

## 亀裂性岩盤のための非線形クラックモデルの開発

株式会社大林組 正会員 ○中岡 健一

## 1. はじめに

亀裂を含む岩盤を等価連続体としてモデル化する方法が数々提案されている(例えば1, 2)。その多くの方法は、亀裂、および、基質のコンプライアンス行列の和の逆行列を、亀裂を含むモデルの剛性行列として求めるものである。本報告では、後に、亀裂にひずみ軟化も適用することも考え、接線弾性係数が負になる問題を避けるために、コンプライアンス行列を使わない数値モデルを開発した。最初のステップとして、亀裂の変位として開口や閉口を扱わず、せん断ずれのみを扱った。非線形の計算方法は、亀裂の応力が粘着力に収まるように、亀裂のずれ量を計算ステップごとに修正する単純なものである。3方向の亀裂を考慮して有限差分法の1要素モデルに適用し、強制変位を加えて亀裂のずれ量や計算の収束性を確認した。その結果、数値モデルは妥当な計算を行うことができると判断した。

## 2. 数値モデルの概要

図-1に示すように、せん断ばねと亀裂の粘着力を表すスライダーで構成される亀裂を考える。摩擦角は考慮しない。代表領域に法線ベクトル $n_i$ の亀裂が複数内在しており、これらの亀裂の平均的なずれを $\delta_i$ とすると、亀裂を含む代表領域の平均的なひずみ $\varepsilon_{ij}^J$ は変位-ひずみの関係から式(1)によって表される。ここで、亀裂の配置や基質が同じ値で表される範囲を代表領域と呼んだ。

$$\varepsilon_{ij}^J = \frac{S}{2V} (\delta_i n_j + \delta_j n_i) \quad (1)$$

$S$ は領域に含まれる亀裂の面積の合計、 $V$ は代表領域の体積である。亀裂の方向が複数の場合、それぞれの方向についての式(1)の結果を足すことにより、代表領域のひ

ずみが求められる。ここでは3方向の亀裂を考え、それぞれの方向の不釣り合い力を収束させる計算を行う。不釣り合い力は、亀裂が弾性範囲の場合は、要素応力から求められる亀裂に働くせん断力 $\tau$ と $k\delta_i$ の差、塑性の場合は $\tau$ と $c$ の差とした。ここで $k$ は亀裂のばね値、 $c$ は粘着力である。 $\tau > k\delta_i$ または $\tau > c$ の場合は $\delta_i$ をわずかに増やして要素の応力を緩和させて $\tau$ を小さくし、その逆のときは $\delta_i$ を減らす。 $k\delta_i$ または $c$ が、 $\tau$ と等しくなるまで収束計算を行う。

## 3. 計算条件

図-2に亀裂の方向と座標系、表-1に入力物性値を示す。各亀裂のばね値は同じとした。式(1)の係数は1とした( $\varepsilon_{ij}^J = \delta_i n_j + \delta_j n_i$ )。一つの亀裂が降伏すれば、その後は降伏した亀裂も含めて全ての亀裂と基質の応力は増えなくなり、複数の亀裂が同時に降伏することはない。ここでは、亀裂3(図-2ではCr3)にのみ粘着力を考慮した。計算モデルは一辺1mの立方体の1要素とし、表-2に示す計算ステップで行った。各ステップはそれぞれ5,000stepに分割して変位を加えた。それぞれのstepにおける不釣り合い力の収束計算回数は70とした。

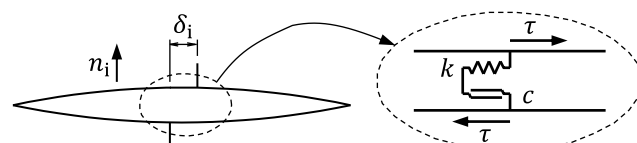


図-1 内部亀裂の模式図

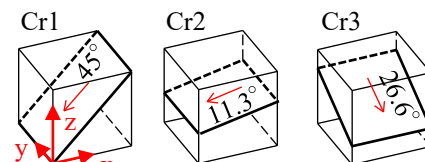


図-2 亀裂の方向

表-1 入力物性値

| 項目                  | 値   |
|---------------------|-----|
| 弾性係数 (MPa)          | 100 |
| ポアソン比               | 0   |
| 亀裂のばね値 (MPa/m)      | 100 |
| 亀裂 (Cr3) の粘着力 (MPa) | 0.8 |

表-2 計算ステップ

|   | 内容                            |
|---|-------------------------------|
| 1 | 一軸圧縮状態でモデル上面を5cm下方(-z方向)に強制変位 |
| 2 | そのまま5cm上方に強制変位(上面のz方向変位を0に戻す) |
| 3 | そのまま上面を-z方向に5cm強制変位           |

キーワード 亀裂性岩盤, 等価連続体, 非線形モデル

連絡先 〒204-858 東京都清瀬市下清戸4-640 大林組技術研究所 Tel: 042-495-1015

#### 4. 計算結果

図-3に、step に対する $z$ 方向の変位 $u_z$ と応力 $\sigma_z$ の関係を示す。変位は入力値であり、10,000 step 以降は $-u_y$ 方向の変位を増やしたため、 $u_z$ は0である。応力は3,800 step において2 MPa まで大きくなり、この時点でCr3が降伏し、5,000 step まで応力が一定となっている。一軸圧縮状態における亀裂面の勾配 $\theta$ と亀裂面のせん断力 $\tau$ の関係は、軸力を $\sigma_z$ とすると $\tau = \sigma_z \sin(2\theta)$ によって表され、Cr2の $\theta (= 26.6^\circ)$ と $\sigma_z = 2$  MPaを用いると $\tau = 0.8$  MPaとなり、粘着力に一致する。5,000 ~ 10,000 step はそれまでとは逆方向の変位により応力が低下している。10,000 step 以降、引張応力がstep とともに大きくなっているのは、モデル上面を $-u_y$ 方向に変位させると、図-2からCr3が下り勾配で開口しようとする力が引張力として働くためである。

図-4に下側の亀裂面に対して上側の面が移動した軌跡の、 $z$ 軸に垂直な面(要素の上面)への投影を示す。点Aは始点である。変位を加えるとともに、上面は下面に対して下りの方向(Cr1とCr2は $-x$ 方向、図では左方向、Cr3は $-y$ 方向、図では下方向)に移動し、点BでCr3が

降伏している間(3,800~5,000step)とどまる。その後、除荷とともに上りの方向に移動し、そのまま点Aを通過する。10,000stepの点Cより後は、強制変位と同じ方向(図では下側)に移動する。

図-5に亀裂の下面に対する上面のずれ量を示す。ずれ量は、図-4の各ステップにおける上面の位置と点Aとの距離とした。変位を加えるとともに、各亀裂の弾性ずれが増え、3,800 step において、Cr1は1cm、Cr2は0.8cm、Cr3は0.385cmで一定となり、除荷が開始される5,000 step 以降低下している。これらの弾性ずれにばね値( $k = 100$  MPa/m)を乗じたせん断力は、要素の亀裂面に沿ったせん断応力 $\tau = \sigma_z \sin(2\theta)$ と一致している。また、3,800 ~ 5,000 step においては、Cr3の塑性ずれ(破線)が増えている。各亀裂のずれが0になる約8,800 step は、図-4において、ずれの軌跡がA点を通過する時点に対応する。

#### 5. まとめ

本報告では、3方向の亀裂を含む数値モデルを開発し、有限差分コードに組み込み、単純なモデルの計算を行った。得られた応力と亀裂のずれの関係を確認することで、モデルは妥当に計算できていると判断した。亀裂は相互作用するため、特に非線形に入った時点での収束性を懸念したものの、不釣り合い力の収束回数を70回から10回としても、図-5の結果の違いは1%程度であり、安定していた。今後は多要素モデルへの適用、摩擦角、亀裂のひずみ軟化、ずれに伴う体積膨張、開口・閉口を表すモデルなどの導入を進めていく。

#### 参考文献

- 1) 吉田秀ら: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535, 1996,
- 2) 佐々木ら: 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研究, 土木学会論文集, No.505, 1994.

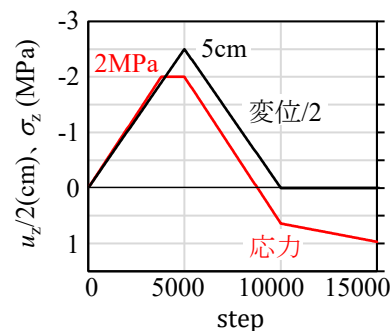


図-3 要素上面の $z$ 方向変位と要素の応力

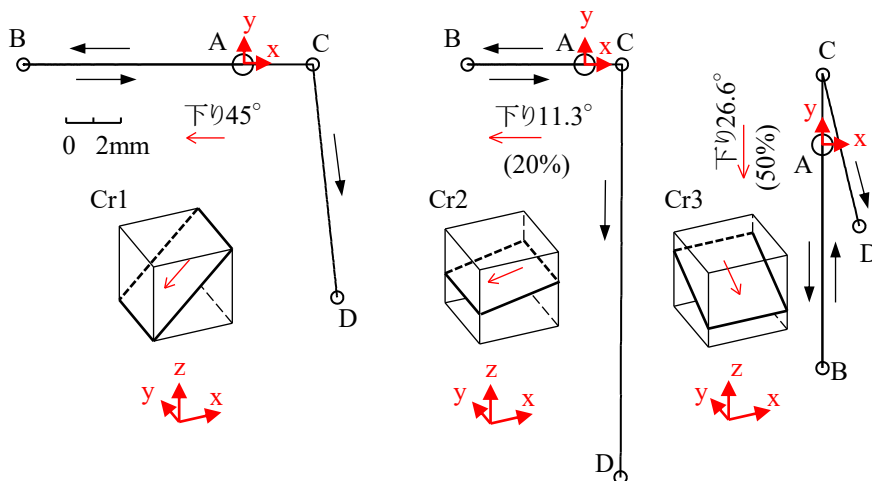


図-4 モデル上方から見た各亀裂の下面に対する上面の位置

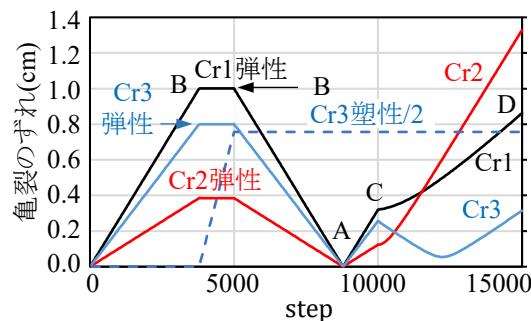


図-5 各亀裂のずれ量