

# 論文 非破壊試験による鉄筋-コンクリート界面の評価手法

前 裕史\*1・鎌田 敏郎\*2・峯澤 博行\*3・内田 慎哉\*3

**要旨:** 本研究では、電食により鉄筋とコンクリートとの界面の付着状態を変化させた供試体を用い、付着状態を非破壊的に評価する手法として、I: 超音波法、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）、および III: 衝撃振動試験についてその適用性を評価した。その結果、I: 超音波法および II: 電磁パルス法によって得られる評価指標は、コンクリートと鉄筋との界面の付着状態と、概ね良い相関を示すことが明らかとなった。また、I および II の手法は、界面の付着状態に応じて、評価指標の感度が異なることもわかった。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 腐食, 付着特性, 非破壊試験, 超音波法, 電磁パルス法, 衝撃振動試験

## 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態に変化が生じ、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すると、腐食ひび割れがコンクリート表面に発生する。この鉄筋の腐食過程において、鉄筋とコンクリートとの界面の付着状態は、著しく変化する。しかも、このような界面の状態変化は、部材の耐荷性能や耐久性を低下させる要因となる。

このような背景に対して、著者ら<sup>1)</sup>は、電食試験によって界面の状態が異なる鉄筋コンクリートはり供試体を対象に各種非破壊試験を行い、試験結果を FEM 解析のインプットデータとして用いて、RC はりの力学性能を評価する手法についての検討を行っている。ここでは、解析結果を検証するため、曲げ載荷試験も併せて実施している。載荷試験の結果、鉄筋の腐食に伴う腐食ひび割れに代表されるコンクリートと鉄筋との界面の状態の変化が、はりの破壊性状に大きく影響を及ぼすことを確認した。一方、非破壊試験結果に基づく解析においては、非破壊の試験結果と実際の界面の状態との対応関係に関する検討が不十分であったため、破壊モードなどを再現することが困難であった。したがって、載荷および解析、いずれの場合においても、コンクリートと鉄筋との界面の状態を把握することが望ましいと考えられる。

そこで本研究では、前述の課題を明らかにするため、電食により鉄筋とコンクリートとの界面の付着状態を変化させた供試体を用いて、I: 引抜き試験によって得られる付着力と各種非破壊試験の結果との関係、および II: 付着状態を評価する手法としての各種非破壊試験法の

適用範囲について評価することを試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体の概要を図-1 に示す。コンクリート部分の寸法は幅 113mm×高さ 113mm×長さ 326mm とした。鉄筋は、直径 13mm の丸鋼 (SS400) を使用した。鉄筋は、引抜き試験を行うことを考慮して、載荷治具設置部分を 400mm、変位測定部分を 5mm に設定し、コンクリート長手方向両端部から前述の所定の長さをそれぞれ突出させた。鉄筋のかぶり厚は 50mm とした。なお、載荷板 (写真-1 参照) からの応力の均等化を図るために、載荷治具設置側に鉄筋径の 2 倍の長さである 26mm の非付着区間を設けた。コンクリートの配合を表-1 に示す。供試体は、次節に示す通り 8 体作製した。

### 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。電食試験の概要を図-2 に示す。供試体を 5%食塩水に浸漬し、定電流を通電した。なお、変位測定部の鉄筋 (突出長さ 5mm) が錆びないように、防食塗装を行った。鉄筋とコンクリートとの界面の状態にバリエーションを設けるため、積算電流量の異なる 8 体の供試体をそれぞれ作製した。すなわち、まず、コンクリート表面に腐食ひ

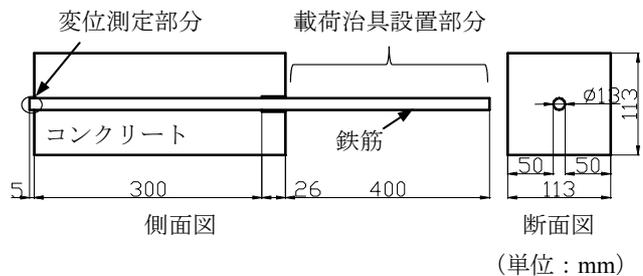


図-1 供試体概要

\*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (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 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

び割れの発生が確認できるまで鉄筋に電流を流した供試体を作製した。この時点における積算電流量は22.8A・hrである。この値を基準に、これよりも積算電流量が小さい供試体を5体、積算電流量が大きい供試体を2体作製した。表-2に各供試体における積算電流量を示す。なお、この表における積算電流量0A・hrは健全供試体に対するものである。

### 2.3 引抜き試験

電食による鉄筋とコンクリートとの界面の付着状態を確認するため、引抜き試験を行った。試験概要を写真-1に示す。試験方法は、土木学会規準（JSCE-G 503）に準じて行った。载荷には油圧ジャッキ（容量：100kN）を用い、载荷速度が5kN/min以下となるように一定の速度で载荷した。なお、鉄筋のすべりは、自由端側の鉄筋突出部に設置した変位計（感度：1/500mm）を用いて計測し、変位の変動を確認しながら载荷を行った。

### 2.4 各種非破壊試験

供試体中の鉄筋腐食に伴う鉄筋とコンクリートとの界面を評価するため、以下に示す各種非破壊試験を、電食試験前および電食試験後に対してそれぞれ行った。なお、電食試験後における非破壊試験は、食塩水から供試体を取り出した後、24時間経過してから実施した。

#### (1) 目視調査

鉄筋腐食により生じたひび割れの発生状況を確認するため、電食後にひび割れの観察を行った。

#### (2) 超音波法

超音波伝播速度の計測には、波形の記録が可能なAE計測装置および探触子（共振周波数140kHzのAEセンサ）を用いた。計測方法は、鉄筋直上のコンクリート表面にて探触子間距離を250mmとし、コンクリートの長手方向に伝播速度を測定した（写真-2参照）。なお、腐食ひび割れがコンクリート側面で発生していることを確認した供試体での伝播速度計測については、いずれの供試体についても腐食ひび割れが発生している面のひび割れ開口部に探触子があたらないようにして貼り付けた。

### (3) 電磁パルス発振および弾性波受振による方法

著者らの既往の研究<sup>2)</sup>を参考にすれば、電磁パルス発

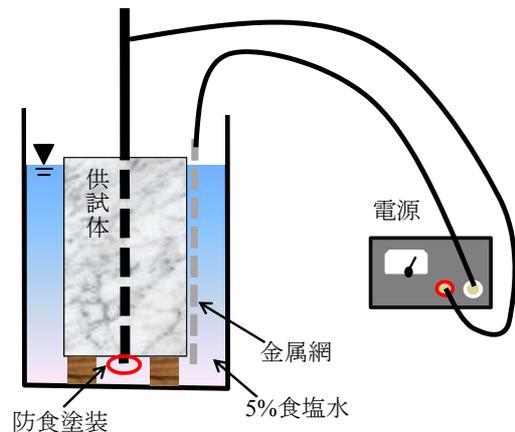


図-2 電食概要

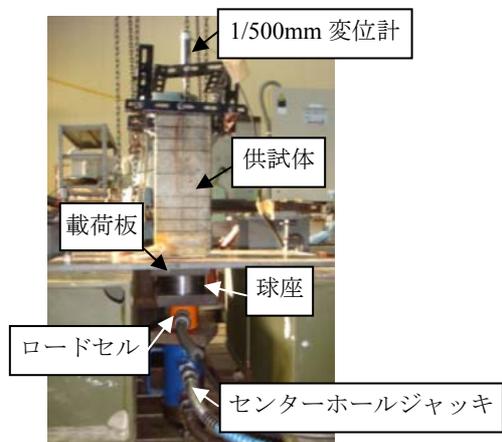


写真-1 引抜き試験状況

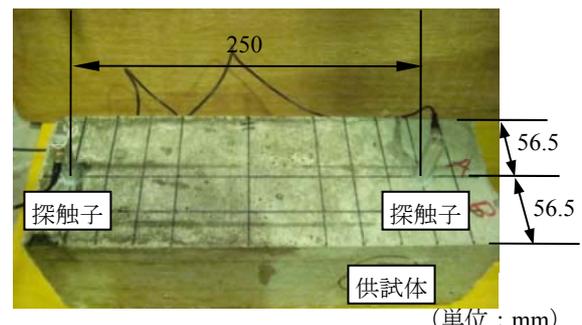


写真-2 超音波伝播速度計測状況

表-1 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	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
20	57.0	44.8	168	295	796	1007	3.13

表-2 積算電流量

供試体	健全	ひび割れ発生前				ひび割れ発生時	ひび割れ発生後	
積算電流量 (A・hr)	0	5.0	7.4	12.0	15.0	22.8	28.3	50.0

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）により、コンクリートと鉄筋界面のはく離を評価できる可能性がある。そこで、本研究では、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界面の付着状態を把握するために、電磁パルス法を適用した。

写真-3 に計測状況を示す。鉄筋を加振するための励磁コイルは、鉄筋の長手方向と磁束線とを平行にするために、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。一方、センサは、センサの中心とコイルの中心が一致するように、供試体のコンクリート表面に貼り付けた（写真-3 参照）。使用したセンサは、60kHz 共振型 AE センサである。なお、コンクリート側面に腐食ひび割れが発生した供試体に関しては、ひび割れ発生面にコイルを設置することとした。

#### (4) 衝撃振動試験

衝撃振動試験による計測状況を写真-4 に示す。支点は、コンクリートの長手方向の両端からそれぞれ 13mm の位置においてアングル材で支持することにより設けた。支間は 300mm である。衝撃の入力には直径 19mm の鋼球を使用し、支間中央において自由落下させた。受振に用いたセンサは、部材形状や支持条件から想定される周期を考慮して加速度センサとした。なお、センサの貼り付け位置は、供試体支持面（アングル材設置面）の支間中央である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 電食によるひび割れ発生状況の観察

写真-5 に電食試験後における鉄筋の自由端側のコンクリート表面（以降、コンクリート底版面と呼ぶ）およびコンクリート側面におけるひび割れ発生状況を示す。コンクリート表面に腐食ひび割れの発生を確認できた積算電流量は 22.8A・hr である。この時点では、側面に 1 本の腐食ひび割れのみが発生していた（写真-5 (a) 参照）。これに対して、電食終了時点における供試体（積算電流量：50A・hr）においては、コンクリート底版面には 3 本（写真-5 (b) 参照）、異なる 2 面の側面においてはそれぞれ 1 本のひび割れの発生を確認した。なお、表-2 に示す積算電流量を 28.3A・hr に設定した供試体では、コンクリート底版面および側面において、それぞれ 1 本の腐食ひび割れの発生を目視により確認した。

#### 3.2 引抜き試験

図-3 に積算電流量と最大付着力比との関係を示す。ここでは、健全供試体（積算電流量 0A・hr）で測定された最大荷重を 1 とし、それに対する積算電流量の異なるそれぞれの供試体での最大荷重の比率を最大付着力比として定義した。また、図に示す点線は、コンクリート

表面において腐食ひび割れを観察した時点の積算電流量を示している。この図によれば、腐食ひび割れが発生する以前においては、最大付着力は概ね増加傾向であることがわかる。これは、電食によって生成された腐食生成物がすべりに対して抵抗したため<sup>3)</sup>と考察できる。その後、腐食ひび割れが発生すると、鉄筋周りの拘束力が低下することにより、健全供試体と同程度の最大付着力

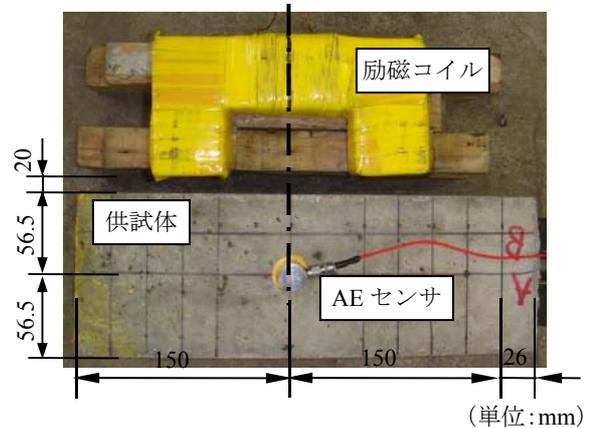


写真-3 電磁パルス法計測状況

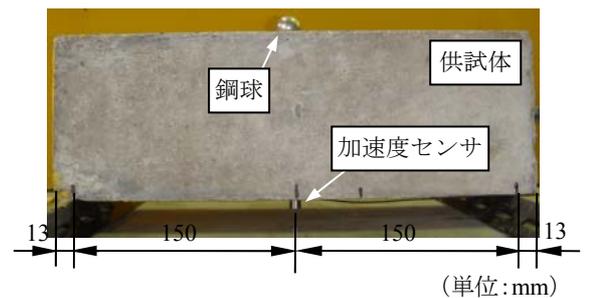


写真-4 衝撃振動試験計測状況

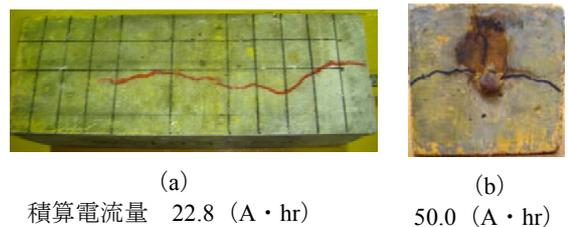


写真-5 供試体側面および底版面におけるひび割れ発生状況

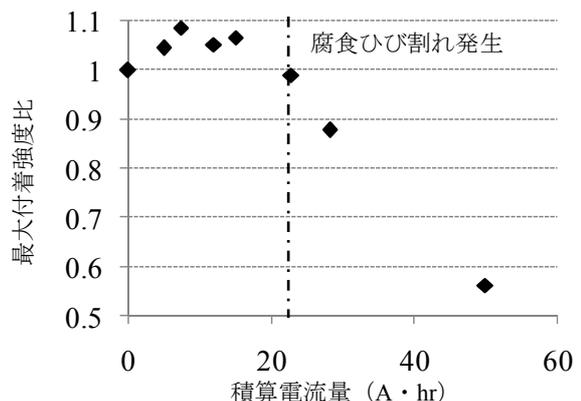


図-3 最大付着強度比と積算電流量との関係

まで低下した。さらに積算電流量が大きくなると、鉄筋の滑りに対する抵抗性が急激に小さくなり、最終的には健全供試体における最大付着力の6割程度となるまで小さくなった。

なお、本研究では電食試験後に引抜き試験を行っているため、引抜き試験開始から終了までにおおよそ20日の期間を要している。したがって、引抜き試験期間におけるコンクリートの材齢の進行に伴う付着力増加の影響の有無を確認するため、試験開始時点および終了時において、圧縮強度試験を行った。その結果、試験開始時においては29.4N/mm<sup>2</sup>、終了時では31.8N/mm<sup>2</sup>となり、引き抜き試験期間におけるコンクリートの強度はほぼ一定であり、その影響は小さいことを確認した。

### 3.3 各種非破壊試験

#### (1) 超音波法

積算電流量と電食前後における超音波伝播速度の比との関係を、最大付着力および腐食ひび割れ発生時の積算電流量と併せて図-4に示す。ここでは、健全供試体(積算電流量0A・hr)で算出された伝播速度を1とし、それに対する積算電流量の異なる各供試体での伝播速度の比率を伝播速度比として定義した。

通电後、コンクリート表面において腐食ひび割れが発生するまでのもの(積算電流量:5.0~15.0A・hrの供試体)では、伝播速度は健全供試体よりも5%程度大きくなっていることがわかる。この原因について考察するため、直径100mm×高さ200mmの供試体を用いて、電食試験開始時点から終了時点までの間、伝播速度の計測を別途行った。図-5にコンクリートの材齢に伴う速度の変動結果を示す。なお、この図における材齢とは、コンクリートを打設した日を0日としている。図より、材齢の進行に伴う速度の増加を確認することはできなかった。そのため、本研究の範囲内では、コンクリートの材齢が伝播速度に与える影響は小さいと考えられる。この他、コンクリートの含水率の影響などが考えられるが、速度増加の原因については、今後詳細に検討を行う予定である。

なお、腐食ひび割れ発生後は、伝播速度が小さくなっている。これはコンクリート表面における腐食ひび割れの影響によるものと考えられる<sup>4)</sup>。腐食ひび割れ発生以降は、センサを設置する箇所や、弾性波の伝播経路上に腐食ひび割れがあり、これにより速度が著しく低下したものと推察される。一方、最大付着力も、腐食ひび割れ発生以降において、値が小さくなっていることがわかる。したがって、腐食ひび割れの発生以降、最大付着力比が低下する領域では、超音波伝播速度が小さくなる傾向を示していることが確認できる。これより、本研究の範囲内では、最大付着力比と伝播速度比との間に相関関係がみられることが明らかとなった。

#### (2) 電磁パルス法

図-6に積算電流量と波形エネルギー比との関係を示す。この図に示す波形エネルギー比とは、励磁コイルに印加したパルスの電圧波形面積に対するセンサで受振した電圧波形の振幅の2乗総和である。図上には、最大付着力

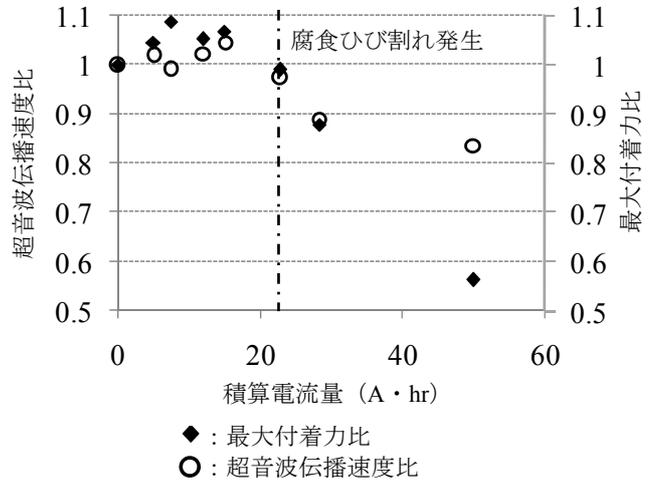


図-4 超音波伝播速度比と最大付着力比および積算電流量との関係

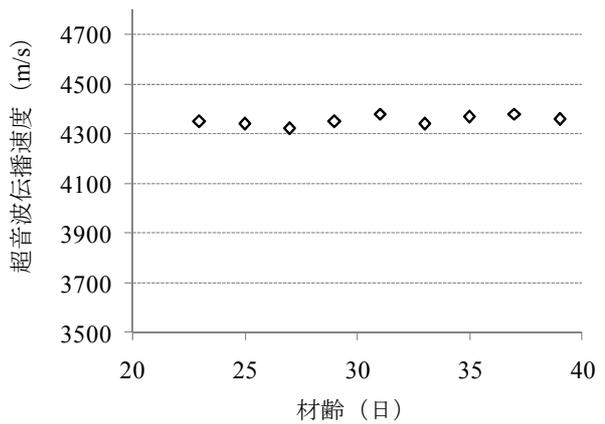


図-5 超音波伝播速度と材齢との関係

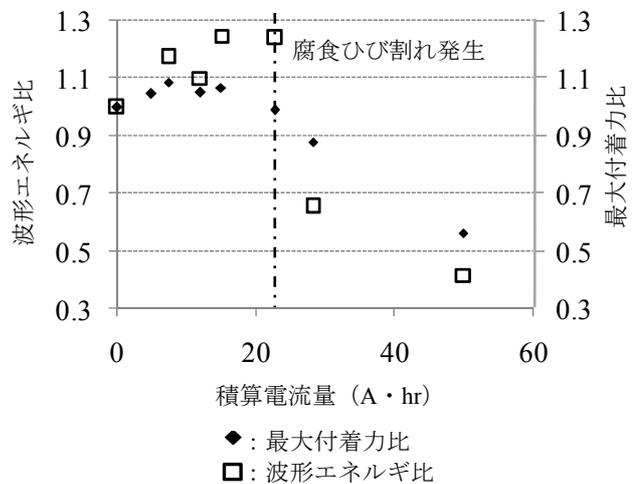


図-6 波形エネルギー比と最大付着力比および積算電流量との関係

比とひび割れ発生時の積算電流量も併せて示した。波形エネルギーは、腐食ひび割れが供試体表面に発生する以前においては、積算電流量が大きくなると波形エネルギーも大きくなった。一般的に、腐食ひび割れがコンクリート表面に確認される以前においては、コンクリートと鉄筋との界面には腐食生成物が生成されている。したがって、この時点では錆による噛み合い効果<sup>3),5)</sup>や鉄筋の腐食膨張に伴うプレストレス効果<sup>3),5)</sup>によって、鉄筋は拘束された状態になっていると考えられる。著者らの電磁パルスを用いた研究成果<sup>2)</sup>によれば、鉄筋がコンクリートによって拘束された条件下においては、センサで受振した波形エネルギーは、拘束されていない場合と比較して、大きくなることを明らかにしている。したがって、腐食ひび割れ発生前における波形エネルギーの増加は、鉄筋腐食に伴う錆の噛み合い効果や膨張圧が主な要因であると考察できる。以上のことから、電磁パルス法では、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腐食に伴う界面の状態変化を把握できる可能性があることがわかった。

これに対して、腐食ひび割れが発生した以降は、波形エネルギーが小さくなっている。これは、前述のとおり、ひび割れによって鉄筋の拘束力が解放されたためと推察できる。

図-6において、波形エネルギーと最大付着力とを比較すると、両者の値そのものは異なるものの、積算電流量に対する変化傾向は概ね同じであることが確認できた。

### (3) 衝撃振動試験

固有振動数比と最大付着力比との関係を、積算電流量と併せて図-7に示す。図上の点線は腐食ひび割れ発生時の積算電流量である。なお、固有振動数比は、健全供試体(積算電流量 0A・hr)で測定された固有振動数を1とし、それに対する積算電流量の異なる各供試体での固有振動数の比率として定義した。図より、積算電流量が大きくなると固有振動数が若干ではあるが小さくなるのがわかる。積算電流量が 0A・hr(健全供試体)と積算電流量 50A・hrのものとを比較すると、固有振動数がおよそ 6%程度低下している。しかしながら、腐食ひび割れが発生する以前に着目すると、固有振動数はほとんど変化していないことも確認できる。固有振動数が低下した積算電流量 50A・hrの供試体は、写真-5(b)に示すとおり、コンクリート表面や断面内においてひび割れの発生が著しい。したがって、ひび割れの発生によって剛性が著しく低下し、その結果、固有振動数が小さくなったと考察できる。

図-7において、固有振動数比と最大付着力比との関係に着目すると、付着力の増減に対して、固有振動数は緩やかに低下する傾向を示している。これより、固有振

動数は、鉄筋とコンクリート界面の付着状態を把握するためのパラメータとしては、十分な感度を有していないものと考えられる。

### 4. 非破壊試験の適用範囲に関する提言

前章までの検討結果に基づき、本研究では、コンクリートと鉄筋との付着状態を評価する手法としての各種非破壊試験法の適用範囲について提言する。ここでは、塩害劣化の進行過程における「潜伏期」、「進展期」、「加速期」および「劣化期」と併せて、非破壊検査が適用できる範囲を図-8に示す。なお、本研究では、「鋼材の腐食開始」を電食開始時点とし、「コンクリート表面に腐食ひび割れ発生」を電食試験によって腐食ひび割れが発生した時点(積算電流量: 22.8A・hr)とした。また、電食試験終了時については、便宜上、「劣化期」と定義することとした。

超音波法によって算出した伝播速度は、図-4から明らかとなっており、コンクリート表面で確認された腐食ひび割れ発生後において著しく低下している。したがって、超音波法の主な適用範囲としては、進展期の後半以降であるとした。

続いて、電磁パルス法によって得られた波形エネルギーは、腐食ひび割れの発生に関わらず、積算電流量の増加に対して変動している(図-6参照)。しかも、電磁パルス法は、伝播速度では把握することが難しいと考えられる腐食ひび割れ発生前においても十分な感度を有していることが明らかである(図-6参照)。そこで、電磁パルス法のこのような特徴を考慮して、適用範囲を進展期から加速期前半とした。

一方、衝撃振動試験によって測定された固有振動数は、ひび割れ発生以降の電食終了時においてのみ、小さくなっている(図-7参照)。これより、衝撃振動試験の適用範囲を、加速期の後半以降とした。

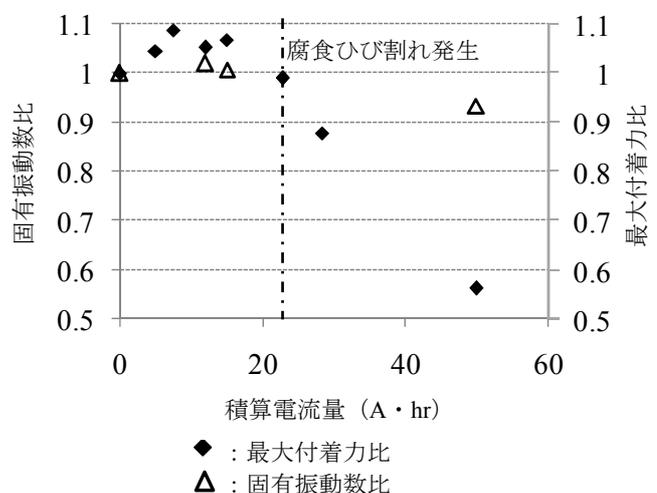


図-7 固有振動数比と最大付着力比および積算電流量との関係

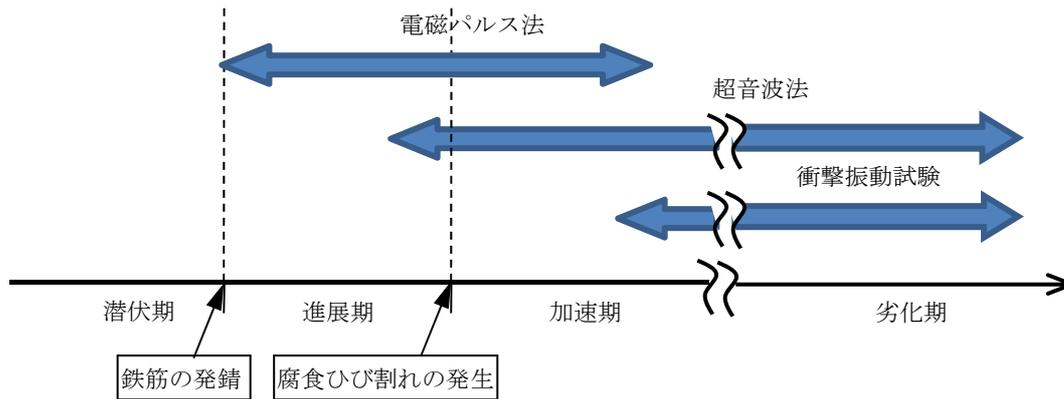


図-8 鉄筋とコンクリートとの界面評価における各非破壊試験の適用範囲

本研究では、一つの試みとして、電食試験によって付着状態を変化させた供試体を用いて、各種非破壊試験法の適用範囲に関する提言を行った。しかしながら、腐食に伴うコンクリートと鉄筋との界面の実際の状態と、各種非破壊試験で用いた評価パラメータとの関係を把握するまでには至っていないのが現状である。今後は、非破壊試験で用いた評価パラメータが把握できる鉄筋界面における実際の物理現象を確認した上で、鉄筋界面の評価手法について更に検討を行う予定である。

## 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) コンクリートと鉄筋との界面状態の変化を表す付着力の変動と、超音波伝播速度および電磁パルス法によって得られた波形エネルギーの変化とは、概ね良い相関があることが明らかになった。
- 2) 超音波伝播速度は、腐食ひび割れの発生と進展に起因してその変化が明確になることを確認した。これより、超音波法は、コンクリートと鉄筋との界面の付着状態が変化する後期において適用可能であると考えられる。
- 3) 電磁パルス法によって得られた波形エネルギーは、伝播速度では感度の低下する腐食ひび割れ発生前において十分な感度を有していることから、付着はく離に至る以前の付着性状の変化の評価に適用可能と考えられる。
- 4) 衝撃振動試験によって測定された固有振動数は、腐食ひび割れを確認した以降のコンクリートと鉄筋との界面の付着状態が著しく低下した領域において感度を有するものの、他の2つの手法と比較して、

その適用範囲は限定される。

## 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 (B) 18360207）を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 峯澤博行, 鎌田敏郎, 宮里心一, 黒田一郎: 鉄筋腐食の生じた RC はりの力学性能評価における非破壊試験の活用, 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, Vol.7, pp.425-432, 2007
- 2) 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
- 3) 武若耕司, 松本進: コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.6, pp.177-180, 1984
- 4) 峯澤博行, 鎌田敏郎, 宮里心一, 黒田一郎, 内田慎哉: RC 部材における電食前後での部材表層部の超音波伝播速度の変化, 日本非破壊検査協会平成 19 年春季大会講演概要集, pp.57-60, 2007
- 5) 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也: 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.139-144, 1991