研究速報

超音波法によるコンクリート構造物のひび割れ調査に関する研究（2）

—コンクリート内部の空隙の測定精度—

Inspection of Concrete Crack by Ultrasonic Technique (2)

—Measurement Accuracy in Internal Void Detection in Concrete—

平田隆祥*・魚本健人**

Takayoshi HIRATA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

1999年に発生したトンネルおよび高架橋からのコンクリート片の剥離，落下事故が契機となり，コンクリート構造物に代表される社会基盤施設の維持管理システムの重要性が再認識[1]された．また，社会問題となる事故が発生し一度信頼性を失うと，信用を回復するために多大な努力[2]が必要となる．専門技術的な内容であっても，誰もが理解できる形での説明責任が求められ，かつ，それがいかに困難であるかを痛感せざるを得ない状況となっている．

コンクリート構造物の維持管理に対する社会的要請に対し，土木学会は，2001年にコンクリート標準示方書・維持管理編[3]を作成した．ここでは，大多数のコンクリート構造物の維持管理方法として，日常点検では目視および打音検査を主体とし，必要に応じて非破壊検査などの詳細点検を実施することが述べられている．

コンクリート構造物の代表的な変状であるひび割れは，通常，コンクリート部材に発生していても，構造耐力上問題のない場合が多く，安全と見なされている．しかし，コンクリート片の剥落のように第三者への影響が想定される箇所では，その危険性を判断することが求められ，コンクリート内部の欠陥の状態を詳細に点検することが必要となる．

本研究は，既設コンクリート構造物におけるコンクリート片の剥落等による第三者への危険性を判断するため，超音波法によりコンクリート内部の欠陥の状況を把握することを目的とした．

2. 超音波法に求められる役割

超音波法は，コンクリート部材内部の空隙やひび割れなどの欠陥状態を詳細に点検する方法として適しており，安全かつ簡便であるため使用実績も多い．しかし，これまで超音波法によるコンクリートの非破壊検査では，検査結果として，超音波伝播速度や超音波伝播時間などの数値，および，超音波波形などが示される場合が多く，非破壊検査になじみのない人にとって，理解しにくい内容となっていた．超音波法の検査結果の提示方法には，

①超音波伝播速度，超音波伝播時間などの数値
②超音波波形データ
③FFT処理，ウエーブレット処理データ
④平面図化（Aモード）
⑤断面図化（Bモード）
⑥立体図化（3D）
⑦リアルタイム画像処理（ソナー）

など種々の方法があり，目的に応じた適切な方法を選択する必要がある．

今後，超音波法が，コンクリート構造物の詳細点検の検査手法として適用される状況となれば，詳細点検の結果を第三者に対し，客観的，かつ，解りやすい形で説明できることが，この検査手法が採用される上で重要となると考えられる．

本研究は，超音波法に求められる役割を考慮し，その検査結果の理解が容易になるよう，検査結果を平面的および立体的に図化することを目的とした．そこで，コンクリート部材内部の空隙の形状を，図化する手順，およびその形状の測定精度について検討した．

3. 実験概要

実験は，コンクリート版の内部に人工的な空隙を作製し，超音波法の測定により，内部空隙の深さを測定して，その測定精度について検討を行った．

3.1 供試体

コンクリート内部の空隙の測定精度を明らかにするため，図1に示すようにアルファベット「A」の形状の空隙を，厚さ130 mmのコンクリート版の裏面に作製し，コンクリート版の表面からこの文字の形状を測定した．空隙は，スチレ

*株式会社　大林組
**東京大学国際・産学共同研究センター

表1　コンクリートの配合および基礎物性

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	圧縮強度 28days (N/mm²)	静弾性係数 E1/3 (×10⁴ N/mm²)
			W	C	S	G	Adm.					
20	55	47.5	160	290	868	989	0.73	11.0	4.4	23.0	47.0	3.39

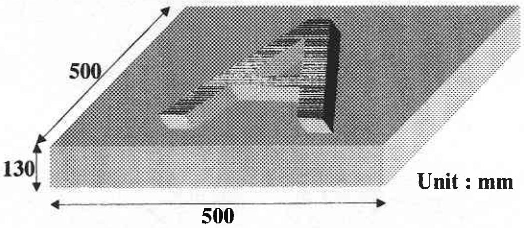


図1　内部空隙測定用供試体

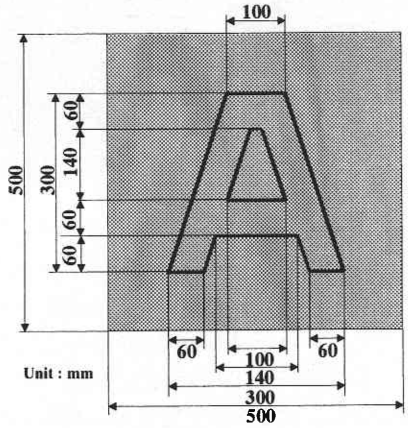


図2　内部空隙「A」の形状・寸法

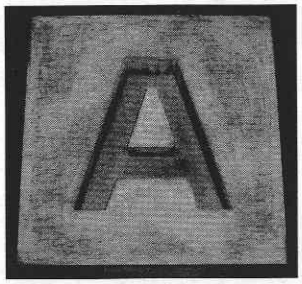


図3　内部空隙供試体の外観（裏面）

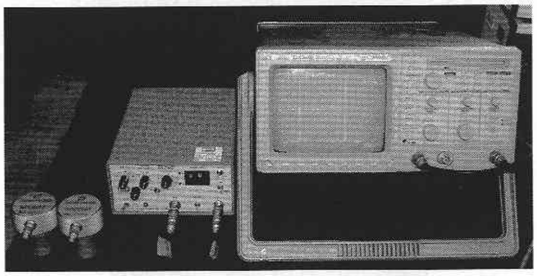


図4　超音波探傷器（Model 5077 PR）

表2　デジタル超音波探傷器の主要性能

パルス電圧（V）	100, 200, 300, 400
パルス幅	10種類
パルス波形	マイナス矩形波
パルス立上り時間（n sec）	10
ローパス・フィルター（MHz）	10
出力インピーダンス（Ω）	50

ン製の軽量断熱材をアルファベット「A」の形状に切り出し，型枠内に設置してコンクリートを打ち込んだ後，所定の材齢にアセトンで溶かして作製した．空隙の厚さは，30 mmと100 mmの2種類とした．この供試体には，最大骨材寸法20 mm,水セメント比55 %，スランプ11.0 cmの普通コンクリートを用いた．測定は材齢28日で行った．供試体の作製に用いたコンクリートの配合を表1に，内部空隙「A」の形状・寸法を図2に，供試体の外観を図3に示す．

3.2　超音波探傷装置

実験では，図4に示すパナメトリクス社製（Model 5077 PR）のパルサーレシーバーとデジタル・オシロスコープを組み合わせて使用した．このパルサーレシーバーは，矩形波を励起し，減衰材料の低周波検査に適している特徴を有する．パルサーレシーバーの主要性能を表2に示す．測定に用いたパルス電圧は-400 Vとした．また，探触子は，直径40 mm，周波数500 kHzの広帯域円形垂直探触子を用いた．

4. 内部空隙の測定方法

内部空隙の測定の前に，透過法でコンクリート供試体の超音波伝播時間を測定した．次に，測定した超音波伝播時間を用いて，2探触子反射法で内部空隙の形状の測定を行った．測定ピッチは，図5，図6に示すようにコンクリート表面にxy座標を定め，10 mm間隔とした．探触子中心間距離は，このセンサの最小距離である60 mmとし，図7に示すように，探触子間距離の補正[4]を行って式（1）からコンクリートの厚さを測定した．その後，測定結果の立体図化を試みた．

超音波伝播時間の測定は，受振波を観察して，図8に示すー反射波到達時間を測定した．また，一連の測定中に受振波の増幅率を変化させると測定時間が変化するため，本実

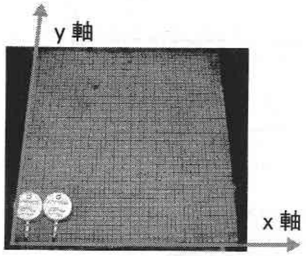


図5　平面座標の設定

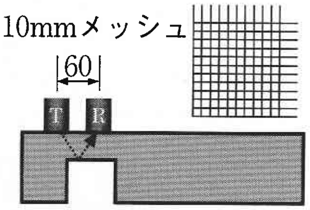
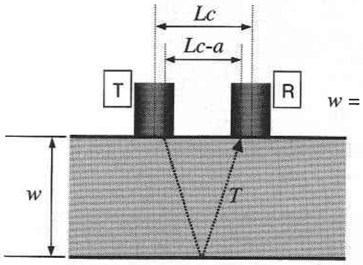


図6　内部空隙の測定方法



$$w=\frac{1}{2}\sqrt{T^2v^2-(Lc-a)^2} \quad (1)$$

w：コンクリート部材厚（mm）
T：超音波伝播時間（μ sec）
Lc：探触子中心間距離（mm）
a：補正距離（mm）
v：超音波伝播速度（mm/μ sec）

図7　コンクリート厚さの算定方法

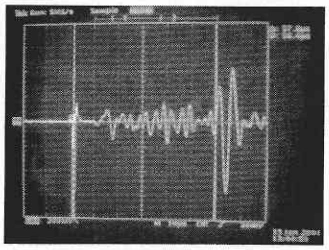


図8　コンクリート版底面の反射波形の例

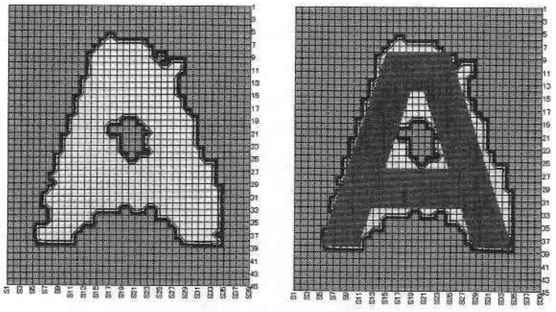


図9　内部空隙の平面図化（Aモード：空隙厚さ30 mm）

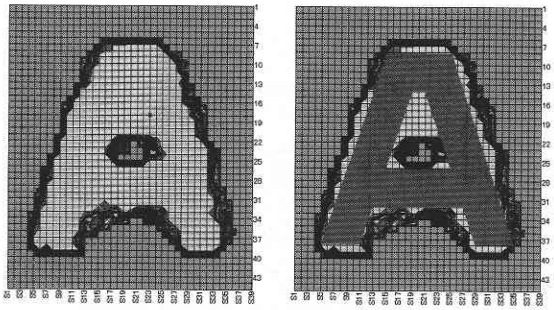


図10　内部空隙の平面図化（Aモード：空隙厚さ100 mm）

験では増幅率を20 dBで一定に固定して測定を行った．探触子の操作は，供試体表面をサンダーで平滑に処理した後，グリセリン系の接触媒質を用い，探触子をコンクリートに密着させて行った．

5. 実験結果および考察

5.1　コンクリート内部の空隙形状の測定精度

コンクリート版内部のアルファベット「A」の空隙形状を測定した結果を，図9，図10に示す．

コンクリート内部の空隙形状を測定するため，最初に1探触子反射法による測定を試みたが，この方法では受振波のノイズに空隙からの反射波が取り込まれ，反射波の識別はできなかった．一般に，鋼材探傷の分野では，内部空隙の測定に1探触子反射法を用いることが多いが，これは，鋼材端部や空隙以外からの反射波がほとんど無いため，この方法による測定が可能と考えられる．一方，コンクリート探傷の場合は，コンクリートマトリックス中に，セメントペーストと音響インピーダンスの異なる骨材が多量に含まれていること，その骨材の周囲に脆弱な遷移体層が形成されること，および予め4.5％程度の気泡が練り込まれていることなどから，欠陥が無い位置でも発振子の近傍で強い乱反射が生じる．これが原因となり，1探触子反射法による測定が困難となると考えられる．従って，コンクリート内部の空隙の測定は，1探触子反射法より2探触子反射法の方が適していると考えられる．

コンクリート版内部のアルファベット「A」の空隙形状を測定した結果，図9に示すように空隙厚さ30 mmの場合，実際の空隙形状より若干大きめに測定し，アルファベット「A」の三角形の部分を小さく測定していた．また，これらの測定は全て，図5に示すように左側に発振子を，右側に受振子を配置して測定を行っている．その結果，発振子が健全部で，受振子が空隙上となるアルファベット「A」の左斜辺の測定では，x軸方向の測定誤差が最大約15 mmとなったのに対し，探触子の設置条件が逆の右斜辺の測定では，測定誤差が最大約25 mmとなり，その測定精度は異なった．一方，y軸方向の測定誤差は最大約20 mmで，探触子の設置方向の影響で測定精度が異なることが明らかとなった．これは，受振子に到達するパルスエネルギーが大きいほど，測定誤差が大きくなる傾向が有ると考えられる．また，表層部に存在する骨材が測定誤差へ及ぼす影響があるのではないかと推察される．

次に，空隙厚さ100 mmの場合の測定誤差は，図10に示すように空隙厚さ30 mmの場合より，さらに，大きくなった．これは，空隙厚さ30 mmの場合より，受振子に到達するパルスエネルギーが大きいことと，空隙の形状の影響が考えられる．また，本実験で使用した探触子の指向角は19.4°で，近距離音場限界距離が41.3 mmであるため，探触子と空隙の位置関係で反射するパルスエネルギーが変化することも誤差要因の一つと考えられる．

5.2 コンクリート内部の空隙の立体図化

コンクリート版内部のアルファベット「A」の空隙を測定し，立体図化した結果を図11，図12に示す．

第三者が理解しやすいように，超音波法によるコンクリート内部の空隙形状の測定結果を，立体図化することができた．測定の結果，空隙厚さ30 mmの厚さの測定誤差は約1.5 mm，空隙厚さ100 mmの測定誤差は約2.5 mmとなった．これらの測定誤差は，実用上問題の無い範囲内と考えられるが，今回の実験は，内部空隙の測定面がコンクリート表面と平行で，最も測定し易い条件であったため，内部空隙が球面のような場合は，さらに測定誤差が大きくなると考えられる．コンクリート内部の空隙形状を正確に測定するためには，探触子の直径を小さくし，かつ指向角を小さくする目的で，測定周波数を大きくすることが望ましい．これらの条件は何れも，超音波パルスエネルギーが小さくなって，減衰が増加する傾向となるため，事前に測定限界を確認する必要があると考えられる．

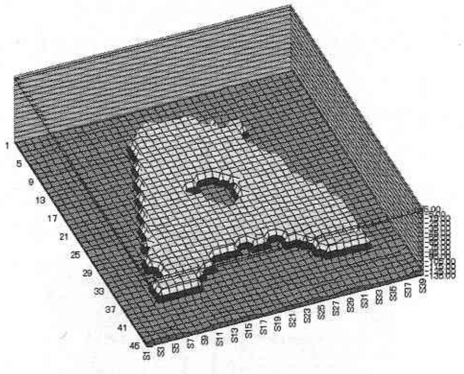


図11　内部空隙の立体図化（3D：空隙厚さ30 mm）

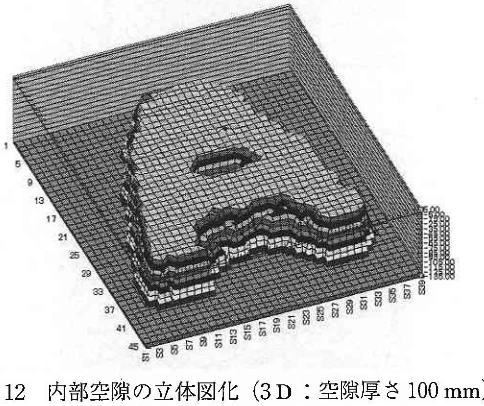


図12　内部空隙の立体図化（3D：空隙厚さ100 mm）

6. まとめ

第三者が理解し易いように，超音波法によるコンクリート内部の空隙形状の測定結果を図化することを目的とし，その測定精度について検討した結果，得られた知見を下記に示す．

(1) コンクリートの内部空隙の測定方法は，健全部の乱反射の影響があるため，1探触子反射法より，2探触子反射法の方が適していると考えられる．

(2) 内部空隙の平面形状の測定精度は，探触子の設置方向により異り，本実験では最大約25 mmとなった．また，受振子に到達するパルスエネルギーが大きいほど，実際の空隙形状より大きく測定する傾向が有ると考えられる．

(3) 第三者が理解し易いように，超音波法によるコンクリート内部の空隙形状の測定結果を立体図化することができた．また，空隙部のコンクリート厚さの測定誤差は最大2.5 mmで，実用上問題の無い範囲内と考えられる．

(4) コンクリート内部の空隙形状を正確に測定するためには，探触子直径を小さくし，かつ測定周波数を大きくすることが望ましいが，超音波パルスエネルギーの減衰が増加する傾向となるため，事前に測定限界を確認する必要があると考えられる．

謝　辞

本研究の一部は，平成12年度科学研究費補助金基盤研究（A）（2）課題番号12305029（代表：魚本健人）によったものであることを付記する．

（2001年2月5日受理）

参 考 文 献

1) 土木学会：社会基盤の維持管理と再生を考える，土木学会誌，Vol. 85, No.2 (2000).
2) 魚本健人：コンクリートの信頼性回復のために，セメント・コンクリート，No. 643, pp. 1–12 (2000).
3) 土木学会：コンクリート標準示方書・維持管理編（2001).
4) 平田隆祥・魚本健人：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定における探触子の影響，第54回セメント技術大会講演要旨，pp. 160–161 (2000).
5) 平田隆祥・魚本健人：超音波法によるコンクリート構造物のひび割れ調査に関する研究（1）-複合手法によるひび割れ深さ測定精度の検討-，生産研究，Vol. 52, No.10, pp. 51–54 (2000).