

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420840

研究課題名(和文) ピークおよび残留強度における岩石の有効応力係数

研究課題名(英文) Effective Stress Coefficient of Rock for Peak and Residual Strengths

研究代表者

藤井 義明 (Fujii, Yoshiaki)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：70192309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：改良破壊包絡線法を開発し、いくつかの岩石について適用した。同方法は、岩石の三軸圧縮試験結果から、有効応力に基づくピーク・残留強度条件式を矛盾なく表すことのできる、有効応力に依存した有効応力係数を逆算する手法であり、従来の破壊包絡線法と比べると、破壊条件式の仮定や試行錯誤が不要という利点を有する。

求めた有効応力係数は、全応力と間隙水圧の関数として定式化し、有限要素法に実装した。岩盤中に掘削された略円形の空洞周辺の有効応力と改良破壊接近度を解析し、有効応力係数の有効応力依存性を考慮することにより、破壊接近度を、より正確に評価することができることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Modified Failure Envelope Method was developed and applied to some types of rocks. Effective stress dependent-effective stress coefficient was evaluated with the method which coefficient can represent failure envelope by effective stress. The modified method is better than conventional Failure Envelope Method because the modified method neither requires assumed failure envelopes nor trial and errors. The evaluated coefficients were formulated as a function of total stress and pore pressure, and installed in a finite element code. Stress severity around a underground rock cavern was analyzed and it was confirmed that stress severity was more precisely evaluated with the effective stress dependent-effective stress coefficient than conventional approaches.

研究分野：岩盤工学

キーワード：岩石 有効応力係数 ピーク強度 残留強度

1. 研究開始当初の背景

申請者は岩石試験(たとえば、Fujii et al., 1998)・岩盤応力測定(たとえば、藤井ら、2006)・数値応力解析(たとえば、Fujii & Ishijima, 1991)等における技術と経験を生かし、岩石試験結果に基づいた深部採炭切羽(たとえば、Fujii et al., 1997)や岩盤斜面(たとえば、Mufundirwa, Fujii et al., 2011)の安定性評価を行ってきた。それらに限らず、二酸化炭素回収・貯蔵、シェールガス採掘、放射性廃棄物の地層処分、トンネルの変状、地震断層の滑りなど、岩盤工学におけるあらゆる問題では、応力と間隙流体圧が与えられた場合の岩盤の安定性を評価する必要がある。そのために用いられる岩盤や岩石の破壊条件は、有効応力(=応力-有効応力係数×間隙流体圧)で記述される。

多孔質体の弾性学では有効応力係数が0~1の値を取る。地盤の場合は、土粒子が一つ一つ独立しているので、有効応力係数は1となり、わかりやすいが、岩石では鉱物粒子同士が部分的に結合しているため、有効応力係数は必ずしも1とはならない。さらに岩石は弾性体ではなく、均質でもなければ等方でもなく、これらが原因で、有効応力係数は有効封圧に依存することがわかっている。ところが従来からの岩盤力学の実際においては、有効封圧に依存した有効応力係数を用いることなく、間隙水圧を無視したり、有効封圧係数を1と仮定したり、あるいは、有効封圧に依存しない一定値を用いたりしていた。

多孔質体の弾性理論に基づいて、弾性範囲の実験結果から有効応力係数を求める方法は古くから開発されている。ところが、上述のように、弾性範囲で求めた有効応力係数の値と、ピーク応力付近で求めた有効応力係数の値は同じ値になるとは限らない。岩石のピーク応力近傍での有効応力係数を求めるために、破壊包絡線法という方法が Franquet & Abass (1999)によって提案された。しかし、この方法は、面倒で不正確な図式解法に基づいており、また、2つのデータしか示されていないので、有用性も明らかにされたとはいえない。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究の目的を、(1)破壊包絡線法を改良し、ピーク応力付近での有効応力係数を簡便・正確に求める方法(改良破壊包絡線法)を開発すること、(2)同方法を残留強度状態にも使えるようにすること、(3)同方法をいくつかの岩石に適用し、有効応力係数の有効応力依存性を明らかにすること、とした。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、いくつかの岩石について三軸圧縮試験を行った。実験においては、供試体の数・ばらつき、試験の手間・時間を低減するために、多段階三軸圧縮試験

を実施し、その妥当性について検討した。

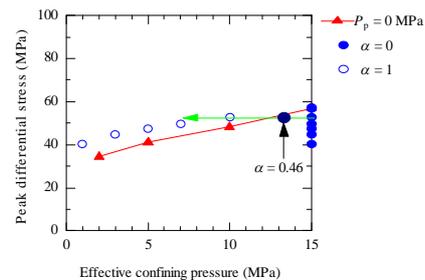
改良破壊包絡線法を開発し、ピーク、および、残留強度における有効応力係数とその有効封圧依存性を求めた。改良破壊包絡線法で求めた有効応力係数は、弾性範囲の有効応力係数と比較し、差異の原因について考察した。

得られた有効封圧に依存した有効応力係数を有効応力の関数として定式化し、有限要素法に実装、地下空洞周りの応力解析を行った。

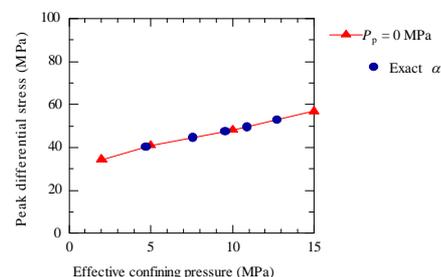
4. 研究成果

改良破壊包絡線法を開発するために、いくつかの封圧・間隙水圧の下でのピーク・残留強度データを得るために、火山性砕屑岩の例として支笏溶結凝灰岩、新第三紀砕屑岩の例として来待砂岩、結晶質岩の例として稲田花崗岩について、三軸圧縮試験を行った。封圧は1~16 MPa、間隙水圧は1~15 MPaである。

三軸試験の結果をもとに、簡単・正確に有効封圧に依存した有効応力係数を求める方法について検討し、以下のような改良破壊包絡線法を考案した。たとえば、図1aのように、間隙水圧下での強度は有効応力係数を1と仮定すると、間隙水圧を0とした場合の破壊包絡線の左上に位置し、0と仮定すると同包絡線の右下に位置する。破壊包絡線が、全応力に関わらず、有効応力で表されると仮定すれば、間隙水圧下での強度が、間隙水圧がゼロの場合(有効応力が全応力と等しいことが既知である)の破壊包絡線上に位置する(図1b)有効応力係数が逆算できる。



(a)



(b)

図1 来待砂岩の三軸強度の例

同方法の適用にあたっては、試料毎の強度のばらつきが問題となる。そこで、多段階三軸試験を試みた。この方法では間隙水圧ゼロとそうでない場合について、それぞれ1つの試料について実験を行えばよいため、準備する試料の数が少なく済み、また、それぞれの場合については試料間のばらつきを考慮せずともよい。さらに、2つの試料の間隙水圧ゼロにおける強度で補正を行うことにより、2つの試料間の強度のばらつきも結果に影響しないという長所を有する。

応力径路はさまざま考えられるので、最適な間隙水圧を一定にして封圧を増加させる径路と、封圧を一定にして間隙水圧を減少させる径路について実験し、通常の試験と比較した結果、後者の応力径路によると、通常の試験と類似した、しかも、ばらつきの少ない結果が得られることがわかった。

これと並行して、インタクトな試料と三軸破壊した試料について間隙水圧ゼロの場合と静水圧より1 MPa少ない間隙水圧を与えた場合について静水圧圧縮を行い、得られた体積弾性率から、Biotの有効応力係数、ならびに、破壊した岩石の有効応力係数を求め、改良破壊包絡線法による結果と比較した。

ピーク強度の有効応力係数は、Biotよりも小さかったが、Biot同様、有効封圧と共に減少した。残留強度の有効応力係数はBiotとほぼ等しかった。破壊後の有効応力係数はほぼ1であった。

稲田花崗岩の結果もほぼ同様であったが、支笏溶結凝灰岩では、おそらく空隙崩壊の影響で、ピーク・残留強度の有効応力係数を求めることはできなかった。

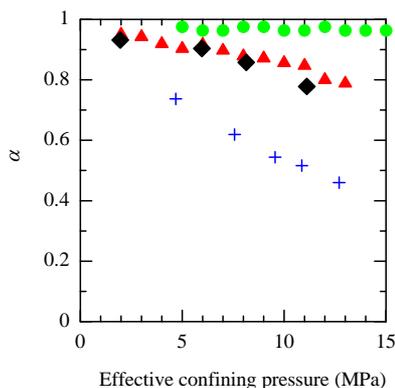


図2 来待砂岩の各種有効応力係数(○: Biot, +: ピーク強度 (多段階), △: 残留強度, ◇: 破壊後)

有限要素法に上記結果を実装するために、各種有効応力係数を1つのパラメーターで表そうとし、結局、最大主応力から30度傾いていると仮定した破断面上の有効直応力を横軸にとると、破壊した供試体の結果以外は、大体、一直線上に乗ってくることがわかった

(図3)

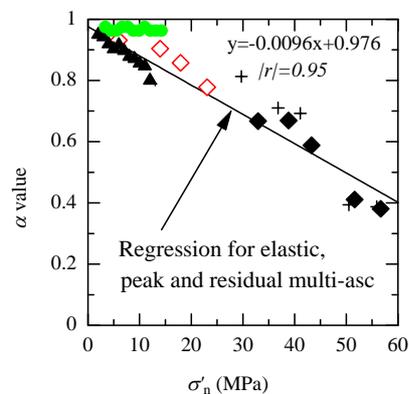


図3 破断面上の有効直応力と各種有効応力係数(○: Biot, +: ピーク強度 (多段階), △: ピーク強度, ◇: 残留強度, ◇: 破壊後)

図3において、有効応力係数 $\alpha$ は破断面上の有効直応力 $\sigma'_n$ により、

$$\alpha = A - B\sigma'_n \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $A$ 、 $B$ は定数である。破断面上の有効直応力を、破断面上の全応力 $\sigma_n$ と間隙水圧 $P_p$ に置き換えれば、

$$\alpha = \frac{A - B\sigma_n}{1 - BP_p} \quad (2)$$

となる。

上式を有限要素法に実装し、鉛直応力15 MPa、間隙水圧5 MPaを受ける来待砂岩で構成された岩盤中に掘削された略円形の空洞周辺(図4、空洞内への流入水排水なし)の有効応力と改良破壊接近度を解析した。なお、改良破壊接近度 $S_s$ とは、破壊の接近度を-1(引張破壊)~0(圧縮の静水圧)~1(圧縮破壊)で表す指標であり、図5中の $\sigma$ を、全ての有効主応力が圧縮の場合は $\sigma_c$ と共に式(3)に、そうでない場合は $\sigma_t$ と共に式(4)に代入して評価する。

$$S_s = \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad (3)$$

$$S_s = -\frac{\sigma}{\sigma_t} \quad (4)$$

解析は、有効応力係数が0(間隙水圧無視)、0.5、1(土質力学と同じ)の場合、来待砂岩で実測された有効応力依存性を持つ場合、その10倍の依存性を持つ場合について行った。

応力に依存した有効応力係数はほぼ1に近くなっている(図6c)が、有効応力依存性を10倍にすると1~0の間の値を示している(図6d)。応力に依存した有効応力係数を用いた場合は、最大有効主応力(図7c, d)・最小有効主応力(図8c, d)ともに $\alpha = 0$ (図7a, 8a)と $\alpha = 1$ (図7b, 8b)の間の値を示して

いる。

有効応力係数の有効応力依存性を考慮した場合(図9c)と比較すると、間隙水圧を無視した場合(図9a)には、小さな破壊接近度が得られ危険側の評価となり、有効応力係数を1とした場合(図9b)には大きな破壊接近度が得られ安全側の評価となることが確認された。

有効応力係数を1として安全側の評価を行うことも実際的と思われるが、より正確に破壊接近度を評価するためには有効応力係数の有効応力依存性を考慮したほうがよい。

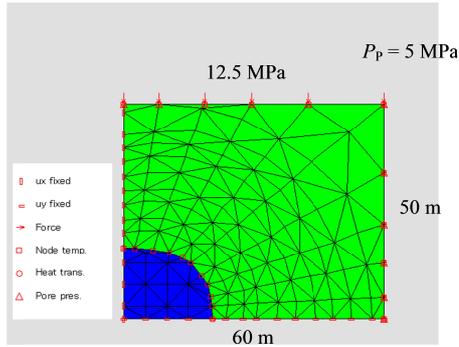


図4 有限要素解析に用いたモデル

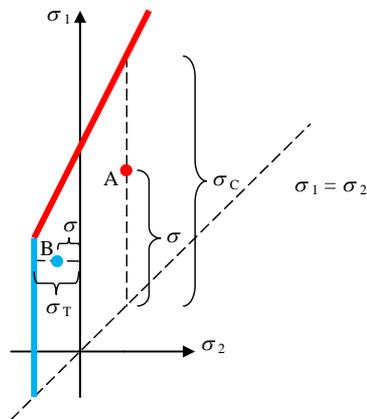
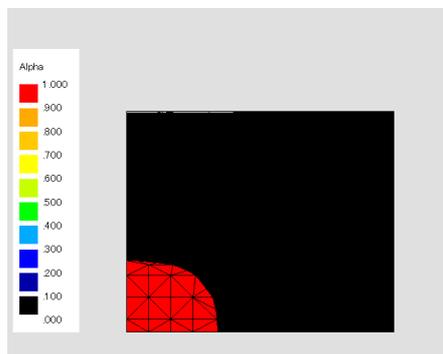
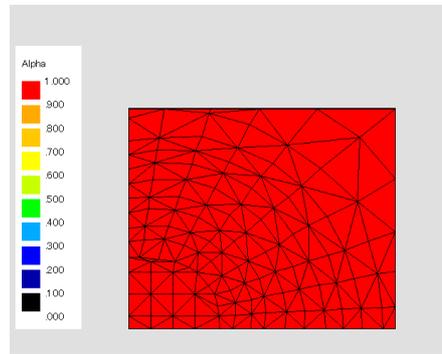


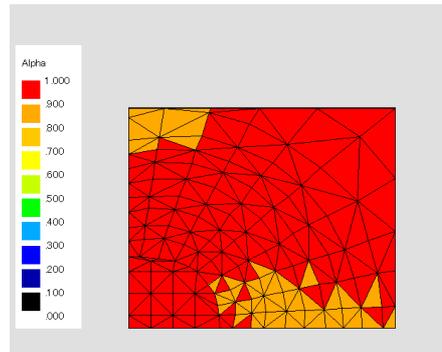
図5 改良破壊接近度



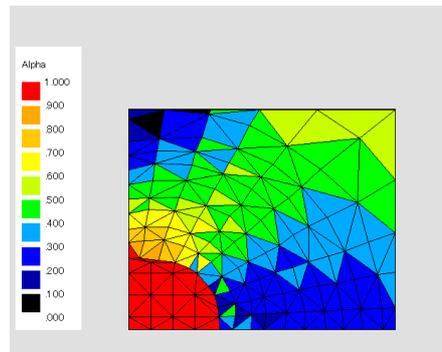
(a) 間隙水圧無視



(b)  $\alpha = 1$

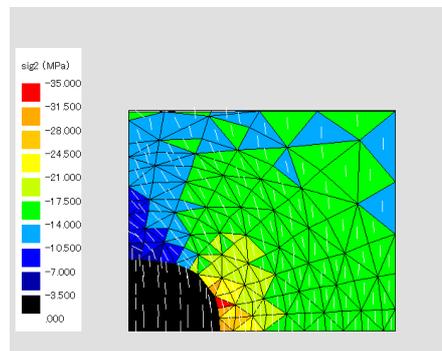


(c) 来待砂岩の応力依存性

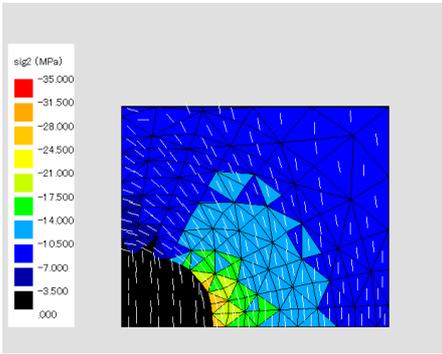


(d) 来待砂岩の10倍の応力依存性

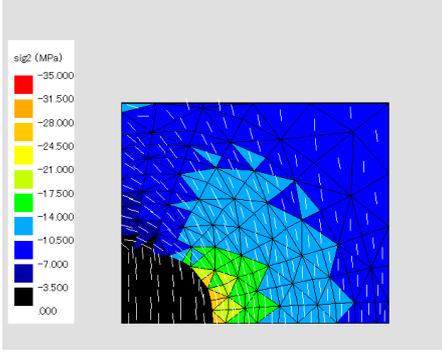
図6 有効応力係数の分布



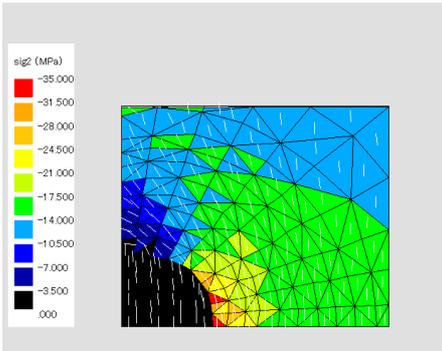
(a) 間隙水圧無視



(b)  $\alpha = 1$

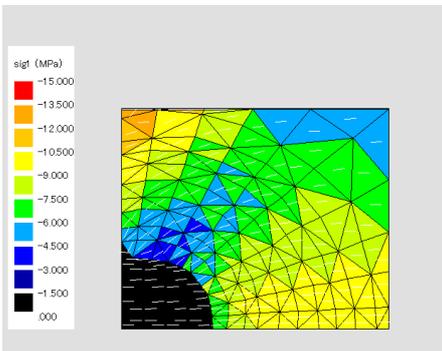


(c) 来待砂岩の応力依存性

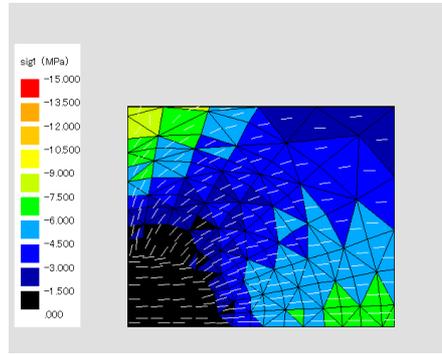


(d) 来待砂岩の 10 倍の応力依存性

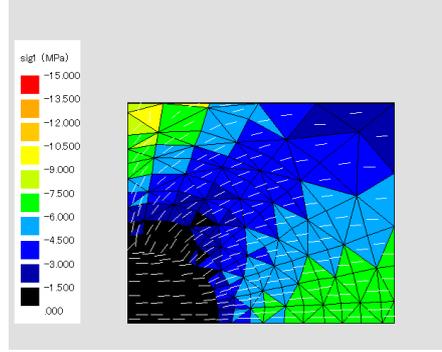
図 7 最大主応力の分布



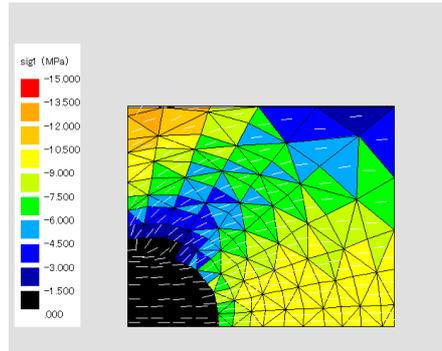
(a) 間隙水圧無視



(b)  $\alpha = 1$

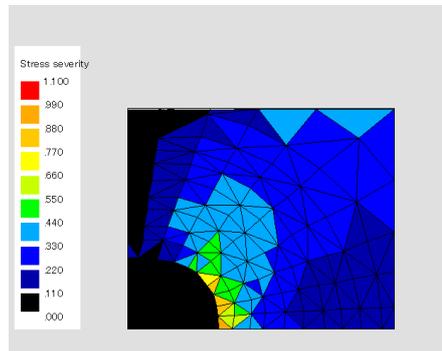


(c) 来待砂岩の応力依存性

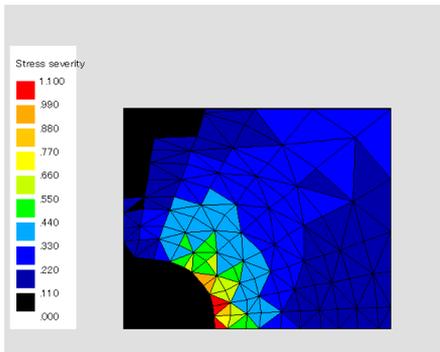


(d) 来待砂岩の 10 倍の応力依存性

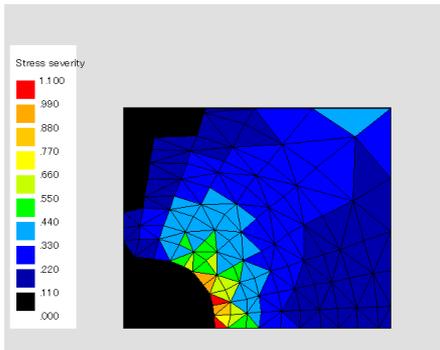
図 8 最小主応力の分布



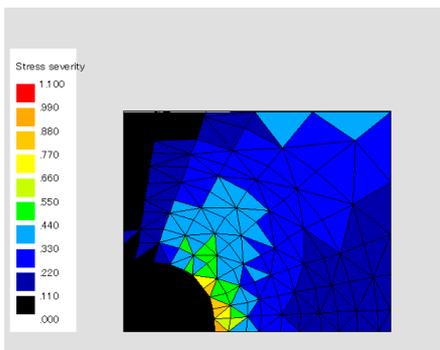
(a) 間隙水圧無視



(b)  $\alpha = 1$



(c) 来待砂岩の応力依存性



(d) 来待砂岩の 10 倍の応力依存性

図 7 改良破壊接近度の分布

## 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 1 件)

Dassanayake, A.B.N., Fujii, Y., Fukuda, D. and Kodama, J. (2015), A New Approach to Evaluate Effective Stress Coefficient for Strength in Kimachi Sandstone, J. Petrol. Sci. Engng., Vol. 131, pp. 70-79, doi: 10.1016/j.petrol.2015.04.015 (査読あり)

### 〔学会発表〕(計 3 件)

Fujii, Y., Dassanayake, A., Alam, A.K.M.B., Fukuda, D. (2016), Formulation and Implementation of

Effective Stress Coefficient of Rock to FEM, 平成 28 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、#2504, 9/15, 岩手大学 (盛岡市)

Dassanayake, A. B. N., Fujii, Y., Fukuda, D. and Kodama, J. (2014), Significant Differences in Effective Stress Coefficient for Rocks within Elastic Region and Peak and Residual Strengths, Proc. ARMS8 (2014 ISRM International Symposium - 8th Asian Rock Mechanics Symposium), RP1-4, Royton Sapporo, Sapporo, Japan, Oct. 14, 2014. (査読あり)

Dassanayake, A. B. N. and Fujii, Y. (2014), Biot's Effective Stress Coefficient of Rocks for Peak and Residual Strengths by Modified Failure Envelope Method, in Alejano, L. et al. (eds.), Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (Proc. EUROCK 2014), pp. 155-160, Vigo, Spain, May. 27. (査読あり)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤井 義明 (FUJII, Yoshiaki)  
北海道大学・工学研究院・教授  
研究者番号：70192309