

シールドセグメントの耐久性能に関する試算

A TRIAL CALCULATION ON THE DURABILITY OF SEGMENTS FOR SHIELD TUNNELSE

岩波 基¹・千代 啓三²
Motoi IWANAMI Keizo CHISHIRO

In shield tunnels, it had been most common to construct secondary lining in former days. On account of it, the durability of primary linings had been left out of consideration. But, recently, the number of tunnels without secondary linings has been increased to reduce expense, so the measures to secure the durability of primary lining have been necessary. These measures are treated as “concrete covers for reinforcements” and “restraints of crack widths” in “Standard segments for shield tunneling”. When expressing the durability in figures, the application of investigating methods in “Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures” is prescribed by “Japanese standard for shield tunneling”. On this condition, we calculated on trial the durability of segments by way of current standards. As a result of it, it was confirmed that current investigating standards of the durability lead extremely more secure judgments. We report these results in this paper.

Key Words : shield tunneling, durability, damage from salt water, carbonation, segments

1. はじめに

従来のシールドトンネルは二次覆工を施すことが多く，一次覆工の耐久性能が問題になることは少なかった．しかし，最近，コスト縮減等の観点から，コンクリート系セグメントでは二次覆工を施さない場合が増えてきており，一次覆工の耐久性能を確保する対策が必要となっている．このようなセグメント本体の耐久性能の確保に関する対策は，「シールド工事用標準セグメント¹⁾」において“鉄筋かぶりの確保”と“ひび割れ幅の抑制”として扱われている．また，耐久性能を定量的に確認する必要がある場合には，「トンネル標準示方書 シールド工法・同解説²⁾（以後，トンネル標準示方書と称す）」において「コンクリート標準示方書（構造性能照査編）（2002年制定）³⁾（以後，コンクリート標準示方書と称す）」の照査方法を適用するように規定されている．そこで，コンクリート系セグメントの耐久性能に関して，現行の規準に準拠して試算を実施した．その結果，耐久性能の照査規準は極端に安全側の評価であることがわかった．本論文は，その結果について考察を加えて報告するものである．

2. 現在の耐久性能照査

一次覆工であるシールドセグメントは覆工の主体であり，十分に管理された工場で製作されるため，初期の耐久性能は高いと考えられる．そのため，鉄筋の純かぶりが25mm以上を有していれば，ひび割れ幅が許容値を満たすことで，セグメント本体は耐久性能を有することが確認できる．そこで，まずひび割れ幅

キーワード：シールド，耐久性能，セグメント，塩害，中性化

¹正会員 長岡工業高等専門学校教授 環境都市工学科

²正会員 株式会社 熊谷組 土木事業本部シールド技術部

の検討について以下に示す。さらに、耐久性能を定量的に確認するの必要がある場合に行う中性化と塩化物イオンの影響に関する検討についても述べる。

(1) ひび割れに対する検討

トンネル標準示方書におけるコンクリート系セグメント本体の耐久性能照査は、算定した曲げひび割れ幅が、トンネルの使用目的や環境条件そして部材の条件から定めた許容ひび割れ幅以下となることを確認して行う。この検討は、耐久性能だけでなく水密性能や美観についても構造物の品質を確認する上で重要な検討であるといえる。しかし、トンネル標準示方書の許容応力度法設計法の記述においては、曲げモーメントおよび軸力によって発生するひび割れへの対応して、許容応力度を低減して対応する場合が多いと記載されているだけである。そこで、一般的に、ひび割れ幅の定量的な照査を行う場合には、使用限界状態の検討方法を流用して行う。トンネル標準示方書における使用限界状態での部分安全係数の目安を表-1に示す。

セグメントに発生するひび割れのうち、曲げモーメントおよび軸力によって発生するひび割れに対応して検討を行う場合、式(1)によって求めたひび割れ幅が、表-2に示した許容ひび割れ幅以下であることを確認する。

$$w = l_{\max} \cdot \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、 w ひび割れ幅 (mm) , l_{\max} : 配力鉄筋の最大間隔 (mm) , σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (N/mm²) , E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²) , ε'_{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 (一般に 150×10^{-6} としてよい)

表-2 許容ひび割れ幅の例(mm)

鋼材の種類	環境条件	
	外 面	内 面
異形鉄筋	一般の環境	腐食性環境
	0.005c	0.004c

(2) コンクリートの中性化に対する検討

トンネル標準示方書ではコンクリート系セグメントの中性化に伴う劣化について注意喚起はあるものの具体的な検討についての記述はない。また、「トンネル標準示方書（開削工法編）2006年制定⁴⁾」においてコンクリートの中性化深さの設計値を求める式は記述されており、照査が具体的にできるが、コンクリートの水セメント比が50%以下で、かぶりが30mm以上ある場合には中性化の検討を省略することができることとなっている。したがって、コンクリート系セグメントは、工場製品で水セメント比が40%以下の高品質なコンクリートであるため、検討する必要はないと考えられる。このため、一般的に計算方法の記述と計算の実施を省略されている。

(3) コンクリートの塩化物の影響に対する検討

トンネル標準示方書では、コンクリート系セグメントの塩化物イオンの浸入について注意喚起はあるが、外部から塩化物イオンが侵入する場合の具体的な検討方法の記述はなく、コンクリート標準示方書に準じて検討することとなっている。沿岸部付近のシールドトンネルに塩害と思われる早期劣化が生じている事

表-1 ひび割れ幅検討における安全係数の例

		トンネル標準示方書
材料係数 γ_m	コンクリート	1.0
	鉄筋	1.0
部材係数 γ_b	曲げ	1.0
荷重係数 γ_f	土圧	1.0
	側方土圧	1.0
	水圧	1.0
	地盤反力係数	1.0
	自重	1.0
	上載荷重	1.0
構造解析係数 γ_r		1.0
構造物係数 γ_i		1.0

例がある．そこで，最近の沿岸部のシールドトンネルでは塩害に対する耐久性能照査を行い，塩害対策を講ずることがある．その際，設計にコンクリート標準示方書の塩化物イオンの浸入に関する耐久性能照査方法を以下に示す．

塩化物イオンの浸入に伴う鋼材腐食に関する照査は，鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d の鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に対する比に構造物係数 γ_i を乗じた値が，1.0以下であることを確かめることにより行う．

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad (2)$$

ここに， γ_i ：構造物係数．一般に1.0としてよいが，重要構造物に対しては1.1とする．

C_{lim} ：鋼材腐食発生限界濃度．一般に 1.2kg/m^3 とする．

C_d ：鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値．一般に，式(3)で求める．

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}}\right)\right) \quad (3)$$

ここに， C_0 ：コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度

c ：かぶりの期待値（mm）．一般に，設計かぶりとする．

t ：塩化物イオンの浸入に対する耐用年数（年）．一般に，式(3)で評価する鋼材位置における塩化物イオン濃度に対しては，耐用年数100年を上限とする．

γ_{cl} ：鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した安全係数．一般に1.3とする．

D_d ：塩化物イオンに対する設計拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）．一般に，式(4)により評価する．

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \cdot \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 \cdot D_0 \quad (4)$$

ここに， γ_c ：コンクリートの材料係数．一般に1.0としてよい

D_k ：コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）

D_0 ：コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す定数（ $\text{cm}^2/\text{年}$ ）．一般に， $200\text{cm}^2/\text{年}$ とする．

w ：ひび割れ幅（mm）

w_a ：許容ひび割れ幅（mm）

w/l ：ひび割れ幅とひび割れ間隔の比．

なお， $\operatorname{erf}(s)$ は，誤差関数であり， $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$ で表される．

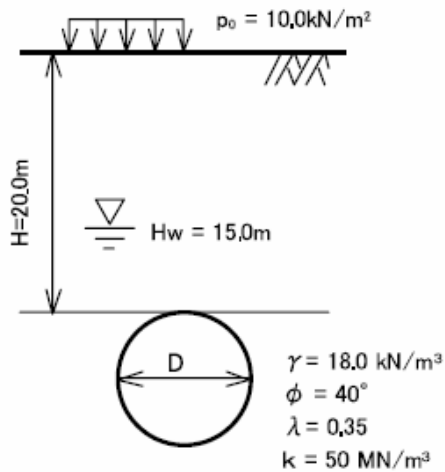
3. 計算条件

(1) 計算条件

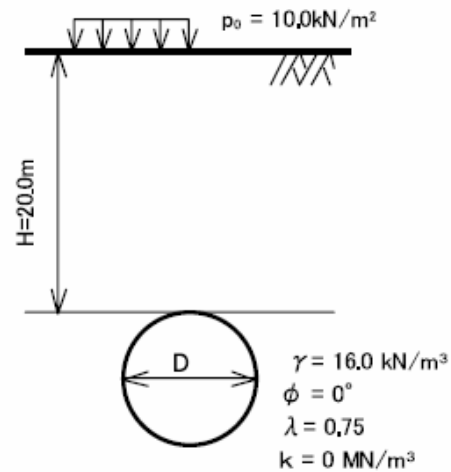
今回の検討では，鉄道トンネルの複線断面を想定して計算条件を設定した．また，都市部の新設トンネルとして土被りは20mとした．地盤が洪積砂層と軟弱粘性土層の場合の2ケースについて計算を実施した．表-4と図-2は地盤条件を示したものである．また，表-5はセグメントの仕様を，表-6は物性条件を示したものである．

表-4 地盤条件

ケース	土被り (m)	地下水位 (GL-m)	土の種類	土水の 扱い	N 値	γ (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	λ	k (MN/m^3)	基盤面 (GL-m)
①	20.0	15.0	非常によく 締まった砂質土	土水分離	50	18.0	40	0.35	50	—
②	20.0	—	非常に軟らかい 粘性土	土水一体	2	16.0	—	0.75	0	45.0



a) 洪積砂層の場合



b) 軟弱粘性土層の場合

図-2 地盤条件

表-5 セグメント仕様

セグメント種類		鉄筋コンクリート製
外径 (m)		10.9
セグメント幅 (m)		1.5
セグメント分割数		8
リング継手数		32
セグメント厚さ (mm)		450
鉄筋	仕様	D22 10本
	有効高さ d1 (m)	0.045
	有効高さ d2 (m)	0.400
	配力鉄筋	300mmピッチ かぶり25mm

表-6 セグメント材料特性

コンクリート	
設計基準強度 N/mm^2	48
弾性係数 kN/mm^2	39
単位体積重量 kN/mm^3	24.5
鉄 筋	
鉄筋の種類	SD345
降伏強度 N/mm^2	345
弾性係数 kN/mm^2	210

表-7 表面塩分イオン濃度

(2) 表面塩化物イオン濃度

大塚ら⁵⁾は漏水が生じ、その漏水に含まれる塩化イオン濃度が海水の1/4である30年間供用したシールドトンネルで、河川下の30リングについて劣化状況の調査と塩分濃度の測定を行った。そのうち7リングに劣化が生じておらず、23リングに劣化が確認された。それぞれの表面付近の塩化物イオン濃度の平

			表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)
鉄道	全体	平均値	6.48
		最大値	20.68
		最小値	0.47
	被害無し	平均値	3.46
		最大値	10.58
	被害有り	平均値	7.45
電力	被害無し	トンネルA平均	5.33
		トンネルB平均	5.97

均値，最大値および最小値等を表-7に示す。

また，吉本⁹⁾は2本のシールドトンネルで鉄筋かぶりが20mmを確保しているセグメントでは劣化が生じていないことを確認し，表面塩分イオン濃度を測定している．表-7にはその値もあわせて記す。

(3) 計算ケース

ひび割れ幅に対する検討に関する耐久性能照査は，図-2に示した洪積砂層と軟弱粘性土層について曲げモーメントおよび軸力によって発生するひび割れの試計算を行った。

塩害に対するコンクリートセグメントの耐久性能照査については，鉄道の表面塩化物イオン濃度の調査結果に基づき，被害がない場合の平均値と最大値についてと全体の平均値について，そして電力では2本のトンネルの測定値について試計算を行った．なお，「シールド工事用標準セグメント¹⁾」において耐久性能を確保する

ために，純かぶりを25mmとしているため，試計算において最外縁の鉄筋の純かぶりを25mmとし，トンネルのように不逆性な構造に最低限必要な50年を供用年数として計算を行う．表-8が実施した試計算のケースである。

表-8 試計算ケース

ひび割れ幅照査	地盤条件		
case1	洪積砂層		
case2	軟弱粘性土層		
塩化物イオンの浸入照査	表面塩化物イオン濃度		
caseA	鉄道	劣化無し	平均値
caseB			最大値
caseC		全体平均値	
caseD	電力	劣化無し	トンネルA
caseE			トンネルB

表-9 ひび割れ幅に関する照査の試計算結果

	最大曲げモーメント(kN・m)	軸力(kN)	鉄筋応力度(N/mm ²)
case1	309.1	703.5	132.43
case2	421.6	801.7	198.70
	最大ひび割れ幅(mm)	許容ひび割れ幅(mm)	$\gamma_i \cdot w/w_a$
case1	0.24	0.16	0.64
case2	0.34	0.16	0.45

(4) 部分安全係数

ひび割れ幅に対する検討に関するトンネル標準示方書の耐久性能照査では，使用限界状態において目安の部分安全係数を全て1.0と記載されており，これに準じた。

塩害に対するコンクリートセグメントの耐久性能照査についても，コンクリート標準示方書の標準値を用いた。

表-10 塩化物イオン濃度計算結果

		鉄 道			電 力	
		劣化無し		全体平均	劣化無し	
		平均値	最大値		A	B
設計拡散係数 D_k	cm ² /年	0.3485				
セメント水比 W/C		0.35				
構造物係数 γ_i		1.1				
設計値Cdのばらつきを考慮した安全係数 γ_{cl}		1.3				
コンクリート材料係数 γ_c		1.0				
D_p の安全係数 γ_p		1.2				
D_k	cm ² /年	0.4183				
純かぶり	mm	25				
耐用年数 t	年	50				
表面イオン濃度 C_0	kg/m ³	3.46	10.58	6.48	5.33	5.97
鉄筋位置の塩化物イオン濃度推定値	kg/m ³	2.60	7.96	4.87	4.01	4.49
限界値 C_{lim}	kg/m ³	1.2				
$\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$		3.10	9.48	5.81	4.78	5.35

4. 計算結果

(1) ひび割れ幅に関する照査

表-9は耐久性能照査におけるひび割れ幅に関する照査の試計算結果を示したものである。

case1とcase2の計算条件では表-9のように鉄筋の最大応力度が許容応力度以下となる結果となった．また，コンクリートの最大応力度も許容応力度を満たす結果となった．しかし，最大ひび割れ幅の計算値は，許容ひび割れ幅の約2倍という結果となった。

(2) 塩化物イオンの浸入

塩化物イオンの浸入に対する耐久性能照査において、最外縁鉄筋位置と設定したコンクリート表面から25mmの位置での塩化物イオン濃度計算値を表-10に示す。

塩化物イオン濃度に対する耐久性能における計算結果は、表-10からわかるようにcase Cを除く全てのケースで、鉄筋位置の塩化物イオン濃度推定値が、限界値 C_{lim} 1.2kg/m³の2.60～7.96で、2以上の値となった。また、安全率が9.5でも鉄筋腐食が発生していない。さらに、供用年数が30年の段階で安全率が1以下となるためには、表面塩分イオン濃度が1.2kg/m³以下がある必要があり、鉄道トンネルの計測値である6.48 kg/m³でも、電力洞道の計測値である5.33 kg/m³でも3年後に $\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$ が1を上回る結果となった。

5. 考察

曲げひび割れ幅によって耐久性能を照査する結果では、鉄筋とコンクリートに発生する許容応力度は許容応力度以下で構造安定性能が確保される主鉄筋量でも、耐久性能が確保できない結果となった。このような結果となった理由として、セグメントのような高品質コンクリートにおいても、許容ひび割れ幅を現場打ちコンクリートと同じように設定することが、照査結果と現実との乖離を生むと考えられる。

塩化物イオン濃度に対する耐久性能における照査についても、実際に鉄筋腐食による劣化現象が発生していないトンネルの照査結果の $\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$ が、全て1以上となり、検討結果と実際とが異なった。さらに、 $\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$ が9.5であっても鉄筋腐食が発生していない。このような結果が生じたのは、鉄筋腐食を生じる塩化物イオン濃度の限界値1.2kg/m³が過小な値である可能性がある。

したがって、現在の耐久性能照査方法をシールドセグメントに適用して設計すると、過大に安全側の照査結果となる可能性が高い。

6. まとめ

以上の検討から得た知見をまとめて記す。

- ・コンクリート系セグメントの場合、最大発生応力度が許容応力度を満たしても、曲げひび割れ幅の照査で耐久性能を確保できない結果となる可能性がある。
- ・コンクリート系セグメントの場合、曲げひび割れ幅の検討による耐久性能によって定まる鉄筋量の方が構造安定性能による値よりも多くなることがある。
- ・塩化物イオンに対する耐久性能の照査では、実際に腐食が発生していないトンネルでも塩化物イオン濃度の限界値 C_{lim} 1.2kg/m³の2.60～7.96で、2以上の値となっている事例がある。
- ・実際に鉄筋腐食による劣化現象が発生していないトンネルにおいて、供用年数が30年の段階で $\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$ が1以下となるためには、表面塩分イオン濃度が1.2kg/m³以下がある必要がある結果となり、照査結果と実際の状態とが異なるものとなった。
- ・現在の照査方法で計算すると、鉄道トンネルの表面塩化物イオン濃度計測値である6.48 kg/m³でも、電気洞道の計測値である5.33 kg/m³でも、供用3年後に $\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$ が1を上回る結果となった。
- ・以上の結果から、シールドトンネルのコンクリート系セグメントにおいて耐久性能の設計方法は、過大な結果となる可能性が高い。
- ・地下構造物の特性を十分に考慮した耐久性能検討方法は確立されていない。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：シールド工事用標準セグメント 2001年
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書 シールド工法・同解説 2006年制定
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編）2002年制定
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書（開削工法編）2006年制定
- 5) 大塚努，瀬筒新弥，田底成智：漏水中の塩化物イオンの影響を受けたセグメントの健全度評価，トンネル工学研究会報告論文集，pp.419-426，2009.
- 6) 吉本：シールドトンネルへの性能照査型設計法の適用に関する研究（博士論文）