# 性能照査型設計法によるシールドトンネルの 試設計例

 津野 究1・滝川 遼2・木下 果穂3・坂田 智基4
 <sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp
 <sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: takigawa.ryo.25@rtri.or.jp
 <sup>3</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp
 <sup>4</sup>正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-10-13)

E-mail:sakata\_t@cfk.co.jp

鉄道トンネルの設計においては、性能規定化に対応できる性能照査型設計法を導入する検討が進められ ており、シールドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定である。そこで、粘性土地盤およ び砂質土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に性能照査型設計法による試設計を行い、決定ケー スとなりうる性能項目を把握した。また、現行の設計標準で用いられている許容応力度設計法による試設 計も合わせて行い、概ね同程度の照査結果となることを確認した。

Key Words: shield tunnel, performance-based design method, required performance, performance item

## 1. はじめに

鉄道トンネルの設計においては、「鉄道に関する技術 上の基準を定める省令」の性能規定化に対応できる性能 照査型設計法を導入する検討が進められており、シール ドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定 である<sup>1)</sup>. そこで、①粘性土地盤に位置する鉄道シール ドトンネル、②砂質土地盤に位置する鉄道シールドトン ネルについて、性能照査型設計法による試設計を行った.

## 2. 性能照査型設計法による試設計

#### (1) 試設計の概要

#### a) 設計対象

図-1 に試設計の条件を示す. トンネルの内径は 6.4m で あり,粘性土のケース (ケース 1) は土被り 10.5m, セ グメント高さ 0.3m, 砂質土のケース (ケース 2) は土被 り 20.5m, セグメント高さ 0.25m である. どちらのケー スも, セグメント幅 1.0mの RC セグメントであり,ボル ト継手を採用している. セグメントの分割を図-2に,材 料物性値を表-1 に示す.



#### b) 性能照査の方法

トンネル共通の要求性能および性能項目について,表 -2が例示される.設計においては、すべての性能項目に 対して限界状態に達しないことを照査することが原則と なる.ただし、一部の性能項目については一定の前提条 件を満足する場合(施工方法や構造諸元等が一定の条件 を満たした上で他の性能項目を満足することが確認でき た場合等)に限定すれば、その照査を満足することが明 らかであり、構造解析を行わなくても、照査を満足する とみなせるものもある.本論文では、直接照査が必要と なり、かつ決定ケースとなる可能性の高い性能項目とし て、安全性(破壊)および復旧性(損傷)の照査結果を 示した.また、設計においては、耐久性の検討および照 査の前提を満足することが前提となる.本論文では、こ のうち、照査の前提(最大、最小鉄筋量および応力度の 制限)について、検討結果を示した.

				ケース1	ケース2
セグメント	コンク	設計基準強度f <sub>a</sub> [Nmm <sup>2</sup> ] 48		8	
本体	リート	ヤング係数	E <sub>c</sub> [kN/mm²]	32.6 <sup>1)</sup>	
	鉄筋	引張降伏強度 f_sk [N/mm <sup>2</sup> ]		345	
	(SD345)	ヤング係数	E₅[kN/mm²]	200	
セグメント	継手	ボルト径		M27	M24
継手	ボルト	強度区分		6.8	4.6
		引張降伏強度f <sub>sk</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]		480	240
	継手板	種別		SS400	
	(SS400)	板厚[mm]		19	19
		引張降伏強度 $f_{sk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		235	
	継手部の		正曲げ	502500	976400
	引張ばね	定数kj[kN/m]	負曲げ	836400	1477000

表-1 材料物性值

<sup>1)</sup>:許容応力度設計法において、構造解析では 39.0kN/mm<sup>2</sup>を用い、照 査ではヤング係数比 n=15 とした.

表-2 要求性能と性能項目・	照査指標の例り
----------------	---------

要求性能	性能項目	照査指標の例	考慮する作用	
安全性	破壞	力、変位・変形		
	疲労破壊	応力度、力	<ul> <li>・設計耐用期間中に生</li> </ul>	
	安 定	力、変位・変形	じるすべての作用およ	
	走行安全性	内空の変位・変形、軌道面 の不同変位 <sup>®1</sup> 、横方向の振 動変位 <sup>®1</sup>	びその繰り返し <sup>※2</sup> ・発生頻度は少ないが 影響の大きい偶発作	
	公衆安全性	中性化深さ、塩化物イオン濃 度、ボルトの種類	用	
	外観	ひび割れ幅、応力度	・設計耐用期間中に比 較的しばしば生じる大 きさの作用	
	水密性	ひび割れ幅、応力度、漏水		
使用性	支持性能	力、変位・変形		
	乗り心地	軌道面の不同変位。		
	騒音・振動	騒音レベル、振動レベル		
復旧性	損傷	部材の変位・変形、力、応 力度、軌道面の不同変位 <sup>=1</sup> 、 横方向の振動変位 <sup>=1</sup>	<ul> <li>・設計耐用期間中に生じる作用</li> <li>・発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用<sup>©3</sup></li> </ul>	
	残留変位	力、変位・変形		

※1 地上の列車も支持する場合には、地上の列車に対しても設定する。

※2 疲労破壊の照査で考慮する作用は、変動の特性を考慮して別に定める。

※3 必要に応じ考慮する作用

#### c) 作用

設計では、土圧、水圧および自重を作用の組合せで考 慮した.ケース1(粘性土)では、土水一体を適用し、 鉛直荷重の算定では、全土被り土圧を作用させた.一方、 ケース2(砂質土)では、土水分離を適用し、Terzaghiの 緩み土圧の基本式を用いて鉛直荷重を算定した.設計作 用を図-3に示す.なお、側方土圧係数2は、ケース1で は0.65を、ケース2では0.45とした.

安全性(破壊)の照査にあたっては,作用のバランス を崩して設計曲げモーメントが大きくなるように,鉛直 土圧,水圧および自重の作用係数を 1.0 とし,側方土圧 の作用係数を 1.0 以下としてまとめて考慮することにし た.その他のケースについては,作用係数を 1.0 とした.

#### d) 構造解析

応答値の算定にあたっては、2 リングはりーばねモデ ルを用い、セグメント本体をはり、セグメント継手を回 転ばね、リング継手をせん断ばねでモデル化した.

覆工と地盤の相互作用については、トンネル半径方向の地盤ばねで考慮した. 地盤反力係数は、Muir Woodの 理論解を基本式とし、裏込め注入と周辺地盤の2層系の 変形特性を考慮して算出した<sup>2</sup>. ケース1では1990kN/m<sup>3</sup> を、ケース2では9620kN/m<sup>3</sup>とした.

セグメント継手については、文献 3) をもとに図-4 に 示すように回転ばね特性を設定した.





## (2) 性能照查

#### a) 応答値の算定

構造解析により得られた断面力を表-3および表-4に示 す.曲げモーメントについては、正曲げの最大値は天端 あるいは下部に、負曲げの最大値はスプリングライン付 近に発現している.また、せん断力の最大値は、アーチ 部あるいは側壁下部に発現している.

#### b) 照査結果

性能照査型設計法による照査の例を表5および表6に 示す.このうち,セグメント本体の照査値を整理した結 果を図-5に示す.セグメント本体については,安全性 (破壊)および照査の前提(応力度の制限)が大きい結 果となっており,ケース1では安全性(破壊)が,ケー ス2では照査の前提(応力度の制限)が決定ケースとな っている.



<b>表-3</b> 断面	カおよび最大値(セグメ	ント本体)(ケース1)
	安全性(破壊)	安全性(破壊)以外
曲げ モーメント		







#### 表-5 照査結果 (ケース1)

				正曲げ	負曲げ
部材諸元	幅		B mm	1000	1000
	高さ		Hmm	300	300
	引張鉄筋		鉄筋量	D22-8本	D19-6本 D22-2本
			Dst	45.0	45.0
	圧縮鉄筋		鉄筋量	D19-6本 D22-2本	D22-8本
			$D_{sc}$	45.0	45.0
安全性	破壊		$\gamma_i \boldsymbol{\cdot} M_d\!/\!M_{ud}$	0.66	0.76
復旧性	+121/年	本体	$\gamma_i \boldsymbol{\cdot} M_{d'}\!M_{yd}$	0.46	0.53
	損協	継手		0.71	0.83
照査の 前提	最小鉄筋量 (脆弱破壊)		$M_{\text{ad}}/M_{\text{yd}}$	0.25	0.28
	最大鉄筋量		量	$P_t \leq 0.75 p_b$	$P_t \leq 0.75 p_b$
	コンクリート応力	本体		0.62	0.72
	度の制限	継手	σ₀(0.4f° <sub>cd</sub> )	0.45	0.74

表-6 照査結果 (ケース2)

				正曲げ	負曲げ
部材 諸元	幅		B mm	1000	1000
	高さ		Hmm	250	250
	引張鉄筋		鉄筋量	D19-8本	D16-8本
			Dst	40.0	40.0
	圧縮鉄筋		鉄筋量	D16-8本	D19-8本
			D <sub>sc</sub>	40.0	40.0
安全性	破	壞	$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud}$	0.73	0.72
復旧性	損傷	本体	$\gamma_i \boldsymbol{\cdot} M_d \! / \! M_{yd}$	0.66	0.65
		継手		0.91	0.80
	最小鉄筋量 (脆弱破壊)		M <sub>atd</sub> /M <sub>yd</sub>	0.29	0.38
照査の 前提	最大鉄筋量		量	$P_t \leq 0.75 p_b$	$P_t \leq 0.75 p_b$
	动州小応力	本体		0.91	0.87
	度の制限	継手	σ₀(0.41° <sub>cd</sub> )	0.78	0.74



図-6 許容応力度設計法との比較

#### (3) 許容応力度設計法との比較

(1) a)に示す設計条件について,許容応力度設計法に よる試設計を行った.ここでは,文献 2) および 3) に したがって物性値の設定や照査を行った.図-6に,性能 照査型設計法と許容応力度設計法で設計した場合の照査 値を比較した結果を示す.これより、今回の試設計のケ ースでは、照査値が概ね同等である結果であることが確 認できた.

## 4. おわりに

本研究では、粘性土地盤および砂質土地盤に位置する 単線シールドトンネルを対象に性能照査型設計法によ る試設計を行った.得られた結果は以下の通りである.

- ・今回の試設計のケースでは、安全性(破壊)および照 査の前提(応力度の制限)が決定ケースになる結果と なった.
- ・性能照査型設計法による試設計の照査値は,許容応力 度設計法と概ね同等であることを確認した.

なお、単線シールドトンネルの2ケースについて試設計 を行ったが、今後は複線シールドトンネルのケースや条 件が異なるケースについても試設計を行っていきたいと 考えている.

謝辞:性能照査型設計法による鉄道シールドトンネルの 照査方法の検討にあたっては、「鉄道構造物等設計標準 (シールドトンネル)に関する委員会」において委員・ 幹事の方々に審議を重ねて頂いた.末筆ながら、感謝の 意を表する次第である.

#### 参考文献

- 1) 稲垣貴文:鉄道構造物等設計標準(トンネル)の改 訂,日本鉄道施設協会誌,vol.57,No.3,pp.48-49, 2019.
- 旧運輸省:鉄道構造物等設計標準・同解説、シール ドトンネル、pp.157-158、1997.
- 鉄道総合技術研究所:シールドトンネルの設計標準 に関する手引き,2001.

## EXAMPLE OF DESIGN FOR SHIELD TUNNEL BY MEANS OF PERFORMANCE-BASED DESIGN METHOD

## Kiwamu TSUNO, Ryo TAKIGAWA, Kaho KINOSHITA and Tomoki SAKATA

The introduction of performance-based design method to railway tunnels has been investigated and the method for the check of performance of shield tunnels is planned to be proposed. This paper therefore carried out the trial design based on the performance-based design method against the railway shield tunnels located in clayey and sandy ground and grasped the performance item determining the speck of structure. The results of design were also compared with those obtained by the conventional allowance stress design method and it was found that both results are match with each other.