

粒状体解析手法を用いた硬岩のモデル化の検討

山口大学大学院 学○李 茜, 足立 光
山口大学大学院 正 船津貴弘, 清水則一

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施設など, 地下深部に地下構造物が多く計画されている。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。その一つに地山の応力状態をあげられる。地下1000mもの深度における応力は, 地上付近のものに比べ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, 硬岩のように岩盤の強度が高い場合においても, 岩盤掘削の影響によって発生した亀裂による破壊が懸念される。そのため, 高応力下における岩盤の亀裂進展挙動の検討が必要となる。また, 亀裂の進展挙動は不連続体的な挙動を示す。そこで, 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は有用であると考えられる。

ただし, この粒状体解析では岩石の力学定数である弾性係数 E やポアソン比 ν , 粘着力 c などを直接入力することができず, 微視的なパラメータを用いる必要がある。そこで, 本研究では硬岩を再現する必要な入力パラメータを調査するために数値解析を行う。

粒状体解析にはPFC2D¹⁾を用いる。

2. 粒状体解析のパラメータの同定

粒状体解析は適切なパラメータを与えることにより, 硬岩を表現することができる²⁾。粒状体解析では, 弾性係数やポアソン比といった巨視的な物性値を与えることはできない。そこで二次元解析及び三次元解析により, 巨視的なパラメータと粒状体解析で使用する微視的なパラメータとの相関をとる。

3. 三軸圧縮試験の解析

図1に解析モデルを, 表1に解析パターンを示す。検討項目としては, 最小粒径 R_{min} , 接触係数 E_c , 鉛直方向剛性とせん断方向剛性の比 k_n/k_s , 粒子間摩擦係数 μ , パラレルボンドの接触係数 $\bar{E}_c$, 鉛直方向剛性とせん断方向剛性の比 $\bar{k}_n/\bar{k}_s$, 強度 $\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c(\text{mean})$, そして強度の標準偏差 $\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c(\text{std.dev.})$ の8つとし, それぞれについて側圧を0.1MPa, 10MPa, 70MPaに変化させ, 計73ケースについて解析を行った。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タに固定して解析を行う。解析の終了条件は軸差応力がピークを越え最大値の80%になる時である。

基本パラメータを用いた解析結果を一例として示す。軸差応力-軸ひずみ曲線及び体積ひずみ曲線の結果を図2に示す。側圧が0.1MPaの場合に応力が急激に低下し, 側圧70MPaの場合低下具合が緩やかになることが見られる。つまり破壊後の挙動が脆性から延性へと変化していることが分かる。また, 側圧0.1MPa・側圧70MPaの解析終了時点で取った変位分布図, 亀裂分布図を図3に示す。側圧が0.1MPaの場合破壊面が一つしか発生していないが, 側圧を上昇させること一つだけではなく複数の破壊面が発生している。

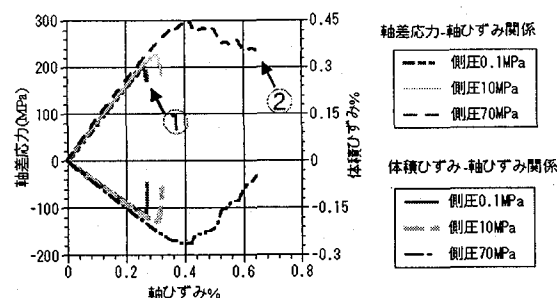
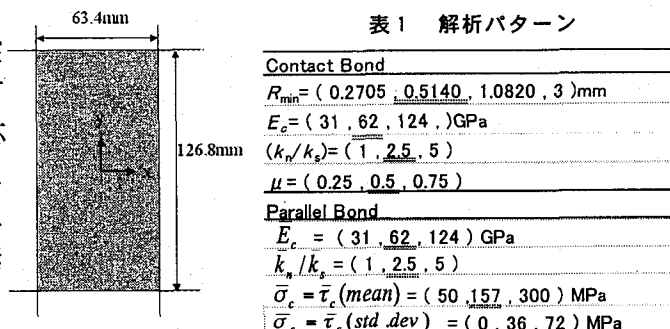


図2 軸差応力-軸ひずみ曲線
及び軸ひずみ-体積ひずみ曲線

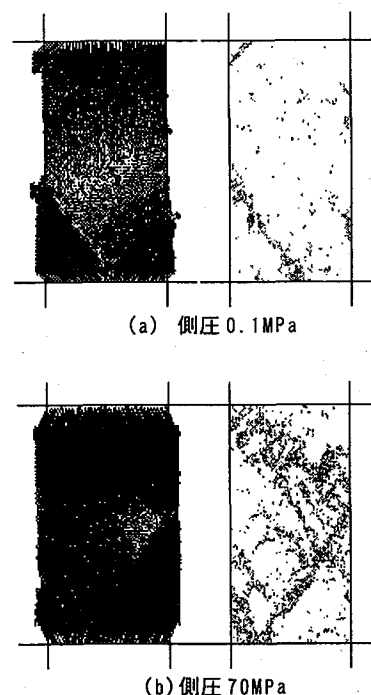


図3 変位分布図と亀裂分布図

4. 圧裂引張試験

解析モデルを図4に、そして解析パターンは表2に示す、解析結果をまとめると、一軸引張強度に影響が大きいパラメータは、粒径、平行ボンドの強度及び λ であることが分かる。また荷重変位曲線(図5)により弾性領域・弾塑性領域・ピーク値・解析終了時点で取った亀裂分布図を図6に示す。亀裂分布図を見ると、亀裂が载荷している方向と同じ方向に発生し、また最大荷重を超えると、亀裂が散らばっている状態から図6(4)のように集中している様子が見られる。

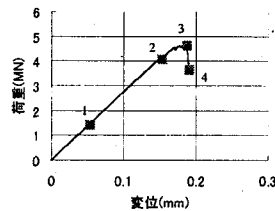


図5 荷重変位曲線

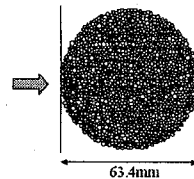


図4 解析モデル

表2 解析パターン

contact bond				
R min (mm)	0.541	1	2.5	
Ec (GPa)	50	62	100	150
kn/ks	0.5	1	2.5	
μ	0.1	0.5	1.5	
parallel bond				
λ	0.1	0.5	1	
Ec (GPa)	50	62	100	150
kn/ks	0.5	1	2.5	
$\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c(\text{mean})$ (MPa)	50	100	157	
$\bar{\sigma}_c = \bar{\tau}_c(\text{Std.Dev.})$ (MPa)	10	25	38	50

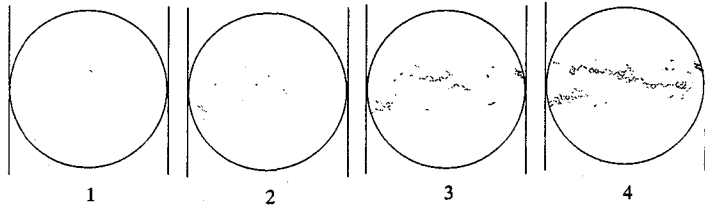


図6 亀裂分布図

(red=normal fail black=shear fail)

5. まとめ

解析の結果に基づいて、硬岩の巨視的な力学定数(弾性係数、粘着力)と粒状体の微視的なパラメータの関係図を図7に示す。また、粒状体解析パラメータと硬岩の力学定数の相関関係を模式的に表したものを図8に示す。平行ボンドの接触係数が大きくなるにつれて弾性係数が大きくなる。鉛直方向剛性とせん断方向剛性の比はポアソン比と比例関係にあり、もっとも大きく影響を与えている。さらに、粘着力は平行ボンドの強度による影響が大きいことが分かる。平行ボンドの接触係数が弾性係数と、平行ボンドの鉛直方向剛性とせん断方向剛性の比がポアソン比と、平行ボンドのばねの強度が一軸圧縮強度・粘着力と、粒子間摩擦係数と内部摩擦角と直接結びついている。以上より、模式図と関係図を組み合わせることで、想定する地山の巨視的なパラメータから微視的なパラメータを求めることができる。

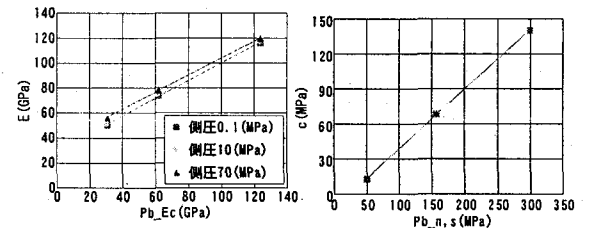
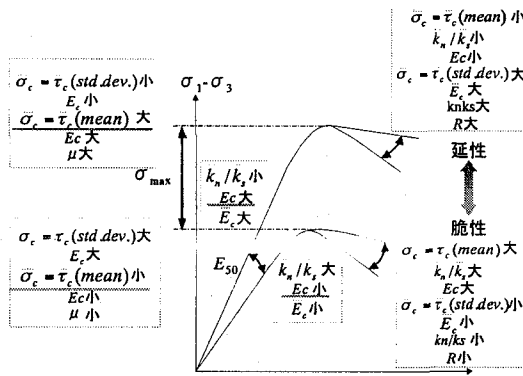
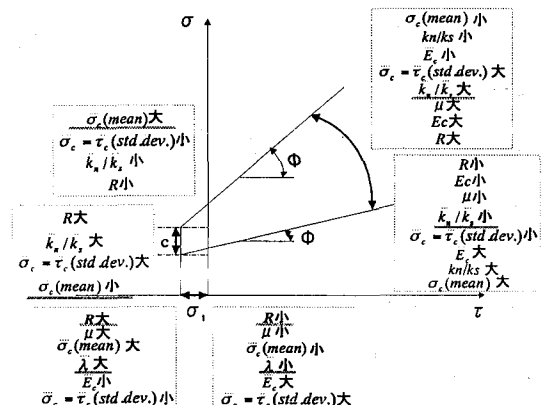


図7 E及びcと微視的なパラメータの関係図



(a) 応力-ひずみ関係におけるパラメータの相関関係



(b) 垂直応力-せん断応力の関係におけるパラメータの相関関係

図8 各パラメータの相関関係

向剛性の比がポアソン比と、平行ボンドのばねの強度が一軸圧縮強度・粘着力と、粒子間摩擦係数と内部摩擦角と直接結びついている。以上より、模式図と関係図を組み合わせることで、想定する地山の巨視的なパラメータから微視的なパラメータを求めることができる。

6. 結論

本研究の結論を示す。

- (1) 粒状体解析法によって、硬岩の三軸圧縮試験及び圧裂引張試験をシミュレートし、粒状体解析のパラメータと硬岩の力学定数の対応づけた。
- (2) 三軸圧縮試験及び圧裂引張試験を例として、粒状体モデルによる岩の亀裂進展挙動を解析した。

参考文献

- 1) ITASCA Consulting Group, Inc: PFC2D, Version 3.0 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, 1329-1364, 2004