

論文 動的 FEM 解析によるコンクリート内部欠陥探査のメカニズムに関する研究

尾場瀬 宏美^{*1}・極檀 邦夫^{*2}・境 友昭^{*3}・池端 秀幸^{*4}

要旨：本研究は、内部空洞を想定したコンクリート供試体を対象とし、衝撃弾性波法における実測結果と動的 FEM 解析結果を比較することより、コンクリート内部欠陥探査のメカニズムを検討した。また、初期波形から得られた鋼球接触時間及び波形の減衰時間ならびに弾性波速度を手掛かりとして、コンクリート内部空洞を直接探査できる簡便方法を提案した。解析結果と実測結果がよく一致したことより、この方法の有効性及び実用性が示唆された。

キーワード：衝撃弾性波法, 動的 FEM 解析, 非破壊検査, 内部欠陥, 弾性波の伝搬

1. はじめに

コンクリート構造物の非破壊検査としては、コンクリートの内部の空洞やジャンカの大きさ、ひび割れ深さ、鉄筋や PC ケーブルを入れるシースの位置及びグラウトの充填の有無、基礎杭の長さ、トンネル内面や舗装部のコンクリートの版厚など対象物は広範囲にわたっている。現時点では、このような広範囲の対象物に対して、コンクリート用の試験装置の統一的な規格はなく、対象物に対して試行錯誤的に適用しているのが実状である。従って、対象物によっては必ずしも十分成果を上げられるとは限らない。

超音波法¹⁾によるコンクリート内部の空隙などの測定方法（試案）が発表されたが、操作の煩瑣さと測定可能深さは 1.5m 前後に止まっている。また、打音法²⁾はコンクリート表層部欠陥の探査に有効とされるが、内部欠陥の検知には無理がある。このため、高精度、簡単、迅速に調査可能な非破壊検査技術が要求されている。

そこで本研究は、コンクリート内部空洞を設けた壁式コンクリート供試体を対象とし、衝撃弾性波法による測定に加え、動的 FEM 解析を行い、シミュレーションと測定結果を比較し、コンクリート構造物の内部欠陥探査技術のメカニ

ズムについて検討した。

衝撃弾性波法³⁾⁴⁾は、コンクリート表面に鋼球等の打撃で弾性波を発生させる方法であり、殆どのものに適用できる。入力波の周波数が 30kHz 以下で波長が長く、波動の減衰が小さいため、長尺構造物の測定も可能という特徴を有する。

既往の研究⁴⁾では、フーリエ変換の代わりに、短い測定データから極めて精度のよいスペクトル推定が可能な方法 MEM (最大エントロピー法) によって周波数スペクトルを求めて、コンクリート構造物の厚さ推定や内部欠陥（空洞・剥離等）の詳細情報を知る測定方法の有効性が検証されている。この方法の解析結果は用いる測定波形データの長さに若干依存するが、調査に際して測定面の処理が必要なく、短時間内でコンクリートの内部欠陥状態を評価することが可能であるとされている。

ここでは、測定波形を MEM により解析しないで、鋼球接触時間及び弾性波速度によりコンクリート内部空洞を直接探査できる簡便方法を提案し、動的 FEM 解析によって弾性波の伝搬シミュレーションを行った。解析結果と実測結果は、良く一致し、この方法の有効性及び実用性が示唆された。

*1 榊大進コンサルタント技術部 工博 (正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科助教授 (正会員)

*3 アプライドリサーチ(株) 工博

*4 榊大進コンサルタント

2. 実験概要

2.1 測定概要

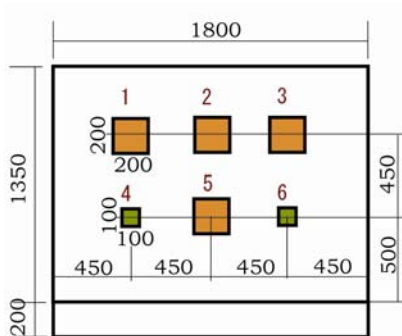
(1) 供試体

空洞や剥離などの内部欠陥を想定した実寸構造物の壁式モデル(図-1)を製作した。供試体寸法は、幅1800×高さ1550(基礎厚さ200)×壁厚200mm、供試体壁内にかぶり厚、サイズの異なる発泡スチロール(厚さ20mm)を6点埋設し模擬空洞とした(表-1)。その内の一箇所は測定面に対して30°傾斜させて発泡スチロールを設置した。

表-1 空洞寸法及びかぶり厚さ(mm)

番号	寸法	かぶり厚さ	備考
1	200×200	30	
2	200×200	30	傾斜角30°
3	200×200	100	
4	100×100	30	
5	200×200	50	
6	100×100	100	

供試体本体と基礎部には、設計強度24N/mm²、スランプ15cm、最大骨材寸法20mmのコンクリートを用いた。



(上)寸法・空洞位置 (下)供試体全貌

図-1 供試体の概要(単位:mm)

(2) 測定装置

測定に使用した測定装置は、鋼球直径10mmのインパクト、加速度センサー及びPCを内蔵した測定器本体から構成され、システム仕様は下記の通りである。

サンプリングクロック: 10 μs(1ch), 1 μs(2ch)

サンプリングデータ数: 1024(1ch), 8192(2ch)

測定時間長: 8~10 ms

解析方法: MEM法(最大エントロピー法), MEMスペクトログラム

(3) 計測方法

測定は、打設後材齢28日以降に行い、コンクリート表面に設けた10cm格子点ごとに加速度センサーを手で鉛直に押し付け、その近傍(4~5cm位)を鋼球で打撃した。なお、供試体壁厚の弾性波速度は、インパルスハンマーと加速度センサーを有する2chの同種測定機器を用いて透過法で測定した。

2.2 測定結果及び考察

(1) 鋼球接触時間

測定波形の初期波形から算出した鋼球接触時間を図-2に示す。空洞が無い場合の平均値130 μsに比べ空洞中心部最大348 μsと接触時間が長くなる結果が得られた。かぶり厚さ3cmと5cmの場合に比べ、かぶり厚さ10cmの空洞3と6の鋼球接触時間の増加は小さいが、空洞部分が明確に特定できることがわかった。

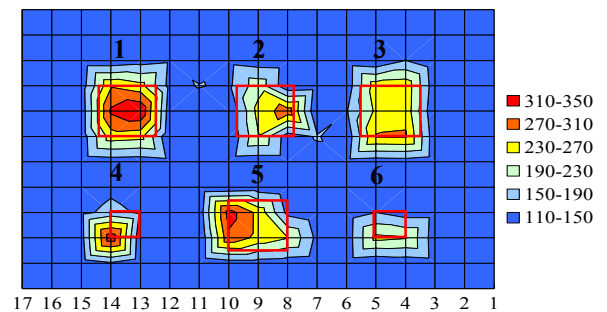


図-2 鋼球接触時間分布(単位:μs)

(2) 弾性波速度分布

図-3は供試体壁厚の弾性波速度測定結果をコンター図で表したもので、また図-4は空洞中心断面における5cm間隔で測定した弾性波速

度の分布を示したものである。

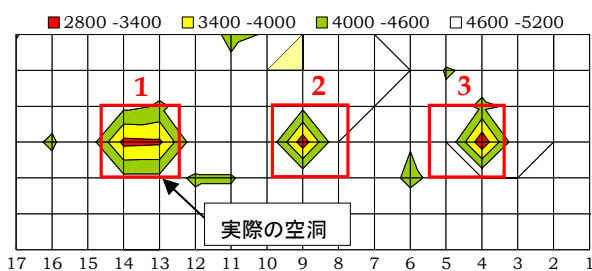


図-3 供試体壁厚の弾性波速度分布(m/s)

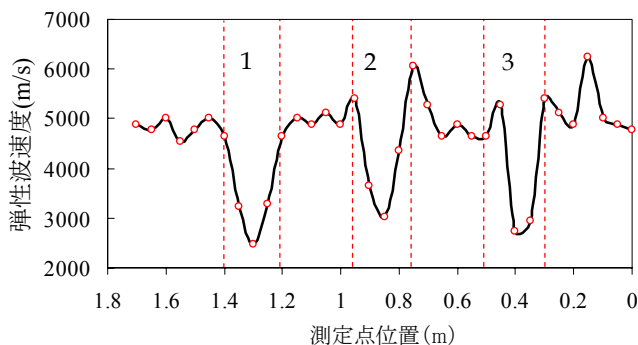


図-4 空洞1~3中心断面の弾性波速度分布

透過法で得られた弾性波速度波は、インパルスハンマー打撃面で測定した多重反射結果より20~30%上回ったが、空洞位置での弾性波速度は

空洞なし位置と比較し約半分程度に低減していることがわかる。

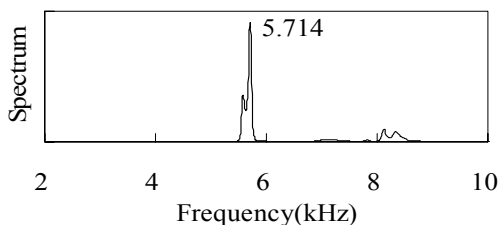
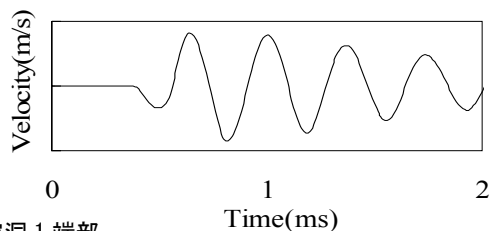
(3) 速度波形及び MEM 解析結果

図-5に測定波形および MEM による周波数解析結果を、表-2に周波数解析結果に加えて速度波形の初期減衰率を示している。いずれも空洞なしの場合に比べ、空洞中央の周波数が低くなり、減衰も小さくなる。また、空洞の影響を受け、空洞端部の周波数もある程度低くなっており、減衰率も空洞なし部分より小さくなっている。

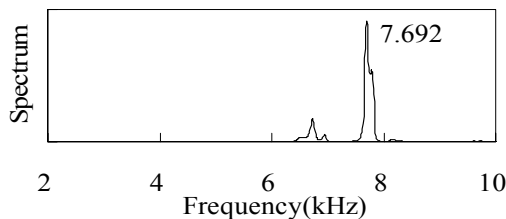
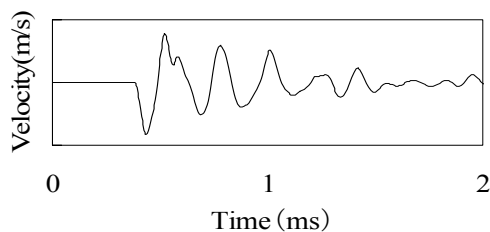
表-2 周波数及び減衰率の比較

空洞番号	検討位置	周波数 (kHz)	減衰時間 (ms)
1	中央	5.714	9.08
	端部	7.692	5.71
	健全部	9.694	5.27
3	中央	5.444	6.92
	端部	6.835	6.15
	健全部	9.596	5.22

(a) 空洞1中央



(b) 空洞1端部



(c) 空洞なし

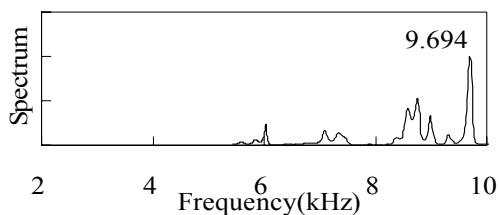
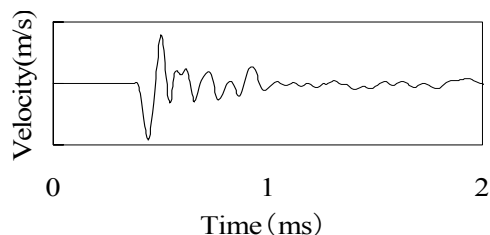


図-5 測定速度波形及び MEM による周波数解析結果

(4) 減衰率

測定した加速度波形の最大振幅が 1/10 までに減衰する時間を求めて、図-6 にプロットした。

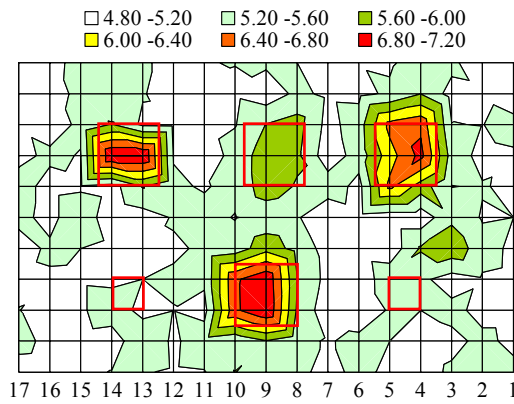


図-6 減衰時間分布(ms)

減衰時間分布を考察すると、寸法 200×200mm の空洞はそれぞれかぶり厚さが異なるが、空洞近傍の減衰時間が長くなっていることが分かった。

3. 動的 FEM 解析

3.1 解析概要

コンクリート表面に衝撃を与えた場合の振動パターンは 2 つに分かれている。一つは縦振動で、もう一つはたわみ振動である。前者はコンクリートと異なる媒質との境界面（空気、欠陥表面等）において弾性波の透過と反射が起こるが、その内のコンクリート内部で繰返される縦波の多重反射現象を指し、後者は衝撃を受けた表層欠陥までの薄いコンクリート板が自由振動して、太鼓の膜のように振動する現象をいう。たわみ振動の周波数は、縦波の多重反射周波数よりも低い場合が多い。

上記の振動パターンはいずれも測定波形では観測されているが、数値解析に関する報告は少ない。また、実測に得られた波形の変化について十分に説明されている訳ではない。

そこで本研究は、供試体の内部空洞中央断面を対象とし、弾性波の伝搬メカニズムに着目し動的 FEM 解析によって波動伝搬のシミュレーションを行った。

3.2 解析モデル

コンクリート内部欠陥周囲の弾性波の伝搬挙動を追跡することが主な目的であるため、図-1 に示している供試体上部と下部を分けて、それぞれの空洞中心断面を抽出し解析対象とする。解析モデルはいずれ厚さ 4mm、底面完全固定の薄板（メッシュサイズ：4 mm×4 mm、厚さ 2mm）であり、これを図-7 に示す。

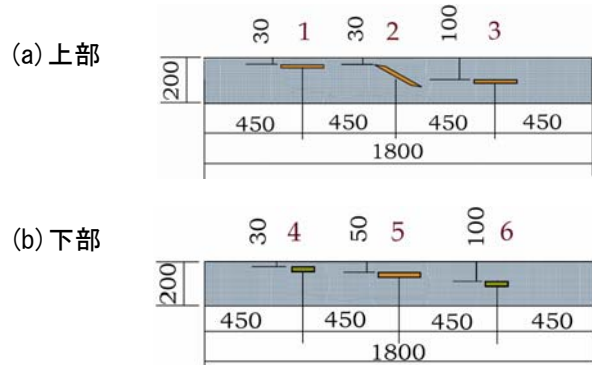


図-7 解析モデル(単位：mm)

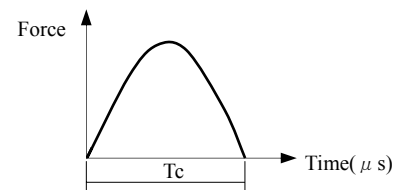


図-8 荷重関数

モデルは弾性体とし、弾性係数：50.0GPa、密度：2350kg/m³、ポアソン比：0.2 とした。

衝撃荷重は測定した鋼球接触時間より継続時間 100 μs の半波正弦波とした。これを図-8 に示す。

3.3 解析結果

図-9 に速度波形の解析結果を示す。空洞中央が打撃された場合、空洞かぶり厚さ分のコンクリートの共振が発生したため、空洞部は空洞端部ならびに空洞なし部分より減衰が小さくなり、周期も長くなっている。この傾向は実測結果（図-5）と一致している。

図-9 は、空洞 1 中央、端部及び空洞なし部分の弾性波伝搬状況であり、それぞれの波動伝搬パターンは大きく異なっている。

表-3 弾性波が底面に到達した時刻(μs)

空洞番号	検討位置	解析結果	時間差
1	中央	124	124-61=63
	端部	65	65-61=4
	健全部	61	-

弾性波が断面底面に到達した時間を表-3にまとめた。空洞なし部分(図-10(c))では、61 μs 時点で弾性波(P波)は既に断面底面に達し、多重反射を繰り返しながら横へ伝達していく。一方、空洞中央を打撃した場合は、弾性波は空洞中央から両端へ進行しながら、空洞表面までの長さ分のコンクリートがたわみ振動を繰り返し、124 μs 後ようやく底面にたどり着く。図-10(b)は空洞端部の弾性波伝搬経路を示しており、上記と異なり、弾性波がまず衝撃を受けた端部から下方へ、そして空洞上表面を迂回して底面へ進行していく。

上記のシミュレーション解析結果を考察すると、コンクリート内部に空洞が存在する場合は、空洞中央部、空洞端部と無欠陥部の測定波形の違いは弾性波の伝搬経路の相違によるものと解釈できる。

4. 比較検討

4.1 周波数

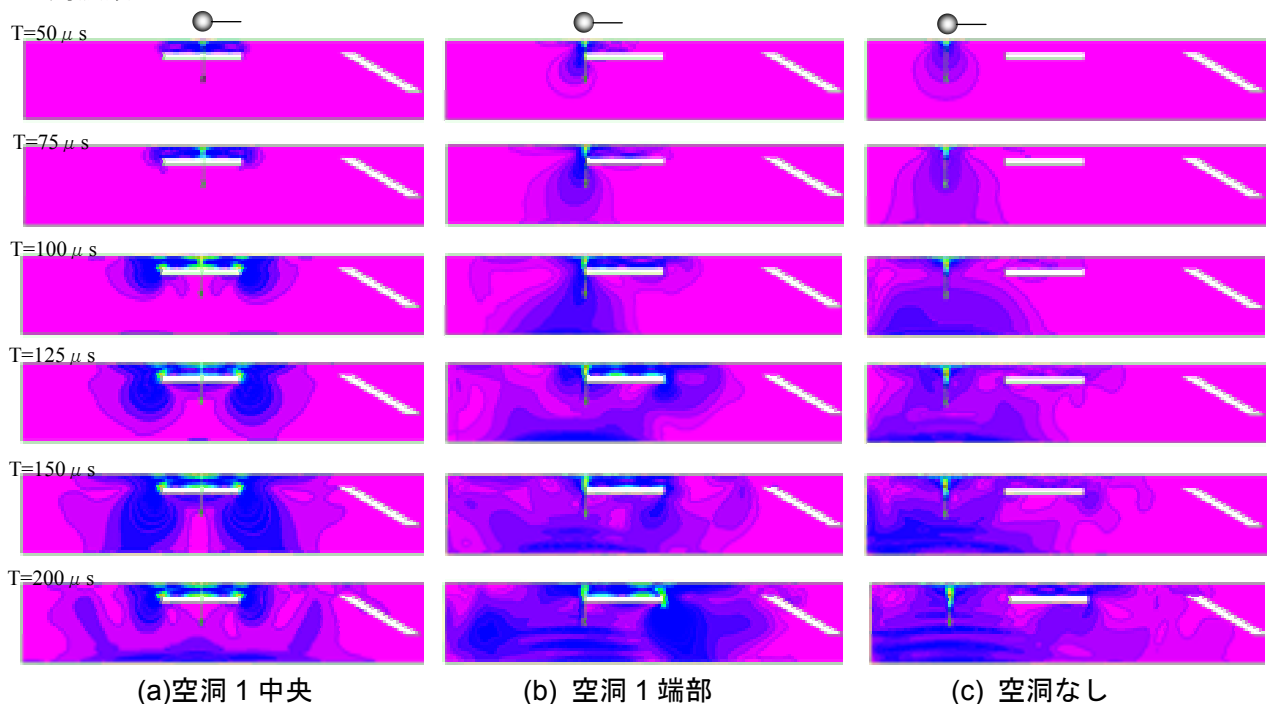
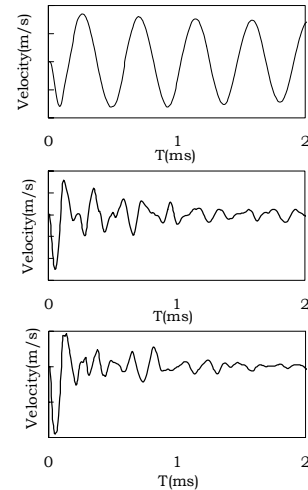


図-10 空洞1近傍の弾性波伝播



(上)空洞1中央(中)空洞1端部(下)空洞なし
図-9 速度波形の解析結果

空洞1と空洞3をサンプルとして、動的FEM解析で得られた速度波形について、MEMを用いて振動数解析を行い、解析結果を表-4にまとめた。今回の実験では、200 \times 200の空洞(合計4つ)を調べた結果、空洞かぶり厚さが深いほど、周波数が低くなるというサナーサロンの結論³⁾と一致しなかった。弾性波の多重反射波による厚さの算出は妥当な結果が得られるが、膜振動の場合は周波数と空洞かぶり厚さの関係は境界条件や支持条件の影響で明確に計算することは困難であるので、改めて検討する必要があると思われる。

表－4 周波数の比較検討 単位:kHz

空洞番号	検討位置	測定結果	解析結果	備考
1	中央	5.714	2.256	かぶり 厚さ 3cm
	端部	7.692	5.013	
	健全部	9.694	7.268	
3	中央	5.444	2.757	かぶり 厚さ 10cm
	端部	6.835	5.263	
	健全部	9.596	6.516	

4.2 鋼球接触時間

空洞1において、初期波形より算出された鋼球接触時間の測定結果と解析結果を表－5にまとめており、いずれも同様な傾向を示している。空洞中央とそれ以外の部分の違いも一目瞭然である。

表－5 空洞1の鋼球接触時間の比較検討(μs)

検討位置	測定結果	解析結果	備考
中央	348	361	かぶり 厚さ 3cm
端部	157	230	
健全部	136	167	

4.3 弾性波速度 Vp

空洞1～3において、透過法による弾性波速度の測定結果では、空洞中央付近の弾性波速度は空洞なし部位に比べ、かなり遅くなっていることが確認された。表－6に示したように、空洞1の弾性波速度を考察した結果、動的FEMの解析結果は実測結果と同じ傾向を示した。

表－6 空洞1の弾性波速度の比較検討(m/s)

検討位置	解析結果	測定結果
中央	2472	2469
端部	4777	5000
健全部	4880	4878

5. 結論

本研究は、内部空洞を想定したコンクリート供試体を対象とし、衝撃弾性波法における実測結果と動的FEM解析結果を比較することより、コンクリート内部欠陥探査のメカニズムを検討した。そして、初期波形から得られた鋼球接触時間及び波形の減衰時間ならびに弾性波速度を

手掛かりとして、コンクリート内部空洞を探索する簡便方法を提案した。

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) 動的FEM解析によるシミュレーションを分析した結果、コンクリート内部に空洞などの欠陥が存在する場合は、弾性波が空洞周辺を迂回して伝搬することで、無欠陥部分に比べ伝搬経路が長くなり、弾性波速度が遅くなることがわかった。
- (2) 空洞部分のかぶり厚さは薄くなっているので鋼球打撃によって微少なたわみ変形が生じるため、鋼球接触時間は長くなることがわかった。コンクリート内部の空洞の有無を確認する目的だけならば、高度な周波数解析を行わないで、鋼球接触時間の平面分布表示を比較する簡便な方法を提案した。動的FEM解析も同様な傾向を示したことから、簡便な方法は有効であると考えられる。
- (3) 弾性波速度の動的FEM解析と測定結果を比較した結果から、空洞中央付近の弾性波速度は健全部より半減したことを手掛かりとして、空洞の存在を確認できたが、空洞の深さ位置を確定することは今後の課題である。

参考文献

- 1) 魚本健人, 加藤佳孝, 非破壊検査研究会: コンクリート構造物の検査・診断－非破壊検査ガイドブック, 理工図書, 2003.8
- 2) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用, 土木学会論文集, No.704/V-55, pp.65-79, 2002.5
- 3) Mary Sansalone, Nicholas J.Carino: Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1986.9
- 4) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002