定ひずみ速度圧密試験における測定精度の影響に関する研究

清水　正喜・遠藤　圭一
鳥取大学工学部土木工学科

The Assessment of Measurement Accuracy in the Constant-Rate-of-Strain Consolidation Test

Masayoshi Shimizu and Keiichi Endo

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University
Koyama, Tottori, 680-8552 Japan

Abstract: In the constant-rate-of-strain consolidation test, the measurement can be easily automated and therefore we can get many data by measuring in a very short time-interval. However, values of constitutive parameters such as the coefficients of volume compressibility and that of consolidation tend to fluctuate if the data measured in a very short time-interval are used. This study aims to establish a way for reducing the fluctuation. In this paper the effects of the accuracy in measurement upon the fluctuation are discussed based on the results from tests that were conducted with different degrees of accuracy. As a conclusion, it was found that even higher accuracy can not reduce the fluctuation but the data have to be selected before analysis so that the error in every two consecutive data will decrease.

Key words : Accuracy, Constant-rate-of-strain consolidation test, Coefficient of consolidation, Coefficient of volume compressibility, Error.

1.　はじめに

定ひずみ速度圧密試験は，JIS [1]で定められた時間間隔よりも短い間隔でデータを測定することが可能である．しかし，そのような短い時間間隔でデータを測定した場合，測定したすべてのデータを用いて結果の整理を行うと，得られる圧縮・圧密に関するパラメータの値は，激しく変動する．著者らは，これまでに，結果の整理に用いるデータを取捨選択することによって，圧縮・圧密に関するパラメータの変動を軽減できることを報告している[2, 3]が，変動の原因に関する考察が不十分であった．本研究は，試験の測定精度に着目し，圧縮・圧密に関するパラメータの変動の原因を明確にすることを目的としている．

2.　試験条件

試料として 65μmふるいで裏ごしした東京湾泥を用いた．その物理的性質を表1に示す．含水比160%に保ちながら72時間練り返した後予圧密した．予圧密は中型圧密容器(直径 15.6 cm，高さ 23.6 cm)を用いて圧密圧力 39.2kPa まで段階的に行った．予圧密した試料から直径6 cm，高さ2 cmの円柱供試体を切り出し，荷重増分比1で先行圧密圧力 p_0(＝78.5kPa)まで段階的に載荷し，9.8kPa まで除荷した後定ひずみ速度圧密(CRS)試験を行った．圧縮速度は 0.1 %/min とした．

軸圧縮荷重，軸変位量，間隙水圧の３つの測定量について，それぞれ精度が異なる２種類の測定

表1　試料の物理的性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)		2.719
粒度	中砂分 (%)	1
	細砂分 (%)	5
	シルト分 (%)	27
	粘土分 (%)	67
コンシステンシー	液性限界 w_L (%)	115
	塑性限界 w_P (%)	46
	塑性指数 I_P	69

表２　測定器の性能と試験の種類

測定されるデータ	測定器	最小読み取り値	試験の種類			
			A	B	C	D
軸圧縮荷重 P	ロードセル	0.00265 kN/1×10^{-6}ひずみ	○		○	
	ロードセル	0.001667 kN/1×10^{-6}ひずみ		○		○
底面間隙水圧 U	間隙水圧計	0.21082 kPa/1×10^{-6}ひずみ	○	○		○
	差圧変換器	0.0336 kPa/1×10^{-6}ひずみ			○	
軸変位 D	ひずみゲージ型変位計	0.002 mm/1×10^{-6}ひずみ	○	○	○	
	レーザー変位計	0.0003 mm/1×10^{-4}ボルト				○

器を用いた．それらを組み合わせて計４つの試験を行った．(表２参照)．

各測定器で測定された量をA／D変換機能を有したデータロガーで計測した．測定時間間隔は 3 秒で統一した．計測器の出力単位は，ひずみゲージ型の測定器の場合は1×10^{-6}ひずみ，レーザー変位計の場合は1×10^{-4}ボルトである．表の最小読み取り値は，データロガーの出力単位当たりの物理量を表しており，本論文では，この値を測定精度の指標とする．最小読み取り値が小さいほど測定精度が高いことを意味する．尚，計測値の電気的変動は，JIS[1]で定められている許容差の範囲内におさまっていた．

3.　結果の整理

結果の整理はJISの方法[1]に準拠した．圧縮・圧密に関するパラメータ，即ち，体積圧縮係数 m_v，圧密係数 c_v，透水係数 k はそれぞれ次のように表される．

$$m_v = \frac{\Delta d}{\Delta p \times h_{av}} \tag{1}$$

$$c_v = \frac{\Delta p \times {h_{av}}^2}{2 \times u_b \times \Delta t} \tag{2}$$

$$k = \frac{\Delta d \times h_{av}}{2 \times u_b \times \Delta t} \tag{3}$$

ここに

p：圧縮応力(軸圧縮荷重を供試体断面積で除したもの)

d：軸方向変位

Δp：時間 Δt 間の p の増加量(kN/m^2)

Δd：時間 Δt 間の d の増加量(m)

u_b：供試体底面における供試体底面の過剰間隙水圧(kN/m^2)

h_{av}：時間 Δt 間の平均供試体高さ(m)

この方法では，すべてのデータを用いると圧縮及び圧密に関するパラメータの値を得ることはできない．

定ひずみ速度圧密試験は単調載荷試験であるので，測定時間間隔 Δt の間に生じる軸圧縮荷重データ P の増加量 ΔP が 0 以下になることは物理的に考えられない．測定した N+1 個の軸圧縮荷重データを $P(t_i)$ (i=0, 1, 2, ･･･, N)とすると，k+1 個(k≦N)の同じ値の軸圧縮荷重データが連続する場合，例えば $P(t_j)=\cdots=P(t_{j+k})$ (j=0, 1, 2, ･･･, N−k)であれば，k 個のデータ $P(t_{j+1}), \cdots, P(t_{j+k})$ を除く必要がある．図 1 は，試験(A)における軸圧縮荷重の初期データを示している．図中の○のデータは ΔP が 0 以下であるので初期データから省き，●のデータを採用する．

また，強制的に一定の軸変位を与えているので，軸変位データ D は，すべての時間間隔において，その増加量が 0 以下になることも物理的に考えられない．したがって，ΔP と同様に，軸変位量データの増加量 ΔD が 0 以下になるようなデータを省く必要がある．

間隙水圧データ U については，過剰間隙水圧 u_b の値が負となるようなことは考えられないので，u_b の値が 0 以下になるようなデータは省く必要がある．

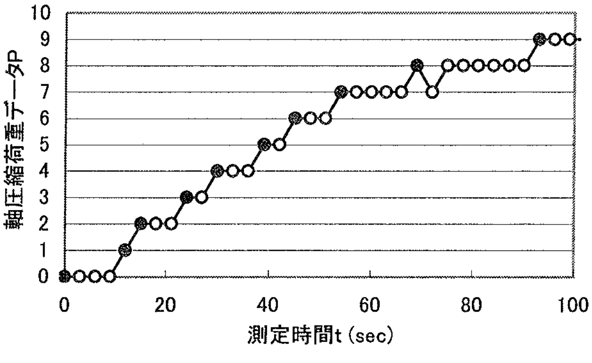


図１　初期データ

以上のようにして修正されたデータを1次データと呼ぶことにする．1次データはΔP，ΔDの値に支配され，それらの最小値は1 digit である．しかし，軸圧縮荷重データPと軸変位データDをさらに多く省くことによって，ΔPとΔDをより大きく取ることも可能である[2]．1次データからさらにΔPとΔDを大きくしたデータを2次データと呼ぶことにする．

試験(A)～(D)から得られた1次データを基にして計算した体積圧縮係数m_v，圧密係数c_v，透水係数kについて比較検討する．図2～4に各試験におけるm_v，c_v，kと平均圧縮応力p_{av}の関係を示す．各図の縦軸の数値は試験(A)から得られたパラメータの値であり，試験(B)，(C)および(D)に対してはパラメータの値を順に10倍して縦方向にシフトして図示した．

(1)　体積圧縮係数m_v

体積圧縮係数m_vはΔpとΔdの関数であるので，m_vの値は圧縮応力pと変位dの精度に影響されると想像できる．

圧縮応力の測定精度だけが異なる試験(A)と試験(B)において結果を比較する．試験(B)は試験(A)に比べロードセルの精度がおよそ2倍高く，圧縮応力pの測定値に含まれる誤差が小さい．図2の試験(A)と試験(B)の結果を比較すると，測定精度の優れている試験(B)の結果のほうがむしろm_vの変動が激しくなっていることがわかる．

次に，軸変位の精度のみが異なる試験(B)と試験(D)の結果を比較する．図2より軸変位の精度の良い試験(D)の結果の方が試験(B)の結果に比べて振動が激しくなっている．

(2)　圧密係数c_v

圧密係数c_vはΔpとu_bの関数である．そこで，まず試験(A)と(B)における結果を比較する．図3よりc_vの値もm_vと同様に，ロードセルの精度の良い試験(B)の結果の方が試験(A)の結果に比べて変動が激しくなっていることが分かる．

次に，間隙水圧の測定精度のみが異なる試験(A)と(C)の結果を比較する．c_vにはu_bの測定精度による違いが見られないことがわかる．

(3)　透水係数k

透水係数kはΔdとu_bの関数である．間隙水圧に含まれる誤差の影響を見るために，試験(A)と(C)の結果を比較する．図4より透水係数の値にはu_bの精度の違いによる影響は表れず，振動現象や振動幅に大きな違いは見られない．

また，試験(B)と(D)の結果によって，軸変位量に含まれる誤差の影響を比較する．試験(D)に用いたレーザー変位計は試験(B)に用いたひずみゲージ型変位計の約10倍の精度である．図4より，精度の良いレーザー変位計を用いた試験(D)のほうが変動は激しくなっている．

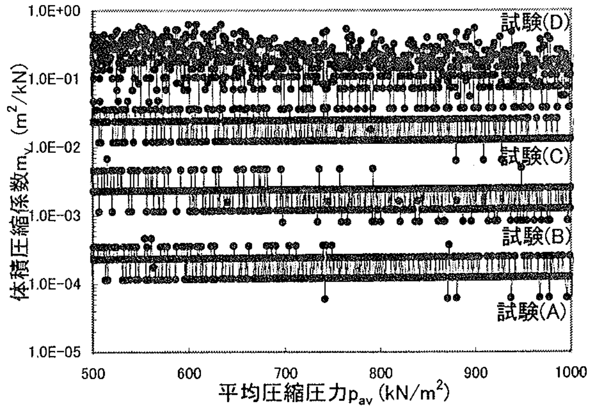


図2　体積圧縮係数m_vと平均圧縮応力p_{av}の関係

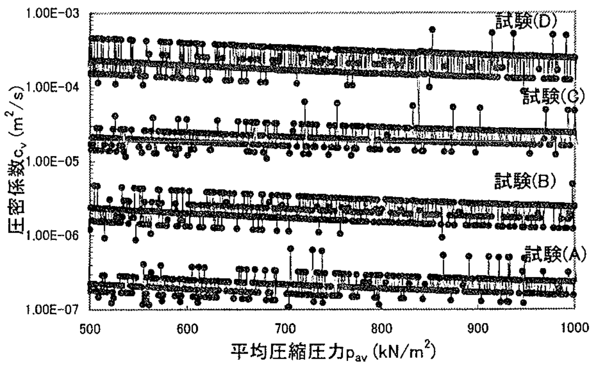


図3　圧密係数c_vと平均圧縮応力p_{av}の関係

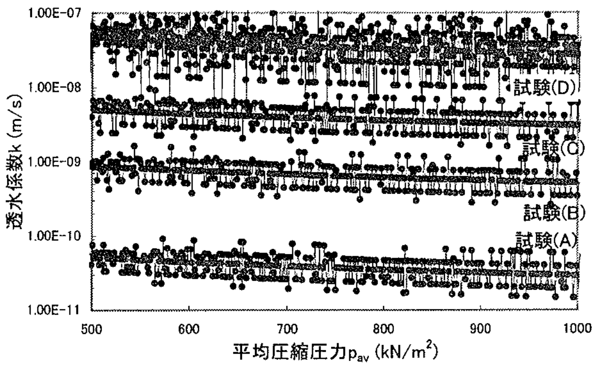


図4　透水係数kと平均圧縮応力p_{av}の関係

4. 結果の考察

上で述べた結果から，圧縮・圧密に関するパラメータの値の変動は，軸圧縮荷重と軸変位量の測定精度の影響が大きいこと，測定精度を上げても各パラメータの値の変動を抑えることはできなかったことがわかる．

変数 x，y の関数を $q(x,y)$ とする．x および y の微小な変化量を δx，δy とするとき，それに伴う q の変化量 δq は，

$$\delta q=\frac{\partial q}{\partial x}\delta x+\frac{\partial q}{\partial y}\delta y \tag{4}$$

で与えられる．今，x，y を測定量，それらの誤差の絶対量を $\delta x,\delta y$ とすると，関数 q の絶対誤差 δq は，

$$\delta q=\left|\frac{\partial q}{\partial x}\right|\delta x+\left|\frac{\partial q}{\partial y}\right|\delta y \tag{5}$$

となる．もしも，q が 3 つ以上の変数から成るときは，増えた変数に対応する項を付け加えればよい[4]．

本研究では，データロガーで計測した値に校正係数をかけて物理的な単位をもつ量を得る．そして，データロガー 1 digit 当たりの物理量を測定量に含まれる誤差として定義する．

m_v の誤差は，式(1)，式(5)より，

$$\delta m_v=\left|\frac{\partial m_v}{\partial \Delta d}\right|\delta\Delta d+\left|\frac{\partial m_v}{\partial \Delta p}\right|\delta\Delta p+\left|\frac{\partial m_v}{\partial h_{av}}\right|\delta h_{av} \tag{6}$$

ここに

$$\left|\frac{\partial m_v}{\partial \Delta d}\right|=\frac{1}{\Delta p h_{av}} \tag{7}$$

$$\left|\frac{\partial m_v}{\partial \Delta p}\right|=\frac{\Delta d}{\Delta p^2 h_{av}} \tag{8}$$

$$\left|\frac{\partial m_v}{\partial h_{av}}\right|=\frac{\Delta d}{\Delta p h_{av}{}^2} \tag{9}$$

相対的な誤差であらわすと，

$$\frac{\delta m_v}{m_v}=\frac{\delta\Delta d}{\Delta d}+\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}+\frac{\delta h_{av}}{h_{av}} \tag{10}$$

c_v の誤差は，式(2)，式(5)より，

$$\delta c_v=\left|\frac{\partial c_v}{\partial \Delta p}\right|\delta\Delta p+\left|\frac{\partial c_v}{\partial u_b}\right|\delta u_b+\left|\frac{\partial c_v}{\partial h_{av}}\right|\delta h_{av} \tag{11}$$

ここに，

$$\left|\frac{\partial c_v}{\partial \Delta p}\right|=\frac{h_{av}^2}{2u_b\Delta t} \tag{12}$$

$$\left|\frac{\partial c_v}{\partial u_b}\right|=\frac{\Delta p h_{av}^2}{2u_b^2\Delta t} \tag{13}$$

$$\left|\frac{\partial c_v}{\partial h_{av}}\right|=\frac{\Delta p h_{av}}{u_b\Delta t} \tag{14}$$

相対誤差で表すと

$$\frac{\delta c_v}{c_v}=\frac{\delta\Delta p}{\Delta p}+\frac{\delta\Delta u_b}{\Delta u_b}+2\frac{\delta h_{av}}{h_{av}} \tag{15}$$

k の誤差は，式(3)，式(5)より，

$$\delta k=\left|\frac{\partial k}{\partial \Delta d}\right|\delta\Delta d+\left|\frac{\partial k}{\partial u_b}\right|\delta u_b+\left|\frac{\partial k}{\partial h_{av}}\right|\delta h_{av} \tag{16}$$

ここに，

$$\left|\frac{\partial k}{\partial \Delta d}\right|=\frac{h_{av}}{2u_b\Delta t} \tag{17}$$

$$\left|\frac{\partial k}{\partial u_b}\right|=\frac{\Delta d h_{av}}{2u_b^2\Delta t} \tag{18}$$

$$\left|\frac{\partial k}{\partial h_{av}}\right|=\frac{\Delta p}{2u_b\Delta t} \tag{19}$$

相対誤差であらわすと

$$\frac{\delta k}{k}=\frac{\delta\Delta d}{\Delta d}+\frac{\delta\Delta u_b}{\Delta u_b}+\frac{\delta h_{av}}{h_{av}} \tag{20}$$

式(10)，(15)，(20)は各パラメータに含まれる誤差の影響因子を表している．実際，各パラメータ毎に影響因子を計算し，その影響度を比較した．試験(A)の場合について結果を図 5～7 に示す．

まず，図 5 と図 6 において Δp の相対誤差が 1 を超えていることについて説明する．

任意の時間 t_i(i=0, 1, …, N) における圧縮圧力 $p(t_i)$ とすると，

$$p(t_i)=\{P(t_i)-P(t_0)\pm\delta P\}K_p/A+p_0 \tag{21}$$

ここに，

K_p：ロードセルの較正係数(kN/1x10^{-6}ひずみ)

A：供試体断面積(cm^2)

p_0：$t=t_0$ のときの圧縮応力(kN/m^2)

δP：軸圧縮荷重データ P に含まれる誤差

ただし，$P(t_0)$ には誤差がないものとした．

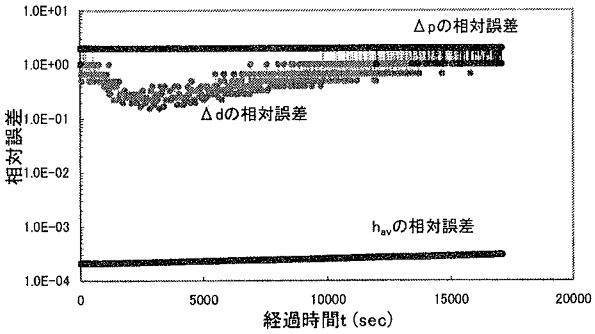


図5　体積圧縮係数m_vの相対誤差に含まれる因子

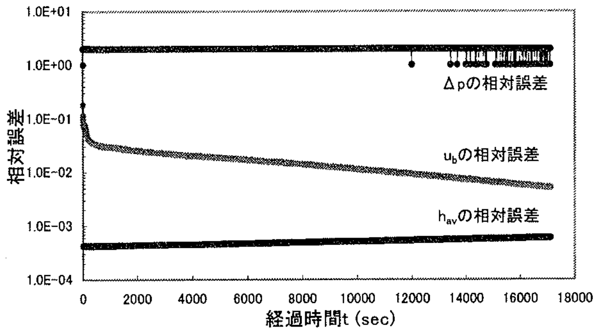


図6　圧密係数c_vの相対誤差に含まれる因子

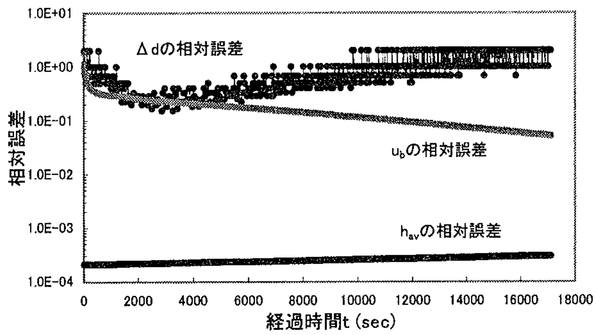


図7　透水係数kの相対誤差に含まれる因子

式(21)より，時間t_iからt_{i+1}までのpの変化量$\Delta p(t_{i+1})$は，

$$\Delta p(t_{i+1}) = p(t_{i+1}) - p(t_i) = \{P(t_{i+1}) - P(t_i) \pm 2\delta P\}K_p / A \tag{22}$$

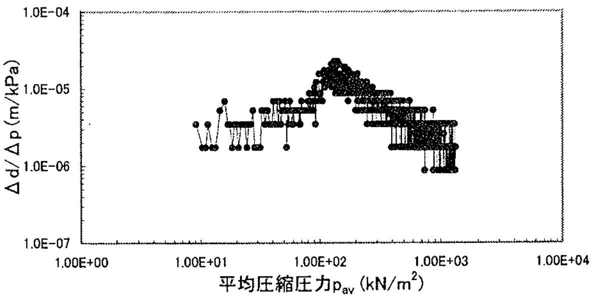
$\Delta p(t_{i+1})$の誤差は，

$$\delta\Delta p = \pm 2\delta P \times K_p / A \tag{23}$$

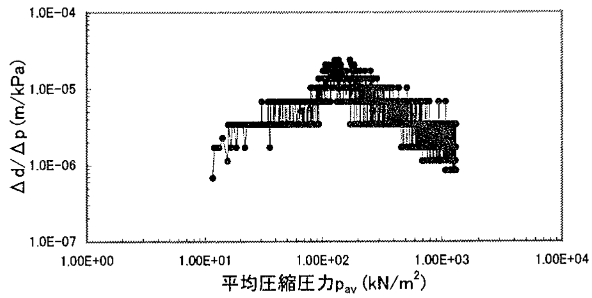
であり，相対誤差は，

$$\frac{\delta\Delta p}{|\Delta p(t_{i+1})|} = \pm\frac{2\delta P}{P(t_{i+1}) - P(t_i)} \tag{24}$$

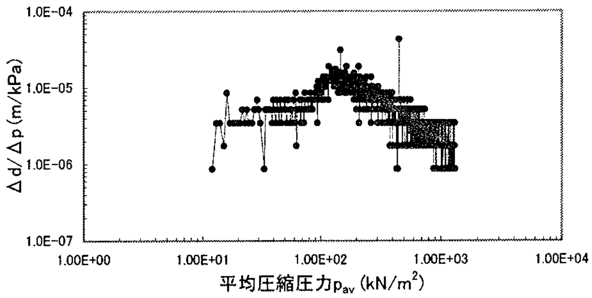
となる．ここで，δPは1 digitであり，$P(t_{i+1})-P(t_i)$は1次データの場合，最低でも1digitであるので，



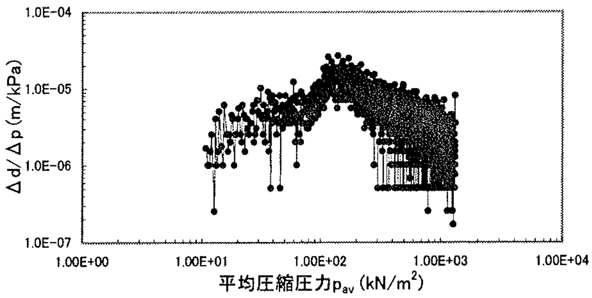
(a)　試験(A)



(b)　試験(B)



(c)　試験(C)

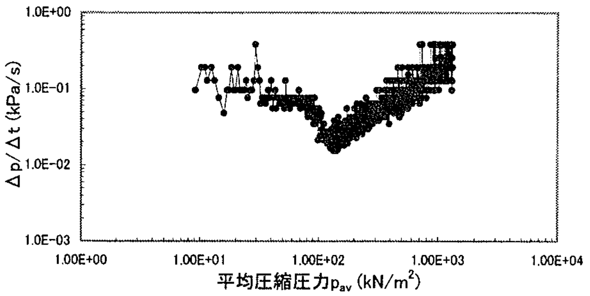


(d)　試験(D)

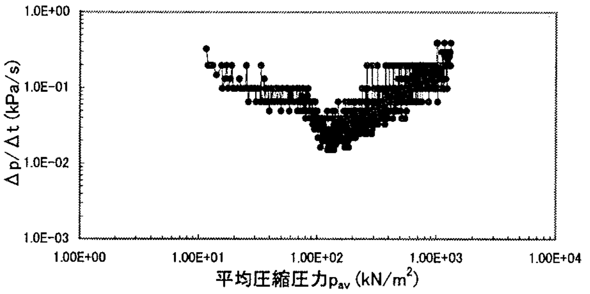
図8　$\Delta d/\Delta p$とp_{av}の関係

相対誤差が最大で2となる．

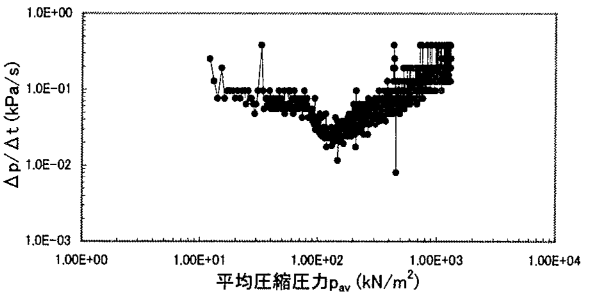
これらの図より，m_vはΔpとΔdの，c_vはΔpの，kはΔdの影響を強く受けることがわかる．そこで，m_vは$\Delta d/\Delta p$に，c_vは$\Delta p/\Delta t$に，kは$\Delta d/\Delta t$に注目し，変動の原因について検討を行った．各試験におけるこれらの値と平均圧縮応力p_{av}の関係を



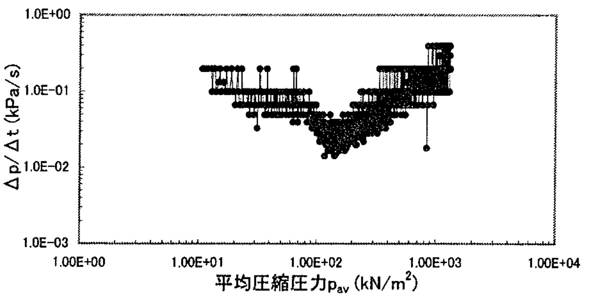
(a) 試験(A)



(b) 試験(B)

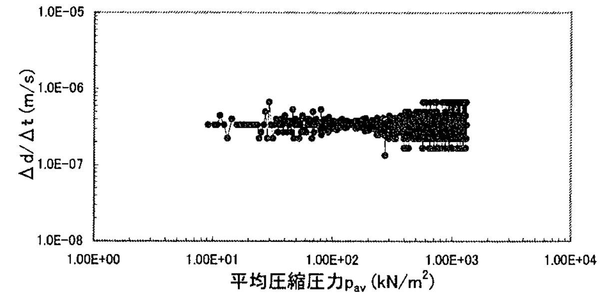


(c) 試験(C)

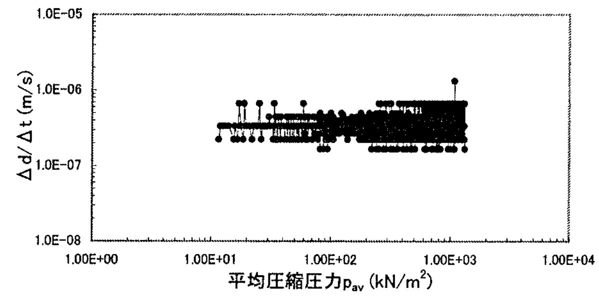


(d) 試験(D)

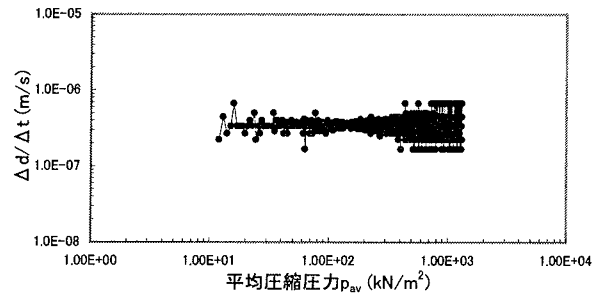
図 9 $\Delta p/\Delta t$ と p_{av} の関係



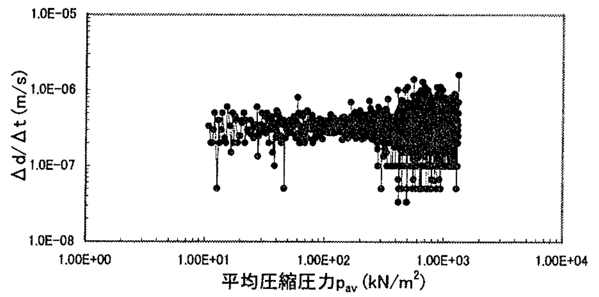
(a) 試験(A)



(b) 試験(B)



(c) 試験(C)



(d) 試験(D)

図 10 $\Delta d/\Delta t$ と p_{av} の関係

図 8〜10 の(a)〜(d)に示す.

精度の異なる測定器で測定した場合の効果について考察する.

精度の劣るロードセルによって測定された軸圧縮荷重データ P は同じ値のデータが連続することが多い．しかし，1 次データでは，そのようなデータは省かれているので，データが省かれた区間では軸圧縮荷重以外のデータの変化量が大きくなり，結果としてその区間における Δd の相対誤差は小さくなる.

軸変位データもロードセルと同様に精度の劣る変位計によって測定されたデータは同じ値のデー

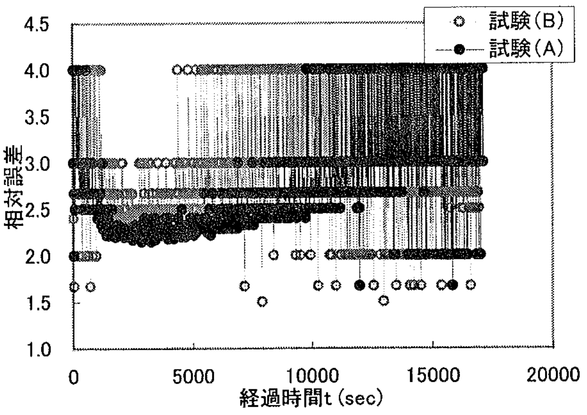


図 11 体積圧縮係数 m_v の相対誤差

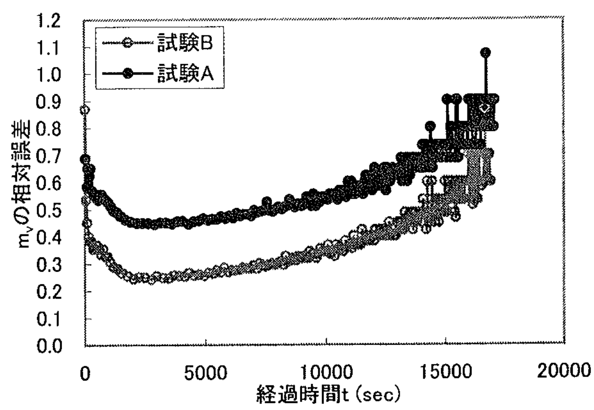


図 12　2 次データを用いた場合の体積圧縮係数の相対誤差

タが連続することが多く，そのデータを省くことにより，その区間における軸変位以外のデータの変化量が大きくなり，その結果 Δp の相対誤差は小さくなる．

$\Delta d/\Delta p$ の値の相対誤差は Δd と Δp の各相対誤差の和であるので，各相対誤差が小さくなることで $\Delta d/\Delta p$ の相対誤差は減少し，体積圧縮係数 m_v の誤差も減少する．つまり，データ間隔が大きい区間が多いということは，体積圧縮係数 m_v の値を計算する際に，相対誤差の小さい Δp と Δd をより多く用いることになるので，m_v の相対的な誤差が小さい区間が多いことになる．したがって，変動が減少すると考えられる．

逆に，精度の良い測定装置で測定したデータは同じ値が連続するデータが少ないのでデータ間隔が狭い区間が多い．したがって，測定値の誤差自体は小さくなるが相対誤差は小さくならない．その分 $\Delta d/\Delta p$ の変動が激しくなると考えられる．

以上のことは，図 8(a) と (b) および (d) を比較することによって確認できる．$\Delta p/\Delta t$ と $\Delta d/\Delta t$ の挙動についても，$\Delta d/\Delta p$ と同じことが言える．このようにして，体積圧縮係数が軸圧縮荷重の測定精度と軸変位量の測定精度の影響を大きく受けること，また，どんなに精度の良い測定装置を用いても，測定値には必ず誤差が含まれおり，測定値のばらつきをなくすことはできず，むしろ変動を激しくすることが説明できる．しかし，データ間隔を大きくすれば相対誤差が小さくなるので，測定制度の良い測定装置を用いた場合でも誤差の影響を軽減することができる．この考え方は，まさにこれまでに提案しているデータ選択の方法[2]の意味を説明している．

$\Delta p/\Delta t$ については Δt 間の圧縮応力増分であるので，Δp の測定値に含まれる誤差の影響を受けることは明らかである (図 9 参照)．したがって，圧密係数 c_v は，軸圧縮荷重の測定精度の影響を大きく受けることが説明できる．

$\Delta d/\Delta t$ は圧縮速度のことであり，定ひずみ速度圧密試験においては一定と仮定しているが，図 10(a)～(d) からわかるように，実際の供試体の変位速度は一定ではなくその値はばらつく．これは，軸変位の測定値に含まれる誤差と供試体の性質による．供試体は，圧縮が進むにつれ圧縮性が小さくなっていくため，平均圧縮応力が大きくなるほど圧縮速度は減少する．圧縮速度が大きいほど測定値に含まれる誤差の影響は大きくなると考えられる．図 10 を見ると，平均圧縮応力が大きくなるにつれて，変動が激しくなっていることがわかる．仮に圧縮装置の圧縮速度の設定値と経過時間から求めた変位量を用いてデータ整理を行った場合，$\Delta d/\Delta t$ は一定値であるので透水係数の値のばらつきは減少すると考えられる．

図 11 は試験 (A) と試験 (B) の体積圧縮係数 m_v の値に含まれる誤差を示したものである．上で述べたとおり，測定精度の優れている試験 (B) のほうが，試験 (A) よりも相対誤差が大きいことがわかる．

以上のことから，圧縮・圧密に関するパラメータと測定値に含まれる誤差について次のようなことが言える．各パラメータの値の変動には測定値の誤差が影響しているが，測定装置の精度を良くして誤差自体を小さくしてもばらつきを抑えることはできず，各パラメータの値の変動を激しくするだけである．ばらつきを抑えるためには，Δp と Δd のそれぞれについて，相対的な誤差を小さくする必要がある．

5.　2 次データによる比較

上で述べたように，圧縮・圧密に関するパラメータの値の相対的誤差は，１次データで比較すると，測定精度の優れている方よりも測定精度の劣っている方が，相対誤差は小さい区間が多いということがわかった．

しかし，精度が異なる２つの試験の結果は，１次データにおいては結果の整理に用いるデータ間隔がデータロガー１digit 分の P によって支配されるので，データ間隔における物理量 Δp は試験によって異なる．そのため，１次データの結果で比較することは必ずしも適切であるとはいえない．したがって，2 次データを用いて Δp の値をおおよそ同じにし，データの比較を行った．

図 12 は試験(A)および試験(B)において $\Delta P \geqq 2$ になるような２次データを用いて得られた体積圧縮係数の値の相対誤差を示したものである．図からわかるように，測定精度の優れているほうが相対誤差は小さくなっている．1 次データにおいては，測定精度を上げる効果は見られなかったが，2 次データを用いることによってその効果が現れた．このことから，測定精度のみならず，結果の整理に用いるデータの選択が重要であることは明らかである．

6.　おわりに

測定精度を上げて，データの読み取り誤差を小さくしても，1 次データを用いて得られた各パラメータの値の変動を軽減させることはできなかった．パラメータの変動には，読み取り誤差自体の大きさは問題ではなく，データの値に含まれる相対的な誤差の影響が大きい．各パラメータの値は，2 つの測定時間におけるデータの差を用いて計算するため，とくに，測定時間間隔 Δt の間に生じる圧縮応力の増加量 Δp と軸変位量の増加量 Δd の値に含まれる相対的な誤差の影響が大きくなる．しかし，結果の整理に用いる時間間隔を大きくすると，Δp と Δd の値に含まれる相対誤差は小さくなるので，パラメータの変動を減少させることができる．

以上のことを考えると，測定器の精度は優れているほうが好ましいが，JIS の規定に合う測定器を用いればよく，用いるデータを十分に吟味することが重要であるといえる．

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費(基盤研究 C(2)10650485，研究代表者清水正喜)の補助を受けて行った．記して謝意を表する．

参考文献

[1] JIS A 1227：「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法」，土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，地盤工学会，2000.
[2] 清水正喜，今村乗仁：定ひずみ速度圧密試験における計測データの吟味方法，鳥取大学工学部研究報告，2000.
[3] 清水正喜，今村乗仁：定ひずみ速度圧密試験における計測データの吟味法，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-A172，2000.
[4] Taylor, J. R.(森茂雄，馬場涼訳)：計測における誤差解析入門，東京化学同人，p. 28，2000.

(受理　平成 14 年 9 月 30 日)