

塩害により劣化したRCセグメントの鉄筋残存量および健全性の将来予測

佐藤 克晴¹・和田 好史²・阿南 健一³・岡 滋晃⁴・斉藤 仁⁵・吉本 正浩⁶

¹正会員 東京電力パワーグリッド(株) 工務部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)
E-mail: sato.katsuharu@tepcoco.jp

²正会員 東京電力パワーグリッド(株) 工務部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)
E-mail: WADA.YOSHIFUMI@tepcoco.jp

³正会員 東電設計(株) 土木本部 技術開発部 (〒135-0062 東京都江東区東雲一丁目7-12-9F)
E-mail: jana@tepscoco.jp

⁴正会員 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)
E-mail: oka.shigeaki@tepcoco.jp

⁵正会員 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)
E-mail: saito.jin@tepcoco.jp

⁶正会員 東京電力パワーグリッド(株) 工務部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町一丁目1-3)
E-mail: yoshimoto.m@tepcoco.jp

塩害により主鉄筋などの鋼材が腐食したシールドトンネルのRCセグメントに対し、補修や補強対策の検討を実施するには、現状の主鉄筋の腐食状態の把握と将来の腐食進行予測が不可欠である。そのため、鋼材をはつり出し、その腐食量により現状の代表的な腐食量を評価するが、今回調査を実施したトンネルでは、主鉄筋の消失が確認された。また、当該トンネルは過去に補修工事を実施していたが、塩害により再劣化した事例でもある。

そこで、本稿では当該トンネルにおける劣化メカニズムを検討するとともに、主鉄筋が消失した場合における鉄筋残存量の評価方法と、健全性の将来予測方法について検討した内容を報告する。

Key Words : shield tunnel, segment, salt damage, re-corrosion, the evaluation of steel corrosion

1. はじめに

東京電力パワーグリッド(株)が保有する地中送電用トンネルは全延長で約420km存在し、このうち約5割が経年30年を超える状況にある。シールドトンネルの一部では、RCセグメントに経年劣化による変状が生じている事例が見られる。とくに、沿岸地域に建設されたシールドトンネルにおいては、塩害に伴う鉄筋腐食が顕著であり、これによりセグメントの耐荷性能が低下し、補修や補強などの対策が必要となる事例が生じている。鉄筋コンクリート構造物の適切な補修や補強対策を行うため、現状の鉄筋腐食量を適切に評価し、将来の腐食進行予測に基づく健全性評価や対策期限の検討は、維持管理上の重要な課題となっている。

塩害環境下にあるトンネルにおいて、顕著な鉄筋腐食が発生しており、とくに腐食程度の激しい箇所では一部

の鉄筋が消失している事例が確認された。調査の結果、腐食の原因は海水を含むトンネル内の漏水によるものと考えられた。また、このトンネルは過去に補修工事を実施しているが、補修工事の実施内容も再劣化を引き起こした一因であると考えられた。

本稿では、当該トンネルにおける調査結果に基づき、劣化メカニズムについて考察した内容を報告する。また、鉄筋腐食量から将来における鉄筋残存量の評価を行い、健全性の将来予測について検討した内容についても報告をする。

2. トンネルの構造の概要

今回、塩害劣化が問題となったトンネルは図-1に示すように沿岸部の運河を横断するシールドトンネルであり、

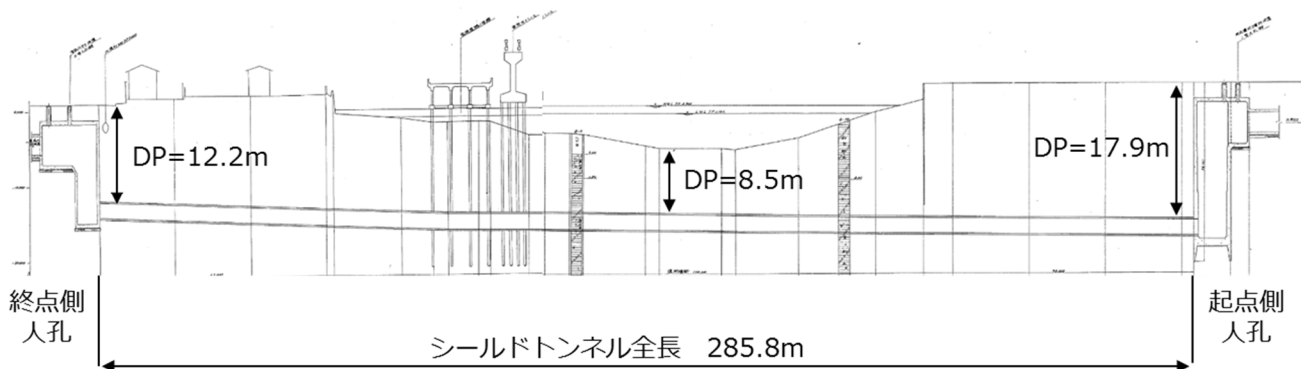


図-1 トンネル縦断面図

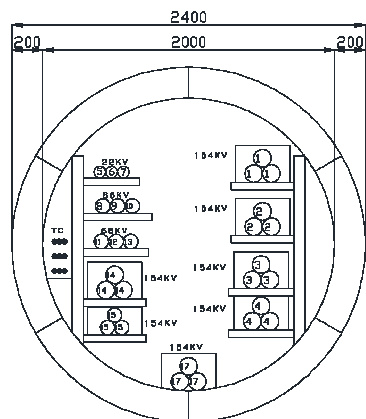


図-2 トンネル断面図 (2016年)

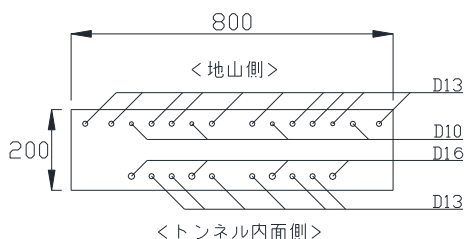


図-3 セグメント主断面図

表-1 トンネルの維持管理経緯

対応年度	経年数	対応内容
1971	0	竣工
1984	13	躯体劣化調査を実施
1986~1988頃	15~17	躯体補修工事を実施
1990~1992頃	19~21	154kVケーブルを4回線から7回線に増加
1993~2015頃	22~44	定期点検等による状態確認を実施
2016	45	躯体劣化調査を実施



写真-1 セグメント表面状況 (1984年)

N値が0～3程度の軟弱粘性土地盤にて建設されたものである。竣工は1971年であり、経年46年の構造物である。

断面図は図-2に示すとおりであり、内径2,000mmのトンネル内に、154kVの地中送電ケーブル7回線その他、多数のケーブルを収容している。セグメント諸元は幅800mm、厚さ200mm、分割数6、リング継手数12の鉄筋コンクリート製セグメントである。

セグメント主断面は図-3に示すように、主鉄筋がトンネル内面側でD16×4本とD13×6本の合計10本、地山側でD13×10本とD10×4本の合計14本となっている。配力筋にはD10が使用されており、設計かぶりは配力筋が18.5mm、主鉄筋が28.5mmである。

3. トンネルの変状とこれまでの維持管理経緯

(1) トンネルの維持管理経緯

当該トンネルの維持管理経緯を表-1に示す。このトン

ネルでは1984年に実施した躯体劣化調査において、配力筋に顕著な腐食が確認されたことから1986年～1988年頃に補修工事を実施している。

その後、定期点検等による状態確認を行ってきたが、2016年に現地を確認した結果、躯体表面に劣化程度の大きい変状が確認された。そのため、再度躯体劣化調査を実施し、鉄筋腐食量の調査結果から健全性の将来予測について検討した。

(2) 過去の補修工事の概要

1984年のセグメント表面状況を写真-1に示す。写真より、セグメント表面には鉄筋腐食跡が確認できる。当時の調査結果によると、配力筋のかぶりは設計かぶりと比較すると不足の傾向にあった。また、トンネル内部の漏水の塩分濃度は2150mg/Lであり、漏水中には塩化物イオンが含まれていることがわかる。コンクリート中の塩化物イオン濃度は図-4に示すとおりであり、標準的な腐食発生塩化物イオン濃度である2.2kg/m³程度¹⁾と比較すると

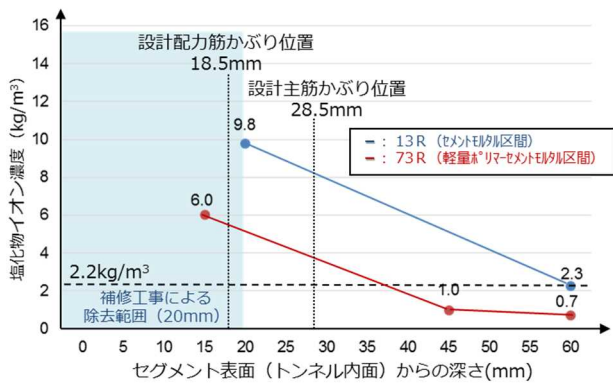


図-4 塩化物イオン濃度調査結果 (1984年)



図-5 補修工事範囲図 (1984年)

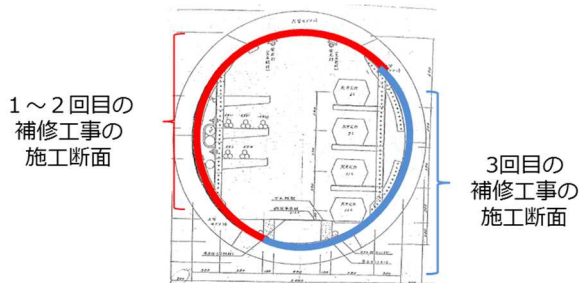


図-6 トンネル断面図 (1984年)

かなり高濃度であることがわかる。以上より、塩害により鉄筋に腐食が生じたものと推定された。ただし、当時の記録では腐食していたのは配力筋のみであり、主鉄筋には腐食は認められていなかった。

この結果を踏まえ、1986年より躯体補修工事を実施した。補修工事は図-5に示すように3回に分けて実施しており、1回目は起点側人孔から102.7mの範囲、2回目は終点側人孔から183.1mの範囲、3回目は全線に亘って実施している。当時のトンネル内部のケーブル配置は図-6のとおりであり、1回目と2回目の補修工事はケーブルの少ない片側半面を行い、2回目の補修工事完了後にケーブルを反対側に移設し、その後3回目の補修工事を実施した。

補修工事ではセグメント表面を20mmはつり、30mmの厚さで断面修復を行い、難燃性のシリコン系材料にて表面被覆を行っている。断面修復材は図-5に示す区間においてセメントモルタル、ポリマーセメントモルタル、軽量ポリマーセメントモルタルの3種類を用いている。各材量の配合表を表-2に示すとおりであり、それぞれの材料の強度特性や施工性などの比較検討をしている。この結果を踏まえ、2回目と3回目の補修工事においては軽量ポリマーセメントモルタルを採用した。

表-2 断面修復材の標準配合(1m³あたり)

断面修復材	セメント	骨材	水	添加剤
セメントモルタル	320 kg	960 kg (砂)	640 kg	0 kg
ポリマーセメントモルタル	240 kg	160 kg (軽量骨材)	480 kg	72 kg
軽量ポリマーセメントモルタル	1154 kg (主材)		173 kg	127 kg



写真-2 トンネル内部状況 (2016年)

(3) 2016年時点のトンネル状況

2016年時点におけるトンネル内の状況を写真-2に示す。写真から過去の補修工事にて設置した表面被覆材の剥離などの表面変状が確認できる。また、断面修復材の浮きや剥離、漏水などが生じている箇所もあった。トンネル内の溜まり水箇所の塩分濃度調査を実施したところ、塩分濃度は13345mg/Lであった。これは、海水の塩分濃度(約20000mg/L)のおよそ7割となる。トンネル内は地中送電ケーブルの発熱や換気の影響により水分が蒸発される傾向にあるため、漏水中に含まれる塩化物イオンが濃縮したものと考えられる。

トンネル内部の表面状態は過去の補修工事における断面修復材の使用区間によって異なり、セメントモルタル、ポリマーセメントモルタル、軽量ポリマーセメントモルタルの順に目視による表面状態は悪い状態であった。

4. 劣化調査の内容と結果

(1) 劣化調査の実施方針

前述のとおり、当該トンネルは過去に補修工事をしてきたが、塩害による再劣化が生じたものと考えられるこ

とから、2016年に再度劣化調査を実施した。調査は躯体の耐荷性能の確認を目的とした鉄筋腐食量調査と、耐久性性能の確認を目的としたコンクリート中の塩化物イオン濃度調査を主体として実施した。

図-2に示すとおり、トンネル内部には多数の地中送電ケーブルを収容しているため、調査箇所は調査可能な天端に限定された。また、過去の補修工事における断面修復材の使用区間ごとの調査を行い、これらの違いによる劣化の進行程度を比較することとした。

(2) 鉄筋腐食量の調査結果

鉄筋の腐食量は、躯体はつり調査により確認した。躯体はつり調査は1箇所につき20cm×40cm程度の範囲で実施し、トンネル内面側の主鉄筋を5本程度露出させ、ノギスにより鉄筋径を計測し、腐食量を算出した。図-7は主鉄筋の腐食量調査結果である。セメントモルタル区間やポリマーセメントモルタル区間においては主鉄筋の消失が確認され、かつ鉄筋腐食量も大きいことがわかる。このことから過去の補修工事における断面修復材の使用区間ごとに、劣化の進行程度は異なると考えられる。

(3) 塩化物イオン濃度調査結果

図-8は各断面修復材の使用区間において実施した、セグメント表面からの深さ方向の塩化物イオン濃度調査結果である。図-4の1984年の調査結果と比較すると、全体的に塩化物イオン濃度は高くなっているが、表面から

30mmの断面修復材の範囲においてはとくに高いことがわかる。また、今回の調査で確認した主鉄筋のかぶり範囲においては、鉄筋の腐食発生限界値を超える塩化物イオン濃度であった。

5. 劣化の検討

(1) 劣化メカニズムの検討

当該トンネルにおける劣化調査の結果を踏まえ、劣化メカニズムを推定した。図-9に劣化モデルを示す。劣化の進行過程は以下のとおりと推定し、結果的に、過去の補修工事における劣化の抑制効果は不適當であった。

- i) 継手部より、高濃度の塩分を含んだ漏水がトンネル内部に浸入する。
- ii) 継手位置において補修材に切れ目を設けていなかったため、塩分を含んだ漏水は表面被覆材と断面修復材、断面修復材とセグメントの隙間に浸透し滞留する。
- iii) 過去の補修工事における躯体表面のはつりにより、セグメント表面には微細なひび割れが多数生じた可能性が高い。その結果、塩化物イオンがセグメント深くまで浸透する。
- iv) 躯体内部の塩化物イオンは完全に除去されないまま断面修復が行われたため、コンクリート中の塩化物イオン濃度が高まり、主鉄筋に腐食が生じる。
- v) 鉄筋の腐食によりセグメントや断面修復材に浮きや剥

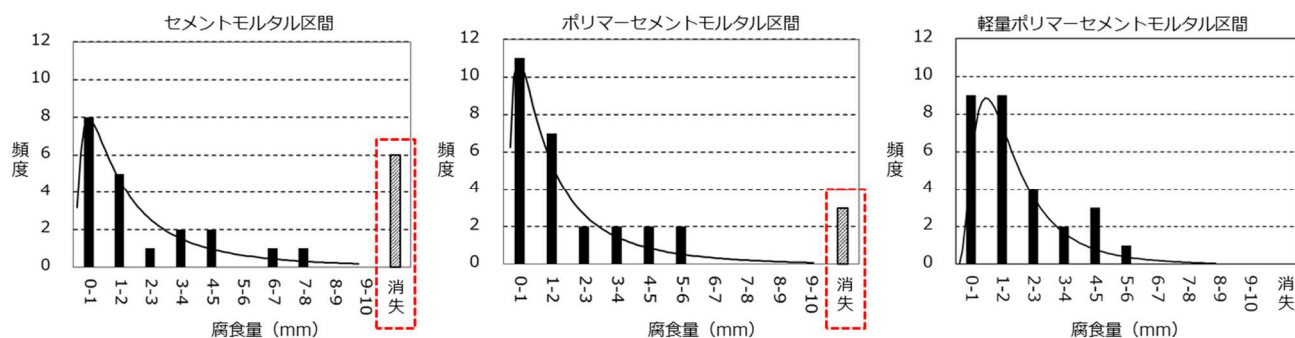


図-7 主鉄筋の腐食量調査結果 (2016年)

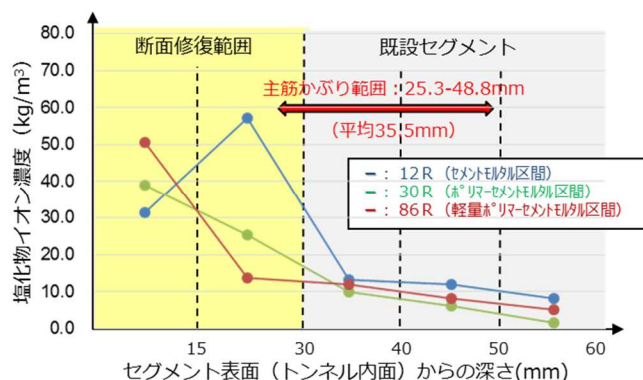


図-8 塩化物イオン濃度調査結果 (2016年)

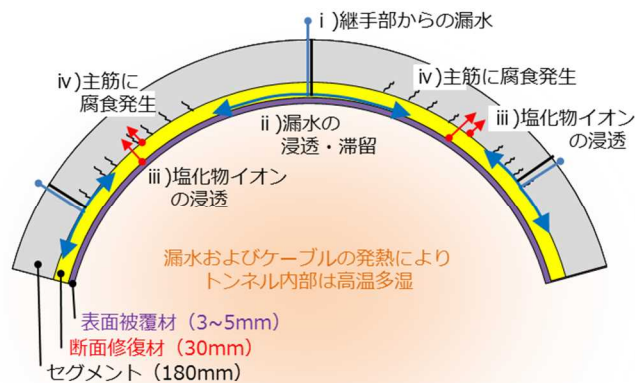


図-9 トンネルの劣化モデル

離が生じる。また、地中送電ケーブルによる発熱や漏水の影響により、トンネル内部は高温多湿であることから、鉄筋の腐食は加速する。

(2) 代表腐食量の算出

劣化調査の結果をふまえ、セグメント主鉄筋の顕著な腐食が確認されたことから、トンネルの健全性について将来予測を行った。健全性の将来予測は、調査結果に基づく代表的な鉄筋腐食量から将来の鉄筋残存量を予測し、構造計算を行うことにより評価する。

代表腐食量の算出は鉄筋腐食量調査結果により行うが、一般に既往の事例²³⁾が示すように鋼材の腐食量の調査結果は平均値を頂点とするような正規分布形状のヒストグラムではなく、図-7に示すような最頻値を頂点として左右の分布形状が異なる対数正規分布形状となる場合が多い。

当該トンネルにおける鉄筋腐食調査は劣化箇所全数に対して実施ものではなく、劣化の大きい箇所を任意に選定したサンプル調査である。この場合の代表腐食量は、確率密度関数による統計処理による以下の式から導くことができる⁴⁾。

$$x_{rep} = x_{mode} + t \times \sigma' \quad (1)$$

ここに

x_{rep} ：代表腐食量

x_{mode} ：サンプルの実数の最頻値

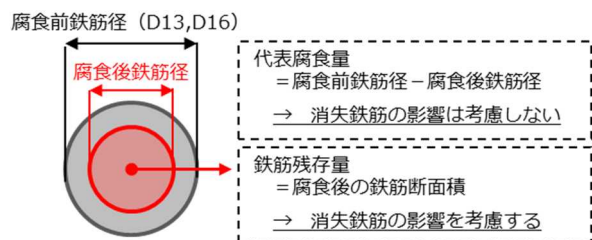


図-10 主鉄筋の腐食モデル

t ：スチューデント t 値

σ' ：サンプルから推定される母集団の標準偏差

なお、消失した鉄筋は当該トンネルにおける代表的な腐食要因とは異なる要因により局部的に腐食が進行したものと考えられ、消失時期も不明であることから、代表腐食量の評価においては考慮しないこととした。

表-3に過去の補修工事における断面修復材の使用区間ごとの代表腐食量の算出結果を示す。この結果より、代表腐食量は大きい方からセメントモルタル、ポリマーセメントモルタル、軽量ポリマーセメントモルタルであることがわかった。

(3) 将来鉄筋残存量の算出

代表腐食量の評価結果より、2016年時点におけるセグメント主鉄筋量を算出する。図-10に示すように、鉄筋腐食による減肉は半径方向に一樣に生じるものと仮定し、代表腐食量から算出した腐食後の鉄筋径を求め、腐食後の断面積を残存鉄筋量として算出する。また、検討断面における鉄筋残存量の総和を主鉄筋量とする。

ここで、前述の代表腐食量の評価時に考慮しなかった消失鉄筋の影響を鉄筋残存率（残存鉄筋数／全鉄筋本数）として考慮し、算出した主鉄筋量に鉄筋残存率を乗じた値を2016年時点における主鉄筋量とした。表-4に、過去の補修工事における断面修復材の使用区間ごとの、消失鉄筋の影響を考慮した主鉄筋量の算出結果を示す。

つぎに、将来主鉄筋量の予測を行う。図-11はセメン

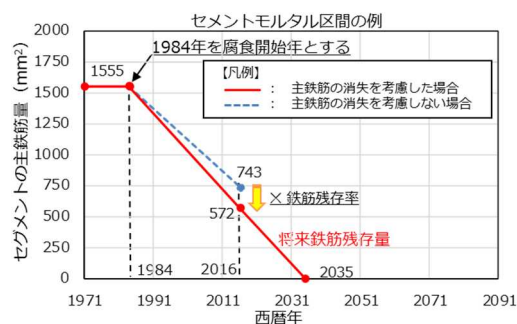


図-11 将来主鉄筋量の予測結果

表-3 代表腐食量の算出結果

区間	サンプル数 (消失鉄筋除く)	最頻値 (x_{mode})	t値 (t)	サンプル標準偏差 (σ')	代表腐食量 (x_{rep})
セメントモルタル	20	0.42	1.07	3.70	4.38mm
ポリマーセメントモルタル	26	0.32	1.06	3.23	3.74mm
軽量ポリマーセメントモルタル	28	0.93	1.06	1.57	2.59mm

表-4 消失鉄筋を考慮した主鉄筋量の算出結果

補修区間	代表腐食量	①主鉄筋量 (検討断面における鉄筋残存量の総和)	②鉄筋残存率 (残存鉄筋本数 ÷ 全本数)	消失鉄筋を考慮した 主鉄筋量 (①×②)
セメントモルタル	4.38mm	743mm ²	0.77 (消失本数 6本, 全本数26本)	572mm ²
ポリマーセメントモルタル	3.74mm	843mm ²	0.90 (消失本数3本, 全本数29本)	756mm ²
軽量ポリマーセメントモルタル	2.59mm	1039mm ²	1.00 (消失本数0本, 全本数28本)	1039mm ²

トモルタル区間における将来主鉄筋量の予測結果であるが、腐食開始年(1984年)と2016年時点における主鉄筋量から、鋼材腐食に伴う腐食電流が一定であると仮定し、鉄筋断面積が経年に比例して減少するものとして評価した。ポリマーセメントモルタル、軽量ポリマーセメントモルタルの区間においても同様に評価した。

主鉄筋の腐食開始年は1984年とした。同年に実施した躯体劣化調査において、主鉄筋の腐食は確認されなかったが、図-4に示すように主鉄筋位置における塩化物イオン濃度は鉄筋の腐食発生限界値を超えている。よって、主鉄筋は腐食していないが、腐食環境下にあることから1984年を腐食開始年と設定した。

6. 耐荷性能の検討

(1) 検討方法

耐荷性能の検討は、参考文献2)と同様に以下のように実施した。

・検討断面

検討断面は、発生応力度が大きくなる図-1に示す土被りが17.9mと最深部になる起点側立坑付近とした。土水圧荷重は、地盤条件から、土水の扱いを土水一体、鉛直荷重を全土被り荷重として算出した。

・劣化の設定

塩害による劣化は、前述の鉄筋残存量として、セグメントの内面側の主鉄筋のみを考慮した。腐食を考慮する場合は、鉄筋の腐食膨張によりセグメント表面に浮きやはく離が認められたことから、かぶりコンクリートを考慮しない断面とした。セグメントの地山側の主鉄筋は、既往の検討³⁾から、腐食が生じない環境として劣化を考慮しないこととした。

・構造計算の方法

構造計算は、検討対象トンネルのセグメントの組立状況を2リング千鳥組で再現し、セグメントや継手を非線形でモデル化した、はりばねモデルによる計算法により実施した。なお、構造計算では劣化による部材の剛性低下は考慮しないこととした。

・耐荷性能の照査の方法

耐荷性能は、応答値(S_d)と限界値(R_d)の比が1.0以下($S_d/R_d \leq 1.0$)の場合に耐荷性能を満足するものとして照査した⁵⁾。セグメントの材量や部材の強度は設計値以上が確保されてると考え、構造物係数などの各部分安全係数は原則として1.0とした。

セグメント主断面の耐荷性能は劣化を考慮した主断面とし、耐荷性能の限界値は地中送電用シールドトンネルの要求性能などからせん断耐力とした。

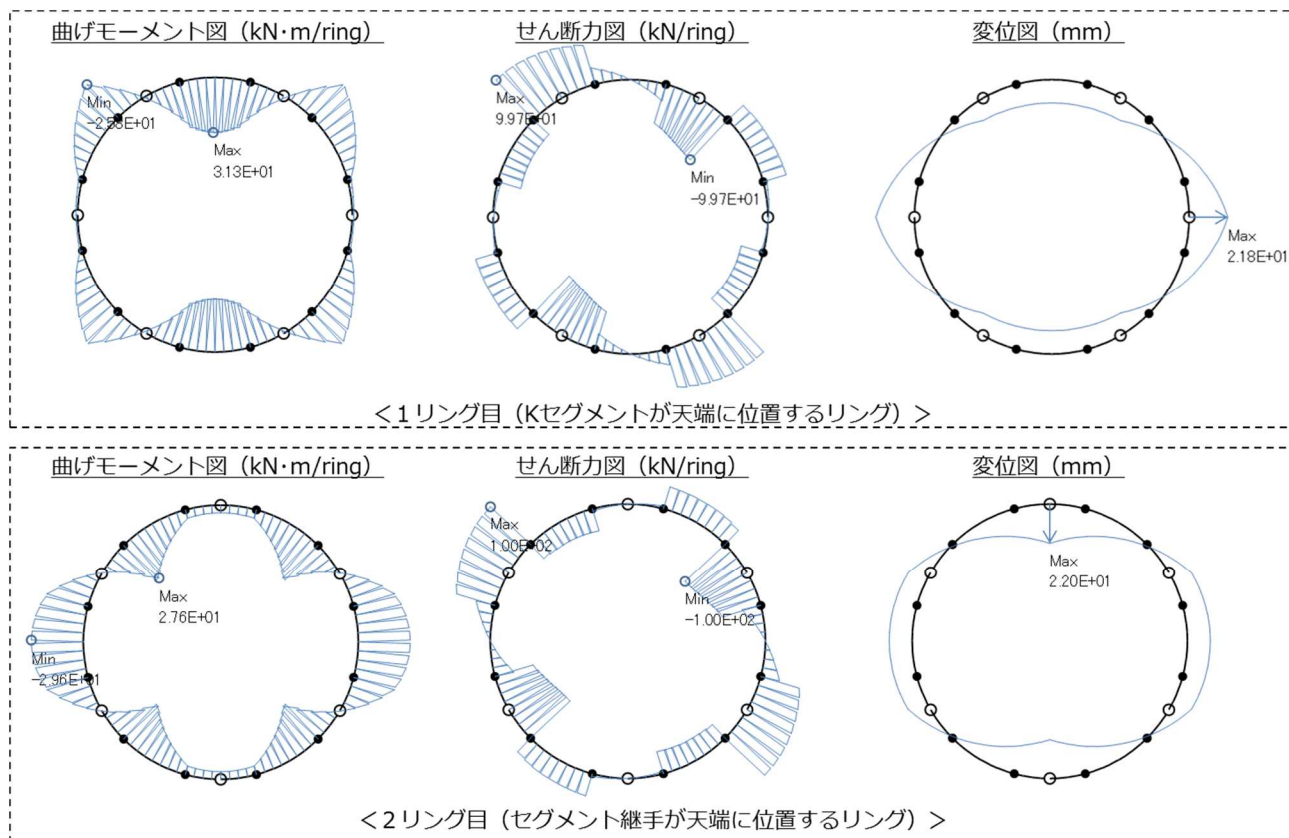


図-12 構造計算結果

(2) 耐荷性能の照査結果

構造計算結果を図-12に示す。当該トンネルにおける発生断面力はセグメントの組立状況の影響により、1リング目と2リング目で傾向が大きく異なる。変形は1リング目はスプリングライン付近のセグメント継手位置、2リング目は天端と下端付近のセグメント継手位置で大きくなる。

図-13は、セグメント主鉄筋の鉄筋残存量と耐荷性能の照査値（応答値 S_d /限界値 R_d ）の関係として整理したものである。

これより、鉄筋の腐食が進行すると、主鉄筋量が 85mm^2 でせん断耐力を満足しなくなる結果が得られた。降伏曲げ応力度は、1箇所が照査値を超えても即座にトンネルの崩壊にはならないと考えられる。一方、せん断耐力はトンネル全体の崩壊の危険性が高い。よって、トンネルの健全性評価はせん断耐力に対して実施した。

(3) 恒久対策期限の推定

将来の鉄筋残存量について、過去の補修工事における断面修復材の種類ごとに、経年数との関係で整理した結果を図-14である。この図を用いて、前述のせん断耐力を満足しなくなる主鉄筋量から、恒久対策期限を推定した。

この結果、補修材にセメントモルタルが使用されている箇所では、2031年にせん断耐力を超過するなど耐荷性能に余裕がない状態であることが明らかとなった。このため、早急に補強などの検討や対策が必要と判断している。

なお、この結果をふまえ、最も劣化の進行しているセメントモルタルによる補修区間については、各リングにパイプサポートを設置する暫定補強対策を実施済みである。前述の通り、降伏曲げ応力度は、1箇所が照査値を超えても即座にトンネルの崩壊にはならないと考えられるが、予期せぬ曲げ破壊に備えるものである。

今後は、耐荷性能を満足する期間内で、恒久補強対策などについての検討を実施することとしている。

7. おわりに

本稿の結果をまとめると以下になる。

- 当該トンネルの健全性評価にあたり、鉄筋の代表腐食量は鉄筋腐食量調査結果より導いた。代表腐食量の評価において、消失した鉄筋は、当該トンネルにおける代表的な腐食要因とは異なる要因により局部的に腐食が進行したものとして考え、考慮していない。
- 将来の鉄筋残存量は、腐食開始年と調査時点における鉄筋残存量の関係から推定した。鉄筋残存量の算出においては消失鉄筋の影響を考慮した。
- トンネルの健全性は、構造計算により算出した限界主鉄筋量と鉄筋残存量の関係から評価した。限界主鉄筋量はトンネル全体の崩壊の可能性が高いせん断耐力にて設定した。

トンネルの健全性評価において、筆者らは既報²⁹⁾に示す評価方法を提案している。今回検討したトンネルは、東京電力パワーグリッド(株)の所有するシールドトンネルにおいて、塩害腐食によるセグメント主鉄筋の消失が確認された事例である。そのため、既往の評価方法を基本としながら、消失した鉄筋を含むトンネルの健全性評価を初めて実施した事例である。

今後、継続して当該トンネルの調査および健全性評価を実施し、本手法の妥当性について引き続き検証していく予定である。今回の報告が、既設シールドトンネルの

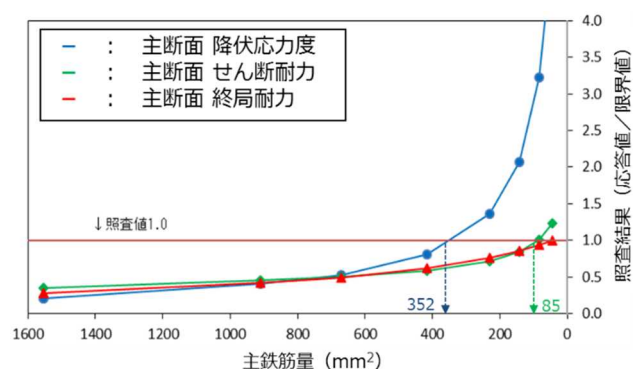


図-13 セグメント主鉄筋量と照査値の関係

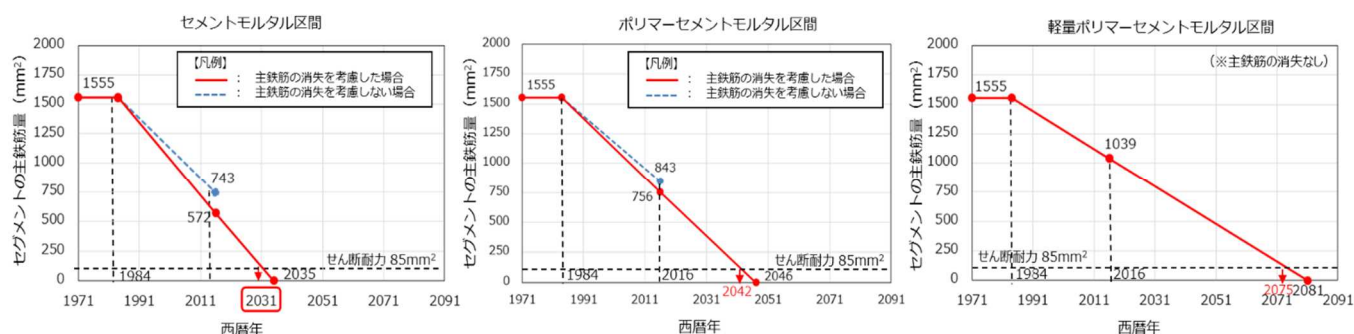


図-14 恒久対策期限の推定結果

健全性評価および対策期限の推定の検討における一助となれば幸いです。

謝辞：本検討にあたり、早稲田大学の小泉教授および立命館大学の小山客員教授より貴重なご指導、ご助言を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，pp.174-175，2013.
- 2) 岡滋晃，阿南健一，実広拓史，吉本正浩：シールドトンネルの鉄筋残存量の評価と補強設計に関する研

究，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，Vol.72，No.3，pp.I_109-I_122，2016.

- 3) 岡滋晃，斉藤仁，吉本正浩：被りコンクリートが剥落した電力用シールドトンネルの耐力評価事例，電力土木，No.387，pp.112-116，2017.
- 4) 岡滋晃，佐藤克晴，斉藤仁：塩害を受けた RC セグメントにおける鋼材腐食量の統計的評価手法，電力土木，No.390，pp.71-74，2017.
- 5) (社)土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書シールド工法・同解説，p.285，2016.

(2017. 8. 11 受付)

THE REPORT ON THE EVALUATION OF STEEL BARS RE-CORRODED BY SALT DAMAGE

Katsuharu SATO, Yoshihumi WADA, Ken-ichi ANAN, Shigeaki OKA,
Jin SAITO and Masahiro YOSHIMOTO

It is important for maintenance of RC segments which suffer from salt damage to clarify the current corrosive condition of the main steel bars. Therefore, the steel bars had been surveyed with chipping cover concrete, and evaluated their corrosive condition. With this corrosion check, it was found that several main steel bars disappeared because of salt damage. Especially, this kind of corrosion which was the "re-corrosion" of past-repaired steel bars with salt damage was our first experience. In this paper, the mechanism of this re-corrosion is discussed. Also, the estimation method of decrement cross area of these steel bars to predict the future condition of a segment is reported.