

# 論文 鉄筋コンクリート内を伝播する超音波を用いた鉄筋腐食の評価に関する検討

原田 和樹\*1・渡辺 健\*2・橋本 親典\*3・石丸 啓輔\*4

**要旨:** 本研究では超音波を用いた非破壊試験により, 鉄筋腐食によるコンクリートの損傷について評価することを目的とし, 鉄筋に沿ってかぶり表面より送受信する超音波の伝播速度や振幅などが腐食の進行に伴いどのように影響を受けるか実験的に検討した。その結果, 伝播速度に関しては腐食およびひび割れ幅の増加に伴う低下が見られた。波形の振幅は腐食の進行により低下する傾向であった。受信側探触子で波形を検出できる距離は, 腐食の進行により短くなることが確認できた。これらより, 鉄筋腐食の進行とそれに伴うコンクリートひび割れによる損傷を評価できる可能性を示した。

**キーワード:** 超音波, 電食, 伝播速度, 振幅, 伝播距離, 鉄筋腐食, ひび割れ

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化要因としては様々なものがあるが, 致命的な欠陥として, 鉄筋の腐食が挙げられる。鉄筋腐食の有無については, 目視点検では腐食が進行しコンクリート表面にひび割れやさび汁が表れた時点ではじめて認識される場合が多いが, その時点でも構造内部の状況を定量評価することは難しい。鉄筋腐食量を調べることは残存耐力などを知る上で重要となるが, それらを非破壊試験で調べる手法は確立されていない。

本研究では弾性波の一種である超音波が鉄筋コンクリートの主筋を伝播する際の伝播特性に着目した。既往の研究により鉄筋の腐食が, 鉄筋を伝わる超音波速度を低下させる要因であることは確認されている<sup>1)</sup>。そこで, 鉄筋の腐食やそれに伴うひび割れが超音波の伝播速度, 振幅および伝播距離に及ぼす影響を定量化することを試みた。それに加えて実際に鉄筋をはつり出すことで鉄筋の腐食量と各パラメータとの相関性の有無について検討を行い, 内部鉄筋の腐食分布を相対的に評価する指標としての有用性を検討した。なお今回想定した劣化程度は, 反応の度合を確認するためにひび割れを目視で確認した後を対象とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体の概要を図-1に示す。供試体は幅 100mm×高さ 200mm×長さ 900mm の RC はり部材である。主鉄筋には D13(SD295A)を使用し, 下面からかぶり 30mm で 1本配置した。コンクリートの配合を表-1に示す。供試体は同配合で 5 体作製した。



図-1 供試体概要

### 2.2 電気腐食試験

鉄筋を早期に腐食させるために電気腐食試験を行った。作製した 5 本の供試体の内 4 本に 1~4 のナンバリングをし, 5%NaCl 水溶液の入った水槽に供試体を入れ通電を行った。水溶液の水位は供試体下面から 100mm と設定した。通電には電源装置を用い, 供試体の下には鉄筋を敷き陰極に, コンクリート部から張り出させた主鉄筋に陽極をそれぞれ繋いだ。

流す電流の大きさは 1A/m<sup>2</sup>を基準とし腐食の進行状況を見て変動させた。超音波の各パラメータと腐食量との相関性については, 後述するように鉄筋の質量減少率を用いることとした。

電食試験を行わない供試体に関しては初期値のみを

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A	SP 剤	塩
20	8	55	4	45	175	318	779	949	7A	0.24	10

\*1 徳島大学 工学部建設工学科 (学生会員)

\*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

\*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

\*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員 (正会員)

取り、この値を全供試体の初期値とした。1~4については電食終了後に計測を行った。電食期間は1を10日、2を20日、3を30日、4を33日とした。

### 2.3 各種計測

本研究では超音波を供試体表面から送り込み、供試体内部の鉄筋を伝わせた際に得られる各種パラメータを計測した。超音波の送受信には探触子(直径:20mm, 周波数:30kHz)を用い、原波形からパラメータを読み取った。計測方法は2ケース設け、それぞれの実験ケースで得たパラメータについて検討を行った。

#### 2.3.1 ケース(1)

ケース(1)の実験概要について図-2に示す。電食を施した供試体の主筋直下に探触子を当て超音波の送受信を行うことで超音波伝播時間、振幅、伝播距離について測定を行った。なお測定は電食2、10日では全供試体、電食20日では2~4、電食30日では3・4、電食33日では4に対して行った。伝播速度は既往の研究<sup>2)</sup>を基に以下の式(1)により算出した。

$$\text{速度} = (\text{ch2 と入力点の距離} - \text{ch1 と入力点の距離}) / (\text{ch2 で検出した時間} - \text{ch1 で検出した時間}) \quad (1)$$

式(1)は便宜上、ch1とch2間の鉄筋に関する超音波伝播速度を表している。探触子間距離は探触子前端間の距離とし、設置間隔は5cmごととした。原波形から超音波伝播時間を読み取る際には波形の第一波の立ち上り位置を計測点とした。振幅および伝播距離の判定にはしきい値(0.15V)を用い、しきい値を初めて超えた波の最大振幅を振幅値の測定点とした。伝播距離に関しては波がしきい値を超えているかどうかで波が到達しているかどうかを判断した。

#### 2.3.2 ケース(2)

ケース(2)の実験概要について図-3に示す。ケース(1)では超音波の送受信点がひび割れ上となる場合があり、ケース(2)ではひび割れの影響を回避するため図-3に示すように送信側探触子を供試体底面の端に付け、ひび割れを挟み込んで対面側に受信側探触子が付くよう配置した。ケース(1)同様超音波伝播時間、振幅、伝播距離について測定を行い、伝播速度は式(1)により算出した。なおケース(2)で測定を行ったのは電食10日では1、電食20

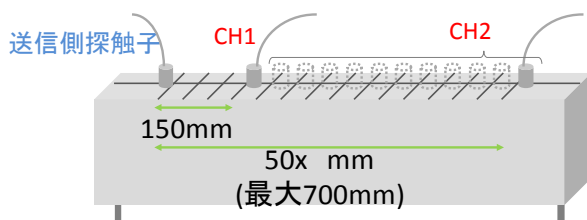


図-2 ケース(1)概要

日では2、電食30日では3、電食33日では4とした。

### 2.4 質量減少率の確認

電食および計測が終了した供試体について、コンクリートをはつり取り鉄筋の質量減少率について検討を行った。コンクリートから取り出した鉄筋を10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に24時間漬けて錆を取り除いた<sup>3)</sup>。

その後鉄筋の質量を5cm間隔で計測し、黒皮を取り除いた健全な鉄筋5cmとの比により質量減少率を算出して区間別でケース(1)、ケース(2)で得たパラメータとの相関性を検討した。

### 2.5 スネルの法則

探触子の位置および質量減少率を測定する位置について、スネルの法則を用いて検討した。スネルの法則の原理について図-4に示す。ここにd:受信側探触子から鉄筋までの最短距離(cm)である。超音波が鉄筋を伝播しその原波形を受信したとき、波形にリンクしている鉄筋の位置は測定点の直下ではなく送信側探触子方向にずれている。これは波が異なる媒質に入射される場合特定の入射角を持つためであり、この角度を計算するものがスネルの法則である。参考文献<sup>2)</sup>によれば、コンクリート表面から入射された超音波が鉄筋に入射される角度および鉄筋から受信側探触子に入射する角度θは式(2)により求められる。

$$\theta = \sin^{-1}(V_{pc} / V_{ps}) \quad (2)$$

ここで $V_{pc}$ :コンクリート部を伝わる超音波の速度(m/s)、 $V_{ps}$ :鉄筋部を伝わる超音波の速度(m/s)である。これにより今研究では $\theta=36.4^\circ$ となる。すなわち理論上は超音波に影響を与える鉄筋の位置は受信側探触子直下から送信

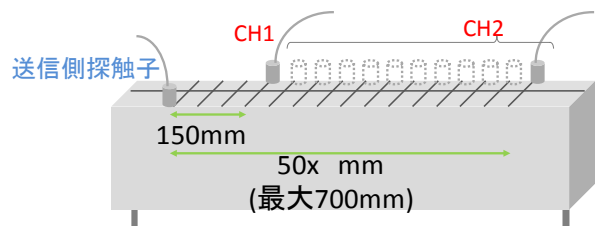


図-3 ケース(2)概要

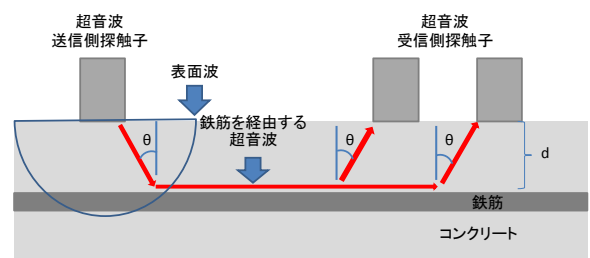


図-4 スネルの法則の原理

用の探触子側に  $d \times \sin \theta$  ずれている。よって今回鉄筋の断面減少率を図る際に鉄筋を切断する位置を  $3 \times \sin(36.4^\circ) = 1.78\text{cm}$  ずらすこととした。

またスネルの法則によると、式(3)を満たしている場合に鉄筋を伝播する波が受信できる。

$$L_{ch} > 2d \sqrt{V_{ps}^2 - V_{pc}^2} / (V_{ps} - V_{pc}) \quad (3)$$

ここで  $L_{ch}$  : 送信側探触子と受信側探触子間の距離(cm)である。式(3)に供試体より実験的に求めた  $V_{pc} = 3690\text{m/s}$ ,  $V_{ps} = 6220\text{m/s}$  を当てはめると、 $L_{ch} = 11.9\text{cm}$  となる。ケース(1)を ch1, ch2 を用いず受信側探触子 1 つで原波形を読み取り、直接伝播時間から速度を算出すると、およそ探触子間距離が 10cm を超えたあたりから各電食期間における伝播速度にばらつきが見られることから、この位置が鉄筋を伝播して受信側探触子に届く波とコンクリート表面を伝い受信側探触子に届く波が重なる点であることが分かる。この点と  $L_{ch}$  の値がおおよそ一致していることから今実験はスネルの法則に基づいていると確認できる。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 速度の経時変化

ケース(1)において測定した各供試体における伝播速度と入力・受信点間距離との関係を表した結果を図-5に示す。なお、今実験では電食 2 日時点ですべての供試体にかぶり(鉄筋直下側)部に鉄筋に沿ったひび割れが確認できた。他方向のひび割れは確認できなかった。各供試体の速度変化を確認すると、全供試体に関して電食日数が進むにつれておおむね段階的に速度の低下が見受けられた。これは既往の研究<sup>1)</sup>と同様の傾向であると言える。今実験では一部の計測点で電食日数が増加しても伝播速度が前回の計測値より速くなっている箇所が存在したが、腐食が進行しひび割れも増大している中で速度が増加するとは考えづらく、このような値は計測誤差によるものであると考えている。しかし大部分の計測点では速度は低下しており、こうした挙動は電食日数の増加に伴う鉄筋の腐食やひび割れなどの複合的な要因によるものであると思われる。

電食日数が 10 日まででは速度の低下がそれ以降の速度低下に比べ著しいが、これは電食日数が 10 日ごろからひび割れ内に腐食生成物の詰まりが確認できたことから、伝播速度に対するひび割れの影響が小さくなったものと考えられる。ケース(1)では得られたパラメータに関して距離減衰の影響が除外できていないが、各供試体の同一計測点で劣化による速度の低下が見受けられることから、

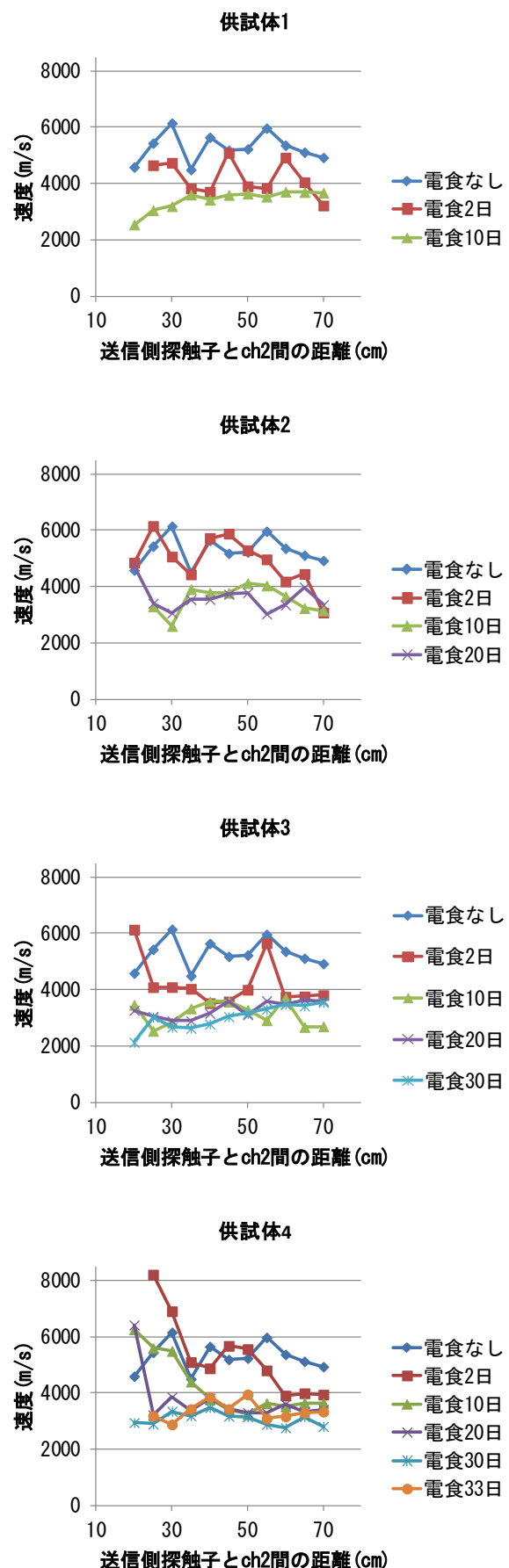


図-5 速度の追跡調査(ケース(1))

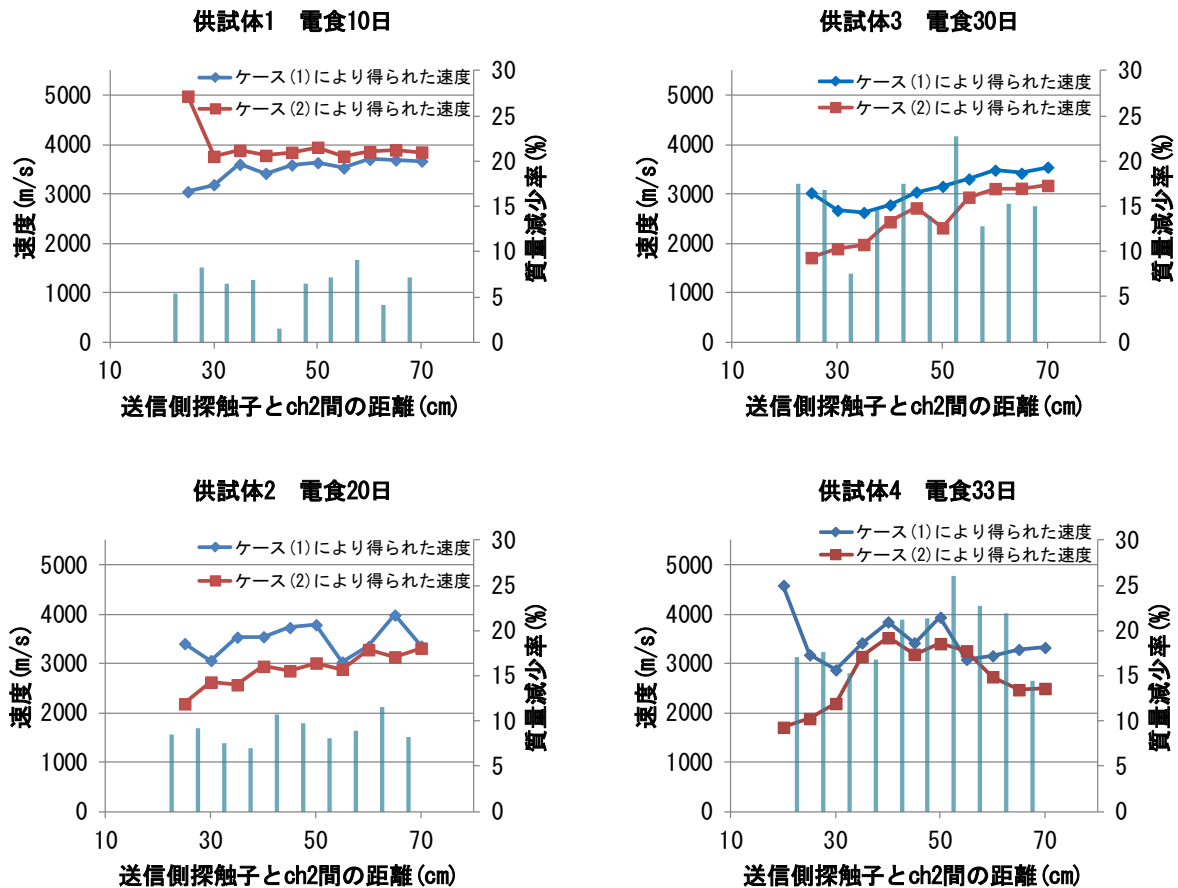


図-6 各ケースにおける速度と質量減少率の関係

速度の低下が超音波の距離減衰によるものだけではないことが言える。

### 3.2 伝播速度と鉄筋の質量減少率の関係について

ケース(1)およびケース(2)で測定した各供試体における伝播速度と区間別鉄筋質量減少率との関係を表した結果を図-6に示す。棒グラフは鉄筋の質量減少率、折れ線グラフは各供試体の電食最終日における超音波伝播速度を示している。ケース(1)とケース(2)それぞれに算出した伝播速度を比較すると、互いに似通った挙動が確認できる。このことより、本研究の手法を用いる際に探触子を設置する点について、ひび割れ上に設置しなくてはならない場合とひび割れを回避できる場合のどちらでも同様に利用できる可能性を示している。続いて鉄筋の腐食量と超音波伝播速度の関係に着目する。局所的な腐食量と伝播速度の間に相関性は確認できなかった。なお、今回コンクリートおよび鉄筋に対する超音波の伝播経路は両ケースで同一のものと仮定したが、より複雑な伝播経路になっている可能性がある。それは鉄筋腐食やそれに伴い発生する腐食生成物、ひび割れなどに起因すると考えられることから、同一供試体内での速度の違いは劣化の存在を示すものであるとも考えられる。

### 3.3 振幅と腐食間の検討

ケース(1)で測定した各供試体における振幅と超音波

伝播速度との関係を表した結果を図-7に示す。ここでは代表的な結果として供試体2の電食20日時点の結果を示す。同一計測日に各測定点で読み取った振幅値が一定の値に収束しており、電食日数が進むにつれて振幅値は減少している。電食開始以前の健全な状態の供試体では振幅の緩やかな低下が確認できる。この段階では鉄筋の腐食およびひび割れは発生していないことから距離減衰のみによる挙動であると言える。つまり電食後の振幅値低下は鉄筋の腐食またはひび割れの影響が卓越していると考えられる。このことより、健全な状態から劣化が進

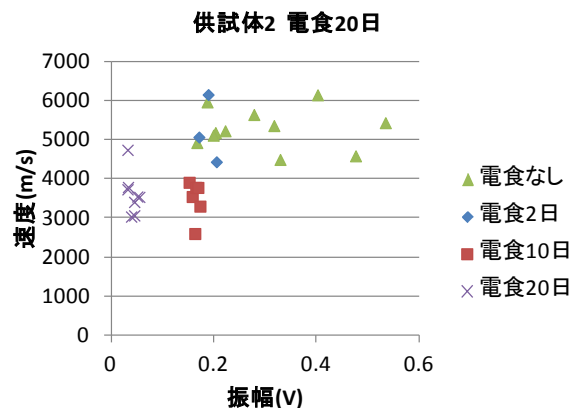


図-7 振幅と速度の関係(ケース1)



行するにつれて最初に速度低下が確認され、その時点で内部劣化が進行している。さらに腐食やひび割れが進行すると速度低下は生じないが、振幅値はさらに低下するため、内部劣化の程度がこれにより評価できる可能性がある。

### 3.4 鉄筋の質量減少率とひび割れ幅の相関性について

鉄筋の質量減少率とその直下に生じたひび割れ幅の関係を表した結果を図-8に示し、ひび割れの全景を写真-1、ひび割れの測定方法を写真-2に示す。ひび割れと腐食量に明確な相関関係は見られない。この結果および超音波伝播速度と腐食量に相関性が見られなかったことから、超音波のパラメータに影響を与えるのは腐食やひび割れなどの複合要因と考えられる。

### 3.5 鉄筋の質量減少率およびひび割れ幅と超音波伝播距離の関係について

各供試体における鉄筋の質量減少率と超音波伝播距離比との関係を図-9に示し、各電食日数において供試体表面に見られたひび割れ幅の平均値と超音波伝播距離比との関係を図-10に示す。伝播距離比は各供試体の健全状態と電食終了時の超音波伝播距離との比を表している。ここで鉄筋の質量減少率は超音波の伝播経路となる部分(送受信探触子間の最大距離 70cm)の質量が健全状態の鉄筋 70cm からどれほど減少したかを百分率で示したものである。図-9より、電食日数33日で伝播距離比が回復しているが、全体の挙動としては腐食日数の増加とともに鉄筋の質量減少率は増大し、超音波伝播距離比の減少傾向が確認された。一方、図-10より、腐食日数が増えるにしたがい平均ひび割れ幅は大きくなり、伝播距離比が短くなる傾向はあるものの、電食10日における平均ひび割れ幅(0.79mm)に対して伝播距離比の減少は小さい。これらのことから、超音波伝播距離比についてはいくつかの要因が複合的に作用し徐々に減少しているが、比較的鉄筋の腐食の影響が大きい可能性が考えられる。



写真-1 ひび割れの全景



写真-2 ひび割れ幅測定の様子

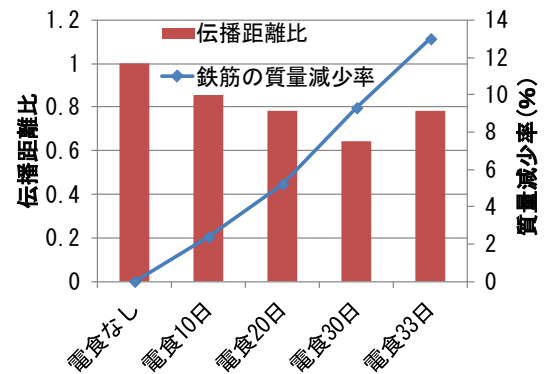


図-9 質量減少率と超音波伝播距離比との関係

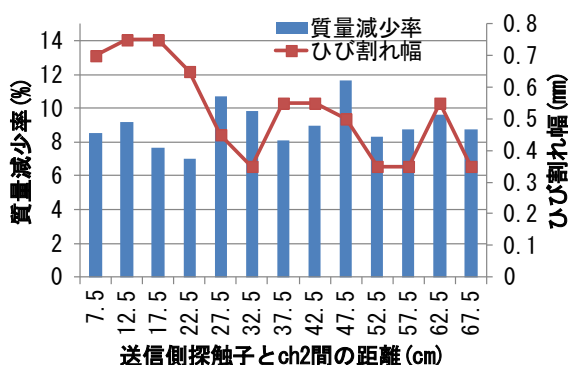


図-8 質量減少率とひび割れ幅の関係(供試体 2)

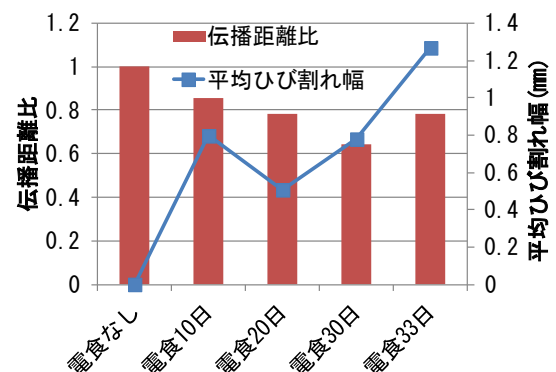


図-10 平均ひび割れ幅と超音波伝播距離比の関係

#### 4. まとめ

鉄筋コンクリート供試体表面に超音波の入出力を行うことが可能な一組の探触子を設置させ、内部鉄筋を伝播した超音波の原波形を得た。この波形より超音波伝播速度、振幅および伝播距離を算出し、供試体表面に生じたひび割れや鉄筋の質量減少率、または各パラメータ間で相関性について検討した。その結果、以下のような結果が得られた。

- 1) 超音波伝播速度は鉄筋腐食の進行およびひび割れ幅の増大に伴い段階的に低下した。しかしある程度腐食の進行が進むと速度の低下の減少は小さくなった。
- 2) 伝播速度と腐食量の関係を局所的に確認した場合、今回用いた手法では明確な相関性は見られなかった。
- 3) 振幅値は電食期間が進むにつれて距離による減衰の影響が少なくなり、どの計測点においても振幅値は低下する傾向を示した。
- 4) ひび割れ幅と腐食量の間に明確な相関関係は見られなかった。
- 5) 電食期間が長くなるにつれて超音波伝播距離は鉄筋腐食やひび割れなどの複合的な要因により短くなる。その中で鉄筋腐食量は伝播距離の減少に伴い増大した。

今実験では鉄筋腐食の定量化を目的として試験を進めたが、各パラメータにはひび割れをはじめとする腐食以外の要因も複合的に作用し、腐食の影響のみを取り出して検討することはできなかった。しかし今回の実験に用いた手法を利用した場合、速度に着目すると、今実験のように一定距離ごとに超音波受信点を離すという手法

を用いることで、鉄筋の腐食量やひび割れなどの複合的な要因による内部劣化を計測距離ごとに定量評価できる可能性があると考えられる。振幅に関して、腐食等の劣化が進行した際の収束値と対応する鉄筋の質量減少率に関するデータを今後増やすことで図-7のような散布図上でゾーニングによる鉄筋コンクリートの内部劣化に関する評価が可能ではないかと考える。

なお今研究で用いた供試体は鉄筋のかぶりや鉄筋径、種類が全て同一のものを使用しており、鉄筋腐食の定量化に向けてはこれらについて検討が必要である。また速度の計測点の決定方法、振幅値の判定に用いるしきい値については今後の検討課題である。

#### 参考文献

- 1) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 稲熊唯史, 長谷川昌明: 鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状調査への非破壊試験の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.823-828, 2008
- 2) 岩野聡史, 森濱和正: 衝撃弾性波法による実構造物での弾性波速度の測定方法について, コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339委員会)(第II期)報告書ならびにシンポジウム講演概要集, pp171-174, 2012.11
- 3) 鎌田敏郎: 非破壊試験と構造解析の融合による塩害を受けるコンクリート部材の耐荷性能の評価手法の開発, 平成21年度(財)港湾空港建設技術サービスセンター研究開発助成報告書, 助成番号:平成20年2月9日付 第08-5号, 研究開発項目:(20指定)② 「港湾・空港のアセットマネジメントに関する研究」に関するもの, pp32-44, 2010