

Przyczynek do diagnostyki kotew skalnych za pomocą propagacji fal sprężystych

Magdalena Rucka¹

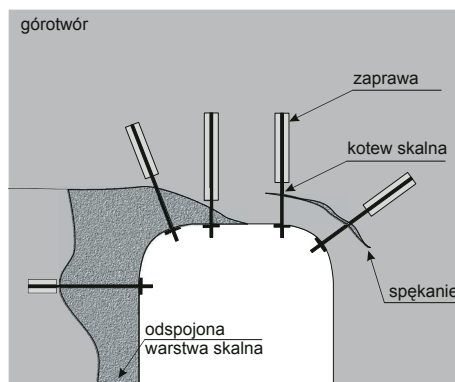
¹ Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: magdalena.rucka@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne propagacji fal sprężystych w pręcie stalowym osadzonym w materiale kompozytowym. W eksperymencie wykorzystano zjawisko propagacji fal generowanych wzbudnikiem piezoelektrycznym i ich bezstykowy pomiar za pomocą wibrometru laserowego. W obliczeniach numerycznych przeanalizowano wpływ modułu sprężystości materiału kompozytowego na charakter fal propagujących w pręcie stalowym. Wykonane badania stanowią pierwszy etap prac ukierunkowanych na diagnostykę ultradźwiękową kotew skalnych.

Słowa kluczowe: propagacja fal sprężystych, kotwy skalne, diagnostyka.

1. Wprowadzenie

Kotwy skalne znajdują zastosowanie w kopalniach głębinowych oraz przy wykonywaniu tuneli drogowych czy też kolejowych. Są wykorzystywane do wzmacniania i zabezpieczania górotworu złożonego z warstw skalnych o różnych właściwościach mechanicznych lub górotworu spękanego. Zadaniem kotew skalnych jest przekazywanie obciążenia do bardziej wytrzymałych warstw podłoża skalnego (rys. 1). W masywie skalnym wiercony jest otwór, w którym umieszczana jest stalowa żerdź kotwy skalnej. Następnie żerdź jest kotwiona przy zastosowaniu żywicy lub zaprawy.



Rys. 1. Wzmacnianie tunelu przy pomocy kotew skalnych

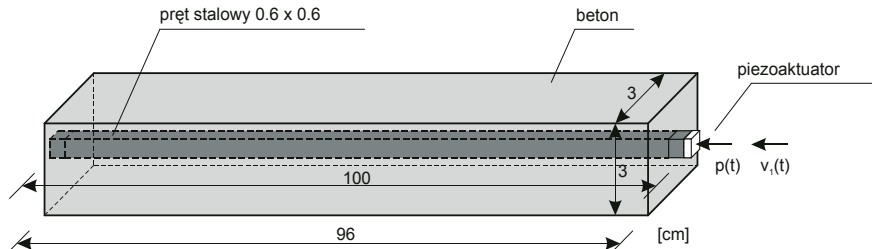
Typowym sposobem na badanie wytrzymałości wykonanych kotwi oraz określenie ich stanu zakotwienia jest próba wrywania (tzw. pull-out test) [1]. Alternatywą dla tej metody typu niszczącego, mogą być metody nieniszczące, dzięki którym możliwe jest wyznaczanie własności materiałowych i stopnia połączenia kotwi z otaczającą ją zaprawą. Obecnie dynamicznie rozwijają się nieniszczące metody diagnostyczne wykorzystujące propagację fal sprężystych, na przykład z użyciem wymuszenia impulsowego [2] bądź też paczek falowych [3, 4].

Niniejsza praca poświęcona jest badaniom eksperymentalnym i obliczeniom numerycznym propagacji fal sprężystych w pręcie stalowym osadzonym w materiale

kompozytowym. W badaniach eksperymentalnych fala ultradźwiękowa w formie paczki falowej została wzbudzona przy użyciu wzbudnika piezoelektrycznego, natomiast pomiar propagującej fali został wykonany bezstykowo za pomocą wibrometru laserowego. W obliczeniach numerycznych przeanalizowano wpływ modułu sprężystości materiału kompozytowego typu beton/zaprawa na charakter fal propagujących w pręcie stalowym. Wykonane badania stanowią pierwszy etap prac ukierunkowanych na diagnostykę ultradźwiękową kotew skalnych.

2. Propagacja fal w pręcie osadzonym w zaprawie/betonie

Przedmiotem badań był pręt stalowy osadzony w materiale kompozytowym typu beton. Pręt o przekroju $0,6 \times 0,6 \text{ cm}^2$ i długości 100 cm został osadzony (zabetonowany) w prostopadłościanie o wymiarach $3 \times 3 \times 96 \text{ cm}^3$. Geometria badanego układu została zaprezentowana na Rys. 2.



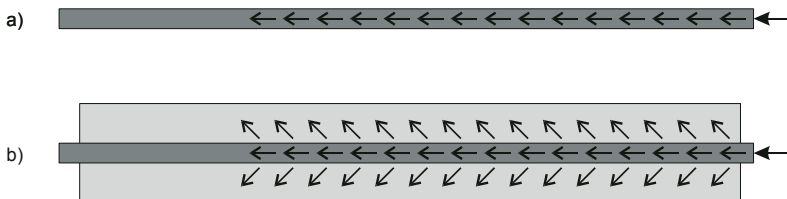
Rys. 2. Geometria pręta stalowego osadzonego w betonie z zaznaczeniem punktów pomiarowych

W ciele stałym nieograniczonym mogą propagować dwa rodzaje fal: fale podłużne (ciśnieniowe) oraz fale poprzeczne (ścinające). Dodatkowo na powierzchni półprzestrzeni sprężystej mogą powstać fale Rayleigha. Prędkości fali podłużnej c_p , poprzecznej c_s i Rayleigha c_R w trójwymiarowym ciele jednorodnym dane są wzorami:

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}, \quad c_R \approx c_s \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu}, \quad (1)$$

gdzie E oznacza moduł sprężystości, ρ to gęstość, zaś współczynnik Poissona oznaczono jako ν . Natomiast w przypadku ciała ograniczonego pewnymi powierzchniami jak na przykład rozważany pręt, mówimy o propagacji fal prowadzonych (ang. *guided waves*). W najprostszym przypadku bez uwzględnienia dyspersji prędkość fali podłużnej w pręcie opisana jest jako $c_p = \sqrt{E/\rho}$.

Fala propagująca w pręcie może ulegać odbiciu lub przenikaniu, w zależności od właściwości falowej oporności akustycznej (impedancji akustycznej) otaczającego go ośrodka. W pręcie otoczonego powietrzem fala propaguje wzdłuż pręta (rys. 3a), a następnie odbija się od jego końców, aż do momentu wytłumienia sygnału (por. [4]). Odmienna sytuacja występuje w przypadku pręta osadzonego w materiale o zbliżonych właściwościach impedancyjnych do stali. Wówczas zachodzi zjawisko tzw. wycieku fali do otaczającego ośrodka (rys. 3b).



Rys. 3. Fala propagująca w pręcie: a) otoczonego powietrzem; b) osadzonego w betonie

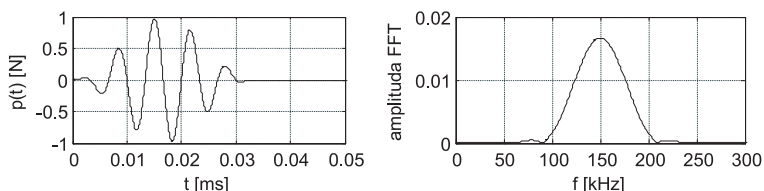
3. Obliczenia numeryczne

3.1. Model obliczeniowy

Obliczenia numeryczne propagacji fal sprężystych w belce betonowej przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem środowiska Abaqus/Explicit. Rozważany układ pręta osadzonego w betonie (rys. 2) został zdyskretyzowany przy użyciu bryłowych elementów ośmiowęzłowych. Wymiar boku elementu wynosił 0,1 cm. Warunki brzegowe założono jako swobodne na wszystkich krawędziach.

Parametry materiałowe stali przyjęto jako: moduł sprężystości $E = 200$ GPa, gęstość masy $\rho = 7556$ kg/m³ i współczynnik Poissona $\nu = 0,33$. Gęstość materiału kompozytowego wynosiła $\rho = 2300$ kg/m³, zaś współczynnik Poissona $\nu = 0,16$. Symulacje numeryczne przeprowadzono dla pręta otoczonego powietrzem, jak i dla osiemnastu prętów osadzonych w materiale kompozytowym o różnych wartościach modułu sprężystości (od 0,5 GPa do 37 GPa). Dla dziewięciu prętów jako materiał otaczający przyjęto beton klasy B60, B55, B50, B45, B37, B30, B25, B20, B15 o modułach sprężystości wynoszących odpowiednio: 37 GPa, 36 GPa, 35 GPa, 34 GPa, 33 GPa, 31 GPa, 30 GPa, 29 GPa, 27 GPa. Dla kolejnych dziewięciu prętów jako materiał otaczający przyjęto materiał typu zaprawa o modułach sprężystości wynoszących odpowiednio: 20 GPa, 15 GPa, 10 GPa, 5 GPa, 4 GPa, 3 GPa, 2 GPa, 1 GPa, 0,5 GPa.

Jako wzbudzenie została przyjęta paczka falową składającą się z pięciu cykli sinusoidy o częstotliwości 150 kHz zmodulowanej oknem Hanninga (rys. 4). Wzbudzenie zostało przyłożone na prawym końcu stalowego pręta za pomocą piezoaktuatora, jak zaznaczono na rys. 2. Obciążenie powierzchniowe o wartości wypadkowej równej 5 N zostało przyłożone na całej powierzchni pręta. Drgania $v_1(t)$ były rejestrowane na prawym końcu pręta.



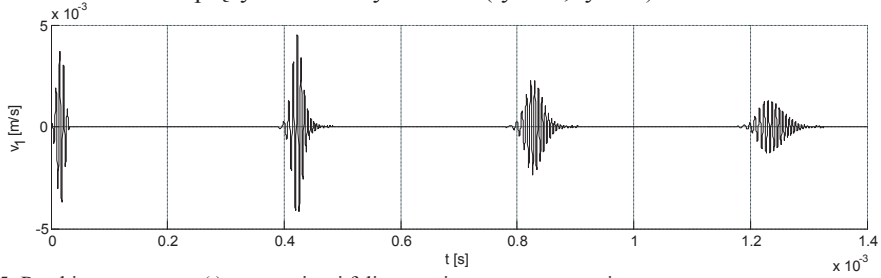
Rys. 4. Wzbudzenie w formie paczki falowej (150 kHz) w dziedzinie czasu i częstotliwości

3.2. Wyniki obliczeń dla różnych typów materiału otaczającego

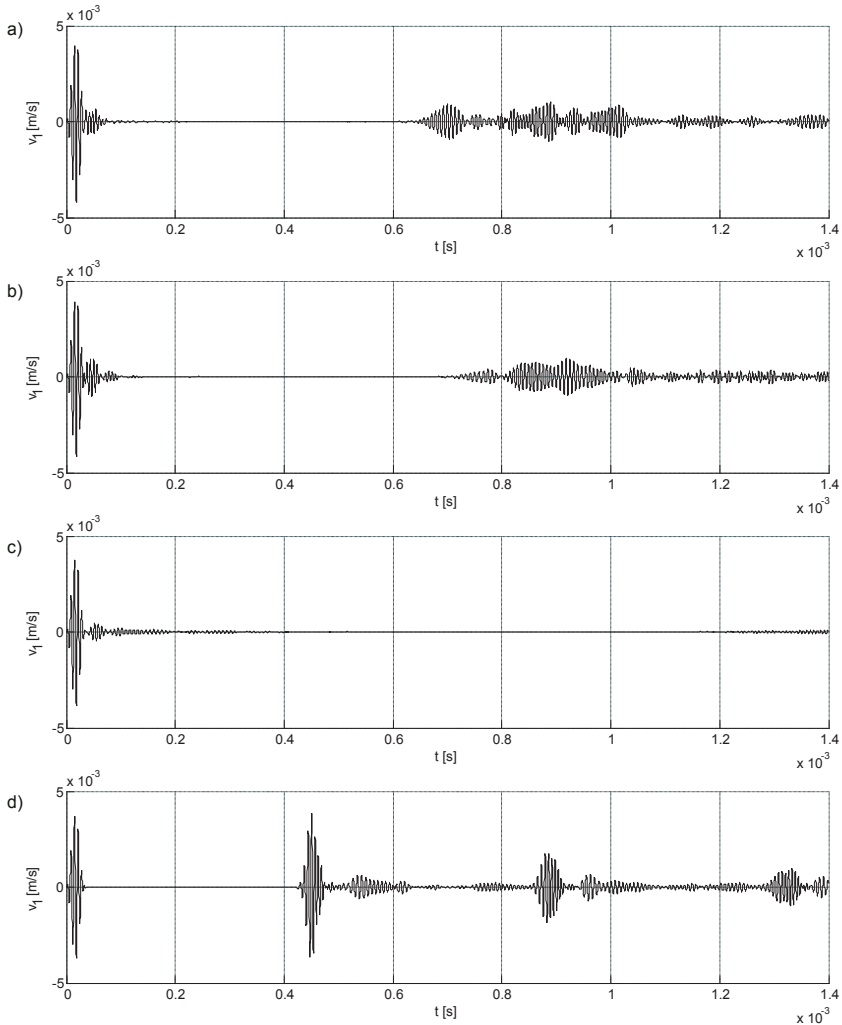
Sygnaly czasowe propagujących fal dla różnych parametrów materiałowych pokazane są na rys. 5. W pręcie swobodnym (otoczonym powietrzem) czas propagacji fali przez podwójną długość pręta (2 m) wynosi 0,39 ms. Dla pręta osadzonego w betonie o najwyższym module sprężystości (37 GPa) czas propagacji jest większy niż w pręcie swobodnym i wynosi 0,64 ms. Zmienia się również charakter sygnału (rys. 6a). Wraz ze zmniejszaniem modułu sprężystości do wartości 30 GPa oraz 5 GPa, czas propagacji wzrasta (rys. 6b i rys. 6c.). Widać też coraz większy wyciek fali do otaczającego ośrodka. Zmniejszenie wartości modułu do 0,5 GPa powoduje spadek wartości impedancji akustycznej zaprawy do poziomu, na którym dominującym staje się zjawisko odbicia a nie wycieku fali (rys. 6d).

Wizualizacje rozkładu propagującej fali w wybranych chwilach czasowych pokazują rys. 7 i rys. 8. Na rys. 7 widoczny jest początkowy moment ($t = 2,8e-5$ s), dla pręta otoczonego powietrzem oraz dla pręta otoczonego materiałem kompozytowym o modułach sprężystości równych 37 GPa, 5 GPa oraz 0,5 GPa. Dla materiału o module sprężystości 37 GPa oraz 5 GPa widoczny jest silny wyciek fali do materiału otaczającego pręt. Rysunek 8 pokazuje chwilę czasową $t = 2,8e-4$ s. Najszybciej propaguje fala w pręcie otoczonym powietrzem (rys. 8a). W podobny sposób propaguje fala w pręcie z materiałem o module sprężystości 0,5 GPa, jednakże widać, iż prędkość fali jest nieco mniejsza (rys. 8d). W materiałach o modułach 37 GPa oraz 5 GPa postępuje wyciek fali, przy czym w pręcie

otoczonym materiałem o module sprężystości równym 37 GPa fala propaguje szybciej niż w materiale o module sprężystości równym 5 GPa (rys. 8b, rys. 8c).



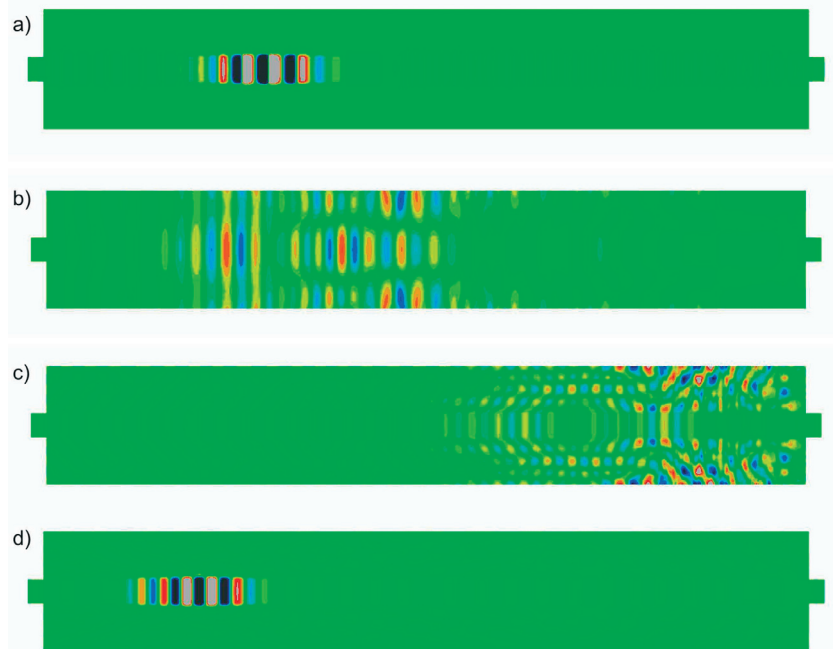
Rys. 5. Przebieg czasowy $v_1(t)$ propagującej fali w przecie otoczonym powietrzem



Rys. 6. Przebiegi czasowe $v_1(t)$ propagującej fali w przecie osadzonym w materiale o module sprężystości: a) $E = 37$ GPa; b) $E = 30$ GPa; c) $E = 5$ GPa; d) $E = 0,5$ GPa



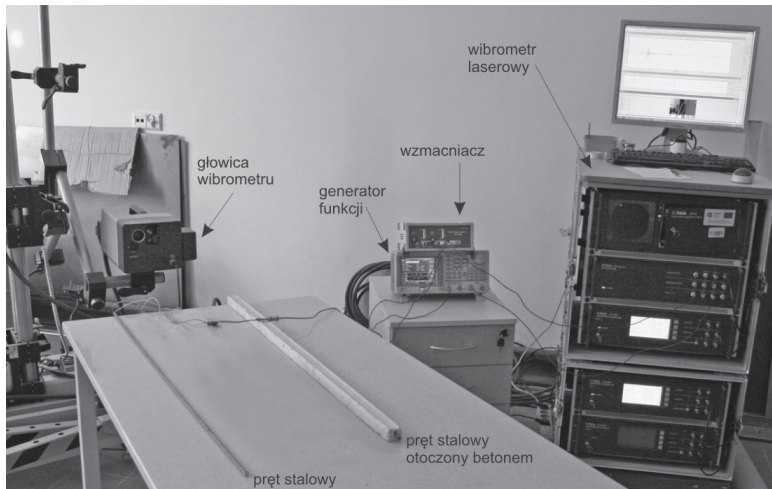
Rys. 7. Propagacja fali (składowa v_z – wzdłuż osi pręta) w chwili czasowej $t = 2,8e-5$ s w prętach otoczonych: a) powietrzem b) $E = 37$ GPa; c) $E = 5$ GPa; d) $E = 0,5$ GPa



Rys. 8. Propagacja fali (składowa v_z – wzdłuż osi pręta) w chwili czasowej $t = 2,8e-4$ s w prętach otoczonych: a) powietrzem b) $E = 37$ GPa; c) $E = 5$ GPa; d) $E = 0,5$ GPa

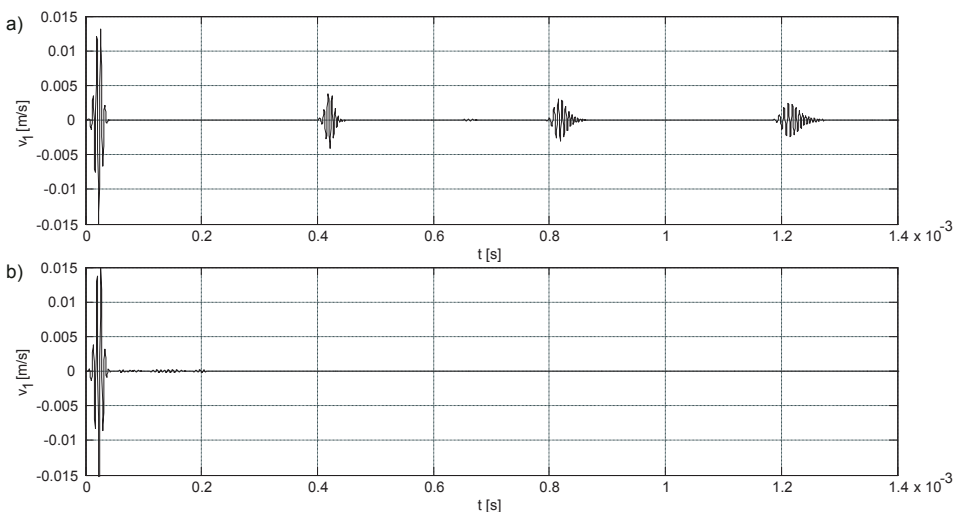
4. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla pręta stalowego oraz dla pręta stalowego otoczonego zaprawą. Jako materiał otaczający zastosowano zaprawę tynkarską. Stanowisko pomiarowe przedstawione jest na Rys. 9. Do wzbudzenia fal sprężystych użyto piezoakuator Noliac CMAP11 o wymiarach 5 mm x 5 mm x 2 mm przymocowany do jednego z końców pręta. Do wygenerowania wymuszenia zastosowano generator funkcji Tektronix AFG 3022 wraz ze wzmacniaczem wysokonapięciowym EC Electronics PPA 2000. Propagujące fale ultradźwiękowe rejestrowano za pomocą wibrometru laserowego Polytec PSV-3D-400-M.



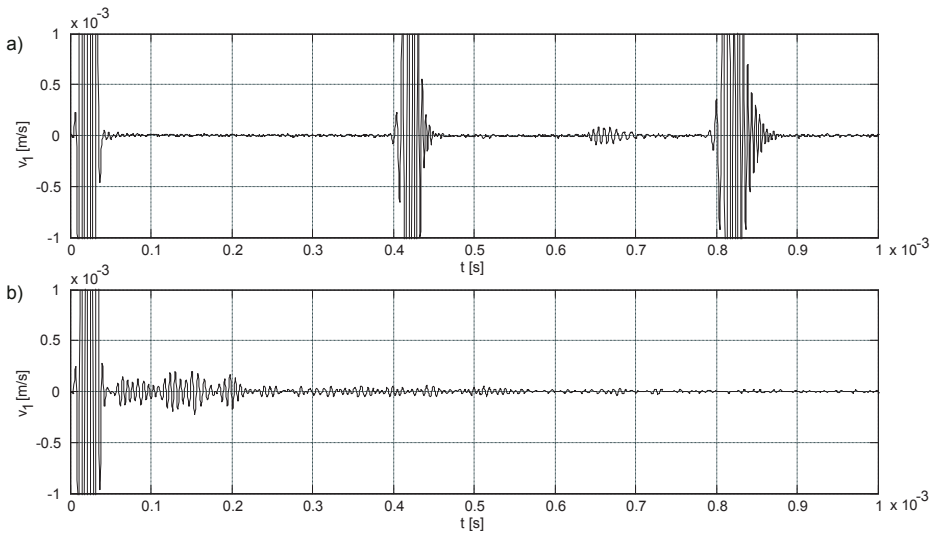
Rys. 9. Stanowisko eksperymentalne do pomiaru propagacji fal

Na rys. 10 pokazane są sygnały propagującej fali zarejestrowane dla pręta stalowego otoczonego powietrzem oraz dla pręta otoczonego zaprawą. Przy zbliżonej amplitudzie paczki wejściowej (ok. 0,015 m/s) charakter obu sygnałów jest odmienny. W pręcie otoczonym powietrzem (rys. 10a) widoczne są kolejne odbicia od końca pręta, podczas gdy w pręcie otoczonym zaprawą widoczna jest jedynie fala wejściowa (rys. 10b).

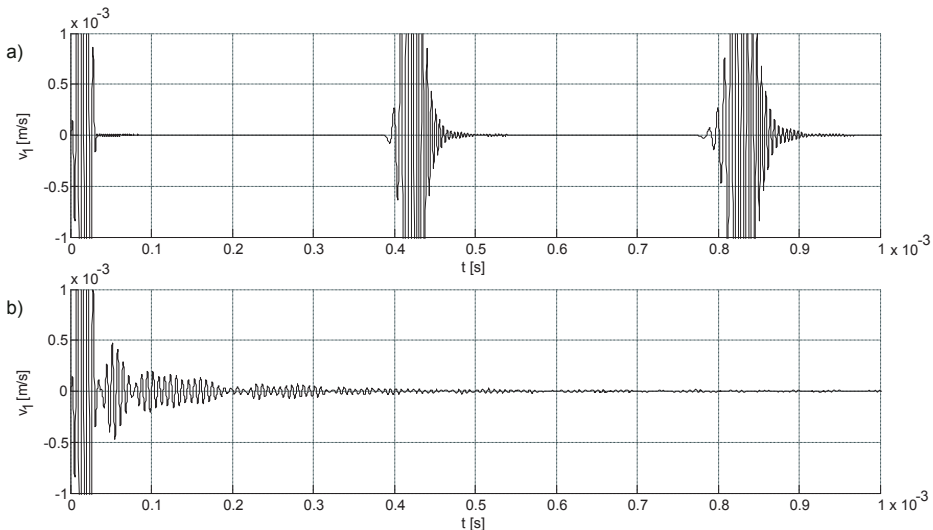


Rys. 10. Pomierzony przebieg czasowy propagującej fali: a) w pręcie otoczonym powietrzem; b) w pręcie osadzonym w zaprawie

Rysunek 11 pokazuje zbliżenie na wybrany fragment pomierzonych sygnałów w zakresie czasowym od 0 do 1 ms oraz amplitudowym $\pm 0,001$ m/s. Na wykresie dla pręta otoczonego powietrzem pomiędzy falą wejściową a pierwszym odbiciem od końca pręta (0,39 ms) nie widać żadnych dodatkowych odbić. Jedynie w drugim przejściu fali pojawia się dodatkowe odbicie (0,64 ms), którym jest postać antysymetryczna powstała na skutek nieidealnych warunków wzbudzenia postaci symetrycznej. Na rys. 11b pokazane są wyniki dla pręta osadzonego w zaprawie. Na wykresie nie widać odbicia od końca pręta, pojawiają się odbicia wyciekającej fali. Rysunek 12 ukazuje przebiegi otrzymane w wyniku obliczeń numerycznych. Widoczna jest zgodność obliczonych przebiegów z sygnałami uzyskanymi eksperymentalnie zarówno dla fali propagującej w pręcie swobodnym, jak i w pręcie otoczonego zaprawą przy przyjęciu modułu sprężystości równego 0,5 GPa.



Rys. 11. Zbliżenie sygnału eksperymentalnego propagującej fali: a) w pręcie otoczonego powietrzem; b) w pręcie osadzonego w zaprawie



Rys. 12. Zbliżenie sygnału numerycznego propagującej fali: a) w pręcie otoczonego powietrzem; b) w pręcie osadzonego w zaprawie o module sprężystości 0,5 GPa

5. Wnioski

W artykule przedstawiono modelowanie propagacji fal sprężystych w prętach stalowych osadzonych w materiale kompozytowym typu beton/zaprawa o różnym module sprężystości. W wyniku obliczeń wykazano, iż w przypadku pręta stalowego osadzonego w materiale o właściwościach impedancyjnych zbliżonych do stali dochodzi do tzw. wycieku fali do otaczającego ośrodka. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych wskazują na pewne różnice jakościowe i ilościowe przebiegów czasowych fal sprężystych w pręcie otoczonym powietrzem oraz pręcie osadzonym w zaprawie. Prędkość propagującej fali oraz charakter sygnału zmieniają się wraz z parametrami materiału otaczającego pręt. Możliwa zatem była ocena parametrów materiałowych materiału otaczającego pręt na podstawie analizy propagacji fal sprężystych w rozważanej próbie imitującej kotwę skalną. Wykonane badania stanowią pierwszy etap prac ukierunkowanych na diagnostykę ultradźwiękową kotew skalnych.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Literatura

- 1 Kilic A., Yasar E., Celik A.G. Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17 (2002) 355–362.
- 2 Jiu-long C., Xiao-yun S., Li F., Yong-bang Y. Experimental study on non-destructive testing of rock bolts based on pseudo-random signal. *Safety Science* 50 (2012) 783–786.
- 3 Chróścielewski J., Rucka M., Wilde K., Witkowski W.: Zastosowanie metody elementów spektralnych do modelowania zjawisk propagacji fal sprężystych dla celów diagnostyki, 56 Konferencja Naukowa KLiW PAN oraz KN PZITB, Kielce- Krynica, 2010, s. 821–828.
- 4 Rucka M.: Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation. *Journal of Sound and Vibration* 329 (2010) 1760–1779.

Contribution to the diagnostics of rock bolts using elastic wave propagation

Magdalena Rucka¹

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

Abstract: This paper presents the numerical and experimental analyses of elastic wave propagation in a steel rod embedded in a composite material. The experiment involved the phenomenon of wave propagation generated by a piezoactuator and non-contact measurements by means of a laser vibrometer. In numerical simulations, the effect of values of elastic modulus of the material on characteristics of waves propagating in a steel rod was analysed. Conducted research presents the first stage of work focused on ultrasonic diagnostics of rock bolts.

Keywords: propagation of elastic waves, rock bolts, diagnostics.