

粒状体解析による硬岩の 圧裂試験シミュレーション手法の検討

田口和也^{1*}・児玉涼¹・中島伸一郎²・清水則一²

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

*E-mail: r019vf@yamaguchi-u.ac.jp

クランプモデルを用いた粒状体解析によって硬岩の圧裂引張試験をシミュレーションした場合、ピーク応力後の急激なひずみ軟化挙動を再現することが困難である。これはモデル内部に亀裂が発生しても、クランプどうしのかみ合わせが原因で急速に進展しないためだと考えられる。本研究では、クランプ形状が圧裂挙動に及ぼす影響を検討するため、粒径とクランプ径を変化させた解析を実施した。その結果、クランプ比(クランプ径と最小粒径との比)を変化させることによって脆性度をコントロールできること、クランプ比を固定し粒径を変化させても局所的な応力低下点までの挙動が変わらないことを明らかにした。

Key Words : DEM, granite, Brazilian tensile test

1. はじめに

岩石の亀裂の発生過程を再現するうえで、個別要素法に基づく粒状体解析手法は有効である¹⁾。粒状体解析では、岩石は粒子要素の集合体としてモデル化される。粒子間には接触時に作用するバネと摩擦が考慮されるほか、岩石の引張や曲げに対する抵抗性を表現するため、**図-1**に示すように粒子間を結合するボン드가考慮される。また、硬岩の持つ大きな脆性度(圧縮強さと引張強さの比)をバネとボンダだけで表現することは困難であったが、**図-2**のように、指定した範囲内の複数の粒子を剛結させるクランプモデル²⁾の導入により表現が可能となっている³⁾。

クランプモデルを用いた粒状体解析の1つの課題は、硬岩の圧裂引張試験をシミュレーションした場合に、ピーク応力後の急激なひずみ軟化挙動を再現することが困難な点にある。これは、クランプの形状によっては、モデル内部に亀裂が発生しても、クランプどうしがかみ合っていて亀裂が容易に進展しないためであると考えられる。そこで本研究では、クランプの形状が圧裂引張試験シミュレーションでの破壊挙動に及ぼす影響の把握を目的とし、クランプ径 R_c と最小粒径 R_{min} との関係を変化させた解析を実施した。解析コードにはParticle Flow Code (PFC2D, Itasca) を使用している。

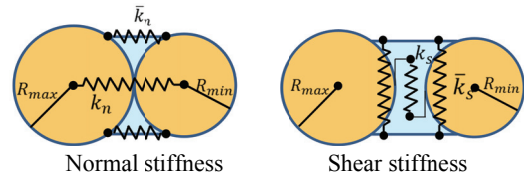


図-1 粒子間の結合(パラレルボンダ結合)²⁾を修正

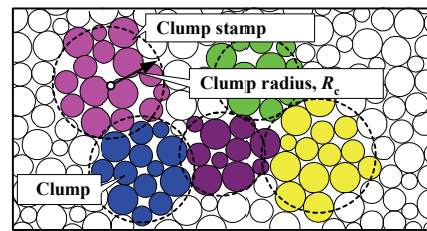


図-2 クランプモデル模式図(同色の粒子のまとまりが1つのクランプ)²⁾を修正

表-1 クランプを用いた粒状体解析における入力パラメータ

Minimum ball radius	R_{min} [mm]
Ball size ratio	R_{max}/R_{min}
Ball density	ρ [kg/m ³]
Contact modulus	E_c [GPa]
Normal/shear stiffness ratio	k_n/k_s
Friction coefficient	μ
Parallel-bond modulus	$\frac{E_c}{\lambda}$ [GPa]
Parallel bond stiffness ratio	$\frac{k_n}{k_s}$
Parallel-bond radius multiplier	λ
Parallel-bond normal strength	$\frac{\sigma_c}{\lambda}$ [MPa]
Parallel-bond shear strength	τ_c [MPa]
Clump radius	R_c [mm]

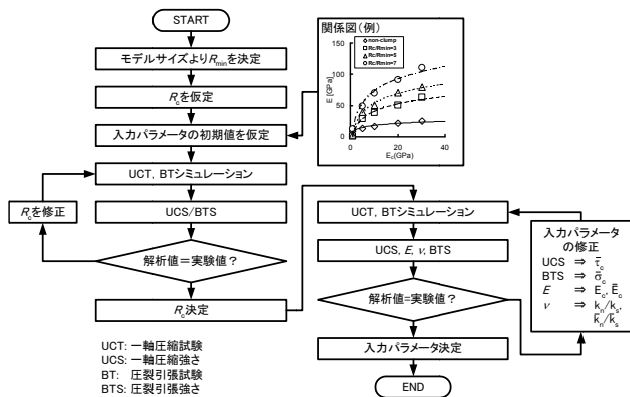


図-3 入力パラメータの決定手順⁴⁾

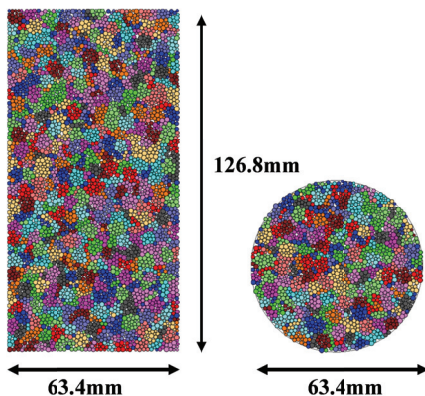


図-4 一軸圧縮試験および圧裂試験シミュレーションのモデル (クランプを色分けしている)

2. 花崗岩のモデル化と圧裂試験シミュレーションにおける課題

クランプモデルを用いた粒状体解析における入力パラメータを表-1に示す。粒子の物理的性質 (最小粒径 R_{min} , 最大最小粒径比 R_{max}/R_{min} , 粒子密度 ρ), 粒子どうしの接触時の変形と強度 (接触係数 E_c , 垂直・せん断バネ比 k_n/k_s , 摩擦係数 μ), 粒子どうしを結合するボンドの変形と強度 (接触係数 E_c , 垂直・せん断バネ比 k_n/k_s , 垂直強度 $\bar{\sigma}_c$, せん断強度 $\bar{\tau}_c$), クランプ径 R_c である。これらのパラメータは一軸圧縮試験や圧裂試験などの要素試験シミュレーションにより試行錯誤的に同定するが, 例えば井上ら⁴⁾はクランプモデルの入力パラメータと要素試験シミュレーションによる力学物性値との関係を明らかにし, 図-3のようなフローチャートによりパラメータ決定の効率化を図っている。

本研究では解析対象例としてLac du Bonnet花崗岩の力学特性¹⁾をモデル化する。図-4の解析モデルを用いて一軸圧縮試験と圧裂試験のシミュレーションを実施し, 井上らの示した入力パラメータ決定手順⁴⁾ (図-3) に従って入力パラメータの調整を行った。解析上の载荷速度は 5.0×10^6 mm/step, 解析終了条件は荷重が最大値を超えて

表-2 Lac du Bonnet 花崗岩の入力パラメータ

R_{min}	0.5 mm	\bar{E}_c	18 GPa
R_{max}/R_{min}	1.7	k_n/k_s	2.5
ρ	2630 kg/m ³	$\bar{\lambda}$	1.0
E_c	18 GPa	$\bar{\sigma}_c$	16±3.2 MPa
k_n/k_s	2.5	$\bar{\tau}_c$	125±25 MPa
μ	0.3	R_c	2.75 mm

表-3 Lac du Bonnet 花崗岩の力学物性値と粒状体解析結果

	Uniaxial compression strength, UCS [MPa]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Brazilian tensile strength, BTS [MPa]
Experiment ¹⁾	200±22	69±5.8	0.26±0.04	9.3±1.3
Simulation	194.0	65.6	0.28	12.7

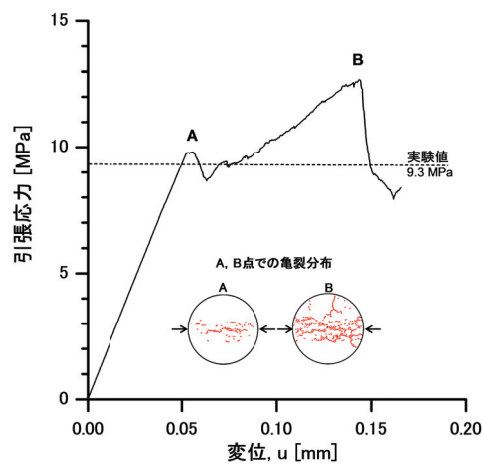


図-5 Lac du Bonnet 花崗岩を対象とした圧裂試験シミュレーション結果 ($R_{min}=0.5$ mm, $R_c/R_{min}=5.5$)

最大荷重の80%時である。

最終的に得られた入力パラメータを表-2に, この入力パラメータによる解析結果を実験値と合わせて表-3に示す。表-3より解析値は実験値を概ね再現しているが, 圧裂強さBTSについては解析値が実験値を2 MPaほど上回っている。そこで圧裂試験の応力-変位関係を見ると図-5のとおりである。応力は直線的に上昇し, A点に達してわずかに応力は低下するものの破壊には至らず, 再び上昇してB点で最大値を示している。また, 図-5にはA, B両点でのモデル内部の亀裂発生状況も示しているが, 最大応力時点のB点では亀裂がモデル全体に過度に広がっている。つまり, シミュレーション結果は圧裂試験時の硬岩の脆性的な破壊現象を十分に再現していない。理由としては, クランプの存在による亀裂進展の阻害や, クランプどうしの噛み合わせによる耐荷力の発揮などが考えられ, クランプ形状を適切に選ぶことが重要であると推測される。

表-4 解析ケース

Case No.	r5c40	r5c45	r5c50	r5c55	r5c60	r5c65	r5c70
R_{min} [mm]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
R_c/R_{min}	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0

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

Case No.	r5c2.75	r4c2.75	r3c2.75	r2c2.75	r1c2.75
R_{min} [mm]	0.5	0.4	0.3	0.2	0.14
R_c [mm]	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

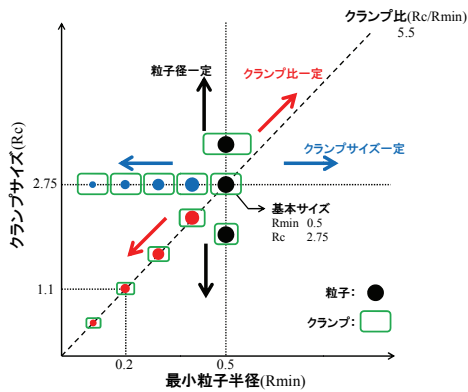


図-6 解析ケース説明図

3. クランプ径および粒子径に関する検討

(1) 解析の概要

クランプ形状が圧裂試験のシミュレーション結果に与える影響を検討するため、クランプ径 R_c と最小粒径 R_{min} との関係を変化させた解析を実施した。解析ケースの一覧を表-4に示す。クランプ径と粒径の変化のさせ方は図-6に示すとおりで、前節の解析条件(表-2)を基本として、①最小粒径を固定してクランプ径を変化させるケース($R_{min} = 0.5$ mm, $R_c/R_{min} = 4.0 \sim 7.0$ の7種類)と、②クランプ比(クランプ径と最小粒径の比)を固定して最小粒径を変化させるケース($R_c/R_{min} = 5.5$, $R_{min} = 0.14 \sim 0.5$ mmの5種類)と、③クランプ径を固定して粒径を変化させるケース($R_c = 2.75$ mm, $R_{min} = 0.14 \sim 0.5$ mmの5種類)である。これらの解析では、圧裂試験の強度変形特性だけでなく、一軸圧縮試験の強度変形特性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。

(2) 最小粒径を固定しクランプ径を変化させた解析結果

図-7, 図-8は、最小粒径を0.5 mmに固定してクランプ径を変化させた圧裂試験シミュレーションの応力-変位関係と最大引張り強さ-クランプ比関係である。図-8より引張強さはクランプ比5.5あたりで極小値を示してい

実験値とPF解析結果

	実験値	Case r5c55	Case r5c60	Case r5c50	Case r5c40	Case r5c45	Case r5c65	Case r5c70
E [GPa]	69±5.8	65.6	74.5	72.0	63.4	66.0	73.4	63.9
ν	0.26±0.04	0.28	0.25	0.27	0.23	0.22	0.26	0.29
UCS [MPa]	200±22	194	190	182	211	198	217	196
BTS [MPa]	9.3±1.3	12.7	18.3	14.0	26.3	23.4	29.8	28.7

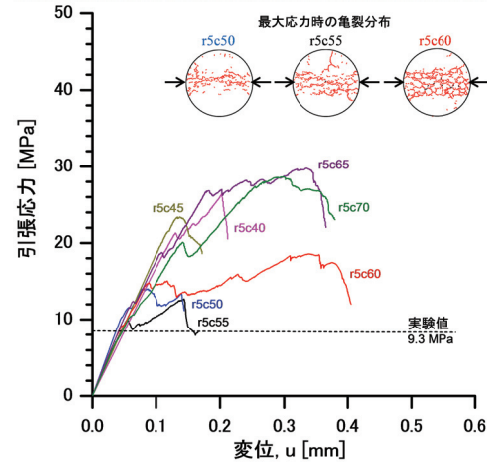


図-7 最小粒径を固定しクランプ比を変化させた圧裂試験シミュレーションの応力-変位関係(最小粒径 $R_{min} = 0.5$ mm, 対象: Lac du Bonnet 花崗岩)

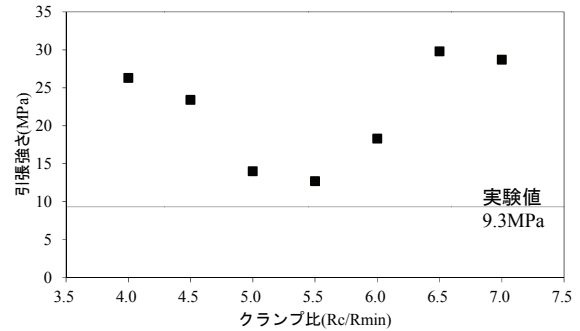


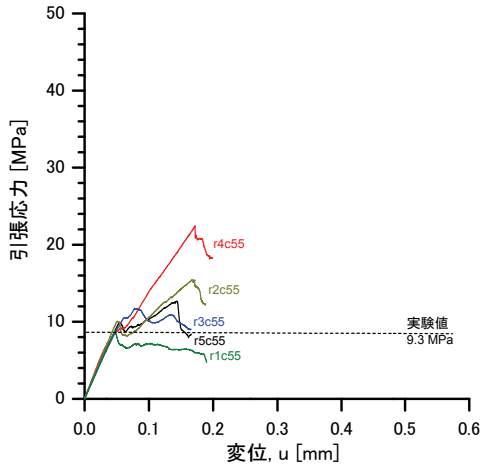
図-8 クランプ比-引張強さ関係図(最小粒径 $R_{min} = 0.5$ mm)

る。基本的に、粒径一定のままクランプサイズを大きくすると、脆性度(圧縮強さと引張強さの比)が上昇すること、すなわち圧縮強さが一定ならば引張り強さは低下することが知られており⁹⁾、図-8のクランプ比4.0~5.5の結果はこれを表しているものと考えられる。一方、クランプ比5.5以上ではクランプサイズの増大とともに引張強さが上昇(脆性度は低下)しているが、これは解析モデルの寸法に対するクランプサイズの比率が上昇するため、その寸法効果が現れているものと考えられる。

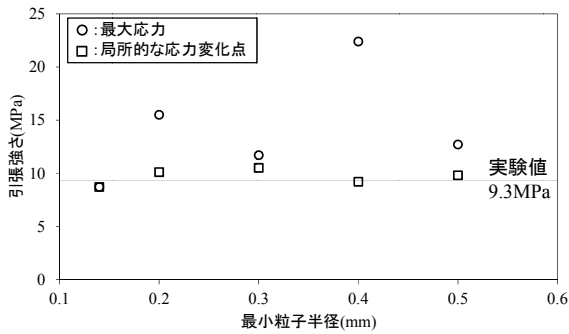
また図-7より、基本としていたクランプ比5.5が最も引張強さを表現できていること、他のCaseにおいて、クランプ比5.5から離れるにつれて、脆性度が低下していくことが確認できる。さらに、図-7より、今回の解析条件の範囲では実験上の引張強さを再現できておらず、脆性的な破壊の再現についても、クランプ比を変化させても改善できていない。

実験値とPFC解析結果

	実験値	Case r5c55	Case r4c55	Case r3c55	Case r2c55	Case r1c55
E [GPa]	69±5.8	65.6	74.0	65.4	67.0	68.5
ν	0.26±0.04	0.28	0.30	0.30	0.26	0.27
UCS [MPa]	200±22	194	191	181	181	191
BTS [MPa]	9.3±1.3	12.7	22.4	11.7	15.5	8.7



(a) 応力-変位関係



(b) 最小粒径-引張強さ関係

図-9 クランプ比を固定し最小粒径を変化させた圧裂試験シミュレーション結果 (クランプ比 $R_c/R_{min} = 5.5$, 対象: Lac du Bonnet 花崗岩)

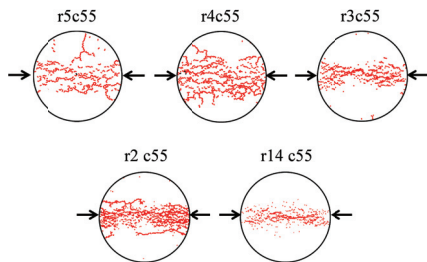


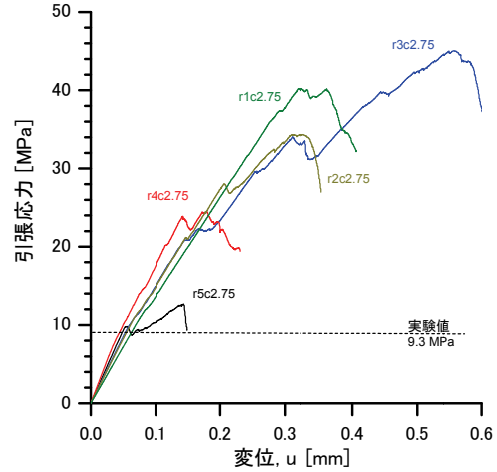
図-10 最大応力時の亀裂分布 (クランプ比固定 $R_c/R_{min} = 5.5$)

(3) クランプ比を固定し最小粒径を変化させた解析結果

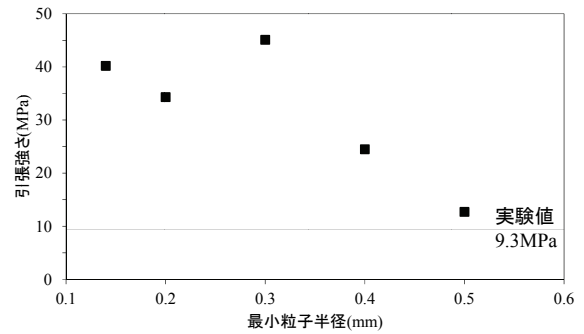
図-9は、クランプ比を5.5に固定し、最小粒径を変化させた圧裂試験シミュレーションの、応力-変位関係と引張り強さ-最小粒径関係である。図-9(b)では、最大引張応力を○で示し、局所的な応力低下点(図-5でいうA点)の応力を□で示している。図-10は、各caseごとの最大応力時に発生している亀裂を示した分布図である。図-9(a)、図-10より、粒径が最も小さい $R_{min} = 0.14$ mmのケースでは、他のケースで見られるような応力の再上昇が

実験値とPFC解析結果

	実験値	Case r5c2.75	Case r4c2.75	Case r3c2.75	Case r2c2.75	Case r1c2.75
E [GPa]	69±5.8	65.6	69	66	65.3	69.3
ν	0.26±0.04	0.28	0.29	0.29	0.26	0.25
UCS [MPa]	200±22	194	198	369	516	731
BTS [MPa]	9.3±1.3	12.7	24.5	45.1	34.3	40.2



(a) 応力-変位関係



(b) 最小粒径-引張強さ関係

図-11 クランプ径を固定し最小粒径を変化させた圧裂試験シミュレーション結果 (クランプ径 $R_c=2.75$, 対象: Lac du Bonnet 花崗岩)

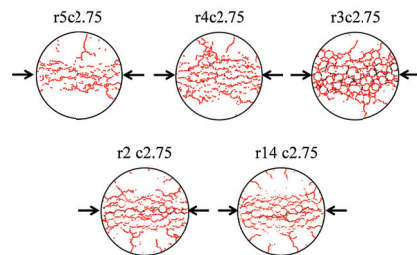


図-12 最大応力時の亀裂分布 (クランプ径 $R_c=2.75$)

なくなり、かつ解析上の最大引張応力が実験値と一致することが確認できる。また図-9(b)より、最大引張応力については最小粒径との関係について一定の傾向は見られないのに対し、局所的な応力低下点については最小粒径によらず概ね一定で、その値についても8~10 MPaと実験上の圧裂強さに近い。このように局所的な応力低下点が概ね一定になるのは、クランプ比が一定であれば、粒径が変わってもクランプどうしの接点数が概ね同数であるため、接触応力やクランプの噛み合わせの程度が同じであることによると考える。

(4) クランプ径を固定し最小粒径を変化させた解析結果

図-11, 図-12は, クランプ径を2.75 mmに固定し, 最小粒径を変化させた圧裂試験シミュレーションの応力-変位関係と最大引張応力-最小粒径関係である. これらの解析のうち, $R_{\min} = 0.3, 0.2, 0.14$ mmの結果 (それぞれ $r3c2.75, r2c2.75, r1c2.75$) については, 変形係数 E , ν は実験値を再現できるものの, 圧縮強さUCSについては実験値を再現できず, 最小粒径が小さくなるにつれて圧縮強さは増大した. また, 図-12より最小粒径が小さくなるほど引張り強さについても増大している. クランプ径を固定したままその中の粒子が小さくなるということは, クランプどうしの接触点数が増大することを表すので, これによって接触応力が緩和されるとともにクランプどうしの噛み合わせが強くなって耐荷力を発揮した結果, 圧縮強さや引張り強さが上昇したものと考える

4. まとめ

粒状体解析による硬岩のモデル化において, クランプ形状が圧裂試験のシミュレーション結果に与える影響を検討するため, クランプ径 R_c と最小粒子径 R_{\min} との関係を変化させた解析を実施した. 解析の結果を以下にまとめる.

- 1) 粒径を固定してクランプサイズを変化させると, 基本的にはクランプサイズが大きくなるにつれて脆性度は上昇する.
- 2) クランプサイズを固定して粒径を変化させると, 基本的には粒径が小さくなるにつれて脆性度は上昇する.
- 3) 1), 2)よりクランプ比 (クランプ径と最小粒径との比) を変化させることによって脆性度をコントロールすることができる. ただし, クランプ比が大

きくなりすぎると, 解析モデルサイズとクランプサイズとのバランスによって寸法効果が現れたり, クランプどうしの接触点数の増大によって噛み合わせが強固に現れたりする. そのため, 解析対象岩石の脆性度は表現できても, 具体的な圧縮強さや引張り強さについては再現できない場合がある.

- 4) クランプ比を固定すると, 粒径を変化させても局所的な応力低下点までの挙動は変わらない. これは, クランプ比が一定であれば, 粒径が変わってもクランプどうしの接触点数は概ね同数であるため, 接触応力やクランプの噛み合わせの程度が同じであることによると考える.

参考文献

- 1) D.O.Potyondy and P.A.Cundall: A bonded-particle model for rock, *Int. J. Rock Mech. & Min.Sci.*, pp.1329-1364, 2004.
- 2) N. Cho, C.D. Martin and D.C. Sego, A clumped particle model for rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 44, pp. 997-1010, 2007.
- 3) 船津貴弘, 李茜, 清水則一, 瀬戸政宏, 松井紀久男: 粒状体解析による岩石の亀裂進展挙動に関する検討, *Journal of MMIJ*, Vol.124, pp.611-618, 2008.
- 4) 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.
- 5) 三輪旭, 井上健太郎, 米田直広, 船津貴弘, 三村陽一, 清水則一: 粒状体解析手法を用いた硬岩のモデル化におけるマイクロパラメータ決定手順の検討, 第61回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, 土木学会, 2009.

EFFECTS OF PARTICLE SIZE AND CLUMP SIZE ON DEM SIMULATION OF BRAZILIAN TENSILE TEST FOR GRANITE

Kazuya TAGUCHI, Ryo KODAMA, Shinichiro NAKASHIMA and Norikazu SHIMIZU

In modeling fracture characteristics of hard rocks using distinct element method (DEM) it is difficult to simulate brittle failure after peak stress in Brazilian tensile test. This is firstly because the clumps inhibit rapid propagation of cracks, and secondly because the adjacent clumps interlock each other. Therefore, determination of appropriate clump size is essential. This paper studied the effects of clump size and particle size on numerical simulation result of Brazilian tensile test for Lac du Bonnet granite. The simulation results revealed that the ratio of uniaxial compressive strength to Brazilian tensile strength is controlled by the ratio of clump size to particle size..