

塩分環境下におけるセグメント コンクリートの高耐久化に関する検討

子田 康弘¹・滝本 孝哉²・上原子 晶久³・飯田 博光⁴・岩城 一郎⁵

¹正会員 日本大学准教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

E-mail:koda@civil.cc.nihon-u.ac.jp

²フェロー会員 日本シビックコンサルタント(株) 事業統括本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

³正会員 弘前大学大学院助教 理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3)

⁴正会員 日本シビックコンサルタント(株) 事業統括本部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-26-2)

⁵正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

近年、社会情勢の変化による建設コストの縮減により、シールドトンネルは二次覆工を省略化する傾向にあり、一次覆工であるセグメントリングにはこれまで以上の高い耐久性が要求される。一方で、塩分環境下にあるシールドトンネルにおいて鋼材腐食によるさび汁の発生やかぶりコンクリートのはく落といった内面劣化の事象が報告されるようになり、シールドトンネルの塩害が顕在化しつつある。本研究では、シールドトンネルの高耐久化を目指し、塩害に対する高い耐久性能をセグメントリングに付加することを目的に検討を行った。実験では、セグメント仕様のコンクリートに各種塩害対策工を施して塩害促進試験を実施した。その結果、鋼材の腐食状況のモニタリングと塩分浸透状況の測定から厳しい塩分環境下でも各種塩害対策を施すことで塩分浸透を抑制することが可能なことを明らかにした。

Key Words : segment concrete, saline environment, high durability, steel corrosion, chloride permeability

1. はじめに

近年、シールドトンネルのセグメントリングは、建設コストの縮減の流れから二次覆工を省略する傾向が高くなっており、これまで二次覆工に求められた耐久性能を一次覆工であるセグメントリングが担う必要が生じている。一方で、図-1に示すように、海底下に構築したシールドトンネルのセグメントリングは、セグメント本体やジョイント部からの塩分混じりの漏水の浸透や飛散、ならびに道路トンネルなどにおいては換気風にも塩分が含まれていることから、セグメントリング内面は鋼材腐食の要因となる酸素と塩水混じりの水分の供給によって、塩害が生じる恐れのある環境下といえる。実際に塩害による覆工内面の劣化を補修する工事が必要とされる事象が報告されている¹⁾²⁾。昨今は、新設土木構造物に対する長寿命化の要求が高くなっており、シールドトンネルのセグメントリングもこれまで以上に塩害に対する高耐久化が求められるものと考えられる。

近年の鉄筋コンクリートセグメントは、施工時荷重と常時荷重に対してひびわれ幅を制御した設計を行って

いるが、施工途中の損傷や供用中の不同沈下といった想定外のひびわれに起因し、塩害によるセグメントリングの劣化が予想以上に進行することも考えられ、トンネル建設時点であらかじめセグメントコンクリートの耐久性を向上させる必要がある。しかしながら、セグメント仕様のコンクリートは、工場製品であるため高い品質が確保されている、または使用するコンクリートの配合が比

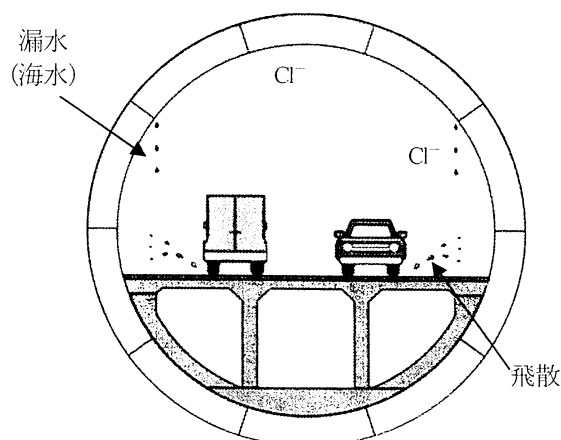


図-1 シールドトンネルにおける塩害劣化の概念図

表-1 実験条件と計測項目

供試体 名称	塩害対策 材料 主成分	供試体の特徴	計測項目			
			鋼材腐食モニタリング		塩化物 イオン 濃度	EPMA 面分析
			アノード ラダー	エキスパンシ ョンリング		
セグメント 配合	-	一般的なセグメント仕様のコンクリート	○	○	○	○
一般構造用	-	呼び強度 24MPa としたコンクリート	○	○	○	○
混合 A 材	無機質セメン ト結晶増殖材	空隙内にセメント結晶を増殖させ緻密化することで塩分の浸透を防ぐコンクリート	○	-	○	○
混合 B 材	アミノカルボ ン酸塩	塩分の浸透は許すが材料の構成分子が鉄筋に防錆層を形成し腐食を防ぐコンクリート	○	-	○	○
塗布 C 材	変性エチレン 酢酸ビニル共 重合樹脂	浸透面からの塩分の浸透を遮断されたコンクリート	-	-	○	○

較的低水セメント比であるといった理由からコンクリート自体の耐久性は確保されているという見方が先行し、特に塩害に対するセグメント仕様のコンクリートの耐久性を評価した研究事例³⁴⁾は多くは見当たらない現状にある。

以上のような背景より、本研究では、塩分環境下におけるシールドトンネルの高耐久化を念頭におき、セグメント仕様のコンクリートに塩害に対する高い耐久性能を工場製造時点で付与するという事前の方策を示すことを目的として、各種塩害対策工を施したセグメント仕様のコンクリートの塩害耐久性を実験的に評価した。実験では、コンクリート製造時に塩害対策材料を混和材として添加するタイプの混合系2種類とコンクリート硬化後にセグメントリング表面を保護する塗布系1種類を選定し、これと比較用の一般構造用配合のコンクリートを実験条件とした。実験は、各種塩害対策工を施した後に塩害促進試験を実施し、鋼材腐食状況のモニタリングと塩分浸透状況の測定を行った。そして、これらの結果に基づき耐久性評価を行った。

2. 実験概要

(1) 実験条件およびコンクリートの配合

a) 実験条件

本実験の条件は、表-1に示すように、セグメント仕様のコンクリート(以下、セグメント配合)の供試体を標準に設定し、塩害対策を施したコンクリート供試体3条件と、一般土木のコンクリート構造物に使用される場合が多い呼び強度24MPaのコンクリート(以下、一般構造用)供試体の計5条件の供試体とした。本実験で使用した塩害対策材料は、表-1に示すように、まず、コンクリート

自体の塩害に対する耐久性を高めることを目的とした材料(以下、混合A材、混合B材)である。これら材料の特徴は、コンクリートの製造時に混合するタイプであり、混合A材(主成分：無機質セメント結晶増殖材)はセメント結晶の増殖による緻密化で塩化物イオンの浸透を防ぐ効果を有しており、これに対して混合B材(主成分：アミノカルボン酸塩)は鋼材に防錆皮膜を形成し腐食を防ぐ効果を有している。また、コンクリートへの塩化物イオンの浸透を遮断する材料(以下、塗布C材)も実験条件に加えている。塗布C材(主成分：変性エチレン酢酸ビニル共重合樹脂)は、コンクリート硬化後、コンクリート表面に塗布するタイプである。

b) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)を使用した。細骨材は、砕砂(埼玉県秩父郡小鹿野町両神産、表乾密度 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ 、硬質砂岩)、粗骨材は、碎石(埼玉県秩父郡小鹿野町両神産、表乾密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ 、硬質砂岩)を使用した。また、混和剤として高性能減水剤(セグメント配合、混合A材、混合B材)とAE減水剤(一般構造用)を使用した。

c) 配合

コンクリートの配合を表-2に示した。供試体の配合条件は、S配合(セグメント配合と塗布C材に使用)、混合A配合(混合A材に使用)、混合B配合(混合B材に使用)、およびN配合(一般構造用に使用)の4種類である。表より、粗骨材の最大寸法 $G_{\max}$ は20mmであり、目標スランブを6cm(S配合、混合A配合、混合B配合)と8cm(N配合)、目標空気量Airを1.5%(S配合、混合A配合、混合B配合)と4.5%(N配合)とした。水結合材比(W/B)と水セメント比(W/C)は、S配合が34.9%、混合A配合が36.4%、混合B配合が34.9%であり、N配合は64.0%とした。

なお、圧縮強度は、塩害促進試験開始日材齢(材齢28

表-2 コンクリートの配合

配合名	G _{max} (mm)	スラ ンプ (cm)	W/C (%)	W/B (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
							W	C	A 材	B 材	S	G	AD	AE
S 配合	20	6.0	34.9	-	1.5	43.5	136	390	-	-	850	1111	9.69	-
N 配合		8.0	64.0	-	4.5	48.8	162	253	-	-	936	989	-	2.68
混合 A 配合		6.0	-	36.4	1.5	43.5	142	370	20.0	-	842	1100	9.69	-
混合 B 配合			-	34.9		43.5	136	390	-	0.6	850	1111		-

AE:AE 減水剤 AD:高性能減水剤

日)で、S配合が75.8 MPa、混合A配合が81.5 MPa、混合B配合が80.0 MPaであり、N配合は30.0MPaであった。

(2) 供試体の形状

本実験の供試体形状は、1)高さが130mm、幅が360mm、長さが500mmの版状供試体と、2)高さが150mm、幅が150mm、長さが150mmの立方体供試体の2種類である。これらの用途としては、版状供試体と立方体供試体を用いて塩害促進による鋼材の腐食状況のモニタリングを行った。立方体供試体はこの他に、塩化物イオンの浸透状況を把握するため、濃度分布の測定とEPMAによる面分析に使用した。

また、塩分の浸透面は、型枠底面としており、それ以外の面は、全て塩害促進試験前に予めエポキシ樹脂によりシールした。

(3) 塩害促進試験の概要

塩害促進試験は、図-2に示す本学所有の大型環境試験装置を使用した。この装置は、内装耐塩害仕様の恒温恒湿室であり、制御プログラムにより温度が-30℃～+80℃、相対湿度が40%～90%RHの範囲で可変運転が可能な実大レベルの供試体(質量で2.8ton未満)も設置できる装置である。

塩害の促進方法は、図-3に示すように、大型環境試験装置室内を温度40℃、相対湿度40%の定値に制御し、10%NaCl水溶液に各供試体を浸漬させ、3.5日毎に乾燥状態と湿潤状態を繰り返すもので、実環境よりも塩分の浸透を促進させる実験⁹⁾を行った。

本実験の塩害促進期間は、この乾湿の繰返しサイクルを159日間実施したものであり、塩害促進試験終了後は、実験室内に静置させた。

(4) 塩害耐久性の評価方法

a) 鋼材腐食のモニタリング

鋼材の腐食状況のモニタリングは、塩害促進試験実施中の傍から随時腐食状況を計測することが可能なアノード・ラダー・システム⁹⁾(以下、アノードラダー)とエキスパンション・リング・システム⁷⁾(以下、エキスパンシ

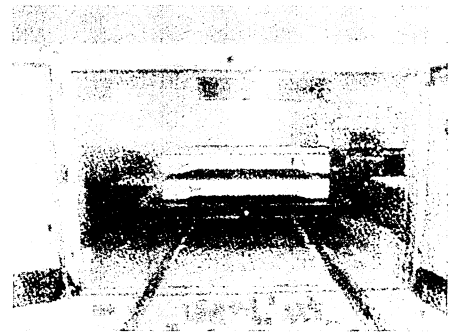


図-2 大型環境試験装置

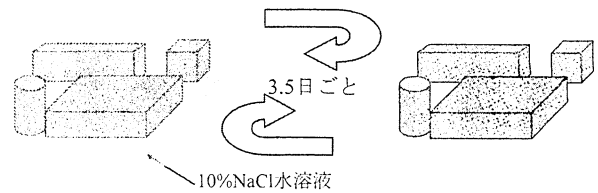


図-3 塩害促進試験の方法

ンリング)を採用した。この鋼材腐食のモニタリングシステムは、陽極となる腐食検知センサ(アノード)と陰極(カソード)、および測定器により構成されている。図-4と図-5は、アノードラダーとエキスパンションリングを供試体に設置した状況を示す図である。まず、図-4に示すアノードラダー(版状供試体)は、鉄筋を模擬した6本の腐食検知センサ(図-4中の●)が梯子状に設置された形状であり、主に新設構造物を対象としたモニタリングシステム⁹⁾で供試体作製時に設置した。次に、図-5に示すエキスパンションリング(立方体供試体)は、6本の腐食検知センサ(図-5中の■)が直径φ56mmのチタン製の円柱と一体化した形状であり、既設構造物のモニタリング用に考案されたシステム⁹⁾であり、供試体をコア抜きし設置した。システムの仕組みは、コンクリート中の腐食検知センサの腐食により形成される腐食電池の電位と電流を測定するもので、深さ方向にアノードを設置するため塩分浸透面からどの位置まで腐食が生じているかがわかる。腐食は、両システムとも電位-150mV以下、電流-15μA以下で腐食可能性領域と判定される⁹⁾。腐食検知セ

ンサの位置は、図-4と図-5中にA1からA6の記号で示しており、両システムともに供試体浸透面から14mm(A1), 25.5mm(A2), 37mm(A3), 48.5mm(A4), 60mm(A5), 71.5mm(A6)の深さにある。また、モニタリングは、3.5日間隔で実施した。

アノードラダーは、セグメント配合、一般構造用、混合A材、混合B材に、エキスパンションリングは、セグメント配合と一般構造用にそれぞれ設置した(表-1参照)。エキスパンションリングによるモニタリングは、システムの仕組みがアノードラダーと同じであるため、アノードラダーのモニタリング結果の検証とシステム間の比較を行うものである。なお、塗布C材は、塩分の浸透が遮断されているかを評価するものでこのモニタリングは実施していない。

b) 塩化物イオン濃度分布測定

塩化物イオン濃度分布の測定は、立方体供試体より採取したφ50mm、長さ150mmのコアを用いて行った。計測方法は、JIS A 1154 : 2003¹⁰⁾に従ったもので、イオンクロマトグラフ法により塩化物イオン濃度を計測した。塩化物イオン濃度の測定は、表-1に示すように、全条件で実施した。

c) EPMAによる面分析

EPMAによる面分析は、土木学会の規準JSCE-G574-2005¹¹⁾に従った。分析は、立方体供試体より採取したφ25mm、長さ150mmのコアを浸透面より80mm、その直交方向に25mm、厚さ11mmのコンクリート板に整形した試料を用いた。EPMAによる面分析は、表-1に示すように、全条件で実施した。表-3には、EPMAの面分析条件を示した。

3. 鋼材腐食のモニタリングによる腐食判定

(1) 電位の経時変化

a) アノードラダー

鋼材腐食のモニタリングは、253 日間実施した。このうち、塩害促進試験開始より、159 日間は塩害促進期間であり、残りの 94 日間は実験室内にて乾燥状態で静置し保存した。室内保存中は、約 50 日間の測定休止期間を設けた後にモニタリングを再開した。なお、ここで示す鋼材腐食のモニタリング結果は、電位の経時変化である。本実験の電流の測定結果に関しては、電位に比べ変動が極端に大きくばらつきがあり、測定値の信頼性が低いと判断し、本実験ではモニタリングの目安値として扱っているため本稿では省略した。

図-6は、アノードラダーの電位の経時変化である。図に示すように、塩害促進期間中の電位は、供試体条件を

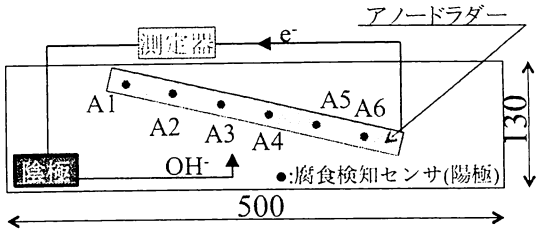


図-4 アノードラダーの概要

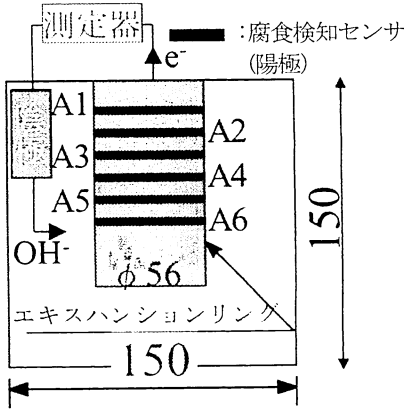


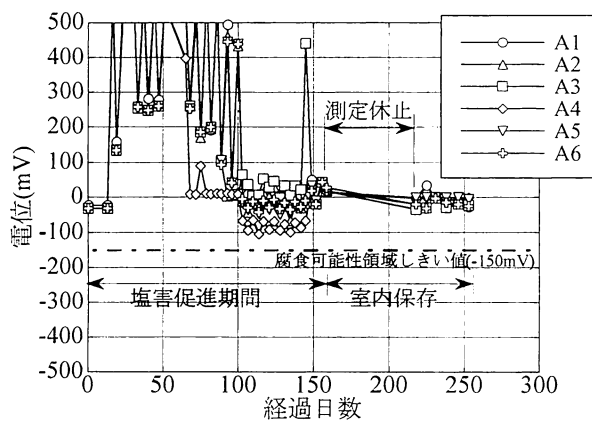
図-5 エキスパンションリングの概要

表-3 EPMA面分析条件

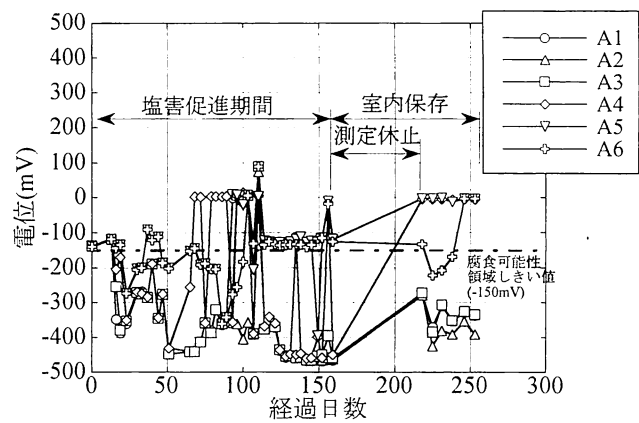
測定元素	塩素 Cl ⁻
加速電圧	15kV
照射電流	5.0×10 ⁻⁸ A
プローブ径	100μm
ピクセルサイズ	100×100μm
単位計測時間	50msec

間わず値が大小に繰り返し変動する傾向にある。これは、乾燥状態と湿潤状態の繰り返しの影響を受けているためで、概ね乾燥状態では電位が小さく、反対に湿潤状態では電位は大きくなる傾向であった。また、図より、塩害促進試験終了後の室内保存期間を見ると電位が安定していることがわかる。これは、保存環境は湿度一定環境ではないものの供試体への塩分供給がなくなり、乾湿の繰り返しに比べある程度供試体内部が乾燥したことが要因と考えられる。

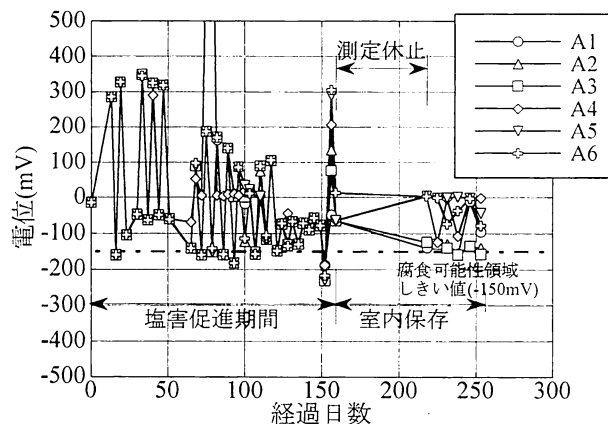
次に、供試体の腐食状況についてモニタリング最終日の253日目に着目してみると図-6(a)、図-6(c)、図-6(d)より、セグメント配合、混合A材、および混合B材は、A1~A6までの全てのセンサで腐食可能性領域(-150mV以下)に達しておらず、供試体内部が腐食性環境にある可能性は非常に低いと判断された。ただし、混合A材は、A3のセンサのみ若干腐食可能性領域に達するという結果になっている。しかし、塩分の浸透方向が一方向であること、A1とA2のセンサが腐食可能性領域にないことから、このA3の測定結果は誤差と判断している。これ



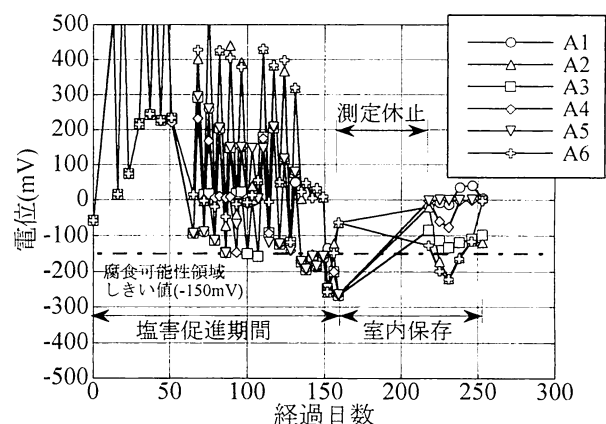
(a) セグメント配合



(b) 一般構造用

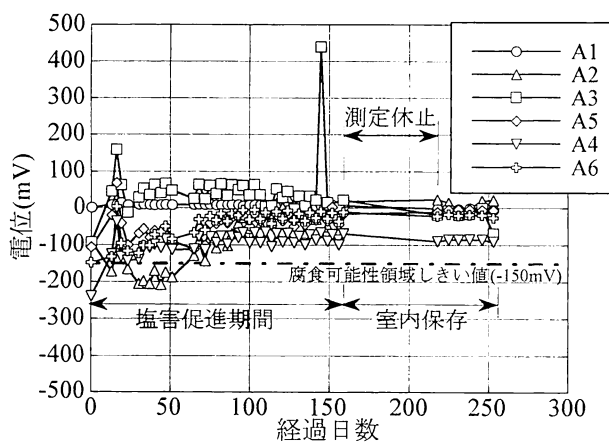


(c) 混合A材

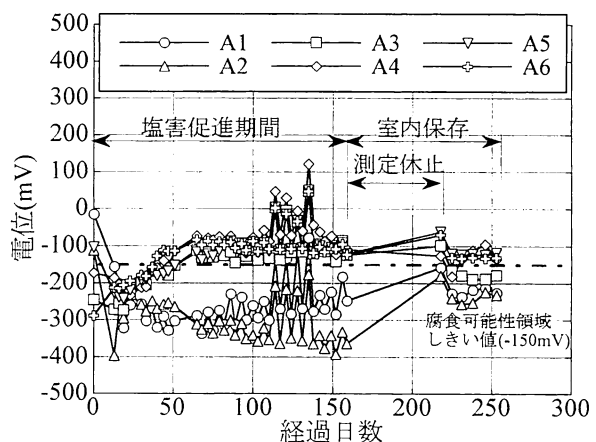


(d) 混合B材

図-6 アノードラダーの測定結果



(a) セグメント配合



(b) 一般構造用

図-7 エキスパンションリングの測定結果

に対して図-6(b)の一般構造用は、A1、A2、A3と浸透面より3番目のセンサまで腐食可能性領域に電位が達していた。これより、供試体内部は、浸透から37mmまでが塩分の浸透によって、鋼材が腐食しやすい腐食性環境にある可能性が高いと判断された。

b) エキスパンションリング

図-7は、エキスパンションリングの測定結果を示す図である。図より、アノードラダーの測定結果と同様に塩

害促進期間中は電位が変動する傾向にあるがアノードラダーよりはその変動幅が小さい。また、253日目の結果は、図-7(a)のセグメント配合と図-7(b)の一般構造用の両者ともアノードラダーと同じく、セグメント配合がA1~A6までの全てのセンサで腐食可能性領域に達しておらず、供試体内部が腐食性環境にある可能性は非常に低く、反対に一般構造用ではA1~A3までが腐食可能性領域に電位が達しており、ここまでが腐食性環境と判断され

表-4 電位による鋼材の腐食判定(モニタリング253日目)

センサ位置	アノードラダー				エキスパンションリング	
	セグメント配合	一般構造用	混合 A 材	混合 B 材	セグメント配合	一般構造用
14mm(A1)	○	×	○	○	○	×
25.5mm(A2)	○	×	○	○	○	×
37mm(A3)	○	×	○	○	○	×
48.5mm(A4)	○	○	○	○	○	○
60mm(A5)	○	○	○	○	○	○
71.5mm(A6)	○	○	○	○	○	○

た。

(2) 電位による鋼材の腐食判定

表-4は、図-6と図-7に示した電位の測定結果を整理した表であり、○は電位が-150mVよりも大きく、×は-150mV以下を表している。つまり、×は腐食可能性領域に達していることを意味する。なお、表-4の腐食判定は、253日目の結果である。表より、一般構造用は37mm位置までが腐食性環境にある可能性が高いと評価されるが、それ以外の供試体は、コンクリート内部が腐食性環境には達していない。

鋼材腐食のモニタリング結果より、アノードラダーとエキスパンションリングは、同様な精度で測定されることを確認し、加えて、セグメント配合、混合A材、および混合B材は、浸透面付近も含め、鋼材が腐食するような内部の環境にはなく、一般構造用のみコンクリート内部が浸透面より37mmまで鋼材が腐食しやすい環境にあると考えられた。

以上のことから、同様の塩害環境下に置かれた場合、一般的な土木構造物に用いられるコンクリート(一般構造用)では、塩害による早期劣化が生じる場合においても、水セメント比や水結合材比を低減させたセグメント配合と各種塩害対策を施したコンクリートでは、劣化の兆候は現れず高い耐久性を有することが示唆される。

4. 塩化物イオン濃度分布による塩分浸透性

(1) 塩化物イオン濃度分布の測定結果

図-8は、塩害促進試験終了時(159日目)のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示した図である。図より、まず、セグメント配合と一般構造用を比較すると一般構造用は、水セメント比が大きいいため、セグメント配合に比べ約2倍の浸透面から70mmの深さまで塩化物イオンが浸透していた。また、浸透面から50mm位置までは鋼材

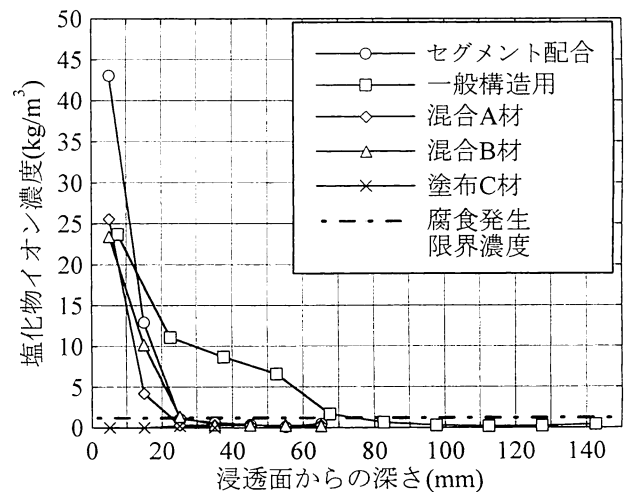


図-8 塩化物イオン濃度分布(塩害促進試験159日)

腐食発生限界濃度(1.2kg/m^3)を大きく超える塩化物イオン濃度が検出されており、3. (2)の腐食判定結果と整合する。次に、混合A材と混合B材を比較すると、混合A材の方が塩分浸透を許容する混合B材より浸透面から15mm位置での塩分浸透が抑制されていることが分かる。これは、混合A材による遮塩効果によるものと思われる。また、混合B材でもセグメント配合より同一位置の濃度が低い傾向にあった。そして、塗布C材は、塩化物イオンが浸透しておらず表面塗装による遮塩効果が発揮されたと考えられる。このように、塩化物イオン濃度分布の測定結果には、各供試体の特徴による塩分浸透性が明確に表れていた。

(2) EPMAによる面分析結果

図-9は、塩害促進試験終了後に実施したEPMAによる面分析結果をコンターマップとして表した図である。図の上部が浸透面であり、浸透面より70mm付近までを示している。図より、浸透面より塩化物イオンが浸透し深さ方向に濃度が薄くなる様子がわかる。セグメント配合と各種塩害対策を行った供試体を比較すると、4. (1)で

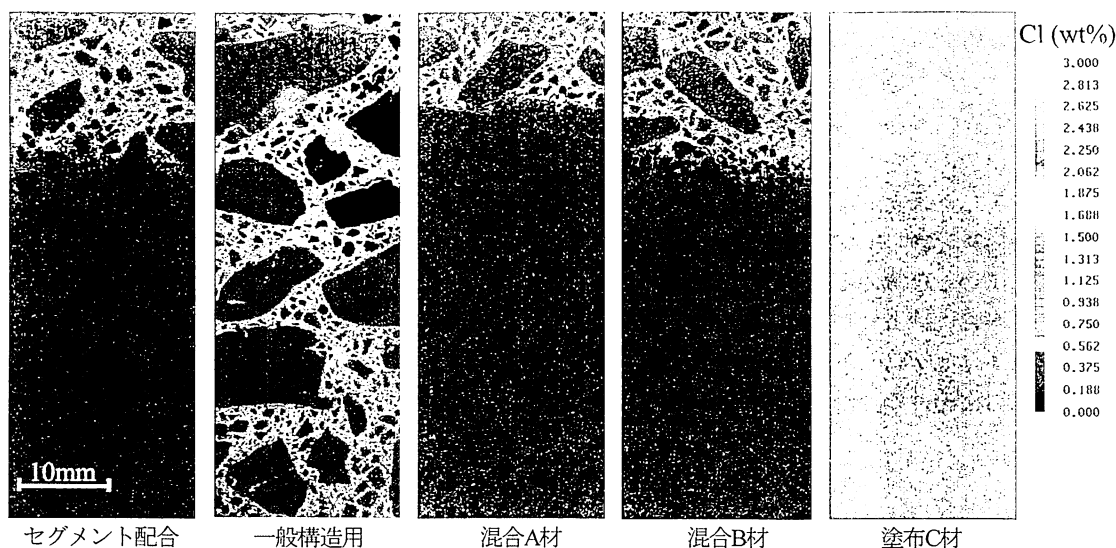


図-9 面分析のコンターマップ(塩害促進試験159日)

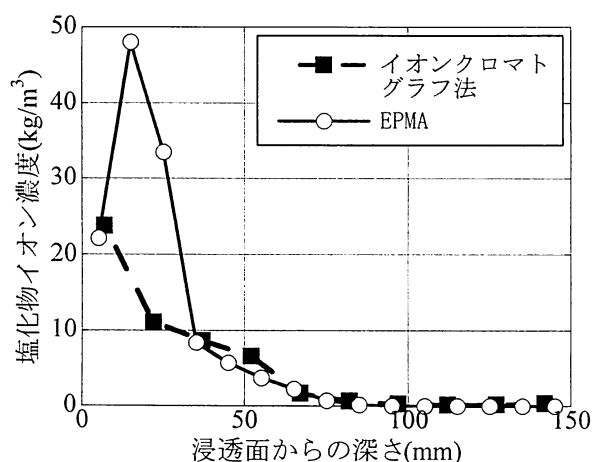


図-10 イオンクロマトグラフ法とEPMAの比較
(一般構造用, 塩害促進試験159日)

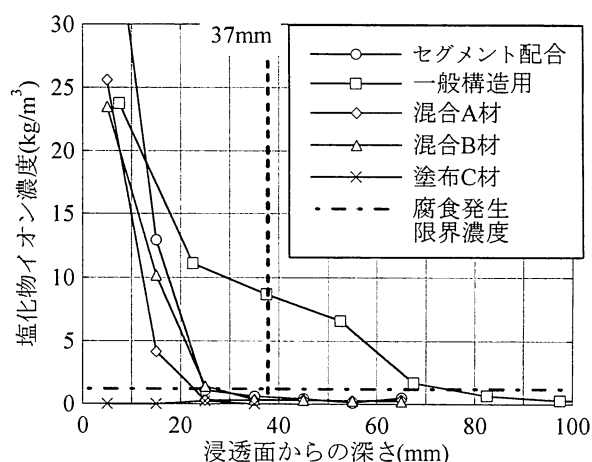


図-11 塩化物イオン濃度分布 (0mm-100mmの範囲)
(塩害促進試験159日)

述べたように、混合A材は、塩分浸透性が抑制されており、これに対して混合B材は鋼材防錆が目的のためセグメント配合と同程度の塩分の浸透を許容していることがわかる。ただし、浸透面付近に塩化物イオンが蓄積される傾向にあった。また、塗布C材は、全く塩分が浸透していないことが確認できる。一方、一般構造用に関しては、80mm近くまで明らかに塩化物イオンが浸透しており、塩害促進による著しい塩分浸透が確認された。

図-10は、EPMAの分析結果を基に求めた塩化物イオン濃度分布とイオンクロマトグラフ法の結果を比較した一例であり、一般構造用を示している。図より、浸透面付近は、両者の測定結果に差が認められるが、約30mm以降より両者の分布傾向がほぼ一致していることがわかる。浸透面付近の違いの理由は、試料の取り方に起因していると考えられる。つまり、イオンクロマトグラフ法では、φ50mmのコアより測定試料を採取し、一方で

EPMAはφ25mmの小径コアを用いている。これにより、小径コアの方が測定範囲が狭く、粗骨材が塩分濃度の測定値に影響しやすい状況にあると判断され、特に浸透面付近の高濃度の領域でその影響が顕著に表れているものと考えられる。しかしながら、20mm以降からは、イオンクロマトグラフ法による結果と調和しており、両者の分析結果は妥当な精度で測定されていると判断している。このような傾向は他の測定結果でも同様であり、約20mm以降の調和を確認している。

(3) 鋼材腐食のモニタリングとの比較

図-11は、図-8の塩化物イオン濃度分布より浸透面から100mmまでの範囲を再掲した図である。この図と表-4より、一般構造用のみ塩分浸透面より37mm位置まで腐食可能性領域に達するという判定であり、また、塩化物

イオン濃度分布についても一般構造用のみ塩分浸透面より約50mm位置までが鋼材腐食発生限界濃度(1.2kg/m³)を大きく超える結果を得た。これらを照合すると、一般構造用は、塩害促進試験により、塩分浸透面より約40mm付近までが鋼材の腐食の可能性があり、かつ鋼材が腐食しやすい環境下にあると考えられる。一方、セグメント配合、および塩害対策を施した供試体は、浸透面近傍だけに塩分が蓄積していると考えられ、遮塩効果が発揮されている状態が両者の比較よりわかる。また、鋼材腐食のモニタリングとイオンクロマトグラフ法という異なる試験方法による塩分浸透性の評価が整合していることも確認された。

(4) 塩害促進試験の促進効果の評価

本実験で実施した塩害促進試験が実環境における何年分の暴露期間相当かを推定するため、塩化物イオンの見かけの拡散係数の推定値に基づく塩化物イオン濃度分布の計算値を算出した。なお、推定には、高濃度の塩化物イオンが浸透面より50mm付近まで浸透した一般構造用の結果を用いた。

まず、塩化物イオンの見かけの拡散係数の推定値は、普通ポルトランドセメントに適用される式(1)¹²⁾により求めた。

$$\log_{10} D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (1)$$

ここに、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)、 W/C ：水セメント比である。

式(1)より、見かけの拡散係数 D の計算値は、一般構造用の水セメント比 W/C が64.0%であるため、324cm²/年となる。

次に、塩害促進試験の実環境における塩害年数の推定では、以下の仮定条件を設定し、式(2)¹²⁾により塩化物イオン濃度分布を算出した。

- 1) 塩化物イオンの見かけの拡散係数は、式(1)により求めた D (324cm²/年)を使用する。
- 2) 年数推定には、式(2)に示す浸透面における塩化物イオン濃度を一定とした拡散方程式を用いる。
- 3) 浸透面における塩化物イオン濃度は、実環境において最も厳しい条件を選定することとし、飛沫帯の塩化物イオン濃度である13.0kg/m³とする¹²⁾。
- 4) セグメントの一般的なかぶり厚と本実験の塩化物イオン濃度分布の測定結果を考慮し、浸透面より約25mmの位置で10 kg/m³程度の塩化物イオン濃度に達する年数を算出する。

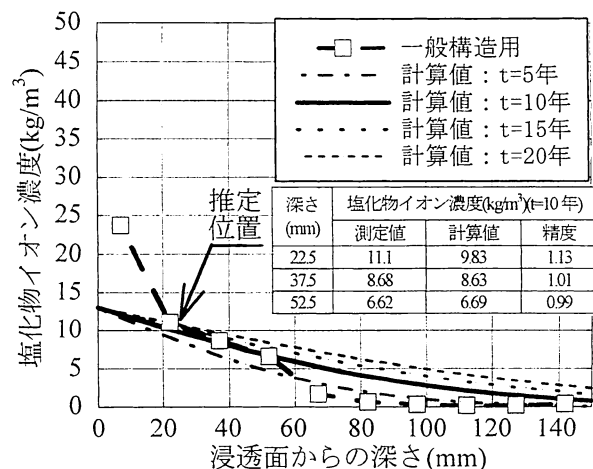


図-12 促進年数の推定(一般構造用)
(塩害促進試験159日)

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \quad (2)$$

ここに、 $C(x, t)$ ：深さ x (cm)、時刻 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_0 ：浸透面における塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D_{ap} ：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm²/年)、 erf ：誤差関数、 γ_{cl} ：予測の精度に関する安全係数(1.0)である。

図-12は、図-8に示した一般構造用の塩化物イオン濃度分布と式(2)による計算値を比較した図である。図中の計算値は、式(2)の時刻 t (年)を5年、10年、15年、および20年としたものである。図より、計算値は、式(2)の時刻 t を10年とした場合(実線)が概ね浸透面より約20mmから50mmの範囲にかけて測定値と調和した(図-12中の表参照)。つまり、本実験の塩害促進試験は、常温環境下よりも早く、かつ高濃度の塩分が供試体に浸透していたと判断され、一般構造用に対する塩害促進試験は、実環境で10年相当と推定された。よって、本実験の塩害促進試験は、飛沫帯という実環境で最も厳しい環境下における10年相当の塩害経過年数であり、このような実環境下では、一般構造用のコンクリートはかぶり位置において明らかに腐食性環境に達するが、一方で、セグメント配合および各種塩害対策工を施したコンクリートは、鋼材腐食発生限界濃度にも達していないものと予想された。

5. まとめ

本研究では、セグメント仕様のコンクリートと、混合系2種類、塗布系1種類の塩害対策工を施したコンクリート、および一般構造用のコンクリートを加えて、塩害に対する耐久性評価を行った。本研究で得られた結果を要

約すると以下ようになる。

- (1) 一般構造用では、塩害促進試験期間中にアノードラダー、エキスパンションリングともにA3(37.5mm)まで腐食可能性領域に達しており、浸透面から70mmの深さまで塩化物イオンが浸透していることから、本試験方法の顕著な促進性が確認された。
- (2) イオンクロマトグラフ法による測定結果とEPMAによる分析結果は、塩化物イオン濃度分布の比較から浸透面付近を除き、調和しており、両者の分析結果は妥当な精度で測定されていることを確認した。なお、表層付近は、試料採取方法の影響を受けて差が生じたと考えられる。
- (3) セグメント配合および各種塩害対策を行ったコンクリートは、塩害促進期間159日を経過した時点でもコンクリート内部が腐食可能性領域に達していないことを確認した。しかし、塩化物イオン濃度分布より、セグメント配合よりも混合A材と混合B材は、同一浸透深さにおける塩分濃度が低いような傾向を示し、特に混合A材で明らかであった。これは混合材の遮塩効果の特徴であり、混合A材は組織の緻密化で塩分浸透自体を防いでおり、一方、混合B材は塩分浸透を許容するが鋼材を防錆するという両者の特徴が塩分濃度分布に表れたと考えられる。塗布C材に関しては、塗布材が塩分浸透を遮断していたことを確認した。
- (4) 本実験の塩害促進試験について、実環境における暴露期間を推定した結果、鋼材位置近傍の塩化物イオン濃度より、一般構造用のコンクリートの場合、最も厳しい飛沫帯に10年程度暴露した状態と同程度であることが判明した。これより、飛沫帯のような厳しい塩害環境下でも、セグメント配合および各種塩害対策工を行ったコンクリートは、評価期間の範囲で塩分の浸透を十分に抑制する効果が期待できると推察される。

今後は、ひびわれの影響と鋼材の腐食に関する評価、および塩害促進試験期間を延長し、より長期の耐久性評価から各種塩害対策工の効果を究明する予定である。

謝辞：本研究の実施に当たっては、ジャパン・ザイペックス(株)、(株)美和テック、大関化学工業(株)の3社の御協力により実験材料の提供と供試体の作製を行いました。また、EPMA分析は弘前大学機器分析センターの装置を利用しました。ここに記して関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 大塚努，堀健三，山中耕太郎：千代田線隅田川シールドトンネル二次巻き工事の施工，土木学会第 61 回年次学術講演会概要集，第 VI 部門，pp.11-12，2006.
- 2) Otsuka, T., Kamel, I. A., : Rehabilitation of Ahmed Hamdi tunnel under the Suez Canal – Part I : study and design, *Tunnelling and Ground Conditions*, pp.601-608, 1994.
- 3) 例えば木村定雄，岡村直利，宇野洋志城，清水幸範，小泉淳：シールド工用コンクリート系セグメントの耐久性能と耐火性能，土木学会論文集 No.728/VI-58，pp.107-119，2003.
- 4) 例えば田辺将樹，佐藤豊，上原元樹，鈴木延彰，吉田聖浩：臨海部経年シールドトンネルの塩害および腐食メカニズムの解明とその対策，トンネル工学報告集第 15 巻，pp.355-362，2005.
- 5) 松田耕作，横田優，荻山和樹，松島学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.807-812，2008.
- 6) Schiessl, P., Raupach, M. : Monitoring system for the corrosion risk of steel in concrete structure, *CONCRETE INTERNATIONAL*, Vol.14, No.7, pp.52-55, 1992.
- 7) Raupach, M., Schiessl, P. : Monitoring the risk of reinforcement corrosion using the expansion-ring system, *Proceedings of the 1st fib Congress*, pp.171-178, 2002.
- 8) 長尾進，飯田博光，大塚孝義：アノード・ラダー式鉄筋腐食モニタリングシステムの適用事例，土木学会第 59 回年次学術講演会概要集，第 VI 部門，pp.191-192，2004.
- 9) 辻伸幸，向井浩三，綾田隆史，新井孝弘，鳥海廣史：エキスパンション・リングを用いた鋼材腐食モニタリング，土木学会第 59 回年次学術講演会概要集，第 VI 部門，pp.189-190，2004.
- 10) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [規準編] JIS 規格集，pp.472-481，2007.
- 11) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準，pp.297-307，2007.
- 12) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 維持管理編，pp.111-114，2008.

INVESTIGATION ON SEGMENT CONCRETE WITH HIGH DURABILITY UNDER SALINE ENVIRONMENT

Yasuhiro KODA, Takaya TAKIMOTO, Akihisa KAMIHARAKO, Hiromitsu IIDA
and Ichiro IWAKI

Recently, in order to reduce initial construction costs due to change in social situations, there has been a tendency to eliminate the construction of inner lining in shield tunnel. Therefore, the improvement of durability in segment

rings as a primary lining is required. On the other hand, the shield tunnel segment concrete under saline environments is severely damaged by chloride-induced deterioration, which is known as rust stain on concrete surface or spalling of concrete cover by steel corrosion. This study aims at investigating the segment concrete with high durability against chloride permeability and steel corrosion. In this experiment, the accelerated chloride permeability test for segment concrete specimens was conducted to give several countermeasure methods against chloride-induced deterioration. Then the monitoring of steel corrosion and the measuring of chloride permeability was examined. As the experimental results, it was confirmed to be able to remarkably control the chloride permeability under the severe saline environments by countermeasure methods against salt attack.