

長崎大学工学部 正員 伊勢田哲也 ○棚橋由彦

同 学生員 竹下修身 和志武義明

まえがき 土を mass とみなしての極限での釣り合い条件による従来の斜面の安定解析では、すべり面の全断面塑性状態を仮定し、破壊の上限界(Upper bound)を与えるが、実際の斜面の破壊現象

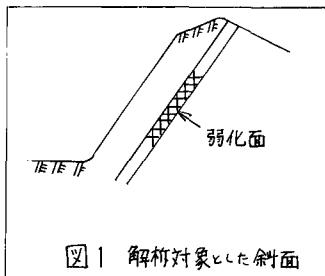


図1 解析対象とした斜面

は必ずしもそうではない。特に図1のようにすべり底面が部分的に弱化面(ex. 粘土層, 破碎帶, joint)を含む場合は、局部的な破壊が起り応力系が再分配され、新たな応力系が破壊(or降伏)の発達を許すかどうかを決定する。本研究ではすべり破壊、引張破壊も含めて降伏後の土の挙動をシミュレートするのに、降伏後の要素を異方性(面内等方性, 軸対称異方性)の発達した材料とみなす有限要素解析を行なった。

解析の条件

1. 解析モデル 図2のように座標をとった縦横比1:10の長方形モデルを三角形要素に分割し、すべり底面の条件は節点拘束条件で表現した。モデルはX方向に平面ひずみ状態にあり、外力は作用せず物体力のみ作用するものとした。(T=1.6 t/m³)。なお応力は図2に示した方向の応力を正と約束する。

2. 応力-ひずみ曲線 土の応力ひずみ挙動について、直応力-直ひずみは図3(a)、せん断応力-せん断ひずみは図3(b)を仮定した。図3(b)の直線Iは弾性域、直線IIはひずみ硬化を伴う塑性域、直線IIIは破壊域にそれぞれ対応する。

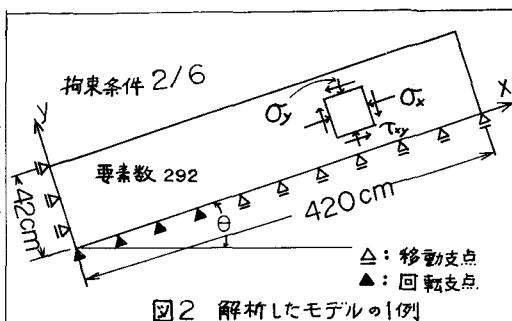
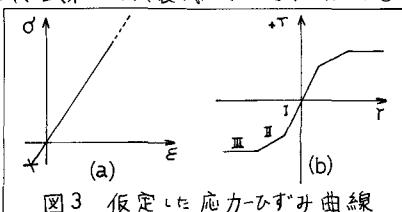
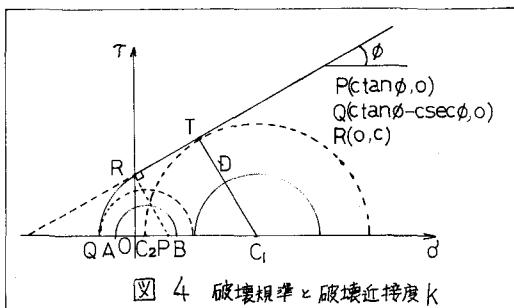


図2 解析したモデルの1例



3. 破壊規準 破壊規準は図4に示すように引張域を円弧で修正したMohr-Coulomb則を適用した。要素が応力ひずみ曲線のどの領域に属するかを制御する指標として、破壊近接度Kを次のように定義した。

$$\sigma_m \geq C \tan \phi : K = \frac{\tau_{max}}{C \cos \phi + \sigma_m \sin \phi} = \frac{C_1 T}{C_1 T + \sigma_m} \quad \text{ただし}$$

$$C \tan \phi > \sigma_m > C(\tan \phi - \sec \phi) : K = \frac{\tau_{max}}{\sigma_m - C(\tan \phi - \sec \phi)} = \frac{C_2 A}{C_2 A + \sigma_m}$$

$$C(\tan \phi - \sec \phi) \geq \sigma_m : K = \infty$$

C :	土の粘性係数
φ :	土の内部摩擦角
$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$:	平均主応力
$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$:	最大せん断応力

4. 解析モデルの条件

- ①拘束条件 $1/6$, 傾斜角 30° , $C = 0.25 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 30^\circ$
- ②拘束条件 $1/3$, 傾斜角 30° , $C = 0.20 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 0^\circ$
- ③拘束条件 $1/3$, 傾斜角 30° , $C = 0.20 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 30^\circ$
- ④拘束条件 $1/6 \sim 1/6$, 傾斜角 30° , $C = 0.25 \text{ kg/cm}^2$, $\phi = 30^\circ$

但し、③, ④は研究予定である。

解析方法

最初全要素を初期（弾性域）の弾性定数 E 、レで全体剛性マトリックスを作成し（応力一ひずみ Matrix は D_{iso}^* ）、求まつた応力成分から各要素の潜在すべり面（引張応力の場合には破断面）が x の正方向と反時計回りになす角度 β と、 $C_m - C \tan \phi$ の正負、破壊近接度 K の値を計算する（Step 0 と呼ぶ）。次に表 1 に従って降伏した要素あるいは、破壊した要素を潜在すべり面法線を軸とする軸対称異方性材料（あるいは面内等方性材料）とみなし、要素の剛性マトリックスを D_{an}^* で置換し、全体剛性マトリックスを修正し、

再計算する（Step 1 と呼ぶ）。以後 Step 1 を繰り返して降伏域の発達を追跡する（Step 2, 3, ……）。

*付録参照

なお多元連立一次方程式の解法は Cholesky の平方根法を用い、計算は九大大型計算機センター F A C O M 230-60 を使用した。

解析結果

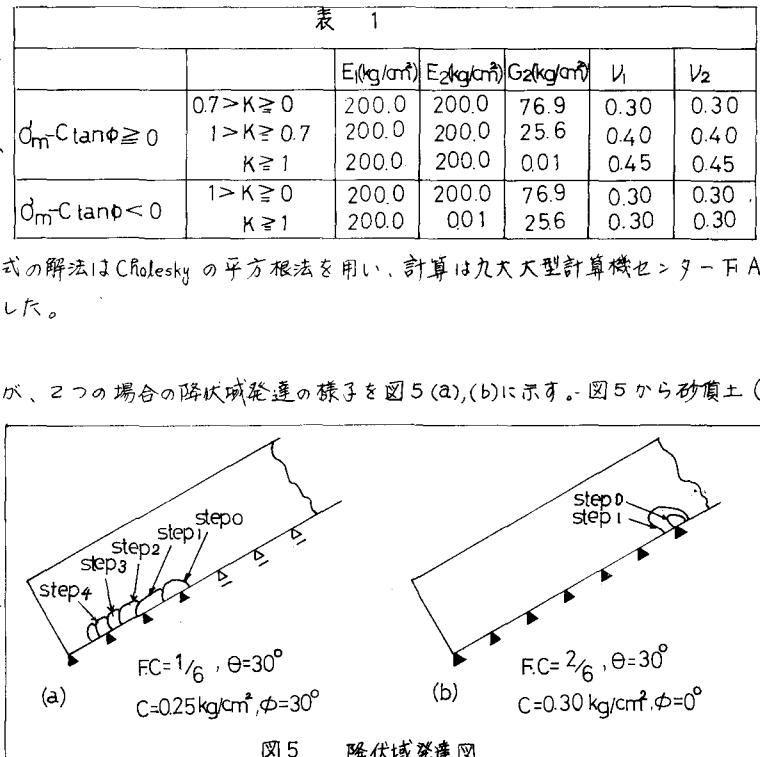
解析途中ではあるが、2つの場合の降伏域発達の様子を図 5 (a), (b) に示す。図 5 から砂質土（ゆき）の場合はすべり面に沿って破壊域が発達し、粘土 ($\phi = 0$) の場合破壊はすべり底面に沿わずに、斜面内に発達するものと推定される。なお詳細な解析結果は当面発表の予定である。

あとがき

降伏（あるいは破壊）後の要素を面内等方性材料でシミュレートすることにより、砂質土と粘土のすべり破壊の発達の相違を明らかにした。また、比較的なおざりにされてきた引張域での土の挙動も、解析の対象とし得た。

参考文献

1. 土木学会第27回学術講演集Ⅲ (1972) 伊勢田哲也他2名 III-90 “斜面のすべり破壊につ



いて”

2. ツェンキウイッチ.O.C., チューン.Y.K., 吉謙雅夫訳 塔風館 “マトリックス有限要素法”

付録

等方性材料の(初期の)応力-ひずみマトリックス D_{iso} は

$$D_{iso} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad [SYM]$$

一方異方性材料の(降伏した要素の) x', y' 座標系での応力-ひずみマトリックス D' は

$$D' = \begin{bmatrix} \frac{1-n\nu_2^2}{n} S & \nu_2 S & 0 \\ -\nu_1 S & \frac{1-\nu_1}{n} S & 0 \\ 0 & 0 & \nu_2 \end{bmatrix} \quad \text{ただし } S = \frac{E_1}{1-\nu_1-2n\nu_2^2}, n = -\frac{E_1}{E_2}$$

E_1, ν_1 は積層面内の変形に関するもの、 E_2, ν_2 , S は積層面に垂直な方向に関するものである。

また (x', y') 座標系から (x, y) 座標系へのひずみ(応力)変換マトリックス L は

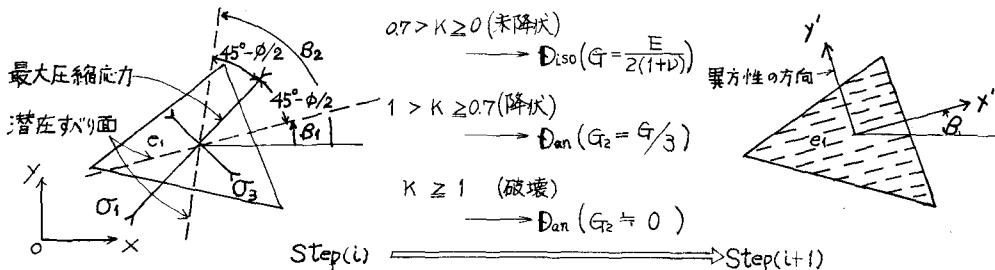
$$L = \begin{bmatrix} \cos^2\beta & \sin^2\beta & -2\sin\beta\cos\beta \\ \sin^2\beta & \cos^2\beta & 2\sin\beta\cos\beta \\ \sin\beta\cos\beta - \sin\beta\cos\beta & \cos^2\beta - \sin^2\beta & 0 \end{bmatrix}$$

したがって (x, y) 座標系での異方性材料の応力-ひずみマトリックス D_{an} は

$D_{an} = L D'^t L$ で与えられる。ただし $t L$ は L の転置行列。

Step*i* から Step(*i*+1) に移る解前予順を図で示すと、

Step*i* で $\sigma_m - c\tan\phi > 0$ なる要素 e_1 については、



Step*i* で $\sigma_m - c\tan\phi < 0$ なる要素 e_2 については、

