

論文 鉄筋腐食の進行による RC 床版の打撃応答特性の経時変化

木沢 敬太^{*1}・井山 徹郎^{*2}・村上 祐貴^{*3}

要旨: 本研究では、打音法に着目し、RC 床版を対象とした電食試験による鉄筋の腐食過程において、加速度センサを用いた定期的な打撃試験を実施することで、鉄筋腐食を伴う床版内部の損傷が打撃応答特性に及ぼす影響について検討した。その結果、鉄筋腐食劣化の進行に伴い打撃応答特性に変化が見られた。具体的には、特定の打撃点において、時間応答波形の振幅が急激に増大し、周波数応答特性は 3kHz 以上の帯域で周波数振幅の急激な増大傾向を示した。

キーワード: 非破壊検査, 打音法, 鉄筋腐食, RC 床版

1. はじめに

積雪・寒冷地域において、冬季に散布される凍結防止剤は、残留した塩化物が道路橋の RC 床版上面からひび割れ等を介して浸透することで、床版内部の鉄筋を腐食させる場合がある。鉄筋腐食により浮き・はく離を生じた RC 床版は、舗装面におけるポットホール等の損傷を誘発するため、道路管理上の大きな問題の一つとなっている。特に高速道路においては、このような舗装面の損傷が重大事故の要因となり得るため、日常的な点検により RC 床版の劣化を早期に検知する必要があるため、そのための非破壊検査手法の開発が急務となっている。

RC 床版内部の欠陥検知に用いられる非破壊検査手法は、赤外線サーモグラフィ法や電磁波レーダー法など多種多様に存在する。数ある非破壊検査手法の中で、打音法は点検の容易さ、費用、精度の面から現在最も用いられている検査手法である。主にコンクリート表面の打撃により生じる音の違いを、人間の聴覚により感知することで欠陥の判別が行われており、高速道路においても、点検者が舗装面からの打音検査によって床版内部の損傷を判定している。しかし、広範囲の検査には多大な時間と労力を必要とし、人間の聴覚を利用した検査手法であるため、損傷の判断に熟練性を要する等の短所も有する。

打音法は、コンクリート表面の打撃により生じた弾性波の応答を音として検出することから、非破壊検査手法の中でも弾性波法に分類される。弾性波法には打音による方法以外にも、打撃等の衝撃によって発生させた弾性波を振動として、表面に設置した振動センサにより受信する、衝撃弾性波法などがある。これらの打撃による弾性波入力によって得られた応答信号を数値データとして解析し、応答特性の差異からコンクリート構造物内部の

変状を定量評価しようとする試みが、現在まで数多くなされている。その中でも、RC 床版内部の欠陥検知に弾性波法を用いた研究として、鎌田らは衝撃弾性波法により、得られた周波数スペクトルのピーク周波数に着目することで、アスファルト舗装面からの水平ひび割れの検出に成功している¹⁾。一方、既往の研究において中山らは、コンクリートの強度や打撃位置の変化が、打音特性の変化の一因となることを示している²⁾。そこで、比較的容易に実施可能である打音検査により定期的な点検を行うことを前提として、同一入力位置における打音特性の経時変化から床版の劣化程度を評価可能となれば、検査精度の向上に有効であると考えられる。

本研究では、アスファルト舗装面からの打撃音により、塩害に起因する RC 床版内部の変状を検知可能とするシステムの構築を最終的な目標とし、その基礎的な検討とした。具体的には、電食試験により塩害による劣化過程を再現し、同一箇所における打撃応答の経時変化を捉えることで、鉄筋腐食を伴う床版内部の損傷が打撃応答特性に及ぼす影響について検証した。なお本実験では、既往の研究において、打撃により生じる音と表面振動との間の強い相関性が示されていることから³⁾、経時変化の傾向を把握することを目的に、高い精度が期待される加速度センサを用い、表面振動の応答特性に着目した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体概要を図-1 に示す。試験体は、長さおよび幅が 900mm、厚さ 180mm の小型 RC 床版試験体である。主鉄筋、配力筋ともに D16 (SD295A) を用い、上側主鉄

*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 環境都市工学科准教授 博 (工) (正会員)

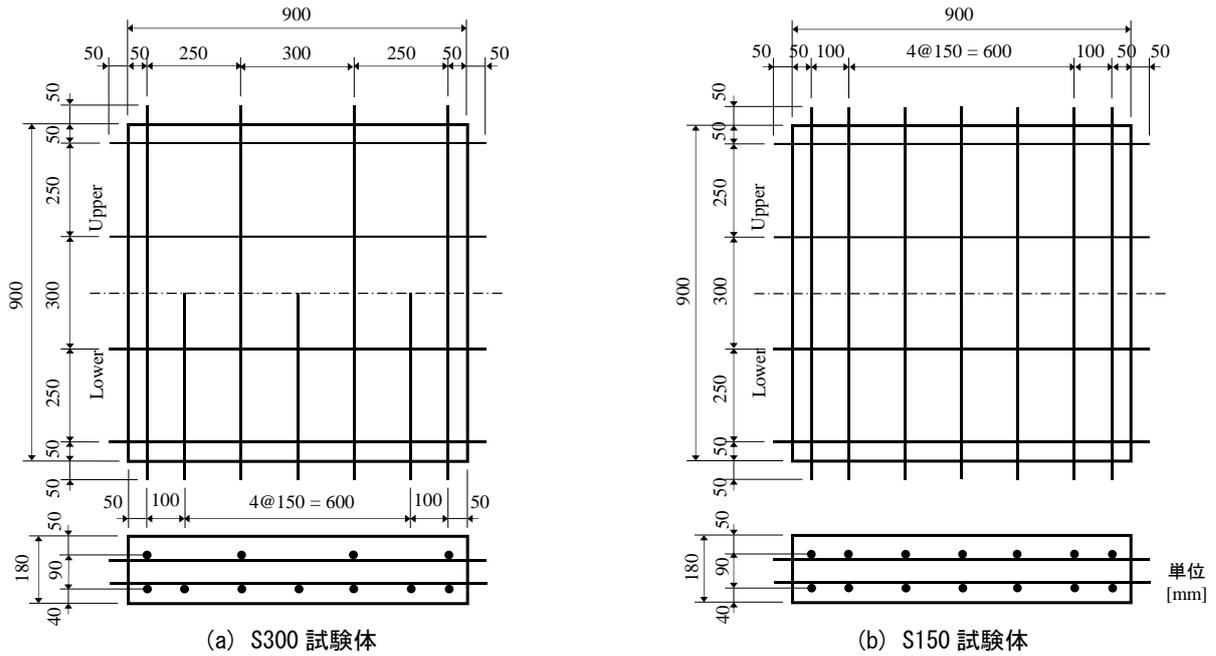


図-1 試験体概要

筋のみ配筋間隔を 300mm (S300 試験体), 150mm (S150 試験体) として 2 体を作製した。なお, 鉄筋の露出部および試験体端部からコンクリート内部方向に 20mm の領域では, 局所的な腐食を防止するため, ビニールテープを巻くことで防食した。また, 本実験では上側主鉄筋のみを腐食の対象としており, 配力筋には主鉄筋との接触部にビニールテープを巻き, 絶縁処理を行った。

コンクリートの配合を表-1 に示す。水セメント比は 55% とし, セメントは S300 試験体に普通ポルトランドセメントを, S150 試験体に早強ポルトランドセメントを使用した。試験体の養生方法は湿布養生とし, S300 試験体は 28 日間, S150 試験体は 7 日間養生を行った。電食開始時における材齢及び圧縮強度は, S300 試験体が材齢 70 日で 34.0N/mm², S150 試験体が材齢 39 日で 32.8N/mm² であり, 各試験体で圧縮強度に大きな差異は無かった。

2.2 電食試験方法

塩害による劣化過程を短期間に再現するため, 鉄筋の腐食手法には, 通電する直流電流密度で腐食を制御可能である電食試験法を採用した。電食試験は図-2 に示すように, 5%NaCl 水溶液を満した水槽に試験体を浸漬し, 上側主鉄筋を陽極, チタンメッシュを陰極として通電を行った。この際, 上側主鉄筋の露出部には熱収縮チューブを装着することで防食した。

本実験では, 電食開始時にあらかじめ打撃試験を実施し, 健全状態における打撃応答の測定後, 全てのの上側主鉄筋に対して, 直流電流を 1 本当たり 3.7mA/cm² の平均電流密度で 42 時間通電した。通電後, 試験体に発生した腐食ひび割れを記録し, 再度打撃試験を実施した。この通電から打撃試験までの一連の流れを 1 サイクルとし,

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 剤
25	55.0	43.0	4.5	155	282	795	1074	2.82	0.00845

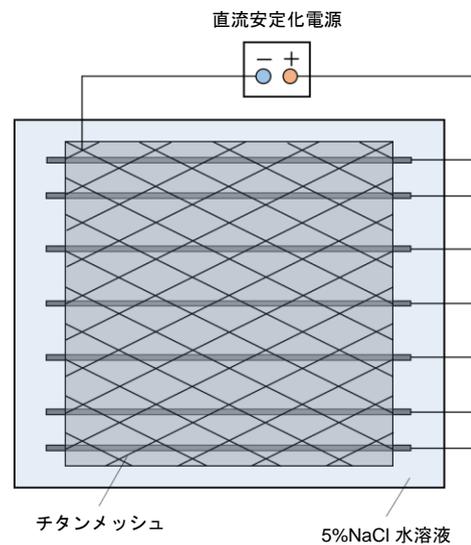


図-2 電食試験概要

各試験体につき計 3 サイクルを繰り返す行うことで, 同一箇所における打撃応答特性の経時変化について検討した。

2.3 打撃試験方法

打撃試験はインパルスハンマを用いて試験体を加振し, 発生した振動応答を加速度センサにより受信した。なお, 本実験に使用した加速度センサは 2Hz~10kHz の周波数範囲で平坦な感度特性を有している。計測におけるサンプリング周波数は 12.8kHz, データ数は 1024 とし, 時間応答, 周波数応答ともに 5 回の打撃による平均を実

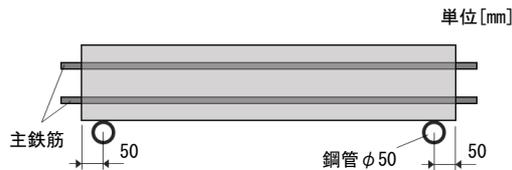


図-3 試験体の支持方法

験データとして採用している。

試験体は両端部から 50mm の位置で、配力筋軸方向に配置した直径 50mm、長さ 1000mm の鋼管上で鉛直支持した (図-3)。測定は、打撃 1 点に対し加速度センサの計測点を 1 点として行った。打撃入力位置は、図-4 に実線で示す 100mm 間隔メッシュの交点とした。加速度センサの取付け位置については、破線で示す 200mm 間隔メッシュの交点とし、打撃点との距離が 70mm となる位置に設置した。例えば打撃点 A1、A2、B1、B2 の 4 点に対するセンサ位置は同一である。これは、同一箇所における応答特性の経時変化を捉えるため、打撃点に対するセンサ位置が測定サイクル毎に変化しないよう固定する目的がある。なお、加速度センサの固定には厚さ 0.4mm の両面粘着テープを用い、試験体表面に密着させた状態で測定を行った。

3. 実験結果

3.1 腐食ひび割れ性状

図-5 に各試験体の腐食ひび割れ性状を示した。S300 試験体においては、電食 1 サイクル目で床版上面中央寄りの主鉄筋軸上にひび割れが生じ、2 サイクル目の時点で水平ひび割れが発生、その後ひび割れ幅が拡大した。S150 試験体においては、1 サイクル目から水平ひび割れが発生し、次第に進展拡大した。

3.2 鉄筋腐食の進行による打撃応答特性の経時変化

(1) 時刻歴応答特性

時間領域の評価には、打撃力によるばらつきを軽減するため、打撃により得られた振動加速度をその打撃力の最大値で除することで基準化した値を、時間軸波形の振幅値として採用した。

一例として、図-6 に各測定サイクルで得られた S150 試験体の打撃点 A1 における時間応答波形を示す。同一打撃点における時刻歴応答特性の経時変化に着目すると、S150 試験体においては図-6 のように、電食 3 サイクル目において急激に振幅値が増大する点が複数箇所見られた。そこで、3 サイクル目における最大の振幅値を健全時の最大振幅値で除することで正規化した最大振幅比を求め、各打撃点において最大振幅値の経時的な変化度を評価した。図-7 に、各打撃点で求めた 3 サイクル目における最大振幅比の値を、打撃点毎の値として入力したコンター図を示す。図-7 より、最大振幅比は全体的

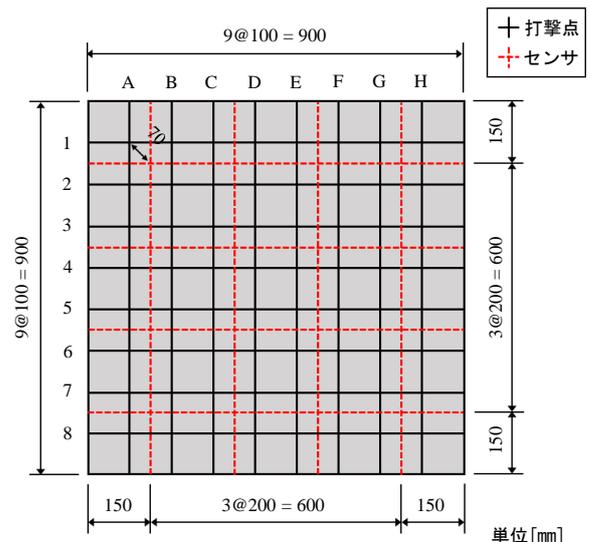
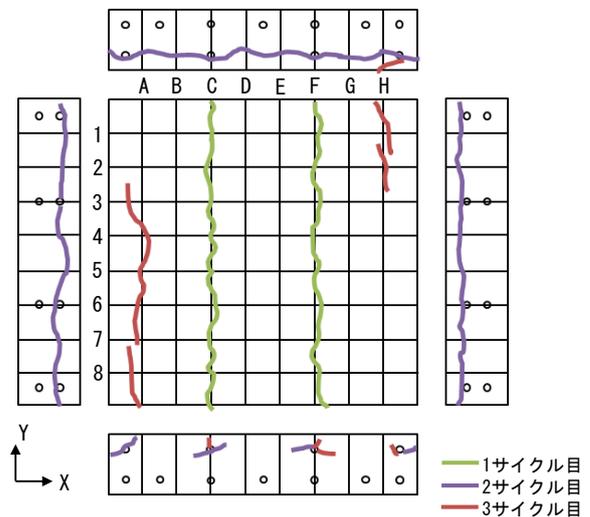
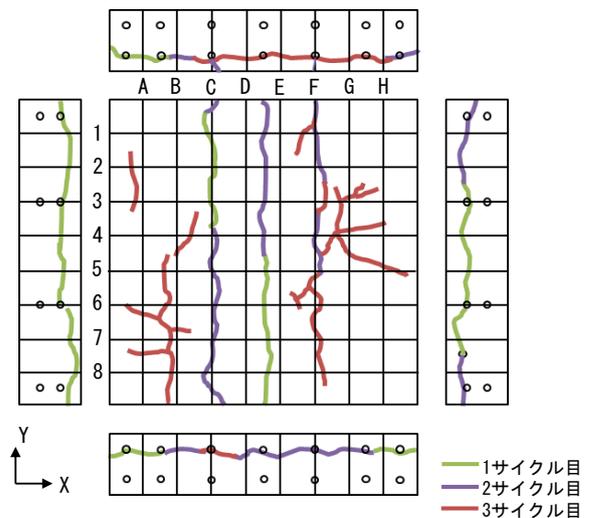


図-4 打撃点およびセンサ位置



(a) S300 試験体



(b) S150 試験体

図-5 腐食ひび割れ性状

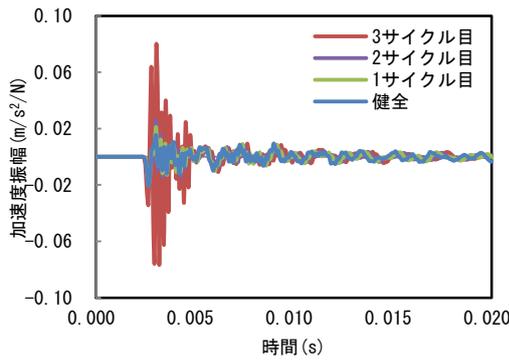


図-6 時間軸波形の経時変化 (S150-打撃点 A1)

に増加傾向にあるが、他の打撃点と比べて極端に増大する点が、まとまって分布していることが分かる。そこで、S150試験体における2サイクル目の最大振幅比についても同様に求め、その分布を図-8に示した。これより、3サイクル目において振幅値が急激に増大したいくつかの点で、2サイクル目の段階においても、他の打撃点と比較して振幅値が増大していることが確認された。

一方、S300試験体においては、図-9に示した3サイクル目における最大振幅比の分布を見ても明らかなように、S150試験体に見られた加速度振幅の急激な増大傾向は確認できなかった。

(2) 周波数応答特性

同一箇所における周波数応答特性の経時変化を見るためには、その測定時点において加振特性に依らない定常的な周波数応答特性を得る必要がある。そこで、本実験では周波数領域の評価に、振動伝達系などにおける入力と出力との関係を表す周波数応答関数を用いた。図-10に、インパルスハンマを用いて試験体表面への打撃により得られた、加振力の振幅スペクトルの一例を示す。このように、インパルスハンマは5kHz付近までの加振周波数特性を有していたため、本実験において対象とする周波数範囲は0~5kHzとした。また、図-10に打撃試験時のコヒーレンス関数の一例を示す。本論文で示したコヒーレンス関数は、インパルスハンマおよび加速度センサにより受信した2つの信号の因果関係の度合を0から1の値で表しており、0に近い場合両者の相関性は低く、1に近い場合は相関性が高いことを意味する。図-10より、対象とした周波数範囲において入力と出力との間に相関があることが確認できる。なお本実験では、周波数応答関数の測定において、コヒーレンス関数を求めるために周波数領域での平均化を行ったため、時間応答の測定とは別に、5回の打撃による平均データを用いている。

はじめに、健全状態の各試験体において、同一打撃位置への入力により得られた周波数応答関数を比較し、図-11にその一例を示す。同一位置における周波数応答特性は、図-11のように試験体間でほぼ一致し、試験体の

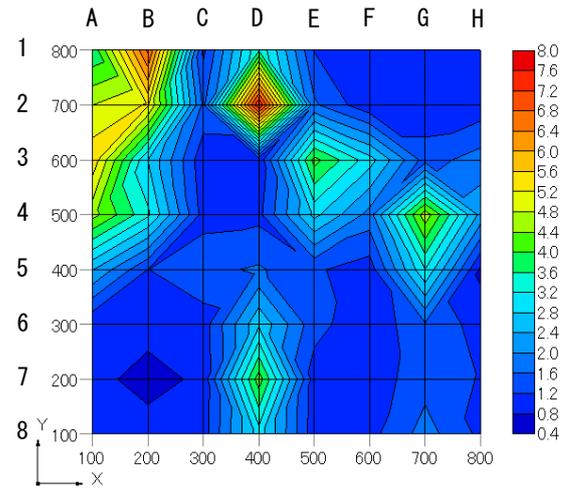


図-7 3サイクル目における最大振幅比分布 (S150)

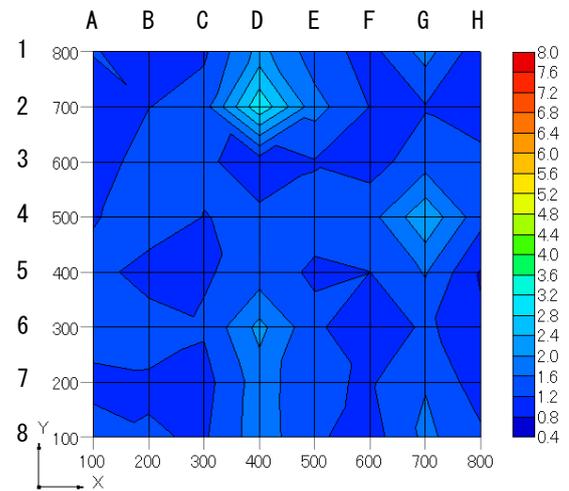


図-8 2サイクル目における最大振幅比分布 (S150)

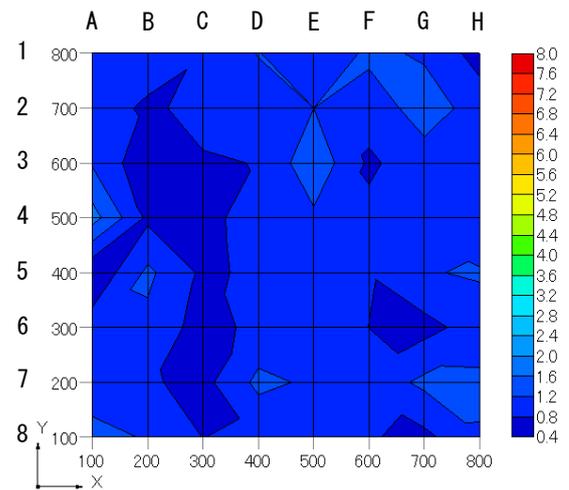


図-9 3サイクル目における最大振幅比分布 (S300)

圧縮強度や配筋状態等による差異は見受けられなかった。

また、含水の影響を勘案するために、S300、S150試験体と同一寸法である無筋の床版試験体を用いて、電食試験体と同時間塩水に浸漬し、打撃試験を行った。一例として、図-12に無筋試験体の打撃点A1における周波数応答関数の変化を示す。このように、周波数応答関数は

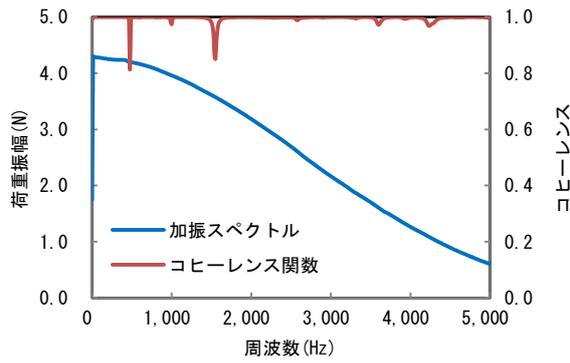


図-10 加振スペクトルおよびコヒーレンス関数の一例

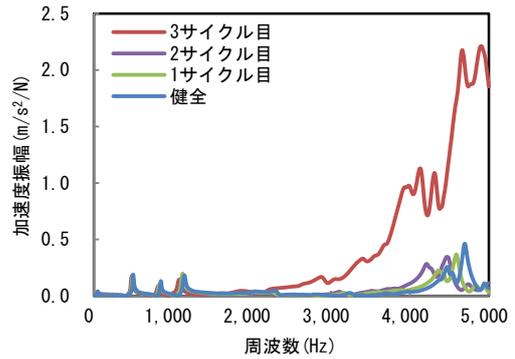


図-13 周波数応答関数の経時変化(S150-打撃点 A1)

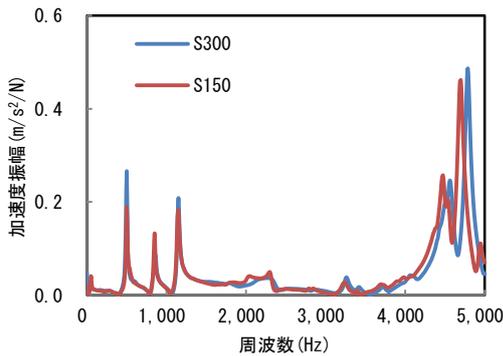


図-11 健全時の周波数応答特性(打撃点 A1)

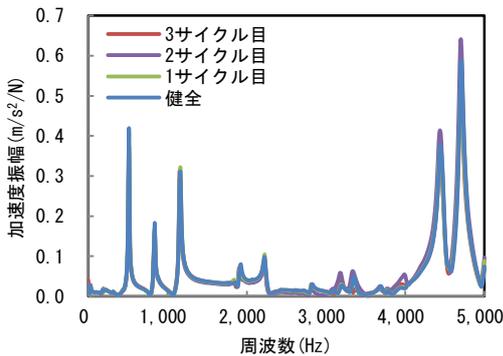


図-12 無筋試験体の周波数応答関数の変化(打撃点 A1)

各測定サイクルで一致し、経時的な変化は確認されなかった。したがって、含水による周波数応答特性への影響は無いものと考えられる。

次に、S150 試験体において最大振幅比が急激に増大した打撃点における周波数応答特性の変化に着目する。図-6 と同一の打撃点 A1 における周波数応答関数の経時変化を図-13 に示す。これより、3 サイクル目の時点で 3kHz 以上の高周波域における周波数振幅が急激に増大していることが分かる。この傾向は他の打撃点においても確認されたため、3 サイクル目における周波数応答関数グラフの面積（以下、周波数応答面積）を算出し、健全時の周波数応答面積で除して正規化した周波数応答面積比を求め、図-14 に打撃点毎の分布を示した。図-7 および図-14 の比較から、最大振幅比と周波数応答面積比の分布傾向は、応答特性に急激な変動が生じた打撃点

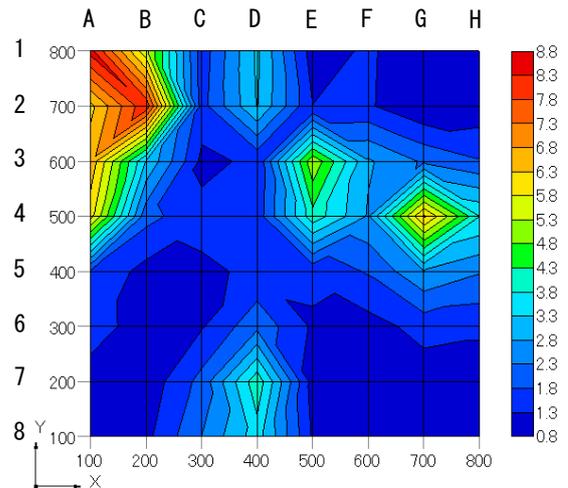


図-14 3 サイクル目の周波数応答面積比分布(S150)

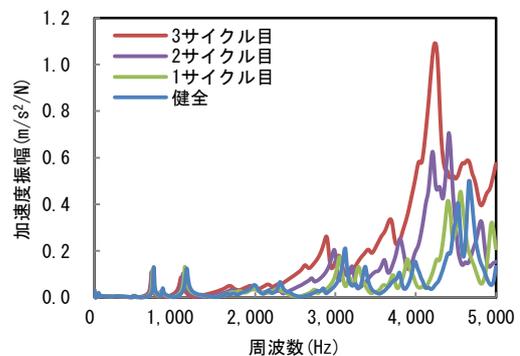


図-15 周波数応答関数の経時変化(S150-打撃点 D2)

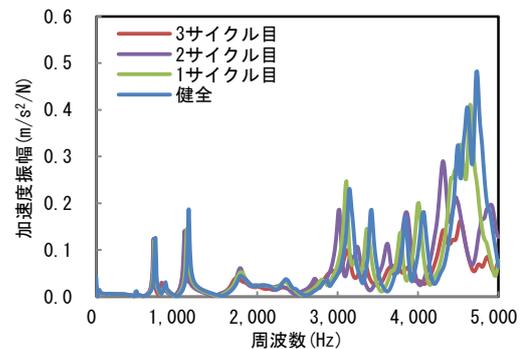


図-16 周波数応答関数の経時変化(S300-打撃点 D2)

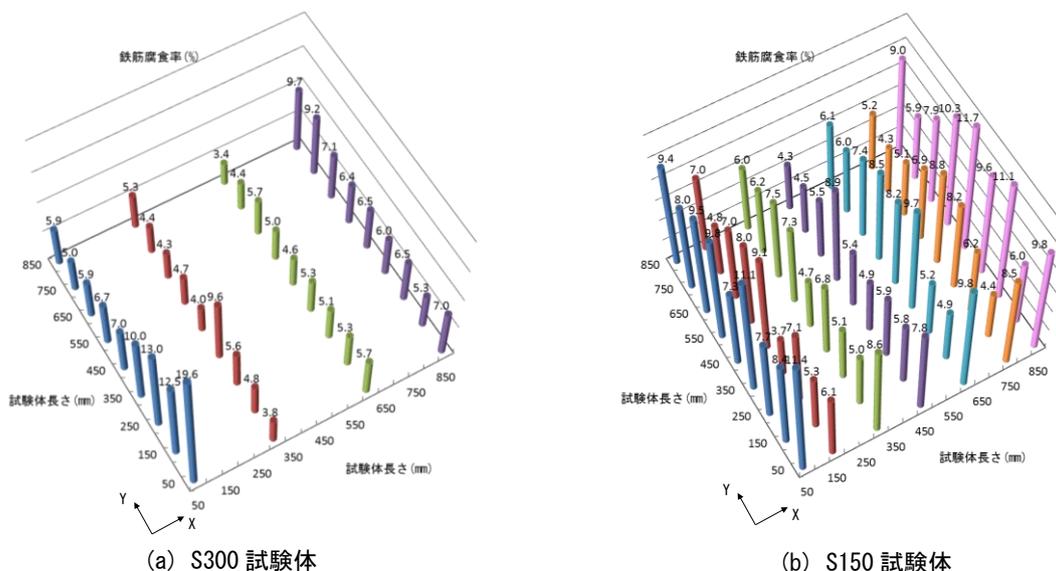


図-17 鉄筋腐食率の分布

に関して概ね一致しており、正の相関が見られた。

その他の周波数応答特性の変動として、一例を図-15に示す。これはS150試験体の打撃点D2における周波数応答特性の変化を示しており、これより健全から3サイクル目へと次第に卓越周波数が低周波側へ移行していることが分かる。3サイクル目において急激な変動が確認されたS150試験体の打撃点A1(図-13参照)においても、健全から3サイクル目にかけて、卓越周波数の低周波側への移行が確認できる。このような卓越周波数の移行は、腐食劣化に伴う剛性の低下により生じたものと推察される。一方、図-16に示すS300試験体の打撃点D2のように、卓越周波数の移行が顕著でない場合もあり、この変動の差異については、配筋密度および同一試験体上での腐食劣化性状の違いが影響したものと考えられる。

また、各試験体において、図-16のような、卓越周波数振幅の経時的な減少傾向が多くの特で確認された。しかし一方で、図-15に示したように、減少していた卓越周波数振幅が次第に増大傾向へと移り変わる点もいくつか見られた。このような変動は、鉄筋の腐食膨張挙動により、試験体内部の弾性波伝播特性が経時的に変化したために生じたものと推察される。

3.3 鉄筋の腐食量が打撃応答特性に及ぼす影響

電食終了後、鉄筋の長さおよび試験前後の質量減少量より、鉄筋の腐食率を打撃点メッシュの100mm間隔で算出した。各試験体における鉄筋腐食率の分布を図-17に示す。大きな変動が見られたS150試験体の3サイクル目における最大振幅比分布(図-7)および周波数応答面積比分布(図-14)と比較すると、鉄筋腐食率との間に直接的な対応は見られなかった。これは打撃応答特性に急激な変動を及ぼす影響要因が、鉄筋の腐食率ではなく内部の腐食ひび割れ性状であるためだと考えられる。

今後は実験の再現性を確認することに加え、配筋密度、腐食程度等の条件を変えた実験を実施し、鉄筋腐食劣化に伴う打撃応答特性の変化について、より詳細な検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋腐食の進行により、同一打撃点において時間応答波形の加速度振幅が急激に増大する点が見つかった。
- (2) 時間応答波形において加速度振幅の急激な変動が見られた打撃点では、周波数応答関数の3kHz以上の周波数振幅が急激に増大した。
- (3) 鉄筋腐食の進行に伴い、同一打撃点において卓越周波数が低周波側へ移行する傾向が見られた。
- (4) 打撃応答特性の急激な変動と鉄筋腐食率との間に直接的な対応は見られず、内部の腐食ひび割れ性状が大きく影響するものと考えられる。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎, 松井繁之ほか: 各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムに関する研究開発, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート, No.19-3, pp.4-25, 2010.6
- 2) 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的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1811-1816, 2011
- 3) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, 第7巻, 第1号, pp.143-152, 1996.1