

定ひずみ速度圧密試験における計測データの吟味方法

清水 正喜・今村 乗仁
鳥取大学工学部土木工学科

Method of Selecting Data in the Constant-Rate-of-Strain Consolidation Test Masayoshi SHIMIZU and Jouji IMAMURA

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University
Koyama, Tottori, 680-8552 Japan
E-Mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: In the constant-rate-of-strain consolidation tests, relationships between constitutive properties can be so scattered as non-realistic if they are determined using all the data measured with short time intervals. Data have to be selected in a reasonable way. A method of selecting data is presented by using actual data on the CRS consolidation tests conducted at various rates of compression. The followings were found: (1) the scattering is due to errors associated with data acquisition system, and (2) the difference between two data should be larger than some meaningful amount, which will depend on the system and measuring conditions.

Key Words: Error, Measurement, Consolidation, Constant-rate-of-strain consolidation test, Constitutive properties

1. はじめに

定ひずみ速度圧密試験の利点の一つは、試験の自動化が容易なことである。そのため、データの測定間隔を非常に短くとることも可能である。例えば、JIS[1]で推奨された測定時間間隔より短い間隔で測定することも可能である。しかし、短い時間間隔で測定した場合、測定したデータをすべて用いて結果の整理を行うと、試料の圧縮・圧密に関するパラメータの関係が非常にばらつくことがある。その原因を考慮して、データを吟味することが重要である。本論文では、測定した軸圧縮荷重データに着目し、測定データを吟味・選択するための方法を提案し、その方法によれば、試料の圧縮・圧密に関するパラメータ間の関係のばらつきを軽減できることを実証する。

2. 試料及び試験条件

本論文では3種類の試料に対して、異なった圧縮速度(r)で行った定ひずみ速度圧密試験の結果を用いて考察する。

用いた試料は次の3種類である(表1):

試料 A: 藤の森粘土とベントナイトを 1:1.2 の質量比で混合し、最大圧密圧力 $49 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ まで一次的に予備圧密したもの。

試料 B: 藤の森粘土とベントナイトを 1:0.5 の質量比で混合し、 $39.2 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ まで予備圧密したもの。

試料 C: $425 \mu\text{m}$ ふるい通過分の東京湾泥を $39.2 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ まで予備圧密したもの。

JIS では試料の塑性指数 I_p により圧縮速度の目安を定めている。表1には各試料の塑性指数 I_p を示した。どの試料も JIS で推奨された圧縮速度は $r=0.01 \text{ (%/min)}$ である[1]。

表1 試料(原試料および調整方法)と塑性指数

試料名	原試料	I_p
A	配合比 藤:べ=1:1.2	65.0
B	配合比 藤:べ=1:0.5	52.1
C	東京湾泥	68.9

表2 荷重計の特性と試験条件

試験 No.	試料	荷重計の特性			試験条件							
		RC kN	K N/10 ⁻⁶ ひずみ	NL %	r %/min	P _{max} kN	P _{max} ×0.5% N	測定間隔 Δt sec				
1	A	4.9	1.63	0.05	0.005	4.4	22	0≤t<10 min	10≤t<30	30≤t<60	60≤t	
								Δt=60s	600	1800	3600	
2	B	9.8	3.27	0.03	0.5	7.0	35	0≤t<5 min	5≤t<25	25≤t<35	35≤t	
								Δt=3s	15	30	60	
3	C	9.8	3.27	0.03	0.01	4.9	25	0≤t Δt=3s				

r:圧縮速度, RC:荷重計定格容量, K:1×10⁻⁶ひずみ当たりの荷重, P_{max}:測定された圧縮力の最大値
NL:荷重計の非線形性

供試体は予め段階载荷によって先行圧密圧力 80kPa まで圧密し, 10kPa まで除荷している. これらの試料に対して, r=0.005%/min(試料 A), 0.5(B), 0.01(C)で行った試験の結果を用いて, 考察を進める.

各試験において用いた荷重計の特性と試験条件を表2に示す. 試験 No. 1と No. 2は試験中にデータ測定時間間隔を変えている. 軸圧縮荷重はひずみゲージ式荷重変換器とA/D変換機能を有したデータロガーにより計測した. 計測器出力は 10⁻⁶ひずみ単位の整数値である.

JISでは, 供試体に作用する軸圧縮力をその最大値の±0.5%の許容差で測定できる荷重計を用いることと規定している. 軸圧縮力はデータロガーの出力値に一定の較正係数(K)を掛けて算定した. Kは単位出力値(1×10⁻⁶ひずみ)当りの荷重(N)であり, 同一荷重に対する指示値の電気的変動はせいぜい1であり, そのような変動に起因する測定誤差は, JISの条件をみたす軸圧縮力の最大値の0.5%以下の測定精度を有する.

また, Kは全荷重範囲にわたって一定としたが, 使用変換器の非線形性は, 変換器の最大容量に対して No. 1試験で0.05%, No. 2, 3試験で0.03%であり, どの荷重計も, 非線形性に伴う最大誤差は上記の条件より小さい.

3. データ整理の方法

データ整理はJISの方法に準拠した. 同方法では,

体積圧縮係数 m_v を次式で算定する.

$$m_v = \frac{\Delta H}{H_m \times \Delta p} \quad (1)$$

ΔH : Δt 間における供試体高さの減少量

H_m : Δt 間の供試体平均高さ

Δp : Δt 間に生じた軸圧縮応力の変化量(=K× $\Delta R/A$; Aは供試体断面積)

$\Delta R=R(t+\Delta t)-R(t)$

式(1)を用いて, 試験時に測定したデータ(以下初期データと呼ぶ)を取捨選択する必要性を述べる.

測定した N 個の軸圧縮荷重データを $R(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) とする. ここで, $R(t_i)$ はデータロガー指示値で整数値である. まず始めに, 同じ値の軸圧縮荷重データが連続するとき, 例えば $R(t_i)=R(t_{i+1})=\dots=R(t_{i+k})$ であれば k 個のデータ $R(t_{i+1}), \dots, R(t_{i+k})$ を除かなければならない. これは式(1)に示すように, 時間 Δt 間に生じた軸圧縮応力の変化量 $\Delta p(=K \times \Delta R/A)$ で除するためである.

また, Δt 間の出力値の差 $\Delta R=R(t+\Delta t)-R(t)$ が負になるような軸圧縮データ $R(t+\Delta t)$ も除く必要がある. これも式(1)からわかるように, Δp の値が負であると体積圧縮係数 m_v の値も負になるためである. 定ひずみ速度圧密試験などの単調载荷試験では, 体積圧縮係数が負になることは物理的に考えられない.

よって一般に定ひずみ速度圧密試験の結果の整理に使用する測定データは,

$$R(j+1)-R(j) \geq 1 \quad (j \geq 1) \quad (2)$$

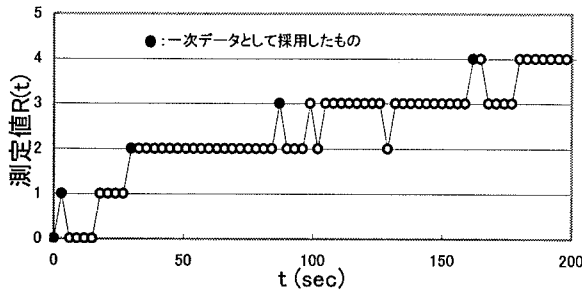


図1：荷重測定値(初期データ)と時間の関係

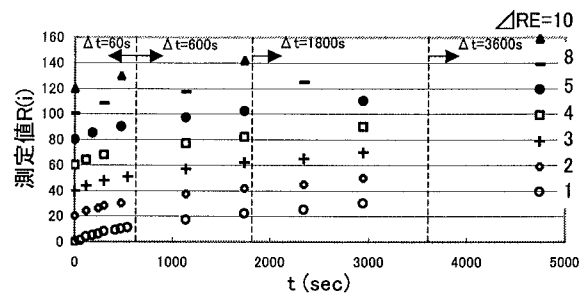
の条件を満たす必要がある。以下式(2)の条件を満たすようなデータを1次データと呼ぶ。

図1に、試験No. 3の結果を例として、初期データ $R(t)$ と測定時間 t の関係を示す。この図より先に述べた $\Delta R \leq 0$ になるようなデータが多数あることがわかる。このようなデータは、試験条件や試料によって多少異なるが、一般に測定時間間隔を短くとるほど多くなる。図1の例では、式(2)の条件を満たすような1次データを黒丸(●)で示した。

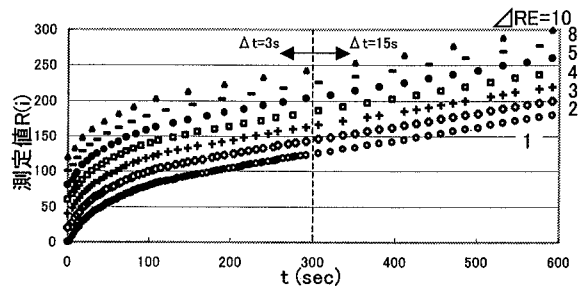
図2(a), (b), (c)に1次データを時間に対して示す(図中1次データは $\Delta R_R = 1$ として示している。その他のデータについては後述する)。また、同図には測定間隔 Δt の変化も示している。

図3(a), (b), (c)は1次データを用いて計算された体積圧縮係数 m_v と圧密係数 c_v をそれぞれ供試体高さ方向の平均有効応力 σ' ($=p-2u_b/3$ ここに、 u_b は底面間隙水圧) に対してプロットしたものである。図を見易くするため結果の一部のみを示している。図より m_v と c_v は σ' に対して振動的に変化していることがわかる。このような振動的挙動は定み速度圧密試験のような単調載荷条件では、土の性質として本来あり得ないものと考えられる。

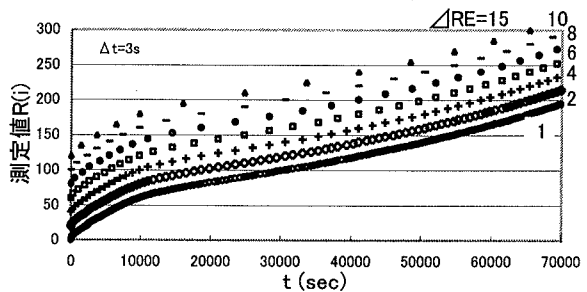
振動的挙動の主な原因として(1) A/D変換の精度や、(2)測定系の電氣的不安定を挙げることができる。原因の(1)は、基本的には変換のビット数が有限である限り解消できないが、ビット数の多い計測器を使用することによって改善できる。(2)については、通常、計測器指示値の最下位桁が ± 1 程度は変動するのでこの影響を避けることは困難である。実際、本研究で使用した計測器においても指示値の最小桁が ± 1 程度変動することは避けられなかった。このような計測システムに起因する問題点を回避するためにはデータをさらに吟味する必要がある。尚、これらの原因は、当然初期データにも



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

図2：1次および2次データと時間の関係

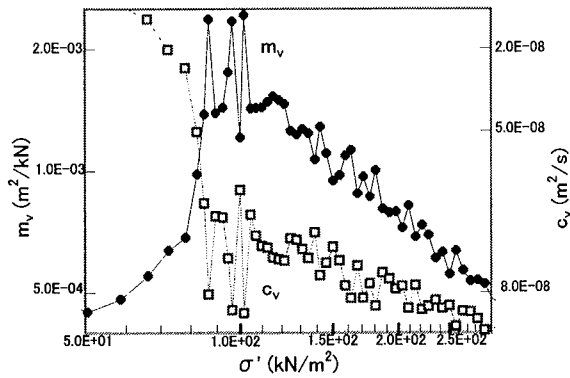
影響していて、その結果として、 $\Delta R \leq 0$ となるデータが多く計測されたと考えられる。

4. データの吟味方法

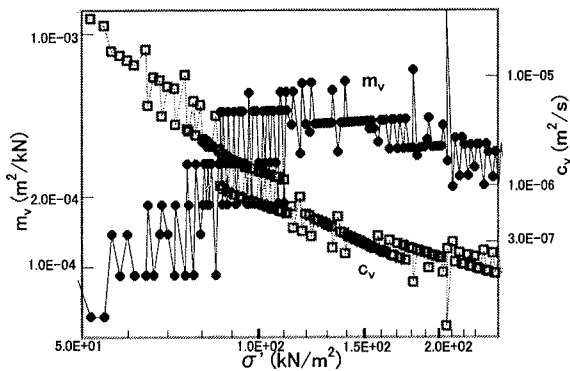
4.1 有意な変動量

計測誤差の影響をできるだけ小さくするためには、体積圧縮係数などの計算に用いる ΔR を大きくとることによって、そこに含まれた計測誤差の割合を小さくすることが有効である。これは次のように説明できる[2]. 時間 t_i と t_j に測定された2つのデータを $R(t_i)$ 、 $R(t_j)$ とすると、

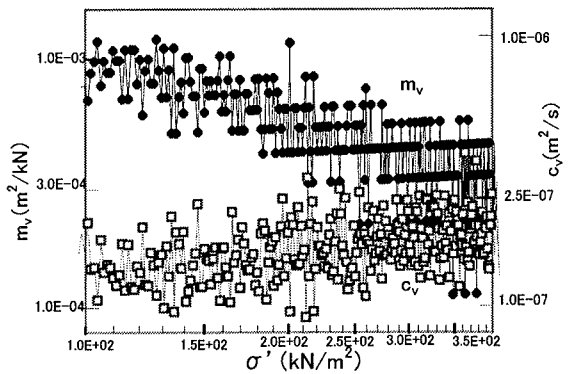
$$\begin{aligned} R(t_i) &= \bar{R}(t_i) \pm \delta R \\ R(t_j) &= \bar{R}(t_j) \pm \delta R \end{aligned} \quad (3)$$



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

図3：1次データを用いて計算した結果

ここに δR は、任意のデータに含まれる誤差の大きさであり、 \bar{R} は真値である。 δR として、測定値の大きさに依らず一定であるような、十分おおきな値を採用すると2つの測定値の差 ΔR に含まれる最大誤差は $2\delta R$ で評価できる、即ち、

$$\Delta R = R(t_j) - R(t_i) = \bar{R}(t_j) - \bar{R}(t_i) \pm 2\delta R \quad (4)$$

式(4)において、任意の2つのデータの差(ΔR)に含まれる誤差($2\delta R$)は、2つの測定値の時間差や値の

差に依存していないので ΔR が大きいほど、 ΔR に及ぼす誤差($2\delta R$)の影響は小さくなる。

ここでは計測誤差の影響を無視できるような連続データの差(変動量)を有意な変動量と呼ぶことにする。ただし、有意な変動量を予め推定できないので試行的に定めなければならない。有意な変動量を ΔR_E と書くと計算に使用するデータは

$$\Delta R(j) = R(j+1) - R(j) \geq \Delta R_E \quad (j \geq 1) \quad (5)$$

の条件を満足すべきである。この条件を満足するデータを2次データと呼ぶ。先に述べた1次データは $\Delta R_E = 1$ の場合に相当している。

2次データとして、No. 1とNo. 2については $\Delta R_E = 2, 3, 4, 5, 8$ または 10 の6つのケース、No. 3については $\Delta R_E = 2, 4, 6, 8, 10$ または 15 の6つのケースを考えて試験結果を整理した。試験No. 3はNo. 1とNo. 2と違う2次データを使用しているが、これはNo. 3の測定時間間隔が短いため ΔR_E の差が1(例えば $\Delta R_E = 2$ と 3 , $\Delta R_E = 4$ と 5)では計算結果に大きな違いがでなかったため特別な意味はない。

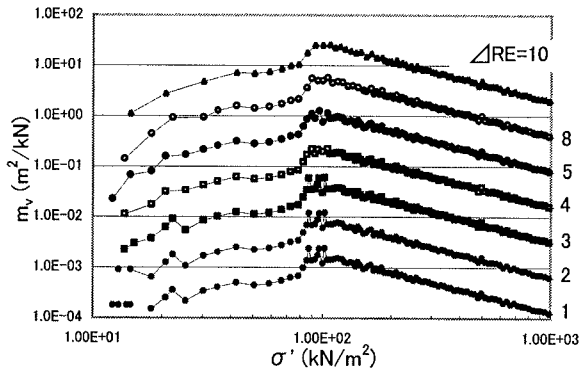
2次データを先の図2に示した。ここで図を見やすくするため、2次データは一定量(=20)だけ縦方向に順にシフトさせた。当然ながら、2次データの個数は ΔR_E が大きいほど減少する。 ΔR_E による個数への影響は、 Δt が小さい試験(または区間)ほど顕著である。なお、これらの図で見る限り、軸荷重は、 ΔR_E の大きさに関わらず、時間的に滑らかに変化している。

図4および図5に、1次データと6種類の2次データから求めた、体積圧縮係数および圧密係数と平均有効応力の関係をそれぞれ示す。ここでも、図を見易くするために、2次データから計算した体積圧縮係数、圧密係数には一定量(=5倍)だけ順に乘以て縦方向にシフトした。また、同図(c)には後述する方法で選択したデータ(JISデータ)による結果も示している。

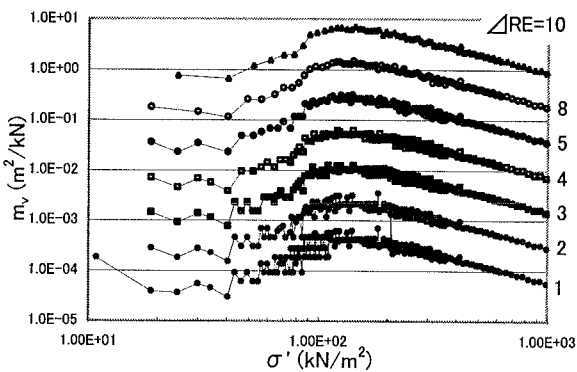
図4および図5から、振動現象は ΔR_E の値が大きくなるにつれて消えていく様子が見られる。

ここで、試験No. 1は試験No. 2およびNo. 3と異なった荷重計を使用している(表2参照)、図4および図5において、(a)の結果を(b)または(c)の結果と比較することに意味はない。

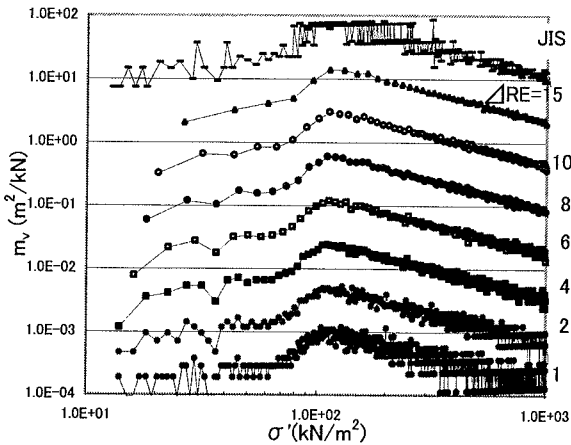
図4および図5のそれぞれにおいて、(b)と(c)を比較すると、 ΔR_E が同じであっても振動の程度が



(a) No. 1



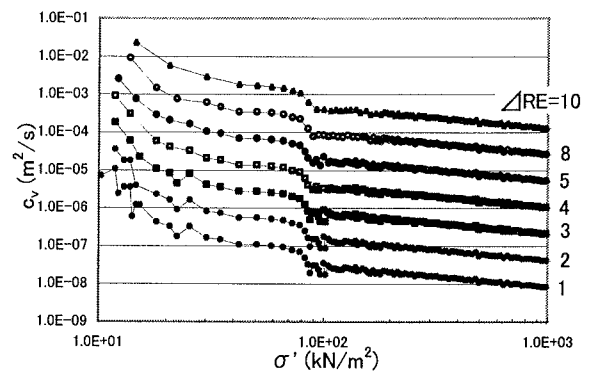
(b) No. 2



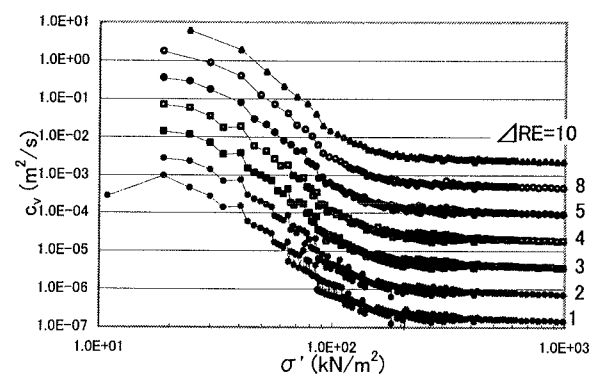
(c) No. 3

図4：2次データから計算した結果(m_v と σ' の関係)

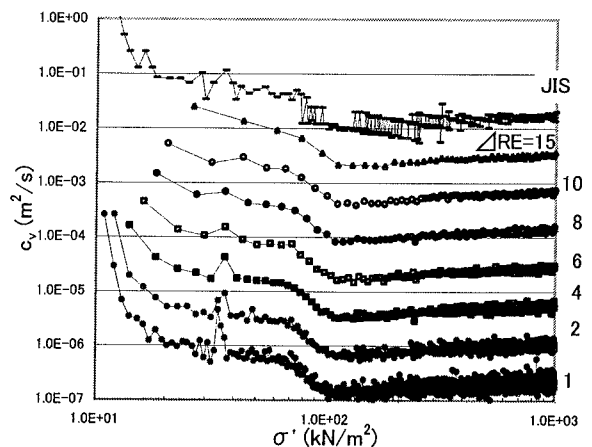
異なっているように見える。これは、2次データの個数が試験によって異なっている(測定時間間隔が異なっている)からである(表2参照)。勿論、圧縮速度、または試料によって挙動は異なるものではあり、そのような本質的な問題も含むが、主として計測時間間隔の違いを反映したものであると考えられる。



(a) No. 1



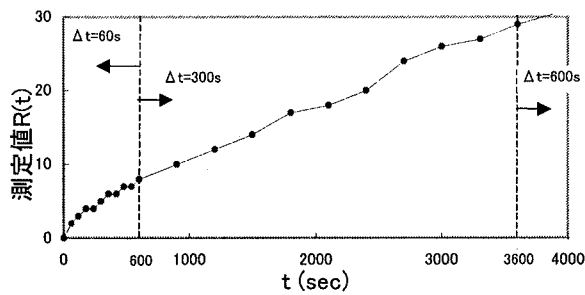
(b) No. 2



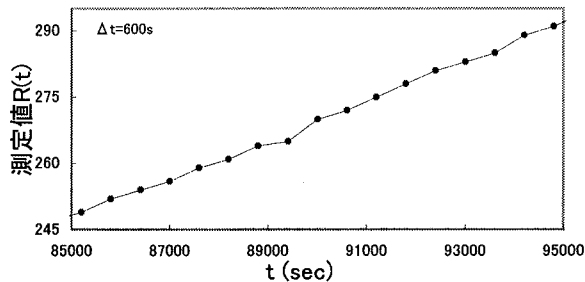
(c) No. 3

図5：2次データから計算した結果(c_v と σ' の関係)

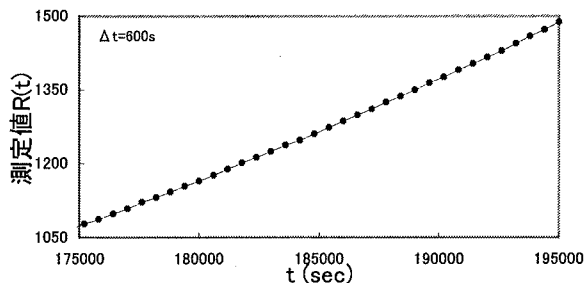
同じ試験に対する図4と図5の結果を比較すると、有意な変動量 ΔR_E が同じであれば、図に示された関係の滑らかさがほぼ同じであることがわかる。よって、ある試験に対する有意な変動量の大きさは、体積圧縮係数か圧密係数のどちらか一方で決定しても良いと言える。



(a) 試験初期



(b) 試験中期



(c) 試験後期

図6：JISデータの荷重測定値と時間の関係(試験No. 3の結果)

4.2 JISに基づくデータ

JISではデータの測定間隔について、試験開始後最初の10分は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と規定している。JISで定められた方法に合うようにデータを選択した場合の結果について述べる。

初期データからJISで標準とされている測定時間間隔 Δt と同じになるようなデータ(以下JISデータと呼ぶ)を作成した。図6にJISデータの軸圧縮荷重 $R(t)$ と時間 t の関係を示す。図を見易くするため、(a)試験初期、(b)試験中期、(c)試験後期に分け、それぞれのある時間幅を取り上げて示した。また、各図には測定時間間隔 Δt も示している。

これらの図から、試験初期では、 $\Delta t=60s$ のとき ΔR_E は0~2、 $\Delta t=300s$ のとき ΔR_E は1~4であることがわかった。JISデータについても、初期データには $\Delta R_E=0$ となるデータがあるので、1次データを作成しなければならない。試験中期では、 ΔR_E は1~5で $\Delta R_E=3$ が一番多かった。また試験後期では ΔR_E は10~15であった。

図4(c)と図5(c)にJISデータから求めた体積圧縮係数と圧密係数の結果をそれぞれ示す。両図から ΔR_E が大きい試験後期を除いて、明らかに先に述べているような振動的挙動が見える。

以上のことから、JISで推奨された圧縮速度、測定時間間隔で定ひずみ速度圧密試験を行っても、1次データを作成、さらに、2次データによる結果の吟味が必要であると言える。

5. おわりに

定ひずみ速度圧密試験において短い時間間隔で測定した場合、すべてのデータを用いるのではなく、計測システムの誤差を考慮してデータを吟味する必要がある。誤差の影響が少なくなるように、連続した2つのデータの差をある大きさ(有意な変動量)以上にすればよいことを実例を挙げて示した。

有意な変動量の値は計測システムと計測方法によって異なるので試行的に決定する必要がある。

また今回のデータの吟味方法では、有意な変動量を定量的に定めることができない。その値は、定ひずみ速度圧密試験の目的を考慮して定める必要がある。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費(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。

参考文献

- [1] JIS A 1227:2000:「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] Taylor, J.R. (林茂雄, 馬場涼 訳): 計測における誤差解析入門, 東京化学同人, p. 328, 2000
(受理 平成12年9月19日)