

[3] 海中暴露 5 年後のコンクリート中の鉄筋の腐食に関する 電気化学的実験

正会員 青 戸 章 (国鉄 鉄道技術研究所)

1. まえがき

既報¹⁾で、表 1 に示した実験要因の各水準で作製した鉄筋コンクリート供試体を、材令 28 日まで海水中に浸漬した状態で定電流陽分極試験を行なったが、分極曲線にきれいな Tafel の線が現われなかったので、鉄筋の腐食抑制作用の指標として陽分極電位が +500 mV・SCE に達する時の陽極電流密度をデータとして解析した結果、混合セメントがよく、また、水セメント比とスランブの小さい密実なコンクリートの方が、鉄筋の腐食抑制作用が高いことを電気化学的に確認できたことを報告した。しかし、この実験では材令 28 日まで海水中に浸漬した状態で試験したので、鉄筋の近傍には海水塩分がまだほとんど浸透していないこともあって、防錆剤やかぶりの効果が有意とならず、また、亜鉛めっき鉄筋の防食効果を数量的に把握することができなかった。それに、+ 500 mV・SCE という陽分極電位で判断するのは、分極が大きすぎるという問題点も有していた。

今回は、上記の実験において同時に作製し、5 年間海中暴露した鉄筋コンクリート供試体について、定電流陽分極試験と定電流陰分極試験を行ない、鉄筋の腐食抑制作用の指標も既報²⁾で報告した改善した方法でデータをとり、これを解析した結果を報告するものである。

2. 実験の要因とその水準

実験の要因とその水準を表 1 に示した。コンクリートの配合(実験数)は A × B × C × D の 4 要因の各水準の組合せの 90 種類とし、これに E と F の各水準をできるだけ直交するように割付けた。供試体は、各実験で定電流陽分極試験と定電流陰分極試験にそれぞれ 1 個ずつ用いた。なお、要因 G は圧縮強度試験のみに適用した。

3. 実験に用いた材料

(1) セメント 日本鉄道建設公団の青函海底鉄道トンネル工事に、耐海水性が高いということで使用されている中庸熱系セメントと混合セメントを、普通ポルトランドセメントと比較した。なお、A₅ は中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを内割り重量で 15 % 混合したものである。

(2) 骨材 細骨材は富士川産の川砂で、粗粒率は 2.82、粗骨材は JIS A5005 に規定する碎石 2005 で、粗粒率は 6.70 である。

(3) 防錆剤 防錆剤を用いる場合は、亜硝酸塩を主成分とした複合系の防錆剤を標準量のセメント × 0.4 % 使用し、これにリグニンスルホン酸カルシウムを主成分とした遅延型の A E 減水剤を標準量のセメント × 0.25 % を併用して、プレーンコンクリートと比較した。

(4) 鉄筋 JIS G3112 に規定する熱間圧延異形棒鋼 2 種 (SD30) の D 10 で、黒皮の状態のままのものと、これに溶融亜鉛めっきを施したものを比較した。

表 1 実験の要因とその水準

要因	水準	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5
A	セメントの種類	A ₁ 普通ポルト	A ₂ 中庸熱ポルト	A ₃ B 種 高 炉	A ₄ B 種 フライ アッシュ	A ₅ B 種 中庸熱フ ライアッシュ
B	スランブ	B ₁ 5 cm	B ₂ 10 cm	B ₃ 15 cm		
C	水セメント比	C ₁ 45 %	C ₂ 55 %	C ₃ 65 %		
D	防錆剤の有無	D ₁ な し	D ₂ あ り			
E	鉄筋の種類	E ₁ 黒 皮	E ₂ 亜鉛めっき			
F	鉄筋のかぶり	F ₁ 4.5 cm	F ₂ 7.0 cm			
G	養生水の種類	G ₁ 真 水	G ₂ 海 水			

(5) 養生と電気化学的実験に用いた海水 神奈川県大磯海岸で採取した天然海水を用いた。

4. 実験の方法

(1) 供試体の作製と海中暴露 あらかじめかぶりに匹敵する長さだけ上下をエポキシ被覆した鉄筋を、図1のように型わくに固定し、可傾式ミキサで3分間練り混ぜたコンクリートを2層につめて、棒形振動機で締め固めた。材令2日で脱型し、供試体の上下面をエポキシ被覆し、材令4日で $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の海水養生槽に浸漬した。材令28～35日で海水養生槽から取出し、2～3個ずつ縄掛けして、神奈川県三浦市油壺海岸へ運び、干潮時には頭部が海面から露出し、満潮時には完全に海面下に水没するように設置して、材令5年まで海中暴露した。

圧縮強度試験用供試体は $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ で、各試験条件について3個ずつ、真水の霧室における標準養生と、上記と同様の海中暴露を行なった。

透水試験用供試体は $\phi 15 \times 15 \text{ cm}$ で、海中暴露のみである。

(2) 透水試験 材令5年で海中から引上げた後、表面に付着した異物を取除き、3週間気乾してから、米国開拓局型の透水試験機を用いて、 15 kg/cm^2 の水圧を24時間加えて、その透水深さを測定した。なお、この試験の要因は、 $A_1 \sim A_5$ 、 B_2 、 C_2 、 $D_1 \sim D_2$ の10種類で、同一条件で3個ずつ試験した。

(3) 塩化物含有量の測定 後述の定電流陰分極試験の終了した供試体1個ずつについて、直径方向に2回割裂した四半分について、半径の $1/2$ の面で2分割し、その内側と外側から試料を採取して、その塩化物含有量(NaCl 換算)を測定した。

(4) 電気化学的実験 図2の装置を用い、供試体を海水に浸漬した状態で、定電流陽分極試験と定電流陰分極試験を、各試験条件について1個ずつ実施した。電流密度は $0.02 \mu\text{A/cm}^2$ 程度からスタートし、1分ごとに約2倍の電流密度に切り換えて行き、分極電位の測定は、飽和カロメル電極(SCE)を基準として、電流密度の切り換え直前に行なった。

5. 実験結果の解析と考察

(1) 圧縮強度 供試体3個の圧縮強度の平均値についての分散分析表を表2に示した(*は危険率5%, **は2.5%, ***は1%, ****は0.5%で有意であることを示す)。A、C、D、Gの4要因が有意となった。要因AとGの効果を材令7日(真水養生のみ)と28日(真水養生と海水養生に有意差なし)の強度と比較したのが図3である。28日から5年までの真水養生の強度の伸びが大きいものに対して、海中暴露では伸びが小さく、特に普通ポルトランドセメントの伸びが非常に小さい。しかし、水セメント比が小さい方が強度が高いという原則は海中暴露5年後においても維持されている。要因Dが有意となったのは、 D_2

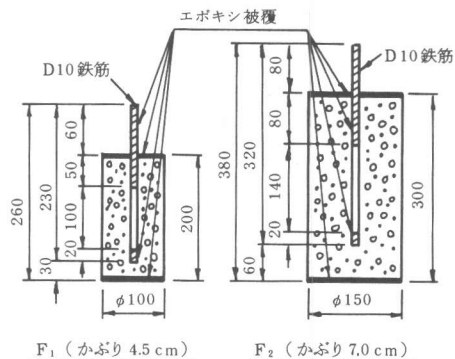


図1 供試体の形状

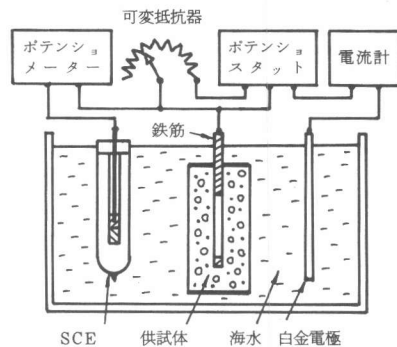


図2 電気化学的実験装置

表2 圧縮強度の分散分析表

要因	df	ss	ms	F
A	4	42 519	10 630	11.33****
B	2	937	468	0.50
C	2	1 889 406	944 703	1 006.89****
D	1	5 578	5 578	5.95**
G	1	575 283	575 283	613.15****
誤差	169	158 562	938	—
計	179	2 672 284	—	—

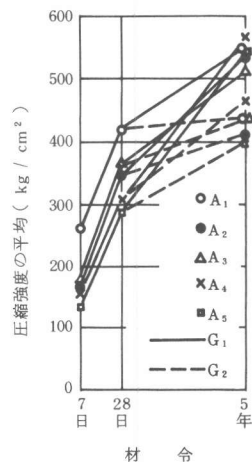


図3 材令と圧縮強度

がA E減水剤使用のために空気が3.5～5%程度連行されているので、材令28日の時点から強度が若干小さくなっているためである。

(2) 透水深さ 分散分析表は省略したが、要因Aの効果のみが有意となった。図4にその結果を示したが、普通ポルトランドセメントより、他の中庸熱系セメントおよび混合セメントの方が水密性がよい。

(3) 塩化物含有量 分散分析表を表3に示したが、A、B、C、内外の4要因が有意となった。Aと内外の効果を図5に示したが、図4の透水深さとほぼ同様の傾向を示している。特に、A₃～A₅の混合セメントは、外側に比して内側の塩化物含有

量が非常に少なく、かぶりの効果が非常に大きいことを示している。また、図は省略したが、スランブと水セメント比の小さい方が、わずかなであるが塩化物含有量が少なくなっている。

表3 塩化物含有量の分散分析表

要因	df	ss	ms	F
A	4	3.2522	0.8130	88.26****
B	2	0.0623	0.0311	3.38*
C	2	0.0908	0.0454	4.93***
D	1	0.0062	0.0062	0.68
F	1	0.0115	0.0115	1.25
内・外	1	8.7649	8.7649	951.49****
誤差	168	1.5476	0.0092	—
計	179	13.7354	—	—

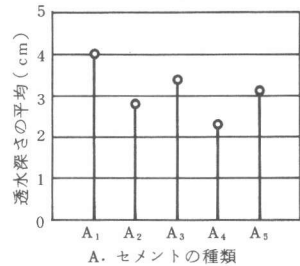


図4 Aと透水深さの関係

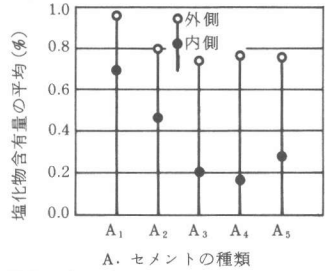


図5 Aと内・外側と塩化物含有量

(4) 定電流分極曲線 定電流陽分極曲線と定電流陰分極曲線の一例を図6に示した。

(5) 自然電極電位 図6の分極曲線で水平の部分が鉄筋の自然電極電位を示している。分散分析表は省略したが、要因DとEの効果のみが有意となった。DとEの効果を材令28日との関連で示したのが図7である。黒皮鉄筋の自然電極電位は海中暴露によって若干低下し、亜鉛めっき鉄筋は反対にかなり上昇している。材令28日では差がなかったのに、海中暴露5年後ではいずれも防錆剤を使用した方が高くなっており、アノード反応抑制型の防錆剤の効果が塩分の存在下で現われたものかと考えられる。

(6) 腐食抑制作用の数量的な把握 図6の定電流分極曲線では、陽・陰分極ともにきれいなTafelの線が現われていないが、既報²⁾で報告したように、両曲線とも自然電極電位より100～400 mV程度分極した辺りに直線部分がわずかながら存在するので、これをTafelの線とみなし、この直線を延長して自然電極電位の直線と交わる点を腐食電流密度 I_c と考えて、陽分極の場合を I_{ac} 、陰分極の場合を I_{sc} としてデ

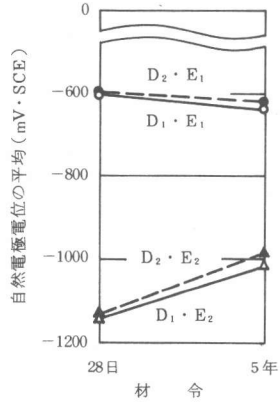


図7 材令と自然電極電位

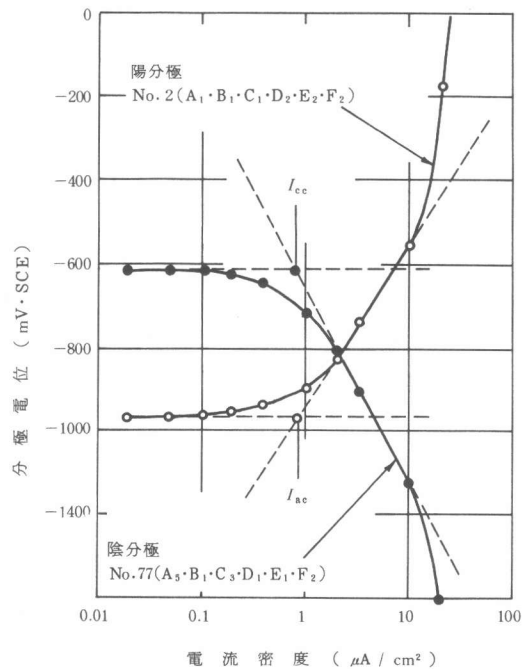


図6 定電流分極曲線の一例

ータをとり、これを腐食抑制作用を表わす指標として解析した。なお、 I_{ae} と I_{ec} は、その値が小さい方が鉄筋に対する腐食抑制作用が高いことを示すものである。

試験条件が同じなら I_{ae} と I_{ec} の値は一致する筈であるが、陽分極試験と陰分極試験は別々の供試体で実施しており、しかも各試験条件について供試体 1 個ずつしか試験していないので、若干のばらつきが生じた。その相関係数は 0.54 と若干小さくなったが、相関係数の検

定を行なうと $F_0 = (n - 2) r^2 / (1 - r^2) = 36.1^{****}$ と高度に有意となっており、表 4 の分散分析表においても有意差はないので、腐食抑制作用の程度を表わす指標として十分な妥当性を有するものと考えられる。

I_{ae} と I_{ec} の分散分析表を表 4 に示した。A, B, D, E, F の 5 要因が有意となった。要因 A と E の関係を示したのが図 8 で、図 4 や図 5 と類似の傾向を示しており、一般にポルトランドセメントより $A_3 \sim A_5$ の混合セメントの方が I_c が小さく、 A_1 は若干逆転しているが、黒皮鉄筋より亜鉛めっき鉄筋の方が I_c が小さくなっている。

要因 B と D の関係を示したのが図 9 で、スランブが大きくなると I_c が大きくなり、いずれも防錆剤を使用した方が小さくなっている。スランブの大きい方が D_1 と D_2 の差が大きくなっているが、スランブの大きい方が単位水量、したがって単位セメント量が多く、防錆剤の使用量も多いので、差が大きくなったのではないかと考えられる。

要因 E と F の関係を示したのが図 10 で、 E_1 、 E_2 の場合ともにかぶりを大きくすると I_c が小さくなっている。

表 4 で要因 C の効果が有意とならなかったが、これは他の要因に比較してばらつきが大きかったためであるが、表 3 の塩化物含有量で C の効果が有意となっている点を考へ合わせると、やはり水セメント比を小さくした方が鉄筋の腐食抑制作用は高くなるものと考えられる。

6. まとめ

- (1) 5 年間の海中暴露によって、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートはすでに強度劣化が始まっているので、水密性を高くして外部からの海水塩分の浸透を防ぐためにも、海洋環境下では混合セメントの使用が望ましい。
- (2) 海中暴露されるコンクリート中の鉄筋の腐食を防止するには、水密性が高く海水塩分浸透が少ない混合セメントを使用することにより、腐食速度を普通ポルトランドセメントの約 2/3 とすることができ、また、スランブと水セメント比の小さい密実なコンクリートとするのがよい。かぶりを 4.5 cm から 7.0 cm とすることによっても腐食速度は約 3/4 となり、この程度のかぶりがあれば防錆剤の使用も効果がある。また、黒皮鉄筋より亜鉛めっき鉄筋の方が腐食速度が小さい。

- 1) 青戸 章：海水浸漬したコンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的実験，土木学会論文報告集，No. 258，Dec. 1976
- 2) 青戸 章：塩分を混入したコンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的実験，土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，Oct. 1979

表 4 I_{ac} と I_{cc} の分散分析表

要因	df	ss	ms	F
$I_{ac} \cdot I_{cc}$	1	0.2645	0.2645	1.98
A	4	8.8286	2.2071	16.51****
B	2	1.1874	0.5937	4.44**
C	2	0.4974	0.2487	1.86
D	1	1.3347	1.3347	9.98****
E	1	5.6996	5.6996	42.63****
F	1	0.7696	0.7696	5.76***
誤差	167	22.3281	0.1337	—
計	179	40.9099	—	—

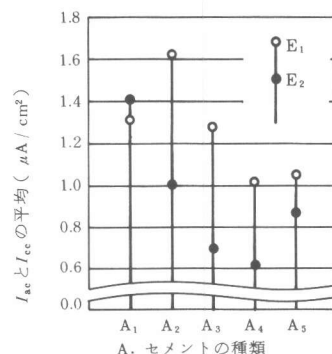


図 8 A と E と I_c の関係

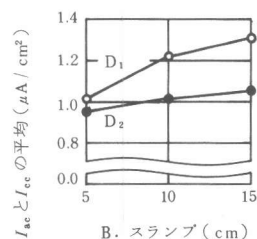


図 9 B と D と I_c の関係

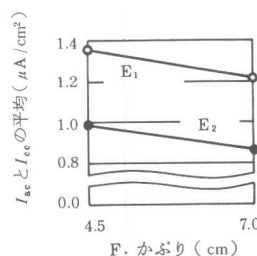


図 10 E と F と I_c の関係