

III-642

複合降伏モデルによる斜面の安定性に関する検討

鹿島建設(株) 正会員 佐々木 猛、永井 文男

1. はじめに

岩盤斜面の安定性評価には、節理などの不連続面が局所的に重要な影響を与える。従来の有限要素法を用いた斜面の安定解析では、これらの要因を平均化した強度変形特性を与えることにより、平均的な岩盤の挙動を解析するものが多い。しかし、施工時に問題となるクラックや節理の開口や滑りに起因する局所的な変形とその安定性を評価することは難しい。この種の問題を解析するため、佐々木ら^{1),2)}は、任意の方向の節理群の組合せを含む岩盤に弾塑性降伏条件を取り入れた複合降伏モデルを提案し、空洞モデルの検討を行った。ここではさらに、変形特性にT.F.Choら³⁾の提案するコンプライアンスマトリックス法を導入することにより節理群の異方性を考慮して岩盤斜面掘削の安定解析を実施し、その適用性を検討したので報告する。

2. 任意の角度を持つ節理群を含む岩盤の強度・変形特性

複合降伏モデルは、岩盤の降伏条件に母岩、クラックの開口、節理群の滑りを取り入れ、これらを母岩や微小クラックのような無指向性のものと節理群のような指向性のものに分類し、それぞれに変形特性と強度特性を設定することにより、節理群を含む岩盤の弾塑性挙動を求める。岩盤の変形は、図-1に示すように岩盤の総ひずみ $\{e_T\}$ を母岩と各節理群のひずみの和であり、かつ母岩と節理群の応力は等しいものと仮定して、コンプライアンスマトリックス法により、節理群を含む岩盤の変形特性を表現した。これらの関係を、(1)~(3)式に示す。これらから、節理群を含む岩盤の異方性の応力-ひずみマトリックス $[D]$ が得られる。

$$\{e_T\} = \Sigma\{e_I\} + \{e_R\} = [\Sigma[F_I] + [E]] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (1), \quad [C] = [D]^{-1} \quad (2), \quad [F_I] = [T_I]^T \cdot [C_I] \cdot [T_I], \quad [C_I] = [K_I]^{-1} / S_I \quad (3)$$

ここに、 $\{e_T\}$: 岩盤の総ひずみ、 $\{e_I\}$: 節理群 I のひずみ、 $\{e_R\}$: 母岩のひずみ、 $\{\sigma\}$: 岩盤の応力、 $[F_I]$: 節理群 I のひずみマトリックス、 $[E]$: 母岩のひずみマトリックス、 $[C]$: 母岩と節理群のひずみの和のコンプライアンスマトリックス、 $[D]$: 節理群を含む岩盤の応力-ひずみマトリックス、 $[T_I]$: 節理群 I の座標変換テンソル、 $[K_I]$: 節理群 I のバネマトリックス、 S_I : 節理間隔である。図-2に岩盤の複合降伏条件を示す。これは、岩盤の強度を母岩および各節理群毎に設定し、それぞれ、Drucker-PragerおよびCoulombの降伏条件を与え、岩盤の降伏は、応力状態が最も早く降伏面に達するモードで発生するものと仮定している。

3. 斜面安定解析への適用

岩盤斜面では一般に、斜面の滑り方向に対する節理群の角度がその安定性に支配的な影響を及ぼす。ここでは、節理群の角度に対する斜面の安定性を複合降伏モデルで検討した。本モデルの解析領域は、幅1200m、高さ800mで境界をローラー支承とした。掘削法面の高さは300mである。変形特性として、母岩は、変形係数 $E=4 \times 10^5 \text{ tf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.25$ 、節理群は、垂直バネ定数 $K_n=3 \times 10^5 \text{ tf/m}^3$ 、せん断バネ定数 $K_s=1.2 \times 10^3 \text{ tf/m}^3$ とした。強度特性として母岩は、粘着力 $C_R=170 \text{ tf/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_R=42^\circ$ 、節理群は、粘着力 $C_I=20 \text{ tf/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_I=40^\circ$ を与えた。初期応力は単位体積重量を $\gamma_w=2.6 \text{ tf/m}^3$ とした自重で与え、斜面上部を掘削した。掘削法面の平均角度は約 60° である。図-3は、母岩および節理群の角度 $\theta=90, 30, -30^\circ$ での塑性領域を示す。母岩では、表層の応力低下域を除き塑性領域は現れていない。各節理群の角度の塑性領域は、図-5に示す本斜面モデルの共役なモービライズド面($\theta=90, -30^\circ$)を中心に現れており、角度により大きさが異なっている。また、これらの範囲以外では塑性領域は現れていない。図-4は、それらの水平変位分布を示す。節理群を含まない母岩の変位が全体的に最も小さい。また、 $\theta=-30^\circ$ の場合が最も大きく法面中央部では他の場合の約2倍である。 $\theta=30^\circ$ の場合は法面上部では母岩に近いが下部では大きい。 $\theta=90^\circ$ の場合は、法尻付近に水平変位が集中している。これらは、塑性領域の大きさおよび節理群の方向と対応している。

4. まとめ

本検討では、複合降伏モデルを斜面モデルに適用し次の結論が得られた。(1)節理群を含む岩盤斜面の安定性評価では、通常の母岩の強度では、塑性領域は表面の応力低下域を除き極めて小さく、節理群の強度とその斜面に対する方向が支配的である。(2)これらの塑性領域は、斜面内の主応力角度で決まるモービリズド面と節理群の角度の関係で決まり、その大きさは節理群の角度で異なっている。(3)各節理群の角度によって、その変形モードも異なっている。したがって、斜面の安定性評価には節理分布の調査が重要な意味を持ってくる。今回、著者らが提案した複合降伏モデルは、節理群を持つ岩盤斜面の安定性に関する要因をある程度明らかにすることができた。今後は、これらの結果と実現象を比較し、その妥当性を検討する予定である。

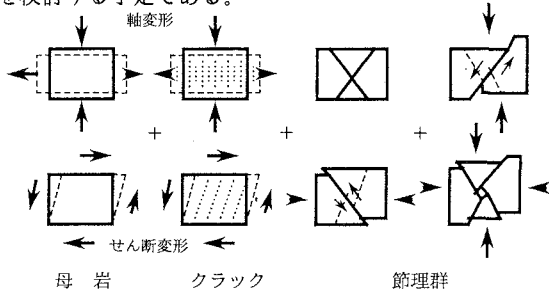


図-1 岩盤の変形特性

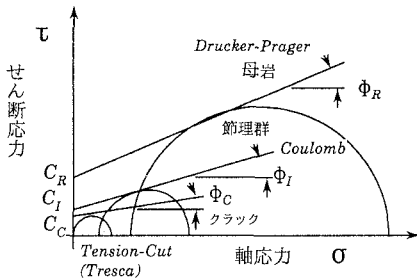


図-2 岩盤の強度特性

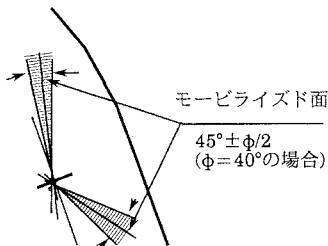


図-5 モービリズド面

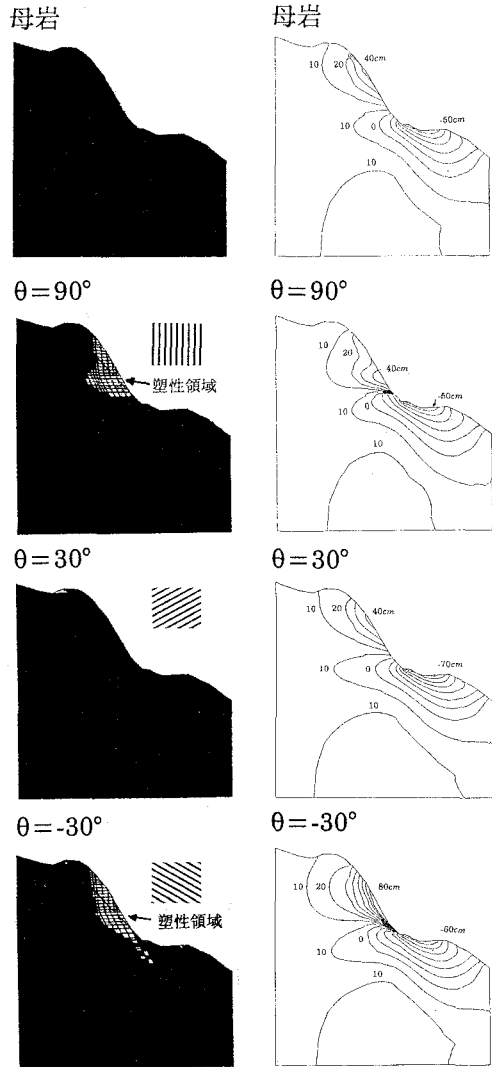


図-3 塑性領域

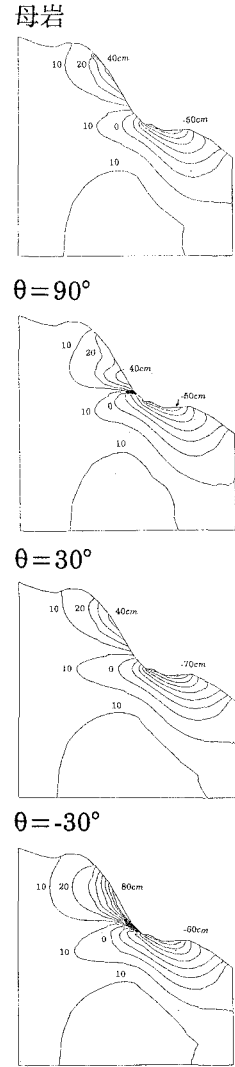


図-4 水平変位分布

参考文献

- 1) 佐々木猛: 岩盤掘削における節理の開閉モデルの一検討、第26回土質工学研究発表会、pp.1157~1158、1991
- 2) 佐々木 猛・吉清孝・安東伸康: 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する検討、土木学会、第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.276~280、1992.2
- 3) T. F. Cho, B. C. Haimson and M. E. Plesha: Continuum modeling of porous rock with arbitrary joint sets including coupled deformation - diffusion behavior, Proceedings of the 7th ISRM Congress, Aachen, pp.805~811, 1991