

# 論文 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食評価に関する基礎的研究

大塚 柚人\*1・榎原 弘貴\*2・金田 尚志\*3・児島 あかり\*4

**要旨:** 本研究では、水セメント比、塩化物イオン含有量、養生条件が鉄筋の分極抵抗にどのような影響を及ぼすかを検討するために、水セメント比および塩化物イオン含有量を変化させた供試体を用いて実験を行った。分極抵抗の測定値と実際に供試体内の鉄筋の腐食状況を確認したところ、分極抵抗の腐食判定の閾値は水セメント比による違いはあるものの腐食状況の結果よりある程度算出することができた。さらに水セメント比の違いや塩化物イオン含有量が多いものほど鉄筋の腐食速度に影響を及ぼすことが分かった。

**キーワード:** 分極抵抗, 自然電位, 腐食速度, 塩化物イオン量, 鉄筋腐食

## 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化過程を調査するために用いられている方法の中に非破壊検査がある。非破壊検査における鉄筋の腐食診断には、主に自然電位法と分極抵抗法が適用されている。自然電位法や分極抵抗法には、腐食判定基準<sup>1)</sup>が設けられており、それを基に腐食環境の推定や腐食の有無と言った情報を取得することにより構造物の健全性の評価がなされている。しかし、実構造物で適用した際には、温湿度や鉄筋のかぶりの影響、特に密配筋部では、測定値に誤った結果が生じやすいことが言われている。そのため、広く知られている測定方法でありながらも、それぞれの要因に対する補正や定量的な解釈に至っていないのが現状である<sup>2),3)</sup>。自然電位に比べて鉄筋の抵抗を測定できる分極抵抗は、判定基準も明確に設定されておらず、さらに腐食速度以外にも腐食発生の有無や腐食の程度を推定できることも期待されつつも、分極抵抗値と腐食発生や腐食程度の関係性と言った情報が少ないのが現状である。

一方で、分極抵抗により腐食環境を実構造物で評価する際には、現場計測において温度変化等で自然電位が容易に変化するため、分極抵抗をできる限り短時間で計測することが求められている<sup>4)</sup>。そのため、測定時間を短時間にするために、高周波と低周波の2周波によって分極抵抗を算出している。その際に測定される分極抵抗値の定量的な解釈は、さらに難しくなっている。

そこで本研究は、現場での分極抵抗の測定方法における測定結果の解釈をより明確にするために、塩害環境下での鉄筋コンクリートの潜伏期から進展期を想定した供試体を対象として、鉄筋の自然電位、現場測定方法による分極抵抗を定期的に測定を行い、分極抵抗値と鉄筋の腐食発生および腐食表面積や重量および鉄筋位置における塩化物イオン含有量等の関係性について検討を

行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

試験に用いたモルタルには、セメントに早強ポルトランドセメント（密度 3.04g/cm<sup>3</sup>）、細骨材には長崎県壱岐産海砂および福岡県玄界灘産海砂（ともに表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>）を用いた。表-1 に作製したモルタル配合を示す。水セメント比を 40%, 55%とし、55%の供試体には、予め内在塩分として、塩化物イオン含有量が 5kg/m<sup>3</sup> 及び 10kg/m<sup>3</sup> となるように練混ぜ水に NaCl を混入して作製した。

供試体は、図-1 に示す様に 100×100×80mm で作製し、かぶり 30mm の位置に D9×95mm の異形鉄筋と、それに 30mm の間隔をあけて φ9×95mm ステンレス棒を

表-1 実験に用いたモルタル配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
	W	C	S
40	271	678	2033
55	271	493	1478

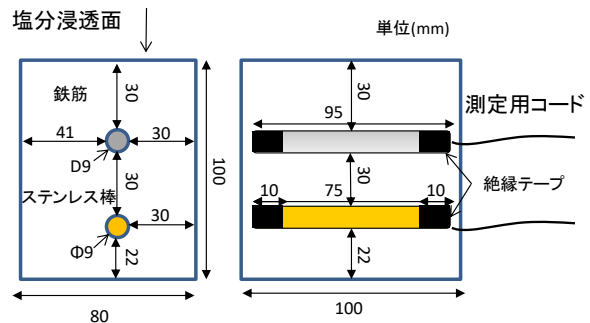


図-1 供試体概要図

\*1 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学 (学生会員)

\*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 博士 (工学) (正会員)

\*3 日鉄住金テクノロジー(株) 計測・検査事業部 博士 (工学) (正会員)

\*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (学生会員)

表-2 試験に用いたモルタルの水準

W/C (%)	塩化物イオン含有量 (kg/m <sup>3</sup> )	養生	供試体数	
			気中	湿布
40	0	気中 湿布	4	4
55	0		4	4
	5		4	4
	10		4	4

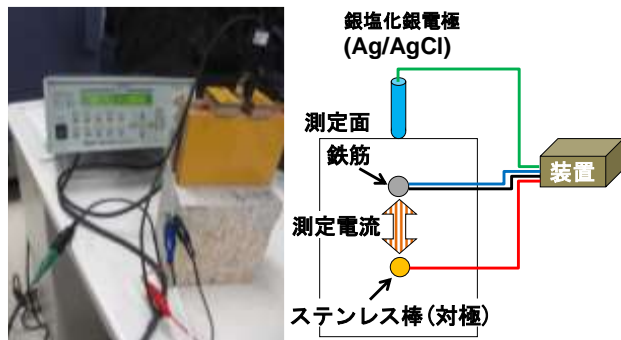


図-2 分極抵抗(自然電位)測定図

並列して埋設した。なお、鉄筋およびステンレス棒の両端部 10mm は、絶縁テープで被覆し、また一端には、測定用のリード線を取り付けている。打設後は、温度 20℃・相対湿度 60%で気中養生を行ったものと温度 20℃の環境下で水分を含んだシートで覆い、その上からビニール袋で覆い湿布養生を行ったものとに振り分けた。養生期間は、気中養生と湿布養生ともに 7 日間行った。その後は、試験面およびその背面を除く全ての面をアルミテープで被覆した。表-2 は、供試体の水準を示しており、供試体は 1 水準につき各 4 体作製した。

腐食促進環境として、塩水浸透環境と乾燥環境を 14 日間ごとに繰返した。塩水浸透環境は、3%濃度の NaCl 水溶液を吸水させたシートをバット内に敷き、その上に試験面を下にして静置させた。供試体の静置中は、バットをビニールシートで密閉しており、バット内の環境は、温度 20℃・相対湿度 80%となっている。一方の、乾燥環境は、温度 20℃・相対湿度 60%の恒温室内とし、同様に静置させた。

供試体の解体は、鉄筋の自然電位(CSE)が-350mV よりも卑となった時点と、それ以外の供試体(-350mV より卑にならなかった)は、自然電位の測定値に関らず、試験材齢 560 日目に一斉に行った。

## 2.2 測定項目および方法

### (1) 自然電位および分極抵抗

分極抵抗および自然電位を所定の材齢にて測定した(図-2)。分極抵抗の測定方法は、埋設したステンレス棒を

対極として用い、分極抵抗測定器を用いて行った。二周波数の矩形波交流を用い、測定周波数は、高周波数 400Hz、低周波数 0.1Hz とした。分極抵抗値は、得られた見掛けの分極抵抗測定値に埋設した鉄筋の表面積を乗じて算出した。自然電位は銀塩化銀電極(Ag/AgCl)を鉄筋直上の試験体表面に設置して測定した後、銅硫酸銅電極(CSE)の電位に変換した。

### (2) 鉄筋の腐食面積率および重量

鉄筋の腐食面積率は、採取した鉄筋にセロハンテープを巻き付け、鉄筋表面の腐食している部分をトレースし、画像処理により求めた。一方の腐食重量は、腐食面積を測定した後に 10%濃度のクエン酸アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬させて、腐食生成物を除去後、腐食生成物の除去前と後の重量差により求めた。

### (3) 塩化物イオン量

全塩化物イオン量は、φ9mm のコンクリート用ドリルを用いて、浸透面から深さ方向に 5 mm 間隔で 30mm の位置まで試料を採取し、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」および JSCE-G572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して電位差滴定装置により算出した。その後は、Fick の第 2 法則により、見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/year) を算出した。この見かけの拡散係数を用いて、かぶり 30mm 位置の全塩化物イオン含有量を推定した。

## 3. 結果および考察

図-3 は全水準における気中養生、湿布養生の自然電位の経時変化を示す。なお、実線が気中養生、破線が湿布養生を示しており、凡例の数字は最初の数字が水セメント比(%), 二番目の数字が塩化物イオン含有量(kg/m<sup>3</sup>)を示している。自然電位は、各水準の供試体 4 体を測定した平均の結果である。養生方法で比較すると、気中養生の方が、湿布養生と比べセメントと水が十分に反応しておらず、塩分の吸収・浸透により自然電位が低下する時期も早く、解体時の最低自然電位も低い結果となった。水セメント比で比較すると、水セメント比 40%では、試験開始から 560 日目で強制解体した供試体が 8 体中 3 体あり、長期間の促進試験でも自然電位が-350mV 以下にならないものがあった。湿布養生の供試体では鉄筋の腐食が確認されないものあり、塩分が鉄筋位置まで浸透しておらず、自然電位も高い値となった。水セメント比 55%の塩化物イオン含有量を 0, 5, 10kg/m<sup>3</sup> 内在させたものを比較すると 5 kg/m<sup>3</sup> と 10 kg/m<sup>3</sup> の自然電位に差が見られなかった。内在塩分が存在しているため、その後の濃度拡散の影響による塩分浸透は、促進されなかったと考えられる。また、従来から言われている様に、自然電位

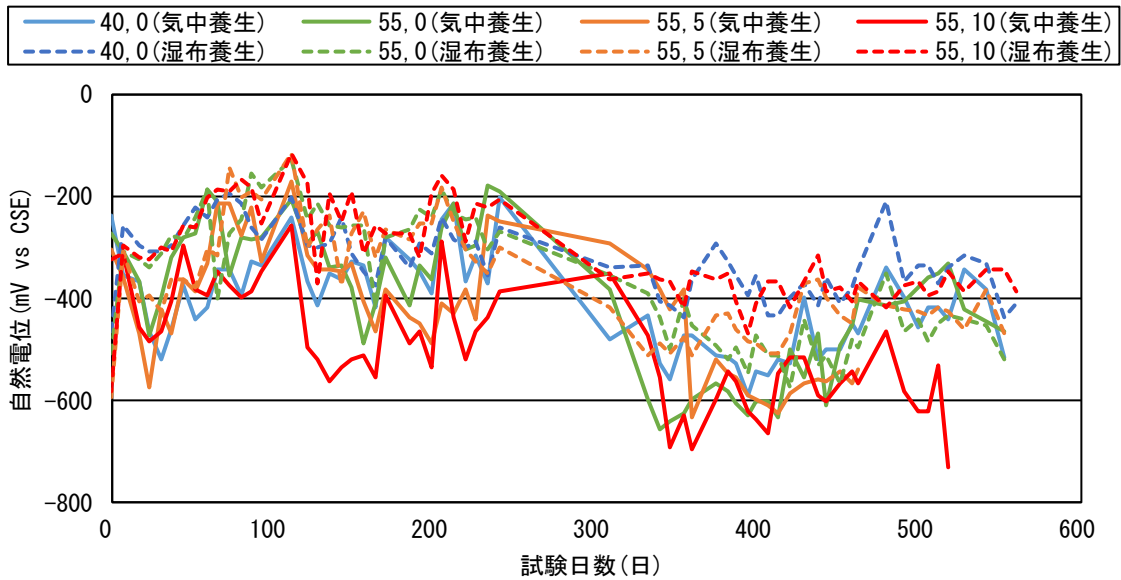


図-3 自然電位の経時変化(気中養生, 湿布養生の両者を含む)

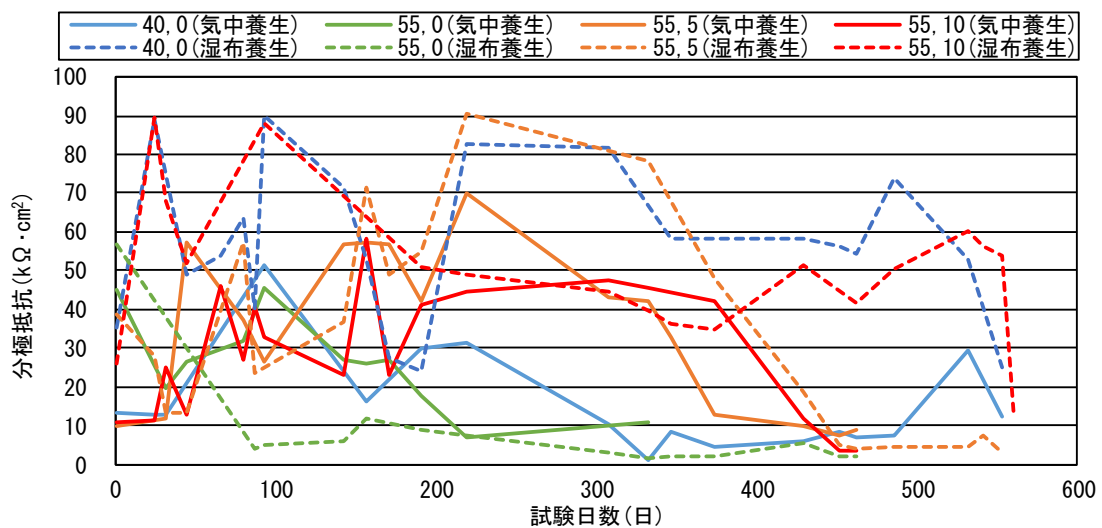


図-4 分極抵抗の経時変化(気中養生, 湿布養生の両者を含む)

は、腐食の有無は判定可能であるが、腐食の程度までは推定することが難しいと言える。

図-4 は全水準における気中養生, 湿布養生の分極抵抗の経時変化を示す。なお、実線が気中養生, 破線が湿布養生を示している。気中養生では、水セメント比 55% の塩化物イオン含有量を 0, 5, 10kg/m<sup>3</sup> 内在させたものを比較すると、無添加の供試体の分極抵抗は早い段階で低下していることがわかる。これは、濃度拡散の影響により塩分浸透の促進がなされたのではないかと考えられる。また、分極抵抗が 22kΩ·cm<sup>2</sup> を下回ると抵抗値の回復が見られず、実際に供試体を解体し鉄筋の腐食状況を確認したところ、鉄筋の腐食が確認された。湿布養生は、気中養生と比べてすべての水準において分極抵抗値

は高い値で推移していた。これは、気中養生よりも十分に水と反応し内部のセメントが緻密になり塩分の浸透を抑制できたものだと考えられる。

図-5 は、水セメント 40%で湿布養生を行った供試体における解体前の定期測定結果と解体時の測定結果での分極抵抗と自然電位の関係を示す。なお、凡例○は、腐食が確認されなかったことを表しており、凡例●は、腐食していたものを表している。この結果、4 供試体の内 3 体に腐食の発生が確認された。腐食が確認されたものは、いずれも分極抵抗が 25kΩ·cm<sup>2</sup> 以下であった。

図-6 には、水セメント比 40%の気中養生を行った供試体の測定結果を示す。腐食の発生は、全ての鉄筋において、実際に供試体を解体したところ腐食が確認され、

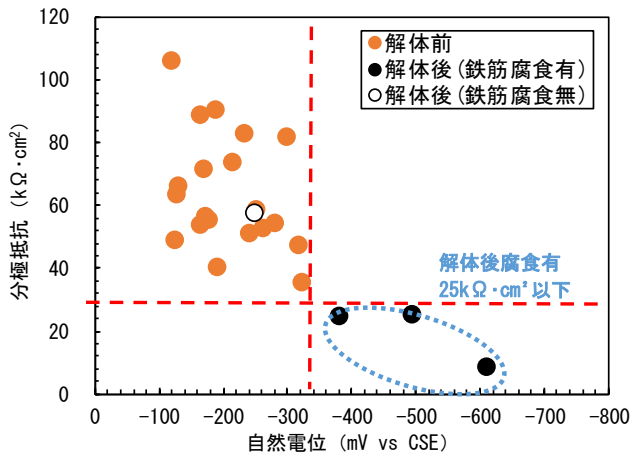


図-5 解体前後の自然電位と分極抵抗の測定結果  
(W/C=40%, 湿布養生)

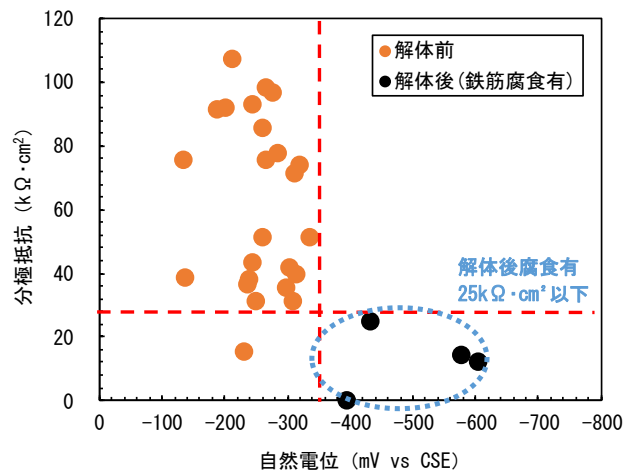


図-6 解体前後の自然電位と分極抵抗の測定結果  
(W/C=40%, 気中養生)

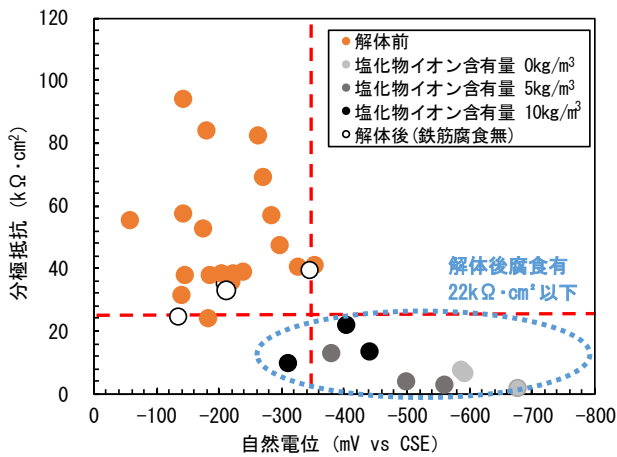


図-7 自然電位と分極抵抗の測定結果  
(W/C=55%, 湿布養生)

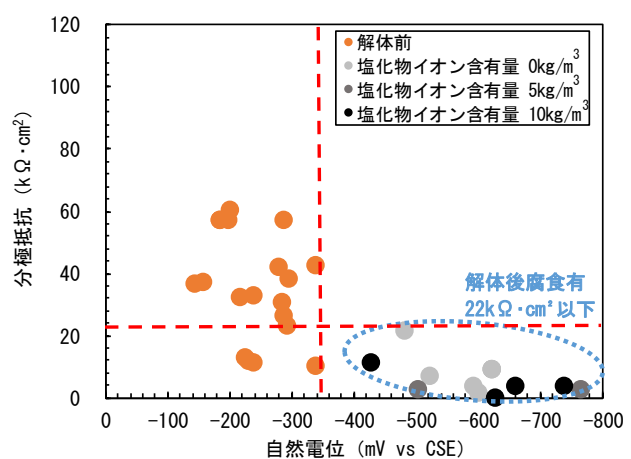


図-8 自然電位と分極抵抗の測定結果  
(W/C=55%, 気中養生)

分極抵抗値は、湿布養生と同様に分極抵抗が  $25\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  以下を示した。

図-7には、水セメント比55%で湿布養生を行った供試体における定期測定結果と解体時の測定結果での分極抵抗と自然電位の関係を初期NaCl添加のものと併せて示す。この結果、腐食が確認されたものは、12体中9体であった。腐食していなかった供試体の分極抵抗値は、最も低いもので、 $25\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ であったのに対し、腐食した鉄筋の分極抵抗の最大値は、 $22\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ であった。

図-8は、水セメント比55%で気中養生のものを示しているが、この結果も同様に、腐食が見られた鉄筋の分極抵抗値は、最大で  $22\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ であった。

以上のことから、水セメント比40%においては、腐食していない鉄筋がなかったため、明確な分極抵抗値における腐食発生の閾値は、分からなかったが、およそ  $25\sim 50\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$  に存在すると予想された。一方の、水セメント比

55%の場合には、腐食判定の閾値は、 $22\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 程度に存在すると考えられた。分極抵抗値による腐食判定の閾値は、水セメント比によって若干ではあるが異なる結果となったが現時点では、測定数も少ないため、データを蓄積していく予定である。

図-9～図-12に、気中養生の各水準における解体時の鉄筋の腐食状況の結果を示す。気中養生ではすべての供試体において、鉄筋の腐食が確認された。図-6、図-8の解体時の分極抵抗の結果より、水セメント比40%のものは  $25\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下、水セメント比55%のものは、 $22\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下で腐食することが確認された。

図-13～図-16に、湿布養生の各水準における解体時の鉄筋の腐食状況の結果を示す。湿布養生では、鉄筋の腐食が確認されたもの3体と腐食が確認されなかったものを示す。腐食が確認されたものは図-5、図-7の解体時の分極抵抗の結果より、水セメント比40%のものは



図-9 解体時の鉄筋の腐食状況  
(気中養生,  $w/c=40\%$ ,  $\text{NaCl}=0\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)



図-10 解体時の鉄筋の腐食状況  
(気中養生,  $w/c=55\%$ ,  $\text{NaCl}=0\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)

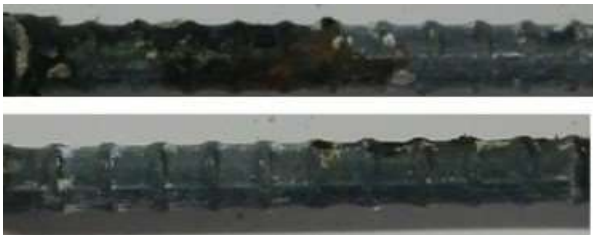


図-11 解体時の鉄筋の腐食状況  
(気中養生,  $w/c=55\%$ ,  $\text{NaCl}=5\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)



図-12 解体時の鉄筋の腐食状況  
(気中養生,  $w/c=55\%$ ,  $\text{NaCl}=10\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)



図-13 解体時の鉄筋の腐食状況  
(湿布養生,  $w/c=40\%$ ,  $\text{NaCl}=0\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)



図-14 解体時の鉄筋の腐食状況  
(湿布養生,  $w/c=55\%$ ,  $\text{NaCl}=0\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食無)



図-15 解体時の鉄筋の腐食状況  
(湿布養生,  $w/c=55\%$ ,  $\text{NaCl}=5\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)



図-16 解体時の鉄筋の腐食状況  
(湿布養生,  $w/c=55\%$ ,  $\text{NaCl}=10\text{kg}/\text{m}^3$ , 腐食有)

25kΩ・cm<sup>2</sup>以下, 水セメント比 55%のものは, 22kΩ・cm<sup>2</sup>以下で腐食することが確認された。なお, 水セメント比 55%で NaCl を添加させなかったものについては, 解体時の分極抵抗は, 39.5kΩ・cm<sup>2</sup> で腐食が確認されなかった。図-17 は, 気中養生および湿布養生における分極抵抗と腐食重量の関係を示す。腐食重量が 0mg のものは, 1 サイクル終了時に測定を行った分極抵抗値を代表値としている。水セメント比 55%に塩化物イオン含有量が 10kg/m<sup>3</sup>のものは, 試験開始初期においても分極抵抗は, 25 kΩ・cm<sup>2</sup>以下と低いことから早期に腐食していたものと推察される。分極抵抗と腐食重量の関係性は, 養生条件や水セメント比に関らず分極抵抗の閾値を定めることにより, 腐食の程度が推定できる可能性がある。

次に, 図-18 に分極抵抗と腐食面積率の関係を示す。分極抵抗と腐食面積率の関係性は, 分極抵抗値が低いものほど腐食面積率は大きくなる傾向を示している。ただし, 図-17 に示した腐食重量との関係性よりもバラツキが大きいことが分かる。分極抵抗の測定値は, 腐食面積よりも腐食重量との関係性がある。これは, 分極抵抗値が腐食速度と反比例の関係にあるためと考えられる。

図-19 には, 分極抵抗値と解体時における鉄筋位置の全塩化物イオン量との関係を示す。なお, 腐食が確認されたもののみ示している。この結果, 解体時の分極抵抗が低いものほど, 鉄筋位置における塩化物イオン量が高い傾向がみられる。腐食発生限界塩化物イオン量を 2.0kg/m<sup>3</sup>と仮定すると, 分極抵抗値が 20 kΩ・cm<sup>2</sup>を閾値として, 腐食発生すると推察された。

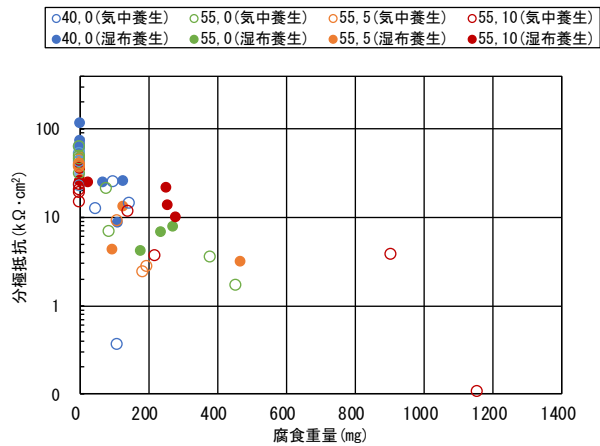


図-17 分極抵抗と腐食重量の関係  
(気中養生, 湿布養生の両者を含む)

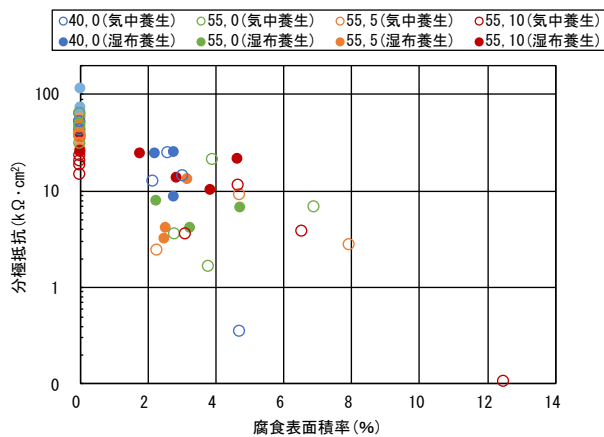


図-18 分極抵抗と腐食表面積率の関係  
(気中養生, 湿布養生の両者を含む)

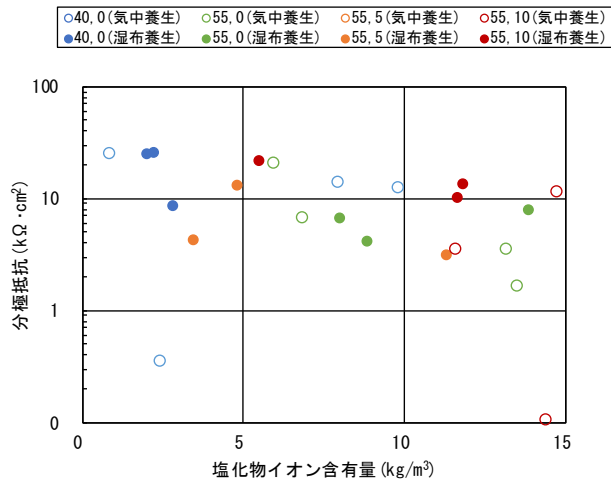


図-19 分極抵抗と全塩化物イオン含有量の関係  
(気中養生, 湿布養生の両者を含む)

#### 4. まとめ

(1) 促進試験にともない, 自然電位が低下するにしたがって, 分極抵抗も低下する傾向が確認できる。分極抵抗法による腐食発生の閾値は, 低周波数 0.1Hz で測定した場合, 20~25  $k\Omega \cdot cm^2$  になると推定された。また, その閾値は, 水セメント比が低下するに従って, 高くなる傾向にあった。

(2) 分極抵抗が低いものほど, 腐食重量は増加しており, 分極抵抗の測定結果から腐食の程度をある程度予測できる可能性が示唆された。

(3) 今回の実験では, 自然電位が  $-350mV$  以下になった時点で試験体を解体して鉄筋の腐食の有無を確認したが, 自然電位の低下を試験体解体の指標とするよりも, 分極抵抗の低下を指標とした方が腐食発生の検知確度が向上すると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 西田孝弘, 岩波光保, 原田健二, 加藤絵万: 電気化学的腐食モニタリングによる鉄筋コンクリート部材の塩害劣化度判定基準の確立に向けた基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No1, 2012
- 2) 大熊千紗都, 岡崎慎太郎, 吉田秀典: 不均一に腐食した鉄筋コンクリートを対象とした分極抵抗法における電流分散性状および腐食診断制度の把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No1, 2018
- 3) 欺波明宏, 樋口正典, 藤田学, 辻幸和: かぶりコンクリート性状が電気化学的鉄筋腐食測定法に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No2, 2007
- 4) 横田優, 佐々木孝彦, 飯島享, 松嶋学: 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No1, 2004