

論文 コンクリートの欠陥評価における打撃音波形パラメータの役割

浅野雅則^{*1}・鎌田敏郎^{*2}・六郷恵哲^{*3}・児玉一郎^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート打撃音から得られる波形パラメータ（最大振幅値・減衰時間）および周波数分布とコンクリート中の欠陥の特徴との対応関係を明らかにする目的で、各パラメータの感度について検討した。実験に加えて3次元FEM解析を行い、周波数分布におけるピーク周波数の物理的な意味について考察した。その結果、打撃音の周波数分布におけるピーク周波数は、欠陥の平面的な大きさを把握するのに適しており、さらに最大振幅値などの波形パラメータを加えることで欠陥深さが評価できることを明らかにした。

キーワード：打音法、欠陥評価、FEM解析、周波数分布、最大振幅値、減衰時間

1. はじめに

打音法はコンクリート構造物の欠陥評価手法として期待されており、様々な観点から検討が行われている。

これに関連して著者らは、主に打撃音波形の最大振幅値や周波数分布に着目して、それらの欠陥評価への有効性を検討してきた^{1)~2)}。

しかしながら打撃音波形パラメータは、欠陥の平面的な大きさと欠陥までの深さの双方の条件の違いにより変化することがわかってはいるものの、各波形パラメータについてそれぞれ欠陥の条件のうちいずれの要因との相関性が最も高いか（感度が高いか）についての詳細な検討はなされていないのが現状である。

したがって今後は、コンクリート中での欠陥の平面的な広がり、欠陥までの深さの情報をそれぞれ個別にした形で、より適確に把握する手法の検討が望まれる。

そこで本研究では、欠陥の評価パラメータとして、打撃音波形の最大振幅値、波形減衰時間および周波数分布を用い、それぞれのパラメータと欠陥の条件との対応関係を調べた。さらに、パラメータの欠陥評価における感度についても比較検討した。検討の手順としては、まず人工欠陥を埋設

した鉄筋コンクリート供試体において実験を実施した。そして3次元FEM解析を行い、得られた波形および周波数分布を実験値と比較検討することにより、周波数分布の物理的な解釈を行った。さらに波形パラメータの検討を行い、複数のパラメータを組合わせた欠陥評価手法に関しても検討した。

2. 実験および解析概要

2.1 供試体

本研究では、長さ195cm、幅195cm、厚さ20cmの鉄筋コンクリート版供試体（W/C：50%）を用いた。内部には円盤状の人工欠陥（発泡スチロール板、厚さ5mm）が埋設されている。欠陥深さは、3, 5, 7および10cmであり、欠陥直径はそれぞれの深さについて10, 15, 20, 30および50cmである。欠陥の設置状況を写真-1に示す。なお、既往の研究結果²⁾から、断面における鉄筋比が小さい場合には鉄筋の影響はほとんどないことが確認されているため、本研究では欠陥上部にも鉄筋を配置した。

2.2 弾性波入力および受振方法

弾性波の入力は、鋼球を高さ10cmからコンクリート表面に落下させることにより行った。なお、

*1 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修（正会員）

*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

*3 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博（正会員）

*4 昭和コンクリート工業株式会社 技術開発部（非会員）



写真-1 欠陥配置状況

既往の実験結果²⁾より、打撃により生じる弾性波の周波数範囲を考慮した上で、用いた鋼球は直径19.05mmの1パターンとした。

打撃音の受振には、コンデンサマイクロフォン（周波数範囲：20Hz～30kHz）を、表面振動の計測には加速度計（周波数範囲：20Hz～45kHz）を用いた。マイクロフォンおよび加速度計により受振された波形は、AD変換器を介しパソコン上に記録した。その後、波形パラメータの抽出を行い、さらにFFT（高速フーリエ変換）により周波数分布を求めた。本研究では、図-1に示すように、受振波形における最大の絶対値を示す振幅を最大振幅値（図中の A_{max} ）と定義し、最大振幅を示した時間から振幅が最後にしきい値と交差する時間までの長さを波形減衰時間（図中の T_d ）として定義した。なお、しきい値は最大振幅値の30%とした。加速度計は打撃点（鋼球落下位置）より水平方向に5cm離れた位置に、マイクロフォンは、加速度計から鉛直方向に10cmの位置にそれぞれ設置した。計測状況を写真-2に示す。

2.3 FEM 解析

FEM解析では、欠陥上側コンクリート部が衝撃荷重を受けたときの挙動を把握する目的で、図-2に示すような3次元モデルを用いて検討を行った。モデルは、簡単のために、欠陥上側コンクリ

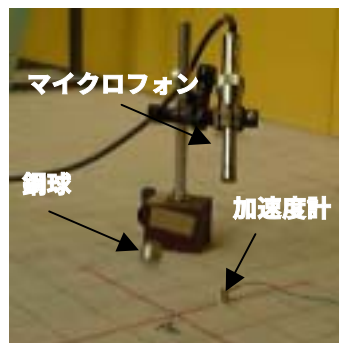


写真-2 計測状況

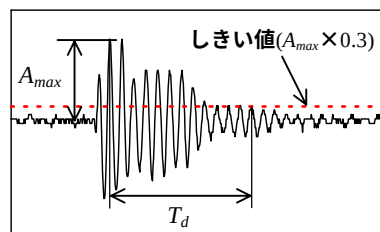


図-1 波形パラメータの定義

ート部を円盤としてモデル化した。モデルは弾性体（弾性係数：40GPa、密度：2.3g/cm³、ポアソン比：0.2）とし、境界条件として底辺におけるx, y, z方向の変位を固定した。

衝撃荷重は、円盤中央部に作用させた。荷重は図-3に示すような波形で節点荷重として入力した。図中において、荷重の継続時間 T_c (sec) は次式³⁾により決定した。ここで、 D は鋼球の直径(m)である。本研究では $T_c = 80 \mu\text{sec}$ を用いた。

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

また、荷重の最大値 F_{max} は次式⁴⁾により求めた。ここで、 m, g および h は、それぞれ鋼球の質量(kg)、重力加速度(m/s²)および落下高さ(m)である。本研究では $F_{max} = 0.88\text{kN}$ とした。

$$F_{max} = \frac{m\sqrt{2gh}}{0.637T_c} \quad (2)$$

解析では、円盤の直径を実験条件と合わせて10, 15, 20, 30および50cmとし、円盤の厚さを3, 5, 7および10cmとして解析を行った。解析の計算時間間隔は2 μs とした。波形出力点は、実験条件を考慮して荷重作用点より5cm離れた位置とした。また出力された波形に対しFFTにより周波数分布を求めた。

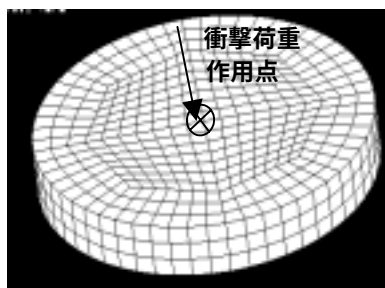


図-2 解析モデル

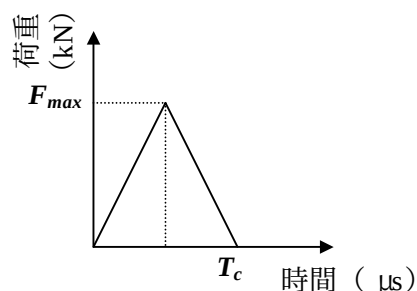


図-3 入力波形

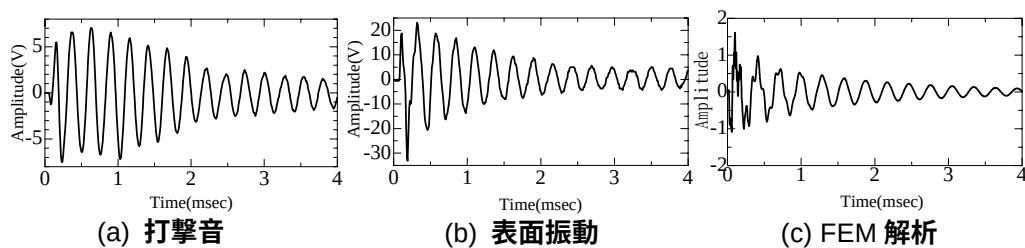


図-4 受振波形（欠陥直径 20cm，深さ 3cm）

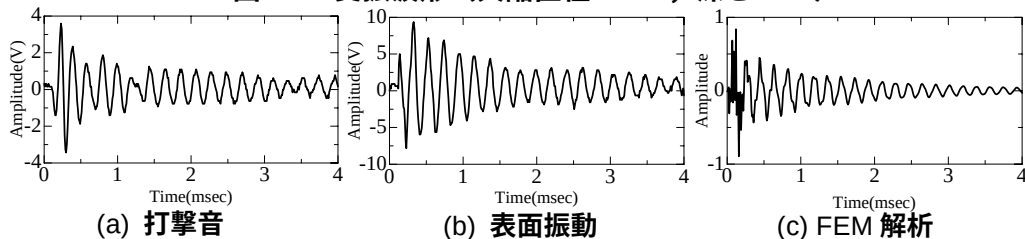


図-5 受振波形（欠陥直径 20cm，深さ 7cm）

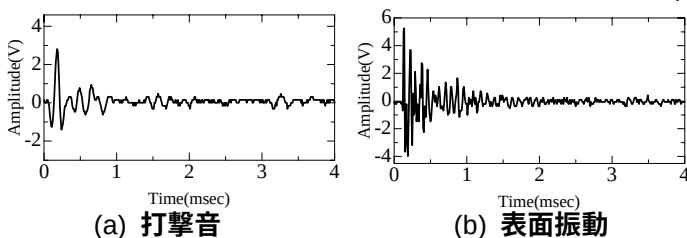


図-6 受振波形（健全部）

3. 実験および解析結果

3.1 周波数分布の物理的解釈に関する検討

図-4 に欠陥直径が 20cm で深さが 3cm の場合について、図-5 に欠陥直径が 20cm で深さ 7cm の場合について、打撃音および表面振動の実験結果、および解析結果の一例をそれぞれ示す。なお、比較のために健全部（供試体における欠陥が埋設されていない箇所）において得られた波形を図-6 にあわせて示す。

これらの図からわかるように、健全部と欠陥部では明らかに異なる特徴を有していることがわかる。すなわち、健全部では、特に打撃音において、振幅が最大値に至った後直ちに減衰し、継続時間は短い。これに対して、欠陥が存在する場合には、振幅が最大値に到達した後は、周期性のある波形が継続している。欠陥がある場合では、欠陥深さが 3 および 7cm の場合ともに、打撃音および表面振動における波形は周期や減衰の傾向が一致しており、よい相関を有しているものと考えられる。一方、解析結果は、実験値と比較すると周期等の

特性をおよそ再現しているものと考えられる。欠陥深さが大きくなった場合、波形における周期が短くなっていることも、実験と解析ともに同様の傾向である。

欠陥の条件の違いが波形におよぼす影響を定

量的に検討するために、各波形について得られた周波数分布を図-7 および図-8 にそれぞれ示す。この場合も比較のために健全部の周波数分布を図-9 にあわせて示す。これらの図によると、各欠陥深さにおいて実験および解析におけるピーク周波数はほぼ一致していることがわかる。また、欠陥深さが変化することにより、周波数分布におけるピーク周波数が変動することも示されている。板状部材におけるたわみ共振現象の場合、同一欠陥直径であれば厚さが大きくなると共振周波数が大きくなる⁵⁾ことが知られており、この場合に対象としている現象はたわみ共振現象であると考えられる。健全部の周波数分布は、打撃音と表面振動では異なる傾向であった。これは、表面振動では周波数分布におけるピーク周波数は板厚に相当する縦波共振周波数を示しているが、打撃音ではその現象が含まれていないためである²⁾。また健全部と欠陥部における周波数分布を比較すると、明らかに分布形状は異なっており、欠陥部ではいずれも明確なピークを有している。この違いに着目すれば、欠陥評価が可能であるものと考えられる。

次に、すべての欠陥のケースにおいて得られたピーク周波数と欠陥直径との関係を図-10 および図-11 に実験および解析それぞれの場合について示す。なお、打撃音では、欠陥深さ 5 および

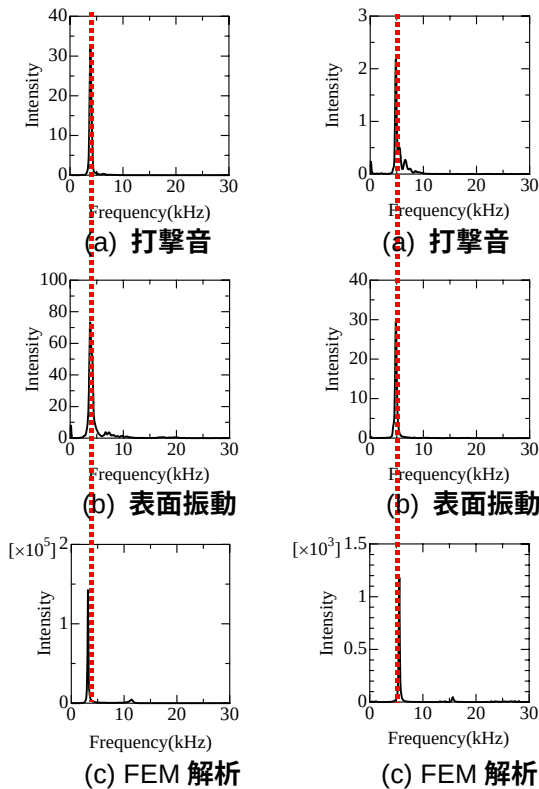


図-7 周波数分布
(直径 20cm, 深さ 3cm)

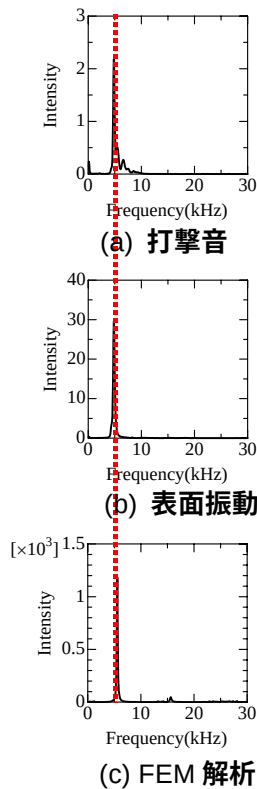


図-8 周波数分布
(直径 20cm, 深さ 7cm)

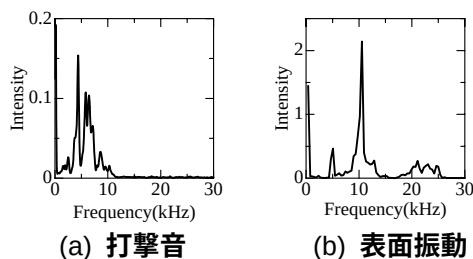


図-9 周波数分布 (健全部)

7cm で直径 10cm の欠陥, および欠陥深さ 10cm で直径 10 および 15cm の欠陥については健全部と同様の周波数分布形状であったため, 図-10 では上記のケースについては表面振動のみの値 (その他のケースでは打撃音および表面振動のピーク周波数は一致している) を示している。

これらの図によれば, 実験値と解析値とは絶対値自体は完全には一致してはいないものの, 欠陥直径が大きくなるとピーク周波数は徐々に小さくなる傾向がみられる。また, 欠陥深さが 3~7cm においては, 直径 10cm の欠陥の場合を除いて欠陥深さが大きくなるほど, ピーク周波数が高くなることも共通している。一方, 欠陥深さが 10cm の場合は, 欠陥直径 10, 30 および 50cm の場合を

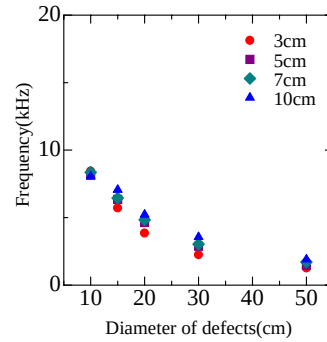


図-10 欠陥直径とピーク周波数
(実験値)

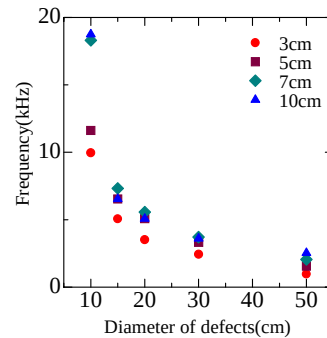


図-11 欠陥直径とピーク周波数
(FEM 解析)

除いて, ピーク周波数は欠陥深さ 7cm の場合よりも小さな値を示した。これは, 解析では円盤の側面を自由境界としているのに対して, 実験ではコンクリートが連続していることに起因するものと考えられる。したがって, 深さ 10cm のケースにおいては, 解析は実験におけるたわみ共振現象を再現できていないものと考えられる。これについてはより実験の条件に近い解析モデルを用いる必要があるものと考えられる。

以上の考察により, 欠陥深さ 3~7cm については打撃音はたわみ共振現象を対象としていることが, 解析的にも明らかになった。

周波数分布を欠陥評価パラメータとして捉えた場合, 図-10 および 11 から考えると, 本研究の範囲内では, 欠陥直径 10cm を除いたケースでは, 欠陥深さごとのピーク周波数の差は大きくはない。これらより, ピーク周波数は, 欠陥の平面的な広がりに対して感度の高いパラメータであると推察できる。したがって, 周波数分布におけるピーク周波数は, 欠陥のおおよその広がりを把握するのに有効であると考えられる。

3.2 波形パラメータの感度に関する検討

図-12(a)および(b)に、打撃音における受振波形の最大振幅値と波形減衰時間を、各欠陥深さごとに示す。図中の点線は健全部において得られた値の範囲を示している。また、最大振幅値および減衰時間ともに、健全部において得られた値に対する比として現している。なお、最大振幅値および波形減衰時間ともに各欠陥直径ごとに示している。

これらの図によれば、最大振幅値および波形減衰時間ともに欠陥深さが大きくなるにしたがって徐々に小さくなる傾向のあることがわかる。これは、欠陥厚さが大きくなると衝撃を受ける部分(主に欠陥上側コンクリート部)の剛性が増加し変形に対する抵抗性が大きくなるため、たわみ共振現象が相対的に生じにくくなったためと考えられる。

最大振幅値と波形減衰時間とを比較すると、傾向は同様であるが、健全部との絶対値の差がより大きくなるのは波形減衰時間であることが図-12(a)および(b)の比較によってわかる。すなわち、図-4～6に示したように、健全部では最大振幅に到達後すぐに減衰してしまうため減衰時間は極めて短い。これに対して欠陥が存在する場合は、波形から明らかなように共振現象が生じているため、健全部のようにすぐに減衰せず、徐々に対数的に減衰することによるものと考えられる。しかしながら、欠陥深さの変化に対するパラメータ値の変動率の観点からみれば、最大振幅値の方が波形減衰時間より若干優れていることがわかる。

これら2つのパラメータは、いずれも欠陥深さが3cmにおいては欠陥直径に対する感度が高いことがわかる。したがってこの場合は、波形パラメータも周波数ピークと同様の役割を果たすものと考えられる。一方、これらのパラメータは、欠陥深さが大きくなると欠陥直径に対する感度は低くなるものの、ともに欠陥深さを把握するのに有効となるものと考えられる。

4. 複数のパラメータによる欠陥評価手法

3. の検討により、周波数分布は欠陥のおおよそ

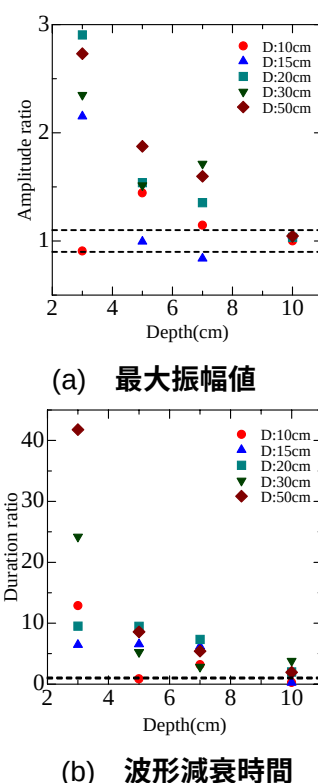


図-12 最大振幅値と波形減衰時間

の平面的な広がりを示すパラメータであり、波形特性としての最大振幅値および波形減衰時間は、欠陥の深さを評価することに適している可能性が示された。したがって、ここではこれらのパラメータを組み合わせた欠陥評価手法に関する検討を行う。

図-13(a)および(b)に、ピーク周波数と最大振幅値の相関図およびピーク周波数と波形減衰時間の相関図を示す。図中の点線は、図-12の場合と同様各波形パラメータにおける健全部の範囲を示している。この相関図によれば、ピーク周波数と最大振幅値の場合は、ピーク周波数が大きくなるほど、つまり欠陥直径が小さくなるほど、または欠陥深さが大きくなるほど最大振幅値は徐々に小さな値になる傾向がわかる。これに対してピーク周波数と波形減衰時間の相関図では、深さ3cmの場合は、最大振幅値の場合と同様ピーク周波数の増加に伴い徐々に小さくなることがわかるものの、欠陥深さ5, 7および10cmでは、ピーク周波数の値と波形減衰時間の関係には明確な関係がみられない。したがって、最大振幅値は欠陥深さが大きくなっても欠陥の大きさに応じた値を示すが、波

形減衰時間は欠陥深さ 5cm 程度以上では欠陥の直径とはほとんど関係なく、感度が小さいものと考えられる。

以上のような結果から考察すると、ピーク周波数とよい相関を有しているのは最大振幅値であることがわかる。したがって、このような関係を用いることにより、欠陥の平面的な広がりに加えて相対的な欠陥の深さ評価が可能であるものと考えられる。

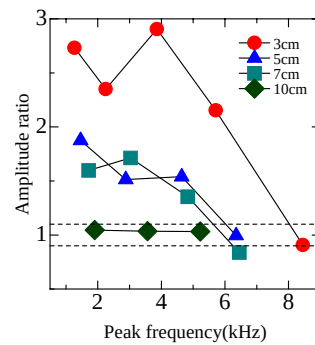
このような関係を用いた欠陥評価を行う手順としては、まず図-10 により欠陥の平面的な広がりを把握でき、さらに図-13 を用いることにより欠陥の相対的な深さの評価を行うことが有効と考えられる。

5. まとめ

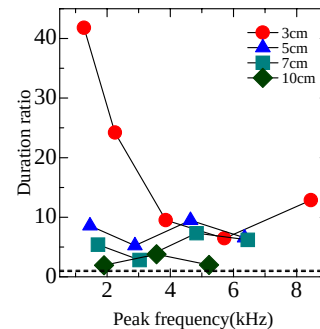
本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 実験における波形と解析における波形は良く一致しており、解析モデルの妥当性が示された。
- (2) 実験と解析における周波数分布のピーク周波数はほぼ一致した。ピーク周波数は欠陥直径が大きくなるほど小さくなり、また、さらに欠陥深さが大きくなるほど大きくなることから、実験における現象はたわみ共振現象であることが、解析結果からも明らかとなった。また、欠陥直径とピーク周波数の相関図より、ピーク周波数は欠陥深さよりも、欠陥直径に対する感度が高いパラメータであることが明らかとなった。
- (3) 波形パラメータとして最大振幅値と波形減衰時間を用いた場合、欠陥深さが大きくなると両者ともに徐々に小さくなる傾向が明らかとなった。
- (4) 周波数分布におけるピーク周波数と最大振幅値の相関図を用いることにより、欠陥の平面的な大きさおよび相対的な欠陥深さを評価する手法の可能性が示された。

謝辞 実験の実施およびデータの整理に際し岐阜



(a) 最大振幅値



(b) 波形減衰時間

図-13 ピーク周波数と波形パラメータ

大学学部生の永田卓寛君に多大なるご助力を頂いた。記してここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.65-79, 2002.5
- 2) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 遠藤友紀雄: コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1545-1550, 2002
- 3) M.J.Sansalone and W.B. Streett: Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 4) 白鳥雅也, 松貝勇, 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.379-684, 1992
- 5) たとえば, 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, 東京大学博士論文, p.12, 1997