

# 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<sup>1</sup>・滝川 遼<sup>2</sup>・木下 果穂<sup>3</sup>・坂田 智基<sup>4</sup>

<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ト株式会社 (〒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

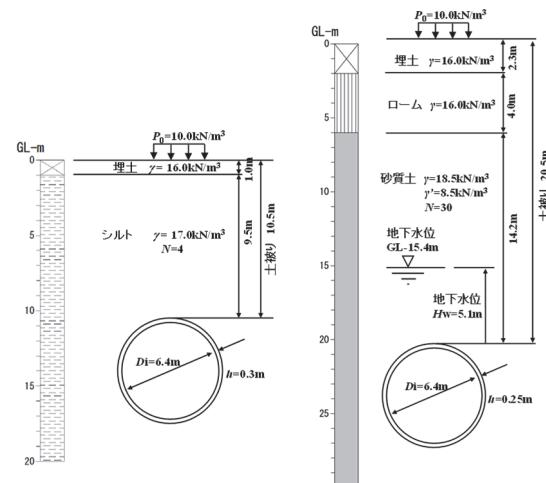
鉄道トンネルの設計においては、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の性能規定化に対応できる性能照査型設計法を導入する検討が進められており、シールドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定である<sup>1)</sup>。そこで、①粘性土地盤に位置する鉄道シールドトンネル、②砂質土地盤に位置する鉄道シールドトンネルについて、性能照査型設計法による試設計を行った。

## 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。



(a) ケース1(粘性土)

(b) ケース2(砂質土)

図-1 試設計の条件

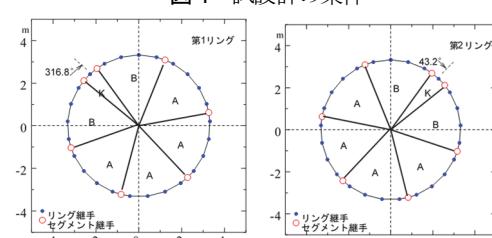


図-2 セグメント分割

## 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對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。

表-1 材料物性値

			ケース1	ケース2
セグメント 本体	コンクリート	設計基準強度 $f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	48	
		ヤング係数 $E_c$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	32.6 <sup>①</sup>	
	鉄筋 (SD345)	引張降伏強度 $f_{sk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	345	
		ヤング係数 $E_s$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	200	
セグメント 継手	継手 ボルト	ボルト径	M27	M24
		強度区分	6.8	4.6
		引張降伏強度 $f_{sk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	480	240
	継手板 (SS400)	種別	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 $k_p$ [kN/m]	836400	1477000
	負曲げ			

<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<sup>②</sup>

要求性能	性能項目	照査指標の例	考慮する作用
安全性	破壊	力、変位・変形	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計耐用期間中に生じるすべての作用およびその繰り返し<sup>③</sup></li> <li>発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用<sup>④</sup></li> </ul>
	疲労破壊	応力度、力	
	安定	力、変位・変形	
	走行安全性	内空の変位・変形、軌道面の不同変位 <sup>⑤</sup> 、横方向の振動変位 <sup>⑥</sup>	
	公衆安全性	中性化深さ、塩化物イオン濃度、ボルトの種類	
使用性	外観	ひび割れ幅、応力度	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計耐用期間中に比較的しばしば生じる大きな作用</li> </ul>
	水密性	ひび割れ幅、応力度、漏水	
	支持性能	力、変位・変形	
	乗り心地	軌道面の不同変位 <sup>⑤</sup>	
復旧性	騒音・振動	騒音レベル、振動レベル	<ul style="list-style-type: none"> <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>④</sup></li> </ul>
	損傷	部材の変位・変形、力、応力度、軌道面の不同変位 <sup>⑤</sup> 、横方向の振動変位 <sup>⑥</sup>	
	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、全土被り土圧を作成させた。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。

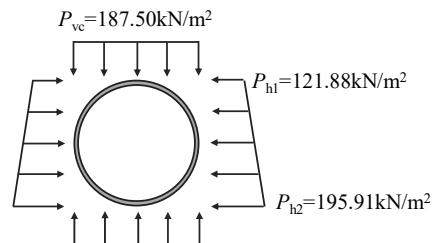
安全性（破壊）の照査にあたっては、作用のバランスを崩して設計曲げモーメントが大きくなるように、鉛直土圧、水圧および自重の作用係数を1.0とし、側方土圧の作用係数を1.0以下としてまとめて考慮することにした。その他のケースについては、作用係数を1.0とした。

## d) 構造解析

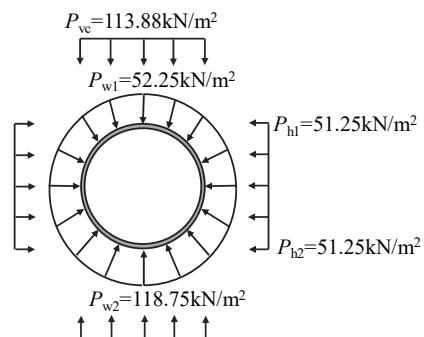
応答値の算定にあたっては、2リングはり一ばねモデルを用い、セグメント本体をはり、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねでモデル化した。

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。



(a) ケース1（粘性土）



(b) ケース2（砂質土）

図-3 設計作用

## (2) 性能照査

### 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。

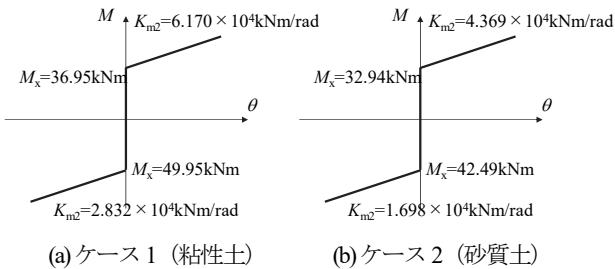


図4 セグメント継手の回転ばね特性(安全性(破壊)以外)

表3 断面力および最大値(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	正曲げ: 151.28 kNm 負曲げ: 165.07 kNm	正曲げ: 111.96 kNm 負曲げ: 117.81 kNm
せん断力	最大: 119.93 kN	最大: 81.18 kN
軸力	最大: 748.48 kN	最大: 715.91 kN

表4 断面力および最大値(セグメント本体)(ケース2)

	安全性(破壊)	安全性(破壊)以外
曲げモーメント	正曲げ: 113.46 kNm 負曲げ: 98.97 kNm	正曲げ: 106.45 kNm 負曲げ: 92.41 kNm
せん断力	最大: 85.01 kN	最大: 80.02 kN
軸力	最大: 785.58 kN	最大: 776.87 kN

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 H mm	300	300
	引張鉄筋 鉄筋量	D22-8 本	DI9-6 本 D22-2 本
	D <sub>s</sub>	45.0	45.0
安全性	圧縮鉄筋 鉄筋量	DI9-6 本 D22-2 本	D22-8 本
	D <sub>c</sub>	45.0	45.0
	$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud}$	0.66	0.76
復旧性	損傷	$\gamma_i \cdot M_d / M_{yd}$	
	本体	0.46	0.53
	継手	0.71	0.83
照査の前提	最小鉄筋量(脆弱破壊)	M <sub>ad</sub> /M <sub>yd</sub>	0.25
	最大鉄筋量	P <sub>i</sub> ≤ 0.75P <sub>b</sub>	P <sub>i</sub> ≤ 0.75P <sub>b</sub>
	コマート応力	本体	0.62
	度の制限	継手	0.45
		$\sigma'_v / (0.4f'_{ad})$	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 H mm	250	250
	引張鉄筋 鉄筋量	D19-8 本	DI6-8 本
	D <sub>s</sub>	40.0	40.0
安全性	圧縮鉄筋 鉄筋量	D16-8 本	DI9-8 本
	D <sub>c</sub>	40.0	40.0
	$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud}$	0.73	0.72
復旧性	損傷	$\gamma_i \cdot M_d / M_{yd}$	
	本体	0.66	0.65
	継手	0.91	0.80
照査の前提	最小鉄筋量(脆弱破壊)	M <sub>ad</sub> /M <sub>yd</sub>	0.29
	最大鉄筋量	P <sub>i</sub> ≤ 0.75P <sub>b</sub>	P <sub>i</sub> ≤ 0.75P <sub>b</sub>
	コマート応力	本体	0.91
	度の制限	継手	0.78
		$\sigma'_v / (0.4f'_{ad})$	0.74

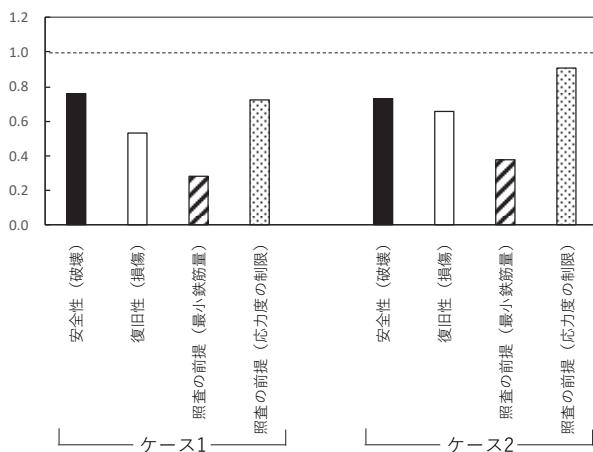


図5 照査値（セグメント本体）

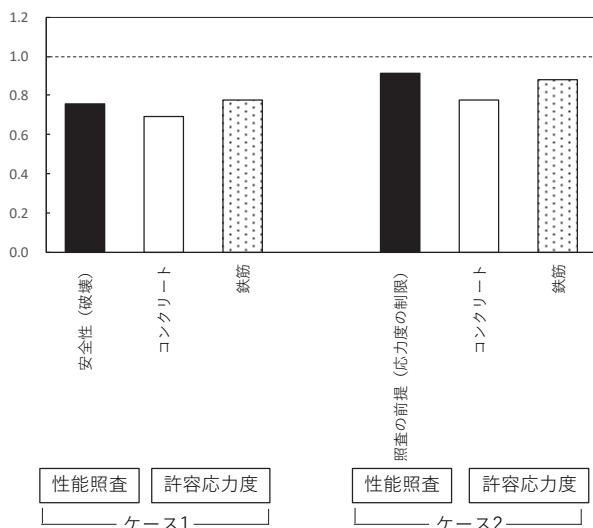


図6 許容応力度設計法との比較

### (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.
- 2) 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.
- 3) 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.