

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) —空隙形状の復元および鉄筋位置の同定—

Nondestructive Test for Concrete Structures using Radar (3)

—Radar Image Processing for Detection of Shape of Voids and Location of Reinforcement Bars—

朴 錫 均* · 魚 本 健 人*

Seok-Kyun PARK and Taketo UOMOTO

1. はじめに

道路陥没の主な原因になる路面下空隙は大型事故に繋がる可能性があるため、それに対する効率的な検査方法が切実に要求されている。レーダ法は、非接触走査方式で広い範囲の構造物を速い速度で測定できるため、この分野の調査には多くの長所をもっている。しかし、道路舗装の厚さ等の調査に関しては、既に部分的に実用化されているが、空隙の探査においてはまだ十分な研究が行われていない。したがって、本研究では、一定の大きさ以上の路面下空隙を対象にして、空隙の存在有無の判断ばかりでなくその規模（大きさおよび形状）まで検出できる方法を開発した。なお、コンクリート構造物のレーダ探査の場合に、一番大きな影響因子中の一つである鉄筋を効果的に検出できる方法についても検討を行った。

2. 解析方法

2.1 空隙形状の復元

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。そのため、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、レーダと空隙間の位置上で、一番近い径路に従い信号が、反射されるため、反射信号の強度はレーダの接近距離と方向により変化する。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る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_m, 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 $(x_m, 0)$ 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) となる。つづいて、座標 (x_m, 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 $G(x_m, y_n)$ 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 $(x_m, 0)$ を通りすぎる直線 y を式 (4) から求めることができる。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し、媒質変化等による電子波の屈折影響を式 (5) のように補正すると復元画像の収束度がより向上される。以上の過程を図3のフロー図に示した。

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

$$G(x_m, y_n) = -\frac{\partial I(x_m, y_n)}{\partial x} / \frac{\partial I(x_m, y_n)}{\partial y}$$

$$I(x_m, y_n) : \text{画像の濃淡強度} \quad (2)$$

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

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

$$\overline{y_n} = c_s y_n \quad c_s : \text{屈折影響補正係数} \quad (5)$$

2.2 鉄筋位置の同定

コンクリート内の鉄筋のように間隔が狭く、複鉄筋の場合には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、鉄筋の水平分解能を高めるための合成開口処理等は限界がある。したがって、本研究では、まず、鉄筋の位置を検出できる最適

*東京大学生産技術研究所 第5部

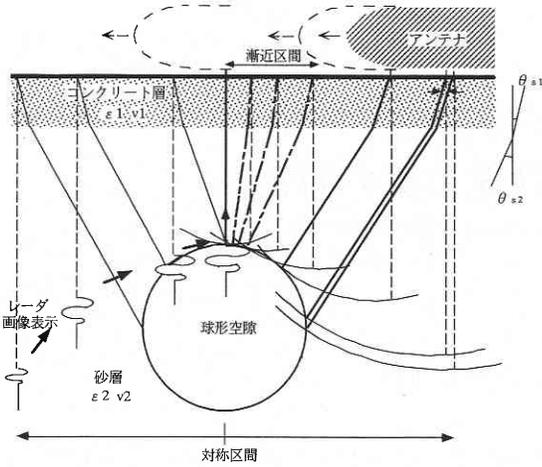


図1 空隙のレーダ画像表示概念

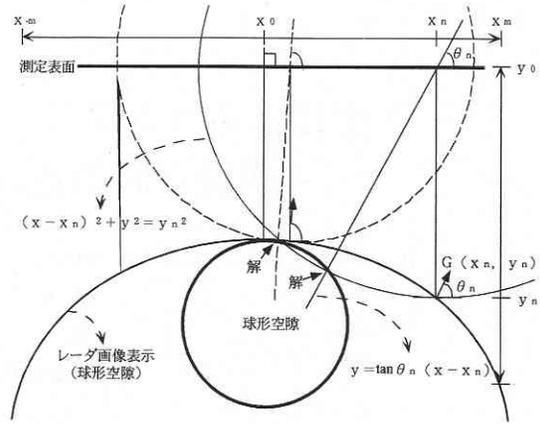
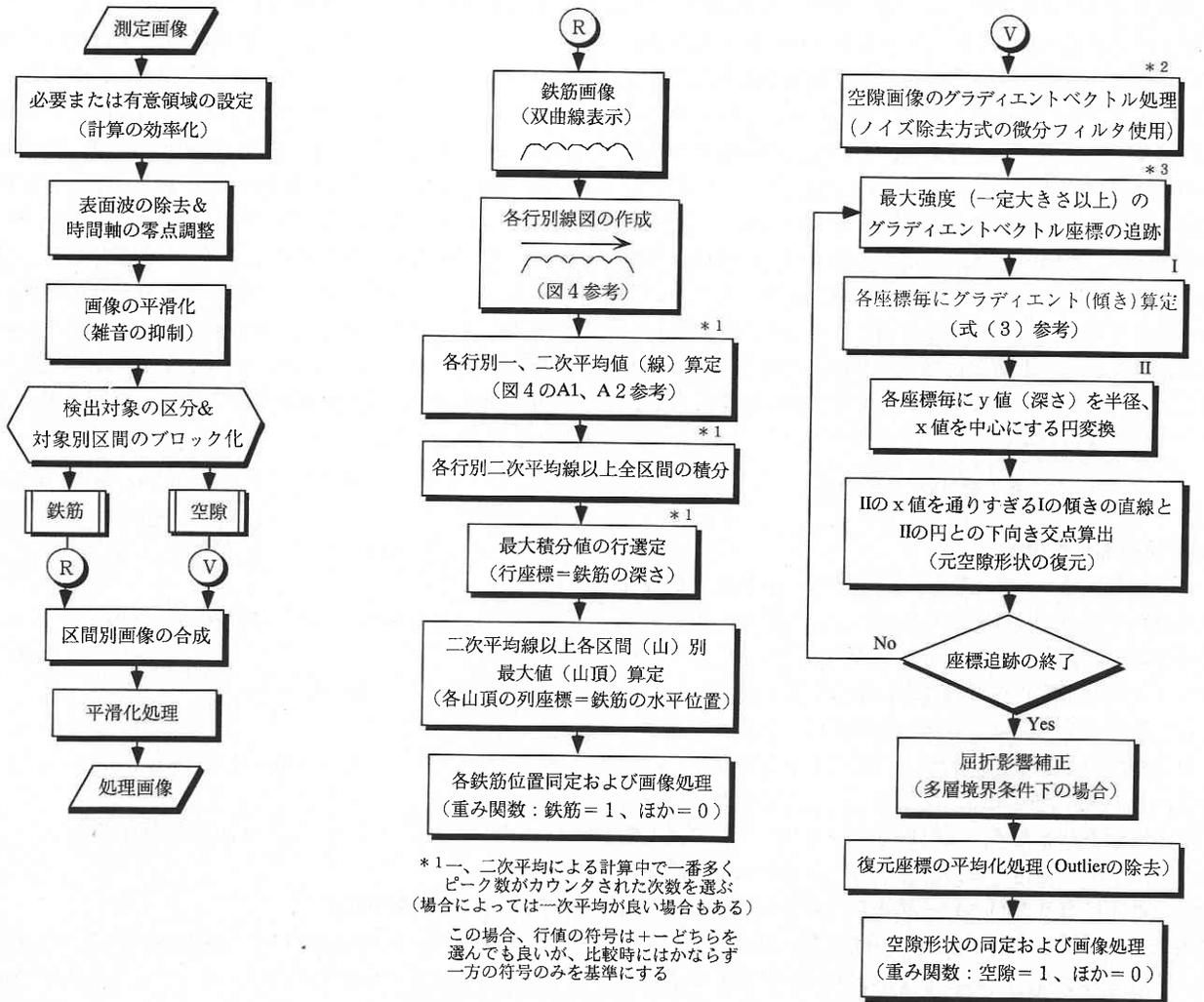


図2 空隙の実形状の復元概念



*1一、二次平均による計算中で一番多くピーク数がカウントされた次数を選ぶ(場合によっては一次平均が良い場合もある)
この場合、行値の符号は+-どちらを選んでも良いが、比較時にはかならず一方の符号のみを基準にする

*2 輪郭線処理により該当座標のみに対するグラディエントベクトル処理方式も可能
*3 空隙からの一番目と二番目(極性が互いに反対)の反射信号中で強い信号の方を選択(後で深さ補正)

図3 画像処理のフロー図

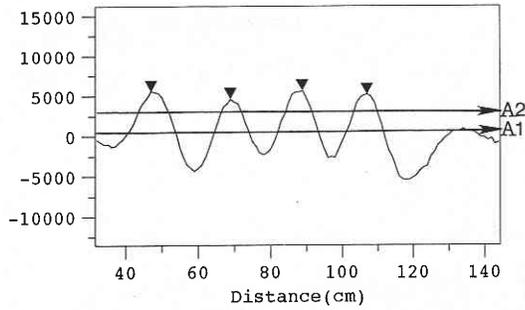


図4 鉄筋の山頂信号部分の行線図 (▼: 鉄筋の位置)

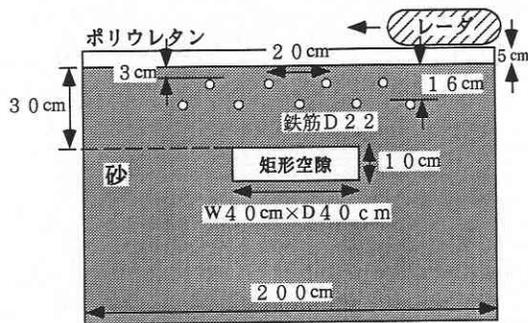


図5 複鉄筋下の空隙配置

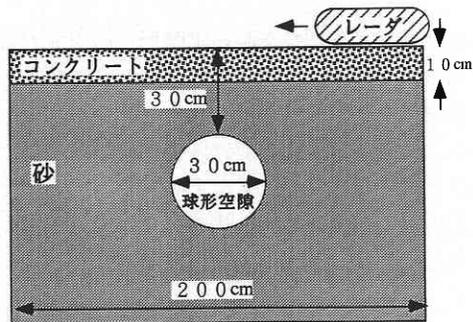


図6 無筋コンクリート下の空隙配置

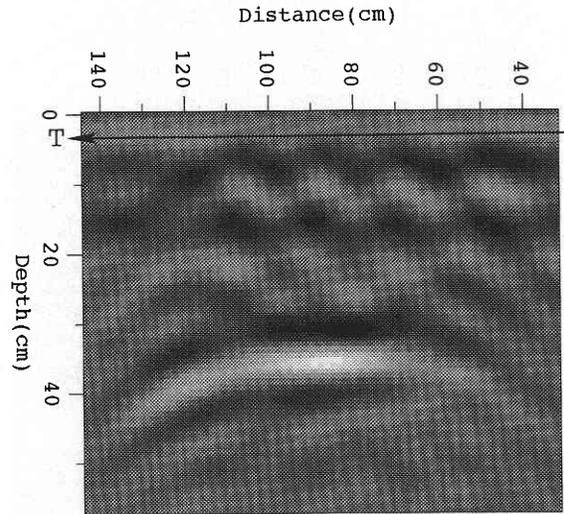


図7 複鉄筋下の矩形空隙の測定結果

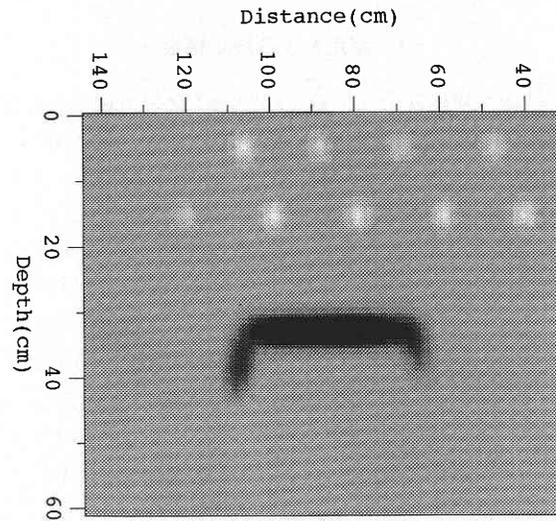


図8 複鉄筋下の矩形空隙の解析結果

方法を考案し、鉄筋の焦点部分のみを重み係数 (=1) により強調し、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提案した。図7には鉄筋径が22cmでピッチが20cmの複鉄筋(図5の配置図参考)に対する測定結果である。ここで、図4のように、図7の測定された横方向鉄筋と直交方向 [T 方向] のデータの配列に対して各行(深さ)毎に線図を描く(ここで、図4は鉄筋の位置で最大のピーク信号が得られた部分の行線図を示している)。この際、各行別平均値以上について積分を行い、図4のように最大のピーク信号群が得られた行座標を画面上の鉄筋の被覆厚さ [垂直位置] とし、各ピークの列座標 [▼表示] を鉄筋のピッチ [水平位置] とする。以上の過程に対するフーコ図を図3に示した。

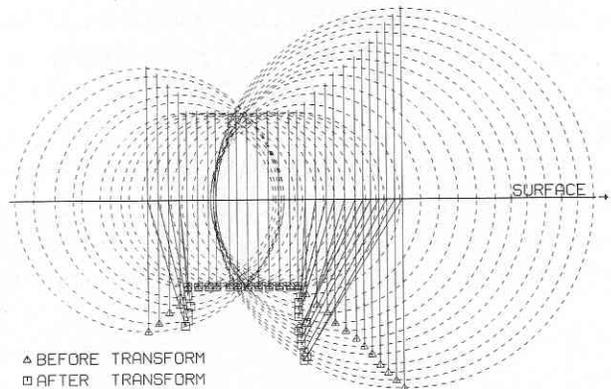


図9 空隙の原形状の復元(変換)概略図

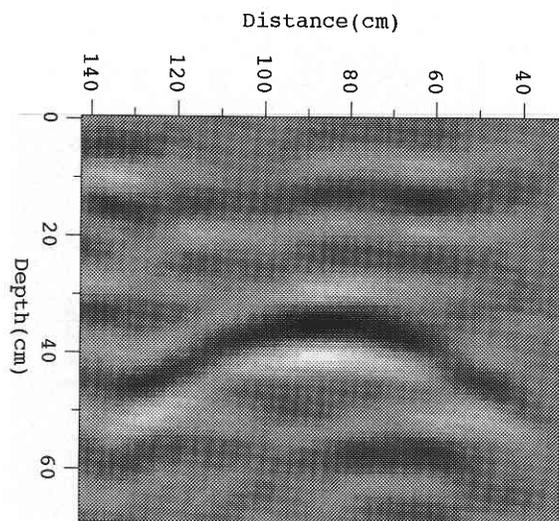


図10 コンクリート下球形空隙の測定結果

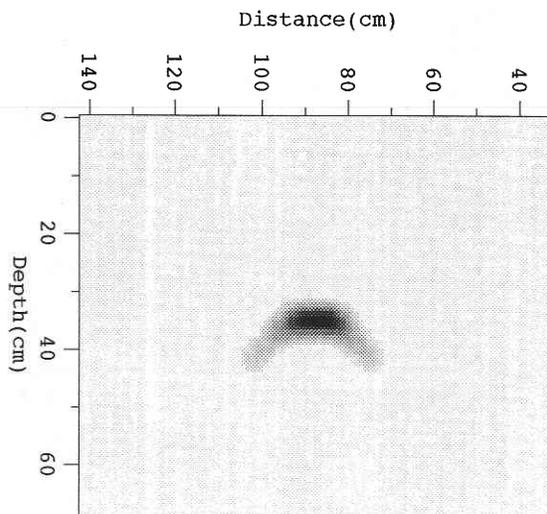


図11 コンクリート下球形空隙の解析結果

3. 測定および解析結果

実験は、複鉄筋条件下の矩形空隙とコンクリートの道路床版下の球形空隙を模擬対象にし、測定は、20MHz~1GHzの広帯域周波数の地中探査レーダを用いた。まず、図5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は矩形空隙に対する形状の復元(変換)過程を上記のアルゴリズムにより図式化したものである。表示は空隙反射信号中で測定距離単位別一定強度以上の最大グラディエントベクトルが得られた座標のみを対象基準にした。画像の雑音等により一部の変換結果に多少のばらつきが見られるが、比較的原形状に近づくことがわかる。この変換過程上では、x, y座標のスケールに注意する。以上の結果から、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ている。なお、図6に対する測定結果と解析結果をそれぞれ図10と図11に示す。図10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11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わかる。

5. ま と め

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と判断される。しかし、実際の構造物ではさらに多くの影響因子が存在するため、この方法を直ちに実用化することはできないが、本方法は任意の物体の形状の復元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業生の坂本大輔君に感謝の意を表します。

(1996年2月19日受理)

参 考 文 献

- 1) S.K. Park, T. Uomoto, M. Yoshizawa: Analysis of Radar Response on Subsurface Objects in Concrete by Simulation Technique, International Symposium NDT-CE, Berlin, pp. 673-680, 1995
- 2) 朴錫均, 魚本健人, 吉沢勝: 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, JCI 年次論文報告集, 第18巻, 第1号, 1996