

三次元地すべり安定解析における影響要素の モデル地すべり解析による評価

Evaluation of influence factors in three dimensional slope stability analysis
by model study and spot inspection

郎 煜 華 佐 伯 孝 中 村 浩 之
Yu-Hua LANG Takasi SAEKI Hiroyuki NAKAMURA



■三次元地すべり安定解析における影響要素のモデル地すべり解析による評価

Evaluation of influence factors in three dimensional slope stability analysis
by model study and spot inspection

(株)中部日本鉱業研究所 郎 煜華
CNK Geo-Technical Institute Inc. Yu-Hua LANG

(株)中部日本鉱業研究所 佐伯 孝
CNK Geo-Technical Institute Inc. Takasi SAEKI

東京農工大学 中村浩之
Tokyo University of Agriculture & Technology Hiroyuki NAKAMURA

キーワード：三次元安全率，モデル地すべり解析，影響要素

Key words：Three-dimensional safety factor, analyses of model landslides, influence factors

1. はじめに

地すべり現象は三次元的な土塊の移動現象であり，三次元的な安定解析が必要である。パソコンの進化と普及によって三次元安定解析が容易になりつつある。地すべり土塊を要素柱に分け，簡便法の立体版であるHovland法に基づいて（中村等，1985）地すべり三次元安定解析を行うプログラム「Fs 3 D」を開発した。これを用いて三次元地すべり安定解析における影響要素に関するモデル地すべり解析を行った。

地すべりの三次元安定解析についての既往の研究（浜崎等，1997；太田・林，1998）は事例ごとに必要抑止力の比率を計算しているが，地形，地質などの影響要素との関係については一般的な結論まで達していない。二次元モデルで地すべり安全率比に関する研究（中村等，1989）や事例データで地すべり形状および土質定数を評価する研究（郎・中村，1998）などがあるが，三次元モデルに関する研究はなされていない。

地すべり規模の平均値などを考慮に入れたモデル斜面を設定し，「Fs 3 D」を用いて異なる条件での三次元安全率および抑止力と二次元のそれらと比較し，地形，地質，地下水などの影響要素を評価した。また移動量の確認された四つの地すべり現場において，従来の二次元解析結果と「Fs 3 D」による三次元解析結果を比較し，地形，地質などによる影響を評価し，この三次元安定解析の有用性を示した。

2. プログラム概要

二次元安定解析で広く使われている簡便法は，一つの断面で内部応力を無視したスライスの抵抗力と滑動力の集合を評価する方法である。本プログラム「Fs 3 D」は地すべり土塊全体を三次元土柱の集合としてその抵抗力と滑動力の平衡を解析する方法である。解析に必要な

データは地表，すべり面，地下水の三次元座標と粘着力，内部摩擦角，および単位体積重量である。解析手順は以下の通りである。まず地質・ボーリング調査などによってすべり面等高線図および地下水面等高線図を作成し，地形図と合わせてデジタル化し，メッシュをかけて三次元データを作る。次にメッシュデータと土質常数データを含めた計算ファイルを入力し，計算結果表と応力分布図などを出力する。

「Fs 3 D」はウインドウ用に開発したもので，画面は三つのウインドウ（データ編集ウインドウ，結果表ウインドウ，と図形ウインドウ）によって構成し，各ウインドウは自由に変形できる。解析結果をデータファイル，結果ファイルおよび図形ファイルに編集・保存できる。またアイコンメニューは解析の順番に並べ，独立したヘルプファイルの充実など使いやすさを重視した。

3. モデル斜面の設定条件及び方法

地すべり規模の平均値を考慮し（渡，1995），仮三次元モデル計算の研究（郎煜華等，1996）を参考にして，7種類の影響要素（長さ，幅，厚さ，勾配，土質定数，末端形状，地下水位）を変化させ，モデル斜面に関する三次元安全率および抑止力を計算し，各要素による影響を評価した。

モデル斜面は地すべりの形状を表す係数である地すべり幅と長さの値によって図-1に示す6グループに分けて，それぞれの値はA：100m/200m，B：133.3m/200m，C：100m/150m，D：75m/150m，F：33.3m/100mである。またC型と同じ幅/長さ比(W/L)で末端形状の異なるE型斜面も設定した。地すべりの厚さ H は10m，20m，30mの3種類に，すべり面勾配 θ は15°，20°，25°の3種類に設定した。モデル斜面の三次元形状について円弧すべりと想定し，長さ，幅および厚さの3要素で決められ

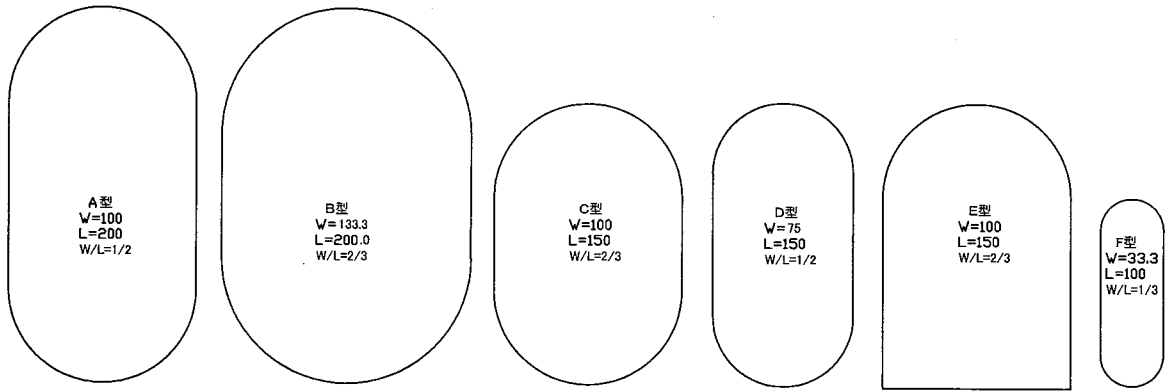


図-1 モデル斜面の平面形状
Fig.1 Plan shape of model slopes

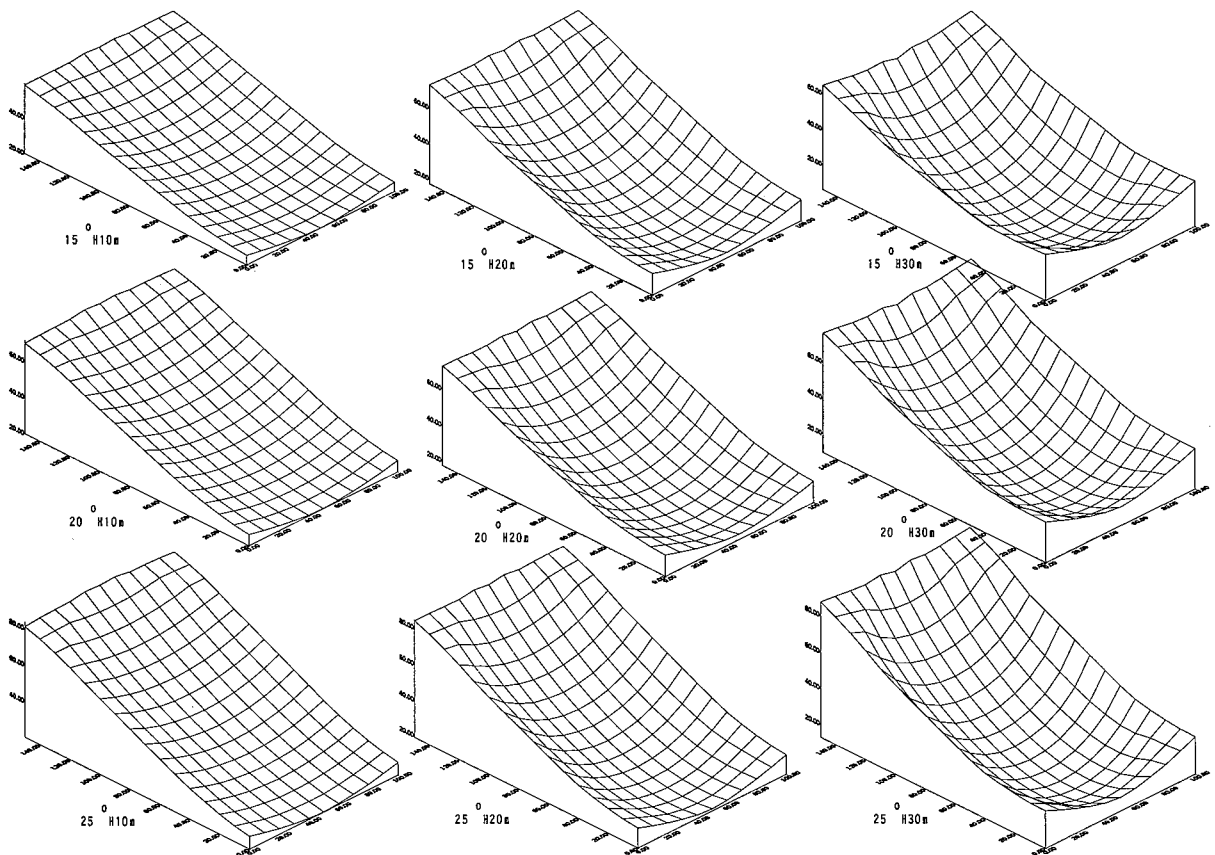


図-2 C型モデルの地すべり面三次元形状図
Fig. 2 Slip surface of model-C

る円弧に通過する形状を設定した (図-2)。

土質定数については同じ粘着力 c を使用して三次元安全率 F_3 および二次元安全率 F_2 が1.00になる場合のそれぞれの内部摩擦角 ϕ_3, ϕ_2 を逆算し, 比較した。また同じ ϕ_2 を使って計算した F_3 と F_2 との差も検証した。粘着力 c については $c=0$ のケースとすべり深度の10%と相当する値をとるケースの2ケースを比較した。

地下水については初期地下水位をすべり土塊の厚さの半分に設定し, 地下水位線はすべり末端とすべり土塊の最大厚さ位置の半分に通る直線に想定し, 2mと5m低

下した場合の F_3, F_2 との変化を比較した。

4. モデル斜面解析結果

4.1 平面形状による影響

地すべりの幅と長さの比 W/L によって決められる平面形状が三次元安全率に及ぼす影響を評価する。前項の7種の要素の内, 他の6種の要素が同じ時の異なる平面形状のモデル斜面における三次元安全率を比較する。同じ形状の三次元安全率はほぼ同じである。図-3はA型 ($W/L=1/2$), B型 ($W/L=2/3$), F型 ($W/L=1/3$) モ

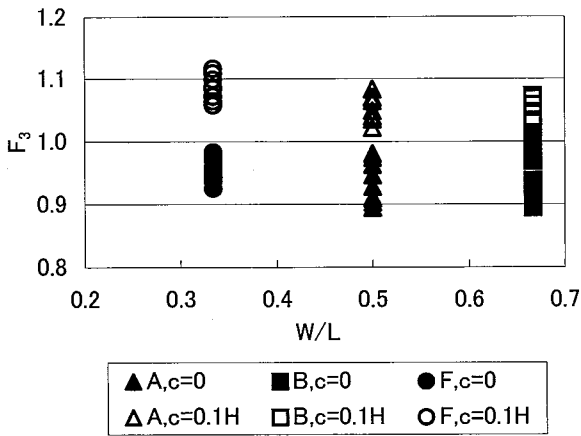


図-3 平面形状による影響
Fig. 3 Influence of plan shape

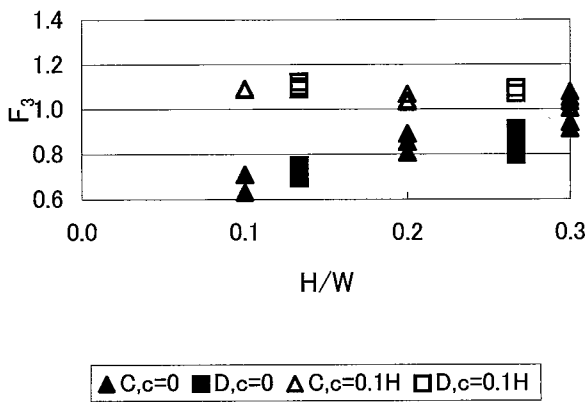


図-4 横断形状による影響
Fig. 4 Influence of section shape

デル斜面の三次元安全率の異なる形状時の値を示す。図の横軸は平面形状 W/L (地すべり幅 W と長さ L の比)で、縦軸は三次元安全率である。即ち、横軸は大きいほど地すべりの平面形状が丸くなる。三角、四角、丸はそれぞれA型、B型、F型モデル斜面を表す。黒マークは粘着力が $c=0$ の条件で、中抜きの白マークは粘着力が地すべり厚さ10%に相当する値を条件にしたケースである。B型の方 (W/L が大きい) F_3 は F_2 の1.00に近づくことがわかる。即ち地すべりの平面形状が丸いほど F_3 と F_2 の差が小さくなる。

4.2 横断形状による影響

厚さと幅の比 H/W によって決められる横断形状が三次元安全率に及ぼす影響を評価する。図-4はC型 ($W/L=2/3$) D型 ($W/L=1/2$) モデルの三次元安全率の異なる横断形状時の値を示す。図の横軸は横断形状 H/W (地すべり厚さ H と幅 W の比)で、縦軸は三次元安全率である。即ち、横軸は大きいほど地すべりの横断形状が深くなり、地すべりの厚さが相対的に大きくなる。 H/W が大きいほど F_3 は F_2 の1.00に近づくことがわかる。即ち地すべりの横断形状が深いほど F_3 と F_2 の差が小さくなる。

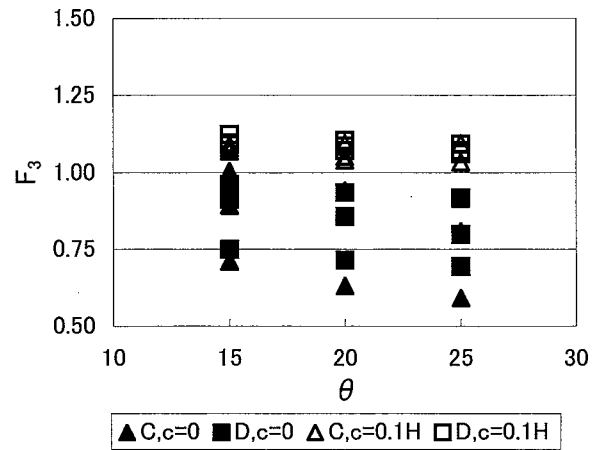


図-5 斜面勾配による影響
Fig. 5 Influence of slope gradient

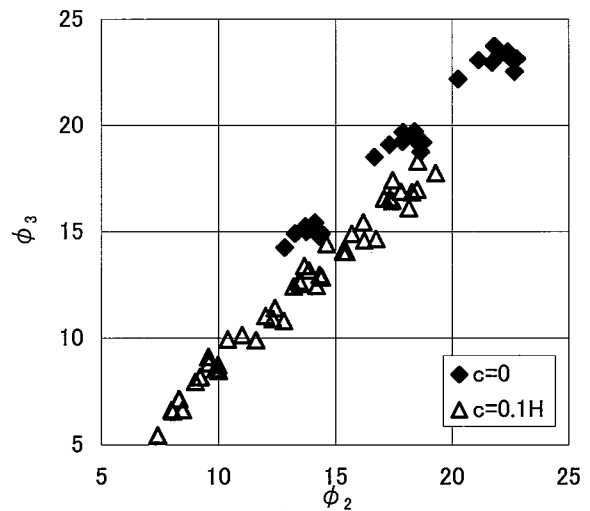


図-6 内部摩擦角による影響
Fig. 6 Influence of internal friction angle

4.3 すべり面勾配による影響

図-5はすべり面勾配と三次元安全率の関係を示している。三角と四角はそれぞれC型、D型モデル斜面に関する計算結果を示す。横軸はすべり面勾配で、縦軸は三次元安全率である。異なる斜面や粘着力のモデル斜面のすべり面勾配を 15° 、 20° 、 25° に変化させ、三次元安全率を計算した。勾配が大きいほど F_3 が小さくなることが確認できる。

4.4 粘着力による影響

図-5からわかるように c が0のときに F_3 は F_2 より小さく、その低下幅も大きい。 c がすべり面厚さの10%に相当する値をとるときに F_3 は F_2 より大きく、その変化幅は狭い。

4.5 内部摩擦角による影響

同じ粘着力 c で $F_3=1.0$ 、 $F_2=1.0$ ときの摩擦角 ϕ_3 、 ϕ_2 を計算・比較した。図-6の横軸は $F_2=1.0$ ときの二次元内部摩擦角 ϕ_2 で、縦軸は $F_3=1.0$ ときの三次元内部摩

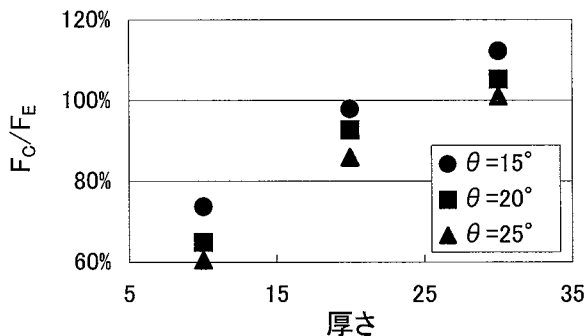


図-7 末端形状による影響
Fig. 7 Influence of front shape

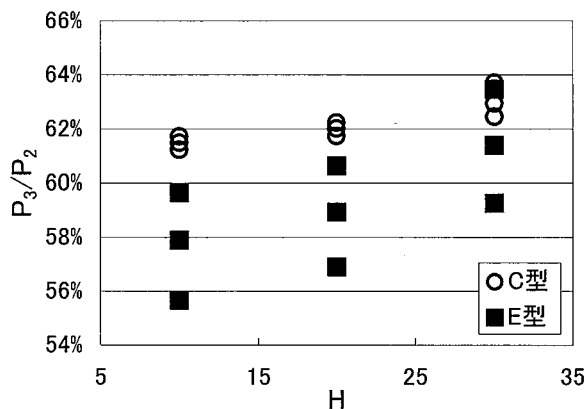


図-9 必要抑止力の比率
Fig. 9 Ratio of restraint pressure

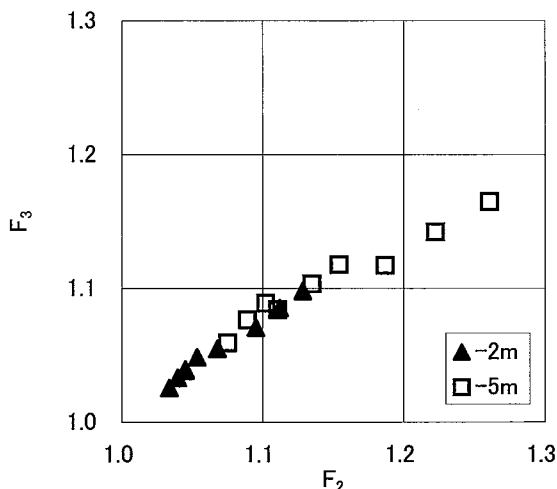


図-8 地下水低下の評価
Fig. 8 Influence of groundwater

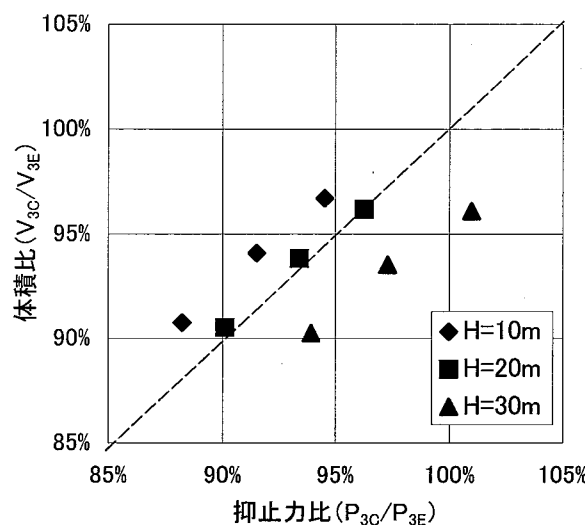


図-10 抑止力比と体積比
Fig. 10 Relation between the ratio of restraint pressure and volume

擦角 ϕ_3 である。 $c = 0$ の場合に逆算で求めた三次元摩擦角は二次元のそれよりやや大きい、 $c = 0.1H$ の場合に逆算で求めた三次元摩擦角は二次元のそれよりやや小さい。

4.6 末端形状による影響

C型とE型は二次元中央断面が同じで、末端形状の異なる三次元モデル斜面である。同じ F_2 のときの F_3 の差を比較した。図-7の横軸は厚さで、縦軸はC型とE型の F_3 の比である。厚さの増大に伴って末端形状による影響が大きくなることを示している。

4.7 地下水低下の評価

地下水位が2mと5m低下した場合の F_3 、 F_2 の変化を図-8に示した。計算条件はC型モデル斜面で、 c はすべり厚さの10%の値とし、 F_2 、 F_3 ともに1.0から逆算したそれぞれの c 、 ϕ を用いた。図の横軸は地下水位が低下したときの二次元安全率で、縦軸は地下水位2m、5m低下したときのそれぞれの F_3 である。地下水位が低下したときの三次元安全率は二次元安全率よりやや小さい。地下水位の変動幅が大きいほど F_3 と F_2 の差が大きくなる。

4.8 必要抑止力の比率

三次元安定解析で得られた必要抑止力 P_3 と二次元安定解析で得られた必要抑止力 P_2 の比を抑止力比と定義し、地すべり形状による抑止力比の変化を調べた。図-9の

横軸は地すべり土塊の厚さで、縦軸はC型およびE型の抑止力比である。厚さの増大に伴って抑止力比も増大する傾向が見られる。E型の抑止力比はC型のそれより小さい。C型とE型の地すべり斜面は二次元断面が同じで、三次元的にE型の体積はC型のそれより大きいから、体積と抑止力の関係を調べた。図-10はC型とE型の体積比と抑止力比との関係を示している。抑止力比の増大は体積比の増大と同じ傾向である。地すべりが厚くなるほどその抑止力比が大きくなる。

5. 地すべり事例における三次元安全率の比較

「Fs3D」を地すべり移動の確認された4現場に適用して検証した。なお地すべり形状と運動方向が複雑な事例について詳しく解析し、三次元解析のメリットを明示した。

5.1 A地すべり

A地区はケスタ地形を呈する山稜の傾斜面にある。この緩傾斜地は東～北東方に5～10°傾斜し、南西部は比

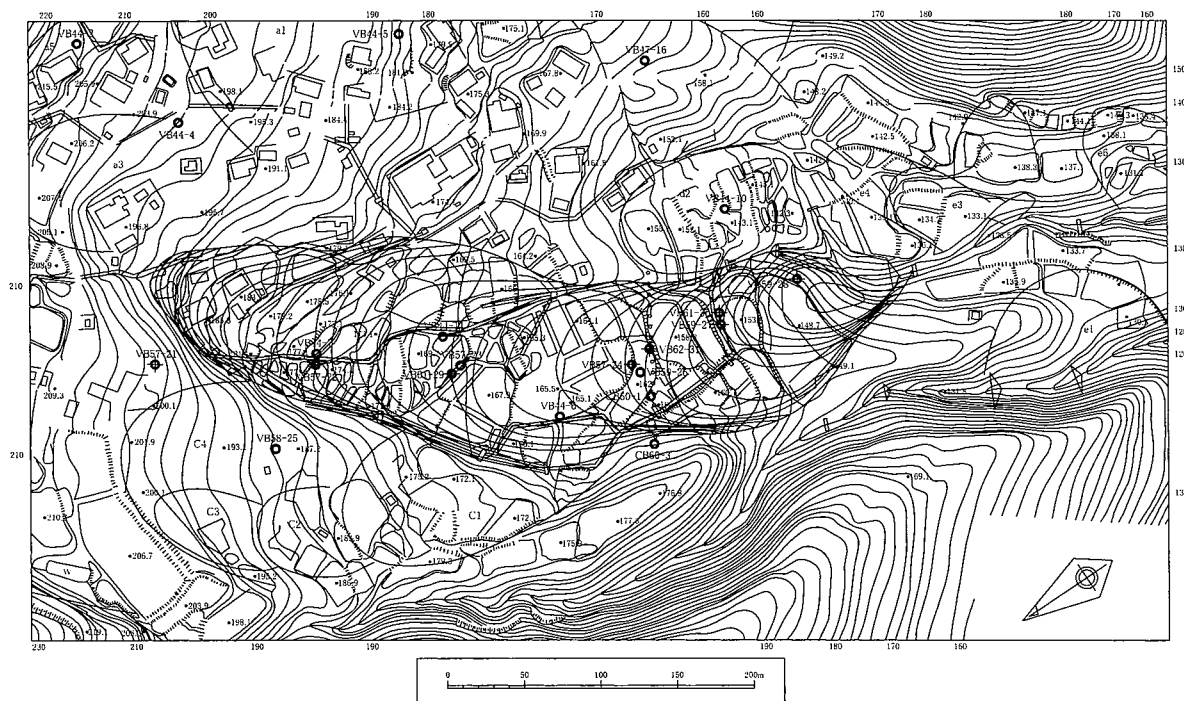


図-11 A地すべり平面図
Fig. 11 Plan map of Landslide-A

較的広大な斜面で人家等が集まっている。そして、緩傾斜地中部に見られる比高差10~15m程度の湾曲した急崖を境に、これより北東側(斜面下方側)は、三方を急崖に囲まれた形の緩傾斜地(下部水田地帯)となる。さらに、この水田地帯の北東端は支尾根によって狭められ、細長く伸びる平坦地となっている(図-11)。

地すべり頭部は、馬蹄形状の比高差約15mの急崖に囲まれており、民家等構造物の基礎部に大きな亀裂が認められる。また、頭部~中央部の水田地帯においては、“千枚田”状の小区画の水田になっており、古くから畦畔の変更のあったことが伺われる。

当地区を構成する基盤岩は新第三系中新統八尾累層中部の沢川凝灰岩砂岩泥岩互層よりなる。岩相は凝灰質砂岩・凝灰岩・砂岩・泥岩が不規則に重なり合った地層で、各層とも2m以上の厚層が多い。

当該ブロック内で行われた移動量観測においては、すべり面付近において10~20mmの変位量が確認されている。

5.2 G地すべり

G地区は比較的低下丘陵性の山地内にあり、南方に向かって高度を増す傾向にあるものの、稜線部の標高は200m~300m程度である。この地域一帯には大規模な河川はなく、小河川が網目状に発達しているが、調査地を含む南部地域では基盤の地質構造を反映して、北方に向かう緩傾斜面あるいはケスタ地形が発達している。このような緩傾斜面上には新旧の地すべり地が発達している。周辺一帯には新第三紀中新世の黒瀬谷累層伏木谷泥岩部層が広く分布しており、北方に緩く傾斜する同斜構造をなしている。また、この泥岩部層は塊状をなす泥岩層の

ほかに所々砂岩層や凝灰岩層が狭在しており、稀に細礫を主とする薄い礫岩層も見られる。地層の走向傾斜は、ほぼEW方向で北方に10°余りで傾斜しており、凝灰岩層は良好な鍵層になっている(図-12)。

当ブロックは、幅40~90m・長さ330mにわたり、北向きの谷地形の中にある。地形的な特徴として本地すべりは谷の曲がり角に沿って曲線状になっている。

5.3 N地すべり

N地区は、庄川支流N川の右岸に位置する標高580~630m位の山地にある。この山地は、地区南西方の標高933.5mの山地より派生する山稜の北向き斜面にあたる。東北流するN川は、現場付近では兩岸を深く穿ってV字谷を形成して流下しているが、上流域の谷底にはかなり幅の広い平地が発達している。調査地一帯は、飛騨新期深成岩類に相当する花崗岩類と、それを被って分布する新第三紀中新世岩稲累層との境界付近にあたる。調査地周辺では、花崗岩及び泥質のホルンフェルス及びこれらを母岩とする崖錐崩積土が分布している(図-13)。

本地すべり地は、古期の大規模な地すべり斜面の東端に位置している。ブロック規模は、幅100m、長さ70m、すべり面勾配28°である。

5.4 T地すべり

T地区は富山県の南部、神通川のK川沿いに位置する。周辺は河床部の標高が200m余り、稜線部の標高が500~600mの比較的起伏の大きい山地地形をなしているが、所々台地状の平坦地や起伏の多い緩斜面が形成されており、古い地すべり滑動の跡が多く見られる。地質は新第三紀中新世の岩稲層の凝灰岩礫岩や凝灰岩等の火山岩類

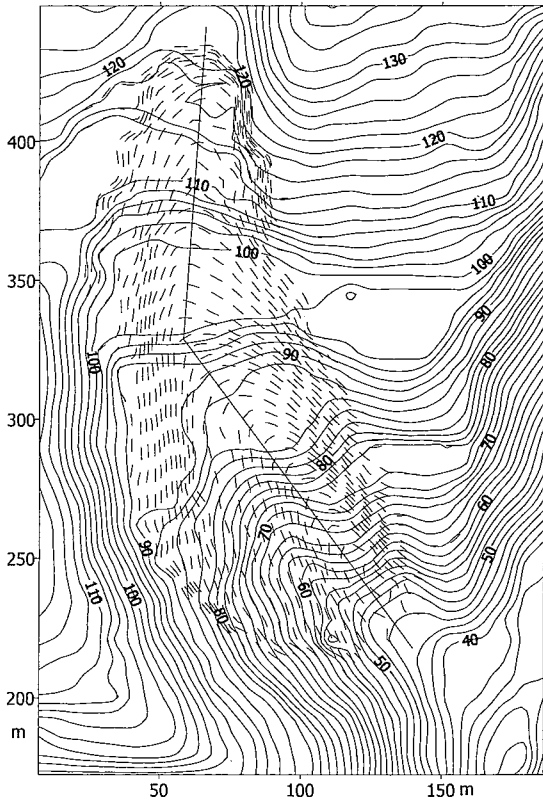


図-12 G地すべり平面図
Fig. 12 3 D frame of slip surface in Landslide-G

を主としたいわゆるグリーンタフ層準であり、NE-ENE 走向で北に約25°の傾斜である(図-14)。

該当ブロックにおいては後方の旧期岩盤地すべりブロックの2次地すべりブロックであり、K川にむかって移動している。地質構造からいうと流れ盤の地すべりで、ブロック規模は幅50~85m、長さ170m、すべり面深度18m、すべり面勾配20°である。

ブロックの形状は不規則かつ長軸は川へ斜めに入るため、運動方向と二次元主断面の確立は困難である。この地すべりにおいて5断面を設定し、それぞれの安全率と内部摩擦角の変化を比較した(図-15)。

6. 事例解析結果

4現場に関する解析結果を表-1に示す。地形的な特徴が異なるにも関わらず同じ c, ϕ の場合には殆どの三次元安全率は二次元のそれより大きい。即ち同じ安全率で逆算する三次元 ϕ_3 は ϕ_2 より小さい。

図-14はT地すべりの平面図、図-15はT地すべりの5断面を示す。断面IIからIVまでは調査時に設定した断面で、断面V, VIは本研究における計算断面である。表-2は三次元安全率 F_3 と各断面の二次元安全率 F_2 及び逆算された内部摩擦角との関係を示す。表-2からわかるように各断面の二次元安全率が1.00のときに逆算された ϕ は7.51°から45.22°と大きく異なっている。そして三次元安全率を1.00として逆算された ϕ 24.92°を用いて計

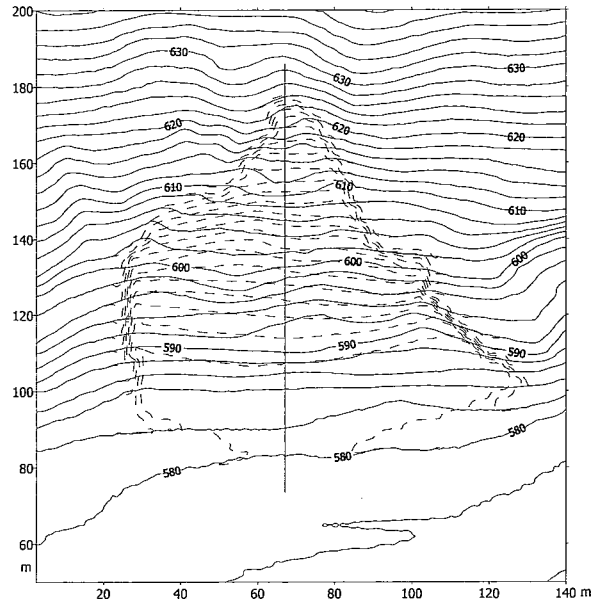


図-13 N地すべり面平面図
Fig. 13 Contour map of slip surface in Landslide-N

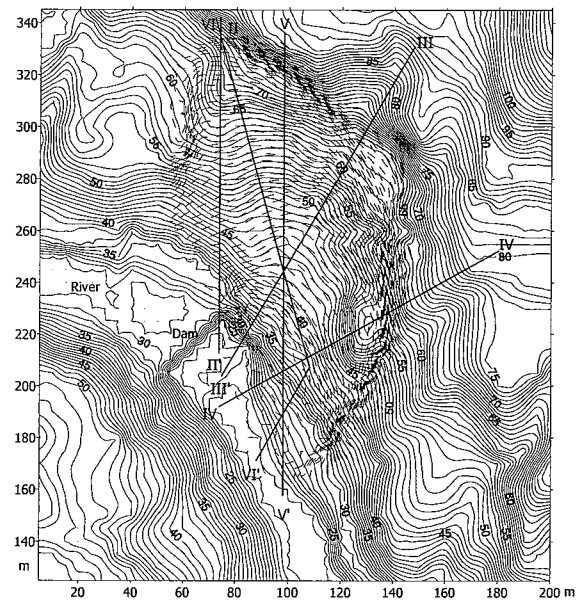


図-14 T地すべり平面図
Fig. 14 Plan map of Landslide-T

算した結果、断面IIIの F_2 は三次元のそれと同じになる。しかし、断面IIIのすべり方向90.4°は三次元計算で得られたすべり方向101.3°とは10.9°の差がある。

7. まとめ

モデル地すべりの三次元安全率および抑止力をプログラム「Fs3D」で解析し、二次元のそれらと比較して、地形要素、土質定数、地下水などが三次元安全解析結果と二次元安定解析結果の差に与える影響を明らかにした。

本研究で得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) 地形形状について以下の場合には F_3 と F_2 の差が小さ

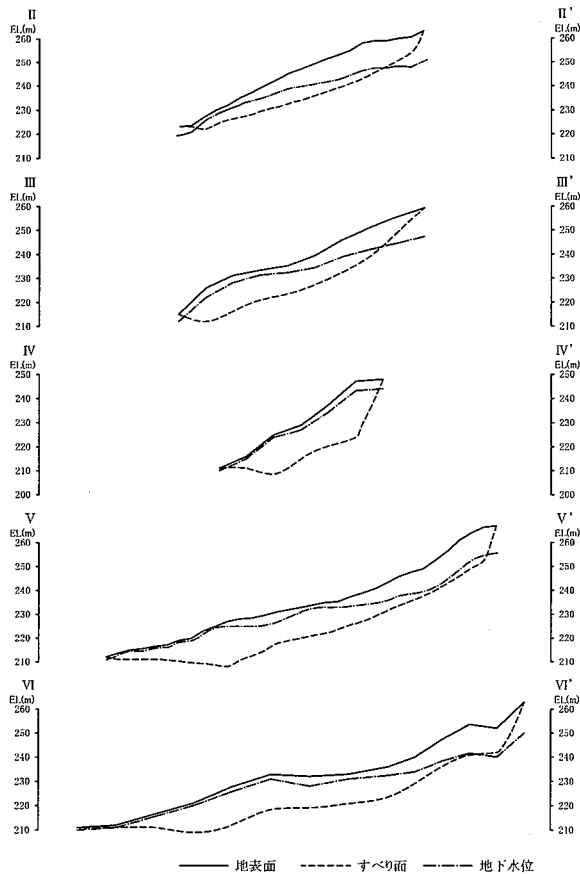


図-15 T地すべり断面図
Fig. 15 Section of Landslide-T

い: 地すべりの平面形状が丸い, 横断形状が深い即ちすべり面深さと地すべり幅の比が大きい, すべり面勾配が小さい。

- 2) 粘着力についてすべり面深さの10%の値をとる c とそれに基づいて逆算された ϕ を用いたときに F_3 は F_2 より大きい, その差は小さく, 概ね0.2以内である。 $c = 0$ の場合に F_3 は F_2 より小さい, その差が大きく, モデル斜面の条件内で0.55の差があった。
- 3) 内部摩擦角について三次元安定解析で逆算された ϕ_3 と二次元の ϕ_2 との差は小さく, ほとんど 3° 以内であり, 地形形状などから受ける影響が少ない。
- 4) 地下水位の変動幅が大きいほど F_3 と F_2 の差が大きくなる。
- 5) 三次元抑止力は二次元抑止力より大きい。抑止力の増大は体積の増大と同じ傾向である。
- 6) 「Fs 3D」を用いて地すべり移動の確認された4現場に適用して検証した結果, 地質・地形などと関係なく三次元安全率は二次元のそれよりやや大きいことが確認された。また本文に述べたG地すべりような形状が複雑な地すべりや, T地すべりような主断面の設定が

表-1 現場検証一覧表

Table 1 Comperation of the 4 landslides

	A現場	G現場	N現場	T現場
長さ(m)	500	330	70	170
幅(m)	180	40-90	100	50-85
勾配($^\circ$)	5	18	28	20
地質	第三紀泥岩凝灰岩	第三紀泥岩	第三紀泥岩	第三紀凝灰岩
特徴	すべり面勾配小さい	地すべり方向曲がる	すべり幅広い	主断面判断困難
$C(KN/m^2)$	6.00	13.00	15.00	15.00
$\phi(^\circ)$	9.40	18.78	23.61	24.92
F_2	1.00	1.00	1.00	0.58~2.29
F_3	1.18	1.21	1.09	1.00

表-2 三次元安全率と各断面の二次元安全率との関係
Table 2 Comperation of F_3 and F_2 in different sections

断面	$c(KN/m^2)$	ϕ	F_3	F_2	ϕ	F_2
sec-II	15	24.92	1.00	1.27	18.62	1.00
sec-III	15	24.92	1.00	1.00	24.89	1.00
sec-IV	15	24.92	1.00	0.58	45.22	1.00
sec-V	15	24.92	1.00	1.22	19.56	1.00
sec-VI	15	24.92	1.00	1.61	13.05	1.00

困難な地すべりについて三次元安定解析は唯一の安全率とすべり方向を計算でき, 応用の可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 太田英将, 林義隆(1998): 地すべり三次元安定解析の利用方法(その1), 第37回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 441-444.
- 浜崎英作, 稲垣裕, 萩野隆(1997): 三次元斜面安定解析について, 第36回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 263-266.
- 中村浩之, 新田邦弘(1989): 極限平衡法による地すべり斜面安定計算式の比較と応用, 土木研究所資料, No. 2805.
- 中村浩之, 中島茂, 吉松弘行(1985): Hovland法による地すべり三次元安定解析手法, 土木研究所資料, No. 2265.
- 郎焯華, 佐伯孝(1999): 三次元地すべり安定解析およびその影響要素の評価, 第38回地すべり学会研究発表会講演集, pp. 279-281.
- 郎焯華, 中村浩之(1998): 黄土地すべりのすべり面形状の特性と崩土の拡散範囲の予測, 地すべり, Vol. 35, No. 1
- 郎焯華, 中村浩之, 網木亮介(1996): 再活動型地すべりおよび初生地すべりの地震時安全率の変化, 平成8年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 51-52.
- 郎焯華, 中村浩之(1996): 地震による崩壊の特徴とそのモデル斜面における理論的解析-中国永登地震を例として-, 地すべり, Vol. 34, No. 3, pp. 25-33.
- LANG Yu-Hua, NAKAMURA Hiroyuki(1997): Influences of the horizontal and vertical seismic force on earthquake induced landslide, Journal of Gansu Sciences China, Vol. 9, No. 36, pp. 91-98.
- 渡正亮(1995): 研修ガイダンスのための地すべり概論, 平成7年度版地すべり防止技術研修テキスト上巻, (社)地すべり対策技術協会, pp. 1-48.

(原稿受付2001年8月27日, 原稿受理2002年8月7日)