

論文 各種非破壊試験データを用いたマハラノビス・タグチ・システムによる断面修復工法の補修効果の定量的評価に関する検討

野内 彩可*1・渡辺 健*2・滑川 達*3・橋本 親典*4

要旨: 本研究では、断面修復工法による補修効果の定量的評価手法の確立を目的に、豆板を中央部に設けた試験体を対象に、様々な方法により断面修復を行い、その前後で各種非破壊試験による評価を実施した。加えて、パターン認識手法の一つである MT (マハラノビス・タグチ) システムに各種非破壊試験データを組み合わせて適用することで補修効果の定量的評価を試みた。その結果、各種非破壊試験により補修効果の相対的評価が可能であった。さらに、MT システムを用いることで、断面修復工法での補修方法違いによる補修効果の違いを健全な状態からのマハラノビスの距離の大小関係によって定量的に評価できる可能性を示した。

キーワード: MT (マハラノビス・タグチ) システム, 品質工学, 非破壊試験, 弾性波法, 断面修復工法

1. はじめに

近年わが国では、インフラ構造物に関わる熟達点検者の減少を発端に、インフラ構造物の欠陥や劣化評価に機械学習やディープラーニング (深層学習) をはじめとした人工知能 (AI) を用いた検討が盛んに行われ始めており、一定の成果が報告されている¹⁾²⁾。著者らもこれまでクラスタリング手法の一つである自己組織化マップ (SOM) を用いて RC 構造物の内部欠陥領域評価に取り組んできた³⁾が、類似した欠陥性状での適用にとどまり、適用範囲の狭さが課題であった。

構造物に生じた欠陥や劣化に対して適用した補修工法による性能の回復程度を定量的に数量化し「見える化」することは、補修品質の確保の観点で重要であり、MT (マハラノビス・タグチ) システム (以下、MT システムと称す) は、これに適したパターン認識手法の一つと言える。MT システムは、品質工学を源流に持つ評価手法であり、健全なデータを基準として複数の指標を一次元化したマハラノビスの距離による定量的評価を実現する。また、SN 比の分析により評価に寄与する特徴量を確認でき、一次元化されたマハラノビスの距離により評価データ間の位置関係を確認できる利点がある。

そこで本研究では、断面修復工法による補修効果の定量的評価手法の確立を目的に、初期欠陥の豆板を中央部に設けた試験体 (以下、部分欠陥試験体) を作製し、様々な方法で断面修復を行うことで、各種非破壊試験手法により補修効果が評価可能か検討した。加えて、各種非破壊試験データを組み合わせて MT システムに適用することで、複数の指標を一次元化したマハラノビスの距離による定量的評価の有用性について検討した。

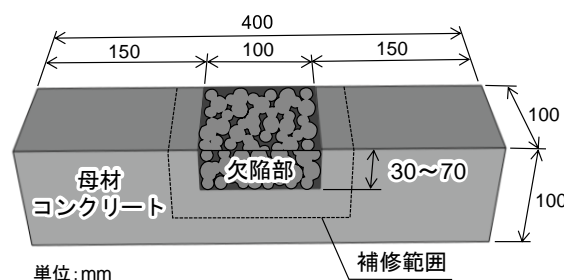


図-1 試験体概要

2. 実験概要

2.1 試験体概要

部分欠陥試験体の試験体概要および試験体のパラメータを図-1 および表-1 に示す。試験体は 100 mm×100 mm×400 mm の角柱試験体である。試験体の中央部には幅 100 mm、長さ 100 mm、深さ 30~70 mm の切り欠きを設け、豆板を模擬したポーラス状の欠陥を母材コンクリート材齢 3 日に後打ちで作製した。

コンクリートの計画配合および使用材料の物性値を表-2 および表-3 に示す。母材コンクリートとポーラス状の欠陥部 (以下、欠陥部) は同一配合で作製し、欠陥部はコンクリート部 (以下、健全部) との応答の違いを明瞭にするため設計空隙率を 20%程度とした。欠陥部の作製方法は、佐々木らの豆板試験体の作製方法を参考に⁴⁾にした。なお、欠陥部の空隙率はモルタル分の落下量および詰め込み量により管理を行い、空隙率は JCI-SPO2-1 を参考に全空隙率を算出した (表-1)。

試験体の養生方法は標準養生とし、母材コンクリート材齢 14 日まで養生を行い、その後は気中養生とした。

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博士 (工学)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)

表-1 部分欠陥試験体のパラメータ

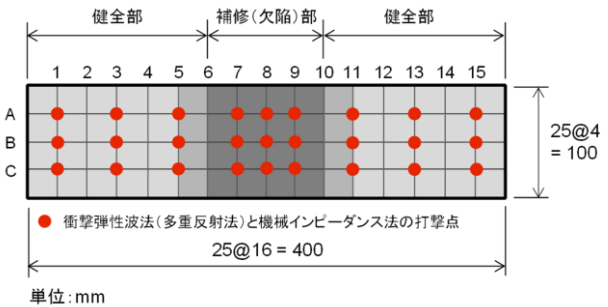
試験体名	欠陥深さ (mm)	欠陥部の除去	補修方法 ※()内は使用補修材	補修界面の処理方法	欠陥部の全空隙率 (%)	曲げ強度 (N/mm ²)
無補修	30	無し	無補修	—	16.9	2.08
S-NSM-wet			表面補修 (NSM)	プレウエッティング	23.1	3.04
S-PCM-p			表面補修 (PCM)	プライマー	27.1	2.66
S-PCM-wet				プレウエッティング	26.9	2.80
無補修	50	有り	無補修	—	20.6	1.09
IS-NSM-wet			内部・表面補修 (NSM)	プレウエッティング	24.4	3.54
IS-PCM-p			内部・表面補修 (PCM)	プライマー	23.2	2.95
IS-PCM-wet			内部・表面補修 (PCM)	プレウエッティング	24.1	3.04
I-NSM-wet+S-PCM-p			内部補修 (NSM) + 表面補修 (PCM)	プレウエッティング (内部補修), プライマー (表面補修)	24.1	3.39
無補修	70	無し	無補修	—	23.9	0.53
S-PCM-p			表面補修 (PCM)	プライマー	26.3	2.40

表-2 コンクリートの計画配合

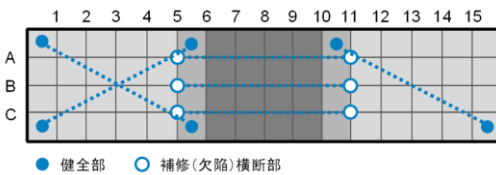
粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能AE減水剤
20	55	48	4.5±1.5	170	309	847	918	0.93	4.02

表-3 使用材料の物性値

材料名	品質
セメント	早強ポルトランドセメント, 密度: 3.12 g/cm ³
細骨材	徳島県産, 硬質砂岩, 砕砂 吸水率: 1.77%, 表乾密度: 2.57 g/cm ³
粗骨材	徳島県産, 砂岩, 砕石 5~15 mm 吸水率: 1.64%, 表乾密度: 2.57 g/cm ³ 10~20 mm 吸水率: 1.62%, 表乾密度: 2.57 g/cm ³
NSM	NSM: セメント系無収縮モルタル 硬練りパッド型
PCM	PCM: ポリマーセメントモルタル ポリアクリル酸エステル (PAE) 系粉末ポリマー混入型
プライマー	PCM専用プライマー, 酢酸ビニル・エチレン共重合体 (EVA) 系エマルジョン主成分型



(a) 衝撃弾性波法および機械インピーダンス法の打撃点



(b) 超音波法の測線

図-2 各種非破壊試験による測定箇所

2.2 欠陥部の補修方法

欠陥部の補修には断面修復工法の左官工法を採用し、断面修復材 (以下, 補修材) には, 表-3 に示すセメント系無収縮モルタル (以下, NSM) およびポリマーセメントモルタル (以下, PCM) を用いた。補修方法は, 欠陥部を除去せず表面のみを補修した場合, 欠陥部をはり取り内部および表面を補修した場合, 無補修の3通りとし, 欠陥深さ 70 mm の試験体については, 欠陥の深さに対し補修方法が適切ではない状態を再現した。なお, 補修材の練り混ぜにはモルタルミキサを用い, 表面補修は欠陥部より 25 mm 広く補修を行った。PCM を用いて補修を行う場合には, プライマー処理を行った場合と, プレウエッティングを行った場合で検討した (表-1)。補修後の試験体の養生方法は湿潤での封緘養生とした。

2.3 各種非破壊試験概要

各種非破壊試験は, 補修前の母材コンクリート材齢 16 日および補修後の補修材材齢 3 日 (母材コンクリート材齢 45 日), 補修材材齢 28 日 (母材コンクリート材齢 70 日) に実施した。なお, 補修を行わない無補修試験体は, 母材コンクリート材齢 16 日と 70 日に試験を実施した。

(1) 衝撃弾性波法による測定方法

衝撃弾性波法は, 補修表面および内部の一体性や充てん度の評価のために多重反射法により実施した。打撃点は図-2(a)に示す 25 mm 間隔のメッシュの交点とし, 左右の健全部および補修 (欠陥) 部の各 9 点とした。打撃の入力には, φ 8 mm の鋼球を用いた。打撃により生じた応答信号の取得には小型の加速度センサ (測定周波数範囲: 4 Hz~20 kHz, 最大使用加速度: 4400 m/s²) を用い, 加速度センサは薄手の両面テープ (厚さ 0.23 mm) を用いて打撃点の近傍に設置した。測定におけるサンプリング時間は 20 μ 秒, サンプリング数は 4096, データ長は 0.0819 秒とし, 5 回の打撃による時刻歴応答をパソコンに記録した。記録した時刻歴応答波形を FFT 変換し, 周波数スペクトル (実効値) を取得した。また, 式 (1) より弾性波伝搬速度 (以下, 弾性波速度) を算出した。

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \quad (1)$$

ここで, V_p は弾性波速度 (m/s), f_0 は卓越周波数 (Hz), L は試験体高さ (m) である。

なお, 本検討で設定したサンプリング時間は版厚に対

して十分とは言えないが、使用した結果は打撃点および対象面での平均値用いており、補修効果の傾向を捉える上では影響は見られなかった。

(2) 超音波法による測定方法

超音波法は、補修表面の一体性の評価のためハンディタイプのドライカップリング式超音波測定器を用いて超音波伝搬速度（以下、超音波速度）を測定した。

表-4 に測定機器の仕様を示す。本装置の送受信探触子間距離は 150 mm であり、計測される弾性波は表面近傍を伝搬する縦弾性波である。超音波速度の測線は図-2(b)に示す通りであり、健全部および補修（欠陥）横断部とした。測定は、試験体の表面性状などに伴う超音波速度のばらつきを考慮して各 3 測線で測定を行い、3 測線での平均値を測定値とした。

(3) 機械インピーダンス法による測定方法

機械インピーダンス法は、加速度センサが内蔵または取り付けられたハンマでコンクリート表面を打撃し、得られた打撃波形からコンクリートの弾性的性質を示す指標となる機械インピーダンスを測定する試験方法である⁹⁾。本研究では、補修表面の強度および一体性の評価のため市販の測定器を使用し、ハンマに内蔵された加速度センサによって取得した打撃力波形を用いて算出した強度指標値（STR 値）および表面劣化指標（INDX 値）を測定した。ここで、STR 値はコンクリート表面の単位面積当たりのバネ係数を指標とする強度推定尺度であるバネ係数度より推定されたコンクリートの圧縮強度 (N/mm²) である。INDX 値は、ハンマがコンクリートに衝突するときの初速度と反発するときの初速度の比を表す値であり、完全弾性体であれば 1、表面に劣化がある場合には INDX 値は大きくなる。

打撃点は衝撃弾性波法の多重反射法と同一であり、打撃は各点 1 回行なった。測定値は、左右の健全部各 9 点と補修（欠陥）部の 9 点での平均値とした。なお、補修後の左右の健全部の値については、5 列および 11 列は補修境界であり、値のばらつきが大きかったことからこれらを除く左右各 6 点での平均値とした。

(4) コンクリートの含水率測定方法

コンクリートの含水率は、コンクリート中を伝搬する弾性波などに影響を及ぼす。そこで、高周波容量式のコンクリート・モルタル水分計を用いて表面含水率の測定を行った。測定は、使用材料の違いを鑑み、健全部および補修（欠陥）部で実施し、2 回の測定による平均値を測定値とした。

2.4 強度試験概要

(1) 母材コンクリートの圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は、母材コンクリートの圧縮強度推定のため φ100 mm×200 mm の円柱試験体を用いて JISA 1108

表-4 ハンディタイプの超音波測定器の仕様

項目	仕様
動作周波数	50 kHz
超音波伝播時間の測定範囲	12.5~150 μ秒
超音波伝播速度の測定範囲	1000~12000 m/s
伝搬時間の測定精度	±0.01・t+0.1 (t: 測定時間)



図-3 曲げ強度試験の様子

に準じて実施した。試験体は、母材コンクリート打設時に作製し、養生方法は部分欠陥試験体と同一である。圧縮試験は、非破壊試験を実施した母材コンクリート材齢 16 日、補修材材齢 3 日と 28 日に各 3 本ずつ実施した。

(2) 補修材の曲げ強さおよび圧縮強さ試験方法

補修材の曲げ強さおよび圧縮強さ試験は、補修材の各強度推定のため 40 mm×40 mm×160 mm の角柱試験片を用いて JIS A 1171 に準じて実施した。試験片は、部分欠陥試験体の補修時に作製し、養生方法は湿潤状態での封緘養生である。曲げ強さ試験は補修材材齢 3 日と 28 日に各 3 本ずつ実施し、破断した試験片を用いて圧縮強さ試験を行った。

(3) 部分欠陥試験体の曲げ強度試験方法

曲げ強度試験は部分欠陥試験体の補修材材齢 30 日に欠陥部を下面として、JIS A 1106 に準じて三等分点載荷により実施した（図-3）。なお、各試験体の曲げ強度試験結果は表-1 に示す通りである。

3. 各種非破壊試験による補修品質の評価結果

3.1 衝撃弾性波法による測定結果

図-4 に各試験体の補修（欠陥）部の弾性波速度を示す。図には左右の健全部の補修材材齢 28 日における弾性波速度の平均値を併せて示している。なお、図の各試験体名は表-1 に示す通りである。

図より、ほぼ全ての試験体において、材齢に伴い補修後の補修部の弾性波速度が増加する傾向が認められ、健全部でも同様の傾向が確認された。これは、式 (2) に示す弾性波動理論に基づく弾性波速度の理論式より、弾性波速度は弾性係数に依存するパラメータであり、図-5 に示す各材料の圧縮試験結果のように材齢に伴う圧縮強

度の増加に伴い弾性係数が増加し、弾性波速度が増加したと考えられる。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

ここで、 V_p は弾性波速度、 E は弾性係数 (N/mm^2)、 ρ は密度 (g/cm^3)、 ν はポアソン比である。

次に補修前後の弾性波速度の変化に着目すると、補修を行った試験体は、補修後の補修部の弾性波速度が大きく増加した。また、欠陥部を除去せず補修した欠陥深さ 50 mm の IS-NSM-wet 試験体および I-NSM-wet+S-PCM-p 試験体の補修部は、補修材材齢 28 日時点で健全部と同程度まで弾性波速度が回復している。

次に、補修方法および欠陥深さの違いに着目すると、欠陥部を除去して補修した試験体の方が欠陥部を除去せず補修した試験体と比較して弾性波速度が全体的に速くなる傾向が認められた。また、欠陥部を除去せず補修した試験体では、欠陥深さの深い欠陥深さ 70 mm の試験体の方が欠陥深さ 30 mm の試験体と比較して補修後の弾性波速度の回復量は小さくなった。これは、多重反射法の場合には、弾性波の伝播方向の平均的な応答を捉えていることから、欠陥部を伝搬する弾性波速度が低下し、欠陥深さ 70 mm の試験体は欠陥領域が広く欠陥部の影響が顕著であったことが要因と考えられる。

補修材の違いに着目すると、弾性波速度は欠陥深さ 50 mm の IS-NSM-wet 試験体が最も速くなった。これは、図-5 に示される圧縮強度の違いから、NSMの方が弾性係数が大きいと考えられ、弾性波速度が大きくなったと推察される。

3.2 超音波法による測定結果

図-6 に補修（欠陥）横断部の超音波速度を示す。図には健全部の補修材材齢 28 日の超音波速度の平均値を併せて示している。

図より、補修後の補修（欠陥）横断部の超音波速度は、衝撃弾性波法と同様に材齢に伴い増加した。また、測定された超音波速度は多重反射法により得られた弾性波速度と比較して 1000 m/s 程度速くなり、超音波速度では、欠陥深さが深くなるほど超音波速度が低下する傾向が認められた。これは、衝撃弾性波法の多重反射法と超音波法では入力周波数や測定原理が異なることや超音波法では送受信端子間で測定した伝搬時間差から超音波速度を算出していることから、欠陥深さに伴う伝搬経路の延長の影響を受けやすかったことが要因として考えられる。

次に、補修前後の超音波速度に着目すると、補修を行った試験体は補修後の超音波速度が大きく増加し、補修材材齢 28 日時点で、補修を行った全ての試験体において超音波速度が健全部以上に回復していることが確認で

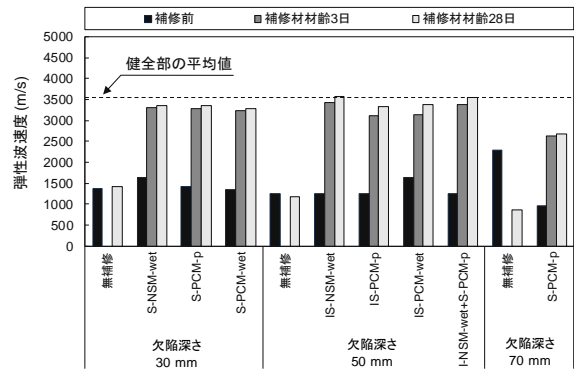


図-4 弾性波速度の測定結果（補修（欠陥）部）

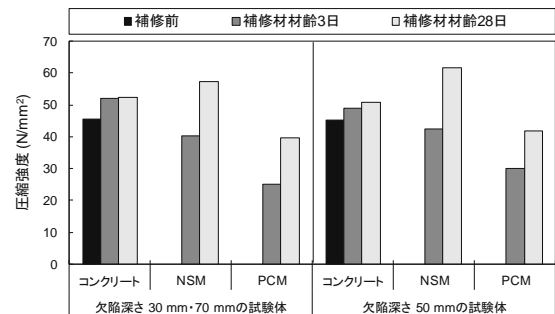


図-5 各材料の圧縮強度試験結果

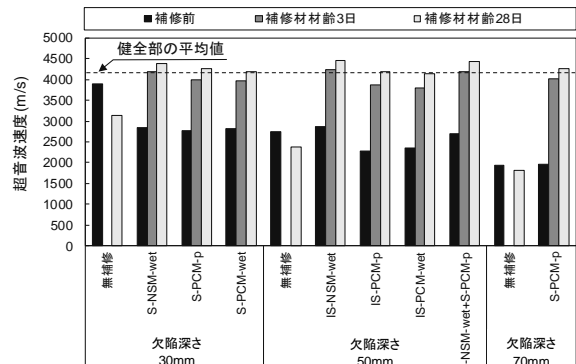


図-6 超音波速度の測定結果（補修（欠陥）横断部）

きる。一方で、欠陥深さ 70 mm の S-PCM-p 試験体のように補修方法が適切ではない試験体であっても、超音波速度が十分に回復していることから、欠陥表面を補修材により覆った場合には、超音波速度により補修内部の状態を評価することは困難であった。

3.3 機械インピーダンス法による測定結果

図-7 に一例として補修（欠陥）部の STR 値を示す。図には補修材の圧縮強さ試験結果および健全部の補修材材齢 28 日の左右の STR 値の平均値を併せて示している。

補修を行った試験体は補修後コンクリートの強度指標である STR 値が増加し、材齢に伴いさらに増加する傾向が確認された。また、IS-NSM-wet 試験体のみ補修材材齢 28 日時点で健全部と同程度まで STR 値が回復していることが確認できる。STR 値と補修材の圧縮強さの実測値を比較すると、欠陥部を除去せず補修を行った試験体は補修材材齢 3 日時点での強度については概ね推定でき

ている。一方で、補修材材齢 28 日および欠陥部を除去して補修を行った試験体は実測値よりも STR 値は小さくなる傾向にあった。

4. MT システムによる補修効果の評価

4.1 MT システムとは

MT (マハラノビス・タグチ) システムは、タグチメソッド (品質工学) の創始者である田口玄一博士によって考案された、パターン認識や予測のための手法である。MT システムは、ばらつき方が一様で正常な状態を基準として設定し、この基準からのパターンの相違を後述するマハラノビスの距離 (Mahalanobis Distance, 以下, MD) により数量化することで、多次元データを一次的に評価可能である。ここで、基準となる結果が安定した状態にあるサンプルから構成される健全なデータ群を単位空間と呼び、評価データ群を信号空間と呼ぶ。

MT 法は MT システムの中でも「判別」と「診断」に向けた手法であり、信号空間のサンプルの MD が「閾値」を超えるかどうかで判別を行う。MT 法による MD の算出は、相関係数の逆行列を用いて式 (3) より算出され、一般に、4.0 以下であれば単位空間の仲間、それ以上であれば仲間とは言えないと判断される。

$$D = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i,j=1}^k a_{ij} \frac{x_i - m_i}{\sigma_i} \frac{x_j - m_j}{\sigma_j}} \quad (3)$$

ここで、 D はマハラノビスの距離 (MD)、 k は項目数、 x は各項目の値、 m は項目ごとの平均値、 σ は項目ごとの標準偏差、 a_{ij} は相関行列の逆行列の (i,j) 成分である⁶⁾。なお、以上の定義式から分かるように、MD は単位空間を構成する健全なデータ群にどれだけ類似しているかをユークリッド距離に測定項目間の相関関係を考慮して表すことのできる尺度である。

各項目の MT 法による評価への影響度の検討には、異常の程度と MD の関係を示す直線の直線性の良さと感度を意味する SN 比を用いた。直交表を用いてその項目を使用した場合としない場合との 2 水準で検討を行い、要因効果図を作成することで、利得により判定を行った。ここで利得とは、各項目を使用した場合の SN 比から各項目を使用しない場合の SN 比を引いた値であり、利得が高ければその項目は判定を行うのに必須であり、値が小さいものは判定には役立たず、利得がマイナスの値かつ高い場合には、その項目を使用することでかえって測定精度が低下することを意味する⁷⁾。

4.2 MT 法による評価に利用するパラメータ

MT 法による評価には、JUSE-StatWorks/V5 を用いた。評価に用いた特徴項目は、(1) 母材コンクリート材齢

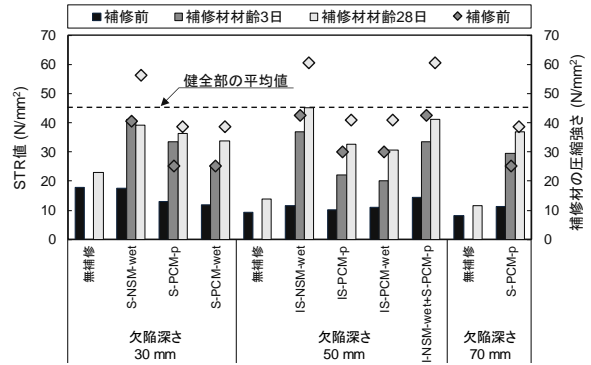


図-7 STR 値の測定結果 (補修 (欠陥) 部)

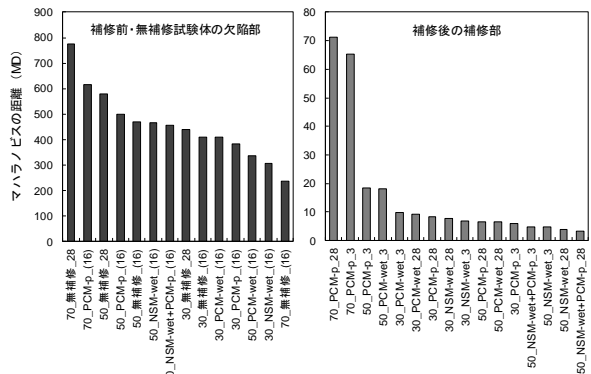


図-8 MT 法より得られた評価結果

(日)、(2) 表面含水率 (%), (3) 弾性波速度 (m/s), (4) 卓越周波数の振幅値 (mV), (5) 振幅比面積, (6) 超音波速度 (m/s), (7) STR 値, (8) INDX 値の 8 次元である。ここで、振幅比面積は、時刻歴応答波形の絶対値を振幅値の最大値で正規化した正規化振幅比から 2μ 秒毎に微小面積を算出し足し合わせた 0.01 秒までの面積の合計値である。本検討では、補修方法の違いによる補修効果の違いを総合的に評価するため、(2)~(8)の特徴項目については、健全部および欠陥 (補修) 部で得られた各種非破壊試験結果の平均値を用いた。なお、(3)~(8)のデータは、評価領域が異なることや MT システムでは始めから特徴項目を絞り込まず網羅的に用いることを推奨していることから各種非破壊試験から得られた全データを用いて評価を行った。

単位空間は、各部分欠陥試験体の補修前後の左右の健全部の全 49 データにより単位空間を作成した。信号空間は、部分欠陥試験体の補修前後の補修 (欠陥) 部の 30 データを用い、正常なデータとして健全部右側の補修材材齢 28 日の 11 データを併せて使用した。

4.3 MT 法による補修品質の評価結果

図-8 に MT 法により得られた評価結果を示す。図の凡例は、例えば 70_無補修_28 (欠陥深さ_補修方法_試験材齢) は、欠陥深さ 70 mm の無補修試験体の補修材材齢 28 日のデータを意味する。補修前および無補修試験体の MD の大きさに着目すると、MD は極めて大きく健全状

態とは明らかに異なることが分かる。また、概ね欠陥深さ毎に並んでおり、試験体の性状に応じて段階的に異なるMDを示している。次に、補修後の補修部のMDに着目すると、欠陥を除去せずに補修した70_PCM-p試験体は他の補修を行った試験体と比較してMDが大きく、健全状態から大きく離れていることから、補修が十分でないことが分かる。なお、MDが4以下のデータは正常とみなされるが今回正常とみなされたデータは50_NSM-wetと50_NSM-wet+PCM-pの補修材材齢28日時点での測定データのみであった。なお、健全部のデータについては、全てMDは4以下の値を示し、健全なデータ空間に分類されていることを確認した。

4.4 MT法による評価結果の妥当性の検討

前節より、MT法による補修効果の評価可能性が示唆されたが、得られた結果の妥当性は不明である。そこで、力学的特性の曲げ強度に着目してMT法により得られたMDと曲げ強度の関係性について検討した。

図-9に曲げ強度とMT法により得られたMDの関係を示す。無補修試験体に着目すると、曲げ強度とMDの間には相関関係が認められ、欠陥深さが深くなるほど曲げ強度は低下し、MDの増加に伴い健全な単位空間から距離が離れることが確認できる。補修試験体は70_PCM-p試験体のみ曲げ強度に対し極めてMDが大きい傾向にあったが、その他の補修試験体については、曲げ強度が高いほどMDが小さく、単位空間に近づく傾向が認められた。

図-10に各項目のMT法による評価への影響度を示す。本研究の範囲内では、弾性波速度の利得が最も大きくなった。これは、本研究では表層付近に存在する豆板を対象としており、また断面修復工法においては、特に奥行き方向の一体性や充てん度の影響が大きく、弾性波速度がこれらの影響を最も捉えることができていたためと推察される。なお、特徴項目の選択にあたっては、今回評価に用いた信号空間データは単一の変状(初期欠陥)を対象としており、今後様々な変状への適用を想定すると、有用なパラメータの傾向は変わると考えられる。

今後は、目視点検データや他の非破壊試験データも含めたパラメータのあり方や、実構造物評価を念頭に置いた単位空間の作成方法および様々な劣化変状を信号空間として、本システムの有用性を検討する予定である。

5. まとめ

本論文により得られた知見を以下に示す。

- (1) 各種非破壊試験により得られた試験データをMT法に適用することで、断面修復工法による補修効果を健全な状態からの距離として表現することが可能であり、補修方法の違いによる補修効果の大小をMDの

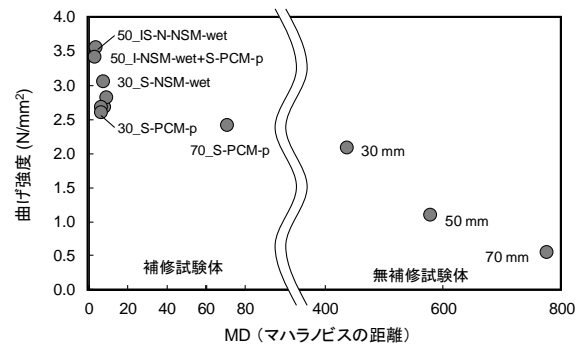


図-9 MDと曲げ強度の関係

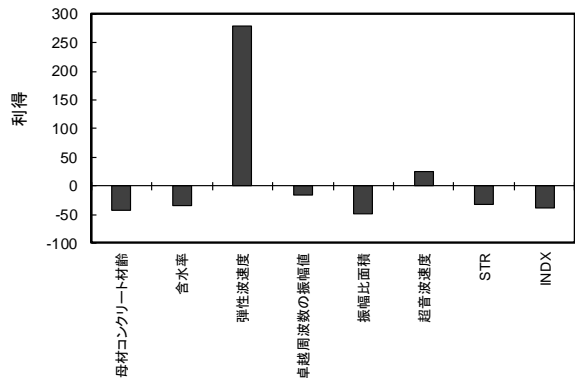


図-10 各項目のMT法による評価への影響度

大小により評価することが可能であった。

- (2) 本研究の範囲内では、MDと曲げ強度の間には相関が認められ、MDによる補修効果の評価の有用性が高いことが示された。

参考文献

- 1) 土木学会 技術推進機構：SIP インフラ連携委員会報告 インフラ構造物へのAI技術適用のための調査研究報告書，2019.3
- 2) 新保弘，溝渕利明，野嶋潤一郎：打音探査への機械学習の適用に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1829-1834，2019.7
- 3) 野内彩可，村上祐貴，井山徹郎，外山茂浩：周波数応答関数を入力値として自己組織化マップに適用したコンクリート内部の欠陥領域評価，コンクリート工学論文集，Vol.29，pp.87-100，2018.9
- 4) 佐々木尚美，小林薫，半井健一郎：樹脂注入による豆板補修工法の提案と各種材料強度の評価，土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)，vol.70，No.2，pp.252-271，2014
- 5) NDIS3434-3 コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第3部：機械インピーダンス試験方法，2017.5 制定
- 6) 田口玄一，兼高達貳(編)：品質工学応用口座 MTシステムにおける技術開発，日本規格協会，2002
- 7) 立林和夫：入門タグチメソッド，日科技連，2004