

論文 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

服部 晋一*1・木部 大紀*2・寺澤 広基*3・鎌田 敏郎*4

要旨：電磁的入力によりシースおよび PC 鋼棒に衝撃を与え、これにより生じる振動に伴う電磁場応答を非接触で検出することにより、グラウト充填評価を行う手法の評価を行った。実験において、供試体中のシースの振動挙動をレーザドップラ振動計で直接計測するとともに、サーチコイルでシースおよび鋼棒近傍の電磁場応答を計測した。また、供試体面における電磁場応答をサーチコイルで計測した。実験で得られた結果から、充填部、未充填部の供試体面において検出された誘導電流と、これより得られる磁束密度の積の差を評価指標として、かぶり 200mm 程度までの範囲で、PC グラウト充填状況の評価を行えることを明らかにした。

キーワード：PC グラウト、充填評価、非破壊評価、電磁的入力方法、電磁場応答、サーチコイル

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良は、その安全性や耐久性に与える影響が大きく、迅速で正確な非破壊評価手法が望まれている。このため、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多くの研究・技術開発が行われ、現場での適用結果が報告されてきた^{1)~3)}。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、グラウト充填状況を十分に把握することが難しいケースも報告されている。

このような状況を背景とし、本研究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迅速に検出できる PC グラウト充填評価手法を確立することを目的とした。本論文では、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と、シースおよび鋼棒近傍の電磁場応答の関係を把握するとともに、コンクリート面の電磁場応答を基に PC グラウト充填状況を評価した結果を示している。

2. 計測原理

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、これを電磁場応答により検出することでグラウト充填状況を評価する。このシ-

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) により計測し、シース、鋼棒近傍の磁束密度は、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する。さらに、供試体面の磁束密度は供試体前面、および裏面に設置したサーチコイルにて検出する。

3. 実験概要

シースの振動応答と、その時発生する電磁場応答を供試体内部、供試体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評価することとした。このため、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するサーチコイルを試作した。さらに、シースのグラウト充填状況を模擬するとともに、サーチコイルを供試体内部に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。また、シースの

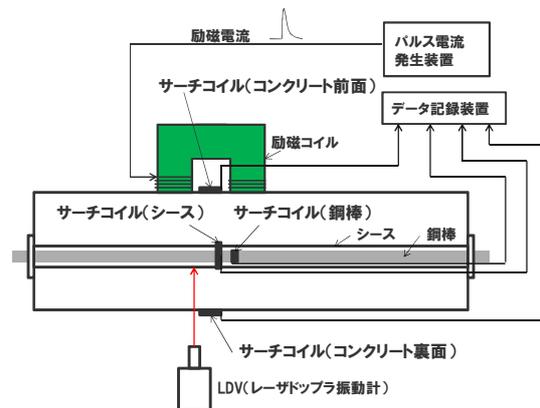


図-1 計測原理

*1 大阪大学 大学院工学研究科 特任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 大阪大学 大学院工学研究科 博士前期課程 (学生会員)

*3 大阪大学 大学院工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*4 大阪大学 大学院工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

かぶりが異なる供試体を製作し、かぶりにより変化する検出性能を評価した。

3.1 電磁的入力装置

図-2 に電磁的入力装置の外形、諸元、および外観を示す。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励磁コイルを製作した。コイル断面は50mm×50mm であり、磁路長は300mm とした。励磁コイルの巻き数は、片端当たり8ターンとしている。

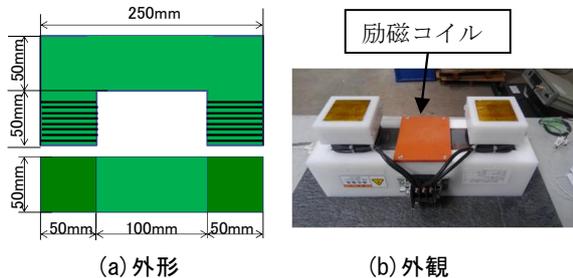
3.2 サーチコイル

電磁場応答をシースおよび鋼棒近傍で検出するため、サーチコイルを供試体内部に設置した。図-3 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。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0.83mm、線径0.5mm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。

3.3 供試体

図-4 に製作した供試体の概要を示す。供試体の寸法は、縦545mm×横1000mm×奥行350mm とした。シースは直径48mm、厚さ0.3mmの鋼製スパイラルシースとし、鋼棒は直径φ32mm とした(表-1)。供試体表面からシースまでのかぶりは150mm、200mm、250mm とした。また、充填部、未充填部の中央部にφ20mmのLDV観察孔を設けた。

シース、鋼棒は、サーチコイルを設置後、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



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

図-2 電磁的入力装置の概要

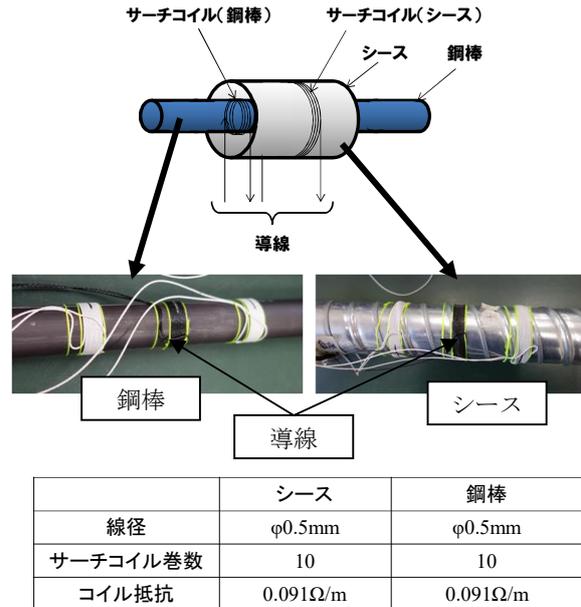


図-3 サーチコイル設置状況

表-1 シース、鋼棒、かぶりの構成

シース径	鋼棒径	かぶり
48mm	32mm	150, 200, 250mm

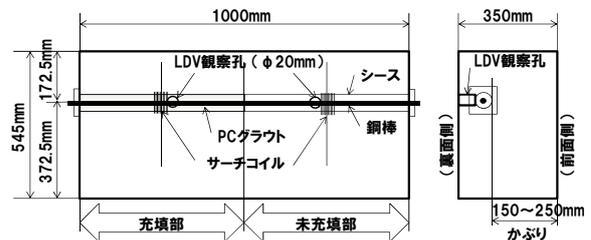
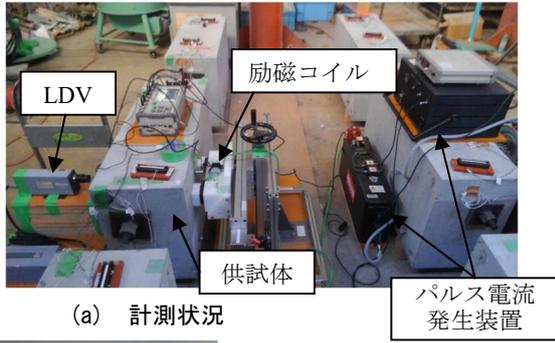


図-4 供試体の概要

片方を完全充填した。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。

3.4 計測概要

図-5 (a) に計測状況を示す。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、励磁コイルがシース直上の供試体表面に接した状態で、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静電容量は1000μFを使用し、パルス電流のピーク値は2500Aとした。供試体内部の磁束密度は、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面に照射し、その反射光をLDVで計測した。一方、供試体表面近傍の磁束密度は図-5 (b) に示すサーチコイルで受信した。供試体面のサーチコイルは巻数5ターンで直径φ20mmを使

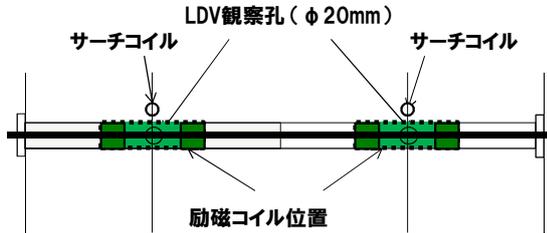


(a) 計測状況



(b) サーチコイル概要 (供試体面)

諸元	
コイル巻数	5ターン
コイル直径	φ20mm



(c) サーチコイル設置位置 (供試体面)

図-5 実験概要

用した。供試体前面側では、シース直上の供試体面で充填部、未充填部の中心位置から約 50mm 上方の位置に、供試体裏面では、LDV 観察孔の約 20mm 上方の位置にコイル面が供試体に接するように設置した。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 $1\mu s$ 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 シースの振動挙動

図-6 に、かぶり 150mm において LDV 観察孔を通して得られたシースの LDV 応答を示す。図において、青線は充填部、緑線は未充填部の時刻歴応答を示している。図より、充填部、未充填部で LDV の応答が異なり、電磁の入力によりシースで振動が発生し、充填部、未充填部において異なる振動挙動を示すことがわかる。

4.2 充填部と未充填部の振動応答の差異

図-7 に、かぶり 150mm の充填部、未充填部における振動応答の差異を示す。図-7(a) は、図-6 に示す充填部、未充填部における LDV 応答の差異を求めたものである。LDV 応答は速度で得られるため、図-7(a) のグラフは充填部、未充填部における速度応答の差を表している。一方、図-7(b) は、図-7(a) で得られた速度応答の

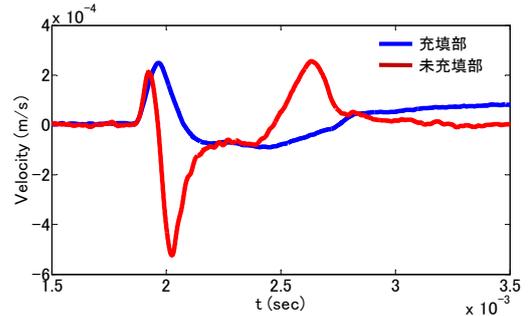
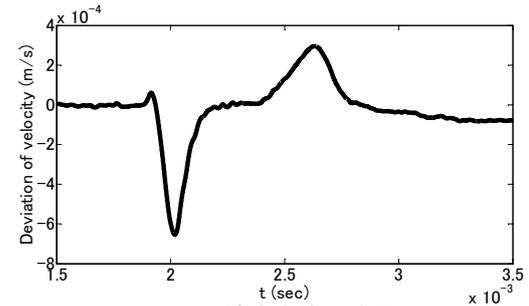
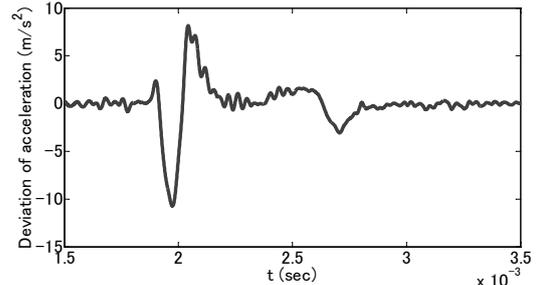


図-6 時刻歴応答波形 (シース面のLDV応答)



(a) 速度応答の差異



(b) 加速度応答の差異

図-7 時刻歴応答の差異 (かぶり150mm)

(速度応答, 加速度応答の差異)

差異を微分し、充填部、未充填部における加速度応答の差異を求めたものである。なお、微分演算時、演算に伴う演算ノイズを低減するため、250Hz 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。

加速度応答の差異 (図-7(b)) 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。

4.3 電磁場応答

(1) シース・鋼棒近傍の電磁場応答

次に、供試体内部の電磁場応答を示す。図-8(a) は、シース・鋼棒に設置したサーチコイルにより検出された誘導電流の時刻歴応答を示している。

図において、実線はシースに設置したサーチコイルの誘導電流であり、破線は鋼棒に設置したサーチコイルの誘導電流を示している。また、青線は充填部、緑線は未充填部の誘導電流を示している。本グラフより、シース近傍、鋼棒近傍いずれの場合も充填部、未充填部で電磁

場応答はほとんど同じであることがわかる。これより、励磁コイル磁場によるシース、鋼棒への作用は、充填部と未充填部において同レベルであることがわかる。

(2) 供試体面での電磁場応答

図-8(b), (c)は、供試体面に設置したサーチコイルの誘導電流、およびこれより算出された磁束密度の時刻歴応答を示している。ここで磁束密度は、サーチコイルの誘導起電力から式(1)、式(2)にて算出した。

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

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

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 (m^2) である。

図において、青線は充填部、緑線は未充填部の応答を示している。図-8(b)において、供試体前面における充填部、未充填部で誘導電流の応答は異なっている。また、図-8(c)においても、充填部、未充填部で磁束密度の応答は異なっている。これらより、供試体面では、シース、あるいは鋼棒の振動の影響が磁束密度の応答の差として表れていることがわかる。

(3) 供試体面での振動挙動の推定

図-9は、シース・鋼棒に作用する電磁力を模式的に示している。図中の赤色の矢印は、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)~(5)で表される⁵⁾。

$$F_{sh} = i_{sh} \times B_{sh} \quad (3)$$

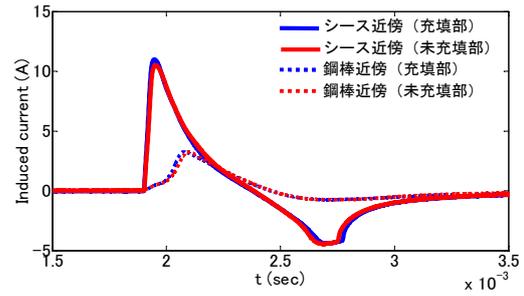
$$F_{st} = i_{st} \times B_{st} \quad (4)$$

$$F_{sh-st} = (\mu_0 / 2\pi d) i_{sh} \cdot i_{st} \quad (5)$$

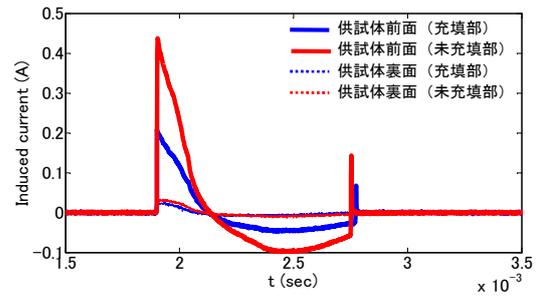
ここで、 F_{sh} : シースに作用する単位長さ当たりの電磁力, i_{sh} : シースに流れる電流, B_{sh} : シース近傍の磁束密度, F_{st} : 鋼棒に作用する単位長さ当たりの電磁力, i_{st} : 鋼棒に流れる電流, B_{st} : 鋼棒近傍の磁束密度, F_{sh-st} : シースに流れる電流と鋼棒に流れる電流間で作用する単位長さ当たりの電磁力, μ_0 : 真空の透磁率, d : シース・鋼棒間の距離を示している。

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と考えられる。一方、シース、鋼棒に流れる誘導電流は、シース、鋼棒の振動とともに、さらに二次的な磁場を周囲に生成し、この影響は供試体面に設置したサーチコイルにも及ぶことが相互誘導の現象として知られている。

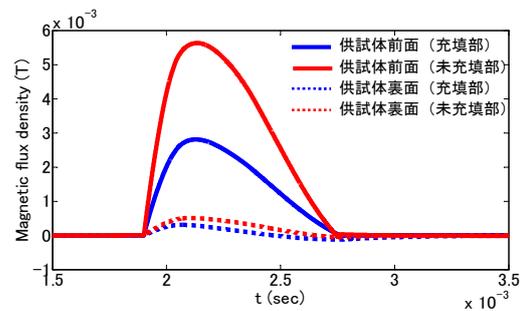
図-10は、供試体面のサーチコイルで検出される電磁



(a) シース・鋼棒近傍の誘導電流



(b) 供試体面の誘導電流



(c) 供試体面の磁束密度

図-8 時刻歴応答波形
(誘導電流・磁束密度)

場応答が、励磁コイルが生成する磁場と、シースおよび鋼棒近傍で二次的に生成された磁場と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を示したものである。これより、供試体面のサーチコイルで検出された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電磁場応答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)~式(5)で示された電磁力の影響を評価するため、供試体面のサーチコイルに流れる誘導電流と、これを積分することで得られる磁束密度の積（以降、供試体面の誘導電流と磁束密度の積）を充填部、および未充填部においてそれぞれ求め、これらの差異とシースの加速度応答の差異との関係性を評価した。

(4) 供試体面での電磁場応答とシースの振動挙動

図-11~図-13に結果を示す。かぶり 150mm においては、供試体面の誘導電流と磁束密度の積の差異は、供試体前面側も裏面側もほぼ同じ位置でピークを示すとともに、このピーク位置はシース上の加速度応答の差異の

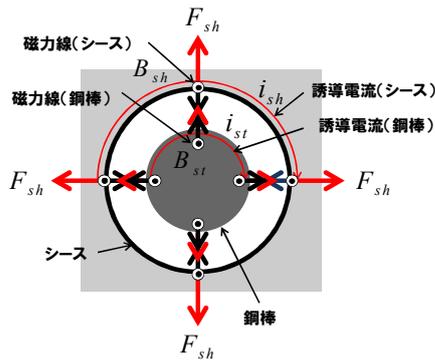


図-9 シース・鋼棒に作用する電磁力（理論）

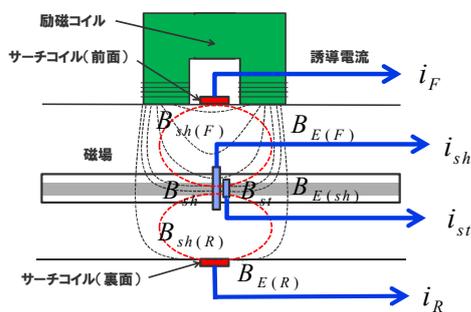


図-10 シース・鋼棒、および供試体面の電磁場応答の関係

ピーク位置とよく一致することがわかった（図-11）。次に、かぶり 200mm においては、供試体面の誘導電流と磁束密度の積の差異は、かぶり 150mm の場合より小さくなるとともに、供試体前面側と裏面側でピーク位置が若干変化した。（図-12）。また、かぶり 250mm においては、供試体面の誘導電流と磁束密度の積の差異は、かぶり 200mm の場合より大きくなり、供試体前面側と裏面側でピーク位置の符号が異なることが分かった。（図-13）。これらの結果より、いずれのかぶりにおいても、充填部、未充填部における加速度応答の差異が、供試体面の誘導電流と磁束密度の積の差異と相関があることがわかった。これらより、グラウト充填の有無で異なる振動挙動の影響が供試体面のサーチコイルで検出され、シース面の加速度応答の差異として推定されたものと考えられる。

5. PC グラウト充填評価

5.1 評価指標

供試体面の誘導電流と磁束密度の積の差異のピーク値は単位長さ当たりの電磁力の次元を持ち、見かけの電磁力に相当する。これを評価指標として、かぶりの異なる供試体において評価指標値を算出した。図-14 に結果を示す。図中棒グラフ上の棒線は、計測回数 3 回のデータより得られた標準偏差 σ により誤差範囲を示している。

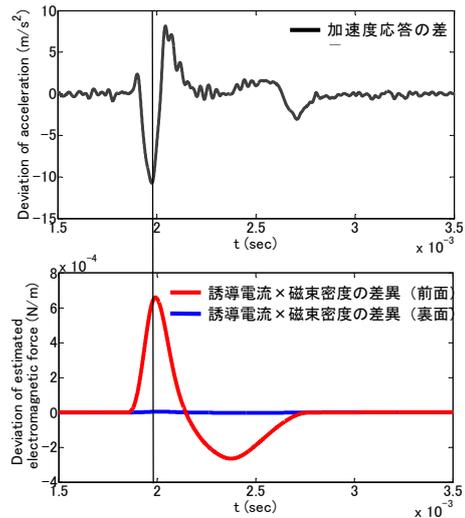


図-11 時刻歴応答の差異（かぶり150mm）

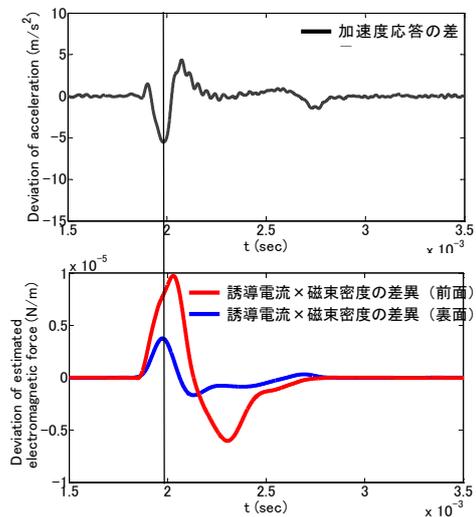


図-12 時刻歴応答の差異（かぶり200mm）

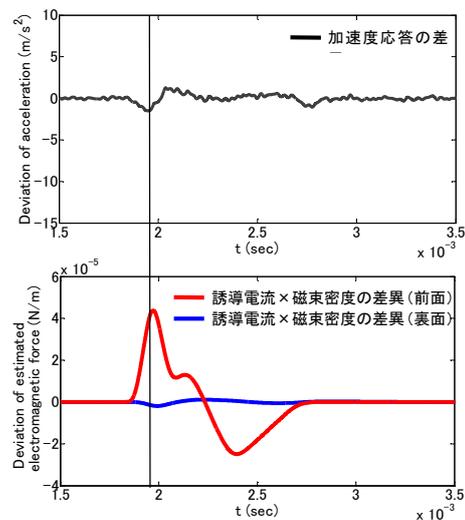
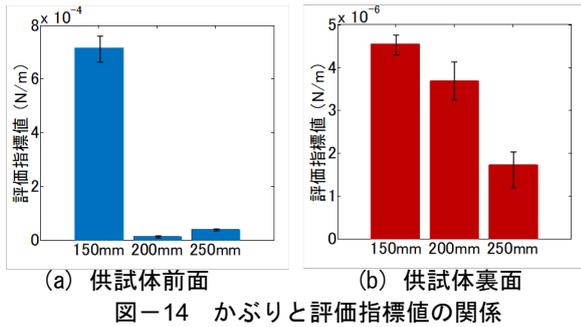


図-13 時刻歴応答の差異（かぶり250mm）

図より、供試体前面、裏面ともに、かぶりが大きくなる



につれて評価指標値は小さくなる傾向を示した。しかし、かぶり 250mm の供試体前面においては、かぶり 200mm よりも評価指標値が大きい結果となった。いずれのかぶりにおいても、供試体前面の評価指標が供試体裏面の評価指標より大きい値となった。

5.2 検出限界の評価

充填部において各かぶりにおいて計測された 3 点の計測データ間の評価指標値の平均値 m 、標準偏差 σ 、および検出限界を表-2 に示す。ここで検出限界値は、データのばらつきを考慮し $m+3\sigma$ とした。図-14 より、かぶり 150mm における評価指標値の大きさは、供試体前面側が $7.1 \times 10^{-4} \text{N/m}$ 、裏面側は $4.5 \times 10^{-6} \text{N/m}$ 程度であるため、かぶり 150mm の未充填部は供試体前面側、裏面側いずれにおいても検出可能であると判断される。次にかぶり 200mm における評価指標値の大きさは、供試体前面側が $1.3 \times 10^{-5} \text{N/m}$ 、裏面側が $3.7 \times 10^{-6} \text{N/m}$ 程度であるため、かぶり 200mm の未充填部は供試体前面側、裏面側も検出可能であるが、供試体裏面側においてより検出しやすいと考えられる。一方かぶり 250mm においては、供試体前面側で $4.0 \times 10^{-5} \text{N/m}$ 、裏面側で $1.7 \times 10^{-6} \text{N/m}$ 程度で、かぶり 200mm の場合よりも評価指標値が大きくなるが、検出限界値もかぶり 200mm の値より大きくなるため、供試体前面側で検出できる可能性があると考えられる。

表-2 充填部における計測点間の評価指標値

かぶり	150mm		200mm		250mm	
	前面	裏面	前面	裏面	前面	裏面
平均値 m (N/m)	6.24×10^{-6}	1.72×10^{-7}	3.02×10^{-6}	3.59×10^{-7}	5.54×10^{-6}	4.58×10^{-7}
標準偏差 σ (N/m)	2.18×10^{-6}	4.32×10^{-8}	1.40×10^{-6}	1.49×10^{-7}	2.63×10^{-6}	1.47×10^{-7}
検出限界 $m+3\sigma$ (N/m)	1.28×10^{-5}	3.01×10^{-7}	7.20×10^{-6}	8.07×10^{-7}	1.34×10^{-5}	9.00×10^{-7}

5.3 PC グラウト充填評価への適用性

以上の結果より、PC グラウト充填部と未充填の差異は、コンクリート面に設置したサーチコイルの受信信号のみから算出される評価指標により評価できる可能性が示された。このことから、本手法を PC グラウトの非破壊評価へ適用した場合、従来の衝撃弾性波法と比較し、コン

クリート内部のひび割れなどの影響を受けず、非接触で計測が可能であるため、効率的に PC グラウトの充填状況の評価できる可能性があると考えられる。

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、グラウト充填状況の評価する手法について検討を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) コンクリート面でサーチコイルにより計測される誘導電流と磁束密度の積の差異を評価指標として、シースの振動挙動と相関が高い評価値が得られることが明らかになった。
- (2) 充填部における計測点間の評価指標値より求めた検出限界値より、かぶり 200mm 程度までグラウト充填評価が可能であるとの結果を得た。
- (3) 供試体前面、および裏面の評価指標を組み合わせることにより、充填不良を検出可能なかぶりの範囲が増大する可能性があることが示唆された。

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) 例えば、鎌田敏郎、内田慎哉、角田瑠、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.
- 2) 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.
- 3) 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, 2017.1
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 同上、pp.299-303.