

改訂鉄道構造物等設計標準（トンネル）に基づく シールドトンネルの試設計

滝川 遼* 津野 究**
木下 果穂** 牛田 貴士***

Trial Design of Shield Tunnels Based on Revised Design Standards for Railway Structures (tunnel)

Ryo TAKIGAWA Kiwamu TSUNO
Kaho KINOSHITA Takashi USHIDA

The design standards for railway shield tunnels have been revised for the purpose of introducing the performance-based design method to railway tunnels. This paper describes the method of performance verification for shield tunnels including performance items and verification indices. A trial design based on the performance-based design method against railway shield tunnels located in the sandy ground was carried out and performance items used for determining structural specifications were identified. The results were also compared with those obtained by the conventional allowance stress design method and it was found that both results were in general agreement with each other.

キーワード：シールドトンネル，性能照査型設計法，要求性能，性能項目，試設計

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説（シールドトンネル）は、今回の改訂により許容応力度設計法から性能照査型設計体系に移行し、鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル）（以下、トンネル標準）に包含されることになった。この改訂に伴い、設計されたトンネルの性能を理解かつ比較しやすいものとするため、要求性能および性能項目はトンネルの施工法によらず共通化したほか、柔軟な条件設定が可能となるよう新たな知見を反映している。

本報告は、今回の改訂により導入される性能照査型設計の手順および効果を例示するものである。まず、要求性能に応じたトンネル共通の性能項目に対して、一般的な設計条件下におけるシールドトンネルの具体的な照査方法について示す。その上で、鉄道シールドトンネルを対象に実施した性能照査型設計法による試設計の結果、および許容応力度設計法との比較結果を示す。

2. シールドトンネルの性能照査の方法

トンネル標準では、要求性能および性能項目は「第Ⅰ編 総論」において、表1のように例示されている。設

計においては、これら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前提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。そのため、まず、それぞれの性能項目に対して照査方法を整理することが効率的な設計作業を行う上で重要であり、シールドトンネルについては「第Ⅲ編 シールド工法編」にその具体的な方法を示している。

シールドトンネルについて、直接照査の可否をそれぞれ

表1 要求性能と性能項目・照査指標の例¹⁾

要求性能	性能項目	照査指標の例
安全性	破壊	力，変位・変形
	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 ^{*1} ，横方向の振動変位 ^{*1}
	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
	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 ^{*1}
	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 ^{*1} ，横方向の振動変位 ^{*1}
	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。

* 構造物技術研究部 トンネル研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）
** 構造物技術研究部 トンネル研究室
*** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

れの性能項目に対して整理すると表2となる。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。これらのうち、構造計算を伴う事項かつ決定ケースとなりうる事項として、ひび割れに関する事項、最大・最小鉄筋量および応力度の制限がある。

3. 性能照査型設計法による試設計

3.1 試設計の概要

図1に示す砂質土地盤に位置する鉄道シールドトンネルを対象に、前述した性能照査の方法を用いて、性能照査型設計法による試設計を行った^{2) 3)}。ケース1は、トンネル内径6.4m、土被り20.5mの単線シールドトンネル、ケース2はトンネル内径9.2m、土被り29.8mの複線シールドトンネルを対象としている。セグメント種別はRCセグメントであり、ボルト継手を採用している。材料物性値を表3に示す。

作用については、土圧、水圧および自重を考慮した。砂質地盤であることから、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2に示す。なお、側方土圧係数は0.45とした。

本稿では、表2に示す性能項目のうち、直接照査が必要となる安全性（破壊）、安全性（安定）および復旧性（損傷）の照査結果を示すとともに、決定ケースとなり得る耐久性の検討（曲げひび割れの検討）および照査の前提（最大・最小鉄筋量、応力度の制限）について検

討結果を示す。なお、地震時の照査は省略できる場合とした。

安全性（破壊）については、側方土圧（図2の P_{h1} 、 P_{h2} ）を低減させ、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作用を設定した。ここでは、

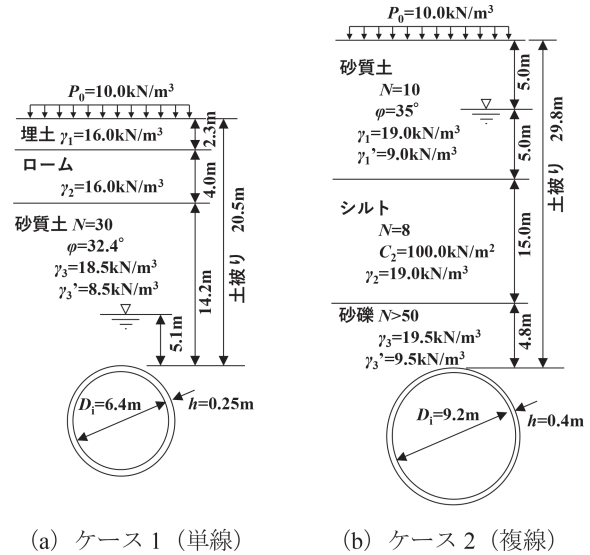


図1 試設計の条件

表3 材料物性値

		ケース1	ケース2
本体	コンクリート	設計基準強度 f_{ck} [N/mm ²]	48
		ヤング係数 E_c [kN/mm ²]	32.6**
	鉄筋	引張降伏強度 f_{syk} [N/mm ²]	345
		ヤング係数 E_s [kN/mm ²]	200
セグメント継手	継手ボルト	ボルト径	M24 / M27
		強度区分	6.8 / 6.8
		引張降伏強度 f_{syk} [N/mm ²]	480 / 480
	継手板	種別	SS400
	板厚 [mm]	19 / 22	
	引張降伏強度 f_{syk} [N/mm ²]	235	
	継手部の引張ばね定数 k_j [kN/m]	正曲げ 976400 / 負曲げ 1477000	224700 / 335800

**：許容応力度設計法において、構造解析では39.0kN/mm²を用い、照査ではヤング係数比 $n=15$ とした。

表2 一般的な設計条件のシールドトンネルの照査の例

要求性能	性能項目	照査		
		○	△	
安全性	破壊	○		
	疲労破壊	—	地盤で支持される場合においては、これを満足するものとしてよい	
	安定	○		
	走行安全性	内空の変位・変形	△	復旧性（部材の損傷）の照査を満足することで、満足するものとしてよい
		軌道面の不同変位	△	安全性（安定）の照査を満足することで、満足するものとしてよい
公衆安全性		△	耐久性の検討を満足することで、満足するものとしてよい	
使用性	外観		△	駅部等、外観に対する配慮が必要な場合に設定する
	水密性		△	要求水準を満足することが確認された継手面の止水を施すこと
	支持性能		△	安全性（安定）の照査を満足することで、満足するものとしてよい
	乗り心地		△	安全性（安定）の照査を満足することで、満足するものとしてよい
	騒音・振動		△	構造計画で検討する
	復旧性	損傷	軌道面	△
部材			○	
残留変位			△	復旧性（損傷）および安全性（安定）の照査を満足することで、満足するものとしてよい

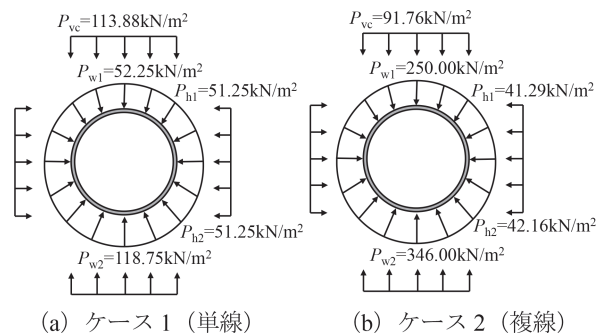


図2 設計作用

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 0.9 とした。その他のケースについては、作用係数を 1.0 とした。

応答値の算定にあたっては、2リングはりばねモデルを用い、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 層系の变形特性を考慮して算出した。ケース 1 では 9620kN/m^3 、ケース 2 では 10320kN/m^3 とした。

セグメント継手については、文献 4 をもとに、図 3 に示すような回転ばね特性を設定した。

3.2 照査結果

構造解析により得られた断面力の例を表 4 に示す。曲

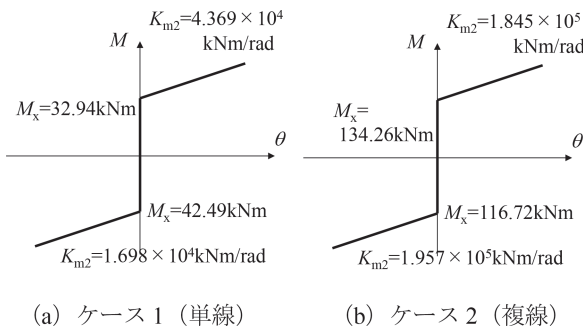


図 3 セグメント継手の回転ばね特性

表 4 設計断面力 (ケース 1)

	安全性 (破壊)	復旧性 (損傷)
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

げモーメントについては、正曲げの最大値は下部に、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、側壁下部に発現している。一方、軸力については、概ね均等に分布している。

性能照査型設計法による照査の一例を表 5 および表 6 に示す。また、セグメント本体の照査値を整理した結果を図 4 に示す。セグメント本体については、ケース 1 では、安全性 (破壊)、耐久性 (曲げひび割れ) 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、照査の前提 (応力度の制限) が決定ケースとなっている。

表 5 照査結果の一例 (ケース 1, 単線)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	D16-8 本	
		D _{st}	40.0	40.0	
圧縮鉄筋	鉄筋量	D16-8 本	D19-8 本		
	D _{sc}	40.0	40.0		
安全性	破壊	本体	$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud}$	0.73	0.72
		継手 [*]	$\gamma_i \cdot M_d / M_{yd}$	0.66	0.61
	安定			0.16	
復旧性	損傷	本体	$\gamma_i \cdot M_d / M_{yd}$	0.66	0.65
耐久性	曲げひび割れ		$\gamma_i \sigma_c / \sigma_{bi}$	1.58	1.19
			$\gamma_i \sigma_s / \sigma_{s1}$	-	-
			w_d / w_{lim}	0.83	0.44
照査の前提	最小鉄筋量 (脆弱破壊)	M_{crd} / M_{yd}	0.29	0.38	
	最大鉄筋量		$P_t \leq 0.75 p_b$	$P_t \leq 0.75 p_b$	
	コンクリート応力度制限	本体	$\sigma'_c / (0.4 f_{cd})$	0.91	0.87
		継手		0.78	0.74

^{*}: 安全性 (破壊) の作用の組合せで設計応答値を算定し、 M_{yd} を設計限界値とした。ここで、構造物係数 γ_i を 1.0 とした。

表 6 照査結果の一例 (ケース 2, 複線)³⁾

			正曲げ	負曲げ	
部材諸元	幅	B mm	1000	1000	
	高さ	H mm	400	400	
	引張鉄筋	鉄筋量	D19-4 本 D22-4 本	D19-8 本	D19-8 本
		D _{st} mm	60.0	60.0	
圧縮鉄筋	鉄筋量	D19-8 本	D19-4 本 D22-4 本		
	D _{sc} mm	60.0	60.0		
安全性	破壊	本体	$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud}$	0.50	0.42
		継手 [*]	$\gamma_i \cdot M_d / M_{yd}$	0.42	0.37
	安定			0.15	
復旧性	損傷	本体	$\gamma_i \cdot M_d / M_{yd}$	0.46	0.38
耐久性	曲げひび割れ		$\gamma_i \sigma_c / \sigma_{bi}$	0.80	0.00
			$\gamma_i \sigma_s / \sigma_{s1}$	0.15	0.04
			w_d / w_{lim}	検討省略	検討省略
照査の前提	最小鉄筋量 (脆弱破壊)	M_{crd} / M_{yd}	0.34	0.35	
	最大鉄筋量		$P_t \leq 0.75 p_b$	$P_t \leq 0.75 p_b$	
	コンクリート応力度制限	本体	$\sigma'_c / (0.4 f_{cd})$	0.69	0.68
		継手		0.58	0.90

^{*}: 安全性 (破壊) の作用の組合せで設計応答値を算定し、 M_{yd} を設計限界値とした。ここで、構造物係数 γ_i を 1.0 とした。

また、ケース2についても、照査の前提（応力度の制限）が決定ケースとなっている。継手については、ケース1および、ケース2とも、照査の前提（応力度の制限）が決定ケースとなっている。

3.3 許容応力度設計法との比較

3.1節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、コンクリートのヤング係数として、改訂前の設計標準をもとに、構造解析では 39.0kN/mm^2 を用い、照査ではヤング係数比 $n=15$ を用いた。また、鋼材のヤング係数は、 210kN/mm^2 を用いた。

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図5に示す。ここで、性能照

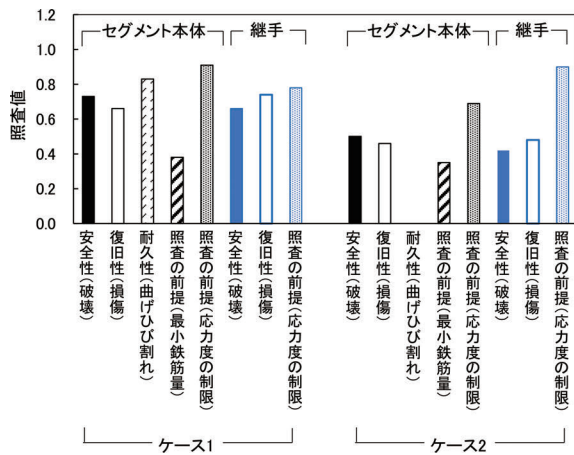


図4 照査結果の比較

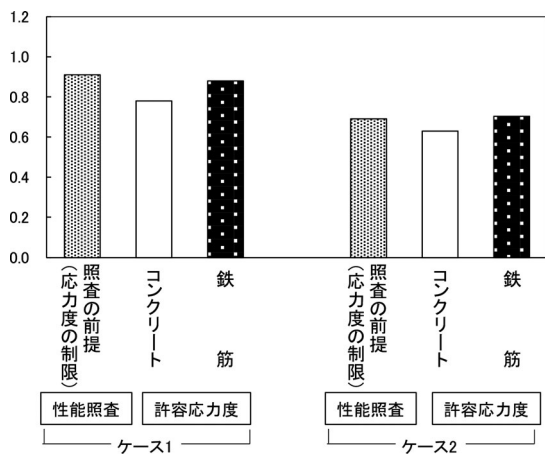


図5 性能照査型設計法と許容応力度設計法の照査値の比較（セグメント本体）

査型設計法については決定ケースとなる性能項目について照査値を示し、許容応力度設計法については「応力度／許容応力度」を示している。これより、改訂による照査結果は概ね同等であることが確認できた。

4. まとめ

鉄道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。得られた知見は、以下の通りである。
 ・砂質土地盤に位置する単線および複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。セグメント本体については、安全性（破壊）、耐久性（曲げひび割れ）および照査の前提（応力度の制限）の照査値が比較的大きくなり、照査の前提（応力度の制限）が決定ケースとなる結果となった。また、継手については、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。

謝辞

本検討を実施するにあたり、「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。また、試設計の実施等にあたり、中央復建コンサルタンツ株式会社の室谷耕輔氏、坂田智基氏、上野紗季氏には多大なるご協力を頂いた。末筆ながら、感謝の意を表する次第である。

文献

- 1) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・開削編，丸善出版，2021
- 2) 津野究，滝川遼，木下果穂，坂田智基：性能照査型設計法によるシールドトンネルの試設計例，地下空間シンポジウム論文・報告集，第26巻，pp.70-73，2021
- 3) 津野究，滝川遼，木下果穂，牛田貴士：複線シールドトンネルを対象とした性能照査型設計法による試設計例，第56回地盤工学研究発表会発表講演集，12-7-2-04，2020
- 4) 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