

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760356
 研究課題名（和文） き裂進展に伴う岩盤の強度発現メカニズムを解明するための
 実験的および数値解析的研究
 研究課題名（英文） Experimental and Numerical Study on Mechanism governing Strength
 of Rock Mass including Crack-propagation
 研究代表者
 石井 建樹
 木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・講師
 研究者番号：60400280

研究成果の概要：

本研究では、不連続性岩盤における強度発現メカニズムを解明するために、単一不連続面および分布不連続面を有する供試体に対して一軸圧縮破壊試験を行うとともに、その数値シミュレーション法を構築した。その結果として、全体構造が降伏するまでのき裂進展メカニズムを明らかにした。さらに、解明したメカニズムに基づいてマルチスケール解析と、それを応用した岩盤の強度特性評価法を開発し、その結果が高い再現性を有することを実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	0	2,400,000
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	180,000	3,780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：岩盤力学・土木材料・マルチスケール解析法・強度特性評価

1. 研究開始当初の背景

岩盤は、母岩材料と礫などの介在物や不連続面で構成された複雑な内部構造を有する。岩盤工学のマクロ的な視点からは、岩盤をそうした内部構造を有する一つの材料として扱う必要がある。しかし、岩盤は内部構造を構成する介在物や不連続面などのスケールが大きく、それらを十分に含んだ供試体試験ができない。代替的な方法として現位置試験が行われるが、スケールは十分ではなく、内部構造の影響を反映した挙動が得られていたとは言い難い。

岩盤に対しては、内部構造の影響を反映した変形・強度特性を評価する合理的な手法が必要なのである。

2. 研究の目的

本研究では、内部構造の影響を反映した岩盤の変形・強度特性評価法を構築するために、A セメントおよび石膏供試体を用いた一軸圧縮破壊試験
 B き裂進展モデルを導入したマルチスケール解析
 により、内部で生じるき裂発生・進展・連結

に伴うマクロ的な強度発現メカニズムの解明を図る。

具体的には、室内供試体実験により AE イベントなどのき裂進展データと供試体のマクロ的な力学挙動との関係を把握すると同時に、そのシミュレーション解析を行うことで、より定量的にマクロ的な強度発現メカニズムを検討する。その際、B に示すマルチスケール解析を新たに開発して検討に用いることで、材料内部でのき裂進展などミクロな構造形態の変化を考慮したマクロな強度特性を導出する。

3. 研究の方法

(1) 室内供試体試験を行って、き裂の発生・進展・連結挙動とマクロ的な変形・破壊挙動の関係を分析・把握する。

石膏を用いた供試体による一軸圧縮破壊試験の実施セメントと石膏を基質部材料として用いて、薄い鉄片によって、図 1 に示すような供試体を作製し、変位制御による一軸圧縮破壊試験を行う。

得られたデータ（荷重変位曲線、ひずみゲージ測定値、AE イベント、き裂の発生・進展・連結の様子を記録した画像データ）をもとに、以下の要因間の関係について定量的な分析を行い、不連続面を含んだ供試体のマクロ的な破壊挙動の支配要因を把握する。

- ・ 供試体を示すマクロ的な剛性とき裂発生・進展の関係
- ・ マクロ的な初期降伏強度、ピーク強度とき裂発生・進展の関係
- ・ 以上の要因間の関係に対する不連続面の配置角度の影響

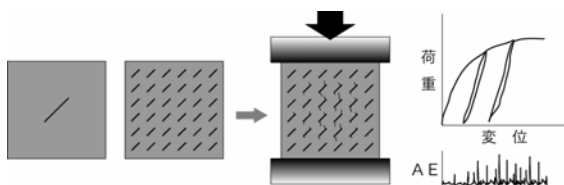


図 1 一軸圧縮破壊試験の概要

(2) 併せて、実験のシミュレーション解析を行い、き裂進展機構に関する検討作業を行う

研究代表者が開発したき裂進展解析法(以下、き裂進展解析法と略す)を用いて、単一の不連続面を配置した供試体試験のシミュレーション解析を行い、荷重変位曲線、ひずみ、き裂の発生・進展・連結の様子を実験結果と比較して、き裂進展機構について検討する。

(3) き裂進展解析法を均質化理論の枠組みに導入して、き裂進展モデルを導入したマルチスケール解析システムの完成を図る。そして、マルチスケール解析システムを用いてマクロ強度発現メカニズムの解明を図る。

具体的には、分布不連続面を配置した供試体試験よりえられた荷重変位曲線、AE イベント・AE 震源などのデータと、マルチスケール解析システムによるシミュレーション解析結果を比較検討し、材料内部での逐次破壊とマクロな強度特性（初期降伏強度、ピーク強度など）との関連性を明らかにする。

(4) マルチスケール解析を応用した平均化により、マクロ強度推定法の確立を図る。

マルチスケール解析システムの完成がもたらすマクロな変形挙動の予測評価だけでは、構造物ごとに、常に全体構造の変形解析を行わなければならないということの意味する。そこで、内部構造の情報をもとにマクロな強度特性について何らかの情報を得ることができれば、岩盤の変形強度特性評価法としては極めて有用なものとなる。

4. 研究成果

(1) 単一不連続面や分布不連続面を配置した石膏供試体を作製し、その一軸圧縮破壊試験を行った。まず単一の不連続面を含む供試体の試験結果として、載荷曲線および AE イベントの履歴を得た。その結果と実験時に撮影したデジタル画像データより、顕著な AE イベントが発生した際に、ウイングクラックと呼ばれる引張り裂が進展することが確認できた。

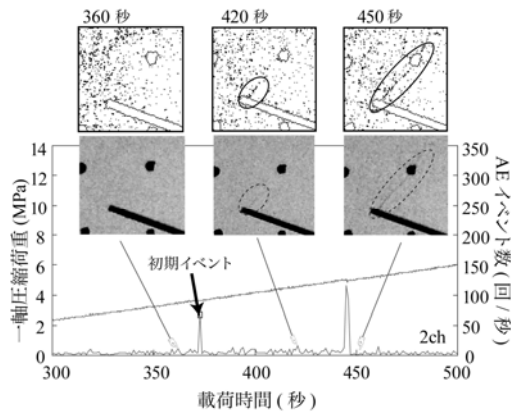


図 2 AE イベント数とき裂進展の関係

分布不連続面を含む各種石膏供試体が示した降伏荷重、ピーク荷重、初期イベント荷重(図 3)は、配置角度が 0, 22.5, 45° の供試体では、初期イベント荷重が一番小さく、初期降伏荷重はそれと同じかやや大きい値として現れ、AE イベントが多発する内部構造変化と全体剛性低下がほぼ同時に生じる。一方、配置角度が 67.5, 90°, 不連続面を含まない供試体では、初期降伏荷重の方が初期イベント荷重よりも小さい。そして、これらの供試体で計測された 3 つ荷重値は、配置角度が 0, 22.5, 45° の供試体のそれらよりも大きな値を示す。

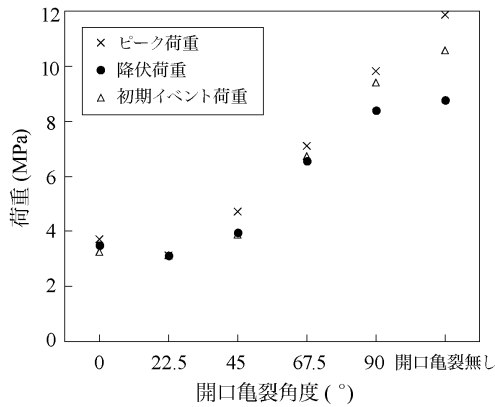


図3 ピーク荷重, 降伏荷重, 初期イベント荷重

以上のように, 既存不連続面の配置角度によって新たなき裂の発生・進展の様子が異なり, 供試体が示す見かけの強度が変わることが明らかとなった. したがって, 新たなき裂の発生・進展に関係したマクロな変化を指標として設定することで, 構造体が示す見かけの巨視的強度を予測できると期待される.

(2) 上記の結果を受けて, 強度特性を予測評価するためには, まずはウイングクラックの発生・進展挙動を追跡できる手法が必要である. そこで, 既に開発したき裂進展解析法が, どの程度実験を再現できるか検討した.

その際, 解析パラメータの設定が不可欠になる. しかし, 本手法を用いた場合, 既に得ている要素試験結果や AE イベントなどから, 数値計算に必要な全ての解析パラメータを設定することができる. 本研究では, その設定法を確立した.

そうして実施した数値計算は, ウイングクラックなどの引張り裂のみが進展する段階においては, ある程度の精度をもって再現できる. 一方で, ピーク荷重発現などは再現することが出来なかった. このような実験結果と数値計算結果との乖離は, 再現できないメカニズムが岩盤の強度発現に深く関わっていることを示唆している. そうした改良を加えて, 終局に至るまでの一連の破壊メカニズムを解明, 検討することは今後の課題である.

(3) 不連続性岩盤には, 多数の不連続面を含んでいる. そのため, 個々の不連続面挙動を陽に評価することはほぼ不可能である. そのため, 何らかの平均化を導入する必要がある. そこで, き裂進展までを考慮した均質化理論に基づくマルチスケール解析を開発した.

均質化理論に基づくマルチスケール解析では, 図4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

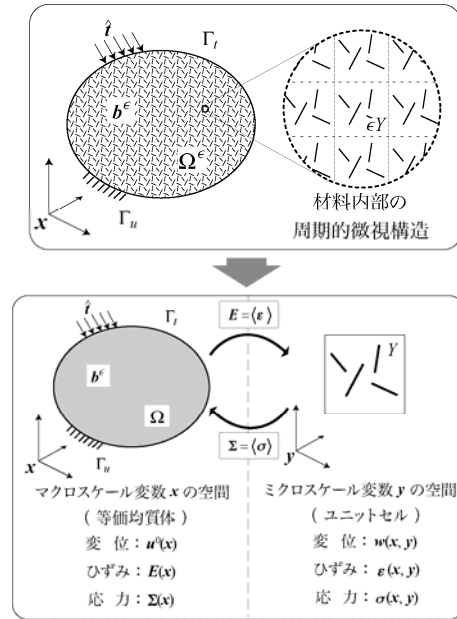


図4 マルチスケール解析法概念図

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, その材料挙動はミ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 に対して周期境界条件下でのミクロ解析を行い, マクロ応力 Σ を求める. これによって, マクロ問題 (全体構造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.

開発したマルチスケール解析法では, 図5のような石膏供試体を, 図6のような解析モデルによって表現できる.

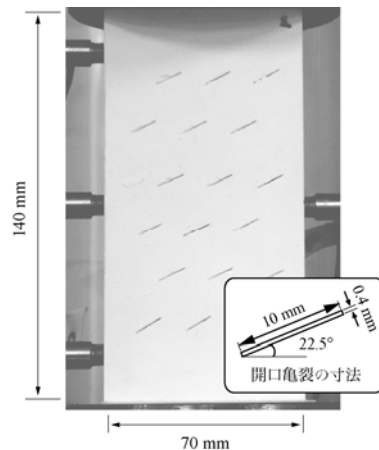


図5 分布不連続面を含む石膏供試体

図7は実験と数値計算による载荷曲線である. 数値計算では, 点Aまで载荷が進むと微視構造内においてき裂が発生するが, 供試体自体は線形挙動を示す. 点Bまで载荷が進む

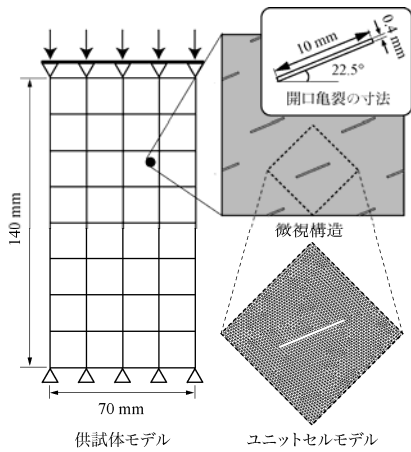


図6 マルチスケール解析モデル

と載荷曲線は非線形挙動となる．こうした挙動は，初期のなじみ部分を除けば，実験の概形を精度良く表現できている．

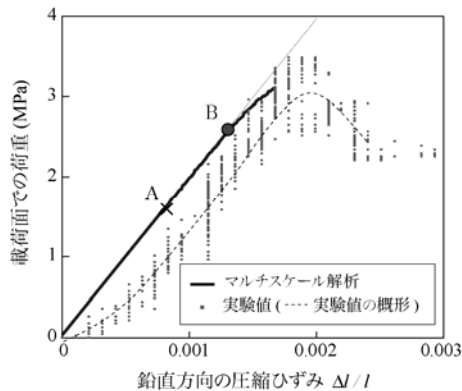


図7 実験とマルチスケール解析の載荷曲線

図8に点Bにおける実験供試体とマルチスケール解析モデルの様子を示す．供試体も出でる内には，内部で発生したき裂の長さをコンターで示している．まずき裂進展の様子を見ると，各箇所でも認められるき裂を精度良く再現できている．また供試体全体で樺状にき裂が進展する様子も再現できている．

こうした成果は，ここ数年になって計算工学分野で盛んに取り組み始めて始めている．しかし，本研究のように一般化有限要素法によるマルチスケール解析を用いて圧縮条件下での破壊挙動を扱うものは類例が少ない．

(4)以上のマルチスケール解析では，各ガウス点においてマイクロ解析を行う手法である．そのため対象とする岩盤構造物毎に，マイクロ解析を行いつつ全体構造の変形解析を行わなければならない．したがって，計算コストの問題から，実用的な手法とは言い難い．そこで，上記のマルチスケール解析を応用して，不連続性岩盤などの強度評価解析法を開発した．

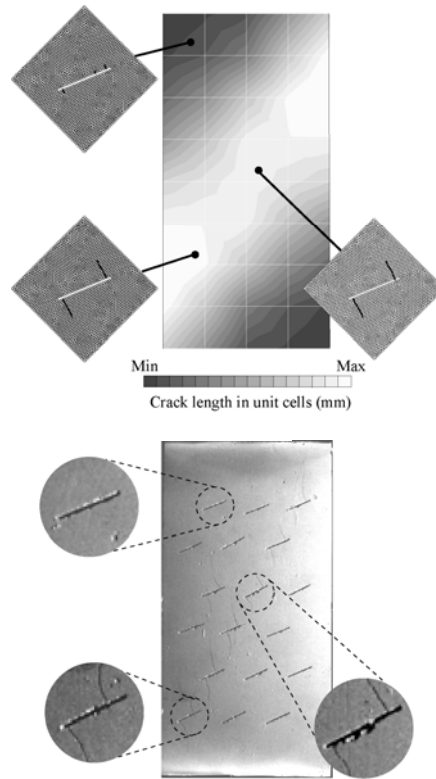


図8 実験とマルチスケール解析のき裂進展

それには図4における「マクロひずみ」から「マイクロ解析」を経て「マクロ応力」を算出する一連のプロセスを利用する．その際に必要なデータは，

- ・ 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特性

の2つである．これらのデータを用いて，ユニットセルに対して種々の載荷を行い，その応答として巨視的な材料としての破壊規準面を推定する(図9)．その際，き裂進展解析を行い，巨視的な材料特性が変化し始めるような時点を選択し，破壊と定義する．

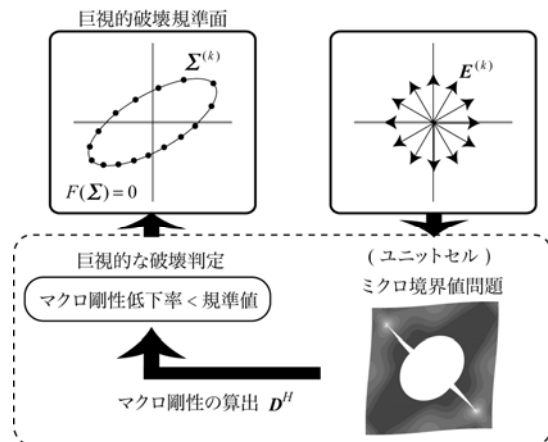


図9 き裂進展を考慮した巨視的な破壊規準の導出

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規準を設定する。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規準を決定する。図 9 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規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 $\Sigma^{(k)}$ 分布を求める。図 5 の石膏供試体に対して、以上のようにして得たマクロ応力 $\Sigma^{(k)}$ を二次曲面で近似した巨視的破壊規準面を図 10 のように得られる。

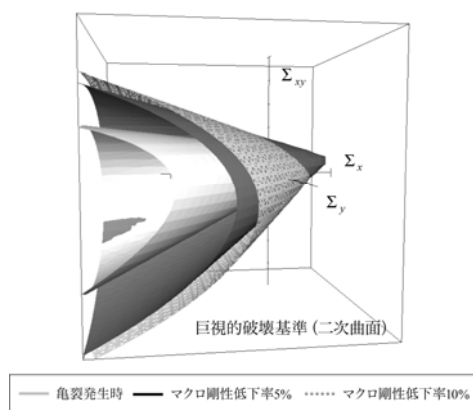


図 10 不連続面を含む石膏材料の巨視的破壊規準

こうして定めた巨視的破壊規準を用いて、極限荷重解析を行えば、分布不連続面を有する石膏供試体の極限荷重を求めることができる。そこで、実験で得られている初期降伏荷重と、本手法により予測した極限荷重の結果を比較した。図 11 は、亀裂発生時、マクロ剛性低下率 5%、10%を破壊とした際、各種配置角度の石膏供試体の極限荷重と、実験により得られた初期降伏荷重である。当然ではあるが、大きなマクロ剛性低下率をもとに定めた場合ほど、降伏荷重の予測値は大きくなっている。き裂発生時を破壊として求めた極限解析では、配置角度 45° で最小の極限荷重を予測したのに対して、マクロ剛性低下率をもとに定めた場合、配置角度 45° よりも配置

角度 22.5° の方が小さい極限荷重を予測し、実験結果とも定性的にも整合する。こうした成果は、本研究の実験的検討において、詳細な検討を行うことによって生み出された成果であると言える。

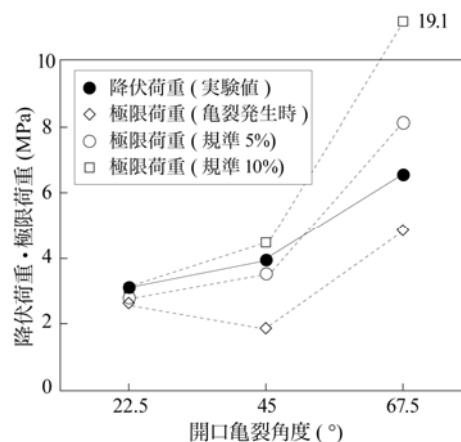


図 11 強度特性(降伏荷重)予測評価結果

(5) 本研究によって、不連続性岩盤のように、内部に無数の不連続面を有する構造物に対して、その降伏荷重までの破壊メカニズムを解明し、その値を予測するシステムを構築することができた。これらのシステムは、研究代表者、あるいはその研究グループのオリジナルな手法に基づくものである。

しかし、課題も多く残されている。ピーク荷重までの破壊メカニズムは、未だに多くの研究者によって議論されるところであり、二次クラックと呼ばれるせん断き裂については本研究で考慮していない。そうした課題を克服し、強度発現メカニズムを解明し、実証することが今後の課題として残されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① K. Terada, T. Ishii, T. Kyoya, Y. Kishino, Finite cover method for progressive failure with cohesive zone fracture in heterogeneous solids and structures, *Computational Mechanics*, 39, pp.191-210, 2007, 査読有
- ② 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, *土木学会応用力学論文集*, Vol.9, pp.273-282, 2006, 査読有
- ③ 石井建樹, 京谷孝史, 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巨視的強度特性の予測評価, *土木学会論文集 C* Vol.63, No.2, 2007, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① T.Ishii, T. Kyoya, K. Terada, N. Nishizawa, Micro-Macro coupled analysis method of heterogeneous materials involving micro-crack propagations, 7th World Congress on Computational Mechanics, 2006, Los Angeles
- ② 石井建樹, 京谷孝史, 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, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2007.1.11, 東京
- ③ T.Ishii, K. Terada, T. Kyoya, Multiscale analysis for prediction of macroscopic strength dominated by propagating micro-cracks, the 9th U.S. National Congress on Computational Mechanics, 2007.7.25, San Francisco
- ④ T.Ishii, T. Kyoya, K. Terada, Multiscale analysis of macroscopic strength dominated by propagating micro-cracks, APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI, 2007.12.5, Kyoto
- ⑤ T.Ishii, T. Kyoya, K. Terada, Effects of frictional slip between crack interfaces to crack propagation in quasi-brittle rocks, 8th World Congress on Computational Mechanics, 2008 (WCCM8) & 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), 2008.7.3, Venice

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 建樹 (ISHII TATEKI)

木更津工業高等専門学校・環境都市工学科・
講師

研究者番号 : 60400280

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者