

# 繰返しせん断を受ける粘土の 非排水および部分排水挙動

安原一哉\*, 兵動正幸\*\*, 平尾和年\*\*\*, 小浪岳治\*\*\*\*

(平成3年8月31日受理)

## Undrained and partial-drained cyclic behaviour of clay

Kazuya YASUHARA\*, Masayuki HYODO\*\*,  
Kazutoshi HIRAO\*\*\*and Takeharu KONAMI\*\*\*\*

*Abstract*—It is very essential for accessing the behaviour of clay under cyclic loading situations induced by earthquake, wave actions and travelling of traffics to model the generation and dissipation processes of cyclic-induced pore pressures in clay. To achieve this purpose, the results from undrained cyclic triaxial tests on a reconstituted marine clay were formulated.

Through the formulation by introducing the two new parameters a unique relationship was found out between the peak stress ratio at the extension side and the double amplitude shear strain.

The pore pressure model proposed in the current paper was then combined with the theory of consolidation to predict the behaviours of clay under partial-drained cyclic loading. Analysis of behaviour for the partial-drained deformation was compared with the observed values for pore pressures and shear strains in drained-cyclic triaxial tests. Thus, it is suggested that the proposed model should provide a practical tool for evaluating the settlements and stability of clay under long-term cyclic loading including the drainage period.

### 1. まえがき

軟弱な粘土地盤が地震、波浪、交通などによって生じる繰返しせん断を受けるとき、地盤の支持力が低下したり、有害な変形および沈下を引き起こすことある。典型的な地震による被害として、1985年におけるメキシコ地

震において、粘土地盤上に建設された構造物が地震中の大変形または地震後の沈下により壊滅的な打撃を受けた事例が報告されている<sup>(1),(2)</sup>。波浪による問題としては、例えば、ミシシッピーデルタの海底斜面の地すべり<sup>(3)</sup>の例や北海油田開発における海底粘土地盤上の重力式プラットフォームの沈下<sup>(4)</sup>の事例や支持力とその評価・適用方法

\* 茨城大学工学部都市システム工学科

Department of Urban and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

\*\* 山口大学工学部社会建設工学科

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube, 755 Japan

\*\*\* 西日本工業大学工学部土木工学科

Department of Civil Engineering, Nishinippon Institute of Technology, Kanda, 800-03, Japan

\*\*\*\* 岡三興業(株)

Okasan Kogyo Corporation, Tokyo, 105, Japan

の検討<sup>(5),(6)</sup>などが挙げられる。また、交通荷重による軟弱地盤上の道路盛土の沈下の事例はわが国にも古くから多く存在し<sup>(7),(8),(9)</sup>、本質的なメカニズムの解明を見ないまま今や慢性的問題になりつつある。

繰返し荷重の継続時間は、地震においては数十秒～数分のオーダーであるが、嵐等による波浪では数日にわたり、さらに交通荷重では数年にも及ぶ。したがって、地震のような短期の繰返しせん断に対しては、地盤の排水条件はほぼ非排水であるが、長期の繰返しせん断においては間隙水圧の発生とその一部消散を繰返すいわゆる部分排水状態にあると仮定してよからう。また、排水境界付近の粘土要素では比較的短期の繰返しせん断時においても部分排水状態にあると考えられる。

筆者らは<sup>(10),(11),(12),(13)</sup>、これまでに主に長期繰返しせん断を対象として、排水および非排水の繰返し三軸圧縮試験を行い、解析モデルと組み合わせることにより、部分排水現象の評価を行ってきた。これらの研究では、当初、片振り載荷で長期の繰返しせん断による比較的小さいひずみの累積を主な対象としていたが、今回新たに両振り載荷で大変形および破壊に至るまでの非排水および排水繰返し三軸圧縮試験を行った。本研究では、まず地震時等でみられる短期の繰返しせん断における変形・強度の評価を行うために、著者の1人<sup>(14)</sup>によって提案されている砂に対する繰返し三軸試験に関する研究成果になって、非排水繰返しせん断過程における間隙水圧およびひずみの予測モデルを作成した。さらに、排水境界付近の要素あるいは比較的長期の繰返しせん断を受ける土供試体の挙動を説明するために、排水繰返しせん断過程を部分排水状態となし、前記提案モデルを適用して、このような条件下で観測される粘土供試体の変形および間隙水圧挙動の評価を行った。

## 2. 試料および試験方法

実験に用いた試料は繰り返し再圧密有明粘土であり、その指数的性質は、それぞれ、 $G_s=2.58$ 、 $w_L=123\%$ 、 $I_p=69$ 、 $C_c=0.700$ 、 $C_s=0.163$ であった。試料は繰り返し後、大型圧密容器で鉛直圧60kPaのもとで、供試体内で一様な含水比分布が達成されるよう十分予圧密し、これから作り出された粘土ブロックから三軸試験用供試体として直径3.5cm、高さ8.75cmの円筒形に成形した。供試体の初期の平均含水比は90～95%であった。間隙水圧は、下部ベダスタル中央に埋め込まれた直径3mmのポー

ラストーンを通じて間隙水圧計で測定された。圧密中および、排水せん断中の間隙水は、供試体側面に巻いたペーパードレーンを通して排水され、また、体積変化は下部ベダスタル側面に連結されたセル外の二重管ビューレットによって測定された。

Table. 1 Cyclic triaxial testing conditions

T e s t N o .	排 水 条 件	圧密後	繰返し荷重	$q_{cyc}$	載荷回数
		含水比 (%)	$q_{cyc}(kgf/cm^2)$	$\sigma_c'$	N
K-26	非 排 水	65.8	1.20	0.60	6
K-27		66.4	1.10	0.55	12
K-16		66.5	1.00	0.50	11
K-20		66.8	0.90	0.45	24
K-25		65.8	0.80	0.40	543
K-12		64.5	0.75	0.375	1674
D-1	排 水	66.6	1.10	0.55	11
D-2		67.8	1.00	0.50	36
D-4		66.5	0.90	0.45	10002
D-5		66.9	0.80	0.40	10000
					10000

( $\sigma_c' = 2.00 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $f = 0.1 \text{ Hz}$ )

繰返し三軸圧縮試験の条件は表-1に示すとおりである。表中の実験番号を示すKの表示が非排水繰返し三軸試験、Dが排水繰返し三軸試験である。いずれも初期圧密応力  $p_c=200\text{kPa}$  で等方圧密を行った後、非排水状態で側圧一定の下で0.1Hzの正弦波軸荷重を加え、軸ひずみ両振幅  $\epsilon_{DA}$  が5%を越えるまで繰返し載荷を継続した。

一方、排水繰返し三軸試験は、圧密後排水コックを解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一部が消散するだけで供試体内に非一様に分布する、いわゆる部分排水状態になると考えられる。原位置でも排水境界付近では、これと同様の部分排水状態の存在が考えられるので、この排水繰返し三軸試験をそのような地盤の模型実験とみなして解析を行った。表中には各供試体の圧密後の含水比、間隙比、繰返し軸差応力振幅  $q_{cyc}$  および最大繰返し回数 N が記されている。

## 3. 非排水繰返しせん断における間隙水圧および軸ひずみ振幅の定式化

非排水繰返し三軸圧縮試験においては、繰返し載荷と共に間隙水圧が上昇し、ひずみ振幅が次第に大きくなり、

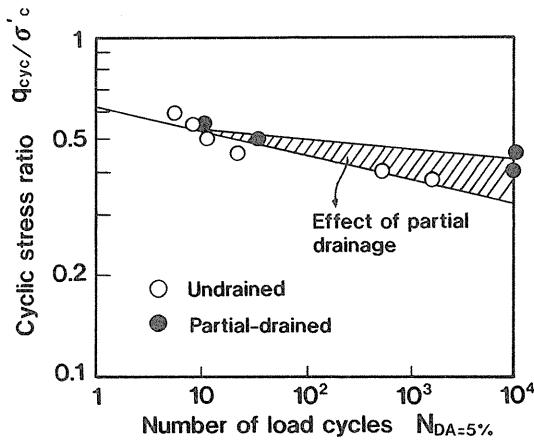


Fig. 1 Cyclic stress ratio versus number of load cycles relations

ついに破壊に至る。図-1は、ひずみ両振幅  $\epsilon_{DA} = 5\%$  に至るに必要な繰返し応力比  $q_{cyc}/p'$  と繰返し回数  $N_f$  の関係を両対数表示したものである。本研究では、供試体のひずみ両振幅が  $\epsilon_{DA} = 5\%$  に至った状態を動的破壊とみなした。図-1は近似的に以下のように定式化される。

$$R_f (=q_{cyc}/p') = 0.624N_f^{-0.071} \quad (1)$$

次に、軸ひずみ振幅が繰返しせん断とともに増加する過程を定量化することを試みた。まず、応力比毎に、各サイクルのひずみ両振幅を残留間隙水圧と対応させて両者の関係を調べてみると図-2の結果となった。

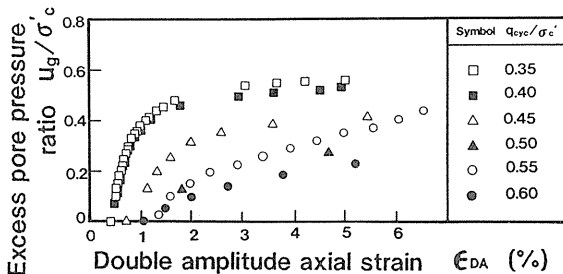
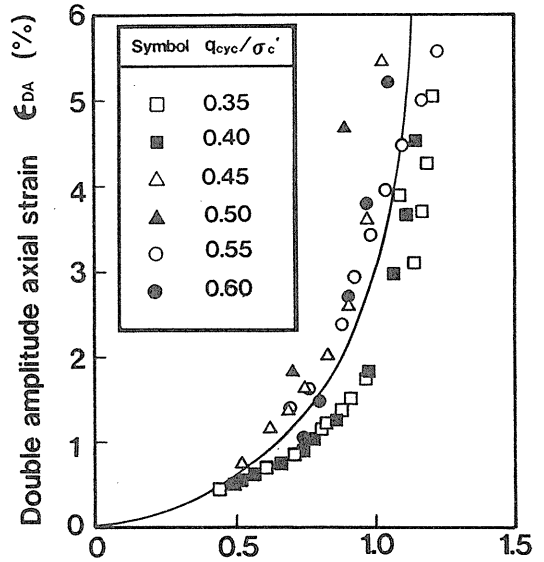


Fig. 2 Relationship between double amplitude of strain and residual pore pressure in undrained cyclic triaxial tests

図のように両者には、ある程度の相関性は認められるが、ユニークな関係があるとは言い難い。そこで今度は、縦軸に各サイクルの軸ひずみ両振幅をとり、横軸に繰返し

応力の各サイクルの伸張側ピーク時における有効応力比  $\eta_p (=q_{cyc}/p')$  をとって両者の関係を調べた。ここで、有効応力比として伸張側の応力比のピーク値を採用したのは、本実験のような荷重振幅制御式による繰返し三軸圧縮実験では各サイクルにおける伸張側のピーク値が最も破壊線に近く、これが各サイクルの軸ひずみ振幅の増加に影響していると考えたからである。図-3がその結



Peak effective stress ratio  $\eta_p$

Fig. 3 Relations between double amplitude axial strain and effective stress ratio in undrained cyclic triaxial tests

果であるが、この図より軸ひずみ両振幅と有効応力比の間には、ユニークな関係が存在することが認められる。このような荷重振幅制御試験における軸ひずみ振幅の変化は、繰返しせん断に伴う剛性の変化を意味することから、この結果は剛性が有効応力と応力振幅の双方に依存していることを裏付けている。ここで用いられた有明粘土の場合、この関係は次のような双曲線で近似できる。

$$\epsilon_{DA} = \eta_p / (c - \eta_p) \quad (2)$$

ここで、 $c$ は限界状態パラメータ  $M$  に関する実験定数で本研究で用いられた有明粘土の場合、 $c=1.30$ であった。

また、排水繰返し三軸試験結果についても同様の整理

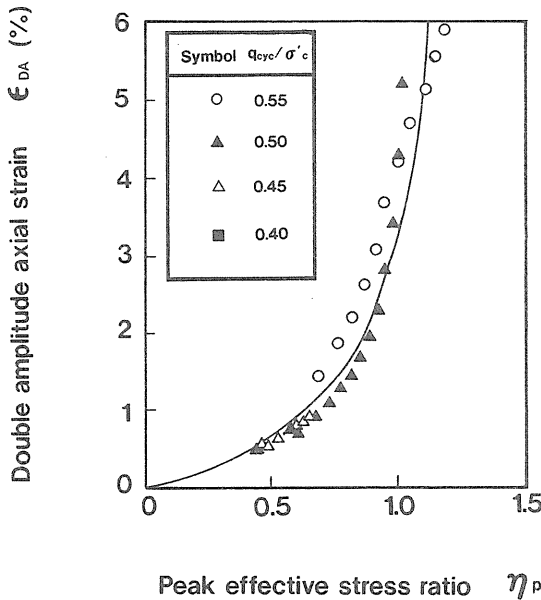


Fig. 4 Relationship between double amplitude of strain and effective stress ratio in drained cyclic triaxial tests

を行うと図-4のような関係となり、この場合も非排水の場合と全く同じ傾向を示し、排水条件に関係なく同様に式(2)の双曲線で表すことが可能となっている。排水繰返し三軸圧縮試験では間隙水圧の上昇と同時に排水境界面(本実験では側面)からの消散を伴うので、供試体内では間隙水圧の分布が生じていると考えられる。ここでは供試体中央部で測定した間隙水圧によりこのような整理を行ったところ、図のような結果となった。また、繰返し载荷中に間隙水圧が上昇から下降に転じることがあるが、軸ひずみ振幅もそれに対応して減少していくことがこの図から確認できる。したがって、粘土の排水繰返し三軸試験における変位振幅は供試体中心部付近の間隙水圧に支配されると考えることができる。

以上で、繰返しせん断をうける粘土においては、繰返し载荷に伴う軸ひずみ振幅と間隙水圧挙動を追跡することが重要であることが分かった。そこで、このことを可能にするために、ここで、2つの新しいパラメータを導入する。

まず1つは図-5に示す応力比 $\eta^*$ であり、これは初期に全応力経路を想定した繰返し応力の伸張側ピーク時における有効応力比 $\eta$ と破壊時(軸ひずみ両振幅

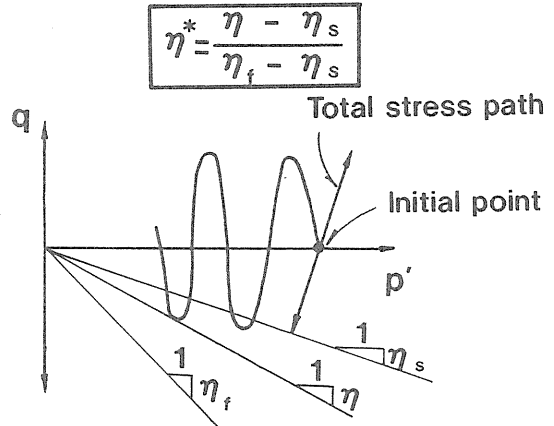


Fig. 5 Definition of the parameter  $\eta$

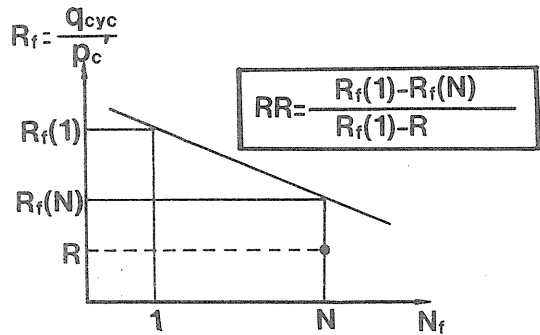


Fig. 6 Definition of the parameter RR

$\epsilon_{DA} = 5\%$ )の応力比 $\eta_f$ の間における任意サイクルの伸張側ピーク値の相対的な位置関係を表すものである<sup>(4)</sup>。もう1つは、図-6に示されるRRという繰返しせん断破壊に対する危険度を表す指標である。これら2つのパラメータの定義式は以下の通りである。

$$\eta^* = (\eta - \eta_s) / (\eta_f - \eta_s) \quad (3)$$

$$RR = \{R_f(1) - R_f(N)\} / \{R_f(1) - R\} \quad (4)$$

式(4)におけるRRの値は、式(2)で与えられる外力としてある任意の大きさの繰返し応力比 $R (=q_{cyc}/p'_c)$ が与えられた場合、繰返し回数1回目( $N=1$ )の载荷に対して $RR=0$ であるが、繰返し回数 $N$ の増加に伴い動的強度 $R_f(N)$ が減少するのでRRは増加していく。さらに破壊が生じる繰返し回数 $N=K$ に達すると $R_f(K)=R$ であるから、式(4)の分子と分母が等しくなると $RR=1$ となる。つまり、RRは1回目の载荷から破

壊に至るまで0~1の範囲で変化することになる。ここで、1回目の载荷に対してはRR=0となり、1回の载荷は破壊に何も影響を与えないという結果になり不合理が生じる。これは強度の初期点の設定方法による問題であり、初期の強度はN=1よりもN=0に設定する方が好ましいようにも思えるが、ここではそのような設定が不可能なこと、比較的長い繰返し载荷を対象としており、N=1での間隙水圧発生は便宜上無視できると判断したため、N=1を初期としてこのように設定した。

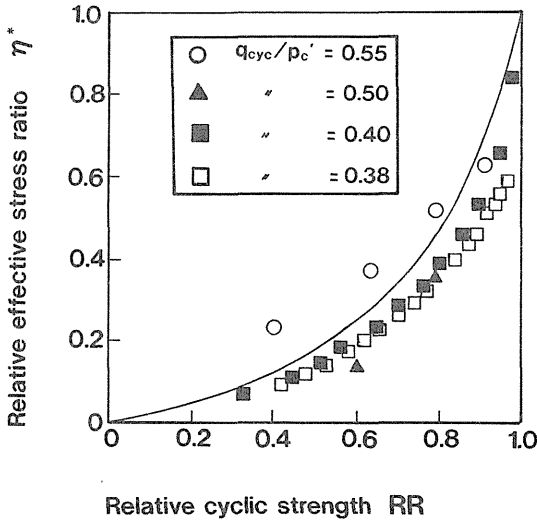


Fig. 7 Relationship between RR and  $\eta^*$

図-7に非排水繰返しせん断時におけるRRと $\eta^*$ の関係が示されている。図中に示された各プロットは、繰返し応力振幅や繰返し回数がそれぞれ異なるにもかかわらず、これら2つのパラメータの間には次式で表される一義の関係が存在している。

$$\eta^* = RR / \{a - (a - 1)RR\} \quad (5)$$

ここで、aは実験パラメータであり、本ケースではa=5.0であった。以上の新しいパラメータの相互関係を模式的に示すと図-8のようになる。

次に、これらの関係を用いて、非排水繰返し三軸圧縮試験における繰返し応力各サイクルの伸張側ピーク時における間隙水圧および各サイクルの軸ひずみ両振幅の予測を行う。まず、繰返し応力比R (=  $q_{cyc} / p'$ )が既知であるので、式(1)より任意の繰返し回数における動的強度 $R_f(N)$ を求め、式(4)のPRの評価を行う。これを式(5)に代入すると $\eta^*$ が求められるので、式(3)より $\eta$

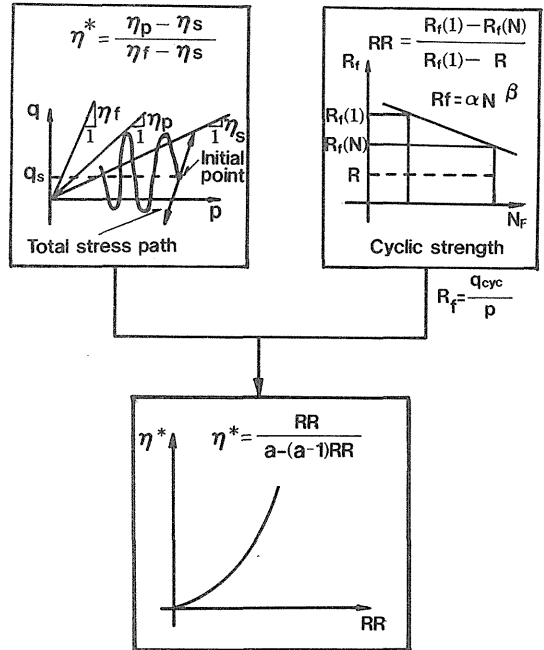


Fig. 8 A key sketch for interrelationship between newly defined two parameters

値が定まる。したがって、次式の関係から応力伸張側ピーク時の間隙水圧の値が判明する。

$$u_p = q_{cyc} (1 / \eta_s - 1 / \eta) \quad (6)$$

ここで、上式に式(3)から求められる $\eta^*$ を代入すると次式が得られる。

$$u_p = q_{cyc} \left\{ \frac{1}{\eta_s} - \frac{1}{\eta^* (\eta_f - \eta_s) + \eta_s} \right\} \quad (7)$$

ここで、

$$\eta^* = \frac{R_f(1) - R_f(N)}{a \{R_f(1) - R\} - (a - 1) \{R_f(1) - R_f(N)\}} \quad (8)$$

と与えられる。このような操作を1回目の繰返し回数から破壊に至るまで繰返し行う。以上により求められた間隙水圧と軸ひずみ両振幅の予測結果と実験結果の対応が図-9, 10にそれぞれ示されている。これらの図において、本提案法による予測結果と実験結果は、ケースにより若干の相違はあるものの、おおむね良好な対応関係にあるものと判断される。

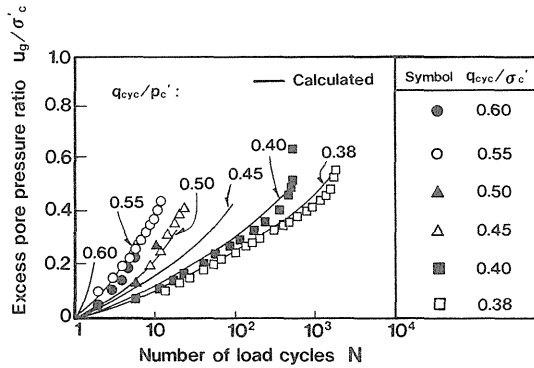


Fig. 9 Predictions of pore pressure in undrained cyclic triaxial tests

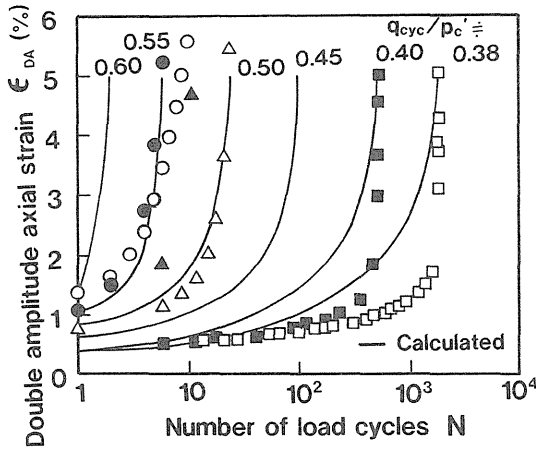


Fig.10 Predictions of double amplitude strain in undrained cyclic triaxial tests

#### 4. 部分排水繰返しせん断における間隙水圧および

##### 4.1 軸ひずみ振幅の評価

排水繰返し三軸圧縮試験も非排水試験と同じ荷重条件で行った。先述のように、粘土は透水性が低いので、本実験のように0.1Hz程度の繰返し荷重条件では排水は部分的であり、間隙水圧は発生とその一部消散が繰返される形で蓄積し、供試体内では一様な分布とならないと考えられる。したがって、この状態では、三軸供試体を1つの要素とみなすことができない。むしろ、境界条件の明確な模型実験に近いので、上述の繰返し荷重条件

下での粘土の挙動の予測モデルの適用性を調べる上では格好の試験であると言えよう。そこで、片振り繰返し荷重を受ける粘土供試体の解析に適用した同じ手順<sup>(11)~(13)</sup>に従った有限要素法を用いて、このような条件下での粘土の挙動の数値計算によるシミュレーションを行った。まず、部分排水繰返しせん断時における間隙水圧の発生および消散の概念を図-11のように考えた<sup>(12)</sup>。この図

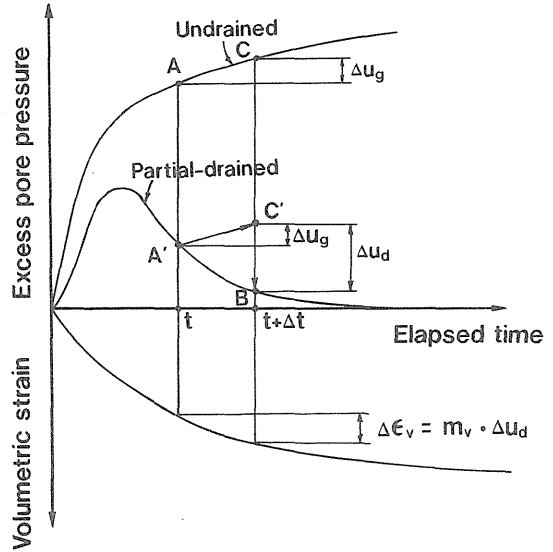


Fig.11 Schematic diagram for variations of excess pore pressures and volumetric strains with elapsed time in partial-drained conditions

において、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。図に描いているように任意の時刻tから微小時間経過後t+Δt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が加えられ、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。またその間の体積ひずみの増分は、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し、体積圧縮係数m<sub>v</sub>を用いて次のように表わされるものとした。

$$\Delta \epsilon_v = m_v \Delta u_d \tag{9}$$

間隙水圧の発生およびその一部消散の解析は、砂の液化問題においてTerzaghi型の圧密方程式を有限要素

化して用いた Booker ら<sup>(45)</sup>の研究にならい次式を用いて行った。

$$|\nabla|^T |k| |\nabla u / \gamma_w| = m_v (\partial u / \partial t - \psi) \quad (10)$$

ここに、 $|k|$ : 透水マトリックス,  $\gamma_w$ : 水の単位体積重量,  $\nabla$ : 微分演算子,  $\psi$ : 非排水せん断による単位時間当りの間隙水圧発生分である。

ここで、体積圧縮係数  $m_v$  および透水係数  $k$  は、非排水繰返しせん断試験後拘束圧はそのまま、間隙水圧を消散させることにより生じる体積ひずみから評価した。この繰返しせん断後の再圧密による体積ひずみを発生した最大残留間隙水圧との関係でまとめると図-12のよう

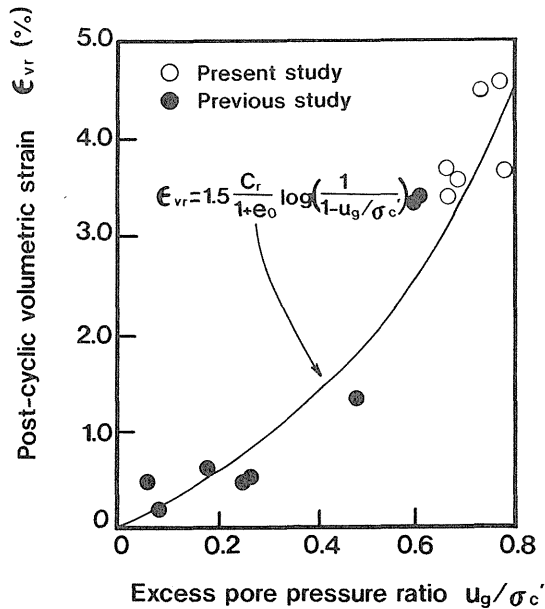


Fig. 12 Post-cyclic recompression volumetric strain related to excess pore pressure ratio

になる。図は、以前行った有明粘土に対する実験結果<sup>(46)</sup>と一緒にまとめられている。この結果より、再圧密時の体積ひずみは明らかに間隙水圧比と高い相関性を有していることが認められるが、本実験結果のように破壊に近い大きなせん断変形を受けた場合に、再圧密による体積ひずみが特に大きくなることが認められる。この体積ひずみを有効応力の変化量で割ることにより  $m_v$  を求めた。また、透水係数  $k$  は再圧密過程における間隙水の排出量を時間の対数との関係で表し、円筒供試体の等方応力

下で側方排水条件の粘土供試体圧密に対して Yoshikuni ら<sup>(47)</sup>により示された理論解に基づく時間係数  $T_v$  を用いて求められた。本研究で用いた粘土では実験の平均値として  $m_v = 0.0270 \text{ cm}^2 / \text{kgf}$  ( $0.000279 \text{ kPa}^{-1}$ ),  $k = 1.61 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  が得られたのでこれらを解析に適用した。解析は、実験と同様軸対称で側方流れを対象とし、図-13のようなメッシュ分割を行った。

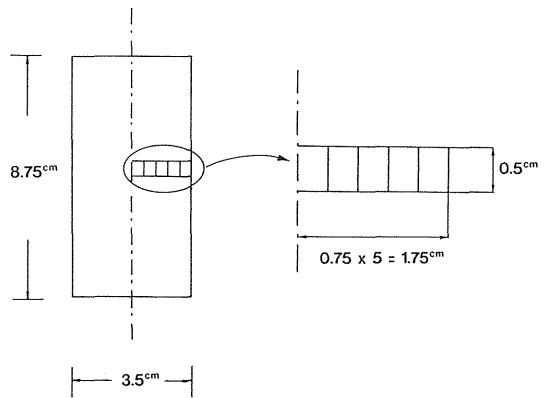


Fig. 13 Finite element model for a clay specimen in triaxial tests

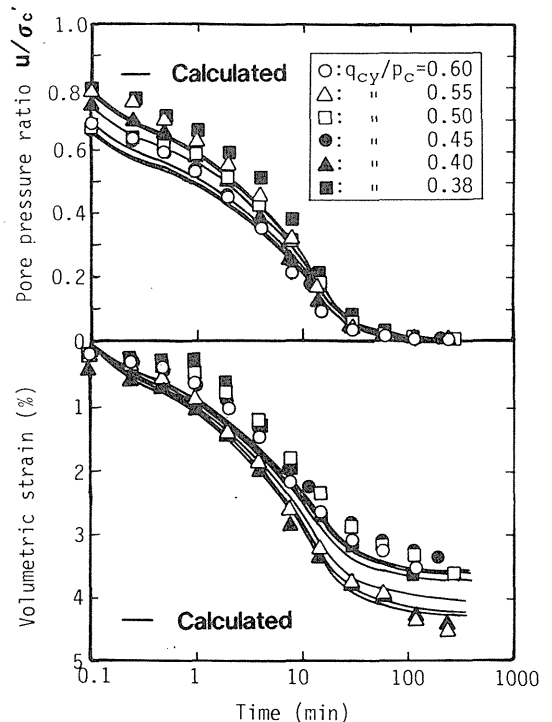


Fig. 14 Observed and calculated variations of post-cyclic  $u$  and  $\epsilon_{vr}$  with time

まず最初に、図-13の要素モデルを用いて非排水繰返しせん断後の蓄積した間隙水圧の消散ともなう再圧密の解析を行った。図-14は間隙水圧および体積ひずみの時間的変化を表しており、プロットが実験結果、実線が解析結果である。この実験結果から本解析の  $m_v$ 、 $k$  を決定したので、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間隙水圧、体積ひずみの計算値と実測値は、共に終始非常によく一致している。

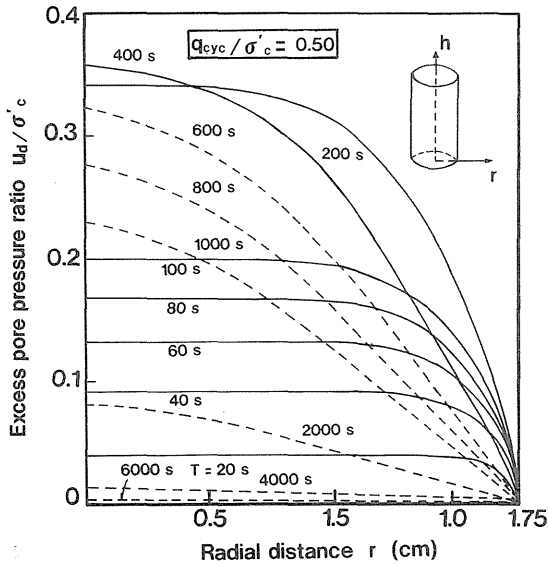


Fig. 15 Generation and dissipation of excess pore pressures in drained-cyclic triaxial tests

次に、同じ供試体モデル (図-13) を対象に部分排水繰返しせん断過程の解析を行った。図-15は、供試体内における間隙水圧分布の時間的変化を表わす解析結果の1例である。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近傍を除けばほぼ均一に上昇しているが、繰返し回数が増加して次第に境界の影響が内部におよぶにつれ、台形状の分布となっている。さらに間隙水圧は、供試中央における値がピークに達する頃にはほぼ三角形の分布形状となり、その後はその形のまま全体的に下降して行き、最後に全域でほぼ同時に消失している。

図-16, 17に解析および実験による繰返し応力の伸張側のピーク時における間隙水圧と各サイクルの軸ひずみ両振幅の繰返し載荷に伴う経時変化の様子を示してい

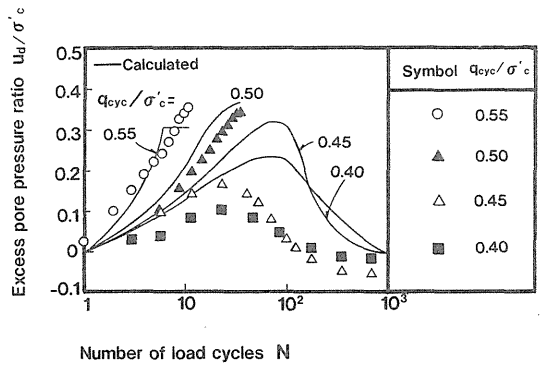


Fig. 16 Predictions of excess pore pressure in drained cyclic triaxial tests

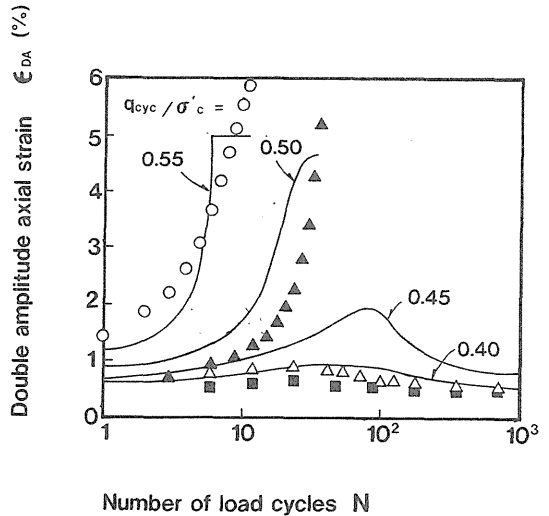


Fig. 17 Predictions of double amplitude of axial strain in drained cyclic triaxial tests

る。图中、予測結果は実線で実測結果はプロットで示されている。ここで間隙水圧は、供試体中心軸で測定されているので、解析結果も中心軸の節点によるものを示した。実験結果から、応力比の高い2つの供試体 ( $q_{cyc}/p'_c = 0.50, 0.55$ ) は、部分排水の繰返しせん断であるにもかかわらず、繰返し載荷中に破壊に達しているが、他の2つは間隙水圧が初期に上昇し、ある時点から下降していく挙動をとることが認められる。また、軸ひずみ振幅もそれに伴い増減する結果となっている。これらの結果と図-9, 10とを比較してみると、非排水の場合いず



れも間隙水圧の上昇、ひずみ振幅の増大を伴い破壊に至っているが、部分排水においてはひずみは抑制され、破壊を免れることができることが認められる。このような効果から、例えば、地震時の粘土地盤や波浪荷重をうける粘土地盤上の海洋構造物基礎の安定性を確保する手段として、ドレーン材を打設するなどの方法が期待される。解析では間隙水圧はFEM解析で、軸ひずみ振幅はその結果を用いて図-5の関係をj用いて評価を行っているが、本解析結果はこのような部分排水繰返しせん断過程における間隙水圧や軸ひずみ振幅のユニークな挙動をうまく説明している。

## 5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 粘土の非排水繰返し三軸圧縮試験を行い、間隙水圧および軸ひずみ振幅の定式化を図った。その結果、各サイクルで最も破壊に近い伸張側の繰返し応力ピーク時における有効応力比 $\eta_p$ と各サイクルの軸ひずみ振幅 $\epsilon_{DA}$ の間に一義的関係が存在することが明らかとなった。また、初期および破壊時の有効応力に対する相対的位置関係を表す応力比 $\eta^*$ と破壊の程度を表すRRの2つのパラメータの導入を行ったところ、両者の間に一義的関係が見い出され、これらの関係式から非排水繰返しせん断過程の間隙水圧やひずみ振幅の評価が可能となった。
- 2) 非排水繰返し試験後圧密試験を行うことにより、発生した間隙水圧の消散による体積ひずみを測定した。その結果から体積圧縮係数 $m_v$ と透水係数 $k$ の値を評価し、排水繰返しせん断における予測モデルのパラメータとした。
- 3) 排水繰返し三軸圧縮試験を行い、これを部分排水試験とみなしてFEMによるシミュレーション解析を行った。その結果、予測モデルによる結果は実験結果をかなりうまくシミュレートできることが確認され、部分排水繰返しせん断における適切な解析手法であることが実証された。

## 参 考 文 献

- 1) Seed, H. B., Romo, M. P., Sun, J. I., Jaime, A. and Lysmer, J. : Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the Earthquake of September 19, 1985, Report No. UCB/EERC-87/15, Univ. of California, Berkeley, 1987.
- 2) Mendoza, M. J. and Auvinet, G. : The Mexico Earthquake of September 19, 1985-Behaviour of building foundations in Mexico City, Earthquake Spectra, Vol. 4, No. 4, pp. 835-852, 1988.
- 3) Eide, O., Andersen, K. H. and Lunne, T. : Observed foundation behavior of concrete gravity platforms installed in the North Sea 1973-1978, Proc. Int. Conf. on the Behaviour of Off-shore Structures, Vol. 2, pp. 435-456, 1979.
- 4) Andersen, K. H., Kleven, A. and Heien, D. : Cyclic soil data for design of gravity structures, Proc. ASCE, Vol. 114, No. GT 5, pp. 517-539, 1988
- 5) Henkel, D. J. : The role of waves in causing submarine landslides, Geotechnique, Vol. 20, No. 1, pp. 75-80, 1970.
- 6) Andersen, K. H. and Lauritzsen, R. : Bearing capacity for foundations with cyclic loads, Proc. ASCE, Vol. 114, No. GT 5, pp. 540-555, 1988.
- 7) 長井 健・畑又左男・松崎幸一・岡本憲三：交通荷重による盛土の振動と沈下について，第7回土質工学研究発表会講演集，pp. 241-244, 1972.
- 8) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. : Settlement of clay subgrades of low bank roads after opening to traffic, Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics, Vol. 1, pp. 115-119.
- 9) 久楽勝行・三木博史・真下陽一・関 一雄：軟弱地盤の低盛土道路の沈下とその対策，土木技術資料，22-8，pp. 13-17, 1980.
- 10) Yasuhara, K. : Undrained and drained cyclic triaxial tests on a marine clay, Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 1095-1098, 1985.
- 11) 兵動正幸・村田秀一・安原一哉：部分排水状態における粘土の繰返しせん断特性，第22回土質工学研究発表会講演集，pp. 617-618, 1987.

- 12) Yasuhara, K., Hirao, K. and Hyodo, M. : Partial-drained behaviour of clay under cyclic loading, Proc. 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp. 659-664, 1988.
- 13) 兵動正幸・安原一哉・村田秀一・平尾和年 : 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, 土木学会論文集, 第400号/Ⅲ-10, pp151-160, 1988.
- 14) Hyodo, M., Murata, H., Yasufuku, N. and Fujii, T. : Undrained cyclic shear strength and deformation of sands subjected to initial static shear stress, Proc. 4th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, pp. 81-103, 1989.
- 15) 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 California, Berkeley, 1976.
- 16) Hyodo, M., Yasuhara, K. and Murata, H. : Earthquake-induced settlements in clays, Proc. 9th World Conf. on Earthquake Engineering, Vol. 3, pp. 89-94, 1988.
- 17) 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.