

クローバークランプを用いた粒状体解析手法による硬岩モデルの圧縮・引張特性

山口大学大学院 学生会員 ○坂本 隆 正会員 中島伸一郎, 清水 則一

1. はじめに

岩の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。硬岩特有の脆性の強さを再現するためにはクランプの導入が不可欠である^{1)~4)}。つまりモデルの構成要素として、単なる円形では不十分であり、要素に凹凸やいびつさを与える必要がある。一方、要素の凹凸の度合いとモデルの破壊特性との関係は未解明の問題であった。そこで本研究では、クランプの凹凸度合いがモデルの破壊特性に与える影響を明らかにすることを目標とする。シンプルなクランプモデルとして、同一径の3粒子を剛結したクランプ要素（クローバークランプ）を用い、一軸圧縮試験および圧裂試験シミュレーションを実施した。クランプの凹凸度合いが破壊特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、そのメカニズムについて考察した。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. クローバークランプを用いた供試体の破壊シミュレーション
(1) クローバークランプ

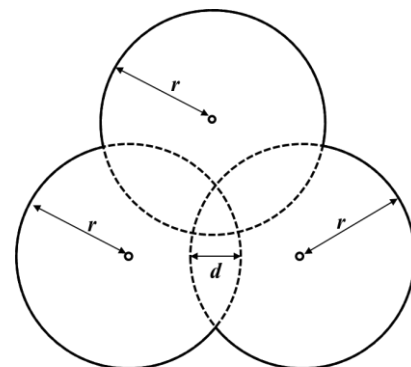
PFC は円形粒子が基本要素であるが、複数の粒子を剛結して一つの剛体要素として挙動させることが可能である。これをクランプという。粒子をオーバーラップさせたクランプも可能である。クローバークランプとは、同一径の3つの粒子をオーバーラップさせて剛結させて、その1つの塊で1つの要素とするものである。クローバークランプは、剛体要素なので作用する力で粒子が分裂することはない。

(2) 解析条件

クランプの凹凸度合いが破壊特性に及ぼす影響を明らかにするため、クローバークランプの粒子間のオーバーラップ量を変化させて一軸圧縮と圧裂試験シミュレーションを行った。ここに、オーバーラップ量は図-1に示すように、粒子半径 r に対する、粒子間の重なり合う距離 d の比によって定義し、その百分率をOLと表現することとする。シミュレーションに用いたマイクロパラメータは表-1⁵⁾に示す。解析は3種類の粒子配置で行った。供試体モデルは、一軸圧縮試験シミュレーションでは高さ126.8mm、幅63.4mm、圧裂試験シミュレーションでは直径63.4mmとした。

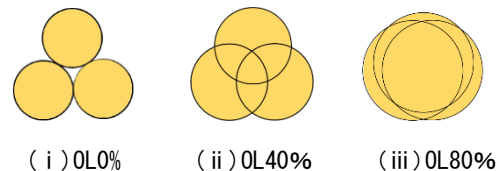
(3) 解析結果および考察

解析結果としてオーバーラップ量と一軸圧縮強度、引張強度、弾性係数、ポアソン比、脆性度(圧縮・圧裂強度比)の関係をそれぞれ図-2(a)~(e)に示す。粒子の配置による影響は図-2(b)より引張強度に大きく見られ、粒子配置の違いにより引張強度の変化の傾向が異なっている。これに伴い図-2(c)より、圧縮強度と引張強度の比である脆性も粒子の配置による値のばらつきが見られる。圧縮強度、弾性係数、ポアソン比は粒子の配置による影響は小さい。圧縮強度はOL=0%の時に最も小さく、OLが大きくなるにしたがって上昇し、非



r: particle radius, d: overlap of particles, OL = d/r [%]

(a) オーバーラップ量の定義



(b) オーバーラップ量の変化

図-1 クローバークランプにおけるオーバーラップ量の定義

表-1 マイクロパラメータ⁵⁾

マイクロパラメータ	入力値	単位
最小粒子半径	1.22	mm
最大粒子半径と最小粒子半径の比	1.66	-
密度	2630	kg/m ³
接触係数	67	GPa
垂直方向とせん断方向剛性の比	2.5	-
摩擦係数	0.5	-
パレルボンドの接触係数	67	GPa
パレルボンドの垂直方向とせん断方向剛性の比	2.5	-
垂直方向強度の平均値・標準偏差	166±38	MPa
水平方向強度の平均値・標準偏差	166±38	MPa

キーワード 硬岩, 粒状体解析手法, 一軸圧縮試験, 圧裂試験

連絡先 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 TEL: 0836-85-9334

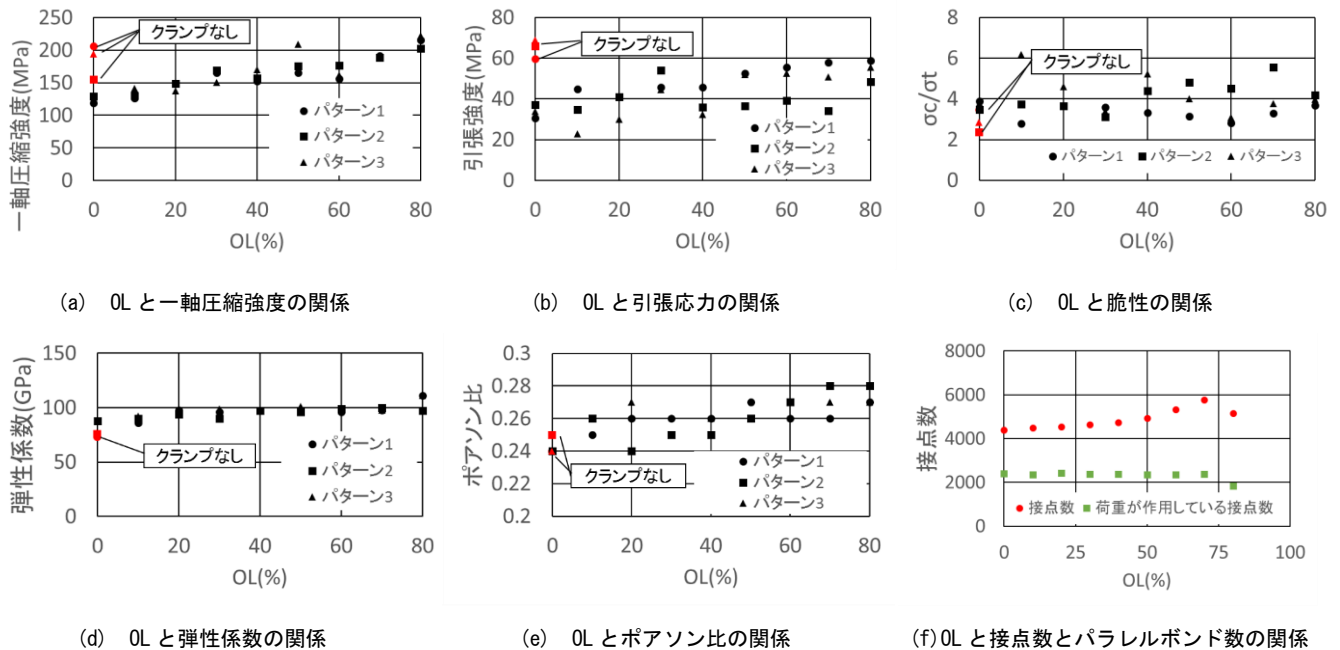


図-2 クローバークランプを用いた一軸圧縮試験と圧裂試験シミュレーション結果

クランプの強度に近づいていくことがわかった。この結果よりクローバークランプの形状は凹凸が少なく滑らかなものほど圧縮強度が大きくなると言える。凹凸度合いが強いほど、モデル内部に強度のばらつきが現れ、相対的に弱い部分から破壊が進行しやすくなっているものと考えられる。また、オーバーラップ量による圧縮強度の差は、要素間の接点数の差によってもたらされている可能性がある。そこで、各オーバーラップ量における接点数とパラレルボンドの数を図-2(f)に示す。この図から分かるようにオーバーラップ量が大きくなるにつれて接点数は増えているがオーバーラップ量が大きくなるにつれて接点数は増えているものの、荷重が作用している接点数は増えていない。つまり、パラレルボンドの数は圧縮強度に影響していなく接点の増加は圧縮強度の変化の原因ではないと考えられる。

3. 結論

本研究では、クランプの凹凸度合いが破壊特性に及ぼす影響を明らかにし、そのメカニズムを明らかにするためクローバークランプのオーバーラップ量を変化させて一軸圧縮試験・圧裂試験シミュレーションを行った。オーバーラップ量が大きくなると供試体の強度が上がる傾向が見られる。つまりクランプの凹凸が顕著になるほどモデルの強度は低下する。オーバーラップ量の増加に伴いモデル内の接点数は増加するものの、荷重を伝達する接点の数は変化しないことがわかった。その原因は接点数の増加に伴うパラレルボンドの増加と考えた。しかし、パラレルボンドの数は増加しておらず、原因は接点数以外のところにあると考えられる。

参考文献

- 1) Cho, N., Martin, C.D. and D.C. Sego, D.C. (2007), A clumped particle model for rock, *Intl. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 44, pp.997-1010.
- 2) Funatsu, T. Li, Q., Shimizu, N., Seto, M. and Matsui, K., 2008, Numerical simulation of crack propagation in rock by Particle Flow Code, *J. MMIJ*, 124: 611 - 618.
- 3) Inoue, K., T. Funatsu and Shimizu, N., 2009, The influence of clump radius on the mechanical properties of hard rocks in the clumped particle model. *Proc. of 2009 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering*, 153 - 160.
- 4) Nakashima, S., Taguchi, K., Moritoshi, A., Shimizu, N. and Funatsu, T., 2013, Loading conditions in the Brazilian test simulation by DEM, *Proc. of the 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMS13-515.
- 5) Itasca : PFC2D Version4.0 Fish in PFC2D, 2008