

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04232

研究課題名（和文）データサイエンスに基づくPCグラウト充填レベルの自動判定

研究課題名（英文）Automated Determination of Grout Filling in PC Duct Based on Data Science

研究代表者

鈴木 啓悟（Suzuki, Keigo）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：40546339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：超音波探傷試験に基づくPCシース管の充填状況について詳細判定技術，打撃試験に基づくスクリーニング判定技術について，信号処理技術，データサイエンス技術を援用しつつ検討した。結果として，フェーズドアレイのフォーカシングによる探傷および機械学習の特に有効性が認められ，詳細点検技術として良好な技術の提案ができた。スクリーニング技術については，PCシース管の未充填部を見落とさない技術と出来た可能性がある。スクリーニングと詳細点検と両手法を用いることで，効率的かつ確実なシース管の未充填部発見をすることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は，必要な情報と不要な情報を区別し，フィルタリングする独自信号処理技術を構築したこと，またデータサイエンス技術によって，自動的にPCシース管を判定できる点にある。また1次元波形を基とする超音波探傷の結果は，機械学習の有効性が多く認められ，今後の超音波探傷試験の技術進展に知見を与える結果を示した。

本研究成果の社会的意義は，現場適用性の良い手法で，効率的かつ確実な診断が行える点にある。点検領域が広範囲に及ぶPCシース管のグラウト充填状態を詳細に把握するには，スクリーニング技術を適用したうえでの詳細点検技術を適用すべきであり，両技術を構築した本研究の成果は社会的意義が高い。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined detailed diagnostic techniques for assessing the filling condition of PC ducts based on ultrasonic testing and screening techniques based on impact testing, utilizing signal processing and data science technologies. As a result, the effectiveness of detection using phased array focusing and machine learning was particularly recognized, and we proposed the method as a promising technology for detailed inspection. Regarding the screening technology, we developed a technique that potentially ensures no unfilled sections of PC ducts are overlooked. By employing both screening and detailed inspection methods, it is possible to efficiently and reliably detect unfilled sections in PC ducts.

研究分野：構造物ヘルスマニタリング、非破壊評価

キーワード：超音波フェーズドアレイ 打撃試験 機械学習 深層学習

## 様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国においてプレストレストコンクリート(PC)構造は多くの橋梁に適用され、現在では全橋梁の約44%を占める。PC構造の内、ポストテンション方式ではシース管に配されたPC鋼材の保護とPC鋼材とコンクリートの一体化の目的でグラウト充填を行うが、充填が不十分で水が浸入するとPC鋼材の腐食、さらには破断を招き、落橋等の事故につながる可能性がある。PC鋼材はPC構造の耐荷力の根幹を成す構成材であり、破断状況によっては耐荷力喪失事故を招く。

直接目視困難なシース管内部のグラウト充填状態を把握する手法では、弾性波を用いて、シース・コンクリート境界面からの反射波を解析する手法が多い。水がシース内部に侵入すると境界面からの反射波は充填状態の反射波と似た傾向にあると考えられるため、滞水状態を含めたグラウト充填評価を行う必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究はポストテンションPC構造に内在するシース管のグラウト充填状況を可視化し、グラウト充填状況を高精度に評価するための超音波探傷手法を確立する。超音波探傷を用いるメリットは音波の指向性の高さにあるほか、kHzオーダーの低周波数帯の波を用いることで、コンクリートの被り厚が200mmを越えても超音波が到達する。PC構造のシース管は予め位置が既知であり、ターゲットを絞った状態で非破壊評価することができる。この点を鑑みれば、指向性の高い超音波を用いることで、特に探傷対象点をフォーカスした可視化が可能である。中心周波数50kHz、100kHzの広帯域超音波を適用し、寄生的離散ウェーブレット変換による特徴抽出のうえ、線形化逆散乱解析による画像化まで行う。シース管状態の判定を客観的にするため、生波形からの判断を機械学習に、画像化結果からの判断を深層学習に基づき、両面から判断する。また超音波探傷は詳細点検を目的としており、スクリーニング技術としての打撃試験も同時に行い、これによるシース管の充填判定も試みた。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 実験用供試体

3種の供試体を用いて超音波の実験を行った。1種目(以下、供試体A)は学内の充填および未充填供試体(図-1)、2種目・3種目については国立研究開発法人土木研究所(土木研究所)内の実橋梁を撤去した供試体3本の計5本を使用した。土木研究所内の供試体の中、荒磯橋供試体は図-2に示す左上のシース管のみ充填忘れによる未充填状態である。1本の試験体を切断した経緯があるため同じ構造の試験体が2本(以下、供試体B-1、B-2)ある。第3種目の供試体は図-3に示す植苗橋試験体(以下、供試体C)である。供試体A、Bには全長に渡って完全未充填状態のシース管がある。供試体Cは1本のシース管について端部での未充填状態が視認できる。ただし未充填区間の延長は不明であり、これは放射線透過試験で確認することとした。

機械学習・深層学習分類器の学習およびその前処理のための信号処理手法の検討には、供試体A、B-1で構築し、分類器の妥当性検証を供試体B-2、テストを供試体Cで実施した。供試体B、Cは実橋梁の撤去部材であるため、現場での有効性についての検討につながる。

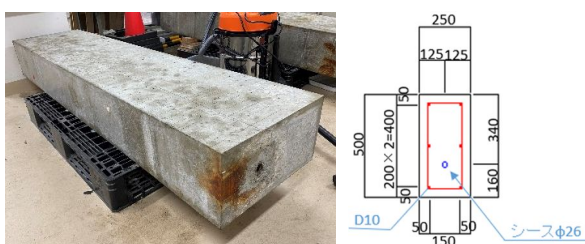


図-1 供試体 A 写真及び断面図



図-2 供試体 B の外観



図-3 供試体 C の外観

### 3.2 超音波探傷試験

使用機器は Verasonics 社製 Vantage32LE を使用しフェーズドアレイによる超音波探傷を行う。フェーズドアレイは複数の探触子から超音波を励起する探傷方法である。励起するタイミングを操作することで、あるポイントにフォーカシングできることが最大の特徴である。今回は広帯域超音波探触子を 4 つ使用した。探傷の様子を図-4 に示す。主にシース管上部を探傷点とし、プローブ間隔を 80mm で配置、Pitch を 3 つ、Catch を 1 つと設定した。供試体 B、供試体 C の探傷は図-5 に示す。

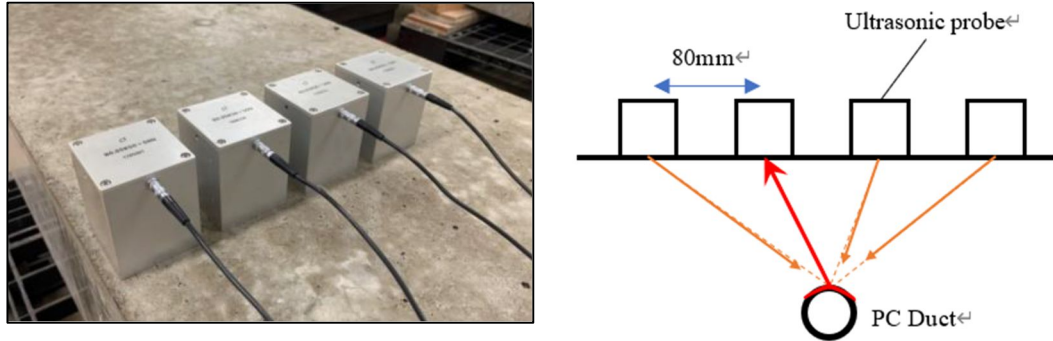
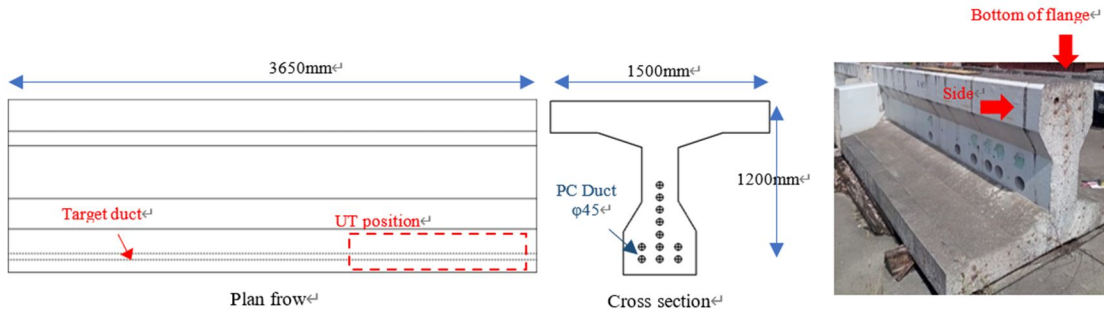
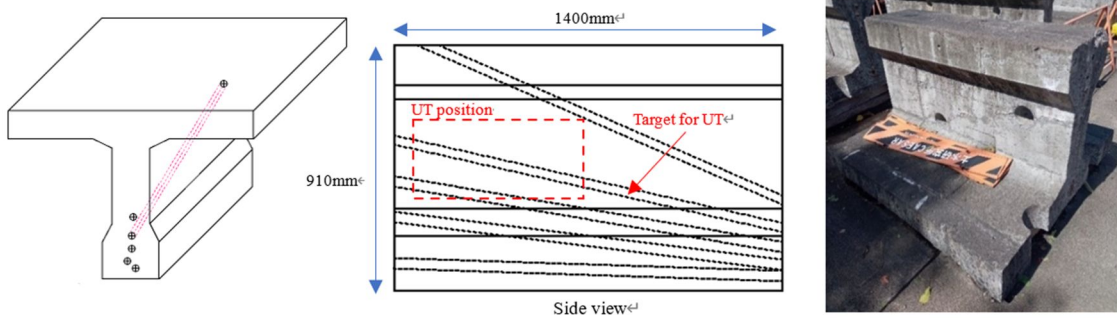


図-4 超音波フェーズドアレイによる探傷



(a) 供試体 B の探傷



(b) 供試体 C の探傷

図-5 供試体 B・C の探傷箇所

### 3.3 打撃試験

打撃データは図-6 に示すようにシース管直上に圧電センサを一列に配置し、センサに隣接する点で打撃して収集する。計測点 6 箇所に対しそれぞれ打撃点を 2 箇所として、打撃は多い程度学習に貢献すると思われるが、時間的制約を鑑みた現場適用性の観点から 1 箇所あたり 10 回に設定して実験を行う。サンプリングレートは 200kHz とした。

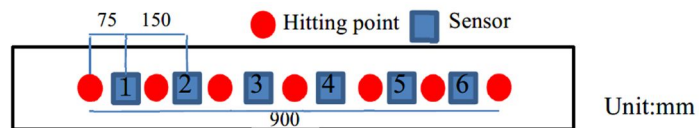


図-6 打撃試験の圧電センサ設置と打撃点の設定

### 3.4 寄生的ウェーブレット変換による生波形のフィルタリング(P-DWT フィルタ)

超音波探傷、打撃試験で蓄積する波形は判定に有益なシース管情報とノイズまたは不要な情報が混在している。そのため、生波形を直接学習に用いずに特徴抽出およびノイズ低減の信号処理、寄生的離散ウェーブレット変換によるフィルタリングを施す。対象信号と同条件で取得され

る波形に対し窓関数をかけ、ノルムが1となるように正規化することにより、実信号マザーウェーブレット(RMW)を作成する。得られたRMWに対し離散ウェーブレット変換を行うことにより、ノイズ低減を行う寄生フィルタを作成する(図-7)。

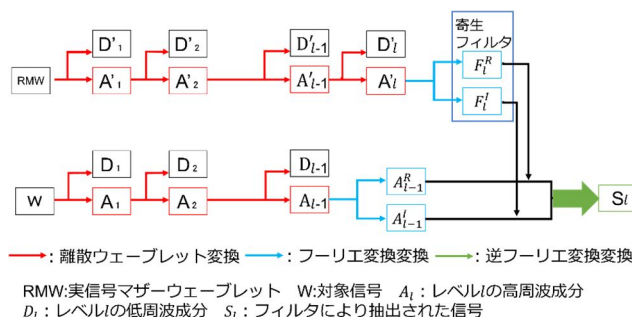


図-7 寄生的離散ウェーブレット変換によるフィルタリング

### 3.5 超音波探傷試験に基づく分類器の構築

取得した超音波波形サンプル数を表-1 に示す。機械学習を行うにあたって機械学習モデルには少ないサンプル数でも良好な精度を示すランダムフォレスト(RF)を使用し分類を行った<sup>2)</sup>。ランダムフォレストはその特性上実行のたびに精度が変化するため5回検証しその平均値を採用する。取得波形はシース管からの反射時刻を推定し、その時刻より前後1000点固定で切り出した。

表-1 取得サンプル数と探傷断面数

	供試体 A	供試体 B-1		供試体 B-2	供試体 C
	top surface	Side	Bottom of flange	Bottom of flange	Side
Unfilled	280	25	75	100	22
Unfilled Water	280	25	75	100	
Filled	280	25	75	100	
Number of sections	40	20		20	4

### 3.6 打撃試験に基づく分類器の構築

打撃試験についても超音波探傷と同様に、教師データを供試体 A、供試体 B-1 で蓄積し、顕彰を供試体 B-2、テストを供試体 C で実施した。サンプル数は教師データ 540、検証データ 540、テストデータ 60 である。分類器は機械学習としてロジスティクス回帰(LR)、RF、深層学習として、1D-CNN、2D-CNN を適用し、精度について比較検証した。

## 4. 研究成果

### 4.1 超音波探傷機械学習の検証データに対する精度とデータ拡張・フィルタリングの有効性

検証を行ったデータ拡張の組み合わせは図-8 に示すように「時刻歴のみ」、「時刻歴+周波数情報」、「時刻歴+位相情報」、「時刻歴+周波数情報+位相情報」、「周波数情報+位相情報」の5パターンである。まず図-8 青にフィルタリングなしの場合のデータ拡張の有無における判定精度を示す。データ拡張を施しても大きな精度の向上は見られなかった。

その一方でフィルタリングによる精度の変化を確認する。Approximation データによる精度を図-8 橙、Detail データによる精度を図-8 灰に示す。全体を通してフィルタリングによって精度が大きく向上した。特に Detail データのデータ拡張有りの精度が非常によく、100%近い精度が記録された。以上より P-DWT フィルタリングとデータ拡張は本研究の機械学習の精度の向上に非常に有効である。以後は最も精度良かった「Detail データ-データ拡張有(時刻歴+周波数情報+位相)」を使用し、検証を行う。

### 4.2 超音波探傷試験 機械学習分類器によるテストデータの判定精度

P-DWT フィルタリングの活用の際して、実際の計測波形ではどの種類のフィルタを適用するべきかが未知である。そのためフィルタを全て施したデータセットを用意しておきその中で最も確率の高いものを正解として判断する方法を提案した。正しい組み合わせでフィルタをかけたものの方がより高い確率で判定可能であると考えた。実用上と計測の条件を考え、健全(充填)、

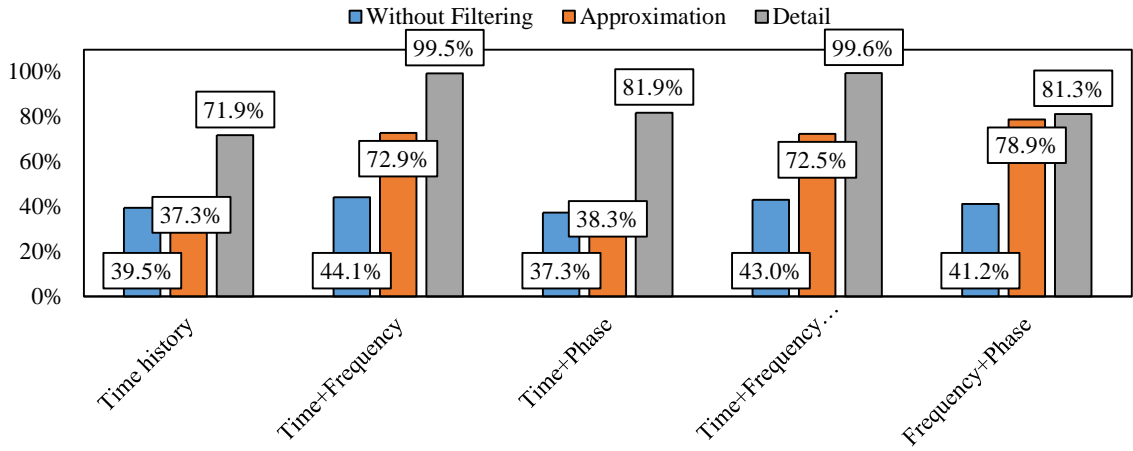


図-8 Random Forest 5 回平均精度比較

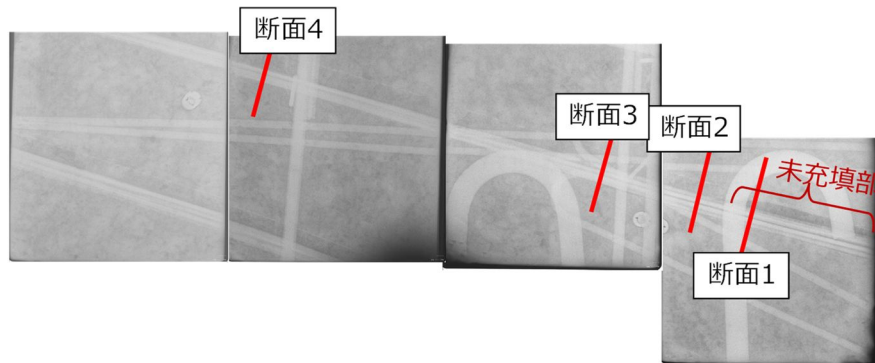


図-9 X線透過試験結果と超音波探傷判定断面

不健全(未充填+滞水)による2分類の精度を求める。

供試体Cに対して別途行われたX線透過法による試験結果画像と超音波探傷の判定対象断面を重ねて図-9に示す。供試体端部において未充填部の存在が確認できる。表-2は超音波探傷の機械学習による判定結果を示しており、X線透過法の結果と一致した。

表-2 超音波探傷の機械学習判定結果

断面番号	X線透過法	超音波探傷
1	未充填	未充填
2	充填	充填
3	充填	充填
4	充填	充填

#### 4.3 打撃試験によるテストデータの判定精度

打撃試験の検証データに対する精度を図-10に示す。機械学習のランダムフォレストについてデータ拡張として周波数情報を付加した結果が最も良好な結果を示した。1D-CNN, 2D-CNNの深層学習の精度が高くない原因として、深層学習の処理過程において適切なサイズでの畳み込みやプーリングが行えず、特徴を消してしまったこと、二次元化した際に縦関係の情報がノイズになったことが考えられる。この結果を基にRFを用いて供試体Cによるテストを行った。

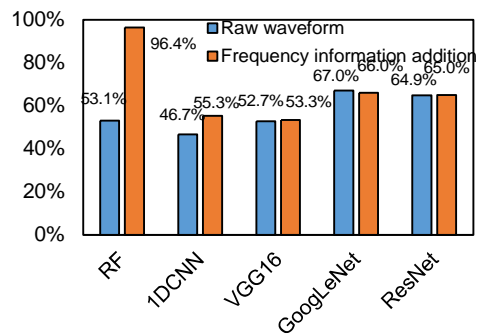


図-10 打撃試験の検証精度

図-11は供試体Cに関する打撃試験の判定結果である。超音波探傷試験とセンサの配置が異なるため、シース管に沿った結果を得ることができる。結果として、66.7%が正解となり、精度としては決して高くない結果となったが、スクリーニング技術として未充填箇所を見落とさずに判定できていたことは評価できる。



図-11 テスト結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishida Y., Suzuki K.	4. 巻 1
2. 論文標題 Non-destructive evaluation of grout unfilled PC duct including water staying condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability Book Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability	6. 最初と最後の頁 2247 ~ 2254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1201/9781003322641-279	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Ishida & K. Suzuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Non-Destructive Evaluation of Grout Unfilled PC Duct Including Water Staying Condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 石田 耀世, 鈴木 啓悟, 角田 貴也, 天谷 公彦
2. 発表標題 滞水状態を考慮したPCグラウト充填評価手法の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ishida Y., Suzuki K.
2. 発表標題 Non-destructive evaluation of grout unfilled PC duct including water staying condition
3. 学会等名 11th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石田耀世, 鈴木啓悟, 角田貴也, 天谷公彦
2. 発表標題 滞水状態を考慮したPCグラウト充填評価手法の提案
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会 第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ishida & K. Suzuki
2. 発表標題 Non-Destructive Evaluation of Grout Unfilled PC Duct Including Water Staying Condition
3. 学会等名 IABMAS 2022: 11th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Reserach 非破壊評価  <a href="https://sites.google.com/view/suzukilab/research">https://sites.google.com/view/suzukilab/research</a></p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------