

特集：鉄道トンネルの設計技術

# 改訂鉄道構造物等設計標準（トンネル）に基づく 山岳トンネルの試設計

野城 一栄\* 嶋本 敬介\*

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

Kazuhide YASHIRO Keisuke SHIMAMOTO

Design standards for railway mountain tunnels have been revised to introduce a performance-verification design method to railway tunnels. This report outlines the performance-based design method introduced in this revision and outlines the procedures for design using this method. First, specific inspection methods for mountain tunnels under general design conditions are shown. Then, the results of trial design using the performance verification design method carried out for the railway mountain tunnel with reinforced concrete are shown, focusing on structural conditions and ground conditions.

キーワード：山岳トンネル，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（都市部山岳工法トンネル）は、今回の改訂において限界状態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。また、あわせて、山岳部のトンネルについても、トンネル標準の第Ⅳ編の適用範囲に包含されることとなった。この改訂に際し、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されたほか、柔軟な条件設定が可能となるよう新たな知見が反映された。

本報告は、今回の改訂により導入された性能照査型設計による設計の手順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山岳トンネルの具体的な照査方法について示す。そして、構造条件や地山条件に着目して鉄筋コンクリート構造の鉄道山岳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を示す。なお、無筋コンクリート構造の性能照査型設計法による設計については文献1、文献2を参照されたい。

## 2. 山岳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。ここで、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、山岳トンネルについては「第Ⅳ編 山岳工法編」にその具体的な方法を示している。山岳トンネルについて、直接照査の要否をそれぞれの性能項目に対して整理したものを表2に示す。例えば、走行安全性の照査指標の一つである内空の変位・変形の地震時以外の照査では、設計限

表1 要求性能と性能項目・照査指標の例<sup>3)</sup>

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 <sup>※1</sup> ，横方向の振動変位 <sup>※1</sup>
使用性	公衆安全性	中性化深さ，塩化物イオン濃度，ボルトの種類
	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 <sup>※1</sup>
復旧性	騒音・振動	騒音レベル，振動レベル
	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>
	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

界値を建築限界外余裕とし、内空の変位・変形が設計限界値を超えないことを確認することが基本原則であるが、「第Ⅳ編 山岳工法編」では、部材の損傷に関する復旧性の照査を満足する場合には、これを満足するものとみなすことができるとしている。これは、部材の損傷に関する復旧性の照査として、

- (a) 曲げ破壊形態を有する場合は、部材の断面力を部材の降伏時の設計断面力以下とする
- (b) せん断破壊形態を有する場合は、部材のせん断力を設計せん断耐力以下とする

ことが満足されれば、内空の変位・変形を十分に小さく抑制できる<sup>3)</sup>ことが理由である。

設計応答値の算定については、鉄道構造物等設計標準・同解説（都市部山岳工法トンネル）の方法を踏襲したほか、加筆・修正を行った。以下に代表的なものを示す。

(1) 土圧

土圧については、完成後に付加的な土圧が作用することが想定される場合に考慮するものとし、全土被り荷重

と緩み土圧の算定方法を新たに掲載した。

(2) 地盤の特性値と設計用値

地盤の特性値と設計用値については、基礎標準<sup>4)</sup>で用いられている数値を新たに掲載した。

(3) 地盤のモデル化

従来の旧基礎標準<sup>5)</sup>に準じていた地盤反力係数の算定方法を、基礎標準<sup>4)</sup>のものに修正した。

その他、直接照査を行う項目については、設計限界値の設定は従来通り部材に応じて関連する設計標準によることを基本としている他、耐久性の検討および照査の前提を満足することが求められる。

### 3. 性能照査型設計法による試設計

#### 3.1 設計条件

鉄筋コンクリート構造の鉄道山岳トンネルを想定し、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。図1に縦断図を示す。設計位置を①小土被り部と②台地部の2通りとし、トンネルの構造を2通りとして、設計ケースは表3に示す計3ケースとした。

①小土被り部は、土被りを約8mとし、ケース1は、都市部を想定し覆工～インバート間の隅角部に擦り付け半径を有する都市部山岳工法トンネルの断面1（図2(a)）としたケース、ケース2は、都市部でなく山岳部にある山岳トンネルの坑口部を想定し、隅角部に擦り付け曲線を有さない代わりに、覆工の側壁部から覆工～インバート間の隅角部にかけて、巻厚を50cmから70cmまで徐々に増加させた断面2（図2(b)）を用いたケースである。

②台地部は、土被りを約26mとし、ケース1と同様

表2 一般的な設計条件の山岳トンネルの照査の例

要求性能	性能項目	照 査		
		○：直接照査が必要となる性能項目	△：前提条件等を満足することで照査を満足するものとしてよい性能項目	
安全性	破壊	○	—	
	疲労破壊	△	地盤で直接支持されない場合等は実施	
	安定	△	地山が安定していない場合等は実施	
	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防水工および排水工を施すことで、満足するものとしてよい	
	支持性能	△	自重と内部荷重が掘削土量よりも重い場合等は実施	
	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（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	

表3 設計ケース

ケース	設計位置	トンネルの構造	防水/排水の別
ケース1	①小土被り部	断面1 図2(a)	防水トンネル
ケース2	①小土被り部	断面2 図2(b)	排水トンネル
ケース3	②台地部	断面1 図2(a)	防水トンネル

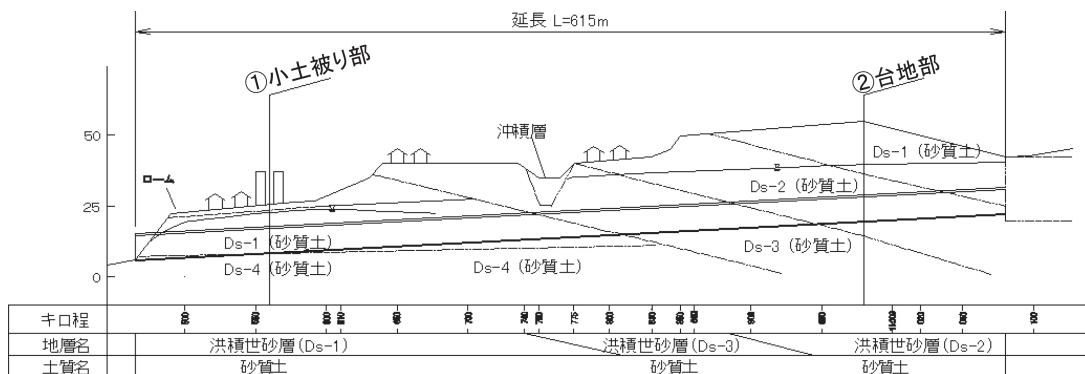


図1 縦断図

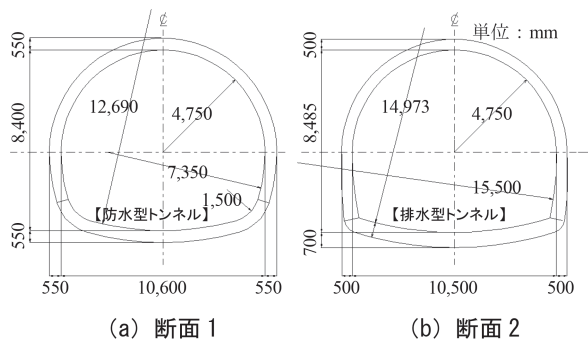


図2 設計対象断面

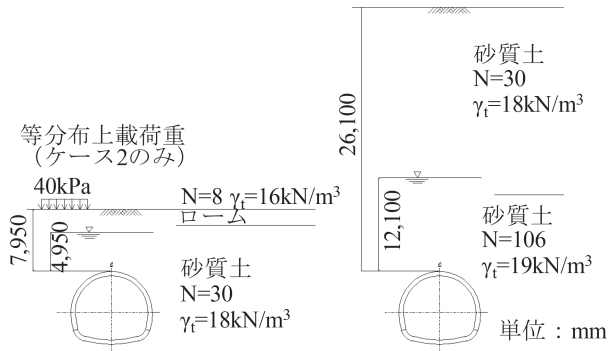


図3 地盤条件

表4 材料物性値

材料	項目	数値
コンクリート	設計基準強度 $f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	24
	ヤング係数 $E_c$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	25
鉄筋	引張降伏強度 $f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	345
	ヤング係数 $E_s$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	200

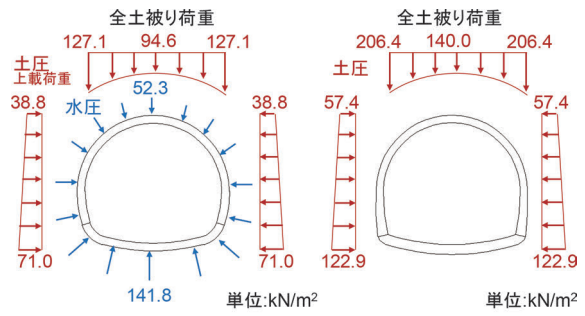
の都市部山岳工法トンネルの断面1とした。

ここで、ケース1, 3についてもケース2と同様に徐々に巻厚を増加させる手法が考えられるが、一般に都市部の山岳工法トンネルにおける事例では多くの事例で巻厚を全周で一様としていること、将来的な周辺地域の開発等に対する構造計画上の配慮から、巻厚は全周で一様とした。

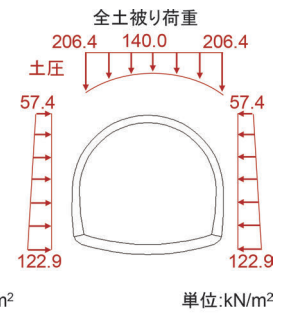
地盤条件を図3に示す。①②とも砂質土地盤とし、トンネル建設前の地下水位は、トンネル天端よりも上方である。

材料物性値を表4に示す。3ケースとも、覆工およびインバートは鉄筋コンクリート構造とした。

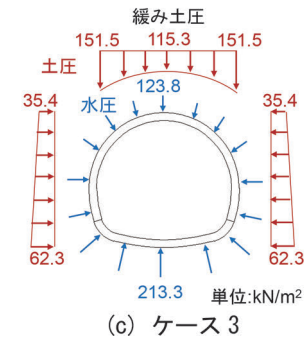
図4に設計作用を示す。作用については、土圧、水圧および自重のほか、ケース2については等分布上載荷重を考慮した。砂質土であることから土水分離とし、ケース1, 2においては、土被りが1D (D:トンネルの掘削幅) 以下の小土被り条件であることから、全土被り荷重を作用させた。ケース3においては、土被りが2Dと大



(a) ケース1



(b) ケース2



(c) ケース3

図4 設計作用 (作用係数=1の例)

きい条件であることから、Terzaghiの緩み土圧の基本式を用いて緩み土圧を算定し、作用させた。また、ケース2は排水トンネルとして建設され水位が下がるため、水圧は考慮しないものとした。

### 3.2 照査

以下、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)、復旧性(損傷)、耐久性の検討(曲げひび割れの検討)および照査の前提(応力度の制限)について検討結果を示す。

設計作用を図4に示す。応答値の算定にあたっては、はり-ばねモデルを用い、覆工およびインバートをはり、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、基礎標準<sup>4)</sup>に準拠し、地盤のN値から定めた。ケース1では22,590kN/m<sup>3</sup>、ケース3では79,820kN/m<sup>3</sup>である。

作用係数を表5に、構造解析により得られた設計断面力の例を表6に示す。曲げモーメントの最大値はアーチ下部~インバート間の隅角部付近に発現している。また、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として、天端と、曲げモーメントが最も大きくなる隅角部を例にとり、照査結果を表7に、配筋諸元を図5に示す。主鉄筋の決定ケースは、多くが照査の前提(圧縮応力度の制限)で、一部、耐久性の検討(曲げひび割れの検討)であった。

表7 照査結果

ケース No.			ケース 1			ケース 2			ケース 3			
位置			天端	隅角部	インバート	天端	隅角部	インバート	天端	隅角部	インバート	
部材 諸元	幅	B mm	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
	巻厚	H mm	550	550	550	500	700	700	550	550	550	
	引張 鉄筋	鉄筋量	D22-8 本	D29-8 本	D22-8 本	D29-8 本	D29-8 本	D22-8 本	D16-8 本	D29-8 本	D22-8 本	
		$D_{st}$	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	
	圧縮 鉄筋	鉄筋量	D19-8 本	D29-8 本	D22-8 本	D16-8 本	D22-8 本	D16-8 本	D16-8 本	D29-8 本	D22-8 本	
$D_{sc}$		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
安全性	破壊	$\gamma \cdot M_d / M_{yd}$	0.54	0.47	0.55	0.49	0.58	0.80	0.32	0.42	0.48	
復旧性	損傷	$\gamma \cdot M_d / M_{yd}$	0.53	0.43	0.51	0.44	0.51	0.76	0.29	0.41	0.50	
耐久性	曲げ ひび割れ	$\gamma \cdot \sigma_{ct} / \sigma_{bt}$	0.66	0.75	0.93	0.61	0.59	0.93	0.02	0.82	0.98	
		$\gamma \cdot \sigma_s / \sigma_{st}$	0.23	-	-	-	-	-	-	0.04	-	0.17
		$w_d / w_{lim}$	-	0.27	0.59	0.82	0.49	0.96	-	0.23	-	
照査の 前提	最小鉄筋量	$M_{ed} / M_{yd}$	0.59	0.33	0.43	0.26	0.33	0.66	0.58	0.34	0.44	
	最大鉄筋量	$P_t / 0.75 p_b$	0.21	0.57	0.41	0.69	0.46	0.14	0.23	0.60	0.44	
	応力度制限	$\sigma_e / (0.4 f_{cd})$	0.63	0.99	0.94	0.98	0.98	0.89	0.41	0.99	0.94	

下線：決定ケース

表5 設計作用の組み合わせと作用係数

要求性能	作用の組み合わせ
安全性 (破壊)	$1.1E_{DV} + 1.1E_{DH} + W_{Pl} + D_1$
復旧性 (損傷)	$E_{DV} + E_{DH} + W_{Pl} + D_1$

$E_{DV}$ :鉛直土圧,  $E_{DH}$ :側方土圧,  $W_{Pl}$ :水圧,  $D_1$ :自重, 上載荷重

表6 設計断面力 (作用係数=1 の例)

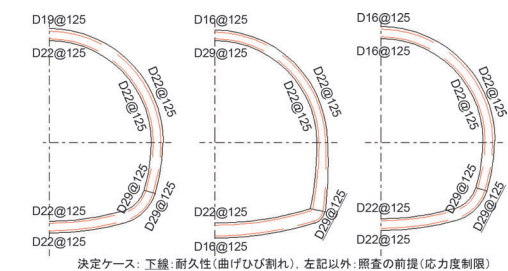
	曲げモーメント(kNm)	軸力(kN)
ケース1		
		-1371
ケース2		
		-856
ケース3		
		-1114

#### 4. まとめ

砂質土地盤に位置する山岳トンネルを対象に、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。

- ・曲げモーメントは、アーチ下部～インバート間の隅角部で相対的に大きな値となる。
- ・主鉄筋の決定ケースは、多くが照査の前提 (圧縮応力度の制限) で、一部、耐久性の検討 (曲げひび割れの検討) であった。

なお、本報告で示した試設計のより具体的な計算過程



(a) ケース 1 (b) ケース 2 (c) ケース 3

図5 配筋諸元

について、設計計算例を取りまとめる予定である。設計実務においてご活用いただければ幸いである。

#### 謝辞

本検討を実施するにあたり、「鉄道構造物等設計標準 (山岳トンネル) 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いただいた。末筆ながら、感謝の意を表する次第である。

#### 文献

- 1) 嶋本敬介, 川越健, 野城一栄, 上野光: 山岳トンネル覆工およびインバートの適みなし仕様の提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.5, pp.21-27, 2022
- 2) 嶋本敬介, 野城一栄, 岡野法之: 地山劣化法を用いた山岳トンネル覆工およびインバートの性能照査法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.5, pp.29-35, 2022
- 3) 仲山貴司, 牛田貴士, 滝川遼: 性能照査型設計法による開削トンネルの試設計, 鉄道総研報告, Vol.33, No.4, pp.41-44, 2019
- 4) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 丸善出版, 2012
- 5) 運輸省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善, 1997