

論文 磁力共鳴法によるグラウト未充填の検出

森 和也^{*1}・鳥越 一平^{*2}・畑仲 俊治^{*3}

要旨：磁力によって PC 鋼材を共鳴させ、鉛直グラウトの未充填箇所を検出する方法を提案する。グラウトが未充填である場合、ある周波数で PC 鋼材を加振すると PC 鋼材は共鳴現象を呈する。一方、充填がなされている場合、PC 鋼材はグラウトによって支持され共鳴現象を生じることはない。グラウトを充填していない PC コンクリート試験片と、グラウトを充填した試験片を製作し、磁力で共鳴現象が生じるか実験した。グラウト未充填の PC 鋼棒は、磁力の周波数とその固有振動数に一致したとき共鳴し、その振動は PC 鋼棒端部において検出することができた。

キーワード：非破壊検査, グラウト, 磁力共鳴法, PC コンクリート

1. はじめに

既設の PC 構造物の中には、グラウトが部分的あるいは完全に未充填であるシース管が確認されている。グラウトの未充填は PC 鋼材の腐食を促進させ、構造物の安全性を脅かす要因となる。したがって、グラウトの未充填箇所の検出は橋梁の管理において急務の課題なのである。

グラウトの未充填を検出する方法には、インパクトエコー法を利用したもの^{1), 2)}、PC 鋼材の弾性波速度の変化を利用したもの^{3), 4), 5)}、透過放射線を利用したものなどがある。インパクトエコー法を利用したものには、大津ら^{1), 2)}による SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact Echo)がある。この手法はインパクトによって発生した弾性波の反射波の周波数スペクトルを映像化して、グラウトの有無を判断する方法である。鎌田ら^{3), 4), 5)}は、PC 鋼材の弾性波速度が、PC 鋼材とグラウトが密着しているときと PC 鋼材が空間に存在する場合とでは、異なることを利用して、グラウトの有無を判断する方法を提案している。

本論文では、磁力によって PC 鋼材を共鳴させ、鉛直グラウトの有無を判定する「磁力共鳴法」を提案する。実際に、立方体の PC コンクリート

試験片を製作し、電磁石によって共鳴現象が生じるかを実験した。さらに、パルス状の磁力を用いて、グラウト未充填検査を行う方法についても考察した。

2. 磁気共鳴法の原理

図-1に、本研究の原理図を示す。検査対象は鉛直シース管である。グラウトの未充填には、部分的な充填不良と、全く充填されていないものがあるが、本論文では後者の検出を目標とする。

鉛直 PC 鋼材において、グラウトが未充填である場合、PC 鋼材に衝撃力あるいは周期荷重を与えると、PC 鋼材は弦のように振動を起こす。PC 鋼材がたわみ振動を生じると、PC 鋼材の張力は変動し、PC 鋼材の端部が振動する。この端部の振動を検出することによってグラウトの有無を検出するのである。

PC 鋼材の振動の基本振動数 f は、弦の基本振動数から次のように求めることができる。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

ここで、 T は PC 鋼材の張力、 L は PC 鋼材の長さ、 μ は PC 鋼材の単位長さ当たりの質量である。

*1 熊本大学 工学部知能生産システム工学科助教授 工博 (正会員)

*2 熊本大学 工学部知能生産システム工学科助教授 工博

*3 (株)ピーエス三菱 名古屋支店土木技術部 (正会員)

3. 実験方法

3.1 試験片

試験片形状を図-2に示す。試験片は、400mm×500mm×600mmの直方体で、400mm×500mmの断面の中央部にシース管を配している。500mm×600mmの面の表面には、鉛直方向と水平方向に鉄筋を施工した。鉛直方向には間隔125mmでφ19の鉄筋を、水平方向には間隔250mmでφ13の鉄筋を配筋した。これは、磁力に及ぼす鉄筋の影響を見るためである。コンクリートの配合を表1に示す。

シース管の内径は45mmで、PC鋼棒の直径は32mmである。PC鋼棒には、約9.8kNの張力を作用させた。立方体試験片は2個製作し、ひとつはグラウトを充填せず、もう一方はグラウトを充填した。

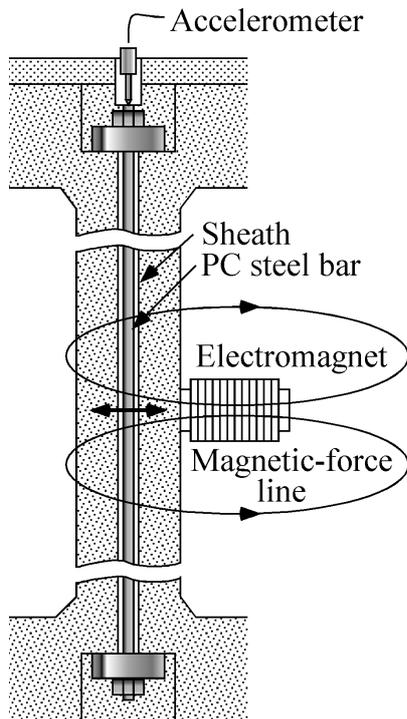


図-1 磁力共鳴法の原理

グラウトを充填していないPC鋼棒の固有振動数 f は次のように推定される。

単位長さ当たりの質量 μ は次式で求められる。

$$\mu = \frac{\pi}{4} d^2 \rho = \frac{\pi}{4} 0.032^2 \times 7850 = 6.31 \text{ kg/m} \quad (2)$$

ここで、 d はPC鋼棒の直径、 ρ は密度である。したがって、PC鋼棒の固有振動数 f は、

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \frac{1}{2 \times 0.6} \sqrt{\frac{1000 \times 9.81}{6.31}} = 32.9 \text{ Hz} \quad (3)$$

しかしながら、本試験のようにPC鋼棒が短い場合は、PC鋼棒の曲げ剛性による復元力が生じるので、式(3)の値は正確なものではないと考えられる。

3.2 電磁石

厚さ0.2mmの電磁鋼板を250枚積層し、直径φ0.4mm、重さ5kgのマグネットワイヤーを巻き付けた。

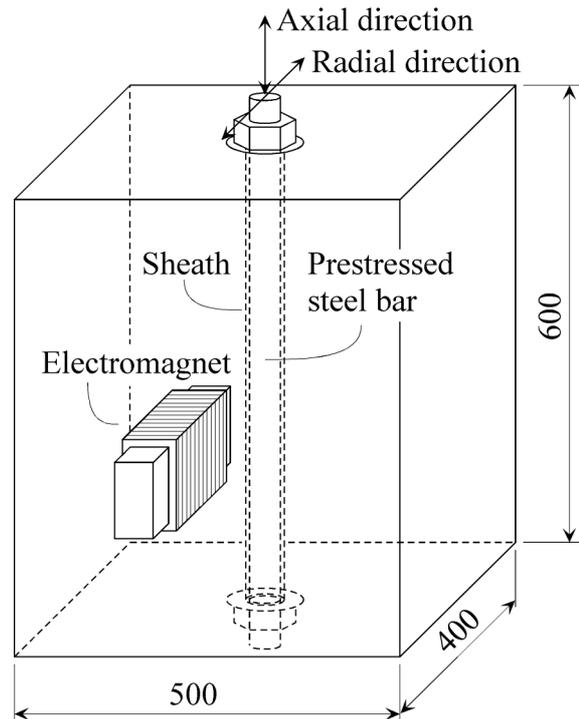


図-2 試験片と加振用電磁石

表1-配合表

Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Fine aggregate (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)
277	183	990	992	4.2	66.0	50.0

3.3 電源

電源は 200V の直流電圧をパワーMOS を用いて断続させ、矩形電圧を発生させた。パワーMOS は、ファンクションジェネレーターでドライブし、矩形電圧の周期をコントロールした。

4. 実験結果

4.1 グラウト未充填の PC 鋼棒の固有振動数

試験片の PC 鋼棒は、長さに対して十分細くないので、固有振動数は式(1)では精度よく求められないと考えられる。そこで、実験的に固有振動数を計測した。グラウトを充填していない試験片の PC 鋼棒の一端を半径方向(Axial direction)にハンマーで打撃を加えて (図-2 参照)、反対側の PC 鋼棒の半径方向の速度変化をレーザー Doppler 振動計で測定した。PC 鋼棒端部を半径方向に打撃すると、シー管内の PC 内部は固定ナットを支点としたわみ振動を生じるからである。

図-3 に、PC 鋼棒端部の速度変化を示している。サンプリング周期は 500Hz で、500 点収集した。

図-4 は、図-3 の結果のパワースペクトルである。図-4 において、約 10Hz、15Hz、35Hz の周波数の位置にピークが確認できる。

これらの振動において、どの振動が PC 鋼棒の振動であるのかを判断するために、試験片の 500mm×600mm の面の中央部に打撃を与えて同様に振動を計測して得られた結果を図-5 に示す。

図-5 において、約 10Hz と 15Hz においてのみピークを確認することができる。この振動は、試験片全体の振動を表すものである。図-4 の結果と比較して PC 鋼棒の固有振動数は、約 35Hz であると推定される。

4.2 グラウト充填の PC 鋼棒の固有振動数

グラウトを充填した PC 鋼棒は振動を抑制されるため、共鳴することはない。この事実は、4.1 節と同様な試験によって確認できる。

図-6 は、PC 鋼材の端部を半径方向に打撃し

たときのもう一端の半径方向速度のパワースペクトルを示している。

図-7 は、試験片中央部を打撃したときの PC 鋼材端部の半径方向速度のパワースペクトルである。図-6 と図-7 において、パワースペクトルがほぼ等しいことから、たわみ振動が発生していないことが確認できる。

4.3 電磁石による磁界強度

製作した電磁石は、1A の直流電流に対して、

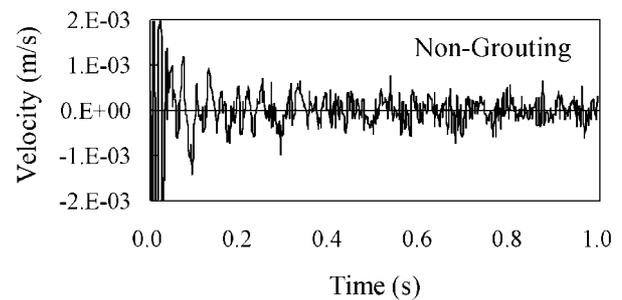


図-3 PC 鋼棒の端部を半径方向に打撃したときのもう一端の半径方向速度

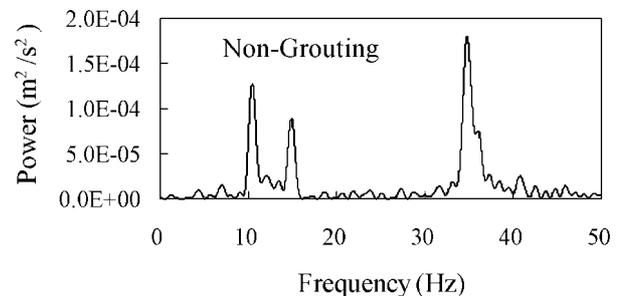


図-4 PC 鋼棒の端部を打撃したときの他点の半径方向速度のパワースペクトル

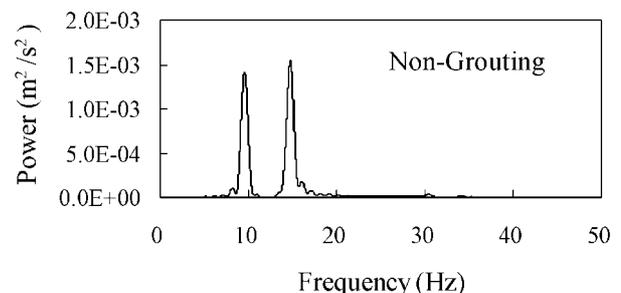


図-5 試験片中央部を打撃したときの PC 鋼棒端部の半径方向速度のパワースペクトル

磁石先端から 20cm の位置において 1.28mT の磁界を発生した。

図-8 は、200V の電源によってコイルに流れる電流を示したものである。このときの加振周期は 30Hz である。この結果、PC 鋼棒が存在する位置における磁界の最大強度 B_{max} は次のようになる。

$$B_{max} \approx 1.28 \text{ (mT/A)} \times 2.5 \text{ (A)} = 3.2 \text{ (mT)} \quad (4)$$

4.4 磁力による PC 鋼棒の加振

図-2 に示すように、電磁石を試験片に隣接して設置し、図-8 に示すような電流を印加した。電流の周波数は、10Hz から 50Hz まで変化させた。

(1) グラウト未充填の場合の PC 鋼棒の振動

図-9 に、PC 鋼棒の固有振動数である 35Hz の周波数の磁力を入射したときの PC 鋼棒端部の半径方向速度のパワースペクトルを示す。図-9 からわかるように、この周波数において PC 鋼棒は共鳴し大きく振動していることがわかる。

図-10 は、40Hz の磁力を入射したときの PC 鋼棒端部の半径方向速度のパワースペクトルである。このように、共振点以外の周波数を試験片に入射しても、PC 鋼棒は共鳴現象を生じることとはなく、PC 鋼棒は振動することはなかった。

図-11 は、35Hz の磁力を入射したときの PC 鋼棒端部の軸方向(Axial direction)速度のパワースペクトルを示している。

図-9 と図-11 より、軸方向の振動の大きさは、半径方向の振動の大きさの約 3 分の 1 になるが、共鳴の判定は可能であることがわかる(振動の大きさは速度に比例し、速度の二乗がパワーに比例する)。

(2) グラウト充填の場合の PC 鋼棒の振動

グラウトが充填されている場合の PC 鋼棒の振動を計測した。図-12 は、35Hz の磁力を入射したものである(35Hz はグラウトがない場合の共振周波数である)。加振周波数でわずかながら振動していることがわかるが、これは磁力によって試験片全体が振動したもので、実際の PC 構造物ではこのような振動は生じることではない。

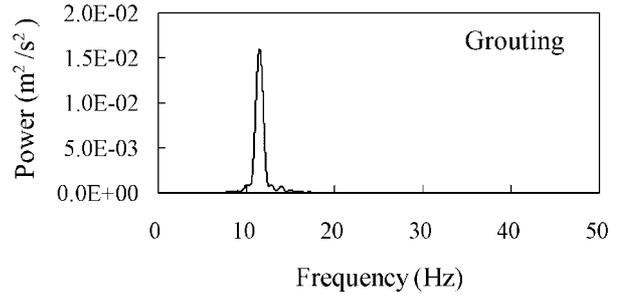


図-6 PC 鋼棒端部を半径方向に打撃したときのもう一端の半径方向速度のパワースペクトル

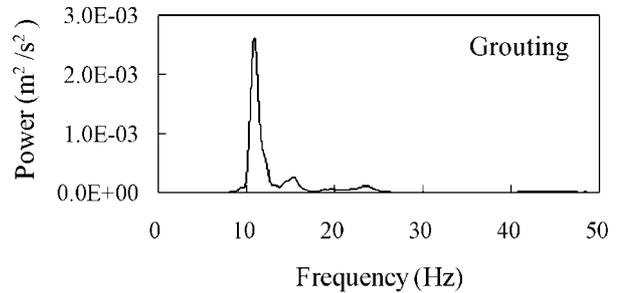


図-7 試験片中央部を打撃したときの PC 鋼棒端部の半径方向速度のパワースペクトル

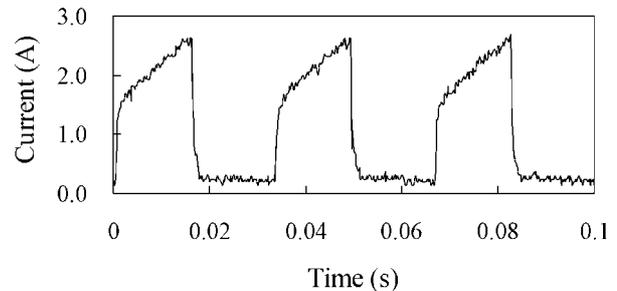


図-8 矩形電圧によって電磁石に流れる電流

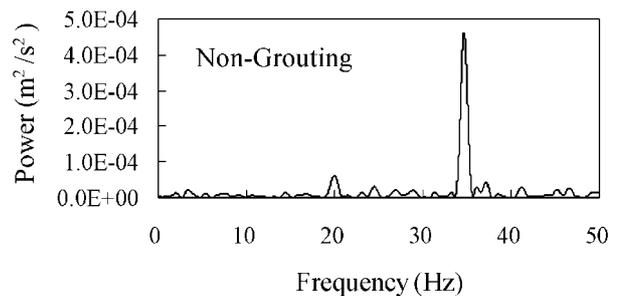


図-9 35Hz の磁力を入射したときの PC 鋼材端部の半径方向速度のパワースペクトル

5. 考察

5.1 磁力共鳴法

図-9や図-11の基となるPC鋼棒の端部における速度振幅のオーダーは、0.001 m/s程度である。この振動の加速度は、振動数が35Hzであることから、 0.22 m/s^2 程度である。この振動レベルは高精度の加速度ピックアップを用いれば計測可能なレベルである。

実際のPC鋼材は端部が頑強に固定されているので、端部での振動の大きさは本実験結果よりも小さくなるのが予想される。しかしながら、実際のPC鋼材は実験で用いたPC鋼棒より長さが十倍程度長い。そこで、たわみ振動の大きさも大きくなり、端部での振動計測が可能になると考えられる。

PC鋼材の端部における振動のレベルが低く、磁力強度を増す必要がある場合は、直流電流を用いた電磁石や永久磁石を用いる方法がある。

図-13は、永久磁石や定電流を用いた電磁石を回転させてPC鋼材を加振する例を示したものである。本研究で用いた電磁石に、高い電圧を架ければ、磁力を強くすることは可能であるが、コイルから膨大な熱が発生し連続的な計測は困難になる。一方、定電流では、コイルのインダクタンスが問題とならなくなるため低い電圧で強力な磁力を発生させることが可能になる。また、鉄心の磁気ヒステリシスによる損失がなくなりエネルギー効率も高くなる。

5.2 パルス電磁力音響法

高橋・橋本らは⁶⁾、パルス状の磁力を鉄筋コンクリートに入射し、鉄筋から発した弾性波（音響）を検査表面で測定して、鉄筋の腐食状態やかぶり厚さの測定する方法を提案している。この方法は、グラウトの未充填検査にも応用可能である。

パルス電磁力音響法をPCグラウトの未充填検査に用いる原理は以下の通りである。図-14に示すように、コイルを用いてパルス状の電磁力を入射すると、PC鋼材はパルス状の変位を生じる。グラウトが未充填である場合、PC鋼材が

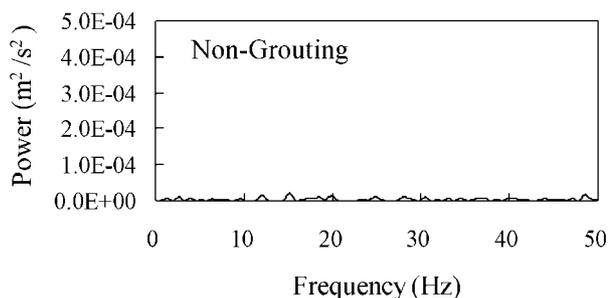


図-10 40Hzの磁力を入射したときのPC鋼材端部の半径方向速度のパワースペクトル。

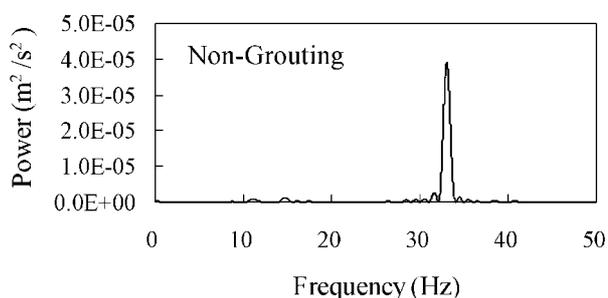


図-11 35Hzの磁力を入射したときのPC鋼材端部の軸方向速度のパワースペクトル

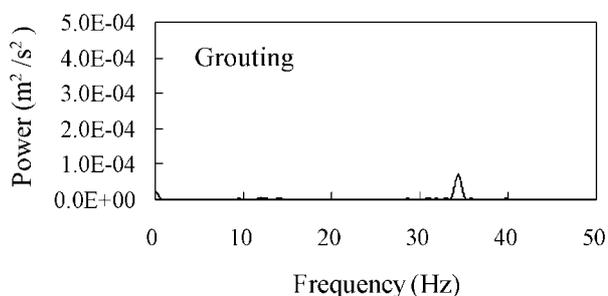


図-12 35Hzの磁力を入射したときのPC鋼材端部の半径方向速度のパワースペクトル

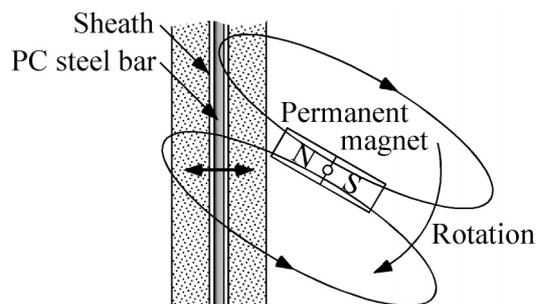


図-13 永住磁石を用いたPC鋼材の加振

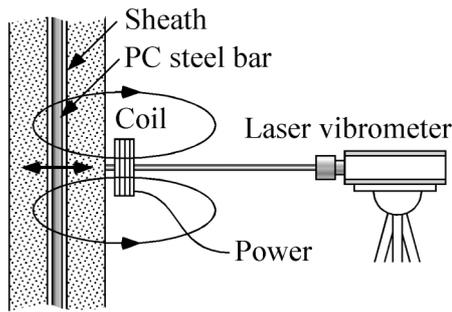


図-14 パルス電磁力音響法のPCグラウト未充填検査への適用例

振動してもその振動はシース管には伝わらず、弾性波が発生して検査表面に達することはない。

一方、グラウトがシース管に充填されている場合、PC鋼材のパルス状の変位によって弾性波が発生し、その弾性波はグラウトを通してシース管に伝わり、検査表面に達する。したがって、検査表面における振動を計測することによってグラウトの未充填検査が行えるわけである。

PC鋼材は、一般的にPC構造物の比較的深い位置に配置されており、磁気による加振が可能であるか問題であったが、本研究の結果、磁力によって20cmの深さにあるPC鋼材を振動させることが可能であったことから、このパルス電磁力音響法をPCグラウトの充填評価に利用できる可能性が見出せた。

パルス電磁力音響法をPCグラウトの未充填検査に用いる利点は、局所的なグラウトの未充填箇所を検出できることである。パルス音響法の問題点は、表面近くに施工されている鉄筋の影響である。電磁力は距離の二乗に反比例して減少することから、表面近くの鉄筋から大きな弾性波が発生する。この問題は、磁力入射の時間と検査壁面の振動が生じる時間のタイムラグを利用して解決することができると考えられる。

6. 結言

磁力によってPC鋼材を共鳴させて、鉛直グラ

ウトの未充填を検出する「磁力共鳴法」を提案し、以下の結論を得た。

- (1) グラウトが未充填であるものと充填してある400mm×500mm×600mmの立方体のPCコンクリート試験片を製作し、磁力で加振したところ、グラウトが未充填であるPC鋼材は、固有振動数において共鳴現象を生じた。
- (2) グラウト未充填のPC鋼棒の共鳴現象は、PC鋼棒端部の振動を計測することによって可能であった。
- (3) パルス状磁力によってPC鋼材を加振するパルス磁気共鳴法をグラウト未充填検査に摘要できる可能性が見出せた。

参考文献

- 1) 渡辺 健, 渡海雅信, 小阪浩二, 大津正康: インパクトエコー法の画像処理に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp.391-396, 2000
- 2) Ohtsu, M. and Watanabe, T.: Stack imaging of special amplitudes based on impact-echo for flaw detection, NDT & E international, Vol. 35, pp. 189-196, 2002
- 3) 鎌田敏郎, 浅野正則, 国枝 稔, 六郷恵哲: 弾性波特性パラメータを用いたPCグラウト充填評価法, 土木学会論文集, Vol. 61, No. 746, pp. 25-39, 2003
- 4) 国枝 稔, 鎌田敏郎, 浅野雅則, 六郷恵哲: PCグラウト充填評価における弾性波パラメータの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp.1589-1594, 2003
- 5) 慶 江虹, 鎌田敏郎, 浅野雅則, 六郷恵哲: 弾性波法によるPCグラウト充填評価の適用性に関する解析的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp.1899-1904, 2004
- 6) 高鍋雅則, 橋本光男: 鉄筋コンクリートの診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, Vol.52, No.11, pp. 628-632, 2003