

## True tri-axial test using Distinct Element Method

Junichi TAKEKAWA, Yoshinori SANADA, Yasuhiro YAMADA and Yuzuru ASHIDA

## 1 はじめに

近年、資源工学や土木工学、防災や環境などの様々な分野において地下空間の利用が進められている。そのため地殻を構成する物質の力学的・工学的な性質を知ることが、安全性・施工性・経済性のためにも大変重要となっている。

従来、地殻を構成する物質の性質を知るために様々な種類の岩石試験が行われてきた。それらは引張試験・せん断試験・圧縮試験に大別される。その中で本研究では、圧縮試験の一種である、岩石供試体に異なる三種類の応力を与えて破壊する真三軸圧縮試験に注目した。

本研究では従来行われている室内試験を数値シミュレーション手法の一種である個別要素法を用いて再現することを試みた。その際、入力とするパラメータを周圧一定の三軸圧縮試験から求め、そのパラメータを用いて真三軸圧縮試験を行った結果が岩石の物性値として適切な範囲にあることを確かめた。また、実際に砂岩を用いて行われた室内試験結果と比較することで、シミュレーション結果は定性的に室内試験結果と一致することが確認できた。

## 2 個別要素法

**2.1 個別要素法とは** 個別要素法とは Cundall<sup>1)</sup>によって提案されたものであり、解析対象を微小な粒子の集合体として考え、個々の粒子の動きを追跡することによって全体の挙動を知ろうとするもので、破壊や不連続な現象を取り扱うのに適している。

個別要素法では、個々の粒子の間に鉛直方向とせん断方向の2種類の仮想バネを設ける。粒子間の力の伝達はこのバネによって、次式のように行われる。

$$F = k \cdot \delta \quad (1)$$

ここで、 $k$ はバネ定数、 $\delta$ は粒子間の相対変位である。このようにして求められた力を用いて、(2)式の運動方程式を解くことによって次のタイムステップにおける個々の粒子の座標値を決定する。

$$m \cdot \dot{v} = F \quad (2)$$

ここで、 $m$ は粒子の質量、 $v$ は粒子速度である。

**2.2 ボンディング破壊条件** 次に要素間に設定した仮想バネの破壊条件について述べる。バネの破壊には鉛直方向と接線方向の2種類について考える。

鉛直方向のバネの破壊条件は引張力が以下の式、

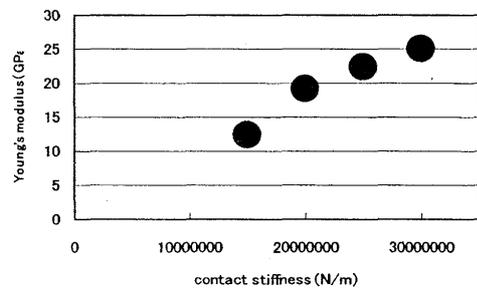
$$f^n \leq f_{crit}^n \quad (3)$$

を満たした時に発生するものとする。ここで、 $f^n$ はバネの鉛直方向の力（圧縮を正とする）、 $f_{crit}^n$ は鉛直方向の破壊時の引張力である。

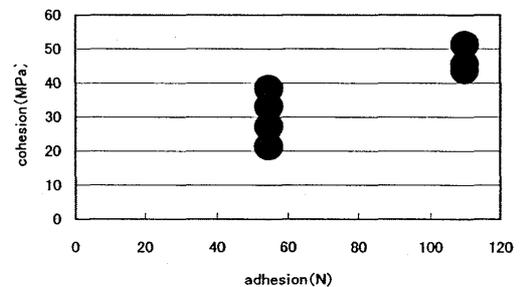
次に、せん断方向のバネの破壊条件は、

$$|f^s| \geq c + \mu \cdot |f^n| \quad (4)$$

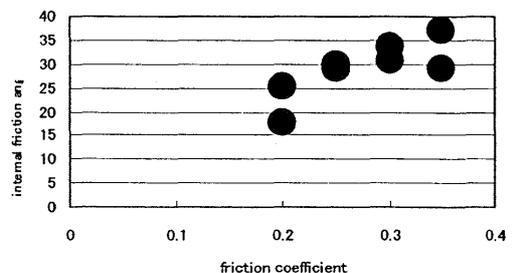
が満たされたときに発生するものとする。ここで、 $f^s$ は



(a) Contact stiffness vs Young's modulus



(b) Adhesion vs cohesion



(c) Friction coefficient vs internal friction angle

Fig.1 Relationship between micro-parameter and macro-parameter.

Table 1 Input parameters.

normal contact stiffness	$2.5 \times 10^7 (N/m)$
shear contact stiffness	$9.6 \times 10^6 (N/m)$
particle size	$0.002 (m)$
density	$2700 (kg/m^3)$
adhesion	$55.0 (N)$
friction coefficient	0.3

バネのせん断方向の力、 $c$ は鉛直方向の力とは無関係に発揮されるせん断抵抗力である粒子間付着力、 $\mu$ は粒子間摩擦係数である。

**2.3 入力パラメーター** 本研究では、数値計算に用いたパラメーターを周圧一定の三軸圧縮試験から決定した。本研究において今回対象としたのは砂岩である。粒子間摩擦係数は内部摩擦角から、粒子間付着力は粘着力から、バネ定数はヤング率からそれぞれ適切と思われる値<sup>2)</sup>を与えるものを採用した。なお、せん断方向のバネ定数は鉛直方向のバネ定数の1/2.6で固定してある。試験結果をFig. 1に示す。ヤング率・内部摩擦角についてはきれいな正の相関が見られる。粘着力に関しても多少のばらつきは見られるものの正の相関を見ることができる。Fig. 1の結果より本研究において採用したパラメーターをTable 1に示す。

### 3 真三軸圧縮試験の計算結果

前章において得られたパラメーターを用いて真三軸圧縮試験を行った。その結果をFig. 2に示す。●印の応力-ひずみ曲線は中間主応力と最小主応力がそれぞれ10MPaの時の結果である。また、■印と▲印の応力-ひずみ曲線は、最小主応力を10MPaで一定としたまま中間主応力をそれぞれ30MPa、50MPaまで上げたものである。図より、中間主応力の増加と共にピーク時の差応力が上昇していることがわかる。また、ピーク時の差応力と軸ひずみは岩石のものとして妥当であると言える。

Fig. 3に実験より得られた真三軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線を示す。実験結果はシミュレーション結果と同様に、中間主応力の増加とともにピーク時の差応力が上昇していることがわかる。しかし、曲線の傾きに関してはシミュレーション結果と実験結果は一致していない。この理由として、実際の室内試験においては端面の拘束効果があるのに対して、シミュレーションでは端面拘束はこちらから定義しない限り発生することはない。このため曲線の傾きに不一致が現れたものと思われる。

### 4 結論

本研究では、個別要素法を用いて圧縮試験の一種である真三軸圧縮試験を行った。周圧一定の三軸圧縮試験より得られたパラメーターを用いて試験を行ったところ、岩石として妥当な応力-ひずみ曲線を得ることができた。また実際の試験結果と定性的に一致する結果を得ることができた。今後は今回得られた知見を元に、定量的

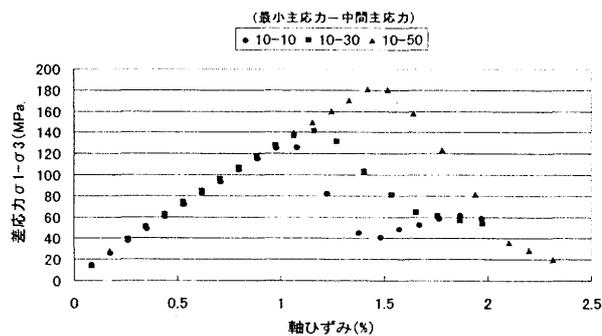


Fig. 2 Stress-strain curves in simulation.

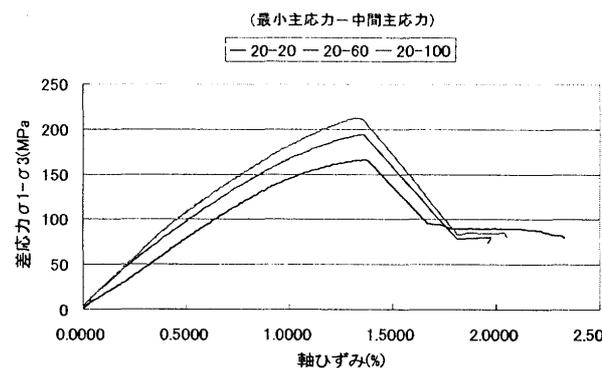


Fig. 3 Stress-strain curves in laboratory test.

な評価を行っていく。また、端面拘束の効果についても実験との整合性を考慮していく。

### 謝辞

本研究における室内試験結果は、(独)産業技術総合研究所の高橋学氏にご協力頂きました。ここに述べて感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) Cundall, P.A. & Strack, O.D.L, *Geotechnique*, 29, 47(1979).
- 2) 日本材料学会、'岩の力学'、第2章(1993)丸善株式会社