

## 報告 RC 構造物への打音法の適用

伴 享<sup>\*1</sup>・歌川 紀之<sup>\*2</sup>・森濱 和正<sup>\*3</sup>

要旨：コンクリート構造物の品質を調査するためのひとつの手法として打音法による非破壊検査に着目した。この手法はハンマーによる打撃音をマイクで収録し、音の物理量から欠陥を検知する手法であり、従来の主観的な耳で聞く叩き検査に比較し、高精度で客観的な判断が可能である。本研究では、鉄筋コンクリート構造物への適用性を検討し、部材厚さや内部欠陥の測定では鉄筋の影響をうけることなく評価が行えることがわかった。また、材齢の違いが評価結果に及ぼす影響や支持条件の違いによる差異等を実験的に検討し、測定上の課題を整理した。

キーワード：非破壊検査，打音法，RC 構造物，内部欠陥，厚さ測定，材齢，支持条件

### 1. はじめに

構造物の維持管理のために、その構造物の完成時の品質や性能を適切に評価し、後の維持管理計画ならびに将来の寿命予測に対して情報を得ることは重要なことである。このような場合、施工時のプロセス検査や出来形検査などで大部分の情報は得られると考えられるが、施工時に生じた品質の不具合箇所などは何らかの方法により調査を行う必要がある。

本研究では、構造物の初期の品質や性能を非破壊試験により把握することを目的とし、一般的な構造物である鉄筋コンクリート構造物を対象に種々の非破壊検査手法を適用し検討を行っている。ここでは打音法に着目し、鉄筋コンクリート構造物の品質検査に対する適用性の検討を行った。

鉄筋コンクリート構造物への適用性の検討では、構造物の条件にもよるが、(1)鉄筋の影響や部材厚さ測定の適用範囲、(2)背面の支持条件や強度の影響、(3)若材齢の影響(新設時の検査)、(4)欠陥の検知性能に着目した。ここでは、これらの項目を検討・整理するために、L字型の鉄筋コンクリート構造の供試体を対象に測定した結果を報告するものである。

### 2. 打音法の概要

#### 2.1 基本的な考え方<sup>1)</sup>

構造物を打撃した時の打撃音は、その構造物の表面振動と非常に強い相関があり、これによって対象構造物の物性や、形状、欠陥の有無など種々の特徴が把握される。

これは、打撃によって各部に伝播した弾性波による音響放射が、部材の固有振動数や板のたわみ振動など対象物の打撃位置における平均的な性状を音の情報として与えてくれることによる。図 - 1 に打撃音の発生概念を示す。

#### 2.2 打撃音の評価方法<sup>2) 3)</sup>

打撃により各部に伝播した弾性波による音響放射の中には、縦波振動や板の曲げ振動等が存在する。ハンマで薄い板を叩くと曲げ振動が卓越して大きな音が発生し、逆に厚い板を叩くと曲げ振動は生じにくいため大きな音が発生しない。つまり、部材厚の大小により曲げ振動にて生じる音の大きさの違いが現象として現れる。

##### (1) 振幅比

振幅比は、打撃によって生じる音の大きさの違いに着目した評価パラメータであり、打撃音最大振幅値を加力振幅最大値で除した値である(図 - 2)。振幅比の算定は式(1)により行う。

\*1 佐藤工業(株) 土木本部技術部門 工修 (正会員)

\*2 佐藤工業(株) 中央技術研究所 工博 (正会員)

\*3 (独)土木研究所 技術推進本部 構造物マネジメント技術チーム (正会員)

なお、式(1)に示すように打撃力にて振動音を基準化することで、個々の打撃力の違いによる影響を少なくしている。

$$\text{振幅比 } A = P_{\max}/F_{\max} \quad (1)$$

ここで、 $F_{\max}$  : 加力振幅最大値

$P_{\max}$  : 打撃音最大振幅値

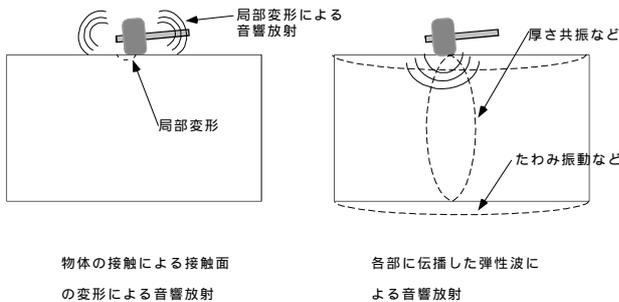


図 - 1 打撃音発生概念

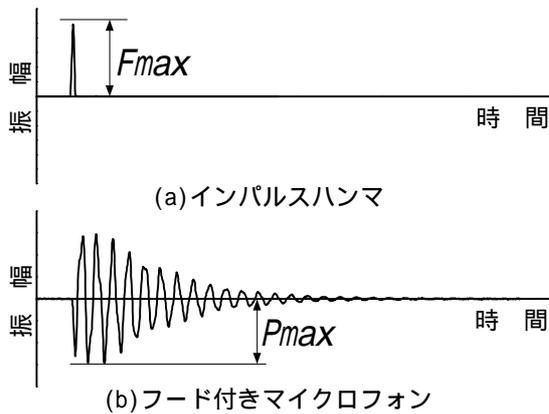


図 - 2 振幅比の算定

## (2) 振幅比と部材厚さの関係式

振幅比により構造物を評価する場合、パラメータの物理的な関係づけを行う必要がある。ここでは衝撃インピーダンスの理論を用いて、振幅比と部材厚さの関係式を導出している。

半無限の曲げ板の衝撃インピーダンス  $Z_b$  の

算定式<sup>4)</sup>は式(2)で表される。

$$Z_b = 4/\sqrt{3} \cdot \rho \cdot V_p \cdot h^{1/2} = 2.31 \cdot \rho^{1/2} \cdot E^{1/2} \cdot h^2 \quad (2)$$

ここで、 $Z_b$  は衝撃力と板の発生速度の比  $Z_b = F_{\max}/v_{\max}$  で表される。また、 $\rho$  は密度、 $V_p$  は弾性波速度、 $E$  は弾性係数、 $h$  は板の厚さである。さらに、半無限の板が音源となる場合、音圧  $P$  と板の速度  $v$  の比は固有音響インピーダンス  $P/v = \rho_a C_a$  として表される。ここで  $\rho_a$  は空気の比重、 $C_a$  は音速である。

したがって、これらのインピーダンスを用いると、厚さと振幅比の関係式は式(3)となる。

$$A = P_{\max}/F_{\max} = v_{\max} \rho_a C_a K / F_{\max} = \rho_a C_a K / Z_b = \rho_a C_a K / (2.31 \rho^{1/2} E^{1/2} h^2) = B h^{-2} \quad (3)$$

ここで、固有音響インピーダンスの右辺の  $\rho_a C_a$  に乗じた係数  $K$  は、音源が有限であることやフード付マイクロフォンのためフード内の限られた場の音圧を測定しており、その特性の補正係数である。なお、 $B = \rho_a C_a K / (2.31 \rho^{1/2} E^{1/2})$  となる。

式(3)から振幅比  $A$  と部材厚さ  $h$  の関係式(4)

$$h = 10^{(0.5 \log B - 0.5 \log A)} \quad (4)$$

が得られる。 $B$  には  $K$  が含まれ機器固有の値となり、機器ごとにキャリブレーションを行い決定する。式(4)を用い打撃音の計測結果から部材厚さを推定し、変状や欠陥の有無の評価を行う。

## 3. 実験概要

### 3.1 対象試験体

L型供試体は図-3に示す鉄筋コンクリート構造である。測定対象部位のコンクリート厚さは、底版部が150~300mm、壁部が280~650mm

表 - 1 供試体の材料種類と底版支持条件

供試体		コンクリート種類			粗骨材 最大寸法 (mm)	底版 支持条件
名称	部位	記号	セメント の種類	呼び 強度		
A	壁	N18	普通	18	25	-
	底版	BB18	高炉 B	18	40	単純支持 (合板型枠)
B	壁	N27	普通	27	25	-
	底版	BB18	高炉 B	18	40	碎石+砂
C	壁	N40	普通	40	25	-
	底版	BB27	高炉 B	27	40	単純支持 (合板型枠)

である。底版には内部欠陥を模擬した発泡スチロール（空洞を模擬，寸法：100×200×20mm）とポーラスコンクリート（寸法：100×200×50mm）が計8箇所設置されている。供試体は3体あり，表 - 1 に示すようにコンクリート種類や底版の支持条件が異なる。

測定は図 - 3 に示すように6測線設け，コンクリート打設後1，2，4，13週，ならびに6，12ヶ月で実施した。各測点では3～5回測定を行い，平均値を評価に用いた。

### 3.2 測定機器

測定機器は，インパルスハンマ，フード付きマイクロフォン，A/D変換器とノートパソコンにて構成されている<sup>2)</sup>。

#### (1) 打撃機器

インパルスハンマは，発生させる打撃力・周波数特性をヘッド部の材質および質量で調整できる。ここでは，スチール製の先端チップを装着し，質量200g程度のインパルスハンマを用いている。また，打撃入力特性は約0～5kHzの範囲の周波数特性を持っている。

#### (2) フード付きマイクロフォン

マイクロフォン周辺にフードを取りつけた聴診器状の集音装置により，周囲の騒音の影響を受けにくい構造としている。それにより，コンクリート内部からの放射音を効率良く計測でき，

マイクロフォンとコンクリートの距離を垂直かつ一定(1cm程度以内)に保つ利点がある。

## 4. 実験結果

### 4.1 部材厚さの評価

図 - 4，5 に供試体 A，B 底版部の測線2，5の測定結果を示す。図は材齢1週と12ヶ月の測定結果をプロットしている。

両供試体とも概ね1週の測定結果が12ヶ月よりも小さくなっており，材齢による弾性係数の違いが結果に現れたものとなった。

供試体の壁部に近い700，900mm位置では，壁部下端の拘束の影響や部材厚さの増加により曲げ振動が生じにくくなると考えられたが，設計厚さとほぼ同じか小さく評価され，厚さに応じた振動をしていることがわかった。

各供試体で，測線による違いや底版の支持条件ならびにコンクリート種類による違いはあまり見られない。

### 4.2 内部欠陥検知

図 - 6 に模擬欠陥位置の測線1，3，4，6の測定結果を示す。なお，内部欠陥深さは測線1，4が浅く，測線3，6が深い。

本方法にて発泡スチロール部のような空隙が存在する欠陥部分を打撃すると，欠陥位置の深さにもよるが，その位置での測定結果は見かけ

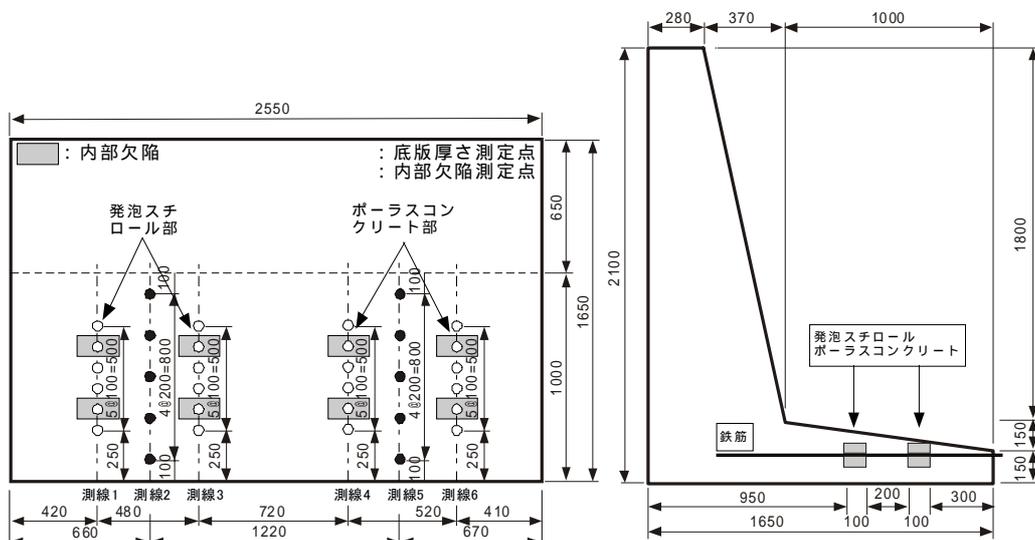


図 - 3 L型供試体の形状ならびに測定位置

の部材厚さが小さくなって現れる。

図に示したように浅い位置の欠陥では、その直上にて3~5cm程度部材厚さが設計値に比べて小さくなっており、健全部の厚さとの違いから欠陥を検知できるものと考えられる。一方、深い位置（鉄筋の下側）に設置された欠陥ではこのような違いは現れにくく、健全部と同じ部材厚さとして評価され、欠陥の検知はできていない。

同じく図に示したように、ポーラスコンクリート部では、すべての供試体にて健全部との区別は不可能であった。

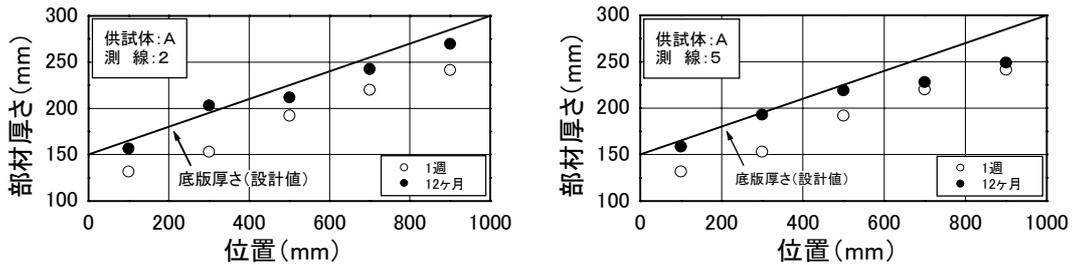
欠陥部の区別が行えない理由は、発泡スチロールでは埋込深さが深いため欠陥直上での曲げ振動が生じにくく、打撃位置における底版その

ものの曲げ振動が生じていることによる。また、ポーラスコンクリート部では底版コンクリートと物性値が同等であり、前述と同様な振動性状となっていることによると考える。

#### 4.3 材齢の影響

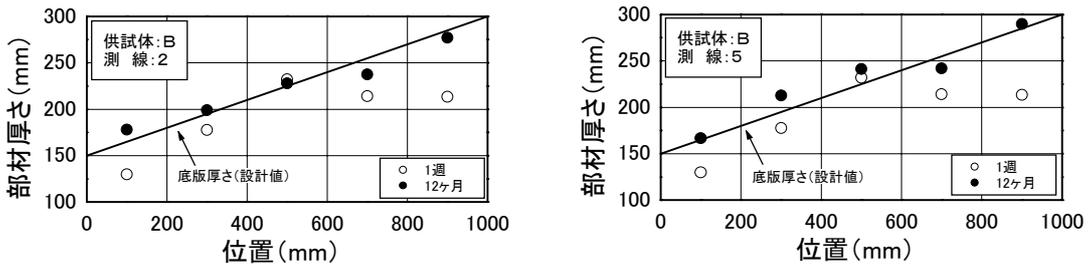
コンクリートは材齢初期で弾性波速度や弾性係数が小さく、時間経過による強度発現に伴いそれらが増加する。構造物の竣工時の品質検査を考えると、型枠脱型直後の測定など材齢初期での測定が行われる場合もある。ここでは若材齢時の測定結果について検討を加えた。

そこで、基準材齢に対してある材齢の振幅比がどのように変化するかを調べるため、式(3)から式(5)を導いた。式(5)に示すように、材齢の違いによるインピーダンスの変化、つまり



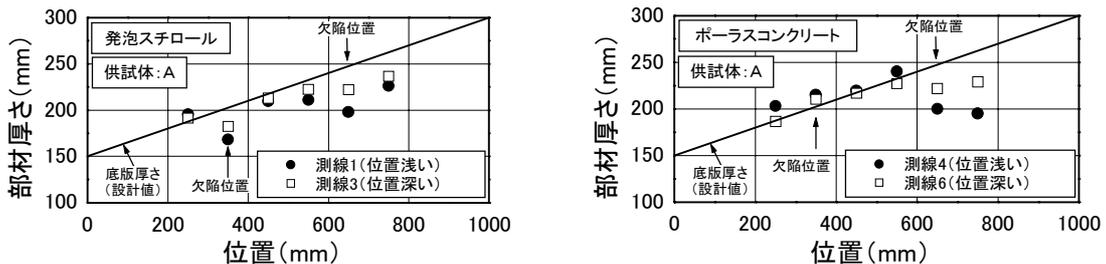
(a)測線2 (b)測線5

図 - 4 部材厚さ測定結果 (A 供試体)



(a)測線2 (b)測線5

図 - 5 部材厚さ測定結果 (B 供試体)



(a) 発泡スチロール (b) ポーラスコンクリート

図 - 6 模擬欠陥の測定結果 (A 供試体)

振幅比の逆数の変化は、密度 と弾性波速度  $V_p$  の積で表される。

$$\left(\frac{A_i}{A_{Ref}}\right)^{-1} = \frac{4/\sqrt{3} \cdot (\rho \cdot V_p)_i \cdot h^{1/2}}{4/\sqrt{3} \cdot (\rho \cdot V_p)_{Ref} \cdot h^{1/2}} = \frac{(\rho \cdot V_p)_i}{(\rho \cdot V_p)_{Ref}} \quad (5)$$

ここで、添字  $i$  はある材齢を表し、添字  $Ref$  は基準材齢を表す。

各材齢におけるコア試験の結果から式(5)により、基準材齢に対する振幅比の逆数を求めた結果(理論値)および打音法で得られた結果(測定値)をコンクリート種類ごと(A・B, C)に整理すると、図-7のようになる。供試体により若干差は見られるが、概ね1週, 2週では13週と比較して、理論値, 測定値ともに振幅比の逆数の比が90%程度であることがわかる。

この結果から、新設時の材齢初期に測定を行う場合には、若材齢時の弾性波速度や弾性係数の値から式(5)の係数を用い補正の必要性が理解できる。

#### 4.4 支持条件の違い

打音法のような振動現象を用いる手法では、構造物に入力するエネルギーが比較的大きく、構造物の支持条件の違いにより構造物全体の振動が生じるなど、ほしい情報と異なる結果が得られる場合も予想される。そこで、3 供試体の底版部にて100×100mm 間隔の格子状での測定を行い、この違いによる差異を検討した。

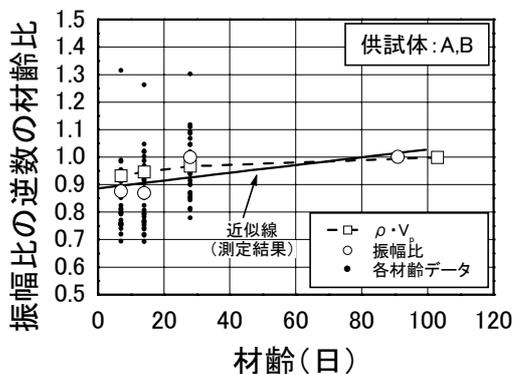
図-8にL型供試体A~Cの部材厚さと周波数重心<sup>2)</sup>のコンター図を示す。この評価パラメ

ータは打撃音周波数スペクトルを打撃入力周波数スペクトルで除算した伝達関数を用いるものである。この関数の0~5kHzの周波数範囲の重心位置(1次モーメント)を求め、この値により音の高低を数値化し評価するものである。供試体の支持条件はすでに表-1で示したように、A, Cが単純支持, Bが砕石+砂支持である。なお、供試体A, Cは5箇所の支持箇所を $\square$ でハッチングしている。

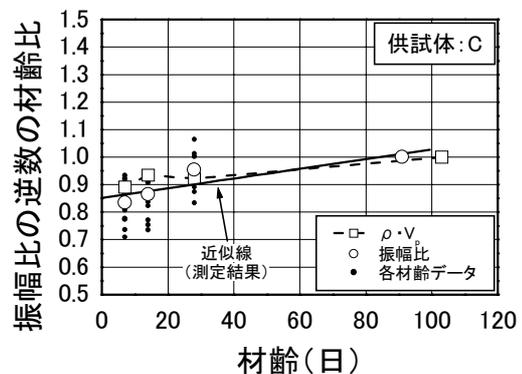
図に示すように、3 供試体の健全部での部材厚さのコンターは、供試体端部から内部にかけて部材が厚くなる傾向はほぼ同じである。埋込深さが浅い発泡スチロール位置では、健全部と比較して局所的に部材厚さが小さく算定されている。

3 供試体とも結果はほぼ同様であり、打撃音の瞬時値である振幅比による評価は、支持条件の違いの影響はあまり受けないことがわかる。

周波数に着目して整理した周波数重心では3 供試体とも供試体端部において、周波数が低くほぼ同じ傾向を示すが、中心部では、供試体Bは他の供試体に比較して周波数が高くなっている。これは支持条件の違いが表れているものと考えられる。供試体Bが砕石+砂支持のため、底版全体の振動が起こりにくいことを表している。以上のように、平均的な音の高低を表す周波数重心の平面的な分布に着目した場合には、支持条件の差異が顕著になることがわかる。



(a) 供試体 A・B



(b) 供試体 C

図-7 材齢経過による変化

## 5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物に打音法を適用する場合の課題を整理し以下のことが分かった。

- (1) 鉄筋コンクリート構造物でも無筋コンクリートで用いた部材厚さの算定式を用い、厚さ測定ができる。ただし、材齢 1 週など若材齢（弾性波速度や弾性係数が低い）のコンクリートについては、算定式中の係数 B を見直し、補正する必要がある。
- (2) 厚さの測定では、300mm 程度までは把握できることが分かった。振幅による評価では底版の支持条件の影響は、ほとんど受けないことがわかった。
- (3) 欠陥の検知は、表層部分にある空洞（発泡スチロール部）は検知できる。ただし、深い空洞やポーラスコンクリート部については検知が難しい。ただし、今回の実験のように欠陥の平面寸法が小さい場合、打音法では欠陥を検出するために細かい間隔の測定が必要と考える。

本研究は、独立行政法人土木研究所との「非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物に関する共同研究」で実施され、本稿は研究成果の一部である。

## 参考文献

- 1) Y.Ito,T.Uomoto : Nondestructive testing method of concrete using impact acoustics ,NDT&E International,Vol.30,No.4,pp.217-222,1997
- 2) 伴ら：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査法の開発、佐藤工業（株）技術研究所報、No.27、pp.43-52、2001
- 3) 北川ら：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 打音法(その2)RC 構造物への打音法の適用、JSNDI 平成 15 年度秋季大会、pp.115-118、2003
- 4) L.Cremer、M.Heckl,E.Ungar : Structure-Bone Sound、Springer-Verlag、p.264、1973

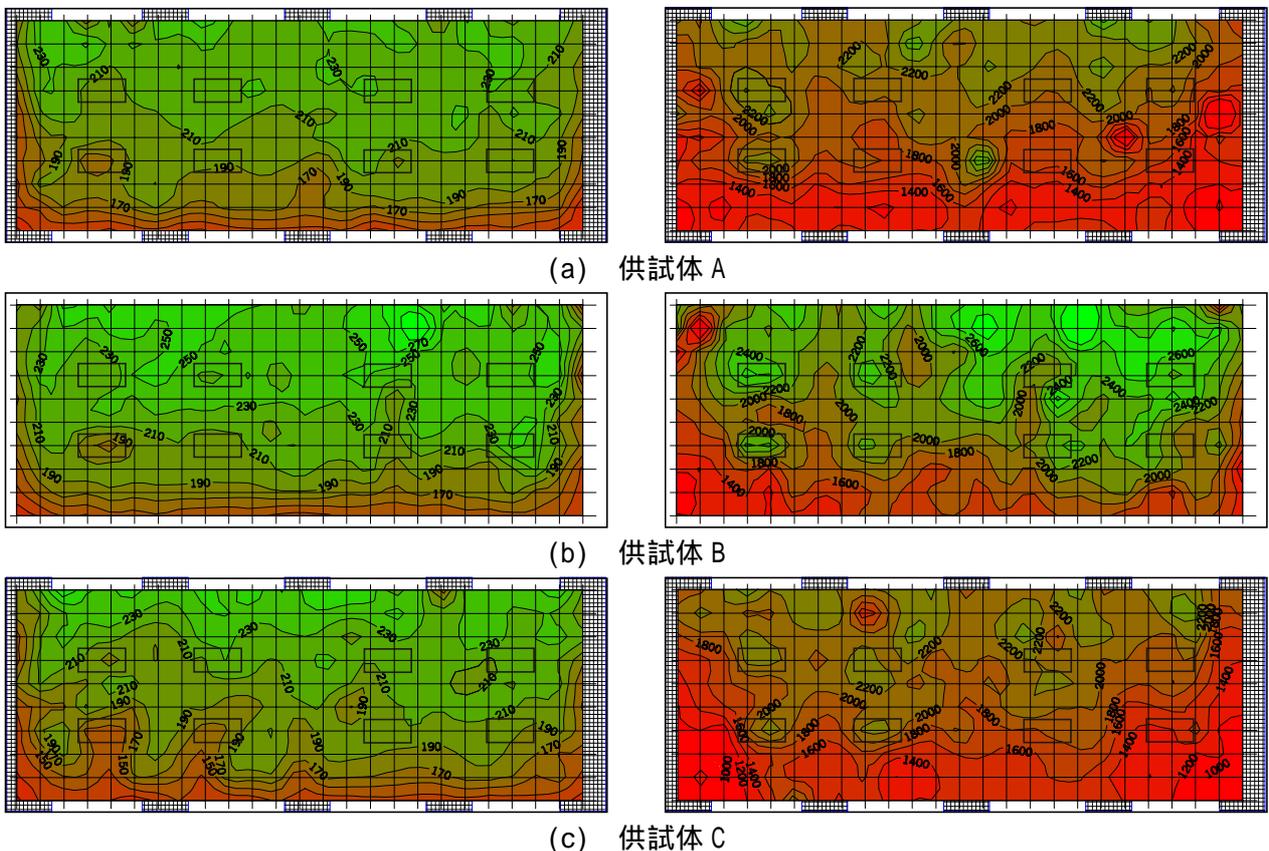


図 - 8 支持条件による比較（左側：部材厚さ，右側：周波数重心）