

論文 コンクリート内部欠陥の寸法および深さと打音特性値の定量的関係

浅野 雅則^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・国枝 稔^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 非破壊試験法としての打音法の信頼性を高める目的で、コンクリート内部欠陥の寸法および表面からの深さと打音特性値（最大振幅値・周波数分布）の関係を定量的に検討した。その結果、欠陥の寸法および深さに対する評価パラメータとしての最大振幅値および周波数分布の感度や適用範囲が明らかとなった。これにより、打音特性値による欠陥の定量評価の可能性が示された。

キーワード: 打音法、内部欠陥、非破壊試験、最大振幅値、周波数分布、FEM 解析

1. はじめに

打音法は、構造物表面にセンサを貼付する必要がなく非接触で計測を行えるため、簡便で効率的な非破壊試験法である。

実務では、鉄道トンネルの覆工コンクリート部分の点検に、打音検査（音の受振は人間の耳）が用いられた事例¹⁾がある。しかしながらこの点検では、異常箇所の判定を「濁音」の有無のみによって行っており、評価は全く定性的である。人間の耳で評価を行う場合、結果は調査者の主観や経験に左右され、個人差が生じるのも避けられない。

一方、打音法を定量的な評価手法とするための研究としては、受振音から部材の固有周波数を測定し、これから動弾性係数を求ることによって劣化を検知する方法²⁾が報告されている。しかしながらこの方法では、部材全体としての平均的な評価であるため、内部欠陥の寸法や存在箇所についての情報を得ることはできない。また、打撃音の振幅を用いて部材の損傷の有無を評価した事例³⁾があるが、損傷の規模や分布状況を定量的に把握するまでには至っていない。

そこで本研究では、打音法によりコンクリート内部欠陥の寸法や表面からの深さを定量的に

把握する手法として、「打音特性値」として受振音の最大振幅値および周波数分布を用いる評価方法の検討を行う。内部欠陥としては、コンクリート中に生じる空隙を模擬し、人工欠陥を埋設したコンクリート供試体における実験を行った。さらに、2次元FEMによる数値解析を実施し、打音特性値と欠陥情報の関係について解析的な検討も加えた。

2. 実験概要

2. 1 供試体

本実験では、図-1に示すように内部に円盤状の人工欠陥（スチレンボード、厚さ0.5cm）を埋設した直方体のコンクリート供試体を作製した。コンクリートの配合を表-1に示す。

人工欠陥の寸法としては、直径5, 10および20cmのものを、供試体表面から3, 5, 7および10cmの位置に配置した。なお、比較のため、欠陥なしの供試体についても作製した。

2. 2 打音実験

(1) 打撃方法

打撃の入力は、鋼球落下にて行った。用いた鋼球はφ30mmである。鋼球の落下高さは10cmとした。なお、供試体は、図-2に示すように

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*3 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工博（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
56	47	185	330	837	940	0.495

Ad : AE 減水剤

厚さ 5cm の砂層上面に設置し、底面全面支持とした。鋼球は人工欠陥の中央部に落下させた。

(2) 打音計測

打撃による放射音の測定には、コンデンサマイクロフォン (20Hz~30kHz においてフラットな感度を有する) を用いた。マイクロフォンで受振された波形は、アンプを介し、高速波形収集システムによりパソコンに記録した。サンプリングタイムは 20 μs とした。その後、受振波形において最大振幅値および波数分布を求めた。なお、マイクロフォンは、鋼球落下位置から水平方向に 5cm、鉛直方向に 5cm の位置に配置した。計測状況を写真-1 に示す。

2. 3 FEM 解析概要

本研究では、汎用解析コード (LS-DYNA) を用いて解析的に検討を加えた。図-3 に示すように、対象としたモデルは平面応力状態とし、コンクリートを弾性体 (密度: 2.3 × 10⁶ kg/mm³, 弹性係数: 42GPa, ポアソン比: 0.2), 砂層を剛体として扱った。なお、弾性体と剛体の境界面は接触のみを考慮した。荷重は、図-3 中に示すような波形で入力し、コンクリート中央部に作用させた。なお、荷重の継続時間 T_c は次式⁴⁾ により求めた。

$$T_c = 0.0043D \quad (1)$$

ここで、D は鋼球の直径(m)である。(1)式より、解析で用いた荷重の継続時間は 120 μs とした。また、鋼球落下によりコンクリートに与えられる荷重 F_{max} は次式⁵⁾により求めた。

$$F_{max} = m(2gh)^{0.5} / (0.637T_c) \quad (2)$$

ここで、m, h および g はそれぞれ、鋼球の質量 (kg), 鋼球落下高さ (m) および重力加速度 (m/s²) である。本解析では、F_{max} を 1.5kN とした。

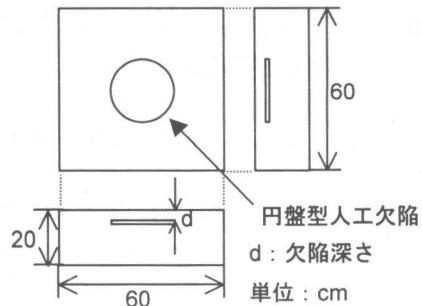


図-1 供試体

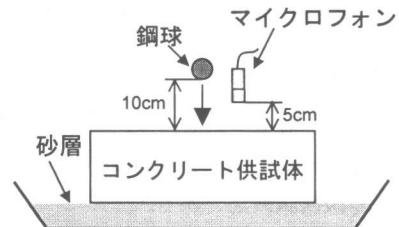


図-2 供試体の設置状況

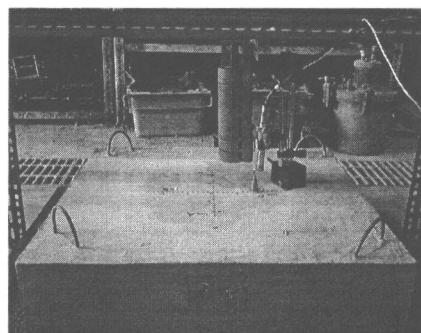


写真-1 計測状況

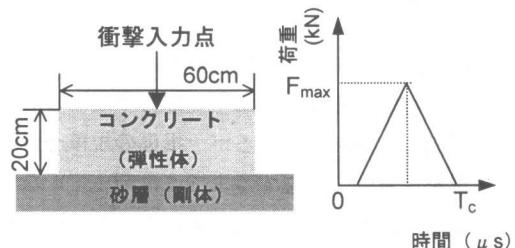


図-3 解析モデルおよび入力波形

なお、著者らは、すでに表面振動と放射音との関係について考察し、これらを等価なものとして扱ってよいことを明らかにしている⁶⁾。したがって、解析では打撃により生じる打撃点で

の表面振動波形を求めた。

3. 欠陥寸法と打音特性値の関係

欠陥なしの供試体における実験および FEM 解析により得られた打撃点での波形を図-4 に示す。また、欠陥（直径 10cm、深さ 5cm）がある場合の結果を図-5 に示す。実験値および解析値ともに欠陥がある場合は、欠陥がない場合に比べて波形の最大振幅値は大きくなり、周期は小さくなることがわかる。これは、欠陥の存在によって、打撃により入力された弾性波が欠陥の上面にて反射した後、反射波が欠陥と供試体表面との間を往復し、欠陥なしの場合と比較して、より短い時間で往復を繰り返すことによるためと考えられる。

この傾向を確認するために、FEM 解析により得られた供試体内部での弾性波伝播挙動を、欠陥がない場合と直径 10cm で深さ 5cm の欠陥が存在する場合について図-6 および図-7 にそれぞれ示す。なお、弾性波伝播挙動として変位

分布を用いた。

また、図中の t は打撃入力時点からの時間を示す。

欠陥なしにおいては、弾性波が底面まで到達し（図-6(a)）、底面（コンクリートと剛体との境界）において反射され（図-6(b)）、コンクリート表面まで変位が伝播する挙動（図-6(c)）

を示していることがわかる。

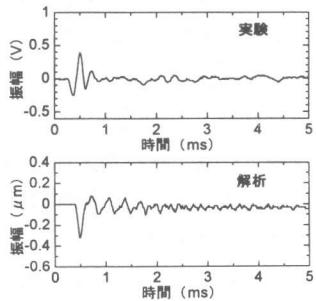


図-4 欠陥なしの場合の波形

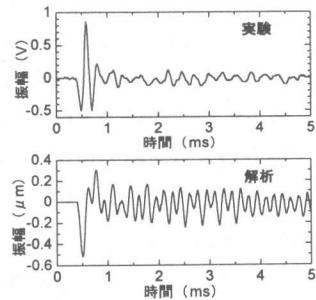
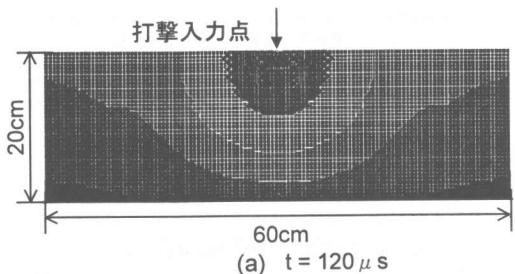
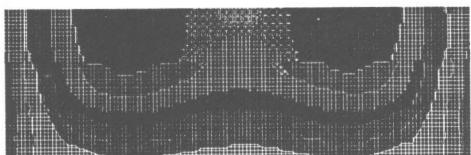


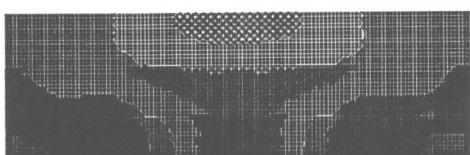
図-5 欠陥ありの場合の波形



(a) $t = 120 \mu\text{s}$

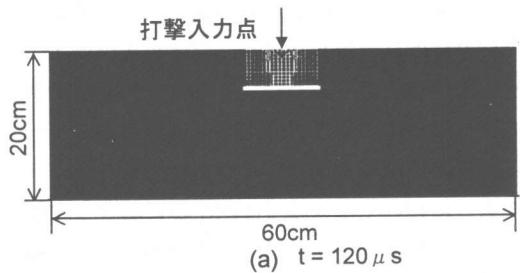


(b) $t = 160 \mu\text{s}$

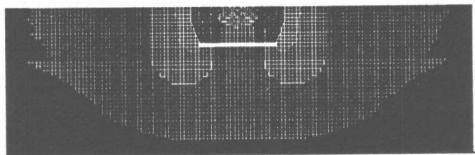


(c) $t = 200 \mu\text{s}$

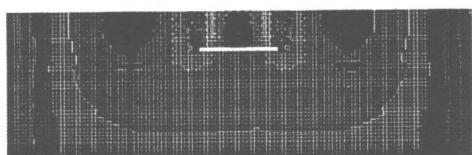
図-6 欠陥なしの場合の弾性波伝播挙動



(a) $t = 120 \mu\text{s}$



(b) $t = 160 \mu\text{s}$



(c) $t = 200 \mu\text{s}$

図-7 欠陥ありの場合の弾性波伝播挙動

一方、欠陥ありにおいては、弾性波が欠陥まで到達すると（図-7(a)）、欠陥部で反射されて供試体上面まで戻る成分と、欠陥両端部分を回折し底面まで到達するものが存在し（図-7(b)）、供試体上面と欠陥との間で反射を繰り返すものと、底面まで到達したものが供試体上面まで戻ってくるものが混在している様子がわかる（図-7(c)）。これら弾性波伝播挙動においても、欠陥がある場合は欠陥なしのものとは明らかに異なることが示されており、振動波形の特性から欠陥に関する情報を得ることが可能と考えられる。

図-8 に、欠陥の表面からの深さごとに、欠陥直径と最大振幅値比との関係を実験および解析のそれぞれについて示す。ここで最大振幅値比とは、欠陥なしの場合において計測された値に対する比率として定義した。なお、解析は欠陥直径 3cm および 15cm の場合も併せて示した。この図によれば、実験値および解析値とともに欠陥深さ 3, 5 および 7cm では、欠陥直径が大きくなるに従い最大振幅値比が大きくなるという傾向は一致しており、深さが浅いほど、その関係は明確であった。これは、欠陥直径が大きくなるにつれて欠陥より上側のコンクリート部の剛性がより小さくなるため、深さが同一の場合においては欠陥寸法が小さい場合と比較して大きな振幅が発生しやすくなるためであると考えられる。一方、欠陥深さが 10cm では、欠陥なしの場合との差が小さく、欠陥直径が 20cm の場合でも評価が困難であった。これは、欠陥深さがある大きさ以上になると、欠陥上側コンクリート部の厚さの増大にともなう剛性の増加の影響が大きく、欠陥直径の違いが剛性変化に与える影響は少なくなるためと考えられる。

欠陥直径が 3cm（解析値）の場合は、欠陥深さが浅い場合でも、欠陥なしの場合との差がほとんど認められない。これは、鋼球落下により入力される弾性波の波長に対して、対象とする欠陥寸法が小さいためであると考えられる。これらの結果より、本研究の範囲内においては、

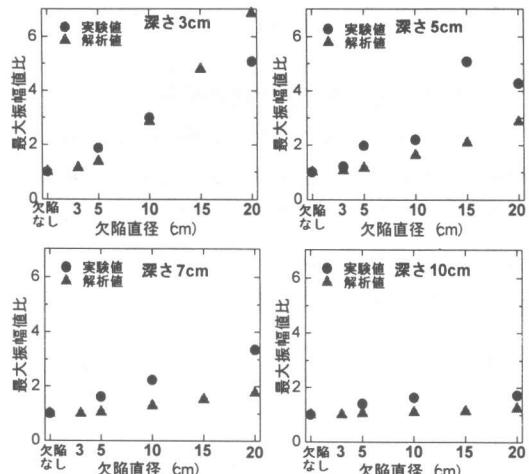


図-8 欠陥直径と最大振幅値比

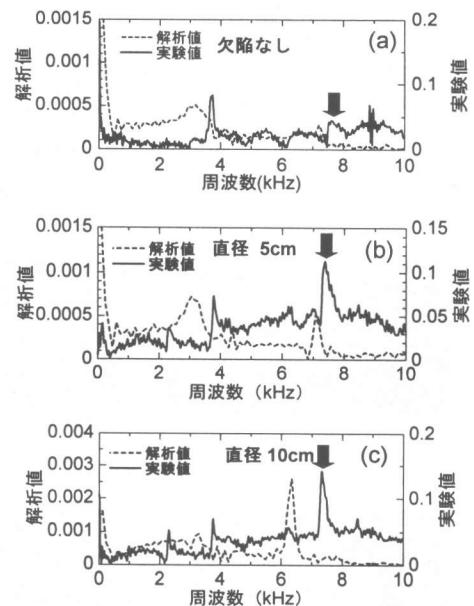


図-9 周波数分布（欠陥深さ 5cm）

一般の鉄筋コンクリート構造物のかぶり程度の深さまでであれば、最大振幅値によって直径 5cm 程度以上の欠陥の大きさを把握することが可能と考えられる。

次に、欠陥直径と周波数分布の関係について検討した。図-9 に、欠陥なしの場合(a)と、直径が 5cm(b)および 10cm(c)で深さが 5cm の場合における周波数分布を示す。これによれば、欠

陥の有無に関わらず、実験値と解析値はよく一致している。しかも欠陥がある場合は、図中に矢印で示す高周波のピークがより卓越する傾向にある。さらに欠陥直径が大きいほど、この高周波のピークが強調されることがわかる。これは、欠陥直径が大きいほど、弾性波の反射に寄与する面積が大きくなり、その結果、供試体上面と欠陥上面との間を往復する波（表面と底面との間の往復に要する時間より短い）の成分が多くなり、高周波成分が増えるためと考えられる。これは、図-6 および 7 からも推測できる。

4. 欠陥深さと打音特性値の関係

欠陥深さと最大振幅値比の関係を図-10 に示す。なお、欠陥深さ 15cm の場合の解析値も併せて示す。解析値と実験値は一致してはいないものの、欠陥直径によらず、欠陥深さが大きくなるに従い最大振幅値は徐々に減少していく傾向がみられる。

欠陥直径が 5cm の場合は欠陥深さ間での差が小さく、深さの情報を得ることは難しい。これに対し欠陥直径が 10cm および 20cm の場合では、欠陥深さ間での違いは明らかである。これにより、ある程度以上の大きさの欠陥であれば、最大振幅値により欠陥深さが評価できるものと考えられる。

人間の耳で聞く打音検査では、欠陥の有無がある程度判断できる¹⁾とされているが、これは主に打撃により生じる放射音の周波数特性（例えば「濁音」と「清音」）を利用している。人間の耳は音の周波数に対する感度はあるが、音圧の変化を敏感にとらえることは困難であり⁷⁾、従って受振音の最大振幅値の変化を適確にとらえることは難しいと考えられる。一方、計測器を用いた場合は、最大振幅値の変化を詳細に評価することができる。よって、適切な計測器を用いた検査を行うことで、最大振幅値が評価に有効なパラメータになり得ると考えられる。

欠陥直径が 10cm の場合における周波数分布を図-11 に示す。なお、欠陥なしおよび深さ

5cm については、すでに図-9(a)および(c)にそれぞれ示してある。これによれば、いずれの深さにおいても、周波数のスペクトルピークの位置はほぼ同じであるが、欠陥深さが小さい場合には、深さの大きいものと比べ、図中に示す高周波のピークが、より強調される傾向が認められる。この理由

としては、図-6 および 7 で示した通り、入力された弾性波が欠陥で反射してコンクリート表面まで戻ってくる距離が欠陥深さが深い場合と比較して短いために、結果として得られる波形には周期の小さい（周波数の高い）成分がより多くなるためであると考えられる。欠陥直径が 10cm で深さが 5cm の場合と

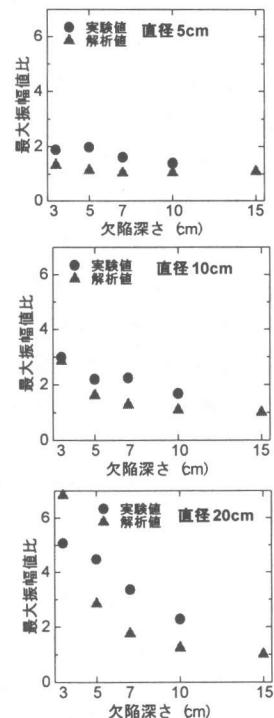


図-10 欠陥深さと最大振幅値比

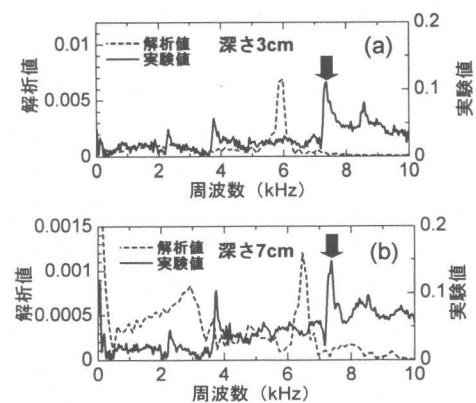


図-11 周波数分布（欠陥直径 10cm）

の比較においては、最大振幅値比の差は小さい（図-10）が、周波数分布を比較する（図-9(c)と図-11(b)）ことにより欠陥深さの違いを把握できることが明らかとなった。

5.まとめ

以下に、本研究により得られた結果を示す。

- (1) 最大振幅値および周波数分布の実験結果は、FEM 解析結果とよい対応を示し、解析モデルの妥当性が示された。
- (2) FEM 解析により、欠陥がある場合の弾性波伝播挙動を視覚的に明らかにした。
- (3) 最大振幅値は、欠陥寸法が大きくなるにつれて増大すること、および欠陥深さの増加にともない減少することが明らかとなった。
- (4) 周波数分布において欠陥寸法および深さの影響を検討した結果、欠陥の存在により高周波のピークが卓越する傾向にあり、欠陥深さが浅いものほど、また欠陥直径が大きいものほどその傾向は強調されることがわかった。
- (5) 打音特性値として最大振幅値および周波数分布を用いることにより、欠陥の定量評価が可能である。
- (6) 本研究の範囲内においては、打音特性値により寸法の定量評価を行う場合、欠陥直径では 3cm 以下の場合、および欠陥深さでは 10cm 以上の場合には適用が困難であった。実験および解析結果の絶対値は必ずしも一致していないが、今後、3 次元モデルによる解析を実施するなど、より実現象に即したモデルにより改善が図れるものと考えている。数値解析を有効に活用すれば、解析によりあらかじめ任意の欠陥寸法や形状、あるいは深さの場合について打音特性値との関係を把握しておくことにより、打音法の信頼性や精度を高めることが可能となる。一方、欠陥の有無や深さの情報であれば、本手法の適用限界を超える場合においては、超音波法によってもある程度の精度で評価できる⁸⁾が、コンクリート表面へのセンサの

接触が不可欠であり、広範囲の調査には多大な時間を要する。よって、それぞれの非破壊試験法の長所を生かして、複数の手法を組み合わせた評価を行うことも必要となるものと考えられる。

謝辞 実験の実施およびデータの整理に際してご助力を得た岐阜大学学部生の阿部晋也君に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション、日経 BP 社, No.240, pp.44-45, 1999.9
- 2) 伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究、東京大学学位論文、1997
- 3) 伊東良浩、木村宋稔、湯山茂徳、李王旺：柱水平交番載荷における AE/UT 法および打音法による柱の損傷進行の評価、構造物の診断に関するシンポジウム論文集、土木学会, pp.145-150, 1998
- 4) M. J. Sansalon and W. B. Streett : Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 5) 白鳥雅也、桧貝勇、岡村雄樹：軽い衝撃荷重を受けるコンクリート部材の応答解析、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.679-684, 1992
- 6) 浅野雅則、阿部晋也、国枝稔、鎌田敏郎、六郷恵哲：打音法における放射音と表面振動の周波数特性の比較に関する基礎的考察、平成 13 年度土木学会中部支部講演概要集, pp.557-558, 2001
- 7) 中村健太郎：音のしくみ、ナツメ社, pp.146-147, 1999
- 8) 富田芳男、鎌田敏郎、長瀧重義、岩波光保：低周波パルス波を用いたコンクリート内部の欠陥評価、土木学会第 52 回学術講演会講演概要集、第 5 部, pp.694-695, 1997