

論文 鉄筋コンクリート部材の内部ひび割れが電磁波の鉄筋からの反射波形に及ぼす影響に関する検討

佐野 俊介*1・清 良平*2・伊藤 均*3・溝渕 利明*4

要旨：本研究は、コンクリート内部にひび割れが生じると電磁波レーダの鉄筋からの反射波形が変化する現象に着目し、ひび割れ内部の比誘電率を変化させた場合の鉄筋からの反射波形の形状の変化について数値的アプローチの検討を行った。検討の結果、ひび割れ内部の比誘電率がコンクリートより低いと鉄筋からの反射波形の左右の反応が強くなること、ひび割れ内部の比誘電率がコンクリートより高い場合鉄筋からの反射波形の頂点の反応が強くなることを確認した。また、ひび割れの長さや幅が大きくなるほど鉄筋エコーの変化が大きくなることも確かめられた。

キーワード：非破壊検査、電磁波レーダ法、内部ひび割れ、gprMax、シミュレーション

1. はじめに

現在の日本では、高度経済成長期に多数建設された構造物の老朽化に伴い、維持管理に関する需要が急増している。一方で、今後の日本では少子高齢化に伴い、税収の減少や技術者の不足が予測される。そのため、このような需要に効率的かつコストを抑えながら対応していくことが重要である。維持管理に関するコストを減らすためには、欠陥が軽微なうちに補修を行う予防保全が有効である。よって、効率的かつ劣化進展の初期段階で判定できる点検手法が必要である。

コンクリート構造物の点検手法には、打音探査が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、打音探査は熟練技術者による暗黙知に依存しているという課題を有している。そのため、人口減少に伴う技術者不足が予測される日本では暗黙知に依存しないで点検できる効率的で定量的な点検手法が求められている。

このような点検手法について、藤原ら¹⁾や著者ら²⁾は電磁波レーダを用いて機械学習を行うことで鉄筋の腐食に伴う内部ひび割れの推定を試みている。電磁波レーダとは、電磁波が比誘電率の異なる物質の境界で反射することを利用して鉄筋の位置やかぶりを推定する手法である。電磁波レーダを鉄筋コンクリート表面上で走査すると鉄筋のある位置で鉄筋エコーと呼ばれる反射波形の画像を得られるが、コンクリート内部にひび割れが存在すると鉄筋エコーに変化が生じることが藤原ら¹⁾により確認されている。そのため、この変化を機械学習によって判定することが可能となれば、コンクリート部材内部のひび割れの推定を行うことができると思われる。

一方、著者らは鉄筋コンクリートを電食して内部ひび

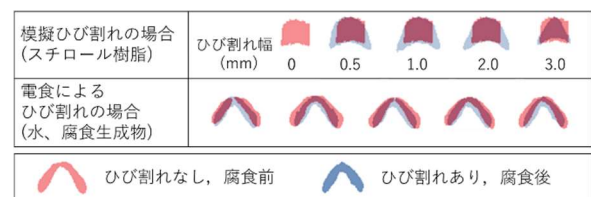


図-1 ひび割れの種類による鉄筋エコーの違い

割れを発生させた場合と模擬ひび割れを埋設した場合での鉄筋エコーは図-1 に示すような異なる変化をすることを確認した。具体的には、電食した場合での鉄筋エコーはすそ野の幅が小さく、模擬ひび割れを埋設した場合での鉄筋エコーはすそ野の幅が大きくなるという変化をした。このように異なる変化をした原因として、ひび割れ内部の比誘電率の違いが考えられる。

ひび割れ内部の比誘電率の違いが鉄筋エコーの変化に与える影響について検証する手法としてシミュレーションを行うことが考えられる。しかし、FDTD法を用いたシミュレーションにより鉄筋コンクリート下の空洞を検出した事例³⁾や機械学習でのデータ拡張にシミュレーションを用いた事例⁴⁾は存在するものの、ひび割れが存在すると鉄筋エコーにどのような変化が生じるかをシミュレーションした事例は少ない。

そこで、本研究では鉄筋エコーの形状変化から内部ひび割れを推定するための研究の一環として、既往の研究と異なる結果となる現象が比誘電率の違いによるものなのか解明することを目的とした。そのため、ひび割れ内部の比誘電率が異なると鉄筋エコーの形状にどのような変化が生じ、また、ひび割れにより反射波形がどのように変化するのかをシミュレーションにより検討を行った。

*1 法政大学 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

*2 計測技術サービス (株) 代表取締役 博士(工学) (正会員)

*3 八千代エンジニアリング (株) 名古屋支店 道路・構造部 (正会員)

*4 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

2. 研究概要

2.1 本研究の流れ

本研究では、より実際の計測に近づけた条件での検討を行うために、アンテナをモデル化し3次元でのシミュレーションを行った。この時、アンテナから出力する電磁波の波形について実際の電磁波レーダから出力される波形をもとにフィッティングすることによって求めることとした。この検討では、ひび割れ内部の比誘電率とひび割れ長さ、幅を変化させ、鉄筋エコーにどのような変化が生じるかを比較、検討した。

シミュレーションにはオープンソースのソフトウェアである gprMax⁵⁾を用いた。gprMax とは、マクスウェル方程式を差分法で解く手法である FDTD 法を用いた3次元での電磁波シミュレーションが可能なソフトウェアである。

2.2 モデルの概要

本研究では、シミュレーションに用いる電磁波波形のフィッティングと3次元のシミュレーションを行った。フィッティングには実在する鉄筋かぶりが70mmの供試体をモデル化したもの(モデル2)を用いた。しかし、図-2に示すように事前検討によりかぶり70mmの場合は鉄筋エコーと表面波が重なる傾向が見られたため、3次元のシミュレーションではかぶりを100mmとしたモデル1を用いて検討した。また、モデル1ではひび割れの長さ、幅、比誘電率をパラメータとして変化させた。

モデル1では、鉄筋コンクリートとしてコンクリートと鉄筋、ひび割れ、空気層をモデル化した。コンクリートの寸法は高さ170×幅148×長さ500mmとし、その上部に寸法65×148×500mmの空気層を設けた。また、D16の鉄筋をコンクリートの長さ方向中央部分にモデリングし、その左右にひび割れをモデリングした。鉄筋のかぶりは100mmとした。また、ひび割れの幅は2、4mmとし、ひび割れの左端から右端までの長さは50、100mmとした。

アンテナは gprMax に組み込まれている GSSI 1.5GHz と呼ばれるアンテナをモデル化したものを用いた。このとき、本研究で用いている電磁波レーダに極力類似した波形とするために、電磁波の発信部分と受信部分を10mmずつ中心に移動させたモデルとした。励起する電磁波波形はフィッティングによって得られたものとした。また、アンテナの中央部分がモデルの左端から105mmの位置となるように配置し、1stepごとに5mmずつ移動するように設定した。図-3にひび割れ長さ100mmの場合のモデル1の断面図を示す。また、表-1にモデル1で検討した全パターンを示す。

モデル2では、鉄筋を3本埋設した鉄筋コンクリートとして、コンクリートと空気層、鉄筋、アンテナをモデ

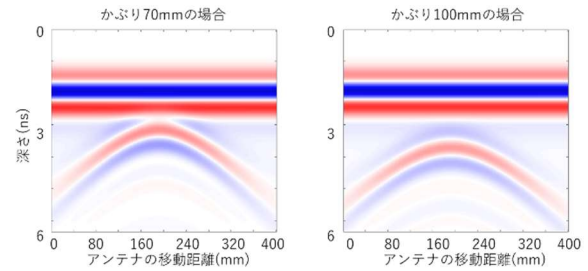


図-2 鉄筋かぶりごとのシミュレーション結果

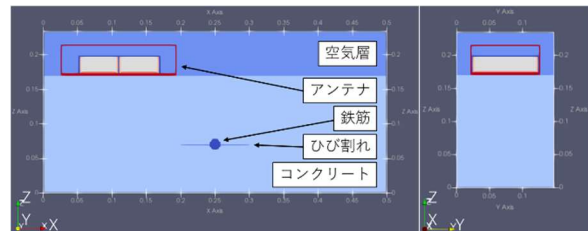


図-3 ひび割れ長さ100mmの場合のモデル1の断面図

表-1 モデル1で検討した全パターン

モデル	ひび割れ長さ(mm)	幅(mm)	ひび割れ内部の比誘電率
モデル1	50	2	1
			ひび割れなし
			16
	100	2	1
			ひび割れなし
			16
		4	1
			ひび割れなし
			16

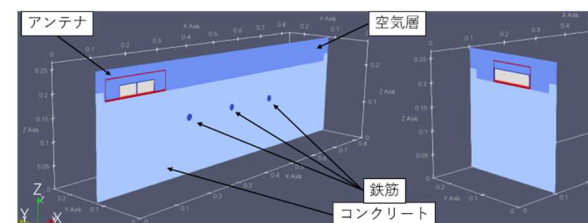


図-4 モデル2の断面図

ル化した。コンクリートの寸法は高さ200×幅250×長さ840mmとし、コンクリート上部の空気層は寸法65×250×840mmとした。鉄筋はD16とし、長さ方向の中央に鉄筋をモデリングし、その左右にも鉄筋を1本ずつモデリングした。鉄筋間の距離は150mmとし、鉄筋かぶりは70mmとした。アンテナはモデル1と同様のものを用い、設定はモデル1の場合と同様とした。図-4にモデル2の断面図を示す。シミュレーションに用いた物性値は、全ケースとも同じものを用いた。コンクリートの物性値は比誘電率8、導電率0S/mとし、空気層の物性値は gprMax に組み込まれている空気をシミュレートした free_space を用いた。鉄筋も同様に gprMax に組み込まれ



写真-1 空中に吊るした鉄筋の計測状況

ている完全な電気伝導体をシミュレートした pec を用いた。なお、free_space は空気層として扱えるように物性値を比誘電率 1、導電率 0S/m として事前定義した設定であり、pec は金属として扱えるように電場を 0、電気伝導率を無限大となるように設定したものである。

ひび割れは、ひび割れ内部の比誘電率の違いが鉄筋エコーに与える影響を検討するために、ひび割れ無し、乾燥状態および湿潤状態にあるひび割れの 3 種類の物性値をパラメータとした。ひび割れ無しの場合はコンクリートの物性値を、乾燥状態にあるひび割れは空気層と同様に比誘電率が 1 である free_space を用いた。湿潤状態にあるひび割れ内部の物性値は未知であるが、本研究では比誘電率の違いによる鉄筋エコーの影響をみるため、仮に比誘電率 16、導電率 0.02S/m とした。

2.3 フィッティングの概要

3 次元のシミュレーションでは、より実際の計測に近い条件での検討を行うためアンテナをモデル化した。ただし、出力する電磁波の波形が実際のものと大きく異なるとシミュレーション結果も異なることが予測されたことから、フィッティングを事前に行い、実際の電磁波レーダによる計測結果を再現できるような波形を得ることを目指した。

フィッティングでは、写真-1 に示すように空中に吊るした鉄筋を電磁波レーダで計測した。得られた波形は前処理し、シミュレーションによる結果が実際の電磁波レーダによる計測結果を再現できているか確認を行った。

鉄筋の計測では、鉄筋と電磁波レーダの距離を 180mm とした。これは、鉄筋の反射波以外の影響を極力除くために、鉄筋を吊るしていない状態で受信強度（ゲイン）が 0 となっていた位置としたためである。鉄筋は D16 とし、電磁波レーダと鉄筋を固定して約 10 秒間計測を行った。

計測後、経時的なノイズを軽減するために 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を用いて、鉄筋ありの波形から鉄筋な

しの波形を差し引くことで鉄筋のみの反射波を抽出した。

次に、鉄筋反射によるピークより前の部分は鉄筋からの反射波でないため、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した。また、鉄筋の比誘電率はコンクリートよりも高いため、鉄筋からの反射は入力位相に対して反転して反射される固定端反射が起きる。そのため、波形の位相を逆とした。さらに、鉄筋反射によるピークを過ぎた 300mm 以降は周りの反射などによるノイズが含まれていると思われるため、ゲインを 0 とした。図-5、6 に前処理の概要を示す。

以上の前処理によって得られた波形を用いて、シミュレーションによる結果と実際の計測結果の比較を行った。また、フィッティングを行っていない状態でのシミュレーションによる結果とも比較した。

シミュレーションにはモデル 2 を用いた。また、鉄筋の影響が少ないと考えられるモデルの端での測定結果を

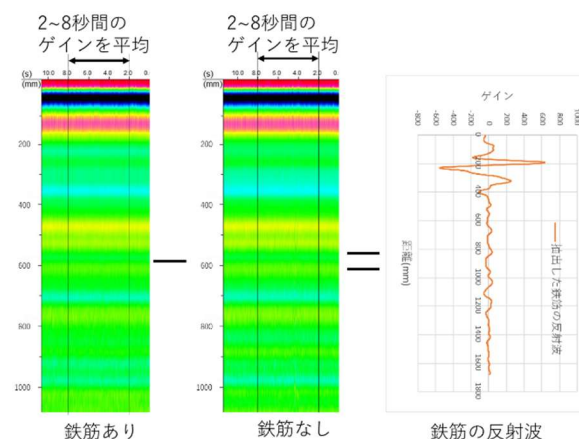


図-5 鉄筋の反射波を抽出するまでの前処理の概要

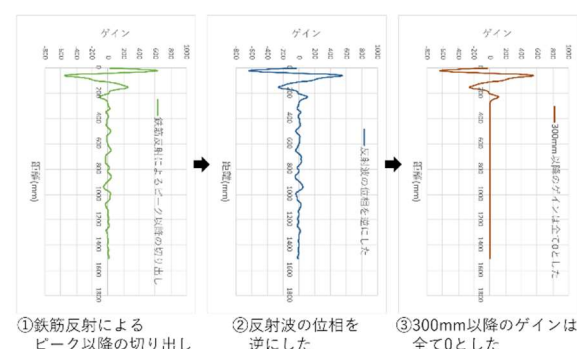


図-6 抽出した後の前処理の概要

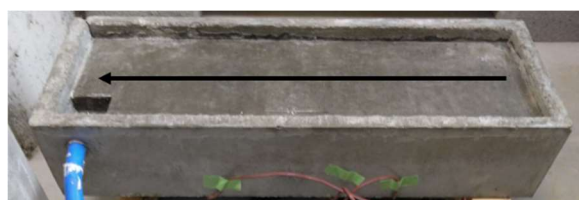


写真-2 キャリブレーション用の供試体

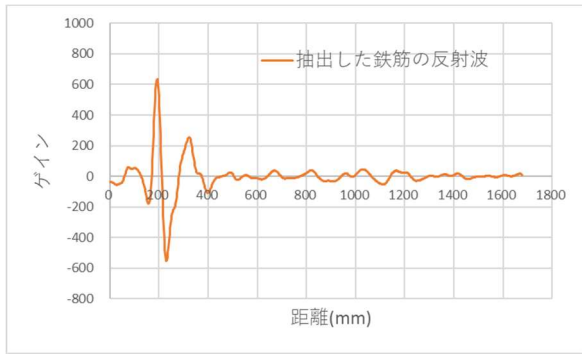


図-7 抽出した鉄筋の反射波

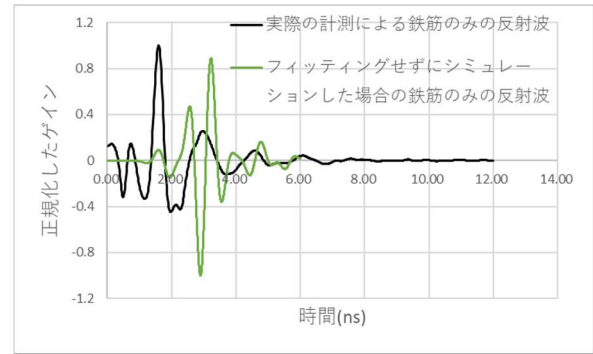


図-9 フィッティングしない場合と実際の計測の結果

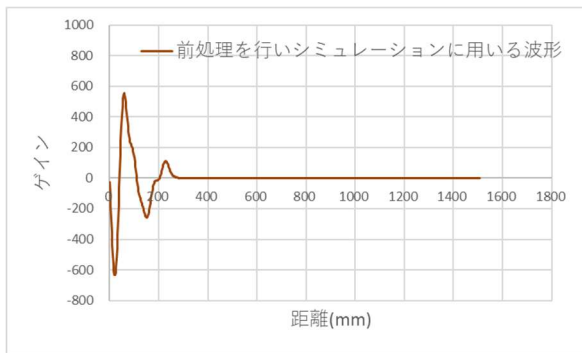


図-8 シミュレーションに用いる波形

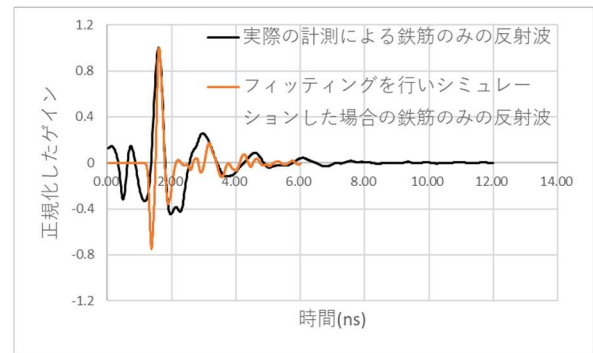


図-10 フィッティングした場合と実際の計測での結果

差し引くことで鉄筋のみの反射波を抽出した。さらに、シミュレーションにより得られた反射波から中央の鉄筋直上での反射波を抜き出し、絶対値の最大値で全体を除することで正規化を行った。

実際の計測では、モデル2と同様に寸法が $840 \times 250 \times 220\text{mm}$ の鉄筋コンクリートの中央を電磁波レーダで10回繰り返し測定した。写真-2にキャリブレーション用の供試体と測線を示す。計測後は、3本埋設されている鉄筋のうち中央の鉄筋直上での反射波を計測ごとに抽出した結果を平均化した。また、シミュレーションの場合と同様に鉄筋による影響がないと考えられる供試体端での測定結果を差し引くことで鉄筋のみの反射波を抽出した。さらに、絶対値の最大値で全体を除することで正規化を行った。

3. フィッティング結果と考察

鉄筋ありの波形から鉄筋なしの波形を差し引くことで抽出した鉄筋の反射波を図-7に示す。図-8から、距離約190mmで波形のピークが見られた。鉄筋は距離180mmの位置に吊りしていたため、距離が約10mmずれているもののこれが鉄筋の反射によるピークと思われる。次に、シミュレーションに用いる波形を図-8に示す。

フィッティングを行っていないシミュレーションにより得られた鉄筋のみの反射波と実際の計測により得られた鉄筋のみの反射波を図-9に示す。図-9から、鉄筋

の反射によるものと思われるピークの位置が両者とも一致しない結果となった。

次に、フィッティングを行ったシミュレーションにより得られた鉄筋のみの反射波と実際の計測により得られた鉄筋のみの反射波を図-10に示す。図-10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、フィッティングを行うことにより実際の電磁波レーダによる計測結果をある程度再現することができたものと思われる。一方、実際の計測において、鉄筋によるピークより前の部分でノイズが生じているが、この部分はコンクリート表面での反射波の影響が含まれるため、実際の計測では表面の粗さなどによりノイズが生じたのではないかと推察される。また、鉄筋によるピークを過ぎた後の波形の形が異なるのは、今回のシミュレーションではコンクリートを均一な物質としてモデル化したため、骨材による影響などを再現できず誤差が生じたのではないかとと思われる。

以上の結果から、今回のシミュレーションによってある程度計測結果の再現ができたことから、これ以降の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。

また、本研究ではかぶり70mmで電磁波波形のフィッティングを行ったが、鉄筋かぶりが大きくなると電磁波の入射角が浅くなることやコンクリート部分での距離が長くなり減衰時間が増えるなど電磁波の挙動が変化する。

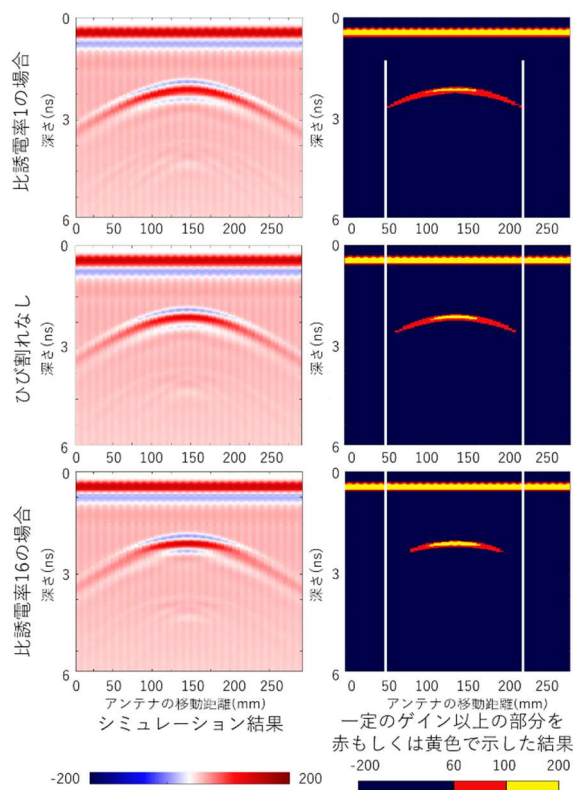


図-11 ひび割れ長さが 50mm の場合の結果

そのため、モデル 1 の鉄筋かぶり 100mm の場合では、実際の計測により得られる鉄筋エコーの形状と比べると誤差が生じる可能性が考えられる。よって、新たに鉄筋かぶりが 100mm の場合の電磁波波形でフィッティングし直すことでより正確なシミュレーション結果が得られると考えられる。

4. シミュレーション結果と考察

モデル 1 を用いたシミュレーションでは、最初にひび割れ幅を 2mm に固定し、ひび割れ長さおよびひび割れ内部の比誘電率を変化させた検討を行った。

ひび割れ長さが 50mm の場合の結果を図-11 に示す。この時、ひび割れ内部の比誘電率が異なるとどのように鉄筋エコーが変化したかを分かりやすくするために、右に一定のゲイン以上の部分を赤で、それよりも強いゲイン以上の部分を黄色で示した結果を示す。また、ひび割れ内部の比誘電率が 1 の場合の鉄筋エコーの両端を白い線で挟んだ。

図-11 から、比誘電率 1 の場合はひび割れ無しの場合よりも鉄筋エコーの幅が広く、比誘電率 16 の場合は狭くなる結果となった。これは図-1 に示す結果と同様であり、シミュレーションによりこの現象を確認することができたといえる。

次に、ひび割れ長さを 100mm とした場合の結果を図-12 に示す。図-12 から、ひび割れ長さが 50mm の場

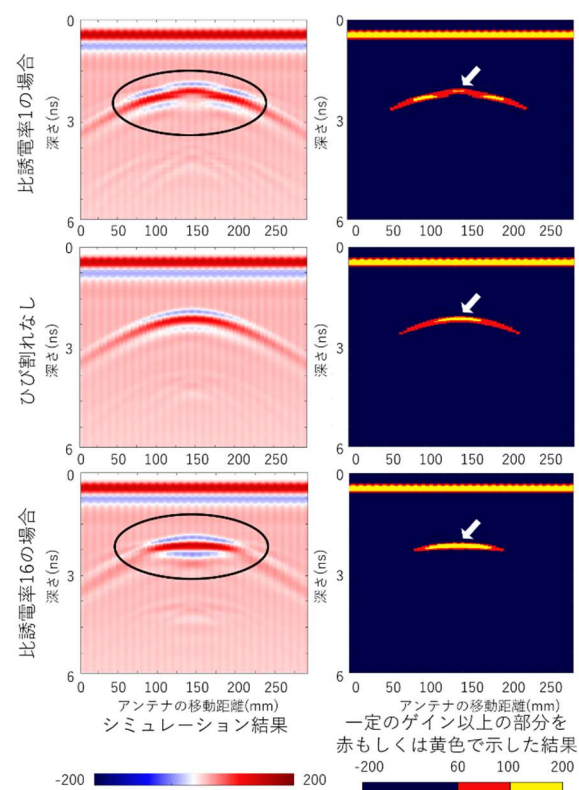


図-12 ひび割れ長さが 100mm の場合の結果

合と比べて、黒丸で囲んだ部分で鉄筋エコーの変化が大きくなる結果となった。これは、ひび割れ長さが長くなることによってひび割れ部分から反射される電磁波が増加したためではないかと推察される。また、比誘電率ごとに鉄筋エコーの変化を比較した場合、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結果となった。したがって、鉄筋エコーの幅の変化は比誘電率の影響が大きいものと推察される。また、これらの変化の要因として、電磁波の干渉があるのではないかとと思われる。鉄筋エコーの頂点に着目すると、ひび割れなしの時は矢印で示す部分のゲインが 117.1 であったが、比誘電率 1 の時はひび割れなしと比べて矢印で示す黄色い部分が縮小しゲインは 100.8 と弱くなっている。一方、比誘電率 16 の時は矢印で示す黄色い部分が拡大しゲインは 128.7 とひび割れなしの場合よりも強くなっている。これは、コンクリートの比誘電率を 8 としているため、ひび割れ内部が比誘電率 1 の場合は反射波がマイナスのゲインとなり、鉄筋の反射波と干渉し打ち消しあったためだと思われる。一方、ひび割れ内部が比誘電率 16 の場合は反射波がプラスとなり、鉄筋の反射波と強め合ったためではないかと推察される。一方で、ひび割れを通過した波による干渉も考えられるため、鉄筋とひび割れのかぶりを変化させた場合結果が異なる可能性が考えられる。そのため、かぶりを変化させたさらなる検討を行っ

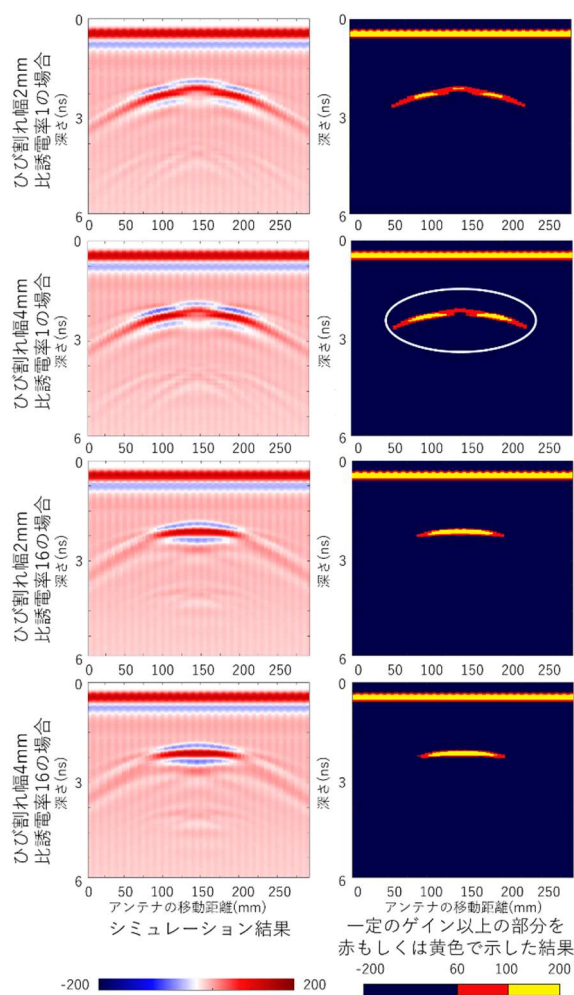


図-13 ひび割れ幅を変化させた場合の結果

ていく必要がある。

次に、ひび割れ長さを 100mm とし、ひび割れ幅を 2mm と 4mm に変化させた場合の結果を図-13 に示す。図-13 から、比誘電率 1 の場合、白い丸で示すように黄色い部分が大きくなり鉄筋エコーのゲインが強くなる結果となった。比誘電率 16 の場合、視覚的な変化は少ないが、鉄筋エコー頂点部のゲインは 128.7 から 137.8 と強くなった。このことから、ひび割れの長さや幅の変化が鉄筋エコーに影響することを確認することができた。よって、鉄筋エコーの変化によって鉄筋近傍の内部ひび割れを推定する可能性を見出したといえる。

以上の結果から、ひび割れ内部の比誘電率がコンクリートと異なると鉄筋エコーが変化すること、およびひび割れ長さとひび割れ幅が鉄筋エコーの変化に大きく影響していることが今回のシミュレーション結果から確認することができたといえる。

5. まとめ

本論文は、コンクリート内部にひび割れが生じると電磁波レーダの鉄筋エコーの形状が変化する現象に着目し、

ひび割れ内部の比誘電率を変化させた場合の鉄筋エコーの形状の変化についてシミュレーションを用いた検討結果についてとりまとめたものである。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) シミュレーションの結果、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。具体的には乾燥状態であり比誘電率がコンクリートよりも小さい 1 の場合は鉄筋エコーの左右のゲインが強調され、湿潤状態であり比誘電率がコンクリートよりも大きい 16 の場合は鉄筋エコーの頂点のゲインが強調された。また、その結果、鉄筋エコーの幅が変化することも確かめられた。
- (2) ひび割れの長さと幅が鉄筋エコーの変化に影響を与えることが確認された。
- (3) 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。

今後の課題として、かぶりを一定としたため、かぶりの違いによる本研究の結果への影響を検討できていない。そのため、今後はかぶりを変化させた検討を行い、検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 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) 佐野俊介, 新保弘, 溝渕利明: 電磁波レーダ画像による機械学習を用いた内部ひび割れ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.44, No.1, pp.1366-1371, 2022
- 3) 園田潤, 昆太一, 佐藤源之, 阿部幸雄: FDTD 法による地中レーダを用いた鉄筋コンクリート下の空洞検出特性, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J100-C, No.8, pp.302-309, 2017
- 4) 光谷和剛, 山本佳士, 園田潤, 木本智幸: レーダ画像および GAN を用いたコンクリート内部欠陥の位置・寸法情報の可視化に関する基礎的研究, 日本計算工学会論文集, Vol.2021, No.1, p.20211001, 2021
- 5) 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