

# 数値解析による地すべりとトンネルの影響評価

藤澤和範\* 奥田慎吾\*\* 九田敬行\*\*\*

## 1. はじめに

地すべりとトンネルの離隔距離は、トンネル掘削によるゆるみの影響を考慮してすべり面から2.0D以上（Dはトンネルの内径）離すことが目安とされている<sup>1)</sup>。しかし、地すべりは規模や運動様式がそれぞれ異なり、また地すべりとトンネルの位置関係や周辺の地山状況によっても相互影響は変化することが想定される。そこで、数値解析を用いて、地すべりとトンネルの位置関係や基盤の地山物性値を変化させたパラメトリックスタディを行い、地すべりとトンネルの相互影響を評価する手法について検討した。なお、本研究は民間企業5社との共同研究で実施したものである<sup>2)</sup>。

## 2. 数値解析手法の概要

検討に用いた5種類の数値解析手法を表-1に示す。弾塑性有限要素法や個別要素法など代表的な解析手法を網羅している。適用した構成則はDrucker-pragerモデルとMohr-Coulombモデルであり、いずれも代表的な弾塑性モデルである。マニフォールド法と個別要素法ではすべり面を分離可能な不連続面としており、他の解析手法では連続面としている。

地すべりの下をトンネルで掘削した事例において、実際に観察されたトンネル坑内および地すべりの観測結果と5種類の解析手法の解析結果を比

較して、それぞれの解析手法の適用性を確認した。その結果、地山の物性値や形状を適切に設定することにより、トンネル掘削に伴って発生した地山の変形を概ね再現することができた。

## 3. 解析方法

### 3.1 解析モデル

パラメトリックスタディに用いた解析モデル図を図-1に、地山物性値を表-2に示す。地盤は地すべり土塊・基盤1・基盤2の3層から成り、基盤1については、強・中・弱の3段階の物性値を設定した。本検討では、地すべりとトンネルの相互影響を評価することを目的としているため、何らかの誘因によって地すべりが発生する可能性が高い状態（安全率が1.0に近い状態）に設定している。トンネルの位置は、地すべり土塊の頭部・中央部・末端部の3ケースとし、それぞれすべり面から0.5D・1.0D・1.5D・2.0D・3.0Dの5ケースの離隔距離を設定した（以降の検討ではD=10mとしている）。境界条件は、側面を鉛直ローラー、底面を固定とした。また、斜面勾配30°を基本モデルとして、斜面勾配が20°と45°の解析モデルを作成した。

### 3.2 解析の手順

解析の手順は、まずトンネル掘削前の状態で自重解析を行い、次にトンネル掘削相当部分の応力を解放してトンネル掘削を模擬している。トンネ

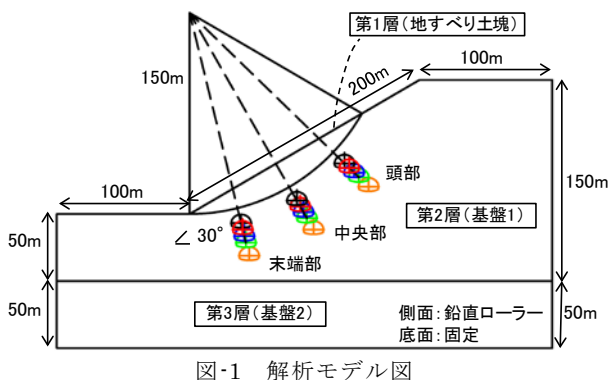


図-1 解析モデル図

表-1 数値解析手法一覧

解析手法	弾塑性有限要素法		マニフォールド法	有限差分法	個別要素法
	有限要素法に属する解析法			差分法に属する解析法	
手法区分	有限要素法に属する解析法			差分法に属する解析法	
構成則	Drucker-Prager	Mohr-Coulomb	Drucker-Prager	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
コード名	ISNA	DIF	MF	FLAC	UDEC
すべり面	連続	連続	不連続	連続	不連続

表-2 地山物性値

	単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	ポアソン比 $\nu$	変形係数 $E$ (MN/m <sup>2</sup> )
第1層	18	20	25	0.35	50
第2層	22	100	30	0.3 <sup>*1</sup> 0.35 <sup>*2</sup>	100
		150			120
		200			150
第3層	22	500	40	0.3	250

\*1 Mohr-Coulomb降伏基準を用いた場合  
\*2 Drucker-Prager降伏基準を用いた場合

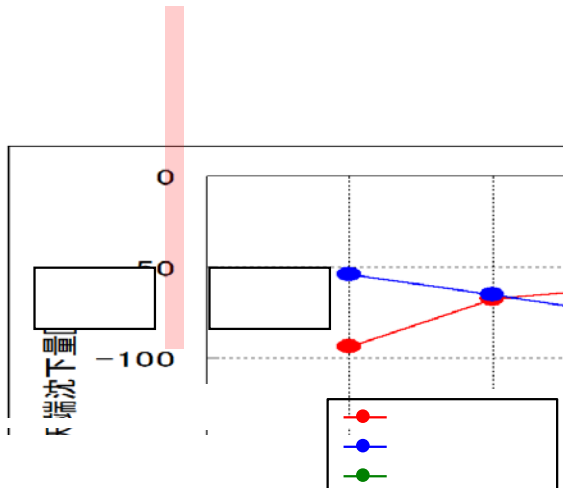


図-2 離隔距離と土被り厚の影響を分離した解析結果

掘削時の応力解放力は、吹付けコンクリートやロックボルト等の支保を考慮した結果、無支保の場合の応力解放力の70%とした。

以上の条件で解析を行い、地すべりとトンネルの離隔距離が変化するようにして、トンネル掘削時に発生する地すべり土塊やトンネル内空断面の変位がどのように変化するか着目するとともに、解析領域内の塑性域やひずみの発生分布状況を勘案して総合的に評価を行った。

### 3.3 解析結果の予備検討

トンネル掘削時に発生する変位量は、地すべりとトンネルの離隔距離の影響と、トンネルの土被り厚による応力解放力の影響を合計した結果と考えた。そこで、簡易な解析モデルを作成して、離隔距離の影響と土被り厚の影響を分離した検討を行った。その結果、離隔距離の影響による変位量と土被り厚の影響による変位量の合計が、分離せずに解析したときに発生する変位量と概ね一致することを確認した(図-2)。解析結果として得られる変位量のうち、土被り厚の影響で発生している変位を低減できれば、離隔距離の影響を評価しやすくなると考えられる。

## 4. 解析結果

### 4.1 トンネル位置による影響

パラメトリックスタディによる解析結果の一例として、有限差分法を用いて、基盤1の物性値が弱、トンネル位置が末端部、中央部、頭部の塑性域 - 変位ベクトル図を図-3,4,5に示す。トンネル位置が末端部では(図-3)、地表面の変位ベクトルは同じ向きを示し、末端ほど大きな変位が発生

した。1.5D以上の離隔距離をとると、トンネル周辺で発生する塑性域がすべり面に到達しないことを確認した。トンネル位置が中央部では(図-4)、地表面の変位ベクトルの向きは末端部と比べて複雑になり、地すべりの中央付近ではトンネルに引きずられる傾向が見られた。3.0D以上の離隔距離をとると、トンネル周辺で発生する塑性域がすべり面に到達しないことを確認した。トンネル位置が頭部では(図-5)、地すべりの頭部付

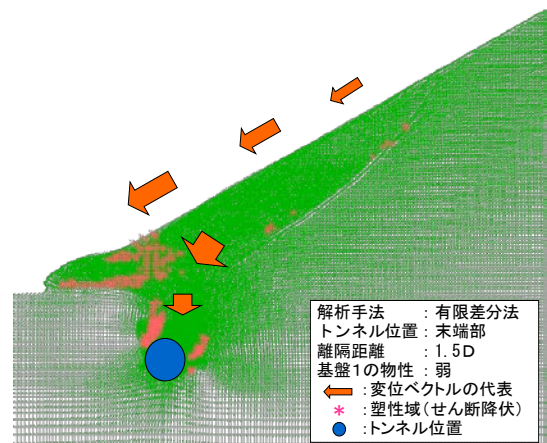


図-3 塑性域 - 変位ベクトル図(末端部)

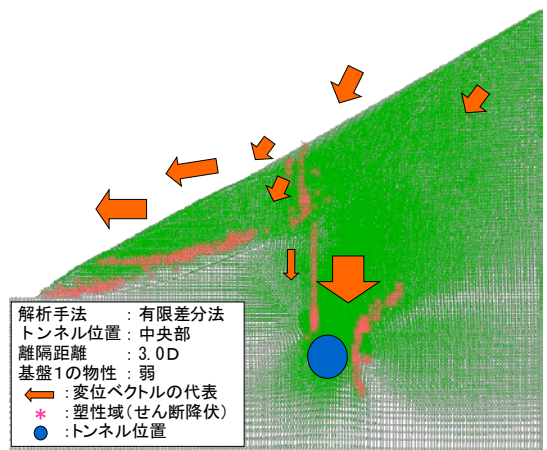


図-4 塑性域 - 変位ベクトル図(中央部)

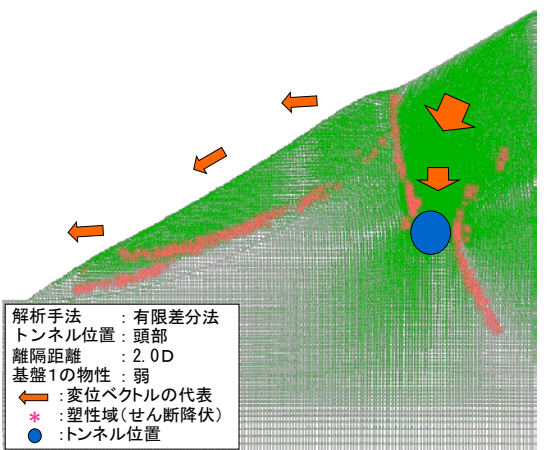


図-5 塑性域 - 変位ベクトル図(頭部)

報文

近ではトンネルに引きずられる傾向が見られた。また、離隔距離を変化させたときに斜面全体の変形は異なる傾向を示した。

4.2 斜面勾配の影響

個別要素法を用いて、トンネル位置が中央部、離隔距離が0.5D、基盤1の物性値が強、斜面勾配が20°、30°、45°の最大せん断ひずみの分布を図-6に示す(ただし、地すべり土塊の物性値は斜面勾配ごとに異なる)。図中では、トンネル掘削時に1.5%以上のひずみが発生した箇所を着色している。

トンネル周辺のひずみ分布は、斜面勾配が大きくなるにつれて、鉛直方向からの傾斜が大きくなる分布傾向を示した。これは、トンネル掘削前の初期応力が斜面勾配に沿った方向に傾斜しており、その影響を受けてトンネル掘削時のひずみ分布が異なっていると考えられる。地すべり土塊内のひずみ分布は、トンネルの直上ではなくやや斜面下方に発生しており、斜面勾配30°ではすべり面に沿って斜面下方に、斜面勾配45°ではさらに斜面上方にひずみが発生した。特に斜面勾配が45°の場合は、トンネル周辺と地すべり土塊周辺のひずみが干渉し、ひずみが大きく分布する結果となっている。

4.3 離隔距離の評価

個別要素法を用いて、トンネル位置が中央部、基盤1の物性値が強、離隔距離が0.5D~3.0Dの最大せん断ひずみの分布を図-7に示す。先ほどと同様、トンネル掘削時に1.5%以上のひずみが発生した箇所を着色している。離隔距離が1.5D以上ではトンネル周辺のひずみと地すべり土塊内のひ

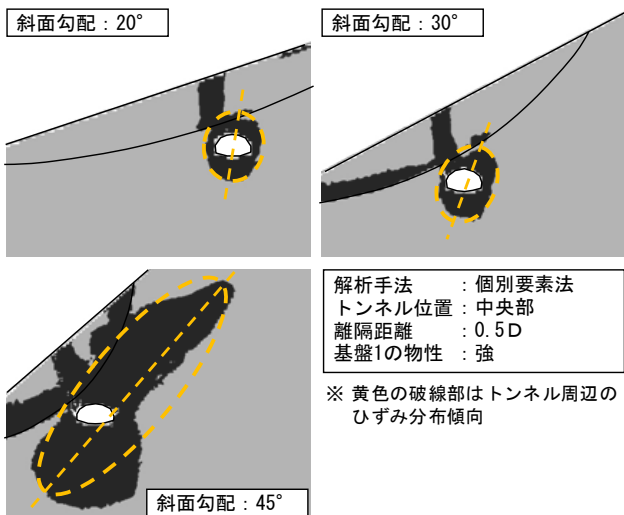


図-6 最大せん断ひずみ分布図(斜面勾配)

ずみが独立した分布となり、1.0D以下ではつながっている。離隔距離が大きくなるにつれて相互の影響が小さくなっていることが読み取れる。

図-8は、トンネルの天端沈下量、地表面の最大鉛直変位量、地表面の最大水平変位量をそれぞれ土被り厚で除したものを指標として、離隔距離との関係を示した図である。離隔距離が2.0D以上では概ね平衡状態を示し、1.5D以下では離隔距離が小さくなるにつれて変位量が大きく増加する傾向が見られた。

本ケースでは、解析領域内のひずみ分布や各指標と離隔距離の関係から、離隔距離が2.0Dより小さくなると地すべりとトンネルの相互影響が大きくなり危険であると判断した。

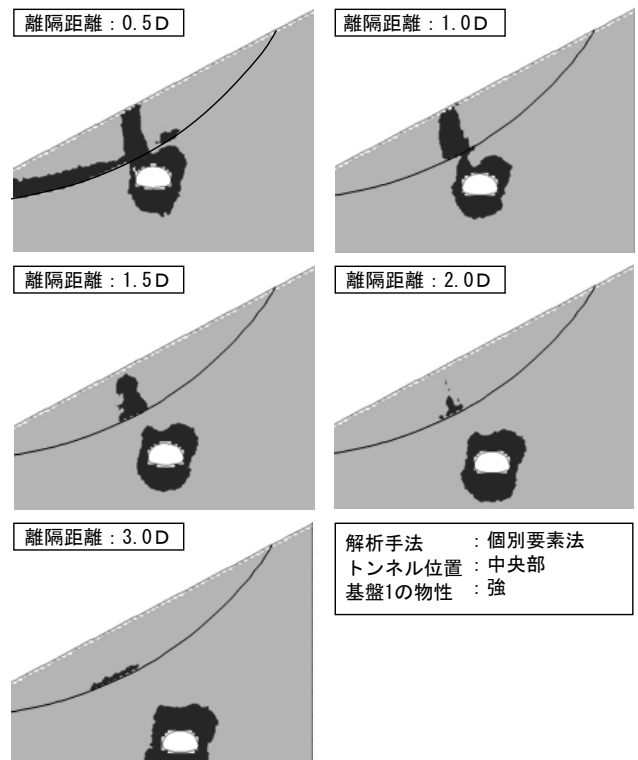


図-7 最大せん断ひずみ分布図(離隔距離)

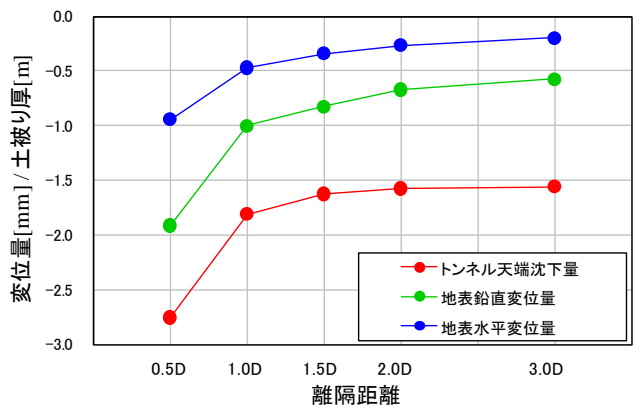


図-8 各指標と離隔距離の関係

#### 4.4 パラメトリックスタディのまとめ

斜面勾配30°、基盤1の物性値が強のケースの各解析手法による離隔距離の評価をとりまとめたものを図-9に示す。図中の赤の着色区間を危険と評価している。本ケースでは、各解析手法による評価のばらつきは、概ね1.0Dの範囲に収まることが確認できた。また、各解析手法で変形機構に大きな差異は見られなかった。基盤1の物性値が弱のケースや斜面勾配45°のケースでは、設定した離隔距離3.0Dの中では評価できない結果となった。

パラメトリックスタディの条件の違いによって、以下のような傾向が得られた。

- (1) 基盤1の物性値が弱いほど、大きな離隔距離が必要となる。
- (2) トンネル位置が末端部から頭部へ向かうほど、やや大きな離隔距離が必要となる傾向があるが、明確な違いは見られない。ただし、変形の傾向は異なる。
- (3) 斜面勾配が急勾配になるほど、大きな離隔距離が必要となる。

物性	トンネル位置	解析手法	離隔距離					
			0.5D	1.0D	1.5D	2.0D	2.5D	3.0D
強	末端部	有限要素法(DP)	赤	赤	赤	青	青	青
		有限要素法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
		有限差分法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
		マニフォールド法(DP)	赤	赤	赤	青	青	青
		個別要素法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
	中央部	有限要素法(DP)	赤	赤	赤	青	青	青
		有限要素法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
		有限差分法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
		マニフォールド法(DP)	赤	赤	赤	青	青	青
		個別要素法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
	頭部	有限要素法(DP)	赤	赤	赤	青	青	青
		有限要素法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
		有限差分法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青
		マニフォールド法(DP)	赤	赤	赤	青	青	青
		個別要素法(MC)	赤	赤	赤	青	青	青

※ MC: Mohr-Coulomb降伏規準  
DP: Draucker-Prager降伏規準

図-9 安全離隔距離の評価(斜面勾配30°、物性値強)

#### 5. おわりに

本稿では、数値解析手法を用いて地すべりとトンネルの相互影響を評価する方法を検討してきた。その結果、検討に用いた解析モデルにおいて、定量的な評価が可能であることを示した。また、パラメトリックスタディの結果から、各条件を変化させた際の地すべりとトンネルの相互作用に関する機構を示した。

こうした評価は、主として、適切な路線を選定する道路計画段階で有効な手法と考えている。さらに、解析結果はその後の工程でも有意な情報を与えてくれる。例えば、地すべりとトンネルの相互の影響が大きくなった際の変形機構をあらかじめ捉えておくことで、実際に異常が発生したときには早期発見が可能である。また、変形が発生しやすい箇所を中心に監視を行うなど、施工中や施工後の計測計画にも活用できる。

今後は、実際の現場における複雑な地山条件、トンネルの構造、施工条件、トンネル掘削時の周辺地山の変形機構などを反映した解析モデルを構築し、トンネル掘削時に観察されるデータと対比することで、より適切な解析モデルの構築方法や解析結果の評価方法を検証していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 財団法人高速道路調査会：トンネル坑口周辺の地すべり・崩壊対策に関する研究報告書、337p、1981
- 2) 独立行政法人土木研究所、基礎地盤コンサルタンツ株式会社、応用地質株式会社、鹿島建設株式会社、日本工営株式会社、川崎地質株式会社：トンネルへの地すべりの影響評価手法に関する共同研究報告書、準備中

藤澤和範\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所土砂管理  
研究グループ地すべり  
チーム 上席研究員  
Kazunori FUJISAWA

奥田慎吾\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所土砂管理  
研究グループ地すべり  
チーム 交流研究員  
Shingo OKUDA

九田敬行\*\*\*



ライト工業株式会社(前  
独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所土砂管理  
研究グループ地すべり  
チーム 交流研究員)  
Takayuki KUDA