

亀裂の進展を考慮した 均質化理論に基づく岩盤の強度特性評価

小早川 博亮^{1*}・島村 真介²

¹一般財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所地震工学領域 (〒270-1194 我孫子市我孫子1646)

²電力計算センター (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町3-5-1)

*E-mail: h-koba@criepi.denken.or.jp

均質化理論に基づく数値解析的な手法を用いた亀裂性岩盤の強度評価に対し、亀裂の進展を考慮する手法を考案した。この方法を亀裂を1枚含むユニットセルに適用した。種々の方向のひずみに対する応答を算定する数値試験により、ユニットセルの応力ひずみ関係を算定するとともに、対応する亀裂の進展状況の評価した。解析の結果、ユニットセル内の亀裂の進展を考慮した破壊規準として、亀裂がユニットセルを貫通するまでの応力の最大値を用いることができることが示唆された。さらに、この破壊規準と従来の初期破壊に対する破壊規準との違いについて考察した。

Key Words : homogenization method, strength, crack propagation, analytical method

1. はじめに

亀裂性岩盤は、へき開や片理、摂理など、初生的に内在する不連続面に起因する、力学特性の異方性を有する。これらの不連続面を考慮して試験を実施し、異方性を考慮した強度や変形特性を評価し、さらにその異方性を考慮できるような解析手法により構造物に対する設計を行うことは、原理的には可能である。しかしながら、岩盤に対して試験により異方性を評価するためには多くの試験体を準備する必要がある。そのためには多大な労力と費用をかけなければならず、工学的には有意義ではない。この異方性を、簡易にかつ合理的にすることの難しさの一つには、この試験実施の困難さがある。これらを簡易に実施できれば、岩盤構造物の設計の合理化につながる。

数値解析的な手法を採用して不連続面を有する岩盤の異方性を評価するという概念があり、均質化法による岩盤物性評価法はそのひとつである¹⁾。この手法は岩盤に含まれる不連続面を含めた材料の分布に周期性を仮定し、その幾何情報と岩盤を構成する材料の力学特性から、マクロな岩盤としての力学特性を評価するものである。これまでに、安山岩に対する検討や、花崗岩、片岩に対して適用されてきた。強度特性評価に対しては、岩盤の周期構造の最小単位であるユニットセルに対し、ユニットセル内の要素の強度を参照し、その強度を初めて超えるような応力が発生した時のマクロ応力を破壊とする初期

破壊により岩盤要素としての破壊を定義していたり、この定義によって評価された岩盤のマクロ強度は設計に用いられている岩盤の強度よりは保守的に評価されるが、過度に保守的になるという課題が指摘されている²⁾。そこで、ユニットセルに分布する亀裂が進展していくことを簡易にモデル化して取り入れる方法を考案し、既往の不連続面を配置した平面ひずみ圧縮試験のシミュレーションに適用したところ、実験結果と計算結果はよく対応し、ピークの応力や亀裂の進展挙動を評価できることが明らかになった³⁾。この手法を用いることにより、ユニットセルのピークの応力に対応する岩盤要素としての強度を評価できる可能性が示唆された。

本論文では、この亀裂進展を考慮したユニットセルの数値シミュレーションの手法を用いて、種々の载荷パターンによる数値試験を実施し、亀裂の進展とその際に得られる応力ひずみ関係を調べる。そして、これらの関係に基づいてユニットセルのピークの応力に対応する強度の定め方を提案する。

2. 解析方法

(1) 亀裂進展解析の概要

均質化解析システムによる岩盤の強度特性の評価法の概念図を図-1に示す。ここでは、図-1に示した強度評

価法のうち、周期境界を与えたユニットセルに対する数値試験の枠組みを用いて亀裂進展解析を行う。その手順は、ある方向 k の単位マクロひずみ用意し、単位マクロひずみの $\beta^{(k)}$ 倍がユニットセルに作用した時のマイクロ解析を、 $\beta^{(k)}$ を変化させて行うものである。 $\beta^{(k)}$ が小さい段階では、ユニットセル内のいずれの要素も破壊規準を超えない応力状態であるが、 $\beta^{(k)}$ が大きくなるに従い、破壊規準を満たせない要素が生じる。この場合にはその要素は破壊したもとしてすでにユニットセル内に存在していた亀裂にスイッチすることで亀裂の進展を表現する。亀裂はここでは連続体の弱層としてモデル化している。スイッチした要素には弱層の物性を与え、応力を分担せずにその周辺に再配分する。再配分の結果つり合いが満たされれば、その $\beta^{(k)}$ に対応するひずみに対してユニットセルは十分に耐えられその際のマクロ応力が算定されるが、 $\beta^{(k)}$ を大きくしていくとあるタイミングでつり合いを満たす応答としての応力は小さくなり、結果として対応するマクロ応力が小さくなる。これが実現したとき、対象とするユニットセル内の亀裂進展の状況と、その状況に応じたマクロ応力とマクロひずみの関係が評価可能となる。

この弱層スイッチは、図-2に示す既往の連続体弱層モデルによる破壊進展解析のアルゴリズム³⁾を用いることとした。与える β_n は初期破壊に対応する β_1 に、 $\Delta\beta_1 (= \beta_1 k)$ を加算したもとして、各 β_n に対するつり合いを解いて、対応するマクロ応力を求めることとした。

(2) 亀裂の貫通の考え方

弱層スイッチにより亀裂の進展を表現することにより、おもに亀裂の端部から、亀裂が進展する。均質化法ではユニットセルの境界条件として周期境界を課していることから、ユニットセルの左右端および上下端はつながっている条件となる。したがって進展した亀裂がユニット

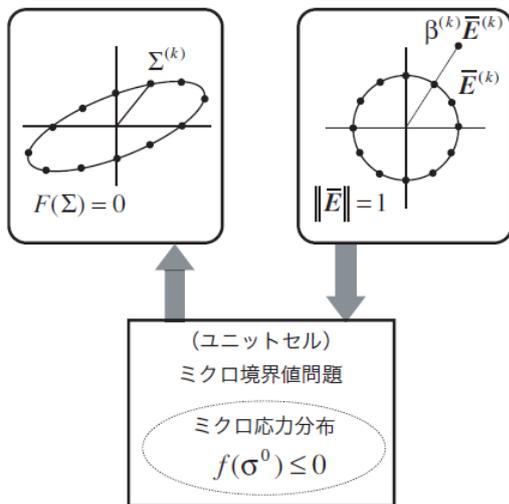


図-1 局所化プロセスを応用したマクロ強度評価¹⁾

セルの境界に達すると、逆側の境界に飛び移って進展していくことになる。このようにして亀裂の進展を追跡し、亀裂自身が連結した際に亀裂が貫通したと考える。ここで、ユニットセルを横断する亀裂が生じた際に亀裂が貫通したと考えるのではないことに注意が必要である。

(3) 解析条件

計算に用いるユニットセルは、図-3に示すように一枚の弱層を含むモデルとした。ユニットセルを構成する

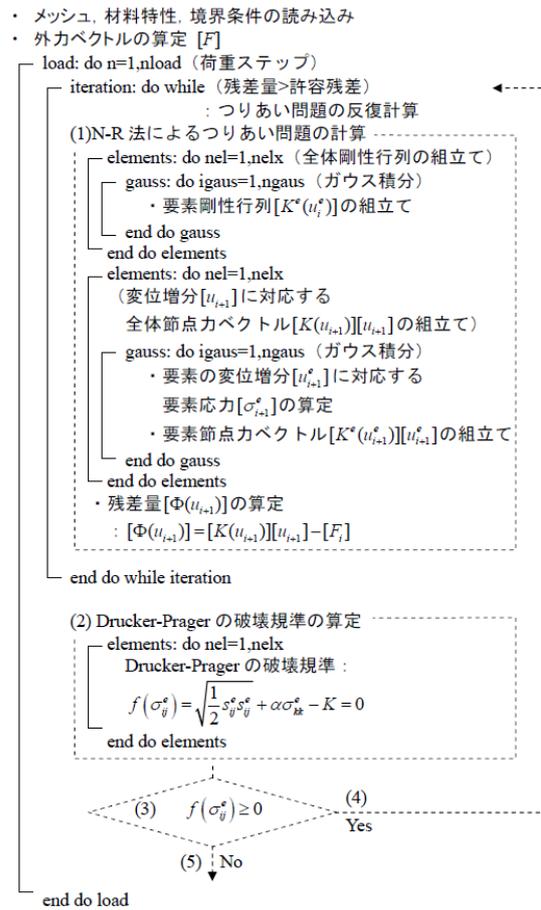


図-2 連続体弱層モデルによる破壊進展解析のアルゴリズム²⁾

横 25 要素 × 縦 50 要素 (1 辺 0.5mm の正方形)

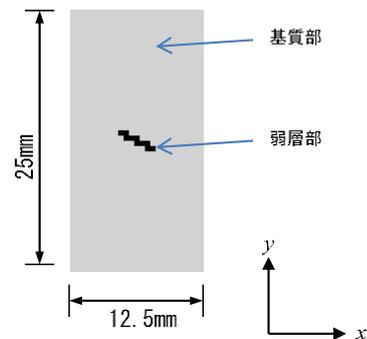


図-3 計算に用いたユニットセル

材料は、基質部と弱層部とし、それぞれの物性値は、表-1に示すような値とした。連続体弱層モデルはかみ合わせを考慮できるものであるが、ここでは線形の物性と

表-1 ユニットセルの物性値

	E_0 [MPa]	ν	C [MPa]	ϕ [deg]
基質部	3040	0.12	2.05	56.3
弱層部	12.3	0	—	—

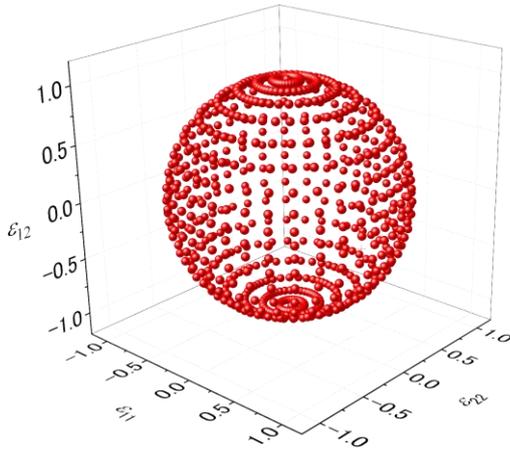


図-4 荷重したひずみパターン分布

している。図-3に示すユニットセルに対し、平面ひずみ状態を満たすあらゆる方向での単位ひずみを、軸ひずみ成分 (ϵ_{11} (x方向), ϵ_{22} (y方向) : 引張を正), せん断ひずみ ϵ_{12} (時計回りを正) の空間で図-4に示すような762通り与えた。

解析は、初期破壊時のマクロ応力を求めた後、破壊した要素を弱層にスイッチして、新たな弱層の配置でユニットセル内の釣り合いを解く。釣り合いが得られれば、次のひずみを加えたステップに進んで計算を繰り返した。計算は、初期破壊時のひずみ(E)の10倍となるひずみまで実施することとした。

3. 解析結果

計算によって得られる偏差応力の第2不変量と偏差ひずみの第2不変量の関係 (以下、応力ひずみ関係と呼ぶ) と、その際の亀裂進展の様子の代表的なものを図-5~7に示す。表示した6つのひずみパターンは、後述するひずみパターンの分類に当てはまるものを選出している。図中、「a)ひずみパターン」は、数値試験のひずみ荷重によって変形するユニットセルを模式的に点線で示しており、また「c)応力ひずみ関係」の各プロットにおける

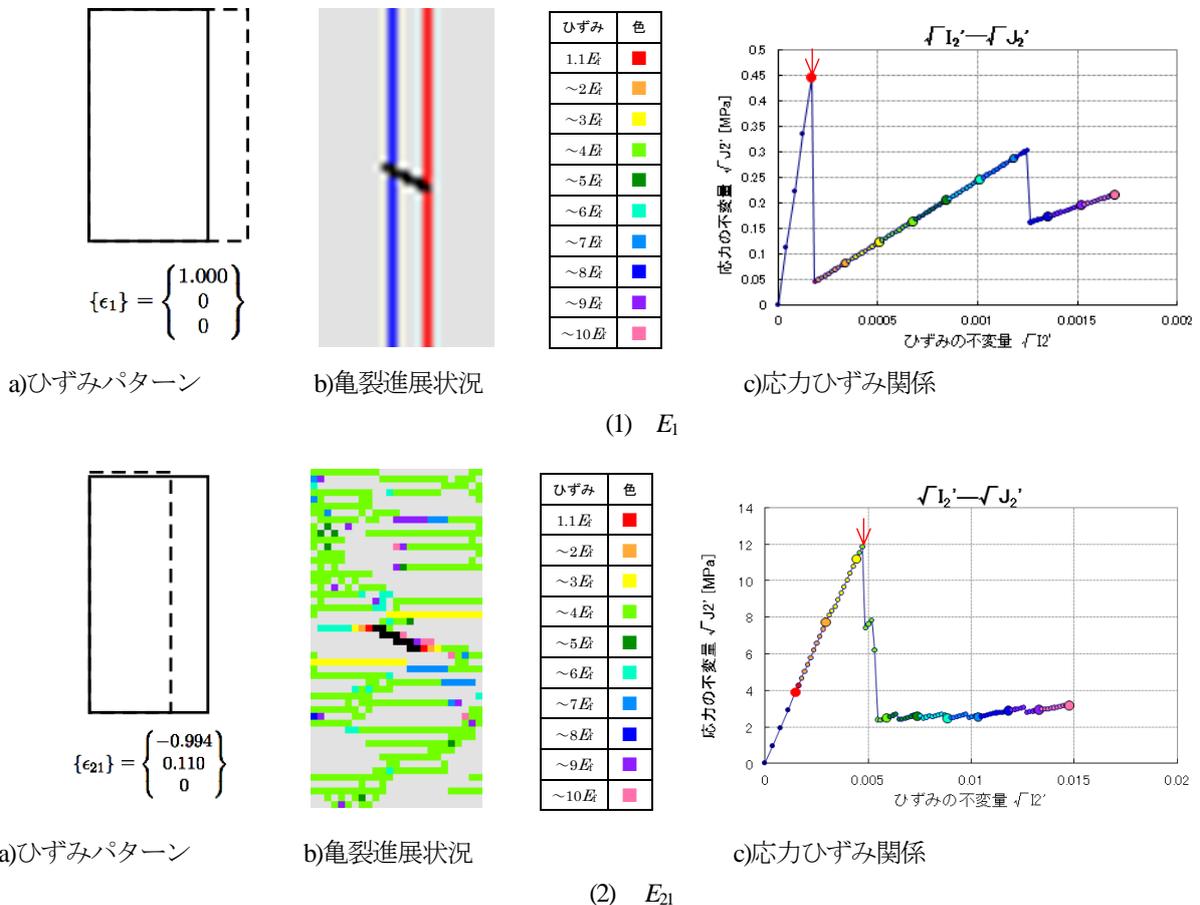
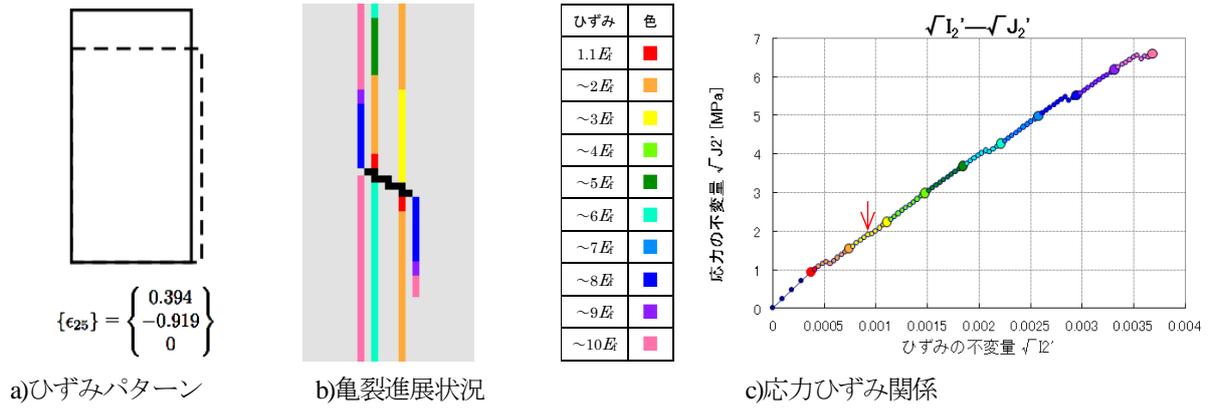
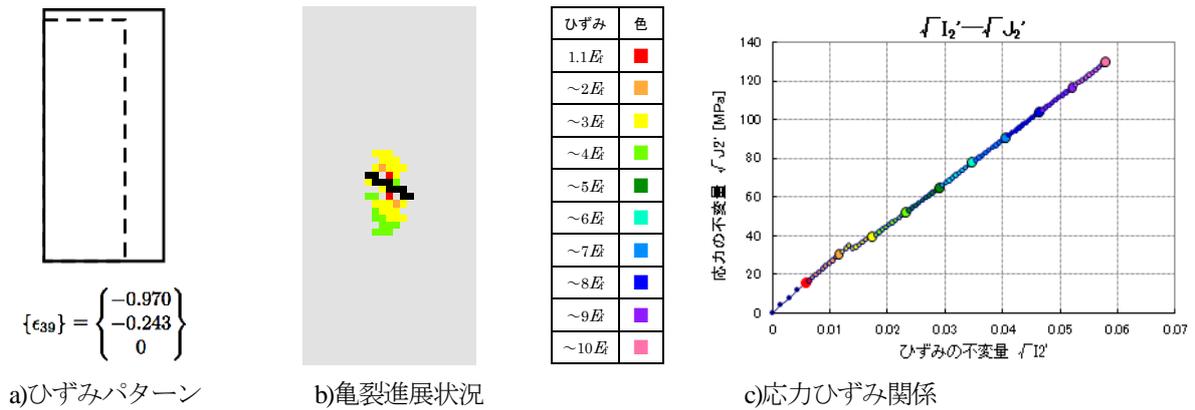


図-5 応力ひずみ関係と亀裂の進展状況 (その1)



(1) E₂₅



(2) E₃₉

図 - 6 応力ひずみ関係と亀裂の進展状況 (その2)

色は、そのひずみ载荷段階で弱層にスイッチした個所の色と一致させて記載している。また、矢印はユニットセルを亀裂が貫通した時点を示している。弱層にスイッチした個所は「b)亀裂進展状況」ひずみのレベルごとに示してある。

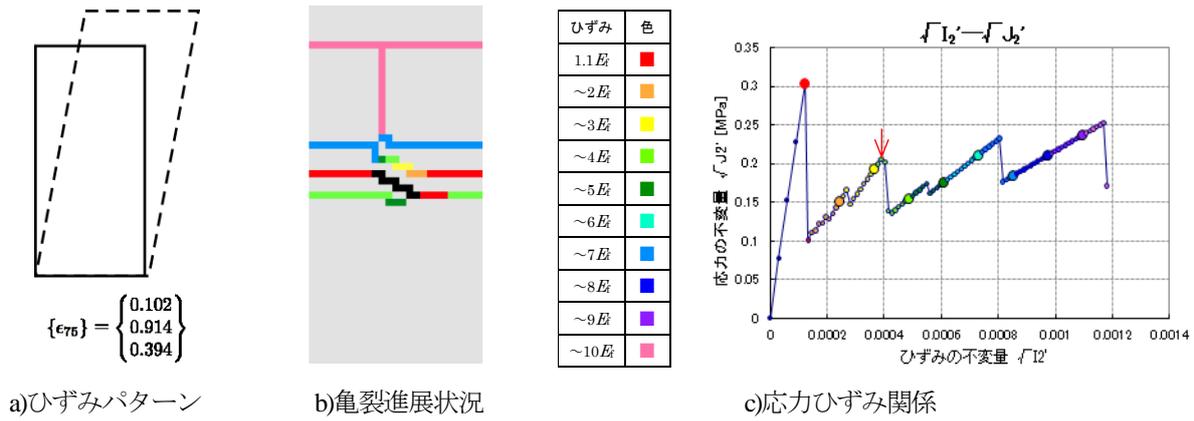
図 - 5(1)に示す E₁のひずみパターンは x 軸方向への伸張である。赤色で示す初期破壊は亀裂の右端部付近から上下方向へ進展し、ユニットセルを貫通する。初期破壊時には応力が急激に低下し、その後はひずみの増加とともに上昇するものの、E_tの10倍の計算の範囲内では初期破壊時の応力を超えるような値は算定されていない。

図 - 5(2)の E₂₁のひずみパターンは x 軸方向の収縮と y 軸方向の伸張である。初期破壊は亀裂の進展状況から亀裂の左右端部で生じており、このときのひずみは 0.001 程度である。さらに、応力ひずみ関係において、ひずみが 0.005 付近で応力のピーク 12MPa を示している。このときのプロットは黄緑色であり、亀裂進展状況で黄緑色のタイミングで弱層にスイッチした要素は領域全体に分布していることが確認できる。また、この黄緑色の E_t が 3~4 倍のひずみレベルで初めてユニットセルを貫通する亀裂が確認されており、応力のピークと、ユニットセルを貫通する亀裂が生じるタイミングが一致している。

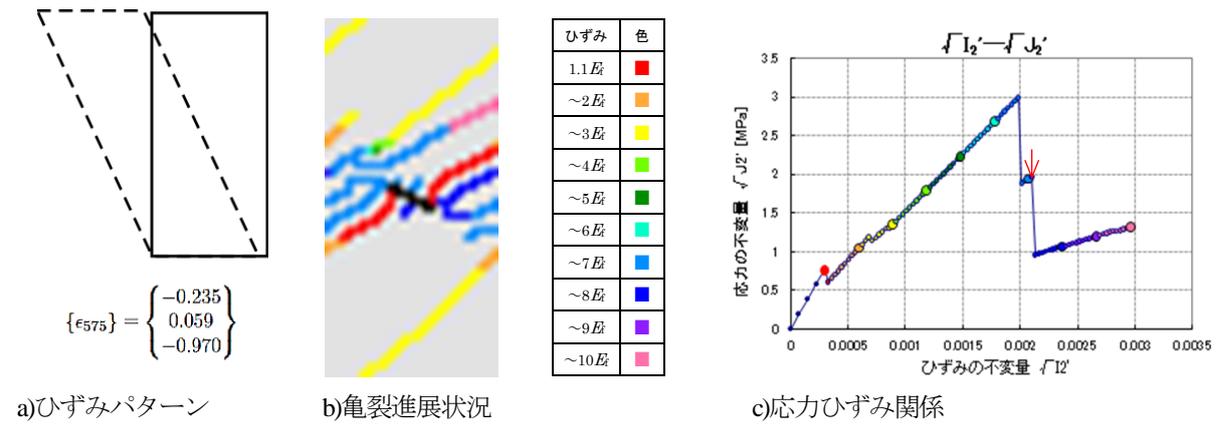
図 - 6(1)に示す E₂₅のひずみパターンは y 軸方向の収縮と x 軸方向の伸張である。初期破壊はひずみが 0.0004 程度で亀裂の左端部から上方と、右端部から下方へ生じ、その後も橙色、黄色とひずみが大きくなるに従って、亀裂も初期破壊に生じた方向へ進展している。応力のピークは E_tの10倍の計算の範囲内では明瞭に認められない。ユニットセルを貫通する亀裂は黄色の E_tの2~3倍のひずみにおいて確認できる。この亀裂貫通は、応力がやや低下しているタイミングにあたる。

図 - 6(2)に示す E₃₉のひずみパターンは両軸方向ともに収縮するパターンである。初期破壊は亀裂の中央から上下へ進展している。さらに、黄色の E_tの2~3倍のひずみにおいて亀裂が進展するのと同時に応力が低下する状態が認められたものの、それ以降のひずみでは亀裂の進展も応力の低下も認められず、計算の範囲内では、ユニットセルを貫通するような亀裂は発生しなかった。

図 - 7(1)に示す E₇₅のひずみパターンは、マクロひずみにせん断があるパターンである。初期破壊は亀裂の両端部から左右水平方向に進展するように生じている。応力ひずみ関係では、初期破壊と同時に応力は半分以下に低下している。その後は、ひずみの増加とともに応力は増加するものの、亀裂が進展するたびに応力は小刻みに



(1) E_{75}



(2) E_{575}

図 - 7 応力ひずみ関係と亀裂の進展状況 (その3)

低下し計算の範囲では初期破壊時の応力を超えることはなかった。また、亀裂がユニットセルを貫通するタイミングは黄緑色の $4E_f$ レベルであった。

図 - 7(2)の E_{575} のひずみパターンも、 E_{75} と同様にせん断があるパターンである。初期亀裂は亀裂の右端部から右上方と、左端部から左下方へ進展するように生じている。初期破壊後にやや応力が低下するものの、その後もひずみの増加とともに応力は増加し、ひずみが0.002付近で応力のピーク3MPaを示す。このときのひずみレベルは E_f が6~7倍の青緑色のプロットであるが、亀裂の進展状況で青緑色で弱層にスイッチした要素は亀裂の左上のごく一部の要素である。すなわち、この段階では亀裂は貫通していない。亀裂が貫通するタイミングはさらにひずみが増加して0.0021 (E_f が7~8倍)を示した時点で、応力が急激に低下している。つまり、応力のピークは亀裂が連結する前に認められている。

4. 考察

(1) 応力の最大値のタイミングによる分類

解析結果を踏まえ、各ひずみパターンの応力の最大値

がどの段階で得られたか分類すると次の通りとなる。

- 1) 初期破壊時の応力が計算の範囲において最大値を示すもの：10% (E_{75})
- 2) 初期破壊以降に応力の最大値（ピーク）が現れ、最終ステップでないもの：47% (E_{21}, E_{575})
- 3) 計算の最終ステップで応力が最大となるもの：42% (E_{25}, E_{39})
- 4) 計算が収束しないもの：1%

1)の初期破壊時の応力が最大、および2)の最大値(ピーク)が算定されるものについては、「計算における応力の最大値（ピーク）」という新たな強度の定義を適用できると考えられるものの、それは全体のひずみパターンの6割程度であり、3)の明瞭にピークがないままに計算を終了するものが4割程度ある。したがって「応力の最大値」のみを定義として扱うことは必ずしも適切ではない。

(2) 亀裂の貫通による分類

亀裂がユニットセルを貫通するタイミングと初期破壊の関係性を調べると次の通りとなる。

- 1) 初期破壊時：18% (E_1)
- 2) 初期破壊以降：70% ($E_{21}, E_{25}, E_{75}, E_{575}$)

3) 亀裂が貫通しない：12% (E_{39})

分類1)の初期破壊と亀裂の貫通タイミングが一致する場合は、この応力は初期破壊時の強度と一致する。一方、亀裂が貫通しない分類3)は1割程度存在する。分類3)については、 $10E_i$ までの計算範囲においては亀裂が連結しないが、さらに大きなひずみまで計算すれば亀裂が連結する可能性がある場合と、 E_{39} ひずみパターンのように両軸方向ともに圧縮では亀裂が連結しない場合とが考えられる。今回の $10E_i$ の範囲まで計算した限りでは前者のようなパターンは生じなかったため、分類3)はほぼ後者のように、亀裂が連結しないと考えることができる。よって、評価の上ではその方向のひずみでは破壊しないと仮定することは必ずしも不適切ではない。

分類2)のうち、亀裂がユニットセルを貫通するまでの間に応力の最大値が現れるタイミングを、ひずみパターン全体に占める割合で示すと次の通りとなる。

2-1) 初期破壊時：10% (E_{75})

2-2) 初期破壊から貫通の間：2% (E_{575})

2-3) 貫通時：58% (E_{21} , E_{25})

分類2)においては、そのほとんどが亀裂の貫通時に応力が最大となり、初期破壊時に応力が最大となるものも一部認められること、さらに初期破壊から貫通の間に応力の最大値が算出されることはほとんどないことが分かる。

以上のことを踏まえると「亀裂がユニットセルを貫通するまでの応力の最大値」という新たな定義が考えられる。この定義を適用した場合に、上記の1)~2)までの分類において、応力の最大値がこれまでの初期破壊と比べてどのようになるのかを示したものが図-8である。応力の最大値が初期破壊よりも大きくなるものは図中青色および緑色に塗色した範囲であり全体の8割程度に上る。

このようにして求めた強度は、既往の二次曲面を用いた降伏曲面の算定方法¹⁾に組み込むことより、岩盤の強度評価に適用できると考えられる。

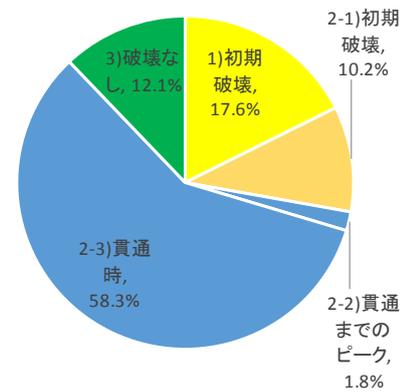


図-8 ユニットセルの破壊分類がひずみパターンに占める割合

5. まとめ

亀裂の進展を、強度に達した要素を弱層におきかえることで表現し、ユニットセルの数値試験に適用した。この方法を用いて、周期境界を考慮したユニットセル内の亀裂の貫通を定め、貫通するまでの応力ひずみ関係とのかかわりを調べた。その結果、初期破壊に変わる新たな貫通破壊に対応する強度を算定できることを明らかにした。今後は、この貫通破壊に対する降伏曲面の算定が可能であるか、さらには実岩盤の評価に適用していく予定である。

参考文献

- 1) 京谷孝史, 寺田賢二郎, 欧陽立珠: 岩石の力学特性と不連続面画像情報による変形強度特性評価, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.131-150, 1999.
- 2) 小早川博亮, 京谷孝史: 亀裂に対する連続体弱層モデルを用いた均質化法による岩盤の強度特性評価, 土木学会論文集 C. Vol.63(2), pp.428-440, 2007.
- 3) 小早川博亮, 島村真介: 亀裂の進展を考慮した岩盤の破壊規準評価, 第53回地盤工学研究発表会, pp.521-522, 2018.

CONSIDERATION OF CRACK PROPAGATION FOR STRENGTH CHARACTERIZATION OF ROCK MASS BY HOMOGENIZATION THEORY

Hiroaki KOBAYAKAWA and Shinsuke SHIMAMURA

We devised a method taking into account crack propagation for the strength evaluation of fractured rock mass using a numerical analysis method based on the homogenization theory. We applied this method to a unit cell model containing one crack. We assessed the stress-strain relationship of the unit cell and evaluated crack propagation conditions using numerical tests conducted to calculate the response to strains in various directions. The analysis result suggested that the maximum value of the stress until the crack penetrated through the unit cell could be used as a failure criterion taking into account the crack propagation in the unit cell.