

地山を粒状体としてモデル化した トンネル逐次掘削解析の試み

中川 光雄¹

¹正会員 株式会社 地層科学研究所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5丁目7-19)

E-mail:nakagawa@geolab.co.jp

施工過程を考慮したトンネル掘削解析では、一般に、有限差分法などの連続体解析が用いられる。ここ最近、地盤を粒状体でモデル化する提言がなされており、従来からも粒状体解析の研究は盛んに行われてきた。しかしながら、どのような地盤材料であれば連続体に対して粒状体でモデル化することに優位性があるのかについてはあまり議論されていない。本報告では、軟岩地山におけるトンネル掘削施工を想定して、地山を粒状体要素の集合で、支保構造を連続体要素でそれぞれモデル化し、両者の相互作用によるハイブリッドなシミュレーションの有用性を検討した。ここでは、粘着力を有する地山材料に対する粒子間接触モデルの適切性や、計算負荷軽減のための遠方境界地山の連続体によるモデル化も検討した。

Key Words : tunnel excavation, granular material, distinct element method, soft rock mass, tunnel support

1. はじめに

トンネル掘削の進行に伴う切羽や周辺地山の变形・破壊、支保工軸力、補助工法の効果などを評価する目的で、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の利用が一般的であり、地山のモデル化にはソリッド要素、支保工や補助工法のモデル化にはビーム要素やシェル要素が用いられることが多い。

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¹⁾が提起されている。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考える。しかしながら、対象とする構造物に対して、どのような地盤材料であれば地山を粒状体の集合でモデル化することが連続体でモデル化することに比べて優位であるのかについての議論はあまり見ない。松島²⁾は、地山を粒状体でモデル化する優位性が大変形問題や破壊問題などマクロな物性がドラスティックに変化する本質的に難しい問題にあると述べている。松島³⁾はさらに、微視構造のシミュレーションを行ってマクロな力学特性を把握することは、現象の理解に重要な役割を果たすとも述べている。これらの粒状体力学の特性は、粒子の幾何学的な配置の変化に

より表現される粒子特性に負う面が大きく、たとえ大変形で定式化されていても連続体解析で表現することは困難であると思われる。

本報告では、まず、著者が本年発表した地山を粒状体でモデル化したトンネル掘削解析の2つの事例を示す。第1の事例⁴⁾は、切羽崩壊によるトンネル内への土砂の流動とこれに起因した地表面陥没の再現性を示したものである。第2の事例⁵⁾は、軟岩(泥質砂岩)に立地するトンネルの逐次掘削シミュレーションを試みたものである。以上、2つの事例に対して粒状体でモデル化する優位性と課題を整理する。

次に、土被りが1D程度の泥質軟岩に施工されるトンネルを対象として、地山を粒状体の集合でモデル化するトンネル逐次掘削シミュレーションの実用性を検討した。粒状体は、粒子要素を剛体球とする粒状体個別要素法を適用し、解析プログラムはPFC3D(米国, Itasca社製)を用いた。この際、先の事例から得られた課題に基づいて、残留強度を考慮できる新たな粒子新たな接触モデルを導入した。これに対して、支保構造は有限差分法解析プログラムはFLAC3D(米国, Itasca社製)による連続体要素でモデル化し、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ビーム要素を用いた。両者は見かけ上1つのプログラムとして、粒状体要素と連続体要素の相互作用を連成させて同時に解析できる。このような粒状体と連続体のハイブリッドなモデル化により、

表-1 土質試験の結果 (砂礫)

礫径分布		5~30	(mm)
間隙率	n	23	(%)
土粒子密度	ρ	2.6	(g/cm ³)
変形係数	E	10	(MN/m ³)
粘着力	c	0	(Pa)
内部摩擦角	ϕ	40	(度)

表-2 個別要素法パラメーター一覧

要素径分布	0.05~0.3	(m)
初期間隙率	23	(%)
要素密度	2600	(kg/m ³)
ばね剛性	要素径に応じて分布	
要素間摩擦角	40	(度)
回転抵抗係数	0.25	

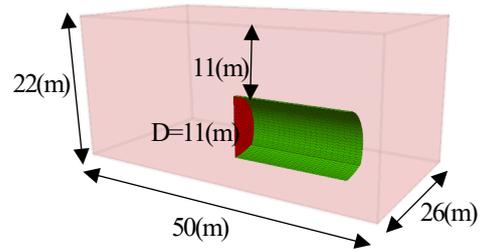


図-1 モデル化領域とトンネル切羽 (1/2 対称モデル)

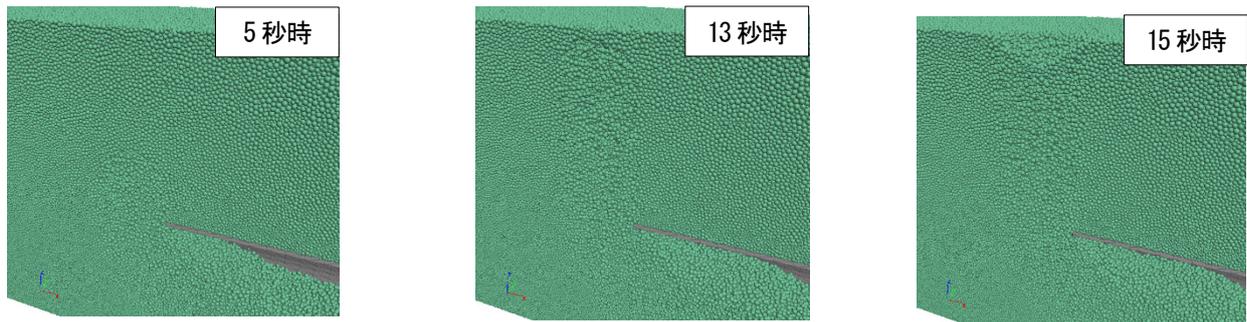


図-2 土砂の流入と崩壊領域の地表への進展

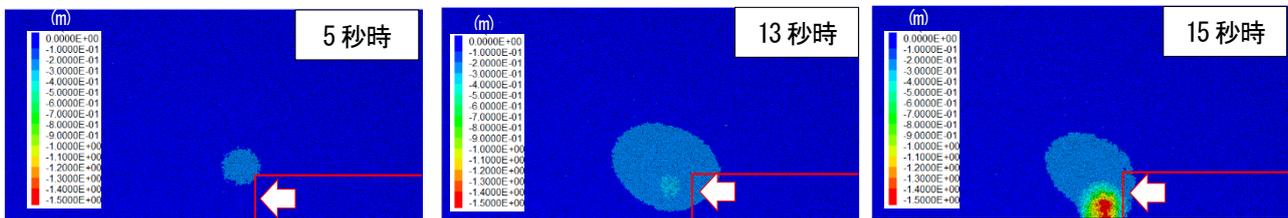


図-3 地表面沈下の進展 (赤線はトンネル位置)

支保構造に発生する軸力分布や応力分布を得ることができ、従来の連続体解析の様式で支保構造の設計の妥当性を評価することが期待できる。

最後に、地山を粒状体でモデル化する留意点や課題を本報告で得られたトンネル掘削シミュレーションの結果から取りまとめる。

2. 地山を粒状体でモデル化したトンネル掘削解析の事例

本章では、著者が公表した粒状体個別要素法を用いて地山を粒状体でモデル化したトンネル掘削解析の事例を示す。1つは、切羽崩壊による土砂の流動とそれに起因した地表の陥没を再現した事例である。もう1つは、軟岩地山での逐次掘削施工を再現してトンネル近傍での局

所的な破壊や変形を再現した事例である。それぞれの事例において得られた結果に基づき、地山を粒状体でモデル化した優位性と課題を述べる。

(1) 事例1: 切羽崩壊による地表面陥没範囲の予測⁴⁾

都市部など、土被りが小さく自立性の悪い未固結地山での山岳工法によるトンネル工事では、切羽崩壊が発生すれば陥没を引き起こし、地上の家屋等に多大な影響を及ぼす懸念がある。このため、今までも粒状体解析や模型実験などにより、土砂がトンネル内へ重力流動して局所的な崩壊領域が地表へ到達する現象の再現が試みられてきた。

a) モデル化の概要と解析結果

この事例では、切羽崩壊による地表での影響範囲を予測するため、表-1に示す通常の土質試験結果から得られる情報を用いて、表-2に示す粒状体個別要素法の主要な

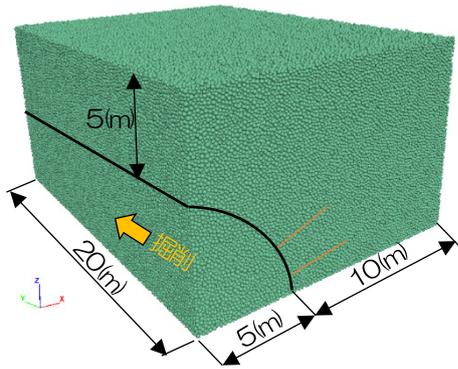


図4 解析モデル領域 (1/2 対称)

表-3 地山の物性値 (泥質砂岩)

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)

パラメータを決定している。

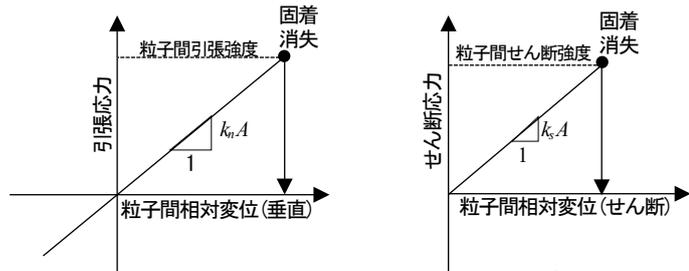
図-1に示す解析モデルに対して、まず、地山の初期応力状態を静的平衡として再現した。次に、トンネル内部の粒子要素を全て消去して剛体壁でモデル化した吹付けコンクリートおよび切羽面を導入し、施工中のトンネルを表現した。切羽崩壊の発生は、切羽に疑似的に設置した剛体壁を瞬時に消去することで模擬した。図-2に示すように、切羽崩壊により土砂がトンネル内へ流入し、これに起因して切羽より崩壊領域が時々刻々と地表へ進展していく様子が分かる。この崩壊は13秒で地表へ到達したことが伺える。図-3に示すように、地表面沈下の進展は、5秒時では最大10(cm)程度であるが、15秒では最大150(cm)となり、陥没の様相を呈する結果が得られている。

b) 粒状体による地山モデル化の優位性

土砂のトンネル内への流動現象は、連続体解析では再現が不可能な現象であることは明らかであり、地山を粒状体でモデル化した優位性の明解な事例であると言える。さらに、地表に進展する破壊現象は、降下する局所的な領域とその周囲の不動領域が不連続面として明瞭に区分されており、これも地山を粒状体でモデル化した優位性であると考えられる。

c) 課題

この事例では、逐次掘削の施工過程をモデル化していない。因って、解析結果として得られた地表面沈下や陥没には施工による成分が含まれていない。また、図-1



(a) 粒子間相対変位(垂直)-引張応力 (b) 粒子間相対変位(せん断)-せん断応力の関係

図5 パラレルボンドモデルの粒子間相対変位と接触応力の関係

表-4 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-5 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-6 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^{-3}	1.6×10^{-4}	7800

より、横断方向におけるモデル境界までの距離がトンネル側壁より2D程度とやや短く、境界の影響が解析結果に含まれる懸念がある。

(2) 事例2: 施工過程を考慮した逐次掘削解析⁵⁾

軟岩地山におけるトンネル施工中の安定性や支保工に発生する応力の予測を目的として、地山を粒状体要素の集合で、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。

a) モデル化の概要と解析結果

先の事例と同様に地山は粒状体要素でモデル化した。これに対して、支保構造は有限差分法を適用して、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でモデル化した。対象としたトンネルは図-4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-3に示す。また、支保構造の物性値を表-4~表-6に示す。地層は均一、最大粒径10(cm)~最小粒径20(cm)として粒子要素の位置と粒径を乱数で分布させた。粘着力を有する地山材料に対する粒子間接触モデルとして、従来からパラレルボンドモデル⁶⁾が用いられてきた。このモデルは、要素間の仮想接触面で応力とモーメントを伝達するため、接触面に微視的な強度パラメータである粒子間せん断強度と粒子間引張強度を与えると、巨視的な系としての粒状体の集合、すなわち地山のせん

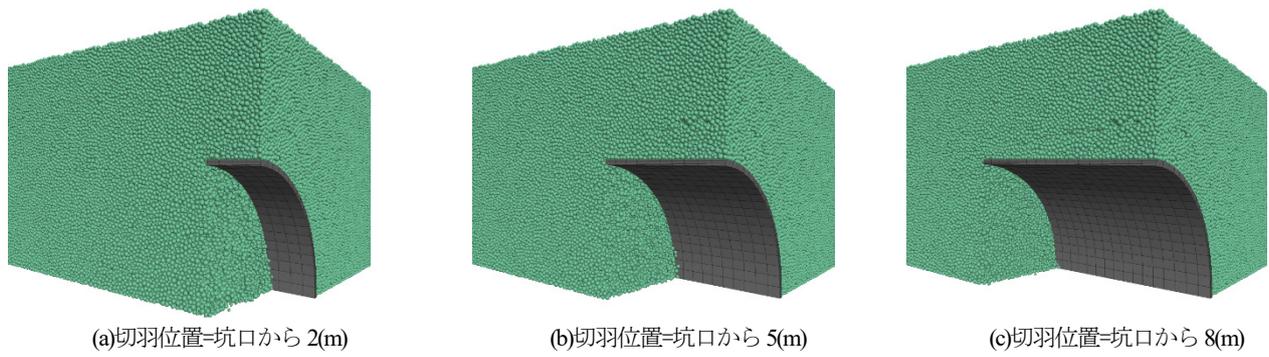


図-6 掘削施工の進展（ロックボルトと鋼製支保工は非表示）

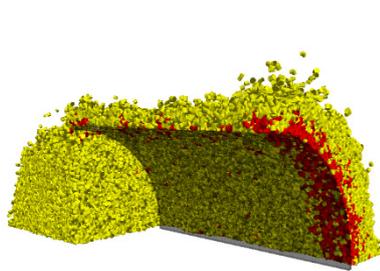


図-7 パラレルボンドモデルの固着消失箇所

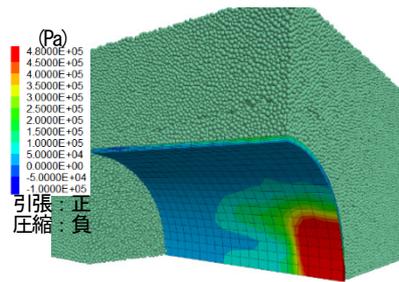


図-8 吹付けコンクリート/最小主応力

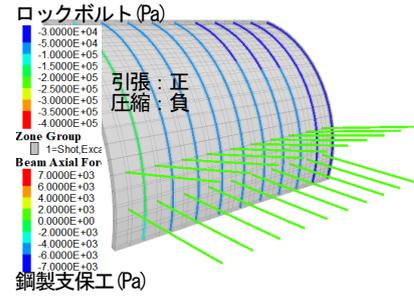


図-9 支保構造の軸力

断強度 (c, ϕ) が表現できる。ただし図-5に示すように、このモデルは粒子間の接触応力が強度に到達した時点で即時に強度を消失する特性を有する。ここでは、表-3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、三軸圧縮試験シミュレーションを実施し、せん断強度600(kPa)、引張強度90(kPa)を得ることができた。

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して、坑口（解析モデル境界）より10(m)までを掘削した。図-6に示した掘削施工の進展より、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していく様子が見られる。これより、この部位で粒子の局所的な再配置、すなわち、局所的な破壊が発生したことが伺える。また、パラレルボンドモデルの固着消失箇所（図-5における bond breaks に該当）を図-7に示す。固着消失は、トンネル近傍の側壁、天盤部、切羽前方に渡り広範囲に発生している様子が見える。吹付けコンクリートに発生した最小主応力を図-8に、支保構造に発生した軸力分布を図-9に示す。ここでは設計上の許容値において言及することはしないが、ソリッド要素でモデル化した吹付けコンクリート内部に発生した応力を介して鋼製支保工に軸力が発生し、はり要素でモデル化したロックボルトが粒状体要素を貫通する位置で相互作用する軸力がロックボルト軸力として分布が表現される状況が確認できる。

b) 粒状体による地山モデル化の優位性

掘削の進行に伴いトンネル天盤部では粒子の再配置が発生しその範囲が拡大していく様子が見られた。このような局所的な破壊の進展は、連続体解析では再現が困難な現象であり、地山を粒状体でモデル化した優位性の顕著な特性であると思われる。

c) 課題

図-7に示したように、切羽やトンネル近傍ではパラレルボンドモデルの固着消失箇所が広範囲に発生する結果が得られた。粒子要素の固着消失を地山の降伏と見なすと、発生領域はやや過大であるように思われる。これは、パラレルボンドモデルが、図-5に示したように粒子間の接触応力が強度に到達した時点で即時に強度を消失することによると思われる。一般に、地山材料は、降伏した後即時に強度を消失せず塑性変形が進行する。そして、ひずみ軟化領域を経て残留強度に到達する。降伏後の強度低下の程度は主に拘束圧の大きさに依存する。因って、粒状体個別要素法を用いて地山をモデル化する場合、粒子間接触モデルとしてパラレルボンドモデルを適用することはやや問題があると考えられる。

3. 新たなトンネル逐次掘削シミュレーションの試み

前章で示した2つの事例から得られたモデル化上の課

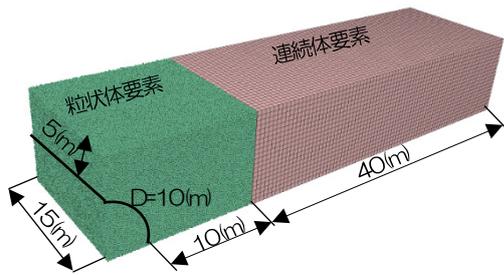


図-10 解析モデル

表-7 地山の物性値 (泥質砂岩)

変形係数	E	100	(MPa)
ポアソン比		0.3	
間隙率	n	30	(%)
湿潤密度	ρ_t	1820	(kg/m ³)
土粒子密度	ρ_s	2600	(kg/m ³)
粘着力	c	250	(kPa)
内部摩擦角	ϕ	35	(度)

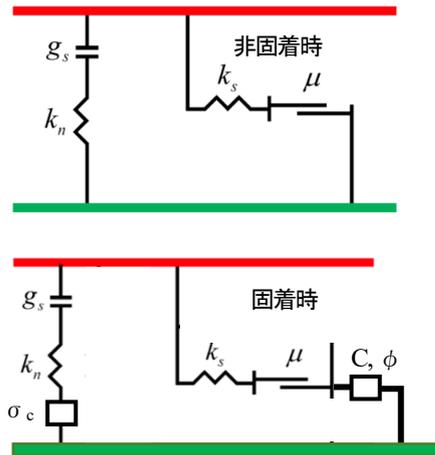


図-11 Soft-Bond 接触モデルの構成成分

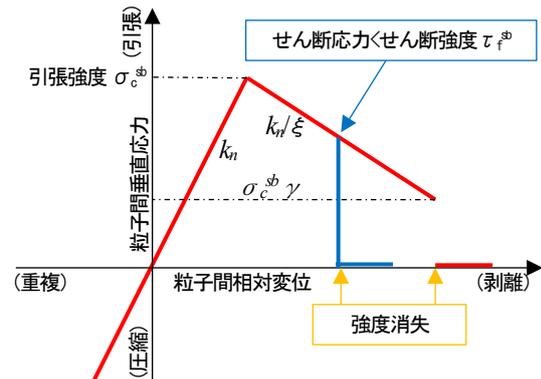


図-12 Soft-Bond 接触モデルの垂直応力-相対垂直変位関係

表-8 Soft-Bond モデルの強度パラメータ

接触せん断強度 τ_f^{sb}	接触引張強度 σ_c^{sb}	破壊強度係数 γ	強度低下勾配係数 ξ
(kPa)	(kPa)		
1350.0	350.0	0.5	2.0

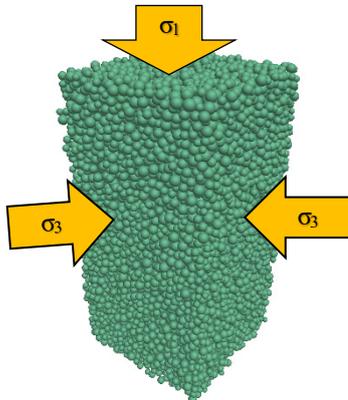


図-13 三軸圧縮試験シミュレーション

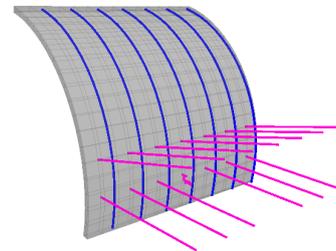


図-14 掘削 7(m)時の支保構造

題に基づき、具体的な改善方法の案を示す。次に、改善方法の案を導入したトンネル逐次掘削シミュレーションを実施する。最後に、得られた解析結果に対して考察する。

(1) 課題と改善案

a) 粒子間の接触モデル

粘着力を含有する地山材料に対して、粒状体個別要素法では従来より周知されているパラレルボンドモデルが適用されてきたことは先にも述べた通りである。しかし、粒子間の接触応力が強度に到達した時点で即時に強度を消失するモデルであることから、切羽やトンネル近傍な

どでは破壊領域が過大となる可能性がある。これに対し、強度到達時での即時の強度消失を抑制するために、強度到達後に粒子間相対変位と強度低下の関係を与えることのできるSoft-Bondモデル⁷⁾を導入する。

b) 側方境界

トンネル掘削解析における側方境界の目安としては、側壁より4D~5D程度が推奨されている⁸⁾。前章で示した事例における側方境界は1D程度であり、境界の影響が解析結果に含まれる懸念がある。これは、側壁より4D~5Dまで範囲全ての地山を粒状体でモデル化することは、計算負荷(メモリや演算速度)の点で極めて不利であることによる。そこで、粒状体によるモデル化の範囲は前

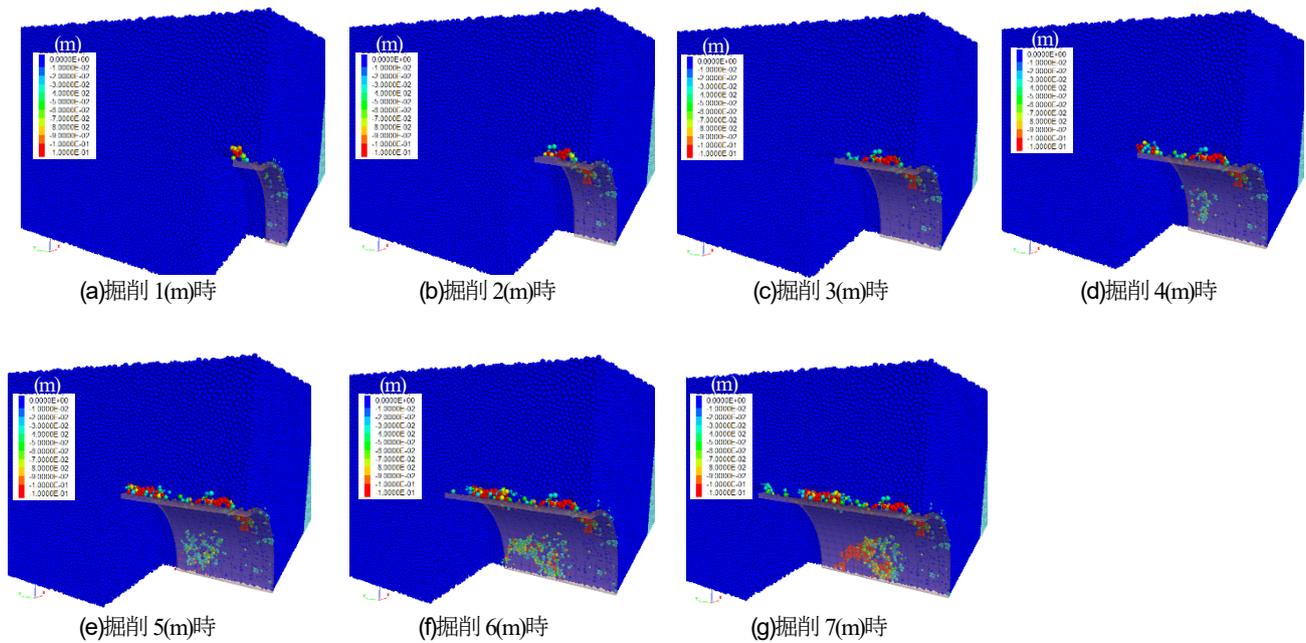


図-15 トンネル近傍地山の局所変形 (鉛直変位量を粒子単位でコンター表示)

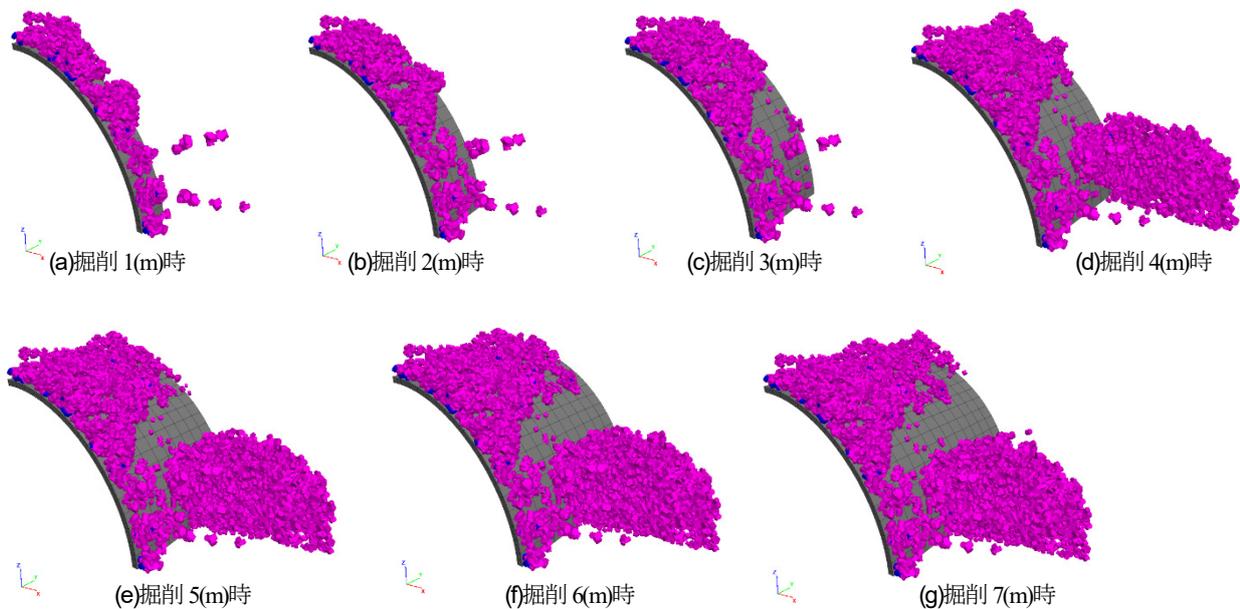


図-16 トンネル近傍地山での Soft-Bond 接触モデルの破壊 (破壊箇所を円柱形で表示)

出の事例同様に側壁より1Dまでとし、1Dから5Dまでは連続体要素(ソリッド要素)でモデル化することを試みる。ただし、両者の連続性を実現するために、境界ソリッド要素と粒状体要素の接触は剛結とする必要がある。

(2) トンネルと解析モデル

対象としたトンネルは図-10に示すように、直径 $D=10(m)$ の円形であり、土被りは $0.5D$ に相当する $5(m)$ とした。解析モデルは、簡略化のため横断面において $1/2$ 対称とし、側方境界の位置は、トンネル側壁から $5D$ 相当

$50(m)$ とした。このうち、トンネルセンターより $15(m)$ までは粒状体要素でモデル化し、以降の $40(m)$ は連続体要素でモデル化した。粒状体要素の粒径分布は最小 $10(cm)$ ～最大 $20(cm)$ として、重心位置と粒径分布は乱数で発生させた。地山は泥質砂岩を想定し、物性値を表-7に示す。また、支保構造は、表-4～表-6に示した物性値を用いた。

(3) Soft-Bond接触モデル⁷⁾

粒子間接触モデルには、パラレルボンドモデルを改良した図-11に示すSoft-Bond接触モデルを適用した。この

接触モデルは、図-12に示すように、粒子間垂直応力が引張の状態にある時、接触引張強度(σ_c^{sh})を超越した後強度低下区間を定義している。この区間での粒子間相対変位に対する強度の低下の程度は、破壊強度($\sigma_c^{\text{sh}}\gamma$ ； γ は破壊強度係数)と強度低下勾配(k_n/ξ ； ξ は強度低下勾配係数)によって決定され、粒子間垂直応力が破壊強度($\sigma_c^{\text{sh}}\gamma$)に到達時点で接触引張強度、すなわち、粒子間の固着は消失する。

(4) Soft-Bond接触モデルパラメータの決定

表-7に示した地山強度に対してこれに対応するSoft-Bondモデルの強度パラメータを求めるため、図-13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、モル円と包絡線から得られる粘着力 c と内部摩擦角 ϕ が表-7に示したせん断強度($c=250(\text{kPa})$, $\phi=35^\circ$)に一致するよう、接触せん断強度 τ^{sh} 、接触引張強度 σ_c^{sh} 、強度低下勾配係数 ξ 、破壊強度係数 γ を試行的に変化させた。数ケースの試行の結果、表-8に示したSoft-Bondモデルの強度パラメータを得ることができた。因って、次節に示すトンネル掘削シミュレーションでは、表-8に示した強度パラメータを用いる。

(5) 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。本報告では、坑口(解析モデル境界)より7(m)までを掘削した。掘削7(m)時の支保構造の状況を図-14に示す。

(6) 解析結果

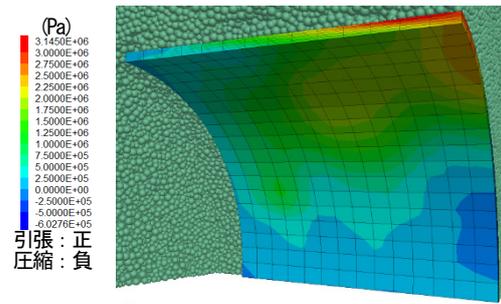
a) トンネル近傍地山の局所変形

掘削の進行に伴い、吹付けコンクリート背面で発生した粒子要素の移動を図-15に示す。ここで粒子要素の移動として鉛直変位を表示した。特に、青以外で着色された粒子要素は、地山内で粒子要素の半径程度の沈下(5cm~10cm)による幾何学的再配置が発生したことを意味し、これに伴いトンネル天盤部上方の地山では空隙の発生が見られる。また、5mを掘削した時点では、側壁に数mの範囲で粒子要素の再配置の発生が見られ、掘削の進行とともにその領域が拡大していく様子が分かる。

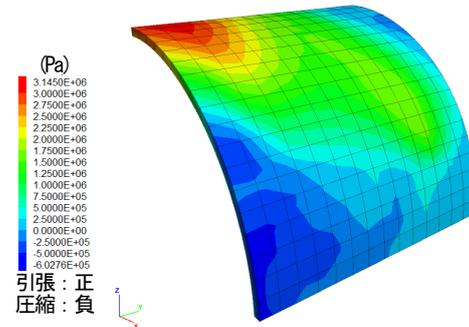
b) トンネル近傍地山の破壊

掘削の進行に伴い、吹付けコンクリート背面で発生したSoft-Bond接触モデルの破壊、すなわち、粒子要素間の固着が消失した箇所を図-16に示す。境界より5mを掘削した時点から側壁よりトンネル半径方向に破壊領域が拡大がみられ、図-15に示した局所変形の発生進展に対応している様子が分かる。

c) 吹付けコンクリートの応力



(a) 内空側の最小主応力



(b) 背面側の最小主応力

図-17 吹付けコンクリートの応力

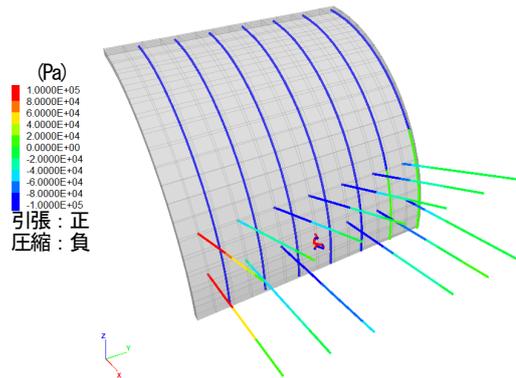


図-18 鋼製支保工とロックボルトの軸力

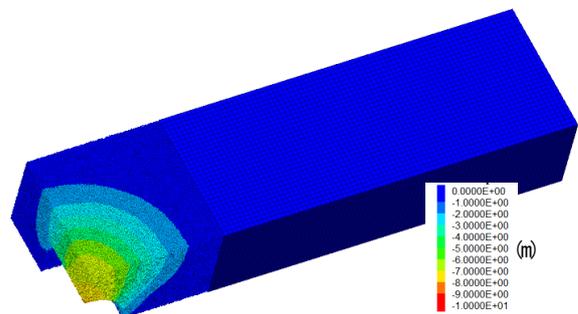


図-19 地表面沈下の分布

吹付けコンクリートに応力の引張成分が発生している領域を把握する目的で、最小主応力の分布を図-17に示す。側壁の下方は圧縮を受けている傾向であるが、天盤部までの多くの領域では引張が支配的であることが伺え

る。ここでは設計上の評価に言及しないが、粒状体要素でモデル化された地山が吹付けコンクリート表面に接触して作用する力によって発生する応力分布が得られることが分かる。

d) 鋼製支保工とロックボルトの軸力

鋼製支保工、および、ロックボルトに発生している軸力を図-18に示す。鋼製支保工は、概ね $1e5(N)$ の圧縮軸力を受け、掘削が進行してもあまり変動はみられない。これに対してロックボルトは概ね引張を受けているが、図-16に示した破壊箇所を中心に圧縮を受けている。特に、境界より5mを掘削した時点で打設したロックボルトは破壊されている様子が伺える。ここでは吹付けコンクリートと同様に、設計上の評価には言及しないが、吹付けコンクリート内部に発生した応力を介して鋼製支保工の軸力が発生し、はり要素が粒状体要素を貫通する位置ではり要素に発生する力がロックボルト軸力の分布として表現される状況が分かる。

e) 地表面沈下

7(m)掘削時点での地表面沈下を図-19に示す。図-15～図-16に示した地山内部が破壊した領域の大きさを考慮すると、地表面沈下は比較的小さいように思われる。これは、破壊の発生が粒状体要素の局所的な再配置であるため、破壊箇所での挙動の影響が地表までに及ばなかったものと推察される。

f) 連続体要素による側方境界

図-19より、地山を粒状体要素でモデル化した領域と連続体ソリッド要素でモデル化した領域の境界にずれ変位が見られないことから、両者の連続性は良好であると判断できる。

(7) まとめ

本章で示した解析結果をまとめる。

①地山を粒状体要素の集合体としてモデル化する優位性という観点に対して、本例ではトンネル近傍において粒子要素の幾何学的再配置、すなわち、局所的な変形・破壊の発生を再現することができた。ただし、施工途中の切羽崩壊は見られなかった。砂質材料に比べて泥質軟岩のような粘着力を含む地山材料をモデル化した場合、大規模な切羽崩壊発生の可能性は低いと推察される。

②泥質砂岩の地山に対してSoft-Bond接触モデルを適用した結果、2章で示した事例のような過大な破壊領域は見られなかった。この観点からは粘着成分を有する地山材料に対してパラレルボンドモデルと比較してSoft-Bond接触モデルを適用することは概ね妥当であると考えられる。

③地山を粒状体要素の集合体としてモデル化して施工過程を実施した逐次掘削シミュレーションにおいて、吹

付けコンクリートや鋼製支保工などの支保構造を連続体要素（ソリッド要素、はり要素など）でモデル化するハイブリッドなシミュレーションの実現を改めて示した。これにより、従来からの連続体要素を用いた設計のための評価方法（軸力分布やモーメント分布など）を踏襲することができる。

④側方境界において1D以遠の境界領域を連続体要素でモデル化することができた。これにより、解析モデルのうち地山領域の全てを粒状体要素でモデル化する必要はなく、今後の粒状体個別要素法解析においてコンピューターの負荷が軽減され、解析評価への取り組みがより現実的なものになると考える。

4. おわりに

本報告は、通常行われるトンネル逐次掘削解析に対して、地山を粒状体要素でモデル化した場合の適用性、優位性を、土被りの小さい泥質軟岩地山を想定して検討した。粘着力を有しない砂質系地山の場合は、破壊に伴う流動現象が発生する可能性があるため、適用の優位性は考えやすい。これに対して、本例で示したように、粘着力を含む地山材料（表層土や泥質軟岩など）に対しては、どの程度の粘着力までであれば、粒状体によるモデル化に優位性があるのか、という命題に対して今後とも検討を進める必要がある。また、支保構造に発生する応力や軸力を地山を連続体要素でモデル化する解析結果と比較するなどして詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 田中幸雄：地盤は、連続体か？ 粒状体か？、地盤工学会誌、Vol.66, No.7, pp.1-3, 2018.
- 2) 松島亘志：DEM(Distinct Element Method)、技術手帳、地盤工学会誌、58-1, pp116-117, 2010.
- 3) 松島亘志、高原利幸、堀 宗朗：粒状体モデル、地盤工学会誌、52-8, pp7-9, 2004.
- 4) 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講演集、pp.1405-1406, 2019.
- 5) 中川光雄：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、土木学会第74回年次学術講演会公演概要集、III-182, 2019.
- 6) 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).
- 7) Yifei Ma and Haiying Huang, 'DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.102, pp109-119(2018).
- 8) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構編、山岳トンネル設計施工標準・同解説、2008.

(2019.8.9 受付)

STUDY ABOUT APPLICATION OF A TUNNEL EXCAVATION ANALYSIS WHICH GROUND IS MODELED AS GRANULAR MATERIAL

Mitsuo NAKAGAWA

In tunnel excavation analysis considering the construction process, continuum analysis such as finite difference method is generally used. Recently, it has been proposed to model the ground with granular material, and research on granular analysis has been actively carried out. However, there is not much discussion as to what kind of ground material has advantages in modeling with a granular body for a continuum. In this report, for tunnel excavating construction in soft rocky area, the ground is constructed by aggregation of granular elements, and the support structure is modeled by continuum elements, and the usefulness of hybrid simulation by the interaction of both is examined. Here, the appropriateness of the interparticle contact model for cohesive geomaterials and the modeling with the continuum of the far boundary ground for reducing the computational load were also examined.