

III-264 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

鹿島建設(株) 正会員 佐々木 猛

1. 研究の目的

岩盤内には、潜在的または顕在的なクラックや節理などの不連続面が存在する。斜面や空洞の掘削工事でこれらは、掘削面周辺岩盤の局所的な安定性に重要な影響を与える。掘削面付近で発生する変形量は、母岩自身の弾性的なものに比較して、クラックや節理の開口や滑りに起因する比率の多いことが過去の現位置試験や計測結果から知られている^{1), 2), 3)}。従来、有限要素法を用いた掘削安定解析では、これらの要因を平均化した特性を与えることが多く、その結果は全体の平均的な挙動を示すものと判断される。しかし、実際の施工時に問題となるクラックや節理の存在に起因する局所的な挙動とその安定性評価をすることは難しい。

本報告では、有限要素法の弾塑性降伏条件にこれらの要因を取り入れ、その結果により物理的な意味を与えることを目的とした。また、これらを従来のモデルと比較することにより、その妥当性を検討した。

2. 複合降伏モデルについて

岩盤掘削による壁面の変形量は、次の要因の和として表されるものとした。すなわち、

- (1) 母岩自身の弾性および弾塑性的な変形(無指向性)
- (2) 岩盤内の潜在的なクラックの開口および滑りによる変形(無指向性)
- (3) 有意な走向/傾斜をもつ、層理、節理群の開口および滑りによる変形(指向性)

掘削によって生じる応力の再配分での岩盤の降伏は、(1)~(3)が持つ強度にその応力状態が最も早く達したものの組み合わせとする。これを以降、複合降伏モデルと呼ぶことにする。

3. 解析の仮定および方法

クラックや節理を含む掘削面付近の岩盤の力学特性として、変形および強度が応力状態に依存するものとした。即ち、壁面周辺の応力状態は、掘削によって除荷(法線方向)と載荷(切線方向)同時に起こる二軸状態(2次元の場合)になる。これらから、以下の事項を考慮した。

- (1) 岩盤内の潜在的なクラックは、ある一定以下の応力(S_2)で開口し、変形係数、強度が低下する。
- (2) ある一定以上の応力(S_2)では、クラックまたは節理は閉合し初期状態の変形係数、強度を有する。
- (3) ある一定以下の(S_2)二軸の応力状態に対して、直交異方性の変形係数、強度特性を持つ(2次元の場合)。
- (4) クラックの開口方向は、主応力の除荷方向とする。
- (5) 節理群の走向/傾斜がクラスター分析などで既知の場合には、これらは、節理面に平行な方向のせん断力で滑るものとする⁴⁾。

以上の仮定を、2次元平面ひずみの弾塑性構成則に導入した。弾塑性構成則として、せん断応力に対して、無指向性のものにはDrucker-Prager⁵⁾、指向性のものにはCoulomb⁴⁾、引っ張り応力に対してはTresca(Tension-cut)⁶⁾の降伏条件に関連流れ則を適用し、有限要素法により空洞モデルを解析した。図-1、図-2に、解析で仮定した変形および強度特性の概念を示した。図-3に解析モデルを示す。

4. 解析モデルおよびケース

地山の初期応力を500t/m²の静水圧状態とし、周辺固定のモデルについて、18×12mの中規模程度の空洞を3ベンチで盤下げするものとした。各ベンチでは掘削解放力を7増分で与えた。表-1、2に解析ケースおよびその物性を示す。3節で提案したモデルを検証するため、解析ケースとして、1)弾性、2)等方性弾塑性

(Drucker-Prager, Tension-Cutモデル), 3)等方クラック($S_1=50\text{tf/m}^2$), 4)節理群1、2、5)等方節理群1、2、6)等方クラック-節理群1、2の組合せによる6ケースについて比較した。3)、6)のケースでは、最小主応力が S_2 以下になった場合、その方向の変形係数(E_2)、および粘着力(C_2)、内部摩擦角(ϕ_2)が当初の $1/5(E_1, C_1, \phi_1)$ になるものとした(図-1、2、3参照)。表-1、2に物性および解析ケースを示す。

5. 解析結果および考察

図-4に、空洞周辺の塑性領域分布を示す。特にケース6では、ケース2と比較して塑性領域に差はないが、降伏の要因が明確になっている。図-5に、空洞中央部の側壁からの水平変位分布を示す。ケース6の変位量は、ケース2に比較し、33%程度大きい。特に、ケース6では、その約30%が掘削壁面から4mの部分で占められる。これは、節理性岩盤の掘削による変位量の大部分が掘削壁面付近の節理の開口または、滑りによるとする現象を良く表現しているものと思われる。また、空洞周辺の変形の傾向をみると、ケース1、2では天端から上半で沈下を示すが、ケース3~6では天端から下端全体に渡って沈下(下向き)となっている。

6. 結論

本検討では、節理性岩盤の掘削解析において、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た。その結果、掘削壁面周辺岩盤の局所的な安定性評価に際し、物理的な意味を与えた。

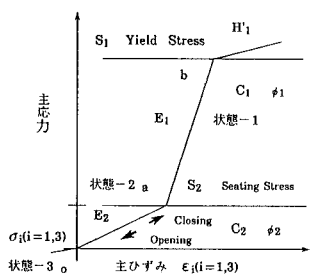


図-1 変形特性

表-1 解析に用いた物性

種類	変形係数・その他	強度降伏条件
母岩	$E_x = E_y = 1 \times 10^5 \text{tf/m}^2$ $G_{xy} = 4 \times 10^4 \text{tf/m}^2$ $\nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.26$ 初期応力、 $\tau_0 = 0$ $\sigma_x = \sigma_y = 500 \text{tf/m}^2$	粘着力- $C_2 = 100 \text{tf/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_1 = 60^\circ$ 硬化係数 $H' = 1/1000E$ Drucker-Prager Tension-cut
クラックの開口	$S_1 = 50 \text{tf/m}^2$ 、異方性 $\sigma_{\min} < S_1; E_{\min} = E_p/5$	粘着力- $C_3 = 10 \text{tf/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_2 = 10^\circ$
節理群-1	節理群角度+45° 他は岩石と同様	粘着力- $C_3 = 20 \text{tf/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_3 = 35^\circ$
節理群-2	節理群角度-60° 他は母岩と同様	粘着力- $C_4 = 20 \text{tf/m}^2$ 内部摩擦角- $\phi_4 = 35^\circ$

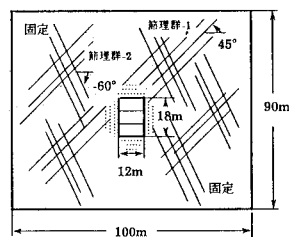


図-3 解析モデルおよび領域

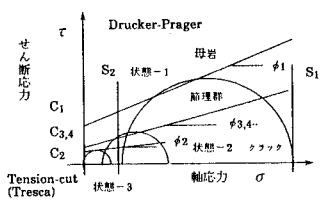
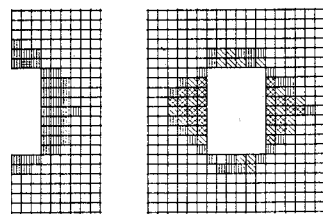


図-2 強度特性(複合降伏モデル)

表-2 解析ケース

解析ケース	弾塑性等方性	クラック異方性	節理群-1	節理群-2	備考
Case-1	等方弾性
Case-2	○	等方弾塑性
Case-3	○	○	クラックの開口
Case-4	○	○	節理群の組合せ
Case-5	○	○	○	複合降伏
Case-6	○	○	○	○	複合降伏



Case-2 Case-6

図-4 塑性領域

参考文献

- 1)土木学会編、“土木技術者のための岩盤力学”，pp.145~157、1975
- 2)G.ゲーデス編著、川本、桜井、足立共訳、“地盤力学の有限要素解析”，森北出版、1981
- 3)川本、林、“地盤工学における有限要素解析”，培風館、pp.252~287、1981
- 4)飯田、小林、“岩盤せん断試験に関する力学的な考察”，第3回岩の力学国内シンポ、1970
- 5)庄子、佐々木、森川、“有限変形理論による不連続面を有する岩盤掘削モデルの弾塑性解析”，岩の力学連合会、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.449~454、1978
- 6)佐々木、“有限変形理論による掘削地盤の弾塑性解析”，第25回土質工学研究発表会、1990

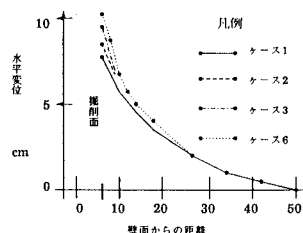


図-5 側壁の水平変位分布