

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420462

研究課題名(和文) 新しい可視化手法に基づいたコンクリート欠陥探査システムの構築

研究課題名(英文) measurement system detecting the defects in concrete structure using a new imaging method

研究代表者

李 相勲 (Lee, Sanghun)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：20377807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：可視化の領域を低周波まで拡張することで表面から浅い位置の欠陥や、欠陥の大きさが小さい場合や形が円形を含めて不規則な場合などを画像化できた。また、反復的な一連の過程を自動化し欠陥の位置を3次元的に表示する探査システムの構築として、実際に共用していた道路橋から切り出した床版の一部を対象に測定実験を行い対象物の劣化状態に対して断面的な分布のみならず平面的な分布も得ることができた。

イパクターの適切な使用による可視化パフォーマンスの向上についても、予備実験に当たる研究を通してイパクターと測定寸法との関係は突き止めており、測定に適切なインパクターを使用し最も精度の高い結果が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：By expanding the domain of the visualization to a low frequency, the irregular defect cases, include the cases that the size of defects are small and the position of defects are shallow from the surface and the form of defects are round, were able to image.

As a construction of the measurement system which automate the repeating series of processes and display the position of the defect for three dimensions, not only the sectional defect images but the horizontal defect images are able to get for the test piece cut from a floor slab of a used bridge.

About the improvement of visualization performance gain by appropriate use of impactor, the relationship of impactor with measurement dimensions have been investigated by the preliminary experiments and it was confirmed that the high precision was provided with an appropriate impactor in the measurement.

研究分野：非破壊検査工学

キーワード：衝撃弾性波法 欠陥の可視化 低周波数領域 3次元探査システム

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの強度推定、厚さ推定、内部欠陥探査、PC グラウト充填状況評価、ひび割れ深さの推定、地中埋設管の劣化調査などへ幅広く適用されている衝撃弾性波法は対象物の表面状態や断面の形状・寸法、インパクトの材質・寸法など測定条件により影響されやすく、対象寸法（たとえば版厚）に応じて検出されるはずの周波数成分が、必ずしも第一ピークで出現しない場合がしばしばある。また測定時や測定後のデータ処理やその分析など、一連の作業から正しい結果を得るには測定や分析に関わる技術者の技量や経験が必要となる。これに対して測定の結果を可視化することで探査精度や使用性の改善を図る研究がなされてきた。しかしながら、これらの方法は測定の結果を可視化することで簡潔明瞭に判断できるようにするという点では一定の成果を上げているが、「着目すべき周波数成分が第1ピークとして出現しない」という Impact Echo 法本来の問題点が依然として残されており、特に内部欠陥についてはその位置が2次元的に（断面方向、スラブ部材では3次元的に）捉えられるという保障はない。また、一部の研究では平面的位置を等高線表記で表しているが空洞を3次的に表すのは困難である。一方、コンクリート壁の側面を叩き中の空洞を探査したのを SIBIE 法で可視化したイメージでは壁の中の空洞の位置（断面方向の深さ）をコンターで捉えているが、入出力点からの距離が同じであれば同様なコンターを示しており（すなわち放射線状）根本的には1次元的な表現であることが分かる。

2. 研究の目的

本研究では、衝撃弾性波法によるコンクリート内部の空洞やひび割れ、部材厚さの測定に対し、新しい可視化手法（Accumulated SIBIE 法、以下 A-SIBIE 法とする）を用いて確実にかつリアルタイムで2次元または3次元測定画像を表示するコンクリート欠陥探査システムを提案する。具体的には、①さまざまな供試体に対する実験及び衝撃応答解析シミュレーションにより空洞やひび割れなどの測定に対する新しい可視化手法の適用性とその拡張性について検討する。②これらの探査にはインパクトが大きく影響することが分かっており、申請者らはマルチインパクト使用（たとえば異なるインパクトによる結果の重畳）による可視化パフォーマンスの向上を図る。③反復的な一連の過程を自動化し欠陥の位置を2次元または3次的に表示する探査システムの構築である。

3. 研究の方法

(1) 実験及び衝撃応答解析シミュレーションによる新しい可視化手法の適用性の拡張

実験及び衝撃応答解析シミュレーションによる可視化の際にその可視化領域を低周

波まで拡張し表示することで可視化性能の向上を試みた。そのため欠陥を模擬した様々な供試体（図1）に対して拡張した可視化手法を適用し測定を行った。

衝撃応答解析シミュレーションについても損傷を有するモデルに A-SIBIE 法を適用し可視化領域を部材厚さに限らず、低周波数領域まで拡張することで欠陥や損傷を検出するための情報量を増やし、可視化手法の精度を高めることを試みた。また、損傷パターンの分析には新たな検討手段として固有値解析を用いた。これらの解析には汎用ソフト midas FEM を使用した。

(2) インパクトの適切な使用による可視化パフォーマンスの向上

インパクトにおける可視化の精度に対する影響を確認するため、予備実験として各試験体に対して測定時のインパクトの直径を変化しながら最適な大きさのインパクトを選定した。その後の本実験では選定されたインパクトのみを用いて測定を行うことにした。また、測定対象が実験室で製作したものでなく実構造物の場合は測定表面の状態が測定に適していない場合（例えば図2の針金露出部）が少なくない。このような場合に対しても可視化パフォーマンスを向上するために測定表面を加工し一定の測定結果が保たれるように工夫した。

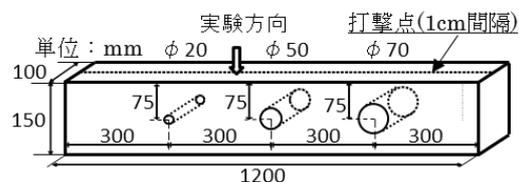
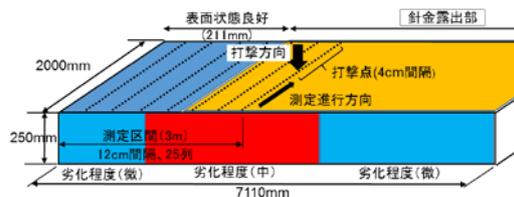


図1 欠陥を模擬した供試体の一例



(a) 外観



(b) 外形および目視による劣化状態

図2 コンクリート床版供試体

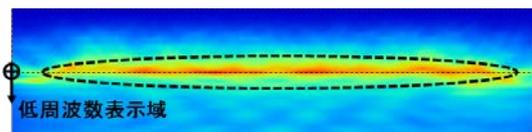
(3) 反復的な一連の過程を自動化し欠陥の位置を2次元または3次的に表示する探査システムの構築

A-SIBIE法に可視化領域を低周波数領域まで拡張した新しい可視化手法の適応性を調べるため、実際に共用していた道路橋から切り出した床版の一部(NEXCO 東日本より提供)を対象に測定実験を行った。測定対象のコンクリート床版を図2(a)に示す。同コンクリート床版に対する劣化状態を供試体提供側が評価したものを図2(b)に示す。測定対象のコンクリート床版について、可視化範囲を低周波数領域まで拡大したA-SIBIE法を用いて損傷度の可視化を行った。可視化の範囲は2m×3mの面積で打撃点の間隔は幅方向4cm、長さ方向12cmである。

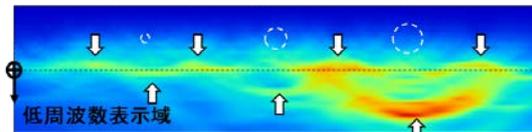
4. 研究成果

(1) 実験及び衝撃応答解析シミュレーションによる新しい可視化手法の適用性の拡張

可視化の領域を低周波まで拡張することで表面から浅い位置の欠陥や、欠陥の大きさが小さい場合や形が円形を含めて不規則な場合でも欠陥を検出することができた。これは、コンクリートが損傷または劣化するとその強度が減少し結果的に弾性係数が低下することに着目し、厚さ振動数より低い周波数域のデータを表示領域まで拡張することで画期的に可視化能力を向上させたことである。その一例を図3に示す。試験体底面を表す部分が明るく強調されており(下向きの矢印で指している部分)、欠陥部がある位置では低周波数域まで拡張して表示した領域(低周波数表示域)に下方向にずれて強調されている部分(上向きの矢印で指している部分)が確認できる。



(a) 供試体1(内部欠陥なし)



(b) 供試体2(内部欠陥の大きさが異なる場合)

図3 可視化における低周波数領域表示

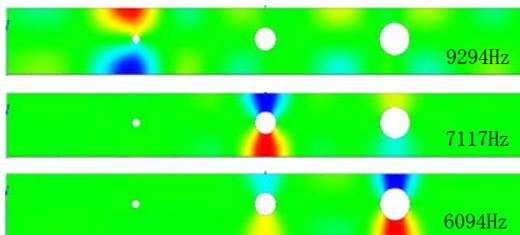


図4 各損傷モデルに対する振動モード

また、固有値解析(図4)による振動モードや固有振動数と衝撃応答解析シミュレーションとの比較により損傷パターン分析に掛かる時間が画期的に短縮できることを確認した。

(2) インパクトの適切な使用および測定表面処理による可視化パフォーマンスの向上

予備実験に当たる研究を通してインパクトと測定寸法との関係は突き止めており、欠陥の可視化のための測定に適切なインパクトを使用し最も精度の高い結果が得られることを確認した。

また、図2のように針金が露出し表面の状態が測定に適していない場合についてモルタルで表面を覆い表面状態を良好にすることで測定が可能になり損傷度評価にほとんど支障は生じないことを確認した(図5)。

(3) 反復的な一連の過程を自動化し欠陥の位置を2次元または3次的に表示する探査システムの構築

反復的な一連の過程を自動化し欠陥の位置を3次的に表示する探査システムを構築と関連して、実際に共用していた道路橋から切り出した床版の一部を対象に測定実験を行い対象物の劣化状態に対して断面的な分布のみならず平面的な分布も得ることができた(図6)。その際に一連の過程を自動化し可視化にかかる時間を短縮した。

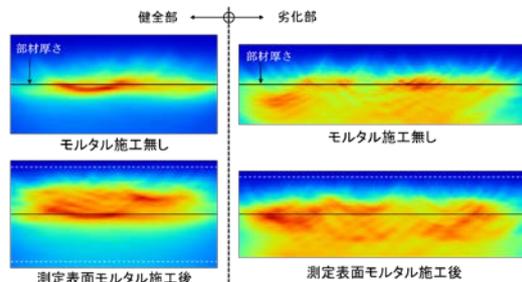


図5 表面処理前後の可視化

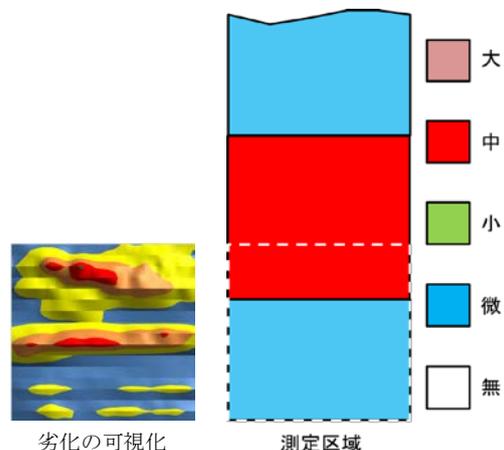


図6 劣化の平面表示一例

## 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 8 件)

- ① 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, Vol.37, No.1, 2015, pp. 1855-1860.
- ② 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材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, Vol.37, No.1, 2015, pp. 1861-1866.
- ③ 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, Vol. 5, 日本非破壊検査協会, 2015, pp. 153-158.
- ④ 西上康平, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 石田卓也: 衝撃応答解析に基づくコンクリート部材の水平ひび割れ評価のための可視化手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.1, 2014, pp. 2122-2127.
- ⑤ Lee, S., Endo, T., Kamada, T., Uchida, S. & Kim, S. : Application of Impact-Echo Method to Heterogeneous Materials, Int.J.Soc.Mater.Eng.Resour., 査読有, Vol.20, No.2, 2014, pp. 170-174.
- ⑥ Lee, S., Kamada, T., Uchida, S. & Linzel, D. : Imaging defects in concrete structures using accumulated SIBIE, Construction and Building Materials, Elsevier, 査読有, Vol. 67, Part B, 2014, pp. 180-185.
- ⑦ 西上康平, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 李 相勲: 衝撃応答解析に基づくコンクリート部材の版厚評価のための可視化手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, No.1, 2013, pp.1903-1908.
- ⑧ 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.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 神田俊平, 森下裕太, 李 相勲: 構造物における固有値解析と時刻歴応答解析の検討, 平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2016.3.5~2016.3.5, 岩手大学, 岩手県, 盛岡市.
- ② 佐野友亮, 佐藤 響, 李 相勲: 低周波数域の表示によるコンクリート床版に対する損傷度の可視化, 平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2016.3.5~2016.3.5, 岩手大学, 岩手県, 盛岡市.

- ③ Lee, S., Kamada, T., Uchida, S., & Linzel, D. : ACCUMULATED SIBIE METHOD FOR IMAGING DEFECTS IN CONCRETE STRUCTURES, Proceedings of the Fifth International Conference on Construction Materials (国際学会), 2015.8.19~2015.8.21, Hilton Resort & Spa at Whistler, BC, Canada.
- ④ 斎藤 親, 相澤元基, 李 相勲: 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手法, 平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2015.3.7~2015.3.7, 東北学院大学, 宮城県, 多賀城市.
- ⑤ 大村章太, 李 相勲: 衝撃応答解析によるコンクリート構造物の損傷と P 波速度の関係に関する検討, 平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2015.3.7~2015.3.7, 東北学院大学, 宮城県, 多賀城市.
- ⑥ 渡邊 凌, 李 相勲: Accumulated - SIBIE 法の拡張に対する解析的検討, 平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2015.3.7~2015.3.7, 東北学院大学, 宮城県, 多賀城市.
- ⑦ Lee, S., Endo, T., Ishida, H. : Detecting defects in concrete structures using accumulated SIBIE, 2015 韓国防災学会学術発表大会論文集, 2015.2.25~2015.2.26, ソウル, 韓国.
- ⑧ 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, 平成 26 年度秋季講演大会講演概要集, 日本非破壊検査協会, 2014.10.28~2014.10.29, 名古屋国際会議場, 愛知県, 名古屋市.
- ⑨ 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, 平成 26 年度秋季講演大会講演概要集, 日本非破壊検査協会, 2014.10.28~2014.10.29, 名古屋国際会議場, 愛知県, 名古屋市.
- ⑩ 斎藤 親, 相澤元基, 李 相勲: コンクリートの欠陥を可視化するための Accumulated SIBIE 法の拡張, 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験部門ミニシンポジウム講演論文集, 2014.10.2~2014.10.2, 東北学院大学, 宮城県, 仙台市.
- ⑪ 渡邊 凌, 李 相勲: Accumulated - SIBIE 法の拡張に対する解析的検討, 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験部門ミニシンポジウム講演論文集, 2014.10.2~2014.10.2, 東北学院大学, 宮城県, 仙台市.
- ⑫ 石田卓也, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 李 相勲: 3次元衝撃応答解析に基づく RC 床版内部の水平ひび割れ評価のための可視化手法, 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, 大阪市.
- ⑬ 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, 大阪市.
- ⑭ 石田卓也, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 西上康平, 李 相勳: 衝撃応答解析に基づくコンクリート床版内部の水平ひび割れ評価のための可視化手法, 平成 26 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2014.5.31~2014.5.31, 大阪産業大学, 大阪府, 大阪市.
- ⑮ 後藤駿介, 高橋翔太, 李 相勳: 振動モードを考慮した衝撃弾性波法によるコンクリート部材厚さ測定の解析的検討, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2014.3.8~2014.3.8, 八戸工業大学, 青森県, 八戸市.
- ⑯ 加藤遼大, 佐藤一樹, 李 相勳: コンクリートの欠陥による曲げモードを可視化するための Accumulated SIBIE 法の拡張, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2014.3.8~2014.3.8, 八戸工業大学, 青森県, 八戸市.
- ⑰ 阿 部淳, 近藤明衛, 李 相勳: 振動モードを考慮した衝撃弾性波法によるコンクリート部材厚さ測定の実験的検討, 平成 25 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2014.3.8~2014.3.8, 八戸工業大学, 青森県, 八戸市.
- ⑱ Lee, S., Abe, J., Goto, S., Endo, T., Takeda, M., Kitatsuji, M.: Application of Impact - Echo for Heterogeneous Materials, 2014 韓国国防災学会学術発表大会論文集, 2014.2.19~2014.2.20, 仁川, 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)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

李 相勳 (LEE SANGHUN)

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号: 20377807

### (2) 研究分担者

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

内田 慎哉 (UCHIDA SHINYA)