

論文 電磁波レーダ法によるコンクリート内部探査画像の改善手法に関する研究

黒川 善幸^{*1}・谷川 恭雄^{*2}・森 博嗣^{*3}・野呂田 陵介^{*4}

要旨：電磁波レーダ法によるコンクリートの非破壊検査は、多くの利点を有するが、実測画像は多くの虚像を含み、その画像から物標位置を特定するには困難を伴う。本研究では、有限時間領域差分法を用いて、励振波形、前後受信アンテナのデータ処理およびリング除去などを対象として、探査画像の改善方法について解析的な検討を行うとともに、モデル試験体を用いた実験を行った。その結果、解析より導かれた前後受信アンテナのデータ処理によるレーダ探査画像の改善の有効性が確認された。

キーワード：電磁波レーダ法、有限時間領域差分法、前後受信アンテナ、リング除去

1. はじめに

電磁波レーダ法によるコンクリートの非破壊検査は、鉄筋や欠陥を視覚的に把握できること、容易かつ迅速に広範囲の調査が可能であることなど、多くの利点を有する。しかし、アンテナが鉄筋などの物標の近傍に存在しているため、探査画像は物標位置を頂点とする山形となり、また、複数の物標やリングの影響を受けるため、実測画像は多くの虚像を含み、その画像から物標位置を特定するには困難を伴う。

本研究では、有限時間領域差分(FDTD)法^{1, 2)}を用いて、励振波形、前後受信アンテナのデータ処理およびリング除去などを対象として、探査画像の改善方法について解析的な検討を行った。また、モデル試験体を用いた実験を行い、解析より導かれた前後受信アンテナのデータ処理およびリング除去がレーダ探査画像の改善にどの程度有用であるかを確認した。

2. 解析的研究

2.1 励振波形による改善

電磁波レーダ法では、ある波形の電磁波を送

信位置で励振する。その波形によって電磁波の伝搬の様子が異なるが、これまで励振波形による探査画像への影響を検討した報告はない。そこで、**図-1**に示す4種類の波形を用いて、励振波形による探査画像の改善効果について調べた。

FDTD法による解析を行う際、従来は励振波形は便宜上、**図-1(a)**に示す1波長分のサイン波と設定していた³⁾。しかし、実際の電磁波レーダ装置では、送信回路でパルス波形を出力しており、アンテナ放射時には帯域制限を受け、およそ500MHz～1GHzの広周波数成分を持つモノサイクル波形となっている。

そこでまず、周波数スペクトルが滑らかで、定式化が容易なことからFDTD法においてよく用いられ³⁾、レーダ装置への適用が可能と思われる、**図-1(c)**のガウシヤパルスを1階微分した**図-1(b)**のようなモノサイクル波形を励振波形とし、実際の電磁波レーダ装置の条件に近づけた。さらに、無限大の周波数成分を持つためレーダ装置への適用は理論上不可能であるが、最も理想的な励振波形である**図-1(d)**の矩形パルスについても比較・検討を行った。

*1 名古屋大学助手 環境学研究科 都市環境学専攻 工修（正会員）

*2 名古屋大学教授 環境学研究科 都市環境学専攻 工博（正会員）

*3 名古屋大学助教授 環境学研究科 都市環境学専攻 工博（正会員）

*4 名古屋大学大学院生 環境学研究科 都市環境学専攻 （非会員）

図-2は、各励振波形によるシングル鉄筋の探查波形である。なお、励振波形によって鉄筋の埋設深さを表す第1のピークの位置がずれるのは、励振波形の立上がり時間が異なるためであるが、常に一定であるため容易に補正できる。

レーダ装置によるシングル鉄筋の実測波形を図-3に示す。図-2(a)、(b)と比較すると、1階微分ガウシヤンパルスを用いることで、第1と第4のピークが小さくなり、実条件に近づいている。また、サイン波と1階微分ガウシヤンパルスによる空隙の探查画像を図-4に示す。図-2の探查波形からわかるように、鉄筋探查ではあまり差がないが、空隙の探查画像では改善が認められる。このことから、励振波形の周波数成分が広がったことで、探查対象の対応性能が向上した

可能性がある。

図-5は、励振波形を1階微分ガウシヤンパルスおよびガウシヤンパルスとした場合の電磁波の平面伝搬図と、図中の縦軸位置における電界強さ比の波形を示したものである。ガウシヤンパルスでは、1階微分ガウシヤンパルスで見られた両極への大きな振幅がないため、電磁波が穏やかに伝搬しており、第1のピーク以降の振幅が小さい。また、図-2(c)の探查波形においても、最も重要な第1のピークが大きくなっており、改善が認められる。

矩形パルスでは、図-2(d)に示すように、第1のピークが最も大きくなり、その後のリングングによる無駄な波形が少なく、より理想的な探查波形となる。

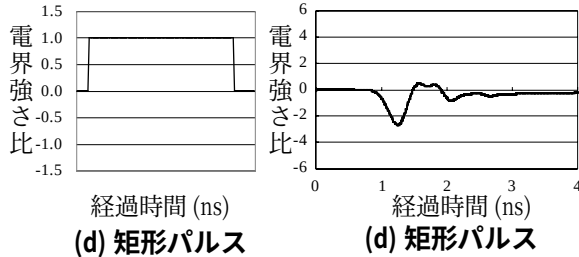
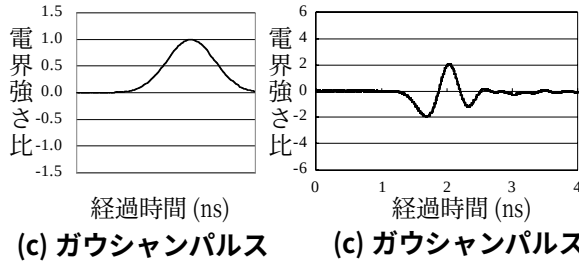
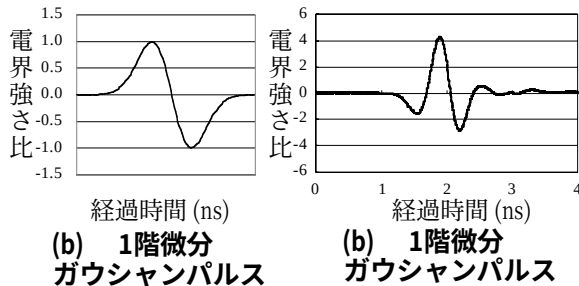
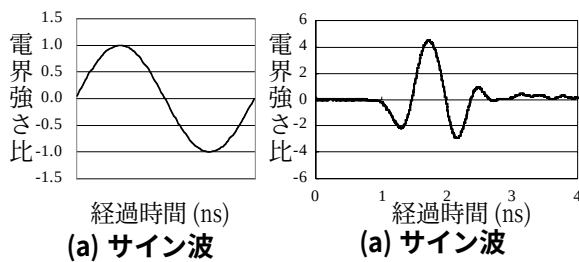


図-1 励振波形

図-2 各励振波形によるシングル鉄筋探查波形

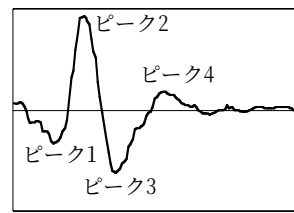


図-3 実測波形

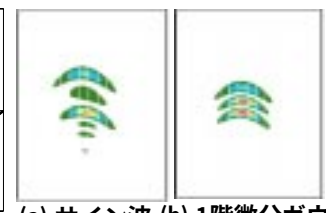


図-4 空隙探查画像の比較

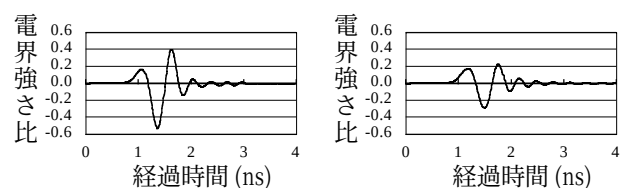
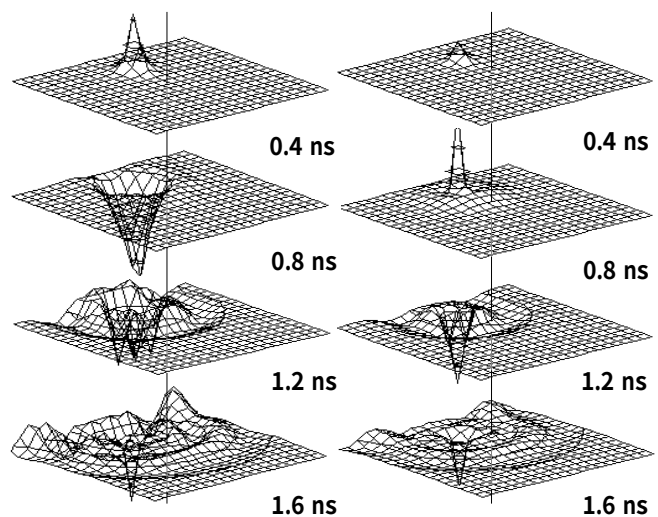


図-5 電磁波の平面伝搬

2.2 前後受信アンテナのデータ処理による改善

送受信アンテナ位置の模式図を図-6に示す。従来の電磁波レーダ装置では、図-6(a)のように、受信アンテナは送信アンテナの前にあり、その1箇所の受信位置における電界強さの時間的変化を用いて探査画像を得るため、ある測定位置から得られるデータは1つに限られていた。

これに対し、図-6(c)に示すように、受信アンテナを送信アンテナの前後2箇所に設置することで2つの受信データを同時に得られるように設定し、それらのデータを和処理することによって、探査画像の改善を試みた。

図-7は、シングル配筋における、前後受信アンテナのそれぞれの探査画像と、それらの画像を単に重ね合わせたもの、また、和処理後の画像を示したものである。前受信アンテナの探査画像が従来のものであり、和処理後の画像は感度を落として表示した。

和処理によって横に広がった影が狭まり、鉄筋の水平位置の探査が正確になっている。これは、図-7(c)の画像からも明らかなように、前後受信画像で反射波が最も強くなるのは、送信アンテナと受信アンテナの中心位置の真下に鉄筋が存在する場合であり、前後受信アンテナの間隔の分だけずれた画像が、和処理によってアンテナ全体の中心で重なったためである。また、重なる部分と重ならない部分における電界強さの差が強調されるため、山形で横に広がっていた無駄な影が減少する。

2.3 リンギング除去による改善

電磁波の特性によって生じる多重反射波であるリンギングは、画像が煩雑になるだけでなく、下部の物標の探査時に特に問題となる。図-8は、上端筋によるリンギングが下端筋探査に及ぼす影響を示している。図はそれぞれ、鉄筋を上端筋と下端筋で1本ずつ配置したシングル配筋と、2本とも配置したダブル配筋における探査波形である。図中の矢印は鉄筋位置を示す。ダブル配筋の探査波形は、上端筋と下端筋の探査波形の合成波となり、理論的には矢印の位置に鉄筋

のピークがある。しかし、上端筋によるリンギングの影響により、下端筋位置を示すピークが後にずれ、その結果、下端筋が実際よりも深く推定される可能性がある。

リンギング除去手法としては、第1のピークのみを残すピーク処理や、反射波が4つの大きなピークを持つことを利用し、第2, 第3, 第4のピークを除去する手法⁴⁾が提案されているが、上部と下部の物標の間隔が狭い場合には、下部の物標の探査は困難である。そこで、リンギングを除去しながらも、下部の物標の探査ができるようなリンギング除去手法について検討した。

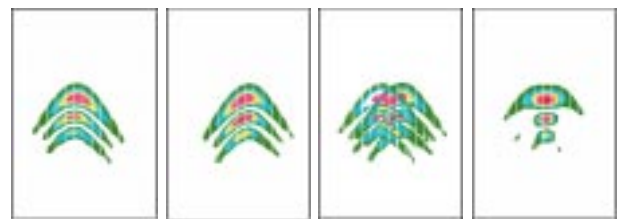
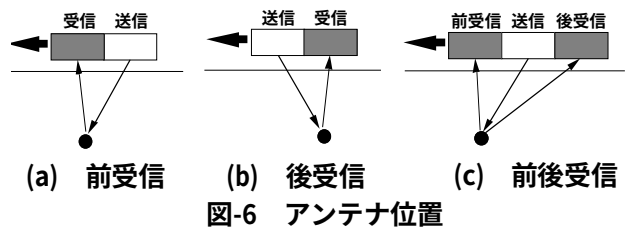
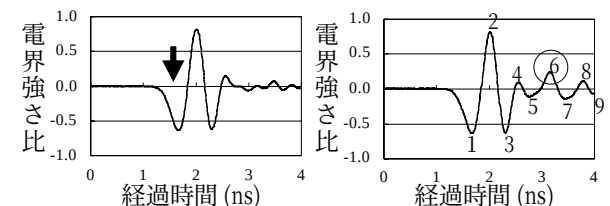
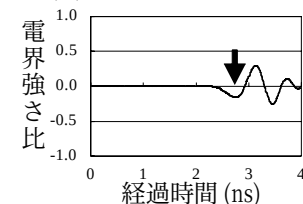


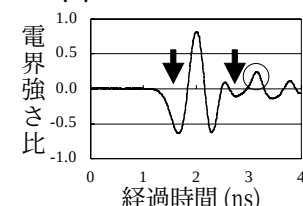
図-7 前後受信データによる和処理



(a) 上部シングル配筋

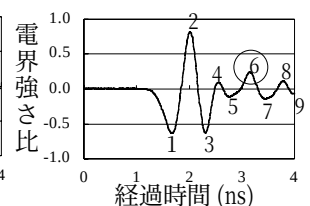


(b) 下部シングル配筋

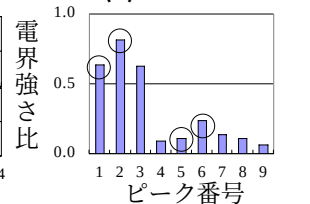


(c) ダブル配筋

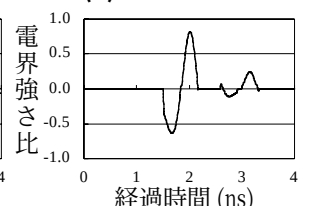
図-8 鉄筋位置が探査波形に及ぼす影響



(a) 除去前



(b) 頂点の絶対値



(c) 除去後

図-9 リンギング除去

図-9(a)は、ガウシヤンパルスによるダブル配筋の探査波形の一例である。上端筋による反射波が減衰した後、6番目のピークで再度大きくなっている。そこで、図-9(b)に示すように、すべてのピークの頂点の絶対値を抽出し、あるピークの絶対値が、その1つ前の値より大きくなる場合と第1のピーク以外は、リングングとみなして除去することとする。残った頂点の前後0.32ns分の波形のみを残すことで、図-9(c)のような探査画像が得られ、リングングを除去しながらも、下部の鉄筋の探査を可能とする。

表-1 解析モデルの寸法とセル数

		寸法 (mm) X×Y×Z	セル数 (個) IX×IY×IZ
解析領域		600×400×400	60×40×40
コンクリート領域		540×340×340	54×34×34
アンテナ	送信	50×10×100	5×1×10
	受信	40×10×100	4×1×10
物標	鉄筋	10×10×340	1×1×34
	空洞	30×10×30	3×1×3

表-2 媒質定数

媒質	導電率 (S/m)	誘電率 (F/m)	透磁率
コンクリート	0.03	7.083×10^{-11}	1.257×10^{-6}
空気	1.0×10^{-8}	8.858×10^{-12}	1.257×10^{-6}
銅	1.0×10^7	8.850×10^{-11}	5.028×10^{-3}

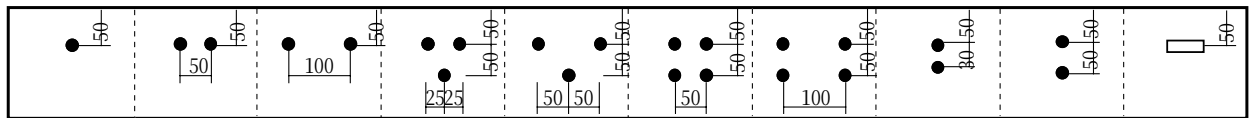
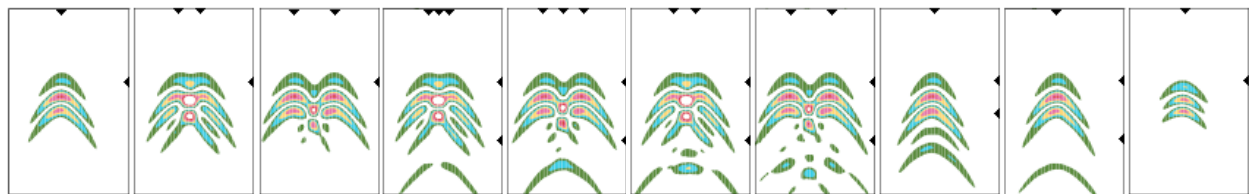
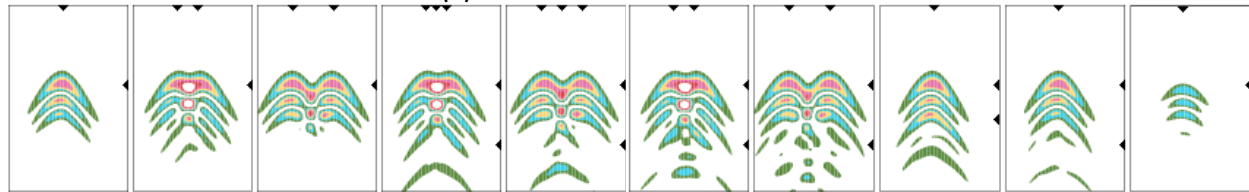


図-10 解析モデル

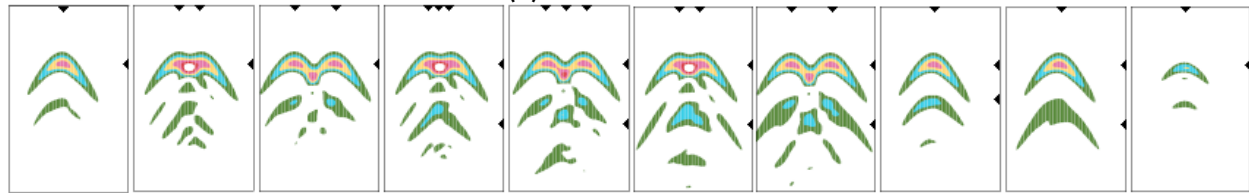
[unit: mm]



(a) 1階微分ガウシヤンパルス



(b) ガウシヤンパルス



(c) 矩形パルス

図-11 各モデルの前受信探査画像

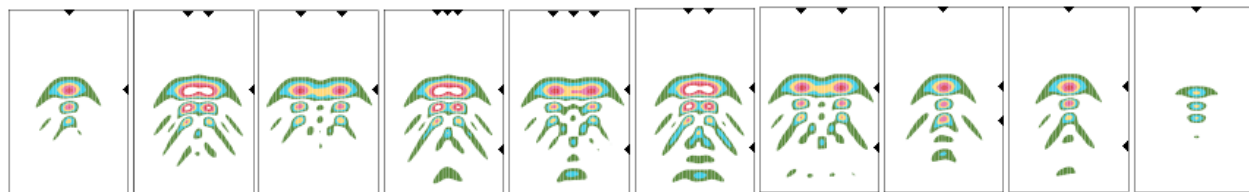


図-12 各モデルのガウシヤンパルスによる探査データを和処理した探査画像

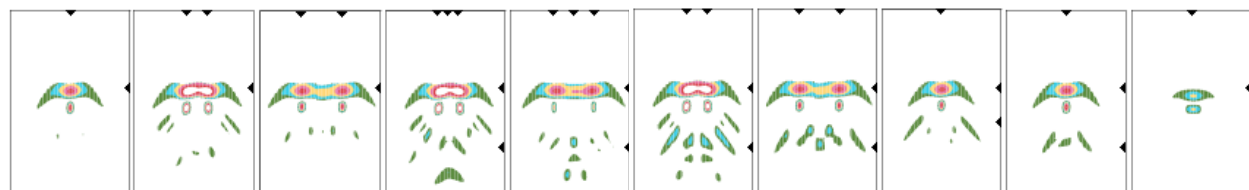


図-13 各モデルのガウシヤンパルスによる探査データを和処理とリングング除去した探査画像

2.4 モデル解析結果

各改善手法を用いて、様々なモデルについて解析を行った。解析領域は大きさが10mmの均一のセルに分割しており、解析モデルの寸法とセル数を表-1に示す。アンテナ走査方向がX軸、深さ方向がY軸、幅方向がZ軸である。各媒質定数を表-2に示す。コンクリートの比誘電率は、乾燥したコンクリートを想定して8とし、領域境界では、無反射の吸収境界条件を想定している。

アンテナの走査距離は350mmとし、35箇所のアンテナ位置で励振し、繰返しステップ数500回の計算を行った。解析の刻み時間は0.008nsであり、1箇所では4ns分の計算を行う。各解析モデルを図-10に示す。

図-11は、1階微分ガウシヤンパルス、ガウシヤンパルスおよび矩形パルスを励振波形とした各モデルの前受信探査画像である。探査画像中の▼は鉄筋位置を示している。ガウシヤンパルスでは、1階微分ガウシヤンパルスの探査画像に比べ、最も重要な第1のピークが大きい。矩形パルスでは、第1のピーク部分の画像が最も強くなり、さらにリングングによる無駄な画像が少ないため、下部の物標の位置がほぼ正確に探査され、大きな改善が認められる。

図-12は、各モデルのガウシヤンパルスによる探査データを和処理した画像である。和処理を施すことによって、横に広がった影が狭まり、鉄筋の水平位置がより正確に探査されている。特に並列に配筋されたモデルに注目すると、2本の鉄筋の中心位置に1本の鉄筋が存在するかのように現れていた影が消えている。さらに、ピッチ50mmのモデルでは、繋がっていた画像が分かち、2本の鉄筋の識別が可能になっている。以上のことから、前後アンテナの2つの受信データの処理によって、水平分解能が向上することが明らかとなった。

図-13は、前後受信データを和処理し、さらにリングングを除去した探査画像である。いずれの画像も、第2のピークは残っているが、リ

ンギングによる無駄な影が除去されている。縦に物標が並ぶモデルでは、下部の物標位置付近に探査画像が現れており、下部探査が容易になり、垂直分解能を向上させることができた。また、千鳥配筋とダブル配筋のモデルの下端筋の位置が明確になり、両モデルの識別が容易になった。ただし、鉄筋間隔が30mmのモデルでは、画像に差はあるものの、下端筋の埋設位置が探査されていない。

3. モデル実験

実験では、4種類のモルタル試験体を用いたが、ここではその中の3種類について述べる。試験体の形状および寸法を図-14に示す。鉄筋には公称径16mmの丸鋼を用いた。

各モデルの前受信探査画像を図-15に示し、探査データを和処理した探査画像を図-16に示す。全体的に、山形で横に広がった無駄な影がなくなり、鉄筋の水平位置がより正確に探査されている。ピッチが50mmの鉄筋探査では、中心位置に鉄筋が存在するかのように現れていた影が消え、さらに繋がっていた画像が分かち、2本の鉄筋の識別が可能になった。ピッチが100mmの鉄筋探査では、中心位置の虚像が残っているが、処理前の探査画像と比較すると、深さ位置が浅くなるため、虚像であることを見分けることができる。

さらにリングングを除去した探査画像を図-17に示す。なお、下端筋による微弱な反射を検出するために、感度を上げている。リングング除去によって、全体的に無駄な影が除去され、S2モデルのピッチが150mmの下端筋の探査が可能になる。しかし、その他の下端筋は探査されていない。これは、減衰および上端筋の反射により、下端筋に到達する電磁波が少ないためと考えられる。したがって、リングング除去を適用するためには、下端筋による反射がわずかでも探査波形の振幅に現れるように感度を調整する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 解析の励振波形に1階微分ガウシヤンパルスを用いると、実際の電磁波レーダ装置に近づく。また、ガウシヤンパルスでは、最も重要な第1のピークが大きくなる。さらに、レーダ装置へは理論上適用できないものの、矩形パルスを用いると、第1のピークが最も強くなり、さらにリングングが少ないため、下部の物標の位置もほぼ正確に探査される。
- 2) 前後受信アンテナによる探査データの和処理により、次のように水平分解能が向上する。
 - ・山形で横に広がった無駄な影がなくなり、物標の水平位置がより正確に探査される。
 - ・並列に配筋された鉄筋間の中心位置に鉄筋が存在するかのように現れる影が消える。
 - ・ピッチが50mmの鉄筋探査では、繋がっていた画像が分かれ、鉄筋が識別できる。
- 3) 本研究で提案したリングング除去方法により、無駄な影が消去された。しかし、解析上は、物標間隔が50mmであれば、下部埋設物の探査が可能だが、実験では、減衰および上端筋の反射により、下端筋に到達する電磁波が少なく、探査されなかった。リングング除去の適用には、感度の調整が必要である。

謝辞

本研究にあたって、清良平氏（計測技術サービス）の助力を得た。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋本修・阿部琢美：FDTD時間領域差分法入門, 森北出版, pp.25-122, 1996.4
- 2) 宇野享：FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, pp.1-57, 1998.3
- 3) 新井宏之：新アンテナ工学, 総合電子出版社, p.166, 1996.4
- 4) 西尾壮平・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸：電磁波レーダ法によるコンクリートの内部探査に関する有限時間領域差分法解析, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.29-36, 2002.7

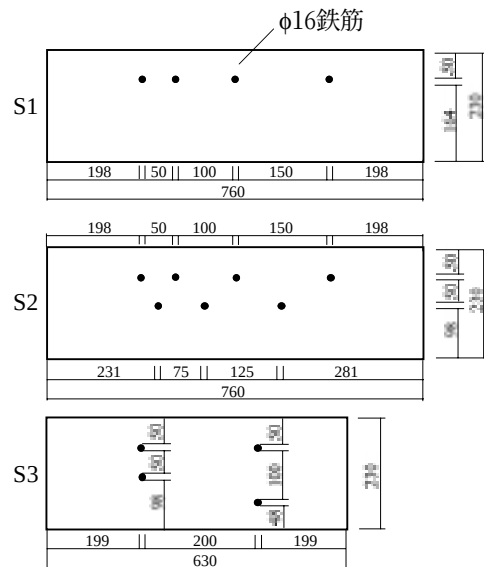


図-14 試験体の形状および寸法

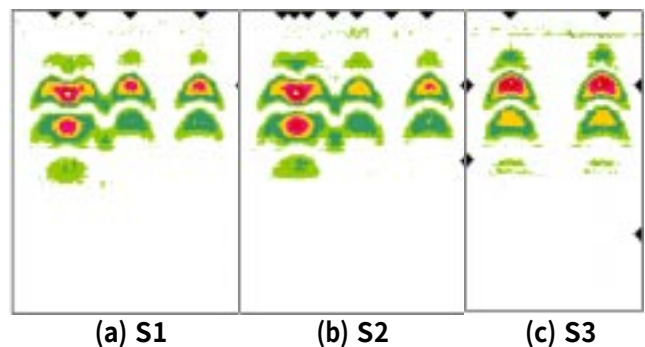


図-15 各モデルの前受信探査画像

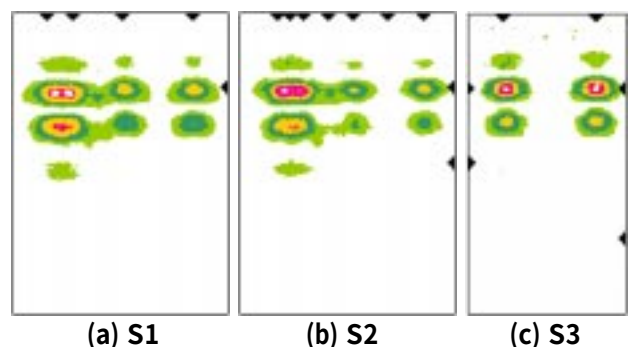


図-16 各モデルの探査データを和処理した探査画像

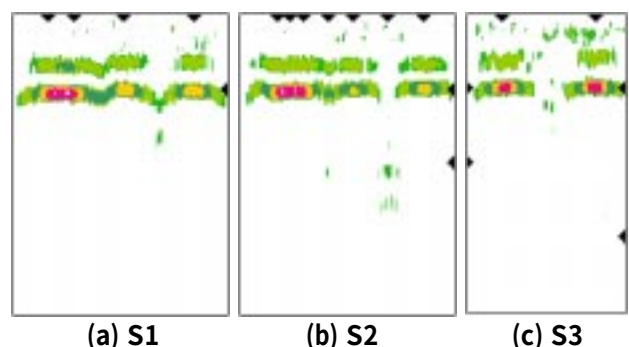


図-17 各モデルの探査データを和処理とリングング除去した探査画像