

# 電気化学的鉄筋腐食測定法の適用性に関する研究

## Studies on Application of Electrochemical Diagnosis to Corrosion of Reinforcing

斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA

樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

主に塩分を混入した鉄筋コンクリート供試体に、電気化学的鉄筋腐食測定法を適用し、実構造物での測定の際に容易に計測可能な含水率やかぶりそれぞれ測定値に及ぼす影響を検討した。検討の結果、含水率の相違が自然電位および分極抵抗に大きな影響を及ぼすこと、含有塩分量および水セメント比が測定結果に影響を及ぼすことが確認された。また、コンクリート抵抗と自然電位および分極抵抗の相関性が高いことも確認された。

キーワード：鉄筋腐食，自然電位，分極抵抗，含水率，かぶり

The electrochemical diagnosis has been applied for reinforced concrete specimens including chloride and the influence of water content and cover concrete on its results have been investigated. The results showed that water content influence considerably half-cell potential and polarization resistance and also chloride content and water-cement ratio have an effect on them. In addition, the good relationships between concrete resistance and them were recognized.

**Key Words:** Reinforcing Corrosion, Half-Cell Potential, Polarization Resistance, Water Content, Cover Concrete

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋の腐食を非破壊的に調査し、その腐食傾向や腐食速度を知ることにより、腐食予防や早期発見が可能となれば、社会資本としての RC 構造物の長寿命化に向けて大きな役割を果たす。現在、鉄筋腐食の検査には種々の方法があるが、最も広く使われている方法の一つに電気化学的測定法がある。これには、自然電位法や分極抵抗法があり、それぞれ腐食傾向と腐食速度の推定に用いることができる。しかし、測定に及ぼす影響因子は多数あり、なかでもかぶりコンクリートの性状が最も大きな影響を及ぼすことは周知の事実である。かぶりコンクリートの性状としては、コンクリート配合、含有塩分量、中性化深さ、含水率、かぶりの大きさなどが挙げられ、それらが単独あるいは複合的に絡み合っただけで電気化学的測定法に影響を及ぼしていると考えられる。これらの影響要因については、過去にもいくつかの研究・報告が行われているが、必ずしも十分に解明されている状況ではなく、また、自然電位法については測定方法が土木学会で標準化されている<sup>1)</sup>ものの、

その評価方法や分極抵抗法については明瞭な基準が確立されていないのが現状である。そのため、実構造物での測定結果に対する評価が難しく、広く知られているものの、今一つ有効な手法として用いられていない原因となっている。

本研究では、実際の測定結果に影響を及ぼす測定条件のうち、現地で比較的簡易に調査可能なかぶりやかぶりコンクリートの水分の状態に着目して、それらが自然電位、分極抵抗に及ぼす影響を調べた。また、含有塩分量の影響や水セメント比の影響についても検討を行った。

### 2. 試験方法

#### (1) 供試体

水セメント比が測定結果に及ぼす影響を調べるため、水セメント比 (W/C) が 70%, 55%, 40% の 3 種類の配合を設定した。配合表を表-1 に示す。使用した鉄筋は異形鉄筋 D16 である。供試体は幅 150mm×高さ 150mm×長さ 500mm の直方体とし、かぶりの大きさによる相違を調べるため、両側面の中央にかぶり 20mm および

40mm になるよう鉄筋を配置した(図-1)。また、含有塩分量が測定結果に及ぼす影響を検討するため、塩化物イオン量換算で、 $0.0\text{kg/m}^3$ 、 $0.6\text{kg/m}^3$ 、 $1.2\text{kg/m}^3$ 、 $2.4\text{kg/m}^3$ の4種類の含有塩分量を有する供試体を製作した。なお、含水率の測定は、同配合の幅100mm×高さ100mm×長さ400mmの直方体供試体(無筋)で行った。

供試体は、養生終了後、風雨に曝される屋外で約1年間自然暴露した。鉄筋端部の処理については、塗装は一切行わず、突出部のみグリースを塗布して錆を防止した。

(2) 測定方法

自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗は、供試体端部より露出させた鉄筋にアースを接続し、供試体側面中央の鉄筋直上で測定した。その際、測定直前の湿潤状態として表-2のような湿潤条件を設定した。湿潤条件1は測定面を自然乾燥させた状態とし、湿潤条件2は、30分間湿らせた布で測定面を覆い断続散水した状態、湿潤条件3は、それを90分間実施した状態である。

自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗は、市販の携帯型鉄筋腐食診断装置(飽和塩化銀電極Ag/AgCl)を用いて測定した。分極抵抗の測定方法は、交流インピーダンス方式で、10Hz~10mHzまでを印加電圧10mVで測定した。

含水率測定は、市販の電気抵抗式水分計を用いて含水率測定用供試体の中央付近で行った。本装置は、コンクリートにφ6mmの穴を30mm間隔で2本あけ、それぞれに電極を挿入して測定する方法で、10mmごとの深さ方向に含水率を測定できる。本方法は建設省建築研究所官民連帯共同研究「外装材の補修・改修技術の開発」に準拠した方法である<sup>2)</sup>。なお、コンクリート表面で測定する含水率測定法は、深さ方向の分布を把握できないことと、実際の構造物ではコンクリート表面が平滑でない場合が多く、誤差が生じやすいため、本研究では用いなかった。

3. 含水率の影響

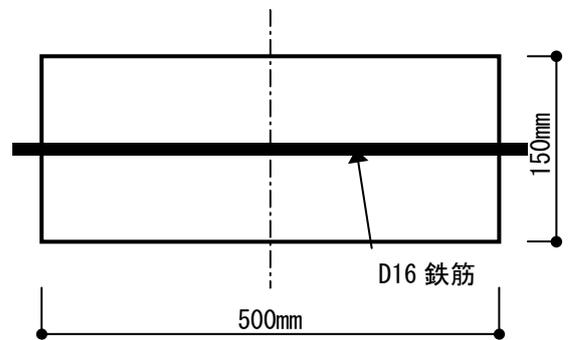
(1) 含水率分布

各供試体別に湿潤条件を変えて測定した含水率の深さ方向の分布を、水セメント比40%、55%、70%について、それぞれ図-2~図-4に示す。なお、図が煩雑になるのを避けるため、含有塩分量 $0.0\text{kg/m}^3$ および $2.4\text{kg/m}^3$ のみを示している。凡例中の最初の数字は供試体の水セメント比、次の数字は含有塩分量( $0.0\text{kg/m}^3 \rightarrow 00$ ,  $2.4\text{kg/m}^3 \rightarrow 24$ )を、その次の数字は湿潤時間(0分 $\rightarrow 00$ , 30分 $\rightarrow 30$ , 90分 $\rightarrow 90$ )を表している。

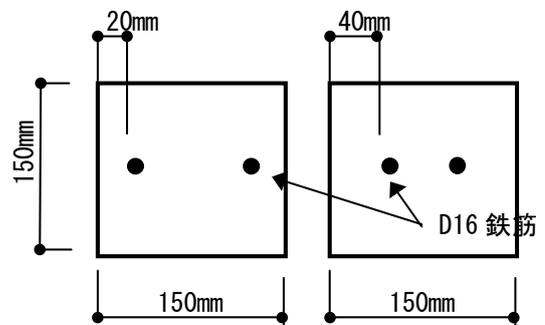
表-1 配合表

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	AE 減水剤
70	10.5 11.5	5.1 4.9	45.5	182	260	814	1001	0.78
55	11.5 11.5	5.5 5.2	44.5	175	318	783	1003	0.95
40	9.5 10.5	4.3 4.6	40.0	174	435	667	1027	1.31

※スランプ、空気量：(上段) 塩分量 $0.0\text{kg/m}^3$   
(下段) 塩分量 $2.4\text{kg/m}^3$



<側面図>



<断面図>

図-1 供試体概要図

表-2 試験水準

含有塩分量	湿潤条件
$0.0\text{kg/m}^3$ $0.6\text{kg/m}^3$ $1.2\text{kg/m}^3$ $2.4\text{kg/m}^3$	条件1：湿潤時間なし 条件2：湿潤時間30分 条件3：湿潤時間90分

いずれの水セメント比においても、深さ方向の含水率はほぼ直線に近い分布を示しており、深さ 40mm 付近では、5.0%前後になっている。ただし、自然乾燥状態（湿潤 0分）では水セメント比が大きくなるにつれ表面付近の含水率が小さくなり、水分の逸散の違いが顕著に表れている。また、湿潤時間の影響については、一部測定のパラツキはあるものの、おおむね水セメント比が大きい程、含水率の上昇量も大きくなっており、吸水率や透水係数の違いが表れる結果となった。含有塩分量による違いは、水セメント比 70%、55%の場合には、塩分を含む場合に若干含水率が大きくなっているが、水セメント比 40%の場合には、違いはほとんど認められない。

(2) 不足含水率

はじめに、深さ方向に対する平均含水率とコンクリート抵抗の相関について図-5 に示す。凡例中の最初の数字は供試体の水セメント比、次の数字はかぶり (20mm→20, 40mm→40) を表している。

図より、かぶり 20mm と 40mm の測定結果が乖離しているのが判る。本方法による含水率、自然電位等の測定結果については既報<sup>3)</sup>でも述べたが、含水率の平均値を用いると、かぶり 20mm とかぶり 40mm では 40mm の場合が当然のことながら大きく評価される結果となる。しかしながら自然電位はかぶりの影響が少ないといった既往の研究<sup>4)</sup>もあり、既報<sup>3)</sup>においても、それほど違わないことから、これら測定値に影響を及ぼす含水率には、ある閾値が存在すると推測される。そこで、閾値と各深さで測定された含水率の差の累積値を不足含水率として、式(1)のように設定した。

$$w_L = \sum (w_T - w_i) \quad (1)$$

ここに、 $w_L$  : 不足含水率 (%),  $w_T$  : 含水率の閾値 (%),  $w_i$  : 深さごとの測定値 (%) である。

含水率の閾値については既報<sup>3)5)</sup>においても検討しており、ここでは含水率の閾値を 5%とした場合の不足含水率とコンクリート抵抗の関係を図-6 に示す。凡例は図-5 と同様である。

水セメント比 70%の測定値のばらつきは大きいものの、かぶり 20mm および 40mm の両測定結果の傾向がおおむね一致しており、不足含水率が 3~4%を超えるとコンクリート抵抗が大きくなる。

(3) 自然電位に及ぼす影響

不足含水率と自然電位の関係を図-7 に示す。凡例は図-5 と同様である。なお、自然電位は CSE (飽和硫酸銅) 電極基準に換算しており、卑側を+として表示して

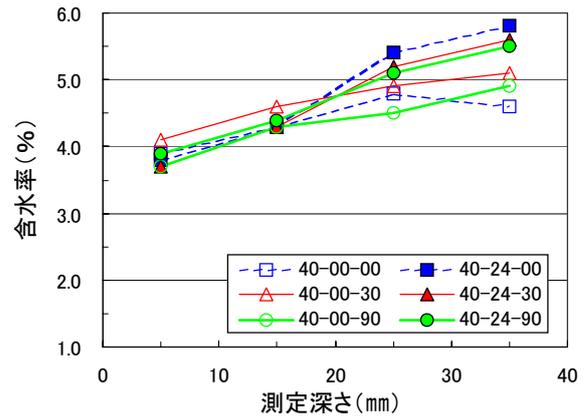


図-2 含水率の分布 (W/C=40%)

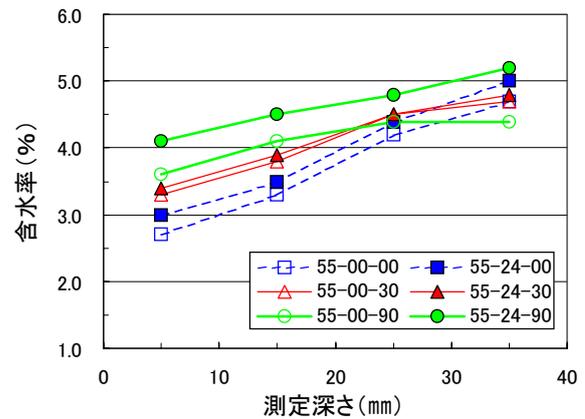


図-3 含水率の分布 (W/C=55%)

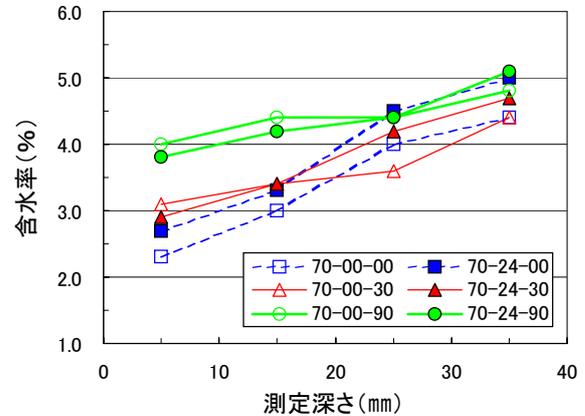


図-4 含水率の分布 (W/C=70%)

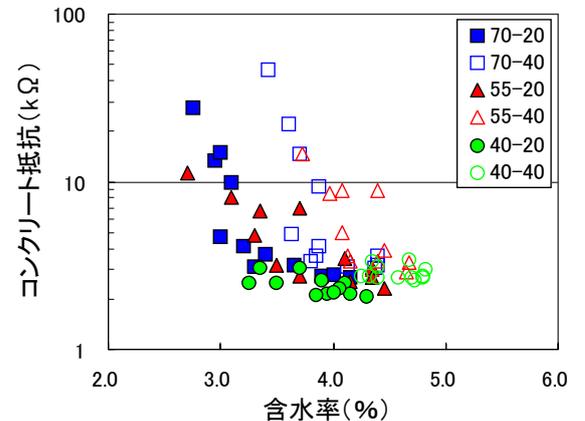


図-5 含水率とコンクリート抵抗

いる。

自然電位に関しては、かなりばらつきの大きい結果となった。不足含水率が大きくなるに従い、自然電位も貴な傾向を示し、不足含水率が3~4%を超えると自然電位が大きく貴側に変化する。特に水セメント比が大きいほど、その傾向は顕著である。本図では塩分量の違いを考慮していないため、厳密にはそれらを考慮する必要があるが、自然電位を検討する場合には、かぶりと深さ方向の含水率分布を測定することで、測定条件の良否を判断でき、また測定された自然電位が補正できる可能性を示唆している。

(4) 分極抵抗に及ぼす影響

不足含水率と分極抵抗の関係を図-8 に示す。分極抵抗は対数で示している。

分極抵抗は自然電位に比べて、いずれの水セメント比においても傾向が類似しており、不足含水率と分極抵抗の対数はおよそ右肩上がりの比例関係にある。ただし、分極抵抗が対数表示のため判りにくいのが、不足含水率が4.0%を超えると測定値のばらつきは大きくなることから、自然電位の場合と同様、測定条件の良否を判断し得るものと考えられる。

4. 塩分量の影響

(1) 塩分量と自然電位の相関

含有塩分量は鉄筋腐食に影響を及ぼす大きな要因の一つである。含有塩分量と自然電位の関係を図-9 に示す。自然電位の表示方法は図-7 と同一である。凡例中の最初の数字は供試体の水セメント比、次の数字は湿潤時間(0分→00, 90分→90)を表している。

いずれの水セメント比および湿潤条件においても、含有塩分量が大きくなるに従い、自然電位は卑な傾向を示している。水セメント比70%および55%では、自然乾燥状態の場合に100mV、湿潤90分では、50mV程度の差が見られる。本結果では、含有塩分量が1.2kg/m<sup>3</sup>まで自然電位が緩やかに卑化し、1.2kg/m<sup>3</sup>と2.4kg/m<sup>3</sup>では、同じような値であるため、一般的に言われている鉄筋腐食限界塩分濃度(1.2~2.4kg/m<sup>3</sup>)との相関がある結果となった。ただし、全体的に自然電位が貴な傾向にあり、鉄筋を取り出していないため、現状では原因は判断できないが、塩分量が比較的少ないため、鉄筋の腐食が進展していない可能性がある。

(2) 塩分量と分極抵抗の相関

含有塩分量と分極抵抗の関係を図-10 に示す。凡例は

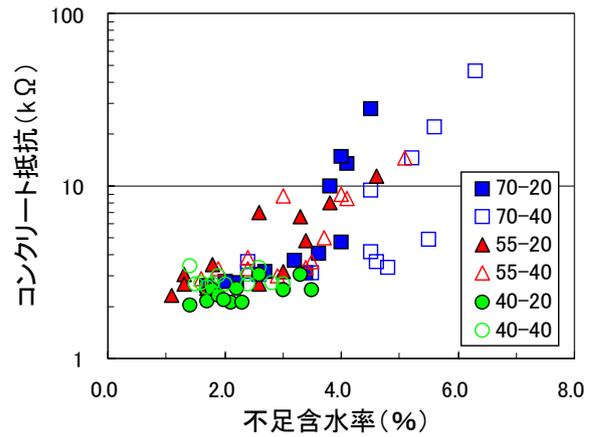


図-6 不足含水率とコンクリート抵抗

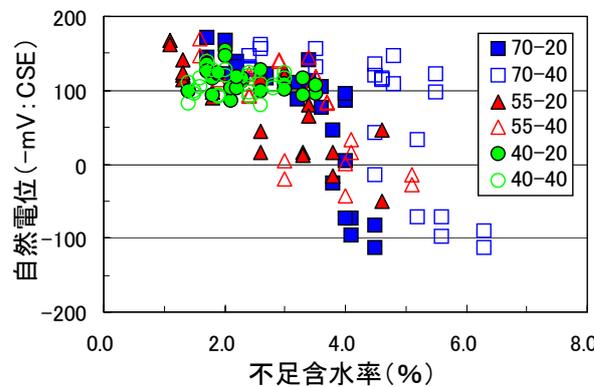


図-7 不足含水率と自然電位

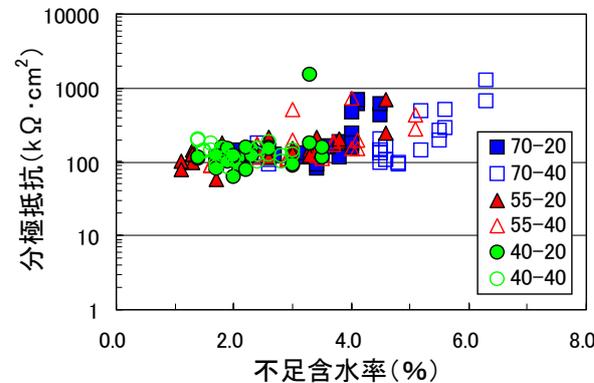


図-8 不足含水率と分極抵抗

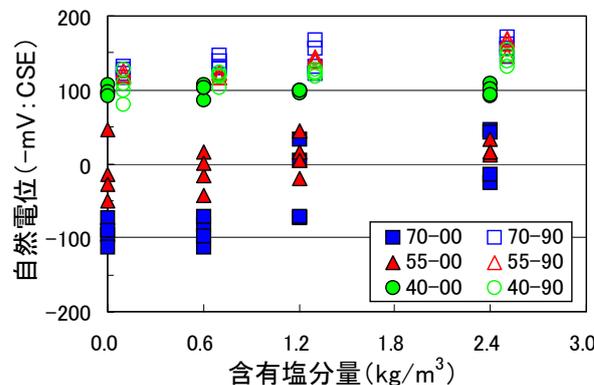


図-9 塩分量と自然電位

図-9と同様である。

水セメント比 70%および 55%の自然乾燥状態の場合においては、塩分量が多くなるに従い、分極抵抗が減少する傾向はあるが、湿潤 90 分では、右肩下がり傾向はあるものの変化は小さい。また水セメント比 40%についても変化が非常に小さい。よって、分極抵抗は含水率が高くなると、塩分量による差異が小さくなる可能性がある。また、全体的に分極抵抗が大きいことから、本結果は比較的腐食の進行が緩やかな状態と考えられる。

## 5. 水セメント比の影響

### (1) 水セメント比と自然電位の相関

水セメント比と自然電位の関係を図-11 に示す。自然電位の表示方法は図-7 と同一である。凡例中の最初の数字は含有塩分量 (0.0kg/m<sup>3</sup>→00, 2.4kg/m<sup>3</sup>→24) を、次の数字は湿潤時間 (0 分→00, 30 分→30, 90 分→90) を表している。

水セメント比 40%については、湿潤時間による変化はほとんどなく、水セメント比 55%, 70%は湿潤させることで、自然電位が 40%の場合よりも卑な傾向を示すようになる。水セメント比による違いは、含水率との相関が高いので、一概には水セメント比のみの影響かどうか判断できない場合がある。

水セメント比 40%の場合はコンクリートが緻密なため、水分が蒸発しにくく、1 年経過した段階でも、他と比べて含水率が高い状態にあり、そのため自然電位も卑な傾向を示している。また水セメント比 40%の場合は緻密さゆえに、鉄筋近傍の酸素が少ない可能性もあり、自然電位が卑な傾向を示しやすい状態にあると考えられる。しかしながら、湿潤状態では水セメント比 55%, 70%の自然電位は 40%よりも卑な傾向を示し、水セメント比による腐食傾向の違いが表れている。よって、低水セメント比の構造物を測定する場合には、含水状態によっては、鉄筋がほとんど腐食していないにもかかわらず、自然電位が卑な傾向を示す可能性がある。

### (2) 水セメント比と分極抵抗の相関

水セメント比と分極抵抗の関係を図-12 に示す。凡例は図-11 と同様である。分極抵抗の場合も自然電位の場合と同傾向が似ているが、塩分を含む場合と含まない場合とでは、湿潤による変化量が大きく異なっているのが特徴的である。すなわち、塩分量が少ないと湿潤により分極抵抗は大きく低下するが、塩分量が多い場合は、分極抵抗の変化量は小さく、その傾向は水セメント比が大きいほど顕著である。また、水セメント比 40%では、鉄

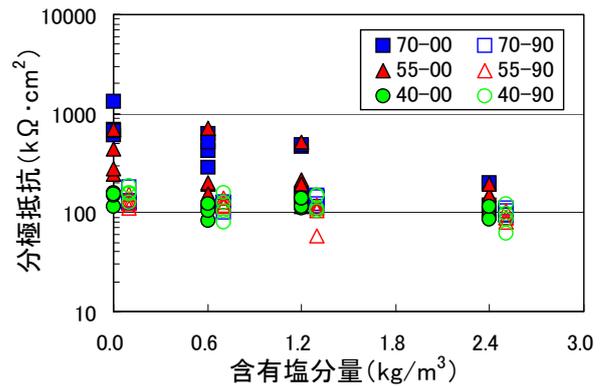


図-10 塩分量と分極抵抗

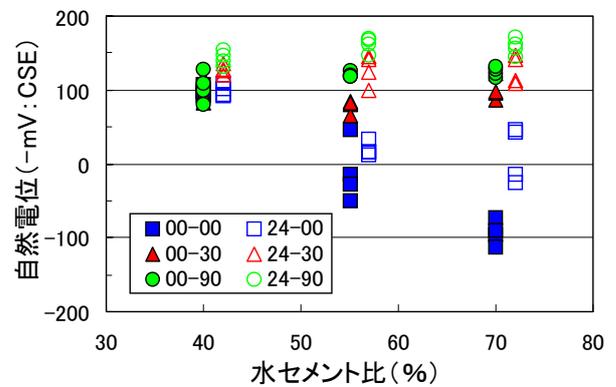


図-11 水セメント比と自然電位

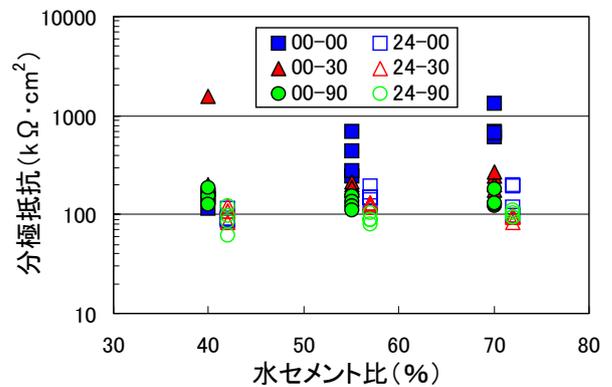


図-12 水セメント比と分極抵抗

筋がほとんど腐食していないにもかかわらず、分極抵抗が小さくなる可能性がある。

## 6. コンクリート抵抗との相関

### (1) コンクリート抵抗と自然電位の相関

コンクリート抵抗は、分極抵抗測定時に同時に測定される項目であり、含水率、塩分量、水セメント比などによって変化する、かぶりコンクリートの性状を示す重

要なファクターである。既報<sup>3)</sup>でも述べたように、コンクリート抵抗と自然電位および分極抵抗との相関性は高いことが確認されている。

本測定結果におけるコンクリート抵抗と自然電位の関係を図-13に示す。凡例中の最初の数字は供試体の水セメント比、次の数字はかぶりを表している。なお、コンクリート抵抗は対数で示している。

水セメント比 55%および 70%の場合は、コンクリート抵抗が小さくなるに従い、自然電位が卑な傾向を示しており、非常に良い相関を示している。全データを対象とした回帰式においても、比較的高い相関係数が得られている。ただし、コンクリート抵抗が 3kΩ以下では、不足含水率の場合と同様、自然電位の変化は小さくなっている。本図では含有塩分量による違いを考慮していないため、厳密には塩分量ごとに関係が異なると考えられるが、コンクリート抵抗が 3kΩ以上で比較的塩分含有量が少ない場合は、ほぼ同様の傾向で評価できると考えられる。

(2) コンクリート抵抗と分極抵抗の相関

コンクリート抵抗と分極抵抗の関係を図-14に示す。なお、コンクリート抵抗および分極抵抗は対数で示している。分極抵抗については、全データに対する回帰式の相関係数は自然電位ほど高くないが、おおむね右肩上がりの比例関係が見られる。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① 含水率の分布から算出される不足含水率は、コンクリート抵抗との相関があり、かぶりによる相違を考慮できることが確認された。
- ② 塩分量は自然電位や分極抵抗に及ぼす影響があるが、含水率が高くなるとその差が小さくなる。
- ③ 水セメント比は含水率に及ぼす影響が大きく、特に低水セメント比では、腐食傾向の大きい測定結果が得られる可能性がある。
- ④ コンクリート抵抗と自然電位および分極抵抗の相関性は高く、含水率、塩分量と併せて検討することで測定結果の精度を向上できる可能性がある。

自然電位、分極抵抗とも、含水率は最も影響を及ぼす測定条件の因子であるが、実際の構造物において含水率をコントロールすることは最も困難な課題である。よって、これらを考慮した測定方法や評価手法を確立することが、電気化学的鉄筋腐食測定法の普及において急務と考えられる。

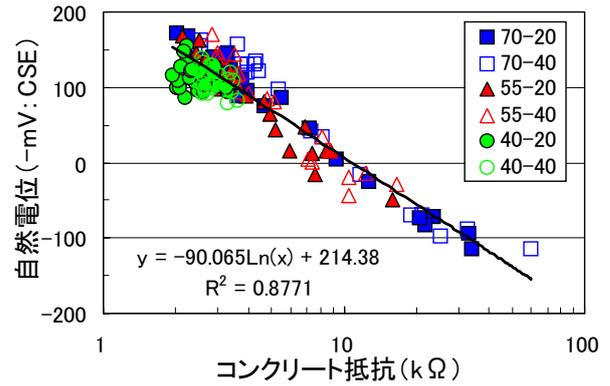


図-13 コンクリート抵抗と自然電位

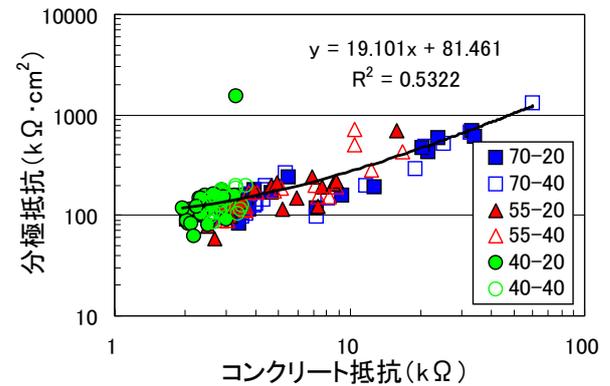


図-14 コンクリート抵抗と分極抵抗

参考文献

- 1) 土木学会規準：コンクリート構造物における自然電位測定方法，JSCE-E601-2000，2000.12
- 2) 沓掛文夫，千歩修，熊谷敏男：注入補修界面の含水率測定方法の一提案，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.313-314，1989.10
- 3) 斯波明宏，樋口正典，藤田学：かぶりコンクリートが電気化学的鉄筋腐食測定法に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.6，pp.373-378，2006.10
- 4) 井川一弘，渡辺博志，渡辺寛：コンクリート中鋼材の自然電位の測定方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1769-1774，2003.7
- 5) 斯波明宏，樋口正典，藤田学：電気化学的鉄筋腐食診断法の適用性に関する実験的研究，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.5，pp.217-222，2005.10