

報告 レーダ法を用いた RC 床版の空隙探査に関する基礎研究

吉沢勝*¹・朴錫均*²・魚本健人*³

要旨：レーダ法は測定が簡易で走査により測定を行う非破壊検査手法である。そこでレーダ法の道路橋 RC 床版への適用に着目し、レーダによる空隙の長さ・幅・厚さを変化させたときの空隙探査限界に関する実験を行った。そして、探査限界と空隙の長さ・幅・厚さとの関係は空隙の体積によって決まる可能性を示した。また、周波数の異なるレーダ装置を用いて、周波数による探査限界の変化を明らかとした。さらに、測定画像の精度向上を図り画像の変化を容易に知るために、同一箇所の測定画像を重ね合わせて画像処理を行う手法について検討を行った。

キーワード：非破壊検査、レーダ法、RC 床版、空隙、画像処理

1. はじめに

レーダ法は測定が簡易で走査により測定を行う非破壊検査手法である。著者らはレーダ法による測定の利点が道路橋 RC 床版の非破壊検査手法として適すると考え、その適用に着目して床版上面から上側鉄筋を通過して下側鉄筋の測定が可能であることを確認し、床版内部に存在する損傷探査が可能であることを検討した[1]。そこで本研究においては、レーダによる空隙の長さ・幅・厚さを変化させたときの探査限界に関する実験を行い、探査限界と長さ・幅・厚さとの関係を明らかとするとともに、周波数の異なるレーダ装置を用いることによって、周波数の変化による探査限界の相違を知ることを目的とした。また、測定結果として得られる画像は損傷の有無を判断する重要な情報であるため、測定画像の精度向上を図り時間経過による画像の変化を容易に行うために、同一箇所の測定画像を重ね合わせて画像処理を行う手法について検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、図-1に示すような RC 床版をモデルとした型枠内に D16 鉄筋を複鉄筋で交差配置し、空隙の大きさを变化させやすいよう比誘電率がコンクリート ($\epsilon=5$) と同様な砂 ($\epsilon=4$) を充填した。供試体の大きさはレーダ装置のアンテナの寸法によって決定し、厚さはコンクリート床版厚とアスファルト厚を考慮した厚さとしてゐる。この供試体を用いて供試体中央の上側鉄筋と下側鉄筋の間に空隙を模した発泡スチロールを配置し、発泡スチロールの大きさを長さ 40 cm × 幅 40 cm × 厚さ 40 cm から表-1のように長

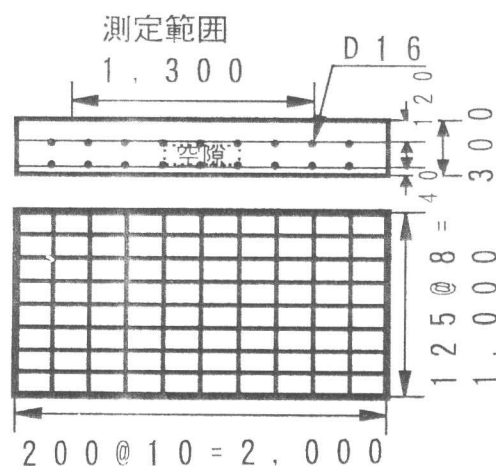


図-1 実験供試体

* 1 (財) 首都高速道路技術センター 開発研究部開発研究課 (正会員)

* 2 東京大学大学院 土木工学専攻 (正会員)

* 3 東京大学教授 生産技術研究所第五部、工博 (正会員)

さ・幅・厚さをそれぞれ変化させ測定を行った。測定に用いたレーダ装置は周波数の違いによる探査限界の相違を知るために、表-2に示す仕様の2種類の市販地中埋設物探査レーダ装置（周波数640MHz、1.5GHz）を使用した。測定区間はレーダ装置の外形寸法から図-1中に示した1.3m区間とし、1cm間隔で測定を行った。測定は後に画像処理を行うために1ケースにつき10回の測定を行った。

表-1 空隙寸法

	寸法(cm)
長さ	40, 30, 20, 10
幅	40, 30, 20, 10
厚さ	10, 7, 5, 4, 3, 2

表-2 レーダ装置仕様

周波数	640MHz	1.5GHz
アンテナ方式	3素子ダイポール	
測定間隔	1cm	
計測速度	1.5km/h	
外形寸法	778(W)×766(D)×267(H)	
重量	25kg	
消費電力	24W(DC24V)	

3. 実験結果

3.1 640MHzレーダ装置

図-2は周波数640MHzのレーダ装置を用いた、供試体内部に空隙を配置しなかったときの測定結果である。この図より電磁波が上側鉄筋を通過しての内部測定が可能であることがわかり、鉄筋のみの場合の測定画像を確認することができる。図-3は40cm×40cm×10cmの空隙を配置したときの測定結果であり、上側鉄筋と下側鉄筋の間に空隙が画像として現れていることがわかる。この2種類の測定結果を基本画像として、空隙の長さ・幅・厚さを個々に変化させたときの測定画像との比較を行うことによって探査限界を求めた。測定の結果、空隙の長さのみを変化させたときの探査限界は20cm×40cm×10cmとなり、幅のみを変化させたときの探査限界は40cm×20cm×10cm、厚さのみを変化させたときの探査限界は40cm×40cm×5

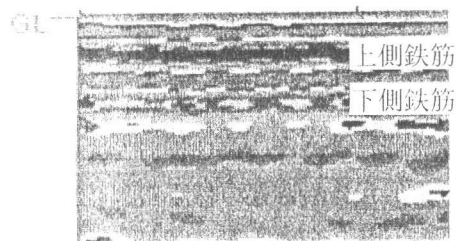


図-2 測定画像（空隙なし）

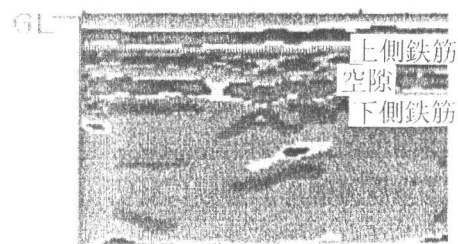
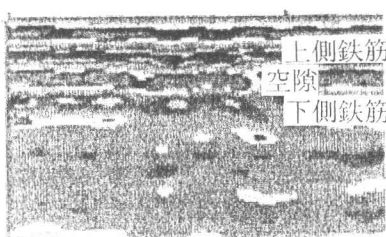
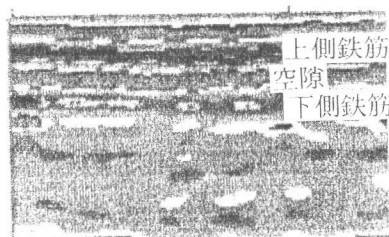


図-3 測定画像(40cm×40cm×10cm)



20cm×40cm×10cm



40cm×20cm×10cm



40cm×40cm×5cm

図-4 測定画像（探査限界）

cmであった。図-4にそれぞれの測定画像を示す。また、これら空隙の長さ・幅・厚さの探索限界をグラフに表すと図-5のようになり、いずれの場合にも探索限界となる空隙の体積は $8,000\text{cm}^3$ であることがわかる。そこで、空隙の長さと同様に幅・厚さを同時に変化させ、探索限界と空隙体積との関係を検証することとした。

図-6は空隙の長さ・幅を変化させたときの $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ の空隙と $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 10\text{cm}$ の空隙を配置したときの測定結果である。測定の結果、空隙体積 $9,000\text{cm}^3$ の $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ の空隙は探索され、空隙体積 $4,000\text{cm}^3$ の $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 10\text{cm}$ の空隙は探索することが出来なかった。もし、空隙の長さ・

幅・厚さがそれぞれ独立して限界となるならば $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 10\text{cm}$ の空隙は探索されるものと考えることができるが、測定結果では探索されていない。これらのことから理論的には証明されていないが、レーダによる探索限界は長さ・幅・厚さによるものである可能性が示された。

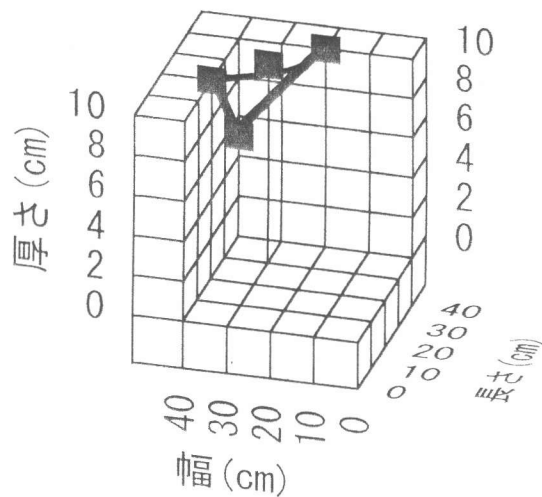


図-5 探索限界 (640 MHz)

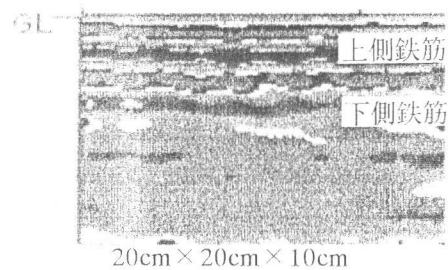
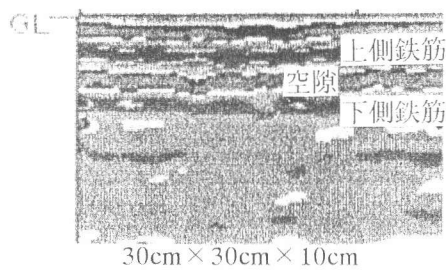


図-6 測定画像 (空隙長さ・幅変化)

3. 2 1.5 GHz レーダ装置

図-7は周波数 1.5GHz レーダ装置を用いた、空隙を配置しなかったときの測定結果である。この図からも 640MHz レーダと同様に、電磁波が上側鉄筋を通過して下側鉄筋を探索しており、内部探索が可能であることを確認することが出来る。そこで、3. 1で述べたと同様に空隙の大きさを変化させて探索限界を求めた。図-8は、空隙の厚さを変化させたときの $40\text{cm} \times 40\text{cm} \times 3\text{cm}$ の空隙を配置した場合の測定結果であり、この厚さが探索限界であった。同様に空隙長さを変化させたときの探索限界は $10\text{cm} \times 40\text{cm} \times 10\text{cm}$ であり、幅を変化させたときの探

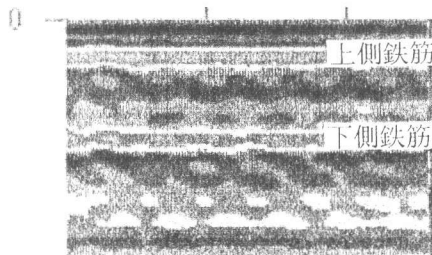


図-7 測定画像 (空隙なし)

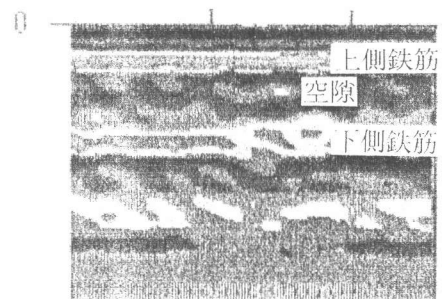


図-8 測定画像 (40cm x 40cm x 3cm)

査限界は40 cm×10 cm×10 cmであった。
1.5GHz レーダでの探査限界をグラフに表すと図-9のようになる。また、図-10に空隙の長さ・幅を変化させた20 cm×20 cm×10 cmの空隙と10 cm×10 cm×10 cmの空隙の測定結果を示す。ここでも20 cm×20 cm×10 cmの空隙は探査可能であったが、10 cm×10 cm×10 cmの空隙については探査されない結果となった。このことから1.5GHz レーダの場合でも探査限界は空隙の体積が4,000cm³以上であると推定される。

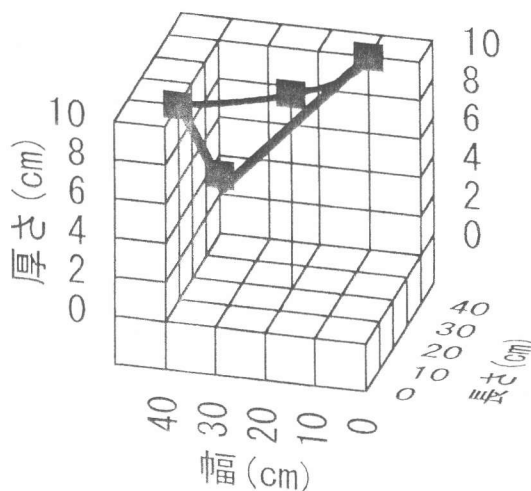
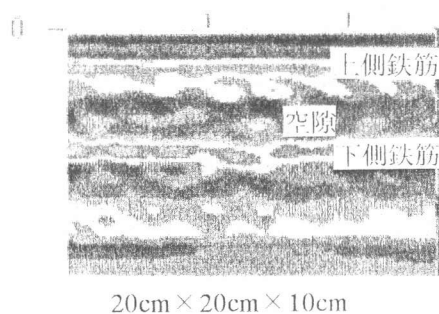
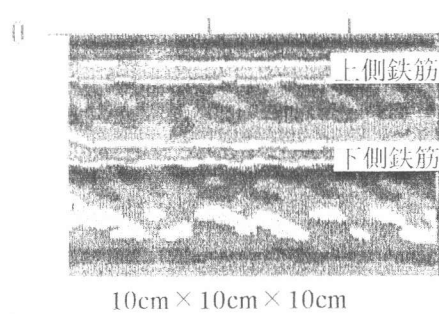


図-9 探査限界 (1.5GHz)



20cm×20cm×10cm



10cm×10cm×10cm

図-10 測定画像 (空隙長さ・幅変化)

4. 画像処理

レーダ法による非破壊検査法において、測定画像は構造物の損傷の有無を判断するうえで大変重要な判断材料となるものである。しかしながら、画像には雑音が発生したり、コンクリートの含水状態等によって誘電率が変化するなど測定結果にバラツキが生じることとなる。このことが画像を認識し、判断を行うことを非常に煩雑で困難なものとしている。雑音を除去するための方法は現在まで様々な方法が研究されている[2]が、コンクリートのように内部で誘電率が変化するような複合材料では十分に除去されていないものと考えられる。また、鉄筋コンクリート構造物に適用したときには鉄筋からの影響を大きく受けて画像が認識しにくくなることが予想され、画像認識を簡便に行う手法が必要になるものと思われる。そこで、測定ごとのバラツキを消去する画像処理 (一次処理) と時間の経過による測定画像の変化を容易に認識できるようにするための画像処理 (二次処理) の二段階の画像処理を行う手法について検討を行った。

まず一次処理では、測定ごとのバラツキとして画像に現れる雑音がランダムに発生することに着目し、同一箇所を複数回測定することによって得られた測定画像を重ね合わせ、ランダムに発生する信

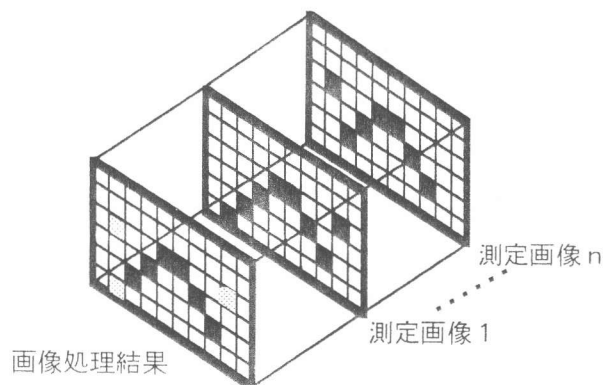
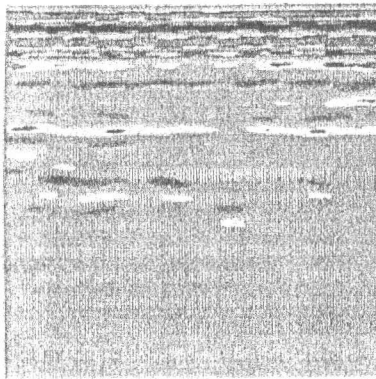
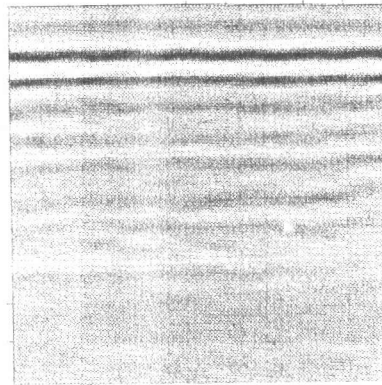


図-11 画像処理概念図 (一次処理)

号を消去していく。一次処理の画像処理概念を図-11に示す。この図からわかるように、それぞれ雑音等のランダム信号を含んだ測定画像をいくつか重ね合わせることによってこれらを消去し、画像処理結果として雑音等を含まない画像を得ることができる。640MHz レーダを用いて測定した空隙を配置しない場合の計測画像及び画像処理結果を図-12に、40 cm×40 cm×10 cm の空隙の場合を図-13に示す。

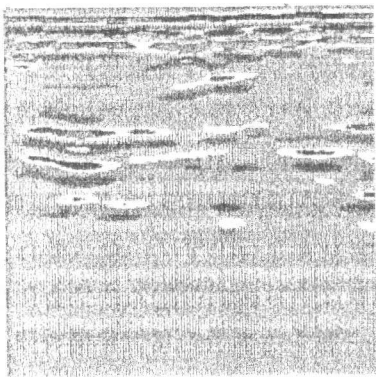


計測画像

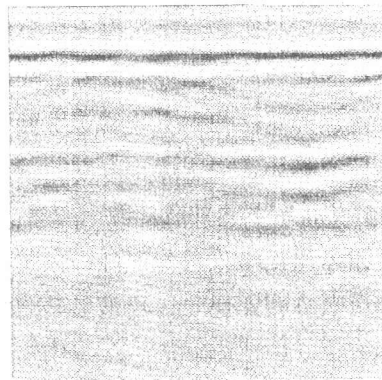


画像処理結果

図-12 画像処理結果(空隙なし)



計測画像



画像処理結果

図-13 画像処理結果(40cm×40cm×10cm)

つぎに二次処理では、時間経過による測画像の変化を容易に認識できるようにするために一次処理とは逆に計測画像を重ね合わせて画像の一致する箇所を消去し、過去のデータとくらべてデータの増えた箇所のみを残す。二次処理の画像処理概念を図-14に示す。この図から計測画像を重ね合わせて画像が一致する箇所を消去することによって、前回から変化のあった箇所のみを容易に知ることができるようになることがわかる。図-1

5に図-12と図-13を用いて画像処理を行った結果と40 cm×40 cm×10 cm の空隙を鉄筋を配置せずに計測した結果を示す。この図を用いることによって図-12の画像が図-13

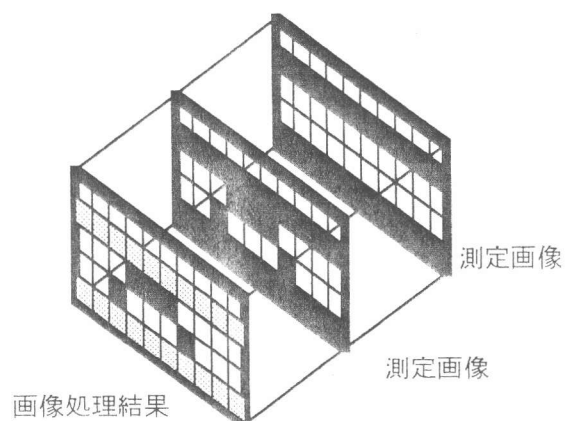
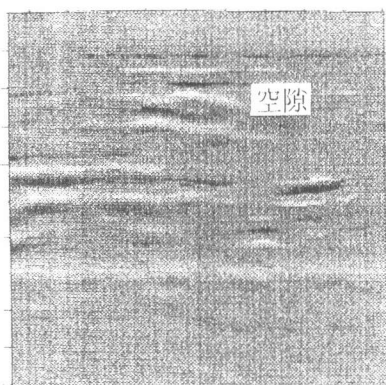
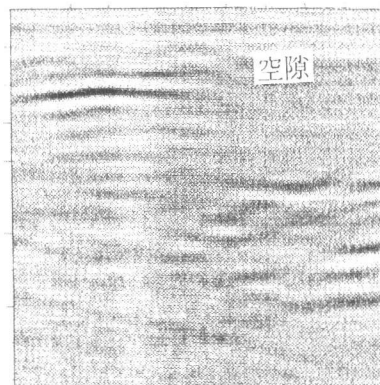


図-14 画像処理概念図(二次処理)

の画像へとどのように変化したのかを容易に知ることができるようになった。なお、図-15より画像処理結果は鉄筋を配置しないときの計測画像と必ずしも一致していないが、本画像処理手法を用いることによって、より容易に空隙部を評価する可能性が示されたものと考えられる。



画像処理結果（二次処理）



鉄筋を配置しないときの空隙計測画像

図-15 画像処理結果（二次処理）と空隙計測画像

5. まとめ

レーダをRC床版の非破壊検査法として適用することに着目し、空隙の探索限界に関する実験を行った。また、測定画像から雑音等を除去し、画像の変化を容易に把握するための画像処理手法について検討を行い、つぎのような結論を得た。

- (1) 鉄筋コンクリート内部に空隙が存在する場合のレーダによる探索限界は、空隙の長さ・幅・厚さによるものではなく空隙の体積による可能性が示された。
- (2) 本実験の条件において、周波数の違いによる鉄筋コンクリート内部の空隙の探索限界は、640MHz レーダで $8,000\text{cm}^3$ 、1.5GHz レーダで $4,000\text{cm}^3$ と推定された。また、探索限界値は空隙の位置（深さ）や鉄筋間隔によって変化することが予想されるため、今後検討を行う必要があると思われる。
- (3) 計測画像を重ね合わせてランダムに発生している信号を取り除くことにより、画像中に含まれた雑音等を取り除くことができるようになった。また、時間経過の異なる計測画像を重ね合わせ、画像の一致する箇所を消去していくことによって計測画像の変化箇所を容易に把握することができることが示された。
- (4) 本画像処理手法を用いることにより、鉄筋コンクリート内部に存在する空隙であってもより容易に空隙を評価することが可能であると考えられる。

謝辞 実験を行うにあたって、芝浦工業大学4年生坂本大輔君には多大なご助力を頂きました。また、測定装置については三井造船（株）に、鋼材については（株）神戸製鋼所にご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 吉沢勝・朴錫均・魚本健人：複鉄筋コンクリート床版への電磁波レーダの適用に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol17, No.1, pp.1187-1190、1995.6
- [2] 関根松夫：レーダ信号処理技術、電子情報通信学会、1991