

mgr inż. Karolina Tatara

Promotor: dr hab. inż. Zbigniew Perkowski, prof. PO

Politechnika Opolska

Wydział Budownictwa i Architektury

ul. Katowicka 48

46-020 Opole

**Identyfikacja kruchych uszkodzeń w konstrukcjach betonowych
z wykorzystaniem transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej
i algorytmu Dijkstry**

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska podejmuje problematykę badania wewnętrznej struktury elementów betonowych za pomocą transmisyjnej tomografii ultradźwiękowej (UTT – ang. *Ultrasound Transmission Tomography*). Wykorzystuje ona pomiary czasów przejścia sygnału po tzw. promieniach pomiędzy założonym układem punktów nadawczo-odbiorczych. Znajomość tych czasów pozwala obrazować wewnętrzną strukturę ośrodka na drodze przekształceń matematycznych poprzez rozwiązanie układu równań algebraicznych względem prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w wydzielonych jego komórkach. W ramach przeglądu literatury stwierdzono, że dotychczas opracowane algorytmy obliczeniowe w UTT konstrukcji betonowych nie uwzględniają zasady Fermata zakładając w uproszczeniu, że fala propaguje najszybciej po prostych promieniach niezależnie od stopnia niejednorodności akustycznej badanego elementu (pomija się ewentualną refrakcję fal). W związku z tym, wychodząc naprzeciw temu problemowi, w pracy przedstawiono efektywny czasowo sposób prowadzenia obliczeń w ramach teorii grafów, który wykorzystuje algorytm Dijkstry. W przypadku ośrodka o dowolnym rozkładzie sztywności i gęstości pozwala on w zadowalającym przybliżeniu na określenie rzeczywistych ścieżek najszybszej propagacji fal ultradźwiękowych i czasów potrzebnych fali na ich przebycie. Sposób ten wykorzystano w pierwszej kolejności do opracowania przykładów numerycznych, w których, w przekrojach elementów betonowych o założonych lokalizacjach stref zdegradowanych sprężycie, obliczono czasy propagacji fal podłużnych. Następnie, stosując aparat matematyczny UTT, odtwarzano z ich wykorzystaniem położenie obszarów uszkodzonych pokazując zakres przydatności omawianej metody w detekcji kruchych defektów struktury betonu. Wykazano jednocześnie zmniejszanie się dokładności tej odmiany tomografii wraz ze wzrostem stopnia degradacji materiału z uwagi na

niespełnianie założenia prostoliniowości promieni. Do rozwiązywania strony matematycznej zagadnienia wykorzystywano algorytm Kaczmarza lub metodę najmniejszych kwadratów z regularyzacją Tichonowa i metodą *L-curve* wykazując zadowalającą dokładność drugiego z wymienionych podejść, gdzie w celu „odszumienia” uzyskiwanych obrazów wprowadzono do macierzy regularyzacyjnej dyskretne operatory pierwszego lub drugiego stopnia. W celu zwiększenia dokładności obliczeń, w obliczeniach uwzględniono również czasy propagacji fal ultradźwiękowych pomiędzy dodatkowymi, fikcyjnymi punktami nadawczo-odbiorczymi, które wyznaczono za pomocą wielomianowych funkcji sklepanych 3-go stopnia interpolujących pierwotnie otrzymane dane.

Stopień uszkodzenia materiału z zastosowaniem UTT określano za pomocą skalarnego parametru uszkodzenia ω definiowanego zgodnie z założeniami mechaniki uszkodzeń. Przydatność tej metodyki w rekonstrukcji rozkładu ω weryfikowano eksperymentalnie przy wykorzystaniu fal podłużnych. W pierwszej kolejności pomiarów dokonano na płycie z pleksiglasu o sztucznie wprowadzonych 3 obszarach zdegradowanych o znanej z góry wartości parametru ω . Potwierdzono tym samym, że UTT można stosować w ilościowym określaniu stopnia kruchego uszkodzenia materiału (ale w przypadku większych z wprowadzonych obszarów). Następnie za pomocą UTT zbadano także ewolucję kruchych uszkodzeń struktury betonu w następujących elementach:

- 3 laboratoryjne belki żelbetowe (10 x 10 x 50 cm) poddane działaniu momentu rysującego,
- prefabrykowana belka żelbetowa (20 x 40 x 360 cm) uszkodzona w wyniku upadku podczas transportu,
- płyta żelbetowa (10 x 80 x 415 cm) zespolona z kratownicą stalową poddana cyklicznie narastającemu obciążeniu o charakterze statycznym aż do wyczerpania nośności.

We wszystkich wymienionych badaniach wykazano celowość zastosowania UTT przy wykrywaniu narastania kruchych uszkodzeń w strukturze betonu począwszy już od fazy mikrozarysowania. Dokładność rekonstrukcji rozkładu uszkodzeń w elementach żelbetowych (ze względu na założenie prostoliniowych promieni łączących punkty nadawczo-odbiorcze fal ultradźwiękowych) oceniano także za pomocą metodologii wykorzystującej algorytm Dijkstry.



mgr inż. Karolina Tatara

Promotor: dr hab. inż. Zbigniew Perkowski, prof. PO

Politechnika Opolska

Wydział Budownictwa i Architektury

ul. Katowicka 48

46-020 Opole

**Identification of brittle damage in concrete constructions
using transmission ultrasound tomography and Dijkstra's algorithm**

Abstract

The doctoral dissertation deals with the issue of testing internal structure of concrete elements by means of ultrasonic transmission tomography (UTT). It uses measurements of signal transitions times on so-called rays between an assumed system of sending and receiving points. Knowledge of these times allows to visualize the internal structure of medium by means of the mathematical transformations by solving a system of algebraic equations relative to velocities of propagation of ultrasonic waves in its separated cells. As part of the literature review, it was found that the computational algorithms in UTT of concrete structures, developed so far, do not take into account the Fermat principle. They assume in a simplified way that waves propagate the fastest over the straight rays regardless of the degree of acoustic heterogeneity of the tested element (the possible refraction of the waves is omitted). Therefore to meet this problem, the dissertation presents a time-effective method of performing calculations in the field of graph theory using Dijkstra's algorithm. In the case of medium with any distribution of stiffness and density, it allows to determine real paths of the fastest propagation of ultrasonic waves and the time needed by the waves to travel them in a satisfactory approximation. This method was first used to develop numerical examples in which the propagation times of longitudinal waves were calculated in the cross-sections of concrete elements with assumed locations of elastically degraded zones. Then, the location of damaged areas was reconstructed using them by means of the UTT mathematical apparatus what showed the range of suitability of the presented method in the detection of brittle defects of concrete's structure. At the same time, the accuracy of this type of tomography decreased with the increase in the degree of material degradation due to not fulfilling the assumption of rays' straightness. The Kaczmarz algorithm or the least squares method with the Tikhonov regularization and L-curve method were used to solve the mathematical side of the problem

what showed a satisfactory accuracy of the second approach, where discrete operators of the first or second order were introduced into the regularization matrix to reduce noise in the acquired images. In order to increase the accuracy of calculations, ultrasonic wave propagation times between additional fictitious sending and receiving points were taken into account which were determined by polynomial spline functions of the third degree interpolating the originally received data.

Using UTT, the degree of material's damage was determined by means of the scalar damage parameter ω defined accordingly with the assumptions of damage mechanics. The usefulness of this methodology in the reconstructing a distribution of ω was verified experimentally using longitudinal waves. First, measurements were made on a plexiglass plate with artificially introduced 3 degraded areas with a known value of the parameter ω . Thus, the usefulness of UTT in quantifying the degree of brittle damage in the material was confirmed (but in the case of the larger areas introduced). Next, the evolution of brittle damage in concrete's structure was investigated in the following elements:

- 3 laboratory reinforced concrete beams (10 x 10 x 50 cm) subjected to the cracking moment,
- prefabricated reinforced concrete beam (20 x 40 x 360 cm) damaged by falling during transport,
- reinforced concrete slab (10 x 80 x 415 cm) combined with a steel truss subjected to the periodically increasing static load until the load capacity was exhausted.

In all the above-mentioned studies, it was demonstrated that UTT is useful in detecting the evolution of brittle damage in the structure of concrete, starting from the phase of micro-cracking. The accuracy of the reconstruction of the damage distribution in the reinforced concrete elements (due to the assumption of straight rays connecting the sending and receiving points of ultrasonic waves) was also evaluated using the methodology based on Dijkstra's algorithm.

