# トンネルの設計における2次元解析結果と3次元解析結果の相違に関する一考察

大成建設(株)土木本音	部土木設計部	正会員	〇市田	雄行
	土木設計部	正会員	小原	伸高

次世代プロジェクト部 正会員 金子 哲也

#### 1. はじめに

山岳トンネルの設計においては,地山変位と支保工 内圧の平衡点を求めることが重要であるが,平面ひず み状態を仮定した理論解や2次元 FEM 解析等から求め られる平衡点と,3次元モデルによる逐次掘削解析から 求められる平衡点は,一部の条件下にて一致せず,無 視できない差異があることが近年報告されている<sup>1),2)</sup>. 本稿は,数値解析を用いてこの差異が大きく生じる地 山条件および原因について検討したものである.

# 2. 解析条件

平面ひずみ状態を仮定した 2 次元解析から得られる 地山応力と変位の平衡点と、3 次元モデルによるトンネ ルの逐次掘削解析から得られる平衡点との比較を行う. 以降,本稿では前者を 2 次元解析,後者を 3 次元解析 と呼ぶ.両者の解析には有限差分法プログラムFLAC3D を用いる.

## (1) 共通条件

2次元解析と3次元解析の比較に際して,両者共通の 解析条件を以下に示す.トンネルは,掘削半径 a=6mの 円形とする.地山は連続体かつ単一地層とし,モール・ クーロンの降伏規準にしたがう弾完全塑性体とする.

表-1 に示すとおり地山物性値と初期地圧の組合わせに より解析を行う.初期地圧  $P_0$ として,土被り Hに相当 する土圧を各地山要素に等方等圧に与える. case1 およ び 2 は,初期地圧が異なるが地山強度比が大きく掘削 後においても地山が弾性状態を維持する場合を想定し たものである. case3 および 4 は,地山強度比 0.1 程度 であり掘削に伴い地山が著しく塑性化する条件となる.

# (2) 2次元解析

素掘りの全断面掘削を仮定し,掘削壁面に掘削相当 外力(初期地圧)を0%から100%まで段階的に作用さ せる.各解析ステップで得られるトンネル壁面最近傍 の地山要素の半径方向応力 *or(a)*と壁面変位量 *Ur(a)*と から, Fenner-Pacher 型の地山特性曲線を得る.

#### (3) 3次元解析

支保工は吹付けコンクリートを想定し表-2 に示す物 性値を与える.一掘進長 1m の全断面掘削とするが、切 羽から支保工設置までの距離は 5m 一定とし、解析ステ ップは、掘削と支保工設置のサイクルを繰り返すもの とする.この断面閉合距離 5m は、早期閉合時の現実的 な施工条件を考慮して設定したものである.

表-1 地山物性値と初期地圧

地山条件			case1	case2	case3	case4	
変形係数	Ε	(MPa)	1,000	10,000	50	500	
ポアソン比	v	(-)	0.30	0.25	0.30	0.30	
粘着力	с	(MPa)	1.00	6.00	0.07	0.50	
内部摩擦角	$\phi$	(°)	45	55	25	40	
一軸圧縮強度	$q_u$	(MPa)	4.83	38.06	0.22	2.14	
地山等級 参	考文南	<sup>3)</sup> より	<b>R</b> 5	<b>R</b> 8	Rı	<b>R</b> 4	
土被り	H	(H)	100	800	100	800	
初期地圧	$P_{0}$	(MPa)	2.0	16.0	2.0	16.0	
地山強度比	$q_u/P_0$	(-)	2.42	2.38	0.11	0.13	

 $\Re q_u = 2c \cdot \tan(45^\circ + \phi/2)$ 

 $\gamma = 0.020 \text{MN/m}^2$ 

支保部材	弹性係数 $E_c$ (MPa)	ポアソン比 v <sub>c</sub> (ー)	備考				
吹付けコンクリート	3,400	0.2	<i>t</i> =25cm				

#### 3. 解析結果

2次元解析から得られた地山特性曲線と3次元解析か ら得られた支保工背面の地山要素の半径方向応力(支 保工内圧に相当)と壁面変位量の掘削中における履歴 および平衡点を図-1に示す.図-1より地山強度比が大 きく地山が弾性的挙動を保つ場合(case1および2)は, 土被りの大小に関わらず3次元解析の地山応力と変位 は2次元解析の地山特性曲線上にて平衡状態に達する. 一方で,地山強度比が0.1程度であり地山が塑性化する 場合(case3および4)では,3次元解析結果は,地山 特性曲線を超える応力値および変位量にて平衡状態に 達する.一般的に2次元解析によるトンネルの変形予 測や支保工の設計では,地山と支保工の応力と変位は 地山特性曲線上にて釣合うものとして取り扱われてき た.しかしながら,例えば釣合点の応力を比較すると, 2次元解析による地山特性曲線と3次元解析による履歴

キーワード 数値解析,地山変位,支保工内圧,塑性域 連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 (新宿センタービル)大成建設株式会社 TEL 03-5381-5296

-839-

曲線の交点における応力に対して, case3 および4の平 衡点における地山応力は 2 倍以上の値を示しており, これは必ずしも無視できる差であるとは言えない.



#### 4. 考察

3 次元解析結果による地山の半径方向応力と壁面変 位量が,2次元解析による地山特性曲線を上回る値にて 平衡状態に達する原因について考察する. case3の結果 を例にして,トンネル壁面の地山応力の履歴と塑性域 分布を図-2 に示す.切羽通過から支保工設置までの期 間は,トンネル壁面は自由面であり半径方向応力は 0 となる.これにより,地山は周方向応力のみが残る一 軸圧縮状態となりトンネル周辺の地山には塑性域が発 達する.一方で,半径方向応力は支保工設置後から支 保工による拘束を受け増加傾向を示す.この結果,地 山は再び3 軸圧縮状態となることで弾性状態に戻る. 切羽近傍で塑性化したものの支保工設置後に弾性状態 に戻った当領域を一時的塑性域と呼ぶ<sup>4)</sup>.

ここで、3次元解析結果の壁面変位量には、図-2に 示すとおり切羽近傍にて拘束圧の減少に伴い発生した

### 参考文献

一時的塑性域内で生じた塑性ひずみによる変位が含ま れる.これに対して、平面ひずみ状態を仮定した 2 次 元解析には、一時的塑性域の発生やこれに起因する塑 性ひずみは考慮されていない.このため、地山強度比 が小さく塑性化し易い地山条件下では、3 次元解析によ る平衡点は、2 次元解析による平衡点より大きな変位を 持つものと考察される.なお、この両者の差異の量に 関する考察は参考文献<sup>4)、5)</sup>を参照されたい.

#### 5. まとめ

3次元解析から得られた地山応力と変位は、2次元解 析から得られた地山特性曲線を超える値にて平衡状態 に達することを示した.ただし、この現象は地山が弾 性状態を維持する場合には見られず、地山強度比が小 さく著しく塑性化するような地山で生じるものである. この原因は、切羽近傍での拘束圧の減少に伴い発生し た一時的塑性域内で生じた塑性ひずみによる変位量を、 2次元解析では考慮していない点にある.

したがって、このような条件下において、2次元解析 を用いたトンネルの変形予測や支保工の設計を行う場 合には、変位量や支保工に発生する応力度を過小評価 する可能性がある.さらに、土被りが大きい条件では、 初期地圧が大きい分だけ2次元解析と3次元解析結果 の差は大きいものと想定されることから、2次元解析に よる諸検討の際は十分留意が必要である.



図-2 地山応力の履歴と塑性域分布 (case3)

- 1) F.Amberg : For a correct interpretation of ground of reaction curves, 12th Congress of ISRM, Beijing China, pp16-21, 2011.
- 2) L.Cantieni, G.Anagnostou : The Effect of the Stress Path on Squeezing Behavior in Tunneling, Rock Mechanics and Rock Engineering 42, pp.289-318, 2009.
- 3)鉄道建設・運輸施設整備支援機構:山岳トンネル設計施工標準・同解説, p.310, 2008.4
- 4) 金子哲也・市田雄行・小原伸高:トンネル切羽近傍における一時的な塑性域に着目した地山挙動の考察,第44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.205-210, 2016.1
- 5) T.Kaneko, T.Ichida, N.Ohara : Study on ground behavior considering temporary plasic zone around tunnel face, 2016 ISRM International Symposium Eurock2016 (投稿中)