

繰返しせん断の周期が粘土層の間隙水圧の発生と沈下に及ぼす影響

松田 博*・大原 資生**・佐野 修司***

Study on the Settlement and the Excess Pore Water Pressure of a Saturated Clayey Layer induced by Cyclic Shear with Different Periods

Hiroshi MATSUDA, Sukeo OHARA and Shuuji SANŌ

Abstract

In case that a soft clayey layer is subjected to cyclic shear by the earthquake ground motion, a predominant period varies due to the characteristics of the ground. In this paper, for normally consolidated specimens, two-way strain controlled cyclic simple shear tests with different periods are carried out under the undrained conditions, and followed by the dissipation of the excess pore water pressure induced during cyclic shear. Then the effects of the period of cyclic shear on the generation of the excess pore water pressure and on the settlement induced by the dissipation of it are investigated. In conclusion, it is clarified that the periods of the cyclic shear have considerable effects upon the generation of the excess pore water pressure, and that the settlement of a clayey layer is hardly influenced by them.

1. まえがき

自然条件や人為的な原因により繰返しせん断を受けた地盤は数多く見られる。これらの地盤上に構造物を設ける際には、あらかじめ地盤の強度や圧密特性を知る必要がある。地震、波浪等においては、地盤に作用する繰返しせん断の周期が異なり、通常の地震においては卓越周期が2~0.5秒程度であるのに対して、波浪では周期が5~10秒と長い。一方、従来行なわれた粘土の繰返し三軸試験の結果をみると、繰返しせん断の周期が異なると発生する過剰間隙水圧にも影響することが報告されている⁴⁾。そこで、本研究では、動的単純せん断試験機を用いて、 K_0 状態にある飽和粘土に種々の周期の繰返しせん断ひずみを非排水状態で与えた後、排水させるという実験を行った。そして繰返しせん断

の周期が、発生する過剰間隙水圧の大きさ及びその消散によって生じる沈下に及ぼす影響について調べた。

2. 試料および供試体

本実験で用いた試料は、粉末状のカオリン粘土で、その物理諸定数をTable 1に、粒径加積曲線をFig. 1に示す。

この試料に含水比が約80%になるように脱気水を加え、よく攪拌した後、水分の蒸発を防ぐために容器をポリ袋で覆って、約24時間放置する。その後、約30分間真空容器に入れて十分脱気を行なった後、せん断箱のゴムスリーブの中に3層に分けて詰める。

その際、各層の表面を、供試体の直径に等しい円板(厚さ5mm)に一定の圧力(3.6mHg)を加えることによって供試体が均質になるようにする。

このようにして詰められた試料を所定の圧密圧力($\sigma_{v0} = 49\text{kPa}$)で約22時間圧密する。圧密後の供試体は直径75mm、高さ約20mmの円板状であり、間隙比は $e_0 = 1.29 \sim 1.33$ であった。

*土木工学科

**宇部工業高等専門学校

***土木工学専攻

Table 1 Physical Properties of Kaolinite Clay

Specific gravity	G_s	2.718
Liquid limit	w_L (%)	53.5
Plastic limit	w_P (%)	28.5
Plasticity index	I_P (%)	25.0
Average grain diameter	D_{50}	$3.8\mu\text{m}$

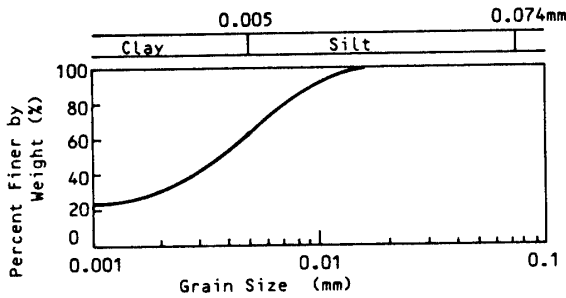


Fig. 1 Grain Size Distribution Curve

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

本実験に用いた実験装置は、電気油圧サーボ式動的単純せん断試験機であり、Fig. 2にこの装置のせん断箱付近を示す。

せん断箱は、Kjellman型と同型で、応力制御方式又はひずみ制御方式により、静的せん断応力を負荷することが可能である。本実験では、ひずみ制御方式を用いた。

せん断箱内の供試体はゴムスリーブで包まれておりその周りには、内径75.2mm、外径96.0mm、厚さ2.0mmのプラスチックリングが15枚積み重ねられている。この

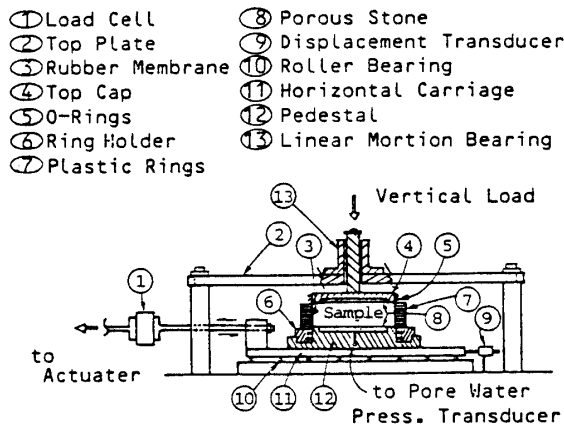


Fig. 2 Shear Box of Simple Shear Test Apparatus

ため、供試体は、横方向の膨張は拘束されるがせん断変形に対してはほぼ自由に挙動できるようになっている。又、間隙水圧は、供試体下面の値が測定できるようになっている。一方、繰返しせん断ひずみ発生装置としては、電気油圧サーボシステムを用いた。このサーボシステムは、Fig. 2のロードセルの左側に取り付けた油圧シリンダーを作動させるものである。

3.2 実験方法

所定の圧密圧力 σ'_{vo} で予圧密して正規圧密状態にある供試体に、圧密圧力に等しいバックプレッシャーを負荷した後非排水状態を保ち、ひずみ振幅 γ_{dyn} が一定の繰返しせん断を行なった。 γ_{dyn} は0.05~3.00%の間で変化させ、繰返し回数 n は200回とした。そしてそれぞれのひずみ振幅について、繰返しせん断の周期を0.2, 0.5, 2.0, 10.0秒とした。なお、これとは別に、繰返し回数とひずみ振幅をそれぞれ $n=50$, $\gamma_{dyn}=2.0\%$ とし、繰返しせん断の周期を変化させるという実験も行なった。繰返しせん断中は、せん断応力、せん断変位、鉛直変位、供試体下面での過剰間隙水圧を測定した。繰返しせん断終了後は、非排水状態のまま間隙水圧が一定値になるまで放置し、その後、供試体上面より排水を行い、圧密沈下量、供試体下面での間隙水圧の時間的変化を測定した。

4. 結果及び考察

4.1 繰返しせん断の周期が過剰間隙水圧の発生に及ぼす影響

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6は、周期 T を10.0, 2.0, 0.5, 0.2 sで一定とし、ひずみ振幅を種々変化させて得られた過剰間隙水圧の上昇過程を示したものである。ひずみ振幅との対応から明確ではないが、周期

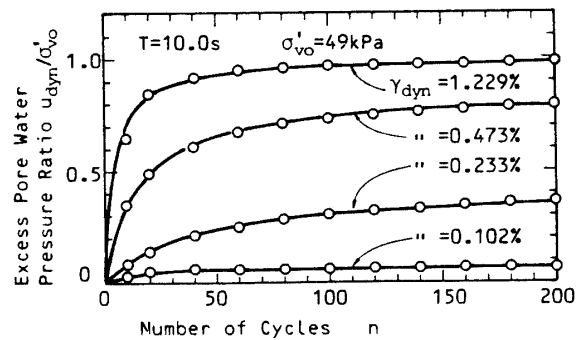


Fig. 3 Excess Pore Water Pressure Induced by Cyclic Shear $T=10$ (s)

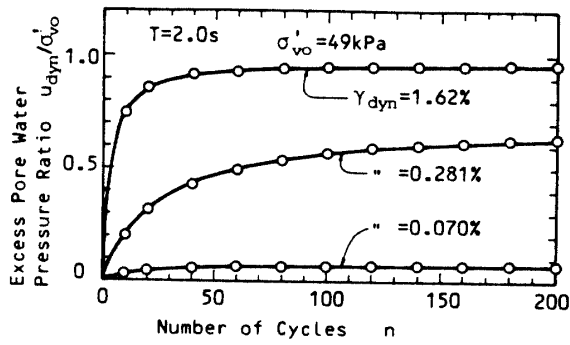


Fig. 4 Excess Pore Water Pressure Induced by Cyclic Shear $T=2.0$ (s)

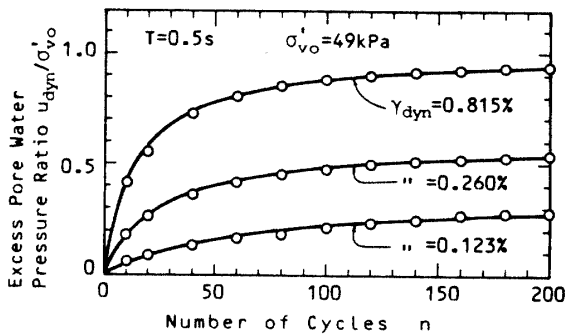


Fig. 5 Excess Pore Water Pressure Induced by Cyclic Shear $T=0.5$ (s)

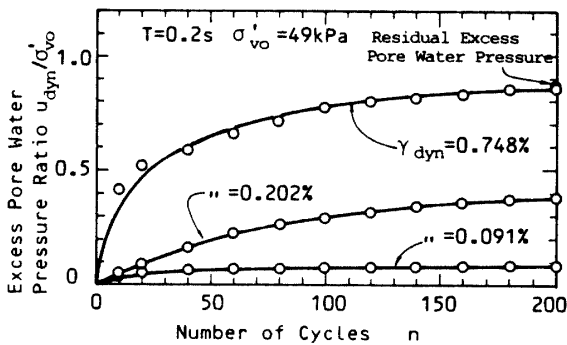


Fig. 6 Excess Pore Water Pressure Induced by Cyclic Shear $T=0.2$ (s)

が短いほど、繰返しの初期において発生する過剰間隙水圧の大きさは小さくなっている。とくに、 $T=0.2$ s の場合においては、 $n=200$ 回で繰返しせん断を終了後もわずかに間隙水圧の上昇がみられる。なお図中の記号はいずれも実測値であり、実線は実測値に対して次式により双曲線近似したものである²³⁾。

$$u_{dyn}/\sigma'_{vo} = n / (\alpha + \beta \times n) \quad (1)$$

ここに、 α 、 β は係数である。式(1)において $n/(u_{dyn}/\sigma$

$'_{vo})$ と n の関係は直線関係となり、この直線の切片の値が α 、勾配が β であって、式(1)からも明らかなように、 $n \rightarrow \infty$ のとき u_{dyn}/σ'_{vo} は $1/\beta$ となる。そこでFig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6の曲線から得られた α 、 β を周期 T をパラメーターとして γ_{dyn} との関係で示したものが、Fig. 7, Fig. 8である。ばらつきはあるものの、同図より次式の関係が成り立つことがわかる。

$$\alpha = A \times (\gamma_{dyn})^m \quad (2)$$

$$\beta = \gamma_{dyn} / (B + C \times \gamma_{dyn}) \quad (3)$$

ここに、 A 、 B 、 C 、 m は定数であり、本実験に用い

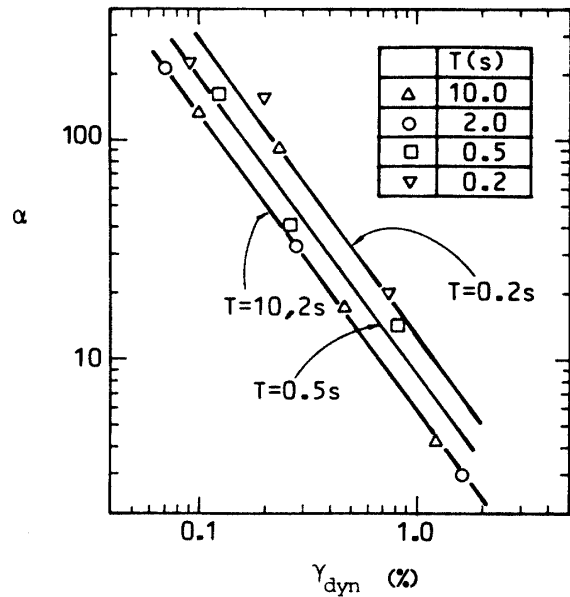


Fig. 7 α versus Cyclic Shear Strain Amplitude

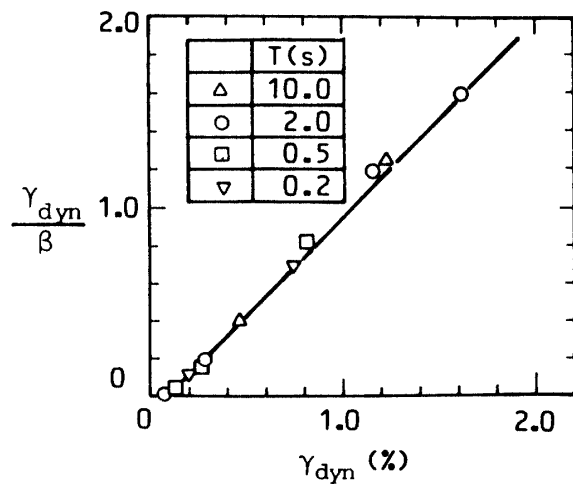


Fig. 8 β versus Cyclic Shear Strain Amplitude

Table 2 Constants A, B, C, m

T(s)	A	B	C	m
10.0	6.00	-0.095	1.070	-1.185
2.0	6.00	-0.095	1.070	-1.185
0.5	8.70	-0.095	1.070	-1.185
0.2	12.90	-0.095	1.030	-1.185

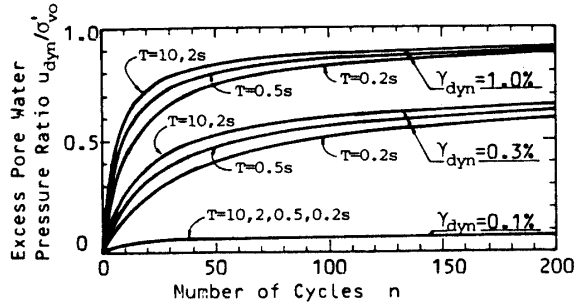


Fig. 9 Excess Pore Water Pressure Calculated by Using Eq.(1)

た試料の定数についてはTable 2に示す。

Fig. 7より, Aは周期によって変化するために α は周期の影響を受け, しかも, 周期が大きくなるほど α が小さくなることがわかる. 一方Fig. 8より, β は周期によらずほぼ一定となっており, このことは, 先述のように, 間隙水圧は $n \rightarrow \infty$ のとき周期の違いによらず一定値に収束することを示している.

Fig. 9は, Fig. 7, Fig. 8によって得た各周期ごとの平均的な α, β の値を用いて, 式(1)により u_{dyn}/σ'_{vo} と n の関係を示したものである. 図中にはひずみ振幅を0.1, 0.3, 1.0%とし周期 T を10.0, 2.0, 0.5, 0.2sと変化させた場合の結果を示している. 同図には, Fig. 7, Fig. 8でのデータのばらつきが含まれているが, 傾向としては γ_{dyn} が, 0.1%程度のときは周期の影響はみられないことがわかる. しかしひずみ振幅が大きくなると周期 T が大きいほど過剰間隙水圧の初期の立ち上がりの勾配が急になり, $n=200$ での過剰間隙水圧の値にも相違がみられる.

式(1)において n で両辺を偏微分すると次式が得られる.

$$\frac{\partial (u_{dyn}/\sigma'_{vo})}{\partial n} = \frac{\alpha}{(\alpha + \beta \times n)^2} \quad (4)$$

式(4)は, 1回の繰返しせん断によって発生する過剰間隙水圧の大きさを示しており, 先述のFig. 7, 8によって得た α, β を用いて, $\frac{\partial (u_{dyn}/\sigma'_{vo})}{\partial n} \sim n$ の関係におよぼす周期の影響を示したものがFig. 10, 11である. それぞれひずみ振幅 γ_{dyn} が0.3と1.0%の結果である.

Fig. 10より, ひずみ振幅が小さい($\gamma_{dyn}=0.3\%$)場合は $n \leq 30$ において, 周期 T が大きい方が過剰間隙水圧の発生は大きく, n がそれ以上になると逆に周期の小さい方が大きくなっている. 同様の傾向は, ひずみ振幅が1.0%の場合にもみられ, この場合には, $n \geq 15$ において, 周期の小さい方が過剰間隙水圧の発生は大きくなっている.

一方, Fig. 12は, ひずみ振幅を約2.2%で一定とし $n=50$ 回の繰返しせん断を行なった後, 非排水状態を保った場合の過剰間隙水圧の変化を示したものである.

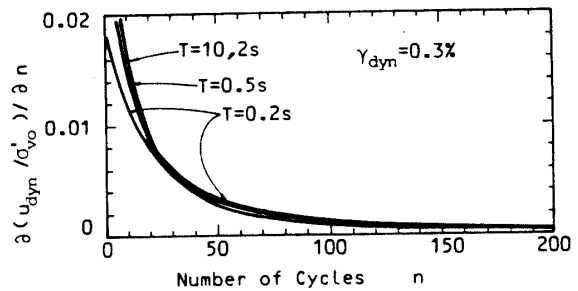


Fig. 10 Relationships between $(u_{dyn}/\sigma'_{vo})/n$ and n $\gamma_{dyn}=0.3$ (%)

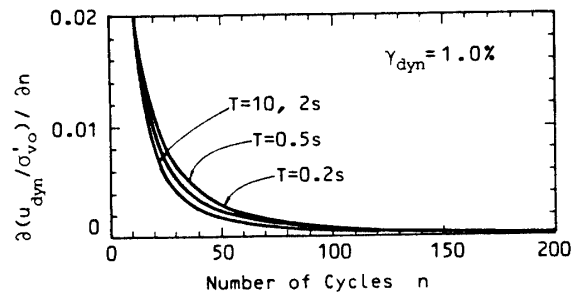


Fig. 11 Relationships between $(u_{dyn}/\sigma'_{vo})/n$ and n $\gamma_{dyn}=1.0$ (%)

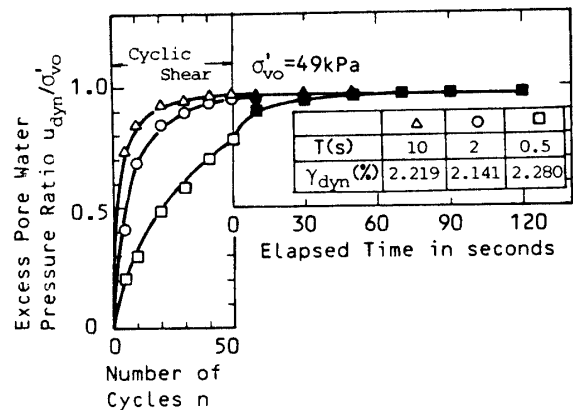


Fig. 12 Relationships between u_{dyn}/σ'_{vo} and Elapsed Time

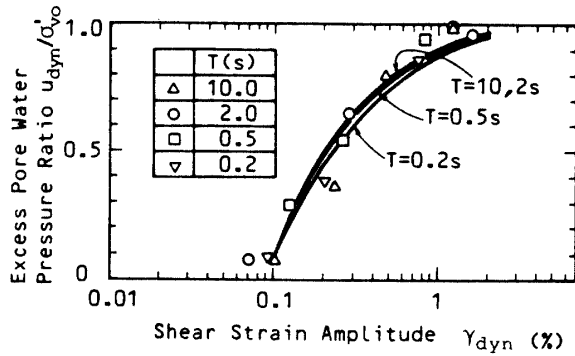


Fig. 13 Relationships between u_{dyn}/σ'_{vo} and γ_{dyn}

同図より、 $n=50$ 回までの過剰間隙水圧の上昇過程は Fig. 3, 4, 5, 6と同様な傾向となっている。しかし、 $n=50$ 回の繰返しせん断後、非排水状態を保つと過剰間隙水圧は T が10 s および 2 s のケースではほぼ一定であるのに対して、 T が0.5 s のときは繰返しせん断後上昇し、約1.0分後に $T=10, 2$ s の曲線にほぼ一致している。同様なことは、 $T=0.5, 0.2$ s のケースにおいて $n=200$ 回後においても確認されている。また、このような繰返しせん断停止後の過剰間隙水圧の上昇については、松井⁹⁾による繰返し三軸試験の結果でも確認されている。

また、ひずみ振幅 γ_{dyn} と $n=200$ 回の時点での間隙水圧 u_{dyn}/σ'_{vo} の関係を示したものが、Fig. 13である。図中の記号は実測値であり、実線は、式(1)に式(2)、式(3)を代入して得た次式

$$u_{dyn}/\sigma'_{vo} = n / \{ A \times \gamma_{dyn}^n + \{ \gamma_{dyn} / (B + C \times \gamma_{dyn}) \} \times n \} \quad (5)$$

によって得られたものである。Fig. 13において、計算値は周期 T が大きいほど過剰間隙水圧の発生量が大きくなることを示しており、このことは、Fig. 9に示した傾向と一致している。しかし、 $T=0.5, 0.2$ s においては、繰返しせん断停止後も過剰間隙水圧は上昇するため、同図の実測値からも明らかのように、ひずみ振幅 γ_{dyn} と間隙水圧比 u_{max}/σ'_{vo} の関係は、周期によって影響されない。一方、過剰間隙水圧が発生する最小のひずみ振幅は、周期 T に関係なく、 $\gamma_{dyn}=0.05\%$ 付近である。

4.2 過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下について

繰返しせん断によって発生した過剰間隙水圧は、排水によって消散し、その時沈下を生じる。

Fig. 14は、正規圧密粘土に繰返しせん断ひずみを与えた際に発生した過剰間隙水圧を消散させることによ

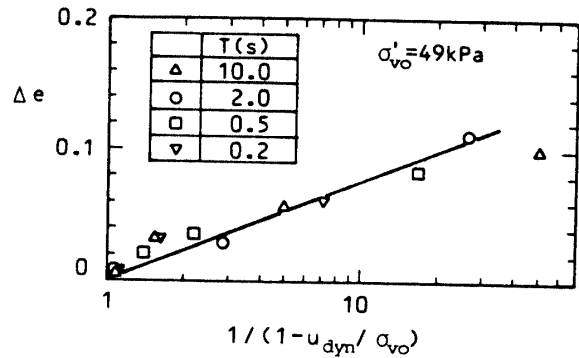


Fig. 14 The Change of the Void Ratio due to the Dissipation of the Excess Pore Water Pressure

て生じる間隙比の変化量 Δe と $\log \{ \sigma'_{vo} / (\sigma'_{vo} - u_{dyn}) \} = \log \{ 1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo}) \}$ の関係である。ここに $\log \{ 1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo}) \}$ は、 $e - \log \sigma'_{vo}$ 曲線上における過剰間隙水圧の変化量、つまり有効応力の減少量を対数表示したものである。

Fig. 14より、得られた実測値はほぼ一直線上にある。このことから、 Δe と $\log \{ 1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo}) \}$ の関係は、繰返しせん断の周期およびひずみ振幅には無関係に、直線関係にあることがわかる。よって、繰返しせん断後の排水過程で生じる圧密沈下量は繰返しせん断中に生じる過剰間隙水圧の大きさのみによって決定されることになる。さらに Δe と $\log \{ 1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo}) \}$ が直線関係にあることから、この勾配は圧縮指数に対応する。ここではこの値を、「繰返しせん断を受けた粘土の圧縮指数」 C_{dyn} と呼ぶことにする。そしてこの場合の C_{dyn} を求めると、0.093となる。

繰返しせん断を受けた粘土の圧縮指数 C_{dyn} を用いることにより、繰返しせん断後の間隙比の変化量 Δe は、次式のように表せる。

$$\Delta e = C_{dyn} \times \log \{ 1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo}) \} \quad (6)$$

したがって、沈下ひずみ ϵ_v は

$$\epsilon_v = C_{dyn} / (1 + e_0) \times \log \{ 1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo}) \} \quad (7)$$

となる。ここに、 e_0 は供試体が繰返しせん断を受ける前の間隙比である。式(6)、(7)中の u_{dyn}/σ'_{vo} は式(5)によって与えられている。従って、繰返しせん断後に生じる沈下ひずみ ϵ_v は、繰返し回数とひずみ振幅によって表すことができる。

Fig. 15は、繰返しせん断中に生じた過剰間隙水圧の消散によって生じる沈下ひずみとひずみ振幅の関係を示したものである。図中の記号は実測値であり、曲線は、式(7)より得られた計算値である。実測の沈下ひずみは周期 T によらずほぼ一定になっていることがわ

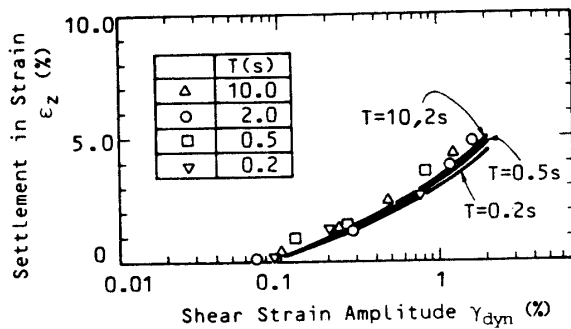


Fig. 15 Settlement Induced by Cyclic Shear Strain

かる。これに対して、計算値は周期 T が小さいほど小さくなる傾向があらわれている。この原因は、先述したように、 T が小さいとき繰返しせん断が終了した後も、過剰間隙水圧は上昇しようとする傾向があるのに対して、計算値では繰返しせん断中の過剰間隙水圧の上昇曲線に対して、カーブフィッティングしているためと思われる。ただ、Fig. 15の結果からも明らかなように、ひずみ振幅が0.5%程度以下では計算値においても周期の影響はほとんどあらわれていない。これらのことから、今回行なった実験の範囲では、沈下ひずみに及ぼす周期の影響はないといえる。ただ、繰返しせん断中の過剰間隙水圧の上昇過程は、周期の影響を受けることから注意を要する。

5. 結 論

本研究では、動的単純せん断試験機を用いて、正規圧密粘土が、周期の異なる繰返しせん断力を受けた場合に生じる過剰間隙水圧の発生、消散、及び、それに伴う沈下特性について調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

(1)ひずみ振幅が一定の場合では、周期が大きいほど過

剰間隙水圧の発生は大きい。

- (2)繰返しせん断の周期が小さいときは、繰返し回数200回において、繰返しせん断停止後もわずかな過剰間隙水圧の上昇がみられる。しかし、ひずみ振幅が同じであれば、周期に関係なく最終的な過剰間隙水圧の値は、ほぼ一定となる。
- (3)過剰間隙水圧の消散に伴って生じる圧密沈下量は繰返しせん断時に発生する過剰間隙水圧の大きさによって決まる。
- (4)繰返しせん断の周期に関係なく、繰返しせん断を受けた粘土の圧縮指数 C_{dyn} は一定である。すなわち、過剰間隙水圧の消散に伴って生じる圧密沈下は、周期の違いによって影響されない。

なお、本研究を行なうに当たっては、椋木隆技官、当時の本学学生、生垣聡志君の助力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大原資生, 松田 博: 飽和粘土の動的強度について, 土木学会論文報告集, 274 (1978), pp.69~78
- 2) 大原資生, 松田 博, 近藤泰生: 排水を伴った飽和粘土の繰返し単純せん断試験, 土木学会論文報告集, 352 (1984), pp.149~157
- 3) 大原資生, 松田 博, 末岡光樹: 繰返しせん断による粘土層の沈下に関する基礎的研究, 第31回土質工学シンポジウム, (1986), pp.79~84
- 4) Matsui T., H. Ohara and T. Ito: Cyclic Stress-Strain History and Shear Characteristic of Clay, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106, GT10, (1980) pp.1101~1120.

(昭和62年10月15日受理)