

音響計測によるコンクリート壁面高速診断システムの開発

著者	田中 秀典, 小針 憲司, 板倉 賢一, 山崎 剛嗣
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	26
ページ	39-45
発行年	2016-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008955

音響計測によるコンクリート壁面高速診断システムの開発

著者	田中 秀典, 小針 憲司, 板倉 賢一, 山崎 剛嗣
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	26
ページ	39-45
発行年	2016-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008955

音響計測によるコンクリート壁面高速診断システムの開発

田中 秀典*1, 小針 憲司*1, 板倉 賢一*2, 山崎 剛嗣*3

1 はじめに

我が国の高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物は老朽化が進み、各地で事故が発生している。こうした耐用年数を過ぎたコンクリート構造物の健全性診断として、様々な検査方法が提案され実施されている⁽¹⁾。非破壊検査方法として、打音、音波、振動、電磁波等を用いる方法が提案されているが、それぞれ欠陥検出精度やコスト、検査時間などに問題を残している。そのため現状では手軽な診断法として、打音検査法が主流になっている。打音検査は、熟練した検査員がコンクリート壁面をハンマーで打撃し、反響音を耳で聞いて欠陥の有無を判断する。検査員に代わって、打音を自動的に分析し、定量的かつ客観的に診断するシステムの開発研究が進められている^{(2)~(5)}。

本研究では、コンクリート壁面内部の欠陥を高精度かつ高速に検出し、壁面展開図にマッピングするハードウェアとソフトウェア・システムの開発を目指している。本報告では、都合によりシステムの詳細を報告することはできないが、システム開発のために実施した基礎実験の結果を報告する。

基礎実験では、コンクリート壁面内部に欠陥に相当する空隙のあるブロックと健全なブロックを供試体として用意し、固体粒子を衝突させた時の衝突音を計測、分析して欠陥検出の可能性や条件を探った。その際特に、実験室内の残響音が衝突音に与える影響についても検討した。以下には、この基礎実験の結果について報告する。

2 残響時間計測

2.1 実験概要

コンクリートブロック供試体への固体粒子衝突実験は、幅と奥行きが3.6m、高さ2.5mの室内で実施した。そこで、この部屋の残響時間（定常音を室内に放射して平衡状態に達した後音を停止し、その後音響エネルギー密度が音源停止直前のエネルギー密度に比べて-60dBになるまでの時間[s]）を計測した。計測には、01dB社製のプリアンプ内蔵無指向性マイクロフォン（40AE、感度：50mV/Pa、応答周波数大域：6.0-20kHz）と、信号コントローラ（Symphonic、最大サンプリング周波数：51.2kHz、分解能：18ビット）、多面体スピーカを用いた。図1に計測状況の概要と、図2にスピーカとマイクロフォンを示す。

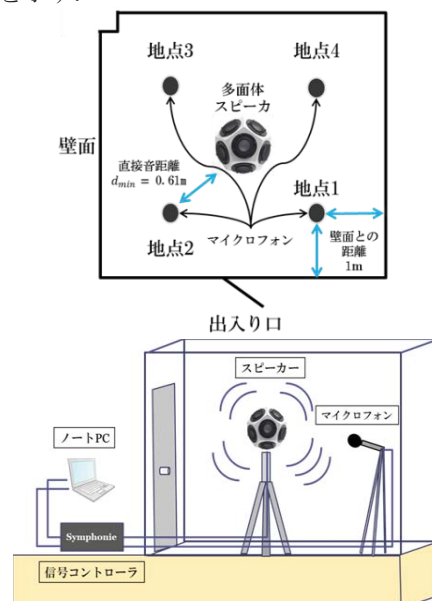


図1 計測概要

(上図：平面配置，下図：計測システム)

*1：株式会社メイセイ・エンジニアリング

*2：室蘭工業大学 しくみ情報系領域

*3：室蘭工業大学 工学部 情報電子工学系学科



図 2 スピーカ（室内中央）とマイクロフォン



図 3 実験室の吸音加工

計測にはノイズ断続法を用い⁶⁾、ノイズとしてはホワイトノイズとピンクノイズを用いた。スタッキング回数は10回で、3回繰り返して平均を求めた。

次に、実験室の壁面に幅10cm、長さ250cm、厚さ5cmのダウ化工株式会社製のスタイロフォーム(A種押出法ポリスチレンフォーム保温板)を5cm間隔で貼り付けて(図3)、同様の計測を行った。

2.2 残響時間計測結果

図4に、ホワイトノイズを用いた場合の、中心周波数に対する残響時間を示す。図1に示したように、マイクロフォンの位置を4箇所設定しており、上部の折れ線群が残響音処理前(図2)で、下部が残響音処理後(図3)である。

図4より、マイクロフォンの配置による残響時間の差は無い事がわかる。また、吸音効果が確認でき、特に高周波数領域で効果が高いことがわかった。ピンクノイズを用いた場合も、同様の傾向を確認した。

3 コンクリートブロック打撃実験

3.1 コンクリートブロック供試体

以上の2種類の室内環境下でコンクリートブロック

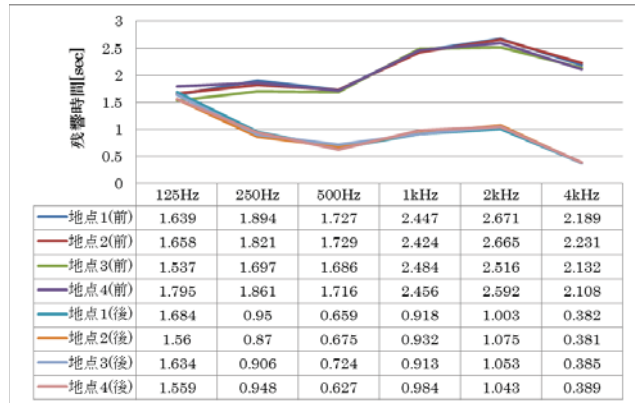


図 4 残響時間計測結果（ホワイトノイズ）

打撃試験を実施した。使用した供試体は、2種類である。いずれも40×40×30cmの大きさで、水、セメント、粗骨材(砂)の配合比が1:1.4:6.1であるが、一方には、欠陥を想定して供試体内部に発泡スチロールを埋め込んでいる。図5は、その欠陥の大きさ(直径200mm、厚さ5mmの円盤)と位置(表面から深さ30mm)を表している。もう一方は、欠陥の無い健全な供試体である。

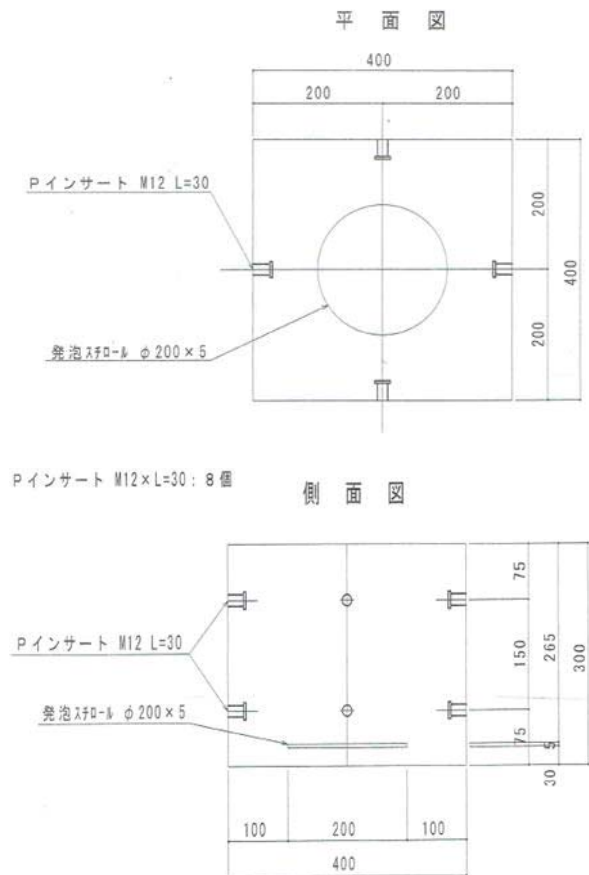


図 5 欠陥を有する供試体
(上：側面図，下：平面図)

3.2 実験手順

残響時間の異なる環境下で、固体粒子を健全なコンクリート供試体と欠陥のある供試体に衝突させ、衝突音を計測する実験を行った。実験条件としては、重量の異なる三つのセラミックス球と、衝突位置からマイクロフォンまでの距離を3段階に変え、更に衝突粒子の数を4段階で増やす実験を行った。これらの組み合わせによる衝突音の違いを、音圧の周波数領域で比較検討した。使用したプリアンプ内蔵型マイクロフォンと衝突音記録装置および分析ソフトウェアは、残響時間測定に用いたものと同じである。

図6は、この実験の模式図である。供試体は、45度に傾けている。セラミックス球は、直径2mm(0.01g)と5mm(0.25g)、10mm(2.1g)の3種である。これを、供試体の中央に、1mの高さから自由落下させた。衝突位置からマイクロフォンまでの距離は、1mを基本として、0.5m、1.5mで行い、同時に複数粒子を衝突させる実験では、1個、5個、10個、20個を衝突させた。表1に示す組み合わせで実験を行った。それぞれ、10回の計測を行っている。

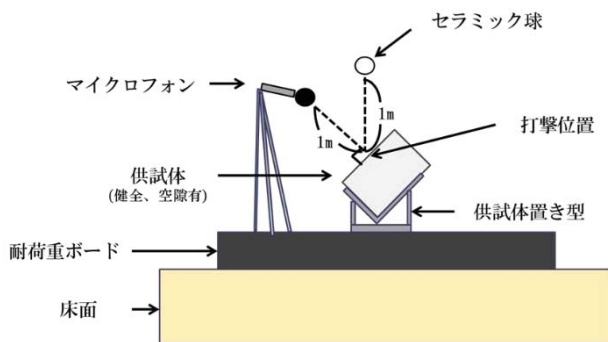


図6 粒子衝突実験の模式図

表1 実験条件の組み合わせ
(球の大きさを変えた実験)

		球の 個数	球の直 径(mm)	マイク 距離(m)
残響処理前	健全な供試体	1	2	1
		1	5	1
		1	10	1
	欠陥供試体	1	2	1
		1	5	1
		1	10	1
残響処理後	健全な供試体	1	2	1
		1	5	1
		1	10	1
	欠陥供試体	1	2	1
		1	5	1
		1	10	1

(マイクロフォンの距離を変えた実験)

		球の 個数	球の直 径(mm)	マイク 距離(m)
残響処理前	健全な供試体	1	2	0.5
		1	5	1
		1	10	1.5
	欠陥供試体	1	2	0.5
		1	5	1
		1	10	1.5
残響処理後	健全な供試体	1	2	0.5
		1	5	1
		1	10	1.5
	欠陥供試体	1	2	0.5
		1	5	1
		1	10	1.5

(球の個数を変えた実験)

		球の 個数	球の直 径(mm)	マイク 距離(m)
残響処理前	健全な供試体	1	5	1
		5	5	1
		10	5	1
		20	5	1
	健全な供試体	1	10	1
		5	10	1
		10	10	1
		20	10	1
	欠陥供試体	1	5	1
		5	5	1
		10	5	1
		20	5	1
1		10	1	
5		10	1	
10		10	1	
20		10	1	
残響処理後	健全な供試体	1	5	1
		5	5	1
		10	5	1
		20	5	1
	健全な供試体	1	10	1
		5	10	1
		10	10	1
		20	10	1
	欠陥供試体	1	5	1
		5	5	1
		10	5	1
		20	5	1
1		10	1	
5		10	1	
10		10	1	
20		10	1	

3.3 実験結果

3.3.1 残響時間の影響

図 4 に示した二通りの残響時間環境下で、コンクリート供試体への粒子衝突実験を行った。図 7 は、直径 5mm のセラミックス球を 1m の高さから自由落下により衝突させたときの、音圧スペクトルである。上が残響時間が長い環境下での結果であり、下図が残響時間が短くなった環境下での結果である。それぞれの縦軸最大値は 0.0018Pa と 0.001Pa であり、横軸は 15kHz まで示してある。青線は健全な供試体の場合であり、赤線は欠陥を有する供試体の結果である。

図 7 の結果から、健全な供試体の場合も、欠陥がある供試体の場合も、部屋の残響時間の影響を受けていないことがわかる。健全な供試体の場合には、1kHz 以下を除くと顕著なピークが見られないが、欠陥を有する供試体では 2kHz から 6kHz の間に幾つかの際立ったピークが見られた。以上の傾向は、他のいずれの実験においても共通した結果であった。

3.3.2 球の大きさによる影響

いずれの実験でも残響時間の影響が、音圧スペクトルに現れなかったため、以下には、残響時間が短い環

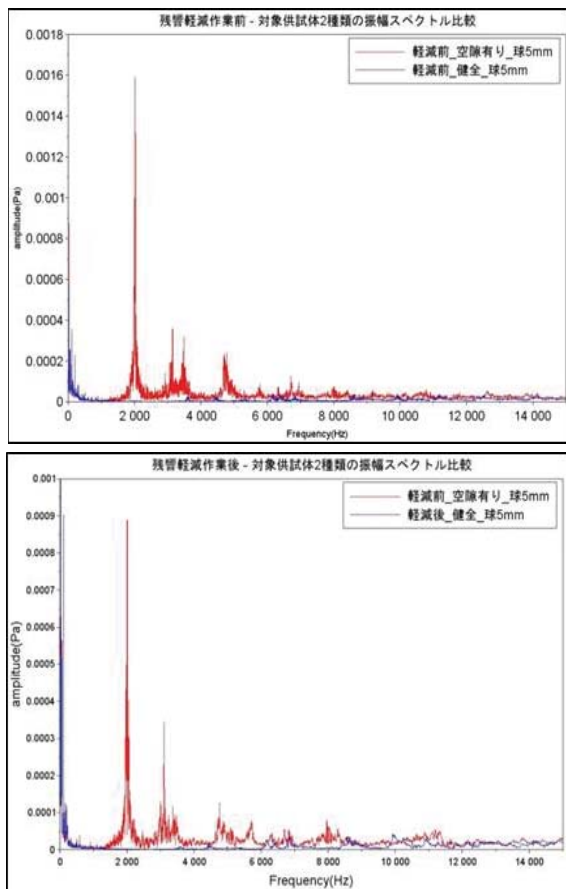


図 7 残響時間が長い環境下(上)と短い環境下、下での衝突音の音圧スペクトルの代表例)

境下での実験結果を示す。

図 8 は、球の直径が異なる場合、すなわち重量が異なる場合の衝突音音圧スペクトルの一例である。衝突位置とマイクロフォンまでの距離は、1m である。上図が健全な供試体の場合で、下図が欠陥のある供試体の結果である。ただし、縦軸の最大値が上図では 4.5×10^{-4} Pa であり、下図では 0.004 Pa である。これより、粒子の重量(質量)が増すと音圧レベル(一般的には、基準圧力に対する比[dB]で表される)が高くなるものの、健全な供試体では全体のレベルが低いことがわかる。また、欠陥の有る供試体の場合には、健全な供試体には見られない特徴的な周波数ピークが 2kHz と 3kHz において見られた。

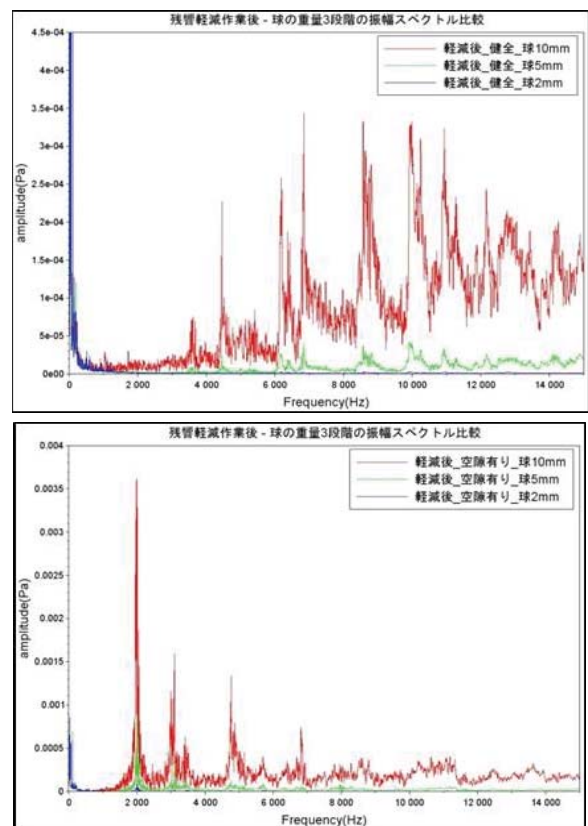


図 8 衝突粒子の大きさを変えた場合のスペク
(上：健全な供試体、下：欠陥のある供試体)

次に、衝突粒子の大きさを変えたすべての実験結果について、音圧スペクトルの総和(1kHz から 25.6kHz の帯域)を求め、実験条件の違いによる比較を行った。

図 9 は、衝突粒子の重量と音圧スペクトルの総和を、残響時間軽減処理の前後および欠陥の有無について調べた結果である。音圧スペクトルの総和は、10 回の実験の平均値である。健全な供試体の場合には、残響処理の前後で大きな違いは見られず、グラフが重なっている。この図より、いずれも粒子重量の増加と共に音

音圧スペクトルの総和が直線的に増加していることがわかる。また、重量が増すと、健全な供試体と欠陥のある供試体の差は大きくなる傾向がある。

図 8 と 9 の結果から、粒子の衝突エネルギーを増すと、当然ではあるが、衝突音も大きくなり、欠陥に対応した卓越周波数が強調されることが確認できた。

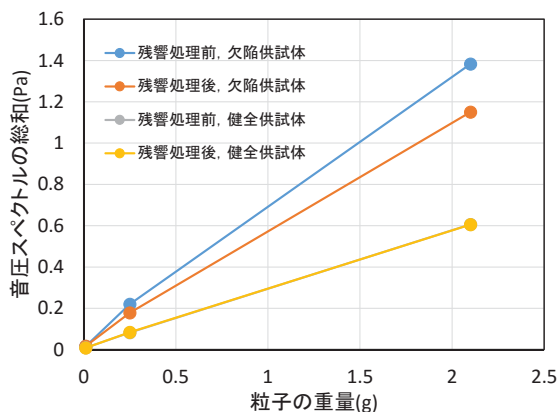


図 9 衝突粒子の重量と音圧スペクトルの総和の関係

3.3.3 マイクロフォン位置の影響

図 10 は、直径 5mm の球を 1m の高さから供試体に衝突させ、衝突位置から 0.5m, 1m, 1.5m にマイクロフォンを設置して記録した衝突音の音圧スペクトルである。上図が健全な供試体の場合で、下図が欠陥のある供試体の結果である。ただし、縦軸の最大値が上図では $5.5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ であり、下図では 0.004Pa である。いずれも距離に応じて減衰しており、特に高周波領域での減衰が大きいことがわかる。この傾向は、直径 2mm の粒子でも、10mm の粒子でも同様であった。

図 11 は、図 9 と同様に、音圧スペクトルの総和とマイクロフォンの位置との関係を残響時間軽減処理の前後および欠陥の有無について調べた結果である。直径が 5mm の粒子の場合である。いずれも衝突位置とマイクロフォンとの距離が増すに従い、音圧が減衰していることがわかる。マイクロフォン位置が 3 点しかないのであるが、距離のべき乗で減衰していると見られる⁷⁾。この減衰傾向は、欠陥供試体の卓越周波数である 2kHz と 3kHz に限っても同様であった。

3.3.4 衝突粒子数の影響

図 12 は、直径 5mm の粒子を 1 個、5 個、10 個、20 個、それぞれほぼ同時に 1m の距離から供試体の中央部に衝突させたときの音圧スペクトルである。上図が健全な供試体の結果であり、下図が欠陥供試体の結果である。ただし、縦軸の最大値が上図では $2.0 \times 10^{-4} \text{Pa}$ であり、下図では 0.0032Pa である。これらの結果より、衝突粒子が 1 個の場合のスペクトルが、粒子を増すと

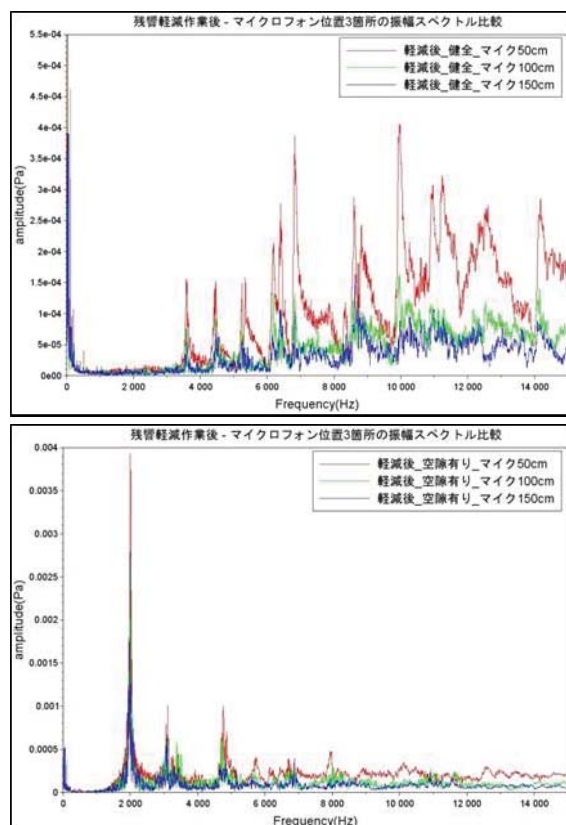


図 10 マイク距離を変えた場合のスペクトル (上：健全な供試体、下：欠陥のある供試体)

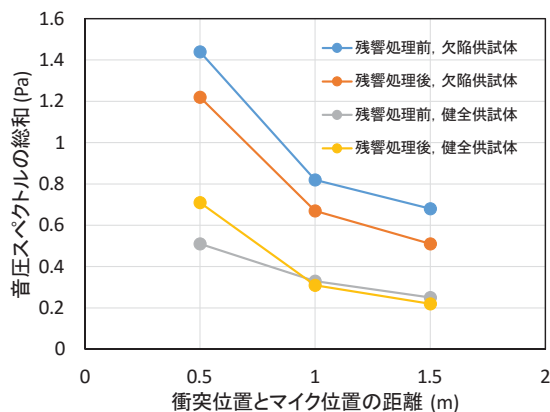


図 11 音圧スペクトルの総和の距離減数(上：健全な供試体、下：欠陥のある供試体)

そのままの形状でレベルアップしていることがわかる。すなわち、欠陥供試体の卓越周波数においても、粒子数が増すとピークが高くなっている。この傾向は、粒子の直径が 10mm の場合でも同様であった。

次に、衝突粒子数と音圧スペクトルの総和の関係について調べた。図 13 は、粒子の直径が 5mm の場合の結果である。バラツキはあるものの、衝突粒子数が増すと音圧も直線的に増加している。すなわち、欠陥供

試体の場合は、粒子による衝突エネルギーにほぼ比例して、卓越周波数を維持したまま衝突音の音圧が上昇すると考えられる。

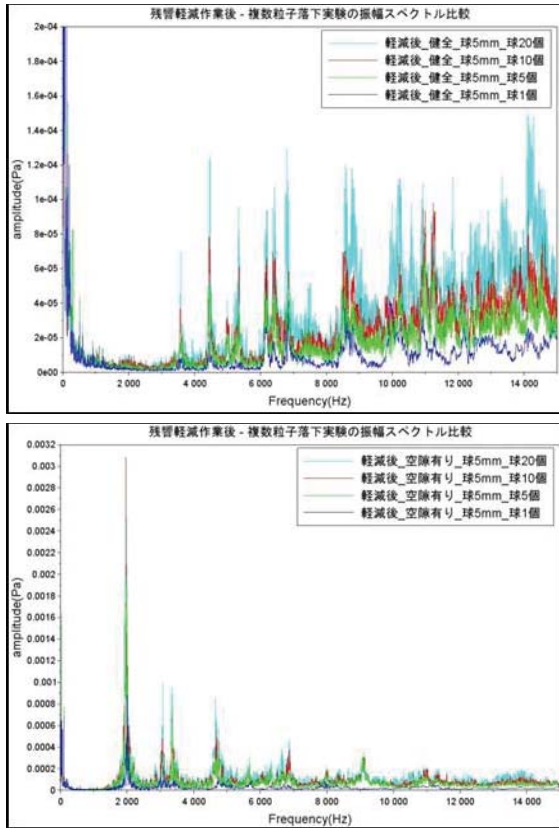


図12 複数粒子を衝突させた場合のスペクトル
(上：健全な供試体，下：欠陥のある供試体)

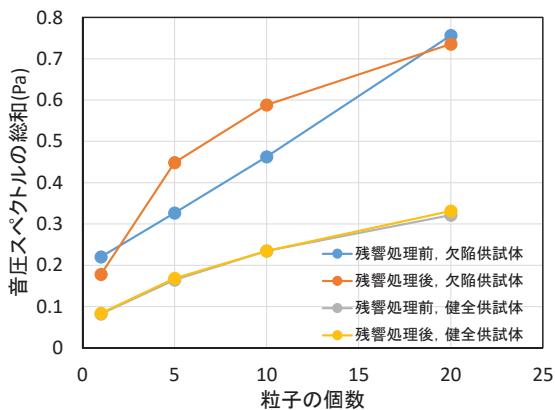


図13 衝突粒子数と音圧スペクトルの総和の関係
(上：健全な供試体，下：欠陥のある供試体)

4 音響計測による壁面診断の可能性

本実験で用いた欠陥供試体の場合、粒子を衝突させ

ると粒子の大きさや個数、残響時間環境に依存せず、健全な供試体よりも常に音圧レベルが高く、健全な供試体では見られない約2kHzと3kHzのピークが見られた。この卓越周波数の原因について、円盤のたわみ振動を仮定して検討した。

図5に示した供試体において、円盤型のコンクリート部分はその下部の空隙の影響でたわみ振動をすると仮定する。端部は単純支持とする。この場合の円盤のたわみ振動による周波数 f_f は、以下の式で近似できる⁽⁸⁾。

$$f_f = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{Ed^2}{12(1-\nu^2)\rho a^4}}$$

ここで、 K_n は振動のモードによって異なる値を持つ係数で、最も低い周波数は $n=1$ 、 $K_n=4.99$ である。 E はヤング率、 ν はポアソン比、 ρ はコンクリートの密度である。 a は円盤の半径、 d は円盤の厚さである。本実験で使用した供試体の空隙の直径は $2a=200\text{mm}$ 、厚さは $d=30\text{mm}$ である。また、 $E=1.9 \times 10^{10} \sim 3.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、 $\nu=0.15 \sim 0.2$ 、 $\rho=2177 \text{ kg/m}^3$ とすると、

$$f_f = 2055\text{Hz} \sim 2855\text{Hz}$$

が得られる。欠陥供試体に見られた卓越周波数は、このたわみ振動によると考えられる。その場合、卓越周波数は円盤の厚さ、すなわちコンクリート壁面奥部の空隙までの距離に伴い変動し、円盤の半径、すなわち欠陥の大きさの二乗に反比例して変化すると考えられる。

以上の結果から、コンクリート壁面に固体粒子を衝突させ、衝突音の卓越周波数に注目することで、奥部の欠陥の有無を推定できると考える。また、今後実験で確かめる必要があるが、欠陥モデルを仮定すれば、卓越周波数から欠陥の規模等も推定できる可能性がある。

5 おわりに

実験室内の残響音特性を調べ、改善を図った上で、二つのコンクリートブロックを用いたセラミックス粒子の衝突実験を行った。内部に空隙のあるブロックと健全なブロックについて、セラミックス球を衝突させ、衝突音の解析を行った結果、以下のことがわかった。

- 実験室内の残響音レベルを改善し、ほぼ様な音響環境下で実験を行った。
- 衝突音の卓越周波数は、ブロック内に欠陥がある場合と無い場合で大きく異なった。
- 欠陥がある場合の卓越周波数は、欠陥部分の円盤たわみ振動から得られる周波数とほぼ一致した。

従って、衝突音の卓越周波数に着目すると、欠陥の有無を推定できると考える。

- 衝突させるセラミックス球の質量はその卓越周波数には影響せず、質量が増すと音圧レベルが高くなることを確認した。
- 今回使用した音響計測システムでは、衝突箇所からマイクロフォンを遠ざけると距離減衰はあるものの、卓越周波数には変化が見られなかった。
- 衝突させるセラミックス球の個数を増しても、卓越周波数には影響せず、個数に応じて音圧レベルが高くなることがわかった。

以上のことより、対象コンクリート壁面に固体粒子を衝突させ、その衝突音を計測、分析することで、コンクリート内部の欠陥の有無を推定できる可能性を見出した。その際、高い衝突音レベルを維持する方法として、粒子の質量を増すだけでなく、複数の粒子をほぼ同時に衝突させることによっても推定可能であることがわかった。今後は、コンクリート内の欠陥の大きさ、深さ等を変えて同様な実験を行うと共に、雑音に強い音響分析ソフトウェアの開発も進める予定である。

文 献

- 1) 魚本健人：『コンクリート構造物の非破壊検査』，森北出版，1990
- 2) 金森正樹，飯坂武男，菊川浩治，梅原秀哲：コンクリートの打音による健全性の評価について，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No1, 2001
- 3) 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集，Vol.25, No.1, 2003
- 4) 三好茜，園田佳巨，川端健太：打音特性を用いた劣化診断に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, 2009
- 5) 山田裕志，川端健太，園田佳巨：コンクリート構造物の打音検査に関する時間 - 周波数解析を用いた基礎的研究，土木学会西部支部研究発表会，2010.3
- 6) 橋秀雄，矢野博夫：『環境騒音・建築音響の推定』，コロナ社，2004
- 7) 鈴木昭次，西村正治，薮本信哉，御法川学：『機械音響工学』，コロナ社，2004
- 8) 近藤恭平：『振動論』，培風館，1999