法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-16

機械学習を用いた電磁波レーダ法による内部 欠陥推定手法に関する研究

佐野, 俊介 / SANO, Shunsuke

(出版者 / Publisher)法政大学大学院デザイン工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. デザイン工学研究科編 / Bulletin of graduate studies. Art and Technology

(巻 / Volume) 12 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 8 (発行年 / Year) 2023-03-24 (URL) https://doi.org/10.15002/00030253

機械学習を用いた電磁波レーダ法による 内部欠陥推定手法に関する研究

A STUDY ON ESTIMATION METHOD OF INTERNAL DEFECTS BY ELECTROMAGNETIC WAVE RADAR METHOD USING MACHINE LEARNING

佐野俊介

Shunsuke SANO

主查 溝渕利明 副查 山本佳士

法政大学大学院デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻修士課程

In this study, the possibility of estimating micro cracks in concrete caused by corrosion and expansion of rebar is investigated by machine learning of reflected waveforms from rebar using electromagnetic wave radar. First, the shape of the reflected waveform from the rebar is examined by experiment and simulation to confirm whether cracks near the rebar cause changes in the shape of the reflected waveform. Then, the possibility of estimating cracks by machine learning is examined using specimens corroded by electrical corrosion. *Key Words* : *Electromagnetic Wave Radar, Machine Learning, Non-destructive test*

1. はじめに

現在の日本は、インフラの老朽化や少子高齢化に伴う 人口減少といった社会問題にさらされている.高度経済 成長期に多数建設された構造物は建設から 50 年を超え るものが増加し、それに伴い点検需要が急増している.そ のため、今後維持管理コストは増大していくと考えられ る.一方で、日本の人口は 2008 年をピークに減少し続け、 さらに少子高齢化によって生産年齢人口の割合も減少し ている.そのため、構造物の点検に関わる技術者の数も減 少していくこと、税収の減少により自治体の予算も縮小 していくことが考えられる.したがって、今後はより少な い人員、予算で効率よく増大する維持管理需要に対処す る必要性が考えられる.これに対処するためには、極力欠 陥が軽微なうちに対策を講じる予防保全が有効である.

また,構造物の点検手法として,打音探査は非破壊かつ 簡易的に行えることから広く用いられている.しかし,打 音探査は人間が判定を行うため定量的な判定ではなく, 技術者の熟練度に依存しているという課題を持つ.その ため,技術者の熟練度に依存しない効率的かつ定量的な 初期段階の劣化を判定できる点検手法が求められている.

そこで、本研究では面的な検査など効率的な点検がで きる電磁波レーダ法に着目した.鉄筋コンクリートを電 磁波レーダにより走査すると、鉄筋エコーと呼ばれる鉄 筋からの反射波形が得られる.この時、鉄筋近傍にひび割 れが存在する場合、鉄筋エコーの形状に変化が生じるこ とが確認されている^り.初期段階の劣化の場合、ひび割れ が微細であるため鉄筋からの反射波形の形状の変化も微 細であり目視では判定が難しいが,機械学習を用いるこ とで初期段階の劣化を判定できると思われる.また,コン ピューターが欠陥の判定を行うことから定量的かつ技術 者の熟練度に依存しない判定であるといえる.そのため, 本研究では電磁波レーダ法に機械学習を用いることで初 期段階の劣化を判定することを目指した.

2. 研究概要

本研究は,電磁波レーダによる鉄筋からの反射波形を 機械学習した場合の鉄筋の腐食膨張によって生じるコン クリート内部の微細なひび割れの推定可能性について検 討した.検討の流れとしては,初めに実験とシミュレーシ ョンにより,鉄筋近傍のひび割れの存在により鉄筋から の反射波形の形状に変化が生じるか確認した.その後,鉄 筋の腐食膨張によって生じるひび割れを再現するために, 鉄筋を埋設した供試体に電食を行ってひび割れを生じさ せ,鉄筋の腐食状況の再現を目指した実験を行った.その 上で,電磁波レーダによる鉄筋からの反射波形を機械学 習させ,判定させることで,欠陥の推定が適切に行えるか どうか検討を行った.さらに,他の非破壊検査手法との欠 陥の推定精度の比較を行った.

3. 鉄筋からの反射波形の形状変化に関する検討

本検討では,模擬ひび割れを埋設した供試体と電食を 行う供試体を電磁波レーダにより計測し,ひび割れの存



図1 模擬ひび割れ供試体の概要



図2 電食を行う供試体の概要

表1 模擬ひび割れ供試体の水準

供試体番号	かぶりC(mm)	鉄筋	ひび割れ幅 ω (mm)
7			ひび割れなし
9			0.5
11	70	D16	1.0
13			2.0
14			3.0

在により鉄筋エコーの形状に変化が生じるか確認した.

(1) 実験概要

a)供試体について

模擬ひび割れを埋設した供試体の概要を図1に示すと ともに、表1に実験の要因と水準を示す.また、電食を行 う供試体の概要を図2に示す.模擬ひび割れを埋設した 供試体では、ひび割れ無しの供試体とひび割れ有りの供 試体の鉄筋エコーをそれぞれ比較した.電食を行う供試 体では、電食前後の鉄筋エコーを比較した.

b) 計測について

模擬ひび割れを埋設した供試体での電磁波レーダによる計測では,供試体横方向に 1cm 間隔の測線を複数回測 定した.赤外線供試体での電磁波レーダによる計測では, 供試体奥行き方向に 1cm 間隔の測線を複数回測定した. どちらの供試体においても,検討には側面からの影響を 考慮して中央の測線のデータを用いた.

(2)実験結果

a) 電食を行う供試体での電食実験結果

供試体を電食した結果,供試体表面には鉄筋に沿って ひび割れが生じていた. 図3に表面ひび割れを赤線で示 す.また,供試体を切断し,マイクロスコープにより切断 面を確認した結果,供試体中央付近で2箇所の内部ひび 割れが確認された. 図4に確認された内部ひび割れを示 す.これらの結果から,供試体には中央部分において内部 ひび割れが存在することが推察される.

b)鉄筋からの反射波形の比較結果

図5、6に模擬ひび割れを埋設した供試体と電食を行う 供試体でのひび割れ無しのエコーを他のエコーと重ね合 わせた図を示す.図5から,ひび割れがある場合は,エコ



図3 電食を行う供試体の表面ひび割れ



図4 電電食を行う供試体の内部ひび割れ

ひび	割れ幅	0	A 0.5	1.0	2.0	(3.0
(m	ım)	~	ひび む	割れ /	ひて	バ割れ うり
図5 4	模擬ひび割	割れに	よる鉄	筋エコー	-の形状	の違い
~				1		\wedge
	() 底	ま食育	前 🦯	腐	食後	

図6 電食前後による鉄筋エコーの形状の違い

ーの幅が広くなるなど藤原らの研究 りと同様の結果となった.一方,図6から腐食後の鉄筋エコーは腐食前のものと比べてエコーのすそ野の幅が小さくなる結果となった.

このように模擬ひび割れの場合と電食によるひび割れ の場合で異なる結果となった原因として,ひび割れ内部 の比誘電率の違いが考えられる.電食を行う供試体は電 食のため浸漬されていたため,内部は湿潤状態であった と思われる.また,同様の供試体で電食実験を行った結果, ひび割れ内部が腐食生成物で満たされている箇所が確認 された.そのため,ひび割れ内部の比誘電率はコンクリー トよりも高い状態にあったと思われる.一方,模擬ひび割 れを埋設した供試体では,模擬ひび割れとして比誘電率 が2.4~2.8のスチロール樹脂を埋設していたことからひ び割れ内部の比誘電率はコンクリートよりも低い状態に あったと思われる.そのため,電磁波がひび割れに到達し たときの挙動は異なると思われる. ここで,式(1),(2)に示すスネルの法則を用いて,コン クリートとひび割れ内部の比誘電率が8,81,入射角を 30°としたときの透過角を求めると、約9.04°となった. これを図示すると図7のようになり,ひび割れが無い場 合よりも鉄筋から離れた場所からの電磁波は届きにくく なる.そのため,電食を行う供試体では腐食後の鉄筋エコ ーのすそ野の幅が小さくなったと推察される.

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t \tag{1}$$

(2)

 θ_i :入射角, θ_t :透過角

ここで, n:

4. シミュレーションを用いた鉄筋からの反射波 形の形状変化に関する検討

実験により,鉄筋近傍のひび割れが存在すると鉄筋エ コーの形状が変化することを確認した.また,ひび割れ内 部の比誘電率の違いにより,鉄筋エコーの形状が異なる と考えられる.そこで,gprMaxによるシミュレーション によりこれらについて検討を行った.

(1) モデルとフィッティング概要

シミュレーションでは、図8に示すような鉄筋コンク リートのモデルを作成し、ひび割れ全長と厚さ、内部の比 誘電率を変化させて検討を行った.表2に検討条件を示 すとともに、表3にシミュレーションに用いた物性値を 示す.シミュレーションに用いた電磁波波形は、実際の電 磁波レーダから得られた波形を用いてフィッティングし た波形とした.

フィッティングでは、**図**9,10に示す無筋コンクリー ト供試体と鉄筋コンクリート供試体を用いて検討を行っ た.これらの供試体は電磁波レーダで図矢印に沿って計 測を行った上でモデル化し、**図**11のように吊るした鉄筋 の計測により得られた波形を用いてシミュレーションを 行った.そして,計測結果とシミュレーション結果をそれ ぞれ比較した.

吊るした鉄筋の計測により得られた波形は,計測開始後2~8秒間のゲインを平均化するとともに,鉄筋を吊るしていない状態での計測結果の場合を差し引くことで鉄筋のみの反射波を抽出した.また,ノイズの軽減などを目的に鉄筋のピーク直前のゲインが0となる位置以降の波形を切り出すとともに,鉄筋反射によるピークを過ぎた300mm以降のゲインを0とした.また,波形の位相を逆とするという前処理も行った.

結果の比較において,鉄筋コンクリート供試体では,計 測結果とシミュレーション結果のどちらの場合も鉄筋の 影響が少ない部分での計測結果を差し引くことで鉄筋の みの反射波を抽出した.

(2) フィッティング結果

図12に無筋コンクリートの場合の比較結果を示す.この時,波形が最大値となったときを0秒としてプロット



図7 ひび割れが水で飽和した場合の電磁波の屈折



図8 鉄筋コンクリートのモデル

表 2 検討条件

04-05-72	電磁波	周波数	かぶり	ひび割れ全長	ひび割れ厚さ	ひび割れ内部の
妖肋1至	の波形	(GHz)	(mm)	(mm)	(mm)	誘電率
						1
				25		8
						16
						1
D16	ノイソノ	ノイツティンクに	100	50	2	8
	ようて持られた政ル					16
					r	1
				100		8
						16

表3 検討条件

		比誘電率	導電率(S/m)			
コンク	リート	8	0			
針	筋	pec(導電体としてシミュ				
30	נעמ	レーションできる設定)				
空梦	記層	free_space(空気としてシ			
	乾燥状態	犬態 ミュレーションできる設知				
ひび割れ	湿潤状態	16	0.02			



図9 無筋コンクリート供試体



図10 鉄筋コンクリート供試体

した.図12から,負のピークとその次のピークの位置が どちらも概ね一致する結果となった.また,ピークの振幅 が異なっていることや約1.5秒以降の減衰を再現するこ とができなかったが,これはアンテナの再現が不十分で あること,コンクリートを均一な物質としてモデル化し



図11 空中に吊るした鉄筋の計測の様子



図12 無筋コンクリートの場合の比較結果







ているためであると思われる.

図13に鉄筋コンクリートの場合の比較結果を示す.図 13から、両者の鉄筋の反射によるものと思われるピーク の位置が一致する結果となった.そのため、鉄筋コンクリ ートの場合でも計測結果の再現をすることができた.

以上の結果より,計測結果の再現がほぼできたことか ら,本検討では今回のフィッティングによって得られた 波形を用いることとした.

(3) シミュレーション結果

図 14, 15 にひび割れ全長を 50, 100mm とした場合の シミュレーションによる結果を示す. これらの結果から, ひび割れ内部の比誘電率がコンクリートの比誘電率より も低い場合は鉄筋エコーの幅が大きく,高い場合は鉄筋 エコーの幅が小さくなる傾向を確認できた.また,ひび割 れ長さが長いほど鉄筋エコーの形状の変化が顕著になっ た.なお,ひび割れ全長 25mm の場合は明確な変化は認 められなかった.これは,ひび割れの上に鉄筋をモデル化 したため,実際にひび割れとなっているのは鉄筋の左右 4.5mm の部分であり,鉄筋エコーに影響を及ぼすにはひ び割れ長さが足りなかったためと思われる.また,ひび割 れ全長が100mmの場合で比誘電率ごとに電磁波レーダ画



図 16 3.6ns での電磁波の強度





図18 反射係数と入射角の関係(比誘電率1の場合)



図 19 反射係数と入射角の関係(比誘電率 16 の場合)

像を比較すると,比誘電率が1の場合は鉄筋エコーの左 右のゲインが強調され,比誘電率が16の場合は鉄筋エコ ーの頂点のゲインが強調されるという特徴を見いだした.

次に、比誘電率が高い場合と低い場合で鉄筋エコーの 形状が異なる変化をする原因について考察するために、 電磁波レーダから発信された電磁波がどのような動きを しているのか検討を行った.鉄筋かぶりが100mm,ひび 割れ長さが200mm,電磁波レーダの送信点がモデルの左 端から150mmの位置にある時の電磁波の強度を図16に 示す.ここでは、電磁波がひび割れで反射しコンクリート 表面付近まで到達した3.6nsでの結果について示す.その 結果、黒い丸で示したようにひび割れ内部の比誘電率が1 の場合、電磁波は送信点側で強度が強くなっているが、ひ び割れ内部の比誘電率が16の場合、電磁波は送信点とは 反対側で強度が強くなった.

この結果について電磁波の反射係数と入射角の関係を 式(1),(2),(3),(4)を用いて計算することで同様の結果と なるか検討を行った.図17に示すように媒質1の比誘電 率を8、媒質2の比誘電率を1,16とした.その結果,図





図 20 ひび割れ内部の比誘電率による 電磁波の挙動の違い

$$R_{\perp} = \frac{\frac{1}{n_2} \cos\theta_i - \frac{1}{n_1} \cos\theta_t}{\frac{1}{n_2} \cos\theta_i + \frac{1}{n_1} \cos\theta_t}$$
(3)

$$R_{\parallel} = -\frac{\frac{1}{n_1}\cos\theta_i - \frac{1}{n_2}\cos\theta_t}{\frac{1}{n_1}\cos\theta_i + \frac{1}{n_2}\cos\theta_t}$$
(4)

ここで、n:媒質の屈折率、 θ_i :入射角、 θ_t :透過角

*R*_⊥, *R*_∥:入射電界が入射面に対して垂直、平行 な場合の反射係数

18, 19 に示す計算結果が得られ, 媒質 2 の比誘電率が 1 の場合は入射角が 20° と比較的浅い角度で電磁波が入射 しても強い反射波となるが,比誘電率が 16 の場合は 70° など深い入射角でないと強い反射波とならない結果とな った.そのため,図20に示す矢印のような動きをした場 合に反射波の強度が強くなり,シミュレーションと一致 する結果となった.

以上より,鉄筋から離れた位置に電磁波レーダがある 場合,ひび割れ内部の比誘電率が1であると強度の強い 電磁波を受信するのではないかと思われる.そのため,鉄 筋エコーの左右のゲインが強調され,鉄筋エコーの幅も 大きくなるのではないかと推察される.また,ひび割れ内 部の比誘電率が高い場合は逆の現象が起きていると思わ れる.一方で,これらの結果は電食直後の供試体は湿潤状 態であり,ひび割れ内部も水である程度満たされた状態 であるという前提に基づいている.そのため,湿潤状態に おいて供試体内部のひび割れが水で飽和しているかどう か検証していく必要がある.

6. 機械学習に用いる画像の切り出し範囲に関す る検討

実験とシミュレーションにより、模擬ひび割れを埋設 した供試体や電食を行った供試体の場合でもひび割れに より鉄筋エコーの形状に変化が生じることを確認した. そのため、機械学習によりひび割れの存在を推定するこ とは可能であると思われる.そこで,はじめに模擬ひび割 れを埋設した供試体を用いて機械学習に用いる画像の切 り出し範囲について検討を行った.

(1)供試体と機械学習の概要

模擬ひび割れを埋設した供試体の水準を表 4 に示す. 鉄筋径が D16 の供試体のデータを教師データとして機械

表4 供試体の水準

供試体番号	かぶりC(mm)	鉄筋	ひび割れ幅 ω (mm)	データの種類	打設日	
1			ひび割れなし			
2		D25	0.5	テストデータ	2020/9/2	
3			1.0			
7			ひび割れなし			
8	70		0.2		2020/8/20	
9	10		0.5			
11		D16	1.0	教師データ		
12			1.5		2020/8/20	
13	1		2.0			
14			3.0		2020/9/2	



図 21 模擬ひび割れを埋設した供試体の計測状況



図 22 3 パターンの切り出し範囲

電磁波レーダ画像

		デー	- タ数		エポック粉	山辺中の神中	両後サイフ
	教師	健全	欠陥	テスト	・エホック数	于自时の相反	画家リイス
ペターン1	522	144	378	324	200	93.33%	81x46
ペターン2	522	144	378	324	50	99.05%	161x141
2h 10	E00	144	270	224	FO	00.05%	160200

表5 機械学習の概要



図 23 パターンごとの判定結果

学習を行い、それ以外の供試体をテストデータとして判定することで画像の切り出し範囲による判定精度の検討を行った.電磁波レーダによる計測では、図21のように9測線を6回測定した.切り出し範囲は図22に示す3パターンとした.機械学習には画像の認識が可能なCNNを用いた.表5に機械学習の概要を示す.

(2) 判定結果

判定結果を図 23 に示す.図 23 から,パターン2と3

ではひび割れ無しの場合も含めてほぼ全面を欠陥と判定 する結果となった.一方,パターン1の場合は一部を誤 判定しているものの,ひび割れ無しを健全と,ひび割れ有 りを欠陥と判定する結果となった.また,パターンごとに F値を計算するとパターン1は0.59,パターン2は0.04, パターン3は0.00となった.

測線1や9など供試体の端部で誤判定することが多か ったが、これはこの部位が鉄筋の端部かつ供試体の端部 であることから、鉄筋エコーが弱く、供試体側面からの反 射の影響もあるため鉄筋エコーが不明瞭となっていたた め誤判定したのではないかと推察される.

以上の結果から,パターン1のように鉄筋エコー周辺 部のみを切り出すことで精度よく判定できると思われる.

6. 電食によるひび割れの判定可能性に関する検 討

本検討では,鉄筋コンクリート供試体を電食すること で内部ひび割れを生じさせ,鉄筋エコーを切り出した画 像を機械学習することでひび割れとその進展を推定でき るか検討を行った.

(1)供試体と機械学習の概要

供試体概要を図 24 に示す.供試体にはかぶりを 70mm として 3 本の D16 鉄筋を埋設し,その間にひずみ計を埋 設した.また,供試体上部の周囲には高さと厚さが 20mm のモルタルの枠を作製し,電食用のプールとした.計測は, 11 測線を 1 計測ごとに 10 回繰り返し計測した.

機械学習では、CNN と異常検知が可能な AnoGAN を用 いて検討を行った.教師データには、電食開始前と開始後 45 日目のデータを用いた.表6 に機械学習の概要を示す.

(2) 電食実験結果

図25にひずみ推移と積算電流量を示す.また,電食実



図 24 供試体概要





図 25 ひずみと積算電流量の推移

験終了後切断した供試体の切断面を図 26 に示す. 図 25 より,電食開始後 35 日から 45 日目の間でひずみの急激 な進展があることから,鉄筋 2 と 3 の間で内部ひび割れ が発生したと思われる.また,図 26 から,鉄筋 2 と 3 の 間でひび割れ幅 1mm の横ひび割れを確認した.さらに, 切断面をマイクロスコープで観察した結果,鉄筋 2 と 3 において幅 20~500µm のひび割れを確認した.

(3) 判定結果

電食開始後 10, 24, 31, 45 日目の判定結果を図 27 に 示す. 図 27 から, AnoGAN の場合は, ひずみが急進展 した後である 45 日目で鉄筋 2 と鉄筋 3 の一部を欠陥と判 定する結果となった. そのため, ひずみの値と切断結果か ら, AnoGAN による判定では幅 1~2mm の内部ひび割れ を判定できたものと思われる.

一方, CNN の場合は24日目で鉄筋2の全てと鉄筋3の 一部を欠陥と判定する結果となった.24日目のひずみ1 の値は約267µであったこと,10日目でゆるやかにひずみ 計1の値が進展していることから,微細なひび割れが存 在していたと推察される.そのため,CNNはこの微細な ひび割れによる鉄筋エコーの変化を捉えることができた のではないかと思われる.また,31日目では,鉄筋3の 全てを欠陥と判定した.31日目はひずみ計2の値が進展 し,ひずみ計1の値よりも大きくなっていることから, 鉄筋2と3の間でも微細なひび割れが存在していると思



われる.そのため、妥当な判定と言える.

以上の結果から、CNN と AnoGAN どちらの場合でも電 食による内部ひび割れを推定することができた.また、 CNN による判定では AnoGAN では推定できない微細な ひび割れを推定できるのではないかと思われる.

7. 他の非破壊検査手法との比較検討

本検討では、電食によりひび割れを発生させた実構造 物大の供試体を用いて、機械学習を用いた電磁波レーダ 法と打音検査による欠陥の推定精度の比較考察を行った. (1)供試体と機械学習の概要

図28に実構造物大の供試体の概要を示す.供試体には 主筋としてD25鉄筋,配筋としてD19鉄筋をかぶり70mm として埋設した.そして,中央部分の鉄筋を電食により腐 食させ,内部ひび割れを発生させた.また,ひずみゲージ を3本埋設し,電食によるひずみの推移を確認した.

計測では,電磁波レーダと打音による計測を行った.電 磁波レーダでは,主筋と配筋をそれぞれ計測した.打音に よる計測では,供試体中央部分を 100mm 間隔の 11× 11=121 打点計測した.

機械学習では電磁波レーダは AnoGAN を, 打音は CNN



図28 実構造物大の供試体

	電食	開始後1	0日目		電食	開始後2	4日目		電食	開始後3	1日目			電食	開始後4	5日目	
	鉄筋3	鉄筋2	鉄筋1		鉄筋3	鉄筋2	鉄筋1		鉄筋3	鉄筋2	鉄筋1		鉄	筋3	鉄筋2	鉄筋1	
	0.010	0.011	0.010	側線1	0.012	0.014	0.010	側線1	0.015	0.013	0.012	側線1	C	0.015	0.021	0.014	側線1
	0.011	0.011	0.012	側線2	0.013	0.014	0.010	側線2	0.014	0.014	0.012	側線2	C	0.014	0.022	0.014	側線2
	0.010	0.011	0.012	側線3	0.011	0.014	0.011	側線3	0.013	0.015	0.011	側線3	C	0.014	0.022	0.015	側線3
	0.010	0.012	0.013	側線4	0.012	0.014	0.011	側線4	0.014	0.015	0.012	側線4	C	0.014	0.022	0.016	側線4
AnoGAN	0.010	0.012	0.014	側線5	0.012	0.014	0.012	側線5	0.016	0.016	0.013	側線5	C	0.014	0.022	0.020	側線5
	0.010	0.013	0.014	側線6	0.013	0.014	0.014	側線6	0.015	0.015	0.013	側線6	C	0.014	0.020	0.021	側線6
	0.010	0.013	0.013	側線7	0.012	0.014	0.014	側線7	0.014	0.016	0.014	側線7	C	0.014	0.020	0.023	側線7
	0.010	0.012	0.013	側線8	0.012	0.013	0.013	側線8	0.014	0.015	0.014	側線8	C	0.013	0.020	0.023	側線8
	0.011	0.012	0.013	側線9	0.012	0.013	0.013	側線9	0.015	0.015	0.015	側線9	C	0.014	0.019	0.019	側線9
	0.011	0.012	0.011	側線10	0.011	0.012	0.012	側線10	0.015	0.014	0.014	側線10	C	0.014	0.018	0.017	側線10
	0.010	0.011	0.011	側線11	0.013	0.012	0.013	側線11	0.017	0.014	0.014	側線11	C	0.015	0.016	0.017	側線11
ひずみ(μ)	1	72 4	11		26	67 1	76		30	04 3	350			45	8 1	930	
	電食	開始後1	0日目		電食	開始後2	4日目		電食	開始後3	1日目			An	oGAN	の凡例	
	鉄肋1	鉄筋2	鉄肋3	/四/ 4台 。	鉄肋1	鉄肋2	鉄肋3	/四/ 化白 。	鉄肋1	鉄肋2	鉄肋3	/四1 4台 -	健子	~			欠陥
	0.772	0.702	0.989	1則線1	0.328	0.156	0.841	1則 総1	0.253	0.012	0.341	1則線1					Лени
	0.793	0.783	0.983	1則線2	0.389	0.210	0.752	1則 続 2	0.038	0.030	0.398	1則線2	0.00	0 0.0	10 0.01	0.020	0.023
	0.755	0.663	0.966	1則称3	0.265	0.105	0.625	1則称3	0.049	0.040	0.206	1則称3					
CNN	0.863	0.765	0.981	1111 和永 4	0.403	0.143	0.573	11則 称永 4	0.092	0.013	0.218	11則称4					
onn	0.864	0.035	0.909	(則) 秋 5 (則) 約 c	0.560	0.114	0.459	限制を自く	0.204	0.050	0.103	11月 市水 5 /1月 6月 C		C	NND		
	0.921	0.577	0.954	1円 形形 D	0.082	0.214	0.571	11月 市永 0	0.2/1	0.021	0.094	11则 形形 D	h+ /			アしつり	500
	0.905	0.600	0.918	1円 秋 / /目 編 o	0.707	0.104	0.470	(則) 秋水 / (目) 約束 o	0.347	0.035	0.155	(則) 秋 / /則 約 の	健白	Ê			火帕
	0.932	0.057	0.981	间線の	0.697	0.097	0.4/4	(則 紀 0	0.244	0.036	0.090	间線の	1.00	0.	75 0.50	0.25	0.00
	0.939	0.430	0.962	(印) 約8 5	0.015	0.078	0.542	(則 約 10	0.383	0.027	0.001	(則約3)					
	0.899	0.309	0.967	側線11	0.701	0.028	0.718	(則 紀 11	0.420	0.002	0.075	间線11					
	0.927	0.200	0.951	11 AG 40K 11	0.524	0.008	0.740	DEJ NOK II	0.450	0.009	0.170	DEJ TOK II					

図 27 CNN と AnoGAN による判定結果の比較

を用いて学習と判定を行った.教師データは電食開始前 と電食開始後 60 日目のデータを用いた.表7に機械学習 の概要を示す.また,電磁波レーダでのテストデータには よりかぶりが浅い配筋のデータを用いた.

(2) 電食試験結果

図 29 にひずみ推移と積算電流量を示す.図 29 より,供 試体中央部分に最も近いひずみ計1の値が電食開始後 30, 50 日目付近で急激に進展した.そのため,この日におい て内部ひび割れが発生したと思われる.

(3) 判定結果

図 30 に電食開始後 11,53 日目の電磁波と打音の判定 結果をそれぞれ示す.図 30 からひずみが急進展した後で ある 53 日目において,どちらの場合でも中央部分を欠陥 と判定する結果となった.したがって,両方法とも同等の 精度で内部ひび割れを推定できたと思われる.

一方,電磁波での判定結果では供試体上部を欠陥と判 定した.これは,供試体上部には別の実験に用いる鉄筋が 埋設されていたため,電磁波レーダ画像が複雑になり誤 判定したと思われる.そのため,鉄筋の配置が複雑な場合 は打音による判定が向いていると思われる.また,電磁波 レーダによる判定では,鉄筋と測線の交点のみをテスト データとして利用するため,打音よりも荒い判定結果と なった.そのため,電磁波レーダは面的な検査が可能なこ とから,大まかな欠陥の位置を推定する用途に適性があ ると思われる.

データの種類	教師データ数	健全データ数	欠陥データ数	エポック数
電磁波レーダ	134	134 (電食開始前のデータ)		100
打音	7744	6304 (電食開始前のデータ+ 電食開始後60日目のデータ)	1440 (電食開始後60日目のデータ)	150

表7 機械学習の概要



図 29 ひずみと積算電流量の推移



8. まとめ

本研究により得られた結果を以下に述べる.

- 実験とシミュレーションによりひび割れが存在する と鉄筋エコーの形状に変化が生じることを確かめた.
- 2) 鉄筋近傍のひび割れ内部の比誘電率が異なると鉄筋 エコーが異なる変化をすることが確かめられた.このような現象が起きるメカニズムとして、電磁波が 比誘電率の低い媒質と高い媒質に入射する際は異な る挙動をするためと思われる.
- ひび割れの長さが鉄筋エコーの変化に影響を与える ことが確認された.
- 4) 出力する電磁波波形を実際の電磁波レーダから得られた反射波波形を用いてフィッティングすることで 誤差はあるものの実際の計測結果を再現することができた。
- 5) 電磁波レーダ画像の機械学習において、鉄筋エコー 周辺部のみを切り出した場合が最も精度よくひび割 れを判定することができた。
- 電磁波レーダ画像の機械学習において、CNN と AnoGAN どちらの場合でも電食による内部ひび割れ を推定することができた.
- CNN による判定では AnoGAN では推定できない微 細なひび割れを推定できる可能性を見いだした.
- 8) 機械学習を用いた電磁波と打音による判定では、どちらも同等の精度で内部ひび割れを推定する結果となった。
- 9) 電磁波と打音による判定を比較した結果,鉄筋の配置が複雑な構造物には打音による判定が向いていると思われる.また,電磁波レーダは大まかな欠陥の位置を推定する用途に適性があると思われる.

謝辞:研究を行うにあたり,たくさんのご指導,ご鞭撻を いただきました溝渕利明教授,山本佳士教授に心より感 謝申し上げます.また,研究を進めるにあたり,沢山ご協 力を頂いたコンクリート材料研究室の皆様にもここでお 礼を申し上げます.

参考文献

- 藤原茜,新保弘,野嶋潤一郎,溝渕利明:電磁波による 鉄筋腐食膨張に伴う内部ひび割れの推定に関する基礎 的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.42,No.1, pp.1630-1635,2020
- 2)多田祐希,三浦泰人,中村光:電磁波レーダを用いた鉄筋腐食に伴う内部ひび割れの検出に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1771-1776, 2017
- 3) Craig Warren, Antonios Giannopoulos, Iraklis Giannakis : gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar, Computer Physics Communications, 209, pp.163-170, 2016