

論文 コンクリート内部欠陥の形状が打撃音周波数特性に与える影響

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，コンクリート内部に存在する欠陥の形状が，打撃音の周波数特性に与える影響について検討を行った。実験に加えて，FEM 解析も行い，打撃を受けた場合の欠陥上側コンクリート部の時刻歴応答および変形挙動の確認も行った。その結果，周波数分布における共振周波数に関しては，欠陥の形状の影響は小さくなく，周波数分布による欠陥の大きさ評価が可能であることが明らかとなった。

キーワード：非破壊検査，打音法，欠陥形状，周波数特性，FEM 解析

1. はじめに

著者らは，これまでに，打音法における欠陥評価指標として，主に打撃音の周波数特性に関する検討を行ってきた^{1,2)}。その結果，欠陥が存在する場合においては，打撃音には，主に，欠陥上側コンクリート部のたわみ共振現象が反映されていることが明らかとなっている。また，共振周波数と欠陥直径の間には良い相関があり，この関係を用いた欠陥の大きさ評価の可能性を示している。

一方，上記の検討で対象としたのは，円盤状欠陥のみである。実構造物における欠陥は，その形状は様々であり，その影響は，現状では未確認である。

そこで本研究では，欠陥形状の違いが打撃音の周波数特性に与える影響を明らかにすることを目的として，実験および解析により検討を行った。検討は，主に FEM 解析により行い，周波数分布における共振周波数の比較を行うとともに，モデルの時刻歴での変形挙動を求め，生じている物理現象について考察を行った。実験では，欠陥面の凹凸の影響についても検討した。

2. FEM 解析概要

2.1 解析ケース

本研究では，欠陥形状として図-1 に示すような 6 種類の解析ケースを用いた。各形状における寸法は，各形状ごとの面積がほぼ一定となるように決定した。各ケースにおける面積を表-1 に示す。この表からわかるように，円盤の面積を基準とした場合，差は最大で 6%程度であり，ほぼ同等と考えることができる。

2.2 解析条件

ここでは，図-2 (円盤の場合) に示すようなモデルにて解析を行った。ここでは，欠陥上側コンクリート部に加えて，周辺コンクリート部もあわせてモデル化した。なお，図に示すように，モデルは対称性を考慮して，円盤，四角形状の場合は 1/4 モデルにて，また三角形形状の場合は 1/2 モデルにて解析を行った。

周辺コンクリート部と欠陥上側コンクリート部の境界は，変位を共有する条件であり，周辺コンクリート部の底面における節点の全自由度を拘束した条件を採用した。モデルは弾性体とし，弾性係数：40GPa，密度：2.3g/cm³，ポアソン比：0.2 とした。

*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 工学部社会基盤工学科 助教授 工博 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 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)

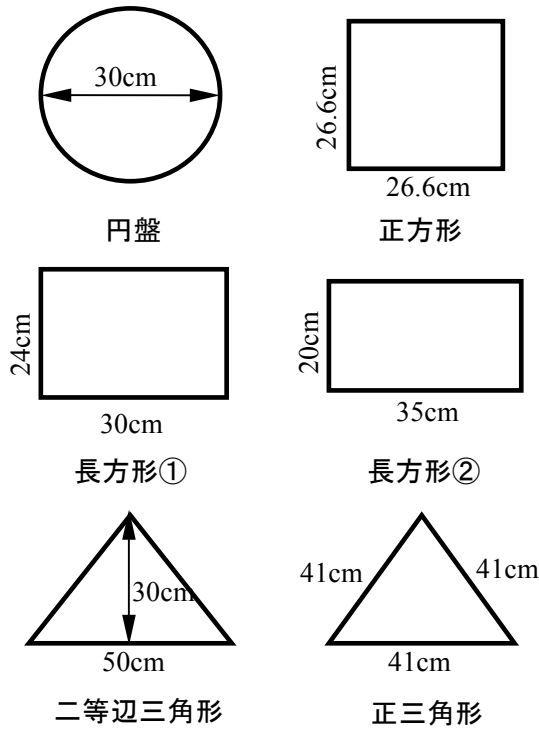


図-1 欠陥形状

表-1 欠陥形状と面積

欠陥形状	面積 (cm ²)	面積比
円盤	706.5	1
正方形	707.6	1.002
長方形①	720.0	1.019
長方形②	700.0	0.991
二等辺三角形	750.0	1.062
正三角形	727.8	1.030

衝撃荷重は、図-3 に示すような波形で入力した。図中における荷重継続時間および荷重の最大値は著者らの既往の研究²⁾で用いた値を採用した。衝撃荷重作用位置はモデルの中心とした。ここでは荷重作用位置より5cm離れた位置の時刻歴節点変位を算出し、FFT（高速フーリエ変換）により周波数分布を求めた。

解析は各形状で、厚さ3および7cmの2パターンについて実施した。

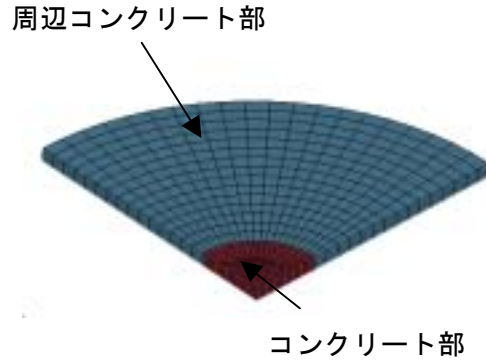


図-2 解析モデル（円盤の場合）

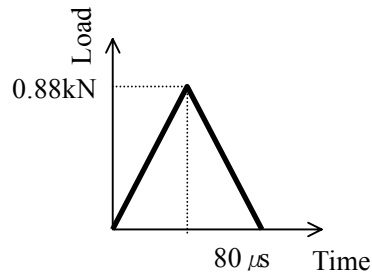


図-3 入力波形

3. 実験概要

3.1 欠陥形状

供試体は、厚さ27cmのコンクリート版（W/C：0.5）を用い、写真-1に示すような二等辺三角形（底辺：50cm、高さ：30cm）欠陥の2種類（凹凸のあるものとないもの、凹凸の高さ：3cm）を深さ7cmに配置したものを用意した。また、比較のために円盤形状も用意した。なお打撃点は欠陥の中心部に相当するコンクリート表面とした。なお、人工欠陥の厚さは5mmとした。

3.2 弾性波計測

計測状況を写真-2に示す。本研究では、直径19.06mmの鋼球を高さ10cmから落下させることにより、コンクリートを打撃した。打撃により生じた打撃音を、マイクロフォン（周波数範囲：0.3Hz～30kHz）により計測した。マイクロフォンにより受振された波形は、アンプを介しAD変換器を通してパソコン上に記録した。計測におけるサンプリングタイムは10μs（ナイキスト周波数：50kHz）とし、計測時間は25msec（データ数2500）とした。実験について



凹凸なし 凹凸あり
写真-1 二等辺三角形の欠陥

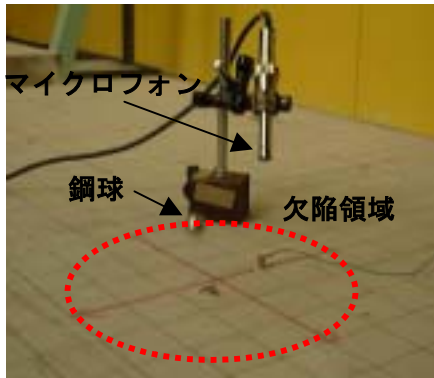


写真-2 計測状況

も、得られた波形に対して FFT を行い周波数分布を求めた。なお、マイクロフォンは打撃点(欠陥上側コンクリート部中心)より 5cm 離れた位置に設置した。

4. 実験および FEM 解析結果

4.1 欠陥深さ 3cm の場合

図-4 に、欠陥深さ 3cm の場合の実験および解析により得られた波形を示す。欠陥形状が円盤の場合の実験および解析の波形を比較すると、解析の場合は対数的に減衰する波形形状であるのに対して、実験の場合は単純な減衰傾向ではなく、異なるものであった。

解析における二等辺三角形形状の場合の波形および正方形形状の波形は、基本的な形状は円盤の場合とほぼ同じであった。

各波形の周波数分布を図-5 に示す。これらの図から、実験・解析結果の何れの場合でも、ほぼ単峰のピークを有する分布形状であり、単一の現象が支配的であると考えられる。様々な欠陥直径および深さに対して検討を行った著者らの既往の研究結果²⁾では、周波数分布におけるピークはたわみ共振現象に起因するものであ

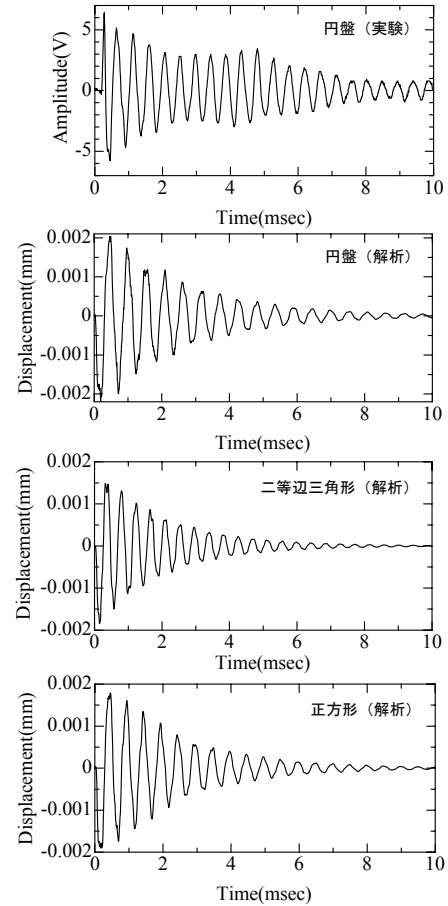


図-4 受振波形 (深さ 3cm)

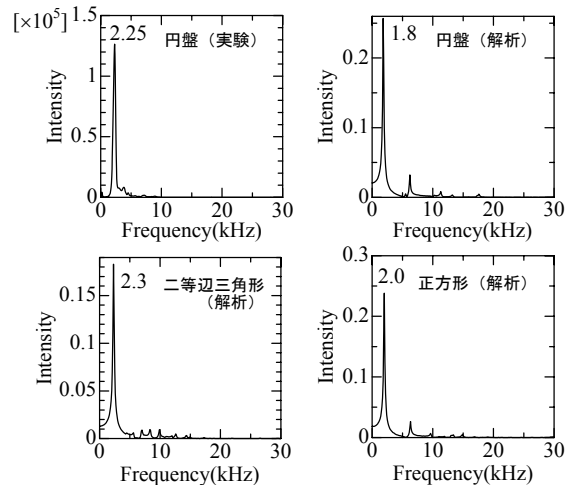


図-5 周波数分布 (深さ 3cm)

ることが示されている。この研究の場合は欠陥形状が円盤であることから、欠陥形状が異なる場合における現象を確認しておくことは重要である。そこで、図-6 に FEM 解析により得られたモデルの変形挙動を各欠陥形状についてそれぞれ示す。

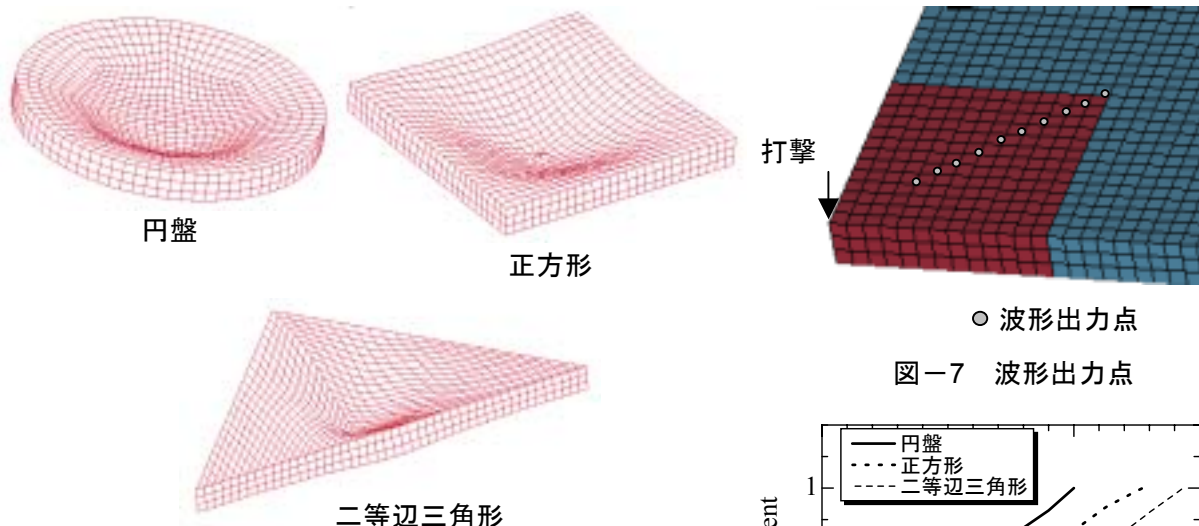


図-6 モデルの変形挙動

何れのモデルにおいても、打撃点の変位が最も大きくなる変形挙動を示しており、たわみ共振現象が生じていることが確認できる。このため、欠陥の形状が異なる場合についても、衝撃を受けた場合の挙動は同じものであることが明らかとなった。

一方、上記のように変形挙動は同じであるが、周波数分布のピーク値は、各欠陥形状ごとに異なるものであった。以下に、この違いについて考察を行う。

共振周波数の値は、円盤の場合が最も小さい値であり、正方形、二等辺三角形の順に大きな値となっている。円盤の場合とその他の場合の違いは、欠陥上側コンクリート部と周辺コンクリートとの境界に角が存在するか否かである。端部近傍領域の変位振幅は、角の存在により変形が拘束されるため、円盤の場合と比べて小さくなることが考えられる。このことを明らかにするため、解析において、図-7 に示すようにモデル端部から1節点ごとに算出される変位波形の最大振幅のプロファイルをモデル形状ごとに求めた。結果を図-8 に示す。

この図によれば、円盤の場合に比べて共振周波数の大きい二等辺三角形や正方形は、変位振幅は円盤と比較して小さいことがわかる。さらに、二等辺三角形の変位振幅は、正方形の場合

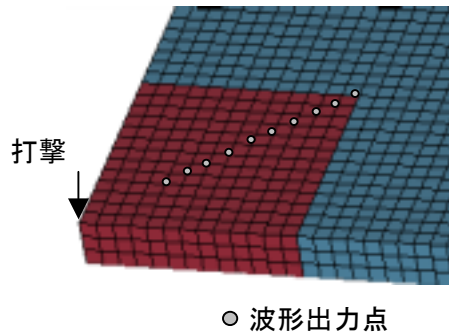


図-7 波形出力点

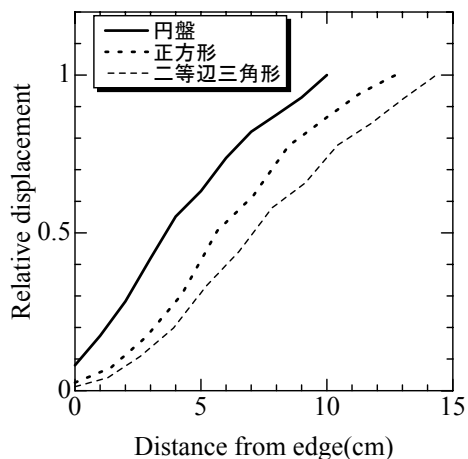


図-8 各モデルの変位振幅

と比べて小さいこともわかる。このように、共振周波数の大きなものほど端部付近の変位振幅は小さくなることがわかった。モデル形状から考察すると、面積は同程度であるため、モデルに鋭角が存在することが原因として考えられる。二等辺三角形の場合、正方形(90°)に比べてモデル端部の角度(約68° および56°)が鋭く、周辺領域から変位の拘束を受ける程度が大きくなると考えられる。このことにより、端部付近の変位振幅が小さくなり、有効に振動する領域もそれに応じて小さくなるため、共振周波数が大きくなったものと考えられる。

このことを確認するため、各欠陥形状ごとのピーク周波数を図-9 に示す。この図からわかるように、円盤の場合に比べて三角形形状や四角形状の場合の共振周波数は大きくなっており、さらに三角形形状の共振周波数は四角形状の共振周波数より大きくなってきている。このことは、先に検討した結果を裏付けるものである

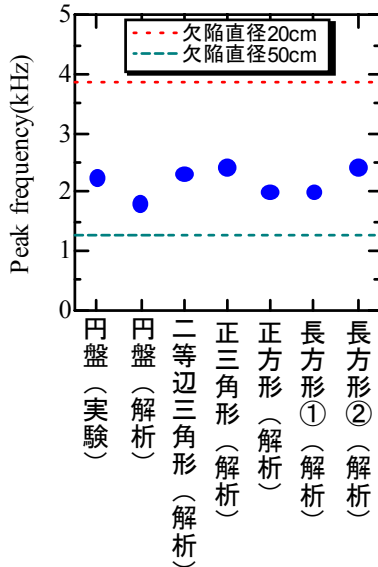


図-9 欠陥形状と共振周波数 (深さ 3cm)

と考えることができる。

しかしながら、共振周波数をパラメータとして考えた場合、形状ごとに違いは存在したものの、それらの差は大きくない。図-9 に示したように、すべてのケースにおける共振周波数は、欠陥直径 20cm および 50cm の間に位置している。このため、欠陥形状が異なる場合でも、その影響は小さいため、ピーク周波数を用いた欠陥の平面的な大きさ評価が可能であると考えられる。

4.2 欠陥深さ 7cm の場合

図-10 に、欠陥深さ 7cm の場合の受振波形を示す。実験および解析ともに、欠陥形状によらず、波形の周期等が何れの場合においても良く一致している。このような傾向は欠陥深さ 3cm の場合と同様である。また、実験における二等三角形凹凸ありのケースでは、凹凸なしの場合と比較して若干周期は長くなっている。これは、凹凸の存在により、欠陥厚さが小さくなっているためと考えられる。次に、すべてのケースにおける周波数分布を図-11 に示す。

深さ 7cm の場合でも、周波数分布にはたわみ共振現象に起因するピークのみ確認できる。また、欠陥形状が異なる場合、共振周波数は大きくなるのが、実験および解析結果からわかる。これは、3cm の場合と同様の理由によるものと考えられる。実験における三角形欠陥凹凸あり

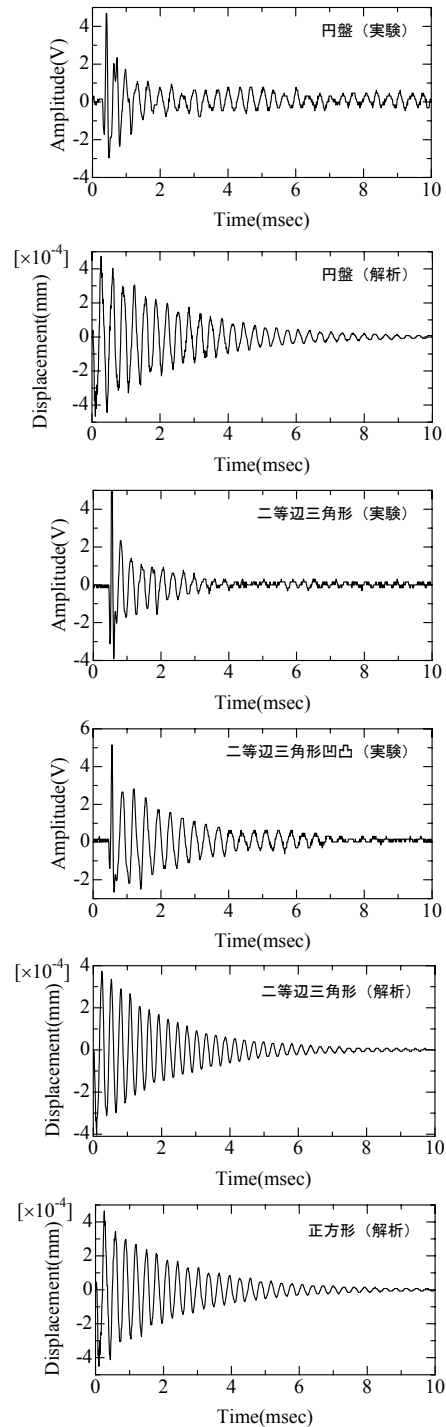


図-10 受振波形 (深さ 7cm)

の場合は、なしの場合に比べて共振周波数が小さくなっている。これは、凹凸ありの場合は欠陥上面の平均的な深さが小さくなったためであると考えられる。

欠陥形状とピーク周波数の関係を図-12 に示す。この図によれば、欠陥深さ 3cm の場合と同様三角形形状および四角形状の欠陥の共振

周波数は円盤の場合に比べて大きくなっているものの、いずれのケースにおいても、欠陥直径20cmにおける値と欠陥直径50cmにおける値の中間部に位置している。この観点から考えると、欠陥面積が同程度であればピーク周波数もおおよそ近い値を示していると捉えることができるため、ピーク周波数と欠陥直径の相関図²⁾を用いれば、欠陥の平面的な大きさ評価が可能となるものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 欠陥形状が異なる場合でも、たわみ共振現象が生じることが確認できた。しかしながら、周波数分布における共振周波数は欠陥形状ごとに若干異なるものであった。
- 2) この原因を、解析におけるモデルの変位振幅の大きさから検討した結果、三角形や四角形状の場合、端部における変位振幅が円盤の場合より相対的に小さくなっており、周辺領域からの拘束の効果が大きくなっているためであることが示された。
- 3) 共振周波数の感度は、欠陥形状により影響を受けるものであったが、欠陥直径の違いによる影響に比べて値の差は相対的に小さいものであった。この傾向は、欠陥深さ3cmおよび7cmの場合で同じであった。

謝辞 本研究の実験の実施に際し岐阜大学学部の豊田剛司君にご助力を得た。記してここに謝意を表す。また、本研究は、財団法人港湾空港建設技術サービスセンターの援助を受けて行ったものである。この援助に対して深く感謝する。

参考文献

- 1) 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

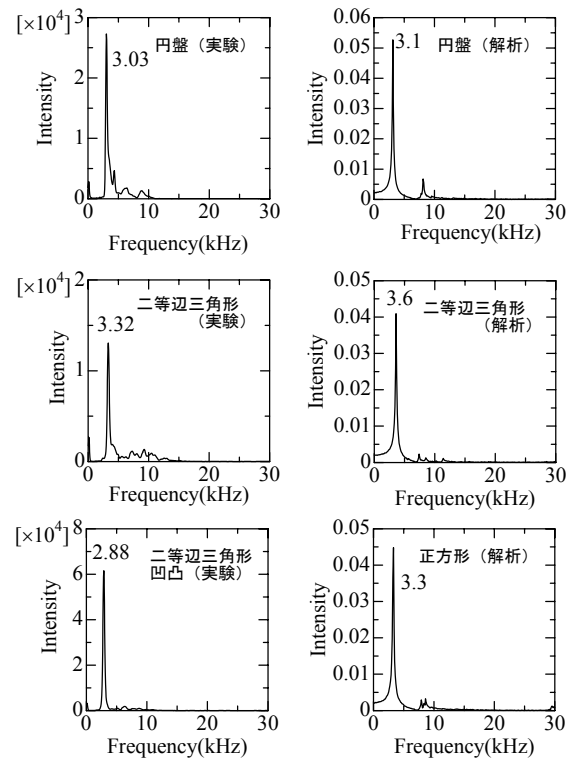


図-11 周波数分布 (深さ 7cm)

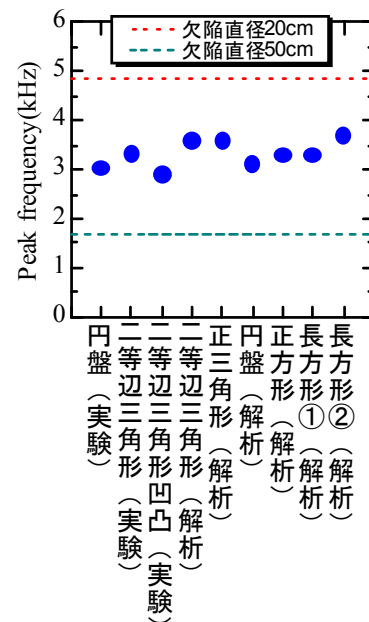


図-12 欠陥形状とピーク周波数 (深さ 7cm)

- 2) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 児玉一郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1583-1588, 2003