

論文 ニューラルネットワークに基づく打音による鉄筋腐食判定に及ぼす テストデータ・教師データ収録時の腐食率の整合性の影響

福井 智大*1・黒田 一郎*2

要旨：本研究は、ニューラルネットワークに基づく鉄筋腐食の打音判定において判定対象であるテストデータの腐食率と整合しない教師データの混入が判定結果に及ぼす影響について検討を行ったものである。腐食率が異なる RC 供試体の打音を収録し、学習過程において陽性の教師データに判定対象よりも腐食が進行したデータを混入させた場合の影響について考察した。その結果、腐食率 1%の判定においては、腐食が進行したデータが混入した場合、混入率が大きくなるほど真陽性率が低下することを確認した。また、腐食率 3%の判定においては、腐食が進行したデータの教師データへの混入による影響を受けにくいことがわかった。

キーワード：非破壊検査, 打音, 鋼球の落下衝突, 鉄筋腐食, ニューラルネットワーク, 教師データ

1. はじめに

近年、社会基盤施設の老朽化に伴う問題が数多く報告されており、維持管理に関する関心が高まっている。RC 構造物の代表的な劣化の一つとして鉄筋腐食が挙げられる。腐食により膨張した鉄筋から圧力を受け、この結果としてひび割れ、あるいは浮き・剥離が生じ、更に腐食が進行した場合には剥落に至る危険性を有していることから、初期段階で鉄筋の腐食性状を把握することは極めて重要である。鉄筋腐食の検知手法としては、検査の効率性や経済的な観点から非破壊で簡便に検査可能な手法が求められており、打音検査もその一つである。打音検査は、主としてコンクリート内部の変状の検知を目的として発展してきたが、鉄筋腐食の間接的検知手法としての可能性を見出す研究¹⁾²⁾も行われている。

打音検査は従来、人間の聴覚に基づく技能的な手法が主流であったが、近年、測定に技能が不要で定量的な評価を可能とする手法が多く提案されている^{例え3),4)}。また、最近では機械学習を活用することで精度の向上や評価の自動化を図る研究^{5),6)}も注目されている。これらの手法はコンクリートの変状の検知を対象としているが、鉄筋腐食の検知においても同様に機械学習を活用することで大きな利便性が得られることが期待されることから、著者らもこれまでにニューラルネットワークモデルを用いた鉄筋腐食の判定手法を提案し、その適用性を確認するとともに打撃条件が判定結果に及ぼす影響について検討を行ってきた⁷⁻⁹⁾。これらは、実際に鉄筋腐食が生じている陽性の教師データの収集を前提とした手法であるが、実用性を考えると、陽性データは鉄筋腐食が生じていない陰性のデータに比べてサンプルの収集が困難となるケースが想定され、特に外観上、腐食ひび割れや錆汁が観

察できない初期段階の鉄筋腐食のデータの収集は容易ではない。よって、このような腐食の初期段階の判定を目的とする場合には、必ずしも教師データの収集段階で、判定対象のテストデータと同程度の腐食レベルの陽性データを得られるとは限らず、テストデータの腐食レベルと整合しない陽性の教師データを取り込む恐れがある。つまり、陽性の教師データには判定対象のテストデータの腐食率と同じ腐食率で収集されたということ、すなわち、テストデータの腐食率との整合が求められる。

そこで本研究では、ニューラルネットワークモデルを用いた打音による鉄筋腐食判定手法において、テストデータの腐食率と整合しない教師データの混入が判定結果に及ぼす影響を調べるため、陽性の教師データの中に、判定対象よりも腐食が進行したデータを混入させた場合の影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1 に供試体の寸法および配筋、表-1 にコンクリ

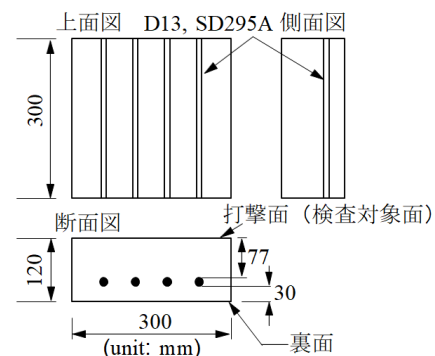


図-1 供試体の寸法および配筋

*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 博(工) (正会員)

表－1 コンクリートの示方配合

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

表－2 鋼球の仕様

直径 (mm)	質量 (g)	落下 高さ H_d (mm)	運動 エネルギー (J)	運動量 (kgm/s)	衝突 速度 v_0 (m/s)	最大 衝撃力 P_{smax} (N)	接触 時間 (μs)
20	31	810	0.246	0.123	3.98	4361	91

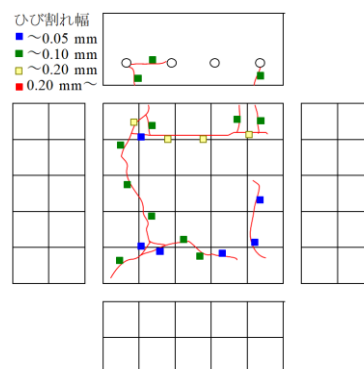
ートの示方配合を示す。供試体は、RC 壁の一部を模した寸法 300×300×120 mm の矩形で、内部には D13 (SD295A) 鉄筋が 4 本平行に配筋されている。かぶりは打音収録を行う打撃面側が 77 mm、裏面側が 30 mm である。この供試体を 8 体作製し、1 か月の水中養生を行った。なお、材齢 28 日での圧縮強度は 34.8 N/mm² であった。

鉄筋の腐食は電食によって行った。目標腐食率は 1%，3%，6% に設定し、通電時間は既往の研究¹⁰⁾ を参考に腐食率 1% あたり 28.2 hr とした。供試体 8 体の内、4 体 (No.1～4) を電食に供し、残りの 4 体 (No.5～8) は電食しない比較のための管理供試体である。なお、本研究では実験終了後に鉄筋の実腐食率を測定していないため、以下で述べる腐食率はすべて目標腐食率を指す。ただし、同一の手法で、同一の配合、かぶり、鉄筋を用いた電食によって±2 割程度の誤差で目標腐食率に近い実腐食率が得られることを確認している。すなわち、本研究においては各目標腐食率に対して、1% では 0.8～1.2%，3% では 2.7～3.3%，6% では 5.4～6.6% の範囲の実腐食率が得られていたと考えられる。

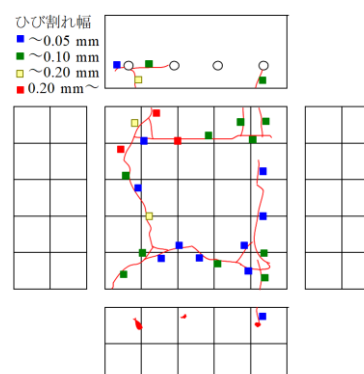
電食の結果、腐食率 1% ではいずれの供試体においても供試体表面に腐食ひび割れは観察されなかったが、腐食率 3%，6% ではかぶりが小さい裏面と一部の側面にのみ腐食ひび割れが観察された。一方で、反対側のかぶりが大きい打撃面にはいずれの供試体においても腐食ひび割れは観察されなかった。ここで一例として、腐食率 3%，6% 時の供試体裏面の腐食ひび割れ分布を図－2 に示す。いずれの供試体においても腐食率 3% では幅 0.2 mm 未満の腐食ひび割れが観察され、最終的な腐食率 6% では腐食率 3% 時に生じたひび割れ幅が微増する程度であった。

2.2 打音収録

本研究では、実験の再現性を重視し、打撃条件を一定に管理可能な設定した高さから鋼球を自由落下により衝突させる打撃方法を採用した。表－2 に示すように直径 20 mm、質量 31 g の鋼球を高さ 810 mm の位置から落下させた。打撃位置は、供試体と実構造物の寸法の違いに



(a) 腐食率 3%



(b) 腐食率 6%

図－2 腐食ひび割れ分布の一例
(No. 1 供試体)

よる境界の影響を取り除くため、打撃面の中心に範囲を限定した。また供試体は、支持条件による影響を取り除くため、供試体と床面の間に厚さ 60 mm の発泡スチロールを敷き詰め、打撃面が上になるよう床面に静置した。マイクロフォンから電圧として出力された音圧を、サンプリング速度毎秒 10 万回のデータロガーで A/D 変換し音圧時刻歴として記録した。本研究では、サンプル長さ L_s を打撃の余韻を含む 40 ms とした。

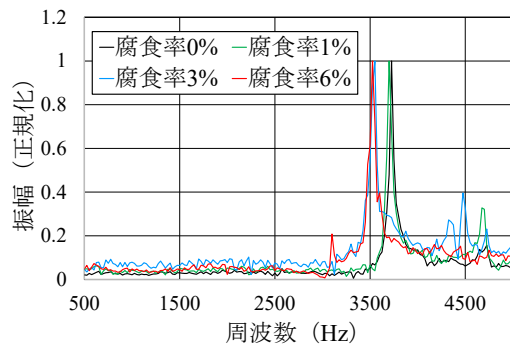
打音収録は、電食前と各目標腐食率到達後に行った。

2.3 ニューラルネットワークに基づく鉄筋腐食判定

(1) ニューラルネットワークモデル

中間層を多層化したニューラルネットワークモデルを用いることで高精度の分析が可能となるが、これらを使用する上では膨大な数の教師データを要する。本研究は実験室レベルでのサンプル収集であり学習に使用できるデータサンプル数に制約があるため、入力層、中間層 1 層、出力層からなる最小構成のニューラルネットワークモデルを採用した。なお、中間層のノード数は 8、エポック数は 400 とした。

学習方法は、出力層のノード誤差から中間層のノードの誤差を順番に算出し、その誤差に基づき結合部の重みを最適化する誤差逆伝播法および勾配降下法を採用した。また、活性化関数にはシグモイド関数を用いた。



図－3 各腐食率のスペクトルの一例

表－3 打音データの区分

区分	収録時期	実際の状態 (陽性・陰性)	対象供試体
C ₀	電食前 (腐食率0%)	鉄筋腐食無し (陰性データ)	腐食供試体 No.1～No.4
C ₁	目標腐食率1%到達時	鉄筋腐食あり (陽性データ)	
C ₃	目標腐食率3%到達時		
C ₆	目標腐食率6%到達時		
N ₀	電食前 (腐食率0%)	鉄筋腐食無し (陰性データ)	管理供試体 No.5～No.8
N ₁	目標腐食率1%到達時 (区分C ₁ と同時期)		
N ₃	目標腐食率3%到達時 (区分C ₃ と同時期)		

(2) 特徴量

収録した音圧時刻歴は、離散フーリエ変換によって振幅スペクトル（以下、スペクトル）に変換した。最大値が 1.0 となるように正規化処理を施し、ベクトル量であるスペクトルを特徴量とした。窓関数は Hann 窓を採用した。

フーリエ変換の際には、音圧時刻歴をサンプル長さ 40 ms で切断しているため、スペクトルの周波数解像度は 25 Hz である。特徴量として用いるスペクトルの周波数範囲は 500～5000 Hz に設定した。そのため、一つのスペクトルが持つ特徴量の数は 181 である。

ここで一例として、図－3 に電食前を含めた各腐食率におけるスペクトルを示す。概略の傾向として、腐食率 0% と 1% では波形全体が似た傾向を示しており、腐食率 3%、6% では、最大ピークの周波数が腐食率 0%、1% に比べて 200 Hz 程度小さくなっている。また、腐食率 3% と 6% を比べると、最大ピーク周波数以降の帯域で両者の違いが顕著である。

(3) データセット

打音データは、表－3 に示すとおり、電食の有無や打音の収録時期の違いによって、腐食供試体 No.1～4 を対

表－4 打音データの選択数

陽性の教師データの混入状態	テストデータ		教師データ		
	陽性	陰性	陽性		陰性
			テストデータの腐食率と同一	テストデータの腐食率と異なる	
混入無し	32	96	32	0	64
20%混入	32	96	26	6	64
50%混入	32	96	16	16	64
80%混入	32	96	6	26	64
100%混入	32	96	0	32	64

象としたデータ C₀～C₆、管理供試体 No.5～8 を対象としたデータ N₀～N₃ の七つの区分に分けられる。区分の記号の添字は打音の収録時期の目標腐食率を表している。

各区分では供試体 1 体につき 16 回の打音収録を行うので、一つの区分は供試体 4 体分の 64 個のデータで構成され、区分全体（7 区分）で 448 個のデータ群となる。この 448 個のデータ群から教師データとテストデータを、両データ間の重複を避けた上で無作為に選択し、学習に使用する陽性の教師データの中に、判定対象の陽性のテストデータとは異なる腐食率のデータを混入させたデータセットを作成した。この時の打音データの選択数を表－4 に示す。一回の判定では、総数 96 個の教師データを用いて学習を行い、総数 128 個のテストデータによって判定を行った。

(4) 判定および評価方法

ニューラルネットワークに基づく鉄筋腐食の判定は、出力値の大きさを判定を行った。出力値は gain を 1.0 としたシグモイド関数の値であるため、0.0～1.0 の範囲の値となる。学習過程においては、鉄筋腐食ありの教師データには 1.0 を、無しの教師データには 0.0 を設定し、テストデータの判定の際には、0.5 以上を鉄筋腐食あり、0.5 未満を無しと判定した。

判定結果は、鉄筋腐食ありと判定する推定陽性と、鉄筋腐食無しと判定する推定陰性の二つである。128 個のテストデータはすべてどちらかに判定されるが、これらの推定陽性および推定陰性は、必ずしも実際の鉄筋腐食の有無と一致するわけではなく誤診が想定される。そのためテストデータは、真陽性、偽陽性、偽陰性、真陰性のいずれかに分類される。

(5) 判定ケース

本研究では、学習に使用する陽性の教師データに判定対象の陽性のテストデータとは異なる腐食率のデータが混入した場合の判定結果への影響について検討を行った。鉄筋腐食の初期段階である腐食率 1% と腐食率 3% の判定を軸とし、表－5 に示すとおり、陽性の教師データ（32

表-5 判定ケース

ケース名 テストデータ 陽性教師データ への混入率と データ区分	テスト データの 区分 (表-3)	陽性教師データへの混入		
		混入教師 データの 区分 (表-3)	混入数	混入率
C_1-0	陽性 C_1 陰性 C_0, N_0, N_1	—	0	0%
C_1-20C_3		C_3	6	20%
C_1-50C_3			16	50%
C_1-80C_3			26	80%
C_1-100C_3			32	100%
C_1-20C_6		C_6	6	20%
C_1-50C_6			16	50%
C_1-80C_6			26	80%
C_1-100C_6			32	100%
C_3-0	陽性 C_3 陰性 C_0, N_0, N_3	—	0	0%
C_3-20C_6		C_6	6	20%
C_3-50C_6			16	50%
C_3-80C_6			26	80%
C_3-100C_6			32	100%

個)に区分 C_3 または C_6 を 20%, 50%, 80%, 100% の割合で混入させた。比較対象の混入無し (混入率 0%) のケースを含め、計 14 ケースの判定を行った。なお、本研究ではニューラルネットワークモデルの性能評価には交差確認法を採用し、各判定ケースにおいて 4 回試行した。

3. 判定結果

3.1 テストデータ C_1 —混入教師データ C_3

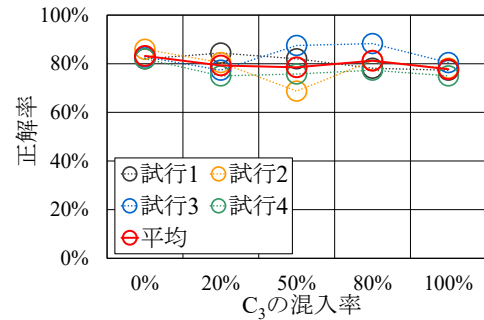
図-4 に区分 C_1 の判定において陽性の教師データに区分 C_3 を混入させた場合の判定結果を示す。なお、図中には比較対象として区分 C_3 が混入していない状態で学習した場合 (表-5 の C_1-0) の結果も示している。

図-4(a) より、各試行にばらつきがあるものの、混入率 0% に比べて区分 C_3 の混入率が増大するにつれて正解率が緩やかに低下していることがわかる。これは、図-4(b) に示す真陽性率の大幅な低下が要因であると言える。区分 C_1 の判定においては、真陽性率が区分 C_3 の混入の影響を大きく受け、危険側の偽陰性の判定が増えてしまう傾向を示した。

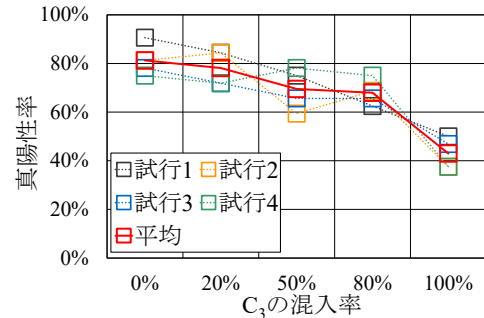
3.2 テストデータ C_1 —混入教師データ C_6

次に、図-5 に区分 C_1 の判定において 3.1 節の区分 C_3 よりも腐食が進行した区分 C_6 を混入させた場合の判定結果を示す。

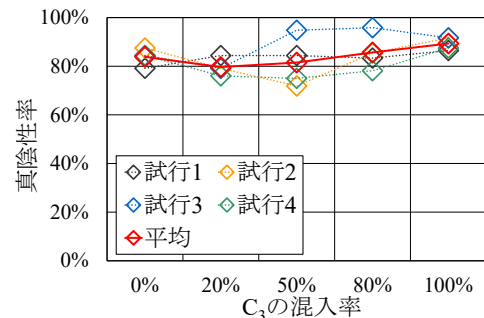
図より、区分 C_3 を混入させた場合と同様に、区分 C_6 の混入率が増えるほど真陽性率の低下に伴い正解率が低下している。3.1 節の図-4 に比べて、混入率の増加に伴う真陽性率の低下の幅が大きく、特に区分 C_6 の混入率が 50% を超えると大幅な低下が目立つ (図-5(b))。



(a) 正解率



(b) 真陽性率



(c) 真陰性率

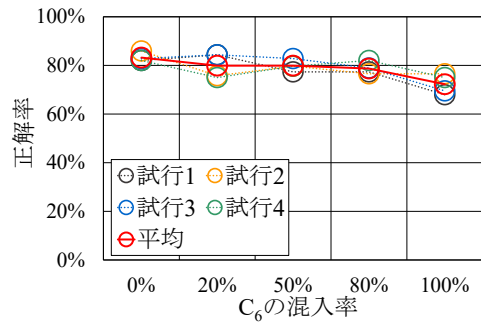
図-4 テストデータ C_1 の判定結果
(陽性の教師データに C_3 を混入させた場合)

以上のことから、スクリーニングを目的とした腐食の初期段階の区分 C_1 (腐食率 1%) の判定においては、できるだけテストデータの腐食率と整合した教師データを収集する必要があると言える。ただし、今回の検討で行った区分 C_1 の判定では混入率 0% の理想的な判定ケース C_1-0 においても真陽性率は 80% 程度であり、混入を避けることができたとしても 20% 程度は偽陰性と判定されてしまう点は留意が必要である。

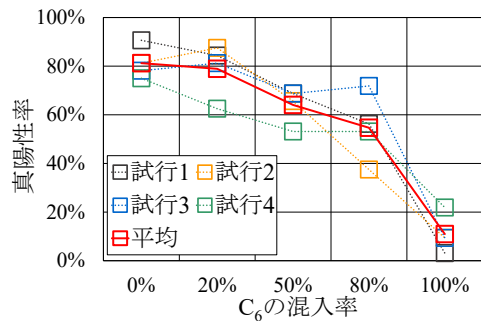
3.3 テストデータ C_3 —混入教師データ C_6

続いて、区分 C_3 の判定において区分 C_6 を混入させた場合の判定結果を図-6 に示す。

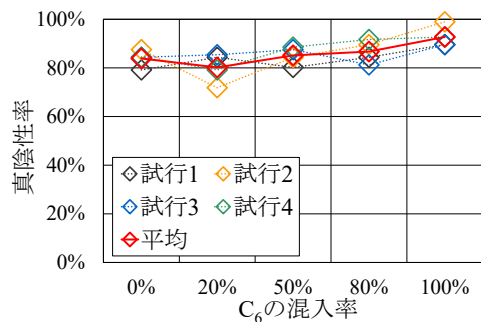
図より、各試行のばらつきが大きいものの、区分 C_6 の混入率が 20%, 50% までは正解率、真陽性率ともに混入率 0% の判定ケース C_3-0 と同等の値を保っており、区分 C_1 の判定に比べて、テストデータの腐食率と整合しない教師データの混入の影響を受けにくいと言える。



(a) 正解率

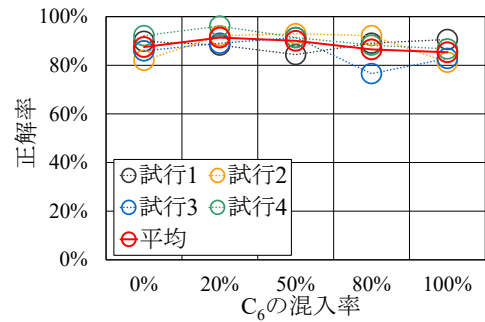


(b) 真陽性率

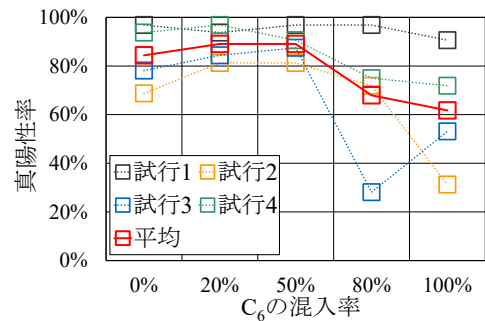


(c) 真陰性率

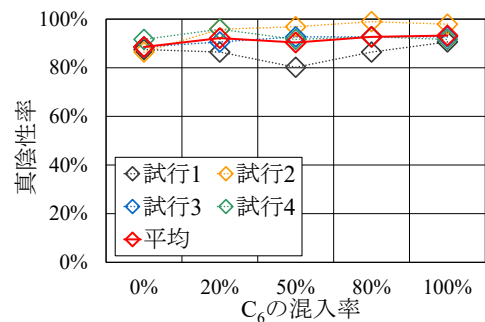
図-5 テストデータ C_1 の判定結果
(陽性の教師データに C_6 を混入させた場合)



(a) 正解率



(b) 真陽性率



(c) 真陰性率

図-6 テストデータ C_3 の判定結果
(陽性の教師データに C_6 を混入させた場合)

以上のことから、腐食率 1%よりも腐食が進行した段階の腐食率 3%の判定においては、陽性の教師データにテストデータの腐食率と整合しない腐食率のデータが混入している場合でも、それが少ない割合であれば混入していない場合と同等の精度で判定できる可能性を有していることがわかった。各試行のばらつきが大きく、打撃方法が限定されていることから今後、更なる検討が必要である。

3.4 混入分のデータ数を取り除いた場合の影響

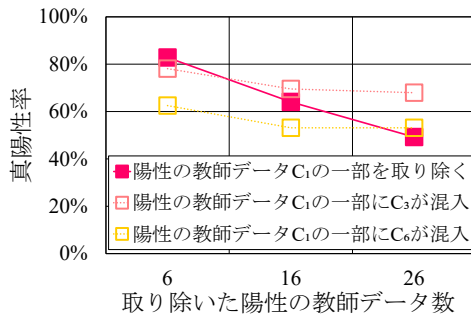
ここまでは、区分 C_1 、 C_3 の判定において陽性の教師データ 32 個の中に、テストデータの腐食率と整合しない腐食率のデータを混入させた場合の影響について検討を行ってきた。ここでは、それらの混入分のデータ数を陽性の教師データ数から取り除いた判定を行った。具体的には区分 C_1 、 C_3 の判定において、陽性の教師データ 32 個の中に、テストデータの腐食率と整合しない腐食率を

混入させる代わりに 6 個、16 個、26 個のデータを取り除き、使用する教師データ数を少なくした判定で、3.1～3.3 節の混入率 20%、50%、80%における結果（真陽性率）との比較を行った。

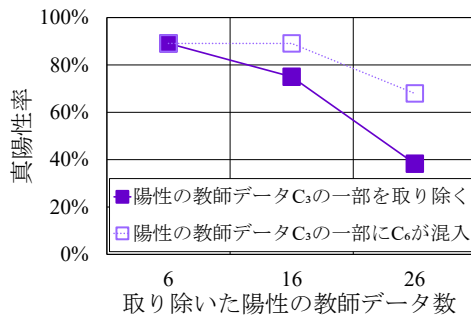
図-7 に、区分 C_1 、 C_3 の判定において陽性の教師データ数の内、混入分のデータ数を取り除いた場合の真陽性率を示す。併せて、図中には比較対象として混入率（混入数）20%（6 個）、50%（16 個）、80%（26 個）の結果も載せた。なお、各値は試行 4 回分の平均である。

図-7(a) の区分 C_1 の判定においては、混入分の教師データを取り除いた場合と、区分 C_3 および C_6 が混入した場合とでは、真陽性率に大きな差異は認められなかった。

一方、区分 C_3 の判定においては、教師データ数を 16 個取り除いた場合に、区分 C_6 の混入率 50%の場合よりも真陽性率が 15%程度低下した（図-7(b)）。このことから、腐食率 3%の判定において陽性の教師データを収集



(a) 区分 C₁ の判定



(b) 区分 C₃ の判定

図ー7 混入分のデータ数を取り除いた場合の真陽性率

する際には、テストデータの腐食率と整合した腐食率のデータを少数収集するよりも、全体数の半分まではテストデータと整合しない腐食率（本研究では腐食率 6%）のデータが混入した状態で多数収集する方が良好な判定結果を得られると言える。ただし、混入する腐食率の大きさの許容範囲に関する検討は本研究において行っていないため、今後の課題である。

4. まとめ

本研究は、ニューラルネットワークモデルを用いた打音による鉄筋腐食判定手法において、テストデータの腐食率と整合しない教師データの混入が判定結果に及ぼす影響について検討を行ったものである。以下に得られた知見を示す。

- (1) 腐食率 1%の判定においては、陽性の教師データに異なる腐食率 3%、6%が混入した場合、混入率が大きくなるほど正解率が低下し、その主な要因は真陽性率の低下であることを確認した。陽性の教師データを収集する際には、テストデータの腐食率と整合した同程度の腐食率のデータを収集することが望ましいことがわかった。
- (2) 腐食が進行した腐食率 3%の判定においては、腐食率 1%の判定に比べてテストデータの腐食率と整合しない教師データの混入による影響を受けにくいことがわかった。陽性の教師データを収集する際には、テストデータと整合した同程度の腐食率のデー

タを少数収集するよりも、全体数の半分まではテストデータと整合しない腐食率のデータが混入した状態で多数収集する方が望ましいことがわかった。

本研究は供試体の寸法など極めて限られた条件下での検討であった。今後、一般的な構造部材を対象とするためには供試体の寸法、鉄筋の本数や配筋位置、鉄筋の腐食方法など幅広い条件を考慮した実験的検討によって多くのデータを蓄積し適用範囲を拡張していく必要がある。

参考文献

- 1) 木沢敬太, 井山徹郎, 村上祐貴: 鉄筋腐食の進行による RC 床版の打撃応答特性の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1867-1872, 2015.
- 2) 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値の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2109-2114, 2016.
- 3) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704, V-55, pp.65-79, 2002.
- 4) 園田佳臣, 川端健太, 別府万寿博, 福井雄気: 打音データを用いたコンクリート内部欠陥の評価に関する基礎的考察, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.802-811, 2011.
- 5) 飯高優翔, 江本久雄, 馬場那仰: k 近傍法によるコンクリートの打音判定の周波数領域と周波数解像度の感度分析, AI・データサイエンス論文集, 第 2 巻, J2 号, pp.733-740, 2021.
- 6) 江本久雄, 馬場那仰, 浅野寛元, 長瀬大和: AI 手法による打音検査の浮き判定の検討, AI・データサイエンス論文集, Vol.1, J1, pp.514-521, 2020.
- 7) 福井智大, 黒田一郎: ニューラルネットワークを用いた打音スペクトルの分析による鉄筋腐食ひび割れ判定手法に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.661-670, 2022.
- 8) 福井智大, 鈴木大地, 黒田一郎: ニューラルネットワークを用いた打音による腐食ひび割れ判定手法結果に及ぼす打音収録条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1246-1251, 2022.
- 9) 福井智大, 黒田一郎: ニューラルネットワークを用いた腐食ひび割れの打音判定における打撃条件の影響, AI・データサイエンス論文集, 第 3 巻, J2 号, pp.35-46, 2022.
- 10) 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的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988.