

名古屋大学工学部 正員 川本 勝万
日本道路公団 正員 藤田 益夫
名古屋大学大学院 学生員 上野 建昭

1. まえがき

自由斜面の安定性の問題については、すべり面上の土塊あるいはロッキープラーの安定、弾塑性ないし逐次解析などの数値解析や実験的研究が行なわれてきているが、筆者らもいままでに線形弾性をもつ等方性、異方性および非等質性斜面、および非線形性をもつ斜面について種々の解析を行ってきた。ここでは、ある破壊特性をもつモデル岩盤斜面に対して、有限要素法を用いて二、三の方法で弾塑性解析を行ない、斜面の塑性領域の拡がりおよび弾塑性応力状態を明らかにし、その安定性を検討した。また、荷重漸増法を適用することにより、水平方向地震力による斜面の塑性領域の拡大ならびに安定性の減少状態について考察を試みようとした。

2. 弾塑性解析法

岩盤の破壊条件としては、種々のものが考えられるが、ここではグリフィスの理論を考慮した二次放物線形の破壊包絡線〔 $\tau^2 = 4\sigma_z(\sigma_z - \sigma_c)$ 、ここに σ_z は一軸圧縮強度、図-1参照〕を用い、次のような二種の方法で解析を進めた。

(a)自由斜面の場合には荷重が定まっているので、弾塑性状態は荷重の増加よりむしろ岩盤材料の劣化によって生ずると考えて、直接反復法を用いる。ある解析段階での応力状態(σ_1 , σ_2)において、最大せん断応力 $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ の極限值 τ_{cr} は $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ の函数となり、主応力差の大小関係によって塑性領域を判定する。

一般に岩盤の応力-ひずみ曲線は図-2に示されるように、モールの応力円が破壊包絡線に接する以前なら非線形な挙動を示す(図中の実線)が、近似的に弾性状態と塑性状態において別々の直線で表わす。最初には初期せん断弾性係数 G (これに対する E , ν を用いる。)によって応力を算定し、その応力状態に対して上記の降伏条件を検討して、弾性係数 E , ポアソン比 ν の修正を行ない反復計算を行なう。この場合、弾性係数(あるいは変形係数)とポアソン比の変化を次のように考える。図-3に示すように、計算段階 i において E_i , ν_i を用いて計算された応力成分(σ_1 , σ_2) $_i$ より次の計算段階に用いられる E_{i+1} は次式で与えられる。

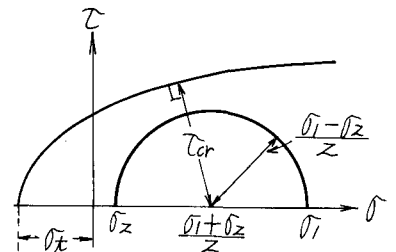


図-1 モールの応力円と破壊包絡線

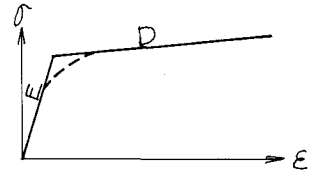


図-2 応力-ひずみ曲線の理想化

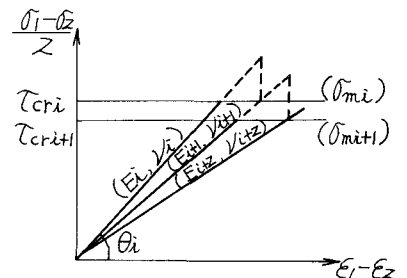


図-3 反復法 ($G_i = \tan \theta_i$)

$$E_{i+1} = \frac{(1+\nu_{i+1})}{(1+\nu_i)} \cdot \frac{\tau_{cr}}{\sigma_i} \cdot E_i$$

また、ポアソン比は ν_i と τ_{cr} の比率によって図-4に示すように変化させる。なお、この場合、 τ_{cr} は次のように求められる。(圧縮を正、引張りを負にとる)

$\sigma_m \leq -\sigma_t$ の場合

$$\tau_{cr} = \sqrt{-2\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_2)}$$

$\sigma_m > -\sigma_t$ の場合

$$\tau_{cr} = \sigma_t - (\sigma_1 + \sigma_2)/2$$

このような計算方法により、斜面高さ100 m, $\gamma = 2.7 \text{ t/m}^3$, $\sigma_t = 1.0, 3.0, 5.0, 10.0 \text{ kg/cm}^2$ の場合について計算を行なった。一例として $\sigma_t = 10.0 \text{ kg/cm}^2$ の弾塑性領域および等最大せん断応力線図を示すと、図-5のようである。

(b)次に斜面の形成を重力加速度の増進に置きかえて考え、斜面の弾塑性応力状態を荷重増進法を用いて解析することを試みた。この考えは、土質斜面の安全率の算定の一手法として用いられているものである。この場合には岩盤の応力-ひずみ関係を図-6のように与え、解析全領域を弾性を保つような重力加速度(あるいは単位体積重量)から単位体積重量 $\gamma = 2.7 \text{ t/m}^3$ になるまでを5段階に分け、塑性域に入った要素においては各荷重増進分に対する変形係数を、弾性係数の1/100の値を、また $\nu = 0.45$ を用いて、逐次解析を行なった。

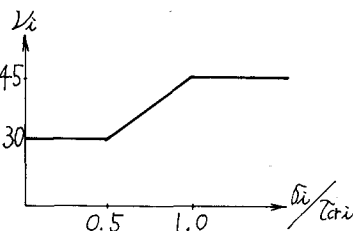


図-4, ポアソン比の変化

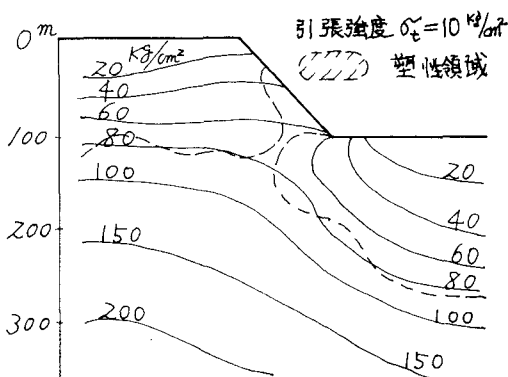


図-5, 弾塑性領域および等最大せん断応力線図

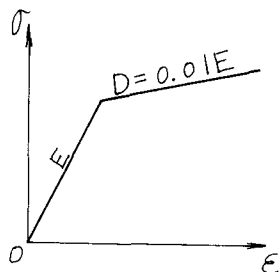


図-6 応力-ひずみ曲線

3. 水平地震力が斜面の安定性に及ぼす影響

自由斜面の崩壊の原因として、潜在的には岩盤内の弱面の存在、岩盤強度の低下、浸透水や間隙水圧の影響が考えられねばならないが、さらに、地震が崩壊の直接的な誘因となることも多いようである。そこで、ここでは自重のみの作用によって安定状態(一般に弾性状態にある)にある斜面が水平地震力の作用を受ける場合を考えて、これを震度法的に取り扱い、0~0.2gの水平地震力が斜面外方に作用する場合の塑性領域の発達過程を、漸増荷重法を用いて逐次解析し、斜面の安定性の変化を考察する。

なお、これらの計算には東大大型計算センターのHITAC 5020を用いた。