ＩＳＳＮ　０３８６－５８７８
土木研究所資料　第３９６２号

土 木 研 究 所 資 料

塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食に関する実験的研究

平成１７年３月

独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

Copyright c (2005) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the writtenpermission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3962号　2005年3月

塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食に関する実験的研究

構造物マネジメント技術チーム　主任研究員　片平　博
交流研究員　北山　良
交流研究員　松浦誠司
主席研究員　渡辺博志

要旨

鉄筋コンクリート構造物では、塩分による鉄筋腐食は極めて重大な問題である。本研究ではコンクリートの水セメント比、ひび割れの有無、ひび割れ補修の有無（および種類）等の条件を種々に設定した鉄筋コンクリート試験体を製造し、初期塩分量や外来塩に対する促進腐食試験を実施した。試験中の試験体の自然電位や分極抵抗を測定し、また、試験終了後の試験体から鉄筋を取り出して腐食状況を観察した。これらの結果から、塩分量や水セメント比と鉄筋腐食との関係、ひび割れが鉄筋腐食に与える影響、および各種補修の効果等について考察した。

キーワード：鉄筋コンクリート、塩分、塩化物イオン、鉄筋腐食、ひび割れ、補修、自然電位、
促進試験

はじめに

鉄筋コンクリート構造物では、塩分による鉄筋腐食が極めて重大な問題である。コンクリート中に塩分が存在すると鉄筋が腐食し、鉄筋の耐力が低下する。また、腐食に伴う膨張圧によってコンクリートにもひび割れが発生し、最終的には構造物としての性能を保持できなくなる。

このため、コンクリート中の塩分量が規制されている。現在のレディーミクストコンクリートの基準(JIS A 5308)ではコンクリート中の塩分量は一律に $0.3kg/m^3$ 以下と定められている。しかしながら、コンクリートの配合やひび割れの有無等によって鉄筋が腐食する塩分量が異なる可能性がある。また、ひび割れに対して様々な補修工法が提案されているが、これらの補修効果に関しても、十分な検討が行われているとはいい難い面がある。

そこで、コンクリートの水セメント比、ひび割れの有無、ひび割れ補修の有無（および種類）等の条件を種々に設定した鉄筋コンクリート試験体を製造し、初期塩や外来塩に対する促進腐食試験を実施した。試験中の試験体の自然電位や分極抵抗を測定し、また、試験終了後の試験体から鉄筋を取り出して腐食状況を観察した。これらの結果から、塩分量や水セメント比と鉄筋腐食の関係、ひび割れが鉄筋腐食に与える影響、および、ひび割れ補修の効果等について考察を行った。

塩分にはコンクリート中に最初から含まれている初期塩と、海からの飛来塩や凍結防止剤等が外部から進入する外来塩とがある。初期塩に関する実験結果を第Ⅰ節に、外来塩に関する実験結果を第Ⅱ節に示す。

なお、測定データ、実験状況写真、試験後の鉄筋の腐食状態写真、ＥＰＭＡ分析結果等の資料を巻末のＣＤ－Ｒに収録する。

第Ⅰ節　初期塩に関する実験

第Ⅰ節　目次

1．実験方法 ……5
1.1　コンクリートの配合 ……5
1.2　試験体の製造 ……5
1.3　ひび割れの製造と補修方法 ……6
1.4　促進試験方法 ……6
1.5　鉄筋腐食量の測定6 ……7
1.6　試験体中の塩分量測定 ……7

2．実験結果と考察 ……8
2.1　自然電位測定結果 ……8
2.2　分極抵抗測定結果 ……8
2.3　鉄筋腐食状態の観察 ……13
2.4　塩分量、水セメント比と鉄筋腐食量の関係 ……15
2.5　ひび割れの影響と補修の効果について ……16
2.6　塩分量測定結果 ……16
2.7　暴露試験結果 ……17

3．まとめ ……19

1．実験方法

1.1 コンクリートの配合

試験体の作製に使用したコンクリート材料の品質を表－１に示す。コンクリートの配合は水セメント比を 40，55，70 %の３水準とし、表－２に示す配合とした。また、各コンクリート配合に対して表－３に示すように塩化ナトリウムを 0，0.6，1.2，2.5，5.0kg/m^3 添加した配合を設定し、合計で 11 バッチの練混ぜを行った。

表－１　コンクリート使用材料

水	水道水
ｾﾒﾝﾄ	普通ポルトランドセメント，密度3.16g/cm^3
細骨材	川砂，密度2.60g/cm^3，吸水率1.05%
粗骨材	川砂，密度2.67g/cm^3，吸水率0.61%
AE減水剤	リグニンスルホン酸塩
AE助剤	界面活性剤

表－２　コンクリート配合とフレッシュ性状

配合名	粗骨材最大寸法(mm)	水ｾﾒﾝﾄ比(%)	目標空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m^3)				混和剤量(g/m^3)		測定ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)	測定空気量(%)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤		
W/C40	20	55	4.5	45	160	400	785	982	1240	8	4.5	3.6
W/C55	20	55	4.5	45	160	291	826	1032	902	2.9	9.6	4.3
W/C70	20	55	4.5	45	160	229	849	1062	710	2.3	6.7	4.1

表－３　塩化物イオン含有量（コンクリート１m^{3}当たり）

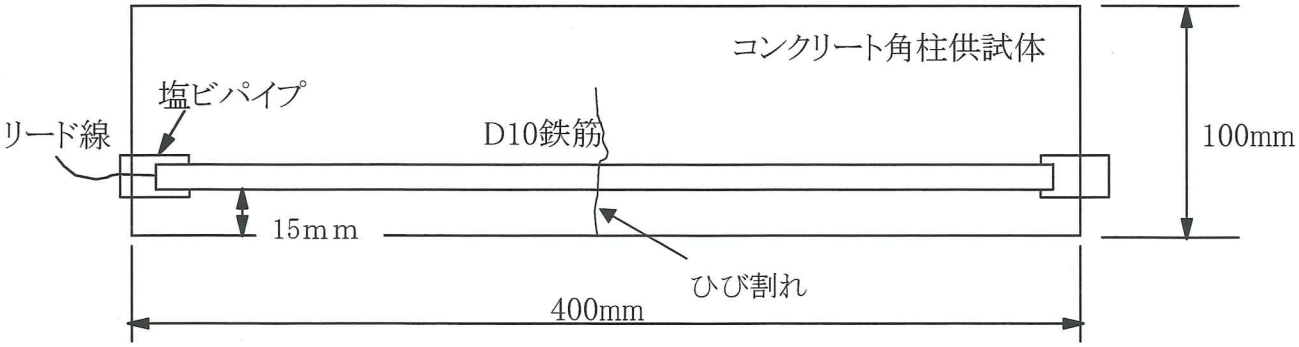
W/C(%)	塩化物イオン含有量(kg/m^3)
40	0.6　2.5　5.0
55	0.0　0.6　1.2　2.5　5.0
70	0.6　1.2　2.5

1.2 試験体の製造

練り混ぜたコンクリートを用いて図－１に示す試験体(10 × 1040cm 角柱)を１配合あたり４本製造した。４本の内訳は表－４に示すとおりである。この試験体には異形鉄筋 D10 を配置し、試験体底面からのかぶり厚さを 15mm とした。コンクリート打設後、翌日に脱枠し、14 日間湿布養生を行い、その後は気間放置した。

表－４　試験体と試験の種類

No.	ひび割れ・補修の条件	試験条件
①	ひび割れなし	促進試験
②	ひび割れあり、補修なし	
③	ひび割れあり、補修なし	暴露試験
④	ひび割れあり、補修あり	促進試験



図－1　試験体形状図

1.3　ひび割れの製造と補修方法

１配合あたり４本製造した試験体のうち３本については、試験体製造後約１ヶ月を経過した時点で、中央点載荷法によるコンクリートの曲げ強度試験方法（JIS A 1106 付属書）を実施し、試験体中央付近にひび割れを発生させた。ひび割れ幅は 0.2mm 程度を目標とした。

ひび割れは図－１に示すように試験体の中央部に１本入れることを目標としたが、実際にはひび割れが枝別れするような状態も観察された（写真集参照）。このため、中央に１本だけひび割れが生じたものを表－４中の②に使用し、ひび割れが多く入ったものは③に使用した。

図-１に示す試験体の下面を上向きにし、その面以外の５面をシリコン系シーリング材でシールした。さらに、表－４に示す④についてはひび割れ表面をパテでコーティングした後に、ひび割れに対して低圧樹脂注入を行った。使用した材料を表－５に示す。

表－5　パテ材・注入材

ひび割れ表面に使用したパテ材	２液型エポキシ樹脂系注入用接着剤
ひび割れ注入材	低粘度型２液型エポキシ樹脂系注入用接着剤　BL グラウト

1.4　促進試験方法

試験体打ち込み後、約２ヶ月を経過した時点から表－４に示す①②④の試験体について促進試験を実施した。

促進試験の方法は日本コンクリート工学協会で定めている JCI-SC3 の方法に準拠した。すなわち、恒温恒湿槽を使用して、以下の工程を１サイクルとし、20 サイクルまで試験を行った。

・湿潤環境：温度 65 ℃、相対湿度 95 %、３日間
・乾燥環境：温度 18 ℃、相対湿度 40 %、４日間

なお、１サイクルごとに鉄筋の自然電位と分極抵抗を測定した。自然電位の照合電極には飽和塩化銀電極を用い、測定した電位は式(1)により飽和硫酸銅電極換算値に変換した。

$$E = E' - 120 - 1.1 \times (t - 25) \qquad (1)$$

ここに、E：自然電位　（ 飽和硫酸銅電極換算値 mV:CSE ）
E'：測定した自然電位　（mV）
t ：測定時の温度

表－４に示す試験体③については屋外に暴露し、７日ごとに鉄筋の自然電位と分極抵抗を測定した。

1.5　鉄筋腐食量の測定

20 サイクルの促進試験を終了した試験体から鉄筋を取り出し、腐食状態を観察した。

腐食状態は以下の腐食面積と腐食度で評価した。

(1)腐食面積率

鉄筋の表面（かぶりコンクリート側）と裏面のそれぞれの腐食面積率を２名の技術者で目視判定した。２名の判定結果の差は最大で 20%，平均では 3.0%程度であった。

(2)腐食度

表－６に示すコンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）改訂版 2003.3 の鉄筋の腐食状況に応じた評価（腐食度２，３，４）を行った。なお、２と３の明確な区別が付けられないものは 2.5 に、錆が見られるが表面的な軽微な錆が一箇所程度であれば 3.5 と判定した。また、どの鉄筋も断面欠損までは進行していなかったと判断されたが，一番腐食が著しいものを腐食度２と判定した。

表－６　鉄筋の腐食度に応じた評価

鉄筋の腐食状況	鉄筋腐食度
断面欠損が著しい腐食	1
浅い孔食など断面欠損の軽微な腐食	2
ごく表面的な腐食	3
腐食なし	4

（出典　コンクリート構造物の健全度診断マニュアル（案）改訂版）

1.6　試験体中の塩分量測定

試験終了後の試験体からコンクリート試料を採取し、コンクリート中の塩分量を測定した。測定方法は JCI-SC4 に示される塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法とした。

試料の採取位置は鉄筋近傍を基本とした。なお、いくつかの試験体については表面から 1cm ピッチで試験体をスライスし、塩分量の奥行き方法の分布を測定した。

さらに、促進試験を行った試験体とは別に、同一バッチのフレッシュコンクリートを用いて円柱供試体を作製した。この円柱供試体は標準養生を行った後に、促進試験の期間中は気乾状態で放置し、促進試験終了の時点で塩分量を測定した。

2．実験結果と考察

2.1　自然電位測定結果

自然電位の測定結果を表－７および図－２に示す。また、１～20サイクルの自然電位の値について異常値を棄却して平均値を求めた結果を図－３に示す。

自然電位に関しては以下の傾向が認められた。

(1)塩分を含まない試験体の自然電位は実験開始前の値からほとんど変化しなかった。

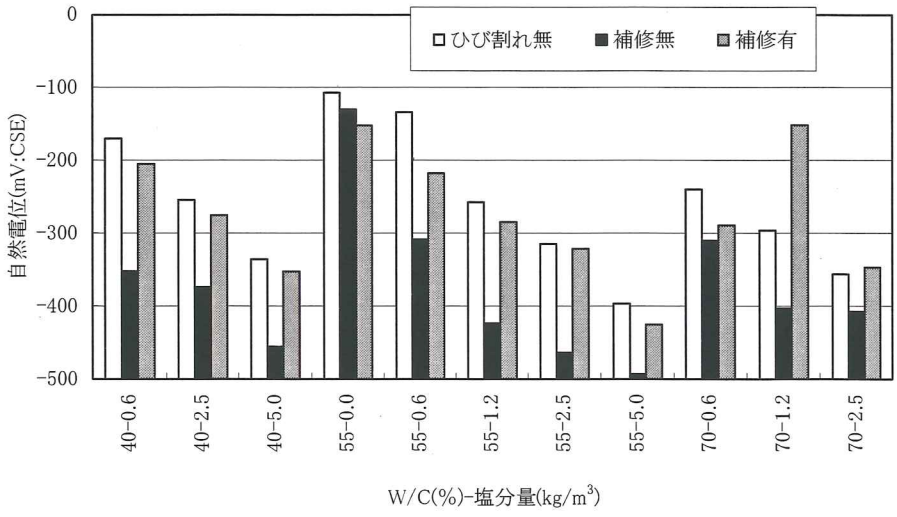
(2)塩分を含む試験体の自然電位の推移としては、１サイクル目で卑側に大きく移行し、その後、わずかに貴側に戻るものが多かった。

(3)ひび割れの無い試験体の結果について、同一水セメント比の試験体同士を比較すると、塩分量の多い試験体ほど、自然電位の値が卑となる傾向を示した。

(4)ひび割れの無い試験体の結果について、同一塩分量の試験体同士を比較すると、水セメント比が大きくなるほど、わずかに自然電位の値が卑となる傾向を示した。

(5)ひび割れ無しの試験体に比較して、ひび割れあり(補修なし)の試験体の自然電位は卑となる傾向を示した。

(6)ひび割れを補修した試験体の自然電位は補修なしのものよりも貴の値を示し、ひび割れ無しの試験体の値に近いものであった。



図－３　コンクリート配合と自然電位の関係

2.2　分極抵抗測定結果

分極抵抗の測定結果を表－８および図－４に示す。

分極抵抗の測定結果は自然電位に比較して安定したデータは得られたかったが、概ね以下のような傾向が認められた。

(1)ひび割れの無い試験体の結果については、塩分量の多い試験体ほど、分極抵抗の値が小さくなる傾向を示した。

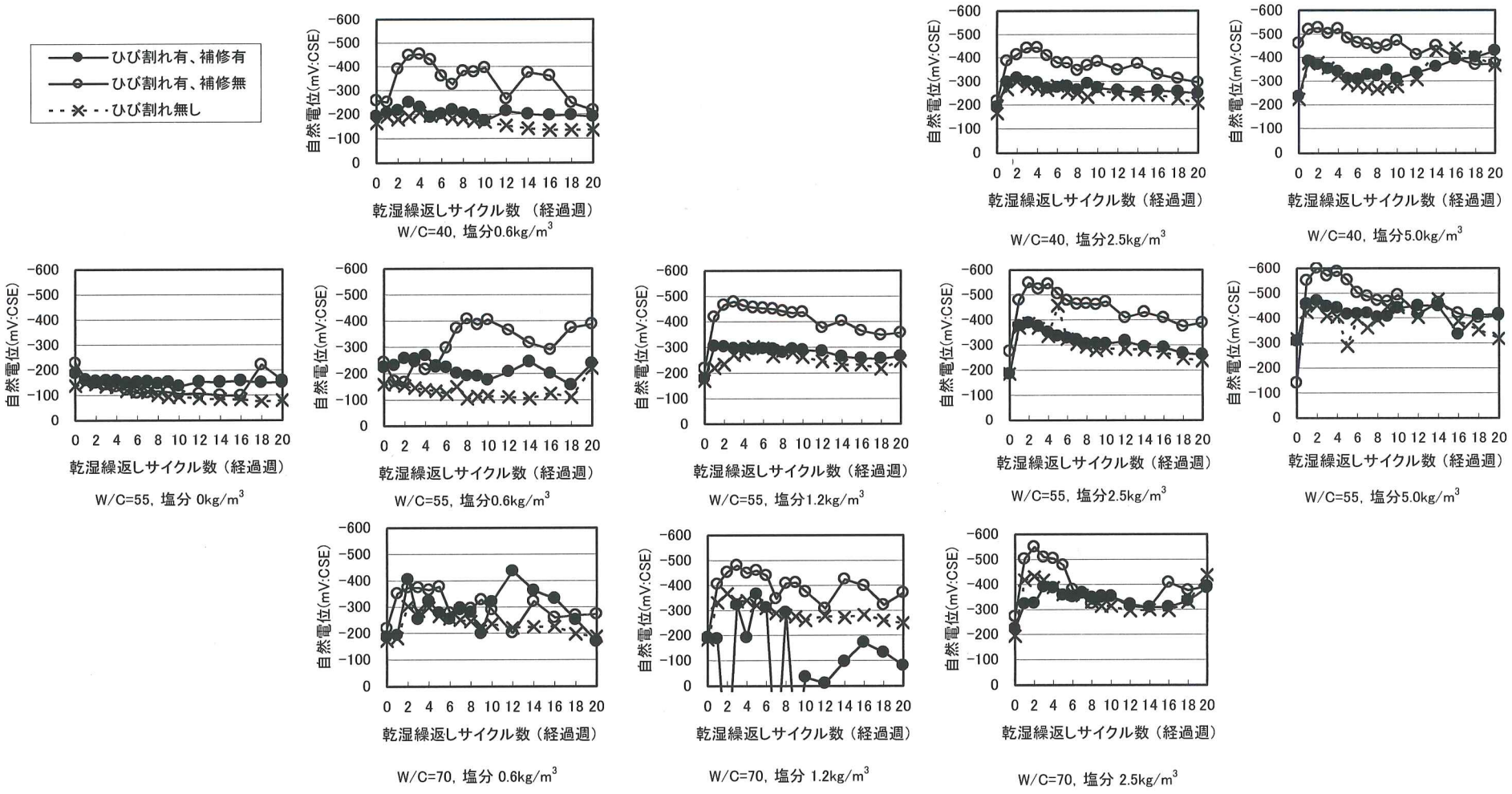
(2)ひび割れ無しの試験体に比較してひび割れあり(補修なし)の試験体の分極抵抗は小さくなる傾向を示した。

(3)ひび割れを補修した試験体の分極抵抗は、ひび割れ無しの試験体の値よりも大きな値を示した。

表－7 自然電位測定結果

（単位 mV:CSE）

W/C-塩分量	サイクル数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
40－0.6	ひび割れ有、補修有	-192	-205	-217	-250	-229	-188	-202	-218	-205	-196	-172	-213	-200	-195	-196	-190
	ひび割れ有、補修無	-257	-251	-391	-448	-453	-430	-360	-325	-381	-377	-396	-264	-375	-361	-248	-216
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-265	-192	-204	-182	-174	-151	-268	-178	-335	-205	-164	-179	-212	-303	-202	-288
	ひび割れ無し	-163	-190	-179	-190	-207	-194	-195	-182	-179	-173	-169	-153	-141	-135	-134	-134
40－2.5	ひび割れ有、補修有	-191	-297	-315	-298	-294	-270	-274	-279	-263	-291	-272	-261	-252	-259	-256	-248
	ひび割れ有、補修無	-217	-387	-413	-442	-444	-410	-378	-377	-346	-367	-383	-348	-375	-330	-312	-295
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-294	-244	-276	-267	-252	-231	-260	-267	-308	-305	-257	-260	-193	-330	-286	-350
	ひび割れ無し	-164	-266	-299	-280	-267	-262	-281	-252	-246	-232	-265	-246	-241	-241	-225	-206
40－5.0	ひび割れ有、補修有	-235	-384	-370	-352	-340	-310	-308	-327	-322	-346	-311	-336	-361	-392	-400	-429
	ひび割れ有、補修無	-461	-519	-527	-501	-522	-482	-463	-458	-439	-451	-472	-411	-449	-396	-369	-374
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-373	-398	-435	-426	-440	-356	-394	-373	-414	-397	-377	-377	-324	-281	-309	-342
	ひび割れ無し	-223	-374	-379	-355	-323	-290	-281	-273	-265	-276	-276	-306	-430	-439	-401	-365
55－0.0	ひび割れ有、補修有	-188	-159	-149	-158	-158	-149	-152	-155	-146	-152	-136	-153	-152	-158	-149	-150
	ひび割れ有、補修無	-227	-162	-157	-142	-134	-121	-109	-111	-116	-112	-105	-105	-100	-98	-220	-157
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-240	-177	-160	-158	-158	-151	-146	-142	-131	-134	-129	-140	-214	-423	-247	-196
	ひび割れ無し	-138	-149	-143	-135	-132	-117	-115	-113	-100	-93	-94	-88	-84	-83	-76	-79
55－0.6	ひび割れ有、補修有	-224	-231	-257	-255	-268	-225	-223	-201	-191	-190	-176	-207	-245	-200	-156	-238
	ひび割れ有、補修無	-243	-171	-166	-246	-215	-230	-298	-371	-409	-386	-405	-365	-316	-290	-373	-388
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-248	-218	-200	-190	-172	-161	-154	-149	-155	-147	-194	-178	-146	-315	-168	-170
	ひび割れ無し	-158	-160	-154	-146	-139	-134	-122	-150	-105	-113	-115	-111	-105	-125	-110	-219
55－1.2	ひび割れ有、補修有	-177	-305	-303	-296	-297	-292	-296	-294	-280	-294	-290	-285	-264	-257	-255	-265
	ひび割れ有、補修無	-218	-420	-466	-479	-464	-456	-453	-451	-442	-435	-439	-376	-404	-364	-348	-356
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-251	-230	-199	-197	-195	-178	-173	-174	-217	-186	-179	-167	-372	-363	-269	-319
	ひび割れ無し	-170	-220	-234	-269	-274	-303	-297	-265	-287	-279	-262	-246	-231	-233	-216	-246
55－2.5	ひび割れ有、補修有	-185	-377	-389	-374	-351	-335	-327	-320	-304	-306	-305	-316	-293	-291	-267	-262
	ひび割れ有、補修無	-275	-479	-548	-524	-545	-505	-479	-463	-466	-462	-473	-409	-431	-410	-375	-388
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-240	-317	-259	-294	-259	-268	-313	-374	-377	-383	-378	-369	-417	-333	-414	-417
	ひび割れ無し	-185	-369	-385	-367	-336	-458	-324	-303	-293	-278	-287	-283	-281	-270	-246	-237
55－5.0	ひび割れ有、補修有	-308	-457	-470	-447	-441	-415	-417	-420	-404	-407	-441	-450	-449	-334	-414	-416
	ひび割れ有、補修無	-141	-551	-600	-570	-587	-553	-502	-488	-471	-467	-492	-416	-462	-420	-402	-410
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-298	-469	-486	-485	-471	-408	-457	-469	-506	-496	-453	-488	-507	-386	-416	-489
	ひび割れ無し	-317	-423	-450	-408	-403	-287	-398	-360	-392	-444	-444	-403	-476	-387	-353	-317
70－0.6	ひび割れ有、補修有	-186	-192	-404	-253	-323	-277	-254	-288	-279	-198	-319	-436	-362	-332	-251	-168
	ひび割れ有、補修無	-219	-351	-373	-373	-364	-376	-278	-296	-294	-328	-289	-201	-322	-259	-268	-273
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-214	-239	-195	-189	-178	-314	-298	-68	-152	-205	-158	-177	-170	-127	-172	-255
	ひび割れ無し	-172	-181	-302	-285	-297	-265	-255	-250	-245	-226	-235	-221	-225	-226	-197	-188
70－1.2	ひび割れ有、補修有	-189	-188	346	-322	-191	-365	-310	318	-292	223	-35	-10	-95	-171	-132	-80
	ひび割れ有、補修無	-192	-405	-452	-480	-448	-459	-439	-346	-407	-411	-374	-307	-424	-398	-321	-370
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-236	-249	-239	-268	-222	-197	-195	-183	-197	-219	-188	-208	-233	-258	-280	-361
	ひび割れ無し	-183	-331	-367	-336	-339	-319	-308	-288	-281	-274	-260	-277	-272	-282	-260	-249
70－2.5	ひび割れ有、補修有	-224	-322	-324	-389	-386	-357	-350	-367	-347	-352	-351	-322	-309	-310	-334	-386
	ひび割れ有、補修無	-272	-502	-550	-509	-504	-477	-379	-364	-323	-347	-352	-313	-308	-408	-377	-392
	ひび割れ有、補修無(暴露)	-230	-331	-339	-288	-336	-317	-318	-341	-348	-374	-382	-367	-431	-336	-420	-441
	ひび割れ無し	-194	-417	-431	-417	-387	-360	-361	-356	-330	-313	-313	-294	-299	-295	-328	-438

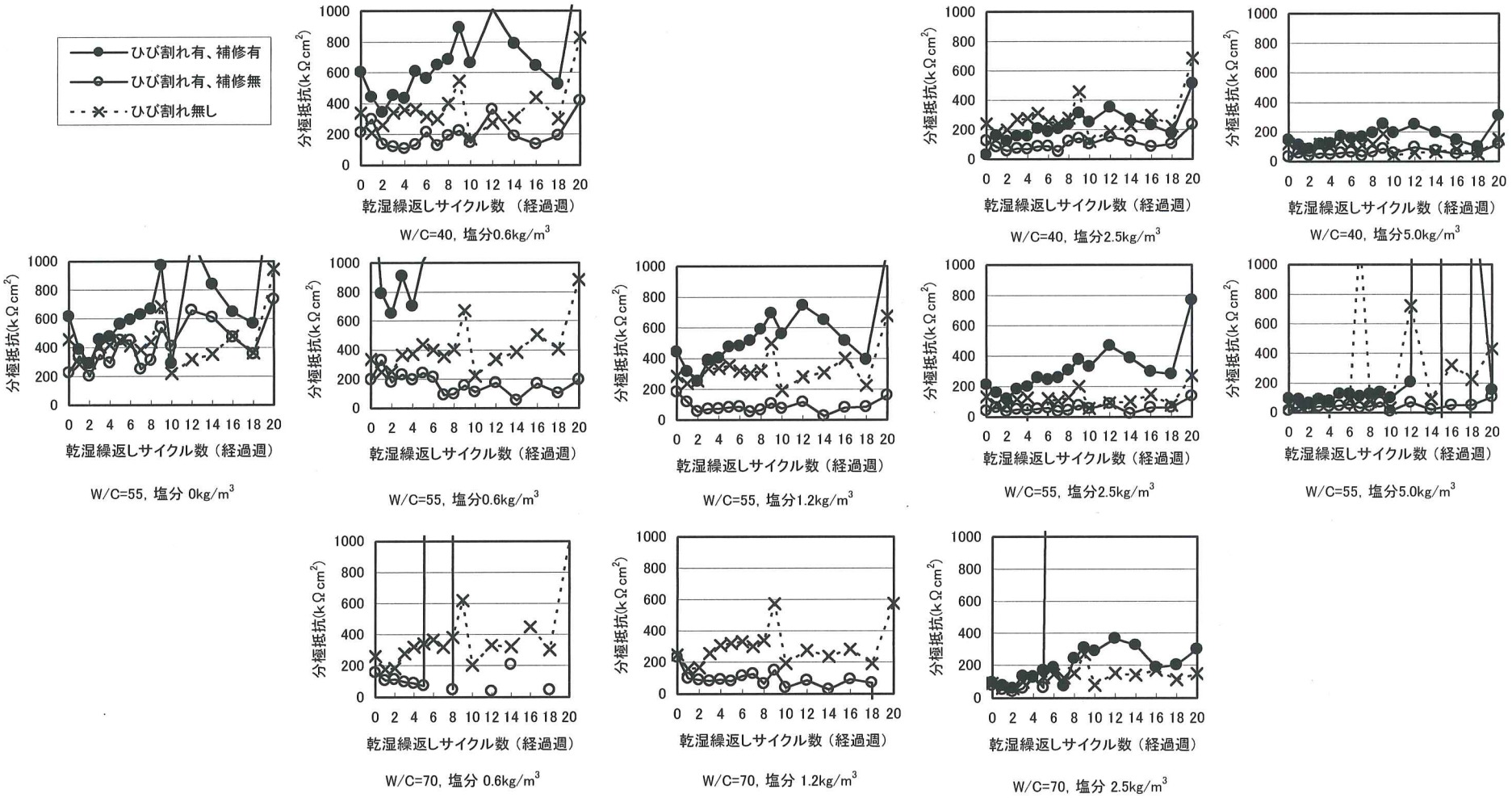

ひび割れ有、補修有
ひび割れ有、補修無
ひび割れ無し
自然電位(mV:CSE)
乾湿繰返しサイクル数（経過週）
W/C=40, 塩分0.6kg/m3
W/C=40, 塩分2.5kg/m3
W/C=40, 塩分5.0kg/m3
W/C=55, 塩分 0kg/m3
W/C=55, 塩分0.6kg/m3
W/C=55, 塩分1.2kg/m3
W/C=55, 塩分2.5kg/m3
W/C=55, 塩分5.0kg/m3
W/C=70, 塩分 0.6kg/m3
W/C=70, 塩分 1.2kg/m3
W/C=70, 塩分 2.5kg/m3

図－2 自然電位測定結果

表－8 分極抵抗測定結果

(単位 $k\Omega cm^2$)

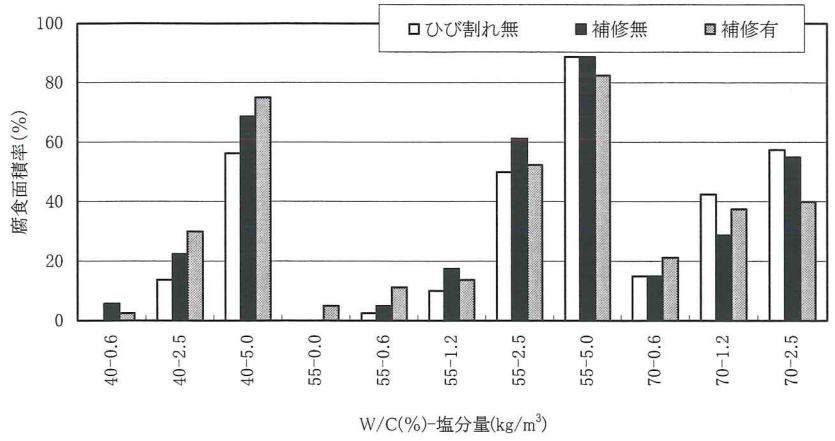
W/C-塩分量	サイクル数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
40－0.6	ひび割れ有、補修有	603	443	344	452	435	608	562	649	684	892	662	1009	789	644	523	1351
	ひび割れ有、補修無	212	299	135	119	106	133	213	125	192	223	146	363	189	135	192	418
	ひび割れ有、補修無(暴露)	107	107	96	125	153	168	88	114	91	114	115	147	123	62	122	145
	ひび割れ無し	341	207	258	341	361	364	316	299	402	545	170	274	310	440	302	829
40－2.5	ひび割れ有、補修有	29	160	122	156	156	209	186	205	236	314	251	352	271	232	176	514
	ひび割れ有、補修無	124	84	57	73	68	86	88	50	122	142	101	151	122	85	103	236
	ひび割れ有、補修無(暴露)	62	67	59	85	91	94	61	68	76	88	88	85	89	54	93	123
	ひび割れ無し	244	178	199	271	277	312	256	241	280	458	122	186	226	299	223	684
40－5.0	ひび割れ有、補修有	145	113	85	117	122	170	156	166	193	254	193	252	195	146	100	311
	ひび割れ有、補修無	31	55	39	54	48	57	62	36	64	86	58	97	74	52	58	120
	ひび割れ有、補修無(暴露)	39	35	29	44	49	64	34	39	45	56	47	64	59	38	77	107
	ひび割れ無し	118	76	83	116	124	136	122	110	116	186	41	59	64	80	51	151
55－0.0	ひび割れ有、補修有	616	386	289	457	478	562	595	630	669	970	289	1147	841	649	567	1688
	ひび割れ有、補修無	227	341	203	350	294	452	452	250	312	537	409	661	611	472	356	737
	ひび割れ有、補修無(暴露)	108	120	110	145	151	150	107	104	123	133	123	137	115	46	115	151
	ひび割れ無し	456	286	297	405	416	449	414	382	439	686	222	317	353	480	363	943
55－0.6	ひび割れ有、補修有	1761	790	652	907	703	1011	1137	1183	1423	2002	1652	1978	1773	1387	1278	2243
	ひび割れ有、補修無	198	329	181	233	195	244	213	90	97	157	111	175	53	170	103	197
	ひび割れ有、補修無(暴露)	127	122	117	150	169	139	113	108	129	141	123	141	146	57	176	200
	ひび割れ無し	336	247	251	365	373	437	399	357	403	673	222	336	386	504	406	884
55－1.2	ひび割れ有、補修有	443	317	253	390	403	475	481	515	590	695	560	747	652	514	393	1110
	ひび割れ有、補修無	183	118	55	70	72	82	87	52	64	107	74	117	26	80	84	160
	ひび割れ有、補修無(暴露)	90	79	74	94	114	110	79	84	98	112	88	109	94	45	114	135
	ひび割れ無し	287	239	257	335	338	357	318	302	320	498	193	281	310	402	226	677
55－2.5	ひび割れ有、補修有	212	160	118	183	199	257	246	258	308	377	330	469	387	299	282	769
	ひび割れ有、補修無	39	62	34	49	44	53	58	35	42	75	55	86	20	59	61	136
	ひび割れ有、補修無(暴露)	47	49	49	62	78	77	53	52	58	65	52	68	70	46	82	104
	ひび割れ無し	131	81	71	115	125	-48964	120	103	127	203	56	93	100	147	77	273
55－5.0	ひび割れ有、補修有	95	90	65	89	79	127	127	108	127	139	97	206	19537	-18814	1616	153
	ひび割れ有、補修無	12	39	30	40	41	45	54	31	42	68	8	67	19	50	48	104
	ひび割れ有、補修無(暴露)	12	33	29	39	50	58	39	43	41	50	46	61	62	48	71	98
	ひび割れ無し	51	40	45	75	74	-29909	80	1206	73	121	31	724	93	320	223	431
70－0.6	ひび割れ有、補修有	535	-23999	-39316	13025	10758	12542	-104198	-58129	57526	-44984	-28462	23035	-28220	-18934	160398	-40883
	ひび割れ有、補修無	157	105	112	97	88	72	25326	149544	47	-72963	-153162	37	206	101545	45	67898
	ひび割れ有、補修無(暴露)	102	233	95	142	122	-124218	-28341	-89847	-30994	115	104	148	159	98	26	175
	ひび割れ無し	259	175	182	276	318	340	364	317	382	621	204	330	320	449	302	1001
70－1.2	ひび割れ有、補修有	300	-29065	4052	440	-658476	-44622	569	180	1028	-26291	-60903	-51979	26532	-29909	148338	-19175
	ひび割れ有、補修無	230	98	88	82	90	81	111	127	63	148	39	84	27	92	70	-32562
	ひび割れ有、補修無(暴露)	85	98	89	83	114	123	114	104	98	116	95	129	128	78	34	139
	ひび割れ無し	247	157	165	256	306	320	330	299	336	574	192	275	235	281	189	576
70－2.5	ひび割れ有、補修有	95	76	59	133	124	168	187	72	241	309	288	365	326	187	201	299
	ひび割れ有、補修無	77	51	38	59	130	63	6344	13387	12181	77666	7863	7393	6754	26291	50290	7152
	ひび割れ有、補修無(暴露)	57	74	67	54	65	96	65	59	63	83	52	55	116	55	37	107
	ひび割れ無し	90	60	57	97	121	125	144	122	151	268	77	152	140	170	111	147


ひび割れ有、補修有
ひび割れ有、補修無
ひび割れ無し
分極抵抗(kΩcm²)
乾湿繰返しサイクル数（経過週）
W/C=40, 塩分0.6kg/m³
W/C=40, 塩分2.5kg/m³
W/C=40, 塩分5.0kg/m³
W/C=55, 塩分 0kg/m³
W/C=55, 塩分0.6kg/m³
W/C=55, 塩分1.2kg/m³
W/C=55, 塩分2.5kg/m³
W/C=55, 塩分5.0kg/m³
W/C=70, 塩分 0.6kg/m³
W/C=70, 塩分 1.2kg/m³
W/C=70, 塩分 2.5kg/m³

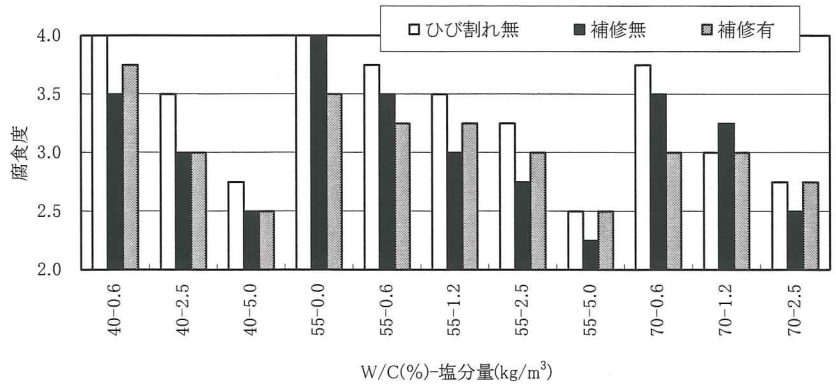
図－4 分極抵抗測定結果

2.3 鉄筋腐食状態の観察

試験終了後にコンクリートから取り出した鉄筋の観察結果を表－９に示す。このうち腐食面積率を図－５に、腐食度を図－６に示す。また、腐食面積と腐食度との対応関係を図－７に示す。



図－５ コンクリート配合と腐食面積率の関係



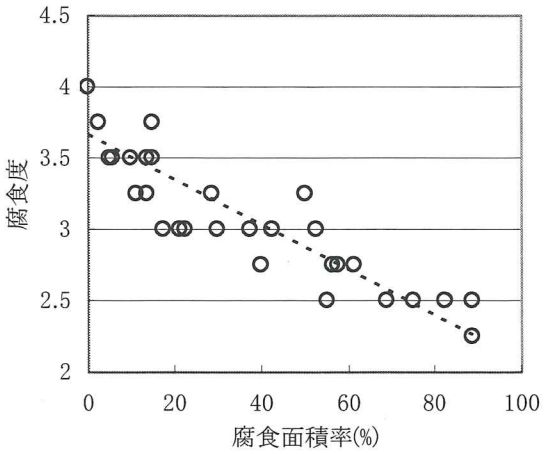
図－６ コンクリート配合と腐食度の関係

鉄筋の腐食状態については概ね以下のような傾向が認められた。

(1) 鉄筋の腐食面積と腐食度とは概ね良く対応した。

(2) ひび割れの無い試験体の結果について、同一水セメント比の試験体同士を比較すると、塩分量の多い試験体ほど、腐食面積は大きく、腐食度の値は小さくなる傾向を示した。

(3) ひび割れの無い試験体の結果について、同一塩分量の試験体同士を比較すると、水セメント比が高いものほど、わずかに腐食面積は大きく、腐食度の値は小さくなる傾向を示した。



図－７ 腐食面積率と腐食度の関係

(4) ひび割れの影響や補修の効果に関しては、わずかに違いが認められるケースもあるが、全体としては明確な傾向は認められなかった。

表－9 鉄筋腐食の観察結果

W/C-塩分量		腐食度			腐食面積率(%)						備考
		表面	裏面	平均	表面		裏面		平均	腐食の特徴	自然電位
					技術者A	技術者B	技術者A	技術者B			平均(1-18)
40－0.6	ひび割れ有、補修有	4	3.5	3.75	3	2	2	3	2.5	中央部のみ錆	-205
	ひび割れ有、補修無	3.5	3.5	3.5	5	10	3	5	5.75	中央部のみ錆	-352
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-216
	ひび割れ無し	4	4	4	0	0	0	0	0	健全	-170
40－2.5	ひび割れ有、補修有	3	3	3	40	45	15	20	30		-275
	ひび割れ有、補修無	3	3	3	25	25	20	20	22.5	中央部のみ錆	-374
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-272
	ひび割れ無し	3	4	3.5	25	30	0	0	13.75		-254
40－5.0	ひび割れ有、補修有	2.5	2.5	2.5	80	70	75	75	75		-352
	ひび割れ有、補修無	2.5	2.5	2.5	90	85	60	40	68.75		-456
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-376
	ひび割れ無し	2.5	3	2.75	90	90	25	20	56.25		-336
55－0.0	ひび割れ有、補修有	3.5	3.5	3.5	5	5	5	5	5		-152
	ひび割れ有、補修無	4	4	4	0	0	0	0	0		-130
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-180
	ひび割れ無し	4	4	4	0	0	0	0	0		-107
55－0.6	ひび割れ有、補修有	3	3.5	3.25	15	20	5	5	11.25		-217
	ひび割れ有、補修無	3.5	3.5	3.5	5	5	5	5	5		-309
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-181
	ひび割れ無し	3.5	4	3.75	5	5	0	0	2.5		-134
55－1.2	ひび割れ有、補修有	3	3.5	3.25	25	20	5	5	13.75		-285
	ひび割れ有、補修無	3	3	3	25	15	15	15	17.5		-424
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-228
	ひび割れ無し	3	4	3.5	20	20	0	0	10		-257
55－2.5	ひび割れ有、補修有	2.5	3.5	3	75	75	30	30	52.5		-321
	ひび割れ有、補修無	3	2.5	2.75	50	50	75	70	61.25		-464
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-345
	ひび割れ無し	3	3.5	3.25	90	90	10	10	50	黒錆は斑点状	-315
55－5.0	ひび割れ有、補修有	2.5	2.5	2.5	85	85	80	80	82.5		-425
	ひび割れ有、補修無	2.5	2	2.25	80	85	95	95	88.75		-493
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-466
	ひび割れ無し	2.5	2.5	2.5	90	80	95	90	88.75		-396
70－0.6	ひび割れ有、補修有	3	3	3	20	10	25	30	21.25		-289
	ひび割れ有、補修無	3.5	3.5	3.5	20	15	15	10	15		-310
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-193
	ひび割れ無し	3.5	4	3.75	30	30	0	0	15		-240
70－1.2	ひび割れ有、補修有	3	3	3	60	55	20	15	37.5		
	ひび割れ有、補修無	3	3.5	3.25	55	50	5	5	28.75		-403
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-233
	ひび割れ無し	2.5	3.5	3	85	70	5	10	42.5		-296
70－2.5	ひび割れ有、補修有	2.5	3	2.75	70	50	20	20	40		-347
	ひび割れ有、補修無	2.5	2.5	2.5	60	60	50	50	55		-407
	ひび割れ有、補修無(暴露)										-358
	ひび割れ無し	2.5	3	2.75	80	80	30	40	57.5	全面に黒錆	-356

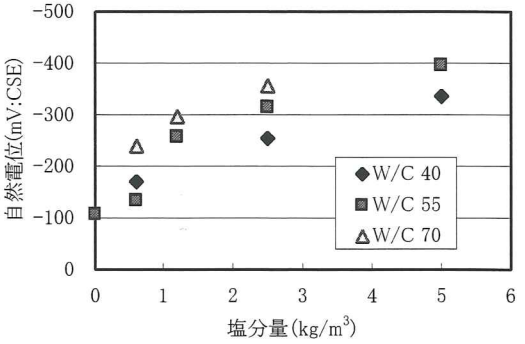
2.4 塩分量、水セメント比と鉄筋腐食量の関係

ひび割れ無しの試験体の測定結果について、塩分量と鉄筋腐食との関連を調査した。

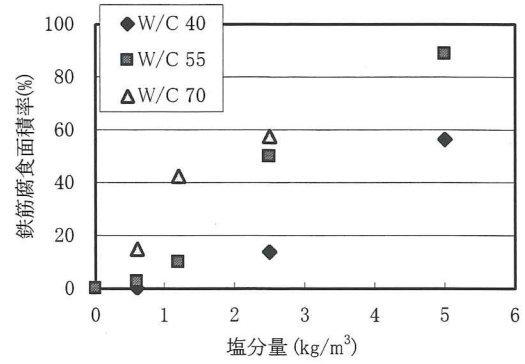
図－８は横軸にコンクリート中の塩分量(kg/m^3)をとり、縦軸にそれぞれ自然電位（1 ～ 18 サイクルの平均値)、鉄筋の腐食面積、鉄筋の腐食度を示した。これらの図から、塩分量が同じ場合は水セメント比が低いものほど（セメント量が多いものほど）腐食しにくい傾向が認められた。

図－９は横軸の塩分量を単位セメント量に対する割合で示し、縦軸にそれぞれ自然電位（1 ～ 18 サイクルの平均値)、鉄筋の腐食面積、鉄筋の腐食度を示した。この図では、水セメント比の違いによる差はほとんど認められなかった。

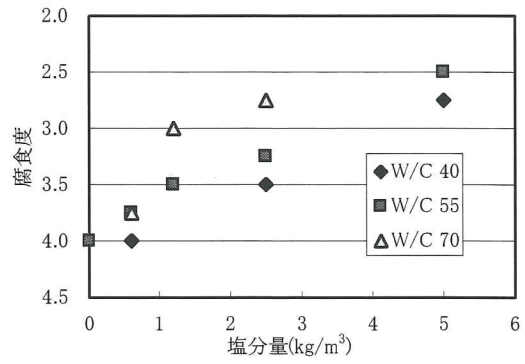
この結果から、鉄筋の腐食のしやすさは、単にコンクリート中の塩分量ではなく、単位セメント量に対する塩分量の割合に対応すると考えられる。



(1) 自然電位との関係

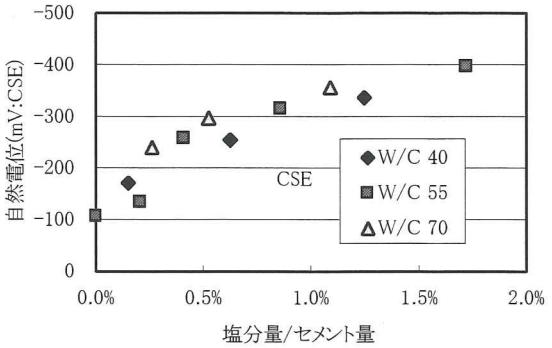


(2) 鉄筋腐食面積率との関係

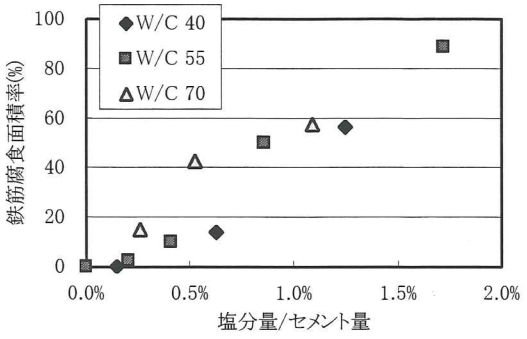


(3) 鉄筋腐食度との関係

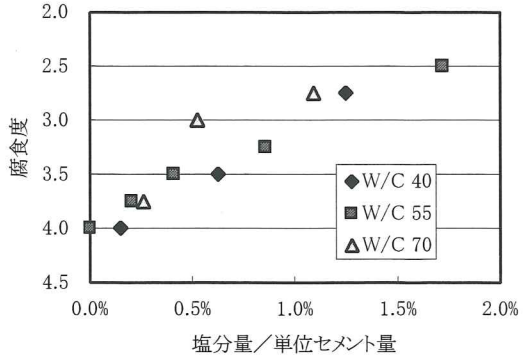
図－８　塩分量と鉄筋腐食の関係



(1) 自然電位との関係



(2) 鉄筋腐食面積率との関係



(3) 鉄筋腐食度との関係

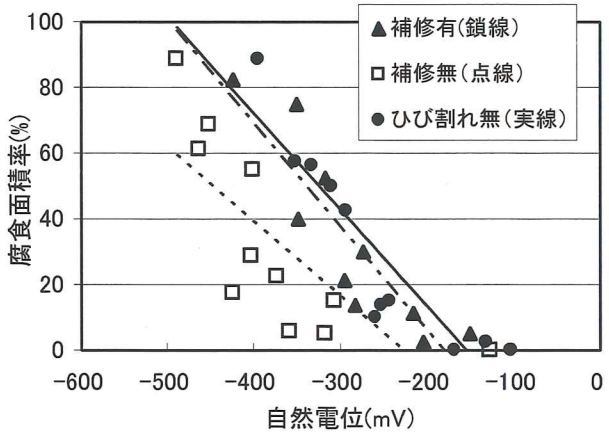
図－９　塩分量／単位セメント量と鉄筋腐食の関係

2.5 ひび割れの影響と補修の効果について

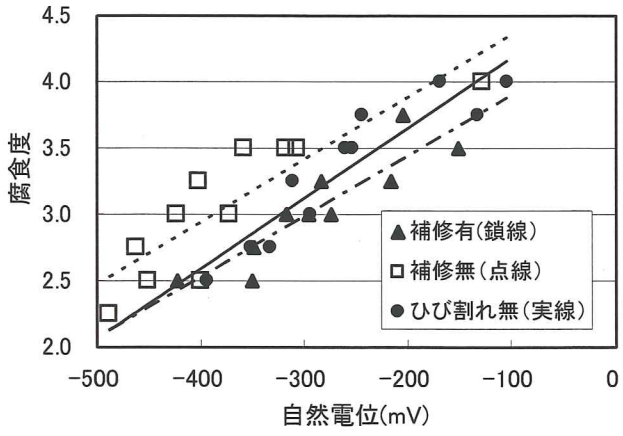
図－３に示す自然電位のグラフでは、ひび割れを有する試験体の自然電位は卑となり、補修を行うことで貴となる傾向を示したが、図－５や６に示す腐食面積や腐食度ではひび割れや補修の影響は明確には現れなかった。

自然電位と腐食面積率の関係を図－ 10 に、自然電位と腐食度の関係を図－ 11 に示す。これらの図では、ひび割れ無しと補修済みのデータについては一致する分布を示しているが、ひび割れありの試験体のデータだけは異なる分布を示した。今回の自然電位の測定は、ひび割れの真上で測定を行っており、ひび割れの存在によって自然電位が正しく測定できなかった可能性が考えられる。

したがって、今回の実験結果としては、ひび割れや補修の有無が鉄筋腐食に与える影響は小さいと判断するのが妥当と考える。ただし、今回の試験は恒温恒湿槽内において槽内の湿度を変化させた実験であり、ひび割れ内に水が直接進入するような条件では、腐食状態に差異が生じる可能性もあると考えられる。



図－10　自然電位と腐食面積率との関係



図－11　自然電位と腐食度との関係

2.6 塩分量測定結果

円柱供試体の測定結果を表－ 10 に、促進試験終了後の角柱供試体の鉄筋近傍の測定結果を表－ 11 に、また角柱試験体の深さ方向の分布を表－ 12 に示す。

表－ 10 の結果では、供試体中の塩分量は練混ぜ時の混入量と概ね一致した。これに対して表－ 11 に示す角柱試験体の鉄筋近傍の塩分量は、練混ぜ時の混入量の約６割程度の量にとどまった。表－ 12 に示す深さ方向の塩分の分布をみると、深さ方向に塩分量が増加する傾向が認められた。

今回の促進試験に用いた角柱試験体は図－１に示すように鉄筋の部分を下側にして打設している。表－ 12 に示す深さとは図－１の下面を深度０とし、上にいくほど深度が大きくなる方向である。表－ 12 に示す塩分の分布から考えて、塩分はブリージング水と一緒に上方（表－ 12 では深い方向）に移動したと考えられる。このため、鉄筋近傍の塩分濃度は、想定した塩分量の６割程度にとどまったと考えられる。

表－10 円柱供試体中の実測塩分量

試験体No. (W/C-全塩分量)	円柱試験体中の 全塩分量(kg/m^3)
40-0.6	0.87
40-2.5	2.60
40-5.0	5.62
55-0	0.13
55-0.6	0.85
55-1.2	1.39
55-2.5	2.51
55-5.0	6.05
70-0.6	1.40
70-1.2	1.61
70-2.5	2.33

表－11 角柱試験体の鉄筋近傍の実測塩分量

試験体No. (W/C-全塩分量)	鉄筋近傍の 全塩分量(kg/m^3)
40-0.6	-
40-2.5	1.65
40-5.0	-
55-0	0.07
55-0.6	0.42
55-1.2	0.69
55-2.5	1.6
55-5.0	2.82
70-0.6	-
70-1.2	-
70-2.5	1.37

表－12 角柱試験体の深度方向の実測塩分量(全塩分量kg/m^3)

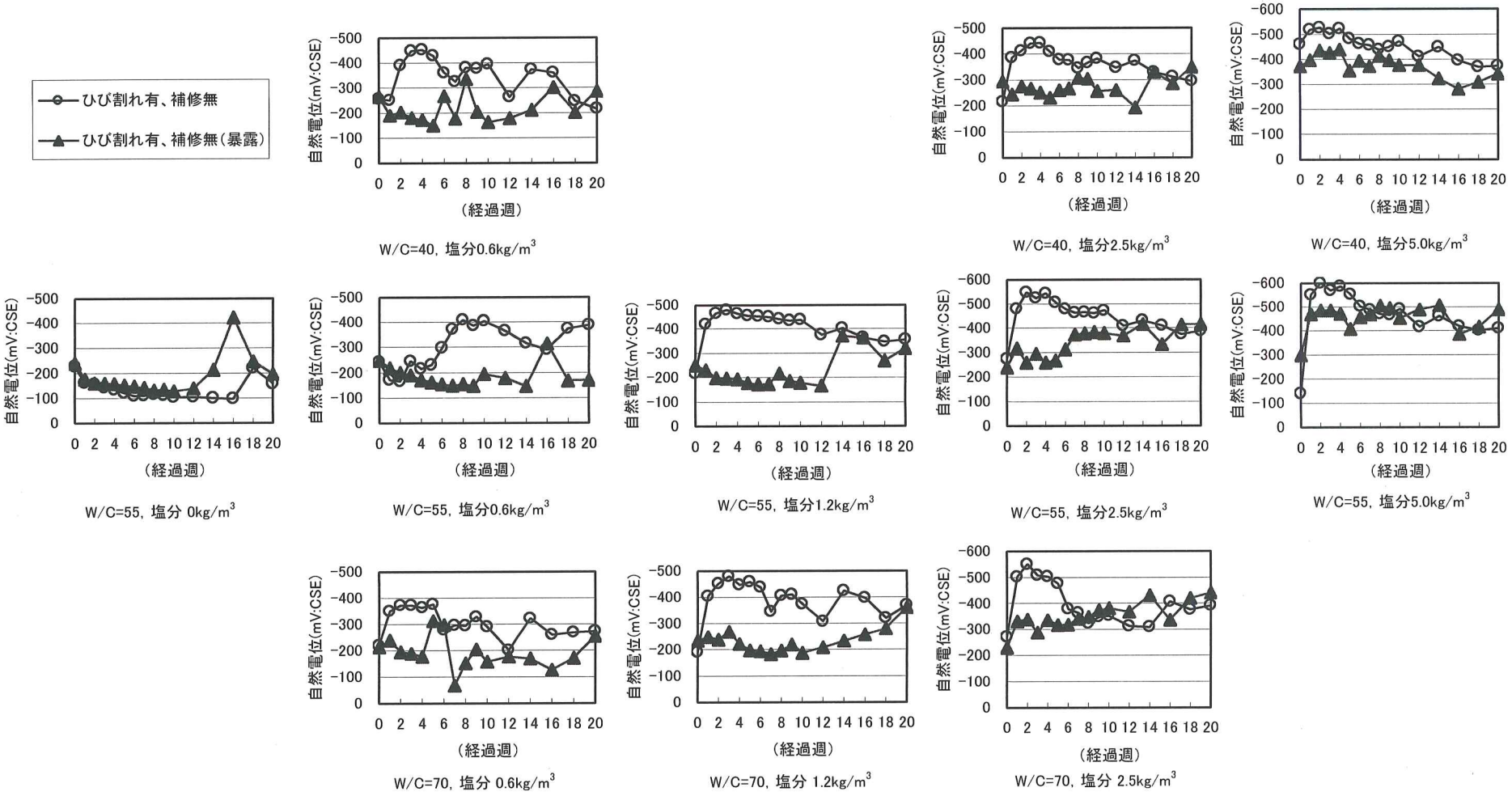
	試験体	40-2.5	55-2.5	70-2.5
深度(mm)	0-10	1.77	1.53	1.30
	10-20	1.61	1.62	1.21
	20-30	1.80	1.88	1.80
	30-40	2.02	1.78	1.69
	40-50	1.88	1.96	1.87
	50-60	1.49	1.59	1.77
	60-70	1.98	1.80	1.93
	70-80	1.90	1.80	1.92
	80-90	1.94	2.15	1.98
	90-100	2.49	2.83	2.23
	平均	1.89	1.89	1.77

2.7 暴露試験結果

暴露試験中の自然電位の測定結果を図－12に示す。試験体はいずれも「ひび割れあり、補修なし」の条件である。図には比較のために「ひび割れあり、補修なし」の促進試験の結果も示した。

図から、促進試験では試験の開始直後から値が卑となる傾向を示しているのに対して、暴露試験体の値は卑となる傾向が緩慢で、腐食しにくい環境であることが予想される。

暴露試験体については数年を経過した段階で解体し、鉄筋の腐食状態を観察することで、促進試験との対応について検討する予定である。



図－12 自然電位測定結果(暴露試験結果)

3．まとめ

初期塩分を有する鉄筋コンクリート試験体に対して促進腐食試験を実施し、以下結果が得られた。

(1) 促進試験終了後の目視観察による鉄筋腐植度と鉄筋腐食面積率とは良い対応を示した。
(2) コンクリート中の塩分量が多いほど、また、水セメント比が高いほど鉄筋が腐食しやすい傾向を示した。
(3) 鉄筋腐食の程度は、コンクリート中の塩分量よりも、セメント量に対する塩分量の割合と良い対応を示した。
(4) 今回の促進試験の条件では、ひび割れや補修の有無が鉄筋腐食に与える影響は小さかった。ただし、ひび割れ内に直接水が進入するような条件では、その限りではないと考えられる。
(5) 促進試験中の自然電位の値は、「ひび割れあり・補修なし」の試験体を除いて、鉄筋腐食度や鉄筋腐食面積率と良い対応を示した。ただし、「ひび割れあり・補修なし」の試験体の自然電位はやや異なる傾向を示した。これより、ひび割れの存在が自然電位の値に影響を与えたためと考えられる。
(6) コンクリート試験体中の塩分の分布は打ち込み時の試験体の下部で小さく、上部で大きくなる傾向を示した。このため、鉄筋近傍の塩分量は計画値の６割程度であった。塩分量が不均一となった原因としては打ち込み時のブリージングの影響が考えられる。

第Ⅱ節　外来塩に関する実験

第Ⅱ節　目次

1．ひび割れ補修工法について …… 25
1.1　各種ひび割れ補修工法の概要 …… 25
1.2　本実験に用いた補修工法 …… 25

2．実験方法 …… 26
2.1　コンクリートの配合 …… 26
2.2　試験体の製造 …… 26
2.3　ひび割れの製造と補修方法 …… 27
2.4　促進試験方法 …… 28
2.5　鉄筋腐食量の測定 …… 29
2.6　ＥＰＭＡ分析および塩分量測定 …… 30

3．実験結果と考察 …… 31
3.1　供試体表面変状調査 …… 31
3.2　自然電位による腐食具合の検討 …… 33
3.3　分極抵抗による腐食具合の検討 …… 36
3.4　鉄筋腐食面積率による検討 …… 39
3.5　鉄筋腐食減少率による検討 …… 45
3.6　自然電位・分極抵抗と鉄筋腐食の関係 …… 48
3.7　ＥＰＭＡ分析および塩分量測定結果 …… 52

4．まとめ …… 56

1. ひび割れ補修工法について

1.1 各種ひび割れ補修工法の概要

ひび割れ補修工法として、注入工法、充填工法、表面被覆工法がある。注入工法はひび割れ内部に樹脂系あるいはセメント系の補修材料を圧力注入する方法。充填工法はひび割れ表面部をカットし、その部分に補修材を充填する方法である。表面被覆工法とはひび割れの表面部を補修材料で覆う方法である。また、浸透性防止剤や塗布含浸剤をコンクリート表面に塗布する表面塗布工法がある。それらの材料としてそれぞれの工法に適した補修材が市販されている。

1.2 本実験に用いた補修工法

本研究は、一般的に実施されている補修工法（文献 1）参照）を検討対象とした。**表－1**に本実験に用いた補修工法を示す。

表－1　実験で使用した補修工法

補修工法	概　　要		材料の系統
表面塗布	毛管現象により，ひび割れへの含浸作用のあるエポキシ樹脂をコンクリート表面に塗布		２液型エポキシ樹脂系注入材
低圧注入	ひび割れに低粘度エポキシ樹脂を低圧で注入		２液型エポキシ樹脂系注入用接着剤
充填	ひび割れ表面を深さ1cm程度までUカットし，材料を充填		１成分形ポリウレタンシーリング材
表面被覆	コンクリート表面を塗装により被覆	（手順は，以下のとおりである。）	
	①プライマー処理	コンクリート表面にエポキシ樹脂プライマーを塗布	２液型エポキシ樹脂系プライマー
	②不陸調整	コンクリート表面の凹凸をエポキシ樹脂系パテで平滑化	２液型エポキシ樹脂系パテ
	③中塗り	エポキシ樹脂系塗料を塗布（水密性、気密性の確保）	２液型溶剤エポキシ樹脂系塗料（中塗）
	④上塗り	ポリウレタン樹脂系塗料を塗布（耐候性の確保）	２液型柔軟ポリウレタン樹脂系上塗塗料
充填＋表面被覆	充填と表面被覆を併用		

2．実験方法

2.1 コンクリートの配合

試験体の作製に使用したコンクリート材料の品質を**表－２**に示す。コンクリートの配合は水セメント比を 40, 55, 70%の３水準とし、**表－３**に示す配合で練混ぜを行った。**表－３**にはフレッシュ性状もあわせて示す。

表－２　コンクリート使用材料

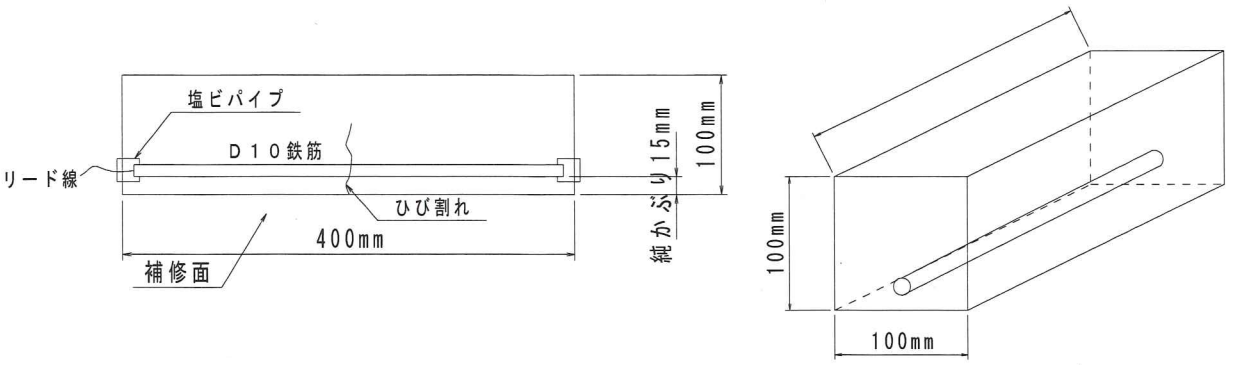
水	水道水
ｾﾒﾝﾄ	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm^3
細骨材	川砂, 密度2.60g/cm^3, 吸水率1.05%
粗骨材	砕石, 密度2.67g/cm^3, 吸水率0.61%
AE減水剤	リグニンスルホン酸塩
AE助剤	界面活性剤

表－３　コンクリート配合とフレッシュ性状

配合名	粗骨材最大寸法(mm)	水ｾﾒﾝﾄ比(%)	目標空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m^3)				混和剤量(g/m^3)		測定ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)	測定空気量(%)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤		
W/C40	20	55	4.5	45	160	400	785	982	1240	8	4.5	3.6
W/C55	20	55	4.5	45	160	291	826	1032	902	2.9	9.6	4.3
W/C70	20	55	4.5	45	160	229	849	1062	710	2.3	6.7	4.1

2.2 試験体の製造

練り混ぜたコンクリートを用いて**図－１**に示す試験体（100×100×400mm 角柱）を各配合あたり 14 本作成した。この試験体には異形鉄筋D10 を配置し、試験体底面からのかぶり厚さを 15mm とした。コンクリート打設後、翌日に脱枠し、14 日間湿布養生を行い、その後は気間養生とした。



図－１　試験体形状図

2.3 ひび割れの製造と補修方法

１配合あたり 14 本製造した試験体のうち 12 本については、試験体製造約１ヶ月後に、中央点載荷法によるコンクリートの曲げ強度試験方法（JIS A 1106 付属書）により、試験体の中央にひび割れを発生させた。ひび割れ幅は**図－１**の試験体下面で概ね 0.2mm と 0.5mm の２種類とした。なお、曲げ試験時には、両端支点部分に鉄板を敷き、ひび割れが試験体の中央部にのみ発生するよう配慮した（付属の写真集参照）。

図－１に示す試験体の下面を上向きにして補修面とし、補修面のひび割れに対して**表－４**に示す各方法により補修を行った。表面塗布と表面被覆については、実際の施工ではコンクリート表面の全面に施工することが可能だが、今回の実験では全面を覆うと自然電位の測定ができないので、**図－２**に示すようにひび割れの周囲に幅 10ｃｍ程度まで施工することにした。さらに補修面以外の５面は、すべてエポキシ樹脂でシールし、外部からの塩水や空気の侵入は、補修面のみから行われる条件とした。各配合の供試体 14 本のひび割れ幅と補修工法の関連を**表－５**に示す。

表－４　実験を行ったひび割れ補修工法

名称	概　　要	施工場所
表面塗布	ひび割れへの含浸作用のあるエポキシ樹脂を コンクリート表面に塗布	ひび割れの周囲幅10cmの範囲
低圧注入	ひび割れに低粘度エポキシ樹脂を低圧で注入	ひび割れ部
充填	ひび割れ表面を深さ1cm程度までUカットし シーラント系充填材で充填	ひび割れ部
表面被覆	コンクリート表面を塗装により被覆（表－４参照）	ひび割れの周囲幅10cmの範囲
充填＋表面被覆	充填と表面被覆を併用	ひび割れの周囲幅10cmの範囲

表－５　試験体の内訳

供試体番号	コンクリート配合	補　修　法					ひび割れ幅	
	W／C	表面塗布	低圧注入	充填	表面被覆	充填＋表面被覆	0.2mm	0.5mm
1	40 55 70	補修無し					ひび割れ無し	
2		補修無し					ひび割れ無し	
3		補修無し					○	
4		補修無し						○
5		○					○	
6		○						○
7			○				○	
8			○					○
9				○			○	
10				○				○
11					○		○	
12					○			○
13						○	○	
14						○		○

2.4　促進試験方法

促進試験は、「JCI-SC3　塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法－乾湿繰返し法－」を参考に、以下の工程を１サイクルとし、20 サイクルまで試験を行った。

- 塩水環境：20℃の３％の食塩水に浸漬、１日間　（浸漬後、自然電位測定）
- 湿潤環境：温度 65℃、相対湿度 95％、２日間
- 乾燥環境：温度 18℃、相対湿度 40％、４日間

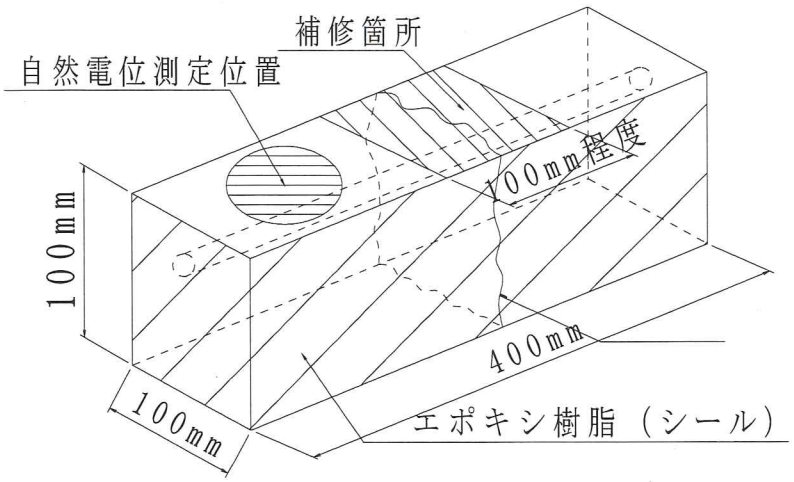
なお、１サイクルごと（塩水環境後）に鉄筋の自然電位と分極抵抗の測定を行った。

自然電位については照合電極が飽和塩化銀電極を用い、電位は式(1)によって飽和硫酸銅電極換算値とした。

$$E = E' - 120 - 1.1 \times (t - 25) \qquad (1)$$

ここに、E　：自然電位（飽和硫酸銅電極換算）　(mV:CSE)
　　E'：測定自然電位（飽和塩化銀電極）　(mV)
　　t　：測定時の温度　(℃)

なお、**図－２**に自然電位測定位置を示す。



図－２　自然電位測定位置

2.5 鉄筋腐食量の測定

促進試験終了後、**図－３**に示すように試験体から鉄筋を取り出し、腐食状態を観察した。
腐食状態は以下の腐食面積率と腐食減少率で評価した。

(1)腐食面積率

供試体から取り出した鉄筋に対して、腐食状況を観察して展開図を作成した。このとき、鉄筋表面の各部位の腐食具合を大（全面が腐食)、中（大と小の中間)、小（表面に点錆が認められる）の３段階で評価し、腐食面積換算としては、大：100%、中：50%、小：20%として、鉄筋全体の腐食面積率を求めた。

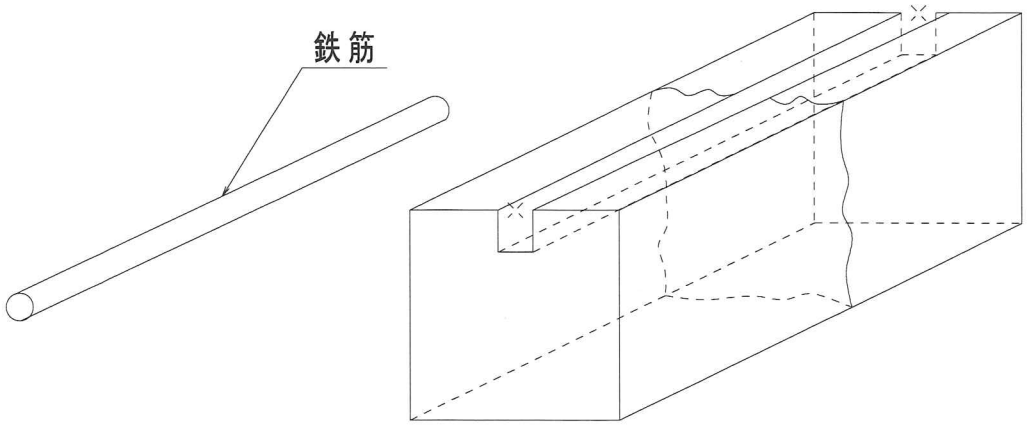
(2)腐食減少率

供試体から取り出した鉄筋を15%クエン酸アンモニウム20℃水溶液に２日間浸漬して、腐食生成物を除錆した。なお、黒皮も除去されるので全く腐食が認められない鉄筋の平均減量（今回の試験結果では0.533(g)）を各鉄筋の腐食減量より差し引いて補正した。

式（２）を用いて腐食減少率を算出した。

$$A=(B-C+D)/B\times 100 \qquad (2)$$

ここに、Ａ：腐食減少率　(%)
Ｂ：試験前鉄筋質量（ｇ）
Ｃ：除錆後鉄筋質量（ｇ）
Ｄ：黒皮除去分質量（0.533g）



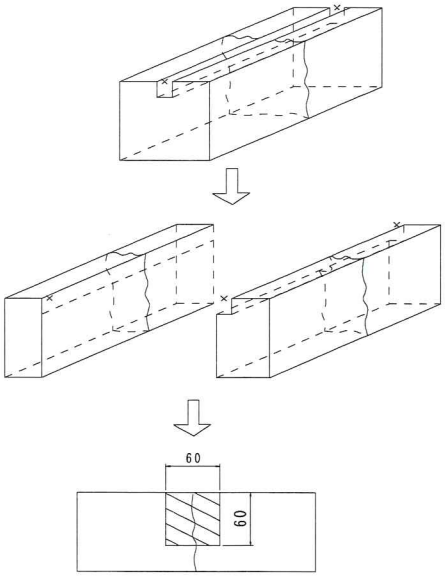
図－３　試験体解体要領図

2.6　ＥＰＭＡ分析および塩分量測定

表－６に示す供試体を、**図－４**に示すように解体し、60×60mm の断面に対してＥＰＭＡ分析を行った。**また、**ひび割れ無しの供試体 40-1，55-1，70-1 について試験体を表面から 1cm 厚さ毎にスライスし、電位差滴定法によりコンクリート中の塩分量を測定した。

表－６　ＥＰＭＡ分析試験体

試験体No.	ひび割れ幅	補修種類
４０－４	0.5	無
４０－６	0.5	表面塗布
４０－８	0.5	低圧注入
４０－１０	0.5	充填
４０－１２	0.5	表面被覆
４０－１４	0.5	充填+表面被覆
５５－４	0.5	無
７０－３	0.2	無



図－４　ＥＰＭＡ供試体作成要領

ＥＰＭＡ分析の試験体の前処理の手順を以下に示す。

・コンクリート供試体を 60×60mm に切断する。
・オイルカッターで厚さ 10mm に切断する。
・分析面を鏡面状態になるまで研磨する。（研磨時にひび割れ部に割れる恐れがあったため、エポキシ樹脂で供試体の周囲をコーティングした。）
・表面の研磨剤・内部のオイルを除去するため超音波洗浄する。
・試験体を真空乾燥機で乾燥させる。
・分析前の処理として分析面に金のコーティングをする。
・分析装置にセットして測定する。

ＥＰＭＡ分析の測定条件は、以下のとおりとした。

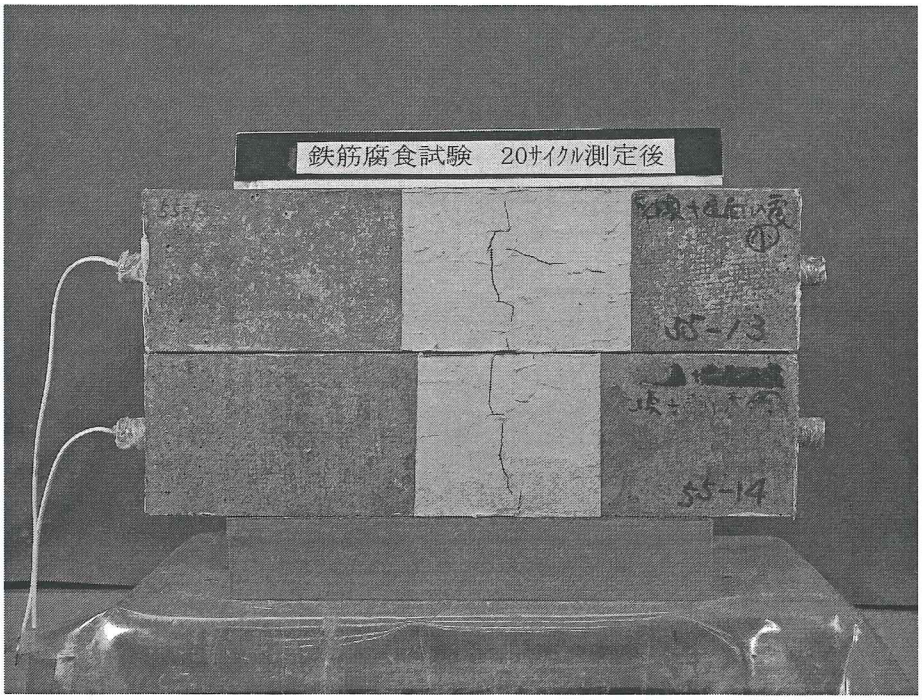
・加速電圧：15ｋV，プローブ電流：0.80μA，プローブ径：137μm，計測時間：30msec，
・ピクセル数：512×512，ピクセルサイズ：70.14mm×70.14mm
・コンクリート供試体に含まれる元素（塩素Ｃｌ，ナトリウム Na，カリウム K，炭素 C）分布を分析した。

3．実験結果と考察

3.1 供試体表面変状調査

促進試験終了後の供試体表面の変状を観察した結果を**表－7**に示す。変状は補修無しの試験体や、補修を行ったものでもW/Cの高い試験体で認められた。

充填＋表面被覆のケースでは1サイクル目で充填箇所の装面の表面にひび割れが確認（写真－1参照）された。ひび割れが発生した原因としては充填材と表面被覆材の熱膨張係数、または乾湿による変形性状が異なり、試験中の急激な環境条件の変化に双方の変形性が追従しきれずに、ひび割れが発生したものと考えられる。



写真－1　充填＋表面被覆に生じたひび割れ

表－7　促進試験終了後の供試体表面変状

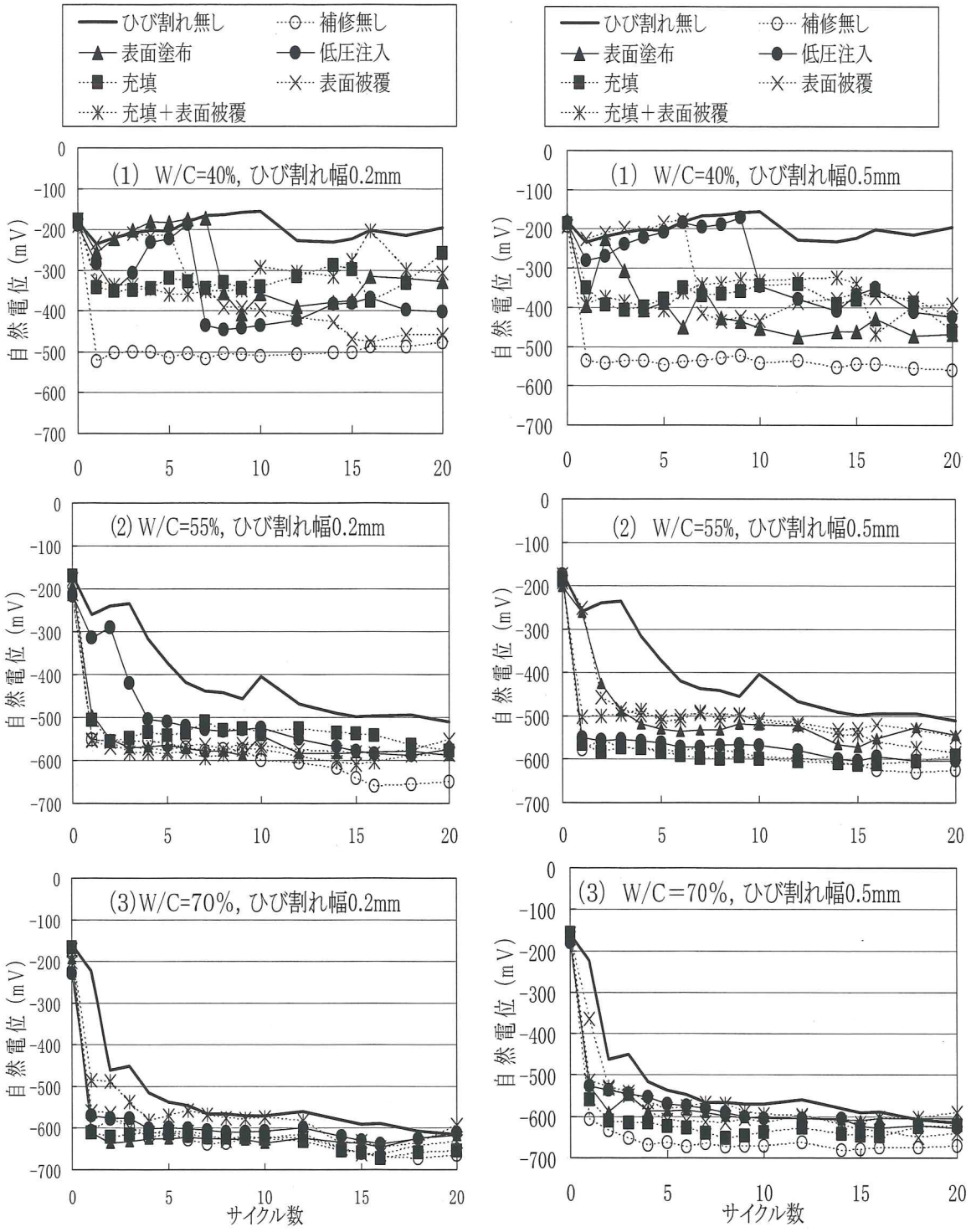
番号	ひび割れ幅	補修方法	促進試験後の表面変状
40-1	無し	補修無し	特に無し
40-2	無し	補修無し	特に無し
40-3	0.2	補修無し	ひび割れ部から超薄い錆汁
40-4	0.5	補修無し	ひび割れ部から超薄い錆汁
40-5	0.2	表面塗布	特に無し
40-6	0.5	表面塗布	特に無し
40-7	0.2	低圧注入	特に無し
40-8	0.5	低圧注入	特に無し
40-9	0.2	充填	特に無し
40-10	0.5	充填	特に無し
40-11	0.2	表面被覆	特に無し
40-12	0.5	表面被覆	特に無し
40-13	0.2	充填＋表面被覆	充填部に沿って太いひび割れ
40-14	0.5	充填＋表面被覆	充填部に沿って太いひび割れ

番号	ひび割れ幅	補修方法	促進試験後の表面変状
55-1	無し	補修無し	特に無し
55-2	無し	補修無し	特に無し
55-3	0.2	補修無し	ひび割れ部から濃い錆汁
55-4	0.5	補修無し	ひび割れ部から濃い錆汁
55-5	0.2	表面塗布	特に無し
55-6	0.5	表面塗布	特に無し
55-7	0.2	低圧注入	ひび割れ部に薄い錆汁が少し
55-8	0.5	低圧注入	ひび割れ部に濃い錆汁
55-9	0.2	充填	特に無し
55-10	0.5	充填	特に無し
55-11	0.2	表面被覆	補修部に鉄筋に沿って超細いひび割れ　と　補修部以外に鉄筋部に薄い錆汁
55-12	0.5	表面被覆	特に無し
55-13	0.2	充填＋表面被覆	充填部に沿って太いひび割れ
55-14	0.5	充填＋表面被覆	充填部に沿って太いひび割れ

番号	ひび割れ幅	補修方法	促進試験後の表面変状
70-1	無し	補修無し	うっすら錆汁が見える
70-2	無し	補修無し	特に無し
70-3	0.2	補修無し	ひび割れ部に濃い錆汁
70-4	0.5	補修無し	うっすら錆汁が見える
70-5	0.2	表面塗布	特に無し
70-6	0.5	表面塗布	特に無し
70-7	0.2	低圧注入	特に無し
70-8	0.5	低圧注入	ひび割れ部に濃い錆汁
70-9	0.2	充填	鉄筋に沿って細いひび割れが見える
70-10	0.5	充填	鉄筋に沿って細いひび割れが見え，補修部に錆汁
70-11	0.2	表面被覆	補修部に鉄筋に沿って細いひび割れが50mm
70-12	0.5	表面被覆	補修部に鉄筋に沿って太いひび割れが10mm
70-13	0.2	充填＋表面被覆	充填部に沿って太いひび割れ
70-14	0.5	充填＋表面被覆	充填部に沿って太いひび割れ

3.2 自然電位による腐食具合の検討

自然電位の測定結果の数値表を**表－８**、グラフを**図－５**に示す。**図－５**のひび割れ無しのデータは、ひび割れ無しの２つの供試体の平均値を示した。



図－５　自然電位測定結果

表－8 自然電位測定データ 20℃

	試験体No.	自然電位(mV:CSE)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20
40－1	ひび割れ無し	−152.0	−209.4	−196.5	−191.0	−180.8	−177.5	−171.2	−151.2	−154.8	−148.8	−139.4	−138.9	−134.7	−131.5	−125.1	−117.7	−120.5
40－2	ひび割れ無し	−162.5	−216.3	−199.0	−182.5	−176.8	−185.6	−148.4	−137.7	−131.2	−123.9	−126.8	−272.3	−285.1	−269.1	−234.2	−267.7	−226.7
40－3	補修無し(0.2mm程度)	−159.0	−501.2	−480.6	−478.0	−478.8	−493.4	−482.1	−495.7	−482.6	−485.6	−489.2	−483.7	−480.9	−481.1	−465.5	−465.7	−454.8
40－4	補修無し(0.5mm程度)	−170.0	−514.2	−521.0	−513.2	−513.6	−523.9	−515.7	−513.0	−506.4	−500.2	−520.1	−514.1	−532.0	−523.4	−522.8	−534.5	−537.6
40－5	表面塗布(0.2mm程度)	−155.4	−234.4	−200.8	−179.3	−158.8	−161.2	−152.3	−151.1	−333.4	−384.9	−335.4	−366.6	−356.6	−352.4	−293.7	−298.2	−306.3
40－6	表面塗布(0.5mm程度)	−155.5	−374.0	−202.4	−284.7	−385.3	−365.3	−429.3	−325.0	−405.5	−413.8	−430.8	−452.1	−439.5	−439.0	−407.5	−451.5	−445.1
40－7	低圧注入(0.2mm程度)	−168.0	−262.4	−326.3	−284.8	−208.7	−201.4	−164.9	−413.0	−424.4	−420.0	−412.3	−401.4	−360.9	−358.0	−345.0	−375.3	−379.3
40－8	低圧注入(0.5mm程度)	−162.1	−258.2	−247.0	−216.8	−199.3	−184.8	−162.5	−172.4	−166.4	−148.3	−323.5	−356.9	−386.2	−345.1	−328.5	−388.2	−402.6
40－9	充填(0.2mm程度)	−153.9	−319.6	−328.0	−327.2	−322.4	−297.9	−306.5	−323.3	−308.5	−321.9	−319.1	−292.9	−266.0	−276.6	−354.3	−309.9	−237.1
40－10	充填(0.5mm程度)	−162.9	−328.9	−372.5	−385.9	−375.6	−357.1	−327.2	−348.5	−344.0	−337.4	−321.7	−318.3	−368.8	−358.6	−334.2	−365.5	−437.6
40－11	表面被覆(0.2mm程度)	−168.6	−211.7	−200.1	−187.5	−195.4	−189.3	−301.4	−323.7	−368.8	−370.0	−376.1	−393.5	−405.6	−447.1	−455.4	−435.3	−435.9
40－12	表面被覆(0.5mm程度)	−171.0	−204.3	−187.6	−175.2	−187.1	−162.3	−155.3	−394.5	−412.9	−401.6	−410.2	−365.8	−356.2	−341.7	−351.5	−353.7	−408.2
40－13	充填＋表面被覆(0.2mm程度)	−154.8	−305.9	−313.5	−313.8	−323.1	−337.9	−337.0	−329.7	−329.7	−327.2	−269.6	−282.7	−293.9	−253.6	−181.5	−277.5	−285.0
40－14	充填＋表面被覆(0.5mm程度)	−172.3	−369.9	−353.1	−362.7	−376.9	−384.8	−338.8	−319.8	−317.4	−306.9	−311.5	−306.7	−302.1	−316.9	−445.1	−375.6	−369.2
55－1	ひび割れ無し	−149.3	−234.8	−223.3	−214.4	−207.4	−265.8	−363.2	−395.3	−399.6	−423.8	−319.5	−419.6	−426.6	−431.2	−431.7	−437.2	−470.3
55－2	ひび割れ無し	−144.6	−239.7	−212.2	−211.0	−380.4	−432.2	−430.3	−435.6	−438.5	−443.7	−443.3	−470.9	−510.4	−521.0	−514.3	−507.6	−506.2
55－3	補修無し(0.2mm程度)	−193.0	−529.9	−534.2	−535.4	−532.5	−540.3	−548.4	−556.1	−552.4	−554.3	−577.7	−583.3	−596.1	−620.0	−637.0	−634.0	−628.4
55－4	補修無し(0.5mm程度)	−167.7	−555.4	−534.4	−550.6	−552.7	−555.1	−561.5	−549.1	−556.1	−562.9	−574.1	−574.6	−585.4	−590.6	−602.6	−608.0	−602.1
55－5	表面塗布(0.2mm程度)	−169.6	−471.2	−528.8	−548.6	−546.4	−542.0	−549.2	−556.5	−555.8	−565.5	−520.3	−561.3	−562.9	−560.8	−557.6	−555.2	−565.7
55－6	表面塗布(0.5mm程度)	−178.9	−238.9	−402.3	−465.8	−496.5	−508.0	−514.7	−510.1	−510.5	−496.6	−498.4	−499.4	−544.4	−549.1	−529.8	−504.4	−522.2
55－7	低圧注入(0.2mm程度)	−191.4	−292.0	−267.2	−398.8	−482.4	−488.3	−497.0	−506.9	−510.5	−505.7	−502.7	−527.0	−546.2	−556.0	−562.4	−565.1	−552.8
55－8	低圧注入(0.5mm程度)	−152.9	−526.9	−535.2	−530.8	−536.6	−538.9	−549.5	−549.8	−545.9	−543.9	−545.1	−557.0	−576.4	−581.0	−571.4	−580.5	−581.1
55－9	充填(0.2mm程度)	−147.9	−484.8	−534.0	−526.7	−511.5	−519.1	−514.3	−487.0	−507.9	−503.8	−512.6	−504.9	−514.1	−516.7	−519.8	−542.5	−556.2
55－10	充填(0.5mm程度)	−165.5	−544.2	−561.1	−551.1	−553.5	−561.1	−569.7	−575.8	−576.3	−571.7	−577.3	−584.0	−587.8	−590.8	−589.3	−582.9	−569.9
55－11	表面被覆(0.2mm程度)	−156.9	−531.1	−547.2	−547.1	−550.2	−555.1	−543.4	−541.9	−552.0	−539.7	−544.0	−554.5	−558.8	−560.4	−562.6	−554.3	−530.0
55－12	表面被覆(0.5mm程度)	−151.7	−229.0	−435.4	−461.6	−475.7	−480.3	−478.4	−473.0	−474.1	−476.3	−485.4	−493.2	−510.1	−508.8	−498.2	−509.4	−525.3
55－13	充填＋表面被覆(0.2mm程度)	−190.3	−529.3	−534.0	−559.5	−559.8	−562.0	−558.5	−571.9	−564.4	−551.8	−552.9	−570.0	−582.9	−587.3	−582.5	−566.3	−563.6
55－14	充填＋表面被覆(0.5mm程度)	−169.7	−480.1	−478.1	−473.4	−465.3	−489.2	−488.8	−468.2	−488.6	−474.5	−493.1	−499.5	−520.9	−522.1	−537.2	−551.2	−562.8
70－1	ひび割れ無し	−135.3	−199.2	−466.3	−374.7	−496.2	−507.7	−503.3	−533.3	−539.8	−551.2	−549.8	−540.0	−567.7	−579.4	−570.0	−603.0	−609.6
70－2	ひび割れ無し	−139.5	−202.1	−411.8	−482.1	−490.2	−522.4	−544.6	−553.8	−548.2	−543.5	−545.1	−536.2	−549.8	−558.6	−562.5	−568.0	−578.3
70－3	補修無し(0.2mm程度)	−152.1	−585.5	−556.8	−575.4	−601.5	−592.5	−606.5	−617.1	−615.2	−604.3	−602.4	−594.0	−625.8	−638.1	−646.1	−651.8	−642.5
70－4	補修無し(0.5mm程度)	−152.4	−584.5	−611.1	−631.0	−646.6	−640.1	−651.7	−642.8	−650.3	−649.3	−648.1	−640.0	−659.2	−656.7	−653.0	−653.2	−648.6
70－5	表面塗布(0.2mm程度)	−170.8	−589.0	−613.4	−609.2	−604.5	−604.1	−599.9	−603.0	−603.3	−606.0	−613.3	−602.1	−612.6	−613.9	−624.7	−602.1	−594.7
70－6	表面塗布(0.5mm程度)	−154.0	−503.2	−566.7	−527.2	−563.6	−565.0	−562.1	−567.4	−576.3	−581.2	−579.4	−583.3	−584.0	−587.8	−582.5	−583.4	−583.6
70－7	低圧注入(0.2mm程度)	−207.2	−549.3	−554.8	−555.2	−579.3	−576.3	−579.5	−583.5	−588.2	−587.6	−585.2	−577.0	−597.3	−608.2	−615.7	−603.8	−588.6
70－8	低圧注入(0.5mm程度)	−157.7	−503.5	−514.5	−522.7	−531.9	−546.8	−552.7	−558.9	−567.5	−577.6	−582.0	−581.7	−583.2	−601.9	−606.5	−598.5	−605.4
70－9	充填(0.2mm程度)	−145.6	−588.7	−599.7	−594.6	−588.8	−591.2	−592.9	−599.3	−601.0	−600.7	−603.4	−610.1	−632.6	−636.1	−651.8	−637.0	−632.3
70－10	充填(0.5mm程度)	−135.5	−536.7	−588.6	−592.4	−592.8	−601.8	−606.0	−617.2	−630.6	−624.4	−615.7	−606.2	−620.5	−623.8	−626.1	−604.0	−598.8
70－11	表面被覆(0.2mm程度)	−179.4	−539.0	−541.4	−578.1	−589.9	−587.8	−588.4	−594.3	−607.3	−599.3	−602.1	−602.7	−626.6	−641.5	−641.4	−619.7	−610.4
70－12	表面被覆(0.5mm程度)	−147.6	−342.0	−509.7	−526.3	−566.3	−587.4	−589.6	−591.5	−593.7	−582.0	−592.2	−575.2	−596.5	−609.4	−611.9	−627.8	−617.4
70－13	充填＋表面被覆(0.2mm程度)	−150.0	−464.7	−466.7	−515.0	−560.0	−548.4	−536.9	−546.4	−554.4	−557.1	−553.2	−561.6	−616.0	−609.3	−625.3	−613.7	−570.6
70－14	充填＋表面被覆(0.5mm程度)	−137.5	−491.3	−506.0	−518.6	−542.6	−559.5	−554.6	−545.5	−547.7	−567.0	−572.8	−576.7	−590.8	−592.3	−580.9	−580.6	−568.2

ASTM C 876 における自然電位による鉄筋腐食性評価を**表－９**に示す。この表と測定結果をもとに、以下に各 W/C 毎に自然電位を考察する。

表－９　ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価

自然電位（E） （mV）	鉄筋腐食の可能性
-200＜E	90%以上の確率で腐食無し
-350＜E≦-200	不確定（グレーゾーン）
E≦-350	90%以上の確率で腐食あり

3.2.1　W/C＝40%のケース

(1)ひび割れ無しの試験体では-200mV程度の値を保持し、腐食しない環境であったと推定される。

(2)ひび割れを補修しない試験体は１サイクル目から-500mV程度の値を示し、腐食する環境であったと推定される。

(3)ひび割れ補修をした試験体のうち、ひび割れ0.2mmの低圧注入、表面塗布、表面被覆の３種類、0.5mmの低圧注入と表面被覆が、比較的良好な結果を示した。

(4)充填のケースでは１サイクル目からグレーゾーンの結果となった。充填工法はコンクリート表面から深さ1cm程度までしか充填しないために、遮塩効果が不十分だったと思われる。

(5)充填＋表面被覆のケースでは１サイクル目から自然電位の値がやや卑となり、-350mV程度の値を示した。この原因としては、このケースでは１サイクル目から充填箇所の塗装にひび割れが確認されており、この影響によるものと推察される。

3.2.2　W/C＝55%のケース

(1)ひび割れ無しの試験体でも、５サイクル程度で-400mV程度まで値が低下した。この理由としては、本試験ではかぶりが15mmしかないこと、乾燥条件から塩水に浸漬するために急速に塩水が浸透すること等によると考えられる。

(2)３サイクルまでの間で、わずかに補修の効果が認められた試験体は、ひび割れ幅0.2mmの低圧注入の試験体のみであった。

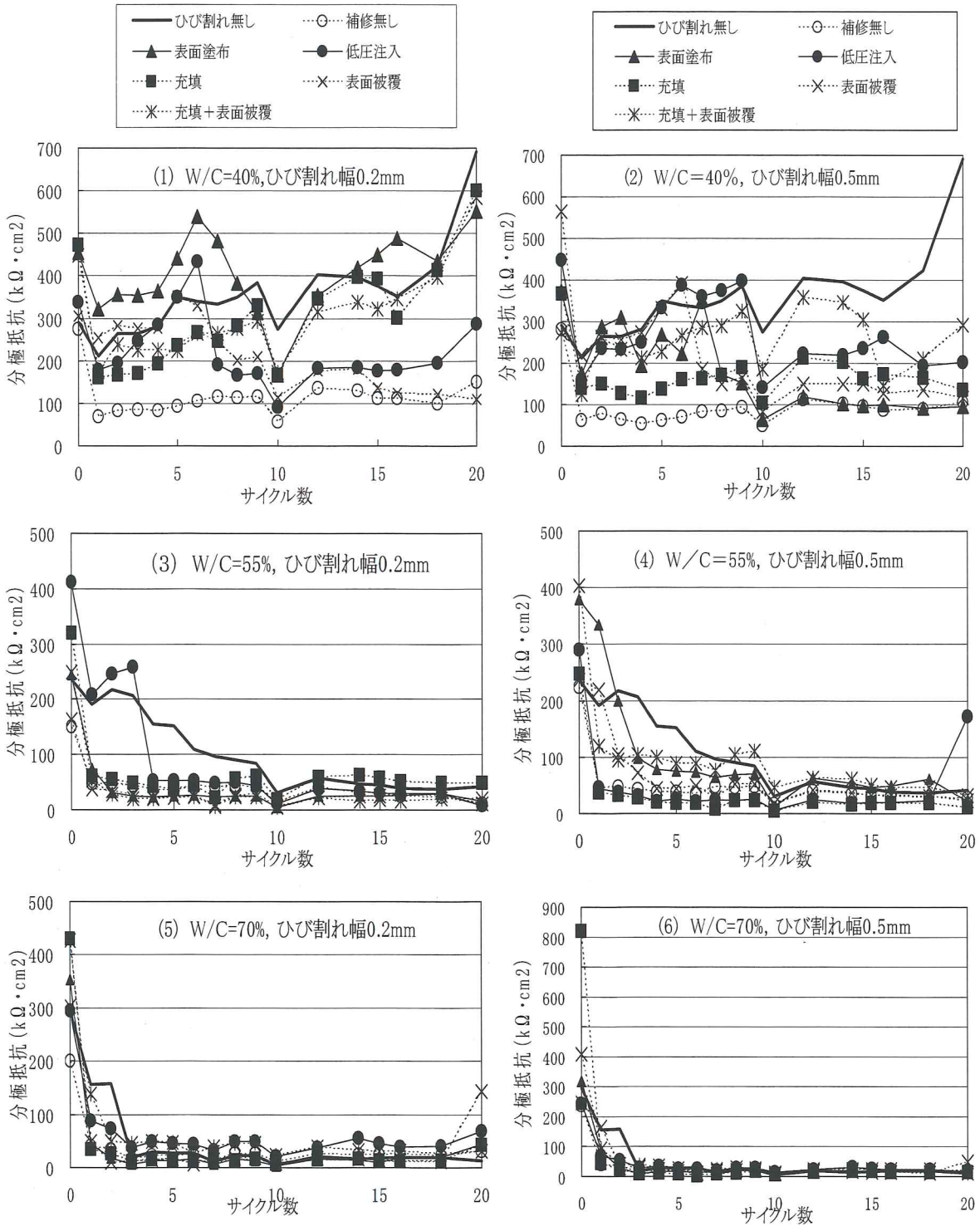
(3)その他の全ての試験体については実験開始直後から-500～600mV程度の値を示した。

3.2.3　W/C＝70%のケース

全ての試験体で試験開始直後から-500～-600mVの卑の値を示した。これは文献２）のとおりコンクリート自体の透水性が高いためにコンクリート表面全体から塩分が浸透したためと考えられる。表面を被覆する表面塗布や表面被覆でも卑の値となった理由としては、今回の実験では、ひび割れ部分の周囲10cm程度までの範囲しか被覆しておらず、その他の部分から塩水が浸透したためと考えられる。

3.3　分極抵抗による腐食具合の検討

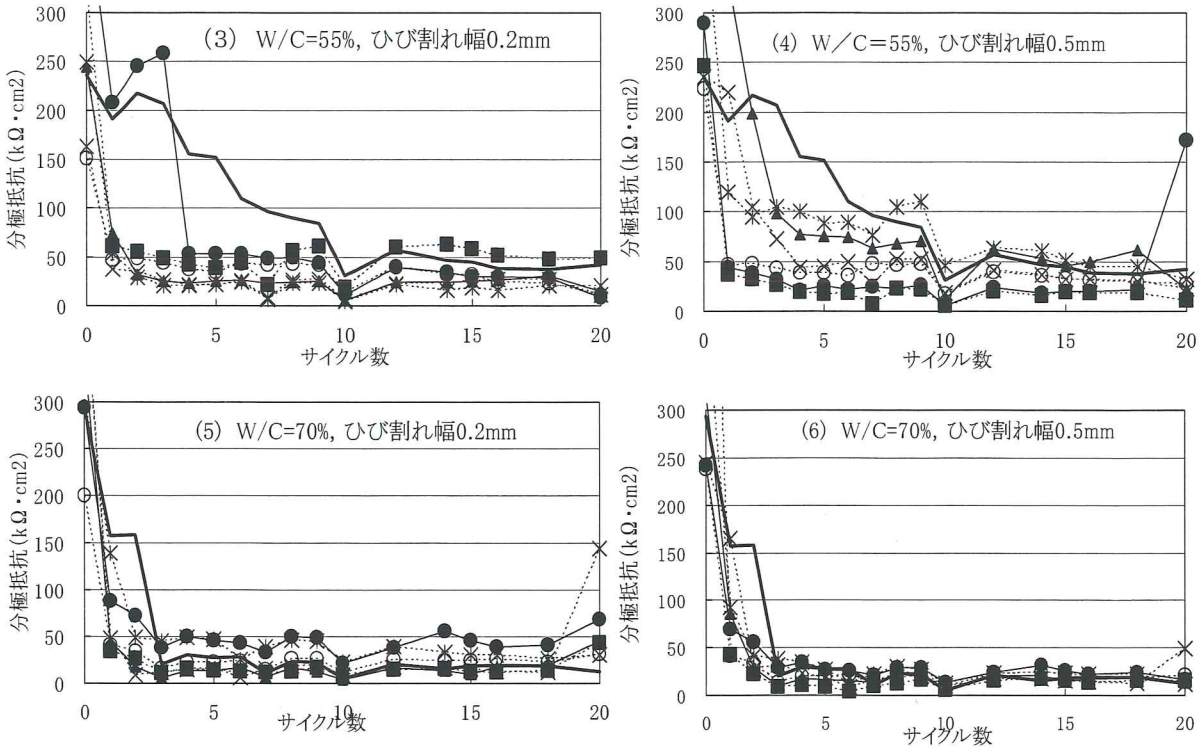
分極抵抗の測定結果の数値表を**表－10**、グラフを**図－６(1), (2)**に示す。**図－６**のひび割れ無しのデータは、ひび割れ無しの２つの供試体の平均値を示した。



図－６　分極抵抗測定結果

表－10 分極抵抗測定データ

	試験体No.	分極抵抗（kΩ・cm²）																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20
４０－１	ひび割れ無し	295.0	233.0	293.0	288.0	310.0	378.0	368.0	353.0	379.0	409.0	404.0	449.0	427.0	416.0	377.0	461.0	732.0
４０－２	ひび割れ無し	287.0	190.0	238.0	242.0	253.0	322.0	311.0	314.0	323.0	361.0	147.0	358.0	366.0	335.0	327.0	386.0	652.0
４０－３	補修無し（0.2mm程度）	274.0	68.3	83.4	84.7	83.7	94.1	106.0	115.0	113.0	116.0	57.8	137.0	131.0	111.0	111.0	100.0	150.0
４０－４	補修無し（0.5mm程度）	281.0	62.3	78.3	65.2	54.1	61.5	70.6	82.4	85.8	94.2	49.7	112.0	102.0	95.9	88.0	88.6	106.0
４０－５	表面塗布（0.2mm程度）	453.0	321.0	356.0	354.0	364.0	442.0	539.0	483.0	382.0	313.0	166.0	355.0	420.0	450.0	489.0	436.0	552.0
４０－６	表面塗布（0.5mm程度）	372.0	174.0	287.0	310.0	194.0	269.0	222.0	355.0	173.0	153.0	64.1	119.0	102.0	97.2	99.3	91.5	96.6
４０－７	低圧注入（0.2mm程度）	337.0	179.0	196.0	248.0	285.0	350.0	434.0	192.0	166.0	170.0	91.0	184.0	185.0	177.0	180.0	196.0	286.0
４０－８	低圧注入（0.5mm程度）	447.0	161.0	236.0	234.0	249.0	333.0	388.0	361.0	376.0	398.0	141.0	222.0	218.0	235.0	263.0	193.0	202.0
４０－９	充填（0.2mm程度）	473.0	161.0	167.0	170.0	194.0	237.0	267.0	246.0	283.0	329.0	166.0	345.0	396.0	392.0	302.0	413.0	601.0
４０－１０	充填（0.5mm程度）	367.0	140.0	150.0	128.0	117.0	138.0	161.0	162.0	170.0	190.0	105.0	212.0	203.0	163.0	173.0	165.0	136.0
４０－１１	表面被覆（0.2mm程度）	305.0	255.0	283.0	276.0	276.0	352.0	329.0	245.0	201.0	210.0	114.0	177.0	181.0	136.0	124.0	123.0	109.0
４０－１２	表面被覆（0.5mm程度）	272.0	218.0	262.0	257.0	272.0	332.0	391.0	186.0	150.0	164.0	82.7	151.0	149.0	149.0	127.0	136.0	116.0
４０－１３	充填＋表面被覆（0.2mm程度）	448.0	175.0	239.0	225.0	225.0	223.0	264.0	265.0	276.0	293.0	173.0	316.0	338.0	321.0	346.0	396.0	585.0
４０－１４	充填＋表面被覆（0.5mm程度）	564.0	125.0	261.0	233.0	212.0	228.0	266.0	285.0	289.0	324.0	185.0	358.0	346.0	305.0	146.0	211.0	291.0
５５－１	ひび割れ無し	252.0	186.0	216.0	204.0	212.0	235.0	158.0	136.0	132.0	118.0	46.6	81.8	69.7	67.6	56.9	55.4	69.3
５５－２	ひび割れ無し	220.0	197.0	219.0	211.0	99.3	69.4	62.2	57.0	48.6	50.5	15.2	33.0	23.7	21.8	20.1	19.5	15.0
５５－３	補修無し（0.2mm程度）	151.0	46.7	48.6	44.3	37.6	34.7	43.2	41.9	43.2	42.3	14.5	40.2	31.6	31.6	24.7	23.8	11.5
５５－４	補修無し（0.5mm程度）	224.0	46.6	47.5	42.9	38.5	39.1	35.8	48.0	46.7	47.8	17.6	39.8	35.9	32.9	31.0	29.5	27.7
５５－５	表面塗布（0.2mm程度）	245.0	74.5	31.7	25.4	23.2	25.5	26.3	23.3	24.5	24.9	5.3	24.8	24.3	25.3	26.2	30.5	15.3
５５－６	表面塗布（0.5mm程度）	379.0	335.0	199.0	98.4	77.5	75.1	74.3	63.7	68.4	70.8	11.6	63.0	53.7	45.8	49.3	61.9	21.9
５５－７	低圧注入（0.2mm程度）	413.0	208.0	246.0	259.0	53.5	53.7	53.6	49.1	49.4	43.9	11.7	39.2	34.9	30.1	30.3	29.2	8.3
５５－８	低圧注入（0.5mm程度）	290.0	43.8	38.2	32.6	21.5	25.4	22.1	25.3	23.3	26.6	5.9	24.0	18.4	20.5	20.1	22.5	172.0
５５－９	充填（0.2mm程度）	320.0	60.5	55.5	48.9	42.2	38.0	43.8	22.0	56.2	61.4	18.5	59.7	62.8	57.9	51.6	48.2	48.4
５５－１０	充填（0.5mm程度）	247.0	36.7	32.1	27.0	19.2	17.7	18.3	7.7	23.2	22.4	5.3	19.9	15.5	19.0	18.4	18.1	11.3
５５－１１	表面被覆（0.2mm程度）	163.0	37.9	34.9	26.1	21.3	21.8	25.3	8.7	26.7	27.5	6.3	22.2	24.3	25.2	27.5	27.2	11.3
５５－１２	表面被覆（0.5mm程度）	236.0	220.0	105.0	72.7	44.5	44.9	49.8	27.6	52.8	52.1	18.2	41.0	36.9	31.9	32.5	30.8	22.9
５５－１３	充填＋表面被覆（0.2mm程度）	249.0	53.2	28.8	20.9	20.6	21.8	24.0	7.0	23.7	23.9	4.5	22.0	15.5	19.2	16.3	20.9	20.9
５５－１４	充填＋表面被覆（0.5mm程度）	403.0	120.0	94.8	105.0	100.0	88.2	89.4	76.2	105.0	110.0	45.7	63.2	60.9	51.1	45.5	45.5	32.0
７０－１	ひび割れ無し	357.0	43.7	139.0	17.6	28.1	27.8	30.2	11.7	24.5	22.6	4.9	20.3	17.6	19.3	20.6	18.6	18.6
７０－２	ひび割れ無し	232.0	270.0	177.0	23.1	31.8	27.6	26.3	10.0	21.9	21.8	5.6	21.5	14.1	17.8	18.1	19.4	6.7
７０－３	補修無し（0.2mm程度）	200.0	41.3	34.4	15.5	22.4	22.2	23.8	14.4	26.2	25.9	11.3	25.3	24.3	24.9	26.2	22.7	30.9
７０－４	補修無し（0.5mm程度）	238.0	41.2	33.5	13.8	20.6	20.2	21.5	13.7	24.4	23.2	9.5	22.2	24.7	22.4	19.9	18.3	21.7
７０－５	表面塗布（0.2mm程度）	353.0	43.6	17.4	5.9	13.3	13.6	16.7	7.3	16.9	12.6	4.0	16.5	14.1	9.4	17.4	19.6	44.6
７０－６	表面塗布（0.5mm程度）	317.0	86.2	28.7	9.5	17.1	16.2	15.9	13.1	22.5	20.0	7.1	20.3	21.7	14.2	17.6	18.8	13.6
７０－７	低圧注入（0.2mm程度）	294.0	88.4	72.7	37.9	49.4	46.1	43.4	32.8	49.4	49.0	21.7	38.0	55.3	46.3	39.5	41.3	68.7
７０－８	低圧注入（0.5mm程度）	242.0	69.4	56.2	29.2	34.5	26.9	26.5	21.0	28.9	28.6	13.5	24.4	32.2	26.0	22.5	23.7	16.5
７０－９	充填（0.2mm程度）	430.0	34.1	26.5	11.2	15.7	13.2	12.9	11.4	13.1	16.5	7.2	14.5	15.5	12.3	11.9	13.7	42.8
７０－１０	充填（0.5mm程度）	819.0	42.7	21.8	8.8	10.9	9.0	3.7	9.6	12.8	16.3	6.1	15.1	17.8	17.0	13.1	15.7	15.7
７０－１１	表面被覆（0.2mm程度）	426.0	48.2	9.1	12.2	14.4	16.7	6.1	15.2	18.2	19.1	8.3	18.0	16.4	15.3	12.8	11.7	144.0
７０－１２	表面被覆（0.5mm程度）	245.0	165.0	28.1	31.4	23.4	18.5	8.7	16.3	19.0	20.1	9.6	17.1	17.6	15.8	14.0	12.2	49.5
７０－１３	充填＋表面被覆（0.2mm程度）	303.0	139.0	49.2	44.8	48.6	46.7	25.3	38.7	46.3	45.2	22.9	38.8	33.1	30.2	30.6	26.5	30.2
７０－１４	充填＋表面被覆（0.5mm程度）	409.0	92.4	41.6	39.0	34.8	27.2	12.9	22.3	30.2	27.4	12.3	23.6	24.1	22.7	22.0	22.0	11.7



図－６（２）　分極抵抗測定結果（縦軸スケールの拡大）

表－11　CEBによる腐食速度の判定基準

分極抵抗 R　（k Ω・cm²）	腐食速度の判定
130～260 より大	不動態状態　（腐食なし）
52 以上 130 以下	低～中程度の腐食速度
26 以上 52 以下	中～高程度の腐食速度
26 未満	激しい、高い腐食速度

CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による腐食速度判定基準を**表－11** に示す。

以下に各 W/C 毎の分極抵抗の値について述べる。

3.3.1　W/C＝４０%のケース

ひび割れ無しのケースでは 200kΩcm² 以上、補修無しのケースでは 100 kΩcm² 程度の値で推移した。各補修を行った各ケースの値は概ねその間の値で推移した。自然電位に比較してデータの変動が大きい。

3.3.2　W/C＝５５%のケース

ひび割れ無しのケースでは試験開始時点では 200kΩcm² 程度であったが、次第に低下し、10 サイクル以降は 50 kΩcm² 程度となった。補修無しでは１サイクル目から 50 kΩcm² 以下となった。ひび割れ 0.2mm の低圧注入のケースでは３サイクルまではやや高い値を示したが、他の補修のケースでは試験開始の初期から 50 kΩcm² 程度の値となった。

3.3.3　W/C＝７０%のケース

全てのケースで試験開始直後から値は大きく低下し、50 kΩcm² 以下となった。

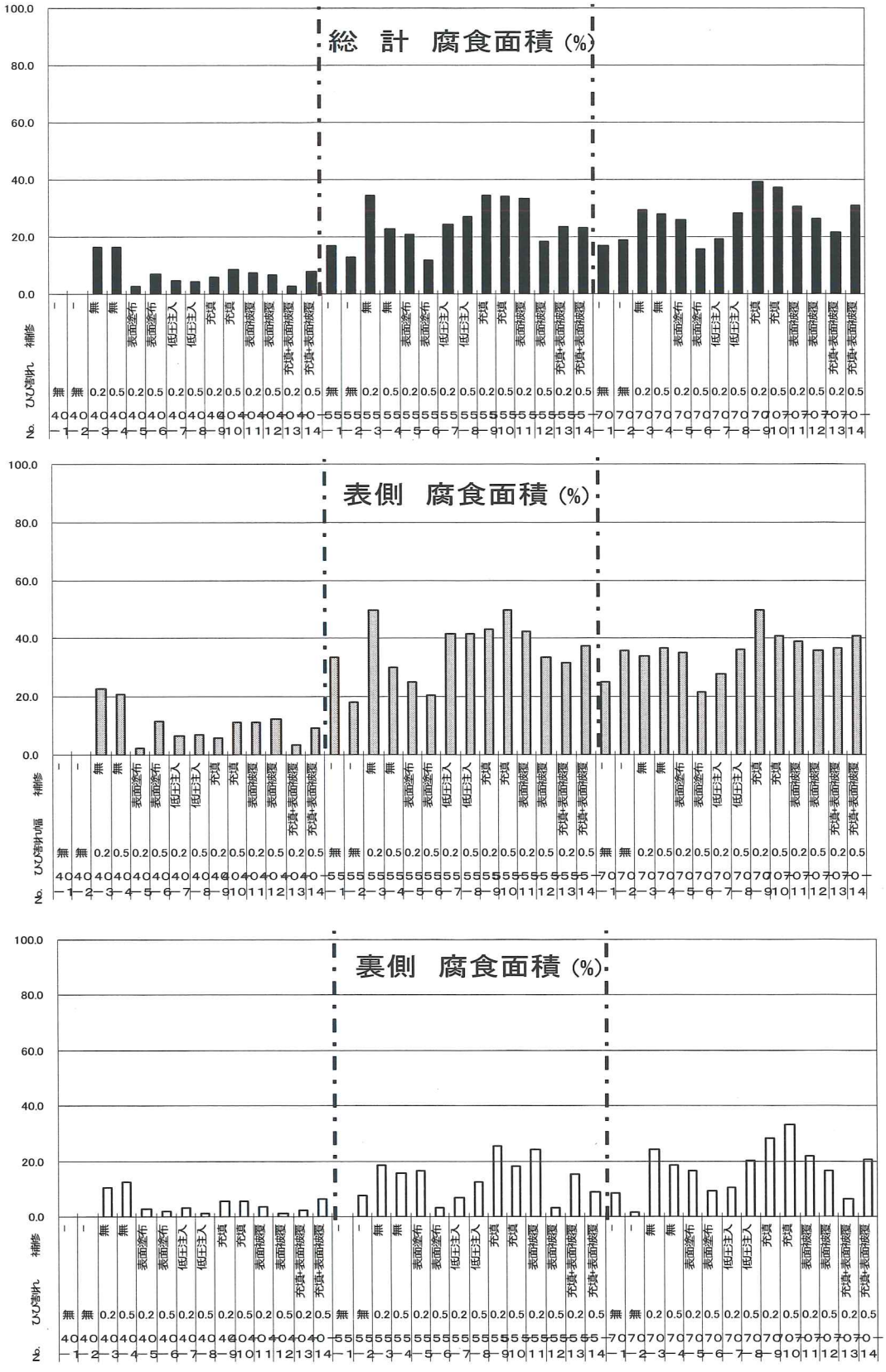
3.4　鉄筋腐食面積率による検討

供試体から取り出した鉄筋に対して腐食状況を観察し、展開図（図－８）を作成した。この展開図をもとに求めた腐食面積率の数値表を**表－12**に、グラフを**図－７**に示す。

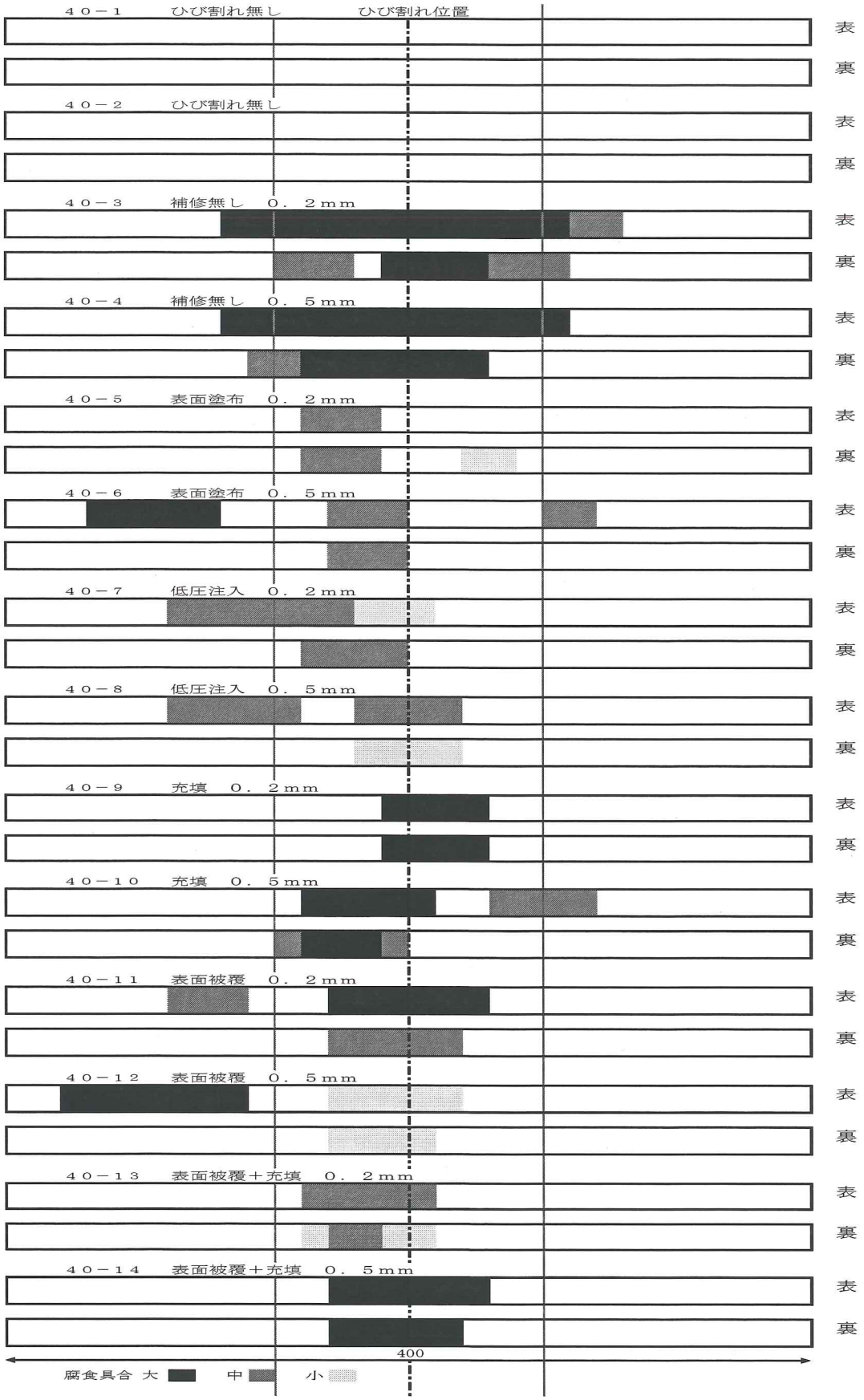
鉄筋の表・裏は、塩分の浸透面を表、その反対面を裏とした。総計は表と裏との平均とした。

表－12 各供試体の腐食面積率

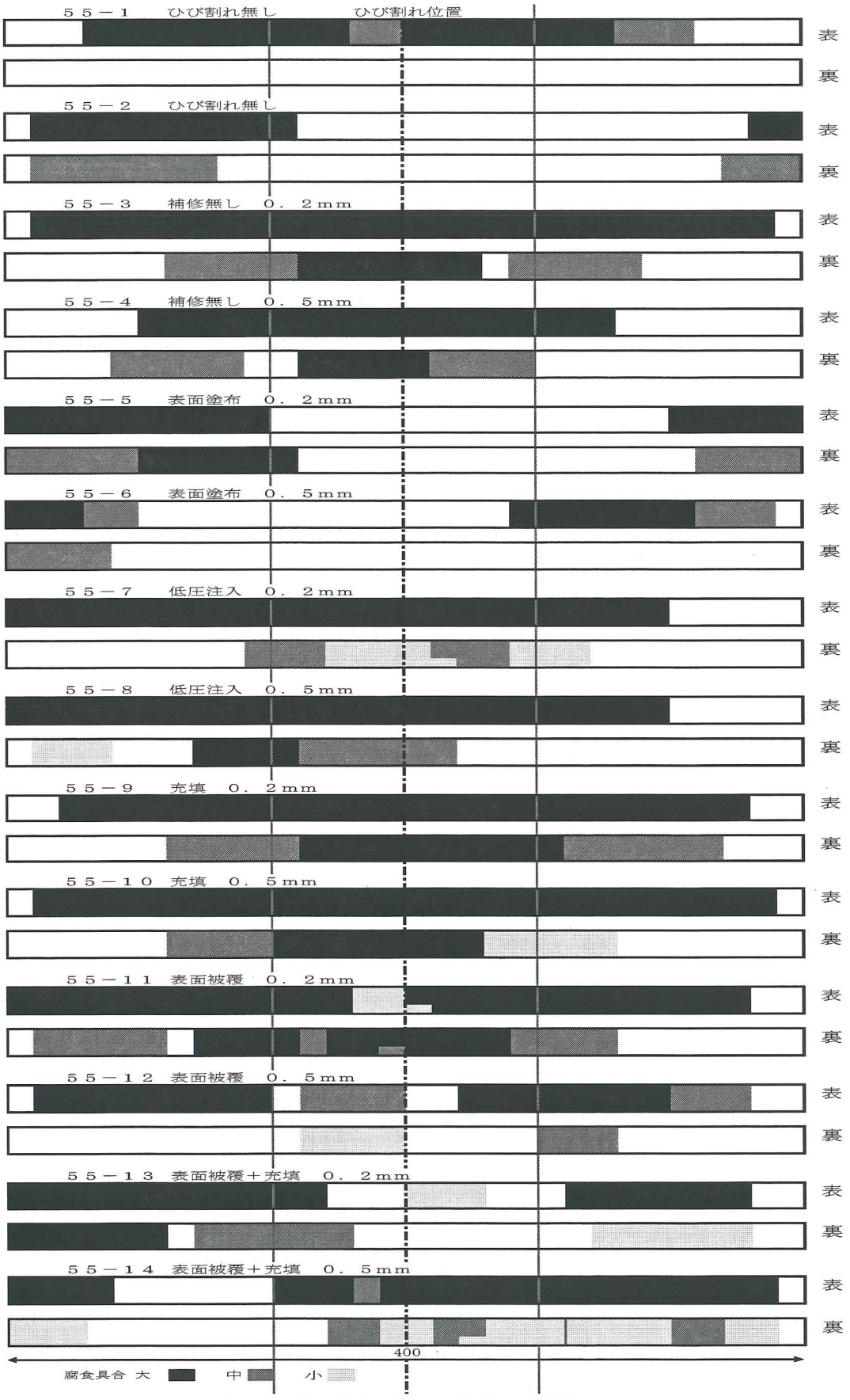
試験体No.	ひび割れ幅	補修種類	表側 腐食面積(cm^2) 大	中	小	表合計(%)	裏側 腐食面積(cm^2) 大	中	小	裏合計(%)	総計(%)
４０－１	無	－	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
４０－２	無	－	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
４０－３	0.2	無	13.0	1.5	0.0	22.9	3.5	5.5	0.0	10.4	16.7
４０－４	0.5	無	12.5	0.0	0.0	20.8	6.5	2.0	0.0	12.5	16.7
４０－５	0.2	表面塗布	0.0	3.0	0.0	2.5	0.0	2.5	2.0	2.8	2.6
４０－６	0.5	表面塗布	4.5	5.0	0.0	11.7	0.0	2.5	0.0	2.1	6.9
４０－７	0.2	低圧注入	0.0	6.5	3.0	6.4	0.0	4.0	0.0	3.3	4.9
４０－８	0.5	低圧注入	0.0	8.5	0.0	7.1	0.0	0.0	3.5	1.2	4.1
４０－９	0.2	充填	3.5	0.0	0.0	5.8	3.5	0.0	0.0	5.8	5.8
４０－１	0.5	充填	5.0	3.5	0.0	11.3	2.5	2.0	0.0	5.8	8.5
４０－１	0.2	表面被覆	5.5	2.5	0.0	11.3	0.0	4.5	0.0	3.8	7.5
４０－１	0.5	表面被覆	6.5	0.0	5.0	12.5	0.0	0.0	3.5	1.2	6.8
４０－１	0.2	充填+表面被覆	0.0	4.0	0.0	3.3	0.0	2.0	2.5	2.5	2.9
４０－１	0.5	充填+表面被覆	5.5	0.0	0.0	9.2	4.0	0.0	0.0	6.7	7.9
５５－１	無	－	18.0	4.5	0.0	33.8	0.0	0.0	0.0	0.0	16.9
５５－２	無	－	10.8	0.0	0.0	18.0	0.0	9.0	0.0	7.5	12.8
５５－３	0.2	無	30.0	0.0	0.0	50.0	6.5	9.5	0.0	18.8	34.4
５５－４	0.5	無	18.0	0.0	0.0	30.0	5.0	9.0	0.0	15.8	22.9
５５－５	0.2	表面塗布	15.0	0.0	0.0	25.0	5.5	9.0	0.0	16.7	20.8
５５－６	0.5	表面塗布	10.0	4.5	0.0	20.4	0.0	4.0	0.0	3.3	11.9
５５－７	0.2	低圧注入	25.0	0.0	0.0	41.7	0.0	5.5	7.0	6.9	24.3
５５－８	0.5	低圧注入	25.0	0.0	0.0	41.7	4.0	6.0	2.5	12.5	27.1
５５－９	0.2	充填	26.0	0.0	0.0	43.3	10.0	10.5	0.0	25.4	34.4
５５－１	0.5	充填	30.0	0.0	0.0	50.0	8.0	4.0	4.5	18.2	34.1
５５－１	0.2	表面被覆	25.0	0.0	2.5	42.5	9.5	10.0	0.0	24.2	33.3
５５－１	0.5	表面被覆	17.0	6.5	0.0	33.8	0.0	2.5	4.0	3.4	18.6
５５－１	0.2	充填+表面被覆	18.5	0.0	3.0	31.8	5.5	5.5	5.5	15.6	23.7
５５－１	0.5	充填+表面被覆	22.0	1.0	0.0	37.5	0.0	5.5	13.5	9.1	23.3
７０－１	無	－	13.5	3.0	0.0	25.0	3.5	2.5	2.0	8.6	16.8
７０－２	無	－	21.5	0.0	0.0	35.8	0.0	0.0	4.5	1.5	18.7
７０－３	0.2	無	19.0	3.0	0.0	34.2	12.5	3.0	3.0	24.3	29.3
７０－４	0.5	無	22.0	0.0	0.0	36.7	9.0	4.5	0.0	18.8	27.7
７０－５	0.2	表面塗布	21.0	0.0	0.0	35.0	9.0	0.0	4.5	16.5	25.8
７０－６	0.5	表面塗布	11.5	1.5	3.5	21.6	0.0	10.0	3.5	9.5	15.5
７０－７	0.2	低圧注入	15.0	0.0	8.5	27.8	4.5	3.5	0.0	10.4	19.1
７０－８	0.5	低圧注入	19.0	5.5	0.0	36.3	7.0	9.5	2.0	20.3	28.3
７０－９	0.2	充填	30.0	0.0	0.0	50.0	6.0	22.0	0.0	28.3	39.2
７０－１	0.5	充填	24.0	1.0	0.0	40.8	16.0	8.0	0.0	33.3	37.1
７０－１	0.2	表面被覆	23.5	0.0	0.0	39.2	7.0	11.0	3.5	22.0	30.6
７０－１	0.5	表面被覆	21.5	0.0	0.0	35.8	5.0	6.5	8.0	16.4	26.1
７０－１	0.2	充填+表面被覆	22.0	0.0	0.0	36.7	0.0	6.0	4.5	6.5	21.6
７０－１	0.5	充填+表面被覆	24.0	1.0	0.0	40.8	4.5	16.0	0.0	20.8	30.8



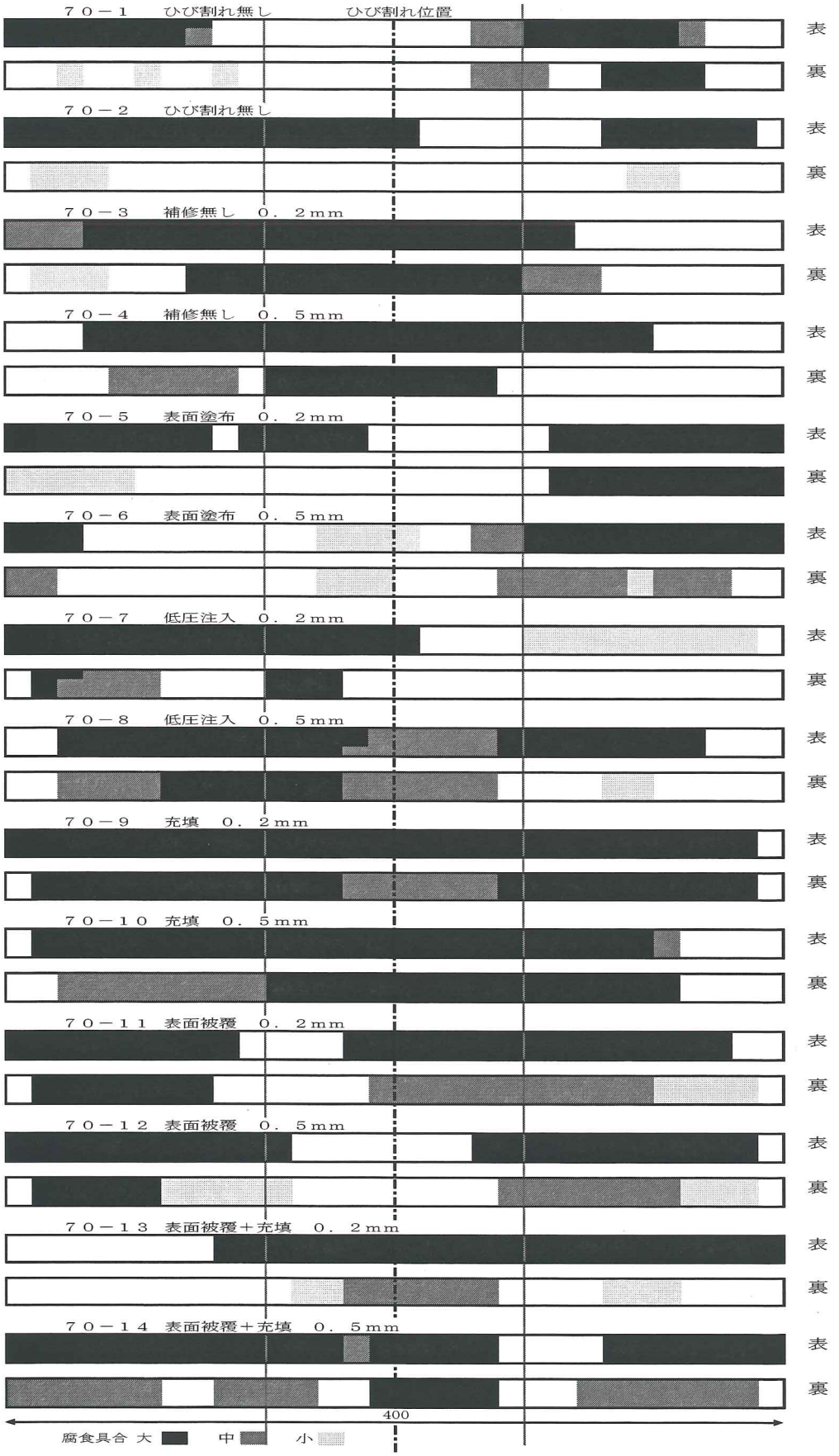
図－7　各供試体の腐食面積率



図－８(1) W/C＝40%の鉄筋の展開図



図－８(2) W/C＝55%の鉄筋の展開図



図－８(3) W/C＝70%の鉄筋の展開図

3.4.1　腐食面積率に関する考察

（１）W/Cごとの腐食面積率を比較すると、W/C40％では腐食面積率が小さく、W/C55％と70％では大きい傾向を示した。

（２）ひび割れの有無を比較すると、ひび割れ無しの腐食面積率は小さく（特にW/C40では腐食無し）、ひび割れあり（補修無し）の腐食面積率は大きい傾向を示した。

（３）各補修工法の腐食面積率を補修無しのものと比較すると、充填工法の腐食面積率は大きく、その他の補修工法の腐食面積率は小さい傾向を示した。特に、低圧注入と表面塗布の腐食面積率が小さい傾向を示した。

（４）鉄筋の表面と裏面を比較すると、裏面は表面の 1/2 程度の腐食面積率であった。

3.4.2　鉄筋の腐食発生位置に関する考察

（１）ひび割れ無しでは、W/C＝40%では腐食がみられず、W/C が 55, 70%と大きくなるごとに鉄筋のほぼ全面に腐食が広がっている。これは、W/C が高いコンクリートは透過性が高いので塩化物イオンがコンクリート表面から侵入したためと考えられる。

（２）ひび割れ補修無しでは、腐食はひび割れ部分を中心に認められ、W/C が 40, 55, 70％と大きくなるごとに腐食範囲が広がっていく傾向が認められた。

（３）各補修のケースをみると、W/C＝40%ではひび割れ付近に腐食がみられるものの、ひび割れ補修無しに比較して全ての補修のケースで腐食面積が少ない傾向を示した。W/C＝55, 70％では、コンクリートの透過性が高いために、ひび割れ位置以外でも腐食している。ただし、補修材で被覆している部分では腐食していないもの（表面塗布、表面被覆）もあった。

（４）補修によってはひび割れ位置よりやや離れた箇所で腐食しているものがあった。その原因としては表面塗布､表面被覆では､ひび割れ発生部分のコンクリート表面を被覆しているためであり、また低圧注入では、ひび割れ部から補修材料が浸透してひび割れ部分の鉄筋表面に被覆を形成していることが確認されており、これによりひび割れ部分の鉄筋に腐食が生じなかったものと推察される。

（５）充填工法は、コンクリート表面から 1cm 程度の深さまでしか充填しないために、充填材の界面沿いに塩化物イオンがひび割れ内に進入し、鉄筋が腐食したものと考えられる。

（６）充填＋表面被覆は、表面被覆材でひび割れ部を覆っているが、今回の実験では塗装面にひび割れが発生しており、そこから充填部分に塩化物イオンが侵入し、鉄筋が腐食した可能性がある。

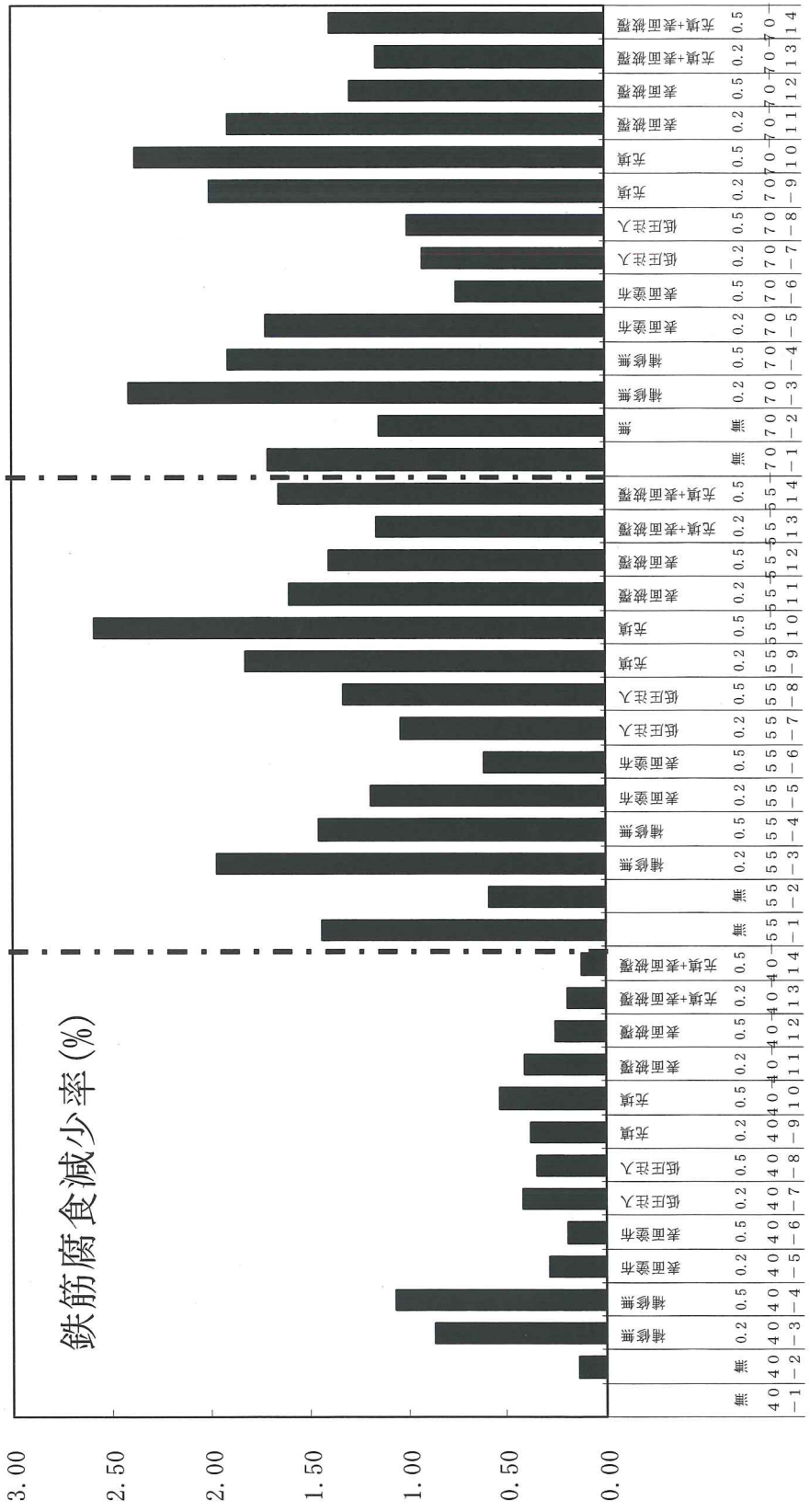
（７）鉄筋の表側と裏側の腐食位置を比較すると、概ね対応しているが、表側に起こった腐食が裏側で発生していない場合も認められた。

3.5 鉄筋腐食減少率による検討

各試験体の鉄筋腐食減少率の数値表を**表－13**にグラフを**図－10**に示す。

表－13　各試験体の鉄筋腐食減少率

試験体No.	ひび割れ幅	補修種類	試験開始前鉄筋質量(g)	20ｻｲｸﾙ終了後鉄筋質量(g)	鉄筋損失質量百分率(%)	補正鉄筋損失質量百分率(%)
４０－１	無	無	174.926	174.393	0.30	0.00
４０－２	無	無	171.096	170.321	0.45	0.14
４０－３	0.2	無	171.322	169.187	1.25	0.86
４０－４	0.5	無	171.740	169.250	1.45	1.07
４０－５	0.2	表面塗布	173.493	172.348	0.66	0.28
４０－６	0.5	表面塗布	171.508	170.524	0.57	0.19
４０－７	0.2	低圧注入	172.503	171.135	0.79	0.41
４０－８	0.5	低圧注入	172.133	170.882	0.73	0.35
４０－９	0.2	充填	175.781	174.461	0.75	0.38
４０－１	0.5	充填	171.710	170.142	0.91	0.53
４０－１	0.2	表面被覆	174.417	173.046	0.79	0.41
４０－１	0.5	表面被覆	171.429	170.343	0.63	0.25
４０－１	0.2	充填+表面被覆	173.582	172.589	0.57	0.20
４０－１	0.5	充填+表面被覆	171.890	171.023	0.50	0.12
５５－１	無	無	171.528	168.401	1.82	1.44
５５－２	無	無	173.185	171.510	0.97	0.59
５５－３	0.2	無	169.883	165.879	2.36	1.97
５５－４	0.5	無	173.267	170.095	1.83	1.45
５５－５	0.2	表面塗布	170.260	167.581	1.57	1.19
５５－６	0.5	表面塗布	171.953	170.252	0.99	0.61
５５－７	0.2	低圧注入	173.669	171.222	1.41	1.03
５５－８	0.5	低圧注入	174.046	171.072	1.71	1.33
５５－９	0.2	充填	171.402	167.621	2.21	1.82
５５－１	0.5	充填	174.381	169.230	2.95	2.58
５５－１	0.2	表面被覆	170.389	167.013	1.98	1.60
５５－１	0.5	表面被覆	174.665	171.572	1.77	1.40
５５－１	0.2	充填+表面被覆	170.320	167.694	1.54	1.16
５５－１	0.5	充填+表面被覆	173.776	170.253	2.03	1.65
７０－１	無	無	172.075	168.476	2.09	1.71
７０－２	無	無	174.200	171.548	1.52	1.15
７０－３	0.2	無	170.501	165.742	2.79	2.41
７０－４	0.5	無	171.116	167.191	2.29	1.91
７０－５	0.2	表面塗布	174.174	170.524	2.10	1.72
７０－６	0.5	表面塗布	171.913	169.976	1.13	0.75
７０－７	0.2	低圧注入	171.621	169.389	1.30	0.92
７０－８	0.5	低圧注入	170.879	168.519	1.38	1.00
７０－９	0.2	充填	175.824	171.643	2.38	2.01
７０－１	0.5	充填	171.414	166.693	2.75	2.37
７０－１	0.2	表面被覆	171.116	167.191	2.29	1.91
７０－１	0.5	表面被覆	173.437	170.538	1.67	1.29
７０－１	0.2	充填+表面被覆	171.650	169.004	1.54	1.16
７０－１	0.5	充填+表面被覆	171.014	167.982	1.77	1.39



図－９　各供試体別の鉄筋腐食減少率

図－９より、各 W/C ごとの鉄筋腐食減少量を比較すると、以下のような傾向が認められた。

（１）W/C＝40%のケース

・補修を行った全てのケースでひび割れ補修無しより腐食減少率が低かった。その中でも表面塗布、充填＋表面被覆は低い値を示し、充填は高い値を示した。

（２）W/C＝55%のケース

・充填以外は、ひび割れ補修無しより腐食減少率が低かった。

・表面塗布と低圧注入は、ひび割れ無しと同程度の結果であった。

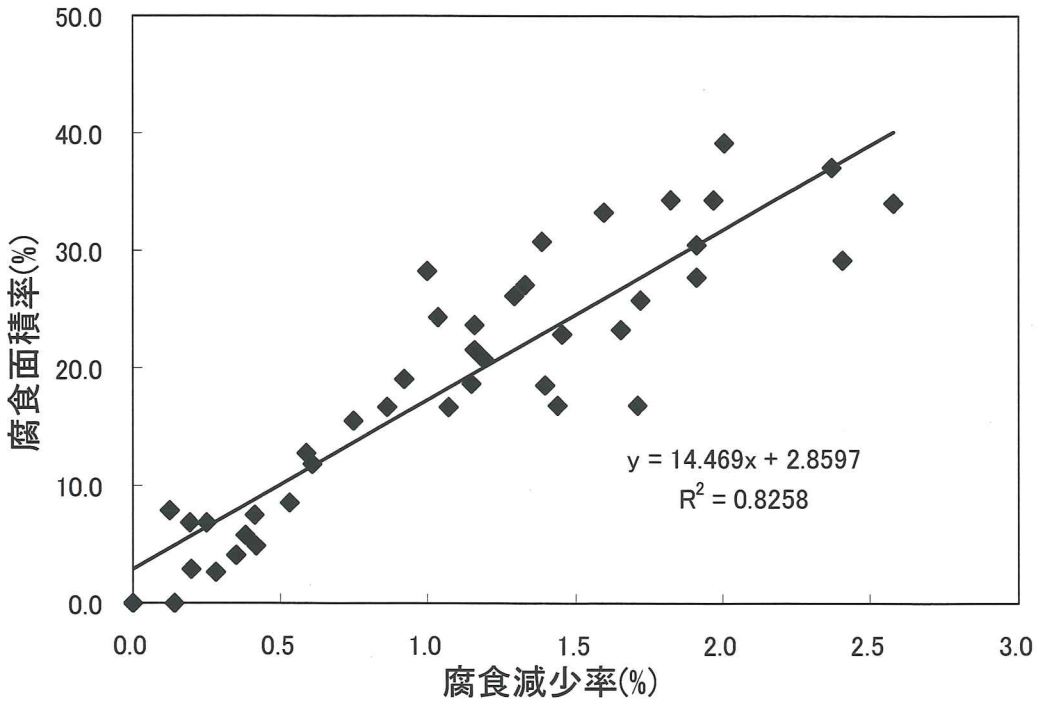
（３）W/C＝70%のケース

・充填以外は、ひび割れ補修無しより腐食減量率が低かった。

・表面塗布、低圧注入、充填＋表面被覆は、ひび割れ無しと同程度か、やや低い結果となった。

いずれの W/C のケースにおいても、充填工法の腐食減量率は、他の補修工法より大きかった。この原因は、コンクリート表面から深さ 1cm 程度までしか充填しないために、遮塩効果が十分でなかったものと思われる。

図－10 に腐食面積率と腐食減少率の関係を示す。腐食面積率は、鉄筋の表と裏の平均の値とした。腐食面積と腐食減量は良く対応する結果となった。



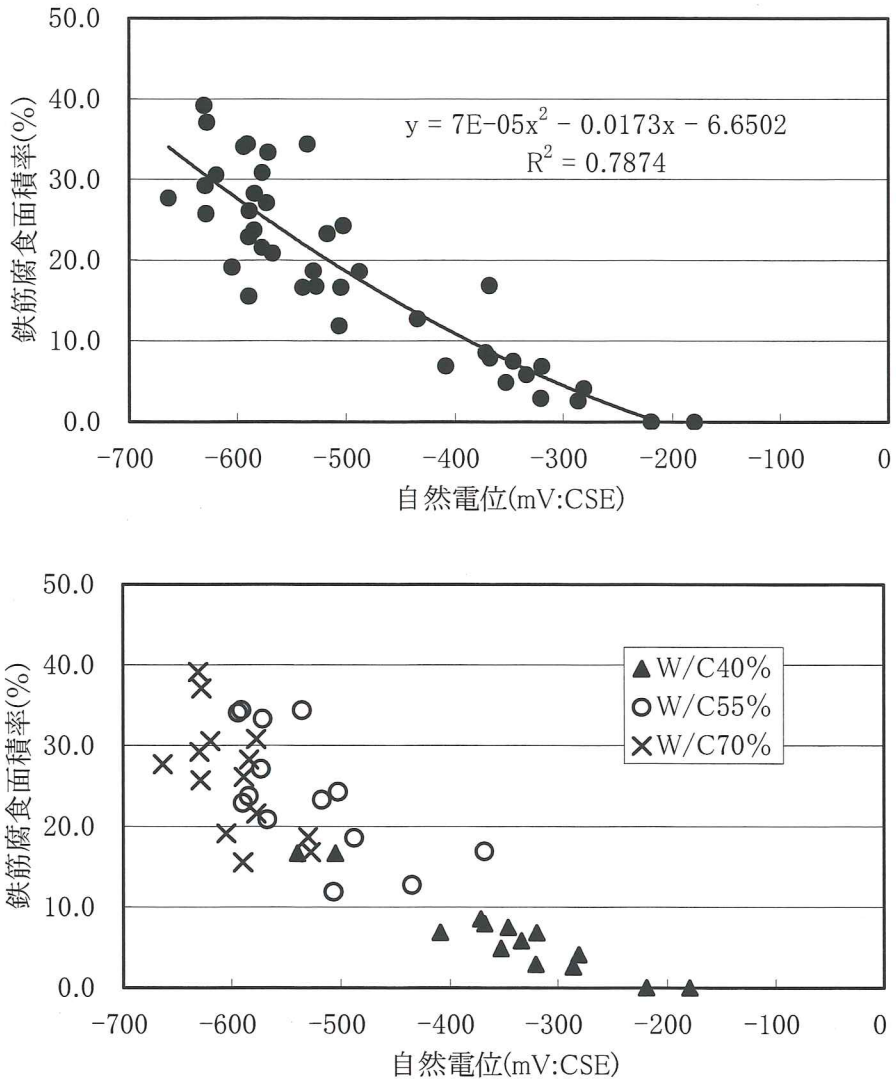
図－10　腐食面積率と腐食減少率の関係

3.6 自然電位・分極抵抗と鉄筋腐食の関係

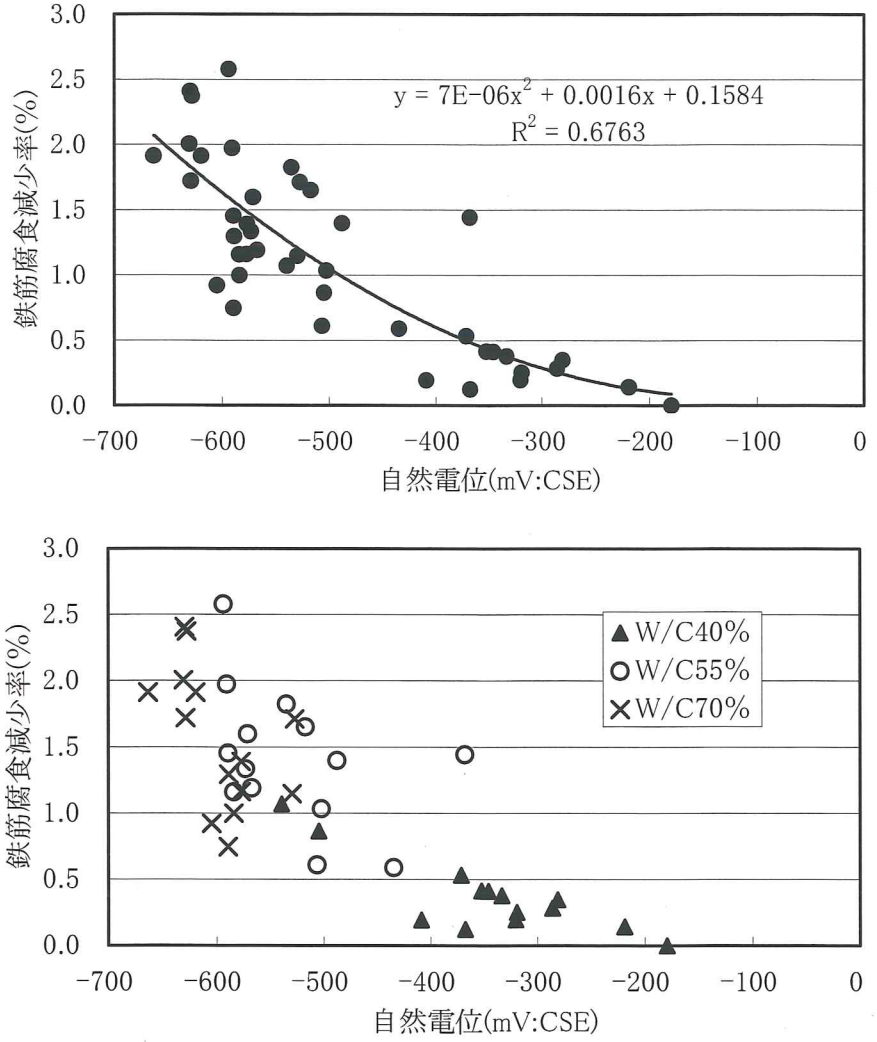
3.6.1　自然電位と鉄筋腐食の関係

自然電位（1～19 回測定値の平均値）と鉄筋腐食面積率との関係について、全データでの関係と各 W/C ごとの関係を**図－11** 示す。また、同様に自然電位と鉄筋腐食減少率との関係を図－12 に示す。

図－11，12 より、自然電位と鉄筋腐食面積率、自然電位と鉄筋腐食減少率との関係は、W/C に関係なく、比較的良い対応を示す結果となった。ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価では「自然電位が -200m 以上では 90%以上の確率で腐食無し、-350mV 以下では 90%以上の確率で腐食あり」とされており、今回の試験結果はこの評価基準と良く一致する結果となった。



図－11　自然電位と鉄筋腐食面積率の関係

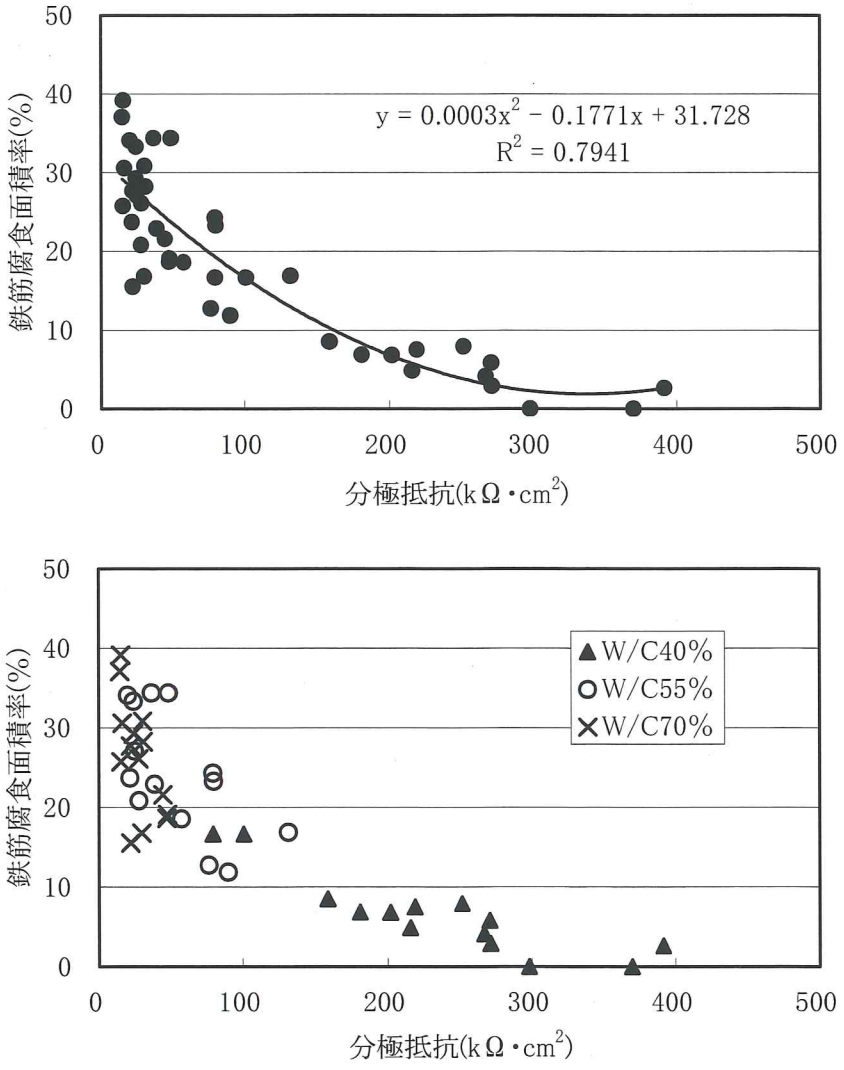


図－12　腐食減少率と自然電位の関係

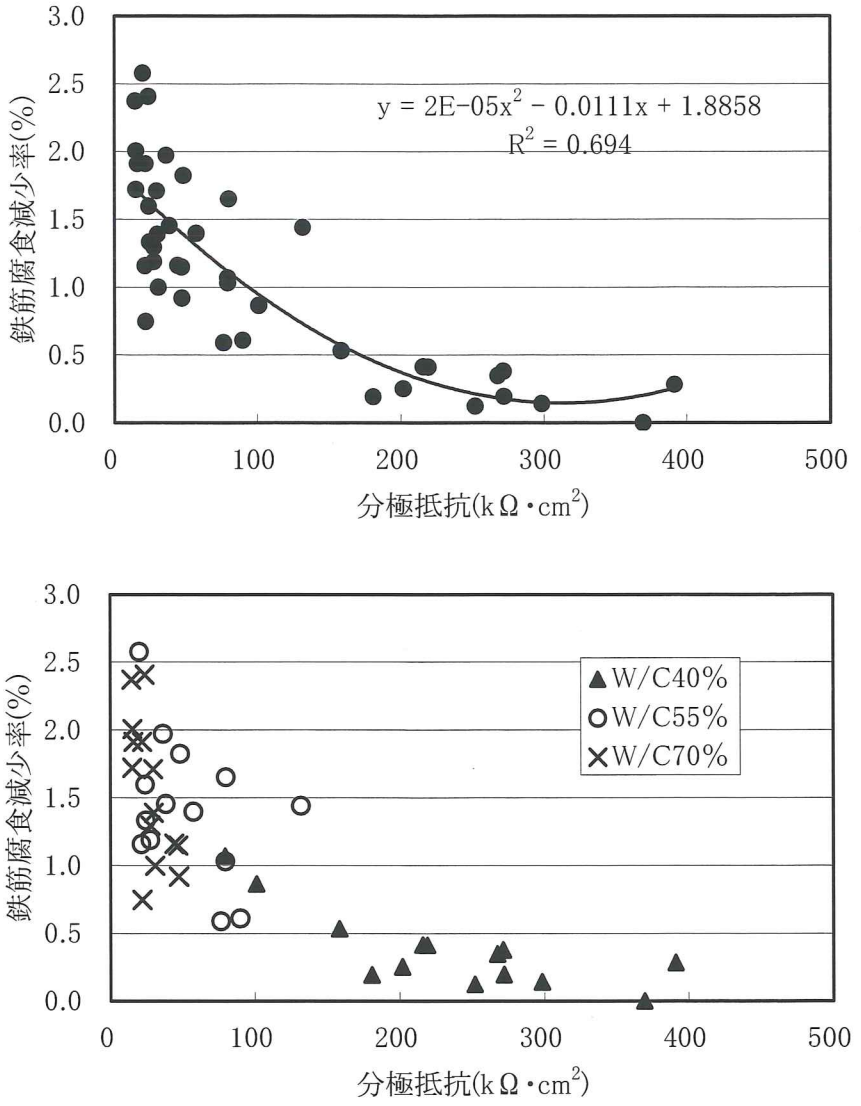
3.6.2　分極抵抗と鉄筋腐食の関係

分極抵抗（1～19回測定値の平均値）と鉄筋腐食面積率との関係について、全データでの関係と各W/Cごとの関係を**図－13**示す。**また、同様に**自然電位と鉄筋腐食減少率との関係を図－14に示す。

図－13，14より、分極抵抗と鉄筋腐食面積率、分極抵抗と鉄筋腐食減少率との関係はW/Cに関係なく、比較的良い対応を示す結果となった。CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による腐食速度判定基準では「分極抵抗が130～260kΩ・cm^{2}以上で不動態状態」とされているが、今回の試験で腐食が生じなかったのは分極抵抗が300 kΩ・cm^{2}以上の範囲であり、CEB判定基準とはやや異なる結果となった。



図－13　腐食面積率と分極抵抗の関係



図－14　腐食減少率と分極抵抗の関係

3.7 ＥＰＭＡ分析と塩分量測定結果

3.7.1　ＥＰＭＡ分析結果

ＥＰＭＡ分析の結果のうち、Cl^-の結果を写真－２に示す。Cl^-の浸透方向は、写真の左から右である。写真－２より以下の傾向が認められた。

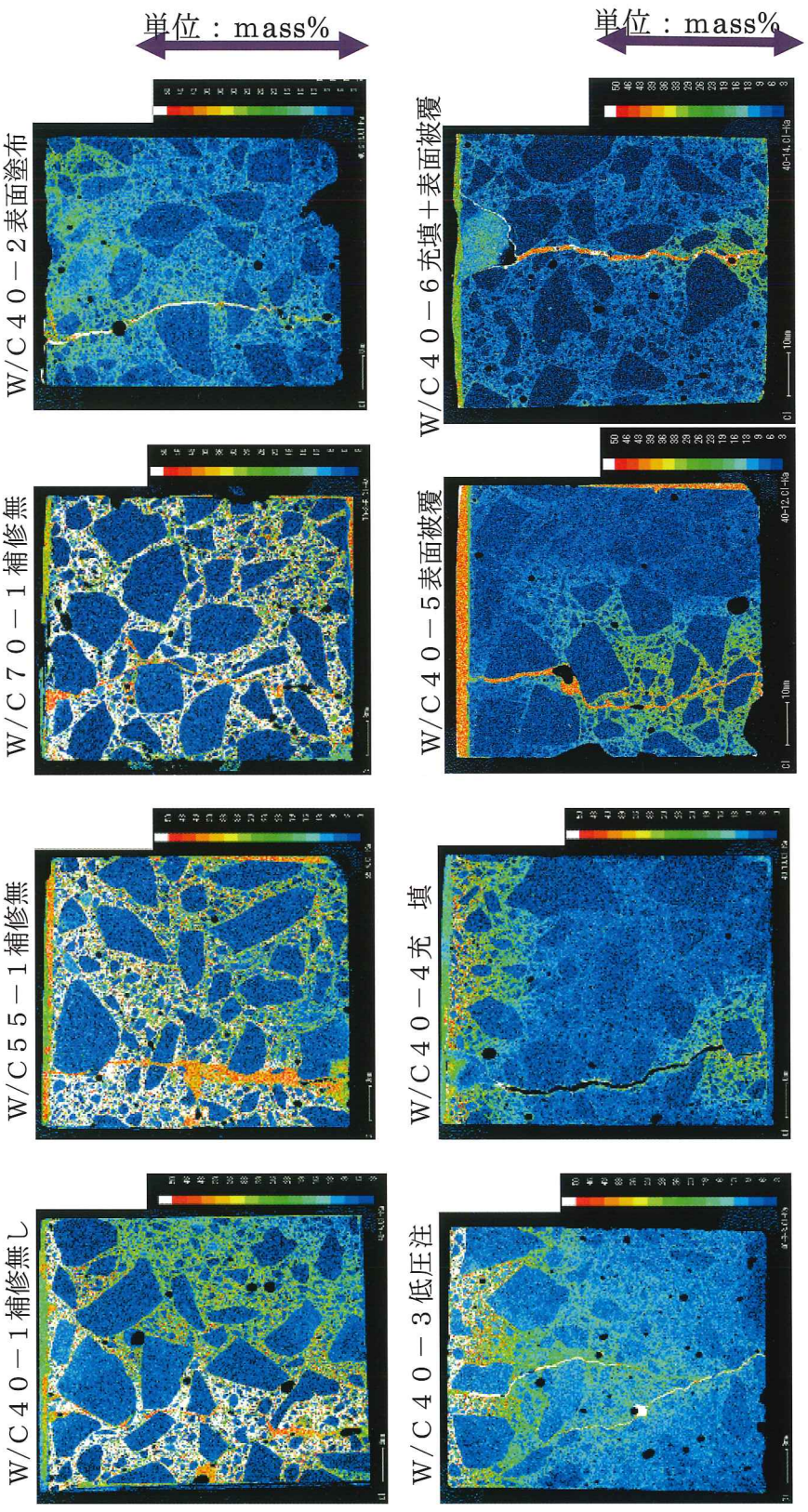
(1) ひび割れ補修無しの試験体では、すべてのW/CでCl^-がひび割れ部から浸透し、その周辺部に広がっていることが確認できた。

(2) コンクリート表面からの浸透深さはW/Cが高いものほど大きい。特にW/C70-1では観察面全面に浸透している。コンクリートのW/Cが高い場合は、ひび割れの有無によらずCl^-が浸透しやすいということ[1)]を検証できた。

(2) 表面塗布と低圧注入では、ひび割れ部には補修材料が充填されており、ひび割れ深部へのCl^-の侵入がみられなかった。

(3) 充填、充填＋表面被覆では、Cl^-がひび割れ深部に侵入している。これらの補修工法ではひび割れの表面付近しか塞いでいないために、補修材とコンクリートとの界面等に生じた隙間からのCl^-の侵入があったと考えられる。

なお、ＥＰＭＡ分析ではCl^-全以外に、Na, KおよびＣについても分析を行ったが、Na, Kに関しては特に顕著な分布は見られなかった。また、Ｃに関してはひび割れ部にコーティングした樹脂、及び塗装材・充填材による高濃度分布が見られるが、他に特に顕著な分布は見られなかった。



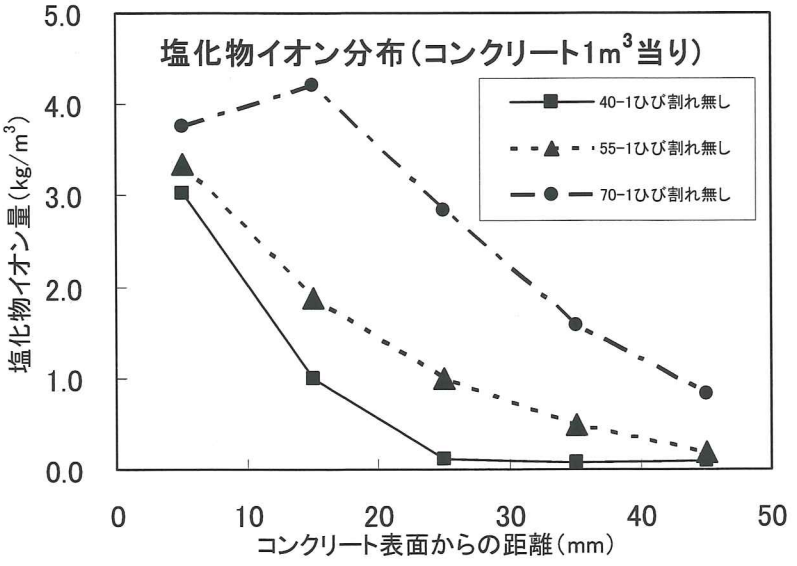
写真－２　ＥＰＭＡ分析結果

3.7.2　塩分量測定結果

ひび割れ無しの供試体 40-1, 55-1, 70-1 について試験体を表面から 1cm 厚さ毎にスライスし、塩分分析を行った。この結果を**表－14** に示す。また、**図－15** にコンクリート 1m³ 当り含有塩化物イオン濃度（kg/m³）の分布を示す。この結果からもＥＰＭＡと同様に W/C が大きいものほど塩分浸透量が大きい傾向が確認できた。

表－14　塩分分析結果

試料番号	採取場所	表面からの距離（mm）	試料採取量（g）	試料溶液からの分取量（ml）	希釈倍率	含有塩化物イオン量	コンクリート 1m³当り 塩化物イオン量	単位セメント量当り 塩化物イオン量
						（%）	（kg/m³）	（%）
1	40-1ひび割れ無し	0 ～ 10	40.00	20	1.00	0.129	3.032	0.758
2		10 ～ 20		100		0.042	0.987	0.247
3		20 ～ 30				0.005	0.118	0.029
4		30 ～ 40				0.003	0.071	0.018
5		40 ～ 50				0.004	0.094	0.024
6	55-1ひび割れ無し	0 ～ 10		20		0.142	3.337	1.147
7		10 ～ 20		100		0.080	1.880	0.646
8		20 ～ 30				0.042	0.987	0.339
9		30 ～ 40				0.021	0.494	0.170
10		40 ～ 50				0.008	0.188	0.065
11	70-1ひび割れ無し	0 ～ 10		20		0.160	3.760	1.642
12		10 ～ 20				0.179	4.207	1.837
13		20 ～ 30				0.121	2.844	1.242
14		30 ～ 40		100		0.067	1.575	0.688
15		40 ～ 50				0.035	0.823	0.359



図－15　塩化物イオン分布

4．まとめ

4.1　各種ひび割れ補修効果について

各種ひび割れ補修法に関して自然電位・分極抵抗、鉄筋の腐食状況（腐食位置、腐食面積率、腐食減少率）等から補修効果について検討した。各測定項目の結果には若干の差異はあるが本実験結果から包括的に各種ひび割れ補修工法の効果を以下に整理する。

（1）　最も高い補修効果を示したのは低圧注入と表面塗布で、厳しい塩害環境下ではひび割れを深部にわたるまで塞ぐ工法が優れていると考えられる。

（2）　充填工法は、他の補修工法に比べて全般的に腐食度が高くなった。その原因として、ひび割れに対して、コンクリート表面からは約 1cm 程度の深さまでしか充填しないためと思われる。充填工法を飛来塩分環境下で行うときは、充分な注意が必要と思われる。

（3）　コンクリートの水セメント比が高い場合にはコンクリート自体の透過性が大きいのでひび割れ部のみを補修をしても、他の部分から塩分が浸透する。このため、水セメント比の高いコンクリートを補修する場合にはコンクリート表面全体を覆う必要があると思われる。ただし、この場合、十分なメンテナンスが必要と考えられる。

（4）　充填工法と表面被覆工法を組み合わせたケースでは、促進試験の初期段階で塗装面にひび割れが生じた。原因として充填材と被覆材の変形性能（伸び能力や熱膨張係数）の違いが考えられ、このような異種の材料を組み合わせる場合は事前に確認試験を行うなどの配慮が必要である。

（5）　補修するひび割れの幅に関して、今回の実験結果からみると 0.2mm と 0.5mm の供試体の結果に差は認められなかった。

4.2　自然電位・分極抵抗と鉄筋腐食の関係について

（1）　自然電位に関しては、自然電位－腐食面積率の関係、自然電位－腐食減少率の関係とも全体的に ASTM C 876 による鉄筋腐食性評価と一致した。

（2）　分極抵抗に関しては、分極抵抗－腐食面積率の関係、分極抵抗－腐食減少率の関係とも CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）による腐食速度判定基準とは多少異なる結果となった。

【参考文献】

1) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 2003, pp. 85-107, 2002

2) 岡田　清、宮川豊章:コンクリートの水セメント比およびひび割れが鉄筋腐食に与える影響について、セメント技術年報 33 巻、pp494-497, 1976. 12

付録CD－Rの内容

１．第Ⅰ節データ集（Excel）

２．第Ⅱ節データ集（Excel）

３．第Ⅰ節写真集
　　ひび割れ導入・補修写真集
　　鉄筋取り出し写真集
　　鉄筋腐食状況写真集

４．第Ⅱ節写真集
　　供試体作製写真集
　　促進試験開始前写真集
　　促進試験終了後写真集
　　取り出し鉄筋写真集
　　ＥＰＭＡ分析写真集