

論文 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

鈴木 僚^{*1}・西村 次男^{*2}・加藤 佳孝^{*3}・岩波 光保^{*4}

要旨：測定環境条件および鉄筋コンクリートの設定条件が電気化学的特性値に及ぼす影響を把握するために、塩化物イオン含有量・水セメント比・かぶりの異なる試験体を、温度・湿度（含水率に影響）の異なる環境下で電気化学的測定を行った。その結果、水セメント比が大きいほど、含水率が自然電位の測定値に及ぼす影響が大きくなり、水セメント比が小さいほど、温度が分極抵抗とコンクリート抵抗の測定値に及ぼす影響が大きくなることがわかった。また、かぶりの違いは、電気化学的測定結果にほとんど影響しなかった。

キーワード：電気化学的測定，鉄筋腐食，測定環境，自然電位，分極抵抗，含水率

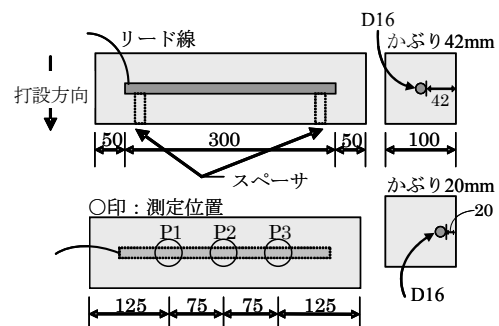
1. はじめに

現在、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の腐食状況を非破壊的に診断する方法として、電気化学的特性値を測定する方法が広く用いられている。電気化学的特性値としては、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗が挙げられ、これらの測定値から腐食の有無や腐食可能性、腐食速度などを判断することが出来る。電気化学的測定を行う場合、温度や含水率といった測定環境条件が測定結果の変動に大きく影響を及ぼすことが知られている。しかしそれらの影響は一定ではなく、水セメント比やかぶりなどの鉄筋コンクリートの配合条件や鉄筋の腐食状況によって、異なった傾向を示す可能性が考えられる。そのため、電気化学的特性値から鉄筋腐食を正しく推測するためには、測定環境条件、配合、かぶりおよび鉄筋の腐食状況が特性値に及ぼす影響を定量的に把握することが重要である。本研究では、鉄筋コンクリートの設定条件（塩化物イオン含有量、水セメント比、かぶり）および測定環境条件が、電気化学特性値測定結果に及ぼす影響の変動を実験的に検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体概要と電気化学的測定位置を図—1に、試験体の種類と数量を表—1に示す。各条件の試験体数量は6体であり、以降1～6の番号で表記する。試験体は100×100×400mmのコンクリート角柱内部にD16 (SD345)を埋め込んだものである。水セメント比は0.55および0.40、粗骨材最大寸法は20mm、鉄筋のかぶりは42mmおよび20mmとした。一部の配合においては練混ぜ水に、試験体の塩化物イオン含有量が0.1% (2.3kg/m³) および0.5% (11.5kg/m³) となるよう塩化ナトリウムを混入した。なお試験体は平成14年1月に作成され、実験室内（温度約20℃、湿度約60%）で約5年経過した後、測定した。



図—1 試験体概要と測定位置 (単位: mm)

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

*2 東京大学生産技術研究所 (正会員)

*3 東京大学生産技術研究所 准教授 博 (工) (正会員)

*4 独立行政法人 港湾空港技術研究所 博 (工) (正会員)

2.2 測定環境条件

通常、電気化学的測定は測定対象のコンクリートを湿潤状態にして実施される¹⁾。そのため測定環境条件は、湿潤状態および測定環境温度 20℃を基準とし、温度および湿度を表—2 に示すそれぞれの状態に変化させ、電気化学的測定を実施した。なお、測定前に試験体を各々の環境下に一週間保管した。

1. 温度 40℃の恒温恒湿装置内で水中浸漬
2. 温度 20℃の養生室水槽内で水中浸漬
3. 屋外（冬、気温 6～14℃）で水中浸漬
4. 温度 40℃、湿度 60%の恒温恒湿装置内
5. 温度 20℃、湿度 60%の養生室内
6. 温度 20℃、湿度 42%の恒温恒湿装置内
7. 屋外（冬、気温 6～14℃、湿度 35～45%）

また計測時に水分計（Kett 製、高周波容量式）を用いて試験体表面より含水率を測定した。

2.3 測定方法

図—1 に○印で示した試験体表面の 3 カ所の測定位置（それぞれ P1, P2, P3 とする）で、電気化学特性値（自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗）を測定した。自然電位は Ag/AgCl 照合電極使用の pH メーターを用いて、また分極抵抗とコンクリート抵抗は携帯型鉄筋腐食診断機（四国総合研究所 SRI-CM-III、周波数 10Hz・20mHz のインピーダンス測定）を用いて測定した²⁾。分極抵抗は、RH60% および乾燥状態で測定不可であったため、湿潤状態のみ検討した。

表—1 試験体の種類と本数

W/C	かぶり	塩化物イオン 含有量	名 称	数 量
0.55	42mm	0.0%	55-42-0	6 体
		0.1%	55-42-1	6 体
		0.5%	55-42-5	6 体
	20mm	0.0%	55-20-0	6 体
		0.1%	55-20-1	6 体
		0.5%	55-20-5	6 体
0.40	42mm	0.0%	40-42-0	6 体
		0.1%	40-42-1	6 体
		0.5%	40-42-5	6 体

3. 実験結果

3.1 同一試験体における測定値のばらつき

表—3 に、温度 20℃で水中浸漬させた試験体（②）の 3 点の、自然電位測定結果とそれらの平均値 μ と分散 σ^2 を示す。同一試験体において、異なる 3 点における自然電位の値は若干異なるが、そのばらつきは小さいことがわかる。また分極抵抗、コンクリート抵抗においても同様にばらつきが小さいことが言えたため、各種試験体の電気化学的特性値については、以下 3 点の測定値の平均値を用いて論じることとする。

3.2 各試験体の鉄筋腐食の可能性

表—4 に湿潤状態および測定温度 20℃における、各種試験体 6 体の電気化学的特性値を示す。以降、これらの値を各試験体の電気化学的特性値の基準値とする。同種類の試験体 6 体はそれぞれ同じ配合条件および環境条件で測定されたものであるが、6 体の基準値は互いに異なっている。鉄筋腐食の可能性について、ASTM の判断基準値によると、Ag/AgCl 照合電極を用いた場合、自然電位 (E) > -80mv であると 90%以上の

表—2 環境測定条件

含水状態 温度	湿潤状態	RH60%	乾燥状態
40℃	1	4	6
20℃	2	5	
10℃	3	7	7

※表中の数字は 2.2 に記述した環境条件を示す

表—3 自然電位の測定値・平均値・分散

名 称	1	2	3	μ	σ^2
55-42-0	40	33	41	38	12.7
55-42-1	-154	-150	-161	-155	20.7
55-42-5	-484	-470	-474	-476	34.7
55-20-0	46	53	52	50	9.6
55-20-1	-180	-184	-182	-182	2.7
55-20-5	-470	-468	-463	-467	8.7
40-42-0	37	45	44	42	12.7
40-42-1	19	15	25	20	16.9
40-42-5	-166	-168	-172	-169	6.3

(単位：mv)

表—4 各試験体における電気化学特性値の基準値

自然電位 (単位: mv)							分極抵抗 (単位: $k\Omega \cdot cm^2$)						コンクリート抵抗 (単位: $k\Omega$)					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
55-42-0	38	75	23	33	25	4	309	392	300	388	398	491	4.97	6.66	3.75	6.40	5.89	2.09
55-42-1	-155	-89	-40	12	-5	-255	154	224	239	266	422	194	2.55	3.86	3.46	4.17	6.49	1.71
55-42-5	-476	-448	-457	-469	-476	-508	26	48	28	44	63	246	0.90	1.30	0.88	1.07	1.42	0.13
55-20-0	50	36	46	61	28	44	291	400	369	535	618	790	4.59	6.56	6.07	8.49	8.04	2.37
55-20-1	-182	-308	-231	-232	36	-54	139	165	136	173	350	387	2.45	3.32	2.39	2.82	4.30	1.39
55-20-5	-467	-474	-424	-432	-459	-448	23	50	22	45	34	9	0.81	1.41	0.83	1.25	1.10	0.48
40-42-0	42	65	102	93	35	45	240	319	334	477	666	1130	3.84	4.67	3.99	5.49	8.40	2.69
40-42-1	20	25	54	98	24	4	236	300	323	402	395	809	2.90	3.82	3.41	5.17	4.89	1.49
40-42-5	-169	-290	-285	-199	-238	-380	95	82	70	113	146	47	1.78	1.94	1.64	2.39	2.77	0.83

自然電位 (単位: mv)

□ : 90%以上の確率で腐食なし

■ : 不確定

■ : 90%以上の確率で腐食あり

分極抵抗 (単位: $k\Omega \cdot cm^2$)

□ : 不活性

■ : 中～高速

(腐食速度)

コンクリート抵抗 (単位: $k\Omega$)

■ : 低～中速

■ : 高速

(測定期間:平成 18 年 10 月～平成 19 年 1 月)

確率で腐食なし、 $E < -230mv$ であると 90%以上の確率で腐食あり、とされている³⁾。判断基準値と測定された自然電位を照合させると、塩化物イオン含有量 0.5%の多くの試験体は腐食可能性あり、塩化物イオンを含まない試験体は全て腐食可能性なしと診断された。含有量 0.1%の試験体は各種試験体で異なる結果が診断された。また腐食速度について、CEBの判断基準値によると、分極抵抗 (R_p) $> 130 k\Omega \cdot cm^2$ であると不活性、 $52 k\Omega \cdot cm^2 \leq R_p < 130 k\Omega \cdot cm^2$ であると低～中速、 $262 k\Omega \cdot cm^2 \leq R_p < 52 k\Omega \cdot cm^2$ であると中～高速、 $R_p < 26 k\Omega \cdot cm^2$ であると高速とされている⁴⁾。塩化物イオン含有量 0.5%の試験体の多くは

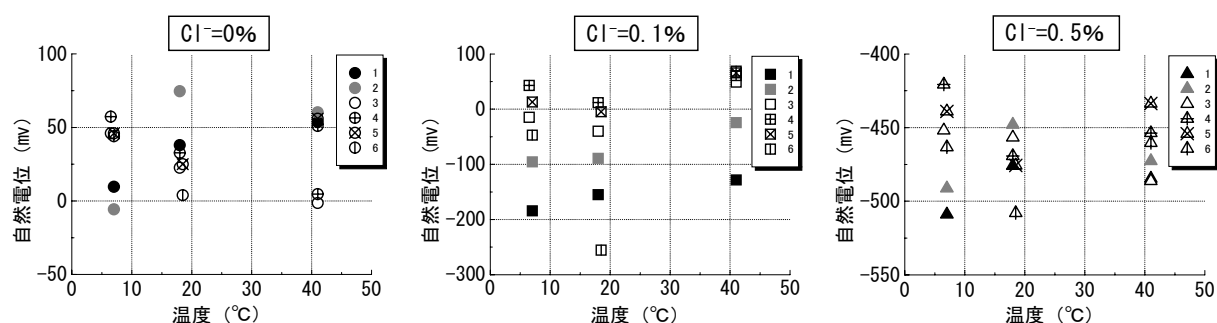
腐食速度が低～高速、含有量 0.1%または塩化物イオンを含まない試験体は全て腐食が不活性であると診断された。

3.3 測定結果の比較

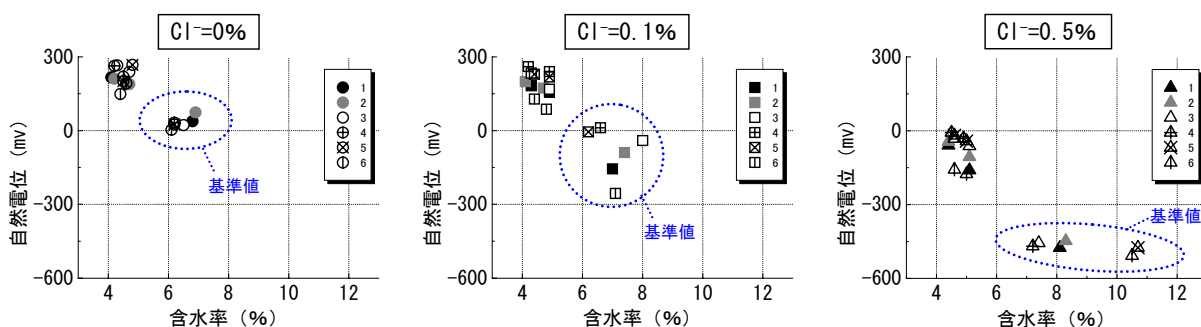
(1) 自然電位

図—2 に湿潤状態における、水セメント比 0.55, かぶり 42mm の各塩化物イオン含有量の試験体の測定温度と自然電位の関係を示す。図中の各記号は各種試験体の試験体番号を示す。測定温度を変化させると自然電位は変化するが、一様に増加あるいは減少傾向を示すものではなく、試験体によってその傾向は異なることがわかる。

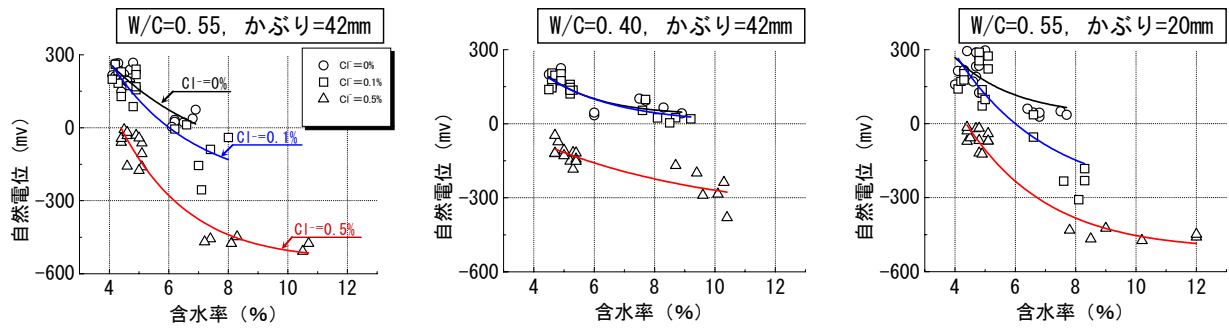
図—3 に水セメント比 0.55, かぶり 42mm, 測



図—2 各塩化物イオン含有量における温度と自然電位の関係



図—3 各塩化物イオン含有量における含水率と自然電位の関係



図—4 各水セメント比、かぶりにおける含水率と自然電位の関係

定温度 20℃の各塩化物イオン含有量の試験体における含水率と自然電位の関係を示す。いずれの塩化物イオン含有量においても、乾燥状態における自然電位は基準値よりも大きい値となった。また乾燥状態での自然電位は湿潤状態と比べて、塩化物イオン含有量 0%においては 150～250mv 程度、含有量 0.5%においては 300～450mv 程度大きい。塩化物イオン含有量が多いほど含水率が及ぼす影響が大きい傾向があると言える。この傾向は水セメント比、かぶり、温度を変えた場合においても同様であった。

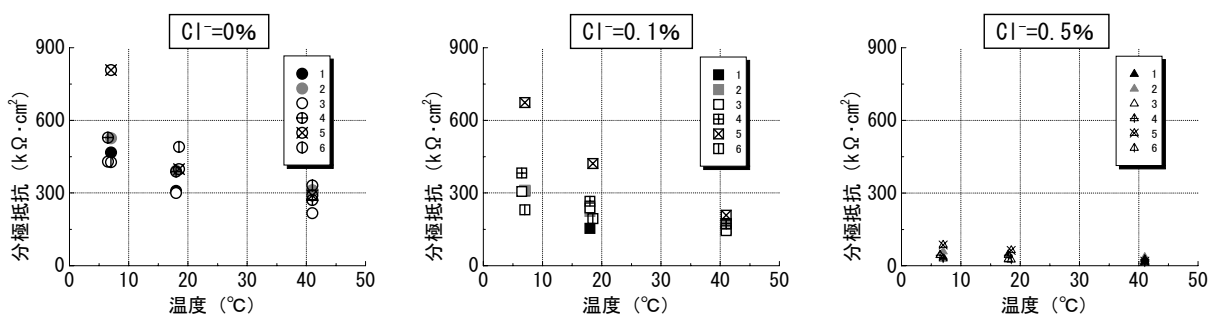
図—4 に温度 20℃における水セメント比とかぶりを変化させた試験体の含水率と自然電位の関係を示す。水セメント比が小さい場合、含水率が自然電位に及ぼす影響が小さいことがわかる。また、かぶりが変化しても、含水率が自然

電位に及ぼす影響に大きな違いは見られない。これらの傾向は、測定温度を変えた場合においても同様であった。

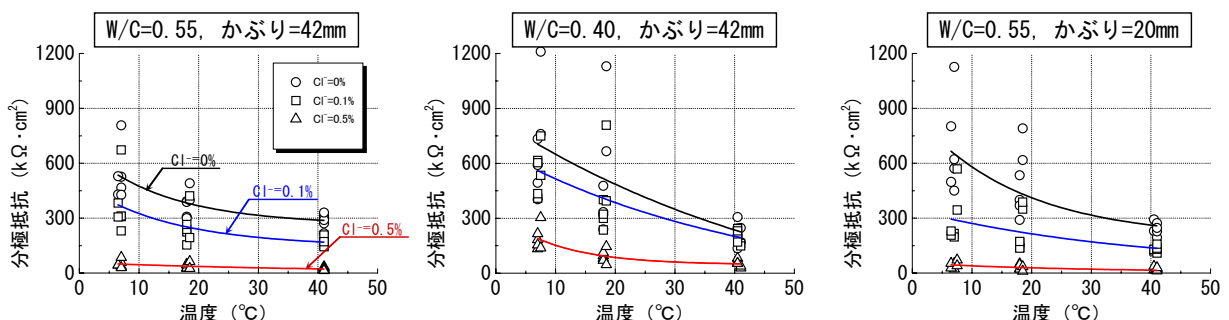
(2) 分極抵抗

図—5 に水セメント比 0.55、かぶり 42mm、湿潤状態の各塩化物イオン含有量の試験体における、測定温度と分極抵抗の関係を示す。いずれの塩化物イオン含有量においても、分極抵抗は基準温度 (20℃) より低い温度であると大きな値を、基準温度よりも高い温度であると小さな値を示す傾向がみられた。また塩化物イオン含有量が多いほど、環境温度が分極抵抗に及ぼす影響が小さい傾向は小さい。この傾向は水セメント比、かぶりを変えた場合においても同様であった。

図—6 に水セメント比とかぶりを変化させた



図—5 各塩化物イオン含有量における温度と分極抵抗の関係



図—6 各水セメント比、かぶりにおける温度と分極抵抗の関係

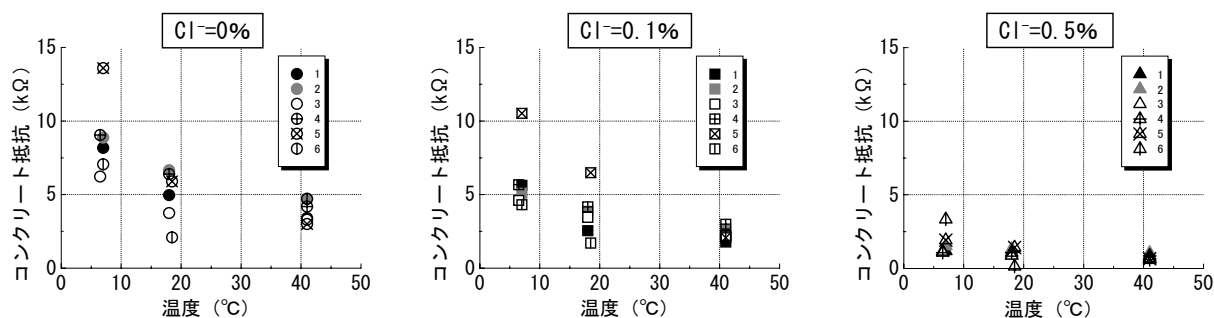
湿潤状態の試験体における，測定温度と分極抵抗の関係を示す。水セメント比が小さい場合，測定温度が分極抵抗に及ぼす影響は大きくなるが，かぶりが増加しても大きな違いは見られない。

(3) コンクリート抵抗

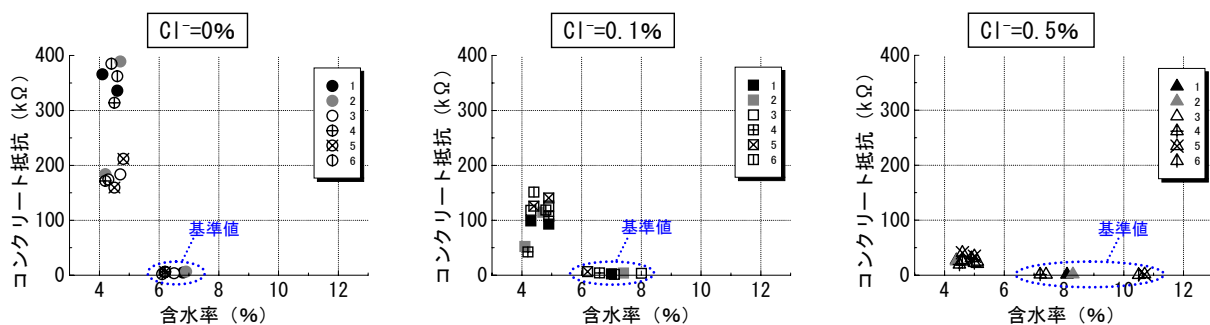
図—7に湿潤状態における，水セメント比0.55，の温度とコンクリート抵抗の関係を示す。い

れの含有量においてもコンクリート抵抗は基準温度（20℃）より低い温度であると大きな値を，基準温度よりも高い温度であると小さな値を示す傾向がみられた。また塩化物イオン含有量が多いほど，環境温度がコンクリート抵抗に及ぼす影響が小さい傾向があると言える。

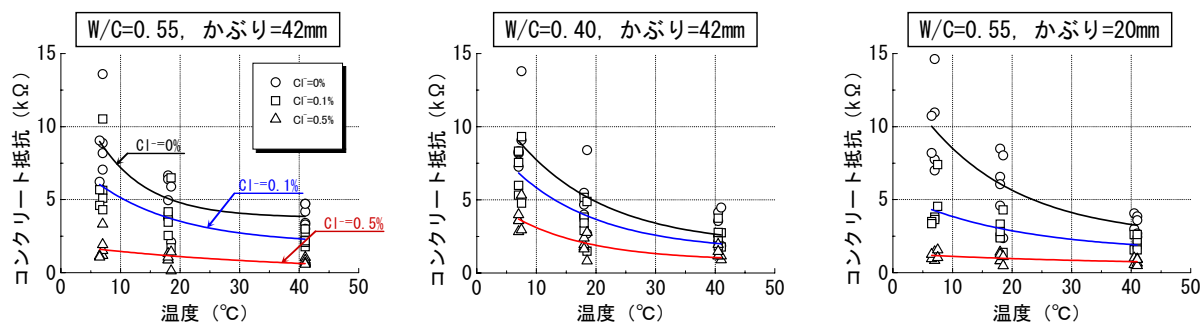
図—8に環境温度 20℃における，水セメント比0.55，かぶり 42mm の試験体の含水率とコンクリ



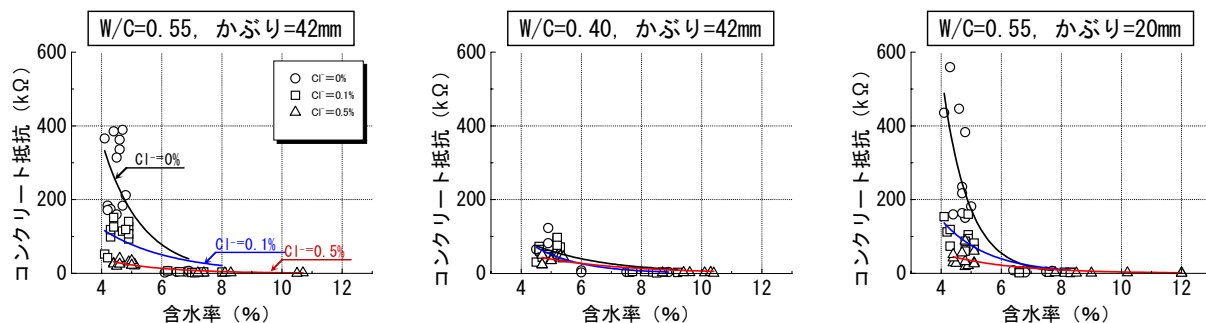
図—7 各塩化物イオン含有量における温度とコンクリート抵抗の関係



図—8 各塩化物イオン含有量における含水率とコンクリート抵抗の関係



図—9 各水セメント比，かぶりにおける温度とコンクリート抵抗の関係



図—10 各水セメント比，かぶりにおける含水率とコンクリート抵抗の関係

ート抵抗の関係を示す。いずれの含有量においても、乾燥状態のコンクリート抵抗の測定値は基準値より高い値となった。また塩化物イオン含有量が多いほど、乾燥状態における試験体の測定値と基準値の比は小さくなる傾向がみられた。

図—9に湿潤状態における、水セメント比とかぶりを変化させた試験体の測定温度とコンクリート抵抗の関係を示す。水セメント比が小さくなると、温度がコンクリート抵抗に及ぼす影響は大きくなり、かぶりの変化が両者の関係に与える影響はそれほど大きくない。

図—10に環境温度 20℃における、水セメント比とかぶりを変化させた試験体の含水率とコンクリート抵抗の関係を示す。水セメント比 0.55、かぶり 0.42mm の試験体において、塩化物イオン含有量が 0%および 0.1%の場合、ほぼ同一の含水率（5%付近、乾燥状態）で異なるコンクリート抵抗値を示すのに対し、水セメント比が 0.40 の試験体においては、塩化物イオン含有量によらず含水率とコンクリート抵抗値の関係は一定であると言える。また、かぶりの変化が含水率とコンクリート抵抗の関係に与える影響はそれほど大きくない。

4. まとめ

以下に本研究より得られた知見を示す。なお、かぶりの違いが電気化学的測定結果に与える影響はほとんど見られなかった。

(1) 自然電位

主として含水率が測定値に影響を及ぼし、乾燥状態における測定値は基準値よりも高くなると言える。また塩化物イオン含有量が多くなるほど、含水率が自然電位の測定値に与える影響は大きくなる。水セメント比を小さくした場合、含水率が自然電位の測定値に与える影響は小さくなる。

(2) 分極抵抗

主として測定温度が測定値に影響を及ぼす。測定温度が基準温度より高い場合は、分極抵抗の

測定値は基準値より小さくなり、測定温度が基準温度より低い場合は、分極抵抗の測定値は大きくなる。また塩化物イオン含有量が多くなるほど、測定温度が分極抵抗の測定値に与える影響は小さくなる。水セメント比を小さくした場合、測定温度が分極抵抗の測定値に与える影響は大きくなる。

(3) コンクリート抵抗

温度と含水率測定値ともに影響を及ぼす。測定温度が基準温度より高い場合は、コンクリート抵抗の測定値は基準値より小さくなり、測定温度が基準温度より低い場合は、コンクリート抵抗の測定値は大きくなる。乾燥状態のコンクリート抵抗値は基準値より高い値を示した。また塩化物イオン含有量が多くなるほど、測定温度と含水率がコンクリート抵抗の測定値に与える影響は小さくなる。水セメント比を小さくした場合、測定温度が分極抵抗の測定値に与える影響は大きくなり、含水率がコンクリート抵抗の測定値に与える影響は小さくなる。

謝辞

本研究で用いた試験体は、（独）港湾空港技術研究所LCM研究センターより提供して頂いたものであり、横田弘センター長、加藤絵万特任研究官および関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート構造物における自然電位測定方法, JSCE-E601-2000
- 2) 横田優, 電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, コンクリート工学年次論文報告集, vol.12, No.1, pp.545-550, 1990
- 3) ASTM C876: Half-cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 4) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft4) BBRI-CSTC-WTCB, Dec.1997