

関西大学大学院理工学研究科ソーシャルデザイン専攻 学生員 ○錦 崇仁
 関西大学学長 フェロー 楠見 晴重
 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 正会員 中村 真

1. はじめに

2005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¹⁾。この崩落事故の要因は、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、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が、その詳細は明らかにされていない。そこで本研究では、個別要素法によるトンネル掘削シミュレーション解析を行い、地盤内の変形挙動を検討することにより、牛鍵トンネルの崩壊メカニズムの解明を試みた。

2. 個別要素法

個別要素法は、P.A.Cundall²⁾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、その動力学の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。

3. 解析モデルの作成

3.1 多層地盤のモデル化

本研究では、落下法によるパッキングシミュレーションを用いて、解析モデルを作成した。その後、各層毎に粒子を色分けし、崩落箇所の地質条件を反映させた。図-1に解析モデルを示す。

3.2 支保工のモデル化

コンクリートで形成される支保工をモデル化する場合、それらの粒子を結合し、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. Mora³⁾によって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ることで、連続体を表現した。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. 解析パラメータの決定手法

4.1 二軸圧縮試験シミュレーション解析

本研究では地山に関して、二軸圧縮試験シミュレーション解析を実施することにより、各層の粘着力及び内部摩擦角を表現し得る解析パラメータを決定した。

表-1に地盤物性値及び解析結果を示す。

4.2 一軸圧縮試験シミュレーション解析

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、これらの設計基準強度を満たし、コンクリートをモデル化し得るばね定数を求めた。表-2に解析結果を示す。

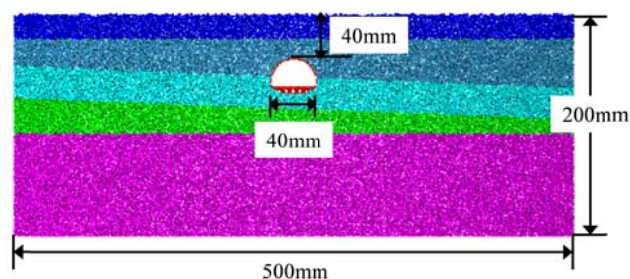


図-1 多層地盤モデル (H=1.0D)

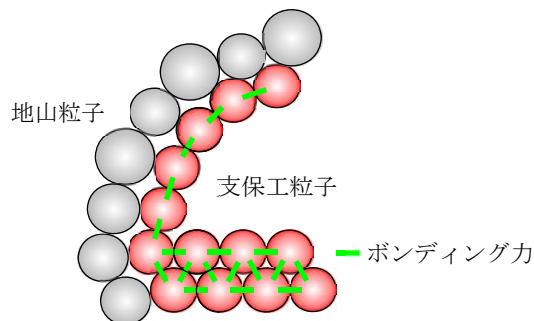


図-2 支保工粒子群の概要

表-1 二軸圧縮試験シミュレーション解析結果

	地盤物性値		解析値	
	c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
ta	34.1	9.6	32.40	10.74
tc-s	18.7	37.5	18.47	37.80
tc-c	8.1	37.1	8.15	38.93
ts	3.4	34.2	3.34	32.19
Nos1	48.0	34.2	48.29	34.32

表-2 一軸圧縮試験シミュレーション解析結果

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

5. 掘削シミュレーション解析

5.1 間隙水圧の計算

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。

5.2 解析条件

表-3に解析条件を示す。Case1が実現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、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った。なお、地下水が存在しない場合は、Case1の条件でも崩落は生じなかった。

5.3 解析結果

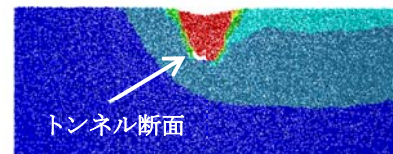
図-3にCase1, Case2の変位分布図を示す。実現現象を想定したCase1ではトンネルが崩落し、インバートを閉合したCase2では崩落が生じなかった。また、土被り $H=1.5D$, $2.0D$ (Case3, Case4) とした場合は、トンネルが変形しているものの崩落には至らなかった。これより、インバートが未閉合であったこと、土被りが小さかったことが崩落の要因として考えられる。

剛性の低いtc-s層及びtc-c層に着目した場合、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

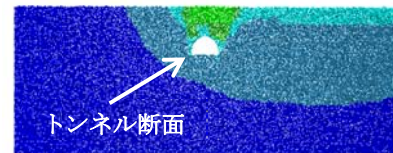
層の粘着力を増加させたCase6では崩落が生じなかった。これらの結果より、tc-c層の剛性が当該規模のトンネルを掘削するには不足していたと考えられる。すなわち、トンネルを掘削する前に補助工法等でtc-c層の剛性を高めていれば、過剰な間隙水圧が作用してもトンネルは崩落しなかったと推測される。

表-3 解析条件

Case	インバート	土被り	tc-s層の粘着力 (kPa)	tc-c層の粘着力 (kPa)
1	未閉合	1.0D	18.47	8.15
2	閉合	1.0D	18.47	8.15
3	未閉合	1.5D	18.47	8.15
4	未閉合	2.0D	18.47	8.15
5	未閉合	1.0D	49.24	8.15
6	未閉合	1.0D	18.47	38.28



Case1



Case2

0.0 10.0(mm)

図-3 変位分布図（変位収束後）

<参考文献>

- 1) 社団法人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
- 2) 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.
- 3) F.Donze, P.Mora and S.Magnier : Numerical simulation of faults and shear zones, Geophys. J. Int., Vol.116, pp.46-52, 1979.