トンネルに近接した地すべりの影響に関する数値解析的検討

NUMERICAL ANALYSIS TO EXAMINE THE EFFECT OF LANDSLIDES ON TUNNELS

太田敬一*・倉岡千郎*・武士俊也** Keiichi OTA, Senro KURAOKA and Toshiya TAKESHI

In the vicinity of known landslide zones, tunnel routes should be designed such that the distance between the landslide and the tunnel is sufficient to avoid adverse impact of the landslide on the tunnel. We modeled the ground surrounding the tunnel and the landslide using numerical analysis to evaluate the quantitative effect of the tunnel offset from the landslide on ground stresses and displacement of the ground surface and tunnel crown. We also considered the effects under different ground conditions and examined two different cases, when the landslide occurs before tunnel construction and when the landslide movement occurs after tunnel construction. We found that the required offset distance between the landslide and the tunnel depended on whether the landslide occurred before or after tunnel excavation and the characteristics of the site conditions. We conclude that the method of setting the offset distance needs to consider the conditions at each site.

Keywords : Landslides, Tunnel, Offset distance, Numerical analysis

1. はじめに

山間部に計画されるトンネルの路線選定に際しては、事 前調査結果に基づいて地すべりなど、施工時および施工後 の供用時に問題となり得る箇所を避けながら概略位置が決 定される。一方、やむを得ずトンネルが地すべりに近接す る場合は、設計や施工上の問題点を把握するため追加調査 を実施し、それに基づき施工可能かどうかを検討し、その 結果、軽微な路線変更の処置が取られる場合がある¹⁰。そ の際トンネルと地すべりとの距離(離隔)を適切に設定す る必要があるが、現行の技術基準では既存の事例や解析を 踏まえ、地すべりの影響がトンネルに及ばないよう、かつ 地すべりの安定性が確保されるよう設定される。

旧道路公団では、トンネルの施工に伴う地すべりの問題 を検討するため、地すべりによりトンネルに変状が発生し た事例を収集している²⁰。それら収集結果から、少なくと も地すべり直下約 20m 以内であれば、トンネル計画時に地 すべり対策について十分検討する必要があるとの知見を示 している³⁰。

これら既往の知見は現場のデータに基づく貴重なもので、 現行の技術基準はこれらの知見などを背景としている。こ の点を踏まえると、個々の現場の条件を技術基準で想定し ている条件に照らし、場合によっては現場固有の条件を考 慮した検討が必要であると言える。それは地すべりがトン

** 独立行政法人土木研究所 土砂管理研究グループ 地すべりチーム

ネルに近接する場合、トンネル掘削に伴い発生する緩みと 地すべりによるトンネルへの影響は、トンネル周辺の地盤 条件や地すべりの安定度によっても異なるからである。し かしながら現在、それら条件を考慮した検討手法は確立さ れていない。したがってそれらの条件なども考慮に入れ、 トンネルと地すべりの離隔の違いによるトンネルへの影響 を検討できる手法により、計画段階で把握しておくことは、 トンネルルートの計画上、不可欠である。

そこで本稿では、まずトンネルと地すべりの近接度に応 じたトンネルへの影響を検討し、地盤条件の応じた適切な 離隔の設定方法を示すため、モデル斜面を用いた数値解析 を行い、トンネルと地すべりの離隔の違いごとの結果を整 理し、設定した地盤条件下での適切な離隔を示した。なお これらは、土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチー ムと弊社を含む民間5社との共同研究の成果(マニュアル⁴⁾) の一部である。

次にマニュアルで想定している地すべり変動の条件につ いて、マニュアルとは異なる条件を設定した解析を行い、 マニュアルで示した成果と比較した。その結果、離隔の検 討に際しては、その現場の条件に応じて解析モデルを設定 する必要があること、その設定は地すべりの変動機構に依 存するため、地すべりの変動機構の解析には、現地におい て十分な調査を行い検討することが必要であることを示し た。

以上の2つの検討内容の順に以下示す。

^{*} 中央研究所 総合技術開発部

2. モデル斜面を用いた離隔距離の検討

本検討にて用いた数値解析手法の概要、解析条件、および解析結果の整理方法を以下に示し、解析のフローを図ー 1に示した。



図-1 解析のフロー

(1)検討に用いた数値解析手法について

地すべりのような必ずしも地盤の性状が良好でなく、現 場固有の条件を有する箇所に近接してトンネルを掘削した 場合のトンネルへの影響を評価するには、地すべりおよび トンネル周辺の地質状況を把握し、それらの工学的な地盤 特性を評価したうえで、トンネル掘削に際し地すべりの影 響を考慮できる手法で検討することが考えられる。

有限要素法などに代表される数値解析手法は地盤の変形 などをモデル化できる手法であり、トンネルを対象とし た解析事例はこれまでに数多く示されている。そこで本 稿では、数値解析手法の1つである個別要素法(Distinct Element Method、以下 DEM)を用いてトンネル周辺の地 盤条件、地すべりに対するトンネルの配置をパラメータと した感度解析を行い、トンネル掘削に伴うトンネル天端沈 下量や、地すべり土塊の変位、およびトンネル周辺と地す べり土塊までの地盤のひずみの分布結果から、地すべりに 近接してトンネルを掘削した場合のトンネルへの影響を示 した。

使用した DEM のプログラムコード UDEC (開発元、 Itasca Consulting Group Inc.) は、岩盤の亀裂、地盤の不 連続面に規制されて生じる崩落、転倒や落下、すべりの開 始から停止に至る大変形挙動をシミュレートできる他、有 限要素法に代表される連続体モデルのように、亀裂や不連 続面に沿った微小なすべり挙動、岩盤や地盤を掘削した後 の微小な変形挙動などもシミュレートできる。

UDEC では岩塊や地盤をモデル化するためのブロック要素、その間の亀裂や不連続面を表すジョイント要素が用意

されており、さらにブロック要素の内部を差分法に基づく 差分要素で分割設定することができるため、有限要素法と ほぼ同程度に岩塊や地盤の変形、応力を求めることができ る。本検討では地すべり土塊およびトンネル周辺の地盤を ブロック要素でモデル化し、そのブロック要素間にあるジョ イント要素を地すべりのすべり面として設定した。

(2) 数値解析条件の設定

一般的に地すべりは三次元的な形状を呈しており、トン ネルとの位置関係を三次元的にモデル化して解析する方が より実際に忠実な解析検討となるが、本検討はトンネル周 辺の地盤条件と地すべりとの配置を変化させた場合のトン ネルへの基本的な影響を検討すること主としているため、 二次元解析とした。解析に用いたモデル形状を図ー2に示 す。モデルは地すべり土塊、トンネル周辺の地盤(基盤1)、 およびその下部層(基盤2)の3つの物性区分を有する斜 面勾配 30 度からなるモデルである。これに対しトンネルの 位置は、地すべり土塊の末端部、中央部、頭部の3カ所を 想定し、それぞれすべり面との離隔を 0.5 (D)、1.0 (D)、1.5 (D)、2.0 (D)、3.0 (D) の5通り設定した (D はトンネル 掘削幅)。解析に用いた地盤の物性値を表-1に示す。地す べり土塊の物性値は崖錘程度、トンネル周辺の物性値は旧 日本道路公団で定める地山等級 DII、E相当の物性値を参 考として設定した5。地盤の構成則は弾完全塑性を適用し、 モールクーロンの破壊基準により降伏判定を行った(以下 弾塑性解析)。なお地下水は考慮していない。トンネルの位 置、離隔、物性値の組み合わせにより設定した解析ケース は30ケースである。



図-2 解析のモデル形状

表-1 物性値一覧

		単位体積重量	粘着力	内部摩擦角	ポアソン比	変形係数
		$\gamma t (kN/m^3)$	c[kN/m²]	φ(°)	ν	E[MN/m ²]
地すべり土塊		18.0	20.0	25.0	0.35	50.0
基盤1	地山等級:E	22.0	100.0	30.0	0.30	100.0
	地山等級:DⅡ		200.0			150.0
基盤2		22.0	500.0	40.0	0.30	250.0

また通常、トンネル支保工をモデル化した二次元解析で 用いられる掘削解放率は、支保工配置前に30~50%の値 を設定し、支保工配置後に残りの掘削解放率を設定するこ とが一般的である⁶⁰。本検討では支保工をモデル化せず、 支保工の掘削解放力の分担率を30%とすることで支保工の 効果をモデルに見込むこととし、掘削解放率を70%と設定 した。なおこの掘削解放率は本検討に限り便宜的に設定し たものである。

解析手順として、まずトンネル掘削前のモデルに自重を 与え初期地山応力を設定した。その際、地すべりのすべり 面の強度は自重の段階で破壊が生じないよう高めの値を設 定し、それ以降の解析ステップでは**表-2**に示す粘着力、 内部摩擦角を設定した。この値はすべり面に作用する垂直 応力とせん断応力から求められる抵抗力とすべり力の比(安 全率)が1.1を上回る程度の強度である。なおこのすべり 面の強度はトンネル掘削以後、変化しないものとした。

表-2 すべり面の粘着力と内部摩擦角

	粘着力	内部摩擦角	
	c[kN/m²]	φ(°)	
すべり面	20.0	25.0	

(3) 解析結果の整理方法

本検討のように、地すべりがトンネルに近接した場合の 解析では、トンネルの掘削に伴いトンネル周辺および地す べり土塊に緩みが生じ、離隔の違いは解析結果の変位量な どに反映される。そこで本検討では、解析結果から離隔ご とに得られるトンネル天端沈下量、地すべり土塊表面の最 大変位を抽出し、これを離隔との関係で整理した。

なおトンネル掘削に伴い得られる解析結果の一つである、 例えば天端沈下量には、地すべりとの離隔の影響による変 位と、トンネル深度の影響による変位が含まれる。地すべ りとの離隔の影響による変位は、地すべり土塊の影響を受 けた変位であり、離隔が小さいとその影響が大きくなり、 離隔が大きいと影響は小さくなる。一方、トンネル深度の 影響による変位は、トンネルの土かぶりの大きさの影響を 受けた変位であり、トンネルの深度が浅いとその影響は小 さく、深度が深いと影響は大きくなる。土かぶりが大きい 程トンネル周辺の初期地山応力が大きく、掘削時に設定さ れる解放力が大きくなるため、変位量は大きくなる。この ように天端沈下量の他、解析で得られる他の変位について も上記の離隔とトンネル深度両方の変位を含んだものであ る(図-3)。



ここで本検討の目的である、地すべりが近接した場合の トンネルへの影響検討という点を踏まえると、解析結果の 変位から離隔の影響たけを抽出して評価する必要がある。 そこでトンネルの配置、離隔ごとに得られるトンネル天端 沈下量、地すべり土塊表面の最大変位をトンネルの土かぶ りで除して無次元化の値とし、離隔との関係を整理した。

その他、トンネル掘削に伴いトンネル周辺に生じるひず みの分布の違いなどからも離隔の影響を評価した。

3. 解析結果

(1)トンネルの位置が地すべりの「中央部」にある場合

図-4にトンネル周辺の地盤の物性値が地山等級 D II 区 分の場合で、トンネル掘削後にトンネル天端で生じた鉛直 変位、地すべり土塊地表面で生じた水平、鉛直変位の最大 値に対し、離隔との関係を示す。前述の通り、各変位はト ンネルの土かぶりで除している。図-4より、離隔が 0.5(D) や1.0(D)の場合は各変位量の変化割合は急激に変化し、 離隔がおおむね 2.0 (D) 程度となると変化割合は小さくなることが認められる。

一方、トンネル周辺の物性値が E 級相当の場合の各変位 量と離隔の関係を図-5に示す。この場合、離隔が 3.0(D) の場合でも各変位量の変化割合は一定値に収斂する傾向を 示していない。



図-4 離隔と各変位量との関係







図-6、図-7にはそれぞれのケースにおけるトンネル 掘削後の最大せん断ひずみ(以後、単に「ひずみ」と称する) の分布を示す。条件ごとの相対的な違いを把握しやすいよ うに、例として1.5%以上の領域を着色している。地山等 級DII区分の物性値の場合は離隔0.5(D)にてトンネル周 辺および地すべり土塊内に1.5%以上のひずみが分布して いるが、離隔1.5(D)より大きいケースでは地すべり土塊 にはほとんどひずみが分布していない。一方、地山等級E 区分の物性値の場合は、今回扱ったいずれの離隔でも地す べり土塊中にひずみが分布している。なお離隔が大きくな るに伴いひずみの分布は徐々に大きくなっているが、これ は解析結果の整理方法のところでも示したように、離隔が 大きくなるに伴いトンネルの土かぶりも大きくなるという、 トンネル掘削深度における応力の大きさに起因したもので ある。



図-6 トンネル掘削後の最大せん断ひずみの分布 (1.5% 以上を着色 地山等級 D IIの物性値の場合)



図-7 トンネル掘削後の最大せん断ひずみの分布 (1.5% 以上を着色 地山等級 E の物性値の場合)

(2)トンネルの位置が地すべりの「末端部」「頭部」にある 場合

「中央部」の場合と同様に、トンネルが地すべりの「末端部」 と「頭部」に配置した場合の、トンネルの天端沈下量、地 すべり土塊地表面で生じた水平、鉛直変位の最大値に対す る離隔との関係を図-8、9に示す。また離隔 0.5 (D) と 3.0 (D)の場合の1.5%以上のひずみの分布を図-10、11に示す。

トンネルの位置が地すべりの「末端部」の場合、地盤物 性値の違いに関わらず各変位量の変化割合は、離隔 2.0 (D) 程度でおおむねー定値で推移する傾向を示している(図-8上、9上)。トンネルの位置が地すべりの「頭部」の場合 は、地山等級 E 区分の物性値の場合において、離隔 3.0 (D) でも一定値に収斂する傾向は見られない(図-9下)。この 場合のひずみの分布を見ると(図-10、11)、離隔 3.0 (D) の場合でもひずみは地すべり土塊に向かって分布しており、 トンネル掘削は地すべり土塊へ影響していることが示され ている。





図-9 離隔と各変位量との関係

(上:「末端部」、下:「頭部」、地山等級:E)



図-10 トンネル掘削後の最大せん断ひずみの分布 (「末端部」、1.5% 以上を着色 左列:地山等級 D II の物性 値の場合、右列:地山等級 E の物性値の場合)



図-11 トンネル掘削後の最大せん断ひずみの分布 (「頭部」、1.5% 以上を着色 左列:地山等級 D II の物性値 の場合、右列:地山等級 E の物性値の場合)

以上のトンネルの位置と物性値ごとに、離隔との関係を まとめると次の通りである。

- トンネル周辺が地山等級 D Ⅱ 程度の物性値の場合は、 トンネルと地すべりの位置関係に依らず、離隔 2.0 (D) 程度以上になると各変位量は一定値を示す。現行の技 術基準によれば、離隔の目安としてトンネル掘削幅:
 D に対して離隔を 2.0 (D) 以上確保することが示され ており^{7),8)}、本検討結果で一定値を示す離隔とこの目 安の離隔は整合している。
- 一方、トンネル周辺が地山等級 E 程度の物性値の場合でトンネルの位置が地すべりの「末端部」にある場合は、 離隔 2.0 (D) 程度以上で各変位量が一定値を示す傾向 となる。トンネルが地すべりの「中央部」「頭部」に位 置する場合は、離隔 3.0 (D) でも一定値に収斂する傾 向は見られない。

以上の結果から、現行の技術基準で目安とされている離 隔2.0(D)以上において、相互の影響が見られなくなる場 合もあるが、地盤条件とトンネルの位置によっては離隔2.0 (D) 以上でも影響範囲と考えた方がよい場合があることが 示された。なお本稿で示す地すべり土塊の挙動は、すべり面 に沿った不連続なすべり挙動よりも主にトンネル掘削面から すべり面を通じ地すべり土塊内部へ向かった連続的な変形 に伴う地すべり土塊自身の変形によるものであり、ここで 示した解析結果はそのような変形機構に基づくものである。

トンネル施工後に地すべりが変動した場合のトンネ ルへの影響検討

本稿冒頭でも一部示したが、地すべりに近接してトンネ ルを計画する際、以下の2点へ留意してトンネルの位置を 決定する必要がある。

- 地すべり変動があるところでトンネルを掘削した場合、掘削の影響が地すべりへ及ばないようにすること
- ② 地すべり変動が発生した場合、トンネルへ影響しないようにすること

前章までの検討方法では上記①に対し、地すべり変動を 有するところにトンネルを掘削した場合を想定し、トンネ ルへの影響を検討している。これは現地の条件に当てはめ れば、トンネル掘削前に地すべりの存在やすべり面に沿っ たすべり挙動が見られることを想定している。この場合の 検討に際しては、トンネル掘削前の解析モデルに地すべり を設定し、その後、トンネルを掘削しトンネル天端の沈下 量などの変位を得ることになる。ここで得られた変位は、 トンネル掘削前に地すべりを設定しているため、地すべり 変動による変位はほとんど含まれず、その大部分はトンネ ル掘削に伴い、掘削部分が有していた荷重が掘削解放力と なって作用した結果生じた変位である。図-12はトンネル 掘削後に生じた変位の分布である。



図-12 トンネル掘削後の変位分布

地すべり変動による変位も含まれているようにも見える が、移動層が一体となって斜面下方へ移動する様子は見ら れず、地すべり変動によるトンネルへの影響はほとんど無 い。

一方、②のようにトンネル掘削後に地すべり変動が発生 した場合のトンネルへの影響は、地すべり変動の前にトン ネルを配置し、トンネル配置後に地すべり変動が発生した 場合の解析を行うことになる。これを現地の条件に当ては めれば、トンネルの配置の検討の際は潜在的な地すべりの 存在は確認されているものの、トンネル施工時点では地す べり変動は無いが、トンネル供用後に地すべり変動が発生 するような場合となる。

すでに前章までで①に関する検討を実施しているため、 ここでは、地すべり変動によるトンネルへの影響という観 点から検討すべく、トンネル掘削後に地すべり変動が発生 する場合を想定した検討を行った。

(1) 検討方法

地すべりの変動によるトンネルへの影響を検討するため、 図-13に示すようにトンネルと地すべりの離隔距離を6通 り設定し、トンネル設置後に地すべりを発生させ、トンネ ルの天端に生じる沈下量に基づいて解析結果を評価するこ ととした。解析に用いた物性値は、トンネル周辺の物性値 は地山等級 DII相当の物性値とし、その他は表-1に示す 通りとした。



図-13 解析に用いた形状の設定

(2) 検討結果

図-14はトンネル天端に生じる沈下量について、地すべ り発生後にトンネルを配置した場合と、トンネルを配置し た後に地すべりを発生させた場合を示したものである。な おトンネル天端の沈下量は、共にトンネル支保工設置後に 発生する変位量を対象にしている。これは施工中に計測で きる変位を対象にしたためである。

図-14に示した解析の結果から、離隔距離 5m を除き、 離隔距離が大きくなるに伴い天端の沈下量は大きくなって いること、トンネル掘削後の地すべりの変動を想定した場 合は、トンネル掘削前に地すべりの変動を想定した場合よ りもやや大き目の沈下量が発生していること、離隔距離が 大きくなる程、それら変位の差は小さくなっていることな どが示されている。なお、これら変位の差についての考察 は後述した。



また図-12に示したトンネル掘削後の変位に対し、トン ネル掘削後の地すべり変動で生じた変位の分布を図-15に 示す。図-12に比較して、地すべり移動層が斜面下方へ移 動していること、その影響がトンネルへ影響していること が示されている。



図-15 変位分布

(3)トンネル掘削の前に地すべりを想定した場合との相違に 関する考察

図-14に示した解析結果は、トンネル掘削前に地すべり 変動を想定した場合と、トンネル掘削後に地すべり変動を 想定した場合で、トンネル天端の沈下量に差が生じること を示す。この相違に関する考察を以下に示す。

先に示したように、トンネル天端の沈下量はトンネル支 保工設置後の累積変位であるため、図-16の下段に示す通 り、トンネル掘削後に地すべり変動を想定した解析結果に は、トンネル支保工設置後の変位に地すべり変動による変 位が加算されている。一方でトンネル掘削前に地すべり変 動を想定した場合は、すでにトンネル掘削前に地すべり変 動が発生しているため、支保工設置後の変位のみである。 よってトンネル掘削後に地すべり変動を想定した場合の変 位の方がトンネル掘削前に地すべり変動を想定した場合よ りも大きくなる。



図-16 変位量の比較(概念図)

本章の冒頭に示したように、トンネルの配置に際し、「地 すべり変動が発生した場合、トンネルへ影響しないように すること」を満たすには、図-16の下段の地すべり変動に よる変位量を小さくすればよい。つまり、図-17に示すよ うに、地すべり変動の影響を小さくし、トンネル掘削前に 地すべり変動を想定した場合と同じになるよう離隔距離を 設定すればよい。



図-17 地すべり変動による変位が小さい場合

図-14に示すように、トンネル掘削前に地すべり変動を 想定した場合と、トンネル掘削後に地すべり変動を想定し た場合それぞれを比較した結果、離隔距離が大きくなるに 従い徐々にその差が小さくなっている。トンネル掘削前に 地すべり変動を想定した場合のトンネル天端の沈下量には、 図-12に示したように、地すべり変動の影響はほとんど含 まれていないため、トンネル掘削後に地すべり変動を想定 した場合の解析結果がその結果に近づくということは、地 すべり変動による影響が小さくなっていることを示す。そ して両者がほぼ一致した時の離隔距離がトンネル掘削後の 地すべり変動を想定した時の安全な離隔距離となる。図-14によれば離隔距離 3.5 (D) 程度でほぼ一致しており、こ の点から安全な離隔距離の目安は 3.5 (D) となる。トンネ ル掘削前に地すべり変動を想定した場合では、安全な離隔 距離は 2.0 (D) であるため、トンネル掘削後に地すべり変 動を想定した場合は、トンネル掘削前に地すべり変動を想 定した場合から示される安全な離隔距離よりも大きくなる 場合があると示された。

このように現地調査結果を踏まえた機構解析に基づきト ンネル設置後に地すべり変動が想定される場合は、ここで 用いた解析モデルを用いた検討を行うことで、より安全な 離隔距離を示せると言える。

なお一方でこの検討結果は、地すべりの変動機構の解析 結果を踏まえた解析モデルの設定により、安全な離隔距離 は影響を受けることを示しており、この点から地すべりの 変動機構の解析に際しては、現地において十分な地すべり 調査や計測を行い、それを踏まえた変動機構を検討するこ とが重要であることを示している。

5. 検討結果のまとめ

数値解析を用いてトンネルに地すべりが近接する場合を モデル化し、トンネルへの影響について感度解析を行った。 本検討で設定した解析条件に基づく結果から判明したこと は以下の通りである。

- トンネルと地すべりの離隔に対し、トンネル天端鉛直 変位、地すべり土塊の地表面の最大変位量などの指標 を用いて整理したところ、それらと離隔との間には、 離隔が小さくなるほど変化割合が急減に変化し、大き くなると徐々に変化割合が小さくなる傾向があること を定量的に示した。変化割合が大きい離隔は注意を要 するなど、これらの指標は適切な離隔を検討する際に 有意であることを示した。
- トンネル周辺の地盤物性値が地山等級 D II 相当の物性 値の場合、トンネルと地すべりの間に 2.0 (D) 程度以 上の離隔があれば、それ以上離隔が大きくなっても変 位量の変化割合は小さいが、地山等級 E 相当の物性値 の場合は、離隔 2.0 (D) であっても変位量の変化割合 は大きいことが分かった。現行の技術基準では離隔の 目安として 2.0 (D) となっているが、地盤条件によっ て離隔 2.0 (D) でも注意を要することを示した。
- トンネル掘削後の生じるひずみの分布は、離隔が小さい場合、その分布は地すべり土塊に達し、離隔が大きいと達しない場合があることを示した。
- トンネル掘削後に地すべりが変動した場合の安全な離 隔距離は、トンネル掘削前に地すべりが変動した場合 を想定して得られた安全な離隔距離よりも大きくなる 場合があることを示した。

6. 今後の課題

既存の地すべりによるトンネルの被災事例を見ると、ト

ンネルの路線選定の段階で地すべりは認識され対策が講じ られていたものの、地すべりの規模や安定度の誤認でトン ネルが被災した事例¹⁰⁾、地すべりを計測監視しながらトン ネルの早期施工で地すべり活動が収束した事例¹¹⁾などがあ る。後者の事例ではトンネル掘削に伴い休止していた地す べりが再滑動し、それに対しインバートの早期閉合により トンネル変位および地すべり挙動が収束したケースである。 トンネルの掘削に伴い地すべりが再滑動し、トンネルの2 次覆工で収束するようなこのケースの機構を数値解析でモ デル化するには、地すべりの極限平衡状態からトンネル掘 削に伴うすべり面の強度低下などによる再滑動、およびト ンネル支保工の効果によるトンネルおよび地すべり変位の 停止までを再現することになる。このように実際に現場で 発生する機構は、複雑な現象であるが、個々の現場の機構 を踏まえ本稿で示した基本的なモデルに各現場の条件を追 加することで、現場固有の特性を踏まえた解析結果を提供 するモデルに発展させることができると考えられる。

参考文献

- 社団法人土木学会:2006年制定トンネル標準示法書[山岳 工法]・同解説、2006.7
- トンネル坑口の地すべり対策における安定解析条件の考 え方:奥園誠之、地すべり技術、Vol.23、No.3 (69号)、 pp.15-21、1997.3
- 日本道路公団:設計要領第一集土工・舗装・排水・造園、 pp. 参 3-27-3-28、1998.5
- 4) 土木研究所資料第4163号:数値解析による地すべりとトン ネルの影響評価手法(案)、2010.3
- 5) 日本道路公団試験研究所:試験研究所技術資料第358号トン ネル数値解析マニュアル、pp.3-26、1998.10
- 6) 土木学会:山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務、
 トンネルライブラリー、Vol.16、pp.135-139、2006.2
- 7) 社団法人日本道路協会:道路土工 のり面工・斜面安定工指 針、pp.344-345、1999.8
- 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(日本道路公団委託)、1981.1
- 9) 櫻井春輔・川嶋幾夫・大谷達彦・村松真一郎:トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ、土木学会論文集 No.493/Ⅲ-27、pp.185-188、1994.6
- 藤澤和範・江田充志・真下英人・高橋近敏・山田康晴:国 道 197 号名取トンネルの地すべり災害速報、土木技術資料、 Vol.47、No.8、pp.4-8、2005.8
- 11)田山聡、竹國一也、神澤幸治、平野宏幸:小土かぶりの大規 模地すべり地帯を情報化施工で突破-第二東名高速道路 引 佐第二トンネルー、トンネルと地下、第36巻3号、pp.15-26、2005.3