音響衝撃法によるコンクリート材料の欠陥評価技術の検討*

磯本良則**, 梶原智裕**

** 広島大学 大学院工学研究科

Non-Destructive Technique of Evaluating Defects on a Concrete Plate by an Acoustic Impact Method*

Yoshinori Isomoto** and Tomohiro Kajiwara**

** Graduate School of Engineering, Hiroshima University

It is very important to assess component materials such as concrete structures with non-destructive techniques. An acoustic impact method takes advantages of an easy handling and low costs in many other non-destructive techniques. Fourier spectrum, which was obtained by a fast Fourier transform of detected waves was examined for the evaluation of artificial defects formed on the square concrete samples. The effects of a striker and a detector on the Fourier spectrum were discussed to detect defects and their positions in the specimen. Vibration mode analyses were attempted to clarify the cause of the many peaks of frequency in the Fourier spectrum. It is found that the peak frequency, its amplitude and half-power bandwidth of the frequency spectrum can be indicators for detecting the artificial defect. The results suggested that this acoustic impact method using a steel ball as a striker and a microphone as a detector was fairly useful as one of non-destructive techniques for the assessment of concrete structures.

Key words : non-destructive technique, acoustic impact method, assessment, concrete material, Fourier spectrum

1. 緒 言

日本の高度成長期に建設されたトンネルなどのコンクリート構造物の剥落事故が近年多発している。施工業者の海砂の洗浄工程にも問題があるにしても日本のコンクリートの安全神話が崩壊するとともに、コンクリート構造物の非破壊検査が重要な課題となっている。コンクリートの非破壊検査に現在主に用いられている方法として超音波探傷法、放射線透過法^{1), 2)} などがある。これらの検査法は実績もあり長所も多いが、作業時間が長い、コストが高いなどの短所があるのも事実である。これに対し、作業時間が短く安価な打音法と呼ばれる非破壊検査法がある。この打音法は山陽新幹線のトンネル塊の剥落事故直後、再発防止の検査として用いられた。この検査で一通りの成果は得られたものの、検査員がハンマーで被検査物を叩き、耳でその良・不良を判断するという人間の経験と勘に頼った原始的な手法であるために検査の自動化が叫ばれているのも事実である。著者らはこの打音法を音響衝撃法と呼び、これまでに金属平板を用いて基礎的な実験を行ってきた^{3), 4)}。しかし、コンクリート材料については行っていない。また、コンクリート材料を対象とした基礎的研究はあるが超音波探傷法や衝撃弾性波法などが主である⁵⁾⁻⁷⁾。コンクリートの非破壊検査技術を確立させるためには音響衝撃法を用いた研究も必要と思われる。そこで、本研究の目的として従来の打音検査法の是非と、本研究の提案する音響衝撃法の適用によるコンクリート材料の欠陥評価技術の検討を行った。

2. 試験装置および試験方法

試験片の形状を Fig. 1 に示す。試験片として一辺が 300 mm、厚さ 30 mm の正方形コンクリート平板の試料を 3 枚用意した。試料 A を健全試験片、試料 B の裏側に試験片の中央から 100 mm の地点を中心に $80 \times 80 \times 10$ mm の大きさで窪み状の欠陥を入れ欠陥試験片とした。試料 C は試料 B と同じ位置に徐々に大きな窪み状の欠陥を作りながら試験を行った。各試験片の健全状態における質量は試料 A および試料 B が約 6.5 kg、試料 C は約 6.2 kg であった。

次に試験装置を Fig. 2 に示す。試験片を発泡スチロール材の上に置きハンマーや鋼球（基準的な鋼球の直径を 11 mm、質量を約 5.5 g とする）を使って試験片の中央または中央から 100 mm の位置に衝撃を与えた。衝撃の強度（ここでは衝突速度）を一定にするために鋼球を同じ高さから落させた。試験片を横向きにしても鋼球の衝突速度を一定にすることで同一の衝撃強度が得られる。また、球の材質および質量が音響に及ぼす影響を求めるための実験も行った。ハンマーでは手で持って叩くために衝撃の強度を一定にすることはできなかった。ハ

Fig. 1 Test specimens.

* 材料と環境 2002 (川崎, 2002) で発表

** 〒739-8527 広島市鏡山 1-4-1 (1-4-1 Kagamiyama, Higashi Hiroshima, 739-8527 Japan)

Fig. 2 Schematic diagram of a testing apparatus.

ンマーや鋼球の衝撃によって発生した試験片の振動や音響は圧電素子 (PZT) およびマイクロホンによりそれぞれ検出され、それらの信号は、特にマイクロホンでは増幅器・ハイパスフィルターを通過した後に、デジタルオシロスコープを通してコンピュータで処理をされた。

振動モードの測定では試料 C を用いて欠陥を施す前の健全状態と欠陥として $50 \times 50 \times 12$ mm を施した場合について試験片の中央に鋼球を衝突させ 2 個の圧電素子を用いた。1 個の圧電素子を中央から 50 mm 離れた位置に固定して基準とし、もう 1 個の圧電素子を欠陥を通る平板の中心線上を移動させながら各場所の振動を測定することで、その周波数スペクトルのフーリエ振幅の位相および大小により振動の節および腹の位置を求めた⁴⁾。

3. 試験結果

まず、 $80 \times 80 \times 10$ mm の窪み状の欠陥のある試験片を用いて、窪みのない部分 (Sound Area) と窪みのある部分 (Defect Area) をハンマーで叩いた時に得られる振動および音波波形を Fig. 3 に、鋼球を落下させた時に得られる振動および音波波形を Fig. 4 に示す。検出場所は衝撃を与えた場所 (衝撃点) の近傍とした。Fig. 3, 4 をみると、いずれの波形も衝突の瞬間に大きな振幅が得られ、その後徐々に減衰していることが分かる。また、打撃方法や検出方法によって振動の周期や波形が異なった。マイクロホンにおいて信号の発生前からノイズと見られる微小な波形が生じている。しかし、このノイズは次で述べる周波数スペクトルでは注目する周波数とは異なる領域 (20 kHz 以上) に発生しているので解析に影響はないことが分かっている。

Fig. 3, 4 の波形のうち圧電素子を用いた場合の振動波形を高速フーリエ変換 (サンプリング間隔 $0.8 \mu\text{s}$, サンプリング数 8192 点, 分解能約 0.15 kHz) して得られた周波数スペクトルをそれぞれ Fig. 5, 6 に示す。縦軸は振動のフーリエ振幅 ($\text{mV} \cdot \text{s}$), 横軸は周波数 (kHz) である。Fig. 5, 6 を比較すると、ハンマーでは約 7 kHz までの振動が顕著に発生しているのに対し、鋼球ではむしろ 7 kHz までの振動は小さく、それ以上の周波数のフーリエ振幅が大きくなっており、打撃方法により顕著に発生する周波数領域が異なることが分かる。ところが 1.22~6.4 kHz に現れるピーク周波数は両者の間でよく一致していることが明らかである。次に、検出器がマイクロホンである場合の周波数スペクトルを Fig. 7, 8 に示す。Fig. 5 と 7 を比較すると検出器にマイクロホンを用いることで圧電素子を用いたときよりも多少高い周波数まで検出が可能であることが分かる。逆に、打撃器に鋼球を用いた

Fig. 3 Waveforms obtained by the impact of a hammer.

Fig. 4 Waveforms obtained by the impact of a steel ball.

Fig. 5 Fourier spectrum of vibration waves detected with a hammer and PZT.

Fig. 6 Fourier spectrum of vibration waves detected with a steel ball and PZT.

Fig. 7 Fourier spectrum of acoustic waves detected with a hammer and a microphone.

Fig. 8 Fourier spectrum of acoustic waves detected with a steel ball and a microphone.

Fig. 9 Fourier spectrum of acoustic waves detected with a steel ball and a microphone in normal and defective specimens.

場合は Fig. 8 のマイクロホンよりも Fig. 6 の圧電素子のほうが高い周波数まで検出が可能であった。一方、7 kHz 以下で検出されたピーク周波数は Fig. 5 から 8 ではほぼ同一であり、打撃方法や検出器の影響を受けないことが分かる。

次に、健全試験片 (Normal) と窪みのある欠陥試験片 (Defective) を用いてこれらの中央に鋼球を衝突させ、衝撃点の近傍の音響をマイクロホンで検出した結果を Fig. 9 に示す。図には示されていないが、窪みを入れる前の欠陥試験片と健全試験片の間には実線で示されるピーク周波数に違いは見られなかったが、窪みを付けることで破線のピーク周波数は数箇所に変化した。例えば健全試験片のピーク周波数 12.96 kHz に注目すると窪みが存在することにより 0.3 kHz、分解能にして 2 つ分の周波数が低周波側にずれるという結果が得られた。また、

欠陥の存在により 16 kHz 付近に新たなピークが発生している。これは、窪みの端面による反射波の影響が考えられる。一方、フーリエ振幅に注目すると、同じ衝撃強度にもかかわらず欠陥が存在する試験片のフーリエ振幅は一部のピーク周波数を除いて小さかった。なお、試験片の中央から 100 mm 離れた位置に衝撃を与えた場合 (Fig. 5-8) と試験片の中央に衝撃を与えた場合ではピーク周波数が明らかに異なっている。これは衝撃点が変わることでコンクリート試験片の振動の仕方が異なったためと考えられる。

4. 考 察

4.1 打 撃 器

Fig. 5, 6 あるいは Fig. 7, 8 より、通常の打音検査で用いられるハンマーと本研究で用いる鋼球から得られる周波数スペクトルの大きな違いは、発生する振動や音響の周波数領域にあると考えられる。前述したようにハンマーの打撃によって発生する周波数の領域に比べて鋼球の衝突によって発生する周波数の領域は高く、たくさんのピークが発生していることが明らかである。たくさんのピークが発生する理由は後述するように振動モードが多数発生しているためと考えられる。ピーク周波数が多い方がそれだけ多くの情報から欠陥による異常を検出することができること、さらに高い周波数では欠陥による周波数のずれが現れやすいことから、鋼球を用いる方が欠陥診断には都合がよい。また、鋼球では位置エネルギーを用いて衝突速度すなわち打撃強度を一定に保つことが容易である。打撃強度を一定にすることで振動振幅の再現性が増す。振幅に注目した解析は後述する。これに対してハンマーでは打撃強度を一定にするための治具が新たに必要である。ゆえに、打撃器としては多くの情報と高い再現性が得られる鋼球の方が有利であると思われる。

鋼球を用いることで高い周波数が発生する理由を明らかにするために、打撃器の材質および質量がピーク周波数に及ぼす影響を調べた。その結果を Fig. 10 に示す。衝撃点は試験片の中央とし、検出器には圧電素子を用いた。周波数スペクトルは上から順にハンマー (質量 212.8 g)、黄銅球直径 25 mm (質量 72.6 g)、黄銅球 19 mm (30.6 g)、鋼球 11 mm (5.5 g) の衝撃によって得られたものである。0.1 mV·s 以上の振幅をピークと判断すると、打撃器の質量が減少するにつれて発生する最大ピーク周波数が高くなっていることが分かる。Fig. 10 より各打撃器において 0.1 mV·s 以上のフーリエ振幅を有する最大ピーク周波数と各打撃器の試験片に対する接触時間を測定した結果を Table 1 に示す。Table 1 より、発生するピーク周波数の増加は打撃器の接触時間の短さに関連があることが分かる。ゆえに、鋼球を用いることによって高い周波数が発生する理由は、試験片に対する接触時間が短いことにより試験片に高い周波数の振動を与えるためであると考えられる。言い換えると、打撃体との接触時間が長いと、打撃体の慣性質量により被打撃体の振動が抑制されるためとみられる。

4.2 検 出 器

検出器としては圧電素子、マイクロホンおよび人間の

Fig. 10 Difference in Fourier spectrum of vibration waves detectable with a hammer and balls.

Table 1 Contacting time and detected frequencies by : strikers.

Striker	Weight g	Contacting Time ms	Detected Frequency kHz
Hammer	212.8	6.9	3.81
Brass Ball L	72.6	3.3	6.71
S	30.6	2.1	12.97
Steel Ball	5.5	1.1	19.22

聴覚がある。これらを分類すると、圧電素子は接触型の振動検出器であり、マイクロホンおよび聴覚は非接触型の音響検出器ということになる。打撃器として前項で有利であると判定した鋼球の衝突試験に注目すると、Fig. 6, 8 から分かるように、圧電素子に比べるとマイクロホンを用いた方が検出できる周波数に限界があるようにみられる。これはマイクロホンによる検出の前段階で用いた増幅器の性能に依存するか振動伝達媒体が空気による振動の減衰が生じるためと考えられるが、両者の間で優劣はつけにくい。また、欠陥を診断する立場から両者を比較すると、両検出器とも欠陥のない場所よりも欠陥のある場所の方が得られるフーリエ振幅が大きいことが分かる。さらに、欠陥のある場所では 5.79 kHz, 8.69 kHz に新たなピークが発生しており、両者の間で結果は同じであった。従って、圧電素子もマイクロホンも欠陥の検出能力はほぼ同じとみなすことができる。両者の検出能力が同じであるならば、検出器としては対象物との接触状態の影響を受けない非接触型のマイクロホンの方が有利であると考えられる。

検出器としての聴覚についてみると、一般的な可聴域としては 0.02~18 kHz⁸⁾ であり、聴覚は経験的に非常に良い音響検出器であると言える。Fig. 9 の試験では、健全試験片と欠陥のある試験片の音の違いは音響診断の経験のない 25 才程度の男性でも聞き取ることができた。しかし、Fig. 8 の試験では窪みのある部分と窪みのない部分での音の違いは聞き取ることができなかった。また、聴覚は音響信号を数値化できないために聞き取れた周波数が何 kHz であるか、健全に比べてどのくらい周波数が

Fig. 11 Vibration mode at a frequency of 1.37 kHz.

Fig. 12 Vibration mode at a frequency of 3.50 kHz.

ずれたかについては不明確であるうえ、聴覚は信号として記録することができないこと、環境に左右されやすいという欠点もあり、測定器としての聴覚は圧電素子やマイクロホンよりも劣っていると言わざるを得ない。

4.3 ピーク周波数と振動モード

一連の振動や音響測定で検出されたピーク周波数は振動モードと関連がある⁴⁾ として、試料 C を用いて衝撃点を試験片の中央とした場合の低次のモード測定を行った。検出された最も低いピーク周波数 1.37 kHz について、健全状態の振動の様子を Fig. 11(a) に、50×50×12 mm の大きさの欠陥がある場合の振動の様子を Fig. 11(b) に示す。破線は試験片および発泡スチロールの支持物 (Fig. 2 参照) を示し、実線は試験片の中心を表す。この周波数は Fig. 9 の 1.52 kHz に相当する。健全試験片であるにもかかわらずこのピーク周波数がずれた理由は健全時の試験片の質量が異なるためである。前報⁴⁾ の金属平板の試験片では両端が節であったのに対し、本実験では試験片の両端が節になっていない。これは試験片の両端を固定していないためである。Fig. 11(a), (b) から、この周波数における振動の形態は基本的に節を 2 つ、腹を 1 つ持ったモード 1 であり、欠陥が入ることによって打撃点 (試験片の中央) からの節の距離が左右で異なっていることが分かる。次に、Fig. 12(a), (b) に 2 番目に低いピーク周波数 3.50 kHz (Fig. 9 の 3.81 kHz に相当) の振動の様子を示す。Fig. 12(a) では健全状態の試験片の中心から左右対称の位置に節を 2 つ、また腹を試験片の中心と両端に 2 つ持ったモード 2 であり、Fig. 12(b) に

示すように、欠陥の存在によって試験片中心からの節の距離はやはり左右で異なっていた。以上の結果より、欠陥が入ることで左右の試片重量の対称性が失われ、健全状態のときに比べ節の位置が微妙に変化することが分かった。さらに高いピーク周波数に注目すると、高次の振動モードが確認されると考えられるが、節と腹の位置に変化が現れるのは、それぞれの周波数において振動のバランスが失われるような欠陥が存在するときであると推察される。

4.4 欠陥の診断

前節までの試験結果および考察より、鋼球の衝突を用いた音響衝撃法により、ある大きさの窪み状の欠陥を対象とした場合の欠陥の有無および欠陥の位置を診断することが可能であることが分かる。ただし、健全な試料における基準的なピーク周波数、フーリエ振幅が得られていることが前提である。まず Fig. 9 より健全な試験片に比べて欠陥のある試験片ではほとんどのピーク周波数に低下が見られ、高周波数側ではその挙動が顕著に現れた。従って、ピーク周波数に注目することで健全試験片と欠陥のある試験片を区別することができる。欠陥の存在によりピーク周波数が減少した理由は、欠陥により試験片の強度（曲げ剛性）が低下したためと考えられる³⁾。また、同図におけるフーリエ振幅に注目すると欠陥のある試験片のフーリエ振幅は小さく、振幅の大小でも欠陥の有無が判断されるとみなされる。フーリエ振幅の低下は、それ自身では振動の低下を意味するが、振動の減衰はフーリエ振幅の低下とともにスペクトルの幅の増大を伴うと考えられる。従って、フーリエ振幅の低下のみから振動の低下と減衰を見極めることは難しい。スペクトルの幅は半値幅で解釈され、これについては後述するが、本実験におけるフーリエ振幅の低下は欠陥の存在によって左右の試片重量の対称性が乱れたものと判断され、振動の低下と減衰を意味するとみられる。ところが Fig. 6 および 8 に示されるように、欠陥のある試験片において、欠陥のない部分に比べて欠陥のある部分でフーリエ振幅が大きくなっていることから、欠陥の位置を特定することができるとみなせる。窪み状の欠陥部でフーリエ振幅、すなわち振動の振幅が大きくなる理由はこの試験体の振動が (1) 式で示される減衰を伴う運動方程式⁹⁾で表されること、大きな質量から小さな質量の部分に振動が伝播するとき、運動量が保存されるならば小さな部分の速度は大きくなり、変位（振幅）も大きくなるためである。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1)$$

ただし m , x , t , c および k はそれぞれ質量、変位、時間、バネ定数および減衰係数である。

上記のピーク周波数および半値幅、フーリエ振幅より検出限界の欠陥の大きさを探った結果を Fig. 13, 14 に示す。半値幅はフーリエ振幅のピークの高さの $1/\sqrt{2}$ における周波数の幅 (kHz) と定義される⁹⁾。横軸は試験片全体の質量に対する欠陥部の質量の比、すなわち質量欠損率である。Fig. 13 は試料 C の中央に鋼球を衝突させたときの質量欠損率に対する 8 kHz 付近のピーク周波数および半値幅の変化を表している。ピーク周波数はわずかながら単調に減少していることが分かる。一方、質量欠

Fig. 13 Effects of the mass loss ratio on Fourier frequency and half-power bandwidth near a frequency of 8 kHz.

Fig. 14 Effects of the mass loss ratio on Fourier amplitude near frequencies of 7.8 and 11 kHz.

損率 0.7% を越えて窪みが大きくなるにつれて半値幅は広がっているが、ある窪みの大きさに極大値を取っている。このときの窪みの大きさ（質量欠損率）において振動のバランスが最も崩れたものと思われる。Fig. 14 に一例として 7.8, 11 kHz 付近のピーク周波数に注目し、欠陥のある部分に鋼球を衝突させたときの質量欠損率に対するピーク周波数のフーリエ振幅の変化を示す。欠陥が大きくなるに連れてフーリエ振幅は増大する傾向があることが分かる。以上のことからピーク周波数よりもフーリエ振幅あるいは半値幅に注目する方が欠陥の診断に適していると思われる。また、欠陥の検出の限界は質量欠損率でおよそ 0.7% 程度ということになる。

本研究においても、健全な試料における基準のスペクトルが得られていることが前提であり、基準のスペクトルが得られない場合の欠陥診断は、今後の課題といえる。

5. 結 論

(1) 鋼球を用いる音響衝撃法は、従来のハンマーを用いる打音検査法に比べて優れた欠陥検出法であることが分かった。

(2) 検出器として圧電素子およびマイクロホンの性能に大差はないが非接触法であるマイクロホンの方が現場では有利であると思われる。

(3) 試験片の中央を叩いた場合は欠陥の存在によりピーク周波数は低下し、半値幅が広がった。これらを検出

することにより欠陥の有無評価が可能であることが分かった。また、欠陥部分のフーリエ振幅は大きいことから、フーリエ振幅に注目することで欠陥の場所を特定することが可能である。

(4) 今回用いたコンクリート試験片では、質量欠損率にして 0.7% ($30 \times 30 \times 5$ mm の欠陥サイズ) 以上の欠陥の検出が可能であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) JSNDI, "Non-destructive Inspection manual" [New edition], Nikkan kogyo newspaper publisher (1978).
- 2) R. Y. Chiao and L.J. Thomas, *Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **41**, 484 (1994).
- 3) Y. Isomoto, H. Kitagawa, M. Hirata, M. Matsumura and A. Imaoka, *Zairyo-to-Kankyo*, **46**, 436 (1997).
- 4) Y. Isomoto and K. Hayashi, *Zairyo-to-Kankyo*, **51**, 418 (2002).
- 5) M. Schickert and H. Wigggenhauser, *Proc. of the Int. Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, **1**, 411 (1995).
- 6) C. Cheng and M. Sansalone, *Materials and Structures*, **26**, 274 (1993).
- 7) Ming-Te Liang and Po-Jen Su, *Cement and Concrete Research*, **31**, 1427-1436, 31 (2001).
- 8) M. Miyayama, "Hito-no-Gokan-to-Seramikku-Sensa", Gihodo Shuppan Co., Ltd. (1994).
- 9) A. Nagamatsu, "Introduction to Modal Analysis", Corona Publishing Co., Ltd. (1993).

(Manuscript received June 13, 2003 ;
in final form July 29, 2003)