

個別要素法による多層地盤中における 浅層トンネルの掘削シミュレーション解析

錦崇仁^{1*}・楠見晴重²・寺田道直³・中村真⁴

¹関西大学大学院 理工学研究科 ソーシャルデザイン専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²関西大学 学長 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁴関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

*E-mail: k004457@kansai-u.ac.jp

トンネルは様々な地質条件の中に掘削されることから、設計に関する明確な基準の設定が困難である。そのため、地山の力学挙動を適切に再現し得る解析手法の構築が求められている。そこで本研究では、個別要素法を用いて多層地盤中における浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を実施し、その妥当性を評価する。その際、実際のトンネル崩落事故を対象とし、対象地域の多層地盤をモデル化し、一軸圧縮試験シミュレーション解析、二軸圧縮試験シミュレーション解析によって、支保工及び地山の物性を再現し得るパラメータを決定した。掘削シミュレーション解析では、地下水やインバート支保工等の条件を設定することにより、崩落の有無について検討した。

Key Words : shallow tunnel, distinct element method, simulation analysis, multilayered ground

1. 緒言

我が国にヨーロッパからNATM (New Austrian Tunneling Method) が導入されて30年以上が経過し、現在は山岳部のトンネルの9割近くが採用する標準的な山岳トンネル工法となっている。導入当初、NATMは山岳部を主体として採用されていたが、近年では様々な補助工法の発達により都市部でも一般的に採用されるようになってきた¹⁾。しかしながら、過密化の進行する都市部の地下空間において、トンネルを施工する際の制約条件はますます困難化している。さらに、都市部に浅層トンネルを掘削する際には、地表面沈下や地中既設構造物に対する影響が問題となり、これらを的確に予測する設計手法の提案が求められている。

トンネルにおいては地山という不確定要素の多い物性を取り扱うことから、設計に関する明確な基準の設定が難しく、依然として経験的に設計が行われている状況にある。このような状況の中で、平成17年5月31日には東北新幹線牛鍵トンネルが建設途中で崩落し、世間の大きな注目を浴びた。

本研究では、前述した東北新幹線牛鍵トンネル崩落事故を対象とし、個別要素法による浅層トンネルの掘削シミュレーション解析を実施した。崩落箇所の地質は物性

値の異なる5層で構成されており、その崩落メカニズムを再現することで、多層地盤中における本解析手法の妥当性を評価することを研究の目的とする。

2. 解析対象としたトンネル崩落事故

平成17年5月31日、東北新幹線牛鍵トンネルの崩落事故が発生し、約6,700m³の土砂がトンネル内に流入した²⁾。牛鍵トンネルは、青森県十和田市牛鍵地区を起点方、上北郡上北町大浦地区を終点とする全長2,070m、土被りが2m～10m (平均8m) の山岳トンネルである。崩落箇所の地質は、下位から野辺地層下部砂層 (Nos1)、砂質土層 (ts)、粘性土層 (tc-c)、軽石混じりの砂質土層 (tc-s)、火山灰層 (ta) で構成され、また、トンネル上部は水田として利用されている。

この崩落事故の原因は、素因として低土被り、剛性の低いtc-s層及びtc-c層が分布していたこと、誘因としてインバート掘削後で不安定であったこと、上部の水田への引水により周辺地山への多量の給水が行われたこと等が挙げられる。表-1に崩落箇所の地盤物性値を示す。本研究では、この崩落を再現するとともに、これらの素因・誘因について検討していく。

表-1 崩落箇所地盤物性値²⁾

地層名	密度 (g/cm ³)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
ta	1.54	34.1	9.6
tc-s	1.49	18.7	37.5
tc-c	1.57	8.1	37.1
ts	1.72	3.4	34.2
Nos1	1.97	48.0	34.2

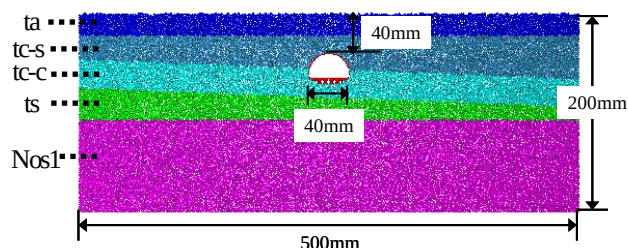


図-1 多層地盤モデル (H=1.0D)

3. 解析手法

(1) 個別要素法の概要

個別要素法は、P.A.Cundall³⁾によって考案された解析手法であり、主に岩盤や地盤といった不連続体を対象としている。数値シミュレーション対象を微小な粒子の集合体として巨視的に捉えることにより、その動力学的挙動を解析する方法である。個々の粒子間に仮想のばねを配し、その作用力から加速度、速度、変位を算出して粒子の挙動を追跡する。本解析手法では、ばね定数を相対変位増分量に乗ずることによって、粒子間の作用力を算出する。

(2) 多層地盤のモデル化

本研究では、正六角形格子状に発生させたランダム粒径粒子を重力落下によりパッキングを行うことで、解析モデルを作成した。

まず、予め粒子群の下方にトンネル形状に等粒径の粒子を配列させ、その粒子を変位拘束してパッキングを行うことで、トンネルを有する解析モデルを作成する。その後、崩落箇所の地質断面図を基に層毎に色分けし、多層地盤をモデル化した。図-1に、土被りH=1.0Dとして作成した解析モデルを示す。ここで、Dはトンネル径を意味する。構成粒子は最小粒径0.6mm、最大粒径1.4mmのランダム粒径粒子で、粒子数は25,657個である。

(3) 支保工のモデル化

本解析においてコンクリートで形成される支保工をモデル化する際、それらの粒子に連続体としての性質を与える必要がある。そこで本研究では、P. Mora⁴⁾によって

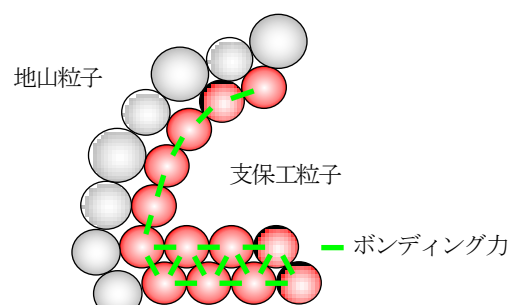


図-2 支保工粒子の概要

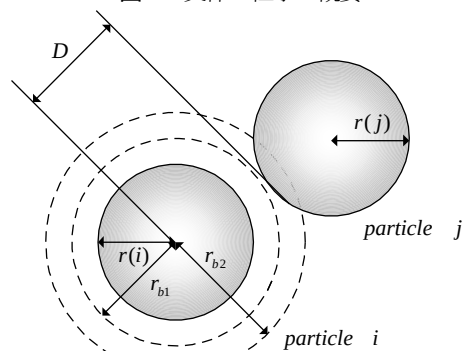


図-3 ボンディング力の作用領域

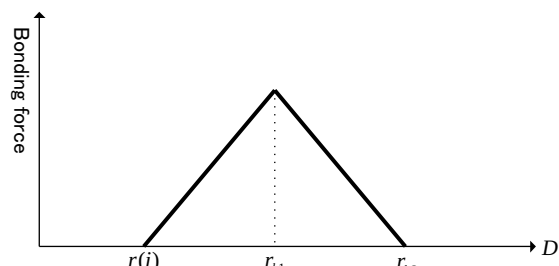


図-4 ボンディング力

提案されたボンディング理論を適用し、粒子間に引張力として定義されるボンディング力を発生させ、アーチ形状の連続体を形成した。図-2は、ボンディング力によって形成される支保工の粒子群の概要を示したものである。

(4) ボンディング理論

本研究では、ボンディング力という粒子間結合力を法線方向、接線方向それぞれに導入することで、支保工をモデル化した。

図-3は、ボンディング力を作用させる領域を示している。領域として、ボンディング半径1 (r_{b1}) とボンディング半径2 (r_{b2}) という2種類のボンディング半径を定義する。 r_{b1} はボンディングが降伏に至る距離、 r_{b2} はボンディングが破断する距離を示している(図-4)。以上のように定義されたボンディング力は、次のように定式化できる

表-2 二軸圧縮試験シミュレーション解析結果

地層名	地盤物性値		解析パラメータ		解析結果	
	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)	減衰係数 (N・sec/m)	粒子間摩擦係数 (-)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
ta	34.1	9.6	145.00	0.08	34.40	10.74
tc-s	18.7	37.5	57.50	0.40	18.47	37.80
tc-c	8.1	37.1	4.25	0.40	8.15	38.93
ts	3.4	34.2	1.00	0.25	3.34	32.19
Nos	48.0	34.2	120.00	0.50	48.29	34.32

表-3 一軸圧縮試験シミュレーション解析結果

	Kn (N/m)	Ks (N/m)	Kn/Ks	ボアソン比	一軸圧縮強度 (MPa)
アーチ	1.8×10^8	6.0×10^7	3.0	0.207	21.05
インバート	2.4×10^8	8.0×10^7	3.0	0.207	28.07

$$F_{ij} = \begin{cases} K \cdot (D - r(i)) & (r(i) < D \leq r_{b1}) \\ K \cdot \frac{(r_{b1} - r(i))(r_{b2} - D)}{r_{b2} - r_{b1}} & (r_{b1} < D \leq r_{b2}) \end{cases}$$

ここに、 F_{ij} ：粒子 i と粒子 j に作用するボンディング力（法線方向、接線方向）、 K ：ばね定数（法線方向、接線方向）、 r_{b1} ：ボンディング半径1、 r_{b2} ：ボンディング半径2である

4. 解析パラメータの決定手法

(1) 二軸圧縮試験シミュレーション解析

a) 解析概要

崩落箇所の地質は物性値の異なる5層で構成されている。そのため、各層毎に解析パラメータを設定し、掘削シミュレーション解析を行う必要がある。そこで本研究では、掘削シミュレーション解析に先立って二軸圧縮試験シミュレーション解析を行い、各層毎の粘着力及び内部摩擦角を表現できる解析パラメータの検討を行った。

供試体モデルは、掘削シミュレーション解析に用いる粒子群から、幅100mm、高さ200mmの形状に切り取って作成した。粒子数は5,155個である。本研究では、解析パラメータ中の減衰係数及び粒子間摩擦係数を変化させて二軸圧縮シミュレーション解析を行った。供試体に拘束圧に見合う水平力を作用させ、一定のひずみ速度で圧縮壁を下降させることで、モデルを圧縮する。粘着力及び内部摩擦角は、各ケースそれぞれについて2種類の拘束圧でシミュレーション解析を実施し、モール・クーロンの破壊規準から求めた。この手順を目標とする粘着力及び内部摩擦角が得られるまで繰返し行い、各層毎の解析パラメータを決定した。

b) 解析結果

表-2 に解析結果を示す。地盤物性値と解析結果を比較すると、概ね一致する結果となった。切羽の安定・崩壊挙動には内部摩擦角より粘着力の方が強く影響する⁵⁾ことから、粘着力の誤差が小さい本解析結果を掘削シミュレーション解析に用いても問題はないと考えられる。

(2) 一軸圧縮試験シミュレーション解析

a) 解析概要

本研究ではトンネル断面を滑らかな曲面でモデル化するために、支保工粒子群を等粒径粒子で作成している。このため、粒径0.63mmの等粒径粒子で構成される幅50mm、高さ100mm、粒子数は3,720個の供試体モデルを用いて一軸圧縮試験シミュレーション解析を行い、支保工粒子群のパラメータを決定した。

大概ら⁶⁾によって、一軸圧縮強度及び引張強度とボンディング半径には正の相関関係があることが報告されているが、これはランダム粒径供試体モデルを用いて行われた3次元シミュレーション解析の結果であり、本研究にそのまま適用することはできない。さらに、これらの強度とばね定数との関係については触れられていない。そこで本研究では、供試体モデルの強度特性に最も大きな影響を与えると考えられるばね定数に着目した。

b) 解析結果

本研究では吹付けコンクリート（アーチ部）と鉄筋コンクリート（インバート部）から構成される支保工を想定しており、それぞれの設計基準強度は、二車線程度の道路トンネル及び鉄道トンネル等では18N/mm²、21～24N/mm²と定められている⁷⁾。これらの設計基準強度を満たす解析条件及び解析結果を表-3に示す。また、一軸圧縮強度とばね定数には明瞭な正の相関関係があることも確認した。

表-4 解析条件

Case	インバート	土被り	地下水	tc-s層の粘着力 (kPa)	tc-c層の粘着力 (kPa)
1	未閉合	1.0D	有	18.47	8.15
2	未閉合	1.0D	無	18.47	8.15
3	閉合	1.0D	有	18.47	8.15
4	未閉合	1.5D	有	18.47	8.15
5	未閉合	1.0D	有	49.24	8.15
6	未閉合	1.0D	有	18.47	38.28

5. 掘削シミュレーション解析

(1) 間隙水圧の計算

上部の水田への引水によって間隙水圧が増加し、崩落直前にはトンネル天端からtc-c層の上面にかけて地下水が存在していた。そのため、この領域に存在する粒子には、間隙水圧を外力として加える必要がある。本研究では、これらの粒子に対して、次式で計算される間隙水圧を作用させることにした。

$$u(i) = (Z(i) - Z_d) \cdot \gamma_w$$

ここに、 $u(i)$ ：粒子 i に作用する間隙水圧、 $Z(i)$ ：地表面から粒子 i までの深さ、 Z_d ：地表面から地下水面までの深さ、 γ_w ：水の単位体積重量である。

(2) 解析条件

西村らの報告⁹⁾によると、実物の1/nの幾何学的相似模型をnG（G：重力加速度）の遠心加速度場においた場合、模型と実物に作用する鉛直応力は等しくなる。すなわち、遠心加速度場を想定したトンネル掘削解析を実施すれば、nGにおかれた縮尺トンネル解析モデル内には、数mの土被りを有する実トンネルと同等の荷重レベルを発生させることが可能となる。そこで本研究では、実現象を再現するために解析モデルを200Gの遠心加速度場において、掘削シミュレーション解析を実施することにした。これにより、二軸圧縮試験シミュレーション解析で得た物性値を、そのままトンネル掘削解析に適用することが可能となる。

表-4に解析条件を示す。Case1が実現象と同じ条件である。本研究では、インバートの断面閉合、土被り、地下水の有無、剛性の低いtc-s層及びtc-c層の粘着力に着目し、掘削シミュレーション解析を行い、崩落要因の検討を行った。

(3) 解析結果

図-5に、各ケースの変位分布図を示す。図が左右非対称になっているのは、トンネル天端からtc-c層の上面に

かけて間隙水圧が作用しているためである。実現象を想定したCase1ではトンネルが崩落し、地下水が存在していなかったと想定したCase2とインバートを閉合したCase3では崩落が生じなかった。また、土被りH=1.5D（Case4）とした場合は、トンネルが変形しているものの、崩落には至らなかった。これらの結果より、地下水が存在していたこと、インバートが未閉合であったこと、土被りが小さかったことが崩落の要因として考えられる。

旧河川の堆積物であり、地盤剛性が低いtc-s層、tc-c層はトンネル崩落に大きく影響したと考えられる。そこで、tc-s層及びtc-c層の粘着力を増加させることにより、各層の剛性を高めたシミュレーションを行った。tc-s層の粘着力を増加させたCase5ではトンネルが崩落し、tc-c層の粘着力を増加させたCase6では崩落が生じなかった。これらの結果より、tc-c層の剛性が当該規模のトンネルを掘削するには不足していたと考えられる。すなわち、トンネルを掘削する前に補助工法等でtc-c層の剛性を高めていれば、過剰な間隙水圧が作用してもトンネルは崩落しなかったと推測される。

(4) 沈下量・変位量の減少率

Case1～Case6の条件下で解析を行うことで、崩落要因についての検討を行った。表-5は、各ケースの最終ステップにおける最大地表面沈下量、天端変位量及び内空変位量を示している。ここでは、これらの結果を減少率という新たな指標を用いて整理することで、地下水が存在したこと、インバート支保工の断面が閉合されていなかったこと、低土被りであったこと、剛性の低いtc-c層及びtc-c層が分布していたことが、それぞれどの程度崩落に起因したのかについて検討を行った。減少率は、次式で計算される。

$$\text{減少率 (\%)} = \left\{ 1 - \frac{\text{Case2} \sim \text{Case6の} \text{変位量}}{\text{Case1の変位量}} \right\} \times 100$$

すなわち、減少率とは崩落時と同条件のCase1と比較して、各ケースの沈下量及び変位量がどの程度減少したのか算出したものである。

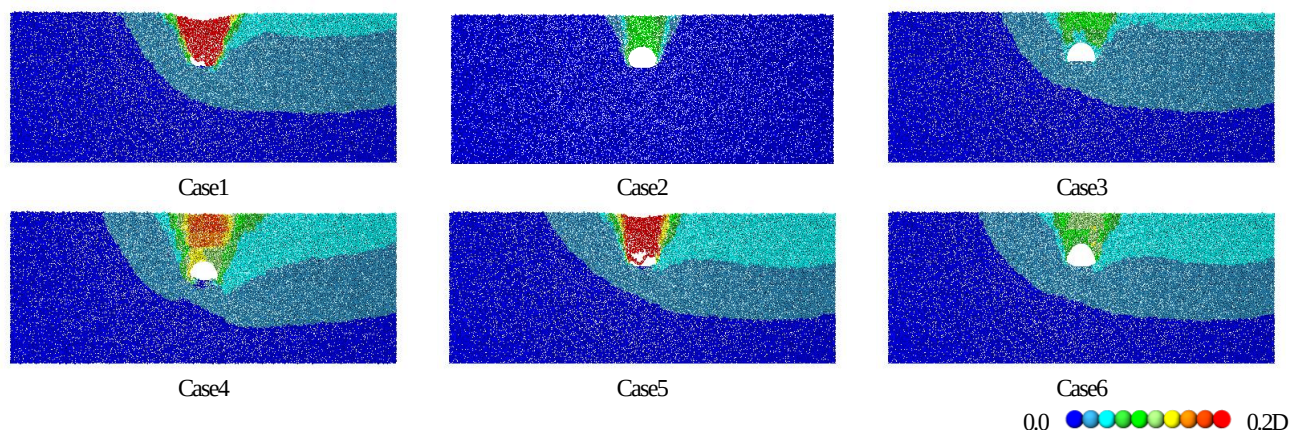


図-5 変位分布図（変位収束後）

表-5 各ケースの最大地表面沈下量・天端変位量・内空変位量

Case	最大地表面沈下量 (mm)	天端変位量 (mm)	内空変位量 (mm)
1	-14.96	-24.94	-2.41
2	-4.40	-4.11	-2.05
3	-3.79	-1.95	-0.11
4	-6.55	-5.00	-2.48
5	-12.35	-25.58	-4.22
6	-4.39	-2.76	-0.37

表-6 各ケースの沈下量・変位量の減少率

Case	減少率 (%)		
	最大地表面沈下量	天端変位量	内空変位量
2	70.59	83.52	14.94
3	74.67	92.18	95.44
4	56.22	79.95	-2.90
5	17.45	-2.57	-75.10
6	70.66	88.93	84.65

表-6 は、各ケースにおける沈下量・変位量の減少率を示す。最大地表面沈下量に関しては、いずれのケースにおいても Case1 より減少する結果となった。特に、地下水が存在しない場合（Case2）、インバート支保工の断面が閉合されている場合（Case3）、tc-c 層の粘着力を増加させた場合（Case6）においては 70%以上減少し、大きな抑制効果が見られた。天端変位量に関しては、基本的には Case1 より減少する結果となった。しかしながら、崩落が生じた Case5 では、Case1 より天端変位量が大きくなっており、減少率も負の値を示した。また、内空変位量が大きく減少しているのは、Case3 及び Case6 のみであった。

これらの結果より、崩落事故に最も影響した要因は、インバート支保工の断面が閉合されていなかったことだと推測される。Case3ではいずれにおいても大きな減少率を示しており、インバート支保工の断面閉合と崩落との関連性が最も高いと考えられる。以下、剛性の低いtc-c層が分布していたこと、地下水が存在したこと、低土

被りであったことの順に続き、減少率という指標を用いることで、各要因が崩落に及ぼす影響について考察することが可能となった。

6. 結言

本研究は、個別要素法を用いて実際に生じたトンネル崩落事例を参考に、様々なケースの解析を行うことによって、崩落要因の検討を行った。また、掘削シミュレーション解析に先立って二軸圧縮試験シミュレーション解析、一軸圧縮試験シミュレーション解析を行い、多層地盤の各層の物性値と支保工を表現できる解析パラメータを決定した。以下に、本研究で得られた成果の要約を示す。

- (1) 供試体モデルによる力学試験シミュレーション解析
 - 1) 等粒径供試体モデルを用いて、一軸圧縮試験シミュレーション解析を実施した。その結果、法線方向ばね定数と接線方向ばね定数の比が同じであれば、ポアソン比も等しくなるということが明らかになった。また、一軸圧縮強度とばね定数には、明瞭な正の相関関係があるという結果も得られた。
 - 2) 解析対象の多層地盤をモデル化するため、ランダム粒径供試体モデルを用いて二軸圧縮試験シミュレーション解析を実施し、各層の物性値を表現できる解析パラメータの検討を行った。その結果、減衰係数・粒子間摩擦係数を変化させて解析を行うことで、任意の粘着力及び内部摩擦角を有する地盤をモデル化することが可能となった。
- (2) トンネル掘削シミュレーション解析
 - 1) 個別要素法にボンディング力を導入し、連続体と不連続体の双方を解析できるプログラムを構築した。これにより、連続体であるコンクリート支保工をモデル化することができ、支保工を有するトンネル掘削シミュレーション解析が可能となった。
 - 2) 供試体モデルと地山モデルの寸法効果を考慮するため、遠心加速度模型実験を参考にした重力加速度を増加させる解析手順を導入した。これにより、供試体モデル破壊時に発生する荷重レベルを地山モデル内に再現することが可能となった。
 - 3) 実際のトンネル崩落事例を参考に、様々なケースの解析を行った。変位分布図によって、視覚的にトンネル崩落の過程を観察することができた。また、沈下量や変位量を算出することで、定量的な評価を行うことができた。そして、減少率という指標を用いることで、各要因が崩落に及ぼす影響について考察することが可能となった。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ24 山岳トンネル工法の調査・設計から施工まで，pp.185-187，2007.
- 2) 日本トンネル技術協会：東北新幹線トンネルの設計施工の研究 牛鍵トンネルWG報告書，2006.
- 3) Cundall, P.A. : A Computer model for simulation progressive, Large scale movement in blocky rocksystem, *Symp. ISRM Nancy France Proc.*, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 4) F.Donze, P.Mora and S.Magnier : Numerical simulation of faults and shear zones, *Geophys.J.Int.* Vol.116, pp.46-52, 1979.
- 5) 久武勝保, 佐藤光平, 伊賀上英伸, 西口和申：トンネル切羽周辺地盤の挙動特性，第38回地盤工学研究発表会，2003.
- 6) 大槻敏：個別要素法による岩盤斜面の3次元崩壊シミュレーション解析，平成19年関西大学修士学位論文，pp.25-52，2007.
- 7) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説，pp.75, pp.105, 2006.
- 8) 西村強, 福田毅, 辻野考治：岩盤斜面安定解析のための2次元個別要素モデル，第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.7-12，2009.

SIMULATION ANALYSIS OF EXCAVATION OF SHALLOW TUNNEL IN MULTILAYERED GROUND BY DEM

Takahito NISHIKI and Harushige KUSUMI and
Mitinao TERADA and Makoto NAKAMURA

It is difficult that to set a clear standard concerning the design, because tunnels are excavated in various geotechnical conditions. So it is required that analytical method that can appropriately reproduce the mechanics behavior on the natural ground. In this study, the purpose of our research is established the analytical simulator in multilayered ground by using DEM. Then, the focus of our research is actual collapse accident of tunnel, and we examined the presence of the collapse by setting conditions of underground water and the invert support, etc. As a result of the simulation, an analysis model has collapsed when underground water exists and non-closing invert as the actual phenomenon.