

論文 超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定精度の向上

平田 隆祥*1・魚本 健人*2

要旨：既存鉄筋コンクリート構造物の維持管理を行うため、構造物の健全性や耐久性を評価することが求められている。本研究は、構造物の主な劣化指標の一つであるひび割れの調査において、ひび割れ深さ測定信頼性向上を目的とし、超音波法による測定方法の検討を行った。

検討の結果、深さの測定結果に影響を与え、大きな誤差要因となるコンクリート表層部の鉄筋を、受信波形データで識別しながら、ひび割れ深さを伝播時間で計測する測定方法を提案し、その測定精度を明らかにした。

キーワード：非破壊検査, 超音波, 伝播時間, ひび割れ深さ, 鉄筋コンクリート, 波形

1. はじめに

1970年代に建設されたコンクリート構造物の劣化問題が顕在化したことや、1995年に発生した兵庫県南部地震における教訓から、既存コンクリート構造物の健全性評価が求められている¹⁾。これらの社会的要請により、既存構造物を維持管理する手法として、コンクリート構造物を破壊せずに調査、診断する非破壊検査の重要性が広く認識されてきている²⁾。

既存コンクリート構造物の健全性や耐久性の詳細な診断を行う場合、コンクリートの主な劣化指標の一つであるひび割れの調査では、その表面分布とともに内部分布の検査が必要となるため、本研究は超音波法によるひび割れ深さの測定方法について検討を行った。超音波法は、ひび割れの深さを測定する方法として、安全かつ簡便であるため使用実績も多い。しかし、測定結果が実際と大きく異なる場合があり、超音波法によるひび割れ調査の信頼性は高いとは言えない。これらの誤差が生じる理由は、超音波非破壊検査機器のみに起因するのではなく、コンクリート構造物中の鉄筋の存在や、ひび割れの複雑さに起因するところも大きいと考えられる。

そこで、本研究では、超音波法によるひび割れ深さ調査の信頼性の向上を目的とし、コンクリー

ト構造物の表層部に配置されている鉄筋の影響を考慮した測定方法を提案し、その方法による基礎的な実験を行った。

2. 主な超音波測定方法と測定誤差の要因

超音波によるコンクリートのひび割れ深さの測定では、一般に、送受信の2つの探触子をひび割れを挟んで設置し、ひび割れ先端を回折または散乱した超音波パルスの伝播時間からひび割れ深さを求める伝播時間法が用いられている。この方法の代表例に、Tc-To法や図-1に示す修正BS法などがある。また、図-2に示すように、コンクリートのひび割れ深さを簡便に測定する方法として、コンクリートのポアソン効果により、超音波の進行方向に対し直角方向に進む超音波を計測する直角回折波法がある^{3),4)}。

これらの測定方法は、良好な条件下では実用的な測定精度が確保されるものの、下記に示す要因などにより大きな誤差を生じる場合がある⁵⁾。

1)伝播時間法では、ひび割れがコンクリート内部で接触している場合やひび割れを鉄筋が貫通している場合などは、ひび割れ先端からの回折波や散乱波ではなく、これらを経由した超音波パルスを受信し、ひび割れ深さを過小評価する可能性がある。また、探触子間の距離を、探触子

*1 (株)大林組技術研究所 土木第三研究室研究員 (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)

の中心とした場合と、探触子前面である最短距離とした場合とでは、超音波伝播速度の算定結果が異なるため、ひび割れ深さの算定結果に影響を与える。

2) 直角回折法では、超音波の回折角が直角となることを確認することが重要となる⁵⁾。また、回折波の振幅値がマイナスからプラスへ反転する位置で計測を行っているが、探触子の感度によっては、反転位置が変化する場合がある。

これらの誤差要因以外にも、コンクリートのひび割れ自体が非常に複雑であり、ごく近傍に2つ以上のひび割れがある場合や、ひび割れが途中で無くなり別のひび割れが発生している場合などがある。また、測定可能な最小ひび割れ幅が明らかとなっていないため、実構造物におけるコンクリートのひび割れ深さの計測を一層難しくしている。本研究では、上記の誤差要因のうち、コンクリート表層部の鉄筋がひび割れを貫通している場合について、その測定方法の検討を行った。

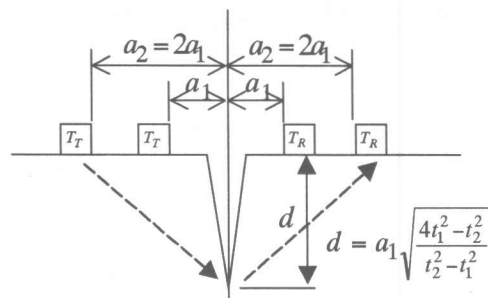


図-1 修正BS法

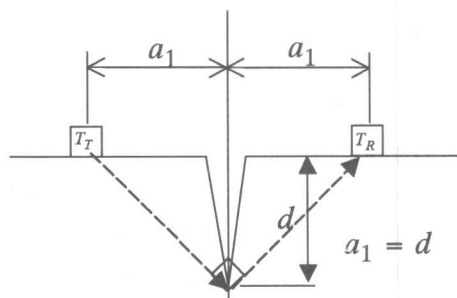


図-2 直角回折法

3. 表層部鉄筋の影響を考慮した測定方法の提案

鉄筋コンクリート構造物では、深さ約80mm以内のコンクリート表層部に、鉄筋が配置されることが多い。従って、超音波法により鉄筋が貫通したひび割れの深さを測定する場合、ひび割れの深さが鉄筋位置より深く、かつ、鉄筋が測定位置の近くにある場合は、図-3に示すように超音波パルスがひび割れ先端ではなく、鉄筋部分を伝播あるいは回折して伝播時間が短くなり、ひび割れ深さを過小評価する。この現象は、ひび割れ深さを大幅に誤る場合があり、超音波法によるひび割れ深さ調査の信頼性を損ねる最も大きな要因の一つとなっている。そこで、受信した超音波エコーが、鉄筋を経由したものであるかを、測定中に識別しながら、鉄筋の影響を考慮してひび割れ深さを計測する方法を提案する。

測定の手順は下記のとおりである。

【操作1】ひび割れ深さの測定位置において、ひび割れに近い位置に送受信の2つの探触子を挟んで設置する。

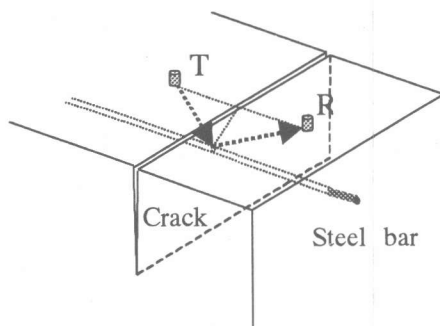


図-3 鉄筋を経由した超音波の伝播経路

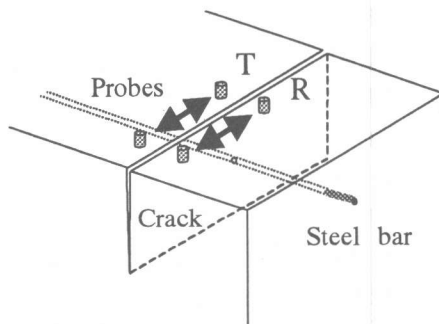


図-4 表層部鉄筋位置の測定

【操作2】鉄筋の配置方向をある程度想定しながら、図-4に示すように2つの探触子間隔を一定にしてひび割れに沿って動かし、超音波の伝播時間が短く、かつ、超音波のエコー高さの最も大きい位置を探す。

これらの操作により、2つの探触子は、ほぼ表層部鉄筋の直上に位置し、鉄筋がひび割れを貫通している場所を特定できる。また、一探触子によるパルス反射法や、鉄筋レーダーなどの他の非破壊検査により、表層部鉄筋の位置が明らかな場合はこれらの操作は必要ない。

【操作3】表層部鉄筋の位置が判明した場所から、図-5の①に示すように、直角回折法を用い、2つの探触子の間隔をひび割れに近い位置から徐々に広げて行き、受信波の立ち上がり十分に反転する距離を探す。この直角回折法は、縦波超音波の回折深さを把握する上で、非常に簡便である。

【操作4】受信波の立ち上がり十分に反転した位置において、図-5の②に示すように、探触子の間隔を一定に保ったまま、両探触子を結んだ線とひび割れとの交点を中心に約45度回転させる。

このとき受信波が鉄筋を伝搬あるいは回折している場合は、回転角度の増加に伴い、伝播距離が長くなり、受信波の立ち上がり時間は遅くなるとともに、回折に伴う立ち上がりのエコー高さは小さくなる。一方、ひび割れ先端を回折している場合は、回転を伴っても超音波の伝播距離が変化しないため、受信波の立ち上がり時間の遅延はなく、立ち上がりエコー高さの極端な減少は見られない。

この操作により鉄筋の識別を行う。

【操作5】鉄筋からの受信波を確認した後、両探触子の間隔を約45度の回転角を保ったまま広げ、直角回折波の影響で受信波の立ち上がりがプラスからマイナスへ反転する位置よりもさらに広い位置で、ひび割れ先端を回折した受信波を測定する。これらの一連の操作により、鉄筋の影響を最小限とし、ひび割れ先端を回折した超音波を計測することができる。計測時の両探触子の回転角度は、受信波形で鉄筋の影響が無いことを確認した場合は、45度以下にすることも可能となる。

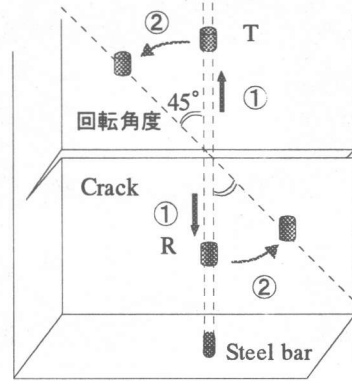


図-5 探触子の回転操作

【操作6】仮に測定の過程で、受信波の第一波が鉄筋の影響を受けているか判らなくなった場合は、両探触子の距離を一定に保ったまま、前述の回転角度を減少する方向に戻す。これにより、鉄筋の影響がある場合は、受信波の第一波の伝播時間が小さくなると共に、立ち上がりエコー高さが大きくなるため確認できる。

4. 実験概要

実験は最初に、探触子の回転操作で、受信波形からコンクリート表層部の鉄筋の影響を識別できるか検討した。次に、測定に使用した探触子の性能を確認するため、探触子の応答速度と受信エネルギーの関係について検討を行った。最後に、上記2つの検討結果を用い、ひび割れを鉄筋が貫通している場合の、ひび割れ深さの測定精度について検討を行った。

4.1 超音波探傷器および探触子

超音波を利用した非破壊検査は、超音波信号の持つ周波数成分や位相情報の利用による方法に移行しつつある。また、検査結果を、第三者に対して客観的に示すことが求められている。そこで、実験には、写真-1に示す探傷条件や結果を電子的に記録できるデジタル超音波探傷器を用いた。表-1にデジタル超音波探傷器の主要性能を示す。

探触子は、チタン酸バリウムを振動子材料とし、振動子直径40mmで周波数100kHzの狭帯域の円形垂直探触子を用いた。

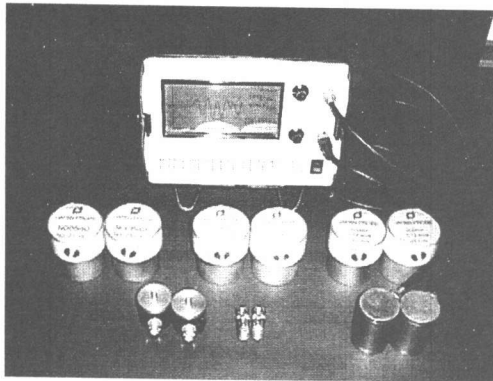


写真-1 デジタル超音波探傷器 (TR-300)

表-1 デジタル超音波探傷器の主要性能

パルス電圧 (V)	-350, -700
パルス幅 (μsec)	5, 10, 20, 50, 100, 200, 2000
パルス波形	矩形波
サンプリング長さ (μsec)	1600
サンプリング時間 (μsec)	0.1
インターフェイス	RS-232C

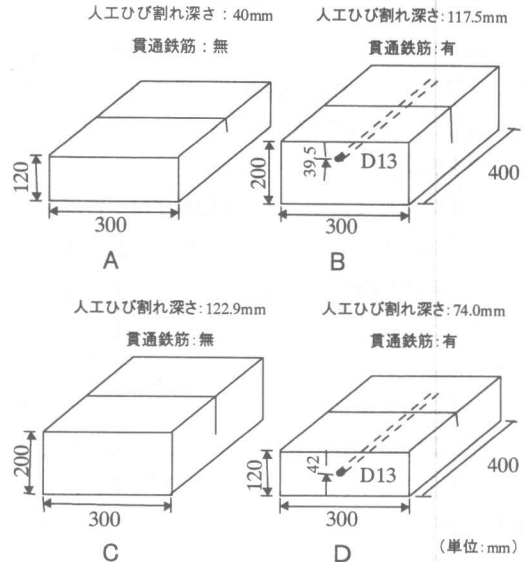


図-6 コンクリート供試体の種類

表-2 コンクリートの配合および物性

供試体	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					圧縮強度 28days (N/mm^2)	静弾性係数 E1/3 ($\times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$)	動弾性係数 ($\times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$)	ポアソン比
			W	C	S	G	Adm.				
A,B,C,D	55	47	163	296	853	1003	0.74	42.7	2.95	4.09	0.18

4.2 供試体および測定方法

実験に使用したコンクリート供試体は、図-6に示す4種類とした。供試体Bおよび供試体Dは、D13の鉄筋がひび割れを貫通している。また、各供試体のひび割れは、スリットによる幅約1mmの人工ひび割れとした。各供試体に用いたコンクリートの配合および物性を表-2に示す。

測定は、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て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 コンクリート表層部鉄筋の識別

3章で述べた探触子の回転操作により、測定した受信波の第一波が、コンクリート表層部の鉄筋を経由した波であるか、あるいはひび割れ先端を回折した波であるかの識別を行った。一例として、

供試体Aおよび供試体Bを測定した結果を図-7に示す。供試体Aのひび割れ深さと、供試体Bの鉄筋のかぶり深さは、ほぼ同じとなっている。

測定の結果、探触子の回転角度の増加に伴い、ひび割れ先端を回折した供試体Aの場合は、受信波のエコー高さに若干のばらつきがあるものの、受信波の立上り時間に遅れは見られなかった。一方、鉄筋を回折した供試体Bの場合は、探触子の回転角度の増加に伴い、受信波の立ち上がりが遅れ、エコー高さは減少した。

従って、超音波が表層部の鉄筋を経由している場合は、探触子の回転操作により、伝播距離が長くなると共に、エネルギーが減少するため、表層部の鉄筋の識別は可能と考えられる。

5.2 探触子の応答速度と受信エネルギー

測定で使用する探触子の受信エネルギーに起因した測定誤差の検討を行った。実験は、図-8に

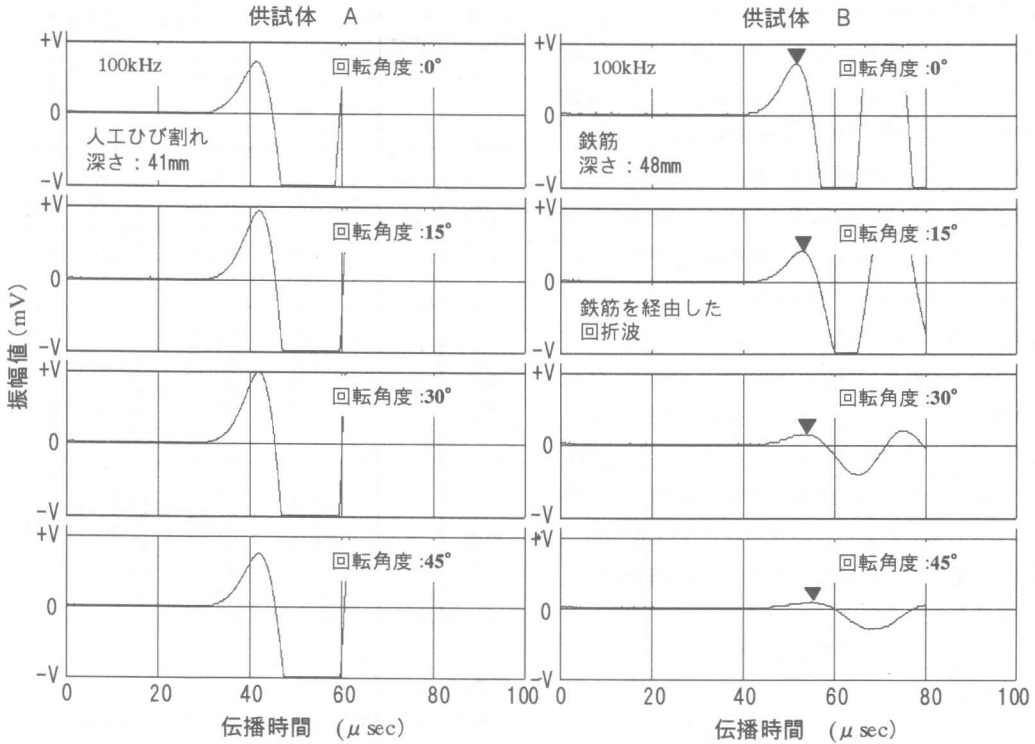


図-7 受信波形によるコンクリート表層部鉄筋の識別

示すように発信探触子および受信探触子を、接触媒質を介して対称に設置し、接触媒質の接触幅を変化させることにより受信波の振幅値を変化させ、振幅値が小さくなった場合の、受信波の立上り時間の遅れを測定した。接触媒質には粘土を用い、接触媒質の厚さの補正は、粘土の超音波伝播速度を用いて行った。受信波の遅延時間と振幅値の関係を図-9に示す。

実験の結果、受信波の立上り時間は、振幅値の減少に伴って遅延した。これは、受信波の第一波の振幅値が小さくなると、超音波探傷器の電圧値測定の分解性能上、見掛けの受信時間が遅れるためと考えられる。従って、測定距離が大きくなると、見掛け上、超音波の受信時間が遅れるため、伝播速度の計算を誤り、ひび割れ深さの測定誤差の要因となっていると考えられる。

5.3 表層部鉄筋の影響を考慮したひび割れ深さの測定精度

コンクリート表層部の鉄筋の影響、および探触

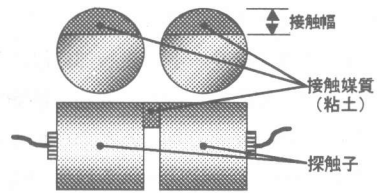


図-8 探触子と接触媒質の設置方法

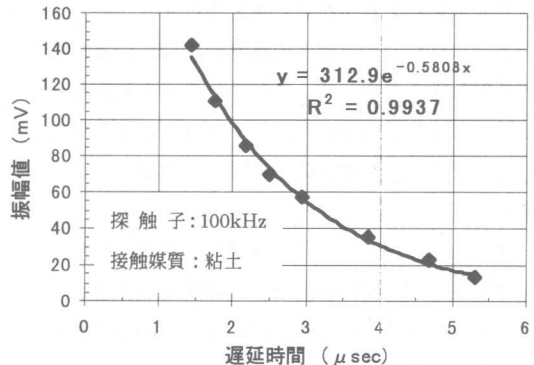


図-9 受信波の遅延時間と振幅値の関係

子の影響を考慮して、供試体B、供試体C、および供試体Dのひび割れ深さの測定を行った。測定は、先ず表面法により、振幅値の補正を行った数点の結果から、超音波伝播速度を算定した。次に、ひび割れを回折した超音波伝播時間を計測して、探触子間距離と超音波伝播速度から三平方の定理でひび割れ深さを算定した。各供試体のひび割れ深さの測定結果と測定精度を表-3に示す。

各供試体のひび割れ深さを測定した結果、コンクリート表層部の鉄筋の有無が測定精度に与える影響は、無筋の場合の測定誤差が5%以内なのに対して、有筋の場合はひび割れ深さによって異なり、5%~15%程度となった。これは、ひび割れ深さの違いにより、ひび割れが浅い場合は、受信波の第一波への鉄筋の影響や測定周波数の影響があると考えられる。

6. まとめ

コンクリート表層部の鉄筋の影響を、受信波形データで識別しながらひび割れ深さを計測する方法を提案し、その測定精度について検討を行った。得られた知見を下記に示す。

①提案したコンクリートの表層部鉄筋の識別方法により、受信波の第一波が、鉄筋の影響を受けているかどうかを確認できると考えられる。

②ひび割れ深さの測定に用いる探触子は、振幅値が小さいと、見掛け上、受信波の立上り時間が遅延する。従って、受信波の立上り時間は、振幅値で補正する必要があると考えられる。

③コンクリート表層部の鉄筋の影響、および探触子の影響を考慮して、ひび割れ深さを測定した結果、有筋の場合は測定誤差が5%~15%程度となり、ひび割れ深さの浅い場合の誤差が大きくなった。

今後、さらに、各種条件下における本ひび割れ深さ測定方法の検討を行い、その適用限界を明らかにすると共に、完成度の高い測定方法を構築する必要があると考えられる。

表-3 ひび割れ深さの測定結果と測定精度

供試体 No.	ひび割れ深さ (mm)	探触子 前面距離 (mm)	補正伝 播時間 (μ sec)	深さ測 定結果 (mm)	測定 精度 (%)
B 鉄筋 有り	117.5	220	78.63	123.50	105
		240	81.35	121.96	103
		260	84.78	122.04	103
		280	88.38	122.28	104
		300	91.56	120.79	103
C 鉄筋 無し	122.9	220	76.79	119.62	97
		240	80.08	119.68	97
		260	83.28	119.01	97
		280	88.26	123.67	101
		300	90.78	120.03	98
D 鉄筋 有り	74.0	220	60.00	73.20	99
		240	65.64	80.58	109
		260	69.71	81.63	110
		280	74.36	84.93	115
		300	78.42	85.59	116

謝辞

本研究をまとめるにあたり、芝浦工業大学卒論生宮本一成君にご助力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 毛見虎雄：コンクリートに対する非破壊試験の現状と今後、非破壊検査, Vol.47, No.9, pp.617-619, 1998
- 2) 魚本健人：コンクリートの劣化と試験・分析方法、非破壊検査, Vol.47, No.9, pp.620-623, 1998
- 3) T.Yamaguchi, S.Hirono and T.Murobuchi: Measurement of Crack Depth in RC Structures by Diffracted Waved Method, Proceeding of International Conference NDT in Liverpool, pp.519-529, 1993
- 4) 山口哲夫, 丸茂文夫, 山口達夫, 岡村憲一：超音波の直角回折波による鉄筋コンクリートのひび割れ深さの測定、非破壊検査, Vol.45, No.10, pp.743-748, 1996
- 5) コンクリートの非破壊試験法・研究委員会報告、日本コンクリート工学協会, pp.83-84, 1992.3
- 6) 魚本健人, 加藤 潔, 広野 進：コンクリート構造物の非破壊検査、森北出版, 1990.5