

報告 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

内田 慎哉*1・鎌田 敏郎*2・稲熊 唯史*3・長谷川 昌明*4

要旨: 本研究では、電食試験により鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリートはり供試体を用いて、コンクリート表層部における鉄筋周りのはく離や鉄筋近傍のひび割れといった変状を評価するため、(i) 超音波法、および(ii) 電磁パルス発振および弾性波受振による方法（電磁パルス法）を実施し、その適用性についての検討を行った。その結果、いずれの手法もコンクリート表層部の変状調査において適用できるものの、コンクリート表面において腐食ひび割れが確認される以前での調査手法としては、電磁パルス法がより有効であることを確認した。

キーワード: コンクリート表層部、鉄筋腐食、非破壊試験、伝播速度、電磁パルス、自然電位、分極抵抗

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材において鉄筋が腐食すると、錆により鉄筋とコンクリートとの付着状況に変化が生じ、腐食の程度によっては境界部がはく離する。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し、コンクリート表面において腐食ひび割れとして確認されることになる。腐食ひび割れの発生が著しくなると、最終的にはコンクリート片のはく落を引き起こし、部材の劣化を加速させる要因となる。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よりも早い時期に、コンクリート表層部における鉄筋周りのはく離や鉄筋近傍のひび割れといった変状を、非破壊で的確に把握することが重要となる。

そこで本研究では、電食試験により鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリートはり供試体を用いて、コンクリート表層部の変状評価を行うため、(i) 超音波法、および(ii) 電磁パルス発振および弾性波受振による方法（以降、電磁パルス法と呼ぶ）の2種類の異なる非破壊試験を実施し、その適用性について検討することを目的とした。

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240mm×高さ360mm×長さ3000mmのRCはり部材である。主鉄筋にはD22（SD345）を使用し、上面および下面からかぶり38mmで2本ずつ配置した。また、側面からのかぶりは、それぞれ39mmである。フープ筋にはR13（SR235）を用いて、200mm間隔で14本配筋した。フープ筋のかぶりは、供試体上面側および下面側で25mm、側面側で26mmである。なお、上面側に設置した2本の主筋が電食試験によって腐食しないように、フープ筋との各接合部分には絶縁テープをそれぞれ巻き付けた。コンクリートの配合を表-1に示す。供試体は、次節に示すとおり、3体作製した。

2.2 電食試験

鉄筋を早期に腐食させるため、電食試験を行った。試験概要を図-2に示す。底版に金属網を敷いた容器内に

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
62.5	45.7	162	260	842	1026	2.60

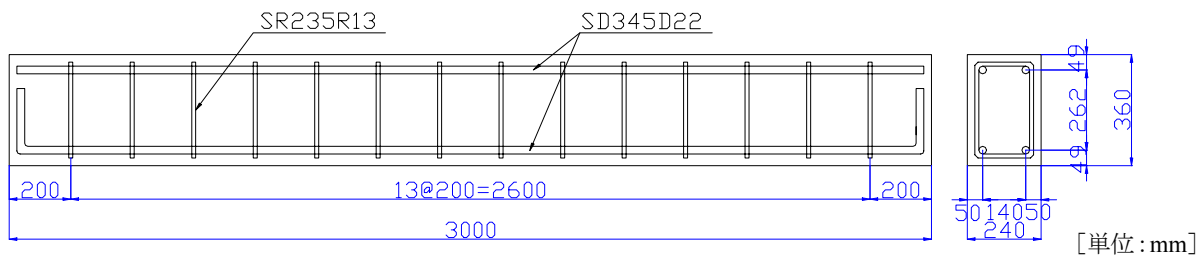


図-1 供試体概要

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)
 *2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)
 *3 ジェイアール東海コンサルタンツ (株) 開発技術部 (正会員)
 *4 東海旅客鉄道 (株) 技術開発部 (正会員)

供試体を設置し、供試体下面から上方向に 100mm の位置に 3%食塩水の水位を設定した。鉄筋への通電は、鉄筋を陽極、金属網を陰極とした回路を形成させた上で、直流定電流により行った。鉄筋近傍におけるはく離およびひび割れの発生程度にバリエーションを設けるため、積算電流量を 6.14A・day, 61.40A・day および 170.54A・day の 3 種類とした。積算電流量を 6.14A・day としたものを「供試体 A」、61.40A・day を「供試体 B」、170.54A・day に設定したものを「供試体 C」と呼ぶこととする。

2.3 非破壊試験

本研究では、目視によるひび割れ観察および自然電位による腐食可能性の評価に加えて、評価対象に応じて超音波法と電磁パルス法の異なる 2 種類の非破壊試験を電食試験前後の各供試体においてそれぞれ実施した。以下にそれらの概要を示す。

(1) 目視

鉄筋の腐食によって生じたコンクリート表面のひび割れを確認するため、電食試験後の供試体を対象に、供試体下面および側面においてひび割れの観察を行った。

(2) 自然電位法

鉄筋の腐食の可能性を把握するため、自然電位の計測を行った。計測方法は、土木学会規準 (JSCE-E601)¹⁾ に準じて実施した。対象とした鉄筋は、供試体下面に配置した L 側および R 側の主筋 2 本である (図-3 参照)。計測位置はいずれの鉄筋においても図-3 中の○印 No.2 ~26 までの計 13 点 (計測間隔は 200mm)、1 供試体あたりでは合計 26 点とした。鉄筋の腐食の可能性は、ASTM C 876²⁾ の規準に従って評価した。なお、本研究で用いた照合電極は、銀塩化銀電極 (飽和) である。そのため、電位差計で測定された電位は、電位計測時の温度を用いて、銅硫酸銅電極 (飽和) を用いた場合の電位に換算した。

(3) 超音波法

鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状を把握するため、超音波伝播速度の計測を行った。超音波計測には、デジタル方式の装置および探触子 (直径: 50mm, 周波数: 50kHz) を用いた。伝播速度の計測方法は、評価対象とした主筋およびフープ筋に応じて、2 ケース設定した。すなわち、供試体下面に設置した L 側鉄筋直上

で探触子間距離を 200mm として供試体長手方向に伝播速度を測定するケース I と、フープ筋の直上で探触子間距離を 140mm として供試体の幅方向に速度を計測するケース II である。ケース I における計測位置および測定手順としては、まず、探触子を図-3 中の No.1 および No.3 の○印にそれぞれ設置し、伝播時間を測定した。そして、探触子間距離を伝播時間で除すことにより、速度を算出した。このようにして算出された速度は、便宜上、探触子間距離の中心位置 (図中の No.2) での速度とした。続いて、各探触子を供試体長手方向にそれぞれ 100mm ずつ移動 (図中の○印 No.2 および No.4) して、伝播速度を求めた。このようにして、図中の No.26 での伝播速度が求まるまで探触子を順次走査した。したがって、ケース I における計測点数は、供試体あたり 25 点となる。一方、ケース II では、探触子を L 側および R 側鉄筋の○印 No.1 の位置にそれぞれ設置し、伝播速度を求めた。なお、探触子を配置した個所は、L 側および R 側鉄筋直上の No.1, 5, 9, 13, 15, 19, 23 および 27 の○印の 8 点である。

(4) 電磁パルス法

著者らの既往の研究³⁾を参考にすれば、電磁パルス法により、コンクリートと鉄筋の界面のはく離の有無を把握することが可能である。そこで、腐食に伴うひび割れがコンクリート表面に現れる前の段階における鉄筋周りのはく離を評価するために、電磁パルス法を適用した。

写真-1 に計測状況を示す。コンクリート表面に非接触で設置した励磁コイルにパルス状の電流を流し、コイル周辺に磁場を発生させた。この磁場内に鉄筋が存在すると、鉄筋に起電流が流れて新たな磁場が発生する。鉄筋による磁界とコイルによる磁界との電磁相互作用によって電磁力が働き、鉄筋が振動する。この鉄筋の振動

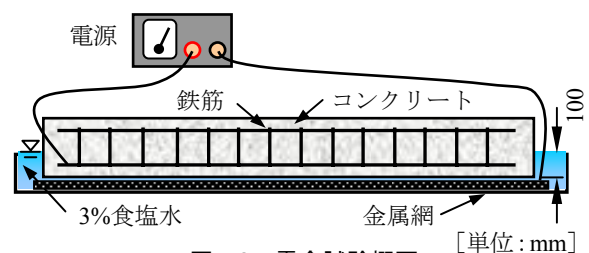


図-2 電食試験概要

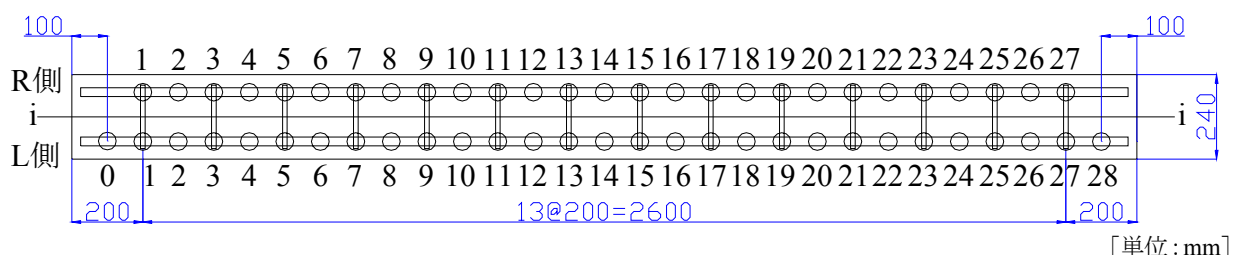


図-3 供試体下面における計測位置の概要

がコンクリートへ伝達され、弾性波として伝播する。そのため、伝播した弾性波には、鉄筋の振動特性が反映される。鉄筋周りにはく離が生じている場合、鉄筋の振動がコンクリートへと伝播する際、はく離によって波の伝播が阻害される。この情報をコンクリート表面に設置したセンサ（写真-1 参照）で捉えることにより、はく離の有無を把握することができる。なお、本研究で用いた評価パラメータは、既往の研究成果³⁾に基づいて、センサにて捉えた電圧波形の最大振幅値とした。

計測対象とした鉄筋は、いずれの供試体においても、図-3 に示す供試体下面に設置した L 側の鉄筋である。励磁コイルは、鉄筋の長手方向と磁束線とを平行にするため、供試体下面の L 側鉄筋上において、コンクリート表面から 20mm の位置に非接触で設置した（写真-1 参照）。コイルの設置箇所は、図-3 に示す○印 No.2, 8, 14, 20 および 26 である。一方、センサは、センサの中心（写真-1 の a）とコイルの中心（写真-1 の b）が一致するように、供試体側面に貼り付けた。以上のようにして、供試体あたり 5 点での測定を行った。なお、使用したセンサは、60kHz 共振型 AE センサである。

3. 実験結果および考察

3.1 電食試験前における非破壊試験の結果

電食試験前における自然電位の計測は、いずれの供試体においても、図-3 に示す L 側鉄筋の No.0, No.14 および No.28 の 3 点においてそれぞれ計測した。いずれの場合においても計測された電位の値は大きく、ASTM の規準を参考にすれば「90%以上の確率で腐食なし」であった。

ケース I およびケース II における超音波伝播速度を図-4 に示す。ケース I では、いずれの供試体においても、4000 から 4400m/s 程度となった。これに対して、ケース II では、おおよそ 4400 から 4700m/s の値となり、ケース I と比較して伝播速度が大きくなっていることが確認できる。この差は探触子間距離が異なることにより、ケー

ス II の方が伝播距離が短くなっていることに起因していると考えられる。ケース I および II において測定された伝播速度に対する鉄筋の影響を確認するため、鉄筋の影響を受けにくいと考えられる各供試体の i-i 線上（図-3 参照）において、任意の複数の箇所での伝播速度の計測を行った。なお、ここでの探触子間距離は、ケース I および II での探触子間距離と同じにするため、200mm と

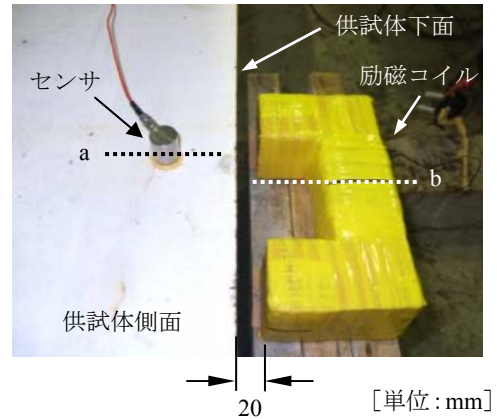


写真-1 電磁パルス法による計測状況

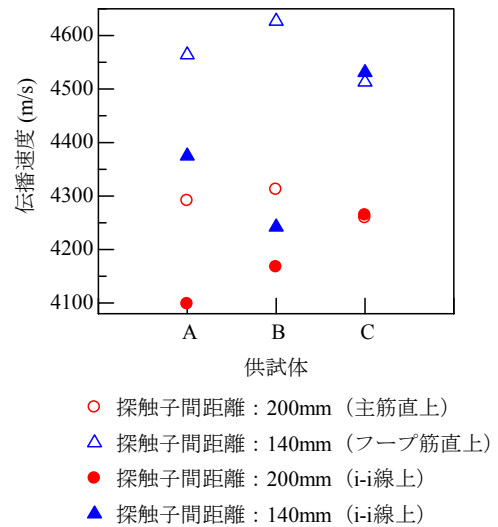


図-5 探触子間距離および計測位置ごとの伝播速度

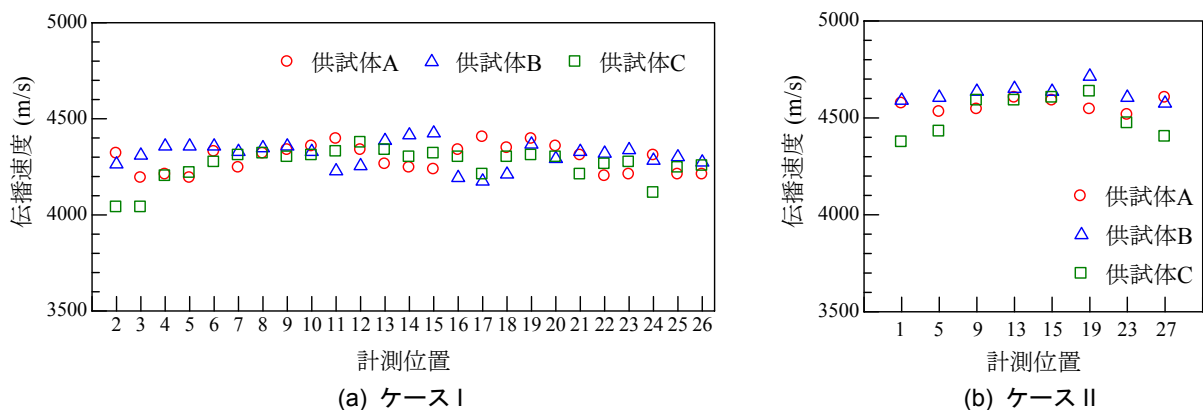


図-4 電食試験前における伝播速度

140mmの2パターンとした。得られた伝播速度は、探触子間距離ごとにそれぞれ平均した。各供試体で得られた探触子間距離200および140mmでの伝播速度(平均値)を図-5に示す。なお、ここでは、ケースIおよびIIにおける供試体A、BおよびCそれぞれについて計測された鉄筋直上での伝播速度の算術平均と併せて示した。いずれの探触子間距離においても、供試体AおよびBについては、鉄筋直上の伝播速度は*i*-i線上でのそれと比較して大きい値となった。一般的に、波の伝播経路内に鉄筋が存在し、かつ波の伝播方向と鉄筋の長手方向とが一致する場合、鉄筋の影響によってコンクリート単体の伝播速度よりも大きくなる⁴⁾。したがって、本実験においても、鉄筋の影響によって伝播速度が大きくなったと考察することができる。しかしながら、供試体Cについては、いずれの探触子間距離の場合においても上記のような傾向を確認することができなかった。

なお、電磁パルス法により測定された受振波最大振幅値は、電食試験前後において比較するため、結果は3.2(4)でまとめて示すこととする。

3.2 電食試験後における非破壊試験の結果

(1) ひび割れの観察

電食試験後における供試体下面のひび割れ発生状況を図-6に示す。供試体Aでは、供試体両端部においてフープ筋に沿って幅の小さいひび割れが若干発生していた。これに対して供試体BおよびCでは、主筋の長手方向に沿って腐食ひび割れが発生していることが確認できる。ひび割れの分布状況やひび割れの幅については、供試体BおよびCともに、ほぼ同じであった。これは、腐食ひび割れの発生により、鉄筋周りの腐食生成物が食塩水によって流されてしまい、錆びによる膨張圧に起因

するひび割れがもはやこれ以上は生じえない状況になったためと考えられる。なお、供試体側面には、供試体BおよびCにおいてのみ、供試体下面側に設置した2本の主筋に沿ってひび割れが発生していた。

(2) 自然電位

図-7に各供試体で計測された自然電位を示す。供試体Aにおける自然電位を、ASTMの規準に従って評価し、「90%以上の確率で腐食あり」と「不確定」とが混在する結果になった。これに対して、供試体BおよびCでは、いずれの計測点においても、「90%以上の確率で腐食あり」と判定された。

(3) 伝播速度

ケースIおよびIIで得られた伝播速度の結果を図-8に示す。ケースIにおける伝播速度は、3800から4500m/sの間に分布している。一方、ケースIIの伝播速度では、3600から4600m/sの範囲にあることが確認できる。電食試験前の伝播速度(図-4参照)と比較すると、いずれのケースにおいても、おおむね速度の低下が認められ、

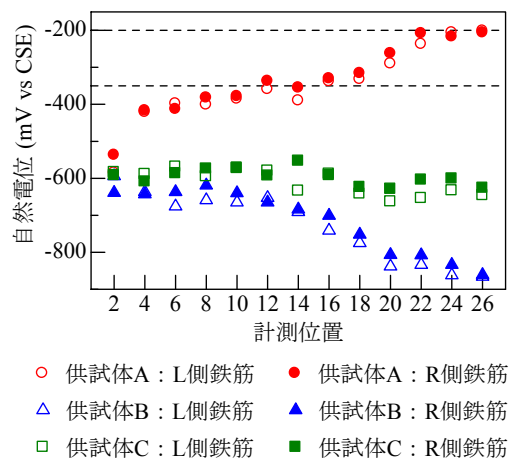


図-7 自然電位

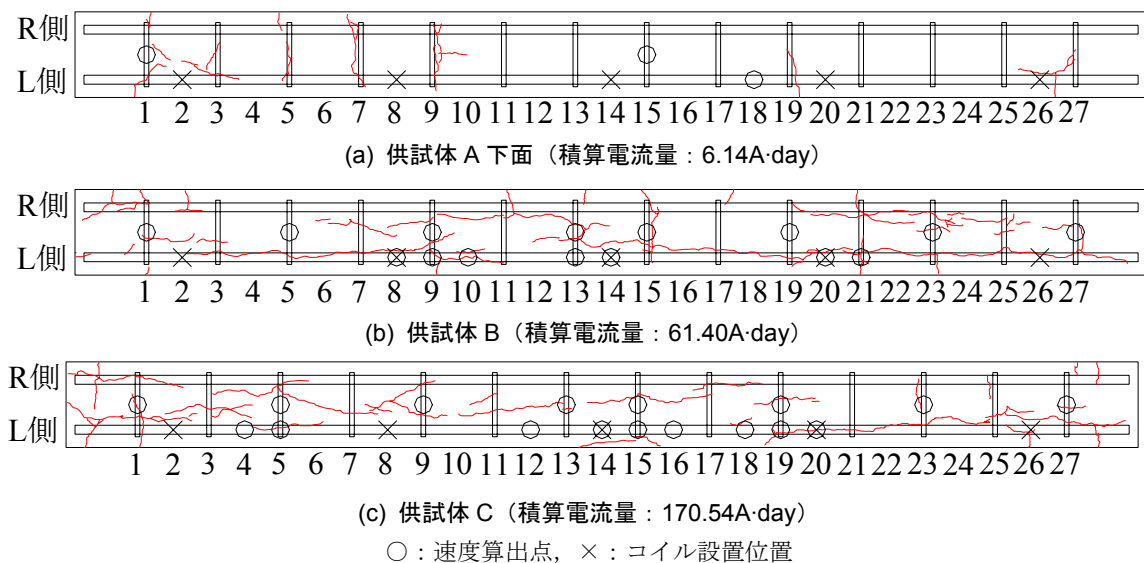


図-6 ひび割れ発生状況と超音波法および電磁パルス法での計測位置

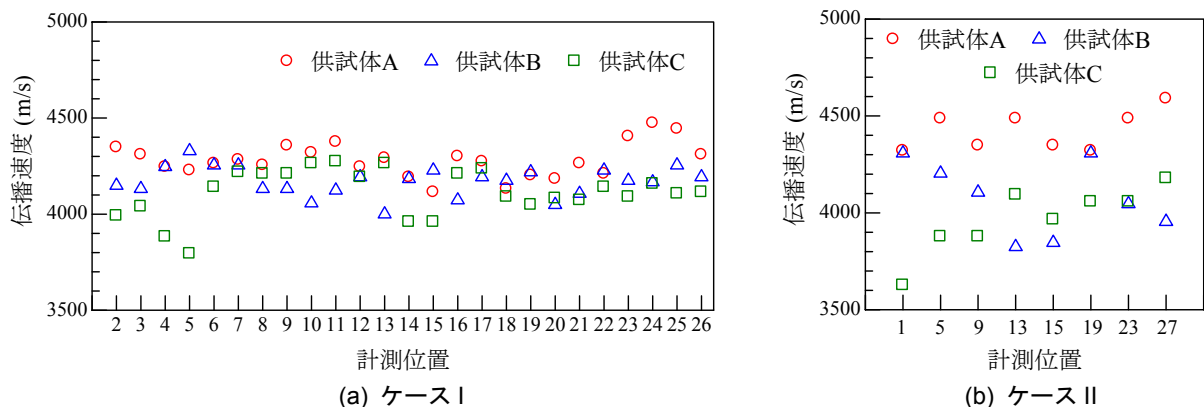


図-8 電食試験後における伝播速度

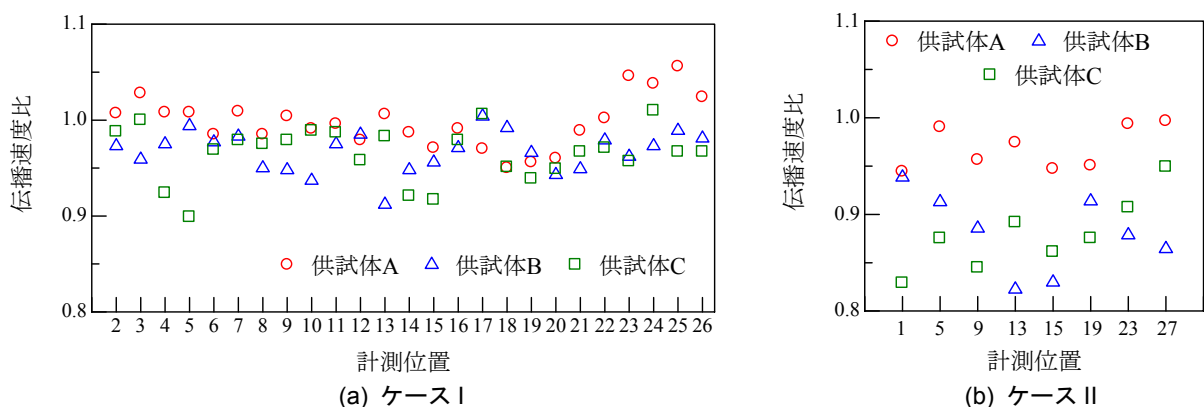


図-9 伝播速度比

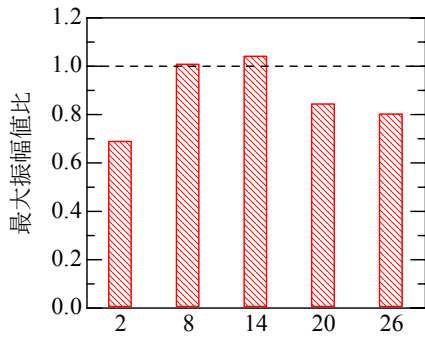
また、速度の値の分布幅が広がっていることがわかる。電食前後における伝播速度の低下程度を供試体ごとに比較するため、電食前後での伝播速度の比を伝播速度比として定義した。算出した結果を図-9 に示す。図によれば、供試体 A では、伝播速度比が 1.0 程度あるいはそれよりも大きくなっている。特に、主筋直上で計測した場合（ケース I）、速度比が 1.0 以上となる計測位置が多く存在していることがわかる。このような伝播速度の増加は、電食試験で使用した食塩水がコンクリート中へと浸透することによりコンクリートの含水率が増加したことなどが主な原因と考えられるが、その詳細については不明である。したがって、今後はこの現象について、更に検討を実施する予定である。

続いて、伝播速度が変化する要因について考察するため、便宜上、伝播速度比が 5%以上小さくなった（速度比 0.95 以下）位置をひび割れ発生状況と併せて図-6 に示す。なお、この図に示す○印は、速度算出点であり、探触子設置位置ではない。この図によれば、速度を算出する際に探触子を設置した箇所や、弾性波の伝播経路上において、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生していることが確認できる。したがって、本研究の範囲内では、腐食ひび割れの影響により、伝播速度が低下したと推察される。また、このような速度低下の割合について

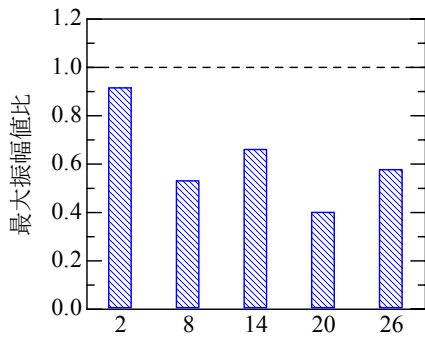
考察すると、フープ筋直上での速度低下率は、主筋直上でのそれよりも大きい（図-9 参照）。図-6 を参考にすれば、腐食ひび割れは、主筋軸方向に発生している。このようなひび割れは、フープ筋に対して直角方向に生じていることになる。したがって、フープ筋直上での計測の場合、フープ筋に対して軸方向のひび割れが多く見られることから、腐食ひび割れによって波の伝播経路が遮られ、速度が著しく低下したものと考えられる。

(4) 電磁パルス法による受振波最大振幅値

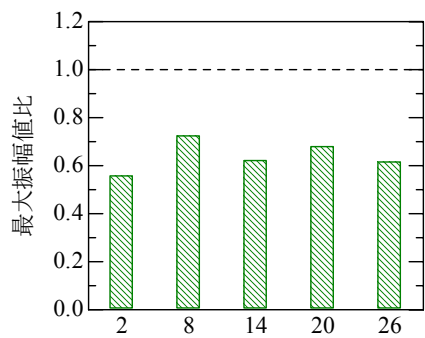
図-10 に、各供試体における最大振幅値比をそれぞれ示す。ここでは、電食試験前に計測された電圧波形の最大振幅値を 1 とし、それに対する電食試験後の振幅の最大値の比率を最大振幅値比として定義した。図-10 (a) に示す供試体 A では、電食前後において振幅がほとんど変化していない計測位置（No.8 および No.14）があるものの、それ以外の部分（No.2, No.20 および No.26）では振幅値が低下していることがわかる。コンクリート表面にひび割れが生じていない場合、振幅の低下は、鉄筋とコンクリートとの界面のはく離によるものと考えられる。これより、計測位置 No.2, No.20 および No.26 では、主筋近傍にひび割れやはく離が生じている可能性が考えられる。そこで、この計測位置におけるひび割れの影響を把握するため、ひび割れ発生状況と計測位置と



(a) 供試体 A



(b) 供試体 B



(c) 供試体 C

図-10 最大振幅値比

の対応を図-6 で確認することとした。図中に示す×印はコイルの設置位置を示している。図-6 を参照すれば、振幅が低下した No.2 および No.20 の位置では、主筋長手方向に沿った腐食ひび割れは発生していない。したがって、少なくともこの計測位置 (No.2 および No.20) における振幅低下は、鉄筋界面のはく離および鉄筋近傍におけるひび割れによるものである可能性が高いことが明らかとなった。なお、計測位置 No.26 においては、主筋直上のコンクリート表面にひび割れが発生していることから、鉄筋界面のはく離や鉄筋近傍のひび割れに加えて、コンクリート表面で確認された腐食ひび割れの影響によって、振幅が低下したものと推察できる。

これに対して供試体 B では、いずれの計測位置におい

ても、振幅値比が 1.0 を下回っており、電食後において振幅値が小さくなった (図-10 (b) 参照)。また、供試体 A と対比すると、振幅値比の低下程度は、供試体 B の方が大きいことも確認できる。一方、図-10 (c) に示す供試体 C においても振幅値比の低下を把握できるものの、低下程度は供試体 B とほぼ同じであった。図-6 によれば、供試体 B および C のいずれの計測位置においても、コンクリート表面に主筋に沿ってひび割れが発生している。したがって、これらの供試体における振幅値比の低下は、主にはく離および腐食ひび割れによるものであると考えられる。

4 まとめ

鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状調査において、(i) 超音波法、および(ii) 電磁パルス発振および弾性波受振に基づく手法を適用した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 超音波法によって得られた伝播速度は、コンクリート表面に発生した腐食ひび割れの影響によって小さくなる場合がほとんどであった。
- 2) 電磁パルス発振および弾性波受振に基づく手法によって測定された受振波最大振幅値を用いることにより、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生する以前におけるコンクリートと鉄筋との界面のはく離および鉄筋近傍のひび割れを把握できる可能性があることを明らかにした。

謝辞

非破壊試験の実施およびデータ整理にあたり、大阪大学大学院 社会基盤設計学領域の学生諸君にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会規準 JSCE-E601-2007：コンクリート構造物における自然電位測定方法，2007
- 2) ASTM C876: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual book of ASTM Standards, 1999
- 3) 宗像晃太郎，鎌田敏郎，内田慎哉，森 和也：電磁パルスにより加振したコンクリート内部鉄筋の振動特性に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.2, pp.781-786, 2007
- 4) 尼崎省二，山本尚志：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鉄筋の影響および表面法による弾性波速度の測定，コンクリート工学論文集，Vol.18, No.2, pp.95-102, 2007