

# 軟岩の変形・破壊挙動に及ぼす拘束圧の効果と ひずみ軟化型弾塑性構成式

足立紀尚<sup>1</sup>・岡二三生<sup>2</sup>・小高猛司<sup>3</sup>・古林秀之<sup>4</sup>・尾崎仁美<sup>5</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 京都大学助教授 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)

<sup>4</sup>正会員 工修 東日本旅客鉄道株式会社 (〒151-8578 東京都渋谷区代々木2-2-2)

<sup>5</sup>正会員 工修 名古屋市技術職員 土木局 (〒460-8508 名古屋市中区三の丸3-1-1)

本論文では、多孔質凝灰岩である戸室石を用い、広範囲にわたる拘束圧に対しひずみ速さ排水三軸圧縮試験を行うことにより、軟岩の変形・破壊挙動に及ぼす拘束圧の効果を明らかにしている。また、すでに提案されている足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式において、本実験により拘束圧依存性を示すことが明らかになった材料パラメータについては、実験結果に基づき拘束圧の関数として定式化を行った。その拘束圧依存性を導入したひずみ軟化型弾塑性構成式を用いて、三軸圧縮試験をシミュレーションした結果、共通のパラメータで異なる拘束圧下の実験結果が精度良く説明できることが示された。

**Key Words:** soft rock, constitutive law, confining pressure dependency, triaxial compression test, strain-softening.

## 1. 序 論

近年、都市部において地下空間の有効利用が重視されるようになり、トンネル等の地下掘削はますます大深度へと移行する傾向にある。それに伴い、長大橋梁やダム、基礎、地下LNGタンクや地下発電所の大深度掘削等の大工事ならずとも、軟岩を対象とした土木建設工事は身近になりつつある。

しかし、従来軟岩は岩盤力学の範疇で扱われることが多く、軟岩を調査するための室内試験とえば、一軸圧縮試験が主流であった。重要構造物の調査・設計にあたっては、軟岩の三軸圧縮試験を行うことが一般的となってきたが、それはごく近年になってからである。三軸試験が用いられ始めた理由の一つは、軟岩の変形係数や強度定数が拘束圧あるいは荷重レベルに応じて変動することがようやく周知となったからである。拘束圧依存性は、圧縮性の高い地盤材料では一般的であるが、岩の分野ではあまり重要視されてこなかった経緯もある。ひずみレベルに応じて変形係数を低減させることは設計上安全側への対応であるので、比較的容易に受け入れられたが、拘束圧依存性を取り入れて変形係数を大きく見積もることは、逆に危険側の対応にもなりかねないために、受け

入れる姿勢が乏しかったことも背景にある。しかし、施工前の自然地盤のままであっても、深さ方向には有効土被り圧に応じて各深度の軟岩の拘束圧は異なることもあれば、施工時には基礎やトンネル等の構造物の種類に関係なく、施工時の掘削、再載荷で拘束圧レベルは大きく変動する。数値解析等で軟岩地盤の変形および破壊の事例解析を行う場合には、拘束圧に応じて連続的に変化する材料パラメータを正確に把握することが重要となる。

本論文では、堆積軟岩(戸室石)の変形・破壊に関する諸特性の拘束圧依存性を、三軸試験結果を用いて検討する。具体的には、軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式である足立・岡モデル<sup>1),2)</sup>の各材料パラメータを検討対象に用い、初期の変形からひずみ軟化にいたる破壊までを含めて議論する。また、同時に拘束圧の関数として各パラメータを定式化することにより、足立・岡モデルの拘束圧の変動に対する適用性を検討する。

## 2. 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式の発展

前述のように軟岩の分野においては、土質力学からのアプローチが乏しい状況にあったが、足立・小川<sup>3)</sup>は軟岩

表-1 戸室石の物性値

比重 $G_s$	2.50
含水比 $w$	26.1%
初期間隙比 $e$	0.64
一軸圧縮強度 $q_u$	2.53 MPa
引張強度 $\sigma_t$	0.39 MPa
圧密降伏応力 $\sigma_{mb}$	7.85 MPa

$q_u$ : 5本の供試体による試験結果の平均値  
 $\sigma_t$ : プラジリアンテストを実施し、4本の供試体の試験結果の平均値

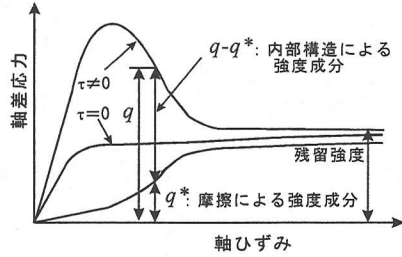


図-1 摩擦と内部構造に起因する強度成分  
 (τ: 応力履歴パラメータ)

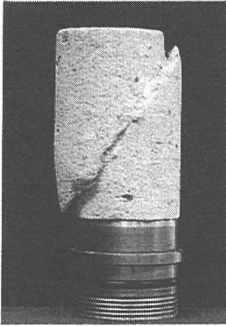


写真-1 拘束圧 0.392MPa

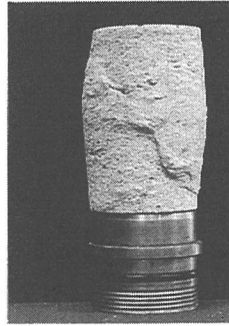


写真-2 拘束圧 1.96MPa

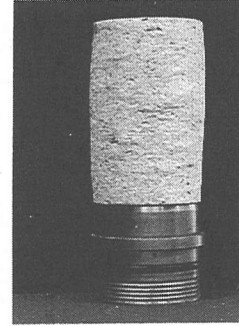


写真-3 拘束圧 4.91MPa

の三軸圧縮試験を数多く行い、拘束圧依存性のみならず、軟岩の圧密・せん断特性について土質力学の見地から統一的に論じた。その後は、粘性土等で培われた土質力学の手法を援用するなどして、軟岩の構成式研究が活発に行われるようになった。軟岩の特徴としては、ひずみ硬化-軟化型の応力ひずみ関係を呈し、かつ、ひずみ軟化に伴い正のダイレイタンスが顕著に現れることが挙げられる。軟岩に限らず、ひずみ硬化-軟化型の構成式はいくつか提案されてきたが、これらを有限要素法等の数値解析に適用した場合、ひずみ軟化時に剛性マトリックスが負値をとる場合が多く、境界値問題への適用は難しかった<sup>4), 5), 6), 7)</sup>。しかし、足立・岡<sup>8)</sup>は降伏関数を応力履歴テンソルで規定することにより、この問題を解決した。すなわち、せん断応力を粘着力やセメンテーションによる内部構造の成分と土粒子のかみ合わせによる摩擦成分とに分け(図-1)、ひずみ軟化の主因は内部構造の劣化によるとし、硬化のみを示す摩擦成分に応力履歴テンソルを対応付けることにより、剛性マトリックスを正值に保つようにした。さらに足立ら<sup>9)</sup>は、塑性ポテンシャル関数およびひずみ硬化則の改良を行い、ダイレイタンス特性をより正確に記述した。本論文においては、各材料パラメータに対する拘束圧依存性を導入することにより、より足立・岡の構成式<sup>8)</sup>の適用性を高める。

### 3. 試料と試験方法

実験は、排水条件での定ひずみ速さ三軸圧縮試験である。用いた試料は、栃木県大谷町戸室地区で採取された堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の戸室石であり、大谷石の一種である。一般的な大谷石と異なり、有機物である「みそ」が少なく、大きな空隙も少ない。戸室石の基本物性を表-1に示す。試料は現地の石切場から乾燥状態のプロックを採取し、実験室に搬入後に直径5cmのコア抜きおよび高さ10cmの端面成形を行った。その後密閉容器に入れて、真空ポンプによって充分脱気した後に、炭酸ガスを封入し加圧を行い、最後に炭酸ガスを脱気水に置き換えることにより十分に飽和させた。その状態のまま三軸試験に用いるまで恒温室内で保存した。

拘束圧は0.196, 0.392, 0.588, 0.981, 1.96, 2.94, 4.91および9.81 MPaの8パターンとし、各拘束圧に対して5本の供試体を用いて、計40ケースの試験を実施した。全試験を通して0.294 MPaの背圧を用いた。また、軸ひずみ速度は全試験を通して $2.8 \times 10^{-2} \%$ /minとし、軸ひずみが15%に至るまで軸圧縮を継続した。载荷途中、軸ひずみが10%および12%に到達した時点で、軸差応力0 MPaまでの除荷および再载荷を行った。なお、軸変位、軸荷重および体積変化の計測には、外部変位計(全長25mm)、外部ロードセル(容量98.1kN)および2重管ピュレットに連結した差圧計(容量0.981N)をそれぞれ用いた。

#### 4. 三軸試験結果

##### (1) 破壊時の供試体の観察

写真-1～3 に試験終了時の供試体を示す。拘束圧 0.981MPa 以下の場合には、いずれも水平面より 50～70° の明確なせん断面が現れる (写真-1)。拘束圧 1.96, 2.94MPa の場合には、せん断面も入りながら樽型に膨らみ (写真-2), それ以上の拘束圧になると、せん断面が観察されない完全な樽型変形となる (写真-3)。すなわち、拘束圧が高くなるにつれて、せん断面を生じるものから、せん断面が現れない樽型変形へと変わるが、拘束圧 1.96～2.94MPa では、両者の破壊機構の遷移領域であると考えられる。

##### (2) 応力-ひずみ関係

図-2 に偏差ひずみ-軸差応力関係を示す。なお、試験結果のばらつきは少なかったため、各拘束圧ごとに1つの試験結果を代表例としてプロットした。図-2 から、拘束圧が高くなるほど強度が増すことがわかる。また、1.96MPa 以下の拘束圧では、明確な荷重ピークが現れる典型的なひずみ硬化-軟化型の挙動を示す。一方、拘束圧が 2.94MPa より高くなると、ひずみ軟化は現れず、ひずみ硬化型のみを示す。

##### (3) 最大・残留強度線

図-3 に最大強度 (○印) と残留強度 (□印) を有効応力経路とあわせて示し、それぞれのデータを結んだ最大強度線と残留強度線も示す。平均有効応力約 4MPa で最大強度線と残留強度線がほぼ一致する。この場合の初期拘束圧  $\sigma_3$  は約 2MPa であり、その拘束圧を境にひずみ硬化-軟化型とひずみ硬化型のみに分かれることが見て取れる。

##### (4) 偏差ひずみ-体積ひずみ関係

図-4 に偏差ひずみ-体積ひずみ関係を示す。図-2 と同様に各拘束圧ごとに1つの試験結果を代表例として示した。0.981MPa 以下の拘束圧下では初期段階では圧縮を示し、最大強度に至る前に膨張に転じる。

体積膨張の度合いは、拘束圧が低いほど著しい。一方、拘束圧が 1.96MPa 以上になると、体積は圧縮する一方である。さらに、体積圧縮の度合いは、拘束圧が高いほど著しい。

##### (5) 平均有効応力-体積ひずみ関係

図-5 に平均有効応力-体積ひずみ関係を示す。図-5 (a) には、体積膨張を示す拘束圧 0.981MPa 以下の試験結果を (1.96MPa の結果も参考のため示した)、図-5 (b) には、体積圧縮のみを示す拘束圧 1.96MPa 以上の

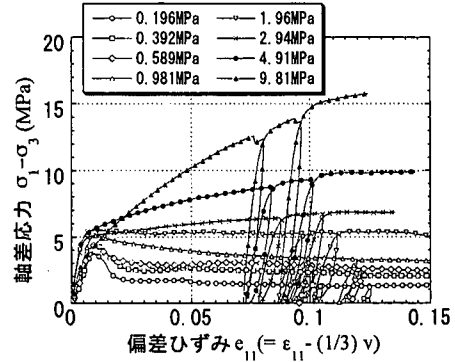


図-2 偏差ひずみ～軸差応力関係

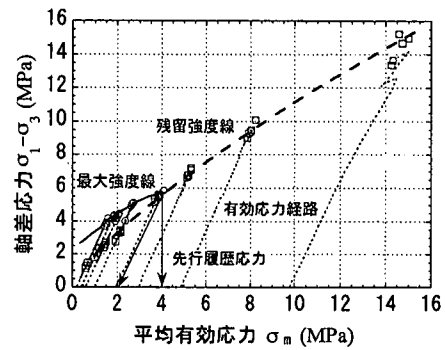


図-3 有効応力経路

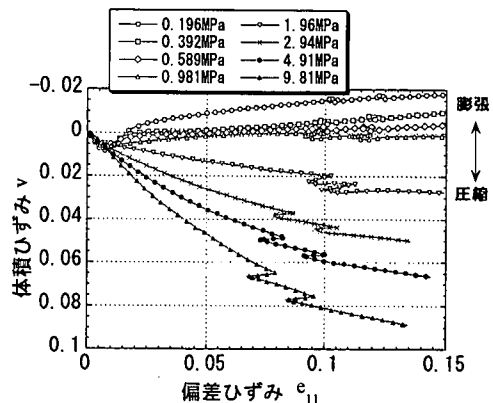


図-4 偏差ひずみ～体積ひずみ関係

試験結果をプロットした。図中の○印は圧密終了時のせん断開始前のデータであり、△印および□印はそれぞれ最大強度発揮時および残留強度時の状態のデータである。

図-5 (a) に示す比較的拘束圧の低い場合は、等方圧密曲線上からせん断が開始されたのち、応力の増加に伴い体積は圧縮し、最大強度線上に至る。最大強度線に達した

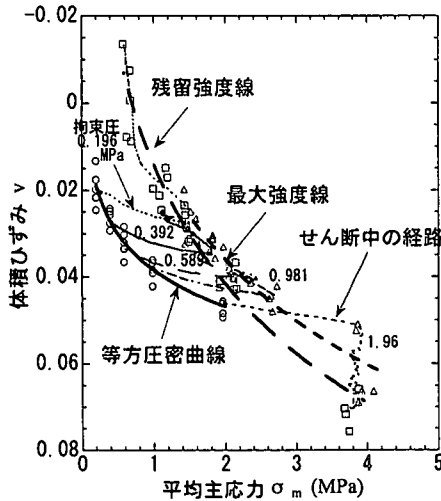


図-5(a) 平均有効応力～体積ひずみ関係(低拘束圧)

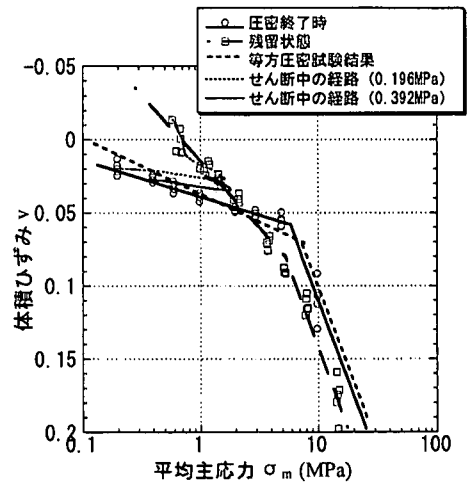


図-6 圧密終了時と残留状態での平均有効応力～体積ひずみ関係

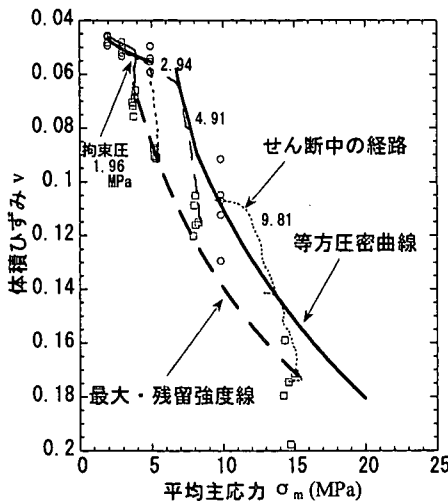


図-5(b) 平均有効応力～体積ひずみ関係(高拘束圧)

後は、応力の減少とともに急激に体積膨張しつつ最終的に残留強度線に到達する。足立・小川<sup>10)</sup>は、せん断初期から最大強度に至るまでは等方圧密曲線に沿って体積圧縮が生じるという結果を得ている。しかし、本実験結果では、せん断後すぐに等方圧密曲線から離れ、より剛性が高い経路をたどっている。すなわち、今回の実験からは、せん断過程においては、等方圧密過程よりも体積弾性率が大きい(圧縮性が低い)という結果が得られた。

図-5(b)に示す高拘束圧のものについては、等方圧密曲線上からせん断を開始し、軸差応力の増加に伴って体積は圧縮したまま、最終的に最大・残留強度線に達する。

### (6) 最大・残留強度における体積ひずみ

図-6に全試験の圧密終了時と残留状態での平均有効応力～体積ひずみ関係を示す。残留状態線と圧密曲線位置関係より、低拘束圧では過圧密領域にあり、せん断に応じて体積圧縮から膨張に転じることが分かる。一方、高拘束圧では正規圧密領域にあり、せん断時も体積圧縮のみである。これは、写真-1で示したように拘束圧によって供試体の破壊形態が異なることとも一致し、破壊形態と応力～ひずみおよびダイレイタンス挙動が密接に関連していることを表している。なお、圧密降伏応力以上の拘束圧においては、最大・残留強度線は別途実施した等方圧密試験結果とほぼ平行になっている。

## 5. 軟岩の弾性係数の拘束圧依存性

足立・岡<sup>11)</sup>は、軟岩における材料強度の発現が摩擦性に起因するものと、セメンテーションや粘着力などの内部構造に起因するものの2つから成り立つと考え(図-1)、残留状態では軟岩の内部構造は破壊され、強度のほとんどは摩擦性に由来すると考えた。本論文では、この考え方を弾性特性にもあてはめ、弾性特性を摩擦成分と内部構造成分に分解して考える。すなわち、摩擦成分とは内部構造が破壊された状態での弾性特性を示すが、それを表すものとして、弾性係数  $G'$ 、 $K'$  を考える。これらは、残留状態における再載荷曲線を用いて求める。一方、内部構造成分を含む通常の弾性係数  $G$ 、 $K$  は初期載荷曲線を用いて求める。なお、せん断弾性係数  $G$  は、軸差応力  $q$  - 偏差ひずみ  $e_{11}$  関係の  $10^3$  ひずみレベルの初期接線勾配  $\Delta q / \Delta e_{11}$  を用いて次式で求める。

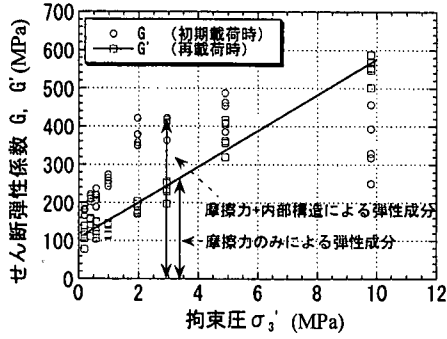


図-7 せん断弾性係数の相違

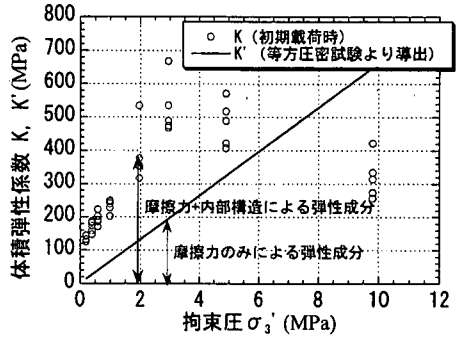


図-8 体積弾性係数の相違

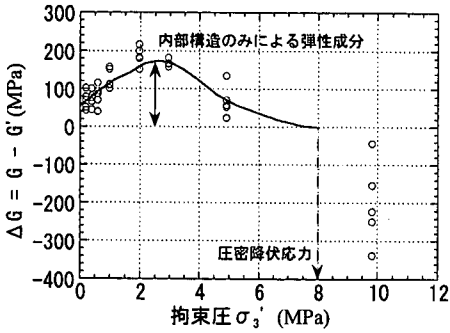


図-9 内部構造のせん断弾性特性

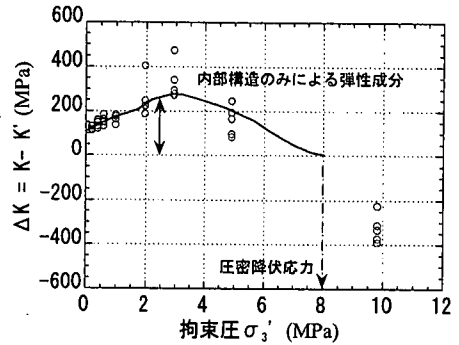


図-10 内部構造の体積弾性特性

$$G = \frac{\Delta q}{3 \cdot \Delta e_{11}} \quad (1)$$

一方、体積弾性係数  $K$  は体積ひずみ  $v$  - 偏差ひずみ  $e_{11}$  関係の初期接線勾配  $\Delta v / \Delta e_{11}$  よりポアソン比  $\nu$  を式(2)で求め、 $\nu$  と  $G$  より式(3)で  $K$  を得る。

$$\nu = \frac{1.5 - \Delta v / \Delta e_{11}}{\Delta v / \Delta e_{11} + 3} \quad (2)$$

$$K = \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} G \quad (3)$$

せん断弾性係数の摩擦成分  $G'$  は残留状態（軸ひずみ12%時）での再載荷曲線の初期接線勾配を用いて  $G$  と同様に式(1)より求める。体積弾性係数の摩擦成分  $K'$  についても、本来ならば残留状態の再載荷時の計測結果を用いて求めるべきであるが、残留状態での体積変化の計測結果の信頼性が低いことから、 $K'$  は以下のように求めた。すなわち、摩擦特性のみで変形特性が支配される材料であれば、弾性領域において  $e \sim \ln \sigma_3'$  関係は直線となるものと仮定し、体積弾性係数  $K'$  と拘束圧  $\sigma_3'$  は直線関係となるものとした。その仮定を利用し、等方圧密試験結果（図-6）の降伏前の弾性領域での直線の勾配の逆数を  $K' \sim \sigma_3'$  関係の勾配として用いた。詳細は付録1を参照されたい。このようにして得た  $K' \sim \sigma_3'$  の勾配と実験による  $G \sim \sigma_3'$  の勾配の両者を用いてポアソン比を逆算すると  $\nu = 0.21$

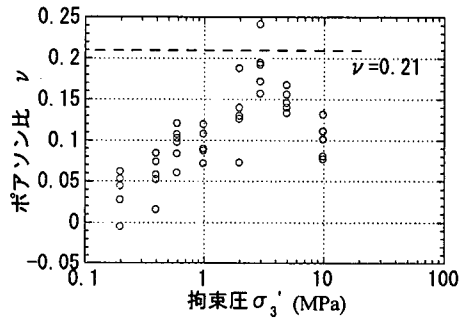


図-11 初期載荷時のポアソン比

となり、地盤材料としては妥当な値となる。

図-7に、せん断弾性係数  $G$  および摩擦成分に起因するせん断弾性係数  $G'$  と拘束圧  $\sigma_3'$  との関係を示す。 $G$  は、摩擦力の他に内部構造の影響を含んだ弾性特性を表している。図-7に示すように、せん断弾性係数  $G$  は拘束圧  $\sigma_3'$  の増大につれて増大するが、拘束圧  $\sigma_3'$  が9.81MPaになると急激に減少し、供試体ごとのデータに大きなばらつきがみられる。これは、せん断初期から塑性変形が卓越して現れるためと考えられる。また、摩擦成分のみによる弾性特性を表す  $G'$  は拘束圧  $\sigma_3'$  に対してほぼ線形な関係を示すことがわかる。もちろん、これらの傾向は計測

するひずみレベルや計測機器の精度に左右され、微小ひずみレベルで高精度な計測を行えば、当然異なる結果となることも予想できる。しかし、ここでは、同一条件の計測でありながら、高拘束圧下では明らかに傾向の異なる変形特性が観察されることに注目したい。

図-8に、体積弾性係数 $K$ および摩擦成分 $K'$ と拘束圧 $\sigma_3'$ との関係を示す。 $K$ は摩擦力の他に内部構造の影響を含んだ弾性特性を表しているといえるが、 $\sigma_3'$ が3MPa付近で最大値をとり、その後は徐々に減少し、拘束圧に対して非線形な関係を示している。また、前述のように、摩擦成分のみによる弾性特性を表す $K'$ は拘束圧 $\sigma_3'$ に対して線形関係を示すと仮定した。

次に、内部構造に起因する弾性特性のみを示すために図-9および図-10に $\Delta G (=G - G')$ および $\Delta K (=K - K')$ と拘束圧 $\sigma_3'$ との関係をそれぞれ示す。 $\Delta G$ および $\Delta K$ は類似の分布形を示しており、ともに拘束圧2~3MPaの時、最大となり、それ以後は徐々に減少してゆき、圧密降伏応力8MPa付近でほぼゼロになる。すなわちセメンテーションや粘着力といった内部構造は圧密降伏応力に達すると著しくその特性を失うと考えられる。それに伴い $G$ と $K$ は圧密降伏応力以降は急激に小さくなり、 $\Delta G$ と $\Delta K$ は負になる。

図-11に初期載荷時のポアソン比 $\nu$ と拘束圧 $\sigma_3'$ との関係を示す。摩擦による弾性成分のみを考える場合の $\nu = 0.21$ よりはかなり小さくかつばらつきが大きい。これは内部構造による弾性成分の変形が、かなり圧縮性の高いことを示している。

前出の図-5では排水せん断中の経路を示し、等方圧密過程と比べてせん断過程の体積弾性率は明らかに大きいことについて述べたが、これは、この材料が、等方圧密過程においては摩擦による弾性成分しか示さないのに対し、せん断中には内部構造による弾性成分が発揮されたためであると推測される。さらに、図-5で見みられたように等方圧密過程においては、圧密降伏応力付近まで内部構造は存在すると言えるが、せん断過程においては、拘束圧0.196MPaといった低拘束圧下でも内部構造は容易に破壊される。このことから、この内部構造の破壊は主にせん断変形に依存して進行すると言える。

## 6. ひずみ軟化型弾塑性構成式で使用する各種パラメータの初期拘束圧依存性

本章では、以上の実験結果に基づき、足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式に含まれる各種材料パラメータの拘束圧依存性について定式化を通して検討する。

足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式および構成式中で用いられる材料パラメータの概要については付録2を、

表-2 足立・岡モデルに含まれる材料パラメータ

$G$	せん断弾性係数
$K$	体積弾性係数
$M_f^*, G'$	ひずみ硬化-軟化パラメータ
$\tau$	応力履歴パラメータ
$\sigma_{mb}, \bar{M}_{in}$	過圧密境界面パラメータ
$b$	塑性ポテンシャルパラメータ

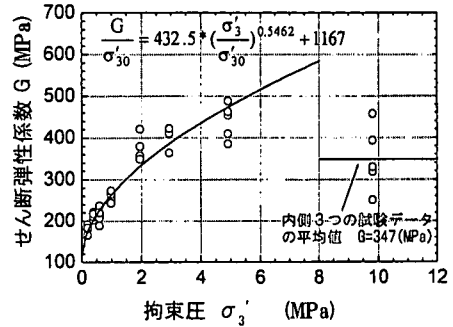


図-12 せん断弾性係数 $G$ の拘束圧依存性

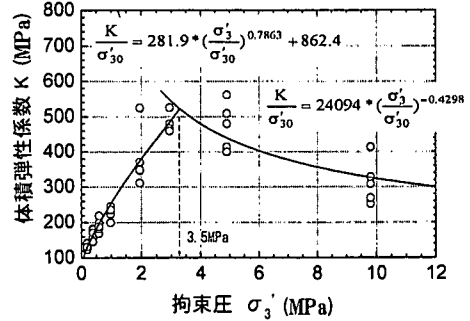


図-13 体積弾性係数 $K$ の拘束圧依存性

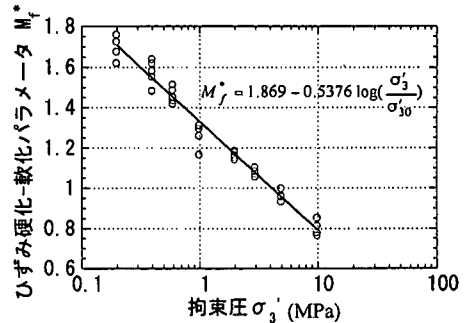


図-14 ひずみ硬化-軟化パラメータ $M_f^*$ の拘束圧依存性

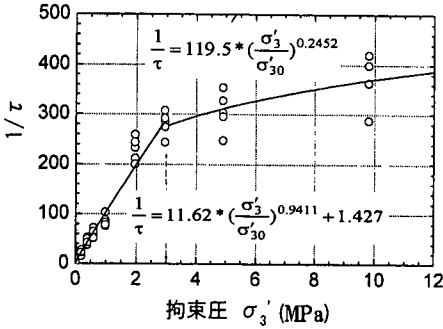


図-15 応力履歴パラメータ  $\tau$  の拘束圧依存性

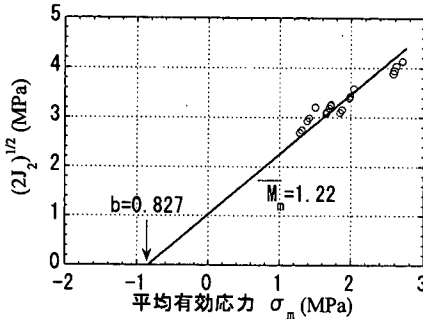


図-16 体積ひずみ最大時の有効応力状態のプロットから推定される塑性ポテンシャルパラメータ  $b$  および過圧密境界面パラメータ  $M_m$

表-3 定式化の結果

G	$\frac{G}{\sigma'_{30}} = 432.5 \times \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)^{0.5462} + 1167$ ( $\sigma'_3 < 8 \text{ MPa}$ )
	$\frac{G}{\sigma'_{30}} = 3537$ ( $\sigma'_3 \geq 8 \text{ MPa}$ )
K	$\frac{K}{\sigma'_{30}} = 281.9 \times \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)^{0.7863} + 862.4$ ( $\sigma'_3 < 3.5 \text{ MPa}$ )
	$\frac{K}{\sigma'_{30}} = 24090 \times \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)^{-0.4298}$ ( $\sigma'_3 \geq 3.5 \text{ MPa}$ )
$M_f^*$	$M_f^* = 1.869 - 0.5376 \log\left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)$
$G'$	$\frac{G'}{\sigma'_{30}} = 1064 + 46.86 \times \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)$
$\tau$	$\frac{1}{\tau} = 11.62 \times \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)^{0.9411} + 1.427$ ( $\sigma'_3 < 3 \text{ MPa}$ )
	$\frac{1}{\tau} = 119.5 \times \left(\frac{\sigma'_3}{\sigma'_{30}}\right)^{0.2452}$ ( $\sigma'_3 \geq 3 \text{ MPa}$ )
$\sigma_{mb}$	8 MPa
$M_m$	1.22
$b$	0.827

またそれ以上の詳細については文献 1) および 2) を参照されたい。なお、この構成式に含まれる材料パラメータを表-2 にまとめた。

### (1) 材料パラメータの定式化

図-12, 13, 14 および 15 に、せん断弾性係数  $G$ 、体積弾性係数  $K$ 、ひずみ硬化-軟化パラメータ  $M_f^*$  および応力履歴パラメータ  $\tau$  とせん断開始時の初期拘束圧  $\sigma'_s$  との関係を示す。また、図中に近似曲線とその定式化の結果も示した。また、 $G$  についても定式化を行っている (図-7 参照)。なお、以上の拘束圧の関数として表される材料パラメータについては単位拘束圧  $\sigma'_{30}$  ( $=98.1 \text{ kPa}$ ) により無次元化している。以上の定式化の結果をまとめて表-3 に示す。

表-3 には拘束圧に依存しないパラメータも同時に示している。初期状態の過圧密境界面を規定する  $\sigma_{mb}$  は、等方圧密試験で得た圧密降伏応力を用い、塑性ポテンシャルパラメータ  $b$  および過圧密境界面パラメータ  $M_m$  は、図-16 に示すように最大の体積圧縮ひずみが発生するときの応力状態線によって推定される。

### (2) 三軸圧縮試験のシミュレーション

(1) で示した手法で定式化された材料パラメータを用いて、4 章で示した排水三軸圧縮試験結果のシミュレーションを行った。図-17 に軸差応力-偏差ひずみ関係、図-18 に体積ひずみ-偏差ひずみ関係を示す。これらの図を実験結果の図-2 および図-4 と比較してみると、低拘束圧の条件のもとでは実験結果をほぼ再現していることがうかがえる。すべての拘束圧の実験を通して、共通のパラメータで変形・破壊挙動を説明しうるのは、構成式の性質上有用な進展である。

最後に、高拘束圧下では、わずかにひずみ軟化を生じる点、あるいは残留状態に早く達する点など、実験を完全に説明していない点も見受けられるが、これは、もともと本構成式が、高拘束圧領域 (正規領域) を想定しておらず、超過圧密領域でのひずみ軟化挙動を説明することを目標として作られていたからである。正規状態に近づくにつれカムクレイモデル等の粘性土の構成式に近づくなどの方策が必要であろう。今後の課題としたい。

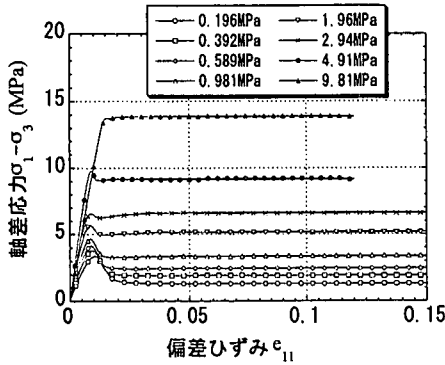


図-17 偏差ひずみ～軸差応力関係（解析結果）

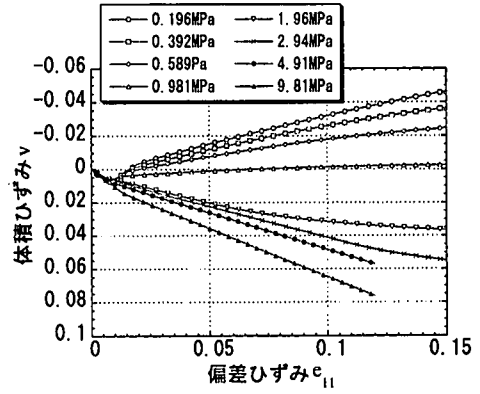


図-18 偏差ひずみ～体積ひずみ関係（解析結果）

## 7. 結論

本研究を通して以下の結論を得た。

- 1) 軟岩（戸室石）に対して、0.196～9.81MPa まで幅広く拘束圧を変えて、多数の排水定ひずみ速さ三軸圧縮試験を実施した。その結果、弾性変形特性、応力～ひずみ関係、応力～ダイレイタンスー特性について、拘束圧に依存して変化が現れることが確認された。
- 2) 弾性特性を摩擦成分と内部構成成分に分けて考えることにより、弾性係数が拘束圧に対して非線形な関数で表されるのは、主に弾性特性の内部構成成分が拘束圧に対して強い非線形性を示すためであることを示した。
- 3) 足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式における材料パラメータに対し、拘束圧依存性を示すものに関して拘束圧の関数として定式化を行った。
- 4) 上記の関数を組み込んだ材料パラメータを足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式に導入し、三軸圧縮試験のシミュレーションを行った。その結果、低拘束圧下においては実験結果を良好に説明することを確認した。

なお、本論文では三軸圧縮試験のみを扱ったため、材料パラメータを拘束圧の関数として定式化を行った。しかし、今後は施工途中に応力状態が刻々と変化するトンネル掘削やダム基礎の施工等の境界値問題を扱うことになる。その場合には、各パラメータは平均有効応力等の関数として定式化する必要がある。しかし、弾性係数は平均有効応力ではなく、対象とする軸方向の有効応力に依存するとの指摘<sup>8)</sup>もあり、各パラメータのより一般的な定式化には慎重な検討が必要である。

## 付録1: $K'$ の導出

降伏前の弾性領域における体積比  $v_s (=1+e)$  と拘束圧  $\sigma_3$  との関係は次式と仮定できる。

$$v_s = \Gamma - \kappa \ln \sigma_3', \quad \Gamma: \text{定数} \quad (\text{A1-1})$$

両辺を微分すると次式を得る。

$$\Delta v_s = -\kappa \frac{\Delta \sigma_3'}{\sigma_3} \quad (\text{A1-2})$$

体積ひずみ  $v$  の定義を考慮することにより、

$$\Delta v = -\frac{\Delta v_s}{v_{s0}} = \frac{\kappa}{v_{s0}} \frac{\Delta \sigma_3'}{\sigma_3} \quad (\text{A1-3})$$

となる。ここに、 $v_{s0}$  は初期比体積 ( $=1+e_0$ ) である。一方、体積弾性係数の定義より次式が成り立つ。

$$\Delta v = \frac{1}{K'} \Delta \sigma_3' \quad (\text{A1-4})$$

(A1-3)と(A1-4)を比べることにより、

$$K' = \frac{v_{s0}}{\kappa} \cdot \sigma_3' \quad (\text{A1-5})$$

の関係が得られる。さらに、図-6 に示した体積ひずみ・拘束圧の関係において弾性領域は(A1-1)を考慮することにより次式のように表される。

$$v = \frac{v_{s0} - v_s}{v_{s0}} = 1 - \frac{v_s}{v_{s0}} = \Gamma' + \frac{\kappa}{v_{s0}} \ln \sigma_3' \quad (\text{A1-6})$$

以上のことから、等方圧密曲線の降伏前の弾性領域の傾きの逆数は、 $K' \sim \sigma_3'$  関係の勾配に等しいと仮定できる。

## 付録2: 足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式

足立・岡のひずみ軟化型弾塑性構成式について、本論文で示した材料パラメータの意味を把握する上での要点



のみを示す。構成式の詳細については、別途文献 1)および 2)を参照されたい。なお、以下で使われる応力はすべて有効応力である。

### (1) 固有ひずみ測度と応力履歴テンソル

応力履歴テンソルの導入に必要な固有ひずみ測度の増分として以下のような偏差ひずみの不変量を採用する。

$$dz = \sqrt{de_{ij}de_{ij}} \quad (A2-1)$$

また、応力履歴テンソルを次式で導入する。

$$\sigma_{ij}^* = \int_0^z K(z-z')\sigma_{ij}(z')dz' \quad (A2-2)$$

式(A2-2)における  $K$  は、連続有界な関数で核関数と呼ばれる。軟岩に対する核関数として式(A2-3)の指数関数を採用すると、応力履歴テンソルは式(A2-4)のようになる。

$$K(z) = \exp(-z/\tau) \quad (A2-3)$$

$$\sigma_{ij}^* = \frac{1}{\tau} \int_0^z \exp(-(z-z')/\tau)\sigma_{ij}(z')dz' \quad (A2-4)$$

ここに、 $\tau$  は応力履歴パラメータであり、ひずみ軟化の度合を表すパラメータである。軸差応力-偏差ひずみ曲線における最大強度を表現できるようにカーブフィッティングにより決定する。

### (2) ひずみ増分と流動則

全ひずみ増分テンソルは弾性ひずみ増分テンソルと塑性ひずみ増分テンソルの和であると仮定する。

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (A2-5)$$

等方線形弾性体と仮定すれば、弾性ひずみ増分テンソルは次式で与えられる。

$$d\varepsilon_{ij}^e = ds_{ij}/2G + d\sigma_m \delta_{ij}/3K \quad (A2-6)$$

ここに、 $ds_{ij}$  は偏差応力テンソル、 $d\sigma_m$  は平均有効応力、 $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタである。

一方、塑性ひずみ増分は次式の間接流れ則に基づいて与えられると仮定する。

$$d\varepsilon_{ij}^p = H \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} df_p \quad (A2-7)$$

ここで、 $f_p$  は降伏関数、 $f_p$  は塑性ポテンシャル関数、 $H$  はひずみ硬化-軟化パラメータである。

### (3) 降伏関数

降伏関数  $f_p$  は現在の応力には直接依存せず、応力履歴比  $\eta^*$  とひずみ硬化パラメータ  $\kappa$  のみの関数として次式で表されるとする。

$$f_y = \eta^* - \kappa = 0 \quad (A2-8)$$

なお、応力履歴比  $\eta^*$  は応力履歴テンソル  $\sigma_{ij}^*$  の不変量で次のように定義される。

$$\eta^* = \sqrt{(s_{ij}^* s_{ij}^* / \sigma_m^{*2})} \quad (A2-9)$$

$s_{ij}^*$  は応力履歴テンソルの偏差成分、 $\sigma_m^{*2}$  はその等方成分である。

### (4) ひずみ硬化パラメータ

式(A2-8)のひずみ硬化パラメータの発展式は次式で表される。

$$d\kappa = \frac{G'(M_f^* - \kappa)^2}{M_f^{*2}} d\gamma^p \quad (A2-10)$$

ここに、 $M_f^*$  は残留状態での応力履歴比  $\eta^*$  の値である。式(A2-10)を、比例載荷条件下で積分すると、次式のような双曲線関数になる。

$$\kappa = \frac{M_f^* G' \gamma^p}{M_f^* + G' \gamma^p} \quad (A2-11)$$

ただし、 $\gamma^p = \int d\gamma^p = \int (de_{ij}^p de_{ij}^p)^{1/2}$

$$\kappa = \int d\kappa \quad (A2-12)$$

### (5) 塑性ポテンシャル関数と過圧密境界面

まず、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。なお、過圧密境界面  $f_b$  は、その内側 ( $f_b < 0$ ) では過圧密的挙動を、外側 ( $f_b \geq 0$ ) では正規圧密的挙動をするという境界を与えるものである。

$$f_b = \bar{\eta} + \bar{M}_m \ln[(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)] = 0 \quad (A2-13)$$

ここに、 $\bar{\eta}$  は次式で与えられる応力比である。

$$\bar{\eta} = \sqrt{s_{ij} s_{ij} / (\sigma_m + b)^2} \quad (A2-14)$$

また、 $\bar{M}_m$  は過圧密境界面パラメータと呼ばれ、せん断過程において最大の体積圧縮ひずみが生じるときの  $\bar{\eta}$  の値である (図-16 参照)

$b$  および  $\sigma_{mb}$  は材料の内部構造を表現するパラメータである。 $\sigma_{mb}$  は塑性体積ひずみの値に応じて変化するものとし次式で定義する。

$$\sigma_{mb} = \sigma_{mb0} \exp\left(\frac{v^p}{\lambda_v - \kappa_v}\right) \quad (A2-15)$$

ここに、 $\sigma_{mb0}$  は  $\sigma_{mb}$  の初期値であり、圧密降伏応力に相当する。 $\lambda_v$  および  $\kappa_v$  はそれぞれ、等方圧密曲線 (体積ひずみ  $v \sim \ln \sigma_m$  曲線) の正規圧密領域および過圧密領域における傾きである。

次に、塑性ポテンシャル関数を次式で与える。

$$f_p = \bar{\eta} + \bar{M} \ln[(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)] = 0 \quad (A2-16)$$

過圧密境界面  $f_p$  の導入により、式(A-16)の  $\bar{M}$  は過圧密領域においては、

$$\bar{M} = -\bar{\eta} / \ln[(\sigma_m + b)/(\sigma_{mb} + b)] \quad (A2-17)$$

正規圧密領域では、

$$\bar{M} = \bar{M}_m \quad (A2-18)$$

とそれぞれ与えられる。

### (6) ひずみ硬化—軟化型弾塑性構成式

塑性ひずみ増分は、塑性載荷過程に対する Prager の適合条件

$$df_p = d(\eta^* - \kappa) = 0 \quad (A2-19)$$

を、式(A2-7)の流動則、式(A2-11)のひずみ硬化パラメータおよび式(A2-16)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。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \left[ \frac{\eta_{ij}}{\eta} + (\bar{M} - \bar{\eta}) \frac{\delta_{ij}}{3} \right] \left[ \frac{\eta_{kl}^*}{\eta^*} - \eta^* \frac{\delta_{kl}}{3} \right] \frac{d\sigma_{kl}^*}{\sigma_m^*} \quad (A2-20)$$

ただし、

$$\lambda = \frac{M_f^*{}^2}{G'(M_f^* - \kappa)^2} \quad (A2-21)$$

したがって、ひずみ軟化型弾塑性構成式は式(A2-5)、(A2-6)、(A2-20)を用いることで導かれる。

### 参考文献

- 1) 足立 紀尚, 岡 二三生: 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.445/III-18, pp.9-16, 1992.
- 2) 足立 紀尚, 岡 二三生, 古池章紀, 小池真史: 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式の改良, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.31-40, 1998.
- 3) 足立 紀尚, 小川豊和: 堆積軟岩の力学特性と破壊規準, 土木学会論文集, No.295, pp.51-63, 1980.
- 4) Höeg, K.: Finite element analysis of strain softening clay, *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 98, SM-1, pp.43-58, 1972.
- 5) Nayak, G.C. and Zienkiewicz, O.C.: Elasto-plastic stress analysis, A generalization for various constitutive relations including strain-softening, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*, Vol.5, pp.113-135, 1972.
- 6) Lo, K.Y. and Lee, C.F.: Stress analysis and slope stability in strain softening soils, *Géotechnique*, 23, pp.1-11, 1973.
- 7) Banerjee, P.K. and Stipho, A.S.: An elasto-plastic model for undrained behavior of heavily over-consolidated clays, Short Communication, *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, pp.97-103, 1979.
- 8) 龍岡文夫, 小倉猛司, 王 林, 早野公敏, 古岡潤一: 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.1-18, 1997.

(1999. 10. 29 受付)

## EFFECTS OF CONFINING PRESSURE ON DEFORMATION AND FAILURE OF SOFT ROCK AND STRAIN SOFTENING TYPE ELASTO-PLASTIC MODEL

Toshihisa ADACHI, Fusao OKA, Takeshi KODAKA, Hideyuki KOBAYASHI  
and Hitomi OSAKI

Through a series of drained triaxial compression tests covering wide-rang confining pressures, the effect of the confining pressure on the deformation and failure of the soft rock are studied. The test sample used is a porous quality tuff called Tomuro-ishi. The material parameters used in the strain softening type elasto-plastic constitutive equation proposed by Adachi and Oka (1992) are obtained from the present test results, and most of them show the confining pressure dependency. Therefore, these parameters are formulated as a function of the confining pressure and the confining pressure dependencies are incorporated in the original Adachi & Oka model. As a result of test simulations, it is shown that the proposed model can well explain the experimental results under different confining pressures in the common basic soil parameters.