

SECコンクリートの海洋構造物への適用に関する調査報告

SEC Mixing Concrete for Marine Construction

戸 田 勝 哉 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
池 谷 眞 也 物流・鉄鋼事業本部橋梁事業部橋梁建設部
浜 田 哲 也 エネルギー・プラント事業本部環境・プラント事業部土建プロジェクト部
門 倉 智 リブコンエンジニアリング株式会社試験研究所 所長

SEC コンクリートは、ブリーディング率が少ないなど優れた性能をもっているため、コンクリートの品質を改良し、耐久性の高いコンクリート構造物の構築を可能にしている。海洋構造物は塩分がコンクリート内部へ浸透し、内部の鉄筋を腐食させるため、塩害に対する耐久性が要求されている。今回、SEC コンクリートの海洋条件に対する耐久性試験を行った。この結果、高炉セメントを使用した場合 SEC コンクリートのほうが普通コンクリートよりも高い耐久性を示したが、フライアッシュが入ったセメントの場合、両者の間に優位さは観測されなかった。

SEC concrete is now mainly applied for spraying concrete because it improves the concrete quality and has an excellent low bleeding rate. Marine structure concrete requires durability against salt damage because chloride corrodes the rebar in concrete. In this report, the durability test was applied to SEC concrete. As a result, SEC concrete showed usually high durability compared to concrete using portland blast furnace slag cement, but was not better than concrete which contained fly ash.

1. 緒 言

コンクリート構造物の寿命は、つい最近まで半永久的とされてきた。しかし、トンネル覆工コンクリートの崩落事故を端緒に、施工当時に使用したコンクリートの品質が起因となる構造物の欠陥が相次ぎ指摘され、これまでのコンクリートに対する信頼性が失われ始めた。これは、過去の一部のコンクリート施工においては、そのコンクリートの生産性および施工スピードのみを重視したあまり、所定の品質をもつコンクリートの使用に対する配慮が不十分であったことも一つの原因と考えられる。

日本道路公団においては1999年に、これまでのコンクリートの品質管理要領を改訂し、ここでは構造物の品質確保や耐久性の向上確保を主眼にしている。コンクリートの品質および耐久性は、コンクリートに用いる材料の品質、コンクリートの配合およびコンクリートの施工方法に大きく影響されるといわれている。練混ぜ方法もコンクリートの品質を大きく左右する要因であり、社団法人土木学会コンクリート標準示方書の練混ぜに関する規定では、これまで「材料をミキサに投入するには全部の材料を同時に均等に投入するのを原則とする。」と明記されていた。これを、1986年には「材料の投入順序は、あらかじめ適切に定め

る」と変更されたのはその認識からである⁽¹⁾。

一方、それより以前の1978年には、日本鉄道建設公団が当時建設中であった青函トンネル工事において、高土圧に対して鋼管支保工が用いられるようになった。このためブリーディングのない中詰めモルタルの製造技術の開発が望まれ始め、これを発端に新しい練混ぜ工法としてSEC工法(Sand Enveloped with Cement)が開発された^{(2),(3)}。その後、この技術がコンクリートの製造にも応用され、SECコンクリート工法が誕生し、これを契機として、各研究機関で基礎研究が進められ、その効果が認められ始めた⁽⁴⁾。SECコンクリート工法とは、材料を分割投入して練り混ぜ、品質の良いコンクリートを製造する工法である。すなわち、骨材を練混ぜ水の一部で調整練りした後にセメントなどの粉体を投入し、骨材の界面に粉体の殻を形成させるとともに粉体の分散を十分にするように一次練混ぜを行う。最後に練混ぜ水の残分と所定の混和剤を投入して二次練混ぜを行い、目的の品質となるコンクリートを製造する方法である。

このように練り混ぜられたSECコンクリートは、従来の一括練りコンクリートに比べブリーディングが少なく、圧縮強度が増大し、耐久性が向上する。また、施工性が良好となり、連続生産された場合の品質が安定するなどの特長をもつ。

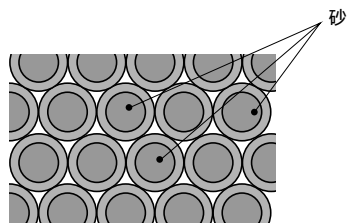
現在では建築用コンクリート、ダム用コンクリート、トンネルの吹付け用コンクリートおよび二次製品用コンクリートなどに広く応用され、品質改善効果が確かめられている。なかでも、ダム建設にパイロット事業として取り入れられ、実績も増えつつある⁽⁵⁾。

当社は、1999 年度に「勝島橋」(東京都品川区)および「朝来 13 号橋梁」(兵庫県道路公社)、1991 年度に「多摩川橋」(日本道路公団)の 3 橋の床版工事に採用し、ポンプ圧送性が良好で、硬化後の耐久性に富んでいることを確認した。また、2001 年度には、当社横浜第 3 工場ドックのソナーピット改修工事および同工場の棧橋新設工事において SEC コンクリートを採用した。

本稿では、飛まつ塩分が浸透して内部鉄筋の腐食状況を観察するために、同工事において打設された SEC コンクリートでテストピースを作製し、促進暴露試験を行った結果について報告する。

2. SEC コンクリートの製造方法とその特長

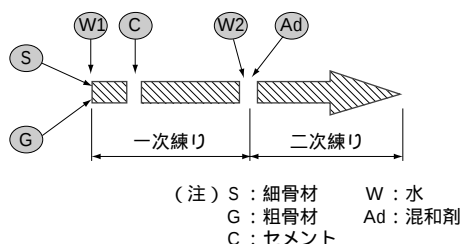
SEC コンクリートは、練混ぜ水を分割投入することで、**第 1 図**に示すように細骨材の周囲が低水セメント比のセメントペーストによって覆われている。SEC コンクリートの製造方法は**第 2 図**に示すフローに従い練り混ぜる。すなわち、細骨材の特性値およびセメントの特性値から定まる適量の一次水量 (W1) と細骨材、粗骨材を練混ぜる。次に、セメントを投入して低水セメント比のち密なセメントペーストが細骨材の回りに付着 (造殻) するように練り混ぜた



(注) ■ : 砂の表面に付着したセメントペースト

第 1 図 細骨材の造殻状況モデル

Fig. 1 Model of sand enveloped with cement



(注) S : 細骨材 W : 水
G : 粗骨材 Ad : 混和剤
C : セメント

第 2 図 SEC コンクリートの練混ぜフロー

Fig. 2 Flow of SEC mixing of concrete

後、最後に、所要の流動性を得るための残余の水と混和剤を投入して練り混ぜる。一次水 (W1) の決定については、次の (1) 式を用いて算出する。

$$W1 = \alpha/100 \times C + \beta_{OH}/100 \times S \quad \dots\dots\dots (1)$$

W1 : 最適一次水量 (kg/m³)

α : セメントの拘束水率 (%)

(キャピラリー状態に必要な水セメント比)

β_{OH} : 細骨材の拘束水率 (%)

C : 単位セメント量 (kg/m³)

S : 単位細骨材量 (kg/m³)

キャピラリーとは、セメント粒子と水が毛管相を形成し、空気が存在しない状態をいい、その状態となるときの水セメント比をセメントの拘束水率と定義している。セメントの拘束水率の測定は、トルク試験で求め細骨材の拘束水率は遠心力試験で求める⁽⁶⁾。

このようにして求めた一次水量で一次練混ぜし、さらに残余の水で二次練混ぜして製造した SEC コンクリートは、全材料を一括投入して練り混ぜるコンクリート (一括練りコンクリート) に比べ、圧縮強度が高くなり、ブリーディングが少なく分離抵抗性が高いためポンプ圧送性が良好になる。また、ち密なコンクリートが得られるため耐久性が向上するなどの特長をもつ。

3. SEC コンクリート試験体形状

プラントサイドから提示された一括練りの配合を基に、SEC 練りにおける一次水量を各試験によって算出し、修理ドック用コンクリートの配合 (**第 1 表**) および棧橋用コンクリートの配合 (**第 2 表**) を求めた。試験体形状については、圧縮強度、透水試験、塩化物透過試験、腐食促進試験体は $\phi 100 \times 200$ mm、現地暴露測定用試験体は $100 \times 100 \times 400$ mm とした。なお、打設した修理ドック、棧橋を**第 3 図**に示す。以下、練混ぜ方法において普通のコンクリートは Non-SEC と記す。

第 1 表 修理ドック用コンクリートの配合
Table 1 Mixture proportion for repair dock

粗骨材 最大 寸法 (mm)	目 標 スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					混和材
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
				W	C	S1	S2	G	Ad
20	12.0 ± 2.5	57.0	45.5	157	275	577	258	1 038	2.75

(注) セメント : 高炉 B 種セメント
細骨材 : 陸砂 (千葉県産)、砕砂 = 7 : 3
粗骨材 : 2005 砕石 (骨材径 5 ~ 20 mm)
混和剤 : AE 減水剤 (ポゾリス 78S)

第2表 栈橋用コンクリートの配合
Table 2 Mixture proportion for pier

粗骨材 最大寸 法 (mm)	目 標 スランブ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材	
				W	C	S1	S2	G	Ad
20	12.0 ± 2.5	41.0	39.3	166	405	392	270	1 049	4.05

(注) セメント: FMKC

細 骨 材: 陸砂 (千葉県産), 砕砂 = 7 : 3

粗 骨 材: 2005 砕石 (骨材径 5 ~ 20 mm)

混 和 剤: AE 減水剤 (ボゾリス 78S)

(a) 修理ドック



(b) 栈 橋



第3図 打設箇所
Fig. 3 Placing structures

4. 試験結果

4.1 試験項目

本試験で行った試験項目を第3表に示す。

4.2 フレッシュ性状

本試験で行った試験体作成時のフレッシュ性状を第4表に示す。ブリーディングは、既往の結果で SEC のほうが Non-SEC よりも小さくなる傾向を示す。今回の測定では、修理ドックの SEC はブリーディングが少なくなったが、栈橋に関しては少なくならなかった。セメントの種類によって、SEC ではブリーディングの減少が見られないケースがある。

第3表 試験項目
Table 3 Test items

性 状	測 定 項 目	測定方法
フレッシュ性状	スランブ, 空気量, 温度	JIS A 1101
	ブリーディング率	JIS A 1123
硬化性状	圧縮強度試験	JIS A 1108
	透水試験	インプット法
	促進中性化試験	高耐久性
	急速塩分浸透試験	AASHTO T277
	自然電位	ASTM C876
	全塩分量	JCI-SC5
	腐食面積率	画像解析

第4表 フレッシュ性状
Table 4 Property of fresh concrete

項 目	修理ドック		栈 橋	
	SEC	Non-SEC	SEC	Non-SEC
スランブ (cm)	15.5	17.5	15.5	14.5
空 気 量 (%)	5.0	5.5	3.6	6.0
コンクリート温度 (°C)	28.0	28.0	33.0	33.0
ブリーディング	率 (%)	1.93	2.80	3.58
	時間 (h)	4	3	5

4.3 圧縮強度試験

圧縮強度測定は、第5表に示す圧縮強度で実施する。

第4図に栈橋および修理ドックで使用したコンクリートについて、圧縮強度試験結果を示す。コンクリートは水中養生とし、温度は 20 ± 2 で制御した。栈橋のほうは W/C が 41%と低かったため、修理ドックで使用したコンクリートより圧縮強度の値が大きく、しかも SEC が 10%程度強度は高くなった。一方、修理ドックで使用したコンクリートに関しては 20 ~ 30%程度 SEC がさらに高くなった。

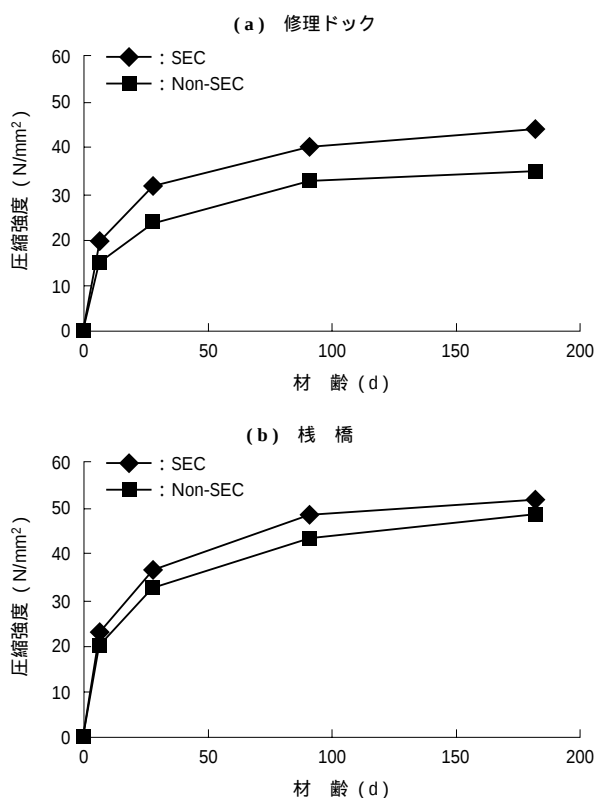
4.4 透水試験

4.4.1 試験目的

インプット法で実施する。この方法は一定の水圧を作用させ、一定時間内に供試体に圧入した水量、または浸透深さによってコンクリートの水密性を評価する。

第5表 圧縮強度測定
Table 5 Table of compressive strength

工事区分	コンクリート	測定日数 (d)	試験体本数 (本)
修理ドック	SEC	7, 28, 91, 182	各 3
	Non-SEC	7, 28, 91, 182	各 3
栈 橋	SEC	7, 28, 91, 182	各 3
	Non-SEC	7, 28, 91, 182	各 3



第 4 図 圧縮強度試験結果

Fig. 4 Test results for compressive strength of concrete

4. 4. 2 試験方法

(1) 供試体の製作方法

- ・ $\phi 100 \times 200$ mm の供試体を高さ 40 mm にカットし、試験供試体とする。
- ・所定の期間の水中養生を終了した供試体を 1 週間気中で乾燥させ、高さと直径を計測する。
- ・乾燥後、エポキシ樹脂でコーティングし、さらに乾燥させる。

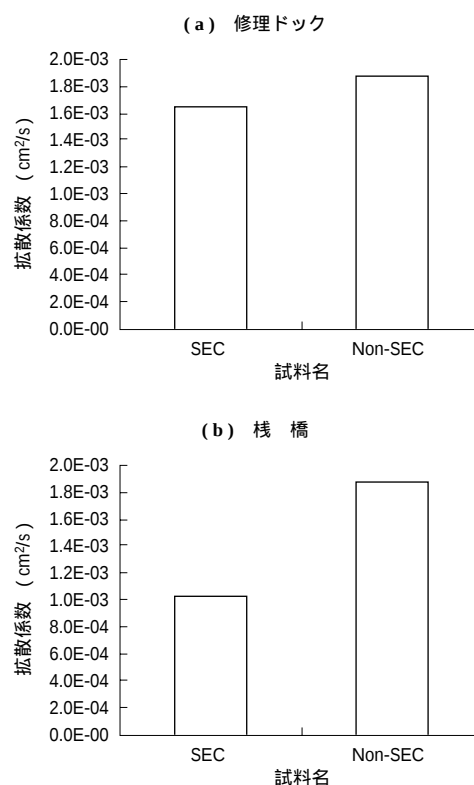
(2) 割裂方法

- ・減圧後すばやく供試体を圧縮試験機で割裂する。
- ・マジックですばやく浸透面を塗り、浸透面積を計測する。

4. 4. 3 試験結果

測定方法はインプット法で行った。条件は浸透圧力 490 kPa、浸透時間は 24 h である。第 5 図に透水試験結果を示す。まず、修理ドックで使用したコンクリートに関しては SEC および Non-SEC に明確な差異は観測されなかった。一方、栈橋で使用したコンクリートに関しては、Non-SEC の拡散係数が大きくなった。

ブリーディング試験の結果では、修理ドックで SEC が優れた結果になったが、栈橋では SEC と Non-SEC との差は確認されなかった。しかし、透水試験の結果では修理ドック



第 5 図 透水試験結果

Fig. 5 Test results for permeability of concrete

クでは SEC と Non-SEC の差が小さかったが、栈橋では SEC が拡散係数が小さくなった。両者の違いは、使用したセメントの種類と水セメント比である。修理ドックで使用したセメントは高炉 B 種であり、SEC が造殻効果を引き起こすが、Non-SEC より内部がち密になるとは限らない。一方、栈橋で使用した FMKC は、SEC にしても造殻効果を引き起こさないが、SEC コンクリートのほうが内部を緻密にし透水性に優れた結果を示すこととなった。セメント種類による SEC 効果の有無について検討を要する。

4. 5 急速塩分浸透試験

4. 5. 1 試験目的

電気化学的な方法を用いて実施する。試験は直径が 100 mm、厚さが 50 mm のコンクリートに 15 ボルトの直流定電圧を印加して、塩化物イオンを電氣的にコンクリート中を移動させる（電氣的泳動）。その移動速度が一定に達した状態のフラックスから、塩化物イオン拡散係数を計算する。また、フラックスが一定に達する時間は、試験するコンクリートの品質に支配される。

評価はネルンストblank式を利用して計算した塩化物イオン拡散係数を用いて行う。すなわち、塩化物イオン拡散係数が大きい場合には、塩分浸透性に対するそのコンクリートの抵抗性は小さいと評価され、小さい場合、その抵

抗性は大きいと評価される．本試験では修理ドックのみ SEC と Non-SEC で比較した．

4.5.2 試験方法

- (1) 所定の期間の水中養生を終了した標準円柱供試体を厚さ 50 mm にスライスする．このとき、標準供試体の上下 30 mm を除く中間部から 50 mm をスライスする．
- (2) 高さと直径を測定する．後の拡散係数の計算ではこの実測値を使用する．
- (3) 円周面をエポキシ樹脂でコーティングする．
- (4) コーティングが乾いた後、真空飽和处理する．これは、コンクリートを蒸留水で飽和させるためである．供試体が乾いていると、吸水によって塩水がコンクリート中へ移動することになる．真空飽和处理は、ASTM C 1202 の試験方法に準拠して行う．

セル内の室へ各試験溶液を注入する．溶液は、陰極側：0.51 mol/l NaCl 溶液（食塩 30 g，純水 970 g），陽極側：0.3 mol/l NaOH 溶液（目安：固形 NaOH 12g，純水 988 g）である．試験は、陽極側の Cl⁻ イオン濃度の増加割合が一定になるまで継続する．通常、最低 5 回の測定（目安：1 日おきの測定では 5 日間、2 日間では 10 日間など）でその割合が一定と認められた場合に実験を終了できる．実験の実施期間は、供試体の品質に大きく支配され、高品質ほど実験期間は長くなる．

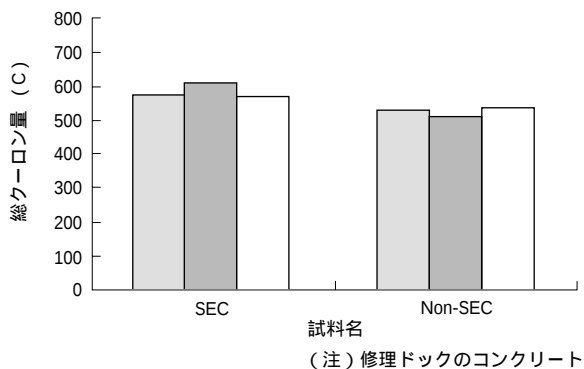
4.5.3 試験結果

修理ドックで使用したコンクリートの、急速塩分浸透試験結果を第 6 図に示す．試験体数は各 3 体である．SEC と Non-SEC の同材齢では、イオン透過量がほぼ同等であった．よって、塩化物イオンのコンクリート内部への浸透しやすさは SEC と Non-SEC では変わらないといえる．

4.6 自然電位測定

4.6.1 目的

SEC および Non-SEC の耐塩害評価を自然電位を測定す



第 6 図 急速塩分浸透試験結果

Fig. 6 Test results for resistance to chloride ion penetration

ることによって行う．ASTM C 876 に基づき鉄筋の健全性を評価する⁽⁷⁾．

4.6.2 測定方法

測定方法は、コンクリート表面を十分にぬらした後脱脂綿を当てて電極と鉄筋との間の電位を測定する．第 7 図に自然電位法による腐食判定を示す．測定した電位が卑（マイナス）側になればなるほど腐食が発生している確率が高くなる．

4.6.3 腐食促進方法

(1) 暴露試験体

海洋近くで、第 3 図に示す桟橋付近に試験体を暴露した．

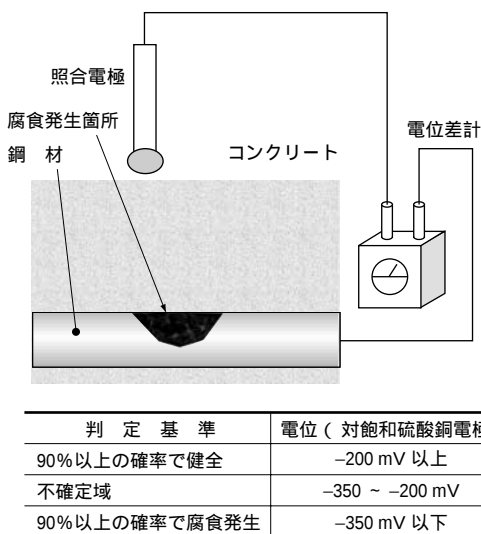
(2) 促進試験体

3 wt% の塩水が循環することによって、3 日間は試験体が浸漬、4 日間は乾燥状態となる．これを 1 週間 1 サイクルで繰り返す．

4.6.4 試験結果

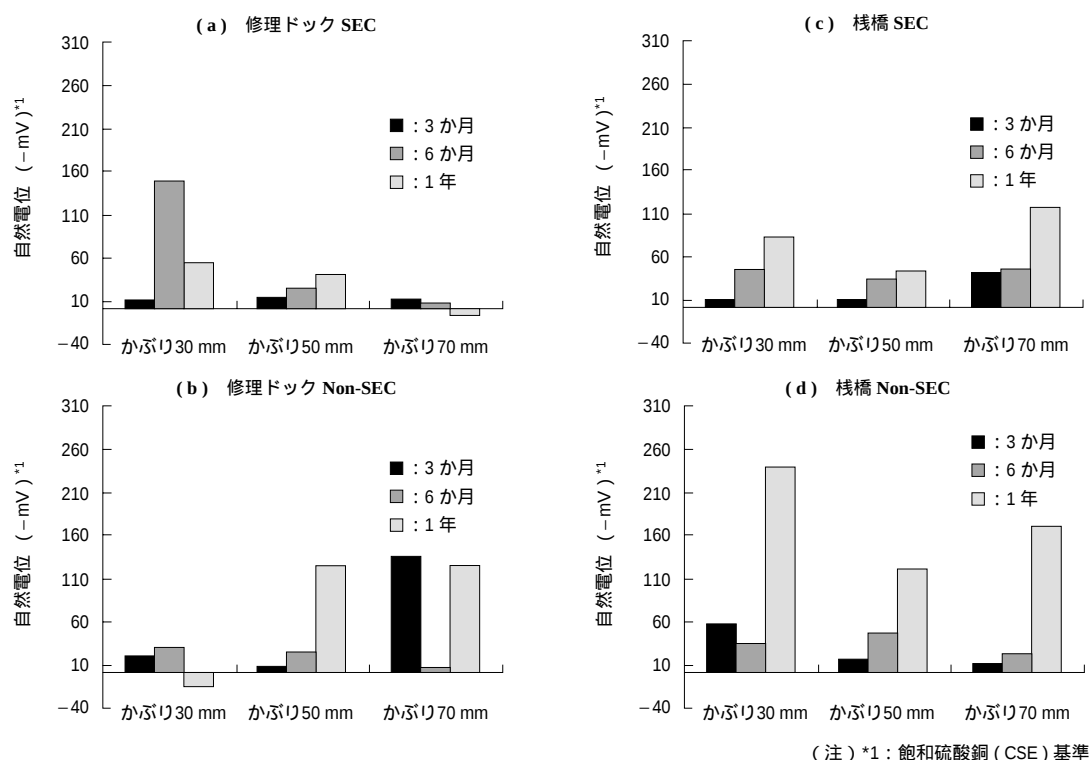
(1) 暴露試験体

第 8 図に暴露試験自然電位の測定を示す．現地で暴露した 100 × 100 × 400 mm の試験体にかぶり 30, 50, 70 mm の位置に D13（直径 13 mm）の鉄筋がある位置で測定したものである．電位も最大で -230 mV (vs.CSE) であり、ASTM の基準からでは、腐食が発生していない．海岸に暴露していても、直接波しぶきが掛かることはないでコンクリート表面にある塩化物イオン量はわずかである．かぶり厚さによる差も特に生じていないことから、鉄筋の表面に塩化物イオンが到達していないものと思われる．



第 7 図 自然電位法による腐食判定

Fig. 7 Decision of corrosion condition by half-cell potential test



第 8 図 暴露試験自然電位
Fig. 8 Results of half-cell potential test for exposure specimens

(2) 促進試験体

第 9 図に促進試験自然電位の測定を示す。腐食促進試験体は、 $\phi 100 \times 200$ mm の大きさに D13 鉄筋がかぶり 30 mm, 50 mm の位置にある鉄筋の電位を測定したものである。塩水乾湿繰返しを行ったため、かなりの量の塩化物イオンがコンクリート内部に浸透したと思われる。第 9 図に示すように、かぶりが 30 mm と 50 mm では大きな差は見られなかったが、50 mm でも大量に塩化物イオンが侵入している。修理ドックが桟橋よりも自然電位の値が相対的に卑であることは、水セメント比が大きいため、塩化物イオンが多く侵入したことによる。SEC と Non-SEC とでは、桟橋は差が見られなかったが、修理ドックの SEC 電位は貴であり、腐食が Non-SEC よりも少ない。

4.7 全塩分量

4.7.1 コンクリートサンプリング方法

試験体は、塩水乾湿繰返しで用いた腐食促進試験体を用いた。なお、コンクリートのサンプリングの方法は第 10 図の試験体割裂に示す鉄筋周りのコンクリートをドリルで所定の量が得られるまで掘削した。その後コンクリート中の全塩分量を JCI-SC5 に準拠し電位差滴定で求めた⁽⁸⁾。

4.7.2 試験結果

第 11 図にコンクリート中の全塩分量の試験結果を示す。

水セメント比は、修理ドックが桟橋よりも大きいため、修理ドックの塩化物イオン量が大きくなった。また、かぶりが小さいほうは塩化物イオンの量が多くなった。SEC と Non-SEC の違いで、桟橋では SEC が塩化物イオンが若干多かったが、修理ドックは Non-SEC のほうが多かった。

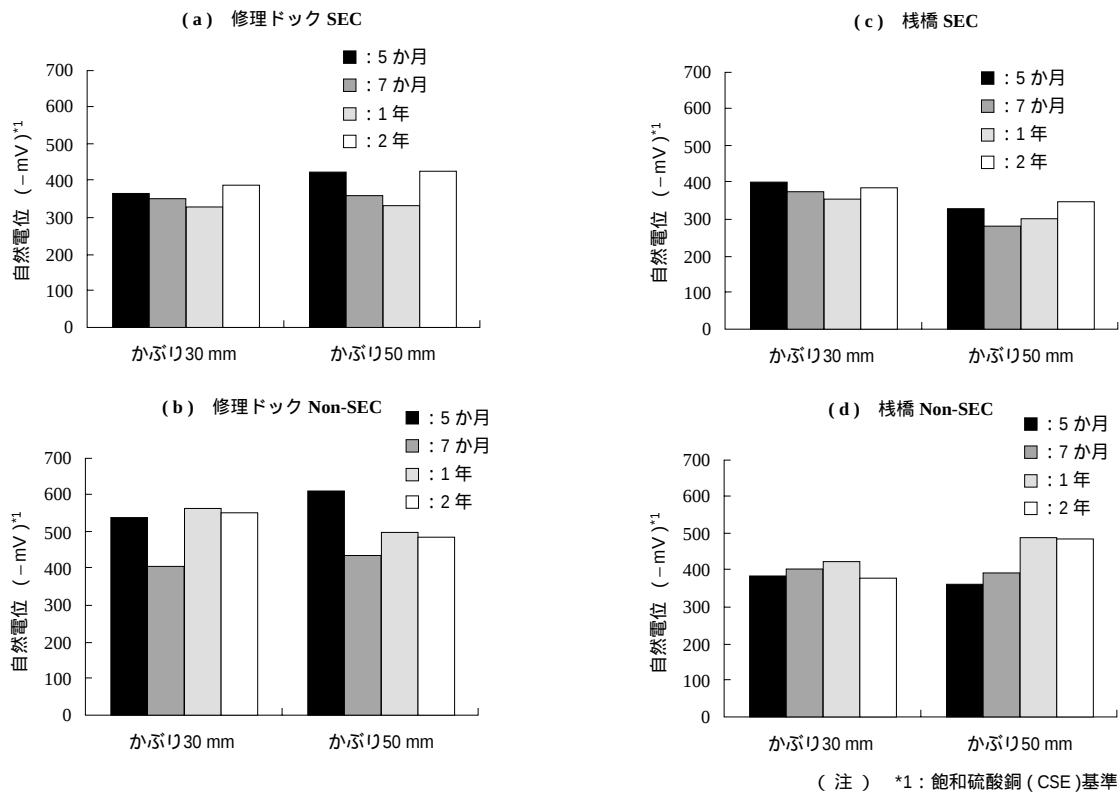
桟橋は SEC と Non-SEC との間にブリーディング率に差がなく、塩化物イオン浸透量に差が見られなかったが、修理ドックは第 2 表に示すとおり SEC のブリーディング率は小さくなったため、SEC の塩化物イオン量が小さくなった。しかし、第 5 図の透水試験と第 6 図の塩化物イオン浸透の結果では、塩化物イオン量との間の相関性は小さいため、コンクリートのち密性よりも鉄筋周りのブリーディングに影響を受けていると思われる。

4.8 腐食面積率

塩水乾湿繰返しによって 2 年間腐食促進させた試験体を、第 10 図のように割裂して鉄筋を取り出した。腐食面積率は、鉄筋表面にトレーシングペーパーを巻き付け、腐食した箇所をトレースし画像解析で算出した。

4.9 試験結果

第 12 図に、腐食位置をトレースした鉄筋の展開図および画像解析から算出した腐食面積率測定値を示す。黒色の部分が腐食した箇所である。桟橋と修理ドックでは、修理



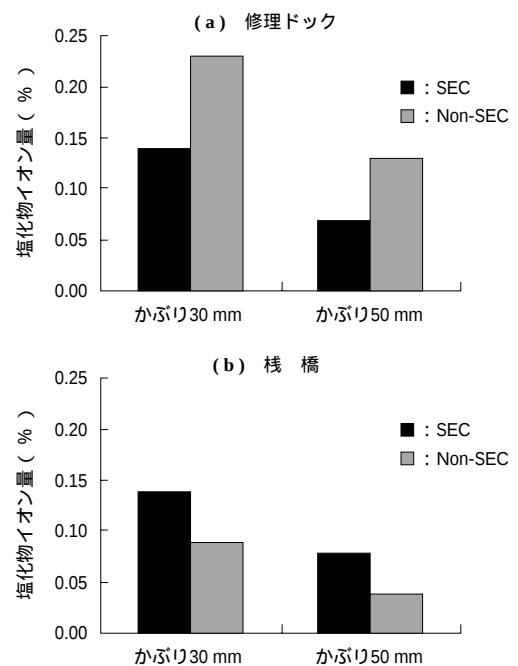
第 9 図 促進試験自然電位
Fig. 9 Results of half-cell potential test for acceleration specimens



第 10 図 試験体割裂 (単位: mm)
Fig. 10 Picture of splitting specimen (unit: mm)

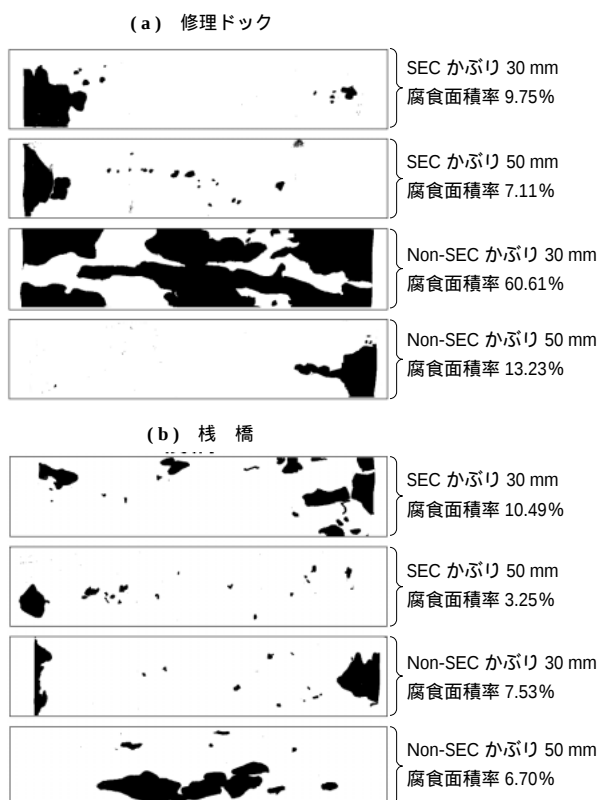
ドックの腐食面積率が大きく、水セメント比が栈橋より大きいと思われる。また、かぶりの違いでは、30 mm が 50 mm よりも腐食面積率が大きく、腐食が激しいことが分かった。

SEC と Non-SEC の違いでは、栈橋の同かぶりでは差が現れなかったが、修理ドックの SEC は腐食面積率が小さく、SEC のほうが優れた結果となった。栈橋と修理ドックの両者におけるコンクリート物性の違いは、セメントの種類、水セメント比でありセメント種類によっては SEC の効果が現れないものがある可能性を示唆している。また、水セメント比が大きいコンクリートについては、SEC の造殻



第 11 図 コンクリート中の全塩分量
Fig. 11 Results of amount of all salt in concrete

効果によってブリーディングを小さくできるため、鉄筋付近に内部ブリーディングを小さくすることができる。しかし、水セメント比が小さいコンクリートに関してはもともとブリーディングが少ないため、内部ブリーディングが生じにくく、SEC と Non-SEC との差は小さい。



第 12 図 腐食面積率測定値
Fig. 12 Results of measurements of corrosion area ratio

5. 結 言

本研究では、SEC コンクリートを海洋コンクリート（栈橋，修理ドック）に適用した場合の、主に、耐塩害性を評価するための試験を実施した。その結果以下のことが確認された。

- (1) フレッシュ性状としてブリーディング率を測定した。その結果、栈橋では SEC と Non-SEC の差が観測されなかったが、修理ドックでは SEC のブリーディング率が小さくなった。
- (2) 圧縮強度に関しては、栈橋については SEC 効果が小さかったが、修理ドックに関しては SEC のほうが優れた結果になった。
- (3) 透水試験，急速塩分浸透試験については、SEC と Non-SEC との差は見られなかった。
- (4) 耐塩害性能を調べるために、腐食促進させた試験体中の自然電位，全塩分量，腐食面積率を調べた結果、栈橋では SEC と Non-SEC との差は見られなかったが、修理ドックに関しては、SEC の耐久性が高い結果

になった。耐塩害性能に関しては、鉄筋周りのブリーディング率が影響していると思われる。

- (5) 今回の試験年数では、SEC と Non-SEC との差異を明確にできた部分と、できなかった部分があるので、試験条件を変えたり、長期での性状を観測するなどの研究が必要である。現在行っている暴露試験は今後も継続予定である。

フレッシュ性状，硬化性状を調べた結果，セメントの種類によってブリーディングが少ないなどの SEC 効果を示す場合と示さない場合があることが分かった。また，水セメント比が小さい場合においては SEC と Non-SEC との差は見られない。今後この件に関しては検討課題として取り組む。

参 考 文 献

- (1) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 1999 年 pp.75 - 79
- (2) 持田 豊：青函トンネルにおけるコンクリート技術の進歩 セメントコンクリート No.396 1980 年 2 月 pp.2 - 9
- (3) 岸谷孝一，伊東靖朗，加賀秀治，山本康弘：S.E.C. コンクリート工法 建築技術 No.380 1983 年 4 月 pp.87 - 104
- (4) 財団法人土木研究センター：性能向上のために分割練混ぜしたコンクリート SEC コンクリート 1998 年 8 月
- (5) 岩倉津一，桑山 賢，青木 潔：四万川ダムコンクリートの練混ぜ方法の比較検討について ダム技術 No.129 1997 年 6 月 pp.38 - 47
- (6) 辻 幸和，二羽淳一郎，伊東靖朗，岡村 甫：遠心力を利用した骨材の保有水試験方法 土木学会論文集 No.304 - 7 1987 年 8 月 pp.103 - 109
- (7) ASTM：Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete C 876 (2001) pp.452 - 457
- (8) 社団法人日本コンクリート工学協会：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）硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法 1987 年 4 月 pp.39 - 46