

防衛大学校 正員 ○ 正垣 孝晴  
 名古屋大学 泉並 良二  
 名古屋大学 正員 浅岡 顕

1. はじめに

標準圧密試験は、粘性土地盤の圧密特性を推定する試験法として広く用いられている。JIS A1217<sup>1)</sup>は圧密諸係数( $c_v, m_v, k$ )を得るための沈下曲線の整理方法として、Taylorの提案した $\sqrt{t}$ 法か曲線定規法のいずれかを用いることにしている。しかし、前者は測定誤差の入り易い圧密初期の沈下量から圧密度90%の時間 $t_{90}$ を推定するものであり、後者は圧密終期までの平均的沈下挙動に注目して圧密度50%の時間 $t_{50}$ を得るが、曲線定規の合わせ方に個人差があり、 $t_{90}, t_{50}$ を得るための沈下量のプロットや圧密諸係数の計算も煩雑で多くの労力を要するという難点がある。

本稿では、標準圧密試験で得られた各荷重段階の等時間間隔の沈下量に沈下予測に関する浅岡の方法<sup>2)</sup>を適用して、圧密諸係数を推定する方法を新たに検討する。そして塑性指数 $I_p$ の異なる6種類の乱さない沖積海成粘性土について標準圧密試験を実施し、 $\sqrt{t}$ 法、曲線定規法による結果と比較して図式解法の適用性を検討する。

2. 図式解法による圧密諸係数の推定法

各荷重段階の沈下量を図-1に示すように等時間間隔 $\Delta t$ で測定し、図-2に示す差分図を作図する。図-2の $\beta_1$ は差分図表示による直線の勾配であり、 $\rho_f$ は最終沈下量である。Terzaghiの圧密理論に基づいて、圧密係数 $c_v$ は図-2に併記した式<sup>2)</sup>で与えられる。また、体積圧縮係数 $m_v$ と透水係数 $k$ は、それぞれ次式(1),(2)で与えられる。

$$m_v = \rho_f / 2Hp \quad \text{---- (1)}$$

$$k = m_v c_v \gamma_w \quad \text{---- (2)}$$

ここで、 $p$ は圧密圧力(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $\gamma_w$ は水の単位体積重量(kgf/cm<sup>3</sup>)、である。

$\sqrt{t}$ や曲線定規法に優る図式解法の特徴を簡潔に述べると次のようである。

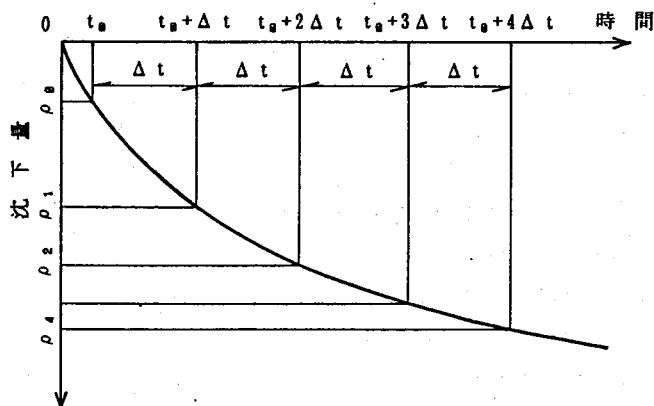


図-1 時間と沈下量の関係

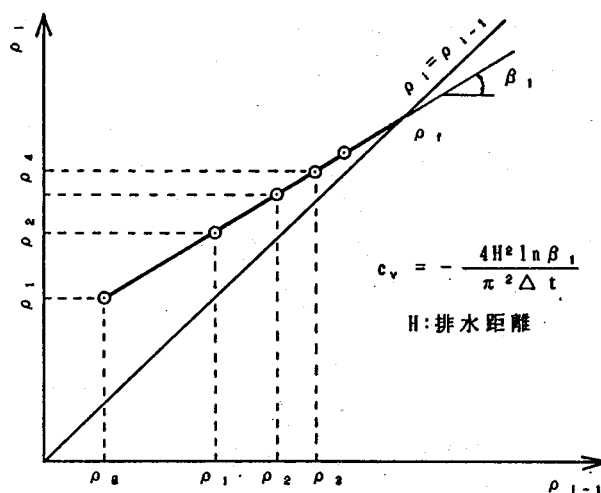


図-2 沈下量の差分図表示

“ Graphical Method on the Consolidation Parameters of Conventional Oedometer Test ”

Takaharu Shogaki (National Defense Academy), Ryouji Izunami, Akira Asaoka(Nagoya University)

- ①  $\sqrt{t}$  法（曲線定規法）で必要な圧密度90%(50%)を得る時の個人差がなく、沈下量のプロットも要しない。
- ② 沈下量を等時間間隔  $\Delta t$  で測定すれば良い。圧密諸係数は、この  $\Delta t$  で測定した沈下量を差分図表示することで容易に得ることができる。したがって、技術者の経験や熟練度等の差が圧密諸係数に与える影響が少ない。

### 3. 試験方法と試験結果の整理方法

#### 3.1 供試土の指数的性質

供試土は、伊勢湾の3地点から採取した乱さない沖積海成粘性土である。試料採取は固定ピストン式シンウォールチューブサンプラーを用いて注意深く行われた。試料片（高さ10cm,直径7.5cm）は試料採取後数日経過しているが、シンウォールチューブから試料を押し出した直後に、松脂を5%添加したパラフィンで完全に密封するとともに、温度変化の少ない試験室で保存した。

圧密沈下のような変形特性を検討する場合には、特に均一性の良い乱れの

少ない良質な自然堆積土が望ましい。表-1は供試土の指数的性質をまとめたものである。塑性図（図-3）を見ると、供試土は  $I_p \approx (40 \sim 85)\%$  の広い範囲を持つ高塑性の粘性土(CH)であることが分かる。

#### 3.2 試験方法と試験結果の整理方法

本研究で行う圧密試験は、JIS A1217に規定された荷重増加率1の標準圧密試験である。したがって、圧密荷重  $p$  も(0,1~12,8)kgf/cm<sup>2</sup>の8段階とし、圧密箱や載荷装置、使用器具もJIS A1217に規定されたものを用いている。供試体のサイズは直径と高さが、それぞれ6cmと2cmであり、両面排水で圧密を行っている。圧密沈下量の測定は変位計（ストローク30mm、精度0.002mm）と静ひずみ測定器を用いて自動計測した。沈下量の測定は図式解法と  $\sqrt{t}$ 、曲線定規法の整理に必要なものとして、表-2に示す時間間隔でサンプリングした。試験結果の整理は、曲線定規と  $\sqrt{t}$  に関しては土質試験法で定められた方法で、 $t_{50}$ と  $t_{90}$ を算出し、 $c_v$ はそれぞれ次式(3),(4)によった。

$$c_v = \frac{0.848(\bar{h}_n/2)^2}{t_{90}} \quad \text{---- (3)}$$

$$c_v = \frac{0.197(\bar{h}_n/2)^2}{t_{50}} \quad \text{---- (4)}$$

表-1 供試土の指数的性質

試料名		A	B	C	D	E	F
粒度特性	レキ (%)	0	0	0	0	0	0
	砂 (%)	8.0	16.0	8.0	11.0	0.5	0
	シルト (%)	45.8	47.0	54.0	39.0	44.5	36.0
	粘土 (%)	46.2	37.0	38.0	50.0	55.0	66.0
	最大粒径 (mm)	0.250	0.840	0.840	0.840	0.105	0.074
液性限界 ( $w_L$ ) (%)		65.5	62.5	65.7	78.4	98.0	119.3
塑性限界 ( $w_p$ ) (%)		26.1	23.0	23.3	28.6	32.5	35.7
塑性指数 $I_p$		39.4	39.5	42.4	49.8	65.5	83.6
土粒子の比重 $G_s$		2.676	2.626	2.627	2.679	2.650	2.643
日本統一分類法		CH	CH	CH	CH	CH	CH

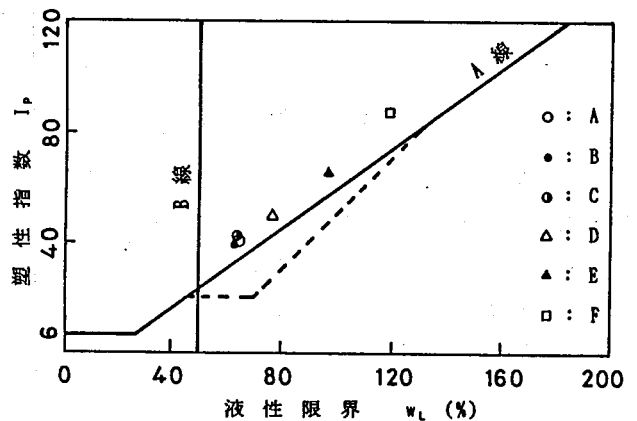


図-3 塑性図

表-2 沈下量のサンプリング時間

時間区分 (分)	サンプリング時間 (秒)
0~3	3
3~30	30
30~180	300
180~1440	1800

ここで、 $\bar{h}_n$  はn番目の荷重段階における供試体の平均高さである。

$m_v$ と $k$ は、それぞれ式(1),(2)と同様にした。

#### 4. 試験結果と考察

##### 4.1 供試土の品質

$l_p, p$ の大小による図式解法の適用性を検討するには、乱れに対する供試土の品質が力学的にも同程度であることが必須である。すなわち、土の乱れは強度特性のみならず圧密特性にも大きな影響を与える<sup>3)</sup>ため、 $l_p, p$ 以外の圧密諸係数に与える影響を可能な限り排除する必要がある。3.1で述べたように、供試土は固定ピストン式シンウォールチューブサンプラーを用いて注意深く採取した試料である。そして、チューブサンプラーから押し出された試料の保存方法も理想的であった。図-4は $e-\log p$ 曲線であり、総ての供試土の結果をまとめて示している。

図-4の $e-\log p$ 曲線を見ると、供試土によらず $p$ が正規圧密領域に移行する直前で明確な折点を持ち、正規圧密領域の $e$ と $\log p$ 関係も直線である。また、図-5は、供試土A、Fの沈下量 $s$ と $\sqrt{t}$ の関係である。(a),(b)図が、それぞれ $p=$

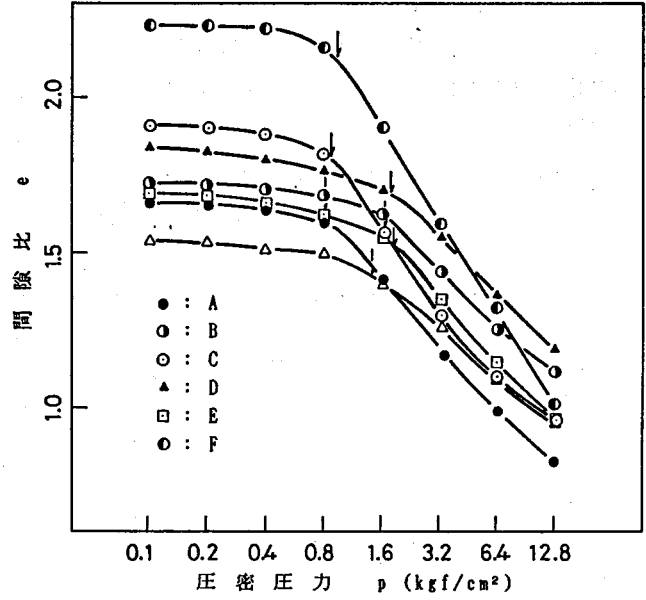
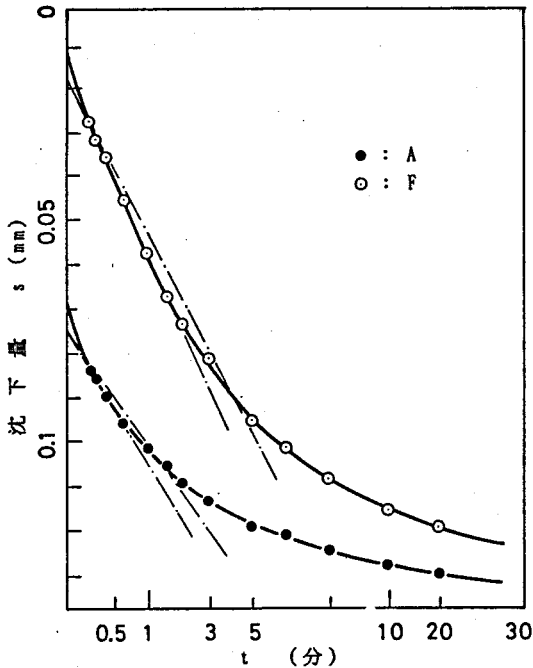
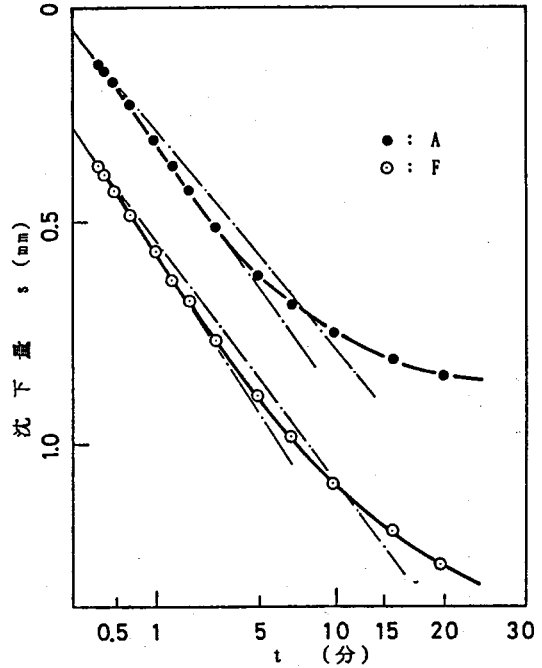


図-4 間隙比と圧密圧力の関係



a) 供試土A (p=0.1kgf/cm²の場合)



b) 供試土A (p=12.8kgf/cm²の場合)

図-5 沈下量と $\sqrt{t}$ の関係

0.1kgf/cm<sup>2</sup>, 12.8kgf/cm<sup>2</sup>の結果であるが、供試土やpの差によらず時間tが小さい圧密開始直後の領域で、sは急激に増大し、sと $\sqrt{t}$ の関係は直線的である。そして、この傾向は図に示さない他の供試土や、pにおいても同様であった。表-3はp<sub>c</sub>とC<sub>c</sub>、一軸圧縮試験の破壊ひずみεをまとめたものである。表-3の飽和度Srが計算上100%を越す値については、比重、圧密リング内径、供試体の体積等の測定誤差の影響と推察される。Sr>100%の値は表中のSrを( )で示しているが、いずれにせよSr≒100%の飽和粘性土であると判断される。また、ε≒(2.3~3.4)%と小さく、供試土によらずほぼ同様の値を有している。

以上のことから、供試土は試料採取から保存ま

表-3 p<sub>c</sub>, C<sub>c</sub>, 一軸圧縮試験の破壊時ひずみεの結果

試料	A	B	C	D	E	F
Sr (%)	100.0	99.3	(100.9)	(102.6)	(103.9)	(102.9)
p <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	1.45	0.85	0.85	1.81	1.46	0.92
C <sub>c</sub>	0.73	0.69	0.95	0.78	0.61	1.05
ε (%)	3.2	2.9	3.0	2.6	3.1	2.3

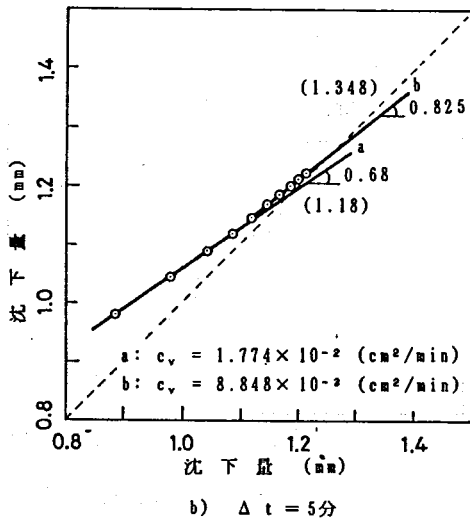
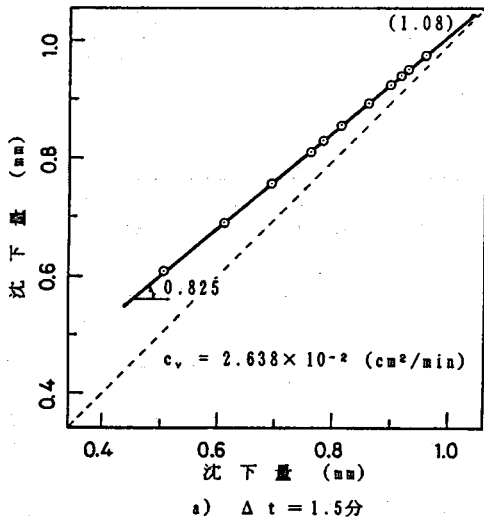


図-7 沈下量の差分図表示 (供試土E, p=12.8kgf/cm<sup>2</sup>)

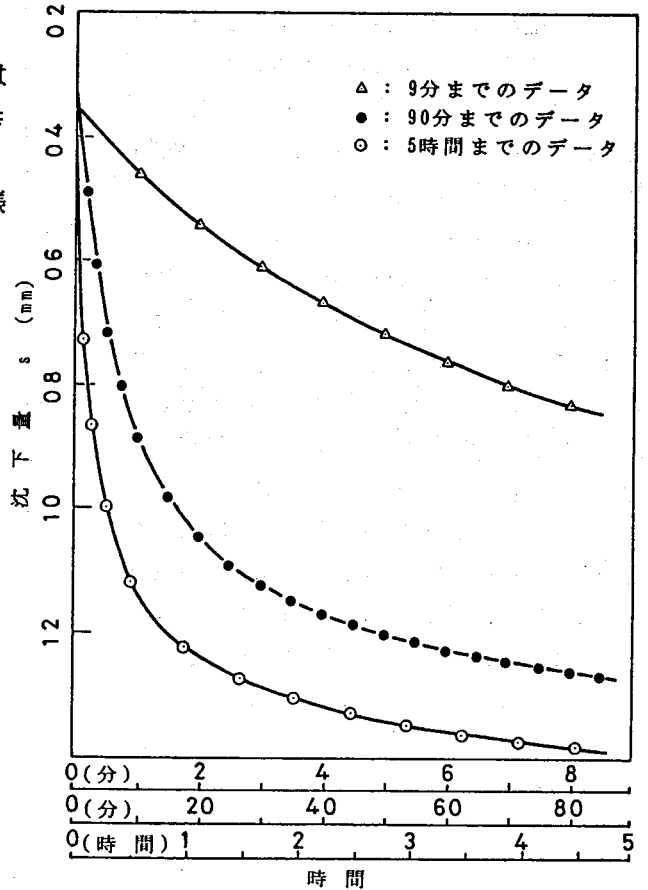
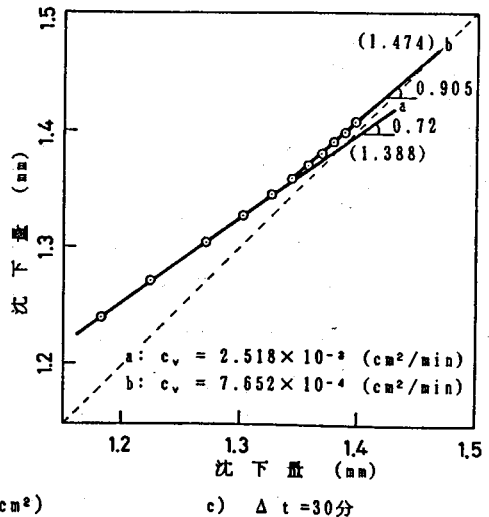


図-6 時間と沈下量の関係



での過程で受けた乱れが同程度であり、力学的にも良好な品質を持つ試料と判断される。

#### 4.2 $\Delta t$ が図式解法の圧密係数 $c_v$ に与える影響

##### 4.2.1 $\Delta t$ が図式解法の $c_v$ に与える影響

図-6は、供試土E ( $p = 12.8 \text{ kgf/cm}^2$ の場合) について、 $\Delta t = 1.5, 5, 30$ 分の3通りの $s$ と $t$ の関係である。また、図-7は各 $\Delta t$ の $s$ - $t$ 関係 (図-6) から得た差分図である。差分図上のプロット点が2本の直線で近似できる場合は、圧密終期の直線を $b$ (他を $a$ )として区別するとともにこの $b$ の直線から図-2に示した式を用いて計算される $c_v$ も $a$ と同様に図中に併記している。 $b$ の直線で示される現象は粘土粒子の骨格変形に関する二次圧密と考えられているものである<sup>4)</sup>。

さて、図-7を見ると採用した $\Delta t$ の値によって $\rho_r, c_v$ が大きく異なっている。図-8は $\sqrt{t}$ 法、曲線定規法に加え、3通りの $\Delta t$ を用いた図式解法の $c_v$ と平均圧密圧力 $\bar{p}$ の関係である。図-8は供試土Aの結果であるが、図-7で見た $\Delta t$ が $c_v$ に与える影響は、図-8の異なった $l_p, p$ のもとでも同じ傾向であった。 $l_p$ 大の供試土Fの場合は、 $\Delta t$ の差が $c_v$ の差に与える影響は、 $l_p$ 小の供試土Aよりも小さい傾向にあった。これは曲線定規法による $t_{100}$ が大きくなり (後述、表-4参照)、 $\rho_r$ の差が小さくなるためである。

図-7,8の結果は図式解法による $\Delta t$ の採り方が極めて重要であることを示している。Magnanら<sup>5)</sup>は $\Delta t = 5, 30$ 分の $\rho_r, c_v$ がほぼ同じ値を持つことを示し、差分図表示に用いる圧密区間や $\Delta t$ の合理的決定法までは言及していない。2.で述べたように、式(1),(2)はTerzaghiの圧密理論で説明できる圧密沈下挙動の領域で決定しなければならない。すなわち、圧密度 $U(Tv) \leq 100\%$ の範囲で、差分図上に10点程度のプロットができる $\Delta t$ を選ぶ必要がある。図-8の最も小さな $\Delta t$ は $t_{100}$ を参考にして上述の基準で決めた $c_v$ であるが、 $\sqrt{t}$ 法、曲線定規法からの $c_v$ と $p$ の差に関係なく良く一致している。

##### 4.2.2 圧密係数 $c_v$ の比較

図-9は、図式解法と $\sqrt{t}$ 法、曲線定規法の $c_v$ を1:1で比較したものである。図式解法から得た $c_v$ は、 $l_p$ の違いによらず曲線定規法による $c_v$ と良く一致しているが、 $\sqrt{t}$ 法との比較では後者で14%程度大きな値を与えている。曲線定規法と図式解法は、一次圧密領域の平均的な沈下挙動から $c_v$ を得るが、 $\sqrt{t}$ 法では沈下増

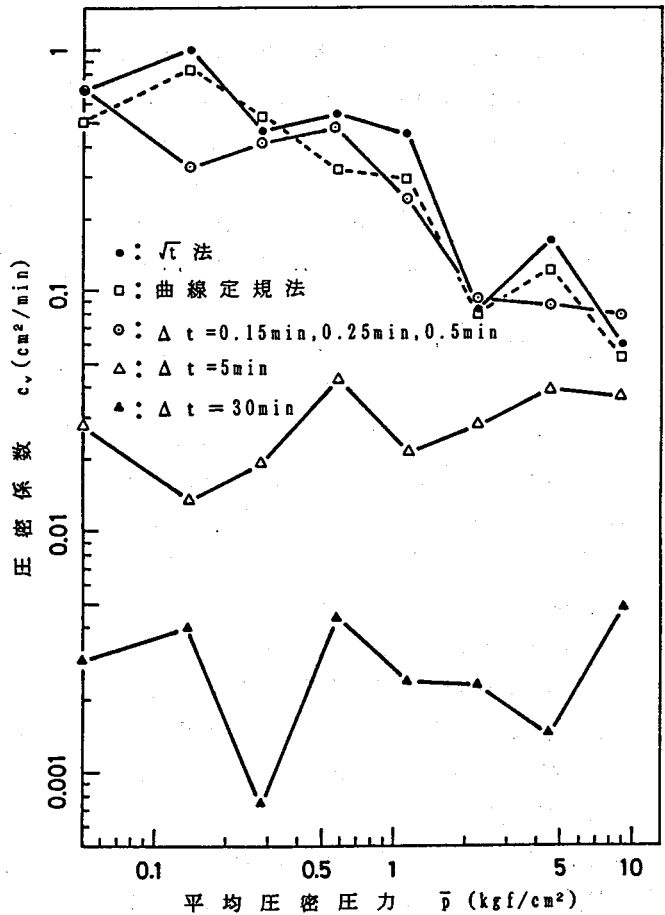


図-8  $c_v$ - $\bar{p}$ の関係 (供試土A)

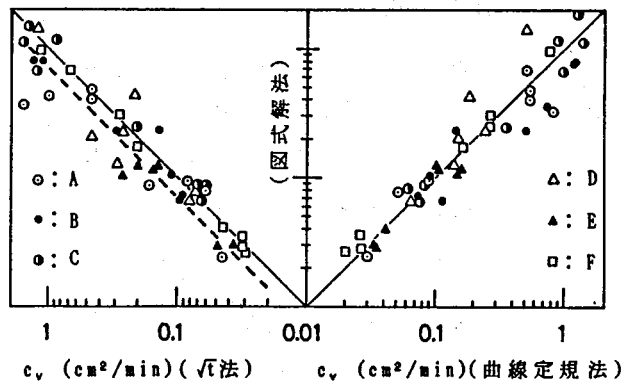


図-9  $c_v$ の比較 ( $l_p$ の影響)

分の大きな圧密のごく初期段階に着目して $t_{90}$ を得る。このため圧密量を過大に評価し易いことが影響しているものと推察される。また、以上の傾向は、 $p$ についても同様であることを確認している。このことは、図式解法が合理的な $\Delta t$ を採用することで、 $l_p, p$ の広い範囲で十分実用に供することを示している。

#### 4.3 図式解法と $\sqrt{t}$ 法、曲線定規法による体積圧縮係数と透水係数の比較

図-10は $m_v$ と $p$ の関係であるが、 $\Delta t$ が大きくなるほど土質試験法(JIS A1217)<sup>1)</sup>の $m_v$ に近づく様子が明らかである。これは $\Delta t$ の増大と共に $\rho_r$ がJIS A1217の方法による値に近づくためであるが、 $\Delta t$ が $m_v$ に与える影響は $c_v$ に比べ、はるかに小さい。図-8と同様の $\Delta t$ を用いた場合の $m_v$ をJIS A1217による値と比較(図-11)すると、 $l_p, p$ によらず後者の $m_v$ が30%程度大きい。

$k$ を $p$ に対してプロットしたものが図-12である。上述のように $\Delta t$ が $m_v$ に与える影響が小さいため、 $\Delta t$ による $k$ が $l_p, p$ に与える影響は図-8で示した $c_v$ の場合と同様である。また、図式解法と $\sqrt{t}$ 法、曲線定規法の $k$ を1:1で比較したものが図-13である。図式解法から得た $k$ は $l_p$ によらず $\sqrt{t}$ で65%、曲線定規法で35%程度小さな値を与えている。図-13は $l_p$ に関するものであるが、 $p$ についても同じ傾向であることを確認している。また、図には示していないが、 $\sqrt{t}$ 法と曲線定規法の $k$ の比較では $c_v$ の場合と同様、 $l_p, p$ によらず $\sqrt{t}$ が20%程度大きい。

以上の考察から、図式解法による $m_v, k$ は、 $c_v$ と同様に十分実用に供することができると判断される。

#### 5. 図式解法の注意点と今後の課題

4.2で述べたように、図式解法を用いる場合の注意点は $\Delta t$ の採り方である。本稿では、曲線定規法による圧密度100%の時間 $t_{100}$ を参考にし

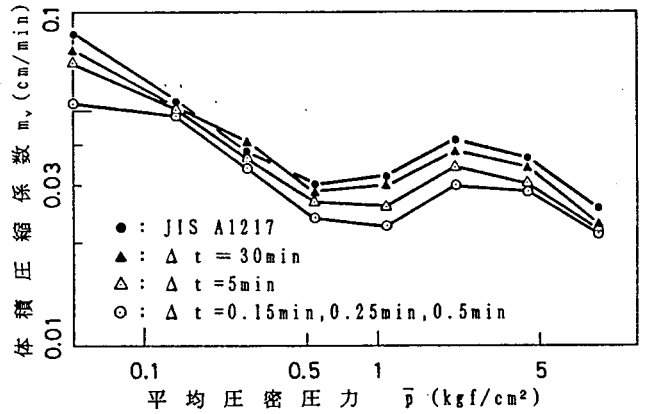


図-10  $m_v$ と $\bar{p}$ の関係 (供試土A)

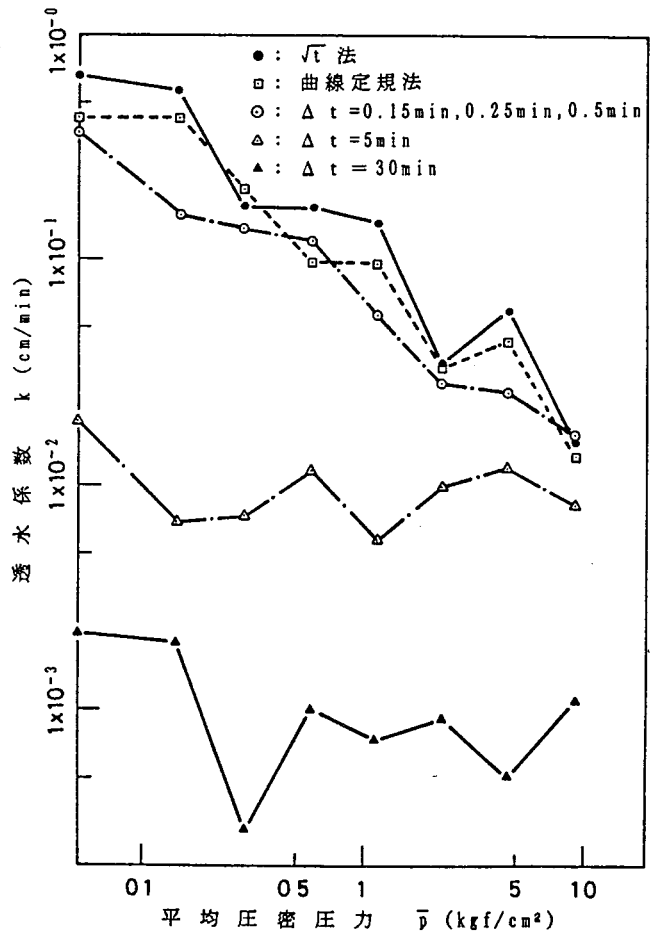


図-12  $k$ と $\bar{p}$ の関係 (供試土A)

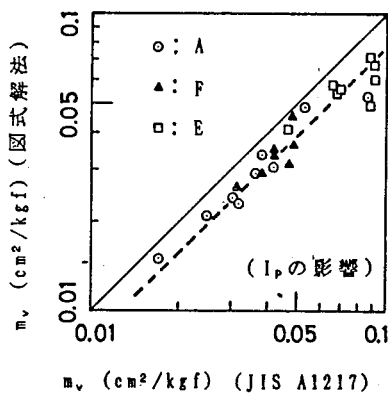


図-11 JIS A1217と図式解法による $m_v$ の比較

て $\Delta t$ を決定したが、 $t_{100}$ によらない合理的な決定法の開発が望まれる。図-14は、各荷重段階における24時間後の最終沈下量 $\rho_{24}$ と $\rho_f$ の比（ここでは、一次圧密と呼ぶ）を $I_p$ に対してプロットしたものである。一次圧密比は $I_p, p$ によらず概ね0.75~0.95の範囲である。したがって、安全側として $\rho_{24}$ の5%に相当する初期沈下量を一次圧密として、この間で $\Delta t$ を決定することが考えられる。また、表-4は各荷重段階における $t_{100}$ をまとめたものである。図-15は $t_{100}$ と $I_p$ の関係であるが、 $p$ が過圧密から正規圧密に移行すると、 $t_{100}$ の変化が大きく $I_p$ の増大とともに大きくなる。 $t_{100}$ は過圧密比OCR（本稿で用いた供試土のOCRは1.2~1.4程度）、地盤強度などによっても変化すると考えられる。今後、このような供試土に対する多くの検討で、図-15の関係が整えば、合理的な $\Delta t$ を得るための目安として用いることができると考えられる。しかし、その結論は今後の詳細な検討を待つことにしたい。

以上の成果を下に、今後必要と思われる検討事項を要約的に列挙すると次のようである。

- ①  $I_p < 40$ の粘性土や泥炭、ビートなどの二次圧密が卓越する有機質土に対する図式解法の適用性の検討。
- ②  $\Delta t$ の合理的決定法（上述）。
- ③ 図式解法による長期残留沈下の検討。すなわち、図-7のb線に関し、物性としてのクリープ現象の検討。
- ④ 図式解法を用いた一段階荷荷を含む急速圧密試験法の開発。

## 6. おわりに

本稿の主要な結論を要約的にまとめると次のようである。

- 1) 図式解法に用いる圧密沈下量の差分図は、Terzaghiの圧密理論で説明できる圧密沈下挙動の領域で決定しなければならない。本稿では、曲線定規法による圧密度100%の時間 $t_{100}$ を参考にしてこの領域を決定した。
- 2) 等時間間隔 $\Delta t$ の採り方が圧密諸係数に与える影響は極めて大きい。 $\Delta t$ は、1)で決定した領域内で差分図が描けるように決定することが必要である。
- 3) 2)で決定した $\Delta t$ を用いた図式解法による圧密諸係数( $c_v, m_v, k$ )は、塑性指数 $I_p$ 、圧密圧力 $p$ の広い範

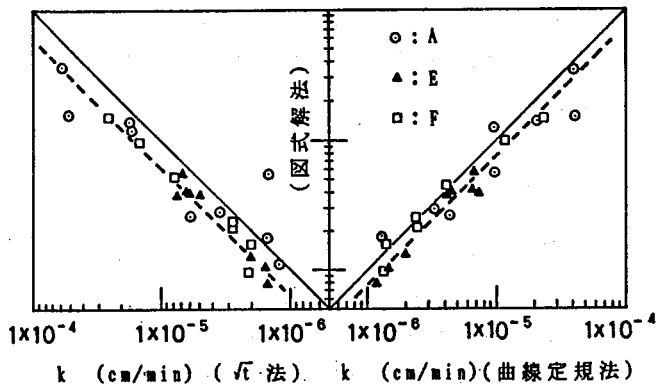


図-13 kの比較 ( $I_p$ の影響)

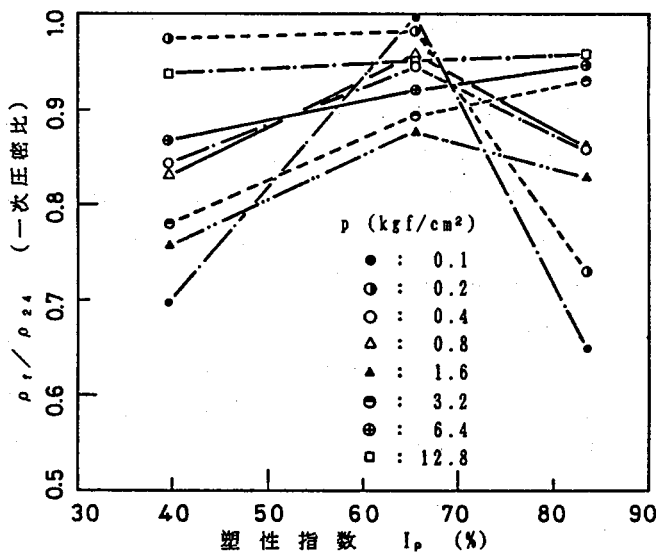


図-14 一次圧密比と塑性指数の関係

表-4 各荷重段階の  $t_{100}$  (分)

試料	$p$	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8
A		1.1	1.2	1.0	0.6	1.9	6.5	4.4	6.4
B		2.3	1.1	2.1	3.4	2.7	8.6	5.0	11.5
C		1.6	1.3	0.7	0.9	2.0	7.0	5.0	5.0
D		1.8	1.7	3.8	7.4	7.0	11.5	11.5	12
E		3.1	4.8	6	9	7	16	15	11
F		3.2	3.4	4.8	16	26	20	25	13

圍で  $\sqrt{t}$  法、曲線定規法と同様な値を与えた。  
このことは図式解法が実用に十分供することを示すものである。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質試験法（第2回改訂版）、土質工学会、pp.372~422,1979
- 2) A.Asaoka :Observational procedure of settlement prediction. Soils and Foundations,Vol.18,No.4,pp.87-101,1978
- 3) 正垣孝晴・松尾 稔：土の乱れと圧密諸係数の変化、第24回土質工学研究発表会講演集、pp.357~358,1989.
- 4) Jamiolkowski,M. and C.C.Ladd : New developments in field and laboratory testings of soils,Proc.of 11th International Conference on Soil Mecanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.57-155,1985, San Francisco.
- 5) Magnan,J.P.and J.M.Deroy:Analyse graphique des courbes de consolidation oedometrique,Bull.liaison Labo.p.et Ch.-109-, Ref.2479,pp.53~56,1980.

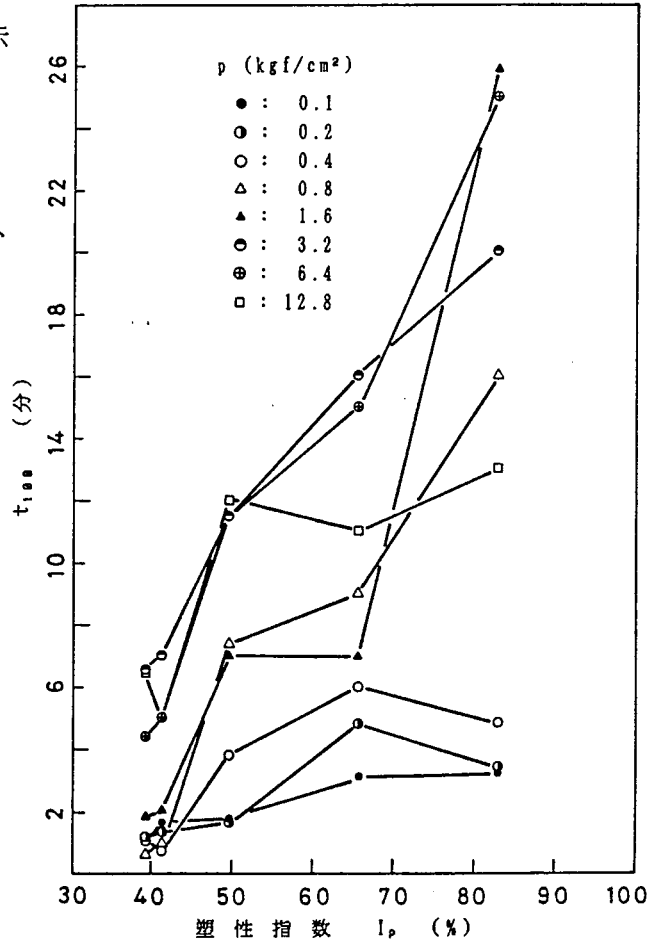


図-15  $I_p$  と  $t_{1.00}$  の関係