

論文 塩害環境下にある地下シールドトンネルの漏水履歴推定と鋼材腐食解析

高橋 佑弥^{*1}・石田 哲也^{*2}・山本 努^{*3}・小椋 紀彦^{*4}

要旨：塩分を含んだ河川の下に位置するシールドトンネルセグメントを対象として、既往の解析システムを用いた塩害進展期末予測を行った。対象構造物の塩分浸透および腐食状況に関する調査を行うとともに、作用する漏水履歴の各パラメータが塩分浸透挙動に与える影響について解析的検討を行った。それらの結果に基づいて、漏水履歴の推定および鋼材腐食解析を行い、ひび割れ発生時期を算定した。その結果、本研究で用いた解析手法により、現実に近い腐食進展状況を再現するとともに、止水を考慮した解析との比較を行うことで合理的な維持管理手法を選択できる可能性を示した。

キーワード：塩化物イオン、乾湿繰り返し、シールドトンネル、鋼材腐食、維持管理

1. はじめに

東京を中心とする首都圏には、これまでに多様な年代および品質の地下コンクリート構造物が建設されており、それらを保有する事業者は、限られた予算の中で膨大な数のコンクリート構造物群を戦略的に維持管理することが求められている。維持管理で考慮すべき劣化の一つとして、感潮河川近傍に位置する構造物の塩害がある。塩分が含まれた地下水が、施工等に起因するひび割れなどを通じた漏水として作用することによって、構造物内部の腐食が進展するという事例である。このような場所にあるトンネルは、海洋構造物同様の塩害リスクに晒されているとみなすことができ、腐食ひび割れに対する適切な予測および事前の対策が必要である。

このような背景のもと、著者らは東京大学コンクリート研究室で開発されてきた熱力学連成解析システム DuCOM¹⁾を用い、地下箱型トンネルの塩害進展期末予測の検討を行ってきた²⁾。現在の塩化物イオン分布をもとに、現在まで作用してきた漏水履歴を推定し、鋼材腐食解析を行うことで、塩害進展期末予測を合理的に行うことに成功している。一方、既報³⁾では、既存の解析システムに対して、低 W/C 材料を対象とした塩分浸透に関するモデルの高度化を行っている。ナノメートルサイズの空隙中の塩分移動および水分移動に関連する現象の定式化により、緻密な空隙構造を持つセメント材料中の精緻な塩分浸透現象の再現を可能にしている。

本研究は、箱型トンネルよりも比較的緻密なコンクリートで構成されたシールドトンネルを対象とし、高度化されたモデルを用いた解析システムを利用して漏水履歴推定および塩害進展予測を行い、合理的な維持管理手法を支援する評価手法を提案することを目的とした。

2. 対象構造物

2.1 対象構造物の概要

本研究の対象構造物は、東京湾の感潮域にある河川の下に位置するシールドトンネルである。トンネルは蒸気養生が施されたプレキャストコンクリートセグメントで構築されている。コンクリートの配合を表-1 に示す。型枠への打ち込み後、2 時間の前養生時間の後に、昇温速度 15~20°C/時、最高温度 60~65°C、等温保持時間 1~2 時間の蒸気養生が行われ、徐冷・脱型後に 7 日程度の水中養生が施されている。調査時の材齢は 43 年であり、セグメント間の目地及び裏込め注入孔を支配的な経路とした漏水が発生している箇所がある。

2.2 調査箇所・項目および調査結果

対象構造物について、100m 程の長さの区間より、漏水もしくは漏水跡の見られる 9 地点（以降、No.1 から No.9 とする）を選定し、塩化物イオン分布、圧縮強度、鉄筋径、かぶり、目視による腐食度およびその他外観変状を調査した。塩化物イオン分布は、採取したコアを用いて JSCE-G574-2010⁴⁾に従って EPMA により測定した。

表-1 シールドトンネルセグメントの示方配合

組骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 R
20	3~6	3	39.5	40	154	390	726	1123	1.95

*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 修士(工学) (学生会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課

*4 株式会社国際建設技術研究所 技術部 修士(工学) (正会員)

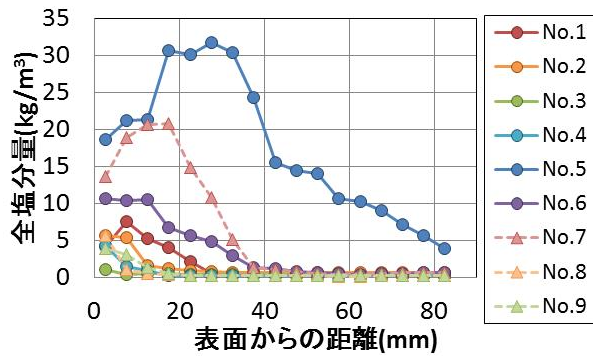


図-1 対象箇所9箇所の塩化物イオン分布

図-1に調査箇所9地点の塩化物イオン分布測定結果を示す。調査箇所は互いに近接しているにも関わらず、様々な塩化物イオン分布が得られている。プレキャストコンクリートのため施工に起因する品質変動は少ないと考えられることから、これら塩分浸透挙動の相違は、主に環境履歴、即ち、作用した漏水履歴の違いによるものと考えられる。表-2に対象箇所調査結果を示す。調査内容は、浮きや剥離等の腐食による外観変状の有無、鉄筋の目視による腐食度、採取コアの圧縮強度、そして腐食解析対象とした鉄筋のかぶりと鉄筋径である。鉄筋の腐食度はそれぞれ、0が腐食無し、Aが点錆び、Bが表面腐食、Cが浅い孔食、Dが断面欠損程度の腐食を表している。圧縮強度は、多くの箇所で80Mpaを超えており、比較的高品質なコンクリートであると判断される。また、塩分量が多い箇所で腐食も進んでいる傾向にあるが、No.9のように塩分量が少ないにも関わらず腐食による外観変状が見られるような箇所もあった。

2.3 解析条件および強度解析結果

対象構造物について、前述した解析システム¹⁾を用いて、長さ30cmの解析要素を作成し、一次元解析を実施した。表-1の配合条件を設定し、養生環境条件は、武井による実験的検討⁵⁾を参考に、打設後2時間後まで20℃封緘、2時間後から6時間後まで65℃蒸気養生、その後7日間20℃水中養生という境界条件を設定した。養生後は、20℃RH60%一定の環境条件とした。また、作用する漏水中の塩分濃度は、濃度についての調査結果および変動幅等の検討等が十分でないことから、本研究では海水と同等の3%一定と仮定することとした。

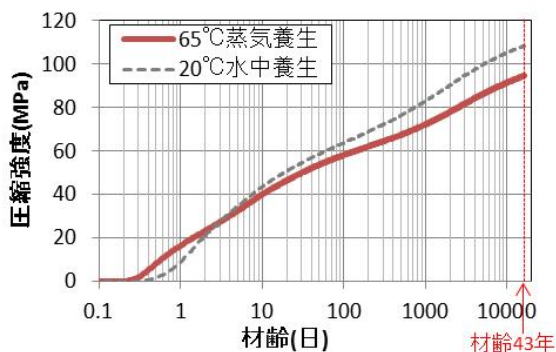


図-2 強度解析結果

表-2 対象箇所調査結果

調査箇所	外観変状	目視の腐食度	圧縮強度 (Mpa)	鉄筋径 (mm)	かぶり (mm)
No.1	無	0～B	73.3	13	12
No.2	無	0～A	84.2	9	9
No.3	無	0～A	80.0	13	18
No.4	無	A	72.5	16	20
No.5	有	A	86.1	16	33
No.6	有	B～D	65.7	13	11
No.7	有	0～A	81.4	16	25
No.8	無	0	85.0	13	17
No.9	有	A	85.7	9	5

以上のような条件で行った解析による強度発現の結果を図-2に示す。図には蒸気養生の他に20℃一定の水中養生条件を設定した結果も併せて示している。蒸気養生による早期の強度発現が表現されているとともに、43年材齢経過時の解析による強度は94Mpaであり、モデルでは配合下の理想的な材料分散を仮定していることを考えると、概ね良好に強度を追跡できているといえる。

3. 塩化物イオン分布と漏水履歴の関係についての検討

3.1 はじめに

鋼材腐食解析について、陸上にある海洋構造物の場合には、供用開始からほぼ同一の塩分供給環境条件が作用するとみなす事が出来るが、地下トンネルの場合には、漏水の開始時期や頻度等が不明なため、腐食解析にあたり、まず環境条件である漏水履歴を適切に設定することが必要である。従って、シールドトンネルにおける漏水履歴と塩分浸透挙動の関係を明らかにすることを目的とし、様々な漏水履歴を設定した解析を実施して、漏水履歴が塩化物イオン分布に与える影響について検討した。設定した漏水履歴の概要を図-3に示す。本研究で漏水履歴とは、開始時期、サイクル長、漏水日数の3つのパラメータで表される乾湿繰返パターンの総称を表すこととしている。漏水開始後は、同一の乾湿繰返しサイクルの漏水が現在まで続くと仮定した。本研究では、図-3にあるように、例えば、材齢15年経過時に漏水が発生し、サイクル長30日・漏水日数5日で漏水が発生する漏

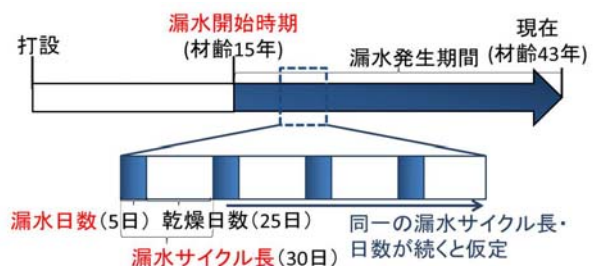


図-3 漏水履歴イメージ(15yより5d/30d)

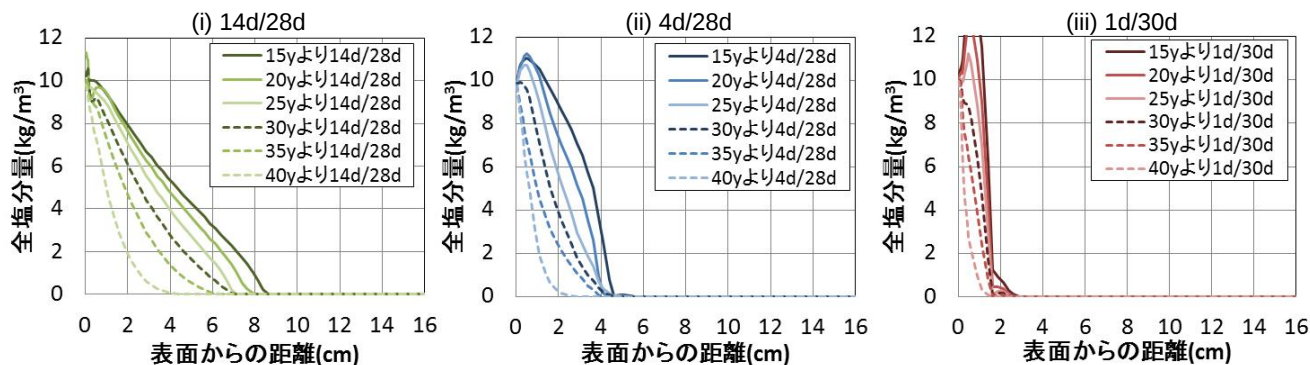


図-4 漏水開始時期を変化させた解析結果

水履歴の場合、「15y より 5d/30d」と表記する。

3.2 漏水履歴パラメータを変化させた塩分浸透解析

(1)漏水開始時期を変化させた解析結果

漏水サイクル長および漏水日数を一定とし、漏水開始時期を変化させた場合の材齢 43 年現在の塩化物イオン分布の変化について検討した結果を図-4 に示す。ここでは、漏水頻度として(i)14d/28d, (ii)4d/28d, (iii)1d/30d の3パターンを設定した。

結果を見ると、漏水頻度によって異なった塩分浸透挙動となることがわかる。(i)14d/28d の漏水頻度の場合には、漏水開始時期が早いほど塩化物イオンの浸透深さが大きくなっており、既往の研究²⁾と同様の結果が得られた。しかし、(ii)4d/28d の場合には深さ 4.5cm 程で、(iii)1d/30d の場合には深さ 2.0cm 程でそれぞれ浸透が停滞し、それより奥には塩分がほぼ浸透しない結果となった。

これら塩分浸透挙動の相違は、内部水分状態の違いによるものではないかと考えている。14d/28d のように湿潤期間の割合が比較的大きい場合には、乾燥により逸散する水が少なく、水が徐々に深部まで浸透して細孔中で移動経路としての連続パスを形成することが考えられる。よって、そのパスを通じて塩分が拡散でき、塩分浸透深さも増大していくものと解釈される。一方、4d/28d や 1d/30d のように乾燥期間の割合が大きい場合には、乾燥の度に内部の水分が逸散するために、湿潤領域が表層近傍に留まる。このような状況では、供試体内部は乾燥環

境が維持され、その結果塩分移動経路としての連続パスが形成されず、塩分の浸透深さは水の浸透深さに限定される。また、漏水日数が小さい程、水の浸透深さも小さいために、長期の塩分浸透範囲がより表層に限られる解析結果となっているのではないかと考えられる。このような挙動は、本対象構造物のような高い遮塩性を有する材料の特徴と言え、乾湿繰り返しサイクルなどの条件によっては、一般的な移流拡散則では説明できない特異な塩分浸透挙動が示されているといえる。

(2)漏水サイクル長を変化させた解析

漏水開始時期を 15 年、漏水日数割合(=漏水日数/漏水サイクル長)を 0.5 で一定とした上で、漏水サイクル長を変化させた解析結果を図-5 に示す。同じ漏水開始時期および漏水日数割合にも関わらず、漏水サイクル長が短い方が、塩分がより深部まで浸透する傾向にある結果となった。これは、漏水サイクル長が短い程、乾湿サイクル数が多く、比較的乾いた構造物表面から大きな毛管力とともに塩水が内部へ浸透する回数が多いからであると考えられる。漏水が作用する総時間が同じでも、異なる塩化物イオン分布となることが示されている。

3.3 解析結果のまとめ

様々な漏水履歴による塩分浸透解析の結果、漏水日数割合や漏水日数、漏水サイクル長によって、複雑に塩分浸透挙動が変化することが解析的に観察された。既往の研究²⁾では、塩分の浸透深さから一意に漏水開始時期を決定することができたが、本研究の対象構造物のような比較的品质の高いコンクリートでは、高い物質移動抵抗性に起因する複雑な水分挙動および塩分浸透挙動から、様々な要因が塩分浸透深さに影響し、体系だった漏水履歴推定方法を確認することが難しい。現時点では、本章で観察された塩分浸透と漏水履歴の各パラメータの関係について念頭に置きながら、網羅的に漏水履歴を設定して現在の塩化物イオン分布を再現する履歴を見つける他に方法がないが、本研究では、実際の漏水発生状況を鑑みて、いくつかの仮定を設けることで、可能な限り現実的な漏水履歴を推定することを試みることとした。

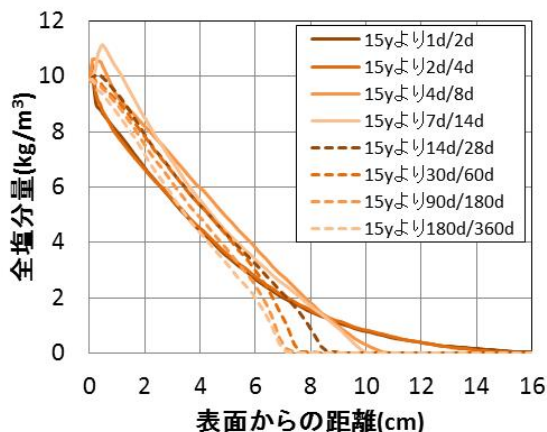


図-5 漏水サイクル長を変化させた解析

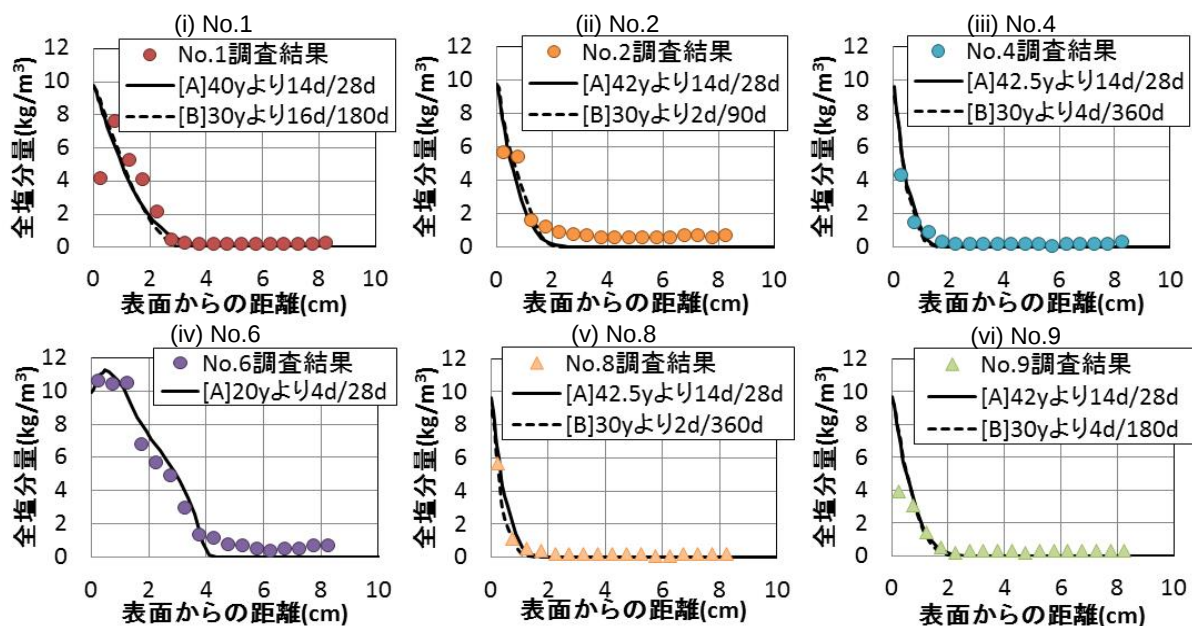


図-6 推定された漏水履歴結果と塩化物イオン分布解析結果

4. 漏水履歴の推定

4.1 漏水履歴推定条件

対象箇所に対して、環境作用の強さが異なる2つのシナリオを設定し、その中で網羅的に漏水履歴を設定して塩分浸透解析を行うことで、現在の塩化物イオン分布を再現する漏水履歴を特定した。設定した2つのシナリオは以下の通りである。

[A] 1か月以下の短サイクルかつ漏水日数割合0.1程度以上の高頻度の漏水が最近開始し、鋼材腐食が急速に進んでいるというシナリオ（高頻度シナリオ）

[B] 数か月以上の長サイクルかつ漏水日数割合0.1程度以下の低頻度の漏水が早期に開始し、鋼材腐食が徐々に進んでいるというシナリオ（低頻度シナリオ）

前者は潮位変動や日々の天気変化による地下水位変動等起因する漏水を、後者は季節変動による目地幅の変化等起因する漏水を想定している。複数のシナリオを設定することで、同一の塩化物イオン分布から推定され得る多様な漏水履歴と鋼材腐食量の変動幅についても把握が可能と考えた。ここで、低頻度シナリオの漏水履歴推定においては、これまでの現場における漏水状況調査より現実的な漏水開始時期の一つとして、材齢30年経過時を設定することとし、高頻度シナリオはそれよりも最近の漏水開始時期を設定することを基本とした。

4.2 漏水履歴推定結果

上記条件のもと、現在の塩化物イオン分布を再現する漏水履歴の推定を行った。しかし、9地点のうちNo.3は有意な塩分測定点が少なく推定が困難な事と、従って腐食速度も極めて遅いと考えられる事から本推定対象から外した。また、No.5とNo.7は、塩分量が極めて大きく、2.3節の条件では、妥当な漏水履歴を推定することが困難

だったことから、別途検討を行った。図-6に、残りの6地点について、推定した漏水履歴結果（図中凡例）と推定された漏水履歴のもと得られる塩化物イオン分布を示す。No.6は、高頻度で30年より早期に漏水が開始する履歴となったことから、高頻度のみの推定とした。結果得られた漏水履歴を見ると、高頻度の場合、ほぼ全ての箇所で漏水開始時期が現在より3年以内と極最近である結果となった。実際にこれら高頻度の履歴が現実的であると断言することは難しいが、腐食進展の速い危険側のシナリオとして、ひび割れ予測の想定に入れる重要性は高い。一方、低頻度の場合には対象箇所によって様々な漏水頻度の履歴が推定された。以上のように、同一の塩化物イオン分布から、環境作用の強さが異なる高頻度と低頻度の2つの漏水履歴が推定された。これら推定の妥当性については、今後現場でのモニタリング等による検証を行う必要があるが、本論文では、これらの履歴を用いて今後の鋼材腐食解析を行うこととした。

4.3 極めて塩分量の多い箇所の漏水履歴推定結果

塩分量が多い2地点については、変動パラメータに漏

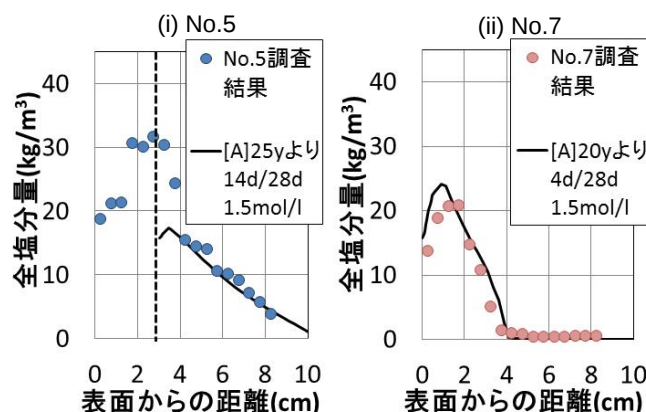


図-7 高塩分濃度箇所の漏水履歴

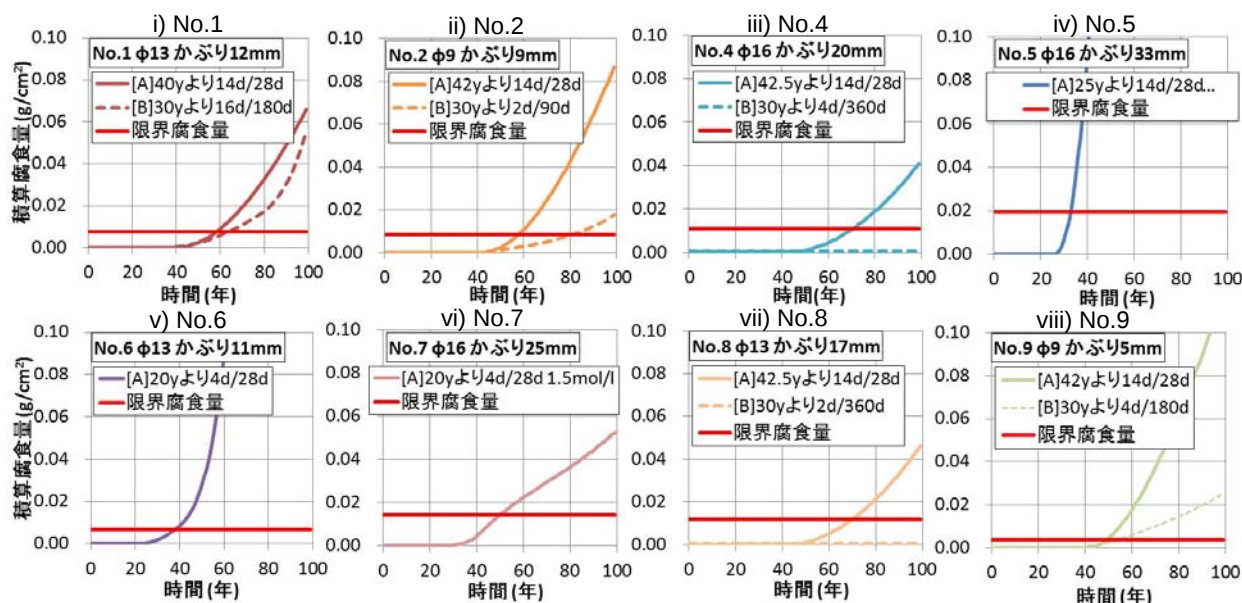


図-8 鋼材腐食解析結果

表-3 ひび割れ発生時期算定結果

	[A]高頻度シナリオ	[B]低頻度シナリオ
No.1	16 年後	22 年後
No.2	15 年後	37 年後
No.4	28 年後	57 年後以降
No.5	11 年前	—
No.6	4 年前	—
No.7	7 年後	—
No.8	27 年後	57 年後以降
No.9	7 年後	13 年後

水中の塩分濃度も加えて、漏水履歴推定を行った。推定を行った結果を図-7に示す。なお、No.5の採取コアには、深さ3cm程でひび割れが生じていたことから、No.5はひび割れからの漏水の侵入を想定し、深さ3cmの点を境界条件設定箇所として解析を行った。結果、両者で非常に高い濃度の漏水が長期かつ高頻度で作用するという履歴が得られた。漏水濃度が極めて高くなる要因としては、ひび割れや構造上の窪み等に漏水が溜まった後に水分のみが蒸発することで、塩分が濃縮されることを可能性として考えている。このような高濃度となる可能性についても、現場での詳細な漏水調査によって検証されることが必要であるが、本研究では、推定されたこれらの漏水履歴を用いて今後の腐食解析を進めることとした。

5. 腐食進展解析

5.1 鋼材腐食解析とひび割れ発生時期の予測

前節にて推定された漏水履歴が今後もそのまま継続すると仮定して、8地点について材齢100年までの鋼材腐食解析を行った。その後、Yokozekiら⁹⁾による式(1)を用いて、表-2に示される鉄筋径・かぶりを基にひび割れ発生限界腐食量を計算し、解析結果と比較することでひび割れ発生時期を算定した。

$$W_{cr} = -1.841\phi(\phi - 8.661) + 145.1\alpha^{-1.194} + 3809D^{-0.8351} + 10.60X_1 - 72.30 \quad (1)$$

ここで、 W_{cr} : 限界腐食量[mg/cm²]、 ϕ : クリーブ係数、 α : 腐食生成物の体積膨張率、 D : 腐食角度、 X_1 : 形状係数である。 X_1 には、(かぶり厚/鉄筋径)と、 $\{1.75 \times (\text{鉄筋間隔} - \text{鉄筋径}) / (2 \times \text{鉄筋径})\}$ のうち小さい方の値を用いる。なお、本研究では、体積膨張率 $\alpha=3.2$ 、腐食角度 $D=360^\circ$ 、クリープ係数 $\phi=0.4$ とした。

鋼材腐食解析結果を図-8に、鋼材腐食ひび割れ発生

時期を算定した結果を表-3に示す。図-8を見ると、高頻度シナリオと低頻度シナリオで顕著な腐食速度の違いが見られる。表-3を見ると、前述の表-2において既に外観変状が表れていたNo.5、No.6、No.7、No.9の4地点について、算定されたひび割れ発生時期は早く、実際の腐食状況を比較的良く再現する解析結果であると言える。No.9においては、現在の浸透塩化物イオン量がそれほど多くないにも関わらず既に変状が表れている事を、本手法によりの確に評価することに成功している。塩分量だけでなく、かぶりなど複数の要因が影響する腐食進展リスクを総合的に判断することが可能となっており、本解析手法の有用性が示されていると言える。

No.3の箇所は、履歴推定や腐食解析を行っていないが、現在の塩化物イオン分布から考えると最も腐食の遅いNo.4の箇所よりも腐食リスクは小さいと判断される。

5.2 止水を想定した鋼材腐食解析

漏水を止めた場合の腐食進展速度の変化について検討を行った。図-8中に実線で示された高頻度シナリオについて、現時点(材齢43年経過時点)で漏水を止めた場合の鋼材腐食解析を加えて行い、腐食進展速度を比較した結果を図-9に示す。多くの箇所で、漏水を止めるこ

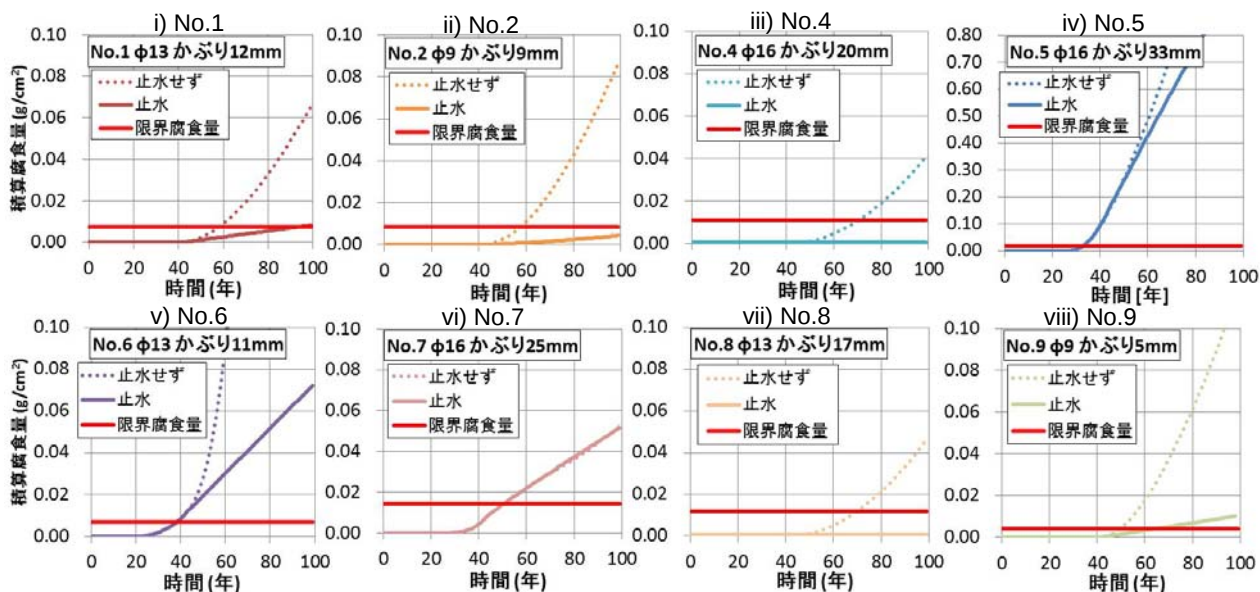


図-9 止水を再現した鋼材腐食解析結果

とにより大幅にひび割れ発生時期を遅らせることが出来るという結果となる一方で、No.5、No.6、No.7のように、現時点で止水を行うことの有効性が認められない箇所もあった。特に、No.7などは、現時点で限界腐食量を超えていない箇所でも、既に浸透した塩分によって止水後も腐食が進み、ひび割れ発生時期を遅らせることが出来ない可能性を示している。

以上のように、本研究の解析手法を用いることで、多様な塩分量や構造物諸元を持った構造物群について、それぞれの箇所の腐食リスクならびに維持管理手法の効用を定量的に評価することが可能であることが示された。これら解析結果を用いることで、それぞれの箇所に適した修復の時期および方法が選定可能であると考えられる。

6.まとめ

本研究では、塩分含有地下水環境下にある地下シールドトンネルセグメントを対象として、既往の熱力学連成解析システムを用いた塩害進展期末予測手法に関する検討を行った。

まず、漏水の乾湿繰り返しパターンが高品質コンクリートの塩分浸透挙動に対して及ぼす影響について、感度解析を行った。その結果、漏水日数割合や、漏水が作用し続ける日数、漏水サイクル長等によって、複雑に内部水分状況が変化し、それに伴って塩分浸透挙動も多様に変化し得ることを示した。

感度解析結果をもとに、対象構造物の漏水履歴推定と鋼材腐食解析を行った。高頻度と低頻度という異なるシナリオを想定して履歴推定を行うことで、同一の塩化物イオン分布から導かれ得る異なる腐食解析結果の変動幅を示すと共に、現在の実際の腐食状況に近いひび割れ発生時期を算定し、更に対策工の効果を示すことに成功し

た。今後、推定結果の確度向上のために、現場での漏水状況についての詳細な調査が必要であると考えている。

謝辞

本研究は、最先端・次世代研究開発支援プログラムの助成を受けて実施しました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T.: MULTI-SCALE MODELLING OF STRUCTURAL CONCRETE, Taylor and Francis, 2008
- 2) 高橋佑弥, 石田哲也, 香川沙絵: 塩害環境におかれた地下構造物の漏水履歴の推定と鋼材腐食解析, 土木学会第63回年次学術講演回講演概要集, 第V部, pp.445-446, 2008.9
- 3) 高橋佑弥, 石田哲也, 岸利治: 低水セメント比領域に着目したコンクリート中の塩分浸透および液状水移動に関する熱力学連成解析の高度化, コンクリート工学年次論文集, 第34巻, 第1号, pp.796-801, 2012
- 4) (社)土木学会: 2010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.333-343, 2010.11
- 5) 武井一夫: 蒸気養生中における薄肉部材の乾燥水量に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第19巻, 第1号, pp.667-672, 1997
- 6) Yokozeki, K., Motohashi, K., Okada, K., and Tsutsumi, T.: A rational model to predict the service life of RC structures in marine environment, Forth CEMENT/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP 170-40, pp.777-798, 1997