

## 海洋暴露25年経過したコンクリートの調査報告

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○正木 守  
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 岩本 靖  
 独立行政法人 土木研究所 守屋 進

### 1. はじめに

コンクリート構造物の設計施工に際しては強度を主とした力学的性質はもちろんのこと、耐久性も重要な検討事項である。しかし、耐久性に関する配慮が十分でなかったために、昭和 50 年代後半に日本海沿岸や沖縄をはじめ、各地で鋼材腐食によるコンクリートの損傷、いわゆる塩害が表面化したことが報告された。これらのコンクリート塩害対策として、1984 年（昭和 59 年）2 月に「道路橋の塩害対策指針（案）」（日本道路協会）が発行された。そこには鋼材かぶりを厚くすること、密実なコンクリートを打設することを基本対策とし、次善策としてコンクリート塗装やエポキシ樹脂鉄筋等の使用が勧められていた。しかし、当時これら塩害対策の長期的な鉄筋防食効果に関するデータが十分でなかったことから信頼性に欠けているのが実状であった。このような背景の下、本研究は海水飛沫を受けるコンクリート構造物の防食技術の確立を目的として、1982 年（昭和 57 年）から海洋技術総合研究施設で長期暴露試験を実施している。研究項目は(1)コンクリートの防食技術の基本である、かぶりと配合、内部組織が防食効果に及ぼす影響の把握、(2)コンクリート中の鋼材の防食技術である樹脂塗装鉄筋の実用化や PC 鋼材の防塩処理材料の開発、(3)塗膜系塗料・含浸系塗料の実用化や耐塩性コンクリートの開発による耐海水コンクリート部材の設計技術の確立などである。本稿では、暴露開始から 25 年経過した供試体の外観劣化度と塩分浸透深さ、内部鉄筋の健全性についての調査結果を報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1. 供試体概要

暴露した供試体の配筋図を図-1 に概要を表-1 に示す。形状寸法は No.1, No.2 どちらの供試体においても 200×200×1200mm の角柱で、純かぶりは 25mm である。通し筋には D13 を 4 本、スターラップには No.1 で φ6 を 14 本、No.2 で φ9 を 14 本使用した。コンク

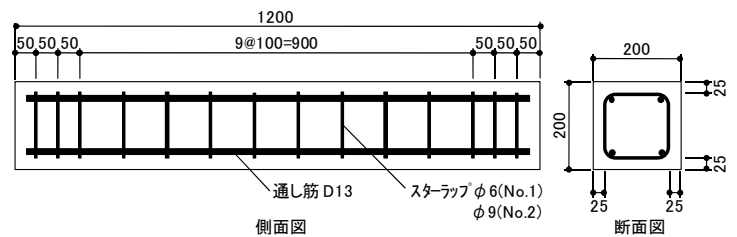


図-1 供試体配筋図

表-1 供試体概要

供試体名	種別	W/C (%)	かぶり (mm)	通し筋	スターラップ <sup>°</sup>	防食鉄筋	形状寸法
No. 1	高炉セメント B	50	25	D13×4	φ6×14	なし	200×200×1200
No. 2	早強セメント	40			φ9×14	亜鉛めっき	

表-2 配合および材齢 28 日圧縮強度

供試体名	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	スランプ <sup>°</sup> (cm)	空気量 (%)	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	材齢 28 日の圧縮強度
No. 1	50	20	42	8	4.5	310	155	774	1125	31.1
No. 2	40	20	38	8	4.5	405	162	667	1147	49.6

リートは No.1 が高炉セメント B 種で水セメント比 50%, No.2 が早強セメントで水セメント比 40% とした。No.2 においては, 通し筋およびスターラップを重鉛めっきで防食した。それぞれの供試体を使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。

2.2. 暴露状況

供試体は静岡県駿河湾沖合 250m に位置する海洋技術総合研究施設(写真-1)で暴露した。供試体の暴露状況を写真-2 に示す。供試体は, 海面から約 2.1m の高さに位置する第3デッキにて暴露を行い, 常時海水飛沫にさらされる厳しい腐食環境である。



写真-1 海洋技術総合研究施設



写真-2 供試体暴露状況

2.3. 調査方法

(1) 外観調査

供試体のコンクリートの浮き, 剥離, ひび割れを目視確認した。劣化度の判定基準を表-3 に示す。

表-3 外観劣化度の判定基準

劣化度	判定基準
A	無傷
B	わずかに損傷あり
C	多少損傷あり
D	多く損傷あり

(2) 塩化物量調査

供試体側面から φ 50mm のコアを採取し, 10~30mm, 30~50 mm, 50~70mm の位置でスライスし, JCI 法のうち電位差滴定法により塩分分析を行った。測定した結果を回帰分析することにより, 塩化物イオンの見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を算出した。なお, 実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(案)(JSCE-G573-2007)において「中性化した領域およびそこから 10mm 以内の深部で採取された試料から得られた結果は, 回帰分析を行う際には用いない方がよい。全く中性化が生じていない場合においても, 構造物表面から深さ 10mm 以内で採取された試料から得られた結果は, 回帰分析を行う際には用いない方がよい。」とのことから, 今回は表面から 10mm までは測定位置から除外した。

(3) 鉄筋腐食量調査

コアを採取した供試体を解体し, 通し筋およびスターラップを取り出し, その腐食状況を観察した。鉄筋の腐食状況は, 建設省総合プロジェクト平成元年5月 塩害を受けた土木構造物の補修指針(案)に示す腐食度の判定基準により評価した。腐食度の判定基準を表-4 に示す。

表-4 腐食度の判定基準

腐食度	判定基準
A	腐食なし
B	ごく表面的な腐食
C	浅い孔食などの断面欠損の軽微な腐食
D	断面欠損が著しい腐食

(4) 鉄筋の引張試験

供試体内部から取り出した鉄筋(通し筋)について, 「JIS Z 2241 金属材料引張試験方法」に基づき鉄筋の引張試験を測定した。引張試験片は, それぞれの供試体において腐食している鉄筋 1 本と腐食が軽微な鉄筋 1 本の計 2 本について実施した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1. 外観観察

供試体の外観観察を行った結果、No.1 については 0.15~0.65mm のひび割れが数本確認されたが、それ以外に大きな損傷は認められなかった。No.2 については供試体端部に一部表面の剥離が確認されたが、ひび割れの発生は認められなかった。どちらの供試体についても外観劣化度は B 程度であった。

#### 3.2. 塩化物イオン濃度分布と見掛けの拡散係数の算出

各供試体の塩化物イオン濃度分布および見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度から求められた回帰曲線を図-2、図-3 に示す。見掛けの拡散係数  $D$  および表面塩化物イオン濃度  $C_0$  は、コンクリート表面からの深さ毎に測定された塩化物イオン濃度に、式(1)に示す Fick の拡散方程式を回帰分析することにより求めた。

$$C(x,t) = C_0(1/\text{erf}(0.1 \cdot x/2(D \cdot t)^{1/2})) + C_{\text{init}} \tag{1}$$

ここに、 $C(x,t)$  : 深さ  $x$ (mm)時刻  $t$ (年)における塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : 表面塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)       $D$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)

erf : 誤差関数

$C_{\text{init}}$  : 初期混入塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

供試体表面の塩化物イオン濃度と回帰曲線から求められた鉄筋位置における塩化物イオン濃度の計算値を表-5 に示す。ここで、スラーラップおよび通し筋位置の塩化物イオン濃度はコンクリート表面からそれぞれの鉄筋表面までの距離を用いて求めた。

表面の塩化物イオン濃度は No.1 で 16.86kg/m<sup>3</sup>、No.2 で 9.58kg/m<sup>3</sup> を示しており非常に厳しい環境状態であると言える。供試体を暴露した第 3 デッキは海面から約 2.1m の高さに位置し、常時海水飛沫を受ける状態であったことから、塩化物イオンが供給されやすい環境であったものと考えられる。塩化物イオン濃度はどちらの供試体もコンクリート表面から深くなるに従って減少し、0kg/m<sup>3</sup> に近づいていく傾向を示した。スラーラップ位置 (かぶり 25mm 位置) の塩化物イオン濃度は No.1 で 2.02kg/m<sup>3</sup>、No.2 で 2.86kg/m<sup>3</sup> であり、どちらも腐食発生限界塩化物イオン濃度<sup>1)</sup>である 1.2kg/m<sup>3</sup> を超えていることが確認された。通し筋位置の塩化物イオン濃度は No.2 で腐食発生限界塩化物イオン濃度を上回ったが、No.1 は 0.91kg/m<sup>3</sup> で腐食発生限界塩化物イオン濃度を下回った。表面の塩化物イオン濃度は、早強セメントを用いた水セメント比 40% の No.2 よりも高炉セメントを用いた水セメント比 50% の No.1 のほうが高いものの、鉄筋位置での塩化物イオン濃度は No.1 のほうが低くなっている。水セメント比が大きいにもかかわらず No.1 のほうが鉄筋位置における塩化物イオン濃度が低くなったことから、高炉セメントの使用により遮塩性が向上したものと考えられる。

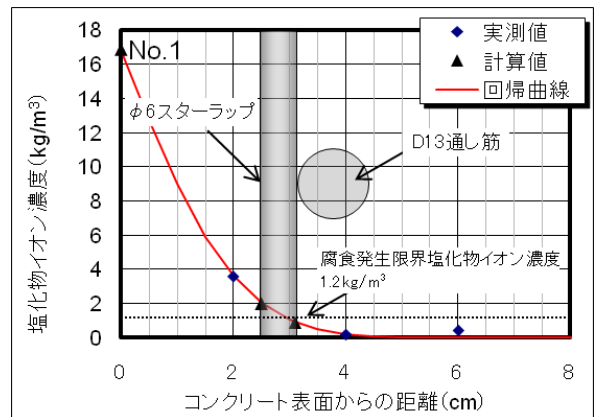


図-2 塩化物イオン濃度分布 (No. 1)

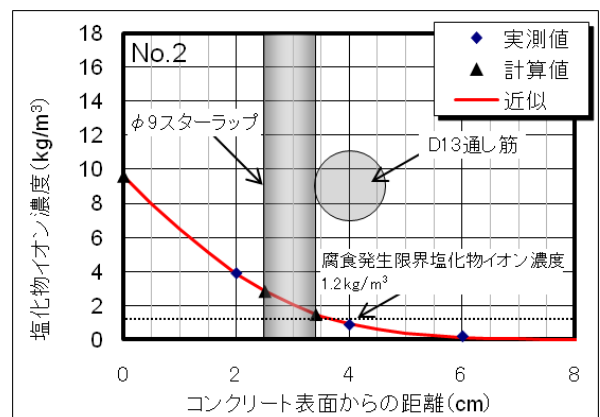


図-3 塩化物イオン濃度分布 (No. 2)

表-5 塩化物イオン濃度の計算値

	表面 (kg/m <sup>3</sup> )	スラーラップ <sup>o</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	通し筋 (kg/m <sup>3</sup> )
No. 1	16.86	2.02	0.91
No. 2	9.58	2.86	1.50

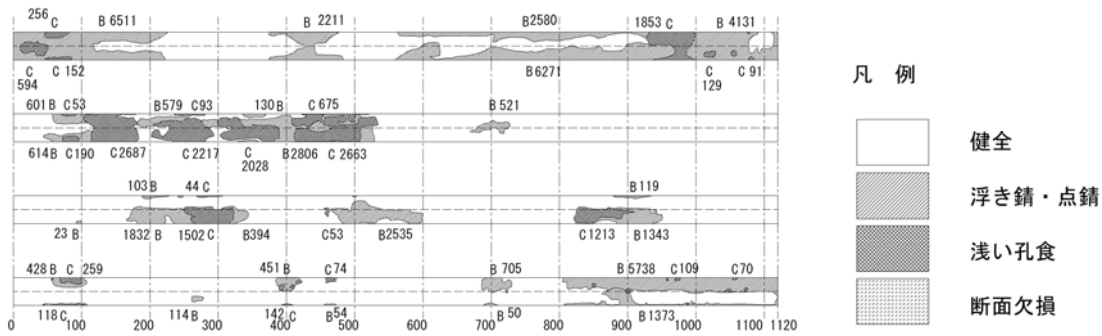


図-4 通し筋の腐食状況図 (No. 1)

3.3. 鉄筋腐食調査

No.1 の通し筋の腐食調査結果を図-4 に示す。No.2 の通し筋については腐食が確認されなかったため図示していない。鉄筋全体の表面積に対し、浮き錆・点錆は 23%、浅い孔食は 9%程度確認された。しかし、断面欠損を起こすような腐食は確認されなかった。鉄筋腐食度は No.1 で C, No.2 で A であった。

鉄筋腐食度と通し筋位置における塩化物イオン濃度の関係を図-5 に示す。鉄筋位置の塩化物イオン濃度は No.1 よりも垂鉛めっき鉄筋を用いた No.2 のほうが高いが、鉄筋腐食度は小さかった。このことから、垂鉛めっき鉄筋により十分な鉄筋の防錆効果が得られているものと考えられる。No.1 については鉄筋位置の塩化物イオン濃度は腐食発生限界塩化物イオン濃度に達していないが、鉄筋の腐食が確認された。図-4 の腐食状況図より、鉄筋が部分的に腐食していることから、局部的に塩化物イオン濃度の高い部分から鉄筋が腐食したものと考えられる。外観観察で認められたひび割れはこれらの鉄筋腐食が起因しているものと考えられる。

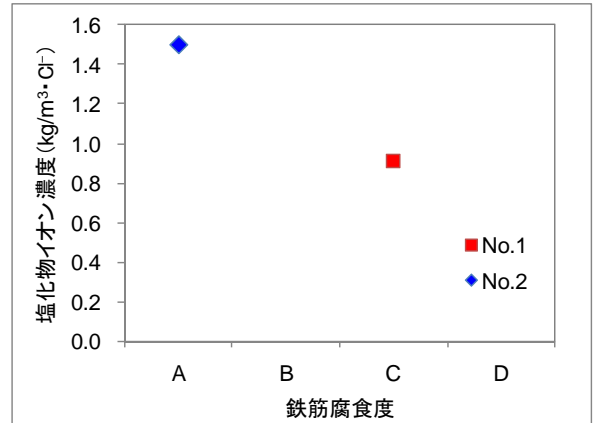


図-5 塩化物イオン濃度と鉄筋腐食度の関係

3.4. 鉄筋引張試験

供試体から取り出した通し筋の引張試験結果を表-6 に示す。比較用として暴露試験開始時の鉄筋の引張特性を合わせて表記した。応力は荷重を鉄筋の公称断面積で除して求めた。取り出した鉄筋の特性は、暴露開始当時とほぼ同等であることを確認した。

表-6 鉄筋の引張試験結果

供試体	腐食度	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
暴露開始時		335.4	502.1	-
No. 1	大	341.8	494.9	1.91 × 10 <sup>5</sup>
	軽微	367.0	528.8	1.97 × 10 <sup>5</sup>
No. 2	-	366.2	517.0	1.97 × 10 <sup>5</sup>
	-	372.5	515.4	1.93 × 10 <sup>5</sup>

4. まとめ

今回の調査では以下の知見が得られた。

- (1) 早強セメントよりも高炉セメントを用いた供試体のほうが遮塩性が高いことを確認した。
- (2) 垂鉛めっき鉄筋による鉄筋の優れた防食効果を確認した。
- (3) 塗装していない鉄筋では、わずかに孔食が確認されたが引張特性は暴露開始時とほぼ同等であった。

本研究では現在も暴露試験を継続しており、今後も定期的に供試体を調査し報告を行う予定である。謝辞：本暴露試験を行った海洋技術総合研究施設を長期間にわたって維持管理していただいております国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所の関係各位に謝辞を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，2007