

論文

[1104] 各種防食方法を適用した鉄筋コンクリートの5年間の海洋
暴露実験

正会員○星野富夫 (東京大学生産技術研究所)

正会員 小林一輔 (東京大学生産技術研究所)

1. はじめに

本報告は、海洋飛沫帯のような厳しい腐食環境下に建設されるコンクリート構造物の防食方法を検討するため、塩化物イオンや酸素の浸透を制御するような各種の積極的な防食処理を施した鉄筋コンクリート梁の暴露実験を5年間にわたって行い、その防食効果を検討したものである。また、耐海水性が優れていると言われている高炉水砕スラグ微粉末を混入したセメントを使用したコンクリートと従来海洋環境下における適用が殆ど取り上げられなかった鋼繊維補強コンクリートを用いた場合についてもとりあげ、暴露実験を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。その化学成分を表-1に示す。また、使用した高炉水砕スラグ微粉末の性質を表-2に示す。細骨材には大井川産の川砂、粗骨材には最大寸法15mmの秩父産砕石(砂岩)を用いた。コンクリートの配合は、表-3に示すような水セメント比が40%、50%および60%の3種とし、これらの配合のコンクリートを用いて無防食の供試体を作製した。各種の防食を施したコンクリートの配合は、表-3の水セメント比60%のものと同じの配合とした。ただし、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)については水セメント比を50%とした。

表-1 普通ポルトランドセメントの化学成分(%)

igloss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
0.5	0.2	21.8	5.2	3.1	64.9	1.3	2.1	99.1

表-2 高炉水砕スラグ粉末の品質

比重	粉末度 (cm ² /g)	ガラス量 (%)	塩基度	化 学 成 分 (%)									
				ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Total S	Mn ₂ O ₃	Total
2.89	4320	99	1.80	2.6	—	32.9	12.3	0.9	41.0	6.0	1.0	0.5	97.2

2. 2 各種防食方法の適用

本実験で取り上げた防食方法は、日本コンクリート工学協会の「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」に規定されている第2種防食法の範囲内に入るもの3種、即ちコンク

表-3 コンクリートの配合

水・セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				スランブ (cm)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
40	43	196	490	736	1,002	8
50	45	196	392	807	1,013	8
60	47	196	327	869	1,006	7

リート表層部に腐食因子の遮へい層を設けて鉄筋の防食を図るものと、コンクリート自体に防食性を付与することによって鉄筋の防食を図る方法2種類の合計5種である。

A) コンクリート自体に防食性を付与することによって鉄筋の防食を図る方法

①高炉水砕スラグ微粉末混入コンクリートの使用

高炉水砕スラグ微粉末の置換率は重量で50%および70%とした。

②鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の適用

鋼繊維は0.5×0.5×30 mmのせん断品とφ0.5 × 30 mmの異形カットワイヤーを使用, それぞれコンクリート容積の1.5 %混入した。

B) コンクリート表層部に腐食因子の遮へい層を設けて鉄筋の防食を図る方法

①繊維強化型枠の使用

早強セメントを用いた水セメント比30%のモルタルと, 長さ37mmに切断した耐アルカリ性ガラス繊維を同時に吹きつけて成形したガラス繊維補強セメント板 (GRC) を永久型枠とするもので, ガラス繊維を容積で3 %および5 %混入し, 計画板厚さを5 mmならびに10mmとする合計4種類のものを使用した。

②合成高分子材料のコーティング

A種: エポキシ樹脂系として変性脂肪族アミンを硬化剤とした無溶剤型の可撓性エポキシ樹脂をコーティングしたもの,

B種: 合成ゴム系としてポリブタジエンをイソシアネートプレポリマーで架橋硬化させた弾性ポリブタジエン防水材をコーティングしたもの

A種, B種とも下地処理としてエポキシ樹脂系プライマーを使用し, 更に耐候性の改善をはかる為に上塗材としてアクリルウレタン樹脂系の塗料を塗布した。これらの全体のコーティング厚さは何れも約0.6~1.0 mmである。

③ポリマーセメントモルタルのライニング

A種: ポリマーディスページョンはアクリル樹脂エマルジョンとエポキシ樹脂エマルジョンを主成分(固形分48%)とするものでポリマーセメント比は25%, 水セメント比は32%である。これに珪砂および珪石粉を用いてモルタルとし, 更に強化材としてガラス繊維を混入したポリマーセメントモルタルを3層に分けてライニングしたもので, このライニング厚さは約10mmである。

B種: ポリマーディスページョンは固形分50%のアクリル樹脂エマルジョンを主体としたものであって, ポリマーセメント比は50%とA種より大きくしたもので水セメント比は30%である。これに骨材として珪石粉を混入した。このポリマーセメントモルタルをA種の3層目のライニング部分に2層に分けてライニングしたものである。

2. 3 供試体の作製

供試体の製作は図-1に示すように□10×10×120cmの矩形梁の内部に長さ110cm, φ10mmの異形鉄筋(高炉品)を2本埋め込んだものであり, 計画かぶり厚さを2cmと3cmの2種類とした。コーティングとライニングおよびGRC型枠を適用した供試体は, 腐食電位を測定する為にコンクリートの打設面は開放状態とし, この面を除いた5面に防食を施した。これらの

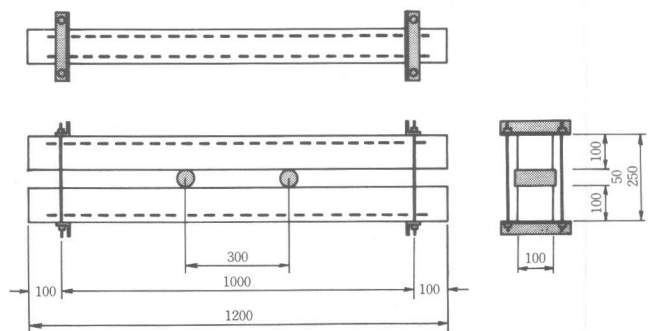


図-1 暴露供試体 (単位: mm)

供試体は図-1に示すように鉄筋コンクリート梁2本を1組として締め付けることによりコンクリート表面で0.2～0.3mmのひびわれを導入し、この状態を保持したまま海洋暴露実験に供した。

2. 4 暴露試験場

暴露実験は、静岡県伊豆半島東海岸（伊東市城ヶ崎）の岩場に設置した海洋暴露実験場において実施したものであり、コンクリート梁は最高潮位から約50cm程度の架台に打ち寄せる波の進行方向に平行になるように設置した。この場所は満潮時には常時波に洗われ、干潮時にも前面に岩礁があるため海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下であって、日本コンクリート工学協会の「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）」におけるコンクリート供試体の暴露試験場の環境区分Aに該当する場所である。

2. 5 実験方法

暴露実験は1983年6月（一部のものは10月）より開始したものである。暴露1年、3年、5年の時点では供試体を引き揚げてコンクリート中への塩分の浸透状態やコーティング材等の劣化状態を詳細に調べるとともにコンクリート梁を解体して鉄筋の腐食状態を調べた。

各種の防食処理を施したコンクリートに海水中の塩分がどのように浸透しているかを調べるために行った塩分含有率の測定は、日本コンクリート工学協会の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（案）」に従って全塩分を電位差滴定法によりNaCl換算で求めた。

鉄筋の腐食面積率の測定は、鉄筋の腐食している部分をセロハン紙に写しとったものを用いて画像解析装置により腐食面積を測定し、この値を鉄筋の全表面積（公称値）で除して求めた。

3. 実験結果と考察

図-2は暴露期間5年の供試体より取り出した鉄筋の腐食面積率を防食方法別に示したものであって、図の表示は同種の2本のコンクリート梁から取り出した4本の鉄筋の腐食面積率の最大値と最小値および平均値を表す。普通ポルトランドセメントを用いた無防食の供試体（以下無防食供試体と称する）でかぶり3cmのものを見ると、水セメント比が小さくなるほど腐食面積率が減少している傾向が見受けられるが水セメント比が40%のものでも相当に大きい腐食面積率を示している。

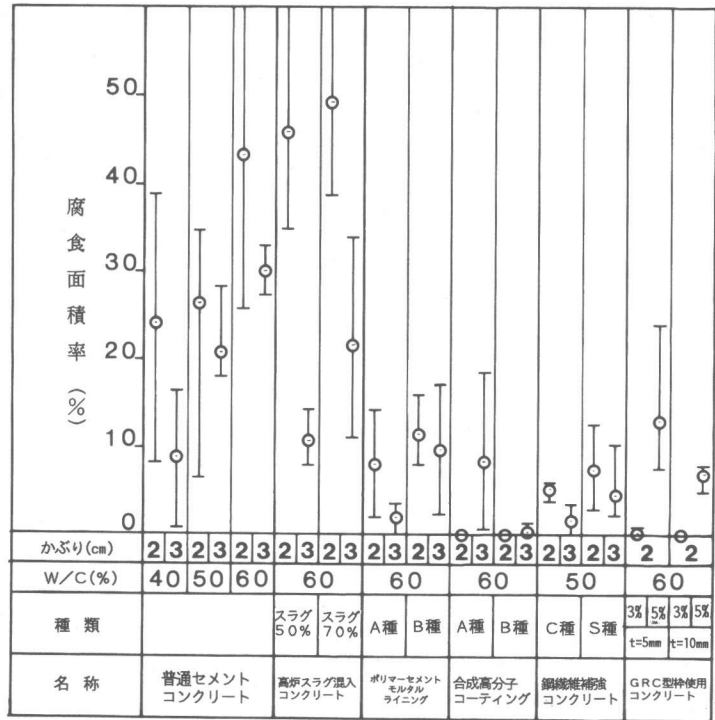


図-2 暴露5年のコンクリート中の鉄筋腐食面積率

また、高炉スラグ微粉末混入コンクリート（以下高炉スラグコンクリートと称する。）の場合には、かぶり厚が2 cmのものではかなり大きな腐食面積率を示し、何れのスラグ置換率の供試体も無防食供試体と同等かそれ以上の値を示したが、かぶり厚が3 cmになるとスラグ置換率によって差があるものの無防食供試体の 1/2程度の腐食面積率となった。かぶり厚が10mm程度異なっただけで、このように鉄筋の腐食面積率に差が生じた理由については次のように考えられる。写真-1～3に示したEPMAによる面分析の結果からも明らかなように、高炉水砕スラグ微粉末を混入したコンクリートは塩化物の浸入を表層部において阻止しており、この効果はスラグ量を増すほど著しい。このことは鉄筋が表面に近い個所に配筋されている場合には腐食を生じやすく、それより内部に配筋されている場合には腐食しにくいことを意味する。それにもかかわらず、表層部で塩化物を阻止しているスラグ量が70%の場合でかぶり厚が3 cmの場合の腐食面積率がスラグ量が50%の場合よりも大きくなっているのは、高炉スラグコンクリートの場合、ひびわれを通じて内部に塩化物が浸入すると鉄筋の腐食が促進されやすく、この場合はスラグ量に依存するためと考えられる。かぶ

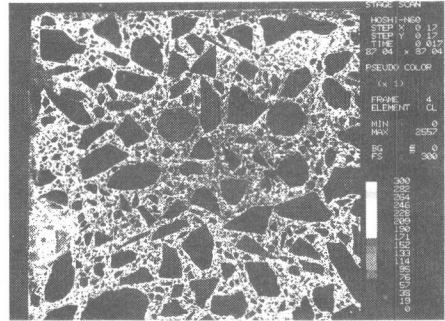


写真-1 EPMAによる面分析
(普通セメントコンクリート：W/C=60%)

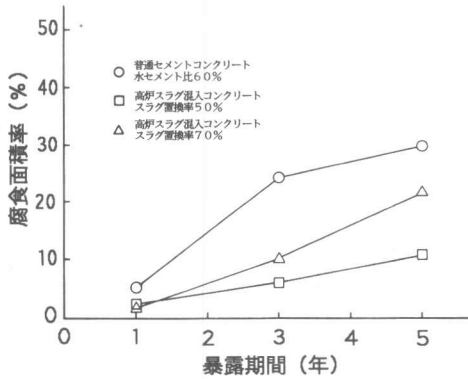


図-3 腐食面積率と暴露期間の関係 (かぶり 3 cm)

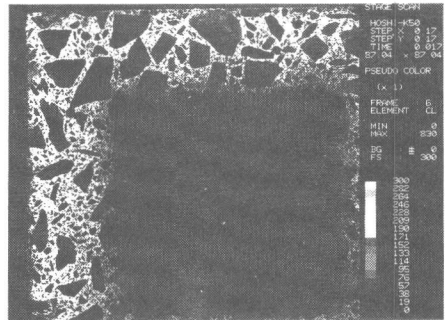


写真-2 EPMAによる面分析
(高炉スラグコンクリート：置換率=50%)

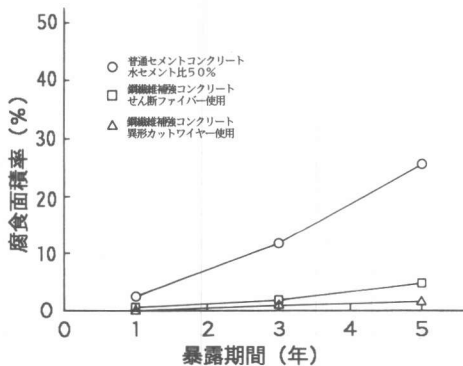


図-4 腐食面積率と暴露期間の関係 (かぶり 3 cm)

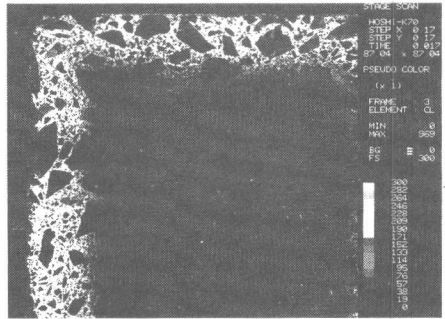


写真-3 EPMAによる面分析
(高炉スラグコンクリート：置換率=70%)

りが3 cmの場合について暴露期間と腐食面積率との関係を示した図-3では、スラグ量70%の場合、暴露期間が3年以降は急速に腐食面積率が増大し、無防食供試体の値に近づいているが、この理由も同様にして説明することができる。

図-2~4に示した鉄筋腐食の結果と図-5および6に示すようなコンクリート中の塩分含有率あるいは図-7に一例を示したひびわれの経時変化などからこれらの防食方法の防食効果を総合的にみると、最も優れた防食効果を示したものはポリブタジエンゴムによるコーチングを行ったものである。この種の材料の劣化状態を調べるために行った付着接着強度をみると、エポキシ樹脂系とポリブタジエンゴム系とも20 kgf/cm²以上の値を示した。また、表面劣化についての目視観察では、エポキシ樹脂系のもでは“ふくれ”と“はがれ”が認められ、ポリブタジエンゴム系のもでは“われ”が認められたが、これらの劣化は主に上塗り材で生じておりこの部分からのコンクリート中への塩化物の浸透は認められなかった。一方、エポキシ樹脂コーチングの場合には条件によりかなりの鉄筋腐食が生じたものがあった。これは曲げ載荷の際にコンクリートに発生させたひびわれに沿ってコーチング材にもひびわれが生じたためであって、鉄筋腐食はこのひびわれ発生位置を中心に生じていた。

これと同様な状況はポリマーセメントモルタルのライニングの場合にも認められる(図-7(b))。これらの防食効果はコンクリート中の塩分含有率からも明らかであって、図-5に示したコンクリート中の塩分含有率をみると表面からの塩化物の浸透は防食コーチングおよび防食ライニングのいずれの場合にもほぼ完全に阻止されており、もしひびわれが無い場合にはこれらの防食方法は海洋飛沫帯のような厳しい腐食環境下においても極めて優れた防食効果を有することを示している。一方、ここで注目されるのはSFRCを用いた供試体の防食効果であって、図-6より明らかなようにSFRCの使用は、同一水セメント比の無防食供試体のものに比べて塩化物の浸透をある程度抑制しているが、かぶりが2~3 cmの部分における塩化物の含有

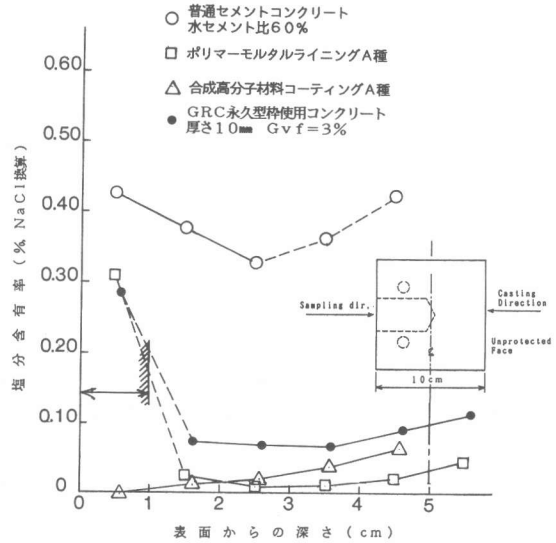


図-5 暴露期間5年のコンクリート中の塩分含有率

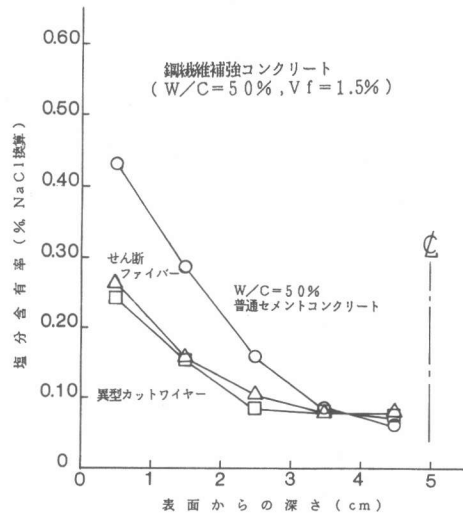


図-6 暴露期間5年のコンクリート中の塩分含有率

率をみると表面からの塩化物の浸透は防食コーチングおよび防食ライニングのいずれの場合にもほぼ完全に阻止されており、もしひびわれが無い場合にはこれらの防食方法は海洋飛沫帯のような厳しい腐食環境下においても極めて優れた防食効果を有することを示している。一方、ここで注目されるのはSFRCを用いた供試体の防食効果であって、図-6より明らかなようにSFRCの使用は、同一水セメント比の無防食供試体のものに比べて塩化物の浸透をある程度抑制しているが、かぶりが2~3 cmの部分における塩化物の含有

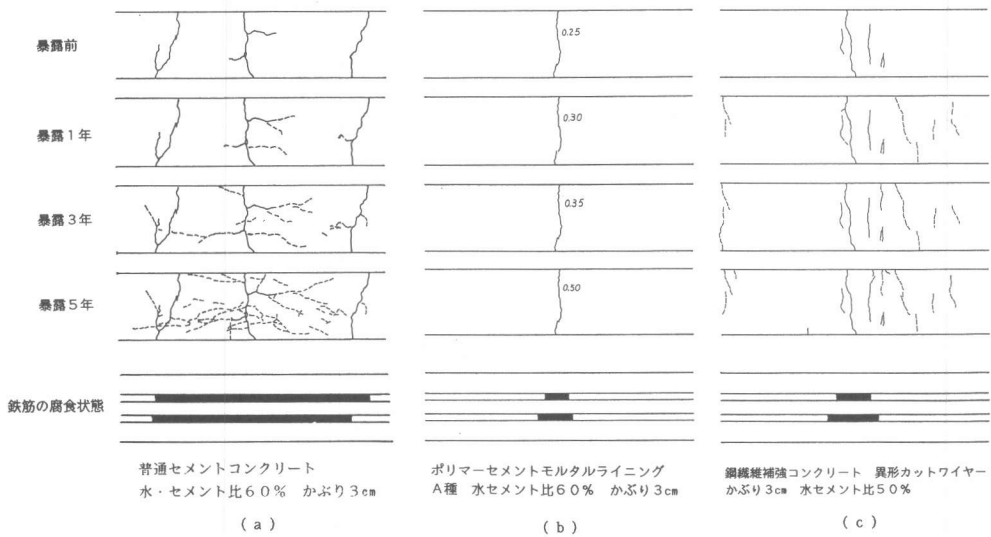


図-7 ひびわれの経時変化と鉄筋腐食

量は鉄筋の腐食に十分な量である。それにも関わらず図-2および図-4の結果はSFRCの使用が内部の鉄筋を極めて効果的に防食していることを示している。このコンクリートの外観を見ると、表面の鋼繊維は腐食しているものの鉄筋を取り出す為に破壊したコンクリート断面の鋼繊維の腐食は表面から1mm以内に止まっていた。鉄筋の腐食がコンクリートの劣化にどのような影響を与えるかを調べるためにひびわれの経時変化と暴露5年時点における鉄筋腐食について検討したものが図-7であって、かぶりが3cm場合の一例を示したものである。(a)は無防食の水セメント比が60%のものであり暴露1年の時点で既に鉄筋に沿ったひびわれが発生し暴露5年の時点では小さなコンクリート片の剝落が認められた。(b)はポリマーセメントモルタルのA種のものであって暴露期間とともにひびわれ幅は拡大しているものの暴露期間中に新たなひびわれの発生や表面劣化が全く認められなかった。(c)は鋼繊維補強コンクリートのひびわれの経時変化を示したものであって、暴露1年の時点で発生しているひびわれは鉄筋の腐食に関与しないような微細なものであった。

4. まとめ

各種の防食処理を施した鉄筋コンクリート梁の海洋飛沫帯における防食効果を5年間の暴露実験によって検討した結果、以下のことが明らかになった。

- ①コンクリートの表層部にポリマーセメントモルタルのライニング、合成高分子材料のコーティングなどの防食被覆を施した場合、これらの防食層にひびわれなどの劣化が生じない限り優れた防食効果を発揮する。
- ②高炉水砕スラグ混入コンクリートの塩化物の遮へい効果が優れていることが認められた。しかし、このコンクリートでもひびわれを生じている場合には、満足な防食効果が得られないことがある。
- ③鋼繊維補強コンクリートは海洋飛沫帯のような厳しい腐食環境下においても優れた防食効果を発揮する。