

シールドセグメントの性能照査に関する試算

大澤拓洋¹・岩波 基²

^{1,2}環境都市工学科 (Department of Civil Engineering, Nagaoka National College of Technology)

A STUDY ON PERFORMANCE-BASED DESIGN OF SHIELD TUNNEL

Takuhiro OHSAWA¹, Motoi IWANAMI²

Abstract

We design shield segments with Performance-Based design method. As a result, I understood that the tunnel segment which I designed with reliability design method is extremely safe about structure stability and durability.

Key Words : Shield Tunnel, Performance-Based Design Method, Reliability Design Method

1. はじめに

1998年に改訂されたISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」では、性能設計を用いることを規定し、その設計照査には限界状態設計、または信頼性設計法を採用することを定めている。しかし、トンネルの分野では、地盤条件や施工条件に応じて覆工に作用する外力(土圧)が複雑に異なることや、その用途に応じてトンネル構造物の内外の環境が様々で覆工の長期耐久性能を適切に評価できないことから、許容応力度設計法が採用されているのが現状である。

シールドトンネルのセグメントの設計に限界状態設計法の導入が試みられているが、それに用いる部分安全係数はデータに基づいて合理的に定められているとは言い難いのが現状である。また、耐久性能については照査方法が鉄筋のかぶりと使用限界状態のひび割れ幅で照査する方法が行われており、シールドセグメントの鉄筋について腐食の可能性を照査する方法は確立されていない。鉄筋について腐食の影響を照査する場合はコンクリート標準示方書[施

工編] 2002年制定¹⁾(以後、コンクリート示方書と称す。)の実験値を極端に安全側の評価をした照査方法が流用されている。

そこで本報告は、シールドトンネルセグメントの常時構造安定性能について地盤分野の知見を利用した土力の確率モデルで限界状態設計法による試算を行い、さらにコンクリート示方書¹⁾以下、に準じた耐久性能の照査を実施して、その結果に考察を加えたものである。なお、継手部については今回検討を行っていない。

2. 現行の照査方法

2006年制定の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。)における常時の構造安定性能照査方法と耐久性能照査方法の考え方について以下に述べる。なお、シールドトンネルセグメント劣化の主原因となっている塩害についてもコンクリート示方書¹⁾に記載されている照査方法を紹介する。

表-1 部分安全係数の目安

		トンネル標準示方書 ²⁾
材料係数 γ_m	コンクリート	1.2
	鉄筋	1.0
部材係数 γ_b	曲げ	1.1
荷重係数 γ_f	土圧	1.0~1.3
	側方土圧	0.8~1.0
	水圧	0.9~1.0
	地盤反力係数	0.9~1.0
	自重	1.0~1.1
	上載荷重	1.0~1.3
構造解析係数 γ_f		1.0~1.1
構造物係数 γ_i		1.0~1.3

表-2 部分安全係数の目安

		トンネル標準示方書 ²⁾
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_f		1.0
構造物係数 γ_i		1.0

2.1 構造安定性能の照査

構造安定性能の照査は、セグメント断面破壊の終局限界状態に対する検討によって行う。つまり、設計断面力 S_d の設計断面体力 R_d 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。

設計断面耐力 R_d は、設計強度を用いて部材断面の耐力 R (R は f_d の関数) を算定し、これを部材係数 γ_b で除した値とする。

設計断面力 S_d は、設計荷重 F_d を用いて断面力 S (S は F_d の関数) を算定し、これに構造解析係数 γ_a を乗じた値を合計したものとす。

表-1にトンネル標準示方書における部分安全係数の終局限界状態での目安を、図-1に構造安定性能の照査手順を示す。

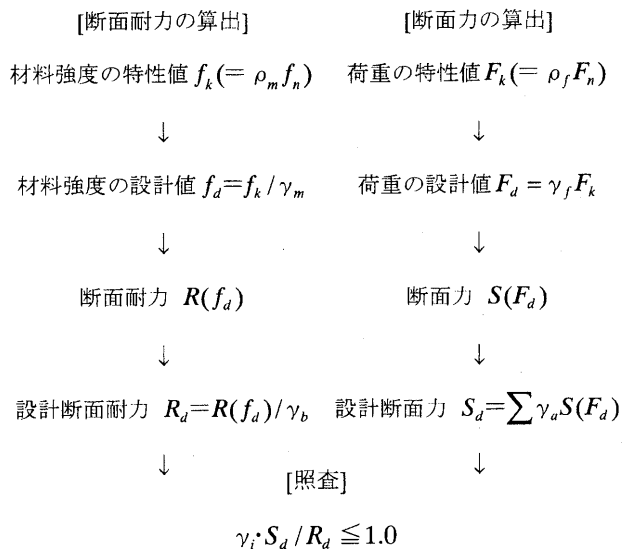


図-1 終局限界状態の照査手順

表-3 許容ひび割れ幅の例(mm)

鋼材の種類	環境条件	
	一般の環境	腐食性環境
異形鉄筋, 普通丸鋼	0.005c	0.004c

*c: 主鉄筋のかぶり(mm)

2.2 耐久性能の照査

セグメントの耐久性能の照査は、セグメント使用限界状態のうちひび割れの検討によって行う。表-2に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ことを基本とし、式(1) ¹⁾によって求めたひび割れ幅が、表-3に示した許容ひび割れ幅以下であることを確認する。

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

ここに、 w はひび割れ幅 (mm), l_{max} は配力鉄筋の最大間隔 (mm), σ_{se} は鉄筋応力度の増加量 (N/mm²), E_s は鉄筋のヤング係数 (N/mm²), ε'_{csd} は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, f'_c はコンクリートの圧縮強度 (N/mm²), c はかぶり (mm), c_s は鉄筋の中心間隔 (mm), ϕ は鉄筋径 (mm) である。

沿岸部付近のシールドトンネルに一部塩害と思われる早期劣化が生じている事例がある。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、沿岸対策を講ずることがある。

表-4 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	D19 10本
	有効高さ d1 (m)	0.045
	有効高さ d2 (m)	0.400

一般的に塩害に対する耐久性能照査はコンクリート示方書¹⁾に準じて以下のような塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査によって行うことが多い。

塩化物イオンの侵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ってよい。

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

ここに、 γ_i は構造物係数であり、一般に1.0とし

表-5 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	33
鉄筋	
鉄筋の種類	SD345
降伏強度 N/mm^2	345
弾性係数 kN/mm^2	210

てよいが、重要構造物に対しては1.1とするのがよい。 C_{lim} は鋼材腐食発生限界濃度であり、一般に $1.2kg/m^3$ としてよい。 C_d は鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値でコンクリート示方書より式(3)¹⁾で求めてよい。

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

ここに、 C_0 はコンクリート表面における想定塩化物イオン濃度、 c はかぶりの期待値 (mm)。一般に、設計かぶりとしてよい。 t は塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年) で、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} は鋼材位置に

表-6 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

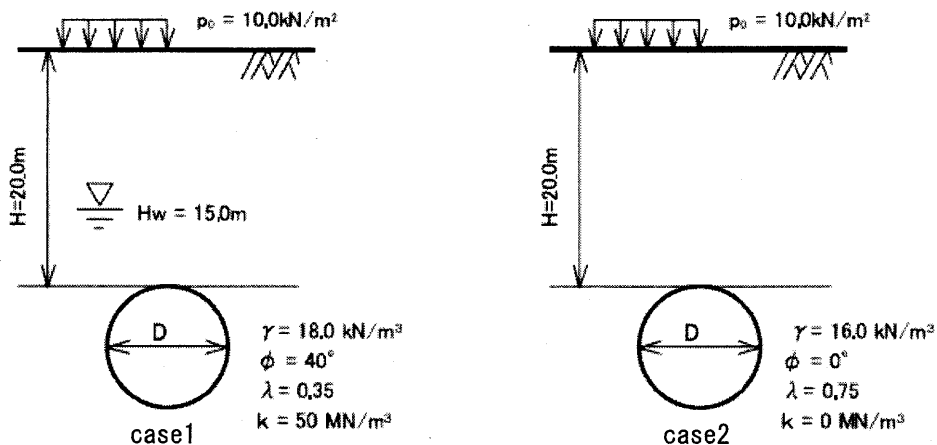


図-2 地盤条件

表-7 構造安定性能の部分安全係数

		トンネル標準示方書 ²⁾		地盤工学トンネル関連文献 ³⁾	
地盤条件ケース		case1	case2	case1	case2
材料係数 γ_m	コンクリート	1.2	1.2	1.2	1.2
	鉄筋	1.0	1.0	1.0	1.0
部材係数 γ_b	曲げ	1.1	1.1	1.1	1.1
荷重係数 γ_f	土圧	1.0	1.1	1.0	1.0
	側方土圧	0.8	0.8	0.5	0.5
	水圧	0.9	0.9	0.9	0.9
	地盤反力係数	1.0	-	0.2	-
	自重	1.0	1.0	1.0	1.0
	上載荷重	1.0	1.0	1.0	1.0
構造解析係数 γ_f		1.0	1.0	1.0	1.0
構造物係数 γ_i		1.0	1.0	1.0	1.0

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であり、一般に1.3としてよい。 C_d は塩化物イオンに対する設計拡散係数 (cm²/年)。一般に、式(4)により評価してよい。

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

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 (cm²/年)。 D_0 は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 (cm²/年)。一般に、200cm²/年としてよい。 w はひび割れ幅 (mm) , w_a は許容ひび割れ幅 (mm) , w/l はひび割れ幅とひび割れ間隔の

比である。なお、 $erf(s)$ は、誤差関数であり、

$$erf(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \text{ で表される。}$$

3. 計算条件

3. 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、土被りは都市部の新設トンネルとして20mとした。地盤は洪積砂層と軟弱粘性土層の場合の2ケースを計算した。セグメントの仕様と物性条件とを表-4,5に、地盤条件を表-6と図-2に示す。

表-8 塩害に対する耐久性能の諸定数

	トンネル関連文献 ⁴⁾		コンクリート示方書 ¹⁾		
	Dトンネル	Eトンネル	海岸付近	文献平均	ひび割れ
設計拡散係数 D_r cm ² /年	0.16	0.98	1.12	1.12	1.69
セメント水比 W/C	—	—	0.38	0.38	0.38
構造物係数 γ_i	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
コンクリート材料係数 γ_c	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Dpの安全係数 γ_p	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
純かぶり c mm	25	25	25	25	25
耐用年数 t 年	60	60	60	60	60
表面イオン濃度 C_0	5.33	5.97	9.00	5.65	9.00

表-9 計算ケース

常時 構造安定性能	地盤条件	部分安全率
case1-1	case1	トンネル標準示方書 ²⁾
case1-2	case1	地盤工学関連文献 ³⁾
case2-1	case2	トンネル標準示方書 ²⁾
case2-2	case2	地盤工学関連文献 ³⁾
耐久性能	地盤条件	部分安全率
case3-1	case1	トンネル標準示方書 ²⁾
case3-2	case2	トンネル標準示方書 ²⁾
塩害に対する耐久性能	部分安全率	備 考
case4-1	トンネル関連文献 ⁴⁾	文献 Dトンネル
case4-2	トンネル関連文献 ⁴⁾	文献 Eトンネル
case5-1	コンクリート示方書 ¹⁾	海岸付近
case5-2	コンクリート示方書 ¹⁾	文献の平均
case5-3	コンクリート示方書 ¹⁾	海岸付近 (施工ひび割れ有)

3. 2 部分安全係数

常時の構造安定性能で終局限界状態の照査に用いる部分安全係数は、トンネル標準示方書²⁾と松尾ら³⁾が土構造物の信頼性設計法で提案した地盤評価モデルとによって定め、これらを洪積砂層に適用した場合をそれぞれcase1-1, 1-2とし、軟弱粘土層に適用した場合をcase2-1, 2-2とした。なお、地盤評価モデルによって定めた部分安全係数は危険確率が5%以下となるように定めた。

耐久性能照査についてはトンネル標準示方書²⁾の使用限界状態における部分安全係数が全て1.0である。これらの値から危険確率の設定根拠を推測することは困難であるため、地盤評価モデルによる試算は省略した。なお、試算の部分安全係수에表-2の目安の値を採用し、洪積砂層の場合をcase3-1、軟弱粘土層の場合をcase3-2とした。

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吉本⁴⁾の調査結果とコンクリート示方書¹⁾により劣化外力の表面イオン濃度 C_0 と拡散係数 D_r を定めた。吉本⁴⁾の調査結果からDトンネルをcase4-1、Eトンネルをcase4-2とした。また、コンクリート示方書¹⁾の海岸付近の場合をcase5-1、文献の平均をcase5-2、海岸付近で施工ひび割れの有る場合をcase5-3とした。

構造安定性能の部分安全係数を表-7に、塩害に対する耐久性能の諸定数を表-8にまとめた。

3. 3 計算ケース

解析ケースを表-9に示す。

4. 計算結果

構造安全性能照査における最大曲げモーメント、その位置の軸力と照査結果を表-10に、耐久性能照査における最大ひび割れ幅と照査結果を表-11に、そして塩害に対する耐久性能照査の最外縁鉄筋位置における塩化物イオン濃度および照査値を表-12に示す。

表-10に示すように、側方土圧と地盤反力係数の

表-10 構造安定性能照査結果

常時 構造安定性能	最大曲げモーメント (kN・m)	軸力 (kN)	$\gamma_i \cdot S/R$
case1-1	267.2	512.9	0.61
case1-2	336.9	727.0	0.72
case2-1	910.1	552.3	2.06
case2-2	2010.9	212.6	5.21

表-11 耐久性能照査結果

常時 構造安定性能	最大曲げモーメント (kN・m)	軸力 (kN)	鉄筋 応力度 (N/mm ²)
case3-1	309.1	703.5	194.67
case3-2	421.6	801.7	287.82
常時 構造安定性能	最大ひび割れ幅 (mm)	許容ひび割れ幅 (mm)	$\gamma_i \cdot w/w_a$ (N/mm ²)
case3-1	0.34	0.203	0.60
case3-2	0.48	0.203	0.42

ばらつきが大きいので、地盤工学における確率モデルから危険確率が5%になるように荷重係数を定めると、最大曲げモーメントがトンネル標準示方書の値より大幅に大きくなる。洪積砂質土層では土圧と水圧を作用させているため照査結果にあたる影響は比較的小さいが、沖積粘性土では水圧を考慮していないため最大曲げモーメントがトンネル標準示方書²⁾の値の約2倍となった。

今回の計算条件では2ケースとも、構造安定性能によって定まる鉄筋量よりも耐久性能を確保するために必要な鉄筋量の方が多結果となった。このケースでは主鉄筋のかぶりが鉄筋応力度100 N/mm²以下でないと耐久性能が確保できない。

表-12より塩害に対する耐久性能におけるでは、実際に腐食が発生していないことが確認されているcaes4-1,2の鉄筋位置での塩化物イオン濃度が限界値 C_{lim} 1.2kg/m³の3~5倍となった。また、caes5-1~3のコンクリート示方書¹⁾に準じた値は限界値 C_{lim} 1.2kg/m³の5~9倍となった。さらに、caes4-2とcaes5-2の結果を比較すると拡散係数よりも表面イオン濃度の影響が大きいことが分かる。

5. 考察

地盤工学における確率モデルから危険確率が5%になるように荷重係数を定めると側方土圧と地盤反力係数のばらつきが大きいので過大な設計になる。したがって、今までの地盤工学で行われてきた地盤確率モデルと危険確率の設定方法ではなく、トンネルの特徴である見なし設計に適してかつ合理的な部分安全係数の設定方法を検討する必要があると考える。

耐久性能の照査結果では曲げひび割れ幅の検討でも塩害についての耐久性能についてでもかぶり不足

表-12 塩害に対する耐久性能照査結果

耐久性能	塩化物イオン濃度 C_d (kg/m ³)	限界値 C_{lim} (kg/m ³)	$\gamma_i \cdot C_d / C_{lim}$
case4-1	3.94	1.2	3.61
case4-2	6.35		5.82
case5-1	10.30		9.45
case5-2	5.65		5.93
case5-3	10.58		9.70

である結果となった。しかし、実際にはトンネル構造物に鉄筋腐食が生じていることは希であり、文献のトンネルDとEは全く鉄筋が腐食していない、したがって、現在の耐久性能照査方法は過大な設計なる可能性が高いと考える。

6. 結論

以上の検討から得た知見をまとめて記す。

- ・地盤工学の確率モデルで側方土圧と地盤反力係数の荷重係数を定めると最大曲げモーメントがトンネル標準示方書の値より大幅に大きくなる。特に、沖積粘性土では大きな最大曲げモーメントを生じる。
- ・地盤工学の確率モデルから荷重係数を定めると過大な設計になる可能性がある。したがって、トンネルに適し、かつ合理的な部分安全係数の設定方法を検討する必要がある。
- ・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。
- ・塩害に対する耐久性能におけるでは、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3~5倍となっている事例がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編] 2002年制定
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法] 2006年制定
- 3) 松尾稔：地盤工学 信頼性設計法の理念と実際、技報堂、1984.3
- 4) 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）、2005.2

(2007.8.31 受付)