



Title	岩石のピーク応力と残留強度における有効応力係数の値とそれらの応用
Author(s)	藤井, 義明; Dassanayake, Anjula; 福田, 大祐 他
Description	資源・素材2014（熊本）－平成26年度資源・素材関係学協会合同秋季大会－、2014年9月15日～19日、熊本大学、熊本市
Citation	資源・素材2014（熊本）企画発表・一般発表講演集（WEB版）, 2014, A4-6
Issue Date	2014-09-16
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/59748
Type	conference paper
File Information	MMIJ2014KUMAMOTO, A4-6. pdf



岩石のピーク応力と残留強度における有効応力係数の値とそれらの応用

Values and Applications of Effective Stress Coefficients of Rocks at Peak Stress and Residual Strength

○藤井 義明¹, Dassanayake Anjula¹, 福田 大祐¹, 児玉 淳一¹

1. 北海道大学

岩石の変形を解析するには有効応力係数が必要であり、通常、多孔質体の弾性論に基づいて1本の供試体に対する弾性領域内の試験によって求めることができる。しかしながら、岩石の破壊を評価するためにはピーク応力における有効応力係数が必要である。その値は多段階改良破壊包絡線法により2本の供試体から求めることができ、岩石は弾性体ではないので、弾性領域において求められた値とは一致しない。一方、岩盤の変形を解析するには、岩石の弾性領域内の有効応力係数よりも、破壊させた岩石に静水圧を負荷して求める有効応力係数の方が適していると思われる。その値は実験で求めることもできるが、ほぼ1であることがわかっている。岩盤の破壊を評価するには岩石の残留強度状態における有効応力係数を用いるのが、上述の3種類の有効応力係数を用いるよりはよいと思われる。その値は改良破壊包絡線法により求めることができ、ピーク応力と弾性領域との中間的な値を示すことがわかっているが、今のところ試験には多数の供試体が必要であり、多段階試験の導入により必要な供試体数を減らすとともに測定結果のばらつきを減少させる必要がある。

キーワード：有効応力係数、改良破壊包絡線法、ピーク応力、残留強度、多段階三軸圧縮試験

1. はじめに

岩盤の変形・破壊を解析するために必要な有効応力係数は通常、多孔質体の弾性論に基づき岩石供試体に対する弾性範囲の実験結果から求められる。しかしながら、言うまでもないが、岩石は非弾性体であるし、岩盤には亀裂が存在しているので、このようにして求めた有効応力係数は、岩石の破壊や岩盤の変形・破壊の解析に用いることができるとは限らない。そこで、ここでは、そのような問題に使うべき有効応力係数の求め方について考察し、各種の有効応力係数を来待砂岩、稲田花崗岩、支笏溶結凝灰岩について求めた結果を比較・検討する。

2. どのような有効応力係数を使うべきか

2.1 岩石の変形

ボアホール周りの応力分布など、健全な岩石に対する応力解析には、通常の、弾性範囲の実験で求められた有効応力係数を用いることができると考えられる。

2.2 岩石構造物の破壊

ボアホールブレイクアウト・コアディスキング・水圧破碎などを考慮する際には、応力が破壊条件に達する。岩石のピーク応力における有効応力係数を求める方法として Failure Envelope Method が Franquet & Abass (1999)により提案されている。この方法は、いくつかの封圧で三軸圧縮試験を行い、間隙水圧を作用させない場合と作用させた場合とで、有効封圧を横軸に取ってモール円上に表した破壊条件が等しくなるように、有効応力係数の値を試行錯誤で求めるものである。同方法では、間隙水圧を作用させない場合に不飽和となっている可能性がある。また、有効応力係数の求め方が非能率的、かつ、不正確であり、さらに、1つの岩種のいくつかの封圧についてのみ適用されており、妥当性が十分検証されたともいえない。そこで、筆者らは Modified Failure Envelope Method (MFEM)を開発し、いくつかの岩石のピーク応力における有効応力係数を求めた(Dassanayake & Fujii, 2013, 2014)。MFEM について、多段階三軸圧縮試験を利用した方法(Dassanayake et al., 2014a, 2014b)を含めて説明する。

2.3 岩盤の変形

破壊条件から離れた応力状態における岩盤の解析には、圧縮破壊させた供試体の有効応力係数を用いるのが良いと思われる。

2.4 岩盤構造物の破壊

石油やLNGの地下備蓄空洞・放射性廃棄物貯蔵空洞など、ある程度以上の大きさを有する地下構造物周辺の亀裂を含む岩盤の破壊では、残留強度状態における有効応力係数を用いるのが良いと思われる。前述の MFEM において残留強度状態の有効応力係数を求めることができる。

3. MFEM

MFEM では、いくつかの封圧 P_c 下で、ある値の間隙水圧 P_p を作用させた場合と 0 MPa に制御した間隙水圧を与えた場合のピーク差応力を縦軸に、有効封圧 P'_c を横軸にとってプロットすると、

$$\alpha = \frac{P_c - P'_c}{P_p} \quad (1)$$

の場合に、間隙水圧がある値と 0 の場合の有効封圧が等しくなり、このときの α がピーク応力における有効応力係数となる (Fig. 1)。

縦軸に間隙水圧や有効応力係数に依存しない差応力を用いたことにより有効応力係数は(1)式で簡単に求めることができるようになった。同様な方法で残留強度についても有効応力係数を求めることができる。

ピーク応力における有効応力係数を求める際に通常の三軸圧縮試験を行うと、十数本の供試体が必要になり、試験が大変で、また、供試体毎の強度のばらつきにより有効応力係数の値もばらついてしまう。しかしながら、多段階三軸圧縮試験を応用するとわずか 2 本の供試体で有効応力係数を求めることができる。

試験の方法は以下のようなものである。まず、間隙水圧 0 MPa の供試体で適当ないくつかの封圧で多段階三軸圧縮試験を行う。載荷履歴の影響を小さくするために、ピークが確認された場合に一旦差応力を 0 にしてから封圧を増加させ、次の軸載荷を行う方法とする。次に、静水圧とそれより 1 MPa 小さい間隙水圧を作用させた供試体に軸載荷を行う。ピーク応力が確認されたら間隙水圧を減少させ、次の軸載荷を行う。最終の載荷は間隙水圧を 0 MPa に制御して行う。次に、有効封圧－最大差応力のプロットを行うが、この時、次式で供試体 2 の最大差応力 PDS_2 の補正を行う (Fig. 2)。

$$PDS'_2 = \frac{PDS_1^0}{PDS_2^0} \times PDS_2 \quad (2)$$

ここで、 PDS_i^0 は供試体*i*の間隙水圧0 MPaにおける最大差応力である。この補正により、供試体毎の強度のばらつきが軽減され、ばらつきの少ない有効応力係数を得ることができる。この補正を可能にするためには、間隙水圧を0 MPaまで低減した軸載荷を最後に行う必要がある。

今のところ、多段階三軸圧縮試験は残留強度については適用できない。これは、強度の収束値を確認するために多量のひずみが必要となり、試験装置のキャパシティを超えてしまうためである。

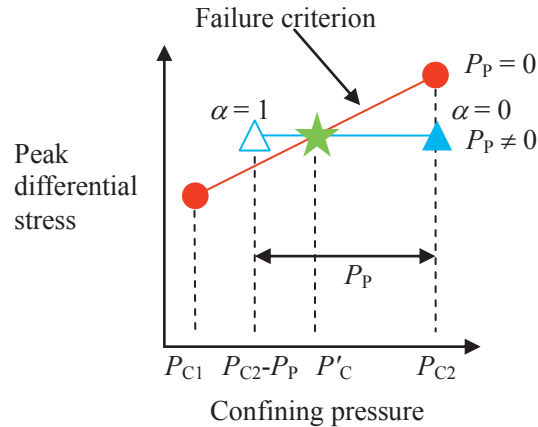


Fig. 1 A schematic diagram showing evaluation of effective stress coefficient using MFEM

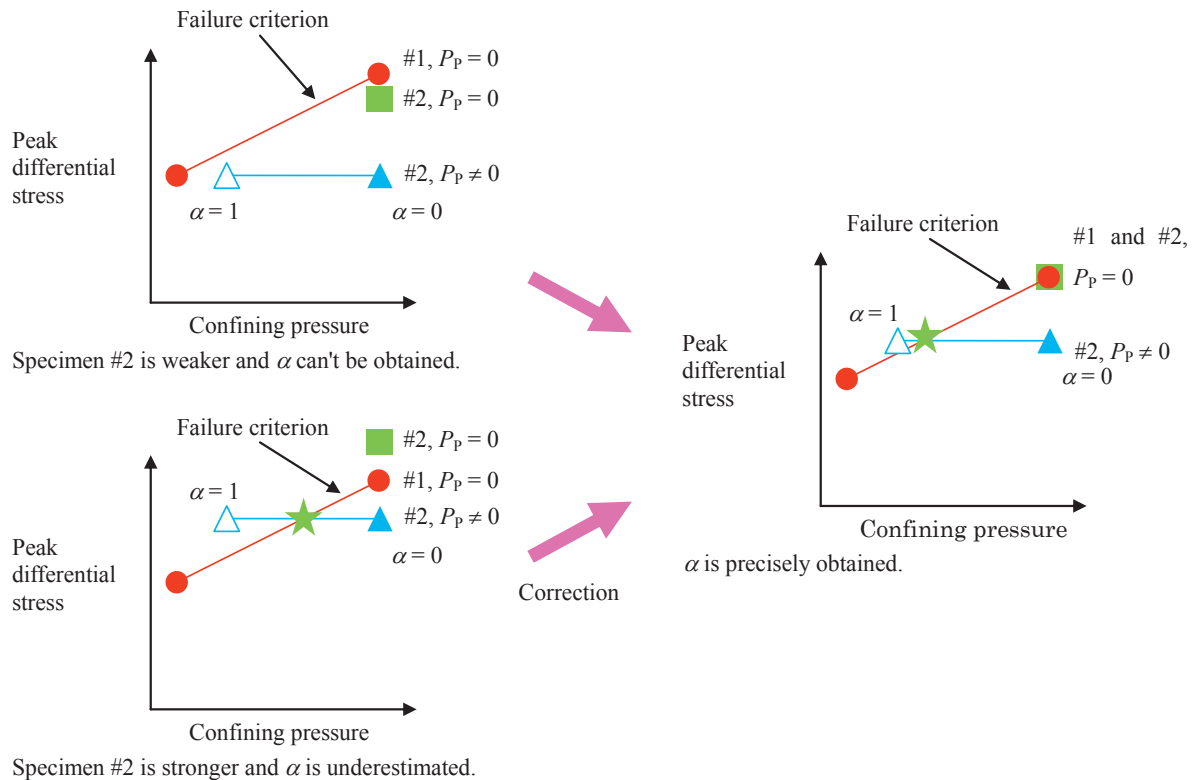


Fig.2 Correction of the peak differential stress for multistage tests.

3. 来待砂岩の結果

三軸圧縮試験では低有効封圧下においてぜい性破壊、高有効封圧下においては延性的な破壊がみられた (Fig. 3a)。

健全な岩石の弾性範囲の有効応力係数は、以下の方法で求めた。

- (1) クロスゲージを貼付した供試体に対して間隙水圧を 0 MPa に保って静水圧縮を行い有効封圧の関数として体積弾性率 K を求めておく。
- (2) クロスゲージを貼付した別の供試体に対して静水圧より 1 MPa 少ない間隙水圧を保って静水圧縮を行い、静水圧－体積ひずみ線図の直線部分の傾きより、その岩石固有の定数として鉱物粒子の体積弾性率 K_s を求める。なお、従来から静水圧と間隙水圧を等しくする、または、供試体を被覆しないなどの方法があるが、筆者らの環境ではひずみゲージの剥がれが頻発したため間隙水圧を静水圧より 1 MPa 小さくした。

定義より

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (3)$$

となる。得られた有効応力係数は、実験した範囲では有効封圧の増加に伴い 1 から 0.8 に低下した (Fig. 3b)。係数減少の原因は、主に、扁平なポアやマイクロクラックの閉鎖によると考えられる。

ピーク応力における有効応力係数を MFEM で求めたところ、健全な岩石の弾性範囲の有効応力係数より小さく、通常の方法・多段階三軸圧縮試験を用いた方法ともに、有効応力の増加に伴い 0.7 から 0.4 に低下した (Fig. 3b)。結果のばらつきは後者の方が小さい。係数減少の原因は、主に、扁平なポアやマイクロクラックの閉鎖によると考えられる。

封圧 2 MPa、間隙水圧 1 MPa で三軸圧縮破壊させた供試体を間隙水圧 1 MPa を保ったまま静水圧縮し、静水圧の増分 ΔP_c 、体積ひずみの増分 $\Delta \varepsilon_v$ から

$$K_f = \left(\frac{\Delta P_c}{\Delta \varepsilon_v} \right) \quad (4)$$

により、破壊した岩石の有効応力係数を求めた。体積ひずみの増分は、水の排出量の増分 ΔV_w で測定した空隙体積の変化と既に測定してある鉱物の体積弾性率から計算される鉱物の体積変化量との和として算出した。

$$\Delta \varepsilon_v = \frac{\Delta V_w}{V} + \frac{\Delta P_c}{K_s} \quad (5)$$

実験中の間隙水圧は封圧より低ければよく、たまたまここでは 1 MPa に保ったが、たとえば、他の実験との整合性を重視して 0 MPa でもよい。破壊した岩石の有効応力係数は、有効封圧とともにわずかに減少しているものの、実質的にはほぼ 1 である (Fig. 3b)。

残留強度状態における有効応力係数は、健全な岩石の弾性範囲における値とピーク応力における値との中間的な値、0.6～0.8 であり、有効封圧の影響は判然としない (Fig. 3b)。

4. 稲田花崗岩の結果

この岩石は、実験の範囲では、有効封圧が高い場合でもぜい性的に破壊した (Fig. 4a)。

健全な岩石の弾性範囲における有効応力係数は有効封圧の増加に伴い 0.8 から 0.7 に減少した (Fig. 4b)。係数減少の原因は、主に、マイクロクラックの閉鎖によると考えられる。

通常の三軸試験結果を用いた MFEM によるピーク応力における有効応力係数は大きくばらついたが、多段階三軸試験による値のばらつきは少なく、有効封圧 6 MPa の 0.7 から 14 MPa の 0.2 へ減少した。係数減少の原因は、主に、マイクロクラックの閉鎖によると考えられる。

破壊した岩石の有効応力係数は、ほぼ 1 であった (Fig. 4b)。

残留強度における有効応力係数は、大きくばらつき、求めることはできなかった (Fig. 4b)。

5. 支笏溶結凝灰岩の結果

この岩石は、有効封圧が低い場合に若干の応力低下をみせたものの、有効封圧が高い場合にはひずみ硬化した (Fig. 5a)。

健全な岩石の弾性範囲における有効応力係数は有効封圧が増加しても 0.092 から 0.9 にわずかに減少しなかった (Fig. 5b)。これは、火山ガスの発泡による扁平度の低いポアが卓越しているためである。

間隙水圧を与えた方がピーク差応力が小さくなる場合が多かった (Fig. 5c) ため、MFEM によるピーク応力における有効応力係数はほとんど求めることができなかった (Fig. 5b)。これは、高封圧下における火山ガラスで構成された岩石基質の破壊に伴う空隙崩壊 (Zaman et al., 1994) が生じ、エンドキャップ型の破壊包絡線となったためと考えられる。

破壊した岩石の有効応力係数は、ほぼ 1 であった (Fig. 5b)。

残留強度における有効応力係数は、有効封圧の増加に伴い1から0.2へ大きく減少した (Fig. 5b)。係数減少の原因は主に空隙崩壊によると考えられる。

6. 各種有効応力係数の間の関係

破断面の角度を30度と仮定して算出した破断面に作用する有効直応力を横軸とすると、ピーク応力における有効応力係数と健全な岩石の弾性範囲における有効応力係数は来待砂岩の場合、ほぼ同一直線上に乗っている。したがって、来待砂岩中の小規模な岩盤構造物の変形・破壊については、有効封圧の関数として算出した有効応力係数を用いて解析することができる。さらに、残留強度状態の有効応力係数も、精度はよくないが、ごく大雑把に言えば、その直線上に乗っており、有効封圧の関数として推定が可能である。

稲田花崗岩の場合は、精度がよくないが、健全な岩石の弾性範囲における有効応力係数とピーク応力における有効応力係数が直線上に乗っているとして解析することは可能と思われる。求めることのできなかった残留強度状態の有効応力係数も、同線上に乗っていると仮定すれば推定することは不可能ではない。

支笏溶結凝灰岩の場合は、低応力下と高応力下で直線が折れ曲がっており、高応力下における空隙崩壊を示していると考えられる。

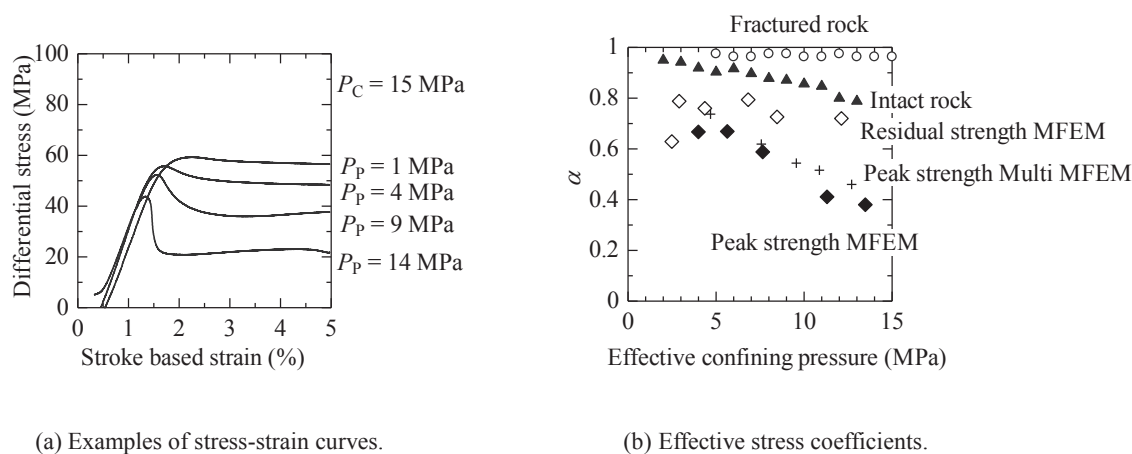


Fig. 3 Results for Kimachi sandstone.

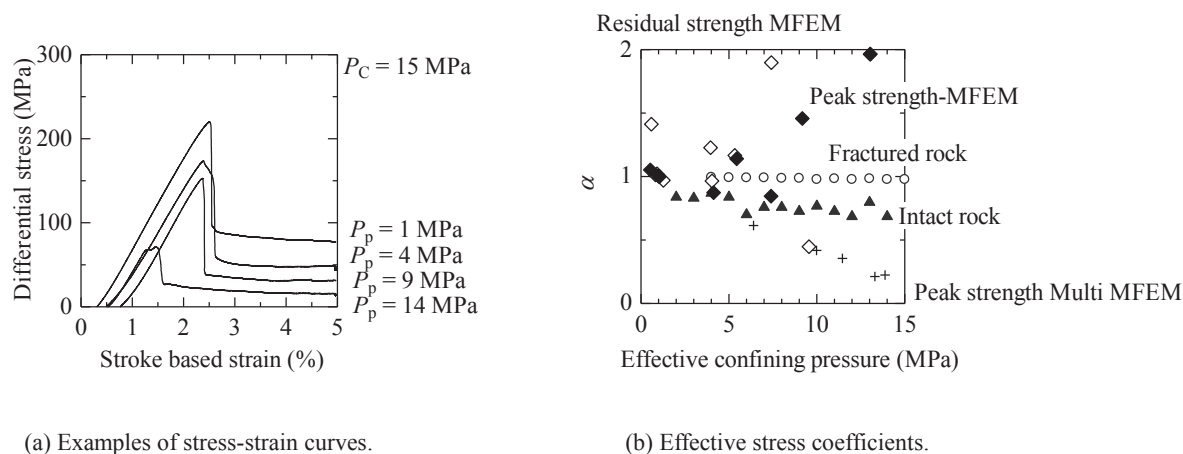
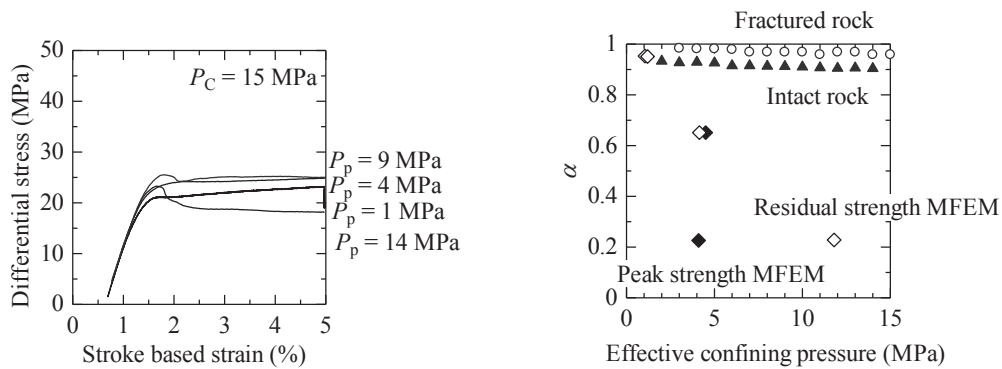
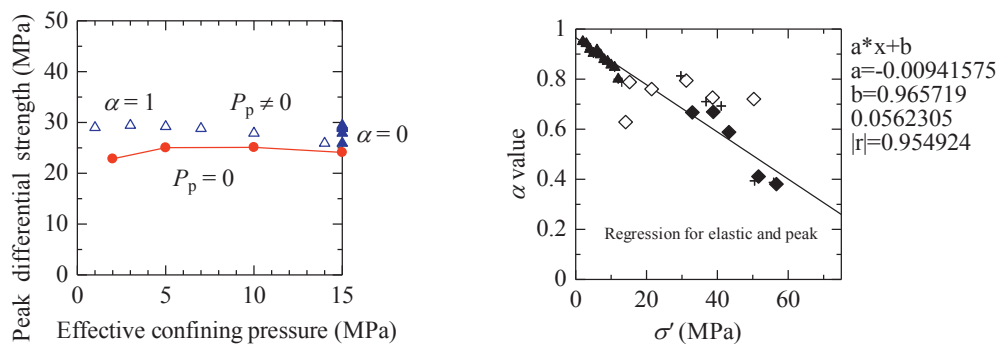


Fig. 4 Results for Inada granite.



(a) Examples of stress-strain curves.

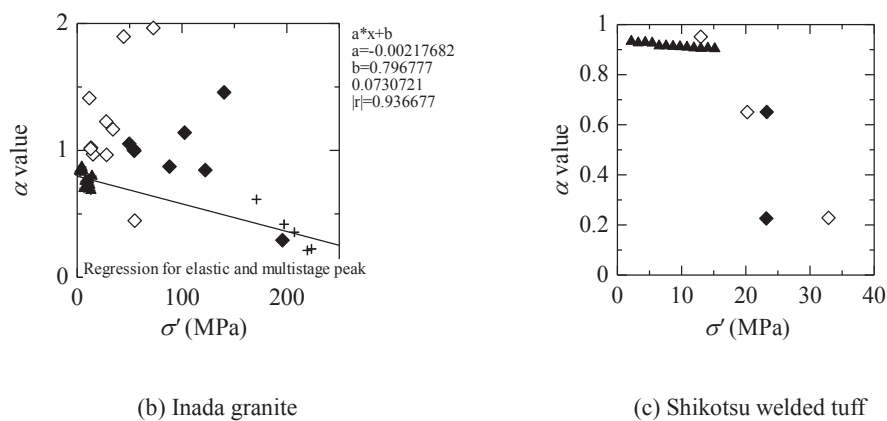
(b) Effective stress coefficients.



(c) Results of multistage test.

(a) Kimachi sandstone

Fig. 5 Result for Shikotsu welded tuff



(b) Inada granite

(c) Shikotsu welded tuff

Fig. 6 Effective normal stress vs. effective stress coefficient.

7. まとめ

来待砂岩・稲田花崗岩・支笏溶結凝灰岩のいくつかの条件下における有効応力係数を求め、比較した。主な結果を以下にまとめて示す。

ボアホール周辺の応力分布など、健全な岩石に対する応力解析に用いることができると考えられる、弾性範囲における有効応力係数は、既存の種々の方法はもちろん、ここで示した方法でも求めることができ、有効封圧とともに減少する。

ボアホールブレイクアウト・コアディスキング・水圧破砕など、岩石構造物の破壊を考慮する際に用いるべきと思われる、岩石のピーク応力における有効応力係数を求める方法として MFEM を提案した。特に、多段階三軸圧縮試験結果を利用すると载荷により

微視的構造が大幅に変わってしまうような岩石を除けば、2本の供試体から、ばらつきの少ない結果を得ることができる。当該有効応力係数は、健全な岩石における弾性範囲の有効応力係数より小さく、有効封圧の増加とともに減少した。

破壊条件から離れた応力状態における岩盤の解析における有効応力係数として使用可能と考えられる、圧縮破壊させた供試体の有効応力係数は、ここで示した方法で求めることができるが、実質上ほぼ1なので、わざわざ実験する必要はないかもしれない。

石油やLNGの地下備蓄空洞・放射性廃棄物貯蔵空洞など、ある程度以上の大きさを有する地下構造物の破壊の解析に用いることができると思われる、残留強度状態における有効応力係数はMFEMにより求めることができ、健全な岩石の弾性範囲における値とピーク応力における値との中間的な値を示した。ただし、現状では多段階三軸圧縮試験を用いることができないために、多数(今回の例では15本)の供試体を要し、また、供試体毎の強度のばらつきが結果に反映される。多段階三軸圧縮試験により残留強度状態における有効応力係数を求める方法の開発とその値に関する更なる検討が望まれる。

最後に、もちろん、破壊した岩石の破断面と岩盤の亀裂とは寸法が違う。岩盤の亀裂が引張によって形成したものであれば成因も違う。水圧破碎では引張破壊に対する有効応力係数が必要である。これらに関する検討は今後の課題としたい。

引用文献

- 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.
- Dassanayake, A.B.N. and Fujii, Y. (2013), Evaluation of Biot's Effective Stress Constant for Peak and Residual Strengths for Shikotsu Welded Tuff and Kimachi Sandstone by using Modified Failure Envelope Method, Proc. MMIJ Fall Meeting 2013 Sapporo, PY-6, p. 570, Hokkaido University, Sapporo, Sep. 3
- Dassanayake, A.B.N., Fujii, Y., Fukuda, D. and Kodama, J. (2014a in press), Significant Differences in Biot's Effective Stress Coefficient for Rocks within Elastic Region and Peak and Residual Strengths, Proc. ARMS8, Sapporo, Japan
- Dassanayake, A.B.N., Fujii, Y., Fukuda, D. and Kodama, J. (2014b, under review), Effective Stress Coefficient of Rocks for Peak and Residual Strengths, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.
- Franquet, J. A. and Abass, H. H., (1999). Experimental evaluation of Biot's poroelastic parameter - Three different methods, 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), June 7-9 Vail, CO, Balkema, Rotterdam, 349-355.
- Zaman, M., Roegiers, J.C. Abdulraheem, A., and Azeemuddin, M., (1994). Pore Collapse in Weakly Cemented and Porous Rocks. J. Energy Resources Tech, Vol. 116, pp. 97-103.