

軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明

足立紀尚¹・岡二三生²・曾良岡宏³・小池真史⁴

¹フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工修 東京電力株式会社

⁴正会員 工修 大成建設株式会社

本論文では、多孔質凝灰岩・大谷石の一種である戸室石に対して、定ひずみ速度排水三軸圧縮試験および排水クリープ試験を行った。さらに、Vaidの応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念を排水条件に適用し、飽和粘性土に対する赤井らによる唯一的な応力-ひずみ-時間関係の概念を導入することによって、ひずみ軟化を呈する堆積軟岩の時間依存性挙動の統一的な説明を試みる。

Key Words : *time dependency, strain rate effect, creep, state surface, strain-softening, soft rock*

1. 序論

一般に軟岩は、ひずみ軟化を示し、かつ時間依存性を有する材料であり、未だ厳密に力学的特性を検討する必要のある材料である。

ひずみ軟化とは、その材料特有のある応力以下の拘束圧下において、せん断により応力が増加し最大強度に達した後、減少に転じ、最終的には残留強度に至る現象のことをいい、変形の進行とともに正のダイレイタンスが観察される。ひずみ軟化現象は、地盤工学の諸問題で論じられる進行性破壊現象と密接に関連すると考えられている。

また、時間依存性挙動とは、材料に外力が作用したときの応答に時間的な影響が生じることをいい、具体的にはひずみ速さ効果、クリープ、および応力緩和などが挙げられるが、これらは、それぞれ独立した現象ではなく、同一の時間依存性挙動を異なる側面から観察したものであると考えられている¹⁾。このような性質は、材料の時間的な強度低下の1つの要因となる。以上のように、軟岩はひずみ軟化および時間依存性挙動の卓越した材料であるので、軟岩を対象とする構造物においては、両者を十分考慮に入れて変形特性を把握することが必要である。

本論文では、堆積軟岩(通称・戸室石)を用いた、定ひずみ速度排水三軸圧縮試験および排水クリープ試験を行い、それらの試験結果より、ひずみ軟化を

呈する材料の時間依存性挙動、すなわち、ひずみ速さ効果とクリープとの統一的な説明を試みる。

2. 軟岩の時間依存性挙動に関する実験

(1) 試料の基本物性

本研究では、理想的な堆積軟岩として多孔質凝灰岩である戸室石を試料に用いた。戸室石は栃木県大谷町戸室地区で採掘される凝灰岩で、通称大谷石の一種である。一般的な大谷石と異なる点は、有機物であるいわゆるみそが非常に少なく、目立った空隙も少ないことである。用いた戸室石の基本物性を表-1に示す。

なお、供試体の飽和に関しては、飽和度を上げるために、供試体内の空気を炭酸ガスに置換した後、蒸留水に浸すという作業を行った。

(2) 定ひずみ速度排水三軸圧縮試験

a) 試験装置ならびに試験方法

拘束圧は、1, 3, 5kgf/cm²(0.098, 0.29, 0.49MPa)の3種類で実施し、負荷は高精度のエアレギュレーターを用いた。また、バックプレッシャーは空気圧をエアレギュレーターで制御した後、2重管ビュレットの上部より排水経路を介して供試体に負荷する。本研究での実験は、すべての種類の実験において、3kgf/cm²(0.29MPa)のバックプレッシャーを負荷した。なお、

表-1 戸室石の基本物性

| | |
|----------------------|-----------------------------------|
| 比重 G_s | 2.51 |
| 初期間隙比 e_0 | 0.63 |
| 一軸圧縮強度 (湿潤) q_u | 30.0kgf/cm ² (2.94MPa) |
| 引張強度 (湿潤) σ_t | 9.4kgf/cm ² (0.92MPa) |

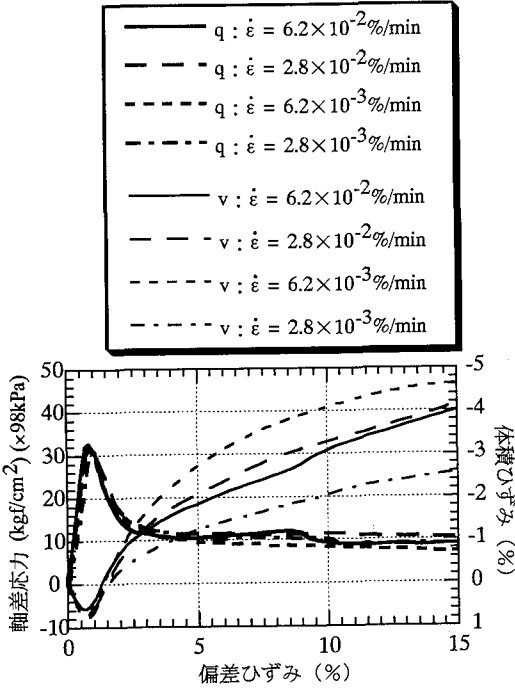


図-1 偏差ひずみ-軸差応力関係および偏差ひずみ-体積ひずみ関係 (拘束圧1kgf/cm²)

材料の時間依存性反応の温度変化による影響を排除するために、一連の試験は定温環境下 (20°C) で実施した。

せん断過程における载荷はひずみ制御で実施した。また、本試験で用いた軸ひずみ速度は、 6.3×10^2 , 2.8×10^2 , 6.3×10^3 , 2.8×10^3 %/minの4種類である。

なお、一番速いひずみ速度でも過剰間隙水圧は0.04kgf/cm² (0.0039MPa)に抑えられており、排水条件が満たされていることが確認された。

b) 試験結果ならびに考察

全ての拘束圧について、同一の議論ができることを確認しているため、ここでは代表例として拘束圧1kgf/cm² (0.098MPa)の結果のみを示す。

図-1に偏差ひずみと軸差応力および体積ひずみとの関係を示す。この図から、応力-ひずみ関係は、せん断が進むにつれて応力が増加し、ピーク強度に達した後、減少に移り最終的には残留強度に至ると

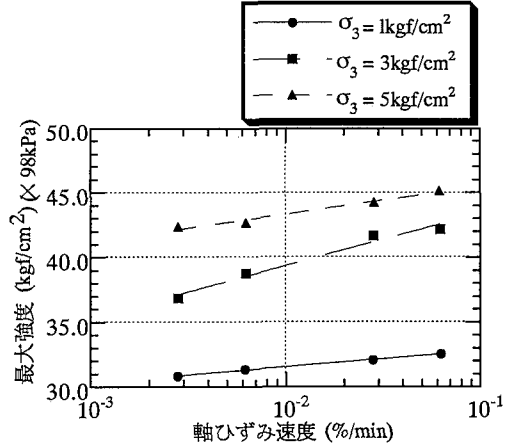


図-2 軸ひずみ速度-最大強度関係

表-2 ひずみ速度効果係数 α

| σ'_3 | q_0 | α |
|------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| 1kgf/cm ² (0.098MPa) | 31.5kgf/cm ² (3.09MPa) | 2.12 |
| 3kgf/cm ² (0.29MPa) | 39.3kgf/cm ² (3.85MPa) | 4.04 |
| 5kgf/cm ² (0.49MPa) | 43.3kgf/cm ² (4.24MPa) | 1.23 |

いう典型的なひずみ硬化-軟化型である。一方、体積ひずみ挙動に関しては、初期段階で体積圧縮が生じ、ピーク強度に至る前に膨張に転じる。

図-2に軸ひずみ速度-最大強度関係を示す。一般に材料のひずみ速度効果として、次式のように、せん断過程のひずみ速度の対数に比例して、軸差応力が大きくなることが知られている²⁾。

$$q = q_0 + \alpha \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (1)$$

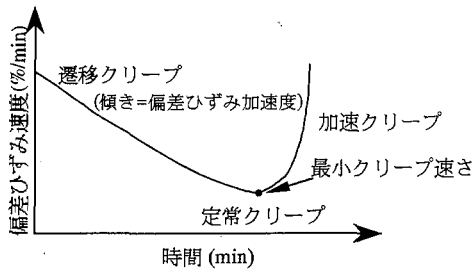
ここに、 q_0 および $\dot{\epsilon}_0$ は基準軸差応力および基準軸ひずみ速度、 α は図-2での直線の勾配である。表-2に、 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \times 10^{-2}$ %/minを基準軸ひずみ速度としたときの、最大強度に対応する基準軸差応力 q_0 および係数 α を示す。 α は拘束圧により異なるが、このひずみ速度の範囲では、式(1)が成立することがわかる。

(3) 排水クリープ試験

a) 試験装置ならびに試験方法

拘束圧は、1, 3, 5kgf/cm² (0.098, 0.29, 0.49MPa)の3種類で実施した。

荷重の载荷は、重錘の懸荷によるレバー载荷方式であり、重錘の懸荷は手動ハンドルの操作によって



- $q = 25.7 \text{ kgf/cm}^2$
- $q = 27.0 \text{ kgf/cm}^2$
- ◆ $q = 28.4 \text{ kgf/cm}^2$
- △ $q = 29.7 \text{ kgf/cm}^2$
- ▼ $q = 31.4 \text{ kgf/cm}^2$

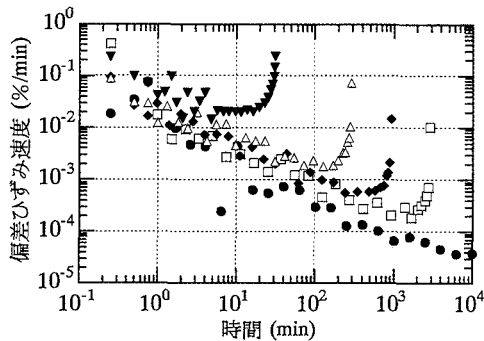


図-3 偏差ひずみ速度-時間関係 (拘束圧1kgf/cm²)

行う。まず、圧密終了後、500kgf(4900N)もしくは522kgf(5145N)の荷重を初期荷重し、その後、所定の荷重まで50kgf(490N)づつ段階的に荷重した。このように、本試験は定荷重クリープ試験であるので、断面補正を行ってクリープ応力を求めると、クリープ試験中に最大0.8kgf/cm²(-0.078MPa)の変化が生じた。

また、クリープ破壊時には急速な体積ひずみの膨張が起こるので、間隙水圧の消散に時間的な遅れが生じ、その結果として過大な負の過剰間隙水圧が発生することが予想される。そこで、全試験結果に対して間隙水圧挙動を検討したところ、最も絶対値の大きな負の間隙水圧が発生した実験パターンでもその値は-0.04kgf/cm²(-0.0039MPa)であった。したがって、本試験結果は破壊に至るまで十分に排水条件を満たしていると判断した。

b) 試験結果ならびに考察

前節と同様に、全ての拘束圧について、同一の議論ができることを確認しているのので、ここでは代表例として拘束圧1kgf/cm²(0.098MPa)の結果のみを示す。

図-3に偏差ひずみ速度-時間関係を示す。この図から、ひずみ速度の減少する遷移クリープ過程から

- $q = 25.7 \text{ kgf/cm}^2$
- - $q = 29.7 \text{ kgf/cm}^2$
- · - $q = 27.0 \text{ kgf/cm}^2$
- · · $q = 31.4 \text{ kgf/cm}^2$
- - - $q = 28.4 \text{ kgf/cm}^2$

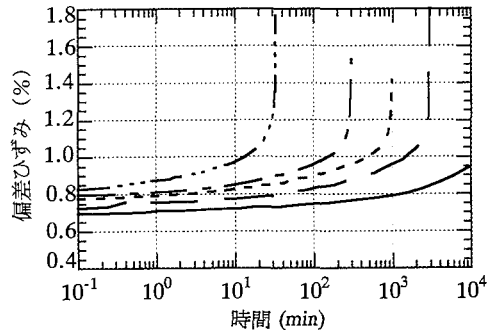


図-4 軸ひずみ-時間関係 (拘束圧1kgf/cm²)

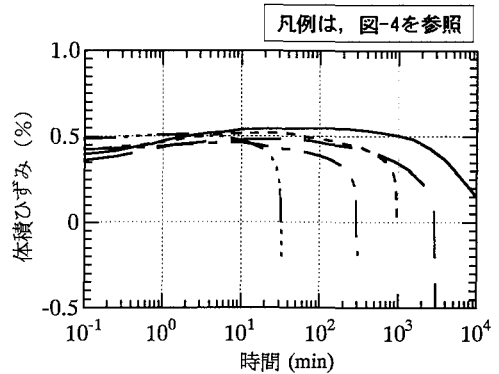


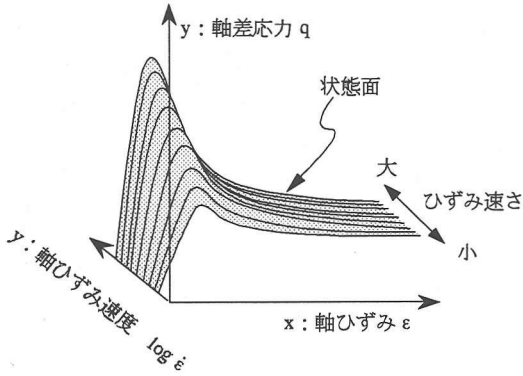
図-5 体積ひずみ-時間関係 (拘束圧1kgf/cm²)

最少クリープ速さ点を経て、ひずみ速度が急激に増大する加速クリープ過程の後、クリープ破壊に至ることがわかる。また、遷移クリープ過程の直線部の勾配で与えられる偏差ひずみ加速度は、平均0.72%/min²である。

図-4に偏差ひずみ-時間関係を示す。図より、遷移クリープ状態では偏差ひずみは時間の対数に対して直線的に増加し、その後、徐々に増加の程度が増えてやがて破壊に至ることがわかる。側方拘束圧が同じ場合、同一の時間におけるひずみ量は軸差応力が大きいほど大きく、また、クリープ破壊時間は軸差応力が大きいほど短い。

図-5に体積ひずみ-時間関係を示す。軸荷重の載荷による圧密の結果、初期に体積は圧縮を示すが、偏差ひずみが最少クリープ速さに至る時刻よりも早い時点で膨張に転じ、やがて破壊に至る。なお初期の圧縮量についてはばらつきが大きく、軸差応力の大きさによる有意の差は見られなかった。

(a) 定ひずみ速度三軸試験から求まる状態面



(b) クリープ試験から求まる状態面

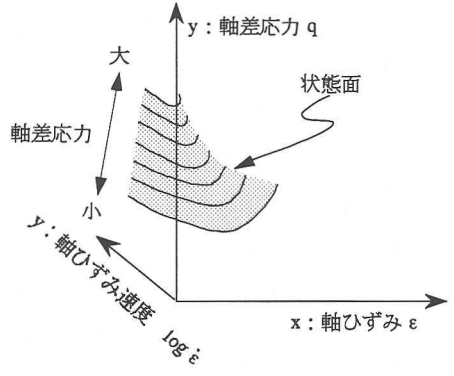


図-6 応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の模式図

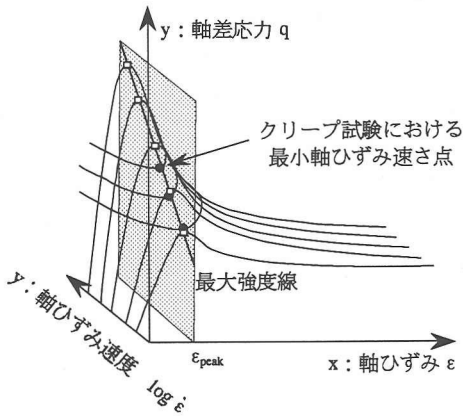


図-7 定ひずみ速度三軸圧縮試験における最大強度とクリープ試験における最小軸ひずみ速度の関係

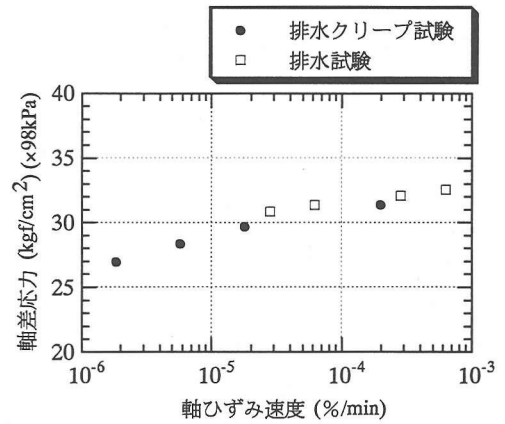


図-8 軸差応力-軸ひずみ速度関係 (拘束圧1kgf/cm²)

3. 時間依存性挙動の統一的説明

(1) 概説

地盤材料の時間依存性挙動としては、主にクリープ、応力緩和およびひずみ速度効果が挙げられる。これらは、材料の別々の性質ではなく、本質的には材料に唯一の時間依存的な特性を、異なった側面から観察したものに過ぎないと考えられている¹⁾。そこで、本研究では、赤井ら³⁾による唯一的な応力-ひずみ-時間関係の考えと、Vaid⁴⁾の応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念、さらには、ひずみ速度効果および軟化を記述できる足立・岡モデルを用いて、地盤材料の時間依存性挙動の統一的な説明を試みる。赤井ら、Vaidの概念は、飽和粘土の非排水挙動に対するものであったが、本論文では、排水条件下の挙動に対して検討する。なお、以下の文中では、応力-ひずみ-ひずみ速度状態面のことを単に「状態面」

と称することにする。

なお、拘束圧については、1, 3, 5kgf/cm² (0.098, 0.29, 0.49MPa)について同様の検討を行った結果、同一の議論ができることを確認しているの、ここでは代表例として拘束圧1kgf/cm² (0.098MPa)の結果のみ示す。

(2) 応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念の妥当性の検討

Vaid⁴⁾は、非排水状態における飽和粘土の時間依存性挙動の総合的な検討の過程で、軸差応力 q 、軸ひずみ ϵ および軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ にて構成される状態曲面の存在を見いだした。すなわち、材料には固有の応力-ひずみ-ひずみ速度状態面が存在し、種々の時間依存性挙動は、その状態に応じた条件と状態面の解を求めることによって説明できるとした。このような考えから、Vaidは自ら実施した様々な時間履歴における飽和粘土の非排水三軸試験を検証し、状態面の概念の妥当性を示した。本節では、排水

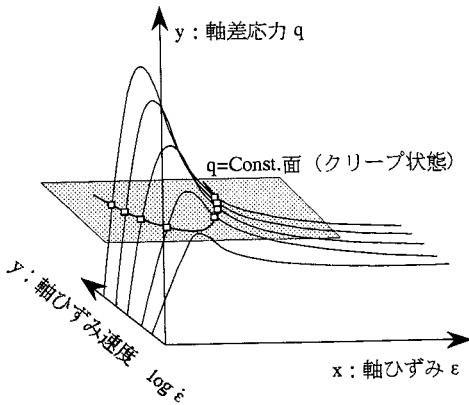


図-9 軸差応力一定の時の軸ひずみ-軸ひずみ速度関係

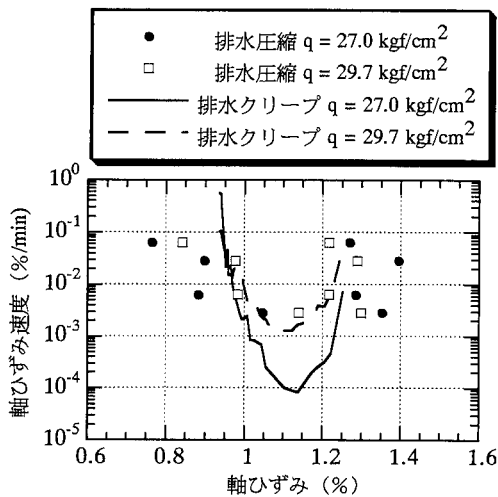


図-10 軸ひずみ-軸ひずみ速度関係 (拘束圧1kgf/cm²)

条件下においてもVaidの状態面の考えが成立するかどうかを検討するために、ある拘束圧における、定ひずみ速度排水三軸圧縮試験から求まる状態面(図-6(a)参照)と、排水クリープ試験から求まる状態面(図-6(b)参照)が同一であることを説明する。

図-7は、図-2に与えられている最大強度線を含み、軸差応力-軸ひずみ速度平面に平行な面と状態面との関係を表している。なお、ここでは、定ひずみ速度三軸圧縮試験において、最大強度をとるときの軸ひずみの値は、一定であるとする。定応力クリープ試験は状態面と $q = \text{Const.}$ 平面の交線で表現されるので、クリープ試験において最小クリープひずみ速度を生じるときの試料の状態は、三軸圧縮試験で最大強度をとるときの状態に相当する。今回の試験結果

からこの内容を検証した図が図-8である。図中の黒いプロットは排水クリープ試験における最小クリープひずみ速度発生時の軸差応力-軸ひずみ速度関係を、また、白抜きのプロットは定ひずみ速度排水三軸圧縮試験における最大強度発生時の軸差応力-軸ひずみ速度関係を示す。図からわかるように、両者の間には非常によい相関関係があり、このことは状態面の概念の妥当性の1つの証明である。

さらに、図-9に、軸差応力一定の面と状態面との関係を模式的に示した図を示す。状態面の概念が成立するならば、定応力クリープ試験におけるひずみ-ひずみ速度関係と、クリープ試験の載荷荷重に対応する軸差応力が発生している時の三軸圧縮試験のひずみ-ひずみ速度関係は対応するはずである。このことを今回の試験結果から検証した図が図-10である。図中の実線および破線は排水クリープ試験における軸ひずみ-軸ひずみ速度関係を表し、また、プロットは定ひずみ速度排水三軸圧縮試験において、クリープ試験に対応した軸差応力が発生しているときの軸ひずみ-軸ひずみ速度関係を表している。図からわかるように、ばらつきはあるものの、三軸試験の結果からもクリープ試験の場合と同様、下に凸な曲線が得られており、定性的には同一の傾向が現れている。

以上、2枚の図面から今回の定ひずみ速度排水三軸圧縮試験と排水クリープ試験の結果を比較し、Vaidの状態面の考えを検証した結果、排水条件下においても三軸圧縮試験とクリープ試験の双方を1つの状態面で説明し得ることがわかった。

(3) 応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念の拡張

前節ではVaidの応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念の妥当性を検討した。状態面の概念は材料のひずみ速さ効果とクリープとを関連づけることが可能であることが明らかとなった。しかしながら、Vaidの理論では間隙水圧の挙動について触れられていない。さらに、状態面の存在を明らかにしているものの、実際の式を与えていない。

そこで、本研究ではVaidの考えに加えてさらに次の2つの仮定を設けて、応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念を拡張するとともに、状態面の定式化を試み、ひずみ速さ効果とクリープの統一的な説明を図る。

- ①排水状態においても、軸差応力-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面が存在する。この状態面は、側方拘束圧に依存する。
- ②排水状態においては、軸差応力-軸ひずみ-軸ひ

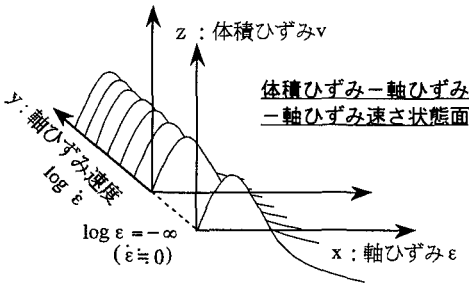
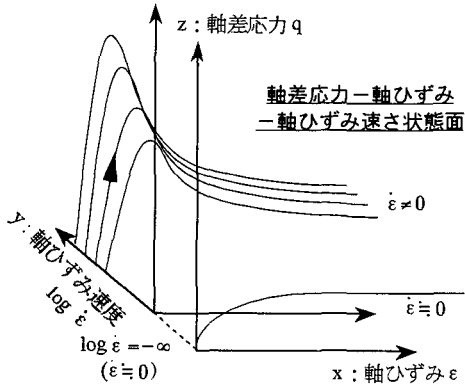


図-11 拡張された応力-ひずみ-ひずみ速度状態面

表-3 構成モデルに用いる材料定数 (戸室石)

| | | | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| σ_s (kgf/cm ²) {MPa} | 1 {0.098} | 3 {0.29} | 5 {0.49} |
| $G=G'$ (kgf/cm ²) {MPa} | 1630 {159.7} | 2064 {202.3} | 2215 {217.1} |
| K (kgf/cm ²) {MPa} | 1225 {120.1} | 1564 {153.3} | 1742 {170.7} |
| M_r | 1.84 | 1.54 | 1.46 |
| M_o | | 1.25 | |
| σ_{mb} (kgf/cm ²) {MPa} | | 80 {7.8} | |
| b (kgf/cm ²) {MPa} | | 8.7 {0.85} | |
| a | 0.972 | 0.917 | 0.958 |
| τ_0 | 447 | 228 | 153 |

ひずみ速度状態面のみならず、体積ひずみ-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面も存在する。なお、この体積ひずみ-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面を「体積ひずみ状態面」と呼ぶ。体積ひずみ状態面は、ひずみ速度に依存しない、時間に独立な事象であるが、側方拘束圧には依存する。

本来、偏差ひずみで状態面を表すことが妥当であると考えられるが、現実には偏差ひずみ速度一定の三軸試験を行うことは困難であるので、本研究では偏差ひずみに代えて軸ひずみで状態面を規定する。

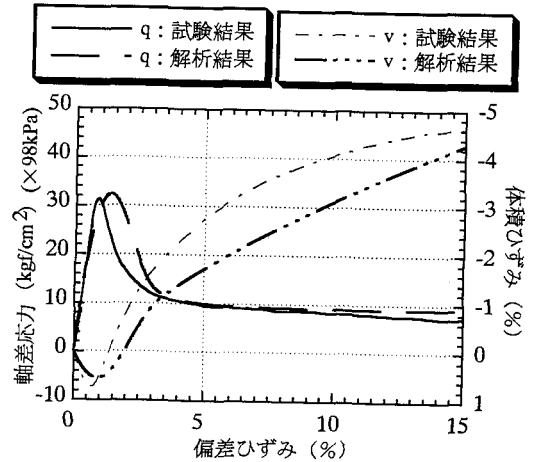


図-12 三軸圧縮試験における実験値と理論値との比較 (拘束圧1kgf/cm², ひずみ速度6.2×10⁻³%/min)

以上に基づき拡張された応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念図を図-11に示す。

(4) 実験結果の解釈

先に述べたように、Vaidは状態面の存在を明らかにしたものの、その実際の式を与えてはいない。本章では、まず材料のひずみ硬化-軟化挙動とひずみ速度効果を表現できる足立・岡のひずみ軟化型弾-粘塑性構成式⁵⁾を状態式として用いて、状態面の3次元モデル化を考える。次に、このようにしてモデル化した状態面に対して、前節で提案した拡張された状態面の概念を適用して実験結果を統一的に解釈することを試みる。

a) 応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の定式化

足立・岡はひずみ軟化型弾塑性構成式⁶⁾を発展させて、ひずみ測定に代わる時間測定を次式のように定義することによって、ひずみ軟化型弾粘塑性構成式⁵⁾を与え、凍結砂のひずみ軟化およびひずみ速度効果の説明に適用した。

$$dz = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^a dt \quad (2)$$

なお、この構成式はひずみ速度効果のみを対象とした構成式であるので、本章では同構成式をあくまでも状態面を決定するための手段として利用している。以下に状態面決定のプロセスを示す。

まず、定ひずみ速度排水三軸圧縮試験結果から、ひずみ軟化型弾粘塑性構成式に含まれる材料定数を決定する。表-3に戸室石を対象とした場合の全9個の

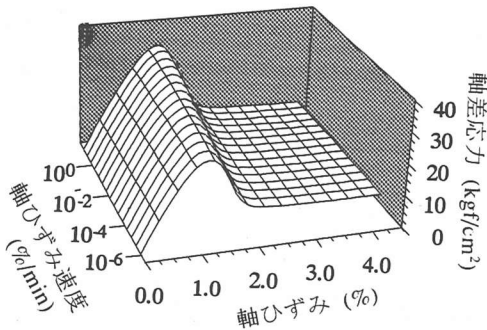


図-13 軸差応力-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面
(拘束圧1kgf/cm²)

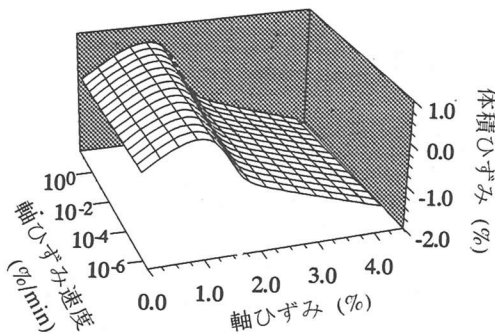


図-14 体積ひずみ-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面
(拘束圧1kgf/cm²)

パラメータの値を示す。ひずみ速さ効果を表現するパラメータ a とひずみ硬化-軟化の形状を規定するパラメータ τ_0 の決定に際して、式(2)の基準軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ は、全側方拘束圧とも一律に 1.0×10^{-2} %/min と設定した。なお、いくつかの材料定数は実験結果からカーブフィッティングにより求めた。これは材料定数を決定する際には常に行われることであり、 E, ν, c, ϕ といった定数を求める方法と同じ物理的意味をもつものである。また、巨視的観点に立つと、地盤材料の材料定数(弾性定数 G, K も含む)が拘束圧依存性を有することは自明である。したがって、本構成式の材料定数 G, K, M, τ は拘束圧に依存する定数であり、本来、 σ_m の関数として与えられるべきものである。

これらの材料定数を用いて、数多くの軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ について軸差応力-軸ひずみ曲線を求める。なお、図-12に拘束圧 1 kgf/cm^2 (0.098 MPa)、ひずみ速度 6.3×10^{-2} %/min の場合の実験結果と、本構成モデルから得られる解析結果との比較を示す。

さらに、これらの曲線をひずみ速度の対数を軸に順に並べることによって、軸差応力-軸ひずみ-軸ひ

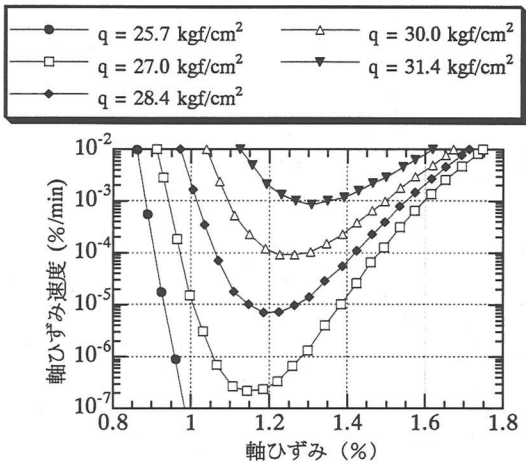


図-15 軸ひずみ-軸ひずみ速度関係 (拘束圧1kgf/cm²)

ずみ速度関係を三次元的に表示する。上述の方法によって求めた状態面を図-13に示す。また、図-14は図-13と同様に本構成モデルを用いて決定した体積ひずみ状態面を表している。

b) 排水クリープ

前項で求めた軸差応力-軸ひずみ-軸ひずみ速度関係を表す曲面を、図-9に示すようにクリープ試験に対応した軸差応力一定の平面で切って、軸ひずみ-軸ひずみ速度関係を求めた。図-15はこのようにして得られた軸ひずみ-軸ひずみ速度曲線を表している。状態面の概念が正しいとすれば、クリープ試験の軸ひずみ-軸ひずみ速度関係は図-15で表されるはずである。

さらに、軸ひずみ-軸ひずみ速度関係に次式を適用して、軸ひずみ速度-時間関係に変換する。

$$t = \int_0^{\epsilon} \frac{dt}{d\epsilon'} d\epsilon' \quad (3)$$

図-16にクリープ試験時の軸ひずみ速度-時間関係の実験値と理論値との比較を示す。図よりわかるように、理論値は遷移クリープ過程・最小クリープひずみ速さ点・加速クリープ過程の3過程を表現できる。また、本解析ではクリープ試験より求められた定数を一切用いていないにもかかわらず、遷移クリープ過程の軸ひずみ加速度が実験結果と大変よく一致する点は注目に値する。

次に、図-16に示した軸ひずみ速度の理論値を時間で積分することによって軸ひずみ-時間関係を求めた。図-17は軸ひずみ-時間関係の実験値と理論値との比較を表している。各時刻における軸ひずみは実

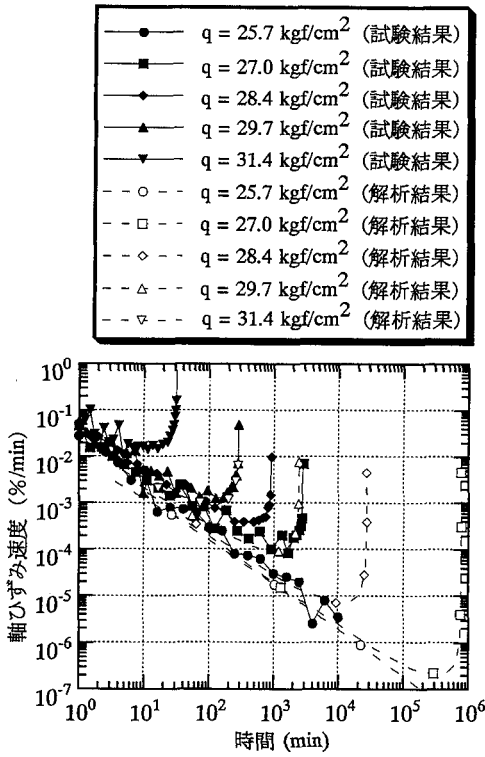


図-16 軸ひずみ速度-時間関係 (拘束圧1kgf/cm²)

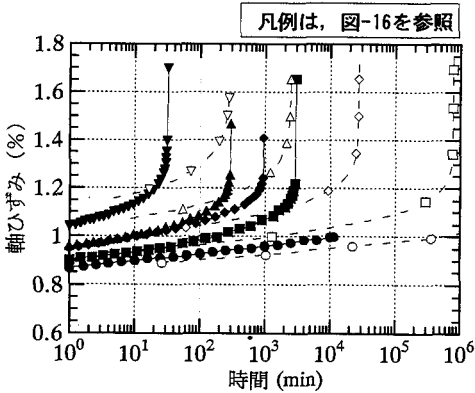


図-17 軸ひずみ-時間関係 (拘束圧1kgf/cm²)

験結果と概ね一致している。

しかしながら、クリープ破壊時間は理論値の方が実験値より大きい傾向がある。このことは、三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係を本構成モデルで近似する際に、ピーク強度が発生するときの軸ひずみが過大に評価されているためと考えられる。

次に、前節で提案した拡張された状態面の概念を適用して、排水クリープ試験の体積ひずみ挙動の説

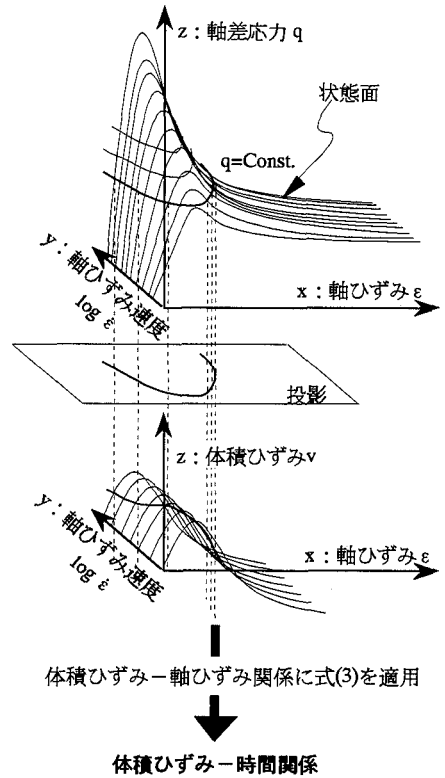


図-18 拡張された応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念による体積ひずみ挙動の説明

明を試みる。前節では、状態面の概念を拡張する際に、軸差応力-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面とともに体積ひずみ-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面が存在すると仮定した。以下にこの仮説による排水クリープ時の体積ひずみ挙動の求め方を示す。

- ①軸差応力-軸ひずみ-軸ひずみ速度状態面を $q = \text{Const.}$ 平面で切ることによってクリープの軸ひずみ-軸ひずみ速度曲線を求める。
- ②①で求めた軸ひずみ-軸ひずみ速度曲線を体積ひずみ-軸ひずみ-軸ひずみ速度曲面に投影し、クリープ時の軸ひずみ-軸ひずみ速度-体積ひずみ関係を得る。
- ③軸ひずみ-体積ひずみ関係に式(3)を適用して、時間に変換する。

図-18は以上の方法を概念的に表している。このようにして得られたクリープ開始後の体積ひずみ-時間関係の理論値と試験結果との比較を図-19に示す。この図より理論値は実験結果よりクリープ载荷時の

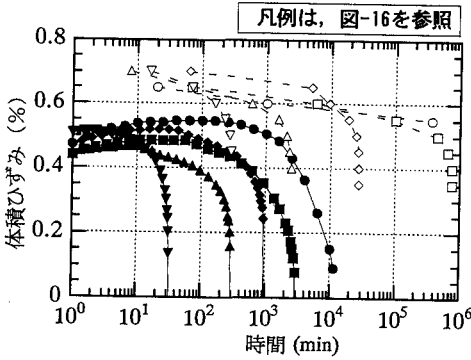


図-19 体積ひずみ-時間関係 (拘束圧1kgf/cm²)

圧縮ひずみを過大に評価する傾向があるものの、体積ひずみが時間の経過に伴って膨張する傾向を表現できることがわかる。

以上に示したように、拡張された状態面の概念を適用することによって、材料の時間依存的な性質であるひずみ速さ効果とクリープを統一的に説明できることが明らかになった。

4. 結論

本研究では、多孔質凝灰岩・大谷石の一種である戸室石に対して定ひずみ速度排水三軸圧縮試験および排水クリープ試験を行った。次に、これらの実験結果から、材料のひずみ軟化-硬化挙動とひずみ速さ効果を表現できる足立・岡のひずみ軟化型弾粘塑性構成式を状態式として用いて、拡張したVaidの応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の3次元的なモデル化を行い、時間依存性挙動の統一的な説明を行った。その結果、Vaidの応力-ひずみ-ひずみ速度状態面の概念は、ひずみ速さ効果とクリープ挙動の関連を説明できることがわかった。

付録

足立・岡のひずみ軟化型弾粘塑性構成式⁵⁾の誘導

文献5)の要点を以下に記す。

まず、全ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}$ は弾性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^e$ と塑性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^p$ の和であると仮定する。

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (\text{A-1})$$

等方線形弾性体と仮定すれば、弾性ひずみ増分テンソル $d\epsilon_{ij}^e$ は次式で与えられる。

$$d\epsilon_{ij}^e = ds_{ij}/2G + d\sigma_m \delta_{ij}/3K \quad (\text{A-2})$$

ここに、 s_{ij} は偏差応力テンソル、 σ_m は平均有効応力、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

一方、粘塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ は次の非関連流動則で与えられると仮定する。

$$d\epsilon_{ij}^p = H \frac{df_p}{d\sigma_{ij}} df_y \quad (\text{A-3})$$

次に、式(A-4)で表される応力履歴テンソル σ_{ij}^* を導入する。

$$\sigma_{ij}^* = \frac{1}{\tau} \int_0^z \exp(-(z-z')/\tau) \sigma_{ij}(z') dz' \quad (\text{A-4})$$

ここに、 τ は応力履歴パラメータと呼ばれる材料定数であり、ひずみ軟化の度合いを表すパラメータである。また、 z は時間測度であり、その増分は次式のように定義される。

$$dz = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^a dt \quad (\text{A-5})$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_0$ は基準軸ひずみ速度、 a はひずみ速さ効果を表現するパラメータである。

さて、降伏関数 f_y は現在の応力 σ_{ij} には直接依存せず、応力履歴テンソル σ_{ij}^* とひずみ硬化パラメータ κ のみの関数として次式で表されるとする。

$$f_y = \eta^* - \kappa = 0 \quad (\text{A-6})$$

なお、 η^* は応力履歴テンソルの不変量で次のように定義される。

$$\eta^* = (s_{ij}^* s_{ij}^* / \sigma_m^2)^{1/2} \quad (\text{A-7})$$

ここに、 s_{ij}^* は応力履歴テンソルの偏差成分を、 σ_m^* はその等方成分である。

また、式(A-6)のひずみ硬化パラメータ κ の発展式は次式で表される。

$$d\kappa = \frac{G'(M_f^* - \kappa)^2}{M_f^{*2}} d\gamma^p \quad (\text{A-8})$$

比例載荷条件では、積分すると、次式のような双曲線関数になる。

$$\kappa = \frac{M_f^* G' \gamma^p}{M_f^* + G' \gamma^p} \quad (\text{A-9})$$

ただし、

$$\gamma^p = \int d\gamma^p = \int (d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p)^{1/2}, \quad \kappa = \int d\kappa \quad (\text{A-10})$$

ここに、 M_f^* は残留状態の η^* の値であり、 G' は残留状態において除荷・再載荷を行った場合の初期接線勾配から決定できる。

塑性ポテンシャル関数は次式で与えられるものとする。

$$f_p = \bar{\eta} + \bar{M} \ln[(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)] = 0 \quad (\text{A-11})$$

ここに、 $\bar{\eta}$ は次式で与えられる応力比である。

$$\bar{\eta} = [s_{ij}s_{ij}/(\sigma_m + b)^2]^{1/2} \quad (\text{A-12})$$

また、 b および σ_{mb} は材料構造を表現するための数学的パラメータである。

次に、塑性ポテンシャル関数 f_p の変化し得る限界を規定する過圧密境界面 f_b を次式で導入する。

$$f_b = \bar{\eta} + \bar{M}_m \ln[(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)] = 0 \quad (\text{A-13})$$

ここに、 \bar{M}_m は過圧密境界面パラメータと呼ばれる材料定数である。このような過圧密境界面 f_b の導入により、式(A-11)の \bar{M} は過圧密領域においては、

$$\bar{M} = -\bar{\eta} / \ln[(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)] \quad (\text{A-14})$$

正規圧密領域では、

$$\bar{M} = \bar{M}_m \quad (\text{A-15})$$

とそれぞれ与えられる。

粘塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^p$ は、塑性載荷過程に対する Prager の適合条件

$$df_y = d(\eta^* - \kappa) = 0 \quad (\text{A-16})$$

を、式(A-3)の流動則、式(A-9)のひずみ硬化パラメータおよび式(A-11)の塑性ポテンシャル関数とともに用いることで以下のように求まる。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \left[\frac{\bar{\eta}_{ij}}{\bar{\eta}} + (\bar{M} - \bar{\eta}) \right] \left[\frac{\bar{\eta}_{kl}^*}{\bar{\eta}^*} - \bar{\eta}^* \frac{\delta_{kl}}{3} \right] \frac{d\sigma_{kl}^*}{\sigma_m^*} \quad (\text{A-17})$$

$$\Lambda = \frac{M_f^{*2}}{G'(M_f^* - \kappa)^2} \quad (\text{A-18})$$

したがって、弾粘塑性構成式は式(A-1)、(A-2)、(A-18)を用いることで導かれる。

参考文献

- 1) 例えば、足立紀尚、龍岡文夫：土の力学（Ⅲ）、技報堂出版、1981.
- 2) Yong, R.N. and Japp, R.D. : Stress-strain behavior of clays in dynamic compression, vibrational effects of earthquakes on soil and foundations, *ASTM, STP*, 450, pp.233-262, 1969.
- 3) 赤井浩一、足立紀尚、安藤信夫：飽和粘土の応力-ひずみ-時間関係、土木学会論文報告集、No.225, pp.53-61, 1974.
- 4) Vaid, Y.P. : Time dependent shear deformation of clay, *Proc. of the Intl. Conf. on Rheology and Soil mechanics*, pp.123-128, 1988.
- 5) 足立紀尚、岡二三生：凍結砂のひずみ軟化型弾粘塑性構成式、土木学会論文報告集、No.454, pp.75-81, 1992.
- 6) 足立紀尚、岡二三生：軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式、土木学会論文報告集、No.445, pp.9-16, 1990.
- 7) 曾良岡宏：軟岩の時間依存性挙動とひずみ軟化型弾-粘塑性構成式に関する研究、京都大学修士論文、1995.
- 8) Mitchell, J.K. : *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- 9) Singh, A. and Mitchell, J.K. : General stress-strain-time function for soils, *Proc. ASCE*, Vol.90, No.SM6, pp.125-157, 1964.
- 10) 足立紀尚、小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊規準、土木学会論文報告集、No.295, pp.53-61, 1980.
- 11) Drucker, D.C. : A more fundamental approach to plastic stress-strain relations, *Proc. 1st U.S. Natl. Congr. Appl. Mech.*, pp.487-491, 1952.
- 12) Roscoe, K.H., Scofield, A.N. and Thurairajah, A. : Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.211-214, 1965.

(1996. 8. 5 受付)

TIME DEPENDENT BEHAVIOR OF SOFT ROCK AND ITS ESSENTIAL INTERPRETATION

Toshihisa ADACHI, Fusao OKA, Hiroshi SORAOKA and Masashi KOIKE

In the following paper, we have taken constant strain rate drained triaxial tests and drained creep tests for porous tuff ; Tomuro rock-one of Oya rock. Applying Vaid's concept on equation of state in stress-strain-strain rate to drained condition, and, moreover, by using Akai's concept on the essential relationship in stress-strain-time for saturated clay, essentially we try to explain time dependent behavior of soft rock that shows strain-softening.