

個別要素法における亀裂発生・進展のモデル化について

A NEW MODELING OF GENERATION AND PROGRESS OF CRACK IN DISCONTINUOUS ROCK MASSES BY USING DISTINCT ELEMENT METHOD

中川光雄*・蔣 宇静**・江崎哲郎***

Mitsuo NAKAGAWA, Yujing JIANG and Tetsuro ESAKI

It is thought that stability of rock structures extremely depend on not only characteristics of mechanical behavior in existent discontinuities but also new cracks which are generated and progress due to loading or excavation in slopes, foundation ground and caverns. In this study, a new approach is proposed for modeling generation and progress of cracks due to shear and tension failure in the matrix by using distinct element method. Appropriateness and reliability of the approach are verified by means of comparison with result of theoretical analysis for the problem of cylindrical hole and bearing capacity of strip footing on slope. As applications to field problems for discontinuous rock masses, simulation of footing of bridge on slope are also carried out.

1. はじめに

岩盤上での大型構造物の建設などによる基礎岩盤の変形や破壊の大部分は、不連続面に沿うせん断やダイレーションに起因することが多いと考えられる。一方で、岩盤の安定機構は、既存の不連続面の挙動のみならず、載荷や掘削によって新たに発生する亀裂の挙動や、さらに、その進展により大きな影響を受けると考えられる。岩盤構造物の施工過程で新たに発生した亀裂とその影響について今までにも幾つかの報告が見られる。例えば、吉田ら¹⁾は、地下発電所の空洞掘削時において、側壁岩盤に設けられた測定孔から得られた計測変位が不連続性を示した点について検討した結果、空洞掘削に伴い新たな亀裂が岩石基質部に発生したことが原因であると指摘している。さらに、新たな亀裂の発生は、測定孔内でのボアホールテレビによっても確認されており、亀裂発生の集中箇所と計測変位の不連続な箇所が一致していることを報告している。このことから、不連続性岩盤の変形挙動や力学的安定性を数値解析により適切に評価し設計へ導入するには、載荷や掘削によって新たに発生する亀裂の挙動やその進展を適切にモデル化することが、既存の単一不連続面の力学的特性を適切に評価しモデル化することと同様に重要であると考えられる。

そこで、本研究は、不連続性岩盤を対象とした数値解析による評価手法の内、岩盤不連続面を1つ1つ具体的に

に表現する不連続体解析を適用する立場を取り、岩石基質部における新規亀裂の発生機構の解明を個別要素法において実現し、発生した亀裂の挙動やその進展をシミュレートする解析的アプローチを新たに提案するものである。本研究で提案する亀裂発生のモデル化手法におけるアルゴリズムとして、個別要素法において実現される亀裂発生前、亀裂発生条件、亀裂発生後の一連のプロセスを仮定や適用限界と併せて示す。そして、幾つかの代表的な理論的解析における破壊領域に対する理論解と、本論文で提案するモデル化手法による解析結果を比較することにより妥当性を検証する。また、不連続性岩盤を対象とした実用例として、急崖岩盤斜面上における橋梁基礎の建設による斜面安定解析の結果を示し考察する。

本研究で提案する解析的アプローチにより、不連続性岩盤を対象として、既存の不連続面の挙動及び、載荷や掘削により新たに発生する亀裂(不連続面)の挙動が複合して具現される破壊の進展メカニズムを、滑りや剥離などによる不連続面の幾何学的影響が顕著な大変形に至るまで追跡することがある程度可能になると考える。

2. 亀裂発生のモデル化と進展の表現

本研究で提案する亀裂発生のモデル化手法(以下、提案手法と称する)は、個別要素法のアルゴリズムの一部として機能する。

*	正会員	工修	(株)CRC総合研究所	関西支社	課長役
**	正会員	博(工)	九州大学工学部	付属環境システム科学研究センター	助教授
***	正会員	工博	九州大学工学部	付属環境システム科学研究センター	教授

2.1 亀裂のモデル化

個別要素法では、岩盤不連続面は岩塊ブロックの境界面として取り扱われ、因って、岩塊ブロックは岩盤不連続面に囲まれた岩石基質部となる。提案手法は、発生する単一亀裂の方向を何らかの定式化により逐次的に決定する手法ではなく、その発生が予測される位置にその大きさの岩塊ブロック境界面として予め定義しておく方法を取る。そして、載荷初期にはこの境界面を挟む岩石基質部が一体となり連続体として挙動するよう周囲の岩石基質部と等価な剛性と強度を有する。また、与えられた亀裂の発生条件により亀裂化と判定された時、境界面の剛性と強度は、自動的に岩盤不連続面の値として処理され、以降は岩盤不連続面として挙動する。本研究では、この境界面を「潜在面」と称する。ここで、定義した潜在面の角度が、実際に発生する亀裂の方向と一致する保証は無い。これに対しては、亀裂が発生すると予測される領域に対し、且つ予測される方向に対し、潜在面がある程度数多く定義すれば、破壊の自由度が損なわれることはないと考えられる。たとえ潜在面を数多く定義しても、実際に亀裂となり得る潜在面は、解析対象領域の全体構造と荷重に支配され、実際には、全ての潜在面が一様に少しずつ亀裂化して進展するものではなく、むしろ、部分的に集中する傾向が多いと考えられる。

2.2 亀裂の発生条件

潜在面が亀裂と判定される条件として、本研究では、Coulomb基準のような不連続面に与えられる降伏・破壊条件ではなく、岩石材料（基質部）に与えられる降伏・破壊条件を適用し、せん断、引張のそれぞれに対して定義すべきであると考えられる。

(a) 亀裂の発生条件式

脆性破壊理論では、Griffith理論²⁾が代表的であり、これを平面応力場へ拡張すると、圧縮強度と引張強度の応力円を包絡する式(1)の2次の放物線となる。

$$\tau^2 + 4\sigma_c\sigma = 4\sigma_c^2 \quad (1)$$

これは、圧縮・引張強度比が8の場合のMohr基準である。岩石の圧縮・引張強度比は通常10前後であり、岩種によっても相当変化するので、これをさらに簡略化して、圧縮・引張応力円の共通接線を破壊基準とし、土の場合と同様にせん断強度パラメータC、 ϕ および引張強度 σ_t を用いると、Mohr-Coulomb基準となる。これを、式(2)、(3)に示す。

$$f_s = (1.0 - \sin \phi)\sigma_1 + (1.0 - \sin \phi)\sigma_3 - 2.0C \cos \phi \quad (2)$$

$$f_t = \sigma_t - \sigma_3 \quad (3)$$

本研究では、岩石基質部を等方・等質と考えて、せん断による亀裂の発生条件として式(2)を、また、引張による亀裂の発生条件として式(3)を適用する。ここで、C、 ϕ および σ_t は亀裂の発生開始を規定する強度パ

ラメータとなる。

(b) 亀裂発生条件式に要する主応力 σ_1 、 σ_3 の評価
提案手法において、式(2)、式(3)の主応力 σ_1 、 σ_3 は、潜在面の位置にて評価されるべきと考える。ここで、亀裂発生以前に潜在面がその近傍の岩石基質部と共に連続体として挙動する仮想的な不連続面であることは、潜在面上の応力が周囲の岩石基質部と連続し、また、潜在面での変位のギャップ量が皆無であることを意味する。本研究では、これが成立することを前提として、Airyの応力関数 $\Phi(x, y)$ を用いて潜在面の近傍の岩石基質部の応力テンソルより潜在面位置の応力テンソルを求める。Airyの応力関数として、式(4)に示す3次の多項式を適用した場合、未知数はa, b, c, dの4つとなる。

$$\Phi = \frac{a}{6}x^3 + \frac{b}{2}x^2y + \frac{c}{2}xy^2 + \frac{d}{6}y^3 \quad (4)$$

式(4)の4つの未知数を一意的に決定するために提案手法では、図-1に示すように、潜在面より一方の側の近傍2地点と他方の側の近傍2地点より合計4組の応力テンソルを得ることにした。決定され応力関数 Φ に基づき、各々の潜在面の代表点をその潜在面の中心位置と考えて、中心位置の座標(x, y)を式(5)に与えると、潜在面位置の応力テンソル($\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y$)が評価されることになる。

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad (5)$$

ここで、式(5)より得られる応力テンソル($\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y$)は、弾性体に対して平衡方程式を自動的に満足したものとなる。因って、提案手法では、潜在面を含む岩石基質部は弾性変形を仮定し、亀裂の発生条件により亀裂と判定されるまでは平衡状態であると仮定することが要求される。不連続性岩盤を対象とする多くの問題では、この仮定が成立すると考える。最後に、主応力(σ_1, σ_3)は、($\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y$)より容易に求まる。

2.3 個別要素法における亀裂発生アルゴリズム

上述した亀裂発生判定を含む個別要素法の計算サイクルを図-2に示す。これより、亀裂の発生条件は、計算サイクル開始位置にて1サイクルに付き1回実行されることが分かる。さらに、亀裂の発生判定に係る具体的なアルゴリズムは、図-3に示される。ここでの処理は、個別要素法モデルにおける全ての境界面の内、潜在面として定義された不連続面のみが対象となる。また、全ての潜在面に対する処理が完了するまでこのアルゴリズムは繰り返される。

2.4 亀裂の進展の表現

発生した亀裂は、個別要素法の計算における岩盤不連続面として挙動し、その周囲に対して逐次的に応力再配分をもたらす。この応力再配分の過程において既に亀裂となった不連続面の隣接もしくは近傍にある別の潜在

面において亀裂の発生条件が満足されるなら、これが新たな亀裂の発生となる。因って、この順次発生する潜在面の亀裂化が、本研究で提案する解析的アプローチにおける亀裂の進展の表現と考える。

3. 提案手法の検証

提案手法による亀裂発生・進展の解析的アプローチの妥当性を検証するために、ここでは、塑性・破壊領域に関して理論的な結果が示されている既発表の研究を用い、提案手法による解析の結果として得られる亀裂発生領域と比較する。理論的解析は、全領域において連続体を仮定しているため、解析対象岩盤は、不連続面の存在しないマッシブな岩から構成されていると仮定する。定義する潜在面の分布形状は、亀裂発生方向の任意性を考慮して、ここでは、正六角形とした。

3.1 静水圧を受ける円形空洞周辺岩盤の弾塑性解析
理論的解析³⁾は、無限遠方で一様分布の静水圧 P_0 を受ける半径 a の円形空洞を図-4のように考える。ここでは、岩盤地山がMohr-Coulomb則に従いひずみ軟化特性を示す等質等方体に対する応力-ひずみ関係が理論解として導かれている。円形空洞周りにおいて塑性流動領域とひずみ軟化領域が生じ、2つの塑性半径 R_e と R_f が式(6)のように求められる。

$$R_e = \left(\frac{4}{3} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \left[\frac{N \zeta^{\alpha-1} (1-K_p)(h+K_p) + \sigma_c \{ (1+h) + 2(\alpha-1) \}}{(1-K_p)(h+K_p) - \sigma_c \{ (1+h) + 2(\alpha-1) \}} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (6)$$

$$R_f = \zeta R_e; \quad \zeta = \left[\frac{2}{\alpha(1+h) + (1-h)} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

$$N = \frac{2p_p}{1+K_p} - \frac{2\sigma_c}{1+K_p} - \frac{2\sigma_c}{(1-K_p)(h+K_p)}$$

$$K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$$

ここで、 ϕ は内部摩擦角、 α はぜい性率、 ζ は R_e と R_f の比、 h は塑性ポアソン比である。解析の対象は、地表から空洞中心まで100mの砂岩岩盤内に位置する半径5mの円形空洞とする。地山の力学的物性値は、表-1に示す。静水圧 $P_0=2.5\text{MPa}$ として式(6)に示した理論解より得られる塑性半径は、地山が完全弾塑性挙動を表す場合、 $R_e=R_f=7.15\text{m}$ と得られる。

提案手法による解析モデルは、対称性を考慮して1/4モデルとし、地山を正六角形状の岩塊ブロックに分割して、岩塊ブロック間の境界面を潜在面とする。ここで、岩石基質部は弾性体としてその物性値と亀裂発生条件に与える強度パラメータを表-1に示す。半径方向および円周方向に主応力 $\sigma_r = \sigma_\theta = 2.5\text{MPa}$ を再現させた後、無支保の状態で掘削領域を100%解放した。提案手法により得られた亀裂が発生・進展して最終的に釣合となった状態を図-5に示す。これより、亀裂の進展が理論解によって求まる塑性半径の位置の手前付近で停滞している現象は、内空壁面付近で亀裂化による岩塊ブロックの剥

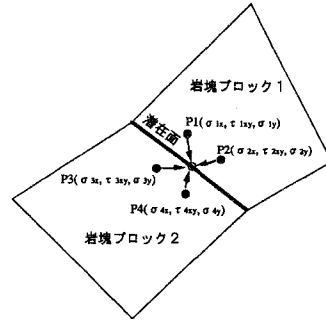


図-1 亀裂発生条件式に要する主応力の評価

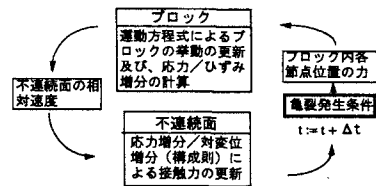


図-2 個別要素法の1計算サイクル Δt のプロセス (Δt は1計算サイクルに要する微小時間増分)

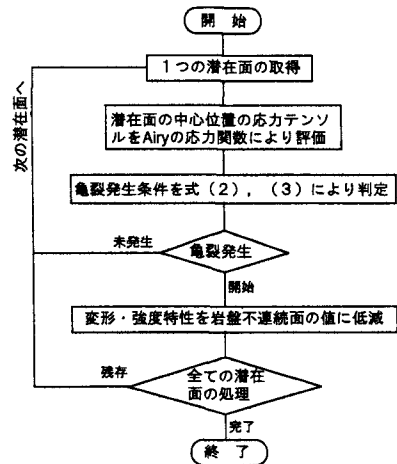


図-3 亀裂発生判定のアルゴリズム

離の発生が見られ、岩塊ブロックの剥離の箇所では応力再配分が中断されたことが原因であると思われる。また、塑性半径を超えて亀裂が進展が進行している現象は、その部分が内空壁面付近で岩塊ブロックの剥離が発生していない箇所の半径方向に存在することから、掘削により解放された応力に、剥離により再配分が中断された応力が付加されたことが原因であると思われる。理論的検討は連続体を前提としているのに対して、提案手法は理論

的検討では塑性化する領域を不連続体としている。このため、提案手法によっては、半径が均一である亀裂発生領域は得られなかったが、理論的検討による塑性半径と図-5に示される亀裂発生領域は、概ね一致していると思われる。

3.2 背面に引張亀裂が存在する斜面安定解析

理論的解析⁴⁾は、図-6に示すように、背面に引張亀裂のある高さ H 、内部摩擦角 ϕ を有する斜面において、法尻を通り安全率が1.0の臨界円弧すべり面位置および臨界円弧すべり面の一部となる背面における引張亀裂の臨界位置が一意的に決定される。ここで、臨界円弧すべり面の中心座標 (x, y) はこの理論における図表より与えられ、半径は必然的に座標 (x, y) と法尻を結ぶ直線距離となる。引張亀裂の臨界位置も、同様の方法で斜面法尻からの距離 b で与えられる。解析の対象は、高さ $H=10.0\text{m}$ 、傾斜勾配 45° 、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ の均一な岩盤斜面であり、 $x=-0.50H\text{m}$ 、 $y=1.35H\text{m}$ 、 $b=1.75\text{m}$ がそれぞれ得られる。

提案手法による解析モデルは、引張亀裂を表現するために斜面法尻から距離 $b=1.75\text{m}$ の位置に予め鉛直方向に空隙を与え、岩盤斜面内に正六角形状の潜在面を定義した。岩石基質部は弾性体として、ヤング係数 10.0GPa 、ポアソン比 0.3 、密度 2500.0kg/m^3 を与えた。亀裂発生条件の強度パラメータとして、 $\phi=20.0^\circ$ を与えた。岩盤自重の載荷後に得られた提案手法による亀裂の発生状態を図-7に示す。亀裂発生領域は、理論的解析により与えられた円弧すべり面に沿ってその内側に発生している結果が得られている。これより、提案手法による解析結果がここで示した理論的解析による円弧すべり面の位置をよく表現していることが分かる。

以上で取り上げた掘削問題と斜面問題は、岩盤工学における代表的な問題であり、また、ここで得られたそれぞれの結果に基づけば、提案手法は、実用上の妥当性や信頼性を有するとの判断が可能であると考えられる。

4. 不連続性岩盤構造物への適用

提案手法の実際問題への適用例として、不連続性岩盤に立地する急崖斜面上の橋梁基礎に橋梁を建設した場合の基礎の安定性を考える。橋梁基礎は、傾斜が $50^\circ \sim 80^\circ$ の急崖斜面上の高さ 25m の位置に設置される直接基礎を想定する。解析モデルを図-8に示す。基礎周辺岩盤の卓越方向を有する2つの不連続面群の内、1つは、 40° の差し目方向に傾斜を有する連続性のある不連続面群であり、もう1つは、これと直交する連続性の乏しい不連続面群とする。岩石基質部の力学的特性は弾性体とし、亀裂発生条件に与える強度パラメータと共に表-2に示す。また、既存不連続面の物性値は、表-3に示す。潜在面は、基礎直下の地表付近に流れ目方向に 0.5m

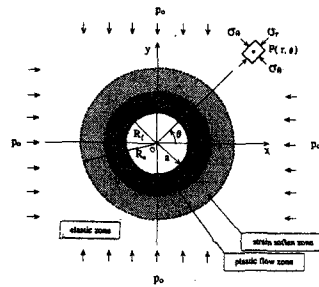


図-4 円形空洞周辺の応力状態と塑性域³⁾

表-1 空洞周辺地山の物性値

ヤング係数	1000.0(MPa)
ポアソン比	0.30
密度	2.50(g/cm ³)
C (亀裂発生条件)	0.34(MPa)
ϕ (亀裂発生条件)	35.0(°)
σ_c (亀裂発生条件)	無限大

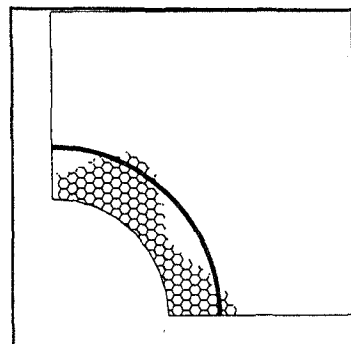


図-5 円形空洞周囲の亀裂発生
(解析モデル内の実線は発生した亀裂を、太線は理論的解析による塑性半径の位置を表す)

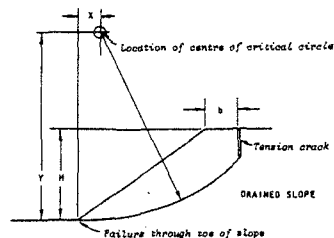


図-6 引張亀裂を有する斜面と円弧すべり面位置⁴⁾

の間隔で定義した。解析の手順は、初期地山応力分布を再現させた後、所定の橋台反力を基礎上面に与えた。亀裂の発生状況を、図-9に示す。この図では、亀裂化し

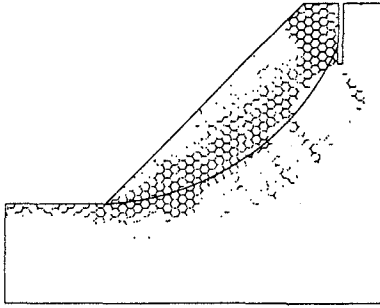


図-7 岩盤斜面の亀裂発生と臨界すべり面
(解析モデル内の実線は発生した亀裂を、太線は理論的解析による臨界すべり面の位置を表す)

た潜在面を細い線で表示している。これより、法面付近を中心として亀裂が発生している様子が見られる。提案手法を適用することにより、初期には、連続性のある不連続面群が差し目方向に傾斜しているため、載荷が岩盤斜面の不連続面に及ぼす影響はあまり無いと考えられる基礎岩盤であっても、岩石基質部に亀裂の発生・進展を考慮することにより、載荷方向に対して流れ目と成り得る新規に発生した不連続面が表現される。原位置調査による初期の不連続面の分布のみでは安定性の判断が困難である場合に対するこの提案手法の適用の有用性が示されたと考える。

5. おわりに

本研究は、不連続体解析手法として個別要素法を用い、既存不連続面のせん断プロセスを忠実に表現し、これに加えて、せん断や引張による岩石基質部での新規亀裂の発生および進展のシミュレートを実現する解析的アプローチを提案した。まず、岩盤工学における代表的な問題の理論解に基づく破壊領域やすべり面位置と提案手法による亀裂発生領域を比較した結果、両者は概ね良好な一致を示したことにより、提案手法は、かなりの妥当性や信頼性を有するとの判断が可能であると考えられる。次に、斜面上の橋梁基礎の安定問題を対象とし、提案手法により亀裂の発生・進展が原因となる崩壊メカニズムの再現が可能であることを示した。以上より、不連続性岩盤を対象とする設計に供する不連続体解析に対する本提案手法の有効性が確認されたと考える。

参考文献

- 1) 吉田次男, 打田靖夫, 平川芳明, 森 聡: 大規模地下空洞掘削時の側壁岩盤挙動の検討, 第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.67- 72, 1998.
- 2) Griffith, A. A. :The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. R. Soc., Ser., A221, pp.163-198,

表-2 基礎周辺岩盤の物性値 (岩石基質部)

ヤング係数	343.35(MPa)
ポアソン比	0.25
密度	2.40(g/cm ³)
C (亀裂発生条件)	0.245(MPa)
φ (亀裂発生条件)	45.0(°)

表-3 基礎周辺岩盤の物性値 (不連続面)

垂直剛性率(K _n)	20000.0(MPa/m)
せん断剛性率(K _s)	1000.0(MPa/m)
粘着力(C)	0.0(MPa)
摩擦角(φ)	35.0(°)

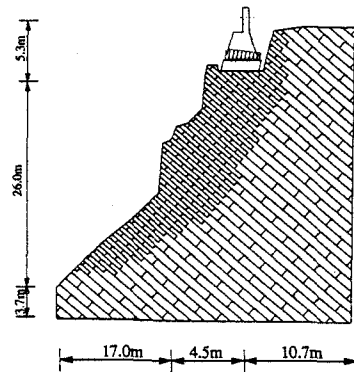


図-8 斜面上橋梁基礎の解析モデル

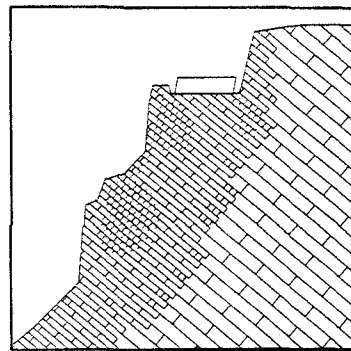


図-9 斜面上橋梁基礎の亀裂発生進展
(解析モデル内の細い線は発生した亀裂を示す)

1920.

- 3) 蔣 宇静: 深部地下空洞の力学的安定に関する理論および実験的研究, 九州大学学位論文, 1993.
- 4) Hoek, E. and Bray, J. :Rock Slope Engineering, Revised third edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.226-241,1981.