

論文 鉄筋コンクリートのひび割れが打撃音に及ぼす影響

伊東良浩*¹ 魚本健人*²

要旨: コンクリートの打撃音は、その物性や形状、内部の欠陥等と密接に関連しており、打撃音に含まれる情報を用いてコンクリートの物性や欠陥を非破壊で検査することが可能である。本研究では鉄筋コンクリート梁の曲げ試験を行い、梁の破壊過程における打撃音の変化について検討を行った。また、ひび割れに水分を供給することによって、これが打撃音に及ぼす影響について調べた。その結果、梁が弾性変形域を越えて塑性域に入った段階から徐々に打撃音の卓越周波数が低下することがわかった。また、損傷の大きな供試体ほどひび割れ中の水分の有無による打撃音の変化が大きいことがわかった。

キーワード: 非破壊検査、打撃音、鉄筋コンクリート、周波数、ひび割れ、曲げ試験

1. はじめに

コンクリートをハンマーなどで打撃したときの打撃音は打撃面の振動と強い相関があり、構造物あるいは部材の共振周波数などを打撃音によっても測定することができる。そしてこれらを用いて、コンクリートの材料物性値や構造物の欠陥などを推定することが可能である。

筆者らはこれまでに無筋コンクリートを用いた実験を行い、ひび割れのようなコンクリートの欠陥が打撃音に及ぼす影響などを検討してきた。その結果、打撃音を振動の問題として解析することが可能であること、ひび割れによって梁の剛性が低下するにつれて打撃音の卓越周波数が低下することなどが明らかとなった[1]。

本研究では、鉄筋コンクリート供試体に曲げを加えることによりひび割れを発生させ、その損傷の程度と打撃音の関係について調べた。また損傷を与えたコンクリート供試体を水浸させ、これが打撃音に及ぼす影響について検討した。

2. コンクリート中の水分が打撃音に及ぼす影響

コンクリート中の水分が弾性波速度に及ぼす影響として、水分が増加するにつれて弾性波速度が増すことが示されている。例えば明石は、コンクリートの質によって乾湿による弾性波速度への影響の程度が異なり、コンクリートの質が悪いほうがその影響が大きいと述べている[2]。これは、コンクリート中のひび割れに空気が存在するよりも水が充填されている方が弾性波が伝播しやすいといったことや、コンクリートの質が悪いと水分を吸収し膨張しやすいために、微小なひび割れが閉じることなどが考えられる。逆に、このように水分の違いによって弾性波速度が大きく変わる場合には、コンクリート内部にひび割れなどが存在することが予想される。

そこで予備的な実験として、健全なコンクリートの乾湿による打撃音の変化をまず測定した。実験は、表1に示すような28日間水中養生後のφ10×20cmのコンクリート供試体を用いて行っ

*1 佐藤工業株式会社 土木本部土木部 課長代理(正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 第5部 教授 工博(正会員)

た。乾燥方法としては高温乾燥（温度 105℃の
 炉乾燥および温度 40℃、湿度 10%）および真空
 乾燥を用い、このときの重量減少に伴う打撃音
 の変化を調べた。測定は図-1 および表-2 に
 示すとおりで、たわみ 1 次共振の節位置でワイ
 ヤによって支持された供試体に横方向から鋼球
 によって打撃を加え、この打撃音により縦波共
 振周波数を測定した。

供試体の縦波速度 V_p は縦波共振周波数が得られれば、
 式(1)に代入して求めることができる。図-2 は各乾燥方
 法について、打撃音によって求められた共振周波数およ
 び式(1)より算定された縦波速度の変化を示したもので
 ある。なお、このときの重量減少率は水中養生 28 日時
 の重量を基準とした値である。測定の結果、いずれの乾
 燥方法によっても、乾燥とともに縦波速度が低下してい
 ることがわかった。また、本供試体においては重量が 1%
 減少したときの縦波速度の低下量はお
 よそ 50~100m/s 程度となった。

$$V_p = 2 f L \quad (1)$$

ここで f : 縦波共振周波数
 L : 供試体長

表-1 供試体コンクリート

W/C %	密度 g/cm ³	圧縮強度 (28days) kgf/cm ²	静弾性係数 kgf/cm ²
60	2.42	388	3.2×10^5

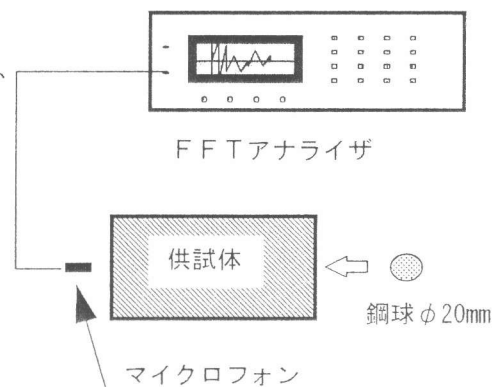


図-1 測定の概要

表-2 センサおよび測定器の仕様

マイクروفオン	周波数範囲	20 ~ 20000 Hz
	音圧感度	-36 dBV/Pa
FFTアナライザ	ダイナミックレンジ	30 ~ 135 dB
	周波数範囲	DC ~ 100 kHz
	入力電圧レンジ	± 1 mV ~ ± 5 V
	直線性	0.01 %FS

3. 鉄筋コンクリートの損傷にともなう打撃音の変化

3.1 実験方法

本実験では鉄筋コンクリート供試体に曲げを加えてひび割れを発生させ、そのときの打撃音の変化を調べた。使用した供試体は図-3 に示すように寸法が 10×10×40cm で長手方向に異形鉄筋（D13）を埋め込んだ鉄筋コンクリート（鉄筋比

1.3%）である。これに JIS A 1106 にしたがって曲げを加え、破壊の進行にともなう打撃音の変化を測定した。打撃音の測定は JIS A 1127 に準じて図-4 に示すような 3 カ所の位置において行い、たわみ共振、縦波共振、ねじり共振を測定した。なお、鉄筋コンクリートの弾性挙動範囲を予測するためにあらかじめ無筋コンクリートの曲げ試験を行ったところ、破壊荷重は 1.78t（縁応力で約 53kgf/cm²、縁ひずみで約 160×10^{-6} ）となった。

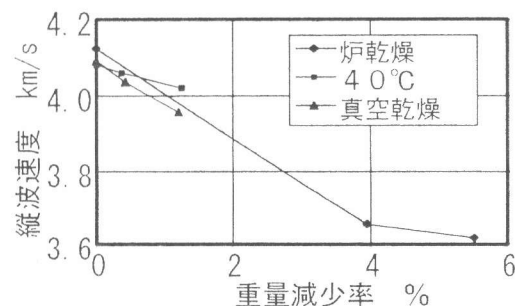


図-2 乾燥による重量減少と縦波速度の関係

3.2 鉄筋コンクリートの曲げ破壊に伴う打撃音の変化

まず、比較のための無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート供試体の載荷前の打撃音の周波数スペクトルの測定結果を図-5に示す。また JIS A 1127 にしたがって、得られた共振周波数から、動弾性係数、動せん断弾性係数、動ポアソン比を求めると表-3の通りとなる。全体に、鉄筋コンクリートで得られた値は無筋コンクリートと比較してやや大きめになるが、動弾性係数で約4%程度の差異である。したがって、1.3%程度の鉄筋比では共振周波数から得られる動的物性値はほぼコンクリートそのものの値としてよいと考えられる。

図-6は最大荷重に達するまで載荷を行った場合の鉄筋コンクリートの上端、中央部および下端のひずみである。図からもわかるように供試体は無筋コンクリートの破壊荷重前後の約1.6tまでは弾的な挙動を示すが、これを越えると中央部のひずみが引張側に転じ、下端部に曲げひび割れが生じ始めた。その後、荷重の増加とともに曲げひび割れが進展し、荷重6.37tで曲げ破壊が生じ荷重が低下した。なお、この段階までのひび割れ幅はほぼ0.05mm程度以下の微小なものであった。図には示されていないが、その後さらに載荷を続けると最大幅0.8mm程度のせん断ひび割れが生じるという結果となった。

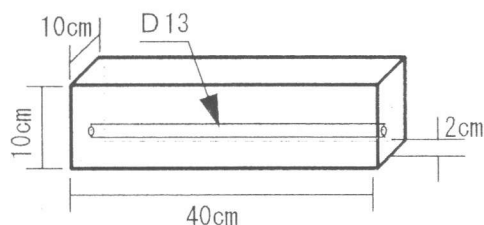


図-3 供試体コンクリート

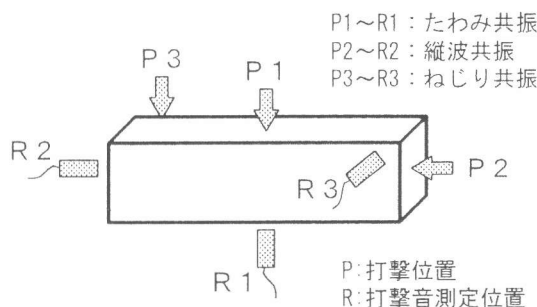


図-4 打撃位置および打撃音測定位置

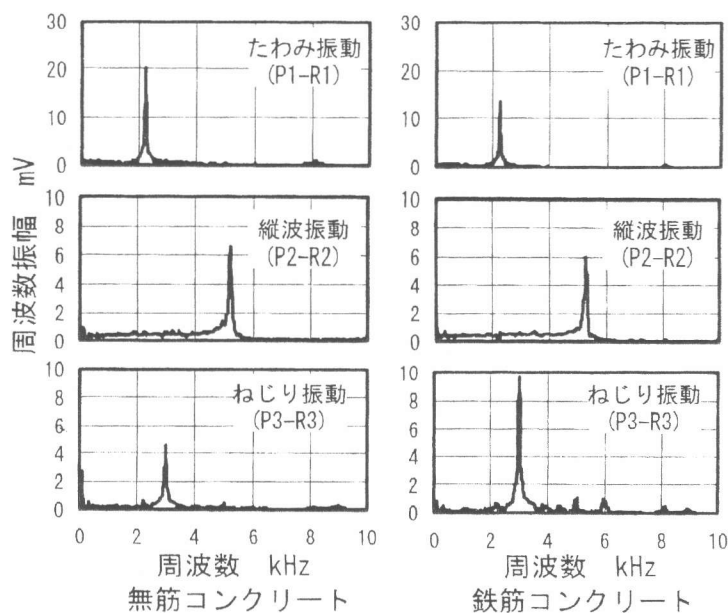


図-5 コンクリートの打撃音

表-3 共振周波数測定結果および動的物性値算定結果

種別	たわみ共振 周波数 Hz	縦波共振 周波数 Hz	ねじり共振 周波数 Hz	動弾性 係数 kgf/cm ²	動せん断 弾性係数 kgf/cm ²	動ポアソン 比
無筋コンクリート	2225	5175	2988	416000	167800	0.27
鉄筋コンクリート	2263	5314	3022	432000	172000	0.31

そこで、このような鉄筋コンクリートの損傷過程を考慮して、5 ケースの荷重レベル (1.5t[弾性範囲内]、3.0t, 5.0t[塑性域]、鉄筋降伏直後、鉄筋降伏後大きなひび割れが発生するまで) を設定し、それぞれのコンクリート供試体とその荷重を加えて損傷を与え、これらの打撃音を測定した。

各荷重レベルでの荷重終了後に各供試体を試験機から取り出して、たわみ共振の 1 次モードの節で支持した状態で打撃音を測定した結果、およびその供試体のひび割れパターンを図-7 に示す。図は縦波共振方向に打撃を行った場合の例であるが、弾性範囲内の荷重レベルでは共振周波数の低下はまったく認められない。しかし、弾性範囲を超えてコンクリートにひび割れが生じているものは、縦波共振周波数が低下した。また、荷重レベルが高くひび割れが進展しているものほど共振周波数の低下は大きいという傾向になった。いずれの場合においても明確な卓越周波数をもった打撃音を得られており、ひび割れ幅 0.05mm 程度のひび割れでは弾性波速度を低下させる要因にはなっているものの、共振を乱すものではないことがわかる。ただし、ひび割れ幅が大きくなると卓越周波数が大きく低下し、供試体全体の共振現象をとらえているかどうかについては明確でなくなった。この傾向はたわみ振動においても同様であったが、ねじり振動においては明確な卓越周波数を得ることもできなかった。

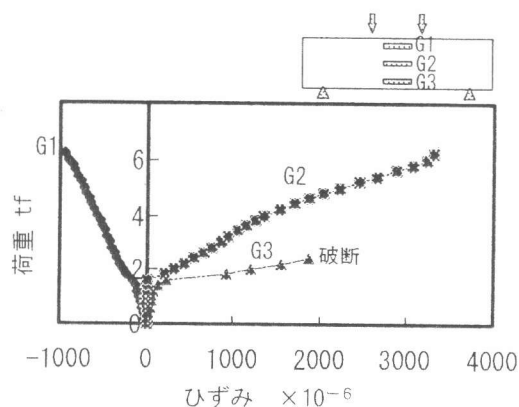


図-6 鉄筋コンクリートのひずみ

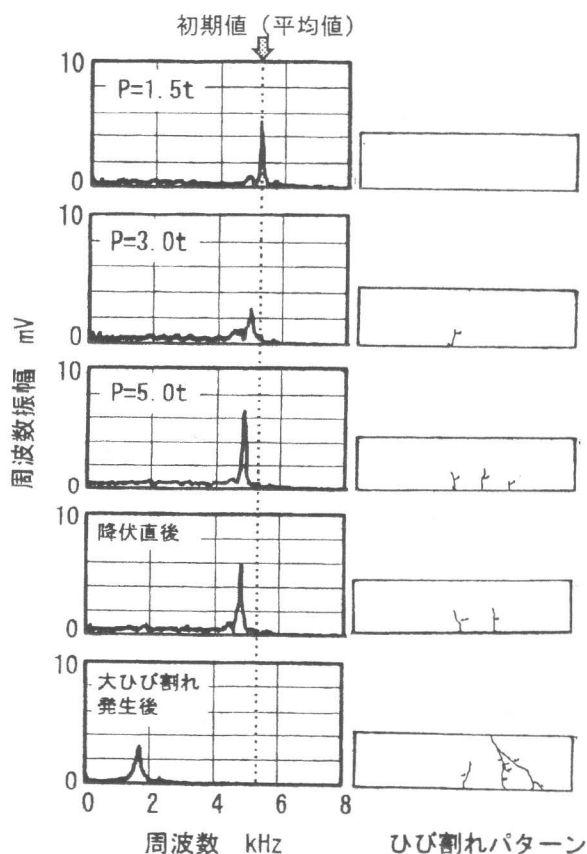


図-7 荷重段階ごとの打撃音の周波数 (縦波共振)

図-8 は卓越周波数の変化を同一の供試体において測定した結果である。たわみ共振周波数、縦波共振周波数、ねじり共振周波数とも荷重 2t 程度から荷重の増加とともに低

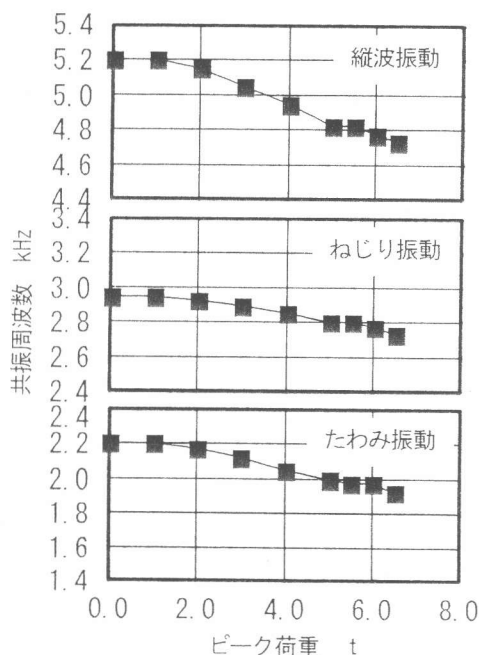


図-8 ピーク荷重の増加にともなう共振周波数の低下

下する。このことは、無筋コンクリートにおける最大荷重が約 1.8t であることと対応していると考えられる。すなわち、鉄筋コンクリートに曲げひび割れが生じることによってはじめ、共振周波数が低下し始めるものと思われる。そして、荷重が増加しひび割れが進展するのに応じてさらに共振周波数が低下していくと考えられる。本実験においては、破壊直前の荷重 6.5t 時でたわみ共振周波数、縦波共振周波数、ねじり共振周波数はいずれも載荷前のおよそ 90% 程度の値となった。

3. 3 コンクリートの乾湿が打撃音に及ぼす影響

ここでは、それぞれの載荷レベルの供試体を水浸および乾燥させた後に打撃音を測定し、乾湿が打撃音に及ぼす影響を検討した。打撃音の測定は、水浸条件については、24 時間水中に放置後すぐに打撃音の測定を行うとし、乾燥条件については、温度 40℃、湿度 10% R.H. で 24 時間乾燥させた後、常温になるまで放置し測定した。

荷重 5t まで載荷した供試体におけるたわみ振動の測定結果を図-9 に示す。5t 載荷することによって低下したたわみ共振周波数は、水浸後かなり値が回復する。これを乾燥させると 5t 載荷後の値よりも共振周波数は低下し、ピークも不明確になった。

図-10 は各載荷レベルの供試体の水浸後の共振周波数に対する乾燥後の共振周波数の割合をまとめたものである。荷重 1.5t までは水浸後と乾燥後の共振周波数にほとんど差異はないが、これを越えると両者に差異が生じ始め、荷重が大きくなるほどその差異が大きくなる傾向にある。3つの共振周波数の中では、たわみ共振における差異が最も大きく、縦波、ねじり共振の傾向はほぼ同様である。ここで、せん断によって大きなひび割れが発生したものについては、卓越周波数が供試体全体のものでないと考えられたので比較していないが、乾燥による卓越周波数の低下は同様に認められた。

図-11 は水浸後および乾燥後に測定した縦波共

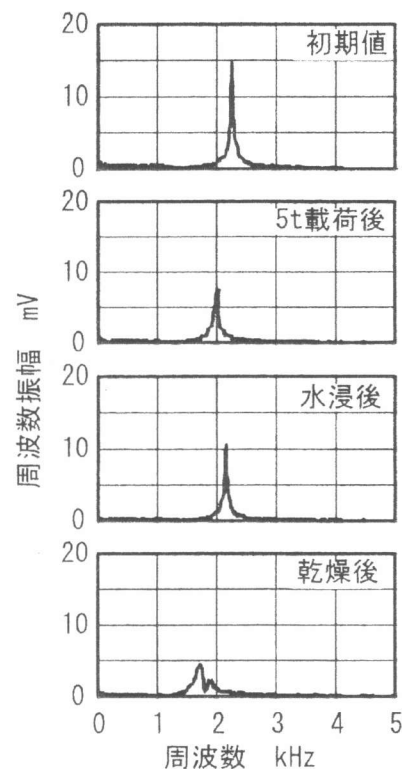


図-9 水分が共振周波数に及ぼす影響（たわみ共振）

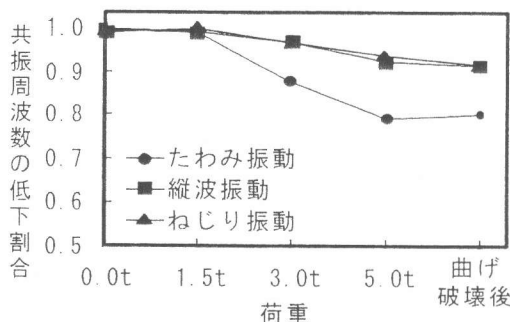


図-10 水浸時の共振周波数に対する乾燥時の共振周波数の低下割合

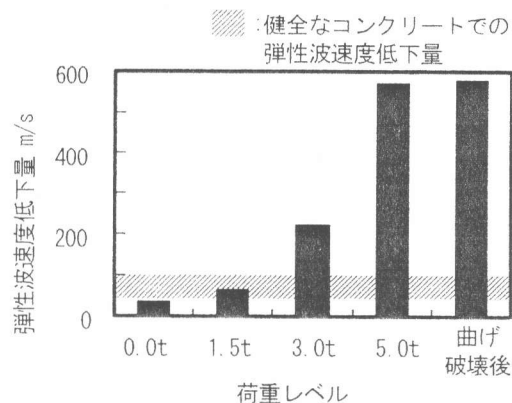


図-11 重量変化1%に対する弾性波速度低下量

振周波数から得られた弾性波速度の変化量とこのときの重量変化から、重量が1%変化した場合の縦波速度の変化量を算定したものである。なお、このときの実際の重量減少率はおよそ0.6~0.8%程度の範囲にあり、特に質量減少率と損傷程度との相関は認められなかった。この結果と予備実験の結果を比較すると、明らかに荷重5tで載荷したものおよび曲げひび割れが生じて破壊したものは、弾性波速度がコンクリートの乾湿に非常に大きな影響を受けていることがわかる。

以上の結果から、損傷の程度の大きなものほど供試体中の水分によって弾性波速度（共振周波数）が変化しやすいことが明らかとなった。なおここでたわみ振動について考えてみると、曲げひび割れが発生しているにもかかわらず、水分が供給されることによりたわみ共振周波数が回復するということは、単にひび割れ部に水が入ったために弾性波が伝播しやすくなっただけではないことが予測される。本実験からは確認することはできないが、例えば水分によるコンクリートの膨張の影響などが考えられる。いずれにしても、このような現象は共振周波数を用いて損傷評価を行う場合、判断を誤らせる原因になるので注意が必要である。しかし、一方ではコンクリート中の水分量を人工的に変化させるなどによって、そのときの打撃音の変化から損傷程度を推定できる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート供試体に曲げを加えることによりひび割れを発生させ、このひび割れの程度と打撃音の関係について検討した。これをまとめると以下の通りである。

- ①鉄筋コンクリート供試体に曲げひび割れが発生すると、たわみ振動、縦波振動、ねじり振動のすべての共振周波数が低下し、降伏直前にはおよそ初期値の90%程度となった。
- ②ひび割れ幅が小さい場合には、梁が降伏荷重を越えても共振を生じるが、ひび割れ幅が大きくなると卓越周波数が不明確になり共振をとらえにくくなる。
- ③コンクリート中のひび割れの増加にともなって、打撃音は水分の影響をより受けやすくなり共振周波数が変動する。このときの変動は、健全なコンクリートの乾湿による変動よりもかなり大きくなる。

ここで示したように、コンクリートの損傷などによって部材の振動特性が変化しやすくなるとすれば、例えば、季節によるコンクリートの含水率の変化、あるいはここでは触れていないが温度による膨張収縮などが構造物の振動特性に影響を及ぼしやすくなっていると考えられる。そこで、この変化を利用することにより構造物の損傷を推定することが可能であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり協力を頂いた研究室の各位、特に多くの実験を手伝っていただいた千葉工業大学卒論生の青山哲也君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 魚本健人、伊東良浩：打音法によるコンクリートの非破壊検査、コンクリート工学論文集、vol.7, no.1, pp143-152, 1996.1
- 2) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集第390号/V-8、pp1-22、1988.2