

# ひずみ硬化型 PH モデルの未固結地山における低土被りトンネル掘削解析への適用

株式会社 地層科学研究所 正会員 ○中川 光雄

## 1. はじめに

都市部など自立性の悪い未固結地山に低土被りのトンネルを施工する場合、地表面沈下などに厳しい制約条件が要求される。このような地山材料の三軸圧縮試験では、載荷直後から逐次的な剛性低下が見られピーク強度以前に非線形性の強い挙動が示される。また、載荷途中からの除荷・再載荷過程は不可逆的であり、除荷剛性が評価できる。トンネル掘削解析で得られる結果は適用する地山構成モデルに依存されると言ってもよく、現場特有の挙動特性を少しでもうまくキャプチャーできる地山構成モデルの適用が望まれる。本報は、載荷過程で逐次進行する剛性低下をひずみ硬化で表現した弾塑性構成則モデルであるPH(Plastic Hardening)モデル<sup>1)</sup>のトンネル掘削解析への適用性を検討する。既報<sup>2)</sup>では、低土被り地山にPHモデルを適用し地表面沈下、リバウンド、水平変位といったトンネル周辺挙動に着目し、実務で多用されるMohr-Coulomb弾完全塑性モデルと比較して考察した。本報では、既報<sup>2)</sup>で得られたトンネル周辺挙動の要因と思われるひずみ硬化領域の発生・進展、および、応力依存性弾性係数の分布を示す。

## 2. PHモデルによる三軸圧縮試験結果の再現

PHモデルは、三軸圧縮試験結果における主応力差-軸ひずみの関係を図-1に示す双曲線関数で近似し、これをひずみ硬化で実現した解析コードFLAC<sup>3D</sup>搭載の弾塑性構成則モデルである。既報<sup>2)</sup>に示した弾性領域と塑性(ひずみ硬化・破壊)領域から構成されるPHモデルの定式化の掲載は本報では割愛する。未固結地山材料の一例として砂質土の三軸圧縮試験結果を表-1と図-2(ドット表示)に示す。これに対して、キャリブレーションにより求めたPHモデルのパラメータを表-2に示す。三軸圧縮試験の再現解析を実施して再現性を確認した結果を図-2(実線表示)に示す。試験結果の載荷、および、除荷・再載荷過程が良好に再現されていることから、本報ではPHモデル、および、表-2に示すパラメータが砂質土の力学特性を代表していると考えられる。

## 3. PHモデルのトンネル掘削解析への適用

直径12(m)の円形トンネルを対象に、地山挙動がPHモデル、および、表-2に示したパラメータに従うとして、解放率40%までの全断面掘削を実施する。解析モデルは簡単のため2次元平面ひずみ条件、1/2対象モデルとする。土被り1D、下方境界領域1Dを有する解析モデルを図-3に示す。

### 3-1 地表面沈下

既往構成則モデルの代表としてMohr-Coulomb弾完全塑性モデル(以下では「MC」と表記)と比較した地表面沈下を

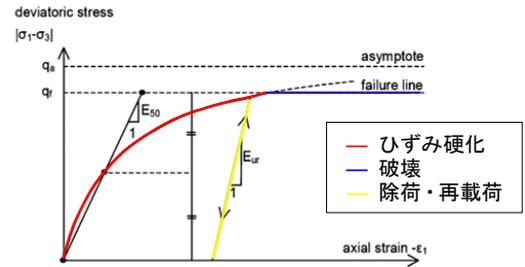
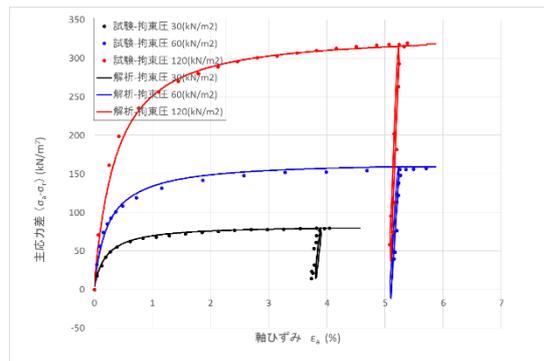


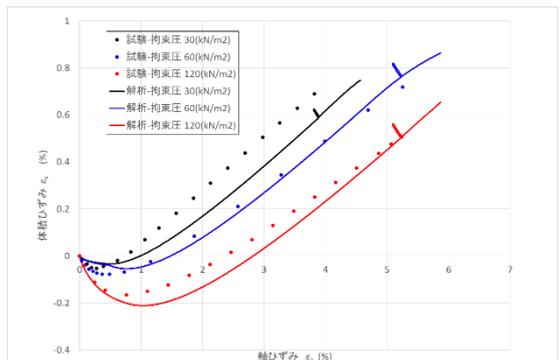
図-1 三軸圧縮試験結果を双曲線関数で近似した軸ひずみ-偏差応力の関係<sup>1)</sup>

表-1 三軸圧縮試験の緒元

供試体 No.		1	2	3
圧密圧力	kN/m <sup>2</sup>	30	60	120
圧縮強さ	kN/m <sup>2</sup>	79.7	156.8	319.3
軸ひずみ	%	4.04	5.71	5.39
変形係数E <sub>50</sub>	MN/m <sup>2</sup>	20.9	39.4	55.1



(a) 軸ひずみ-主応力差の関係



(b) 軸ひずみ-体積ひずみの関係

図-2 三軸圧縮試験結果とPHモデルによるキャリブレーション

表-2 PHモデルのパラメータ(キャリブレーション結果)

弾性係数 E <sub>50,ref</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	10250	ポアソン比	0.3
除荷弾性係数 E <sub>r,ref</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	32000	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	0
m	0.707	せん断抵抗角(°)	34.7
R <sub>t</sub>	0.957	ダイラタンシー角(°)	6.4
p <sup>ref</sup> (kN/m <sup>2</sup> )	10		

キーワード トンネル掘削解析, ひずみ硬化, 三軸圧縮試験, 除荷剛性, 未固結地山, 低土被り

連絡先 〒532-0011 大阪市淀川区西中島5丁目7-19 (株)地層科学研究所 [nakagawa@geolab.jp](mailto:nakagawa@geolab.jp)

図-4 に示す。ここでMCの特性は、降伏前は線形弾性、変形係数は拘束圧に依存しない、除荷時の変形係数は载荷時と同一である、とする。MCでは変形係数を指定する必要があり、本報では三軸圧縮試験の拘束圧30(kPa), 60(kPa), 120(kPa)に対応して得られた $E_{50}$ である20.9(MPa), 39.4(MPa), 55.1(MPa)の3種類を適用する。図-4(a)より、MCはPHモデル(以下では「PH」と表記)に比較して、与える変形係数によって水平距離3Dまでの沈下の傾向にかなりの相違が見られる。また、土被り2Dおよび3Dの掘削解析を別途実施し、トンネルセンターでの地表面沈下量を比較する。図-4(b)より、PHは土被りの増加に伴い沈下量は減少するが、MCではその逆の傾向が得られている。

3-2 ひずみ硬化領域の進展

解放応力の増加に伴い発生・拡大するひずみ硬化領域を図-5に示す。ひずみ硬化領域は、塑性ひずみの増加に伴い降伏関数が拡大する図-1の赤線区間に該当する。図-5より、トンネル側方から下約60°の方向は解放率10%時から発生し徐々に拡大している。これに対して、トンネル側方より上約60°の方向は解放率10%時で発生が少ないものの、応力解放の増加に伴い地表に向かって拡大する様子が見られる。なお、本解析では破壊領域は見られなかった。

PHモデル自体には载荷・除荷の判定区分は存在しないので、本報では式(1)に示す動員摩擦角 $\phi_m$ が初期応力時よ

$$\sin \phi_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2c \cdot \cot \phi} \quad (1)$$

り低下した領域を「除荷領域」と仮定し、推定による除荷領域を図-6に示す。これより、除荷領域は図-5(d)に示した弾性領域とはほぼ合致する結果が得られている。

3-3 弾性係数の分布

PHモデルにおける弾性係数は、三軸圧縮試験で適用した特定の拘束圧 $\sigma_3$ に対して得られた除荷剛性にに基づき、任意の $\sigma_3$ の関数として定式化され弾性領域で適用される。初期応力時の弾性係数を図-7(a)に示す。これより、深度依存性のある弾性係数の分布が実現されている様子が分かる。また、40%解放時の弾性係数を図-7(b)に示す。これより、トンネル周辺では掘削解放により影響を受けた $\sigma_3$ に応じた弾性係数が分布している様子が分かる。図-4に示したPHとMCの相違は、弾性領域が多くの割合を占めることから、弾性係数の分布の相違がかなり寄与していると思われる。

4. おわりに

PHモデルをトンネル掘削解析に適用する有効性的一端が垣間見えた。今後は軟岩地山への適用を試みる。また、山留掘削問題への適用性も検討する。

参考文献

- 1) Cheng, Z. and Detournay, C., Plastic hardening model I: Implementation in FLAC3D. In P. Gomez, C. Detournay, R. Hart, M. Nelson (eds), Proc. 4<sup>th</sup> Itasca Symposium on Applied Numerical Modeling. pp 267-276, 2016.
- 2) 中川 光雄: ひずみ硬化型PHモデルのトンネル掘削解析における適用性の検討, 第51回地盤工学研究発表会講演集, 2016(投稿中).

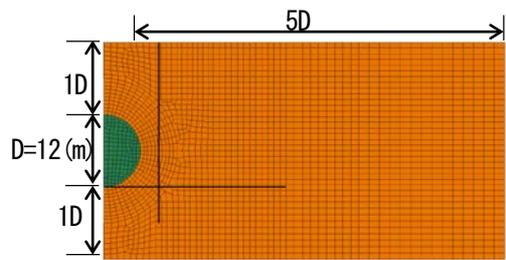
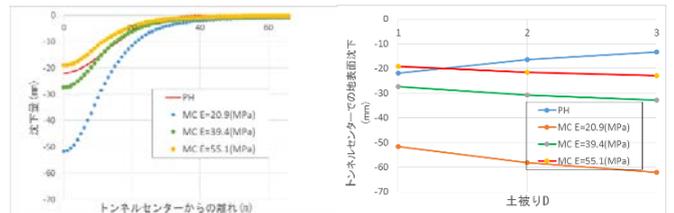
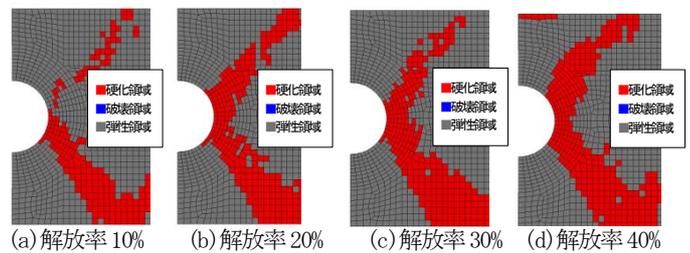


図-3 トンネル掘削解析モデル(土被り1D)



(a) 地表面沈下(土被り1D) (b) トンネルセンターでの沈下  
図-4 地表面沈下の比較



(a)解放率10% (b)解放率20% (c)解放率30% (d)解放率40%  
図-5 掘削解放の進展に伴うひずみ硬化領域の発生・拡大

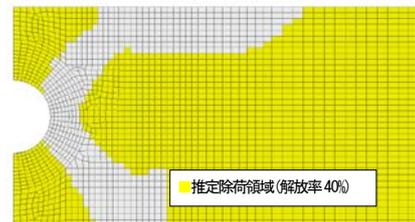
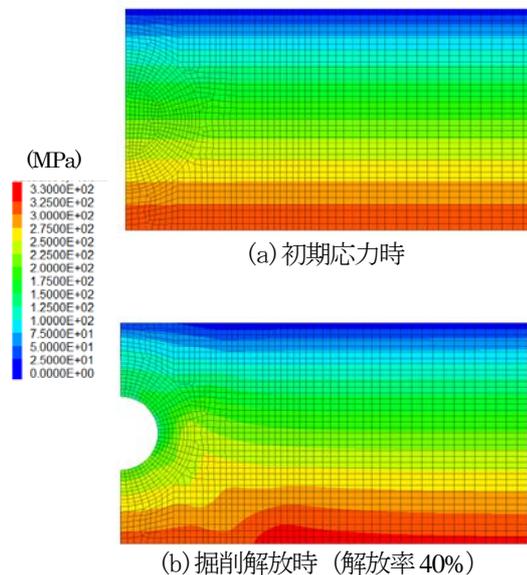


図-6 掘削により除荷が発生したと推定される領域



(a) 初期応力時  
(b) 掘削解放時(解放率40%)  
図-7 弾性係数の分布