

電磁的入力方法により励起されるシースおよび鋼棒の電磁場応答を用いた PC グラウト充填評価手法に関する基礎的検討

服部 晋一*1・木部 大紀*2・寺澤 広基*3・鎌田 敏郎*4

In this study, an electromagnetic impact method using electromagnetic responses to evaluate grouting conditions in PC grouted tendon ducts was investigated, where the diameters of PC sheaths were small and the depths of them were considerably deep or covering concrete was damaged with delamination and cracks. For observing the elastic response of sheath, and also the electromagnetic behavior both of sheath and PC bar, specially designed specimens were built where holes through concrete to the sheath were bored and several electric search coils were set on the sheath and PC bar. By applying large pulse current for exciting coil, pulsive magnetic field was generated around the sheath and PC bar. The elastic response of sheath and the electromagnetic response both of sheath and PC steel bar were measured with non-contact manner and compared. As a result, it was found that the elastic responses of sheath and PC bar are estimated quantitatively using the difference of the electromagnetic responses on the concrete between fully grouted part and imperfectly grouted part. Finally, it was considered that quick evaluation of imperfectly grouted conditions is possible using the electromagnetic responses on the concrete.

Keywords : PC grout, non destructive evaluation, electromagnetic impact method, electromagnetic response

1. はじめに

ポストテンション方式の PC 構造物において、シース内部のグラウト充填不足は、その安全性や耐久性に与える影響が大きい。そのため、当該構造物の点検では、シース内部のグラウトの充填状況を非破壊で適確に評価する手法の確立が望まれている。これに対して、これまで衝撃弾性波法など、弾性波を用いた非破壊評価手法の適用について数多くの研究・技術開発が行われ、現場での適用実績も報告されてきた。これらの手法では、PC 鋼材垂直方向に弾性波を伝播させる手法（インパクトエコー法）や、PC 鋼材軸方向に弾性波を伝播させる手法などがあり、周波数特性や弾性波伝播速度に着目してシース内部のグラウト充填状況を把握する処理を採用している^{1)~3)}。また、弾性波応答に音響伝達関数を導入し、充填部、未充填部の応答の差を評価する手法も提案されている⁴⁾。さらに、インパクトエコー法を基に、高周波で振幅の大きな弾性波を入力して、反射波の信号をスペクトルイメージング法により画像化する手法⁵⁾や、弾性波トモグラフィによりグラウトの充填状況を可視化しようとする研究⁶⁾も行われている。一方、最近ではこれらの機械的な入力方法に対し、電磁的入力方法によりシースに衝撃を与え、弾性波応答の大きさからグラウト充填状況を評価する手法も提案されている^{7, 8)}。しかしながら、シース埋設深さに対してシース直径が小さい

場合など、条件によっては、グラウト充填状況を十分に把握することが難しい課題がある。インパクトエコー法を用いたグラウト充填状況評価の適用範囲に関する研究事例においては、安定的に未充填を検出可能なかぶりは 100 mm 以下で、シース直径が 63 mm 以上の程度であるとの報告がなされている⁹⁾。さらに、かぶりコンクリート部分にひび割れや剥離などの変状がある場合は、弾性波の減衰や伝播経路の変化によりグラウト充填状況の評価が難しい場合がある。今後初期の PC 橋梁などへの点検を充実するなかで、検出方法のさらなる改善が求められている。

そこで、本研究では、電磁的入力によりシースおよび PC 鋼棒（以降、鋼棒とする）に衝撃を与え、これにより生じる振動に伴う電磁場応答を非接触で検出することにより、従来の衝撃弾性波法と比べて検査効率を大幅に向上させるグラウト充填評価手法¹⁰⁾の検討を行った。実験では、衝撃により発生する振動特性を高精度に制御できる電磁的入力方法を適用し、供試体中のシースの振動挙動を直接計測するとともに、シースおよび鋼棒の電磁場応答を計測した。実験で得られた結果から、シース内部のグラウト充填状況と振動挙動、および電磁場応答との関係を把握し、これらと、シースおよび鋼棒上で発生する振動特性の理論的解析結果とを比較して実験結果の妥当性を検証することによって、本手法の基礎検討を行うことを本研究の目的とした。

*1 Shinichi HATTORI : 大阪大学大学院 工学研究科 特任研究員

*2 Hiroki KIBE : 大阪大学大学院 工学研究科 博士前期課程

*3 Koki TERASAWA : 大阪大学大学院 工学研究科 助教

*4 Toshiro KAMADA : 大阪大学大学院 工学研究科 教授

2. 原 理

電磁的入力方法を用いた計測原理を図 - 1 に示す。パルス電流発生装置よりパルス状の励磁電流が励磁コイルに流され、励磁コイルにて急峻な磁場が励起される。この磁場によりシース、鋼棒に電磁力が作用し、シース、鋼棒に振動が発生する。グラウトが充填されている場合は鋼棒が拘束され振動は小さいが、グラウトが未充填であると振動が大きくなるため、これを検出することでグラウト充填状況を評価する。このシースの振動は、シースまで貫通した観察孔を通してレーザドップラ振動計 (LDV) で計測される。また、シース、鋼棒上の磁束密度は、シース、鋼棒それぞれに設置したサーチコイルにより検出される。さらに、コンクリート面上の磁束密度はコンクリート前面、および裏面に設置したサーチコイルにて検出される。

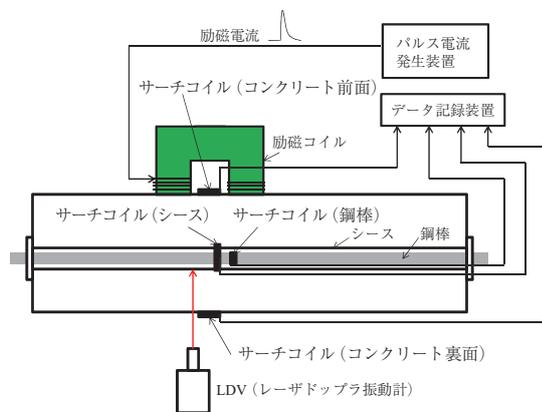


図 - 1 計測原理

3. 実験概要

シースの振動応答を直接観測し、その時発生する電磁場応答をコンクリート内部、コンクリート面で同時に計測することで、シースおよび鋼棒の振動挙動と電磁場応答の関係を明らかにすることとした。このため、効率良く磁場を励起できる電磁的入力装置を作製した。また、電磁誘導を利用してシース、鋼棒近傍で電磁場応答を検出できる電磁場応答検出回路を試作した。さらに、シースの充填状況を模擬するとともに、電磁場応答検出回路を埋設することにより、シースの振動応答、および、シース、鋼棒近傍の電磁場応答を直接検出可能とする供試体を作製した。

3.1 電磁的入力装置

写真 - 1 に電磁的入力装置の外観を示す。高透磁率で飽和時の磁束密度が大きい電磁鋼板をコの字型に積層した励磁コイルを適用し、パルス電流発生装置でパルス状の電流を流すことにより磁場を生成する。本実験において励磁コイルの巻き数は、片端あたり 8 ターンとしている。また、励磁コイル諸元を表 - 1 に示す。

3.2 電磁場応答検出回路

電磁場応答をシースおよび鋼棒上で検出するため、電磁場応答検出回路を供試体内部に設置した。具体的には、10 巻きのサーチコイルをシースおよび鋼棒に巻き付け、その

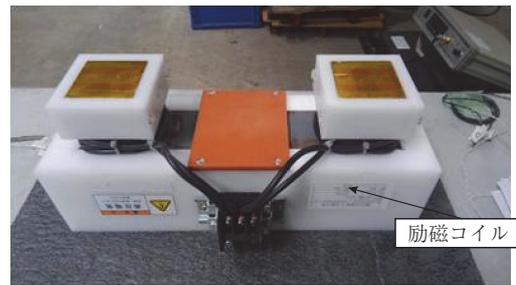


写真 - 1 電磁的入力装置

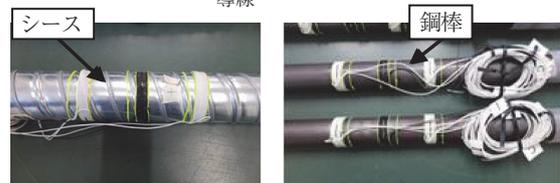
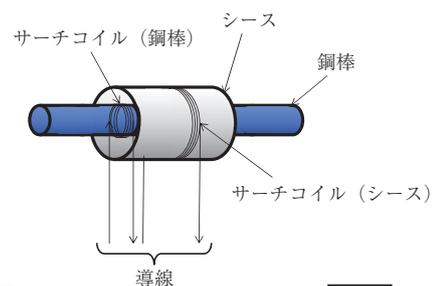
表 - 1 励磁コイル諸元

| 諸元 | 仕様 (mm) |
|------------|----------------|
| コイル寸法 | 200 × 100 × 50 |
| コイル断面 | 50 × 50 |
| コイル磁路長 | 300 |
| コイル巻数 (片端) | 8 ターン |

導線を供試体外部に引き出し、シース、鋼棒上で発生する磁束密度を誘導起電力により計測できるようにした。導線としては、外径 0.83 mm、線径 0.5 mm のビニル絶縁ビニルシースケーブルを使用した。シースに設置の導線はシースに沿って供試体上部に引き出し、鋼棒に設置の導線はシース内部を鋼棒に沿って鋼棒端部より引き出した。図 - 2 に電磁場応答を検出するサーチコイルの設置方法、および設置状況を示す。

3.3 供試体

サーチコイルを設置したシース、鋼棒より構成される PC 構造において、プレストレスをかけない状態で片方半分はグラウトを完全充填し、残りの半分はグラウトを充填しない完全未充填とした。このような充填状況を模擬するため、シース単体で鋼棒を通し、鋼棒の中央部でシースをシールした状態でグラウトを上方より充填することで片方



| | シース | 鋼棒 |
|----------|-----------|-----------|
| 線径 | φ 0.5 mm | φ 0.5 mm |
| サーチコイル巻数 | 10 | 10 |
| コイル抵抗 | 0.091 Ω/m | 0.091 Ω/m |

図 - 2 電磁場応答検出回路

を完全充填した。さらにグラウト硬化後、グラウトを充填しないシースをジョイントにて接続し、2体のシースを1体として埋設することにより充填部、未充填部を施工した。ここで鋼棒は、供試体端面でナットをスパナで手締めすることにより固定した。これは、電磁的入力により生じる弾性波の挙動については、鋼棒の応力状態による影響は小さいと考えたためである。シース径、鋼棒径、およびかぶりの構成を表-2に示す。また、図-3に供試体の概要を示す。供試体の寸法は、縦545 mm × 横1000 mm × 奥行350 mmとした。シースは直径48 mm、厚さ0.3 mmの鋼製スパイラルシースとした。また、鋼棒は直径φ32 mmである。充填不足が発生しやすいPC桁端部における計測を想定し、コンクリート表面からシースまでのかぶりは150 mmとした。また、充填部、未充填部の中央部にφ20 mmのLDV観察孔を設けている。

3.4 計測概要

図-4(a)に電磁的入力方法での計測状況を示す。2軸方向に移動可能な計測架台に電磁的入力装置を搭載している。励磁コイルは、シース直上のコンクリート表面近傍(以降、コンクリート面上とする)で、2つのコイル端面の中心位置とシースの充填部、未充填部の中心位置が一致するよう位置決めした。パルス電流発生装置の電圧は900 Vとし、静電容量は1000 μFを使用した。パルス電流のピーク値は3400 Aであった。コンクリート内部の磁束密度は、シースおよび鋼棒に設置したサーチコイルで受信することで計測した。また、シースの振動は、レーザー光をLDV観察孔を通してシース表面に照射し、その反射光をLDVで受信し計測した。一方、コンクリート面近傍の磁束密度は図-4(b)に示すサーチコイルで受信した。コンクリート面のサーチコイルは巻数5ターンで直径φ20 mmを使用した。いずれの計測条件においても計測回数は3回とし、受信した信号はデータ数10000点、サンプリング間隔1 μsの時刻歴応答波形として波形収集装置に記録した。

4. 実験結果

4.1 シースの振動応答

図-5にLDV観察孔を通して得られたシースのLDV応答を示す。計測点は、シース裏面側で、供試体裏面から深さ152 mmの位置にある。図において、灰色線は充填部、

表-2 シース、鋼棒、かぶりの構成

| シース径 | 鋼棒径 | かぶり |
|-------|-------|--------|
| 48 mm | 32 mm | 150 mm |

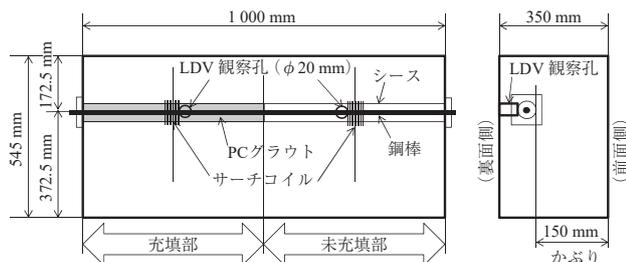
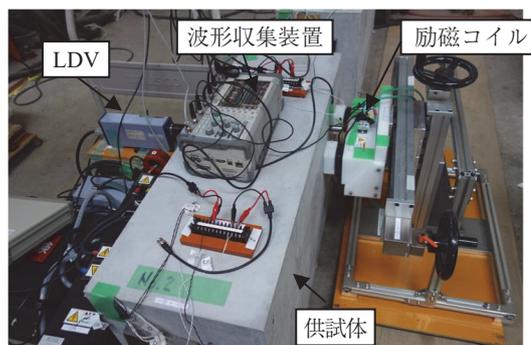


図-3 供試体の概要



(a) 計測状況



| 諸元 | |
|-------|--------|
| コイル巻数 | 5 ターン |
| コイル直径 | φ20 mm |

(b) サーチコイル (コンクリート面上)

図-4 実験概要

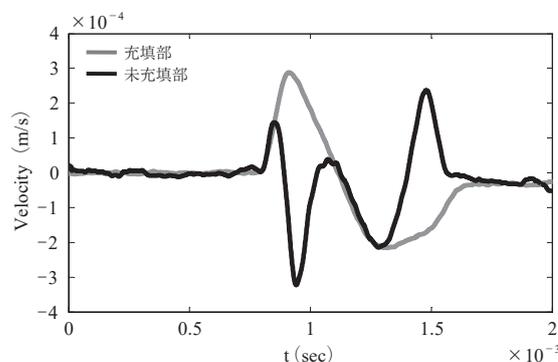


図-5 時刻歴応答波形 (シース上のLDV応答)

黒線は未充填部の磁束密度を示している。図より、充填部、未充填部でLDVの応答が明らかに異なっていることが分かる。充填部においては、2つのピークが存在し、未充填部においては、5つのピークが存在する。これより、電磁的入力によりコンクリート内部のシースでは、振動が発生し、しかも充填部、未充填部において異なる振動挙動を示すことが分かった。

4.2 電磁場応答

(1) コンクリート内部の磁束密度

次に、コンクリート内部、コンクリート面上の電磁場応答を示す。磁束は、サーチコイルの誘導起電力から式(1)にて算出した。また、磁束密度は式(2)より算出した。

$$\Phi = -\frac{1}{N} \int V dt \quad (1)$$

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2)$$

ここで、Φ:磁束 (Wb)、V:サーチコイルに発生する誘導起電力 (V)、N:サーチコイル巻数、B:磁束密度 (T)、S:サーチコイル面積 (m²) である。

図-6は、かぶり150 mmにおける充填部、未充填部のシース、鋼棒表面近傍の磁束の時刻歴応答を示している。

図において、実線はシース近傍の磁束であり、破線は鋼棒近傍の磁束を示している。また、灰色線は充填部、黒線は未充填部の磁束を示している。シース近傍の磁束は、シース上のサーチコイルから得られた磁束から鋼棒上のサーチコイルの磁束を差し引いた値で示している。本グラフより、シース近傍の磁束は、未充填部に対して充填部がピーク時の振幅比で約5%程度大きくなるが、鋼棒近傍の磁束は充填部、未充填部でほぼ同じ応答を示すことが分かる。これより、磁場によるシース、鋼棒への作用は、充填部と未充填部においておおむね同レベルであることがわかる。また、シース近傍での磁束は $t = 1.1 \times 10^{-3} \text{sec}$ 付近で飽和に至り、その後鋼棒の磁束が $t = 1.4 \times 10^{-3} \text{sec}$ 付近でピークとなった。これは、シースにおいて外部から磁場の侵入を遮蔽する磁気遮蔽効果が表れ、シースが飽和に近づくことで内部に磁場が侵入し始め、その後ピークを迎えたためであると考えられる。シースの磁束が飽和に近づくことと鋼棒にも磁束が流れ始めていることから、磁場の一部がシースを透過して鋼棒に流れていることが分かる。

(2) コンクリート面上の磁束密度

図 - 7 は、充填部、未充填部のコンクリート面上における磁束密度の時刻歴応答を示している。図において、灰色線は充填部、黒線は未充填部の磁束密度を示している。図 - 7(a) では、未充填部に対して充填部がピーク時の振幅比で約16%程度大きくなることが確認された。また、図 - 7(b) では、未充填部に対して充填部がピーク時の振幅比で約50%程度大きくなることが分かった。充填部、未充填部にかかわらずコンクリート面に対するシース、鋼棒の位置関係が同一であるため、シース近傍における磁束とコンクリート面上の磁束密度は比例関係にあると考えられるが、図 - 7(a), (b) のいずれにおいても、充填部、未充填部で磁束密度の振幅比はシース近傍の磁束の振幅比より大きくなっている。このことから、シース、鋼棒に透過した磁束により電磁力が作用し、この影響がコンクリート面上で磁束密度の応答の差として表れたと推察される。

4.3 充填部と未充填部の振動応答の差異

図 - 8 に充填部、未充填部における振動応答の差異を示す。図 - 8(a) は、図 - 5 に示す充填部、未充填部におけるLDV 応答の差を求めたものである。LDV 応答は速度で得られるため、図 - 8(a) のグラフは、充填部、未充填部

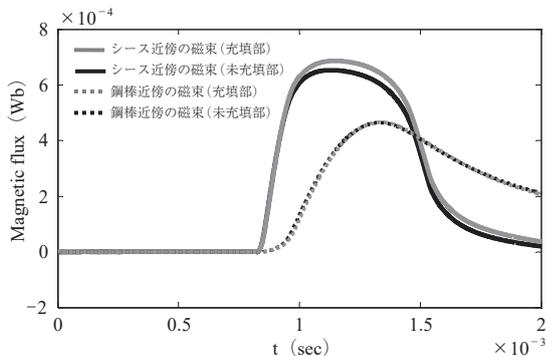


図 - 6 時刻歴応答波形 (コンクリート内部の磁束)

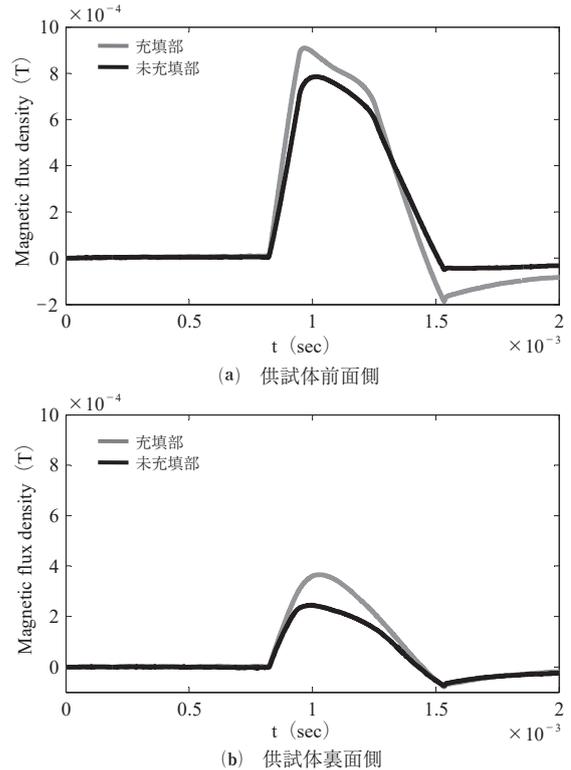


図 - 7 時刻歴応答波形 (コンクリート面上の磁束密度)

における速度応答の差を表している。一方、図 - 8(b) は、図 - 8(a) で得られた速度応答の差を微分し、充填部、未充填部における加速度応答の差を求めたものである。なお、微分演算においては演算ノイズを低減するため、250 Hz のローパスフィルタを適用するとともに遅延補正を行った。

速度応答の差では2箇所ピークが表れるのに対し(図 - 8(a))、加速度応答の差では4箇所ピークが表れることがわかる(図 - 8(b))。これらは、充填部、未充填部における振動挙動の差異を示しており、電磁力の作用が充填部と未充填部で異なっていることを示している。

4.4 加速度応答とシース・鋼棒の電流との関係

加速度応答における充填部と未充填部の差が明らかになったので、この応答とシースの表面近傍を流れる電流、および鋼棒の表面近傍を流れる電流との関係を評価した。図 - 9 に充填部、未充填部における加速度応答の差とシース、鋼棒の表面近傍に流れる電流の関係を示す。電流については、凡例に示したとおり、シースの表面近傍に流れる電流を“シースに流れる電流”、鋼棒の表面近傍を流れる電流を“鋼棒に流れる電流”とした。図中実線がシースの、破線が鋼棒に流れる電流を示す。グラフより、加速度応答の差におけるピーク位置 F1、および F4 は、シースに流れる電流のピーク位置とそれぞれ良い一致を示すことがわかる。また、ピーク位置 F2 は、鋼棒に流れる電流のピーク位置と良く一致することがわかる。一方、加速度応答に差異が発生する時点 (F1, F2, F3, F4) で、充填部と未充填部でシース、鋼棒にはほぼ同じ電流が流れていることから、充填部と未充填部に作用する電磁力もほぼ同じ大きさであ

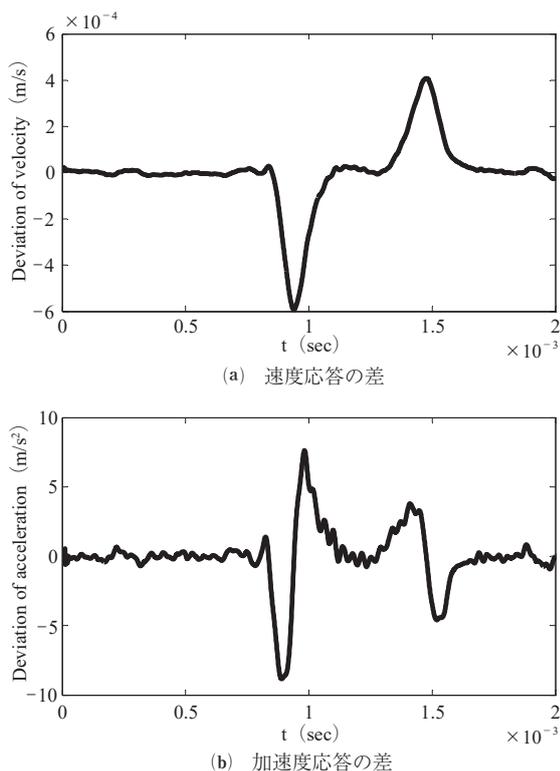


図 - 8 時刻歴応答の差
(速度応答, 加速度応答の差)

り, 電磁力の作用で発生する振動応答は, 充填部と未充填部におけるグラウト充填状況に起因する拘束条件の差異により異なった挙動を示したと考えられる。なお, 図 - 6 ではシース近傍の磁束に充填部と未充填部で差があったが, 図 - 9 のシースに流れる電流では充填部と未充填部

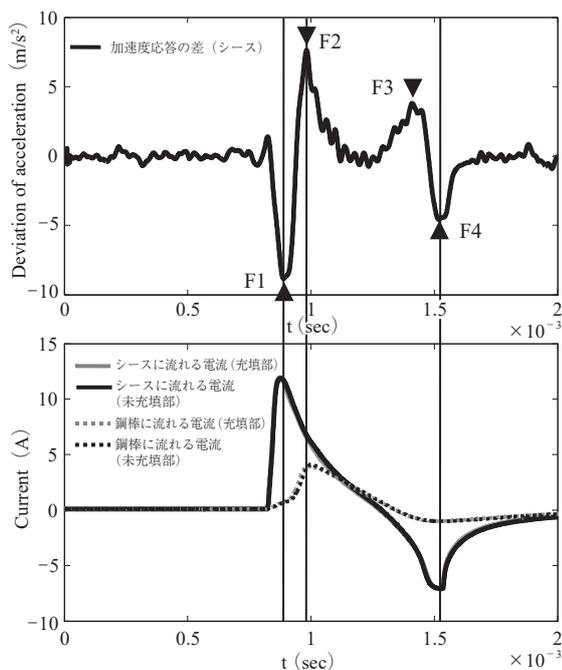


図 - 9 時刻歴応答
(加速度応答の差とシース・鋼棒の電流との関係)

で差が無いように見えるのは, 式(1)に示す関係があるため, シースに流れる電流を積分して得られる磁束が, より差を大きく示す結果となったためと考えられる。

5. 考 察

5.1 シース・鋼棒に作用する電磁力

4.4 より, 加速度応答の差とシース・鋼棒に流れる電流との関係が明らかになった。本節では, シース・鋼棒に流れる電流とシース・鋼棒に作用する電磁力の関係を理論的に考察する。図 - 10 は, シース・鋼棒に作用する電磁力を模式的に示している。図中の灰色の矢印は, シースおよび鋼棒に流れる電流とその位置における磁束密度で作用する電磁力を示している。また, 黒い矢印は, シースおよび鋼棒に流れる電流間で作用する電磁力を示している。これらの電磁力は, 電磁気学の知見より, 式(3)~式(5)で表される¹¹⁾。

$$F_{sh} = i_{sh} \times B_{sh} \tag{3}$$

$$F_{st} = i_{st} \times B_{st} \tag{4}$$

$$F_{sh-st} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{d} i_{sh} \cdot i_{st} \tag{5}$$

ここで, F_{sh} :シースに作用する単位長さあたりの電磁力, i_{sh} :シースに流れる電流, B_{sh} :シース近傍の磁束密度, F_{st} :鋼棒に作用する単位長さあたりの電磁力, i_{st} :鋼棒に流れる電流, B_{st} :鋼棒近傍の磁束密度, F_{sh-st} :シースに流れる電流と鋼棒に流れる電流間で作用する単位長さあたりの電磁力, μ_0 :真空の透磁率, d :シース・鋼棒間の距離を示している。

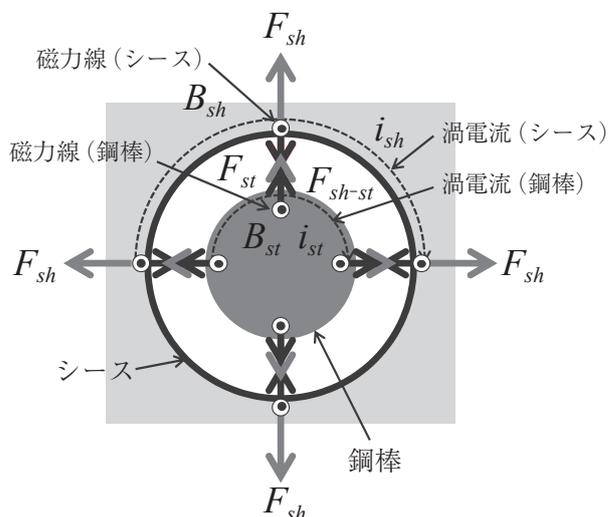


図 - 10 シース・鋼棒に作用する電磁力

これらの電磁力がシースおよび鋼棒に作用することで充填部, および未充填部に振動挙動の差異が表れる理由につき, 以下に考察する。図 - 11 は, 充填部, 未充填部におけるシースの断面を示している。充填部においてはグラウトが充填されており, 未充填部においてはグラウトが充填されていない。このため, 充填部においてはシース・鋼棒間にグラウトが存在することでシース, 鋼棒が拘束され,

電磁力による変位が発生しにくいと考えられる。一方、未充填部においてはシース・鋼棒間に空隙が存在することで、電磁力による変位が発生しやすい。このため、電磁力の応答が変化し、速度応答、および加速度応答に差異が発生したと考えられる。そこで、充填部、未充填部における電磁力の差を理論的に考察した。

$$\Delta F_{sh} = i_{sh} \times \Delta B_{sh} + B_{sh} \times \Delta i_{sh} + \Delta i_{sh} \times \Delta B_{sh} \quad (6)$$

$$\Delta F_{st} = i_{st} \times \Delta B_{st} + B_{st} \times \Delta i_{st} + \Delta i_{st} \times \Delta B_{st} \quad (7)$$

ここで、 ΔF_{sh} ：充填部、未充填部のシースに作用する単位長さあたりの電磁力の差、 ΔB_{sh} ：充填部、未充填部のシース近傍の単位長さあたりの磁束密度の差、 Δi_{sh} ：充填部、未充填部のシースに流れる単位長さあたりの電流の差、 ΔF_{st} ：充填部、未充填部の鋼棒に作用する単位長さあたりの電磁力の差、 ΔB_{st} ：充填部、未充填部の鋼棒近傍における単位長さあたりの磁束密度の差、 Δi_{st} ：充填部、未充填部の鋼棒に流れる単位長さあたりの電流の差である。

式(6)は、充填部のシースにおいて単位長さあたりに作用する電磁力(F_{sh})と、未充填部のシースにおいて単位長さあたりに作用する電磁力(F_{sh}')の差(ΔF_{sh})を算出したものである。この電磁力の差は、空隙が存在することで充填部と未充填部のシースに変位が発生したため生じたものである。ここで、式(6)で作用する電磁力の関係を図-12(a)に示す。図において、①、②で示される電磁力は、それぞれ式(6)において第1項と第2項で表される電磁力である。一方、図よりこれらの電磁力はそれぞれシースの変位方向と逆方向に作用することが分かる。このため、充填部、未充填部において電磁力の差異として作用する電磁力は、主として③で示される電磁力であり、式(6)においては第3項に対応する。これより、シースの振動に寄与する電磁力は、充填部と未充填部の磁束密度の差と、充填部と未充填部に流れる電流の差の積で得られることが分かる。

また、式(7)は、充填部の鋼棒において単位長さあたりに作用する電磁力(F_{st})と、未充填部の鋼棒において単位長さあたりに作用する電磁力(F_{st}')の差(ΔF_{st})を算出したものである。この電磁力の差も、空隙が存在することで充填部と未充填部の鋼棒に変位が発生したため生じたものである。ここで、式(7)で作用する電磁力の関係を図-12(b)に示す。図において、①、②、③で示される電

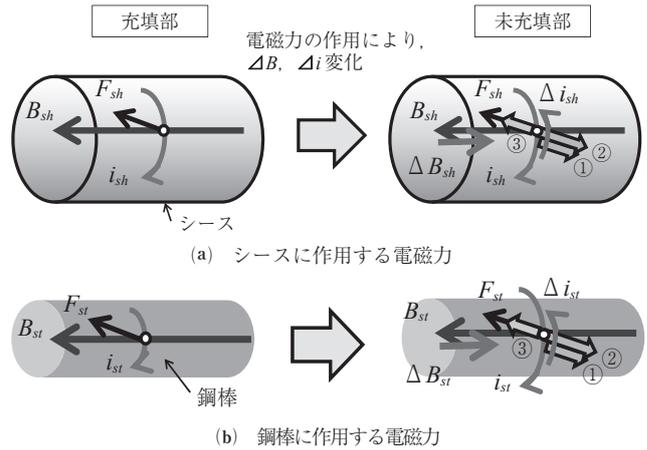


図 - 12 シース、鋼棒に作用する電磁力

力の関係は、シースの場合と同様である。これらより、シース、鋼棒の振動に寄与する電磁力は、充填部と未充填部の磁束密度の差と、充填部と未充填部に流れる電流の差の積で得られることが分かる。

5.2 コンクリート面上の電磁場応答と電磁力の関係

図-13は、図-7で示したコンクリート面上における磁束密度を用いて充填部、未充填部における時刻歴応答の差を算出したものである。図中灰色線は、供試体前面側の磁束密度の差であり、黒線は供試体裏面側の磁束密度の差である。グラフより、供試体前面側の磁束密度の差と供試体裏面側の磁束密度の差には応答に明確な違いが見られる。

一方、コンクリート面上での電磁場応答は、コンクリート内部の電磁場応答と相互誘導の関係があることが電磁気学より知られている。図-14にコンクリート面上の電磁場応答とコンクリート内部の電磁場応答の関係を模式的に示す。励磁コイルに励磁電流が流れることにより、供試体表面、シース、鋼棒、供試体裏面に磁束が流入する。一方、この磁束の変化によりシース、鋼棒に渦電流が流れることで、供試体表面、および供試体裏面に磁束が生成される。これらの関係は、式(8)、式(9)、式(10)、式(11)により表される¹²⁾。

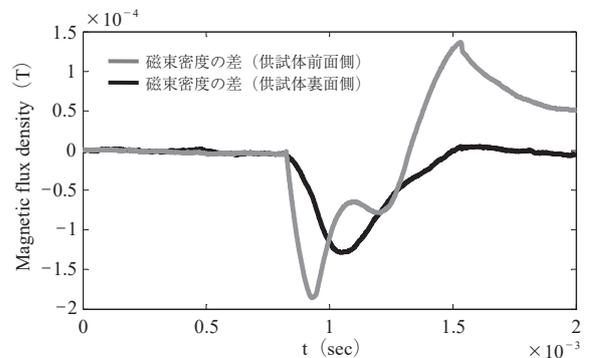


図 - 13 時刻歴応答 (コンクリート面上の磁束密度の差)

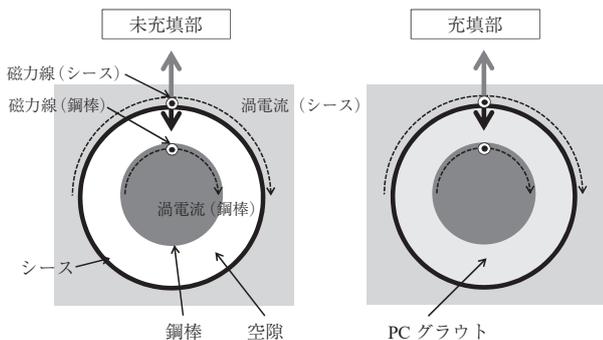


図 - 11 シース・鋼棒に作用する電磁力

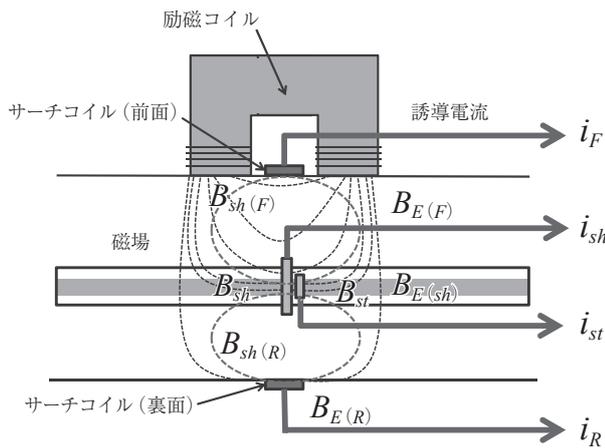


図 - 14 コンクリート面上の電磁場応答と
コンクリート内部の電磁場応答の関係

$$i_F = -\frac{N_2 S_2}{r_2} \frac{\partial}{\partial t} (B_{sh(F)} + B_{st(F)} + B_{E(F)}) \quad (8)$$

$$i_{sh} = -\frac{N_1 S_1}{r_1} \frac{\partial}{\partial t} (B_{sh} + B_{E(sh)}) \quad (9)$$

$$i_{st} = -\frac{N_1 S_1'}{r_1} \frac{\partial}{\partial t} (B_{st} + B_{E(st)}) \quad (10)$$

$$i_R = -\frac{N_2 S_2}{r_2} \frac{\partial}{\partial t} (B_{sh(R)} + B_{st(R)} + B_{E(R)}) \quad (11)$$

ここで、 i_F ：供試体前面側のサーチコイルに流れる電流、 i_{sh} ：シースに流れる電流、 i_{st} ：鋼棒に流れる電流、 i_R ：供試体裏面側のサーチコイルに流れる電流、 $B_{sh(F)}$ ：シースに流れる電流が供試体表面に生成する磁束密度、 $B_{st(F)}$ ：鋼棒に流れる電流が供試体表面に生成する磁束密度、 $B_{E(F)}$ ：励磁コイルの電流が供試体表面に生成する磁束密度、 B_{sh} ：シース近傍の磁束密度、 B_{st} ：鋼棒近傍の磁束密度、 $B_{E(sh)}$ ：励磁コイルの電流がシース近傍に生成する磁束密度、 $B_{E(st)}$ ：励磁コイルの電流が鋼棒近傍に生成する磁束密度、 $B_{sh(R)}$ ：シースに流れる電流が供試体裏面に生成する磁束密度、 $B_{st(R)}$ ：鋼棒に流れる電流が供試体裏面に生成する磁束密度、 $B_{E(R)}$ ：励磁コイルの電流が供試体裏面に生成する磁束密度、 N_1 ：シース上のサーチコイルの巻数、 N_2 ：コンクリート面上のサーチコイルの巻数、 S_1 ：シース上のサーチコイルの断面積、 S_1' ：鋼棒上のサーチコイルの断面積、 S_2 ：コンクリート面上のサーチコイルの断面積、 r_1 ：シース上のサーチコイルの抵抗、 r_2 ：コンクリート面上のサーチコイルの抵抗である。

式(8)～(11)より、コンクリート面上に設置したサーチコイルで受信される誘導電流は、シースおよび鋼棒近傍の磁束密度と励磁コイルの電流による磁束密度が、異なる成分比で結合した磁束密度による誘導電流であることが分かる。このため、式(8)、式(11)を用いてコンクリート面上の誘導電流を積分して磁束密度を算出することで、シースおよび鋼棒近傍の磁束密度を成分として含む磁束密度が得られると考えられる。そこで、式(3)で示されたシースに作用する電磁力を推定するため、供試体前面側のサーチコイルに流れる充填部と未充填部の誘導電流の差と、これを積

分することで得られる供試体前面側における充填部と未充填部の磁束密度の差の積（以降、誘導電流の差と磁束密度の差の積）を求め、シースの加速度応答の差との関係性を評価した。図-15に結果を示す。波形の前半（区間-1）は正の相関、波形の後半（区間-2）は負の相関を示すが、図より加速度応答の差のピーク位置（F1）と供試体前面側の誘導電流の差と磁束密度の差の積のピーク位置（G1）が一致することが分かった（図-15上図、中図）。

同様に、供試体裏面側のサーチコイルに流れる誘導電流の差と磁束密度の差の積を求め、シースの加速度応答の差との関係性を評価した結果を図-15（上図、下図）に示す。図より加速度応答の差のピーク位置（F2）と供試体裏面側の誘導電流の差と磁束密度の差の積のピーク位置（G2）が一致することが分かった。以上より、シース・鋼棒の振動応答は、コンクリート面上の磁場応答から推定できることが分かった。

一方、充填部において計測された3つの計測データのうち2つの計測データを選択し、これらの2つの計測データ間において、コンクリート面上の誘導電流の差と磁束密度の差の積を求め、シースの加速度応答の差との関係性を評価

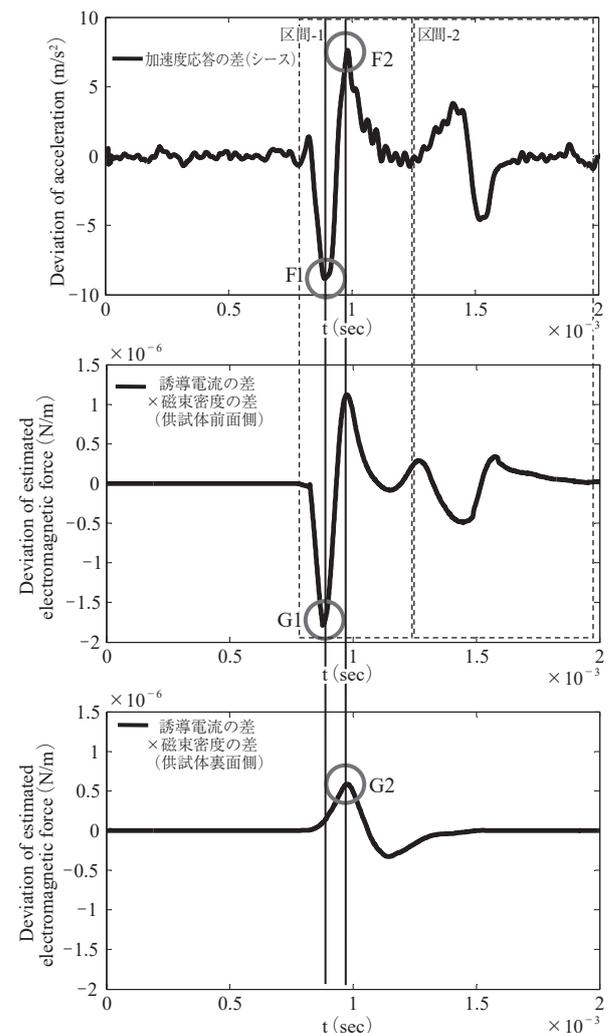


図 - 15 加速度応答の差とコンクリート面上の
電磁場応答（充填部・未充填部間）

した結果を図 - 16 (上図, 下図) に示す。この場合は、シースの加速度応答の差も、コンクリート面上の誘導電流の差と磁束密度の差の積も非常に小さな応答となり、振動挙動に差異がないことが分かる。これらの結果より、充填部のコンクリート面上の誘導電流の差と磁束密度の差の積を参照データとすることで、対象とする部位の充填状況が評価できることが分かる。

グラウト充填状況を評価する評価指標としてコンクリート面上の誘導電流の差と磁束密度の差の積のピーク値を用いて充填状況の評価を行った。充填部において計測された3つのデータを充填部における参照データ1, 2, 3とし、未充填部において計測された3つのデータを未充填部におけるデータ4, 5, 6とした。充填部における参照データ1, 2, 3と未充填部におけるデータ4, 5, 6を組合せた評価条件を表 - 3 に示す。ケース1～3を充填部間の評価とし、ケース4～6を充填部・未充填部間の評価とした。このような評価条件で得られた結果を図 - 17 に示す。供試体前面側の誘導電流の差と磁束密度の差の積のピーク値 (G1) の大きさは約 $2 \times 10^{-6} \text{ N/m}$ 程度であり、供試体裏面側のそのピーク値 (G2) の大きさは約 $5 \times 10^{-7} \text{ N/m}$ 程度であった。一方、充填部間における誘導電流の差と磁束密度

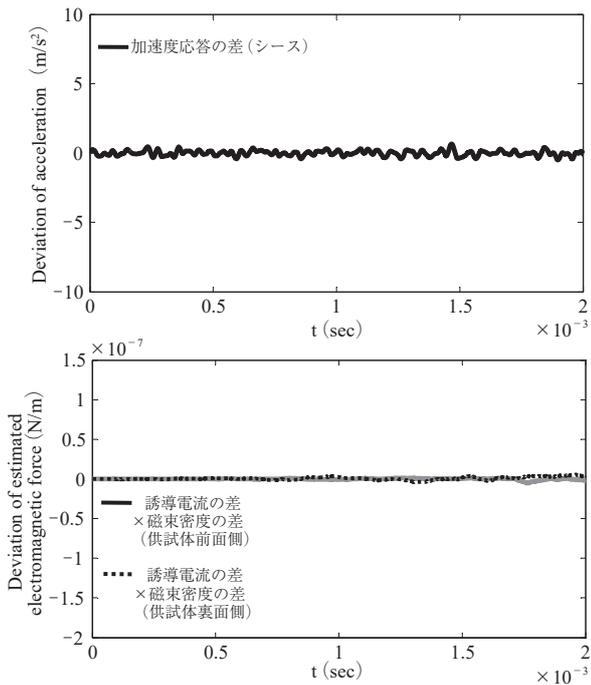


図 - 16 加速度応答の差とコンクリート面上の電磁場応答 (充填部間)

表 - 3 評価条件

| ケース | 参照データ | 評価対象 | 評価項目 |
|-----|-------|------|--------------|
| 1 | 1 | 2 | 充填部間評価 |
| 2 | 1 | 3 | |
| 3 | 2 | 3 | |
| 4 | 1 | 4 | 充填部・未充填部間の評価 |
| 5 | 1 | 5 | |
| 6 | 1 | 6 | |

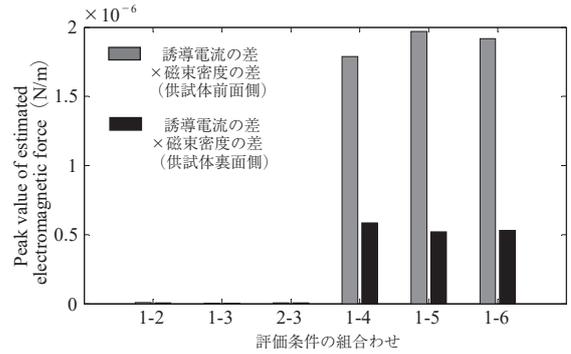


図 - 17 評価指標 (誘導電流の差×磁束密度の差)

の差の積のピーク値 (G1) の大きさも、供試体裏面側のそのピーク値 (G2) の大きさも約 $6 \times 10^{-9} \text{ N/m}$ 程度であった。このため、PCグラウトが充填されている箇所と未充填の箇所では、コンクリート面上の誘導電流の差と磁束密度の差の積のピーク値を用いて充填状況の評価が可能であることが明らかになった。

5.3 PCグラウトの非破壊評価への適用性

以上の考察により、PCグラウトが充填されている箇所と未充填の箇所では、シース・鋼棒の振動挙動に差異が発生することが明らかになった。また、このシース・鋼棒の振動挙動の差異は、コンクリート面上に設置したサーチコイルの受信信号のみから評価できる可能性が示された。

図 - 18 に本手法を非破壊評価システムとして構築した場合の構成例を示す。図中、充填部のコンクリート表面に設置したサーチコイルにより充填部の誘導電流を記録し、これから算出した磁束密度も記録する。次に、評価対象部となる位置でコンクリート表面に設置したサーチコイルにより充填部の誘導電流を記録し、これから算出した磁束密度も同じく記録する。これらの信号より、誘導電流の差、磁束密度の差を求め、これらの積を演算することにより、電磁場応答波形を推定する。最後にこれらのピーク値を評価指標として評価する。この結果、ピーク値の差が検出されることで未充填と判定する。

本手法は、コンクリート面に対して非接触での計測が可能であることから、従来の衝撃弾性波法と異なり、かぶりコンクリートの品質や表面の凹凸などの影響を受けないこ

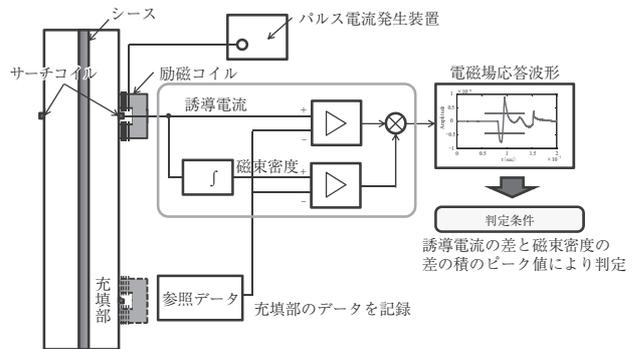


図 - 18 非破壊評価システムの構成例

とが分かる。これは、コンクリートの透磁率と空気の透磁率がほぼ同じであり、発生した磁場はコンクリート表面近傍で検出可能であるためである。ただし、シース近傍にひび割れが存在する場合は、シースや鋼棒の拘束条件が変化し、評価結果に影響を及ぼす可能性があり注意が必要である。

以上のような方式上の特長により、本手法の適用によりグラウト充填状況を評価可能なシース径やかぶりの適用範囲が拡大すると考えられるが、本研究ではシース径 48 mm、かぶり 150 mm を対象として評価を行った。シース径やかぶりの影響などについては今後の課題として継続して検討を進めていく必要がある。

一方、実際の構造物を想定すると、断面内に複数のシースが存在するケースもあり、本研究で対象とした単一のシースの場合とは異なる状況も考えられる。これら複数のシースが存在するケースについても、今後さらに検討を継続する予定である。

6. ま と め

本研究では、電磁的入力によりシースおよび PC 鋼棒に衝撃を与え、これにより生じる電磁場応答を非接触で検出することにより、コンクリート内部のシース、および鋼棒の振動挙動を把握することによってグラウト充填状況を評価する手法について基礎的検討を行った。以下に、得られた結果をまとめて示す。

- (1) 充填部、未充填部の加速度応答の差異は、コンクリート面上の磁束密度の差とコンクリート面上の誘導電流の差の積とに強い相関があることが分かった。
- (2) コンクリート内部のシース・鋼棒の振動挙動は、コンクリート面上の電磁場応答から推定できることが確認できた。
- (3) 電磁的入力方法を用いたうえで、コンクリート面上においてシースおよび PC 鋼棒からの電磁場応答を非接触で計測することで、シース内部のグラウト充填状況の評価を、従来の衝撃弾性波法と比較して、より迅速に行える可能性が示唆された。

謝 辞

本研究は、平成 29 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度の援助を受けて行ったものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Sansalone, M. and Streett, W.B.: Impact Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, 21, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, 1997.
- 2) 極壇邦夫, 境 友昭: 衝撃弾性波法による PC 橋梁シース管グラウトの充填度合の測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1899-1904, 2002.
- 3) 例えば, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 角田 蛸, 佐藤浩二: 実橋梁 PC 桁での非破壊試験による PC グラウト充填評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.238-250, 2012.
- 4) 例えば, 服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉: 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, 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, 第 14 巻, pp.707-714, 2014.
- 5) 山田雅彦, 渡海雅信, 中居陽子, 大津政康: SIBIE による PC グラウト未充填部の検出性能の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008.
- 6) 大澤 智, 塩谷智基, 木虎久人, 縦山好幸: 弾性波トモグラフィによる PC のグラウト充填評価, 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, 第 14 巻, pp.715-720, 2014.
- 7) 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, Vol.32, No.1, 2010.
- 8) 服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 朝倉 響, 寺澤広基: 弾性波の入力方法と PC グラウト未充填部の検出能力との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.239-250, 2017.
- 9) 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, 第 13 巻, pp.229-236, 2013.
- 10) 服部晋一, 木部大紀, 寺澤広基, 鎌田敏郎: 機械的/電磁的入力での弾性波とコンクリート中鋼材の電磁的応答を統合した PC グラウト非破壊評価手法のための基礎評価, 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, 第 18 巻, pp.243-248, 2018.
- 11) 後藤憲一, 山崎修一郎共編: 詳解電磁気学演習, 共立出版, pp.253-261, 2016.
- 12) 同上, pp.299-303.

【2018 年 12 月 10 日受付】