

シールドトンネルの設計における 地盤条件と作用に関する感度分析

滝川 遼¹・津野 究²・木下 果穂³

¹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

²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

³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

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。本研究では、粘性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、地盤条件と作用を変えた感度分析を行った。感度分析では、地盤条件は N 値 0～8 の一様地盤とし、作用は土水一体で鉛直荷重を $150\sim350\text{kN/m}^2$ としており、これらについてパラメトリックスタディによる構造解析を実施した。また、破壊に関する安全性と照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）について照査を行い、単線シールドトンネルにおいて照査値を満足する地盤条件と作用の範囲を示した。

Key Words: shield tunnel, performance-based design method, ground condition, parameter study

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¹⁾。そこで本研究では、粘性土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に、地盤条件と作用を変えた複数のケースについて性能照査型設計法による試設計を行い、照査値の感度分析を行った。

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、セグメント高さ 0.3m 、セグメント幅 1.0m の RC セグメントである。なお、セグメント継手およびリング継手は考慮せず、剛体一様の条件で検討している。材料物性値を表-1 に示す。

表-2 に地盤条件と作用を変えた複数のケースを示す。地盤条件は粘性土の一様地盤とし N 値については 0, 2,

3, 4, 6, 8 の 6 ケース、作用については鉛直荷重を 150kN/m^2 , 200kN/m^2 , 250kN/m^2 , 300kN/m^2 , 350kN/m^2 の 5 ケースとし、これらの組合せ 30 ケースについて構造解析を実施した。なお、鉛直荷重と土被りの関係についての例を表-3 に示す。トンネル覆工に全土被り荷重が作用し、粘性土の単位体積重量 $\gamma=17\text{kN/m}^3$ 、地表面荷重 $P_0=10\text{kN/m}^2$ とした場合、鉛直荷重 $150\text{kN/m}^2\sim350\text{kN/m}^2$ は、土被り $1.2D\sim2.9D$ (D : トンネル外径) に相当する。

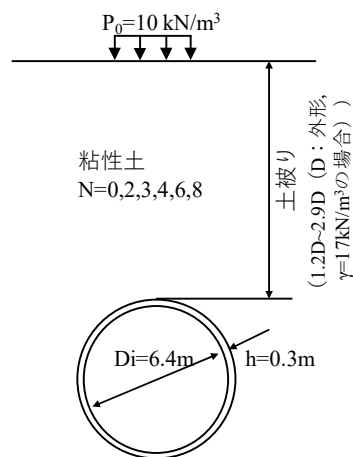


図-1 検討条件

表-1 材料物性値

セグメント 本体	コンクリート	設計基準強度 f_k [N/mm ²]	48
		ヤング係数 E_c [kN/mm ²]	32.6
	鉄筋(SD345)	引張降伏強度 f_{yk} [N/mm ²]	345
		ヤング係数 E_s [kN/mm ²]	200

表-2 検討ケース

N 値	鉛直荷重 P_v (kN/m ²)				
	150	200	250	300	350
0	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
2	case 6	case 7	case 8	case 9	case 10
3	case 11	case 12	case 13	case 14	case 15
4	case 16	case 17	case 18	case 19	case 20
6	case 21	case 22	case 23	case 24	case 25
8	case 26	case 27	case 28	case 29	case 30

表-3 鉛直荷重と土被りの関係についての例

	鉛直荷重 P_v (kN/m ²)				
	150	200	250	300	350
土被り(m)	8.2	11.2	14.1	17.1	20.0
外径比	1.2D	1.6D	2.0D	2.4D	2.9D

※粘性土の水中単位体積重量 $\gamma=17\text{kN/m}^3$ 、地表面荷重 $P_0=10\text{kN/m}^2$ とした場合

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-4 が例示される¹⁾。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）と照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）について検討結果を示した。

表-4 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	考慮する作用
安全性	破 壊	力、変位・変形	・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 ^{※2} ・発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用 ^{※3}
	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 ^{※1} 、横方向の振動変位 ^{※1}	
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	・設計耐用期間中に比較的しばしば生じる大きさの作用
	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}	
復旧性	騒音・振動	騒音レベル、振動レベル	・設計耐用期間中に生じる作用 ・発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用 ^{※3}
	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。

※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、土水の取り扱いについては土水一体を適用した。設計作用の例を図-2 に示す。側方土圧は等変分布荷重とし、セグメント上半部に作用する鉛直土圧の特性値と、スプリングライン位置の鉛直土圧の特性値に側方土圧係数 λ を乗じ、これをトンネル底部まで延長した分布形状とした。また、底部反力は鉛直荷重と同様としており、自重はセグメント覆工の図心線に沿って分布する鉛直方向の荷重として定めた。側方土圧係数 λ は、N 値 0～8 の範囲を想定し 0.7～0.6 とした。解析に用いた側方土圧係数と地盤反力係数を表-5 に示す。

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 0.9 として考慮した。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、剛性一様リングとし、セグメント本体をはりとしてモデル化した。なお、モデルの節点数は 100 節点とした。

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、文献 2) の地盤ばねモデルの地盤反力係数 $\times$ トンネル半径の値を参考に算出した。N 値と地盤反力係数の関係について表-5 に示す。なお、N 値 0 については、地盤反力係数を 100 kN/m^2 とした。

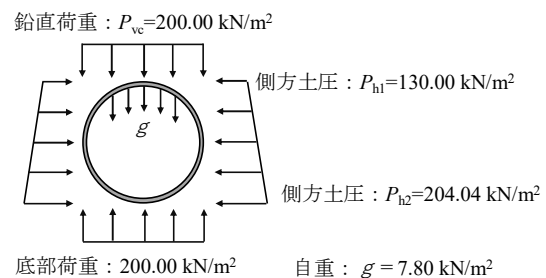
図-2 設計作用の例 (N 値 4, 鉛直荷重 200 kN/m^2)

表-5 N 値と側方土圧係数および地盤反力係数

N 値	側方土圧係数 λ	地盤反力係数 $\times$ トンネル半径 $k_r \times R_c$ (MN/m ²)	地盤反力係数 k (kN/m ²)
0	0.7	0.335	100
2	0.7	3.5	1045
3	0.675	5.25	1567
4	0.65	7.0	2090
6	0.625	10.0	2985
8	0.6	13.0	3881

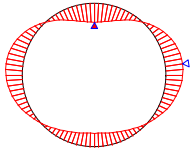
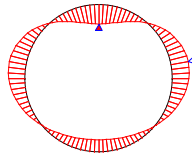
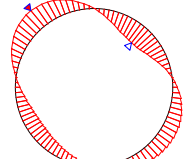
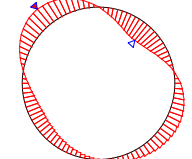
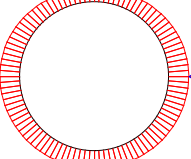
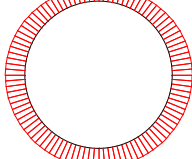
(2) 性能照査

a) 応答値の算定

構造解析により得られた断面力の例を表-6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に、負曲げの最大値はスプリングライン付近に発現しており、せん断力の最大値は、アーチ部に発現している。

また、正曲げにおける、安全性（破壊）の最大曲げモーメントを図-3に、安全性（破壊）以外の最大曲げモーメントを図-4に示す。全てのケースにおいて、鉛直荷重の増加とともに最大曲げモーメントは増加しており、最大曲げモーメントの範囲は安全性（破壊）で 91.22 kNm～315.19kNm、安全性（破壊）以外で 54.70 kNm～265.25kNm である。

表-6 断面力および最大値（N 値 4, 鉛直荷重 200 kN/m²）の例

	安全性（破壊）	安全性（破壊）以外
曲げモーメント	 正曲げ：158.94kNm 負曲げ：141.86kNm	 正曲げ：120.38kNm 負曲げ：105.14kNm
せん断力	 最大：98.20kN	 最大：75.36kN
軸力	 最大：711.25kN	 最大：710.79kN

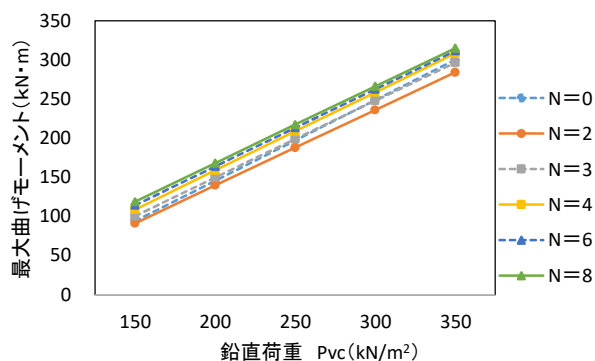


図-3 最大曲げモーメント（安全性（破壊），正曲げ）

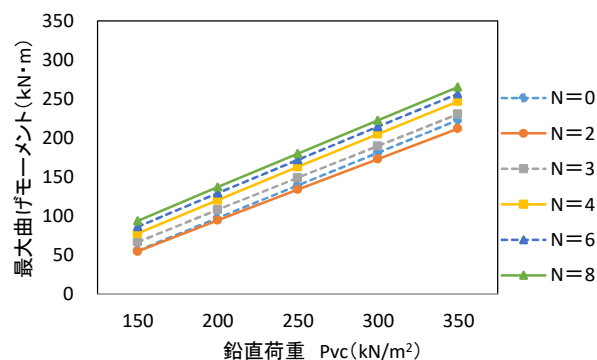


図-4 最大曲げモーメント（安全性（破壊）以外，正曲げ）

b) 照査結果

性能照査型設計法による照査の例を表-7に示す。照査の結果、安全性（破壊）と照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）の照査値が厳しく、安全性（破壊）が決定ケースとなっている。なお、本研究の試設計断面では、負曲げについてはボルトボックス等による断面欠損がないことから、セグメント幅の全断面を有効断面として照査している。

また、安全性（破壊）の照査値を図-5に、照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）の照査値を図-6に示す。安全性（破壊）、照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）とともに、鉛直荷重の増加に伴い照査値が大きくなり照査値が厳しくなる傾向がみられる。今回の検討条件では、安全性（破壊）、照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）とともに、鉛直荷重が 250 kN/m² では照査を満足し、300 kN/m² ではおおむね照査を満足しない結果となった。

表-7 照査結果の例（N 値 4, 鉛直荷重 200 kN/m²）

			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	D22-8 本
			D _s	45.0	45.0
	圧縮鉄筋		鉄筋量	D22-8 本	D22-8 本
			D _c	45.0	45.0
安全性	破 壊		γ _i ・M _d /M _{rd}	0.68	0.56
復旧性	損傷	本体	γ _i ・M _d /M _{yd}	0.49	0.40
照査の 前提	最小鉄筋量 (脆弱破壊)		M _{sd} /M _{yd}	0.32	0.34
	最大鉄筋量			P _i ≦0.75p _b	P _i ≦0.75p _b
	コンクリート応力 度の制限	本体	σ _c /(0.4f _{cd})	0.64	0.55

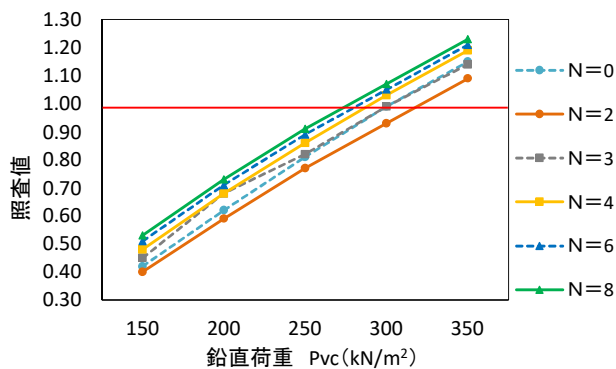


図-5 照査値（安全性（破壊・曲げ））

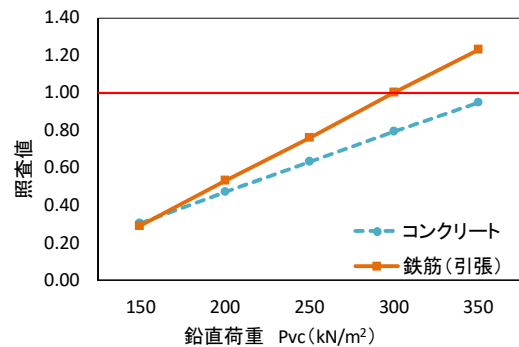


図-7 照査値（許容応力度照査 N値4）

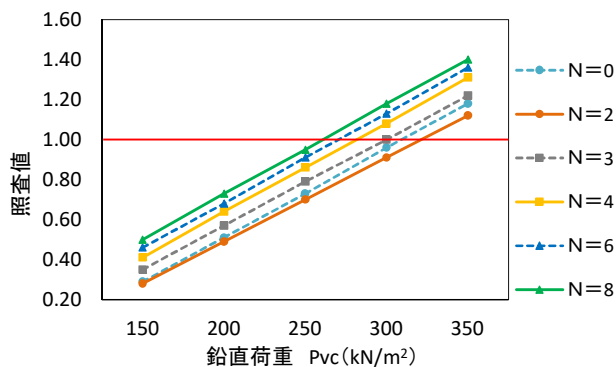


図-6 照査値（照査の前提（コンクリートの応力度の制限））

3. 許容応力度設計法による試設計

N値4の地盤条件（表-2のcase16～case20）を対象に、許容応力度設計法による試設計を行った。設計条件は、(1) a)と同様であり、コンクリートのヤング係数については、文献2) に従い $E_c=39.0\text{kN/mm}^2$ を使用した。

照査結果を図-7に示す。照査値と鉛直荷重の関係では、鉛直荷重が 250kN/m^2 では照査を満足し、 300kN/m^2 では照査を満足しない結果となり、性能照査型設計法とおおむね同等の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、地盤条件と作用を変えた複数のケースによる感度分析を行った。感度分析の結果、単線シールドトンネルにおける照査値を満足する範囲を示した。また、一部のケースで許容応力度設計法による試設計を実施し、おおむね同等の結果になることを確認した。

今後は、複線シールドトンネルを対象とした同様の検討や、地盤条件について砂質土（土水の取り扱いが土水分離）を対象とした検討を実施し、さらに、セグメント継手の回転ばねの影響を考慮できるようにすることで、新線建設時の概略検討に参考となるような成果にしたいと考えている。

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。

PARAMETER STUDY OF GROUND CONDITION AND VERTICAL FORCE IN THE DESIGN OF SHIELD TUNNEL

Ryo TAKIGAWA, Kiwamu TSUNO, Kaho KINOSHITA

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 ground and investigated the influence of ground condition and amount of action on the design results. Structural analysis was carried out under the homogeneous ground condition where STP-N values and vertical force caused by earth pressure range from 0 to 8 and from $150\text{ to }350\text{ kN/m}^2$, respectively. This paper carried out the check against the destruction safety and prerequisite of verification and shows the range of vertical force satisfying verification of design.