

堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の時間依存特性と構成式

TIME DEPENDENT CHARACTERISTICS AND CONSTITUTIVE EQUATIONS OF SOFT SEDIMENTARY ROCK (POROUS TUFF)

赤井 浩一*・足立 紀尚**・西好一***

By Koichi AKAI, Toshihisa ADACHI and Koichi NISHI

1. 序論

大谷石(多孔質凝灰岩)を理想的な半固結状態にある堆積軟岩として用いた先の研究¹⁾で、軟岩は拘束圧の大きさによってひずみ硬化あるいは軟化を示す弾塑性体であり、かつ時間依存性とダイレイタンシー特性を有する材料であることを明らかにした。本論文は大谷石を用いたクリープ試験によって、軟岩の時間依存性挙動を調べ、先に得られた塑性挙動に関する結果とあわせ、体積膨張を伴うその粘塑性挙動を記述できる構成式の誘導を行ったものである。

足立²⁾は結晶質岩石材料の非可逆変形には、その分子内の転移による塑性あるいは粘塑性挙動と結晶境界の分離や欠陥の拡大による2つがあることを、岩塩を用いた実験によって示し、第1の塑性・粘塑性挙動を記述できる構成式をPerzyna³⁾の弾・粘塑性体理論により、また、第2のせい性挙動に対してはWeidlerとPaslay⁴⁾の理論に基づいてそれぞれ求めた。すなわち、結晶質岩石は拘束圧の高低によって、低い場合にはせい性非可逆変形を、高いときには粘塑性流動を示すとの考えに立脚したものである。

しかし、間隙をもつ軟岩の場合は低い拘束圧のもとであっても体積膨張を伴う時間依存性挙動を示す。そこで、軟岩の体積膨張を伴う粘塑性挙動を実験によって明らかにした後、それを粘弾・粘完全塑性体と考え、Perzynaの理論と実験事実に基づき構成式を誘導した。この際静的平衡状態に対する応力-ひずみ関係を完全塑性体と仮定しているから、ひずみ硬化-軟化挙動を考慮しておらず、したがって、弾塑性体で時間依存性とダイレイタンシー特性を有する材料であるとして軟岩を扱ったものであ

る。さらに硬軟を問わず岩石は拘束圧が高くなり先行履歴応力(土質材料の先行圧密圧力と類似)以上になるとせん断過程でも常に体積圧縮を伴うひずみ硬化を示すようになる。したがって、ここで求めた構成式は体積膨張を伴う挙動を対象としているから、その適用は先行履歴応力以下の拘束圧状態に限られている。

2. 試料と実験方法¹⁾

本研究で使用した実験装置と試料はすでに報告¹⁾しているが、試料について再度簡単にふれておく。試料は大谷石と通称される第三紀堆積の多孔質凝灰岩である。これを実験試料として用いた理由は均質な供試体を多数準備でき、堆積軟岩の力学挙動を解明するのに適していると判定したからである。その物理諸量を表-1にまとめ示す。

供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱形である。水面下の軟岩の力学挙動を主として解明しようすることから、供試体は水で飽和させて用いた。飽和は容器内で供試体を水浸させ、容器にサクションを作用して強制的に行った。

水で飽和された供試体を三軸室内にセットし、5kg/cm²のイニシャルバックプレッシャーを適用して所定の圧密圧力で等方圧密を行った後に、排水ならびに非排水クリープ試験を行った。

なお、軸荷重の載荷は長期間一定に保つことから空気圧作動のベロフラムシリンダーによった。また、そのクリープ荷重の載荷方法は一部を除いて一段載荷、すなわち1供試体には1つの荷重載荷とし、所定の軸差応力を一度に作用する方法によった。表-2は行ったクリープ試験の条件をまとめたものである。

表-1 物理諸量

間隙率	n	36.9 %
湿潤密度	r_t	1.86 g/cm ³
乾燥密度	r_d	1.52 g/cm ³
粒子比重	ρ_s	2.38

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部 交通土木工学科

** 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所

*** 正会員 工修 電力中央研究所 土木技術研究所

表-2 クリープ試験条件

排水ならびに(載荷)方法	側圧 σ_3 (kg/cm ²)	クリープ載荷応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) (kg/cm ²)
排水(一段載荷)	5	20 30 42 45 47 50
		54
		15
		20 55 60
		55, 60
		20
	15	35 60 77
非排水(二段載荷)		
非排水(一段載荷)		

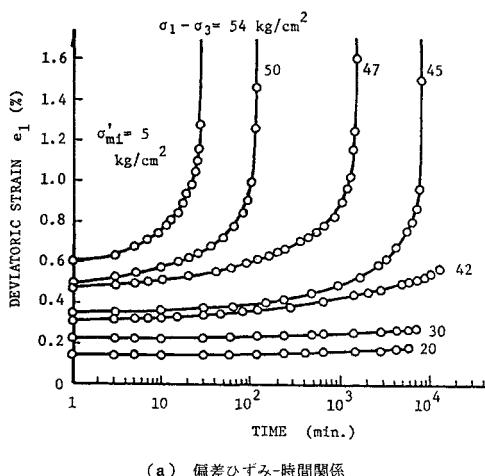
表に明らかなように、側圧(圧密圧力= σ_{mi}')は5と15 kg/cm²の2種である。

3. 実験結果と考察^{5), 6)}

(1) 排水クリープ試験

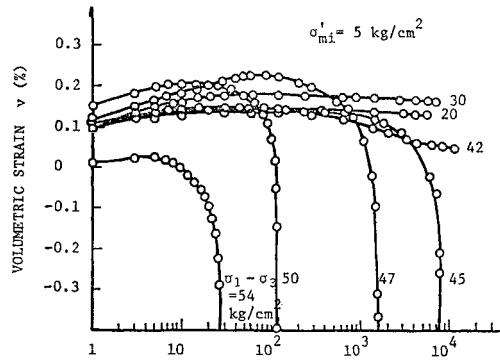
表-2に示したように、排水クリープ試験は初期側圧5, 15 kg/cm²の2つの場合に対して、所定の軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)を一度に載荷する方式で行った。

図-1は側圧5 kg/cm²に対する結果を(a)に偏差ひずみ e_1 -時間関係、(b)に体積ひずみ v -時間関係、(c)に平均有効応力 σ_m' -時間関係をクリープ応力(軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$))をパラメーターとして、それぞれ示したものである。これらの図から、クリープ応力の大小がクリープ変形挙動に影響を与える、10⁴分の時間内に限ると45 kg/cm²以上の軸差応力下では最終的にクリープ破壊に至り、また、クリープ破壊が生ずるまでの時間は応力の

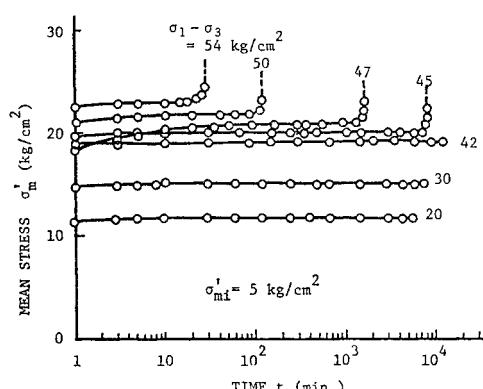


(a) 偏差ひずみ-時間関係

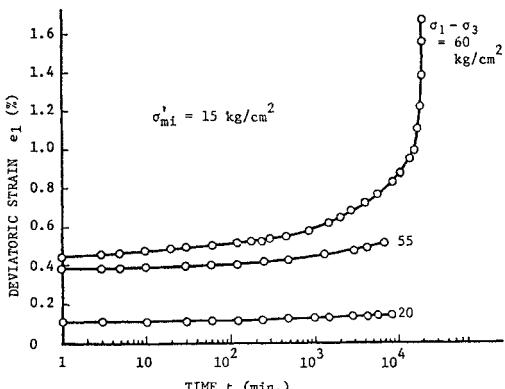
増大とともに減少することがわかる。また、初期に体積圧縮傾向を示すが、次第に膨張に転じ、クリープ破壊に至る場合は破壊直前に急激な体積膨張が生ずる。図-1(c)はクリープ変形過程の平均有効応力の変化の様子を表わしている。破壊直前の急激な上昇(間隙水圧の減少)部分を除くと試験期間中ほぼ一定に保たれている。したがって、低拘束圧下(先行履歴応力以下)の排水クリー



(b) 体積ひずみ-時間関係



(c) 平均有効応力-時間関係

図-1 側圧5 kg/cm²の排水クリープ試験結果図-2 側圧15 kg/cm²の排水クリープ試験における偏差ひずみ-時間関係

試験は有効応力一定という条件のもとでのクリープ挙動を与えるものと考えてよい。

図-2は 15 kg/cm^2 の側圧における結果を偏差ひずみ-時間関係として示している。このクリープ時間内で破壊に至るのは $(\sigma_1 - \sigma_3) = 60 \text{ kg/cm}^2$ の場合であり、図に示さないが、破壊直前に急激な体積膨張が生ずることは側圧 5 kg/cm^2 のときと同様である。

図-3は図-1, 2のひずみ-時間曲線から求まる等時曲線としての応力-ひずみ関係を各側圧に対してそれぞれ示したものである。ある応力(図中の応力-ひずみ関係の急激な変曲点)以上では塑性流動が顕著となり、それに対応して体積変化が圧縮から膨張に転ずる。その限界応力は側圧 5 kg/cm^2 で約 40 kg/cm^2 , 15 kg/cm^2 に対して 55 kg/cm^2 程度である。この限界応力を静的降伏応力と呼び構成式の誘導に際し重要な役割を果たす。すなわち、静的降伏応力以下では最終的にクリープ変形が平衡状態に至り落着くが、これ以上の軸差応力では終局的にクリープ破壊が生ずるものと考える。

静的降伏応力以下でも、変形は時間とともに増加する。これを粘弾性的な変形と考え、その一つの表現方法として、図-3に示す応力-ひずみ関係の初期の直線部から求まる弾性係数の時間的变化を調べてみた。等方性材料と仮定すれば、せん断弾性係数 G は次式で与えられる。

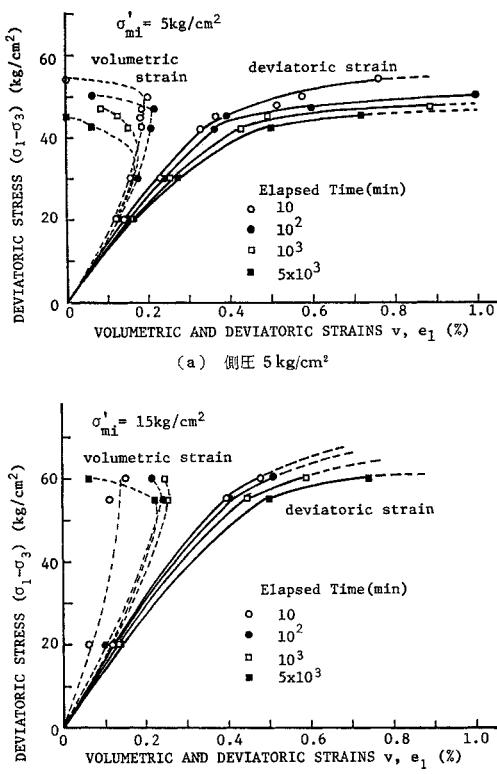


図-3 等時曲線としての応力-ひずみ関係

$$G = 4(\sigma_1 - \sigma_3)/3 \quad \Delta \epsilon_1 = 4(\sigma_1 - \sigma_3)/3(4\epsilon_1 - 4v/3) \quad (1)$$

したがって、応力-偏差ひずみ関係の初期直線部分の勾配の $1/3$ の値として決定できる。一方、体積弾性係数 K は側圧を一定に保つ試験($\sigma_3' = \text{一定}$)では平均有効応力 σ_m' の増分は軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の増分の $1/3$ に相当する値だけ増加するので、次の関係が成立する。

$$K = 4\sigma_m'/4v = 4(\sigma_1 - \sigma_3)/3 \cdot 4v \quad (2)$$

K も G と同様図-3の応力-体積ひずみ関係の初期の勾配の $1/3$ の値として決定できる。通常用いるヤング係数 E 、ポアソン比 ν は G 、 K と次の関係があるから G 、 K の値が決まればただちに求められる。

$$E = 9KG/(3K+G), \nu = (3K-2G)/2(3K+G) \quad (3)$$

このように、時間とともに変化する弾性係数を求め、その結果を表-3にまとめたが、表には後述する非排水試験の結果と比較のための応力制御による排水試験結果をあわせて与えている。非排水条件では体積ひずみ v を0と考えると式(1)は次式となる。すなわち、軸ひずみ ϵ_1 と応力との関係として G が決定される。

$$G = 4(\sigma_1 - \sigma_3)/3 \cdot 4\epsilon_1 \quad (4)$$

この場合、 $K = \infty$ を仮定することになり、さらに式(3)から $E = 3G$, $\nu = 0.5$ となる。

表-3から以下の結論を得る。

(1) せん断弾性係数 G は時間とともに減少する(せん断変形は時間とともに増加する)。

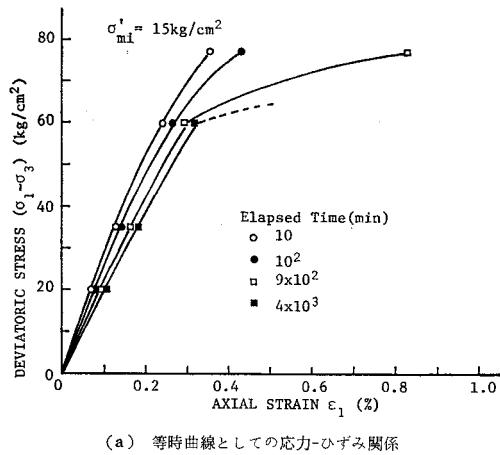
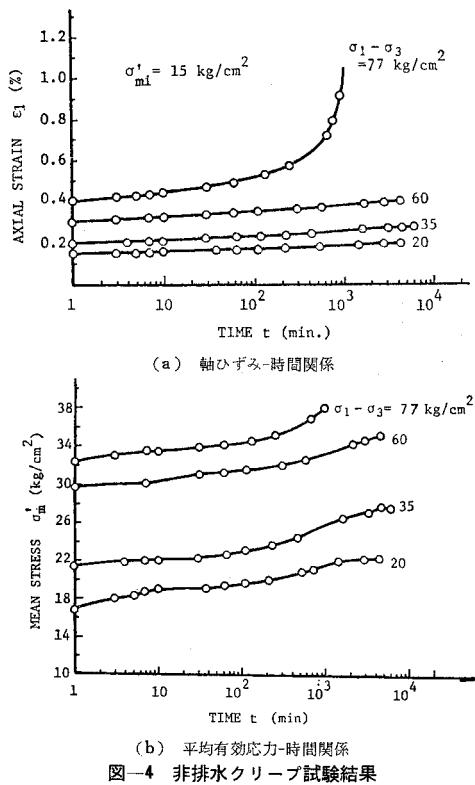
(2) 体積弾性係数 K は圧密による時間の効果を考慮すると、粘弾性状態で時間的変化はないと考えられる。

(3) ポアソン比は $0.15 \sim 0.20$ の値である。

表-3 クリープ試験から求まる弾性係数の時間変化*

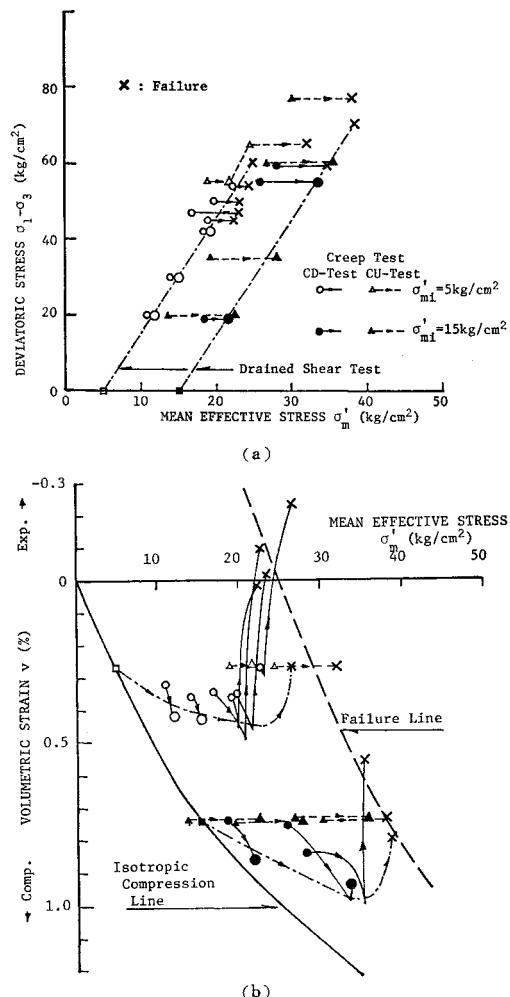
排水条件	側圧 (kg/cm ²)	時間(分)	G (kg/cm ²)	K (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ν
排水	5	10	4.60×10^3	4.22×10^3	10.12×10^3	0.10
		10^2	4.33×10^3	3.92×10^3	9.49×10^3	0.10
		10^3	3.88×10^3	4.07×10^3	8.82×10^3	0.14
		5×10^3	3.60×10^3	4.51×10^3	8.54×10^3	0.18
	排水せん断	3.12×10^3	7.41×10^3	8.21×10^3	0.31	
排水	15	10	5.70×10^3	12.35×10^3	14.81×10^3	0.30
		10^2	5.56×10^3	5.65×10^3	12.55×10^3	0.13
		10^3	4.90×10^3	5.80×10^3	11.47×10^3	0.17
		5×10^3	4.61×10^3	6.06×10^3	11.04×10^3	0.20
	排水せん断	5.00×10^3	6.45×10^3	11.92×10^3	0.19	
非排水	15	10	4.19×10^3	—	12.58×10^3	—
		10^2	3.92×10^3	—	11.77×10^3	—
		10^3	3.51×10^3	—	10.53×10^3	—
		5×10^3	3.37×10^3	—	10.10×10^3	—
	非排水せん断	4.08×10^3	—	12.24×10^3	—	

* 弾性係数はクリープ載荷応力 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 20 \text{ kg/cm}^2$ に対するひずみを用いて算定した。



(2) 非排水クリープ試験

表-2 に示す条件で非排水クリープ試験を行った。図-4 は側圧 15 kg/cm² の試験結果を、(a) 軸ひずみ-時間関係、(b) 平均有効応力-時間関係として与えたものである。この場合、 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 77 \text{ kg/cm}^2$ でクリープ破壊に至り、また、すべての試験において平均有効応力が時間とともに増加（間隙水圧は減少）していることがわかる。より詳細に検討するため準備したのが図-5 で、(a) 等時曲線としての応力-軸ひずみ関係、(b) 等時曲線として求まる間隙水圧-軸ひずみ関係である。塑性流動が顕著になるのは軸差応力が少なくとも 60 kg/cm² 以上で、同一側圧の排水クリープ試験の 55 kg/cm² より大きな値となっている。これは単に応力の大小のみで論ずることは難しく、応力と体積変化の両方から検討する必要がある。図-6 は排水ならびに非排水クリープ過程の



有効応力と体積の変化を示したものである。すなわち、(a) に有効応力の推移を与えていたが、実線で示す排水クリープ経路の右方向への変化は圧密過程におけるものと、図-1(c) に示すような破壊直前の制御不可能な平均有効応力の増加のためである。また、点線で表わす非排水クリープ経路は先に述べた試験中の平均有効応力の時間的な増加に対応するものである。図中には参考のため排水せん断試験の結果も与えている。この図には非排水クリープ試験の方が大きなクリープ強度を与えることが示されている。さて図-6(b) をみてみよう。横軸に平均有効応力、縦軸に体積ひずみを下向きに圧縮側となるようにとり、体積変化の様子を表わしている。非排水の場合には体積変化は微小であるから、 σ_m' -軸に平行な経路となる。他方、排水条件ではクリープ初期に圧密による体積圧縮が、クリープ破壊に至る場合は破壊直前の急激な体積膨張が生ずる。図-6(b) で示すように、破壊状態が点線で表わされるものとする。すなわち、体積膨張が生ずると破壊時の平均応力 σ_m' が小さくなるから、破壊強度も小さくなることに対応する。そこで、同一の拘束圧（たとえば $\sigma_3 = 5 \text{ kg/cm}^2$ ）による排水と非排水試験を考えてみよう。非排水条件下では体積変化が生じないが、排水条件では破壊時に体積が膨張するため、破壊時の平均応力 σ_m' は小さくなるから強度も非排水の場合に比較して小さなものとなる。より多くのデータの集積が必要であるが、破壊に与える排水条件の影響は応力と体積変化の双方から検討することが大切である。

図-5(b) はクリープ過程の間隙水圧変化を示すが、いったん上昇した間隙水圧が時間とともに減少している。これはせん断による体積膨張のまだ発生していない低い応力レベルでも認められる。供試体は 2. で述べたように準備され、圧密過程で 5 kg/cm^2 のバックプレッシャーを適用している。したがって、考得る理由は排水試験では試験過程中間隙水圧はほぼ 5 kg/cm^2 に保たれるが、非排水条件では過剰間隙水圧の発生により、 5 kg/cm^2 以上の値となることである。すなわち、供試体内に水の浸透していない間隙 (dead pore) があって、 5 kg/cm^2 以上の間隙水圧となってはじめて浸透が生ずるため、いったん増大した間隙水圧が次第に減少するものと考えられる。気乾試料を飽和させて用いる試験の一つの問題である。

なお、図-5(a) から求めた弾性係数 G は表-3 に示したとおりである。

(3) クリープひずみ速さの時間変化

クリープ試験結果を用いて応力-ひずみ-時間関係を求める際にクリープひずみ速さの時間変化に基づくことが多い。構成式誘導の準備とともにひずみ速さがいかに変

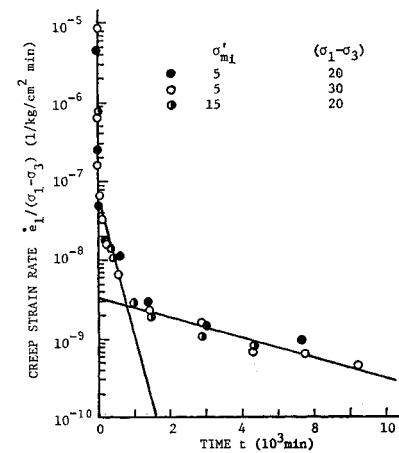
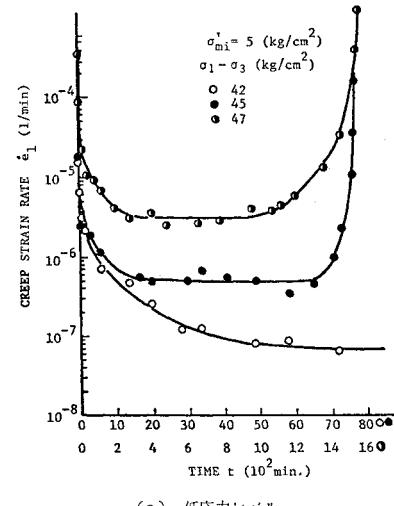
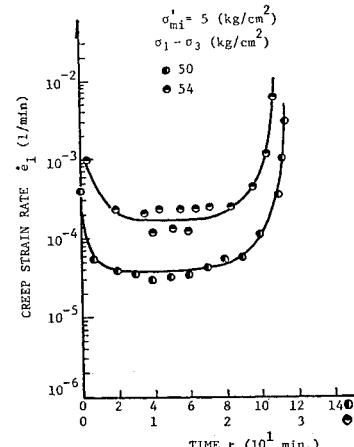


図-7 クリープひずみ速さの時間変化（粘弾性領域）
と挙動の近似方法



(a) 低応力レベル



(b) 高応力レベル

図-8 クリープひずみ速さの時間変化（粘塑性領域）

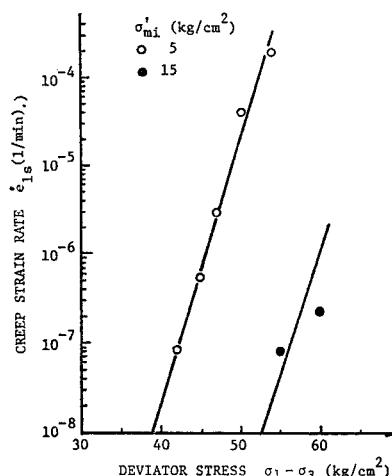


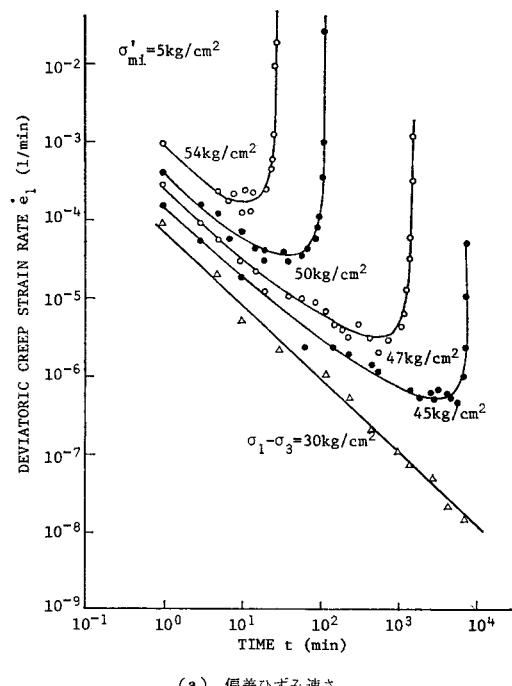
図-9 定常クリープひずみ速さとクリープ応力との関係

化するかを調べてみる。

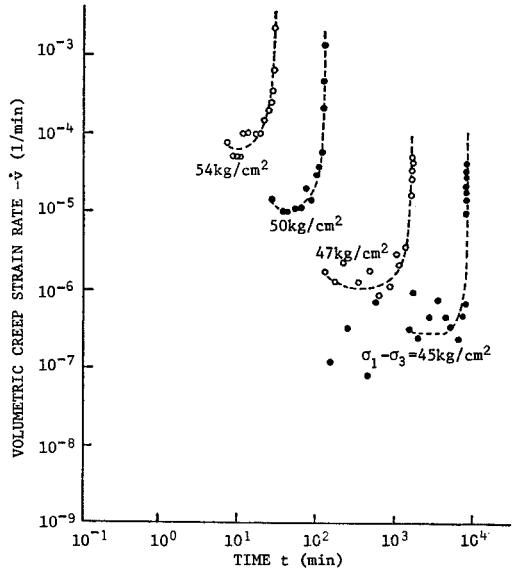
図-7 は排水クリープ試験結果、破壊に至らない場合のクリープひずみ速さを軸差応力で正規化して縦軸に対数で、横軸は普通目盛で時間をとり求めた図である。図から、側圧の大小にかかわらずクリープひずみ速さは時間とともに減少することがわかる。この変化は図中に与える二本の直線の和として近似的に表わすことができるが、次節で改めて論ずる。図-8 はクリープ破壊に至る場合のクリープひずみ速さの時間変化を示している。荷重載荷後、ひずみ速さは急速に減少するが、やがて定常状態に至り、最終的にはひずみ速さが加速されて破壊する。この定常クリープひずみ速さと軸差応力の関係を求めた図-9 からひずみ速さの対数と軸差応力が比例する関係が得られる。 $10^{-8}/\text{min}$ のひずみ速さが十分小さいと考えるかどうかは問題であるが、図中の 2 本の直線と $10^{-8}/\text{min}$ -軸との交点の値、39 と 52.5 kg/cm^2 は前述した静的降伏応力であるとして構成式の誘導において用いる。

(4) クリープ破壊

材料は標準的なせん断試験（土質材料では $1\%/\text{min}$ のひずみ速さ）で求まる強度に比較して、それより小さな応力でも持続して載荷すると破壊する。すなわち、静的降伏応力以上の応力を持続して載荷するとクリープ破壊を生ずるわけであるが、たとえばクリープ破壊に至るまでに要する時間を知る手段はないかということは齊藤⁷⁾の地すべりが発生する時刻を予測して列車事故を未然に防いだという先駆的な仕事にみられるように、施工管理においても重要である。これに関しては定常クリープひずみ速さと破壊に至るまでの時間との間に関係のあることが知られている^{7)~9)}。そこで、側圧 5 kg/cm^2 の排水クリープ試験結果を用いて、ひずみ速さと時間の関



(a) 偏差ひずみ速さ



(b) 体積ひずみ速さ

図-10 ひずみ速さの時間変化

係を両対数紙上に求めたものが図-10 である。(a) に偏差ひずみ速さ $\dot{\epsilon}_1$ の時間変化を、(b) に体積ひずみ速さ $\dot{\nu}$ の時間変化をそれぞれ与えている。なお、体積ひずみ速さは初期の圧密過程を除き、かつクリープ破壊に至る場合に限って示してある。偏差ひずみ速さは時間とともに直線的に減少するが、破壊に至るものはやがて定常クリープ状態を経て加速され破壊に達する。後述する塑性流動過程のダイレイタンシー比 ($\dot{\nu}/\dot{\epsilon}_1$) は定常クリープ

表-4 クリープ試験結果(定常クリープ状態とクリープ破壊)

σ_{m1}' (kg/cm ²)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (kg/cm ²)	$[(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m']_s$	e_{1s} (%)	\dot{e}_{1s} (l/min)	$\dot{\epsilon}_s$ (l/min)	$\dot{\epsilon}_s/\dot{e}_{1s}$	t_s (min)	e_{1a} (%)	t_a (min)	t_r (min)	$\dot{e}_{1s} \cdot t_r$ (10 ⁻⁸)
5	54	2.35	0.75	1.97×10^{-4}	-0.98×10^{-4}	0.50	7	0.99	21	28	5.52
	50	2.30	0.60	3.80×10^{-5}	-1.27×10^{-5}	0.33	20	0.82	70	115	4.37
	47	2.27	0.64	3.67×10^{-6}	-1.84×10^{-6}	0.59	200	0.95	1 000	1 565	5.74
	45	2.25	0.53	5.44×10^{-7}	-3.78×10^{-7}	0.70	1 600	0.87	7 116	7 716	4.20
	42	2.20	0.51	8.70×10^{-8}	-1.60×10^{-8}	0.18	4 290	—	—	—	—
15	60	1.71	0.75	2.30×10^{-7}	-1.97×10^{-7}	0.86	4 960	1.06	17 300	21 000	4.83
	55	1.65	0.57	8.90×10^{-8}	-8.00×10^{-8}	0.90	4 245	—	—	—	—

状態の値である。表-4は排水クリープ試験結果得られる定常状態ならびに破壊時の状態をまとめたものである。表中の添字sは定常状態を、t_sは定常状態開始時間を、t_aは加速クリープ開始時を、またt_rは破壊時の値をそれぞれ示している。

まず、定常クリープ開始までのひずみ量e_{1s}と加速クリープ開始時のひずみ量e_{1a}の応力との関係を調べてみると図-11が求まる。ばらつきはあるが、少なくとも加速クリープはe_{1a}=0.9%の値になると応力状態にかかわりなく生ずるといえる。定常クリープ速さe_{1s}とクリープ破壊時間t_rおよび加速クリープ開始時間t_aの

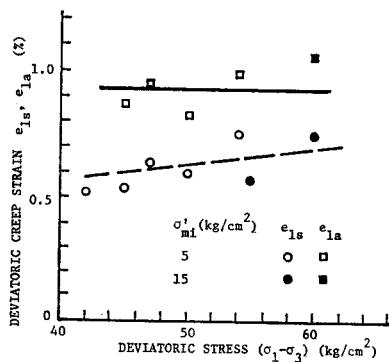


図-11 定常クリープならびに加速クリープ開始時の偏差ひずみとクリープ応力との関係

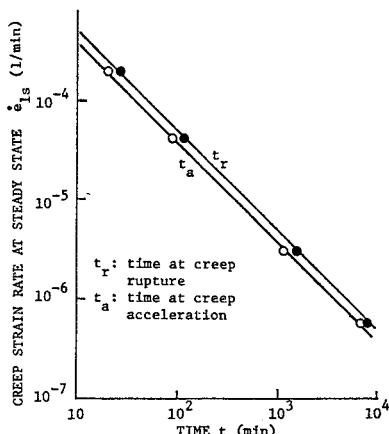


図-12 定常クリープひずみ速さと加速クリープ開始ならびにクリープ破壊時間との関係

関係を側圧5kg/cm²の場合について求めると図-12を得る。明らかにe_{1s}とt_aあるいはt_rとは逆比例関係があつて、次式で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} \dot{e}_{1s} \cdot t_a = \text{一定} = 3.60 \times 10^{-3} \\ \dot{e}_{1s} \cdot t_r = \text{一定} = 4.96 \times 10^{-3} \end{array} \right\} \quad (5)$$

この関係式を用いて側圧15kg/cm²、(σ₁-σ₃)=60kg/cm²の破壊時間を推定してみるとt_r=2.16×10⁴分となる。実験結果はt_r=2.1×10⁴分であるから、側圧にかかわらずこの関係が成立することがわかる。

なお、クリープ破壊に至らない場合の直線関係は次式で表わされる¹⁰⁾。

$$\ln \frac{\dot{e}_1(t, \sigma_1 - \sigma_3)}{\dot{e}_1(t_1, \sigma_1 - \sigma_3)} = -m \ln \left(\frac{t}{t_1} \right) \quad (6)$$

ここにe₁(t, σ₁-σ₃)はある基準時間t₁(たとえば1分)における偏差ひずみ速さで、かつ軸差応力(σ₁-σ₃)の関数である。この材料に対しては図-10(a)からm=0.95となり、大阪粘土のm=1.00、London clayのm=0.93などと近い値である¹¹⁾。

4. 粘弾性、粘完全塑性体とした構成式

(1) 実験結果のまとめ

クリープ試験の結果をまとめると以下となる。

(1) 静的降伏応力以下ではクリープ破壊は生じない。図-9の応力と定常クリープ速さの関係から求まる10⁻⁸/minに対する応力をもって静的降伏応力を本論文では定義づける。留意すべきはその応力状態でひずみ速さが0でないことである。この応力レベルでは偏差ひずみ速さは時間とともに減少し、図-7のようにこの挙動は2本の直線の和として近似的に表わすことができる。一方、体積変化は時間依存性挙動を示さないと仮定できる。

(2) 静的降伏応力以上では最終的にクリープ破壊に至る。偏差ひずみ速さは図-8のように最初減少するが、定常状態を経て加速されて破壊する。図-10にみられるように体積ひずみ速さも定常状態では一定値をとり、体積膨張を伴う塑性流動過程である。

以上の挙動を記述できる構成式を線形粘弾性理論と

Perzyna の粘塑性理論によって誘導しよう。

(2) 粘弾性挙動と構成式¹²⁾

静的降伏応力以下では偏差ひずみは図-7に示す挙動を呈し、体積変化は時間依存性挙動を示さないと仮定できる。このような挙動を記述できる構成式としては図-13のレオロジカルモデルがあり、数式で表わすと次式となる。

$$\begin{aligned} e_{ij}(t) &= S_{ij}(t)/2G_1 - (1/2\eta_2) \int_0^t e^{-(G_1/\eta_2)(t-\tau)} \\ &\quad S_{ij}(\tau) d\tau + (1/2\eta_3) \int_0^t e^{-(G_1/\eta_3)(t-\tau)} S_{ij}(\tau) d\tau \\ v(t) &= \sigma_m'(t)/K_1 \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ ：偏差応力、 $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$ ：偏差ひずみ、 $G_1, G_2, G_3, K_1, \eta_2, \eta_3$ ：材料定数である。

いったんこのモデルを受け入れると問題は式中の材料定数をいかに決定するかである。ここでは排水クリープ試験結果を用いて定数を定める。なお、体積変化は時間に依存しないから、等方圧縮あるいは排水せん断試験による表-3のKの値を用いればよい。ただし、Kは拘束圧によって変化する点に留意を要する。

クリープを応力が一定に保たれたときの変形挙動であるとすると、式(7)で $S_{ij}(t)=$ 一定、 $\sigma_m'(t)=$ 一定とおくことで積分でき、次式が求まる。

$$\begin{aligned} e_{ij}(t) &= \left[\frac{1}{2G_1} + \frac{1}{2G_2} (1 - e^{-(G_1/\eta_2)t}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2G_3} (1 - e^{-(G_1/\eta_3)t}) \right] S_{ij} \\ v(t) &= \frac{\sigma_m'}{K_1} \end{aligned} \quad (8)$$

したがって、クリープひずみ速度は式(8)を微分することで次のように求まる。

$$de_{ij}(t)/dt = [e^{-(G_1/\eta_2)t}/2\eta_2 + e^{-(G_1/\eta_3)t}/2\eta_3] S_{ij} \quad (9.1)$$

$$dv(t)/dt = 0 \quad (9.2)$$

軸対称三軸圧縮条件では応力、ひずみには次の関係がある。

$$S_{11} = 2(\sigma_1 - \sigma_3)/3, \quad e_{11} = e_1 = 2(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/3 = \varepsilon_1 - v/3$$

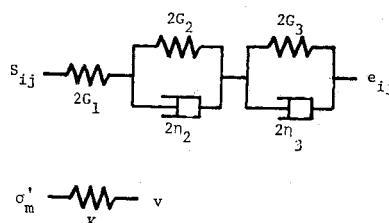


図-13 粘弾性挙動に対するレオロジカルモデル

$$\sigma_m' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3, \quad v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$$

これを用いると式(9.1)は次のように表わされる。

$$\dot{e}_1/(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{3} [e^{-(G_1/\eta_2)t}/\eta_2 + e^{-(G_1/\eta_3)t}/\eta_3] \quad (10)$$

縦軸に $\dot{e}_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ の対数を、横軸に時間 t をとりクリープ試験結果をプロットすると図-7が求まる。時間 t が小さいクリープ初期では式(10)の右辺の第1項(図-13のモデルの第二変形要素)が、時間 t が大きくなると右辺第2項(モデルの第3変形要素)が図-7の二本の直線にそれぞれ対応するものと考えることにより、クリープ変形を二本の直線の和として近似的に表わすことができる。この仮定に基づいて、材料定数 G_2, G_3, η_2, η_3 を以下のように求める。

(1) まず η_2, η_3 は二直線の縦軸の片辺の値から決定できる。すなわち、

$$\eta_2 = 1/3[\dot{e}_1/(\sigma_1 - \sigma_3)]|_{\text{第1直線 } t=0},$$

$$\eta_3 = 1/3[\dot{e}_1/(\sigma_1 - \sigma_3)]|_{\text{第2直線 } t=0}$$

(2) 式(10)の右辺第1項のみを考え対数をとることによって、第1の直線の勾配は $(G_2/\eta_2)/\log_e 10$ となることがわかる。 η_2 はすでに求まっているから、 G_2 が決定できる。 G_3 は第2の直線の勾配から同様に定まる。

このようにして定めた材料定数を表-5にまとめて示す。

表-5 粘弾性定数
(図-13参照)

G_2	$2.2 \times 10^4 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
G_3	$3.3 \times 10^4 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
η_2	$6.1 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2 \cdot \text{min})$
η_3	$1.1 \times 10^8 \text{ (kg/cm}^2 \cdot \text{min})$

G_1 について言及する。 G_1 は瞬時弾性係数であるから、論理上は載荷直後の変形量から決定されるものである。しかし、ここでは $t=10$ 分の値を用いることによって式(8)から逆に求め、まず式(8)を次のように書き改める。

$$\begin{aligned} e_{ij}(t) &= \frac{S_{ij}}{2G^*(t)}, \\ \frac{1}{G^*(t)} &= \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} [1 - e^{-(G_1/\eta_2)t}] \\ &\quad + \frac{1}{G_3} [1 - e^{-(G_1/\eta_3)t}] \end{aligned} \quad (11)$$

すなわち、時間依存弾性係数 $G^*(t)$ を考えるわけであるが、これは表-3に与えた G に相当する。そこで、 $t=10$ 分における表-3の G と式(11)で決まる $G^*(10$ 分)が等しいと仮定することにより、まず G_1 が定められる。これによって、すべての材料定数が決定されたから、任意時間の $G^*(t)$ が式(11)により求め得る。表-6は $G^*(t)$ の $t=10^2, 10^3, 5 \times 10^3$ 分と ∞ における値を表-3の G と比較して与えたものであり、 G_1 の値もともに示している。

これによって、静的降伏応力以下の粘弾性挙動を記述できる図-13のモデルによる構成式が確定したことになる。

表-6 瞬時せん断弾性係数 G_1 と時間依存弾性係数 $G^*(t)$

排水条件	側圧 (kg/cm ²)	時間 (min)	G (表-3) (kg/cm ²)	$G^*(t)$ (kg/cm ²)	G_1 (kg/cm ²)
排水	5	10	4.60×10^3	4.60×10^3	
		10^2	4.33×10^3	4.35×10^3	
		10^3	3.88×10^3	3.74×10^3	4.65×10^3
		5×10^3	3.60×10^3	3.52×10^3	
		∞	?	3.44×10^3	
非排水	15	10	5.70×10^3	5.70×10^3	
		10^2	5.56×10^3	5.31×10^3	
		10^3	4.90×10^3	4.44×10^3	5.76×10^3
		5×10^3	4.61×10^3	4.12×10^3	
		∞	?	4.01×10^3	

(3) 粘塑性挙動と構成式^{13),14)}

静的降伏応力以上では図-8 あるいは図-10 のように偏差ひずみ速さは定常状態から加速され最終的に破壊に至る。この過程で体積膨張を生じ、体積ひずみ速さも定常状態では一定の値を保つ。このような挙動を記述できるものとして Perzyna による構成式がある。

Perzyna はひずみ速さに依存する降伏面を考え、それを動的降伏面 $f_d(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}^{VP}) = k_d$ とよび、平衡時の静的降伏面 $f_s(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}^s) = k_s$ との差を表す関数、すなわち、超過応力関数 F を次式で定義して導入した。

$$F = f_d/f_s - 1 \quad \dots \dots \dots (12)$$

さらに、動的降伏面の convexity とひずみ速さベクトルとの直交性 (normality rule) から次の構成式を与えた。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{VP} = \frac{1}{\eta} \phi(F) \frac{\partial f_d}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{VP}$ は粘塑性ひずみ成分である。動的降伏関数 f_d は式(12), (13) から次のように表わされる。

$$f_d = k_s \left[1 + \phi^{-1} \left\{ \eta (2\dot{\varepsilon}_{ij}^{VP} / \dot{\varepsilon}_{ij}^s)^{1/2} \cdot \left(2 \frac{\partial f_d}{\partial \sigma_{kl}} \frac{\partial f_d}{\partial \sigma_{kl}} \right)^{-1/2} \right\} \right] = k_d \quad \dots \dots \dots (14)$$

この関係式から f_d が静的降伏値 k_s よりひずみ速さの ϕ^{-1} 関数分だけ大きいことが理解できる。

式(13)の基本概念は図-14(a)のレオロジカルモデルと同じである。モデルの式表示は、

$$\dot{\varepsilon}^{VP} = \frac{(\sigma - \kappa)}{\eta} \quad \dots \dots \dots (15)$$

であり、粘塑性流動は超過応力 ($\sigma - \kappa$) によるが、これは式(13)の $\phi(F)$ に対応している。一般に塑性抵抗 κ は材料のひずみ硬化-軟化によって変化する。また、図-9 からもわかるようにひずみ速さと超過応力との関係は非線形である。さらに粘塑性流動時に生ずるダイレイタンシー挙動を記述するものでなくてはいけない。こ

のような材料の挙動を説明するため、静的降伏関数 f_s によりひずみ硬化-軟化を表すとともに超過応力関数 F の関数 $\phi(F)$ で非線形性を導入し、さらにダイレイタンシーは粘塑性ひずみ速さベクトルと動的降伏面との直交性 (normality rule) で表現するものである。図-14(b) は材料の時間に依存しない塑性変形 (inviscid plasticity) を支配する静的降伏面があり、その面上の A_s 点

と同一の塑性ひずみ状態であっても、粘塑性ひずみ速さをもっている場合にはそのひずみ速さの効果によって動的降伏面上の A_d に応力状態があるというこの理論の考え方を示している。

この理論をいかに適用するかを具体的に説明しよう。粘塑性流動過程の偏差ひずみ速さを示す図-8 から、その加速部分を除くと粘塑性挙動と同様、模式図、図-15(a) のようにその挙動を二本の直線の和として近似的に表わし得る。また、体積変化に対しては図-15(b) のように 1 本の直線で近似する。すなわち、ここでは粘塑性

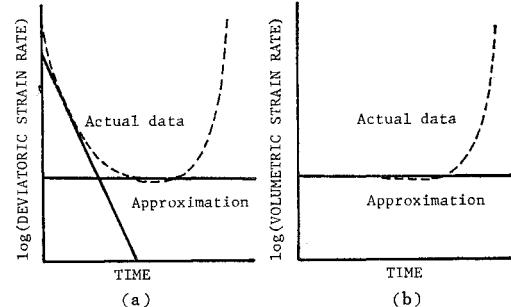


図-15 粘塑性挙動の近似方法

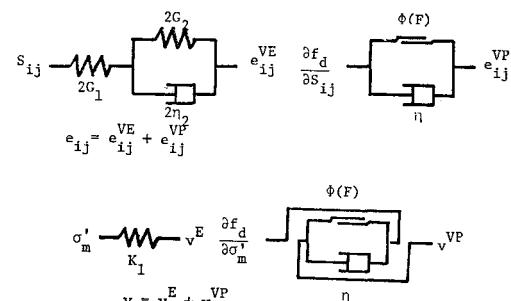


図-16 粘塑性挙動に対するレオロジカルモデル

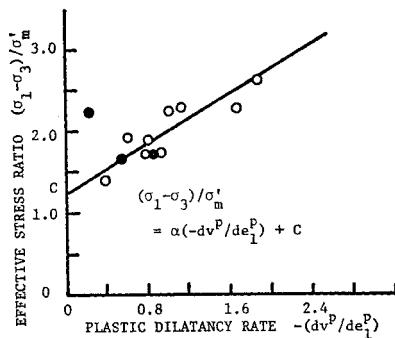


図-17 有効応力比とダイレイタンシー比の関係

は定常状態の挙動を表わすものと仮定して以下話を進める。この挙動を表わすレオロジカルモデルは図-16のようなものである。本研究は前述したように体積膨張が生ずる場合についてのみ考えるので、図に示すような押したら伸びるモデルとして表現してある。

いずれにしても、静的ならびに動的降伏曲面を決定することが必要である。Associated flow rule の立脚する normality rule は塑性降伏関数が応力の第 1, 第 2 不変量の関数であると仮定すると次のようになる。

$$dv^P / \sqrt{2 I_2^P} = -d(\sqrt{2 J_2}) / d\sigma_m' \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 $\sqrt{2 J_2} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$: 偏差応力の第 2 不変量、 $\sqrt{2 I_2^P} = \sqrt{de_i^P de_j^P}$: 塑性偏差ひずみ増分の第 2 不変量である。式(16)を積分することで降伏関数が求まるが、それを可能にするためには式(16)の左辺が応力の関数で表わされるとよい¹⁵⁾。図-17 はダイレイタンシー比 dv^P / de_1^P と応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ の関係をせん断試験結果から求めたものである。なお黒点は静的降伏応力に近い応力レベルによるクリープ試験から得たものである。ややばらつきはあるが、図中の直線でその関係が表わされる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m' = \alpha(-dv^P / de_1^P) + C \dots\dots\dots(17)$$

ここに、 α と C は材料定数で、大谷石に対して $\alpha=0.75$, $C=1.25$ となる。式(17)を応力とひずみの不変量を用いて書き換えると次式となる。

$$\sqrt{2 J_2} / \sigma_m' = \alpha^*(-dv^P / \sqrt{2 I_2^P}) + C^* \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $\alpha^*=\alpha$, $C^*=\sqrt{2/3}C$ である。式(18)を式(16)に代入すると積分できて次式となる。

$$\sigma_m' \left\{ \frac{C^*}{\alpha^*} + \frac{\alpha^*-1}{\alpha^*} \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_m'} \right) \right\}^{\alpha^*/(\alpha^*-1)} = C_1 \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 C_1 は積分定数であるが、ここでは C_1 を図-17 に示されるように $\sqrt{2 J_2} / \sigma_m' = C^*$, $\sqrt{2 J_2} = k$ のとき体積変化が生じないという次の条件で決定する。

$$\sqrt{2 J_2} / \sigma_m' = C^* \text{ で } \sqrt{2 J_2} = k \text{ (硬化・軟化パラメーター)} \dots\dots\dots(20)$$

結局、塑性降伏関数は次のように求まる。

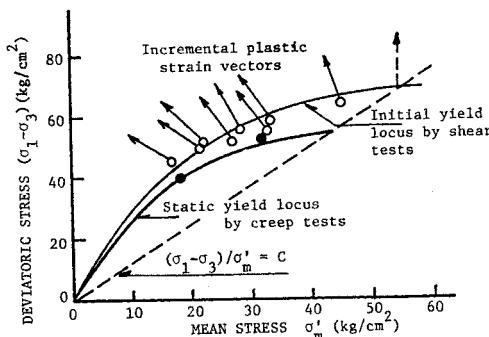


図-18 塑性降伏曲面と対応する塑性ひずみ増分ベクトル、ならびに静的降伏曲面

$$f = C^* \sigma_m' \left[\frac{1 + \frac{\alpha^*-1}{C^*} \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_m'} \right)}{\alpha^*} \right]^{\alpha^*/(\alpha^*-1)} = k \dots\dots\dots(21)$$

ここでは静的平衡状態、すなわち $\dot{e}_{1s}=10^{-8}/\text{min}$ のひずみ速さに対応する塑性降伏条件を表わすものを静的降伏条件として次式で表わす。

$$f_s = C^* \sigma_m' \left[\frac{1 + \frac{\alpha^*-1}{C^*} \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_m'} \right)}{\alpha^*} \right]^{\alpha^*/(\alpha^*-1)} = k_s \dots\dots\dots(22)$$

図-18 はせん断試験による初期降伏応力値に対応する降伏面と、 $\dot{e}_{1s}=10^{-8}/\text{min}$ に対応する静的降伏面を式(22)で求めた結果を示している。せん断試験は 10^{-8} 以上のひずみ速さで行ったために差が生じ、ひずみ速さ依存性が現われている。

式(22)の静的降伏関数を確定させるにはひずみ硬化-軟化パラメーター k_s を決める必要がある。すなわち、静的平衡状態にある弾-塑性体とした応力-ひずみ関係を決めることである。しかし、本論文では軟岩の時間依存性挙動を記述できる構成式を誘導する第一歩として、図-19 の実線で模式的に示す静的応力-ひずみ関係を点線のような弾-完全塑性体とした応力-ひずみ関係で近似的に表わすこととする。これは図-15 の近似に対応して

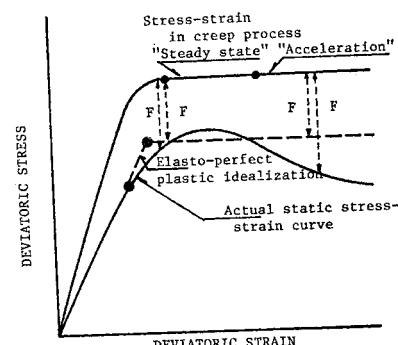


図-19 粘完全塑性体による近似方法

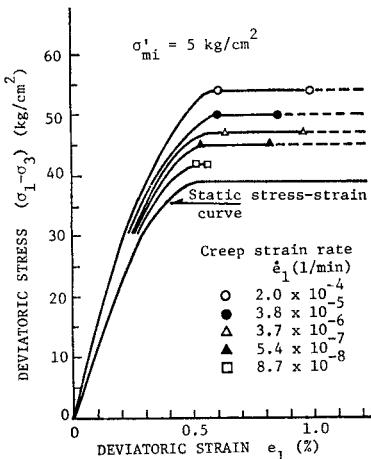


図-20 ひずみ速さの応力-ひずみ関係への影響

いる。すなわち、初期のひずみ速さの急激な減少は図-16 のモデルの粘弾性部によるとし、定常状態のひずみ速さを粘塑性とし、加速クリープを無視することである。しかし、図-19 の実線のようなひずみ硬化軟化型の静的応力-ひずみ関数を考えると、超過応力関数 F がひずみとともに変化して、初期にひずみ速さは減少するが、軟化過程では F が再び増加するから、加速クリープ状態の説明も行いうる。

図-20 は側圧 5 kg/cm² の排水クリープ試験から求めた図-19 に対応する関係図であるが、少なくとも定常クリープ状態をこのような近似で表わし得ることを示している。厳密には前述したようなひずみ硬化-軟化型の応力-ひずみ関係を考える必要があるが、この点については以後の研究にゆだねる。

このように、静的応力-ひずみ関係を弾-完全塑性体と考えると静的降伏関数は応力のみの関数となり、応力空間内に固定され、一方、動的降伏関数は応力とひずみ速さの関数となる。そこで、動的降伏関数が図-18 でも説明したように静的降伏関数と同一の関数形で与えられるものと仮定する。すなわち、次式で表わされる。

$$f_d = C^* \sigma_{m'} \left[\frac{1 + \alpha^* - 1}{C^*} \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \right]^{\alpha^*(\alpha^*-1)} \\ = k_d (\sqrt{2 I_2 V^P}) \quad (23)$$

これによって、動的降伏関数が決定されたから、式(13)、(23)から粘塑性挙動を記述する構成式が次のように誘導できる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{VP} = \frac{1}{\eta} \phi(F) \cdot h \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \\ \left[\left(\frac{C^* - \sqrt{2 J_2}/\sigma_{m'}}{\alpha^*} \right) \frac{\delta_{ij}}{3} + \frac{S_{ij}}{\sqrt{2 J_2}} \right] \quad (24)$$

ここに、

$$h \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) = \left[\frac{1 + \alpha^* - 1}{C^*} \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \right]^{\alpha^*(\alpha^*-1)}$$

式(24)を偏差ひずみと体積ひずみ成分に分けると、

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{VP} = \frac{1}{\eta} \phi(F) h \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \frac{S_{ij}}{\sqrt{2 J_2}} \quad (25.1)$$

$$\dot{v}^{VP} = \frac{1}{\eta} \phi(F) h \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \cdot \left(\frac{C^* - \sqrt{2 J_2}/\sigma_{m'}}{\alpha^*} \right) \quad (25.2)$$

式(25.2)はせん断応力 $\sqrt{2 J_2}$ による体積変化、すなわちダイレイタンシーを表わしている。

さて、構成式を確定するために残された課題は汎関数 $\phi(F)$ の決定である。排水クリープ試験結果を用いてそれを求めてみる。式(25)からただちに次の関係を得る。

$$\phi(F) = \eta \dot{\varepsilon}_{ij}^{VP} \left[h \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \frac{S_{ij}}{\sqrt{2 J_2}} \right] \\ = \eta \dot{v}^{VP} \left[h \left(\frac{\sqrt{2 J_2}}{\sigma_{m'}} \right) \left(\frac{C^* - \sqrt{2 J_2}/\sigma_{m'}}{\alpha^*} \right) \right] \quad (26)$$

軸対称三軸試験の場合に式(26)は次のようになる。

$$\phi(F) = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta \dot{\varepsilon}_1^{VP} / h \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{m'}} \right) \\ = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta \dot{v}^{VP} \left[h \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{m'}} \right) \left(\frac{C - (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{m'}}{\alpha^*} \right) \right] \quad (27)$$

式(27)の右辺、すなわち $\dot{\varepsilon}_1^{VP}$ と分母はクリープ試験で確定する値であり、また、超過応力関数 F も f_d, f_s がクリープの条件が決まれば求められるから、すべて既知の値となる。そこで $\dot{\varepsilon}_1^{VP} / h \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{m'}} \right)$ と $\dot{v}^{VP} / \left[h \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{m'}} \right) \left(\frac{C - (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_{m'}}{\alpha^*} \right) \right]$ を縦軸に対数で、横軸

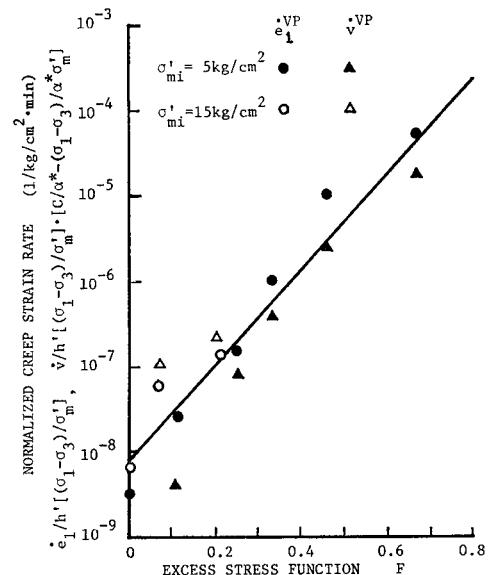
図-21 超過応力の汎関数 $\phi(F)$ と粘性係数の決定

表-7 粘塑性状態における粘弾性定数（図-16 参照）

側 (kg/cm ²)	圧 (kg/cm ²)	G_2 (kg/cm ²)	η_2 (kg/cm ² ·min)
5	54	5.1×10^3	1.38×10^4
	50	10.7×10^3	4.20×10^4
	47	6.3×10^3	6.30×10^4
	45	7.7×10^3	6.00×10^4
	42	7.7×10^3	6.00×10^4
15	60	7.7×10^3	1.00×10^7
	55	9.9×10^3	9.00×10^6

に超過応力関数 F をプロットすると図-21 が求まる。図中の直線でその関係を近似的に表わすことによって $\phi(F)$ は次のように決定できる。

$$\phi(F) = \exp[aF] \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

ここに a は材料定数で大谷石に対して $a=12.8$ となる。また、粘性係数 η は $\eta=1.01 \times 10^8$ ($\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$) となる。図-15 のような近似を行ったが、初期の変形を表わす粘弾性定数 G_2 , η_2 は表-7 に与える。これより粘塑性の卓越する高い応力の場合には粘性係数 η が小さな値となり、前述したような F の変化を考慮すべきであるといえる。

図-22 は定常クリープ状態のひずみ速度ベクトルの方向とそれに対するこのように決定された動的降伏面を表わすが、その直交性は十分ではない。

粘塑性挙動に対する構成式はこれすべて与えられた。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^V &= \varepsilon_{ij}^{VE} + \varepsilon_{ij}^{VP} \\ \varepsilon_{ij}^{VE} &= S_{ij}/2 G + \sigma_m' / 3 K_1 \\ &\quad + (1/2 \eta_2) \int_0^t e^{-(G_2/\eta_2)(t-\tau)} S_{ij} d\tau \\ \varepsilon_{ij}^{VP} &= \frac{1}{\eta} \exp[\alpha F] \cdot h\left(\frac{\sqrt{2} J_z}{\sigma_m'}\right) \\ &\quad \left[\left(\frac{C^* - \sqrt{2} J_z / \sigma_m'}{\alpha^*} \right) \frac{\delta_{ij}}{3} + \frac{S_{ij}}{\sqrt{2} J_z} \right] \end{aligned}$$

以上、軸対称三軸圧縮試験結果のみを用いて理論を開発し、諸定数の決定を行った。したがって、一般的な三

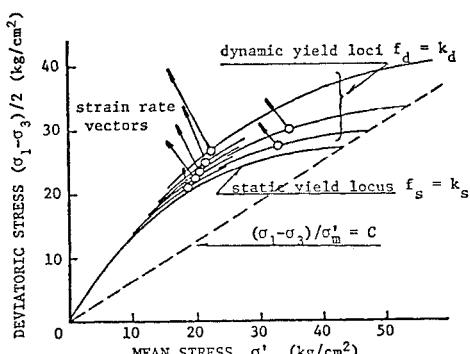


図-22 静的ならびに動的降伏曲面とひずみ速度ベクトルの方向

次元応力下の問題への適用性は境界値問題の解析に用い、実際の挙動と比較することによってのみ検証されるものである。

5. 結論

時間依存性に重点をおいて堆積軟岩の力学挙動を明らかにし、その挙動を記述できる構成式を誘導した。すなわち、多孔質凝灰岩である大谷石を理想的な堆積軟岩として試料に選び、排水ならびに非排水三軸クリープ試験を行った。その結果、先行履歴応力以下の拘束圧のもとで、軟岩の時間依存性挙動を明らかにした。その拘束圧の範囲内では塑性流動過程で常に体積膨張を示す。また、ある応力以上では最終的にクリープ破壊に至る限界応力（静的降伏応力とよぶ）の存在することを示した。これらの実験事実に基づき、静的降伏応力以下では粘弾性体、静的降伏応力以上では粘弾塑性体と考え、軟岩の時間依存性とダイレイタンシーを表現できる構成式を誘導した。

本研究で得られた結論は以下である:

(1) 大谷石の場合、先行履歴応力以下の低拘束圧における排水クリープ試験は有効応力一定という条件下的クリープ挙動を与えると考えてよい。

(2) 先行履歴応力以下では、非排水クリープ強度が排水クリープ強度より大きい。この説明には単に有効応力のみならず体積変化をあわせ考える必要があるがより詳細な検討が必要である。

(3) ある応力以上ではクリープ破壊に至る限界応力が存在する。その限界応力を静的降伏応力とよび、本研究では $10^{-8}/\text{min}$ の定常ひずみ速度に対応する応力値として便宜的に決定した。

(4) 静的降伏応力以下で、せん断変形は粘弾性挙動を示す。しかし、体積変化は時間依存性挙動を示さないと考えられる。

(5) 静的降伏応力以上で、体積膨張を伴う粘塑性流動を示す。定常クリープ状態では偏差ひずみ速度も体積ひずみ速度もほぼ一定値となる。

(6) 定常クリープひずみ速度とクリープ破壊時間の間に逆比例の関係がこの材料に対しても成立する。

(7) 静的降伏応力以下の挙動は線形粘弾性モデルを構成式に用いて説明できる。モデルを提示し、材料定数の近似的決定方法を詳細に解説した。

(8) 静的降伏応力以上の体積膨張を伴う粘塑性挙動を説明する構成式を粘弾-粘完全塑性体と考え、Perzynaの理論と実験事実により誘導した。すなわち、軟岩を時間依存性とダイレイタンシー特性を示す弾-塑性体と仮定したことになる。

(9) ここに求めた構成式は先行履歴応力以下の粘塑性挙動、すなわち体積膨張が常に生ずる場合に限られている。また、静的平衡状態の応力-ひずみ関係にはひずみ硬化-軟化挙動を考慮していない。これらの2点は以後の研究課題である。

参考文献

- 1) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の弾-塑性挙動、土木学会論文報告集、第271号、pp. 83-95, 1978.
- 2) 足立紀尚・世良田章正：岩石材料の粘塑性と直接せん断試験、材料、Vol. 20, No. 209, pp. 151-155, 1971.
- 3) Perzyna, P. : The Constitutive Equations for Work-hardening and Rate Sensitive Plastic Materials, Proc. Vibrational Problems, Warsaw, Vol. 4, No. 3, pp. 281-290, 1963.
- 4) Weidler, J.B. and P.R. Paslay : Analytical Description of Behavior of Granular Media, Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM 2, pp. 379-395, 1969.
- 5) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：軟岩のクリープ特性、第10回土質工学研究発表会講演集、pp. 795-798, 1975.
- 6) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：Mechanical Properties of Soft Rocks; Proc. 9th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 7-10, 1977.
- 7) 齊藤迪考：斜面崩壊の予測について、土と基礎、Vol. 20, No. 2, pp. 13-19, 1972.
- 8) Campanella, R.G. and Y.P. Vaid : Triaxial and Plane Strain Creep Rupture of an Undisturbed Clay, Canadian Geotechnical Jour., Vol. 11, No. 1, pp. 1-10, 1974.
- 9) 関口秀雄：Rheological Characteristics of Clays, Proc. 9th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, pp. 289-292, 1977.
- 10) Singh, A. and J.K. Mitchell : General Stress-Strain-Time Function for Soils, Proc. ASCE, SM 1, pp. 21-46, 1968.
- 11) Mitchell, J.K. : Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., p. 323, 1976.
- 12) 桜井春輔：Time-dependent Behavior of Circular Cylindrical Cavity in Continuous Medium of Brittle Aggregate, Ph. D. Thesis Michigan State Univ., 1966.
- 13) Adachi, T., S. Serata and S. Sakurai : Determination of Underground Stress Field based on Inelastic Properties of Rocks, Proc. 10th Symp. on Rock Mechanics, Berkeley, pp. 293-328, 1969.
- 14) Adachi, T. and M. Okano : A Constitutive Equation for Normally Consolidated Clay, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 4, pp. 55-73, 1974.
- 15) Ohta, H. : Analysis of Deformations of Soils Based on the Theory of Plasticity and its Application to Settlement of Embankments, Dr. Eng. Thesis, Kyoto University, 1971.

(1978.2.1・受付)