

## オンライン実験による液状化地盤の非線形振動解析

### ON-LINE EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SURFACE GROUND MOTION IN LIQUEFACTION PROCESS

片 田 敏 行\*・伯 野 元 彦\*\*

By Toshiyuki KATADA and Motohiko HAKUNO

#### 1. ま え が き

強震時において、地盤のひずみが大きくなると、地盤は非線形振動をする。したがって、強震時の地盤挙動を明らかにするためには、地震時における地盤の非線形振動特性を解析する必要がある。また、たとえば地中埋設管などの地中構造物の地震時挙動は周辺地盤の動きに完全に支配されることが知られているので<sup>1)</sup>、地中構造物の耐震性を知るためにも、地盤が破壊に近づくような大変形も含めて、なるべく正確に地盤の地震応答を知ることが必要である。

一般に、動的外力に対する構造物の非線形応答を解析する際には、その構造物の応力-ひずみの関係が必要となってくる。通常は、数式でモデル化した復元力特性を用いて数値解析される。このことは地震時における地盤の非線形振動解析においても同様である。土に関しても、数多くの応力-ひずみモデルが提案されている<sup>1)</sup>。

しかし、応力-ひずみ関係をモデル化して数値解析を行う方法では、応答が破壊近くまでに達すると、仮定したモデルに多くの誤差を含むことになってくる。このような困難を解消する方法として、計算機-動的試験機のオンライン・リアルタイム実験方法が著者の 1 人伯野<sup>2)</sup>によって初めて提案された。

この実験方法は構造部材の動的試験機から実際の復元力の提供を受けて、構造物の非線形応答計算を行うものである。この方法では復元力特性のモデル化を行わないので、復元力特性が非常に複雑な構造物の応答解析に適しているといえよう。また、復元力特性の数学モデルが提案されているものに対しても、そのモデルの妥当性が検討できる。

伯野はこの実験方法を「はり<sup>2)</sup>」と「杭基礎模型<sup>3)</sup>」に

適用して、その有効性を実証している。その後、この実験方法は建築の分野で盛んに行われている。

たとえば、

- ① 骨組構造<sup>4),5)</sup>
- ② 高力ボルト接合部<sup>6)</sup>
- ③ 鉄筋コンクリート柱<sup>7),8)</sup>
- ④ 鉄筋コンクリート造耐震壁<sup>9),10)</sup>

などに適用されている。さらに、最近では、建築研究所において、実物大の鉄筋コンクリートビルを破壊させる実験にまで使われるようになった。

本論文は、動的試験機としての土質振動三軸試験装置と、アナログ計算機を組み合わせたオンライン・リアルタイム実験方法を用いた地盤の非線形振動の解析手法を提案するものである。実験解析例として、本論文では液状化過程における砂層地盤の非線形振動を取り上げた。

#### 2. 解析方法

オンライン実験にあたっては、動的試験に用いる供試体が 1 個であるので、表層地盤を 1 自由度系でモデル化する必要がある(図-1 参照)。

もちろん、多層地盤の場合 1 自由度系として取り扱えるのかなど問題もある。多層の場合、非線形領域に入る層が 1 層のみの場合には、他の層の振動は計算機中で計算すればよいから簡単である。しかし、 $n$  層が非線形領域に入る場合には、 $n$  個の振動三軸試験装置を並列に計算機とオンライン結合させなければならず、大変な実験装置となってしまふ。本研究では第 1 段階として、地表 1 層のみとし、かつそのみが非線形(液状化)となるものとした。

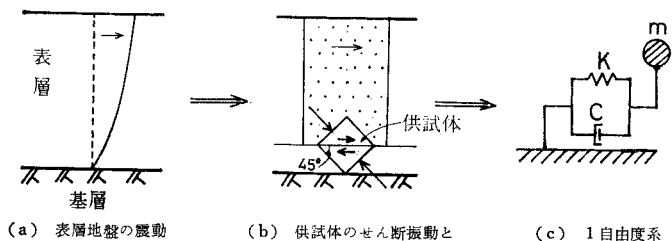
周知のように、1 自由度系の振動方程式は次式で与えられる。

##### 1) 線形の場合

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{y} \dots \dots \dots (1)$$

\* 正会員 工博 武蔵工業大学講師 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 東京大学地震研究所教授



(a) 表層地盤の震動 (b) 供試体のせん断振動と表層地盤の関係 (c) 1自由度系

図-1 表層地盤のモデル化

2) 非線形の場合

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \frac{1}{m}R(t, x) = -\ddot{y} \quad (2)$$

ここで、

$x$ : 変形量

$t$ : 時間

$\beta$ : 1自由度系の減衰定数

$\omega_0$ : 1自由度系の固有円振動数

$R(t, x)$ : 復元力

$\ddot{y}$ : 入力加速度

式(2)で与えられる非線形計算の場合には、復元力関数  $R(t, x)$  が必要となる。変形が塑性領域に入ると、もちろん「復元力-変形」の関係は直線では表わされず、複雑なヒステリシス・ループを描くようになる。一般に、これまでの非線形計算は数式でモデル化された復元力特性を用いて行われてきた。

しかしながら、土のような複雑な非線形特性を示す物質では、その特性を精度良く仮定することはなかなか難しい。したがって、本研究ではこの復元力特性を実験により求めつつ計算を実行しようとした。振動三軸試験装置の供試体に計算から得られる強制変位を加えて、その結果得られる反力を地盤の復元力と考えて、地盤の非線形振動解析を行うものである(図-2参照)。

このようにして、これまで非線形応答計算に際し適当にモデル化されていた復元力特性をより現実に近い形で利用することができる。

a) 式(2)の係数  $1/m$  の決定

加振開始時には線形振動を行うと思われるから、

$$k/m = \omega_0^2 \quad (3)$$

と表わせる。ここで、ばね定数は次式で与えられる。

$$k = (G/l)A \quad (4)$$

ただし、

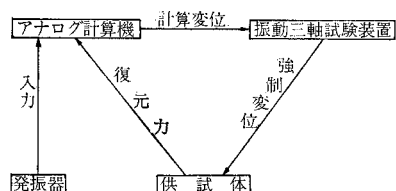


図-2 オンライン・リアルタイム実験のブロック図

$G$ : 地盤の剛性率  
 $l$ : 供試体の鉛直高さ  
 $A$ : 供試体の断面積

となる。

$$\therefore 1/m = \omega_0^2 \cdot l / (G \cdot A) \quad (5)$$

さらに、剛性率  $G$  が次のように与えられるものとするれば、

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (6)$$

ここで、

$\rho$ : 土の密度

$V_s$ : 地盤の  $S$  波伝播速度

式(5)は次のようになる。

$$1/m = \omega_0^2 \cdot l / (\rho \cdot V_s^2 \cdot A) \quad (7)$$

したがって、加振開始時には式(7)より求められた  $1/m$  の値を用いればよい。

b) 計算の剛性・ダンピングと実験の剛性・ダンピングの関係

オンライン実験方法では地盤のせん断振動の計算(アナログ計算機で行われる)には振動三軸試験によって得られる供試体の復元力が用いられる。この復元力は強制変位に対して位相遅れをもっており、ヒステリシスを描く。このヒステリシス・ループの面積が計算のダンピングとなり、ループの傾きが計算の剛性となる。

c) 計算変位と供試体変位の関係

図-2 に示されている計算変位とは地表面の変位を意味し、強制変位とは供試体に作用する載荷ピストンの変位を意味する。本論文で提案するオンライン実験では振動三軸試験により供試体に生じるせん断応力を地盤の復元力と考えているから、供試体は地盤中では水平方向に対して  $45^\circ$  の傾きをなす位置にあるとみなされる(図-1(b))。それゆえ、計算変位と供試体変位の経時的变化は同じでも、その値は異なる。

また、図-1 に示すように表層地盤は1自由度系にモデル化されている。地震時における表層の変位分布(図-3)に比較して、このモデル化はかなりの近似的なモデル化といえよう。したがって、オンライン実験によって計算される地盤変位の値は地震時における実際の地盤

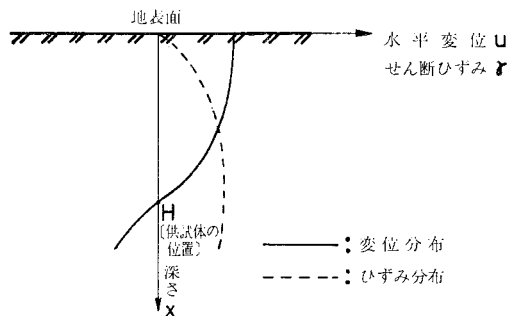


図-3 表層地盤の変位分布とひずみ分布

変位の値とは異なるものと思われる。

本研究では、地震時における表層地盤の深さ方向の変位分布あるいはひずみ分布をもとに、供試体の変位応答から地表面の変位を計算することにする。本研究で用いた算出方法については後に述べることにする。

### 3. 実験装置

実験装置は振動三軸試験装置、アナログ計算機、発振器、記録装置より成っている(写真-1 参照)。そのブロック図は図-2 に示されている。次に、各装置について説明する。

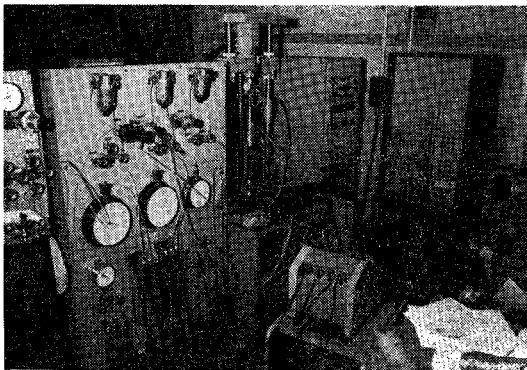


写真-1 実験装置の全景

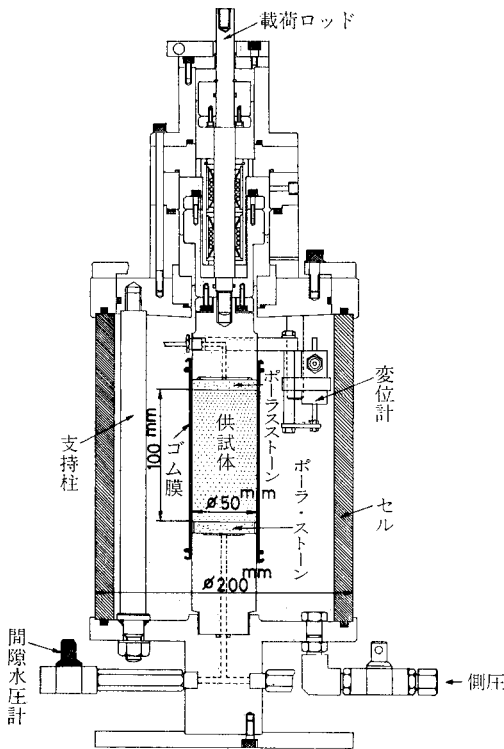


図-4 ピック・アップ配置の概略図

#### a) 振動三軸試験装置

実験に用いた振動三軸試験装置は誠研舎製のもので、以下にこの仕様を示す。

表-1 振動三軸試験装置の仕様

荷重能力	{ 動的荷重 500 kg(4.9 N) 静的荷重 500 kg(4.9 N) 静的荷重 ひずみ
駆動振幅	最大 $\pm 5$ mm (負荷 500 kg(4.9 N))
駆動周波数	最高 10 Hz
制御方式	力制御・変位制御

供試体には間隙水圧と変位を、荷重ピストンには変位を、油圧アクチュエータの先端には垂直荷重を検出するための計器が取り付けられている。ピック・アップの配置の概略図を図-4 に示す。

#### b) アナログ計算機

計算機としてデジタル計算機を用いる方が精度の点から好ましいが、費用が多くかかり、計算に要する時間が長くなり、リアルタイムでの計算が不可能となるなどの点から本研究ではアナログ計算機を用いた。

実験に用いたアナログ計算機の仕様を以下に示す。

表-2 アナログ計算機の仕様

製 造	横河電気(株)
演 算 速 度	低 速 型
演 算 電 圧	$\pm 10$ V
サークル・テスト	振幅誤差 $\pm 0.1$ [%/サイクル], 周波数誤差 $\pm 0.5$ [%]
ド リ フ ト	$5 \mu$ V/h

アナログ計算機では、実際の現象と同じ速さで解を得ることができるので振動三軸試験装置とのオンライン・リアルタイム実験が可能となるわけである。特に、土のように荷重の速度によって、液状化したりしなかったりするものでは、この実時間による実験が重要であろうと考えた。

#### c) 発振器

ランダム波の発生には、ランダム波発生装置を用いた。

### 4. 実験および考察

実験にあたって、モデル地盤の物性値を表-3のように仮定した。

表-3 モデル地盤の物性値

固有振動数	$f_0$	2 Hz
S波伝播速度	$V_s$	70 m/s
土の密度	$\rho$	1.8 t/m <sup>3</sup> (184 kg/m <sup>3</sup> )
減衰定数	$\beta$	0.02

ランダム入力波としては、10 Hz 以上の成分をカットしたものを用いた。また、実験には、乾燥砂、飽和砂および不飽和砂より成る供試体を用いた。供試体の寸法は直径が 5 cm、高さが 10 cm である。

#### a) 地表最大変位の算出方法

表層地盤を弾性体と仮定すれば、供試体変位から地表面の変位を求めることができる。以下に本研究で用いた算出方法について述べる。

地表面でのせん断応力が零であるという境界条件を考慮すれば、せん断振動している表層地盤の深さ  $x$  における水平変位  $u$  は、

$$u(x, t) = F\left(t - \frac{x}{V_s}\right) + F\left(t + \frac{x}{V_s}\right) \dots\dots\dots (8)$$

地震時に表層地盤の固有振動数  $f_0$  (2 Hz) を有する正弦波が最も卓越すると仮定して、

$$F\left(t \pm \frac{x}{V_s}\right) = A \sin 2\pi f_0 \left(t \pm \frac{x}{V_s}\right) \dots\dots\dots (9)$$

(複号同順)

とすれば、式 (8) は次式のようになる。

$$u(x, t) = A \sin 2\pi f_0 \left(t - \frac{x}{V_s}\right) + A \sin 2\pi f_0 \left(t + \frac{x}{V_s}\right) \dots\dots\dots (10)$$

このとき、表層地盤のせん断ひずみ  $r$  は次式で与えられる。

$$r = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{2\pi f_0}{V_s} A \left\{ -\cos 2\pi f_0 \left(t - \frac{x}{V_s}\right) + \cos 2\pi f_0 \left(t + \frac{x}{V_s}\right) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

深さ  $H$  のところに振動三軸試験の供試体があると想定すると、深さ  $H$  における地盤のせん断ひずみ  $r_H$  は

$$r_H = \frac{2\pi f_0}{V_s} A \left\{ -\cos 2\pi f_0 \left(t - \frac{H}{V_s}\right) + \cos 2\pi f_0 \left(t + \frac{H}{V_s}\right) \right\} \dots\dots\dots (12)$$

また、地表面の水平変位  $u_s$  は式 (10) より  $x=0$  として、

$$u_s = 2A \sin 2\pi f_0 t \dots\dots\dots (13)$$

振動三軸試験で得られる供試体の最大せん断ひずみ  $r_{max}'$  と表層地盤の深さ  $H$  に生じる最大せん断ひずみが等しいと仮定する。また、式 (12) の右辺において、

$$-\cos 2\pi f_0 \left(t - \frac{H}{V_s}\right) + \cos 2\pi f_0 \left(t + \frac{H}{V_s}\right) = -2 \sin 2\pi f_0 t \sin \frac{2\pi f_0 H}{V_s}$$

ここで、深さ  $H$  が地盤の固有振動数  $f_0 = V_s/4H$  なる関係を満足するものとするれば、

$$\sin \frac{2\pi f_0 H}{V_s} = 1$$

であるから、式 (12) は、

$$|r_H| \leq 2 \frac{2\pi f_0}{V_s} A$$

となり、

$$r_{max}' = \frac{4\pi f_0}{V_s} A \dots\dots\dots (14)$$

$r_{max}'$  の値は振動三軸試験より既知であるから、式 (14) より  $A$  の値が求まる。すなわち、

$$A = \frac{V_s}{4\pi f_0} r_{max}' \dots\dots\dots (15)$$

式 (15) を式 (13) に代入すれば、地表面の変位  $u_s$  は、

$$u_s = \frac{V_s}{2\pi f_0} r_{max}' \sin 2\pi f_0 t \dots\dots\dots (16)$$

式 (16) より地表面の水平変位の最大値  $u_{smax}$  は次式で与えられる。

$$u_{smax} = \frac{V_s}{2\pi f_0} r_{max}' \dots\dots\dots (17)$$

表-3 より  $V_s = 70$  m/s,  $f_0 = 2$  Hz であるから、

$$u_{smax} = 557 r_{max}' \dots\dots\dots (18)$$

以上のように、式 (18) を用いれば、供試体の最大せん断ひずみ  $r_{max}'$  より近似的ではあるが地表面の水平変位を求めることができる。

**b) 地表最大速度と地表最大加速度の算出方法**

式 (16) より地表速度  $v_s$ 、地表加速度  $a_s$  は次式で与えられる。

$$v_s = \frac{du_s}{dt} = V_s r_{max}' \cos 2\pi f_0 t \dots\dots\dots (19)$$

$$a_s = \frac{d^2u_s}{dt^2} = -2\pi f_0 V_s r_{max}' \sin 2\pi f_0 t \dots\dots\dots (20)$$

したがって、地表面の最大速度  $v_{smax}$ 、最大加速度  $a_{smax}$  は、

$$\left\{ \begin{aligned} v_{smax} &= V_s r_{max}' \dots\dots\dots (21) \\ a_{smax} &= 2\pi f_0 V_s r_{max}' \dots\dots\dots (22) \end{aligned} \right.$$

式 (21), (22) における  $V_s, f_0$  の値は表-3 で与えられているから、振動三軸試験より  $r_{max}'$  の値が明らかになれば、近似的に地表速度と地表加速度の値を求めることが可能となる。

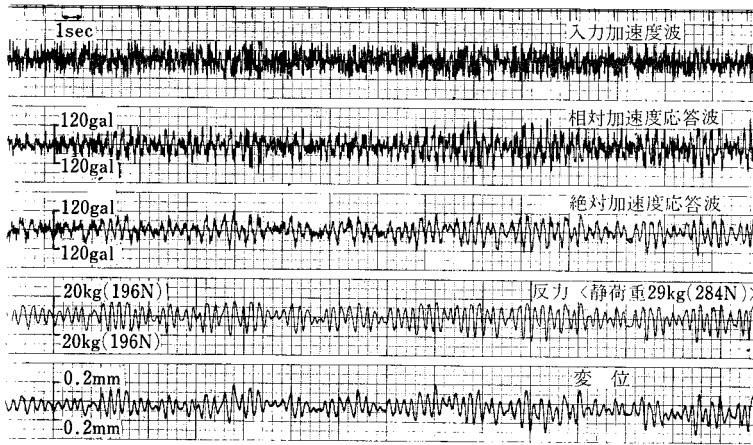
**(1) 地盤の加速度応答特性**

**a) 乾燥砂**

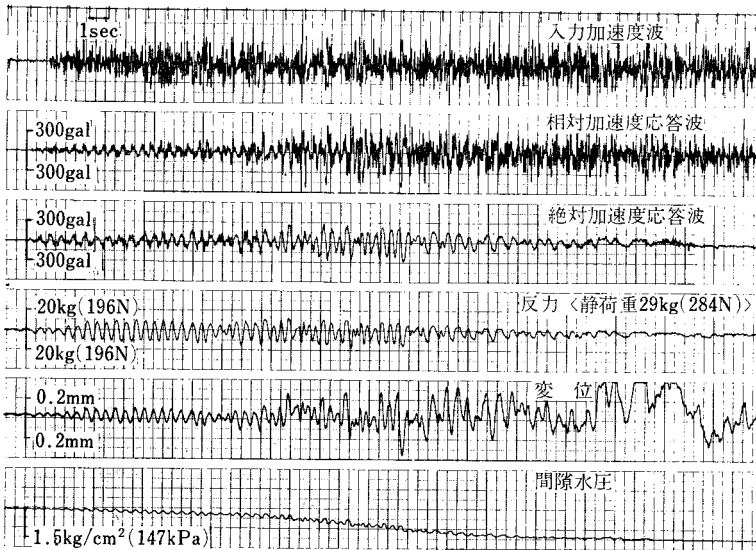
乾燥砂供試体 (相対密度 29%) による実験結果を図-5 (a) に示す。地盤の応答には初めに想定した固有振動数の影響が出るはずである。図-5 (a) をみると、10 Hz までの成分を含むランダム入力波に対して、供試体の応答加速度波形は周期約 0.5 秒の成分波が卓越しているのがわかる。これは、想定した地盤の固有振動周期を示している。そして、供試体が乾燥砂であったので破壊が起こりにくく、剛性がある限度以下には低下しなかったためか、応答加速度波形の約 0.5 秒の卓越周期は、振動の全期間にわたってほとんど変わらないことがわかる。

**b) 飽和砂**

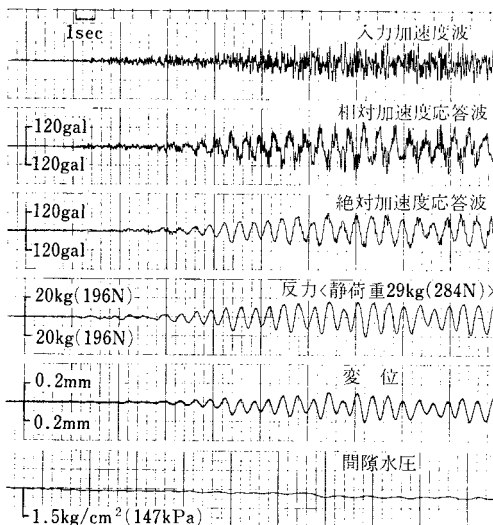
次に、飽和な供試体を加振させた場合の実験結果を図-5 (b) に示す。図-5 (b) をみてわかるように、加振により間隙水圧が上昇して供試体の液状化が始まると反



(a) 乾燥砂  $D_r=29\%$



(b) 飽和砂  $D_r=36\%$



(c) 不飽和砂  $D_r=35\%$

図-5 オンライン実験結果

力が減少していく。さらに、供試体が完全に液状化すると、変位振幅は大きくなり不安定となった。このとき応答加速度波の波形特性は次のような変化を示す。

加振直後には地盤の固有周期である0.5秒の波が卓越している。しかし間隙水圧が側圧 [1.5 kg/cm<sup>2</sup>(147 kPa)] の約1/2を超えると反力は減少していき、絶対応答加速度は徐々に零となっていく。このことは反力  $R(t, x)=0$  のとき、もし、 $\beta \cong 0.0$  ならば式(2)より、

$$\ddot{x} = -\ddot{y}$$

となり、絶対応答加速度  $\ddot{x} + \ddot{y} \cong 0$  となることによって理解できる。

e) 不飽和砂

不飽和な供試体を加振させた場合の実験結果を図-5(c)に示す。不飽和な供試体は二酸化炭素を使用せずに、脱気水を供試体に直接注入して、供試体を湿潤させて作製した。図-5(c)をみてもわかるように、加振により間隙水圧が上昇して供試体が軟化すると応答加速度波形に約1秒の長周期成分が卓越してくる。しかし、さらに加振させても、これ以上の変化はみられなかった。不飽和なので供試体は完全には液状化しなかったのであろう。間隙水圧は測圧 [1.5 kg/cm<sup>2</sup>(147 kPa)] の約1/2程度までしか上昇しなかった。

以上のように、オンライン実験方法を用いることによって、液状化過程における砂層地盤の非線形振動を解析できるのがわかる。

(2) 地盤の復元力特性

ランダム波を1自由度系への入力加速度波として供試体を加振させて得られた反力-変位曲線を図-6(a), (b), (c)に示す。

a) 乾燥砂

図-6(a)は乾燥砂に対するオンライン実験(図-5(a))より求

められた反力-変位曲線である。ほぼヒステリシスをもった直線的な関係とみなせるのではなからうか。

### b) 飽和砂

図-6 (b) は飽和砂に対するオンライン実験 (図-5

(b)) より求められた反力-変位曲線である。加振によって供試体が軟化、液状化につれて、ループの形状は図-7(a), (b), (c), (d) に示すような複雑な変化をする。

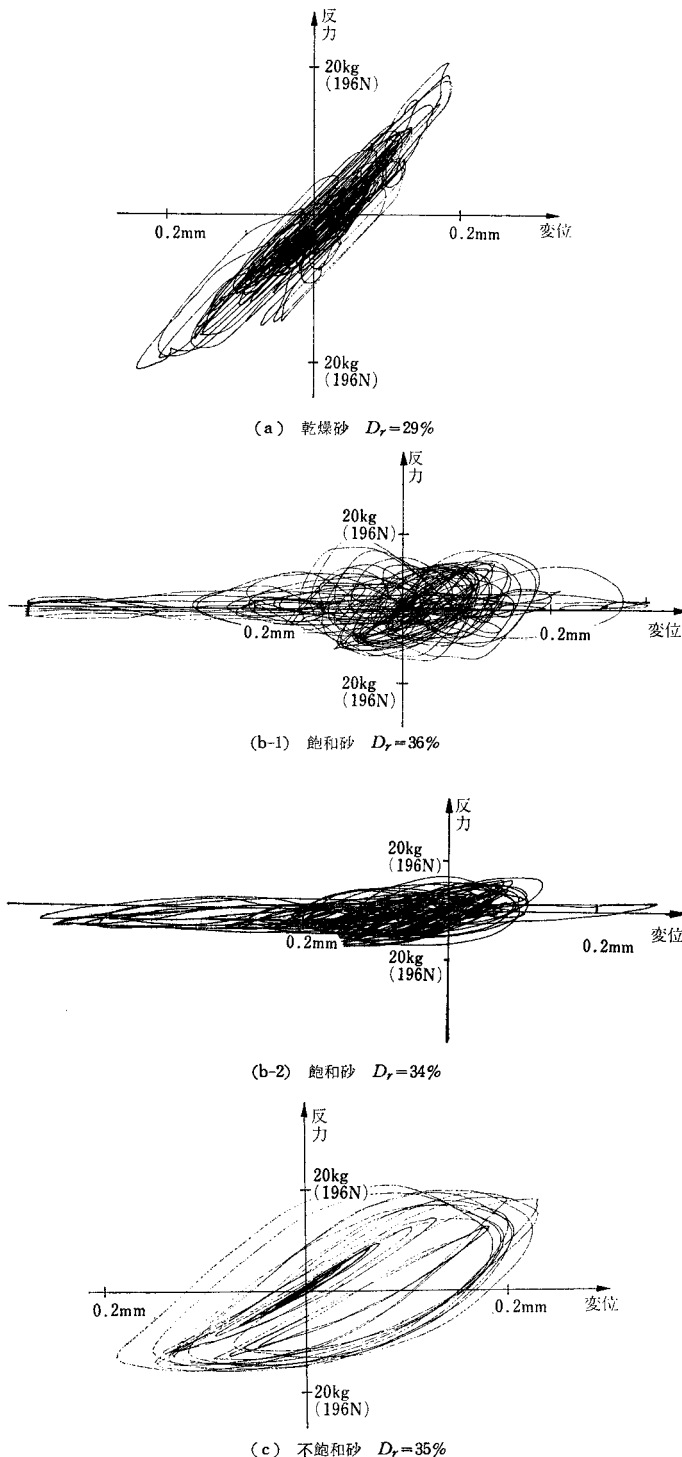


図-6 オンライン実験によって得られた反力-変位曲線

最初は乾燥砂の場合と同様にヒステリシスをもっているが、一定の剛さで振動する。時間の経過とともに、ヒステリシス・ループがふくらみ、ほとんど楕円形とも見られるような状態となる。この状態では、変形の大きい領域では変形の小さいところにおけるより、復元力はむしろ低下しているということを示している (図-7(b), (c))。

通常のバイリニア・モデルは図-8のように変形が進んでも復元力は上昇していくが、飽和砂の場合には図-9のようになったことを示している。

さらに、振動の回数が進み、液状化が進むと図-7(d)のように復元力がほとんどなくなる。その結果、大変形を生じることになる。ただし、この大変形は地盤でいえば地表と液状化しない基盤との相対変位を示しているのであって、地表の加速度はほとんど零である。

### c) 不飽和砂

図-6 (c) は不飽和砂に対するオンライン実験 (図-5 (c)) より求められた反力-変位曲線である。加振直後にはヒステリシスをもった線形振動をしている。その後、供試体が軟化につれて、急激に大きなループを描く。しかし、本実験で用いた作製方法による不飽和供試体では、これ以上の軟化・液状化はしなかった。

また、ループの形状はひずみ硬化型を示しているようにもみえるが、それほど明瞭ではない。さらに、ループの傾きはほとんど低下しなかった。

## 5. あとがき

振動三軸試験装置とアナログ計算機を組み合わせたオンライン・リアルタイム実験方法を用いた地盤の非線形振動解析手法を提案した。この解析手法を用いて、液状化過程における砂層地盤の非線形振動特性の解析を試みた。以下に得ら

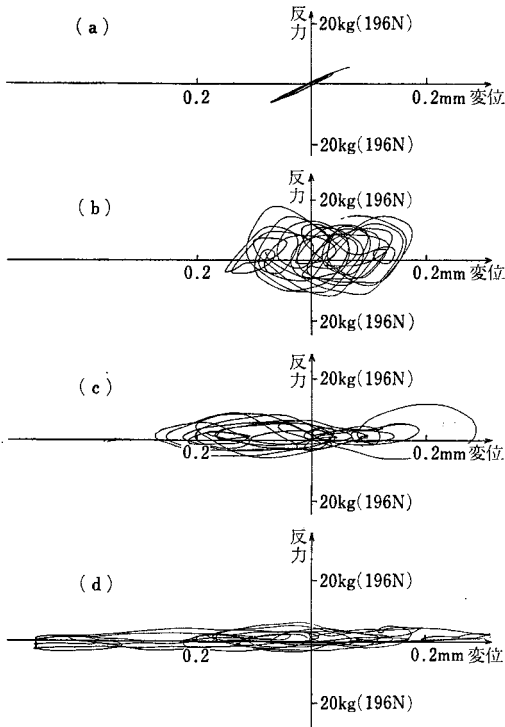


図-7 液状化過程における飽和砂の復元力特性の変化

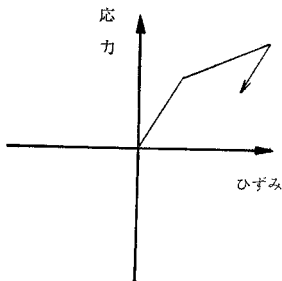


図-8 バイリニア・モデル

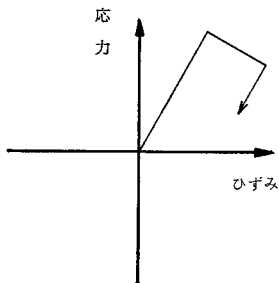


図-9 オンライン実験より得られた履歴ループの特徴

れた結論を述べる。

(1) オンライン・リアルタイム実験方法の適用性について、次のような結論を得た。

- ① 動的試験機として振動三軸試験装置を、計算機と

してアナログ計算機を用いたオンライン・リアルタイム実験装置を開発した。

- ② この実験装置は飽和砂の完全液状化状態まで、正常に作動することがわかった。
- ③ その結果、この実験方法により実復元力を用いて、液状化過程における地盤の非線形振動解析が可能となった。

(2) オンライン・リアルタイム実験方法によって、地盤の非線形振動解析を行った結果、次のようなことがわかった。

- ① 供試体が乾燥砂の場合には、加振中に地盤の加速度応答や変位応答において、応答特性には、ほとんど変化が見られなかった。すなわち、加振前に仮定した地盤の固有周期で振動していた。これは、供試体が乾燥砂であったので、剛性がそれほど低下しなかったためである。
- ② 供試体が飽和砂の場合には、供試体が液状化すると、反力は減少しほとんど零に近くなる。また、応答変位は振幅が大きくなり不安定となる。加振直後において応答加速度波形には地盤の固有周期が見られるが、液状化すると絶対加速度応答は零となる。これは液状化によって地盤応力が零になり、基盤から入射した地震波が地表に伝わり得ないことを示している。
- ③ これに対して、供試体が不飽和の場合には、加振によって間隙水圧が上昇すると、応答加速度波に長周期成分が卓越し、その振幅も大きくなった。本実験で行った作製方法による不飽和供試体を用いる限り、この大きな応答加速度振幅は加振の継続中においてわたってみられた。

(3) 地盤の反力-変位曲線については次のようなことがわかった。

- ① 供試体が乾燥砂の場合にはバイリニア的なループを描く。加振中にループの傾きが低下してくることはなかった。
- ② 供試体が飽和砂の場合、液状化の程度によって、反力-変位曲線は大きく分けて、3つの段階に分けられた。すなわち、④ 加振直後の線形振動における直線、⑤ 急激にヒステリシス・ループの面積が大きくなる段階、⑥ 剛性がなくなり、ほぼ変位のみヒステリシス、の3段階に分けられた。
- ③ 供試体が不飽和の場合には、加振直後にはほぼ直線であるが、間隙水圧が上昇するにつれて、急激に大きなループを描く。しかし、ループの傾きはそれほど低下しない。

(4) 将来の研究について

本研究はその入口によりやく立ったという段階であっ

て、今後次のような歩みを進めていかなければならないと思っている。

① 実験装置と計算機の改良：

本研究は土の動的試験機としては、振動三軸試験機を、計算機としてはアナログ計算機を使用した。今後これを動的ねじりせん断試験機など土の境界条件をより満足させる試験機とデジタル計算機に変更することも考えられる。その方が精度が向上することであろうからである。

② 各種の土に関する実験：

今回の研究では、砂について行ったが、これを海底軟弱粘土など現在、強い地震の場合に、どんな挙動をするのかはっきりとは解明されていないものに対象を広げていくことも耐震工学上、是非必要なことと思う。

③ 多層地盤についての取り扱い：

本研究では、複雑化を避けるため1層地盤のみを取り扱ったが、今後は多層地盤についても研究を進めなければならない。

謝 辞：本研究は、文部省科学研究費の補助によって行ったことを記して感謝いたします。

実験の一部は、卒業研究として、武蔵工業大学の横山雅一君（現・鉄建建設）に手伝ってもらいました。また、原稿の清書と図表の整理にあたっては武蔵工業大学院生の古川禎一君に手伝ってもらいました。深謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土と構造物の動的相互作用，p. 16，土質工学会，昭和48年10月。
- 2) 伯野元彦・四俣正俊・原 司：計算機に制御されたはりの動的破壊実験，土木学会論文報告集，No. 171，pp. 1～9，1969.11。
- 3) 伯野元彦・横山功一・佐藤安一郎：模型杭基礎の復元力特性に関するオンライン・リアルタイム実験，土木学会論文報告集，No. 200，pp. 85～90，1972.4。
- 4) K. Takanashi, K. Udagawa and H. Tanaka : A Simulation of Earthquake Response of Steel Buildings, 6-W.C.E.E. New-Delhi, 1977.1.
- 5) 高梨晃一・宇田川邦明・関松太郎・田中 尚：電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の地震時崩壊の解析，東京大学生産技術研究所生産研究，Vol. 26，No. 11，1974.11。
- 6) 高梨晃一・宇田川邦明・田中 尚：地震時におけるボルト接合の挙動，東京大学生産技術研究所生産研究，Vol. 26，No. 2，1973.2。
- 7) 岡田恒男・関松太郎・伊藤秀夫：鉄筋コンクリート部材の復元力特性，東京大学生産技術研究所生産研究，Vol. 25，No. 2，1973.2。
- 8) 関松太郎・岡田恒男：鉄筋コンクリート部材の復元力特性（第2報），東京大学生産技術研究所生産研究，Vol. 26，No. 2，1974.2。
- 9) 久野雅祥・岡田恒男：耐震壁をもつ低層鉄筋コンクリート建物の地震応答-1 質点壁フレーム並列系の応答，日本建築学会関東支部研究報告集，1975。
- 10) 久野雅祥・岡田恒男・関松太郎：鉄筋コンクリート立体模型の振動破壊実験-その1-1層純ラーメン，日本建築学会大会学術講演梗概集，1976。
- 11) たとえば，片田敏行・伯野元彦：液状化過程における地中構造物の動的挙動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，No. 306，pp. 1～10，1981.2。
- 12) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，p. 239。

(1980.5.30・受付)