

亀裂発生・進展解析モデルを用いた岩石の破壊挙動に関する検討

愛媛大学大学院 学生会員

○津曲康輝

愛媛大学大学院

正会員

安原英明

愛媛大学大学院

正会員

木下尚樹

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分や高温岩体地熱発電など、地下岩盤の利用法は年々拡大しているが、その長期利用性や安定性の評価には多くの課題を残している。特に岩盤内に発達する亀裂は力学・水理学特性に大きな影響を与えると考えられていることから、岩盤中の微小亀裂の発生や進展等の詳細な予測が必要不可欠となる。そこで本研究では Wei et al.¹⁾が提案している不連続体理論に基づき、引張・せん断の破壊現象についてそれぞれ圧裂引張試験および一軸圧縮試験の解析を実施し、岩石の破壊挙動に関する検討を行う。

2. 支配方程式

本研究はせん断と引張による損傷を区別するため、それぞれに以下に示す破壊判定式を用いて破壊判定を行う。

$$\text{引張： } F_1 \equiv \sigma_1 - f_{t0} = 0 \quad (1)$$

$$\text{せん断： } F_2 \equiv -\sigma_3 + \sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - f_{c0} = 0 \quad (2)$$

ここで、 F_1 ：引張破壊基準関数 [Pa]、 F_2 ：せん断破壊基準関数 [Pa]、 σ_1 ：最大主応力 [Pa]、 σ_3 ：最小主応力 [Pa]、 f_{t0} ：一軸引張強さ [Pa]、 f_{c0} ：一軸圧縮強さ [Pa]、 ϕ ：内部摩擦角 [°]である。上記の判定式を基に、損傷度を定義するため、次式で表される損傷変数を算出する。

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \quad \text{and} \quad F_2 < 0 \\ 1 - |\varepsilon_{t0} / \varepsilon_1|^n & F_1 = 0 \quad \text{and} \quad dF_1 > 0 \\ 1 - |\varepsilon_{c0} / \varepsilon_3|^n & F_2 = 0 \quad \text{and} \quad dF_2 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 D ：損傷変数 [-]、 ε_1 ：最大主ひずみ [-]、 ε_3 ：最小主ひずみ [-]、 ε_{t0} ：最大引張ひずみ [-]、 ε_{c0} ：最大圧縮ひずみ [-]、 n ：構成係数 [-]である。以上で算出した損傷変数を基に、次式のように岩盤の力学パラメータを変化させ、岩盤内の損傷による劣化を考慮する。

$$E = (1 - D)E_0 \quad (4)$$

ここで、 E ：損傷領域のヤング率 [Pa]、 E_0 ：初期ヤング率 [Pa]である。以上の破壊判定、損傷変数の算出およびヤング率の低下を繰り返すことで、弾性領域において損傷の有無を判別することができる（図1）。

また、本解析では岩盤の不均質性を考慮するため、次式で表されるワイブル分布を用いることで、ヤング率および強度を不均質に分布させる（図2）。

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{m-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{u_0} \right)^m \right) \quad (5)$$

ここで、 m ：形状定数 [-]、 u ：各物性値、 u_0 ：各物性値の基準値である。

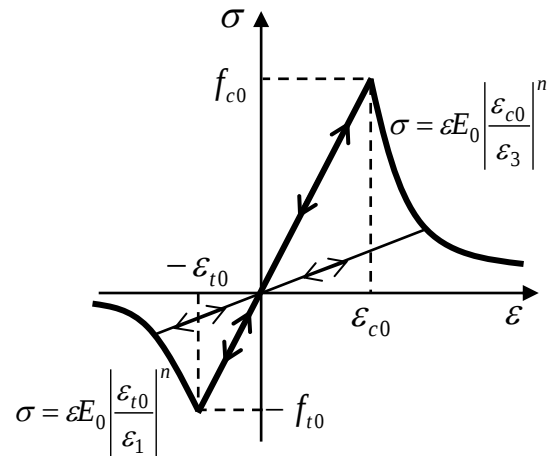


図1 解析内応力ひずみ関係

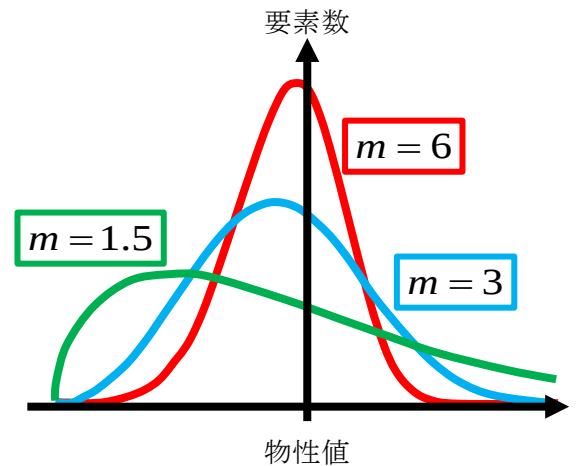


図2 各形状定数による物性値の分布比較

表1 力学パラメータ

ヤング率	59.9 [GPa]
ポアソン比	0.25
引張強さ	7.7 [MPa]
一軸圧縮強さ	147.6 [MPa]

3. 圧裂引張試験解析

本研究で実施した圧裂引張試験，一軸圧縮試験の結果より得られた力学パラメータを表1に示す．また，図3左側には圧裂引張試験の実験および解析結果をまとめる．図3左下の応力ひずみ曲線で引張応力が最大となった点において，解析領域中央から上下方向へ引張による損傷領域が進展していく様子が確認された．また損傷域が下端の固定点付近まで伸びると，左右2方向へ広がり，境界まで到達した．この亀裂の広がり方は実際の供試体破壊状況にも見受けられる．また，試験結果および解析結果の応力-ひずみ関係は概ね一致していることがわかる．

4. 一軸圧縮試験解析

図3右側には一軸圧縮試験の実験および解析結果をまとめる．図3右上に示す応力ひずみ曲線の降伏点に到達するまでは解析領域全体に微細な損傷域が見られたが，明確な亀裂として進展することはなかった．しかし降伏点に到達すると急激なせん断による損傷域の進展が見られた．せん断の損傷域は解析領域を横断するように斜め方向に進展し，一軸圧縮試験のせん断破壊で見られる斜め方向のすべり面を示していることが確認された．また，応力ひずみ関係もほぼ一致しており，解析モデルの妥当性が確認される．

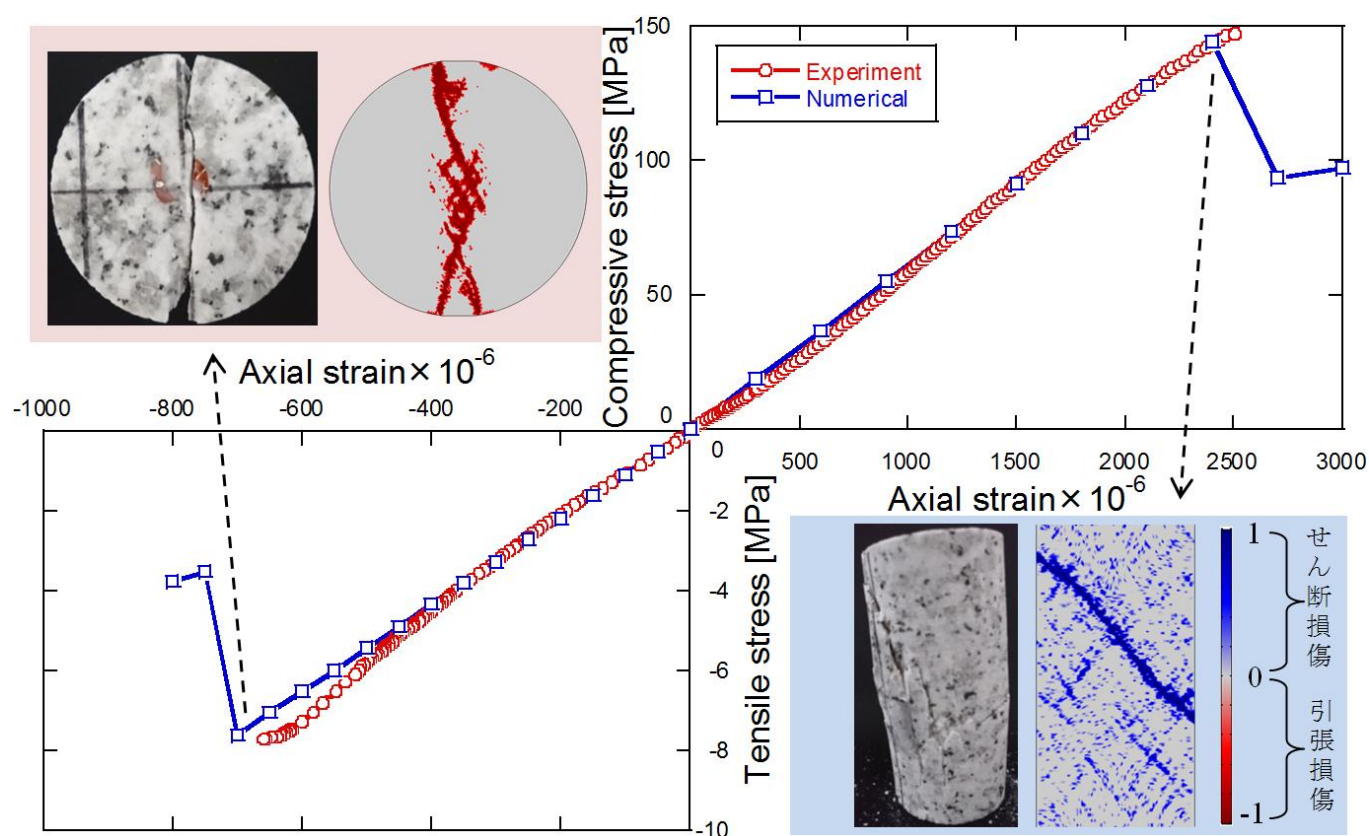


図3 各試験での応力-ひずみ関係および破壊状況

5. おわりに

本研究では，圧裂引張試験および一軸圧縮試験を実施し，解析を行った．解析では明確な亀裂の広がりが見られ，引張，せん断のいずれの破壊状態においても損傷域の分布や応力，ひずみの状態など高い精度で再現できていることを確認した．したがって本解析モデルは岩盤の破壊現象を十分に考慮できるとされることから，今後はさまざまな実問題への適用を図りたい．

参考文献

- 1) C.H. Wei, W.C. Zhu, Q.L. Yu, T. Xu, S. Jeon : Numerical simulation of excavation damaged zone under coupled thermal-mechanical conditions with varying mechanical parameters, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences , Vol.75, pp.169-181, 2015