

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：17401
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009 ～ 2011
 課題番号：21560505
 研究課題名（和文） 衝撃弾性波法における時間領域信号に基づくPCグラウト充填度評価
 研究課題名（英文） PC Grout Evaluation Based on Time-Domain Signal of Impact-Echo

研究代表者
 森 和也（MORI KAZUYA）
 熊本大学・自然科学研究科・教授
 研究者番号：50190989

研究成果の概要（和文）：本研究は、衝撃弾性波法において時間領域信号に基づいてPCグラウトの充填度を評価する方法を開発するものである。多数の衝撃弾性波法の結果を加算平均して、PCグラウトの有無の判定に成功した。さらに発展的研究として、検査地点へのアクセスの方法に関する改善に取り組んだ。鉛直な壁面を自走することができる装置開発をおこなった。装置は衝撃弾性波法装置を搭載したタイプと遠隔目視装置を搭載したタイプを開発した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a judging method to check the existence of grout in tendon ducts. The method is based on the averaging of the multiple time-domain signals of the Impact-Echo. Further more, we have tried to improve the method of accessing inspection points on concrete walls. We have developed two types of climbing machines for vertical concrete walls. One type carries an impact echo machine. The other carries a remote visual inspection device.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |
| 2010年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2011年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：衝撃弾性波法，時間領域信号，PCグラウト，充填度評価，非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に大量のコンクリート構造物が製造され、その中には多くのシース管を用いた構造物があった。当時、シース管のグラウト充填の重要性が十分認識されておらず、近年、部分的に、あるいは、シース管全体にわたって未充填のシース管が散見された。シース管の未充填は緊張材の腐食、破断を引き起こす恐れがあり、早急な対応が求められていた。

一方、当時衝撃弾性波法の研究が活発におこなわれていた。衝撃弾性波法とは、検査物体に鋼球で衝撃を与え、その振動をセンサーで計測するものである。振動データから検査物体に存在する欠陥や検査物体の幾何学的情報を得る。この方法がコンクリート分野で注目されているのは、コンクリートに適切な周波数成分を含む弾性波を入力できるからである。また、入力エネルギーが十分に強いことも大型構造物の検査では有利である。

2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、シース管のPCグラウトの充填状況を衝撃弾性波法で検出することであった。

研究が進むうちに、検査箇所へのアクセスの問題が生じ、発展的研究として、コンクリート壁面を登攀する衝撃弾性波法の装置を搭載した機械の開発にも着手した。

3. 研究の方法

図-1に、衝撃弾性波法の検査方法を示している。検査面を鋼球で打撃し、弾性波を内部に発生させる。弾性波は欠陥や背面で反射し、検査面に戻る。弾性波は再び検査面で反射し、内部に伝播する。その振動を加速度ピックアップやレーザードップラー振動計で計測する。

振動の計測に加速度ピックアップを用いると、振動は加速度の値として得られ、図-2のような結果を得る。この時間領域信号を高速フーリエ変換(FFT)によって周波数領域信号、すなわち周波数スペクトルに変換すると、図-3のような結果を得る。このような周波数スペクトルを用いて欠陥検出する方法が一般的な衝撃弾性波法である。

欠陥検出の原理は以下の通りである。図-1の弾性波の伝播において、弾性波速度を C_p 、欠陥までの表面からの距離を d 、背面までの距離を w とする。弾性波が欠陥で反射する場合、弾性波が打撃面から入射して戻るまでの経路の長さは $2d$ となる。そこで、一回の往復に要する時間は $2d/C_p$ となる。その結果、表面に生じる変位は、周期 $2d/C_p$ を持ち、模式的に図-4(a)のようになる。

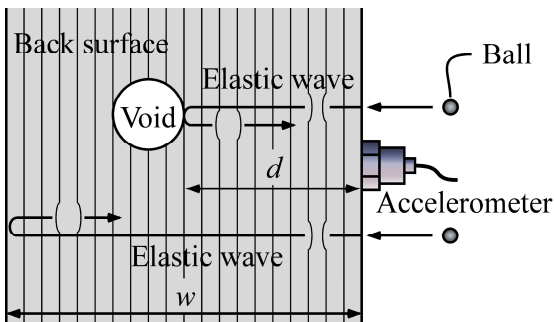


図-1 衝撃弾性波法

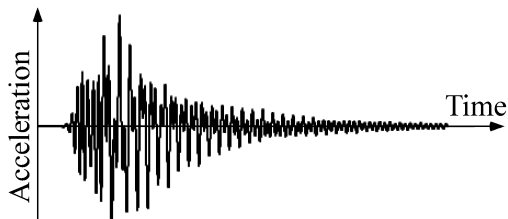


図-2 加速度の時間領域信号

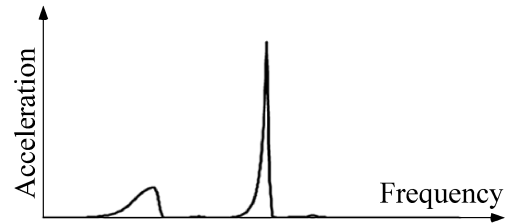
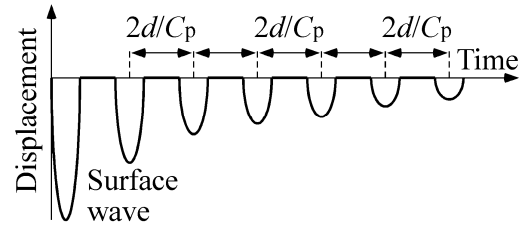
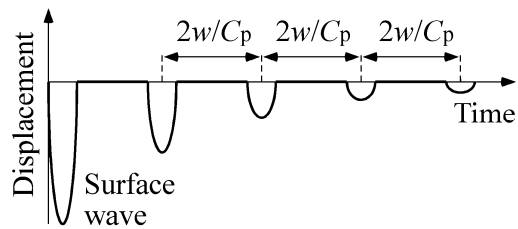


図-3 加速度の周波数スペクトル

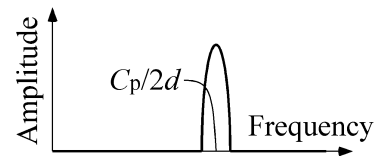


(a) 欠陥からの反射

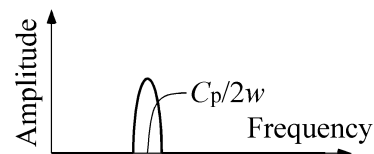


(b) 背面からの反射

図-4 検査表面における変位変化



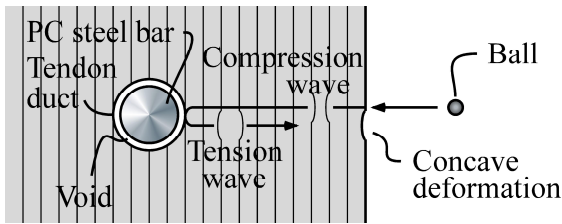
(a) 欠陥からの反射



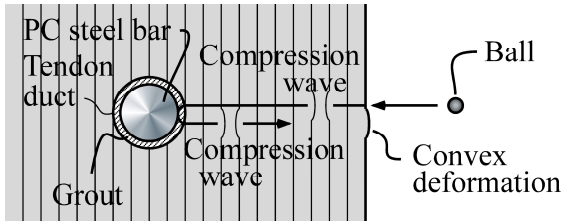
(b) 背面からの反射

図-5 周波数スペクトル

実際に計測されるデータは複雑な値となる。その理由は、加速度ピックアップを用いた場合は変位の二回微分値となることや、弾性波の減衰や拡散のためである。しかし、図-4における $2d/C_p$ や $2w/C_p$ の周期性は失われることはない。その結果、計測される振動データを高速フーリエ変換すると図-5のような周波数スペクトルが得られる。欠陥と検査面との間の繰返し反射によるピークがその対応する位置 $C_p/2d$ に発生し、背面と検査面との間の繰返し反射のピークがその対応す



(a) グラウト未充填の場合の第一反射波



(b) グラウト充填の場合の第一反射波

図-6 第一反射波の挙動の違い

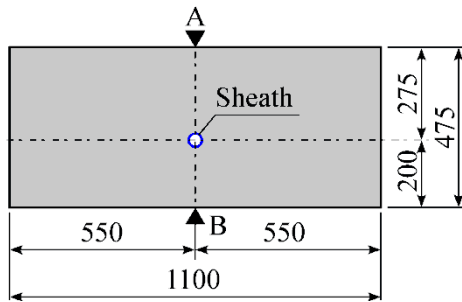
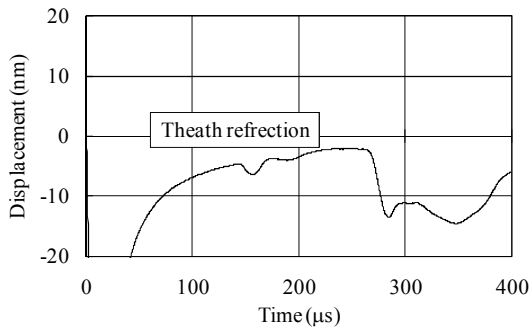
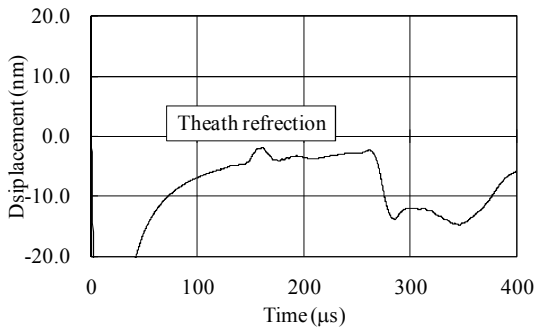


図-7 有限要素法における試験片寸法



(a) 空隙の場合の変位変化



(b) 充填の場合の変位変化

図-8 加振点Aにおける変位変化

る位置 $C_p/2w$ に発生する。衝撃弾性波法は、この振幅スペクトルに基づいて、欠陥の有無や検査体の幾何学的情報を得る。検査体の内部に欠陥がある場合は、背面反射のピーク的位置の手前にピークが生じる。欠陥の位置はそのピークの周波数から求めることができる。また、欠陥の大きさの情報もそのピークの大きさから概算できる。

本研究では、弾性波の第一反射波のみを利用してイメージングをおこなう。

図-6 はシーす管を対象とした第一反射波の挙動を模式的に示したものである。衝撃によって発生する弾性波は圧縮波で、この弾性波が未充填のシーす管（空隙）で反射すると引張波となって反射する。引張が検査面に到達すると凹変形を生じさせる。

一方、シーす管がグラウトで充填されている場合、弾性波はシーす管内部に伝達され、鋼材で反射する。鋼材の音響インピーダンスはコンクリートの音響インピーダンスより高いので、弾性波は圧縮波として反射する。圧縮波が検査面に到達すると凸変形を生じさせる。

すなわち、対象物の音響インピーダンスが周囲のコンクリートの音響インピーダンスより低い場合は検査面は凹変形し、対象物の音響インピーダンスが周囲のコンクリートの音響インピーダンスより高い場合は検査面を凸変形させる。この変位の違いを計測することによって欠陥を判定する。

4. 研究成果

シーす管からの第一反射波によって欠陥が判定できるかどうかを、まずは2次元の有限要素法シミュレーションで確認した。

図-7 に試験片形状を示す。シーす管は、直径 38 mm、厚さ 0.5 mm の鋼製とした。緊張材は鋼棒とし、直径 32 mm とした。

衝撃荷重は、ヘルツの分布荷重とし、分布させる区間の幅を 2.6 mm とした。衝撃の時間変化も正弦波の半波長形状とし、荷重時間を $22.3 \cdot s$ とした。衝撃荷重の最大値は 1270 N とした。

図-7 の試験片において、グラウトが充填されている場合とされていない場合の、A 点に衝撃を与えたときの A 点の変位変化を図-8 に示す。図-8(a) のグラウト未充填（空隙）の場合、前節の検出原理において説明したとおり、シーす管からの反射波は負方向の変位、すなわち凹変形を生じさせる。一方、図-8(b) のグラウト充填の場合は、正方向の変位、すなわち凸変形を生じさせる。

図-8 において、 $100 \cdot s$ 以前の負の変位は衝撃による直接的な変位であり、 $260 \cdot s$ 以降の負の変位は背面反射によるものである。

次に、第一反射波を用いて欠陥のイメージングをおこなう。本研究では時間領域変位に

において弾性波経路長さとピーク周波数を関係付ける。

図-9 のように座標をとると、弾性波が衝撃によって入力されて評価点で反射されて計測点に戻るまでの弾性波経路長さ L は式(1)で求められ、その反射に要する時間は L/C_p となる。そこで、評価点の弾性波の反射評価値を、図-10 の時間領域変位の値を $D(L/C_p)$ とする。検査対象内の任意の位置の反射評価値を求めてイメージングする。

本研究ではさらに、ノイズの低減を目的として多数回打撃し、その結果得られる反射評価値 $D(L/C_p)$ の加算評価値 DS を用いてイメージングをおこなった。

今回の実験で用いた試験片の寸法を図-11 に示す。厚さ 475 mm の試験片で、シース管が 2 本配置されている。一本はグラウトが充填されており、もう一本は未充填である。シース管及び緊張材の寸法は有限要素法シミュレーションと同じで、シース管の直径 38 mm、厚さ 0.5 mm の鋼製である。緊張材は鋼棒で直径 32 mm である。

衝撃荷重は、電動エアガンと BB 弾を用いて行った。BB 弾は、直径 6.0 mm、質量 0.12 g、弾性係数 1.2 GPa ポアソン比 0.36 のプラスチック弾である。BB 弾の衝突速度は約 70 m/s である。

振動計測は、図-11 のシース管の中心上の A 点および C 点とした。計測にはレーザードップラー振動計を用いた。したがって、計測データは速度である。検査面からシース管中心深さまでの距離は 275mm である。

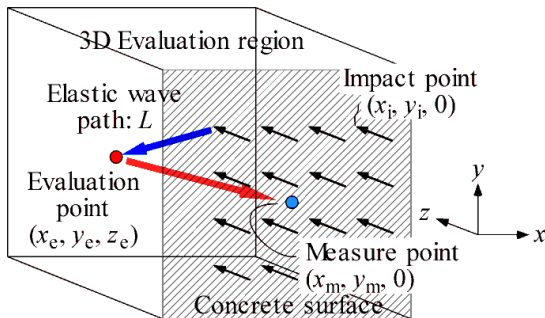


図-9 イメージングの方法

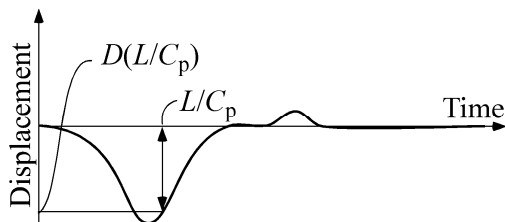


図-10 時間領域の変位信号

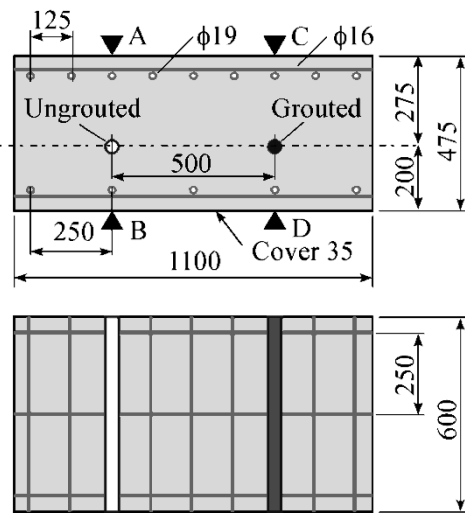
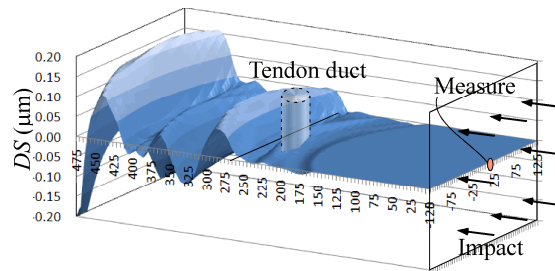


図-11 グラウト充填評価試験片

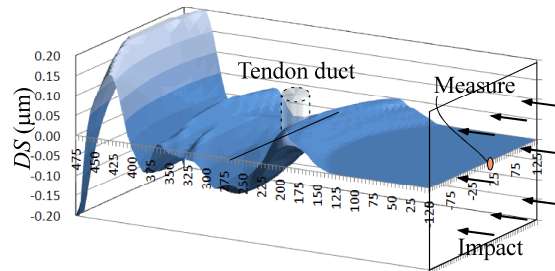
打撃点は振動計測点を中心とする一辺 20cm の正方形内の 2cm 間隔の格子状点とした。打撃点数は計測点を除く 120 点である。

(2) 実験結果

120 回の衝撃試験によって得られた変位変化を加算してイメージングしたものを図-12 に示す。図-12(a) はグラウト未充填の結果であり、図-12(b) はグラウト充填の結果である。図-12(a) はシース管が存在する位置において、加算評価値 DS が負の値を示しているのが分かる。一方、図-12(b) のグラウト充填の場合、シース管が存在する位置において DS が正の値を示しているのが分かる。したがって、 DS の値を用いてグラウトの充填、未充填の判定が可能である。



(a) グラウト未充填の結果



(a) グラウト充填の結果

図-12 シース管のグラウト充填評価

衝撃弾性波法では、しばしば検査箇所へのアクセス問題となることがある。シース管は橋梁の桁や橋台の全体にわたって設置されているからである。そこで、このアクセス問題を解決するために、図-13 に示すような、衝撃弾性波法の装置を搭載したコンクリート壁面を登攀する壁面走行装置を開発した。検査装置の大きさは、縦 104cm、横 80cm、高さ 24cm であり、重量は 24kg である。

図-14 に、壁面走行装置の機構を示している。装置は、二組ずつの吸盤 A から D まで、計 8 個の吸盤を持つ。吸盤 A と吸盤 C、吸盤 B と吸盤 D は互いに連結され、吸盤 A と吸盤 C の連結体と吸盤 B と吸盤 D の連結体は、相対的に上下の平行移動と回転移動をおこなうことができる。

また、検査装置は図-15 に示すような、回転する支柱に固定された鋼球で壁面を叩く装置を搭載しており、壁面振動は音響振動としてマイクロフォンで計測できる。



図-13 登攀型コンクリート検査機械

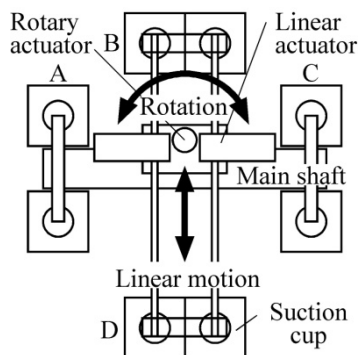


図-14 検査機械移動の機構

本装置を用いて人工欠陥を有するコンクリート試験片の欠陥検出試験をおこなった。人工欠陥は、直径 20cm、厚さ 1cm のポリスチレンをコンクリート試験片に埋め込んだものである。人工欠陥の表面からの深さは 2.5cm とした。

図-15 の装置で壁面を叩き、表面振動を音響を介して計測した。その信号を FFT 解析によって周波数スペクトルに変換したものを図-16 に示している。図-16 には、比較のために、欠陥を有していないコンクリート壁面の試験結果も示している。

図-16 からわかるように、人工欠陥を有する試験片は、2.5kHz の位置に鋭いピークを示した。

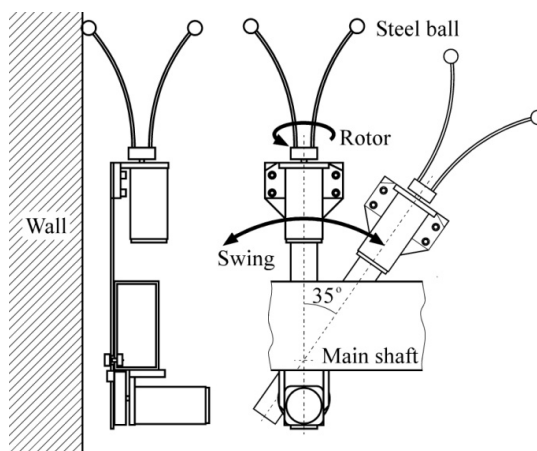


図-15 鋼球による衝撃装置

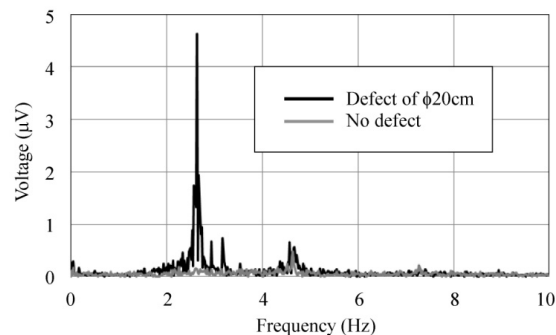


図-16 壁面の振動解析結果

今後の展開は以下のようなことを計画している。本衝撃弾性波法装置は、検査表面を多数回均一に打撃することが可能である。しかも打撃のスピードが極めて早い。そこで、本コンクリート壁面登攀装置の衝撃試験結果と加算平均処理とを組み合わせ、アクセスの困難な箇所が存在するシース管の PC グラウト充填の評価がおこなえる装置の開発を実施する。

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6件)

- ① Saeko TOKUOMI and Kazuya MORI, Development of Climbing Testing Machine for Concrete Wall Using Impact Acoustics, Proceedings of Singapore International Nondestructive testing Conference & Exhibition, 査読有, No. 16, 2011
- ② Kazuya MORI, Tatsuya IWAMOTO and Saeko TOKUOMI, Remote-Controlled Testing Machine for Vertical Concrete Wall, Proceedings of ATEM' 11, 査読有, 2011
- ③ Kazuya MORI, Kenichi NISHI and Tatsuya IWAMOTO, Imaging of Time-Domain Displacement Signals Based on the Impact Echo Method, Proceedings of ATEM' 11, 査読有, 2011
- ④ Kazuya MORI, Ippei TORIGOE, and Tatsuya IWAMOTO, Development of high accurate impact echo method and its application to filling evaluation of PC grout, Proceedings of FraMCosS-7, 査読有, Vol. 2, 2010, pp. 1154-1157
- ⑤ Tatsuya IWAMOTO, Kazuya MORI and Ippei TORIGOE, FEM Simulation of High-Accurate Impact Echo Method Using by Time Domain Signal in PC Grout Evaluation, Proceedings of FraMCosS-7, 査読有, Vol. 1, 2010, pp. 576-578
- ⑥ 森 和也, 岩本達也, 鳥越一平, 貝田博英, 衝撃弾性波法における時間領域信号の加算平均によるノイズ低下とPCグラウト充填評価への適用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, 第9巻, 2009, pp. 17-24

[学会発表] (計8件)

- ① Saeko TOKUOMI and Kazuya MORI, Development of Climbing Testing Machine for Concrete Wall Using Impact Acoustics, Singapore International Nondestructive testing Conference & Exhibition, 2011.11.3, the Holiday Inn Atrium, Singapore, Singapore
- ② 徳臣佐衣子, 森 和也, 打音法を用いたコンクリート壁面の非破壊検査装置の開発, 日本機械学会九州支部宮崎講演会, 2011.9.30, 宮崎大学 (宮崎県)
- ③ Kazuya MORI, Tatsuya IWAMOTO and Saeko TOKUOMI, Remote-Controlled Testing Machine for Vertical Concrete Wall, ATEM' 11, 2011.9.20, 神戸コンベンション

センター (兵庫県)

- ④ Kazuya MORI, Kenichi NISHI and Tatsuya IWAMOTO, Imaging of Time-Domain Displacement Signals Based on the Impact Echo Method, ATEM' 11, 2011.9.19, 神戸コンベンションセンター (兵庫県)
- ⑤ Kazuya MORI, Ippei TORIGOE, and Tatsuya IWAMOTO, Development of high-accurate impact echo method and its application to filling evaluation of PC grout, FraMCosS-7, 2010, 5, 25, Seogwipo KAL Hotel, Jeju, Korea
- ⑥ Tatsuya IWAMOTO, Kazuya MORI and Ippei TORIGOE, FEM Simulation of High-Accurate Impact Echo Method Using by Time Domain Signal in PC Grout Evaluation, FraMCosS-7, 2010, 5, 24, Seogwipo KAL Hotel, Jeju, Korea
- ⑦ 森 和也, 岩本達也, 鳥越一平, 衝撃弾性波法のPCグラウト充填度評価への適用 (実験による検討), 土木学会第64回年次学術講演概要集, 2009.9.3, 福岡大学 (福岡県)
- ⑧ 岩本達也, 森 和也, 鳥越一平, 衝撃弾性波法のPCグラウト充填度評価への適用 (有限要素法による検討), 土木学会第64回年次学術講演概要集, 2009.9.3, 福岡大学 (福岡県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 和也 (MORI KAZUYA)
熊本大学・自然科学研究科・教授
研究者番号: 50190989

(2) 研究分担者

鳥越 一平 (TORIGOE IPPEI)
熊本大学・自然科学研究科・教授
研究者番号: 40134663