

論文

[1111] 若材令で海水に接するコンクリート中の鉄筋腐食に関する一実験

正会員○堤 知明 (東京電力技術研究所)

正会員 本橋 賢一 (鹿島建設技術研究所)

正会員 ミスラ スティール (鹿島建設技術研究所)

正会員 山本 明雄 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

海洋コンクリート構造物はコンクリート中の鉄筋腐食の観点から極めて厳しい環境にあり、耐久性を確保するためにコンクリートの配合、かぶり、混入塩化物量の規制等様々な配慮が図られている。養生に関しても、例えば土木学会コンクリート標準示方書においては「材令5日まで海水に洗われないように保護しなければならない」と示されている。

初期養生の程度はコンクリート中の鉄筋腐食に影響し、養生期間は長いことが望ましいが、作業環境が厳しい海上での工事等では十分な養生期間の確保が難しいのが実情である。鉄筋の腐食を予測するには現実に即した養生条件下でのデータの蓄積が望まれるものの、このような研究は少ないものと考えられる。

表-1 使用材料

Cement	Ordinary Portland Cement (OPC, Sp. Gr. 3.16) Blast Furnace Slag Cement (BFSC, Sp. Gr. 3.04)
Fine agg.	River sand (Sp. Gr. 2.61)
Coarse agg.	Crushed stone (Sp. Gr. 2.67)
Admixture	AEWR

本研究は、材令5日から塩水に接し、以後1ヶ月間2種類の暴露条件に置かれたコンクリート供試体中の鉄筋腐食の程度を調べたものであり、セメントの種別、混入塩化物量、水セメント比を要因として実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

使用材料を表-1に示す。高炉セメントB種のスラグ混入率は約45%である。コンクリートの配合は、粗骨材最大寸法20mmで、スランブ 8 ± 2 cm、空気量 5 ± 1 %を満足するように試験練りを行って定めた。

2.2 実験方法

実験要因、実験条件及び測定項目を表-2に示す。

表-2 実験要因、実験条件及び測定項目

Cement type	OPC, BFSC
Water-cement ratio	0.40, 0.55, 0.70
Initial Cl^- content*	0.20, 0.35, 0.50
Curing	5 days [in formwork in room (20°C, 80% RH)]
Exposure in 3.3% NaCl solution	a) Immersed b) Cyclic wetting and drying
Exposure period	1 month
Measurements	Corroded area, Cl^- content in reinforcement neighbourhood

実験要因は、セメントの種別（普通ポルトランドセメント — 以下OPCと略記、高炉セメントB種 — 以下BFSCと略記）、水セメント比、混入塩化物量並びに

暴露条件である。混入塩化物量は既往の研究[1]を参考にしてセメントに対する重量比で変化させ、NaClを練りませ水に溶かしてコンクリートに混入した。

* Cl^- %, by wt. of cement, added to mixing water as NaCl

コンクリート供試体は $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の円柱供試体であり、図-1に示すように、異形鉄筋D13 (SD30A) をかぶり 25 mm になるように2本づつ配置した。鉄筋のかぶりを正確に確保するという実験の都合から、鉄筋の全長 15 cm のうち下側 2 cm の表面はエポキシ系樹脂で被覆しており、腐食の調査対象とした鉄筋長さは 13 cm である。鉄筋は黒皮が健全なものを使用し、コンクリート打込み前にアセトンで脱脂した。

コンクリート供試体は、鋼製型枠をつけた状態で 20°C 、 $80\%\text{ R.H.}$ の養生室に置き、材令5日で脱型して、所定の暴露条件下に移した。

暴露条件は2種類で、塩水中への浸漬 (20°C の条件室内で $3.3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中に供試体を浸漬させる) と乾湿繰返し (供試体を 50°C の $3.3\%\text{ NaCl}$ 水溶液中に8時間浸漬、続いて 20°C 、 $60\%\text{ R.H.}$ の気乾状態に16時間さらすというサイクルの繰返し) である。

上記の各暴露条件に1ヶ月間さらした後、供試体を割裂して内部の鉄筋を取り出し、鉄筋の腐食状況を調査した。腐食状況は腐食面積率で示し、腐食面積は腐食部分のトレース図からイメージアナライザーを用いて測定し、鉄筋の公称直径を基に腐食面積率を計算した。また、鉄筋と接していたコンクリートから電気ドリルを用いて試料を採取し、「JCI-SC4、硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠して、電位差滴定法により、全塩分及び一部について可溶性塩分を測定した。一分析当たりのコンクリート試料の量は $5\sim 10\text{ g}$ であった。供試体の数は各条件につき2本であり、即ち、各条件で4本の鉄筋の腐食面積率と各々の鉄筋近傍の塩分分析値を得たことになる。

3. 実験結果と考察

3. 1 腐食の全般的な傾向

全ての鉄筋で腐食がみとめられ、個々の鉄筋の腐食面積率は最少 0.1% ～最大 2.0% であった。腐食状況の例は図-2に示すように、ほとんどの腐食は鉄筋の節の近傍に生じていた。

腐食面積率を混入塩化物量 (セメントに対する重量%) で整理して、図-3 a (塩水中への浸漬) および図-3 b (乾湿繰返し) に示す。腐食面積率は鉄筋4本の平均値である。両図から、以下の大略の傾向が分かる。

- ・対セメント重量比で示した混入塩化物量が大きいほど、腐食面積率は大きい傾向がみとめられるが、腐食面積率は水セメント比の影響を受けている。
- ・セメントの種別で比較すると、OPCに比べてBFS Cの腐食面積率が大きい場合が多い。

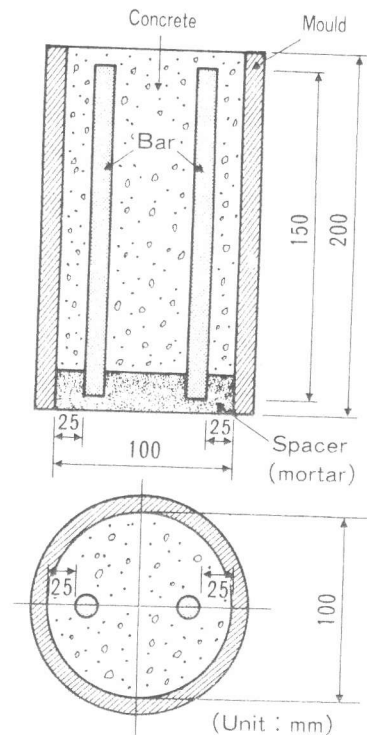


図-1 供試体形状

Cement : OPC
W/C : 40%
In. Cl^- : 2.1 kg/m^3
Exp. : D/W
Corr area : 0.9%

◆ corroded portion

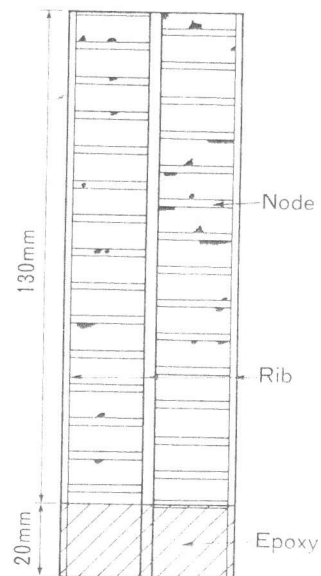


図-2 鉄筋腐食状況

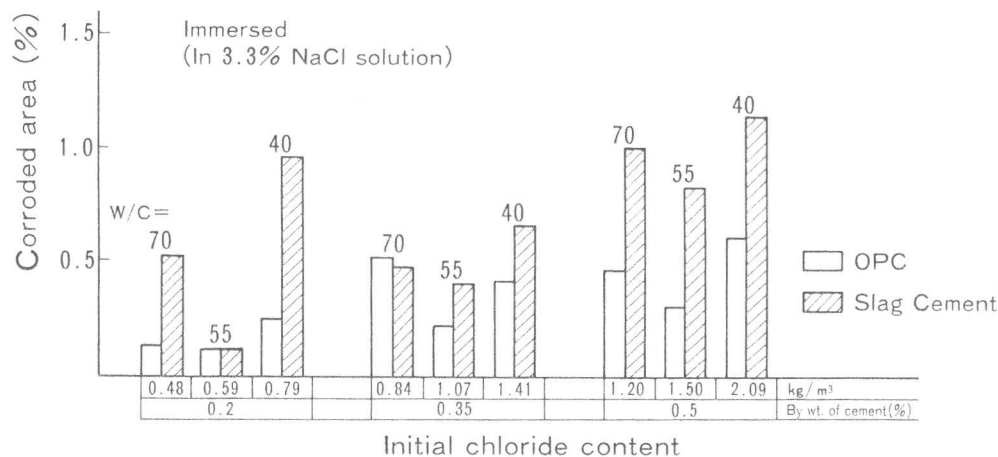


図-3 a 混入塩化物イオン量と腐食面積率との関係
(浸漬条件)

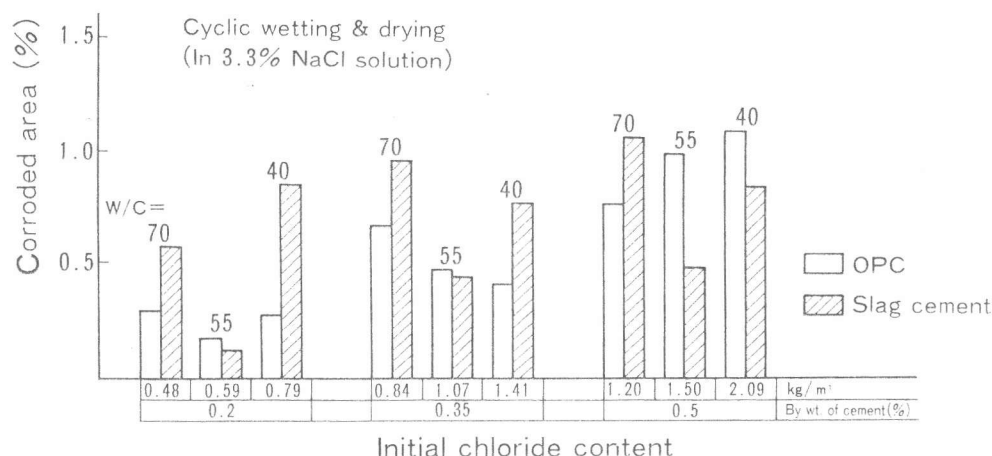


図-3 b 混入塩化物イオン量と腐食面積率との関係
(乾湿繰返し条件)

3. 2 腐食面積率と実験要因との関係

本実験では、水セメント比40%の配合が55%または70%に比べて、腐食面積率が大きくなる傾向を示した。これは、混入塩化物量がセメントに対する重量比で一定の場合、水セメント比が小さい配合ほど塩化物イオンの絶対量が増加するためではないかと推測された。そこで、混入塩化物量をコンクリート1m³中の塩化物イオン量に換算して腐食面積率との関係を整理した。これを暴露条件とセメントの種別毎に分けて図-4 a、4 b、5 a及び5 bに示す。図中の点は4つのデータの平均値を、範囲は最大値と最小値を示している。これらの図から、次のことが言える。

①腐食面積率と混入塩化物量との関係

腐食面積率は、バラツキが大きいものの、初期の混入塩化物量 (Cl^- 換算, kg/m^3) の増加に伴って大きくなる傾向を示している。混入塩化物量が約 0.5 kg/m^3 (Cl^-) においても、目視で確認されるような腐食が認められた。

②腐食面積率と水セメント比との関係

同一の混入塩化物量で比較すると、セメントの種類にかかわらず水セメント比40%と55%との腐食面積率では明らかな差はみられなかったが、水セメント比70%の腐食面積率が最も大きい場合がほとんどであった。このことは、水セメント比が55%と70%との間におい

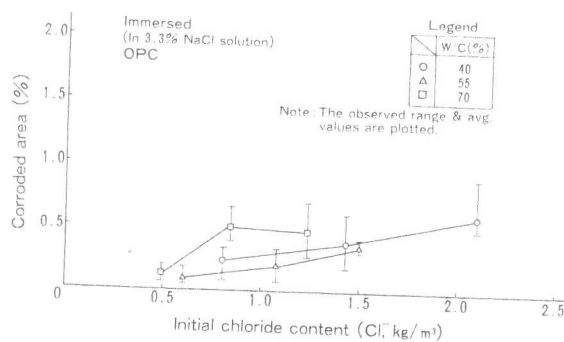


図-4 a 塩化物イオン量と腐食面積率との関係（浸漬条件、OPC）

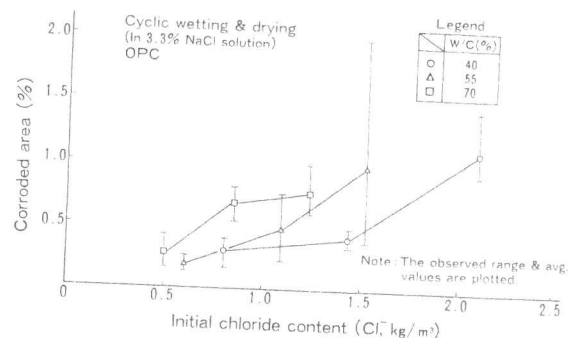


図-4 b 塩化物イオン量と腐食面積率との関係（乾湿繰返し条件、OPC）

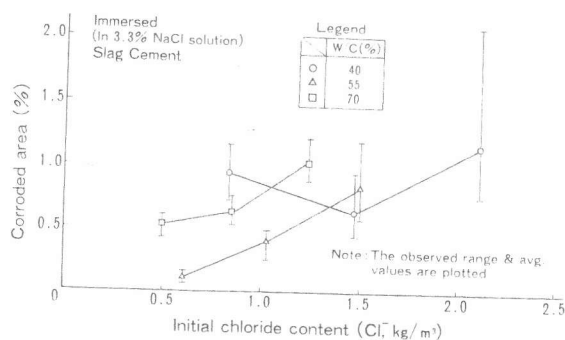


図-5 a 塩化物イオン量と腐食面積率との関係（浸漬条件、BFSC）

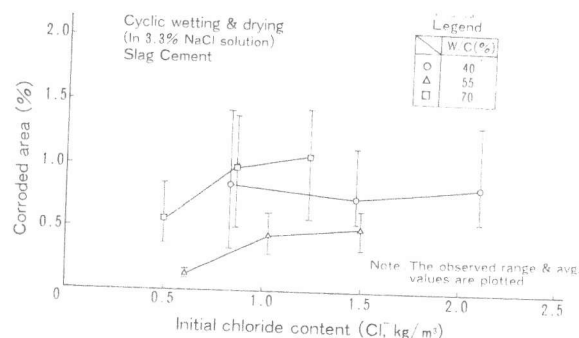


図-5 b 塩化物イオン量と腐食面積率との関係（乾湿繰返し条件、BFSC）

で大きく変化する何らかのコンクリートの品質が腐食面積率に影響していることを示唆するものであり、その品質としては、例えば水密性、酸素の拡散性 [2] あるいは暴露環境からの浸透塩化物の影響が考えられる。

③腐食面積率とセメントの種別および暴露条件との関係

セメントの種別で比較すると（図-4 a と 5 a あるいは図-4 b と 5 b との比較）、OPC の腐食面積率はBFSCに比べて全般的に小さな値を示した。特に、混入塩化物量が少ない領域 0.5 kg/m^3 (Cl^-) 付近ではOPCの腐食面積率がBFSCに比べて小さいことがわかる。また、暴露条件の相違によつては（図-4 a と 4 b あるいは図-5 a と 5 b との比較）、腐食面積率はあまり変化しないという結果であった。乾湿繰返しは塩水浸漬に比べてより厳しい条件を想定したものであるが、両者の腐食面積率は当初予測したほど差異を生じなかった。この理由として、暴露期間が1ヶ月であったこと、また、コンクリートの含水率が小さいほど酸素拡散係数が大きいという報告 [3] から、設定した乾湿繰返しのサイクルではコンクリートの乾燥が乾燥時間内にあまり進まなかったことが考えられる。

3. 3 鉄筋近傍のコンクリートの塩分分析結果

鉄筋近傍のコンクリートの全塩分及び可溶性塩分の分析を行った。以下は塩水浸漬条件のデータであり、全塩分分析値を実測塩化物量と呼び、実測塩化物量と混入塩化物量との差を浸透塩化物量とみなして検討する。

①浸透塩化物量と配合条件との関係

浸透塩化物量と水セメント比との関係を図-6に示す。浸透塩化物量はBFSCの方がOP

Cに比べてやや小さいという傾向が見られるが、水セメント比によってはほとんど変化していない。塩化物の浸透は水セメント比が小さく密実なコンクリートほど小さいというのが一般的な評価と考えられる。例えば文献[4]においてもそのように報告されているが、これは材令28日から海水に接した場合のデータである。今回の実験のように若材令から海水に接した時の塩化物の浸透を検討したデータは乏しく、ここではコンクリートの吸水量の研究報告

[5]を参考にする。この研究は材令1日で供試体を水中に浸漬して以後の吸水量の変化を測定したもので、水セメント比40%の方が70%に比べて吸水量が大きくなると報告している。このことは、若材令から海水に接する場合には、塩化物の浸透は拡散現象に加えてコンクリートの吸水し易さに影響され、水セメント比が小さいことが必ずしも塩化物の浸透抑制につながらないことを示すものと考えられる。

また、鉄筋近傍のコンクリートの浸透塩化物量は平均 2.1 kg/m^3 であって、混入塩化物量($0.5 \sim 2.1 \text{ kg/m}^3$, Cl^-)と同量以上の塩化物が1ヶ月間に浸透したことになる。

②実測塩化物量と腐食面積率との関係

実測塩化物量と腐食面積率との関係を図-7に示す。混入塩化物量で整理した場合に比べて腐食面積率のバラツキが大きいが、腐食面積率は実測塩化物量が多いほど大きく、同一の実測塩化物量で比較するとBFSCにおける腐食面積率はOPCより大きい傾向が見られる。

③可溶性塩分量と全塩分量の割合

鉄筋近傍から採取したコンクリート試料の全塩分量と可溶性塩分量との関係を図-8に示す。データにややバラツキはあるものの、BFSCにおける可溶性塩分の全塩分に対する割合はO

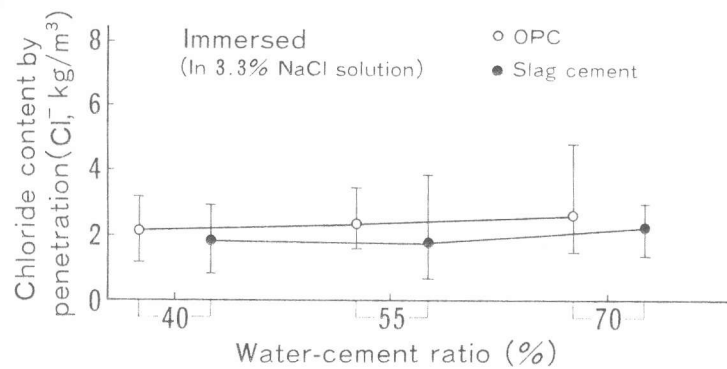


図-6 水セメント比と浸透塩化物量との関係

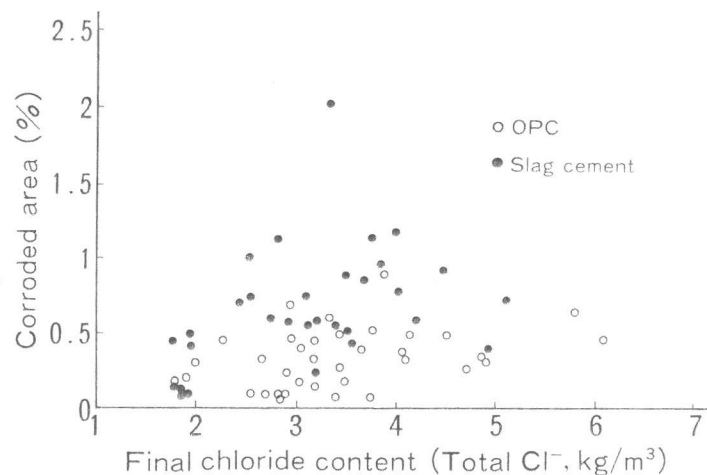


図-7 実測塩化物量と腐食面積率との関係

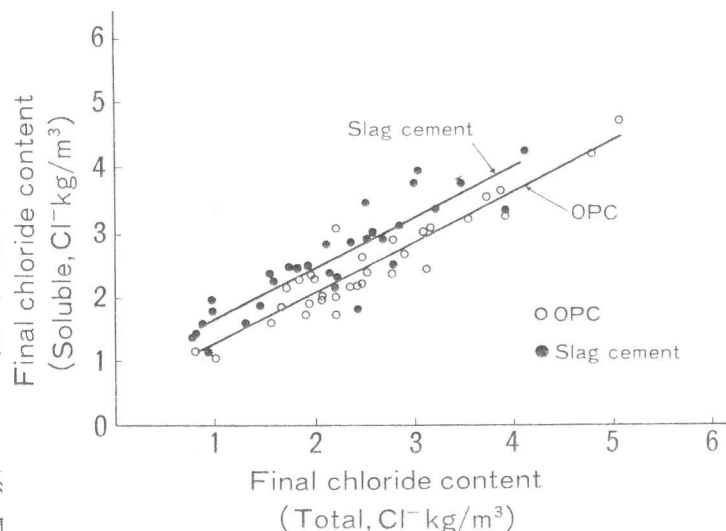


図-8 全塩化物量と可溶性塩化物量との関係

PCに比べて大きいという傾向が見られ、同一の実測塩化物量ではBFSCの腐食面積率がOPCに比べて大きいという前述の結果と符号する。可溶性塩分の割合の大小で、セメント硬化体中における塩化物の固定化能力を論じることには無理があると考えられるが、高炉セメントの塩化物固定化能力はスラグ混入量によって変化するという報告〔6〕との整合性を含めて、今後の検討が必要と思われる。

4. まとめ

若材令で海水の作用を受けるコンクリート中における鉄筋の腐食状況を調べるために、材令5日で塩水に接し以後1ヶ月間2種類の暴露条件にさらす方法で、コンクリート中の鉄筋腐食を検討した。水セメント比が40～70%の範囲で、混入塩化物量が約0.5～2.1kg/m³ (Cℓ⁻換算)の範囲で実施した実験の結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 腐食面積率はバラツキが大きいものの、混入塩化物量をセメントに対する重量比ではなくコンクリート1m³中の塩化物イオン量でとらえると、鉄筋の腐食面積率と比較的良く対応した。混入塩化物量0.5kg/m³ (Cℓ⁻)においてもわずかではあるが腐食が認められた。
- (2) 2種類の暴露条件で腐食面積率に顕著な差は見られなかったが、この原因として今回設定した乾湿繰返しサイクルでは乾燥時間内においてコンクリートの乾燥があまり進まなかったことが考えられた。
- (3) 鉄筋近傍のコンクリートの塩分分析値と混入塩化物量の差を浸透塩化物量とみなして計算すると、浸透塩化物量は平均2.1kg/m³ (Cℓ⁻)となり、水セメント比40%のコンクリートであってもかぶり25mmの鉄筋近傍まで1ヶ月間にかなり多量の塩化物が浸透する結果であった。
- (4) 塩水中に継続して浸漬する条件では、高炉セメントB種使用の腐食面積率は普通ポルトランドセメント使用に比べて大きかった。これと直接結び付けることはできないが、鉄筋近傍のコンクリート試料における可溶性塩分の全塩分に対する割合は、高炉セメントB種使用の方が普通ポルトランドセメント使用に比べて大きかった。

5. あとがき

今回の実験では鉄筋腐食に対する混入塩化物の要因効果と浸透塩化物の要因効果を整理して検討することが出来なかったため、追加実験として塩化物を混入しない、または今回に比べて少ない条件での実験を行っている。

参考文献

- 1) Simm, J. D. & Fookes, P. G., Proc. Instn. of Civ. Engrs., Part 1, 1989, Apr., 333-358
- 2) Tuutti, K., ACI, SP-65, 1980, pp223-237
- 3) 出頭, セメント系材料の酸素拡散性状に関する研究, 前田建設技術研究所報, 1988, VOL. 29-1, pp52
- 4) 鳥居, 川村, コンクリート工学年講, 1990, VOL. 12, pp489 ~ 494
- 5) Misra, S. & Uomoto, T., 第43会土木学会年講, 1988, VOL. 5, pp200 ~ 201
- 6) 染谷ら, コンクリート工学年講, 1989, VOL. 11, pp603 ~ 608