機械学習を用いた打音スペクトルの分析による鉄筋の腐食ひび割れの判定に関する基礎的研究

防衛大学校　○福井智大，正会員　黒田　一郎，（株）九検　西　敏臣

１．はじめに

近年，鉄筋コンクリート構造物の老朽化が問題視されており，鉄筋腐食の判定も代表的な課題の一つである．効率的な整備性の観点からコンクリート内部の状態を確認する手法は非破壊検査に頼らざるを得ない。そこで，簡易的手法として，鋼球の衝突によるコンクリート表面振動を用いた機械学習による鉄筋の腐食ひび割れの判定法を提案し，その有用性を実験で確認する．

２．実験概要

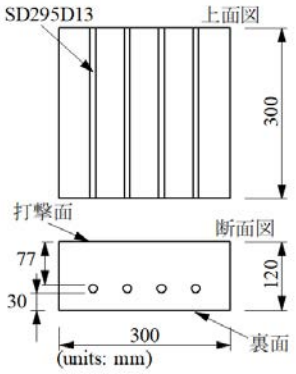
供試体は，壁面の一部を模した寸法 300×300×120mm の矩形で，D13鉄筋を4本配している（**図－１**）．鉄筋の腐食方法は電食である．腐食率は最終的に6%と設定し，腐食の前後で鋼球の衝突実験を行った．供試体は全8体でその内4体を電食に供し，残りの4体は電食させない管理供試体である．かぶりが30mmと小さい表面（裏面）では，腐食ひび割れが観察されたが，反対側のかぶりが77mmと大きい衝突面には腐食ひび割れは認められず，外観では鉄筋の腐食を検知できない条件である．

衝突実験は，供試体への衝撃の入力を鋼球の自由落下による衝突によって行い，その際の打音を収録した．実構造物を対象とした現場での測定を鑑みれば，鋼球の落下衝突よりもハンマによる打撃の方が実用性は高いが，本実験では，実験の再現性を重視し，衝撃を一定とするために，鋼球を設定された高さから自由落下により衝突させることとした．使用した鉄球の直径は20mm，落下高さ810mmである．また，打音の収録にはマイクロフォンを使用し，衝突面の直上300mmの位置に設置した．

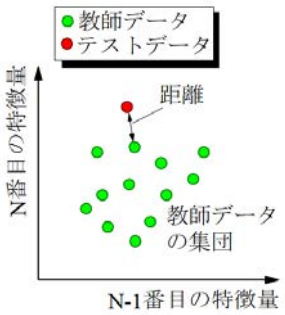
収録した音圧時刻歴波形をフーリエ変換によりパワースペクトルに変換した．変換の際の時刻歴のサンプル長さは0.08sとした．パワースペクトルは最大値が1.0になるように正規化処理が施されている。このパワースペクトルを特徴量として，局所外れ値因子法を用いた腐食ひび割れの有無に基づいて鉄筋腐食の判定を試みる．そこでは，まず，500Hzから10000Hzの帯域を25Hz毎に分割した380個の周波数fからなるパワースペクトル$P(f)$を380次元の座標を持つベクトルデータとした．これは380次元のデカルト座標上の1つの点として表現可能である．腐食前に収録したパワースペクトルのベクトルデータの集合（教師データ）に対して，腐食後に収録したパワースペクトルのベクトルデータ（テストデータ）のデカルト座標上の位置を比較し，両者が近傍にあるならば，テストデータは教師データと区別がつかず腐食無しと判定される．反対に充分な距離で離れているならテストデータは腐食していると判定できる（**図－２**参照）．ここでの距離はユークリッド距離で定義した．鉄筋腐食の判定においては，テストデータから教師データまでの距離の代表値を教師データ（全24点）間の距離の代表値で除した値が一定の閾値を上回っている場合を腐食と判定する．

３．実験結果

パワースペクトルを用いて局所外れ値因子法に依る判定を全６４個のテストデータを対象に行った結果，閾値1.6程度において正解率，F値F_mともに最大となったが，両者とも70%程度であり，改善の余地がある．パワースペクトルは特定の周波数で大きな値を示しているものの（**図－３**の黒線），それ以外の多くの周波数では0に近い値となっていて，これら値はユークリッド距離を算出する上で有効に活かされていない．そこでパワースペクトルの値を1より小さい冪指数で冪処理することによって



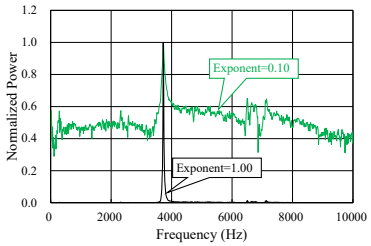
図－１　供試体の諸元



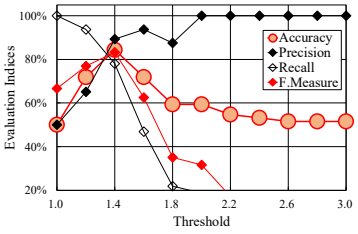
図－２　局所外れ値因子法の概念図

キーワード　鉄筋腐食，非破壊検査，機械学習，局所外れ値因子法，冪指数，閾値，サンプル長さ，遮断周波数
連絡先　〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校　Phone：046-841-3810　Mail：ikuroda@nda.ac.jp

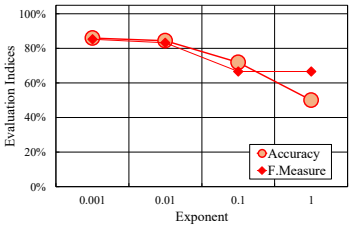
© Japan Society of Civil Engineers



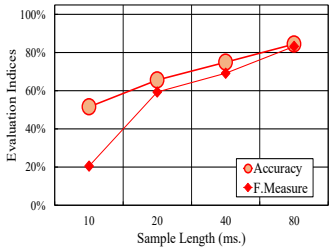
図－３ 冪指数 0.1 で冪処理したパワースペクトルの例



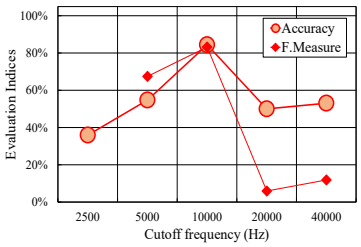
図－４ 冪指数 0.01 で冪処理した評価指数の判定



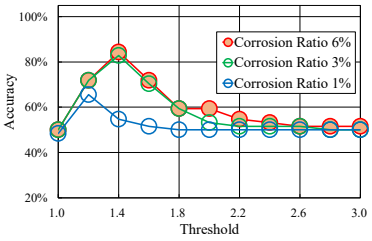
図－５ 冪指数と評価指標の関係



図－６ サンプル長さと評価指数の関係



図－７ 遮断周波数と評価指数の関係



図－８ 各腐食率における正解率

0に近い値を引き上げ，これらの値が特徴量としてユークリッド距離の算出に反映されるよう工夫した．**図－３**の緑色線は，冪指数0.1で冪処理したパワースペクトルの例である．冪処理したことにより，全ての周波数帯域のパワースペクトルの値が0.0～1.0の間に広く分布している．

図－４に冪指数0.01で冪処理したパワースペクトルによる判定結果を示す．冪処理することにより，正解率，*F*値F_mともに大きな値を示すようになっている．これらは，概ね閾値が1.4の時に最大値となり，その閾値を採用した際の冪指数と正解率，*F*値の関係（**図－５**）では，冪指数が0.01および0.001において，正解率，*F*値ともに80%を超える数値を示している．

次に別のパラメータ（サンプル長さL_Sおよび遮断周波数F_{CO}）を変化させた場合の評価指数への影響を検討した．**図－６**は，冪指数を0.01，遮断周波数を10000Hzと固定して，サンプル長さL_Sを10～80msに変化させた場合の正解率と*F*値である．サンプル長さが短くなると両方の評価指数が低減している．サンプル長さが短くなるとスペクトルの周波数間隔が反比例して大きくなるので，遮断周波数が同じ，即ちスペクトルの帯域幅が同じならば，特徴量の個数がサンプル長さに比例して減少する．このことは，判定結果の精度に影響すると考えられる．

次に**図－７**に，冪指数0.01，サンプル長さを80msに固定したままで，遮断周波数F_{CO}を2500～40000Hzの範囲で変化させた場合の正解率とF値を示す．遮断周波数が小さくなると，周波数帯域が狭まって特徴量の個数が減る．反対に遮断周波数が大きくなると特徴量の個数は増えるものの特徴量が増えるのはNyquist周波数（本実験では50000Hz）に近い領域であるため信号としての質の劣化が懸念される．**図－７**は，本実験では10000Hzの遮断周波数が正解率と*F*値向上のためには最適であることを示している．

以上は，腐食率は6%での検討であるが非破壊検査としては，より小さい腐食率で良好な判定が可能であることが望ましいため，腐食率3%と1%のテストデータに対しても正解率の検討を試みた（**図－８**参照）．

冪指数0.01，サンプル長さ80ms，遮断周波数が1000Hzに固定している．腐食率1%では正解率が70%に満たないが，腐食率6%と3%の違いはほとんど無く，本実験の条件では，3%の腐食率があれば正解率80%以上の精度で判定可能であることが確かめられた．

４．まとめ

以下にまとめを示す．

(1) 音圧スペクトルを特徴量として，局所外れ値因子法により腐食判定を行う際には，適切な冪指数を用いて冪処理を行うことによって，精度の向上を図ることが期待できる．

(2) 音圧時刻歴のサンプル長さ，パワースペクトルの遮断周波数は，正解率と*F*値に影響を与える．

(3) 本実験では，3%以上の腐食率であれば，腐食判定の正解率は80%を超えることが可能である．

参考文献

1) 佐相聡史，勝木太，日比野克彦：機械学習を利用した打音法によるコンクリート浮き部検出精度に関する研究，土木学会第73回年次学術講演会，2018.

© Japan Society of Civil Engineers