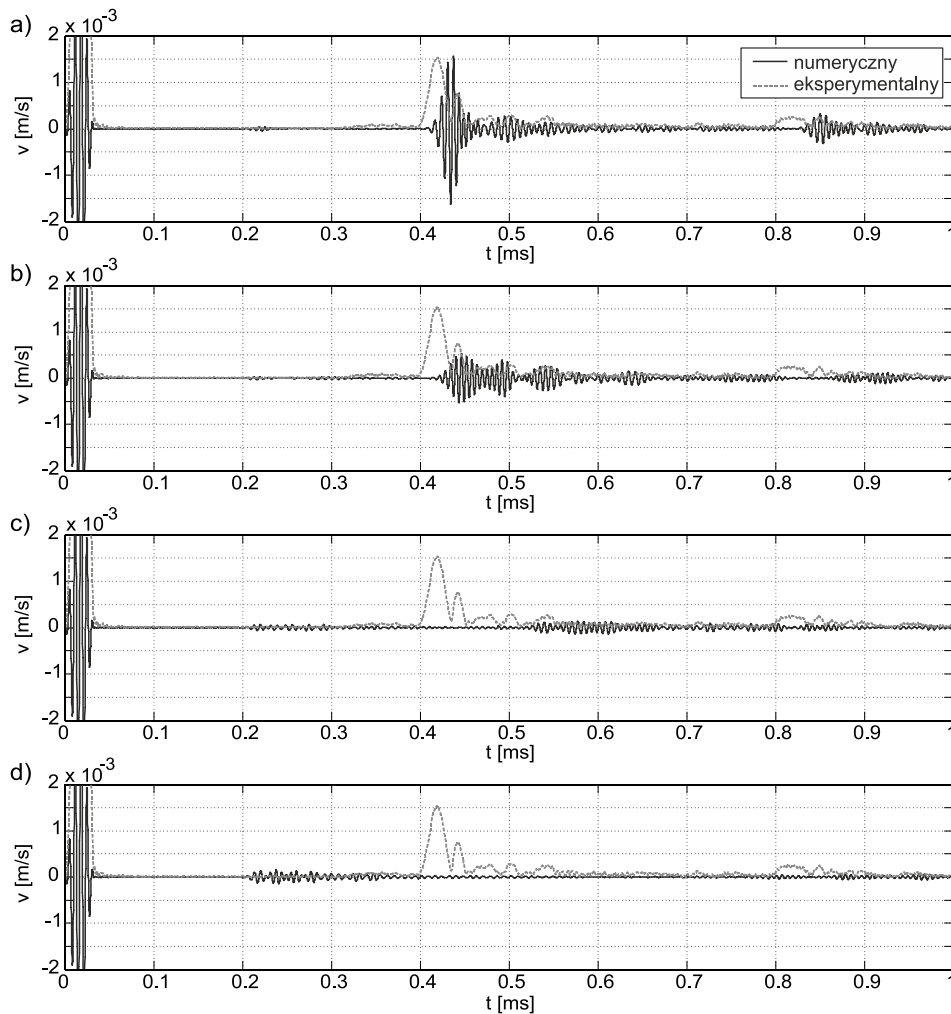
Fig. 6. Envelopes of experimental signals of waves propagated in: a) free rod, b) rod with mortar of length 12 cm, c) rod with mortar of length 24 cm, d) rod with mortar of length 48 cm

4. Obliczenia numeryczne

Obliczenia numeryczne propagujących fal w poszczególnych prętach wykonano w środowisku Abaqus/Explicit za pomocą metody elementów skończonych. Układ został zdyskretyzowany z wykorzystaniem 8-węzłowych elementów bryłowych o wymiarach $1 \times 1 \times 1$ mm. Wzbudzenie zrealizowano poprzez przyłożenie na jednym z końców pręta na całej jego powierzchni obciążenia powierzchniowego o wartości wypadkowej 5 N. Sygnały prędkości drgań były rejestrowane na tym samym końcu pręta, co wzbudzenie.

Moduł Younga oraz gęstość pręta stalowego wyznaczono doświadczalnie, ich wartości wynosiły $E = 200$ GPa, $\rho = 7556$ kg/m³. Współczynnik Poissona przyjęto jako $\nu = 0,33$. Gęstość zaprawy wynosiła $\rho_z = 1770$ kg/m³, a współczynnik Poissona zaprawy przyjęto jako $\nu_z = 0,16$. Ponieważ moduł sprężystości zaprawy nie był identyfikowany, w pierwszym etapie wykonano obliczenia dla

różnych jego wartości w celu kalibracji parametrów modelu numerycznego. Na rysunku 7. przedstawiono przebiegi czasowe prędkości propagującej fali w pręcie z długością zakotwienia 48 cm dla wartości modułu sprężystości $E = 0,5$ GPa, 1 GPa, 2 GPa, 5 GPa. Widoczne jest zjawisko wycieku fali do otaczającego ośrodka, postępujące wraz ze wzrostem wartości modułu sprężystości zaprawy. Ze względu na coraz bardziej zbliżoną wartość oporności akustycznej zaprawy do wartości oporności stali amplituda odbicia od końca pręta spada

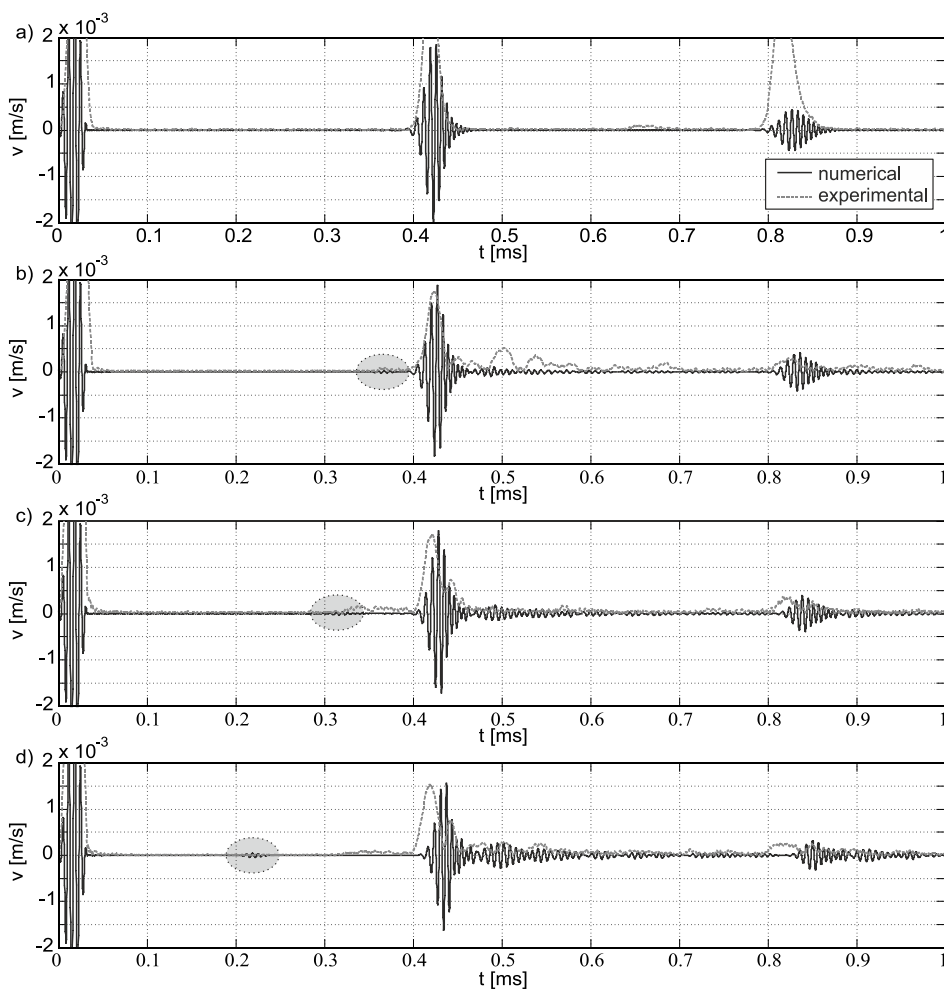


Rys. 7. Przebiegi czasowe propagującej fali dla pręta z zaprawą długości 48 cm o różnych wartościach modułu sprężystości zaprawy: a) $E = 0,5$ GPa, b) $E = 1$ GPa, c) $E = 2$ GPa, d) $E = 5$ GPa

Fig. 7. Time histories of wave propagation signals in the rod with mortar length of 48 cm and different elastic modulus of mortar: a) $E = 0,5$ GPa, b) $E = 1$ GPa, c) $E = 2$ GPa, d) $E = 5$ GPa

do zera, lecz rośnie wartość amplitudy odbicia od miejsca zakotwienia (por. rys. 7c oraz 7d). Linią przerywaną zaznaczono obwiednię sygnału uzyskanego eksperymentalnie. Najbardziej zbliżony do wyników eksperymentalnych przebieg czasowy uzyskano dla wartości modułu sprężystości równego 0,5 GPa (por. rys 7a). Ta wartość modułu sprężystości została przyjęta do dalszych obliczeń numerycznych.

Na rysunek 8. przedstawiono sygnały uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych dla prętów z zaprawą na długościach 12 cm, 24 cm i 48 cm oraz dla

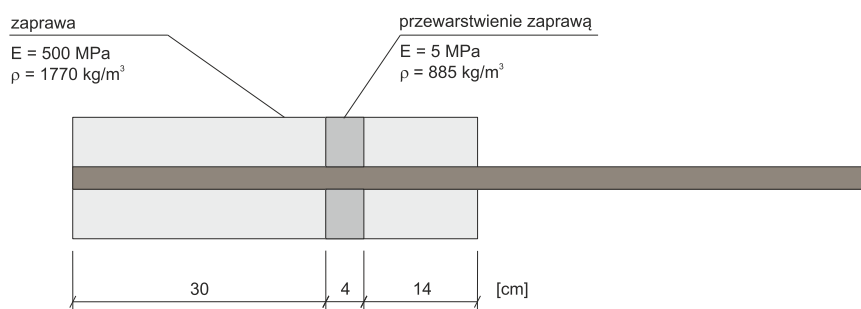


Rys. 8. Porównanie sygnałów eksperymentalnych i numerycznych w pręcie: a) swobodnym, b) z zaprawą długości 12 cm, c) z zaprawą długości 24 cm, d) z zaprawą długości 48 cm

Fig. 8. Comparison of experimental and numerical signals in a) free rod, b) rod with mortar of length 12 cm, c) rod with mortar of length 24 cm, d) rod with mortar of length 48 cm

pręta swobodnego. Linia przerywaną zostały naniesione obwiednie sygnałów uzyskanych w eksperymencie dla analogicznych długości zakotwienia. Na wykresach zaznaczono odbicia fali od początku zakotwienia pręta w zaprawie. Odbicia od zaprawy pojawiają się w 0,35 ms (rys. 8b), 0,30 ms (rys. 8c) oraz 0,21 ms (rys. 8d) dla prętów z zaprawą na odcinkach długości odpowiednio 12 cm, 24 cm oraz 48 cm. Możliwa jest zatem detekcja długości swobodnej pręta, która wynosi odpowiednio 87 cm, 75 cm oraz 52 cm. Różnica pomiędzy wartościami rzeczywistymi a zidentyfikowanymi wynosi odpowiednio 1,2%, 1,4% oraz 4%. W przypadku długości zakotwienia równej 12 i 24 cm (rys. 8b i 8c) wyniki obliczeń numerycznych w postaci amplitudy i czasu pojawienia się fali odbitej od końca stalowego pręta i początku odcinka osadzonego w zaprawie zgadzają się z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie. Rozbieżności widoczne są w przypadku otuliny długości 48 cm (rys. 8d), ponieważ użyty model numeryczny nie zakładał uszkodzenia czy też pogorszenia warunków przyczepności zaprawy do stali.

W kolejnym etapie wykonano obliczenia dla pręta otoczonego zaprawą na długości 48 cm z uwzględnieniem uszkodzenia zaprawy (por. rys. 2.). Uszkodzenie zostało wymodelowane jako przewarstwienie słabszą zaprawą o wartości modułu sprężystości stukrotnie mniejszej (5 MPa) oraz gęstości dwukrotnie mniejszej (885 kg/m^3) niż w pozostałej części bryły zaprawy ze względu na chęć odwzorowania znacznego uszkodzenia otuliny w formie np. pęknięcia czy też rozkruszenia. Geometrię wykonanego modelu przedstawiono na rys. 9. Położenie słabszej warstwy materiału i jej grubość wynikały z pomiarów położenia uszkodzenia w rzeczywistym modelu. W ogólnym przypadku tak zamodelowana nieciągłość może reprezentować imperfekcje mogące wystąpić w rzeczywistym elemencie konstrukcyjnym, np. niedokładne otulenia pręta, lokalne zniszczenie materiału, inkluzję czy rozwarstwienie.

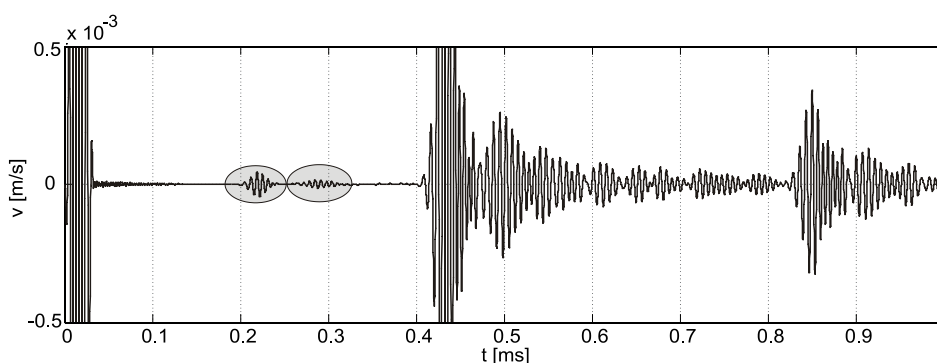


Rys. 9. Model pręta z zaprawą na długości 48 cm oraz uszkodzeniem zaprawy

Fig. 9. Model of the rod with the mortar length of 48 cm and mortar damage

Na rysunku 10. przedstawiono przebieg czasowy sygnału prędkości drgań uzyskanego dla modelu pręta w zaprawie z przewarstwieniem w wyniku obli-

czeń numerycznych. Na wykresie zaznaczono dwa odbicia: 1) powstałe po dotarciu fali do początku zakotwienia, 2) powstałe po dotarciu fali do miejsca, gdzie występuje warstwa materiału o innych właściwościach materiałowych.



Rys. 10. Numeryczny przebieg czasowy fali propagującej w pręcie z zaprawą na długości 48 cm oraz uszkodzeniem zaprawy

Fig. 10. Numerical time history of wave propagation in rod with the mortar length of 48 cm and mortar damage

5. Wnioski

W pracy przedstawiono wstępne wyniki doświadczeń i obliczeń numerycznych propagacji fal sprężystych ukierunkowanych na identyfikację zmian konstrukcji. Badania przeprowadzono dla prętów stalowych otoczonych zaprawą na różnej długości. W wyniku obliczeń wykazano, że charakter zarejestrowanego sygnału propagującej fali zmieniał się wraz ze zmianą modułu sprężystości zaprawy. Zjawisko wycieku fali do otaczającej bryły zaprawy zwiększało intensywność wraz ze wzrostem wartości modułu sprężystości zaprawy. Uzyskane rezultaty badań numerycznych i eksperymentalnych umożliwiły detekcję stanu zakotwienia pręta oraz detekcję uszkodzeń w obrębie bryły zaprawy. Identyfikację długości zakotwienia pręta przeprowadzono na podstawie analizy czasów odbić w sygnałach fali ultradźwiękowej oraz prędkości jej propagacji.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Literatura

- [1] Gołaski L., Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W.: System for the global monitoring and evaluation of damage processes developing within concrete structure under service load. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 7(4), 2012, pp. 237-245.

- [2] 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*, vol. 10(3), 2010, pp. 5-18.
- [3] Degala S., Rizzo P., Ramanathan K., Harries K.A.: Acoustic emission monitoring of CFRP reinforced slabs. *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, pp. 2016-2026.
- [4] Jurek M., Nazarko P., Ziemiański L.: Nieniszczące badania konstrukcji: wykrywanie zmian w elementach konstrukcji z wykorzystaniem zjawiska fal sprężystych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 243, 2007, s. 67-87.
- [5] Rucka M.: Diagnostyka konstrukcji ramowych i płytowych za pomocą fal sprężystych. 56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB. *Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa*, Wydaw. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2010, s. 851-858.
- [6] Ervin B.L., Kuchma D.A., Bernhard J.T., Reis H.: Monitoring corrosion of rebar embedded in mortar using high-frequency guided ultrasonic waves. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 135, 2009, pp. 9-18.
- [7] Lu Y., Li J., Ye L., Wang D.: Guided waves for damage detection in rebar-reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, vol. 47, 2013, pp. 370-378.
- [8] Na W-B., Kundu T., Ehsani M.R.: Lamb waves for detecting delamination between steel bars and concrete. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 18, 2003, pp. 58-63.
- [9] Rucka M.: Przyczynek do diagnostyki kotew skalnych za pomocą fal sprężystych. *Budownictwo i Architektura*, nr 12(1), 2013, s. 227-234.

DETECTION OF REBAR ANCHORAGE LENGTH USING ELASTIC WAVE PROPAGATION

Summary

The article presents results of experimental and numerical studies aimed to evaluate the possibility of condition assessment of a steel rod anchored in mortar. The tests were performed for the steel rod embedded in mortar of different lengths. One of the experimental models has been deliberately damaged by removing the part of mortar from a section of the rod. To detect the condition state of anchorage, the phenomenon of propagation of elastic waves was used. Identification of anchorage length as well as damage detection in mortar was made based on analysis of reflections in the registered wave propagating signals.

Keywords: propagation of elastic waves, steel rod, anchorage length, non-destructive diagnostics

Przesłano do redakcji: 02.03.2014 r.

Przyjęto do druku: 02.06.2014 r.

DOI: 10.7862/rb.2014.18