

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(第2報)

著者	田中 秀典, 小針 憲司, 板倉 賢一, 畑山 喬紀
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	27
ページ	5-9
発行年	2017-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009768

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 (第2報)

田中 秀典*1, 小針 憲司*1, 板倉 賢一*2, 畑山 喬紀*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。これまでに、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⁽⁶⁾。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、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。

本報告では、基礎実験としてコンクリート内の欠陥の大きさや深さを変えた粒子衝突実験、衝突エネルギー

を変えた実験、ならびに衝突粒子としてドライアイス・ペレットを用いた実験の結果について述べる。

2 コンクリートブロック粒子衝突実験

2.1 コンクリートブロック供試体

使用したコンクリートブロック供試体は、外形が200mm×300mm×300mmである。供試体は大きく分けて2種類を使用した。供試体内部に厚さ5mmの円盤状の発泡スチロールを埋め込み擬似的に欠陥を作り出したものと⁽⁶⁾、発泡スチロールを埋め込んでいない健全な供試体である。欠陥を持つ供試体に関しては、空隙の直径や埋め込んだ深さを変えて4種類用意した(表2.1)。

表1 コンクリートブロック供試体

供試体	空隙の直径 [mm]	空隙の深さ [mm]	備考
1	0	0	健全な供試体
2	150	30	空隙の直径による違い
3	200	30	
4	200	50	空隙の深さによる違い
5	200	70	

2.2 実験手順

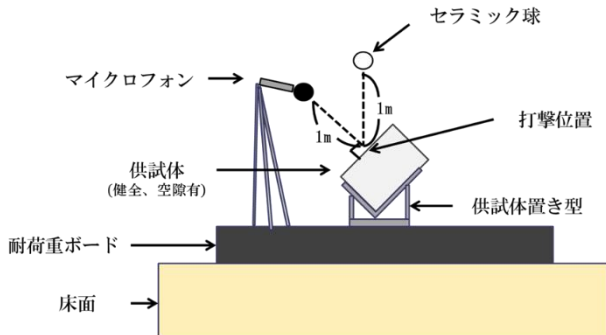
図1は、粒子衝突実験の模式図である。直径5mmのセラミックス球を、1mの高さから自由落下させ、供試体中央に衝突させた。上述の各供試体に対して10回試行し、衝突音を計測した。マイクロフォン(01dB社製, 40AE, 感度: 54.5 mV/Pa, 応答周波数: 10 Hz~16 kHz (±2 dB), ダイナミックレンジ: 146 dB (20 μPa))は、衝突個所から1mの位置に配置した。マイクロフォンの出力は、増幅器(01dB社製, Opus)で増幅されたのち、AD変換器(DataTranslation社製、

*1: 株式会社メイセイ・エンジニアリング

*2: しくみ情報系領域情報システム学ユニット

*3: 室蘭工業大学工学部情報電子工学系学科

DT9837B, 分解能: 24bit, サンプルング周波数: 最大 105.4 kHz) を介してパーソナルコンピュータに取り込んだ。録音, 解析ソフトウェアとしては, QuickDAQ (DataTranslation 社製) を用いた。計測時間を 1 秒とし,



サンプルング周波数は 40kHz に設定した。

図 1 粒子衝突実験の模式図

2.3 実験結果と考察

2.3.1 供試体中の空隙径の影響

空隙の直径が異なる 3 種類の供試体を用いて行った粒子衝突実験の結果を, 図 2 に示す。10 個の衝突音の平均振幅スペクトルである。空隙の直径が 200mm の供試体 (赤線) には, 3000Hz 近くに大きなピークが現れ, 直径が 150mm の場合 (青線) には 4000Hz 前後にピークが見られる。健全な供試体では, 際立ったピークは現れなかった。すなわち, コンクリート表面から比較的浅い箇所に直径 200mm 程度の空隙 (欠陥) がある場合は, 粒子衝突音は 2000Hz から 5000Hz の範囲に卓越周波数を持つと考えられ, 直径が小さくなるに従い卓越周波数は高くなることがわかった。

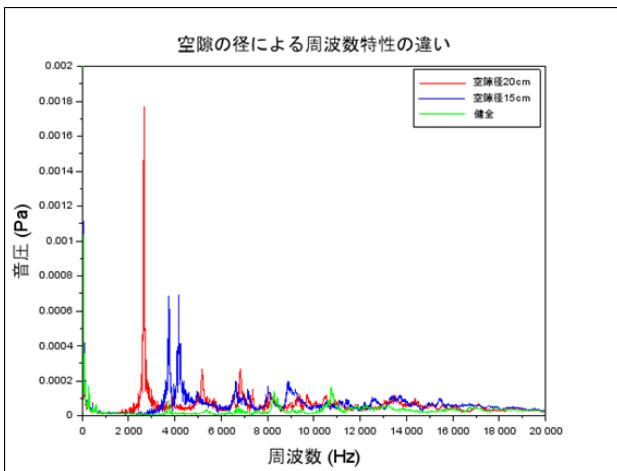
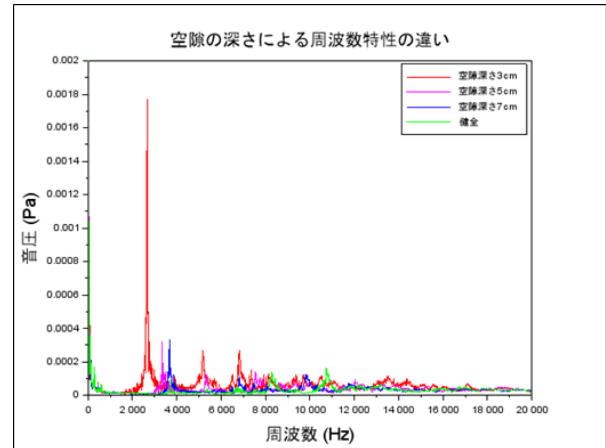


図 2 空隙の直径と卓越周波数

2.3.2 供試体中の空隙深さの影響

表 1 の空隙深さの異なる 4 種類の供試体を用いた実験の結果を, 図 3 に示す。それぞれ, 10 個の衝突音の平均振幅スペクトルである。空隙の深さが 50mm の供試体 (ピンク線) は, 3500Hz あたりに卓越周波数があり, 深さが 70mm の供試体 (青線) には, 4000Hz 近くが卓越しているのがわかる。すなわち, 空隙の深さが



深くなるほど卓越周波数が大きくなるのがわかる。

図 3 空隙の深さと卓越周波数

ここで, これらの卓越周波数について, 円盤のたわみ振動を仮定して検討してみる。供試体中の空隙上部の円盤型コンクリート部分が, その下部の空隙の影響でたわみ振動をすると仮定する (図 4)。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⁹⁾。

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

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。

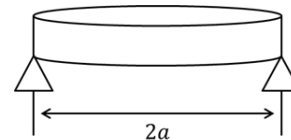


図 4 単純支持された円盤のたわみ振動

次に, $E = 1.9 \times 10^{10} \sim 3.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\nu = 0.15 \sim 0.2$, $\rho = 2177 \text{ kg/m}^3$ と仮定して, それぞれの供試体のたわみ振動を求めた。その結果と, 粒子衝突時の卓越周波数を比較したのが, 表 2 である。

表 2 各供試体の卓越周波数

供試体	空隙直径 2a[mm]	空隙深さ d[mm]	衝突音周 波数[Hz]	たわみ振動周波 数[Hz]
2	150	30	4180	3654~5075
3	200	30	2670	2055~2855
4	200	50	3360	3425~4758
5	200	70	3680	4795~6661

表 2 によると、空隙（欠陥）の深さが浅い場合はたわみ振動と考えられるが、50mm を超えると別の振動モードを考慮する必要がありそうである。

このように、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、比較的浅い場所にある欠陥の有無は推定できると考える。ただし、この結果は直径 5mm のセラミックス球を自然落下させた場合の結果で、より大きな衝突エネルギーを加えた場合には、より深くの欠陥を検知できる可能性がある。

3 衝突エネルギーと卓越周波数

次に、粒子の衝突エネルギーを変化させるために、落下高度と落下粒子数を変えた実験を試みた。供試体は、表 1 の供試体 3 のみを使用し、直径 5mm のセラミックス球を用いた。

3.1 粒子の落下高度の影響

粒子の落下開始地点は、供試体の真上 10cm とし、最高点を供試体の真上 190cm とした。高さ 10cm ごとに 19 段階で粒子を落下させた。それぞれの高さで 5 回の試行を行い、平均振幅スペクトルを求めた。

図 5 は、代表的な高さの平均振幅スペクトルを表している。いずれの場合にも、供試体 3 の空隙に応じた周波数にピークが見られる。ここで、落下高さごとのピーク値（音圧）を調べた。図 6 が、その結果である。落下高度が増すと衝突エネルギーも高くなり、ピーク値も高くなることが期待されたが、高さ 50cm まで落下粒子高度とともに卓越点の音圧が増加するものの、それ以降は増加傾向が緩やかになっている。また、高さ 150cm 辺りからは頭打ちになっている。この原因としては、粒子の衝突個所のバラツキなど実験精度の影響や空気抵抗等が考えられるが、実用化の段階でも起こり得ると考えられ、単一の固体粒子に加えるエネルギーには限界があると推察される。

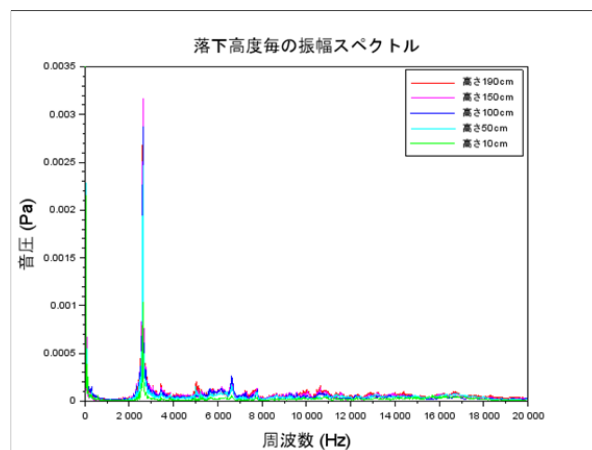


図 5 落下高度と振幅スペクトル

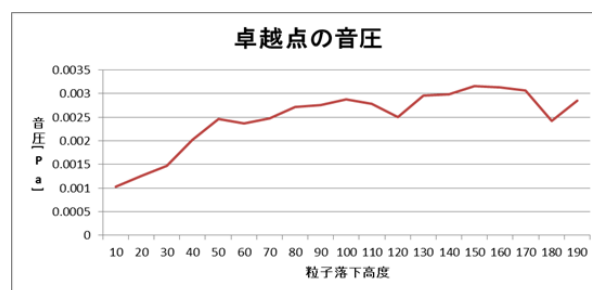


図 6 粒子の落下高度と卓越周波数の音圧

3.2 落下粒子数の影響

供試体の直上 1m から、落下粒子の個数を変化させて衝突音を計測した。粒子数は 10 個から始め、10 個ずつ 100 個まで増やす実験を行った。それぞれの個数で 5 回の試行を行い、平均振幅スペクトルを求めた。

図 7 は、代表的な落下粒子数での平均振幅スペクトルである。いずれの個数においても、供試体 3 の卓越周波数が顕著に表れている。ここでも、落下粒子数を増やすと供給エネルギーが増し、卓越周波数のピーク値（音圧）が高くなることを期待したが、その傾向は約 40 個までであった。図 8 は、落下粒子数と卓越周波数の音圧値の関係を表している。40 個を超えると逆に音圧が下がり、それ以降は減少と増加を繰り返している。このような結果になった原因としては、粒子が拡散したことや、粒子同士の干渉などが考えられる。いずれにしても、対象とする診断面積に対して、衝突粒子数の限界があると推察される。

4 ドライアイス・ペレット衝突実験

本研究開発では、最終的にコンクリート壁面に衝撃を与える媒体として、ドライアイス・ペレットを想定

している。ドライアイス・ペレットを用いる理由としては、以下がある。

- ・コンクリート壁面に衝突した後、昇華して気体になるため、片づけが不要である。
- ・固体の衝突であるため、液体や気体に比べエネルギーの伝達効率が良い。
- ・コンクリート壁面の洗浄効果が期待できる。
- ・電気配線等があっても、濡らすことがない。
- ・粒子径の種類も多く、比較的容易に入手可能である。

これまでのセラミック球と同様な効果があるかを確かめるために、直径が9mmの円柱状のドライアイス・ペレットを用いて、これまでと同様な実験を試みた。用いた供試体は、健全な供試体1と空隙を有する供試体3である。1個のドライアイス・ペレットを1mの高さから自由落下させる場合と、複数(10個程度)のドライアイス・ペレットを同じく1mの高さから自由落下させる実験を行った。

図9は、ドライアイス・ペレット衝突実験の平均振幅スペクトルである。落下粒子が単数の場合(青線と緑線)でも複数の場合(赤線と水色線)でも、空隙のある供試体(赤線と青線)の場合では3000Hzと6000Hzにピークが見られた。一方、健全な供試体の場合は、落下粒子が単数でも複数でも、卓越したピークは見られない。したがって、ドライアイス・ペレットを用いた空隙有無の判別は、これまでのセラミックス球と同様に可能であると考えられる。

5 おわりに

空隙(欠陥)の大きさと深さの異なるコンクリート供試体を用意し、セラミックス球による衝突実験を行った。その結果、コンクリート壁面内の空隙の判別に、円盤のたわみ振動を利用することで、空洞の位置や大きさを推定できることがわかった。ただし、検出できる空隙の深さには限界があり、ある深さからは円盤のたわみ振動では説明できなくなることがわかった。

供試体に衝突させる粒子の高さを変えた実験からは、粒子の質量にもよるが、卓越周波数の音圧を最大にする最適高さ(最適エネルギー)があると考えられた。また、複数の粒子を衝突させる実験においても、最適な粒子数があると考えられた。

ドライアイス・ペレットの衝突実験により、ドライアイス・ペレットの衝突音からも十分に空隙を検出できることが分かった。

この他、本文では紹介できなかったが、診断システムのためのソフトウェアの一部として、雑音下の衝突

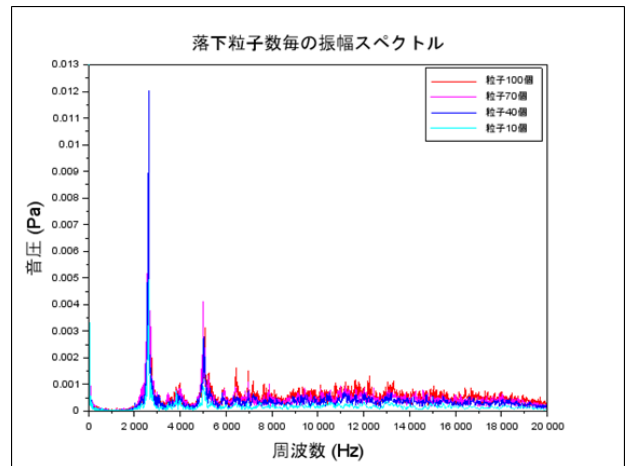


図7 代表的な落下粒子数での平均振幅スペクトル

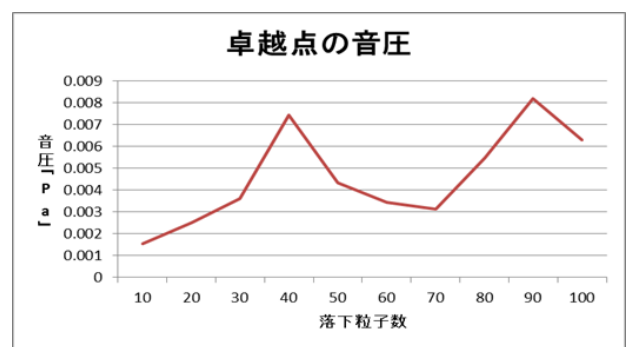


図8 落下粒子数と卓越周波数の音圧値

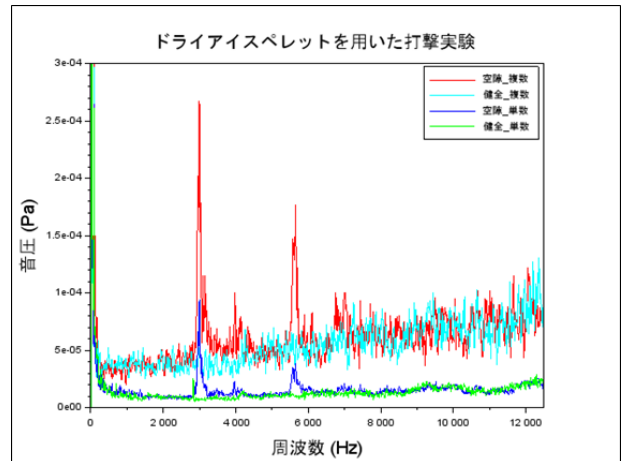


図9 ドライアイス・ペレットによる衝突実験

音を検出するのに、適応フィルタのアルゴリズムであるLMS(Least Mean Square)が有効であることが分かった。

今後は、ドライアイス・ペレットの射出装置を開発し、同様な実験を行うとともに、自動診断ソフトウェアの開発などを進める予定である。

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) 田中秀典，小針憲司，板倉賢一，山崎剛嗣：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，室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告，No.26, 2016
- (7) 橘秀雄，矢野博夫：『環境騒音・建築音響の推定』，コロナ社，2004
- (8) 鈴木昭次，西村正治，薙本信哉，御法川学：『機械音響工学』，コロナ社，2004
- (9) 近藤恭平：『振動論』，培風館，1999