

IDENTYFIKACJA KRUCHYCH MIKROUSZKODZEŃ ELEMENTÓW BETONOWYCH ZA POMOCĄ TOMOGRAFII ULTRADŹWIĘKOWEJ

Zbigniew PERKOWSKI, Karolina GOZARSKA
Politechnika Opolska, Opole, Polska

1. Wprowadzenie

Identyfikacja kruchych mikrouszkodzeń konstrukcji budowlanych i ich elementów jest jednym z istotnych zadań diagnostyki w inżynierii lądowej. Zostało opracowanych wiele technik pozwalających na określenie lokalizacji i zakresu kruchych defektów w strukturze wewnętrznej materiałów. Od dawna dużym zainteresowaniem cieszą się metody wykorzystujące ultradźwięki. Klasyczne metody z tego zakresu opierają się głównie na wykorzystaniu jednej pary głowic (nadajnik-odbiornik), gdzie bada się czas przejścia dźwięku między nimi oraz zapis i widmo sygnału falowego z odbiornika (np. [1]). Gdy analizujemy sygnały uzyskiwane w przypadku odpowiednio rozmieszczonych zespołów nadajników i odbiorników fal ultradźwiękowych, to wtedy wykorzystywać już można aparat pojęciowy i metody tomografii (z greckiego „obrazowanie warstwowe”). W ogólności wyróżnia się cztery rodzaje tomografii ultradźwiękowej (np. [3]): fali ciągłej (CWUT), dyfrakcyjnej (UDT), odbiciowej (URT) i transmisyjnej (UTT). W przypadku detekcji kruchych mikrospektań elementach z materiałów skalopodobnych (np. z betonu) przy małym stopniu wyężenia, kiedy nie formują one jeszcze wyraźnie zlokalizowanych nieciągłości, które mogą efektywnie odbić sygnał ultradźwiękowy, zdaniem autorów korzystnie jest wykorzystać tomografię transmisyjną, która generalnie polega na zebraniu informacji zawartych w impulsach ultradźwiękowych rejestrowanych po przeniknięciu przez badany obiekt [3,6]. W metodzie tej, w celu znacznego uproszczenia rozważań, zakłada się najczęściej, że droga, po której dźwięk propaguje między punktami pomiarowymi najszybciej, jest prostoliniowa, czyli nie uwzględnia się dyfrakcji fali. W niniejszym artykule, w oparciu o wyniki testu numerycznego, zilustrowano, jak założenie prostoliniowości tych dróg może zakłócać dokładność rekonstrukcji tomograficznych, biorąc pod uwagę stopień mikrozarzysowania elementu betonowego.

2. Opis stosowanych w pracy metod tomograficznych

Jedną z istotnych wielkości mierzonych przez urządzenia tomograficzne jest prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w badanym elemencie – w szczególności tych rodzajów fal, które rozchodzą się najszybciej (np. podłużnych w elementach masywnych). Ich średnią prędkość można oszacować przez pomiar czasu propagacji zaburzenia falowego między nadajnikiem i odbiornikiem, zakładając jednocześnie prostoliniowość dróg, po

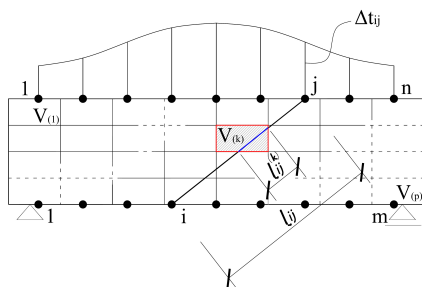
których dźwięk rozchodzi się najszybciej. Opisując kruche mikrouszkodzenia materiału w sposób rozmyty, zgodnie z koncepcjami kontynualnej mechaniki uszkodzeń (np. [8]) za pomocą skalarnego parametru uszkodzenia $\omega \in [0,1]$ [2] i przy zastosowaniu zasady równoważności odkształceń [4], można przyjąć, że moduł Younga materiału przy ewolucji uszkodzeń spada proporcjonalnie do wyrażenia $1-\omega$. Jeśli przyjąć także brak istotnego wpływu rozwoju mikrouszkodzeń na wartość współczynnika Poissona i gęstości materiału, to wówczas można oszacować zmianę prędkości fal podłużnych (o danej częstotliwości i długości większej od reprezentatywnej objętości materiału) z zależności:

$$c_L = \sqrt{1-\omega} c_{L0}, \quad (1)$$

gdzie c_{L0} , c_L to prędkości fal podłużnych odpowiednio w materiale bez uszkodzeń i z uszkodzeniami. Na tej podstawie zobrazowanie już tylko rozkładu prędkości rozchodzenia się fal mechanicznych w elemencie może pozwolić na pośrednie określenie w nim rozkładu mikrouszkodzeń (oczywiście trzeba również zdawać sobie sprawę z tego, że w przypadku takich materiałów porowatych jak beton wpływ na prędkość fal dźwiękowych ma wiele innych czynników, np. wilgotność i lepkość materiału, częstotliwość fali). Przykładowo można w tym celu podzielić badany obszar elementu na podobszary (tzw. komórki), w których zakłada się stałą prędkość fali dźwiękowej, dalej założyć układ odbiorników i nadajników fali ultradźwiękowej odpowiednio w punktach $i=1,2,\dots,m$ i $j=1,2,\dots,n$ oraz drogi najszybszej propagacji dźwięku między nimi (tzw. promienie) jako proste (rys. 1). Wtedy przybliżoną rekonstrukcję rozkładu prędkości falotrzymuje się rozwiązując następujący układ równań [3]:

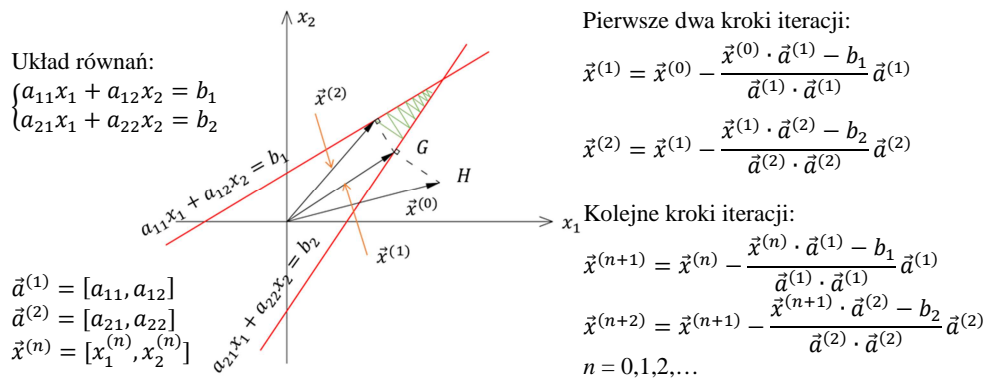
$$\sum_k l_{ij}^{(k)} f_{(k)} = \Delta t_{ij}, \text{ gdzie: } l_{ij} = \sum_k l_{ij}^{(k)}, f_{(k)} = \frac{1}{c_{L(k)}} \text{ i } l_{ij}^{(k)} = 0, \text{ gdy } l_{ij}^{(k)} \notin V_{(k)}, \quad (2)$$

gdzie: Δt_{ij} – mierzony czas przejścia fali z punktu i do j ; l_{ij} – długość promienia łączącego punkty i i j ; $l_{ij}^{(k)}$ – długość promienia między punktami i i j , przypadająca na k -tą komórkę; $f_{(k)}$ – odwrotność prędkości $c_{L(k)}$ rozchodzenia się podłużnej fali ultradźwiękowej w k -tej komórce; $V_{(k)}$ – obszar zajmowany przez k -tą komórkę, $k=1,2,\dots,p$. Oczywiście liczba utworzonych promieni musi być równa lub większa od liczby komórek p . Na rys. 1 pokazano przykładową implementację podejścia w przypadku prostokątnego przekroju elementu, który znajduje się w płaskim stanie naprężenia lub odkształcenia.



Rys. 1. Przykładowy układ komórek i promieni w transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej z układem równoległym nadajników i odbiorników.
Fig. 1. Exemplary set of cells and rays in the ultrasonic transmission tomography with a parallel set of transducers.

Do poszukiwania wartości $f_{(k)}$ w tomografii z powodzeniem wykorzystuje się numeryczną metodę iteracji zaproponowaną w 1937 roku przez polskiego matematyka Stefana Kaczmarza. Metoda ta znajduje przybliżone rozwiązania układów równań liniowych o dużej liczbie niewiadomych. W pierwszej kolejności należy obrać dowolny punkt w przestrzeni rozwiązań (najczęściej wybiera się początek układu współrzędnych), a następnie rzutować go w kierunku normalnym do hiperpłaszczyzny wyznaczonej przez jedno z równań układu. W następnych krokach takie rzutowanie punktu, uzyskanego z kroku poprzedniego, wykonuje się na hiperpłaszczyźnie wyznaczonej kolejnymi równaniami układu. Po wyczerpaniu wszystkich równań układu rzutowanie powtarzamy w tej samej kolejności, jak w etapie pierwszym. Procedurę powtarza się, aż do momentu uzyskania żądanej dokładności rozwiązania. Szczegółowy tok postępowania w tej metodzie omówiono m.in. w pracach [3,7]. Ideę algorytmu Kaczmarza przedstawiono na rys. 2, na przykładzie układu dwóch równań.



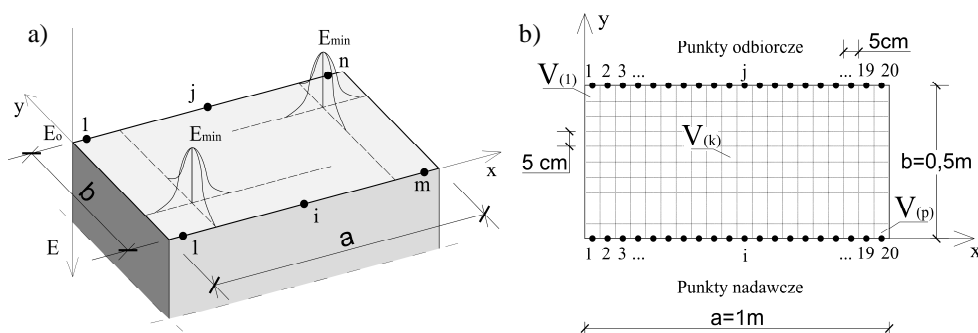
Rys. 2. Idea algorytmu Kaczmarza na przykładzie układu dwóch równań [3].
 Fig. 2. The idea of Kaczmarz algorithm on the example of set of two equations [3].

3. Przykład obliczeniowy

W celu sprawdzenia skuteczności prezentowanego sposobu identyfikacji rozkładu mikrouszkodzeń ze względu na upraszczające założenie prostoliniowości promieni przeprowadzono przykładowe obliczenia w przypadku przekroju betonowego elementu pryzmatycznego o wymiarach $a \times b = 1\text{m} \times 0.5\text{m}$, znajdującego się w płaskim stanie odkształcenia. Założono następujące parametry materiałów w stanie nieuszkodzonym: moduł Younga – $E=35\text{GPa}$, współczynnik Poissona – $\nu=0.15$ i gęstość – $\rho=2300\text{kg/m}^3$, które odpowiadają prędkości nietłumionych fal podłużnych $c_{L0} \approx 4008\text{m/s}$. W przekroju zadano hipotetyczny rozkład mikrouszkodzeń skumulowanych w dwóch strefach i przekładający się na rozkłady modułu Younga, jak pokazano schematycznie na rys. 3a. Związany z nimi rozkład prędkości fal podłużnych c_L (w m/s) opisano funkcją:

$$c_L = 4008 \left(1 - A \exp\left(-100\left(x - \frac{1}{4}a\right)^2\right) \exp\left(-250\left(y - \frac{1}{4}b\right)^2\right) - A \exp\left(-100\left(x - \frac{3}{4}a\right)^2\right) \exp\left(-250\left(y - \frac{3}{4}b\right)^2\right) \right), \quad (3)$$

gdzie: A – bezwymiarowy parametr, określający w skali od 0 do 1 maksymalny spadek prędkości dźwięku w punktach $[0.25a, 0.25b]$ i $[0.75a, 0.75b]$; x, y – współrzędne punktów, należących do obszaru przekroju (w metrach); a, b – długości boków przekroju (w metrach). bliczenia przeprowadzono w 4 przypadkach, kiedy w punktach $[0.25a, 0.25b]$ i $[0.75a, 0.75b]$ maksymalny spadek prędkości w stosunku do stanu materiału bez uszkodzeń wynosił: 5%, 10%, 20% i 40% (odpowiednio: $A=0.05$, $A=0.1$, $A=0.2$ i $A=0.4$). Czasy przebiegu fali ultradźwiękowej między układami punktów $i=1, 2, \dots, 20$ i $j=1, 2, \dots, 20$, których usytuowanie pokazano na rys. 3b, otrzymano za pomocą własnego programu komputerowego napisanego w środowisku Matlaba.



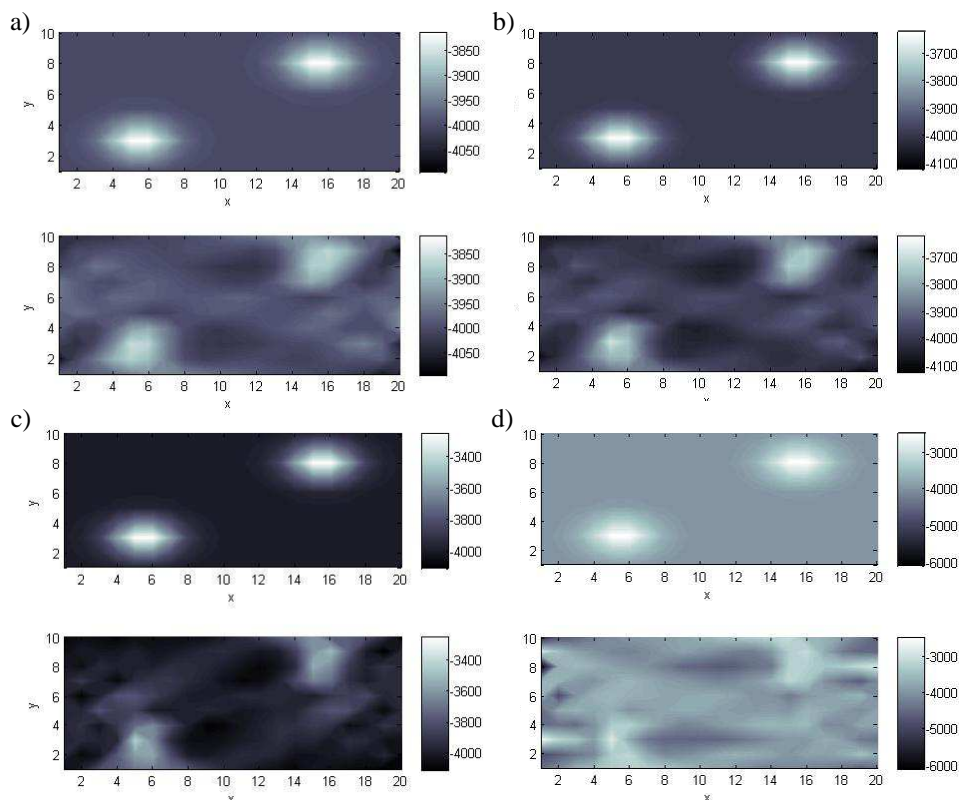
Rys. 3. a) Schematyczny rozkład założonych zmian modułu Younga w efekcie uszkodzenia w przekroju elementu. b) Rozkład punktów nadawczo-odbiorczych i komórek, w których zakłada się stałe prędkości fal podłużnych, stanowiących niewiadome układu równań (2).
Fig. 3. The schematic distribution of assumed change of Young's modulus due to damage in the cross-section of element. b) The distribution of sending-receiving points and cells, in which one assumed constant velocities of longitudinal ultrasonic waves being the unknowns of set of equations (3).

Program rozwiązywał odpowiadające prezentowanemu zadaniu zagadnienie początkowo-brzegowe teorii sprężystości sformułowane w przemieszczeniach (np. [5]), przy wykorzystaniu Metody Różnic Skończonych. Rekonstruowane rozkłady prędkości fali, obliczone metodą Kaczmarza z układu równań (3) przy układzie 200 komórek pokazanych na rys. 3b, przedstawiono na rys. 4. W każdym przypadku uzyskane obrazy tomograficzne zestawiono z odpowiadającym im obrazami pierwotnymi w identycznej skali szarości. W trzech pierwszych przykładach (rys. 4a, 4b, 4c) rekonstrukcje obrazu można uznać za zadawalające. Zaburzenia dokładności w otrzymanych rozkładach prędkości, widocznych szczególnie na tle obszaru nieuszkodzonego, nie utrudniają lokalizacji stref uszkodzonych. W 4. przypadku rekonstrukcja rozkładu prędkości odbiega istotnie od pierwotnego. Patrząc na rys. 4d można mylnie stwierdzić, że uszkodzenia występują na całym obszarze przekroju. Z drugiej strony istotną informacją, którą można w tym przypadku uzyskać, jest to, że przekrój jest w dużej mierze „osłabiony”, choć pozbawieni jesteśmy już możliwości precyzyjnej lokalizacji stref uszkodzonych.

4. Podsumowanie

Przedstawione rekonstrukcje tomograficzne rozkładów prędkości fal ultradźwiękowych obrazują pośrednio rozkłady kruchych uszkodzeń materiału. W analizowanych przyczynkowo przykładach jakość otrzymanych rekonstrukcji można uznać za

zadowalającą, kiedy kruche uszkodzenia materiału nie wpływają na obniżenie prędkości fal ultradźwiękowych więcej niż o ok. 20% w stosunku do stanu materiału bez uszkodzeń struktury. Powyżej tej wartości jakość odtwarzanych tomograficznie rozkładów prędkości jest niedostateczna i spowodowana jest nieuwzględnieniem w modelu obliczeniowym znacznego ugięcia fal akustycznych przy przejściu ze stref nieuszkodzonych do uszkodzonych.



Rys. 4. Założone rozkłady prędkości fal podłużnych w przekroju elementu zgodnie funkcją (3) i ich rekonstrukcje tomograficzne. Poszczególne obrazy uzyskano przy: a) $A=0.05$, b) $A=0.1$, c) $A=0.2$, d) $A=0.4$.

Fig. 4. The assumed distributions of longitudinal waves in the cross-section of element according to the function (3) and their tomographic reconstructions. The following images are obtained for: a) $A=0.05$, b) $A=0.1$, c) $A=0.2$, d) $A=0.4$.

Oznaczenia symboli

a, b - szerokość i wysokość przekroju, width and height of the cross-section, [m],

c_L - prędkość ultradźwiękowej fali podłużnej,
longitudinal ultrasonic wave velocity, [m/s],

l_{ij} - długość odcinka (promienia) między punktami nadawczo-odbiorczymi (i i j) fali dźwiękowej, length of section (ray) between sending-receiving points (i and j) of ultrasonic wave, [m],

Δt_{ij} - czas przejścia fali z punktu i do j , wave transmit time from the point i to j , [s],

- A - bezwymiarowy parametr o sensie wynikającym z równania (3),
dimension less parameter of sense following from the equation (3), [-],
- E - moduł Younga, Young's modulus, [Pa],
- $V_{(k)}$ - obszar k -tej komórki, area of the k -th cell,
- ν - współczynnik Poissona, Poisson's ratio, [-],
- ρ - gęstość masy, mass density, [kg/m³],
- ω - skalarny parametr uszkodzenia, scalar damage parameter, [-].

Literatura

- [1] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., Metody lokalizacji wad konstrukcji betonowych – metoda ultradźwiękowa (cz. I), Przegląd Budowlany, 9, str. 29-36, 2007.
- [2] Kachanov L.M, O vremenirozrušenija v uslovijachpolzučesti, Izv. AN SSSR, Otd. Tech. Nauk, 8, str. 26-31, 1958.
- [3] Kak A.C., Slaney M., Principles of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, New York, 1999.
- [4] Lemaitre J., A continous damage mechanics model for ductile fracture, J. Egeineering Materials and Technology, 107, str. 83-89, 1985 .
- [5] Nowacki W., Teoria sprężystości, PWN, Warszawa, 1970.
- [6] Opiełiński K.J., Gudra T., Uniwersalne stanowisko badawcze do ultradźwiękowej tomografii transmisyjnej, Badania Materiałów, 3, 15, Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących, Chorzów, 2002.
- [7] Polakowski K., Sikora J., Filipowicz F., Algebraiczne metody konstrukcji obrazów tomografii ultradźwiękowej, Prace Instytutu Elektrotechniki, Z. 230, str. 81-99, Politechnika Warszawska, 2007.
- [8] Skrzypek J.J, Ganczarski A., Modelling of Material Damage and Failure of Structures. Theory and Applications, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1999.

IDENTIFICATION OF BRITTLE MICRODAMAGE OF CONCRETE ELEMENTS BY MEANS OF ULTRASONIC TOMOGRAPHY

Summary

An application of ultrasonic transmission tomography to reconstructions of ultrasonic wave velocity distribution in cross-sections of structural members affected by brittle microdamage is presented in the paper. To simplify the problem the methods of continuous damage mechanics for modeling change of sonic wave velocity caused by damage of material is employed in the isotropic case. Also the concept of division of tomographically tested cross-sections into square “cells” of constant sound velocities and assuming straight “rays” of ultrasound propagation between the sending-receiving points are introduced in the considerations. Finally own numerical example is discussed for concrete prismatic element which shows a satisfactory precision of the used tomographic imaging if a local drop of sound velocity is not bigger than 20% in a comparison with material in the undamaged state. The effect is related to neglecting in the considerations the diffraction of ultrasonic waves on the damage areas.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego
Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadre naukowe województwa opolskiego II