

# 地中送電用シールドトンネルの耐久性設計 に関する提案

吉本正浩<sup>1</sup>・信岡卓<sup>2</sup>・笠井靖浩<sup>3</sup>・大塚正博<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 修 (工) 東京電力 (株) (〒108-0023 東京都港区芝浦4-19-1)

E-mail: yoshimoto.m@tepcoco.jp

<sup>2</sup>正会員 東電設計 (株) (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail: jnobu@tepscoco.jp

<sup>3</sup>正会員 修 (工) 東京電力 (株) (〒170-0013 東京都千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: kasai.y@tepcoco.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 博 (工) 東京電力 (株) (〒170-0013 東京都千代田区内幸町1-1-3)

E-mail: ootsuka.masahiro@tepcoco.jp

本論文は、地中送電用シールドトンネルの耐久性を保証する設計方法として、鉄筋コンクリート製セグメントの構造細目と曲げひび割れ幅の制御方法を既設トンネルの劣化調査結果に基づいて提案したものである。まず、構造細目は主鉄筋を配力鉄筋よりもセグメント本体断面の内側に配筋することを原則にした上で、耐久性を保証するかぶりの厚さを内陸性環境と海洋性環境条件とに分けて定めた。次に、土水圧等の永久荷重作用時の曲げひび割れが要因で生じる配力鉄筋の腐食に対し許容できるひび割れ幅を内陸性環境と海洋性環境とに分けて定めた。

**Key Words :** *shield tunnels for transmission , durability assurance method , thickness of minimum cover , allowable crack width , seashore or inland atmosphere*

## 1. はじめに

我が国のシールドトンネルの用途は、鉄道、道路およびライフラインと様々である。シールドトンネルの供用状況は、この用途により大きく異なっており、この用途が経年時の劣化に大きく影響していると考えられる。この経年時の劣化を抑制するための耐久性の設計とは、設計耐用期間において対象構造物に経年劣化による機能低下がないことを保証する行為と考えられるが、新設時の設計だけでなく供用後の維持管理にまで広げて考える必要がある。すなわち、経年劣化に対して補修、補強などの修繕行為の実施の有無や程度を判断することなども耐久性の設計にあたり考えられる。

筆者らは、電力設備建設のコスト縮減と信頼性向上を目的にシールドトンネルに限界状態設計法の適

用を検討しており、耐久性の設計はトンネルが経年劣化により使用限界状態に達しないことを保証する設計方法と考えている。

シールドトンネルの耐久性設計の現状と検討課題を整理したものを表-1に示す<sup>1),2)</sup>。この表では、シールドトンネルの耐久性を構成部材であるRCセグメント本体部と継手部に分けて整理している。継手部の耐久性には止水と継手金物の劣化の抑制が必要である。このうち止水設計は文献<sup>3)4)</sup>等により体系化されている。また、継手の劣化は近年様々な継手形式があり耐久性を考慮した材料選択ができると考えられる<sup>5)</sup>。一方、RCセグメント本体部には鉄筋腐食の抑制が必要であるが、かぶりおよびひび割れ制御方法等、現状では整理できていない課題がある。これより本論文はRCセグメント本体部の耐久性を保証する設計方法を提案するものである。

表-1 許容応力度法での耐久性設計の考え方と本論文の検討課題

着目部材	許容応力度法の耐久性の考え方	地中送電用途の場合の問題点	本論文の課題
RCセグメント本体部	・鉄筋の純かぶり 25mm を確保 ・曲げひび割れ幅を主鉄筋の許容応力度程度に制御 <sup>1),2)</sup>	・鉄筋の発錆に対する様々な環境条件下での純かぶりおよびひび割れ幅の許容値の妥当性が不明	・環境条件に応じた最小かぶり ・環境条件に応じた曲げひび割れ幅の許容値の設定
RCセグメント継手部		・シール材にて止水設計 <sup>3),4)</sup> ・継手材料は様々な選択肢がある <sup>5)</sup>	

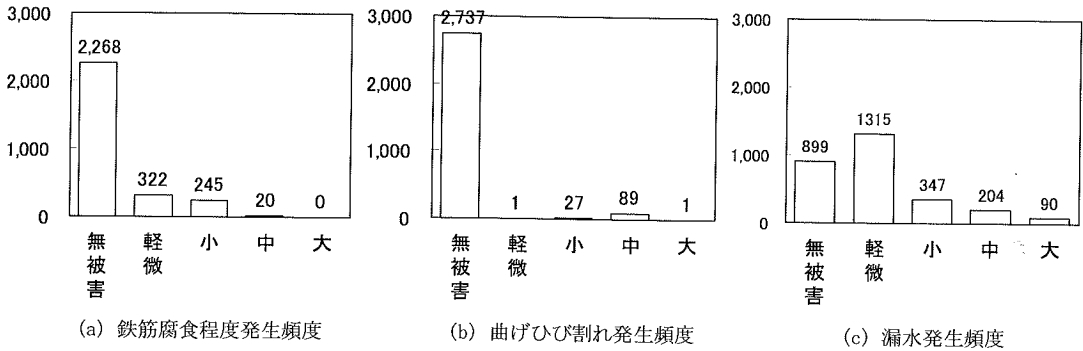


図-1 鉄筋腐食程度および鉄筋腐食要因（ひび割れ、漏水）の発生頻度

なお、本論文の対象構造物は、地中送電用のシールドトンネル（二次覆工なし）である。これは本検討内容が、この対象構造物の維持管理記録および劣化調査に基づいているからである。

表-2 維持管理記録の竣工年度別分類表

竣工年	地点数	総延長	調査箇所数
S40 年以前	1	30m	6
S41 年～50 年	12	9,415m	1,883
S51 年～60 年	8	4,800m	960
S61 年以降	1	30m	6
合計	22	14,275m	2,855

## 2. シールドトンネルの全体的な劣化の傾向

本章では、地中送電用のシールドトンネルの内空側で発生している劣化の全体的な傾向を得るため、表-2 に示す 22 地点より総延長 14,275m の維持管理記録を収集し傾向を分析した。表-2 に示す竣工年度別の内訳より、分析対象は、供用年数が約 15 年～約 40 年のトンネルである。なお、各々の調査単位は 5m 毎なので、維持管理記録の総数は合計 2,855 箇所になる。

シールドトンネルの劣化現象を鉄筋腐食程度、ひび割れおよび漏水の 3 種類に着目して整理したヒストグラムを図-1 に示す。図-1 の横軸（無被害、軽微、小、中、大）は、表-3(a)～(c) に示す判定基準で定義される各劣化現象の程度である<sup>6)</sup>。筆者らの扱う地中送電用のトンネルではこの判定基準を目安に維持管理を行っており、中以上は補修が必要な劣化となっている。

まず、図-1(a)の鉄筋腐食は、全体の約 79.4% (2,268 箇所/2,855 箇所) が無被害である。そして、何らかの鉄筋の腐食があるのは全体の約

20.6%である (587 箇所/2,855 箇所)。一方、補修が必要な中以上は全体の約 0.7% (20 箇所/2,855 箇所) である。

次に、図-1(b)のひび割れの傾向であるが、シールドトンネルのひび割れには、土水圧などの永久荷重の作用による曲げひび割れと施工時のジャッキ推力などの一時的な作用によるひび割れとがある。このうち図-1(b)に扱うひび割れは、主に前者と考えられる曲げひび割れである。この曲げひび割れは、全体の約 4.1%で発生している (118 箇所/2,855 箇所)。文献 7)8)によると曲げひび割れは鉄筋腐食の要因の一つであると考えられる。しかしながら、図-1(a)と(b)との比較より曲げひび割れ箇所数よりも鉄筋の腐食箇所数が多いことがわかり、鉄筋の腐食は曲げひび割れ以外に中性化や塩分等の別の要因があると推測できる。

最後に、図-1(c)の漏水は全体の約 68.5% (1,956 箇所/2,855 箇所) で発生している。シールドトンネルの漏水の経路としては、セグメントの継手部と本体のひび割れ部とが考えられるが、ほとんどの漏

表-3(a) 鉄筋腐食の程度<sup>6)</sup>

鉄筋腐食の量	鉄筋腐食の進行程度	軽微	小	中	大
調査単位の50%以上	全周断面欠損				●
	部分的断面欠損				●
	軽微な腐食			●	
調査単位の10~50%以上	全周断面欠損				●
	部分的断面欠損			●	
	軽微な腐食		●		
調査単位の10%以下	全周断面欠損			●	
	部分的断面欠損		●		
	軽微な腐食	●			

※：調査単位であるトンネル5m毎に評価を行う

表-3(b) ひび割れの程度<sup>6)</sup>

ひび割れの幅	ひび割れ数	軽微	小	中	大
1mm以上	3本以上				●
	2本以下				●
0.3~1.0mm未満	3本以上			●	
	2本以下		●		
0.1~0.3mm未満	3本以上			●	
	2本以下		●		
0.1mm以下	3本以上	●			
	2本以下	●			

※：調査単位であるトンネル5m毎に評価を行う

表-3(c) 漏水の程度<sup>6)</sup>

漏水の量	漏水ヶ所数	軽微	小	中	大
噴き出し	6ヶ所以上				●
	3~5ヶ所				●
	2ヶ所以下			●	
滴下	6ヶ所以上				●
	3~5ヶ所			●	
	2ヶ所以下		●		
にじみ	6ヶ所以上	●			
	3~5ヶ所	●			
	2ヶ所以下	●			

※：調査単位であるトンネル5m毎に評価を行う

水は継手部からのものである。これは図-1(b)と(c)との比較において、ひび割れ箇所数よりも漏水箇所数の方が非常に多いことからわかる。継手部からの漏水の発生頻度が多いことは、多くの継手部を有するシールドトンネルの特徴である。したがって、鉄筋が腐食する環境的な要因に継手部からの漏水の影響を考慮するのが現実的と考えられる。一方、セグメント本体の貫通ひび割れからの漏水は、本論文の鉄筋が腐食する環境的な要因としない。この理由は発生頻度が低いこと以外に次を根拠としている。

- ・RCセグメントは曲げひび割れを想定した部材であり、貫通ひび割れは設計上で想定しない
- ・ジャッキ推力等の施工時荷重の作用で貫通ひび割れが発生する可能性があるが、これは施工時荷重に対する設計で抑制すべき課題である<sup>9)</sup>

表-4 詳細調査対象トンネルの竣工年度と環境条件

環境条件	調査対象	調査年度
内陸性	A トンネル(S47)	H13
	B トンネル(S48)	H13
	C トンネル(S55)	H14
海洋性	D トンネル(S52)	H13
	E トンネル(S49)	S60

表-5(a) 漏水の塩化物イオン濃度分析結果

調査対象	Cl <sup>-</sup> 濃度	備考
D トンネル	6.20 kg/m <sup>3</sup>	一般的な濃度 海水：20.0 kg/m <sup>3</sup> 淡水：0.03 kg/m <sup>3</sup>
	5.35 kg/m <sup>3</sup>	
	3.05 kg/m <sup>3</sup>	
E トンネル	2.15 kg/m <sup>3</sup>	
	2.12 kg/m <sup>3</sup>	

表-5(b) コンクリート表面塩化物イオン濃度分析結果

調査対象	Cl <sup>-</sup> 濃度	備考
D トンネル	2.25 kg/m <sup>3</sup>	継手からの漏水が乾燥した箇所のコンクリート表面析出物採取
	2.44 kg/m <sup>3</sup>	
	44.7 kg/m <sup>3</sup>	
E トンネル	75.4 kg/m <sup>3</sup>	
	5.75 kg/m <sup>3</sup>	

### 3. シールドトンネルの内空側の劣化要因分析

鉄筋が腐食する要因には、環境的な要因（漏水の有無や塩分等）と構造的な要因（ひび割れやかぶり等）とがある。また、経年的な要因には中性化や塩化物イオンの影響もある。本章では、地中送電用シールドトンネル内空側の鉄筋の腐食要因を分析する。このため、第2章で補修が必要な中以上の鉄筋の腐食が認められたトンネルに対して、詳細な劣化調査を実施した。

#### (1) 詳細劣化調査の概要

詳細劣化調査を行ったトンネルの竣工年度と環境条件を表-4に示す。海洋性環境か否かの分類は、大気中の飛来塩分を考慮し、海岸からの距離が約1km以内にあることを一つの目安にした<sup>10)</sup>。一方、地下水に塩分が含まれる場合、トンネル内部は漏水による塩分の供給も考えられる。このため、本劣化調査では現地踏査で採取した漏水およびコンクリート表面析出物の塩化物イオン濃度の値でも海洋性環境か否かを判断している。この値を表-5(a)(b)に示す。DとEトンネルの継手部からの漏水は、一般的な淡水以上、海水以下の塩化物イオン濃度であり、海水の影響があるとわかる。また、文献10)によると、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が1.5kg/m<sup>3</sup>以上あると海洋性環境と判断できると考えられる。そして、表-5(b)より漏水が乾燥したコン

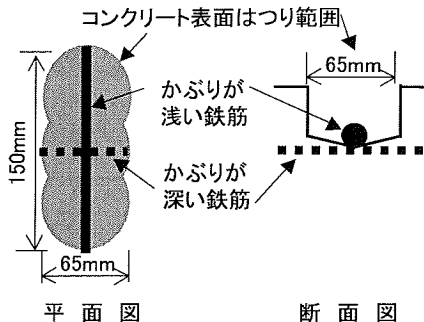


図-2 鉄筋腐食調査の説明図

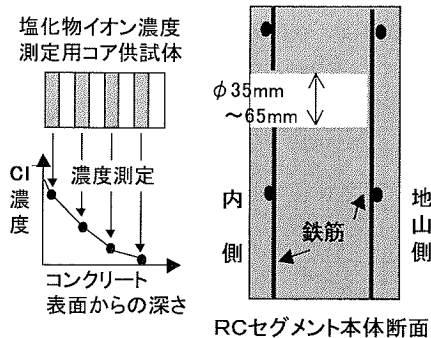


図-3 塩化物イオン濃度測定の説明図

表-6 鉄筋腐食調査の調査水準と項目

水準	ひび割れの有無	あり				なし
	漏水の有無	漏水あり		漏水なし		—
	ひび割れの大小	大	小	大	小	—
項目	ひび割れ幅	○	○	○	○	—
	鉄筋かぶり	○	○	○	○	○
	鉄筋腐食程度	○	○	○	○	○
	中性化試験	○	○	○	○	○

表-7 鉄筋腐食程度のグレード<sup>1)</sup>

グレード	鉄筋の状態
1	黒皮の状態。または、錆が生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート面に錆が付着していることはない。
2	部分的に錆があるが小面積の斑点状である。
3	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
4	断面欠損を生じている。

クリート表面析出物の濃度は  $1.5\text{kg/m}^3$  以上あるとわかるので、D と E トンネルを海洋性環境と分類した。以下 a) b) に詳細劣化調査の概要を記述する。

#### a) 鉄筋腐食調査

鉄筋腐食調査の調査水準は、表-6 に示すように、鉄筋の腐食要因と考えられる漏水の有無、ひび割れの有無およびかぶりの大小である。そして、各々の調査箇所ではひび割れ幅、かぶり、鉄筋腐食程度および中性化深さを記録している。

図-2 は 1 箇所あたりの調査説明図である。1 箇所あたりの調査は、まず、漏水とひび割れの有無および程度を確認する。なお、漏水が有るとは、継手部からの漏水により、コンクリート表面やひび割れが濡れている状態である。

次に、鉄筋が露出するまでコンクリートをはつり、かぶりを測定する。そして、鉄筋の腐食程度を外観より表-7 の基準で判定する<sup>1)</sup>。また、中性化深さは同一箇所のはつり面にフェノールフタレイン 1% 溶液を散布し呈色反応させ、正面から見て上部・下部・右側・左側の各々の非呈色深さを測定し、その平均値にしている。

#### b) 塩化物イオン濃度測定

海洋性環境と判断される D, E トンネルでは、コンクリートの深さ方向の塩化物イオン濃度を測定するために表-8 に示す数量のコアを採取した。塩化物イオン濃度測定の説明図を図-3 に示す。試験方法は、JCI-SC5「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」に準拠している。

表-8 塩化物イオン濃度測定箇所一覧表

調査対象	コア採取箇所数	備考
D トンネル	3	漏水箇所より採取
E トンネル	6	漏水有無不明

#### (2) 調査結果および考察

以下に、詳細劣化調査の結果を示して各腐食要因と鉄筋腐食程度との関係を考察する。

##### a) 鉄筋腐食程度とかぶり

RCセグメントを構成する鉄筋には、主鉄筋、配力鉄筋および組立鉄筋がある。今回の調査で見られた鉄筋の腐食は、配力鉄筋および組立鉄筋の腐食であり、主鉄筋はほぼ無被害である。この理由は、図-4 に示す鉄筋腐食程度の代表例(グレード 4)のように、主鉄筋が配力鉄筋の内空側に配置されているためである。したがって、ここでは配力鉄筋と組立鉄筋の腐食に関しての考察を行うので、かぶりとは配力鉄筋と組立鉄筋の純かぶりである。

図-5 は、鉄筋腐食グレードとかぶりの関係である。図中の点線は調査データを包含する鉄筋腐食の傾向であり、点線より右側を各鉄筋腐食グレードに対する安全側のかぶりと判断した。以降は、内陸性と海洋性に分けて、鉄筋の耐久性を安全側に保証可能なかぶりを考察する。

図-5(a) (b) は内陸性環境の調査結果である。図-5(a) は曲げひび割れがない場合、図-5(b) は曲げひ

び割れがある場合である。まず、ひび割れがない場合、かぶりが約 5mm 以下で腐食が顕著な傾向にある。そして、鉄筋腐食グレード 1 を安全側に保証するかぶりは約 10mm 以上と考えられる。次にひび割れがある場合は、かぶり 20mm 以下のデータが無く厳密な傾向ではないが、鉄筋腐食グレード 1 はかぶりが約 20mm 以上で安全側に保証できるとわかる。

図-5(c)(d)は海洋性環境の調査結果であり、図-5(c)は曲げひび割れがない場合、図-5(d)は曲げひび割れがある場合である。まず、ひび割れがない場合、かぶりが約 12mm 以下で腐食が顕著な傾向にあり、鉄筋腐食グレード 1 を安全側に保証するかぶりは約 17mm 以上と考えられる。次にひび割れがある場合のかぶりは、約 15mm 以下で腐食が顕著な傾向にあり、約 20mm 以上あれば鉄筋腐食グレード 1 を安全側に保証すると考えられる。

また、図-5 より漏水と鉄筋腐食の傾向もわかるが、ひび割れ有無のいずれも、漏水の有無で鉄筋の腐食に明確な差異はないと考えられる。この傾向は、内陸性および海洋性のどちらの環境でも同様である。

#### b) 鉄筋腐食程度と中性化

図-5 より得られる傾向より、かぶりが少ない場合に鉄筋が腐食することがわかる。この場合の鉄筋の腐食要因の一つに中性化が考えられる。中性化は中性化残りの程度で鉄筋に腐食を生じさせるため、図-6 に示す中性化残り度でデータを整理分析する<sup>10)</sup>。ここでのかぶりとは、調査で実際に計測した配力鉄筋と組立鉄筋の純かぶりである。なお、ひび割れがある場合の中性化による鉄筋の腐食は次項のひび割れ幅で傾向を分析しているので、ここでは、ひび割れがない場合のみを取り扱う。

図-7 は、鉄筋腐食グレードと中性化残りとの関係である。図中の点線は調査データを包含する鉄筋腐食の傾向であり、点線より右側を各鉄筋腐食グレードに対する安全側の中性化残り度と判断した。以下に鉄筋の耐久性を安全側に保証可能な中性化残りを考察する。図-7(a)は内陸性環境の結果である。中性化残りが約 2mm 以下で腐食が顕著な傾向にある。そして、鉄筋腐食グレード 1 を安全側に保証する中性化残りは約 10mm 以上と考えられる。一方、図-7(b)は、海洋性環境の結果である。中性化残りが約 12mm 以下で腐食が顕著な傾向にあり、約 16mm 以上あれば鉄筋腐食グレード 1 を安全側に保証すると考えられる。

また、図-7 より漏水の傾向もわかり、漏水なしの方が鉄筋の腐食が顕著である。この理由は、図-8 に示すように漏水なしの方が中性化の進行が早い傾

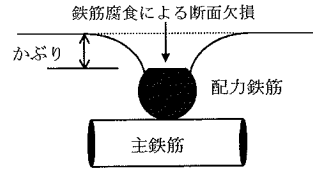
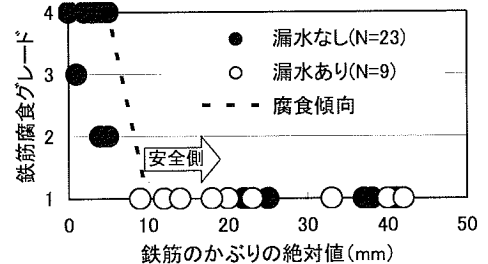
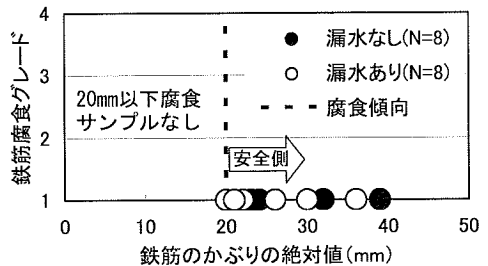


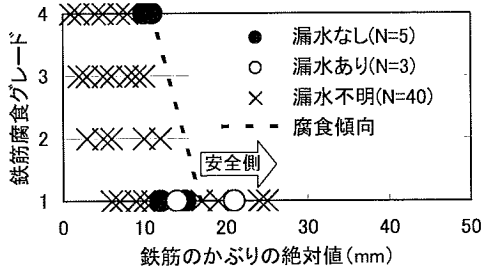
図-4 鉄筋腐食程度の代表例 (グレード 4)



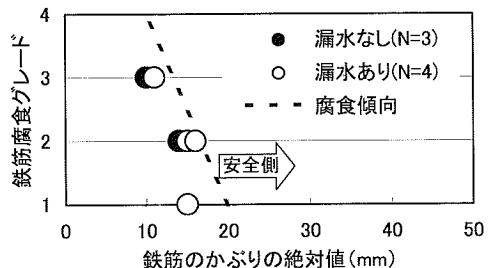
(a)内陸性環境、曲げひび割れなし



(b)内陸性環境、曲げひび割れあり



(c)海洋性環境、曲げひび割れなし



(d)海洋性環境、曲げひび割れあり

図-5 鉄筋腐食グレードとかぶりの関係

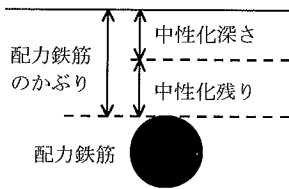
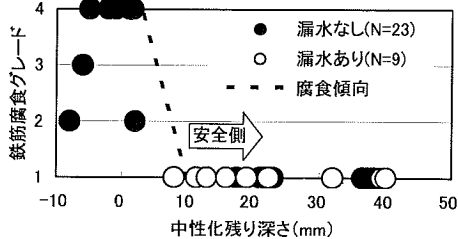
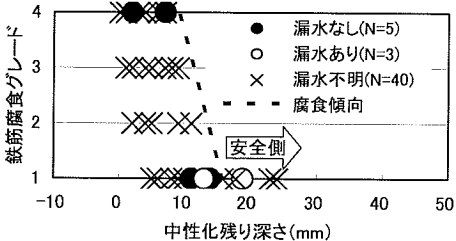


図-6 配力鉄筋の中性化残り



(a) 内陸性環境、曲げひび割れなし



(b) 海洋性環境、曲げひび割れなし

図-7 鉄筋の腐食グレードと中性化残りとの関係

向にあるためである。この傾向は、文献 12) の中性化の進行は相対湿度が低いと早いという報告と一致する。このため、内陸性と海洋性のどちらも、漏水のない方が中性化が進行して鉄筋の腐食が顕著な傾向になると考えられる。

表-9 は、鉄筋腐食と中性化残りに関する傾向をまとめたものである。表-9 には文献 10) に定めてある中性化残りについての許容値も示しているが、今回得られた中性化残りに関する傾向は、内陸性および海洋性環境ともに妥当であると考えられる。

### c) 鉄筋腐食程度と曲げひび割れ

文献 7) では、曲げひび割れによる主鉄筋の腐食は、曲げひび割れ幅を許容ひび割れ幅以下に抑制して防止するとしている。そして、この許容ひび割れ幅を主鉄筋のかぶりの関数で定めている。したがって、本論文も同様に鉄筋の腐食と曲げひび割れとの関係の評価には、図-9 に示すようにひび割れ幅 (W) とかぶり (C) とを考慮する。ここで、a) b) 項とは異なりかぶり (C) は主鉄筋のかぶりである。

一方、今回の調査箇所の曲げひび割れは、土水圧などの永久荷重の作用による応力ひび割れと考えられるが、この発生は配力鉄筋の上に多い。この場合、

表-9 鉄筋腐食程度と中性化残りに関する傾向

環境条件	耐久性を保証する 中性化残り	文献 10) の 許容値
内陸性	約 10mm 以下	10mm 以上
海洋性	約 16mm 以下	10mm 以上 最大 25mm

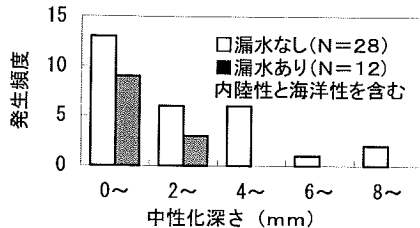


図-8 鉄筋の腐食程度と中性化深さとの関係

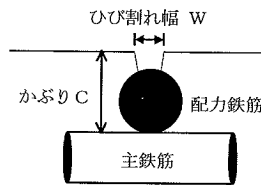
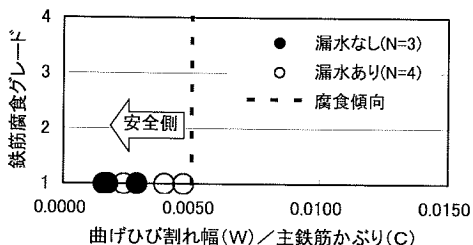
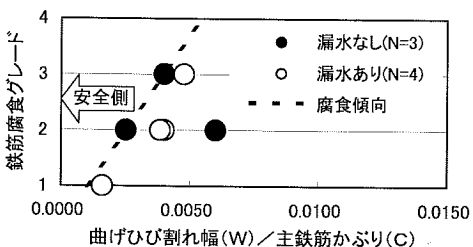


図-9 ひび割れ幅 (W) とかぶり (C)



(a) 内陸性環境



(b) 海洋性環境

図-10 配力鉄筋の腐食グレードと W/C との関係

表-10 鉄筋腐食程度と曲げひび割れに関する傾向

環境条件	耐久性を保証する W/C	文献 7) の許容値
内陸性	0.005 以下	0.005
海洋性	0.0025 ~ 0.004	0.0035 ~ 0.004

鉄筋の腐食は配力鉄筋に発生しやすいので、本論文では鉄筋の腐食の評価を主鉄筋ではなく配力鉄筋に対して行っており、この点が文献 7) の考え方とは異なる。

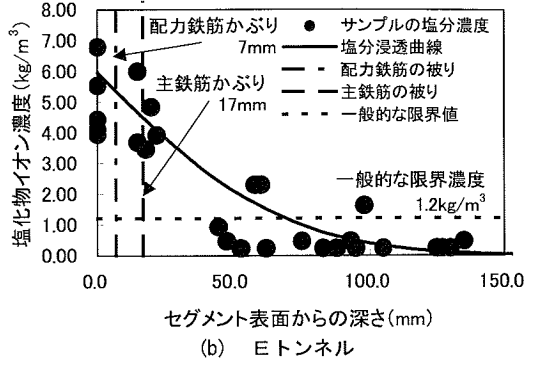
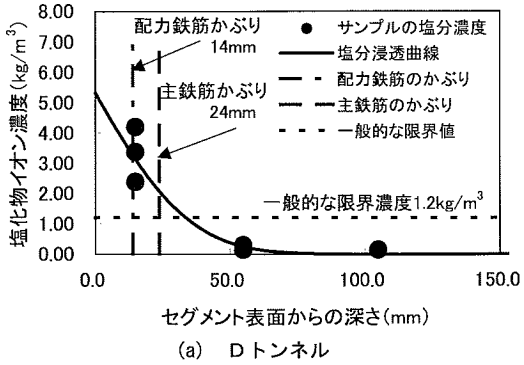


図-11 各トンネルの塩化物イオン濃度測定結果と主鉄筋および配力鉄筋のかぶりとの関係

図-10 は曲げひび割れ位置での配力鉄筋の腐食と W/C との関係である。図中の点線は調査データを包含する鉄筋腐食の傾向であり、点線より左側を各鉄筋腐食グレードに対する安全側のひび割れ幅と判断した。以下に鉄筋の耐久性を安全側に保証可能なひび割れ幅を考察する。図-10(a)は内陸性環境の結果である。W/C が 0.005 以上のひび割れ幅の大きなデータが無く厳密な傾向ではないが、鉄筋腐食グレード 1 は W/C が約 0.005 以下で安全側に保証できるとわかる。図-10(b)は、海洋性環境の結果である。W/C が約 0.0025 以上で腐食グレード 2, W/C が約 0.004 以上で腐食グレード 4 が鉄筋に生じている。

また、図-10(a) (b)より漏水の傾向もわかるが、内陸性と海洋性のどちらでも、漏水の有無で鉄筋の腐食に明確な差異はない。

表-10 は、鉄筋腐食程度と曲げひび割れに関する傾向をまとめたものである。表-10 には文献 7) に定めてある許容ひび割れ幅も比較のために示しているが、今回得られた傾向は、内陸性および海洋性環境ともに妥当であると考えられる。

d) 鉄筋腐食程度と塩化物イオン量

a) ~ c) のかぶり、ひび割れおよび中性化の検討で、鉄筋は海洋性環境の方が腐食しやすい傾向にあることがわかった。このため、海洋性環境のトンネルには塩分の影響が生じていると考えられる。

塩分の影響による鉄筋腐食の可能性は、文献 10) を参考に判断できる。これによると、鉄筋位置の塩化物イオン濃度が限界濃度 (1.2kg/m³) を超えると鉄筋腐食の可能性が高い。本章の調査で海洋性環境に分類した D, E トンネルの塩化物イオン濃度測定結果を図-11 に示す。この図にはコンクリート表面からの塩化物イオン浸透量の推定曲線も示しており、この推定には式(1)および表-11 に示す各種係数を用いている。なお、図-11 にある配力鉄筋および主鉄筋のかぶりは、調査箇所の実測値である。

表-11 塩化物イオンの浸透量推定に用いる各種係数

調査対象	C <sub>0</sub> (kg/m³)	D <sub>d</sub> (cm²/年)
Dトンネル	5.33	0.16
Eトンネル	5.97	0.98

表-12 シールドトンネル内空側の環境条件の定義

内陸性環境	大気および地下水に塩分が含まれていない環境条件、一般に海岸からの距離が 1 km 以上の地点
海洋性環境	大気および地下水に塩分が含まれている環境条件、一般に海岸からの距離が 1 km 以内の地点

$$C_d = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1C}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right] \quad (1)$$

ここに、C<sub>d</sub> : 表面から深さ C の塩化物イオン濃度 (kg/m³), C<sub>0</sub> : コンクリート表面塩化物イオン濃度 (kg/m³), C : コンクリート表面からの深度 (mm), D<sub>d</sub> : 塩化物イオンの拡散係数 (cm²/年) t : 使用年数 (年) である。

図-11 より、D, E トンネルの塩化物イオン濃度は、配力鉄筋および主鉄筋位置で限界濃度 (1.2kg/m³) を超えており、鉄筋腐食の可能性があるとわかる。

e) まとめ

鉄筋が腐食する環境要因には、漏水の有無や塩分等の環境的な要因がある。本章では、詳細劣化調査の結果をもとに、これらの環境要因毎に鉄筋腐食程度とかぶり、ひび割れおよび中性化との傾向を分析し、設計時点で鉄筋の耐久性を安全側に保証する定量的な数値を得た。また、内陸性環境と海洋性環境とで、鉄筋の腐食傾向に明確な差異が生じており、海洋性環境の詳細調査では塩分の影響があることが確認された。したがって、地中送電用シールドトンネル内空側の環境条件を内陸性環境と海洋性環境とに区分する。環境条件の定義は表-12 に示すとおり

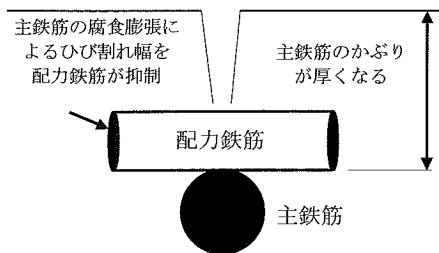


図-12 主鉄筋と配力鉄筋の配筋に関する構造細目

表-13 鉄筋が腐食しないかぶりの最低値

環境条件	ひび割れなし	ひび割れあり
内陸性	約 10mm	約 20mm
海洋性	約 17mm	約 20mm

表-14 中性化に対するかぶりの最低値（100年相当）

環境条件	表-9に示す 中性化残り	100年相当 中性化深さ	中性化に対 するかぶりの 最低値
内陸性	10mm	4mm	14mm
海洋性	16mm	4mm	20mm

表-15 詳細調査結果より推定した供用100年時点の平均中性化深さ

調査対象	調査時点の 供用年数	調査時点の平均 中性化深さ	平均中性化 速度係数	供用100年時点の 平均中性化深さ予測値
Aトンネル	28年	1.6(mm)	0.30 (mm/√年)	3.0(mm)
Cトンネル	22年	1.2(mm)	0.26 (mm/√年)	2.6(mm)
Dトンネル	24年	2.0(mm)	0.41 (mm/√年)	4.1(mm)
Eトンネル	14年	1.0(mm)以下	0.27 (mm/√年)以下	2.7(mm)

である。表-12の環境条件を地下水だけでなく大気中に含まれる塩分量でも区分している根拠は、海洋性環境では漏水なしの場合でも、漏水ありの場合と同様に鉄筋が腐食する傾向にあるためである。

なお、海洋性環境の場合、大気中より漏水の方が塩分濃度が高いのは一般に明白であるので、当初は、漏水ありの方が鉄筋腐食が顕著な傾向になると予想していた。しかしながら、本調査では漏水の有無で異なる傾向は得られなかった。この理由をひび割れの有無を観点にして考察する。

まず、ひび割れが無い場合の理由は、中性化速度の影響が考えられる。図-8に示したように、漏水ありの方が中性化の進行は遅いことがわかる。つまり、漏水の影響は中性化の進行の遅さと相殺されると考えられる。

次に、ひび割れがある場合の理由は、調査データにかぶりが薄く、ひび割れ幅が大きいデータが無いためと考えられる。これは図-5(b)にかぶり20mm以下のデータが無いこと、図-10にW/Cが0.005以上のデータが無いことからわかる。かぶり20mm以下のデータが無い理由は、RCセグメントに曲げひび割れが生じる部位は製造時点で設計かぶりが精度よく確保されていたと考えられる。また、既往の計測事例よりシールドトンネルの設計荷重は、実際よりもやや大きい値であった報告例が多い<sup>13)</sup>。つまり、シールドトンネルは、漏水の影響で鉄筋が腐食するような大きなひび割れは生じにくい環境にあったと考えられる。これは図-1(b)にて曲げひび割れの発生数が少ないことからわかる。

#### 4. 耐久性を保証する構造細目

本章では、3章の調査結果に基づいて、RCセグメントの耐久性を保証する構造細目を提案する。

##### (1) 配筋の構造細目

RCセグメントを構成する主な鉄筋は主鉄筋と配力鉄筋であるが、図-12に示すように主鉄筋のかぶりが厚くなるように配筋することを原則とする方が耐久性の面からは良い。この構造細目の耐久性に対する利点は次の2点である。

- ・主鉄筋のかぶりが大きくなり耐久性が増す
- ・主鉄筋の腐食膨張によるひび割れを配力鉄筋が抑制する

##### (2) かぶりの構造細目

ひび割れ、中性化および塩分などの腐食要因に対するRC構造物の耐久性は、コンクリートの配合に耐久性を考慮した上で適切なかぶりを設定し保証する必要がある。しかし、セグメントは水セメント比が通常で約35%前後と既に耐久性の高い配合であり、かぶりの大小が耐久性を左右することになる。

本論文では、地中送電用のシールドトンネルの耐久性を保証するかぶりの構造細目を設定するにあたり次のa)~e)を考慮している。

##### a) 鉄筋の腐食発生に対するかぶりの最低値

かぶりの最低値は、ひび割れ、中性化および塩分などの腐食要因に対して、鉄筋の耐久性を保証するように設定する。表-13は3章の調査より得られた鉄筋の耐久性を安全側に保証可能なかぶりである。



環境条件およびひび割れの有無で鉄筋の腐食傾向が異なっていたため4区分に分けた。

なお、内陸性環境（ひび割れあり）では、かぶり20mmを最低値としているが、これは、調査でかぶり20mm以下のデータがないためである。一方、海洋性環境（ひび割れあり）のかぶりの最低値も20mmである。つまり、内陸性環境（ひび割れあり）では、かぶりの最低値を20mm以下にできる可能性もあるが、これには根拠のあるデータを揃えて証明する必要がある、今後の課題とする。

#### b) 中性化に対するかぶりの最低値

3章の調査より中性化残り深さと鉄筋腐食程度に関連があることがわかったので、中性化の進行に対し耐久性を確保するかぶりを検討する。

中性化に対するかぶりの最低値を算定したものを表-14に示す。中性化は経年的な現象であり、鉄筋の耐久性を確保するためには、表-9に示した中性化残りにトンネルの供用期間分の中性化深さを加算する必要がある。この供用期間を表-14では100年としている。表-14の供用100年相当の中性化深さである4mmは、表-15に示すように3章の詳細調査より各トンネルの平均中性化速度係数を求め、100年相当の中性化を予想した中で最大値である4.1mmを根拠にしている<sup>10)</sup>。なお、表-15の平均中性化深さには漏水箇所とかぶり剥落箇所のデータは含んでいない。これは、漏水箇所は中性化が遅いこと、かぶり剥落箇所は設計時点と中性化の開始位置が異なることによる。100年間を考慮した中性化深さが4mm程度と比較的に小さい理由は、RCセグメントの水セメント比は通常で約35%前後であり中性化の進行に対して高い抵抗性があるためと考えられる。

#### c) 塩分の影響に対するかぶり

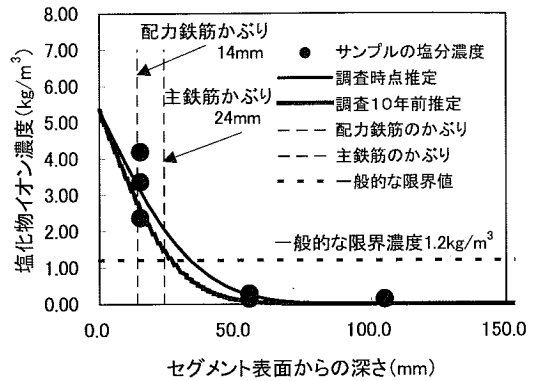
塩分に対する耐久性の保証は、設計耐用期間において、鋼材位置の塩化物イオン濃度が限界濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ に至らないようにするのが一般的である<sup>10)</sup>。

表-11に示したD、Eトンネルの塩分調査データと式(1)とを用いて限界濃度に至らないかぶりを供用期間50年と100年に対して計算したものを表-16に示す。このように供用期間に対して限界塩分濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ に至らないかぶりを求めると、かぶりが大きくなり現実的ではないことがわかる。

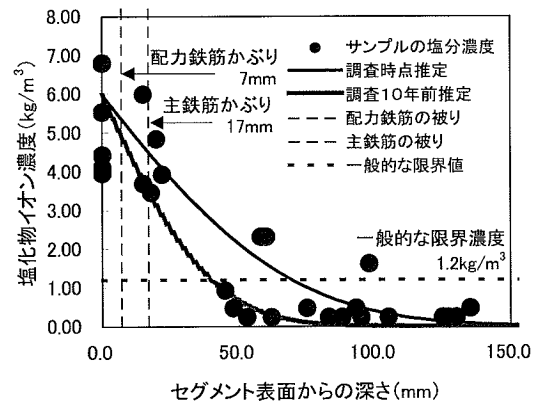
一方、図-13は、今回調査したトンネルで調査時点と調査10年前との塩化物イオン浸透量を推定した結果の比較である。これより、調査の10年前でも配力鉄筋および主鉄筋付近の塩化物イオン濃度は、限界濃度 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えていたと推測できる。しかしながら、塩化物イオン濃度が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超えて

表-16 限界濃度に至らないかぶりの計算値

推定地点	供用期間 50 年	供用期間 100 年
D トンネル	50mm	70mm
E トンネル	128mm	180mm



(a) Dトンネル



(b) Eトンネル

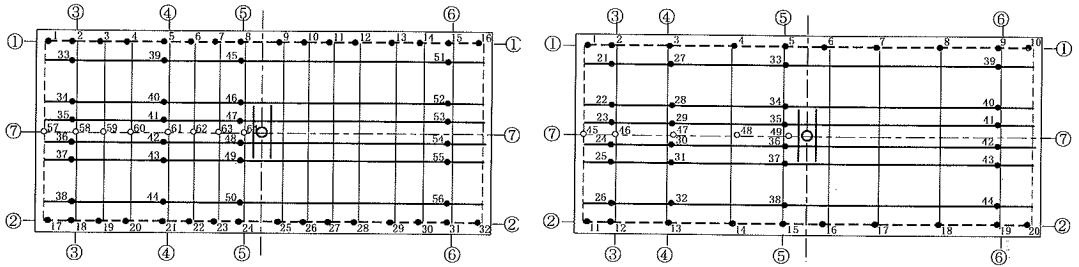
図-13 調査時点および調査の10年前の塩化物イオン浸透量の推定結果の比較

10年以上経過した条件でも、図-5(c)に示したように配力鉄筋のかぶりが17mm程度以上の場合には、鉄筋の腐食が生じていない。この理由には、漏水箇所の中性化の進行が遅いこと、セグメントの水セメント比が約35%前後と高耐久であることが考えられる。つまり、コンクリート表面の塩化物イオン濃度が高いのは漏水箇所であり、このような箇所は図-8に示したように中性化の進行が遅い。一方でセグメントのコンクリート硬化体は非常に密であり鉄筋は高いアルカリ環境下にあるため腐食が進行しにくい条件下にあると考えられる。

以上より、塩分に対する耐久性は、a)の「鉄筋の腐食発生に対するかぶりの最低値」で保証できると考えられる。

表-17 コンクリート打設によるかぶり変動量を測定したセグメント供試体一覧表

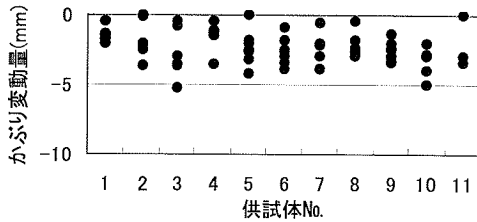
No.	1~2	3	4	5	6	7~9	10	11	
種別	高流動セグメント						固練りセグメント		
諸元	内径 3,000mm, セグメント幅 1,200mm, セグメント厚さ 200mm								
鉄筋比	0.23%						0.31%	0.29%	
主鉄筋	D10×6本						D10×8本	D10×4本 D13×2本	
配力鉄筋	D10 @150mm	D10 @300mm	D6 @150mm	D6 @300mm	D6 @150mm	D6 @300mm			



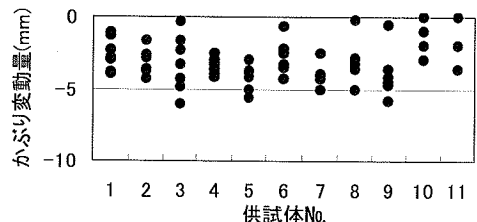
配力筋@150mmの場合

配力筋@300mmの場合

図-14 コンクリート打設によるかぶり変動量の測定位置



(a) 内空側のかぶり変動量



(b) 地山側のかぶり変動量

図-15 コンクリート打設によるかぶり変動量の測定結果

#### d) セグメント製作時に考慮するかぶりの変動量

セグメントの製作時にはかぶりの検査が実施され、この時の合格基準は、かぶりが減る方向の鉄筋のずれを認めないのが原則である<sup>1),10)</sup>。しかし、この検査はコンクリート打設前に実施されるため、コンクリートの打設時に鉄筋が若干ずれていると考えるのが現実的である。これによるかぶりの変動量を把握するため、表-17 に示すセグメントについて、コンクリート打設の前後のかぶりを測定している<sup>10)</sup>。

通常のRCセグメントは、コンクリート打設時の鉄筋かごの変形を防止する等の目的のために引張鉄筋比を0.50%程度以上にしている。一方、表-17のNo.1~No.9の高流動コンクリートを打設した鉄筋かごは引張鉄筋比0.23%、No.10~11の固練りコンクリートを打設した鉄筋かごは引張鉄筋比0.29~0.31%である。つまり、表-17の供試体は鉄筋かごの剛性が通常のRCセグメントよりも低いので、測定で得られるかぶりの変動量は通常よりも大きな値であると考えられる。

図-14 に示す測定位置は、各供試体の内空側と地山側のそれぞれより代表断面を7断面抽出し、その断面内の主鉄筋と配力筋のかぶりの変動量を測定している。図-15 は各供試体の測定段面毎の平均値であるが、全ての供試体でかぶりが減少する傾向であり、この方向へのかぶりの変動量は最大5mm程度である。したがって、セグメントの最小かぶりを設定する場合には、セグメント製作時のかぶりの変動に対する余裕として5mmを考慮するべきと考える。

#### e) まとめ

最低かぶりの構造細目を表-18 に示す。この表に示すかぶりは、表-19 に示すように本節 a)~d) の検討結果を全て考慮しており、ひび割れ、中性化および塩分などの腐食要因に対する耐久性を担保した値としている。

表-18 に示すかぶりの構造細目では、環境条件だけでなく、ひび割れの有無でも最低かぶりを区分している。この理由は、ひび割れの有無で鉄筋の腐食の傾向が異なることが、調査結果よりわかったため

表-18 最低かぶりの構造細目

環境条件	ひび割れなし	ひび割れあり
内陸性	20mm	25mm
海洋性	25mm	25mm

表-19 a)~d)の検討結果を全て考慮した最低かぶりの算定

評価項目	環境条件		海洋性	
	ひび割れなし	ひび割れあり	ひび割れなし	ひび割れあり
a)鉄筋の腐食発生に対するかぶりの最低値	10mm	20mm	17mm	20mm
b)中性化に対するかぶりの最低値	14mm		20mm	
c)塩分の影響に対するかぶり	a)鉄筋の腐食発生に対するかぶりの最低値にて保証している			
a), b), c)の最大値	14mm	20mm	20mm	20mm
d)コンクリート打設時の鉄筋の移動に対する割増し量	+5mm			
かぶりの最低値	19mm	25mm	25mm	25mm

である。このひび割れの有無は、土水圧などの永久荷重の作用による曲げひび割れ発生の可能性を構造計算により判断することになる。しかし、構造計算により曲げひび割れなしと判断される場合でも、施工時の荷重によるひび割れが発生する場合がありますので注意する必要があります。

なお、本章では、かぶりの最低値を検討したが、RCセグメントのかぶりは厚すぎると施工時の荷重による端部の欠けが増えて、逆に耐久性が低下する場合もあるので注意する必要があります。

## 5. ひび割れ幅の照査に関する提案

ひび割れ幅の照査は、土水圧などの永久荷重に対して計算される曲げひび割れ幅が、限界値に到達しないことを式(2)で確認するのが一般的である<sup>7)</sup>。

$$W_s / W_R \leq 1.0 \quad (2)$$

ここに、 $W_s$ ：曲げひび割れ幅、 $W_R$ ：ひび割れ幅の限界値である。

本章では、式(2)の考え方を基本に、3章の調査結果に基づいたRCセグメントの耐久性を保証するひび割れ幅の照査方法を提案する。

### (1) ひび割れ幅の限界値

#### a) 内空側の限界値

本論文のトンネル内空側の詳細劣化調査では、配力鉄筋の腐食はみられたが主鉄筋の腐食はほとんどなかった。荷重を負担しない配力鉄筋の腐食は、直接的にはトンネル構造の安全性には影響しないため許容できるという考えもある。しかしながら、配力鉄筋の腐食を許容すると、コンクリート断面は、表

表-20 内空側のひび割れ幅の限界値

環境区分	内陸性	海洋性	備考
内空側	0.005 C	0.0035 C	C:主鉄筋のかぶり(mm)

表-21 地山側のひび割れ幅の限界値

環境区分	土中の環境	備考
地山側	0.005 C	C:主鉄筋のかぶり(mm)

面剥離や主鉄筋の定着力低下などが生じて、設計の前提条件とは異なる状態になることが懸念される。したがって、本論文では、配力鉄筋の腐食を許容しない前提でひび割れ幅の限界値を設定する。

内空側のひび割れ幅の限界値を表-20に示す。この限界値は3章の調査結果に基づいており、配力鉄筋に対し耐久性を保証するものである。

#### b) 地山側の限界値

シールドトンネルの地山側は、調査がほぼ不可能であるため、劣化について不明な点が多い。

一般的には、地山側の特に地下水位以深は、酸素供給がわずかであるので鋼材の腐食は進行しにくいと考えられる<sup>15)</sup>。また、近年の施工技術の発達によりシールドトンネルの裏込め層の充填は良好であり、地山側の鋼材は裏込め層とかぶりなどで二重に保護されることになる。つまり、地山側は内空側よりも鋼材が腐食しにくい環境条件と考えられるが、一方、地山側は補修が困難なので、耐久性に関する信頼性を内空側よりも慎重に取り扱う必要もある。

筆者らは、2章より地中送電用のシールドトンネルの約7割に多少の漏水が発生している傾向を得ているので、漏水を前提に地山側の環境条件を次のように想定している。

トンネルが地下水位以深に位置する場合は、漏水

表-22 曲げひび割れと配力鉄筋との位置関係

調査対象	曲げひび割れデータ数	配力鉄筋上のひび割れ数	出現率
A トンネル	7	7	100%
C トンネル	14	14	100%
D トンネル	7	7	100%
計	28	28	100%

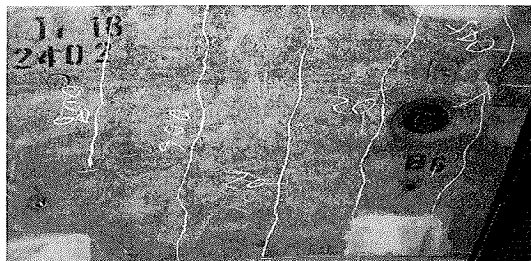
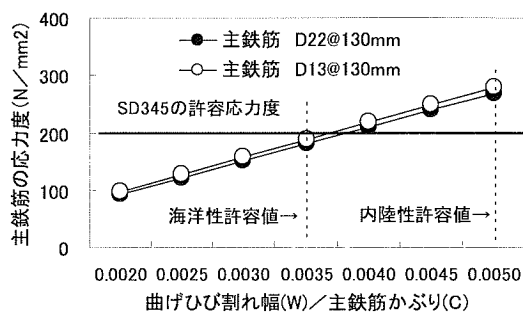


写真-1 曲げひび割れの代表例 (C トンネル)



(試算条件：セグメント幅 1200mm, セグメント厚さ 200mm, 配力鉄筋間隔 150mm, かぶり 50mm)

図-16 曲げひび割れ照査と許容応力度との関係

が生じると多少の地下水の移動が生じるため、鋼材を腐食させる酸素が供給される可能性がある。さらに、アルカリ性が洗われてしまう水みちの箇所裏込め層には長期間の表面保護を期待できない。一方、トンネルが地下水位で浅に位置する場合は、土中の間隙からの酸素供給があるので鋼材には腐食の可能性がある。また、土中は大気中よりも二酸化炭素の濃度が10~100倍ほど濃いといわれるため、地山側の表面の保護材に期待できる裏込め層も大気中と同等以上に中性化する可能性がある<sup>16)</sup>。このような地山側の劣化の現象を証明するデータは少ないが、地山側は補修が困難なので、上述のように考えて信頼性を担保する方が安全であると考えられる。

したがって、表-21に示すようにシールドトンネルの地山側の環境条件は地下水位の深浅にかかわらず鋼材は腐食する環境とする。そして、地山側の曲げひび割れ幅の照査の限界値は、文献7)の一般環境(土中の環境)に準拠して定めることにする。

## (2) 曲げひび割れ幅の算定式

曲げひび割れ幅  $W_s$  の算定方法は文献7)に式(3)が定められている。

$$W_s = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \{4 \cdot C + 0.7(C_s - d_s)\} \cdot (\sigma_s / E_s + \epsilon_{csd}) \quad (3)$$

ここに、 $k_1$ ：鋼材の表面変状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、 $k_2$ ：コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、 $k_3$ ：引張鋼材の段数の影響を表す係数、 $C$ ：軸方向鉄筋の純かぶりの期待値(mm)、 $C_s$ ：軸方向鉄筋の中心間隔(mm)、 $d_s$ ：軸方向鉄筋径(mm)、 $\sigma_s$ ：軸方向鉄筋応力度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_s$ ：鉄筋のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $\epsilon_{csd}$ ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である。

式(3)の「 $1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \{4 \cdot C + 0.7(C_s - d_s)\}$ 」の項は、曲げひび割れ間隔の項であり、ひび割れ間隔を主鉄筋の鋼材量およびかぶりの関数で算定している<sup>17)</sup>。これに対し文献18)には、RCセグメントの配力鉄筋の間隔が密なため、曲げひび割れは配力鉄筋の直上に配力鉄筋の間隔で生じるとの実験が報告され、これに基づいて曲げひび割れ幅の算定方法に式(4)が提案されている。なお、中規模なシールドのRCセグメントの配力鉄筋間隔は150mm程度である。

$$W_s = S_w \cdot (\sigma_s / E_s + \epsilon_{csd}) \quad (4)$$

ここに、 $S_w$ ：セグメント配力鉄筋間隔(mm)である。

一方、表-22は3章の調査結果より、曲げひび割れと配力鉄筋との位置関係を照合したものである。表-22より、調査結果では曲げひび割れの100%が配力鉄筋の上で生じており、曲げひび割れは配力鉄筋の上に生じる可能性が高いことがわかる。写真-1はCトンネルで撮影した配力鉄筋間隔で発生している曲げひび割れの例である。なお、写真-1では曲げひび割れをチョークで強調している。

以上を考慮すると、RCセグメントの曲げひび割れ幅の算定は、配力鉄筋の間隔を曲げひび割れ間隔とする式(4)を用いる方が、シールドトンネルの実態に整合すると考えられる。また、曲げひび割れの照査に式(4)より算定される応答値を用いることは、前節でひび割れ幅の限界値を配力鉄筋の腐食に対して設定したことも整合している。ただし、式(4)の適用条件は次の2点である。

- ・配力鉄筋の間隔が式(3)で算定される曲げひび割れ間隔よりも密になること
- ・第4章(1)配筋に関する構造細目に合格すること

### (3) 許容応力度法との比較

従来の許容応力度法と比較することで、本章の曲げひび割れの照査方法の妥当性を確認する。図-16は、曲げひび割れ幅が限界値に達するときの主鉄筋の応力度を式(4)より計算した結果である。試算条件は、セグメント幅 1,200mm, 主鉄筋 8 本, 配力鉄筋間隔 150mm という一般的なものである。

鉄筋の許容応力度  $200\text{N}/\text{mm}^2$ (SD345)と表-20の曲げひび割れ幅の限界値に相当する応力とを比較すると、曲げひび割れ幅の照査結果は、海洋性環境でほぼ同等程度、内陸性環境で許容応力度よりも4割程大きい応力を主鉄筋に許容するとわかる。この計算結果には曲げひび割れ幅の算定に式(4)を用いたことが影響している。つまり、本章の曲げひび割れの照査方法は、内陸性環境にて既往の設計にない引張応力を主鉄筋に許容するとわかる。一方、表-20のひび割れ幅の限界値は、許容応力度法で設計された既設トンネルの調査を根拠にしているため、主鉄筋の応力が著しく許容応力度を超えることは前提にない。したがって、最終の設計結果は主鉄筋の引張応力の値に注意する必要がある。なお、実際のトンネルのRC断面設計では圧縮側のコンクリート応力に応力制限値<sup>7)</sup>があり、これも主鉄筋の引張応力に制限を与える。このため、主鉄筋の引張応力が著しく許容応力度を超える計算結果になるか否かは、コンクリート強度とのバランスを考慮する必要がある。

## 6. 結論

本論文の結論は次の①～③のとおりである。なお、これらは、RCセグメントの主鉄筋を配力鉄筋よりも断面の内側に配筋するのが前提条件である。

- ①鉄筋の耐久性を保证するかぶりを環境条件(内陸性環境, 海洋性環境)と構造条件(ひび割れの有無)に分けて表-18に示すように提案した。この値は内陸性環境の曲げひび割れなしの場合で20mm, その他の場合は25mmである。
- ②永久荷重作用時の曲げひび割れが要因で生じる配力鉄筋の腐食に対して許容できるひび割れ幅の限界値を表-20および表-21に示すように提案した。この値は内陸性環境で0.005C, 海洋性で0.0035Cである。ここに、C:主鉄筋のかぶり(mm)である。
- ③土水圧等の永久荷重作用時の曲げひび割れ幅算定に配力鉄筋の間隔を考慮し、式(4)を提案した。これは、ひび割れ幅の限界値を配力鉄筋の腐食に対して定めたことと整合を図ったものである。

## 7. おわりに

シールドトンネルの経年劣化の様相は、その用途により大きく異なるものと考えられる。

今回、地中送電用シールドトンネルの耐久性を検討するにあたり、数多くの既設トンネルを調査した。これらの劣化調査は、総延長14,275mの地中送電用シールドトンネルより最も劣化が生じている地点を対象に実施されたものである。したがって、調査で得られたデータはトンネルの劣化について特に顕著な傾向を示すものである。また、調査のデータ数が少なく根拠が乏しいものは、既往の基準類に定めてある指標値と比較してその妥当性を確認している。以上より、本論文が提案する耐久性設計方法は、地中送電用トンネルの実態に即した形で、その耐久性を安全側に保証可能であると考えられる。

一方、本論文の結論は、供用時の維持管理にも応用ができる。つまり、既設構造物の劣化点検時には、本論文にある環境条件毎のかぶりやひび割れ幅の提案値が修繕行為の要否を判断する目安になると考えられる。しかしながら、地中送電用のシールドトンネルは、送電量による温湿度の変化や換気方法などでも環境が区分でき、それぞれの環境区分で劣化現象は異なる可能性もある。このため、トンネルの効率的な維持管理を行う上では、更に詳細な環境区分での劣化傾向を調査する必要がある。今後このトンネルの劣化を研究し、信頼性の向上に努める所存である。

地中送電用のシールドトンネルがより高品質かつ経済的に建設され、耐久的に供用されることを念願する次第である。

謝辞：本論文の検討にあたり、多大な御指導と御助言を頂いた東京都立大学 山本稔名誉教授、早稲田大学 小泉淳教授、(財)地域地盤環境研究所 小山幸則所長をはじめとする建設会社、コンサルタントの方々、末筆ながら誌面を借りて心から謝意を表する次第です。

### 参考文献

- 1) (社)土木学会, (社)日本下水道協会: シールド工専用標準セグメント, pp. 357-360, 2001.7.
- 2) (社)土木学会: トンネル標準示方書, シールド工法編, pp. 93-96, 1996.5.
- 3) 大塚正博, 塩治幸男, 小林亨, 小泉淳: シールド工専用セグメントの水膨張シール材による止水設計法につ

- いて, 土木学会論文集, No.651/VI-47, pp. 61-79, 2000. 6.
- 4) 大塚正博, 塩冶幸男, 小林亨, 小泉淳: 水膨張シール材の長期的な耐久性の評価について, 土木学会論文集, No.706/VI-55, pp. 101-110, 2002. 6.
  - 5) 土木工学社: セグメントの新技術, 2000. 2.
  - 6) 東京電力(株): 洞道とマンホールの点検管理に関する手引, 1998.
  - 7) (社)土木学会: コンクリート標準示方書[2002年制定]構造性能照査編, pp. 95-102, 2002. 3.
  - 8) (社)土木学会: トンネルへの限界状態設計法の適用, トンネルライブラリー, 第11号, pp. 114-116, 2001. 5.
  - 9) 吉本正浩, 阿南健一, 大塚正博: シールドトンネルの施工時荷重の照査方法に関する一提案, 土木学会論文集, No.756/VI-62, pp. 131-144, 2004. 3.
  - 10) (社)土木学会: コンクリート標準示方書[2002年制定]施工編, pp. 22-28, 2002. 3.
  - 11) (社)土木学会: コンクリート標準示方書[2001年制定]維持管理編, pp. 90-93, 2001. 1.
  - 12) (社)日本コンクリート工学協会: 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方, pp. 24-29, 1991. 5.
  - 13) (社)土木学会: 都市 NATM とシールド工法との境界領域, トンネルライブラリー, 第13号, pp. 119-207, 2003. 10.
  - 14) 秋葉芳明, 吉本正浩, 大野弘城: 良質な地盤におけるシールド用RCセグメントの鉄筋量低減の検討, 電力土木, No.290, pp. 111-115, 2000. 11.
  - 15) 吉本正浩: 地中送電用立坑ならびに開削トンネルの性能照査型設計法, 電力土木, No.303, pp. 12-21, 2003. 1.
  - 16) 日本防食技術協会: 土木・建築における防錆防食, 1967. 9.
  - 17) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, 1970.
  - 18) 中村敏一, 石村彰生: RCセグメントの水密性に関する評価について, トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, 2001. 11.

(2003. 6. 13 受付)

## DURABILITY ASSURANCE METHODS OF REINFORCED CONCRETE SEGMENTS OF SHIELD TUNNELS FOR TRANSMISSION

Masahiro YOSHIMOTO, Takasi NOBUOKA, Yasuhiro KASAI  
and Masahiro OOTSUKA

This paper proposes the durability assurance methods of shield tunnels for transmission which are assembled by reinforced concrete segments based on the degradation analysis of existing shield tunnels for transmission. The main features of these methods are the following three points.

First, we group the environmental conditions of these tunnels into seashore and inland atmosphere. Secondly, we propose thickness of minimum concrete cover to reinforcement of segment under both environmental conditions. Thirdly, we propose the allowable crack width against both environmental conditions to control cracks caused by bending force of the segments against the permanent loads.