

粒状体解析手法による岩石の破壊靱性試験の解析

船津 貴弘^{1*}・李 茜¹・石川 昌義²・米田 直広¹・清水 則一¹

¹山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²中電技術コンサルタント株式会社 (〒734-8510 広島県南区出汐2-3-30)

*E-mail: funatsu@yamaguchi-u.ac.jp

岩盤の亀裂の進展は、不連続体解析手法の一つである粒状体解析手法により再現可能であることが報告されている。しかしながらこの手法では入力値として岩盤の物性をそのまま入力することができず、適切な微視的パラメータを選定する必要がある。さらに、岩石の亀裂進展問題に適用する場合には岩石の亀裂の進展抵抗を定量的に表す破壊靱性値をも考慮する必要がある。そこで本研究ではこのような問題を検討することを目的として岩石の破壊靱性試験の解析を行い、解析結果の破壊靱性値と実験結果との比較を行った。

Key Words : *particle flow code, fracture toughness, crack propagation, micro-scopic parameters*

1. はじめに

近年、将来に向けて高レベル放射性廃棄物の地層処分場など、地下数百メートル以深の地下深部に岩盤構造物の建設が計画されている。しかし、大深度における岩盤の力学特性や地質条件は不確定な要素が多く、設計時に検討すべき項目が多数存在する。例えば、地山の応力状態や対象とする地山の断層などを含む地質の条件があげられる。通常、地圧は深度に比例して増大する。したがって、深部における応力は非常に大きな値を取ることが予想される。そして、このような高応力下においては、たとえ良好な地山であっても岩盤掘削の影響によって発生した亀裂による岩盤構造物の破壊が懸念される。

また、断層が広く分布しているわが国においては、この断層の存在も検討すべき項目となる。他方地下数百メートルから1000メートルを対象とした岩盤構造物建設の事例のなかで、立坑では高角度で立坑と交差する断層・破碎帯等の脚部を掘削することにより発生するいわゆる「高抜け現象」と呼ばれる坑壁の崩壊現象が発生している。すなわち断層などの欠陥が岩盤の安定性に大きく影響を及ぼしている。

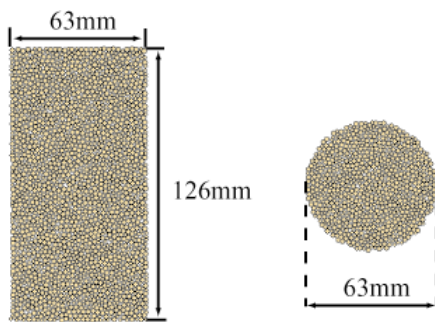
このような欠陥を持つ材料の安定性を評価するには破壊力学に基づいた検討が必要である。しかしながら、破壊力学パラメータである破壊靱性を岩盤に利用する場合には、岩盤に潜在する亀裂をいかに取り扱うかが難しい。

従来の岩盤力学ではこの潜在亀裂を岩盤固有の特性として扱い、岩盤の強度や変形特性に取り込むことで対処してきた。また、岩盤構造物の安定性の評価に一般的に使用される、連続体解析手法では材料の分離などを表現するのは困難である。ただし、先述した断層を起点とした破壊の現象を明らかにし、有効な対処法を決定するには岩盤中の亀裂の進展挙動を考慮する必要がある。また、放射性廃棄物の地層処分では、建設場所として花崗岩をはじめとする結晶質岩と同時に堆積岩についても検討されており、亀裂の進展挙動は両者で異なることが想定される。

そこで本研究では、亀裂の進展など不連続体的な挙動を再現することができる個別要素法に基づく粒状体解析に着目した。この粒状体解析を用いて岩石の亀裂の進展挙動を明らかにすることを目的とし、数値解析を行なう際に必要な入力パラメータと岩石の力学特性との同定を行なった。さらに、破壊靱性試験の解析を実施し室内試験の結果と比較し、粒状体解析手法の岩石の亀裂進展問題に対する適応性の検討を行った。なお粒状体解析にはPFC2D¹⁾を用いた。

2. 粒状体解析における微視的パラメータの選定

粒状体解析では、弾性係数やポアソン比といった巨視



(a) Biaxial test (b) Brazilian test

図-1 二軸圧縮試験解析モデルおよび圧裂引張試験も解析モデル

表-1 解析パターン

Contact Bond	
$R_{min} = (0.2705, 0.5140, 1.0820, 3) \text{ mm}$	
$E_c = (31, 62, 124) \text{ GPa}$	
$(k_n/k_s) = (1, 2.5, 5)$	
$\mu = (0.25, 0.5, 0.75)$	
Parallel Bond	
$E_c = (31, 62, 124) \text{ GPa}$	
$k_n/k_s = (1, 2.5, 5)$	
$\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c(\text{mean}) = (50, 157, 300) \text{ MPa}$	
$\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c(\text{std.dev}) = (0, 36, 72) \text{ MPa}$	

的な物性値を直接入力することはできない。したがって二軸圧縮試験および圧裂引張試験を行い、巨視的な物性値と粒状体解析で使用する微視的な入力値との相関を予め明らかにしておく必要がある²⁾。

(1) 二軸圧縮試験および圧裂引張試験

a) 解析条件

二軸圧縮試験では側圧を一定に保ち、軸方向に等変位载荷を行い、軸方向応力を増加させていく。二軸圧縮試験の解析モデルを図-1(a)に示す。供試体サイズは縦126.8mm×横63.4mmとしており、その領域に指定した粒径の粒子を発生させる。圧裂引張試験では、図-1(b)に示す解析モデルを作成し、この試験片を挟む壁に等変位速度を与えることで試験を行なった。その間の载荷荷重の最大値から引張強さを算出した。

解析パターンとしては、粒径、接触係数、コンタクトボンドの鉛直方向剛性とせん断方向剛性の比、粒子間摩擦係数、パラレルボンドの接触係数、パラレルボンドの鉛直方向剛性とせん断方向剛性の比、パラレルボンドの強度および強度の標準偏差の8通りを設定し、それぞれについて3ケース（粒径のみ4ケース）、そして側圧を0.1MPa, 10MPa, 70MPaに変化させ計73ケースの解析を行った。また、供試体の解析パターンを表-1に示す。表中の下線部分は解析の基本パラメータである。一つの検討項目を変化させる時に、他の項目を下線部のパラメー

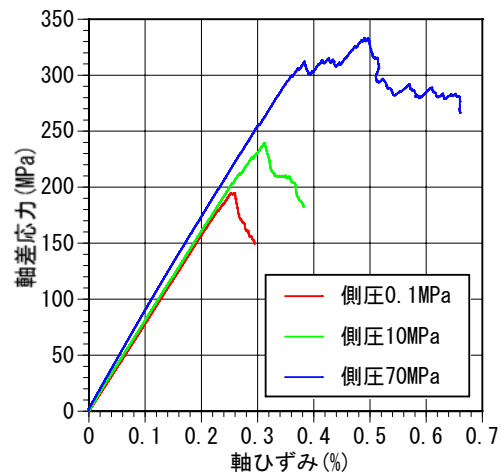


図-2 軸差応力 - 軸ひずみ曲線

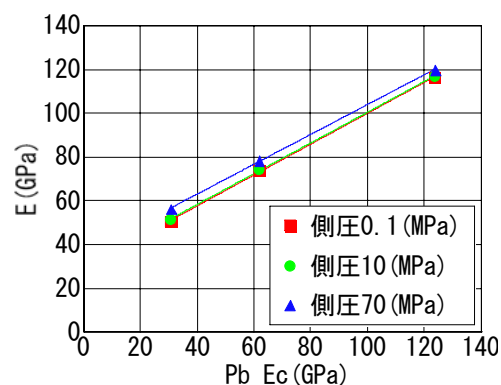


図-3 弾性係数とパラレルボンドの接触係数との関係

タに固定して解析を行なう。解析では応力、ひずみのデータを回収しそれらから、弾性係数、ポアソン比、粘着力および内部摩擦角、引張強さを計算した。

b) 解析結果

図-2に解析結果である軸差応力 - 軸ひずみ曲線の一例を示す。同図が示すように側圧の増加と共に最大応力の増大および最大応力後の領域での挙動の延性化が確認できる。

図-3は巨視的な物性値である弾性係数と粒状体解析の微視的パラメータの一つであるパラレルボンドの接触係数との関係を示す。同図より微視的パラメータと巨視的パラメータの相関が分かり、任意の想定物性値に対して微視的パラメータを選択することができる。

(2) 微視的パラメータと岩石の力学特性との関係

これまでの結果に基づいて、岩石の巨視的な力学定数と粒状体の微視的パラメータの関係を明らかにすることにより任意の物性を持つ岩石に対して適切な入力値を設定する。

表-2 来待砂岩の力学特性³⁾

σ_c	σ_t	E_{50}	ν
(MPa)	(MPa)	(GPa)	
59.0±2.5	4.82±0.12	8.23±1.43	0.22±0.10

表-3 解析結果

	σ_c	σ_t	E_{50}	ν
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	
ケース A	15.3	5.08	8.02	0.19
ケース B	59.4	17.1	7.85	0.20

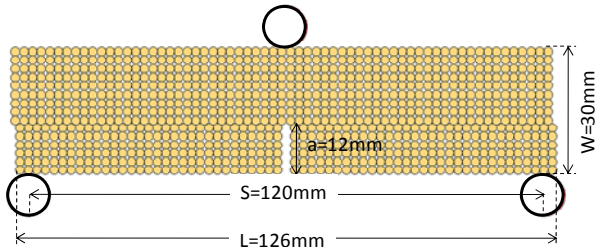


図-4 解析モデル

(3) 来待砂岩の入力値の選定

本報告では岩石試料として島根県産の来待砂岩を想定した。表-2に来待砂岩の力学特性を示す。解析に必要な入力値は前節までの結果から二軸試験および圧裂引張試験を行い来待砂岩の物性に適合するように設定した。ただし粒状体解析手法では主として粒子の形状に起因して、圧縮強さと引張り強さを同時に満たすことが難しい。そこで本報告では引張り強さとヤング率、ポアソン比を合わせたケース（ケースA）と一軸圧縮強さとヤング率、ポアソン比を合わせたケース（ケースB）の2ケース設定した。両者の解析結果を表-3に示す。ただし、モードI破壊靱性が開口亀裂の進展抵抗を表すこと、およびモードI破壊靱性と引張り強さに相関があること⁴⁾より、以下の解析ではケースAの入力値を用いることとする。

3. 破壊靱性試験

(1) 破壊靱性試験の解析

破壊靱性試験法としてSENRBB(Single Edge-Notched Round Bar in Bending)試験を想定した解析を行う。解析モデルを図-4に示す。供試体の寸法に相当する領域に単一粒径の粒子を整列に配置した。またノッチはノッチ相当領域の粒子に存在する粒子を消去することで作成し、ノッチ先端の中心に粒子間が位置するようにノッチの上方に位置する粒子は半径分ずらして配置した。ただし、本解析は2次元解析であることから実際には円柱形供試体のSENRBB試験片とは異なり長方形供試体のSC3PB (a single-edge

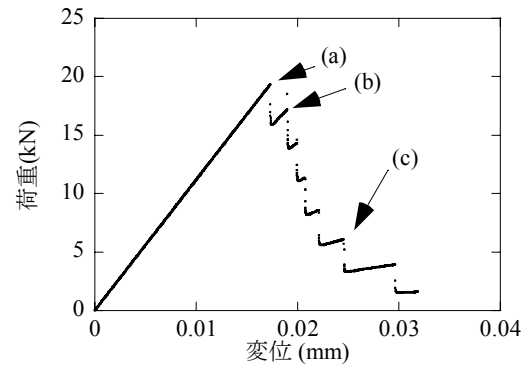


図-5 解析による荷重 - 変位曲線

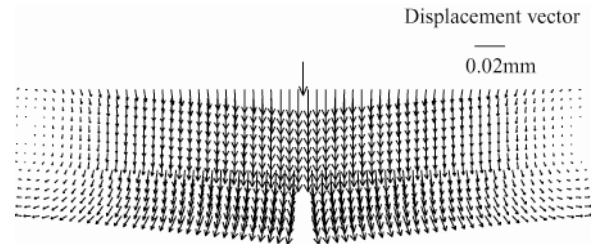


図-6 変位分布図

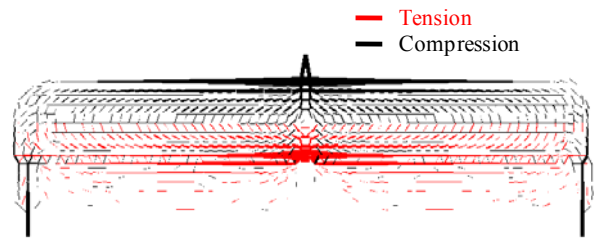


図-7 接触力分布図

straight-through cracked rectangular plane in three-point bending) 供試体に相当している。SC3PB試験片を用いるモードIの破壊靱性値 K_{IC} は次式(1)で表わされる⁵⁾：

$$K_{IC} = \frac{FS}{BW^{3/2}} f(\alpha) \quad (1)$$

ここで、Fは最大荷重(N)、Sはスパン長さ(m)、Bは試験片厚さ(m)、Wは試験片幅(m)、aは人工亀裂の長さ(m)である。 α は $(\alpha=a/W)$ である。また、無次元化された応力拡大係数は次式(2)で示す。

$$f(\alpha) = \frac{3(\alpha)^{1/2} [1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)]}{2(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}} \quad (2)$$

(2) 実験結果と解析結果の比較

図-5に解析結果の荷重-変位曲線を示す。同図から最大荷重までは、弾性的な挙動を示していることが分かる。さらに最大荷重は 19.4kN であり、式 (1) より破壊靱性値は $0.886\text{MPam}^{0.5}$ と算出される。この値は船津らの室内試験³⁾から得られた破壊靱性値 $0.592\text{MPam}^{0.5}$ より約 1.3 倍大きい値である。

次に、最大荷重時の各粒子の変位分布図と粒子間に働く力であるコンタクトフォースの分布図をそれぞれ図-6、

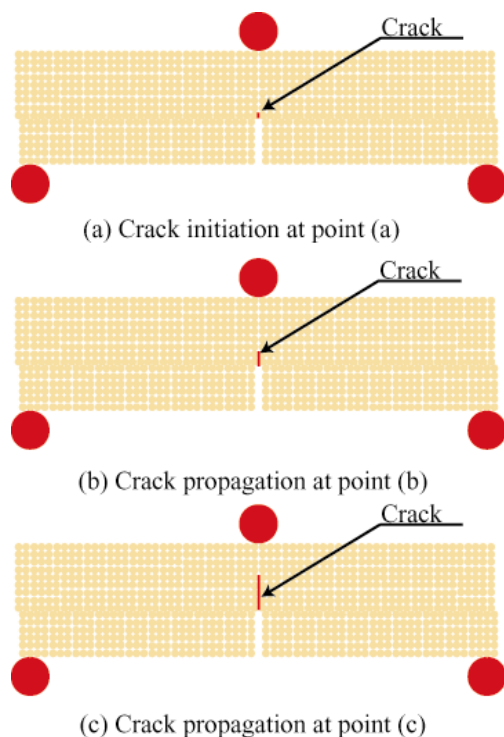


図-8 解析中の亀裂進展分布

図-7に示す。変位分布図よりノッチの開口変位の様子がわかり、それに対応するようにノッチの先端には引張力が働いており、応力集中が形成されていることが分かる。また、解析中の亀裂進展過程を図-8に示す。図中の(a),(b),(c)は図-5のそれに対応している。同図より亀裂は荷重が最大値に到達したときに進展し始めており、その後荷重の低下とともに亀裂が進展していることが分かる。

4. まとめ

本研究では2次元粒状体解析手法により、三点曲げによる破壊靱性試験の再現解析を行った。その結果、

- (1)粒状体解析法によって、硬岩の二軸圧縮試験及び圧裂引張試験をシミュレートし、粒状体解析の微視的パラメータと岩石の力学定数を対応づけた。
- (2)粒状体解析手法により得られた破壊靱性値は、実験値のそれに対して約1.3倍になった。
- (3)粒状体解析手法によりノッチの開口変位やノッチ先端の応力集中、亀裂の進展過程を確認することができた。

謝辞：本研究の一部は科研費（平成18年度、19年度、研究代表者：船津貴弘、課題番号：18860058）の助成を得て行ったことを付記する。

参考文献

- 1) ITASCA Consulting Group ,Inc:PFC2D, Version3.0 FISH in PFC2D 2002.
- 2) D. O. Potyondy, P. A. Cundall :A bonded-particle model for rock, *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sci.*, 41, pp.1329-1364, 2004.
- 3) 船津貴弘, 瀬戸政宏, 島田英樹, 松井紀久男: *Journal of MMIJ*, 118, pp.605-611, 2002.
- 4) Zhang, Z.X.: An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock, *Int. J. of Rock Mech. & Mining Sc.*, 39, pp.401-406, 2002.
- 5) 小林英男:破壊力学, pp. 70-71, 共立出版, 1997.

SIMULATIONS OF FRACTURE TOUGHNESS TESTING BY PARTICLE FLOW CODE

Takahiro FUNATSU, Qian LI, Masayoshi ISHIKAWA, Naohiro YONEDA and Norikazu SHIMIZU

This paper firstly describes the numerical modeling using Particle Flow Code (PFC2D) of biaxial compression test and Brazilian test so as to make clear relationships between microscopic parameters, which are input parameters for the PFC2D, and mechanical properties of rock. Using these relationships, proper input parameters for the modeling of rock material with specific mechanical properties can be selected. And then a number of numerical modeling of fracture toughness testing using SENRBB (Single Edge-Notched Round Bar in Bending) specimen are conducted. And then, the results of the simulation are compared with the experimental data.