

堆積軟岩の三軸クリープ試験法およびクリープ変形モデルの検討

STUDY OF TRIAXIAL CREEP TESTING METHOD

AND MODEL FOR CREEP DEFORMATION ON SEDIMENTARY SOFT ROCKS

早野 公敏*・松本 正士**・龍岡 文夫***・古関 潤一*

Kimitoshi HAYANO, Masashi MATSUMOTO, Fumio TATSUOKA, and Junichi KOSEKI

In this study, triaxial creep tests on the two types of sedimentary soft rocks were performed. The testing method had two features; one was the local strain measurement and the other was the step change of strain rates with a single specimen. The comparison between the locally and externally measured axial strains showed a large gap during creep, and suggested local strain measurement should be important on the tested geomaterials. To simulate test results, a simple model for creep deformation was examined, which is based on the so-called "isotach" behaviour of the stress-strain relationship that the current stress depends on the current strain and strain rates.

1. はじめに

比較的均質な堆積軟岩地盤を対象とする橋梁の基礎やトンネル掘削工事において、地盤内に生ずるひずみレベルは小さく、せいぜい 0.2%程度である^[1]。これまで原位置弾性波速度試験から求めた剛性を基準に、局所変位測定法を用いた高精度三軸試験結果から求めた「ヤング率のひずみレベルによる非線形性や圧力レベル依存性」を考慮する変形予測法が提案されている^[2]。しかし、変形特性の時間依存性を取り扱った地盤の変形解析及び高精度な三軸試験結果は少ない。そこで、本研究では小ひずみレベルにおいてクリープ特性を含む時間依存性のある変形を適切に予測するために、局所変形測定装置(LDT)を用いた三軸クリープ試験を行い、堆積軟岩のクリープ変形特性および「非線形な応力・ひずみ関係のひずみ速度依存性」を利用したクリープ変形予測について基礎的な検討を行った。

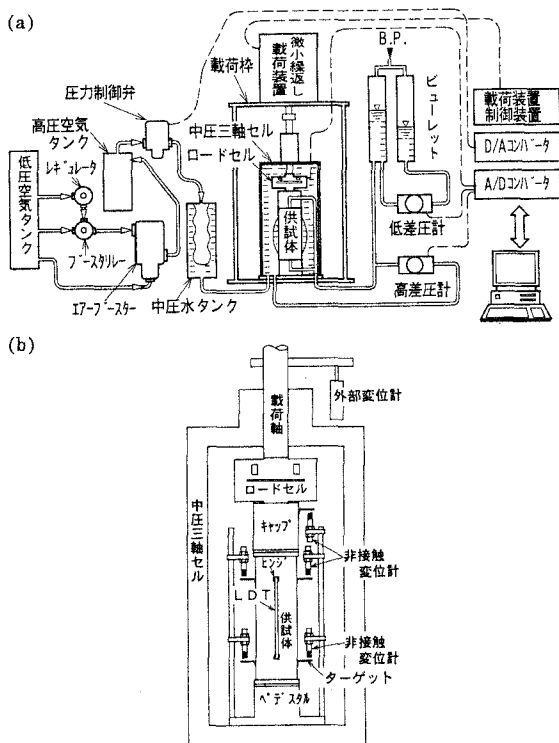
2. 三軸試験装置及び方法

三軸クリープ試験システムを、図 1(a)に示す。三軸セルは 30kgf/cm²まで加圧可能であり、アクリル円筒を通して供試体(φ:50,H:125mm)の観察が可能である。微小繰返し載荷が随時可能な変位制御式載荷装置を軸載荷に用い、AC サーボモーターの採用により、最大 3000 倍の軸変位速度変化が減速ギヤの取り替えなしに可能である^[3]。変位制御であるため、高精度のひずみ速度一定の試験が可能であり、その結果を用いるとクリープ変形特性を非線形な応力・ひずみ関係のひずみ速度依存性と関連させて議論しやすい。クリープ状態では三軸セル内部に設置したロードセルの出力変化がゼロになるようにフィードバックし、軸変位制御

* 正会員 東京大学生産技術研究所

** 正会員 東急建設技術研究所

*** フェロー 東京大学工学部



図一 (a) 軟岩クリープ試験システム全体図

(b) 変位測定装置

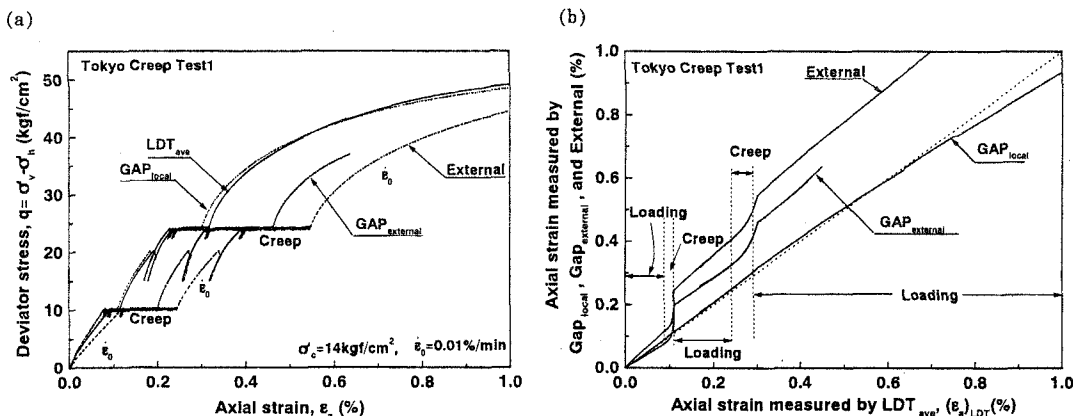
を行うことにより、応力一定状態を保った。このような変位制御でクリープ状態を実現するためには、約 0.001% のひずみ振幅の断続的な繰返し载荷が必然となる。しかし繰返しひずみは十分に弾性的挙動の範囲内であり、クリープ変形に与える影響は少ないと考えられる。

図 1(b)に、供試体の 4 通りの軸ひずみの測定方法を示す。すなわち①供試体側面 2 地点間を計測する一对の局所変形測定装置(以降、略して LDT_{ave})、②供試体側面 2 地点間を計測する一对の非接触変位計 (Gap)_{local}、③キャップの変位を測定する非接触変位計一個 (Gap)_{external}、④载荷軸の変位を測定するダイヤルゲージ一個 (External) をひずみの測定に用いた。①と②がひずみの直接的測定、③と④が間接的測定である。試料として、東京湾海上から海底下深さ約 119-148m でロータリーコアチューブサンプリングにより採取された細粒質砂質軟岩(上総層群、初期含水比 $w_0=24.1-24.4\%$ 、平均粒径 $D_{50}=0.041-0.045mm$)と、神奈川県相模原市の実験洞で深さ約 50m からダイレクトコアリングにより採取された泥質軟岩(上総層群、 $w_0=23.3-25.7\%$ 、 $D_{50}=0.0023-0.0057mm$)の 2 種類を対象とした。2 重負圧法を用いて飽和化後、

原位置に載圧 σ'_v 、まで等方圧密を行い、一晚放置後、側圧 σ'_h 一定のまま、軸差応力 $q = \sigma'_v - \sigma'_h$ を増加させて排水条件でせん断を行い、途中でクリープ試験を行った。供試体に 2 段階あるいは 3 段階のクリープ荷重をそれぞれ約 3 日間ほど与えた。

3. 測定法による軸ひずみの違い

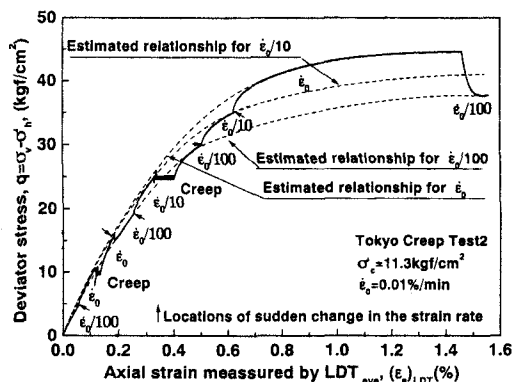
図 2(a)に、砂質軟岩の排水せん断時の軸差応力・軸ひずみ関係を示す。(テスト名:Tokyo Creep Test1)^[4]。 $q=10$ 及び $25kgf/cm^2$ で約 3 日間のクリープ荷重を与え、それ以外は一定のひずみ速度 $0.01\%/min (= \dot{\epsilon}_0$ とする)で载荷した。4 通りのひずみの測定法を比較すると、直接的測定の LDT_{ave} と (Gap)_{local} によるひずみが類似しているのに対し、間接的測定の External と (Gap)_{external} によるひずみは、これらよりも大きい。特に測定位置が供試体から離れるほど同じ q に対して大きくなる。図 2(b)は、 LDT_{ave} のひずみと他の測定法によるひずみを比較したものである。 LDT_{ave} と (Gap)_{local} のひずみが単調载荷時もクリープ载荷時もよく一致しているのに対して、External と (Gap)_{external} によるひずみは大きく、特にクリープ载荷時に著しい。本試験では供試体側面にろ紙を巻き、側面排水の条件であり、供試体の上下端部と中央部の圧密度の差による影響とは考えにくい。通常、軟岩を対象とする単調载荷の三軸圧縮試験では、間接的測定のひずみに Bedding error や System compliance error の影響による誤差が含まれる^[5]。図 3 ではそれらの影響がクリープ状態において特に著しく生じていると考えられる。従って、クリープ変形を適切に検討するためには、局所的なひずみの測定が必須であると考え、本研究ではクリープ変形の予測に局所的測定法の LDT_{ave} によるひずみを詳細に検討することとした。



図一2(a) 砂質軟岩の軸差応力・軸ひずみ関係(Tokyo Creep Test1) (b) 測定法による軸ひずみの違い

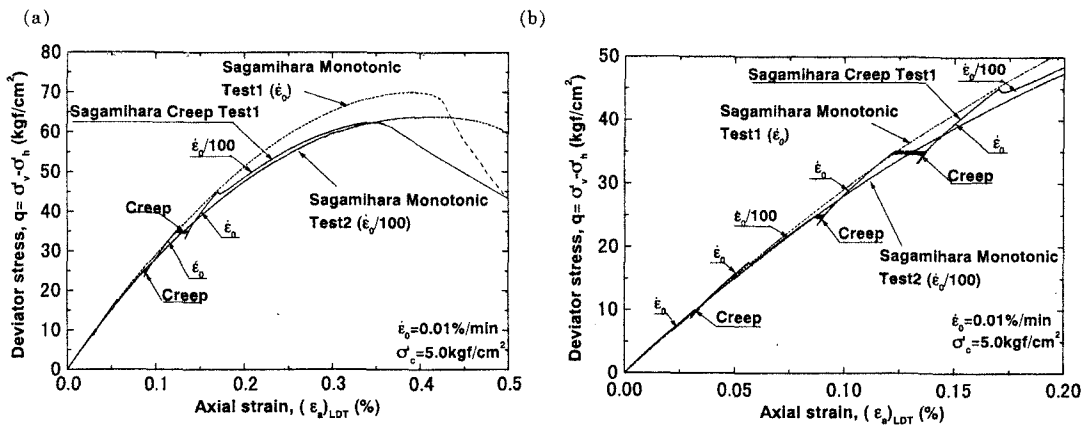
4. 応力・ひずみ関係のひずみ速度依存性

応力・ひずみ関係のひずみ速度依存性を調べるために、せん断途中でひずみ速度を最大 1000 倍変化させ、クリープ载荷を含めた排水三軸クリープ試験を行った。砂質軟岩の軸差応力・軸ひずみ関係を図 3 に示す(Tokyo Creep Test2)。ひずみは全て LDT_{ave} による値である。 $q=10$ 及び 25kgf/cm^2 において約 3 日間の排水クリープを行った。クリープ载荷以外では、载荷途中でひずみ速度を $\dot{\epsilon}_0, \dot{\epsilon}_0/10, \dot{\epsilon}_0/100$ ($0.01, 0.001, 0.0001\%/min$) の 3 段階で変化させて単調载荷を行った結果、応力・ひずみ曲線には、ひずみ速度による違いが認められた。図中の点線の曲線は 3 段階の応力・ひずみ曲線をそれぞれ補間して単調载荷時における固有の曲線の形を予測したものであるが、ひずみ速度を急変させると応力・ひずみ関係は、過去の

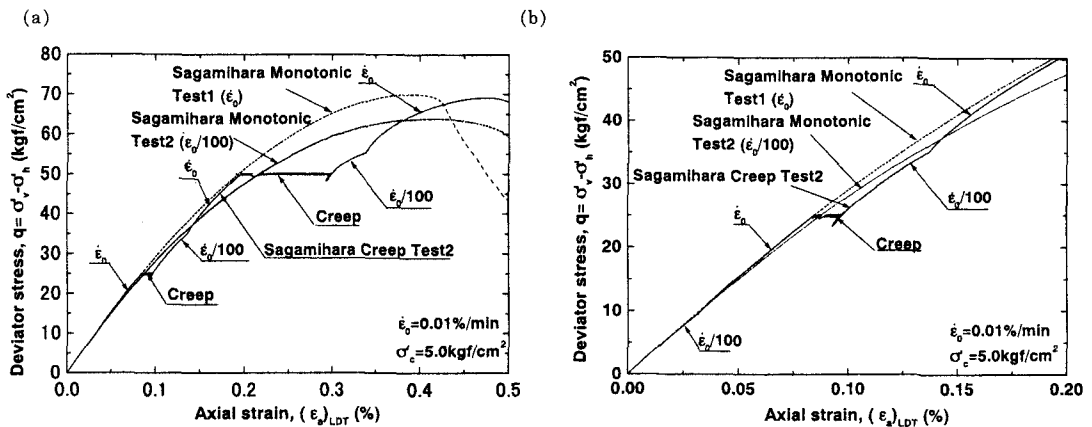


図一3 ひずみ速度を急変させた砂質軟岩の軸差応力・軸ひずみ関係(Tokyo Creep Test2)

の応力・ひずみ履歴に関わらず、それぞれのひずみ速度に固有の応力・ひずみ曲線を辿る傾向がみられた。Suklje^[6]はこの特性を isotach と呼んでいる。ここでは、ひずみ速度が急増する場合、非常に高い剛性を示した後降伏を示して剛性が低下する一方で、ひずみ速度が急減すると、応力レベルは低下するがある応力レベルになると接線剛性が急に回復して、どちらも現在のひずみ速度に固有の応力・ひずみ関係に戻っていく傾向を isotach と呼ぶ。このような isotach 特性は、藤の森粘土を正規圧密状態で用いた三軸試験においても認められている^[7]。図 4(a)(b)、図 5(a)(b)に、泥質軟岩の応力・ひずみ関係を示す。図中には、ひずみ速度を载荷途中で急変させた試験の結果(Sagamihara Creep Test1,2)に加え、ひずみ速度一定 ($0.01\%/min, 0.0001\%/min$) の単調载荷試験結果(Sagamihara Monotonic Test1,2)も合わせて表示した。ひずみは全て LDT_{ave} による値であり、(b)はひずみレベルが $0.0\sim 0.2\%$ 以下の部分を拡大したものである。Sagamihara Creep Test1(図 4)では $q=10, 25, 35\text{kgf/cm}^2$ において、Sagamihara Creep Test2(図 5)では $q=25, 50\text{kgf/cm}^2$ においてクリープを行い、その他はひずみ速度 $0.01\%/min, 0.0001\%/min$ の 2 段階で载荷した。Sagamihara Creep Test1 の $q=25\text{kgf/cm}^2$ におけるクリープ直前のひずみ速度は $0.0001\%/min$ であり、



図—4 ひずみ速度を急変させた泥質軟岩の軸差応力・軸ひずみ関係 (Sagami-hara Creep Test1)



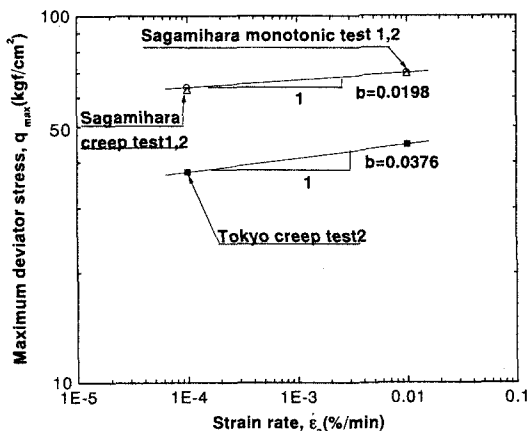
図—5 ひずみ速度を急変させた泥質軟岩の軸差応力・軸ひずみ関係 (Sagami-hara Creep Test2)

その他のクリープ試験前後のひずみ速度は、0.01%/min である。ただし、最後の载荷段階でのひずみ速度は 0.0001%/min である。砂質軟岩に比べて差は小さいが、ひずみ速度による応力・ひずみ曲線の違いが見られる。また、砂質軟岩と同様にひずみ速度に応じた固有の応力・ひずみ曲線を辿っていく isotach 特性も認められる。

表 1 に各試験結果の最大軸差応力 q_{max} 、ピーク強度時の LDT_{ave} による破壊時軸ひずみ $(\epsilon_i)_{LDT}$ 、初期含水比 w_0 の値を示す。表 1 中の Tokyo Creep Test2 では、図 3 のように延性的挙動を示したため、ひずみ速度 0.01%/min, 0.0001%/min に対してそれぞれ q_{max} を求め、 $(\epsilon_i)_{LDT}$ は同値 1.5% とした。西ら^[8]や趙ら^[9]によると軟岩や硬岩の

表—1 各三軸試験の最大軸差応力 q_{max} 、破壊時軸ひずみ $(\epsilon_i)_{LDT}$ 、初期含水比 w_0

Test name	Strain rate at $(\epsilon_i)_{LDT}$ (%/min)	q_{max} (kgf/cm ²)	$(\epsilon_i)_{LDT}$ (%)	w_0 (%)	Condition
Tokyo Creep Test 1	0.01	50.2	1.25	24.1	Creep at $q=10,25 \text{ kgf/cm}^2$
Tokyo Creep Test 2	0.01	44.7	1.5	24.4	Creep at $q=10,25 \text{ kgf/cm}^2$
	0.0001	37.6	1.5		
Sagami-hara Monotonic Test1	0.01	70	0.393	24.3	Monotonic loading (strain rate=0.01%/min)
Sagami-hara Monotonic Test2	0.0001	63.9	0.407	25.7	Monotonic loading (strain rate=0.0001%/min)
Sagami-hara Creep Test1	0.0001	62.4	0.347	23.3	Creep at $q=10,25,35 \text{ kgf/cm}^2$
Sagami-hara Creep Test2	0.01	69.1	0.468	24.7	Creep at $q=25,50 \text{ kgf/cm}^2$



図—6 最大軸差応力 q_{max} のひずみ速度依存性

q_{max} はひずみ速度の影響を受け、ひずみ速度の増加に伴い、 q_{max} が増加する。同様に図 6 に本研究で得られたひずみ速度と q_{max} の関係を示すが、ひずみ速度の増加に伴い、 q_{max} が増加している。両対数表示上での傾き b 値は、 q_{max} のひずみ速度依存性を表しており、砂質軟岩の q_{max} のひずみ速度依存性が泥質軟岩に比べて大きい。ここで砂質軟岩の b 値は図 3 の一つの供試体でひずみ速度に対応する q_{max} により得ているが、泥質軟岩の b 値は、図 4,5 より 4 つの供試体の q_{max} で得られる平均した値であり、本試験で行ったひずみ速度の範囲内における値である。より一般的な b 値を正確に求めるためにはさらに幅広いひずみ速度の載荷試験を行う必要がある。

載荷途中でひずみ速度を急変させる三軸試験は、応力・ひずみ曲線のひずみ速度依存性を調べるうえで有効であり、またその結果を用いてクリープ特性との関連を議論できる。本試験で用いた軟岩には、応力・ひずみ曲線のひずみ速度依存性が認められ、またひずみ速度を急増したり、あるいは急減すると、剛性が変化して、どちらも現在のひずみ速度に固有の応力・ひずみ関係に戻っていく isotach 特性が認められた。そこで、その特性を利用して段階的なクリープ載荷に対して有効なクリープ変形のモデルを以下で考察する。

5. 段階載荷クリープ変形予測値と実測値の比較

三軸クリープ試験におけるクリープ載荷時の変形量を応力・ひずみ曲線のひずみ速度依存性 (Isotach 特性) を利用して予測し、実測値と比較する。まず図 6 よりひずみ速度により異なる q_{max} を

$$q_{max} = a(\dot{\epsilon})^b \quad (1)$$

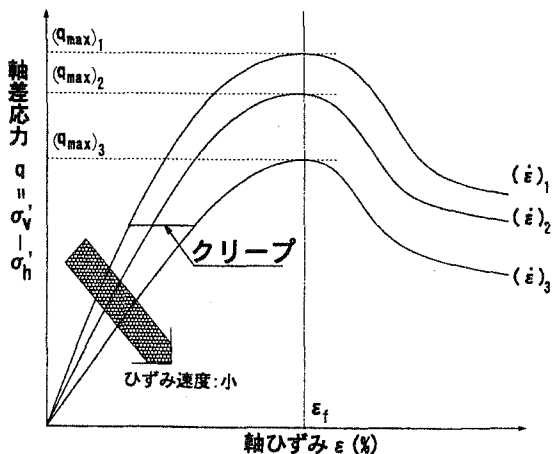
と表す。応力・ひずみ関係を現在の軸差応力 q が $q(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 、すなわち現在のひずみ ϵ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ のみで表し、かつ破壊ひずみ ϵ_f は $\dot{\epsilon}$ によらないと仮定する。また正規化した q/q_{max} と ϵ/ϵ_f の関係

$$q/q_{max} = f(x) \quad (x = \epsilon/\epsilon_f) \quad (2)$$

は異なる $\dot{\epsilon}$ に対し同一とする。図 7 のようにクリープ中は、ひずみ速度により異なる応力・ひずみ曲線を遷移していくと考え、クリープ状態におけるクリープひずみ $(\epsilon_a)_{creep}$ と時間 $t(\text{min})$ の関係を次のように導出する。(1),(2)式より、 q は、

$$q = q(\epsilon, \dot{\epsilon}) = a(\dot{\epsilon})^b \cdot f(\epsilon/\epsilon_f) \quad (3)$$

と表される。本研究では(3)式の実験結果に基づいて用いている。クリープ状態で $dq=0$ より、



図—7 単純化した応力・ひずみ曲線とクリープ

$$dq = \frac{\partial q}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial q}{\partial \dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} = a \cdot (\dot{\varepsilon})^{b-1} (b \cdot f(x) \cdot d\dot{\varepsilon} + \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_f} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \cdot d\varepsilon) = 0 \quad (4)$$

$$\therefore d\varepsilon = -C_r \frac{d\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}} \quad (5) \quad C_r = \frac{b \cdot \varepsilon_f \cdot f}{\partial f / \partial x} \quad (6)$$

(6)式で $\frac{\partial f}{\partial x}$ を x の関数で定式化し、 C_r を変化させ

ながら(5)式で $d\dot{\varepsilon}$ を与えて、ひずみを計算していくことが可能であるが、ひずみが収束するような小ひずみレベルにおけるクリープ中は、 q_{max} の変化および正規化した剛性 $\frac{\partial f}{\partial x}$ の変化が十分小さいと考えら

れるので C_r を一定と仮定し(5)式を積分すると

$$\varepsilon = -C_r \cdot \ln \dot{\varepsilon} + Const. \quad (7)$$

$$\varepsilon = C_r \ln \left(\frac{A}{C_r} t + B \right) \quad (A, B : Const.) \quad (8)$$

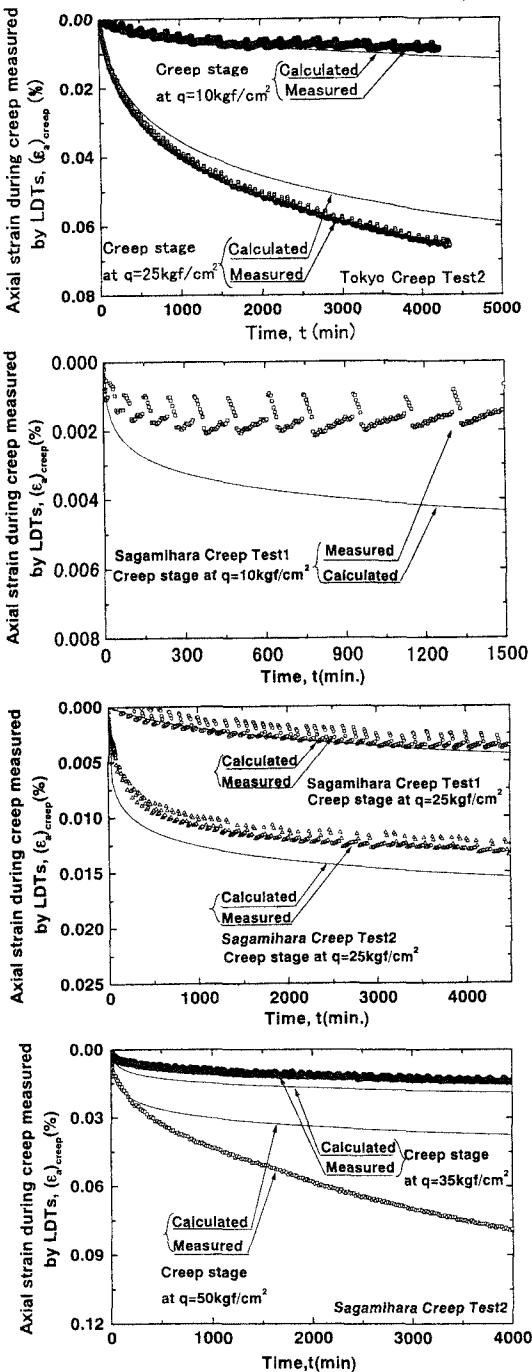
クリープの初期条件($t=0$ では $(\varepsilon)_{creep}=0$)を用いて、クリープひずみ $(\varepsilon)_{creep}$ は

$$(\varepsilon)_{creep} = C_r \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{initial}}{C_r} \cdot t + 1 \right)$$

($\dot{\varepsilon}_{initial}$:初期クリープ速度) (9)

(9)式は、十分時間が経過するとクリープひずみ $(\varepsilon)_{creep}$ が $C_r \ln(t)$ に比例することを示しており、いわゆる対数クリープ則に近い関係となる。従ってクリープ係数 C_r が大きいほどクリープひずみの進行が大きいことを意味している。(6)式より、破壊時ひずみ ε_f 、ピーク強度のひずみ速度依存性 b 、せん断荷重レベル f が大きいほど、正規化された剛性 $\frac{\partial f}{\partial x}$

が小さいほど C_r は大きくなる事が分かる。(9)式を用いてクリープ変形量を算出し、実測値と比較した結果を図8に示す。(9)式に用いた値を表2に示した。これらの図で、軸ひずみ速度のデータが微小に変化しているのは、クリープ試験における荷重一定の条件を変位制御荷重装置の on-off で制御しているためである。従って、データ群の下限包絡曲線を理論曲線と比較する必要がある。全体的に砂質軟岩のほうが実測値と計算値が良く合っている。これは、砂質軟岩の場合、クリープを行った試験結果(Tokyo Creep Test2)から、計算に必要な定数を直接求めているためである。泥質軟岩では Monotonic Test1,2 からクリープ予測に必要な定数を間接的に



図—8 クリープ変形量の実測値と予測値の比較

求めているため、実測値と理論値の差が大きい。しかし、それでも、 $q=50\text{kgf/cm}^2$ のクリープを除き傾向は

一致している。特に $q=25\text{kgf/cm}^2$ のクリープにおいて、クリープ載荷開始時のひずみ速度の差 ($\dot{\epsilon}_0$ と $\dot{\epsilon}_0/100$)がクリープ速度に及ぼす影響を良く表している。 $q=50\text{kgf/cm}^2$ では時間の経過に伴い、実測値が計算値を大きく上回る。こ

表一2 クリープ変形予測に用いた値

Test name	q at the creep (kgf/cm ²)	q _{max} (kgf/ cm ²)	ε _f (%)	f(= q/q _{max})	∂ f / ∂ x (x= ε _f)	$\dot{\epsilon}^{\text{initial}}$ (%/min)	C _r
Tokyo Creep Test 2	10	44.7	1.5	0.224	2.61	1.11*10 ⁻⁵	4.84*10 ⁻³
	25	41.3		0.605	2.13	1.44*10 ⁻⁴	1.60*10 ⁻²
Sagamihara Creep Test1	10	70	0.4	0.143	1.62	2.43*10 ⁻⁴	6.94*10 ⁻⁴
	25	63.9		0.391	1.47	3.13*10 ⁻⁶	2.11*10 ⁻³
	35			0.5	1.30	4.11*10 ⁻⁴	3.05*10 ⁻³
Sagamihara Creep Test2	25	70		0.357	1.47	1.37*10 ⁻³	1.92*10 ⁻³
	50			0.714	1.05	1.50*10 ⁻³	5.39*10 ⁻³

の要因として、高いせん断応力レベル $q/q_{\max}$ におけるクリープ荷重が、内部構造を著しく損傷し、弾性係数の大きな低下をもたらしていることが考えられる。上記クリープモデルの関係で言うと、実験では図 5 を見てもわかるように $q=50\text{kgf/cm}^2$ のクリープ後に破壊時軸ひずみ ϵ_f は相当増加しているが、このことをモデル化では無視していることが挙げられる。

6. まとめ

堆積軟岩の三軸クリープ試験においてクリープ変形を正確に求めるためには、ひずみの局所的な測定が必須である。また、載荷途中でひずみ速度を急変させた三軸試験は、応力・ひずみ曲線のひずみ速度依存性を調べるうえで有効である。本研究で用いた砂質軟岩・泥質軟岩には、過去の応力・ひずみ履歴に関わらず、ひずみ速度に応じた固有の応力・ひずみ曲線を辿っていく isotach 特性が認められ、その特性を用いてクリープ変形の予測を行った。その結果、高いせん断応力レベルを除いて、実測値と計算値はよく一致し、段階的なクリープ載荷やひずみ速度履歴の影響を受けたクリープ変形量を良く表現できた。今後は、さらにデータを蓄積し、より一般的なひずみ速度履歴を含めた応力・ひずみ関係を予測する方法から原位置挙動・原位置試験結果との関連を検討していきたいと考えている。

7. 参考文献

- 龍岡文夫, 小高猛司, 王林, 早野公敏, 古関潤一: 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文報告集, No. 561/III-38, pp. 1-17, 1997. 3.
- 井上昭生, 孫蘇明, 栗原敏広, 龍岡文夫, 古関潤一: 多々羅大橋 2P 基礎の施工時沈下の数値解析, 第 33 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1293-1294, 1998. 9.
- 天谷宗徳, 濱谷正司, 佐藤剛司, 古関潤一, 龍岡文夫: 変位制御微小繰返し三軸載荷装置における AC サーボモーターの利用, 地質と調査, 通巻 73 号, pp. 46-50, 1997. 9.
- 高橋輝, 早野公敏, 佐藤剛司, 古関潤一, 龍岡文夫: 堆積軟岩のクリープ試験における各種の変位測定方法の比較, 第 33 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 1197-1198, 1998. 9.
- 早野公敏, 佐藤剛司, 古関潤一, 龍岡文夫: 局所ひずみ測定を用いた三軸圧縮試験による軟岩の変形特性, 地盤工学会「岩の一軸および三軸圧縮試験の方法と結果の適用に関するシンポジウム」, pp. 113-116, 1998. 5
- Suklje, L.: Rheological aspects of soil mechanics, Wiley-Interscience, London, 1969.
- 桃谷尚嗣, 石井高幸, 龍岡文夫: 正規圧密粘土における変形特性のひずみ速度依存性と非排水クリープの予測, 第 33 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp. 615-616, 1998. 9.
- 西好一, 岡本敏郎, 江刺靖行: 各種載荷条件下における泥岩の強度-変形特性とその統一的解釈, 土木学会論文報告集第 338 号, pp. 149-158, 1983.
- 趙顕, 大久保誠介, 福井勝則: 周圧下での三城目安山岩のクリープ, 資源と素材, Vol. 111, pp. 543-548, 1995.