

## 地中レーダによるRCDコンクリートの未充填部検出法の検討

誌名	農業工学研究所技報
ISSN	09153314
著者	畑山, 元晴 長束, 勇 森, 充広 黒田, 清一郎
巻/号	199号
掲載ページ	p. 83-90
発行年月	2001年2月

〔農工研技報 199〕  
〔83～90, 2001〕

## 地中レーダによるRCDコンクリートの未充填部検出法の検討

畑山元晴\*・長束 勇\*・森 充広\*\*・黒田清一郎\*

### Ground Penetrating Radar for Detecting Mortar-unfilling Parts of RCD Concrete

by Motoharu HATAKEYAMA, Isamu NATSUKA,  
Mitsuhiro MORI and Seiichiro KURODA

#### 目 次

I 緒言	83	IV モデルヤード試験	96
II 地中レーダの原理	83	1 モデルヤードの概要	86
1 地中レーダの概要	83	2 モデルヤード測定結果	86
2 探査装置	84	3 ポーラス箇所の検出	86
3 測定原理	84	V RCDコンクリートヤード試験	87
III 疑似施工不良部試験	84	1 RCDコンクリートヤードの概要	87
1 疑似施工不良部試験の概要	84	2 RCDコンクリートヤード測定結果	87
2 測定方法	85	VI 結 言	89
3 疑似施工不良部試験の結果	85	参考文献	89
		Summary	90

#### I 緒 言

公共事業におけるコスト縮減は喫緊の課題であり、農業用コンクリートダム施工においても低コスト化を目指した工法の一つであるRCD工法の施工事例が見られる。しかし、RCD工法に用いるコンクリートは流動性が非常に小さいため、施工条件によってはコンクリートの未充填部が生じる可能性がある。このため、コンクリートの品質管理において、現時点では多点でボーリングコア（試験体）を採取して確認を行っている。ところが、この方法ではコンクリートの硬化後でなければコアの採取が不可能であるため、結果を得るまでに時間を要し経費がかかる。また、多点でコア採取を行っても、得られる情報は、部分的な点の情報であり、連続した面としての確認はできていない。

そこで、これまで筆者らが、農業用基幹施設やその基礎

地盤のごく浅い部分（地下数m以浅）を対象として研究開発を進めてきた地中レーダを用いて、施工後直ちに迅速かつ連続的にコンクリートの品質確認ができれば、コスト面で有利となる上に施工管理の確実性が飛躍的に向上するのではないかという発想から、地中レーダによるコンクリート未充填部の検出技術に関する検討を行った。本報告は、その検討結果をとりまとめたものである。

なお、本報告は、経常研究「電磁波を用いた構造物や構造物基礎の調査・評価手法の基礎的検討（平成7～11年）」の成果の一部であり、本研究の推進にあたっては、東北農政局会津農業水利事務所に多大なるご協力を戴いた。関係各位に謝意を表する。

#### II 地中レーダの原理

##### 1 地中レーダの概要

船舶、航空機など地上で利用されているレーダの原理を地中に適用し、浅層の地下構造を非破壊で探査する手法の一つに地中レーダがある。すなわち地中レーダとは、地中に超短波（VHF）から極超短波（UHF）の領域の高周波電磁波を発射し、この電磁波の反射・屈折・透過などの物理

\* 造構部土地質研究室

\*\* 現東北農政局

平成12年11月15日受理

キーワード：電磁波、地中レーダ、RCDコンクリート

現象を測定することによって地下構造や異常物の位置を調査する物理探査法のひとつである<sup>1)</sup>。

地中レーダによる探査の利点は

- ①高周波、すなわち波長の短い電磁波を使っているので、分解能（近接する2つの物体を分離して識別する能力）<sup>2)</sup>が高いこと
  - ②アンテナを移動させるだけで、リアルタイムで直下の地下構造が確認できるため、解析を必要とする他の物理探査手法に比べると特殊な技能を必要とせず、作業性に優れていること
  - ③非破壊で調査できること、
  - ④ボーリングなどの直接試験結果は、あくまで「点」の情報に過ぎないが、地中レーダでは、ある測線上の断面が連続的に測定できること
- などが挙げられる。

2 探査装置

Fig. 1 に一般的な地中レーダ探査装置のシステム概要図を示す<sup>3)</sup>。地中レーダシステムは電磁波を放射・受信するアンテナ部と、それらの制御を行う本体、および得られた結果を表示するディスプレイから成り立っている。アンテナ部にはパルス電磁波を送信する部分と、反射波を受信する部分があり、ほとんどの場合、送受信部は一体化されている。アンテナ部には、通常アタッチメントとして距離計がセットされており、探査しながら同時に走行距離を測定する仕組みになっている。本体部にはコンピュータが搭載されており、得られた信号の増幅・処理を行ってディスプレイに表示する仕組みになっている。得られた画像は、外部記憶装置（磁気テープ等）に保存されるか、もしくはビデオ出力を経てビデオテープに録画される。

アンテナから放射される電磁波の中心周波数はおよそ数十MHz～数GHzである。アンテナは、周波数ごとに専用の

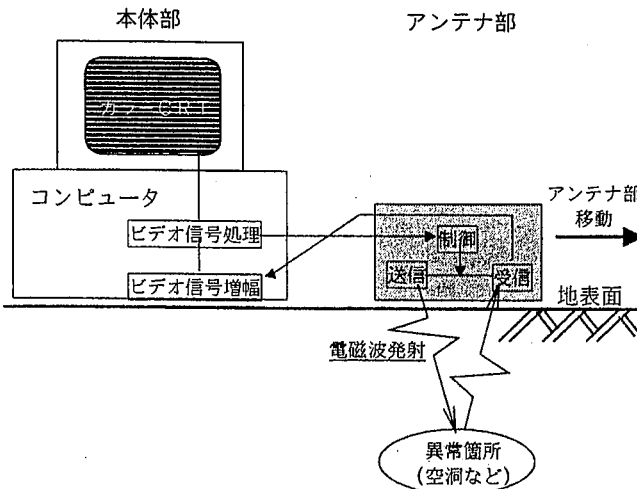


Fig. 1 地中レーダシステム概要図

ものとなり、探査目的や期待する探査深度に応じて、数種類のアンテナを使い分ける必要がある。

3 測定原理

地中レーダでは、アンテナ部から地中にパルス状の電磁波を周期的に放射し、その電磁波が地中のどこで反射するかを測定する。基本的には下記に示す4ステップを連続することにより測定が行われる。

- ①アンテナからパルス電磁波が発射される。
- ②電磁波は減衰しながら地中を進行し、異常箇所の上面に到達する。
- ③異常箇所の上面に到達すると、一部は反射波として地上に戻るが、一部はさらに透過し、異常箇所内を減衰しながら進行する。
- ④異常箇所上面で反射した電磁波がアンテナに到達する。異常箇所下面に到達した透過波は、さらに下方へ透過する電磁波と、再び地表へ向かう反射波に分かれる。

地中レーダでは、異常箇所の上、下面で反射した電磁波がアンテナに戻ってくるために、ある大きさをもった異常箇所の場合、多重反射という現象が見られる。したがって、地中レーダ測定記録の解釈には、この点に留意する必要がある。

III 疑似施工不良部試験

1 疑似施工不良部試験の概要

現地実験に先立ち、通常のコンクリートと、ポーラスコンクリートでは、地中レーダ測定記録に相違があるのかどうかを調べるために疑似施工不良部試験を実施した<sup>4)</sup>。Fig. 2 に試験モデルの平面図および縦断面図を示す。

図に示すように、長さ6m、幅1.5m、高さ0.5mの型枠を作製して中央で二分し、一方に通常の密実なコンクリート（以降、Good側）、もう一方に疑似ポーラスコンクリート（以降、Bad側）を打設した。Bad側は高さ45cmまで80～150mmの石英斑岩粗骨材2,884kgを投入し、その上に20～40mmの石英斑岩粗骨材360kgを敷き、表層にはモルタルを打設した。Bad側の間隙率は約39%である。電磁波の到達

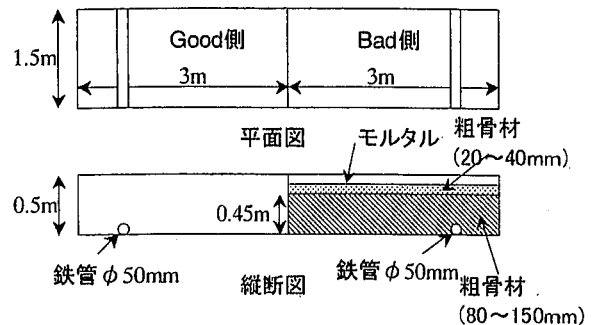


Fig. 2 疑似施工不良部試験モデルの平面図・縦断面図

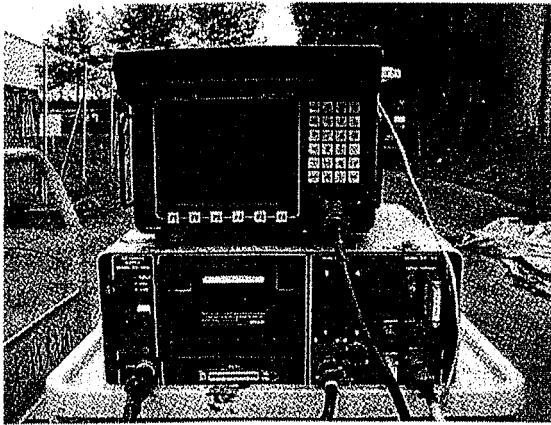


Fig. 3 地中レーダシステム 本体

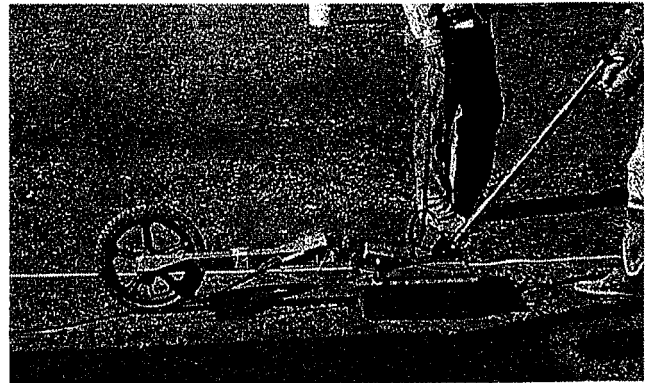


Fig. 5 地中レーダシステム アンテナ (500MHz)

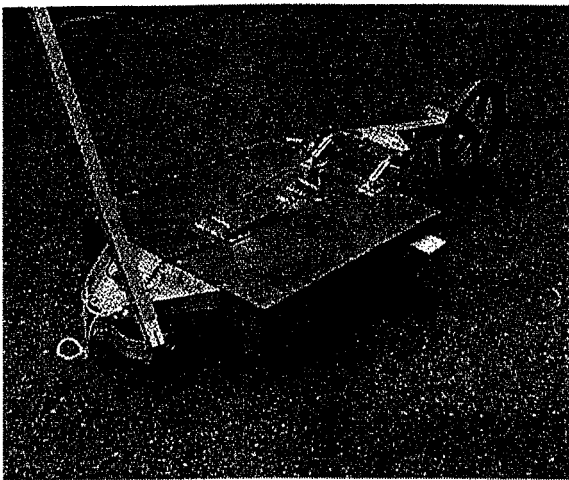


Fig. 4 地中レーダシステム アンテナ (300MHz)

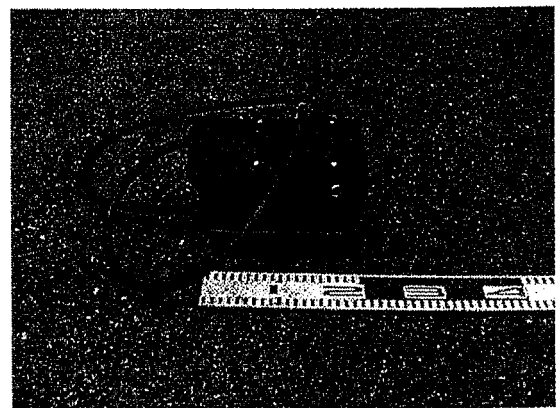


Fig. 6 地中レーダシステム アンテナ (1GHz)

深度を確認するために、供試体左右端から50cm、深度50cmのところ目となる直径50mmの鉄管を埋設した。用いた地中レーダシステムは、G社のデジタル式地中レーダシステム (Fig. 3, 4, 5, 6) である。

## 2 測定方法

測定は、電磁波の送信受信の距離を一定に保ちながらアンテナを動かすプロファイル測定にて行った。この方法により得られる記録は、横軸が水平距離、縦軸が反射時間である。反射時間は深度に換算できることから、測線下の地下断面に類した記録 (反射断面記録) となる<sup>9)</sup>。パルス電磁波が発射されてから地中の異常箇所で反射し、再びアンテナに戻ってくるまでの時間を往復反射走時といい、単位は一般にns ( $1\text{ns} = 10^{-9}\text{sec}$ ) で表示する。

プロファイル測定概念図<sup>2)</sup>をFig. 7に示す。

## 3 疑似施工不良部試験の結果

中心周波数300MHz、500MHz、1GHzの3種類のアンテナを用いて、供試体の測定を行った。300MHzのアンテナを用いた測定は供試体を作製して約1週間後に、500MHzならびに1GHzのアンテナを用いた測定は約3.5ヶ月後に行っ

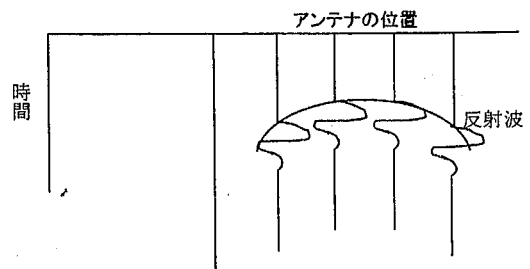
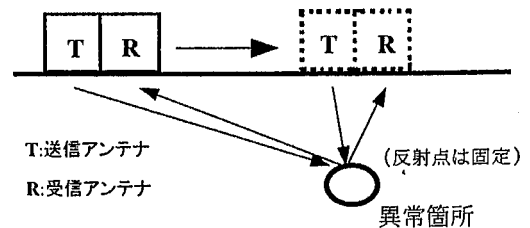


Fig. 7 プロファイル測定

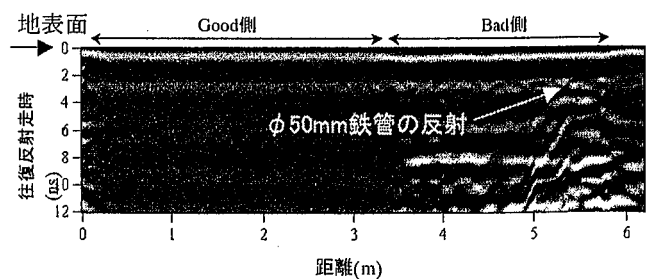


Fig. 8 疑似施工不良部試験モデル供試体測定結果

た。500MHzのアンテナを用いて測定した結果をFig. 8に示す。この図から明らかなように、Good側とBad側に明瞭な測定記録の相違が確認できた。Good側では電磁波の減衰が大きく地表から3ns程度までの反射面しか捉えられなかったのに対し、Bad側では10ns以上の反射面をも捉えていた。また、Bad側ではあらかじめ埋設しておいた鉄管の反射面が捉えられたが、Good側では検出できなかった。300MHzおよび1GHzのアンテナにおいても同様の結果が得られた。この試験の結果から、密実なコンクリートと間隙の多いポーラスコンクリートでは、反射パターンが全く異なることが判明し、地中レーダによるコンクリートの施工不良部の検出が可能である見通しを得た。

#### IV モデルヤード試験

##### 1 モデルヤードの概要

疑似施工不良部試験の検討結果に基づいて、実際のRCDコンクリートにおける測定記録はどのように計測されるかを転圧回数4回と12回とした試験ヤードにおいて測定し、RCDコンクリート中の電磁波伝播速度、比誘電率の値を得ることを目的としてモデルヤード試験を行った。作製した試験ヤードをFig. 9上段に示す。転圧機械の進入路であるスロープ区間を除いた全長は14mである。転圧回数を変えた区間は、それぞれ2.7mであり、その区間内には、電磁波が到達するかどうかを確認するために、 $\phi 150\text{mm}$ の塩ビ管(VP)をあらかじめ埋設し、コンクリートの比誘電率との差をできるだけ大きくするために管中を水で満たした。試験ヤードは平成8年11月に打設し、それ以降、年に1～2回の頻度で実験を行った。

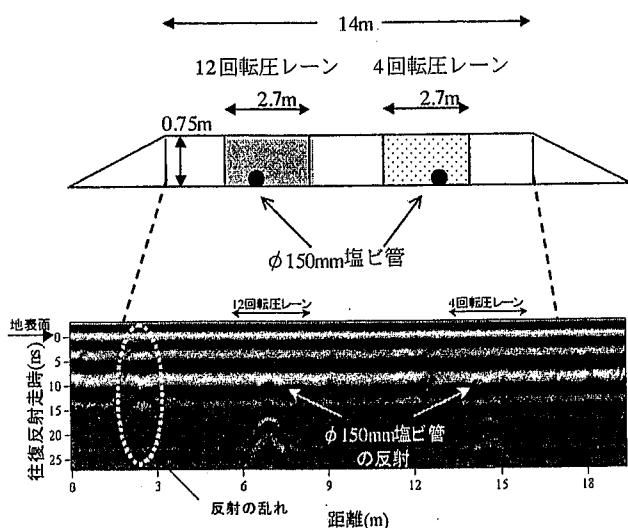


Fig. 9 500MHzのアンテナを用いたモデルヤード試験の測定記録結果

##### 2 モデルヤード測定結果

周波数500MHzのアンテナによる測定結果の一例(平成10年7月)をFig. 9下段に示す。探査深度を確認する目的で埋設した塩ビ管は、明瞭に検出することができた。しかし、管の上面を示すと考えられる反射面は非常に弱く、その下の多重反射部分が、逆に強い反射面として現れている。これは、RCDコンクリートと管との比誘電率の差よりも、管と管内の水との比誘電率の差が大きいためであると考えられる。

転圧回数の相違による地中レーダ測定記録の相違について検討した結果、次の2点が明らかになった。

① 4回転圧区間の測定記録は、12回転圧区間の測定記録と比較すると若干乱れている部分もあるが、その差はほとんど認められない。

② 12回転圧レーンに設置した管からの反射は、4回転圧レーンに設置した管からの反射よりも、やや強い。

①について、この原因を確認するため、転圧回数4回および12回の供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施した。その結果、4回転圧のRCDコンクリートと12回転圧のRCDコンクリートとの間の強度差はほとんどなかった。したがって、転圧回数4回でも十分に締め固まっているため、地中レーダ測定の記録としては差が認められなかったと考えられる。一方、②については、4回転圧レーンでは12回転圧レーンよりも電磁波の減衰が大きいためであると考えられる。すなわち、4回転圧レーンにおける水分が多い、もしくは4回転圧レーンの比抵抗値が低いことによると推定される。

##### 3 ポーラス箇所の検出

先に示したFig. 9中に「反射の乱れ」が認められている(Fig. 9点線内)。この箇所は、数回測定を実施した際、必ず異常が現れていた。そこで、この部分において、平成10年7月の調査時に、コアサンプリングを行った。Fig. 10の下段がそのコアの写真である。写真右側に示した充填されているコンクリートコアは、異常反射が検出された地点から約1.2m埋設管寄りの地点でサンプリングしたものである。

異常な反射の乱れが認められた地点のコアは、表層から15cm程度までは密実であったが、15cm～22cmにかけての約7cmの区間に、コアが採取できないほどにくずれたポーラス箇所(ジャンカ)が検出された。反射異常が現れた原因は、ポーラス部分での比誘電率が、周囲のRCDコンクリートの比誘電率と比較して大きく異なっているためであると考えられた。前述したとおり疑似施工不良部試験におけるポーラス部分の検出結果でも、通常のコンクリートと疑似ポーラスコンクリートでは極端に反射パターンが異なり、ポーラス部分での反射面がより強く現れることが明らかになっている。

そこで、検出できたポーラス部分について、Table 1に示

す方法により間隙率を計算した。なお、間隙率の計算には、コア抜き後の孔内体積等の実測値および既存資料による粗骨材比重を用いた。その結果、検出できたポーラス部分の間隙率は、34%であった。

## V RCDコンクリートヤード試験

### 1 RCDコンクリートヤードの概要

さらに、上記の試験結果を踏まえ、RCDコンクリート打設直後においてもポーラス部の発見が可能であることを確認するため、実際の施工法で作製したヤードにおいて打設直後に測定試験を行った。

作成したRCDコンクリートヤードをFig.11に示す。このヤードは、南北幅21.8m、東西幅15mであり、東西方向に撒き出し幅約7mの3列にて施工している。また、RC

Dコンクリートの施工に先立ち南側および北側には有スランプコンクリート（幅3m）を打設している。

### 2 RCDコンクリートヤード測定結果

地中レーダによる測定測線を南北方向および東西方向に設定した。Fig.11に示す点線矢印が測線である。測定には、これまでの試験においてポーラス部の異常反射を明瞭に検出した500MHzの周波数のアンテナを用いた。

測線A-A'の測定結果をFig.12に示す。RCDコンクリート打設直後の測定においても、南側から10m付近に反射の乱れを生じる箇所が検出された。

続いて、測線A-A'にて反射の乱れを検出した箇所を通る東西方向（測線B-B'）に測定を行った結果をFig.13に示す。この測定の結果においても反射の乱れを生じる箇所を検出した。この箇所は2測線のほぼ交点に当たる部分

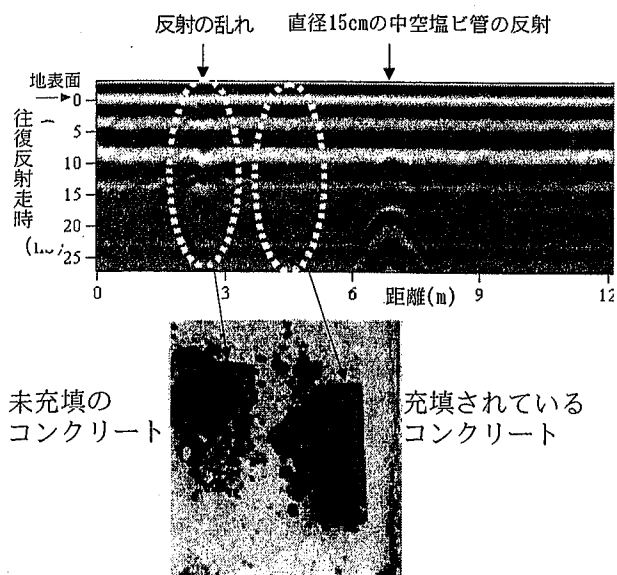


Fig.10 モデルヤード試験 コア写真

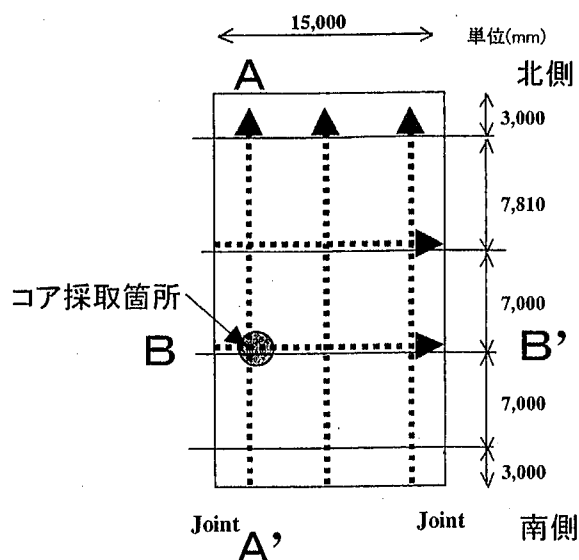


Fig.11 RCDコンクリートヤード

Table 1 モデルヤード試験 コアポーラス部間隙率計算

番号	項目	数値	備考
①	コア抜き後の孔内体積	4,130cm <sup>3</sup>	孔内に薄いビニールを敷設し、水を注入して測定。
②	RCDコンクリートコアの体積	2,445cm <sup>3</sup>	バケツに水を満たしてコアを入れ、あふれた水の体積をRCDコアの体積とした。
③	粗骨材の重量	2,827 g	実測
④	粗骨材の比重	2.55	既存データ
⑤	骨材のみの体積	1,108.6cm <sup>3</sup>	③/④=2,827/2.55=1,108.6cm <sup>3</sup>
⑥	空隙の体積	576.4cm <sup>3</sup>	①-②-⑤=576.4cm <sup>3</sup>
⑦	空隙率	34.2%	⑥/(①-②)=576.4/1,685*100=34.2%

(Fig.11参照)であり、RCDコンクリートの硬化を待ってコアの採取を行ったところ、IV章で行ったモデルヤード試験と同様にコンクリートが十分に充填されていないポーラス部を検出することができた (Fig.14)。この部分の間隙率を Table 2 に示す方法により計算したところ、24%であった。

Fig.15は、今回コアを採取した箇所付近の施工状況写真である。この箇所はRCDコンクリートの撒き出し・転圧の境界にあたる場所であり、粒径の大きい骨材が集積しやすい部分であった。従来からRCD工法においては骨材分離の発生が懸念されており、それを防止するために実施

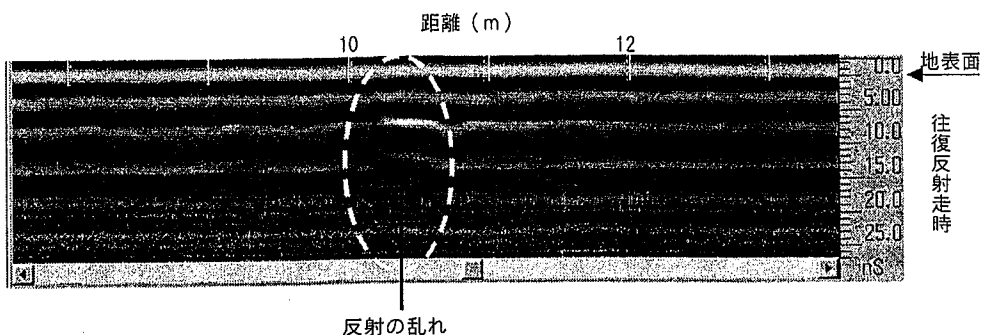


Fig.12 測線A-A'の測定結果

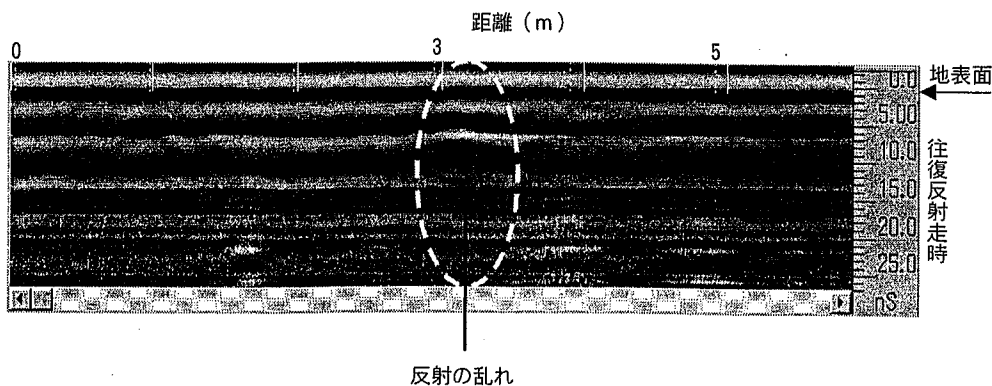


Fig.13 測定B-B'の測定結果



Fig.14 RCDコンクリートヤード コア写真

Table 2 RCDコンクリートヤード コアポーラス部間隙率計算

番号	項目	数値	備考
①	コア抜き後の孔内体積	17,909cm <sup>3</sup>	メジャーおよびノギスにてコアの外形を測定。
②	RCDコンクリートコアの体積	17,054cm <sup>3</sup>	バケツに水を満たしてコアを入れ、あふれた水の体積をRCDコアの体積とした。
③	コアの重量	41,205 g	実測
④	コアの延長	70.85cm	実測 90° 直交方向で計測した2点の平均。
⑤	ポーラス部分の延長	13.85cm	実測
⑥	空隙率	24.4%	$(①-②) / ((⑤/④) * ①) * 100 = 855 / 3,501 * 100 = 24.4\%$

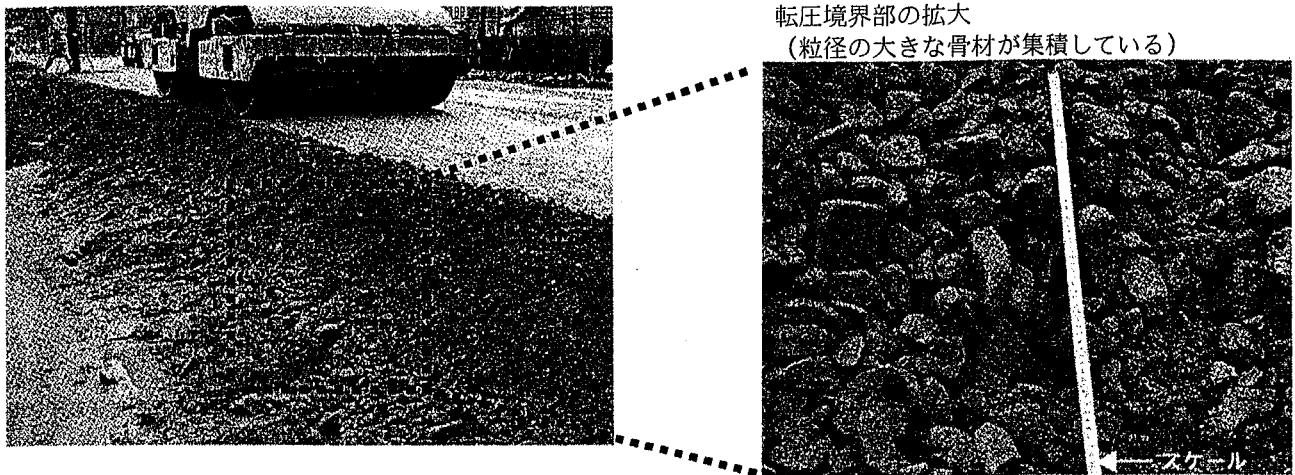


Fig.15 RCDコンクリートヤード施工状況

されている撒き出し端部におけるコンクリート掻き混ぜなど、撒き出し・転圧の施工には十分留意する必要があるといえる。

## VI 結 言

地下構造を非破壊で探査できる手法の一つである地中レーダを活用し、RCDコンクリートの品質判定への適用性について実証するために試験を行い、以下のことが確認できた。

- ① 充填されたコンクリートと間隙の多いポーラスコンクリートでは、反射パターンが全く異なり、地中レーダによるポーラス部分の検出が可能であることが明らかになった。
- ② 周波数500MHzのアンテナを有する地中レーダシステムを用い、硬化後のモデルヤードにおいてコンクリートの地表面下75cmに配置した異常物（直径15cm中空塩ビ管）を明瞭に検出する事ができた。
- ③ 上記モデルヤードにおいてコアが採取できないほどくずれたポーラス箇所を反射の乱れとして検出することができた。この部分の間隙率は、34%であった。
- ④ 実際の施工法で作製したRCDコンクリートヤードにおいて、コンクリート打設直後に測定を行った結果、コンクリートが十分に充填されていないポーラス箇所を検出することができた。この部分の間隙率は24%であった。以上により、RCDコンクリートの硬化の程度にかかわらず、周波数500MHzを使用した地中レーダによって、完

全に空洞ではないものの、明らかに施工不良であるコンクリート未充填部を検出できる見通しを得た。地中レーダは、RCDコンクリートの連続迅速な品質判定技術として適用が可能であり、施工管理の確実性を向上する一手法であると言える。

本手法は、近年社会問題化しているコンクリートの品質判定にも、効率的な非破壊検査・点検システムとして応用できるものと考えている。また、地中レーダを現場技術者にとっても使い勝手のよい探査技術として普及させるためには、得られた画像を適切に処理し、測定記録の解釈を容易にするための技術開発が必要であり、今後は、そのシステム化に向けた研究を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 竹内睦雄(1991)：小講座 地下レーダ，農土誌59(9)，69
- 2) 佐藤源之(1996)：地中レーダ技術，セメント・コンクリート No593，1～8
- 3) 竹内睦雄・中山熙之・小前隆美・濱田浩正・中山康(1991)：農業土木における地下レーダの利用，土地改良測量設計 No. 34，10～17
- 4) 森充広・長束勇・畑山元晴(1999)：地下レーダの測定原理と適用事例，農業土木学会誌，67(11)，65～72
- 5) 物理探査学会：物理探査ハンドブック 手法編 第7章地中レーダ



## Ground Penetrating Radar for Detecting Mortar-unfilling Parts of RCD Concrete

by Motoharu HATAKEYAMA, Isamu NATSUKA,  
Mitsuhiro MORI and Seiichiro KURODA

### Summary

These days, RCD construction method, which is one of the concrete dam construction technologies, is sometimes selected. But the RCD concrete paste is so hard that mortar-unfilling parts could be born. Many boring cores are drilled to confirm the quality of RCD concrete for this problem. So it costs much, and it takes much time to check the reliability of construction. In addition, you need to check the RCD concrete as the plane because boring core is nothing but 'point' data. If you can get on-site information of inner concrete in advance, you can manage the quality of RCD concrete efficiently.

Ground penetrating radar has the highest resolution among the ground survey methods. Moreover, you can survey the RCD concrete non-destructively using this technology. We apply this technology to find mortar-unfilling parts in the RCD concrete. In this paper, the field experiment to find these parts in the RCD concrete is reported.

As the result, mortar-unfilling part that has 24% or over porosity can be found using the 500 MHz frequency antenna. We detect that this fact has no relationship with the stage of stiffening level. We conclude that the ground penetrating radar is available for the non-destructive and rapid quality control of RCD concrete.