

機関番号：14401
 研究種目：研究活動スタート支援
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21860055
 研究課題名（和文） 弾性波シミュレーションを組み込んだ次世代型コンクリート非破壊欠陥探査システムの開発
 研究課題名（英文） Development of Elastic-Wave Simulation Analysis-Based Non-Destructive Evaluation Methods for Internal Defects of Concrete
 研究代表者
 内田 慎哉（UCHIDA SHINYA）
 大阪大学・工学研究科・特任助教
 研究者番号：70543461

研究成果の概要（和文）：

本研究では、供用中のコンクリート構造物での弾性波挙動を弾性波シミュレーションにより予めシミュレートし、内部欠陥を現地で適確に評価することが可能な計測条件を事前に決定するための【次世代型コンクリート非破壊欠陥探査システム】を提案した。提案したシステムの妥当性を検証するため、削孔による探査結果との比較を行った結果、両者は概ね一致した。したがって、本システムは、実構造物の欠陥探査に対して有効であることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, elastic-wave methods were performed at existing RC members to survey the defects. Before measurements by elastic-wave methods, impact response analysis was applied to determine optimal measurement conditions. Efficiency of 'Analysis-Based Non-Destructive Evaluation Methods' were confirmed by visual inspections. Evaluation results by this method agreed well with results of visual inspection. Thus, validity of the proposed methods for internal defects of concrete was demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：コンクリート工学、非破壊検査工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：鉄筋コンクリート、非破壊試験、弾性波法、電磁パルス法、PCグラウト、
 動磁場解析、衝撃応答解析、連成解析

1. 研究開始当初の背景

コンクリートの内部欠陥の探査に適用可能な非破壊試験としては、弾性波法（超音波法、衝撃弾性波法、電磁パルス法、打音法）、電磁波法および電気化学的手法などがある。このうち弾性波法は、電磁波法や電気化学的手法と比較して、内部の欠陥部分とコンクリート部分の物理的ギャップ（音響インピーダ

ンス）を利用して欠陥を探査する方法のため、欠陥の有無や位置を直接的に評価することが可能な方法として位置付けられている。特に、弾性波法は、その他の方法と比較して、基本原理が理解しやすく、現地で容易に、しかも効率よく欠陥を探査できることが知られている。

しかしながら、近年では、実構造物の内部

欠陥の探査において弾性波法を適用した場合、必ずしも適確に欠陥を探査できない場合があることが、多くの研究者により指摘されている。具体的には、実構造物の場合、対象とする部材の幾何学的な複雑さ、径の大きな鉄筋による反射の影響など、様々な影響因子により、供試体レベルとは異なる波の伝播挙動を示し、欠陥探査を行うことが困難な場合が多い。加えて、対象とする欠陥の種類と形状に対して、弾性波の入力方法、受信方法および周波数分析方法をどのように組み合わせれば適確に欠陥を検出できるかも不明であり、試行錯誤を繰り返して、現地で計測を行う場合がほとんどであった。

以上より、申請者は、このような影響を弾性波シミュレーションにより事前に把握することができれば、供試体レベルの欠陥探査方法としての弾性波法を、実構造物レベルの手法へと高度化することができると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、供用中のコンクリート構造物での弾性波挙動を弾性波シミュレーションにより予めシミュレートし、内部欠陥を現地で適確に評価することが可能な計測条件を事前に決定するための【次世代型コンクリート非破壊欠陥探査システム】を開発することである。本研究で対象としたコンクリート内部欠陥は、道路橋 RC 床版の内部で発生する水平ひび割れおよび橋梁 PC 桁の横締め鋼棒の PC グラウトの未充填部である。

3. 研究の方法

(1) 道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出

道路橋 RC 床版の内部に発生する水平ひび割れを衝撃弾性波法により効率よく適確に検出し、しかも各種様々な道路橋 RC 床版へ適用できるようにするため、弾性波シミュレーション解析により「I: 弾性波の入力方法」、「II: 弾性波の受信方法」および「III: 周波数分析方法」の最適な組み合わせを決定するための手法の提案を行なった (図 1 参照)。提案した手法の妥当性を検証するため、供用中の道路橋から切り出した RC 床版に対して水平ひび割れの検出を試みた。

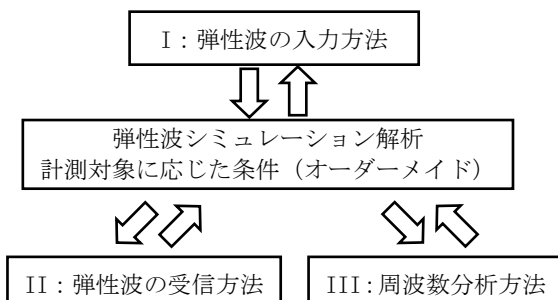


図 1 RC 床版の水平ひび割れ検出手法決定のイメージ

(2) 橋梁 PC 桁のグラウト未充填箇所の検出
実験で用いた供試体および計測条件を基于設定した解析モデルを対象に、動磁場・弾性波動連成解析を行い、電磁パルス法による PC グラウト充填評価手法の有効性を検討した。続いて、提案した評価手法の実構造物への適用性についての検討も併せて試みた。

4. 研究成果

(1) 道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出

①道路橋から切り出した RC 床版の概要
供用中の道路橋から切り出した RC 床版の概要を図 2 に示す。対象とした RC 床版は、アスファルト舗装 (厚さ: 60mm) を有する鋼繊維補強コンクリートで増厚 (増厚コンクリートの厚さ: 60mm) 補強されたものである。

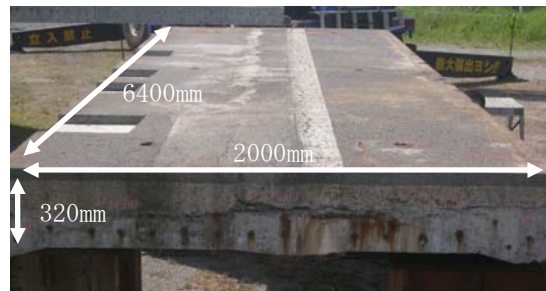


図 2 道路橋から切り出した RC 床版の概要

②解析モデルの概要

解析モデルの一例を図 3 に示す。モデル内部には水平ひび割れを模擬した直径 200mm の空隙部を深さ 60mm の位置に設けた (欠陥ありモデル)。空隙部のないモデル (欠陥なしモデル) も併せて作成した。モデル要素は 1 辺 10mm の 8 節点ソリッドである。モデルの支持は、図 3 に示す斜線部とした。支持面の境界条件は、節点の全方向の変位を固定とした。鋼球打撃による弾性波入力を模擬するため、正弦波の半波を三角波により近似した波形を衝撃力として与えた。衝撃力の入力位置は、モデル中央の 1 節点 (図 3 中の矢印) である。弾性波の出力位置は、衝撃力を入力した節点から y 方向へ 50mm 離れた節点とした。サンプリング間隔は 1 μ s、サンプリング数は 10000 点である。

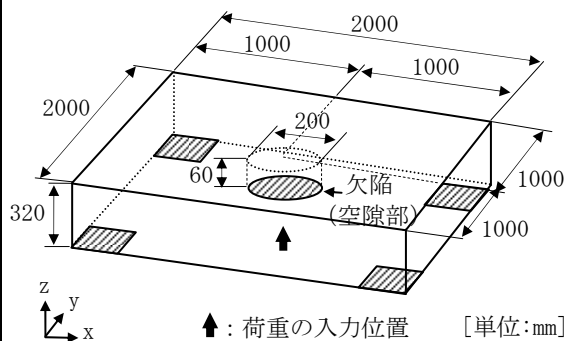


図 3 解析モデルの一例

③弾性波の入力方法の選定

弾性波の入力方法を決定するため、鋼球直径を 3.2, 6.4 および 12.8mm の 3 ケースに設定し、欠陥ありおよび欠陥なしモデルを対象に解析を行なった。解析で得られた加速度波形を高速フーリエ変換 (FFT) して求めた周波数スペクトルを図 4 に示す。図中には、理論上の板厚共振周波数: f_T を矢印、欠陥共振周波数: f_d を破線でそれぞれ示している。欠陥なしモデルでは、鋼球直径に関わらず f_T 付近にピークが出現した。しかしながら、鋼球直径が 3.2mm の場合では、 f_T 近傍のピーク以外にもそれと同程度のピークが複数出現している。したがって、鋼球直径は 6.4 および 12.8mm が適切であると考えられる。続いて、欠陥ありモデルでは、鋼球直径 3.2 および 6.4mm のケースで f_d 近傍にピークが出現している。以上のことから、鋼球直径は 6.4mm が適切であると判断した。

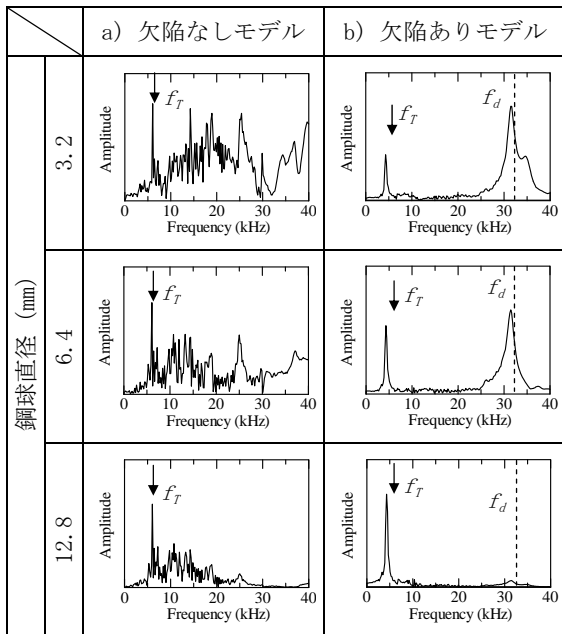


図 4 鋼球直径ごとの周波数スペクトル

④弾性波の受信方法の選定

弾性波の受信方法を決定するため、出力する波の種類を加速度および変位の 2 ケースに設定した。弾性波の入力に使用した鋼球直径は 6.4mm である。変位波形を FFT することにより求めた周波数スペクトルを図 5 に示す。加速度波形の結果は、図 4 に示している。変位波形の周波数スペクトルは、欠陥なしモデルでは f_T 位置近傍にピークが出現しているものの、欠陥ありモデルでは f_d 周辺にピークは出現していない。よって、加速度波形を出力することが適切であると考察できる。

⑤周波数分析方法の選定

周波数分析手法は、FFT および最大エントロピー法 (MEM) の 2 ケースとした。なお、弾性波の入力は鋼球直径 6.4mm、出力は加速

度波形である。MEM により算出した周波数スペクトルを図 6 に示す。FFT の結果は、図 4 に示している。それぞれの周波数スペクトルを比較すると、MEM を使用することにより、 f_T あるいは f_d 位置近傍に出現しているピークの形状が鋭くなり、かつ、これらのピーク周波数以外の周波数成分が若干ではあるが小さくなっていることが確認できる。したがって、周波数分析方法としては、MEM が好ましいと考えられる。

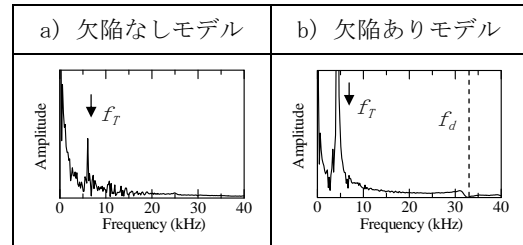


図 5 変位波形を FFT することにより求めた周波数スペクトル

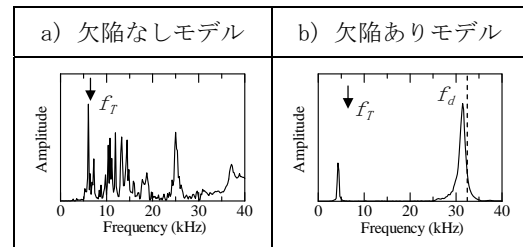


図 6 MEM により算出した周波数スペクトル

⑥切り出し RC 床版に対する本手法の妥当性の検証

衝撃弾性波法による計測は、図 2 に示す床版底面のコンクリート表面で行った。弾性波の入力、受信および周波数分析は、解析結果に基づき、鋼球直径 6.4mm、加速度センサおよび MEM とした。計測結果の一例を図 7 に示す。計測箇所 B では f_T 近傍にピークが出現しており、水平ひび割れは発生していないと考えられる。これに対して計測箇所 A および C では、 f_T よりも高い周波数領域に単独のピークがそれぞれ出現している。コンクリートの縦波速度とピーク周波数の値から、計測箇所 A では床版底面から 125mm の位置、C では 167mm の位置に水平ひび割れがそれぞれ発生していると考えられる。計測による推定結果を確認するため、計測箇所 A, B および C の位置で削孔を行い、孔内に棒状のスカナーを挿入し、内部のひび割れ発生状況を撮影し

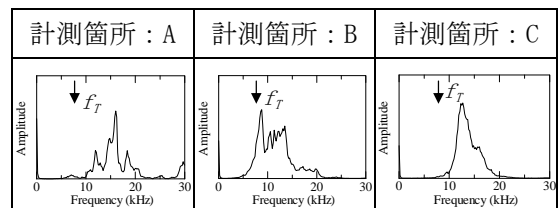


図 7 計測結果の一例

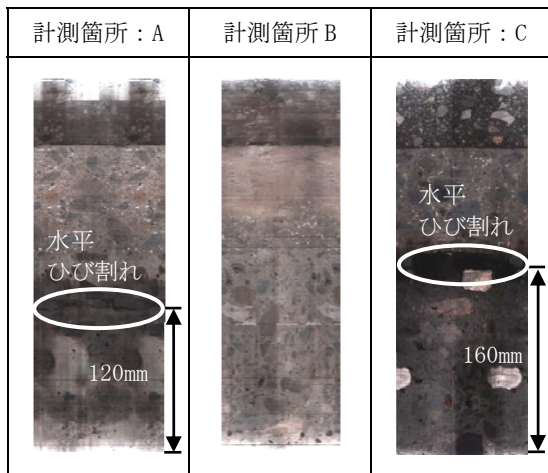


図8 RC床版内部の水平ひび割れ発生状況

た。図8に示す撮影結果より明らかとなお、推定結果は、削孔結果と概ね一致した。

(2) 橋梁PC桁のグラウト未充填箇所の検出

① 動磁場解析によるPC鋼棒および鋼製シースに作用する電磁力の範囲およびその大きさの把握

動磁場解析では、漏れ磁束を考慮し、まず、空間のモデル化を行った。この部分の寸法は、縦1500mm、横2500mm、高さ1200mmであり、すべての面に対して固定境界条件を与えた。その中央部には、縦235mm、横2000mm、高さ235mmのコンクリート供試体および励磁コイルをそれぞれモデル化した(図9参照)。供試体のモデル内部には内径32mm、厚さ1mm、長さ2000mmの鋼製シース1本を、かぶり100mmとなるように設定し、その内部には直径23mm、長さ2200mmのPC鋼棒をモデル化した。供試体両端部は定着プレートを設けた。励磁コイルは、鉄心に導線を巻きつけたものとしてモデル化し、シース直上かつ供試体長手方向中央に設定した。なお、励磁コイルの先端とコンクリート表面との間隔は20mmとした。要素は、いずれも8節点6面体ソリッドである。コンクリート要素1辺の長さは約10mmとした。また、空気層についても同様に、供試体近傍で約10mmとし、供試体から離れるに従って要素1辺の寸法が大きくなるように(最大で100mm)分割した。一方、PC鋼棒および鋼製シースの表層部には、表皮効果を考慮して表皮層を設けた。表皮層の深度(表皮深さ)は、例えば、磁束密度が鋼棒表面での値の $1/e$ (e :自然対数の底)となる際の鋼棒表面からの深さのことであり、次式により求めることができる。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

ここで、 δ :表皮深さ(mm)、 f :周波数(Hz)、 σ :電気伝導率 $[=1.0 \times 10^7 \text{S/m}]$ 、 μ :透磁率

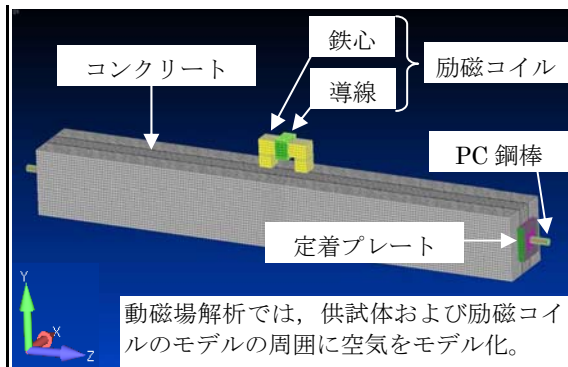


図9 動磁場解析および衝撃応答解析のモデル概要

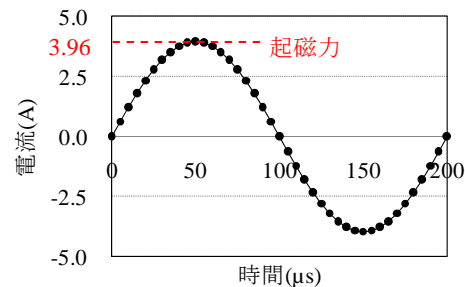


図10 導線に入力する電流波形

$[=2\pi \times 10^{-3} \text{H/m}]$ である。式(1)より、表皮深さは0.032mmとなる。なお、周波数は、供試体での計測時に導線に実際に電流を流した時間 $[=200 \mu\text{s}]$ より5000Hzとした。解析における表皮層のモデル化では、解析の精度を確保するため、表皮深さ(半径方向)を少なくとも2分割する必要がある。そのため、PC鋼棒および鋼製シースの表皮層の半径方向の要素分割数を2つとし、各要素寸法を0.016mmとした。なお、長手方向は、10mmの長さで均等に分割した。

図10に導線に流す電流波形を示す。この図に示す電流の最大値(起磁力)は、次式により算出した。

$$MMF = nI\sqrt{2} \quad (2)$$

ここで、 MMF :起磁力(A)、 n :導線の巻数 $[=10 \text{巻}]$ 、 I :導線に流れる電流の実効値 $[=0.28\text{A}]$ である。式(2)より、起磁力は3.96Aとなる。一方、図に示す横軸の時間は、供試体での計測条件と同じく200μsに設定した。図10に示す正弦波の電流を導線に入力することにより、コイル周辺に瞬間的な磁界を発生させた。この磁界により鋼棒表面およびシース表面の各節点に作用するx、yおよびz方向それぞれの電磁力を求めた。電磁力の時間変化を把握するため、0から200μsとなるまで5μsごとに電磁力をそれぞれ求めた。

放電開始時刻から150μs後におけるシースに作用する電磁力のコンター図を図11に

示す。図から明らかなように、コイル直下のシース部分に集中的に電磁力が作用していることがわかる。励磁コイル側のシース表面における電磁力を求めた結果、 $1.2 \times 10^{-3} \text{N}$ であった。これに対して、シース内部の鋼棒表面における電磁力は $8.5 \times 10^{-16} \text{N}$ であり、シースのそれと比較して極めて小さい値となった。これは、PC 鋼棒がシースによる磁気遮蔽の影響を受けたためである。このことから、励磁コイルから発生した磁界により鋼製シース部分が主に振動することが明らかとなった。なお、上記の傾向は、磁界が生じている時間内ではほぼ同様であった。

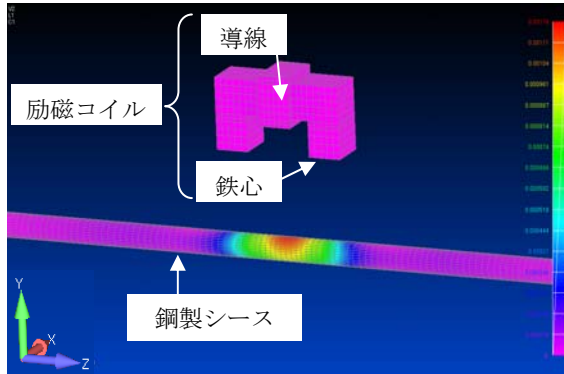


図 11 鋼製シースに作用する電磁力分布

② 衝撃応答解析による最大振幅値の有効性の検証

衝撃応答解析における供試体モデルは、動磁場解析におけるコンクリート供試体のモデル (図 9 参照) と同じである。なお、ここでは、「グラウト完全充填」と「グラウト未充填」の 2 ケースのモデルをそれぞれ作成した。境界条件は、コンクリート供試体モデルの 1 側面 (図 9 : y-z 平面, $x = 0 \text{mm}$) にある全節点の変位を全方向固定した。もう一方の側面 (図 9 : y-z 平面, $x = 235 \text{mm}$) は無反射条件とした。動磁場解析により得られたシース表面における各節点の x, y および z 方向に作用する電磁力の経時変化を、衝撃応答解析における衝撃荷重としてそれぞれ入力した。弾性波の出力は、シース長手方向中央かつシース上のコンクリート表面 (図 9 におけるコイルの直下) および PC 鋼棒片端部のそれぞれ 1 節点とした。

コンクリート表面および鋼棒端部で出力した変位波形の最大振幅値を図 12 にそれぞれ示す。コンクリート表面におけるグラウト未充填モデルの最大振幅値は、充填モデルよりも約 2.3 倍大きい。これは、グラウト充填の場合、シースの振動がグラウトにより拘束されるためであると考えられる。一方、鋼棒端部におけるグラウト未充填モデルの最大振幅値は、充填モデルよりも著しく小さい。グラウトが存在しないために、シースの振動が鋼棒に伝達されなかったと考えられる。い

ずれのモデルにおいても、供試体実験で得られた最大振幅値の傾向と概ね一致することが明らかとなった (図 13 参照)。

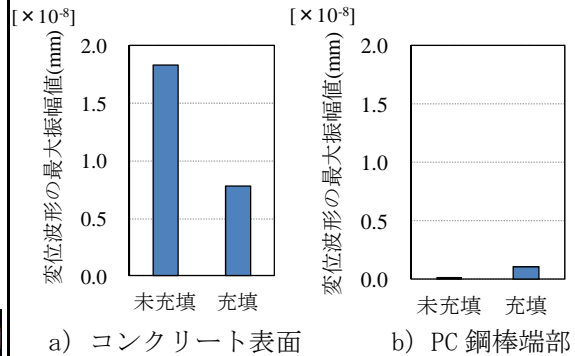


図 12 コンクリート表面および PC 鋼棒端部における変位波形の最大振幅値 (解析結果)

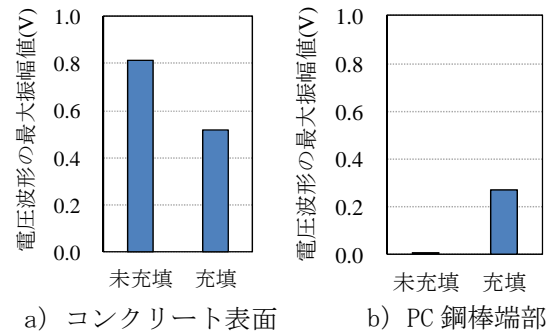


図 13 コンクリート表面および PC 鋼棒端部における電圧波形の最大振幅値 (実験結果)

③ 実構造物への適用性

実構造物として PC 橋梁の横締めを対象として電磁パルス法を適用し、得られた最大振幅値からグラウト充填状況の評価を試みた。電磁パルス法による推定結果と、削孔により把握した実際のグラウト充填の有無は、概ね一致する結果であった。また、グラウト未充填箇所にグラウトを再充填した後、電磁パルス法による計測を行い、グラウト再充填の良否への本手法の適用性についての検討も併せて行った。その結果、グラウト再充填前後の最大振幅値を比較することにより、グラウトが適切に再充填されているかの良否を評価できることが明らかとなった。

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 4 件)

① Shinya Uchida, Toshiro Kamada, Toshiki Iwasaki and Hotaru Tsunoda, Non-Destruct

ive Evaluation for Horizontal Cracks in RC Slabs of Highway Bridges Based on Analysis-Aided Impact Elastic-Wave Methods, International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, 査読有, (2011), 掲載決定

② 中野陽子, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 塩谷智基, 鋼繊維補強モルタルの繊維分散性の非破壊評価への弾性波速度トモグラフィの適用, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 33, (2011), 掲載決定

③ 宗像晃太郎, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 角田 蛸, PC グラウト充填状況の違いが電磁パルス法で測定される最大振幅値に与える影響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. 32, (2010), 1685-1690

④ 角田 蛸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 宗像晃太郎, 電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法の妥当性検証への動磁場解析および衝撃応答解析の適用, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 32, (2010), 1691-1696

[学会発表] (計 6 件)

① 角田 蛸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 岩崎俊樹, 電磁パルス法による PC グラウト未充填箇所検出における評価指標の解析的検討, 平成 23 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2011. 6. 12, 関西大学千里山キャンパス, 発表決定

② 内田慎哉, 非破壊評価およびシミュレーション解析を併用したコンクリート構造物のメンテナンスシステム, CAE POWER 2010 秋の CAE カンファレンス ~疲労寿命評価と非破壊探傷シミュレーション~, 2010. 11. 5, メルパルク OSAKA, 招待講演

③ 角田 蛸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 岩崎俊樹, 電磁パルス法による PC グラウト充填評価手法の妥当性検証のための磁場解析および衝撃応答解析の適用, 第 54 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2010. 10. 26, ハートピア京都

④ 角田 蛸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 岩崎俊樹, 磁場解析と衝撃応答解析の併用による電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法の妥当性の検討, 平成 22 年度土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, 2010. 9. 1, 北海道大学札幌キャンパス

⑤ 内田慎哉, 鎌田敏郎, 前 裕史, 岩崎俊樹, 角田 蛸, ウェーブレット変換と自己相関係数を併用した衝撃弾性波法に基づくコ

ンクリート版厚推定手法, 平成 22 年度土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, 2010. 9. 1, 北海道大学札幌キャンパス

⑥ 角田 蛸, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 岩崎俊樹, 宗像晃太郎, 動磁場解析と衝撃応答解析の併用による電磁パルス法に基づく PC グラウト充填評価手法の検証, 平成 22 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2010. 5. 22, 京都大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 慎哉 (UCHIDA SHINYA)
大阪大学・工学研究科・特任助教
研究者番号: 70543461