論文　非破壊検査手法としての打音法の解析的考察

秋山　哲治[*1]・清宮　理[*2]・山下　雄太[*3]・壹岐　直之[*4]

要旨：鋼殻にコンクリートを充填する合成部材では，施工時に鋼板とコンクリートとの間に未充填部が生じる可能性がある。この未充填部の範囲を打音法により検出する。従来の聴覚に頼る方法ではなく，工学的な方法での検出を目標として，室内実験およびそれを対象にFEM解析を行い，実験で得られた波形と解析で得られた変位の応答波形とを分析し，スペクトルを比較した。そして，打音の発生メカニズムおよび未充填部の範囲，鋼板の厚さなど条件で波形がどのように異なるのか有限要素法により調べ，打音法への有限要素法の適用について考察した。

キーワード：打音法，有限要素法，合成部材，動的解析

1. まえがき

鋼板が部材周囲に存在する鋼・コンクリート合成部材では，鋼殻内にコンクリートを充填した場合，鋼板とコンクリートとの間に未充填部が生じる可能性がある。しかし未充填部は，鋼板の存在により外からの目視では確認できない。未充填部の検出に関しては，打音法[1),2)]，赤外線法，RI法，超音波法などが検討され，現在ではおもに未充填部の深さが検出可能なRI法が採用されている。しかし，RI法は，作業が連続的に行えず，コストも高い。未充填部の発見を高速かつ安価に行うために，打音法による検査方法を第一段階で実施する。打音法では，現在は熟練した作業員が金槌でコンクリートなどを打撃し，反響音により欠陥の有無を特定する方法が採られている。また，打音法は土木分野においてはトンネル・橋脚などを対象にした劣化診断に使用されているが，本研究での打音法は，沈埋トンネルなどに採用されている鋼コンクリート合成部材の施工段階におけるコンクリートの未充填部の発見を目的としている。

現在の打音法のおもな問題点としては，人間の手によるものであるために広範囲での検査に多くの時間が必要となること，また，人間の聴覚を頼りにしているために作業員の経験と勘が要求され，客観的，工学的な適用性の説明が不十分となることが挙げられる。これらの問題点を解決するためには，打撃によって得られた音の周波数や振幅などの特性を根拠に工学的に未充填部を測定する技術を確立することが必要であると考える。本研究においては，未充填部の存在する合成部材をモデル化し，ハンマーによる衝撃荷重を与えた時の応答を有限要素法による動的解析を行い，実験データと比較することで打音の発生機構と打音法での波形に関する検討を行う。

ところで，実験と解析とで得られたデータは質の異なるものである。すなわち，実験では音圧，解析では変位を対象としている。マイクロフォンによる測定は，供試体表面との間に空気層が介在する非接触状態の測定であり，また供試体表面から放射される音を全体にわたって受容するため，音の干渉や周囲の雑音の影響を受ける。したがって，マイクロフォンにより測定

*1 若築建設(株) 事業統括本部技術研究所　工修　(正会員)
*2 早稲田大学　理工学部社会環境工学科教授　工博　(正会員)
*3 早稲田大学大学院　理工学研究科建設工学専攻
*4 若築建設(株) 事業統括本部技術研究所　博(工)　(正会員)

される打撃音と表面の振動は等しいものととらえることは厳密にはできない。そこで，表面に振動子を取り付けて測定した波形と打撃音の波形とを比較したところ，両者の波形の相互相関係数が非常に高いことが分かった。

2. 実験の概要

2.1 測定機器の構成

本研究では，次のような方法 および **図－１** に示す機器構成により打音を測定した。

打撃はインパルスハンマーにより人力で行った。コンデンサー式マイクロフォンを，打撃した点のすぐそばに置いて打撃音を測定した。マイクロフォンでの受信用センサーには，騒音計ユニットにより電圧の形で出力した。また発生した打撃音をFFTアナライザにより振動数分析した。マイクロフォンの測定振動数の範囲は20Hzから20kHzで，波形振幅は 30dBから135dBの範囲を測定できる。FFTアナライザの解析能力は 0Hzから100kHzの範囲である。

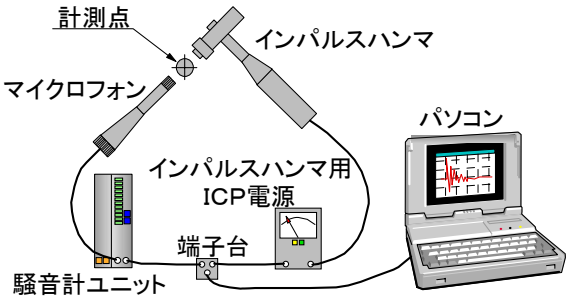
2.2 実験供試体

供試体は，寸法500×500×300mm，設計基準強度24N/mm^{2}の普通コンクリートの上面に，鋼板を４本のスタッドジベルで結合して製作した。コンクリート上面中央に薄い木製合板を型枠にして円形状の空洞を作り，これを未充填部とした。未充填部の大きさは，円形直径が50，100，200および300mmの４種類とし，厚さを20mmとした。鋼板の材質はSS400で，板厚を9，12，16および22mmの４種類とした。打撃位置には，供試体中央から0，50，100，150および200mmの点を設定した。例として板厚9mm，空洞直径200mmの供試体の形状寸法を**図－２**に示す。

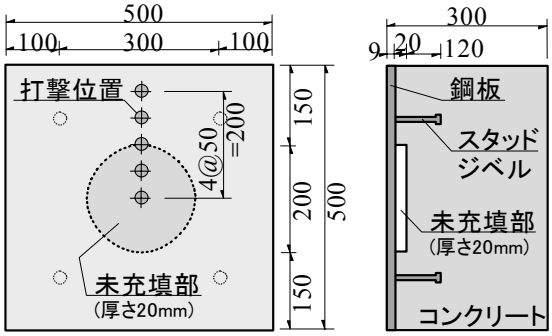
3. ＤＩＡＮＡによる解析

3.1 解析モデル

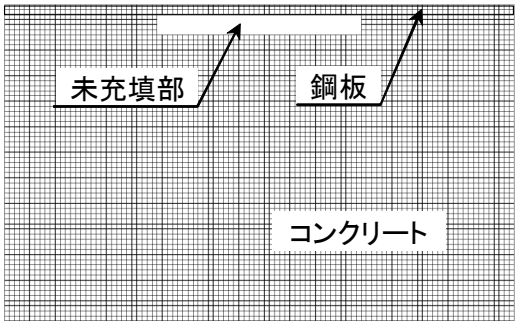
実験に使用した各供試体では未充填部が円形で一様な形状であることから，空洞の直径方向断面で２次元の有限要素モデルにした。モデル作成では，5mm四方程度の４節点四角形平面ひずみ要素のメッシュに分割した。要素数は供試体の種類によって異なるが6000程度である。拘束の条件は，モデルの下面を完全固定とした。**図－２**の供試体をモデル化したメッシュの概要を**図－３**に示す。



図－１　測定機器の構成



図－２　実験供試体寸法（単位mm）



図－３　メッシュ図

3.2 材料のモデル化

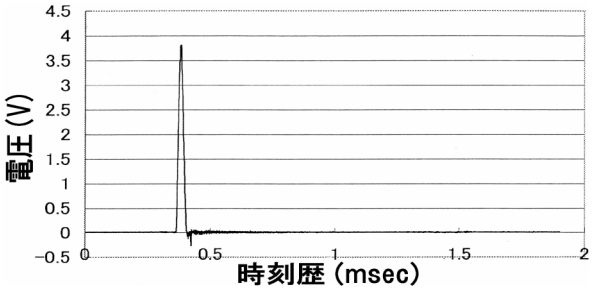
合成部材を構成する鋼板およびコンクリートの諸元を次のように定めた。本解析では，荷重および変位が非常に小さいため，材料非線形は考慮せず弾性体とした。

鋼材はヤング係数を206kN/mm^2，ポアソン比を0.3，密度を7.85g/cm^{3}と設定した。

コンクリートは設計基準強度24N/mm^2　普通コンクリートでヤング係数を25kN/mm^2，ポアソン比を0.2，密度を2.35g/cm^{3}と設定した。

3.3 荷重のモデル化

実験での打撃は，人力によるため，ケース毎に入力される荷重は異なってくる。また，データはインパクト電圧の形で採取された。その一例を**図－４**に示す。そこで，入力された衝撃荷重の平均的な性状をあらわす波形として，周期0.08msecの三角波半周期分を設定し，打撃する点に対して鉛直方向の集中荷重として加えた。



図－４　実験での入力波形例

3.4 解析ケース

表－１に解析ケースを示す。板厚9mm，未充填部直径200mmのモデルを基準として，実験と同様に板厚あるいは未充填部幅を変化させたモデルを作成した。打撃位置は，板厚9mm，未充填部直径200mmの基準モデルに関しては実験で打撃した５ヶ所を設定し，それ以外のモデルは中央を打撃したケースのみ解析を行った。

表－１　解析ケース

名称	板厚 (mm)	未充填部幅 (mm)	備考
9-20	9	200	基準モデル
9- 5	9	50	未充填部幅を変化させたケース
9-10	9	100	
9-30	9	300	
12-20	12	200	鋼板の厚さを変化させたケース
16-20	16	200	
22-20	22	200	

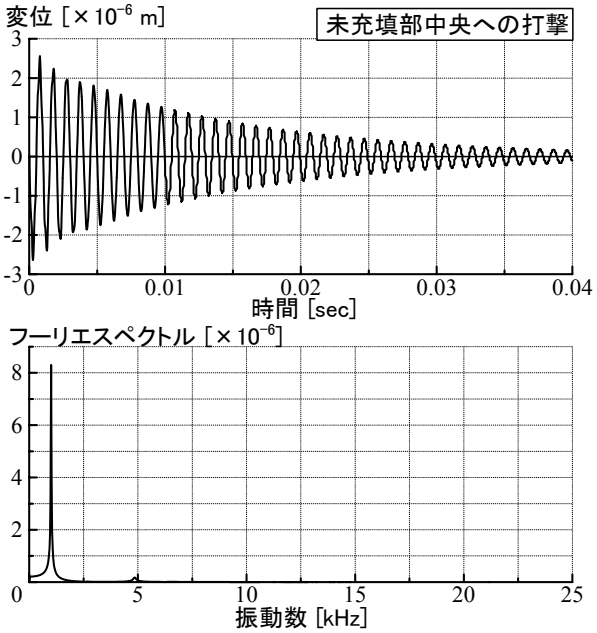
3.5 解析方法

FEM解析プログラムにはDIANA 7を使用した。Dianaの線形過渡解析モジュール*SHOCKを使用し動的解析を行った。時間積分の方法にはNewmark-β法を用い，オプションパラメータはデフォルト値である$\gamma=1/2$，$\beta=1/4$とした。モデルには粘性減衰としてRayleigh減衰を与えた。係数αおよびβは，未充填部上部の鋼板を両端固定の梁としてモデルごとに求めた一次および二次の固有円振動数より計算した値を用いた。タイムステップはt＝0.02msecで，解析は2100ステップにわたって実行した。

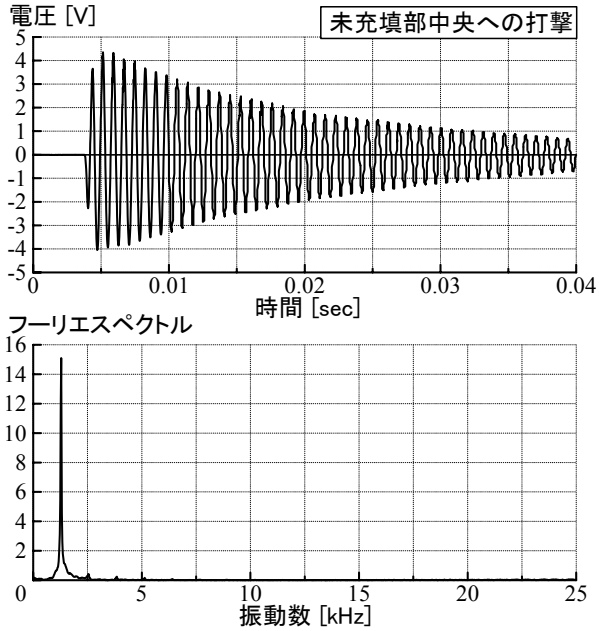
4. 結果および考察

4.1 未充填部の中央への打撃

図－５に有限要素法での変位波形，**図－６**に実験での電圧波形を示す。両者の波形は原点の



図－５　変位応答波形とフーリエスペクトル(FEM)



図－６　電圧波形とフーリエスペクトル（実験）

ずれや,第１波の立ち上がりの大きさを除けば,波形振幅の減衰傾向など，両者の振動性状は良く一致している。また，各々の波形のフーリエスペクトルを示す。

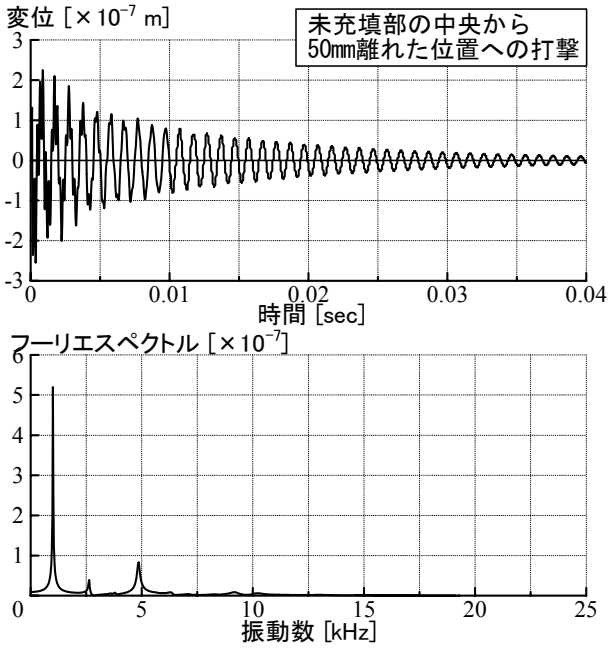
未充填部中央を打撃した場合，実験および解析ともに，ほとんどのケースでスペクトルには１ヶ所に大きなピークが見られた。ピークの振動数は板厚9mm，未充填部幅200mmのとき1.2kHz程度であった。これは未充填部上部の鋼板を，両端固定の梁と仮定したときの一次固有振動数1.19kHzに近いことから,未充填部中央への打撃では一次モードの振動が卓越すると考えられる。

4.2 未充填部中央より50㎜離れた位置への打撃

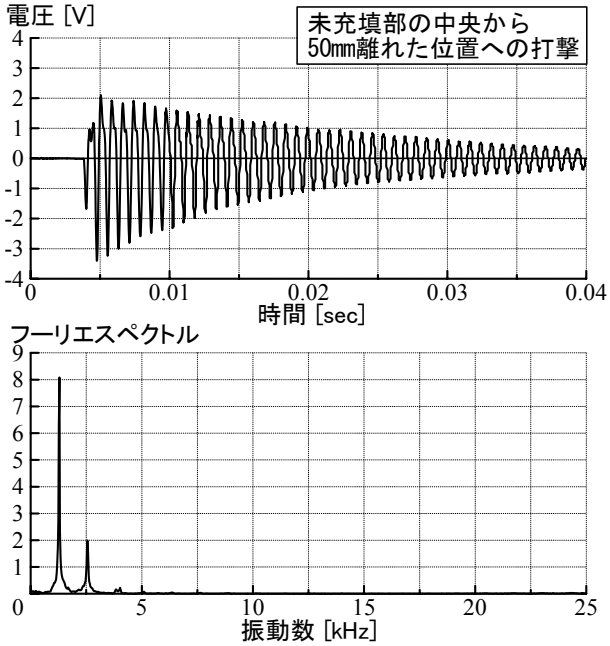
図－７および**図－８**に結果を示す。中央を打撃した場合と比較すると，振幅値は小さく振動波形の減衰も大きい。また，フーリエスペクトルの結果から，より高い周波数帯にもピークが現れている。このことから，未充填部の中央以外を打撃した場合では，一次モードに加えて，より高次のモードの振動も起こっていると考える。現場では，未充填部の中央点以外を打撃する場合が多いと考えられ，実際の充填検査を行う上ではこのような状況を考慮する必要がある。すなわち，機械的に測定位置を設定すると未充填部を正確に把握できない可能性がある。

4.3 充填部への打撃（中央より200㎜離れた位置）

図－９および**図－10**に結果を示す。充填部を打撃すると，実験および解析ともに振幅が小さく，未充填部と比べて振動の継続時間が短い。解析では２ヶ所の大きなピークが見られるが，実験では低振動数で広い範囲に亘ってスペクトルが分布し，white noise的な振動数となった。この差異は，振幅が小さいため周囲の雑音などの影響や計測の誤差などが大きく現れていると推測できる。したがって充填部においては，振動波形から卓越振動数を推定することは困難である。一方で，板厚9mm，未充填部幅50mmのケースでは，実験および解析ともに振幅が小さく，スペクトルも充填部を打撃したものに近い



図－７　変位応答波形とフーリエスペクトル(FEM)

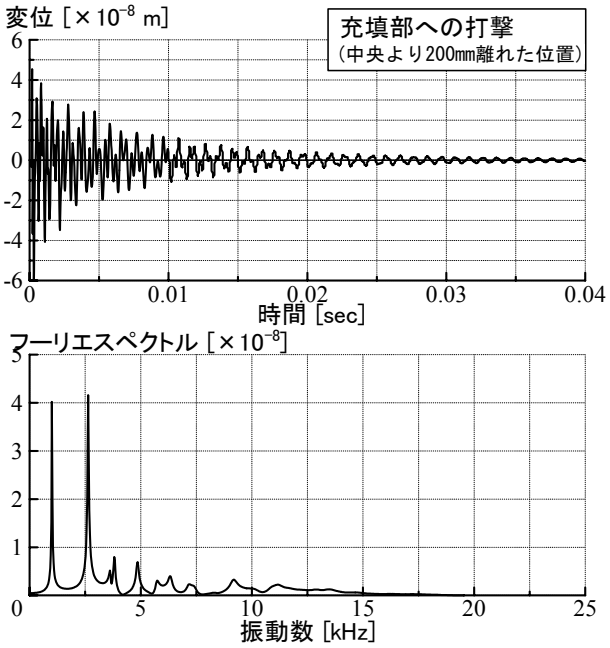


図－８　電圧波形とフーリエスペクトル（実験）

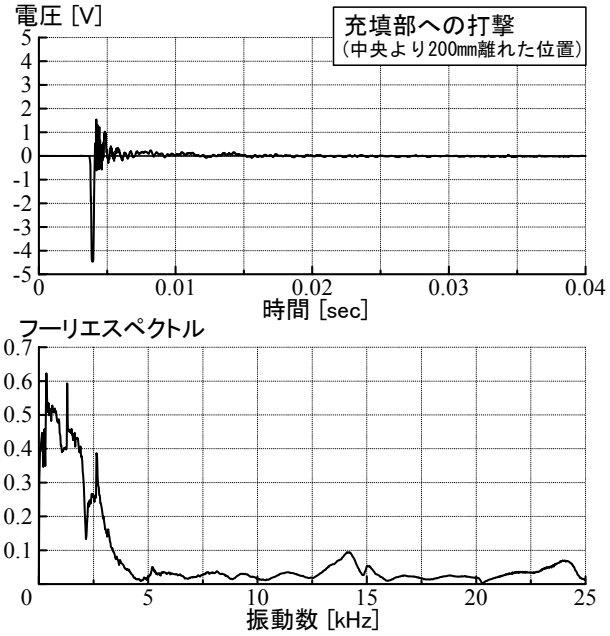
結果となった。これは，他のケースに比べて未充填部が相対的に小さいためと考えられる。したがって，打音法での検出において，小さい未充填部の認識が出来ないことを示している。

4.4 板厚による影響

未充填部幅200mmの中央への打撃での，板厚を変化させた場合において，スペクトルのピークとなる卓越振動数を比較した。実現象におい



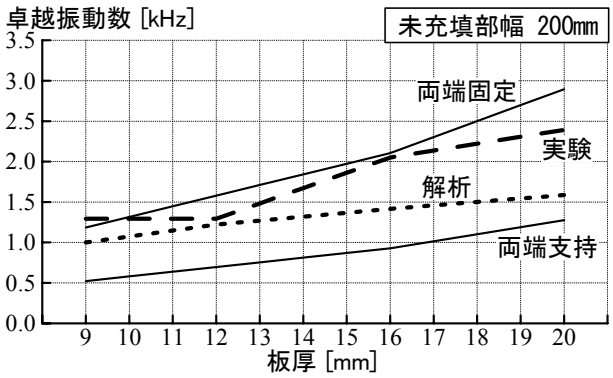
図－９ 変位応答波形とフーリエスペクトル(FEM)



図－10 電圧波形とフーリエスペクトル（実験）

ては，充填部と未充填部との境界は完全固定ではなく，微小な隙間や剥離によってある程度の自由度があると考えられる。そこで，未充填部を両端固定および両端ピンの梁であると仮定して，一次固有振動数の理論値を3.2で用いた値にて算出した。この理論値と，解析値および実験値とを比較したものが**図－11**である。

板厚が大きくなると卓越振動数は大きくなる



図－11 板厚と卓越振動数

傾向があった。さらに，解析値および実験値は，２つの境界条件により求めた一次固有振動数の中間にほぼ入っている。このことから，打撃を与えた時の振動は，中間的な境界条件の下で起こっていると考えることができる。

また，解析では充填部と未充填部との境界は完全に固定されているとしているが，両端固定の梁の理論値とは異なっており，その差は板厚が大きくなるほど大きくなっている。これは，板厚が大きいケースの解析では，未充填部のみの振動にはならず，両端固定の梁となっていないためと考えられる。

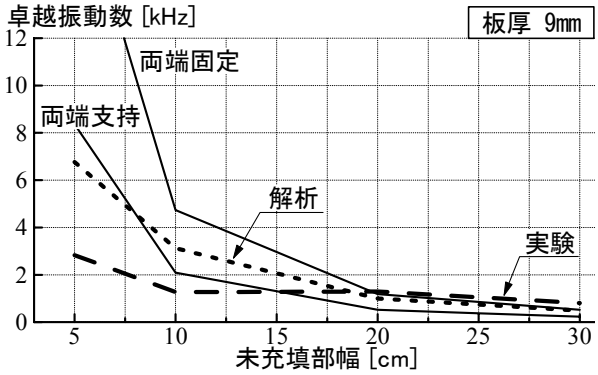
4.5 未充填部幅による影響

板厚9mmでの未充填部中央への打撃での，未充填部幅を変化させた場合の卓越振動数を比較した。前節と同様に，両端固定および両端ピンの梁を仮定した理論値を求め，解析値および実験値とを比較したものが**図－12**である。

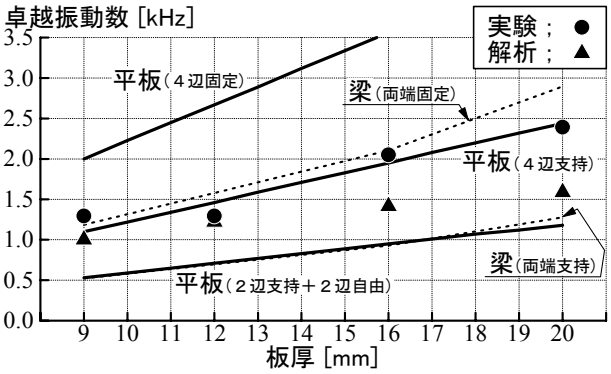
未充填部の直径が大きいほど卓越振動数は低くなる傾向があった。また，未充填部幅が小さい場合では，理論値，解析値，実験値は一致しなかった。理由としては，板厚が大きい場合と同様に，梁の仮定が適用できないことや，実験において未充填部よりも広い範囲で鋼板が振動していた可能性が高いことが考えられる。

5. ３次元（平板）での理論値との比較

図－11では，卓越振動数に関して，すべての未充填部幅において，実験値が解析値を上回った。この理由としては，実験の方が未充填端部



図－12　未充填部幅と卓越振動数



図－13　板厚と卓越振動数

における拘束力が大きいこと，すなわち，解析が２次元であるのに対して，実験は３次元であることが挙げられる。また，実現象では未充填部の形状・発生位置によって拘束度が様々な状況となることが考えられるため，卓越振動数が予測と異なる可能性がある。これらのことから，**図－11**に３次元での理論値を加え，実験値と比較した。なお，３次元での理論値は，平板での４辺固定および４辺支持とした場合の一次固有振動数とした。未充填部として円形にこだわっていないのは，実際の現場では未充填部の形状が様々であることが予想されるためである。**図－13**に結果を示す。

一次固有振動数の理論値は，拘束力の影響によって，４辺支持より４辺固定の方が大きくなった。また，板厚9，16mmでの実験値は，４辺固定および４辺支持での２つの境界条件により求めた範囲内にあった。なお，平板の境界条件をさらに緩和した状態，例えば２辺支持＋２辺自由（＝梁モデルと同じ条件）まで考え併せると，実験値のすべてが，設定した境界条件での理論値の範囲内に収まった。このことから，打音法での解析モデルを考える場合は，未充填端部での境界条件を幾つか設定することが必要であると考える。これは，実現象においては境界条件が多岐にわたる可能性がある，こととも相関している。したがって，卓越振動数などを正確に評価する際には，３次元での拘束効果を評価できる計算モデルの方がより望ましいことが判った。

6. まとめ

本研究での結論を以下に示す。

1) FEM解析によって得られる表面振動と，実験によって得られる音圧とは，板厚に対して十分大きい未充填部を打撃した場合には比較的よく一致することが確認できた。
2) 充填部を打撃したケースでは，仮に表面振動の解析が正確に行われたとしても，打音データに含まれる各種ノイズが相対的に大きくなるため，解析によって卓越振動数を推定することは困難であった。
3) 本研究では２次元解析を行ったが，解析モデルは３次元の方がより望ましい。また，未充填部検出のための打音法へのFEM解析の適用について，モデル化では未充填端部の支持条件等を十分注意して設定する必要がある。

なお，本研究は，国土交通省国土技術政策総合研究所，(独)港湾空港技術研究所，早稲田大学，(財)沿岸開発技術研究センター，五洋建設(株)，佐伯建設工業(株)，東亜建設工業(株)，東洋建設(株)，若築建設(株)で実施している加振併用型充てんコンクリートに関する共同研究の一環として実施したものである。

参考文献

1) 壹岐直之，清宮理，佐野清史，内藤英晴，秋山哲治：合成部材におけるコンクリート充填性評価のための打音法，コンクリート構造物の非破壊検査への期待 シンポジウム論文集 Vol.1，pp.181～190，2003.7
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報告集，Vol.25，No.1，pp.1583～1588，2003.7