

弾塑性地山の体積ひずみの挙動が トンネル掘削時の地山特性曲線に及ぼす影響について

清水建設 技術研究所 正会員 熊坂博夫

1. はじめに

トンネルの変形挙動と安定性に影響を及ぼす因子として、トンネルの形状・寸法，加背割などの施工方法や支保構造とともに特に地山の力学特性が重要視されている。しかし、当初設計段階では地山情報が制約されるため、比較的簡易な力学モデルが用いられている。このため、著者は一軸圧縮強度とアイダンの状態ひずみ比¹⁾を用いて簡便な地山のひずみ軟化モデルを作成し、これをトンネルの逐次掘削解析に適用した結果を報告している²⁾。この報告において、ある地山条件ではひずみ軟化解析よりも完全弾塑性解析の先行変位量が大きいという結果が得られた。

そこで、本報告では地山を完全弾塑性体としたときの体積変化（ダイレイタンス）のモデル化による影響を把握するため、二次元掘削解析により地山特性曲線を比較したので報告する。

2. 区分線形ひずみ軟化モデルと定式化²⁾

本報告では図-1に示す応力～ひずみ曲線を軸ひずみの弾性限界ひずみ ϵ_1^e ，軟化開始ひずみ ϵ_1^s ，流動開始ひずみ ϵ_1^f により四つの直線関係で表わし、これを有限差分法FLAC³⁾のひずみ軟化モデルに組み込み解析を行った。このモデルでは、塑性化の進行を表すひずみ硬化パラメータ $\epsilon^{(p)}$ を偏差塑性ひずみ e_{ij}^p を用いて次式で与えている。

$$\epsilon^{(p)} = \sqrt{\frac{1}{2} e_{ij}^p e_{ij}^p} \quad (1)$$

式(1)の硬化パラメータ $\epsilon^{(p)}$ は図-1の軸ひずみ ϵ_1^e ， ϵ_1^f に対してそれぞれ次式で表される。

$$\epsilon_s^{(p)} = \sqrt{\frac{1}{3} (1 + \alpha_f + \alpha_g^2)} (\eta_s - 1) |\epsilon_1^e| \quad (2)$$

$$\epsilon_f^{(p)} = \epsilon_s^{(p)} + \sqrt{\frac{1}{3} (1 + \alpha_g + \alpha_g^2)} (\eta_f - \eta_s) |\epsilon_1^e| \quad (3)$$

$$\epsilon_1^e = \frac{\kappa - 1}{E} \sigma_3 + \epsilon_0. \quad (4)$$

ここに、係数 α_f と α_g はA'B', B'C'の勾配 f, g から求
キーワード：トンネル，安定解析，弾塑性地山，地山特性曲線

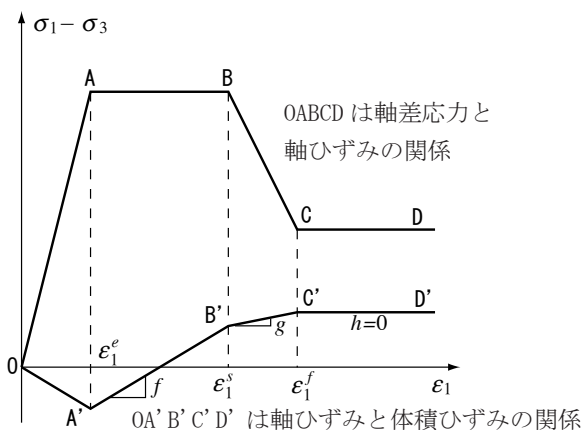


図-1 区分線形ひずみ軟化モデル

まるダイレイタンス係数， η_p, η_s, η_f は一軸圧縮強度で与える状態ひずみ比， E は地山の弾性係数， ϵ_0 は換算一軸圧縮強度による限界ひずみである。

今回は、内部摩擦角を一定と仮定し、ひずみ軟化時の強度低下はせん断強度の低下で表現し、次式で与えている。

$$0 \leq \epsilon^{(p)} \leq \epsilon_s^{(p)} : c = c_p,$$

$$\epsilon_s^{(p)} \leq \epsilon^{(p)} \leq \epsilon_f^{(p)} : c(\epsilon^{(p)}) = c_p + \frac{c_r - c_p}{\epsilon_f^{(p)} - \epsilon_s^{(p)}} (\epsilon^{(p)} - \epsilon_s^{(p)}).$$

$$\epsilon_f^{(p)} \leq \epsilon^{(p)} : c = c_r. \quad (5)$$

ここに、 c_p ， c_r はピーク強度および残留強度のせん断強度である。なお、本報告では残留強度のせん断強度 c_r は拘束圧の依存性を考慮して⁴⁾。

3. 解析モデルと解析条件について

トンネルの形状と寸法は円形で径6mとした。解析に用いた地山の物性を表-1に示す。塑性時の勾配 f は関連流れ則により与え、ひずみ軟化の勾配 g は勾配 f の1/2と設定した。初期地圧は既往の研究²⁾と同様に10.8MPaとした。岩盤等級Dの応力～ひずみ関係を図-2に示す。

4. 解析結果と考察

岩盤等級C,D,Eに対して、地山を完全弾塑性体、

表-1 岩盤等級と物性値⁵⁾

岩盤等級		C	D	E
弾性係数	MPa	3500	2500	1500
ポアソン比	—	0.3	0.3	0.3
内部摩擦角 ($\phi=\phi_p=\phi_r$)	Degree	28.0	27.0	25.0
粘着力(cp)	MPa	3.0	2.0	1.0
粘着力(cr)	MPa	0.15	0.28	0.39
一軸圧縮強度	MPa	15.0	10.0	5.0
換算一軸圧縮強度	MPa	10.0	6.5	3.1
η_s	—	1.6876	1.877	2.254
η_f	—	2.394	2.743	3.467

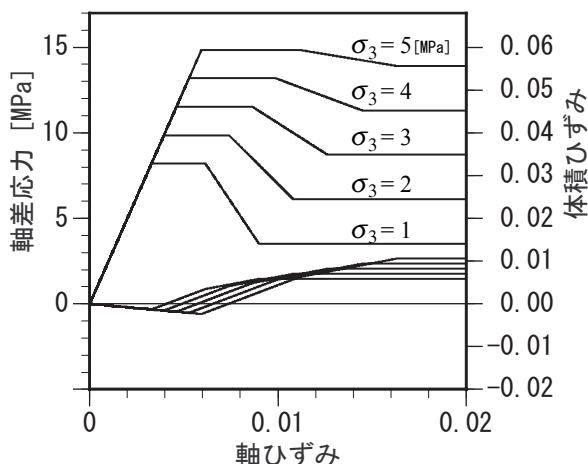


図-2 岩盤等級Dの応力～ひずみ関係

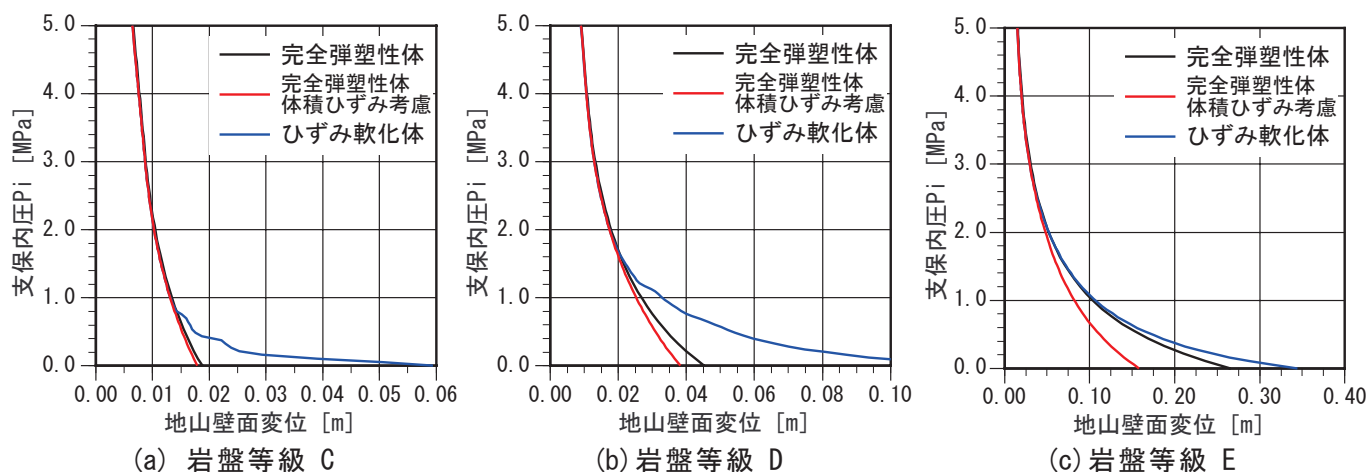


図-3 岩盤等級C,D,Eにおける地山特性曲線

体積変化を考慮した完全弾塑性体およびひずみ軟化体の三ケースに対して二次元掘削解析により地山特性曲線を求めた。その結果を図-3に示す。また、それぞれの地山強度比、状態ひずみおよび無支保の壁面ひずみを表-2に示す。

図、表より、岩盤等級Eの地山のように、地山強度比が小さく、塑性流動域まで大きなひずみが生じる場合、完全弾塑性体では過剰な体積膨張による変位量となる。なお、ひずみ軟化体はさらに大きな変位量となるが、これはトンネル周辺地山に強度低下が生じるため、完全弾塑性体の場合よりも塑性領域が広がるためと考えられる。

5. おわりに

前述した逐次掘削解析において、完全弾塑性解析とひずみ軟化解析の先行変位量に関する不整合の原因は、本報告で検討したように体積ひずみのモデル化による影響の可能性が考えられる。今

表-2 地山強度比とひずみ

岩盤等級		C	D	E
地山強度比		1.39	0.93	0.46
状態ひずみ	$\epsilon_s : \sigma_3 = 0$	0.48	0.49	0.75
	$\epsilon_f : \sigma_3 = 0$	0.68	0.71	1.16
壁面ひずみ (%)	完全弾塑性体	0.63	1.51	8.87
	完全弾塑性体 体積ひずみ変化考慮	0.60	1.28	5.28
	ひずみ軟化体	1.98	4.29	11.47

後、逐次掘削解析を実施して確認してゆきたい。

参考文献

- (1) アイダマン，他：土木学会論文集，No.448/III-19，pp.73-82，1992，
- (2) 熊坂：トンネル工学報告集，第20巻，pp.93-99，2010．
- (3) ITASCA：FLAC version 6 User's Guide．
- (4) Kumasaka：Int. J. JCRM，vol.7，No. 1，pp.11-16，2011．
- (5) 核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 99-022，1999．