

室内試験による地盤反力係数の解析

A HYBRID EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DYNAMIC K -VALUE IN LABORATORY

片田敏行*・佐藤祐明**

By Toshiyuki KATADA and Hiroaki SATO

In a dynamic response analysis of structure-ground system, we often use spring-mass model. A propagation characteristics of an earthquake force between structure and surface ground is shown in dynamic K -value. We generally obtained K -value from the results of vibration test of structure or its model. But the vibration test is very expensive and offhand.

Therefore, this paper suggests an analytical method of a dynamic K -value in a laboratory based on a hybrid experimental method. A hybrid experimental apparatus for analysis of K -value is composed of micro-computer and dynamic tester. We calculate the dynamic behavior of structure by a micro-computer and obtain an earthquake force due to the relative displacement between structure and ground by a dynamic tester.

As an analytical case, we analyzed the dynamic K -value of between surface ground and structure during an earthquake.

Keywords: hybrid experiment, dynamic K -value, dynamic tester, micro-computer

1. ま え が き

地盤中に存在する地中構造物や地盤中に基礎を有する構造物の地震時挙動を解析する際に問題となるのは表層地盤と構造物が一体となって動くかどうかである。一体となって動くときには地盤の応答と構造物基礎の応答は等しいとして、構造物の応答解析が行われる。したがって、表層地盤の挙動を求め、これを入力として構造物に作用させて、構造物に生じる応力を算出し、耐震設計を行えばよい²⁾。

これに対して、地盤と構造物が別々の挙動が予想される場合には、いわゆる“動的相互作用”が生じるのでより詳細な解析が必要とされる^{1), 4), 5)}。実際に地震観測を行い動的相互作用の影響も明らかにする試みもなされている^{6), 7)}。

本研究の解析対象としている地盤-構造物系の振動現象のような力学問題は、

- 地盤の挙動
- 地盤から構造物への地震力の伝達
- 構造物の振動

の3点に分けて考えることができる。

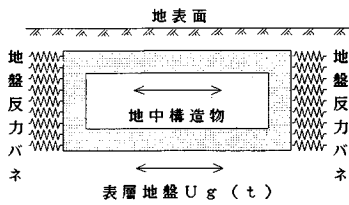
表層地盤は強震時に非線形振動をすると考えられる。現在ではさまざまな種類の解析法と土の復元力関数モデルが提案され、液状化する飽和砂地盤の非線形振動解析が可能にまでなっている。構造物も同様に非線形振動解析が可能である。

これに対して、地盤と構造物の間では強震時に剝離や滑動などが生じ、このため、挙動が複雑となる。地盤-構造物系の動的解析において両者の間をばねで表現した力学モデル(図-1)が使われることが多い⁹⁾。このばねの特性は地盤反力係数で表わされる。このパラメータは地盤が構造物をどの程度の拘束力で支持し、その結果どの程度の地震動エネルギーが構造物に入力するかを決定する重要なパラメータである。したがって、このばねを精度よく解析し、その特性を明らかにする必要がある。

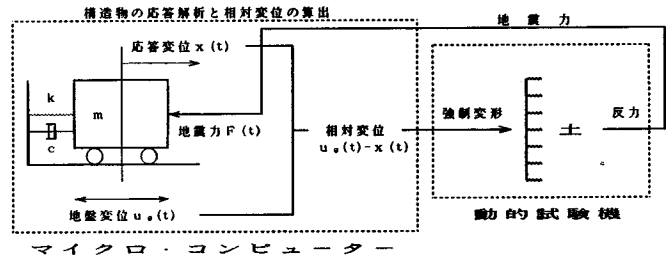
この地盤反力特性については、さまざまな観点から、その特性が解析されている。たとえば、地震時の構造物の挙動や構造物の起振実験の結果から逆解析されて、求められている^{6), 7), 10)}。あるいは、模型地盤に構造物模型を埋設し、これを加振して、その振動性状から地盤反力特性を推定している^{8), 13)}。飽和砂の液状化過程における地盤反力特性も同様である¹²⁾。これらの模型加振実験で

* 正会員 工博 武蔵工業大学助教授 土木工学科
(〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

** 飛鳥建設(株)(〒102 千代田区三番町2番地)



図一 地盤-構造物系の力学モデル



図二 ハイブリッド実験手法に基づく地盤反力係数の算出方法の概念図

は模型地盤あるいは構造物模型を変位制御あるいは荷重制御で一方的に振動させている。これに対して、地盤あるいは構造物の動特性を考慮したハイブリッド実験による解析も行われている^{18),19)}。

これらの研究成果により、地震時における地盤反力の非線形な特性が明らかになってきている。さらに、地盤-構造物系の振動解析に必要な地盤反力係数の概略値が推定できるようになってきた。しかし、これらの解析では模型地盤を用いているので、構造物模型と接する地盤は一様で均質な場合が多い。また、野外で構造物模型を加振するにしても、実験装置が大がかりになり、人手も掛かる。それゆえ、現実に出会うさまざまな種類の土に対して、手軽に解析が行いにくい。

そこで、本研究ではハイブリッド実験手法に基づく室内実験により地盤反力係数の値を求める方法を提案する。同時に解析例を示し、その実用性を検討する。室内実験で解析できれば、手軽にさまざまな種類の土とさまざまな動特性を有する構造物間の地盤反力係数が明らかにできる。

地盤反力特性は基礎の形状やその大きさに支配される。しかし、構造物の動的挙動を1自由度系で表現することにより、この複雑な地盤反力特性の概略を室内実験で解析が可能となるように試みるものである。ハイブリッド実験解析では表層地盤-構造物系の振動系を計算機と動的試験機で表現している。それゆえ、ハイブリッド実験解析が可能となれば表層地盤と構造物の固有周期および入力波の周波数特性などを同時に考慮した解析が可能となる。地震動が弱いと表層地盤と構造物の相対変位は小さい。しかし、強震時には表層地盤と構造物が異なった動きをする可能性が生じる。このため、表層地盤と構造物の両方の動特性を考慮したハイブリッド実験解析が必要である。

なお、解析対象とする地盤反力係数はせん断振動する地盤と構造物を結ぶ水平方向のばねとする。

2. ハイブリッド実験解析のための動的相互作用の力学モデル

(1) モデル化の考え方

地盤反力の特性は地盤と構造物の両方の動特性の影響を受ける。したがって、この点を考慮して解析する必要がある。そこで、本研究では、計算機と動的試験機より構成されるハイブリッド実験装置を用いて、地盤反力係数を含む地盤-構造物系の振動と力学的に等価な振動系を室内で再現する(図-2)。

その解析結果を用いて、ばね特性を明らかにする。構造物の動的挙動は1次の固有振動のみを考慮して、1自由度系の線形振動で表わされるものとした。この応答計算はマイクロ・コンピューターで行う。実際の構造物は多自由度系で、しかも非線形振動をする可能性がある。しかし、今回は簡略化のため、1次の振動モードを考慮することとし、1自由度系で表現した。

地盤反力は動的試験機より求め、地震力としてオンラインでマイコンに送る。すなわち、地盤変位から応答計算で算出された構造物変位を減じて、相対変位を求める。これを動的試験機に送り、土よりの供試体を強制変形させ、その反力を求める。これを構造物に作用する地震力としてマイコンに送り、次のステップの応答計算に用いる。

入力変位波はあらかじめ基盤振動に対する表層地盤の応答変位を求め、これを用いた。また、地盤反力特性の非線形性を詳しく考察するために、正弦波も入力変位波として用いている。

(2) ハイブリッド実験解析における挙動と実挙動の整合

ハイブリッド実験解析では計算機と試験機を結合して、実現象と力学的に等価なモデルを構成する必要がある。図-1に示すように地盤変位 u_g は地盤反力ばねを介して地震力 $F(t)$ として構造物に作用する。このような地震力 $F(t)$ が作用する1自由度系の振動方程式は次式によって表わされる。

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = F(t)/M \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $F(t)$ は構造物全体に作用する地震力であり、 M は構造物の全質量である。

しかし、動的試験機で用いる土の供試体は直径が5 cm であるから、求められる反力の受圧面積は19.63 cm²となる。それゆえ、動的試験機より計算機に取り入れる地震力は受圧面積19.63 cm²に対する力である。そこで、この地震力を $R(t)$ とし、式(1)と同じ固有円振動数 ω_0 、減衰定数 β を有する1自由度系の振動方程式で構造物の挙動を表わす。この方程式は次式で表わされる。

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = R(t)/m \dots\dots\dots(2)$$

式(1)と式(2)が同じ応答をするためには、固有円振動数 ω_0 と減衰定数 β が同じ値ならば、それぞれの右辺が互いに等しくなければならない。すなわち、

$$\frac{F(t)}{M} = \frac{R(t)}{m} \dots\dots\dots(3)$$

また、実挙動とハイブリッド解析で、単位面積当たりに作用する地震力が同じとすれば、

$$\frac{F(t)}{A} = \frac{R(t)}{a} \dots\dots\dots(4)$$

となる。この式(3)と式(4)より、次式が得られる。

$$\frac{M}{m} = \frac{A}{a} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 A ：構造物における地震力の受圧面積
 a ：供試体の断面積

この結果、式(2)の右辺における $1/m$ は式(5)より求められる。 M と A の値は解析対象とする構造物の質量と地震力の受圧面積より求めればよい。

3. 解析システムの構築

(1) 解析システムの概要と解析装置の構成

2. (1) で述べた考え方にに基づき、解析装置を構成すれば、図-3 のようになる。計算機(本研究ではマイコン NEC 9801 VM を用いている)では構造物の挙動が応答計算され、地盤との相対変位が求められる。動的試験機では土の供試体は地盤と構造物の相対変位で強制変形され、その反力として地震力が求められる。

(2) 解析手順

解析の手順をフローチャートで図-4 に示す。まず、地盤変位 $u_g(t)$ (本研究では正弦波と不規則波を用いている) と構造物の応答変位 $x(t)$ の相対変位を求める。次に、動的試験機で土を強制変形させて、その反力を構造物に作用する地震力と考えて、応答変位を計算する。この応答変位と地盤変位との相対変位を求めて、次ステップの構造物の応答変位を求める。これを繰り返して解析を行う。

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = R(t)/m$$

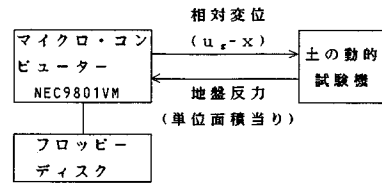


図-3 解析装置の構成

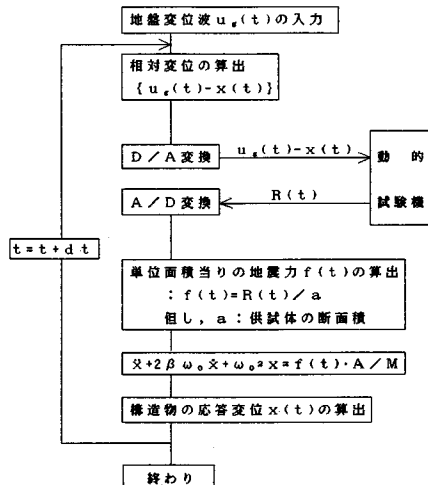


図-4 解析手順のフローチャート

4. 地盤反力を解析するための動的試験

構造物に作用する地震力を求めるために、計算機より得られる地盤変位と構造物変位との間の相対変位を目標変位とする動的試験を行う。解析対象とする振動を一次元のせん断振動とすれば、構造物と接するところで、水平方向に地震力が働く。すなわち、表層地盤と構造物の相対変位だけ地盤が強制変形を受け、それにより地震力が構造物に働く。したがって、任意の深さに見合う応力状態にした土を水平方向に強制変形させて、その反力を求めればよい(図-5)。このとき、土は原位置と同じ応力状態とすればよい。

図-5 と同じ状態で土を強制変形させることのできる動的試験機を新たに製作するのは多額の費用を要する。そこで、本研究では振動三軸試験機を用いることにした。振動三軸試験機を用いた場合、図-5 と違う点は垂直方向に載荷することである(図-6)。このため、加振中に供試体全体に土の自重が作用することになる。しかし、供試体が小さいので、この影響は無視できると考え、振動三軸試験機を用いる。また、振動三軸試験機には任意の深さの応力状態を再現できるという利点もある。

図-6 に示すように、任意の応力状態にセットした供試体を鉛直方向に加振し、その反力を求める。さらにこ

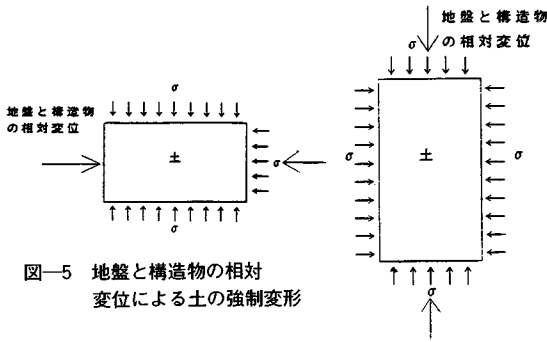


図-5 地盤と構造物の相対変位による土の強制変形

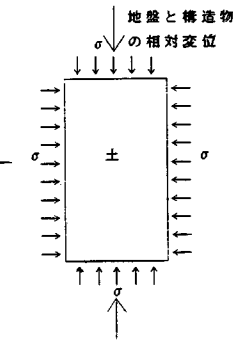


図-6 振動三軸試験機を用いた場合の加振状況

の値を計算機に送って、鉛直応力を求め、これから地震力を算出すればよい。

5. 解析例

(1) 解析モデルおよびその物性値

本研究では地盤反力ばねを用いた力学モデルにより挙動が解析される軸直角方向のトンネルの動的挙動を解析例とする。トンネルに関する力学モデル(図-1)では地盤反力ばねが使われている。そこで、このばねの特性を解析する。解析に用いたトンネルと地盤状況は特定の構造物ではなく、文献^(4),15)を参考に、その物性を想定した。想定したトンネル断面の諸元を表-1に示す。表-1に示す値を用いて、式(5)中の構造物の質量 M と受圧面積 A を求めた。 M の値は断面積 S に全長を掛け、重力加速度で割ればよい。また、 A の値はトンネルの高さと全長の積で与えられる。

地震動によって、トンネルには水平方向に曲げ振動が生じる。本研究ではこの曲げ振動と表層地盤との間の地盤反力特性を解析対象とした。このとき、この曲げ振動の1次モードのみを考慮することにすれば、トンネルの挙動は1自由度系で表現される。それゆえ、表-1に示した構造物を1自由度系でモデル化する必要がある。そこで、地盤-構造物系の1次モードに対する相互作用を解析することとし、1自由度系の固有振動数を1次モードの固有振動数と同じと仮定した。具体的にはトンネルの固有振動数は表層地盤の影響を強く受けて、地盤-構造物系の1次固有振動数と同じ $f_0=1.5$ Hz と想定した。さらに、トンネルの粘性減衰は10%と仮定した。

なお、構造物の質量算出にあたっては付加質量の効果

表-1 トンネル断面の諸元

曲げ剛性 $E I$	2.49×10^{10} (Kgf \cdot cm 2)
断面積 S	4.97×10^5 (cm 2)
全長	500 (m)
構造物の単位体積重量 γ	2.4×10^{-3} (Kgf/cm 3)

は考慮されていない。

(2) 試料土の種類とその特性

実験には試料砂としては豊浦標準砂を、試料土としては関東ロームを用いた。これらの試料土の特性を表-2に示す。

(3) 入力変位波

解析に用いたのは不規則波と正弦波の2種類である。不規則波は以下のように求めた。表層地盤の挙動は基盤加速度入力波に対する応答として解析できる。そこで、表層地盤を1自由度系でモデル化し、この系に対する応答変位(図-7)を地盤反力係数の解析用入力変位とした。1自由度系の復元力関数には、表層地盤の非線形性を考慮して、Ramberg-Osgoodモデルを用いた。表層地盤の特性値は表-3に示す。

用いた基盤加速度波は日向灘沖地震(1969.4.21.; $M=7.5$)の細島における地震加速度記録(NS成分)である。この地震加速度波の最大値を200 galとして、1自由度系の応答解析を行った。また、正弦波は軟弱地盤を想定して1.5 Hzとした。

表-2 (a) 試料砂の特性 (豊浦標準砂)

最大間隙比	$e_{max}=0.992$
最小間隙比	$e_{min}=0.619$
比重	$G=2.63$
50%粒径	$D_{50}=0.18$ mm
均等係数	1.58

表-2 (b) 試料土の特性 (関東ローム)

液性限界	$W_L=97.2\%$
塑性限界	$W_P=65.0\%$
比重	$G=2.72$
含水比	$w=75\sim 77\%$

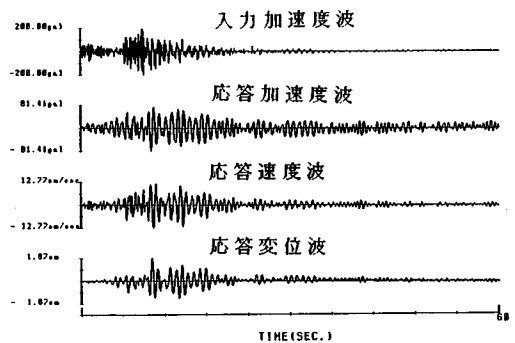
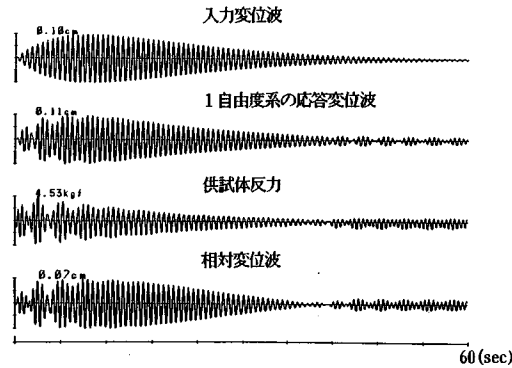


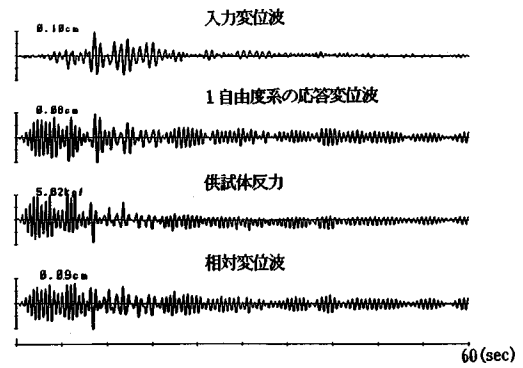
図-7 不規則入力変位波算出のための表層地盤(1自由度系)の応答解析結果

表-3 不規則波算出のための表層地盤モデル

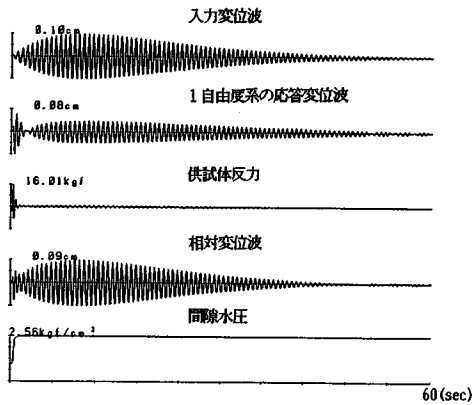
復元力関数モデル	Ramberg-Osgoodモデル
初期最大せん断剛性	913 Kgf/cm 2
初期最大せん断応力	0.269 Kgf/cm 2
最大履歴減衰定数	0.32
層厚	1000 cm
単位体積重量	1.8 gf/cm 3



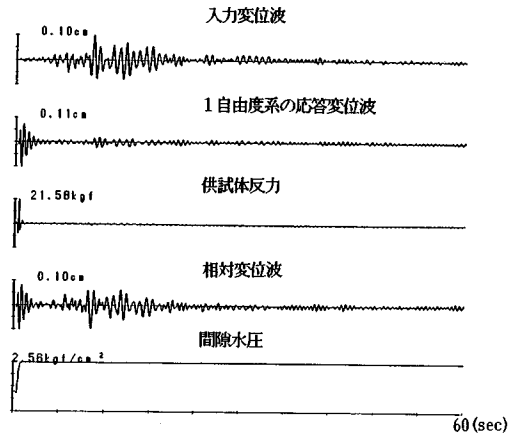
図—8 (a) 関東ロームの場合の解析結果 (入力変位波, および 1自由度系の応答変位波, 供試体反力, 相対変位波) -正弦波 (1.5 Hz)



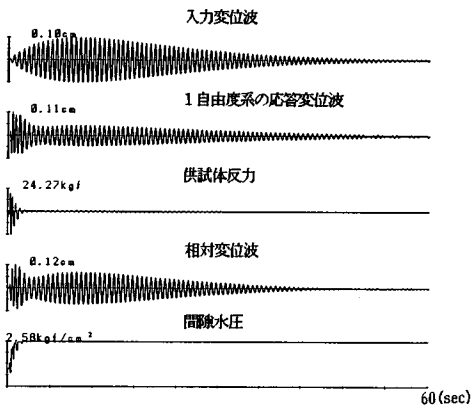
図—9 (a) 関東ロームの場合の解析結果 (入力変位波, および 1自由度系の応答変位波, 供試体反力, 相対変位波) -不規則波



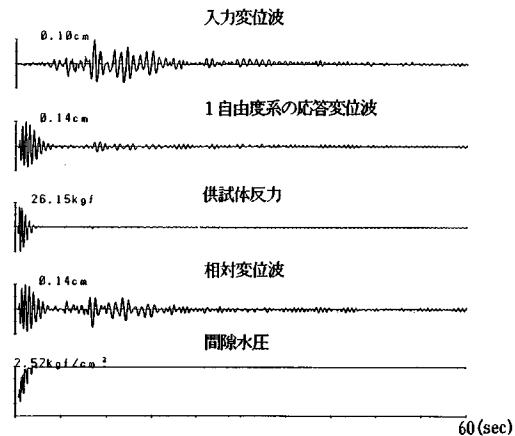
図—8 (b) 飽和砂 (ゆる詰め $D_r=36.9\%$) の場合の解析結果 (入力変位波, 1自由度系の応答変位波, 供試体反力, 相対変位波, 過剰間隙水圧波) -正弦波 (1.5 Hz)



図—9 (b) 飽和砂 (ゆる詰め $D_r=32.1\%$) の場合の解析結果 (入力変位波, 1自由度系の応答変位波, 供試体反力, 相対変位波, 過剰間隙水圧) -不規則波



図—8 (c) 飽和砂 (密詰め $D_r=76.6\%$) の場合の解析結果 (入力変位波, 1自由度系の応答変位波, 供試体反力, 相対変位波, 過剰間隙水圧波) -正弦波 (1.5 Hz)



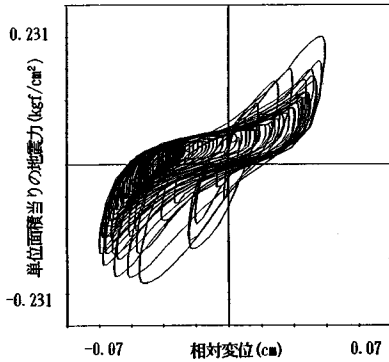
図—9 (c) 飽和砂 (密詰め $D_r=82.7\%$) の場合の解析結果 (入力変位波, 1自由度系の応答変位波, 供試体反力, 相対変位波, 過剰間隙水圧) -不規則波

この2種類の入力変位波はその最大振幅を0.1 cmとして、ハイブリッド実験解析に用いた。加振開始時にはこの変位が高さ10 cmの供試体を強制変形させる。したがって、構造物の近傍では最初に概略 10^{-2} 程度のひずみが生じることになる。それゆえ、供試体寸法によ

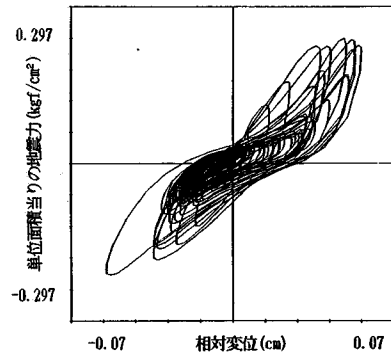
て、得られる地盤反力特性が異なることが考えられる。

(4) 解析結果

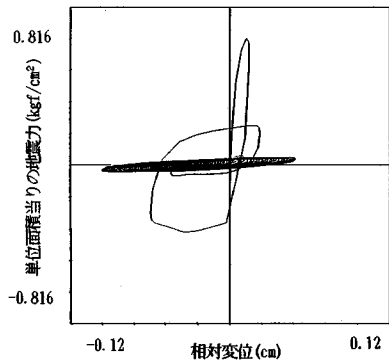
関東ロームおよび飽和砂よりなる供試体を用いて、解析を行った。入力変位波、得られた1自由度系の応答変位、入力と1自由度系の相対変位および供試体の反力を



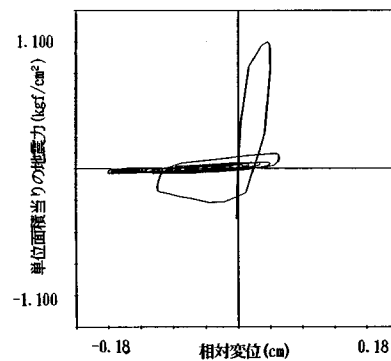
図—10 (a) 関東ロームの場合の供試体変位 (相対変位)～供試体反力の関係-正弦波 (1.5 Hz)



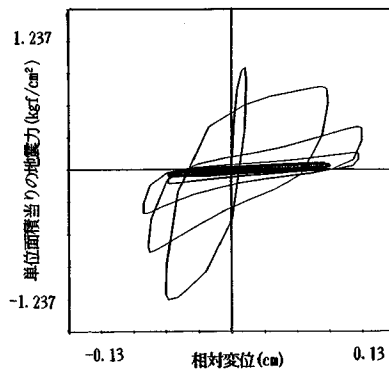
図—11 (a) 関東ロームの場合の供試体変位 (相対変位)～供試体反力の関係-不規則波



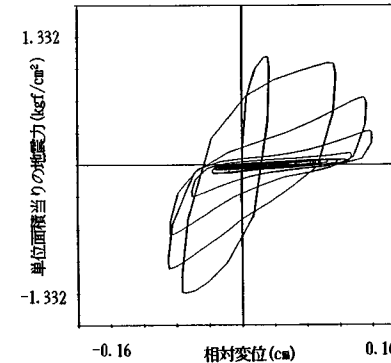
図—10 (b) 飽和砂 (ゆる詰め $D_r=35.9\%$) の場合の供試体変位 (相対変位)～供試体反力の関係-正弦波 (1.5 Hz)



図—11 (b) 飽和砂 (ゆる詰め $D_r=32.1\%$) の場合の供試体変位 (相対変位)～供試体反力の関係-不規則波



図—10 (c) 飽和砂 (密詰め $D_r=76.6\%$) の場合の供試体変位 (相対変位)～供試体反力の関係-正弦波 (1.5 Hz)



図—11 (c) 飽和砂 (密詰め $D_r=82.7\%$) の場合の供試体変位 (相対変位)～供試体反力の関係-不規則波

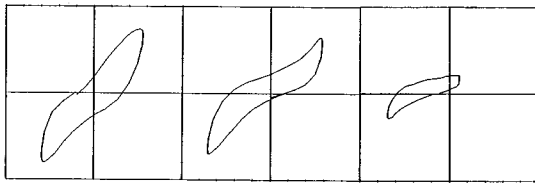


図-12 (a) 履歴ループの変化 (正弦波：関東ロームの場合)

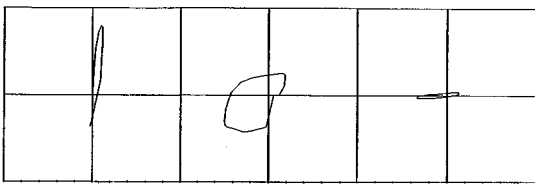


図-12 (b) 履歴ループの変化 (正弦波：ゆる詰め飽和砂の場合)

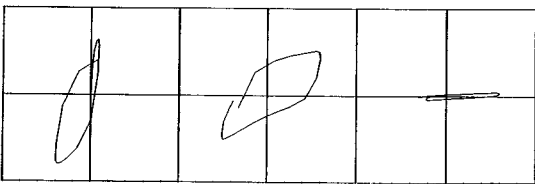


図-12 (c) 履歴ループの変化 (正弦波：密詰め飽和砂の場合)

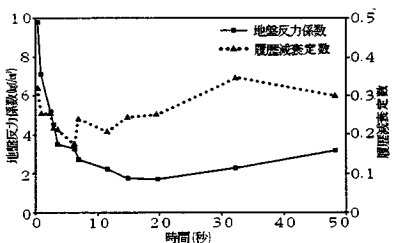


図-13 (a) 地盤反力係数と履歴減衰定数の変化 (関東ロームの場合-正弦波入力)

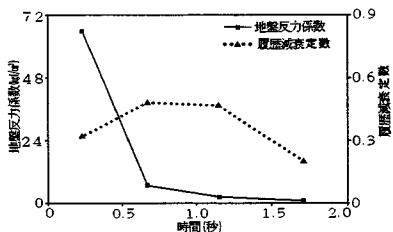


図-13 (b) 地盤反力係数と履歴減衰定数の変化 (ゆる詰め飽和砂の場合-正弦波入力)

図-8 (正弦波入力の場合)、図-9 (不規則波入力の場合) に示す。

正弦波、不規則波とともに振動開始直後に1自由度系の応答変位と供試体反力はともに大きい。その後、加振により供試体の剛性が低下したり、あるいは液状化したりしていくと、供試体反力は小さくなる。

飽和砂の場合、正弦波、不規則波ともに加振直後の数波で液状化していき、供試体反力はなくなり、地震力は1自由度系に作用しなくなる。その後、1自由度系は最初の数波の地震力で減衰自由振動している。

(5) 考察

a) 地盤反力～相対変位の関係

図-8, 9 に示す解析結果より得られた地盤反力と相対変位の関係を図-10, 11 に示す。関東ロームの場合、正弦波入力、不規則波入力ともにループの形はよく似ている。ループは変位が大きくなると反力が大きくなるひずみ硬化型をしている (図-12 (a))。これは地盤と構造物の相対変位が大きくなり、土を大きく強制変形させると、それだけ大きな反力が構造物に作用することを示している。

また、ゆる詰め飽和砂の場合には最初の数波で液状化してしまう。それゆえ、ループも①液状化前の剛性がそれほど低下しないループ、②液状化の過渡状態における大きな楕円形のループ、および③反力がほとんどなく、変位のみが交番するループ、3種類に分けられる (図-12 (b))。本研究で得られたこのループの変化をみるに、構造物が飽和したゆる詰め砂に接していると、ほとんど瞬時に液状化して、構造物に地震力は最初の1~2回を除いて、ほとんど作用しないといえる。しかし、本研究では入力波の最大値を0.1 cmとしている。それゆえ、これより小さい振幅の入力波の場合には徐々に液状化していくことも考えられる。

密詰め飽和砂の場合には、ゆる詰め砂ほど急速には液状化しない。最初の1~2回のループはゆる詰め砂の場合とよく似ている。その後、ループは徐々に剛性が低下していき、完全な液状化状態となる (図-12 (c))。

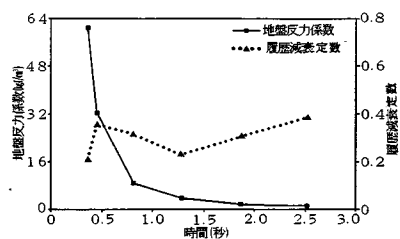


図-13 (c) 地盤反力係数と履歴減衰定数の変化 (密詰め飽和砂の場合-正弦波入力)

b) 地盤反力係数特性の変化

図一10, 11より供試体変位(相対変位)～供試体反力の曲線より地盤反力係数と履歴減衰定数を求めた(図一13(a)～(c))。履歴ループの傾きである地盤反力係数は関東ロームのとき振動の初期→中期→後期で、正弦波入力の場合、 $9.8 \text{ kgf/cm}^3 \rightarrow 4.5 \text{ kgf/cm}^3 \rightarrow 1.8 \text{ kgf/cm}^3$ と振動を繰り返すにつれて、地盤反力係数が低下していく。また、ゆる詰め飽和砂でも、正弦波入力の場合、振動の初期→中期→後期で、 $65.9 \text{ kgf/cm}^3 \rightarrow 2.3 \text{ kgf/cm}^3 \rightarrow 0.7 \text{ kgf/cm}^3$ と、液状化すると地盤反力が非常に小さくなるという変化をした。

c) 履歴減衰定数¹⁾

次に、履歴減衰定数の値の変化をみると、関東ロームでは、加振直後に大きな値を示し、その後徐々に低下して、全体として0.17～0.35の間で変動している。これは加振直後に供試体が急速に塑性変形するが、その後は定常的な振動となるからと思われる。

これに対して、液状化する飽和砂では、密詰め砂とゆる詰め砂では若干傾向が異なり、液状化の過渡状態における値が違う。すなわち、密詰め砂で0.35→0.23→0.35と、ゆる詰め砂で0.32→0.48→0.20と変化している。ゆる詰め砂では加振直後において、1つのループを描いている最中にも物性が急速に変化していく。そのため、履歴曲線はきれいな楕円とはならず、円に近い形となっている。それゆえ、履歴減衰定数が大きくなる。

以上のような解析結果より、地盤-構造物系の間に生じる履歴減衰定数は0.20から0.50までの値を取り、その減衰効果の概略が明らかになっている。

なお、図一13のような解析結果は通常の応力制御あるいはひずみ制御試験からも似たような履歴ループが得られるかもしれない。しかし、単にあらかじめ決められた入力波で加振するのではなく、ハイブリッド実験解析により現実に近い状態で解析が行われている。

6. あとがき

本研究は地盤-構造物系の地震応答解析の際に必要なとされる地盤反力係数を室内試験により求める方法を提案している。地盤と構造物よりなる振動系は構造物の線形応答を計算するマイクロ・コンピューターと地盤が構造物に与える地震力を求めるための試験機を電氣的に結合して構築した。この振動システムを地盤変位に相当する不規則波と正弦波で加振することによって、地盤反力係数の非線形な特性を求めている。

解析例として、関東ロームと飽和砂に対する地盤反力係数を求めた。この解析では表層地盤と構造物の動特性の両方が考慮され、より現実に近い状態で値が求められている。これはハイブリッド実験解析によって初めて可

能であるといえる。

本研究は地盤反力係数をハイブリッド実験法に基づき算出するための解析システムの考え方、地盤-構造物系のモデル化および解析装置の概要に主眼を置いて行った。得られた地盤反力係数は、加振直後や液状化後などを除けば、従来の値¹⁾とそれほど変わらない。地盤反力の非線形性によって生じる履歴減衰定数が得られている点に特長がある。

また、得られた解析結果は本研究で使用した計器類、油圧サーボ・コントローラー等の精度の影響を受けていることに留意する必要がある。この点については文献22)に詳述してあるので参考に使いたい。

なお、本研究で得られた地盤反力特性と履歴減衰定数の値は、2種類の入力波、1種類の構造物モデル、1種類の応力状態等の限定された状態におけるものである。それゆえ、今後の課題としては種々の動特性の構造物モデルに対して、さまざまな種類の土との間の地盤反力係数を求めることが残されている。また、表層地盤の非線形化や構造物モデルの多自由度化を行った、より現実に近い解析システムに改良することなども残されている。

謝 辞：本研究における解析には運輸省港湾技術研究所により公刊された地震加速度記録を用いています。また、本研究の遂行にあたっては、山崎武文氏((株)長大)より有益な助言をいただいております。謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会：土と構造物の動的相互作用。
- 2) 土岐憲三：構造物の耐震解析——新体系土木工学11(土木学会編)第4章。構造物と地盤の動的相互作用, 1981.4.
- 3) 土岐憲三・三浦房紀：地盤-構造物系の非線形地震応答解析, 土木学会論文集, No.317, pp.61～68, 1982.1.
- 4) 竹宮宏和・山田善一：深い杭基礎を有する高橋脚の地震時地盤との動的相互作用, 土木学会論文集, No.318, pp.51～64, 1982.2.
- 5) 山田善一・竹宮宏和・河野健二・平野 明：動的相互作用を考慮した多点入力系高橋脚の地震応答解析, 土木学会論文集, No.328, pp.1～10, 1982.12.
- 6) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和：開北橋における地震動入力と動的相互作用の解析, 土木技術資料, No.22-6, pp.33～38, 1980.
- 7) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和・相沢 興：開北橋における地盤とケーソン橋脚の動的相互作用の解析, 土木学会論文集, No.322, pp.15～24, 1982.6.
- 8) 畑野 正・渡辺啓行：動的地盤係数の測定-粘土地盤における一適用-, 土木学会論文報告集, No.145, pp.47～55, 1967.9.
- 9) 原田隆典・久保慶三郎・片山恒雄・広瀬利光：地中円筒

- 剛体基礎の動的ばね係数と減衰係数, 土木学会論文集, No. 339, pp. 79~88, 1983. 11.
- 10) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和・相沢 興・後藤勝志: 根入れのある円筒基礎の加振実験, 土建資料第 1735 号, 建設省土木研究所, 1981.
 - 11) 土山茂希・早川 誠・吉田 望・中村 晋: 地中構造物の実測地震時ひずみを用いた地盤ばね定数の算出について, 土木学会第 42 回年次学術講演会, I 部門, pp. 1022~1023, 昭和 62 年 9 月.
 - 12) 宮島昌克・北浦 勝・細野俊秀: 液状化過程における地中埋設管の管軸方向地盤ばね定数に関する実験的考察, 土木学会第 42 回年次学術講演会, I 部門, pp. 1024~1025, 昭和 62 年 9 月.
 - 13) 高津和義・山田 淳・志波由紀夫: 沈埋トンネル~地盤間ばね定数に関する実験, 土木学会第 42 回年次学術講演会, I 部門, pp. 1058~1059, 昭和 62 年 9 月.
 - 14) 栗林栄一・川島一彦・柴田松雄: 沈埋トンネルの地震応答におよぼす耐震継手の効果, 土木技術資料, 21-12, 1979.
 - 15) 川島一彦・大日方尚巳・後藤勝志・加納尚史: 沈埋トンネルの地震応答におよぼす地盤剛性の箇所別の変化の影響, 土木技術, 27-6, 1985.
 - 16) 伊津野和行・山田善一・家村浩和・水元義久: 地震応答実験システム (HYLSER) による RC 柱模型の修復・補強効果の検討, 第 18 回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会耐震工学委員会, pp. 321~322, 1983 年 7 月.
 - 17) 家村浩和・山田善一・下司弘文・今井清裕: 変動軸力下における RC 柱模型の HYLSER による弾塑性地震応答実験, 第 18 回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会耐震工学研究委員会, pp. 325~328, 1973 年 7 月.
 - 18) 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, 第 200 号, pp. 85~90, 1972 年 4 月.
 - 19) 望月利男: くい上部構造物連成系の振動特性に関するオンラインリアルタイム実験 (その 1), 日本建築学会論文報告集, No. 318, pp. 63~71, 1975. 5.
 - 20) 片田敏行・伯野元彦: オンライン実験による液状化地盤の非線形解析, 土木学会論文報告集, 第 318 号, pp. 21~28, 1982 年 2 月.
 - 21) 片田敏行・板谷裕二・勝田博敏: 飽和砂層を含む多層地盤の実復元力を用いた非線形波動解析, 土木学会論文集, 第 356 号, pp. 475~481, 1985 年 4 月.
 - 22) 片田敏行・勝田博敏・中田隆博: TSS 回線による大型計算機を用いたハイブリッド地盤応答解析, 土木学会論文集, 第 376 号, pp. 549~556, 1986 年 10 月.
 - 23) 家村浩和: ハイブリッド実験の発展と将来, 土木学会論文集, No. 356/I-3, pp. 1~10, 1985. 4.

(1988.2.6・受付)