

大阪洪積粘土の圧密特性について

石 井 義 明

CONSOLIDATION PROPERTY OF OSAKA DILUVIAL CLAYS

By Yoshiharu ISHII

Synopsis

In this report the experimental results on preconsolidation pressure values and consolidation curves of Osaka diluvial clays are presented. They are affected by such factors as pressure increment ratio, loading period etc.

The results obtained are as follows;

- (1) Preconsolidation pressure P_c increases with decreasing pressure increment ratio $\Delta p/p$ irrespective of the samples (Fig-2,3).
- (2) Elapsed time until 100 percent primary consolidation becomes longer with decreasing pressure increment ratio (Fig-n,7).
- (3) For undisturbed samples preconsolidation pressure decreases with increasing loading period (Fig. 4), but it is inverse for remoulded samples (Fig. 5).

1. ま え が き

大阪周辺の洪積層の土質調査はすでに多くなされている¹⁾。これによれば先行圧密荷重 P_c は現在の推定有効上載圧 P' より大きな値を示しいわゆる過圧密状態にあることを示している。これは過去に現在推定される P' より大きな圧力を受けたことを示すと同時に粘土粒子間のセメンテーション的な結合なども影響していると考えられる。

大阪泉州地区の土質調査報告書¹⁾ にもとずき P_c と深さ D の関係を Fig. 1 に示した。この周辺の地下水位は地表より -3m にあるので有効上載圧 P' は -3m までは $P' = 1.8\text{g/cm}^3 \times D$ それより深い部分については $P' = 0.8\text{g/cm}^3 \times D$ とした。図より $P_c > P'$ であることがわかる。

$P_c > P'$ となる理由としてはセメンテーションなども考えられるが、実験より得られる P_c が一つの試料について常に唯一に定まったものでなく、圧密試験条件によって異なることが Leonards²⁾, Crawford³⁾ らにより明らかにされている。ここに圧密試験条件というのは荷重増加比 $\Delta P/P'$, すなわち各荷重段階における前段階荷重 P' に対する次段階荷重の増加量 ΔP または荷重載荷時間のことである。

しかしこれら問題の研究結果に対する解釈につ

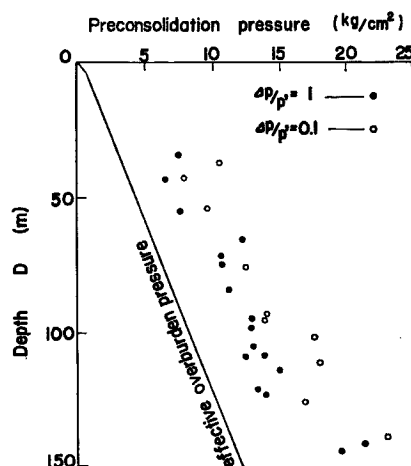


Fig. 1 Distribution of preconsolidation pressure against depth.

いては統一的な説明はなされておらず、今後さらに実験データの集積が必要である。

本文は大阪泉大津市で採取した洪積層粘土試料について種々の載荷条件のもとで行なった圧密試験の結果と、すでになされた研究結果との比較を行なうとともに、その他液性限界など土のもつ性質の変化に圧密特性がいかに対応するかについて調べた実験的研究の結果である。

2. 試 料

試料は地表面下 36m~150m の範囲の深さから直径 15cm のサンプリングチューブを用いて採取した不攪乱試料を主に用いたが、実験結果の考察を助けるために練り返し後再圧密した粘土を一部に用いた。不攪乱試料は深さや液性限界など変化に富ませるため上記深さの範囲から10種類取り出し実験を行なった。これらを用いた試料の採取深さ D 、標準圧密試験より求めた先行圧密荷重 P_c 、液性限界 w_L 、塑性指数 I_p 、自然含水比 w 、比重 G を Table 1 に示した。

Table 1 Physical properties of undisturbed samples.

D m	P_0 kg/cm ²	C_c	w_L %	I_p	w %	G
37.2~ 39.1	8.5	0.196	36.3	18.8	19.6	2.67
43.7~ 45.3	7.0	0.600	69.0	44.9	39.0	2.65
54.0~ 55.7	7.7	0.774	74.1	45.5	48.5	2.62
75.1~ 76.7	10.8	0.804	76.8	51.5	47.5	2.68
93.5~ 95.1	13.0	0.400	60.9	38.6	36.0	2.68
95.1~ 96.6	14.8	0.641	79.1	51.9	44.5	2.65
101.0~102.2	13.1	1.831	110.2	76.1	55.0	2.65
112.0~112.8	15.0	1.140	103.0	68.2	55.4	2.68
126.6~128.3	17.0	0.754	94.3	65.5	56.1	2.58
139.9~140.6	21.3	1.170	101.0	66.9	50.5	2.65

3. 実験結果と考察

(a) 荷重増加比 $\Delta P/P'$ が先行圧密荷重 P_c におよぼす影響について

Crawford³⁾ によれば実験室における圧密速度が現場のそれより早く例えば Leda clay の圧密が 1%/年 に対し、実験室では 1/10分で 1%圧密が進行すると述べている。これは実験室においては $\Delta P/P'$ が大きいために急激な載荷のため部分的に構造の破壊が生ずるためである。このことより圧密試験結果から透水性を予測したりすることは疑わしく、実際問題に実験結果を外挿することの危険性を指摘している。Leonards と Altschaeffe²⁾ は不攪乱、攪乱再圧密試料を用い $\Delta P/P'$ が P_c におよぼす影響について実験を行なっている。それによれば $\Delta P/P'$ を非常に小さくすると圧密曲線がもとの処女圧密曲線からはずれ、正規粘土でも有効上載圧力 P' より大きな P_c が得られ、これを疑似先行圧密荷重 P_{eq} と名づけている。

そこで $\Delta P/P'$ の影響をみるため同一試料から取り出した 3 個の供試体について各荷重段階における載荷時間を 24 時間、 $\Delta P/P'$ がそれぞれ 1.0, 0.5, 0.1 について圧密実験を行なった。採取深度 75.1m~76.7m の試料について得られた間げき比 e と荷重 P の関係は Fig. 2 である。なお同一データでも e のスケールが異なると $e-\log P$ 曲線の最大曲率の位置が異なるため P_c として異なった値が得られるという報告があるので全部同一スケールで整理した。また図において処女圧密曲線は折れ曲っている。そこで最初の直線領域を延長し Casagrande による手法を用いて P_c を求めた。

図は $\Delta P/P'=0.1$ の場合 $P_c=12.4$ kg/cm²、 $\Delta P/P'=1.0$ すなわち標準圧密試験による P_c は 10.8 kg/cm² で $\Delta P/P'$ が小さいものほど大きな P_c を得ている。この実験を他種の粘土についても行なったが同様な傾向を得た。練り返し再圧密した試料について行なった結果を示せば Fig. 3 のようになる。これは練り返

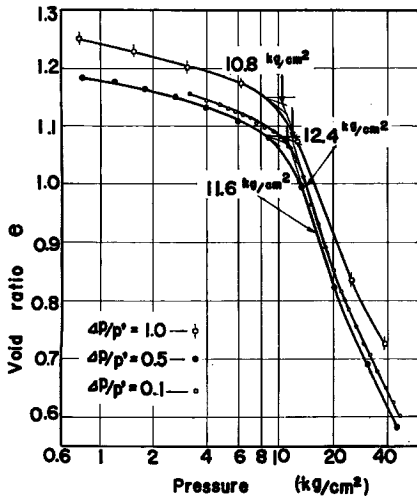


Fig. 2 Void ratio—log pressure curves for undisturbed clay.

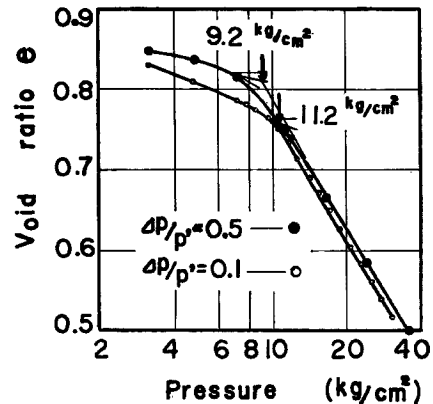


Fig. 3 Void ratio—log pressure curves for remoulded samples.

し再圧密試料 ($P_c=0.5 \text{ kg/cm}^2$) を圧密試験機にセット後、段階的に荷重を増やし、 10 kg/cm^2 の先行圧を与えた後、一たん除荷後所定の $\Delta P/P'$ で再圧密する方法をとった。この図においても不攪乱試料同様 $\Delta P/P'=0.1$ の場合 $P_c=11.2 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\Delta P/P'=0.5$ については $P_c=9.2 \text{ kg/cm}^2$ となって $\Delta P/P'$ が小さいものほど P_c は大きな値となっておりこれらは Leonards らが得た結果と同じ傾向であった。これら試料の鋭敏比 S なども測定し $(P_{eq}-P_c) \sim S$ の関係についても調べたが試料が層を有しているため成形が困難であり正確な一軸圧縮強度が求まらずバラツキが多く一定の傾向は得られなかった。 $\Delta P/P'$ を小さくして得られた先行圧密荷重と深さ D の関係を Fig. 1 中にプロットしたが標準圧密試験による $P_c \sim D$ の関係より右にずれ全体に大きな先行圧密荷重を得ることを示している。

(b) 荷重載荷時間の影響について

Crawford²⁾ は自然堆積海成粘土を用いて荷重載荷時間や初期供試体高さなどが P_c におよぼす影響を調べ、荷重載荷時間が長くなると得られる P_c は小さくなる結果を得ている。ここでも同一試料から取り出した3個の供試体をそれぞれ $\Delta P/P'=1.0$ 一定、荷重載荷時間を24, 72, 168時間の3種としてこれらの影響を調べた。(a)の実験で用いたと同一不攪乱試料を用い得られた結果が Fig. 4 である。

図において載荷時間が24時間である標準圧密試験法による場合 $P_c=10.8 \text{ kg/cm}^2$ であるのに対し載荷時間をこれより長く168時間(一週間)の場合は $P_c=9.7 \text{ kg/cm}^2$ で載荷時間が長くなるほど P_c は小さな値となっている。しかしこの値の相違はわずかであるので、同様な傾向が他の粘土についてもみられるかどうかをみるため他種の試料についても調べたが同様な傾向にあった。繰り返し再圧密した試料を用い (a) と同様な方法により 10 kg/cm^2 の先行圧を与えた後 $\Delta P/P'=0.5$ で載荷時間をそれぞれ24, 72時間の条件で2個の供試体について調べた結果は Fig. 5 である。

これによれば不攪乱試料の場合とは結果が逆になり載荷時間が24時間とした場合は $P_c=9.2 \text{ kg/cm}^2$ であるが72時間の場合は $P_c=9.9 \text{ kg/cm}^2$ となり載荷時間が長くなると大きな P_c を得ている。これは同一試料を用いて 1 kg/cm^2 の先行圧を与えた場合も同様な傾向を得たが、載荷重が小さい段階では供試体と圧密リング間の摩擦の影響が大きいとも考えられるので図は省略した。

このような不攪乱試料と繰り返し再圧密試料の傾向の相違を土粒子の骨格構造の概念を用いて考察すれば以下のように考えられる。

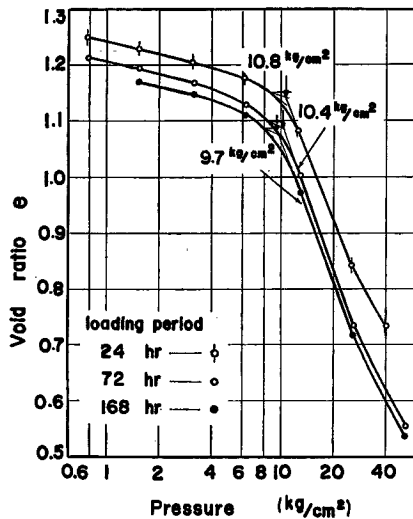


Fig. 4 Void ratio—log pressure curves for undisturbed clay.

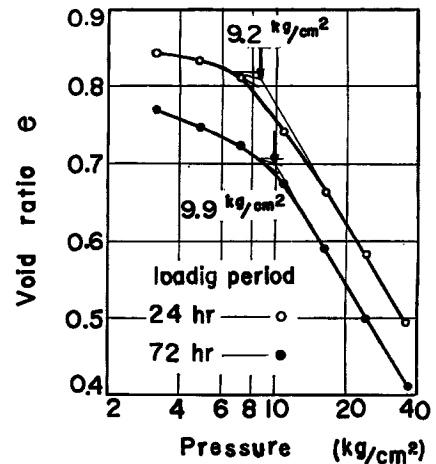


Fig. 5 Void ratio—log pressure curves for remoulded clay.

土粒子の骨格構造については多くの研究者により提案されており主に綿毛化構造、ランダム構造、配向構造の3種に分類されている。そして綿毛化、ランダム構造は自然堆積粘土に多くみられ、配向構造は主に圧密効果により生成されるといわれる⁵⁾。また構造を形成する粒子間の結合作用としてけん引力、反発力以外に自然土においてはセメンテーション的な結合によっても構造が形成されるといわれている。しかしセメンテーション的な結合力は時間(地質学的 order の)が必要なため、基本的には粘土粒子間に作用する力はけん引力と反発力とから成ると説明されている⁴⁾。不攪乱試料は綿毛化構造を有する場合が多く、かつ粒子間にセメンテーション的な結合を有しているため圧密時間が長くなると構造の破壊が進行しセメンテーション的な結合が破壊される。このため圧密により間げきが減少し骨格の強度の増加に比し、セメンテーション的な結合力の減少が大きい。一方練り返し再圧密試料はセメンテーション的な結合力をほとんど有しないため圧密により間げきが減少し骨格の強度が増加したものと考えられる。このような考察を実証するには不攪乱試料を圧密試験によりその試料の P_c 以上の荷重により骨格構造やセメンテーション的な結合力を一たん破壊したもののについて荷重時間を種々変え再圧密試験を行なう必要がある。しかしこれについてはまだ実験を行っていない。

用いた不攪乱試料にセメンテーション的な結合力が存在するか否かについてはこれを測定できないため明確にはいえない。しかし不攪乱粘土と練り返し粘土の $e-\log P$ 曲線 (Figs. 2, 3, 4, 5) に注目すると不攪乱粘土のそれは処女圧密曲線が折れ曲っている。しかし練り返し粘土のそれは直線となっている。これは不攪乱試料が綿毛化的な構造を有し P_c を越えると構造が急速に破壊されるために大きい圧縮性を示す領域と、構造が破壊されより安定な構造を作るように粒子が徐々に配向される領域に分かれるためではないかと考えられる。また表 -1 に示したように含水比の変化が深度の増加に比して少なくこれからも不攪乱試料は綿毛構造のような比較の間げきの大きい構造を有しているものと想像される。このような不攪乱試料と練り返し再圧密した試料の相違が荷重荷重時間の長短によって逆の傾向を得たものと思われる。

(c) $\Delta P/P'$ の変化にともなう時間・沈下曲線の変化について

圧密の所要時間は $t = (1/C_v) \cdot H^2 T$

$C_v = k/m_v \cdots$ 圧密係数, k : 透水係数, m_v : 体積圧縮係数, H : 排水距離, T : 時間係数, により表わされ t は荷重 P や $\Delta P/P'$ によりあまり変化がないといわれている。その理由は有効応力の増加とともに k, m_v と

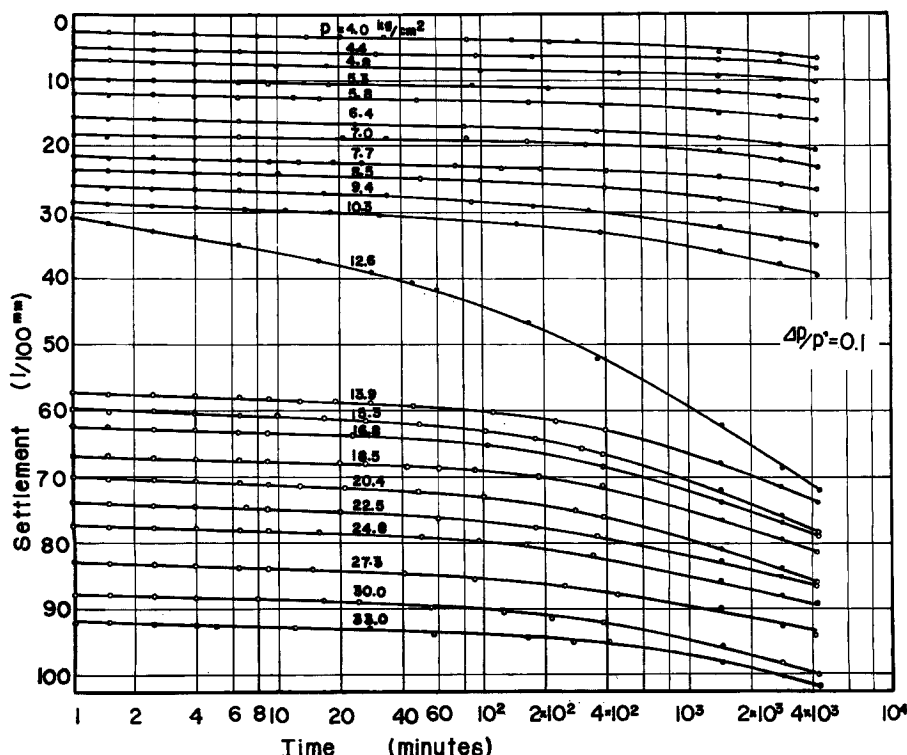


Fig. 6 Effect of pressure increment ratio on shape of settlement-time curves for undisturbed clay.

も小さくなるからである。しかし (a) で行なった結果の時間・沈下曲線の一例を示すと Fig. 6 のようになり $\Delta P/P' = 0.1$ の場合 72 時間経過後もなお一次圧密が終了していない。図は深度 75.1 m ~ 76.7 m から採取した不攪乱試料に $\Delta P/P' = 0.1$, 荷重載荷時間 72 時間の条件で得られたもので、また図面の都合により載荷重 4.0 kg/cm² 以下のこれらの関係は省略し、時間は 1 分から 4320 分までのものについてのみプロットした。

同一試料から取り出した供試体について $\Delta P/P' = 1.0, 0.5$ などこれらの関係をプロットした場合は 24 時間以内に一次圧密が終了し、二次圧密領域が表われた。ただしこの場合 $\Delta P/P' = 1.0$ に比し 0.5 では一次圧密終了時刻がやや遅れる傾向にあった。繰り返し再圧密した試料についても同様な傾向にあった。

これらは標準圧密試験機を用いているため試料と圧密リング間の摩擦の影響、供試体が圧密リングにこう束されているため供試体内応力の異方性の影響なども考えられるので、三軸試験機を用いて荷重載荷時間は 24 時間で一定とし、 $\Delta P/P'$ を種々変え等方圧密試験を行なった。供試体は三軸試験機の載荷能力が 8 kg/cm² であり不攪乱供試体の P_c 以下であるため先行圧密荷重 0.5 kg/cm² の繰り返し再圧密供試体を用いた。

体積変化は精度 1/100 cm³ のビューレットを用いて測定し、得られた体積変化・時間の関係は Fig. 7 である。図は一つの供試体について $\Delta P/P'$ を種々変えており側圧 2 kg/cm² までは $\Delta P/P' = 1.0, 2 \sim 4.5$ kg/cm² については $\Delta P/P' = 0.5, 4.5 \sim 5.0$ kg/cm² については $\Delta P/P' = 0.1$ の割合で側圧を増加した結果である。図において $\Delta P/P' = 1.0, 0.5$ の場合は一、二次圧密曲線が表われている。しかし $\Delta P/P' = 0.1$ については 4320 分経過後も一次圧密が終了していない。これらは圧密リングを用い得られた Fig. 6 の結果同様 $\Delta P/P'$ が小さくなると圧密所要時間が長くなる。 $\Delta P/P' = 0.1$ の場合実験の都合で一次圧密終了まで実験を続けなかったがこれらより等方圧密を行なった場合も圧密所要時間が $\Delta P/P'$ に影響されることが明らかである。

Barden⁶⁾ は繰り返し粘土を用い排水距離、すなわち試料厚さや $\Delta P/P'$ が二次圧密におよぼす影響を調べ、

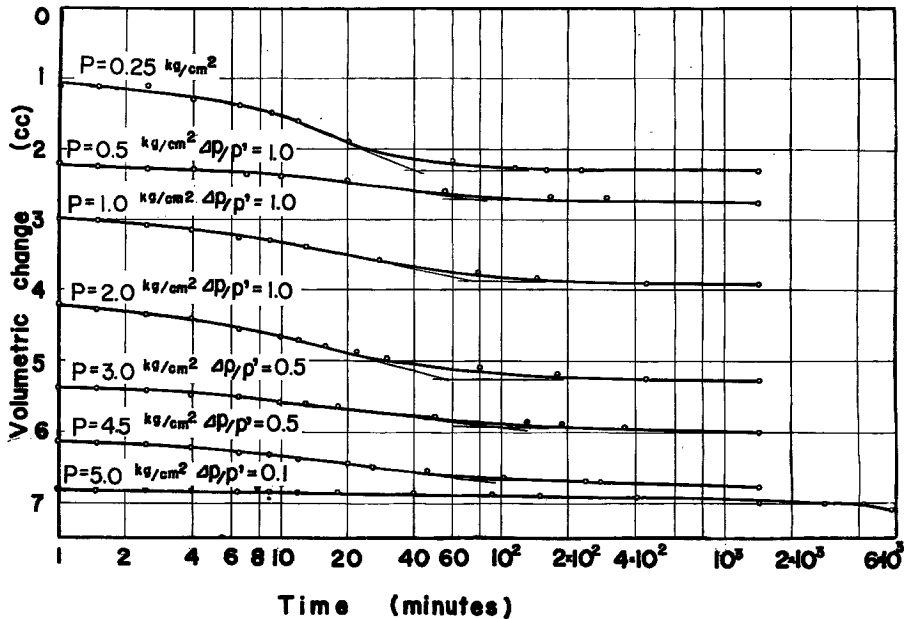


Fig. 7 Effect of pressure increment ratio on shape of volumetric change-time curves of isotropic consolidation.

同時に間げき水圧 u の測定も行なっている。これによれば ΔP が大きくなると二次圧密は小さくなり、 ΔP が小さい場合二次圧密は増大すると述べている。この場合 ΔP が大きいと ΔP に比して粘土構造の粘性抵抗 τ は無視されるほどであり、また高い初期間げき水圧 u_0 が生じ圧密は Terzaghi 理論に従う。一方 ΔP が小さくかつ発生する u_0 も小さく τ と同じオーダーである場合 τ の効果は無視できないことを指摘している。

しかし今回行なった実験結果では ΔP が十分大きくても $\Delta P/P'$ が小さいと圧密所要時間が遅れる結果を得た (Figs. 6, 7)。一方これらの遅れが時間沈下関係についてのみ生ずるものか、 u の消散過程もこれらに付随して生ずるものかを知るために三軸試験機に供試体を水中セットし、供試体周辺に口紙を巻き側面排水を行なうとともに、供試体上端面中心部で u を測定した。この場合 u が供試体全体に等しく分布するよう各荷重増加段階で側圧を増加後、24時間してから圧密を開始する方法をとった。供試体上端面中心部で測定した u は三軸装置外に取り付けた間げき水圧計で読みとりこれを電磁オシロに自記させた。

得られた体積変化・時間、間げき水圧・時間の関係を一つの図にまとめたものが Fig. 8 である。

図は $\Delta P/P' = 0.5$ 、載荷時間 5760 分の条件で得られたものである。図から分るように初期荷重段階では二次圧密領域を生じているが、以後は前記の結果同様一次圧密終了時刻が遅れている。一方 u は体積変化・時間曲線の挙動とよく対応している。すなわち $\Delta P/P'$ による圧密の遅れは体積変化との関係とともに u についても消散時間が遅れるといえる。(a) の実験において $\Delta P/P'$ が小さいと P_0 が大きな値を得たが $\Delta P/P'$ が小さくなると u の消散時間が長くなることが一つの理由と考えられる。なぜなら $\Delta P/P'$ が小さいと理由は不明であるが u の消散が遅れ荷重載荷時間が比較的短いとまだ供試体中に u が残留している状態で次段階の荷重を増加することになる。このため有効上載圧は全部が有効応力とならず、上載圧の一部は u によって支えられるため P_0 が大きな値を得るのではないかと考えられる。しかしここで示したような u の測定データが少ないので今後さらに実験を積み重ねてから詳しく考察したい。

(d) $\Delta P/P'$ が圧縮指数 c_e の変化におよぼす影響について

Figs. 2, 4 の処女圧密曲線に注目すると途中で折れている。この折点前後の含水比 w を圧密試験終了後

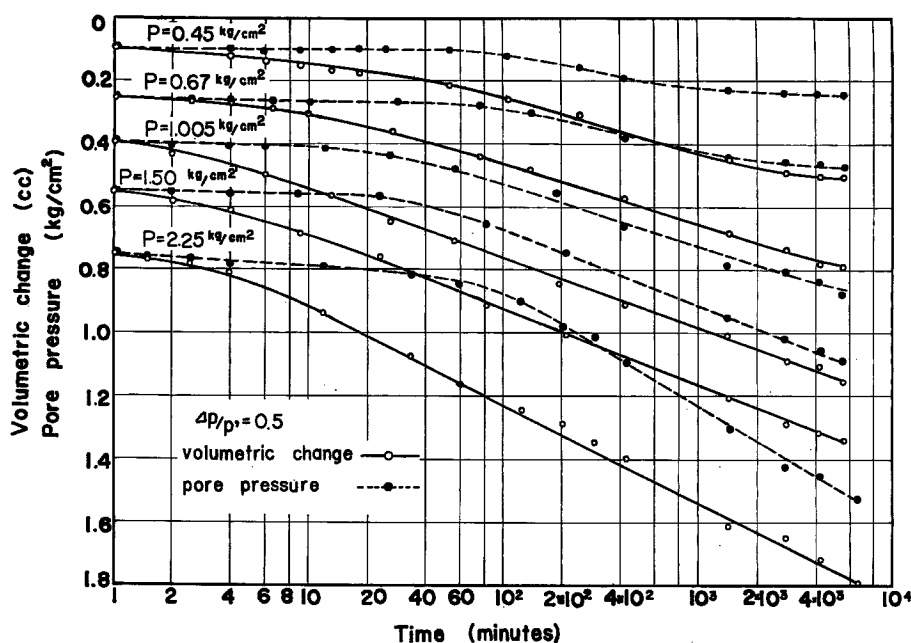


Fig. 8 Relationship between volumetric change and pore pressure versus time.

の供試体重量から逆算すると Figs. 2, 4 の供試体については $w=25\sim 28\%$ の範囲にあり、この試料の塑性限界 $PL=25.3\%$ なのでほぼ PL に近い状態で折れ曲るものと思われる。これは他種の塑性限界の異なる試料についても PL に近い w で折れ曲っているが、液性限界 w_L の低いシルティなものについてはほとんど折れ曲らなかった。

得られた曲線 $e-\log P$ において P_0 を越えた後最初に表われる直線領域の勾配を c_{e1} 、折れ曲った後に表われるものを c_{e2} として液性限界 w_L との関係でプロットすると Fig. 9 となる。図より c_e は w_L の大きなものほど大きな値を示し、 c_{e1} は c_{e2} より大きく $w_L=36\%$ 附近ではほぼ c_{e1} と c_{e2} が等しくなっている。これより処女圧密曲線が折れ曲るのは w_L が高い場合に表われ低い場合は表われないといえる。また繰り返し再圧密試料についてはこれら現象は生じなかった。

また $\Delta P/P'$ が小さい場合はこの折れ曲りが比較的明瞭である。同一試料から取り出した供試体であっても c_{e1} は載荷条件により異なった値となり結果はバラツキにはいるが $\Delta P/P'$ が小さいほうが大きな c_{e1} を、載荷時間が長いほうが大きな c_{e1} を得るようである。しかし c_{e2} については載荷条件にあまり関係なく荷重載荷条件が異なっても同じような値を得た。

これらは構造の概念を用いて考えるならば w_L

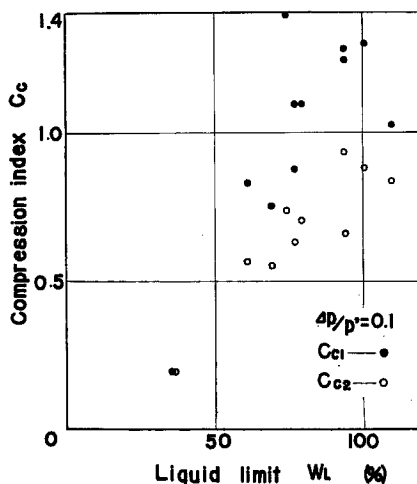


Fig. 9 Relationship between compression index and liquid limit.

が大きいものについては P_c を越す荷重を受けると構造が急速に破壊され圧密が進行するため c_{c1} の領域が生ずると思われる。

c_c と w_L の間に直線関係があることは多くの文献にみられる。今回用いた試料の標準圧密試験法から得た c_c と w_L の間には

$$c_c \doteq 0.016(n_L - 33)$$

$\Delta P/P' = 0.1$ として得られる c_{c2} と w_L の関係はこれを直線関係にあるとみなせば

$$c_{c2} \doteq 0.012(w_L - 18)$$

であった。

村山⁷⁾ らは c_c と初期間けき比 e_0 の関係を近似的に $c_c \doteq 0.6(e_0 - 0.5)$ で表わし c_c が e_0 により規定されとしている。そして e_0 軸との切片の値が 0.5 となるので $e - \log P$ 曲線が $e = 0.5$ に漸近するのではないかと述べている。今回行なった結果をみると $c_c - e_0$ を直線関係とみなせば e_0 軸との切片は 0.4~0.5 であった。しかし $e - \log P$ 曲線において最終荷重段階の e は 0.5 以下のものもあり必ずしも $e = 0.5$ に漸近しないようである。

4. む す び

今回の研究で得られた主な結果をまとめると (1) $\Delta P/P'$ が小さいと得られる P_c は大きく、 $\Delta P/P'$ が大きいと P_c は小さな値を得て、これは従来なされてきた研究結果と同傾向である。(2) しかし荷重載荷時間の影響については不攪乱試料と練り返し再圧密した試料では傾向が逆になった。すなわち不攪乱試料については従来研究と同様、載荷時間が長くなると得られる P_c は小さな値となり、練り返し再圧密試料については載荷時間が長くなると得られる P_c は大きな値となる。(3) 圧密所要時間は $\Delta P/P'$ などにあまり影響されないとされているが、 $\Delta P/P'$ が小さくなると圧密の遅れが生じこれは標準圧密試験機を用いた場合はむしろ、三軸試験機を用い等方圧密を行なった場合も遅れが生じた。(4) 間けき水圧についても体積変化・時間関係に対応し消散時間が遅れる傾向にあった。

圧密特性に関する研究は今後さらに実験を続け、Bjerrum⁸⁾ が指摘するような有効圧密荷重が一定であっても e が継続的に減少するいわゆる長時間圧密の問題もあり間けき水圧の挙動を測定するとともに $\Delta P/P'$ により圧密所要時間の遅れる理由なども考えて行きたい。

終りに実験ならびに本稿作成にあたり終始適切な御指導と御助言を載いた京都大学防災研究所村山朗教授ならびに八木則男助教授に心からお礼申し上げます。また実験に協力して下さった村山研究室、柴田研究室の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば村山朗・八木則男：泉州地区の土質等に関する調査報告書，大阪府，昭 45。
村山朗：大阪市周辺地域の地層および地質に関する調査研究報告，大阪府，昭 40。
- 2) Leonards, G.A. and A.G. Altschaeffl.: Compressibility of Clay, Proc. ASCE, 90-SM, 1964, pp. 133-155.
- 3) Crawford, C.B.: Interpretation of the Consolidation Test, Proc. ASCE, 90-SM, 1964, pp. 5-87.
- 4) 最上武雄：土質力学，技報堂，昭 44, pp. 27-28.
- 5) 例えば上掲 (4) および Rosenqvist, I. Th.: Physico-chemical Properties of Soils: Soil-water System, Proc. ASCE, 1959.
- 6) Barden, L.: Consolidation of Clay with Non-linear Viscosity, Géotechnique, Vol. 15, 1965, p. 345.
- 7) 村山朗・植下協・柴田徹：大阪沖積粘土の力学特性とその対策，土と基礎特集号，No.2, 昭 35, pp. 26-32.
- 8) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings, Géotechnique, Vol. 17, 1967, pp. 7-83.