

論文 コンクリート内部欠陥の深さが打音特性に及ぼす影響

小池 耕太郎^{*1}・井山徹郎^{*2}・野内彩可^{*3}・村上祐貴^{*4}

要旨：本研究では、RC コンクリート床版の打音点検の高精度化、効率化を最終的な目的として、人工欠陥を埋設したコンクリート試験体を作製し、打撃を加えた際のコンクリート表面の加速度および音圧の時刻歴波形や周波数スペクトルと欠陥の有無や深さの関係について実験的検討を行った。さらに、有限要素法による時刻歴応答構造解析を行い、打音特性値と欠陥情報との関係について解析的検討も行った。その結果、欠陥部に打撃を加えた場合、欠陥深さが 30mm までは、欠陥を有しない試験体に比べて最大加速度や最大音圧が増加した。また、加速度および音圧の周波数スペクトルで囲まれた面積には欠陥深さとの相関が認められた。

キーワード：非破壊検査, 打音法, 内部欠陥, 周波数応答特性, 時刻歴応答特性

1. はじめに

現在、わが国では高度経済成長期に整備された RC 構造物の老朽化が社会的な問題となっている。各種劣化を生じた社会資本ストックが増大する一方、財政健全化等を目的とした公共投資への縮減が進むとともに高度な専門的知識・技術力を有する経験豊富なインハウスエンジニアが減少している。予算、人員の確保に厳しい制約が課せられた中で、社会資本ストックの安定的な供用のためには、新しい点検技術や点検の自動化を推進し、高精度かつ効率的な維持管理活動の展開が必要不可欠である。

RC 床版の点検に焦点を当てると、目視点検、たたき点検、地中レーダー法、赤外線法などが代表的な非破壊点検手法である。特に、たたき点検、すなわち、石頭ハンマー等による打撃音に基づく診断は、点検の容易さ、コストの面で他の検査法に比べ優れている。欠陥の検知率も比較的高いことから、わが国では最も広く用いられる方法である。しかしながら、打音検査は点検者の聴覚に依存する手法のため、点検結果には点検者の経験や主観の影響が多分に含まれることとなる。また、欠陥の存在する位置（深さ）までは判定できない。

浅野ら^{1),2)}は、鋼球を落下させることにより打撃を行った実験において、打撃音の最大振幅値やピーク周波数が欠陥の寸法や深さと相関性を有することを明らかにしている。また、三好ら^{3),4)}は、連続的な打撃を加える事による新たな打音検査法を提案し、回転式打音検査の場合、打音の周波数特性や最大音圧を比較することで、欠陥の位置や大きさとの相関性が確認できるとしている。

また、中山ら⁵⁾はコンクリートの強度や打撃位置が打音特性に及ぼす影響について検討を行っており、コンク

リートの強度や打撃位置の変化は、打音特性の変化の一因になることを指摘している。このように、打音法に関する既往の研究は数多く存在し、また有用な知見が蓄積されつつあるが、未だ課題も残されている。例えば、RC 床版上面からのたたき点検の高精度化、効率化という観点からは、アスファルト面から打撃する必要性が有り、欠陥箇所が比較的深い位置になることに加え、比較的大きな加振力も必要となる。

そこで、RC 床版の打音点検の高精度化、効率化に向けた基礎的研究として、人工欠陥を埋設したコンクリート試験体に対し、打撃を加えた際のコンクリート表面の加速度や音圧の時刻歴波形や周波数応答特性と欠陥の有無および深さの関係について実験的検討を行った。また、有限要素法による時刻歴応答構造解析を行い、打音特性値と欠陥情報との関係について解析的検討も行った。

2. 実験概要

2.1 試験体および実験パラメータ

試験体の形状、寸法を図-1に示す。試験体は、900mm×900mm、高さ 180mm の床版を模擬した試験体である。コンクリートの配合表は表-1に示す通りであり、セメントには早強セメントを使用した。細骨材には川砂、粗骨材には川砂利を用いた。実験パラメータは、コンクリート内部の空洞を模擬した人工欠陥の有無および人工欠陥の埋設深さである。人工欠陥は、直径 200mm、厚さ 5mm の円盤状に加工したスチレンボードである。欠陥埋設深さは 4 水準であり、試験体上面から欠陥中心高さまで 30mm、70mm、110mm および 150mm である。埋設深さ 110mm、150mm の試験体はそれぞれ埋設深さ 70mm、

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (学生会員)
 *2 長岡工業高等専門学校 機械工学科助教 博 (工) (非会員)
 *3 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (非会員)
 *4 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博 (工) (正会員)

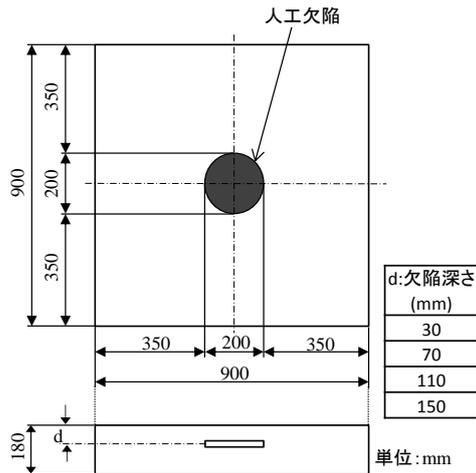


図-1 試験体の形状・寸法

表-1 コンクリート配合表

W/C(%)	単位量(kg/m ³)					圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(N/mm ²)
	水:W	セメント:C	細骨材:S	粗骨材:G	混和剤		
60	155	258	835	1040	1.29	25.4	26981

30mm と同一試験体であり、試験体を裏返して試験を行った。なお、埋設深さ 70mm, 30mm の試験体の打撃面は打設面である。

2.2 測定方法

図-2 に示すように、試験体端から 50mm の位置を直径 50mm の単管パイプで支持した。打撃の入力は、インパルスハンマー（周波数範囲：0~8kHz, 測定範囲 2200N）を用いて行い、試験体に 5 回打撃を加えたデータの平均を実験結果とした。マイクロフォン（周波数範囲 10Hz~20kHz）は、打撃箇所から水平方向に 20mm, 鉛直方向に 20mm の位置に配置し、打撃の際に発生する打音を収録した。また、打撃の際に発生するコンクリート表面の振動を、加速度センサー（周波数範囲：2Hz~10kHz）を用いて受信した。加速度センサーは、試験体上面中心に厚さ 0.4mm の両面粘着テープを用いて貼り付けた。

打撃箇所は、図-2 に示すように試験体端から 50mm 内部の位置から水平、垂直方向に 100mm 間隔で線を引き、それらの交点である。なお、試験体中心部に対して打撃を加える際は、加速度センサーの設置位置を試験体中心部近傍とした。各センサーからの受信信号はサンプリング周波数 12.8kHz, データ数は 1024 として収録した。

3. 実験結果および考察

3.1 打撃位置が時刻歴波形に及ぼす影響

図-3 に欠陥を有しない試験体（以降、健全試験体）の打撃点 B2, B8, H2, H8 および E5 に対して打撃を加えた際の加速度の時刻歴波形を示す。なお、加速度センサーは、各打撃点近傍に設置した。打撃点の名称は図-2 に示すように、試験体上面に 100mm 間隔で描いた水平および垂直方向の線の名称で表されており、例えば打撃

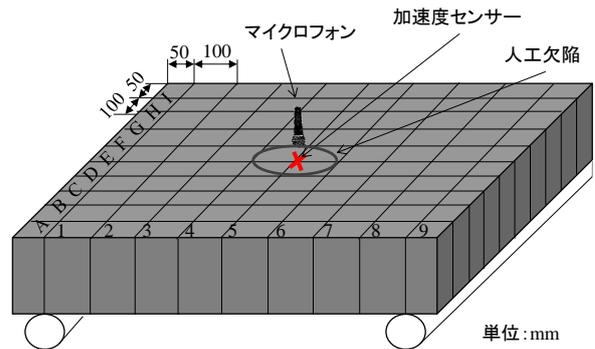
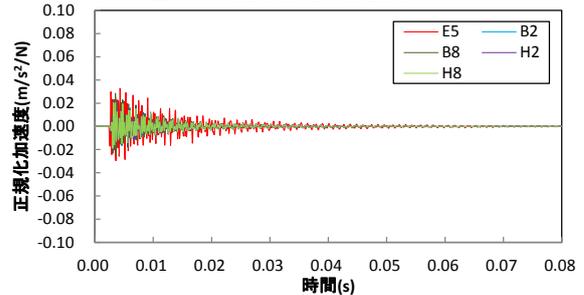
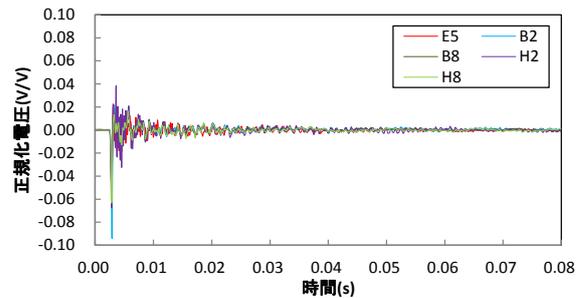


図-2 打撃試験測定概要



(a) 加速度センサー



(b) マイクロフォン

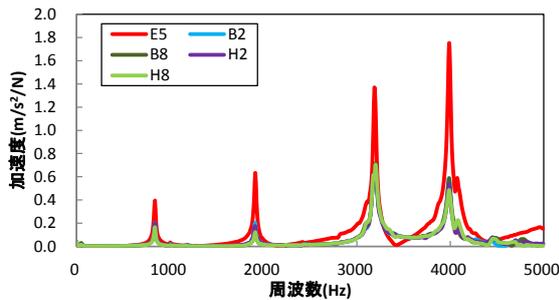
図-3 各打撃点における時刻歴波形

点 B2 の場合、線 B と線 2 の交点を打撃している。なお、時間領域の評価には、打撃力のばらつきを考慮するため、加速度はインパルスハンマーの最大荷重値で除して正規化し、音圧（電圧）は打撃時の最大電圧で正規化した値を採用している。

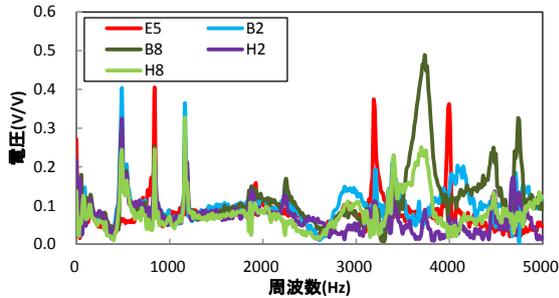
図-3(a) に示すように、加速度は試験体中心部が他の領域に比べて若干大きい。これは、打撃振動がたわみ振動であり、試験体支持位置から離れている中心付近では、他の領域に比べて加速度が大きくなったと考えられる。これに対し、マイクロフォンでは図-3(b) に示すように打撃点 H2 が他の打撃点と比べ若干大きい。しかしながら、試験体中心から H2 と対称の位置にある B2, B8, H8 の波形に顕著な差異が認められないことから、H2 と他の打撃位置との音圧の違いは、打撃位置によるものではなく、ノイズが影響していると思われる。マイクロフォンの場合、空气中を伝達した振動を受信するため、加速度センサーと比較して感度は低下すると考えられる。

3.2 打撃位置が周波数応答特性に及ぼす影響

図-4 に健全試験体の打撃点 B2, B8, H2, H8 および

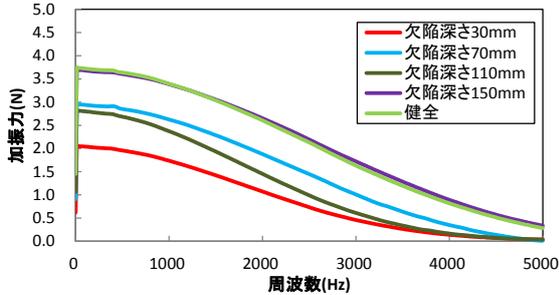


(a) 加速度センサー

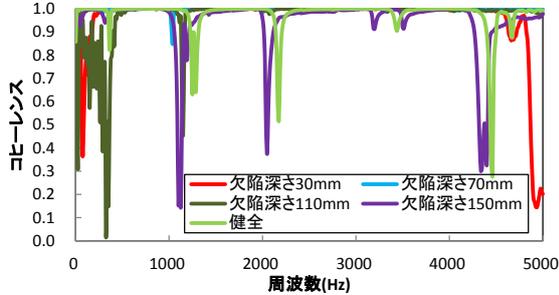


(b) マイクロフォン

図-4 各打撃箇所における周波数応答関数



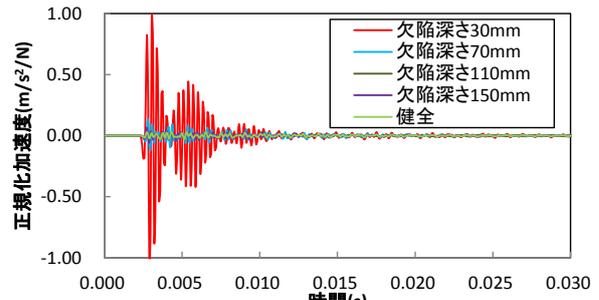
(a) インパルスハンマーのパワースペクトル



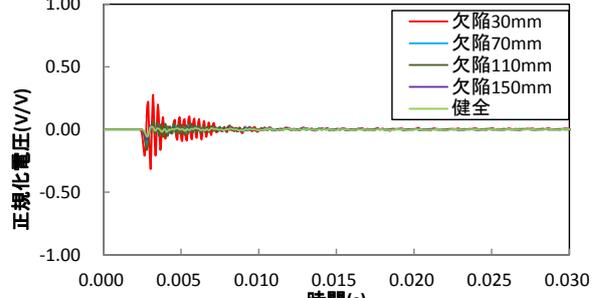
(b) 打撃と加速度との相関関係 (打撃点 E5)

図-5 出力と入力の信頼性

E5 に対して打撃を加えた際の周波数応答関数を示す。図-4(a)に示すように、加速度センサーでは加速度のピーク周波数に打撃位置の影響は認められなかったが、打撃点 E5 は、他の打撃点に比べてピーク周波数の加速度が大きい。一方、図-4(b)に示すように、マイクロフォンでピーク電圧は、3000~5000Hz の周波数域において打撃位置による差異が認められた。なお、本実験で用いたインパルスハンマーの加振周波数範囲は0~8000Hz であるが、図-5(a)に E5 を (試験体中心) 打撃した時のインパルスハンマーのパワースペクトルを示すように、5000Hz の時点で加振力はほぼゼロになっていることか



(a) 加速度センサー



(b) マイクロフォン

図-6 欠陥深さの異なる試験体の時刻歴波形

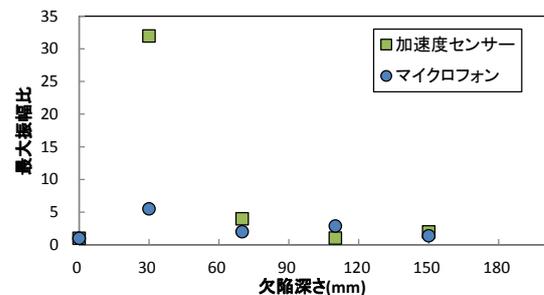
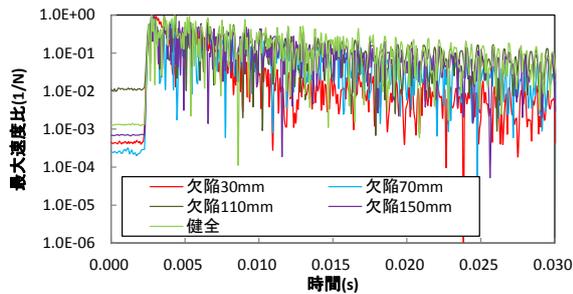


図-7 最大振幅比と欠陥深さ

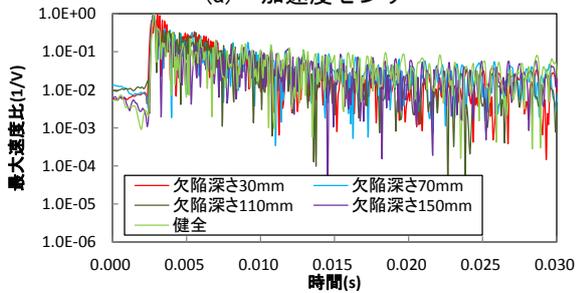
ら、0~5000Hz の周波数の範囲内で周波数応答特性の検討を行うこととした。図-5(b)に示すように、0~5000Hz で打撃と加速度との相関性を示すコヒーレンスが、ピーク周波数付近では概ね 1.0 に近い数値を示していることが確認される。なお、コヒーレンスとは、入力と出力の因果関係の度合を示すもので、0 から 1.0 の値で表される。1.0 に近い程、5 回加えた打撃力の周波数応答特性にばらつきが少ないことを意味する。

3.3 欠陥深さが時刻歴応答特性に及ぼす影響

図-6 に健全および欠陥深さの異なる試験体の E5 に打撃を加えた際の加速度の時刻歴波形を示す。加速度、音圧ともに欠陥深さが浅い程、最大振幅が大きくなる傾向にある。図-7 に健全試験体の最大振幅、最大電圧で正規化した加速度および音圧の最大振幅比と欠陥深さの関係を示す。欠陥深さが 30mm の加速度の最大振幅は、健全試験体と比較して約 31 倍大きい。音圧の場合においても、加速度に比べて感度は低下するものの、健全試験体に比べて約 5 倍最大振幅が大きい。また、最大振幅は欠陥位置が深くなるに従い、急激に低下し、加速度、音圧ともに、欠陥深さが 70mm の時点では、有意な差異は確認できない。

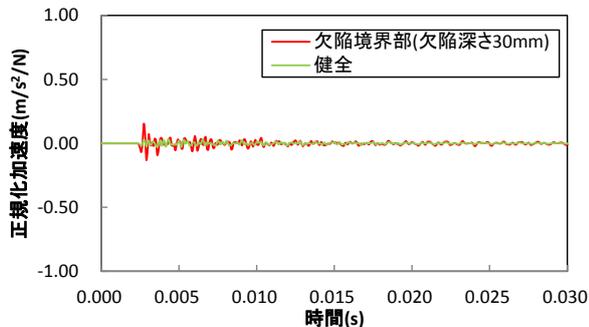


(a) 加速度センサー

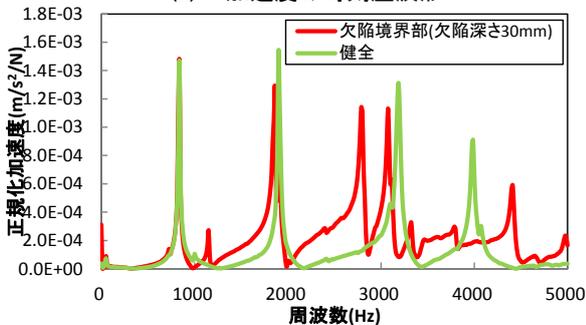


(b) マイクロフォン

図-8 加速度振幅の時間経過に伴う低下割合



(a) 加速度の時刻歴波形



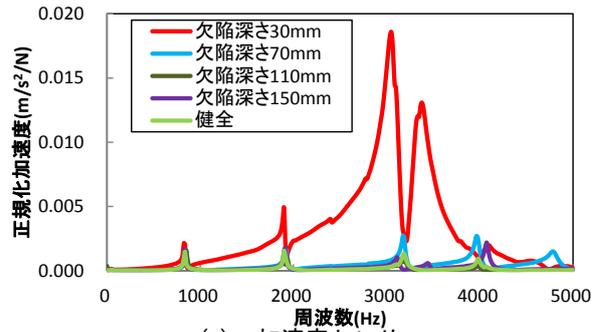
(b) 加速度の周波数スペクトル

図-9 欠陥境界部の振動特性 (深さ 30mm)

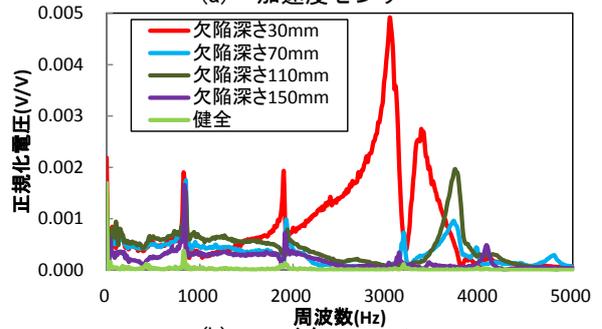
図-8は図-6に示した打撃力の加速度および音圧の時刻歴波形を最大振幅で正規化して対数表記したものである。なお、負側の加速度も絶対値として示している。同図に示すように、加速度振幅の減衰特性に欠陥の有無や埋設深さの影響は顕著に認められなかった。

3.4 欠陥が欠陥部直上以外の領域の振動に及ぼす影響

図-9は、欠陥深さが30mmである試験体の欠陥境界部上(E4打撃)のコンクリート表面を打撃した時の加速度の時刻歴波形および周波数スペクトルである。なお、加速度はインパルスハンマーの最大荷重値で除して正規化した。欠陥境界部の最大加速度は、健全試験体(E5打撃)



(a) 加速度センサー



(b) マイクロフォン

図-10 周波数スペクトル

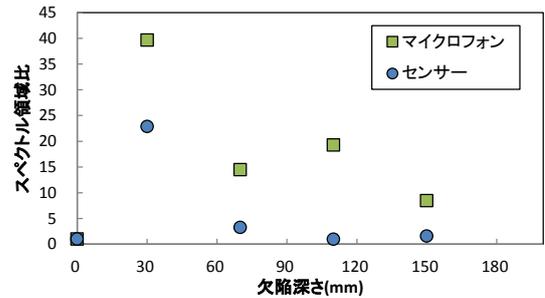


図-11 スペクトル領域比と欠陥深さ

の加速度と比較して若干大きいですが、図-7に示した加速度最大振幅比と欠陥深さの関係に着目すると、欠陥深さが30mmでは、欠陥直上の最大加速度が健全試験体の約31倍大きいことから、欠陥部が欠陥部以外の領域の加速度特性に及ぼす影響は少ないと考えられる。このことは、図-9(b)に示す加速度の周波数特性が、境界部と健全部で大きな差異がないことから判断される。

3.5 欠陥が周波数応答特性に及ぼす影響

図-10に各試験体のE5打撃時の周波数スペクトルを示す。加速度はインパルスハンマーの最大荷重値で除し、音圧(電圧)は打撃時の最大電圧で除した値である。加速度、音圧ともに欠陥深さ30mmの試験体は、3000Hz付近の加速度が非常に大きい値を示した。また、欠陥深さが30mmの場合、3000Hzと3400Hz付近に加速度振幅にピークが生じた。このことは4章で詳述する。欠陥深さ70mm以深では上述の傾向は認められず、3200Hz付近に一つのみピークが生じた。

各試験体の周波数スペクトルで囲まれた面積を健全試験体に対する割合(以下、スペクトル領域比)とし、欠陥深さとの関係を示したものが図-11である。図-7

に示した最大振幅の場合と同様、欠陥深さが70mmの場合までは、加速度、音圧ともに健全試験体よりも大きな値を示した。欠陥深さが70mm以上においても音圧の場合は、健全試験体よりも大きな値を示し、鋭敏に欠陥深さの影響を捉えているが、これはノイズの影響も考えられ、今後更なる検討が必要である。

4. 有限要素法による解析的検討

4.1 解析の概要および条件

3章までで得られた実験結果の妥当性を評価するため、打音検査を模した条件で有限要素法による数値解析を行った。解析は有限要素法ソフトウェア ANSYS を用い、時刻歴応答構造解析として行った。図-12 に解析モデルの一例として欠陥深さ 30mm のモデルを示す。3章までの実験の結果から、欠陥の深さが70mmより深くなると、音圧および加速度の特性が健全体と変わらなくなるため、ここでは欠陥深さが30mm、70mmの場合と健全試験体の場合の3つのモデルを解析した。モデルの大きさおよび形状は図-1に示した実験に用いた試験体と同一のものとし、単管パイプによる支持点に相当する場所を完全拘束した。解析は打撃による荷重を、モデルの中心に加えた場合と、中心から100mm離れた点、すなわち欠陥の境界部に加えた場合について解析を行った。荷重波形は予備実験より、パルス幅が 9.4×10^{-4} s、振幅（ピーク荷重値）が2200Nのインパルス波とした。解析に使用した材料物性値は、ヤング率には実験値の 26981 N/mm^2 とし、減衰比については既往の研究を参考に0.0079という値を設定した⁶⁾。解析の評価項目は荷重を加えた点における単位荷重あたりの加速度特性とした。

4.2 解析結果

図-13 および図-14 に、モデル中心に荷重を加えた際の解析結果をモデルごとに実験値と比較した結果を示す。ここで、図-13 は加速度の時刻歴応答を、図-14 は周波数スペクトルをそれぞれ比較したものである。周波数スペクトルの比較では実験結果との比較に際し、解析により得られた加速度振幅を、解析に用いた最大荷重値(2200N)で除して単位荷重あたりの加速度を算出した。時刻歴応答の結果より、解析では欠陥深さが70mmと健全試験体の場合を比較すると、実験結果とは異なり、加速度の波形に明確な違いは見られなかった。一方、欠陥深さが30mmの場合は、解析で求めた加速度は実験で得られた加速度に比べて振幅の最大値が50%程度小さい値を示しており、実験結果を再現できていないといえないが、全体的な傾向としては、欠陥の存在によって健全試験体に比べて加速度の振幅が大きくなり、減衰に要する時間が長くなったことから、実験と同様の結果を示していると考えられる。

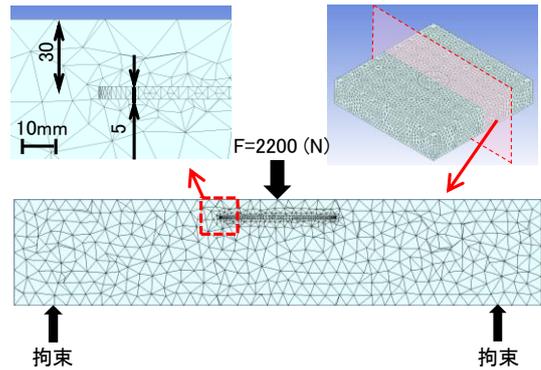
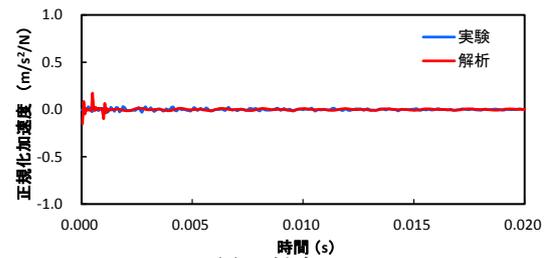
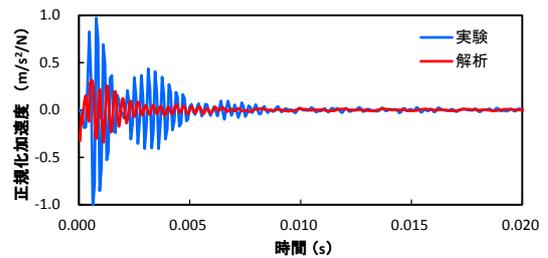


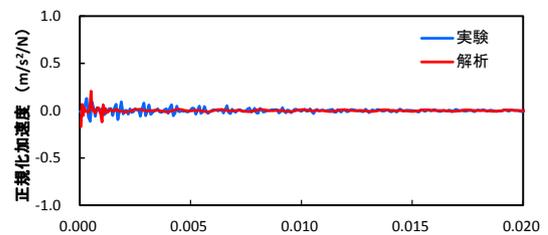
図-12 解析モデル（欠陥深さ 30mm）



(a) 健全



(b) 欠陥深さ 30mm



(c) 欠陥深さ 70mm

図-13 加速度の時刻歴応答波形の比較

次に周波数スペクトルについて比較すると、健全試験体の解析結果で表れた1次と2次の加速度振幅のピーク、すなわち卓越周波数は実験値よりも低くなった。これはセメントと骨材の分布などの材料の非線形な特性を、解析では計算コストの制約上定義することができず、それにより卓越周波数が実験結果よりも低周波数帯にシフトしたものと考察する。このことは欠陥深さ30mm、70mmの結果でも同様であった。また、健全部と欠陥深さ70mmの結果は、時刻歴応答解析の結果と同様に、卓越周波数、加速度振幅ともに大きな違いは見られなかった。欠陥深さ30mmの結果では、実験では3000Hzと3400Hz付近に加速度振幅に明確なピークが生じた。一方で解析結果では2700Hzと2900Hz付近に2つのピークが確認できてお

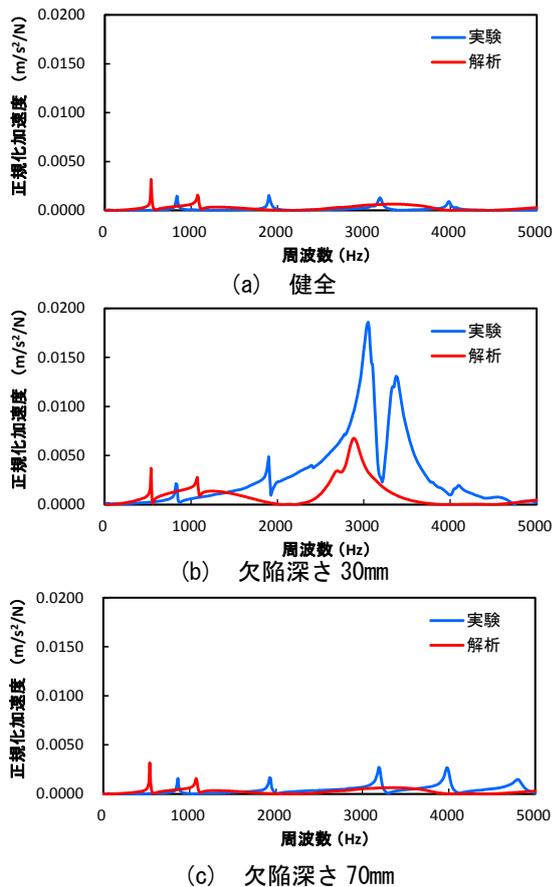


図-14 加速度の周波数スペクトルの比較

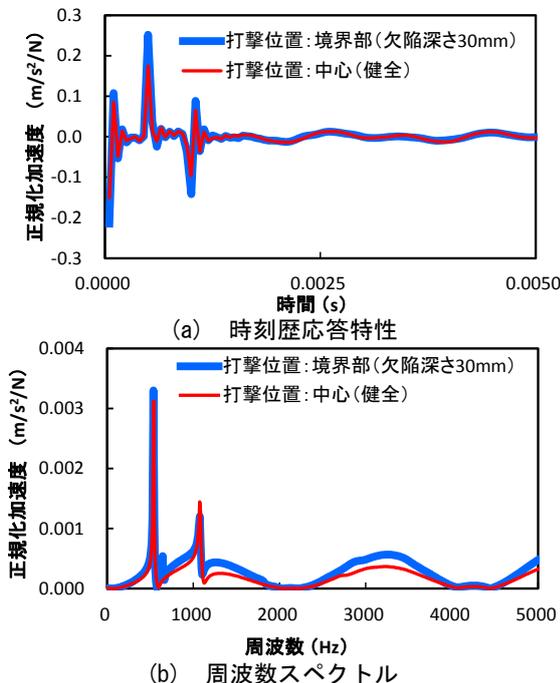


図-15 打撃位置の違いによる加速度特性の比較

り、上述した卓越周波数のピークシフトを考慮すると、欠陥の有無による周波数スペクトルの変化は実験、解析ともに同様の結果を示しているといえる。また、欠陥の存在により2つの卓越周波数が生じた理由としては、試験体内部や表面を伝播する弾性波による振動と、試験体表面から欠陥部までの最薄部におけるたわみ振動がそれ

ぞれ独立して表れたものと考察する。

図-15 に打撃位置の違いによる加速度の時刻歴応答と周波数スペクトルをそれぞれ比較した結果を示す。欠陥 30mm の欠陥境界部を打撃した際に得られる加速度は、時刻歴応答、周波数スペクトルともに健全試験体を打撃したときの加速度応答とほぼ一致していることが解析結果からも示されており、加速度特性が変化する打撃地点を結ぶことで、表面付近の欠陥の大きさと大まかな形状を把握することが可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲内では、欠陥部に打撃を加えた場合、欠陥深さが 30mm までは、欠陥を有しない試験体に比べて最大加速度が増加した。
- (2) 本実験の範囲内では、周波数スペクトルで囲まれた面積は欠陥深さとの相関が認められた。
- (3) 欠陥部が欠陥部直上以外の領域の振動特性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。
- (4) 周波数スペクトルの変化をみることで欠陥の有無を判別可能であることを FEM による時刻歴応答構造解析結果からも確認できた。

参考文献

- 1) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 六郷恵哲, 遠藤友紀雄: コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.589-594, 2002
- 2) 浅野雅則, 鎌田敏郎, 国枝稔, 六郷恵哲: コンクリート内部欠陥の寸法および深さと打撃特性値の定量関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.589-594, 2001
- 3) 三好茜, 園田佳巨, 吉田直紹: 回転式打音検査によるコンクリート構造物の欠陥状態に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1723-1728, 2008
- 4) 中山歩, 園田佳巨, 三好茜, 吉田直紹: 回転式打音の音圧特性に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1729-1734, 2008
- 5) 中山慎也, 玉井宏樹, 坂田力: コンクリートの欠陥状態が判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1811-1816, 2011
- 6) 福沢公夫, 沼尾達弥, 小野間満, 長橋潤: コンクリートの減衰自由振動における減衰固有振動数と減衰特性の関係, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, V-192, pp432-433, 1988