

微視的亀裂進展を考慮した マルチスケール解析に基づく岩盤の強度予測

石井 建樹^{1*}・京谷 孝史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

岩盤などの不均質脆性材料の変形強度特性は、構成材料内部における亀裂の発生・進展や異種材料界面の剥離などの微視的な破壊現象と密接に関連している。本論文では、岩盤の強度評価を目的に、微視的亀裂進展を考慮したマルチスケール解析に基づく強度特性評価法を提案する。検証には、分布亀裂を有する石膏供試体の一軸圧縮試験を行い、提案手法によりその強度予測を行うことで、提案手法の強度評価手法としての適用可能性を示した。

Key Words : evaluation of strength, multi-scale analysis, crack propagation, Finite Cover Method

1. はじめに

岩盤構造物等の不均質材料から成る物体の変形強度特性は、材料内部での亀裂の発生・進展や異種材料界面の剥離などの微視的な変形・破壊現象と密接に関連している。近年、そうしたミクロスケールでの力学挙動の影響を反映させつつ、物体全体の力学挙動を評価し得る手法として、マルチスケール解析法が注目を集めている¹⁾⁻³⁾。

著者らは、微視的亀裂進展に伴う岩盤の材料特性変化を考慮するために、一般化有限要素法の1つである有限被覆法 (Finite Cover Method : 以下, FCM) に基づく亀裂進展解析法⁴⁾をマルチスケールモデリングの枠組みに組み込んで、微視的亀裂進展までを考慮したマルチスケール解析法を開発した⁵⁾。この新しいマルチスケール解析法は、微視構造内部で生じる亀裂進展挙動を反映して全体構造の変形挙動を予測評価し得る可能性を有している。

本論文は、開発した微視的亀裂進展を考慮したマルチスケール解析法⁵⁾に基づいて岩盤の巨視的強度特性の予測評価法を新しく提案するものである。例題として、分布亀裂を有する石膏供試体の一軸圧縮試験とその数値シミュレーションを行い、試験結果との比較を通して、岩盤のような構造体に対する強度評価手法としての適用可能性について検証する。

2. 微視的亀裂進展を考慮したマルチスケール解析

著者らが開発した微視的亀裂進展を考慮したマルチス

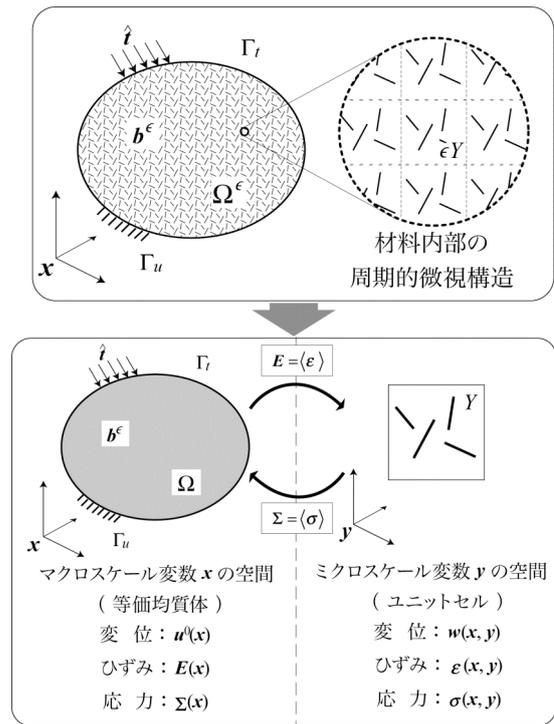


図-1 2つのスケール変数の導入による全体構造 (等価均質体) と微視構造 (ユニットセル) の分離

ケール解析法の詳細については参考文献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。

均質化理論に基づくマルチスケールモデリング¹⁾²⁾では、図-1に示すように、全体構造を記述するマクロスケールと材料内部の微視構造を記述するミクロスケールに分けて、2つの境界値問題として不均質構造体を取り扱う。マクロ境界値問題は全体構造のつり合い問題として定式

化され、その材料挙動はマイクロ問題により求められる不均質な微視構造の力学応答の平均として同定される。マクロひずみ \mathbf{E} を所与の条件として微視構造の単位構造 Y （ユニットセル）に対して周期境界条件下でのマイクロ解析を行い、得られるマイクロ応力 $\boldsymbol{\sigma}$ からマクロ応力 $\boldsymbol{\Sigma}$ を求める。これによって、マクロ問題（全体構造のに対する境界値問題）における構成関係が微視構造の応答を反映して与えられることになる（局所化プロセス）。

以上の枠組みの中に、マイクロ解析として亀裂進展解析を取り入れる。亀裂進展解析には、メッシュ分割に依存せず不連続面を表現できるFCMを用いた亀裂進展解析法⁴⁾を採用する。全体構造（マクロ）と微視構造（マイクロ）の両者がつり合った時点で引張亀裂の発生を行い、微視構造内において最大主応力が基準に達した箇所で最大主応力軸と直交する方向に亀裂を発生させる。マイクロ場において亀裂進展解析を導入することにより、岩盤内部で生じる微視的な亀裂進展までを反映したマクロ問題の非線形な構成関係を導出することが可能となる。

3. マルチスケールモデリングを応用した巨視的強度特性の予測評価システム

(1) マルチスケール解析に基づく強度評価システム

岩盤のように内部に微視構造を有する物体の巨視的な強度特性はその微視構造の影響を強く受ける。そうした内部構造を有する物体の巨視的強度に対して、マルチスケール解析の枠組みを利用した予測解析が可能である。それには図-1における「マクロひずみ $\mathbf{E} \rightarrow$ マイクロ境界値問題 \rightarrow マクロ応力 $\boldsymbol{\Sigma}$ 」の局所化プロセスと呼ばれる一連のプロセスを利用する。そのために必要なデータは、

- ・内部微視構造を表すユニットセルモデル
- ・ユニットセル構成材料の材料特性（破壊基準等）

の二つである。構成材料の破壊基準は供試体試験から求める。

これらのデータを用いてユニットセルに対する種々の载荷を行い、その応答として巨視的破壊基準面を推定する。これにより、微視構造の影響を反映した巨視的な材料強度特性を定量的に予測することが可能となる。著者らは、このようにして得た巨視的破壊基準を極限荷重解析と結びつけて、不均質な材料から成る物体の極限荷重を予測評価する強度評価システムを提案している^{2),3)}。

(2) 微視的亀裂進展を考慮した新しい巨視的破壊基準

著者らが提案している従来法では、大規模な破壊現象に先行する「微視的な破壊」を引き起こす限界荷重を用いて巨視的破壊基準を決定していた。実際には、微細な破壊が直ちに巨視的な材料特性を変化させる破壊に結

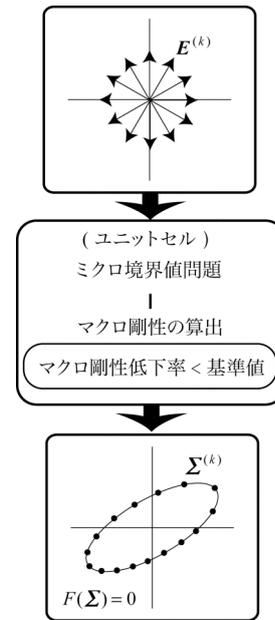


図-2 亀裂進展を考慮した巨視的破壊基準の導出

びつくとはいえ考え難く、従来の破壊の定義に基づく破壊基準は安全側過ぎることは明らかである。そのため、定量的にはかなり低めの強度を評価するという問題があった。

そこで、従来法のアイディアを応用しつつ、亀裂進展解析の特徴を活かした強度特性評価手法を発展的に提案する。微細な亀裂が発生した後において、巨視的材料特性が変化し始めるような時点を合理的に選択し、それを改めて「破壊開始」と定義し直して巨視的破壊基準を定めるならば、その破壊基準を用いた極限荷重解析は工学的に十分な精度で対象構造体の破壊強度を与えるようになる。そうすれば、その手法は工学的に非常に有用なものとなる。

このような考えに基づき、微視的な亀裂進展に伴う巨視的な特性変化に着目して新たな破壊基準を設定する。その指標としては、次式に定義するユニットセルのマクロ剛性の低下率 ϕ [%]に着目する。

$$\phi = \frac{\|D_{\text{init}}^H - D^H\|}{\|D_{\text{init}}^H\|} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 D_{init}^H 、 D^H は、それぞれ初期状態および亀裂発生後の評価時点でのユニットセルから求まるマクロ剛性である。

このマクロ剛性低下率 ϕ [%]を用いて巨視的破壊基準を次のようにして決定する。図-2に示すように、様々な方向に増分的にマクロひずみを付与して亀裂進展を追跡しながらをマイクロ解析を行い、マクロ剛性低下率 ϕ があらかじめ設定しておいた基準値を破らない限界状態にあるユニットセルに対応したマクロ応力 $\boldsymbol{\Sigma}^{(k)}$ 分布を求める。こうして得られたマクロ応力 $\boldsymbol{\Sigma}^{(k)}$ を二次曲面で近似し、これを巨視的破壊基準とする。

4. 分布亀裂を有する石膏供試体の強度予測

(1) 分布亀裂を有する石膏供試体の一軸圧縮試験

図-3に示す亀裂を規則的に配置した石膏供試体に対して、一軸圧縮試験を行った。石膏モルタルの配合は重量比で石膏：水=10：7とした。同じ条件で作成した石膏モルタル円柱供試体を用いた試験の結果は、ヤング率 2.95 GPa, ポアソン比 0.1, 一軸圧縮強さ13.6 MPa, 引張強さ 3.0 MPaであった。

供試体の寸法は140×70×30mmであり、内部に10 × 0.4mmの開口亀裂を千鳥状に配置した。開口亀裂は、ステンレス製の板を鉛直に立てた型枠に石膏を流し込み、石膏モルタルが硬化した後に板を引き抜き作成した。そして、石膏モルタルの同一バッチから、水平からの亀裂角度が22.5°、45°、67.5°となる3種類の供試体をそれぞれ3本ずつ作成して試験を行った。

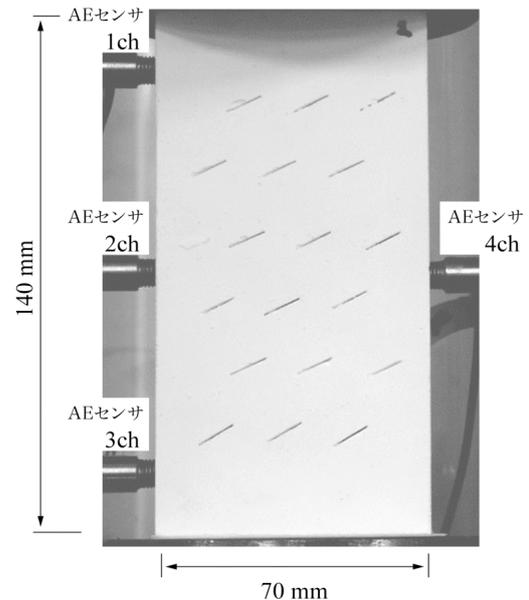


図-3 分布亀裂を有する石膏供試体の一軸圧縮試験

(2) 新しい巨視的破壊基準

亀裂の進展に伴うユニットセルのマクロ剛性低下率に注目した新しい破壊基準がどのようなものであるかを示す。ここでは、亀裂角度が22.5°、45°の供試体を対象に、マクロ剛性低下率が5%と10%の時点それぞれに注目した場合の破壊基準面を先に述べた方法で定めた。比較のために、亀裂発生時に注目した破壊基準面も併せて求めた。

図-4にユニットセルの解析モデルを示す。開口亀裂はユニットセルの中央に配置し、開口幅0.4mmに対して一要素となるように要素寸法を設定した。また、千鳥構造を模擬するため、正方形を45°回転した境界形状のユニットセルとした。

図-5, 6にそれぞれの供試体での各基準に対する巨視的破壊基準を示す。図には巨視応力空間における二次曲面を示す。全ての基準において巨視的破壊基準は引張側で頂点を持ち、圧縮側に広がった二葉双曲面となっている。巨視的破壊基準は、亀裂発生時を基準とした場合よりも、マクロ剛性低下率5%を基準とした方が、ほぼすべての载荷方向に対して大きい値を示した。これに対して、基準値をマクロ剛性低下率10%とすると、引張側（頂点付近）では剛性低下率5%を基準とした場合よりも巨視的破壊基準が小さくなった。これらのことは、基準値として適切な値を設定する必要があることを示唆している。

(3) 分布亀裂を有する石膏供試体の強度評価

こうして定めた巨視的破壊基準を用いて極限荷重解析を行い、分布亀裂を有する供試体の破壊強度を予測して、実験で得られている初期降伏荷重と比較を行う。

図-7に、各巨視的破壊基準（亀裂発生時、マクロ剛性低下率5%、10%）を用いた極限荷重解析の結果と実験

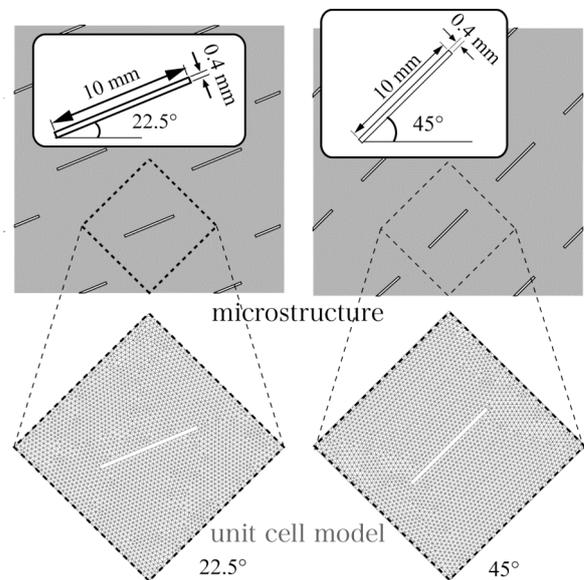


図-4 ユニットセルモデル

における初期降伏荷重の値を示す。亀裂角度67.5°のケースについては、亀裂の配置状態が22.5°のユニットセルを90°回転させた場合と同じであることから、22.5°の巨視的破壊基準を90°回転させたものを巨視的破壊基準としている。こうしたことが可能なのもマルチスケール解析に基づく本提案法の長所である。

極限荷重と亀裂角度との関係について見ると、亀裂発生時をもとに定めた破壊基準を用いた極限解析では、亀裂角度45°の供試体が最も小さい極限荷重を示している。しかしながら、実験では亀裂角度45°よりも22.5°の方が小さい値を示しており、この解析結果は定性的に実験結果と整合していない。

これに対して、マクロ剛性低下率5%、10%をもとに定めた巨視的破壊基準を用いた場合には、そうした問題点が改善され、実験結果と定性的にあう結果が得られて

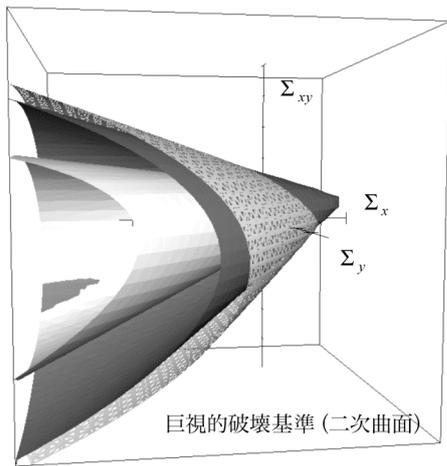


図-5 亀裂角度 22.5° の巨視的破壊基準

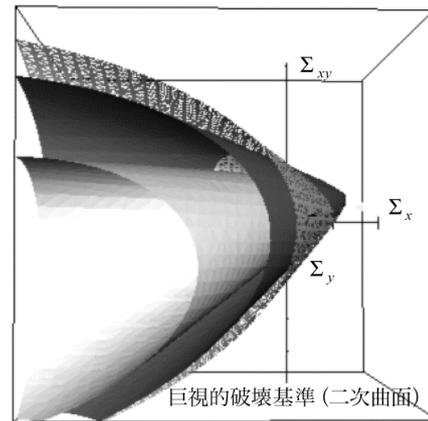


図-6 亀裂角度 45° の巨視的破壊基準

いる。このことは、強度特性を予測評価する上で、破壊に伴う構造変化を考慮することの重要性を示唆している。そして、低下率5%をもとに定めた破壊基準では、定性的にも定量的にも実験結果と整合する結果を得ている。

以上のことから、亀裂の発生・進展を考慮して適切に設定したマクロ剛性低下率に着目して巨視的破壊基準を決定することで、岩盤のような構造体の強度特性を予測評価できる可能性が示された。ただし、巨視的破壊基準を決定する際の目安となるマクロ剛性低下率の基準値を適切に設定する方法については更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 菊地昇: 均質化法入門 計算力学レクチャーシリーズ 1, 丸善, 2003.
- 2) 京谷孝史, 欧陽立珠, 寺田賢二郎: 岩石の力学特性と不連続面画像情報による岩盤の変形強度特性評価, 土木学会論文集, No. 631/III-8, pp.131-150, 1999.
- 3) 京谷孝史, 寺田賢二郎: マルチスケール応力変形解析法とその分布亀裂を含む材料の強度特性評価への適用, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp.49-64, 2001.

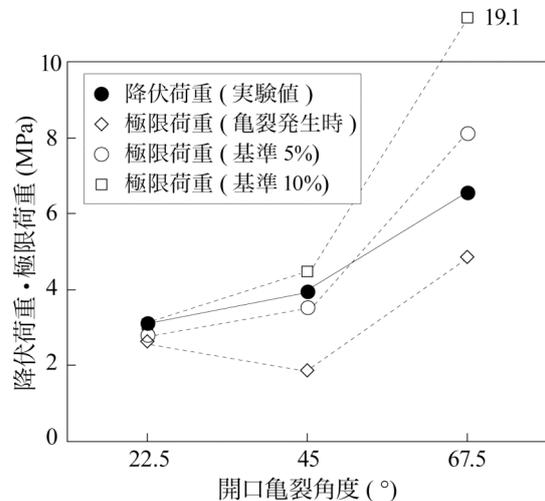


図-7 強度特性の予測評価結果

- 4) 石井建樹, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 岸野佑次: 界面要素を用いた有限被覆法に基づく破壊進展解析法の開発, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp.213-225, 2005.
- 5) 石井建樹, 京谷孝史, 西沢直樹, 寺田賢二郎: 微視的亀裂進展を考慮した非均質準脆性材料のマルチスケール解析, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 9, pp.273-282, 2006

STRENGTH EVALUATION OF ROCK MASS BASED ON MULTISCALE ANALYSIS METHOD INVOLVING MICRO-CRACK PROPAGATIONS

Tateki ISHII and Takashi KYOYA

The mechanical behavior and the strength characteristic of quasi-brittle inhomogeneous solids such as rock is strongly governed by the behavior and failure process, such as cracking within the microstructure involved in them. In order to predict such strength characteristic of rock mass, utilizing the multiscale analysis method with micro-crack propagations, a numerical method for evaluation of macroscopic strength of cracked bodies is proposed. Numerical analysis of an uniaxial loading test show that the predicted strength agrees fairly well with those of experiments and demonstrate the potential of the proposed method for evaluating the strength of quasi-brittle solids.