

## 弾性波減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化技術の開発

|           |     |     |    |
|-----------|-----|-----|----|
| 飛島建設技術研究所 | 正会員 | ○桃木 | 昌平 |
| 飛島建設技術研究所 | 正会員 | 蔡   | 華堅 |
| 京都大学大学院   | 正会員 | 塩谷  | 智基 |
| 日本大学      | 正会員 | 小林  | 義和 |

## 1. 目的

近年、橋梁やダムなどの社会資本の老朽化が顕在化し、構造物を維持管理する上で、その健全性をいかに適切に、かつ、効率的に評価するかが命題となっている。弾性波法は弾性波の特性値（伝播速度、周波数、エネルギーなど）が計測対象の物性に依存して変化することを利用した非破壊検査手法であり、コンクリート構造物の健全性を評価する手法として多くの研究がなされている<sup>1)</sup>。本研究では、コンクリート構造物の損傷規模や分布を弾性波法で評価するために、程度の異なる模擬の損傷を有する試験体において弾性波特性値を計測し、各特性値の損傷に対する感度を検証した。その結果得られた損傷に対して高感度に変化する弾性波エネルギーの“減衰特性”に着目し、構造物内部を減衰比で示し、内部損傷を可視化可能な「減衰トモグラフィ」を開発した。さらに模擬の内部損傷を有する試験体を用いて減衰トモグラフィの精度検証を実施した。

## 2. 損傷度と弾性波特性値に関する基礎試験

## 2.1. 試験概要

図1に試験体の概要を示す。モルタル試験体の寸法は150×150×150 mmであり、打設時にビニル片（15×15×0.5 mm/1枚）を体積比で0, 1, 5, 10%ずつ混入させ、健全および軽微な損傷から重度な損傷までを模擬した。弾性波計測は超音波による透過法で行った。センサはAEセンサ（60 kHz 共振型）、超音波の入力にはパルス発生器を用いた。計測システムの概要を図2に示す。パルス発生器から発信される波形と試験体を透過して受信される波形をセンサで収録し、発信波形と受信波形の初動の時間差により算出した伝播速度、および発信波形のエネルギーに対する受信波形のエネルギーの比（以下、減衰比と記す）を求めた。

## 2.2. 試験結果

図3は、試験で得られた各損傷度での弾性波伝播速度および減衰比を示したものである。低下率は健全な試験体で得られた値を1として算出した。図から、いずれの特性値も損傷度が大きくなるにしたがって値が低下することがわかる。しかし、伝播速度の低下率に比べ、減衰比の低下率は著しく、損傷度を高感度に評価できる特性値であることがわかった。

## 3. 減衰トモグラフィ

## 3.1. 逆解析アルゴリズム

一般に弾性波トモグラフィとは、調査領域をセルに分割し、調査領域を透過した多数の波線の情報を用いてそれぞれのセル

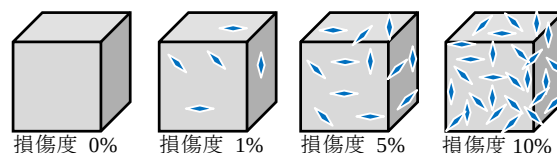


図1 模擬損傷を有するモルタル試験体

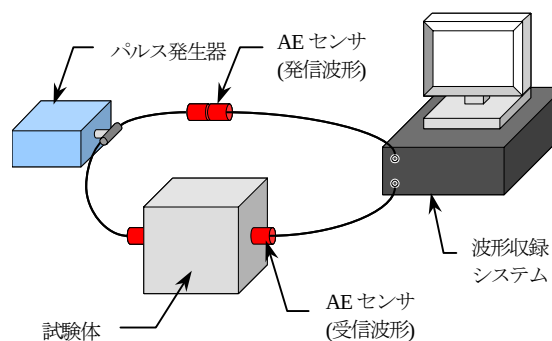


図2 計測システム概要

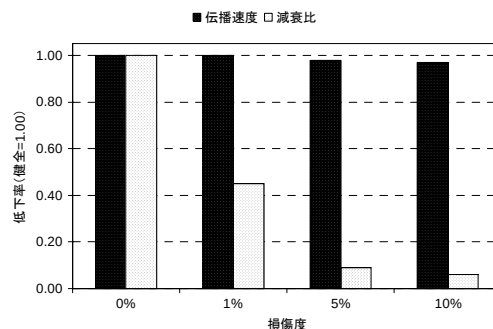
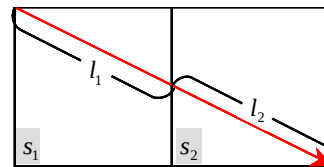


図3 損傷度に対する弾性波特性値低下率

キーワード 非破壊検査, 弾性波, 減衰, トモグラフィ

連絡先 〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472 飛島建設株式会社 技術研究所 TEL 04-7198-7572

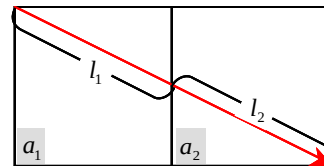
の弾性波特性値を求め、その分布をもとに調査領域を評価する手法である。伝播速度によるトモグラフィでは、各セルに与えられた初期スローネス  $s$ （速度の逆数）と波線追跡モデルより得られる伝播経路長  $l$  の一次関数の和集合（図 4(a)）から、任意の節点間における理論走時が得られる。この理論走時と観測走時との走時残差を最小にするスローネスを逆解析で求め、再分布したものが、観測データに基づく速度構造となる<sup>2)</sup>。これに対し、弾性波のエネルギー減衰によるトモグラフィでは理論減衰比を、各セルに与えられる減衰パラメータ  $a$  と波線長  $l$  から成る指数関数の積集合（図 4(b)）とし、観測減衰比との残差が最小となる減衰パラメータを各セルに再分布することで、全セルの減衰比構造を求めている。



(a) 理論走時の算出

理論走時：

$$\sum s_i \cdot l_i$$



(b) 理論減衰率の算出

理論減衰比：

$$\prod \exp(-a_i \cdot l_i)$$

図 4 理論値の算出方法

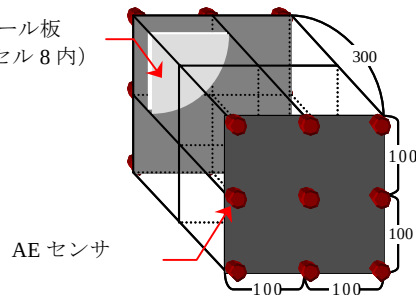
発泡スチロール板  
(厚さ 5mm, セル 8 内)

図 5 試験体・センサ配置概要

### 3.2. 減衰トモグラフィの精度検証試験

試験概要を図 5 に示す。検証する領域は  $200 \times 200 \times 300$  mm で、片面 9 個ずつ計 18 個のセンサを設置した。各センサを発信点とし、対面の 9 個で受信する。したがってこの計測で得られる波線は  $18 \times 9 = 162$  本である。解析モデルは計 8 個の六面体セルに分割した。計測は健全部と一部に内部損傷を有する損傷部の 2 パターンで実施した。内部損傷は発泡スチロール板（厚さ 5 mm）で模擬しており、損傷はセル番号 8 にのみ存在する。弾性波入力方法および伝播速度、減衰比の計測方法は、2 章の試験方法と同様である。

### 3.3. 検証結果

健全部の観測減衰比：  $A$  と波線長：  $l$  との関係を数式 1 に示す。

$$A = \exp(-5.2316 \cdot l) \quad (\text{数式 1})$$

$$\exp(-5.2316) = 0.005345 \quad (\text{数式 2})$$

であった。このとき、数式 2 で示される値を、当該試験体に固有な弾性波の単位距離当たりの減衰比を示すものとした。この値を、

健全を示す基準値とし、逆解析で算出された減衰パラメータ  $a$  から求めた各セルの単位減衰比との割合を健全度として表 1 に示す。同表には伝播速度の結果も併せて示す。伝播速度の場合、損傷の無いセルは基準となる健全部で得られた値に対してほぼ同等の値を示すのに対し、損傷の有るセル 8 の値は基準値の 45 % であり、損傷箇所を的確に捉えていることがわかる。一方、減衰比の場合、損傷の有るセル 8 の値は基準値の 0.02 % であり、伝播速度よりも顕著に損傷箇所を示した。このように、弾性波のエネルギー減衰比に着目することによって、内部の損傷度をより高感度に検出・評価できることがわかった。

### 4. まとめ

コンクリート構造物を弾性波エネルギーの減衰比構造で示すことで、内部の損傷度をより高感度に検出・評価できることがわかった。減衰特性を用いた損傷評価には厳密な理論解がなく、また、計測条件や対象物の幾何学性状に影響されやすいなど、実構造物への適用には課題もある。今後は基礎的な試験によって減衰比が有効となる損傷の評価指標をデータベース化するとともに、減衰比の算出に有効な波形処理方法を探り、実用化を目指したい。

### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No. 73, 2008.
- 2) 塩谷智基, D. G. Aggelis, 桃木昌平：弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価，とびしま技報 No. 56, pp. 111-116, 2007.

表 1 各セルのパラメータ

&lt;基準値&gt; 速度：4,484 m/sec, 減衰比：0.005345

|    |      |   | 伝播速度    | 健全度  | 減衰比      | 健全度  |
|----|------|---|---------|------|----------|------|
|    |      |   | [m/sec] | [%]  |          | [%]  |
| セル | 損傷無し | 1 | 4,066   | 91   | 0.008669 | 100+ |
|    |      | 2 | 4,229   | 94   | 0.006181 | 100+ |
|    |      | 3 | 3,908   | 87   | 0.000127 | 2    |
|    |      | 4 | 3,852   | 86   | 0.000126 | 2    |
|    |      | 5 | 4,869   | 100+ | 0.015118 | 100+ |
|    |      | 6 | 4,124   | 92   | 0.001289 | 24   |
|    |      | 7 | 5,047   | 100+ | 0.001895 | 35   |
|    | 損傷有り | 8 | 2,021   | 45   | 0.000001 | 0.02 |