

# 論文 レーダ法によるコンクリート路面下空隙の定量的評価に関する検討

朴 錫 均\*<sup>1</sup> ・ 魚 本 健 人\*<sup>2</sup> ・ 吉 沢 勝\*<sup>3</sup>

要旨：道路陥没の主な原因になる路面下空隙を非破壊検査でより効果的に計測するため、地中探査レーダによる改良された解析方法を開発した。本研究は、空隙の存在有無を把握することだけでなく、できるだけ空隙の大きさおよび形状までも求められる可能性に関して検討した。実験は、模擬条件として無筋コンクリートの道路床版下および配筋条件下の空隙を検出対象にした。なお、鉄筋と空隙のみを追跡できる基礎的なアルゴリズムと目標物の水平分解能を高め、その形状までも復元できる解析方法を考案した。

キーワード：レーダ、コンクリート道路床版、鉄筋、空隙、合成開口

## 1. はじめに

レーダによる非破壊検査方法は広い範囲の構造物を比較的速い速度で測定できるため、道路調査等に効率的な利用が期待され、この分野の研究が最近活発に進行されている。特に、道路舗装の厚さ等を調査する分野では、既に部分的に実用化され多くの成果が報告されている。一方、道路の路面下の空隙の検出については、一定の大きさ以上の空隙は道路陥没の主原因として、大事故を起こす恐れがあるため、この分野の研究は一層重要な課題になっている〔1〕。したがって、先進各国では、この分野の研究に全力を尽くしているが、道路の多層構造的な特性および材料的性質による不要信号（目標物以外及び異物質からの信号や雑音）の影響、探査装置の限界等の様々な理由のため、今まで、空隙の存在有無の調査に限定されて研究が行われている実情である。しかし、空隙の存在有無の判断ばかりでなくその規模までを把握することができれば、検査技術の発展は勿論、いろいろの側面から数多い効果が期待されるであろう。例えば、空隙の補修において補修の必要性有無の判定、最適充填のできる液状補修材の注入位置（ボーリング位置）の選定、注入量の予測等も非破壊的に可能になる。特に、注入補修量の予測は、補修計画の樹立および予算の策定、過剰注入による道路の破損等の不作用の防止のためにも必要不可欠な要素である。

本研究は以上の必要性に立脚して、路面下空隙をより効果的に計測するため、地中探査レーダによる改良された解析方法を提案し、空隙の大きさおよび形状を求められる可能性に関して検討した。

実験は、模擬条件として無筋コンクリートの道路床版下および配筋条件下の空隙を検出対象にした。解析の際には、複鉄筋および空隙に対して初めて合成開口処理を試み、新しい手法によりこれらの水平分解能を高め、形状まで予測できる解析方法を実験的に開発した。

## 2. 解析方法

### 2. 1 水平分解能向上に関する既存の方法

レーダから発せられた信号は一定のビーム幅で広がって伝播されるため、目標物から反射して戻る信号の画像は実際の目標物の形状とは異なる。それで、検出対象の目標物に対する水平分解能を高め

\*1 東京大学大学院 土木工学専攻（正会員）

\*2 東京大学教授 生産技術研究所、工博（正会員）

\*3（財）首都高速道路技術センター（正会員）

るために合成開口処理が有効な方法として使われている。航空機および衛星レーダによる地上の目標物観測の場合に使用されてきた本方法は、最近では地中レーダの探査分野でも適用されている(しかし、地中分野の合成開口処理は装置等の特性上、厳密に地上レーダのものとは異なる) [2]。地中探査を基準とした合成開口処理の原理は、アンテナから一定のビーム幅で広がる信号を目標物の焦点に合わせて位相補正を実施し、より鋭い指向性が得られるよう重み関数を用い、測定されたレーダ画像を再処理することにより目標物を焦点に収束させることである。

しかし、以上の処理は今までは埋設パイプのように点物体(線状物体)と仮定できるものに対して行われ、比較的容易に一つの焦点に画像強度を収束させることが可能であったが、図1のように任意の媒質内に存在するある大きさの空隙(ここでは球形空隙を例にした)が存在する場合については、より工夫した解析方法が必要である。しかも、問題は広がった信号を一定の焦点に収束させることだけではなく、その原形状に復元させることである。なお、コンクリート内の鉄筋のように間隔が狭く、複鉄筋の場合にも反射信号の散乱および干渉等により各鉄筋の焦点または反射信号の前縁が区別しにくくなるため、合成開口処理に限界がある。そのため、本研究では、次のような新しい解析方法を考案した。

## 2. 2 新解析方法

### (1) 物体形状の復元

図1のように実際の空隙に対するレーダの測定結果は、厚い線で示したように反射して戻り、細い点線の軌跡に従い画面上で表示されるため、図2のように広がった信号として現れる。このとき、斜めの各信号は円の軌跡に従いレーダの測定面と直交する方向の深さ信号として表示される。なお、レーダの位置が空隙の真上に近づければ近づくほど直進に近い信号の影響を強く受けるため反射信号の強度はより強くなる。すなわち、画像上では画像の濃淡の差として示される。したがって、逆に画像の濃淡の変化が最大になる方向はレーダからの信号が空隙の任意面に当たって反射して戻り信号の方向を指し示すと考えられる。このことから、次のような解析方法が可能である。すなわち、図2のように得られたレーダ画像表示の任意の座標  $(x_n, y_n)$  における深さ  $y_n$  が半径となる円をその座標の  $x$  軸(測定表面)と交差する座標  $(x_n, 0)$  を中心にして描く。

これを対称区間の半分である 0 から  $m$  までの区間で画像表示座標ごとに求めると次の式(1)と

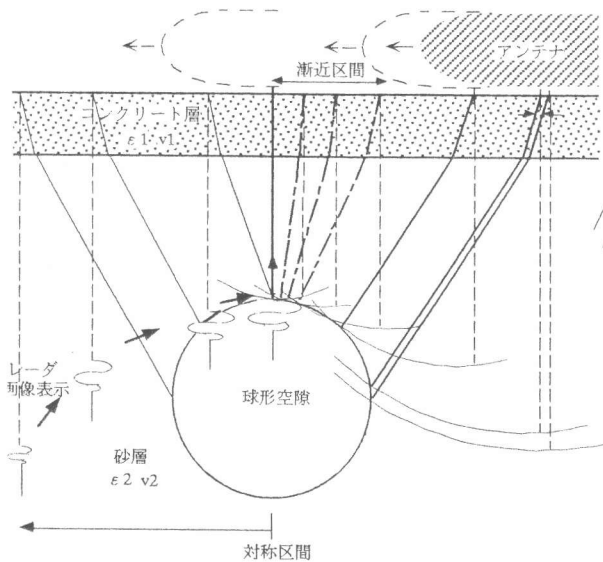


図1 空隙のレーダ画像表示概念

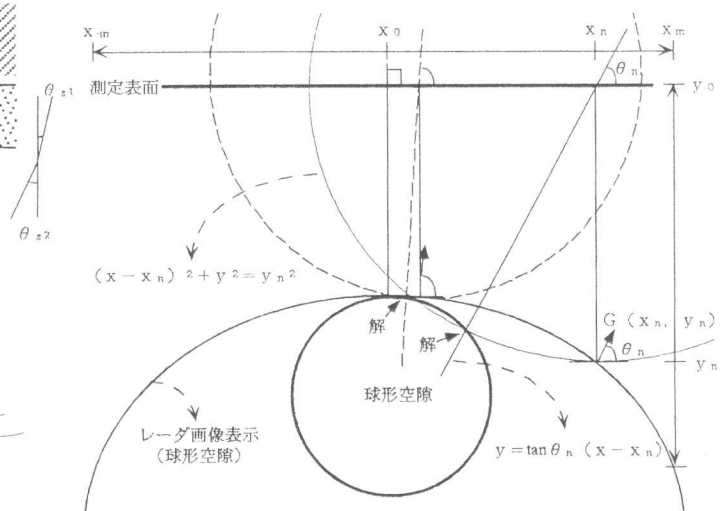


図2 空隙の実形状の復元概念

なる。つづいて、座標  $(x_n, y_n)$  における画像の濃淡強度のグラディエントベクトル  $G(x_n, y_n)$  を式 (2) により求め、そのときのベクトルの方向 (傾き) も式 (3) により計算すれば、この方向と同じ傾きを持ち座標  $(x_n, 0)$  を通りすぎる直線  $y$  を式 (4) から求めることができる (ただし、この場合の傾きの方向は反射波の位相がレーダの信号処理方式等によって変わる可能性があるため、符号の調整が必要な場合がある)。すなわち、もとの空隙の形状は式 (1) の円と式 (4) の直線が合う交点中で下向値を求めて描くと、復元が可能であり、形状を検出することができる。この際、解析は一定の画像強度以上の信号に対して実施する。ただし、道路のように多層構造では各層の誘電率の差による電磁波の屈折の影響を考慮しなければならない場合がある。この影響を考慮するため式 (5) のように屈折影響を補正すると復元画像の収束度がより向上される。

$$\sum_{n=0}^m (x-x_n)^2 + y^2 = y_n^2 \quad (1)$$

$$G(x_n, y_n) = -\frac{\partial I(x_n, y_n)}{\partial x} / \frac{\partial I(x_n, y_n)}{\partial y} \quad I(x_n, y_n): \text{画像の濃淡強度} \quad (2)$$

$$\tan \theta_n = -\frac{1}{G(x_n, y_n)} \quad (3)$$

$$\sum_{n=0}^m y = \tan \theta_n (x - x_n) \quad (4)$$

$$y_n = C_s y_{n0} \quad C_s: \text{屈折影響補正係数、} y_{n0}: \text{補正前の} y_n \quad (5)$$

## (2) 鉄筋位置の同定

本研究では、鉄筋の位置を検出できる最適方法を考案し、これにより、鉄筋の焦点部分のみを重み係数 (=1) によって強調し、他の部分は重み係数 (=0) により画像の背景信号として同一化させる方法を考案した。図7には鉄筋径が22cmでピッチが20cmの複鉄筋 (上部筋4本、下部筋5本、垂直間隔13cm基準、以上図5 (a) 参考) に対する測定結果である。ここで、鉄筋からのピーク信号 (山の頂点) を鉄筋の位置と設定すると、この頂点は肉眼では把握しにくいいため、次のような判読方法が良い。すなわち、図3と図4のように、図7の測定されたデータ中で鉄筋の配筋方向と直交方向 [T方向] のデータの配列に対して各行 (深さ) 別に線グラフ (行線図) を描く。ここで、図3は鉄筋位置ではない部分の行線図で、図4は鉄筋位置に相当する部分の行線図を示している。

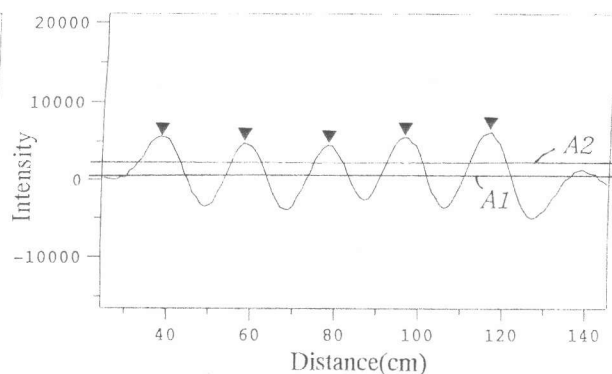
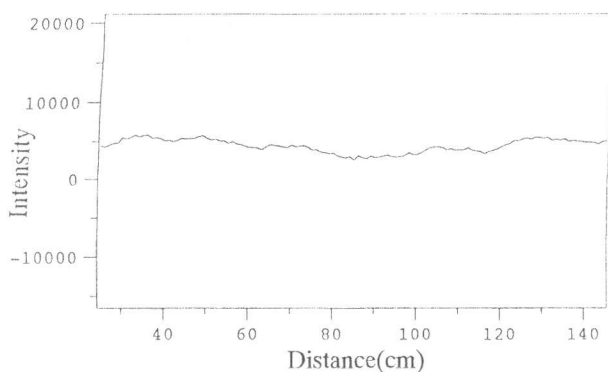


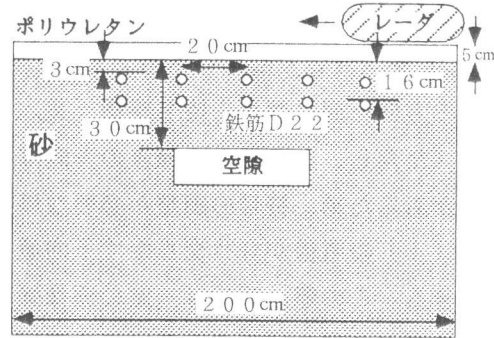
図3 鉄筋位置ではない行の線グラフ

図4 鉄筋位置である行の線グラフ (▼: 鉄筋の位置)

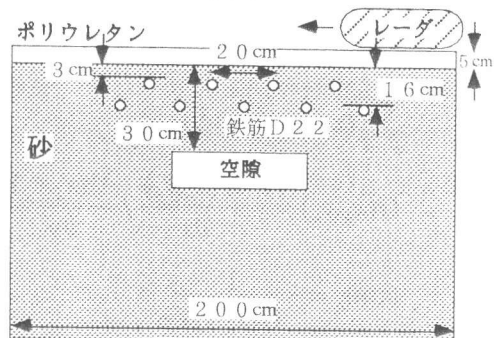
この際、描かれた各行線図の中で図4のように一連の山形の曲線群が最大強度となる場合の行座標が各鉄筋の垂直位置に、そのときの曲線群の各ピーク [▼表示] が鉄筋の水平位置に相当する。その理由は、レーダでは鉄筋に対し測定された信号が図7のように双曲線形を成し、その中心部（双曲線または山の頂点）が鉄筋の中心位置になり、本方法によりその位置を求めることができるためである。

この過程を電算化するためには、まず測定画像から鉄筋位置区間を概略設定しその区間の各行毎に平均値を求めた後、直線を引き [図4のA1]、その平均線以上の値を各行別に積分する。それから各行別積分値を比較し最大値が得られた行 [鉄筋の垂直位置] を選ぶ。次は、選ばれた行において、平均線以上の領域中で独立された各山形をそれぞれの配列に定めた後、各配列毎に最大値を求めれば、その値が鉄筋の水平位置に相当する。この際、鉄筋の配筋深さの差等により二つ以上のピークが一次平均線 [図4のA1] の上で独立せずに連結され存在する可能性等があるため、平均を一次平均線以上の値に対してもう一回平均した値を二次平均線 [A2] として利用するほうが良い場合がある。なお、鉄筋からの多重反射信号がピークに選ばれる可能性は各行別に平均値上で+（または-）以上の値のみを選ぶことによって避けることができる（多重信号中では、初めの山頂信号の次の信号が問題になる可能性があるが、この信号は初めの信号と反対の極を持っているため、この方法は理論的には有効である）。ただし、複鉄筋の場合には、両方の鉄筋を一回で一緒に検出する方法は、あるしきい値を決めておき、それ以上の値を満足する複数の最大値を選べば可能であるが、実際には様々な影響因子のためしきい値を設定することが難しい。よって、本方法では両方の鉄筋の存在区間を二つのブロックに分けて実施した。この解析方法は、本レーダの測定画像のみでは検出しにくい鉄筋の縦横配筋間隔が各々10、20cmである場合にも適用が可能であり、鉄筋の分解能を最大限に向上させることができる。しかし、この方法は各行の鉄筋の配置が同じ深さを持つ場合に有効であり、条件によっては上記の計算アルゴリズムは誤った解を求めてしまう可能性もあるため、できる限り肉眼確認と計算を並行するほうが良い。

なお、本方法では誘電率に対する情報がなくても計算には何んら差し支えない。したがって、正確な深さ方向の情報が必要な場合は、代表箇所のみを選び対象媒質における実際の鉄筋の深さと画面上の鉄筋の深さを補正しておくこと、正確な結果が得られる。以上の処理は鉄筋領域と空隙領域に分けて(ブロック化)別々に解析を行い、後で合わせて画像を示した。



(a)



(b)

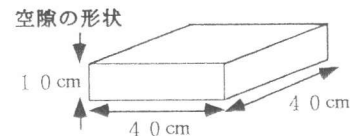


図5 各複鉄筋条件 (a、b) 下の矩形空隙配置図

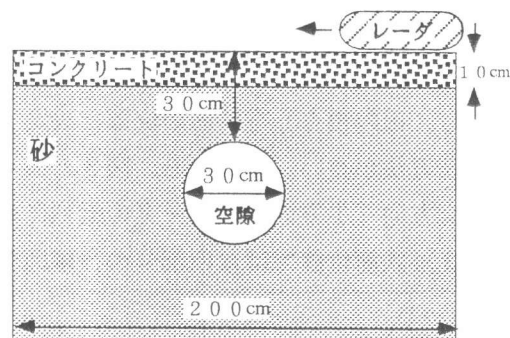


図6 無筋コンクリート床板下の球形空隙配置図

### 3. 実験概要

実験は、配筋条件下の空隙を模擬対象にするために、図5のように同じ砂の中に矩形空隙を入れた後、その上に各配筋条件別鉄筋を配置した。鉄筋は本実験のレーダの測定方向と直交し、最大感度を有する横方向配筋についてのみ考慮した。たとえば、鉄筋コンクリートを使わなくても、ただ誘電率の差による影響のみを考慮すれば、全般的な特性は鉄筋コンクリートの条件とあまり変わらないと考えられる。この場合、表面にポリウレタンシートを敷いて測定したのはアンテナの移動性を高めるためである。なお、無筋コンクリートの道路床版下の空隙を模擬して図6のように球形空隙を図5の空隙と同じくポリウレタン系の材料で人工制作し埋設した。使用コンクリートの配合及び条件はW/C: 55%、S/A:46%、スランプ:5cm、最大骨材寸法:20mm、粗骨材:比重2.70の秩父産砕石、空気量: 2.6%、圧縮強度 $400\text{kg/cm}^2$ であり、埋設用砂は静岡県富士川産砂(比重: 2.62、含水率: 2~3%)を使用した。

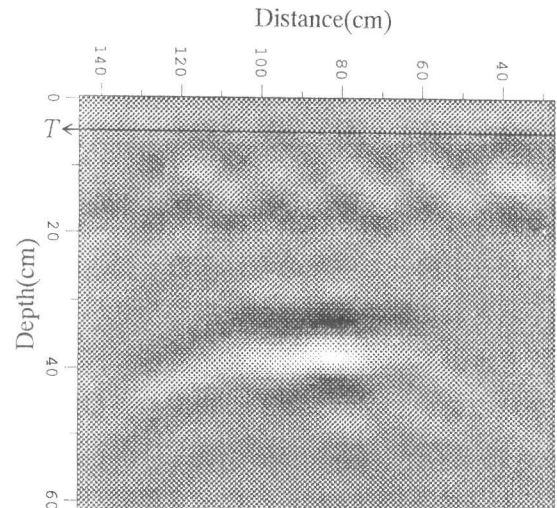
測定はFMCW方式の地中探査レーダを用い、 $2\text{km/h}$ 以内の速度で行った。この装置は3素子ダイポール、3偏波モード動作のアンテナ方式を採用しており、 $20\text{MHz}\sim 1\text{GHz}$ の広帯域周波数(探査深度 $1\text{m}$ )の高分解能型である。レーダセンサ部の外形寸法は $W78\times D78\times H27\text{cm}$ である。

### 4. 測定および解析結果の分析

#### 4.1 複鉄筋影響下の空隙

以下に示す各結果はレーダからのデジタルデータを別途の計算及び画像処理により行ったものである。図5(a)に対する測定結果を図7に示す。これは表面波の除去を実施し、表面を時間軸の0に合わせて調整した結果である。なお、上記の解析方法による空隙形状の復元および鉄筋の同定を実施した結果を図8に示す。ここで、参考として図9は、図7と図8の矩形空隙に対するグラディエントベクトルを測定された信号そのまま求めた結果である(実際の適用では事前に平滑化処理等による雑音処理過程が必要である)。一方、

図10には図5(b)(上下水平鉄筋のずれ間隔 $10\text{cm}$ )に対する解析結果を示した。まず、測定結果からは解析が難しいが、各場合の解析結果を見ると、鉄筋位置の同定(白い部分)および矩形空隙の形状(黒い部分)が比較的明確に再現されていることが



(T: 図3と図4の線図のプロット方向)

図7 配筋(a)下の矩形空隙の測定結果

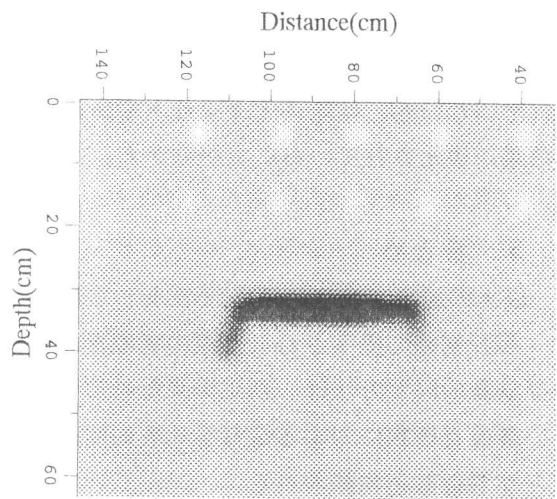


図8 配筋(a)下の矩形空隙の解析結果

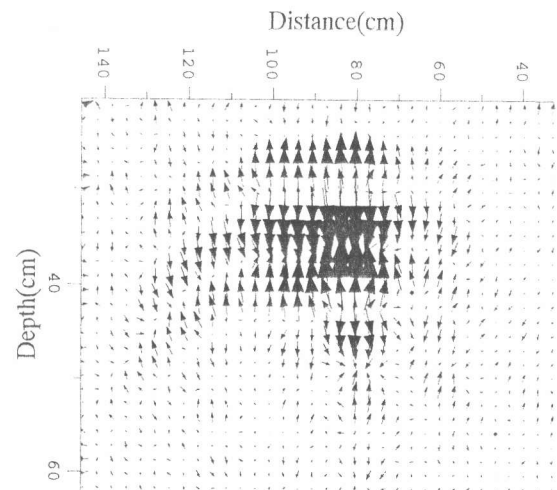


図9 矩形空隙のグラディエントベクトル例

わかる。特に、各目標物の材料的特性による反射係数の値も+-の極性（画像の色）が明らかに区別されることから、材質の性質までも区分できる可能性があることが分かる。なお、鉄筋が配置図の位置と多少異なって示される理由は実際配置との差のためであり、図8で空隙の右端部の下側の画像が多少弱く示された理由は図9の結果でも分かるようにある大きさ以上のベクトル値を追跡して行く過程でこの領域の値がしきい値以下の濃度を表したためである。

#### 4.2 無筋コンクリート路面下の空隙

これに関する図6の測定結果と解析結果をそれぞれ図11と図12に示す。図11は表面波および等方性の境界からの反射波を除去した状態の結果である。図12の結果を見ると、完全に球形の形状は現れていないが、空隙の大きさなど実際の形状に近い結果が復元されていることが分かる。

#### 5. まとめ

以上の結果をまとめると次のようである。

(1) 初めて提案された空隙の実際形状の復元および鉄筋の同定方法は、測定結果だけでは判別しにくい各種目標物に対する情報を比較的明確に表わすことができるかと判断される。

(2) 実際の構造物では多くの影響因子が存在するため、本方法の実用化にはまだ研究が補完される必要があるものの、本方法は任意の大きさを持つ物体の形状の復元およびコンクリート内の鉄筋の同定にもある程度有効であると考えられる。

「謝辞」本研究の実験にあたり、御協力を頂いた芝浦工業大学卒論生の坂本大輔君と(株)三井造船の関係者各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- [1] 村松敏光、野口哲男、須田幸彦：路面下地中探査技術、土木学会誌、Vol.80、pp.14-17、1995
- [2] 荒井郁男、鈴木務：合成開口地中レーダ、第2回センシングフォーラム、pp.19-24、1995
- [3] 朴錫均、魚本健人：レーダ法によるコンクリートの非破壊検査に関する研究(3)、生産研究、48巻5号、1996.5

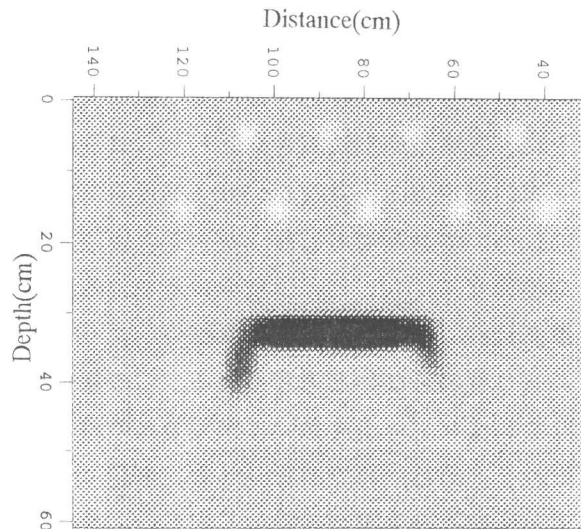


図10 配筋(b)下の矩形空隙の解析結果

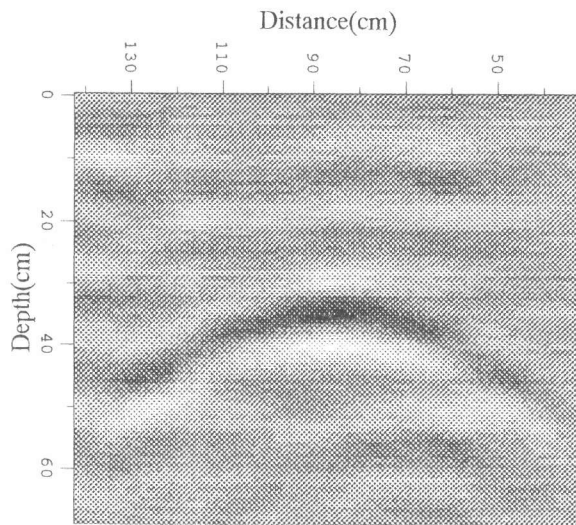


図11 コンクリート下球形空隙の測定結果

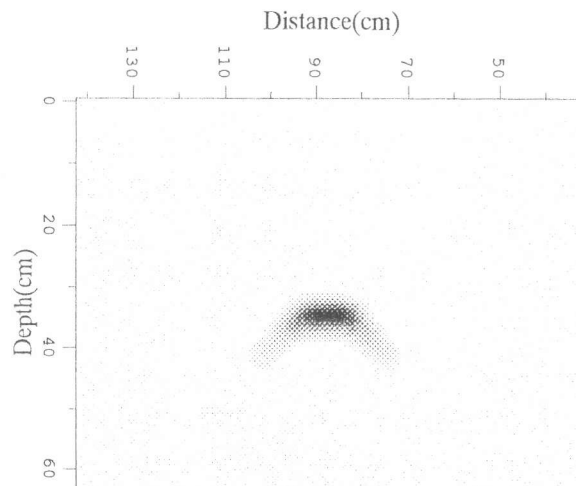


図12 コンクリート下球形空隙の解析結果