

(1) 繰返し載荷を受けた粘土の圧密特性

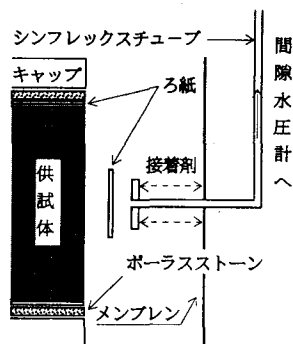
横浜国立大学工学部 (学) ○上野 恭宏
 横浜国立大学工学部 (正) ブラダン テージ
 横浜国立大学工学部 (正) 今井 五郎

1. はじめに

粘土地盤に地震や交通等の繰返し荷重が作用すると、負のダイレタンシーに起因する過剰間隙水圧が蓄積され、地盤中の有効応力が低下する。また、その消散に伴って地盤沈下が生ずる。この現象を室内でシミュレートするために非排水繰返し三軸試験が行われているが、従来では供試体の上面及び下面で間隙水圧を測定していたため、両面排水にすると圧密中の供試体中央の間隙水圧変化を知ることができない。小針を供試体中央に挿入したようなやり方もあるが、異物の影響についての議論が常にあり解決されていない。そこで本研究では、供試体内に異物を挿入することなく供試体中央高さにおける間隙水圧を測定できるように工夫し(図-1参照)、圧密中の過剰間隙水圧の消散の様子を調べた。本報告では、非排水繰返し載荷を受ける粘土中の間隙水圧分布及びその後の粘土の圧密特性を詳細に調べることを試み、その結果について検討した。

表-1 実験条件及び結果

Test No.	e_0	e_c	$q/2\sigma'_c$	$f(\text{Hz})$	N_c	$\Delta u_{\max}/\sigma'_c$	$DA_{\max}(\%)$	Δe
TC-1	1.752	1.495	0.20	0.2	500	0.345	0.7	0.479
TC-2	1.783	1.511	0.22	0.2	500	0.612	1.4	0.474
TC-3	1.782	1.496	0.25	0.2	213	0.843	5.6	0.405
TC-4	1.737	1.497	0.20	0.1	500	0.400	0.7	0.460
TC-5	1.768	1.494	0.23	0.1	500	0.637	1.4	0.452
TC-6	1.792	1.495	0.25	0.1	145	0.743	3.1	0.431
TC-7	1.777	1.494	0.20	0.05	500	0.501	1.0	0.467
TC-8	1.784	1.492	0.23	0.05	240	0.875	7.6	0.375
TC-9	1.776	1.499	0.25	0.05	110	0.905	11.6	0.365



※ $DA_{\max}(\%)$: 最大両振幅軸ひずみ Δe : 過剰間隙水圧消散に伴う間隙比変化

図-1 中央間隙水圧の測定方法

2. 試料及び実験方法

本研究では、東京湾海成粘土を74 μm のふるいで濾して、液性限界の2倍で繰返し調整試料(土粒子の密度2.69 gf/cm^3 、液性限界80%、塑性指数45)を0.5 kgf/cm^2 で予圧密し、高さ10cm、直径5cmの供試体に成形した。この供試体を用いて以下の手順で実験を行った。

- ① 有効拘束圧 $\sigma'_c=1\text{kgf}/\text{cm}^2$ ($\sigma'_c=3\text{kgf}/\text{cm}^2$, $\sigma'_{bf}=2\text{kgf}/\text{cm}^2$)で等方圧密を行った。
- ② 載荷周波数 f 、繰返し応力比 $SR(=q/2\sigma'_c)$ を3種類ずつ変えて所定の回数まで非排水繰返し載荷を行い、軸差応力がゼロの状態繰返し載荷を停止した。
- ③ 供試体の上面及び下面における間隙水圧の平均値(以後、平均間隙水圧と呼ぶ)と供試体中央高さにおける間隙水圧(以後、中央間隙水圧と呼ぶ)との差が0.01 kgf/cm^2 程度以内に収まるまで非排水状態で放置した。
- ④ 上、下面より排水させ、そのときの中央間隙水圧変化、排水量及び沈下量を測定した。

なお、平均間隙水圧で測定したB値、中央間隙水圧で測定したB値共に時間遅れがなく、全ての実験で0.96以上であった。また、実験の種類は表-1にまとめて示した。

3. 実験結果及び考察

3-1 繰返し載荷過程における粘土の挙動：図-2は、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ (Δu は水圧波形のピークとした)の増加傾向に与える繰返し応力比の影響を示したものである。繰返し応力比が大きいほど過剰間隙水圧比も大きく、その変化の割合は、ある繰返し応力比を境にして急激に増加している。図-3は、過剰間隙水圧比の増加傾向に与える載荷周波数の影響を示したものである。載荷周波数が小さいほど過剰間隙水圧比が大きい、その変化の割合は、ある載荷周波数を境にして急激に増加している。これらのことから、過剰間隙水圧比の増加傾向は繰返し応力比や載荷周波数の影響を強く受けることが分かる。また、中央過剰間隙水圧比と平均過剰間隙水圧比の増加傾向の違いに注目すると、繰返し応力比が小さい場合や載荷周波数が大きい場合には、平均過剰間隙水圧比が中央過剰間隙水圧比をわずかに上回る程度なのに対して、繰返し応力比が大きい場合や載荷周波数が小さい場合には、次第に中央過剰間隙水圧比が平均過剰間隙水圧比を大きく上回るようになっていくことが分かる。この現象を、まず繰返し応力比の面からみてみる。軸ひずみは、供試体断面のどの部分でも同じであるが、側方ひずみは、端面摩擦等の影響で供試体中央高さ付近において最も大きくなる。繰返し応力比が小さいと、生じるひずみが小さいので問題にならないが、繰返し応力比が大きいと生じるひずみが大きく、この影響が強く現れるために中央間隙水圧の上昇が著しくなると考えられる。次に、載荷周波数の面からみてみる。図-4、図-5は、平均過剰間隙水圧比と中央過剰間隙水圧比の変化を示したものである。これらについて波形のピーク差及び振幅に注目し、表-2のように整理した。△

表-2 供試体内部の水圧の発生仕方

Test No.	$q/2\sigma'_c$	$f(\text{Hz})$	$\Delta t/T(\%)$	um/ua
TC-2	0.22	0.2	15.0	0.286
TC-5	0.23	0.1	10.8	0.379
TC-8	0.23	0.05	9.0	0.474

表したもので、 $\Delta t/T$ は、両波形のピーク差 Δt の載荷周期 T (s)に対する比を表したものである。※ T ：載荷周期(s)

で、載荷周波数が大きいほど大きくなっている。また um/ua は、 $N_c=100$ における両波形の振幅の比を表したもので、載荷周波数が大きいほど小さくなっている。従って、載荷周波数が大きいほど供試体内部への力及び水圧の伝達はより遅れることが分かる。これは、載荷周波数に依存する粘性のために力及び水圧が遅

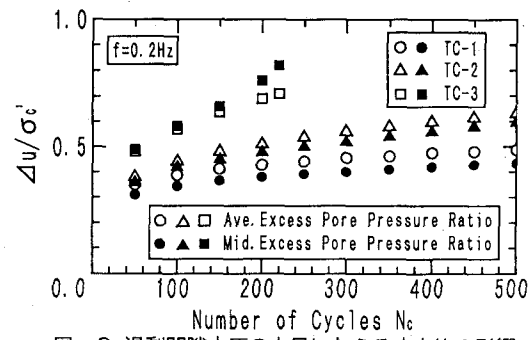


図-2 過剰間隙水圧の上昇に与える応力比の影響

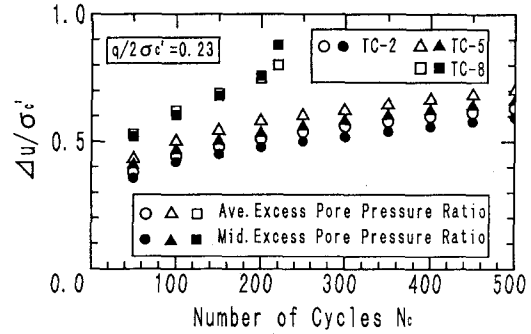


図-3 過剰間隙水圧の上昇に与える周波数の影響

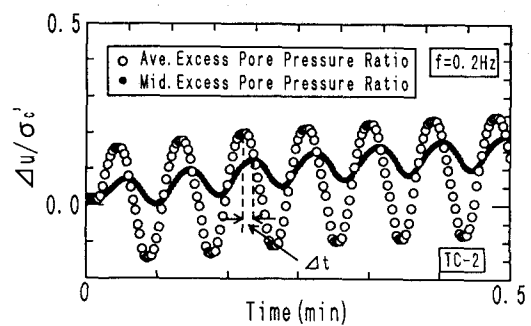


図-4 平均過剰間隙水圧と中央過剰間隙水圧の変化

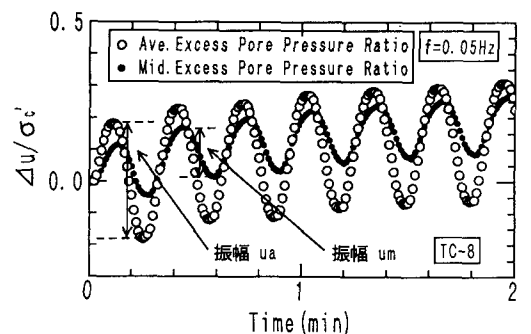


図-5 平均過剰間隙水圧と中央過剰間隙水圧の変化

れて伝わるためと考えられる。逆に言えば、載荷周波数が小さいほど供試体内部へ力及び水圧が十分に伝わるということであり、従って中央間隙水圧の上昇は著しくなると考えられる。

3-2 放置過程における粘土の挙動：図-6、図-7は、繰返し載荷停止後の過剰間隙水圧比の変化の様子を示したものである。図-6は、繰返し載荷停止時に中央過剰間隙水圧比と平均過剰間隙水圧比の差がほとんどなかった場合（繰返し応力比が小さく、載荷周波数が大きい場合）のもので、放置を開始してから数10分程度で両者の値がほとんど等しくなっており、供試体内の間隙水圧分布がほぼ一樣になっていることを示している。しかも両者の値の変化は極めて微小なものである。これに対して図-7は、繰返し載荷停止時に中央過剰間隙水圧比が平均過剰間隙水圧比を大きく上回っていた場合（繰返し応力比が大きく、載荷周波数が小さい場合）のもので、両者の値がほぼ等しくなるまでに約180分という極めて長い時間がかかっている。従って、中央過剰間隙水圧比と平均過剰間隙水圧比の差が大きいほど、それらが均一化するのにより長い時間を要することが分かる。さらに、この状態に至るまでの両者の挙動には大きな違いが見られる。すなわち中央過剰間隙水圧比は、繰返し載荷後やや増加してから緩やかに減少しているが、平均過剰間隙水圧比は繰返し載荷後急激に増加し、次第に緩やかな増加へと移行している。これは、繰返し載荷後もしばらくは非排水クリープ現象によって過剰間隙水圧が増加することを意味している。また、最終的に蓄積された過剰間隙水圧の大きさを比較すると、図-7の場合が図-6の場合を大きく上回っている。図-8は、最大過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma'_c$ と最大両振幅軸ひずみ $DA_{max}(\%)$ の関係を示したもので、両者の間に一義的な関係があることが分かる。但し $DA_{max} \geq 10(\%)$ の範囲では、 $\Delta u_{max}/\sigma'_c$ がほとんど変化しないにもかかわらず DA が増加していく（供試体が破壊してしまっている）ため両者の関係は不安定なものとなる。

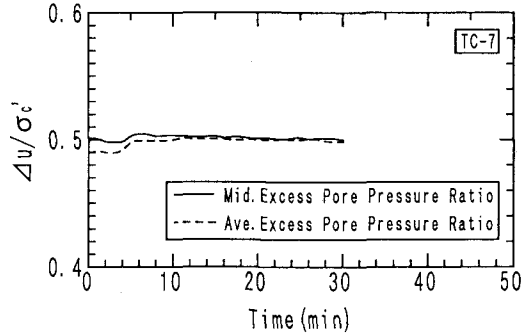


図-6 放置過程における過剰間隙水圧の変化

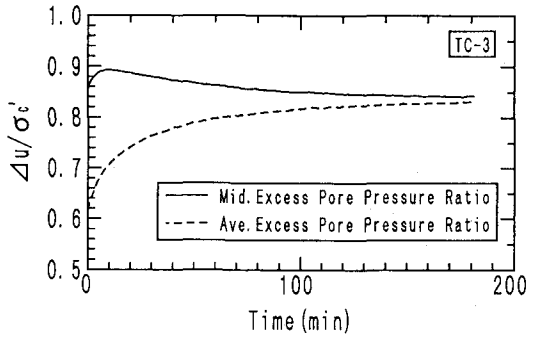


図-7 放置過程における過剰間隙水圧の変化

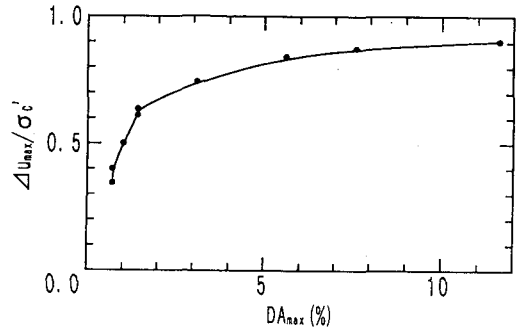


図-8 最大過剰間隙水圧と最大両振幅軸ひずみの関係

3-3 過剰間隙水圧消散過程における粘土の挙動：図-9に、TC-2における等方圧密過程から過剰間隙水圧消散過程までの実測データを示した。従来では、繰返し載荷後の圧密特性を次式で示す再圧縮指数 C_r^* によって定義していた。

$$C_r^* = \Delta e / \log(p_b'/p_c') \quad \text{ここに、} p' \text{ は平均有効応力である。}$$

この定義式は、 $C \sim D$ 間の $e \sim \log p'$ 関係が直線であることを仮定しているが、図-9から分かるように実際の $e \sim \log p'$ 関係は直線ではない。そこで本研究では $C \sim D$ 間に適当な数の計測点を取り、ある点を挟む2点を結んだ線分の傾きをその点における再圧縮指数 C_r^* と定義し、圧密の進行に伴う C_r^* の変化の様子を調べた。図-10は、横軸に有効応力比 p_b'/p_c' 、縦軸に C_r^* を取って示したものである。 C_r^* はやや減少した後緩

やかに増加に転じ、圧密終了 ($p_D'/p_C'=1$) に近づく
と急激に増加している。これは、 $p_D'/p_C'=1$ が過圧密
領域と正規圧密領域の境界点であるためと考えられる
。また C_r^* は、標準圧密試験より得られた膨張指数 C_s と
圧縮指数 C_c の間の大きさの値、具体的には C_s の 1~25 倍
の値を取り、蓄積過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma_c'$ (表-
1 参照) が大きいほど全体的に C_r^* の値も大きい。さら
に、 C_r^* の変化傾向には繰返し応力比や周波数の影響は
見られない。但し、圧密開始直後及び終了直前は、過
剰間隙水圧の変化が極めて微小であるため省略した。
図-11 は、刻々と変化する C_r^* の平均値 $C_{r^* Ave}$ と C_r'
の比較を示したものである。 $C_{r^* Ave}$ は、 $e-\log p'$ 曲線
を一次近似した場合の傾きとも考えられるが C_r' より小
さく、全体的に C_r^* の範囲の最小値寄りの値となってい
る。

4. 結論

本研究により、以下の結論を得た。

- ① 繰返し載荷によって供試体内部に伝達される水圧
には時間遅れが伴い、その度合いは載荷周波数に
依存する。
- ② 繰返し応力比が大きく載荷周波数が小さいほど、
同一繰返し回数における過剰間隙水圧比及び両振
幅軸ひずみは大きくなり、また供試体内の間隙水
圧の分布もより著しくなる。
- ③ 過剰間隙水圧比と両振幅軸ひずみの間には一義的
な関係が成り立つ。
- ④ C_r^* は圧密開始後やや減少した後、緩やかに増加す
る過程を経て急激に増加する。
- ⑤ C_r^* の大きさは蓄積過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma_c'$ の
大きさにのみ依存する。
- ⑥ C_r^* は C_s と C_c の間の値を取り、具体的には C_s の 1~2
5 倍程度である。

参考文献

- 1) 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
会論文報告集, 第257号, pp. 41~51, 1977
- 2) Kazuya Yasuhara and Knut H. Andersen: "RECOMPRES
SION OF NORMALLY CONSOLIDATED CLAY AFTER CYCLI
C LOADING", "SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 31, No. 1,
pp. 83~94, 1991

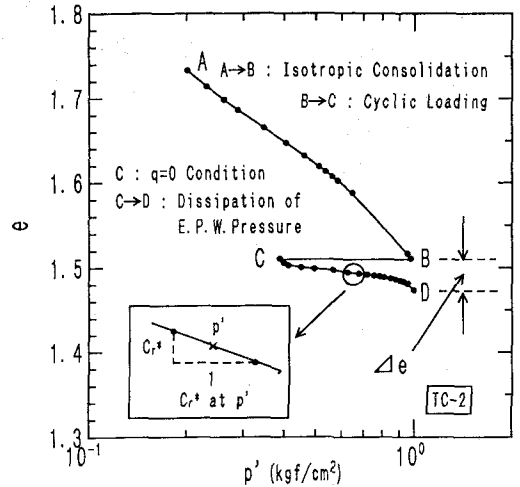


図-9 $e-\log p'$ 曲線

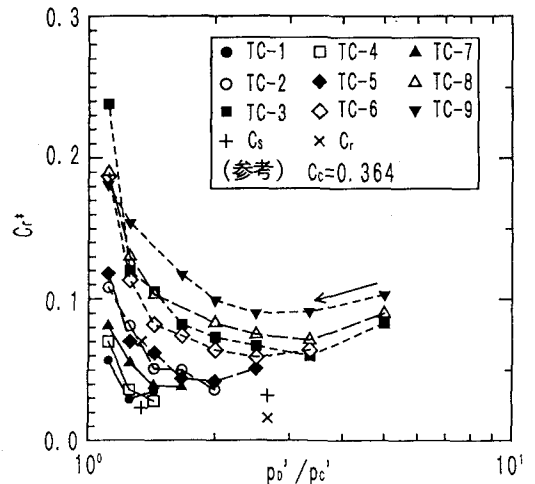


図-10 C_r^* と有効応力比の関係

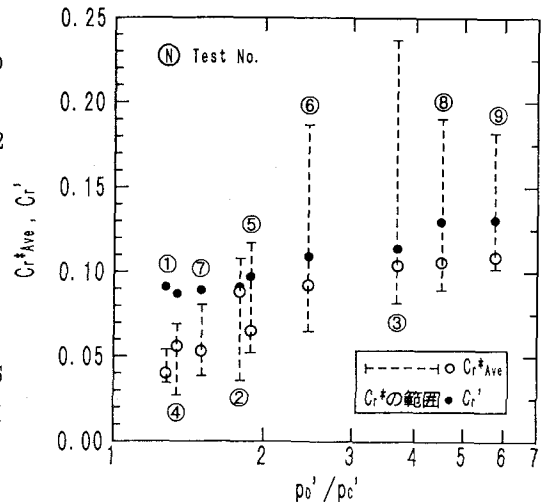


図-11 $C_{r^* Ave}$ と C_r' の関係