

報告

[1080] 海洋環境下に2年間暴露したコンクリートの性状について

正会員 杉田英明(九州電力 総合研究所)
 正会員 御手洗泰文(九州電力 玄海発電所建設所)
 正会員 永松武教(西日本技術開発 調査部)
 正会員 ○藤本 浩(西日本技術開発 調査部)

1. まえがき

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物は、潮風等により海塩粒子が飛来・浸透し、経年とともにコンクリート内部に塩分が蓄積される。これらの塩分によって鉄筋の腐食が著しく促進され、かぶりコンクリートにひびわれが生じて表面が剝落するなどの被害が多く見受けられる。

本研究は、このような環境下における鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化抑制対策の確立を目的として、各種の暴露供試体を海洋環境下に設置し、外部からの浸透塩分量、自然電位による鉄筋腐食の推定、コンクリートの劣化過程、各種塗装材及び補修材の防食効果の追跡調査を行っているものである。暴露実験は、昭和61年9月より開始し、暴露を平成9年までの11年間を予定しているが、今回は暴露後2年目までに得られた結果について報告する。

2. 調査概要

2.1 調査の目的

本調査は、シリーズⅠとして「鉄筋コンクリートの劣化に関する調査」、シリーズⅡとして「鉄筋コンクリートの防食に関する調査」に大別され、各々の目的は次の通りである。

シリーズⅠ：鉄筋コンクリートの劣化に及ぼす水セメント比及び初期混入塩分量の影響を検証する。

シリーズⅡ：①多量の塩分を含むコンクリート中での防錆鉄筋及び防錆剤の鉄筋腐食抑制効果を検証する。

②P I C板型枠、各種塗装材及び補修材の耐久性や塩分浸透抑制効果などについて検証する。

2.2 暴露供試体の概要

(1) 形状及び配筋

暴露実験に供した供試体の形状及び配筋を図-1に示す。

暴露供試体は、幅(天端)30cm、長さ110cm、高さ100cmのミニフーチングとし、縦筋(φ16mmの丸鋼)のかぶり厚さを10、20、30、40mmの4通りに変化させた。なお、供試体の両壁面

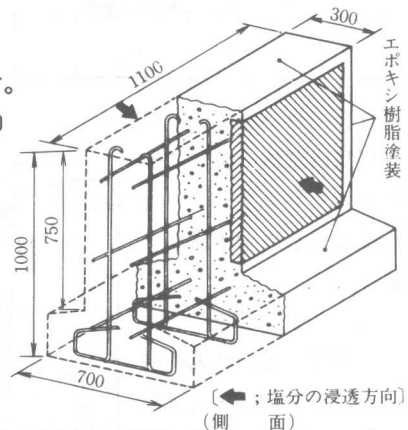
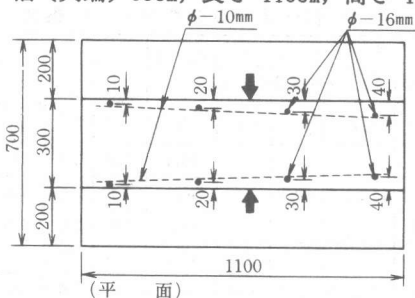


図-1 暴露供試体の形状及び配筋

以外はすべてエポキシ樹脂を塗布して外部からの塩分の浸透を防いだ。

(2) 種類

シリーズ I, II の実験に供した暴露供試体の種類を表-1 に、また供試体 (壁面) の表面処理を図-2 に示す。

①シリーズ I

- a. 水セメント比を55, 60, 65%に変化させた打放しコンクリート 3種
- b. 塩分 (NaCl) を 320, 500, 800g/m³混入した打放しコンクリート (W/C =60%) 3種

②シリーズ II

- a. 塩分 (NaCl) を 800g/m³混入したコンクリート (W/C =60%) に防錆鉄筋及び防錆剤を使用した打放しコンクリート 2種

- b. 型枠に P I C 板 (厚さ約10mm) を使用し、コンクリート (W/C =60%) を打設・一体化した 1種

- c. 水セメント比60%の暴露供試体壁面を塗装材 (9銘柄) により表面仕上げを施した 9種

- d. 暴露供試体 (W/C =60%) 壁面のコンクリートを縦筋のかぶり厚さまではつとり、補修材 (7銘柄) で埋戻した 7種

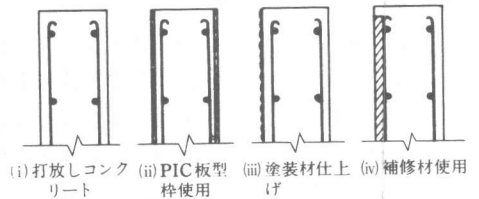


図-2 暴露供試体の表面処理

表-1 暴露供試体の種類

調査項目	調査番号	水セメント比 (%)	混入塩分 (NaCl) 量 (g/m ³)	防食材の種類	供試体番号								
					暴露環境								
					内陸	海上大気中	飛沫帯						
鉄筋コンクリートの劣化に関する調査 (シリーズ I)	鉄筋コンクリートの劣化に及ぼす水セメント比の影響	5500	55	-	-	1	2						
		6000	60		3	4	5						
		6500	65		-	16	17						
	鉄筋コンクリートの劣化に及ぼす混入塩分量の影響	6032	60	320	-	18	19						
		6050		500	-	20	21						
		6080		800	-	22	23						
鉄筋コンクリートの防食に関する調査 (シリーズ II)	鉄筋の防食効果	6080M	60	800	-	24	25						
		6080R		防錆鉄筋		26	27						
	塗装材料の防食効果	6000	60	0	PIC板型枠	-	14	15					
					(エポキシ)+(ウレタン樹脂系)		6	B面					
					単層アクリル樹脂系		7	B面					
					シラン系含浸撥水材塗料		8	B面					
					ウレタン樹脂系		9	B面					
					フッ素樹脂系		10	B面					
					合成樹脂エマルジョン系リシン		11	B面					
					合成樹脂エマルジョン系		12	B面					
					アクリルゴム系複層弾性塗料		13	A面					
					エポキシ樹脂系		13	B面					
					補修材料の防食効果		6000	60	0	ポリマーセメント系 (A)	-	6	A面
										ポリマーセメント系 (B)		7	A面
										早強性ポリマーセメント系		8	A面
SBR系	9	A面											
ポリマーセメント系 (C)	10	A面											
ポリマーセメント系 (D)	11	A面											
モルタル	12	A面											

(3) コンクリートの調査

暴露供試体の製作に使用したコンクリートの調査は表-2 に示す通りである。

2.3 暴露環境

暴露場所は、鹿児島県川内市の沿岸 (海上大気中) と福岡県京都郡の苅田発電所放水路内 (飛沫

表-2 コンクリートの調査

調査番号	粗骨材の最大寸法 (mm)	調査条件				細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					投入塩分 (NaCl) 量 (g/m ³)
		水セメント比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	塩分量 (NaCl) (g/m ³)		水	セメント	細骨材	粗骨材	A E 剤	
5500	20	55	15±2.5	4±1	0	45.1	178	324	810	1026	3.24	-
6000		60				46.1	178	297	838	1020	2.97	
6500		65				47.3	178	274	869	1007	2.74	
6032	20	60	15±2.5	4±1	320	45.1	178	324	810	1026	3.24	200
6050					500	46.1	178	297	838	1020	2.97	420
6080					800	47.3	178	274	869	1007	2.74	780

セメント：普通ポルトランドセメント、細骨材：海砂、粗骨材：結晶片岩砕石

帯)とした。前者は常時潮風を受け、波しぶきをまれに受ける環境にあり、後者は潮の干満作用による乾湿の繰り返しを受け鉄筋の腐食上きわめて厳しい環境にある。暴露供試体は、コンクリートを打設して7日目に型枠を脱型し、それ以降屋外で気中養生を行い、材令が30～50日に達した時点から現地暴露を開始した。ただし、塗装及び補修供試体については、海上大気中のみとし、また水セメント比60%の暴露供試体については海塩粒子の影響を受けない環境(内陸)にも暴露した。海上大気中及び飛沫帯における暴露状況を図-3及び写真-1, 2に示す。

2.4 調査項目及び調査方法

調査項目及び調査方法を表-3に示す。

本調査では、暴露後1, 2, 3年目に現地で暴露供試体の外観観察、非破壊試験及びコンクリート中の鉄筋の自然電位測定を行い、コンクリートならびに塗膜の劣化状況及び鉄筋の腐食状況を調査した。さらに、塗装及び補修供試体については、塗膜及び補修材の付着強さの測定(暴露後1, 2年目)を行った。また、暴露後1, 2年目においては、暴露供試体よりコアを採取し、コンクリートの力学的性質、中性化深さ、コンクリート表面からの塩分の浸透量をそれぞれ調査した。なお、塩分の分析は、採取したコアをコンクリート表面から20mm間隔(表面からの深さ0～20, 20～40, 40～60, 60～80, 130～150mm)に切断し、それぞれについて試験調整を行った後可溶性塩分量(CI⁻換算)を測定した。なお、採取コアは力学的性質試験用(φ100mm)を3本、中性化深さ及び塩分量(φ68mm)を各1本とした。

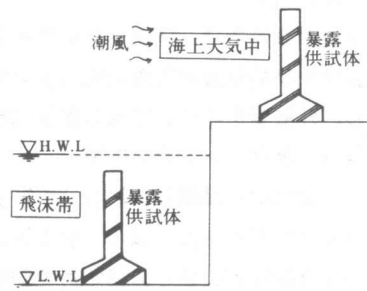


図-3 暴露状況



写真-1 海上大気中における暴露状況

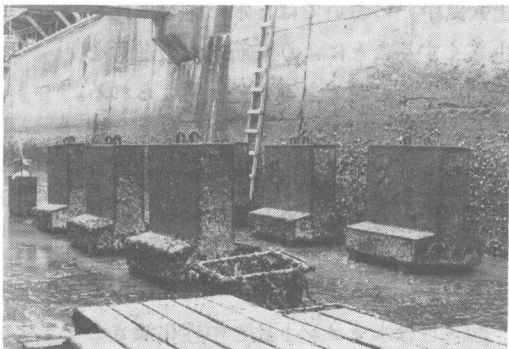


写真-2 飛沫帯における暴露状況(干潮時)

表-3 調査項目及び調査方法

調査項目		調査方法	試験材令
現地調査	外観調査	目視及びハンマ打診によるコンクリートの劣化(ひびわれ、浮き、剥落、鏽汁)状況の観察及び塗膜の劣化(われ、ふくれ、はがれ、変色、白亜化)状況の観察	1, 2, 3年
	非破壊試験	シュミットハンマによる反発硬度の測定及び超音波パルスの伝播速度の測定	
	鉄筋腐食度の調査	コンクリート中の鉄筋の自然電位測定 (ASTM C 876)(塗装供試体は除く)	
	付着強さ	JIS A 6909 塗膜の付着力及びコンクリートと補修材界面の付着力を測定	1, 2年
室内試験	力学的性質		1, 2年
	圧縮強度	JIS A 1107, JIS A 1108 暴露供試体よりコアを採取して実施(塗装及び補修供試体は除く)	
	動弾性係数	JIS A 1127 圧縮強度試験用のコア供試体について実施(塗装及び補修供試体は除く)	
	超音波伝播速度	圧縮強度試験用のコア供試体について、超音波伝播速度を測定(塗装及び補修供試体は除く)	
	中性化深さ	コア供試体を割裂し、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧	
塩分量	JCI 塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法によりコンクリート中の可溶性塩分量を測定		

3. 調査結果

今回の報告では、鉄筋コンクリートの劣化に及ぼす水セメント比の影響とP I C板型枠、各種塗装材及び補修材の防食効果について、主に外観調査、中性化深さ、浸透塩分量の結果を述べる。なお、外観調査については暴露後3年目までの結果を示す。

3.1 水セメント比の影響

海上大気中に暴露した場合は、いずれも暴露後1年目でかぶり厚さ10mmの位置に縦筋に沿ったひびわれが発生した。なお、水セメント比65%の場合については、ひびわれ以外に暴露後2年目で浮きと錆汁が、さらに3年目で剝落がみられた。これに対して、飛沫帯の場合は、暴露後1年目でかぶり厚さ10mmの位置にひびわれと錆汁の溶出跡が認められ、しかもひびわれの程度が小さいわりに錆汁の溶出が著しい。

図-4はかぶり厚さ10mmの位置におけるひびわれの程度及びその進行状況を示したものである。

なお、図中のひびわれ長さ比は、供試体の壁高(75cm)に対するひびわれ長さを示したものである。ひびわれの程度及びその進行は、海上大気中では水セメント比65%が55、60%に比べて大きい傾向にあるが、飛沫帯においては特に水セメント比の影響は認められない。したがって、潮風や波しぶきをまれに受ける環境(海上大気中)においては、水セメント比を小さくすることにより鉄筋腐食の進行を抑制することができるものと考えられる。また、海洋環境下においては、かぶり厚さが小さいと短期間で鉄筋の腐食が進み、構造物の耐久性に多大な影響を及ぼすため、十分なかぶり厚さの確保が必要であると判断される。

図-5は水セメント比と中性化深さの関係を示したものであるが、暴露後2年目においては水セメント比の違いによる顕著な差は認められない。むしろ暴露環境の違いによる影響が認められ、常時湿潤状態に近い状況にある飛沫帯に比べて空気中の炭酸ガスの影響を受ける海上大気中の方が中性化の進行が大きくなっている。

図-6は水セメント比と浸透塩分量の関係を検討したものである。なお、図中の浸透塩分量とは、供試体中心部(塩分の浸透が認められない部分)との塩分量の差を示す。外部からの塩分の浸透は、表面部では水セメント

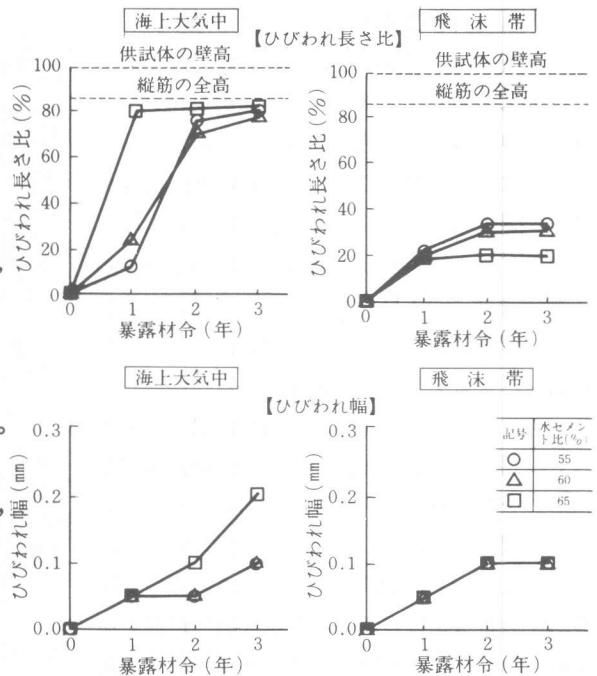


図-4 ひびわれの程度及びその進行状況 (かぶり厚さ10mmの位置)

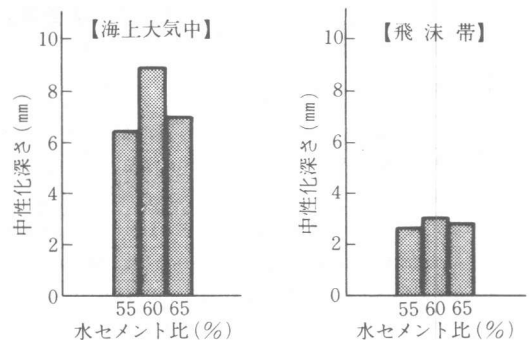


図-5 水セメント比と中性化深さの関係

比による差異は特に認められないが、コンクリート内部においては、水セメント比が大きくなるにしたがって増加する傾向が認められる。したがって、水セメント比を小さくし、コンクリートを緻密にすることにより、塩分の浸透をある程度抑制できるものと考えられる。

暴露環境とコンクリート（水セメント比60%）中の塩分量の関係を図-7に示す。内陸に暴露した場合は外部からの塩分の浸入は認められないが、海上大気中及び飛沫帯においては塩分の浸透深さがそれぞれ40mmと80mm程度まで認められる。また、表面部分（深さ0~20mm）の塩分量は、内陸に暴露した場合に比べて海上大気中の場合約9倍、飛沫帯の場合約27倍となっており、飛沫帯が極端に大きくなっている。

3.2 PIC板型枠の防食効果

PIC板型枠を使用した暴露供試体は、海上大気中及び飛沫帯の場合とも外観的異常や中性化は認められない。

図-8はPIC板型枠を使用した供試体とその基準となる打放しコンクリート（W/C = 60%）の塩分量を示したものであ

る。PIC板型枠を使用した場合の塩分浸透深さは、海上大気中で20mm、飛沫帯で40mm程度まで認められるが、これは打放しコンクリートの浸透深さに比べて1/2程度である。また、塩分量は打放しコンクリートに比べて海上大気中の場合約1/3（深さ0~20mm）、飛沫帯の場合深さ0~20mmで約1/2、深さ20~40mmで約1/7となっている。したがって、PIC板型枠は防食効果に優れているとともに、中性化の抑制や塩分の浸透抑制にも効果的であると考えられる。

3.3 塗装材の防食効果

各種塗装材で表面仕上げを施した供試体については、外観的異常や中性化は認められない。ただし、塗膜（含浸撥水材塗料とエマルジョン系の塗装材2種は対象としない）の変色がいずれの塗装材についても認められ、特にエポキシ+ウレタン樹脂系とエポキシ樹脂系の塗装材について

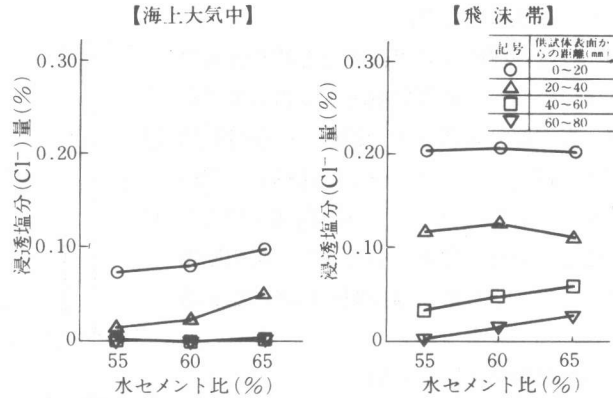


図-6 水セメント比と浸透塩分量の関係

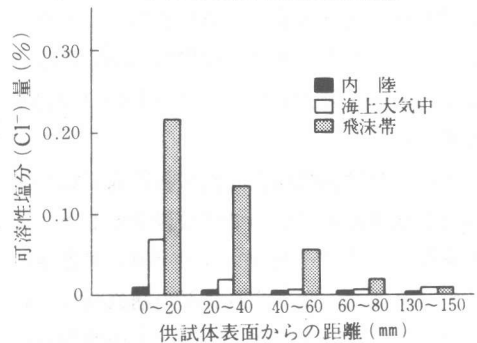


図-7 暴露環境とコンクリート中の塩分量の関係

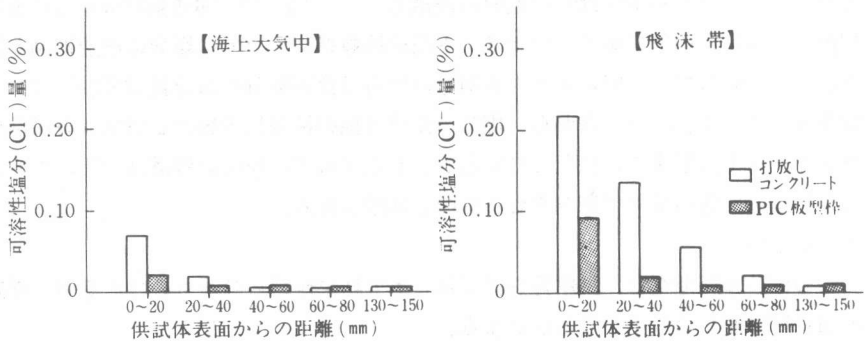


図-8 供試体表面からの塩分量分布

は白亜化も認められた。

図-9は各種塗装材で表面仕上げを行った供試体の表面からの塩分量を示したものであるが、表面部分(深さ0~20mm)の塩分量はいずれも打放しコンクリートに比べて1/2以下となっており、コンクリート内部への塩分の浸透も認められない。中でもフッ素樹脂系については、塩分の浸透抑制が顕著に認められる。

3.4 補修材の防食効果

各種塗装材を使用した供試体については、いずれも外観の異常は認められない。また、中性化は一般のモルタル補修についてのみ認められたが、打放しコンクリートの1/3程度である。

図-10は供試体表面層に各種補修材を施した供試体の表面からの塩分量を示したものである。ポリマーセメント系4種、早強性ポリマーセメント系、SBR系の補修材については、表面部分(深さ0~20mm)の塩分量は打放しコンクリートに比べて1/2以下となっており、コンクリート内部への塩分の浸透も認められない。中でもポリマーセメント系の補修材については塩分の浸透抑制が顕著に認められる。これに対して、一般のモルタル補修の場合は表面部分の塩分量が打放しコンクリートと同程度となっている。しかしながら、塩分の浸透は他の補修材の場合と同様に表面部分のみであり、コンクリート内部までには至っていない。したがって、塩分の浸透は一般のモルタル補修を行うことによってもある程度抑制されるものと判断される。

4. まとめ

この種の暴露調査は、長年月を経てはじめて結果が得られるものであるが、暴露後2年目までの調査結果からは以下のことがいえる。

① 海洋環境下においては、外部からの塩分浸透が多いため、かぶり厚さが小さいと短期間で鉄筋の腐食が進行し、構造物の耐久性に多大な影響を及ぼす。したがって、十分なかぶり厚さの確保が必要である。

② 塩分の浸透量は、水セメント比が大きくなると多くなる傾向にある。したがって、水セメント比を小さくし、コンクリートを緻密にすることにより鉄筋腐食の進行をある程度抑制できると考えられる。

③ PIC板型枠及び今回使用した各種塗装材ならびに補修材料は、防食効果に優れているとともに中性化抑制、塩分の浸透抑制に効果的である。ただし、一般のモルタル補修については中性化及び塩分浸透の抑制が他の補修材に比べて劣っている。

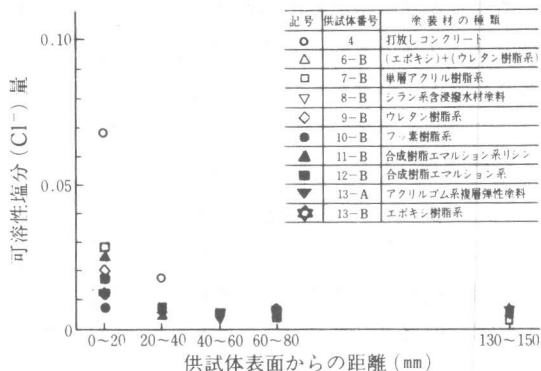


図-9 塗装供試体における塩分量分布

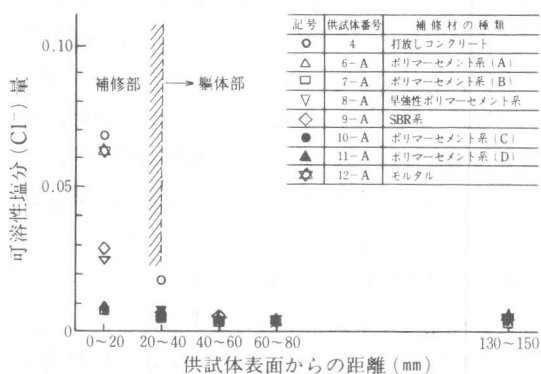


図-10 補修供試体における塩分量分布