

山口大学大学院 学生会員 ○田口 和也
山口大学大学院 学生会員 児玉 涼
山口大学大学院 正会員 中島伸一郎
山口大学大学院 正会員 清水 則一

1. はじめに

粒状体解析手法によって硬岩の圧裂試験をシミュレートすると、モデル内部に亀裂が発生しても容易には進展せず、実験上で見られるような脆性的な破壊が再現できないという問題が指摘されている^{1), 2)}。本研究では、この原因として、粒子形状の複雑さによる岩の持つ不均質性が、解析上で十分考慮されていない可能性を取り上げ、これを考慮した圧裂試験シミュレーションを実施して破壊状況を比較した。なお、本研究では解析コードとして Particle Flow Code (PFC) を使用している。

2. 硬岩のモデル化における圧裂シミュレーションの課題

粒状体解析では、岩石を粒子要素の集合体として表現し、ボンドやクランプにより粒子を結合して岩石の力学特性を表現する。入力パラメータリストを表-1 に示す。これまでの研究から、硬岩の持つ高い脆性度（圧縮強さと引張強さの比、硬岩では 10～20 程度）を表現するためには、指定した範囲の粒子を剛結するクランプモデルの導入が必要であること、脆性度が 20 程度の硬岩の場合は、最小粒子径に対するクランプ径の比（以下、クランプ比 R_c/R_{min} ）が 5.5 程度であることが明らかにされている¹⁾。

ところが、実際に硬岩の要素試験をシミュレートしてみると、圧裂試験に関して、解析結果と実験結果とが必ずしも整合しない。例えば、図-1 は Lac du Bonnet 花崗岩（脆性度 21.5、物性値は表-2 参照）の圧裂試験シミュレーション結果である。ここでは文献 1) に基づき、最小粒子径 R_{min} を 0.5 mm、クランプ比 $R_c/R_{min}=5.5$ として解析している。図より、最大応力 B 点を解析上の圧裂強さとする、実験結果よりも解析結果は 37% も大きい。また、A 点で応力が局部的に低下したのちに再び上昇を示しており、脆性的な破壊を示す実験上の現象とは異なる。さらに、図中には A、B 两点での亀裂分布を示しているが、B 点はモデル全体に亀裂が広がりすぎている。このような 2 段階の応力変化および最大応力時における亀裂の過度の分布は、他の岩石をモデル化した場合にも同様に発生することを確認した。つまり、クランプを使用した従来の解析では、圧裂試験の破壊現象を十分に表現できていない。

表-1 クランプを用いた PFC 解析の入力パラメーター一覧

最小粒子半径	R_{min} [mm]
最大・最小粒子半径の比	R_{max}/R_{min}
粒子密度	ρ [kg/m]
粒子の接触係数	E_c [GPa]
粒子の垂直・せん断方向剛性の比	k_n/k_s
摩擦係数	μ
ボンドの弾性係数	pb_E_c [GPa]
ボンドの垂直・せん断方向剛性の比	pb_k_n/k_s
ボンド接着面・最小粒子半径の比	pb_R_c
ボンドの垂直方向強度	$pb_ \sigma_c$ [MPa]
ボンドのせん断方向強度	$pb_ \tau_c$ [MPa]
クランプ半径と最小粒子半径の比	R_c/R_{min} [mm]

表-2 Lac du Bonnet 花崗岩の要素試験結果

弾性係数	ポアソン比	一軸圧縮強さ	圧裂引張強さ
E [GPa]	ν	UCS [MPa]	BTS [MPa]
69±5.8	0.26±0.04	200±22	9.3±1.3

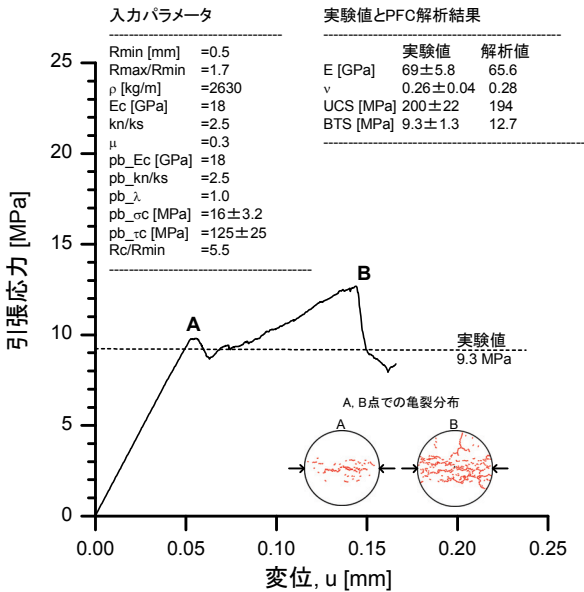


図-1 Lac du Bonnet 花崗岩を対象とした圧裂試験シミュレーション結果 ($R_{min} = 0.5$ mm, $R_c/R_{min} = 5.5$)

表-3 解析ケース

Case No.	r5c55	r5c60	r5c50	r4c55	r3c55	r2c55	r1c55
R_{min} [mm]	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.14
R_c/R_{min}	5.5	6.0	5.0	5.5	5.5	5.5	5.5

3. クランプ径および粒子径による不均質性の考慮

①圧縮強さと引張強さの比、すなわち脆性度の再現に対してはクランプ比 R_c/R_{min} が支配的であること¹⁾、②クランプを用いないモデルでは、図-1のような2段階の応力変化は見られず、最大応力時の亀裂分布も载荷軸上の狭い範囲に現れること¹⁾、の2点を考えると、粒子径およびクランプ比による粒子形状の複雑さの表現が、圧裂試験シミュレーションでは重要であると推測できる。

そこで、クランプ比 R_c/R_{min} と粒子径 R_{min} について、図-1 で用いた入力パラメータを基本として (表-3 の Case r5c55)、表-3 のように変化を与えて解析を実施した。ここでは、圧裂強さだけでなく、圧縮強さや弾性係数も同時に実験値を満たすことを目標に入力パラメータを調整している。

図-2 は、最小粒子径を $R_{min} = 0.5$ mm に固定し、クランプ比を $R_c/R_{min} = 5.0, 5.5, 6.0$ と変化した場合の圧裂試験シミュレーション結果である。図より、この範囲でクランプ比を変化させても解析上の最大応力は実験値 (BTS = 9.3 MPa) を再現できないことが確認できる。また、2 段階の応力変化についても、クランプ比を変化させても改善していない。

つぎに、図-3、図-4 は、クランプ比を $R_c/R_{min} = 5.5$ に固定し、最小粒子径を $R_{min} = 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.14$ mm と変化した場合の圧裂試験シミュレーション結果である。図より、最小粒子径と最大応力との関係は必ずしも一定の傾向は見られないものの、粒子径が最も小さい $R_{min} = 0.14$ mm の場合には、他のケースでは見られる2段階の応力変化がなくなり、かつ解析上の最大応力が実験値と一致することがわかる。この結果から岩石の圧裂特性を再現するためには、最小粒子径の大きさが重要であるといえる。

4. 考察

図-1～図-3 より、最大応力は解析ケースによって大きくばらつく一方で、局所的な応力低下点 (図-1 における A 点) は、最小粒子径やクランプ比によらずおおむね一定で、値も 8～11 MPa と実験上の圧裂強さに近い。このことから、解析結果の局所的な応力低下点の実験上の圧裂強さに相当しており、解析は亀裂が発生して応力が低下を示した後の亀裂の進展過程を再現できていないという可能性が指摘される。粒状体解析における亀裂の進展性のモデル化に関しては今後の課題である。

参考文献

- 1) 井上ら：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，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集，III-143，2009.
- 2) 中島ら：粒状体解析による硬岩のモデル化における圧裂引張試験と一軸引張試験の適用性，第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，No.30，2011.
- 3) N.Cho et al.: A clumped particle model for rock, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 44, pp.997-1010, 2007.

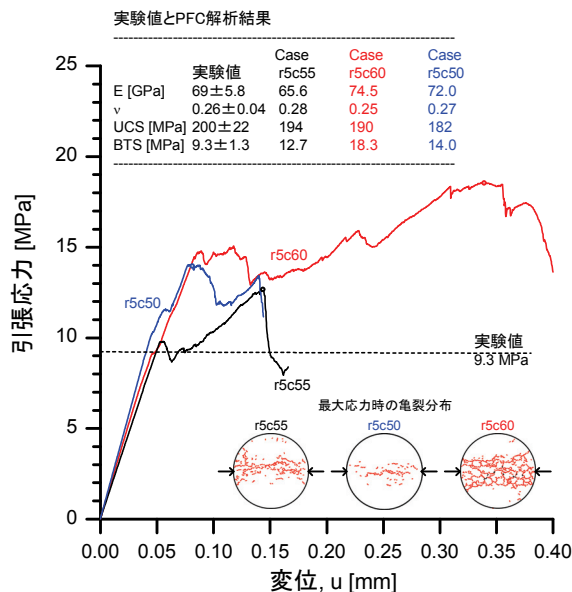


図-2 クランプ比を変化させた場合の Lac du Bonnet 花崗岩を対象とした圧裂試験シミュレーション結果 (最小粒子径固定 $R_{min} = 0.5$ mm)

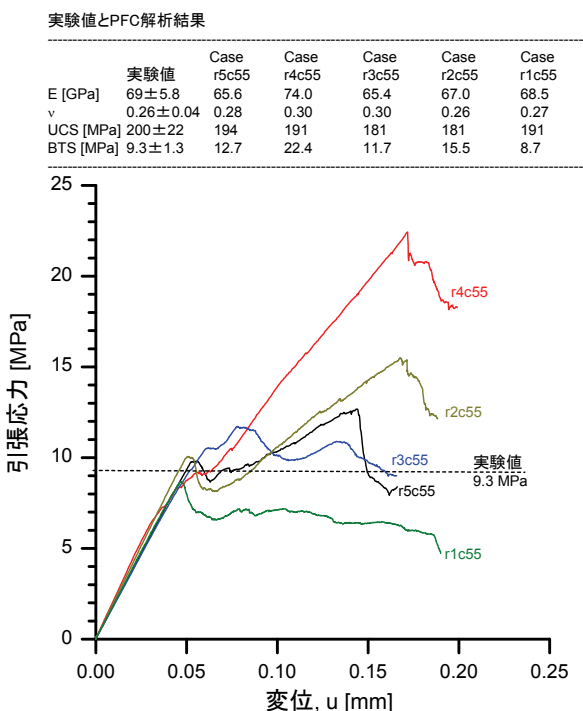


図-3 最小粒子径を変化させた場合の Lac du Bonnet 花崗岩を対象とした圧裂試験シミュレーション結果 (クランプ比固定 $R_c/R_{min} = 5.5$)

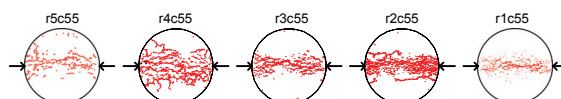


図-4 最小粒子径を変化させたケースにおける最大応力時の亀裂分布

- 4) D.O.Potyondy and P.A.Cundall: A bonded-particle model for rock, Int. J. Rock Mech. & Min.Sci., pp.1329-1364, 2004.