

粘土の非排水変形挙動における ISOTACHモデルの適用性について

谷口 浩二¹・澁谷 啓²・三田地 利之³

¹正会員 工修 株式会社ドーコン (元 北海道大学大学院 学生)
(〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

E-mail: kt1444@docon.jp

²正会員 Ph.D. 工博 北海道大学大学院 助教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: shibuya@eng.hokudai.ac.jp

³フェロー会員 工博 北海道大学大学院 教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: mitachi@eng.hokudai.ac.jp

等方圧密した飽和粘性土供試体を用いて、ひずみ速度およびひずみ加速度を制御した一連の非排水三軸圧縮試験を行い、ひずみ速度効果およびひずみ加速度効果に関する実験的知見を得た。これらの実験結果に基づいて、非可逆ひずみと非可逆ひずみ速度をパラメーターとした isotach(アイタック)モデルにより、広範囲なひずみにおけるせん断時の応力～ひずみ関係の時間依存性を評価した。さらに、非排水クリープおよび非排水リラクゼーション過程におけるひずみおよび応力の経時変化に関する予測式を導き、実測値との比較検討から、これらの時間依存性挙動の予測における isotachモデルの適用性を検討した。

Key Words : isotach model, stress-strain behaviour, time effects, undrained creep, undrained relaxation

1. はじめに

粘性土のせん断挙動の時間依存性を表現するための構成式は多種多様である^{1),2)}。土要素の降伏が連続的である場合、図-1に示すように非排水せん断時の三軸供試体の応力～ひずみ関係を例にとると、現在の応力が現在のひずみや載荷開始からの経過時間により一義的な支配を受けるとする Isochronous(アイソクロナス)型モデルでは、軸ひずみ速度一定試験において偏差応力～軸ひずみ曲線上の状態aから状態cに至るまでに要する時間と、状態aで非排水クリープ(a→b)させた後に再載荷して状態cの近傍に到達するまでの時間は等しいことを仮定しており、これは明らかに周知の実験事実と異なっている。さらに、より本質的な問題として、状態a～cに至る過程で状態の遷移は連続性を有しているにもかかわらず、時間原点を各々の状態により恣意的に選択することによって時間の流れに不連続が生じ、応力～ひずみ～時間関係における客観性を欠いていることが挙げられる^{3),4)}。

従って、土要素のひずみ量とひずみ速度はともに随時客観的に測定することが可能であり、式(1)のように現在の応力がその瞬間における全ひずみ ϵ

とその速度 $\dot{\epsilon}$ により一義的に支配されていると仮定した初期の isotach(アイタック)型モデル^{6),7)}を用いて表すことにより、応力ひずみ関係に客観的妥当性を持たせることが可能である。

$$F(\sigma, \epsilon, \dot{\epsilon}) = 0 \quad (1)$$

このことが粘性土の圧密・せん断挙動において、時間効果の解釈あるいは予測に関する isotach 型モデルの適用性を検討する上で最大の特長となる⁵⁾。

一方、龍岡ら²⁾は式(1)において非可逆ひずみ成分を考えることにより、小ひずみ域での isotach 特性を厳密に議論している。さらに、ひずみ速度を急

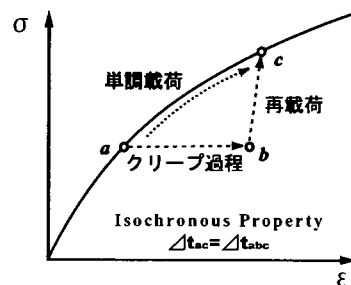


図-1 isochronous モデルの仮定

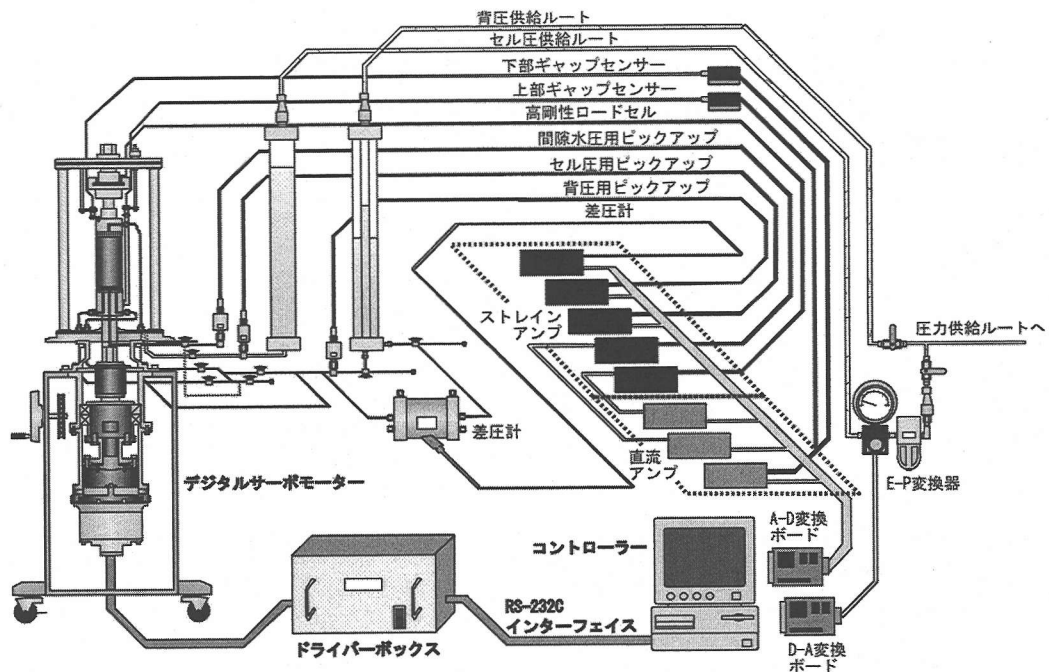


図-2 実験システム

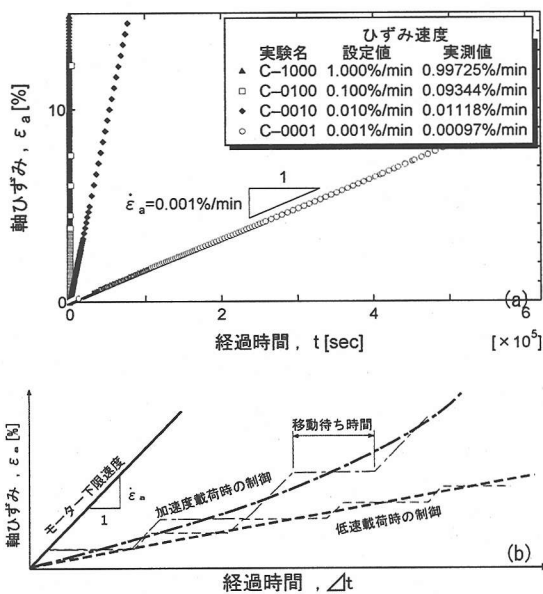


図-3 ひずみ速度制御図 (a:実測図, b:概念図)

変させた場合、応力～ひずみ関係がひずみ速度に固有な応力～ひずみ関係を一時的に逸脱することが報告されており、ひずみ速度に加えてひずみ加速度をパラメーターとしたモデル化が必要と主張している。本研究では、ひずみ速度及びひずみ加速度を制御可能な三軸試験システムを独自に開発して、室内再構成粘土試料を用いた非排水三軸圧縮試験を実施した。

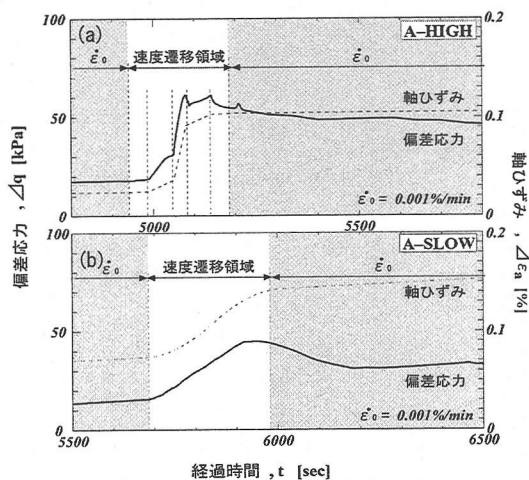


図-4 ひずみ速度の制御状況 (a:A-HIGH, b:A-SLOW)

一連の実験ではひずみレベルとして 10^{-5} (=0.001%) ~ 10^{-2} (=1%) に及ぶ広範囲のひずみにおけるひずみ速度およびひずみ加速度効果について実験的に究明し、さらに実験結果からフィードバックしたパラメータを用いて非排水クリープおよび非排水リラクゼーション過程におけるひずみおよび応力の経時変化のシミュレーションを行うことにより、粘土の時間効果における isotach モデルの適用性について検討している。

表-1 試験条件および結果一覧

試験ID	初期含水比	圧密条件	B値	軸ひずみ速度	最大 偏差応力	最大過剰 間隙水圧	最終 有効応力比 M	初期 弾性係数 E _{max}	弾性限界 軸ひずみ (ε _a) _{EL}
	%	kPa		%/min	kPa	kPa		MPa	%
C-1000	47.9		0.95	1.000	240.2	199.9	1.34	165	0.0070
C-0100	46.2	等方圧密	0.97	0.100	219.7	201.8	1.29	160	0.0050
C-0010	48.9		0.97	0.010	203.7	215.8	1.33	155	0.0048
C-0001	47.4	圧密圧力 300kPa	0.96	0.001	194.2	217.3	1.34	147	0.0045
A-HIGH	47.9		0.95	0.001 ←→0.1	198.2	215.3	1.24	155	0.0050
A-SLOW	49.7	載荷速度	0.96	0.001 ←→0.05	194.5	217.3	1.28	155	0.0060
R-COMBI	49.1	0.5kPa/min	1.00	0.100	204.6	210.2	1.28	148	-
R-LIMIT	50.1		0.99	0.100	221.1	219.7	1.36	155	-

2. 実験の概要

(1) 試験装置

試験装置には多機能三軸試験装置Mark-III^{8),9)}を用いた。図-2は、実験に用いた試験システムである。軸方向載荷システムにデジタルサーボモーターを搭載し、10nmオーダーの精度で軸ひずみを制御することが可能である。デジタルサーボモーターは高精度の変位制御に特化した載荷装置であるが、本研究では次項で説明する比較的簡単なコマンド形式による位置決め指令によって極めて低速度のせん断試験や加速度せん断試験を可能にした。

(2) 速度・加速度制御

公称高さ100mmの三軸供試体の軸ひずみ速度の制御は、デジタルサーボモーター単体で本来の機能として出力可能な速度範囲(10~0.02%/min)の下限値(=0.02%/min)よりもさらに小さい速度を実現するために、ソフトウェア上で新たな工夫を施した。プログラム上に設けた擬似低速化ルーチンによりモーターの移動を微小分割し、それぞれの制御間隔ごとに移動待ち時間を設定することによってひずみ速度を実用上0.0001%/minまで低下させた。図-3にその制御状況と概念図を示す。制御されたひずみ速度は実用上充分な線形性を有しており、長期にわたる実験において安定したひずみ速度の制御が可能であることを予備実験にて確認した。

また、擬似低速化ルーチンを応用して、ひずみ増分量と移動待ち時間を適宜調整することによって、ひずみ速度の連続的変化、すなわちひずみ加速度の制御を行った。図-4に、軸ひずみ加速度制御試験での実測データを示す。ある時刻においてひずみ速度を急変させた試験(A-HIGH)と、緩変させた試験(A-SLOW)のそれぞれにおける軸ひずみおよび偏差応力の変化をせん断開始からの経過時間に対してプロットしている。各試験において、速度遷移領域における軸ひずみ加(減)速度の絶対値がほぼ一定

になるように制御した。また、遷移領域での軸ひずみ速度の最大値はそれぞれの試験において0.1%/minと0.05%/minであった。

(3) 試料および実験条件

本研究で用いた試料は、粉末状態で市販されているNSF粘土である。一連の試験では、新しいバッチの試料(ρ_s=2.76g/cm³, w_L=54%, I_p=32)を用いたため、当該研究室でこれまでに報告¹⁰⁾⁻¹²⁾した旧バッチの試料(ρ_s=2.78g/cm³, w_L=54%, I_p=26)と一次的性質が若干異なる。まず、NSF粘土試料に蒸留水を加えて液性限界の2倍程度の含水比でスラリー状にし、負圧によって予圧密セルに段階的に引き込み、その後、そのまま真空に近い負圧の下でスラリー試料中に溶け込んだ気泡を体積膨張させながらハンマーによる衝撃により浮上させて飽和度を高めた。次に、予圧密セル内を大気開放した後に鉛直応力150kPaで10日間の一次元圧密を行った。このブロック試料を直径50mm、高さ100mmの円柱形に整形し、周面排水のためのろ紙(幅10mm、高さ120mm)を側面8方向に貼付けてゴムメンブレン(直径50mm、厚さ0.2mm)で覆った。三軸セル内において、供試体に200kPaの背圧を加えた状態で有効圧密圧力300kPaまで軸方向載荷速度0.5kPa/minで等方圧密した。一次圧密の終了は、3t法により判断した。

表-1は、試験条件および結果のまとめである。一定で異なる軸ひずみ速度でせん断したCシリーズ試験(4供試体)、せん断途中で加(減)速度をほぼ一定で変化させたAシリーズ試験(2供試体)およびRシリーズ試験(2供試体)を実施した。試験R-COMBIは、せん断中の任意の時点において非排水クリープ過程と非排水リラクゼーション過程を導入した試験、R-LIMITは後述する下限応力を求めるために実施した試験である。

3. 実験結果

(1) ひずみ速度の影響 (Cシリーズ試験)

図-5にCシリーズ試験の偏差応力と軸ひずみの関係を示す。適宜軸ひずみ ε_a とその非可逆成分 ε_a^{ir} を用いてデータを整理している。非可逆な軸ひずみ成分 $d\varepsilon_a^{ir}$ は、

$$d\varepsilon_a^{ir} = d\varepsilon_a - d\varepsilon_a^e \quad (2)$$

より求めた。弾性成分 $d\varepsilon_a^e$ は、

$$d\varepsilon_a^e = dq/E^e \quad (3)$$

で定義される。ここで割線ヤング係数 E^e は、別途実施した非排水せん断試験結果より、単調载荷中の異なる偏差応力レベルで0.002%の軸ひずみ振幅を用いて繰り返し载荷を行い、以下の実験式を得ている。

$$E^e = E_{max} \cdot (p'/p'_0)^{0.5} \quad (4)$$

ここで、 p'/p'_0 は非排水せん断中の平均有効主応力と等方圧密圧力($p'_0=300\text{kPa}$)の比、 E_{max} はせん断初期における初期弾性係数(=140.5 MPa)である。

なお、ひずみ速度が大きくなるにつれ、応力～ひずみ関係が非線形性を示し始める弾性限界軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{EL}^{13)}$ が大きくなっている(図-5c, 表-1参照)。

いずれにしても、0.01%以下の微小ひずみ領域か

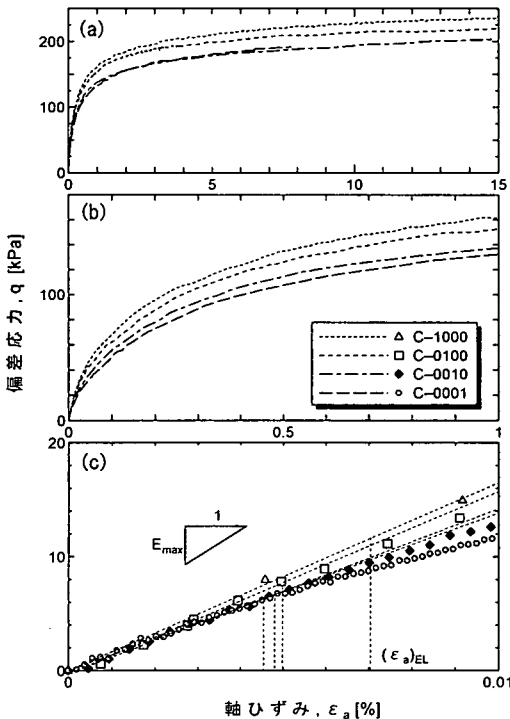


図-5 Cシリーズ試験の偏差応力～ひずみ関係

ら応力～ひずみ関係に及ぼす速度の影響が顕在化しており、 $\varepsilon_a > (\varepsilon_a)_{EL}$ では速度が大きい程剛性が大きいことが分かる。

図-6に有効応力経路の比較を示す。ひずみ速度が小さい程、同一の q において過剰間隙水圧の発生量が大きいことが分かる。

(2) 非排水クリープと非排水リラクゼーション (試験R-COMBI)

図-7に、経過時間、軸ひずみ速度および q を軸ひずみ ε_a に対してプロットしている。本試験では、ある偏差応力まで軸ひずみ速度一定(=0.1%/min)で単調せん断した後に、偏差応力一定の状態でも約24時間クリープを許した。その後軸ひずみ速度一定でせん断した後にリラクゼーションを許し、再度同じ軸ひずみ速度を用いてせん断した。クリープおよびリラクゼーションの後での再载荷に伴い、応力～ひずみ関係は固有の速度ラインに帰着する傾向を示すが、ひずみの進行に従ってその効果は逓減する。これは、試験中にも進行する非排水クリープの影響によって軸ひずみ速度が等しい状態の偏差応力の発現に対して差異が生じているものと推測される。

(3) ひずみ加速度の影響 (Aシリーズ試験)

本シリーズの2つの試験では、それぞれ単一の供試体を用いて、軸ひずみ速度を段階的に変化させることにより、試料の品質のバラツキに影響されない応力～ひずみ関係におけるひずみ速度の変化の影響を調べた。図-8及び図-9は、それぞれ試験A-HIGH及びA-SLOWの結果である(図-4, 表-1参照)。

これによると、加(減)速度の大小によらず、軸ひずみが1%以下のとりわけ小ひずみ域では、速度

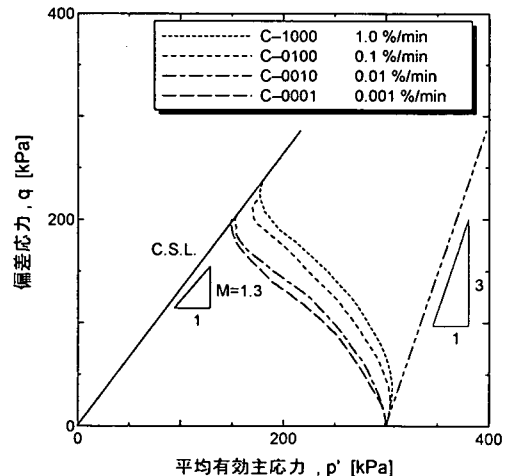


図-6 Cシリーズ試験の有効応力経路

変化直後に見かけ上の高剛性領域を伴って次のひずみ速度固有ラインに遷移する挙動、すなわち isotach 挙動が顕著に認められた。一方、軸ひずみが1%程

度を超えると、加(減)速度を与えた場合に固有の速度ラインから応力~ひずみ関係が逸脱する現象が観察された。従って、粘土の isotach 性は主に降伏前の小ひずみ域において顕著であり、これ以降はひずみ加速度などの要因により isotach 性が保持されないことが推測される。

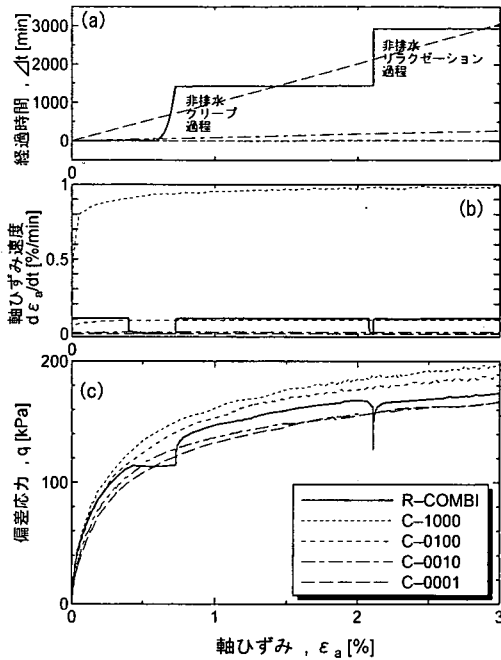


図-7 非排水クリープ及び非排水リラクゼーション過程における応力~ひずみ~時間関係

4. isotachモデルの適用性の検討

(1) simple isotachモデル

a) 基本式

simple isotach モデルは特定のひずみ速度における応力~ひずみ関係を規準として任意のひずみ速度での挙動を説明しようとするモデルである²⁾。

今、規準とする非可逆ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^r$ に対応する偏差応力 q_0 と、任意の非可逆ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^r$ に対応する偏差応力 q を考えると次の実験式が成り立つ²⁾。

$$\ln(q) = \ln(q_0) + b \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^r}{\dot{\epsilon}_0^r}\right) \quad (5a)$$

$$q = (q_{\max})_0 f(x) \left(\frac{\dot{\epsilon}^r}{\dot{\epsilon}_0^r}\right)^b \quad (5b)$$

上式が非排水せん断における simple isotach モデルの基本形となる。ここで $(q_{\max})_0$ は規準とする非可逆

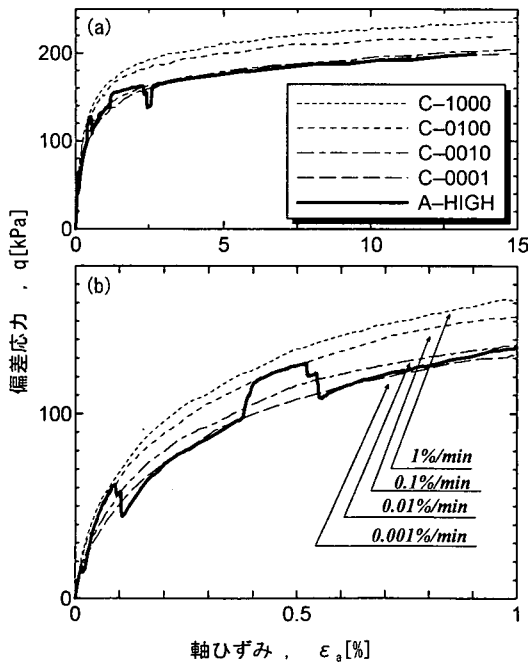


図-8 A-HIGH 試験における偏差応力~ひずみ関係

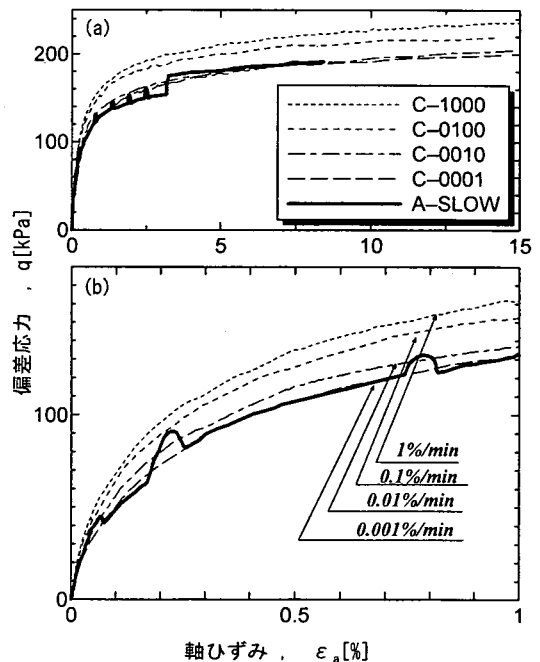


図-9 A-SLOW 試験における偏差応力~ひずみ関係

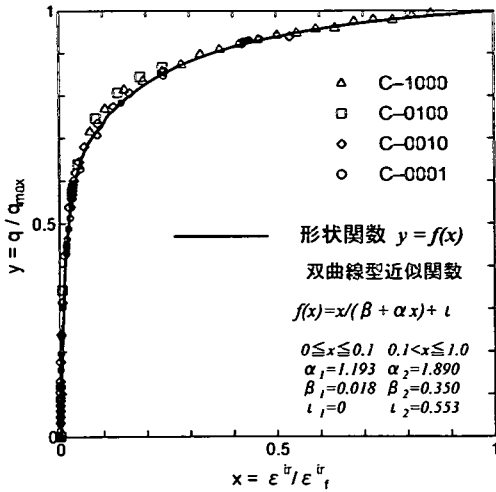


図-10 形状関数 $f(x)$

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^r$ における圧縮強度, $f(x)$ および b は以下に説明する形状関数と動的応力勾配である。

b) 形状関数 $f(x)$

異なるひずみ速度における応力～ひずみ曲線群 (C シリーズ試験) を, $q/q_{\max} \sim \epsilon^r/\epsilon_f^r$ 関係を用いて正規化する方法を試みた(図-10)。ここで q_{\max} は圧縮強度, ϵ_f^r は q_{\max} 発現時における ϵ^r の値である。

この関係を形状関数 $f(x)$ として定義し, 次の双曲線型関数を用いて近似した。

$$f(x) = \frac{x}{\beta + \alpha_1 x} + l_1 \quad (6)$$

ここで $x = \epsilon^r/\epsilon_f^r$ である。広範囲のひずみにわたって高い近似率を満たすため, 応力～ひずみ関係を $0 \leq x \leq 0.1$ の小ひずみ域と $0.1 < x \leq 1$ の大ひずみ域に分割し, 各々の範囲内で係数 α , β , l を定めて, 関数としての連続性を保つために係数 l を調整した。

c) 動的応力勾配 b

式(5a),(5b)における係数 b は, 偏差応力に及ぼすひずみ速度効果を表現するパラメータであり, 動的応力勾配と呼ぶ。任意のひずみ速度を規準ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0^r$ を用いて正規化し, これを ξ とする。偏差応力に関しても q/q_0 を同様に定義する。図-11 は, C シリーズ試験において $\dot{\epsilon}_0^r = 0.01\%/min$ とした場合の ξ と q/q_0 の関係である。動的応力勾配 b はひずみレベルに起因する値の離散度が比較的小さいため, 実験を行った軸ひずみ速度の範囲内ではひずみ速度効果を的確に表現することが可能である。

d) 非排水クリープ挙動の予測式

式(5a),(5b)に示す simple isotach モデルにおいて, クリープ条件($dq=0$)を与えることにより次の予測式を得る²⁾。

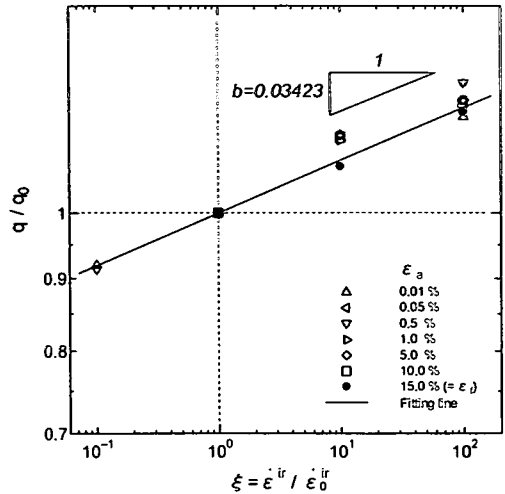


図-11 動的応力勾配 b

$$dq = \frac{\partial q}{\partial \epsilon^r} d\epsilon^r + \frac{\partial q}{\partial \dot{\epsilon}^r} d\dot{\epsilon}^r$$

$$= q \left[\frac{1}{\epsilon_f} \frac{\partial f(x)}{\partial x} d\epsilon^r + \frac{b}{\dot{\epsilon}^r} f(x) d\dot{\epsilon}^r \right] = 0$$

$$q \neq 0 \text{ であり, また } c_r = \frac{b \cdot f(x) \cdot \epsilon_f}{\partial f(x)/\partial x} \text{ とすると,}$$

$$d\dot{\epsilon}^r = -c_r \frac{d\epsilon^r}{\epsilon^r} - c_r \cdot d \ln(\dot{\epsilon}^r) \quad (7)$$

ここで c_r はクリープ係数である。

上式により, 非排水クリープ過程における非可逆ひずみ速度増分を与えることで, 任意の時間原点から開始されたクリープ量を算出することができる。

e) 非排水リラクゼーション挙動の予測式

非排水クリープと同様にして, 式(2)における $d\epsilon = 0$ の条件と形状関数の逆関数, 加えて E^e (式(4)参照) を用いることにより, 式(5b)から次式が得られる。

$$dt_{relax} = \frac{1}{\dot{\epsilon}_0^r} \exp \left[\frac{1}{c_r E^e} (q_i - q) - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{q}{q_i} \right) \right] d\epsilon^r \quad (8)$$

ただし, q_i はリラクゼーション開始時点における偏差応力である。また, E^e は偏差応力の関数であるから随時変化するが, その変化量は僅かであり, 近似的に $E^e = \bar{E}^e (const.)$ とする。式(8)の被積分関数を数値積分することによりリラクゼーション開始からの経過時間と応力の変化を予測することができる。

(2) new isotach モデル

a) 基本式

任意時点における非可逆ひずみとその時点の非可逆ひずみ速度に対応する動的応力は, 式(9)のように同一の非可逆ひずみにおける下限応力と瞬時の過

剰応力の和で表すことができる、と仮定する²⁾。

$$\sigma = \sigma^f(\epsilon^f) + \sigma^v(\dot{\epsilon}^v) \quad (9)$$

$$q = (q_{\max})_L \cdot f(x) + (q_{\max})_L \cdot f(x) \cdot v(\xi) \quad (10)$$

$$= (q_{\max})_L \cdot f(x) \{1 + v(\xi)\}$$

ここで、最大下限応力 $(q_{\max})_L$ は、後述する下限応力ひずみ関係における最大偏差応力より求める。

b) 速度関数 $v(\xi)$

ひずみ速度の変化による偏差応力の変化の割合を示すために下限的な応力ひずみ関係に相当するひずみ速度を用いて正規化した非可逆ひずみ速度 ξ により定義するのが速度関数 $v(\xi)$ である。 $v(\xi)$ はひずみ速度効果に関する仮定に基づき、以下の要件を満足するような関数である必要がある。

① $\dot{\epsilon}^v = \dot{\epsilon}_L^v$ のとき $\xi = \frac{\dot{\epsilon}^v}{\dot{\epsilon}_L^v} = 1, v(\xi) = 0$

[ひずみ速度効果の下限値の存在]

② $\xi \rightarrow \infty$ のとき $v(\xi) = C(\text{const.})$

[ひずみ速度効果の上限値の存在]

③ $v(\xi) \geq 0$ (単調増加関数)

[ひずみ速度効果の連続性]

ここで、 $\dot{\epsilon}_L^v$ は後述する下限ひずみ速度である。

従って図-11に示すように、Cシリーズ試験結果により得られた $\xi \sim q/q_{\max}$ 関係に対して指数関数で近似して $v(\xi)$ を求めた。

$$v(\xi) = \alpha(1 - \exp(1 - \xi^\beta)) \quad (11)$$

$$\alpha = 1.28 \quad \beta = 0.0196$$

この速度関数は、条件①、②および③を満足する。下限ひずみ速度では $v(\xi) = 0$ となり、また、条件②によりひずみ速度が無限大に発散するとき $v(\xi)$ は係数 α と等しくなる。ここで、図-12に示すように2つのisotachモデルにおいて偏差応力を非可逆ひずみの関数と非可逆ひずみ速度の関数の積として考えた場合に後者の項を便宜的にひずみ速度効果 $N(\dot{\epsilon}^v)$ と定義すると、 $N(\dot{\epsilon}^v)$ は2つのisotachモデルのひずみ速度効果を定量的に示すことができる。

図-13により、本実験に用いた粘土試料における $N(\dot{\epsilon}^v)$ は、室内実験で採用されているような典型的な応力 \sim ひずみ関係に対して非常に大きなひずみ速度(10¹⁰%/min)を適用した場合においても、後述する応力の下限的な状態($N(\dot{\epsilon}^v) = 1$)に対する強度増加は120%程度にとどまっており、またsimple isotachモデルにおけるひずみ速度効果が $\dot{\epsilon}_0^v$ からかけ離れるに従ってnew isotachモデルの予測値と比較して過大もしくは過小となっていることがわかる。

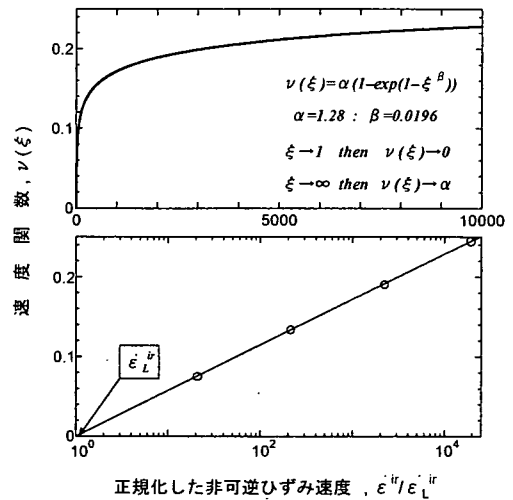


図-12 速度関数 $v(\xi)$

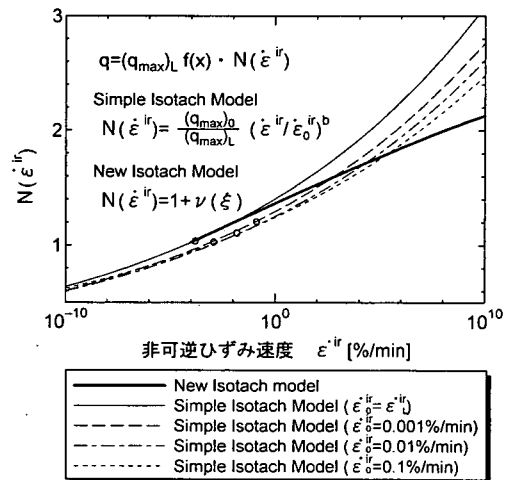


図-13 ひずみ速度効果

(c) 下限応力

図-14に示すように、ひずみ速度が低下しても偏差応力の変化が生じない、すなわちひずみ速度効果における応力ひずみ関係の下限状態の存在を仮定する。このときのひずみ速度を下限応力における非可逆ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_L^v$ と定義し $\dot{\epsilon}_L^v$ において発現する偏差応力を下限応力 q_L とする。 q_L は図-15に示すように、以下の①～⑥の手順を繰返して実験的に求めた。

- ① 任意のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_0$ による単調載荷を停止。
- ② リラクゼーション条件下で q の変化を追跡。
- ③ $\dot{\epsilon}_0$ を用いて q を僅かに除荷。
- ④ 除荷を停止し、一定時間(10分間)リラクゼーション条件下で q の変化を追跡。

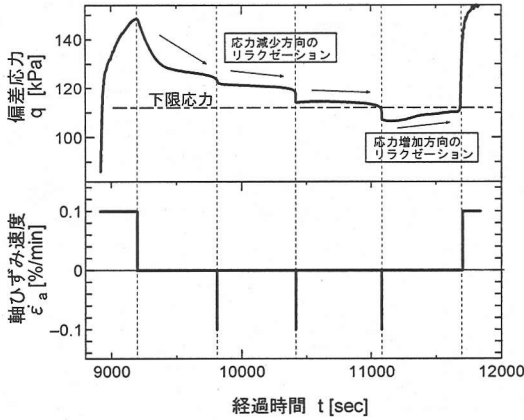


図-14 下限応力の概念

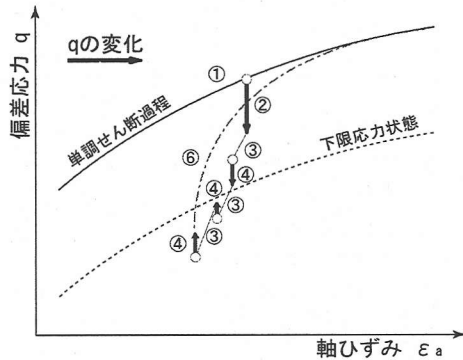


図-15 下限応力～ひずみ関係の求め方

- ⑤ リラクゼーション中の q の変化が正（圧縮側）になるまで③、④の手順を繰り返す。
- ⑥ $\dot{\epsilon}_0$ を用いて次のひずみレベルまで再載荷。

図-16 は、試験 R-LIMIT（表-1 参照）のリラクゼーション過程における q の変化量を示している。円の大きさが一定測定時間（上記④参照）における q の変化量に対応し、 q の減少と増加を区別して示している。まず、図-14 を用いて、軸変形を拘束したときの応力変化が発生しない応力～ひずみ関係を曲線で近似することにより下限応力～ひずみ関係を定めた。下限応力における非可逆ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_b^{ir}$ は下限応力の最大値を用いて最大偏差応力と非可逆ひずみ速度の関係より外挿して求めた。

d) 非排水クリープ過程の予測式

非排水クリープ条件下では $dq=0$ より以下のような式で表すことができる。

$$dq = (q_{\max})_L \left(\frac{\partial f(x)}{\partial \dot{\epsilon}^{ir}} (1 + \nu(\xi)) d\dot{\epsilon}^{ir} + f(x) \frac{\partial \nu(\xi)}{\partial \dot{\epsilon}^{ir}} d\dot{\epsilon}^{ir} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\epsilon_f} \frac{\partial f(x)}{\partial x} (1 + \nu(\xi)) d\dot{\epsilon}^{ir} + f(x) \frac{1}{\dot{\epsilon}_b^{ir}} \frac{\partial \nu(\xi)}{\partial \dot{\epsilon}^{ir}} d\dot{\epsilon}^{ir} = 0$$

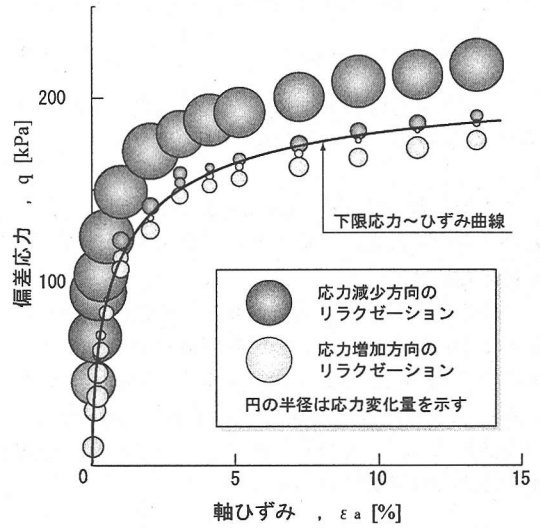


図-16 下限応力～ひずみ関係

両辺を積分して速度関数の逆関数を用いると、

$$\xi = \nu^{-1}(w_{CR}) = \nu^{-1} \left((1 + \nu(\xi_0)) \frac{f(x_0)}{f(x)} - 1 \right)$$

$$\dot{\epsilon}^{ir} = \frac{d\epsilon^{ir}}{dt} = \dot{\epsilon}_b^{ir} \cdot \nu^{-1}(w_{CR})$$

$$dt = \frac{d\epsilon^{ir}}{\dot{\epsilon}_b^{ir} \cdot \nu^{-1}(w_{CR})} \quad (12)$$

ここで、 w_{CR} は $w = \nu(\xi)$ とした場合、逆関数を用いて $\xi = \nu^{-1}(w)$ と表記できることから、非排水クリープにおける速度関数を表す。また、 ξ_0 および x_0 はそれぞれ非排水クリープ開始時点での ξ および x とする。式(12)により、非排水クリープ過程における微小時間増分とクリープひずみの関係を得ることができる。

e) 非排水リラクゼーション過程の予測式

非排水リラクゼーション過程では $d\epsilon = 0$ より、以下のように表すことができる。

$$d\epsilon = \frac{dq}{E^{eq}} + \frac{\partial}{\partial q} (\epsilon_f \cdot f^{-1}(x)) dq + \frac{\partial}{\partial \xi} (\epsilon_f \cdot f^{-1}(x)) d\xi = 0$$

$$\Rightarrow \left(\frac{1}{E^{eq}} + \frac{\epsilon_f}{\partial f(x)/\partial x} \frac{f(x)}{q} \right) dq + \frac{\epsilon_f}{\partial f(x)/\partial x} \frac{\partial \nu(\xi)}{\partial \xi} \frac{1}{1 + \nu(\xi)} d\xi = 0$$

ここで、 $f^{-1}(x)$ は形状関数の逆関数である。

両辺を積分して速度関数の逆関数で整理すると、

$$\xi = \nu^{-1}(w_{RX})$$

$$= \nu^{-1} \left((1 + \nu(\xi_0)) \cdot \exp \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x} \frac{q - q_0}{\epsilon_f \cdot f(x)} + \ln \left| \frac{q}{q_0} \right| \right] - 1 \right)$$

$$\Rightarrow dt = \frac{1}{\dot{\epsilon}_b^{ir} \nu^{-1}(w_{RX})} = \frac{\epsilon_f}{\dot{\epsilon}_b^{ir}} \frac{dx}{\nu^{-1}(w_{RX})} \quad (13)$$

ここで、 w_{rx} は前述の w_{cr} と同様に非排水リラクゼーションにおける速度関数、 q_0 は任意の微小時間増分における非排水リラクゼーション開始時点での q を示す。

式(13)により、非排水リラクゼーション過程において微小時間増分での任意の q に対する応力減少量を得ることができる。

以上より、非排水クリープと非排水リラクゼーションの経時変化は速度関数の逆関数を用いて表現することができ、従って、これらを組み合わせることによって、粘性土の非排水条件下における時間効果を統一的に表現することが可能である。

(3) 予測と実測の比較検討

図-17～19は、それぞれ非排水せん断、非排水クリープおよび非排水リラクゼーションにおける比較である。試験A-SLOW試験の応力～ひずみ関係の予測においては、simple isotachモデルの予測精度がnew isotachよりも明かに劣っている(図-17参照)。

simple isotachモデルでは、基準とするひずみ速度から大きくかけ離れた非常に遅いひずみ速度、あるいは逆に衝撃載荷試験のような速いひずみ速度でのひずみ速度効果を正確に予測できないようである。

一方、new isotachモデルでは、ひずみ速度効果の下限である下限ひずみ速度を用いてひずみ速度効果を客観的に定義するため、広範囲なひずみ速度の変化に対して統一かつ現実的な推定が可能である。

非排水クリープおよび非排水リラクゼーションにおける比較において、両モデルにおいて有意な差は認められない(図-18および図-19参照)。しかし、同様な理由で、クリープ速度がsimple isotachモデルにおける基準ひずみ速度より極端に大きいあるいは小さい場合には、simple isotachモデルの予測精度が悪くなることが推定される。従って例えば図-15に示した方法により、応力ひずみ関係の下限状態を実験的に求めることができれば、new isotachモデルを用いた非排水せん断挙動の予測の方が汎用性が高く、任意の時点におけるひずみ速度等を随時計測することによって、ひずみ速度効果を精度良く推定することが可能である。ただし、isotachモデルより導出された各式はあくまでも等方圧密供試体に対して適用されたものであり、また、ひずみの遷移を1方向のみに限定した上でその原点を定義している。

よって、一般の地盤の解析に適用する際には圧縮・膨張側のひずみの原点に関する検討を新たに行う必要がある。

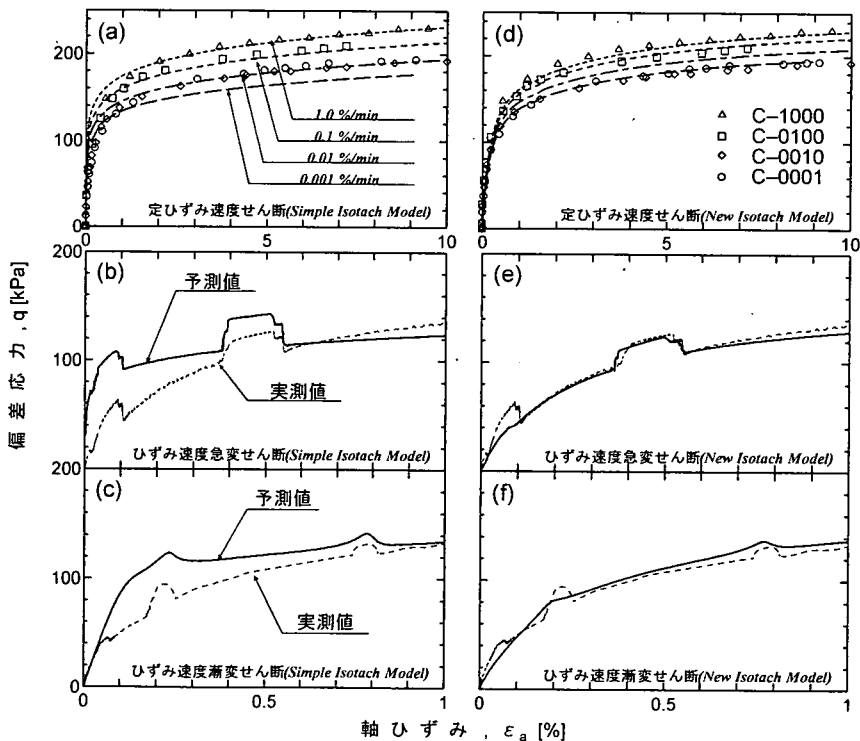


図-17 Isotachモデルによる非排水せん断時の応力～ひずみ関係の予測

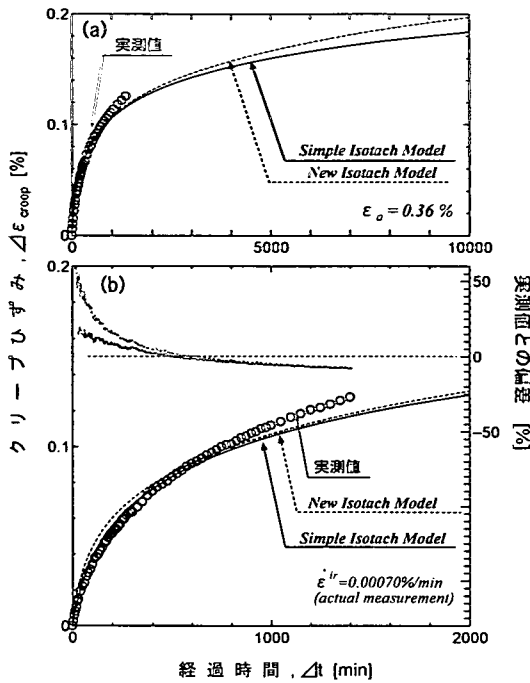


図-18 非排水クリープ挙動の予測

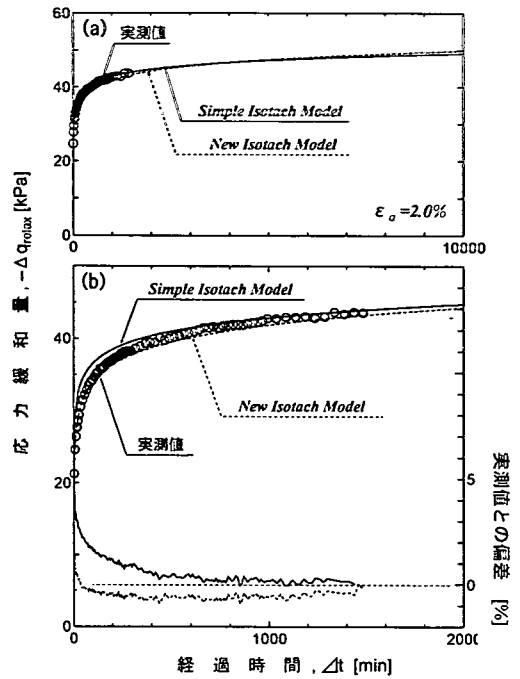


図-19 非排水リラクゼーション挙動の予測

5. 結論

軸ひずみ速度およびひずみ加速度を制御可能な三軸試験システムを独自に開発し、等方圧密した室内再構成飽和粘性土供試体を用いて、ひずみ加速度効果の検証を含んだ一連の非排水三軸圧縮試験を実施した。その結果、広範囲のひずみにおけるひずみ速度効果に関して以下の結論を得た。

1) 0.001%/min~1%/minの広範囲における一連の軸ひずみ速度一定試験から、ひずみ速度が大きい程同一ひずみでの剛性が大きいというひずみ速度効果が、0.001%の微小ひずみレベルから顕著に観察された。

2) 加速度一定試験から、ひずみレベルが大略1%より小さい小ひずみ域では、加速度の大小にかかわらず、非可逆ひずみと非可逆ひずみ速度をパラメータとしたisotach型モデルを用いて応力~ひずみ関係を評価できる。ただし、ひずみレベルが1%を超えるとひずみ加速度効果等を考慮する必要がある。

3) 2つ(simpleとnew)のisotach型モデルを用いて、非排水クリープおよび非排水リラクゼーション過程におけるひずみおよび応力の経時変化に関する予測式をそれぞれ導いた。

4) new isotachモデルのパラメータを決定する上で、ひずみ速度効果の客観的な指標を定めるための下限応力状態を定義し、下限応力を求める為の実験手法

を提案した。

5) simple isotachモデルでは、基準とするひずみ速度から大きくかけ離れた非常に遅いひずみ速度、あるいは逆に衝撃载荷試験のような速いひずみ速度でのひずみ速度効果を正確に予測できない。一方、new isotachモデルを用いると広範囲なひずみ速度において非排水変形挙動の統一かつ現実的な推定が可能である。

謝辞：一連の三軸試験の実施においては、函館工業高等専門学校 川口貴之助の協力を得た。

参考文献

- 1) Adachi, T., Oka, F. and Mimura, M. : Modelling aspects associated with time dependent behavior of soils, *Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behavior*, ASCE STP No.61, pp.61-95, 1997.
- 2) Tatsuoka, F., Santucci de Magistris, F., Hayano, K., Momoya, Y. and Koseki, J.: Some new aspects of time effects on stress-strain behaviour of stiff geomaterials, Keynote Lecture, Proc. of Second International Conference of Hard Soils and Soft Rocks, Napoli (Evangelista and Picarelli e.d), Balkema, Vol.2, 1998.
- 3) Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Kaneda, K. : Super-loading yield surface concept for highly structured soil be-

- behaviour, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.
- 4) Hashiguchi, K. and Okayasu, T. : Time-dependent elastoplastic constitutive equation based on the subloading surface model and its application to soils, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.4, pp.19-36, 2000.
 - 5) Imai, G. : Analytical examination of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, Keynote Lecture, Proc. of Int. Sympo. on Compression and Consolidation of Clayey Soils (IS-Hiroshima'95), Balkema, Vol.2, pp.891-935, 1995.
 - 6) Suklje, L. : Rheological aspects of soil mechanics, *Wiley-Interscience*, London, 1969.
 - 7) Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R. : Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of natural sensitive clays, *Geotechnique*, Vol.35, No.2, pp.159-180, 1985.
 - 8) Shibuya, S. and Mitachi, T. : Development of a fully digitized triaxial apparatus for testing soils and soft rocks, *Geotechnical Engineering*, Vol.28, No.2, pp.183-207, 1997.
 - 9) 黄聖春, 三田地利之, 澁谷 啓, 館市弘達:微小ひずみレベルから破壊に至るまでの乱さない粘土の変形と非排水強度特性, 土木学会論文集, No.589,III-42,pp.305-319, 1998.
 - 10) Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Degoshi, T. : Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay," *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.3,pp.365-375, 1995.
 - 11) 福田文彦, 三田地利之, 澁谷 啓 : 練り返し粘土の変形および強度特性に発現する誘導異方性, 地盤工学会論文報告集, Vol.37, No.4, pp.139-148, 1997.
 - 12) 川口貴之, 三田地利之, 澁谷 啓 : 練り返し飽和粘土の小ひずみ域における変形係数の定式化, 土木学会論文集 No.638/III-49, pp.179-191, 1999.
 - 13) Tatsuoka, F. and Shibuya, S. : Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, Keynote Lecture, Proc. of 9th Asian Regional Conference on SMFE, Bangkok, December, Vol.2, pp.101-170, 1991.

(2000. 12. 14 受付)

APPLICABILITY OF ISOTACH MODEL TO UNDRAINED DEFORMATION BEHAVIOUR OF CLAY

Kouji TANIGUCHI, Satoru SHIBUYA and Toshiyuki MITACHI

A series of undrained triaxial compression tests with controlled strain-rate and strain-acceleration was performed on reconstituted clay. On the basis of the test results, isotach models using irrecoverable strain and its strain rate were developed so as to evaluate time-dependent behaviour of the clay under undrained conditions. Applicability of these isotach models was in depth examined in relation to the undrained behaviour of clay subjected to shearing, creep and relaxation.