

## 第4回 ひび割れ・剥離・空洞（その2）

講師：鎌田 敏郎

### 1. はじめに

今回は、前回に引き続き、コンクリート中の欠陥検出に用いる非破壊検査技術の中から、剥離や空洞を評価する方法について解説します。コンクリート中の剥離や空洞は、物理的観点からみれば、両方とも、コンクリート中に「期せずして発生した空気層」であり、同種のものと考えることができます。この「空気層」の各種物理的性質（たとえば音響的特性、熱特性、電気的特性など）は、コンクリートのそれと比べて著しく異なります。したがって、剥離や空洞を検出するためには、「空気層」と「コンクリート」との間の“物理的特性のギャップ”をうまく評価することのできる非破壊検査法を用いなければならないのです。

具体的には、剥離・空洞（以降、内部空隙とする）の評価方法としては、音響的特性を活用した弾性波法（超音波法、衝撃弾性波法、打音法）、熱特性を利用したサーモグラフィ法、電気的特性に着目した電磁波レーダ法、X線透過特性を生かしたX線透過法などがあります。これらの非破壊検査法を適用すれば、検査法の種類にもよりますが、内部空隙の有無を把握できるだけでなく空隙の平面的な大きさや構造物表面からの深さ、あるいは場合によっては空隙の厚み（奥行き）までも評価できる可能性があります。

本号では、このうち、弾性波法、サーモグラフィ法、および電磁波レーダ法に関して、手法の簡単な原理と特徴、適用の事例などについて紹介します。

### 2. 弾性波法による内部空隙評価

弾性波法の概要と種類に関しては、前回すでに解説していますので、ここでは省略します。そこで今回は、まず、弾性波法の原理のなかでも、とくに内部空隙の評価に活用される弾性波の特性について説明します。2つの異なる媒質の境界面に弾性波が入射する場合は、境界面で弾性波の透過と反射が起こり、媒質のそれぞれの音響インピーダンス（媒質の密度と音速の積）の差が大きいほど反射の強さは大きくなります。この原理によれば、空気は、コンクリートと比べて音響インピーダンスがきわめて小さく、両者の境界面では弾性波の強い反射が起こることになります。そのため、コンクリート中の内部空隙によって発生した反射波に着目すれば、弾性波法によって内部空隙の評価が可

能となるわけです。

以下に、弾性波法の分類<sup>1)</sup>にしたがって、内部空隙の評価方法についての具体的なイメージをそれぞれ示します。

#### 2.1 超音波法

コンクリート中に内部空隙がある場合、超音波法で得られる受振波形には、図-1のように、入射波と底面エコーとの間に内部空隙に起因する欠陥エコーが現れます。したがって、欠陥エコーの有無から内部空隙の検出が可能となります。また、コンクリートの超音波伝播速度が既知であれば、欠陥エコーの到達時間から、内部空隙までの深さを求めることもできます。さらに、コンクリート表面上で超音波探触子を走査し、欠陥エコーの認められる範囲を調べれば、内部空隙の平面的な規模を把握することもできます。この事例として、コンクリート供試体の表面から深さ10 cmの位置に正方形の人工空隙を埋め込み、コンクリート表面から超音波法により空隙探査を行った結果<sup>2)</sup>を図-2に示します。これによれば、反射波の最大振幅値のコンター図と空隙の大きさおよび分布状況は良い対応を示すことがわかります。

超音波法は、以降に示す他の弾性波法と比較すると弾性波の波長が短いことから、小さな内部空隙に対する検出感度が高い反面、コンクリート中での超音波の減衰が大きく、表面から深い部分の検査にはあまり適していません。

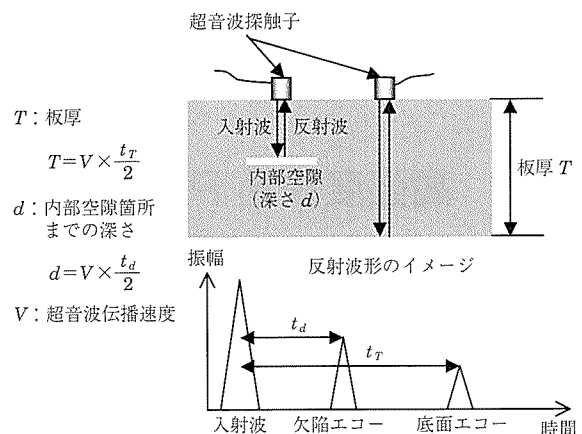
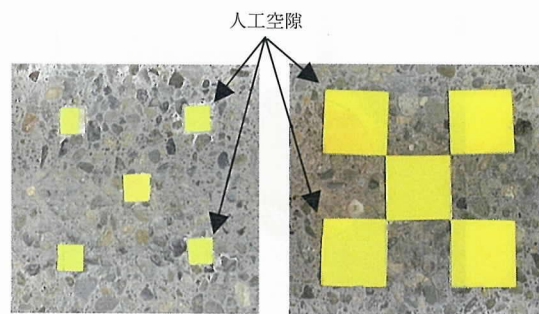
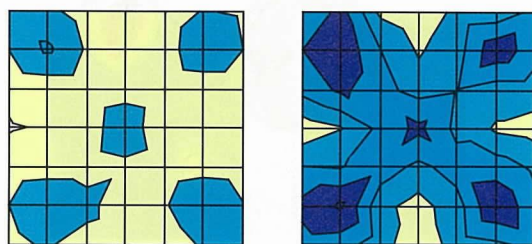


図-1 超音波法による内部空隙検出の原理



(a) 人工空隙設置状況



(b) 反射波の最大振幅値比のコンター図

図 - 2 超音波法による内部空隙の検出結果<sup>2)</sup>

## 2.2 衝撃弾性波法

ここでは、衝撃弾性波法のうち、インパクトエコー法<sup>3)</sup>について述べます。この方法では、部材表面と底面との間(図 - 3 (a))、あるいは部材表面と内部空隙との間(図 - 3 (b))でそれぞれ縦波の共振現象が生じることに着目し、受

振波スペクトルにおけるピーク位置(周波数の値)から内部空隙の評価を行います。この方法では、内部空隙なしの場合は、周波数分布には、板厚に相当する縦波共振周波数 $f_T$ が明確なピークとして現れます。これに対して内部空隙ありの場合は、板厚に相当するピーク周波数よりもさらに高い周波数領域に、部材表面から空隙までの距離に相当する縦波共振周波数 $f_d$ が出現します。このように、周波数ピークを詳細に検討することによって、内部空隙の把握が可能となります。

衝撃弾性波法では、超音波法よりも周波数の低い波が用いられることから、小さな空隙に対する感度は低くなります。しかし、一方で、超音波法と比べると、コンクリート中で弾性波の減衰が起こりにくく、より深い位置にある空隙の検出も可能です。

## 2.3 打音法

「打音」といえば、目視検査と併用してコンクリート表面をハンマで叩いたときの音を耳で聞く「打音検査」があります。打音検査では、[清音]や[濁音]のように音の種類を感覚的に評価し、剥離の有無などの判定を行っています。しかしながらこの方法は、音の種類という主観的な判断基準によっているため、経験や個人差が生じるなどの問題が残ります。これを解決する手段として、この打音検査にあえて計測機器を導入し、音の波形を記録する方法を「打音法」として、以下に解説します。

ここで述べる打音法は、前述のインパクトエコー法と原理はよく似ていますが、受振にはマイクロフォンを用いま

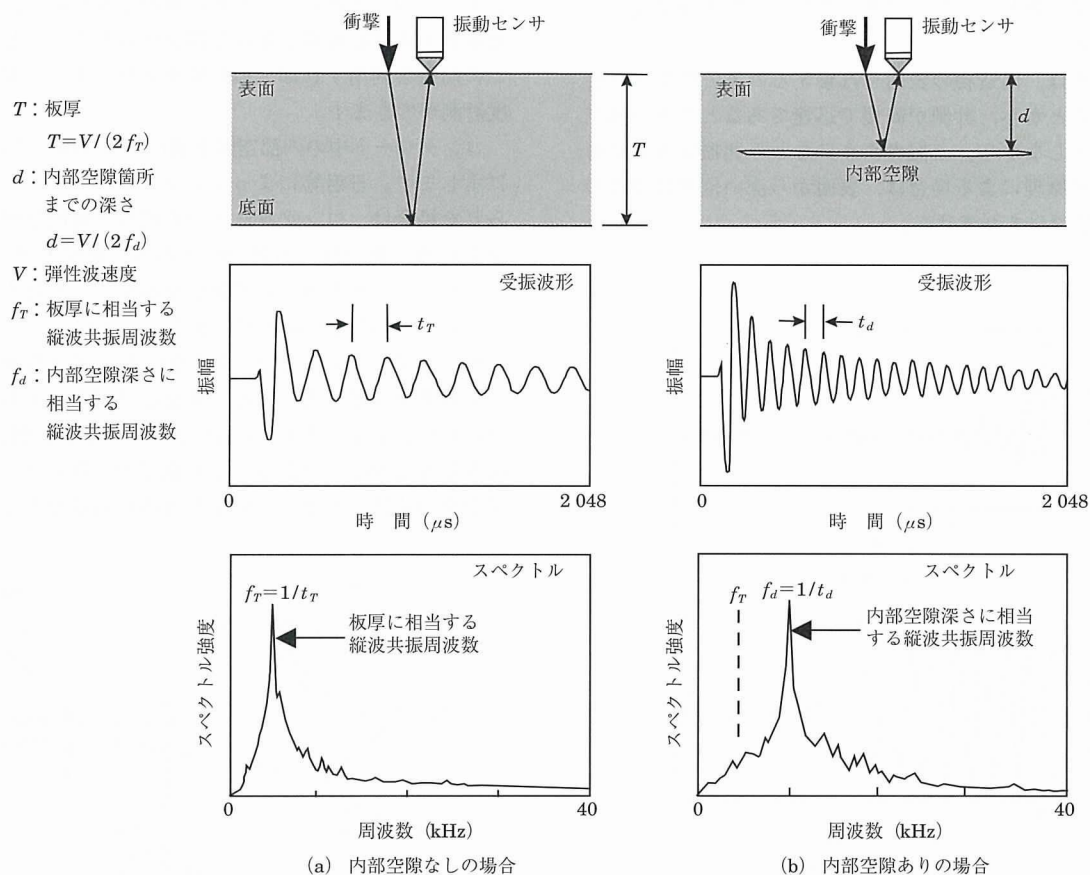


図 - 3 衝撃弾性波法による内部空隙検出の原理

す(図-4)。インパクトエコー法が部材厚方向の縦波共振に基づいているのに対して、打音法では内部空隙と構造物表面との間の板のたわみ共振に着目する点が特徴ともいえます。

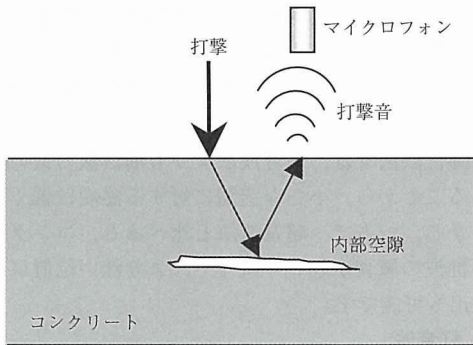
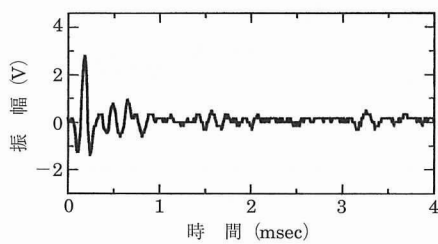


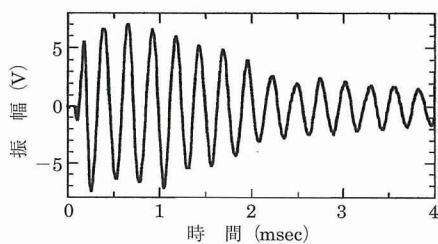
図-4 打音法による内部空隙検出の原理

図-5に示すように、内部空隙のある箇所での打音波形は、健全部での波形と比べて、たわみ共振に伴う周期的挙動が顕著であり、最大振幅値も大きくなっていることがわかります<sup>4)</sup>。したがって、波形から卓越周波数や振幅の特性値を抽出することにより、客観的で定量的な評価が可能となります。図-6は、円形の人工空隙を埋設したスラブ供試体の表面において一定間隔で打音を計測し、得られた波形の最大振幅値の分布状況を示したものです<sup>5)</sup>。これによれば、振幅値の大きな部分を示す赤色の箇所が内部空隙箇所とはほぼ一致しており、打音により空隙箇所が視覚的に把握できます。

この方法は、構造物の表面を打撃するのみで受振も非接触であることから、計測が簡便で迅速であるところが利点です。しかしながら、上記のようにたわみ共振周波数に着目した評価原理による場合は、表面から深い位置の空隙の検出は容易ではありません。



(a) 健全部



(b) 内部空隙箇所

図-5 打音の計測波形の例<sup>4)</sup>

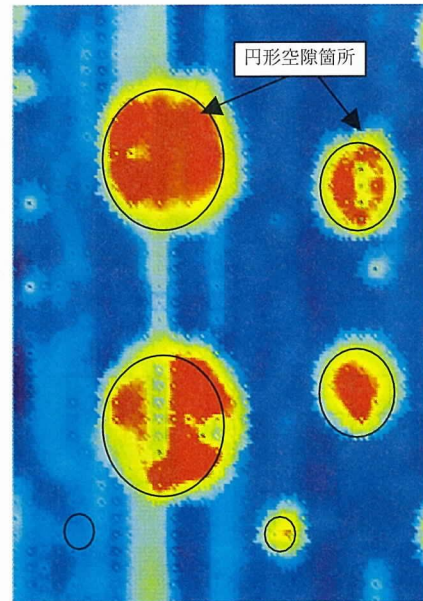


図-6 打音波形の最大振幅値分布<sup>5)</sup>

### 3. サーモグラフィ法による内部空隙評価

サーモグラフィ法は、赤外線センサにより測定対象物の表面温度を測定し、熱画像として表示することで種々の評価を行う手法です。ここで、温度測定についてもう少し詳しく述べておきます。すなわち、すべての物体は、その温度が絶対零度以上であれば、表面から赤外線を放出しています。このとき放射される赤外線の波長や量は、物体の表面温度および放射率と密接な関係があります。したがってこの関係を利用すれば、赤外線センサによって非接触で温度計測ができます。

コンクリート中の内部空隙を検出する原理について図-7に示します。日射等によってコンクリート表面に熱が与えられた場合は、コンクリート中の内部空隙部分が断熱層となるため、健全部と内部空隙との間に温度差が生じます。したがって、熱画像上の特徴的な温度差に着目することによって、内部空隙の検出ができるわけです。

サーモグラフィ法では、構造物に対して非接触で遠方からの計測が可能であるため、調査足場が不要であり、広範囲にわたる迅速な検査が実施できます。また、測定結果が、検査領域と対応した画像として視覚的に得られるため、内部空隙の位置や大きさの程度が即時に判断できる点も特徴

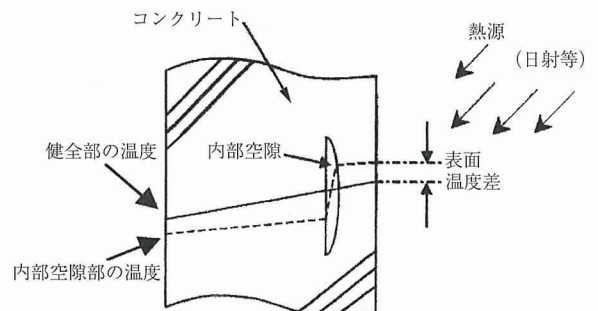


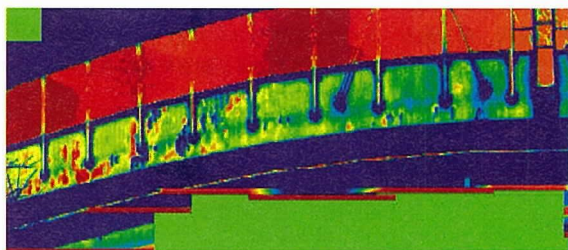
図-7 サーモグラフィ法による内部空隙検出の原理

です。しかしながら、この手法は、あくまでも表面温度に基づく評価方法であるため、構造物表面から深い位置（一般的には、表面から 10 cm 以上の場合）にある空隙を検出するのは困難です。また、構造物周辺の温度や日射などの環境条件、あるいは表面の色や汚れの程度によっても影響を受ける場合があります、内部空隙の評価の際にはこれらの点に注意が必要です。

図 - 8<sup>6)</sup> に、橋梁高欄部の可視画像とサーモグラフィとをあわせて示します。この図によれば、コンクリートに浮きが生じた部分が表面温度の高い（赤色の）部分としてとらえられており、欠陥箇所を視覚的に容易に判断することができます。



可視画像



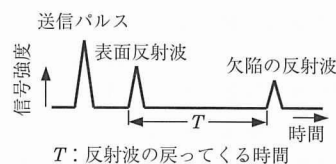
サーモグラフィ

図 - 8 サーモグラフィ法による橋梁高欄部コンクリートの調査事例<sup>6)</sup>

#### 4. 電磁波レーダ法による内部空隙評価

電磁波レーダ法は、アンテナから発信された電磁波（マイクロ波）が、電気的特性の異なる物質の境界面で強く反射する性質を利用してコンクリート中の鉄筋の位置や内部空隙を検出するものです。異なる物質の境界面での電磁波の反射の程度は、物質間の比誘電率 $\epsilon_r$ の差が大きいほど大きくなります。たとえば、物質の比誘電率 $\epsilon_r$ は、空気で1、水で81、コンクリートでは4～12、および鉄筋（導体）では $\infty$ となっており、コンクリートの場合は鉄筋との間の境界面での反射がもっとも大きくなるのがわかります。電磁波レーダ法が、主に鉄筋探査に活用されるのはこの理由によります。

市販の電磁波レーダ探査装置では、図 - 9 のようにコンクリート表面において送信 / 受信アンテナを非接触で走査できるため、比較的広い範囲を効率的に検査することができます。また、検査結果は、サーモグラフィ法と同様に、アンテナの走査を行った範囲の縦断面図として視覚的にとらえることができるなどの利点があります。しかしながら、



T: 反射波の戻ってくる時間

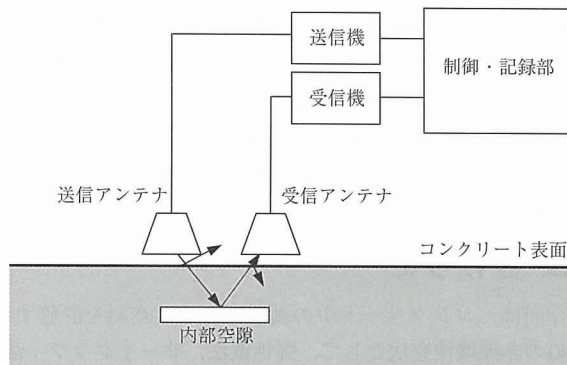
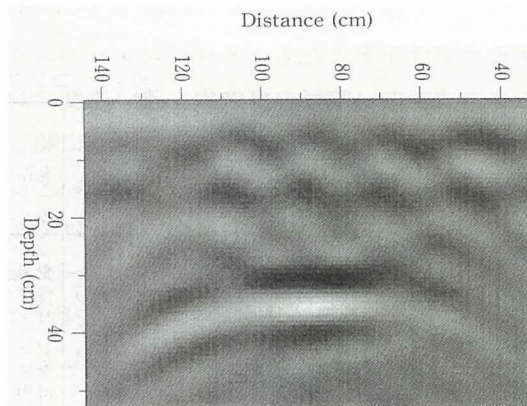


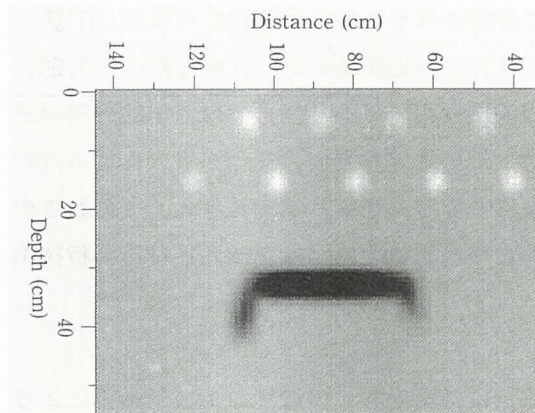
図 - 9 電磁波レーダ法による内部空隙検出の原理

コンクリート表面に多くの水分が存在する場合は、電磁波の水による反射の影響が大きくなり、内部空隙の検出が困難となります。また、内部空隙の検出にあたっては、鉄筋からの電磁波の反射の影響を十分考慮することが重要です。

図 - 10 (a)<sup>7)</sup> に、複数鉄筋下にある矩形の空隙を電磁波



(a) 解析処理前の画像



(b) 解析処理後の画像

図 - 10 電磁波レーダ法による内部空隙の評価結果<sup>7)</sup>

レーダにより測定した結果を示します。図中には、表面から 10 cm 程度および 20cm 程度付近に、鉄筋からの反射によるものと思われる陰影がほぼ等間隔に表れています。また、表面から 30 cm 程度の箇所には、長さ約 40 cm の反射源も認められます。上記の結果に、さらに画像処理を施し、電磁波の反射源の位置関係を明瞭にしたものが図 - 10 (b) 7) です。この図から、コンクリート中の鉄筋位置や空隙の箇所や規模を、かなりの確に把握できることがわかります。この例で示されるように、電磁波レーダ法では、解析方法を工夫することによって内部空隙の厚さを評価できる可能性もあります。

## 5. おわりに

今回は、コンクリート中の剥離あるいは空洞を評価するための非破壊検査法として、弾性波法、サーモグラフィ法、および電磁波レーダ法について解説しました。最後に、これまでに述べてきた内容を表 - 1 に簡単にまとめておきます。本号では、各手法の概要を示すだけでなく、手法相互の特徴の違いや構造物の検査に適用する際の留意点に的を絞って述べたつもりです。今回の情報が、内部空隙を検査する手法の選定にあたって読者諸氏の参考となれば幸いです。ここで紹介した検査技術は、いずれも、計測法の標準化など、今後解決すべき課題も少なくはありません。しかしながら同時に、各種センサの性能向上、データ収集システムのロボット化、各種解析技術の新規開発など、関連技

術の進歩によって飛躍的に発展する可能性も有しています。これからの構造物の調査において、より多くの場面で非破壊検査が有効に活用されることを願って本号の結びとします。

今回は、コンクリートの組織構造や化学成分の診断方法を中心に解説します。ご期待下さい。

## 参考文献

- 1) コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, (社)日本コンクリート工学協会, 2001
- 2) 山口岳思, 鎌田敏郎, 国枝 稔, 六郷恵哲: 超音波法による新旧コンクリート打継ぎ界面における欠陥評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1929-1934, 2004
- 3) Sansalone, M. and Streett, W.B.: Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, NY and Jersey Shore, PA, 1997
- 4) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 児玉一郎: コンクリートの欠陥評価における打撃音波形パラメータの役割, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1583-1588, 2003
- 5) 下村雄介, 鎌田敏郎, 稲田昌俊: 打撃音によるコンクリート表層部の品質評価手法, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, 2005
- 6) 財団法人土木研究センター: 赤外線サーモグラフィによる変状調査マニュアル, 2005
- 7) 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) - 空隙形状の復元および鉄筋位置の同定 -, 生産研究, Vol.48, No.5, p.19, 1996

表 - 1 コンクリート中の内部空隙評価方法

評価方法	具体的手法	適用範囲 (検査可能な最大深さ)	
弾性波法	超音波法	発振子により超音波を入射し、コンクリート中を伝播した超音波の特性からコンクリートの内部を評価	おおむね 20 cm 程度
	衝撃弾性波法 (インパクトエコー法)	コンクリート中の表面を機械的に打撃した後、コンクリート中を伝播してきた弾性波を受振し、受振波の特性からコンクリート内部を評価	数十 cm 程度 (板厚であればこれ以上でも推定可能)
	打音法	コンクリートをたたいて発生する打撃音をマイクروفोन等の音響機器を用いて計測し、コンクリートの内部を評価	おおむね 10 cm 程度
サーモグラフィ法	測定対象物から放出される赤外線量をもとに表面温度を測定し、熱画像として表示することでコンクリートの内部を評価	おおむね 10 cm 程度	
電磁波レーダ法	アンテナから発信された電磁波が電気的特性の異なる物質の境界面で反射され戻ってくるという特性を利用しての内部を評価	数十 cm 程度 (空隙体積がかなり大きければ、これ以上でも可能)	

【2005 年 5 月 27 日受付】