

8 風化による岩盤斜面の応力・変形の変化について

名古屋大学 正 員 川 本 脩 万

名古屋大学 学生員 藤 田 益 夫

1. 概 説

岩盤斜面の安定問題に対して、最近、種々の実験や数値解析が行なわれてきている。成層岩盤における斜面の安定性は、その成層状態と斜面の傾斜との相対的な関係に大きく影響されるが、方向性をもたないひび割れ岩盤の斜面の安定性に対しては、斜面下の応力状態、とくに斜面のり先付近の応力集中や、かなり大きなせん断応力などが重要な要素として指摘されはじめた。岩盤斜面の安定性に関する考え方として安全率があり、これに対する種々の定義がなされているが、大別すると、二通りの考え方ができる。一つは、アーチダムの推力をうける基礎岩盤のように外力による荷重増加に対する安全率であり、他の一つは、重力の作用による自由斜面のように、岩盤の強度低下に対する安全率である。この研究では、後者の場合について考え、局部的な岩盤の強度低下をもたずと考えられる種々の要因のうち、とくに重要な要因である風化変質現象を取りあげ、代表的なモデル岩盤斜面について表面からの風化変質度の相違によって、岩盤斜面近傍の応力状態、斜面の変形状態がどのように変化するかを有限要素法で解析したものである。

2. 解析方法

一般に、斜面はひび割れなどの存在で等方等質でないが、ひび割れが一定の方向性をもたず、ランダムに分布していると考えると、疑似等方等質の弾性体と考えることができる。解析対象斜面として高さ 20 m、傾斜角 45° の等方等質の弾性自由斜面を取り扱った。この場合、弾性係数は $E = 4 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$ (等方等質性の場合には応力値は弾性係数に無関係であり、変位は弾性係数に関係するが、 E の単位として求められる。なお後述の非等質性の場合には火山内部の未風化岩のそれを E として応力、変位が求められる。)、ポアソン比 $\nu = 1/3$ 、単位体積重量 $\gamma = 2.6 \text{ t/m}^3$ と仮定した。

解析方法として、有限要素法 (Finite Element Method) を用い、自重による斜面の応力および変位の解析方法として、つぎの二つの方法を比較した。

(1) 各要素の自重を三等分して、三節点に分配して節点荷重とする方法。

(2) $\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_x = \lambda \gamma H$ ($\lambda = \nu/(1-\nu)$), $\tau_{xy} = 0$ の斜面形成前の初期応力を考え、斜面境界において自由表面をつくるように外力を作用させ、初期応力と重ね合わせる方法。

なお、この両者とも境界条件として、斜面遠方の鉛直断面において水平変位を、底辺の水平断面に沿っては水平、鉛直変位を拘束した。この二つの方法の計算の結果、応力はほとんど同じで、変位も相対的には一致することがわかったので、ここでは (1) の方法を採用した。

計算手段として、反復法を用い、根の収れんを加速するために、Over-Relaxation Factor として、1.86 を導入した結果、反復回数は 100 回程度で充分であった。計算はすべて東大大型計算機センターの HITAC 5020 E を使用して行った。なお、計算時間は一ケースについて約一分程度である。

つぎに表面からの風化による影響を明らかにするため、つぎのような考え方をもとにした。

Serafin らの岩盤せん断試験や、ダムサイトの弾性波速度試験などの結果から明らかのように、おもに、岩盤の風化度はその弾性係数にかなりの影響を与える。ここで行った解析では、表面からの風化変質による岩盤の弾性係数 E' (kg/cm^2) が表面からの深さ d (m) に対して対数関数的に変化すると考え、次式のように仮定した。

$$E'/E = 1 - W_R \quad (d \leq 0.1 d_0)$$

$$E'/E = W_R \log_{10} \left(\frac{10d}{d_0} \right) + (1 - W_R)$$

$$E'/E = 1 \quad (0.1 d_0 < d < d_0)$$

$$(d \geq d_0)$$

ここに、

E' ; 風化岩盤の弾性係数 (kg/cm^2)

E ; 未風化岩盤の弾性係数 (kg/cm^2)

d ; 各表面からの垂直な深さ (m)

d_0 ; 各表面からの垂直な風化深さ (m)

W_R ; 風化率 (表面における岩盤の弾性係数の未風化岩盤のそれに対する減少率)

計算例として、 $d_0 = 10, 20, 30 \text{ m}$, $W_R = 0.5, 0.9$ の場合を考え、それぞれつぎのように分類した。解析 (I) ; $d_0 = 10 \text{ m}$, $W_R = 0.5$, 解析 (II) ; $d_0 = 10 \text{ m}$, $W_R = 0.9$, 解析 (III) ; $d_0 = 20 \text{ m}$, $W_R = 0.9$, 解析 (IV) ; $d_0 = 30 \text{ m}$, $W_R = 0.9$ 。これらの場合の弾性係数の変化を図示すると、図-1、図-2 のようになる。なお、ポアソン比はいずれの場合にも $\nu = 1/3$ とした。

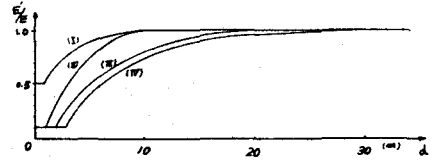


図-1 弾性係数比 E'/E と深度距離の関係

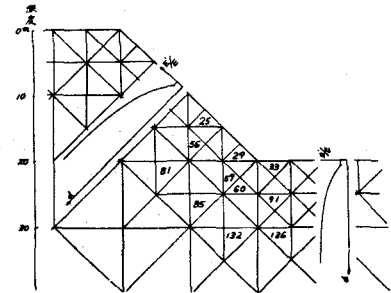


図-2 斜面下の要素系の一部と風化による弾性係数の低下の表示

3. 解析結果と考察

地山の变形状態についてみると、地山深部においては、ここで与えた程度の風化による弾性係数の低下によってほとんど影響されることはないが、表面附近において図-3に示すように、未風化状態の水平変位は斜面天端附近では引込み、斜面下方でははみ出す傾向があるが、風化率の増大につれて鉛直、水平方向の変位はともに増大し、水平方向の変位は斜面全体にははみ出しはじめる。さらに、風化率が0.9の場合、風化深度が20m、30mと深くなると表面変位は著しく増大することがわかる。また、図-4より、風化率の増大にともなって、引張応力領域の発達過程が斜面の上部に移動してくることなど一諸に考えると、斜面天端からのすべり破壊が生じる危険性を表わしているように考えられる。

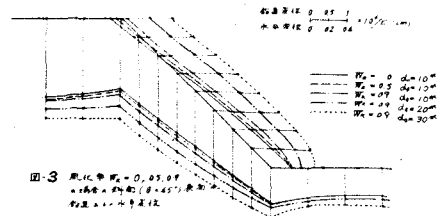


図-3 風化率 $W_R = 0.5, 0.9$ の場合、 $d_0 = 10, 20, 30 \text{ m}$ の場合の水平変位の分布

斜面の近傍の応力状態について考察すると、風化率の増大、風化深度の増大による等最大せん断応力線、引張応力領域の変化について大略を示すと図-4. のようである。風化変質による弾性係数の低下の割合が大きいほど、自由表面の近傍では、最大主応力 σ_1 の減少が大きくなり、したがって、最大せん断応力 $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ は減少する。しかし、風化深度が深くなるにつれて斜面天端附近に引張応力領域が発生してくることがわかり、ここに斜面崩壊の一因があるように思われる。

斜面附近の垂直深さに対する一連の要素系として、図-2 に示すように、(25, 56, 81) の系列、(29, 59, 85) の系列、(29, 60, 132) の系列、(33, 91, 136) の系列について、各要素の重心に関する主応力 (σ_1, σ_2) 、せん断応力 τ_{xy} と風化率の関係を図-5 に、風化率 $W_R = 0.9$ の場合には、風化深度との関係を図-6 に示した。これらの図表より、風化による表面附近の弾性係数の低下の割合が大きいほど、応力は表面附近で減少し、地山内部で高くなることがわかる。また、岩石の風化が地山内部に達するにつれて応力は急減する。ある程度風化が進むと、弾性係数の変化が急変的でなく、緩変的となり、全体として弾性係数が一様の未風化状態に近くなり、応力はまた大きくなり始めることがこの解析でわかった。したがって、岩盤の風化変質現象による斜面の安定は、応力によって規定するより、変形によって規定すべきであるように思われる。

この解析では、ポアソン比の変化を考慮しなかったが、当然、ポアソン比の変化を考慮すべきであり、この点とともに成層岩盤を対象とした直交異方性の場合や岩盤の強度低下による塑性領域の発達過程を考慮した場合を現在解析中である。

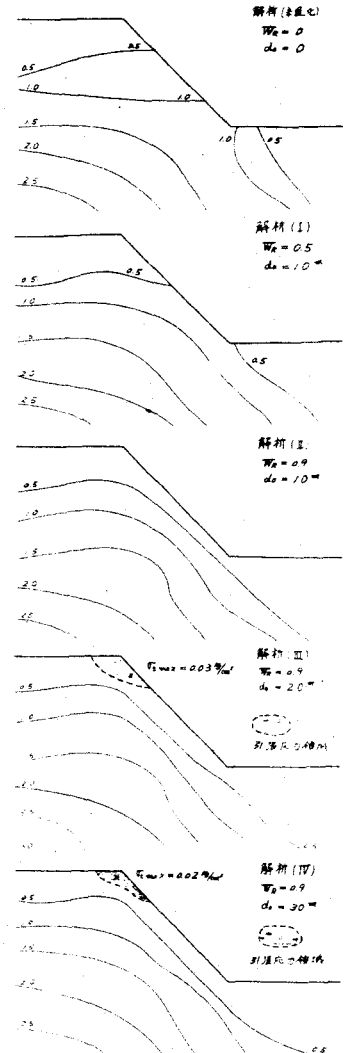


図-4 風化率と等最大せん断応力線および引張領域図

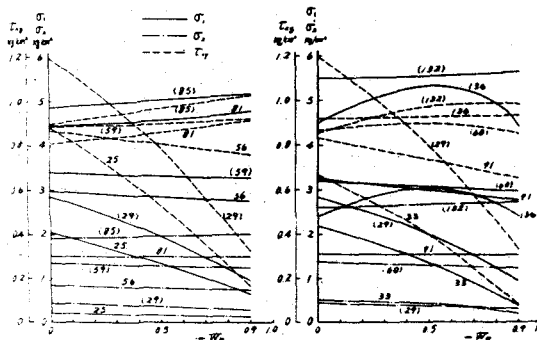


図-5 傾斜角45°の斜面下の各要素の応力と風化率の関係

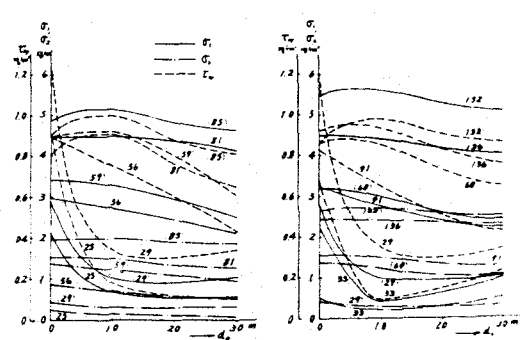


図-6 傾斜角45°の斜面下の各要素の応力と風化深度の関係