

# 弾性波の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

## Development of Concrete Damage Visualization Technique by Elastic Wave Attenuation

桃木 昌平<sup>\*1</sup> 蔡 華 堅<sup>\*1</sup>  
Shohei Momoki Hwakian Chai  
塩谷 智基<sup>\*2</sup> 小林 義和<sup>\*3</sup>  
Tomoki Shiotani Yoshikazu Kobayashi

### 【要旨】

コンクリート構造物の損傷や補修時期、方法を検討する場合、現状の損傷把握がその鍵といえ、様々な検査手法が適用されている。しかし現状では、各検査手法の標準化とその判断基準の一般化には、さらに多くの事例の蓄積が必要とされている。その中で、弾性波を利用した検査技術は、構造物検査手法としての有用性に加え、これまで容易ではなかった修繕効果の定量評価まで可能な検査手法として注目されている。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、まず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。その結果から、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の分布図で示して内部損傷を可視化する「減衰トモグラフィ」技術を開発した。本稿では、上記の基礎試験、実大試験体を用いた減衰トモグラフィの精度検証、および減衰トモグラフィへの応用が可能と考えられる表面波の減衰特性による損傷の定量評価技術の基礎研究を報告する。

【キーワード】 弾性波法 減衰特性 トモグラフィ コンクリート構造物 内部損傷

## 1. 緒言

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。その結果から、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すことで、内部の損傷を可視化できる「減衰トモグラフィ」を開発した。以下、上記の基礎試験、模擬損傷を有する実大試験体を用いた精度検証、および減衰トモグラフィへ応用することで、これまで適用が困難であった一面配置による損傷可視化が可能と考えられる表面波の減衰特性を用いたひび割れの定量評価技術に関する基礎研究について記す。

## 2. 損傷程度と弾性波特性値に関する基礎試験

### 2.1 弾性波特性値

弾性波とは、弾性体の中を伝わる波動である。波動とは、媒質中の1点の粒子の振動が隣隣の粒子に移り、その振動が遠くまで伝わっていく現象のことを指し、粒子の振動方向や波の進行方向によって、縦波（P波、Primary wave）、横波（S波、Secondary wave）、レイリー波（R波、Rayleigh wave）など、いくつかの種類に分けられる<sup>2)</sup>。弾性波法を用いたコンクリートの非破壊検査は、これら弾性波の伝播挙動が、欠陥部あるいはコンクリートの力学特性など、評価したい対象の物理的指標に依存して変化することを利用して実施される。計測される弾性波特性

表一 利用する弾性波特性値と評価対象との関係

弾性波特性値	原理	評価対象（代表例）
伝播速度	伝播経路の変化	ひび割れの有無
周波数	共振周波数	剥離、空隙
振幅エネルギー	欠陥部での減衰	ひび割れの有無
位相	位相の変化	ひび割れ深さ

1. 技術研究所 第三研究室 2. 京都大学大学院 工学研究科 3. 日本大学 理工学部

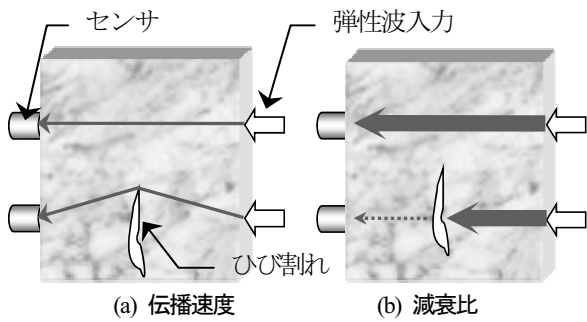


図-1 弾性波法による評価<sup>1)</sup>

値としては、伝播速度（または伝播時間）、周波数、振幅エネルギー（減衰比）、位相などがある。表-1に各弾性波特性値とコンクリート構造物の評価対象との対応関係を、図-1に例として伝播速度と減衰比による評価の概要を示す。

## 2.2 試験概要

図-2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、健全な場合と打設時にビニル片（15×15×0.5 mm/1枚）を体積比で1, 5, 10%ずつ混入させ、軽微な損傷から重度な損傷まで模擬した試験体を準備した。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、日本フィジカルアコースティクス社製）、超音波の入力にはパルス発生器（同社製）を用いた。計測システムの概要を図-3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検出し、発信波形と受信波形との初動の伝播時間差より伝播速度を、発信波形の最大振幅エネルギーに対する受信波形の最大振幅エネルギーの比より減衰比を求めた。

## 2.3 試験結果

図-4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により無次元化した。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、減衰比は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 トモグラフィ

図-3に示すような単一配列で弾性波を透過させて伝播時間やエネルギーを計測し、算出した弾性波伝播速度やエネルギー減衰比から健全性の情報を得ようとしても、その走査線間（始点から終点までの間）の平均的な情報しか得られず、相対評価から不健全だと判定できる情報

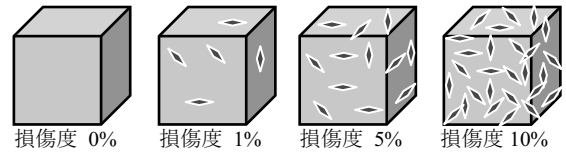


図-2 模擬損傷を有するモルタル試験体

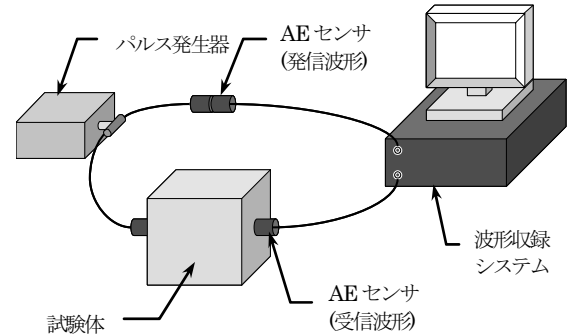


図-3 計測システム概要

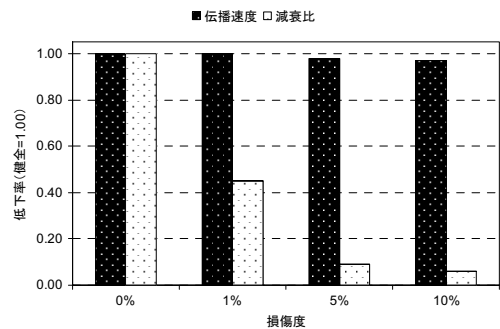
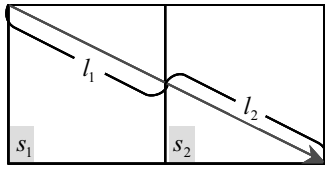


図-4 損傷度に対する弾性波特性値の低下率

であっても、実際にどの位置が不健全であるかを判別することはできない。しかし、センサを複数配列して多方向の情報取得し、これらを基にマトリクス演算を行うことで、構造物を任意のセルに分割した解析モデルにおいて、各セルの弾性波特性値を逆解析問題の一種として得ることができる。これらをコンター図等で表すことで、対象領域の劣化分布図が推定できる。このような手法のことをトモグラフィ (Tomography) という<sup>3)</sup>。医療などで利用されるCTスキャン (Computed Tomography) はエックス線を用いたこの手法の代表例である。

### 3.2 減衰比逆解析アルゴリズム

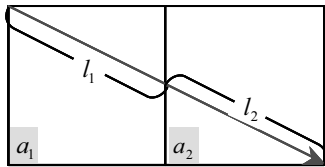
弾性波伝播速度によるトモグラフィでは、各セルに与えられたスローネス  $s$ （速度の逆数）と波線追跡モデルより得られる伝播経路長  $l$  の一次関数の和集合から、任意の節点間における理論上の伝播時間が得られる（図-



理論伝播時間＝

$$\sum s_i \cdot l_i$$

(a) 理論伝播時間の算出



理論減衰比＝

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

(b) 理論減衰比の算出

図－5 理論値の算出方法

5(a)．この理論値と計測で得られた伝播時間との残差を最小にするスローネスを逆解析で求め、各セルに再分布したものが、計測に基づく伝播速度の分布図となる<sup>4)</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  $a$  と伝播経路長  $l$  から成る指数関数の積集合とし (図－5(b))、計測された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、構造物の減衰比分布図を取得する。

## 4. 減衰トモグラフィの精度検証

### 4.1 検証試験概要

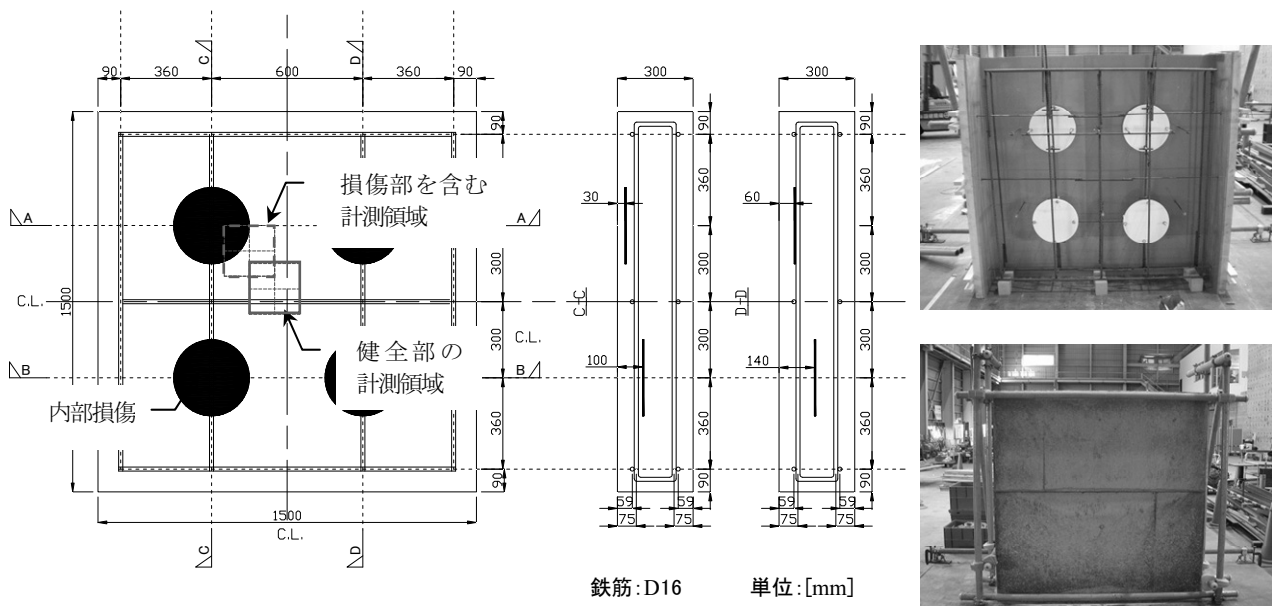
減衰トモグラフィの精度を検証するため、既知の位置に内部損傷を有する試験体を用いて計測を実施した。試験体概要を図－6に示す。試験体は、1,500×1,500×300 mmの床版を用いた。今回計測を行い、精度を検証した領域は200×200×300 mmである。計測領域とセンサ配置の概要を図－7に示す。片面9個ずつ計18個のAEセンサ (60 kHz 共振型、日本フィジカルアコースティクス社製) を設置した。各センサを発信点とし、対面の9個のセンサで受信する。したがってこの計測で得られる波線は162本となる。解析モデルは計8個の六面体セルに分割した。計測は健全部と一部に内部損傷を有する損傷部の2パターンで実施した。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。減衰比の算出方法は、境界条件による多重反射等の影響を極力少なくするため、取得した波形の初動に最も近い振幅エネルギー (以下、初動振幅と記す) の比を採用した。弾性波の入力方法、および参照用として同時に実施した伝播速度の計測、算出方法は、2章の試験方法と同様である。

### 4.2 検証結果

健全部で計測された減衰比  $A$  と伝播経路長  $l$  との関係性を数式(1a)に示す。

$$A = \exp(-5.2316 \cdot l) \quad (1a)$$

$$\exp(-5.2316) = 0.005345 \quad (1b)$$



図－6 内部損傷を有する床版試験体

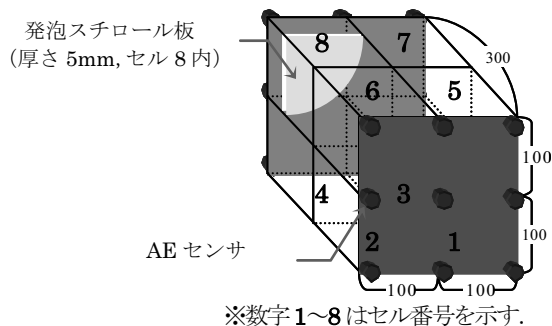


図-7 計測領域およびセンサ配置概要

表-2 各セルのパラメータ

セルNo.	伝播速度 [m/sec]	健全度 [%]	単位減衰比	健全度 [%]	
損傷なし	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
損傷あり	8	2,021	45	0.000001	0.02

<基準値> 伝播速度: 4,484 [m/sec]  
 単位減衰比: 0.005345

このとき、数式(1b)で示される値は、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考えることができる。この値を健全を示す基準値として、逆解析で算出された減衰パラメータから求めた各セルの単位距離当たりの減衰比（以下、単位減衰比と記す）との割合を健全度として表-2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と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、単位減衰比の場合、損傷のあるセル8の値は基準値の0.02%であり、伝播速度よりも顕著な差異をもって損傷箇所を示した。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、内部の損傷程度をより高感度に検出、評価できることがわかった。

損傷の無いセルでは、伝播速度に比べ単位減衰比のバラつきが大きかった。これは、反射などによる波形処理の誤差以外に、今回のような実大規模の試験体では、骨材や水セメント比などにも少なからずバラつきがあると考えられ、そうした性状の違いを鋭敏に反映したとも推測される。換言すれば、第2章で示したように減衰比は非常に感度の高い指標であるため、伝播速度では判別でき

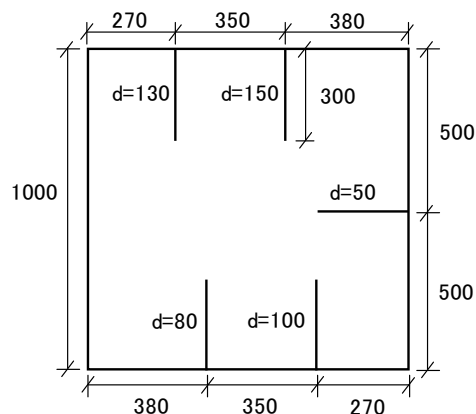
ない状態をも判別できる可能性がある。

## 5. 表面波減衰特性によるひび割れ深さの定量評価

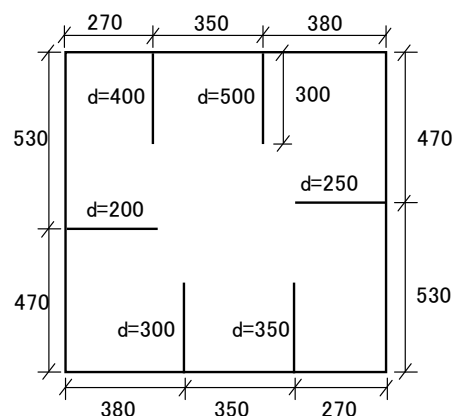
### 5.1 レイリー波による評価

構造物表面において励起した弾性波の中では、レイリー波が中心となる表面波成分がエネルギーの大半を占める。そのレイリー波がひび割れに到達すると、ひび割れにより遮断されるためエネルギーが減衰する。このエネルギーの変化率は、ひび割れが深く、かつレイリー波の波長が短くなるほど大きくなる。したがってひび割れの前後で弾性波の減衰、および波長を計測することで、ひび割れ深さが推定できると考えられ、積極的に研究がなされている<sup>5)</sup>。しかし、深いひび割れを評価する場合は、計測の信頼性が低下するため、実用化に向けて計測手順やデータ解析方法など課題が残されている。

このような課題に着目して、人工的にひび割れを導入した実大規模のコンクリート試験体を用いて、鋼球ハン



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図-8 人工ひび割れを有する試験体（平面図）

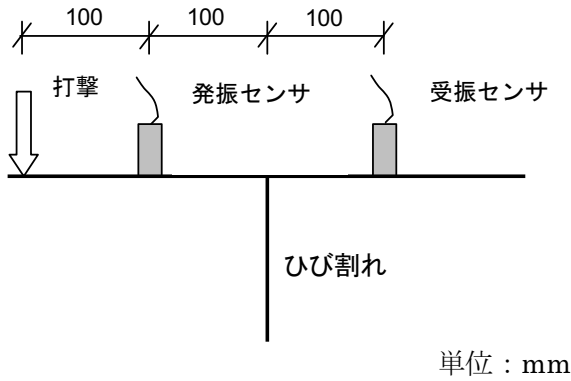


図-9 センサ配置および打撃位置

マによって励起した弾性波のレイリー波減衰特性とひび割れ深さとの関係を実験的に検証した<sup>9)</sup>。以下、実験概要および実験結果について報告する。

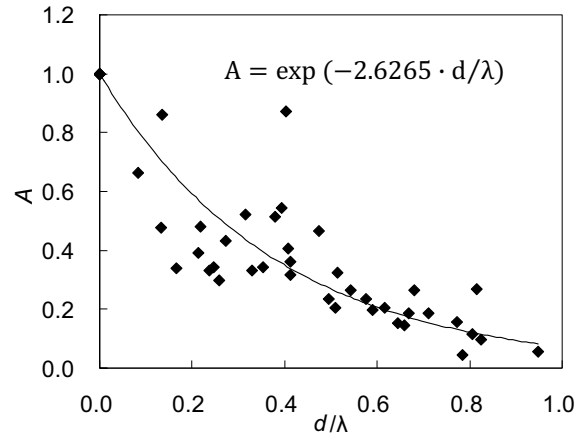
### 5.2 実験概要

実験に用いたコンクリート試験体の概要を図-8に示す。試験体の寸法は、1,000×1,000×1,000 mmであり、コンクリートを打設する前に、型枠内に厚さ0.4 mm、幅300 mmの鋼板を異なる深さで設置し、コンクリート硬化後、それらの鋼板を引き抜くことによって人工ひび割れを形成させた。ひび割れの深さは50 mmから500 mmまで11種類である。試験体Aの一边は比較のために健全部として確保した。

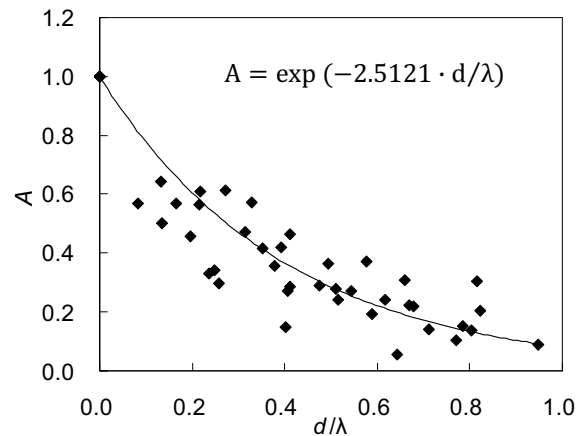
図-9にセンサ配置を示す。計測は加速度センサ（30 kHz共振型、富士セラミックス社製）を使用した。打撃点近傍のセンサを発振波形収録用のセンサ（以下、発振センサ）、ひび割れを挟んで反対側のセンサを受振波形収録用のセンサ（以下、受振センサ）とした。様々な励起周波数（波長）を有する弾性波を励起させるために、直径5、8、11、15、25、および35 mmの鋼球ハンマを使用した。

表-3 直径の異なる鋼球ハンマによる重心周波数と波長

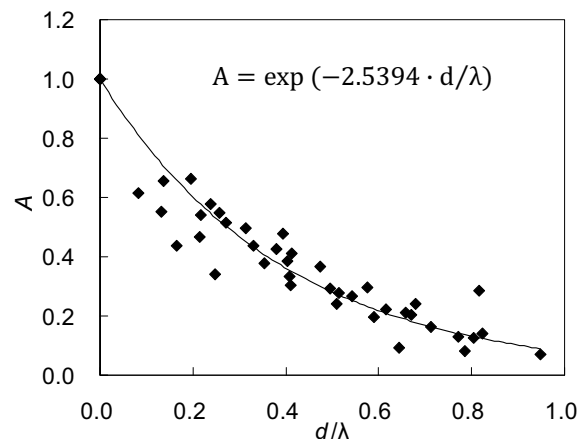
ハンマ直径 (mm)	重心周波数 $f_c$ (kHz)	主要波長 $\lambda$ (mm)
5	18.08	124
8	11.56	194
11	10.74	209
15	9.48	237
25	6.49	346
35	4.19	537



(a) 圧縮側振幅



(b) 引張側振幅



(c) 平均振幅

図-10 減衰比と波長当たりのひび割れ深さの関係

### 5.3 実験結果と考察

計測した波形より、本実験におけるレイリー波の伝播速度は2,247 m/secであった。弾性波の重心周波数は、高速フーリエ変換により求めた周波数スペクトルから算出した。伝播速度と重心周波数を用いて算出した本実験におけるレイリー波の波長を表-3に示す。

減衰特性を利用してひび割れ深さを評価するため、レイリー波の減衰比を求めた。レイリー波の減衰比は、受振波形の振幅エネルギーを発振波形の振幅エネルギーで除した値である。レイリー波の振幅エネルギーは、圧縮側、引張側、およびそれらの平均値の3ケースとした。

図-11に、減衰比  $A$  と波長当たりのひび割れ深さ  $d/\lambda$  との関係を示す。各ひび割れ深さよりも短い波長のデータは、全て遮断されるものとして除外した。これらの結果より、 $A$  と  $d/\lambda$  に高い相関性が認められた。相関に基づき得られたひび割れ深さ  $d$  を求める近似式を数式(2)に示す。

$$d = -a \cdot \lambda \cdot \ln A \quad (2)$$

ただし、 $a$  は実験で得られる定数である。

このように、レイリー波の波長と減衰特性を利用することで、ひび割れの深さを定量的に推定可能であることがわかった。この手法は一面配置のセンサで深さ方向の情報まで把握でき、かつ減衰特性を用いる手法であり、3.2項で示したアルゴリズムの適用が可能であることから、これまで困難であったセンサ配置が一面に制限されるコンクリート構造物を広域的に、かつ深さ方向まで把握することのできる技術へと発展できると考え、現在研究を進めている。

### 6. 結論

本研究で以下のことがわかった。

- ① 弾性波のエネルギー減衰比に着目することで、コンクリート構造物内部の損傷程度や位置をより高感度に検出、評価できる。
- ② 表面波成分であるレイリー波の減衰特性を利用することで、ひび割れ深さを定量的に評価できる。課題は以下の通りである。

- ① 減衰特性を用いた損傷評価には理論解がない。
- ② 減衰特性は、計測条件や幾何学性状に影響されやすい。

今後は基礎試験や実構造物での試験施工によってデータを蓄積し、実構造物への適用を目指したい。

#### 【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) 日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験 I, pp. 8-9, 2006.
- 3) 雑誌サイト日経ものづくり：  
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/WORD/20060818/120215/>.
- 4) 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.
- 5) 呉 佳暉, 堤 知明：コンクリートひび割れ深さの NDT 検証方法, 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, pp. 231-238, 2008.
- 6) H. K. Chai, S. Momoki & K. Tazaki : Assessing Surface-Opening Concrete Cracks by Stress Wave Tomographic Imaging for Approximate Investigation and Rayleigh Wave for Sizing , Proceedings of 1st Asia Pacific Young Researchers and Graduates Symposium, pp. 1-8, 2009.

**Summary** Various inspection methods are used to understand the damages to a concrete structure to understand the damages and decide the time and method of repairing. Data needs to be accumulated for a number of cases in order to standardize the inspection methods and generalize standards for making decisions. Inspection technologies using elastic waves have been effective for inspecting structures and are attracting attention as a method that can quantitatively assess the effects of repairing, which have been difficult. In this study, which aimed to evaluate the scales and distribution of damages in concrete structures using the elastic wave method, the elastic wave property values of specimens that had various degrees of damage were measured, and the sensitivity of the values to the damages was investigated. From the results, attenuation property of elastic wave energy, which responded to damages at high sensitivity, was noticed, and an attenuation tomography system, which visualizes internal damages by showing the inside of the structure in distribution map of attenuation ratio, was developed. A basic study on quantitative assessment of damage using the attenuation properties of surface waves, which is likely feasible to the attenuation tomography, is also described.

**Key Words** : Elastic wave method, Attenuation, Tomography, Existing concrete structure, Sub-surface damage