

不連続面の摩擦すべりが 亀裂進展に及ぼす影響について

石井 建樹^{1*}・京谷 孝史²・寺田賢二郎²

¹木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1)

²東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

*E-mail: cishii@kisarazu.ac.jp

一般に、岩盤の破壊過程には、単に岩石の破壊だけではなく、岩盤中に含まれている節理などの不連続面における摩擦すべり挙動などが強く影響を及ぼしている。本稿は、摩擦すべりが影響するような圧縮荷重下での破壊過程を、既に提案したFCM亀裂進展解析法を用いて解析するものである。そして、その数値シミュレーションの結果から、不連続面における摩擦すべりが亀裂進展挙動に及ぼす影響について検討し、その考察結果を報告する。

Key Words : failure, crack propagation, frictional slip, Finite Cover Method (FCM)

1. はじめに

岩盤には、不連続性岩盤と称する節理などの無数の亀裂や弱部を含んでおり、強い不均質性を有している¹⁾。そのため、その変形強度特性は、節理など不連続面における摩擦すべり挙動と、それら不連続面の発生・進展挙動などが絡み合った結果として現れる。したがって、岩盤の挙動を予測するためには、こうした破壊メカニズムを把握することが重要である。不連続面を含む構造体における亀裂進展メカニズムについては、実験や論理的な検討が既に行われている²⁾³⁾⁴⁾。これらの知見に加え、種々の力学量を算出可能な数値実験を行えば、より詳細に破壊メカニズムを検討することができると考えられる。

そこで本論文では、先に開発したFCM亀裂進展解析法⁵⁾を用いて、物体内部に存在する不連続面での摩擦すべり挙動と亀裂進展挙動との関連性の把握を試みる。例題解析には、単一の不連続面を中央に配置した供試体モデルに対する一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行い、不連続面の接触状態や摩擦特性の違いによって亀裂進展挙動がどのように変化するかを検討する。

2. 摩擦接触を考慮した亀裂進展解析の概要

先に開発したFCM亀裂進展解析法の詳細は参考文献⁵⁾に譲ることとし、ここではその概要を述べるにとどめる。

既往の不連続性岩盤を対象とした数値シミュレーションの多くは、解析モデルに結果が左右されてしまうとい

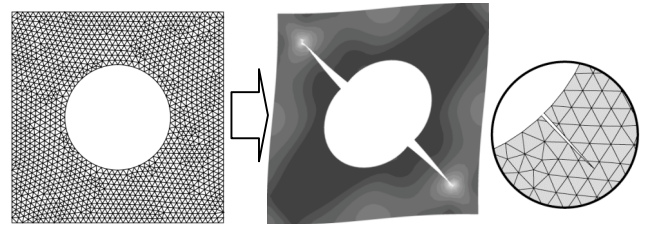


図-1 有限被覆法のメッシュフリーな特性

う問題点を有していた¹⁾。例えば、連続体モデルでは亀裂進展など不連続性挙動の表現に難があり、一方で離散体の集合として岩盤を捉えた解析モデルでは、設定する不連続面の位置（要素配置）に依存して得られる結果が異なってしまう。こうした事情により、メッシュフリー的な特性を持つ一般化有限要素法に基づく解析法が近年注目を集めている。

著者らも、一般化有限要素法の一つである有限被覆法（Finite Cover Method : FCM）に基づく亀裂進展解析法を提案している⁵⁾。この手法では、Lagrange未定乗数法と組み合わせることで不連続面での摩擦接触までを加味しながら、図-1に示すように要素分割に依存せずに亀裂進展挙動を追跡できる。なお本解析は、引張応力に基づく亀裂進展を静的に追跡している。

3. 不連続面の摩擦特性による亀裂進展への影響

(1) 一軸圧縮試験の概要

本稿では、図-2に示すように、単一不連続面を配置し

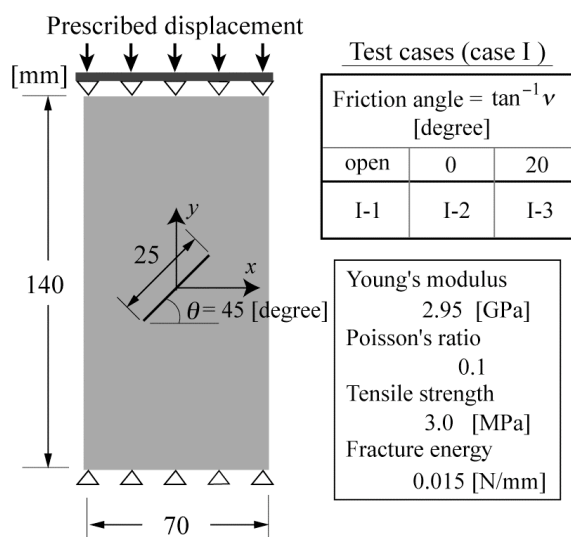


図-2 不連続面を含む供試体の一軸圧縮試験

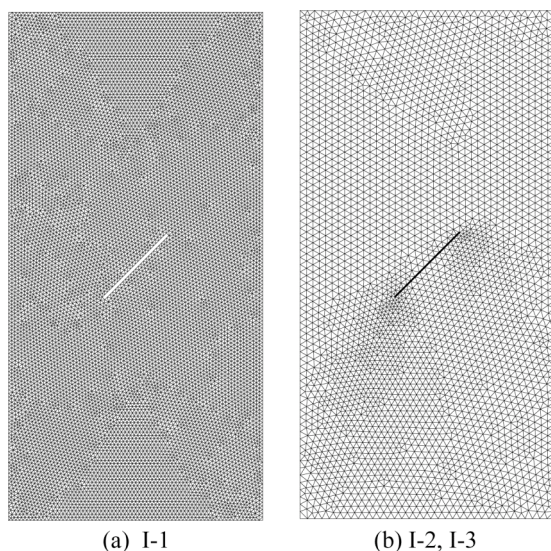


図-3 解析モデル

た供試体の上面に荷重変位を与え、平面ひずみ条件下での変位制御による一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行う。供試体の寸法は70×140mm、その中央に水平からの角度 $\theta=45^\circ$ で長さ25mmの不連続面を配置する。

図-3にその解析モデルを示す。図-3(a)に示すモデルには幅1mmの開口不連続面を配置し、図-3(b)に示すモデルには摩擦角 0° および 20° の摩擦特性を有する閉じた不連続面を配置する。これら3種類のモデルともに、基質部材料のパラメータを図-2のように設定した。

なお、呼称による混乱を避けるために、供試体が初期状態に有している既存の不連続面のみを不連続面と呼ぶものとし、荷重により新たに形成された不連続面については亀裂と呼ぶものとする。

(2) 各モデルにおける亀裂進展経路

図-4に荷重変位0.8mm時の亀裂進展経路および最大主

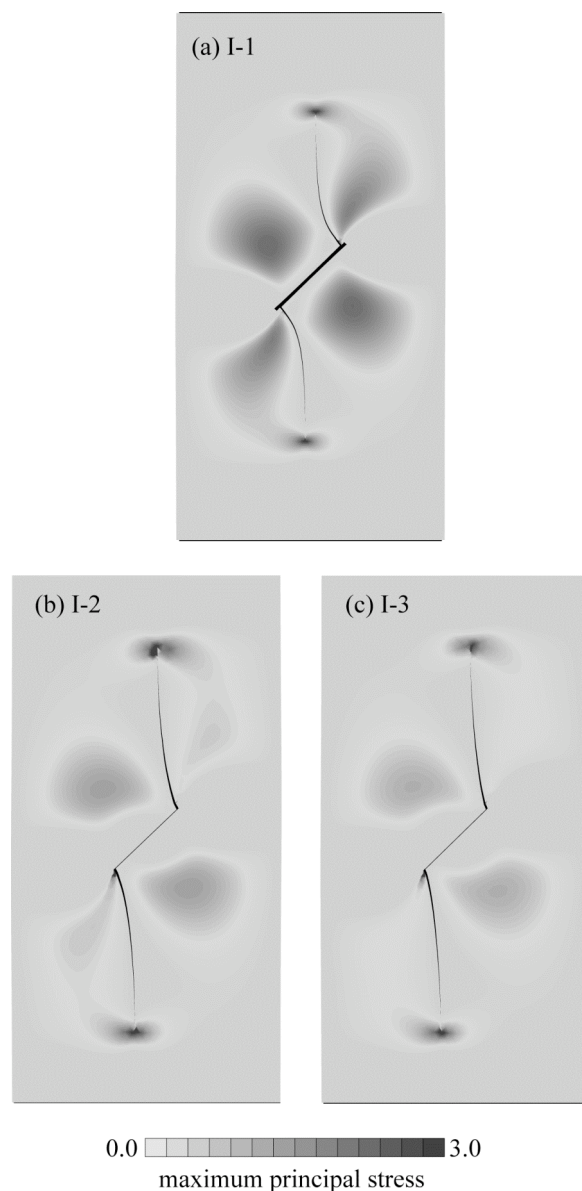


図-4 亀裂経路・最大主応力分布(荷重変位0.8mm)

応力分布を示す。I-1において、荷重変位0.8mmまで不連続面の接触は生じなかった。図では、3つの供試体全てで、亀裂が既存不連続面先端から進展している。しかし、各供試体の様子は接触の有無によって異なっている。最大主応力分布を見ると、図-4(a)に示す開口不連続面を有するI-1では、最大主応力が広範囲に分布している。これに対して、図-4(b), (c)に示す閉じた不連続面を有するI-2, 3では、最大主応力は亀裂先端でのみ大きな値を示しており、局所的な箇所引張応力が集中する様子が見て取れる。

図-5に各モデルにおける亀裂先端の軌跡を示す。開口不連続面を有するI-1では既存不連続面に対してほぼ垂直に亀裂が発生しているのに対して、I-2, 3ではそれよりも鉛直方向に亀裂が発生している。このような既存不連続面の接触の有無と亀裂発生方向に関する傾向は、Hoek・Bieniawskiによるガラス板を用いた実験結果²⁾とほ

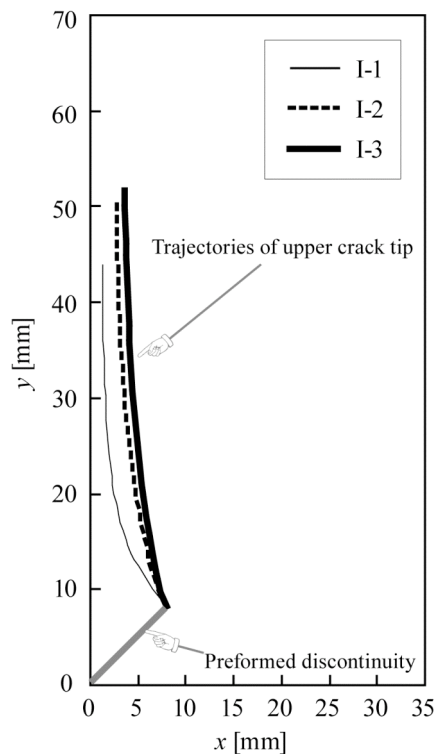


図-5 各モデルにおける亀裂進展経路

ば一致している。また不連続面が接触している場合でも、I-2とI-3とはわずかに亀裂進展方向が異なっている。図-5では不連続面の摩擦を考慮するI-3の方がI-2よりも鉛直方向に向かって亀裂が進展している。こうした現象は、Nemat-Nasser・Horii⁴⁾の指摘と整合している。

(3) 各モデルにおける亀裂進展経路

図-6に荷変位と亀裂進展距離との関係を示す。亀裂は、I-2、I-1、I-3の順に小さい荷変位で発生する。全てのモデルにおいて亀裂はある荷段階で急激に進展する様子がみてとれるが、その様相は不連続面の接触状態・摩擦特性に依存して異なっている。摩擦のない接触であるI-2では、荷変位が0.2～0.3mmにかけて急激に亀裂が進展しているのに対して、I-1では、全体として荷変位に対してなだらかに増加している。さらに、摩擦接触のI-3では、荷初期ではI-1と比べても亀裂は進展していないが、荷変位0.35mm付近になると急激な亀裂進展が生じて、I-2の亀裂進展量に迫るところまで亀裂が伸びている。

しかしながら、既存不連続面中央での接線方向相対変位と亀裂進展距離の関係をみると、図-7に示すように、I-2、I-3は同じ変形モード（不連続面に沿ってすべるというモード）であるため、接線方向相対変位と亀裂進展距離は一致している。したがって、すべり（接線方向相対変位）の発生の挙動が摩擦特性に依存して大きく異なることが、図-6における亀裂進展挙動の違いに現れていると

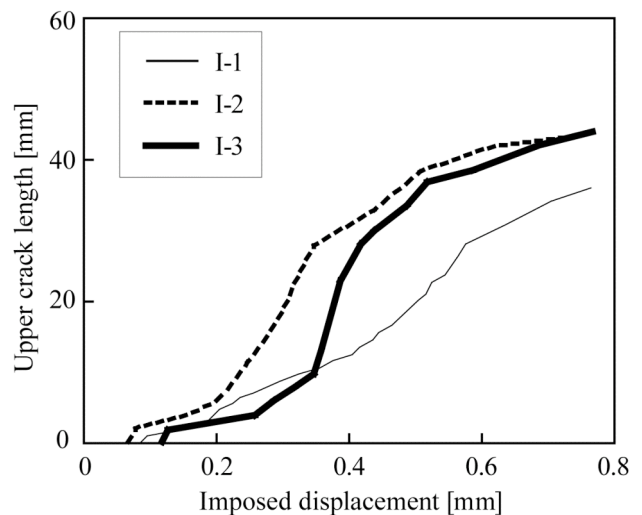


図-6 荷変位と亀裂進展距離の関係

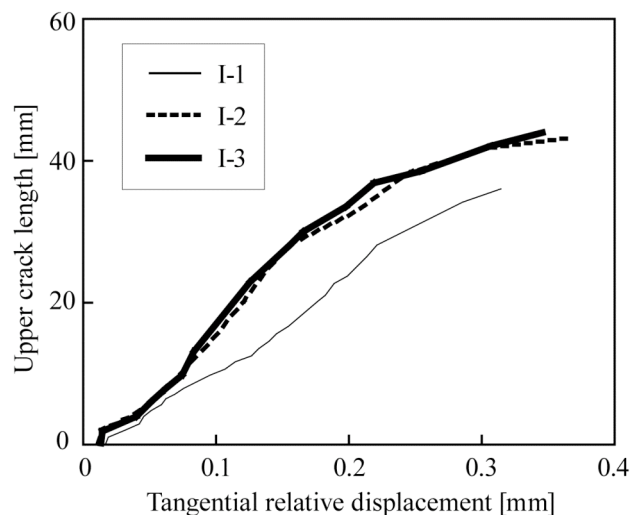


図-7 接線方向相対変位と亀裂進展距離の関係

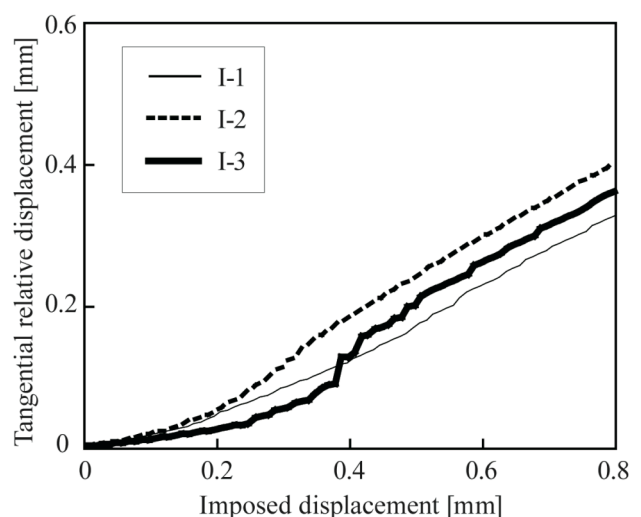


図-8 不連続中央の接線方向相対変位の推移

考えられる。

そこで、図-8の不連続面中央のすべり量(接線方向相

対変位)の推移に着目すると、図-6と似通った傾向を示していることが見て取れる。I-1,2では全体的になだらかに不連続面に沿った相対変位が増加しているのに対して、I-3では載荷変位0.4mmの手前から急激にすべり量が増加している。これは、図-6でみられる急激な亀裂進展にわずかに遅れて生じた現象である。また計算過程においてある要素で亀裂が発生すると、続いてその先にある要素で次々と亀裂が生じていく現象が認められた。これらの現象は、接触面を含む物体では亀裂発生がすべりを、すべりが亀裂進展を促進することを示唆している。そして、摩擦抵抗力が存在する場合には、そうした現象が、ある載荷段階により集中する傾向があると考えられる。

以上より、摩擦接触面を有する物体における亀裂進展メカニズムは次のようにまとめられる。

1. 載荷初期段階では、摩擦抵抗力により大きな変形は生じないため、亀裂は徐々に進展する。
2. ある程度亀裂が進展すると、それにより解放された力により摩擦接触面ですべらせようとする力が増加する。
3. 結果として不連続面でのすべり量が増加し、更なる亀裂進展を促す。
4. 2., 3.の挙動が互いに作用しあうことで、ある載荷段階において急激な亀裂進展が発生する。

4. おわりに

本稿では、内部に不連続面を有する物体における亀裂進展のメカニズムを検討するために、摩擦接触を考慮したFCM亀裂進展解析法による数値シミュレーションを実施して、以下のような知見を得た。

- 不連続面を含む物体では、その面での接触の有無によって、生じる応力分布が異なる。
- 接触する不連続面を有する物体では、亀裂先端に引張応力が集中し、亀裂は接触しない場合よりも最終的には大きく進展する。

- 亀裂の進展方向は、不連続面の接触状態や摩擦特性に応じて変化し、すべりが生じる限りにおいては摩擦抵抗力が大きいほど鉛直方向（載荷軸方向）に進展する。
 - 接触する不連続面を有する物体では、ある載荷段階において急激に亀裂が進展する。
 - そうした載荷段階は不連続面の摩擦特性によって異なる。しかし、すべり量と亀裂進展量との関係は、摩擦特性に依存しない。
 - 亀裂進展は、摩擦接触面においてすべらそうとする力を増長させる。
 - すべりは、亀裂先端に引張応力を集中させ、亀裂進展を増長させる。
 - 接触する不連続面を含む物体においては、亀裂進展と摩擦すべりの相互作用により破壊は進行する。
- 本研究は、初歩的な検討に過ぎないが、今後は例題を増やし更なる検討を行っていく。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（若手研究B:18760356）の援助により行った。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) 岩盤崩落問題研究小委員会編：岩盤崩落の考え方，土木学会，2004。
- 2) Hoek, E., Bieniawski, Z. T.: Brittle fracture propagation in rock under compression, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol.1 pp.137-155, 1965.
- 3) Nemat-Nasser, S., Horii, H.: Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting exfoliation and rockburst, *Journal of Geophysical Research*, Vol.87, pp.6805-6821, 1982.
- 4) Nemat-Nasser, S., Horii, H.: Rock failure in compression, *International Journal of Engineering Science*, Vol.22, No.8-10, pp.999-1011, 1984.
- 5) 石井建樹，京谷孝史，寺田賢二郎，岸野佑次：不連続面の摩擦接触を考慮した破壊進行の解析，土木学会論文集 A，Vol. 62, No.2, pp.371-383, 2006.

EFFECTS OF FRICTIONAL SLIP BETWEEN CRACK INTERFACES TO CRACK PROPAGATION IN QUASI-BRITTLE MEDIA

Tateki ISHII, Takashi KYOYA and Kenjiro TERADA

Failure processes of rock mass generally involve not only cracking within constituents but also slippage between crack interfaces, especially when they are subjected to compressive loading. In this paper, these processes under uni-axial compressive loading are simulated in terms of the numerical analysis method based on the finite cover method (FCM). The results of several numerical tests demonstrate the effects of slippage between the crack interfaces to crack propagation.