地すべり対策工の効果推定における安定解析の不確定要素の影響

On the Influence of the Indefinite Elements of the Stability Analysis on Presumption of Effect of Landslide Countermeasures

榎田充哉^{*})

Mitsuya ENOKIDA

Abstract

The safety factor of 2-dimensional analysis used by countermeasure plan of a landslide serves as a value which included the error with various indefinite elements about the calculation error and stability analysis by the stability analysis formula to adopt. Although the error of safety factor has influenced on effect presumption of countermeasure greatly, there is almost no verification example with the general-purpose but only with individual on-site example. On the other hand, though the designed safety factor in countermeasure plan is an important value which determines the scale of countermeasure, the validity of the value owes a lot to experience, and it is not verified scientifically yet. By verifying the influence of the indefinite element on effect of countermeasure generally, I think in the future, it will be also useful to verification of the validity of designed safety factor. In this paper, I took notice of 3 main indefinite elements, the unit weight of move layer, strength parameters of slip surface, slip surface depth. Then verified influence of these 3 elements on effect of countermeasure using the Fellenius method are bigger than using the simple Janbu method are more than 60% of whole. I also verified about the superposition effect of the presumed error by two or more indefinite elements, or the presumed error by the difference in a stability analysis formula.

As a result, it became clear change of effect presumption of countermeasure by the presumed error of indefinite elements becomes larger as a scale of landslide is small, the influence of the indefinite elements increases by using countermeasure together, and the landslides which's evaluation value of countermeasure effect using the Fellenius method are bigger than using the simple Janbu method are more than 60% of whole.

Keywords : landslide, stability analysis, designed safety factor, countermeasure

和文要旨

地すべりの対策工計画で利用される2次元安全率は採用する安定解析式による計算誤差や安定解析に関するさまざまな不確定要素によって誤差を含んだ値となっている。この安全率の誤差が対策工の効果推定にも大きく影響しているが、個別の現場事例について検証した事例はあるものの汎用的な検証事例はほとんどない。

一方、対策工計画における計画安全率は対策工の規模を決定する重要な値であるが、その値の妥当性は経験的なものに負うところが大きく、学術的に検証されていない。対策工効果に与える不確定要素の影響を汎用的に検証することにより、今後、計画安全率の妥当性の検証に役立つと考える。

本論では代表的な不確定要素として移動層の単位体積重量、すべり面の土質強度定数、すべり面深度の3つに注目し、地下水排除工、排土工、抑止工の3つの対策工効果へのこれら不確定要素の影響を全国133現場243断面の現場事例データを用いて検証した。その中で複数の不確定要素による推定誤差の重ね合わせ効果や安定解析式の違いによる推定誤差についても検証した。

その結果、不確定要素の推定誤差による対策工効果推定の変動は地すべりの規模が小さいほど大きくなること、対策工を併用することによってその不確定要素の影響が増大すること、簡便法による対策工効果の評価値が簡易Janbu法による評価値より大きくなる地すべりが全体の6割以上になることなどが明らかとなった。

キーワード : 地すべり, 安定解析, 計画安全率, 対策工

1. はじめに

地すべりの対策工計画では通常、2次元の極限平衡法 (Limit Equilibrium Analysis) による安全率を用いて対策工の効果の評価する。地すべりの現状安全率または初期安全率を推定し、計画安全率 (目標安全率) を達成するための対策工の組合せを検討して対策工計画が作成される。この計画安全率の大きさは地すべりの規模や地すべりによって被災するであろう保全対象の重要性などによって決められるものであるが、各種基準書にはその目安として $F_b = 1.10 \sim 1.20$ と記載されている。

地すべりの安全率 F は $F > 1.0$ であれば安定状態であり、極論すれば計画安全率は $F_b = 1.01$ でも充分であるが、降雨や融雪などの誘因変量が予想を上回った場合の

安全率の余裕を考慮する必要があることや、すべり面位置などの地すべり形状の推定誤差、すべり面に作用する間隙水圧分布の推定誤差、すべり面粘土のせん断強度など土質定数の推定誤差など安定解析に関する様々な不確定要素によって生じる安全率の誤差も考慮する必要がある。現在一般的に採用されている計画安全率の値の妥当性は経験的なものに負うところが大きく、学術的な根拠は明確でない。

採用した安定解析式の違いによる対策工効果の推定値の違いも重要な問題である。この問題に関しては地すべり研究者の中でも間違った認識が広がっているものもある。例えば簡便法による安全率が厳密解より常に小さくなるという考え方、その結果、対策工の効果を通小に評価するので安全側の設計となるとして簡便法を好評価する考え方である。筆者の研究¹⁾⁷⁾では解析対象中の53%の

^{*}) 国土防災技術株式会社

〒336-0002 埼玉県さいたま市北浦和2-12-11

地すべり地で簡便法の安全率が厳密解より1%以上小さくなるものの、逆に1%以上大きくなる割合も27%に達する事が分かっている。仮に小さい安全率を算出するとしても、結果としてすべり面粘土のせん断強度定数を大きな数値として評価することにつながり、対策工効果を過大に評価する恐れがあると考えられるが、このことは何らかの形で検証する必要がある。

様々な要因による安全率の誤差が対策工の効果推定に大きく影響しているが、個別の現場事例について検証した事例はあるものの汎用的な検証事例はほとんどない。筆者らはこれまで数多くの地すべり地の安定解析や対策工の効果推定を行い、実在する地すべり地の縦断面データを用いて、安定解析式による計算誤差の大きさや不確定要素の影響などを調べてきた¹⁾²⁾。対策工効果に与える不確定要素の影響を汎用的に検証することにより、今後、計画安全率の妥当性の検証に役立つと考える。

本論では、全国から集めた多くの現場事例を用いた一連の研究の中で、いくつかの不確定要素についての対策工効果への影響や代表的な安定解析式による対策工効果の推定値の違いについて解析的に検証できたのでその結果を報告する。

2. 解析用現場事例データの概要

解析に用いた事例データは133現場分の243断面である。ここでの現場数は同一の地すべり地であっても、異なった移動ブロックについてはそれぞれ別の現場として集計した。同一ブロックについても比較的規模が大きい地すべりで複数の縦断測線が設けられ、すべり面調査が行われている場合は、主断面以外の縦断面データも解析対象とした。これらの事例は自然斜面での地すべり事例であり、1～2例の特例を除きそのほとんどが非円弧形の断面形状を有している。

事例データの大まかな地質条件を図-1に示す。

事例データの地すべり規模は図-2に示すような弦長 L で分類した。分類した地すべり規模の割合は図-3に示すとおりである。

図-1 事例データの地質条件
Fig. 1 The Geologic classification of case data

3. 解析条件

安定解析式には簡易な安定解析式でありながら比較的計算誤差が小さいとされている簡易Janbu法を採用し、安定解析式による違いを比較するために簡便法 (Fellenius法) を用いた解析も行った。

安定解析における不確定要素にはさまざまなものがあるが、今回検証した不確定要素の種類は表1に示す通りで、移動層の単位体積重量とすべり面深度、すべり面の土質強度定数の3種類である。すべり面深度については調査結果から得られた縦断面形状を元に調査結果そのもの場合と調査結果より1m深い場合、1m浅い場合の3つのケースを比較したが、データ加工処理を簡単にするためにすべり面形を同一にしてすべり面からの土塊高さのみを調整した (図-4参照)。すべり面の土質強度定数は粘着力 c' を3つに変化させて、臨界水位での安全率

図-2 断面形状の表現
Fig. 2 The expression of cross sectional form

図-3 事例データの地すべり規模
Fig. 3 The landslide scale of case data

表-1 検証した不確定要素と設定値
Table 1 The indefinite element and setting value which were verified

不 確 定 要 素	設 定 値
移動層の単位体積重量 γ [kN/m ³]	18, 20
すべり面深度 h [m]	調査値, 調査値+1.0, 調査値-1.0
すべり面強度定数 c' [kPa]	0, 10, 20
安定解析式	簡易 Janbu 法, 簡便法 (Fellenius 法)

1) ϕ' は $F_0 = 1.0$ 対応の値を逆算解析で求めた。

図－4 すべり面深度条件の設定方法

Fig. 4 The setting method of slip surface depth conditions

F を $F=1.0$ として ϕ を逆算解析で求めている。これらの設定値は日常的に頻繁に起こり得る推定誤差を想定している。単位体積重量にしても 2 kN/m^3 程度の推定誤差は容易に発生し得るし、すべり面深度の推定もパイプ歪み計などの地中移動量観測ですべり面位置が確定している場合でも 50 cm 程度の判定ミスが容易に生じ、それ以外の条件では数 m の推定誤差は容易に発生する。また、すべり面の土質強度定数も残留強度であるとして $c'=0\text{ kPa}$ とする場合と $c'=h$ (最大すべり面深度 m) kPa とした場合などで容易に発生する推定誤差の範囲にある。

上記3種類の不確定要素の影響が安全率に与える影響についてはすでに学会で発表しているが²⁾、不確定要素の影響によって地すべりの安全率が最大 $8\%\sim 26\%$ 程度の範囲で変化することなど分かっている。本研究では対策工効果への影響に着目し、地下水排除工、排土工、抑止工の効果推定値に与える影響を調べた。

地下水排除工による地下水位低下量は地すべり地内に8基の集水井を施工した場合の水位低下量の分布を定常解析の群井理論で算出した。8基の集水井による水位低下量は地すべり地や断面によって異なるため、異なる断面間で地下水排除工効果の対比はできないが、同一断面での比較は可能である。

排土工は地すべり頭部を一般的な任意の形状で排土した断面形で検討した。

抑止工の効果は現状安全率 $F=1.0$ を $F=1.05$ にするために必要な単位幅当りの必要抑止力 P_u を算出して比較したが、安定解析式の分子項に P_u が作用するとした次式の値を採用した。

$$F = f_0 \frac{\Sigma S + P_u}{\Sigma T} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 f_0 ：修正係数、 ΣS 、 ΣT ：安定解析式における分子項と分母項の総和

スライス内の力の釣り合いから誘導すると必要抑止力などの力は必ず安定解析式の分母項に作用するが、ここではそのことを無視して慣用的に用いられている方法に準拠した。

不確定要素の違いにより必要抑止力が変化することは、所定の安全率を確保するために必要な抑止力が変化する

 表－2 計算条件
Table 2 Calculation conditions

条件番号	安定解析式	単位体積重量	粘着力 c'	すべり面深度
001	簡易 Janbu	18 kN/m^3	0 kPa	調査値
002	簡易 Janbu	20 kN/m^3	0 kPa	調査値
003	簡易 Janbu	18 kN/m^3	10 kPa	調査値
004	簡易 Janbu	18 kN/m^3	20 kPa	調査値
005	簡易 Janbu	18 kN/m^3	0 kPa	調査値－ 1 m
006	簡易 Janbu	18 kN/m^3	0 kPa	調査値＋ 1 m
301	簡便法	18 kN/m^3	0 kPa	調査値
302	簡便法	20 kN/m^3	0 kPa	調査値
303	簡便法	18 kN/m^3	10 kPa	調査値
304	簡便法	18 kN/m^3	20 kPa	調査値
305	簡便法	18 kN/m^3	0 kPa	調査値－ 1 m
306	簡便法	18 kN/m^3	0 kPa	調査値＋ 1 m

ということであり、逆にいえば同じ抑止力を期待して採用した抑止工でも不確定要素によって達成される安全率が変わるといことである。つまり、所定の達成安全率に対する必要抑止力 P_u を比較することで、抑止工効果の大小が比較できることになる。これはすべての抑止工に共通である。

対象とする不確定要素を組み合わせで計算条件を設定した。表2に計算条件を示す。何れの条件も排土前の現状断面で臨界水位時の安全率 F が $F=1.0$ となるように内部摩擦角 ϕ を決定している。その臨界水位の状態から各対策工を施工した場合に達成する安全率または必要抑止力を算出して比較した。

4. 解析結果

4.1 不確定要素の推定誤差による対策工効果推定値の違い

(1) 単位体積重量の影響

図－5は単位体積重量 γ の違いが抑制工の効果推定に与える影響を調べたものである。横軸は対策工効果の変動率であるが、これは $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ の場合に達成する安全率を $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ の場合の達成安全率で割り、その比が 1.0 より何%上下するかをみたものである。以下、変動率と表現した場合は比較対象値の比を百分率で表示した比率が 100% の場合を 0% として比率の差を表したものとす。図－5で変動率が負の値になるということは $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ の場合の達成安全率が $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ の時より小さいことを示す。縦軸は変動率の範囲毎の該当する断面数である。

図－5(a)の地下水排除工の工事効果は $0\sim -1\%$ の範囲に入る断面が最も多く、 $0\sim -6\%$ の範囲に全体の 98% の断面が含まれる。つまり、地下水排除工の効果推定値は γ が小さいほど大きくなり、実際より小さな γ で地下水排除工の効果推定すると効果を過大に評価する

ことになる。

図-5(b)は同様の方法で頭部排土工の効果推定値の差異を調べたものであるが、変動率が $\pm 1\%$ 以内に収まるケースが全体の93%にのぼり、単位体積重量の違いは排土工効果にあまり影響しないことがわかる。

図-5(c)は地下水排除工と頭部排土工を併用した場合の効果調べたものであるが、地下水排除工の影響が大きく、図-5(a)とほぼ同じ分布形になっている。工事効果の変動の大きさは11%の γ の推定誤差に対して最大8%程度、全体の99%が6%以内の変動率内に収まっている。 γ の推定誤差に比べると対策工効果の変動は小さい。

図-6は同じく単位体積重量の推定誤差の影響が抑止工の効果推定に与える影響を調べたものである。横軸の必要抑止力の変動率は $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ の場合の必要抑止力を $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ の場合の値で割った比が1.0より何%上下するかをみたものである。抑止工の必要抑止力は安定解

析分母項の ΣT に左右されるため γ の変動率と同様に11.1%増加する変動率が期待される。図-6では変動率11~12%が全体の80%となっている。簡便法では式の性質上、 γ の比と必要抑止力の比は完全に一致する。当然の事ながら γ が大きくなると所定の安全率を確保するための必要抑止力は増加する。逆にいえば γ が大きくなると同じ規模の抑止工で得られる達成安全率が小さくなるということである。

つまり、抑止工の場合も実際より小さな γ で工事効果を推定すると効果を過大に評価することになり、その工事効果推定の変動の大きさは γ の推定誤差とほぼ同じになる。

(2) すべり面の土質強度定数の影響

図-7は前項と同様の手法ですべり面の土質強度定数の影響を調べたものである。 $c' = 0\text{ kPa}$ の場合と $c' = 10\text{ kPa}$ の場合を比較している。

図-7(a)をみると最頻値が0~-1%で0~-11%に全体の94%が集中している。地下水排除工の効果は c' を大きく推定すると工事効果を小さく推定することになる。5%より大きい変動率の頻度は約30%であり、この程度の効果推定値の差異は頻繁に発生することがわかる。

排土工に関する効果推定値の変動率は0~-1%が最頻値であるが、+4%~-3%の間に92%が含まれる。つまり、土質強度定数の推定誤差による排土工効果の推定は過大になる場合と過小になる場合があり、今回の設定値程度の c' の違いではほとんどの場合4%程度以内の推定値の違いになる。

地下水排除工と排土工を併用した場合の変動率の頻度分布図(図-7(c))はそれぞれの分布パターンをそのまま加算したような分布形となっている。

$c' = 0\text{ kPa}$ と $c' = 20\text{ kPa}$ との比較では何れの抑制工の場合も変動率の頻度ピーク位置は図-7とほぼ同じであるが、ピーク位置での頻度は小さくなり分布範囲が若干広がる。

図-8は同じく抑止工の効果推定におよぼす影響を調べたものである。推定値の変動率は0~+1%が最頻値で全体の38%が分布し、0~+9%の間に全体の96%が分布している。つまり、土質強度定数による抑止工の効果推定の差異が比較的小さい地すべりは全体の38%と多いものの、変動率のほとんどが正の値であることから、

(a) 地下水排除工

(b) 頭部排土工

(c) 地下水排除工+頭部排土工

図-5 単位体積重量の違いによる抑制工の達成安全率の変動
Fig. 5 The change of the achievement safety factor of control works by the difference in unit volume

図-6 単位体積重量の違いによる抑止工の必要抑止力の変動
Fig. 6 The change of the required deterrent of prevention works by the difference in unit volume

図-7 すべり面強度定数の違いによる抑制工の達成安全率の変動

Fig. 7 The change of the achievement safety factor of control works by the difference in shear strength of slip surface clay

図-8 すべり面強度定数の違いによる抑止工の必要抑止力の変動

Fig. 8 The change of the required deterrent of prevention works by the difference in shear strength of slip surface clay

c' を大きくすると所定の安全率を確保するための必要抑止力が大きくなる傾向にあるといえる。

(3) すべり面深度の影響

図-9はすべり面深度が地下水排除工の効果推定に与える影響を調べたものである。最頻値は0~-1%で、0~-10%に全体の98%が分布している。すべり面深度を実際より深く推定すると地下水排除工の効果を小さく評価することになり、1mの違いで最大10%程度小さく評価することがわかる。

変動率の頻度分布の形状は単位体積重量を増加させた場合と類似している。抑止工に対する影響も単位体積重量を変化させた場合と同様であることからここでは割愛する。

$h \rightarrow h-1\text{m}$ の場合の頻度分布図は図-9の変動率の正負を逆転させた分布となる。

4.2 地すべり規模との関係で調べた対策工効果推定値の違い

対策工毎の効果推定の違いを地すべりの規模との関係で調べた結果を示す。

図-10は地下水排除工の効果推定値の違いを地すべり規模との関係で表示し、不確定要素の種類毎に比較したものである。ここでは、効果推定値の違いをわかりやすいように達成する安全率の差で表現した。横軸にはすべり規模を代表する値として地すべりの断面形における弦長 L を採用した。縦軸は地下水排除工による達成安全率の差である。不確定要素の推定誤差の影響が無ければ、達成安全率の差は0.0近傍に分布することになる。図中の点線や1点鎖線は視覚的な境界を示したものであるが、分布形の特徴がこの2つの線の付近に変化しているように思われる。図-5(a)と図-10(a)を比較すると、同じ単位体積重量と地下水排除工に関する解析結果でありながら、前者ではデータ分布が+1%~-8%であるのに対し、後者は0.01~-0.12まで分布しており、数字が合わない。これは地下水排除工によって達成する安全率が $F > 1.0$ で、事例毎にその値が異なることに起因する。

3つの不確定要素ともに分布形は類似しており、弦長 L が小さいほど安全率差のバラツキが大きくなっている。

図-9 すべり面深度の違いによる地下水排除工の達成安全率の変動

Fig. 9 The change of the achievement safety factor of groundwater drainage works by the difference in slip surface depth

弦長が大きい場合はどの不確定要素の場合も安全率差は約0.02以内であるが、弦長が小さい地すべりでは単位体積重量の場合で最大0.12程度、土質強度定数の場合で最大0.4程度、すべり面深度の場合で最大0.17程度となっている。不確定要素の推定誤差の大きさがこれより大きくなれば当然この達成安全率の差は増大する。視覚的に判断すると分布形状が弦長 $L=400\sim 500\text{m}$ 付近で変化しているようにみることが出来る（図中の点線）。また、安全率差が0.1を越える地すべりは弦長 L が200m以内の地すべりに多い。

図-11は前項と同様に地すべり規模と頭部排土工効果推定値の差の関係を調べたものである。地下水排除工の場合と比較すると安全率の差が正負両方に分布するという違いはあるものの弦長 L に関係する分布形の違いは顕著ではない。また達成安全率の差のパラッキの大きさも地下水排除工に比べて小さい。

(a) 単位体積重量による影響

(b) 土質強度定数による影響

(c) すべり面深度による影響

図-10 地すべり規模との関係から見た地下水排除工の達成安全率の変動

Fig. 10 The change of the achievement safety factor of groundwater drainage works judged from the relation with the landslide scale

地下水排除工と頭部排土工を併用した場合の達成安全率の差の分布図を図-12に示すが、両対策工単独の場合

(a) 単位体積重量による影響

(b) 土質強度定数による影響

図-11 地すべり規模との関係から見た排土工の達成安全率の変動

Fig. 11 The change of the achievement safety factor of soil removal works judged from the relation with the landslide scale

(a) 単位体積重量による影響

(b) 土質強度定数による影響

図-12 地すべり規模との関係から見た抑制工併用の達成安全率の変動

Fig. 12 The change of the achievement safety factor of combined control works judged from the relation with the landslide scale

の分布形をそのまま重ね合わせたような分布形となっている。特徴的なことは図-12(b)に示すように地下水排除工単独では最大の達成安全率差が-0.38程度であったのに対し、対策工を併用することで最大の差が約-0.46に増大していることである。1つの不確定要素による対策工効果の推定誤差が対策工を併用することにより増大する場合があることが確認された。

4.3 不確定要素推定誤差の重ね合わせ効果

図-13は3つの不確定要素を組合せた場合の地下水排除工の効果推定における達成安全率の差の分布を調べたものである。

図-13(a)は単位体積重量 γ と土質強度定数の推定誤差を組合せた場合の分布図であるが、当然両者単独の場合の達成安全率差を加算した分布形になる。つまり、この図の縦軸値は図-10(a)の縦軸値の符号を逆にした値と図-10(b)の値を加算したものと同値になるので、達成安全率の差が正の場合は単位体積重量の推定誤差の影響が強

く、負の場合は土質強度定数の推定誤差の影響が大きいと概観することができる。図-13(a)で特徴的なことは弦長が短い地すべりでは土質強度定数の影響が優勢であり、弦長 L が長い地すべりでは逆に単位体積重量の影響が優勢となっている。また、負の値は-0.30付近まで分布し土質強度定数の影響を強く受けた地すべりが複数存在するのに対し、単位体積重量の影響を受けた正の値は+0.02程度以下であり、対策工効果推定に大きな影響がでない。

図-13(b)はすべり面深度と土質強度定数の組合せであるが、達成安全率の差が正の値となるものは前者の推定誤差による影響、負となるものは後者の影響であると見ることができる。弦長の長短にはほぼ関係なく土質強度定数の影響が優勢となっている。安全率の差が+0.01以上となる事例はの中で3件のみであり、残りのほとんどの現場事例ではすべり面深度の影響は無視できる程度である。

図-13(a)にも共通することであるが、土質強度定数の影響を受けた負側の安全率差-0.05以下の事例は多く存在するのに対して、正側の+0.03以上となる事例は皆無である。図-10を見ると単位体積重量やすべり面深度の単独の影響で最大0.05以上の安全率差が生じる事例は数多く存在しているにも関わらず、図-13(a)(b)ではそれらの影響を強く受けた事例はほとんど無い。つまり、図-13(a)(b)で安全率差が0.0付近より下にある程度離れている事例は土質強度定数の推定誤差の影響は強く受けるがもう一方の影響はあまり受けない地すべりで、0.0付近に分布する事例にはどちらの不確定要素の影響もあまり受けないものと、両方の不確定要素の影響を同程度に強く受けるものがあると判断できる。

図-13(c)は単位体積重量とすべり面深度の組合せで、正の値が前者の影響、負の値が後者の影響である。縦軸の正負の分布状況を詳しく見ると弦長 L が100m程度より短い地すべりではすべり面深度の影響が優勢となり、弦長がそれより長い地すべりでは単位体積重量の影響が優勢になっていることがわかる。

図-14は頭部排土工および頭部排土工と地下水排除工の併用における推定誤差の重ね合わせ効果を調べたものである。頭部排土工がからむため不確定要素の組合せは単位体積重量と土質強度定数のみである。

図-14(a)の頭部排土工のみの場合の安全率差の分布は図-11(b)の土質強度定数の違いによる分布とほぼおなじ分布状態であり、ここでも土質強度定数の影響が大きいことがわかる。もともと排土工の効果推定に関する単位体積重量の影響は小さいことを図-5(b)で示したが、そのことが現れた結果となった。同様の理由から図-14(b)の頭部排土工と地下水排除工の併用の場合も図-13(a)の地下水排除工単独の場合の分布状態とほぼ同じである。

上記の計算事例は安全率差を小さくする設定値の組合せで比較したが、逆にどちらも安全率差を大きくするような組合せであれば安全率差は加算されることになる。

図-13 不確定要素の推定誤差の重ね合わせによる地下水排除工の達成安全率の変動

Fig. 13 The change of the achievement safety factor of groundwater drainage works by superposition of the presumed error of indefinite elements

(a) 頭部排土工

(b) 地下水排除工+頭部排土工

図-14 不確定要素の推定誤差の重ね合わせによる抑制工併用の達成安全率の変動

Fig. 14 The change of the achievement safety factor of combined control works by superposition of the presumed error of indefinite elements

4.4 安定解析式の違いが対策工効果推定値に与える影響

図-15は安定解析式の違いが抑制工の効果推定に与える影響を調べたものである。横軸が対策工効果の変動率であるが、簡便法の場合に達成する安全率を簡易Janbu法の達成安全率で割り、その比が1.0より何%上下するかをみたものである。変動率が正の値になるということは簡便法による達成安全率が高いということになる。

図-15(a)の地下水排除工に関しては全体の98%の地すべりで簡便法による対策工効果が大きく算出されるが、ほぼ差がないと認められる変動率の絶対値1%未満の地すべりが144件(59.2%)と大半を占める。変動率は4%程度までの頻度が高い。

図-15(b)の頭部排土工に関しては0~1%の変動率の地すべりが多く、分布形はほぼ左右対称である。つまり、簡易Janbu法の効果が大きく算出される地すべりとその逆となる地すべりの割合はほぼ同じであり、その変動率の範囲は+5%~-8%程度であることがわかる。

図-15(c)は地下水排除工と頭部排土工を併用した場合のものであるが、分布形は頭部排土工の場合の分布とほぼ同じであるが、変動率のピーク位置での頻度が減少し、変動率が1~4%の範囲で頻度が大きく増加している。これは両者の効果推定値の変動がそのまま合算されたと考えられると見ることができる。

図-16は安定解析式の違いが抑止工の効果推定に与える影響を調べたものであるが、手法は不確定要素による

(a) 地下水排除工

(b) 頭部排土工

(c) 地下水排除工+頭部排土工

図-15 安定解析式の違いによる抑制工の達成安全率の変動
Fig. 15 The change of the achievement safety factor of control works by the difference in stability analysis method

図-16 安定解析式の違いによる抑止工の必要抑止力の変動
Fig. 16 The change of the required deterrent of prevention works by the difference in stability analysis method

影響を調べた手法と同じである。横軸の必要抑止力の変動率が正の場合は簡便法による必要抑止力が大きくなるということであり、逆に言えば同一の規模の抑止工で達

成される安全率は簡便法の方が小さい地すべり地ということである。

この図での最頻値は0～1%で、正負両方の変動率が分布するが、負の変動率の方が分布範囲も広く分布数も多い。つまり、簡易Janbu法による必要抑止力が大きくなる場合が多いことを意味している。変動率の分布範囲は+20%～-58%であるが、抑止工による負担安全率が5%であることから安全率の変動率に単純換算すると1%～-3%となる。

簡易Janbu法と簡便法のどちらが対策工の効果を大きく評価するかを対策工毎に比較した表が表-3である。1%未満の違いはほぼ同値であると判断し、簡易Janbu法による工事効果が1%以上大きくなる割合を示したのが括弧内の数字である。これによると地下水排除工の効果は常に簡便法の方が大きく評価され、その他の対策工では6割から7割の地すべり地で簡便法の方が効果をより大きく算出する。6割から7割という比率は抑制工も抑止工もほぼ同じである。

図-17と図-18は安定解析式の違いによる抑制工と抑止工に関する対策工効果の違いを地すべり規模との関係でみたものである。地下水排除工だけは弦長 L が短いもののほど誤差のバラツキが大きいことがわかるが、その他の対策工については明瞭な傾向は現れない。

前節までの不確定要素に伴う対策工効果推定値の差異については簡便法でも評価したが、簡便法での変動率の分布も簡易Janbu法によるものとほとんど同じであった。

5. 考察

不確定要素による対策工効果の推定値の差異は不確定要素の種類によってその大きさや発生頻度分布が異なるが、対策工の種類による分布状況の違いがより大きいことがわかった。また、不確定要素の組合せによる対策工効果推定値の差異は加算されるものもあるが、相殺されるものやどちらか一方の影響のみが優勢になるものもある。現時点ではこれらの法則性を見いだすまでは至っていないが、次のような事実が確認された。

①地すべり縦断面の弦長 L が短い地すべりほど不確定

表-3 簡易Janbu法による工事効果が簡便法より大きく算出される地すべりの割合

Table 3 The rate of the landslide by which the construction effect by the simple Janbu method is computed more greatly than the Fellenius method

対策工の種類		地すべり地の割合
地下水排除工 ($c' = 0 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)		1.6 % (0 %)
頭部排土工		38.3% (24.3 %)
地下水排除工+頭部排土工		30.9% (19.8 %)
抑止工	($c' = 0 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)	43.2% (36.6 %)
	($c' = 10 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$)	31.4% (25.1 %)

() 内の数字は1%以上大きい場合の割合

要素の推定誤差の影響を強く受ける地すべりが多い。特に弦長 L が200m以下の地すべりは対策工効果の推

(a) 地下水排除工

(b) 頭部排土工

(c) 地下水排除工+頭部排土工

図-17 安定解析式の違いによる抑制工の達成安全率の変動と地すべり規模の関係

Fig. 17 The relation between the achievement safety factor of control works by the difference in stability analysis method and landslide scale

図-18 安定解析式の違いによる抑止工の必要抑止力の變動と地すべり規模の関係

Fig. 18 The relation between the required deterrent of prevention works by the difference in stability analysis method and landslide scale

定値に安全率差で0.2以上の大きな差異を生じる場合がある。多くのケースでは弦長 L が500mを越えると不確定要素による効果推定値の差異は小さくなる。

- ② 1つの不確定要素による対策工効果推定値の差異が対策工を併用することにより増大し、安全率の差にして0.46程度の大きな推定差異が生じることもある（土質強度定数による影響、図-12(b)）。
- ③ 土質強度定数の推定誤差の影響を強く受ける弦長の短い地すべりの中には単位体積重量やすべり面深度の推定誤差の影響をあまり受けない事例が多く存在する。
- ④ 弦長が短い地すべりで単位体積重量やすべり面深度の影響を強く受ける事例では同時に土質強度定数の影響も強く受け、両者の不確定要素に対策工効果をうち消しあうような推定誤差が生じた場合は、効果推定値の差異が相殺されて小さくなる。

これらの傾向は簡易Janbu法も簡便法もほぼ同じである。

以上の結果は計画安全率を地すべりの規模を考慮した値に設定する必要があることを示唆している。特に弦長 L が200m以下の小規模な地すべりの場合、計画安全率を1.5以上に設定しなければならない地すべりも存在する。

しかし、小規模な地すべりでも不確定要素の影響が小さい地すべりも存在している。これは地すべりの断面形状によるものであると考えるが法則性は見いだせていない。規模が小さいというだけで、計画安全率をむやみに大きくするということは経費削減の趨勢に逆行するものであり、かつ合理的ではない。現時点では解析対象の地すべり断面形状が不確定要素の影響をどの程度受けるかを安定解析時に個別に検証し、その程度を評価した上で、計画安全率を設定するという方法がより良い方法であると考えられる。

安定解析式による対策工効果推定値の差異については簡便法による効果の推定値が簡易Janbu法より大きくなる地すべりの割合が、抑制工、抑止工共に6割以上であった。この6割以上という比率の高さからも、また、簡易Janbuの方が簡便法より内部応力の釣り合いなどが考慮され、より厳密解に近いことからみても、簡便法を用いた設計が過小設計になっている地すべりが多く存在する可能性は高い。

6. おわりに

安定解析に関する不確定要素が対策工の効果推定に与える影響と、同じく安定解析式の違いが与える影響について検証した結果、次のことが明らかになった。

- ① 不確定要素による対策工効果推定値の差異はその傾度分布や地すべり規模との関係が対策工毎に大きく異なる。
- ② 単位体積重量の約10%の推定誤差に伴う排土工効果推定値の差異は、今回の計算条件の場合、全体の93%の地すべり地で1%以下の小さな差異に収まり、単位体積重量の誤差が排土工効果の推定に与える影響は小さい。

③ 地すべり縦断面の弦長 L が短い地すべりほど不確定要素による影響を受けやすい地すべりが多い。特に弦長 L が200m以下の地すべりでは安全率の差で0.2以上の大きな効果推定値の差異が発生する場合がある。弦長 L が500mを越えると不確定要素による影響は小さくなり、今回の計算条件の範囲内では効果推定値の差異は0.02程度以下であった。

④ 1つの不確定要素による対策工効果推定値の差異が対策工を併用することにより増大し、安全率の差にして0.46程度の差が生じることもある（土質強度定数の誤差が抑制工併用時に与える影響）。

⑤ 不確定要素の中では特にすべり面の土質強度定数の違いが与える影響が優勢である。他の不確定要素による効果推定値の差異はほとんどの事例で土質強度定数の違いによって相殺され影響が小さくなることが確認されたが、土質強度定数の影響は相殺されない事例が数多く存在した。

⑥ 簡便法による対策工効果の推定が簡易Janbu法によるものより大きくなる地すべりが全体の6割以上になり、この傾向は抑制工と抑止工で顕著な違いはない。地下水排除工では全体の98%の地すべり地で簡便法による工事効果推定の方が大きな効果として計算される。

今回の検証では3つの不確定要素の中ですべり面の強度定数の影響が大きいことが確認された。すべり面の強度定数の影響が大きいということは c' 、 ϕ 逆算時の安全率や地下水位分布が不適切であった場合も、工事効果の推定誤差が大きいということである。

今回の解析は全体の誤差の分布状態に着目したものであり一定の成果は得られたが、今後は誤差の現れ方の違いが弦長 L 以外の地すべり断面形状のどこの違いによるものかについて検証し、法則性を見いだす必要がある。また、今回検証した不確定要素の他に、逆算時の間隙水圧分布の違いや地すべりの移動方向と解析方向が一致しない場合の問題、3次元解析と2次元解析の問題など、対策工効果の推定に大きな影響を及ぼす要因はあるが、これらについては今後取りあげていく予定である。

参考文献

- 1) 木下 恵, 榎田充哉: 岩盤地すべりに対するJanbu式の適用性について, 第38回地すべり学会研究発表講演集, pp. 283~286, 1999
- 2) 榎田充哉, 木下 恵: 地すべりの安全率に与える不確定要素の影響について, 第39回地すべり学会研究発表講演集, pp. 313~316, 2000
- 3) 社日本河川協会: 建設省河川砂防技術基準(案)同解説計画編, pp. 85, 山海堂, 1997
- 4) 藤原明敏: 地すべりの解析と防止対策, pp. 425~426, 理工図書, 1979
- 5) 山田剛二, 渡正亮, 小橋澄治: 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, pp. 37~38, 山海堂, 1971
- 6) 申 潤植: 地すべり工学-理論と実践-, pp. 794, 山海堂, 1989
- 7) 木下 恵, 榎田充哉: 岩盤地すべりにおけるJanbu法の優位性と適用性, 地すべり, Vol. 37, No. 3, pp. 25~31, 2000
(原稿受付2001年8月23日, 原稿受理2001年10月26日)