

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

中島 伸一郎^{1*}・児玉 涼²・井上 健太郎³・清水 則一¹

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

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

³正会員 株式会社エイト日本技術開発 (〒732-0055 広島市東区東蟹屋町15-3)

E-mail:nakasima@yamaguchi-u.ac.jp

硬岩の亀裂進展、破壊現象への粒状体解析手法の適用性を検討することを目的として、クランプモデルを用いた2次元の粒状体解析により花崗岩の力学特性のモデル化を実施した。一軸圧縮試験および圧裂試験シミュレーションにより入力パラメータの同定を行うことはできたものの、圧裂試験シミュレーションでは、引張強さがクランプ配置に依存して大きくばらつくこと、モデル内に十分な数の亀裂が発生しても明確な脆性破壊を生じず、解析上の最大応力点は岩石の破壊点とは一致しない可能性があることなどが明らかとなった。また、引張領域のモデル化では、圧裂引張試験よりも一軸引張試験シミュレーションを用いた方が、クランプ配置の影響が小さく、安定的にモデル化が可能であることが明らかとなった。

Key Words : DEM, granite, uniaxial compression test, Brazilian tensile test, uniaxial tensile test

1. はじめに

空洞掘削時の地山の力学挙動や岩盤構造物の長期的な安定性を評価するうえで、岩盤内部における亀裂の発生と進展を適切に表現することは重要である。自然状態では連続体的であった岩盤が、応力解放や応力集中による亀裂の発生・開口・進展によって局所的に不連続体的に挙動するようになるさまを、連続体力学に基づく有限要素解析法や有限差分法で表現することは必ずしも容易ではない。一方、岩盤の不連続的な挙動を取り扱うことから不連続体力学に基づく解析手法が用いられ、個別要素法の1つである粒状体解析手法により岩盤の破壊現象を模擬することも行なわれている¹⁾。

粒状体解析手法では、岩石は粒子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、岩石の引張りや曲げに対する抵抗性を表現するため、図-1のように粒子間を結合するボンド¹⁾が考慮される。また、従来、バネとボンドによる粒子結合だけでは、岩石の圧縮強さと引張強さを同時に満たすことができないことが課題として指摘されてきたが、図-2のように複数の粒子を剛結するクランプ²⁾を導入して複雑な粒子形状を表現することにより、10倍程度の岩石の圧縮引張強度比を表現できるようになってきている³⁾。

粒状体解析では、表-1のように、粒子やクランプの形状と粒子密度、粒子間に作用するバネやボンドの剛性と

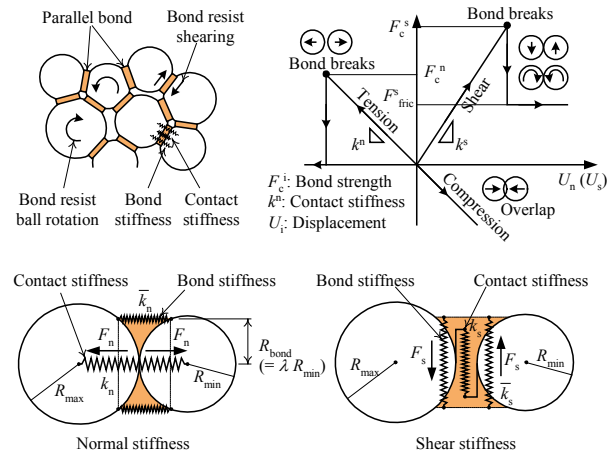


図-1 粒子間の結合 (パラレルボンド結合)²⁾を修正

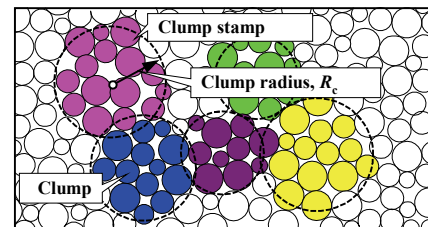


図-2 クランプモデル模式図²⁾を修正

強度などが入力パラメータとなる。これらの入力パラメータは、仮想的な存在である粒子の物理特性と粒子間の力学特性を規定するものであるため、実際の岩石の物性値を直接的に入力することができず、試行錯誤的に要素

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	\bar{E}_c [GPa]
Parallel bond stiffness ratio	\bar{k}_n/\bar{k}_s
Parallel-bond radius multiplier	$\bar{\lambda}$
Parallel-bond normal strength	$\bar{\sigma}_c$ [MPa]
Parallel-bond shear strength	$\bar{\tau}_c$ [MPa]
Clump radius	R_c [mm]

表-2 花崗岩の力学物性値と粒状体解析結果

	Uniaxial compression strength [MPa]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio	Brazilian tensile strength [MPa]
Experiment ⁵⁾	139.1	24.1	0.29	11.9
Simulation	139.0	27.2	0.28	10.1

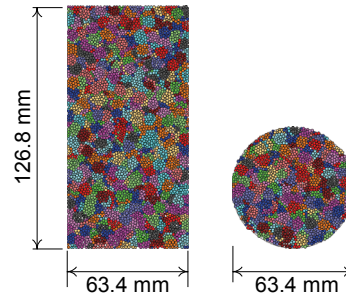


図-4 一軸圧縮試験および圧裂引張試験シミュレーションのモデル

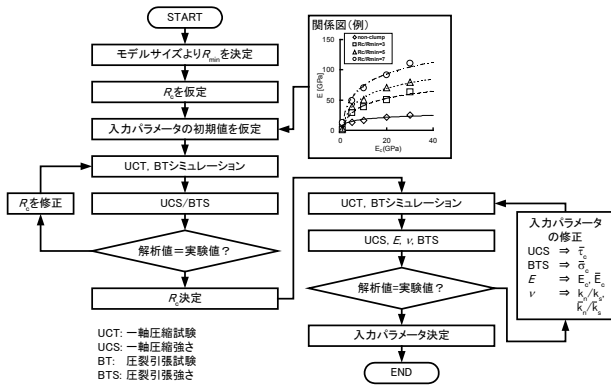


図-3 入力パラメータの決定手順⁴⁾を修正

試験シミュレーションを繰り返して同定していかざるを得ない。入力パラメータの最終的な値を得るまでに膨大な労力を要することも多い。これに対して井上⁴⁾は、種々の入力パラメータに対する要素試験シミュレーションを実施し、入力パラメータと力学物性値との関係図を作成するとともに、図-3のように入力パラメータを効率的に決定するための手順を示している。

本研究では、硬岩の亀裂進展、破壊現象への粒状体解析手法の適用性をさらに検討するため、硬岩として代表的な花崗岩のモデル化を試みた。解析には2次元のParticle Flow Code (PFC2D, Itasca) を使用し、クランプモデルを用いて花崗岩をモデル化した。本論文では、解析結果に基づいて、圧裂引張試験のシミュレーションでは、解析上の最大応力時は岩石の破壊時点と必ずしも一致しない可能性があること、圧裂引張試験シミュレーションでは、得られる引張強さがクランプ配置に大きく依存してばらつくことなどの課題を明らかにする。また、引張領域における硬岩の強度変形特性のモデル化では、圧裂引張試験よりも一軸引張試験シミュレーションを用いた方が、クランプ配置の影響が小さく、安定的にモデル化が可能であることなどを指摘する。

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

(1) 一軸圧縮試験および圧裂引張試験シミュレーションによる花崗岩の力学物性値のモデル化

ここでは佐藤⁵⁾が文献から収集した花崗岩の強度・変形試験のデータに基づき、その平均値をモデル化することとした。対象とした力学物性値を表-2に示す。

解析モデルのサイズは、図-4に示すように、一軸圧縮試験シミュレーションについては63.4×126.8 mm、圧裂引張試験シミュレーションについては直径63.4 mmとした。図における同色の領域は1つのクランプを表している。解析上の載荷速度は、一軸圧縮試験、圧裂引張試験ともに5.0×10⁶ mm/stepである。計算の終了条件は、荷重が最大値を超えて最大荷重の80%まで低下したときとした。

入力パラメータの調整は、図-3に示す手順で実施した。まず、井上⁴⁾が示したクランプ半径ごとの入力パラメータと力学物性値との関係図に基づいて、クランプ半径とその他の入力パラメータを仮設定し、一軸圧縮試験と圧裂引張試験のシミュレーションを実施する。解析で得られる一軸圧縮強さと圧裂引張り強さの比を実験値と比較し、一致しなければクランプ半径を調整してシミュレーションを繰り返す。圧縮強さと引張強さの比が再現できた時点でクランプ半径は固定し、以降は、その他の力学物性値を再現するよう入力パラメータを調整していく。調整にあたり、各力学物性値に影響の大きい入力パラメータとして、ヤング率Eについては粒子とボンドの接触係数E_c、 \bar{E}_c 、ポアソン比νについては粒子とボンドの垂

表-3 花崗岩の入力パラメータ

R_{min}	0.5 mm	\bar{E}_c	7.3 GPa
R_{max}/R_{min}	1.5	\bar{k}_n/\bar{k}_s	1.3
ρ	2630 kg/m ³	$\bar{\lambda}$	0.8
E_c	7.3 GPa	$\bar{\sigma}_c$	3±0.6 MPa
k_n/k_s	1.3	$\bar{\tau}_c$	140±28 MPa
μ	0.3	R_c	2.5 mm

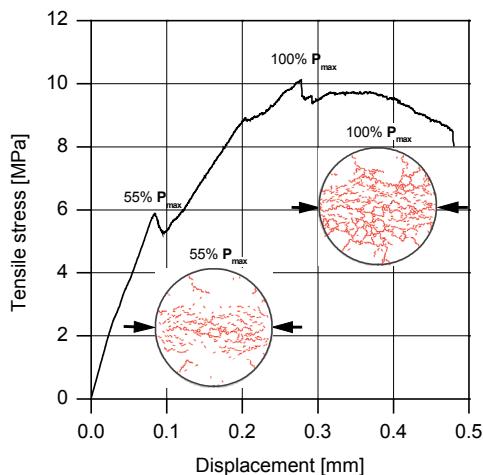


図-5 圧裂引張試験シミュレーションによる応力変位関係と最大引張応力時および55%応力時のモデル内の亀裂分布

直・せん断バネ剛性の比 k_n/k_s , \bar{k}_n/\bar{k}_s , 一軸圧縮強さ UCS についてはボンドのせん断強さ $\bar{\tau}_c$, 圧裂引張強さ BTS についてはボンドの引張り強さ $\bar{\sigma}_c$ であることがわかっていて、解析結果に応じてこれらの入力パラメータ値を微調整していく。

(2) 解析結果

最終的に得られた入力パラメータを表-3に、また、この入力パラメータによる解析結果を表-2に示す。表-2より、解析結果は実験値を良く再現していることが確認できる。

図-5は、圧裂引張試験シミュレーションによる変位応力関係を示す。図より、応力変位関係は最大応力時だけでなく、最大応力の55%の時点にも局所的なピークを持つことが確認できる。図-5には、この2つのピークにおけるモデル内の亀裂分布（赤は引張亀裂）も表示しているが、これを見ると、最大応力時には亀裂がモデル全体に広がっていることがわかる。実際の硬岩の圧裂試験では、亀裂がこれほど広範囲に広がるまで供試体が分離せずに保持されることは考えにくい。また、最大応力の55%時点でモデル内の亀裂はすでに载荷ライン上を貫くように分布しており、この時点でモデルは破壊に至っていてもおかしくない。これらの結果から、圧裂引張試験のシミュレーションでは、最大引張応力時点が岩石の破壊と一致していない可能性が指摘される。シミュレーションにおいてモデル内に亀裂がある程度発生しても破壊が脆

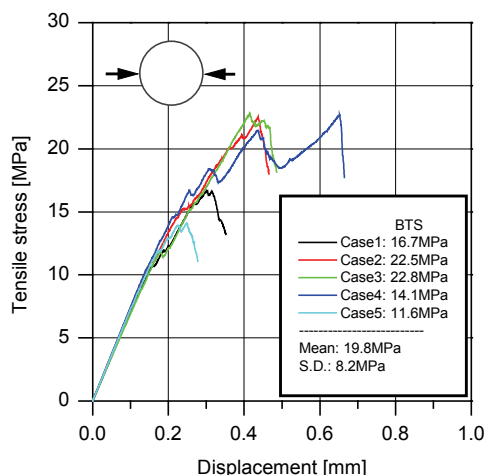


図-6 クランプ配置の異なる5種類のモデルに対する圧裂引張試験シミュレーション結果

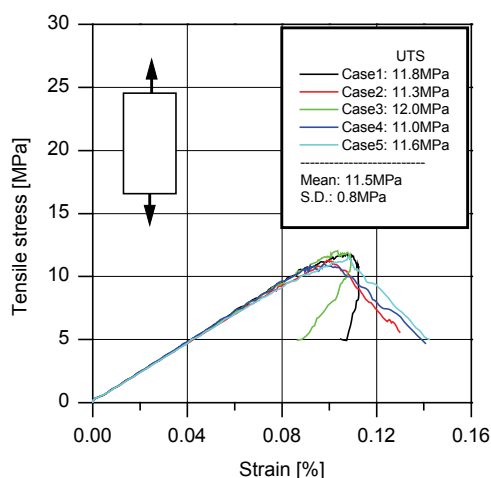


図-7 クランプ配置の異なる5種類のモデルに対する一軸引張試験シミュレーション結果

性的に進行しない原因としては、クランプの存在が亀裂の進展を阻害したり、クランプどうしの噛み合わせが耐荷力を発揮して亀裂への応力集中を抑えてしまうことなどが考えられる。

(3) 圧裂引張強さのクランプ配置依存性

クランプ配置の異なる5種類のモデルで圧裂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-6は圧裂引張試験シミュレーションによる応力変位関係を示す。図より、圧裂引張試験シミュレーションではクランプ配置によって引張強さが40%程度もばらつくことが確認できる。

このように圧裂引張試験シミュレーションで引張強さがばらつく1つの理由として、圧裂引張試験はモデル内部の応力状態が均質でないことが考えられる。そこで、モデル内部の応力状態が均質である一軸引張試験をシミュレートすることで岩石の引張強度特性をモデル化することを考える。

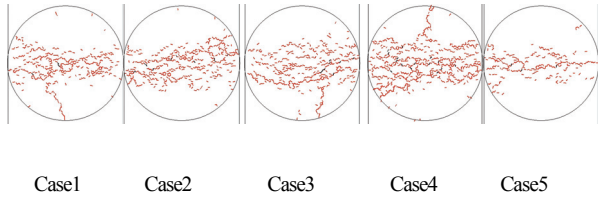


図-8 クランプ配置の異なる 5 種類のモデルの圧裂引張試験シミュレーションによる最大応力時の亀裂分布

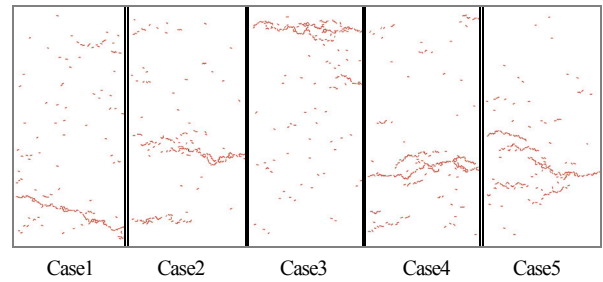


図-9 クランプ配置の異なる 5 種類のモデルの一軸引張試験シミュレーションによる最大応力時の亀裂分布

表-4 稲田花崗岩の力学物性値⁶⁾と粒状体解析結果

	Uniaxial compression test				Uniaxial tensile test				Brazilian test
	Uniaxial compression strength [MPa]	Young's modulus [GPa]		Poisson's ratio	Uniaxial tensile strength [MPa]	Young's modulus [GPa]		Poisson's ratio	Brazilian tensile strength [MPa]
		Tangent	Secant			Tangent	Secant		
Experiment ⁶⁾	163	58.6	47.5	0.27	7.1	21.3	26.2	0.06	8.5
Simulation	160	46.5	52.8	0.30	7.2	26.0	27.6	0.05	8.2

図-7 は一軸引張試験シミュレーションによる応力ひずみ関係である。図より一軸引張試験シミュレーションではクランプ配置の影響がほとんど見られず、引張強さのばらつきが小さい。圧裂引張試験シミュレーションでは強度のばらつきが40%だったのに対し、一軸引張試験シミュレーションでは強度のばらつきは7%程度である。

図-8、図-9 は、圧裂引張試験シミュレーションと一軸引張試験シミュレーションの最大応力時の亀裂分布を示している。圧裂引張試験シミュレーション結果では亀裂が帯となって分布しているのに対し、一軸引張試験シミュレーション結果では幅の狭い亀裂帯がほぼ水平方向に発生することが確認できる。また、一軸引張試験シミュレーションでは亀裂帯の入る高さはモデルによって異なっている。一軸引張試験では応力状態がモデル内で均質であるため、構造的に最も弱い部分から破壊が進行する。そのため亀裂帯が発生する高さはモデルに依存し、その一方で強度のばらつきは小さくなるものと考えられる。これに対して圧裂引張試験では破壊の発生位置をモデル中心に規定しているため、モデル中心部の構造的な強さによって強度がばらつくものと考えられる。

3. 一軸引張試験シミュレーションを用いた入力パラメータの設定

前述から、硬岩の引張領域における力学特性をモデル化する際には、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。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。

表-5 稲田花崗岩の入力パラメータ

R_{min}	0.25 mm	$\frac{E_c}{E_s}$	16 GPa
R_{max}/R_{min}	1.5	$\frac{k_n}{k_s}$	2.4
ρ	2619 kg/m ³	λ	0.6
E_c	16 GPa	$\frac{\sigma_c}{\tau_c}$	20 ± 4 MPa
k_n/k_s	2.4	τ_c	160 ± 32 MPa
μ	0.3	R_c	1.5 mm

一軸引張試験の実施例は多くないが、ここでは林ら⁶⁾による稲田花崗岩の一軸圧縮試験、一軸引張試験および圧裂引張試験の結果を再現することを試みた。表-4 に実験値とシミュレーション結果を示している。また、入力パラメータを表-5 に示す。表より、シミュレーションは稲田花崗岩の力学物性値を適切に表現できている。図-10、図-11 はそれぞれ一軸圧縮試験および一軸引張試験のシミュレーション結果である。図より、圧縮領域、引張領域の変形特性も再現できている。

引張強度を確認するため、一軸圧縮試験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-12 に示す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。

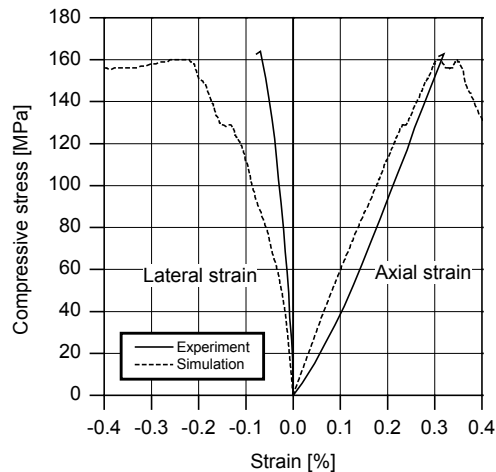


図-10 稲田花崗岩の一軸圧縮試験シミュレーション結果

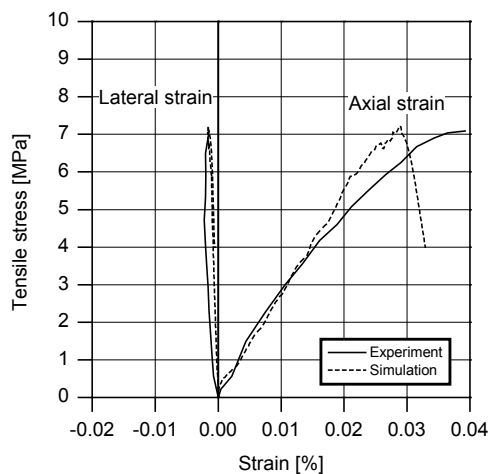


図-11 稲田花崗岩の一軸引張試験シミュレーション結果

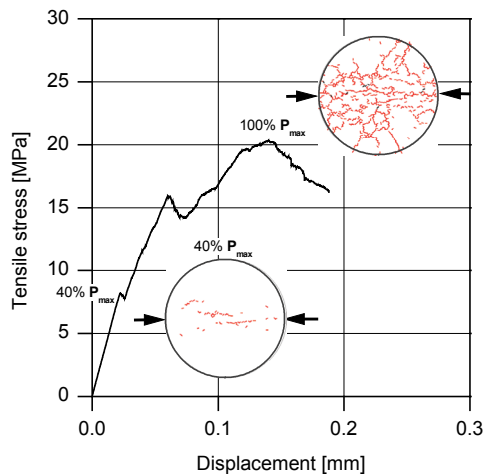


図-12 圧裂試験シミュレーションによる応力変位関係と最大引張応力時および40%応力時のモデル内の亀裂分布

4. まとめ

本研究では、クランプを用いた2次元の粒状体解析により、花崗岩の力学特性のモデル化を行った。一軸圧縮試験および圧裂引張試験の要素試験シミュレーションを行った結果、圧裂引張試験のシミュレーションでは、解析上の最大応力点が岩石の破壊時点と必ずしも一致しない可能性があること、圧裂引張試験シミュレーションでは得られる引張強さがクランプの配置に大きく依存してばらつくことなどの課題を明らかにした。また、引張領域における硬岩の強度変形特性のモデル化では、圧裂引張試験よりも一軸引張試験シミュレーションを用いた方が、クランプ配置の影響が小さく、安定的にモデル化が可能であることなどを指摘した。

クランプモデルは、粒状体解析において複雑な粒子形状を表現することができ、岩石の圧縮強さと引張強さの比を再現するには有効な手段であるが、一方で、引張によって発生した亀裂が脆性的に進展していくのを妨げる方向に作用する可能性がある。硬岩のモデル化におけるクランプの物理的・力学的な意味も含め、引張領域における岩盤の亀裂進展・破壊現象の表現方法については今後の課題である。

参考文献

- 1) D.O. Potyondy and P.A. Cundall, A bonded-particle model for rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, pp. 1329–136, 2004.
- 2) N. Cho, C.D. Martin and D.C. Segol, 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: 粒状体解析手法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) 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.
- 6) 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.

NUMERICAL SIMULATION OF BRAZILIAN TENSILE TEST AND UNIAXIAL TENSILE TEST FOR HARD ROCKS BY DISTINCT ELEMENT METHOD

Shinichiro NAKASHIMA, Ryo KODAMA, Kentaro INOUE and Norikazu SHIMIZU

This paper describes the numerical simulation using Particle Flow Code (PFC2D) of uniaxial compression test, Brazilian tensile test and uniaxial tensile test to determine the proper microscopic parameters of granite. The result clarifies that Brazilian test simulation is not necessarily applicable for identification of microscopic parameters to simulate tensile behaviors of hard rocks because the tensile strength obtained from Brazilian test simulation shows wide variation depending on the alignment of clumps within the rock model, and also because brittle failure in Brazilian test are not simulated when we use clumped particle models in PFC simulation.