

報告

打音による機械学習を用いた実橋RCT桁橋の樹脂充填評価について

西 敏臣*, 古賀 美智恵*, 加川 順一**, 大野 誠也***, 黒田 一郎****

*株式会社 九検 (〒849-0932 佐賀市鍋島町八戸溝166-35)

**SGエンジニアリング株式会社 (〒733-0861 広島市西区草津東1丁目11-51)

***有限会社大野塗装店 (〒791-0101 愛媛県松山市溝辺町甲102-1)

****防衛大学校教授 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水1丁目10-20)

樹脂注入工法は、老朽化したコンクリートを研ることなくコンクリート内部に樹脂を浸透させることによって部材の機能を回復させることが可能であるが、注入対象とした部材への樹脂の充填の成否を確認するためには非破壊的な検査手法を必要とする。本報告は、建設後100年を経て剥離浮きを生じ、樹脂注入工法によって補修された鉄筋コンクリート(以下、RC)T桁橋における樹脂充填の成否の評価を打音による機械学習に基づく手法で試みた結果を報告したものである。提案手法によって注入前後の打音の違いを定量的に判定することができることを確かめた。

キーワード：非破壊検査，打音，機械学習，樹脂注入

1. はじめに

樹脂注入工法は、ひび割れ等のコンクリート内部の空隙や鉄筋周辺の空隙に樹脂を浸透させることによって部材を研ることなく機能を回復させるものであり^{1),2)}、経年劣化した道路橋床版の補修においても有効性が期待できる工法である。この補修工法では、注入された樹脂が空隙の隅々まで行き渡って充填されることが重要であるが、補修の現場における充填の成否は何らかの非破壊的な検査手法を必要とする。一方、RC部材の非破壊的な検査手法として、打音を用いることは様々な視点から検討が重ねられており多くの知見が積み重ねられてきた^{3),4)}。加えて、AI技術の発展が目覚ましい近年では、打音を入力として各種の機械学習の技術で処理して診断結果を得る手法の研究が盛んとなっている^{5),6)}。本報告では、機械学習の手法の一つとして局所外れ値因子法^{7),8),9)}を採用し、打音を用いて道路橋床版への樹脂の充填状況の評価した。

検討の対象としたのは、樹脂注入工法による補修を受ける既存のRCT桁橋である。管理された状況下で施工される部材を対象として、樹脂注入の前後で取得した打音を用い、提案する判定手法を用いて、注入前の打音と注入後の打音を比較し、樹脂の注入によってその特性に変化が生じるかを調べた。更に、充填の成否の判定、すなわち、充填された箇所と充填がなされていない箇所の判別への本判定手法の

適用性の評価を試みた。

2. 対象部材と樹脂注入方法ならびに打音の取得

2.1 対象部材

対象とした道路橋RCT桁橋は、全長10.26m、幅員5.26mで、竣工年は1924年で100年経過した橋梁である。補修計画書によれば、支承部、橋梁端部、一部床版中央部の水かかり部が補修箇所とされている(いずれも下面)。図-1に橋梁損傷図を、写真-1に全景をそれぞれ示す。図-1の斜線部は主桁のかぶりコンクリートが剥離した範囲で、防錆処置を施し



写真-1 対象構造物の全景

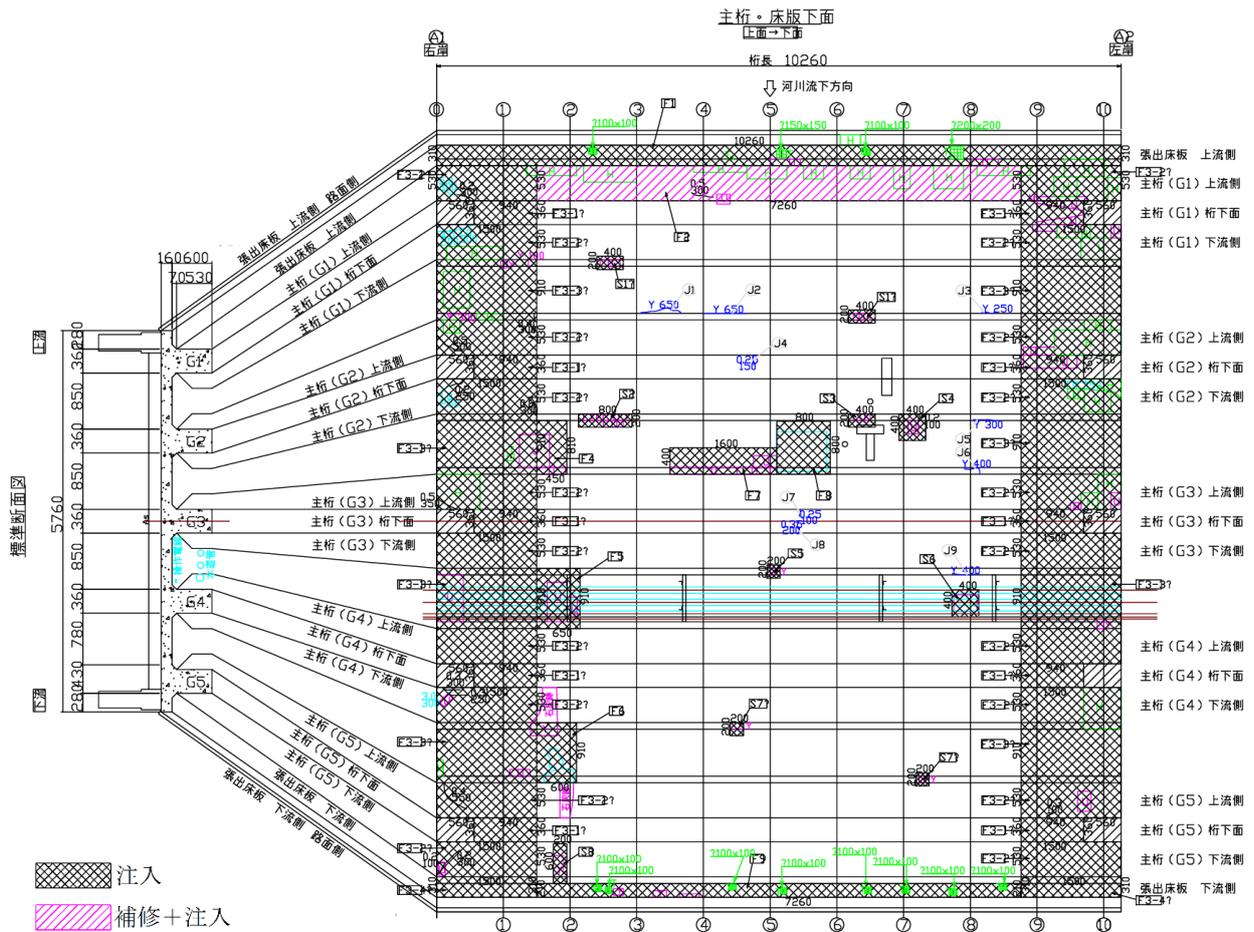


図-1 橋梁損傷図



写真-2 補修前状況

た上で断面補修材にてかぶりを再建した。写真-2に主桁のかぶり再建前の状況を示す。網掛部は、残存していた本来のかぶりをそのまま活かすが、鉄筋腐食に伴う空隙が想定されたため、かぶり再建部とともに樹脂注入による補修を行った。

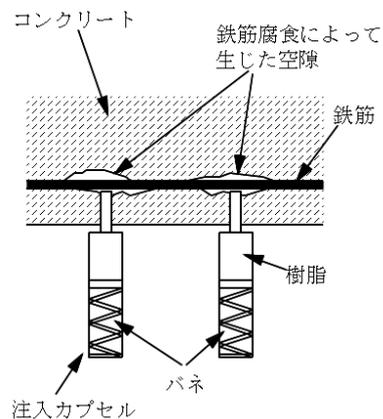


図-2 内圧充填接合補強工法の概念

2.2 樹脂注入方法

樹脂注入は、内圧充填接合補強工法¹⁾で行った。コンクリート表面から鉄筋位置まで穿孔し、エポキシ樹脂を注入するためのカプセルを取り付け、カプ

セル内のバネの伸長力によって樹脂を注入(図-2)した。

2.3 打音の取得

打音の取得は、斜線部のかぶりを再建後、網掛部と斜線部に樹脂を注入する前に網掛部と斜線部の両方で行い、これを注入前打音とした。打音の取得位置は注入計画範囲の10cm格子点上とした。取得位置は全3376箇所である。一つの打点につき1回ずつ打音を取得し、樹脂の注入を経て樹脂の硬化後に再び同じ位置で打音を取得し、それを注入後打音とした。打音を取得する際のコンクリート表面の打撃は、直径約22mmの鋼球を先端に取り付けた樹脂製の棒を用いて手動で行った。使用した打音取得機器を写真-3に示す。サンプリングレートは毎秒25000サンプルとし、サンプル長さ40.96ms、サンプル数1024個の音圧時刻歴として取得した。

3. 機械学習による判定手法

3.1 入力データ

打音を用いた判定には、機械学習の一種である局所外れ値因子法^{7),8),9)}を採用した。なお、本報告では、樹脂が注入される前からコンクリートが健全で空隙が無い、あるいは、樹脂が充填された状態を陰性と定義し、空隙があつて樹脂が充填されていない状態を陽性と表わしている。取得した打音の時刻歴データをFourier変換することによって周波数と振幅の関係であるスペクトルが得られる。窓関数はHann窓を採用した。このスペクトルはN個の数値からなるベクトルデータであり、N次元超空間である特徴空間上の1つの点として表現することが可能である。本研究では、打音のスペクトルの内の500Hz～10kHzの周波数バンドの390個の振幅値を、超空間上の点の座標値としたので、Nの値は390となる。

3.2 局所外れ値因子法

局所外れ値因子法は、データの密集度に基づいて異常を判定する手法であり、正常データ、すなわち陰性データが特徴空間内では密集していることを前提とする。図-3にその概念を示す。

本研究では、教師データあり、すなわち、教師ありの条件で局所外れ値因子法を適用している。教師データとは、正常か異常かが予め判明しているデータであり、学習器にとって判断の基準となるデータである。教師ありの局所外れ値因子法では正常(陰性)の教師データを複数必要とする。

教師データ群(複数の教師データの集合)が特徴空間に配置されていて、正常(陰性)か異常(陽性)かを評価したいテストデータが同じ特徴空間に置かれた場合に、そのテストデータの周りのデータの分布が密であるならそのテストデータは正常(陰性)、疎であるなら異常(陽性)と判定される。ここで、評価対象のテストデータの周辺のデータの粗密の度



写真-3 打音取得機器 (PDC-200A)

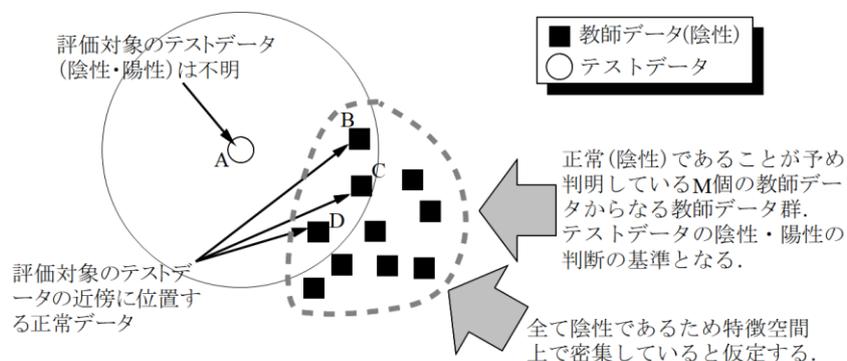
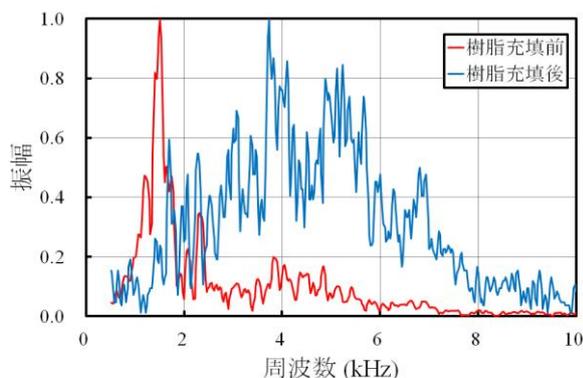


図-3 局所外れ値因子法概念

表-1 無筋コンクリート供試体の製作に使用したコンクリートの示方配合表

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
57	46.2	174	305	817	1012



打音収録位置B91
 $S_{Pr} = 3.636, S_{Po} = 0.736$

図-4 樹脂充填前後の打音スペクトルの比較

合いを定量的に表すために局所密度が用いられる。この局所密度は、テストデータとその近傍の k 個の点との距離の平均値の逆数である。図-3に示す局所外れ値因子法概念図で説明すれば、B, C, DがテストデータAの近傍のデータであり(k は3として説明)、AB, AC, AD間の距離の平均値の逆数がテストデータAの局所密度である。この局所密度を用いて、評価対象のテストデータの正常・異常を判定するスコア値 S が次の式で求められる。

$$S = LD_T / LD_A \quad (1)$$

ここで、 LD_T は教師データとして与えられる正常データの局所密度、 LD_A は評価対象のテストデータの局所密度である。 LD_T としては、評価対象のテストデータの近傍の正常データ(図-3でのB, C, D)の局所密度を算出してその平均とする手法も一般的であるが、今回はより単純に全ての教師データの各点間の距離(教師データの点が M 個あるものとして $M C_2$ 通りの組み合わせ)の平均値を求め、その逆数とした。

3.3 スコア値による判定と閾値

式(1)で算出されるスコア値 S は1.0前後であればテストデータは教師データと似ていて陰性、1.0よりも有意に大きければ似ていなくて陽性と判定される。いうなれば S はテストデータが教師データに

似ていない度合いを数値で表現しているが、1.0よりもどれだけ大きければ陽性と判定するべきかを明確に示すことはできない。

そこで、スコア値 S が、予め決めておいた閾値 T (1.0よりも大きめの値)よりも小さいならば、評価対象のテストデータの局所密度は大きくて正常(即ち、推定陰性)と判定され、反対に大きいならば局所密度が小さくて異常(推定陽性)と判定される。この閾値 T は学習器側では設定不可能であり人間側で決める必要のある内部パラメータ(ハイパーパラメータ)である。

以降では、上述の近傍数 k は5と設定し、スコア値 S は、樹脂充填前のスコア値 S_{Pr} と充填後のスコア値 S_{Po} を添え字で区別して表す。

4. 対象部材での教師データの設定

局所外れ値因子法では陰性の教師データを予め準備する必要があるが、対象構造物は現場の実構造物であるため、実験室で準備された実験供試体のように内部の空隙が管理されている訳ではなく、陰性である部位を特定することは困難である。そこで、板状の無筋コンクリート供試体を準備し、それを打撃することで得た打音を教師データとして、樹脂注入前の対象構造物において剥離などの変状がなく健全と推定される部位の打音を評価し、スコア値 S が小さい部位を選定した。使用した無筋コンクリート供試体は、 $300 \times 300 \times 120$ mmの寸法で、水セメント比57%、強度は 39N/mm^2 (28日養生後の実測値)である。この供試体の製作に使用したコンクリートの示方配合を表-1に示す。このようにして選定された部位(対象構造物での推定陰性の部位)で収録された打音(10個)を以降の対象構造物の打音の評価のための教師データとして採用した。

5. 樹脂注入前後の打音の評価

図-4に、樹脂注入前後の打音スペクトルの比較例として打音収録箇所B91での比較を示す。スペクトルは、最大値が1.0になるように正規化して表示している。充填前のスコア値 S_{Pr} は3.636と大きかったが、充填後のスコア値 S_{Po} は0.736と小さくなっていて、樹脂を充填することによってスコア値が小さ

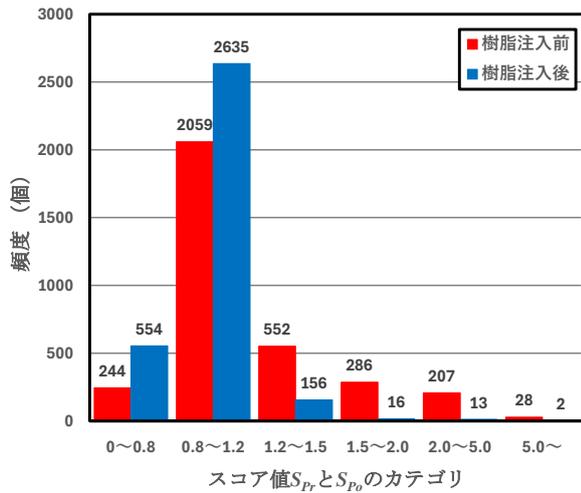


図-5 充填前後のスコア値のヒストグラム

くなっている。樹脂充填前のスペクトル（赤線）は1kHz～2kHzの間の狭い範囲の振幅だけが卓越した特徴を示している。これは劣化によってコンクリート内部に空隙が生じ、空隙とコンクリート表面に挟まれた層の振動が卓越して現われたものと考えられる⁹⁾。一方で、樹脂充填後は空隙が樹脂で充填されて硬化し、コンクリートと一体化したために、コンクリート内部を反射する縦波振動が重畳して広い周波数帯域に多くの峰を持ったスペクトル性状となっている（図中の青線）。

図-5は、全3376箇所の打音取得位置での充填前後のスコア値 S_{Pr} と S_{P0} をその大きさを6つのカテゴリに分類したヒストグラムを示す。充填後のスコア値 S_{P0} は、充填前のスコア値 S_{Pr} よりも小さめとなっていることが判る。具体的には、充填前の S_{Pr} は1.2より大きくなる頻度が全3376個中の1073個であるのに対して、充填後の S_{P0} は187個と5分の1以下に減少した。

次に、ある打音収録箇所での樹脂充填前のスコア値 S_{Pr} を横軸に、同じ箇所での樹脂充填後のスコア値 S_{P0} を縦軸に設定して充填前後のスコア値の変化の図示を図-6に示す。斜めの橙色の線は $S_{P0} = S_{Pr}$ を表す45度線であり、紫色と緑色の線は $S_{Pr} = 1.5$ と $S_{P0} = 1.5$ をそれぞれ表す。全3376個のプロットの内多くの45度線の右下に位置しており、充填前のスコア値 S_{Pr} よりも、同じ箇所での充填後のスコア値 S_{P0} の方が小さいことを表している。スコア値の減少は、樹脂を注入することによって打音のスペクトルの特性が陰性である教師データ群に近づいたことを表している。注入前のスコア値 S_{Pr} の中には10.0に近い値も含まれていて幅が広く、全3376箇所の中で紫色の線（ $S_{Pr} = 1.5$ ）の右に位置するのは521箇所（全体

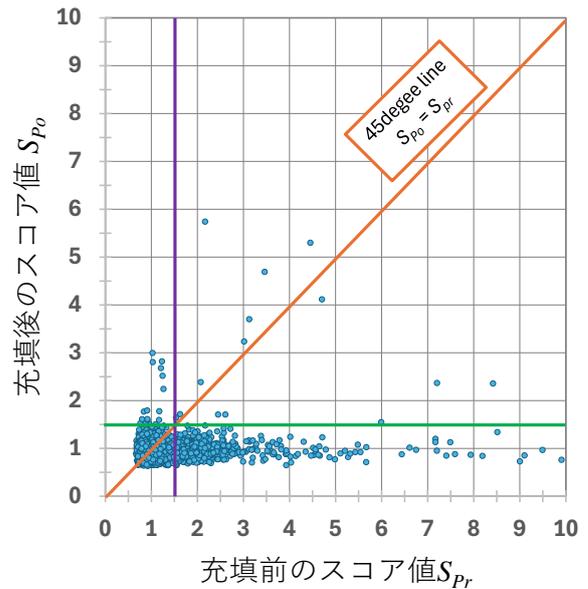


図-6 樹脂充填前後のスコア値の変化

の約15%)であるのに対して、注入後は緑色の線（ $S_{P0} = 1.5$ ）の上に位置するのは31箇所（全体の約1%）である。また、橙色の45度線の左上に位置して充填したことでスコア値が大きくなったプロットもいくつかあるが、それらのほとんどは緑色の線（ $S_{P0} = 1.5$ ）の下側でかつ紫色の線（ $S_{Pr} = 1.5$ ）の左側に位置しており、注入前と注入後のスコア値がどちらも1.5を下回っている箇所であり、これらは、陰性・陽性を判定するためのスコア値の閾値 T （3章参照）を1.5と設定するならば、注入前、注入後ともに陰性と判定される。

6. まとめ

機械学習に基づく手法により樹脂注入前後の打音の違いをスコア値で定量的に表すことができた。これを基に注入に成功した箇所と失敗した箇所の判別ができると期待される。本手法を用いることで現場での取得打音データによる品質管理の数値による定量評価が可能になり、従来の人の聴覚に依存した検査に依存することなく客観的手法として管理できる可能性を示せた。

参考文献

- 1) 渡邊祥庸, 瀬野健助, 加川順一, 二羽淳一郎: 内圧充填接合補強工法によるコンクリート中への樹脂充填性能と補修効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1465-1470, 2012.
- 2) 西尾亮人, 柿澤雅樹, 六郷恵哲, 小林孝一: コン

- クリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.441-446, 2016.
- 3) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 遠藤友紀雄: コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1545-1550, 2002.
 - 4) 水野敦大, 三浦泰人, 鈴木理絵, 中村光: 打音法による模擬ひび割れおよび腐食ひび割れを有するコンクリートの打撃応答特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2109-2114, 2016.
 - 5) 佐相聡実, 勝木太, 日比野克彦: 機械学習を利用した打音法のコンクリート浮き部検出への適用性に関する基礎的研究, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.6, pp.201-206, 2018.
 - 6) 歌川紀之, 安永守利, 杉本恒美: 叩き点検を代替する技術の開発, コンクリート工学, Vol.55, No.6, pp.502-509, 2017.
 - 7) 藤野陽三: 構造物のモニタリング技術, コロナ社, p.115, 2020.
 - 8) 黒田一郎, 福井智大, 西敏臣: 機械学習を用いた鋼製重錘衝突時の打音スペクトルの分析による鉄筋腐食判定手法に関する基礎的研究, 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.21, pp.337-342, 2021.
 - 9) 西敏臣, 古賀美智恵, 廣重幸, 黒田一郎: RC部材補修における局所外れ値因子法に基づく樹脂充填判定手法に関する基礎的研究, AI・データサイエンス論文集, Vol.3, No.J2, pp.879-888, 2022.

(2024年7月12日受付)