

地山のせん断強度を考慮したシールドトンネル覆工の試設計

中央復建コンサルタンツ（株） 正会員 杉嶋 敏夫

中央復建コンサルタンツ（株） 正会員 ○鈴木 和重

1. はじめに

地盤はせん断強度を有する構造材料であって、山岳トンネルは基本的にこの地山のせん断抵抗に依存した構造物である。沖積平野に広がる都市域を対象とするシールドトンネルでも、設計土圧に満たない土圧計測結果が存在するように、ある地盤条件下ではこの地山自身のもつ支保力が有効に発揮されているはずである。

筆者らはこの考えに基づき、現場計測データの分析結果を踏まえ、地山自身の支保力ならびに覆工の耐荷挙動に及ぼす施工過程の影響を考慮した地盤-覆工連成解析手法を提案してきた^{1), 2)}。本稿では、実在する複数のシールドトンネルについて、本解析手法を用いた覆工の試設計を行い、解析手法が与える設計上の特徴について把握したので報告する。

2. 解析法の概要

地盤と覆工の相互作用関係を表現する解析モデルは、覆工をはり要素として考慮する有限要素法、または地盤と覆工を連立させて解いた弾性理論解を基礎とし、これに初期地山分担率と称する応力解放過程を表すパラメータを導入したものである。詳細は参考文献に譲ることとし、ここでは基本概念のみを示す。

覆工を有するトンネルの掘削問題において、周辺地盤の応力 $\sigma(P)$ は、素掘りの場合の応力 $\sigma^{(1)}(P)$ と覆工の存在により地盤に作用する応力 $\sigma^{(2)}(P)$ を用いて式(1)のように表現できる。

$$\sigma(P) = \sigma^{(1)}(P) + \sigma^{(2)}(P) \quad (1)$$

ここで、 P は掘削により生じる不釣り合い力で、概念として地盤応力を P の関数として表示する。

初期地山分担率 α を、覆工が建て込まれ耐荷状態となる以前に解放される不釣り合い力の、全不釣り合い力に対する割合、と定義すると式(2)のように表せ、目的とする地盤応力 $\sigma'(P)$ は式(3)のように表すことができる。ここで、 P_L は覆工が建て込まれ耐荷状態に至る過程で解放される不釣り合い力である。

$$\alpha = (P - P_L) / P = 1 - P_L / P \quad (2)$$

$$\sigma'(P) = \sigma^{(1)}(\alpha P) + \sigma^{(1)}\{(1 - \alpha)P\} + \sigma^{(2)}\{(1 - \alpha)P\} = \sigma^{(1)}(P) + (1 - \alpha)\sigma^{(2)}(P) \quad (3)$$

覆工の断面力は、式(1)による地盤応力と対応する断面力 N 、 M 、 S に対して式(4)のように表示できる。

$$N' = (1 - \alpha)N, \quad M' = (1 - \alpha)M, \quad S' = (1 - \alpha)S \quad (4)$$

3. 解析モデルの特性

地山特性曲線はNATMの基本理念を表現するものであるが、図-1は提案する解析法における弾性理論解を用いてシールドトンネルの対象地山と覆工剛性に対して相当の関係を求めたものである。地山の変形係数と覆工の弾性係数の比 $e = E_G/E_L$ を地山の剛性を表すパラメータとし、縦軸はトンネル天端覆工土圧の初期地圧に対する比、横軸は半径方向ひずみとして示す。平板型RCセグメントの弾性係数を $E_L = 30 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ にとれば、地盤の変形係数は、たとえば $e = 10^{-3}$ では $E_G = 30,000 \text{ kN/m}^2$ に対応する。 $T = t/r_0$ は覆工厚 t の掘削半径 r_0 に対する比で、 $T = t/r_0 = 0.06$ は半径 $r_0 = 5\text{m}$ のトンネルに対し、厚 $t = 30\text{cm}$ の覆工を示す。

$T = 0.06$ の覆工の拘束曲線に着目すると、同一の剛性を有する覆工であっても地山特性が異なればその拘束曲線の勾配は異なる。これは覆工単体の荷重-変位関係が線形であることに對し、地山と連成させた場合には地山自身の支保力がその剛性に依じて有効に発揮されていることを示すにほかならない。

施工要因を考慮するパラメータとして初期地山分担率は重要である。図-2は既存トンネル²⁾の覆工剛性と土圧データから初期地山分担率 α を求めたものであり、これらトンネルには全土被り圧は作用していないこと

キーワード シールドトンネル、覆工、地山特性曲線、弾性理論解、有限要素法、初期地山分担率

連絡先 〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町2-11 中央復建コンサルタンツ(株) 東京本社 総合設計室 TEL03-3669-1630

が分かると同時に、 N 値が大きくなるほど初期地山分担率、すなわち覆工が耐荷する前に解放され地山が負担している掘削応力の割合が大きくなる傾向が読みとれる。筆者らはこれを、地山剛性すなわち地山の反応に応じた施工制御を反映したものと考えている。

4．試設計の結果とまとめ

上記の手法により実在するトンネルの覆工部材を試算し求めた。実在トンネルとは、

図-2で N 値と初期地山分担率 α の関係を示したものと同一である。覆工は平板型RCを想定し、標準セグメント³⁾を踏襲し引張鉄筋比を1%程度以下となるよう設定した。

表-1に示すとおり、覆工部材は従来法によるものに比べて相当小さなものとなり、その傾向は地山剛性が大きいほど顕著となることが把握された。実際の問題への適用にあたっては、施工条件や供用上の要請を考慮する必要があるが、土圧に対して要求される覆工剛性の点では地山の特性と支保力をよく反映し、比較的硬質な地山におけるシールドトンネル覆工の設計に適用可能であると考える。

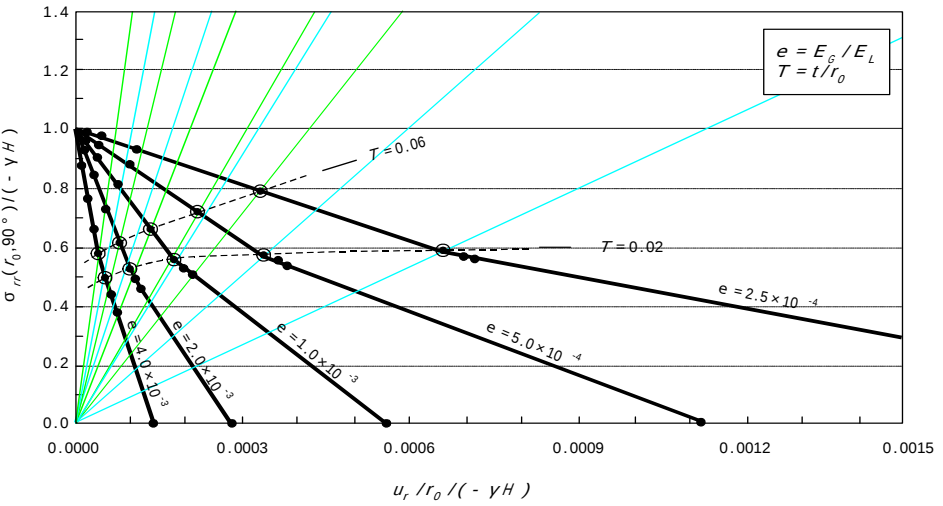


図-1 シールドトンネルにおける地山と覆工剛性を対象とした地山特性曲線

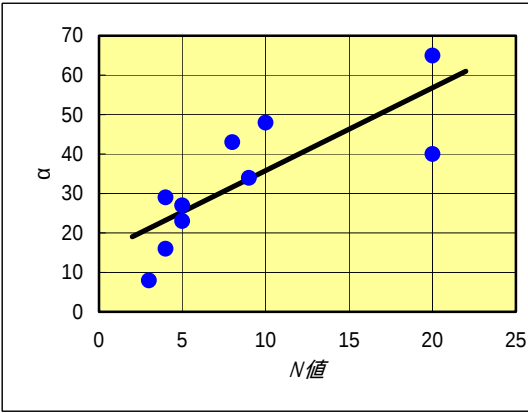


図-2 地山剛性（ N 値）と初期地山分担率

表-1 試設計結果（実在トンネルと試設計結果における覆工厚の比較）

番号	覆工外径 (mm)	土被り (m)	土被り圧 (tf/m ²)	実在トンネル		仮想トンネル（試設計結果）				トンネル周辺の土質
				構造形式	覆工厚 (mm)	初期地山 分担率 α (%)	N 値	地盤の 変形係数 (tf/m ²)	覆工厚 (mm)	
	5700	18.5	35.2	ダクタイル	(250)	65	20	4000	125	洪積粘性土
	5700	17.2	32.7	ダクタイル	(250)	40	20	4000	125	洪積粘性土
	4500	12.5	22.5	RC 平板	200	48	10	2000	125	沖積質砂
	5300	28.5	52.0	RC 平板	280	34	9	1800	225	洪積粘性土
	4950	12.9	23.2	RC 平板	275	43	8	1600	125	洪積粘土質沖積土
	8150	22.5	40.6	RC 平板	375	27	5	1000	275	洪積粘性土
	8150	22.5	40.6	RC 平板	375	23	5	1000	300	洪積粘性土
	3950	21.6	32.7	RC 平板	275	29	4	800	200	沖積沖積質粘土
	5300	14.1	23.6	ダクタイル	(250)	16	4	800	225	沖積粘性土
	7150	15.0	25.4	RC 平板	300	8	3	600	250	沖積粘性土

参考文献

1) 中村浩，山崎系治，中廣俊幸，杉嶋敏夫，大西豊：応力解放率の概念を導入したシールドトンネルの一設計法，土木学会論文集，No.638/ -49，pp.241-250，1999.12.
2) 杉嶋敏夫，足立紀尚：地山支保力と施工過程を考慮したシールドトンネルの一設計法，トンネル工学研究論文・報告集，第11巻，pp.43-50，2001.11.
3) 土木学会・日本下水道協会 共編：シールド工用標準セグメント，2001.7.