

長期繰返し荷重を受ける乱さない粘土の挙動

安原一哉*・Knut. H. ANDERSEN**

NGI型単純試験機を用いて、長期繰返し載荷途中に含まれる排水過程が、粘土の力学的挙動に及ぼす影響について調べた。その結果、(1)排水を伴う繰返し載荷は、正規圧密粘土の力学的性質を改善するが、過圧密粘土では劣化させる場合があること、(2)排水履歴後のせん断強度増加は粘着力によるものであること、(3)繰返し載荷後の再圧縮沈下の評価には圧密試験による再圧縮指数が有用であることが判った。

Keywords : cyclic load, clay, compressibility, strength, drainage

1. 緒 言

地震、波浪、交通などの繰返し荷重をうける土構造物や基礎地盤の挙動は、短期載荷条件と長期載荷条件とに分けられる。このうち短期載荷条件では載荷は顕著な排水が生じる以前の期間に限られる。したがって、この期間では土は非排水条件にあると考えられる。一方、長期載荷条件においては、地盤は繰返し載荷中は部分排水状態にあると考えられる。この過程では、土は体積変化を生じるが、このときの過剰間隙水圧の発生、消散のメカニズムは複雑である。

また、長期繰返し載荷においては載荷の休止期間中、非排水繰返し荷重によって発生した過剰間隙水圧は、繰返し載荷が停止後消散する可能性がある。ここでいう長期繰返し載荷とは、このようにある回数の繰返し載荷後休止期間を経て、また次の繰返し載荷をうける場合を指しており、上記の部分排水挙動は、ここでは取り扱わない。なお、この問題については、別途考察を行っていることを付記する¹⁾。

本文では、したがって、再圧縮による体積変化を含んだ粘土の繰返し履歴後挙動(いわゆる、Post-cyclic behaviour)に焦点を置いている。具体的には、以下の事項を調べた。

- 1) 非排水繰返し挙動に及ぼす排水履歴の影響
- 2) 再圧縮による沈下とその評価
- 3) 排水を伴う繰返し荷重履歴後の静的せん断特性

なお、本研究では、波浪による繰返し荷重をうける海洋構造物の基礎の挙動を想定している。

2. 実験概要

海洋構造物基礎の排水による沈下は、荒天(ストーム)中あるいは荒天と次の荒天との間に起こると考えられる。これが、繰返し荷重履歴後地盤や構造物の沈下を引き起こすことになり、したがって、これが次のストーム中の土の挙動に影響を与えることになる。

波浪荷重をうける海洋構造物基礎地盤の応力状態を簡略化すると、Fig.1のようになる²⁾。このような応力条件を室内試験において再現する方法はいくつか考えられるが、繰返し荷重負荷後の沈下の評価のためには、単純せん断試験(DSS試験)が適している。このような方向で海洋開発の先進国であるノールウェイでは、海洋構造物基礎地盤の設計のために、NGI型単純せん断試験(Fig.2)が用いられてきた³⁾。本研究でもこれを用いた。ここで取り扱う試験の特徴は、Fig.3に示すように、おのおのの非排水繰返し荷重の載荷過程と次のシリーズの繰返し載荷過程との間に排水過程を含むことである。

本研究で使用された粘土試料は、乱さないドラメン粘土である。NGIでは、この粘土に対する室内繰返し試験(繰返し三軸試験、繰返し単純せん断試験)が過去に多く積み重ねられている⁴⁾⁻⁶⁾。このドラメン粘土の平均的な指数的性質は、自然含水比 $w_n=52\%$ 、液性限界 $w_L=55\%$ 、塑性指数 $I_P=27$ そして土粒子の真比重 $G_S=2.76$ である。

繰返し単純せん断試験では、面積 35 cm^2 、初期高さ 1.6 cm の円板形供試体で使用された。この供試体に対し繰返しせん断応力を負荷するように、数段階に分けて $\sigma_{vc}'=392\text{ kPa}$ まで先行圧密させた。しかる後に、 τ_{hcy}/σ_{vc}' をパラメータとして所定の τ_{hcy} を負荷する。周波数は 0.1 Hz である。実験は応力制御で等体積のもとで行われた。なお、実験の概要は Table 1 にまとめている。

* 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒316 日立市中成沢町 4-12-1)

** NGI Section leader

Table 1 Testing conditions of DSS tests with undrained cyclic loading and drainage on normally consolidated Drammen clay.

Test No.	σ'_{vc} (kPa)	$\tau_{h,cy}$ (kPa)	$\tau_{h,cy}/\tau_{sf}$	N (cycle)
2-11	392	46	0.54	706
2-12	"	"	"	135
2-13	"	"	"	750
2-13-2	"	"	"	1000
2-14	"	"	"	1270
2-15	"	"	"	313
2-16	"	37	0.44	500
2-17	"	42	0.50	500
2-18	235	27	0.53	650
2-19	196	41	0.96	7
2-20	392	45	0.52	2000
2-21	"	"	"	74
3-2*	"	39	0.47	1000
3-3*	"	34	0.41	2100
4-2(B)	"	56	0.65	500
4-3(B)	"	42	0.50	500
4-4*(B)	"	56	0.65	300
4-6(B)	"	49	0.58	461
SC-25	39	22	0.40	141

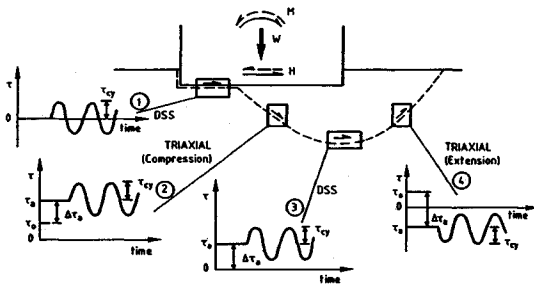


Fig.1 Simplified load conditions for some elements along potential failure surface²⁾

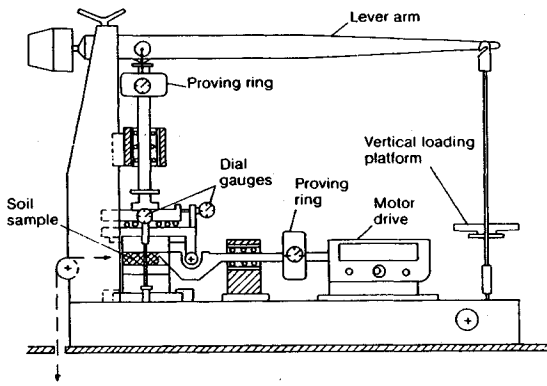


Fig.2 NGI direct-simple shear testing apparatus³⁾

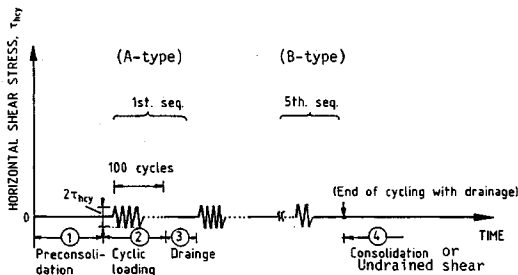


Fig.3 Loading sequences of cyclic DSS tests with drainage

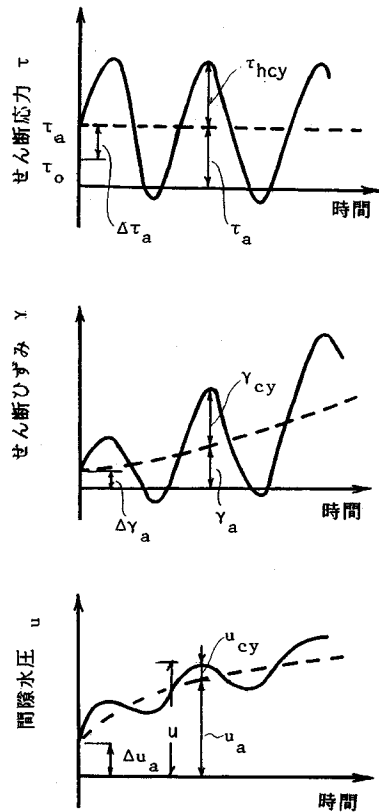


Fig.4 Shear stress, shear strain and excess pore pressure during cyclic loading⁷⁾

る。また、繰返し荷重に伴うせん断応力、せん断ひずみおよび間隙水圧の経時変化を Fig.4 に示した。

3. 非排水繰返し荷重時の挙動

正規圧密粘土と過圧密粘土に対する、1 シリーズの非排水載荷と次のシリーズとの間に排水を伴う繰返し単純せん断試験の典型的な結果を Fig.4 と Fig.5 に示している。これらの結果は、おのおののシリーズの載荷回数 が 100 回である 5 段階の非排水繰返し単純せん断によるものである。それぞれの繰返し載荷後に排水が許されてお り、その排水段階の測定時間は 30 分である。

正規圧密粘土の結果を示した Fig.4 では、非排水静的せん断時の破壊せん断応力 τ_{hf} の 65% に対応する $\tau_{hcy} = \pm 56$ kPa が適用されている。最初のシリーズの繰返し載荷段階中に 304~314 kPa の平均間隙水圧 u_a が生じている。これは、圧密時の初期鉛直応力の約 80% に相当する。この最初の段階では、載荷回数に伴って繰返しせん断ひずみ γ_{cy} も急速に増加しており、間隙水圧が 304~314 kPa のとき、 $\gamma_{cy} (= \gamma_{DA}/2)$ はすでに 3% 以上に達している (ちなみに、繰返し載荷中の間隙水圧及びせん断ひずみ成分は Fig.4 のように模式化され

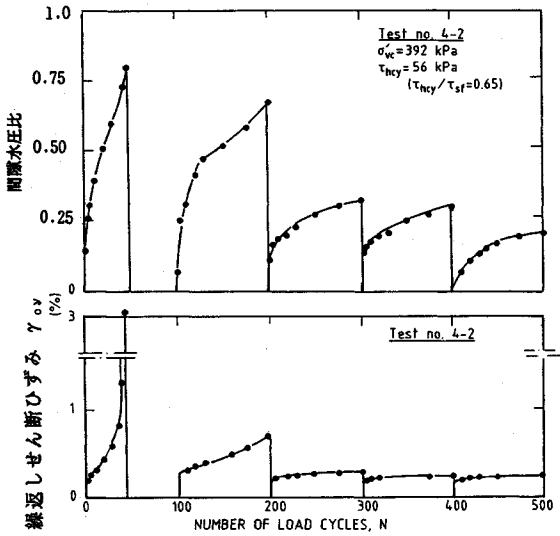


Fig. 5 Effect of drainage on development of cyclic shear strains and excess pore pressures in normally consolidated clay

る)。それゆえ、このとき、供試体は破壊近傍にあると考えられたので、完全な破壊を避けるため、载荷は45回で停止し排水を許した。このようなプロセスを続けていくと、排水の回数が増える度に間隙水圧の発生が鈍化する。そして、最後の5段階目の繰返し载荷終了時にはわずかに初期鉛直応力の15%から18%に相当する59~69 kPaの過剰間隙水圧が発生したに過ぎない。このことは、排水を伴う繰返し载荷による先行せん断 (preshearing) は正規圧密に対し、安全側の効果を与え、また、繰返し载荷により抵抗力が大きく改善されることを意味している。また、このことは間隙水圧の挙動のみからだけでなく、Fig. 5の繰返しせん断ひずみ γ_{cv} の経時変化の傾向からも同様に言えることである。

Fig. 6は正規圧密土に対する手順と全く同じ手順で、過圧密土 (OCR=4) に対して行った排水を伴う繰返し単純せん断試験結果を示したものである。用いられた水平繰返しせん断応力は破壊時の静的せん断応力 τ_{sf} の45%に相当する $\tau_{hcy} = 31$ kPaを负荷した。正規圧密供試体とは対称的に、過圧密供試体においては発生する間隙水圧は引き続き繰返し荷重期間に伴って増加する。この過圧密供試体に対しては、繰返しせん断ひずみもまた先行せん断によってかなり影響を受けることがFig. 6よりわかる。

4段階目の繰返し荷重载荷過程において繰返しせん断ひずみは急激に増加し、繰返し回数が約40回した後、繰返し荷重による破壊 ($\gamma_{cv} = 3\%$) が発生しそうになった。そこで繰返し载荷をこのとき停止し、第5段階目の繰返し荷重が加えられる前に排水を許した。Fig. 6からわかるようにこの段階で供試体は繰返し荷

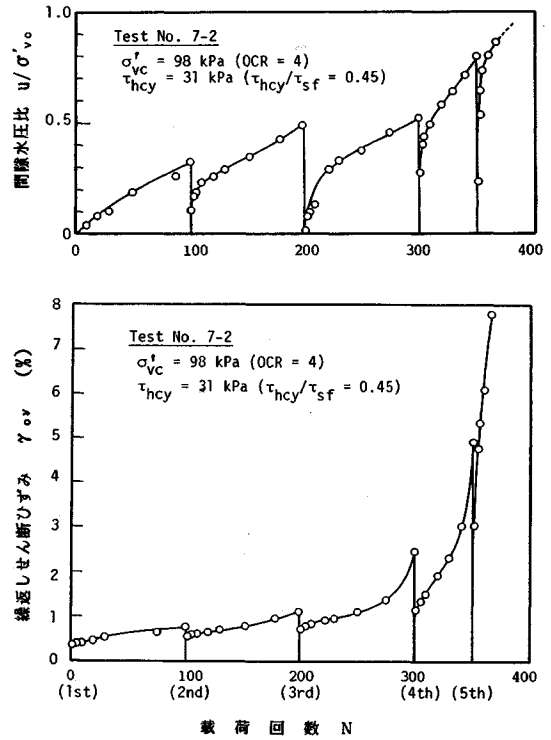


Fig. 6 Effect of drainage on development of cyclic shear strains and excess pore pressures in overconsolidated clay (OCR=4)

重に対して全く抵抗力を失ってしまったようにみえる。第5段階目においては、供試体はわずかに数回の繰返し荷重負荷後完全に破壊した。このことは排水を伴う先行せん断は、過圧密粘土に対し粘土骨格構造の劣化を伴い、引き続き非排水繰返しせん断に対し抵抗力がより小さくなることを示している。

4. 繰返し载荷履歴後の再圧縮挙動

前述のように繰返し荷重によって生じた過剰間隙水圧の消散に伴って排水が生じるが、これに伴って再圧縮沈下が起きる。非排水繰返し荷重によって生じる平均間隙水圧 Δu_a は正規圧密粘土や軽い過圧密粘土において、有効応力の低下をもたらす。このことは土要素の有効応力状態が、Fig. 7(a)における荷重沈下関係における点Aから点Bに移動することに相当する。排水が起こり繰返し荷重によって生じた間隙水圧が消散するに伴って有効応力は再び増加する。したがって土要素はFig. 7(b)に示された圧密試験における再圧縮過程の点Bから点Cへ至るときの曲線に従うと仮定することは問題を解決する一手段と考えられる。

Fig. 7(a)の点Cにおいては、有効応力は繰返し荷重の開始前の値と同じ鉛直有効応力 σ_{vc}' に達する。上記のことを確かめるためには、通常の圧密試験における再

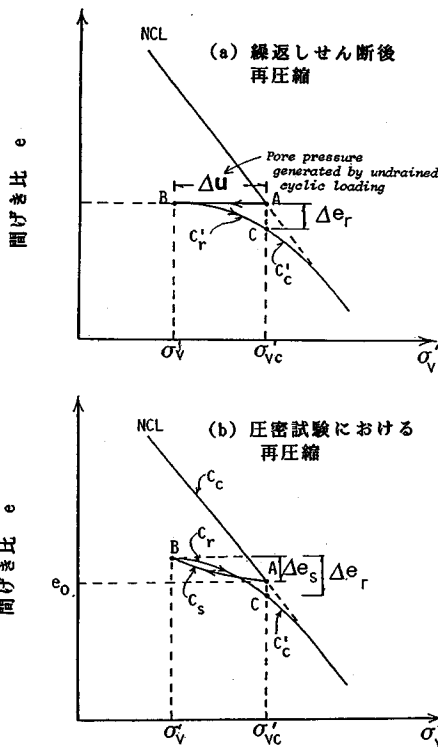


Fig.7 e -log σ'_v relations in (a) cyclic DSS tests followed by drainage and (b) oedometer tests (normally consolidated clay)

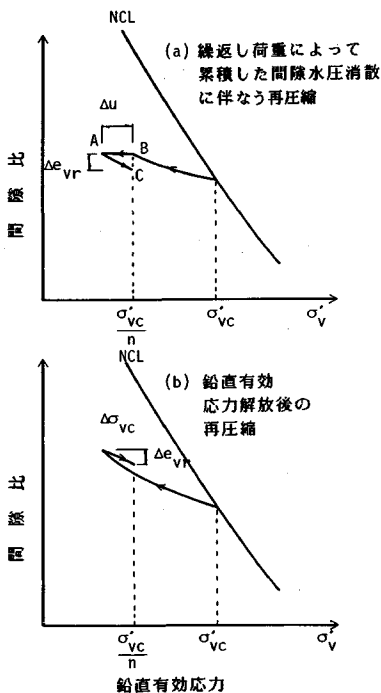


Fig.8 e -log σ'_v relations in (a) cyclic DSS tests followed by drainage and (b) oedometer tests (overconsolidated clay)

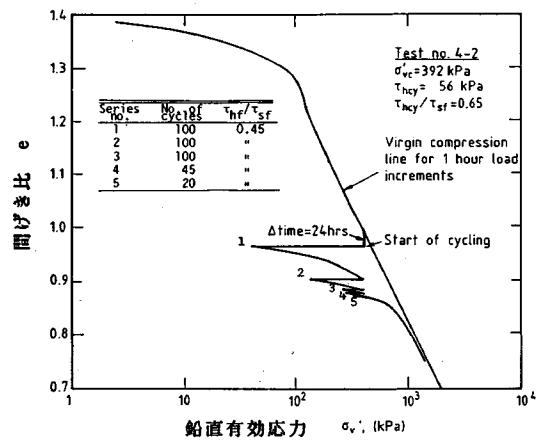


Fig.9 e -log σ'_v path from cyclic DSS test with drainage on normally consolidated clay

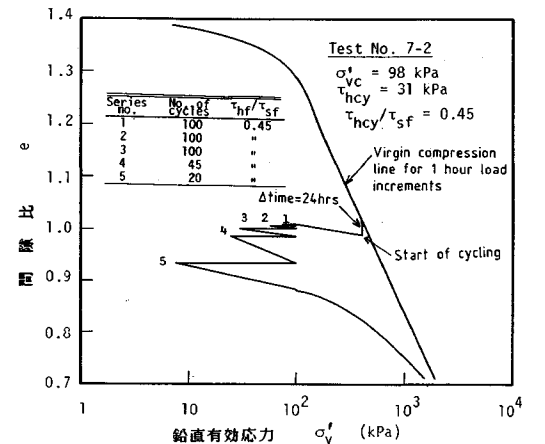


Fig.10 e -log σ'_v path from cyclic DSS test with drainage on overconsolidated clay (OCR=4)

圧縮曲線と繰返し履歴後の再圧縮曲線との間の類似性を調べなければならない。もしこれらの挙動が同じであれば、圧密試験から得られる再圧縮のデータに基づいて繰返し荷重によって生じた間隙水圧の消散による体積変化を予測することができる。上記のことは過圧密土についても同様に適用しうる。Fig.8はこのことを模式的に示したものである。

Fig.9とFig.10は試験No.4-2 (OCR=1) および試験No.7-2 (OCR=4) の静的な e -log σ'_v 経路を示している。Fig.9とFig.10の結果はFig.5とFig.6に示された結果を e -log σ'_v 関係に再整理したものである。Fig.9からは正規圧密粘土供試体に対しては、繰返し荷重による間隙水圧はおおのこの繰返し荷重段階毎に減少し、引き続き間隙水圧消散中の間隙比の変化はおおのこの載荷段階後に小さくなるのが良くわかる。一方、過圧密粘土 (OCR=4) に対してはFig.10からわかるよ

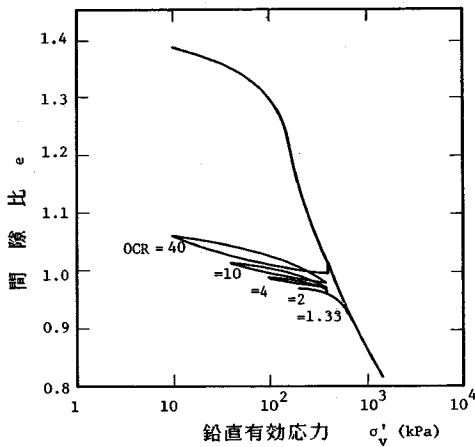


Fig. 11 e - $\log \sigma'_v$ path from oedometer test on normally consolidated clay with five series of unloading and reloading

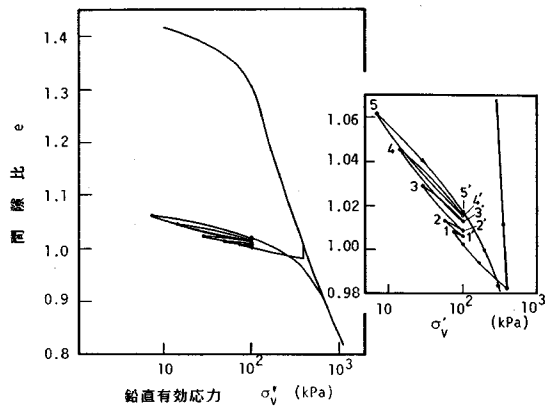


Fig. 12 e - $\log \sigma'_v$ path from oedometer test on overconsolidated clay with five series of unloading and reloading (OCR = 4)

うに、これらの傾向は逆になる。すなわち、間隙水圧は排水履歴後の非排水繰返し荷重段階が進むにつれて増加し、間隙水圧消散後の間隙比変化はそれに伴って増加する。

非排水繰返し履歴後の再圧縮と比較するため、そして、繰返し荷重による間隙水圧の消散による体積変化を予測するためのデータを得るために、二つのオドメータ型圧密試験を単純せん断装置を用いて行った。

この試験においては、Fig. 4 と Fig. 5 の繰返し単純せん断試験で観測された鉛直応力履歴とできるだけ等しくなるような除荷・載荷が試みられた。この荷重履歴は、過圧密供試体に対しては全く良く対応しているが、正規圧密供試体に対しては圧密試験における除荷荷重の方が単純せん断におけるものより大きくなっている。ともあれ、これら二つの試験結果は e - $\log \sigma'_v$ 経路の形で Fig. 11 と Fig. 12 に示されている。

Fig. 9, 10 の繰返し単純せん断後に排水を伴う試

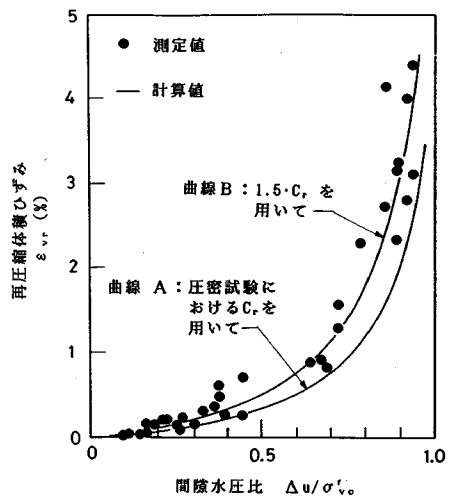


Fig. 13 Observed and calculated values of post-cyclic recompression volume strains versus normalized excess pore pressure in normally consolidated clay

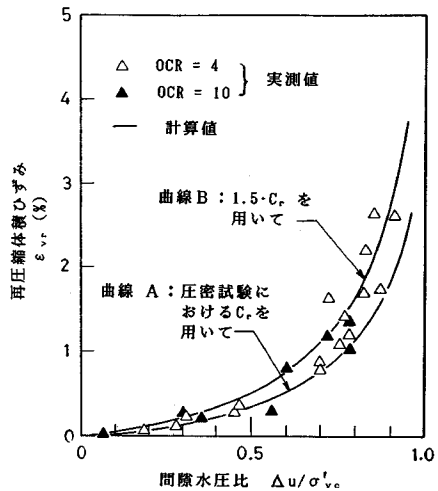


Fig. 14 Observed and calculated values of post-cyclic recompression volume strains versus normalized excess pore pressure in overconsolidated clay (OCR=4 and 10)

験結果と、繰返しせん断履歴を受けず単に鉛直応力の載荷・除荷が繰返される圧密試験結果 (Fig. 11 と Fig. 12) とを比較することによって、次のようなことが明らかになった。

1) 正規圧密粘土供試体に対しては、間隙比はおのこの載荷後に小さくなる。この事実は、繰返し DSS 試験と圧密試験ともに同じ傾向である。しかし、累積する間隙比減少量は繰返し履歴をうけたものが、大きくなっている。このことは圧密特性に及ぼす繰返し載荷の影響を示している。すなわち、供試体が初期鉛直応力 ($\sigma_{vc}=392$ kPa) を越えて載荷重を受けるとき、供試体はともに正規圧密線 (NCL) に近づく傾向があるものの、

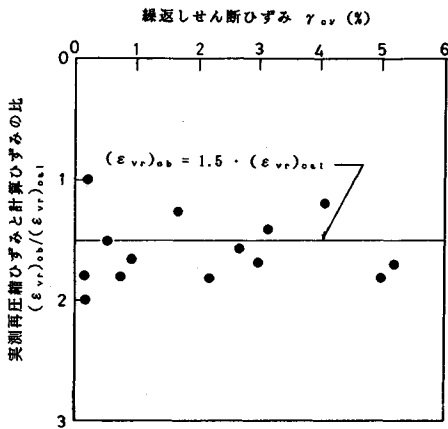


Fig. 15 Influence of cyclic shear strain on relation between observed and calculated post-cyclic recompression volume strains

繰返し履歴を受けたものはNCLへいくぶんゆっくり戻り、完全にはNCLに到達しない。

2) 過圧密供試体に対しては、繰返し荷重を受けた試験においてはおのおのの再載荷後に間隙比はかなり小さくなる。一方、繰返し荷重履歴を受けないとき、逆に間隙比は増加する。この点で正規圧密供試体と際立って相違している。初期鉛直応力を越えるときの $e-\log \sigma'_v$ 曲線の挙動は正規圧密土のそれに類似しているが、とりわけ、繰返し履歴を受けた供試体は、はるかにゆっくりNCLに近づく傾向があることが強調される。

繰返し荷重によって累積された過剰間隙水圧 Δu の消散に伴う体積変化 ϵ_{vr} と間隙水圧比 u/σ'_{vc} との関係を正規圧密土と過圧密土 (OCR=4, OCR=10) 毎にまとめてみると Fig. 13, 14 のようになる。ところで、 Δu の消散に伴う圧縮ひずみの変化は Fig. 7(a) を参照すれば次式によって表せることがわかる。

$$\epsilon_{vr} = \frac{C'_r}{1+e_0} \log \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} \right)} \right] \dots \dots \dots (1)$$

ここで問題は、上式に含まれる C'_r を決定することであるが、Fig. 7(a) と Fig. 7(b) の近似を考えると上式の C'_r は圧密試験における再圧縮指数 C_r をもって代用すれば、沈下予測はある程度可能なようである。排水を伴う繰返しDSS試験結果から得られる体積ひずみ $(\epsilon_{vr})_{ob}$ と C_r を用いた計算による体積ひずみ $(\epsilon_{vr})_{cal}$ との比 $(\epsilon_{vr})_{ob}/(\epsilon_{vr})_{cal}$ は Fig. 15 に示すように、繰返し載荷中のせん断ひずみによらず平均的にほぼ1.5となることがわかる。すなわち、繰返し履歴後の粘土の再沈下の評価に式(1)を用いるときには、ここで用いた粘土については $C'_r = 1.5 C_r$ とすることが便利であることがわかる。すなわち、式(1)は次式のように修正して用いる方が実用的な目的に適うと言えよう。

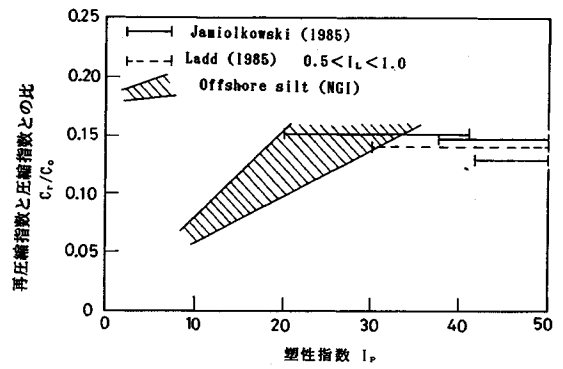


Fig. 16 Ratio of recompression and compression indices related to plasticity index

$$\epsilon_{vr} = 1.5 \frac{C_r}{1+e_0} \log \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} \right)} \right] \dots \dots \dots (2)$$

この関係は大原・松田⁸⁾の行った実験結果に対しても適用が良好である⁹⁾。このように C'_r/C_r の値は実験を行わなくとも一定値であれば、式(2)を実際に利用するに当たって便利である。したがって、この点はさらに塑性の異なる粘土に対する実験結果を集積する必要がある。用いた粘土試料の再圧縮指数についても十分なデータはないが、例えば、いくつかのデータをまとめた Fig. 16 を参照すればほぼ $C_r = (0.1 \sim 0.155) C_c$ くらいである⁹⁾。これを参照して $C_r = 0.15 C_c$ を用いれば式(2)は

$$\epsilon_{vr} = 0.225 \frac{C_c}{(1+e_0)} \cdot \log \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} \right)} \right] \dots \dots \dots (3)$$

となつて、圧縮指数 C_c が知られていれば再圧縮沈下の概略は、式(3)より知られることになる。

式(3)においてドラメン粘土の圧縮指数の平均値として $C_c = 0.350$ とし⁹⁾、式(3)を適用すれば、計算曲線は Fig. 13 の実線 (曲線 B) となる。図に見るように、計算値と実測値との対応は、良好と言うことができる。同様の手順を、過圧密土に対しても適用して $\epsilon_{vr} \sim \Delta u/\sigma'_{vc}$ 関係の計算曲線を求めてみると Fig. 14 のようになる。正規圧密土に対する Fig. 13 と同様 $1.5 C_r$ とすることによって、計算値は実験値と良い対応を示している。

Fig. 13 と Fig. 14 を総合すると、繰返し応力によって累積した過剰間隙水圧の消散に伴う沈下は、再圧縮沈下のほぼ1.5倍であることを意味しており、このことは地震や波浪など繰返し荷重をうける粘土地盤の沈下計算に反映させる必要がある。

5. 再圧縮後の非排水せん断挙動

繰返し荷重によって生じた正の過剰間隙水圧の消散

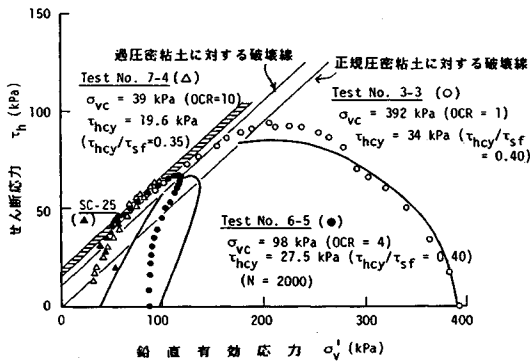


Fig. 17 Stress paths in post-cyclic undrained monotonic shear after Type A tests
(実線は繰返し履歴のない場合)

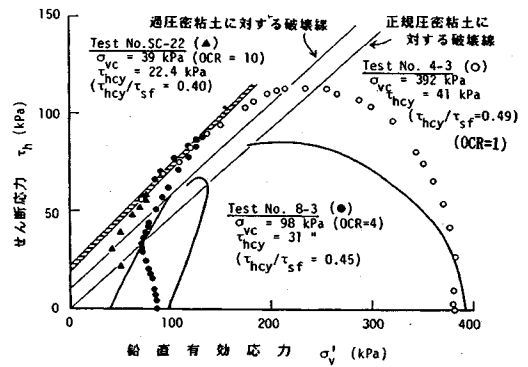


Fig. 18 Stress paths in post-cyclic undrained monotonic shear after Type B tests
(実線は繰返し履歴のない場合)

に伴って排水が生じるが、正規圧密粘土の場合は間隙比を減少させるため、先に述べたように次の繰返し荷重に対する抵抗力が大きくなる。このことは排水後の静的せん断強度も大きくなることを示唆している。

Fig. 17はOCR 1, 4, 10の供試体に対する1シリーズの排水を伴う繰返し載荷後の等体積せん断試験(タイプA)におけるストレス・パスを示している。これによれば正規圧密粘土の場合には、ストレスパスの形状はとりわけ初期において繰返し荷重履歴を受けない供試体のそれと酷似しているものの、最大せん断応力 $\tau_{h,max}$ は若干大きくなっている。

これに対し、タイプB(排水を伴う繰返し載荷試験を5シリーズ繰返した試験)における排水履歴後の等体積せん断試験の結果(Fig. 18)によれば排水履歴の回数が増加することによって、すべての供試体の最大せん断応力はタイプAの場合よりも一段と大きくなっていることがわかる。

以上のことを今度は過圧密粘土について眺めてみよう。タイプAの結果を示したFig. 17では、両者のストレス・パスの形状に若干の相違がみられるものの、最大せん断応力に大きな違いがみられない。これに対し、タイプBの結果(Fig. 18)ではタイプAの結果に比べると、最大せん断応力は著しく増加していることがわかる。過圧密土においても非排水履歴後の排水によってせん断抵抗が増加していることがわかる。この結果は、しかし、先のFig. 6にみられるように、排水履歴は過圧密土の繰返し荷重に対する抵抗力を増大するのに役立たないという結論と異なっている。

このように、過圧密土については、繰返し荷重に対する応答は単調載荷の静的荷重に対する応答とは必ずしも符合しないことがわかる。

最後に、Fig. 17とFig. 18に繰返し荷重を受けない供試体に対するせん断試験結果に対応する破壊線を実線で引いてみると、斜線で示した範囲にある繰返し載荷

履歴を受けない粘土供試体の破壊包絡線とほぼ平行であるものの、粘着力 c' が排水履歴によって増大することが見られる。しかも、その程度は、Fig. 17とFig. 18を比較すれば排水履歴の回数が増えるほど、その傾向が著しいことがうかがえる。ただし、どちらの破壊包絡線も排水履歴を有しない静的破壊線の勾配とほぼ同一にある。このことは、とりもなおさず、破壊時の有効内部摩擦角 ϕ' は、繰返し履歴や排水履歴の影響を受けないことを示唆している。

以上を要するに、排水を伴う繰返し履歴後の粘土のせん断抵抗の増加は粘着成分の増加によるものであり、摩擦成分とは無関係と判断される。

6. 結 言

本文は排水を伴う非排水繰返し載荷をうける粘土の挙動について論じた。このような目的を達成するために、乱さない粘土に対する繰返し単純せん断試験によって、繰返し変位(せん断ひずみ)、繰返し強さおよび繰返し荷重履歴後の沈下特性を調べた。その結果次のような結論が得られた。

- 1) 正規圧密粘土に対しては、排水を伴う繰返し載荷は粘土のせん断強度の増加に有利である。また、繰返し変位を小さくし次のシリーズの繰返し載荷による破壊回数を遅延させる効果がある。
- 2) 一方、過圧密粘土に対しては、応力レベルの大きい領域では排水を伴う繰返し載荷は、逆に繰返し変位を増加させ、また、繰返し破壊回数を小さくするというように望ましくない効果をもたらす傾向がある。
- 3) 非排水繰返し荷重によって生じた過剰間隙水圧が消散するに伴って粘土は圧密による体積変化を生じる。これが波浪をうける海洋構造物や地震後の粘土地盤の再沈下につながる。そして、この沈下は圧密試験における再圧密による沈下よりはいくぶん大きくなる。しかし、その沈下の評価は圧密試験における再圧縮指数を利

用することによって可能である。

4) 繰返し荷重を受けた後、排水の履歴を有する正規圧密粘土は排水履歴の回数が増えるとともに、単調載荷静的せん断時の最大せん断応力を増大させる。過圧密粘土も同様であるが、正規圧密粘土ほど顕著でない。

5) 排水履歴に伴う強度の増加は、粘着力の増加によるものであり内部摩擦角には無関係である。

引用文献

- 1) 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及び変形予測，土木学会論文集，第400号/Ⅲ-10，pp.151～160，1988.
- 2) Andersen, K.H. and Lauritzen, R. : Bearing Capacity for foundations with cyclic loads, Journal of Geotechnical Eng. Division Proc. ASCE, GE Vol.114, No.5, pp.540～555, 1988.
- 3) Bjerrum, L. and Landva, A. : Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, Geotechnique, Vol.16, No.1, pp.1～20, 1966.
- 4) Andersen, K.H. et al. : Effect of cyclic loading on clay behaviour, Proc. of Conf. Design and Construction of Offshore Structures, pp.75～79, Institution of Civil Engineers, London, 1976.
- 5) Andersen, K.H. et al. : Cyclic and static laboratory tests

on Drammen clay, Journal of the Geotechnical Eng. Division, Proc. ASCE, Vol.106, No.GT5, pp.499～529, 1980.

- 6) Andersen, K.H. et al. : Cyclic soil data for design of gravity structures, Journal of Geotechnical Eng. Division Proc. ASCE, GE, Vol.114, No.5, pp.517～539, 1988.
- 7) Andersen, K.H. : Properties of soft clay under static and cyclic loading, Invited Lecture, Proc. Int. Conf. Eng. Problems of Regional Soils Beijing, China, 1988.
- 8) Ohara, S. and Matsuda, H. : Study on the settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear, Soils and Foundations, Vol.28, No.3, pp.103～113, 1988.
- 9) Yasuhara, K. and Andersen, K.H. : Post-cyclic recompression settlement of clay, Proc. 5th Int. Conf. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.1, pp.159～167, 1989.
- 10) 松井保・小原秀夫・伊藤富雄：飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響，土木学会論文集第257号，pp.41～51，1978.
- 11) 鈴木猛康：動的応力履歴を受けた飽和粘性土の沈下挙動，応力地質，Vol.25, No.3, pp.21～31，1985.
- 12) 安原一哉・Andersen, K.H.・Berre, T. :排水を伴う非排水繰返し三軸試験における異方圧密不攪乱粘土の挙動，土木学会論文集，436号，pp.1～8，1991. (1990.4.9受付)

CLAY BEHAVIOUR UNDER CONSEQUITIVE LONG-TERM CYCLIC LOADING IN DIRECT SIMPLE SHEAR TESTS

Kazuya YASUHARA and Knut H. ANDERSEN

The cyclic direct-simple shear tests on undisturbed Drammen clay were carried out. Every test involves several series of consecutive undrained cyclic loading with drainage between each series of cyclic loading. The results from laboratory tests indicate the followings : (1) For normally consolidated clays, cyclic loading followed by drainage will be beneficial to resist the subsequent cyclic loading. On the contrary, for overconsolidated clays cyclic loading followed by drainage may be unfavourable and lead to larger cyclic displacements and a small number of cycles to failure during subsequent cyclic loading. (2) The recompression index obtained from conventional oedometer tests can be adopted for predicting the approximate values of post-cyclic recompression settlements. (3) Drainage after undrained cyclic loading improves the undrained static strength.