

(76) 地すべりを考慮したトンネル坑口部の逆解析手法の検討

APPLICATION OF NEW BACK ANALYSIS METHOD FOR LANDSLIDE STABILITY AROUND TUNNEL ENTRANCE

岡本 敦*・進士正人**・李 弘揆**

Atsushi OKAMOTO, Masato SHINJI and Hong-Gyu LEE

The authors developed new back analysis method using monitoring data to a landslide which occurred around the entrance of tunnel. In this case, the tunnel being located under the sliding plane of the landslide, calculated value from the ordinary back analysis, in which only stress release by the tunnel excavation was considered, didn't fit the measured value. Then, in the new method, a body force as the movement of the landslide mass was added to the ordinary back analysis and good results were obtained. Furthermore, the authors carried out stability analysis of the landslide with the data of the back analysis and examined the loosened area and decreasing of the sliding plane strength due to the tunnel excavation.

1. まえがき

現在、地すべり性斜面に関する安定解析の方法は、主に極限平衡解析を中心にした方法がよく用いられている。また、計測技術の発展に伴って施工時に実施された動態観測結果を逆解析することにより施工時の安定解析を検証する方法も検討されている。しかし、トンネル坑口部の地すべりに逆解析を適用した場合、トンネルの掘削の影響だけでは計測変位が説明できないことがある。

そのため、本論文では、普通の逆解析に加えて、地すべりブロックの運動を新たな物体力の作用と考えた逆解析を行った。即ち、通常の逆解析の結果である初期応力と弾性係数以外に、地すべりに起因して発生する不平衡力と地すべり面の強度低下を考慮して、計測変位に最も一致する変位分布を逆解析により求めた。さらに、逆解析により求めた地山の物性値を用いて、トンネル掘削後の地すべりの安定性について極限つり合い式により検討を行い、トンネル掘削によるゆるみ領域及びすべり面の強度低下について検討を行った。

2. 地すべりの滑動力を考慮した逆解析手法の提案

トンネル掘削を誘因とした地すべり現象の発生状況を考えると、トンネル掘削による地山変形と地山変形による地すべりの変形の両者が混合されて計測されると考えられる。従って、逆解析では地すべりを誘発する不平衡力を考慮する必要がある。そこで、櫻井ら¹⁾が提案している逆解析に以下の式で示される地すべりに起因して発生する外力を、トンネル掘削による等価節点外力に加えて逆解析を行うこととした。

$$\{f\} = - \int_{V_s} [N]^T \{\gamma\} dV \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_s は地すべり領域、 $\{\gamma\}$ は地すべり土塊の見掛けの物体力である。即ち、この逆解析では計測変位と逆解析によって求められる初期応力パラメータの関係式において、以下のように単位重量が作用した時の影響を考慮している。

$[A]\{\sigma\} = \{u\}$ 、ここで、 $\{\sigma\} = \{\sigma_x/E, \sigma_y/E, \tau_{xy}/E, \gamma/E\}^T$ である。

この式を最小自乗法により最適化することにより、地すべりの滑動力を考慮した逆解析を行うことができる。

* 日本道路公団 道路技術課

** 応用地質株式会社 川本地盤工学研究所

3. 新しい逆解析手法の適用

和泉層群の砂岩・頁岩の互層地域に発生した地すべりを地質調査結果に基づき3つの領域に分割する。図-1に全体の解析メッシュ図および材料区分図を示す。図-2に計測結果を示す。計測は、孔内傾斜計により5箇所で実施されており、すべり面で極端な変位増加を記録している。そのため、このトンネルでは、傾斜計が何度も挿入不能となっており、その都度計測データの欠損が発生している。従って、逆解析では、5本の傾斜計の測定時期がほぼ等しいデータを採用した。さらに、計測時期がそれぞれ異なるので、逆解析においては傾斜計のデータが定性的に一致すればよいものとした。

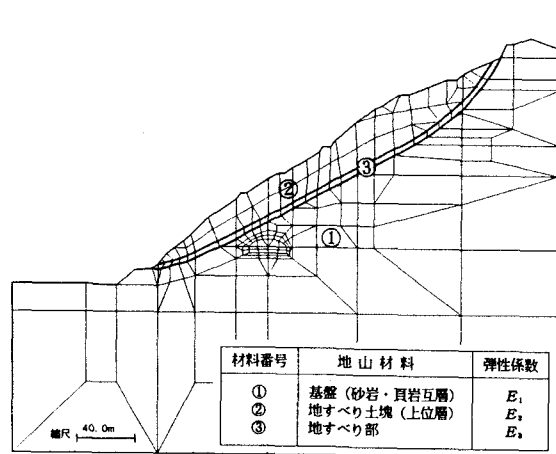


図-1 解析メッシュ図および材料分布図

3-1. ケース 1

地山を一様な弾性体と仮定した上で、計測値により一致させるように弾性係数の比率を $E_2/E_1=10$ 、 $E_3/E_1=0.01$ に変化させた。逆解析結果は以下のとおりである。図-3および図-4に、それぞれ計測値と計算値との比較、および変位分布図を示す。さらに、表-1には逆解析結果の一覧を示す。図-3から明かなように、計測値と計算値は全く一致せず、トンネル掘削の影響だけでは、計測変位が表現できないことがわかった。また、図-4に示した変位分布から明かなように、トンネルの周辺で谷側に変形する挙動を示すことがわかった。従って、従来の斜面の逆解析では、このような地すべり変形挙動を逆解析により一致させることは極めて難しいことがわかった。言い換えれば、このトンネルの変形挙動は、トンネルの掘削による変形以外の変形挙動が発生しているともいえる。

3-2. ケース 2

ここでは、通常の斜面の逆解析に加えて、地すべりブロックの運動を新たな物体力の作用と考えた逆

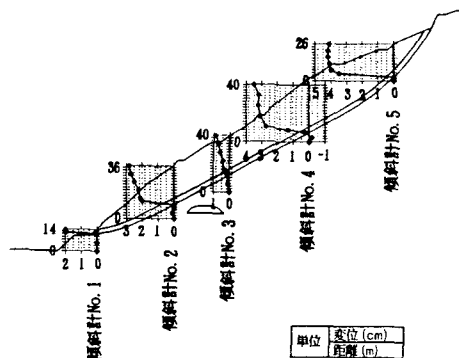


図-2 孔内傾斜計による計測結果図

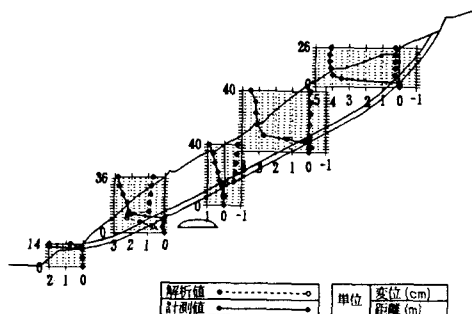


図-3 計測値と解析値の比較図 (ケース 1)

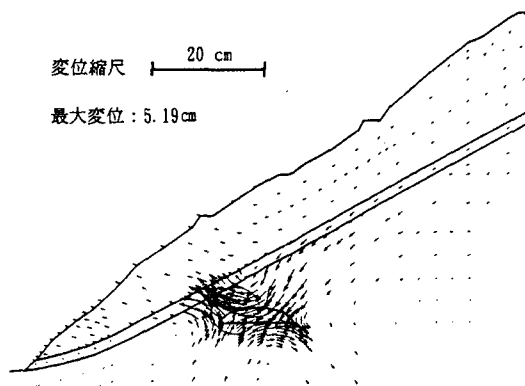


図-4 変位分布図 (ケース 1)

解析を行った。即ち、通常の逆解析の結果である初期応力パラメータ $\{\sigma_x/E, \sigma_y/E, \tau_{xy}/E\}$ 以外に地すべりブロックに物体力 $\{\gamma/E\}$ を作用させ、計測変位に対して逆解析を行った。逆解析は物性を変化させ行ったが、計測値により一致させるように地山物性値を $E_2/E_1=10$ 、 $E_3/E_1=0.01$ 、領域3の $m=0.1^*$ に変化させた。図-5 および図-6 に、それぞれ計測値と計算値との比較、および変位分布図を示す。さらに、表-2 には逆解析結果の一覧を示す。図-5 から明らかなように、地すべりブロックの物体力を考慮しない場合の逆解析よりも計測値と計算値の傾向は極めて一致しており、ここで提案する地すべりブロックの運動を考慮した逆解析が妥当であることがわかる。図-7 に逆解析結果から得られた最大せん断ひずみ分布図を示す。同図から明らかなように、トンネル掘削の影響が地すべりに影響を与え、大きなひずみが地すべり面に発生していることが明らかになった。これらの結果から、今回開発した手法が、トンネルのゆるみによって地すべりが誘発される場合の逆解析に有効であることを示している。

表-1 逆解析結果一覧(ケース1)

σ_x/E	0.181×10^{-2}
γ/E	0.441×10^{-7}
τ_{xy}/E	0.441×10^{-2}
E	45373 kgf/cm ²
σ_x	81.97 kgf/cm ²
σ_y	-10.00 kgf/cm ²
γ_{xy}	-58.47 kgf/cm ²
計測値と計算値との誤差	0.276×10^1

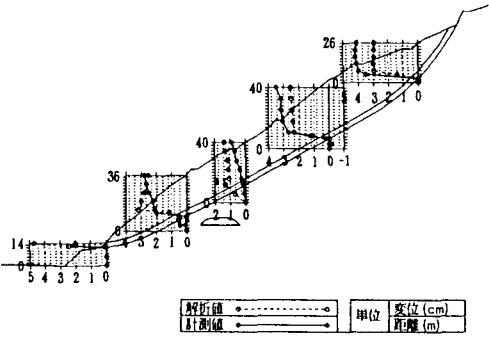


図-5 計測値と解析値の比較図(ケース2)

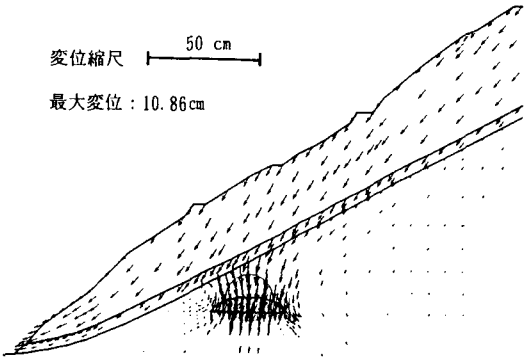


図-6 変位分布図(ケース2)

表-2 逆解析結果一覧(ケース2)

σ_x/E	-0.250×10^{-2}
γ/E	0.582×10^{-6}
τ_{xy}/E	-0.880×10^{-3}
地すべり土塊の見掛けの物体力 γ	0.167×10^{-2} gf/cm ³
E	3437 kgf/cm ²
σ_x	-8.58 kgf/cm ²
σ_y	-10.00 kgf/cm ²
γ_{xy}	-3.02 kgf/cm ²
計測値と計算値との誤差	0.505×10^0

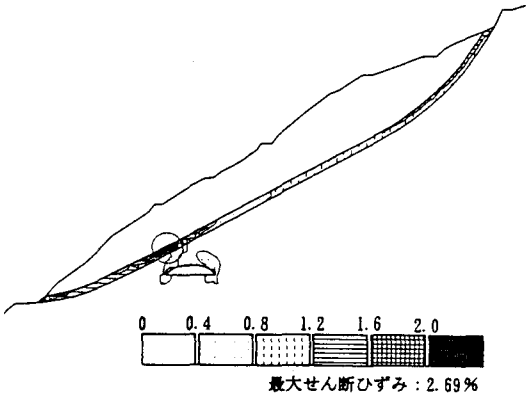


図-7 最大せん断ひずみ図(ケース2)

* せん断剛性の低下を表す異方性パラメータ

4. 逆解析結果を用いた地すべりの安定解析

逆解析結果を用いて、以下の手順で安定解析を実施した。

①変位計測データを用いて、逆解析により地山の力学特性（弾性係数、異方性パラメータ）を推定する。

②弾性係数 E と異方性パラメータ m からすべり面のせん断弾性係数 G を決める。

$$G = E \times m \dots\dots\dots(2)$$

③せん断弾性係数 G に地山の限界せん断ひずみ γ を掛けて、すべり面の限界せん断強度 τ_c を算出する。

$$\tau_c = G \times \gamma \dots\dots\dots(3)$$

④すべり面の内部摩擦角 ϕ を仮定すると、粘着力 c は次式で求められる。

$$c = (1 - \sin \phi) / \cos \phi \times \tau_c \dots\dots(4)$$

⑤この c 、 ϕ による安定計算により、現時点での斜面の安定性を検討する。

トンネル坑口の地すべりに対し、フェレニウス法による安定解析を行った。まず、トンネル掘削前の地山の安全率を $F_s=1.0$ と仮定し、逆算法により c 、 ϕ を求めた。図-8 にそれらの関係を示す。その結果は、 $c=2(\text{tf/m}^2)$ のとき、 $\phi=27.5^\circ$ である。

次に地すべり土塊の内部摩擦角が $\phi=27.5^\circ$ であると仮定して、地中傾斜計の計測データからすべり面の逆解析を行った結果、トンネル掘削後の c は、式(4)により $c=1.04(\text{tf/m}^2)$ となる。

ただし、限界せん断応力 $\tau_c=1.72(\text{tf/m}^2)$ であり、限界せん断ひずみ γ を5%と仮定した結果である。

逆解析より得られた $c=1.04(\text{tf/m}^2)$ と、 $\phi=27.5^\circ$ を地すべり全体に適用し、フェレニウス式で安定計算を行うと、安全率は $F_s=0.95$ となる。

次に、トンネル掘削による地すべりへの影響を評価するため、地すべり領域の区分を試みた。即ち、図-7 に示す斜面の変位計測データを用いた逆解析結果（最大せん断ひずみ図）を見ると、すべり面の中でもひずみが大きく発生する領域と小さい領域に分かれることがわかる。

そこで、ゆるみが大きい領域に対しては $c=0$ 、 $\phi=27.5^\circ$ 、ゆるみが小さい領域に対しては $c=2(\text{tf/m}^2)$ 、 $\phi=27.5^\circ$ の条件を適用し、フェレニウス式により安定計算を行って安全率 $F_s=0.95$ を満たす $c=0$ の領域を計算した。その結果、図-9 に示すように、非常に幅広い区間を $c=0$ の領域として定めないと安全率 $F_s=0.95$ を満たさないことがわかった。これはトンネル掘削によるゆるみが異常に広がっていることを意味しており、現実的とはいえない。

そのため、逆解析結果から得られた最大せん断ひずみ図より、ひずみが大きく発生する区間(1.5%程度以上)を定めておいて、以下の手順で限界せん断ひずみ γ を求めてみた。

① ひずみが大きく発生する領域と、小さい領域に区分し、下記の条件で安定解析を行う。

ゆるみが大きい領域に対しては $c=0(\text{tf/m}^2)$ 、 $\phi=27.5^\circ$

ゆるみが小さい領域に対しては $c=2(\text{tf/m}^2)$ 、 $\phi=27.5^\circ$

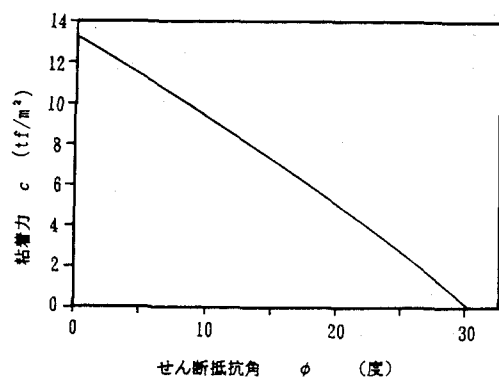


図-8 安全率 $F_s=1.0$ を満たす c と ϕ の関係図

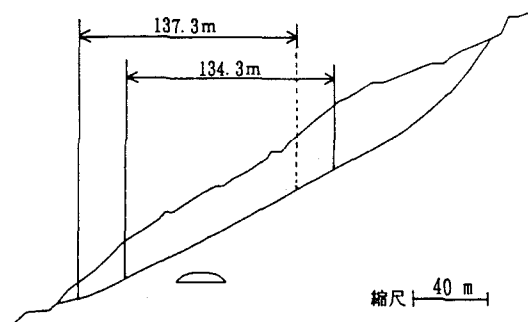
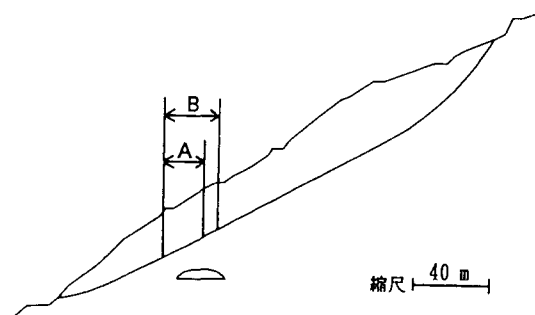


図-9 安全率 $F_s=0.95$ を満たす $c=0$ の領域図
(条件、ゆるみが大きい領域: $c=0$ 、 $\phi=27.5^\circ$ 、
ゆるみが小さい領域: $c=2\text{tf/cm}^2$ 、 $\phi=27.5^\circ$)

- ② ①で得られた安全率を固定してすべり面全体の c を一様にしたときの c を求める。
 ③ ②で求めた c を用いて $c = (1 - \sin \phi) / \cos \phi \times \tau_c$ より限界せん断応力 τ_c を求める。
 ④ ③で求めた限界せん断応力 τ_c を用いて $\tau_c = G \times \gamma$ より限界せん断ひずみ γ を求める。

上記の手順により、最大せん断ひずみ図でゆるみが大きい領域と小さい領域として考えられる区間に対し、安定計算を行うと、図-10に示すように、限界せん断ひずみ γ が7.7~8.0%の値が得られた。従って、限界せん断ひずみ γ を8%程度で考えれば、最大せん断ひずみ図とほぼ等しい範囲で $c = 0$ の領域が定義できることがわかった。

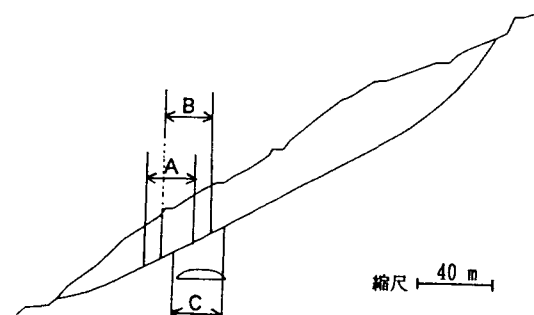
一方、ゆるみが大きい領域と小さい領域の強度定数について、ゆるみが大きい領域に対しては $c = 0$ (tf/m²)、 $\phi = 18.3^\circ$ ($=27.5 \times (2/3)$)、ゆるみが小さい領域に対しては $c = 2$ (tf/m²)、 $\phi = 27.5^\circ$ と定義し、フェレニウス式により安定計算を行うと、図-11に示すように、最大せん断ひずみ図とほぼ等しい範囲でゆるみ領域が定義できることがわかった。



ケース	安全率 F_s	限界せん断ひずみ γ (%)	L_i^* (m)
A	0.98	8.03	24.9
B	0.98	7.73	34.0

* L_i は、ゆるみが大きく発生する領域の底面の長さ(m)

図-10 ゆるみが大きく発生する領域を定めるとき
 限界せん断ひずみの逆算およびその結果
 (条件、ゆるみが大きい領域: $c=0$, $\phi=27.5^\circ$ 、
 ゆるみが小さい領域: $c=2\text{tf/cm}^2$, $\phi=27.5^\circ$)



ケース	安全率 F_s	限界せん断ひずみ γ (%)	L_i^* (m)
A	0.95	5.00	30.3
B	0.95	5.00	30.4
C	0.95	5.00	29.9

* L_i は、ゆるみが大きく発生する領域の底面の長さ(m)

図-11 安全率 $F_s=0.95$ を満たす $c=0$ の領域及び結果
 (条件、ゆるみが大きい領域: $c=0$, $\phi=18.3^\circ$ 、
 ゆるみが小さい領域: $c=2\text{tf/cm}^2$, $\phi=27.5^\circ$)

5. おわりに

通常の逆解析では計測値と解析値が一致しにくいトンネル坑口付近の地すべりに対して、通常の逆解析に加えて、地すべりブロックの運動を新たな物体力の作用と考えた逆解析手法を提案し、現場計測結果に適用したところ、この手法の妥当性が確認できた。

また、逆解析により求めた地山の物性値を用いて、トンネル掘削後の斜面の安定性を検討した。その結果、トンネル掘削後のゆるみ域の c 、 ϕ を求めるためには、すべり面の限界せん断ひずみ γ を正確に知る必要があり、これは事前調査の段階で土質試験等によって明らかにしておくことの重要性が再確認された。

参考文献

- 1) 櫻井春輔・D. Niyom・進士正人：現場計測結果に基づく切り取り法面の安定性評価，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 307~312，1995。