

(11) 侵食小起伏面下に発達する風化岩盤斜面の安定について

工業技術院地質調査所

○ 釜井俊孝

正会員 高橋 学

Stability of weathered rock slope developed under low-relief surface

Toshitaka KAMAI, Geological Survey of Japan

Manabu TAKAHASHI, Geological Survey of Japan

Abstract

The thickness of weathering crust developed on low-relief surface exceeds 20 meters in Tsukuba Metamorphic rock area. The tensional release and weathering along geological structure are recognized on the steep slope developed under the low-relief surface by river erosion and excavation of quarries. Recently, local evidences of slope instability (cracks and small slope failure etc.) are identified at the part of steep slope. The safety factor of slope stability by limit equilibrium method are estimated about 1.0 by using shear coefficients which is determined by triaxial and direct shear tests on geological discontinuities (joint and bedding plane). RBSM analysis shows the existence of local yielded areas on the slope and this area corresponds to deformable zone which is recognized by occurrence of cracks and collapse. And it is inferred that another slope instability area exist at the part of upper slope in hard weathering crust by the same analysis. In case of excavation long slope which composed of weathered rock, it seems necessary to pay attention to the stability of upper slope and necessary to investigate the shape of weathering crust in surrounding area.

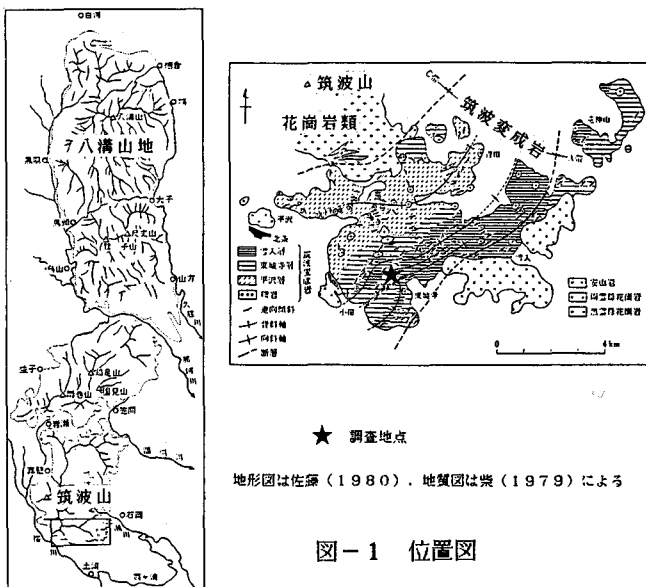


図-1 位置図

1. はじめに

わが国の山地の内部には、河川沿いの段丘面よりも高い位置に比較的平坦な面が発達することがあり、侵食平坦面や侵食小起伏面などと呼ばれている。筑波山地に分布する小起伏面は多くが侵食によって破壊され、保存が悪いため定高性のある山稜などに面影をとどめているに過ぎない。しかし、採石によって広い範囲に露出がみられることから、風化帯の構造を容易に観察することができる。筑波山地に限らず、こうした侵食小起伏面の下には比較的傾斜の急な斜面が発達している。この急斜面は地形発達史的には活発な侵食の場であり、実際に河川の急速

な下刻や人工的な掘削を原因とする斜面崩壊がしばしば発生している。しかしながら、そうした斜面崩壊について報告した例は少ない。そこで今回は、筑波山地の一部で発生した斜面の不安定化について報告し、それと風化構造、不連続面の性質との関連について検討する。

2. 地形、地質の概要

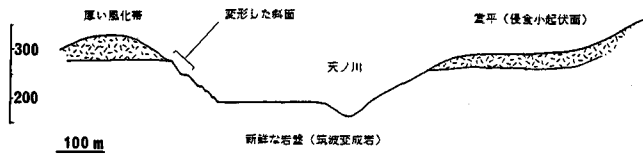


図-2 模式断面図

らなり、稜線付近は関東ロームにおおわれている。変成岩類は、泥岩起源の黒雲母-石英片岩ホルンフェルス、白雲母-黒雲母-石英片岩ホルンフェルスおよび砂岩起源の(白雲母-)黒雲母-ホルンフェルスである。これらは、頻繁に黒雲母花崗岩とアブライトの小脈に貫かれている。

3. 斜面の変形

調査地点付近の山腹には多くの採石場が点在し、人工斜面が広く形成されている。昭和60年に一部の

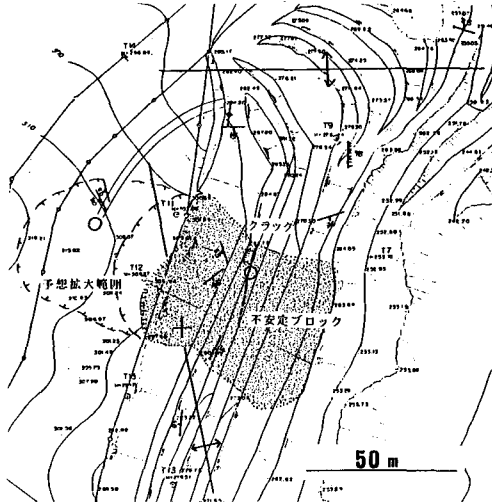


図-3 平面図

斜面上で崩落が発生し、昭和62年には問題の斜面上で新たにクラックが発見され、不安定化の兆候が認められている。地層及び節理の走向傾斜、クラックの位置、推定される不安定ブロック及びその予想拡大範囲を図-3に示す。走向傾斜の変化から複背斜構造が推定され、問題の斜面付近の地質構造は、掘削斜面に対して流れ盤となっている。クラックは、北北西-南南東の走向を持ち、約30m連続する。中心部では、約20cm開口している。280mレベルと290mレベル間の斜面には、崩壊が認められる。これは、斜面の勾配が急すぎるために発生した小規模な浅い崩壊と考えられる。

4. 風化帯の構造

図-4は、ボーリング地点の地質の概要とコアの弾性波速度(P波、S波)を示している。地質は両地点とも砂岩、泥岩起源のホルンフェルスから成る。節理、層理

などの不連続面の発達が良好である。10~20mの厚

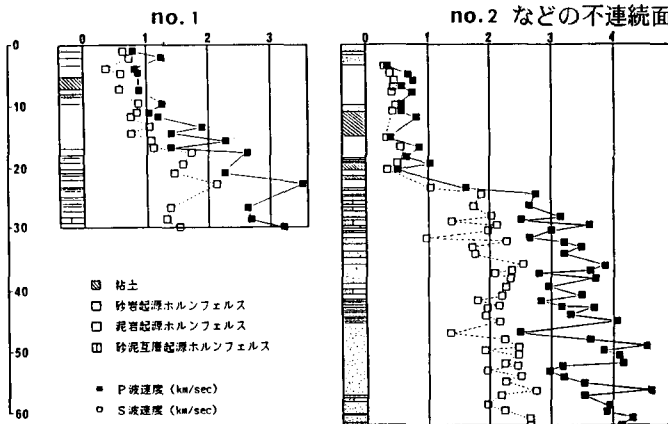


図-4 ボーリング柱状図と弾性波速度

さで風化殻が発達しており、No. 1では-12m付近、No. 2では-22m付近を境に弾性波速度の傾向が変化する。コアの肉眼観察の結果もこれと整合的であり、No. 1の12m以浅は弱く風化し、No. 2の22m以浅は強く風化している。図-5は風化帯の断面図である。280~290mレベルまでは弱風化の岩盤が発達するが、それ以上の高度では岩盤の風化が急に著しくなる。強風化帯の下底の構造は、ほぼ平坦

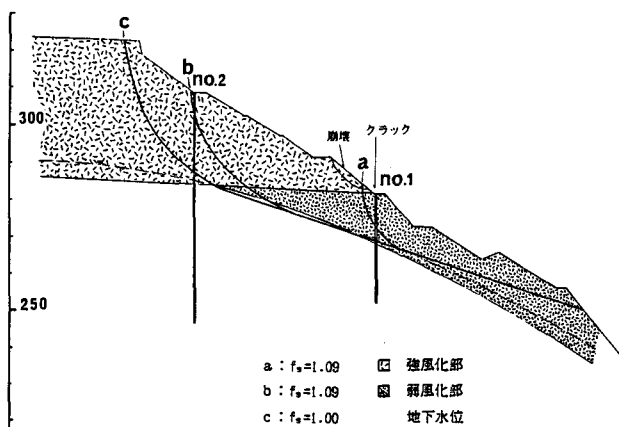


図-5 断面図

表-1 三軸圧縮試験の供試体と結果

採取位置	母岩の風化	不連続面の傾斜	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ
① no.1 11.70-11.90	弱	55°	0.00 Mpa	38.0
② no.1 18.25-18.60	新鮮	38°	0.02	31.5
③ no.1 21.50-21.80	新鮮	73°	0.01	24.5
④ no.2 33.00-33.20	新鮮	37°	0.00	31.0
⑤ no.2 37.70-37.80	新鮮	37°	0.00	45.0
⑥ no.2 40.20-40.50	新鮮	48°	1.00	28.5

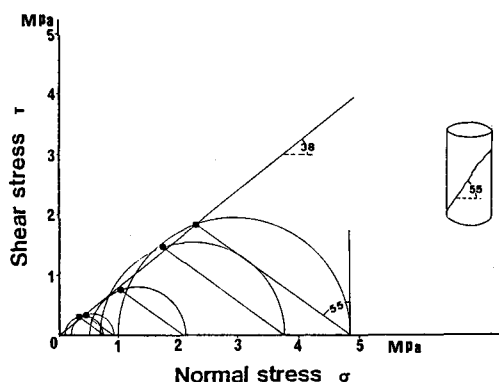


図-6 三軸圧縮試験結果の例 (①)

表-2 一面せん断試験の供試体と結果

採取位置	母岩の風化	不連続面の状態	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ
① no.1 -11.4m	弱	新鮮	0.018 Mpa	25.0°
② no.2 -9.0m	強	一部粘土化	0.00	27.0
③ no.2 -26.4m	弱	酸化鉄付着	0.00	18.0
④ no.2 -12.0m	強	一部粘土化	0.00	27.0
⑤ no.2 -25.4m	弱	新鮮	not coulomb's criterion	

図-6は、試験結果の一例でモールの応力円を示している。せん断は不連続面に沿って起こっているのだから、破壊時の応力状態は図に示したようなモール円上の点である。これらの応力点はほぼ一直線上に並び、破壊基準としてクーロンの破壊基準が適用できる。粘着力 c は0に近く、内部摩擦角はほぼ30~45°の範囲である。

であり、付近に発達する侵食平坦面に平行である。一方、現在の斜面に近い部分では地層の層面に沿った弱い風化が認められ、上記の強風化帯形成後の谷の発達や掘削による緩みを反映していると考えられる。

5. 不連続面のせん断試験

斜面は風化したホルンフェルスによって構成されており、不連続面の発達が著しい。そこでこうした斜面の安定を議論するため、コアの三軸圧縮試験と一面せん断試験を行い、不連続面のせん断常数を求めた。

5.1 試験の方法

5.1.1 三軸圧縮試験

不連続面を含んだ試料をφ50mm、長さ100mmの円柱に整形し、封圧 σ_3 を0.10.2, 0.5, 0.7, 1.0Mpaに設定した多段階三軸圧縮試験を行った。各段階毎に注水を行い、不連続面に水が存在する状態で排水せん断を行った。試料の採取位置と状態は表-1のとおりである。

5.1.2 一面せん断試験

不連続面を含んだ試料をno.1及びno.2孔から採取し、直径35mm、高さ約20mmの円盤状に整形して供試体とした。供試体は全部で5個である。採取位置と状態は表-2のとおりである。次に、外径60mm、内径35mmの黄銅製スパーサーに供試体を押し込み、一面せん断試験機を用いて不連続面の多段階せん断試験を行った。垂直応力は、現地の状態を考慮して、0.029, 0.058, 0.145, 0.218Mpaの4種類とした。せん断に先だって、不連続面を水で満たし、せん断速度を0.25mm/min.として試験を行った。試験機のせん断面に対する不連続面の傾斜は試験結果に影響を与える。そこでスパーサーの底面に取り付けた3本のネジにより不連続面の傾斜を調整した。また、同じ垂直応力において0°方向の試験と180°方向の試験を行い、両者の平均を取ることで傾斜の影響を除去した。

5.2 試験の結果

5.2.1 三軸圧縮試験

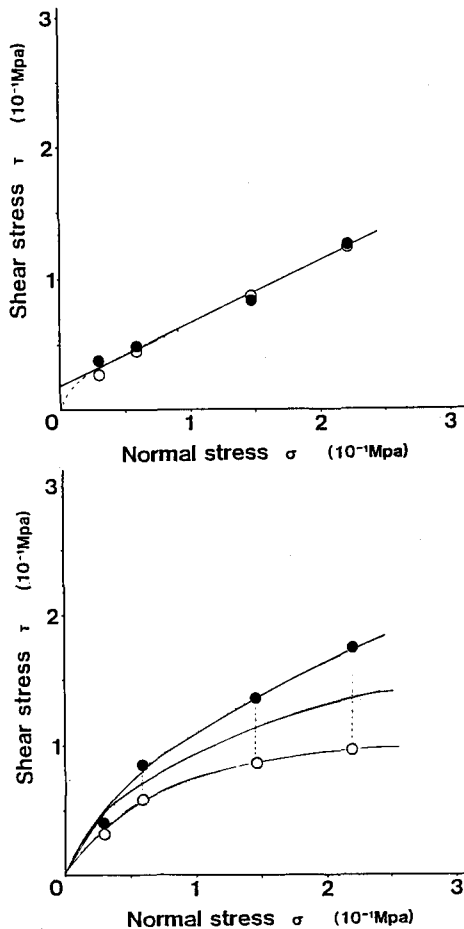


図-7 一面せん断試験の例 (①, ⑤)

表-3 計算常数 (限界平衡法)

	単位体積重量 γ	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ
強風化部	1.71/t/m³	0.0 Mpa	20°
風化部	2.2	0.0	25
新鮮岩盤	2.5	1.0	30

上部の強風化部を含む b, c すべりも同様な安全率であり, 今後それらも考慮する必要があることがわかる。

6.2 RBMSMによる検討

表-4 計算常数 (RBMSM)

	単位体積重量 γ	粘着力 c	内部摩擦角 ϕ	弾性係数 E	ポアソン比 ν
強風化部	1.71/t/m³	0.0 Mpa	20	2000 t/m²	0.4
風化部	2.2	0.0	25	3000	0.35
新鮮岩盤	2.5	1.0	30	8000	0.3

れる (図-8)。ただし, これらが接続していないため, 崩壊には至らないと解釈される。斜面中央部に

5.2.2 一面せん断試験

垂直応力とせん断強さ (ピーク) の関係の一例を図-7に示す。白丸が0° 方向, 黒丸が180° 方向の結果である。⑤の供試体を除けば, 実験を行った垂直応力の範囲でほぼ直線関係となり, 三軸圧縮試験の場合と同様, クーロンの破壊基準が適用できそうである。せん断常数を表-4に示す。粘着力 c は小さく, ほとんど0に等しい。内部摩擦角は, 20~30° となり, 三軸圧縮試験の結果に比べてやや低い。これは三軸圧縮試験の供試体が新鮮な場合が多いのに対し, 一面せん断試験の供試体は風化したものが多いためと考えられる。

一般に, 新鮮で硬い岩石の場合, 不連続面の破壊基準は双一次型か指数関数型になり, 2本の直線か曲線で近似される。しかし, 不連続面の *asperity* が小さく滑らかな場合は, 残留状態に近づくため1本の直線で近似される。今回の試験において, ⑤の供試体の結果は前者に相当し, ①の場合は後者に相当すると考えられる。また, ②と④は母岩が強く風化し, 不連続面に粘土が認められる場合である。この場合は, 新鮮な岩石に比べて ϕ は比較的一定であるが, c は低下して0となる。また, ③のように酸化鉄の付着が認められる場合は, せん断強さが著しく低下し, ϕ が低くなる傾向が認められる。

6. 安定の検討

斜面変形の原因を説明するため, 斜面の安定を検討した。計算には限界平衡法とRBMSMを用いた。

6.1 限界平衡法による検討

想定したすべり面を図-5に示す。直線部の傾斜は, 地層の傾斜に沿うものと仮定し, 最も不安定となる曲線部を繰り返し計算により求めてすべり面とした。計算に使用した常数は表-3に示す。このうち, 単位体積重量 γ は物理試験の結果を用いた。計算の結果, 安全率はほぼ1.0となり, クラックが発生したものの崩壊には至っていない現状を説明する結果である。また現在, 地表部で変形が認められるのはaのすべり面のみであるが,

RBMSMによる解析は川井・竹内 (1988) のプログラムを用いた。使用した常数は表-4に示すように, 限界平衡法の場合と同様である。ただし, 弾性係数とポアソン比はこれまでの解析例を参考に推定した。解析の結果, 斜面上部の強風化部と中部の弱風化部の2ヶ所に降伏域が認めら

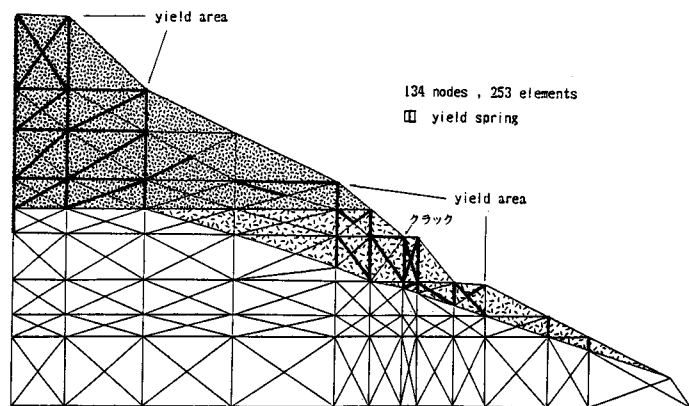


図-8 RBSMによる解析結果

表れた降伏域は、実際に変形が見られた場所と一致している。しかし、計算された変位は数mmであり、実際よりも1オーダー以上小さい。また、斜面上部の強風化域の変形は、踏査では発見されていない。しかし、この部分で変形が生じやすいことは限界平衡法による検討からも推定されるため、今後も監視を強める必要がある。

7. まとめ

筑波変成岩地帯に発達する小規模な侵食小起伏面上には厚い風化殻が形成されている。それらの下部斜面は、侵食や人工的な掘削により急斜面となっており、地質構造に沿った緩み域が形成される場合がある。今回は、そうした斜面で発生した変形について議論し、不連続面のせん断常数を用いて解析した場合、現在の斜面の安全率がほぼ1.0であることが指摘された。また、RBSM等による検討の結果、変形が上部の強風化域にも発生する可能性のあることが示された。このことから、侵食小起伏面下に長大斜面を形成する場合、上部斜面の安定についても注意を払う必要があると考えられる。また、そうした斜面の掘削計画を立てる場合には、対象地域を含むやや広い範囲で風化帯の構造を調査する必要があると考えられる。

本研究を進める上で、地質調査所の黒田和男博士には内容について貴重なご意見をいただいた。バリノサーベイ（株）の五十嵐俊雄博士には変成分帯や風化度についてコメントをいただいた。また、筑波大学の大貫靖浩氏には実験を手伝っていただいた。この場を借りて感謝の意を表す。

【参考文献】

- 佐藤 正（1980）：八溝山地の地形。猪郷久義他編 日本地方地質誌「関東地方」，朝倉書店。
- 柴 正敏（1979）：茨城県，筑波変成岩類の層序と変成分帯。岩鉱，74，122～125。
- 川井忠彦・竹内則雄（1988）：離散化極限解析（RBSM）とプログラミング。地殻開発に伴う数値解析法ワークショップ第1回 講演資料。