

(7) 面谷流紋岩の変形破壊挙動について

琉球大学工学部 正会員 ○ 渡嘉敷直彦
中部電力（株） 正会員 土山 茂希
同 上 正会員 神谷 将弘
名古屋大学工学部 正会員 川本 眺万

1. 緒 言

岐阜県本巣郡根尾村周辺の岩盤は、一般に面谷流紋岩と呼ばれている。この面谷流紋岩は極めて硬質な岩であり、岩盤としての力学特性は、節理系等の不連続面の特性に支配されよう。一方、近年分布不連続面を内包する岩盤に対する力学理論は、損傷場の理論やクラックテンソルの理論が提案されており、その妥当性が検証されている。これらの理論は、本質的には母岩の物性と亀裂の幾何特性を分離して不連続性岩盤の挙動を記述するものである。したがって、母岩の力学特性を明らかにすることは、基礎岩盤の力学特性を検討する上で重要な意味をもっている。

本報告は、上述の観点に基づき、面谷流紋岩の岩石供試体を用いて室内一軸圧縮試験、三軸圧縮試験ならびに圧裂試験を行い、母岩のダイレタンシー特性を含めた変形破壊特性を把握しようとするものである。この目的を達成するために、次のような室内試験とその結果の検討を行う。（１）岩石円柱供試体の一軸圧縮試験ならびに圧裂試験を行って、母岩の一軸圧縮強度、圧裂引張強度ならびに一軸圧縮状態における塑性変形特性を調べる。（２）基礎岩盤の強度・変形問題への適用を考慮して、岩石の塑性変形挙動に着目した三軸圧縮試験を行い、非関連流れ則による増分塑性理論に基づいて硬化関数およびダイレタンシー関数を決定し、面谷流紋岩の弾塑性構成式を提示する。さらに有限要素法を用いて円柱岩石供試体の圧縮試験のシミュレーションを行い、誘導された構成式の妥当性を検証する。

以下、実験装置、試料および実験方法について説明し、試験結果の考察ならびに一般応力条件下での弾塑性変形破壊挙動について考察を加える。

2. 試験の概要

2. 1 実験装置

使用した試験機は、載荷板間に供試体と並列に剛性支柱を設けて圧縮時の剛性を高めた高剛性圧縮試験機である²⁾。本試験機は、剛性支柱の下部に配置した剛クサビを変形速度制御または荷重速度制御により微動させ、支柱を上下させることにより供試体への載荷を行っている。三軸圧縮試験の側圧は、ニードルバルブを用いた油圧制御装置によって一定の圧力を保っている。供試体の軸方向変位、軸荷重、側方変位（３点）および側圧の諸量は、デジタルひずみ計で A/D 変換された後、マイクロコンピュータのディスクに記録され、実験後の一連のデータ処理に用いられる。

2. 2 試料および供試体

試験に用いた岩石試料は、岐阜県本巣郡根尾村周辺に産する面谷流紋岩であり、白亜紀後期に形成された火山岩岩盤である³⁾。室内試験に用いる岩石試料は、上記地点よりブロックサンプルとして搬入されたもので、実験室においてコアの抜き取りと供試体の成形を行った。供試体の寸法は、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験において直径 5cm、高さ 10cm の円柱形とし、圧裂引張試験において直径 5cm、高さ 3cm とした。試験に用いた試料の物

表－1 試料の物理諸量

単位体積重量 γ_s (g/cm ³)	1.927
比 重 G_s	2.56
含水比 w (%)	4.57
間ゲキ比 e	0.339
間ゲキ率 n (%)	25.30
飽和度 S_r (%)	34.56

理諸量を表-1に示す。

2. 3 実験方法

面谷流紋岩の変形破壊特性を調べるため、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験および圧裂試験を行った。表-2に各試験の試験条件を示す。一軸圧縮試験および三軸圧縮試験は、変形速度制御による単調載荷を行い、ひずみ速度は 0.1%/min の一定値に設定した。供試体の軸方向変位は、供試体の上下端のベDESTALに取り付けた2本の差動トランスにより測定した。供試体の体積変化を調べるため、3本のリング型ゲージを円柱供試体の側方に取り付け、供試体の側方変形を測定してその体積変化を求めた。一軸圧縮試験は、供試体を三軸セル内にセットし側圧をかけない状態で載荷を行った。圧裂試験は、供試体を剛性試験機の載荷板間にセットし、破壊時の最大圧縮荷重を求めた。三軸圧縮試験は、拘束圧を30, 60, 90, 120(kgf/cm²)とし、各拘束圧ごとに3~4本の供試体について載荷試験を行った。載荷の方法は、所定の側圧に達するまで等方圧を加え、その後軸方向変位を与えてせん断試験を行った。

3. 試験結果および考察

3. 1 一軸圧縮特性および圧裂引張強度

一軸圧縮試験結果を表-3に示す。岩石供試体の一軸圧縮強度および初期接線弾性係数の平均値は、それぞれ 2050 kgf/cm²、4.14×10⁵ kgf/cm²である。本結果より、供試体は節理や風化のない部分より採取された岩盤のより初生状態に近い値と考えられる³⁾。平均圧裂引張強度は、209 kgf/cm²であり、ぜい性度は、9.8である。火成岩のぜい性度としては比較的小さい値を示している³⁾。一軸圧縮時の塑性変形挙動は、三軸圧縮試験結果においてまとめて述べる。

3. 2 三軸圧縮特性

拘束圧 0, 30, 60, 90, 120(kgf/cm²)における軸ひずみ ϵ_1 と軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ の代表的な関係を図-1に示す。各拘束圧に対する初期降伏点とピーク強度を示す点を偏差応力 S と体積応力 $\bar{\sigma}$ の応力空間 ($S, \bar{\sigma}$) に示すと、図-2のようになる。初期降伏点とピーク時の降伏点について偏差応力と体積応力の関係は、それぞれ直線関係を示し、その傾き α はほぼ一致する。これより、面谷流紋岩の降伏時の挙動は等方硬化体と見なすことができる。傾き α は最小2乗近似より $\alpha = -1.099$ と求めた。図-3に各拘束圧に対する体積ひずみ ϵ_v と軸差応力の関係を示す。いずれの場合も降伏後ダイレタンシーの傾向を示している。一般応力条件下における塑性

表-2 試験条件

試験	側圧 (σ_3) (kgf/cm ²)	載荷方法 載荷速度	供試体
一軸圧縮試験	0	変位速度制御 単調載荷 0.1% / min	5cmφ×10cm 4本
三軸圧縮試験	30 60 90 120	変位速度制御 単調載荷 0.1% / min	5cmφ×10cm 13本
圧裂試験	—	変位速度制御 単調載荷 0.1% / min	5cmφ×10cm 13本

表-3 一軸圧縮試験結果

供試体 番号	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	初期接線弾性 係数(kgf/cm ²)	初期降伏応力 (kgf/cm ²)	ポアソン比
1	1440	4.44×10^5	955	0.210
2	2060	4.04×10^5	1030	0.243
3	2320	4.17×10^5	1000	0.238
17	2380	3.89×10^5	1061	0.224

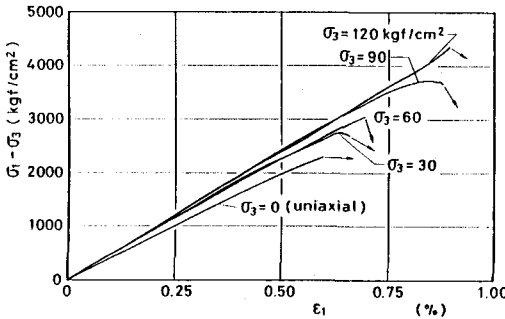


図-1 軸ひずみと軸差応力の関係

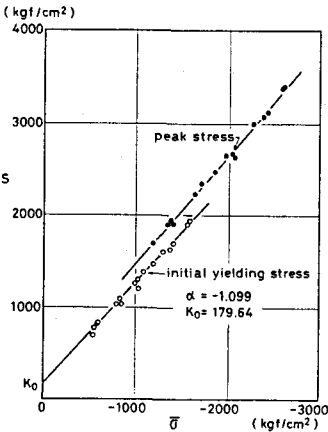


図-2 $\bar{\sigma}$ - S 空間の降伏点

応答を明らかにするため、初期弾性係数と初期弾性時のポアソン比を用いて供試体の軸方向および半径方向の塑性ひずみを算出し、偏差塑性ひずみ e^p と体積塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ を求めた。図-4に応力と $\alpha \bar{\sigma} + S$ と偏差塑性ひずみ e^p の関係を示す。ただし、拘束圧一定の試験中に体積塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ が変化するために、偏差塑性ひずみ e^p と体積塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ の関係も図中に示してある。体積塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ をパラメータとして、偏差塑性ひずみ e^p と応力と $\alpha \bar{\sigma} + S$ の関係をプロットすると図-5のようになる。Drucker-Prager の降伏条件を仮定すれば、図-5は塑性ひずみ e^p 、 $\bar{\epsilon}^p$ に対する硬化の条件、すなわち硬化関数 K を与える。一方、体積塑性ひずみ増分と偏差塑性ひずみ増分のノルムの比として定義されるダイレタンシー関数 $\beta = d\bar{\epsilon}^p/de^p$ と体積応力 $\bar{\sigma}$ の関係をプロットすると図-6のようになる。これらの実験結果に基づいて、硬化関数 K およびダイレタンシー関数 β を単調関数で仮定する。

3.3 硬化関数およびダイレタンシー関数の関数形

単調関数の関数形を表すため、ラプラス変換の離散スペクトル理論を用い、単調増加の硬化関数としての離散近似関数を仮定する。

$$K = K_0 + a_1 \{-\exp(-\bar{\epsilon}^p/\omega_1)\} + a_2 \{1 - \exp(-e^p/\tau_1)\} + a_3 \{1 - \exp(-\bar{\epsilon}^p/\omega_1) \cdot [1 - \exp(-e^p/\tau_1)]\} + a_4 \{1 - \exp(-\bar{\epsilon}^p/\omega_2)\} + a_5 \{1 - \exp(-e^p/\tau_2)\} + a_6 \{1 - \exp(-\bar{\epsilon}^p/\omega_2) \cdot [1 - \exp(-e^p/\tau_2)]\} \quad (1)$$

ここで、 τ_1 、 ω_1 、 τ_2 、 ω_2 は離散スペクトルであり、図-6より決定される。 K_0 は降伏関数の初期値であり、図-2より定まる。係数 $a_1 \sim a_6$ は、最小2乗近似より決定される。実験結果より、 $K_0=179.64$ 、 $a_1=34.2209$ 、 $a_2=248.005$ 、 $a_3=-26.3729$ 、 $a_4=-36.7145$ 、 $a_5=152.188$ 、 $a_6=-31.2362$ が得られた。決定された硬化

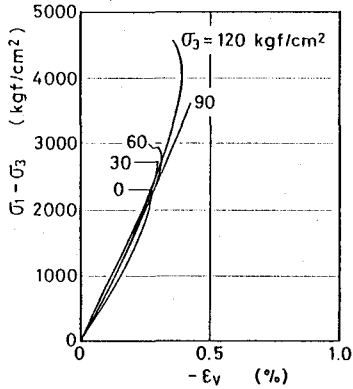


図-3 体積ひずみと軸差応力の関係

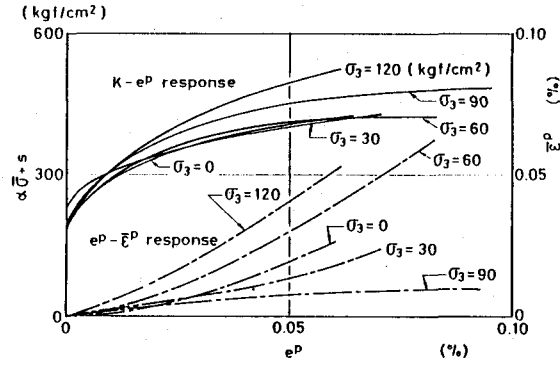


図-4 応力と $\alpha \bar{\sigma} + S$ と偏差塑性ひずみの応答

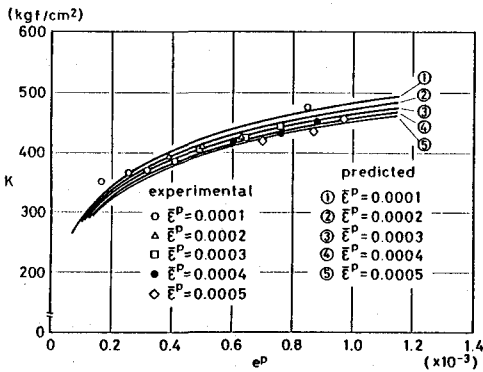


図-5 硬化の応答

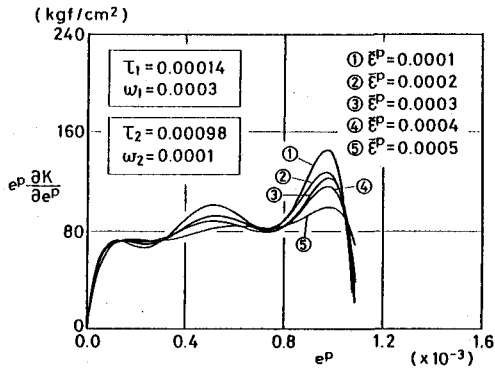


図-6 硬化関数のスペクトラム

関数 K は、図-5の実線のようになる。図-7よりダイレタンシー関数 β は、体積応力 $\bar{\sigma}$ に対して減少関数となるので、次の関数形

$$\beta(\bar{\sigma}) = b_0 + b_1 \exp\left(-\frac{\bar{\sigma}}{\tau}\right) \quad (2)$$

を近似関数とする。ここで τ は離散スペクトルであり、実験結果より $\tau = -932$ が得られた。また、係数は $b_0 = -0.1123$, $b_1 = 2.3735$ が得られた。近似関数を図-7に示す。

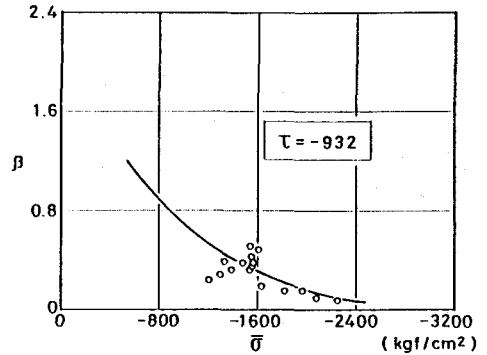


図-7 ダイレタンシー関数

4. 構成式および一軸圧縮試験のシミュレーション

ダイレタンシー関数を用いた非関連流れ理論¹⁾より、面谷流紋岩の弾塑性構成式を次のように決定した。実験事実より、材料の等方硬化則とひずみ硬化則および Drucker-Pragerの降伏条件式を仮定した。ダイレタンシー関数 β を非関連流れ則へ導入し、応力およびひずみの直交成分を用いると、弾塑性構成式は次のように与えられる。

$$d\bar{\sigma} = \left[\bar{D}^e - \frac{\{\bar{D}^e(\underline{m} + \beta \underline{n})\} \otimes \{\bar{D}^e(\underline{m} + \alpha \underline{n})\}}{h' + (\underline{m} + \alpha \underline{n}) \cdot \bar{D}^e(\underline{m} + \beta \underline{n})} \right] d\underline{\varepsilon} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{D}^e$ ：弾性マトリックス、 $\underline{m}$, $\underline{n}$ ：偏差応力テンソルおよび体積応力テンソル方向における単位テンソル、 $h' = h(\underline{l} \cdot \underline{m})$ であり、 $\underline{l}$ は偏差ひずみテンソル方向の単位テンソル、 h は次式で与えられる。

$$h = \frac{\partial K}{\partial e^p} + \frac{\beta}{(\underline{l} \cdot \underline{m})} \frac{\partial K}{\partial \varepsilon^p} \quad (4)$$

(3) 式へ実験より得られた係数 α 、硬化関数 K およびダイレタンシー関数 β を導入すると、面谷流紋岩の構成式が導かれる。得られた構成式の妥当性を検討するため、有限要素法を用いて一軸圧縮試験のシミュレーションを行った。計算結果と実験結果の対応を図-8に示す。軸ひずみ、軸応力関係および体積ひずみ、軸応力関係ともほぼ対応しており、構成式およびパラメータの有効性が確認された。

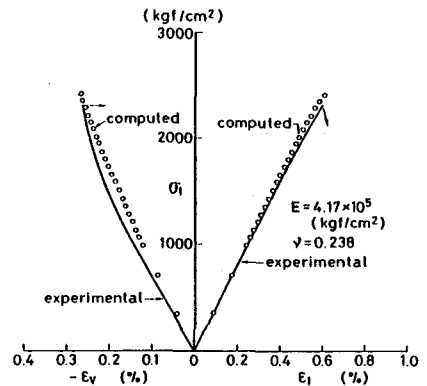


図-8 一軸圧縮試験の有限要素解析

5. 結論

極めて硬質な面谷流紋岩の変形破壊特性を検討した結果、次の点が明らかとなった。1) 面谷流紋岩の一軸圧縮強度、初期接線弾性係数および圧裂引張強度の平均値は、それぞれ2050kgf/cm²、 4.14×10^5 kgf/cm²、209kgf/cm²である。2) 120kgf/cm²までの拘束圧下では、初期降伏強度、ピーク降伏強度ともに偏差応力、体積応力の空間上で直線関係を示し、その傾きはほぼ一致する。これより降伏後の変形破壊挙動はDrucker-Prager型の破壊条件と等方硬化則に従うと仮定される。3) 面谷流紋岩の構成式の有効性が確認された。

参考文献

- 1) 市川康明：増分弾塑性理論と岩質材料の破壊過程に関する基礎的研究，名古屋大学学位論文（1986）。
- 2) 川本眺万，渡嘉敷直彦，石塚与志雄：新しいタイプの高剛性試験機による岩質材料の一軸圧縮変形試験について，材料，Vol.30, No.332, pp.517-523（1981）。
- 3) 三木幸蔵，古谷正和：土木技術者のための岩石・岩盤図鑑，鹿島出版会（1983）。

(7) On the Deformation and Failure Behaviour of Omotani Rhyolite

by

N. Tokashiki

(Faculty of Engineering, University of the Ryukyus)

S. Tsuchiyama and M. Kamiya

(Chubu Electric Power Co. Inc.)

T. Kawamoto

(Dept. of Geotechnical Engineering, Nagoya University)

ABSTRACT

The behaviour of the rock mass of Omotani rhyolite depends not only on the mechanical properties of the rock but also on the discontinuities. Recently, the damage mechanics theory and the fabric tensor theory have been developed rock mechanics which account for the influence of distributed discontinuities. These theory are essentially treated by differentiating the material properties of rock and the geometrical properties of discontinuity. Therefore, it is very important to account for the material properties of rock in estimating the mechanical behaviours of the foundation rock mass.

In this paper, an experimental study on the deformation and failure behaviour including dilatancy characteristic of Omotani rhyolite is presented. For the purpose to specify for the deformation and failure behaviour of Omotani rhyolite, the conventional uniaxial and triaxial test and brazilian test are conducted. In plasticity behaviour, the incremental constitutive theory for dilatant materials is applied. The hardening function and the dilatancy factor in the constitutive equation are specified from experimental results using a method of spectrum approximation of a Laplace transformation. Using the obtained material parameters uniaxial compression test is simulated by the finite element analysis.

The main results are as follows:

- (1) The uniaxial compressive strength, the initial elastic modulus and the tensile strength of Omotani rhyolite are 2050 kgf/cm^2 , $4.14 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ and 209 kgf/cm^2 , respectively.
- (2) Under the confining pressure of 120 kgf/cm^2 , the initial yielding and the peak stress points in deviatoric and volumetric stress states are approximated by straight lines with same inclination. Then, it can be assumed that the deformation and strength behaviour after yielding depends on the Drucker-Prager's yielding condition with isotropic strain hardening.
- (3) The constitutive equation determined by the experimental results is applied to Omotani rhyolite and the uniaxial compression test is simulated by FEM. The numerical results are good agreement with experiments, then the validity of the constitutive equation is verified.