

論文 鋼球衝突時のコンクリートの表面振動を用いた機械学習による鉄筋腐食判定

黒田 一郎*1・西 敏臣*2

要旨: 鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食の有無を非破壊で簡便に検出する手法の確立を目的として、コンクリート表面の振動加速度を機械学習の一種である K 近傍法で処理して判定に結びつける手法を提案する。その有用性を確かめるために、電食によって鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリート供試体を対象として鋼球の落下衝突による衝撃を与えて収録した加速度スペクトルを、K 近傍法を用いて無腐食供試体の教師データと比較することを試みた。腐食率 3%の鉄筋腐食であっても本手法で判定可能であることを確認した。

キーワード: 鉄筋腐食, 非破壊検査, 表面振動, 機械学習, K 近傍法

1. はじめに

鉄筋腐食は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を議論する上での重要な課題である。コンクリートという材料の特性上、鉄筋腐食を含めた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。

コンクリートを対象とした非破壊検査手法はこれまで多くの手法が提案されてきたが、損傷とならないレベルの衝撃を外部から与えて表面振動や打音などの反応を調べる手法¹⁾²⁾は、検査装置の簡便さから、常時の広範囲な検査として大きな期待が寄せられる。衝撃時の反応は多くの場合時刻歴として収録されるが、それらをどのようにして内部状態の判定に結びつけるかは多様である。機械学習はその判定手法の一つであり、コンピュータに認識能力を付与することによって人間の五感以上の判定能力を発揮させることに期待するものである。鉄筋コンクリートの分野でも、近年、この機械学習を取り入れた検査手法に関する研究も積み重ねられており、例えば、その一種である K 近傍法を用いた内部欠陥の検出を目指した佐相らの研究³⁾などを挙げることができる。

本研究では、衝撃時のコンクリート表面振動から鉄筋

腐食を検出する手法を開発することを目的とし実験的検討を行なった。具体的には、電食によって鉄筋を腐食させた供試体に鋼球の落下衝突によって衝撃荷重を作用させた際の表面振動加速度を収録し、K 近傍法を用いた無腐食供試体との比較・判定の実行可能性を確認するものである。但し、表面振動加速度を分析対象とする本手法は、鉄筋腐食そのものを直接的に検出しているのではなく、腐食ひび割れが表面振動加速度に与える影響を検出することによって間接的に鉄筋腐食の判定に結びつける手法である。

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1に供試体の諸元を示す。供試体は、鉄筋コンクリート壁の一部を切り出した形状を模しており、300×300mmの正方形で、厚さは120mmである。内部には4本の D13SD295A鉄筋が63mmのあき（芯から芯の間隔75mm）で平行に並べられており、そのかぶりは、一方が30mmでその反対側は77mmである。使用したコンクリートの配合を表-1に示す。打設後1ヶ月の水中養生の後に気乾状態で充分乾燥させてから実験に供した。

鉄筋の腐食は電食によって行なった。供試体を3%NaCl水溶液に浸潤させた状態で4本の鉄筋に直流電流を通電し、目標とする腐食量6%に至るまで腐食を進行させている。腐食率は、文献⁴⁾を参考として電流値と通電時間で管理した。

供試体の総数は8体であり、その内の4体（C1～C4）を

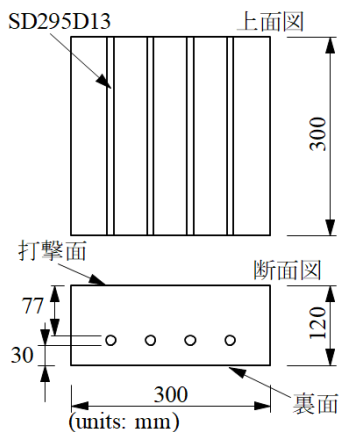


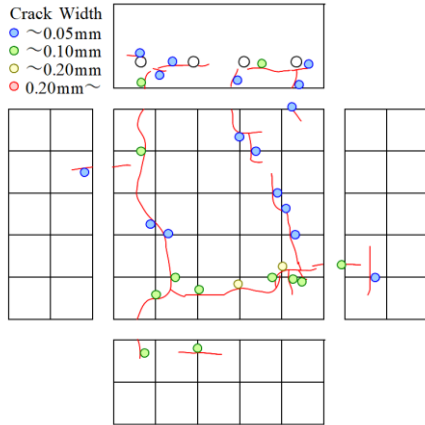
図-1 供試体の諸元

表-1 立方配合

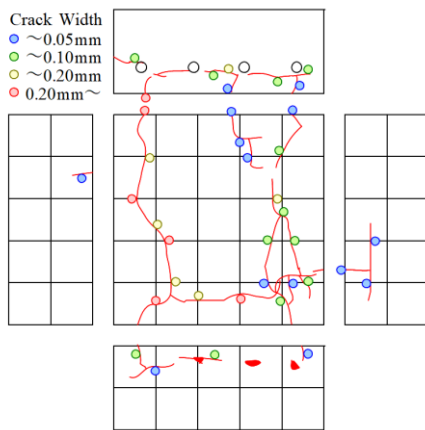
粗骨材 最大寸法 G_{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤 A
20	60	3.0	175	292	680	1060	3.5

*1 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 博士 (工学) (正会員)

*2 九検 技術顧問



(a) 腐食率 3%



(b) 腐食率 6%

図-2 腐食ひび割れの例

表-2 鋼球の仕様

直径 (mm)	落下 高さ (mm)	質量 (g)	運動 エネルギー (J)	運動量 (kgm/s)	衝突 速度 (m/s)
20	810	31	0.246	0.124	3.98

電食に供し、残りの4体 (N1~N4) は比較のために腐食させない管理供試体である。

図-2(a), (b)に、C1供試体の腐食率3%および6%時の腐食ひび割れ分布を示す。かぶりが30mmと小さかった側の表面(図-1で裏面と呼称)は図に示すように腐食ひび割れが生じたが、反対側のかぶりが77mmと大きかった側の面(図-1の打撃面)には腐食ひび割れが生じなかったため、これらの図では打撃面は示していない。

2.2 衝撃実験

供試体への衝撃の入力は、鋼球の自由落下による衝突によって行なった。実構造物を対象とした現場測定での測定を鑑みれば、鋼球の落下衝突よりもハンマを用いた方法の方が実用性が高いが、実験時の衝撃条件をなるべく一定とすることを目的とし、本衝撃実験では鋼球を一

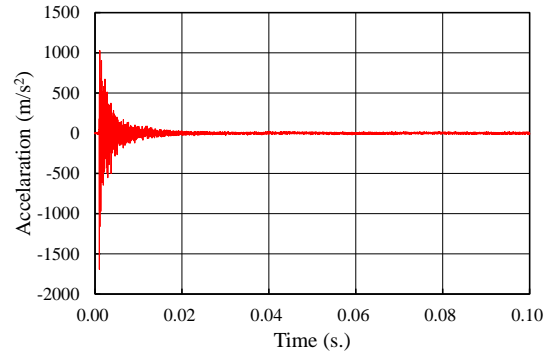


図-3 加速度時刻歴波形の例

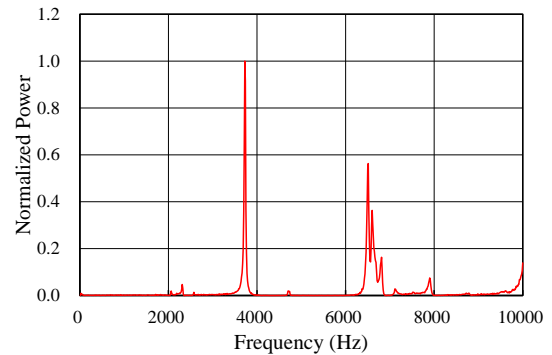


図-4 パワースペクトルの例

定の高さから自由落下させることとした。鋼球の直径は20mmで、落下高さは810mmである(表-2)。

供試体は、2.1節で説明したように打撃面(図-1)には腐食ひび割れが生じていなかったが、この打撃面が上側になるように鉄筋コンクリート床面に静置し、鋼球の衝突はこの打撃面の中心に対して行なった。このように設定した狙いは、腐食ひび割れが目視観察できない側を検査対象として腐食ひび割れ(間接的には鉄筋腐食)を判定し得るかを確認するためである。

本研究で検討するような打撃による非破壊検査を実施する上では、構造部材の全ての表面が検査対象となることが理想であるが、構造物によっては一部の表面が検査対象として選択できない条件がいくつか想定される。まず一つ目としては、近年、補修・補強を目的としてコンクリート部材表面を繊維シートや樹脂で被覆する工法が提案され実用化されている(例えば、栗橋⁹⁾)。このような被覆処置は恒常的なものであり、その表面は打撃に対する応答特性が通常のコンクリート表面とは大きく異なるので、打撃による非破壊検査の実施対象からは取り除かざるを得ない。また、二つ目としては、覆土構造物(例えば、大野⁷⁾)では覆土に覆われた側の表面にアクセスするために覆土を除去する労力は非破壊検査を実施する上で大きな負担となるし、トンネルのような地下構造物では地盤に面している側の表面へのアクセスは現実的でない。

以上のような条件下では、検査できない側の表面に生じた腐食ひび割れを判定するためには、腐食ひび割れが生じていない表面を対象にした検査でその裏側の腐食ひび割れを判定できることが求められる。この点を鑑みて本実験では、上述のように、供試体の腐食ひび割れが生じていない側(即ち図-1の打撃面)を検査対象とした。

また、供試体の支承条件が実験結果に与える影響をなるべく排除することを目的として、供試体と床面の間には厚さ60mmの発泡スチロール板を敷き詰めている。

鋼球衝突時のコンクリート表面の振動加速度は、打撃面に接着した加速度計により行なった。使用した加速度計の感度は $0.5\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ 、周波数帯域は $\text{gain} \pm 5\%$ で $1 \sim 10000\text{Hz}$ 、 $\text{gain} \pm 10\%$ で $0.7 \sim 20000\text{Hz}$ である。加速度の時刻歴は、サンプリング速度毎秒10万回(100kSample/s)のデータロガーを用いて収録している。収録した加速度時刻歴の一例を図-3に示す。概ね 0.05s 程度で加速度は収束に至っていることが分かる。

また、衝撃実験は、電食前、1%腐食時、3%腐食時、6%腐食時の計4回実施し、実験前には3日以上供試体を気乾状態で乾燥させている。

2.3 K近傍法

衝撃実験によって収録した加速度時刻歴波形は、フーリエ変換によってパワースペクトル $P(f)$ に変換した。図-4にその一例を示す。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になるように無次元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K近傍法⁴⁾を用いた鉄筋腐食の判定を試みる。なお、前述のように、本手法は腐食ひび割れを判定することによって間接的に鉄筋腐食の判定に結びつけている。

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_k 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。腐食していないとき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(Negative)と判定される。反対に、十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(Positive)と判定できる。図-5はその概念を説明したものであるが380次元の超空間は図示できないので2次元で表現している。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 D_{tk} を、教師データ間の距離の代表値 D_{kk} で除した値が一定の閾値を上回っている

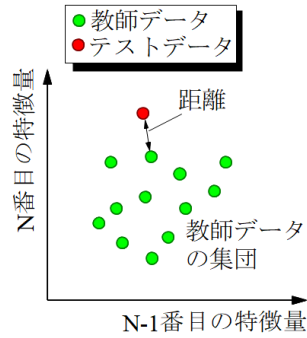


図-5 K近傍法

表-3 K近傍法による判定で用いる諸量

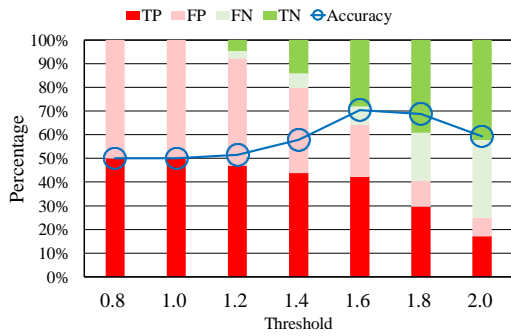
記号	名称	説明
P	Actual Positive	鉄筋が腐食していたテストデータの数. $P = TP + FN$
N	Actual Negative	鉄筋が腐食していなかったテストデータの数. $N = FP + TN$
pP	Predicted Positive	鉄筋腐食と判定されたテストデータの数. $pP = TP + FP$
pN	Predicted Negative	鉄筋腐食無しと判定されたテストデータの数. $pN = FN + TN$
TP	True Positive	P の中で鉄筋腐食と正しく判定されたテストデータの数
FP	False Positive	N の中で鉄筋腐食と誤判定されたテストデータの数
FN	False Negative	P の中で鉄筋腐食無しと誤判定されたテストデータの数
TN	True Negative	N の中で鉄筋腐食無しと正しく判定されたテストデータの数
Acc	Accuracy: 正解率	全テストデータ数に対する正しく判定されたテストデータの割合. $Acc = (TP + TN) / (TP + FP + FN + TN)$
Rec	Recall: 再現率	P であるテストデータ数に対する TP の割合. $Rec = TP / (TP + FN) = TP / P$
Pre	Precision: 適合率	鉄筋腐食と判定されたテストデータ数に対する TP の割合. $Pre = TP / (TP + FP) = TP / pP$
Fm	F Measure: F値	Rec と Pre の調和平均. $Fm = (2 \times Rec \times Pre) / (Rec + Pre)$

場合を腐食と判定する。教師データまでの距離の代表値 D_{tk} の算出では、テストデータからの距離が近い側の教師データを4点選抜し、これら4点の教師データからテストデータまでの距離を求めて平均した。教師データ間の距離の代表値の計算では、上で選抜した4点の組み合わせ($4C_2=6$ 組)で相互間の距離を計算した上で平均し求めた。

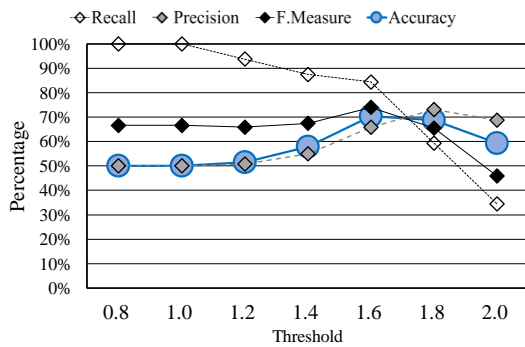
教師データは、電食する前の全ての供試体8体(C1~C4およびN1~N4)を用いて各3回ずつ収録した加速度時刻歴のパワースペクトルを用いており、都合8体×3回の24個である。テストデータは、各腐食率の時点で、供試体1体につき8回計測したパワースペクトルであり、こちらは都合8体×8回の64個である。これら64個のテストデータの内半分の32個が腐食供試体(C1~C4)のものであり、残りの32個が無腐食供試体(N1~N4)のものである。

2.4 K近傍法による判定

K近傍法による判定は、腐食と判定する Predicted Positiveと腐食無しと判定する Predicted Negativeの2つで



(a) TP, FP, FN, TN, Acc



(b) Acc, Rec, Pre, Fm

図-6 パワースペクトルを用いた判定結果
腐食率 6%

あるので、64個のテストデータはすべてこれらのどちらかの判定が下される。しかし、判定には誤謬が含まれるため、Predicted PositiveとPredicted Negativeは実際の腐食の有無Actual PositiveとActual Negativeとは一致しないため、64個のテストデータは次の4つの何れかに分類される。True Positiveは、実際に腐食していたテストデータを正しく腐食と判定した場合であり、判定としては正解である。同様にTrue Negativeは腐食無しのテストデータをその通りに腐食無しと判定した正解である。それ以外に、不正解の判定結果として、腐食テストデータを誤って腐食無しと判定するFalse Negativeと、腐食無しを腐食ありと判定するFalse Positiveがある。

64個のテストデータがこれらに分類された個数を表-3に示す記号P~TPで表わす。同じ表に示すAcc以降の各項目は、判定結果の正確さを表わす指標である。

正解率Accは、テストデータ総数に対する正しく判定されたテストデータ数の割合であり、これが100%なら全てのテストデータが正しく腐食の有無を判定されたことになる。判定がランダムに行なわれた場合や全て腐食または全て腐食無しと判定した場合であっても本実験の正解率は50%が期待されるので、正解率は50%~100%の間で評価可能である。

再現率Recは、実際に腐食していたテストデータの内の

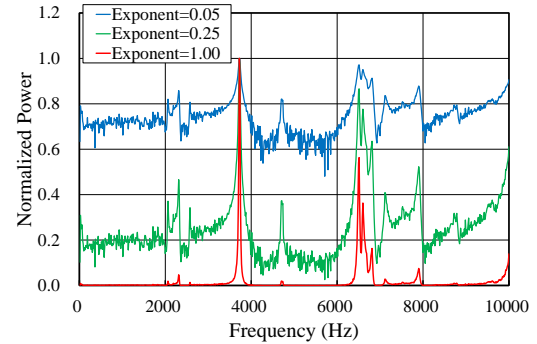


図-7 べき乗処理したパワースペクトル
腐食率 6%

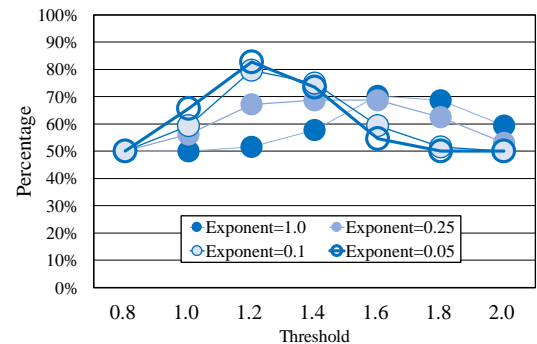


図-8 べき乗処理したパワースペクトルを用いた正
解率のべき係数による比較

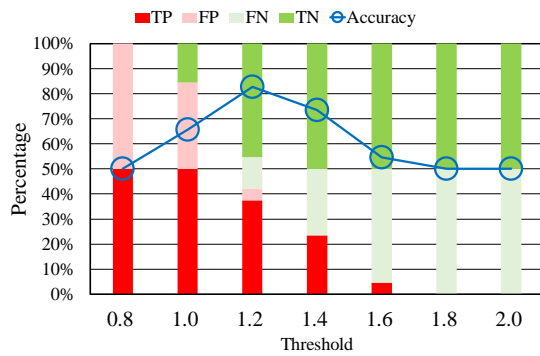
どれだけを腐食と判定できたかを表わし、適合率Preは、腐食と判定されたテストデータの内のどれだけが実際に腐食していたかを表わす。再現率が100%近くであっても適合率が低いならば、腐食していないテストデータまで腐食と判定してしまっている訳で、判定の閾値が小さ過ぎることを表わしている。反対に適合率が大きいのに再現率が小さいならば、腐食であるという判定に過剰に慎重であって、閾値が大き過ぎる可能性を示唆している。

このように再現率と適合率はトレードオフの関係にあり、どちらか片方だけで判定結果を評価するのは難しい。そこで、両者の調和平均であるF値 F_m を採用して判定の正確さの評価指標とした。このF値 F_m は再現率と適合率の調和平均であるので(表-3中の定義式を参照)、再現率と適合率のどちらかが小さければ他方が大ききともF値 F_m は0%に近づく。即ち、F値 F_m が大きな値を示すということは再現率と適合率の両方が揃って大きな値を示していることを表わしている。

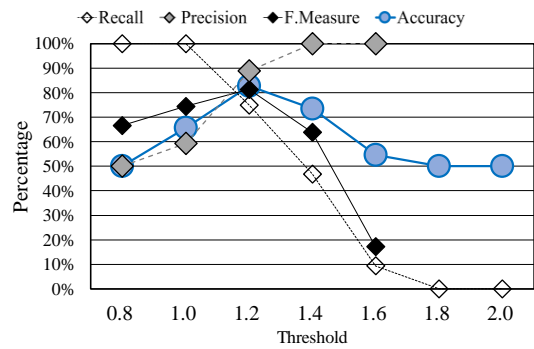
3. 実験結果

3.1 パワースペクトルを用いた判定

パワースペクトルを用いてK近傍法に依る判定を全64個のテストデータを対象に行なった結果を図-6(a), (b)に示す。これらの図に示すのは腐食率6%での結果である。

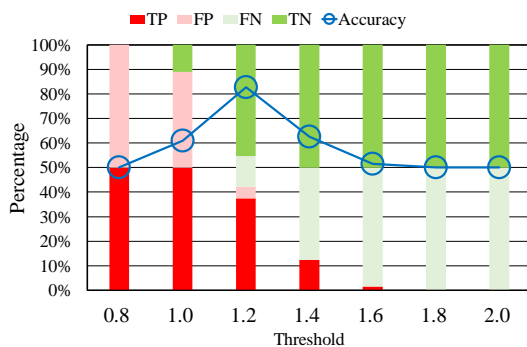


(a) TP, FP, FN, TN, Acc

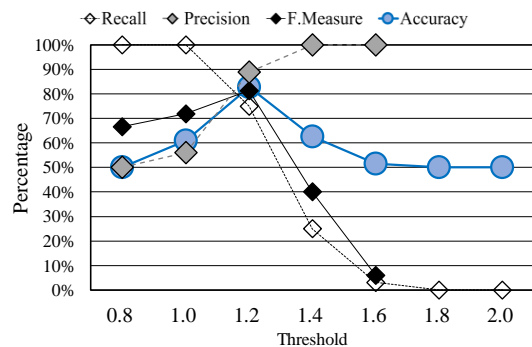


(b) Acc, Rec, Pre, Fm

図-9 べき乗処理したパワースペクトルを用いた判定 (腐食率 6%)

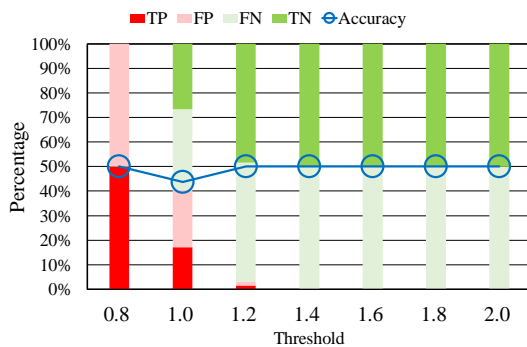


(a) TP, FP, FN, TN, Acc

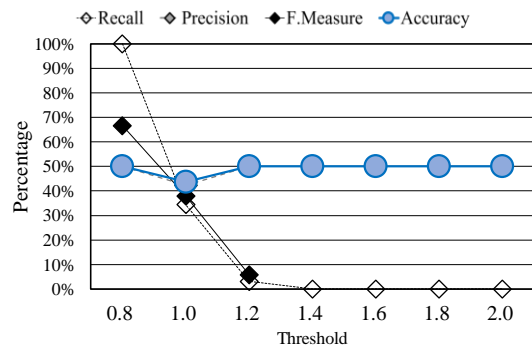


(b) Acc, Rec, Pre, Fm

図-10 べき乗処理したパワースペクトルを用いた判定 (腐食率 3%)



(a) TP, FP, FN, TN, Acc



(b) Acc, Rec, Pre, Fm

図-11 べき乗処理したパワースペクトルを用いた判定 (腐食率 1%)

閾値 (Threshold) が1.6程度において、正解率、 F 値 F_m ともに最大となっているが、両者とも70%程度であり、改善の余地がある。

図-4に示したパワースペクトルの例を見れば、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、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0に近い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、全ての周波数帯域でのパワースペクトル特性をユークリッド距離の算出に反

映させるために、パワースペクトルの値を1より小さいべき係数でべき乗処理することによって0に近い値を引き上げ、これらの値が特徴量として活かされるよう工夫した。図-7に示すのはこのようにしてべき乗処理されたパワースペクトルである。べき乗処理することによって全ての周波数帯域のパワースペクトルの値が0~1の間の広い範囲に分散することとなっている。

このようにしてべき乗処理されたパワースペクトルをK近傍法で判定した正解率の比較を図-8に示す。べき係

数 (Exponent) が0.1または0.05では、閾値1.2で正解率は80%近くまで向上している (図-8)。

これらを踏まえ、べき係数0.05を採用することとし、その判定結果を図-9(a), (b)に示す。閾値1.2において、False PositiveとFalse Negativeの数は小さく抑えられ正解率はピークとなっている。閾値が1.2よりも小さいと再現率は100%に達して、腐食テストケースを一つも逃さず腐食判定できているが、適合率は低く、腐食無しテストケースまで腐食と誤判定している。一方、閾値が1.2よりも大きいと、適合率は大きくなるものの、再現率は低下し、腐食テストデータの多くを見逃してしまっている。そこで、今回のべき係数0.05での検討では、閾値を1.2と設定するのが妥当である。

3.2 腐食率との関係

以上から、べき係数0.05を導入し、閾値を1.2に設定することによって、腐食率6%のテストデータを正解率80%以上で判定することができることが明らかとなったが、腐食率をもっと小さい場合にどの程度まで判定が可能かを調べたい。図-2(a), (b)に裏面側の腐食ひび割れが示されているように、腐食率3%と6%ではひび割れ幅が異なる。また、腐食率1%では腐食ひび割れは全く見つからなかった。このように腐食が軽微な状態でも腐食の判定ができるならば本手法の有用性はさらに高まる。

図-10(a), (b)と図-11(a), (b)に腐食率3%と、腐食率1%での判定結果をそれぞれ示す。

腐食率3%では、腐食率6%と同様に、閾値1.2で誤判定であるFalse PositiveとFalse Negativeの数が抑えられ、正解率、 F 値 F_m ともに80%を超えてピークを示している。

一方、腐食率1%では、いずれの閾値でも正解率、 F 値 F_m ともに50%から大きく離れることは無く、有効な判定がなされていない。誤判定False PositiveとFalse Negativeのテストデータ数も抑制できていない。

各腐食率における正解率をまとめたのが図-12である。腐食ひび割れが認められなかった腐食率1%では、正確な判定は期待できないものの、腐食ひび割れが生じていた腐食率3%では腐食率6%と同程度の正解率のレベルで腐食判定ができていることが分かる。このように、本手法では、腐食ひび割れの有無が判定結果に密接に関わっており、鉄筋腐食そのものを判定しているのではなく、腐食ひび割れによる表面振動加速度の変状が評価対象となっていることが明らかである。

4. まとめ

本研究では、コンクリート表面の振動加速度をK近傍法で処理して腐食ひび割れの有無を判定し、翻って間接的に鉄筋腐食判定に結びつける手法の有用性を、電食で鉄筋を腐食させた供試体を対象とした鋼球衝突実験で検

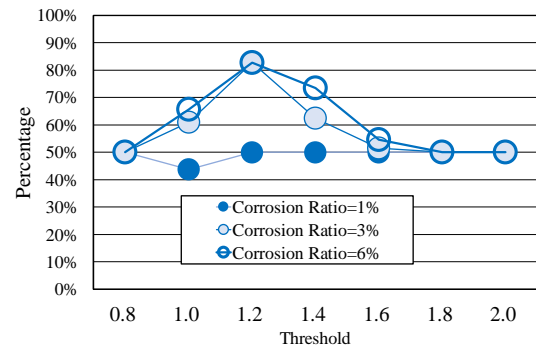


図-12 各腐食率における正解率

証した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 加速度履歴を変換したパワースペクトルに対してべき係数0.05でべき乗処理すれば、K近傍法を用いて腐食ひび割れの有無の判定が可能となる。但し、最適なべき係数は供試体の諸元に依存すると考えられるので、実構造物を対象として本手法を発展させる際にはその大きさを検討する必要がある。
- (2) 本研究で提案する手法では、鉄筋の腐食率3%において腐食ひび割れの判定の正解率は80%以上となる。

参考文献

- 1) 大野健太郎: 弾性波を利用したコンクリートの劣化領域の可視化技術, コンクリート工学, Vol.53, No.5, pp.452-457, 2015.
- 2) 服部晋一, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 朝倉響, 寺澤広基, 弾性波の入力方法とPCグラウト未充填部の検出能力との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集E2, Vol.73, NO.2, pp.239-250, 2017.
- 3) 岩野聡史, 内田慎哉, 麓隆行, 小澤満津雄: 衝撃弾性波法による火害を受けたコンクリートの劣化評価方法に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.28, pp.35-45, 2017.
- 4) 佐相駿実, 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.
- 5) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988.
- 6) 栗橋祐介, 三上浩, 今野久志, 佐藤元彦, 岸徳光: AFRPシート曲げ補強したRC梁のシート破断抑制法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1043-1052.
- 7) 大野友則, 大山浩代, 別府万寿博, 塩見昌紀: RC覆土式火薬庫の内部爆発に対する覆土の効果, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.875-888, 2008.