

論文 鉄筋断面内腐食分布と各種非破壊試験手法の関連に関する基礎研究

山上 晶子*1・松本 浩嗣*2・二羽 淳一郎*3

要旨: 電食試験を行って強制的に腐食させた試験体に対して、3D スキャンを用いて断面形状を測定することで鉄筋の長手方向および断面の円周方向の腐食の分布を検討し、鉄筋断面の円周方向における腐食の分布を考慮して非破壊試験の結果と腐食量の関係について検討した。その結果、分極抵抗および超音波伝播時間に関しては、腐食の分布が非破壊試験結果に与える影響は小さいこと、断面欠損率と自然電位の関係では、自然電位と測定面に最も近い鉄筋断面部位の断面欠損率に直接的な対応は見られないこと、電磁パルス法においては鉄筋加振により発生する弾性波の減衰はひび割れに大きく影響を受けることを明らかにした。

キーワード: 非破壊試験, 鉄筋腐食, 電食試験, 3D スキャン, 腐食の分布

1. はじめに

現在、多くの鉄筋コンクリート構造物(以下、RC 構造物)の供用期間が 50 年を経過しており、環境作用による経年劣化が懸念されている。鉄筋腐食は RC 構造物の劣化の代表例であり、断面欠損による強度の減少やコンクリートとの付着力の低下が懸念されるため構造物の維持管理が重要視されている。一般的な維持管理の流れでは、定期的な点検の診断結果から対策や新たな維持管理計画の策定が行われるため、点検は維持管理において大きな役割を担う。また非破壊試験は構造物を破壊せずに診断でき、点検において有効な方法と考えられるため、近年非破壊試験の研究が精力的に行われている。

しかし、実際には腐食した鉄筋は同一断面内においても腐食分布は偏ると考えられるが、例えば鎌田ら¹⁾の研究には腐食の程度は質量減少率を用いて評価されているため、鉄筋の断面内の腐食分布が考慮されていない。腐食の偏りがある場合に非破壊試験結果が鉄筋の全体の腐食量あるいは局所的な腐食量のどちらの影響を受けるのか定かでない、局所的に大きい劣化を把握できない危険性や全体の腐食量の過大評価や過小評価が懸念される。

3D スキャンは、レーザーにより物体の形状を三次元的かつ定量的に把握できるという特徴がある²⁾。そこで本研究では各種の非破壊試験を行い、3D スキャンを用いて鉄筋の断面を詳細に分析し腐食の分布を明らかにした上で、その分布が非破壊試験結果に及ぼす影響について検

討した。なお、本研究で行った非破壊試験は、自然電位法(腐食環境の判別)、分極抵抗法(腐食速度の測定)、電磁パルス法(腐食量の相対的な測定)、超音波法(内部腐食ひび割れの同定)、ならびにひび割れ幅の測定である。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に、本研究で用いたコンクリートの配合を示す。試験体は図-1 に示すように幅 100mm、高さ 100mm、長さ 300mm の角柱および幅 200mm、高さ 200mm、長さ 300mm の角柱であり、それぞれの試験体の断面中央に直径 16mm の異形鉄筋を配置した。また、打込みから 24 時間後に脱型を行い、材齢 7 日目まで湿潤養生を行った。

2.2 腐食促進方法

鉄筋を腐食させるため、打込み後 7 日目以降に図-2 に示すように電食試験を実施した。電食試験では 1.3A の電流を目標断面欠損率 2.5%、5%、10% に対してそれぞれ 11.5h、23.1h、47.4h 通電した。通電時間は予備実験から決定している。また、電解質溶液として 3% の塩化ナトリウム水溶液を使用し、試験体底面から 2cm の深さまで浸漬させることで鉄筋全体に腐食を強制的に導入した。

2.3 実験ケース

表-2 に実験ケースを示す。実験パラメータは、軸方

表-1 本研究で用いたコンクリートの配合

G_{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Unit wight (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE
20	60	45	173	291	808	1005	2.18

G_{max} :粗骨材最大寸法, W/C:水セメント比, s/a:細骨材率

W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, AE:AE 減水剤

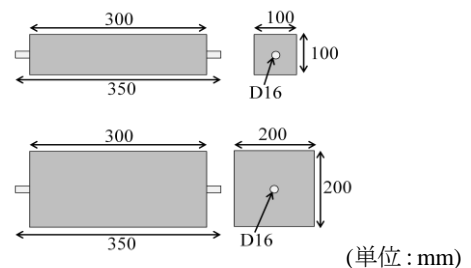


図-1 供試体概要図

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博(工) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-2 実験ケース

試験体名	断面の1辺の長さ (mm)	実測の断面欠損率 (%)	目標断面欠損率 (%)
100-C0	100	0	0
100-C3.7	100	3.7	2.5
100-C7.6	100	7.6	5.0
100-C18.7	100	18.7	10.0
200-C0	200	0	0
200-C3.8	200	3.8	2.5
200-C4.2	200	4.2	5.0
200-C9.0	200	9.0	10.0

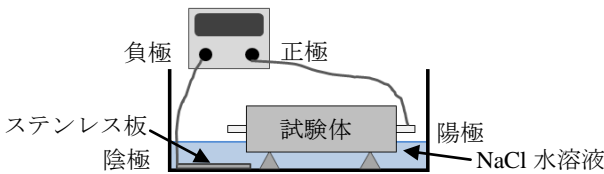


図-2 電食試験概要図

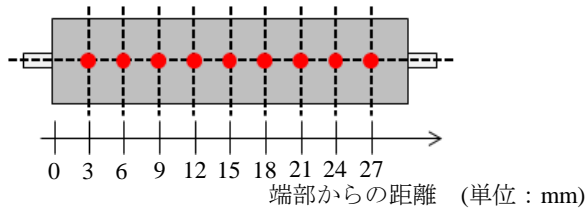


図-3 自然電位および分極抵抗の測定箇所

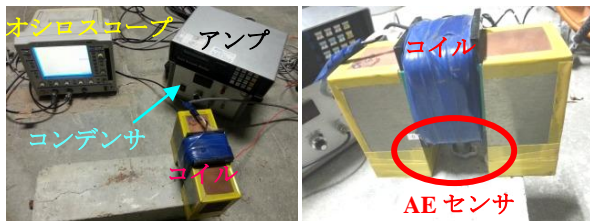


図-4 電磁パルス法概要

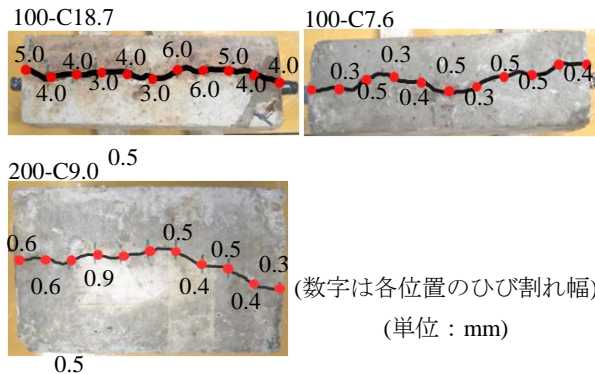


図-5 腐食ひび割れ性状

向鉄筋の腐食による断面欠損率およびかぶり厚である。実構造物において腐食が進行し加速期後期になると補修工法としては断面修復工法が一般的であり、また目視の段階

で腐食が判断できるため、本研究では断面欠損率の目標値を比較的小さく設定した。ただし、腐食ひび割れが非破壊試験結果に与える影響を検討するため、断面欠損率が10%程度のもも試験ケースに含めた。なお、断面欠損率の算出方法は3.2で述べる。さらに、実構造物においては様々なかぶり厚が存在するため、かぶり厚が非破壊試験結果に与える影響を検討することを目的として、断面の1辺の長さをパラメータとして設定した。

2.4 非破壊試験概要

(1) 自然電位法

試験体の4面に対して自然電位の多点計測を行った。測定位置を図-3に示す。電極の面積がひび割れに対して十分に大きいため、ひび割れの測定への影響はないと考えられる。照合電極に銀・塩化銀電極を使用し、温度20°C、相対湿度60%の恒温恒湿装置内で試験を行った。また、測定時には試験体内部まで湿潤状態である必要があることや、かぶり厚50mmの試験体において試験前に試験体を24時間水中に浸漬させる必要があることが報告されているため³⁾、本研究においても試験体を恒温恒湿装置内で水中に24時間浸漬させた。浸漬後は水分量の変化を防ぐためアルミテープで測定面以外を被覆して測定し、測定面を変える際は、測定し終えた面を再度被覆し、次の測定面のアルミテープを剥がして測定を行った。

(2) 分極抵抗法

自然電位の計測と同時に分極抵抗の測定を行った。測定位置や環境条件は自然電位と同様である。2周波数法を適用し、高周波は周波数10kHz、低周波は10mHzのインピーダンスから分極抵抗値を求めた。なお、3電極方式で計測を行い、参照電極には銀・塩化銀電極、対極にはステンレスを使用した。

(3) 超音波法

超音波法には表面法と対面法が存在するが、実構造物では表面法が用いられることや、表面法による計測結果と対面法による計測結果は同様であると報告されていることから本研究では表面法を採用した。また本研究では、端子同士の距離が短いと超音波がコンクリートの表面付近を通過し、腐食ひび割れや腐食生成物の影響を受けないと考え、軸方向鉄筋上の試験体端部より3cmの箇所および27cmの箇所に2つの端子を設置し、端子間の超音波伝播速度を計測した。なお、試験は角柱供試体の1面のみに対して実施し、腐食ひび割れが生じている試験体に対してはその面を試験対象とした。

(4) 電磁パルス法

角柱供試体の4面(A, B, C, D面と称する)に対して電磁パルス法による弾性波計測を行った。コンクリートの表面にコイルを設置し、コンデンサから瞬間的に交流電流を流す。コイルに電流が流れることでコンクリート

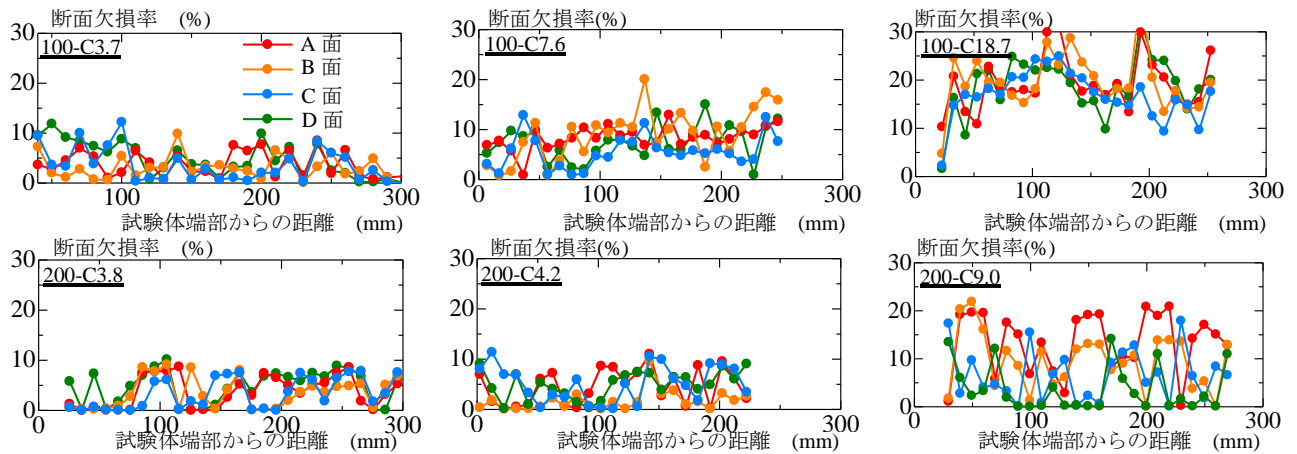


図-6 断面欠損率の鉄筋軸方向の分布

表-3 断面欠損率

試験体名	A 面 (%)	B 面 (%)	C 面 (%)	D 面 (%)
100-C3.7	3.7	3.1	3.5	4.8
100-C7.6	8.3	9.0	5.6	7.5
100-C18.7	19.3	19.8	16.8	18.7
200-C3.8	3.4	3.3	4.8	3.7
200-C4.2	4.5	1.7	5.1	4.9
200-C9.0	13.9	9.5	6.4	3.7

■ : 打設面 ■ : NaCl 水溶液浸漬面 ■ : ひび割れ面

内部の軸方向鉄筋周辺の磁場が変化することで軸方向鉄筋が振動する。それにより生じた弾性波をコンクリート表面に取り付けた AE センサによって計測する方法が電磁パルス法である。実験概要を図-4 に示す。コイルは試験体の中央に軸方向鉄筋に対して垂直方向に設置し、AE センサはコイルの真下に取り付けた。なお、交流電流の最大値は 1200mV、アンプの増幅値は 40dB であり、5μ秒の間隔ごとに 1024 個のデータを測定した。

3. 電食試験結果

3.1 腐食ひび割れ状況

試験体 100-C7.6, 100-C18.7, 200-C9.0 については、電食試験後に軸方向鉄筋に沿ったひび割れを確認した。図-5 に各試験体の腐食ひび割れ性状を示す。腐食ひび割れはいずれの試験体も、1 面のみが生じていた。

3.2 鉄筋腐食状況

非破壊試験後に試験体から軸方向鉄筋を取り出し、JCI-SCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」⁴⁾に従って、60℃のクエン酸水素二アンモニウムに 2 日間浸漬した。その後、3D スキャンを用いて 1cm 間隔で軸方向鉄筋の断面形状を測定し、断面欠損率を求めた。表-3 に断面欠損率の一覧を、図-6 に各試験体の断面欠損率の分布を示す。なお、本研究では試験体の 4 面に対して

表-4 軸方向の腐食分布

試験体名	標準偏差
100-C3.7	2.06
100-C7.6	2.30
100-C18.7	4.73
200-C3.8	2.49
200-C4.2	2.07
200-C9.0	3.10

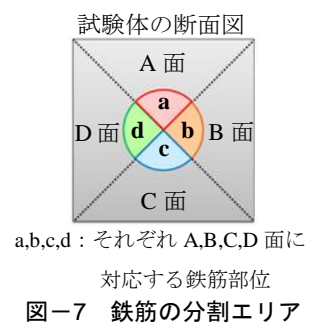


図-7 鉄筋の分割エリア

非破壊試験を行ったため、鉄筋の断面を図-7 に示すように 4 等分にし、各部位の腐食量を 3D スキャンの測定結果から評価した。さらに、図-8 は同一断面内における部位 a, b, c, d の断面欠損率の標準偏差を 1cm ごとに示したものを表す。表-4 の標準偏差とは部位 a, b, c, d の断面欠損率の平均を腐食量として長手方向に 1cm ごとに測定した腐食量の標準偏差を表す。図-6 より、同一断面であっても 4 つに分割した部位で腐食量に差があることは明らかである。100-C3.7 では同一断面での断面欠損率の差の最大は 10.1%、100-C7.4 では 15.3%、100-C18.7 では 19.5%、200-C3.8 では 8.6%、200-C4.2 では 9.8%、200-C9.0 では 20.8% であり、腐食に偏りがあることが分かる。さらに、表-4 の軸方向標準偏差と図-8 の各断面内における部位 a, b, c, d の断面欠損率の標準偏差を比較すると、断面内の円周方向の断面欠損率のばらつきは長手方向の断面欠損率のばらつきよりも大きいことが分かる。また、図-8 において、腐食が進行するにつれて標準偏差が大きくなっているため、腐食が大きくなるにつれて断面内の円周方向の断面欠損率のばらつきも大きくなることが示された。しかし、表-3 より各試験体に着目すると、腐食の偏りとひび割れが発生する面や打設面、NaCl 水溶液の浸漬面との相関は本研究においてはみられなかった。

以上のように、軸方向および円周方向に対して腐食に偏りが生じた。次章では、非破壊試験の性質に応じて、

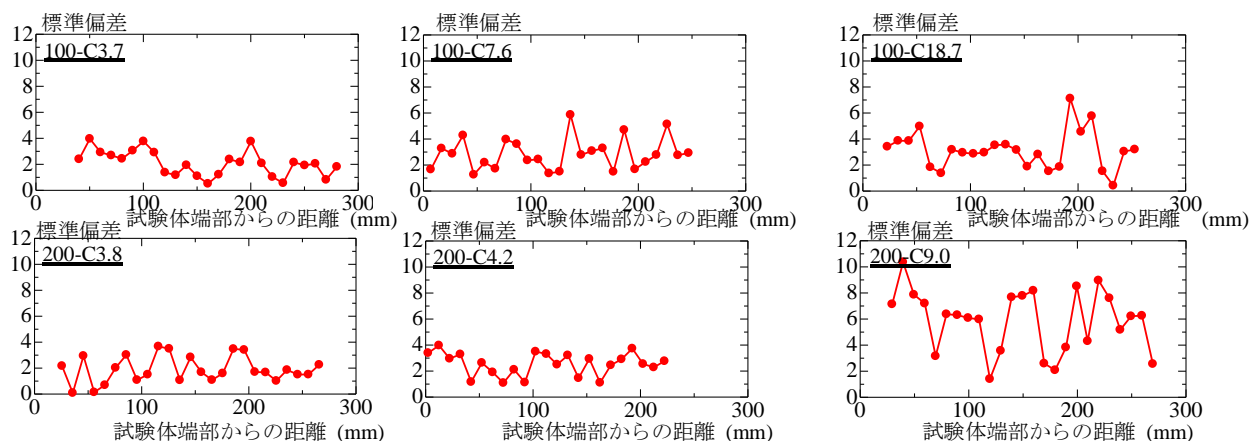


図-8 各断面内における部位 a,b,c,d の断面欠損率の標準偏差

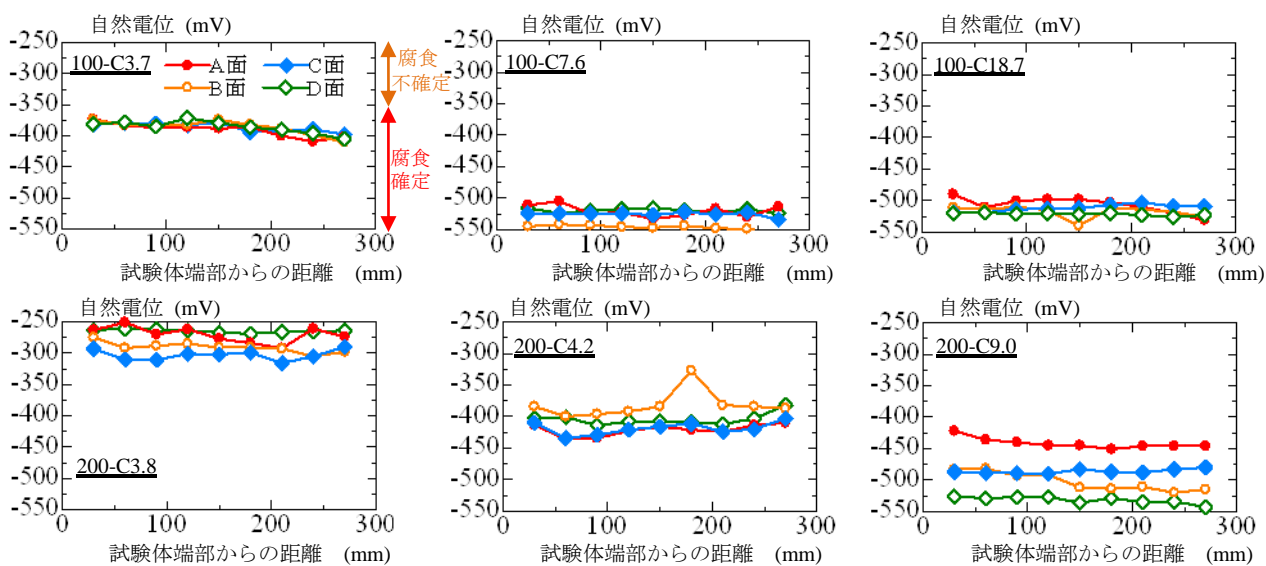


図-9 自然電位測定結果

腐食の偏りを考慮して考察を行う。

4. 非破壊試験結果

4.1 自然電位および分極抵抗の測定結果

図-9 に自然電位の測定結果を、図-10 に分極抵抗法の測定結果を示す。測定値については ASTM の評価基準を適用させるために照合電極および温度の補正を行っている。図-9 および図-10 より、試験体の 4 面の測定結果を比較すると、測定地点の端部からの距離は同じであっても自然電位値や分極抵抗値に差があるため、軸方向鉄筋の同一断面内にも電位の偏りがあり、腐食の進行やひび割れによって隙間ができることで電気二重層の抵抗値も異なる可能性があると考えられる。そこで断面欠損率やひび割れ幅との関係について考察する際には、断面を a, b, c, d 部に分割してそれぞれ求めた断面欠損率を用いた。電食試験中は強制的に電気を流すため、鉄筋の電位差は非常に大きい値となる。この試験から得られる値とは、電食試験後に周囲の環境によって生じた電位値であり、試験時の温湿度は一定であるため、ひび割れの

影響により水分や酸素の供給量が変化することで電位は変化すると考えられる。図-11 にひび割れ幅と自然電位の関係を、図-12 に断面欠損率と自然電位の関係を示す。なお、図-12 において左図は断面を a, b, c, d 部に分割してそれぞれ求めた断面欠損率と自然電位の関係、右図は同一断面内の円周方向の腐食の偏りを考慮しない平均的な断面欠損率と自然電位の関係である。図-9 より、100-C7.8, 100-C18.7 および 200-C9.0 においてひび割れが発生した A 面と他の 3 面の計測結果に一定の関係は見られなかった。図-11 より、100-C7.6 と 100-C18.7 を比較するとひび割れ幅が拡大しても自然電位に大きな差がないことがわかる。従って、ひび割れの有無によって水分や酸素の供給量は大きく異なるが、ひび割れ幅の大きさが自然電位に与える影響は小さいと考えられる。また、アノード部の電位が下がるほど腐食しやすく、腐食の化学反応によりさらに電位は下がるため、自然電位は腐食が進行するほど下がると考えられる。しかし、図-12 より、腐食の円周方向の偏りを考慮した際の断面欠損率と自然電位の関係は、腐食の偏りを考慮しない場合に比べ

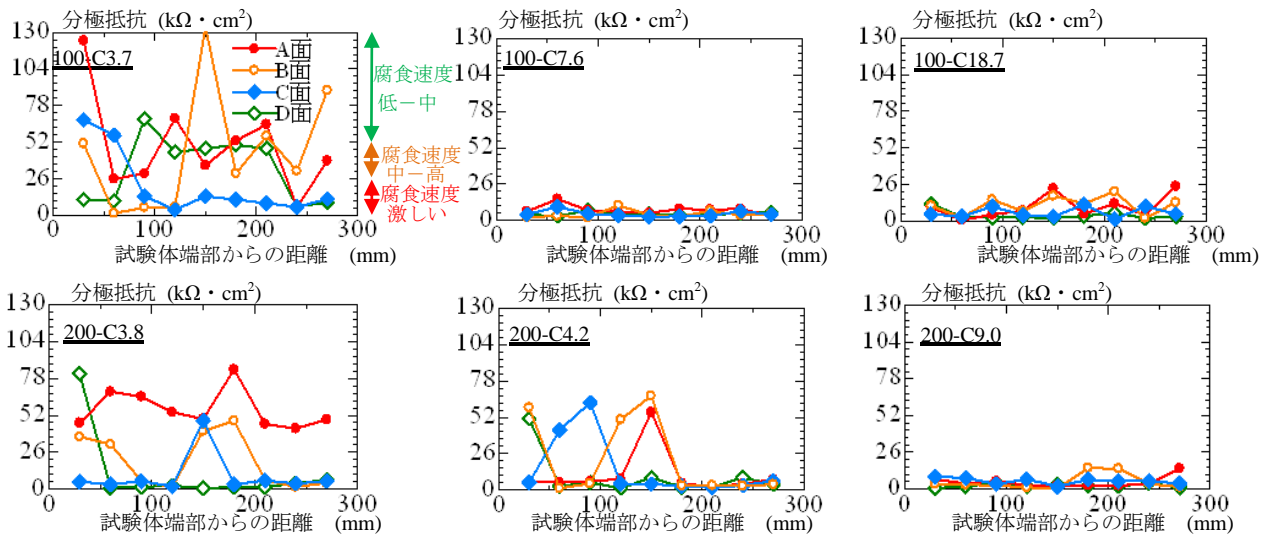


図-10 分極抵抗測定結果

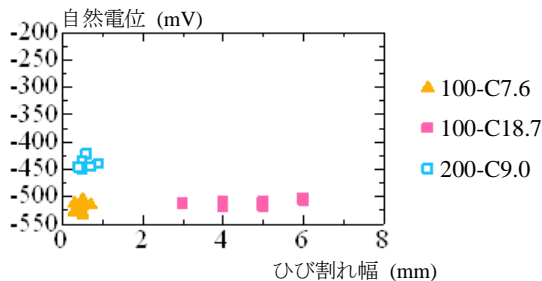


図-11 ひび割れ幅と自然電位の関係

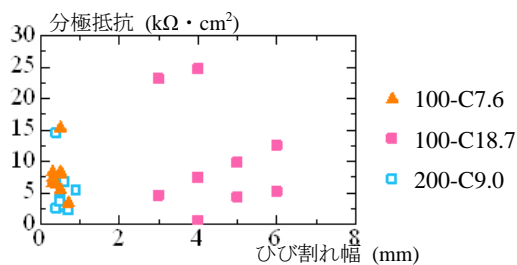


図-13 ひび割れ幅と分極抵抗の関係

てばらつく傾向が見られた。従って、自然電位と測定面に最も近い鉄筋断面部位の断面欠損率に直接的な対応は見られなかった。一方、図-13より、ひび割れ幅と分極抵抗値に明白な関係はみられなかった。また、図-14より、ひび割れを有する試験体の軸方向鉄筋は断面欠損率の大小に関わらず分極抵抗は $0 \sim 20 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ 程度に収まるが、ひび割れを有していない場合は $0 \sim 90 \text{ k}\Omega/\text{cm}^2$ とばらつきが大きい傾向を示し、腐食の偏りを考慮したものと考慮していないもので大きな差異は見られなかった。

4.2 電磁パルス法試験結果

図-15の上側の図に示すように、平均的な断面欠損率の増加に伴い、弾性波の減衰に遅れが見られる傾向があり、鎌田ら¹⁾の研究と同様の傾向を示した。かぶり厚が92mmのものに関しても同様の傾向が見られた。この原

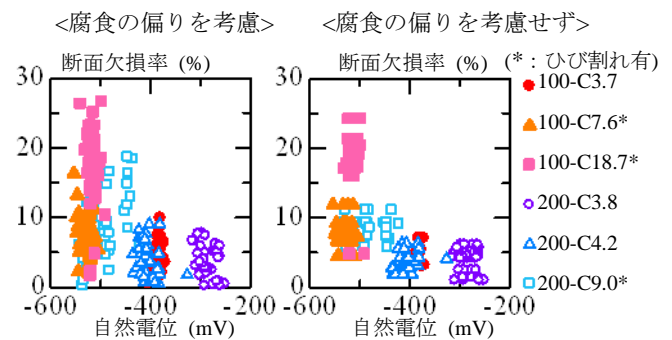


図-12 断面欠損率と自然電位の関係

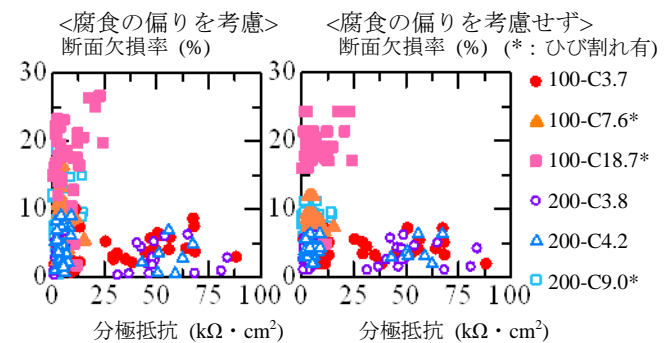


図-14 断面欠損率と分極抵抗の関係

因として腐食ひび割れおよび腐食生成物の影響が考えられる。なお、コイルの設置された位置から長手方向に両側250mmの範囲内に位置する鉄筋は振動すると報告されている¹⁾ため、本研究での試験体の鉄筋は全体的に振動していると考えられる。そのため、評価に用いる断面欠損率には全体平均を用いている。次に図-15の下側の図に着目すると、ひび割れを有するA面に比べてひび割れの発生していない3面では、A面よりも断面欠損率が高い場合でさえ弾性波の減衰が比較的早い傾向が見られた。同様の傾向は、ひび割れを有する100-C7.8, 200-C9.0においてもみられた。従って、腐食が進行しており、腐

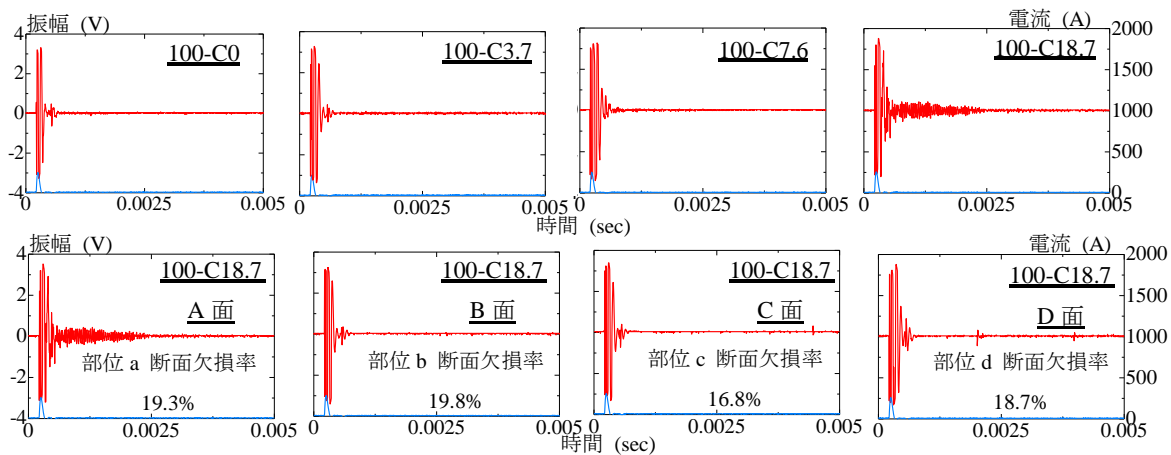


図-15 AE センサで計測した弾性波形および波形エネルギー

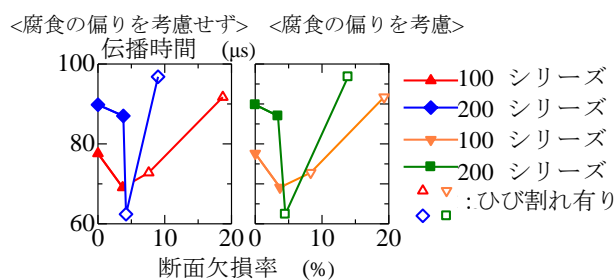


図-16 超音波伝播時間

食生成物が存在していてもひび割れが発生していない場合には弾性波の減衰の遅れは顕著には見られず、ひび割れが弾性波の減衰に及ぼす影響が大きいと考えられる。

4.3 超音波試験法

図-16に超音波伝播時間を示す。図-16の左図より、健全時を比較すると、200 シリーズの健全な供試体(200-C0)の方が伝播時間は長いことが分かる。鋼の超音波伝播速度は約 5000m/s であり、本研究に用いたコンクリートの伝播速度は別途作製した円柱供試体を用いて計測したところ、4045m/s であった。従って、かぶり厚が小さい場合は軸方向鉄筋内を超音波が経由するが、かぶり厚が大きい場合はかぶりコンクリート部分のみ、あるいは軸方向鉄筋内を経由するものの、その距離が比較的短いことが原因ではないかと考えられる。また、断面欠損率の全体平均と超音波伝播時間に着目すると、ひび割れ発生前は断面欠損率が大きくなるほど伝播時間が短くなり、ひび割れ発生後は断面欠損率が大きくなるにつれて伝播時間が長くなる傾向が見られた。ひび割れ発生後に腐食が進行するにつれて超音波伝播時間が長くなる原因は、超音波がひび割れを迂回したためと考えられる。一方、ひび割れ発生前に腐食の進行に伴い超音波伝播時間が短くなる原因は腐食生成物により付着が強くなり、コンクリートと鉄筋の境界面を超音波が経由する時間が短縮された可能性が考えられる。また、試験は全て A 面で行ったため、超音波は鉄筋の断面部位 a を経由する可

能性が高い。試験体の鉄筋の断面部位 a の断面欠損率と超音波伝播時間の関係性を示したものが図-16 の右図である。腐食の偏りを考慮した場合もひび割れ発生以前は腐食の進行に伴い伝播時間は短縮され、ひび割れ発生以後は腐食の進行に伴い伝播時間が長くなり、断面欠損率の全体平均を用いた場合と同様の傾向であった。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 鉄筋断面内の腐食の偏りを考慮した場合、分極抵抗や超音波法は腐食の偏りを考慮していない場合と同様の傾向があると考えられる。
- (2) 断面欠損率と自然電位の関係では、自然電位と測定面に最も近い鉄筋断面部位の断面欠損率に直接的な対応は見られないと考えられる。
- (3) 電磁パルス法において、鉄筋振動により発生する弾性波の減衰には腐食ひび割れが与える影響が大きいと考えられる。

参考文献

- 1) 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方法の開発、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
- 2) 佐藤孝史，疋田雅也，倉知星人，小林孝一：電食と塩分による鉄筋の腐食が鉄筋の腐食形状に与える影響の比較、コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1063-1068，2009
- 3) 鈴木僚，西村次男，加藤佳孝，岩波光保：測定環境条件が鉄筋コンクリートの電気化学的測定結果に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.751-756，2007
- 4) 日本コンクリート工学会：JCI 規準集（1977-2002），pp.90-94，2004