

性能照査型設計法による開削トンネルの試設計

仲山 貴司* 牛田 貴士** 滝川 遼*

Trial Design of a Cut and Cover Tunnel Applying a Performance-Based Design Method

Takashi NAKAYAMA Takashi USHIDA Ryo TAKIGAWA

The design standards for railway cut and cover tunnels based on the limit-state design method are under revision for the purpose of uploading them with those based on the performance-based design method in near future. In this report, in order to demonstrate the procedure of the new design method, we have presented a trial design of a railway cut and cover tunnel applying the new design code and difference between the results according to new and current design codes, which have sufficient bearing capacity during seismic condition. We carried out the normal condition performance verification of a 2×2 lane double decked reinforced concrete culvert and a 1×2 lane single decked reinforced concrete culvert. Consequently, we confirm that it is possible to make economical design based on the new design code.

キーワード：開削トンネル，性能照査型設計法，要求性能，性能項目，限界状態設計法

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）（以下、開削標準）の設計体系は、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する¹⁾。この改訂に伴い、設計されたトンネルの性能を理解、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するほか、応答値の算定では、従来の手法は踏襲しつつ、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、開削標準の改訂で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。

以降において、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開削トンネルの具体的な照査方法について示す。続いて、地震時以外の場合について、①駅間トンネルを想定した1層2径間の断面、②駅部トンネルを想定した2層2径間の断面に対する試設計を限界状態設計法と性能照査型設計法で行い、必要となる配筋量を比較した結果を示す。

2. 開削トンネルの性能照査の方法

開削標準では、要求性能および性能項目は「第1編 総論」において、表1の通り例示される。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うえで重要であり、開削標準では「第II編 開削工法編」にその具体的な方法を示している。

例えば、走行安全性の照査指標の一つとして挙げている

表1 要求性能と性能項目・照査指標の例

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 勞 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*, 横方向の振動変位*
	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*
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*, 横方向の振動変位*
	残 留 変 位	力, 変位・変形

※ 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
 ** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

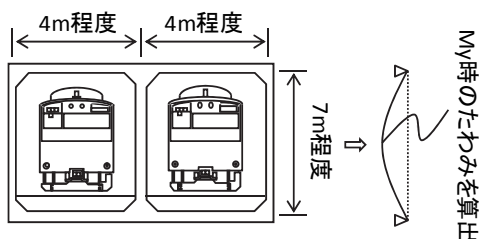


図1 内空（側壁）の変位量の算出方法

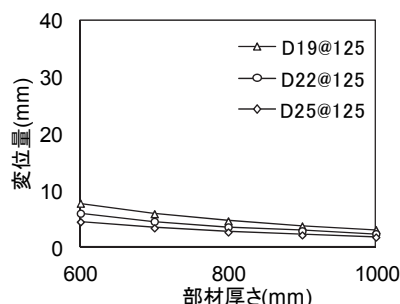


図2 内空（側壁）の変位量の算出結果

表2 一般的な設計条件の開削トンネルの照査の例（地震時以外）

要求性能	性能項目	照査	限界状態設計法との関係	
安全性	破壊	○	終局限界状態（断面破壊）	
	疲労破壊	△	地盤に支持されている下床版は省略可	
	安定（浮き上がり）	○	終局限界状態（安定）	
	走行安全性 （内空の列車）	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省略可
		軌道面の不同変位	△	安全性（安定）の照査を満足することで省略可
公衆安全性	△	耐久性の検討を満足することで省略可		
使用性	水密性	△	要求水準を満足することが確認された防水工を施すことで省略可	
	乗り心地 （内空の列車）	軌道面の不同変位	△	安全性（安定）の照査を満足することで省略可
	騒音・振動	△	構造計画で検討	
復旧性	損傷	軌道面	△	安全性（安定）の照査を満足することで省略可
		部材	○	使用限界状態（変位・変形）
	残留変位（浮き上がり）	△	復旧性（部材の損傷）、安全性（安定）の照査を満足することで省略可	

○：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が省略できる性能項目

表3 耐久性の検討，照査の前提（決定ケースとなりうる事項のみ）

検討項目		限界状態設計法との関係
耐久性の検討	鋼材腐食	ひび割れに関する検討
		中性化に関する検討
照査の前提	最大，最小鉄筋量	釣り合い鉄筋比
		脆性的な破壊の防止
	応力度の制限	

る内空の変位・変形の地震時以外の照査では，設計限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となる。ただし，「第Ⅱ編 開削工法編」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。

この背景として，部材の損傷に関する復旧性の照査を満足することで内空の変位・変形が小さく抑止されているという点がある。部材の損傷に関する復旧性の照査では，性能レベル1（機能は健全で補修をしないで使用可能な状態）となる状態に対して設計限界値を設定し，次の確認を行う。

(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。

図1は，(b)を満足するという前提のもと(a)の状態に到達した場合（My時）の側壁のたわみを，単純梁として簡易かつ安全側に試算する方法を示したものである（ひび割れ発生以降の非線形性は部材一様の有効剛性を使用）。試算結果は図2の通りであり，主鉄筋量によって多少異なるが，たわみ量は10mm以下と十分に小さくなるのがわかる。

このように直接照査の要否を，それぞれの性能項目に対して整理すると表2となる。なお，表1に示した性能項目うち，外観に関する使用性は，駅部等で外観に対する配慮が必要な場合を除き，一般に省略してよいとしていること，また，支持性能は，施工前の先行荷重より

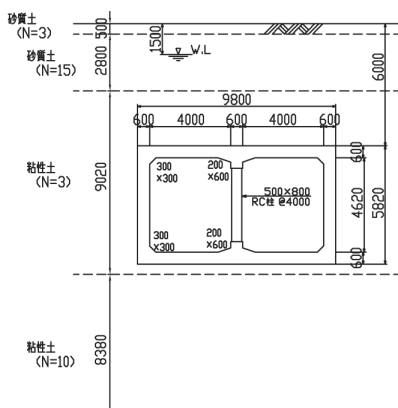


図3 設計断面（1層2径間）単位（mm）

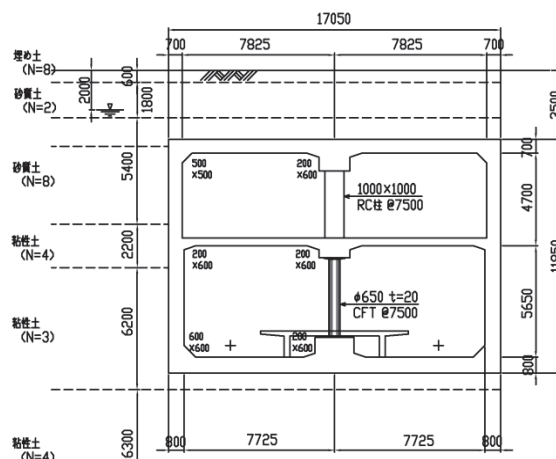


図4 設計断面（2層2径間）単位（mm）

表4 設計地下水位（1層2径間）

	使用性	安全性
平水位	G.L.-1.5m	—
高水位	G.L.-0.5m	G.L.-0.0m
低水位	G.L.-2.5m	G.L.-3.3m

表5 設計地下水位（2層2径間）

	使用性	安全性
平水位	G.L.-2.0m	—
高水位	G.L.-1.0m	
低水位	G.L.-3.0m	

底面荷重が大きくなる場合に設定するものであることから、表2では記載していない。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。表3はこれらのうち構造計算を伴う事項のみを整理したものである。これらの表には、従来の限界状態設計法における検討項目との関係も示した。開削標準を用いた一般的な設計条件下の性能照査型設計では、従来の限界状態設計法の検討項目を網羅し、かつ、照査、検討する項目は同程度である。

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。また、設計応答値の算定については、従来の手法を踏襲したが、鉄筋のかぶりなどの仕様規定化されていた事項について柔軟な条件設定を可能とするほか、以下の新たな知見も反映している。

(1) 変動荷重による土圧

最新の土木学会トンネル標準示方書に準じて土被り1m未満の地表面上の自動車荷重を修正した。この修正により設計応答値は微増する傾向にある。

(2) 地盤の特性値と設計用値

土の単位体積重量について、調査事例に基づいた修正を行った。この修正により設計応答値は微増する傾向にある。

(3) 地盤のモデル化

従来の旧基礎標準に準じていた地盤反力係数の算定方法を、現行の基礎標準のものに修正した。この修正により設計応答値は微増または微減する傾向にある。

(4) 設計曲げひび割れ幅の算定方法

開削トンネルに発生する曲げひび割れは、コンクリートの収縮とクリープの影響だけでなく、供用中の土水圧の変動の影響を受けることから、これらの影響を曲げひび割れ幅の変動を考慮する係数 k_4 で考慮することとし、駅間の開削トンネルの事例分析から0.7を例示した。この修正により設計応答値は大きく減少する傾向にある。

3. 限界状態設計法と性能照査型設計法の比較

前述した性能照査の方法を用いて、限界状態設計法と性能照査型設計法による試設計を行った。なお、設計法による照査結果を比較することが目的であるため、照査結果に余裕が見られる箇所についても部材厚は固定し、配筋量のみの変更に留めている。

3.1 設計条件

開削トンネルは、従来、駅間に多く採用されていたが、シールド工法の発展により駅部での採用が多くなる傾向にある。そこで、試設計の断面には駅間を想定した1層2径間と駅部を想定した2層2径間を選定した。それぞれの断面寸法は図3、図4、地下水位は表4、表5のように設定した。なお、いずれの設計も設計耐用期間は100年、環境条件は「一般の環境」とし、コンクリートの配合は $W/C=55\%$ 、 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、 $D_{max}=25\text{mm}$ とした。

3.2 照査結果

性能照査型設計による照査結果の一例として、開削ト

表6 照査結果の一例（1層2径間）

位置			上床版 スパン中央	側壁（下側） 支承前面
部材 諸元	幅	B mm	1000	1000
	高さ	H mm	600	700
	引張鉄筋	鉄筋量	D16@125mm	D16@125mm
		Dst mm	65	70
圧縮鉄筋	鉄筋量	D16@125mm	D16@125mm	
	Dst mm	65	180	
安全性	破壊	$\gamma_1 \cdot M_d / M_{rd}$	0.49	0.65
復旧性	損傷	$\gamma_1 \cdot M_d / M_{rd}$	0.42	0.72
		$\gamma_1 \cdot \sigma_{ed} / \sigma_b$	0.55	0.97
耐久性	曲げひび割れ	$\gamma_1 \cdot \sigma_{ed} / \sigma_{s11}$	0.58	1.05
		w_d / w_{lim}	検討を省略	0.70
		最小鉄筋量 (脆性破壊)	M_{ed} / M_{yd}	0.66
照査の 前提	最大鉄筋量		$p_t \leq 0.75p_b$	$p_t \leq 0.75p_b$
	コンクリートの圧縮 応力度の制限	$\sigma'_{ed} / (0.4f_{cd})$	0.45	0.68

表7 照査結果の一例（2層2径間）

位置			上床版 スパン中央	側壁（B2下側） 支承前面
部材 諸元	幅	B mm	1000	1000
	高さ	H mm	700	1000
	引張鉄筋	鉄筋量	D19@125mm	D22@125mm
		Dst mm	70	70
圧縮鉄筋	鉄筋量	D16@125mm	D16@125mm	
	Dst mm	65	180	
安全性	破壊	$\gamma_1 \cdot M_d / M_{rd}$	0.58	0.72
復旧性	損傷	$\gamma_1 \cdot M_d / M_{rd}$	0.54	0.79
		$\gamma_1 \cdot \sigma_{ed} / \sigma_b$	0.96	1.74
耐久性	曲げひび割れ	$\gamma_1 \cdot \sigma_{ed} / \sigma_{s11}$	0.74	-
		w_d / w_{lim}	検討を省略	0.79
		最小鉄筋量 (脆性破壊)	M_{ed} / M_{yd}	0.53
照査の 前提	最大鉄筋量		$p_t \leq 0.75p_b$	$p_t \leq 0.75p_b$
	コンクリートの圧縮 応力度の制限	$\sigma'_{ed} / (0.4f_{cd})$	0.53	0.91

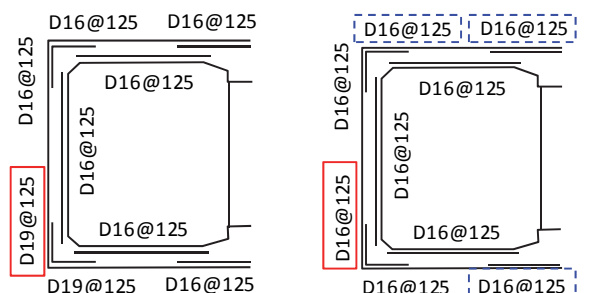


図5 配筋諸元（1層2径間）

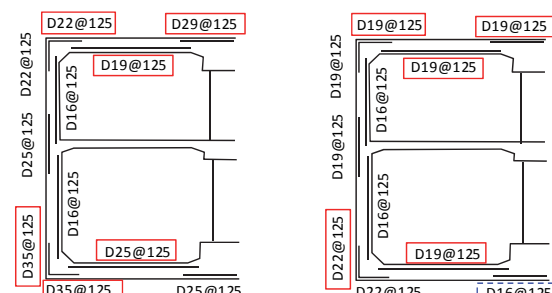


図6 配筋諸元（2層2径間）

ンネルで照査結果が厳しくなる側壁下端と上床版中央の照査値を表6、表7に示した。照査値は、損傷に関する復旧性、耐久性の検討（曲げひび割れ幅）および照査の前提（脆性破壊）が高くなる傾向があり、図5、図6の配筋諸元に示すように、主鉄筋の決定ケースは、これらのうち主鉄筋量の変更に伴う感度が高い、耐久性の検討（曲げひび割れ幅）、照査の前提（脆性破壊）という結果になった。

なお、照査値自体ではD13@125mmやD16@250mmでも照査を満足する箇所もあるが、本試設計では温度ひび割れ幅を抑制するための配力鉄筋量や将来的な周辺地域の開発等に対する構造計画上の配慮を考慮できないため、設計実績を踏まえ主鉄筋はD16@125mmを最小とした。

この結果、開削標準における性能照査型設計法を用いる場合、全位置で主鉄筋量は同等または小さくなることわかる。1層2径間では同等であり、これは従来の開削トンネルが所要の性能を有していることを明示できている結果であると考えられる。一方、寸法の大きい2層2径間では主鉄筋量の低減効果が大きく、近年の大断面の開削トンネルに対しては改訂による効果が高い可能性を示唆しているものと考えている。

4. おわりに

本報告で得られた知見を以下に整理する。

- (1) 開削標準の性能照査型設計に移行した場合にも、従来の限界状態設計法と同等の照査・検討項目で、開削トンネルの性能を明示できることを示した。
- (2) 1層2径間の開削トンネルでは、限界状態設計法と同様の主鉄筋量となることを確認した。
- (3) 2層2径間の開削トンネルでは、限界状態設計法よりも主鉄筋量を減少でき、断面が大きくなるほど、改訂による効果が高い可能性を確認した。

なお、本報告で示した試設計のより具体的な計算過程等について、設計計算例を取り纏める予定である。設計実務においてご活用頂ければ幸いです。

謝辞

本検討を実施するにあたり、「鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）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。

文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会：鉄道構造物等設計標準・解説（開削トンネル），2016.3