粘性土地盤中のシールドセグメントの限界状態設計法における荷重係数の選定について

長岡工業高等専門学校　学生会員　○関　すみれ
長岡工業高等専門学校　正会員　岩波　基

１．はじめに

シールドセグメントの設計においては，地盤条件や施工条件に応じて覆工に作用する外力が複雑に異なることなどから許容応力度設計法が採用されているのが現状である．また，シールド工事用セグメントの設計には限界状態設計法の導入が試みられているが，その部分安全係数の荷重係数は信頼性設計にて合理的に定められているとは言い難い状況にある．そのため，2006 年改訂の「トンネル標準示方書シールド工法・同解説」[1)]（以後，トンネル標準示方書と称す）では限界状態設計法についての記載がなされたが，部分安全係数には目安としての幅をもたせて記述してあり，目安の幅が設計の照査値へ与える影響や，設定の考え方に関する明確な記述はない．

荷重係数については，部分安全係数のうち設計結果への影響が最も大きいと考えられるが，限界状態設計法の荷重係数については設定方法が十分に確立していない．そこで本検討は，はりーばねモデルを用いて解析を行い，均質な粘性土地盤中の鉄道シールドトンネルが許容応力度設計法と同程度の設計結果となるための，荷重係数を選定する方法を明らかにすることを目的とする．

表-1　セグメントの仕様

ケース	1		2		3		4	
セグメントの種類	RC平板形		RC平板形		RC平板形		RC平板形	
外形(m)	6.3		6.3		10		10	
セグメント幅B(m)	1.2		1.2		1.2		1.2	
セグメント分割数	8等分割		8等分割		8等分割		8等分割	
リング継手	32		32		32		32	
セグメント厚さh(m)	0.25		0.25		0.35		0.35	
鉄筋	鉄筋量(As)	D16×7	鉄筋量(As)	D16×7	鉄筋量(As)	D19×7	鉄筋量(As)	D19×7
	両面からの鉄筋被り(mm)			50	両面からの鉄筋被り(mm)			55

表-2　地盤条件

ケース	1	2	3	4
土被り(m)	12	20	20	30
地下水位(GL-m)	6	10	10	15
土の種類	中位の粘性土			
土水の扱い	土水一体			
N値	4			
単位体積重量γ (kN/m^3)	18			
側方土圧係数λ	0.65			
地盤反力係数k (MN/m^3)	5			

表-3　セグメントの物性値

コンクリート	
許容応力度(N/mm^2)	48
許容曲げ圧縮応力度(N/mm^2)	16
ヤング係数E_c (kN/mm^2)	31.4
鉄筋	
鉄筋の種類	SD345
許容応力度(N/mm^2)	200
降伏強度(N/mm^2)	345
ヤング係数E_s (kN/mm^2)	210

２．解析方法および検討方法

荷重係数の設定方法を明確にするためには，各種荷重のデータを統計分析した上で，現行の許容応力度設計法の結果が妥当であると今までのシールドトンネル実績からいえることから，許容応力度設計法で行った設計結果とほぼ一致することが求められる．そこで，あらゆる条件における荷重係数の設計結果への影響を把握して，これらの条件を満たす荷重係数を設定することが必要である．ここでは，その第一段階として以下の検討条件で構造計算を行った．検討には，シールド工法による鉄道トンネル実施例集 [2)]より，施工実績が最も多い単線用トンネルの外径 6.3m と複線用トンネルの外形 10m の鉄道用シールドトンネルについて検討を行うこととした．実績 [2)]より，**表-1** にセグメントの仕様を示す．なお，**表-2** に示すようにケース 1~4 の鉄筋量は最小鉄筋量で定まっており，許容応力度設計法では許容値に対して十分余裕があることを確認してある．また，一様な中位の粘性土地盤を想定して，地下水位は土被りの中間にあるものとした．また，セグメントの材料について今回の検討で採用した物性値をまとめたものが**表-3** である．

表-4　採用した荷重係数

	荷重係数の値
鉛直土圧	1.05
側方土圧係数	0.8, 0.9, 1.0
水圧	0.9, 1.0
地盤反力係数	0.9, 1.0
自重	1.0, 1.1
上載荷重	1.0, 1.1, 1.2, 1.3

トンネル標準示方書 [1)]では，限界状態設計法の終局限界状態における荷重係数の目安の値は幅を持たせて記載されてある．そこで本検討では，検討の対象とする実績 [1)]より，検討に採用した荷重係数の値を**表-4** に示す．鉛直土圧の荷重係数を 1.05，他のすべての荷重係数の目安の幅を 0.1 刻みに設定した全 96 種類の組み合わせで解析を行う．

キーワード　シールドトンネル，セグメント，限界状態設計法，荷重係数
連絡先　〒940-0875　新潟県長岡市西片貝町 888 長岡工業高等専門学校　TEL 0258-32-6435

解析は，3 リングのモデルを用いて，はりーばねモデル計算法によって行った．本検討では，算定した最大曲げモーメントをその時の軸力に対する曲げ耐力で除したものを設計の照査値とし，この値によって設計結果への影響への評価を行った．したがって，今回の検討に採用している設計の照査値は，終局限界状態の照査において，構造物係数が 1.0 のとき，照査値が 1.0 以下で安全であり，構造物係数が 1.3 では，照査値が 0.77 未満で安全であることを示す値である．

表-5 最大曲げモーメントの平均値と軸力の平均値

ケース	1	2	3	4
最大曲げモーメントの平均値(kN・m)	83.5	107.1	102.6	126.4
最大曲げモーメント時の軸力の平均値(kN)	634.6	809.8	859.8	1270.9

３．計算結果

各ケースごと全 96 種類の構造解析を行い，最大曲げモーメントとその時の軸力を算定した．**表-5** には 4 ケースそれぞれの算定した最大曲げモーメントとその時の軸力の平均値を示す．**表-6** には，設計の照査値が最大となった荷重係数の組み合わせと最小になった組み合わせを示す．ケース 1 では最小の照査値 0.280 に比べ，最大の照査値は 0.574 となり 2 倍以上の違いを生じた．ケース 2 では，最小の照査値 0.361 に対し最大の照査値は 0.597 となり，ケース 3 でも最小の照査値 0.144 に対し最大の照査値は 0.204 と，約 1.5 倍の照査値の変化が見られた．ケース 4 では最小の照査値 0.195 に対し最大の照査値 0.228 と，約 1.2 倍の照査値の変化が見られた．よって，荷重係数の設定で，終局限界状態の照査値が大きく変化することが分かった．

表-6 最大と最小の荷重係数の組合せ

ケース	1		2		3		4	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
設計の照査値	0.574	0.280	0.597	0.361	0.204	0.144	0.228	0.195
土圧	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
側方土圧係数	0.8	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0
水圧	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
地盤反力	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9
上載荷重	1.3	1.0	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.0
自重	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0

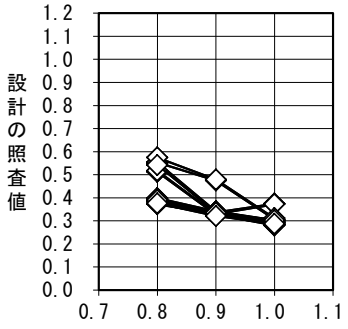

図-1 側方土圧係数と照査値（ケース 1）

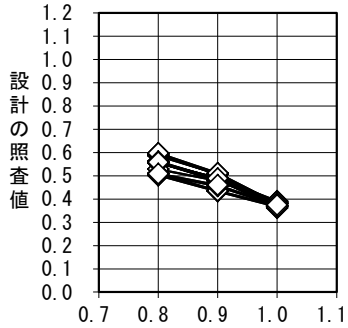

図-2 側方土圧係数と照査値（ケース 2）

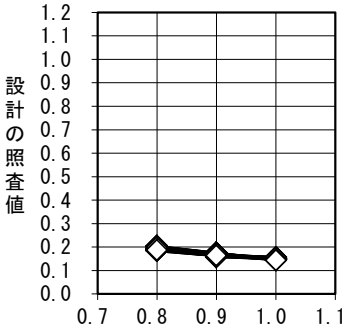

図-3 側方土圧係数と照査値（ケース 3）

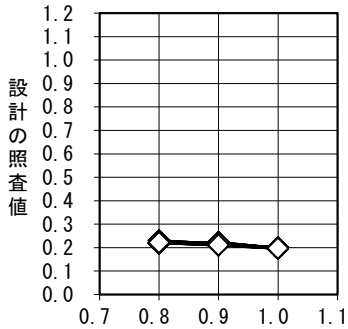

図-4 側方土圧係数と照査値（ケース 4）

4 ケースの結果より得られた，最も影響を与えると考えられている荷重係数の側方土圧係数の変化によって設計の照査値がどのように変化するかを表したグラフを**図-1～図-4** に示す．これらの図から側方土圧係数の影響が顕著であることが分かった．**図-1** と**図-2** から単線用トンネルでは側方土圧係数を 0.8 にして設計することが妥当であると考えられる．また，**図-3** と**図-4** から複線用トンネルでは，終局状態限界で設計結果を判断することができないと考える．

４．おわりに

本検討の結果から，ケース 1，2 の単線用トンネルでは，側方土圧係数以外の荷重係数の影響は設計結果への影響が小さく，側方土圧係数は 0.8 にすることが妥当であると考える．また，ケース 3，4 では終局限界状態で設計仕様が決定できないため，別途，使用限界状態等の検討が必要であると考える．

参考文献

1) 土木学会トンネル工学委員会：2006 年制定，トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説

2) 鉄道総合研究所鉄道技術推進センター:シールド工法による鉄道トンネル実施例集（その４），2010.3