

粒状体個別要素法における 岩石力学物性の設定に及ぼす粒子数および粒度分布の影響

清水浩之* 村田澄彦** 石田毅***

Effects of particle number and size distribution on macroscopic mechanical properties of rock models in DEM

by

Hiroyuki SHIMIZU*, Sumihiko MURATA** and Tsuyoshi ISHIDA***

In this study, a new Distinct Element Method (DEM) code had been developed, and a series of rock test simulations, such as uniaxial compression test, uniaxial tension test and Brazilian test are performed to investigate the effects of particle number and size distribution on macroscopic mechanical properties of rock models. Each simulation result was in good agreement with actual experimental results conducted by previous researchers, and the findings obtained from this study can be summarized as follows. The variation of calculated values of macroscopic mechanical properties decreases with increasing the number of particles. When the number of particles is 10000 or more, stable results are obtained as a rock test. Moreover, macroscopic mechanical properties of rock model, such as uniaxial compressive strength, Young's modulus and uniaxial tensile strength are significantly affected by porosity of the rock model. Since small particles fill the space among large particles, the porosity of the rock model decreases with increasing the maximum/minimum radius ratio of the particles, and particles are densely packed in the rock model. When the particle is closely arranged, the displacement of each particle is restrained with the adjacent particles even if the bond between particles breaks. As a result, the macroscopic mechanical properties of rock model increase greatly.

Key words: Distinct Element Method (DEM), Rock, Particle size distribution, porosity, Macroscopic mechanical properties

1 緒 言

近年のコンピュータ技術の進歩に伴い、種々の数値解析手法が開発されている。シミュレーションにより岩石の破壊を模擬することにより、実験で測定困難な微小亀裂の発生についても検討することが可能となる。岩石のような連続体に対して最もよく用いられる数値解析手法に有限要素法や境界要素法などがある。これらの手法は解析精度が高く、応用範囲も広いことが長所として挙げられるが、微小亀裂の発生や進展および破壊にともなう大変形といった現象を取り扱うためにはメッシュを切りなおす等の煩雑な操作を行う必要がある。

一方、粒状体個別要素法 (Distinct element method: DEM)^{1, 2)} は岩石を円形粒子の集合体としてモデル化するため、空隙、潜在亀裂、鉱物結晶の境界面等によって岩石内部に生じる応力の不均一を比較的容易に、かつ適切に表現できる特徴がある。すなわち、実際の岩石における亀裂の発生過程に忠実なモデル化が可能である。したがって、岩石のような脆性材料の破壊に関する数値解析手法として、DEM は有効であると考えられる。

個別要素法は初期モデルを適切に設定することで、容易に不均一な岩石を表現でき、現実に近い適切なシミュレーションを行うことが可能である。そのためには、粒子間結合の剛性、強度といった入力パラメータと、モデル内の単位面積当たりの粒子数や粒度分布といった岩石

モデルの微小な内部構造に影響するパラメータを合理的に決定することが必要不可欠である。入力パラメータについては、多くの研究者により種々の決定法が提案されているが³⁾、粒子数や粒度分布については、いくつかの研究例は報告されているものの^{2, 4, 5)}、妥当な決定手法が確立されていないのが現状である。現実の岩石供試体には非常に小さい鉱物粒子も含まれており、これを忠実に再現するためには膨大な数の粒子が必要となるが、粒子数があまりにも多いと、シミュレーションに長い時間を要する、あるいは解析が不可能となる場合もあるため、解析の対象となる岩石の内部構造を完全に再現することは現状では困難である。したがって、適切なシミュレーションを行うためには、対象岩石の特徴を良好に表現し、なおかつ解析可能である粒子数や粒度分布を決定するための指標を得ることが必要となる。

そこで、本研究では独自に開発を行った二次元 DEM コードにより^{6, 7, 8)}、粒子数や粒度分布をさまざまに変化させた岩石モデルを用いて、基本的な岩石試験である一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂試験のシミュレーションを行なった。その結果、本研究で用いた DEM コードの妥当性を検証するとともに、粒子数や粒度分布といった岩石モデルの微小な内部構造に影響するパラメータが岩石モデルのマクロな物性に与える影響について詳細な検討を行ったので報告する。

+ 原稿受理 平成 年 月 日 Received

* 学生会員 京都大学大学院 京都市西京区京都大学桂, Graduate Student, Kyoto Univ., Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto

** 正 会 員 京都大学大学院 京都市西京区京都大学桂, Associate professor, Kyoto Univ., Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto

*** 正 会 員 京都大学大学院 京都市西京区京都大学桂, Professor, Kyoto Univ., Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto

2 解析手法の概要

本研究では、膨大な計算時間を必要とし解析結果の解釈も複雑になる 3 次元解析を避け、まず単純な 2 次元モデルを用いて検討を行うこととした。個別要素法の基本原理や詳細なアルゴリズムについては、過去に多くの研究報告がなされているので^{1,2)}、ここでは省略するが、本研究に特徴的なアルゴリズムについては以下に詳しく説明する。なお、本論文では、応力やひずみは圧縮を正とする。

2.1 粒子間の結合

結合力を有する円形粒子の集合体により岩石をモデル化する。ここでは、2つの粒子 i, j の間を法線方向、接線方向、回転ばねの 3 つのばねで結合することにより、反発力とともに引張力をも表現した。法線方向ばねは粒子の法線方向の相対変位を、接線方向ばねは接線方向の相対変位を、回転ばねは相対回転変位をそれぞれ拘束することで、粒子間に反発力または引張力が生じる。結合点に作用するこれらの反発力または引張力は、次の法線方向作用力 f_n 、接線方向作用力 f_s 、モーメント f_θ の合力として与えられ、それぞれの作用力は粒子間の相対変位から次式で求められる。

$$f_n = k_n (dn_j - dn_i) \quad (1)$$

$$f_s = k_s \left\{ ds_j - ds_i - \frac{L}{2} (d\theta_j + d\theta_i) \right\} \quad (2)$$

$$f_\theta = k_\theta (d\theta_j - d\theta_i) \quad (3)$$

ここで、 k_n 、 k_s 、 k_θ はそれぞれ法線方向ばね、接線方向ばね、回転拘束ばねのばね定数を、 dn 、 ds 、 $d\theta$ はそれぞれ法線方向変位、接線方向変位、回転変位を表しており、添字 i, j はそれぞれの粒子の番号を示している。粒子間の結合は模式的に Fig.1 のようになっており、 L は結合されている粒子間の距離を表す。結合幅 D は 2 粒子の半径の調和平均から次式で与えられる。

$$L = r_i + r_j \quad (4)$$

$$D = 2 \cdot \frac{2r_i r_j}{r_i + r_j} \quad (5)$$

また、粒子間に作用する垂直応力 σ とせん断応力 τ は作用力 f_n 、 f_s から次式で評価する。

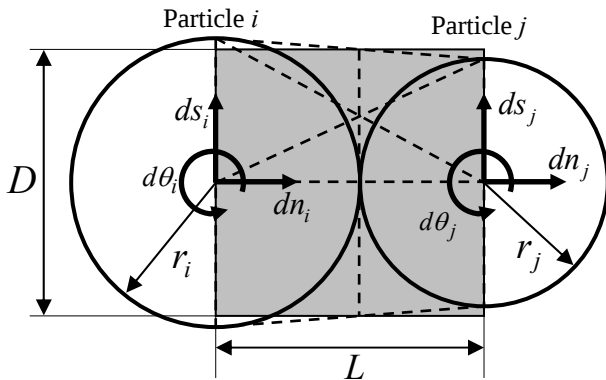


Fig.1 Bonded particles model.

$$\sigma = \frac{f_n}{D} \quad (6)$$

$$\tau = \frac{f_s}{D} \quad (7)$$

ばね定数 k_n 、 k_s 、 k_θ をそれぞれ独立したチューニングパラメータとした場合、これらの値を決定するのに大きな労力が必要となる。そこで、本研究では 2 つの粒子間の結合部分を弾性梁とみなすことにより法線方向ばね定数 k_n 、回転ばね定数 k_θ を決定し、接線方向ばね定数 k_s については法線方向ばね定数 k_n の定数倍で与える。それぞれのばね定数は次式で与えられる。

$$k_n = \frac{E_p A}{L} \quad (8)$$

$$k_s = \alpha \cdot k_n \quad (9)$$

$$k_\theta = \frac{E_p I}{L} \quad (10)$$

ここで、 E_p 、 I 、 A 、 α はそれぞれ、粒子間の結合部分に与えたヤング率、断面二次モーメント、結合部分の断面積、法線方向と接線方向のばね定数比である。断面二次モーメント I については結合幅 D 、奥行き 1 の矩形断面を仮定している。このように、本研究において、三種類のばね定数を決定するのに必要な入力パラメータは粒子間の結合部分に与えたヤング率 E_p と法線方向と接線方向のばね定数比 α の二つとなっている。ただし、粒子間の結合部分に与えたヤング率 E_p は、微視的（ミクロ）なもので一軸圧縮試験のシミュレーションの結果得られる岩石モデルのヤング率とは異なるものである。したがって E_p 、 α を変更したシミュレーションを繰り返すことにより解析対象となる岩石のマクロな変形強度特性を与える値を決定すること、つまり Calibration が必要である。

2.2 結合の破断による微小亀裂の表現

本研究では、次のように微小破壊の発生条件を定めた。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma < 0 \text{ (Tensile)} \\ |\sigma| \geq \sigma_c \end{array} \right\} \dots \text{結合の破壊条件 1}$$

$$|\tau| \geq \tau_c \dots \dots \dots \text{結合の破壊条件 2}$$

すなわち、破壊条件 1 のように引張応力 σ があらかじめ定める法線方向ばねの引張強度 σ_c を超える場合、あるいは破壊条件 2 のようにせん断応力 τ があらかじめ定める接線方向ばねの強度 τ_c を超える場合に粒子間の結合を破断させることにより、微小亀裂の発生を表現した。このとき、いずれかの破壊条件を満たした時点で、これ以降その粒子間には引張力が作用しないこととした。微小亀裂は、2 粒子の接触点に生成され、その進展の方向は 2 粒子の中心を結ぶ直線と垂直な方向となる。

本研究における式 (6) による垂直応力の評価は、Fig.1 のように仮定した長さ L 、幅 D の弾性梁の断面における平均垂直応力となっている。一方、Potyondy and Cundall の構築した parallel-bond model においては²⁾、粒子間に作用する垂直応力 σ を、モーメント f_θ を用いて評価してお

Table1 Rock model properties

Particle density:	2500 (kg/m ³)
Friction coefficient of particle:	0.5
Friction coefficient of wall:	0.3
Young's modulus of particle (E_p):	145 (GPa)
Poisson's Ratio of particle (ν_p):	0.3
Spring stiffness ratio (α):	0.3
Shear strength of bonding (σ_c):	245 (MPa)
Tensile strength of bonding (τ_c):	60 (MPa)

Table2 Calibration results

	Simulation	Experiment
-Uniaxial compression test-		
UCS of rock model:	189.2 (MPa)	100 - 250 (MPa)
Young's modulus of rock model:	71.4 (GPa)	50 - 75 (GPa)
Poisson's Ratio of rock model:	0.261	0.1 - 0.26
-Uniaxial tension test-		
Tensile strength of rock model:	16.2 (MPa)	
-Brazilian test-		
Tensile strength of rock model:	15.4 (MPa)	7 - 25 (MPa)

り、これは、仮定した弾性梁の断面内での最大引張応力により引張破壊の判定を行なうことを意味している。しかし、この垂直応力の評価では、後に述べるように、引張応力を過大に評価してしまう可能性があるため、本研究では回転ばねによるモーメントを用いない式 (6) による垂直応力の評価法を採用した。この点が、本研究のモデルと Potyondy and Cundall のモデルの最も大きな違いである。

3 各種岩石試験シミュレーションの概要

3.1 岩石モデルの作成方法と入力パラメータ

岩石モデルは、ばねによって接続された円形粒子の集合体で表現されている。粒子半径は、設定した最大粒子半径と最小粒子半径の間で、乱数により偏りなく一様にばらつくように与える。岩石モデルの作成 (パッキング) 方法については、乱数により半径を決定した粒子を、すでに配置されている粒子と重なり合わず接触できる位置を探索して配置し、モデル内の空間がなくなり、あらかじめ設定した最小の半径を有する新しい粒子が配置できなくなるまでこの手順を繰り返す手法を用いた。以上のように作成した岩石モデルに対して、一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂試験のシミュレーションを行う。シミュレーションに使用した入力パラメータは、岩石モデルの物性値が花崗岩程度の値となるように決定した。決定した入力パラメータを Table1 に示す。また、Calibrationの結果得られた岩石モデルのマクロな物性値と室内試験における一般的な花崗岩の物性値¹¹⁾を Table 2 に示す。本研究では、すべてのシミュレーションで Table1 に示す入力パラメータを用いた。Fig.2 は一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂試験のシミュレーションにおけるそれぞれの载荷条件と典型的な亀裂の発生状況を示している。

Potyondy and Cundall の構築した parallel-bond model を用いた場合、岩石モデルの引張強度が実際よりも大きくなってしまふことが問題点として指摘されているが^{2,5,9,10)}、本研究では、岩石モデルの一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比だけでなく引張強度についても妥当な値が得られることが確認できた。これは、前述したような垂直応力の評価法の違いによるものと考えられる。

なお、Table2 と Fig.2 に示したシミュレーション結果には、4 章における Group D に属する岩石モデルを用いた。

3.2 一軸圧縮試験のシミュレーションの概要

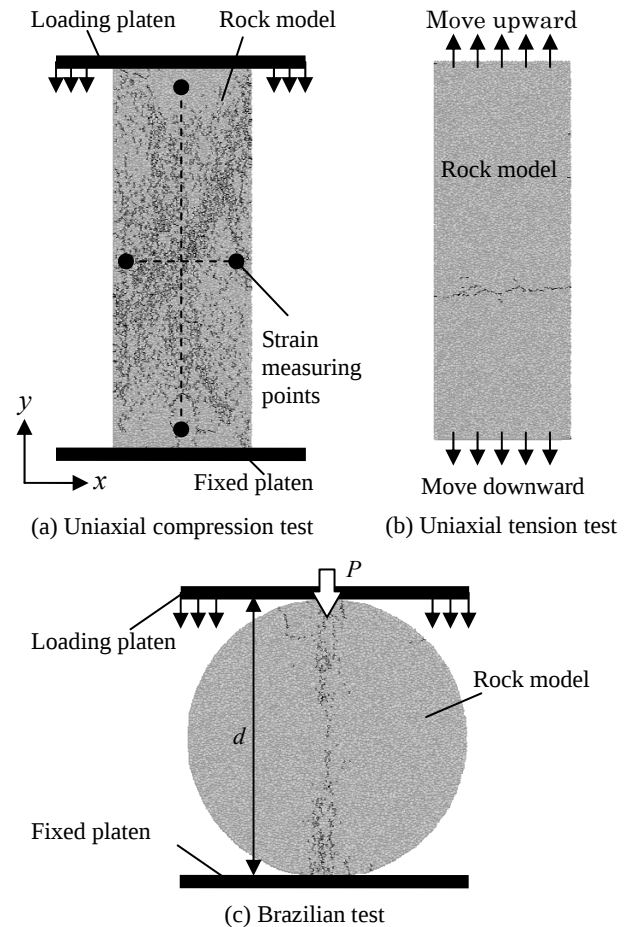


Fig.2 Loading condition for the simulation and spatial distribution of cracks. The solid lines indicate the crack generations

Fig.2 (a) に示すように、モデルの下部の载荷板を固定しておき、上部の载荷板を変位速度一定でゆっくりと下方に動かすことにより一軸圧縮試験を再現する。岩石モデルと载荷板の間には摩擦力が作用している。モデルの側面には拘束壁は設けていない。軸方向応力は、モデル上端の粒子から上部の载荷板に作用する反力の载荷軸方向の分力の総和をモデルの幅で除すことにより算出した。岩石モデルのひずみは、Fig.2 (a) に示すように岩石モデルの中心線上、端部付近の 4 個の粒子を選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測することにより算出した。ヤング率やポアソン比は、実験と同様に radial strain が

-0.01%となる時の軸応力と peak strength の 50%の値の割線により平面応力状態を仮定して求める^{12,13)}。

現実の一軸圧縮試験では、荷重速度はできるだけ低速が望ましいとされているが、これをシミュレーションでそのまま再現した場合、膨大な計算時間が必要となる。これに対し、Moon らの研究によると¹⁴⁾、個別要素法による一軸圧縮試験のシミュレーションでは、荷重速度がある程度以下になると、荷重速度にかかわらずほぼ一定の結果が得られることが示されている。したがって、本研究では荷重速度を変更した一軸圧縮試験のシミュレーションを繰り返すことにより、できるだけ短時間で安定した結果が得られるような荷重速度を採用した。

Fig.2 (a) に示すように、一軸圧縮試験のシミュレーションでは、荷重が進むとともに亀裂の発生数が増加していき、亀裂が岩石モデル全体に広く分布する。軸応力が peak strength に達するときには亀裂の進展や連結が連鎖し、極めて短時間で破壊が進行する。このような、一軸圧縮応力下における岩石の破壊過程に関しては、参考文献 (7), (8) で詳細に検討しており、粒状体個別要素法を用いることによって微小亀裂の発生から最終破断面の形成までの岩石の破壊過程を詳細に検討できることが示されている。

3.3 一軸引張試験のシミュレーションの概要

一軸引張試験には一軸圧縮試験と同じ岩石モデルを用いる。Fig. 2 (b) に示すように、モデルの上部と下部に位置する粒子を選択し、それらの粒子を上下に強制移動させることによりモデル内に引張力を作用させる。一軸引張試験による岩石モデルの引張強度は、選択した上部の粒子が、接続された他の粒子から受ける引張力の荷重軸方向の分力の総和をモデルの幅で除すことにより算出した。

一軸引張試験における亀裂の発生傾向は、多数の亀裂が発生し、これらの亀裂が集中、連結して破壊に至る一

軸圧縮試験の場合とは異なり、Fig. 2 (b) に示すように、岩石モデル内の一部に発生した亀裂が急速に進展することにより破壊に至る。この結果は、現実の一軸引張試験における岩石の破壊機構と調和的である。

3.4 圧裂試験のシミュレーションの概要

圧裂試験には円形の岩石モデルを使用する。Fig.2 (c) に示すように、モデルの下部の荷重板を固定しておき、上部の荷重板を変位速度一定でゆっくりと下方に動かすことにより圧裂試験を再現する。シミュレーションの結果得られる岩石モデルの引張強度は、モデル上端の粒子から上部の荷重板に作用する反力の総和 P とモデルの直径 d から次式で求められる。

$$S_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (11)$$

ここで、 l はモデルの長さをあらわすが、二次元であるので $l=1$ として計算している。

Fig. 2 (c) に示すように、圧裂試験のシミュレーションではモデルの中心に荷重軸方向と平行な亀裂が発生している。この結果は一般的な圧裂試験結果と一致している。また、Table2 に示すように、圧裂試験のシミュレーションにより得られた岩石モデルの引張強度は一軸引張試験により得られた値と同等の値となった。

4 シミュレーション結果

4.1 粒子数の影響

岩石モデルを構成する粒子数が解析結果に与える影響を検討するため、Table3 に示すような、粒子数の異なる 4 つの Group A, B, C, D について、粒子の配置が異なる岩石モデルをそれぞれ 16 個ずつ作成した。一軸圧縮 (引張) 試験に用いる長方形モデルはすべて幅 51mm, 高さ 143mm に統一した。また、圧裂試験のシミュレーションには円形モデルを用いており、長方形モデルと同様の粒度分布、粒子数となるように円形モデルの直径を 96mm

Table3 Four data sets with different number of particles

For uniaxial compression (tension) test Width: 51mm Height: 143mm	For Brazilian test Diameter: 96mm			
	Group A	Group B	Group C	Group D
Number of particles (average):	1107	2591	5364	9444
Maximum particle radius:	1.8mm	1.16mm	0.8mm	0.6mm
Minimum particle radius:	0.9mm	0.58mm	0.4mm	0.3mm
Max/Min particle radius ratio:	2.0	2.0	2.0	2.0
Porosity of the model (average):	19.62%	19.37%	19.01%	18.80%

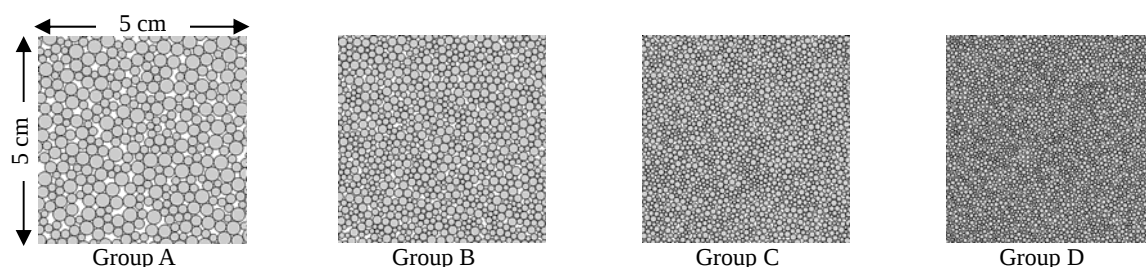


Fig.3 Close-up views of a rock model in group A, B, C and D. Sixteen models are randomly generated for each group.

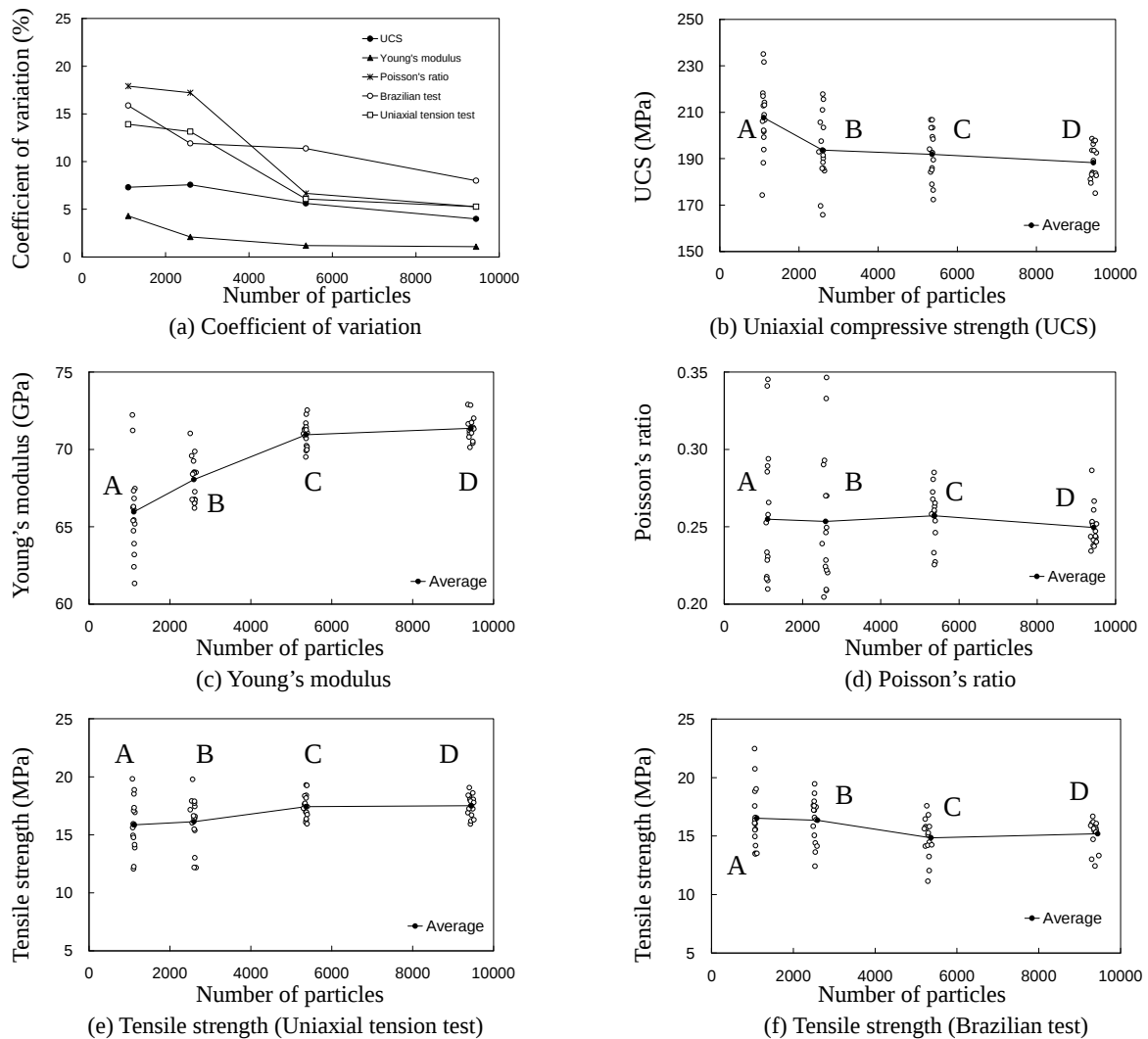


Fig.4 Relationships between the number of particles and macro properties of rock model.

とした。各 Group における最大、最小粒子半径は、最大／最小粒子半径の比を 2 として、Group A は粒子数が約 1000 個、Group B は約 2500 個、Group C は約 5000 個、Group D は約 10000 個となるように決定した。Fig.3 は 4 つの Group A, B, C, D に属する 16 の岩石モデルからそれぞれひとつを選び、モデル内の一部分を拡大して粒子の配置状況を示したものである。Table3 中の Porosity は岩石モデル内の空隙の割合を示しており、この値が小さいほど粒子が密に配置されていることを示している。これらの岩石モデルを用いて、一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂試験のシミュレーションを行なった。入力パラメータは Table1 の値を用いた。

シミュレーションの結果を Fig.4 に示す。Fig.4 (a) は Fig.4 (b) - (f) に示す、シミュレーションにより得られた岩石モデルの一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比、一軸引張強度、圧裂引張強度の値のばらつきを示す変動係数と粒子数の関係を表している。これを見ると、粒子数の増加に伴って、結果のばらつきが小さくなっていることがわかる。特に、粒子数が約 10000 個である Group D では、いずれの値の変動係数も 10%以下となっており、

岩石試験として安定した結果が得られた。

Fig.4 (b) はモデルの一軸圧縮強度 (UCS) と粒子数の関係を表している。各 Group における平均値に着目すると、粒子数の増加に伴って若干の一軸圧縮強度の低下が見られる。現実の岩石は鉱物粒子の集合体であり、その内部には空隙、潜在亀裂、鉱物結晶の境界面等の潜在的な欠陥が分布している。したがって、試験片が大きくなるに伴い、破壊の核となる潜在的な欠陥の存在、あるいは破壊が発生する確率が増大するために破壊強度は低下することが知られている。このことは一般に寸法効果と呼ばれている。一方、シミュレーションでは、亀裂が発生する場所は粒子間の結合部分となっている。したがって、粒子数が増加すると粒子間の結合箇所も増加し、亀裂の発生が可能な場所が増加することになる。そのため、岩石モデル内に亀裂が発生しやすい部分が含まれる確率が増大し、Fig.4 (b) に示すような粒子数の増加に伴う一軸圧縮強度の低下が見られたと考えられる。このことは、粒状体個別要素法においては、岩石モデルの大きさではなく、モデルを構成する粒子数によって現実の岩石における寸法効果と同様の効果が得られることを示している。

Fig.4 (c) はモデルのヤング率と粒子数の関係を表している。平均値に着目すると、一軸圧縮強度とは逆に、粒子数の増加に伴ってヤング率の増加が見られる。一軸圧縮試験のシミュレーションにおけるヤング率は岩石モデル内の粒子部分と空隙部分をあわせた見かけのヤング率となっており、このことは、粒子が密に配置されているほどヤング率が大きくなることを意味している。Table3によると、粒子数の増加に伴い岩石モデルの空隙率が減少しており、Fig.4 (c) に見られるヤング率の増加はこのような岩石モデルの空隙率の減少によるものと考えられる。また、Fig.4 (a) によると、ヤング率の変動係数は最も結果のばらつきが大きいGroup Aにおいても5%程度となっており、このことは岩石モデル内の粒子配置の変化がヤング率に与える影響が小さいことを示している。

Fig.4 (d) はモデルのポアソン比と粒子数の関係を示している。粒子数の増加に伴って値のばらつきが急速に収束しているが、各 Group における平均値に着目すると粒子数の変化によるポアソン比の増減は見られなかった。

Potyondy らの研究によると²⁾、岩石モデルのポアソン比は粒子数によらず、入力パラメータの Spring stiffness ratio (α) に強い影響を受けることが示されており、本シミュレーションの結果は従来の研究結果と一致している。しかし、Fig.4 (a) に示すように、ポアソン比のばらつきは粒子数に大きく影響されている。本研究では、3.2 節で述べたように、岩石モデル端部付近の 4 個の粒子を選出し、それらの粒子の変位を計測することで岩石モデルのひずみを算出している。そのため、粒子数が少ない場合には一つの亀裂が発生することによる影響が非常に大きく、岩石モデルを構成する粒子の配置が結果のばらつきに大きく影響すると考えられる。

Fig.4 (e), (f) はそれぞれ一軸引張試験と圧裂試験により得られたモデルの引張強度の粒子数による変化を示している。各 Group における平均値に着目すると、いずれの試験法においても、得られた引張強度に大きな違いはなく、粒子数の変化による引張強度の増減も見られなかった。ただし、Fig.4 (a) に示すように、圧裂試験に比べて一軸引張試験の値のばらつきが小さく、より安定した結果が得られることがわかった。一軸引張試験では、岩石モデル内の最も弱い部分に亀裂が発生し、それが進展することにより破壊に至る。一方、圧裂試験においては亀裂の発生場所が载荷軸線上に限定される。そのため、粒子数が少ない場合には各粒子の配置が大きく影響し、

結果のばらつきが大きくなったものと考えられる。

4.2 粒度分布の影響

粒度分布が解析結果に与える影響を検討するため、Table4 に示すような、最大粒子半径の異なる 4 つの Group E, F, G, H, 各 16 個ずつの岩石モデルを作成した。Fig.5 は 4 つの Group E, F, G, H に属する 16 の岩石モデルからそれぞれひとつを選び、モデル内の一部分を拡大して粒子の配置状況を示したものである。Table4 に示すように、各 Group の最小粒子半径を固定し、最大粒子半径を変化させることにより、各 Group における最大／最小粒子半径の比は、それぞれ 2, 3, 4, 5 となっている。各 Group の岩石モデルの高さと幅は、高さ／幅の比と粒子数が一定となるように調節されている。

前節の結果から、圧裂試験に比べて一軸引張試験の値のばらつきが小さく、より安定した結果が得られることが示されており、一軸引張試験であれば一軸圧縮試験と同じ岩石モデルを用いることができることから、ここでは圧裂試験のシミュレーションを行わず、一軸引張試験により引張強度の検討を行なう。入力パラメータは Table1 の値を用いた。シミュレーションの結果を Fig.6 に示す。Fig.6 (a) は変動係数と最大／最小粒子半径比の関係を示している。これを見ると、いずれの場合でも変動係数は 10%以下となっており、粒度分布の変化が結果のばらつきに影響しないことがわかった。

Fig.6 (b), (c), (d) はそれぞれモデルの一軸圧縮試験により得られた圧縮強度およびヤング率、一軸引張強度と最大／最小粒子半径比の関係を示している。いずれの結果も、最大／最小粒子半径比の増加に伴って値の増加が見られた。Fig.6 (e) は各 Group に属するモデルの粒子半径の累積度数分布を表している。Fig.6 (e) によると、Group E はほぼ様な粒度分布となっているが、最大／最小粒子半径比が大きくなるに伴って小さい粒子半径の粒子の割合が増加している。これは、3.1 節で述べた手法によりモデルを作成する際に、大きい半径の粒子の間を埋めるために小さい半径の粒子が多数使われたことが原因であり、これにより Table4 に示す最大／最小粒子半径比の増加に伴う空隙率の低下が起こったと考えられる。

上述したように各 Group の岩石モデルの粒子数は一定であるが、Group E, F, G, H の順にモデルの空隙率が低下しており、より密な粒子配置となっている。粒子が密に配置されている場合、粒子間の接続が破断した後でも隣接する粒子との接触により各粒子の変位が拘束され

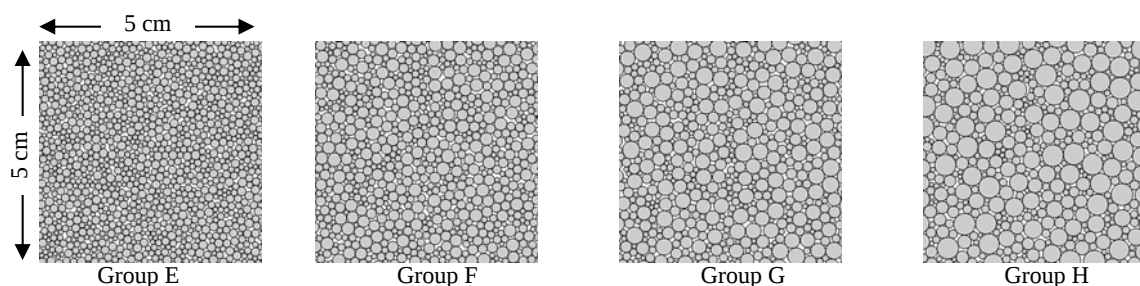


Fig.5 Close-up views of a rock model in group E, F, G and H. Sixteen models are randomly generated for each group.

Table4 Four data sets with different Max/Min radius ratios.

	Group E	Group F	Group G	Group H
Number of particles (average):	9378	9878	9375	9457
Maximum particle radius:	1.0mm	1.5mm	2.0mm	2.5mm
Minimum particle radius:	0.5mm	0.5mm	0.5mm	0.5mm
Max/Min particle radius ratio:	2.0	3.0	4.0	5.0
Porosity of the model (average):	18.89%	15.97%	14.08%	12.57%
Model width:	100mm	130mm	150mm	170mm
Model height:	200mm	260mm	300mm	340mm

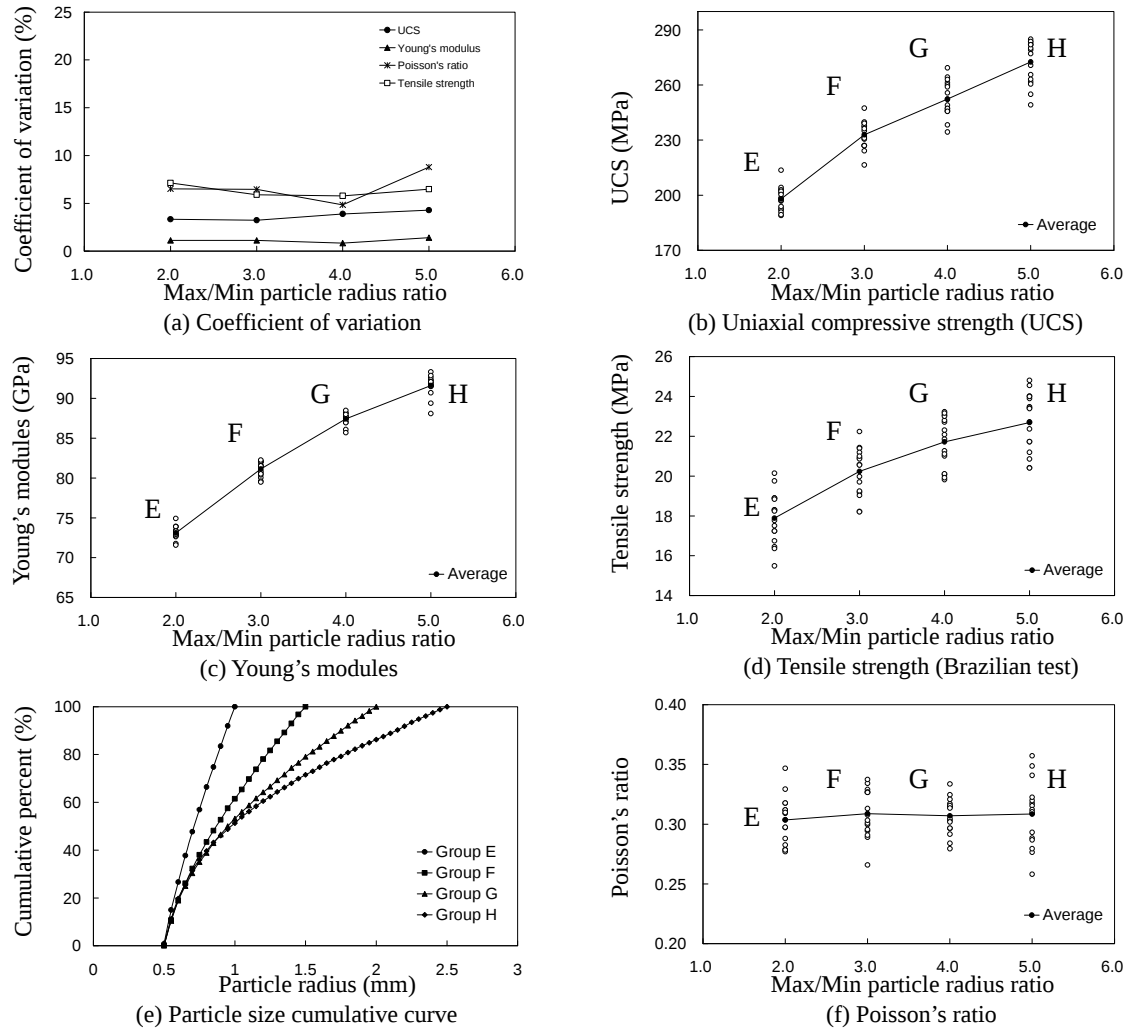


Fig.6 Relationships between the particle radius distribution and macro properties of rock model.

る。また、空隙率が下がることにより、モデル内で実際に荷重を受け持つ領域が増加し、粒子間の接続点ひとつに作用する応力が相対的に小さくなる。Fig.6 (b), (c), (d) に示した一軸圧縮強度、ヤング率、一軸引張強度の増加はこのことが原因であると考えられる。一方、粒子が密に配置されることは、一つの粒子に対する接続点数が多くなること、つまり、Group E, F, G, H の順に岩石モデル内に存在する粒子間の結合箇所が多くなっていることを意味している。4.1 節では、粒子間の接続点数が増加することにより岩石モデル内に亀裂が発生しやすい部分が含まれる確率が増大し、その結果一軸圧縮強度が

低下するという、現実の岩石における寸法効果と同様の効果が得られることが示されている。しかし、Fig.6 (b) に示した一軸圧縮強度は Group E, F, G, H の順に大幅に増加しており、これは、岩石モデルの空隙率の減少による岩石モデルの強度の増加が、前述した寸法効果による強度の減少よりも大きいためであると考えられる。

Fig.6 (f) はモデルのポアソン比と最大/最小粒子半径比の関係を示しているが、値のばらつき、平均値ともに最大/最小粒子半径比の増加に伴う変化は見られなかった。この結果と前節の結果をあわせて、岩石モデルを構成する粒子数や粒度分布が、岩石モデルのポアソン比に

与える影響は小さいことが明らかとなった。

5 結論

本研究では独自に開発を行った DEM コードにより、粒子数や粒度分布をさまざまに変化させた岩石モデルを用いて、基本的な岩石試験である一軸圧縮試験、一軸引張試験、圧裂試験のシミュレーションを行なった。その結果、岩石モデルの一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比だけでなく引張強度についても妥当な値が得られることが確認できた。さらに、粒子数や粒度分布が岩石モデルのマクロな物性に与える影響について検討を行なったところ以下の知見が得られた。

1. 岩石モデルを構成する粒子数の増加に伴って、結果のばらつきが小さくなった。このことは、粒状体個別要素法における結果のばらつきが粒子数に大きな影響を受けていることを示している。粒子数が約 10000 個になると、一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比、一軸引張強度、圧裂引張強度の値の変動係数が 10%以下となり、岩石試験として安定した結果が得られた。
2. 岩石モデルを構成する粒子数の増加に伴って一軸圧縮強度の低下が見られ、粒状体個別要素法においてモデルを構成する粒子数によって現実の岩石における寸法効果と同様の効果が得られることがわかった。
3. 一軸圧縮試験のシミュレーションにおけるヤング率は岩石モデル内の粒子部分と空隙部分をあわせた見かけのヤング率となっており、粒子が密に配置されているほどヤング率が大きくなることがわかった。また、岩石モデル内の粒子配置の変化がヤング率に与える影響が小さいことがわかった。
4. 岩石モデルを構成する粒子数や粒度分布の変化が岩石モデルのポアソン比に与える影響が小さいことが明らかとなった。
5. 一軸引張試験と圧裂試験のシミュレーションの結果、いずれの試験法においても、得られた引張強度の平均値に大きな違いはなかった。ただし、圧裂試験に比べて一軸引張試験の値のばらつきが小さく、安定した結果が得られることがわかった。
6. 岩石モデルの空隙率の変化が岩石モデルの岩石力学物性に及ぼす影響は非常に大きいことがわかった。空隙率が下がると、隣接する粒子との接触により各粒子の変位が拘束される。また、モデル内で実際に荷重を受け持つ領域が増加し、粒子間の接続点ひとつに作用する応力が相対的に小さくなる。その結果、ヤング率等の岩石力学物性が大幅に増加すると考えられる。

本研究では粒子数や粒度分布が岩石力学物性に与える影響について検討を行なったが、妥当な粒子数や粒度分布を決定するためには、他種の岩石試験のシミュレーションを行なう等、更なる研究が必要である。

参考文献

- 1) P.A.Cundall and O.D.L.Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, Vol.29,

No.1, pp.47-65, (1979).

- 2) D.O.Potyondy and P.A.Cundall, "A bonded- particle model for rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, pp.1329-1364, (2004).
- 3) J.Yoon, "Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.44, No.6, pp.871-889, (2007).
- 4) T.Koyama and L.Jing, "Effects of model scale and particle size on micro-mechanical properties and failure processes of rocks - A particle mechanics approach", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.31, No.5, pp.458-472, (2007).
- 5) M.P.J.Schöpfer, C.Childs and J.J.Walsh, "Two-dimensional distinct element modeling of the structure and growth of normal faults in multilayer sequences: 1. Model calibration, boundary conditions, and selected results", *Journal of Geophysical Research*, Vol.112, B10401, (2007).
- 6) H.Shimizu, S.Murata and T.Ishida, "The applicability of distinct element modeling for rock fracture", *Journal of MMIJ*, Vol.124, No.12, pp.777-784. (2008), (in Japanese).
- 7) H.Shimizu, S.Murata and T.Ishida, "Distinct element analysis for rock failure under uniaxial compression", *Journal of MMIJ*, Vol.125, No.3, pp.91-97. (2008), (in Japanese).
- 8) H.Shimizu, T.Koyama, T.Ishida, M.Chijimatsu, S.Nakama and T.Fujita, "Distinct element analysis for ClassII behavior of rock under uniaxial compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (2009), (to be submitted).
- 9) A.Fakhimi, "Application of slightly overlapped circular particles assembly in numerical simulation of rocks with high friction angles", *Engineering Geology*, Vol.74, No.1, pp.129-138, (2004).
- 10) H.Huang, "Discrete element modeling of tool-rock interaction", PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, USA, (1999).
- 11) R.D.Lama and V.S.Vutukuri, "Handbook on Mechanical Properties of Rocks II", pp.289-398 (1992), Translated by H.Masuda and S.Tanaka, Kokonsyoin.
- 12) C.E.Fairhurst and J.A.Hudson, "Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.36, pp.279-289, (1999).
- 13) E.T.Brown, "Rock characterization, testing and monitoring: ISRM. suggested methods", (1981) Pergamon Press,.
- 14) T.Moon, M.Nakagawa and J.Berger, "Measurement of fracture toughness using the distinct element method ", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.44, pp.449-456, (2007).