

トンネル掘削解析において地山を粒状体としてモデル化する試み

株式会社 地層科学研究所 正会員 ○中川 光雄

1. はじめに

トンネル掘削の進行に伴う切羽の安定、地表面沈下、支保工や補助工法の効果などを評価する目的で、3次元数値解析が行われる。実業務においては、有限差分法や有限要素法などによる連続体解析が多用されており、地山はソリッド要素、ロックボルト、鋼製支保工、先受け工などははり要素、吹付けコンクリートはシェル要素もしくはソリッド要素が用いられることが多い。当然のことながら、各々のタイプの要素には弾性や弾塑性などの構成則とパラメータが必要である。

ここで、地盤を連続体と捉えるべきか、粒状体の集合と捉えるべきかといった議論が提起されている¹⁾。これは、近年におけるコンピュータの演算処理能力の飛躍的向上や大規模地盤災害の多発も相まって、地盤をモデル化する手段として、粒状体が連続体と並んで認知されつつあることを示唆するものであると思われる。

上述の背景を踏まえ、本報では、地山を粒状体の集合で、支保構造を連続体で同時にモデル化するトンネル掘削解析の実用性を検討した。まず、地山のモデル化には粒状体個別要素法を適用し要素を剛体球とした。これに対して、支保構造のモデル化には有限差分法を適用し、吹付けコンクリートはソリッド要素、鋼製支保工とロックボルトははり要素を用いた。このような粒状体と連続体のハイブリッドなモデル化が実現できれば、地表面沈下や補助工法の効果の評価のみならず、支保構造に発生する応力や変形を従来の連続体解析の様式で得ることが期待できる。解析プログラムは市販コードとし、米国 Itasca 社製の *PFC^{3D}* および *FLAC^{3D}* を用いた。

2. 解析モデルの概要

(1) 解析モデル領域と支保構造

本報で対象としたトンネルは図-1に示すように、直径 $D=10$ (m)、土被り $0.5D$ 相当 5 (m)、簡略化のため、 $1/2$ 対称モデル、トンネル側壁から側方境界までは $1D$ 相当 10 (m) とした。地山は泥質砂岩を想定し、物性値を表-1に示す。支保構造の物性値を表-2～表-4に示す。

(2) 粒状体による地山のモデル化

要素の粒径分布は最小 10 (cm)～最大 20 (cm) として乱数で発生させた。要素間接触モデルには、要素間で応力とモーメントを伝達できるパラレルボンドモデル²⁾を適用した。このモデルは、接触点での接線方向と法線方向のそれぞれに対して微視的な系としての強度パラメータを与えると、巨視的な系としての地山のせん断強度あるいは引張強度が表現できる。ここでは、表-1に示した地山強度に対してこれに対応するパラレルボンドモデルの強度パラメータを求めるため、図

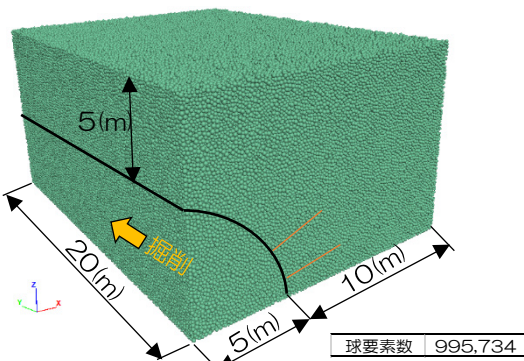


図-1 解析モデル領域 (1/2 対称)

表-1 地山の物性値

変形係数	E	110	(MPa)
ポアソン比		0.3	
間隙率	n	30	(%)
湿潤密度	ρ_t	1820	(kg/m ³)
粘着力	c	240	(kPa)
内部摩擦角	ϕ	40	(度)

表-2 吹付けコンクリートの物性値

変形係数 (MPa)	ポアソン比	厚さ (m)	密度 (kg/m ³)
4000	0.2	0.2	2300

表-3 ロックボルトの物性値

変形係数 (MPa)	ポアソン比	断面積 (m ²)	密度 (kg/m ³)
2.1×10^5	0.3	4.46×10^{-4}	7800

表-4 鋼製支保工の物性値

変形係数 (MPa)	ポアソン比	断面積 (m ²)	断面2次モーメント		密度 (kg/m ³)
			I_y (m ⁴)	I_z (m ⁴)	
2.1×10^5	0.3	6.353×10^{-3}	4.72×10^{-8}	1.6×10^{-4}	7800

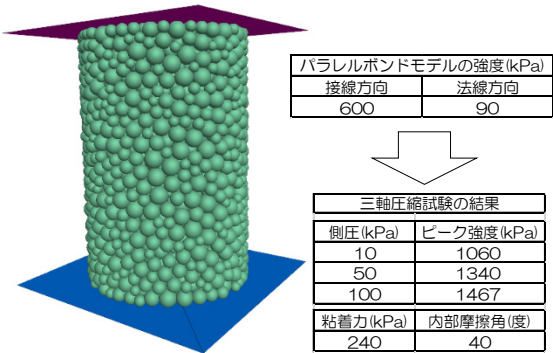


図-2 三軸圧縮試験シミュレーション

-2に示す三軸圧縮試験シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、モール円と包絡線から得られる粘着力と内部摩擦角が表-1に示したせん断強度に一致するように、強度パラメータを試行的に変化させた。なお、パラレルボンドモデルのばね係数は、厳密性を排除して表-1に示した変形係数が粒子要素の直径に応じて配分される手法³⁾を適用した。

キーワード 粒状体, 連続体, トンネル掘削, 個別要素法, 有限差分法
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

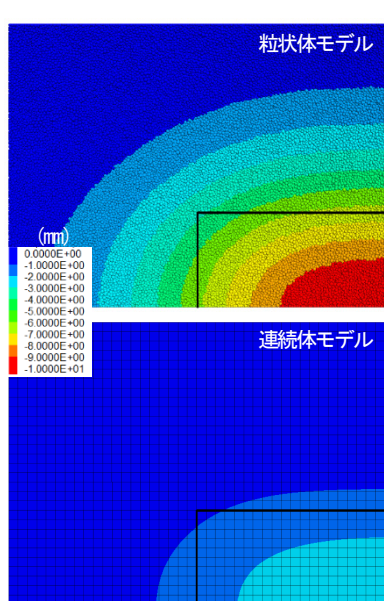
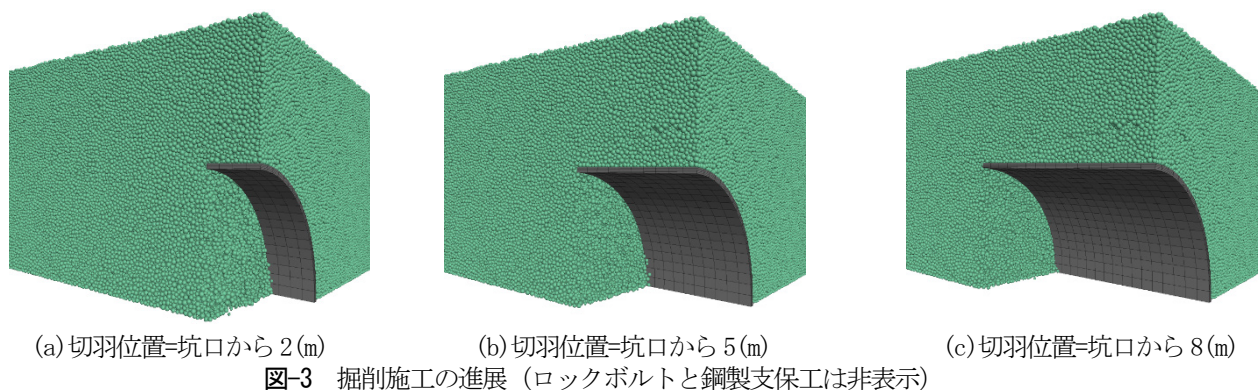


図-4 地表面沈下

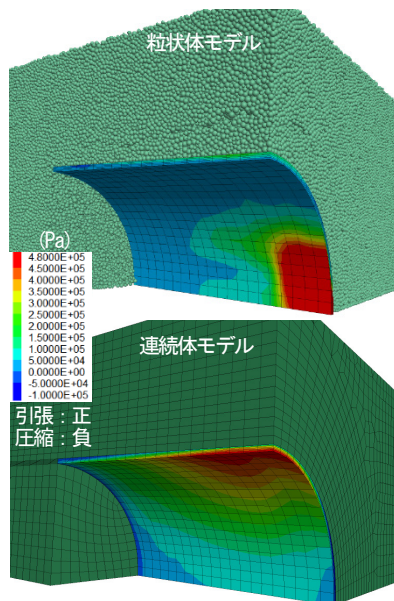


図-5 吹付けコンクリート/最小主応力

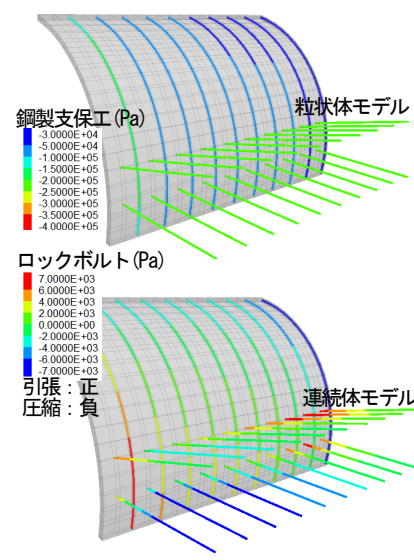


図-6 支保構造の軸力

3. トンネル逐次掘削シミュレーション

掘削施工は1(m)ピッチで逐次的に行い、地山掘削、吹付けコンクリート施工、鋼製支保工の建込み、ロックボルトの打設を繰り返す。本報では、坑口(解析モデル境界)より10(m)までを掘削した。掘削途中の地山と支保構造の状況(抜粋)を図-3に示す。トンネル天盤部上方の地山では空隙が発生し切羽方向に進展する様子が見られることから、地山内で要素の再配置が発生したことが伺える。

比較・参考のために、地山を連続体要素(Mohr-Coulomb弾塑性体)でモデル化した同様のシミュレーションをFLAC^{3D}のみを用いて実施した。地山のモデル化以外にも必ずしも同一条件とは言えない要因もあることから単純には比較できないが、ここでは参考程度に10(m)掘削施工完了時での結果を示す。まず、図-4に示す地表面沈下より、粒状体モデルは連続体モデルに対して概ね2~2.5倍の沈下量が得られている。次に、図-5に示す吹付けコンクリートに発生した最小主応力の分布より、引張応力が卓越している箇所は粒状体モデルでは側壁付近であるのに対して連続体モデルは天盤付近である。最後に、図-6に示す支保構造に発生した軸力分布より、鋼製支保工では、粒状体モデルは連続体モデルに対し概ね0.5倍程度の圧縮軸力である。ロックボルトでは、粒状体モデルは引張軸力が発生しているが、連続体モデルでは一部

に圧縮軸力が見られる。

以上の解析結果では、地山を粒状体の集合でモデル化した場合と連続体でモデル化した場合では異なる様相が見られる。これは、地山の変形挙動が、粒状体モデルでは要素の幾何学的な再配置により、連続体モデルでは構成側により表現される両モデルの基本的な相違点に主要因があると考えられる。

4. おわりに

本報で示した粒状体シミュレーションはやや厳密性を欠く簡易的なものではあるが、実務に即した掘削施工シミュレーションを試みた。予測の手段である数値解析において、地盤のモデル化を選択し使い分ける時代が到来したと考える。

参考文献

- 1) 田中幸雄：地盤は、連続体か？ 粒状体か？、土と基礎、Vol.66, No.7, pp.1-3, 2018.
- 2) D. O. Potyondy and P. A. Cundall, 'A bonded-particle model for rock' International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol.41, pp1329-1364(2004).
- 3) 中川光雄：切羽崩壊による地表面沈下・陥没範囲予測のための粒状体個別要素法の適用性検討、第54回地盤工学研究発表会発表講演集, 2019.(投稿中)