

シールドトンネル弾性有限要素解析の入力設定に関する研究

INPUT DATA DETERMINATION OF SHIELD TUNNEL FEM ANALYSIS

猪熊 明¹⁾・田子島 充²⁾

Akira INOKUMA, Mitsuru TAGOSIMA

This paper discuss how we can determin the input data of shield - tunnel elastic FEM analysis. It especially focuses on stress release ratio, which might have something to do with tunnel diameter, not with overburden.

Key Words: shield tunnel, FEM, stress release ratio

1. はじめに

シールドトンネルの弾性有限要素法の入力設定では、入力物性値、解析領域、初期応力など種々の問題があるが、掘削相当外力もしくは応力解放率も大きい影響を与える要因である。本論文は、掘削相当外力の設定に関して計測変位値とよく整合する応力解放率と、土被り高に対するトンネル径の比もしくは全土被り圧に対するテルツァギのゆるみ土圧の比との関係を調べ考察した。

2. 解析方法

地山変位解析の入力値の設定方法については、変形係数、ポアソン比、地山の単位体積重量、掘削相当外力をセットで取扱う必要がある。これらについて即応の研究¹⁾を基に以下のように設定することとした。

地盤の変形係数は原則として現位置で計測されたN値から求めた。換算式を次に示す。

$$E = 700 \text{ N (kpa)} \quad (\text{砂質土}) \quad (1), \quad E = 500 \text{ N} + 7000 \text{ (kpa)} \quad (\text{粘性土}) \quad (2)$$

ポアソン比は、一般に地盤のN値より水平方向土圧を求めるのに用いる側方土圧係数 λ と平面歪の拘束を示す式(3)より逆算して求めたポアソン比を入力値とする。

$$\lambda = \nu / (1 - \nu) \quad (3)$$

地盤の単位体積重量は水中重量を用いる。掘削相当外力は初期土圧との比すなわち応力解放率で表示し、(4)式による。

$$(\text{掘削相当外力}) = \alpha \{ \text{初期有効土圧} - (\text{泥土圧} - \text{水圧}) \} \quad (4) \quad \text{ここに、} \alpha : \text{応力解放率}$$

応力解放率 α の設定は(5)式によるが、トンネルに作用する土圧はテルツァギの式(6)式、(7)式による。ただし(6)式の B_1 は(7)式の値とトンネル掘削幅の $1/2$ との算術平均とする。又 ϕ は(8)式による。

$$\alpha = a \cdot (\text{トンネルに作用する有効土圧}) / (\text{初期有効土圧}) \quad (a \text{ は定数で } 1.0 \text{ とする}) \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K \tan \phi} (1 - e^{-k \tan \phi H/B_1}) \quad (6) \quad B_1 = B_0 + H_0 \tan \left[\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right] \quad (7)$$

$$\phi = 15 + \sqrt{15N} \quad (8)$$

1) 建設省 土木研究所 新材料開発研究官

2) 日本シビックコンサルタント株式会社 技術研究部 構造担当部長

ここに、 K ：実験定数 $=1$ ， ϕ ：土の内部摩擦角， γ ：土の単位体積重量， c ：土の粘着力， B_1 ：緩み幅， H ：土被り， B_0 ：トンネル幅の $1/2$ ， H_0 ：トンネル高さに相当する値である。

3. 解析事例

(1) 解析モデル

泥水加圧式シールドトンネル3モデル（S，K，Y）、泥土圧式シールドトンネル1モデル（O）についての解析事例を示す。

S，K，Yトンネルは円形断面であり、Oトンネルの断面は長方形断面である。これらトンネルのFEM解析モデルの概要図を図-1～4に示す。概要図にはトンネル形状、位置、地盤条件、ならびに、(2)、(3)式により算出した弾性係数 E 、ポアソン比 ν 等を表記した。

また、FEM解析領域は以下のように設定した。

$$Br \geq 4H + D$$

$$Hr \geq H + 2D$$

上式において、 Br は解析幅、 Hr は解析深さ、 D はトンネル外径である。長方形断面Oモデルでの D の適用は Br については幅、 Hr については高さとした。

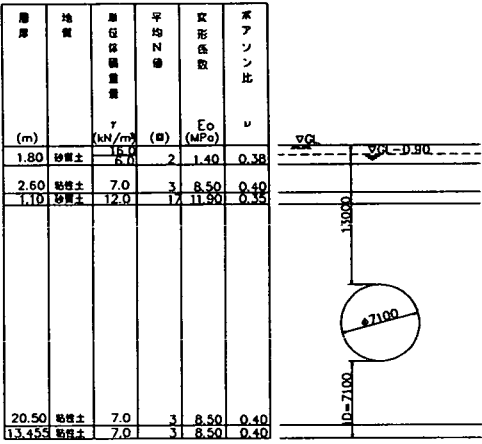


図-1 FEM解析モデル概要図（Sトンネル）

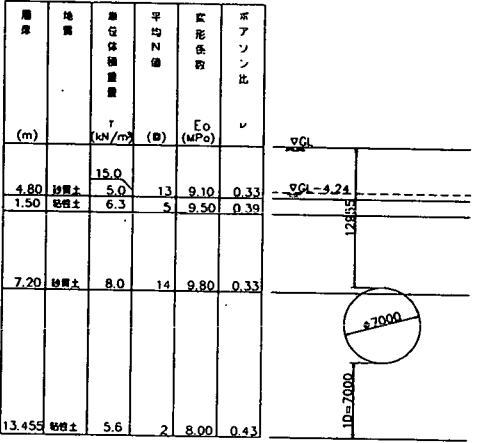


図-2 FEM解析モデル概要図（Kトンネル）

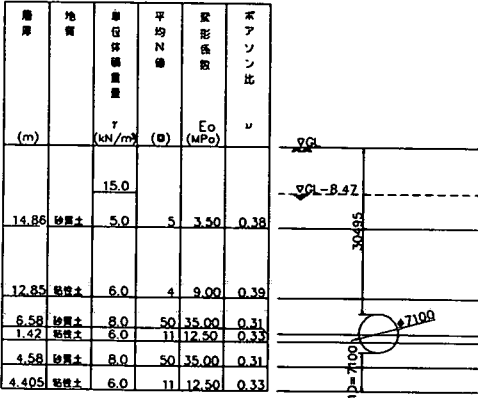


図-3 FEM解析モデル概要図（Yトンネル）

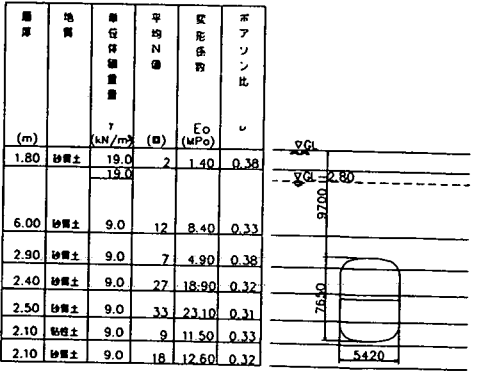


図-4 FEM解析モデル概要図（Oトンネル）

(2) 応力解放率

応力解放率は2通りの方法を考えた。第1の応力解放率-1は、(6)式のテルツァギの緩み土圧と初期有効土圧の比から(5)式、および、表-1の注に従い算出する。緩み土圧計算において異なった土層の処理は、各土層ごとに緩み土圧を計算しこの値を上載荷重としながらトンネル直上の緩み土圧を算出する手法とした。

第2に応力解放率-2として(9)式に示すようにトンネル水平径と土被り厚の比を応力解放率とする。

$$\alpha = \{(\text{単位体積重量} \times \text{トンネル水平径}) / (\text{初期土圧})\} \quad (9)$$

これらの解放率の値を表-1に示す。

(3) 掘削相当外力

掘削相当外力算出は、まず、地下水位以上を湿潤、以下を水中重量とした地盤モデルにおいて初期応力解析を行い、この応力状態からトンネル形状にそって計算する。その後、(4)式の(泥土圧-水圧)を計算し、掘削相当外力とを相殺した後、この値に前述の応力解放率を乗じたものをFEM解析上の最終的な掘削相当外力とした。

(4) 解析結果

各モデル、および、応力解放率-1、2についてのFEM解析結果(トンネル直上地表面変位)と計測変位値を表-1に示す。

また、Sトンネルモデルの解析結果変位図を図-1に示す。

表-1 FEM解析結果一覧表

トンネル		S	K	Y	O	
トンネル外径 D (m)		φ 7.100	φ 7.000	φ 7.100	幅 D×高さ L 5100×7650	
土被り h (m)		13.000	12.955	30.495	9.700	
地下水位高さ (m)		12.100	8.715	22.025	6.900	
泥水圧 (kpa)		96～181	233～317	307～393	120～130	
初期有効土被り圧 Pv (kpa)		103.7	129.1	306.5	115.3	
テルツァギゆるみ土圧 σ (kpa)		32.2	61.5	50.6	62.3	
応力解放率－1 = σ / Pv		0.30	0.50	0.15	0.55	
応力解放率－2 = D/h		0.55	0.55	0.20	0.50	
地表面変位 (mm)	F E M	応力解放率－1	－14	＋2	－3	－14
		応力解放率－2	－26	＋2	－4	－13
	計測変位値	－30	－8	－4	－12	

注)

・テルツァギのゆるみ土圧は(6)式のB1を(((7)式のB1)+0.5D)/2として計算したものである。

・変位の記号

(-) 沈下

(+) 隆起

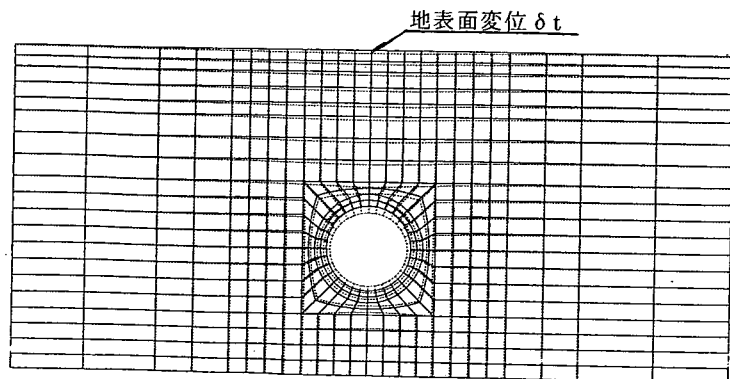


図-5 SトンネルモデルFEM解析結果変位図

注)

地表面変位δt

応力解放率-1

δt = -14 mm

応力解放率-2

δt = -26 mm

4. 考察

表-1からYトンネルとOトンネルについては、今回提案した応力解放率-1, 2ともに地表面変位量と計測された変位量が非常に良い整合を示すことがわかる。Sトンネル、Kトンネルについては計測値の方が沈下量が大きくなっている。Kトンネルについては、計測されたトンネル作用土圧が計算に用いたゆるみ土圧より大幅に大きいことがわかっている。従って(6)式の有効土圧を求める時にB1の値を提案する方法より大きくすることにより、解析の変位量をより実測の変位量に近づけることができる。Sトンネルについては計測されたトンネル作用有効土圧(計測泥水圧-水圧)は負の値であり実際にはあり得ない。実体的にはトンネルは浮力により上部地山に押しつけられていると考えられ、頂部は受動土圧状態になっていると思われる。計測値の解釈についてこの点を考慮して実際には計算に用いたゆるみ土圧より大きい値が作用していると考えられるが、確認はしていない。

応力解放率-1と-2を比較する。地表面変位の計測値と解析値の比は、Kトンネルを除く3トンネルにおいて、応力解放率-1では2.14~0.86、応力解放率-2では1.15~0.92の間であり、応力解放率-2の方が比較的狭い範囲に収まる。従って、今回の計算からは(9)式より応力解放率を有効に推定することができると考えられる。トンネル水平径は(6)、(7)式からゆるみ土圧に直接影響を与える要因であり、ゆるみ土圧に近い要因から掘削相当外力を設定できることがわかる。

応力解放率を(5)式で求め、地山の変位量を推定するという方法の根拠は、「地山が悪ければ、トンネルに作用する土圧も大きいし地山変位も大きい」という経験上の知見である。この知見自体は山岳トンネルからシールドトンネルに至る広範囲で有効であると考えられるが、FEM計算の入力値設定手法としては応力解放率単独でなく変形係数、ポアソン比、単位体積重量等の設定方法とセットで論じなければならない。山岳工法における岩盤の変形係数の設定方法は本論文の方法とは異なるので、山岳工法の解析での応力解放率の設定は提案の手法がそのまま有効とはならない。ただ現象の支配要因が真の土圧でなくゆるみ土圧である場合には、入力設定の考え方としては提案の手法は今後の検討に値するものと考えている。

5. まとめ

シールドトンネルの弾性有限要素法の入力設定で、掘削相当外力の設定に関して計測変位を算出する応力解放率と、土被り高に対するトンネル径の比もしくは全土被り圧に対するテルツァギのゆるみ土圧の比との関係を調べ考察した。その結果変形係数等他の入力設定について指定した方法によれば、計測変位値を推定できる応力解放率は $[(\text{トンネル水平径} \times \text{単位体積重量}) / (\text{初期土圧})]$ から推定できることを示した。

参考文献

- 1) 猪熊 明他, 異形断面シールドトンネルの覆工設計と地盤計測解析, 土木学会論文集投稿中
- 2) 建設省土木研究所トンネル研究室, 軟弱地盤中のシールドトンネルの現場計測, 土木研究所資料2839号, 平成元年12月
- 3) 建設省近畿地方建設局大阪国道工事事務所他, 大阪市内国道1・2号シールド施工技術検討報告書, 平成9年3月