

論文 衝撃弾性波法による鉄筋腐食に起因するコンクリート表層部の変状の非破壊評価手法に関する基礎的検討

藤井 壮太*1・内田 慎哉*2・岩野 聡史*3・片岡 繁人*4

要旨：本研究では、電食により塩害劣化を模擬した鉄筋の腐食程度の異なる複数のコンクリート供試体を作製し、衝撃弾性波法によりコンクリート表層部の変状を非破壊で評価することを試みた。その結果、鋼球打撃によりかぶりと同程度の波長の表面波を入力することにより、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生する前の段階において、鉄筋腐食に伴う鉄筋周辺の剥離やひび割れを含むコンクリート表層部の変状を、相互相関関数を活用して求めた表面波の位相速度から、非破壊で評価できる可能性があることを明らかにした。

キーワード：鉄筋コンクリート、塩害、鉄筋腐食、衝撃弾性波法、相互相関、表面波、位相速度

1. はじめに

コンクリートの劣化の一つに塩害がある¹⁾。コンクリート標準示方書 [維持管理編]では、塩害による鉄筋腐食に伴うコンクリート構造物の劣化進行過程を、「潜伏期」、「進展期」、「加速期」および「劣化期」の4つに区別している²⁾。図-1に示すとおり、塩化物イオンが鉄筋に到達すると、鋼材の腐食が開始する。腐食に伴って鉄筋に錆が生じ、鉄筋とコンクリートとの境界面の付着が低下する。さらに鉄筋の腐食が進行すると、錆による膨張圧が原因で鉄筋周辺にひび割れが発生する。その後、これらのひび割れがさらに進展すると、ひび割れがコンクリートの表面に達し、目視により腐食ひび割れの発生を確認できるようになる。このような鉄筋の腐食過程で発生するコンクリート表層部(図-1参照)における鉄筋界面の剥離やひび割れは、部材の耐荷性能や耐久性能を低下させる要因となる。したがって、部材の耐荷性能や耐久性能を確保する意味で、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生する前の段階で、鉄筋の腐食に伴うコンクリート表層部の変状を、非破壊で評価することが重要となる。

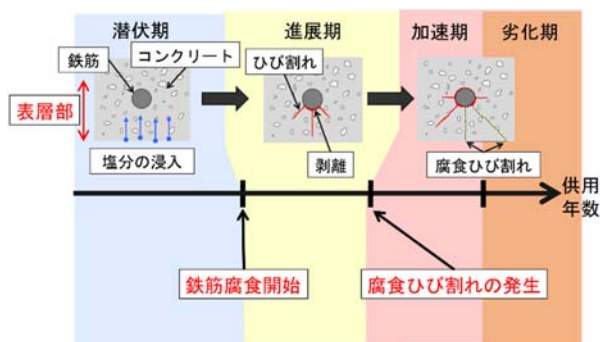


図-1 塩害を受けるRC部材の劣化進行過程

そこで本研究では、電食により塩害劣化を模擬した鉄筋の腐食程度の異なる複数のコンクリート供試体を作製し、衝撃弾性波法で測定した波形に対して相互相関関数を利用して表面波の位相速度を算出し、得られた速度から、コンクリート表層部の鉄筋腐食に伴う鉄筋周辺の剥離やひび割れといった変状を、非破壊で評価する方法について検討することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の概要を写真-1に示す。コンクリート部分の寸法は、幅 300mm×高さ 150mm×長さ 850mmとした。鉄筋はD16の異形鉄筋を使用し、供試体の幅方向中央にかぶり 50mm で1本配置した。鉄筋は側面からそれぞれ 50mm 突出させている。なお、供試体は、計4体作製した。コンクリートの配(調)合を表-1に示す。生コン工場で製造した呼び強度:21のコンクリートを使用した。コンクリートの使用材料は、セメント:普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³)、水:地下水、細骨材:庄

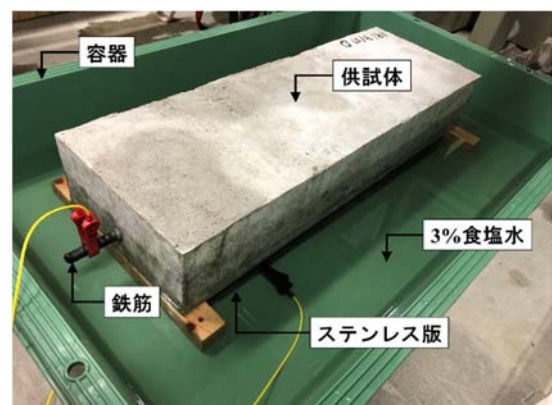


写真-1 供試体および電食試験の概要

*1 富山県立大学 大学院 工学研究科 環境工学専攻 (学生会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 リック(株) 技術研究所課長 博士(工学) (正会員)

*4 リック(株) 技術研究所 修士(工学) (正会員)

川水系陸砂（表乾密度：2.59g/cm³，粗粒率：2.70），粗骨材：庄川水系陸砂利（表乾密度：2.61g/cm³，実積率：63.0%，最大寸法：25mm），混和剤：AE 減水剤標準形Ⅰ種である。なお、フレッシュコンクリートの性状は、スランブ 6.5cm，空気量 5.1%である。打設後の供試体は材齢 1 日で脱型し，材齢 28 日まで湿布養生した。材齢 28 日に，別途作製した円柱供試体（供試体と同様に湿布養生）で，JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づき静弾性係数の試験を行った。その結果，圧縮強度は 27.7N/mm²，静弾性係数は 27.8kN/mm²であった。材齢 28 日以降は，電食試験に供するまでの間，屋内で静置した。

2.2 電食試験

鉄筋を促進腐食させるため，電食試験を採用した。電食試験の概要を写真－1 に示す。3%食塩水を満たした容器内に，コンクリートのかぶり部分のみが浸漬するように供試体を静置した。鉄筋への通電は，鉄筋を陽極，ステンレス版を陰極とした回路を形成させた上で，500mA の直流定電流により行った。また，通電期間中は，食塩水の供試体への浸透および蒸発を考慮して，食塩水の量が一定となるよう適宜必要に応じて，3%食塩水を容器内に補充した。

鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状の程度を変化させるため，電食における通電期間（電食期間）を 5 ケースに設定した。電食期間とこれに対応する供試体名との関係を表－2 に示す。なお，表中の健全供試体とは，供試体 A,B,C の電食試験開始前の状態の供試体のことを指す。

電食試験終了後，鉄筋の腐食程度を把握するため，鉄筋断面減少率を求めた。具体的には，次節に示す衝撃弾性波法の測定を行った後，供試体から鉄筋をはつり出し，除錆を行った。除錆には，質量濃度 10%のクエン酸二アンモニウム水溶液（60℃）に 48 時間浸漬し，その後，真鍮ブラシを用いて腐食生成物を除去した。除錆後の鉄筋は，乾燥を十分に行った上で，ノギスにより鉄筋の直径を 1 箇所あたり 2 方向（リブを含めた径とこれに直行する径）測定し，平均値をその点での鉄筋直径とした。その後，以下に示す式により，鉄筋断面減少率を求めた。

$$A/A_0 = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100 \quad (1)$$

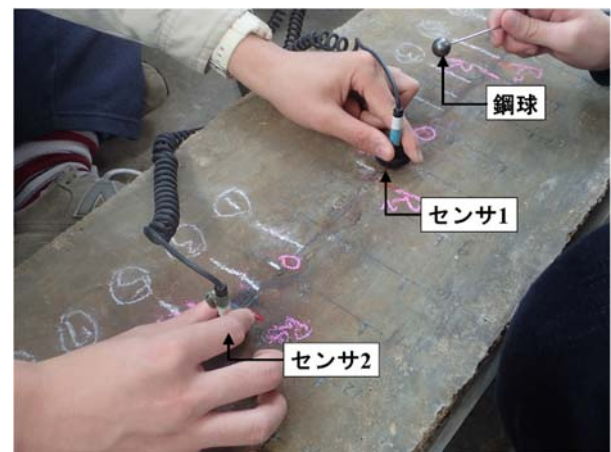
ここで， A/A_0 ：鉄筋断面減少率， S_0 ：試験体打設前の鉄筋直径から求めた鉄筋の断面積， S ：除錆後の鉄筋直径から推定した鉄筋の断面積である。なお，鉄筋直径の測定は，コンクリート中に埋め込まれていた長さ 850mm の範囲において，長手方向に 10mm 間隔で行った。

表－1 コンクリートの配（調）合

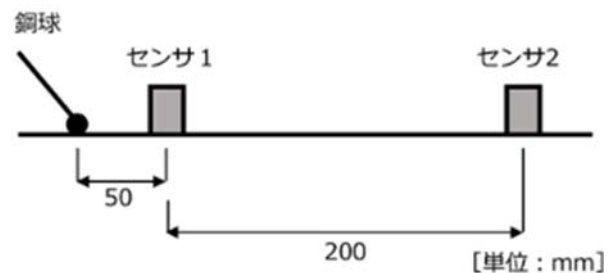
W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	A
61.5	46.8	171	278	845	966	2.78

表－2 電食期間と対応する供試体名

電食期間	供試体名
0 日	健全供試体
3 日	供試体 A
6 日	供試体 B
14 日	供試体 C
18 日	供試体 D



写真－2 衝撃弾性波法による測定状況



図－2 鋼球打撃とセンサ配置との関係

2.3 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法による測定状況を写真－2 に示す。鋼球打撃とセンサ配置との関係を図－2 に示す。衝撃弾性波法による測定は，食塩水に浸漬した供試体面の鉄筋直上において，図－3 に示す 4 箇所（4 測線）で実施した。いずれの供試体においても，打撃とセンサ配置を図－2 に示す関係を保った上で，鉄筋全長に渡って計測するため，測線 1 から測線 4 に向かって走査して測定した。弾性波

の入力は、鋼球打撃で行った。入力する弾性波の周波数にバリエーションを設けるため、直径の異なる3種類の鋼球（5，10，15mm）を使用した。弾性波の受信には、周波数応答（±3dB）が0.2～20000Hzの加速度センサを使用した。センサで受信した信号は、サンプリング時間間隔0.5μs，データ数4000個，測定時間長2msでデジタル化した後、波形収集装置に記録した。

測定した受信波形の例を図-4に示す。両センサで受信した波形を用いて、表面波の位相速度を算出した。具体的な算出手順としては、まず、両センサで受信した波形（図-4参照）に対して、相互相関関数を次式により求めた。

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^{0.1} \{f(t) \cdot g(t+\tau)\} \quad (2)$$

ここで、 $R(\tau)$ ：時間差 τ での相関係数、 τ ：時間差、 $f(t)$ ：センサ1の受信波形、 $g(t)$ ：センサ2の受信波形である。なお、相関係数は0msから0.1msまでのセンサ1の受信波形から計算している。これは、0.1ms以降では表面波以外の波動が受信される可能性があり、この影響を少しでも排除するためである。図-5に、算出した相互相関関数を示す。この関数において、相関係数が極大となる複数の時間差から、式(3)により表面波の位相速度をそれぞれ算出し、一般的な表面波の位相速度（1500m/s～2500m/s）となる値を採用して位相速度に決定した。

$$C_R = \frac{L}{\tau_0} \quad (3)$$

ここで、 C_R ：表面波の位相速度、 L ：センサ間隔、 τ_0 ：相関係数が極大となる時間差である。

3. 実験結果および考察

3.1 腐食ひび割れ発生状況

電食試験実施後の、供試体表面による腐食ひび割れ発生状況を写真-3に示す。供試体A（電食期間3日）では、コンクリート表面にひび割れは確認できず、供試体B（電食期間6日）では目視で確認するのが困難な程度の微細ひび割れが、局所的に発生していたが、概ね供試体Aと同様に健全である。これに対して供試体C（電食期間14日）では、供試体の片端部から中央にかけて（衝撃弾性波法の計測における測線1～測線2上）ひび割れが発生しており、供試体D（電食期間18日）では、供試体の長手方向に一本のひび割れが発生した。以上より、電食試験による通電期間に応じて、コンクリート表層部に鉄筋腐食に伴うひび割れが発生していることが確認できた。

3.2 鉄筋断面減少率

除錆後の鉄筋の腐食状況を写真-4に示す。また、鉄筋断面減少率の結果を表-3に示す。表中に示す「測線」

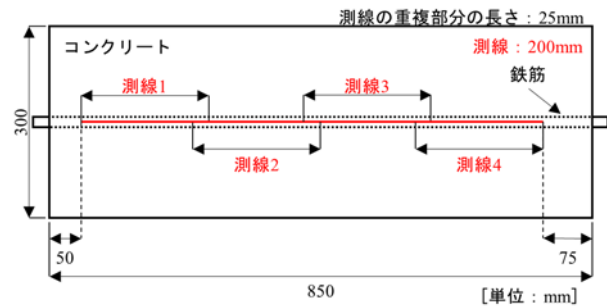
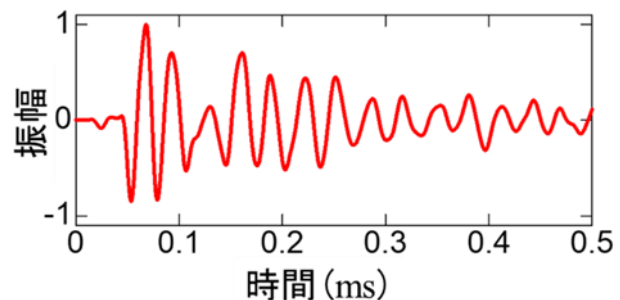
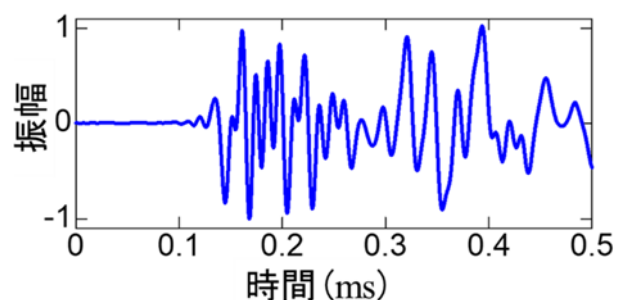


図-3 測定箇所



(a) センサ1の受信波形 $f(t)$



(b) センサ2の受信波形 $g(t)$

図-4 測定した受信波形の例

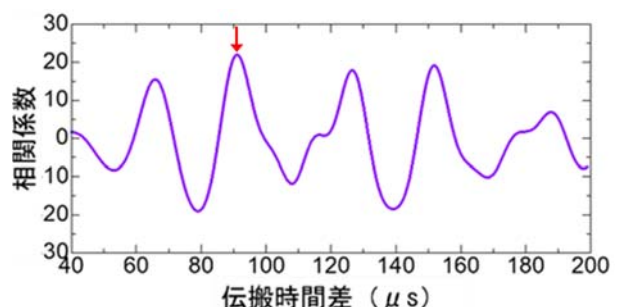
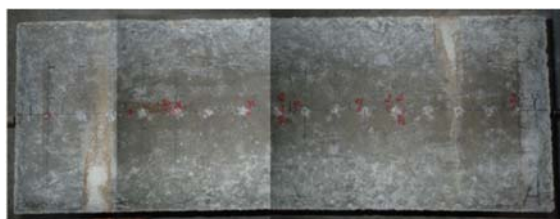


図-5 相互相関関数の例（↓：採用した時間差）

とは、衝撃弾性波法による「測線」（2.3参照）と対応している。例えば、「測線1」における鉄筋断面減少率とは、測線1の区間（長さ200mm）において10mm間隔で算出した20箇所の鉄筋断面減少率を平均した値である。なお、健全供試体では、衝撃弾性波法による測定後、鉄筋をはつり出していない。そのため、表中に示す「健全供



(a) 供試体 A (電食期間 3 日)



(b) 供試体 B (電食期間 6 日)



(c) 供試体 C (電食期間 14 日)



(d) 供試体 D (電食期間 18 日)

写真-3 腐食ひび割れ発生状況

試体 (電食期間 0 日) の「鉄筋断面減少率」は、0.00 として取り扱った。電食試験による通電期間に応じて、またコンクリート表面の腐食ひび割れの発生状況に応じて、鉄筋断面減少率が変化していることが確認できた。

3.3 衝撃弾性波法

衝撃弾性波法により各測線で求めた表面波の位相速度とそれに対応する測線で算出した鉄筋断面減少率との関係を、鋼球直径ごとに整理した結果を図-6 に示す。図中に示す破線は、最小二乗法により推定した線形回帰式である。また、決定係数も併せて示している。いずれの鋼球直径においても、鉄筋断面減少率が大きくなると表面波の位相速度が小さくなっていくことがわかる。これは電食試験により鉄筋が腐食した結果、鉄筋とコンクリート界面の剥離、鉄筋周辺のひび割れ、コンクリート表面に顕在化した腐食ひび割れにより、表面波の位相速



(a) 供試体 A (電食期間 3 日)



(b) 供試体 B (電食期間 6 日)



(c) 供試体 C (電食期間 14 日)



(d) 供試体 D (電食期間 18 日)

写真-4 鉄筋の腐食状況

表-3 鉄筋断面減少率

供試体名	測線 1	測線 2	測線 3	測線 4
健全供試体 (電食期間 0 日)	0.00	0.00	0.00	0.00
供試体 A (電食期間 3 日)	0.16	0.28	0.24	0.31
供試体 B (電食期間 6 日)	0.75	0.79	1.42	1.14
供試体 C (電食期間 14 日)	3.58	4.28	3.77	0.71
供試体 D (電食期間 18 日)	4.21	4.72	5.82	3.81

[単位: %]

度が徐々に小さくなっていったと考察できる。ここで、表面波の位相速度と鉄筋断面減少率との相関関係に着目すると、鋼球直径 5mm の相関が最も良く、鋼球直径が大きくなるにしたがって相関が悪くなっていくことが確認できる。これは、供試体を伝搬する表面波の波長の違いによるものと考えられる。著者らの既往の研究³⁾では、鋼球打撃でコンクリート中に入力された弾性波のうち、

表層部分を伝搬する表面波の周期 T_R は、鋼球打撃時に鋼球とコンクリートが接触している時間（接触時間⁴⁾ T_c になることを明らかにしている。これらの関係式を以下に示す。

$$T_c = 0.0043D \quad (4)$$

$$T_R = T_c \quad (5)$$

ここで、 D ：鋼球直径である。一般的に、表面波が伝搬する表面からの深さ D_R は、表面波の波長 λ_R によって決定⁵⁾され、以下の式から求めることができる。

$$f_R = \frac{1}{T_R} \quad (6)$$

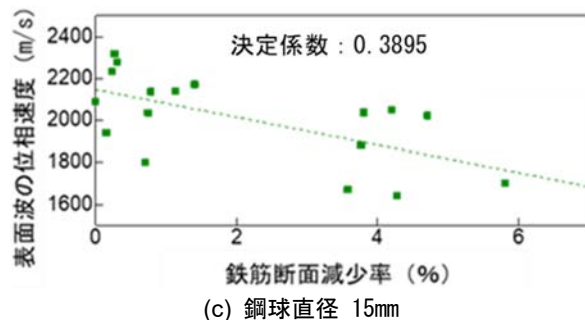
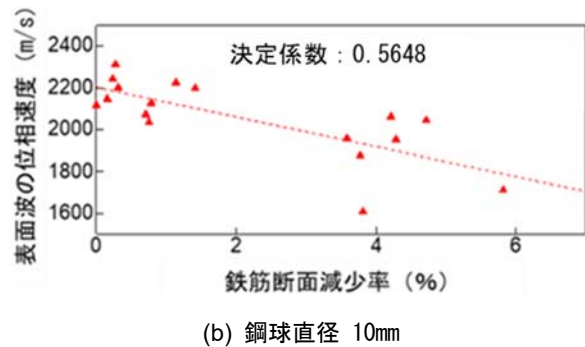
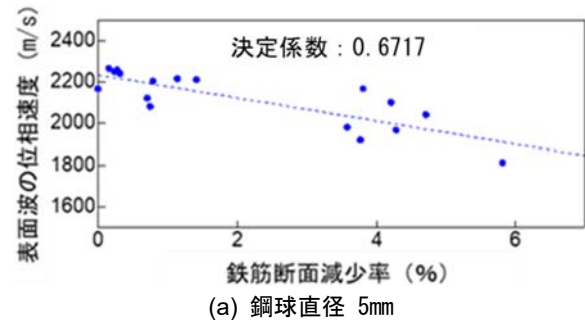
$$\lambda_R = \frac{C_R}{f_R} \approx D_R \quad (7)$$

ここで、 f_R ：表面波の周波数である。健全供試体で測定した表面波の位相速度は、鋼球直径 5mm：2166m/s、鋼球直径 10mm：2144m/s、鋼球直径 15mm：2078m/s であった。これらより、式(4)～(7)を用いて、表面波が伝搬する深さを推定すると、表－4 のとおりとなった。表に示す「表面波が伝搬する深さ D_R 」は、塩谷らが既往研究⁶⁾で示した「表面波が影響を受ける深さ（探査深度）」と一致した。しかしながら、表面波の周期の算出方法^{3),6)}、表面波が伝搬する深さとその表面波が影響を受ける深さ（探査深度）の関係^{5),6)}については、研究者により主張が異なり、また経験的に決定している側面もあるため、理論的な解を見出すに至っていないのが現状である。そのため、今後は、弾性波動解析を援用して、この課題の解決方法を見出す予定である。

表－4 より、鋼球直径 5mm のときに表面波が伝搬する深さは約 50mm となる。一方、供試体のかぶりは 50mm であることから、鋼球直径 5mm を用いた場合、表面波はかぶり部分を主に伝搬していると推測できる。したがって、鉄筋腐食に伴って生じる鉄筋界面の剥離やひび割れの影響により、表面波の位相速度が小さくなると考察できる。一方で、鋼球直径が大きくなると、表面波が伝搬する深さがかぶり以上の値になり、ひび割れなどが生じていない健全なコンクリート部分も表面波が伝搬することになる。さらに、鋼球直径が大きくなると入力された弾性波の波長が長くなることから、底面からの反射波である縦波や底面側で同様に伝搬する表面波の振幅が大きくなると考えられる。これら複数の影響因子によって、表面波の位相速度と鉄筋断面減少率との相関が小さくなったと考えられる。加えて、鋼球直径が大きくなると、打撃により弾性波が伝搬すると同時に、供試体の曲げ振動も発生するため、算出される表面波の位相速度に影響を与える因子になり得る。そのため、今後は、供試体寸法も考慮した計測を行い、入力波長と探査深度（表面波が影響を受ける深さ）との関係性を、実験を通して把握

表－4 鋼球直径と表面波が伝搬する深さとの関係

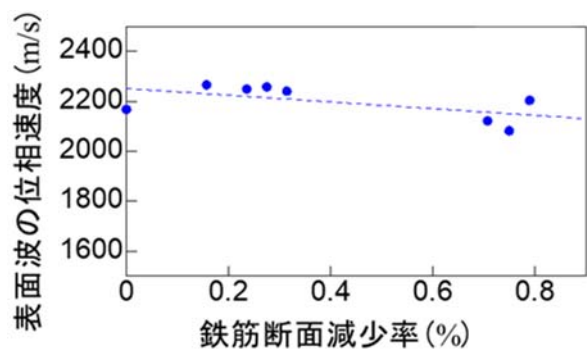
鋼球直径 D (m)	接触時間 T_c (μ s)	周波数 f_R (kHz)	深さ D_R (mm)
0.005	21.5	46.5	46.6
0.010	43.0	23.3	93.1
0.015	64.5	15.5	139.7



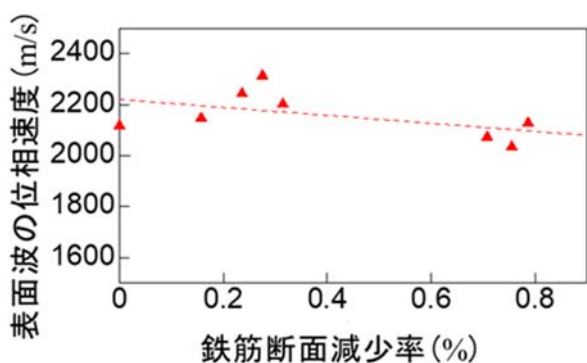
図－6 表面波の位相速度と鉄筋断面減少率との関係

する必要がある。

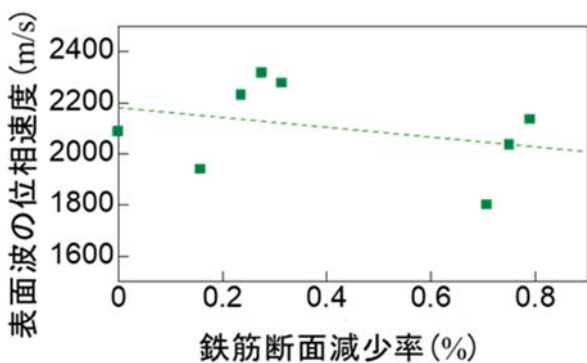
続いて、コンクリート表面に腐食ひび割れが顕著化する前の段階でも、測定される表面波の位相速度が鉄筋腐食の影響を受けているのかを確認するため、図－6 に示す結果から、腐食ひび割れが表面に目視で確認できない段階における測定結果のみ抽出した。その結果を図－7 に示す。図より、鉄筋断面減少率が大きくなるほど測定される位相速度が小さくなり、また、鋼球直径が小さくなるほど両測定値の相関が大きくなることが確認できる。これは、鉄筋腐食による鉄筋とコンクリート界面の剥離や鉄筋付近のひび割れの発生の影響を受けているためと



(a) 鋼球直径 5mm



(b) 鋼球直径 10mm



(c) 鋼球直径 15mm

図ー7 コンクリート表面の腐食ひび割れ発生前の
表面波の位相速度と鉄筋断面減少率との関係

考えられる。したがって、コンクリート表面で腐食ひび割れの発生が確認できない腐食の初期段階、すなわち進展期の初期段階（図ー1 参照）において、かぶり部分の変状を評価できる可能性があることが示唆された。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 衝撃弾性波法により得られる表面波の位相速度は、計測箇所における腐食ひび割れ発生の有無に関わらず、鉄筋断面減少率が大きくなるにしたがって小さくなる。
- (2) 鋼球打撃によりかぶりと同程度の波長の表面波を入力すると、表面波の位相速度と鉄筋断面減少率との相関が最も高くなる。
- (3) 本研究の範囲内では、表面波の波長とかぶりが同程度となる鋼球を選定すれば、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生する前の段階において、鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状を、表面波の位相速度から非破壊で評価できる可能性がある。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(C)18K04314）の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'20 [基礎編]，pp.35-42，2020
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2018
- 3) 久保元樹，内田慎哉，岩野聡史，野崎 峻：コンクリート表面に設置した加速度計で測定した応答波形から鋼球とコンクリートの接触時間を推定する方法の実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1641-1646，2018.7
- 4) Sansalone, M. and Streett, W. B.: Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.30-34, 1997
- 5) 例えば，物理探査学会：新版 物理探査適用の手引きー土木物理探査マニュアル 2008ー，pp.91-94，2008
- 6) 例えば，小西雄治，小椋紀彦，塩谷智基：表面波トモグラフィによる損傷深さの評価に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第18巻，pp.385-390，2018.