

論文 弾性波を用いたコンクリート構造物の欠陥評価

福島謙一*1・魚本健人*2

要旨：コンクリート構造物に存在する様々な欠陥の中から特にひびわれを対象とし、いくつかのモデルを設定し、実験、2次元 FEM 解析によって伝播状況、伝播速度等の測定特性と周波数、探触子位置等の各種影響因子の分析を行った。発・受振子がひびわれ開口部から等間隔でない場合でも、透過法による縦波速度を用いて、幾何的にひびわれ深さを求める方法を提案し、解析、人工ひびわれによる実験においても精度が良いことがわかった。

キーワード：ひびわれ、弾性波、縦波速度法、超音波、指向性

1. はじめに

近年、構造物の維持管理の重要性が認識されるようになり、社会資本投資を新規投資のみとして考えるのではなくライフサイクルコストでとらえる考え方が浸透しつつある。特に、維持管理をする上で構造物を破壊せずに調査、診断する非破壊検査は重要な技術の一つである。

本研究では、種々の非破壊検査の中でも古くからコンクリート構造物に適用されている弾性波による非破壊検査手法を用い、コンクリート表面に存在する欠陥、特にひびわれの認識を対象とし、実験には比較的実績も多く、安全で簡便な超音波法を採用した。

超音波によるひびわれ深さ検査や内部欠陥検査においては、ひびわれ、欠陥によりそれに適する探触子の配置、周波数の選択等の測定条件が異なり、これらの検査には経験や試行錯誤が必要であるが、今後は経験によらず、正確で効率的な検査法の確立が望まれている。

そこで、本研究ではコンクリート構造物に存在する様々な欠陥の中から特にひびわれを対象とし、いくつかのモデルを設定し、実験、解析の両方からそれぞれに関して、測定特性（伝播状況、伝播速度など）、および各種影響因子（周

波数、探触子位置など）の分析を行った。

2. 新たなひびわれ深さ算出方法の提案

超音波を用いてひびわれ深さを算出するための方法は、現在までにいくつかの方法が提案されている。その中でも伝播時間を用いる Te-To 法、T 法^{1), 2)}は、コンクリート表面を伝わる波を縦波と同じ速度と仮定している。これは、従来コンクリートを対象とした超音波を用いた非破壊検査では数~50kHz 程度の低い周波数が使われているため、ほとんど超音波の指向性がないことや、実用上そのようにすることが便利であることによると考えられる。また、BS 法は探触子の中心ではなく端から超音波を発・受振すると仮定している。

従来のコンクリートの縦波用発・受振子を用いたひびわれ深さ検査においては、2 探触子法で発・受振子をひびわれ開口部を中心にして等間隔で設置する方法しか提案されていない。現場の条件等でそのように設置することができない場合に適用できる方法が示されておらず、等間隔に設置する方法が最も精度良くひびわれ深さを求められるということが明らかにされているわけでもないのが現状である。

*1 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東京大学教授 国際・産学共同研究センター, 工博 (正会員)

そこで、透過法による縦波速度を用いて発振子がひびわれ開口部から等間隔でない場合にも、超音波が直線的に伝播し、ひびわれ先端で回折するとして幾何的にひびわれ深さを求める方法を提案する。

これは、コンクリート表面から斜めに入射し、ひびわれ先端部を回折してきた超音波が縦波速度で伝播するとして計算する方法で、従来の Te-To 法や T 法よりも実際の伝播メカニズムに基づいたものであると考える。

2 探触子法で上で示した縦波音速 V と、ひびわれ開口部から L_1 の位置の発振子からひびわれの先端部を回折してきた、ひびわれ開口部から L_2 の位置の受振子までの超音波の伝播時間 T を用いて次式によりひびわれ深さを求める。

$$d = \sqrt{\left\{ \frac{(VT)^2 - L_1^2 + L_2^2}{2VT} \right\}^2 - L_2^2} \quad (1)$$

$L_1 = L_2 = L/2$ のときは次式となる。

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{V^2 T^2 - L^2} \quad (2)$$

本研究では、従来の方法とあわせて、今回提案した方法でもひびわれ深さを推定した。以下、このひびわれ深さ推定方法を縦波速度法と呼ぶ。

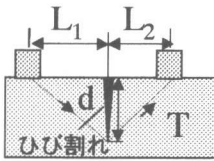


図-1 縦波速度法

3. 解析

3.1 解析方法³⁾

弾性波伝播時間を求める方法として、2次元 FEM を用いて時間領域における解析を行った。運動方程式の解法にはニューマークの β 法を用い、減衰モデルとしては $\alpha [M] + \beta [K]$ で表される比例減衰モデル ($[M]$: 質量マトリックス, $[K]$: 剛性マトリックス) を用いた。本解析では $\alpha = 1 \times 10^{-4}$, $\beta = 1 \times 10^{-6}$ とした。

解析モデルは材料をコンクリートとし、厚さ方向に拘束のない 2次元平面応力モデルとした。表-1 に本解析で用いた物性値を示す。振動は三角形パルス波 (図-2) を発振子に相当する位置に半波長与え、受振子に相当する位置での変位を出力とした。

表-1 コンクリートの物性値

材料名	単位体積重量(g/cm ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
コンクリート	2.38	33.0	0.210

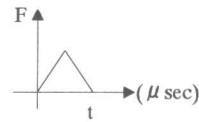


図-2 入力波

3.2 解析内容

(1) 周波数の相違が弾性波指向性に及ぼす影響

コンクリートは金属のような均質な物質でないため、金属材料に用いる数 MHz 程度の周波数の音波を入射しても、散乱が多く、減衰が大きく、到達距離が短いので使用できない。そのため、数~数十 kHz の周波数が使用され、その指向性はほとんどないとされてきたが、実験的には可視的に確認できないコンクリート内部における、周波数の相違が弾性波指向性に及ぼす影響を FEM 解析による弾性波の伝播状況から確認することを試みた。

ここでは、発振した波の伝播の状況を、一定の変位振幅値に達した節点の変位ベクトル図によりあらわした。発振周波数として 50kHz, 500kHz を想定し、継続時間がそれぞれ $10\mu s$, $1\mu s$ の三角形パルス波を大きさがそれぞれ $10 \times 40\text{cm}$, $1 \times 4\text{cm}$ の解析モデルの中心から下方向に発振した。各周波数の弾性波伝播状況を図-3 に示す。なお、図中の格子線は、50kHz については、横方向 5cm, 縦方向 4cm 間隔で、500kHz については、横方向 5mm, 縦方向 4mm

間隔である。

50kHz では時間がたつにつれて、発振点を中心として、波頭はほぼ円弧状に様に伝わっているのに対して、500kHz では $1.0\mu\text{s}$ 経過後は、表面に伝わる波が遅く、下方向の大きいベクトルが目立ち、発振された方向へ向かう性質が強いことがわかる。

このように、50kHz と 500kHz では弾性波の指向性が大きく異なり、50kHz よりも高い周波数では指向性が高くなり、縦波と同じ速度の波が表面に伝わると考えるのは問題がある可能性があることがわかった。

したがって、たとえば、数百 kHz 程度の周波数でひびわれ深さを求める時には、T 法、Tc-To 法等を安易に用いると精度が悪くなることが考

えられる。また、本解析では点発振であるのに対し、実際の測定においては面発振・面受振であるため、高周波数の超音波指向性はより高いと考えられる。

(2) 弾性波解析によるひびわれ深さ計算

図-4 に示すような中心部に深さ 4, 8, 16cm のひびわれを有する $20\times 40\text{cm}$ のコンクリートモデルを用いて、振動は継続時間 $10\mu\text{s}$ の三角形パルス波を発振子に相当する位置に半波長与え、受振子に相当する位置で一定の変位振幅値のしきい値を設定することにより伝播時間を求めた。なお、解析上で、ひびわれはその幅を 0 としてひびわれの左右に節点を設けることによって考慮した。全てのモデルについて発・受振点間隔を 8, 16, 32cm として解析を行った。受振波形の一例を図-5 に示す。

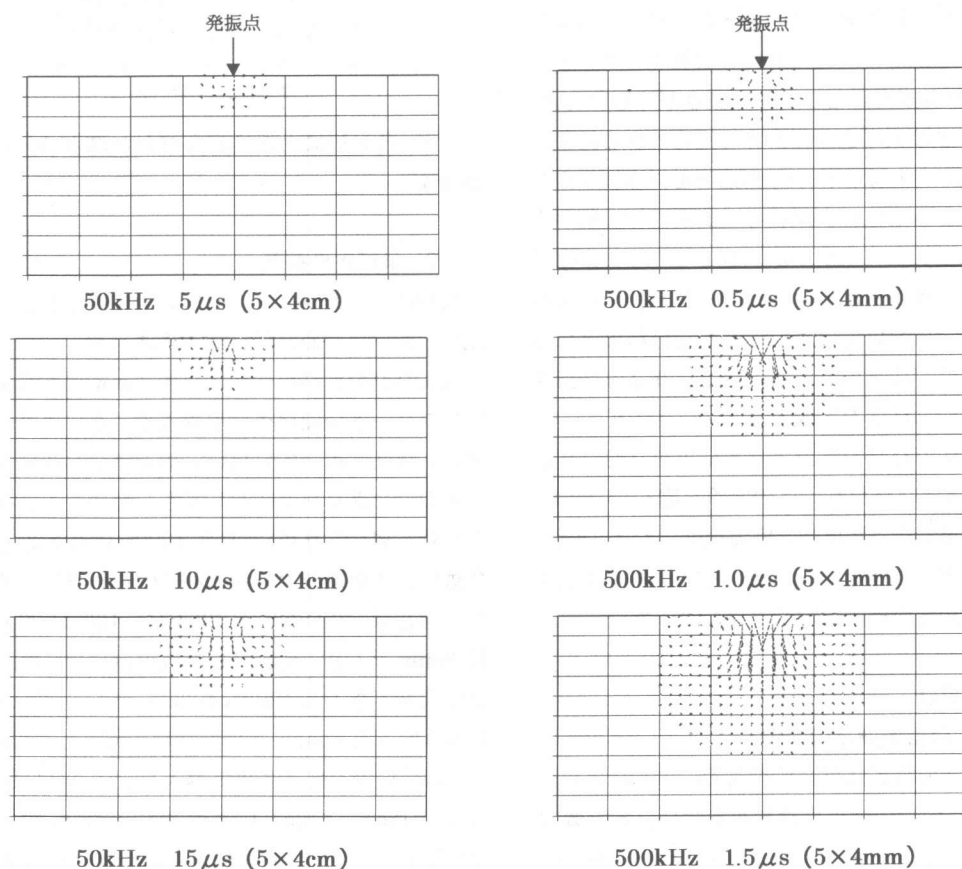


図-3 各周波数による弾性波伝播状況

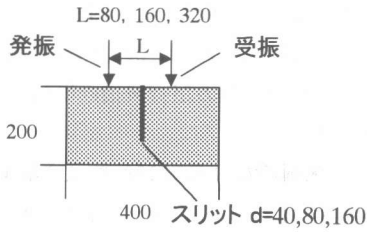


図-4 弾性波解析の概要

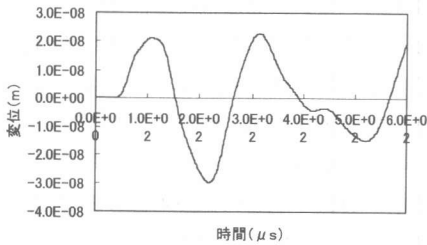


図-5 受振波形の一例

発・受振間隔と縦波速度法で計算したひびわれ深さ推定結果の関係を図-6 に示す。いずれの解析ケースについても図中白抜きでプロットした発・受振間隔とひびわれ深さが等しいとき、推定深さは実際よりも大きく推定される結果となった。これは、ひびわれ先端を弾性波が直角に回折すると位相が反転し、到達波の振幅が小さくなり、立ち上がり角が鋭敏でないことが原因であると考えられる。しかしながら、そのほかのケースにおいては推定精度が良い結果となった。次に、従来の方法も含めて、ひびわれ深さ推定方法の精度を比較するため、各モデルごとに各方法でひびわれ深さ推定結果を平均したものと、実測ひびわれ深さの関係を図-7 に示す。その結果、推定精度は、縦波速度法が $\pm 1.4\text{cm}$ 、従来の方法が $\pm 1.4\sim 2.0\text{cm}$ となり縦波速度法の推定精度が最も良いことがわかった。

4. 実験

4.1 超音波測定の概要⁴⁾

超音波の測定は超音波探傷器により行い、直径4cmの狭帯域垂直探触子を用い、周波数は50kHzとした。探触子とコンクリート表面の接触には、グリセリン系の接触媒質を用いた。

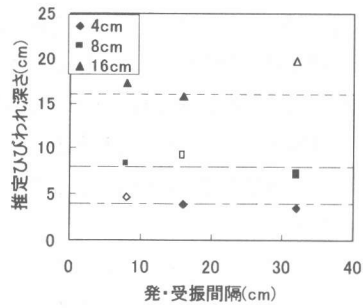


図-6 解析によるひびわれ深さ推定結果

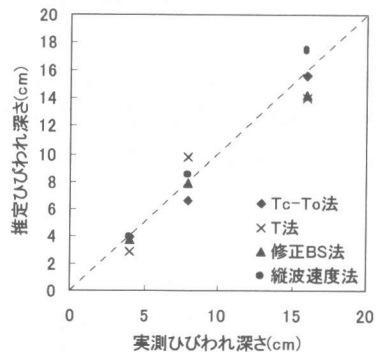


図-7 各方法による推定ひびわれ深さの比較(解析)

4.2 供試体の概要

実験に用いた供試体として、人工ひびわれ供試体、曲げひびわれ供試体を作成した。

人工ひびわれ供試体は、厚さ1mmの鉄板をコンクリートの硬化後に引き抜くことにより作成し、鉄筋は用いていない。構造物レベルのサイズのコンクリートに対しても、超音波の伝播の性質を調べるために、長さ1500mmのものも含めて、2種類の大きさの供試体を作成し、その大きさは $100\times 200\times 400\text{mm}$ 、 $100\times 200\times 1500\text{mm}$ とした。曲げひびわれ供試体は、供試体の大きさを $100\times 200\times 400\text{mm}$ とし、鉄筋のかぶり厚さを50mmとした。ひびわれは試験体の中心部に軸方向と垂直に導入し、深さはいずれも約18cm、幅は0.05mmから2.5mmの4種類に変化させた。表-3に供試体No、供試体の大きさ、ひび割れの深さの一覧を示す。

人工ひびわれ供試体は 100×200×400mm の供試体については、発振子をひびわれ開口部から 4, 8, 12, 16cm の位置に固定し、受振子を移動させて測定を行った。100×200×1500mm の供試体については、発振子をひびわれ開口部から 10cm の位置から 70cm の位置まで発。受振子を等間隔にして測定を行った。曲げひびわれ供試体は発振子をひびわれ開口部から 4, 8, 12cm に固定し、鉄筋の直上から 3cm 離して測定した。図-8 に人工ひびわれ供試体、図-9 に曲げひびわれ供試体概要を示す。

4.3 実験結果

(1) 人工ひびわれ

図-10, 図-11 に探触子間隔と縦波速度法による人工ひびわれ深さ推定結果を示す。図-10 では探触子間隔の影響はほとんどなく、推定精度は±1.5cm 以下の結果となった。供試体 150-9 では、探触子間隔が 100cm 以上になると推定深さが実測よりも大きくなった。原因として、伝播距離が 100cm 以上になると減衰が大きく受振子でとらえられるパワーが小さくなることが考えられる。したがって、表面法では伝播距離が 80cm 程度までは、伝播時間の測定に与える減衰の影響が少なく精度良くひびわれ深さが推定できると考えられる。

次に、従来の方法も含めて、ひびわれ深さ推定方法の精度を比較するため、供試体ごとに各方法で全てのひびわれ深さ推定結果を平均したものと、実測ひびわれ深さの関係を図-12 に示す。その結果、推定精度は、縦波速度法が±1.0cm、従来の方法が±1.5~3.3cm となり縦波速度法の推定精度が最も良いことがわかった。

(2) 曲げひびわれ

縦波速度法による探触子間隔とひびわれ深さ推定結果の関係を図-13 に示す。

表-2 コンクリートの硬化物性

圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (GPa)	ポアソン比
43.69	33.0	0.21

表-3 供試体一覧

供試体No	欠陥の種類	大きさ (cm)	ひびわれ深さ (cm)	ひびわれ幅 (mm)
20-4	人工ひびわれ	10×20×40	4.3	1.0
20-8			8.2	
20-16			16.2	
150-9		10×20×150	9.2	1.0
A	曲げひびわれ	10×20×40	約18.0	最大0.05
B				最大0.5
C				最大1.1
D				最大2.5

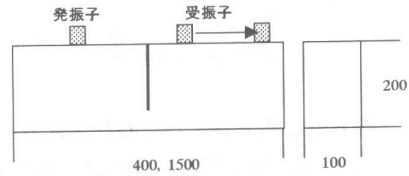


図-8 人工ひびわれ供試体概要

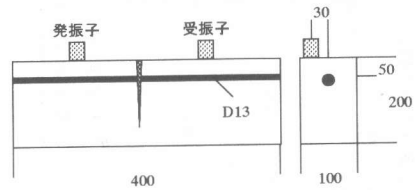


図-9 曲げ供試体概要

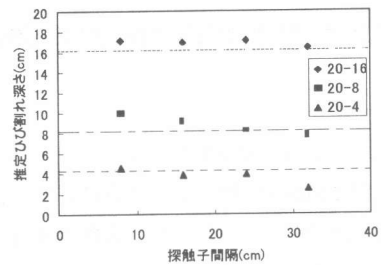


図-10 縦波速度法による人工ひびわれ深さ推定 (20-4, 20-8, 20-16: 深さ 4.3, 8.2, 16.2cm)

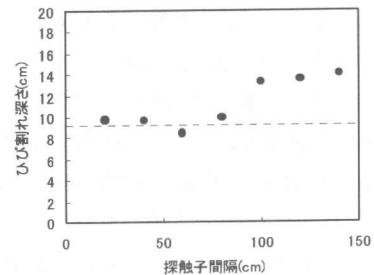


図-11 縦波速度法による人工ひびわれ深さ推定 (150-9: 深さ 9.2cm)

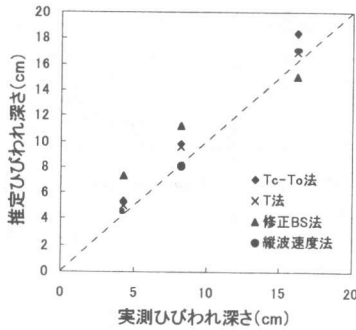


図-12 各方法による推定ひびわれ深さの比較
(20-4, 20-8, 20-16 : 深さ 4.3, 8.2, 16.2cm)

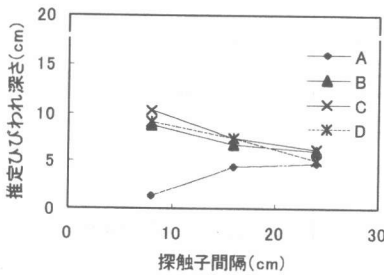


図-13 曲げひびわれ深さ推定結果 (深さ約 18cm)

ひびわれ幅が比較的大きい B, C, D については、探触子間隔が 8cm での推定ひびわれ深さは表面から観察されるひびわれ深さの半分程度であり、探触子間隔が大きくなるにつれて深さが小さく推定された。また、B, C, D に関してはひびわれ幅の違いが推定深さに与える影響はほとんどない結果となった。

それに対して、ひびわれ幅が 0.05mm と小さい A については、探触子間隔が大きくなるにつれて深さが大きく推定される結果になった。また、すべての供試体について、探触子間隔が大きくなるにつれて、推定深さがかぶり厚さの 5cm に近づいている傾向がみられる。

また、いずれの供試体についても表面から観察されるひびわれ深さよりもひびわれ深さが小さく推定されたことに関しては、コンクリート内部でひびわれ面の一部が接触している状態で

あるため、その部分を超音波が伝播することが原因の一つに考えられる。

5. まとめ

(1) 発・受振子がひびわれ開口部から等間隔でない場合でも、透過法による縦波速度を用いて、超音波が直線的に伝播し、ひびわれ先端で回折するとして幾何的にひびわれ深さを求める方法を提案した。解析、人工ひびわれによる実験では縦波速度法によるひびわれ深さ推定は精度が良いことがわかった。

(2) コンクリート中を伝播する弾性波において、周波数の相違が指向性に及ぼす影響を FEM 解析で変位ベクトル図表示することにより明らかにした。

(3) 表面法では探触子間隔、伝播距離が 80cm 程度までは、伝播時間の測定に与える減衰の影響が少なく精度良くひびわれ深さが推定できることがわかった。

(4) 一定幅以上の鉄筋コンクリートの曲げひびわれに関しては、探触子間隔を小さくして測定することにより、表面からのひびわれ深さの半分程度の深さを推定する結果となることがわかった。

最後に、本研究においてご指導頂いた東京大学館石和雄助教授、佐藤工業(株)伊東良浩氏、実験を手伝って頂いた千葉工業大学佐藤大輔君に心より感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 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(株)，1990.
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，1992.3.
- 3) 伊東良浩：粗骨材の形状，配置が弾性波の伝播速度に与える影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.747-752, 1994.
- 4) 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 pp129-136, 1998.7.