

論文 機械学習に基づく打音によるRC供試体の欠陥判定に及ぼす表面塗装の影響

鈴木 大地*1・黒田 一郎*2

要旨：人工欠陥を有する表面を塗装されたRC供試体を対象として、欠陥を検知するための打音を用いた非破壊検査における局所外れ値因子法(LOF)の適用性及びその検査での表面塗装の影響を確認することを目的として実験的検討を行った。LOFに基づく塗装前のコンクリート表面の直接打撃と塗装後の塗材を介した打撃の打音スペクトルを入力データとした欠陥判定を試みた。その結果、表面塗装によって正解率期待値が1割程度低下すること、塗装後では打撃応答の高周波成分の減衰が顕著であり、その帯域を含む打音スペクトルを入力データとした場合の判定性能の低下が著しいことを明らかにした。

キーワード：非破壊検査, 打音, 局所外れ値因子法, 表面塗装, 人工欠陥

1. はじめに

日本の高度経済成長期に建設された多くのインフラは現在、その耐用年数の限界に近づいている。国土交通省によると、令和6年3月時点において国家機関の建築物等の施設数の7割以上が築後20年を経過¹⁾しており、予防保全の重要性が高まっている。そこで、施設の点検・診断、措置及び記録からなる流れ（メンテナンスサイクル）の中で定期的な点検が実施されている。そこでの点検では、経済性や効率性の観点から、多くは目視確認や打音検査が実施されている。

打音検査は検査対象をハンマ等で打撃し、その打音から点検を行う方法で、目視で検出困難な浮きやひび割れを見つけることが可能であるが、一方で点検者の経験、技能に依存する。そこでデジタル化された打撃応答を用いたRC構造物の劣化・損傷の把握を目的とした研究^{2),3)}は多くあり、近年では機械学習に基づいた研究⁴⁾⁻⁶⁾へと発展を遂げている。

しかし、その研究の多くは土木構造物を想定しており、コンクリートの剥き出しの露出面を前提にしているが、実際の建築物の多くは外壁塗装を有している。外壁塗装は、紫外線や排気ガス等からコンクリートを保護しコンクリートの劣化を防ぐ目的や周りの環境に溶け込むようにする美観の付与、防水性や防汚性等の機能の付与の目的がある⁷⁾。公共建築物は、JISA 6906（建築用仕上塗材）に基づいて、防水形複層塗材Eが外壁塗材として多用されている。これらの塗材はコンクリート表面の小さなひび割れに追従⁸⁾する性能を有しているため、コンクリートのひび割れの目視による評価が困難となり、また、雨だれの汚れが目立たないようにするため、凹凸状の模様になるように塗装されることが多く、その表面形状が打音検査に及ぼす影響についての検討はなされていない。

以上を踏まえ、本研究では、人工欠陥を有する表面を塗装されたRC供試体の欠陥の有無を、機械学習の一種である局所外れ値因子法⁹⁾(Local Outlier Factor Method, 以降LOFと略称)に基づく打音を用いて判定することを目的として実験的検討を行った。実験は、コンクリート表面から深さ50 mmに人工欠陥を有するRC供試体の塗装前の打音と塗装後の塗材を介した打音を収集し、LOFで判定することを試みている。その際、教師データ数の影響及び塗装による打撃応答の特徴の違いから、LOFの内部パラメータの1つである周波数帯域の影響についても検討を加えている。

2. 実験概要

2.1 供試体と塗装の概要

実験に用いた供試体は一边500 mmの正方形で厚さが200 mmの直方体で、縦100 mm×横100 mm×厚さ5 mmの発泡スチロール2枚を人工欠陥とし、コンクリート表面から深さ50 mm及び100 mmの位置に設置した。図-1に供試体諸元を示しており、RC壁の一部を切り出した形状を模している。供試体には4本のφ9SR235鉄筋を配しており、発泡スチロールの上下辺を鉄筋と接着し、打込みを行うことで供試体内

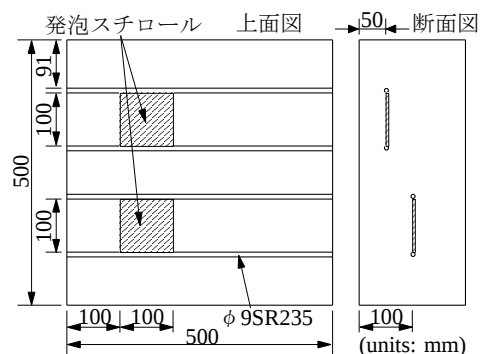


図-1 供試体諸元

*1 防衛大学校 理工学研究科前期課程 (学生会員)

*2 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 工博 (正会員)

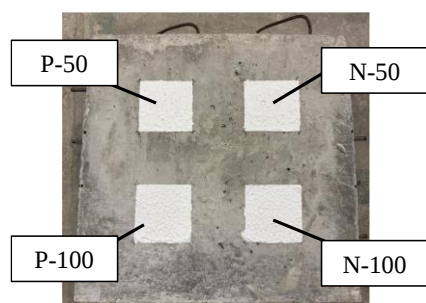
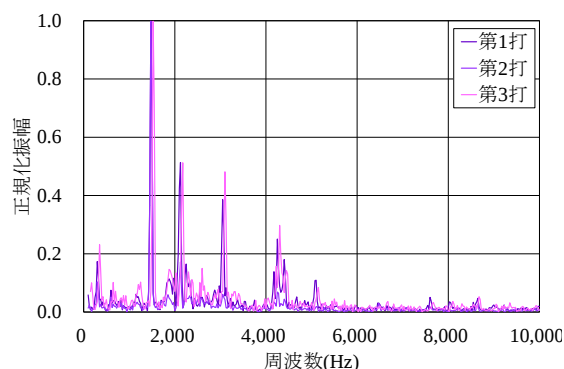
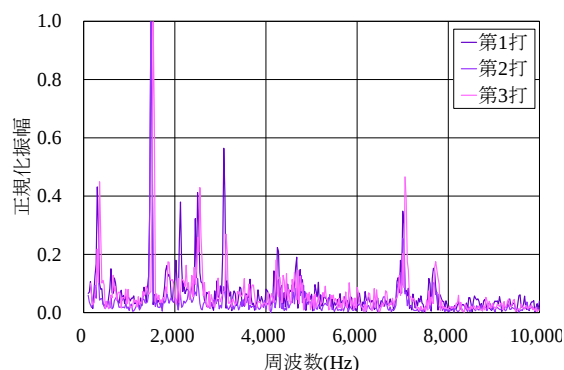


写真-1 供試体上面の塗装（4箇所）



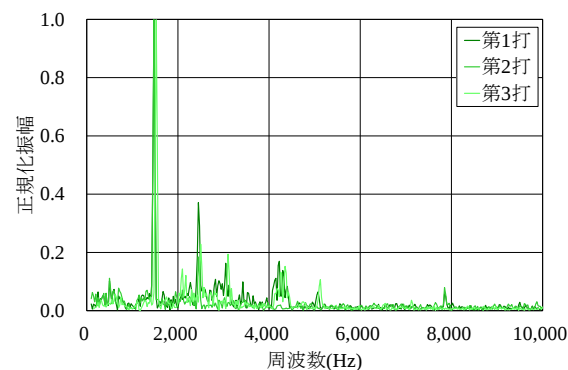
(a) N-50



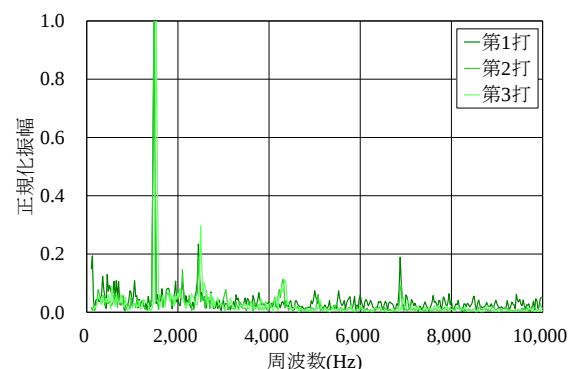
(b) P-50

図-2 塗装前打音のスペクトルの例

に人工欠陥を設置している。さらに、供試体上面に写真-1に示すコンクリート表面の白色部分である塗装(人工欠陥と同じく100 mm四方)を4箇所施した(写真-1のP-50, N-50, P-100, N-100)。本研究では人工欠陥のある部位を陽性(記号P)、ない部位を陰性(記号N)と定義する。P-50とP-100は、深さ50mm, 100mmの人工欠陥の位置に対応している。N-50とN-100は人工欠陥のない健全部位であり、それぞれP-50, P-100と同じ深さに鉄筋が埋まっている。本論文では紙面の都合もあり、これらの内のP-50で収集した陽性データ(人工欠陥あり)と、N-50で収集した陰性データ(人工欠陥なしで健全)の2種類の打音データを使用する。塗材はJIS A 6906の規格に合致する防水形複層塗材Eを使用した。塗装要領はマスチックローラーを使用し、規定量



(a) N-50



(b) P-50

図-3 塗装後打音のスペクトルの例

0.08~0.12 g/cm²を2回塗り重ねることで凹凸の模様をつけた。塗装によって生成される塗膜は3~5 mm程度である。

2.2 打音収集

打音収集のための打撃は、手動インパクトハンマ(質量0.16 kg, 感度2.27 mV/N)を用いてP-50とN-50の2箇所の100 mm四方の範囲を満遍なく打撃した。塗装前にコンクリート表面を直接打撃した塗装前打音と、同供試体に塗装後に塗材を介して打撃した塗装後打音を収集した。打音は、打撃位置から供試体表面の直上に300 mm離れたマイクロフォン(感度46.76 mV/Pa)によって測定し、電圧として出力された音圧をサンプリング速度毎秒10万回(100 kSample/s)のデータロガーによってA/D変換し、時刻歴として収集している。その際には、インパクトハンマの出力電圧が0.02 Vを下回る打撃では打音の音圧が周辺の雑音と同じオーダーになってしまうので、その10倍の0.2 V(衝撃力で約90 N)を下回る微弱な打撃での打音は収録から除外した。

収録した打音時刻歴を用いてFourier変換によって打音のスペクトルを得ている。その際には打音の余韻部を含む0.04 sをサンプル長さとしたため、スペクトルの周波数解像度は25 Hzである。図-2に、N-50とP-50での塗装前打音のスペクトルの例(各3打)を示す。N-50とP-50のどちらも0~5000 Hzの帯域に複数大きなピークが生じ、P-50

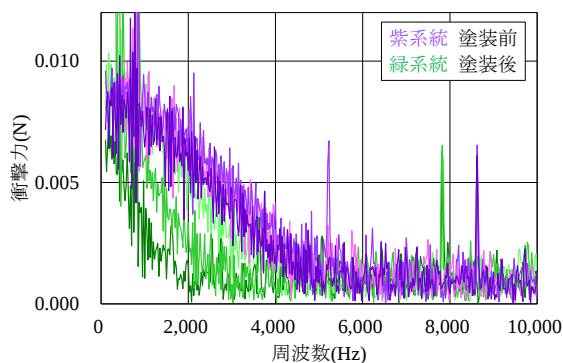


図-4 衝撃カスペクトルの例 (N-50)

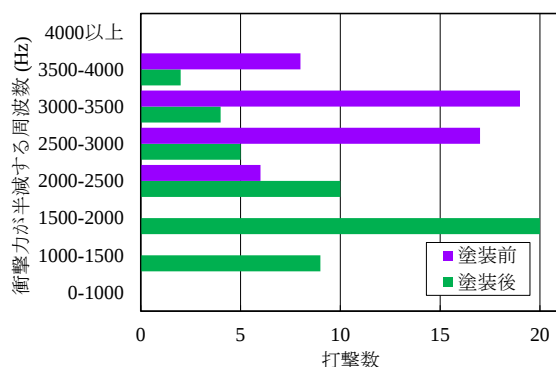


図-5 衝撃力が半減する周波数 (N-50, 各50打)

のみに約7000 Hzにもピークが確認できる。図-3に、塗装後打音のスペクトルの例を示す。塗装後においてもP-50に特有の7000 Hz前後におけるピークが認められる。また、塗装前(図-2)と塗装後(図-3)の打音スペクトルの比較から、400 Hz程度と2000 Hz以上の振幅が減少していることがわかる。これらのスペクトルの違いを3.1節で後述する機械学習の一種であるLOFにより捉えることで欠陥の有無を判定する。

手動インパクトハンマの出力として塗装前と塗装後に収集した衝撃力のスペクトルの例を各3打ずつ図-4に示す。打撃位置はN-50である。衝撃力が低周波帯域の半分まで低下する周波数は、塗装前では3000 Hz前後である一方で、塗装後では打撃毎の特性の違いが強く、約1000~3000 Hzの間に分布した。これは、塗材によって衝撃力の高周波成分が減衰するものの、マスチックローラーによる塗膜の凹凸形状のために、打撃毎の衝突箇所での塗膜厚さの違いによって減衰の特性が異なっているためと考えられる。そこで塗材によって衝撃力が減衰するトレンドを捉えるため、N-50で収集した塗装前後での衝撃カスペクトルを使用して、衝撃力がその最大値の半分まで減少する周波数を求めて、図-5にヒストグラムとしてまとめた。その際には、衝撃力のスペクトルにはスパイクが多いため、その最大値を評価するために窓幅500 Hzの移動平均を用いている。塗装前では全ての打撃で衝

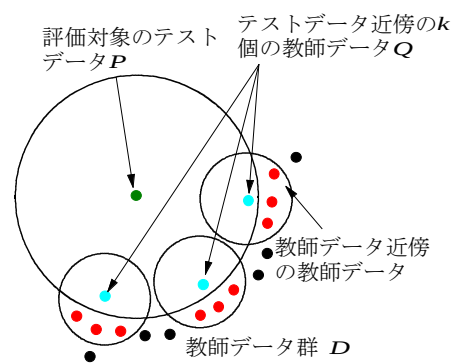


図-6 LOF概念図

撃力が半減する周波数は2000 Hz以上であり、3000~3500 Hzの範囲での打撃数が多く、高周波成分を豊富に含んでいることがわかる。塗装後では1500~2000 Hzの帯域に最も多く分布し、塗装によって高周波成分の減衰が顕著であるが、塗装前と同様に3000 Hz以上に分布する打撃データも存在し、塗装による衝撃力の高周波成分の減衰特性は打撃毎のばらつきが大きい。

3. 判定手法

3.1 局所外れ値因子法の概要

LOFは、機械学習の一種であり、特徴空間上のデータの局所密度に基づいて異常を判定する手法である。図-6にLOFの概念図を示す。N個の陰性である教師データからなる教師データ群Dと同じ特徴空間に置かれた判定対象であるテストデータPから近傍のk個の教師データQを探して、それらとの距離の平均の逆数をそのテストデータPの局所密度 LD_P と定義すれば、テストデータPのLOF値は次の式で求められる。

$$LOF = \frac{1}{k} \left(\sum_{Q \in N_k(P)} \frac{LD_Q}{LD_P} \right) \quad (1)$$

ここで、 $N_k(P)$ はQの集合であり、 LD_Q は教師データQの局所密度である。このLOF値は近傍の教師データとの局所密度の比較であり、テストデータPの局所密度 LD_P が、近傍の教師データQの局所密度 LD_Q と同等であれば1.0に近い値となりテストデータPは陰性と判定される。テストデータPが陽性であれば、テストデータPは陰性である教師データ群Dから離れた位置にプロットされるので局所密度 LD_P は小さくなりLOF値は1.0よりも大きな値となる。しかし、LOF値は陽性であると疑わしい度合いを数値で表わしているのに過ぎないので、ハイパーパラメータとして1.0よりも大きめの閾値 Th を設定しておき、LOF値が、この閾値 Th に満たないならばテストデータは陰性と判定され(推定陰性)、上回るなら陽性と判定される(推定陽性)。

3.2 パラメータ及び評価指標

LOFでは、LOF値の大小でテストデータの陰性・陽性

表－1 評価指標

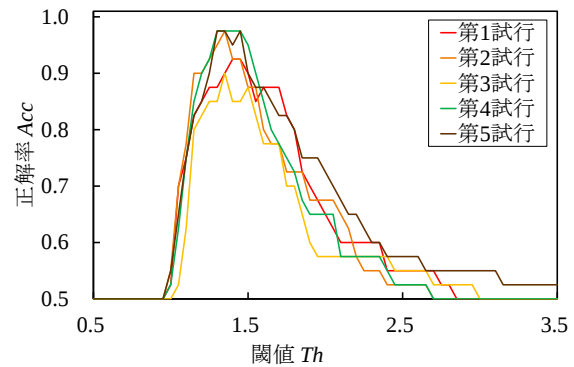
評価指標	定義
偽陽性率	$FPR = TP / (TN + FP)$
真陽性率	$TPR = TP / (TP + FN)$
正解率	$Acc = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$
正解率期待値	$E(Acc) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Acc_t$
AUC期待値	$E(AUC) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T AUC_t$

を判定するがハイパーパラメータとして閾値 Th の設定が必要となる。本研究では閾値は最大3.50まで0.05刻みで変化させている。教師データ数 N は学習器の性能に影響するので $N=4, 8, 16, 32, 64, 128$ の6段階設定している。また、近傍数 k と N の比率である k/N を1/16で統一した上で k 値を定め、 N の値が16以下の $N=4, 8$ では $k=1$ と固定している。

判定結果は、欠陥ありと推定される推定陽性と、欠陥なしと推定される推定陰性の2クラスである。一方で、実際の欠陥の有無によって実際陽性と実際陰性に2分され、真陽性 TP 、偽陰性 FN 、偽陽性 FP 、真陰性 TN の4通りに分類することができる。これを踏まえて表－1に示す評価指標の正解率 Acc 及び偽陽性率 FPR と真陽性率 TPR を基に求められるROC曲線のAUC値 AUC を用いて判定結果を評価する。

図－7に5回の試行の正解率 Acc と閾値 Th の関係の一例（塗装前、 $N=64$ ）を示す。3.1節で前述したように陰性のテストデータは式(1)で表わされるLOF値が1.0に近い値になると期待されるので、閾値 Th が概ね1.5より小さくなるとこれらの陰性のテストデータを誤って陽性と判定してしまう第1種過誤が生じて正解率が低減している。反対に閾値 Th を大きくし過ぎて陽性のテストデータのLOF値よりも上回るとそれら陽性のテストデータを誤って陰性と判定してしまう第2種過誤が生じ、これも正解率の低下の原因となる。図－7に示す例では、正解率 Acc の最大値は0.9～1.0の範囲であり試行毎のばらつきがある。そこで、計10回の試行での正解率の期待値 $E(Acc)$ を評価指標として採用した。

次に、ROC曲線のAUC値について説明する。AUC値は、横軸に偽陽性率 FPR （0.0～1.0の値をとる）、縦軸に真陽性率 TPR （同じく0.0～1.0）を置いた直交座標上において、閾値 Th を変化させた場合の FPR と TPR の関係を表すROC曲線と横軸に挟まれた部分の面積を指し、この値が1.0を達成するならば、閾値を適切な値に設定すれば全てのテストデータを正しく判定できることを表す。そして、値が小さくて0.5に至るならば判定結果はランダムな出力と



図－7 正解率期待値 $E(Acc)$ と閾値 Th の関係の一例

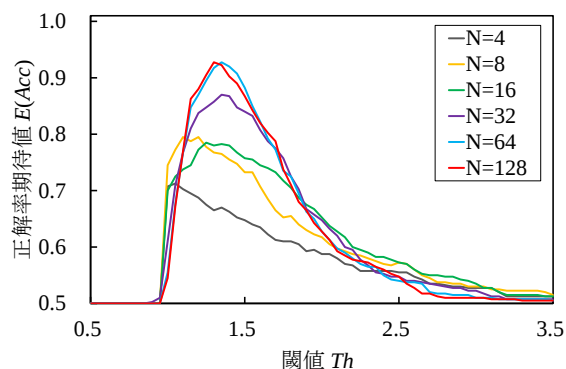
評価が変わらないことを表わしている。AUC値も正解率 Acc と同様に各試行のばらつきが存在すると考えられるので、計10回の試行でのAUC値の平均であるAUC期待値 $E(AUC)$ を採用した。

4. 判定結果

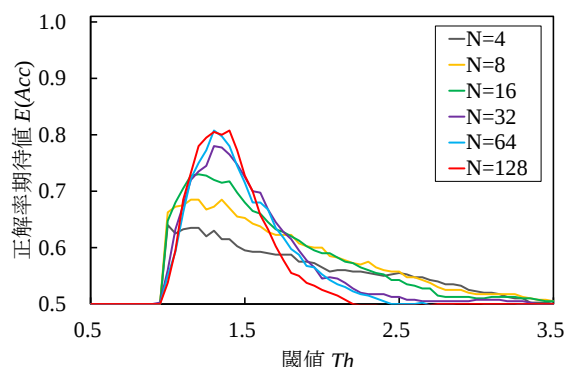
4.1 判定結果に及ぼす教師データ数 N の影響

教師データ数 N を4～128個に変化させたRC供試体の欠陥判定結果の正解率期待値 $E(Acc)$ と閾値 Th の関係について、塗装前を図－8(a)に、塗装後を図－8(b)にそれぞれ示す。使用した周波数帯域は図－2及び図－3の打音スペクトルから7000 Hz前後のピークを含みつつDCオフセットを排除した100～8000 Hzと設定した。図－8(a)の塗装前の判定結果から、教師データ数 N が少なめの4個において、閾値 Th が1.0と小さい時は第1種過誤すなわち偽陽性が生じて正解率期待値 $E(Acc)$ は低い、閾値 Th が1.1程度あれば $E(Acc)$ は0.7前後に達し、偽陽性を排除し、 $E(Acc)$ が向上する。 Th が1.1を超えて増大すれば第2種過誤すなわち偽陰性が生じ、 $E(Acc)$ は低減を始める。教師データ数 N を32個まで大きくすると正解率期待値の最大値は0.85を超えることがわかり、教師データ数の増加により判定性能が向上することを確認した。教師データ数 $N=64$ とすると、閾値 $Th=1.3$ で正解率期待値 $E(Acc)$ は0.9に達し、塗装前の状態において本提案手法のLOFによる人工欠陥を有するRC供試体の欠陥判定が可能であることがわかった。更に N を大きくした $N=128$ では、 $E(Acc)$ の最大値は0.9を超えるものの、 $N=64$ と同程度のことから、教師データ数を64個より多く準備しても判定性能の向上は認められず頭打ちすることがわかった。

図－8(b)の塗装後の判定結果に目を転じれば、 $E(Acc)$ と Th の関係は、塗装前の判定結果の図－8(a)と似た傾向であることが見て取れる。教師データ数 N が大きくなることで $E(Acc)$ が上昇することから、塗装前と同様に教師データ数 N の増加が判定性能の向上に寄与していることがわかる。しかし、教師データ数 N を増やして、64, 128に



(a) 塗装前



(b) 塗装後

図-8 正解率期待値 $E(Acc)$ と閾値 Th の関係における教師データ数 N の影響

達しても $E(Acc)$ の最大値は0.8程度であり、塗装前の判定結果(図-8(a))に比べ、1割程 $E(Acc)$ の最大値が低いことがわかった。

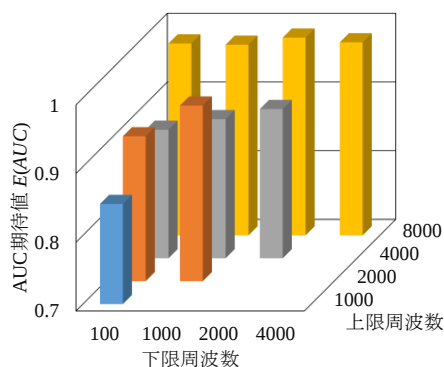
4.2 判定結果に及ぼす周波数の影響

2.2節で検討した衝撃力スペクトルの減衰トレンドでは、塗装を施すことによって高周波成分が減衰し、打撃毎にその減衰特性が異なることがわかった。また、打音のスペクトルも塗装の前後で異なっていた。

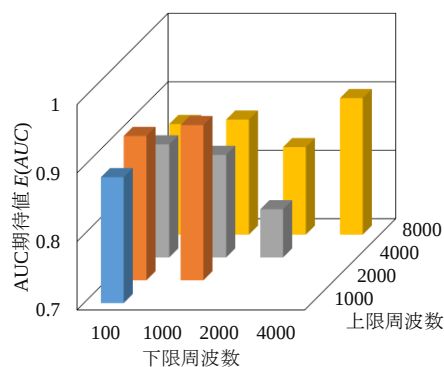
そこで LOFの入力データとする打音スペクトルの周波数帯域が塗装の前後での判定結果に与える影響について確認する。表-2に塗装の有無でのLOFに使用する周波数帯域を変化させた判定結果をAUC期待値で評価してまとめた。教師データ数 N は64で統一している。図-9では、情報の可視化を助けるため3D縦棒グラフで示す。周波数帯域は下限周波数を100, 1000, 2000, 4000 Hzの4パターン、上限周波数を1000, 2000, 4000, 8000 Hzに設定することで、それらの組み合わせとして計10種類の検証を行っている。図-9(a)の塗装前の判定結果から、高周波帯の上限周波数8000 Hzにおいて、下限周波数のいずれでも $E(AUC)=0.97$ 以上と良好な判定が可能であることがわかった(図-9(a)黄色)。一方で、低周波帯のみの100~1000 Hz(図-9(a)青色)では $E(AUC)$ は0.846と低く、塗装前と

表-2 周波数帯域とAUC期待値の関係

		周波数バンド(Hz)									
		100~1000	100~2000	1000~2000	100~4000	1000~4000	2000~4000	100~8000	1000~8000	2000~8000	4000~8000
塗装	なし	0.846	0.911	0.956	0.887	0.903	0.917	0.979	0.978	0.988	0.981
	あり	0.884	0.911	0.927	0.865	0.85	0.77	0.862	0.868	0.828	0.899



(a) 塗装前



(b) 塗装後

図-9 周波数帯域とAUC期待値の関係

しては最も判定結果が振るわなかった。上限周波数の2000 Hz(図-9(a)橙色)または4000 Hz(図-9(a)灰色)とした計5種類の判定では $E(AUC)$ は0.88~0.95程度であり、100~1000 Hzより判定結果は改善するものの、上限周波数8000 Hz(図-9(a)黄色)のいずれの判定にも達していない。提案手法において周波数帯域の違いによって $E(AUC)$ に0.1以上の差があり、低周波成分のみでの判定性能は振るわない。8000 Hzまでの高周波成分を含ませた判定では、100~4000 Hzのどの下限周波数でも $E(AUC)$ が高くなったことから、4000~8000 Hzの高周波帯を含ませることが重要であることがわかる。

次に、図-9(b)の塗装後の $E(AUC)$ を図-9(a)の塗装前と比較すれば、塗装前より低下するのがわかる。その中で、最も好成績であるのは1000~2000 Hzの判定で、 $E(AUC)$ は0.92以上である。さらに、100~1000 Hzでの $E(AUC)$ は0.88であり、これは塗装前の同じ周波数帯域での $E(AUC)$ の値は0.85より大きく、塗装によって唯一判定

性能が向上している周波数帯域である。その他の検討したすべての周波数帯域において塗装することで $E(AUC)$ は低下している。特に性能の低下が顕著であるのは、周波数帯域2000~4000 Hzと2000~8000 Hzの2種類で、 $E(AUC)$ の低下幅は共に0.14を超えており、どちらも2000 Hz以下の周波数を含まない判定である。塗装することで衝撃力の高周波帯域の減衰が強くなった結果（2.2節）、塗装後の判定では低い周波数帯域の寄与が大きくなり、このような結果を招いたのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究は、実構造物におけるコンクリート外壁の塗装を再現する目的で表面を塗装された人工欠陥を有するRC供試体を対象として、LOFに基づく打音による欠陥判定の有用性を確かめるために実験的検討を行ったものである。欠陥判定に及ぼす表面塗装の影響を調べ、LOFで入力データとする打音スペクトルの周波数帯域の影響についても検討したものである。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 塗装前のRC供試体の欠陥判定では、LOFに基づく提案手法により教師データ数 $N=64$ で正解率期待値0.9を超える判定が可能である。塗装後では正解率期待値は0.8程度であり、塗装前より約1割低下した。教師データ数 N の増大は判定性能の向上に有効であるが、塗装の有無に関わらず $N=64$ 以上での判定性能の改善は見られなかった。
- (2) 塗装による打撃応答特性（衝撃力、打音のスペクトル特性）の違いに着目し、LOFで入力データとする周波数帯域を変化させると、塗装前では高周波成分を含んだ場合に判定性能が良好であるのに対して、塗装後では高周波成分を含まず低周波帯域のみを入

力データとすると判定結果が向上した。

参考文献

- 1) 国土交通省大臣官房長官繕部：国家機関の建築物等の保全の現況，令和6年3月，p.24-25
<https://www.mlit.go.jp/gobuild/content/001728930.pdf>
- 2) 伴享，歌川紀之，森濱和正：RC構造物への打音法の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1809-1814，2004.
- 3) 三好茜，園田佳巨，川端健太：打音特性を用いた劣化診断に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.2131-2136，2009.
- 4) 新保弘，溝渕利明，尾関智子，野嶋潤一郎：機械学習による打音探査の定量化に関する検討，AI・データサイエンス論文集，Vol.4，No.J1，pp.522-529，2020.
- 5) 野内彩可，村上祐貴，井山徹郎，外山茂浩：打撃応答特性を自己組織化マップに適用したコンクリート内部欠陥の領域判定，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1879-1884，2017.
- 6) 森藤優一，黒田一郎：LOF 及び k 近傍法によるRC梁の損傷判定における周波数帯域の影響の検討，構造工学論文集，Vol.69A，pp.757-767，2023.
- 7) 河野政典：仕上材の躯体保護効果—建築仕上材の中性化抑制効果について—，Finex，Vol.10，No.57，pp.23-24，1998.
- 8) 和田環，藤井大輔，澤田瑞恵，富田洸：外装塗装材料のひび割れ追従性評価技術，鹿島技術研究所年報，第69号，2021.
- 9) M. M. Breunig, H. P. Kriegel, R. T. Ng, J. Sander: "LOF: Identifying Density-Based Local Outliers", Proc. ACM SIGMOD, pp.93-104, 2000.