

数値シミュレーションに基づく ウイングクラックの普遍的な進展メカニズム に関する基礎検討

石井 建樹^{1*}・伊藤 理大¹・京谷 孝史²

¹木更津工業高等専門学校 環境建設工学専攻（〒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

岩盤などのように、不連続面を含む物体は圧縮荷重を受けると、その不連続面からウイングクラックと呼ばれる引張亀裂が発生・進展する。このような亀裂進展は、不連続面の力学応答に依存することは想像に難くない。そこで本研究では、異なる特性を設定した単一不連続面を含むモデルを用いて、一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行った。そして、それらの結果を整理することで、ウイングクラック進展の普遍的なメカニズムと考えられるような成果を得たので、本稿で報告する。

Key Words : wing-crack, crack propagation, compressive load

1. はじめに

岩盤などのように、不連続面を含む物体は、圧縮荷重を受けると、その不連続面からウイングクラックと呼ばれる引張亀裂が発生・進展する¹⁾²⁾。このような亀裂の挙動は、不連続面の力学挙動に依存することは想像に難くない。そして、内在する不連続面の特性自体一定ではなく、不連続面の力学挙動が不連続面の特性に左右されて様々な応答する。そのため、不連続面を含む物体内部で生じる亀裂進展挙動は極めて複雑な挙動として捉えられがちである。

そこで、不連続面の特性に左右されないで、何らかの変形挙動と亀裂進展挙動との関連性が把握できれば、今後の亀裂進展に関する研究における一助となると考えた。本稿では、数値シミュレーションを通して、亀裂進展長さと関係のある変形挙動について検討したので、その結果を報告する。

まず、異なる特性の不連続面を有するモデルに対して数値シミュレーションを行い、それら不連続面の特性の相違によって、どのように亀裂進展挙動が変化するかを確認する。次に、不連続面の角度による影響を確認する。最後に、それらの数値実験結果を整理することにより、本研究で目的とする亀裂進展挙動と関係の深い変形挙動について検討する。

2. 摩擦接触を考慮した亀裂進展解析の概略

本研究では、著者らが先に開発したFCM亀裂進展解析法³⁾を用いて、単一の不連続面を中央に配置したモデルに対して一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行った。本稿は数値解析法の新規性を示すものではないので、解析手法の詳細は参考文献³⁾に譲り、ここでは概略のみを記載する。

一般化有限要素法の一つである有限被覆法（Finite Cover Method : FCM）をLagrange未定乗数法と組み合わせた本手法は、不連続面での摩擦接触までを加味しながら、要素分割に依存せずに亀裂進展挙動を追跡できる。さらに結合力ひび割れモデル⁴⁾の導入により、亀裂先端に生じる破壊進行領域を表現している。なお本稿の例題では、摩擦モデルとしてCoulomb摩擦を仮定し、引張応力に基づく亀裂進展を静的に追跡している。

3. 面の摩擦特性による亀裂進展への影響

(1) 一軸圧縮試験の数値シミュレーション

図-1に示すように、単一不連続面を配置した供試体の上面に載荷変位を与え、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実験を行う。それにより、不

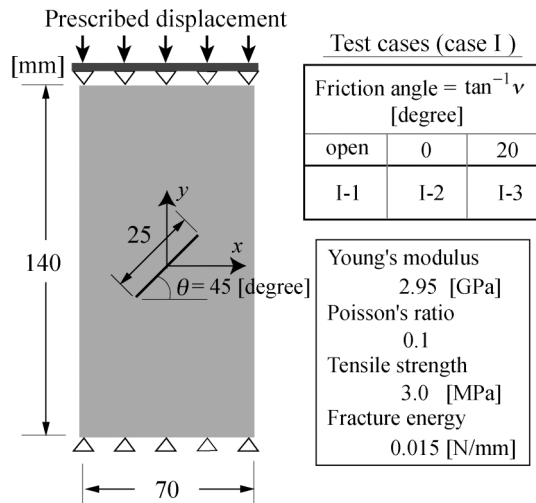


図-1 45°で配置した不連続面を含む供試体の一軸圧縮試験

連続面特性による亀裂進展挙動の違いを明らかにする。

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。供試体には、不連続面特性が異なる3種類のモデルを準備する。開いた不連続面を有するモデル(case I-1)には、幅1.0mmの開口不連続面を配置し、閉じた不連続面を有するモデルには、それぞれ摩擦角0° (case I-2) および20° (case I-3) の摩擦特性を付与する。これら3種類のモデルともに、基質部材料の材料パラメータを図-1のように設定した。

なお呼称に関する混乱を避けるために、以下では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、载荷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-2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¹⁾に一致している。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-3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・Hori²⁾の指摘と整合する。

(3) 不連続面の摩擦特性と亀裂進展挙動

図-3に载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の順に小さい载荷変位で発生する。全てのモデルにおいて亀裂はある载荷段階で急激に進展する様

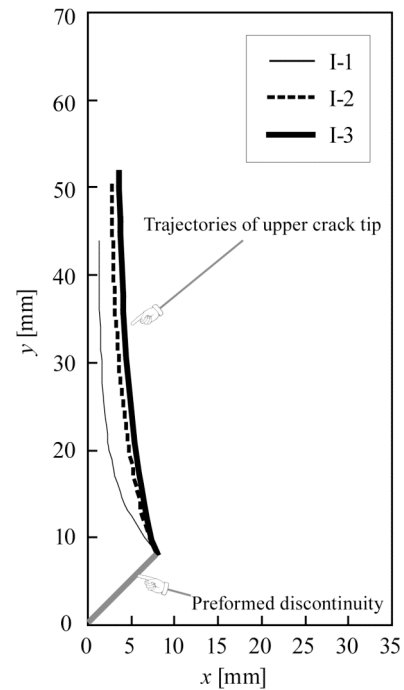


図-2 各モデルにおける亀裂進展経路 (case I)

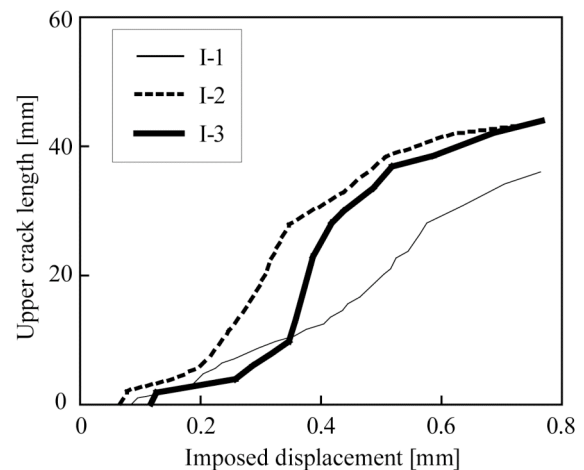


図-3 载荷変位と亀裂進展距離との関係 (case I)

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、载荷変位が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、全体として载荷変位に対してなだらかに増加している。摩擦接触のI-3では、载荷初期ではI-1と比べても亀裂は進展していないが、载荷変位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。

4. 面の配置角度による亀裂進展への影響

次に、不連続面のその中央に水平からの角度 $\theta =$

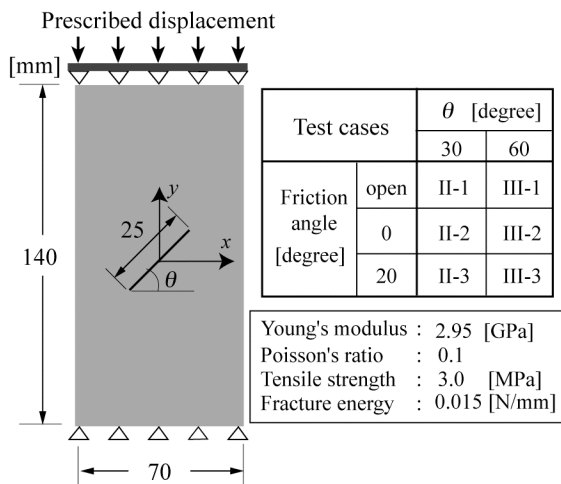


図-5 不連続面の配置角度を変化させた一軸圧縮試験

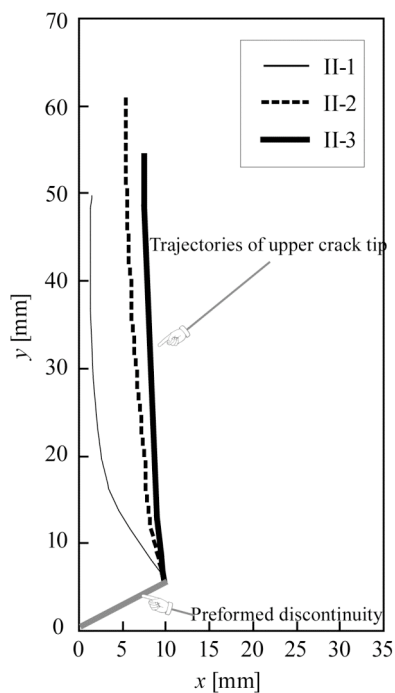


図-6 亀裂進展経路 (case II)

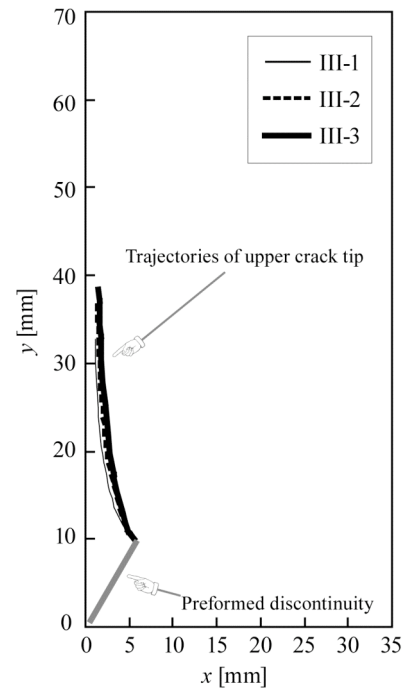


図-7 亀裂進展経路 (case III)

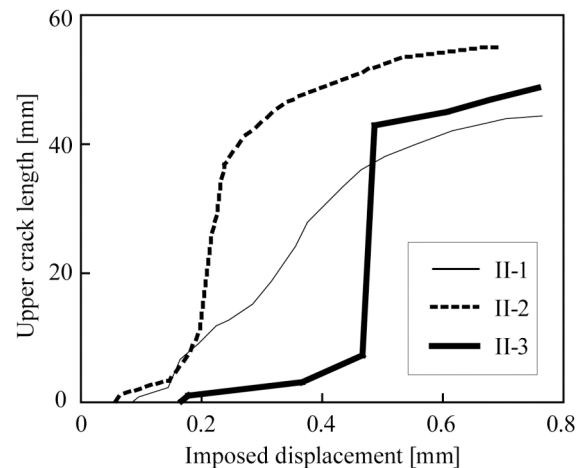


図-8 荷変位と亀裂進展距離との関係 (case II)

30° および60° として、図-1と同様の数値実験を行う。図-5にその試験の概要を示す。解析パラメータは、case Iの数値シミュレーションと同じである（図-1参照）。

図-6、図-7に各ケースにおける亀裂先端の軌跡を示す。それぞれのケースにおいて、図-2と同様に、開口不連続面を有するモデルよりも接触面を持つモデル、摩擦のないモデルよりも摩擦抵抗力のあるモデルの方が鉛直方向に向かって亀裂が進展している様子が見て取れる。一方、60° に配置したモデルでは、3種類のモデルでほぼ同様の亀裂進展経路が得られており、不連続面による影響があまり顕著ではなかった。また図-2、図-6、図-7を見比べると、不連続面が低角度で配置されたモデルや接触面を持つモデルほど、亀裂が大きく進展している。

図-8、図-9に荷変位と亀裂進展距離との関係を示す。図-8では、図-3よりも顕著に亀裂がある荷変位段階で急激に進展する様子がみとれる。これに対して、図-9では全てのモデルにおいてなだらかに増加する亀裂進展が観察されるだけである。

5. 亀裂進展と関係の深い変形挙動

これまでに記した結果より、内在する不連続面の特性や配置角度によって、亀裂進展挙動が異なることが明らかとなった。こうした亀裂進展挙動のメカニズムを考える上で、すべての現象を一纏めにして考察することは

困難が伴う。そこで、不連続面の特性に依存しない、亀裂進展挙動と変形挙動との関係を見出すことを考える。

図-10に、不連続面中央での水平方向相対変位と亀裂進展距離の関係を示す。図中、全ての結果が、ほぼ同一の曲線上に乗っている。初めのうち、水平方向相対変位に対して亀裂が線形的に進展する。そして、亀裂長さが40mm程度になると、亀裂の進展が緩やかになる変曲点が見て取れる。これは境界拘束の影響と考えられる。

図-10から読み取れる知見は、亀裂進展がその進展方向に直交する方向の相対変位に比例することを示している。すなわち、極めて初歩的なメカニズムを基に全ての引張亀裂進展を考えることができ、不連続面の特性に依存する変形挙動と切り離して考えることで、種々の亀裂進展挙動が説明できる可能性を示している。

6. おわりに

本稿では、数値シミュレーションを通して、亀裂進展長さと関係のある変形挙動について検討した。その結果、不連続面の特性の相違によって、圧縮荷重を受ける物体内部の亀裂進展は異なる複雑な挙動を示すことが明らかとなった。しかし亀裂進展挙動自体は、その進展方向に直交する相対変位のみに依存することも明らかとなった。これにより、亀裂進展挙動と不連続面の特性に依存する変形挙動と切り離して考えることができ、こうしたアプローチに基づいて、種々の亀裂進展挙動が説明できる可能性を示した。

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) Hoek, E., Bieniawski, Z.T. : Brittle fracture propagation in rock under compression, *Int. J. of Frac. Mech.*, 1, pp.137-155, 1965.

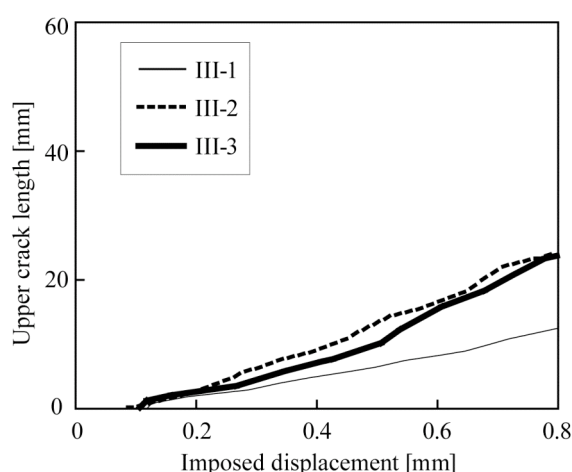


図-9 荷変位と亀裂進展距離との関係 (case III)

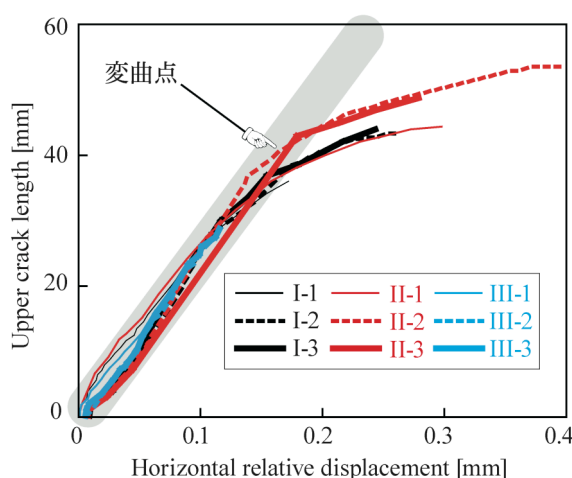


図-10 水平方向相対変位と鉛直方向亀裂進展距離との関係

- 2) Nemat-Nasser, S. Horii, H. : Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting exfoliation, and rockburst, *J. of Geophysical Research*, 87, pp.6805-6821, 1982.
- 3) 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, 62(2), pp.371-383, 2006.
- 4) Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P.E. : Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6, pp. 773-782, 1976.

NUMERICAL STUDY ON BASIC MECHANISM OF WING-CRACK PROPAGATIONS

Tateki ISHII, Masahiro ITO and Takashi KYOYA

In the body including a discontinuity under compressive loads, so-called wing-cracks propagate from the discontinuity. These crack propagations are governed by the mechanical behaviors between the surfaces of discontinuity, such as frictional slip. In this paper, we carry out several numerical simulations on models including a discontinuity of different surface properties. These simulations indicated that the wing-crack propagation were only governed by perpendicular relative displacement to the propagating crack direction.