報告　各種要因が補修後の再劣化に及ぼす影響

宇野　祐一*1・魚本　健人*2・元売　正美*3・松田　敏*4

要旨：本研究は，塩害で劣化したコンクリート構造物に補修を施した後，再劣化が起こる原因の究明とその対策を提案することを目的として５年計画で開始したものである。研究ではコンクリート中の塩分量，断面修復深さと範囲，上面塗装の有無，補修工法の種類などの補修時に想定される要因を考慮した試験体を作製し，海洋環境下および内陸環境下に暴露し，鉄筋の自然電位の変化，鉄筋腐食状況，塩化物イオンの分布等を調べる。本稿では，実験の概要と海洋暴露１年の調査結果の一部について報告する。結果，１年の短期間においても，補修方法によって鉄筋の発錆状況に差異があることが明らかとなった。

キーワード：塩害，補修，補修方法，再劣化，塩化物イオン量，自然電位，鉄筋腐食状況

1.　はじめに

近年，劣化したコンクリート構造物の補修事例が増えているが，それに伴って，補修後，比較的早期に再劣化に至る事例報告も増大している。このような再劣化の進行は，補修材料の良し悪しだけでなく，補修時の構造物の損傷度，補修の方法や施工の適切さなどに大きく左右されると考えられるが，その原因やメカニズムについては，ほとんど解明されていないのが現状である。今後，構造物の適切な維持管理計画を策定するためには，補修後の再劣化について検討を行っておくことが重要であると考えられる。

実験は，劣化要因を塩害に絞り，道路橋床版を対象とした場合の補修後の再劣化原因の解明と対策方法を提案するために，鉄筋コンクリート試験体の暴露試験を行って，補修時の条件の違いならびに各種補修工法（材料）性能が再劣化に及ぼす影響を把握することを目的として実施するものである。

2.　実験概要

塩害の補修工法は多種多様な工法が提案されているが，本研究では，断面修復工と表面被覆工による補修工法に限定して検討を行う。

2.1　暴露条件と劣化要因

実験は，異なる補修条件や補修工法（材料）を組み合わせた試験体を海洋環境下ならびに内陸環境下に暴露し，定期的に調査を実施して行うものとし，大きく以下の２シリーズについて検討する。

実験－１：補修時の条件の違いが再劣化に及ぼす影響の把握

実験－２：補修工法（材料）の違いが再劣化に及ぼす影響の把握

実験－１では，代表的な補修工法１工法を選定して補修時の条件を変化させた試験体を作製し，実験－２では，補修時の条件を１つに固定して種々の補修工法を施した試験体を作製する。

表－１に実験の目的，再劣化の要因，補修工法および暴露条件をとりまとめて示す。本報告は，この中の実験－１ついて，測定が終了した海洋暴露１年の結果の一部をとりまとめたものである。

*1 ショーボンド建設（株）　事業本部土木部部長　工博　（正会員）
*2 東京大学生産技術研究所　教授　工博　（正会員）
*3 （株）エムエヌビー　中央研究所　課長代理
*4 （株）熊谷組　土木本部　土木技術部　リニューアルグループ　課長

表－１　実験の目的と再劣化要因ならびに実験条件

実験シリーズ	1		2	
目的	補修条件の違いが再劣化に及ぼす影響の把握		補修工法（材料）の違いが再劣化に及ぼす影響の把握	
再劣化の要因	①塩化物イオンの再拡散 ②鉄筋周囲の残存塩化物イオン量 ③部分的断面修復によるマクロセル腐食 ④床版上面からの腐食因子の浸入 ⑤補修部分からの腐食因子の再浸入		⑥補修工法（材料）の防食性能	
補修工法	共通仕様		各種仕様	
暴露場所	海洋	内陸	海洋	内陸

2.2　試験体

(1) コンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメントを用い，細骨材として静岡県大井川水系陸砂を，粗骨材として最大寸法が 20mm の東京都青梅産硬質砂岩砕石を使用した。コンクリートの水セメント比は 65%とし，混和剤にＡＥ減水剤標準型（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）ならびにＡＥ剤（アルキルアリルスルホン酸化合物）を使用して，目標スランプ 12cm，空気量 4.5%に設定した。28 日の圧縮強度は，32～36N/mm^2 であった。

練混ぜ水は上水道水を使用し，塩化物イオンは塩化カルシウムを使用して予め練混ぜ水に溶解して添加した。塩化物イオン量は，0，2.4，4.8kg/m^3 の３水準である。

(2) 鉄筋

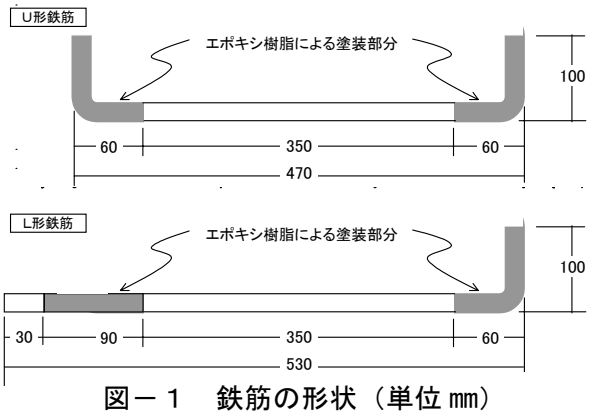
鉄筋は, JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定する SD345，D19 を使用し，**図－１**に 示すように加工し，加工時の影響を考慮して折曲げ部両端にエポキシ樹脂を塗布した。

また，図中のＬ型鉄筋は電位測定試験体用に加工したもので，一部の試験体に使用した。エポキシ樹脂塗装後，翌日に，各鉄筋の質量（基準質量）を測定した。

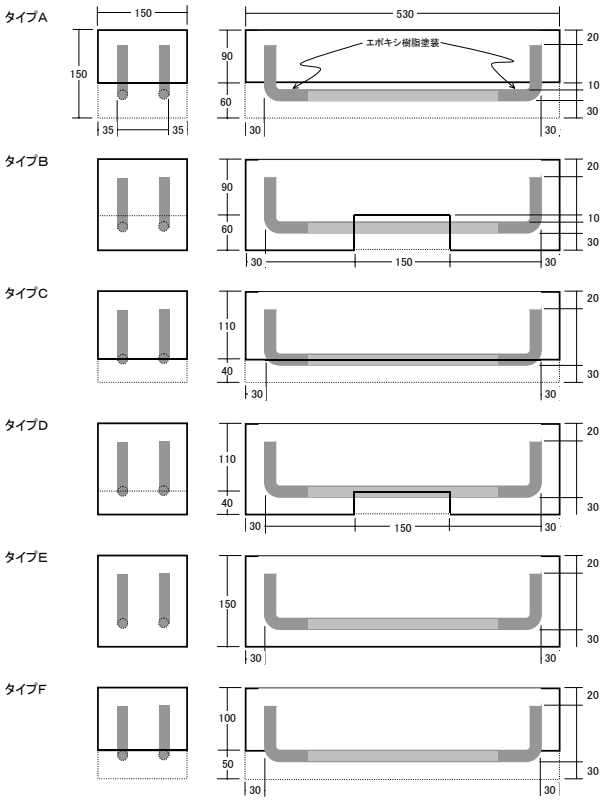
(3) 試験体形状

試験体の寸法は 150×150×530mm とし, 鉄筋のかぶりは 30mm とした。模擬はつり部の範囲，深さにより**図－２**に示す６タイプの試験体を作製した。

(4) コンクリート試験体の作製



図－１　鉄筋の形状（単位 mm）



図－２　試験体のタイプ（単位 mm）

模擬はつり部には, 発泡スチロールを設置し，鉄筋の設置は発泡スチロール, 木製スペーサー,

水糸を使用して所定の位置に収まるようにしてコンクリートを打設した。

(5) 補修方法ならびに補修材料

実験－１（共通試験体）の補修は，以下の手順で行った。模擬はつり部のコンクリート下地は，エアージェットタガネとワイヤーブラシ等を用い表面の汚れやレイタンスを取り除き，圧搾空気でかすや埃を除去した。その後，ポリマーセメントペースト(ベオバ系粉体ポリマー)をコンクリート部分にのみプライマーとして塗布し，断面修復材は同種のポリマーを主成分とするポリマーセメントモルタルを吹付け施工した。

所定の養生が終了した後，サンダーケレンを行い，エポキシ樹脂系プライマーを塗布して，エポキシ樹脂パテ材でパテ処理を行った。引き続き，柔軟型エポキシ樹脂中塗り材を２層塗布し（乾燥膜厚 320μm），柔軟型ウレタン樹脂上塗り材を最終的に１層（乾燥膜厚 30μm）塗装した。後述する上面被覆を行わない試験体については，試験体上面（コンクリート打設面）を塗り残し，5 面について被覆を施した。

2.3　試験体の組合わせ

試験体の種類と試験条件の組合わせを総括して**表－２**に示す。

実験－１では，内在する塩化物イオン量，はつり範囲，鉄筋に対するはつり深さ，上面被覆の有無の要因を組み合わせて作製している。このうち，はつりの範囲は，部分的に断面修復を行った場合を想定しており，マクロセル腐食の発生を模擬している。鉄筋に対するはつり深さの要因は，塩化物イオンの再拡散の影響ならびに鉄筋周囲の塩分の存在状態が再劣化に及ぼす影響を捉えることを目的としている。また，上面の被覆材の有無は，床版上面の防水の有無を想定している。従来補修では，床版下面の劣化部分に対して直接，施工されるのが一般的であり，既存床版防水の健全性を考慮に入れて設計が行われることは少ない。しかしながら，床版防水が適切に行われていない場合には，当然，塩分，酸素等の腐食物質が，床版上面から侵入するケースが考えられる。表中の試験体番号の意味は，実験シリーズ－配合 No.（混入塩分量の違い１：0kg/m^3，２：2.4kg/m^3，３：4.8kg/m^3）－試験体のタイプ－上面被覆の有無である。

表－２　試験条件の組合わせ

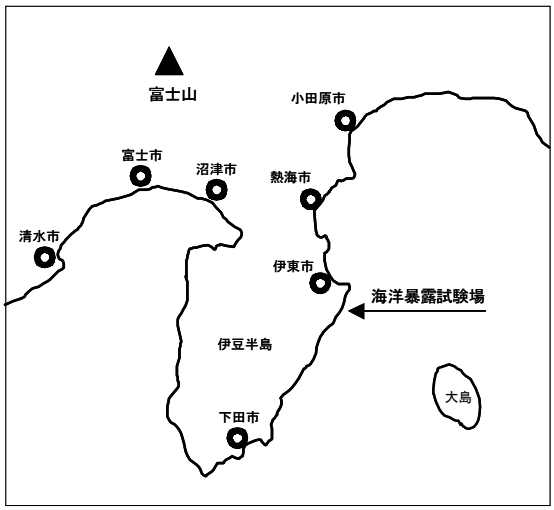
実験シリーズ	番号(*1)	Cl^-量 (kg/m^3)	はつり		表面被覆方法
			位置	深さ	
1	1-2-A-無	2.4	全面	鉄筋裏	上面無し
	1-2-B-無	2.4	部分	鉄筋裏	上面無し
	1-2-C-無	2.4	全面	鉄筋半分	上面無し
	1-2-D-無	2.4	部分	鉄筋半分	上面無し
	1-2-A-有	2.4	全面	鉄筋裏	全面塗布
	1-2-B-有	2.4	部分	鉄筋裏	全面塗布
	1-2-C-有	2.4	全面	鉄筋半分	全面塗布
	1-2-D-有	2.4	部分	鉄筋半分	全面塗布
	1-3-A-有	4.8	全面	鉄筋裏	全面塗布
	1-3-B-有	4.8	部分	鉄筋裏	全面塗布
	1-3-C-有	4.8	全面	鉄筋半分	全面塗布
	1-3-D-有	4.8	部分	鉄筋半分	全面塗布
	1-1-A-無	0	全面	鉄筋裏	上面無し
	1-1-B-無	0	部分	鉄筋裏	上面無し
	1-1-E-無	0	補修無し		上面無し
	1-1-E-有	0	補修無し		全面塗布
	1-2-F-有	2.4	全面	鉄筋表面	全面塗布

(*)試験体番号：　実験シリーズ－配合No.－試験体タイプ－上面の被覆の有無

2.4　暴露実験

海洋暴露実験は，**図－３**に示す静岡県伊豆半島東海岸（伊豆海洋公園内：静岡県伊東市富戸 841-1）に設置した暴露場において実施した。この海洋暴露場は波打ち際に設置されており，ここで暴露される試験体は，満潮時には波で洗われ，干潮時にも前面に岩礁があるために常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境である。

この環境条件を把握するために，暴露場より約 10m内陸寄りの岩場に設置した飛来塩分



図－３　海洋暴露実験場所

測定器(土研式)により，1993年9月～1996年8月まで測定した年間飛来塩分量は 400～800Clmg/dm^2 であった[1)]。暴露は，実際の床版を想定して，全試験体とも，かぶりが下になるように設置した。

表－３　暴露試験の評価項目

評価項目	評価内容	評価方法
試験体の劣化状況	外観観察（目視）	コンクリート：ひび割れ、浮きの状態
		断面修復材：ひび割れ、浮きの状態
		表面被覆材：膨れ、割れ、剥がれの状態
	塗膜の表面変化	色差・光沢の測定
鉄筋の腐食状況	電気化学的測定	腐食電位・分極抵抗の測定
	腐食量	鉄筋の質量減少量の測定
	腐食面積率	鉄筋の腐食面積率の測定
塩分の分布状況	塩分量	塩分分析
	塩分の移動	ＥＰＭＡによる広域マッピング分析
コンクリートの性能変化	圧縮強度	圧縮強度の経時変化の測定

実験は，1，3，5 年暴露後に，各種測定と試験体の解体調査を，0 年と 0.5，2，4 年暴露時は，各種測定のみ実施することとした。なお、内陸暴露についても、東大生研千葉実験所において同様に開始している。

2.5　評価項目および評価方法

暴露実験を行った試験体について実施する評価項目を**表－３**に総括して示す。

(1) 外観観察

コンクリート躯体ならびに断面修復材について，ひび割れと浮きの有無を目視により外観観察する。また，表面被覆材のふくれ，割れならびにはがれの有無を目視により外観観察する。

(2) 塗膜の表面変化

材令に伴う塗膜の褪色と光沢の変化を色差計ならびに光沢計を用いて調べる。

(3) 電気化学的測定

自然電位，分極抵抗ならびにコンクリート抵抗を調べる。

測定を行う試験体は，1-1-E-無，1-1-B-無，1-2-B-無ならびに 1-1-D-無の４種であり，5 年間の暴露期間を通じて同一の試験体で測定を行うために，5 年時解体予定試験体に，**図－２**に示したＬ型鉄筋を埋設しておき，端部から 2～3cm 程度出している鉄筋にリード線を接続して，解放上面（鉄筋までの距離 100mm）より測定する。

(4) 鉄筋の腐食面積率の測定

鉄筋腐食状況と腐食面積率測定を行うため，試験体から取り出した鉄筋に透明フィルムを巻き付けて，発錆部分を写し取り，画像解析装置を用いて，腐食面積率を測定する。

(5) 鉄筋の腐食量の測定

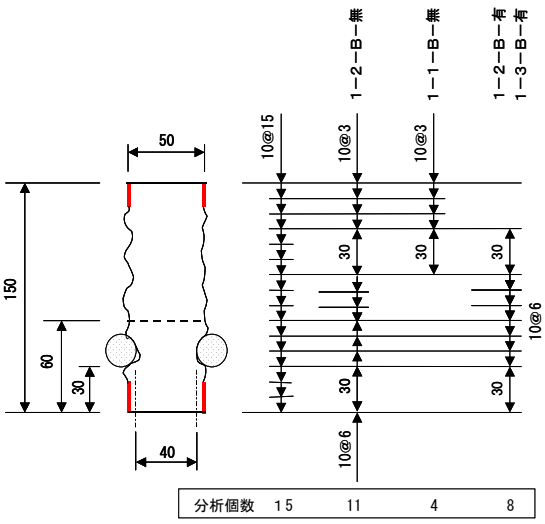
コンクリートに埋設する前の鉄筋の重量を予め測定しておき，解体調査の際に取り出した鉄筋の重量減少から，腐食量を求める。

錆の除去は，クエン酸二アンモニウム 10%水溶液に鉄筋を 24 時間浸漬し，ワイヤーブラシを用いて行う。また，黒皮分を補正するために，暴露に供しなかった鉄筋についても同様の作業を行う。

(6) 塩分分析

塩分分析は，JCI-SC4 で定める塩分分析法に従って，全塩分を測定する。

分析を行う試験体は，1-1-B-無，1-2-B-無，1-2-B-有ならびに 1-3-B-有であり，**図－４**に示す採取方法によって２鉄筋間の長さ 50mm の部分を採取し，かぶりから上面までのサンプルを切り出して分析する。他の試験体については，



図－４　塩分分析サンプルの採取方法（単位：mm）

鉄筋位置の塩化物イオン量を測定し，鉄筋腐食との相関のみを把握する。

(7) ＥＰＭＡ分析

図－４で示す２鉄筋間の中央部分からコンクリートサンプルを採取し，かぶりから上面までの塩分の分布状況をマッピングによって調べる。

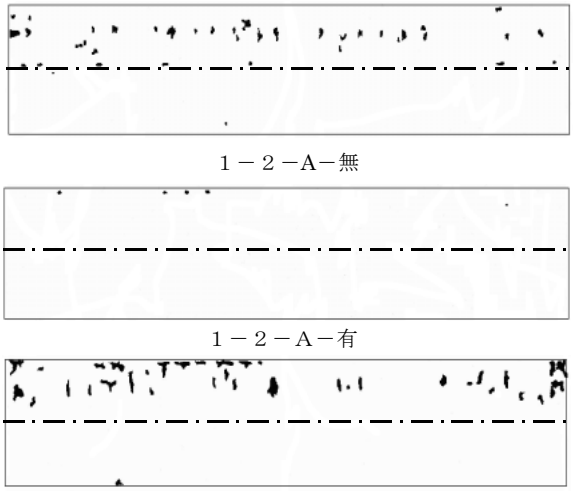
なお，ＥＰＭＡ分析は，塩分分析を行った４試験体について実施するものとする。

(8) コンクリートの圧縮強度

試験体作製に使用したコンクリートについてφ10×20cm の円柱試験体を，本実験の暴露環境に同時暴露し，経年の圧縮強度の変化を調べる。

3. 実験結果と考察（実験-1，海洋暴露１年）

図－５～７に全面補修を行った試験体の腐食状況を示す。図の下半分がかぶり側，上半分が反かぶり側として表示してある。これらの図から，いずれもが反かぶり側で腐食が卓越して発生してことがわかるが，これは，躯体コンクリートの内在塩分の影響が現れた結果と考えられる。しかしながら，Ａ試験体は，鉄筋裏 10mm まで完全にはつり取って施工を行う状況を想定しており，鉄筋は完全に断面修復材で覆われている。したがって，内在塩分が多い場合には，従来適切と考えられている補修を行っても，期待される補修効果が発揮できない場合があることを示している。また，上面被覆の有無の効果を見ると，コンクリートに塩化物イオンを 2.4kg/m^3 混入したＡ試験体（はつりが鉄筋裏 10mm，1-2-A-無と有）とＣ試験体（はつりが鉄筋のセンター，1-2-C-無と有）では，明らかに，上面を被覆することによって，腐食が抑制されていることがわかる。これは，上面被覆が酸素の供給を制御しているためと考えられるが，コンクリートに 4.8kg/m^3 以上の塩化物イオンが内在する場合（1-3-A，C-有）には，その効果よりも塩化物の影響が卓越して，腐食が発生している。注目に値するのはＦ試験体の結果であり，はつり深さを除く条件が同一のＡ試験体（1-2-A-有）ならびにＣ試験体（1-2-C-有）に比較して腐食の進行が顕著である。Ｆ試験体は，両試験体の中間の位置（鉄筋がちょうど露出する位置）にはつり界面があることから，施工時に断面修復材が鉄筋と躯体コンクリート間に回り込みにくく，充填不良が発生したため等が原因と考えられ，このような施工条件は避けるべきであることを示唆している。一方，**図－８**ならびに**図－９**は部分補修を行った場合の結果であり，Ｂ試験体が鉄筋裏 10mm，Ｄ試験体が鉄筋半分まではつった条件を想定している。両図より，既設コンクリートと断面修復材界面のコ

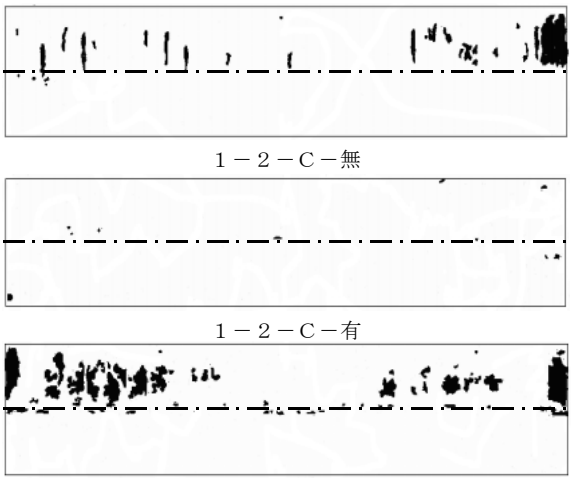


１－２－A－無

１－２－A－有

１－３－A－有

図－５　　Ａ試験体の鉄筋腐食状況

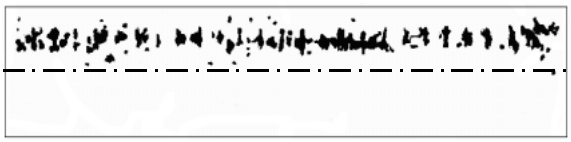


１－２－C－無

１－２－C－有

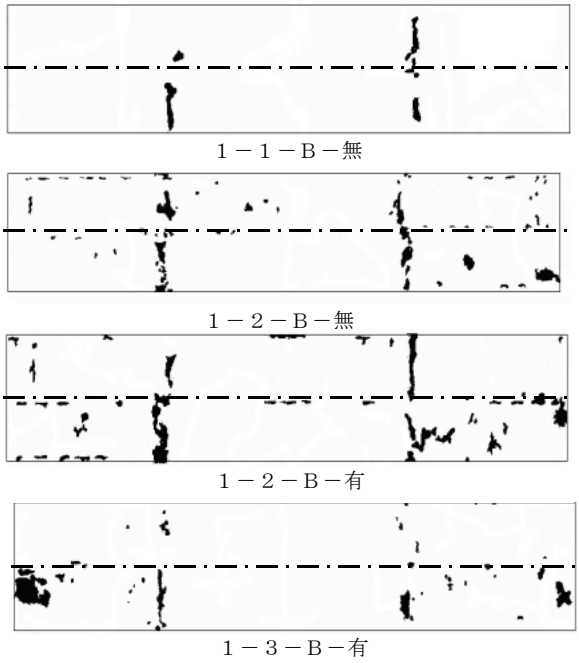
１－３－C－有

図－６　　Ｃ試験体の鉄筋腐食状況

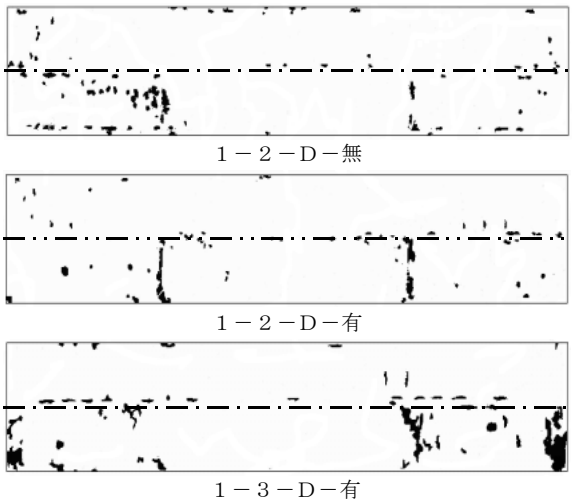


１－２－F－有

図－７　　Ｆ試験体の鉄筋腐食状況



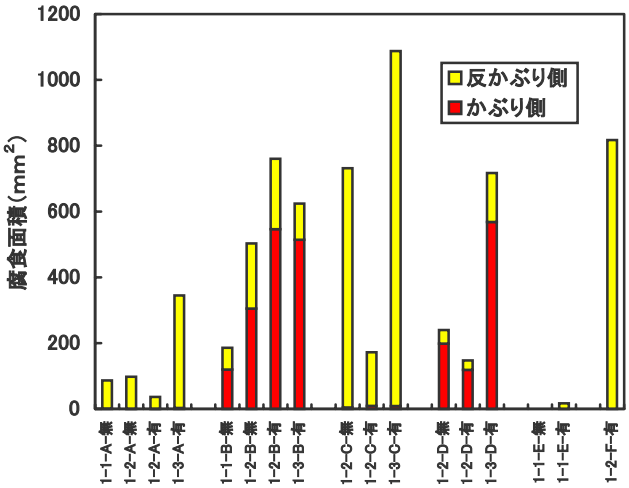
図－８　　Ｂ試験体の鉄筋腐食状況



図－９　　Ｄ試験体の鉄筋腐食状況

ンクリート側にマクロセルが原因と思われる腐食が発生していることがわかる。この現象は，塩分未混入のＢ試験体（1-1-B-無）においても観察され，旧来より言われているように部分補修がマクロセル腐食を発生される要因であることが確認された。また，Ｂ試験体とＤ試験体では，鉄筋の半分まではつるＤ試験体の方がマクロセル腐食が緩和されている結果となっているが，その原因については，今後，検討を行う。上面被覆の有無については，部分補修試験体では顕著な差は見られていない。

図－１０は，腐食面積を測定した結果をとりまとめたものである。先に考察した結果を確認



図－１０　　腐食面積測定結果

する内容となっているが，全面補修を施したＡ，Ｃ，Ｆ試験体では，反かぶり側のみが腐食しているのに対して，部分補修のＢ，Ｄ試験体ではいずれの側も腐食しており，前者とは反対にかぶり側の腐食が卓越していることが分かる。

4.　おわりに

本稿では，開始した実験の内容報告を主体に，1 年海洋暴露の結果のうちから，腐食状況測定結果について記述した。その他の評価項目についても結果が出ており，引き続き報告する予定である。なお，本研究は，東大生研魚本研究室と産学 20 団体との共同研究として開始されているものであり，実験を行うに当たっては，共著者以外の以下の共同研究メンバーにご協力いただいた。芝浦工業大学勝木氏，ブリヂストン㈱深津氏，電気化学工業㈱森本氏，西松建設㈱椎名氏，佐藤工業㈱弘中氏，東急建設㈱伊藤氏，太平洋マテリアル㈱斉藤氏，前田建設工業㈱渡部氏，㈱大林組竹田氏，大日本塗料㈱里氏，コニシ㈱北澤氏，住友大阪セメント㈱榊原氏，石川島播磨工業㈱戸田氏，飛島建設㈱平間氏，槙島氏，ニチエー吉田㈱河原崎氏，日本化成㈱伊藤氏，オリエンタル建設㈱小川氏（順不同）。

参考文献

1)　星野富夫，魚本健人，守屋正裕：海洋暴露環境の評価に関する検討，土木学会年次学術講演概要集，　V-336, pp.732-733,1997 年