

論文 超音波法によるコンクリート内部のひび割れ形状の測定

平田 隆祥*1・魚本 健人*2

要旨: コンクリート構造物の維持管理では、コンクリート片の剥落などによる、通行人等への第三者障害が問題となっている。従って、第三者障害が想定される箇所では、コンクリートの点検が特に必要となっている。本研究は、コンクリートの変状の一つであるひび割れについて、そのコンクリート内部での形状を、超音波法により詳細に点検する方法の可能性を検討した。

検討の結果、超音波法によるひび割れの詳細点検は、測定限界はあるものの、コンクリート部材内部のひび割れの状態を立体的に把握することが可能であることが明らかとなった。

キーワード: コンクリート構造物, 非破壊検査, 超音波, 詳細点検, ひび割れ深さ, 3D

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、一度信頼性を失うと、信用を回復するために多大の努力が必要となる²⁾とともに、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、2001年に土木学会は、コンクリート標準示方書・維持管理編³⁾を作成した。この維持管理編では、構造物の管理区分で異なるが、日常点検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、ひび割れの詳細点検が必要となる。

そこで、本研究では、コンクリートの剥落等を想定し、超音波法により、コンクリート部材内部

のひび割れの形状を詳細に点検する方法について検討した。

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。

今後、非破壊検査が、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、何れの非破壊検査手法においても、詳細点検の結果を第三者に対して解りやすい形で説明出来ることが、その検査手法が採用される上で重要になると考えられる。

本研究は、超音波法に求められる役割を考慮し、その検査結果を理解し易くするため、測定結果を平面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、斜めひび割れ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を行った。

*1 (株)大林組技術研究所 土木材料研究室研究員 (正会員)

*2 東京大学国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

3. 実験概要

実験は、最初に、表面から深さ方向にコンクリートの超音波伝播速度が変化している場合の、測定方法の違いが超音波伝播速度の測定結果へ及ぼす影響について検討を行った。次に、コンクリート部材内部の斜めひび割れの図化、および、その形状の測定精度について検討を行った。最後に、この図化手法を、実構造物のひび割れの測定に用い、その適用性について検討を行った。

3.1 音速分布がある場合の超音波伝播速度の測定

超音波を用いて長さの測定を行う場合、超音波が発信されてから受信されるまでの超音波伝播時間に、測定対象材料の超音波伝播速度を乗じることにより、超音波伝播時間を距離に変換して長さを求める。従って、この超音波伝播速度の測定結果が誤っていると、長さの算定結果に影響を及ぼし、測定誤差が生じることとなる。

一方、実構造物のコンクリート内部の超音波伝播速度は、均一でないことが知られている。例えば、ブリーディング量が多い場合の部材上部や、乾燥などの影響により、側壁コンクリートの表層部では、圧縮強度や弾性係数が低下し、超音波伝播速度は小さくなる⁴⁾。

そこで、図-1に示すコンクリート供試体を作製し、周囲を材齢 28 日までアルミ箔で封緘養生し側面の1面のみを室内で乾燥条件として、コン

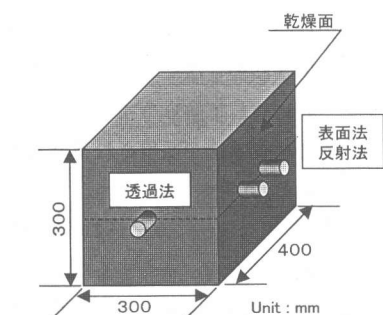


図-1 コンクリート供試体の形状

クリート乾燥面から奥行方向に速度分布を作り、透過法、反射法、および、表面法によりコンクリートの超音波伝播速度を測定して比較した。測定に用いた超音波探傷器を図-2に示す。この超音波探傷器は、受振したパルス波形の加算平均や、非正常信号に時間依存性を持たせて周波数・時間平面上の強度として表せるウエーブレット処理が可能で、コンクリート中の鉄筋の影響を除去できる特徴を有する。測定上、装置の設定は一定条件とした。なお、本研究で供試体の作製に用いたコンクリートの配合および基礎物性を表-1に示す。

3.2 コンクリート内部のひび割れの立体図化

(1) 斜めひび割れ

コンクリート内部の斜めひび割れを立体的に図化しその測定精度を明らかにするため、図-3に示す人工の斜めひび割れ供試体を作製し、そのひび割れの形状を図-2の超音波探傷器を用いて測定した。斜めひび割れは、表-2に示すように角度 α と角度 β を組み合わせて9種類作製し、ひび割れは厚さ1mmのステンレス板を所定の時間で引き抜いて深さ150mm程度のひび割れを作製した。斜めひび割れの測定は、最初に近接迂回波法によりひび割れに沿って10mm間隔で多点測定し、図-3に示す様な各測定点の波形図を得た。

次に、図-4に示すように各測定ポイントにおいて、ひび割れに対して直行方向に探触子を動かし、超音波伝播時間が最短となる位置が、斜めひ

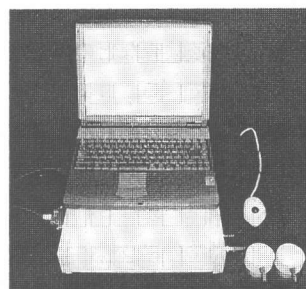


図-2 超音波探傷器 (UCM-2000)

表-1 コンクリートの配合および基礎物性

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 28days (N/mm ²)	静弾性係数 E1/3 (×10 ⁴ N/mm ²)
		W	C	S	G	Adm.					
55	47.5	160	290	868	989	0.73	11.0	4.4	23.0	47.0	3.39

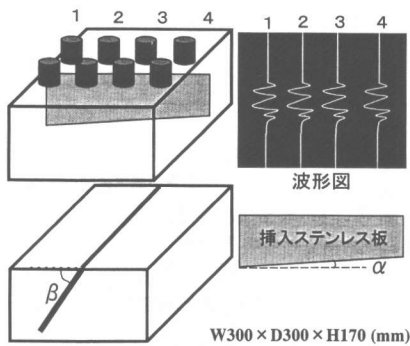


図-3 斜めひび割れ供試体の形状と測定方法

表-2 供試体のパラメータ

角度	水準	備考
α	5°, 15°, 30°	3×3 9体作製
β	30°, 60°, 90°	

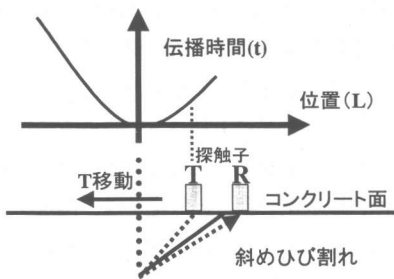


図-4 ひび割れ先端位置の測定方法

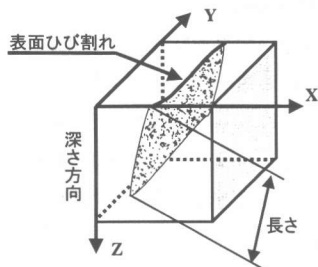


図-5 空間座標の設定方法

ひび割れの先端部の直上にあたりと仮定して測定を行った。最後に、測定結果を用いて、図-5に示すように各測定ポイントの空間座標を算定し、3Dグラフソフトにプロットして、斜めひび割れの立体図化を行った。

(2) 実構造物への適用性

実構造物において、コンクリート部材の内部に

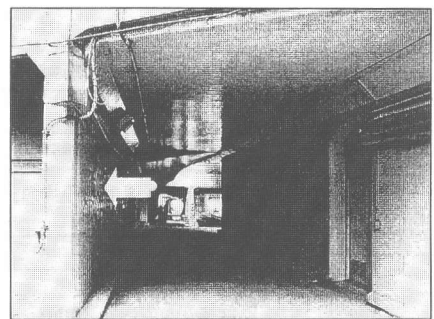


図-6 トンネルの外観

発生しているひび割れの立体図化を試みた。測定対象構造物は、図-6に示すボックスカルバート形式のトンネルである。このコンクリート構造物は、昭和54年に施工されており、内空幅4500mm、内空高さ4500mm、コンクリート部材厚さ450mmで、コンクリート面は塗装が施されている。ひび割れの測定は、このトンネルの入口付近、左側壁部の幅3000mm、高さ2000mmの範囲に存在する2本のひび割れを対象とした。超音波探傷器は図-2の機種を用い、ひび割れに沿って125mm間隔で測定を行い、本手法の実構造物への適用性を検討した。

4. 実験結果および考察

4.1 音速分布がある場合の超音波伝播速度の測定結果

乾燥面から深さ方向に、透過法によって超音波伝播速度の分布を測定した結果、超音波伝播速度は図-7に示すように表層部の約100mmの範囲で低下していた。乾燥面付近の超音波伝播速度は4500m/sec程度で、乾燥面から離れている位置の4600m/sec程度より約2%低下していた。また、乾燥面に対し鉛直方向に測定した透過法超音波伝播速度は4631m/secで、速度分布の平均値4586m/secと近い値となった。

次に、乾燥面に2つの探触子を設置し、探触子間距離を変化させて、対称面からの反射波により超音波伝播速度を測定した。超音波伝播速度の算定は超音波探傷器の影響を考慮し⁵⁾、式(1)により探触子間距離を補正する方法を用い、最小二乗近似で求めた。同様に、表面法による超音波伝播速

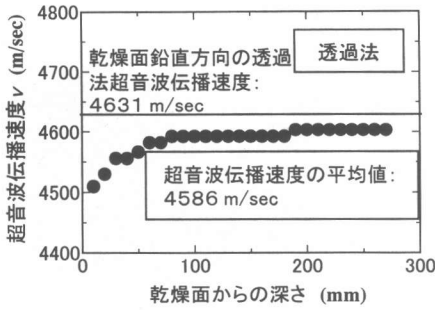


図-7 乾燥の影響による速度分布 (透過法)

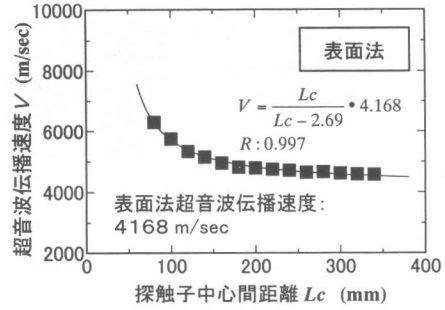


図-9 表面法による超音波伝播速度

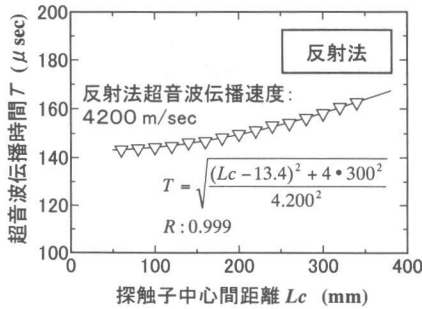


図-8 反射法による超音波伝播速度

度の測定も、式(2)を用いて最小二乗近似で求めた。

$$T = \sqrt{\frac{(Lc - \alpha)^2 + 4 \cdot w^2}{v^2}} \quad (1)$$

$$V = \frac{Lc}{Lc - \alpha} \cdot v \quad (2)$$

T : 超音波伝播時間 (μ sec)

Lc : 探触子中心間距離 (mm)

α : 補正距離 (mm)

w : コンクリート部材厚 (mm)

v : 実際の超音波伝播速度 (mm/ μ sec)

V : 探触子中心間距離で算定した超音波伝播速度 (mm/ μ sec)

測定の結果、超音波伝播速度は、図-8、図-9に示すように、反射法では4200m/secとなり、表面法では4168m/secとなりほぼ等しい値となった。また、これらの値は、透過法による乾燥面付近の超音波伝播速度よりも7%程度遅くなっていた。探触子間の補正距離は、反射法の場合が13.4mm、表面法の場合が2.7mmで、探触子設

置方法が全く同じでも、異なる値となった。以上の結果より、このコンクリート供試体の超音波伝播速度は、乾燥の影響と考えられる100mmの範囲を除けば、4600m/sec程度と考えられる。仮に、乾燥面にひび割れが生じており、ひび割れ深さを測定する場合は、表面法による超音波伝播速度を用いるとひび割れ深さを危険側に浅く判定するおそれがあることを考慮する必要がある。さらに、コアサンプリングによりコンクリートの超音波伝播速度を直接確認する場合は、透過法で測定を行うため、ひび割れ深さの算定では、測定データの精度を比較検討できる透過法による超音波伝播速度を用いるのが好ましいと考えられる。

4.2 コンクリート内部のひび割れの立体図化

(1) 斜めひび割れ

深さ方向のひび割れ形状を、平面的に表したBモードの表示例を図-10に、斜めひび割れの立体図化の例を図-11に示す。また、ひび割れ先端位置の測定誤差と、角度 β の誤差との関係を図-12に、角度 α 、角度 β と深さ方向のひび割れ長さの誤差を図-13に示す。

コンクリート部材内部のひび割れの平面形状は、10mm間隔で得られた受振波形の振幅値を輝度処理することにより、図-10の黒く塗りつぶされた形状で確認できる。この測定結果と、ひび割れ先端直上位置の測定結果とを併せて、各測定ポイントの空間座標を計算し、図-11に示すように斜めひび割れを立体的に図化することができた。この斜めひび割れの立体図形が、実際の立体形状とどの程度異なっているか、測定精度の検証を行った

結果、ひび割れの傾き角度 β は、
 図-12 に示すようにひび割れ先端
 位置の測定値が、ひび割れからの
 距離が大きくなるプラス側に 10%
 シフトすると、角度 β は、マイナ
 ス方向約 3 度ずれることが明らか
 になった。次に、斜めひび割れの
 角度 α 、角度 β と深さ方向のひび
 割れ長さの関係は、角度 α が大き
 く、かつ、角度 β が小さいほど、
 ひび割れの長さを短く計測し、測
 定誤差が大きくなった。今回の実
 験の組合せでは、角度 α が 30° で、
 かつ、角度 β が 30° の場合、深さ
 方向のひび割れ長さは、約 25% 短
 く計測された。従って、コンクリ
 ート部材内部の斜めひび割れを立
 体的に図化する場合、測定した
 ひび割れの角度に対する補正が必
 要で、理論的な補正方法を確立す
 ることが今後の課題である。

(2)実構造物への適用性

トンネル左側壁部の、測定エリア内のひび割れの発生状況を図-14 に示す。この図には、電磁波レーダを用いてコンクリート表層部の配筋状況を探査した結果も併せて示している。また、トンネル左側壁部のひび割れを、立体的に図化した結果を図-15 に示す。ひび割れ深さの測定には、透過法超音波伝播速度を用いた。

測定の結果、コンクリート表面に塗装が施された状態でもひび割れ深さを測定することができたが、ひび割れ幅は測定できなかった。また、斜めひび割れとなっているか確認した結果、超音波伝播時間に明確な傾向が現れなかったため、角度 β は、 90° に近いと判断した。ひび割れ C 1 の深さは、コンクリートの側壁厚さ 450mm の約 1/2 であったのに対し、ひび割れ C 2 の場合は、上部が約 200mm で、下部になるほどその深さは浅くなり約 100mm となっていた。このように、コンクリート部材内部のひび割れを立体的に図化するこ

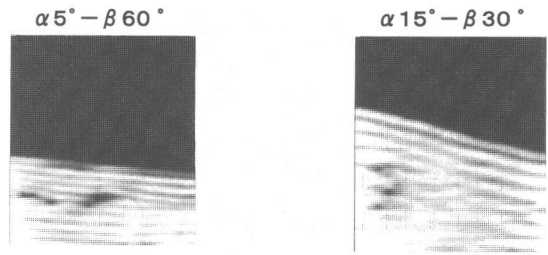


図-10 ひび割れの平面形状(黒色部)の表示例

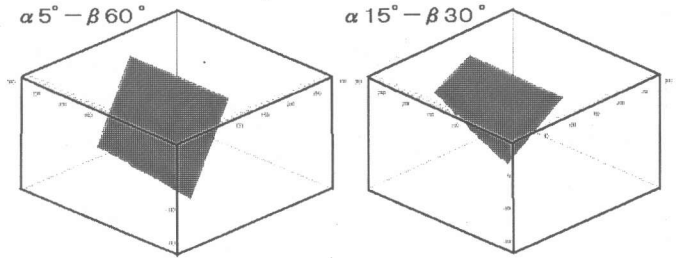
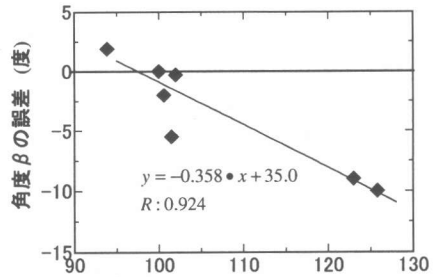


図-11 斜めひび割れの立体図化の例 (ひび割れ両端部は測定不可)



ひび割れ先端位置の測定精度 (%)
 図-12 先端位置の測定精度と角度 β の誤差

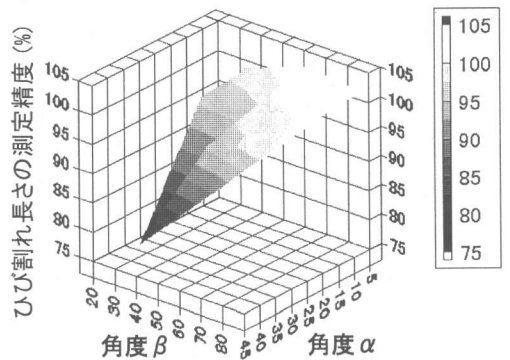
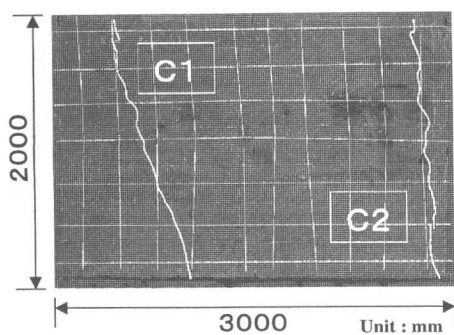
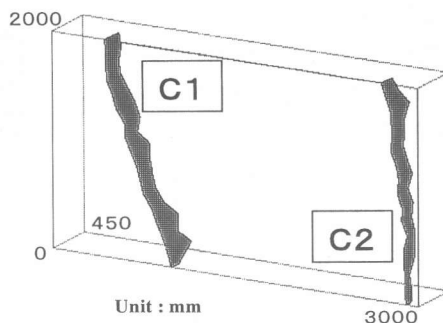


図-13 角度 α 、 β と斜めひび割れ長さの測定精度



図一14 側壁部のひび割れ状況（メッシュは配筋）



図一15 側壁部のひび割れ立体図化

とにより、ひび割れの現状把握が容易になり、コンクリート構造物の内部診断を行う一手法として有効であることが確認できた。

6. まとめ

コンクリート部材の斜めひび割れの形状を、立体的に図化することを試み、その形状の測定精度について検討を行った。本実験の結果、得られた知見を下記に示す。

①測定方法の違いにより、得られる超音波伝播速度は異なるため、長さ計測を行う場合は、その影響を考慮し、厳しい判断となる透過法の超音波伝播速度を用いるのが好ましいと考えられる。

②乾燥等の影響によりコンクリート部材内部に超音波伝播速度分布が生じている場合の速度差は、測定方法が異なっても最大で 10%程度であることが明らかとなった。

③コンクリート部材内部の斜めひび割れを、立体的に図化することが可能であることが明らかとなった。しかし、この方法では、ひび割れ面が曲面となっている場合は正確な測定が出来ないため、今後の検討が必要と考えられる。

④斜めひび割れの測定精度は、ひび割れ先端位置の測定値がプラス側に大きくなる程、角度 β は小さく測定される。また、角度 α が大きくなり、かつ、角度 β が小さいほど、深さ方向のひび割れ長さを小さく測定するため、立体図化ではひび割れ角度の影響を考慮し、補正が必要になると考えられる。

⑤実構造物のコンクリート部材内部のひび割れ形状を立体的に把握することにより、ひび割れ深

さが部材厚のどの程度まで達しているか、また鉄筋まで到達しているかなど、視覚的に容易に判断することが可能となると考えられる。

謝辞

実構造物の測定は、東京大学生産技術研究奨励会「コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会」の成果の一部を使用させていただきました。また、本研究をまとめるにあたり、千葉工業大学卒論生 北川真也君にご助力いただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。

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：コンクリート構造物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，十河茂幸，竹田宣典：型わく用透水性シートによるコンクリートの品質改善の影響範囲，土木学会第 44 回年次学術講演会概要集 V，pp.660-661，1989
- 5) 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