

第4章 土の定ひずみ速度載荷による圧密試験

4.1 まえがき

4.1.1 規格・基準の改変経緯と主な改正点

本規格は、土質試験基準検討委員会「透水・圧密試験小委員会」および「JIS および ISO 検討委員会」によって、その素案が作成された。素案は、地盤工学会、通商産業省工業技術院「規格調整委員会」および建設省「土木部会」の審議を経て、2000年5月頃に官報に告示される予定である。

土の圧密特性を求める試験としては、荷重を倍増させながら24時間ごとに載荷する JIS A 1217「土の段階載荷による圧密試験方法」が、広く一般的に行われている。しかし、この方法ではひとつの供試体で試験が完了するのに約10日を要し、他の土質試験に比べて試験期間が長いので、この試験が一連の土質試験に必要な日数の制約条件となる場合が多い。また、段階載荷方式の試験では、浚渫土のような超軟弱粘土の低応力域での圧密特性、硬質粘土や擬似過圧密粘土の圧密降伏応力付近での圧密特性、さらには砂分の多い粘土の圧密係数などを求めることが困難である。

そこで、1985年から3年間、土質工学会に「特殊圧密試験方法に関する研究委員会」が設置され、急速圧密試験を中心に各種の特殊圧密試験について一斉試験を実施した。その結果に基づいて試験方法が検討され、手引きが取りまとめられた¹⁾。この検討により、急速圧密試験としては定ひずみ速度載荷による圧密試験が最も実用的であると結論づけられた。また、アメリカ (ASTM D 4186-89)、スウェーデン²⁾ などでは既に試験方法が基準化されていることを踏まえて、1989年より3年間、「定ひずみ速度圧密試験方法基準化委員会」が設置されて、基準化作業が行われた。この基準化委員会では、再度一斉試験を拡大して実施し、試験方法の問題点、段階載荷方式の圧密試験との差異などが検討された³⁾。つぎに前回の研究委員会に取りまとめられた試験方法を土台に、ASTM D 4186-89の基準などを参考にしながら基準案が作成され、1993年に地盤工学会基準として JGS T 412-1993「土の定ひずみ速度圧密試験方法」が制定された。そして今回の JIS の見直しを機に、透水・圧密関係の学会基準の中でただ一つ JIS 化されていなかったこの試験方法は新規 JIS として制定された。

今回の JIS 制定に伴って、これまでの地盤工学会基準 JGS T 412-1993「土の定ひずみ速度圧密試験方法」と異なる主な要点は、以下の通りである。

① JIS A 1217「土の段階載荷による圧密試験方法」

との整合性をとるために名称を「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法」とした。

- ② 対象土を飽和粘性土から細粒分を主体とした透水性の低い飽和土に変更した。
- ③ 供試体作製器具や供試体の成形方法など JIS A 1217「土の段階載荷による圧密試験方法」と重複するところは JIS A 1217 を引用するように改正した。
- ④ 圧密リングの必要条件を示すとともに、供試体の土質特性によっては標準以外の寸法の圧密リングを使う必要性を明示した。
- ⑤ 背圧供給装置と変位計に要求される精度を高くした。
- ⑥ 供試体を水浸させる際の試験手順を変更し、注意事項を明示した。
- ⑦ 背圧を付加する際の注意事項、および対処方法を明示した。
- ⑧ 試験時には未知数である圧密係数を用いて算出されるひずみ速度の上限値、計算を開始できる時間、および計算時間間隔に関する規定を削除した。
- ⑨ 試験機の解体に関する標準的な手順を示した。
- ⑩ 体積圧縮係数 m_v と圧密係数 c_v を時間 t とそれより Δt 前の時間 t' の間で算出するようにした。

4.1.2 定ひずみ速度載荷による圧密試験の特徴

土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法は、土を片面排水条件、一定のひずみ速度のもとで連続的に加える軸圧縮圧力と供試体非排水面の間隙水圧の変化から圧密諸定数を求める試験方法である。この試験方法の長所は、①試験時間が短縮できる。②連続的なデータが得られる。③超軟弱粘土から硬質粘土まで、また有機質土から砂質粘土まで適用範囲が極めて広い。④試験の自動化が容易である。⑤載荷に衝撃を伴わない、ことなどである。一方、短所として、①二次圧密に関する情報が得られない。②ひずみ速度の違いによる時間効果を受ける。③解析理論が複雑で、試験結果を整理する際の理論の単純化に伴う誤差が少なからずある、ことなどが挙げられる。このように、一般の粘性土に対してこの試験方法は、試験時間を短縮するための簡便法として利用できる。一方、超軟弱粘土に衝撃を与えないで載荷を行うためや硬質粘土の圧密降伏応力付近の圧密特性を連続的に得るためなど、定ひずみ速度載荷方式を用いざるを得ない場合も多い。したがって、定ひずみ速度載荷による圧密試験方法と段階載荷による圧密試験方法との関係は、二者択一ではなく、並列の関係にあると考えられる。

4.2 日本工業規格「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法」(JIS A 1227)

日本工業規格 (JIS A 1227:2000)

土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法 (案)

Test method for one-dimensional consolidation properties of soils using constant rate of strain loading

序文 この規格は新規に制定した日本工業規格である。

1. 適用範囲 この規格は、土を片面からの排水を許しながら連続的に一次元圧密し、圧縮性と圧密速度に関する定数を求める試験方法について規定する。細粒分を主体とした透水性の低い飽和土を対象とする。

2. 引用規格 次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その最新版を適用する。

JIS A 1202 土粒子の密度試験方法

JIS A 1217 土の段階載荷による圧密試験方法

3. 定義 この規格で用いる主な用語の定義は、次による。

- a) 圧密 細粒分を主体とした透水性の低い土が静的荷重を受け、間げき（隙）水を徐々に排水して密度を増加すること。
- b) 定ひずみ速度載荷 供試体を片面排水条件のもとで一定のひずみ速度で連続的に圧縮する載荷方法。
- c) ひずみ速度 供試体の初期高さをもとに算定したひずみの時間的変化の割合。
- d) 軸圧縮圧力 供試体の軸方向に作用する圧縮力を供試体断面積で除したものの。
- e) 間げき水圧 供試体内部の背圧を上回る水圧。
- f) 背圧 供試体の飽和度を高める手段として供試体内部の間げき水に付加される圧力。
- g) 圧密降伏応力 土が可逆的な体積変化を示す領域から、非可逆的な体積変化を示す領域に移行する境界の圧密圧力。
- h) 過圧密 現在受けている圧密圧力が圧密降伏応力より低い状態。
- i) 正規圧密 現在受けている圧密圧力が圧密降伏応力を超えている状態。

4. 試験装置及び器具

4.1 圧密試験機 圧密試験機は、次による。圧密試験

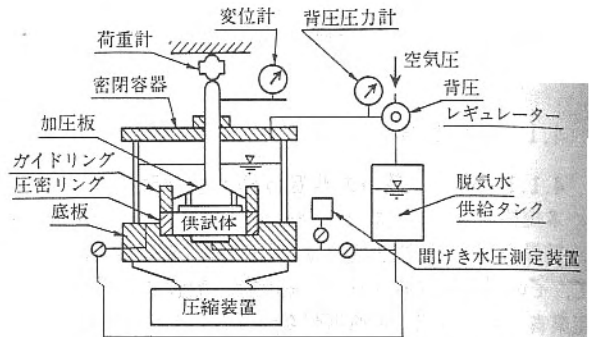


図1 定ひずみ速度圧密試験機の構成例

機の構成例を、図1に示す。

a) 圧密容器 圧密容器は、次のものから構成され圧密圧力によって変形しない十分な剛性をもつもの。

- 1) 圧密リング 圧密リングは、内面の滑らかなリングで、内径6cm、高さ2cmを標準とする。ステンレス鋼などのさびない材質で、土との摩擦の少ないものを用いる。また、最大圧密圧力時の内径変化は、0.05%以下のもの。

備考1. 供試体の土質特性によっては、5.1に基づいて異なる寸法のリングを使用する。

2. 圧密リングとガイドリングが一体化した構造のものでよい。

- 2) ガイドリング ガイドリングは、圧密リングと同じ内径で、高さが加圧板の外周の高さと同程度のもの。

- 3) 加圧板 加圧板は、中心に載荷点がある剛な円板で、多孔板をもち、ガイドリング及び圧密リング内を滑らかに動くもの。

備考 加圧板の直径は、圧密リングよりも0.2mm程度小さく、外周面は滑らかで、外周の高さは10~15mmのもの。

- 4) 底板 底板は、圧密リングを固定する剛板で、間げき水圧を測定するための多孔板をもつもの。

- 5) 多孔板 多孔板は、十分な剛性をもち、土粒子が入らない程度に間げきが小さいもの。

備考1. 加圧板に用いる多孔板は、透水係数が 10^{-4} cm/s以上で、供試体の断面積の85%以上の面積を有するもの。

2. 多孔板に土粒子の侵入が懸念される場合は、圧縮性の小さな親水性の透水性薄膜をフィルターとして用いる。

3. 試験前に多孔板に目詰まりがないことを確認する。

b) 密閉容器 密閉容器は、次の条件を満たすものとする。

- 1) 圧密容器内の供試体を水浸し、密閉状態で背圧を加えることができるもの。
- 2) 背圧の作用下で、加圧板を介して供試体に軸圧縮力を加えることができるもの。

c) 圧縮装置 圧縮装置は、圧密容器を水平に支持し、所定の軸圧縮力まで一定のひずみ速度を供試体に与えることができるもの。

d) 背圧供給装置 背圧供給装置は、所定の背圧を 200 kN/m^2 未満では $\pm 2 \text{ kN/m}^2$ 、 200 kN/m^2 以上では 1% の圧力変動の範囲内で試験終了まで連続して加え得るもの。

e) 荷重計 荷重計は、電気式荷重計を用い、供試体に作用する軸圧縮力をその最大値の $\pm 0.5\%$ の許容差で測定できるもの。

f) 変位計 変位計は、電気式変位計を用い、予想される供試体の総圧密量が 10 mm 未満の場合は 0.002 mm まで、 10 mm 以上の場合は 0.01 mm まで測定できるもの。

g) 間げき水圧測定装置 間げき水圧測定装置は、電気式圧力変換器を用い、供試体内の間げき水圧を 200 kN/m^2 未満では $\pm 2 \text{ kN/m}^2$ 、 200 kN/m^2 以上では $\pm 1\%$ の許容差で測定できるもの。

備考 1. 間げき水圧測定系の脱気を十分にを行い、気泡が残らないようにする。また、間げき水圧測定系の容積を小さくするなどして、間げき水圧の変化に伴う圧力変換器を含む測定系の容積変化をできるだけ小さくすることが望ましい。

2. 間げき水圧の測定は温度変化の影響を受けやすいので、試験室内の温度変化を $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内に制御することが望ましい。

h) 記録装置 記録装置は、試験中の軸圧縮力、間げき水圧及び圧密量を連続的に記録できるもの。

4.2 供試体作製器具 供試体作製器具は、JIS A 1217 の 4.2 (供試体作製器具) に規定するものとする。

4.3 その他の器具 その他の器具は、JIS A 1217 の 4.3 (その他の器具) に規定するものとする。

5. 供試体

5.1 供試体の形状と寸法 供試体は、直径 6 cm 、高さ 2 cm を標準とする。それ以外の寸法の供試体を用いる場合は、供試体の直径を高さの 2.5 倍以上にする。

備考 供試体の高さは、試料の最大粒径の 10 倍以上にすることが望ましい。

5.2 供試体の成形 供試体の成形は、JIS A 1217 の 5.2 (供試体の成形) に規定するものとする。

6. 試験方法

6.1 準備 準備は、次の手順で行う。ただし、一連の操作は、供試体の吸水膨張を防ぐために手際よく行う。

a) 背圧供給装置から脱気水を供給し、圧密試験機の間げき水圧測定系及び圧密容器底板の多孔板を飽和する。

備考 供試体の吸水膨張を防ぐために、多孔板上の余分な水分をふき取っておく。

b) 間げき水圧測定装置を調整し、この時点の値を原点とする。

c) 供試体が入った圧密リングを底板上に固定し、ガイドリングを圧密リングに取り付ける。

d) 加圧板を供試体上面に置いて、密閉容器で圧密容器内の供試体を密閉する。

備考 供試体端面と多孔板を密着させるために、試料の圧密降伏応力の推定値の 10% を超えない程度の圧力で加圧板を短時間押す。

e) 圧密容器を圧縮装置に設置し、変位計を取り付ける。

f) 変位計及び荷重計を調整し、この時点の値を原点とする。

g) 加圧板の載荷ピストンを荷重計で固定して、水浸時に供試体の吸水膨張を許さないようにする。

h) 圧密容器内に脱気水を満たして、供試体を水浸させる。

備考 水浸によって荷重計の読みが増加する場合には、荷重計の読みを記録して膨潤圧を求める。

i) 供試体内に段階的に背圧を作用させて、供試体底面の水圧の変化を記録する。

備考 1. 背圧の値は、 $50 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ 程度とする。

2. 供試体底面の水圧の測定値が十分短い時間内で背圧に等しくならない場合には、水圧の値が背圧にほぼ一致するまで放置するか、背圧を増加させる。

3. 圧密容器の構造によっては、背圧によって加圧板上向きの力が作用する場合があるので、その値を記録する。軸圧縮力を求める場合には、荷重計の読みからその値を差し引く。

6.2 軸圧縮及び測定 軸圧縮及び測定は、次による。

a) 試験の目的に応じて適切なひずみ速度を決定する。

備考 ひずみ速度は、 $0.01 \sim 0.1\%/\text{min}$ の範囲を標準とする。

参考 試料の塑性指数に応じて、参考表1に示す値をひずみ速度の参考とすることができる。

参考表1 ひずみ速度の参考値

塑性指数 I_p	ひずみ速度 (%/min)
10未満	0.1
10~40	0.05
40以上	0.01

b) 決定したひずみ速度で、供試体を連続的に軸方向に圧縮する。

c) 圧縮開始後、経過時間 t (min) における軸圧縮力 P_t (N) と供試体の圧密度 d_t (cm) 及び供試体底面の間げき水圧 u_t (kN/m²) を測定する。

備考 測定間隔は、軸圧縮開始後最初の10分間は1分間隔、1時間までは5分間隔、その後は10分間隔を標準とする。

d) 軸圧縮力が所定の圧密圧力に相当する値に達したら、軸圧縮を終了する。

e) 圧縮開始から終了までの間の最高及び最低室温を記録する。

6.3 解体 解体は、次による。

a) 背圧を除荷した後、密閉容器内の水を排水する。

b) 軸圧縮力を除荷した後、密閉容器を取り外し、圧密容器を解体する。

c) 圧密容器から供試体全量を蒸発皿に取り出して、110±5°Cで質量が一定になるまで炉乾燥し、供試体の炉乾燥質量 m_s (g) をはかる。

7. 計算

7.1 供試体の初期状態 初期状態の供試体の含水比 w_0 (%), 間げき比 e_0 (%), 飽和度 S_{r0} (%) は、次の式によって算出する。

$$w_0 = \frac{(m_T - m_R) - m_s}{m_s} \times 100$$

$$e_0 = \frac{H_0}{H_s} - 1$$

$$S_{r0} = \frac{w_0 \rho_s}{e_0 \rho_w}$$

$$H_s = \frac{m_s}{\rho_s A} = \frac{m_s}{\rho_s \pi D^2 / 4}$$

ここに、

w_0 : 初期含水比 (%)

e_0 : 初期間げき比

S_{r0} : 初期飽和度 (%)

m_T : 圧密前の供試体と圧密リングの質量 (g)

m_R : 圧密リングの質量 (g)

m_s : 供試体の炉乾燥質量 (g)

H_0 : 供試体の初期高さ (cm)

H_s : 供試体の実質高さ (cm)

A : 供試体の断面積 (cm²)

D : 供試体の直径 (cm)

ρ_s : JIS A 1202 によって求めた土粒子の密度 (g/cm³)

ρ_w : 水の密度 (g/cm³)

備考 e_0 のかわりに体積比 f_0 を用いてよい。 f_0 は、次の式によって算出する。

$$f_0 = \frac{H_0}{H_s}$$

ここに、

f_0 : 初期体積比

7.2 圧密度と圧力との関係

7.2.1 圧縮曲線、圧縮指数及び圧密降伏応力 圧縮曲線、圧縮指数及び圧密降伏応力は、次の手順で求める。

a) 時間 t (min) における供試体高さ H_t (cm), 間げき比 e_t , 軸圧縮圧力 σ_t (kN/m²) 及び圧密圧力 p_t (kN/m²) を次の式によって算出する。

$$H_t = H_0 - d_t$$

$$e_t = \frac{H_t}{H_s} - 1$$

$$\sigma_t = \frac{P_t}{A} \times 10$$

$$p_t = \sigma_t - \frac{2}{3} u_t$$

ここに、

H_t : t における供試体高さ (cm)

d_t : t における供試体の圧密度 (cm)

e_t : t における間げき比

σ_t : t における軸圧縮圧力 (kN/m²)

P_t : t における軸圧縮力 (N)

p_t : t における圧密圧力 (kN/m²)

u_t : t における供試体底面の間げき水圧 (kN/m²)

b) 縦軸に e_t を算術目盛に、横軸に p_t を対数目盛にとりて圧縮曲線を描く。

備考 圧縮曲線は、 e_t のかわりに次の式によって算出する体積比 f_t で描いてもよい。

$$f_t = \frac{H_t}{H_s}$$

ここに、

f_t : t における体積比

c) 圧縮曲線の正規圧密領域の直線部に2点 a, b をとり、圧縮指数 C_c は、次の式によって算出する (図2参照)。

$$C_c = \frac{e_a - e_b}{\log(p_b/p_a)}$$

ここに、

C_c : 圧縮指数

備考1. 圧縮曲線を体積比 f で描いた場合には、 C_c は次の式によって算出する。

$$C_c = \frac{f_a - f_b}{\log(p_b/p_a)}$$

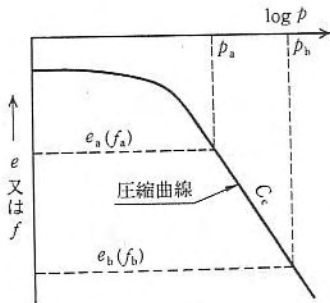


図2 C_c の求め方

2. 圧縮曲線に明りょう（瞭）な直線部分が認められない場合は、正規圧密領域の最もこう（勾）配の大きい部分を直線近似して求める。

参考 目的に応じて必要な圧力範囲における圧縮曲線の平均こう配から C_c を求める。その場合は、対応する圧力範囲を併記する。

- 1) 圧密降伏応力 p_c (kN/m²) は、次の方法によって求める（図3参照）。ただし、 p_c を求めにくい場合は、 p_c を算術目盛にとって $e-p$ 曲線又は $f-p$ 曲線を描き、それが上に凸な部分をもたなければ p_c を求めなくてよい。

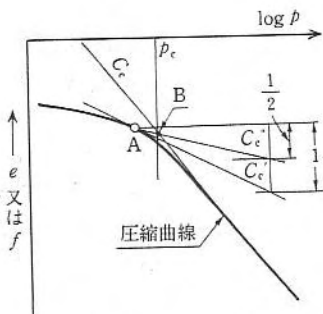


図3 p_c の求め方

- 1) $C'_c = 0.1 + 0.25 C_c$ なるこう配をもつ直線と圧縮曲線の接点 A を求める。
- 2) 点 A を通って $C''_c = C'_c/2$ のこう配をもつ直線と圧縮曲線の正規圧密領域の最急こう配を代表す

る直線の延長との交点 B の横座標を p_c とする。

備考 間げき比 0.1 に相当する縦軸のスケールを横軸の対数目盛 1 サイクルの長さの 0.1~0.25 にとって圧縮曲線を描き、明りょうな最大曲率点が得られる場合には、次の方法で p_c を求めてよい（図4参照）。

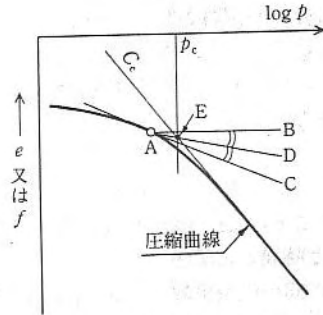


図4 p_c の求め方（備考の方法による）

1. 圧縮曲線の最大曲率の点 A を求め、この点から水平線 AB 及び曲線の接線 AC を引く。
2. 二つの直線の二等分線 AD と圧縮曲線の正規圧密領域の最急こう配を代表する直線の延長との交点 E の横座標を p_c とする。

7.2.2 体積圧縮係数 体積圧縮係数は、次の手順で求める。

- a) 時間 t (min) とそれより Δt 前の時間 t' (min) の間の圧密量の増分 ΔH (cm) と平均供試体高さ $\bar{H}$ (cm) は、次の式によって算出する。

$$\Delta H = H_t' - H_t$$

$$\bar{H} = \frac{H_t + H_t'}{2}$$

ここに、

ΔH : t と t' の間の圧密量の増分 (cm)

$\bar{H}$: t と t' の間の平均供試体高さ (cm)

H_t' : t' における供試体高さ (cm)

- b) t と t' の間の圧縮ひずみの増分 $\Delta \epsilon$ と軸圧縮圧力の増分 $\Delta \sigma$ (kN/m²) は、次の式によって算出する。

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta H}{\bar{H}}$$

$$\Delta \sigma = \sigma - \sigma'$$

ここに、

$\Delta \epsilon$: t と t' の間の圧縮ひずみの増分

$\Delta \sigma$: t と t' の間の軸圧縮圧力の増分 (kN/m²)

$\alpha': t'$ における軸圧縮圧力 (kN/m²)

- c) t と t' の間の体積圧縮係数 m_v (m²/kN) は、次の式によって算出する。

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma}$$

ここに、

m_v : t と t' の間の体積圧縮係数 (m²/kN)

- d) 縦軸に m_v を対数目盛に、横軸に次式で求めた平均圧密圧力 $\bar{p}$ (kN/m²) を対数目盛にとって $\log m_v$ と $\log \bar{p}$ の関係を示す。

$$\bar{p} = \sqrt{p_t \cdot p_{t'}}$$

ここに、

$\bar{p}$: t と t' の間の平均圧密圧力 (kN/m²)

$p_{t'}$: t' における圧密圧力 (kN/m²)

7.3 圧密量と時間との関係

- a) t と t' の間の圧密係数 c_v (cm²/d) は、次の式によって算出する。

$$c_v = \frac{\Delta \sigma \bar{H}}{2 \bar{u} \Delta t} \times 1.440$$

$$\bar{u} = \frac{u_t + u_{t'}}{2}$$

ここに、

c_v : t と t' の間の圧密係数 (cm²/d)

Δt : 計算に用いる時間間隔 ($t - t'$) (min)

$\bar{u}$: t と t' の間の供試体底面の平均間げき水圧 (kN/m²)

$u_{t'}$: t における供試体底面の間げき水圧 (kN/m²)

参考 t と t' の間の透水係数 k (cm/s) は、次の式によって算出することができる。

$$k = \frac{g_n \rho_w \Delta H \cdot \bar{H}}{2 \bar{u} \Delta t} \times \frac{1}{60 \times 100}$$

ここに、

k : t と t' の間の透水係数 (cm/s)

g_n : 標準の重力加速度 (9.81 m/s²)

- b) 縦軸に c_v を対数目盛に、横軸に $\bar{p}$ を対数目盛にとって $\log c_v$ と $\log \bar{p}$ との関係を示す。

8. 報告 試験結果については、次の事項を報告する。

- 試料を採取した位置
- 供試体の直径及び高さ
- 供試体の初期状態の含水比、間げき比、又は体積比及び飽和度
- 背圧の大きさ
- ひずみ速度
- 軸圧縮圧力、供試体底面の間げき水圧及び圧密量

と時間との関係

- 圧縮曲線
- 圧縮指数
- 圧密降伏応力
- 体積圧縮係数と平均圧密圧力の関係
- 圧密係数と平均圧密圧力との関係
- 試験期間中の最高及び最低室温
- その他報告事項

参考 その他の報告事項の例として、以下のような項目がある。

- 試料及び供試体の作製方法
- 供試体の状態、貝殻片及び粗大粒子の混入状態
- 膨潤圧

4.3 規格の解説

4.3.1 試験方法の原理

定ひずみ速度載荷による圧密試験は、1964年に Crawford (クロフォード)⁴⁾ により提案された。当初、この試験からは $e - \log p$ 曲線だけが求められていたが、その後、Smith and Wahls (スミス・ウェールズ)⁵⁾、Wissa (ヴィッサ) et al.⁶⁾、梅原・善⁷⁾、Lee (リー)⁸⁾、Znidarcic (ズニダースィック) et al.⁹⁾ などによる理論的研究が進み、圧密係数 c_v をはじめとする圧密定数も求められるようになった。これらの研究で用いられている理論は、粘土の応力-ひずみ関係に非線形性を考慮するか否かによって、非線形弾性圧密理論と線形弾性圧密理論に、層厚の変化を考慮するか否かによって、有限ひずみ理論と微小ひずみ理論に大別される。

本規格では微小ひずみの線形弾性圧密理論が採用されている。しかし、ここではもう少し一般的な微小ひずみ非線形弾性理論を用いて、圧密係数 c_v の算出方法を中心に定ひずみ速度載荷による圧密試験の理論的背景を説明する。

(1) 支配方程式 多くの粘土では圧密の進行に伴って体積圧縮係数 m_v と透水係数 k が変化する場合が多い。さらに、 m_v と k の比、すなわち圧密係数 c_v も変化する場合も考えられる。しかし、問題が複雑になり過ぎるので、ここでは m_v と k は変化するが c_v は一定となる場合を考える。この場合、圧密の支配方程式は次式で示される¹⁰⁾。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} \quad (6.4.1)$$

(2) 試験条件

定ひずみ速度載荷による圧密試験では、供試体の上端面(排水面)の変位速度 r が一定となるように強制的

に圧縮するので、試験条件は、

$$\frac{\partial w(0,t)}{\partial t} = r = \text{一定} \quad (6.4.2)$$

ここに、 $w(0,t)$ は排水面の z 方向変位であり、ひずみ $\varepsilon(z,t)$ を用いると、

$$w(0,t) = \int_0^{H_0} \varepsilon(z,t) dz \quad (6.4.3)$$

ここに、 H_0 は供試体の初期高さである。なお、ここでは微小ひずみを考えているので、圧密中の層厚変化は考えない。一方、平均ひずみ速度は、 $\bar{\varepsilon}(t)$ を平均ひずみとして、

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{1}{H_0} \int_0^{H_0} \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial t} dz \quad (6.4.4)$$

で表される。これに式(6.4.2)と式(6.4.3)を考慮すると、定ひずみ速度載荷による圧密試験の試験条件は、次のように書き表せる。

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{r}{H_0} = \text{一定} \quad (6.4.5)$$

(3) 定常状態の存在 平均ひずみ速度は、式(6.4.1)と式(6.4.4)から、 c_v が一定の供試体に対して、

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{c_v}{H_0} \int_0^{H_0} \frac{\partial^2 \varepsilon(z,t)}{\partial z^2} dz \quad (6.4.6)$$

上式の右辺を積分すると、

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = \frac{c_v}{H_0} \left[\frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial z} \right]_0^{H_0} \quad (6.4.7)$$

上式に式(6.4.5)を考慮すると、

$$\left[\frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial z} \right]_0^{H_0} = \frac{r}{c_v} \quad (6.4.8)$$

が得られる。ここで、供試体の非排水面の境界条件は、

$$\left. \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial z} \right|_{z=H_0} = 0 \quad (6.4.9)$$

よって、式(6.4.8)から排水面では次式が成立する。

$$\left. \frac{\partial \varepsilon(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{r}{c_v} \quad (6.4.10)$$

境界条件が式(6.4.9)と式(6.4.10)で表されるように時間的に変化しない場合、式(6.4.1)で示されるような放物型の微分方程式の解は、ある時間を経過した後、定常状態に達し、

$$\frac{d\bar{\varepsilon}(t)}{dt} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon(z)}{\partial z^2} \quad (6.4.11)$$

の関係を満たすようになる。

(4) 定常状態での解 定常状態においては、式(6.4.1)、式(6.4.5)および式(6.4.11)より、

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon(z)}{\partial z^2} = \frac{r}{H_0} \quad (6.4.12)$$

を満たすことがわかる。この式を境界条件、

$$z = H_0 \text{ (非排水面) で、} \frac{\partial \varepsilon(z)}{\partial z} = 0 \quad (6.4.13)$$

$$z = 0 \text{ (排水面) で、} \varepsilon(z) = \varepsilon(0) \quad (6.4.14)$$

のもとで z に関して積分すると、定常状態におけるひずみ分布が求められ、次式のような二次曲線分布とな

る。

$$\varepsilon(z) = \varepsilon(0) - \frac{r}{c_v H_0} \left(H_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (6.4.15)$$

また、 $z = H_0$ (非排水面) でのひずみを $\varepsilon = \varepsilon(H_0)$ と表せば、排水面と非排水面のひずみ差は式(6.4.15)から、次式のように表せる。

$$\varepsilon(0) - \varepsilon(H_0) = \frac{r H_0}{2 c_v} \quad (6.4.16)$$

なお、非定常域でのひずみ挙動は、Wissa et al.⁶⁾によって求められている。

(5) 線形弾性の場合 m_v を一定とした場合、すなわち粘土を線形弾性体としたときの応力-ひずみ関係は、

$$\varepsilon = m_v \sigma' \quad (6.4.17)$$

また、つり合方程式の解 (有効応力の原理)、

$$\sigma = \sigma' + u \quad (6.4.18)$$

より、 $z=0$ では $u=0$ 、すなわち $\sigma = \sigma'$ となるため、 $\varepsilon(0) = m_v \sigma$ である。よって、定常状態における有効応力と間隙水圧分布は、式(6.4.15)からそれぞれ次式のように求められる。

$$\sigma' = \sigma - \frac{r}{m_v c_v H_0} \left(H_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (6.4.19)$$

$$u = \frac{r}{m_v c_v H_0} \left(H_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \quad (6.4.20)$$

両式より、式(6.4.15)で示されるひずみと同様に、有効応力と間隙水圧も二次曲線分布となることがわかる。さらに、ここで注目すべきことは、式(6.4.20)の u が z だけの関数であることである。すなわち、任意の z に対して、次の条件が得られる。

$$\frac{du}{dz} = 0 \quad (6.4.21)$$

また、全応力 σ は供試体内で一定であり、供試体に載荷された軸圧縮圧力と等しいことを考慮すると、式(6.4.17)、式(6.4.18)、式(6.4.19)および式(6.4.21)から次式が成立する。

$$\frac{d\sigma'}{dz} = \frac{d\sigma}{dz} = \frac{d\sigma'}{dz} = \frac{1}{m_v} \frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{r}{m_v H_0} \quad (6.4.22)$$

いま、 $z = H_0$ の間隙水圧を $u = u_t$ とおくと、式(6.4.20)は、

$$u_t = \frac{r H_0}{2 m_v c_v} \quad (6.4.23)$$

さらに、式(6.4.22)を考慮すると、

$$u_t = \frac{H_0^2}{2 c_v} \frac{d\sigma}{dz} \quad (6.4.24)$$

したがって、定ひずみ速度載荷による圧密試験の圧密係数 c_v は、次式によって求められる。

$$c_v = \frac{H_0^2}{2 u_t} \frac{d\sigma}{dz} \quad (6.4.25)$$

また、体積圧縮係数 m_v は、式(6.4.17)で定義されるため、次式によって求められる。

$$m_v = \frac{d\varepsilon}{d\sigma'} \quad (6.4.26)$$

式(6.4.26)において、右辺の増分の取り方に、場所的増分を取る方法と時間的増分を取る方法がある。場所的増分を取る場合には、任意時間 t における供試体の上下境界面のひずみの差と有効応力の差を取る。この場合、供試体の上下境界面の有効応力の差は非排水境界面の間隙水圧と等しいため、 m_v は次式によって求められる。

$$m_v = \frac{\varepsilon(0, t) - \varepsilon(H_0, t)}{\sigma'(0, t) - \sigma'(H_0, t)} = \frac{\varepsilon(0, t) - \varepsilon(H_0, t)}{u_t} \quad (6.4.27)$$

一方、時間的増分を取る場合には、供試体の任意な位置 z における微小時間 Δt 間のひずみ増分と応力増分を取る。 m_v が一定の場合には、供試体が定常状態に達すると式(6.4.22)が成立するため、 m_v は次式によって求められる。

$$m_v = \frac{\varepsilon(z, t) - \varepsilon(z, t - \Delta t)}{\sigma'(z, t) - \sigma'(z, t - \Delta t)} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma'} = \frac{r}{H_0} \frac{\Delta t}{\Delta \sigma} \quad (6.4.28)$$

式(6.4.27)と式(6.4.28)を比較すると、式(6.4.27)には実測することができない $\varepsilon(0, t)$ と $\varepsilon(H_0, t)$ を含んでいるため、実用上、 m_v は式(6.4.28)によって計算される。

式(6.4.21)、式(6.4.22)、および式(6.4.23)からわかるように、粘土を線形弾性体とした場合の定ひずみ速度載荷による圧密試験の応力、ひずみ、間隙水圧挙動は図-6.4.1のようになる。

(6) 非線形弾性的場合 ASTM D 4186-89 の基準では、間隙比 e と圧密圧力 σ' の間に次式の関係を仮定し、非線形弾性として取り扱っている。

$$e = e_1 - C_c \log \frac{\sigma'}{\sigma_1'} \quad (6.4.29)$$

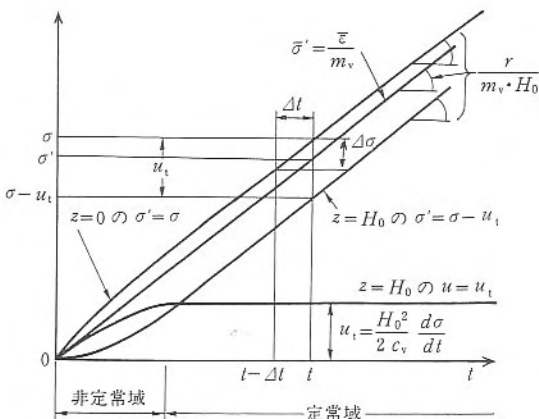


図-6.4.1 線形弾性圧密理論に基づく各量の時間的変化

ここに、 e_1 は基準となる σ_1' での間隙比、 C_c は圧縮指数である。微小ひずみを考慮すると、式(6.4.15)、式(6.4.18)、および式(6.4.29)から定常状態での有効応力と間隙水圧はそれぞれ次のように求められる。

$$\sigma' = \sigma \exp \left\{ -\frac{2.30(1+e_0)r}{C_c C_v H_0} \left(H_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \right\} \quad (6.4.30)$$

$$u = \sigma \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2.30(1+e_0)r}{C_c C_v H_0} \left(H_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \right\} \right] \quad (6.4.31)$$

ここに、 e_0 は供試体の初期間隙比である。

また、式(6.4.5)、式(6.4.29)、式(6.4.30)、および式(6.4.31)から、応力の増大速度は、

$$\frac{d(\log \sigma')}{dt} = \frac{d(\log \sigma)}{dt} = \frac{(1+e_0)r}{C_c H_0} \quad (6.4.32)$$

一方、間隙水圧の増大速度は線形弾性的の場合と異なり、定常状態になっても次式で示すようにゼロにならない。

$$\frac{du}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} \left[1 - \exp \left\{ -\frac{2.30(1+e_0)r}{C_c C_v H_0} \left(H_0 z - \frac{z^2}{2} \right) \right\} \right] \quad (6.4.33)$$

最終的に、圧密係数 c_v は式(6.4.16)、式(6.4.29)、および式(6.4.32)から、次式で求められる。

$$c_v = -\frac{H_0^2}{2 \log \left(1 - \frac{u_1}{\sigma} \right)} \frac{d(\log \sigma)}{dt} \quad (6.4.34)$$

式(6.4.30)～式(6.4.31)からわかるように、粘土を非線形弾性体とした場合の定ひずみ速度載荷による圧密試験の軸圧縮圧力、ひずみ、間隙水圧挙動は図-6.4.2のようになる。

4.3.2 適用範囲

(1) 定常状態の達成時間 式(6.4.25)および式

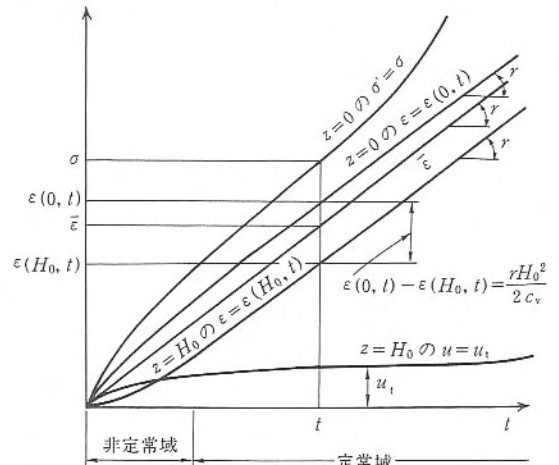


図-6.4.2 非線形弾性圧密理論に基づく各量の時間的変化

(6.4.34)が適用できるのは、微小ひずみ理論が適用でき、かつ供試体内部のひずみ変化が定常状態に達している場合である。Wissa et al.⁶⁾によると、供試体が定常状態に達するのに要する時間は、時間係数で $T_v \geq 0.5$ である。すなわち、式(6.4.25)および式(6.4.34)が適用できる時間の下限値 t_c は次式で与えられる。

$$t_c = 0.5 \frac{H_0^2}{c_v} \quad (6.4.35)$$

(2) 微小ひずみ理論の適用限界 微小ひずみ理論では、圧密中の層厚の変化は無視できると仮定している。JIS A 1217「土の段階載荷による圧密試験方法」では、各荷重段階ごとに層厚を一定と仮定することはそれほど無理な近似とは言えない。しかし、定ひずみ速度載荷による圧密試験では、ひずみが30%以上になるまで連続的に載荷するため、層厚の変化を無視するこの仮定は現実的でない。そこで、層厚の変化を考慮できる有限ひずみ理論に基づく解析法が梅原・善⁷⁾、Lee⁸⁾、Znidarcic et al.⁹⁾、清水¹¹⁾などによって提案されている。

梅原・善⁷⁾は、三笠¹⁰⁾によって提案された圧密比 $\xi = f_0/f$ (f_0 : 供試体の初期体積比, f : 供試体の体積比)を用いた圧密支配方程式、

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = c_v \xi \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \quad (6.4.36)$$

を差分法により離散化した次式を利用して、供試体内の任意な場所における体積比 f を供試体の平均ひずみ $\bar{\varepsilon} = rt/H_0$ (r : 変位速度) と正規化ひずみ速度 rH_0/c_v を用いて求める図表を示している。

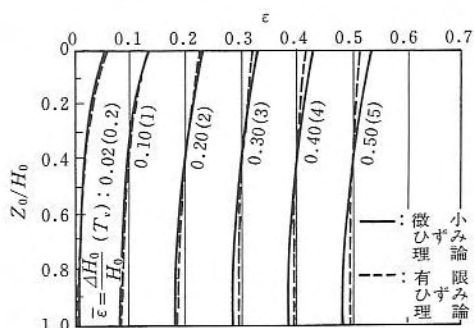
$$\begin{aligned} & \xi(Z_0, T' + \Delta T) - \xi(Z_0, T') \\ &= n^2 \frac{c_v}{rH_0} \Delta T' \xi^2 \{ \xi(Z_0 + \Delta Z_0, T') \\ & \quad - 2\xi(Z_0, T') + \xi(Z_0 - \Delta Z_0, T') \} \end{aligned} \quad (6.4.37)$$

ここに、 $Z_0 = z_0/H_0$, $T' = rt/H_0$, n : 分割数, H_0 : 供試体の初期高さ, z_0 : 原始座標, $\xi(Z_0, T') < \bar{\xi} < \xi(Z_0, T' + \Delta T)$ である。

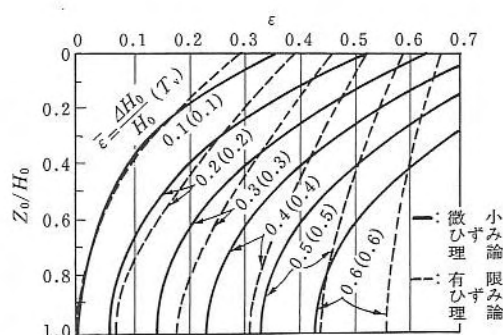
図6.4.3は、微小ひずみ理論と有限ひずみ理論で得られるひずみ分布を比較したものである¹¹⁾。 rH_0/c_v が大きくなるほど (r および H_0 が大きくなる, または c_v が小さくなるほど), また平均ひずみ $\bar{\varepsilon} = rt/H_0$ が大きくなるほど両者の差は大きくなる。

また、Lee⁸⁾は、微小ひずみ理論で解析できる範囲として、正規化ひずみ速度 $rH_0/c_v < 0.2$ と計算に用いる時間係数増分 $\Delta T \leq 0.1$ を示している。すなわち、ひずみ速度の上限値 r_c と計算に用いる時間間隔の上限値 Δt_c は次式で与えられる。

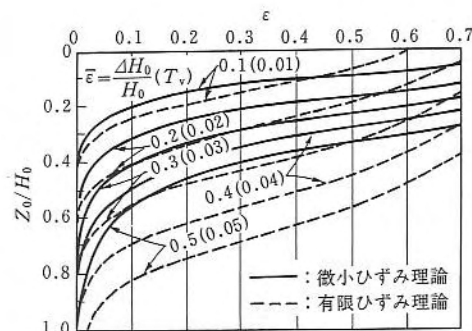
$$r_c = 0.2 \frac{c_v}{H_0^2} \quad (6.4.38)$$



(1) $r \cdot H_0 / c_v = 0.1$



(2) $r \cdot H_0 / c_v = 1$



(3) $r \cdot H_0 / c_v = 10$

図-6.4.3 微小ひずみ理論と有限ひずみ理論によるひずみ分布の比較(土質工学会¹¹⁾)

$$\Delta t_c = 0.1 \frac{H_0^2}{c_v} \quad (6.4.39)$$

有限ひずみ理論に基づく解析法は、実際の定ひずみ速度載荷による圧密試験の実態に即している。しかし、一般的な解析解が得られないため、圧密係数 c_v の値を計算式で求めることができないという欠点も有している。

(3) 適用土質 定ひずみ速度載荷による圧密試験によって圧密係数 c_v を求めるためには、供試体非排水面での間隙水圧の測定が不可欠であり、さらに間隙水圧を精度よく測定するためには供試体が飽和している必要がある。そこで本規格では、飽和した土を対象としている。

また、供試体非排水面で発生する間隙水圧が適切な値になるようにひずみ速度を選べば、超軟弱粘土や硬質粘土、さらには砂質粘土に対しても e_v を求めることができる。

洪積粘土あるいは沖積粘土でも鋭敏比の高い粘土では、 e - $\log p$ 曲線が圧密降伏応力 p_c 付近で急変するものが多い。このような試料に対して段階载荷による圧密試験を行った場合、 e - $\log p$ 曲線の p_c 付近にデータが得られれば、 p_c を比較的精度よく求められる。一方、その付近にデータがない場合には、複雑な補間法を用いても圧密降伏応力を正しく求められないことが報告されている¹²⁾。このような試料に対して、精度よく圧密降伏応力を決定するためには、定ひずみ速度载荷による圧密試験を実施するとよい。

本規格の適用土質は、供試体の成形ができるような試料であるが、スラリー状の超軟弱な試料に対しても本規格を適用することができる。しかし、このような場合には試験中に生じるひずみが大きくなるため、前述したような有限ひずみ理論を用いた解析を行う必要がある。

4.3.3 試験装置および器具

(1) 圧密容器 圧密容器は、JIS A 1217「土の段階载荷による圧密試験方法」に規定される機能を満たしたうえで、一定したひずみ速度で圧縮が行え、背圧の負荷、圧密度、間隙水圧、軸圧縮力の測定などが規定される許容差で測定できる機構および構造とする。

この試験では、供試体の圧密度を正確に測定することが重要である。しかし、载荷ピストン、加圧板、多孔板、フィルター、底板などには最大 10 kN に近い力が作用して各部に変形が起こっており、通常はこれらの変形を含めた状態で変位計測を行っている。図-6.4.4 は、供試体に鋼製のグミーを用いた場合の圧密容器の変形量を調査した結果である。また、図-6.4.5、図-6.4.6 には、この結果を用いて圧密圧力-間隙比、平均圧密圧力-体積圧縮係数の関係を補正した例を示した。図から明らかなように、圧密圧力 2.5 MN/m² で 0.1 mm 程度の変

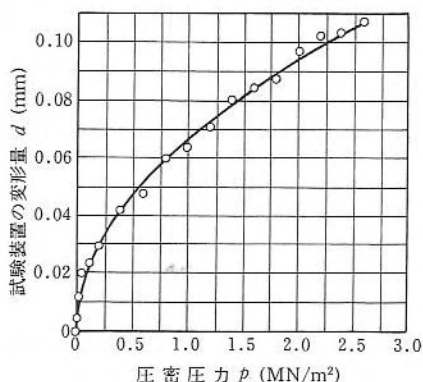


図-6.4.4 圧密容器の変形

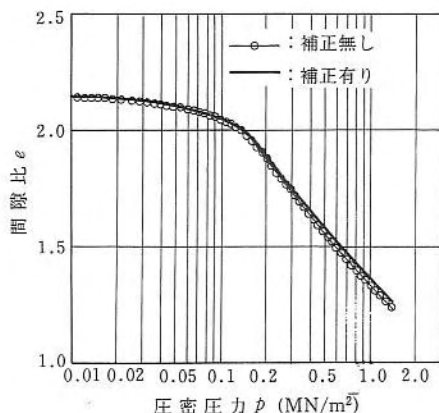


図-6.4.5 圧密容器の変形が e - $\log p$ 曲線に及ぼす影響

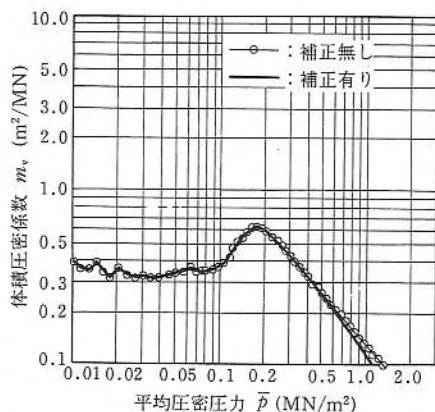


図-6.4.6 圧密容器の変形が m_v に及ぼす影響

形量であれば、装置の変形は圧密降伏応力 100~200 kN/m² の試料の試験結果にあまり影響を与えないことがわかる。

しかし、硬質な試料など変形量の少ない試料の試験を実施する場合には、図-6.4.4 に示すような較正試験を予め実施し、必要に応じて結果の補正を行うことが望ましい。

(2) 圧密リング ステンレス鋼を用いたリングでも、間隙水に含まれる各種溶存ガス、硫黄、塩素などの影響で腐食する場合がある。最近では、チタン合金を素材とするリングを使用する例があるが、経済性を除けば、耐食性、剛性、試料との摩擦などの面でステンレス鋼製より優れている（本編 3.3.3(1)(a)参照）。

また、リングの肉厚については、表-6.4.1 に示すように ASTM D 4186-89 では供試体に最大軸圧縮力が作用したときのリングの内径変化が 0.03% 以下、ETC 5-N 95.6¹³⁾ では 0.05% 以下である必要があると規定され

表 6.4.1 諸外国の基準との比較

	ASTM D 4186-89 D 2435-90	BS 1377 Part 5-90	ETC 5-N 95.6	JIS A 1217 A 1227
圧密リングの内径変化 (最大圧密圧力時)	0.03% 以下	——	0.05% 以下	0.05% 以下
圧密リングの径 高さ 径/高さの比	5 cm 以上 1.2 cm 以上 最低 2.5 で 4 以上を推奨	5~10.5 cm 1.8 cm 以上 2.5 以上	3.5~10.5 cm 1.2 cm 以上 2.5 以上	6 cm 2 cm 2.5 以上
加圧板の寸法	圧密リング内径より 0.2~0.5 mm 小さい	——	圧密リング内径より 0.5 mm 小さい 0.2 mm 小さい(軟弱土)	圧密リング内径より 0.2 mm 小さい
載荷装置の圧力変動	0.5%	1.0% または 1 kPa	1.0% または 1 kPa	1.0%
試供体の粒径と 圧密リングの高さ	圧密リングを選択可能 最大粒径の 10 倍以上	圧密リングを選択可能 最大粒径の 5 倍以上	圧密リングを選択可能 ——	圧密リング一種類 ——
多孔板の透水性	試供体の最低 10 倍	——	十分に大きい	10^{-4} cm/s 以上
多孔板の径	圧密リングの 0.2~ 0.5 mm 以下	圧密リングの 0.5 mm 以下	圧密リングの 0.5 mm 以下	面積が試供体の 85% 以上
変位計	0.0025 mm の精度 (分解能)	0.002 mm の精度で 10 mm 以上の容量, 12 mm 以上で 0.01 mm	0.002 mm の精度で 10 mm 以上の容量, 10 mm 以上で 0.01 mm	0.002 mm の精度で 10 mm 以上の容量, 10 mm 以上で 0.01 mm

ている。リングの寸法についても、ASTM ではリング高さが供試体最大粒径の 10 倍以上、BS 1377 Part 5-90 では最大粒径がリング高さの 5 分の 1 と規定している。

(3) 加圧板、底板 加圧板および底板は、軸圧縮力に対し十分な剛性を有する構造とする。また、加圧板上のピストンも通常の圧密試験容器に比べ長くなるため、曲げや圧縮に対し十分な剛性を有する構造とする。

(4) 多孔板 加圧板および底板に設置する多孔板は、十分大きな剛性を有するものを使用する。供試体の下部に発生する平均的な間隙水圧を測定するには、下部多孔板の直径と試料の直径が等しいことが望ましい。しかし、試料が低塑性で圧密速度が速い場合や硬質粘土で圧密リング内面の密着が不十分な場合には、下部多孔板から供試体側面を通して過剰間隙水圧の消散が懸念される。

このため、下部多孔板の外径を小さくして供試体側面を通しての過剰間隙水圧の消散を回避することが対策として考えられる。図-6.4.7 のタイプ A, B は下部多孔板の外径を上部多孔板の直径と同等にしたものであり、タイプ C は下部多孔板の外径を小さくしたものである¹⁴⁾。なお、タイプ B, C の実験では供試体を圧密リングに納めるときに、供試体と圧密リング側面との間に空隙が生じないように十分配慮されている。その結果、圧縮曲線および体積圧縮係数については、各タイプの実験結果には差が認められない。しかしながら、圧密係数については特に低塑性の $I_p=12.7$ である砂粘土混合土の

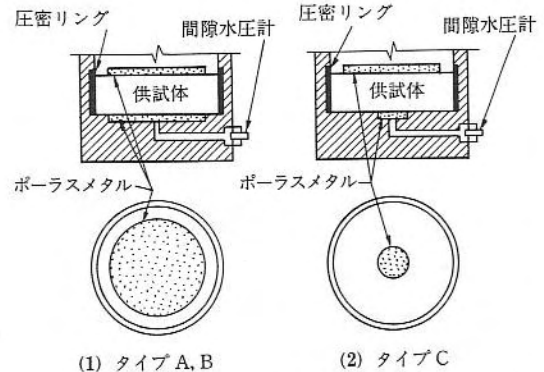


図-6.4.7 下部多孔板の径を変えた試験方法の例
(梅原¹⁴⁾に加筆修正)

試料の場合に図-6.4.8 に示すとおり、タイプ A で求められる圧密係数が段階載荷圧密試験やタイプ B, C の場合に比べて著しく大きい。したがって、塑性指数 I_p が 30 以下の試料に対しては、タイプ B, C のように間隙水圧の測定精度を上げるための対策をとることが望ましい¹⁵⁾。

また、下部多孔板は、間隙水圧を圧力変換器に伝達する媒体であり、試験時には飽和した状態である必要がある。このため、多孔板につながる経路や多孔板自体を容易に脱気や飽和が行える構造が必要となる。

さらに、より正確な圧密圧力を求めるためには、応力解放などにより供試体内に発生した負の間隙水圧を含

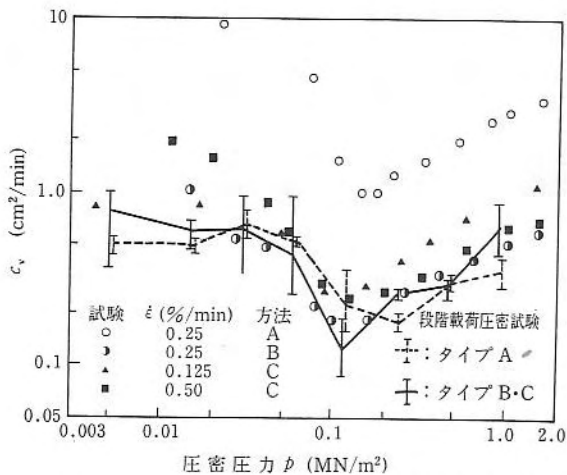


図-6.4.8 圧密係数と圧密圧力の関係に及ぼす試験法の影響(梅原¹⁴⁾に加筆修正)

め、試験前から試験中に到る間隙水圧の変化を精密に測定する必要がある(図-6.4.9参照)。この負の間隙水圧が十分発生することから、供試体および間隙水圧の測定経路の飽和を確認することができる。このために、セラミックフィルター(素焼きの陶板)に代表されるような空気侵入値(A. E. V)が100~200 kN/m²程度の多孔板を使用するとよい(第7編3.5.2(2)参照)。

圧縮性の小さな透水性薄膜には、多孔性高分子薄膜であるメンブレンフィルターなどがある(本編3.3.3(1)(c)参照)。

(5) 密閉容器 供試体上面に背圧を負荷するため、圧密リングを容器内に密閉できる構造とする。

図1の試験機の構成例は、基本的に三軸室と同じ機能を有している。

軸圧縮力を測定するための荷重計を密閉容器外に設置する場合には、載荷板上のピストンと密閉容器の摩擦をできる限り少なくする。また、ピストンの中心軸と圧密リングの中心軸は正確に一致した構造とする。

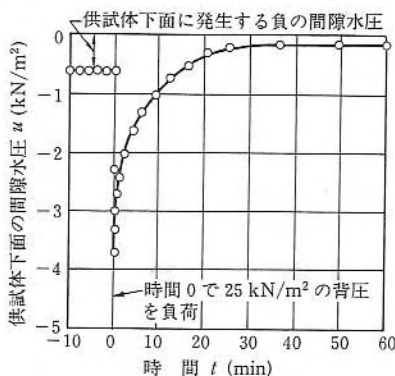


図-6.4.9 負の間隙水圧の測定例

(6) 圧縮装置 一定の圧縮速度で圧密変位量を供試体に与える装置として、電動ジャッキや空気圧シリンダーを使用した載荷装置が使用される。参考表1に示されるひずみ速度は、供試体の高さが2cmの場合0.02~0.002 mm/minとなる。最大圧縮力は、10 kN以上が必要である。

電動ジャッキを用いる装置は、比較的簡便に安定した圧縮変位速度と大きな圧縮力が得られるが、作動中の振動や計測器に与える電氣的ノイズの影響に注意する。空気圧シリンダーを用いる装置は、試料の圧縮量を圧力発生装置にフィードバックすることにより軸圧縮力を制御し、一定の圧縮変位速度を得るものが多い。その種の装置は汎用的に種々の試験に用いられるが、本試験で対象となる圧縮変位速度を得るためには、精密なフィードバックや制御機構が必要となる。

試験中の圧縮速度の変化は、直接軸圧縮力や間隙水圧に反映するので、変位速度の一定した装置を使用することが重要である。

(7) 背圧供給装置 図1の例は、密閉容器上部から空気圧を負荷し、容器内の水を介して供試体内部に背圧を作用させるものである。この場合、試験中に密閉容器内の水位が変動すると、空気圧が一定でも背圧は変動することに注意する。

背圧供給装置のタンク内にいわゆるバルーンを設置し、空気と水が接しない状態で背圧を負荷できる装置がある。この場合、密閉容器内は水で満たされるため、前述した水位変動による背圧の誤差は生じない。また、水と加圧空気が直接接しないため、試験用水(脱気水)に空気の溶け込む量が少なく、間隙水圧の測定には都合がよい。

(8) 荷重計 軸圧縮力の測定には、一般にひずみゲージ型ロードセルが使用される。使用するロードセルの容量は、試験する最大の圧密圧力と予想される最大間隙水圧の和から選定する。目安として、1600 kN/m²を最大圧密圧力とする場合には容量10 kNのものを使用する。

規格に示される計測圧縮力の許容差を満足するためには、軸圧縮力の大きさに対応した較正係数(実荷重と測定値の換算係数)を求めておく必要がある。ロードセルの持つ精度にもよるが、図-6.4.10の例のように容量の10%程度毎に分割した各荷重範囲内の較正係数を求め、結果の整理に使用することが望ましい。

(9) 変位計 圧密量の測定には、ひずみゲージ型、差動トランス型、デジタル型(デジタルリニアゲージなど)等の変位計が使用される。デジタル型以外の変位計については、荷重計同様に実変位と測定値の較正係数を求めておく。デジタル型は、比較的簡単な装置で安定した性能が得られ、温度変化に対する安定性にも優

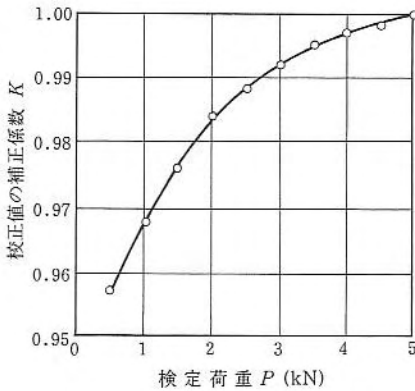


図-6.4.10 荷重計較正係数の補正

れ、ほとんどの装置は較正することなく使用できる。

(10) 間隙水圧測定装置 間隙水圧の測定には、ひずみゲージ型や半導体型の電気式圧力変換器が用いられる。

供試体の下部に発生する間隙水圧は、同位置での背圧を上回る水圧として求められる。このため、間隙水圧を測定する変換器と背圧を測定する変換器は同等の精度、安定性を有するものとする。また、変換器の較正も較正圧力を両変換器に同時に加えて行う必要がある。較正係数は、荷重計の場合と同様に圧力領域毎に求めておくと、精度のよい測定と結果の整理ができる。

差圧計を用いると、供試体下部の背圧を上回る水圧を直接測定することができる。そのため、本試験に差圧計を使用した場合、背圧が若干変動した場合でも正確に間隙水圧の測定を行うことができる。

(11) 記録装置 この試験には、供試体の力学挙動の測定に電気的な変換器の使用が欠かせない。変換器から得られる情報はほとんどの場合電圧であり、この量を直接、あるいは増幅して測定、記録する。パーソナルコンピュータやいわゆるデータロガーの普及により、電圧などを精度よく比較的簡便にデジタル値に変換し保存することが可能となっている。このことは、試験後のデータ整理に対しても大変有効である。

しかし、測定の対象となる電圧には種々のノイズが含まれていることが多い。ノイズの除去は、電気的なフィルターや測定値の加算平均などである程度は可能であるが、装置の構築時にできるだけ安定した機器を選定する努力が必要である。また、事前に、各変換器に負荷を加えない状態で測定を実施し、試験に対応した期間中安定した作動と計測を行えることを確認する^{15), 16)}。

4.3.4 試験方法

(1) 準備 容器底板と圧密リング下面は、背圧が直接供試体底面に作用しないようシールできる構造とする。一般にシール材としてOリングが使用されるが、

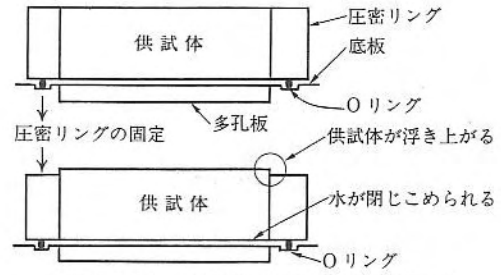
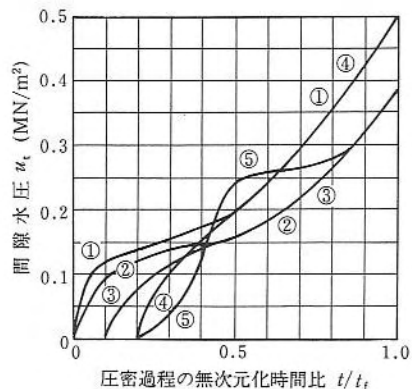


図-6.4.11 圧密リング固定時の悪い例

図-6.4.11 に示すように固定時にOリング締め代に溜まっている水がリング内の試料を押し上げないよう、また、試験時には完全止水が行えるよう考慮した構造とする。さらに、供試体底面と下部多孔板の間に設置するフィルターが厚い場合にも、組立時にフィルターが試料を押し上げるので注意する。

間隙水圧の測定にあたっては、特に軸圧縮初期における水圧の立ち上がり注意到を要する。供試体および多孔板の不飽和や加圧板と供試体の密着不足、軸荷重圧縮装置のあそびなどの原因によって、図-6.4.12の③、④、⑤の例に模式的に示すように、軸圧縮初期段階で間隙水圧が計測されない場合がある¹⁷⁾。その結果、得られる圧密係数などに大きな誤差が含まれることになる。図-6.4.13は、図-6.4.12の間隙水圧発生モデルを用いて圧密係数を計算した数値実験結果である。適切に間隙水圧が測定された場合(①、②)と比較して、③、④、⑤の場合には、過圧密領域での圧密係数が1オーダー程度大きく得られる。これは、間隙水圧が適正に発生しない現象を水圧の消散過程として評価したためである。過圧密領域での正確な試験結果を得るためには、精度の良い間隙水圧測定が不可欠である¹⁷⁾。

6.1 d) 備考 に示した方法以外にも、供試体端面と多


図-6.4.12 間隙水圧測定結果の模式図(日下部ら¹⁷⁾に加筆修正)

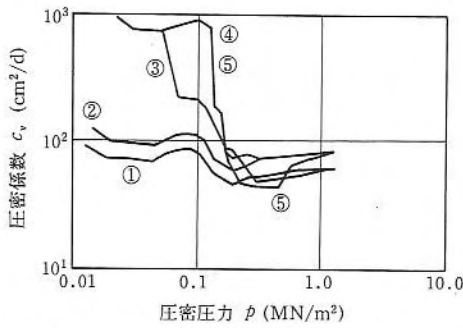


図-6.4.13 間隙水圧測定値が圧密係数に及ぼす影響(日下部ら¹⁷⁾に加筆修正)

孔板を密着させる方法として、軸圧縮を行う前に試料の圧密降伏応力推定値の10%程度に相当する十分小さい軸圧縮力を作用させて、一時間程度両面排水状態で予備的な圧密を行う方法がある。この予圧密の有無が試験結果に及ぼす影響を、特に供試体底面の間隙水圧挙動に着目して整理したものが図-6.4.14である³⁾。この図からわかるように、予圧密の有無が試験時の間隙水圧挙動に及ぼす影響はあまり大きくない。しかし、供試体端面と多孔板の密着をさせておく必要があるため、加圧板を軽く押しつける方法を[6.1 d)備考]に示した。

図-6.4.14には、[6.1 i)]の試験に用いる背圧の大きさが試験結果に及ぼす影響を調査するために行った実験結果の一例も併せて示されているが、この実験結果で見る限り用いる背圧の大きさが結果に及ぼす影響はないと言ってよい³⁾。なお、高い鋭敏比をもつ軟弱粘土の乱さない試料に対して背圧を適用する場合、背圧の大きさは原位置での静水圧に相当する大きさの範囲であればCU

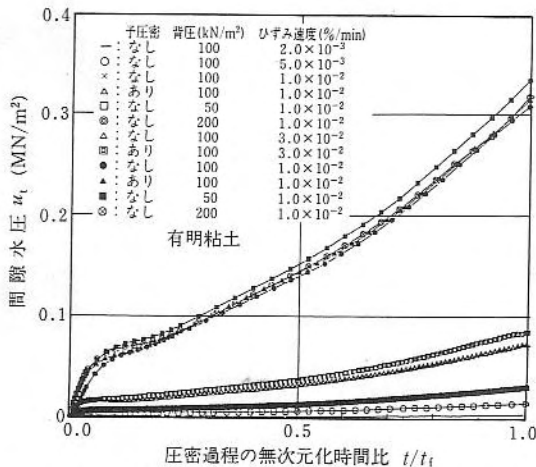


図-6.4.14 予圧密や背圧の有無による間隙水圧測定結果への影響(土質工学会³⁾に加筆修正)

三軸圧縮試験結果にあまり影響しないことが報告されている¹⁸⁾。また、300 m以上の海底地盤中の大深度から採取された比較的硬質な粘土試料の場合には、原位置で受けていた水圧が3 MN/m²以上になり室内実験装置の容量などの上で不都合な点が多いので、背圧の大きさは試料の受けていた静水圧の半分程度でよいことが報告されている¹⁹⁾。

図-6.4.15は供試体の飽和度をチェックするために、供試体に背圧を段階的に(49.1 kN/m²から98.1 kN/m²まで)作用させたときに供試体底面で測定された間隙水圧の経時的な変化を示したものである。供試体底面の間隙水圧は10分程度で供試体上面に作用させた背圧と等しくなっている。このように供試体底面の間隙水圧増加量が背圧の増加量と十分短い時間で等しくなれば供試体の飽和は十分と言えるが、そうでない場合には間隙水圧が増えるまでより長い時間放置するか、背圧の大きさを増加させる必要がある。

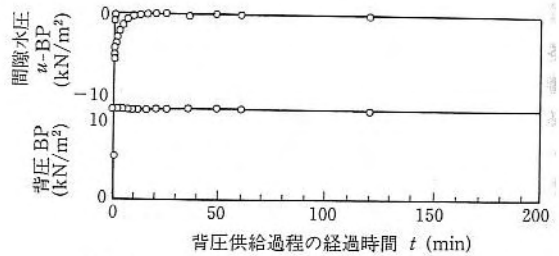


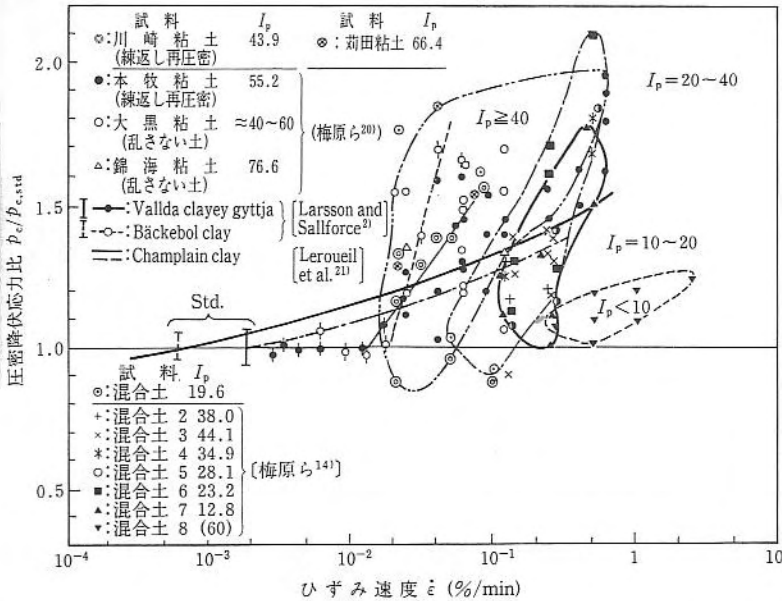
図-6.4.15 背圧作用時の間隙水圧挙動

(2) 軸圧縮と測定 [6.2 d)]の軸圧縮を終了する圧密圧力は試験の目的によって異なるが、軸圧縮過程中に結果の整理を並行して行って圧縮曲線を描き、圧密降伏応力 p_c を超えて正規圧密領域に十分入ったことを確認した上で軸圧縮を終了するとよい。

図-6.4.16は、既往の実験における各種の試料についての定ひずみ速度圧密試験で求められた圧密降伏応力 p_c とJIS A 1217の段階荷重による圧密試験で得られた $p_{c, std}$ の比をひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に対して試料の塑性指数別に整理したものである¹⁾。[参考表1]は、この図をもとに定ひずみ速度圧密試験の p_c と段階荷重圧密試験の $p_{c, std}$ が一致するようなひずみ速度を読みとって、試料の塑性指数別に整理したものである¹⁾。一方、ASTM D 4186-89では、 p_c とは無関係に試験中の供試体非排水面の過剰間隙水圧が軸圧縮圧力の3~30%を超えないひずみ速度を選択することが望ましいとしている。

4.3.5 計算

(1) 圧密量-圧力の関係 供試体の間隙比 e_0 は、定ひずみ速度条件下で供試体の圧密変位量から決まる供試体全体についての平均的な値を求める。また、供試体


 図-6.4.16 ひずみ速度と圧密降伏応力比の関係 (土質工学会¹⁾ に加筆修正)

の圧密圧力 p_c は、土粒子骨格の線形弾性を仮定して次式で求めている。すなわち、放物線分布した供試体内のひずみすなわち有効応力分布に基づいて、実測された供試体排水面の有効応力 = 軸圧縮圧力 σ_t と供試体非排水面の有効応力 ($= \sigma_t - u_t$, u_t : 供試体非排水面の間隙水圧) を用いて、圧密圧力は次式のように求められる。

$$p_c = \frac{2(\sigma_t - u_t) + \sigma_t}{3} = \sigma_t - \frac{2}{3}u_t \quad (6.4.40)$$

一方、ASTM D 4186-89 では非線形弾性を仮定して間隙比 e_t と圧密圧力の対数 $\log p_c$ の間に線形関係が成り立つことを用いて、次式で圧密圧力 p_c を求めている。

$$\log p_c = \frac{1}{3} [2 \log (\sigma_t - u_t) + \log \sigma_t]$$

$$\therefore p_c = \{ (\sigma_t - u_t)^2 \sigma_t \}^{1/3} = (\sigma_t^3 - 2\sigma_t^2 u_t + \sigma_t u_t^2)^{1/3} \quad (6.4.41)$$

これらの2つの算定式による p_c の値の違いをひずみ速度圧密試験時の供試体非排水面の間隙水圧比 (u_t/σ_t) に対してプロットしたものが図-6.4.17 に示されている。定ひずみ速度圧密試験の一斉試験結果³⁾ によると、 $I_p=40$ 程度の試料で、この間隙水圧比の値は試験の初期段階を除けば0.3以下である。また、算定式の違いによる p_c の違いは2%以下である。

(2) 体積圧縮係数 体積圧縮係数 m_v は時間 t から $t' (=t+\Delta t)$ の間では供試体内で一定であるとして、次式で算定する。

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} \quad (6.4.42)$$

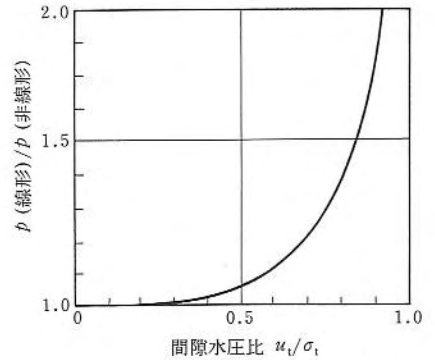


図-6.4.17 圧密圧力の計算式の比較

ここに、 $\Delta \varepsilon$ は供試体の圧縮ひずみで、Wissa et al.⁶⁾ の方法では供試体の初期高さ H_0 をもとに算定した値を用いているが、本規格では有限ひずみを考慮して供試体の平均高さ $\bar{H}$ から決まるひずみを用いている。

(3) 圧密係数 圧密係数 c_v は供試体内部で一定の体積圧縮係数 m_v に対応する値として、Wissa et al. の定常状態における理論解から次式で算定する⁶⁾ (本編 4.3.1 参照)。

$$c_v = \frac{\Delta \sigma \cdot \bar{H}^2}{2 \cdot \bar{u} \cdot \Delta t} \times 1440 \quad (6.4.43)$$

なお、 $\bar{u}$ は時間 t と t' における供試体非排水面の間隙水圧の平均値であり、Wissa et al. の c_v の計算式で u_t を用いているのとは異なっている。 $\bar{u}$ を用いる理由は、規格の m_v の算定式(6.4.42)で有限ひずみを考慮して $\bar{H}$ を用いていることとの対応をはかるとともに、供試体底面の間隙水圧は変動しやすいのでそれらのばらつきを平滑化するためである。

図-6.4.18 は同一の試料でひずみ速度が異なるときの $\bar{u}$ と u_t を用いて計算した c_v の値を比較したものであるが、両者の違いはほとんどないと言ってよい。

一方、ASTM D 4186-89 では圧密圧力の算定式の場合と同様に非線形弾性を仮定して間隙比 e と圧密圧力の対数 $\log p$ の線形関係を用いて、次式で c_v を算定している。

$$c_v = - \frac{\bar{H}^2 \log (\sigma'_t / \sigma_t)}{2 \Delta t \log (1 - u_t / \sigma)} \quad (6.4.44)$$

式(6.4.43)と式(6.4.44)による c_v の値の違いを、定ひずみ速度圧密試験時の供試体非排水面の間隙水圧比 u_t/σ_t に対して図-6.4.17と同様にプロットしたものが図-6.4.19 に示されている⁶⁾。圧密圧力 p_c の場合と比較すると、両者の差は大きいのが、間隙水圧比の値が0.3以下であればその差は20%以下である。

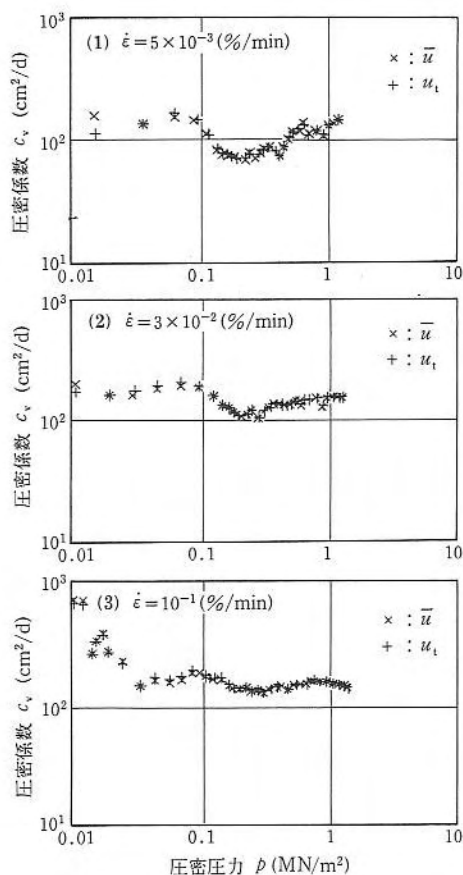


図-6.4.18 圧密係数の比較

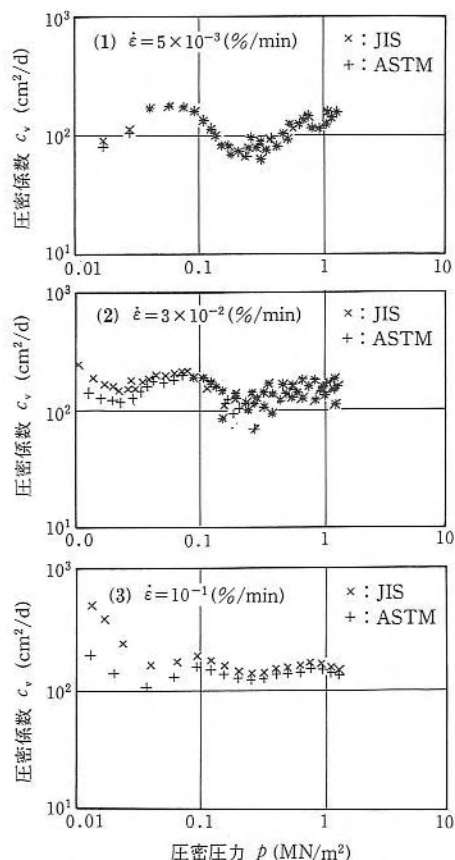
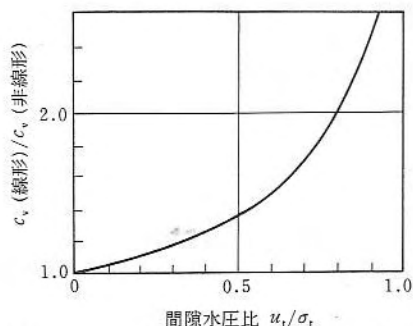


図-6.4.20 圧密係数の計算例

図-6.4.20 は同一の試料について、本規格と ASTM D 4186-89 で示された計算式を用いて実際に得られた c_v の値をひずみ速度別に比較したものである。図-6.4.19 で示されているように、ひずみ速度の小さい試験で間隙水圧比が小さい場合にはあまり違いはないが、ひずみ速度が大きい試験の初期段階で間隙水圧比が大きい時に両者の違いが大きくなる。

図-6.4.19 圧密係数の計算式の比較
(Wissa et al.⁶⁾ に加筆修正)

4.3.6 報告

試験中の時間 t 、軸圧縮圧力 σ_t 、間隙水圧 u_t および圧密変位量 d_t の関係は、定ひずみ速度圧密試験の試験結果の適否を判断するとともに結果の整理の基本となる重要なデータである。図表-6.4.1 に示すようなデータシートの記入例にしたがって、パーソナルコンピュータなどの記録装置の出力結果を添付する必要がある。

また、圧縮曲線と $\log m_v$ 、 $\log c_v$ - $\log p$ 曲線は、図表-6.4.2、図表-6.4.3 のように、JIS A 1217 と同じデータシートを利用して報告してもよい。ただし、定ひずみ速度圧密試験方法により求めたことを明記しなければならない。体積圧縮係数 m_v と圧密係数 c_v の値は、計算式からわかるように、時間 t と t' の間で定義されるものなので、いずれも圧密圧力 p の相乗平均値に対してプロットすればよい。

また、図表-6.4.4、図表-6.4.5 に測定値の記入例と計算書の一例を参考のために示したが、通常はパーソナルコンピュータなどにより測定値から必要な値を計算し、グラフ作成までの処理を行うことになる。

4.4 結果の解釈と利用

4.4.1 代表的な測定例

(1) 測定データ 定ひずみ速度圧密試験中に得られる測定記録は、図表-6.4.1のデータシート記入例(土の定ひずみ速度圧密試験(測定記録))に示されているように、載荷時間に対する圧密量は一定速度を保つように強制的に制御される。軸圧縮圧力および間隙水圧は、載荷初期の段階で上に凸のカーブとなり、軸圧縮が進むにつれて下に凸のカーブとなるのが普通である。これらの測定記録から、図表-6.4.2、図表-6.4.3のデータシート記入例に示される圧縮曲線($e-\log p$, C_c , p_c), $\log c_v-\log p$, $\log m_v-\log p$ 関係が求められる。一般に、軸圧縮圧力は圧密圧力と一致しないので、必要な圧密圧力の最大値と過剰間隙水圧の2/3の和を超えた時点まで軸圧縮圧力を連続して載荷する必要がある。

(2) 試験の所要時間 定ひずみ速度圧密試験では、試料の物性やひずみ速度の設定によって所要の圧密圧力に達する載荷時間が異なる。しかしながら、ひずみ速度が設定された場合、試験時間が前もって予測できれば、試験計画などの実用的観点から都合がよい。図-6.4.21は、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と載荷終了までの時間 t_t の関係を示したもので、最大圧密圧力は、圧密降伏応力 p_c の3倍まで載荷したものである。図-6.4.21から明らかなように、ひずみ速度と載荷終了までの時間との関係は、試料の液性限界 w_L によらず両対数紙上で1:1の勾配となっている。これらの関係を利用すれば、おおよそその試験時間を推定することが可能である。

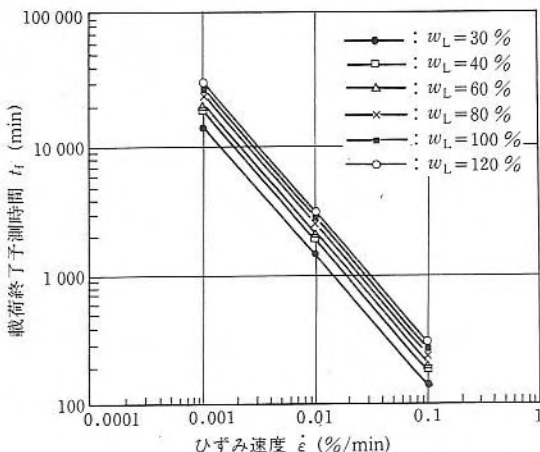


図-6.4.21 ひずみ速度と載荷終了予測時間の関係
(大阪湾洪積粘土)(p_c の3倍まで載荷した場合)(土田²⁰⁾に加筆修正)

4.4.2 評価と利用

(1) 圧縮曲線および圧密降伏応力 圧密試験は典

型的な模範試験であるため、段階載荷であるか定ひずみ速度載荷であるかなど試験方法の違いにかかわらず、供試体内部に試験条件に応じた間隙比と有効応力の分布が生じる。しかし、圧密試験で測定される物理量は、ひずみ分布を積分した値である供試体上端面の変位であったり、間隙水圧分布の境界値である非排水面の間隙水圧などであるため、試験条件によって変わるこれらの値から供試体固有の特性を表す圧縮曲線や圧密係数を求めるには、それぞれの試験条件を考慮した境界値問題の解を利用する必要がある。

圧密現象を対象とした境界値問題を解くためには、質量保存則や運動量保存則などの場に関する力学的な一般法則だけでなく、粘土の透水特性を表した間隙水の流動則と粘土骨格の変形特性を表した構成式が必要となる。逆にいえば、飽和粘土の一次元圧密試験時の力学的応答を表した境界値問題の解には、間隙水の流動則と粘土骨格の構成式の特性が反映されていることを示している。例えば、圧密試験結果を整理する際に、透水特性と変形特性にそれぞれDarcyの法則と非時間依存性の構成式を仮定した境界値問題の解を使う場合、得られた結果もDarcyの法則と非時間依存性の構成式というフィルターを通したものとなる。

このとき、理論で仮定した材料特性と実際の粘土の材料特性が同じであれば何の問題も起きないが、実際にはそううまくいかない。すなわち、Darcyの法則は実際の粘土の透水特性を比較的忠実に表しているの、透水特性にDarcyの法則を用いることはほとんど問題を生じさせない。しかし、変形特性に非時間依存性の構成式を用いることは、実際の粘土の変形特性が多分に時間依存性を有しているため、様々な問題を引き起こしている^{22),23)}。その代表的なものが、本編3.3.6(2)c)で示した圧密係数の算出に一次圧密比を使うかどうかの問題である。

さらに、粘土の変形特性に時間依存性があるかどうかは、粘土骨格の応力-ひずみ関係を反映した圧縮曲線に直接関係している。具体的には、定ひずみ速度圧密試験で用いるひずみ速度は得られる圧縮曲線の形状に影響を与え、ひずみ速度が大きいと圧縮指数 C_c はあまり変わらないものの、圧密降伏応力 p_c が大きくなることが知られている。

例えば、図-6.4.22はカナダの乱さない鋭敏粘土試料の段階載荷と定ひずみ速度載荷による圧密試験結果をもとに、試験中のひずみ速度別に圧縮曲線を整理したものである。ひずみ速度が大きければ大きいほど、骨格の粘性によって圧縮曲線は右に移動していることが観察される²⁴⁾。これを模式的に示したものが図-6.4.23であり、ひずみ速度が大きくなるにつれて、圧縮曲線は右側に平行移動した形となる。このひずみ速度が、圧密降伏応力

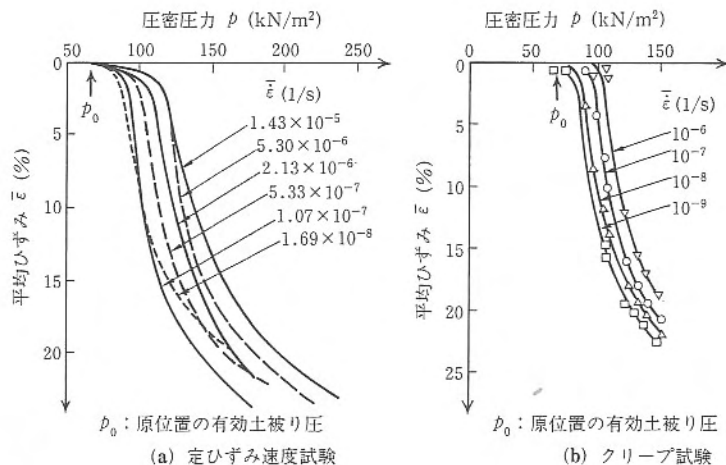


図-6.4.22 Batiscan 自然堆積粘土の $\bar{\epsilon}$ - $\bar{\epsilon}$ - p 関係 (Leroueil et al.²⁴⁾ に加筆修正)

に与える影響の実例を示したものが図-6.4.24 である。土質により圧密降伏応力に与えるひずみ速度の影響は異なるが、圧密降伏応力はひずみ速度の対数の増加に対して、ほぼ直線的に増加することがわかる。

このように、定ひずみ速度圧密試験から得られる圧密降伏応力は、その試験で用いたひずみ速度に対応した値と考えるのが妥当である。一方、段階載荷による圧密試験から得られる圧密降伏応力は、一段階の載荷時間を24時間とした場合の値である。よって、定ひずみ速度圧密試験におけるひずみ速度と段階載荷圧密試験における24時間載荷後のひずみ速度が異なれば、両者の圧密降伏応力の値が異なるのは当然の結果である。

しかし、設計などの実務ではこれまで段階載荷による圧密試験結果を用いてきたので、定ひずみ速度圧密試験結果を安心して実設計に用いるためには、定ひずみ速度圧密試験結果を段階載荷による圧密試験結果と比較・検討する場合が多く見られる。ひずみ速度が大きく異なるようであれば、定ひずみ速度圧密試験結果を段階載荷による圧密試験結果にすり合わせる必要がある。この、いわゆる補正法については以下の2つの考え方がある。

- ① 試料の塑性指数に応じて、段階載荷による圧密試験と同じ圧密降伏応力が得られるように適切なひずみ速度を選択する。
 - ② 試料に応じてひずみ速度を変えるのではなく、あるひずみ速度で一律に試験を行い、付加的な操作を行うことにより補正を行う。
- ①の考え方は、本規格の推奨する方法であり、図-6.4.16の結果などをもとに参考表1のひずみ速度の目標値が示されている。
- ②の方法はいくつか提案されているが、その主な考え

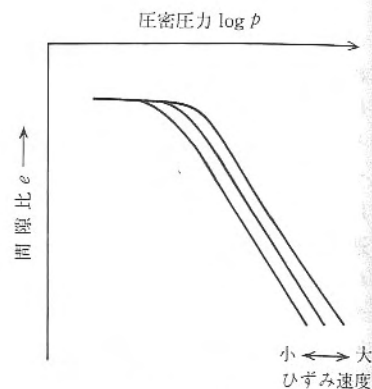


図-6.4.23 ひずみ速度が e - $\log p$ 曲線に及ぼす影響

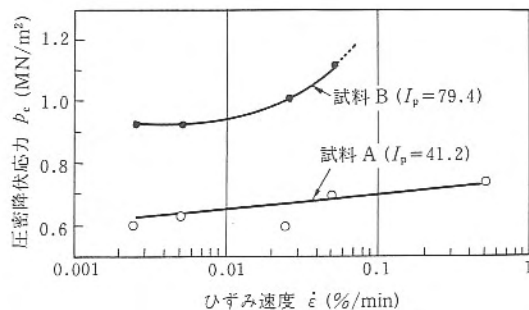


図-6.4.24 圧密降伏応力とひずみ速度の関係

方は段階載荷方式の圧密試験をクリープ試験ととらえ、二次圧密成分を考慮する点にある。具体的な手法としては、定ひずみ速度圧密試験の載荷終了後に、排水クリープ試験を行う方法²⁵⁾と、載荷終了後に応力緩和試験を行う方法²⁶⁾が提案されている。いずれの方法も、ひずみ速度を試料に応じて変更する必要がないという利点を持つが、手順が若干複雑になることと、1日程度試験期間が延びるという欠点を持っている。

(2) 体積圧縮係数、圧密係数 体積圧縮係数 m_v および圧密係数 c_v は、正規圧密領域においてはひずみ速度の影響をあまり顕著に受けないことが知られている。図-6.4.25、図-6.4.26は、大阪湾沖積粘土を再圧密して作製した試料の試験結果である²⁶⁾。 m_v 、 c_v は載荷方法の影響を受けず、また JIS A 1217「土の段階載荷による圧密試験方法」による結果ともよく一致する。

以上をまとめると、定ひずみ速度圧密試験から得られる体積圧縮係数と圧密係数は、正規圧密領域においては載荷方法やひずみ速度の影響をあまり受けないとみなしてよい。しかし、ひずみ速度が過大であると本編4.3.1で述べたひずみ、有効応力および間隙水圧の二次曲線分

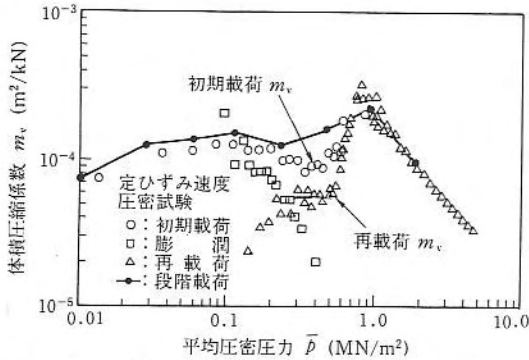
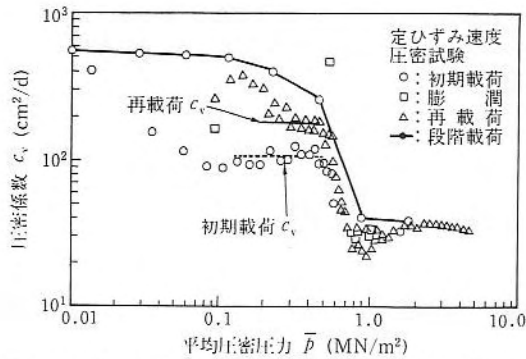
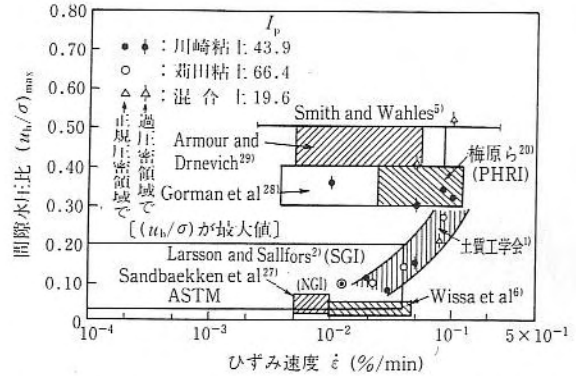
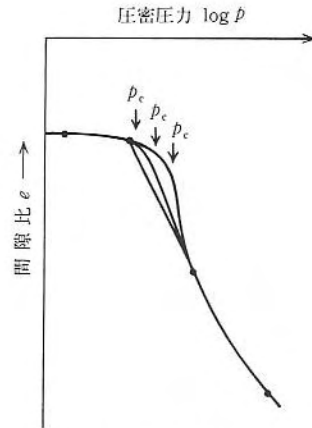
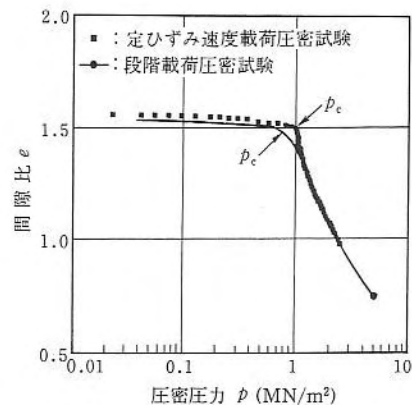

 図-6.4.25 体積圧縮係数と平均圧密応力の関係 (水上²⁶⁾に加筆修正)

 図-6.4.26 圧密係数と平均圧密圧力の関係 (水上²⁶⁾に加筆修正)

 図-6.4.27 ひずみ速度と間隙水圧比の関係 (土質工学会¹⁾に加筆修正)

 図-6.4.28 p_c の補間 (小林¹²⁾に加筆修正)


図-6.4.29 定ひずみ速度載荷圧密試験と段階載荷圧密試験による結果の比較

布の仮定が成立しなくなり、試験方法に関する理論の適用性を失うことが考えられる。また、 c_v の計算では間隙水圧測定精度が重要な要素となるため、通常の試験で用いている間隙水圧計の精度を考慮すると、ある程度の間隙水圧が発生するような適切なひずみ速度を設定することが必要である。

既往の定ひずみ速度圧密試験結果をまとめた図-6.4.27によると、軸圧縮の初期段階を除き、ほとんどの場合、同一時間における間隙水圧と軸圧縮圧力の比(間隙水圧比)の最大値は0.5以下になっている¹⁾。

(3) 硬質粘土への適用 洪積粘土あるいは沖積粘土でも鋭敏比の高い粘土では、圧縮曲線が圧密降伏応力の付近で急激に変化するものが多い。このような試料のJIS A 1217による段階載荷方式の圧密試験において、圧縮曲線の変曲点付近のデータが得られる場合には、圧密降伏応力も精度よく求められるが、その付近のデータがない場合には、複雑な補間法を用いても圧密降伏応力に大きな誤差が生じることが報告されている(図-6.4.28 参照)¹²⁾。

図-6.4.29は、洪積粘土に対してJIS A 1217による

段階載荷圧密試験とJIS A 1227による定ひずみ速度圧密試験を実施した結果を比較したものである。このような試料に対しては、定ひずみ速度圧密試験を実施して連

統的な圧縮曲線より圧密降伏応力を決定することが不可欠であることがわかる。

図-6.4.30は、最大GL-1500mから採取された大阪層群下部から最下部の粘土試料の定ひずみ速度圧密試験結果の例である。極めて密な状態の試料であるが、圧密圧力の増大により圧縮性が増大していることがわかる³⁰⁾。

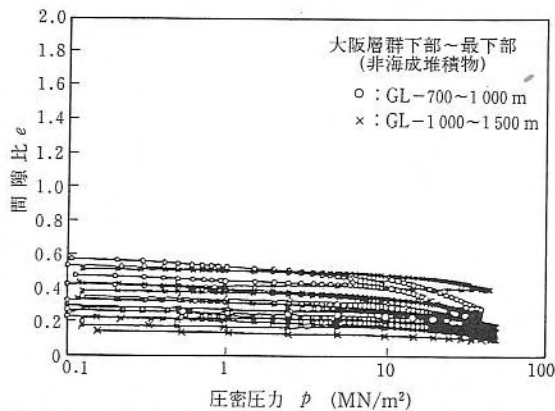


図-6.4.30 e - $\log p$ 曲線 (大阪層群下部～最下部) (伊藤³⁰⁾ に加筆修正)

(4) 超軟弱粘土への適用 本規格の適用土質は供試体の作製が可能であるような試料であるが、いわゆるスラリー状の超軟弱な粘土試料に対しても定ひずみ速度圧密試験を適用した例がある⁷⁾。この場合、試験結果の解析では、本編4.3.1に述べられているような有限ひずみ理論を用いた解析が行われるのが普通である。

(5) 試験結果の現地への適用 試験結果を現地の圧密現象へ適用した例がいくつか報告されている。梅原らの研究¹⁴⁾では、低塑性のシルト質地盤(塑性指数: 12.6)の圧密現象の解析に段階載荷による圧密試験と定ひずみ速度による圧密試験の両方が適用された。段階載荷圧密試験で得られた圧密係数 c_v よりも、定ひずみ速度圧密試験で得られた c_v の方が約2~2.5倍大きくなった。実際の現場での圧密速度により推定された圧密係数は、定ひずみ速度圧密試験で得られたものであることを実証している。

栗原らの研究³¹⁾では、有明粘土および洪積粘土地盤の圧密降伏応力は、段階載荷方式の圧密試験よりも定ひずみ速度圧密試験の方が精度よく得られることを示している。

Leroueil (ルローエル) et al. の研究²²⁾では、Gloucester 粘土地盤の原位置での先行圧密圧力とひずみ速度の関係を調べ、①原位置でのひずみ速度が $2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5} \%/\text{min}$ 程度であること、②24時間間隔で載荷する段階載荷方式の圧密試験(ただし、ひずみ速

度は原位置よりも2オーダー大きい)から得られた圧密降伏応力が原位置の先行圧密圧力に近い値を与えることなどが報告されている。

Larsson and Sallfors (ラーソン・セルフォース)の研究²⁾では、非常に軟弱な有機質粘土地盤、軟弱粘土地盤、硬質粘土地盤について、それぞれ定ひずみ速度圧密試験から得られる圧密降伏応力と原位置での先行圧密圧力を比較し、両者がよく一致したと報告されている。また、Leroueil et al.²²⁾と同じ Gloucester 粘土に対して定ひずみ速度圧密試験を実施し圧密降伏応力を求めたところ、ひずみ速度が $1.2 \times 10^{-2} \%/\text{min}$ 以下であれば、Leroueil et al.が行った段階方式の圧密試験結果と同様な結果が得られたことも述べられている。

引用・参考文献

- 1) 土質工学会・特殊圧密試験方法に関する研究委員会：委員会報告 I-3, 定ひずみ速度圧密試験について, 特殊圧密試験に関するシンポジウム発表論文集, pp. 27~46, 1988.
- 2) Larsson, R. L. and Sallfors, G.: Automatic continuous consolidation testing in Sweden, consolidation of soils, STP 892, ASTM, pp. 299~328, 1986.
- 3) 土質工学会・定ひずみ速度圧密試験方法標準化委員会：共通仕様による飽和粘性土の全国一斉定ひずみ速度圧密試験の結果について, 土と基礎, 第40巻, 第2号, pp. 105~110, 1992.
- 4) Crawford, C. B.: Interpretation of the consolidation test, Proc. ASCE, Vol. 90, SM 5, pp. 87~102, 1964.
- 5) Smith, R. E. and Wahls, H. E.: Consolidation under constant rates of strain, Proc. ASCE, Vol. 95, SM 2, pp. 519~539, 1969.
- 6) Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heiberg, S.: Consolidation at constant rate of strain, Proc. ASCE, Vol. 97, No. SM 10, pp. 1393~1413, 1971.
- 7) Umehara, Y. and Zen, K.: Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 2, pp. 79~95, 1980.
- 8) Lee, K.: Consolidation with constant rate of deformation, Geotechnique, Vol. 31, No. 2, pp. 215~229, 1981.
- 9) Znidarcic, D., Schiffman, R. L., Pane, V., Croce, P., Ko, H. Y. and Olsen, H. W.: The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: Part V, constant rate of deformation testing and analysis, Geotechnique Vol. 36, No. 2, pp. 227~237, 1986.
- 10) 三笠正人：軟弱粘土の圧密, 鹿島出版会, 1996.
- 11) 清水正喜・辻 博幸・檀原隆宏：定ひずみ速度圧密試験結果の整理法の提案, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 417~418, 1993.
- 12) 小林正樹：スプライン関数による e - $\log p$ 曲線の補間法, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp. 339~340, 1991.
- 13) Atkinson, J. H., Anagnostopoulos, A. G., Bonnechère, F., Claytos, C. R. I. and Head, K. H.: ETC 5-N 95.6 Incremental loading oedometer test on water-saturated soil, Workshop 2, Standardisation of laboratory testing, XI ECSMFE, pp. 45~62, 1995.
- 14) 梅原靖文・松本一明・石井一郎：定率ひずみ方式による急速圧密試験の混合土への適用性, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第1号, pp. 43~67, 1983.

- 15) 新しい調査・計測技術の土質工学への対応に関する研究委員会：委員会報告，新しい調査・計測技術に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 36～40，1990.
- 16) 伊藤徳二郎・沢田好幸・島山正則：サーボ制御による定ひずみ速度圧密試験装置の開発，新しい調査・計測技術に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 171～176，1990.
- 17) 日下部伸・小田恵之輔・善功企・赤木寛一：定ひずみ速度圧密試験の間隙水圧と圧密係数，第48回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp. 1006～1007，1993.
- 18) 赤井浩一・小谷章：不攪乱飽和粘土の圧密とせん断におよぼす back pressure の効果，土木学会論文集，No. 91，pp. 1～7，1963.
- 19) 土田孝：三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究，港湾技研資料，No. 688，pp. 177～180，1990.
- 20) 梅原靖文・松本一明・成田実・梅田裕史：連続載荷方式による急速圧密試験，港湾技術研究所報告，第12巻，第4号，pp. 131～170，1973.
- 21) Leroueil, S., Samson, L. and Bozozuk, M.: Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at gloucester, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, No. 3, pp. 477～490, 1983.
- 22) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, Preprint of Specialty Session 9, Proc. 9th ICSMFE, pp. 229～238, 1977.
- 23) 今井五郎：飽和土の一次元圧密，わかりやすい土質力学原論（第1回改訂版），土質工学会，pp. 187～243，1992.
- 24) Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. and Bouchard, R.: Stress-Strain-Strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays, Geotechnique, Vol. 35, No. 2, pp. 159～180, 1985.
- 25) 三笠正人・ブラダンテージ B. S.・諏訪靖二・北村明洋：定ひずみ速度圧密試験結果の補正について，第44回土木学会年次学術講演会講演概要集，pp. 366～367，1989.
- 26) 水上純一・小林正樹・小泉和弘：沖積粘性土地盤に対する定率ひずみ圧密試験の適用性，港湾技術研究所報告，第30巻，第3号，pp. 3～24，1991.
- 27) Sandbaekken, G., Berre, T. and Lacasse, S.: Oedometer testing at the Norwegian Geotechnical Institute, Consolidation of Soils, STP 892, ASTM, pp. 329～353, 1986.
- 28) Gorman, C. T., Hopkins, T. C., Deen, R. C. and Drnevich, V. P.: Constant-rate-of-strain and controlled-gradient consolidation testing, Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 3～15, 1978.
- 29) Armour, D. W., Drnevich, V. P.: Improved techniques for the constant-rate-of-strain consolidation test, Consolidation of Soils, STP 892, ASTM, pp. 170～183, 1986.
- 30) 伊藤佳洋・竹澤清一郎・松本正毅・堀江正人・本郷隆夫：大阪平野深部の土質特性調査（その3）一定ひずみ速度圧密試験一，第32回地盤工学研究発表会講演集，pp. 217～218，1997.
- 31) 栗原正美・鈴木耕司・深谷建夫・半沢秀郎：ひずみ制御式圧密試験による圧密降伏応力の決定，特殊圧密試験に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 109～114，1988.