

(8) 最小主ひずみに基づいた岩石の新しい破壊規準を説明する一つのモデル

北海道大学工学部 ○藤井 義明
北海道大学工学部 石島 洋二

A Model Supporting New Rock Failure Criterion Based on Minimum Principal Strain

Yoshiaki FUJII, Hokkaido University
Yoji ISHIJIMA, Hokkaido University

Abstract

The authors have been proposing a criterion for brittle failure of rock. This criterion, named tensile strain criterion, denotes that brittle failure occurs when minimum principal strain reaches a critical value (critical tensile strain). It has been confirmed that critical tensile strain is not affected by experimental conditions such as confining pressure, loading rate, water contents, creep stress etc.

A model to explain the criterion has been developed. In this model, bonding material and particles in rock are idealized by trusses and pin connections, respectively. The model showed non-linear behaviors such as strain softening and residual strength state under biaxial compression, which are observed in actual rocks under triaxial compression. This correspondence implies the validity of the model.

Confining pressure dependency was not recognized in analyzed critical tensile strains. This should imply the propriety of the tensile strain criterion.

1. 緒言

筆者らは、引張ひずみ規準と名付けた岩石のぜい性破壊規準を提案している¹⁾⁻⁵⁾。同規準は次に示すきわめて簡単な式で表現される。

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{TC} \quad (1)$$

ここで、 ε_T は引張ひずみ（縮みを正とした場合の最小主ひずみ）である。 ε_T は、クラックやポアの周辺に存在する局所的な引張ひずみではなく、ある大きさの面積（長さ）内の平均的な量で、例えば、ひずみゲージや変位計等で計測する。また、当然のことながら、 ε_T には弾性ひずみ成分の他にダイラタンシー等に起因する非弾性ひずみ成分も含まれている。 ε_{TC} は限界引張ひずみと呼ばれ最大荷重点における引張ひずみと定義される。すなわち、(1)式は岩石のぜい性破壊が、引張ひずみがある限界値に達したときに生じることを意味している。

現在までに、少数の例外を除いて、圧裂引張下と単軸圧縮下における限界引張ひずみが等しいこと、三軸圧縮試験における限界引張ひずみが封圧に依存せず単軸圧縮下とほぼ等しい値を示すこと、限界引張ひずみが封圧、載荷速度、制御方法、含水率、クリープ応力等に依存しないこと等が明かにされている。

本規準は現在広く用いられている Coulomb の破壊規準や、Hoek and Brown の破壊規準に比べて、測定が容易な唯一つの力学定数で表現され、かつ、力学定数が諸条件に依存しないという長所を有する。

また、岩盤内空洞の安定性評価に応用する場合には、破壊条件式に代入すべき測定値が、容易に測定できる最小主ひずみ唯一つであるという利点を持つ。

本規準が実用化されれば岩盤工学に大きく貢献することが期待され、この観点から筆者らは本規準の適用範囲に関し、実験的な検討を多数行っている。しかしながら、従来から破壊規準をひずみによって表現する試みが多数なされている⁶⁾⁻¹³⁾にも関わらず、現在使用されることが稀であることを鑑みれば、真に本規準が実用化されるためには実験的な検討とともに、理論的な裏付けが必要であると考えられる。そこで本研究では、岩石を表現するための一つの理論モデルを開発し、同モデルについて引張ひずみ規準が成立するか検討する。

2. 理論モデル

岩石の変形・破壊挙動についてはマイクロクラックを含む連続体のモデルを用いて検討されることが多い。このようなモデルからは、破壊力学に基づいて破壊の初生に関する有益な知見を得ることができるものの、破壊後の挙動を導くことは困難であると考えられる。そこで、粒子間の結合力をトラス部材、粒子をピン接合部で模し、有限要素法による構造解析を行った。

2.1 線形解析

先ず、圧縮を受ける粒子の集合体の変形・破壊挙動に関して基礎的な知見を得ることを目的として、粒子間の結合力を一次式で近似した線形構造解析を行い、破壊時の巨視的なひずみを評価し、引張ひずみ規準が成立するか検討した。トラス部材の剛性を 1、粒子の集合体の厚みを 1 と仮定し、図 1 に示すような構造物を紙面の上下から圧縮する場合を解析したところ、上下方向の大きさ 1 の圧縮応力に対応して当該構造物は左右方向に相当量伸びることが明かになった(図 2)。引き伸ばされる部材は 1 ~ 12 であり、部材 3、5、8、10 で最も引き伸ばされる量が多い。

図 1 で荷重を左右方向とした場合も、平均的なヤング率やポアソン比には異方性がみられるものの、やはり一部の粒子間の距離が引き伸ばされることがわかった。

次に、三軸圧縮試験を模して、図 1 と同じモデルについて、上下・左右から大きさ 1 の等方圧を載荷し、次に、上下方向の応力のみを増加する場合について、先程の解析結果を重ね合わせて解を導いた。

破壊は、ある二つの粒子間距離が 0.45 (これは、上下方向から大きさ 1 の応力で単軸圧縮したときの部材 3、5、8、10 の伸びに相当する) だけ引き伸ばされたときに初生すると仮定し、破壊の初生時の状態を Coulomb の条件式や破壊初生時の軸ひずみ(限界圧縮ひずみ)、横ひずみ(限界引張ひずみ)で記述すると表 1 のようになった。内部摩擦角は実際の岩石と類似の

値(載荷方向に応じて 30° 、あるいは、 17.9°)を示している。単軸圧縮強度や限界引張ひずみの異方性(載荷方向が結果に及ぼす差異)は小さく、内部摩擦角や限界圧縮ひずみの異方性は大きい。限界圧縮ひずみは側圧に大きく依存しているが、限界引張ひずみの側圧依存性は小さい(単軸圧縮強度と

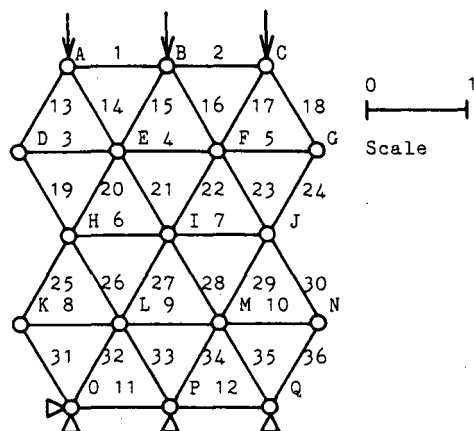


図 1 ピン接合トラスによる岩石のモデル(モデルを上下に圧縮する場合)

等しい側圧の作用でも単軸圧縮状態に比べて 20 % しか減少していない)。上記三つの破壊規準を比べると、試験条件に対する依存性は引張りずみ規準がもっとも小さく、この意味で優れているといえる。

2. 2 非線形解析

実際の岩石の変形には、破壊前にも非線形挙動が見られ、破壊後はひずみ軟化～残留強度状態を示す。前節のモデルではこれらの挙動を正確に表現することはできない。そこで、粒子間の結合力 F として以下のモース関数を導入した。

$$F = 2 U \alpha \left[\exp \{ - \alpha (r - r_0) \} - \exp \{ - 2 \alpha (r - r_0) \} \right] \quad (2)$$

ここで、 U 、 α はそれぞれエネルギー、 r^{-1} のディメンジョンを持つ定数、 r は粒子間距離、 r_0 は平衡状態における粒子間の距離である。元々(2)式は二つの原子間の結合力を表すために用いられる関数であり¹⁴⁾、原子間距離が縮まると反発力が生じ、引き伸ばされると引力が生じることを示している。引力は上に凸な非線形性を示し、原子間距離がある程度 (α^{-1} に略等しい) 引き離されると最大値を示し、その後減少する (図 3)。

図 1 のようなモデルについて構造解析を行うと、圧縮を受ける材料についても一部の粒子間の距離が引き伸ばされ、以下のように理論強度が導かれることがわかった。解析にあたっては図 1 のモデルにおいて $U = 1$ 、 $r_0 = 1$ 、 $\alpha = 10$ を仮定し、大きさ 0、5、10 の等方圧を作用させた後、圧縮方向に軸変位を 0.025 づつ 0.5 まで加えた。

各境界条件下における非線形解は以下のような反復計算によって求めた。

- (1) トラス部材の剛性として無載荷状態 ($F = 0$) の値を与え線形解析を行う。
- (2) 得られた部材の伸縮に対応した見掛けの剛性を求め、これを入力データとして再度線形解析を行う。
- (3) (2) を繰り返し、見掛けの剛性の修正量が十分小さくなった場合に解が収束したものとする。

無載荷状態におけるトラス部材の剛性の初期値は、(2) 式を粒子間距離 r で微分することにより得られた傾き S を示す以下の式 (図 3) に $r = r_0$ を代入して $2 U \alpha^2$ と評価して用いた。

$$S = 2 U \alpha^2 \left[2 \exp \{ - 2 \alpha (r - r_0) \} - \exp \{ - \alpha (r - r_0) \} \right] \quad (3)$$

また、トラス部材の見掛けの剛性は、 $r = r_0$ 、 $F = 0$ の点から変位-荷重線図上の点に引いた割線の傾き、すなわち、 $F / (r - r_0)$ として評価した。

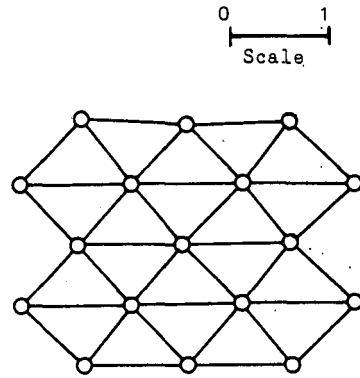


図 2 図 1 のモデルを上下に圧縮した場合の変形

表 1 線形解析の結果得られた破壊の初生条件 (σ_3 は側圧)

载荷方向	上下	左右
Coulomb	1.00 + 3.00 σ_3	1.22 + 1.89 σ_3
限界圧縮ひずみ	0.91 + 2.31 σ_3	1.54 + 1.97 σ_3
限界引張りひずみ	0.42 + 0.00 σ_3	0.52 - 0.11 σ_3

解析結果は全体的にひずみの値が大きいものの、実際の岩石の変形・破壊挙動との間に以下のような類似点がみられた(図4)。

(1) 応力とひずみの間にひずみ軟化挙動を含む非線形挙動が現われている。

(2) 側圧の増加とともに最大荷重、残留強度がともに増加している。

(3) 側圧の増加とともに構造物が変形しにくくなっている。

(4) 残留強度状態の応力が、横ひずみが縮みから伸びに移行する点の軸応力の値と等しくなっている¹⁵⁾。

最大荷重点における巨視的なひずみは図5のようであり、限界圧縮ひずみは側圧の増加とともに増加しているが、限界引張ひずみは側圧に依存していない。すなわち、引張ひずみ規準は試験条件に依存していないことがわかる。

3. 結言

引張ひずみ規準を理論的に裏付けることを目的として岩石を粒子の集合体として表す一つのモデルを開発した。粒子間の距離の変化量と結合力の関係を線形関数で与えた場合、破壊の初生について引張ひずみ規準が成立することが明かになった。

一方、粒子間の距離の変化量と結合力の関係をモース関数で与えた場合には、ひずみ軟化挙動や残留強度状態を含む実際の岩石と同様な非線形挙動が得られ、最大荷重点について引張ひずみ規準が成立することが明かになった。

本モデルに関して、今後、弱面や三次元粒子配列構造を導入することにより、引張ひずみ規準をより詳細に検討できるようになり、また、岩石の変形・破壊挙動一般についても有益な知見が得られるものと期待される。

参考文献

- 1) 藤井義明・木山保・石島洋二：岩石の新しい破壊規準、資源と素材、Vol.109、p. 549-550、(1993)
- 2) 藤井義明・木山保・石島洋二：岩石の新しい破壊規準とその応用、平成5年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料、[E]岩盤力学と情報化探鉱、p. 5-8、(1993)

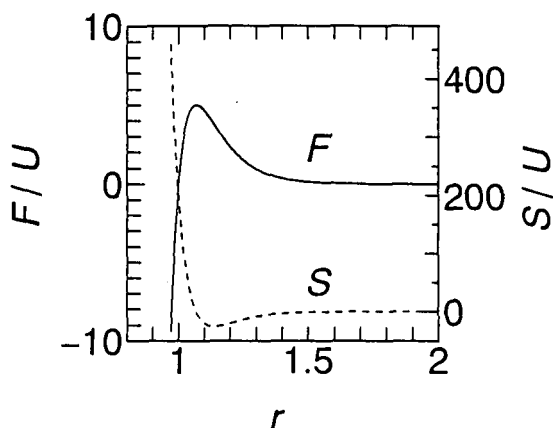


図3 粒子間の距離 r と結合力 F の関係 ($r_0 = 1$ 、 $\alpha = 10$)、 S は $r - F$ 線図の傾き

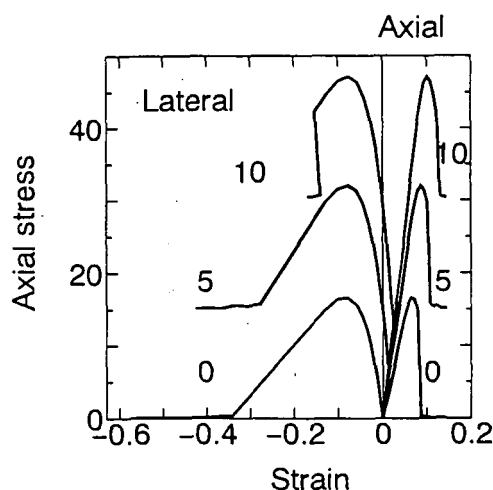


図4 非線形解析の結果得られた限界ひずみと軸圧の関係

- 3) 藤井義明・木山保・石島洋二：引張ひずみ規準に関する研究、資源と素材、Vol.110、No.3、p. 211-214、(1994)
- 4) Fujii, Y., Kiyama, T. and Ishijima, Y.: A New Criterion for Brittle Failure of Rock, New Horizons in Resources Handling and Geo-engineering (Proc. MMII / AusIMM Joint Symp., Ube, Japan), p.469-476, (1994)
- 5) 藤井義明：引張ひずみ規準について、地質調査所主催大深度地下空間開発技術研究講演会資料、(1994)
- 6) Bridgman, P.W.: Reflections on Rupture, J. Appl. Phys., Vol.9, p.517-528, (1938)
- 7) Nadai, A.: Theory of Flow and Fracture of Solids, Vol.1, 2nd Edition, McGraw Hill, New York, p.207-209, (1950)
- 8) Carino, N.J. and Slate, F.O.: Limiting Tensile Strain Criterion for Failure of Concrete, J. Am. Concrete Inst., Vol.73, p.160-165, (1976)
- 9) Kotte, J.J., Bérczes, Z.G., Gramberg, J. and Seldenrath, Th.R., Stress-strain Relations and Breakage of Cylindrical Granitic Rock Specimens under Uniaxial and Triaxial Loads, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.6, p.581-595, (1969)
- 10) Stacey, T.R.: A Simple Extension Strain Criterion for Fracture of Brittle Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, p.469-474, (1981)
- 11) Hatano, T.: Theory of Failure of Concrete and Similar Brittle Solid on the Basis of Strain, Int. J. Frac. Mech., Vol.5, No.1, p.73-79, (1969)
- 12) Tsuboi, C.: Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock and Strength of the Earth's Crust, J. Phys. Earth., Vol.4, No.2, p.63-66, (1956)
- 13) 桜井春輔・川嶋幾夫・大谷達彦：岩石の限界ひずみに対する環境要因の影響について、土木学会論文集、No.463/III-22、p.177-180、(1993)
- 14) 日本材料学会編：破壊と材料、第3版、p.84、裳書房、(1992)
- 15) 藤井義明・木山保・児玉淳一・石島洋二：岩石の三軸試験時の残留強度に関する考察、資源・素材学会平成6年度春季講演会講演要旨集、p.109-110、(1994)

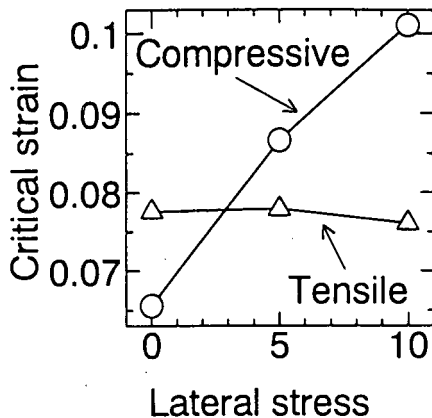


図5 非線形解析の結果得られた応力-ひずみ線図