

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289132

研究課題名(和文) 弾性波動解析を援用したカスタマイズド衝撃弾性波非破壊評価システムの提案

研究課題名(英文) A proposal of a customized analysis-aided impact elastic wave evaluation system for nondestructive test using impact response elastic wave analysis

研究代表者

鎌田 敏郎 (Kamada, Toshiro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10224651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリート構造物の調査に幅広い適用性を有する衝撃弾性波法において、計測対象である実構造物の条件に応じて計測・評価方法をカスタマイズする「カスタマイズド衝撃弾性波非破壊評価システム」を構築した。具体的には、トンネル覆工コンクリート、道路橋RC床版、橋梁PC桁を対象に実構造物のコンクリート部材をモデル化した上で、衝撃応答解析により弾性波の入力方法、弾性波の受信方法、波形分析方法の最適な組み合わせ方法を決定した。その後、供試体での計測結果と解析モデルでの結果の照合からシステムの改良を行い、実構造物における検証により「カスタマイズド衝撃弾性波非破壊評価システム」の有効性を評価した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a “customized analysis-aided impact elastic wave evaluation system” was developed in which measurement and evaluation processes were customized in accordance with the conditions of target concrete structures. These target structures were tunnel concrete lining, RC slab of highway bridges, and prestressed concrete girder of bridges. Appropriate combination of elastic wave excitation, wave detection, and wave analyzing process were determined by modeling and simulating the target concrete structures using impact response elastic wave analysis. Thus, the measurement results of specimens and the simulation results of analysis model were evaluated for organizing the system. Finally, the proposed “customized analysis-aided impact elastic wave evaluation system” were verified effective by applying to existing target structures in service.

研究分野：土木工学 コンクリート工学 維持管理工学 非破壊検査

キーワード：衝撃弾性波 弾性波動解析 カスタマイズド評価システム 弾性波入力 弾性波受信 波形分析 アンカーボルト 鋼板接着補強RC床版

## 1. 研究開始当初の背景

衝撃弾性波法は、対象物表面にハンマーや鋼球等を機械的に衝突させたときに生じる弾性波を用いる非破壊試験法である。この方法の適用例としては、これまで以下のようなものがあった。

部材底面や内部ひび割れ(欠陥)からの反射波の繰り返しに起因する共振周波数に基づく部材寸法や内部ひび割れ(欠陥)までの深さの推定

弾性波速度と周波数特性による PC 部材でのグラウト充填状況や未充填箇所の評価  
反射波の到達時間等によるコンクリート杭の杭長や損傷箇所の評価

以上に示すように、衝撃弾性波法の適用範囲は極めて広く、また、用いられる弾性波の周波数範囲が超音波法の場合と比べて低いことから、コンクリート中での波の減衰が小さく、特に構造物レベルでの調査において活用が期待されている。

このような背景の下、この試験法に関しては、国内外において、以下の規格・規程が制定され、運用されるに至っている。

・NDIS(日本非破壊検査協会) 2426-2: コンクリート構造物の弾性波による試験方法 第2部: 衝撃弾性波法, 2009.

・ASTM(American Society for Testing and Materials)-C1383-04: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, 2004.

しかしながら、非破壊評価の現場においては、測定対象物の条件(形状・材質等)や使用する測定器具等により、評価結果に種々の要因に起因する影響が含まれ、非破壊評価結果と、削孔等により調査した実態とは必ずしも一致しないケースが少なくなかった。また、同一の評価対象であっても、測定者/測定器具等によって評価結果が異なるなど、一部信頼性に乏しい面も払拭できないという実情があった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、計測対象である実構造物の条件に応じてカスタマイズする「カスタマイズド衝撃弾性波非破壊評価システム」を構築することである。具体的には、計測対象である実構造物のコンクリート部材をモデル化した上で、衝撃応答解析により「弾性波の入力方法(打撃方法、鋼球直径、打撃位置)」、「弾性波の受信方法(センサの種類、設置位置、設置数)」、「波形分析方法(波形処理、周波数分析方法)」の最適な組み合わせ方法を決定するものである。

本システムの評価対象としては、

- ：トンネル覆工コンクリート、フーチング等の部材厚さ
- ：道路橋 RC 床版内部に生じる水平ひび割れ
- ：橋梁 PC 桁の PC グラウト充填状況

とし、実構造物での有効性の検証まで含めた検討を行うこととした。ただし、社会的優先度に対応して、具体的な評価対象は、当初の計画から一部変更することとした。

## 3. 研究の方法

(1) 評価対象 ~ ごとの検討範囲(部材諸元・欠陥情報)の整理(文献調査/ヒアリング)

まず、評価対象 ~ ごとに、本研究で検討すべき範囲(部材諸元・欠陥情報)を文献調査、あるいは、研究連携先へのヒアリング等により明確化する。

(2) 評価対象 ~ に対応した基本実験供試体の製作および計測による弾性波挙動の把握

評価対象 ~ ごとに基本実験供試体を製作する。供試体は、従来の標準的な仕様の衝撃弾性波法では評価が難しいと予想されるものを対象とする。また、弾性波入力の実現性を改善するため、衝撃を安定的に加えることが可能な打撃装置の試作を行い、この打撃装置を用いてコンクリート内部での弾性波挙動を、実験を通して明確にする。

(3) 評価対象 ~ に対応した基本解析モデルでの弾性波挙動の把握および適用範囲の明確化

評価対象 ~ に対応した基本実験供試体(2)参照)を対象として、衝撃応答解析のモデル(基本解析モデル)を作成し、供試体での計測結果と基本解析モデルでの計算結果との対応から、要素設定/寸法、弾性波境界条件等の詳細な検討を行う。その後、(1)で整理した評価対象 ~ の検討範囲(部材諸元・欠陥情報)に対して解析モデルを作成し、衝撃応答解析により弾性波挙動の把握を行う。最後に、(1)で設定した検討範囲のうち、従来の標準的な仕様の衝撃弾性波法で評価が可能なものと、評価が困難なものに分類する(適用範囲の明確化)。

(4) 基本解析モデルを用いた弾性波入力・受信・波形分析方法の改善

衝撃応答解析により、従来の標準的な仕様の衝撃弾性波法で評価が困難なものに分類されたものについては、弾性波の入力方法(打撃方法、鋼球直径、打撃位置)、弾性波の受信方法(センサの設置位置および数)、波形分析方法(波形処理、周波数分析方法)の改良を行う。その上で、(1)で設定した検討範囲との対応関係について明らかにする。

(5) 「カスタマイズド評価システム」の構築

(4)において改善した「弾性波入力・受信・波形分析方法」を用いて、(2)で製作した基本実験供試体を対象に計測を行い、「カスタマイズド評価システム」の有効性を供試体レベルで検証する。以上の検討を踏まえて、

評価対象の種々の条件に対して最適な弾性波の入力・受信・波形分析方法を確定することのできる「カスタマイズド評価システム」を構築する(図1参照)。

**(6) 実構造物における「カスタマイズド評価システム」の有効性の検証**

最後に「カスタマイズド評価システム」の実構造物への有効性の検証を行う。本システムにより実構造物での計測を実施後、本システムでの評価結果の精度や、確からしさを把握する。最後に、本システムでの評価結果と、実構造物の実態とを比較することにより、本システムの実構造物に対する有効性の検証を行う。

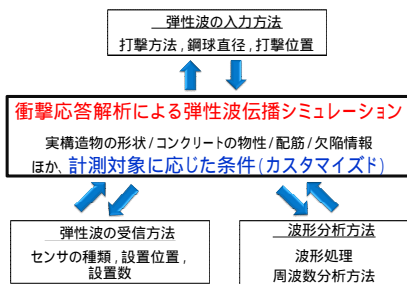


図1 カスタマイズド衝撃弾性波非破壊評価システムの構成

**4. 研究成果**

**(1) 評価対象 ~ ごとの検討範囲(部材諸元・欠陥情報)の整理(文献調査/ヒアリング)**

評価対象 ~ ごとに、本研究で検討すべき範囲(部材諸元・欠陥情報)を明確にした。表1に対象とした具体的な評価項目を示す。

表1 本研究における評価対象

| 評価対象 | 実構造物      | 評価項目                                  |
|------|-----------|---------------------------------------|
|      | トンネル覆工    | 接着系あと施工アンカーボルト固着状況(接着剤充填状況)の評価        |
|      | 道路橋 RC 床版 | 鋼板接着補強した RC 床版の内部損傷(水平ひび割れ、曲げひび割れ)の評価 |
|      | 橋梁 PC 桁   | 橋梁 PC 桁の PC グラウト充填状況の評価               |

**(2) 評価対象 ~ に対応した基本実験供試体の製作および計測による弾性波挙動の把握**

評価対象 ~ ごとに基本実験供試体を製作した。基本実験供試体の一例として、図2に評価対象 ~ に対応して製作した基本実験供試体を示す。鋼板接着補強した RC 床版の内部損傷として曲げひび割れを模擬した欠陥を埋設している。

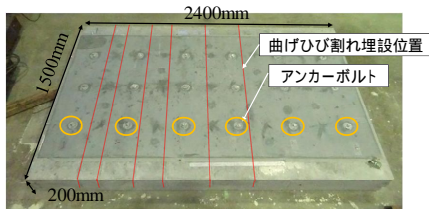


図2 基本実験供試体の例(評価対象 ~ )

**(3) 評価対象 ~ に対応した基本解析モデルでの弾性波挙動の把握および適用範囲の明確化**

上記(2)の基本実験供試体の解析モデルを作成し、汎用的な衝撃応答解析により、供試体での計測結果と基本解析モデルでの計算結果との対応関係を把握した。また、ヘルツの接触理論に基づく弾性波入力方法、要素決定、弾性波境界条件等の検討を行った。次に整理した評価対象 ~ の検討範囲に対して欠陥を模擬した解析モデルを作成し、欠陥により変化する弾性波挙動を把握した。図3に弾性波挙動の解析例(評価対象 ~ )を示す。

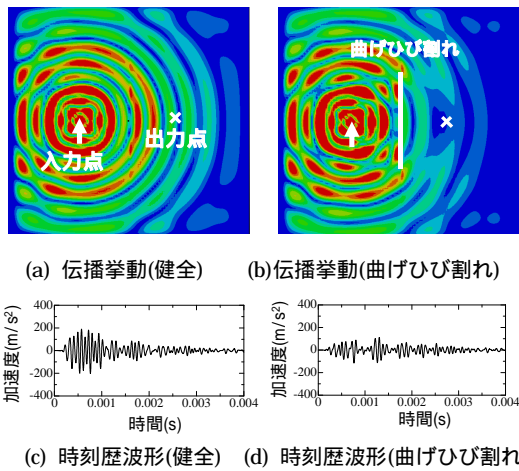


図3 基本解析モデルによる弾性波挙動(評価対象 ~ )

**(4) 基本解析モデルを用いた弾性波入力・受信・波形分析方法の改善**

「弾性波動解析」により、従来の標準的な仕様の衝撃弾性波法では評価が困難と分類された対象について、弾性波の入力方法(打撃方法、鋼球直径、打撃位置)、弾性波の受信方法(センサの設置位置、および数)、波形分析方法(波形処理、周波数分析方法)の改良を行った。図4に評価対象 ~ において行った入力方法の改善例を示す。本事例においては、アンカーボルトをインパルスハンマーで打撃することにより弾性波を入力し、隣接するアンカーボルトにおいて加速度センサで応答を受信した。また、評価指標として式(1)に示す波形エネルギー積算率  $E_{int}$  を新しく導入し、受信波形の分析を行った。

$$E_{int}(T) = \frac{\sum_{t=1}^T \{y''(t)\}^2}{\sum_{t=1}^{4000} \{y''(t)\}^2} \quad (1)$$

ここで、 $y''(t)$ は時刻  $t$  における加速度時刻歴波形の振幅値である。図5に波形エネルギー積算率  $E_{int}$  による評価例を示す。図中 A 点、B 点より得られる波形エネルギー積算率、鋼板が剥離した床版においても、ひび割れが検出できることが明らかになった。

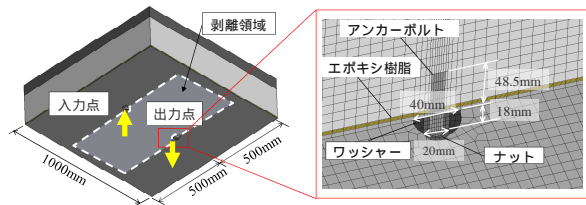


図4 アンカーボルトから弾性波の入出力を行う入出力方法の改善例（評価対象）

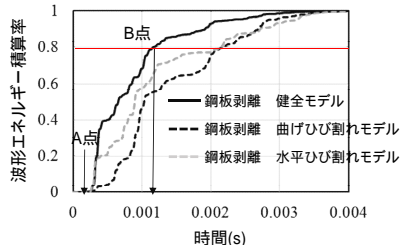


図5 波形エネルギー積算率によるひび割れモデルの評価例（評価対象）

(5) 「カスタマイズド評価システム」の構築

(4)において改善した「弾性波入力・受信・波形分析方法」を用いて、製作した基本実験供試体を対象に計測を行った。ここで、供試体のコンクリートの内部欠陥に関する情報を把握するため、サーモグラフィ装置などを用いた測定も併せて行った。図6は、評価対象において実施した基本実験供試体における計測例を示している。また、図7に評価結果を示している。その結果、「カスタマイズド評価システム」の有効性を供試体レベルで検証することができた。

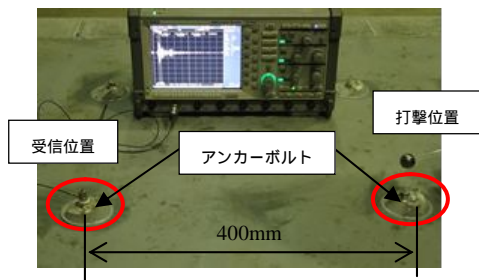


図6 基本実験供試体における計測例（評価対象）

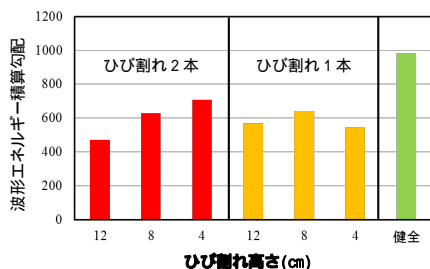


図7 ひび割れ状況と波形エネルギー積算勾配の関係（評価対象）

(6) 実構造物における「カスタマイズド評価システム」の有効性の検証

評価対象 ~ に対して、実構造物において「カスタマイズド評価システム」の有効性の検証を行った。図8に、評価対象において対象とした実構造物の検証事例を示す。本事例は、供用後40年以上経過した鋼板接着補強RC床版であり、鋼板のはく離状態、床版内に生じる曲げひび割れ、水平ひび割れの評価を行った。本システムでの評価結果の精度や確からしさを把握するために、複数の検査手法による評価結果と照合し、実構造物に対する有効性の検証を行った。さらに、本システムの評価精度を向上するため、得られた評価結果と同様の条件で弾性波解析を行い、「カスタマイズド評価システム」のパラメータの調整を行い、評価精度の向上を行った。図9に、評価対象に対して「カスタマイズド評価システム」を適用して得られた損傷評価のためのフローを示す。

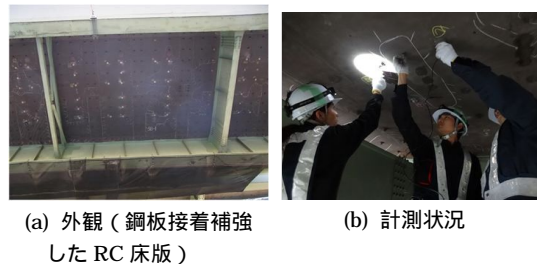


図8 実構造物における評価（評価対象）

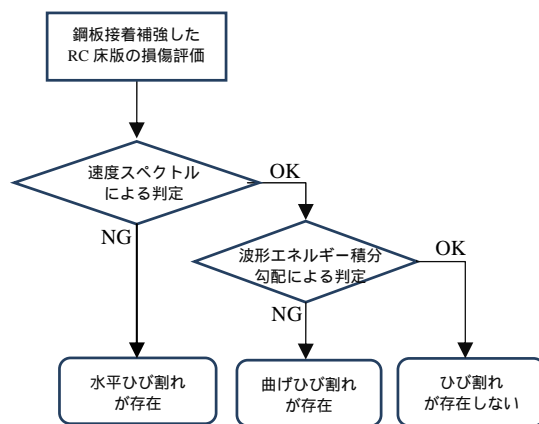


図9 鋼板接着補強したRC床版の損傷評価のためのフロー（評価対象）

同様に、他の評価対象に対しても衝撃応答解析と基本実験供試体、および実構造物での評価を行い、実構造物の条件に応じてカスタマイズする「カスタマイズド衝撃弾性波非破壊評価システム」が、評価対象 ~ のいずれにおいても適用可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 9件)

前田洋祐, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 李 興

洙, 西上康平: PC グラウト充填評価のためのインパクトエコー法の適用範囲に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 査読有, 第 13 巻, 2013, pp.229-236.

李 興洙, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 前田洋祐: 電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法に関する動磁場・弾性波動解析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 査読有, 第 13 巻, 2013, pp.215-220.

木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎: 電磁パルス法による接着系あと施工アンカー固着部の非破壊評価手法に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 36 巻, 2014, pp. 2166-2121.

Lee, S., Kamada, T., Uchida, S., Linzell, D.: Imaging Defects in Concrete Structures using accumulated SIBIE, Construction and Building Materials, 査読有, Vol.67, Part B, 2014, pp.180-185.

DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.018

Lee, S., Endo, T., Kamada, T., Kim, S.: Application of Impact-Echo Method to Heterogeneous Materials, International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, 査読有, Vol.20, No.2, 2014, pp.170-174.

DOI:10.5188/ijsmr.20.170.

石田卓也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 寺澤広基, 澤田友治: 鋼板接着補強した RC 床版の弾性波による損傷評価に関する解析的検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 査読有, 第 15 巻, 2015, pp.359-364.

石田卓也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 澤田友治: 弾性波法に基づく鋼板接着補強した RC 床版内部の損傷評価手法に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 37 巻, 2015, pp.1855-1860.

林本和也, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宮田弘和: アンカーボルト打撃時の応答特性に着目した接着剤充填状況の非破壊評価手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 37 巻, 2015, pp.1861-1866.

李 相勲, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 遠藤孝夫: 低周波数域の表示によるコンクリート構造物の欠陥測定, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 査読有, 第 5 巻, 2015, pp.153-158.

[学会発表](計 19 件)

Miyata, H., Tanaka, K., Uchida, S., Kamada, T., Nishigami, K., Liu, X: Non-destructive testing to evaluate soundness of adhesive portion around anchor bolts in concrete by elastic-wave simulation analysis-based electromagnetic pulse, 4<sup>th</sup> International

Symposium on Life-Cycle Engineering (国際学会), 2014.11.16 ~ 2014.11.19, Riega Royal Hotel and Waseda University, Tokyo, Japan.

Hattori, S., Kamada, T., & Uchida, S.: Impact Elastic-Wave Methods for Detection of Grouting Condition in Post-Tensioning Tendon Ducts of PC Members using Adaptive Noise Canceller, 15<sup>th</sup> Int. Conf. European Bridge Conference on Structural Fault and Repair (国際学会), 2014.7.8 ~ 2014.7.10, London, Imperial College, University of London.

Uchida, S., Kamada, T., Iwano, S., Lee, H., Kawasaki, Y., Tateyama, K., Okamoto, T.: Frequency Analysis Methods for Concrete Thickness Estimation by Impact-Echo Method, 5<sup>th</sup> US-Japan NDT Symposium (国際学会), 2014.6.16 ~ 2014.6.20, Makena Beach & Golf Resort, Hawaii, USA.

木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎, 三輪秀雄, 高鍋雅則: 電磁パルス法に基づく接着系あと施工アンカー固着部の非破壊評価手法に関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10 ~ 2014.9.12, 大阪大学, 大阪府, 吹田市.

服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 中川拓郎: 音響伝達関数を用いた衝撃弾性波法による PC グラウト充填状況の非破壊評価手法の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10 ~ 2014.9.12, 大阪大学, 大阪府, 吹田市.

木村貴圭, 内田慎哉, 宮田弘和, 鎌田敏郎, 三輪秀雄, 高鍋雅則: 電磁パルス法に基づく接着系あと施工アンカー固着部の健全度評価に関する実験的検討, 土木学会関西支部年次学術講演会, 2014.5.31, 大阪産業大学, 大阪府, 大東市.

鎌田敏郎, 内田慎哉, 宮田弘和: 接着系あと施工アンカーの健全度評価に関する解析的検討, 中部セメントコンクリート研究発表会, 2013.11.22, ウィンクあいち, 愛知県, 名古屋市.

宮田弘和, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 西上康平, 劉 軒, 田中克則: 電磁パルス法に基づくアンカーボルト固着部の健全度評価手法の開発, 第 30 回日本道路会議, 2013.10.31, 都市センターホテル, 東京都, 千代田区.

大村章太, 李 相勲, 内田慎哉, 遠藤孝夫: 衝撃応答解析によるコンクリート構造物の損傷と P 波速度の関係に対する検討, 日本非破壊検査協会秋季講演大会, 2014.10.28 ~ 2014.10.29, 名古屋国際会議場, 愛知県, 名古屋市.

相澤元基, 李 相勲, 鎌田敏郎: コンクリートの欠陥を可視化のための Accumulated SIBIE 法の拡張, 日本非破壊

検査協会秋季講演大会，2014.10.28～2014.10.29，名古屋国際会議場，愛知県，名古屋市。

石田卓也，鎌田敏郎，内田慎哉，寺澤広基，澤田友治：鋼板接着補強した RC 床版の衝撃弾性波法による内部損傷評価手法に関する解析的検討，土木学会関西支部年次学術講演会，2015.5.30，摂南大学，大阪府，寝屋川市。

石田卓也，鎌田敏郎，内田慎哉，寺澤広基，澤田友治：衝撃弾性波法による鋼板接着補強された RC 床版内部のひび割れ損傷の非破壊評価手法，土木学会第 70 回年次学術講演会，2015.9.16～2015.9.18，岡山大学，岡山県，岡山市。

Ishida, T., Kamada, T., Uchida, S., Terasawa, K., Hattori, S.: Analytical Investigation of Nondestructive Evaluation Method for Internal Defects in Reinforced Concrete slabs with Steel Plate Bonding Based on Impact Elastic-Wave Method, 5th International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (国際学会)，2015.8.19～2015.8.21，Hilton Resort & Spa at Whistler, BC, Canada。

林本和也，内田慎哉，鎌田敏郎，宮田弘和，寺澤広基：衝撃応答によるアンカーボルト固着部の接着剤充填状況の非破壊評価手法，土木学会関西支部年次学術講演会，2015.5.30，摂南大学，大阪府，寝屋川市。

林本和也，内田慎哉，鎌田敏郎，宮田弘和，寺澤広基：接着系あと施工アンカーを対象とした衝撃応答に基づく接着剤充填状況の非破壊評価手法，土木学会第 70 回年次学術講演会，2015.9.16～2015.9.18，岡山大学，岡山県，岡山市。内田慎哉，鎌田敏郎，宮田弘和，岡本享久，前川晴香，林本和也：非接触衝撃弾性波法による接着系あと施工アンカー固着部の接着剤充填状況の非破壊評価手法，日本コンクリート工学会，コンクリート構造物の最先端診断技術に関するシンポジウム，2015.7.30，東京理科大学，東京都，新宿区。

内田慎哉，小澤満津雄，大野健太郎，岩野聡史，麓 隆行，迫井裕樹：機械インピーダンスによる火害を受けたコンクリートの劣化範囲の非破壊評価手法に関する基礎的研究，土木学会第 71 回年次学術講演会，2016.9.7～2016.9.9，東北大学，宮城県，仙台市。

Lee, S., Kamada, T., Uchida, S., Linzell, D.: Accumulated Sieve Method for Imaging Defects in Concrete Structures, 5<sup>th</sup> International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications (国際学会)，2015.8.19～2015.8.21，Hilton Resort & Spa

at Whistler, BC, Canada。

Lee, S., Kawana, R., Endo, T., Ishida, H.: Effect of Wave Propagation to Seismic Response on Semi-Infinite Boundary of Discrete System, 2016 韓国防災学会学術発表大会，2016.2.18～2016.2.19，ソウル，韓国。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鎌田 敏郎 (KAMADA TOSHIRO)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10224651

### (2) 研究分担者

李 相勲 (Lee Heung-Soo)  
東北学院大学・工学部・教授  
研究者番号：20377807

### (3) 研究分担者

内田 慎哉 (UCHIDA SHINYA)  
立命館大学・理工学部・講師  
研究者番号：70543461

### (4) 研究分担者

寺澤 広基 (TERASAWA KOKI)  
大阪大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：50750246