

微小ひずみ領域において等方圧密時間が変形係数に与える影響

地盤工学研究室 清水憲一

指導教員 豊田浩史

1. はじめに

典型的な擁壁や基礎における地盤の変形は、大部分が 0.1%以下といわれている。したがって、構造物の詳細な変形量を求めるためには、このような微小ひずみ領域での正確な変形係数を得ることが不可欠である¹⁾。その領域の変形係数は局所ひずみ測定を取り入れた三軸試験装置^{2,3,4)}を使って求めることができるが、粘性土の場合、圧密時間に左右されるという問題がある。この問題は、強度に関しては一般に 3t 法によって圧密打ち切り時間を算出することで解決されているが、微小ひずみレベルの変形係数に対する 3t 法の適用性は研究されていない。

そこで、本研究は、等方圧密時間を変えて微小ひずみレベルの変形係数を計測し、微小ひずみ領域において等方圧密時間が変形係数に与える影響と 3t 法の適用性について検討を行った。

2. 実験概要

本研究は特殊な装置を組み入れた三軸試験機を使用して、微小ひずみ領域の変形を計測する。実験で使用する試料は、新潟県柏崎市米山付近より採取した粘性土（以後、米山粘性土と称す）、市販品のカオリン粘土 A とカオリン粘土 C（以後、A と C と称す）、標準砂の豊浦砂、全部で 4 種類である。これら 4 種類の試料の物性値を表-1 に示す。米山粘性土とカオリン粘土は一次元圧密で 50kPa の予圧密を行い、供試体を作成した。豊浦砂は、空中落下法により間隙比 $e=0.65$ になるように供試体を作成した。供試体の大きさは、直径 50mm、高さ 125mm である。

本研究の三軸試験機は、分解能 0.1 μ m の局所変位計を使用することで微小ひずみ領域の変形を計測

する。また、長時間圧密により、メンブレンより空気が進入し、土の飽和度が下がるのを防ぐために三軸室内を脱気水で満たし、通気性のない油越しに空圧制御を行えるよう試験機に改良を加えてある。

実験の流れは、有効応力 50kPa（背圧 200kPa）で等方圧密した供試体を所定の有効応力になるまで等方圧密し、その後所定の圧密時間を経てせん断速度 0.002 %/min のせん断を行う。

表-1 試料の物性値

土の種類	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$W_L(\%)$	$W_p(\%)$	I_p
豊浦砂	2.65	N.P.	N.P.	N.P.
米山粘性土	2.746	46.2	31	15.2
カオリン粘土A	2.73	50.5	16.9	33.6
カオリン粘土C	2.76	74.5	27.7	46.8

N.P. : nonplastic 非塑性

表-2 3t 法の結果（有効応力 300kPa）

	豊浦砂	米山粘性土	A	C
Time (hour)	0* ¹	6.1(3.1* ²)	6.4	7.5

*1 : 3t 法適用外

*2 : 有効応力 150kPa

3. 3t 法の結果

粘性土の圧密過程では、圧密にかなりの時間を要し、その強度は圧密を打ち切る時間によって変わることから、これらの問題は 3t 法で解決するのが一般的である。

本研究で使用する米山粘性土、A、C は粘性土であるから圧密打ち切り時間を 3t 法により求めるのが一般的であり、実際これらの試料に 3t 法を行うと表-2 に示す圧密打ち切り時間が得られる（有効応力 300kPa の場合）。豊浦砂は砂質土なので 3t 法の適用外であり、圧密にかかる時間は短く、実際は排水が落ち着いたら圧密を終えればよい。

このように 3t 法の圧密打ち切り時間（以後、3

t 法圧密時間(t_c)と称す) が求めたが、この圧密時間で微小ひずみ領域の変形係数を計測できるのかを調べる必要がある。そこで次項の条件で実験を行って微小ひずみ領域の変形係数が圧密時間によって受ける影響を検討する。

4. 実験条件

本研究では等方圧密時間が微小ひずみ領域の変形係数に与える影響を検討するので、等方圧密時間を表-3 のように変化させた。そして、その後三軸圧縮を行い微小ひずみ領域の変形係数の変化を計測し考察する。

5. 実験結果および考察

米山粘性土は $p' = 300\text{kPa}$ で排水せん断(CD)・非排水せん断(CU), $p' = 150\text{kPa}$ で CD を行った。等方圧密時間が変形係数に与える影響を図-1.2.3 に示す。表-4 と図-4 には各圧密時間の微小ひずみ領域における変形係数を示す。これらから以下のことがいえる。

- ・ 微小ひずみ領域において米山粘性土の変形係数は、三軸圧縮時の排水条件・有効拘束圧に関わらず、等方圧密時間の影響を受ける。その影響力は、等方圧密時間が長くなるにしたがい次第に小さくなる。
- ・ 米山粘性土は 3 t 法圧密時間(t_c)で実験を行うと、三軸圧縮時の排水条件・有効拘束圧に関わらず、微小ひずみ領域における変形係数を過小評価してしまう。

表-3 実験条件 等方圧密時間

土の種類	等方圧密時間 (hour)
豊浦砂	0.25, 1, 12, 48
米山粘性土	3, 12, 36, 48, 72
カオリン粘土A	5, 55, 72, 101
カオリン粘土C	144, 198, 240

表-4 各圧密時間での変形係数 (米山粘性土)

Time (hour)	弾性係数 E (MPa)		
	CD 300	CD 150	CU 300
3	76	100	104
12	200	143	268
24	235	170	305
36	248	173	315
48	253	176	320
72	256	178	325
192	258	-	-

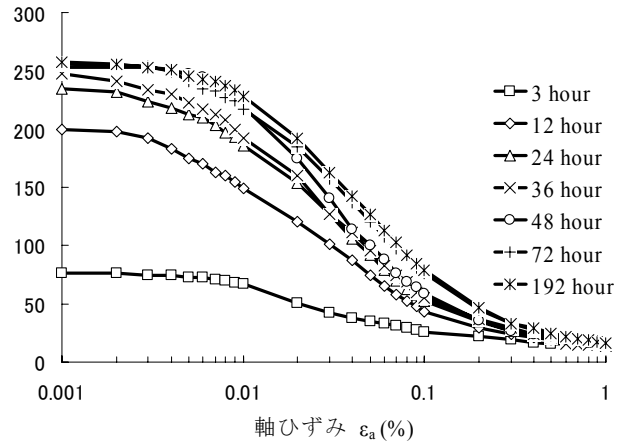


図-1 弾性係数—局所軸ひずみ (米山 CD300)

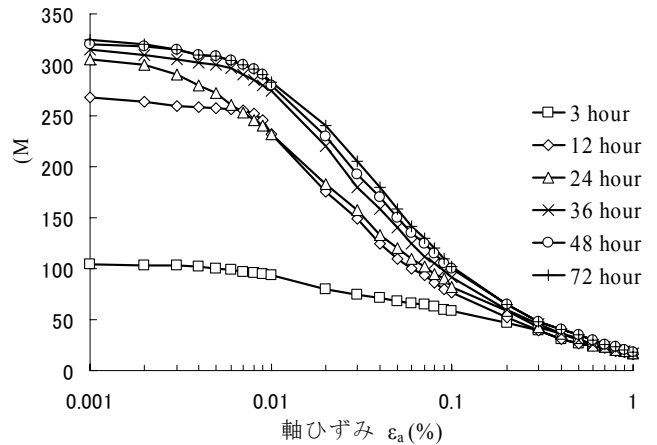


図-2 弾性係数—局所軸ひずみ (米山 CU300)

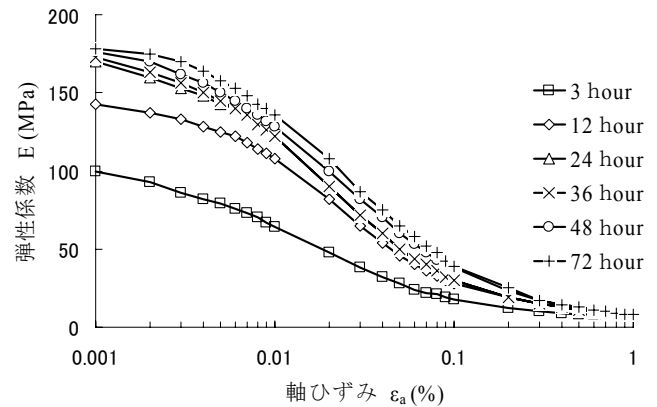


図-3 弾性係数—局所軸ひずみ (米山 CD150)

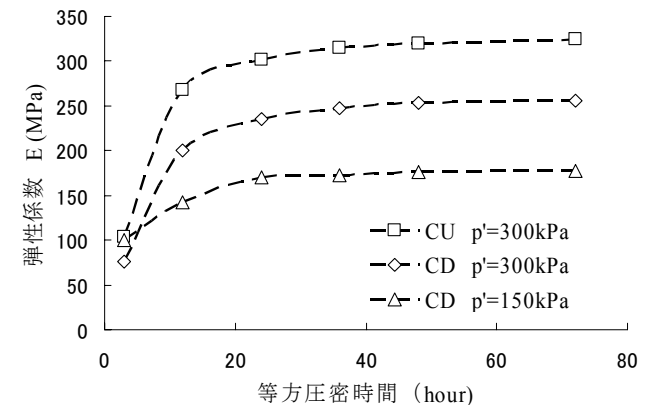


図-4 弾性係数—等方圧密時間 (米山粘性土)

カオリン粘土 A と C は、 $p' = 300\text{kPa}$ で排水せん断 (CD) を行った。等方圧密時間が変形係数に与えた影響を C は図-6、A は図-7 に示す。表-5.(a), (b) と図-8 には各圧密時間の微小ひずみ領域における変形係数を示す。これらから以下のことがいえる。

- ・ 微小ひずみ領域においてカオリン粘土(A・C)双方の変形係数は、等方圧密時間の影響を受ける。その影響力は、等方圧密時間が長くなるにしたがい次第に小さくなる。
- ・ カオリン粘土(A・C)は 3 t 法圧密時間(t_c)で実験を行うと、微小ひずみ領域における変形係数を過小評価してしまう。

豊浦砂は、 $p' = 100\text{kPa}$ で CD を行った。等方圧密時間が変形係数に与えた影響を図-9 に示す。表-6 と図-6 には各圧密時間の微小ひずみ領域における変形係数を示す。これらから以下のことがいえる。

- ・ 微小ひずみ領域において豊浦砂の変形係数は、等方圧密時間の影響を受けない。
- ・ 排水が落ち着いた時点を押密打ち切り時間として微小ひずみ領域における変形係数を計測する方法が適用できる。

表-5 各圧密時間での変形係数 (カオリン粘土 A,C)

(a)カオリン粘土 C

Time (hour)	弾性係数 E (MPa)
	CD 300
5	61
55	103
72	113
101	121
144	123
198	124
240	125

(b)カオリン粘土 A

Time (hour)	弾性係数 E (MPa)
	CD 300
24	138
36	
50	155
72	153
96	

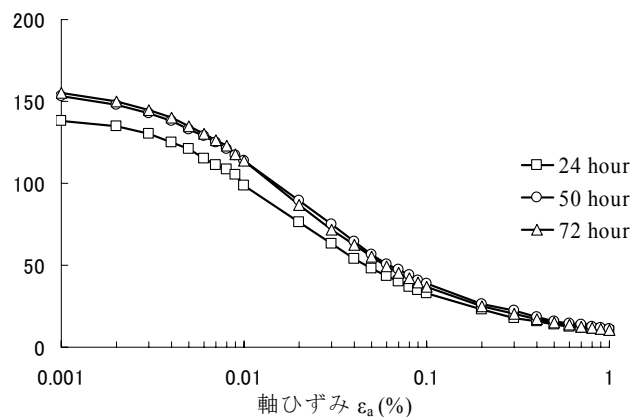


図-7 弾性係数—局所軸ひずみ (カオリン粘土 A)

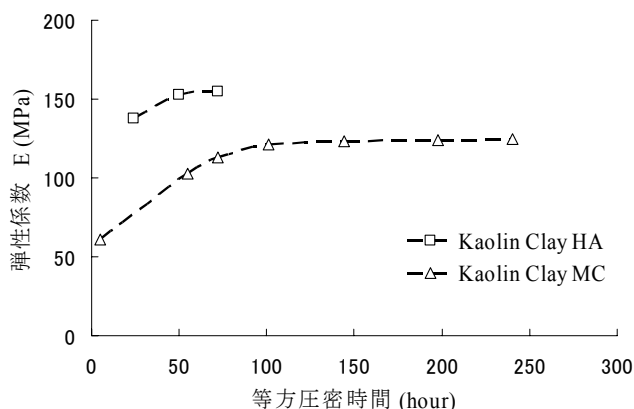


図-8 弾性係数—等方圧密時間 (カオリン粘土 A,C)

表-6 各圧密時間での微小ひずみ領域における変形係数 (豊浦砂)

Time (hour)	弾性係数 E (MPa)
	CD 100
0.25	220
1	224
12	227
48	229

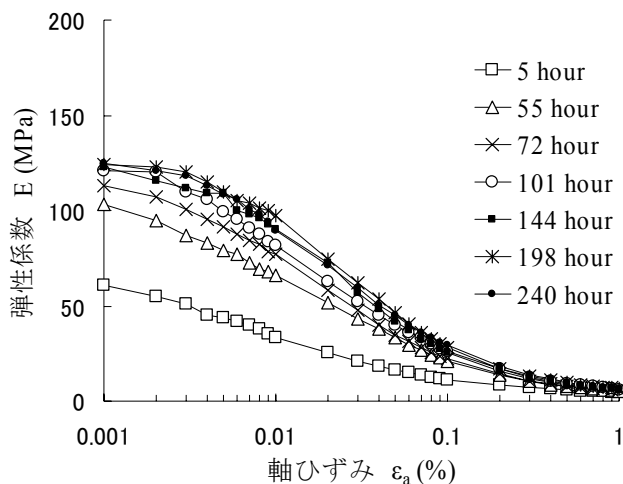


図-6 弾性係数—局所軸ひずみ (カオリン粘土 C)

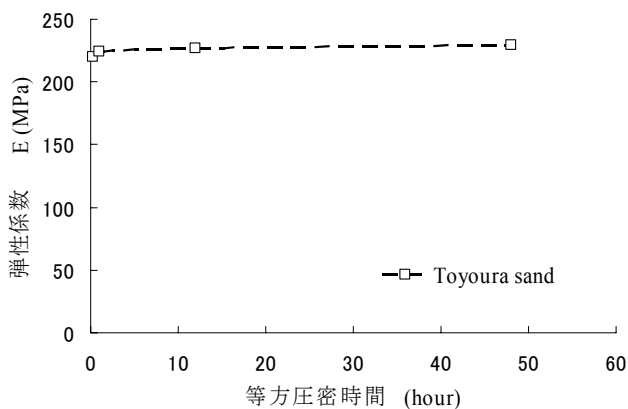


図-9 弾性係数—等方圧密時間 (豊浦砂)

6. 圧密打ち切り時間の算出

以上の結果から、微小ひずみ領域の変形係数を計測するには長時間の圧密時間が必要となることが判明し、あまりにも長い時間だと経済的ではない。そこで、微小ひずみ領域における変形係数を実験で計測するためには、3t法以外の方法が必要である。

ここで、各土の微小ひずみ領域における変形係数がある程度発揮された時間を求めることにした。そこで本研究は変形係数の変化に着目し、以下に示す式(1)と条件を使って、微小ひずみ領域の変形係数が求められる圧密時間（以後、微小ひずみ圧密時間(t₀))を算出する。

$$\frac{E_{t+\Delta t} - E_t}{E_t} = \Delta E_t \quad (1)$$

E_t: 時間tのときの変形係数 (MPa)

E_{t+Δt}: 時間tからΔt経ったときの変形係数 (MPa)

ΔE_t: 変形係数の変化率 (無次元)

条件 ΔE_t ≤ 0.02 (無次元) Δt = 5 (hour)

この式は、等方圧密時間と変形係数の関係を表した式である。この式を用いるとある時間変化に起きた変形係数の変化率(ΔE_t)を求めることができる。そこで、変形係数の変化率(ΔE_t)と時間Δtを設定してやり、その設定したΔE_t値以内であれば変形係数が落ち着いたと定め微小ひずみ圧密時間(t₀)の算定を行う。

式.1, 条件.1 を用いて算出した変化率(ΔE_t)を表-7に、各土の微小ひずみ圧密時間(t₀)を表-8に示す。

表から以下のことがわかった。

- ・ 米山粘性土は、応力条件が同じであれば、三軸圧縮時の排水条件に関わらず、微小ひずみ圧密時間(t₀)がほぼ同じである。
- ・ 米山粘性土は、微小ひずみ圧密時間(t₀)が有効拘束圧によって異なる。

次に、微小ひずみ領域の変形係数が求められる圧密時間(t₀)を、3t法の表現法を用いて表現する。

表-7 等方圧密時間と変形係数の変化率(ΔE_t)の関係

Yoneyama			
	CD 300	CU 300	CD 150
Time t ₀ (hour)	ΔE _t	ΔE _t	ΔE _t
3→8	1.0132	1.0096	0.2800
12→17	0.1150	0.0970	0.0839
24→29	0.0319	0.0331	0.0176
36→41	0.0121	0.0095	0.0116
48→53	0.0036	0.0037	0.0034
72→77	0.0006	0.004未満	0.003未満

Kaolin C	
	CD 300
Time t ₀ (hour)	ΔE _t
5→10	0.0705
55→60	0.0369
72→77	0.0177
101→106	0.0050
144→149	0.0024
198→203	0.0008
240→245	0.001未満

Kaolin A	
	CD 300
Time t ₀ (hour)	ΔE _t
24→29	0.0338
36→41	0.0284
50→55	0.0101
72→77	0.0032
96→101	0.003未満

表-8 各土の微小ひずみ圧密時間(t₀)

土の種類	t ₀ (hour)
米山粘性土	36 (24*)
カオリン粘土 A	50
カオリン粘土 C	72

*: p'_v=150kPaの圧密時間

7. 圧密打ち切り時間の表現

本研究では、米山粘性土・カオリン粘土 (A・C) ・豊浦砂の微小ひずみ圧密時間 (t_0) が得られた。

ここで、その微小ひずみ圧密時間 (t_0) の表現方法を変える。その方法は、実験をして得られた各土の微小ひずみ圧密時間 (t_0) を 3t 法と同様な表現法とするものである。その理由は、3t 法は簡便な方法であるのは周知の事実であり、その方法から微小ひずみ圧密時間 (t_0) を算出できれば、実務効率の向上により経済的な実験が行えるからである。

その手法は、①3t 法と同様に体積ひずみ-圧密時間関係の圧密曲線を描く②3t 法と同様に圧密曲線の最急勾配に線を引く (最急勾配線を引く) ③微小ひずみ領域における変形係数が発揮される圧密時間 (t_0) に垂線を圧密曲線と接するまで引く④その接点に最急勾配線を引き、時間軸と接した時間(t_E)を得る。⑤その時間(t_E)が微小ひずみ領域における変形係数が発揮される圧密時間 (t_0) を 3t 法の手法で表現した時間である。この手法の順序と概略図を図-10 に示す。

この時間(t_E)は、式(2)で表現される。

$$t_E = X \times t_T \quad (2)$$

t_E : 圧密時間 (t_0) を 3t 法の手法で表現した時間

X : 圧密時間係数

t_T : 圧密曲線の最急勾配より求まる時間

本研究では、微小ひずみ圧密時間 (t_0) を 3t 法と同様に求めたものを時間(t_E)と称し、各土の時間(t_E)と圧密時間係数(X)を表-9 にまとめた。表中の t_T は、圧密曲線に引いた最急勾配線と時間軸が交わった点の時間のことである。つまり、時間 (t_E) は t_T の何倍なのかを表し、その倍率を圧密時間係数(X)としている。

表-9 より、

- 米山粘性土の時間 (t_E) の圧密時間係数(X)は有効拘束圧に関わらず同一に表現される。そこで、圧密時間係数(X)は土によって固有の値があると考え、カオリン粘土 A・C についても考察する。

8. 圧密打ち切り時間に関する指標の検討

一般に粘性土を評価するときは、土の物性値、特に塑性指数(I_p)を用いる。そこで、圧密時間係数(X)と各土の物性値との関係を調べ、そこから圧密打ち切り時間に関する指標の検討を行う。各土の物性値 (塑性指数(I_p)) と圧密時間係数(X)の関係を図-11 に示す。

図-11 から以下のことがいえる。

- 粘性土の塑性指数と圧密時間係数(X)関係には比例関係が成り立っている。よって、塑性指数と圧密時間係数(X)関係は圧密打ち切り時間を算出するのに大まかな指標になる。

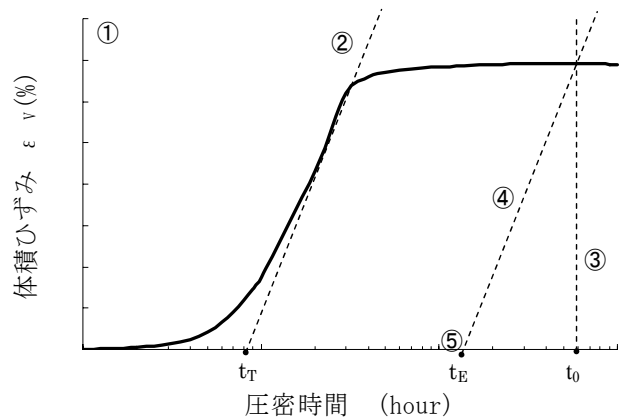


図-10 3t 法の手法を用いた圧密時間の算出方法

表-9 各土の時間(t_E)と圧密時間係数

	時間 t_E	圧密時間係数 X
豊浦砂	1 t_T	1
米山粘性土	20 (20*) t_T	20
カオリン粘土 A	25 t_T	25
カオリン粘土 C	30 t_T	30

*: $p' = 150 \text{ kPa}$ の時間(t_E)

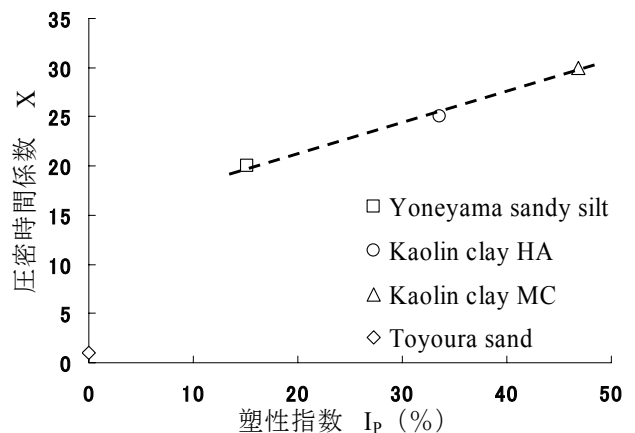


図-11 塑性指数と圧密時間係数(X)関係

9. 結論

本研究では、米山粘性土・カオリン粘土 MC・カオリン粘土 HA・豊浦砂を用いて等方圧密時間が変形係数に与える影響と 3t 法の適用性に関する検討を行った。

本研究で得られた知見を以下に示す。

豊浦砂の場合

- ① 微小ひずみ領域における変形係数は、等方圧密時間の長短の影響を受けない。
- ② 排水が落ち着いた時点を押密打ち切り時間として微小ひずみ領域における変形係数を計測する方法が適用できる。

米山粘性土・カオリン粘土 (MC・HA) の場合

- ③ 微小ひずみ領域における変形係数は、三軸圧縮時の排水条件・有効拘束圧に関わらず、等方圧密時間の影響を受ける。その影響力は、等方圧密時間が長くなるに連れ次第に小さくなる。
- ④ 微小ひずみ領域における変形係数は、三軸圧縮時の排水条件・有効拘束圧に関わらず、等方圧密時間の増加とともに大きくなる。その増加は、等方圧密時間が長くなるにしたがい次第に小さくなる。
- ⑤ 米山粘性土の微小ひずみ圧密時間 (t_0) を時間 (t_E) から表現することで、有効拘束圧に関わらずに同一表現された。
- ⑥ 本研究で得られた塑性指数と時間 (t_E) の圧密時間係数の関係(図.11)は、微小ひずみ測定実験の圧密終了時間を決定する大まかな指標になる。

今後は、試料の種類を増やし、圧密打ち切り時間を決定する指標の精度を上げていく必要がある。

参考文献

- 1) 龍岡文夫(1990)：局所軸ひずみ測定装置－理論と測定例－,土木学会年次学術講演会講演概要集第三部,Vol.45,pp.1100-1101
- 2) Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation characteristics of soils and rocks from field and

laboratory tests, Keynote Lecture, Proc. of 9th Asian Regional Conf. on SMFE, Vol.2 pp.101~170, 1992.

- 3) Shibuya, S.,Tatsuoka, F., Teachavorasinskun, S., Kong, X. J., Abe, F., Kim Y-S. and Park, C-S.: Elastic deformation properties of geomaterials,地盤工学会論文報告集, Vol.32,No.3, pp.26~46,1992.
- 4) Shibuya, S.,Mitachi, T., Fukuda, F. and Degoshi, T.: Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clay, Geotechnical Testing Journal, Vol.18, NO.3 pp.365~375,1995.