

論文 超音波法を用いたコンクリート構造物中の欠陥評価技術

内田昌勝*1・岡本享久*2・柴田辰正*3・大津政康*4

要旨：コンクリート構造物の内部に存在している欠陥の大きさや位置を非破壊検査にて評価する目的で、コンクリート試験体に曲げ载荷により導入したひびわれを 0.15～2.0 mmの間で変化させ、これらの幅と試験体を透過した超音波の変化との関係について検討を加えた。その結果、鉄筋コンクリートの耐久性を維持するための目標となる最大ひびわれ幅 0.3 mmを中心としたひびわれを超音波法により定量的に評価できることがわかった。すなわち、ひびわれを含むコンクリート試験体を透過した超音波の最大振幅値と継続時間を解析することにより、試験体のひびわれ幅の推測が可能となった。

キーワード：コンクリート，超音波，透過法，ひびわれ幅，振幅値，継続時間

1. はじめに

先の阪神・淡路大震災を契機に、経年劣化した既存の鉄筋コンクリート構造物の構造耐力の見直しが迫られている。社会資本であるこれらの構造物を新たに建設するには膨大な費用が必要となるため、補修・補強して構造耐力を維持させていくことが必要である。このような社会事情を背景に、コンクリート構造物の健全性を簡易に評価できる技術の確立が強く望まれており、特に、大型のコンクリート構造物の内部で発生しているひびわれの位置や大きさの評価技術に関する要求はますます高くなっている。

本研究では、鉄筋コンクリート構造物中に生じているひびわれ（内部欠陥を含む）を定量的に評価することを目的として、超音波の透過法に着目し、鉄筋の存在が計測結果に及ぼす影響、ひびわれ幅と超音波の変化との関係、さらには超音波の透過法の実用化への検討について考察を加えた。なお、超音波の計測は、AE と超音波の併用測定システムを考慮して、AE の計測システムを利用した。

2. 超音波透過法の測定結果に及ぼす鉄筋の影響

鉄筋コンクリート構造物に超音波法を適用する場合、鉄筋とコンクリートの弾性係数や密度の違いなどによって、超音波の特性値が鉄筋の影響を受けることが以前から言われている。谷川らは、鉄筋の軸方向が超音波の伝播方向と一致しなければ、伝播速度は鉄筋の影響をほとんど受けないことを指摘している [1]。これは、透過法によって鉄筋コンクリート内部の欠陥の大きさを評価する場合、鉄筋の影響を受けずに評価できる可能性を示唆している。そこで、本研究では 10×10×40cm のコンクリートの断面の中心に D 13 および D 16 を配置した条件と鉄筋を配置しない条件で、超音波透過法によって鉄筋の軸方向と垂直方向に超音波を伝播させ、波形の変化を測定して、鉄筋の影響を確認した。なお、この場合のコンクリートの圧縮強度は 44MPa であり、

*1 日本セメント㈱中央研究所 副主任研究員 工修（正会員）

*2 日本セメント㈱中央研究所 主席研究員 工博（正会員）

*3 日本セメント㈱中央研究所 研究員 工修（正会員）

*4 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 工博（正会員）

骨材の最大寸法は 20 mm であった。

その結果、図-1 に示すように試験体を透過した超音波の最大振幅値には大きな差が見られなかった。同様に筆者らの研究で、周波数分布にも大きな変化がないことが確かめられている [2]。したがって、鉄筋コンクリート中に生じているひびわれ（内部欠陥を含む）を超音波透過法で評価する場合、超音波の伝播方向と鉄筋の長手方向が一致しない条件が多いこと、事前に鉄筋の配置方向を避けて超音波測定することは容易であることより、次章ではプレーンコンクリート試験体を用いて超音波透過法によるひびわれ幅の評価を行うことにした。

3. ひびわれを導入した試験体による内部欠陥の検討実験

3. 1 試験体の概要

試験体寸法は図-2 に示すように 30×30×60cm であり、長手方向の中心部に曲げ荷重により貫通ひびわれを導入した。粗骨材の容積比が曲げ荷重によって形成されたひびわれ面に及ぼす影響を調べる目的で、W/C を 50% に固定した上で、粗骨材の容積比をそれぞれ 0.3 および 0.4 の 2 条件に変えた。コンクリートの製造には、普通ポルトランドセメント、青梅産の砕砂（比重 2.59, FM=2.71）および砕石（比重 2.65, FM=6.81, Gmax=20 mm）を用い、スランプは 8cm を目標に高性能減水剤の添加量で調整した。コンクリートの配合と物理的性質を表-1 に示す。

表-1 コンクリートの配合条件および物理的性質

調査番号	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材容積比	比重	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	ポアソン比	縦波伝播速度 (km/s)
Mix01	50	55	0.3	2.27	42.4	27.3	0.21	3.97
Mix02	50	43	0.4	2.35	44.6	30.2	0.20	4.07

3. 2 超音波の計測方法

試験体は図-2 に示すように打設面を上面とし、超音波の発振子 (P1~P3) および受振子 (S1~S3) には、60kHz に共振点を持ち周波数帯幅 10~500kHz の感度を有している AE センサを用い、深さ方向にそれぞれ 3ヶ所配置した。各 AE センサは、平坦に研磨したコンクリート表面にカプラントとしてシリコングリースを塗布した後、感度チェ

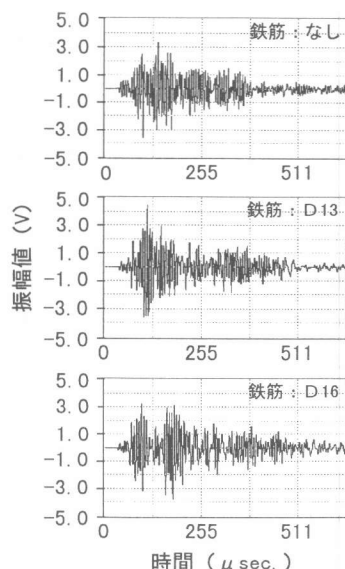


図-1 超音波計測結果に及ぼす鉄筋の影響

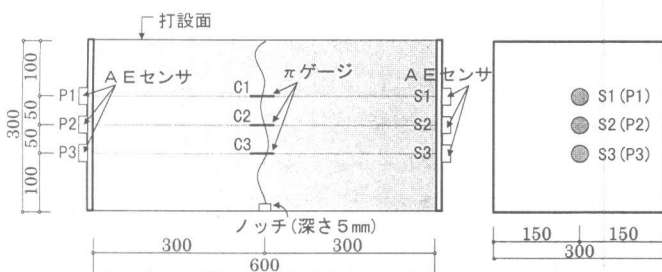
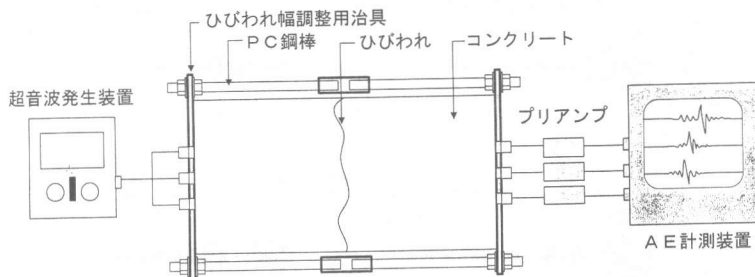


図-2 試験体の寸法およびセンサの配置(mm)



図－3 超音波の計測システム

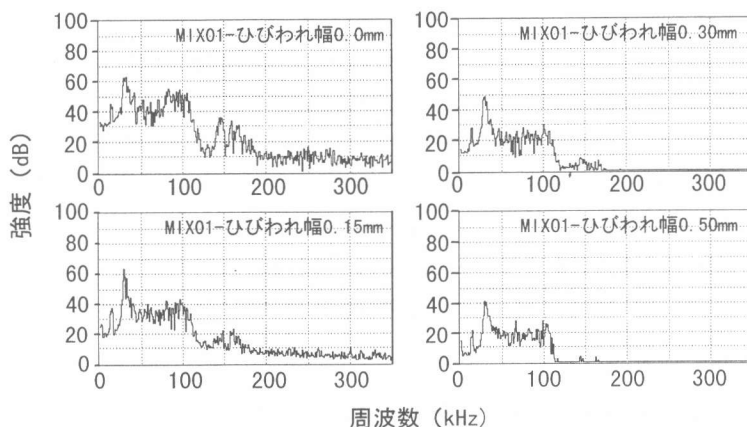
ックを行いながら粘着テープで圧着して取付けた。超音波の測定は、図－3に示すシステムで行った。すなわち、立ち上がり時間が約20nsec、出力電圧300Vのスパイク波を入力して発振した後、対面する受振子で検出した弾性波をプリアンプで40dB増幅し、17.8mV (45dB)に設定したしきい値を越えた弾性波をAE計測装置で計測した。

超音波の測定は、試験体の下部中央に約5mmのノッチを加えた後、ひびわれ幅調整用治具と発振子および受振子を試験体に取り付け、ひびわれ発生前の超音波の測定を行った後、2等分点1線載荷でコンクリートを貫通する曲げひびわれを導入した。ひびわれ幅は0.15、0.3、0.5、1.0、2.0mmの5条件を目標に調整し、各段階で超音波の測定を行った。なお、ひびわれ幅は試験体の両側面のC1～C3(図－2)をπゲージで計測しながら調整した。

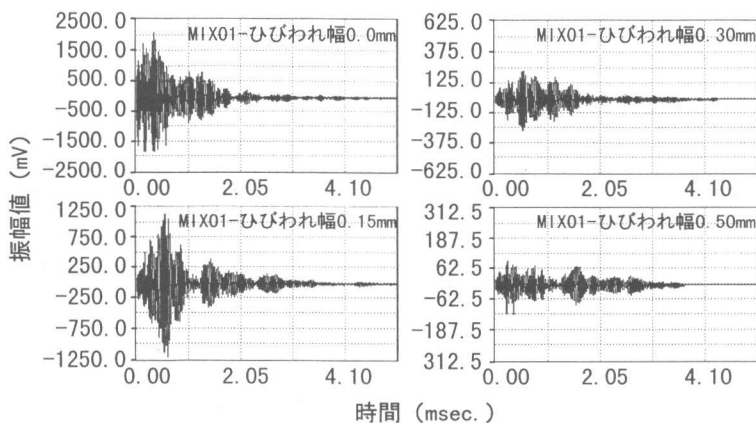
4. 試験体を透過した超音波の周波数分布および波形の変化

試験体を透過した超音波の周波数分布の一例を図－4に示す。ひびわれが導入される前の周波数分布には、50、100および150kHz付近にピーク値が観察できたが、ひびわれ幅が0.3mm以上になると150kHz付近の周波数のピークがほとんど観察できなくなった。一般に超音波の周波数が高いほど減衰は大きい[3]が、連続した弾性体が割れて接している状態では界面における散乱も大きくなると考えられる。特に、このケースのようにひびわれ幅が拡大するとその傾向が顕著となるため、比較的周波数の高い150kHzピークが現れなくなったと考えられた。

一方、ひびわれ透過時の超音波の波形は、図－5に示すようにひびわれ幅が大きくなるに従って、明らかに振幅値が小さくなり、波形形状も次第に細長くなっているのが分かる。これは、超



図－4 試験体を透過した超音波の周波数分布



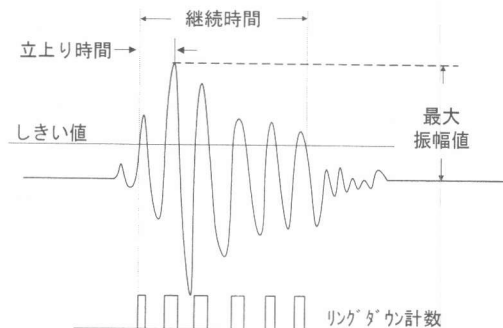
図－５ ひびわれを透過した超音波波形

音波の波形の変化に着目することで、鉄筋コンクリートの耐久性と関係のあるひびわれ幅が 0.3 mm を中心としたひびわれの大きさを周波数分布の変化より定量的に評価できる可能性を示唆している。そこで、ひびわれ幅と透過する超音波の波形の変化について検討した。

５．コンクリート中のひびわれ幅の定量評価に関する考察

５．１ 信号処理パラメータとひびわれ幅の関係

ひびわれを透過した超音波の波形の情報を簡易にかつ定量的に評価するため、AE の信号処理パラメータ解析の手法を利用して検討した。一般的な AE の信号処理パラメータとしては、図－６に示すように、最大振幅値、立上り時間、継続時間およびリングダウン計数などがある。図－５によれば、ひびわれ幅が大きくなるほど、透過する超音波の形状が細長く変化しているので、最大振幅値および継続時間に着目して検討した。継続時間とは、「信号がしきい値と交わったときから、最後にしきい値と交わるまでの波形の継続時間」である。



図－６ 弾性波の信号処理パラメータ

超音波の各パラメータとひびわれ幅の関係を粗骨材の容積比と測定位置別に整理して、図－７に示す。その結果、各パラメータの絶対値は粗骨材の容積比や測定位置によって若干異なるものの、全体的な傾向としていずれのパラメータ値もひびわれ幅が大きくなるに従って急激に小さくなり、その低下率は最大振幅値の方が大きいことが分る。これは、図－８の最大振幅値(Ap)に対する継続時間(Du)のパラメータ比とひびわれ幅との関係からも分るように、ひびわれ幅の増加に伴い透過する超音波の形状が細長くなることが原因と思われた。したがって、図－５の超音波波形の観察結果と一致するので、ひびわれを透過する超音波の波形変化をモニターする方法として、最大振幅値および継続時間の各パラメータを用いることは妥当と考えられた。

５．２ ひびわれ透過時のパラメータ伝達率(PR) の変化

鉄筋コンクリート構造物では、鉄筋がコンクリートを拘束しかつひびわれが骨材界面に沿って

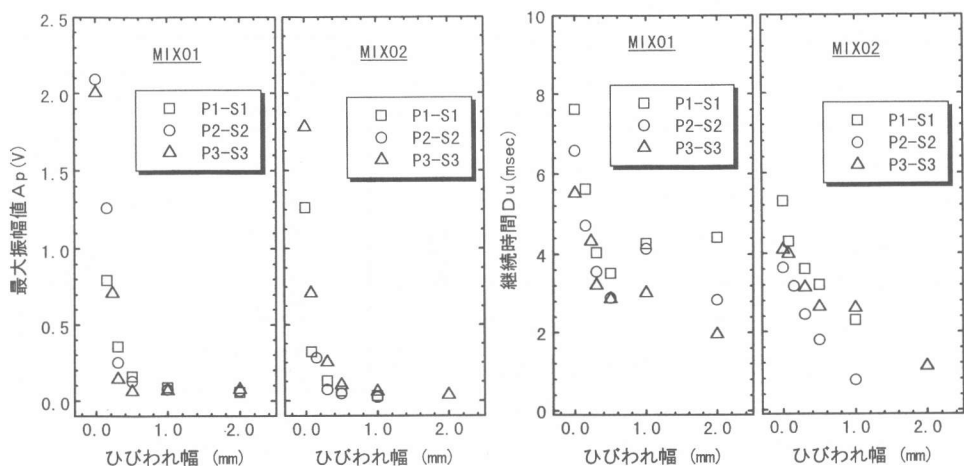


図-7 ひびわれ幅と各パラメータ値

複雑に形成されるので、一度ひびわれが発生してもその幅が狭い場合、ひびわれ面が互いに接触し、超音波が伝播すると考えられる。ここで、ひびわれ発生前の健全時の信号処理パラメータ値を基準とし、これとひびわれ発生後の各パラメータ値との比を伝達率(PR)と定義して、全データをまとめてひびわれ幅との関係で整理した。その結果、図-9に示すようにひびわれ幅の増加につれて、各PR値が指数関数的に単調減少することが分った。

そこで、この原因を考察するため、コンクリート中の骨材の粒度分布に着目して検討した。骨材を各粒度ごとに同一径でかつ球状であると仮定すると、今回使用したコンクリートの単位容積当たりの骨材の径と数量分布は、図-10の示すように骨材径とその数量が両対数表示で負勾配の直線分布をしているのが分る。ここで、ひびわれ幅と骨材分布の関係について考えてみる。例えば、ひびわれ幅が0.3mmまで拡大にすると、ひびわれ界面に存在する0.3mm以下の骨材が界面で接触する可能性がほとんどなくなることが容易に想像できる。さらに、骨材の

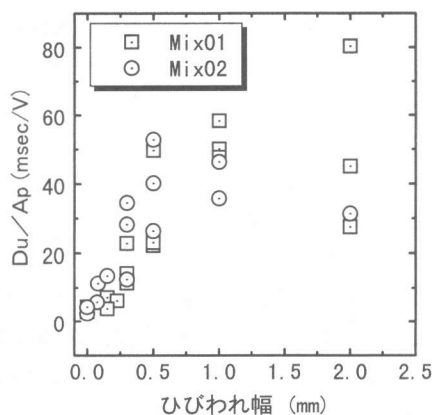


図-8 パラメータ値(D_u/A_p)とひびわれ幅の関係

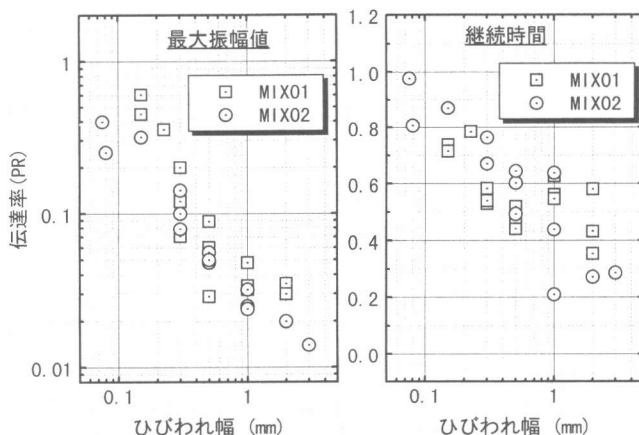


図-9 ひびわれ幅と振幅値および継続時間のPR値

分布を考慮すると、ひびわれ幅が大きくなるほどその界面で接触することができる骨材が存在する確率は、指数関数的に単調減少すると考えることができる。したがって、ひびわれ幅の増加に伴う振幅値および継続時間のPR値の減少は、これらの影響によると推察される。

さらに、超音波の最大振幅値と継続時間に関するPR値とひびわれ幅の関係をより明瞭に区別するため、図-11に横軸に継続時間および縦軸に最大振幅値のPR値としたマップ図をひびわれ幅ごとにデータを分類してプロットした。その結果、ひびわれ幅が0.3mmおよび0.5mmを境にグループ化できることが分った。すなわち、これらの最大振幅値と継続時間の両方の値から、このマークを用いてひびわれ幅を推定することにより、比較的精度良くひびわれ幅の推定ができ、実用的な方法の一つと思われる。

6. まとめ

本研究では、超音波透過法による鉄筋コンクリート構造物の内部に発生しているひびわれの評価方法について検討した。すなわち、粗骨材の容積比の異なる(0.3,0.4)コンクリート試験体に曲げ載荷で発生させたひびわれの幅を0.15から2.0mmまで変化させ、ひびわれを透過した超音波の特性値について調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 透過法による超音波波形に及ぼす鉄筋の影響は、鉄筋の軸方向と垂直に伝播させた場合では少ない。
- (2) ひびわれ幅が0.3mm以上に広がると100kHz以上の周波数が減衰してピーク値が現れなくなる。
- (3) 最大振幅値と継続時間のパラメータの伝達率をあわせて評価することによって、ひびわれ幅が0.3mm未満、0.3mmから0.5mm未満、0.5mm以上の3ランクの評価が可能となった。

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7年度通産省工業技術院の委託研究費に基づいて実施されたものであり、ここに深く敬意を表します。

【参考文献】

- [1] 谷川恭雄・山田和夫・小阪義夫：コンクリートの複合非破壊試験法に関する研究，第1回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.21-24，1979
- [2] 社団法人日本建材産業協会：鉄筋コンクリートの健全性評価方法の標準化のための調査研究成果報告書，pp.87-92，1996.3
- [3] 石井勇五郎：新版 非破壊検査工学，pp.48-52，1993.8

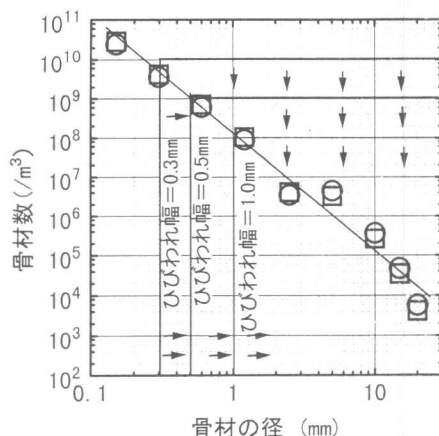


図-10 単位体積当たりの骨材の粒度分布

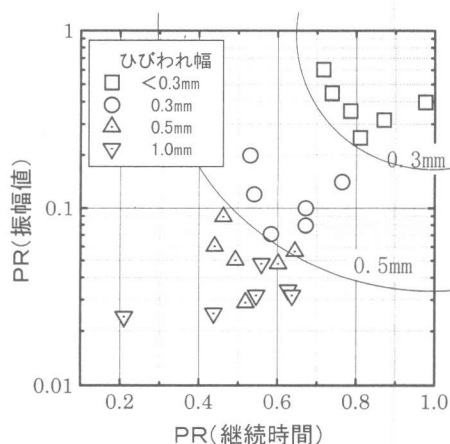


図-11 ひびわれ幅と各パラメータのPR値