

すべり破壊を考慮した岩盤斜面の変形挙動について

名古屋大学工学部 正会員 川本 暁万
 名古屋大学大学院 学生員 〇竹田 直樹

1. 概要

構造物が巨大化するにしたがって、その基礎として、岩盤を解析する必要性が増してきている。しかし、岩盤は、クラックと岩の複合した構造及び複雑な挙動を示す非線形材料より成っているの、どのようにモデル化を行なうかが、非常にむずかしい。この論文においては、クラックを含む三角形要素により、これらの岩盤のモデル化を考えた。そして、先在クラックの影響、逐次破壊の様子などを、岩盤斜面を解析例として示した。解析手法としては、応力状態によって破壊面を考慮することができる特別な三角形要素を用いた有限要素法による。

その結果、自重のみを考えた場合、先在クラックの存在によって、変形が大きくなり、また破壊クラックの発生位置も先在クラックの位置に左右されることを知る事ができた。斜面上に荷重を載荷した解析例については、応力分配法と比較した場合、せん断破壊の特長がより明白に示す事ができた。さらに、変位ベクトルより、荷重変位曲線の曲率が最大の所で、著しい変位の不連続箇所が生じていることが調べられた。しかし、どの荷重をもって、極限支持力とみなすかについては、実験値との比較のうえ、さらに十分に検討する必要があると考えられる。

2. 解析手法

2-1. 要素の破壊規準、破壊後の挙動

1) 先在クラックについて

先在クラックの破壊規準を図1 (a) に示すように仮定する。つまり垂直応力の程度によって、バイリニアールで近似するものである。変形については、クラックの垂直方向では図1 (b) のように、 δ_n が負ならば σ_n は0であり、ある一定のクラックの閉合の後は、 δ_n は一定となることを仮定している。クラックのせん断方向に対しては、図1 (c) で示すように、 τ までは弾性的に、それ以後はせん断応力は一定で、変位だけ増大するというように理想化を行なう。

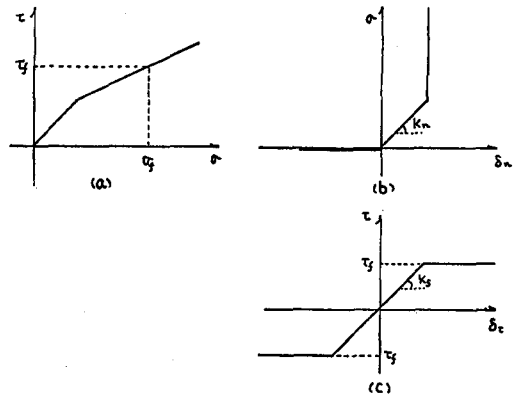


図 1 理想化されたクラック

2) 岩について

破壊規準は図2 (a) で示したような規準を示すものである。これは、岩が引張力に対して脆いということと、モール・クーロンの破壊規準との合成されたものである。さらに変位については、図2 (b), 図2 (c) で示すように、クラックの場合と様子が似ているが、これは破壊規準に達したのから、破壊面をクラックと考えて計算してゆこうという考えによる。変曲点はいずれも破

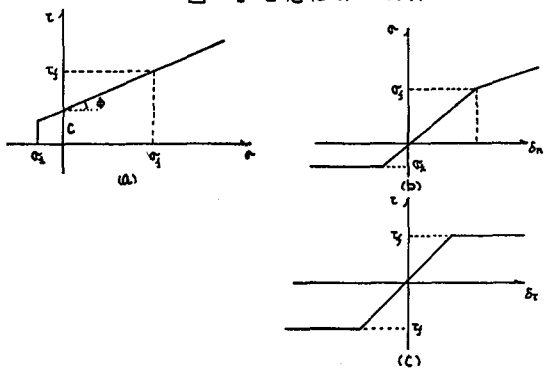


図 2 理想化された岩

破壊準に達した応力を示す点と対応している。

2-2 ジョイント・トライアングル要素

2-1で仮定した諸性質を解析中に考慮するために図3のような特別なジョイント・トライアングル要素を考える。この要素は、一般の三角形要素の中にジョイントを組み込み、あたかも、ひとつの構造物のように考えて、クラックの特性を出さうとするものである。図3中のθはせん断破壊による場合は、モールの破壊角が破壊規準に達した時の破壊面が、

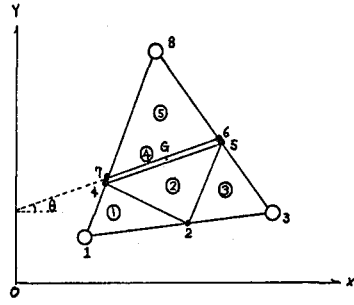


図3 ジョイント・トライアングル要素

基準座標、X軸となす角である。引張り破壊の場合は、最小主応力面が基準座標、X軸となす角度としてある。④要素は、ジョイント要素であり、三角形1, 3, 8の重心を通るように生じさせる。この要素の剛性行列の導入を以下に述べる。

図3中の全剛性は次のように書ける。

$$F = KU$$

要素内部に関する剛性と他の要素に関する剛性とに分けると、

$$\begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \{F_a\} &= \{F_{21}, F_{22}, F_{a1}, F_{a2}, F_{31}, F_{32}, F_{c1}, F_{c2}, F_{11}, F_{12}\}^T \\ \{F_b\} &= \{F_{11}, F_{12}, F_{31}, F_{32}, F_{a1}, F_{a2}\}^T \\ \{U_a\} &= \{U_{a1}, U_{a2}, U_{a3}, U_{a4}, U_{a5}, U_{a6}, U_{a7}, U_{a8}, U_{a9}, U_{a10}\}^T \\ \{U_b\} &= \{U_{b1}, U_{b2}, U_{b3}, U_{b4}, U_{b5}\}^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (1) \text{式より、} \quad F_a &= K_{aa}U_a + K_{ab}U_b \\ F_b &= K_{ba}U_a + K_{bb}U_b \end{aligned}$$

$$(2) \text{式より、} \quad U_a = [K_{aa}]^{-1} \{F_a\} - [K_{aa}]^{-1} [K_{ab}] \{U_b\}$$

②を①に代入すると

$$\begin{aligned} \{F_b\} &= [K_{bb}] \{ [K_{aa}]^{-1} \{F_a\} - [K_{aa}]^{-1} [K_{ab}] \{U_b\} \} + [K_{bb}] \{U_b\} \\ &= \{ [K_{bb}] - [K_{bb}] [K_{aa}]^{-1} [K_{ab}] \} \{U_b\} + [K_{bb}] [K_{aa}]^{-1} \{F_a\} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } \{R_p\} &= [K_{bb}] [K_{aa}]^{-1} \{F_a\} \\ [K_{pp}] &= \{ [K_{bb}] - [K_{bb}] [K_{aa}]^{-1} [K_{ab}] \} \quad \text{とおくと} \end{aligned}$$

$$\text{したがって} \quad \{F_b\} = [K_{pp}] \{U_b\} + \{R_p\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } \{R_p\} &= 0 \text{ より} \\ \{F_b\} &= [K_{pp}] \{U_b\} \quad (4') \end{aligned}$$

以上、 $[K_{pp}]$ によって、節点1-3-8だけで、この要素の特性が表現されたわけである。

2-3 解析過程

対象岩盤を有限要素分割を行なう。その際、クラックが既存であれば、あらかじめ2-2で説明した、要素をあてはめておく。そして、クラックの性質に関するデータ、岩の性質に関するデータを入れる。次に荷重、境界条件を代入して、全体剛性をつくり、変位を未知数として解く。そして、応力を変位より求め、それぞれの

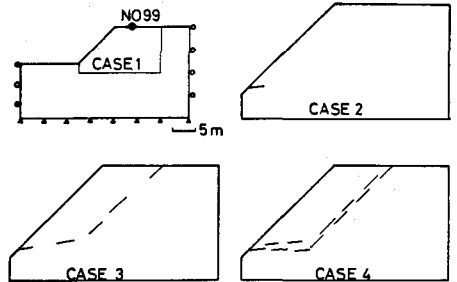


図4 各ケースの初期クラック状態

要素について、応力を検査し、応力が破壊規準を超えるものは、2-2の要素に置き換えを行ない、すべての要素が規準内におさまるように反復を繰り返す。反復が終了したら、次の荷重段階へ進む。ただし、本計算では、簡単のため、初期クラックは、最初から降伏しているものとした。

3. 解析結果

図4に示すように、45度の傾きをもつ岩盤斜面をモデル化してある。さらに初期のクラックの状態により、4ケースに分類してある。ケース1はクラックが0の場合、ケース2はクラックが1個、ケース3はクラックが5個、ケース4は、クラックが12個の場合である。図の5~7は自重のみを考え、図の8~11では分布荷重のみを考えて解析を行なった。

図5は図4中の節点99の垂直変位を自重の何倍の荷重について、どのように変形してゆくかを示したものである。●で示す点は要素が最初に降伏する荷重と変位の関係を示している。この図より、先在クラックの数が多くなるにしたがって、変形が大きくなり、また低い荷重で全体に破壊が進展することがわかる。さらにクラックの発生が斜面上端に達した時点で変位が著しく増大することが図6との対応より明らかである。図6は、ケース1のクラックの発生状態を荷重段階で示したものであり、クラックは、斜面法先部分より、順次荷重の増大に伴ない、斜面上端へと発達してゆく。8.9P(自重の8.9倍)の図中の弧は、円弧スベリ法によって求めた、最小安全率のスベリ面である。クラックの発生状態は、このスベリ面の内側に分布しており、その方向は、ほぼ円弧の接線方向に向いている。なおこの円弧スベリ法によって、最小安全率は3.8と計算されたが、この値は、要素が最初に降伏する荷重4Pと近似している。

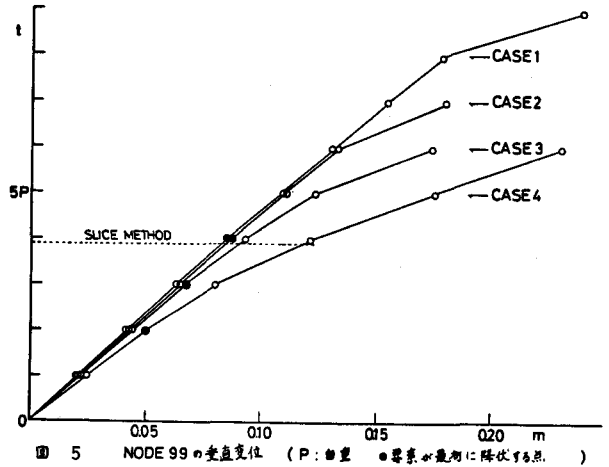


図5 NODE 99の垂直変位 (P: 自重 ●要素が最初に降伏する点)

図7はケース3荷重5Pの場合のクラックの発生状態を示している。図6と比較すると、そのクラック発生は、先在クラックに大きく影響され、先在クラックに近い部分より、クラックが生じていることがわかった。クラック数もかなり多くなっていることが示された。

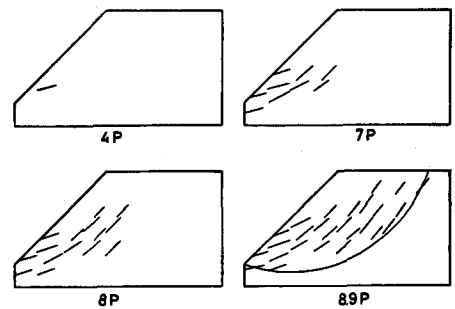


図6 CASE1のクラック発生状態 (8.9Pの円弧スベリ)

図8は、等分布を考えた場合の荷重と荷重直下の垂直変位、水平変位の関係を示したものである。たて軸が荷重、横軸が変位である。ジョイント・トライアングル要素を用いた、本計算方法と、応力分配法によるものを比較して示してある。両方法とも、変曲点は同じ荷重であるが、変曲点以後は、本計算方法は、破壊面を考慮しているため、水平方向は、応力分配法より若干なり大き

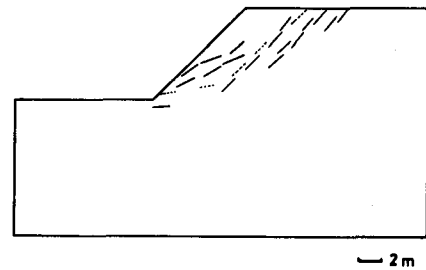


図7 要素のクラック発生状態 (CASE3, 5P, ---は初期のクラック)

くなっている。図9は破壊ワラックの状態を荷重、変位曲線の変曲点付近の荷重値で示している。この図と応力分配法による降伏要素の状態を示した図10と比較すると、降伏要素の発生箇所は類似している。図11は荷重30-40t, 60-70tの変位の差をとったもので、(a)図は弾性内であり、(b)図は図8の変曲点付近の図である。(a)図では変位ベクトルが二様であり、極端に大小、方向の変化はない。しかし(b)図では、変位ベクトルがある一定の線を境界として、明白に差がある。したがってこの境界より上部で全体破壊が生じていると考えられる。

4. 結論

本解析法により、岩盤の変形挙動に、先在ワラックが大きな影響を及ぼすこと。自重を考えた場合、法先部分よりワラックが生じ、次第に上部へ発達してゆく状態、荷重直下より、ワラックが下部へ発達してゆく状態などの逐次破壊の現象を示すことができた。さらに変位ベクトルを考慮することで、斜面の全体の挙動を把握できる可能性を示すことができた。

しかし、荷重-変位曲線より、どの荷重をもって全体破壊とみなすかを明らかにするには、実験値と比較の上、まだ十分な検討をすることが必要である。

以後、反復過程、摩擦係数の検討を行ない、より精度の高い解析を行ないたいと考えます。

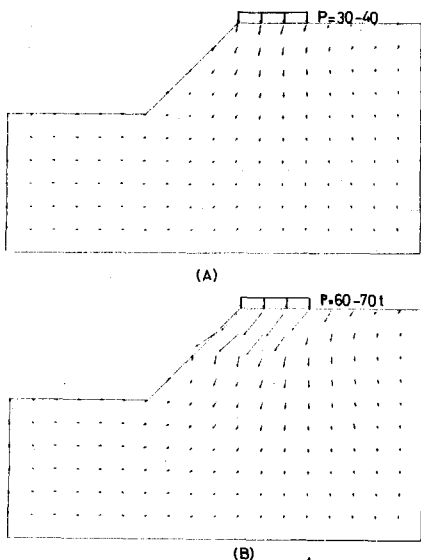


図11 変位ベクトル

1015mm
008mm —2m

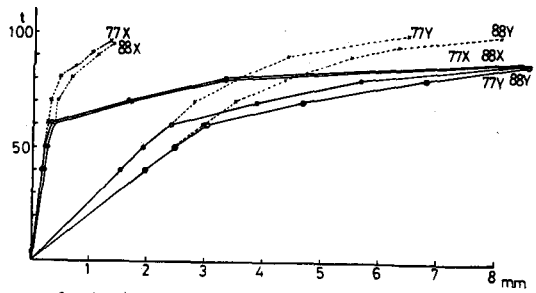


図8 荷重変位曲線 (—:実験値,:応力分配法)

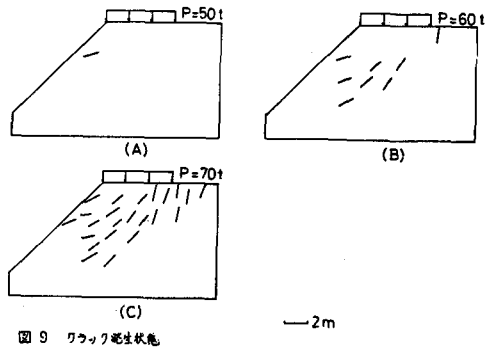


図9 ワラック発生状態

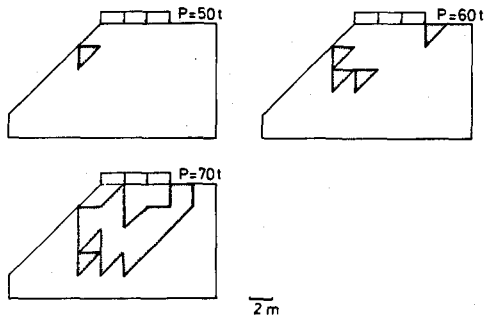


図10 要素の降伏状態 (応力分配法)

参考文献

- 1) Goodman, R.E., Taylor, F.L., and Brekke, T.L. 'A Model for the Mechanics of Jointed Rock' Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, May, 1968, pp 637-658
- 2) 川本胤方, 斎藤敬明; 岩盤の複合破壊を考慮した応力解析, 第8回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集, pp21~25

Displacement Behavior of Rock Slope with Considering
the Shear Failure

Toshikazu Kawamoto
Naoki Takeda
Depart. of Civil Eng.
Nagoya University

As the structure becomes bigger, we have to face to analyze the rock mass as the base of it. But, it is difficult to analyze the rock mass because it is composed of joints and rock which shows brittle behavior.

In this paper, the rock mass is modeled by the cracked triangle, and the effects of preexistent crack, the mode of progressive failure of rock slope are studied. A numerical method is F.E.M. which use the special cracked triangle element. The rupture surface is possible to be considered by this element. By increasing the load incrementally, displacements of nodes and stress of elements are calculated by F.E.M. If there are preexistent cracks in the rock slope, those are substituted by the special element previously. After calculation the special elements are substituted for the usual elements when the stress of elements reach the fracture criterion and the calculation is iterated till no more fractured elements are gained.

The results are that the fracture begins from the toe when the own weight only are considered, and that those crack reach the upper surface of slope gradually. If there were cracks in the rock slope, they effect the fracture mode. The fracture begins near those crack and displacements are bigger than sound rock slope. On the contrary, the fracture begins under the load in the case which the load is considered. This case are compared with the Stress transfer method.

Yield regions are almost same, but about displacements, this method is bigger than the Stress transfer method, because this method consider the rupture surface. And the clear discontinuous line is expressed by the displacement vector. This vector's load corresponds with the turning point of the displacement.

But, decision of the ultimate supporting load by this method is in need of more discussion with comparing with the results of laboratory or in-situ test.