トンネル掘削による地すべり斜面の変位挙動のメカニズムの考察（その 2）

山口大学大学院　学　○藤本崇人　非　田口和也
山口大学大学院　正　中島伸一郎　正　清水則一

1.　はじめに

山岳地帯の多い日本の道路建設では，不安定斜面直下でのトンネル掘削を行うことがある．その際，不安定斜面におけるトンネル掘削は地すべり等を誘発する危険性があり，その対策が重要であるが，地すべり誘発のメカニズムは十分に明かされていない．そこで，本研究では粒状体解析を用いてトンネル掘削による地すべり挙動のメカニズムの解明を目的とする．従来の連続体解析では地すべり挙動を再現できるモデルの構築が困難であるため，筆者らは粒状体解析コード（PFC2D,Ver.3.0,ITASCA 社製）を用いて，そのパラメータの値を調整することでこの問題に取り組んでいる [1]．ここでは，トンネルの掘削方法について検討を行い，解析結果からトンネル掘削と地すべり発生のメカニズムについて考察する．

2.　トンネル掘削による斜面の変位挙動の分析 [2]

図 1 に地すべり斜面にトンネル掘削した事例の縦断面図を示す．地すべりが想定される土塊の上側（B-1），中央（B-2），下側（B-4）の 3 箇所の孔内傾斜計で計測された地山の水平変位計測結果を示す．これより水変位が増加していることから，トンネル掘削が斜面の地すべり挙動に大きく影響を与えていることがわかる．

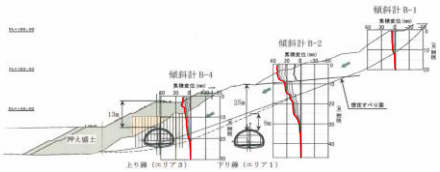


図 1 地すべり斜面の縦断図

3.　数値解析シミュレーション

3.1 解析モデルの作成

トンネル掘削を行うと地すべり挙動が生じる．しかし，従来の連続体解析手法では変位は主に掘削領域に向かって生じる（図 2, 図 3）ため，本研究では地すべり挙動の再現が可能なモデルの構築を行う．はじめに，粒子間強度を 10 MN として水平地山モデル（図 4）を作成し，地盤掘削により斜面を形成する．次に斜面付近の粒子間強度を 0.3 MN に低下させ，限界状態モデル（図 5）を作成する．その後，掘削領域の粒子を消去し，覆工を作りトンネル掘削モデル（図 6）を作成する．また，応力の評価位置を図 7 に示す．なお，解析に用いる他の入力パラメータを表 1 に示す．

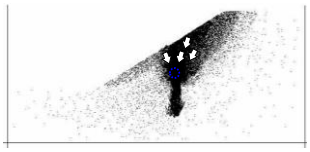


図 2　粒状体解析（従来）

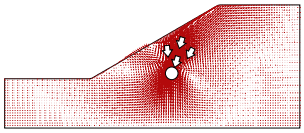


図 3　連続体解析 [1]

図 4　水平地山モデル

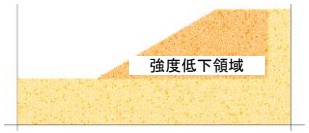


図 5　限界状態モデル

図 6　トンネル掘削モデル

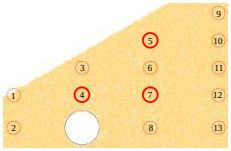


図 7　応力の評価位置

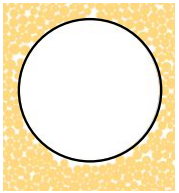


図 8　剛性覆工モデル

図 9　柔性覆工モデル

3.2 トンネル掘削モデル

トンネル掘削モデルとして剛性覆工モデル（図 8）と柔性覆工モデル（図 9）の 2 種類を用いる．まず剛性覆工モデルとは，円形の剛体壁要素を用いて覆工を再現したものである．一方，柔性覆工モデルとは，粒子間を Parallel bond（以下 pb）で面接着したものでトンネルの覆工を再現した．また，本研究では粒状体解析で再現できる垂直縫地に着目し，垂直縫地を施工した場合の効果の検討を行った．

表 1　入力パラメータ

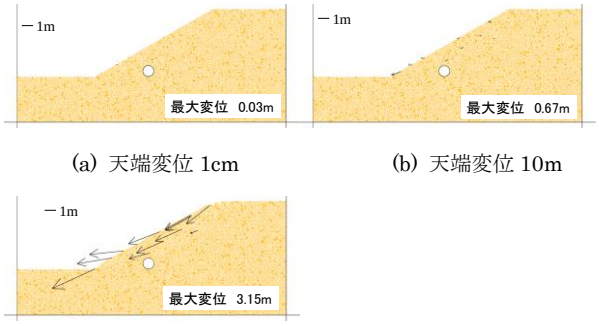
最小粒子半径(m)			0.1
最大粒子半径(m)			0.2
間隙率			0.15
ばね定数 (N/m)	粒子間	垂直方向	5.0×10^8
		せん断方向	2.5×10^8
	壁-粒子間	垂直方向	5.0×10^8
		せん断方向	2.5×10^8
粒子間摩擦係数			0.37
粒子密度(kg/m^3)			2000
ContactBond (MN)	垂直方向強度		10
	せん断方向強度		

4. 解析結果とメカニズムの考察

解析結果を図 10～12 に示す．剛性覆工モデルの解析結果図 10 に着目すると，トンネル掘削時の天端変位を大きくすると変位ベクトルも大きくなり，斜面に沿う変位(地すべり挙動)を確認した．次に，天端変位が 0cm～10cm に至る応力経路を図 11 に示す．図中の点 A は水平地盤から斜面を形成した時の応力，点 B は図 5 に示した限界状態時(地すべりが生じる直前)の応力，点 C はトンネル掘削終了時の応力である．また，点 C′は斜面に強度低下領域を設定しない時(弾性体的挙動を示すケース)のトンネル掘削時の応力状態を示す．なお，図 11 に示す破壊基準線は, 表 1 に示すパラメータを有する粒状体の二軸圧縮シミュレーションより得た巨視的な破壊基準である. 不安定な斜面では地山の応力が破壊基準線付近へと変化し, トンネル掘削により最小主応力が減少して破壊基準線付近を推移し，斜面のすべりが促進される．一方，図 12 に示す柔性覆工モデルでは, 図中の点 B, C は図 11 と同様であるが, 点 C′′は限界状態の斜面に斜面表層から垂直縫地を打設した際のトンネル掘削時の応力状態を表す. 柔性覆工モデルのみでは覆工の崩落が見られるが, 垂直縫地によって崩落は防げる．このとき，応力経路において垂直縫地によって地山の応力低下が免れ, 連続体と同様な経路となっていることが分かる. これが垂直縫地の効果を表すものと考えられる．

5. まとめ・今後の課題

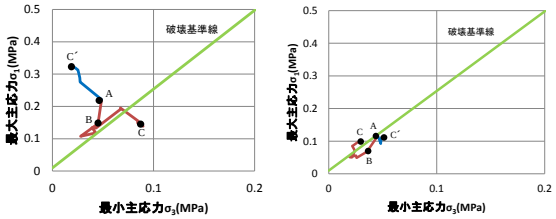
本研究では, 粒子間力を変化させることでトンネル掘削による，地すべり挙動を再現できる可能性を示した．そのメカニズムは，応力が破壊基準線付近を推移し，トンネル掘削後も破壊基準線付近を推移する応力経路から, 地すべりの発生が説明できるものと考えられる．また，垂直縫地を行うことで斜面の変位が抑制され, 補強工としての効果を検討することができた．今後の課題として，覆工の剛性の相違による斜面の挙動の特徴や, 補強工の効果とそのメカニズムの検討を行うことを考えている．



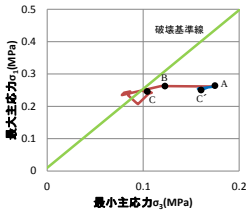
(a) 天端変位 1cm　(b) 天端変位 10m

(c) 天端変位 30cm

図 10 剛性覆工モデル(一括掘削)―変位ベクトル図



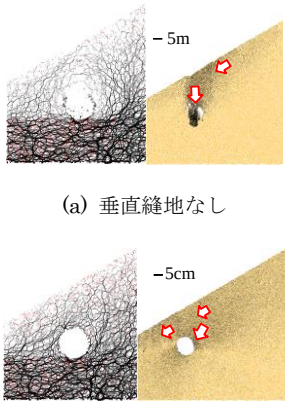
(a) 応力経路④　(b) 応力経路⑤



A	斜面形成時
B	斜面限界状態
B～C	トンネル掘削時挙動
A～C′	トンネル掘削時挙動(弾性状態)

(c) 応力経路⑦

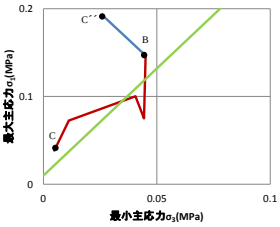
図 11 剛性覆工モデル(逐次掘削)―応力経路



(a) 垂直縫地なし

(b) 垂直縫地あり

B	斜面限界状態
B～C	垂直縫地なし
B～C′′	垂直縫地あり



(a) 応力経路④

(pb の接着力：1.21MPa)

図 12 柔性覆工モデル―粒子間力図，変位ベクトル図，応力経路

参考文献

1) 今富公太，清水則一，平野宏幸： トンネル掘削による地すべり斜面の変位挙動のメカニズムの考察，土木学会第 64 回年次学術講演概要集，III383,pp.765-766，2009.9.

2) 田山聡，竹國一也，神澤幸司，平野宏幸：小土被りの大規模地すべり地帯を情報化施工で突破一第二東名高速道路　引佐トンネル一，トンネルと地下，第 36 号巻 3 号，pp.207-218，2005.