研　究　速　報

コンクリートのひびわれ深さが打撃音に及ぼす影響

Influence of Crack Depth on the Impact Sound of Concrete

伊　東　良　浩*・魚　本　健　人**

Yoshihiro ITO and Taketo UOMOTO

1. は じ め に

コンクリート構造物の損傷や劣化を非破壊で検査する手法の一つとして打音法がある．この方法は，簡便であり非接触で測定を行うことができるという利点があるにもかかわらず，理論的な解釈や適用方法の研究があまり進められていない．そしてその判断は測定者の経験に委ねられている場合が多いと思われる．一方，打撃により発生する音は打撃面の振動と密接に関連していることは知られており[1]，測定方法などを工夫することによってコンクリート厚さ測定[2]や衝撃振動測定[3]あるいは衝撃弾性波法[4]といった方法と同等の測定が可能である．

そこで本研究では，打撃によって生じる縦波共振およびたわみ共振に注目して，コンクリートに生じるひびわれによって打撃音およびこれらの共振周波数がどのように変化するかについて，実験および解析により検討を行った．

2. コンクリート打撃音の測定

2.1 実験の概要

コンクリートの打撃音に影響を及ぼす因子としては，本来検知の目的であるコンクリートの欠陥や劣化によるもの以外に，対象物の形状，支持条件，物性値など構造物固有のもの，さらに打撃方法，打撃位置および打撃音収録位置など測定条件によるものなどが考えられる．

ここでは10 cm×10 cm×40 cm の角柱供試体を用いて，供試体の打撃位置，打撃音収録位置を変化させることによって，供試体に縦波共振およびたわみ共振を発生させ，これらがコンクリートのひびわれによってどのような影響を受けるかを調べた．実験に用いた測定装置およびその配置を図 1 に示す．

*佐藤工業㈱
**東京大学生産技術研究所　第 5 部

表 1　供試体コンクリート

W/C %	単位体積重量 t/m^3	σ_{91} kgf/cm^2	弾性波速度 km/s
60	2.35	381	4.3

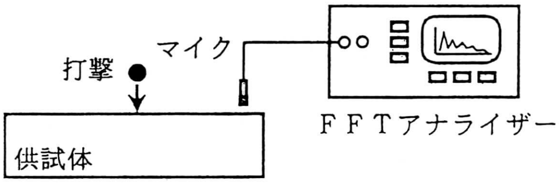

図 1　測定装置

用いた供試体コンクリートの配合および物性は表 1 に示すとおりである．なお，表に示しているとおり，ここでは対象とする供試体の弾性波伝播速度を超音波試験装置によりあらかじめ測定し，これと打撃音測定結果との関係についても検討する．

本実験では，供試体の中央部に人工的に切り欠きを入れ，ひびわれモデルとした．供試体は，共振が生じやすいようにたわみ共振の一次モードの節の位置で支持した．切り欠

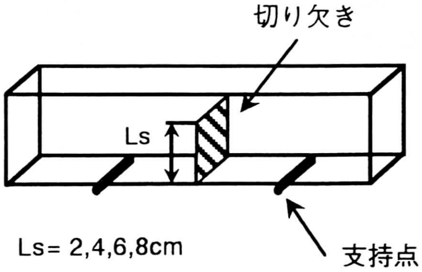

図 2　スリット位置

きは，図２に示すように供試体中央下部に長手方向に垂直に入れ，切り欠き深さを増しながら打撃音の測定を行った．切り欠き深さは2，4，6，8 cm とした．

2.2　打撃位置および測定位置の影響

打撃位置および測定位置が打撃音に及ぼす影響を明らかにするため，打撃位置およびマイク位置を変化させて測定を行った．典型的な例として，図３に示すように供試体長手方向中央上部 P1 において縦方向から，および 10×10 cm 面中央 P2 位置において横方向から打撃を加えた場合についての測定結果を示す．マイク位置はそれぞれ図の R1，R2 の位置である．

それぞれの測定結果を図４に示す．両者を比較すると P1 位置からの打撃を R1 位置で測定した場合には，約2.2 kHz の位置に卓越周波数が認められ，P2 位置から打撃し R2 位置において測定したものは約5.0 kHz に卓越周波数が認められた．両者は明らかに異なった振動であり，載荷条件を考慮すると，前者は供試体の一次たわみ共振と考え

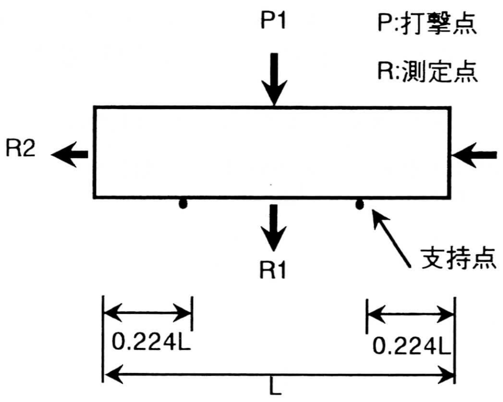

図３　打撃位置および測定位置

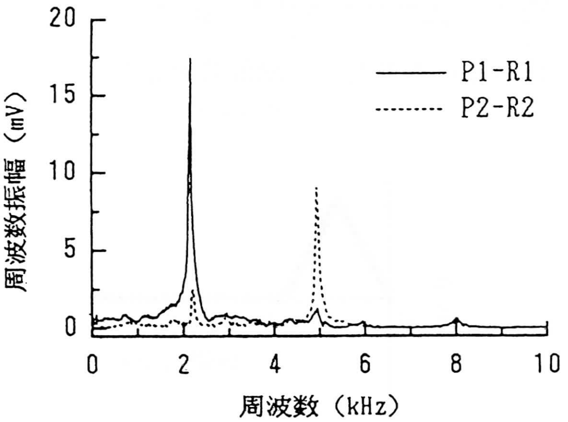

図４　打撃位置の違いによる卓越周波数の違い

られ，後者は供試体長手方向の縦波共振と考えられる．

以上の結果から，打撃方向を変化させることによってある特定の共振を生じさせ，それを打撃音として捕えることが可能であることが明らかとなった．

2.3　超音波試験結果との比較

縦波共振周波数が得られれば，式(1)から供試体の弾性波速度を得ることができる．ここでは縦波共振が5.0 kHz であるので弾性波速度 V_{pf} は4.0 km/s となった．これは，弾性波速度試験結果に比べて0.3 km/s 小さいものであった．

$$V_{pf} = f_L \times (2 \times L) \tag{1}$$

ここで，V_{pf}：縦波共振から求められる弾性波速度
f_L　：縦波共振周波数
L　：供試体長

この原因を検討するため，弾性波速度が既知である金属材料において実際に生じる縦波共振と，弾性波速度から算定される共振周波数がどのような関係になっているかを検証した．ここでは，4 cm×4 cm×48 cm のアルミニウム棒を用い，打撃により生じた縦波共振周波数および式(1)より求めた弾性波速度と，超音波伝播速度試験によって求めた弾性波速度を比較した．

得られた弾性波速度は，それぞれ4.95 km/s，6.40 km/s となり一般的なアルミニウムの非拘束状態および拘束状態の弾性波速度[5]にほぼ一致し，同一供試体であっても測定法によってポアソン比による拘束効果が異なることがわかった．

このことから，10 cm×10 cm×40 cm のコンクリート供試体においても同様のことが生じうると仮定し，非拘束条件での動弾性係数と弾性波速度の関係式である式(2)および拘束条件下の式(3)と実測値から求められたそれぞれの弾性波速度から動弾性係数 E_d および動ポアソン比 ν_d を求めると，それぞれ $E_d = 3.8 \times 10^6\ \mathrm{tf/m^2}$，$\nu_d = 0.24$ となった．つまり，上記の仮定が正しいとすればこのような異なる測定方法により，動弾性係数と動ポアソン比が同一の供試体において求められることになる．

$$E_d = V_{pf}^2 \cdot \rho \tag{2}$$

$$E_d = V_{pd}^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)/(1 - \nu_d) \tag{3}$$

ここで V_{pf}：縦波共振周波数から求められる弾性波速度
V_{pd}：超音波試験から求められた弾性波速度

ρ　：コンクリートの密度

2.4　切り欠きの影響

図5は切り欠き深さを2 cmから8 cmへと増加していった場合の周波数スペクトルの変化を示したものである．たわみ共振周波数は切り欠き深さが2 cmあたりから大きく低下し，縦波共振はスリット深さが8 cmとなっても比較的低下率は小さいことがわかった．このときのたわみ共振周波数の周波数振幅は必ずしも線形的には増加していないが，スリット深さの増加とともに振幅の増大が認められ，切り欠きによるたわみ量の増大が推測された．

このようなことから，コンクリート構造物にひびわれが生じた場合，その構造物の剛性が低下するために，たわみ共振周波数が低下し，振幅が増大する傾向が生じるものと考えられた．一方，縦波共振については，ひび割れ深さが小さい段階ではあまり共振周波数に影響が認められず，断面の半分以上にひび割れが生じてようやくその影響が明確になってくる程度であるので，構造的な欠陥を検知するには不向きであると考えられた．

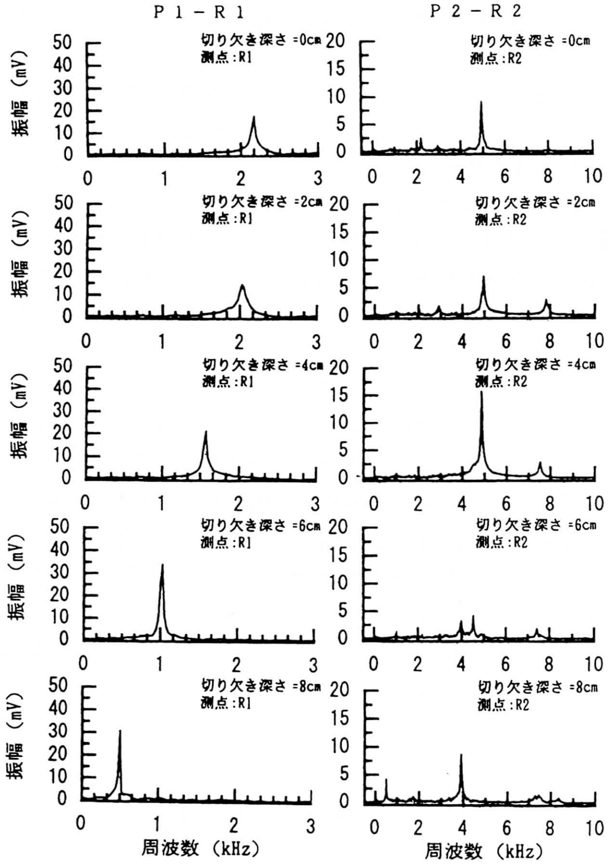

図5　切り欠き深さの増加にともなう打撃音の周波数スペクトルの変化

3. 解析的検討

3.1　解析方法

解析は2次元FEMにより時間領域での解析を行った後，着目点においては変位をフーリエ変換して周波数分布を求めた．解析に用いた物性値は表2に示すとおりで，図6に示すように半断面モデルを用いて，切り欠き部の境界を順に取り除くことで切り欠きをモデル化した．計算は，たわみ共振方向P1および縦波共振方向P2の2方向の荷重条件で，切り欠き深さをゼロ，2.5 cm，5.0 cm，7.5 cmに変化させて実施した．荷重は図7に示すような継続時間50 μsの三角形波を半波長与えた．

なお，2．3で述べたように共振はポアソン比による拘束の影響を受けていないと考え，平面応力モデルを仮定して計算を行った．

3.2　解析結果

計算の結果得られた卓越周波数と実際の測定結果の比較を図8に示す．切り欠きがない場合には，縦波共振およびたわみ共振のいずれも卓越周波数はほぼ完全に一致した．また，切り欠きを設けた場合にも縦波共振周波数に若干の

表2　解析に用いたコンクリート物性値

単位体積重量 t/m^3	動弾性係数 kgf/cm^2	動ポアソン比
2.35	3.8×10^5	0.24

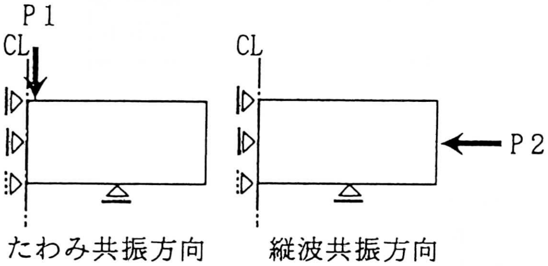

図6　解析モデル

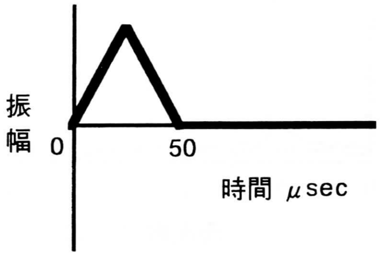

図7　荷重条件

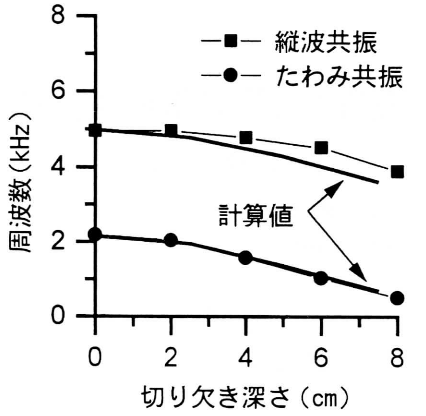

図8　計算値と測定値の比較
(共振周波数)

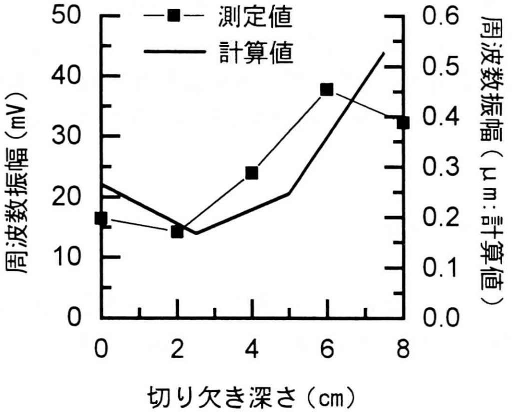

図9　計算値と測定値の比較
(たわみ共振周波数の振幅)

差異が生じた程度で，非常に精度よく共振周波数が求められた．このように，同一の物性値を用いて異なる2つの共振モードを精度よく再現できるということは，用いた物性値がほぼ正当であることを示しているものと考えられる．そして，少くとも10 cm×10 cm×40 cm 供試体程度の寸法のものにおいては，ポアソン比による拘束効果がないものと考えて計算を行うことが適当であると判断された．

また，測定打撃音の卓越周波数は，コンクリート表面の振動の卓越周波数と同一であることが解析的に確認された．たわみ共振周波数の低下は，切り欠きを設けることによって供試体の剛性が低下することから引き起こされると考えられる．そこで当然たわみ量の増加が予測されるが，その周波数振幅を比較すると図9のようになる．測定値，解析値とも切り欠き深さの増加によって振幅がほぼ同様に増加する傾向が認められる．なお，縦波共振については実測値と解析値はあまり一致しなかった．

以上，解析結果と実測値がよい一致を示していることは，ひびわれを有するコンクリートにおける打撃音の分析を振動問題として解析的に評価することが十分可能であることを示していると考えられる．

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りである．

①コンクリート表面を打撃することによって得られる打撃音は表面の振動とほぼ等価である．共振を生じるようにコンクリート構造物を打撃し，表面振動が大きな位置で打撃音を測定することにより，振動測定と同様に構造物の振動の測定が基本的には可能であることが確認された．

②コンクリートのひびわれやその他の原因によって構造物の剛性が低下すると，打撃音の低周波数成分が増し振幅が増加する．言い換えると，同様な形状の構造物において低周波成分の多い箇所は何らかの原因で剛性が低下している可能性があると考えられる．

③10 cm×10 cm×40 cm 供試体程度の寸法で弾性波速度や動弾性係数を求める場合，超音波速度試験による方法と縦波共振を用いる方法では，ポアソン比による拘束の影響が全く異なるので，両者を混同しないよう注意すべきである．

以上のようなことは，構造物の寸法や支持条件の違いによる影響，ノイズの問題など解決すべき点もあるが，あらかじめ解析により生じるべき共振周波数や振動モードを推定しておくことなどにより，構造物の欠陥や劣化の定量的評価が可能であると考えられる．　(1995年2月13日受理)

参考文献

1) 富田　豊，堀内敏夫：鋼球の衝突音，日本音響学会誌，Vol 34, No 5, pp 318-322, 1978
2) 白木徳夫，伊東良浩他：打音法によるトンネル覆工厚および覆工背面空洞の調査法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 1, pp 595-600, 1993
3) 今井賢一，西村昭彦：衝撃振動試験による高架橋基礎の詳細調査方法について，土木学会第48回年次学術講演会概要集，No. 5, pp 502-503
4) C. Cheng, M. Sansalone: The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies, Materials and Structures, Vol. 26, pp 274-285, 1993
5) 理科年表1993年版，国立天文台編，p 495，1993
6) 伊藤　毅：音響工学原論，コロナ社，p 137，1955