

2. FEMによる地すべり解析の基礎理論

Fundamental theories of FEM for landslide analysis

山崎孝成／国土防災技術株式会社

Takanari YAMASAKI／Japan Conservation Engineers Co., Ltd.

山田正雄／国土防災技術株式会社

Masao YAMADA／Japan Conservation Engineers Co., Ltd.

キーワード：地すべり，変形係数，ポアソン比，ピーク強度，残留強度

Key words：landslide, modulus of deformation, poisson's ratio, peak strength, residual strength

2.6 地盤パラメータの設定

2.6.1 はじめに

(1) 本節の目的

FEM解析においては、①地盤形状の設定、②メッシュ作成、③物性値（地盤パラメータ）の設定、④境界条件（あるいは拘束条件）の設定、⑤解析実行、⑥結果表示という流れが一般的である。

本節では③の物性値（地盤パラメータ）に関して既存文献のレビューを行い、すべり面のせん断強度パラメータについては、最近の研究成果を踏まえた解説を行う。

(2) 地すべり地における各種物性値の必要性

沖積層や洪積層および新鮮な岩盤に関する物性値については多くのデータが蓄積され、構造物の設計用に基準化されているものもある。最近地盤工学会から出版された「地盤技術者のためのFEMシリーズ②」¹⁾では、これらの物性値が解析者に使いやすいかたちでまとめられているので参照されたい。

一方、地すべり地においては、①実用に供されている安定解析が2次元の極限平衡法が主流であるため、FEM解析があまり行われていないこと、②地すべりの移動土塊および地すべり的には基岩とされる不動層が、不淘汰の礫と粘性土の混合層・風化岩・破碎岩で構成されているため、ボーリングコアによる土質・岩石試験に困難が生じること、以上の理由などにより、公表されている物性値のデータは、少ないのが現状である。

しかしながら、潜在的なすべり面が存在する斜面における切土の影響やアンカー工がすべり面下に位置するトンネルに与える影響などは、FEM解析による評価が必要である。したがって、地すべり地においても、各種物性値の原位置および室内試験を実施し、データの蓄積が必要になってくると思われる。

2.6.2 各種地盤パラメータ

(1) 湿潤単位体積重量(γ)

移動層は一般的に18(kN/m³)の値が使われているが、地すべり地において採取されたボーリングコアを用いて計測した752個のデータを表-1に示す。

計測したコアは棒状コアを選ばざるを得ないため、実

表-1 ボーリングコアによる湿潤単位体積重量

地質・土質	平均	標準偏差	信頼区間 (95%)	データ数
粘性土・砂質土・ ローム・変質安山岩	19.1	0.13	0.25	334
マサ土	16.9	0.61	1.38	10
泥岩・風化泥岩	20.8	0.27	0.54	131
砂岩・礫岩・頁岩・ 凝灰角礫岩	22.4	0.23	0.46	91
凝灰岩・風化凝灰岩	18.2	0.41	0.84	39
花崗岩類	23.1	0.55	1.12	28
変成岩・蛇紋岩	28.2	0.20	0.41	76
火山岩	23.6	0.49	1.00	43
単位kN/m ³				計 752

際の値より少し大きめの値になっていると推定される。変成岩・蛇紋岩がかなり大きな値になっているのは、緑色岩と蛇紋岩が全体の約60%を占めているのが影響しているためである。ちなみに結晶片岩のみの平均値は26.4(kN/m³)である。

近年のコア採取はコアパックを使用しているため、コア長・コア径およびコア箱の重量を計測し、コア箱自体の重量を引けば γ を簡単に求めることができる。この方法であれば、例えば空洞があったり木片が採取されていたとしても、最も原位置に近い γ が得られるので、現場において採取直後に実施するのが望まれる。

(2) 変形係数(E)

1) ボーリングコア試験による変形係数

山田(1989)²⁾のデータを地質別に再編集し、SI単位に換算した一軸圧縮強度と変形係数の関係を図-1に示す。得られた相関式を式(1)に示す。

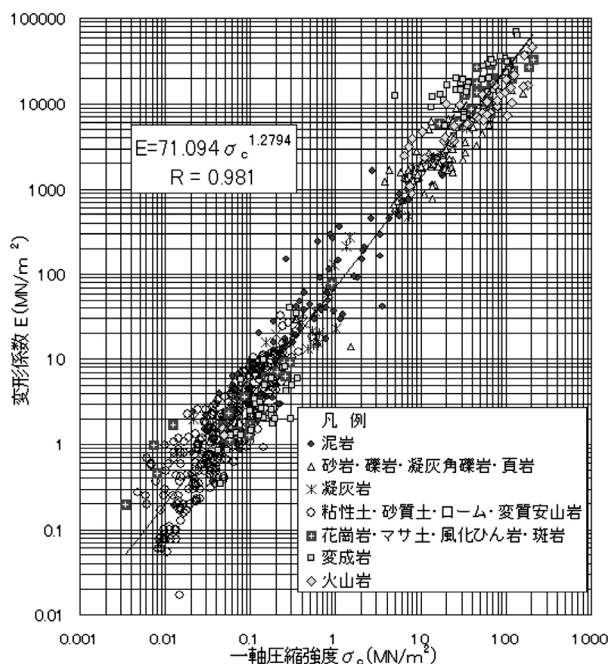
$$E(\text{MN/m}^2) = 71.1\sigma_c^{1.28} \dots\dots\dots(1)$$

(相関係数 $R = 0.981$)

地すべり地のコアであるため、一軸圧縮強度の小さい(0.3MN/m²以下)ものと大きい(5MN/m²以上)ものが多いが、その中間のデータが少ないという特徴がある。礫混り土や強風化岩・破碎岩は試験に使用できるような棒状コアとして採取されないのが原因である。

相関係数はかなり高いので、孔内水平載荷試験のデー

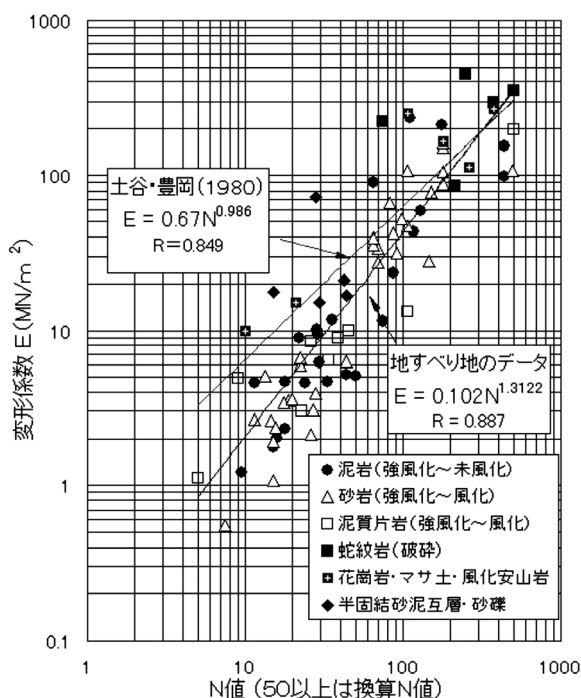
タがない場合の変形係数の推定値として利用可能であるが、条件の良いコアを使用しているので、原位置の変形係数よりは高めの値になる点に留意する必要がある。



図－1 一軸圧縮強度と変形係数の関係

2) 孔内水平載荷試験による変形係数

地すべり地で計測された変形係数は極めて少ないが、ボーリング孔で実施された孔内水平載荷試験（LLTとエラストメータ）の E 値と同時に実施された標準貫入試験 N 値との関係を図－2，相関式を式(2)に示す。



図－2 N 値と孔内水平載荷試験による変形係数 E

$$E \text{ (MN/m}^2\text{)} = 0.102N^{1.312} \dots\dots\dots(2)$$

(相関係数 $R = 0.887$)

地すべり地以外のデータでは土谷・豊岡 (1980)³⁾の N 値と変形係数 E の関係図があり、図－2に回帰曲線を追加し、相関式を式(3)に示す。

$$E \text{ (MN/m}^2\text{)} = 0.670N^{0.986} \dots\dots\dots(3)$$

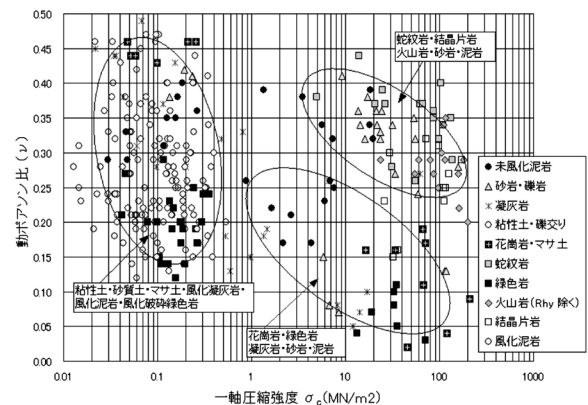
(相関係数 $R = 0.849$)

地すべり地の N 値から得られる変形係数は、非地すべり地から得られた E 値より小さい傾向にある。換算 N 値200以下で徐々にその傾向が強まるが、地すべり地は土谷・豊岡(1980)³⁾が対象にした沖積層・洪積層と比較すれば、土質が不均質であるためと考えられる。移動層の多くが礫混り土で構成されているため、礫の影響を受けて高めの N 値が計測され、 N 値が高い割には小さい E 値になると思われる。なお、データの半固結砂泥互層・砂礫は最上部鮮新統～中部更新統の河成～湖成堆積物である。

(3) ポアソン比(ν)

地すべり地の試料で計測されたポアソン比も極めて少ない。ポアソン比を測定するためには、コアの長軸および円周方向にひずみゲージを添付して行うが、風化岩や礫混り土・粘性土は添付が難しく、しかもコア自体が均質ではないため測定は困難である。

そこで、地すべり地で採取されたコアを用いてP波およびS波振動子による超音波試験を行い、得られたP波とS波から動ポアソン比を求めた結果を図－3に示す。



図－3 一軸圧縮強度とポアソン比の関係
(地すべり地の346個のデータ)

一軸圧縮強度が大きくなると、ポアソン比が小さくなる傾向は認められるが、ポアソン比は含水比によっても変化する(例えば三木(1978)⁴⁾)ので、砂岩、凝灰岩、花崗岩、蛇紋岩および火山岩にやや相関関係が認められるが、そのほかの地質では明瞭な関係は認められない。地質別にみたポアソン比の分布範囲を表－2にまとめて示す。

一般的には地盤の変形解析にポアソン比が大きく影響しないので、参考値としては利用可能である。

表-2 地質区分による動ポアソン比の範囲

地質	一軸圧縮強度 σ_c MN/m ²	動ポアソン比 ν
礫混り粘土, 粘性土, 砂質土, 変質安山岩, ローム	0.01~0.3	0.15~0.47
マサ土	0.05~0.3	0.44~0.46
風化泥岩	0.03~0.4	0.15~0.47
風化凝灰岩	0.02~0.5	0.15~0.45
泥岩・シルト岩	0.04~20	0.17~0.40
砂岩・礫岩	0.1~60	0.10~0.40
凝灰岩	0.6~20	0.05~0.35
風化破碎緑色岩	0.04~0.4	0.15~0.30
火山岩(流紋岩除く)	20~200	0.20~0.35
花崗岩	15~200	0.05~0.20
緑色岩	10~70	0.05~0.10
結晶片岩	25~100	0.15~0.30
蛇紋岩	5~130	0.25~0.40

表-3 は申 (1989)⁵⁾がHobst and Zajic (1983)⁶⁾の岩石の変形係数, ポアソン比をまとめたものである。この表は岩石の種類, 風化度合いに応じてポアソン比を提示しているので, 解析者には利用しやすいと思われる。

表-3 岩石の変形係数・ポアソン比 (Hobst and Zajic)

岩種区分	地質と風化状態	単軸圧縮強度 (MN/m ²)	変形係数E (MN/m ²)とポアソン比		
硬岩1	a) 新鮮な火成岩, 変成岩	60以上	密度小	密度中	密度大
	b) 新鮮な堆積岩(厚層)		5000以上	2000~5000	500~2000
硬岩2	a) 部分風化火成岩・変成岩	15以上	2000以上	500~2000	100~500
	b) 部分風化堆積岩(厚層)				
硬岩3	a) 新鮮な堆積岩(板状)				
	b) 風化火成岩・変成岩	10以上	500以上	100~500	500~1000
硬岩4	a) 風化堆積岩(※板状)	10以上	50~100	30~50	
	b) 部分風化堆積岩(薄層)				
軟岩1	新鮮な/固結した	2~10	50~100		
軟岩2	部分風化/中程度に固結	1~2	30~50		
軟岩3	風化/あまり固結していない	0.3~1	20~30		

単軸圧縮強度: 5cm立方の岩石試料についての試験値, 水で飽和した試料について試験
※ 変質した火成岩や変成岩は土として取り扱う

(申 (1989)⁵⁾の表をMN/m²に修正)

2.6.3 粘着力(c)とせん断抵抗角(ϕ)

(1) すべり面粘土の残留せん断抵抗角(ϕ_r)

日本の地すべりの多くが再滑動型の地すべりであることは良く知られているところである。その特徴は, 最終的にせん断された主変位せん断面であるすべり面が鏡肌を呈し(例えば山崎ほか (2003)⁷⁾), すべり面粘土のせん断強度は残留強度に低下していることである。

すべり面は数mm(第三系)~数cm(変成岩)の薄層を形成し, その上下には数十cm~数mのせん断帯を伴い(一般的にはすべり面から上部の方がせん断帯が厚い), 従属せん断面が多数発達しているのも特徴である。

すべり面粘土の残留強度を求めるためにリングせん断試験が多く用いられているが, 山崎ほか (2000)⁸⁾は第三系の泥岩・凝灰岩を源岩とするすべり面粘土以外は, 安定解析との整合性が得られないとし, その原因は実際のすべり面粘土を構成している粒度構成とリングせん断試験に使用する調整試料の粒度構成が大きく異なることを指摘している。

矢田部ほか (1991)⁹⁾は, 破碎帯地すべりのすべり層の粘性土には砂と礫の含有量が多いことから, 残留強度に

与える粒度の影響を調べ, 砂分の含有率が30%を越えると影響が大きくなり, 80%を越えると砂のみの残留強度を示すこと明らかにしている。

また, 山崎ほか (2000)⁸⁾はイライトとモンモリロナイトの混合試料に対するリングせん断試験結果から, モンモリロナイトが30%以上含まれるとせん断強度がモンモリロナイトに規制され, 残留せん断抵抗角 $\phi_r = 4^\circ$ 前後の値を示すことを述べている。

最も理想的にすべり面粘土のせん断強度を求める方法は, すべり面そのものをせん断面とする原位置せん断試験である。真弓ほか (2003)¹⁰⁾は, すべり面をせん断面に一致させることができる繰返し一面せん断試験機(すべり面せん断試験機)を開発し, 全国の地すべり地から不攪乱採取した124個の試料を用いて, せん断試験を行っている(図-4参照)。

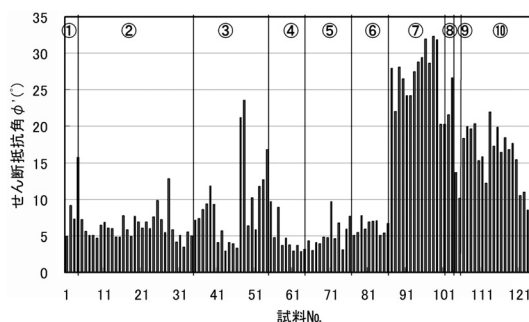


図-4 日本各地のすべり面せん断試験結果
(真弓ほか (2003)¹⁰⁾①~⑩は表-4の地質No.に対応)

地質毎の残留せん断抵抗角 ϕ_r を表-4にまとめて示す。なお, 残留強度状態のすべり面粘土の粘着力は, 解析上 $c_r = 0$ としてよい。

表-4 地質毎のすべり面せん断試験結果一覧表

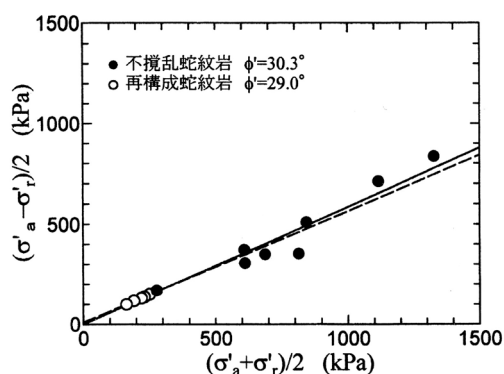
地質	地質No.	残留せん断抵抗角 ϕ_r	
		mini ~ max	平均
古第三系以前の堆積岩	①	5 ~ 16	9
新第三系 凝灰岩	②	4 ~ 13	6
" 凝灰角礫岩	③	3 ~ 24	9
" 凝灰質泥岩・泥岩	④, ⑤	3 ~ 10	5
" 熱水変質安山岩	⑥	5 ~ 8	6
三波川 泥質片岩	⑦	20~32	27
" 塩基性片岩	⑧	22~27	24
長崎変成岩(雲母片岩)	⑨	10~14	12
御荷鉾緑色岩類	⑩	8 ~ 22	16

(2) 地すべり移動層(蛇紋岩)のせん断抵抗角(ϕ_p)

三田地ほか¹¹⁾は, 気泡ボーリングで採取された粘土化した蛇紋岩の不攪乱試料および再構成試料(攪乱試料)を用いて, 三軸圧縮試験によるピークせん断抵抗角を求めている(図-5参照)。理想的な不攪乱状態の蛇紋岩に対して行った三軸圧縮試験としては, おそらくこれまでに例のない貴重な試験といえる。

図-5に示すように, ピーク強度は不攪乱試料で $\phi = 30.3^\circ$, 再構成試料では $\phi = 29.0^\circ$ を示し, ほぼ同じ値で

ある ($c' \approx 0$ kPa)。更に風化粘土化蛇紋岩の葉片に沿って二分し、試料の表面を磨いて行った繰り返し一面せん断試験では $\phi_r = 6.5^\circ$ の値を得ている。



図一五 不攪乱および再構成蛇紋岩の三軸CU試験結果
(三田地ほか (2003)¹¹⁾)

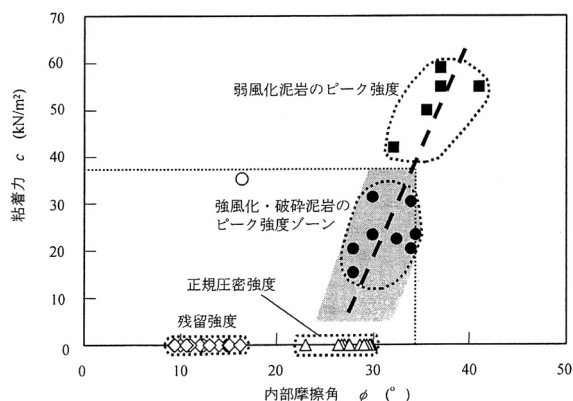
横田ほか (1995)¹²⁾は蛇紋岩風化粘土の再構成試料を用いて、三軸圧縮試験とリングせん断試験を行い以下のような結論を得ている。

- ① アンチゴライト (antigorite) とクリソタイル (crysotile) を主成分とする試料によるピーク強度および残留強度は $\phi_p' \approx \phi_r = 30^\circ$ 前後の値
- ② 滑石 (talc) を主成分とする場合はピーク強度及び残留強度はともに小さく、 $\phi_p' \approx \phi_r = 20^\circ$ 前後の値
- ③ モンモリロナイト (montmorillonite) および緑泥石 (chlorite) が主成分の場合は、antigorite と chrysotile を主成分とする試料の ϕ_p' 、 ϕ_r より 10° 以上小さく、残留強度への低下が大きい

したがって、蛇紋岩分布地帯における移動層のせん断抵抗角は、構成鉱物を分析することにより、ピーク強度値の $\phi_p' = 20 \sim 30^\circ$ が解析に使用できるとされる。

(3) 地すべり移動層(泥岩)の(c)とせん断抵抗角(ϕ)

宣保ほか (2003)¹³⁾は島尻層群分布地帯の地すべり地において三重管コアチューブを用いて採取された不攪乱試料について三軸圧縮試験(CU)を行い、ピーク強度を求め、既往データと併せて図-6にまとめている。



図一六 島尻層群泥岩の強度 (宣保ほか (2003)¹³⁾)

図の点線で示した切片の $c = 37.5 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 35.0^\circ$ は経験的な限界破壊強度とみなし、正規圧密強度付近にまでおよぶ網掛け部分が強風化・破碎泥岩の強度ゾーン、崩積土は正規圧密強度ゾーン ($c_{sf} = 0$ 、 $\phi_{sf} = 23 \sim 30^\circ$) に位置づけられるとしている。したがって、この図は泥岩分布地帯の移動層における粘着力とせん断抵抗角を決定するにあたって有効である。

(4) 地すべり移動層(その他の地質)の c 、 ϕ

泥岩・蛇紋岩以外の地すべり移動層および相当層から不攪乱で採取された試料による試験事例は少ない。砂質土や粘性土に関しては、 N 値から推定可能であるが、その他の地質を源岩とする移動層や崩積土に関しては、泥岩や蛇紋岩の例を参考に推定せざるを得ない。

2.6.4 おわりに

以上地すべり地の各種物性値を概説したが、すべり面粘土のせん断強度以外は、解析に使用できるデータが少ない。したがって、気泡ボーリング等を用いた不攪乱試料の採取と三軸圧縮試験の実施、孔内水平載荷試験による変形係数については、試験を数多く実施してデータを蓄積することが必要である。また、地すべり調査報告書に埋もれていると思われるこれらの貴重なデータを、地すべり学会として掘り起こしを行い、公表することも望まれる。

参考文献

- 1) 若井明彦他 (2003)：地盤技術者のためのFEMシリーズ②－弾塑性有限要素法がわかる－，地盤工学会，pp.190－195.
- 2) 山田正雄 (1989)：地すべり地における土質・岩石試験結果について，地すべり，Vol. 26, No. 2, pp.17－23.
- 3) 土谷 尚・豊岡義則 (1980)：SPTのN値とプレシオメータの測定値 (Pf, Ep) の関係について，サウンディングシンポジウム，土質工学会，pp.101－108.
- 4) 三木幸蔵 (1978)：わかりやすい岩石と岩盤の知識，鹿島出版会，pp.150－151.
- 5) 申 潤植 (1989)：地すべり工学－理論と実践－，山海堂，pp.53－69.
- 6) L. Hobst and J. Zajic (1983)：Anchoring in Rock and soil, Development in Geotechnical Engineering Vol. 33, Elsevier Scientific Pub. Co.
- 7) 山崎孝成・岩淵清任・須藤 充 (2003)：膨潤性凝灰岩に形成されたすべり面，地すべり，Vol. 39, No. 4, pp.48－49.
- 8) 山崎孝成・真弓孝之・由田恵美 (2000)：高純度粘土鉱物のリングせん断特性－すべり面粘土との対比－，地すべり，Vol. 37, No. 2, pp.30－39.
- 9) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔 (1991)：破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性，土木学会論文集，No. 436/Ⅲ－16, pp.93－101.
- 10) 真弓孝之・柴崎達也・山崎孝成 (2003)：すべり面せん断試験によるすべり面のせん断強度評価，地すべり，Vol. 40, No. 4, pp.15－24.
- 11) 三田地利之・藤澤久子・和智真太郎・大河原正文・工藤 豊 (2003)：神居古潭帯に分布する蛇紋岩の不攪乱状態および再構成粘土試料の力学特性，地すべり，Vol. 40, No. 4, pp.35－43.
- 12) 横田公忠・矢田部龍一・八木則男 (1995)：蛇紋岩風化粘土の強度特性，土木学会論文集，No. 529/Ⅲ－33, pp.155－163.
- 13) 宣保清一・中村真也・比嘉 優・吉沢光三 (2003)：安定解析に必要な強風化・破碎泥岩の強度，農業土木学会論文集，No. 227, pp.113－118.

(原稿受付2004年3月4日，原稿受理2004年3月11日)