

第三紀堆積泥岩の弾塑性挙動に関する研究（その1）

—最大強度までの弾塑性および粘弾性挙動について—

渡 辺 浩 平
(技術研究所)

傳 田 篤
(技術研究所)

川 崎 廣 貴
(土木本部)

中 沢 亨
(土木本部)

§ 1. はじめに

近年、原子力発電所、本州四国連絡橋、青函トンネルなどの大型かつ重要構造物が、第三紀堆積泥岩などの軟質岩盤（以下、軟岩と呼ぶ）に建設されており、この種の構造物が増加する傾向にある。軟岩は硬質岩盤と異なり、岩石材料から得られた強度変形特性は岩盤のものにほぼ等しいと一般に考えられていることから、これらの構造物と軟岩の挙動を解析によって正確に求めるためには、軟岩の挙動を構成式を用いて忠実にモデル化する必要がある。また、軟岩にはスウェリング、スレーキングと呼ばれる特異な性質もあり、これらを考慮することも重要と考えられている。

地盤材料に対する構成式の研究は、松井・阿部¹⁾²⁾により概説されているように、1960年代から粘土・砂などの土質材料について活発に行なわれている。そして、これらの中で Roscoe らの提案した「Critical State Energy Theory」と関連流れ則に基づく「Cam Clay Model」は粘土に関する、また Poorooshasb らの提案した非関連流れ則に基づくモデルは砂に関するその後の弾塑性モデルの基本となっている。

足立ら³⁾⁴⁾は、過圧密粘土の構成式に関する研究を Roscoe らの研究を拡張することによって行なうとともに過圧密粘土と軟岩の相関について研究を行ない、両者の共通性について論じるとともに両者を統一的に表現できる構成式の研究を行なっている。足立³⁾により第三紀堆積凝灰岩(大谷石)に対して行なわれた一連の研究は、軟岩に関する構成式の研究としては先駆的なものである。その後、軟岩に関する構成式の研究が活発に行なわれるようになり、軟岩の強度変形特性を把握するため試験装置の開発整備が進められ、その成果の発表が盛んになりつつある。また、西⁵⁾は繰返し荷重を受ける飽和砂が過剰間隙水圧の蓄積によって過圧密領域に移行する場合の挙動を表現できる弾塑性構成式の研究を、Poorooshasb らの研究を拡張することによって行なっている。過圧密

粘土と軟岩の共通性と同じく、過圧密砂に関する研究成果も軟岩に適用が可能であると考えられる。

本研究は、第三紀堆積泥岩の力学特性について検討するため、標準圧密試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験、二軸クリープ試験などの一連の室内試験を行ない、これらの試験結果に基づいて弾塑性構成式について検討を行なったものである。三軸圧縮試験結果については、最大強度までの挙動について検討を行なった。最大強度に至る変形特性については、拘束性の違いによって弾性変形のみの場合と、ひずみ硬化を伴う弾塑性変形を起こす場合が見られた。このうち、弾性変形を起こす部分については弾性定数の拘束圧依存性について検討を行なった。また、ひずみ硬化を伴う弾塑性変形を起こす部分については、足立らおよび西によって提案された構成式に用いられている降伏規準、塑性ポテンシャル、硬化則を参考に、これらを準用した弾塑性モデルによって検討を行なった。三軸クリープ試験は、堆積軟岩の時間依存性挙動を検討するために行なったものである。これらの試験結果およびシミュレーション結果について報告する。

§ 2. 試験概要および試験結果について

2.1 物理試験および基本的な力学試験

表一には、今回使用した泥岩の基本的な物理定数および力学定数を示した。また、図一には標準圧密試験結果を示した。これより、圧密降伏応力 p_0 、圧縮指数 λ および膨潤指数 κ として、それぞれ 115 kgf/cm^2 {11.27 MPa}、0.125 および 0.055 の値が得られた。なお、膨潤曲線の勾配が圧縮時に比べて膨潤時にかなり大きくなっているが、これは膨潤開始時の応力レベルが大きいため構造破壊を起こしたものと考えられる。一軸圧縮試験からは、一軸圧縮強さ q_u として 22.1 kgf/cm^2 {2.17 MPa} の値が得られた。また、圧裂試験から引張り強さ σ_t として 3.3 kgf/cm^2 {0.32 MPa} の値が得られた。

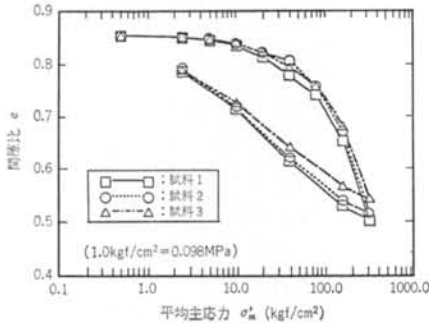
2.2 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は、側圧一定三軸圧縮試験と平均主応力一定三軸圧縮試験を行なった。

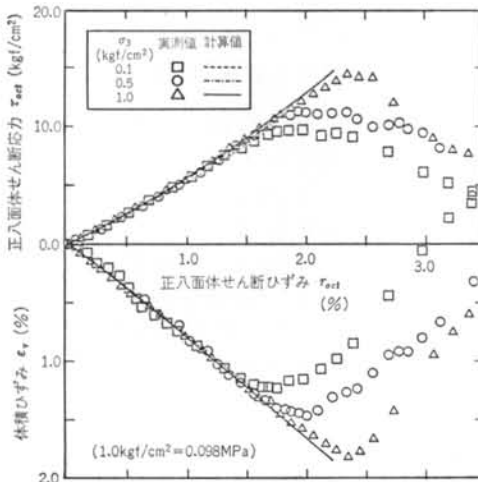
側圧一定三軸圧縮試験はひずみ速度一定 ($\dot{\epsilon}_1=0.0025\%/min$) の排水条件で行ない、側圧 σ_3 は、0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0 kgf/cm^2 {0.01, 0.02, 0.05,

項目		重力単位	SI 単位
物理試験	自然間隙比 e_n	0.83	0.83
	湿潤単位体積重量 r_t	1.92 tf/m^3	18.82 kN/m^3
	乾燥単位体積重量 r_d	1.48 tf/m^3	14.50 kN/m^3
	自然含水比 w_n	29.3%	29.3%
	粒子比重 G_s	2.72	2.72
一軸試験	一軸圧縮強さ q_u	22.1 kgf/cm^2	2.17 MPa
圧裂試験	引張り強さ σ_t	3.3 kgf/cm^2	0.32 MPa
標準圧密試験	圧密降伏応力 p_c	115 kgf/cm^2	11.27 MPa
	圧縮指数 λ	0.215	0.215
	膨潤指数 κ	0.055	0.055

表一 物性値



図一 圧密試験結果

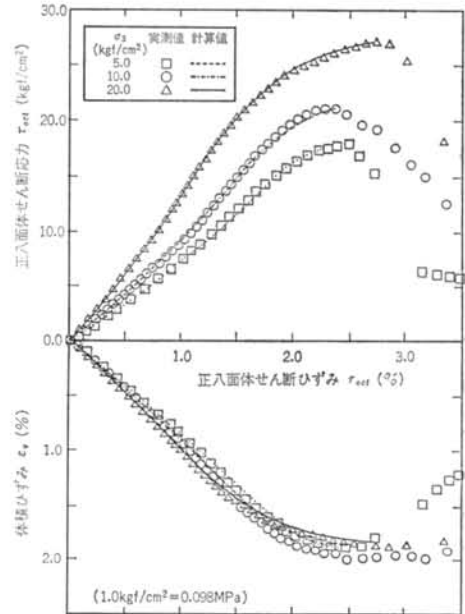


図二 応力ひずみ関係 (側圧一定, 低拘束圧)

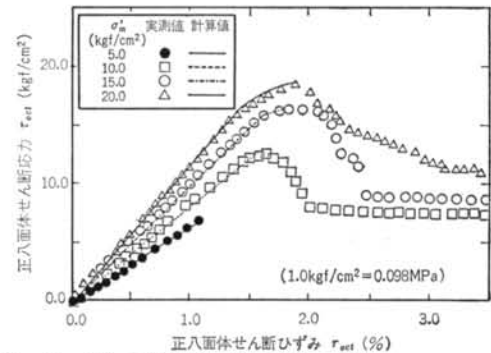
0.10, 0.49, 0.98, 1.96 MPa) の 7 種類を用いた。バックプレッシャーは 2.0 kgf/cm^2 {0.20 MPa} とした。また、平均主応力一定三軸圧縮試験は、ひずみ速度一定 ($\dot{\epsilon}_1=0.0025\%/min$) の排水条件で行ない、平均主応力 σ'_m は、5.0, 10.0, 15.0, 20.0 kgf/cm^2 {0.49, 0.98, 1.47, 1.96 MPa} の 4 種類を用いた。バックプレッシャーは 1.0 kgf/cm^2 {0.10 MPa} とした。

なお、本文においては応力パラメータとしては、主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ によって式(1)、式(2)で表わされる正八面体せん断応力 τ_{oct} と平均主応力 σ'_m を、ひずみパラメータとしては主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ によって式(3)、式(4)で表わされる正八面体せん断ひずみ τ_{oct} と体積ひずみ ϵ_v を用いた。また、応力およびひずみは圧縮を正とした。

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}^{1/2} \quad \dots(1)$$



図三 応力ひずみ関係 (側圧一定, 高拘束圧)



図四 応力ひずみ関係 (平均主応力一定)

$$\sigma'_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \dots\dots(2)$$

$$r_{oct} = \frac{2}{3}\{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2\}^{1/2} \quad \dots(3)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad \dots\dots(4)$$

図-2には、正八面体せん断応力(τ_{oct})~正八面体せん断ひずみ(r_{oct})~体積ひずみ(ε_v)関係の実測値を、側圧 0.1 kgf/cm²(□), 0.5 kgf/cm²(○), 1.0 kgf/cm²(△)の場合について示した。なお、側圧 0.2 kgf/cm²の場合については図の煩雑さを避けるため省略した。図-3には、正八面体せん断応力(τ_{oct})~正八面体せん断ひずみ(r_{oct})~体積ひずみ(ε_v)関係の実測値を、側圧 5.0 kgf/cm²(□), 10.0 kgf/cm²(○), 20.0 kgf/cm²(△)の場合について示した。また、図-4には正八面体せん断応力(τ_{oct})~正八面体せん断ひずみ(r_{oct})関係の実測値を、平均主応力 5.0 kgf/cm²(●), 10.0 kgf/cm²(□), 15.0 kgf/cm²(○), 20.0 kgf/cm²(△)の場合について示した。なお、体積ひずみについてはほとんど発生しておらず、図の煩雑さを避けるために省略した。

なお、図-2、図-3および図-4の曲線は提案した構成式を用いて求めたシミュレーション曲線であるが、これについては後に述べる。図-2~図-4の応力ひずみ関係からは最大強度に達した後、明瞭なひずみ軟化挙動を示すのがみられる。しかし、今回のシミュレーションは最大強度までの挙動について行なうことにする。

最大強度に達するまでの応力ひずみ関係をみると、図-2の場合は弾性変形のみ生じており、図-3の場合はひずみ硬化を伴いながら弾塑性変形を起こしている。また、図-4をみると平均主応力 σ'_m が 10 kgf/cm² 以下の場合には最大強度までは弾性変形のみ生じており、15 kgf/cm² 以上の場合にはひずみ硬化を伴いながら弾塑性変形を起こしている。

また、試験後の供試体の破壊状態をみると側圧 0.1~

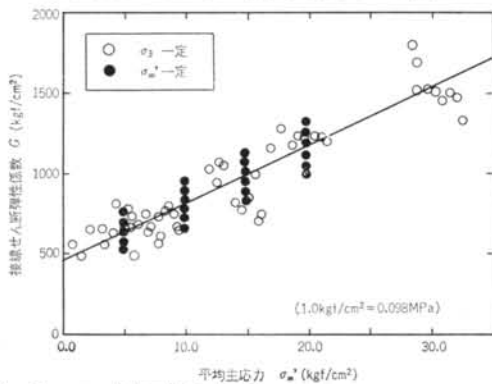


図-5 Gの拘束圧依存性

1.0 kgf/cm² の場合および平均主応力が 5 kgf/cm² と 10 kgf/cm² の場合には、引張り破壊によると考えられる縦割れや横割れの亀裂を生じている。また、側圧 5.0~20.0 kgf/cm² の場合および平均主応力が 15 kgf/cm² と 20 kgf/cm² の場合には、明瞭なせん断破壊を生じている。

次に、弾性領域における応力ひずみ関係をみると、側圧一定三軸圧縮試験の場合には必ずしも直線ではなく、やや上反りの曲線になっている。これは、側圧一定条件で行なっているため軸圧力が増加するのに伴って拘束圧(または、平均主応力 σ'_m)が増加し、弾性係数が増加するためであると考えられる。平均主応力一定三軸圧縮試験についていえば、弾性領域の応力ひずみ関係はほぼ直線になっている。

そこで、弾性領域における弾性係数の拘束圧依存性について検討を行なうため、今回行なったすべての試験について得られた応力ひずみ関係から、接線せん断弾性係数 G を求め図-5に示した。また、側圧一定三軸圧縮試験について得られた応力ひずみ関係から、接線体積弾性係数 K を求め図-6に示した。

図-5、図-6をみると実測値は平均主応力 σ'_m についてほぼ直線関係にある。このため、式(5)、式(6)に示すような実験式を用いて接線弾性係数の拘束圧依存性を表わすことにした。また、図-5、図-6には式(5)、式(6)の関係を実線で示した。

$$G = 470 + 36 \cdot \sigma'_m \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots\dots(5)$$

$$= 46.1 + 36 \cdot \sigma'_m \quad (\text{MPa})$$

$$K = 450 + 21 \cdot \sigma'_m \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots\dots(6)$$

$$= 44.1 + 21 \cdot \sigma'_m \quad (\text{MPa})$$

図-7には、側圧一定および平均主応力一定三軸圧縮試験から得られた最大強度(○)、初期降伏応力(□)の実測値を示した。また、図中には応力経路(点線)および実験式として用いた最大強度線(実線)、初期降伏線(一点鎖線)をそれぞれ示した。最大強度は、平均主応力

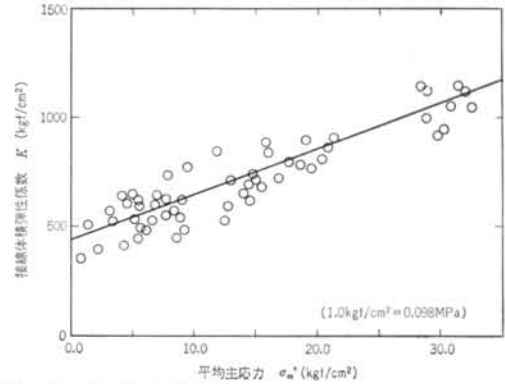


図-6 Kの拘束圧依存性

$\sigma'_m = 12.5 \text{ kgf/cm}^2$ {1.23 MPa} を境に、これより小さい場合については式(7)で、またこれより大きい場合については式(8)でそれぞれ表わすことにする。

$$(\tau_{oct})_f = 1.95 + 1.12 \cdot \sigma'_m : \sigma'_m < 12.5 \text{ kgf/cm}^2 \quad \dots(7)$$

$$= 0.19 + 1.12 \cdot \sigma'_m : \sigma'_m < 1.23 \text{ MPa}$$

$$(\tau_{oct})_f = 10.5 + 0.434 \cdot \sigma'_m : \sigma'_m \geq 12.5 \text{ kgf/cm}^2 \quad \dots(8)$$

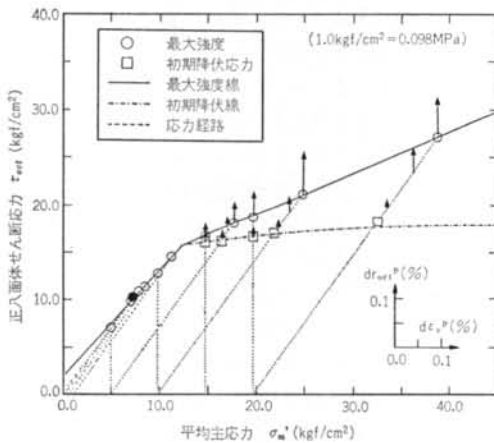
$$= 1.03 + 0.434 \cdot \sigma'_m : \sigma'_m \geq 1.23 \text{ MPa}$$

また、図中には一軸圧縮強さ(●)も示したが、式(7)によってほぼ表現できる。なお、最大強度線と σ'_m 軸との交点を A^* とすると、式(7)、式(8)は一般に式(9)のように表わされる。

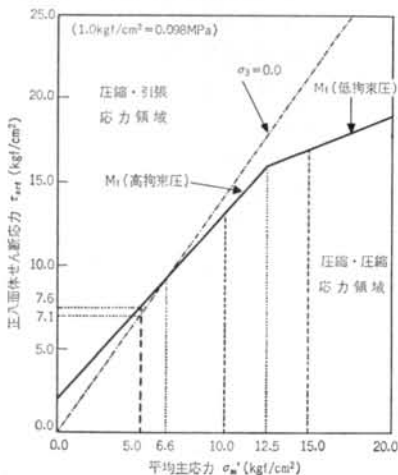
$$\left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} \right)_f = M_f \quad \dots\dots(9)$$

ここに、 A^* は過圧密粘土や軟岩のように粘着力のある材料に対して足立ら⁴⁾が導入したパラメータである。

式(7)、式(8)に対応する M_f および A^* の値は、それぞれ



図一七 強度および塑性ひずみ増分



図一八 平均主応力一定試験の応力経路と応力領域

れ $\sigma'_m < 12.5 \text{ kgf/cm}^2$ では $M_f = 1.12$, $A^* = 1.7 \text{ kgf/cm}^2$ {0.17 MPa}, $\sigma'_m \geq 12.5 \text{ kgf/cm}^2$ では $M_f = 0.434$, $A^* = 24.2 \text{ kgf/cm}^2$ {2.37 MPa} となる。

また、Mohr-Coulomb の破壊規準に用いられる粘着力 C および内部摩擦角 ϕ と式(9)の関係は、式(10)、式(11)のように表わされる。

$$C = A^* \cdot \tan \phi \quad \dots\dots(10)$$

$$\sin \phi = \frac{3 \cdot M_f}{M_f + 2\sqrt{2}} \quad \dots\dots(11)$$

式(10)、式(11)より、粘着力 C と内部摩擦角 ϕ を求めると、それぞれ $\sigma'_m < 12.5 \text{ kgf/cm}^2$ では 2.8 kgf/cm^2 {0.28 MPa}, 58.3° , $\sigma'_m \geq 12.5 \text{ kgf/cm}^2$ では 10.5 kgf/cm^2 {1.03 MPa}, 23.5° となる。

また、図一七には側圧 5.0, 10.0, 20.0 kgf/cm^2 の場合および平均主応力 15.0, 20.0 kgf/cm^2 の場合について、ひずみ硬化時の塑性領域における塑性ひずみ増分方向を示している。この塑性ひずみ増加方向は、ほぼ垂直となり塑性せん断ひずみの発生が明瞭に認められるのに比べ、塑性体積ひずみについてはほとんど発生していない。

図一四の応力ひずみ関係で、平均主応力 5.0 kgf/cm^2 {0.49 MPa} の場合には応力ひずみ関係が途中で終了しているが、これは側圧が引張応力となり試験が不可能となったためである。これについては、次のように説明される。

最大強度 $(\tau_{oct})_f$ については、側圧一定三軸圧縮試験から平均主応力 12.5 kgf/cm^2 {1.23 MPa} を境に式(7)および式(8)で表わされる関係が得られている。式(7)より平均主応力 5.0 kgf/cm^2 のときの最大強度 $(\tau_{oct})_f$ は、7.6 kgf/cm^2 {0.74 MPa} で、側圧が 0.0 kgf/cm^2 となるときに正八面体せん断応力 $\tau_{oct} = 7.1 \text{ kgf/cm}^2$ {0.70 MPa} よりも大きな値となり、破壊が発生しなかったことが裏付けられる。ちなみに、式(7)の関係からは平均主応力 6.6 kgf/cm^2 {0.65 MPa} 以下では、最大強度に達するまでに側圧が 0.0 kgf/cm^2 となる。これらの関係を示すと図一八のようになる。

2.3 三軸クリープ試験

第三紀堆積泥岩の時間依存性について検討を行なうため、三軸クリープ試験を行なった。試験は一段階载荷とした。側圧は、0.2, 0.5, 5.0 kgf/cm^2 {0.02, 0.05, 0.49 MPa} の3種類を用いた。また、载荷応力は、側圧 0.2 kgf/cm^2 の場合は、 $\tau_{oct} = 4.2(0.4)$, 7.4(0.7), 8.4(0.8), 9.5(0.9) kgf/cm^2 , 側圧 0.5 kgf/cm^2 の場合は、 $\tau_{oct} = 4.5$

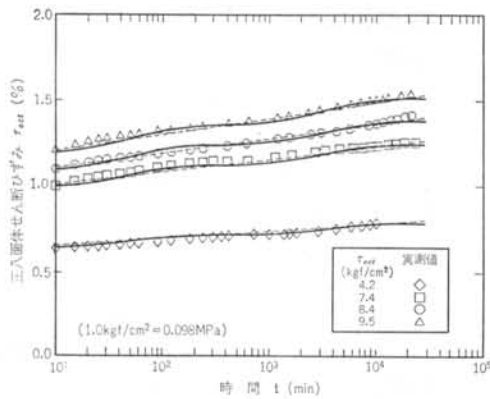


図-9 クリープ曲線 (側圧: 0.2 kgf/cm²)

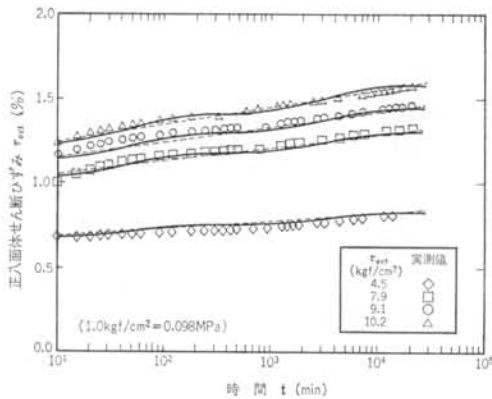


図-10 クリープ曲線 (側圧: 0.5 kgf/cm²)

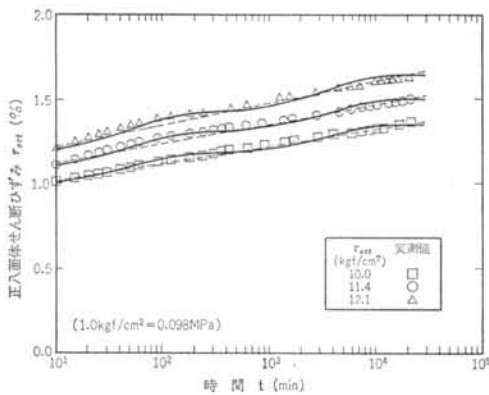


図-11 クリープ曲線 (側圧: 5.0 kgf/cm²)

(0.40), 7.9(0.7), 9.1(0.8), 10.2(0.9) kgf/cm², 側圧 5.0 kgf/cm² の場合は, $\tau_{oct} = 10.0(0.55)$, 11.4(0.63), 12.1(0.70) kgf/cm² を用いた。なお, 括弧内の値は三軸圧縮試験から得られた最大強度に対する比率である。図-9～図-11には, それぞれの側圧に対する正八面体せん断ひずみ $\tau_{oct} \sim$ 時間 t (min) 関係を示した。なお, 側

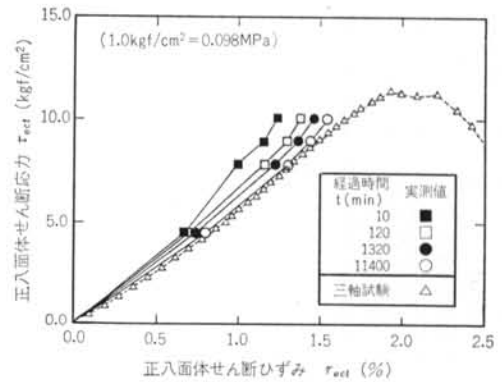


図-12 等時曲線としての応力ひずみ関係 (側圧: 0.5 kgf/cm²)

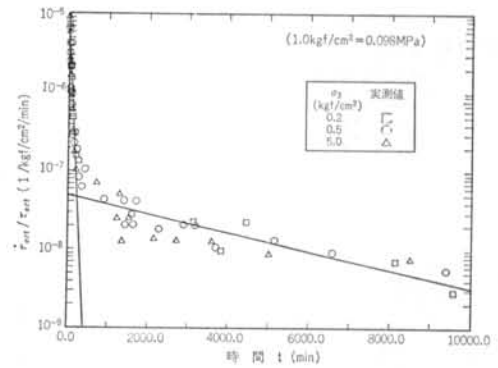


図-13 正規化ひずみ速度～時間関係 (強度比 0.7)

圧 0.2, 0.5 kgf/cm², 強度比 0.9 の場合はクリープ破壊に至る結果も得られたが, 本研究においては検討を行なわなかった。図中の実線および破線は, 2種類の粘弾性モデルを用いたシミュレーション曲線であるが, これについては後に述べる。

図-12には, 側圧 0.5 kgf/cm² の場合の正八面体せん断応力 $\tau_{oct} \sim$ 正八面体せん断ひずみ r_{oct} 関係の経過時間 $t = 10$ min (■), 120 min (□), 1,320 min (●), 11,400 min (○) における等時曲線を示した。また, 図中には側圧一定三軸圧縮試験から得られた側圧 0.5 kgf/cm² の場合の実測値 (△) も示した。この図から, $t = 1,1400$ min における等時曲線と比較的小さなひずみ速度で行なわれた三軸圧縮試験結果とがほぼ対応する。なお, この傾向は他の側圧についてもみられた。

図-13は, 強度比が 0.7 の場合の正八面体せん断ひずみ速度 \dot{r}_{oct} を正八面体せん断応力 τ_{oct} で正規化した値 \dot{r}_{oct}/τ_{oct} と経過時間 t との関係を側圧 0.2 kgf/cm² (□), 0.5 kgf/cm² (○), 5.0 kgf/cm² (△) について片対数で示したものである。図中の2直線は, これらの関係を近似的に表わしたものである。

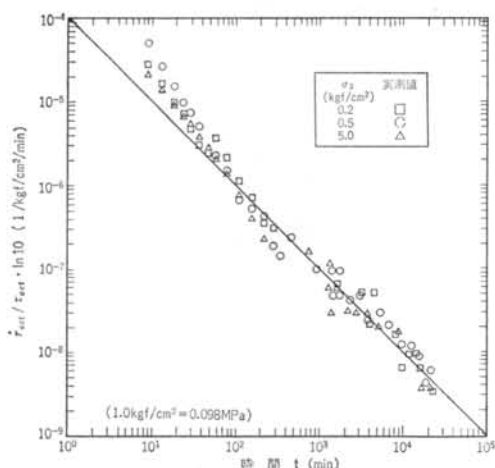


図-14 正規化ひずみ速度～時間関係(強度比 0.7)

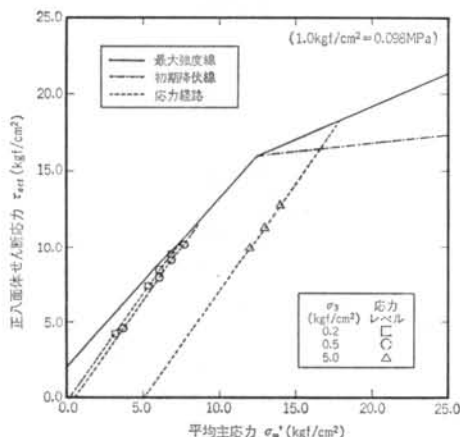


図-15 三軸クリープ試験の応力レベル

図-14は、 $\dot{\epsilon}_{oct}/\tau_{oct} \cdot \ln 10$ と経過時間 t の関係を両対数で表わしたものである。図中の直線は、これらの関係を近似的に表わしたものである。なお、図-13、図-14の各近似直線は構成式の誘導と関連しており、これについては後に述べる。

これらの結果より、クリープ変形はひずみ速度が減少する傾向を示しており、粘弾性クリープとして評価できることが分かる。試験を行なった応力レベルを三軸圧縮試験から得られた応力域と対応させたものが図-15であるが、各応力レベルは弾性領域にある。なお、前述したとおり強度比が高い場合には試験時間内でクリープ破壊に至る場合と至らない場合があり、クリープ破壊に至る場合の粘塑性クリープを含めたより一般的な議論を行なうためには、さらにデータの蓄積が必要である。

§ 3. 弾塑性構成式およびシミュレーション結果

弾塑性構成式について検討するに当たって、本研究で参考とした従来の研究について述べる。

西⁶⁾は、繰り返し荷重を受ける飽和砂の弾塑性挙動の評価を応力比 τ_{oct}/σ'_m を用いて行なっている。また、繰り返し荷重下で間隙水圧および塑性ひずみの蓄積が停止する平衡状態を表わすために、平衡状態線を規定している。これは、過圧密領域における弾性領域と対応するものである。一方、赤井ら⁷⁾は第三紀堆積凝灰岩(大谷石)の弾塑性挙動の評価を応力比 $\tau_{oct}/(\sigma'_m + A^*)$ を用いて行なっている。これは、粘着力を有する材料に対して応力比～ひずみ増分比関係を規定するために提案されたものである。

以上の研究を基に、本研究では西の提案した降伏規準、硬化則、平衡状態線を準用し、応力比 τ_{oct}/σ'_m の代わりに応力比 $\tau_{oct}/(\sigma'_m + A^*)$ を用いて検討を行なうことにする。

3.1 降伏規準および初期降伏規準

降伏規準としては、式(2)に示すように応力比 $\tau_{oct}/(\sigma'_m + A^*)$ 一定の条件を用いる。

$$f = \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} - \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} \right)_y \quad \dots\dots(12)$$

また、初期降伏を規定するために式(13)のように表わされる平衡状態線を用いる。 σ'_{mc} は、圧密降伏応力 (p_c) である。

$$\left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} \right)_y = \alpha M_f \left(\frac{\sigma'_{mc} + A^*}{\sigma'_m + A^*} - 1 \right)^{1/2} \quad \dots\dots(13)$$

3.2 硬化則

硬化則としては、式(4)に示すような正八面体塑性せん断ひずみ r_{oct}^p を硬化パラメータとして用いる双曲線を使用する。

$$\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} = \frac{(M_f/R_f)G'r_{oct}^n}{(M_f/R_f)G'r_{oct}^n + G'r_{oct}^p} \quad \dots\dots(14)$$

ここで、 R_f は応力が最大強度に達しても、ひずみが有限の値に留まるようにするために用いる定数である。ここでは、0.95の値を用いた。

次に、試験結果より G' を算定する。 G' については式(4)を r_{oct}^p について微分し、変形することによって式(15)の関係が得られる。

$$G' = \frac{d \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} \right)}{dr_{oct}^p} / \left(1.0 - \frac{R_f}{M_f} \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m + A^*} \right)^2 \quad \dots\dots(15)$$

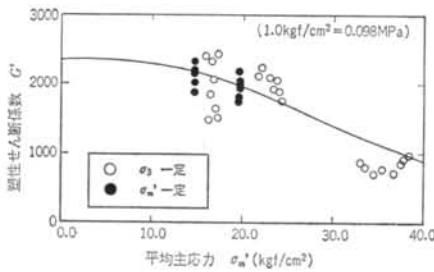


図-16 G' の拘束圧依存性

図-16は、側圧一定および平均主応力一定三軸圧縮試験のうち、ひずみ硬化を伴う弾塑性挙動を示したのものについて、式(16)を用いて求めた G' の実測値と拘束圧の関係である。

G' と平均主応力 σ_m' の関係を表わす実験式としては、式(16)を用いる。

$$G' = \frac{2400}{1.0 + 2.5 \times 10^{-5} \cdot (\sigma_m')^3} \quad (\sigma_m': \text{kgf/cm}^2) \quad \dots(16)$$

$$= \frac{2400}{1.0 + 2.66 \times 10^{-2} \cdot (\sigma_m')^3} \quad (\sigma_m': \text{MPa})$$

図-16には、式(16)で表わされる G' と σ_m' の関係を実線で示した。

3.3 塑性ポテンシャル

次に塑性ポテンシャルであるが、試験結果より塑性体積ひずみの発生がほとんど認められなかったことから、式(17)に示すような Von-Mises の規準を用いることにする。

$$g = \tau_{oct} - k \quad \dots(17)$$

3.4 弾塑性構成式の定式化

式(5)から式(17)までを弾塑性論に基づいて定式化すると、式(18)に示す応力ひずみ関係が得られる。

$$\{d\sigma\} = \left[[D^e] - \frac{[D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} - \left\{ \frac{\partial f}{\partial \varepsilon^p} \right\}^T \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \right] \{d\varepsilon\} \quad \dots(18)$$

3.5 シミュレーション結果

上述の構成式を用いたシミュレーション結果について示す。まず、側圧一定試験について側圧 0.1~1.0 kgf/cm² の場合については、式(18)の弾性部分を用いてシミュレーションを行なう。図-2には、正八面体せん断応力 (τ_{oct}) ~ 正八面体せん断ひずみ (r_{oct}) ~ 体積ひずみ (ε_v) 関係のシミュレーション結果を破線 (側圧 0.1 kgf/cm²)、

一点鎖線 (側圧 0.5 kgf/cm²)、実線 (側圧 1.0 kgf/cm²) で示したが、実測値との対応は良いことが分かる。

次に、ひずみ硬化を伴う弾塑性挙動を示した側圧 5.0, 10.0, 20.0 kgf/cm² の場合についてシミュレーションを行なう。解析に用いた物性値は $A^* = 24.2 \text{ kgf/cm}^2$ (2.37 MPa), $M_f = 0.434$, $\alpha = 0.60$ である。図-3には、正八面体せん断応力 (τ_{oct}) ~ 正八面体せん断ひずみ (r_{oct}) ~ 体積ひずみ (ε_v) 関係のシミュレーション結果を破線 (側圧 5.0 kgf/cm²)、一点鎖線 (側圧 10.0 kgf/cm²)、実線 (側圧 20.0 kgf/cm²) で示したが、この場合についても実測値との対応は良いことが分かる。

さらに、平均主応力一定試験について、図-4には正八面体せん断応力 (τ_{oct}) ~ 正八面体せん断ひずみ (r_{oct}) 関係のシミュレーション結果を実線 (平均主応力 5.0 kgf/cm²)、破線 (平均主応力 10.0 kgf/cm²)、一点鎖線 (平均主応力 15.0 kgf/cm²)、実線 (平均主応力 20.0 kgf/cm²) で示したが、この場合についても実測値との対応は良いことが分かる。

以上より、検討を行なった応力範囲について、式(18)に示した弾塑性構成式によって、使用した泥岩の最大強度までの挙動が表現できることが分かった。

§ 4. 粘弾性構成式およびシミュレーション結果

三軸クリープ試験より得られた粘弾性クリープについて、構成式を用いて検討を行なう。粘弾性クリープの評価法としては様々なものが提案されている。この中で、赤井⁸⁾らによって提案された5要素モデルを用いた研究、および村山・柴田⁹⁾によって提案された対数クリープモデルによって検討を行なうことにする。

4.1 赤井らのモデル

赤井ら⁸⁾は、粘弾性クリープ挙動について図-17に示

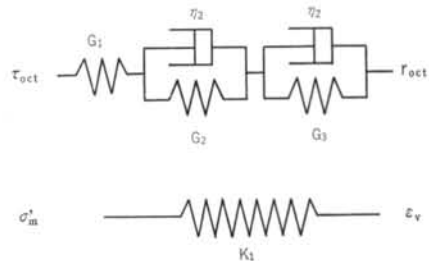


図-17 赤井らのモデル

すようなモデルを提案している。つまり、せん断変形については5要素モデル、体積変形については弾性モデルを用いている。このモデルでは、せん断変形および体積変形はそれぞれ式(19)、式(20)のように表わされる。

$$\tau_{oct}(t) = \left[\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right\} + \frac{1}{G_3} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{G_3}{\eta_3} t\right) \right\} \right] \tau_{oct} \quad \dots\dots(19)$$

$$\varepsilon_v(t) = \frac{1}{K_1} \sigma'_m \quad \dots\dots(20)$$

ここで、 $G_1, G_2, G_3, K_1, \eta_2, \eta_3$ は定数である。

これらの定数のうち、 η_2, η_3 については図-13に示す2直線の切片の値から、 G_2, G_3 については勾配から決定され、それぞれ $G_2=5,200 \text{ kgf/cm}^2 \{509.6 \text{ MPa}\}$ 、 $G_3=5,500 \text{ kgf/cm}^2 \{539.0 \text{ MPa}\}$ 、 $\eta_2=2.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{min} \{2.45 \times 10^4 \text{ MPa} \cdot \text{min}\}$ 、 $\eta_3=2.0 \times 10^7 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{min} \{1.96 \times 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{min}\}$ の値が求まった。 G_1 については、 $t=10 \text{ min}$ における実測値と既に求まっている G_2, G_3, η_2, η_3 を用いて式(19)から求めた。 G_1 は割線せん断弾性係数 (G_1)_s として求めたが、平均主応力 σ'_m の関数として式(21)のような関係が得られた。

$$(G_1)_s(t=10 \text{ min}) = 540.0 + 40.0 \cdot \sigma'_m \text{ (kgf/cm}^2) \quad \dots\dots(21) \\ = 52.92 + 40.0 \cdot \sigma'_m \text{ (MPa)}$$

これらの関係を用いたシミュレーション結果を、図-9～図-11に実線で示したが、試験時間内では実測値と良い対応が得られた。なお、本モデルを用いて長期変形を推定すると、変形は一定値に収束する。

4.2 村山・柴田モデル

村山・柴田⁹⁾は、Eyringの粘性理論(Rate Process Theory)を拡張することによって、粘土のレオロジーモデルの提案を行なっている。これは図-18のように表わされるが、ダッシュポットは非ニュートン粘性を示し一種の修正3要素モデルである。このモデルは、下限降伏値 σ_0 (弾性と粘弾性挙動の境界応力) と上限降伏値 σ_u (粘弾性と粘塑性挙動の境界応力) の間の応力が作用したときに、ひずみ ε と時間の対数 $\log t$ が式(22)のように直線になるというものである。

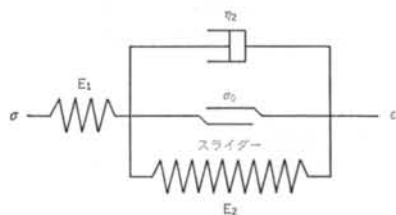


図-18 村山・柴田のモデル

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} + \frac{2.3(\sigma - \sigma_0)}{B_2 E_2} \log A_2' B_2 E_2 \\ + \frac{2.3(\sigma - \sigma_0)}{B_2 E_2} \log t = a + b \log t \quad \dots\dots(22)$$

ここで、 A_2', B_2 はレオロジー定数である。

また、下限降伏値 σ_0 が作用応力 σ に対して小さい場合 ($\sigma_0/E_1 \approx 0$) には、式(22)は式(23)のように表わされる。

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma - \sigma_0)} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2.3}{B_2 E_2} \log A_2' B_2 E_2 \\ + \frac{2.3}{B_2 E_2} \log t = a' + b' \log t \quad \dots\dots(23)$$

ここでは、式(23)を式(24)のように用いて各側圧に対して c, d の値を求めた。なお、式(24)を時間 t で微分すると式(25)のように表わされ、この関係から $t=1.0 \text{ min}$ のときの左辺の値として d が求まる。

$$\frac{\tau_{oct}}{\tau_{oct}} = c + d \log t = c + d \frac{\ln t}{\ln 10} \quad \dots\dots(24)$$

$$\log \left(\frac{\tau_{oct}}{\tau_{oct}} \ln 10 \right) = \log d - \log t \quad \dots\dots(25)$$

図-14より、直線の勾配が -1.0 で対数クリープ則が成り立つこと、 $t=1.0 \text{ min}$ のときの切片の値から $d=0.0001(1/\text{kgf/cm}^2) \{0.001(1/\text{MPa})\}$ なる値が得られた。

また、 c については $1/c$ として、平均主応力 σ'_m の関数として式(26)のような関係が得られた。

$$\frac{1}{c} = 540.0 + 45.0 \cdot \sigma'_m \text{ (kgf/cm}^2) \quad \dots\dots(26) \\ = 52.92 + 45.0 \cdot \sigma'_m \text{ (MPa)}$$

これらの関係を用いたシミュレーション結果を、図-9～図-11に破線で示したが、本モデルについても試験時間内では実測値と良い対応を示した。なお、本モデルを用いて長期変形を推定すると、変形は継続する。長期変形については本試験結果からは結論が得られず、今後の検討課題である。

§ 5. あとがき

第三紀堆積泥岩の室内試験を行ない、最大強度までの弾塑性および粘弾性挙動について検討を加えた。その結果、三軸圧縮試験および三軸クリープ試験による検討からは、以下のような結論が得られた。

(1) 平均主応力 $\sigma'_m=12.5 \text{ kgf/cm}^2 \{1.23 \text{ MPa}\}$ を境に最大強度に至る変形特性および破壊形式が異なること、および最大強度の実験式も異なる。

(2) 弾性変形特性について、接線せん断弾性係数 G と接

線体積弾性係数 K は拘束圧に依存し、平均主応力 σ_m の一次式で表わされる。

(3)検討を行なった応力範囲における弾塑性挙動については、提案した弾塑性構成式によって最大強度までの挙動が表現できる。

(4)三軸クリープ試験による時間依存性に関する検討では、試験を行なった応力レベルにおいては粘弾性挙動を示した。これは、ひずみ速度一定三軸圧縮試験から求めた弾性領域と対応している。

(5)粘弾性モデルとして赤井らによって提案された5要素モデルと、村山・柴田によって提案された対数クリー

プモデルを用いて検討を行なったが、試験時間内では両者ともに実測値と良い対応を示した。

以上、最大強度に至るまでの変形挙動、および低拘束圧領域における変形の時間依存性について検討を行なった。なお、今後は最大強度後の軟化挙動、および粘塑性挙動を示す応力領域における時間依存性について検討を行なう予定である。

最後に、本研究を行なうに当たっては京都大学足立紀尚教授にご指導をいただいたことを記して、感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 松井保, 阿部信晴: “土の構成式入門(5) 弾塑性体理論と適用(その1)” 土と基礎 Vol.31, No.11(1983年) pp.97~105
- 2) 松井保, 阿部信晴: “土の構成式入門(5) 弾塑性体理論と適用(その2)” 土と基礎 Vol.31, No.12(1983年) pp.73~79
- 3) 足立紀尚, 西好一: “過圧密粘土の構成式” 京都大学防災研究所年報 第19号・B (1976年) pp.1~13
- 4) 足立紀尚, 西好一, 藤本和義: “過圧密土と軟岩の相関について” 第11回土質工学研究発表会発表講演集(1976年) pp.933~936
- 5) 足立紀尚: “堆積軟岩の力学的挙動に関する研究” 京都大学博士論文(昭和54年8月)
- 6) 西好一: “非排水繰返し荷重下における飽和砂の弾・塑性挙動と構成式” 土木学会論文報告集 第319号(1982年) pp.115~128
- 7) K. Akai, T. Adachi & K. Fujimoto: “Constitutive Equations for Geomechanical Materials based on Elasto-Viscoplasticity” Constitutive Equations of Soil; Preprints of Specialty Session 9, 9th ICSMFE (1977) pp.1~10
- 8) 赤井浩一, 足立紀尚, 西好一: “堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の時間依存特性と構成式” 土木学会論文報告集 第282号(1979年) pp.75~87
- 9) 村山朗郎, 柴田徹: “粘土のレオロジー的特性について” 土木学会論文集 第40号(1956年) pp.1~31

