

報告

[1104] 高海水圧作用下におけるRCセグメントの耐久性に関する研究

正会員 増田 隆 (日本道路公団試験所)

正会員○藤岡正男 (日本道路公団試験所)

関根信哉 (日本道路公団試験所)

1 まえがき

東京湾横断道路は、川崎側約10kmがトンネル、木更津側約 5kmが橋梁で計画されており、トンネル部はシールド工法により施工される。トンネル径は約14m、トンネル最深部は水深約28m、土被り約20mである。このためトンネル上部に約 5kgf/cm²、下部には約 6kgf/cm²の海水圧が作用することになる。つまりトンネル支保工である鉄筋コンクリートセグメント(以下「RCセグメント」という。)に高海水圧が作用することになる。RCセグメントに海水が浸透すると、塩素イオンの作用によって鉄筋表面の不動態被膜が破壊されて鉄筋が腐食する可能性がある。しかも5~6kgf/cm²もの高海水圧が作用する場合には、コンクリート中への海水浸透速度はかなり速くなるので鉄筋の腐食が促進される可能性があるものと考えられる。

本実験は、海水圧作用下でのコンクリート中への海水の浸透深さ、塩素イオンの浸透拡散、塗装材の浸透抑制効果等について調べ、RCセグメントの耐久性に関する検討を行ったものである。

2 試験概要

2.1 使用材料および配合

表1 普通ポルトランドセメントの化学成分 (%)

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。細骨材は

igloss	insol	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S O ₃	Total
0.6	0.1	22.2	5.1	2.9	64.8	1.3	2.0	99.0

埼玉県児玉郡上里町産の陸砂、粗骨材は埼玉県秩父郡両神村産の砂岩碎石を用いた。コンクリートの配合を表2に示す。単位セメント量400kg/m³はRCセグメントに相当する配合、単位セメント量300kg/m³は二次覆工に相当する配合である。

表2 コンクリートの配合

種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	水・セメント比 (%)	
RCセグメント	20	3	2	35	
二次覆工	20	15	4	56.3	
細骨材	単位量 (kg/m ³)			高性能	
率 (%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
40	140	400	742	1156	4.0%
49	169	300	887	959	1.8%

2.2 試験項目と試験方法

(1) 海水浸透試験

試験体は150cm × 230cm × 65cmの鋼製型枠にコンクリートを打設後、単位セメント量400kg/m³の配合は常圧蒸気養生(最高温度65℃、1時間)後脱型し、3日間水中養生し、以後材令28日および6か月まで気中養生した。また、単位セメント量300kg/m³の配合は6日間湿潤養生し、以後材令28日まで気中養生した。材令28日および6か月を経過後コンクリートブロックからφ10cm × h65cmのコアを採取して試験体を作成した。その内の一部に上側表面と側面上部約5cmに(社)日本道路協会「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」のA種適合仕様(以下、「塗装A」という。)の塗装を行った。

海水浸透試験装置は図1に示すとおりである。鋼製の円筒管の中に試験体を入れ、周囲の間隙をシリコン系シーラントで充填し試験装置にセットした。加圧には元圧150kgf/cm²の圧縮窒素ガス入りポンプを用いて、1次レギュレータで7kgf/cm²に減圧した後、2次レギュレータで所定の圧力(2, 4, 6 kgf/cm²)まで減圧した。減圧した窒素ガスは水量測定装置内で海水と置換し、塩素イオン浸透装置内で試験体上面から海水圧を加えた。所定の期間加圧後試験体を取りだし、海水浸透深さ測定、塩素イオン浸透量測定等の各試験に供した。

海水浸透試験に使用した海水は人工海水(JIS A 6205)を用い、表3に示す条件で行った。

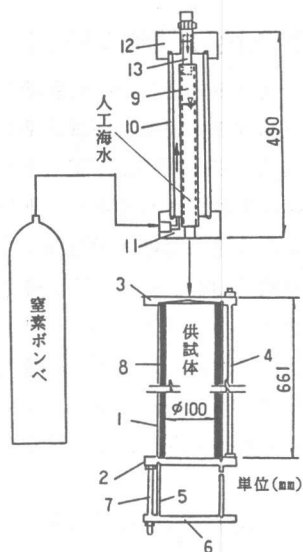


図1 海水浸透試験装置

(2) 圧縮強度試験

コンクリートの強度試験用円柱供試体 (φ15cm × h30cm) およびコンクリートブロックから採取したコア供試体 (φ10cm × h20cm) をJIS A 1107, JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。試験結果は表4に示すとおりである。

(3) 海水浸透深さ測定

海水浸透試験が終了した試験体を割裂し、目視で人工海水の浸透深さを測定した。測定の結果、境界部分が不鮮明なため、人工海水の浸透深さを確認できなかったものが多く、また確認できたものにおいても加圧期間にかかわらず測定値にばらつきが多かった。

(4) 塩素イオン浸透量測定

海水浸透試験が終了した試験体から図2に示す位置から試料 (φ10cm × h1cm) を採取し、コンクリート中に浸透した塩素イオン量を測定した。測定方法はJCI 腐食防食研究委員会の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(案)」によった。

(5) 塗装材の遮塩性試験

塗装Aについて、(社)日本道路協会「道路橋の塩害対策指針(案)・同解説」の試験方法によって、試験片の表側に3%の食塩水を入れ裏側に蒸留水を入れて、塗膜中を透過する塩素イオン量を測定した。試験の結果、塩素イオン透過量は測定下限値 ($1.1 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{日}$) 以下であった。

(6) 透水試験

試験体は、単位セメント量が 300 kg/m^3 、 400 kg/m^3 のコンクリートブロックからコアを採取し、試験体寸法 $\phi 10 \text{ cm} \times h10 \text{ cm}$ を作成した。試験方法はアウトプット法で、圧力 6 kgf/cm^2 で行った。試験の結果、透水係数は、単位セメント量 400 kg/m^3 で $6.96 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ 、単位セメント量 300 kg/m^3 で $3.20 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ であった。

3 試験結果

(1) 塩素イオンの浸透量

表3 海水浸透試験条件

試験体No	単位セメント量 (kg/m ³)	養生方法	加圧力 (kgf/cm ²)	塗装材	加圧期間
400-2	400	蒸気+気中 (計1か月まで)	2	なし	1週, 1.3 6, 12ヶ月
400-4			4		
400-6			6		
400A-6		蒸気+気中 (計6か月まで)	6	塗装A	1週, 1.3 6ヶ月
400(6)-6				なし	
300-6				300	

表4 圧縮強度試験

NO	単位セメント量 (kg/m ³)	圧縮強度 (kgf/cm ²)							
		標準養生		蒸気養生or湿潤養生+気中養生					
		28日	2ヶ月	28日	2ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	12ヶ月
1	400	581	-	489	500	-	511	587	577
2	400	585	642	404	403	504	489	-	-
3	300	360	-	319	328	-	-	-	-
4	300	364	379	299	310	325	325	-	-

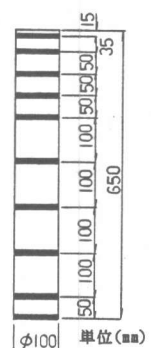


図2 試料採取位置

コンクリート中への塩素イオン浸透状況は図3に示すとおりであり、単位セメント量、加圧力、加圧期間、塗装材の有無によって異なる傾向が認められた。

①単位セメント量 $400\text{kg}/\text{m}^3$ と $300\text{kg}/\text{m}^3$ を比べると、塩素イオンの浸透量は単位セメント量の少ない方が大きな値を示す。

②加圧力が大きくなるにしたがって、コンクリート内部に浸透する塩素イオン量は増加する。

③傾向として、加圧期間が長くなるにしたがって、コンクリート内部に浸透する塩素イオン量は増加する。

④加圧期間12ヶ月までの範囲では、塗装材を用いた場合塩素イオンの浸透はほとんど認められない。

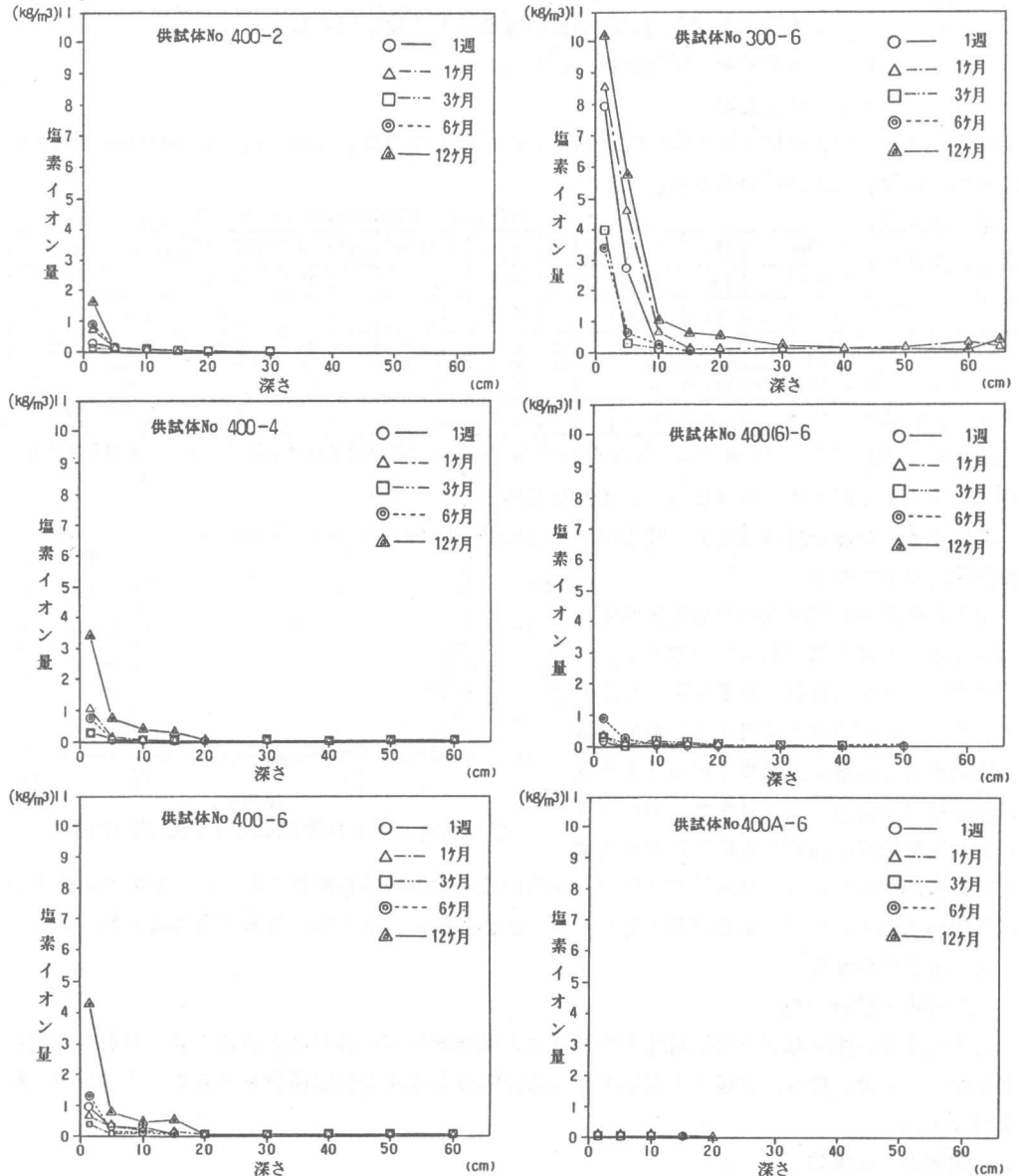


図3 塩素イオン浸透状況

(2) 塩素イオン拡散係数

コンクリート中の塩素イオン浸透現象は、Fickの第2法則として知られている拡散方程式 $\partial C / \partial t = D e \cdot \partial^2 C / \partial x^2$ で表せることが知られている。

上式を初期条件 $C(x, 0) = 0$ 、境界条件 $C(0, t) = C_0$ のもとで解くと (a) 式のようになる

$$C(x, t) = C_0 \{1 - \text{erf}(x / 2\sqrt{D e \cdot t})\} \dots\dots\dots (a)$$

$C(x, t)$: 境界塩素イオン量が C_0 の場合における境界面から x cm の位置での t 時間 (sec) 経過後の浸透塩素イオン量 (kg/m³)

C_0 : 境界塩素イオン量 (kg/m³) (本試験では、分析した最も浅い位置、すなわち表面から深さ 1.5 cm 部分の塩素イオン量を代用した。)

$D e$: 塩素イオン拡散係数 (cm²/sec)

erf : 誤差関数

コンクリート中の塩素イオン量の定量的な関連を得るために、(a) 式より各加圧期間毎の塩素イオン拡散係を次の手順より求めた。

① (a) 式に

表5 塩素イオン拡散係数 (×10⁻⁷ cm²/s)

No	1週-0	1ヶ月-0	3ヶ月-0	6ヶ月-0	12ヶ月-0	12ヶ月-1週	12ヶ月-1ヶ月	6ヶ月-3ヶ月	1ヶ月-1週
400-2	430.0	12.0	20.0	0.8	0.5	0.12	0.20	1.3	1.2
400-4	57.0	11.0	5.4	0.9	1.3	1.3	1.6	2.1	14.0
400-6	170.0	140.0	5.2	0.8	1.2	0.9	0.9	1.2	2.5
400(6)-6	260.0	34.0	7.5	1.7	-	-	-	11.0	23.0
300-6	110.0	56.0	2.5	1.1	5.3	26.0	19.0	45.0	1000

例) 12ヶ月-1週 ; 加圧開始 1週後から12ヶ月目までの期間における塩素イオン拡散係数を示す。係数を代入して塩素イオン量 $C(x, t)$ を求める。

② 塩素イオン量の計算値と実測値との残差平方和を求める。

③ この残差平方和が最小となる場合の塩素イオン拡散係数 ($D e$) を求める。

塩素イオン拡散係数の結果を表5に示した。また、加圧期間と塩素イオン拡散係数の関係を図4に示す。塩素イオン拡散係数は加圧初期の段階 (1ヶ月まで) では大きい

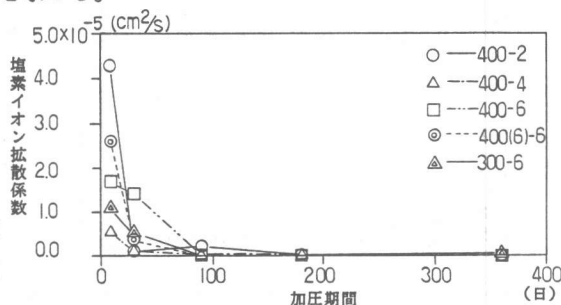


図4 塩素イオン拡散係数と加圧期間の関係

減少する傾向があり、6ヶ月以後ではほぼ一定値に収束する傾向が認められた。加圧開始直後では試験体の状態により毛細管浸透等の影響により拡散係数が大きくなったものと考えられる。

4 耐久性の検討

(1) 海水の浸透予測

海水浸透深さ測定結果では、海水の浸透深さの境界部分が不鮮明により測定できなかった場合が多かったため、既往の文献¹⁾を用いて水の透水係数から水の拡散係数を求めて、海水浸透予測を行った。

① 水の拡散係数

水の拡散係数を (b) 式より求めた。

$$\beta^2 = k \cdot E_v / W_0 \quad \dots\dots (b)$$

単位セメント量400kg/m³の場合

$$k = 6.96 \times 10^{-11} \quad (\text{測定値})$$

$$E_c = 4 \times 10^8 \quad (\text{仮定値}) \text{ より } E_v = 2 \times 10^8$$

$$\therefore \beta^2 = 1.39 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$$

単位セメント量300kg/m³の場合

$$k = 3.20 \times 10^{-9} \quad (\text{測定値})$$

$$E_c = 3 \times 10^8 \quad (\text{仮定値}) \text{ より } E_v = 1.5 \times 10^8$$

$$\therefore \beta^2 = 4.80 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$$

②海水の浸透予測

海水の浸透予測を (d) 式より求めた。

$$\beta^2 = \alpha D_m^2 / 4t\xi^2 \quad \dots\dots (c)$$

$$\therefore t = (D_m^2 / 4\beta^2 \xi^2)^{7/4} \quad \dots\dots (d)$$

β^2 : 水の拡散係数 (cm²/s)

k : 水の透水係数 (cm/s)

E_v : コンクリートの空隙を除いた
実体部の圧縮率 (gf/cm³)

$$E_v = E_c / 3(1-2\nu)$$

E_c : ヤング係数 (gf/cm²)

ν : ポアソン比 = 1/6

W_0 : 水の密度 = 1gf/cm³

ξ : 圧力に関する係数 (P=2, 4, 6kg/cm² の場合 $\xi=0.477, 0.813, 0.977$)

D_m : 海水の浸透深さ (cm)

t : 時間 (s)

α : 時間に関する係数 (t^{3/7})

海水が浸透するに要する時間は、表6に示す程度であると予測された。

(2) 塩素イオン浸透予測

塩素イオン浸透予測は、Fickの第2法則の拡散方程式 (a) 式を用いて以下の手順で求めた。

① C_0 の推定

加圧期間 1週間、1月間、1年間の測定結果から 1年以上の C_0 を推定した。推定式を図5に示した。

②各経過年数間における C_0 の増分の推定

図5より経過年数 (1, 5, 10, 20, ... 100年) における C_0 を $C_1, C_5, C_{10}, \dots, C_{100}$ とし、各経過年数間における C_0 の増分 $C_5 - C_1, C_{10} - C_5, \dots, C_{100} - C_90$ を求めた。

③ C_0 の増分における $\Delta C(x, t)$ の推定

各経過年数間の C_0 の増分における境界面から x cm の位置での t 時間経過後の浸透塩素イオン量を求めた。拡散係数は、毛細管浸透等の影響を考慮して加圧期間 1ヶ月間から12ヶ月間における拡散係数を用いた。

④ $C(x, t)$ の推定

③で求めた $\Delta C(x, t)$ を加算して、塩素イオン浸透量を算出した。

塩素イオン浸透量の推定値の一例を図6に示した。

また、深さ 5cm の部分の塩素イオン浸透量が 0.6kg/m³ および単位セメント量の 0.4% に達するに要する期間は、表7に示す程度であると予測された。

(3) 鉄筋の腐食速度の予測

一般にコンクリート中にある鉄筋は、コンクリートが高アルカリのため、鉄筋表面に薄い酸化物の保護被膜が形成され、腐

表6 海水の浸透予測

単位セメント量 (kg/m ³)	加圧力 (kgf/cm ²)	浸透に要する時間		
		Z=5cm	Z=40cm	Z=65cm
400	2	1週	—	147年
	4	1日	—	23年
	6	半日	—	12年
300	6	—	2日	—

注) Zは表面からの深さ

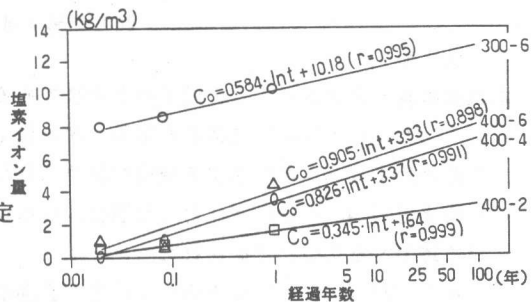


図5 境界塩素イオン量の推定

表7 塩素イオン浸透予測

単位セメント量 (kg/m ³)	加圧力 (kgf/cm ²)	期間	
		0.6 kg/m ³	単位セメント量の0.4%
400	4	1年	5年
	6	1年	8年
300	6	1週	2週

食していく状態にあると言われている。しかし、高圧海水下では、4(1)(2)より、かなり早い時期に水と塩素イオンが供給され不動態被膜が破壊されると思われる。この状態に酸素が供給されると鉄筋の腐食が始まり、さらに酸素が供給されると腐食は進行すると考えられる。

そこで、コンクリートが完全に均質な理想状態にあり、ひびわれや局部的な材料分離等がまったくなく、しかも酸素の供給は主として圧力により浸透した海水中の溶存酸素(1~8ppm程度²⁾³⁾)のみによると考えると、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は非常に遅いと予測される。

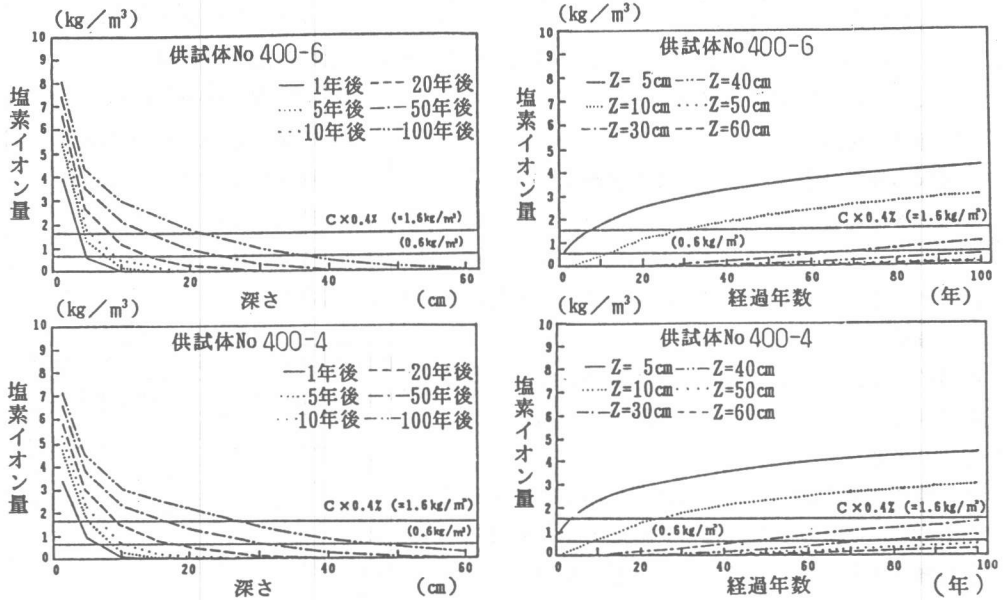


図6 塩素イオン浸透予測

5 まとめ

本試験の結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) コンクリート内部に浸透する塩素イオン量は、加圧力が大きくなるほど、あるいは加圧期間が長くなるほど増加する傾向が認められた。
- (2) 海水圧が 4, 6 kgf/cm²作用した場合、海水はRCセグメントの全厚(65cm)を約13~23年で透過するものと予測された。
- (3) 海水圧が 4, 6 kgf/cm²作用した場合、表面から 5cmの位置における塩素イオン浸透量を単位セメント量の 0.4%とすると、RCセグメントに相当する単位セメント量400kg/m³では約 5~ 8年でこの値を越えるものと推定される。
- (4) コンクリートが完全に均質な理想状態にあり、ひびわれや局部的な材料分離等がまったくなく、しかもコンクリート中の鉄筋が、海水中の溶存酸素だけで鉄筋腐食が生じると仮定すると、コンクリート中の鉄筋の腐食速度は非常に遅いと予測される。
- (5) 塗装を行った場合には、コンクリート中への塩素イオンの浸透はほとんど認められなかったが、試験期間が 1年と短いので長期間の効果は確認できなかった。

参考文献

- 1) 村田二郎：コンクリートの水密性、土木学会論文集、No. 77, 1961. 11
- 2) 腐食防食協会編 防食腐食便覧 日刊工業新聞社
- 3) 西条八束編 内湾の環境科学 培風館