山口大学大学院	学	〇児玉涼 J	+上健太郎
山口大学大学院	Æ	中島伸一郎	清水則一

1. はじめに

岩の亀裂進展破壊の研究は大深度地下開発などにおいて重要で あり, 亀裂進展破壊の再現には個別要素法に基づく粒状体解析手 法が有効であると考えられる.しかし,粒状体解析手法の入力値で あるマイクロパラメータ(以下,パラメータと呼ぶ)は対象硬岩 の要素試験から直接求めることができないため値の同定が困難で ある.そこで,本研究では PFC (Particle Flow Code)による硬岩 のモデル化に関して,井上ら¹⁾が提案したパラメータ決定手順の 妥当性を検討し,引張領域における硬岩の強度変形特性のモデル 化では従来の圧裂試験よりも一軸引張試験シミュレーションを用 いる方が適当であることを示した.

2. 圧裂試験シミュレーションによる硬岩のモデル化の課題

(1) 引張強度と亀裂分布の関係

井上らのパラメータ決定手順¹⁾では、一軸圧縮試験と圧裂試験 の数値シミュレーションにより表-1 に示すパラメータを決定す る.この決定手順で花崗岩の平均的な強度・変形特性²⁾をモデル 化したときの圧裂試験シミュレーション結果を図-1,図-2に示す. 図-2(a)より最大応力時には、亀裂はモデル全体に広がっており、 すでに引張破壊が生じた後と思われる.一方、図-2(b)より局所 的に引張応力が低下した引張応力 5.6MPa 時の亀裂分布からこの 段階あるいはこの段階以前に引張破壊が生じたと考えられる.す なわち、圧裂試験のシミュレーションでは、最大応力時と供試体 の破壊とが一致していないと考えられる.

(2) 引張強度のクランプ配置依存性

クランプ配置を変えた5種類のモデルで圧裂試験および一軸引 張試験シミュレーションを行い、クランプ配置による影響を比較 した.図-3(a)に示すように圧裂試験ではクランプ配置が変化す ると引張強度は大きくばらついている.一方、図-3(b)に示す一 軸引張試験ではクランプ配置の影響はほとんど見られず、引張強 度のばらつきが小さいことが分かる.また、これらの引張強度か ら算出した標準偏差からも一軸引張試験シミュレーションに比べ て圧裂試験シミュレーションの方がばらつきやすいことが分かる.

(3) パラメータ決定手順の改良

以上より,硬岩の引張領域をモデル化するにはクランプ配置に よる影響が少ない一軸引張試験の方が適していると考えられる. そこで,引張領域のパラメータ同定に圧裂試験ではなく一軸引張

表─1 パラメーター覧					
最大粒子半径と最小粒子半径の比	$\rm R_{max}/\rm R_{min}$	-			
最小粒子半径	R _{min}	mm			
密度	ρ	kg/m^3			
接触係数	E _c	GPa			
垂直方向剛性と水平方向剛性の比	k_n/k_s	-			
摩擦係数	μ	-			
パラレルボンドの接触係数	pb_E _c	GPa			
パラレルボンドの垂直方向剛性と	pb_k_n/k_s	_			
水平方向剛性の比					
接着面半径と最小粒子半径の比	pb_λ	1			
垂直方向強度の平均値	pb_σ_c	MPa			
垂直方向強度の標準偏差	$\text{pb}_\sigma_{\text{c}}, \text{std}$	MPa			
せん断方向強度の平均値	pb_{τ_c}	MPa			
せん断方向強度の標準偏差	$pb_{-}\tau_{c},std$	MPa			
クランプ半径	R _c	mm			



試験を用いることを提案する. 圧裂試験は上記の課題に加えて,供 試体内部の応力状態が不均質なのに対し,一軸引張試験では供試体 内に引張応力のみが一様に発生するため,応力状態として単純であ ることからモデル化しやすいと考えられる.また,一軸引張試験か らは応力--ひずみ関係より引張領域の変形係数を同定することが可 能であるため,解析結果と比較することでより正確に硬岩をモデル 化できると考えられる.

3. 一軸圧縮・一軸引張試験データ³⁾を用いた花崗岩のモデル化

改良後のパラメータ決定手順で硬岩をモデル化したシミュレーション結果を表-2および図-4に示す.ここで、モデル化した硬岩は、林ら(2008)による花崗岩の一軸圧縮試験、一軸引張試験および圧裂試験結果を用いている³⁾.図-4(b)より引張領域の変形特性も含めて再現できている.

引張強度を確認するため一軸圧縮および一軸引張試験シミュレーションから決定したパラメータを用いて圧裂試験シミュレーション を行った. 図-5, 6 に示す圧裂試験シミュレーション結果から最大 応力時と供試体の破壊とが一致していないという課題は残っている が,局所的に応力が低下した引張応力 8.2MPa 付近で引張破壊が生 じていると考えられる.パラメータ決定にかかる労力として,一軸 引張試験シミュレーションを用いて花崗岩をモデル化すると圧裂試 験結果も同じパラメータで再現できるため,試行錯誤の回数が減少 し,効率的な決定手順になったと考えている.岩石試験として,一 軸引張試験が行われることは少ないが,硬岩の一軸引張強度は圧裂 強度にほぼ等しいという一般的な実験的事実を利用すれば,引張強 度の断定しにくい圧裂試験の解析は行わずに,硬岩をモデル化する パラメータが決定できると考えられる.

4. 結論

本研究では、一軸圧縮試験と圧裂試験シミュレーションを用いた 硬岩のモデル化におけるパラメータ決定では、引張領域の再現が不 十分であるという課題を提示し、その改善方法として一軸引張試験 を用いた決定手順を提案した.その結果、引張領域における変形特 性を実験値と比較できるようになったこと、クランプ配置の影響が 少なく引張強度がばらつきにくい一軸引張試験シミュレーションで モデル化が行えることから正確かつ効率の良いパラメータ決定手順 が同定できた.

表-2 実験値³⁾と数値解析の比較 実験値 数値解析 軸圧縮強度(MPa) 163 160 47.5 52.8 ヤング率(GPa) ポアソン比(-) 0.27 0.3 ·軸引張強度(MPa) 7.2 7.1 圧裂引張強度(MPa) 8.5 8.2 180 数值解析 実験値 150 Ω 軸差応力(90 60 30 横ひずみ 軸ひずみ 0 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 ひずみ(%) (a) 一軸圧縮試験シミュレーション - 数値解析 実験値 8 (MPa) n 引張応力(7 横ひずみ 軸ひずみ 0 -0.01 0.01 ひずみ(%) -0.05 -0.03 0.03 0.05 0.01 (b) 一軸引張試験シミュレーション 図-4 一軸圧縮試験および一軸引張試験の 実験値³⁾と数値解析の変形特性比較 30 実験值σ_t=8.5MPa³⁾ ⁽²⁵ 20 (Mba) σ_t=8.2MPa (図-7 (b) σ_t=20.1MPa (図-7 (a)) Ē 5 ٥ 0.05 0 1 0 015 0.20 0.00 変位(mm) 図-5 引張応力
 一変位曲線

(a)最大応力時
 (b)応力 8.2MPa 時
 図-6 各応力時の亀裂分布

参考文献

- 1) 井上健太郎, 三輪旭, 清水則一, 船津貴弘: クランプモデルを用いた粒状体解析手法による硬岩のモデル化 におけるマイクロパラメータ決定手順, 第64回年次学術講演会概要集, 土木学会, pp.285-286, 2009.
- 2) 佐藤稔紀,石丸存,杉原弘造,清水和彦:文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの 収集,動力炉・核燃料開発事業団報告書, pp.8, 1992.
- 3) 林為人,高橋学,藤井幸泰,西山哲,竹村貴人:一軸引張状態における数種類の花崗岩質岩石と斑れい 岩の変形特性,材料, Vol.56, No.7, pp.654-659, 2007.