

# 地震に起因した粘土層の沈下予測に関する研究

松田 博\*・星山 英一\*\*

## Study on the Estimation of Earthquake-Induced Settlement of Clay Layers

Hiroshi MATSUDA and Eiichi HOSHIYAMA

### Abstract

It has been observed by the cyclic simple shear test that the seismic settlement of a clayey layer is considerably large compared with the settlement induced by the secondary compression; for kaolinite clay, the settlement induced by cyclic shear strain even reaches 5% in strain, and that such a settlement depends on the cyclic shear strain amplitude, number of strain cycles, and the overconsolidation ratio. Practically, the seismic settlement has been confirmed in Japan and in Mexico. So, this problem cannot be disregarded in the present situation that the structures have become precisely and also it is necessary to clarify the settlement characteristics of soft ground induced by earthquakes.

In this paper, the method to estimate the seismic settlement of a clayey ground is proposed.

As a result of estimation, the settlements of 0-3 cm are obtained for the case of the soil profile in Mexico City. These values reasonably agree with the results obtained by leveling at the 1985 Mexico Earthquake.

### 1. 緒 言

軟弱な粘土地盤が、地震時に繰返しせん断を受けると、粘土層内には過剰間隙水圧が累積する。繰返しせん断直後においては地盤はほぼ非排水状態にあるために、過剰間隙水圧は残留するが、時間経過とともにそれは消散し、その結果粘土層は沈下する。

既に著者らは、地盤中の応力条件の再現性が優れていること、供試体の高さが直径に比べて大きくないために、過剰間隙水圧の変化を良い精度で測定できるということから、動的単純せん断試験機を用いて実験を行っている<sup>4)</sup>。その結果によると、繰返しせん断によ

て生じる粘土層の沈下は二次圧密等による沈下に比べると著しく大きく、せん断ひずみ振幅、繰返し回数、過圧密比の大きさ等によっても異なるが、沈下ひずみで5%にも達することがある。軟弱な粘土地盤が地震後に沈下したという事例は、実際、わが国やメキシコにおいても認められており<sup>3)6)7)</sup>、また近年は埋設管をはじめとして都市機能に直接かかわる構造物が多く築造され、かつそれら構造物自体も精密化していることから、地震に起因した地盤の沈下については明確にしておく必要がある。

そこでここでは従来より得ている実験結果をもとに、粘土地盤に地震力が作用したときに生じる沈下量を予測する手法を示した。また、メキシコシティのモデル粘土地盤について地震によって生じる沈下量を計算によって求め、その結果を1985年のメキシコ地震による沈下実測データと比較した。

\*土木工学科

\*\*大学院土木工学専攻

2. 繰返しせん断によって累積する過剰間隙水圧およびその消散に伴う沈下

すでに飽和粘土に繰返しせん断ひずみが作用した場合、累積する過剰間隙水圧の大きさ  $u_{dyn}$  は、一様なせん断ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  と繰返し回数  $n$  の関数として次式で与えられることを示した<sup>4)</sup>。

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

ここに、 $\sigma'_{vo}$  は繰返しせん断前の有効鉛直応力であり、 $\alpha$ 、 $\beta$  は次式で与えられる。

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

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

$$\text{ただし、} \gamma_{dyn} > -B / C \quad (4)$$

ここに、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$  は定数である。式(1)において、 $\psi$  は過圧密粘土の場合、繰返しせん断の初期において生じる負圧に対する補正值であって、ひずみ振幅との関係で次式であらわされる。

$$\psi = D + E \times \log \gamma_{dyn} \quad (4)$$

ここに、 $D$ 、 $E$  は定数である。

したがって式(1)、(2)、(3)、(4)により、累積する過剰間隙水圧は一様なひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  と繰返し回数  $n$  の関数としてあらわされる。

Fig. 1 は、繰返しせん断試験を粘土供試体に対して行って得られたひずみ振幅と過剰間隙水圧の関係で、繰返し回数が10、50、100、200回での結果を示している。図中の印は実測値であり、曲線は式(1)~(4)によって得た計算値である。

一方、繰返しせん断によって累積した過剰間隙水圧が消散すると間隙比は減少する。そのときの間隙比の変化に関しては、Fig. 2 に示したように  $\Delta e \sim \log \{1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo})\}$  の関係が繰返し回数や拘束圧によらずほぼ線形関係にあることが示されている。また Fig.

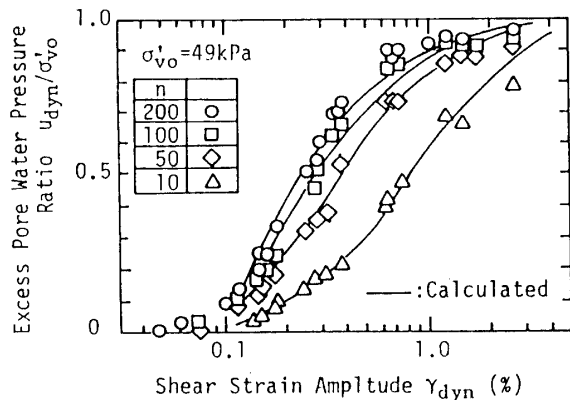


Fig. 1 Relationships between  $\gamma_{dyn}$  and  $u_{dyn} / \sigma'_{vo}$ .

2の直線の勾配は  $e \sim \log P$  関係における直線の勾配と一致する。そこで繰返しせん断によって累積した過剰間隙水圧の消散時の勾配を  $C_{dyn}$  とすると、間隙比の変化  $\Delta e$  は次式で与えられる。

$$\Delta e = -C_{dyn} \times \log \{1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo})\} \quad (5)$$

したがって、繰返しせん断によって生じる沈下ひずみ  $\epsilon_v$  は

$$\epsilon_v = C_{dyn} / (1 + e_0) \times \log \{1 / (1 - u_{dyn} / \sigma'_{vo})\} \quad (6)$$

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。また、式(5)および式(6)中の  $u_{dyn} / \sigma'_{vo}$  は式(1)で与えられることから、繰返しせん断後に生じる沈下ひずみも一様なひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  と繰返し回数  $n$  との関係であらわされる。

Fig. 3 は繰返しせん断に起因した沈下ひずみとせん断ひずみ振幅の関係を示したもので、図中の印は実測値であり、曲線は式(6)によって得られた計算値である。したがって式(6)より、任意の振幅のせん断ひずみが任意の回数作用した場合に生じる粘土地盤の沈下

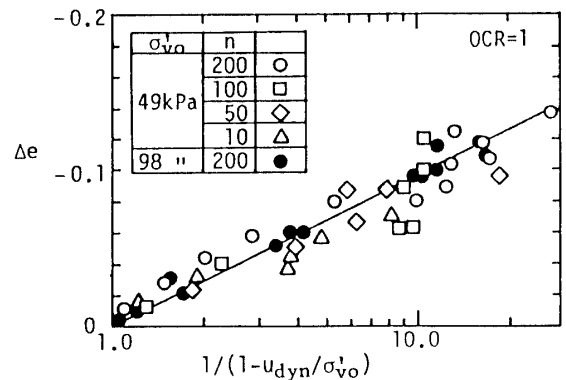


Fig. 2 The change of void ratio due to the dissipation of excess pore water pressure.

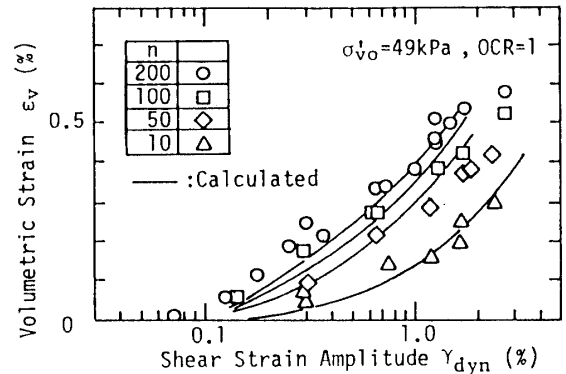


Fig. 3 Settlement in strain induced by cyclic shear strain.

ひずみの推定が可能となる。

### 3. ひずみ波形の不規則性の影響

軟弱地盤に地震力が作用した場合に生じる地盤の沈下量を推定するためには、ランダムなせん断ひずみ-時間関係を等価な一樣ひずみ振幅および等価な繰返し回数でおきかえる必要がある。既に、飽和砂の液状化の判定においては、ランダムなせん断応力を一樣振幅の応力で置き換える手法がいくつか提案されている<sup>1)2)5)</sup>が、ひずみ制御試験を対象とした手法はみられない。そこで、ここでは新たに実験を行って、ランダムなせん断ひずみ波と等価な一樣ひずみ振幅および等価な繰返し回数を求める方法について検討した。

#### 3.1 実験装置および実験方法

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る。せん断箱は Kjellman 型であり、供試体はゴムスリーブで包まれ、その周りにはアクリル製のリングが積み重ねられているので、供試体はせん断変形に対してはほぼ自由であるが、横方向の膨張は拘束される。試料は粉末状のカオリン粘土 ( $G_s = 2.718$ ,  $w_L = 53.5\%$ ,  $I_p = 25.0$ ) であり、これに初期含水比80%となるように脱気水を加え攪拌する。この含水比を保って24時間放置した後、約30分真空脱気を行い、せん断箱に詰める。そして圧密圧力  $\sigma'_{v0} = 49\text{kPa}$  で約22時間  $K_0$  圧密した後、Fig. 4 に示すような3種類の

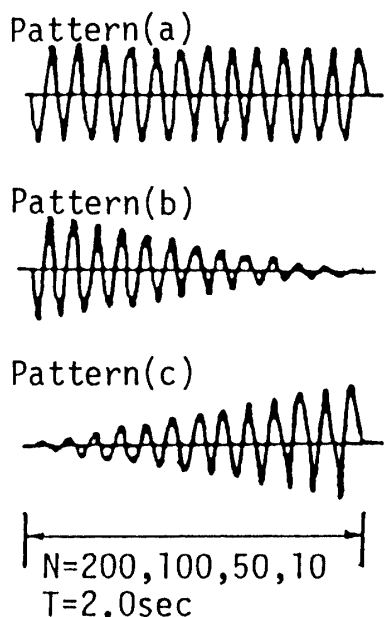


Fig. 4 Cyclic strain patterns.

繰返しひずみパターンで繰返しせん断試験を行った。すなわち、パターン(a)は先述した一樣ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  の波形であり、繰返し回数  $n$  は200, 100, 50, 30, 10として実験した。パターン(b)はせん断ひずみ振幅が所定の繰返し回数でゼロとなるように減衰する波形、パターン(c)は所定の繰返し回数でせん断ひずみ振幅がゼロから設定した値まで増加するものである。なお、パターン(b), (c)での繰返し回数(この場合は一樣振幅の繰返し回数と区別するため  $N$  とする)は、 $N = 200, 100, 50, 10$ とし、またいずれのパターンにおいても繰返しせん断の周期は  $T = 2.0\text{sec}$  とした。

#### 3.2 不規則なせん断ひずみ時刻歴と等価な一樣ひずみ振幅および繰返し回数

Fig. 5 はパターン(a)のひずみ波形によって得られた、せん断ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  と過剰間隙水圧比  $u_{dyn}/\sigma'_{v0}$  の関係を示しており、繰返し回数  $n = 200, 100, 50, 30, 10$  回での結果である。Fig. 6 はパターン(b)および(c)

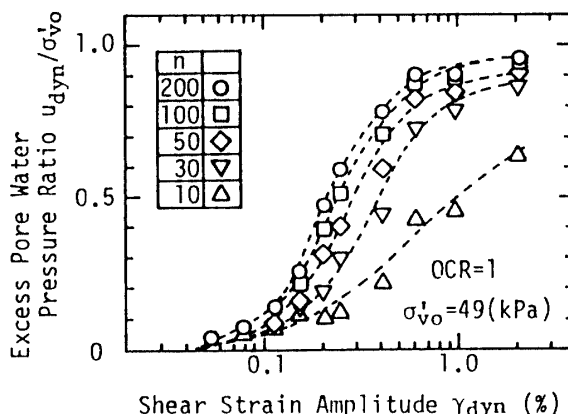


Fig. 5 Relationships between  $\gamma_{dyn}$  and  $u_{dyn}/\sigma'_{v0}$ .

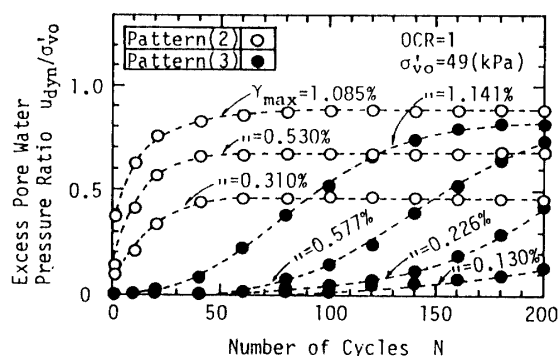


Fig. 6 Relationships between number of cycles  $N$  and  $u_{dyn}/\sigma'_{v0}$ .

によって得られた繰返し回数  $N$  と過剰間隙水圧比  $u_{dyn}/\sigma'_{vo}$  の関係を示している。同図は  $N=200$  として得られたものであり、パターン (b) と (c) では過剰間隙水圧の上昇過程に明らかに相違がみられる。しかしながら、Fig. 7 のように  $N$  サイクル後の過剰間隙水圧比  $u_{dyn}/\sigma'_{vo}$  を最大せん断ひずみ振幅  $\gamma_{max}$  との関係で整理すると、多少のばらつきはみられるものの累積する過剰間隙水圧の大きさに、波形の違いによる影響はほとんどみられない。そこで、ここではパターン (b) と (c) の波形での最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$  に着目し、パターン (b), (c) によって累積する過剰間隙水圧と、Fig. 5 での過剰間隙水圧を対応させることにより、パターン (b), (c) と等価な一樣ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  を求めた。そして、 $\gamma_{dyn}/\gamma_{max}$  と  $\gamma_{max}$  の関係を示したものが Fig. 8 である。Fig. 8 では  $n=30$  についての結果を示したが、Fig. 5 を用いることにより  $n=200, 100, 50, 10$  に対する関係も同様に求まる。Fig. 8 は等価な繰返し回数  $n=30$  に対する結果であるから、不規則波形の  $\gamma_{max}$  および繰返し回数  $N$  が求まれば、同図により等価な一樣ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  が求まる。ここでは、以上の結果の検証のため、実地震加速度を2階積分して得られる Fig. 9 で示される不規則変位波形を用いて変位制御繰返し単純せん断試験を行った。実験ではその最大せん断ひずみ

振幅を0.1%–2.0%の間で変化させ、繰返しせん断中に累積する過剰間隙水圧の大きさを求めた。一方、等価なひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  と繰返し回数  $n$  を Fig. 8 によって求め、これらの値をもとに不規則波形によって生じる過剰間隙水圧を推定した。その結果をまとめたものが Table 1 である。この表には等価な繰返し回数  $n$  を200, 100, 50とした場合の結果も示している。同表から、等価な繰返し回数  $n$  がいずれの場合にも、過剰間隙水圧の推定値は実測値より大きく、その傾向は  $n$  が大きいほど顕著になっている。しかし、等価な繰返し回数  $n$  として  $N$  と近い値を用いると誤差は小さくなる傾向がみられる。

#### 4. 地震に起因した粘土層の沈下予測手法

##### 4.1 沈下予測手法の概略

ここでは以上の実験結果にもとづいて地震に起因した粘土層の沈下予測手法を新たに考案した。その概略は次のとおりである。まず、地盤を  $n$  層に分割し、各層について弾性定数  $G$ 、密度  $\rho$  および減衰定数  $h$  を決定する。次に基盤層に所定の地震加速度を与え、地盤内の応答ひずみ量を応答解析によって求める。そして各層ごとに得られるランダムなひずみの時刻歴と等価

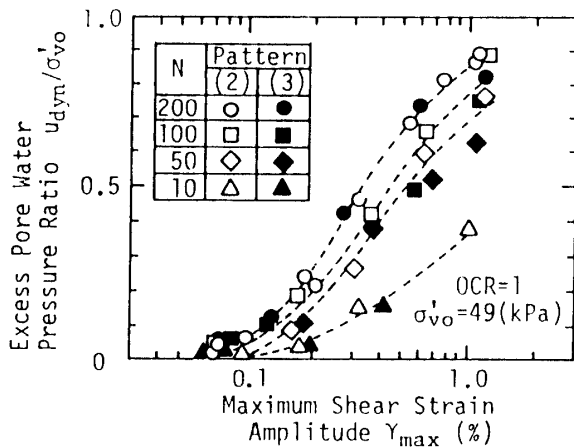


Fig. 7 Relationships between  $\gamma_{max}$  and  $u_{dyn}/\sigma'_{vo}$ .

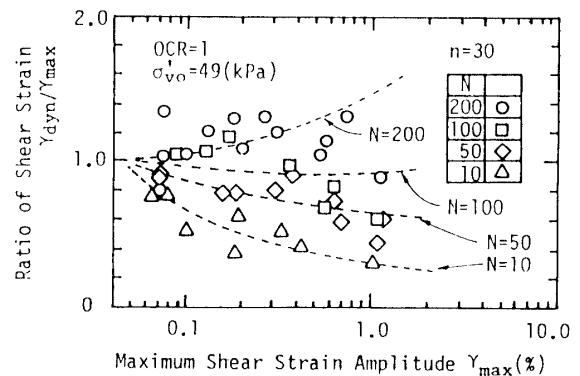


Fig. 8 Relationships between  $\gamma_{max}$  and shear strain ratio.

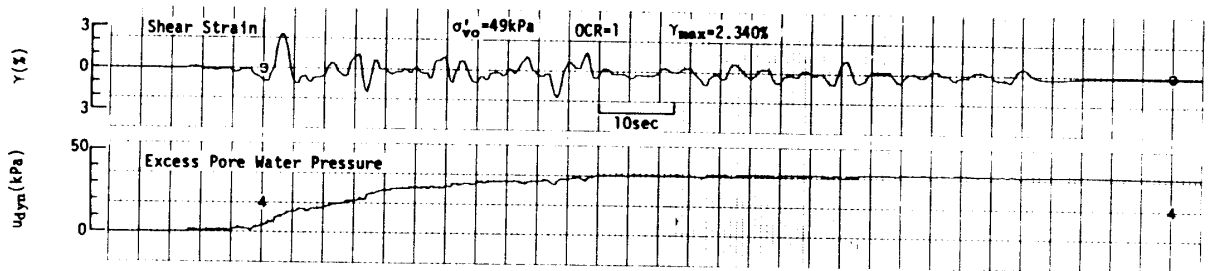


Fig. 9 Typical record of cyclic simple shear test.

Table 1 Comparison of the estimated results with observed results.

$\gamma_{max}$ (%)	N	n	$\gamma_{dyn}/\gamma_{max}$	$\gamma_{dyn}$ (%)	$u_{dyn}/\sigma'_{vo}$		error (%)
					(calculated)	(observed)	
0.200	11	200	0.383	0.077	—	0.063	—
		100	0.402	0.080	—		—
		50	0.477	0.095	0.074		17.0
		30	0.515	0.103	0.092		45.7
0.580	11	200	0.240	0.139	0.324	0.217	49.4
		100	0.255	0.148	0.303		39.8
		50	0.310	0.180	0.295		36.1
		30	0.360	0.209	0.266		22.4
1.105	16	200	0.225	0.249	0.571	0.380	50.3
		100	0.250	0.276	0.534		40.6
		50	0.285	0.315	0.474		24.7
		30	0.390	0.431	0.478		25.8
2.020	23	200	0.224	0.452	0.750	0.593	26.5
		100	0.258	0.521	0.725		22.2
		50	0.285	0.576	0.659		11.1
		30	0.420	0.848	0.680		14.7

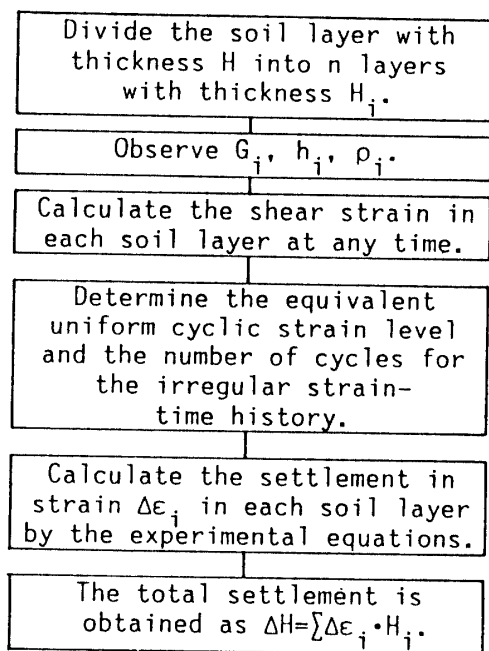


Fig.10 Flow chart.

な一様ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  および繰返し回数  $n$  を求める。得られた  $\gamma_{dyn}$  と  $n$  を先述の式 (6) に代入して各層の沈下ひずみを求め、各層毎に得られる沈下量の総和より粘土層全体の沈下量を求める。以上の過程をフロー

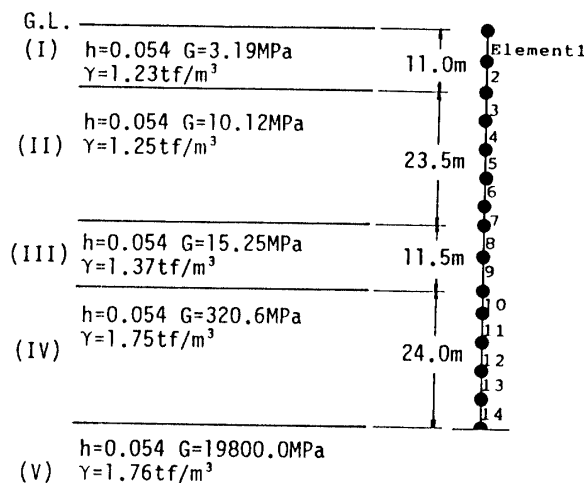


Fig.11 Soil profile and lumped mass idealization.

チャートに示したものが Fig.10である。

#### 4.2 モデル地盤の沈下量予測

モデル地盤としては、Fig.11に示したようなメキシコシティの湖床域の地盤を考え、地盤定数を図中のように設定した。またこの地盤を図中に示した15節点からなる集中質量系モデルであらわして応答計算を行った。なお地震加速度は第IV層の下部境界に入力させる

こととした。

計算で用いた地震波は1964年新潟地震波, 1978年宮城県沖地震波(石巻市の開北橋), 1968年十勝沖地震波(八戸), 1940年 ElCentro 地震波, 1952年タフト地震波および乱数を用いて発生させた模擬地震波である。

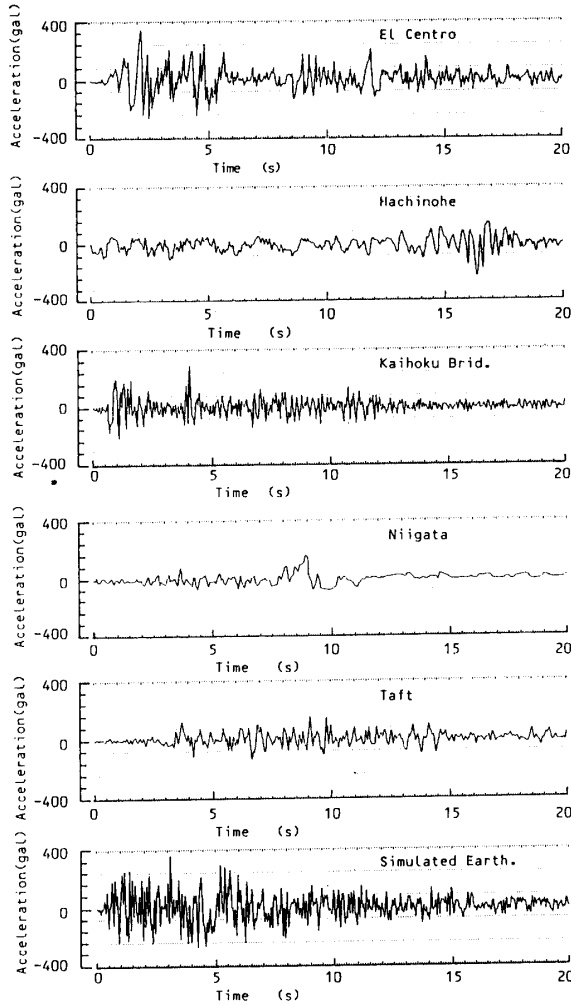


Fig.12 Accelerograms.

これら地震波について加速度波形を示したものが Fig.12であり, この内, 模擬地震波について変位応答スペクトルを示したものが Fig.13である。

そしてこのような地震波によってモデル地盤内に生じる応答変位量を先述した集中質量系モデルを適用した一次元応答解析によって求めた。なお, ここでは入力加速度の最大値はそれぞれの加速度波形に対して 34.4gal, 341.7gal として計算を行った。この内, 34.4 gal という値は, メキシコ地震の際に得られた加速度記象をもとに決めた。

まず, Fig.14に示すような応答計算によって得られる不規則なせん断ひずみの時刻歴をもとに, Fig. 8を用いて等価な一様ひずみ振幅  $\gamma_{avn}$  および等価な繰返し回数  $n$  を求め, その値から繰返しせん断後に累積する過剰間隙水圧の大きさを求めた。そしてその消散によって生じる沈下ひずみから粘土層の沈下量を計算した。その結果を示したものが Table 2 である。同表より, 最大加速度が 34.4gal のとき, 沈下量は ElCentro 地震波で 0.3cm, 新潟地震波で 3.0cm ということがわかる。

一方, 1985年9月19-20日の地震によってメキシコシティーの粘土層地帯では多くの被害が生じた。Jaime<sup>3)</sup>によると, 湖床域の一区画では1985年5月から地盤沈

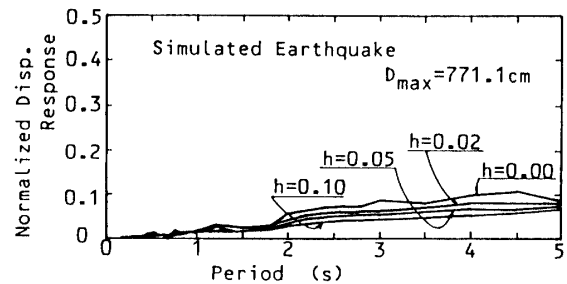


Fig.13 Normalized displacement response spectrum for simulated earthquake.

Table 2 Estimated settlement in the case of soil profile as shown in Fig.11.

			ElCentro (NS) 5/12/'40	Hachinohe (NS) 5/16/'68	Kaihoku Brid. (Tr) 6/12/'78	Niigata (EW) 6/16/'64	Taft (N21S) 7/21/'52	Simulated
Input Max. a = 34.4gal	h=0.054 n=30	$\Delta H(\text{cm})$	0.32	2.83	0.18	3.00	0.75	0.85
Input Max. a = 341.7gal	h=0.054 n=30	$\Delta H(\text{cm})$	52.52	48.77	25.98	63.25	41.47	49.67

下の測定が行われており、ちょうど測定から5ヶ月後に地震が発生した。そして、地震後も測定が続けられたということで、その結果を Fig.15に示す。図中の番号11-18は4階建の建造物の沈下であり、番号1-10は上載圧の影響がない場所での結果である。同図より、調査区域のうち上載圧の影響がない番号1-10では地震後0-3 cmの沈下が生じていることがわかる。Fig.11のモデル地盤は Jaime の報告書にある測定箇所と異なるものの、Table 2の値と近い結果が得られている。

一方、最大加速度を341.7galとした場合では、約50cmの沈下を生じることとなる。ただ、ここで示した沈下予測手法は、粘土層のみを対象としており、Fig.11での下層部のせん断剛性率が大きい箇所に対して適用するには多少問題も含まれる。しかし、ここで示した地盤を例にとると、下層部のGの大きい層の沈下を無視したとしても、沈下量の大きさに大きい誤差を生じない。

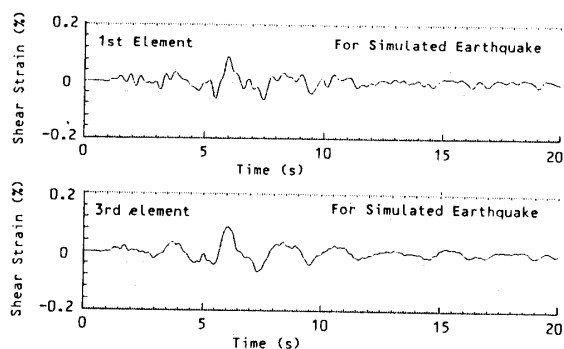


Fig.14 Time-histories of shear strain for the simulated earthquake.

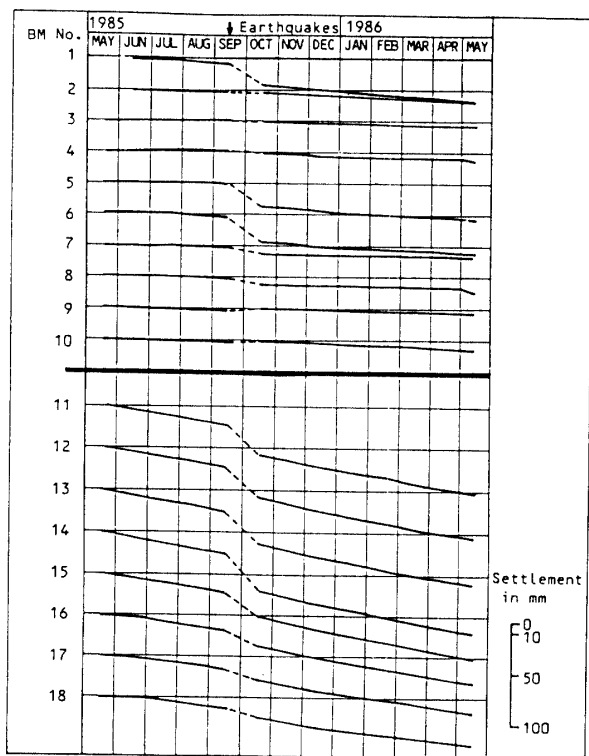


Fig.15 Leveling results in Mexico City (after Jaime, 1987).

## 5. 結 言

粘土層に地震力が作用することによって生じる沈下を予測する手法を示した。ここでは特にひずみ波形の不規則性の影響を考慮するために、新たに実験を行い、ランダムなひずみの時刻歴と等価な一様ひずみ振幅および繰返し回数を求める手法を考案し、それをもとに沈下の予測計算を行った。

その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) ひずみ波形のパターンが異なっても、最大ひずみ振幅および繰返し回数と同じであれば、繰返しせん断によって残留する過剰間隙水圧の大きさは等しい。
- 2) パターンが異なるひずみ波形について、その最大ひずみ振幅  $\gamma_{max}$  と一様ひずみ振幅  $\gamma_{dyn}$  の比  $\gamma_{dyn}/\gamma_{max}$  を  $\gamma_{max}$  との関係で整理した図を用いると、ランダムなひずみの時刻歴と等価な一様ひずみ振幅および繰返し回数を求めることができる。
- 3) メキシコシティのモデル地盤について、ここで示した予測計算によって得られた沈下量は約0-3cmであって、これは1985年のメキシコ地震での実測沈下量と近い値を示す。また、最大加速度340gal程度の地震が作用したときは約50cmの沈下を生じる。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたっては、宇部工業高等専門学校校長 大原資生氏から有益な御助言を頂いた。また、本研究で使用した地震波は、山口大学 山本哲朗氏から提供して頂いたものである。末筆ながら感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) Annaki M. and K. L. Lee, "Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics", Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT6, 549-564, 1977.
- 2) Ishihara K., "Pore Water Pressure Response and

- Liquefaction of Sand Deposits during Earthquakes", Proc. Int. Symp. on Dynamical Methods in Soil and Rock Mech., Plastic and Long-term Effects in Soils, edited by G. G. Balkema, 161-193, 1977.
- 3) Jaime A. P., M. P. Romo et al., "Seismic Induced Settlement in a Building", 8th PanAmerican Cong. on Soil Mech. and Found. Eng., 257-275, 1987.
  - 4) O-hara S. and Matsuda H., "Study on the Settlement of Saturated Clay Layer Induced by Cyclic Shear", Soils and Foundations, Vol.28, No.3, 103-113, 1988.
  - 5) Seed H.B., Idriss I. M., Makdisi F. and Banerjee N., "Representation of Irregular Stress Time Histories by Equivalent Uniform Stress Series in Liquefaction Analyses", Report No.EERC75-29, 1-13, 1975.
  - 6) 鈴木猛康 「動的応力履歴を受けた飽和粘性土の沈下挙動」, 応用地質, Vol.25-3, 21-31, 1984.
  - 7) Zeevaert L., "Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, Van Nostrand Rein-hold Company, 522-523, 1972.

(平成2年4月14日受理)