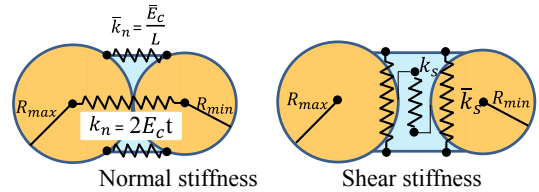


粒状体解析を用いた硬岩の一軸圧縮・引張試験解析とマイクロパラメータ決定の効率化

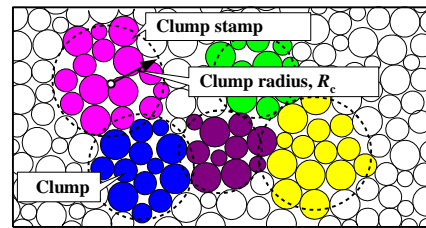
山口大学大学院 学 ○田口和也 久保田淳  
山口大学大学院 正 中島伸一郎 清水則一

1. はじめに

粒状体解析による岩石の破壊シミュレーションで一番問題となるのは、入力パラメータの同定である。図-1、表-1に示すような粒子径やクランプ径、粒子間のバネ係数などの値を決定するため、多数の要素試験解析が必要となる。従来は一軸圧縮試験と圧裂試験の要素試験解析が行われてきたが<sup>1,2)</sup>、圧裂試験は粒子配置によって解析強度がばらつきやすいなどの問題があった<sup>3)</sup>。一方、圧裂試験に代わって一軸引張試験解析は、粒子配置による結果の乱れも小さく安定的にパラメータ同定が可能である。本研究では、一軸引張試験解析を導入した入力パラメータ決定法<sup>3)</sup>(図-2)の効率化のため、一軸圧縮試験および一軸引張試験のパラメトリックスタディを行い、入力パラメータと解析結果の力学特性値(マクロパラメータ)との関係を明らかにする。



(a) 粒子間の結合(パラレルボンド結合)



(b) 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)

図-1 粒状体解析手法

2. 要素試験シミュレーション

図-3に示すような高さ126.8 mm、幅63.4 mmの2次元モデルを用いて一軸圧縮・引張試験の要素試験解析を行った。圧縮試験解析では、モデル上下端に設けた壁要素を等速で近づけることで载荷を表現した。一方、引張試験解析では壁要素を使用せず、モデル上下端付近の所定の厚み内に存在する粒子を直接、上方・下方へと遠ざかる方向にと変位させた。変位速度は、一軸圧縮試験・引張試験解析ともに10 nm/stepである。入力パラメータの値は表-1のとおり変化させた。表-1で基本としたパラメータを軸として、粒子間およびボンドの接触係数  $E_c (= \bar{E}_c)$  と垂直・せん断剛性比  $k_n/k_s (= \bar{k}_n/\bar{k}_s)$ 、ボンドのせん断強さ  $\bar{\tau}_c$  と引張強さ  $\bar{\sigma}_c$  の4つのパラメータを独立に変化させた。解析結果のばらつきを考慮し、同一パラメータで粒子配置を5パターン変化させ、解析結果の平均値をとった。

3. 解析結果

一軸圧縮・一軸引張試験シミュレーションによる応力ひずみ関係の例を図-4に示す。各ケースの応力ひずみ関係から圧縮強さ、引張強さ、弾性係数およびポアソン比を図のように求め力学特性値(マクロパラメータ)

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

パラメータ	記号	基本	解析ケース
Minimum ball radius	$R_{min}$ [mm]	0.5	const
Ball size ratio	$R_{max}/R_{min}$	1.5	const
Ball density	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2630	const
Contact modulus	$E_c$ [GPa]	20	1,5,10,30
Normal/shear stiffness ratio	$k_n/k_s$	2.5	1,5,7.5,10
Friction coefficient	$\mu$	0.5	const
Parallel-bond modulus	$\bar{E}_c$ [GPa]	20	1,5,10,30
Parallel bond stiffness ratio	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	2.5	1,5,7.5,10
Parallel-bond radius multiplier	$\bar{\lambda}$	0.8	const
Parallel-bond normal strength	$\bar{\sigma}_c$ [MPa]	10	2,5,15,20
Parallel-bond shear strength	$\bar{\tau}_c$ [MPa]	100	50,80,120,250
Clump radius	$R_c$ [mm]	0,1,5,2.5,3,3.5	

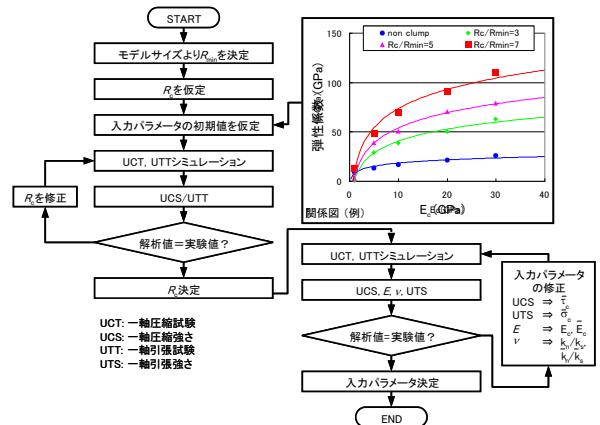


図-2 マイクロパラメータ決定手順<sup>2)</sup>

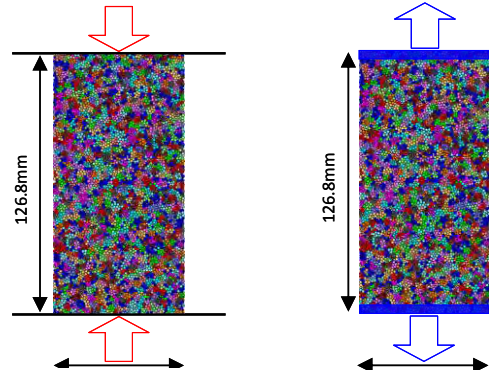
タ)とした。さらに全ての解析結果から、縦軸にマクロパラメータ、横軸に入力パラメータをとった関係図を作成したのが図-5である。ここでは、表-1に示す12種類の入力パラメータのうち、各マクロパラメータに影響力の大きかったものを示している。すなわち、一軸圧縮試験の弾性係数に対しては粒子間およびボンドの接触係数  $E_c (= \bar{E}_c)$ 、ポアソン比に対しては粒子間およびボンドの垂直・せん断剛性比  $k_n/k_s (= \bar{k}_n/\bar{k}_s)$ 、一軸圧縮強さに対してはボンドのせん断強さ  $\bar{\tau}_c$ 、一軸引張強さに対しては引張強さ  $\bar{\sigma}_c$  の影響力が大きい。またクランプが解析結果に及ぼす影響も大きいこともわかる。図-5(a)より非クランプモデルに比べてクランプモデルの弾性係数は2.5倍以上大きく、また、クランプ径が大きくなるに従って弾性係数も大きくなる。これはクランプ径が大きくなるにしたがってクランプ形状が複雑となり、クランプどうしの噛み合わせが強くなることでモデル全体の剛性を高めていると考えられる。図-5(c)より一軸圧縮強さについては、非クランプモデルおよびクランプ比  $R_c/R_{min}=3$  の場合には  $\bar{\tau}_c$  に対して変化が小さいのに対して、クランプ比を  $R_c/R_{min}=5$  まで大きくすると  $\bar{\tau}_c$  の増加に対して顕著に増加している。つまり、非クランプモデルでは入力パラメータの調整によって圧縮強さをコントロールすることが困難であったのに対して、クランプの導入によって圧縮強さの調整が比較的容易になったことを表している。図-5(d)より一軸引張強さについては、ボンドの引張強さ  $\bar{\sigma}_c$  に比例して増加すること、また、クランプ径の大小は引張強さにほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

4.まとめ

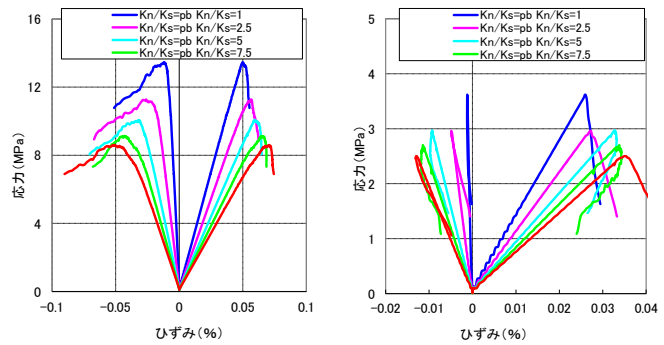
粒状体解析による硬岩のモデル化において、一軸引張試験解析を導入した入力パラメータ決定法の効率化のため、一軸圧縮試験および一軸引張試験のパラメトリックスタディを行い、入力パラメータと解析結果の力学特性値との関係を明らかにした。得られたマクロ-マイクロパラメータ関係図を利用することにより、モデル化する岩石の要素試験結果から入力パラメータの値の目安を求めることができるためパラメータの同定が容易となる。

参考文献

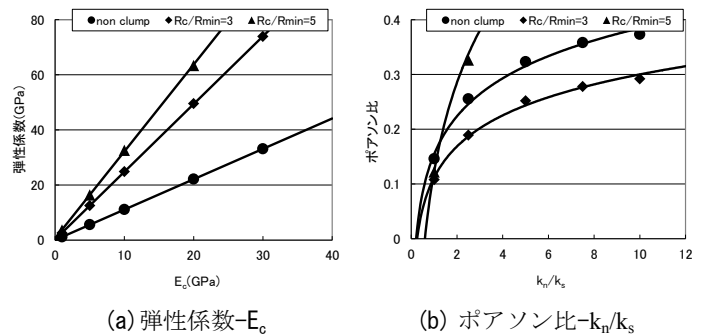
- 1) 船津貴弘, 李茜, 清水則一, 瀬戸政宏, 松井紀久男: 粒状体解析による岩石の亀裂進展挙動に関する検討, Journal of MMIJ, Vol.124, pp.611-618, 2008.
- 2) 井上健太郎, 三輪旭, 清水則一, 船津貴弘: クランプモデルを用いた粒状体解析手法による硬岩のモデル化におけるマイクロパラメータ決定手順, 第64回年次学術講演会概要集, 土木学会, pp.285-286, 2009.
- 3) 中島伸一郎, 児玉涼, 井上健太郎, 清水則一: 粒状体解析による硬岩のモデル化における圧裂引張試験と一軸引張試験の適用性, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, pp.167-172, 2011.



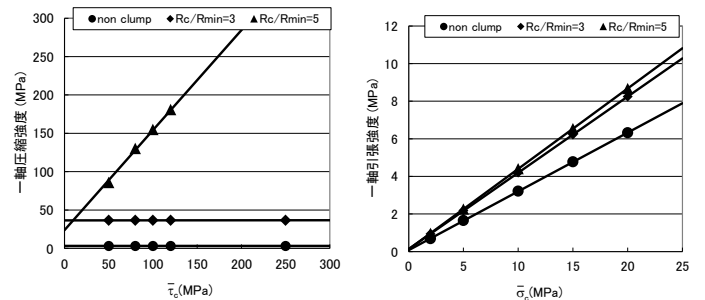
(a)圧縮試験シミュレーション (b)引張試験シミュレーション  
図-3 マイクロパラメータ決定手順



(a)一軸圧縮強さ (b)一軸引張強さ  
図-4 応力ひずみ関係



(a)弾性係数- $E_c$  (b)ポアソン比- $k_n/k_s$



(c)一軸圧縮強さ- $\bar{\tau}_c$  (d)一軸引張強さ- $\bar{\sigma}_c$   
図-5 マクロ-マイクロパラメータ関係図