

長期繰返しせん断を受ける粘土の間隙水圧および変形予測

PREDICTION OF PORE PRESSURE AND DEFORMATION IN SOFT CLAY UNDER LONG-TERM CYCLIC SHEAR CONDITIONS

兵動正幸*・安原一哉**・村田秀一***・平尾和年****

By Masayuki HYODO, Kazuya YASUHARA, Hidekazu MURATA and Kazutoshi HIRAO

The purpose of the present paper is to depict the clay behaviour of long-term drained cyclic loading. The empirical relations of time-dependent shear deformation and cyclically induced pore pressure were formulated through the undrained cyclic triaxial test on plastic marine clay which is assumed to be close to an element test. An analytical model was presented by combination of the equation of induced pore pressure with the Terzaghi's type of consolidation theory. The model successfully explained the behaviour of generation and dissipation of pore pressure and volumetric change in clay during cyclic loading. It was suggested from the result of finite element analysis that the proposed model should be a clue to predict the deformation, settlement and stability of soft clay under long-term cyclic loading with inclusion of drainage.

Keywords: clay, cyclic triaxial test, partial drain, FEM

1. ま え が き

軟弱な粘土地盤が波浪や交通などの外力を受けるとき、地盤内要素には繰返しせん断応力が長期にわたり作用し、有害な沈下や破壊を生ずることがある。これらの外力により発生する地中応力は、地震時によるものとはかなり異なり、波形や周波数特性などに違いがあることもさることながら、これらの応力の作用がきわめて長期に及ぶことがこの問題を特徴付ける1つの要因となっていると考えられる。このような長期にわたる繰返しせん断応力の作用の結果、粘土地盤においては変形が徐々に進行し、ついにはそれを基礎とする構造物などに重大な影響を与えることが確認されている。わが国においても、軟弱地盤地帯における低盛土道路の交通荷重による沈下の事例¹⁾や波浪外力を受ける防波堤基礎地盤の支持力減少の問題²⁾などが報告され検討課題として取り上げられている。

長期の繰返しせん断に対する粘土の挙動はこれまでも数多く調べられており、その目的に応じてさまざまな方法で実験が行われてきた。その大部分は、繰返し三軸圧縮試験、繰返し単純せん断試験によるものであり、目的別に分けると、次の3つのグループに大別できるようなのである。

- ① 繰返しせん断に対する粘土の一般的挙動の把握
- ② 交通荷重に対する道路基礎地盤の安定性の評価
- ③ 波浪に対する海洋構造物基礎地盤の安定性の評価

ここで取り上げた項目の中には、地震等を対象とした短期の繰返しせん断に関するものは含まれていない。上記のほとんどは、数百回から数十万回にも及ぶ繰返しせん断に対するものであり、それぞれの目的に応じて初期および繰返し応力条件、繰返し回数、破壊の定義などが異なっている。

①に関する研究は、特に具体的な現場の対象は明らかではないが、初期圧密方法や載荷速度の違いによる影響、間隙水圧の測定方法など基礎的検討が行われたものである。これに属するもので、初期の代表的研究として Sangrey ら³⁾の研究が挙げられる。Sangrey らは、不攪乱粘土を用いて等方、異方、過圧密のそれぞれの圧密条件から圧縮側片振りの繰返し軸応力を作用させ、応力・ひずみ特性を調べるとともに、繰返しせん断時の有効応

* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 正会員 工博 西日本工業大学教授 土木工学科
(〒800-03 福岡県京都郡刈田町大字新津 1633)

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

**** 正会員 西日本工業大学助手 土木工学科
(〒800-03 福岡県京都郡刈田町大字新津 1633)

力経路を示した。次に、繰返しせん断試験時における間隙水圧の測定方法など試験精度の向上をはかったものとして以下の研究が挙げられる。まず、Hydeら^{4),5)}は、ペDESTALの端面摩擦除去や間隙水圧の供試体内での測定など試験精度の向上に努める一方、クリープ試験結果との対応から、独自の繰返し載荷に対する変形の定式化を行った。さらに、松井ら^{6),7)}は、間隙水圧の測定精度と載荷周波数について検討し、また独自の間隙水圧予測式を提案した。

②の交通荷重の問題に関しては、古くから繰返し三軸圧縮試験により路盤材料を中心に検討が行われてきたが、基礎地盤内にもその影響が及ぶとして、最近は主に基礎地盤内の粘土を対象に研究が進められている。Yamanouchiら⁸⁾やYasuharaら⁹⁾は、高塑性の海成粘土を対象に繰返し三軸圧縮試験を行い、交通荷重に対する粘土地盤の一次元的沈下予測を行った。さらに、著者ら^{10),11)}は、繰返し三軸圧縮試験結果を有限要素解析と組み合わせ、沈下の三次元的予測方法の提案を行った。また、Raymondら¹²⁾は、粘土の繰返し三軸圧縮試験を行い、道路の舗装設計を考慮した具体的な破壊の定義を示した。

③の波浪に関しては、Andersenらの一連の研究^{13)~15)}が挙げられる。Andersenらは、不攪乱の海成粘土に対して繰返し三軸圧縮試験と繰返し単純せん断試験を実施し、海洋構造物基礎の設計上の立場から、粘土地盤の繰返しおよび残留せん断ひずみ量を評価し得るノモグラムを作成した。また安原ら¹⁶⁾は、繰返し単純せん断試験により、非排水繰返しせん断後に再圧密試験を行い、長期にわたる波浪を受けた海洋構造物基礎地盤の沈下性状について調べた。粘土の再圧密に関する類似の研究は地震時を対象としたものであるが、大原ら¹⁷⁾および鈴木¹⁸⁾によっても行われ再圧密特性に及ぼす繰返しせん断履歴の影響が調べられた。

本研究の主眼は、飽和粘土の長期にわたる繰返しせん断に対する挙動をとらえ、実際の問題へ適用可能な手法を見出すことにある。そのためには、要素試験→モデル化→模型実験→現場への適用、というプロセスを踏まえる必要があると考える。長期の繰返しせん断が作用する間、地盤内の粘土要素は、過剰間隙水圧の発生と消散が組み合わされた部分排水状態と考えられる。本研究では、このような条件下の地盤の変形を評価するために力学的モデルを作成し、排水繰返しせん断時における変形量の算出を試みた。ここでは、非排水繰返し三軸圧縮試験を要素試験、排水繰返し三軸圧縮試験を模型実験とみなして議論を進めた。

2. 長期繰返しせん断を受ける粘土の変形のメカニズムおよび試験方法

粘土の長期繰返しせん断に対する変形の主要因は、次の2つに大別されると考えられる。

① 非排水繰返しせん断によるせん断変形

② 発生した過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化

①の要因は、定体積における変形であり体積ひずみは生じないが、方向によって収縮または膨張側の垂直ひずみを与える。②は、上昇した間隙水圧の逐次消散に伴う変形であり、変形の進行は粘土の透水性と関係する。粘土は透水係数が小さいので、各サイクルで発生する間隙水圧はそのサイクルでは消散しきれず、いわゆる部分排水状態になることが想像される。しかし、繰返しせん断が長期に及ぶ場合、間隙水圧の生成量が繰返し回数の増加とともにしだいに減少していき、ある時点以降は間隙水圧消散分が発生分を上回るようになって、最終的には間隙水圧は消失すると考えられる。このような間隙水圧の消散により体積ひずみが累積していくのであるが、その量には排水状態なら生じるはずの繰返しせん断によるダイレイタンス成分が含まれており、かなりの大きさになると思われる。実際の変形は、これら2つの要因が組み合わされ、時間とともに進行していくものと考えられる。

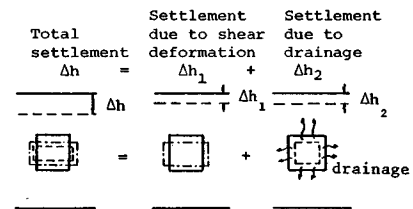


Fig.1 Schematic diagram for explaining the settlement of ground due to long-term cyclic loading.

水平地盤の沈下の問題にこの考え方を適用するとFig.1のような模式図が考えられる。つまり、全体の地盤沈下は、非排水せん断によるせん断変形の鉛直成分と発生間隙水圧の消散による体積変化の鉛直成分の和で表わされることが示されている。これら2つの要因に基づく変形を評価するために、Fig.2に示す3つのタイプの繰返し三軸圧縮試験を行った。

タイプAは、供試体圧密後非排水繰返しせん断を行うもので、所定の振幅をもつせん断応力の繰返し載荷に対する残留間隙水圧および残留せん断ひずみの評価を目的とする。

タイプCは、圧密後非排水で適当な回数の繰返しせん断を行い、その後発生した間隙水圧を静的に消散させる

ものであり、繰返しせん断後の再圧密試験である。ここでは、間隙水圧の消散に伴う体積ひずみを測定し、体積圧縮係数や透水係数などを求め、これらの定数に及ぼす繰返しせん断履歴の影響について調べる。なお、タイプAとタイプCは同じ非排水せん断過程を含んでいるが、このように異なるタイプの実験として行ったのは、繰返しせん断による間隙水圧蓄積後（Aタイプ）および消散後（Cタイプ）の静的非排水強さを調べることを意図したからである¹⁹⁾。しかし、この問題は本文では取り扱わない。タイプADは、圧密後排水コックを開放したままで排水を許す形で繰返しせん断を加えるものである。このような排水繰返しせん断試験においては、載荷速度に比べて粘土の透水係数が小さいために、繰返しせん断中間隙水圧は供試体内で分布し、いわゆる部分排水状態となると考えられる。現地盤でもこれと同様の部分排水状態が想定されるので、この実験を模型実験とみなして行う。この状態に対応する解析モデルを作成し、実験結果と比較検討する。

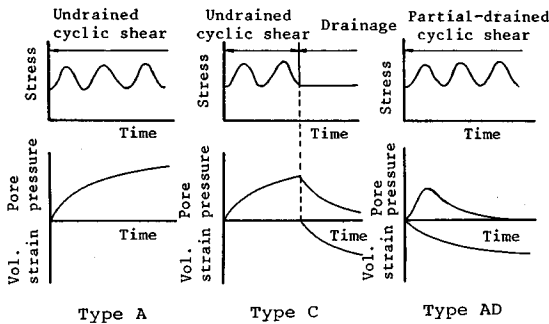


Fig. 2 Three types of cyclic triaxial tests performed in this study.

実験に用いた試料は乱した有明粘土であり、物性値は、 $G_s=2.65$, $w_L=123\%$, $I_p=69$, $C_c=0.70$, $C_s=0.163$, $\phi=40^\circ$ であった。試料は攪乱後 0.6 kgf/cm^2 で予圧密され、直径 3.5 cm 、高さ 8.75 cm に成形された。間隙水圧は、下部ペダスタル中央に埋め込まれた直径 3 mm のポーラスストーンを通じて間隙水圧計で測定され、排水は、供試体側面に巻いたペーパードレーンを通じ、下部ペダスタル側面よりセル外の2重管ビューレットへと行われた。繰返し三軸圧縮試験の条件は Table 1 に示すとおりであり、初期圧密応力 $\sigma_c=100, 200, 300 \text{ kPa}$ の3種類の等方応力で圧密を行った後、種々の大きさの軸応力 $\Delta\sigma_a$ を片振りで圧縮方向に 1 Hz の周波数で繰返し載荷した。ここで、載荷周波数 1 Hz の適用は、速度効果の問題、間隙水圧の一様性などの面から重要な検討課題ではあるが、過去における安原ら²⁰⁾による検討結果や、供試体寸法が比較的小さいこと、実験の効率化などを考

Table 1 Conditions of cyclic triaxial tests on Ariake Clay.

Test No.	σ_c (kPa)	$\Delta\sigma_r$ (kPa)	N (cycle)	w_i (%)	e_c
A-1	200	40	3600	95.6	2.021
A-2	200	80	3600	93.3	1.982
A-3	200	100	3600	90.6	1.953
A-4	200	120	3600	93.8	1.960
A-5	200	140	3600	90.5	1.871
A-7	200	100	172800	92.5	1.934
A-10	200	120	172800	93.2	1.893
A-15	100	36	3600	93.8	2.086
A-16	100	64	3600	94.5	2.071
A-17	100	86	3600	93.3	2.084
A-18	300	76	3600	94.1	1.822
A-19	300	137	3600	95.6	1.861
C-1	200	100	3600	90.9	1.895
C-2	200	120	172800	91.7	1.896
C-3	200	140	3600	92.7	1.895
C-4	200	80	172800	91.6	1.950
C-5	200	80	3600	92.2	1.915
C-6	200	80	17280	91.4	1.850
C-7	200	80	360	93.3	1.952
C-10	200	80	5000	91.9	1.972
C-11	200	80	87000	92.4	1.869
C-12	200	80	3600	91.2	1.894
AD-1	100	40	3600	94.3	2.013
AD-2	100	60	3600	93.1	2.000
AD-3	100	80	3600	93.0	2.039
AD-4	200	80	3600	93.1	1.895
AD-5	200	120	3600	93.5	1.850
AD-6	200	160	3600	92.5	1.861
AD-8	300	120	3600	92.1	1.708
AD-9	300	180	3600	92.7	1.688
AD-10	300	240	3600	93.2	1.741

慮して、ここではこの周波数を採用した。繰返し回数は、3600回を標準としたが、さらに長期の繰返しせん断に対応させるために、最大172800回まで実験を行った。

3. 非排水繰返しせん断試験における間隙水圧およびせん断ひずみとその定式化

軸圧片振りの非排水繰返し三軸圧縮試験においては、繰返し回数の増加に伴い体積は一定であるが、間隙水圧が上昇し、軸ひずみが残留し増加していく。本実験で実測される量は、軸ひずみと間隙水圧である。これらは、初期圧密圧、繰返し軸応力、およびその繰返し回数に依存する。すなわち、同一の試験条件においてこれらは、繰返し軸応力 $\Delta\sigma_a$ と初期圧密応力 σ_c の比である応力比 $\Delta\sigma_a/\sigma_c$ と繰返し回数 N によって表わされるようである。そこで、残留軸ひずみ ϵ_a と残留間隙水圧 u_g をいずれも応力比 $\Delta\sigma_a/\sigma_c$ と繰返し回数 N の関数形として定式化を試みたところ、以下のような指数関数表示によるものが妥当なものとして得られた。さらに、重回帰分析により定数の決定と重相関係数を求めたところ以下に示す結果となった。

$$\epsilon_a = 0.096 (\Delta\sigma_a/\sigma_c)^{1.745} (\log_{10} 10 N)^{1.763} \dots \dots \dots (1)$$

(重相関係数 $R=0.933$)

$$u_g/\sigma_c = 0.064 (\Delta\sigma_a/\sigma_c)^{1.418} (\log_{10} 10 N)^{1.535} \dots \dots \dots (2)$$

(重相関係数 $R=0.936$)

これらの実験式の特徴を述べると、軸ひずみおよび間

隙水圧ともに、圧力比の変化には比較的敏感に反応するが、繰返し回数については対数で表わされるため繰返し初期において大きく変化するものの、回数の増加に従って増加率が低くなる傾向を表わしている。このような式形は長期繰返しせん断時の挙動を表現するものに適していると思われる。回帰による相関係数は、軸ひずみ、間隙水圧ともに $R=0.93\sim 0.94$ となり、高塑性の有明粘土にしてはかなり高い相関性を示しているようである。

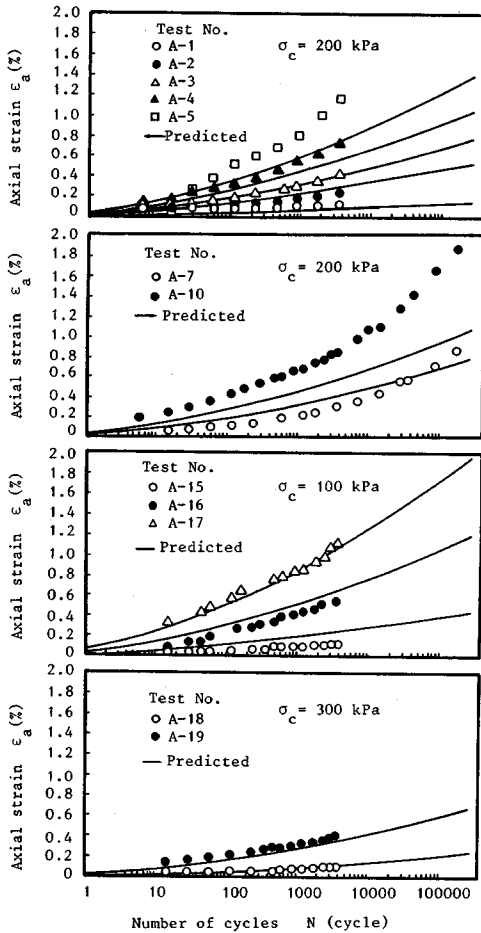


Fig. 3 Variations of axial strain with number of load cycles (comparison of observed with calculated results).

Fig. 3 に残留軸ひずみと繰返し回数の関係、Fig. 4 に残留間隙水圧と繰返し回数の関係をそれぞれ示す。Table 1 に挙げた A タイプの実験ケースすべてについて実験結果と作成された実験式によるそれぞれの予測結果が示されている。Fig. 3, 4 中、プロットが実験結果であり、実線が予測結果である。Fig. 3, 4 は、初期等方圧密応力 100, 200, 300 kPa のそれぞれの圧密応力ごとに分けて示されている。軸ひずみには実験データに若

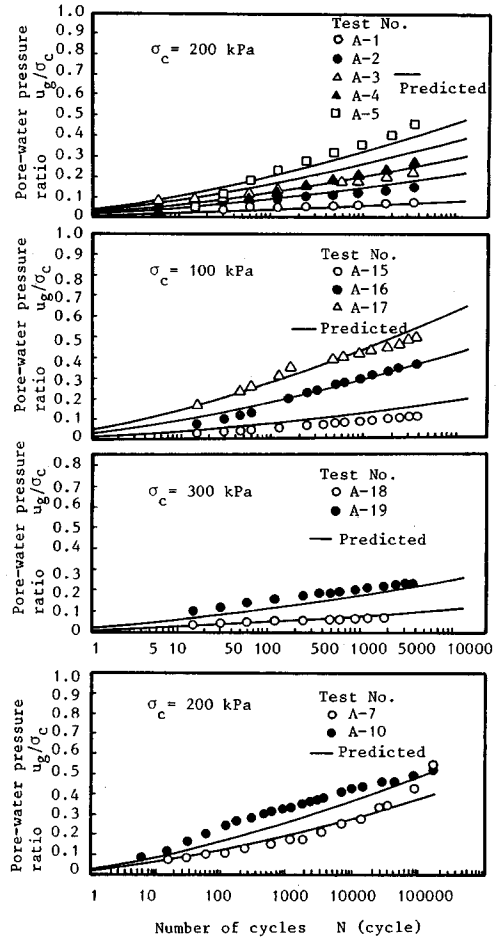


Fig. 4 Variations of pore pressure with number of load cycles.

干ばらつきがみられ、予測結果との間に幾分差異がみられるもののおおむね良好な対応が認められる。また、間隙水圧においては、両者はかなりよく一致していることが認められる。

4. 排水繰返しせん断試験における間隙水圧および体積ひずみとその予測

(1) 部分排水繰返しせん断の概念

これまで繰返しせん断における部分排水の問題は、主として砂地盤の液状化にかかわる問題として取り上げられてきた。Umehara ら²¹⁾は、飽和砂の繰返しせん断において、発生する間隙水圧の一部を消散させて液状化強度が増加する程度を調べ、透水係数、排水距離、繰返し載荷周波数などの関係で整理を行った。O-hara ら²²⁾は、液状化防止工法としてのグラベルドレーンの効果を表わすために、部分排水状態における間隙水圧発生量の定量的評価を行った。これらの研究によれば、各サイクルにおいて発生した間隙水圧にある程度以上の消散を伴

う場合には、後続のサイクルの間隙水圧発生に影響が現われることが示されている。

粘土は砂に比べると透水性がきわめて低いので、地震のような短期の繰返しせん断に対しては非排水状態に近いと考えられるが、長期繰返しせん断時においては間隙水圧の消散は、重要な検討項目になってくると考えられる。ここで、粘土の部分排水繰返しせん断時の間隙水圧および体積ひずみの変化過程を表わすモデルとして Fig. 5 の概念を仮定する。図中、上部に示す曲線が非排水、中央が部分排水状態における間隙水圧の変化過程であり、下部の曲線がそれに伴う体積ひずみの累積過程を描いたものである。

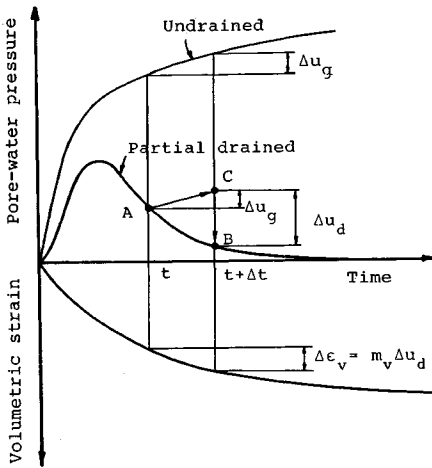


Fig. 5 Schematic diagram for pore pressure and volumetric strain in partial-drained condition.

(2) 解析モデル

Fig. 5 の概念に基づき解析モデルを作成する。図に描かれているように任意の時刻 t から微小時間後 $t + \Delta t$ までの間隙水圧の挙動は A→B であるが、解析モデルとして同時刻域での非排水の間隙水圧発生量に加えられ、かつ間隙水圧の一部が消散されるという経路、つまり A→C→B をたどるという設定を行った。ここで、微小時刻域における間隙水圧消散量は粘土の透水性を考えるとかなり小さいので間隙水圧発生量は排水の影響を受けず、非排水繰返しせん断試験結果から直接予測できるものと考えた。その間の体積ひずみ増分は、C→B による間隙水圧減少、つまり有効応力の増加によって生じるものと考えられ、間隙水圧の減少量 Δu_d と体積圧縮係数 m_v を用いて次式で表わされるものとした。

$$\Delta \epsilon_v = m_v \Delta u_d \dots \dots \dots (3)$$

間隙水圧の発生およびその一部消散の解析は、砂の液化化問題において Terzaghi 型の圧密方程式を有限要素化して用いた Booker ら²³⁾の研究にならい次式を用いて

行った。

$$\{\nabla\}^T \{k\} \{\nabla u / \gamma_w\} = m_v (\partial u / \partial t - \dot{\psi}) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\{k\}$: 透水マトリックス、 γ_w : 水の単位体積重量、 ∇ : 微分演算子、 $\dot{\psi}$: 非排水繰返しせん断による単位時間当たりの間隙水圧発生分である。 ψ は式 (2) を用いて次のように表わされる。

$$\psi = \partial u_d / \partial t = 0.043 \sigma_c (\Delta \sigma_d / \sigma_c)^{1.18} (\log_{10} 10 N)^{0.535} (f / N) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 f は繰返しせん断の周波数である。この方法では、本来繰返しせん断によって引き起こされるであろうダイレイタンスーが、非排水状態で間隙水圧の上昇という形で現われ、さらにこの間隙水圧が少しずつ消散されていくことにより体積ひずみが生じていくという過程を追跡していくことになる。

(3) 排水繰返し三軸圧縮試験および FEM 解析

この現象を室内実験によってシミュレートするために、排水条件で繰返し三軸圧縮試験を行った。供試体および荷条件は非排水のものと同じであるが、繰返しせん断中に発生する間隙水圧の一部が供試体周面に巻かれたペーパードレーンを通じて排出される。すなわち、間隙水の流れは供試体の半径方向のみに生じることになるので軸対称流れの問題として取り扱うことが可能と思われる。なお、荷周期に比べ透水係数が小さいので、間隙水圧は各サイクルにおいて完全に消散しきれず、供試体内において境界条件に基づき分布すると考えられる。間隙水圧は下部ペダスタル中央のポラスストーンに接する箇所について測定し、体積ひずみは二重管ビューレットへの排水量を測定することにより求めた。

ここで行われた排水繰返し三軸圧縮試験では、供試体内の各所で間隙水圧の発生と一部消散が生じているが、その程度は排水境界との位置関係によって異なると考えられる。この実験供試体を対象に有限要素法により、繰返しせん断時の間隙水圧発生と消散および体積ひずみの増加についての挙動をシミュレートした。Table 1 の AD-1~AD-10 の試験条件に対しておのおの解析を行った。解析のための要素分割は Fig. 6 に示されるとおりである。厳密には Fig. 6(a) のように供試体全域を区分すべきであるが、ここでは半径方向の軸対称流れのみが対象であるので、Fig. 6(b) のように半径方向に一の要素を取り出して行っても等価であることを確認し、簡素化されたモデルを用いた。

(4) パラメーターの決定

解析に必要なパラメーターは、体積圧縮係数 m_v と透水係数 k である。これらは、繰返しせん断により発生した間隙水圧を消散させ、体積ひずみを生ぜしめる程度を表わすものであるから、その決定方法としては、非排水繰返しせん断後蓄積された間隙水圧を消散させる再圧

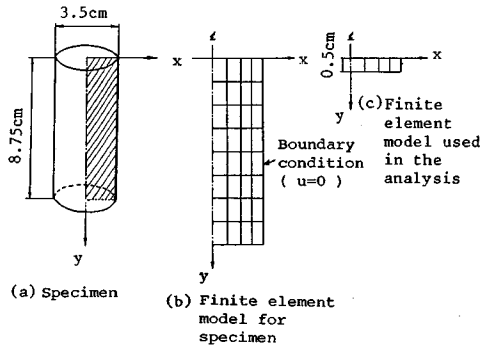


Fig. 6 Finite element model for specimen in cyclic triaxial test.

密試験によるべきと考えられる。Table 1 に示すCタイプの試験は、この目的のために行われたものである。発生した間隙水圧量の違いによる影響をみるために、同一の応力比条件で繰返し回数の異なる場合についても検討を行った。繰返しせん断で発生した間隙水圧は、再圧密試験において体積ひずみの増加とともに減少し、約1時間後にはほぼ完全に消失してしまい、その時点で体積収縮もほとんど生じなくなる。ここでは、再圧密過程での間隙水圧および体積ひずみの時間的変化を測定した。また、その結果から体積圧縮係数 m_v と透水係数 k を求めた。 m_v は過剰間隙水圧が完全に消散するまでに生じる体積ひずみを有効応力の変化量で割ることにより求めた。また、 k は再圧密過程における間隙水の排出量を時間の対数 ($\log t$) との関係で表わし、円筒供試体の等方応力下、側方排水条件の圧密に対して Yoshikuni ら²⁴⁾により示された時間係数 T_v を用いて求めた。

ここで、CタイプとADタイプの挙動を比較するために、Fig. 7 に両者の e - $\log p$ 関係の概念を示した。Fig. 7(a) が再圧密過程を、Fig. 7(b) が部分排水繰返しせん断過程を示すものである。いずれも間隙水圧の消散と体積収縮を伴うので、式(4)の圧密方程式が適用できる。それぞれの式形を図中に示しているが、時間的な間隙水圧の発生項がCタイプにはなく、ADタイプに存在する形となっている。ここで、パラメーター m_v 、

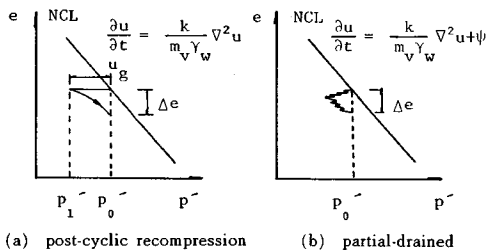


Fig. 7 State paths in post-cyclic recompression and partial-drained cyclic loading.

k は両者において同じものが使えると仮定している。

Cタイプの各試験により得られたそれぞれの体積ひずみを発生した間隙水圧比との関係でまとめると Fig. 8 のような結果となる。図のように、体積ひずみは間隙水圧比と一義的な関係を持ち、間隙水圧比の増大とともに直線に近い放物線状に増加することが認められる。このような傾向は、繰返し単純せん断試験で不攪乱粘土を対象に行った鈴木¹⁸⁾の研究結果においても示されている。

次に、 m_v と k を発生間隙水圧比との関係でプロットするとそれぞれ Fig. 9, 10 のようになる。データの数が限られており、プロットが幾分ばらついてはいるが、これら2つの係数は繰返しせん断によって生じた間隙水圧の大きさには依存せず、ほぼ一定の値となることがいえるようである。 m_v および k は実験結果を平均すると、 $m_v = 0.0126 \text{ cm}^2/\text{kgf}$ ($0.000126 \text{ kPa}^{-1}$)、 $k = 1.93 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ($1.93 \times 10^{-10} \text{ m/s}$) となり、解析のパラメーターとしてこれらの値を用いた。なおここで求めた m_v と k は、拘束圧 $\sigma_c = 200 \text{ kPa}$ における結果から得られ

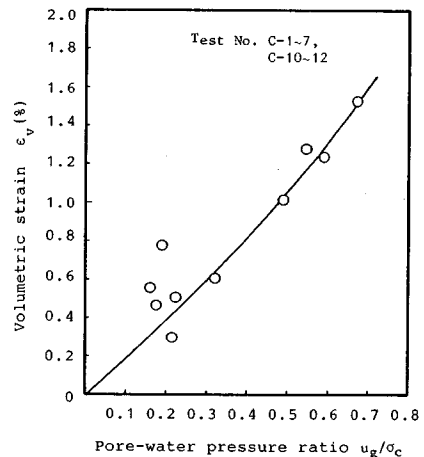


Fig. 8 Relationship between recompression volumetric strain and cyclically induced pore pressure.

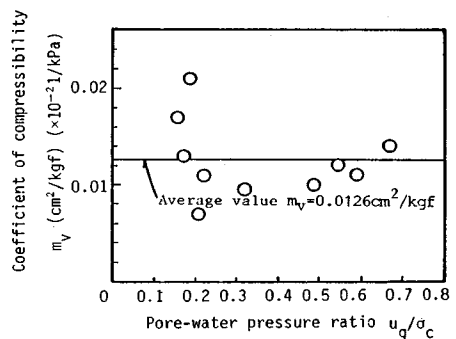


Fig. 9 Coefficient of compressibility obtained by post-cyclic recompression tests.

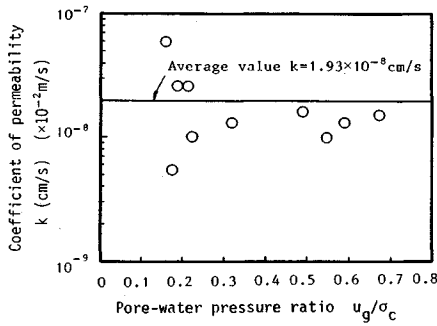


Fig. 10 Coefficient of permeability obtained by post-cyclic recompression test.

たものである。これらは、本質的には有効応力に依存するものであるから他の拘束圧に対する検討も必要と思われるが、ここではAおよびADタイプの拘束圧の平均値として200 kPaを設定し、検討を行った。

(5) 実験結果および予測結果

まず最初に、Fig. 6の要素モデルを用いてCタイプの条件に対して解析を行った。すなわち、非排水繰返しせん断で蓄積された間隙水圧を静的に消散させるものである。非排水繰返しせん断によって発生する間隙水圧の大きさは、Aタイプの結果から定式化された式(2)を用いて求めた。Fig. 11は、間隙水圧および体積ひずみの時間的変化を示すものである。図中プロットで示すのが実測結果、実線が解析結果である。実験においては、間隙水圧が排水初期にかなり大きく減少し解析結果と幾分差異がみられるが、全体的傾向としては比較的良好に対応しているようである。体積ひずみの方は、この実験から体積圧縮係数、透水係数を決めたので最終的に両結果が近い値になるのは当然であるが、途中の経過も含めて終始よく一致しているようである。データのばらつきも考慮に入れると、この程度の対応はかなり評価できるものと思われる。

次に、同じ供試体モデル (Fig. 6) を対象に部分排水繰返しせん断過程、すなわちADタイプにおける挙動の解析を行った。Fig. 12は、供試体内における間隙水圧分布の時間的な変化を表わす解析結果である。供試体中央部から周面に至るまでの半径方向の間隙水圧分布が描かれている。間隙水圧は、繰返しせん断初期において側方境界面近傍を除けばほぼ均一に上昇しているが、しだいに境界の影響が内部に及ぶにつれ台形状の分布となる。そして、供試体中央における間隙水圧の値がピークに達する頃には分布形状はほぼ三角形となり、その後はその形のまま全体的に下降していき、全域でほぼ同時に消失してしまう。

Fig. 13は、供試体中心部における間隙水圧および供試体全体の体積ひずみの時間的変化を表わすものであ

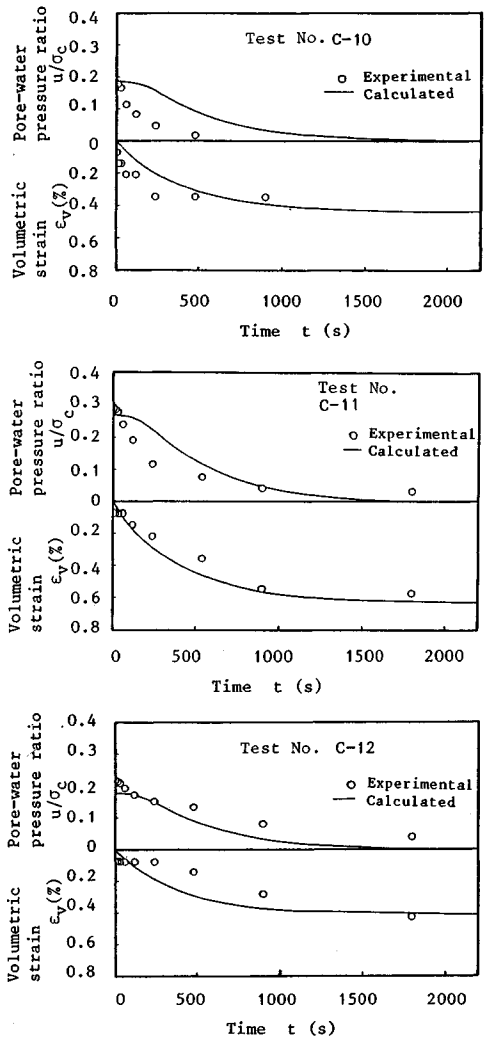


Fig. 11 Comparison between observed and calculated pore pressure and volumetric strain in post-cyclic recompression test.

る。図中、実験結果はプロットで、解析結果は実線で示されている。3つの図は、それぞれ応力比ごとにまとめたものであり、いずれも初期圧密応力 $\sigma_c = 100, 200, 300$ kPa の場合について描かれている。実験においては、間隙水圧比が同一の応力比において拘束圧の違いにより異なる結果となっており、拘束圧の増加に伴い大きくなる傾向を示している。一方解析では、間隙水圧比は拘束圧によらず一本の曲線で表わされている。これは本研究において、体積圧縮係数 m_v を発生間隙水圧比との関係で調べており、拘束圧に依存する形にしていなかったためと思われる。しかしながら、解析結果は、実験結果の全体挙動をうまく表現しており、特に間隙水圧がピークに至る時点とその大きさおよび間隙水圧が消散していく過程

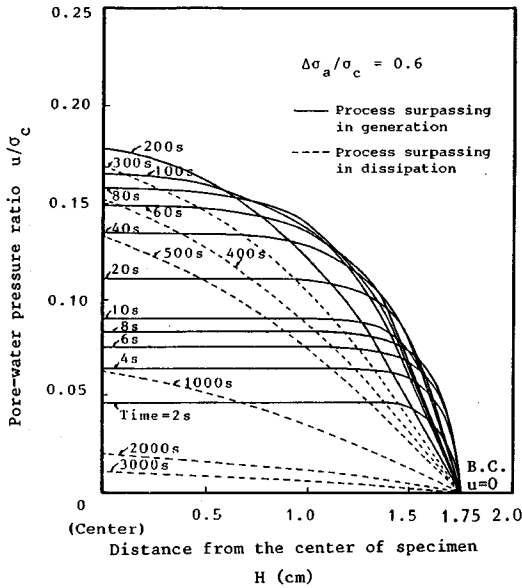


Fig. 12 Distribution of pore pressure in specimen under partial-drained cyclic loading.

など実験結果とよい対応を示している。したがって、ここで取り扱った拘束圧の範囲における平均的な挙動を表わすものとして、本解析は有効であると考えられる。体積ひずみの方は、実験・解析ともに拘束圧による違いが現われており、拘束圧および応力比の大きいところで幾分差異が出ているものの、両者における時間的変化挙動はかなりよい対応関係にあると考えられる。このような実験および解析結果の良好な対応から、ここで仮定した部分排水繰返しせん断のモデルは、妥当なものであると判断される。

最後に、2. で述べた長期繰返しせん断による粘土の変形を予測するものとして、排水繰返しせん断試験における軸ひずみ量を提案する解析手法を用いて評価することを試みた。ここで材料の等方性を仮定して、排水繰返しせん断における軸ひずみ ϵ_{ad} は、次のように非排水繰返しせん断による軸ひずみ ϵ_{au} と排水繰返しせん断における体積ひずみ ϵ_v の1/3の和で表わされるものと仮定した。

$$\epsilon_{ad} = \epsilon_{au} + 1/3 \epsilon_v \dots \dots \dots (6)$$

Fig. 14 は、実験および解析による軸ひずみの結果を3種の応力比条件についてまとめたものである。図より、比較的低い応力比において両者はよく一致しているが、応力比が高くなるにつれ差がみられるようになり、応力比0.8に至っては解析結果は実験結果の6割ほどの大きさしか予測できない結果となっている。このことは、土の変形が等方的に生じていないということと、本解析の基礎となるAタイプとCタイプの実験の主体が応力比

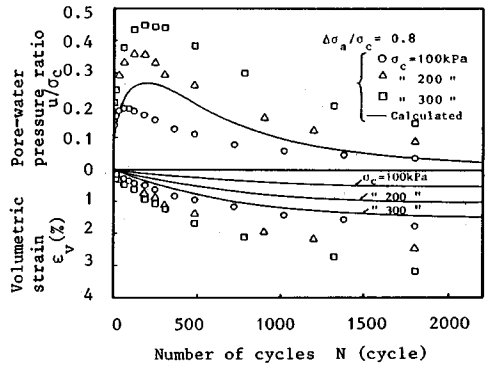
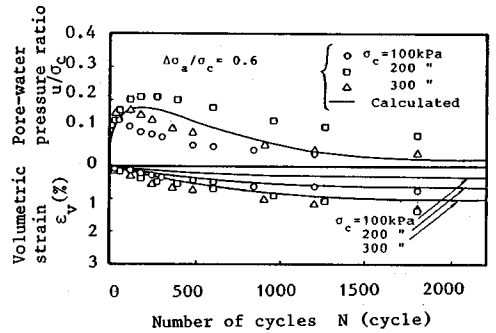
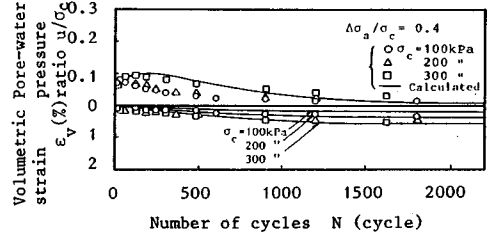


Fig. 13 Comparison between observed and calculated pore pressure and volumetric strain during partial-drained cyclic loading.

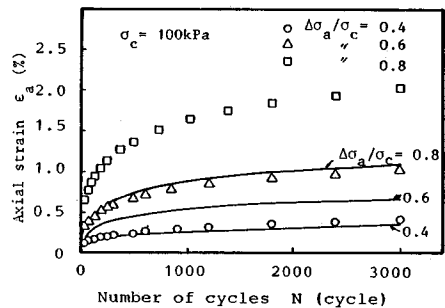


Fig. 14 Comparison between observed and calculated axial strain under partial-drained cyclic loading.

0.8よりも低いところで行われており、高い応力比に対する対応が十分ではなかったためと推察される。しかし、長期の繰返し载荷の問題で実際に現場で遭遇する応力比

は、それほど高い値となることはまれであると考えられるので、この解析による予測結果は一応の成功を収めたものと考えられる。

提案の方法を用いれば交通荷重や波浪荷重などによる長期にわたって繰返し荷重を受ける粘土地盤の変形および安定性の評価が可能である。モデルの検証のために、ここでは三軸供試体による排水繰返しせん断試験結果を用いたが、より排水距離の長い現場スケールの実験が行われればさらに深い検証が可能と考えられる。ここで提案した方法は、実験結果と直結したものであり、複雑なモデル化等のプロセスを経ない。その分誤差の累積も少ないと考えられるし、取扱いも容易である。また、地盤の弾塑性解析等非線形解析の経験から、地盤内応力の大きさそのものは弾性解析より求められたものとさほど違いがないことから、弾性解析による応力値および主軸の方向などを利用して本解析手法を適用すれば簡便で合理的な解析方法になると考えられる。

5. 結 論

長期の繰返しせん断による粘土の変形を定量的に評価するために、繰返し三軸圧縮試験および FEM 解析を行った。長期繰返しせん断における粘土の変形を非排水繰返しせん断によるせん断変形と、発生した間隙水圧の消散に伴う体積変化の 2 つの成分から成るものとし、これらの成分をそれぞれ独立に評価を行い、重ね合わせる方法について提案を行った。その過程および得られた知見を要約すると以下のとおりである。

まず、非排水状態でのせん断変形を調べるために、等方圧密された粘土供試体に対して圧縮側片振りの繰返し三軸圧縮試験を行った。得られた残留間隙水圧および残留軸ひずみは、応力比と繰返し回数の指数関数としての表示が適していることが判明した。

次に、繰返しせん断中の発生間隙水圧の逐次消散による変形を評価するために、排水繰返し三軸圧縮試験を行うとともに、間隙水圧の発生と一部消散を表わす解析モデルを作成した。これは先に求められた非排水せん断時における間隙水圧式と Terzaghi 型の圧密方程式を組み合わせたものであり、時間的な間隙水圧の変化と同様体積ひずみの変化も評価できる形とした。モデルの精度の検証のために排水繰返し三軸試験供試体を対象に FEM 解析を行った。圧密方程式に含まれる体積圧縮係数および透水係数を求めるために、非排水繰返し三軸圧縮試験に引き続き再圧密試験を行い、発生間隙水圧の消散による体積ひずみを求めた。その結果より、まず体積ひずみと発生間隙水圧の間には一義的關係があることが明らかとなった。また、体積圧縮係数と透水係数については、間隙水圧との相関性はみられなかったが、すべての実験

ケースで、ほぼ同一のオーダーのものが得られた。

FEM 解析結果と実験結果とは間隙水圧、体積ひずみにおいて良好な対応関係を示し、解析モデルの妥当性が検証された。さらにここで得られる体積ひずみと非排水せん断により得られるせん断ひずみを組み合わせることにより、繰返しせん断を受ける地盤の変形予測が可能となることが示唆された。この考え方により排水繰返しせん断試験における軸ひずみの予測を行ったところ、高塑性粘土の実験データのばらつき等を加味するとかなり良好な対応結果であることが認められた。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、山口大学工学部助手 安福規之氏に有益な意見を頂いた。また、解析や結果の整理で同大学院生の藤井照久君、同学生の新藤浩史君（現・西部ガス（株））の協力を得た。ここに深謝の意を表わしたい。なお、本研究の一部は第 1 著者に対し昭和 62 年度文部省科学研究費（奨励研究 A）の補助を受けたものであることを付記し、関係各位に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 久楽勝行・三木博史・真下陽一・関 一雄：軟弱地盤上の低盛土道路の沈下とその対策，土木技術資料，22-8，pp. 399~403，1980。
- 2) 大根田秀明・梅原靖文・善 功企・樋口嘉章・入澤一明：波力を受ける海洋構造物基礎粘土地盤の支持力に関する模型実験，第 10 回海洋開発シンポジウム論文集，pp. 117~122，1985。
- 3) Sangrey, D. A., Henkel, D. J. and Esring, M. J. : The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading, Canadian Geotech. Jour., Vol. 6, No. 3, pp. 241~252, 1969.
- 4) Hyde, A. F. L. and Brown, S. F. : The plastic deformation of silty clay under creep and repeated loading, Geotechnique, Vol. 26, No. 1, pp. 173~184, 1976.
- 5) Hyde, A. F. L. and Ward, S. J. : A pore pressure and stability model for a silty clay under repeated loading, Geotechnique, Vol. 35, No. 2, pp. 113~125, 1985.
- 6) 松井 保・小原秀夫・伊藤富夫：飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響，土木学会論文報告集，第 257 号，pp. 41~51，1977。
- 7) Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T. : Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, Proc. ASCE, Vol. 106, No. GT 10, pp. 1101~1120, 1980.
- 8) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. : Deformation of saturated soft clay under repeated loading, Proc. Int. Symp. on Soft Clay, pp. 165~178, 1977.
- 9) Yasuhara, K., Hirao, K. and Aoto, H. : A simplified strain time relation for soils subjected to repeated loads, Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading, pp. 791~800, 1980.
- 10) 兵動正幸・村田秀一・安原一哉：交通荷重による低盛土

- 道路下粘土地盤の変形解析，第31回土質工学シンポジウム論文集，pp.27~32，1986.
- 11) Hyodo, M., Yasuhara, K. and Murata, H. : Traffic-induced pore pressure and deformation of soft clay deposit beneath embankment, Int. Symp. on Geotech. Eng. of Soft Soils, pp.231~238, 1987.
 - 12) Raymond, G.P., Gaskin, P.N. and Addo-Abedi, F.Y. : Repeated compressive loading of Leda clay, Canadian Geotech. Jour., Vol.16, No.1, pp.1~10, 1979.
 - 13) Andersen, K.H. : Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading, Proc. Int. Conf. on the Behaviour of off-shore structures, Vol.1, pp.392~403, 1976.
 - 14) Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. and Rosenbrand, W.F. : Cyclic and static laboratory tests on Drammen Clay, Proc. ASCE, Vol.106, No. GT 5, pp.499~529, 1980.
 - 15) Andersen, K.H. and Heien, D. : Foundation engineering criteria for gravity platforms—Procedures and soil parameters to calculate stability, stiffness, cyclic displacements and settlements of gravity platforms on clay, NGI report 40013-32, 1986.
 - 16) 安原一哉・Andersen, K.H. : 繰返し波浪荷重を受ける粘土地盤の沈下，海底地盤に関するシンポジウム論文集，pp.151~156, 1987.
 - 17) 大原資生・松田 博・近藤泰生 : 排水を伴った飽和粘土の繰返し単純せん断試験，土木学会論文集，第352号，pp.149~158, 1984.
 - 18) 鈴木猛康 : 動的応力履歴を受けた飽和粘性土の沈下挙動，応用地質，25巻，3号，pp.21~31, 1984.
 - 19) 安原一哉・平尾和年 : 繰返し荷重をうけた飽和粘土の非排水せん断特性，土木学会論文集，第364号，pp.113~122, 1985.
 - 20) Yasuhara, K., Yamanouchi, T. and Hirao, K. : Cyclic strength and deformation of normally consolidated clay, Soils and Foundations, Vol.22, No.3, pp.77~91, 1982.
 - 21) Umehara, Y., Zen, K. and Hamada, K. : Evaluation of soil liquefaction potentials in partially drained conditions, Soils and Foundations, Vol.25, No.2, pp.57~72, 1985.
 - 22) O-hara, S., Kotsubo, S. and Yamamoto, T. : Pore pressure developed in saturated sand subjected to cyclic shear stress under partial-drainage conditions, Soils and Foundations, Vol.25, No.2, pp.45~56, 1985.
 - 23) Booker, J.R., Rahman, M.S. and Seed, H.B. : GADFLEA—A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading, Report No.EERC 76-24, Univ. of Calif. Berkeley, 1976.
 - 24) Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. : Consolidation of a clay cylinder with external radial drainage, Soils and Foundations, Vol.15, No.1, pp.17~27, 1975.

(1988.1.22・受付)