

論文 超音波法による鉄筋コンクリート部材の欠陥調査法

内田昌勝*1, 大津政康*2, 岡本享久*3, 森大介*1

要旨: 鉄筋コンクリート構造物の表面ひび割れ深さなどの情報を超音波法で評価する場合、鉄筋の存在やひび割れの発生状態などによって測定誤差が発生する。本研究では、これらの影響範囲をできる限り定量的に掴み、精度向上を図る目的で実施した。その結果、ひび割れ付近に鉄筋が存在する時はP波が鉄筋表面で反射するためひび割れ深さを過小評価すること、曲げひび割れは開口角度(≡ひび割れの幅/深さ)が一定値以上であればひび割れ界面の影響を受け難いことがわかった。これらの成果は、超音波法によって診断する際の判断材料として有用な資料となる。

キーワード: 超音波, ひび割れ深さ, 鉄筋コンクリート, 伝播速度, 振幅値

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に発生した表面ひび割れの深さを探査する方法として、計測方法の簡易さや測定精度が比較的良好なことなどから超音波法が広く適用されている¹⁾²⁾。

超音波法では表面ひび割れの深さを評価する場合、縦(P)波がひび割れ界面で回折する性質を利用している。すなわち、入射角 θ でひび割れ先端に達したP波は、同じ角度で回折して受振されるため(図-1)、健全部とひび割れを伝播したP波の伝播時間差を評価することで、ひび割れを評価でき、多く利用されてきた式(1)。

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{\left(\frac{T_c}{T_0}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

d : ひび割れ深さ, L : 探触子間隔,

T_c : ひび割れ部を伝播したP波の伝播時間,

T_0 : 健全部を伝播したP波の伝播時間

しかし、超音波法の欠点として、探触子の種類や間隔などの影響でP波の振幅値が小さくなった場合、実際の計測では環境ノイズなどに埋もれてP波の検知が難しくなること、鉄筋やひび割れ幅の影響を受けてひび割れの深さを正確に評価できない場合があることなどが指摘され

ている³⁾(図-2)。

本研究では、まずP波の伝播時間差による評価方法において、探触子の種類や計測条件、鉄筋の存在およびひび割れ幅などの条件が探査精度に及ぼす影響を実験的に把握した。

続いて、超音波の最大振幅値が伝播距離の増加によって減少すること⁴⁾およびひび割れ付近に鉄筋が存在した場合でも、超音波は断面積が大きいコンクリート部分を主に伝播すると考えられるので、最大振幅値(A_{pc})の変化を利用して、鉄筋の影響を除外してひび割れ深さを評価する方法について検討した。

更に、P波の伝播時間差と超音波の最大振幅値の変化を組合せて表面ひび割れ深さの評価方法の提案を試みるものである。

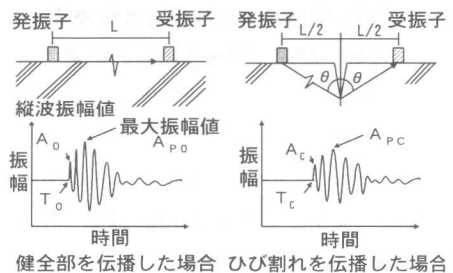


図-1 コンクリート中を伝播する超音波

*1 太平洋セメント(株)研究本部清澄研究所 正会員

*2 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博 正会員

*3 太平洋セメント(株)研究本部清澄研究所 工博 正会員

2. 実験概要

2.1 モデル試験体

試験体には、打設時に厚さ 0.3mm の鉄板を配置しコンクリートの硬化後に引抜くことで導入した人工ひび割れを含むタイプ(図-3)と、実際の载荷により曲げひび割れを発生させるタイプ(図-4)を用意した。人工ひび割れの試験体は、無筋コンクリートと鉄筋コンクリートの2種類とし、寸法は幅 500×長 1400×高 200mm、試験体中央部に深さが 50, 75, 100mm のひび割れを導入した試験体をそれぞれ製作した。

曲げひび割れの試験体は、図-4 に示すように中央部にひび割れを誘発させるノッチを導入し、ひび割れ深さを変えるため版厚が 150mm と 200mm の異なる2種類を用意した。

全ての試験体には、呼び強度 30、スランプ 15cm、最大骨材寸法 20mm のレディーミクストコンクリートを用いた。

2.2 超音波の計測方法

超音波測定は二探触子法により行い、立上り時間約 20nsec., 最大電圧約 300V のスパイク波を発生可能なバルサードライバーにより発生させた超音波を R1.5 型(15kHz 共振, 受感面積 4.9cm²), R3 型(30kHz 共振, 受感面積 4.9cm²), R6 型(60kHz 共振, 受感面積 1.9cm²)の3種類の探触子を用いて検出し、40dB 増幅して波形計測システム(図-5)により収録した。

3. 伝播時間差によるひび割れ探査精度

3.1 探触子間隔, 探触子種類の影響

人工ひび割れを導入した無筋コンクリート試験体を用いて、図-6 に示す3本の計測ラインで、探触子間隔(L)を 50, 100, 150, 200, 300mm の5段階に変化させ実験をした。探触子は R1.5 型, R3 型, R6 型の3種類の全て用いた。

まず、健全部において P 波の伝播距離に対する振幅値(A₀)の変化を調べた。その結果、図-7 に示すように探触子間の距離に対しては、指数的に減少していくことがわかった。また、使用

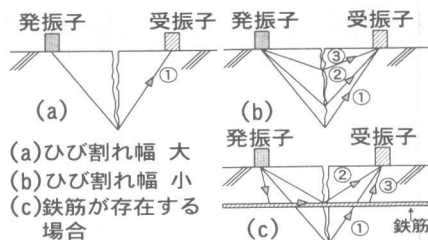


図-2 ひび割れの存在と超音波の伝播経路

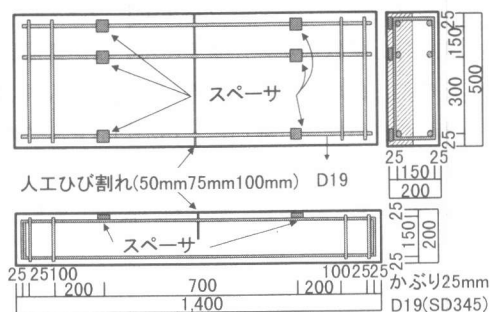


図-3 人工ひび割れ試験体
(無筋コンクリート, 鉄筋コンクリートの2ケース)

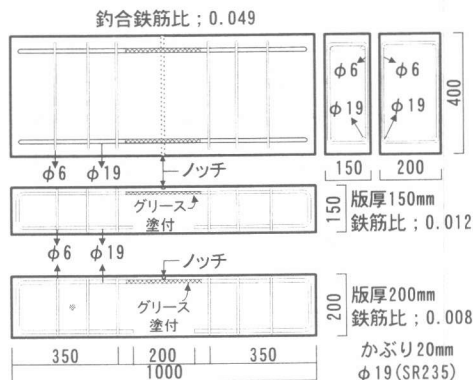


図-4 曲げひび割れ試験体
(実際の载荷により導入したひび割れ)

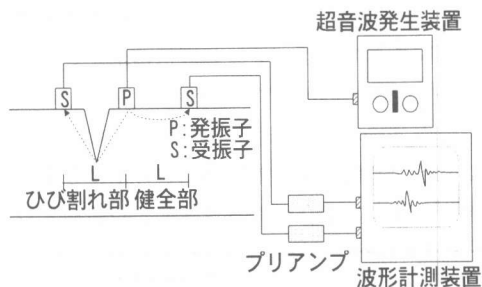


図-5 探触子配置及び計測システム

する探触子によっては、探触子間隔の増加による振幅値(A_0)の減少割合に差があることが分かった。次に、ひび割れ部における P 波の振幅値(A_c)と探触子間隔の関係を整理した。その結果、健全部と同様にひび割れを回折した場合も探触子毎に P 波の振幅値の大きさが異なることがわかった(図-8)。

したがって、探触子の種類や探触子間隔によっては、P 波の振幅値が小さくなり伝播時間を正確に捉えられなくなる可能性もあるので、計測時条件の選定には注意を払う必要がある。

更に、ひび割れ深さ 75mm では 100~150mm 間で、100mm では 150~200mm 間で P 波の振幅値が反転しているのが分かる。これは、回折した P 波の位相が臨界入射角(θ_0 : コンクリートでは約 45°)を境として反転したことが原因と考えられる⁵⁾。このような状態で計測した場合、P 波の伝播時間が不明確になり推定精度が低下する可能性がある。したがって、位相変化を考慮してひび割れ深さを評価するには、探触子間隔を増やすこと、P 波の振幅値の観察を行うことなどの工夫が必要と思われる。

3.2 鉄筋が探査精度に及ぼす影響

鉄筋の存在がひび割れ深さの推定精度に及ぼす影響範囲を定量的に把握するため、人工ひび割れを導入した鉄筋コンクリート試験体を用いて、図-9 に示すように探触子から鉄筋までの水平距離(L_s)を 0 から 150mm まで変化させて実験した。また、計測条件が推定精度に及ぼす影響を調べるため、超音波探触子に R6 型と R1.5 型を用い、探触子間隔(L)は 150, 200, 300mm で計測した。

実験の結果、図-10 に示すように探触子と鉄筋の水平距離(L_s)がひび割れ深さと同程度以上離れた位置で計測した結果は推定値と実測値が良く合い、鉄筋上(鉄筋からの距離 0mm)で計測した推定値の平均は約 30mm で鉄筋のかぶりと同等の結果であることがわかった。また、探触子の種類や探触子間隔(150, 200, 300mm)が変



図-6 人工ひび割れ無筋試験体の計測ライン

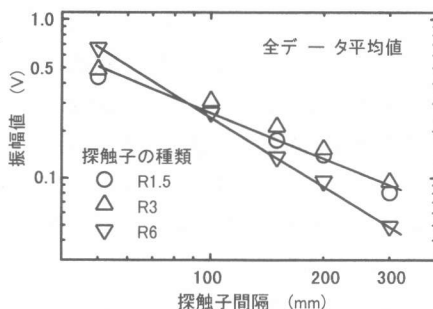


図-7 P 波の減衰特性

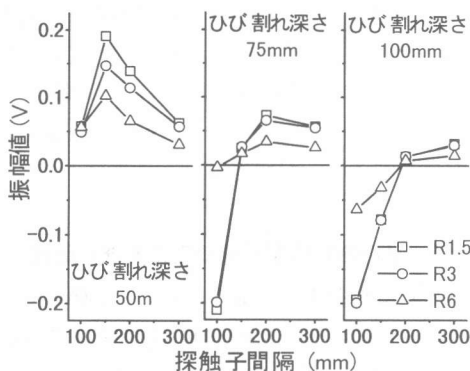


図-8 ひび割れを回折した P 波の振幅値

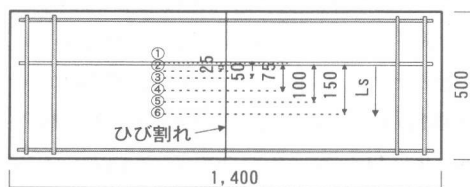


図-9 人工ひび割れ試験体の計測ライン
(鉄筋コンクリート)

化しても全体的な傾向はほとんど変わらないことがわかった。

そこで、これらの関係を理論的に考察するため、P 波の経路が図-11 のように 2 経路を想定し、各伝播経路の短いものを解析値とした。こ

ここで、図-11(a)はひび割れの先端部で回折する場合(dc)を、図-11(b)はひび割れ面に存在する鉄筋上反射する場合(ds)を想定している(式(2))。

$$dm = \text{Min}(dc, ds) \tag{2}$$

$$ds = \sqrt{Ls^2 + Lc^2}$$

dm：モデル解析値，

ds：鉄筋上で反射したときのひび割れ深さ

dc：人工ひび割れの深さ，Lc：鉄筋のかぶり，

Ls：探触子から鉄筋までの水平距離

このモデルの解析値と推定値を比較すると図-12のように良く一致することから、鉄筋の影響による推定値の変化はこのモデルでは説明することができる。

さらに、実構造物では鉄筋の位置やかぶり深さが事前に分かれば、このモデルを応用することで推定可能なひび割れ深さの限界条件を求めることができる。すなわち、推定値が式(2)のdsより小さければ鉄筋の影響を受けずに評価していることとなり、測定結果の信頼性を検証するのに役立てることができる。

3.3 ひび割れ幅が探査精度に及ぼす影響

曲げひび割れ用の試験体を用いて、図-13に示す荷重方法で中央部の表面ひび割れ幅を0.1～0.5mmまで変化させ、ひび割れ深さと推定値と実測値の関係を調べた。ひび割れの深さは、試験体側面で計測した値の平均値とした。

ひび割れの深さは、表面ひび割れ幅が0.1mmに達した時点でほぼコンクリート表面(センサ配置部)から中立軸までの距離の計算値(版厚150mm：112mm，版厚200mm：153mm)に達し、その後ほとんど変化しなかった。図-14に表面ひび割れ幅と実測値/推定値の関係を示す。この結果、コンクリート表面上のひび割れ幅が広がるほど推定値/実測値が1に近づくことがわかるが、版厚ごとにその傾向が異なることがわかった。これは、ひび割れが開いている角度(開口角度)が影響していると考えられた。そこで、ひび割れの開口角度(θ =ひび割れ幅/ひび割れ深さ)と推定値/実測値の関係を検討した。

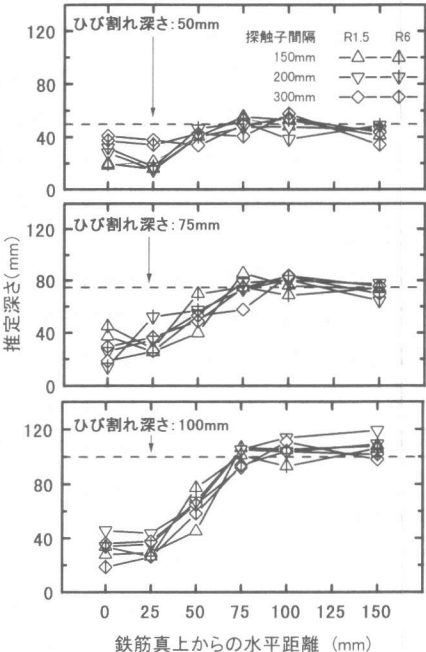
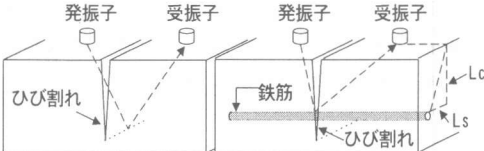


図-10 鉄筋の存在がひび割れ深さの推定値に及ぼす影響



(a)鉄筋の影響無し (b)鉄筋の影響有り

図-11 解析モデル

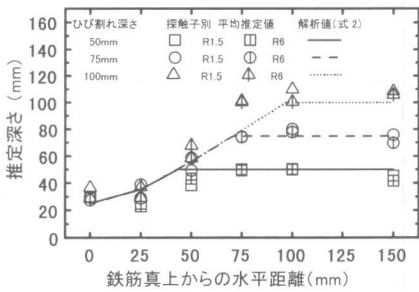


図-12 解析値と推定値の比較

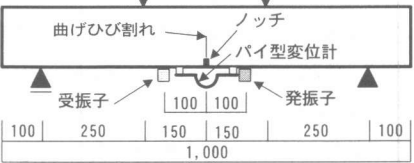


図-13 曲げひび割れ試験体の荷重方法

その結果、図-15 のようにひび割れの深さに拘わらず開口角度と推定値/実測値の関係には一定の関係があることがわかった。これは、曲げひび割れ界面の接触状態が、表面ひび割れ幅よりひび割れ開口角度に支配されているためと考えられる。このように、今回の実験の範囲からは、開口角度が 0.0015rad を超えていればひび割れ界面の影響を受けずに評価できると考えられる。

4. 最大振幅値によるひび割れ深さの評価

4.1 最大振幅値とひび割れ深さ

ひび割れの深さと超音波の最大振幅値の変化の関連を掴むため、人工ひび割れを導入した無筋コンクリート試験体を用いて実験した。探触子には、R1.5, R3, R6 型を用い、最大振幅値は健全全部での値に対するひび割れ部での値の比(最大振幅値比)で評価した。図-16 に探触子間隔を 50,100, 150mm の最大振幅値比の平均値とひび割れ深さの関係を示す。この結果、ひび割れが深くなる程、最大振幅値比は指数的に減少する傾向があることがわかった。

しかし、ひび割れ深さの増加によって最大振幅値比の低下する割合が大きな探触子(R6 型など)を用いると、ひび割れ深さを評価できる範囲が狭くなるため、計測器の選定は重要である。

4.2 測定結果に及ぼす鉄筋の影響

図-17 では、人工ひび割れを導入した鉄筋コンクリート試験を用いて、鉄筋までの水平距離が最大振幅値比に及ぼす影響を各探触子(R1.5, R6)ごとに検討した。

その結果、R1.5 型では鉄筋上の場合を除いて、鉄筋と探触子間の水平距離に拘わらずひび割れ深さが増加するほど最大振幅値が小さくなることがわかった。しかし、図-16 のひび割れ深さと振幅値比の関係より求めた推定値と比較すると計測位置によってバラツキが大きく、定量的な評価に適用するのは難しいと考えられる。また、ひび割れ深さの増加によって最大振幅値比

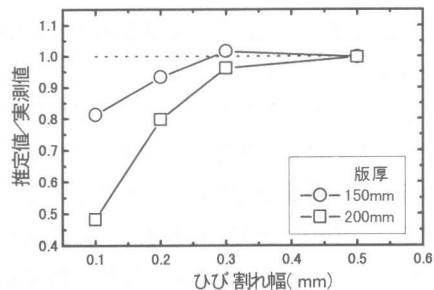


図-14 表面ひび割れ幅と推定値/実測値の関係

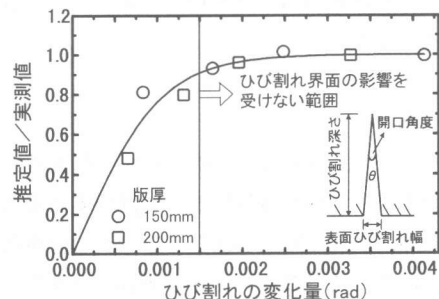


図-15 開口角度と推定値/実測値の関係

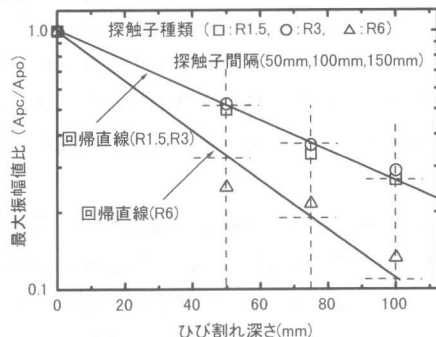


図-16 ひび割れ深さと最大振幅値比の関係

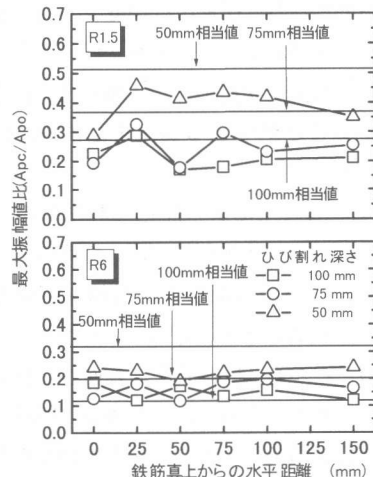


図-17 最大振幅値比の及ぼす鉄筋の影響

の低下率が大きい R6 型では、計測する位置によっては深さ 75 と 50mm の最大振幅値比の関係が逆転するケースも見られた。

このように、最大振幅値比による定量的な評価は難しいが、鉄筋の影響を受けずにひび割れ深さの相対的な関係を掴むのには利用することができる。この際、使用する探触子の距離減衰(超音波の伝播距離の増加に伴って最大振幅値が減少する)特性によっては、検知することができるひび割れの範囲が浅くなるため注意して適用する必要がある。

5. 結び

鉄筋コンクリート構造物に発生した表面ひび割れの深さを超音波法によって評価する場合、計測条件、鉄筋の存在およびひび割れの発生状況などによってひび割れ深さを正確に評価できない場合がある。そこで、超音波の P 波の伝播時間差を利用してひび割れ深さをより正確に評価することができる計測方法および評価範囲を検討した。さらに、鉄筋近傍のひび割れ深さを評価するため、超音波の最大振幅値の適用性を検討した。

- (1) P 波の振幅値は、探触子間隔の増加、探触子の種類および入射角の変化による位相の反転などによって小さくなるため、環境ノイズレベルが高い場合は P 波の伝播時間を正確に評価できず、探査精度が低下する可能性があることがわかった。また、鉄筋の存在やひび割れの発生状態の相違に拘らず、正確に評価することができる範囲を定量的に把握することができた。
- (2) 超音波の最大振幅値の変化を利用することで、鉄筋上での計測を除けば、鉄筋の影響を受けずにひび割れ深さの相対的な関係を把握することができることがわかった。
- (3) 以上のことから、超音波法で表面ひび割れの深さを評価する場合、P 波の振幅が明瞭に判断できる計測条件でかつ、鉄筋の存在やひび割れの発生状態が推定結果に及ぼす範囲を

把握して伝播時間差からひび割れ深さを評価すること、鉄筋近傍で計測する場合は参考値として最大振幅値の変化量を調べることが必要である。

- (4) 鉄筋の存在やひび割れの発生状況による影響範囲は、鉄筋のかぶり、位置および表面ひび割れ幅(w)を計測することができれば、鉄筋の存在やひび割れの発生状況が推定値に影響を及ぼす範囲が以下の方法で求めることができる。

①鉄筋の影響範囲：

推定値が、測定位置から鉄筋までの最小水平距離(L_s)と鉄筋のかぶり(L_c)の関係から決まるひび割れ深さの限界値(d_s)より小さい。

$$d_s = \sqrt{L_s^2 + L_c^2}$$

②ひび割れ界面の影響範囲：

推定値が $w/0.0015$ より小さいければ、ひび割れ界面の影響を受けないと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、日本建材産業協会のもとで行われた平成 10 年度通産省工業技術院の委託研究費に基くものであり、ここに深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 大津政康：コンクリートの非破壊検査方法(原理と手法)－ひび割れ幅、深さ、長さ等－、コンクリート工学, vol.27, No.3, pp.49-52, 1989.3
- 2) 渡辺博志・河野宏隆：コンクリート構造物の維持管理の合理化と健全度診断技術、コンクリート工学, vol.33, No.9, pp.19-28, 1995.9
- 3) 内田昌勝・岡本享久・大津政康：超音波法による鉄筋コンクリート部材の欠陥探査、構造物の診断に関するシンポジウム論文集(土木学会), pp129-136, 1998.7
- 4) 石井勇五郎：新版非破壊検査工学, 産報出版, pp.48-52, 1993.8
- 5) 広野進・戸井田克・溝渕利明：RC 構造物の非破壊検査に関する研究－新しいコンクリートひび割れ測定法の開発－, 鹿島建設技術年報第 36 号, pp17-20, 1988.6