

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (1) 課 題 名：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開発
- (2) 研 究 期 間：平成 29～30 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：鎌田 敏郎（大阪大学・教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：鎌田 敏郎（大阪大学・教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：寺澤 広基（大阪大学・助教）  
服部 晋一（大阪大学・特任研究員）  
内田 慎哉（富山県立大学・准教授）  
三輪 秀雄（株式会社アミック・専務）  
芦塚 憲一郎（西日本高速道路株式会社・課長）  
横山 和昭（西日本高速道路株式会社・課長）
- (6) 補助金交付総額：19,500,000 円

(7) 技術研究開発の目的

コンクリート構造物の点検において、橋梁 PC 桁のシース内部のグラウト充填不良は、外観目視により把握することが困難であるにも関わらず、構造物の安全性や耐久性に与える影響は甚大であり、これらを非破壊で適確に検出する手法の確立が望まれている。このような背景の中、これまで、衝撃弾性波法など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増えつつある。しかしながら、たとえば、PC 桁のシース埋設深さに対してシース直径が小さい場合など、内部欠陥等の条件によっては、それら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。そこで、本研究では、衝撃により発生する弾性波を確実にシースに伝達させ、これにより欠陥等で発生する振動や、微小な電磁場の応答を同時に検出することで、検出能力が従来よりも格段に向上する PC グラウト非破壊評価手法の開発を行う。このため、弾性波の特性を高精度に制御できる機械的入力方法、および電磁的入力方法を開発するとともに、これらの入力方法を組み合わせ、弾性波の入力によりシース内部の鋼材で励起される電磁場の応答を高感度に検出できるセンサも同時に開発することにより、コンクリート内部の PC グラウト充填不良を、迅速に精度よく適確に抽出できる非破壊評価システムを構築することを目的とする。

(8) 技術研究開発の内容と成果

<研究開発の内容>

1) 弾性波の特性を精度良く抽出可能とする機械的、電磁的入力方法の開発

電気エネルギーを高効率で機械エネルギーに変換する電気機械変換手段を導入し、電子制御により衝撃入力を高精度で制御できる機械的入力装置を開発する。一方で、機械的入力方法と同程度の急峻な立ち上がりを有する電磁的入力装置を開発する。これらにより、埋設深さ 150～200mm、直径が 35mm 程度のシース内の PC グラウト充填状況を精度良く検出できる弾性波計測システムを構築する。

2) 機械的入力方法と電磁的入力方法との融合による信号検出性能の向上

機械的入力方法と電磁的入力方法で発生した弾性波の伝播特性の差異に着目した指標を

導入し、それぞれの方法の特性が検出能力を高める計測配置により、表面波、あるいは電磁ノイズの影響を低減させ、SN比の高い計測を実現可能とする。SN比低減目標：20dB以上。

### 3) 弾性波特性と電磁的応答の統合評価による欠陥の検出能力の改善

電磁的入力方法においてシース内部のPC鋼材から反作用として発生する微小磁場を検出する電磁場検出センサを開発し、弾性波特性と電磁的応答を統合評価することにより欠陥検出能力の改善を図る。

本技術開発により、シース長1m当たりのPCグラウト充填状況を1分で検査できることを可能とする。

<研究開発の成果>

## ①弾性波の特性を精度良く抽出可能とする機械的、電磁的入力方法の開発

【平成29年度】

### 1) 機械的入力方法

電気エネルギーを高効率で機械エネルギーに変換する電気機械変換手段（電磁ソレノイド）を導入し、電子制御により異なる鋼球径（6mm、10mm、16mm）の鋼球を射出することにより、衝撃入力を高精度で制御できる機械的入力装置を開発した。これにより、衝撃時の接触速度等を再現性良く制御することを可能とした。また、計測の効率化を図るため、機械的入力方法を構成する電磁射出装置と加速度センサを一体型の構造とした。以上により、これまで煩雑であったセンサの貼り付け作業や打撃入力の大幅な作業軽減を図り、効率的な計測を可能とした（図-1-1）。

### 2) 電磁的入力方法

高透磁率で飽和時の磁束密度が大きい軟磁性材料を励磁コイルのコアに適用するとともに、蓄電回路の容量増大、蓄電電圧の増大などにより、機械的入力方法と同程度の急峻な立ち上がりをもつ電磁的入力方法を開発した。これにより、鋼製シース内部のPC鋼材に直接作用する磁場が生成されることを確認した（図-1-2）。

【平成30年度】

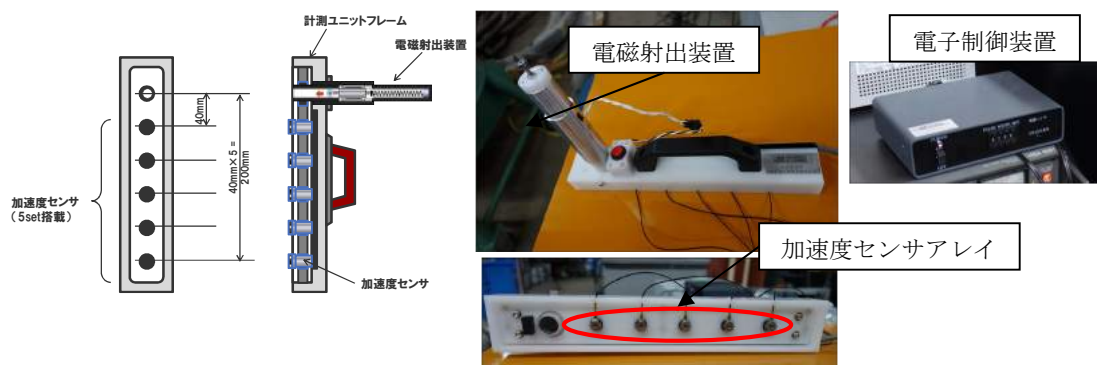
### 1) 機械的入力方法

鋼球径、設定電圧により衝撃入力を調整し、PCグラウト未充填の検出感度を大幅に向上する入力条件を明らかにした。また、加速度センサアレイの背面より応力を印加する計測架台を導入することにより、加速度センサとコンクリート面の接触圧を高め、シース埋設深さに対してシース直径が小さいPC桁へ適用可能な入力方法を確立した。

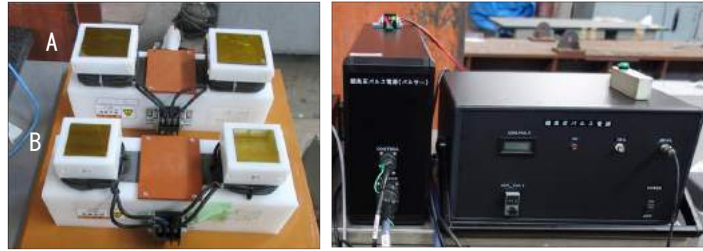
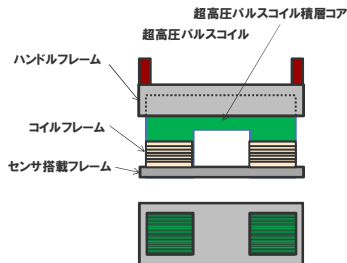
### 2) 電磁的入力方法

供試体に埋設した電磁場応答検出回路（図-1-3）によりシース、およびPC鋼材上の電磁場応答の特性を評価した。また、パルス電流発生装置の蓄電電圧、放電回路の電気抵抗の低減などにより励磁回路の効率化を行い、磁束密度の立ち上がり速度の大幅な改善を行った。さらに、PCグラウト充填評価を検出する最適な入力条件を明らかにし、実構造物において効率的な計測が可能となるよう装置の小型化を図った。

これらにより、埋設深さ150~200mm、直径が35mm程度のシース内のPCグラウト充填状況を精度良く検出できる弾性波計測システムを構築した。



諸元	A	B
コイル断面積 (mm <sup>2</sup> )	70×70	50×50
コイル幅 (mm)	270	250
コイル脚高さ (mm)	50	50
重量 (kg)	15.2	9.6



励磁コイル

パルス電流発生装置

図-1-2 電磁的入力方法（平成29年度製作）

## ②機械的入力方法と電磁的入力方法との融合による信号検出性能の向上

【平成29年度】

欠陥性状を模擬した供試体を製作した（シース径：φ45mm、38mm、PC鋼棒φ32mm、26mm、かぶり：150mm～250mm）。PC鋼材上における弾性波の特性を直接計測できる観察孔とともに、電磁誘導による渦電流や磁場の変化を検出する電磁場応答計測回路（サーチコイル）をシース、PC鋼棒に組み込み、供試体内部、供試体面での信号検出性能の評価を可能とした。

【平成30年度】

PCグラウトの部分充填を評価するため、部分充填状況（25%、50%、75%）を模擬した供試体を新たに製作した（シース径：φ45mm、38mm、PC鋼棒φ32mm、26mm、かぶり：150mm～200mm）。また、製作した供試体において、機械的入力方法、電磁的入力方法を用いて検出性能の評価を行った。また、それぞれの入力方法の差異に着目した評価指標（波形エネルギー、スペクトル重心、区間コヒーレンス）を導入し評価した。続いて、これらの評価指標を組み合わせ、グラウト充填状況検出における信頼性向上を図るための検討を行い、各手法の適用範囲を明らかにした（表-1-1）。

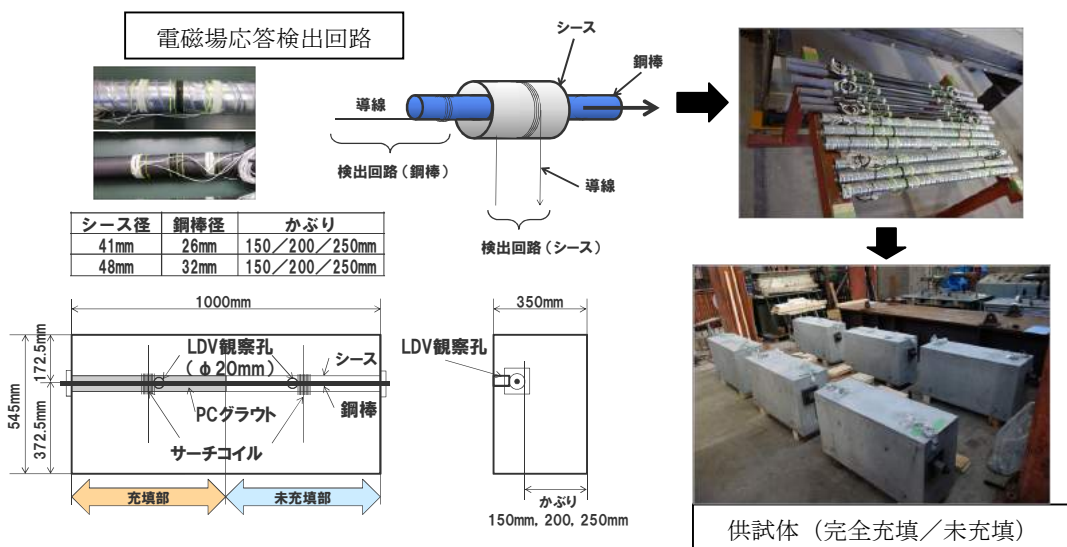


図-2-1 電磁場応答検出回路を埋設した供試体の製作（平成30年度）

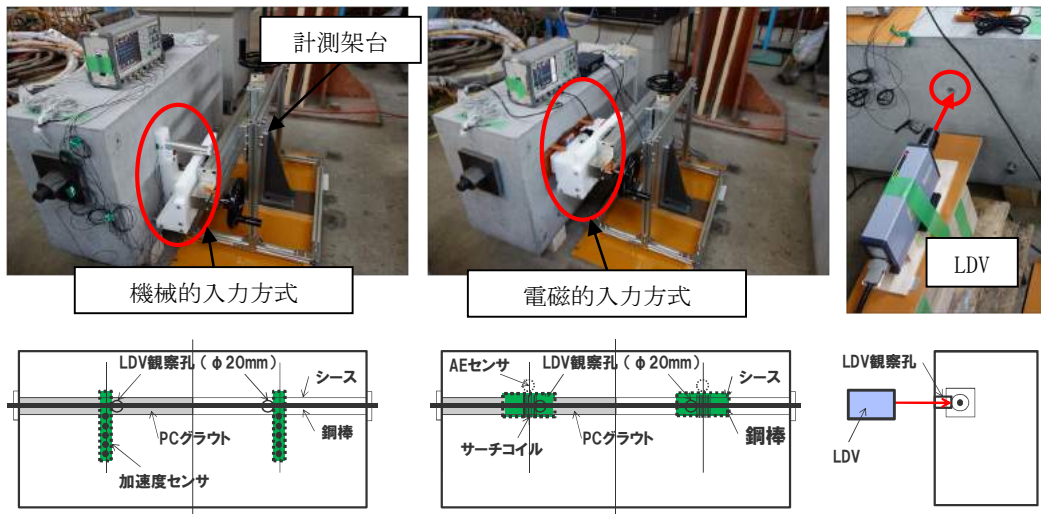
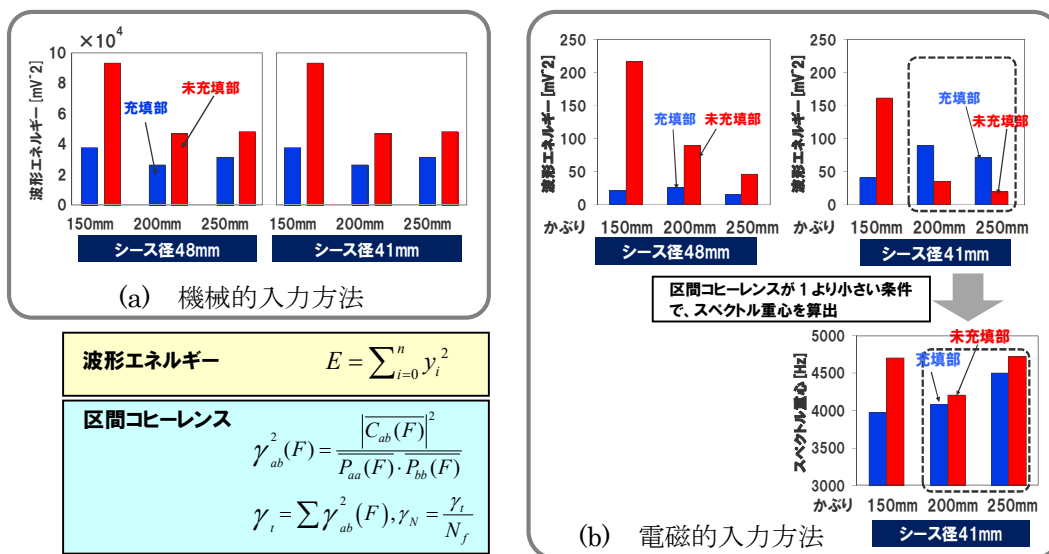


図-2-2 機械的／電磁的入力方法の評価状況（平成30年度）



$y_i$ : 波形の振幅値、 $F$ : 周波数、 $P_{xx}$ : 波形  $x$  のパワースペクトル、 $C_{ab}$ : 波形  $a$ 、 $b$  のクロススペクトル、 $N_f$ : サンプル数

図-2-3 機械的／電磁的入力方法（弾性波応答）の評価指標

表-2-1 機械的／電磁的入力方法の評価指標と適用範囲

評価指標	機械的入力方法	電磁的入力方法 (弾性波応答)
波形エネルギー	シース径 48mm, 41mm において、かぶり 150-250mm の範囲において充填状況の評価可能	シース径 48mm の場合、かぶり 150-250mm の範囲において充填状況の評価可能 シース径 41mm の場合、かぶり 150mm まで評価が可能 (区間コヒーレンスとスペクトル重心を援用することにより、かぶりが 250mm の範囲まで評価が可能)
スペクトル重心	-	急峻なパルス電流を使用時に有効 (区間コヒーレンスが小の条件) 未充填部の方が高周波となる
区間コヒーレンス	-	スペクトル重心の適用性を判定 (値が小さい条件でスペクトル重心が有効)
評価指標	機械的入力方法	電磁的入力方法 (弾性波応答)
波形エネルギー	シース径 48mm, 41mm において、かぶり 150-250mm の範囲において充填状況の評価可能	シース径 48mm の場合、かぶり 150-250mm の範囲において充填状況の評価可能 シース径 41mm の場合、かぶり 150mm まで評価が可能 (区間コヒーレンスとスペクトル重心を援用することにより、かぶりが 250mm の範囲まで評価が可能)
スペクトル重心	-	急峻なパルス電流を使用時に有効 (区間コヒーレンスが小の条件) 未充填部の方が高周波となる
区間コヒーレンス	-	スペクトル重心の適用性を判定 (値が小さい条件でスペクトル重心が有効)

### ③弾性波特性と電磁的応答の統合評価による欠陥の検出能力の改善

【平成29年度】

鋼材内部の微小な磁束密度の変化を受動的、あるいは能動的に検出できる電磁場検出センサを開発した。また、励磁コイルが発生する比較的大きな磁場の下においても、グラウト充填状況の違いにより発生する微小な磁場の検出を行えるセンサ配置を検討し、電磁的入力装置に搭載した(図-3-1)。

【平成30年度】

#### ③-1) 電磁場応答検出方法の確立

シース、鋼棒の電磁場応答を評価した結果、磁場がシースを透過し鋼棒にも到達することが明らかになった。また、シース、鋼棒に作用する電磁力はコンクリート面における誘導電流と、これを積分して得られる磁束密度の積(誘導電流×磁束密度)の充填部と未充填部の差( $\Delta$ (誘導電流×磁束密度))を評価指標として、未充填部の検出が可能であることを明らかにした。

#### ③-2) 評価システムの構築

機械的入力方法、電磁的入力方法、弾性波応答、電磁場応答を組み合わせ「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非破壊評価システム」の構築を行った。この結果、弾性波入力条件、計測配置、評価指標の最適な組み合わせを決定する適用フローの提案を行った。

#### ③-3) 開発技術の実構造物における検証

西日本高速道路株式会社が管理する橋梁を対象に、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非破壊評価システムを適用し、欠陥検出能力、運用性の評価を行った。この結果、本開発が目標としている検査効率(シース長1m 当たり1分)で検査できることを確認した。

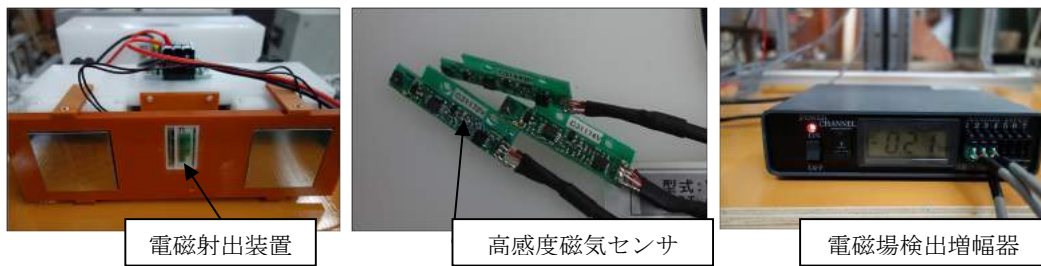


図-3-1 電磁場検出センサ (平成29年度製作)

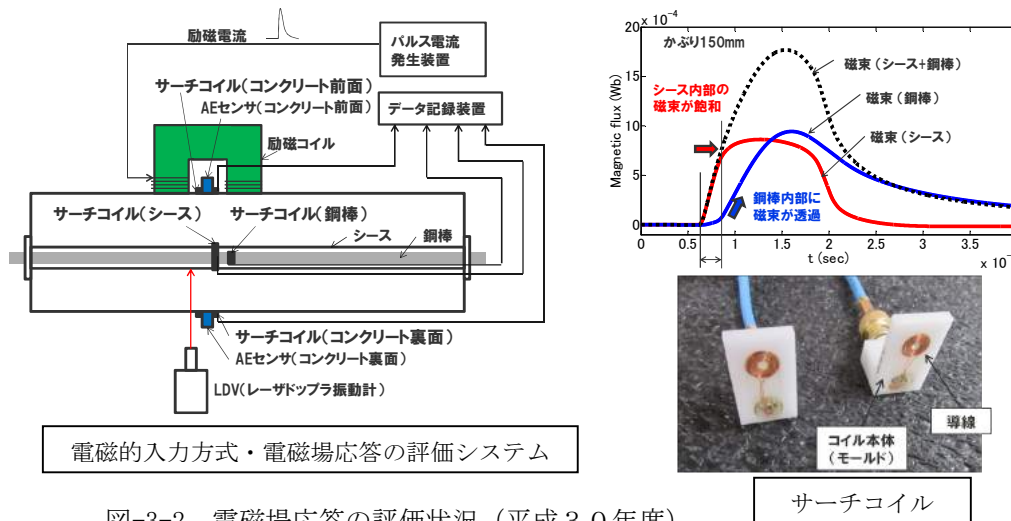


図-3-2 電磁場応答の評価状況 (平成30年度)

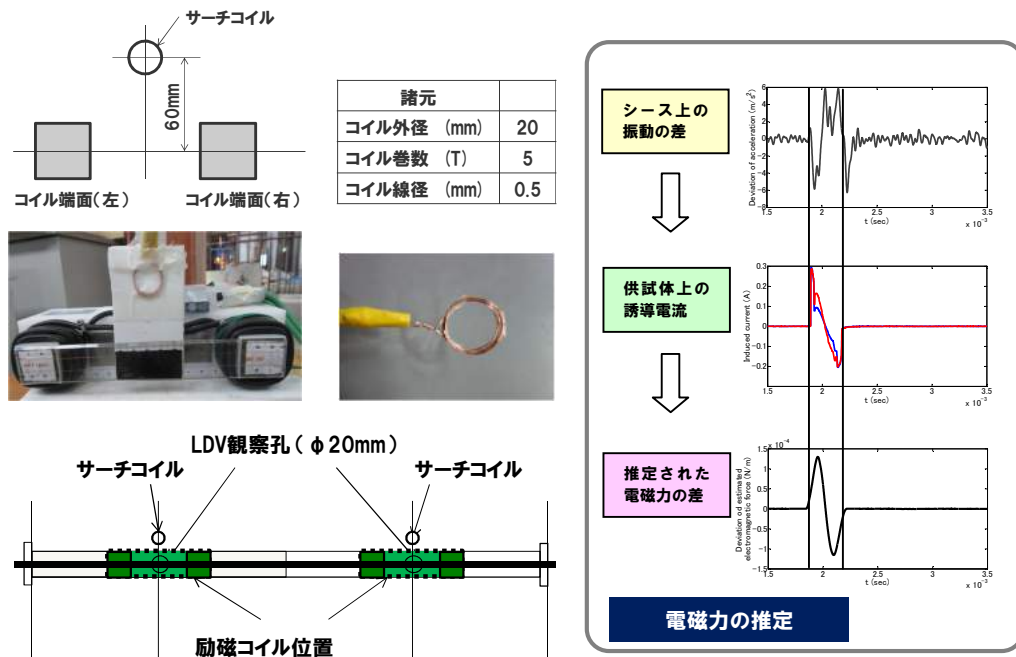
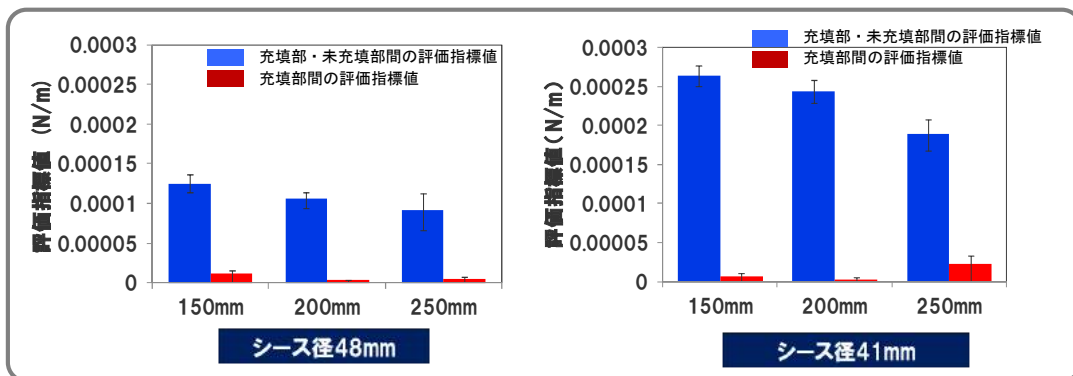


図-3-3 電磁場応答の評価状況（平成30年度）



推定された電磁力の差

$$\Delta F = \sum_{n=1}^N (i_n \times B_n)_V - \sum_{n=1}^N (i_n \times B_n)_F$$

$\Delta F$ : 推定された電磁力 (N/m)、 $i_n$ : 供試体面の誘導電流 (A)、 $B_n$ : 供試体面上の磁束密度 (Wb/m<sup>2</sup>)、添字 V は未充填部、添字 F は充填部

図-3-4 電磁場応答の評価指標（平成30年度）

表-3-1 電磁場応答の評価指標と適用範囲

評価指標	電磁的入力方法（電磁場応答）
充填部における誘導電流と磁束密度の積と未充填部における誘導電流と磁束密度の積との差 ( $\Delta F$ ) のピーク値 $\Delta F = \sum_{n=1}^N (i_n \times B_n)_V - \sum_{n=1}^N (i_n \times B_n)_F$ $\Delta F$ : 推定された電磁力 (N/m)、 $i_n$ : 供試体面の誘導電流 (A)、 $B_n$ : 供試体面上の磁束密度 (Wb/m <sup>2</sup> )、添字 V は未充填部、添字 F は充填部	シース径 48mm、41mm いずれの場合においても、かぶり 150-250mm の範囲において充填状況の評価可能

【実構造物における適用性評価】

以上により、実構造物における適用性評価を実施し、「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非破壊評価システム」が目標とした埋設深さ150～200mm、直径が35mm程度のシース内のPCグラウト充填状況の評価に適用可能であることを確認した。

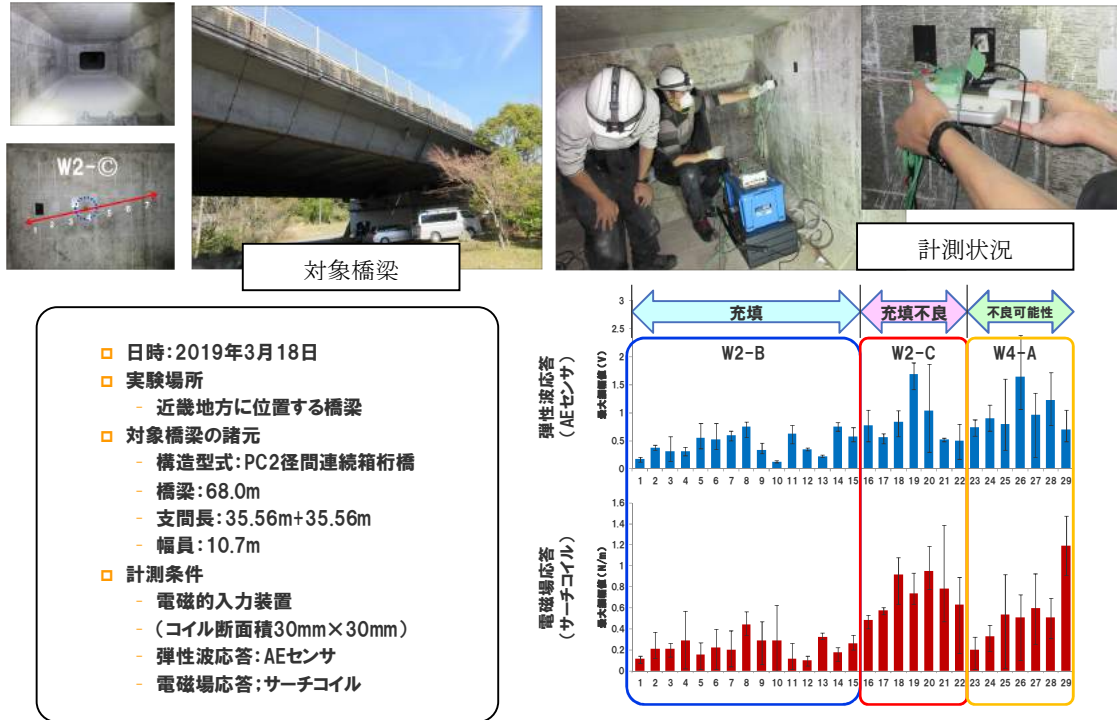


図-3-5 実構造物における適用性評価 (平成30年度)

表-3-2 開発システムの適用効果

	適用効果	特記事項
準備段階	計測面への前処理が不要 (効率化)	
計測段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>・センサの設置作業が不要 (効率化)</li> <li>・励磁コイルの設置が容易 (効率化)</li> </ul> ⇒ 自動化、機械化が容易	電磁場応答検出センサを励磁コイルに搭載し一体化
評価・判定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リアルタイムに結果を出力 (効率化)</li> </ul> ⇒ 評価・判定の効率化が可能	充填部での評価指標を参照データとして未充填部を評価する
特長	コンクリート内部の欠陥 (うき、はく離、クラック) の影響を受けにくい。	



(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
日本材料学会 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 (Vol. 18 pp. 243-248)	H30. 10. 25	日本材料学会	服部 晋一 木部 大紀 寺澤 広基 鎌田 敏郎
プレストレストコンクリート工学会、プレストレストコンクリート (査読中)		プレストレストコンクリート工学会	服部 晋一 木部 大紀 寺澤 広基 鎌田 敏郎
コンクリート工学年次論文集 (Vol. 41)	R01. 7. 10	日本コンクリート工学会	服部 晋一 木部 大紀 寺澤 広基 鎌田 敏郎
日本材料学会 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 (査読中)		日本材料学会	服部 晋一 木部 大紀 寺澤 広基 鎌田 敏郎
日本材料学会 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 (査読中)		日本材料学会	木部 大紀 服部 晋一 寺澤 広基 鎌田 敏郎
土木学会年次学術講演会 (印刷中)	R01. 9. 3	土木学会	服部 晋一 木部 大紀 寺澤 広基 鎌田 敏郎

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
なし	なし	なし	なし	なし

(5) 成果の実用化<sup>\*</sup>の見通し <sup>\*</sup>※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

本補助事業により得られた成果を用い、実橋における適用評価を H30 年度に実施した。また、本開発成果品 (PC グラウト非破壊評価手法の電源装置) を適用した実橋の検査工事 (H31 年度) が計画中である。開発者は、本検査工事における本補助事業の成果品の適用に関わる技術支援を無償で行い、装置の適用結果を入手することで開発成果品の実用化に関わる追加評価を実施する予定である。

(12) その他

なし。