

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

GROUND MOTION ANALYSIS DUE TO HYBRID EXPERIMENTAL METHOD
USING TIME SHEARING SYSTEM

片田敏行*・勝田博敏**・中田隆博***

By Toshiyuki KATADA, Hirotoshi KATSUTA and Takahiro NAKATA

The authors have suggested to use the actual restoring force of soil in an analysis of surface ground motion during earthquake. The analytical equipment consists of a micro-computer to calculate the vibration equation and dynamic triaxial testing machine to obtain the actual restoring force of soil.

The micro-computer has two limits in the respect of a calculation velocity and a memory capacity. In order to remove the above limits, we develop new analytical equipment that uses a digital computer in a computer center. This computer is electrically connected to a dynamic triaxial testing machine by TSS (Time Shearing System). The dynamic behavior of very soft surface ground during the earthquake, such as a reclaimed ground, is analyzed.

Keywords: TSS, on-line experimental method, ground motion analysis

1. ま え が き

構造物や表層地盤の非線形地震応答解析の方法には、数値解析に用いる復元力モデルに関し、大別して2つの解析理論がある。1つは数式でモデル化された復元力関数を用いる方法である。他の1つは、構造物や表層地盤を構成している材料より成る供試体をセットした動的試験機より提供される実復元力を用いる方法である。

後者は応答計算を行う計算機と実復元力を取り出す動的試験機を電気的に結合させることからオンライン・リアルタイム実験方法とか、デジタルの計算機とアナログの動的試験機を結合させることから、ハイブリッド実験方法とかよばれている。このオンライン実験方法の最大の特徴は復元力のモデル化を行わないので、複雑な非線形性を示すものや、破壊領域に近い大非線形領域における解析を精度よくできるところにある。

このようなオンライン実験方法の特徴やその発生から発展の歴史、さらには現状およびその将来については家村の論文¹⁾に詳しいので省略する。ここでは、オンライ

ン実験方法を地震時における表層地盤の非線形地震応答解析方法に適用した土質用オンライン実験方法に限定して述べることにする。

土は複雑な非線形性を示す。しかも飽和砂の場合には液状化という非線形な上にさらに非定常な現象が生じる。このため、液状化する飽和多層地盤の非線形地震応答解析には数々の仮定と近似された間隙水圧上昇モデル⁴⁶⁾と非線形復元力モデル⁴⁷⁾を用いた有効応力解析法⁴⁸⁾などが用いられている。これに対して片田ら(1982)は、オンライン実験方法の特徴を生かして、アナログ計算機と土質用振動三軸試験機を用いたオンライン実験装置を開発し、これを用いて飽和砂層地盤の非線形応答特性と非線形復元力特性を明らかにしている^{6)~8)}。このとき、地盤の挙動は1自由度系の振動方程式で表現されている。また、家村らの鉄筋コンクリート曲げ部材のハイブリッド実験システムでも1自由度系としている³²⁾。

しかし、アナログ計算機を用いた場合にはその計算性能の限界から、表層地盤を多自由度系や連続体として数値解析するのは困難である。さらにアナログ計算機は電圧で演算を行うため非線形応答計算の場合には、その応答値を定めるのが不可能である。いわば現象の相似形が明らかになるにすぎない。また、電圧変化による演算精度はデジタル演算の精度よりも格段に劣る。このような

* 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)

** 正会員 (株)大林組

*** 学生会員 武蔵工業大学(修士課程) 土木工学専攻

点から片田ら(1984)は計算機としてマイクロ・コンピュータ(NEC社製PC8001)を用い、地盤の挙動を波動方程式で表現し、液状化過程における飽和砂層地盤の非線形応答特性と非線形復元力特性をより精度よく解析しようと試みている^{14)~16)}。家村(1982)もハイブリッド実験システムの計算機としてマイコンを用いている³⁰⁾。この結果、安価なマイコンを用いた土質用オンライン実験装置により手軽に実復元力を用いた表層地盤の非線形応答解析が可能になった。

応答計算用にマイクロ・コンピュータを使用した場合にもマイコンの計算能力といった問題が生じてくる。たとえば、片田らの論文^{14)~16)}では飽和砂層地盤を表層2層と基盤層にモデル化している。表層地盤をこれ以上複雑にすると計算に時間がかかりすぎて時間ステップが長くなり、飽和砂の物性の変化に追従できるリアルタイムでの解析が不可能となってしまう。

それゆえ、構造物や表層地盤をどのようにモデル化してもリアルタイムで応答計算ができるような計算機が必要となる。特別の解析のためにオンライン実験装置、たとえば地盤応答解析に用いる振動三軸試験装置と電子計算機を結合させた土質用オンライン実験装置に大型計算機やミニコンピュータを専用するのは経済的に不可能である。そこで、本論文では、このような点を解決して複雑な地盤モデルを用いても実復元力を用いた非線形地盤応答解析が可能な実験システムと解析理論を提案するものである。

解析例としては、超軟弱な表層地盤の地震時における非線形応答特性を取り上げることにする。

2. 解析装置の概要

(1) 解析装置のブロックダイヤグラム

本研究では、マイコンを大型計算機の端末としての機能とA/D、D/A変換の制御のための機能の2つを同時に持つようにシステムの設計を行った。解析装置のブロック図を図-1に示す。また、データ処理用として、マイコンをデータの記憶、作図、出力用にも使用している。ただし、応答計算は大型計算機が行い、マイコンでは行っていない。

(2) 大型計算機、マイコン、振動三軸試験機の結合

応答計算を行う大型計算機は東京大学大型計算機センターのM280H、端末と中央処理装置を結ぶのにRACAL VADIC社製の音響カプラー(1200BPS)を使用した。通信回線は専用回線を用いたモデムが望ましいが、今回は一般の電話回線を用いた。よって半二重の通信方式である。端末装置としてのマイコンはNEC社製のPC9801Fに通信用のインターフェイスRS-232C、A/D、D/A変換用のインターフェイスGP-IB、RAM

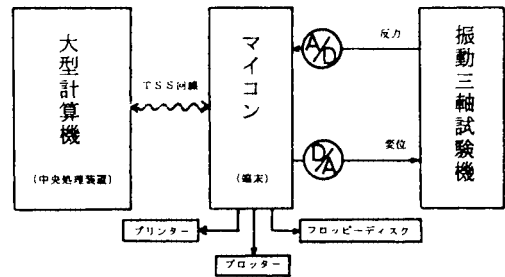


図-1 解析装置のブロック図

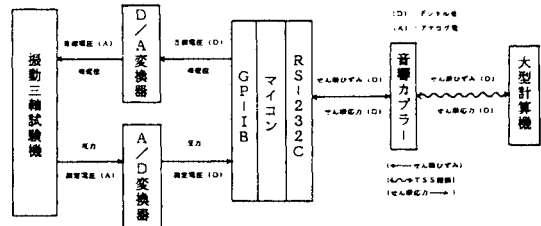


図-2 大型計算機、マイコン、振動三軸試験機の結合

の容量を増すために増設RAMを装着した。A/D、D/A変換器には、アドテック社製のR488シリーズ(12Bit)を用いた。応答計算に用いる復元力特性は、誠研舎製の振動三軸試験機よりリアルタイムで取り入れた。これらのようすを図-2に示す^{41), 42), 45)}。

マイコンのキーボードの操作により、大型計算機内での応答計算、A/D、D/A変換、振動三軸試験機が同時にスタートする。大型計算機での応答計算により算出されたせん断ひずみは電話回線にのせて端末装置のマイコンに送られる。マイコンではせん断ひずみを供試体への垂直変位に変換する。さらに、これを目標電圧に直してD/A変換器へ送る。D/A変換器より出力された電圧は振動三軸試験機の供試体に目標変位として加えられる。このとき荷重計によって検出された荷重はアナログ電圧としてA/D変換器に送られ、デジタル化されてマイコンに取り入れられる。マイコン内では、電圧を力に換算してからせん断応力へと変換し大型計算機へ送る。大型計算機では取り入れたせん断応力を使って応答計算を開始する。以上が本システムにおける1ステップ間の過程である。これを繰り返すことにより地盤の応答値が実復元力を用いた形で求まる。

(3) 中央処理装置および端末装置のプログラムの概要

制御プログラムは大きく2つに分けられる。1つは大型計算機内で応答計算を行う部分と、もう1つはマイコン内でデータの受け渡し等を行う部分である。両者のプログラムの概要を図-3に示す。

中央処理装置側のプログラムについては、通常の応答

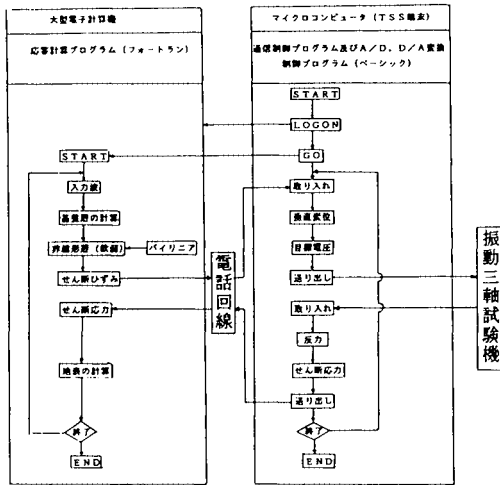


図-3 制御プログラムの概要

計算と何ら変わりはない。逆にいえば、これがオンライン実験方法の特徴である。実復元力としてのせん断応力を取り入れる部分を除けば、地盤挙動の定式化をし、これを数値的に解くことにより応答値がそのまま求まる。

ここでの問題点は中央処理装置への入力と中央処理装置からの出力をどうするかということである。これまでのハイブリッド実験装置で用いていたマイコン(BASIC言語)では、入出力用の特殊なコマンドが用意されていたので、それを用いることにより、タイミングを取るための考慮もしないで比較的簡単に用いることができた。

しかし、ここで用いる FORTRAN 言語には、入出力用の特殊なコマンドは用意されていない。そこで、作動している FORTRAN プログラム中への入出力は、READ 文と WRITE 文によって行うことにした。つまり応答計算によって計算された応答値を WRITE 文によって端末へ送り、端末から送られてきたデータを READ 文によって読み込むということである。一見あたりまえなことをやっているようだが、特に READ 文による読み込みにあたっては、どのようにそのタイミングを取るかが問題となることが予想される。

一方、端末装置側のプログラムであるが、これは参考になる文献がほとんどなく、試行錯誤で作成したので最適の方法とはいえないかもしれないが、現段階では正常に動いているのでその流れを説明する。まず、端末装置としての PC 9801 F を大型計算機センターと TSS 回線で接続する⁴³⁾。この後、大型計算機内の応答計算プログラムを走らせて待機状態にしておく。この状態でキーボードよりスタート・キーを入力するとシステム全体が動き始め、オンライン実験を開始するようにプログラムされている。サブルーチンの中では、地盤と供試体の位置関係を考慮して、せん断ひずみを供試体へ加える垂直

変位に変換し、また、供試体反力を想定地盤のせん断応力への変換を行っている。その他に大型計算機との結合用のインターフェイスである RS-232C や A/D, D/A コンバータ用のインターフェイスである GP-IB の制御、データ処理用としてフロッピーディスクへのデータの収納、プリンターへの出力、プロッターへの出力等を行っている。

なお、RS-232C インターフェイスを用いて大型電子計算機と接続するには、種々の規則(データ転送形式等)が決められているので、この規則に従う必要がある。通信の際の規則はプログラム中で規定(一部はハードウェアに依存)している。主としてプログラム中で指定するデータ転送形式には、データ通信速度、通信方式、データビット数、スタート・ストップビット数、パリティチェック、受信データのフロー制御等がある。

データ通信速度(ボーレート)はシリアル転送である。RS-232C のライン上にどれだけで速度でデータを送出するかを決定するもので、本システムでは 75~9 600 ボーまで設定できるようになっているが、変復調装置の制約により 1 200 ボーとなっている。

通信方式については東大大型計算センターでは全二重通信方式がとられている。

データビット数は1つのデータを何ビットで表わしているかということ、通常マイクロコンピュータでは7ビットか8ビットを用いる。このシステムでは1文字7ビットを選択している。

次に同期(タイミング)のとり方について説明する。各ビットごとに同期をとる方法と文字(キャラクタ)ごとに同期をとる方法があるが、これらを同期式といい、以下に示す(連続)同期式と調歩(非)同期式がある。

同期式は送信信号中にビットごとの同期信号が組み込まれていて、データ伝送の際最初に特定の符号を送った後データを送り、一連のデータ伝送を終了するものである。調歩同期式は送信するキャラクタの前にスタートビット、後にストップビットをつけて文字の区切りとし、これによって同期をとるものである。

本システムでは東京大学大型計算機センターの 1 200 ボーの TSS (VOS 3) が調歩同期式でスタート・ストップビットが1ビットなので、これを採用した。

パリティチェックは、データを伝送している途中何らかの理由でデータが別の符号に変わることがあるのを検査することで、伝送したデータの信頼性を高めるデータチェックのことをいう。通常、伝送する各符号に1つの余分な符号(パリティ・ビット)を付ける。これは、パリティ・ビットを含めて、全体の符号(ビット)内の'1'を示すビットの数を偶数にするか奇数にするかを規定して、受信側でこれをチェックし誤りを検出するもの

である。本システムでは東大側の規定でイーブン・パリティを採用している。

以上の規則に従って、RS-232Cのライン（バッファ）にデータを出力（入力）し、PRINT#という形で本体のCPUとデータのやりとりを行った。

次に中央処理装置と端末装置での、データのやりとりにおけるタイミングの取り方について述べる。

まず、端末装置が中央処理装置からのデータを受け取るときには、“文字変換+コントロールコード”という形で1つのデータとして判断する。通常のTSS端末のように送られてきた信号をそのままCRTに出力すれば問題はない。しかし、ここでは送られてきたデータを数字として処理して、その値を次の処理に用いるので、送られてきたデータ（文字変数）のどこからどこまでを数字として判断するかが重要である。具体的には1つ1つの文字をコントロールコードかどうかを判断して、コントロールコードならばそれ以前に送られてきた文字を1

つの数字として処理することにした。

また、端末装置から中央処理装置にデータを送るときには、初めに中央処理装置側からREAD文によるデータの催促の信号であるBELLコードが送られてくる。そのBELLコードを確認してからデータを中央処理装置側に送ってやらないとタイミングがずれてしまう。

以上の通信システムの概念図を図-4に示す。

(4) 振動三軸試験機の変位制御における問題点

本研究で使用した振動三軸試験機（誠研舎製）の電気的制御方法の概要を図-5に示す。振動三軸試験機では、供試体に拘束圧と垂直荷重を加えることにより、供試体を地中の応力状態と等しくなるようにしている。そのときの垂直荷重を静的目標値として供試体に加えている。また、オンライン実験では、振動方程式または波動方程式を数値解析により解き応答変位を求め、これを動的目標値として供試体に加えている。これらの目標値を図-5に示す電気回路でアナログ電圧により制御して油圧サーボで供試体に加えている。

実験時の供試体への载荷は、図-6のように静的目標値と動的目標値を合わせた形で载荷される。目標値を維持するために、測定値（変位または荷重）をローパスフィルター、ハイパスフィルターの2つのフィルターを用いて、静的成分と動的成分の2つに分離している。分離された静的成分と動的成分はフィードバック回路によって、静的目標値と動的目標値とそれぞれ比較される。

ところで、本研究で使用しているような市販の振動三軸試験機は応力制御方式で1 Hz程度以上の目標動的荷重が達成できるように調整してある。このため、約0.5 Hz以下の長周期の入力波に対して応答特性が悪い。そこで、本研究では静的測定値と動的測定値に分離するために用いるローパスフィルターとハイパスフィルターの2つのフィルターを改良することにした。すなわち、0.02 Hz以上をカットするローパスフィルター（従来は0.2 Hz）と0.02 Hz以下をカットするハイパスフィルター（従来は0.2 Hz）を用いた。その結果、約0.5 Hz以下の長周期の入力波に対してもよい応答特性が得られるようになった。

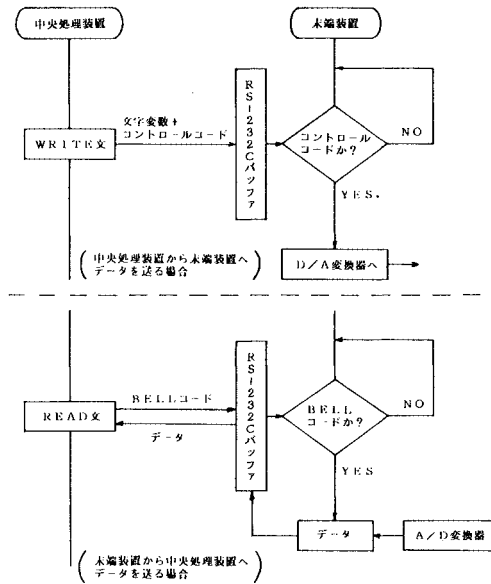


図-4 通信システムの概要図

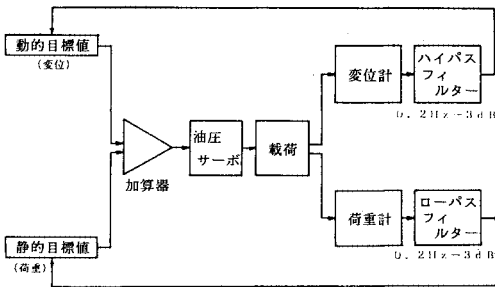


図-5 振動三軸試験機における振動制御のためのフィードバック回路の概略

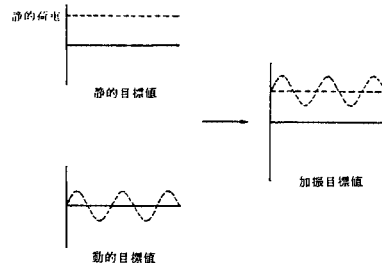


図-6 加振制御の概念図

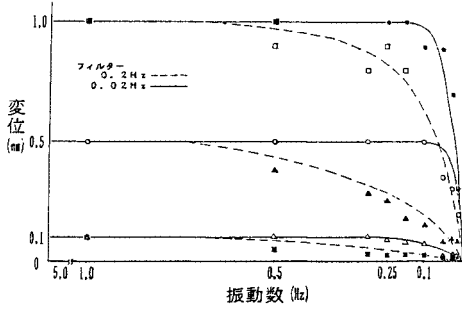


図-7 フィルターの変更による応答特性の違い

新しい油圧サーボ制御回路と古い制御回路について変位制御実験を行った結果得られた応答曲線を図-7に示す。図-7からも新しい制御回路の方が、長周期の入力波に対して応答特性がよいことがわかる。

3. 解析例

(1) 数値解析理論

地震時における地盤の挙動を定式化するには、振動方程式や波動方程式による定式化が考えられる。振動方程式による定式化では地盤を多質点系にモデル化して、その一部に実復元力を取り込んで応答計算を行う方法が考えられる。しかし、この方法では層間の境界条件や地下逸散減衰等が考慮できない。そこで、波動方程式による定式化を行い、これを差分法により離散化し、さらに地層間における境界条件や地下逸散を考慮した方法³⁹⁾を用いることにする。同じ方法により飽和砂層を含む多層地盤の実復元力を用いた非線形震動解析が行われている¹⁰⁾。用いた差分方程式は参考文献16) または39)を参照されたい。

(2) 地盤のモデル化

本研究では、基盤層の上に超軟弱な粘土層がのった地盤を想定することにする。その概要を図-8に示す。したがって、何ら実際の地盤をモデル化したものではない。このような地盤モデルを設定したのは次のような理由による。すなわち、本論文で開発したハイブリッド実験解析装置の実用性を検証するのに必要最小限の層構造を有する地盤であればよいと考えた。このため、表層が1層で、それに基盤層がある地盤構造とした。表層は超軟弱な土より成ると仮定し、そのせん断波速を20 m/sとした。また、層厚は36 mとした。このとき、表層地盤には差分格子点が4個存在し、土のせん断応力は3種類が必要となる(図-8)。このうちの1つに動的試験機より得られる実復元力を用いる。

実復元力を用いる層は基盤層の上の超軟弱粘土層とし、振動三軸試験機にはカオリン粘土より成る供試体を用いた。試料土の物理的性質を表-1に示す。供試体の

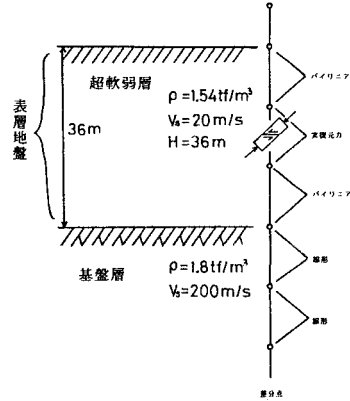


図-8 地盤のモデル化

表-1 試料土のモデル化

土の種類	カオリン粘土
比重 G_s	2.65
液性限界 W_L	72.1%
塑性限界 W_P	33.0%
含水比 w	77.0%

寸法は、直径5 cm、高さ10 cmである。2つの差分点の間のせん断応力をこの供試体より得られるせん断応力に置き換えることになる。実復元力を用いる以外の非線形層での非線形復元力特性としては、従来提案されているパイロニア・モデルを用いた。その弾性限界ひずみは0.001、弾塑性傾斜率は0.4とした。また、せん断弾性係数 G はせん断波速度 V_s より次式を用いて求めた。

$$V_s = \sqrt{G/\rho}$$

このとき用いる $V_s \cdot \rho$ の値は図-8に示したように、

$$\text{表層地盤} : \rho = 1.54 \text{ tf/m}^3, V_s = 20 \text{ m/s}$$

$$\text{基盤層} : \rho = 1.8 \text{ tf/m}^3, V_s = 200 \text{ m/s}$$

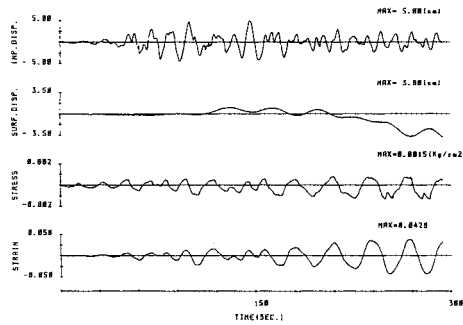
と仮定した。

これらの値を用いた場合、図-8をみてわかるように表層地盤は4つの差分格子点と3つの復元力で表現される。用いる動的試験機は1台であるので、1種類の復元力しか得られない。それゆえ、地表より2番目の復元力に動的試験機より取り入れたカオリン粘土の復元力を用いた。

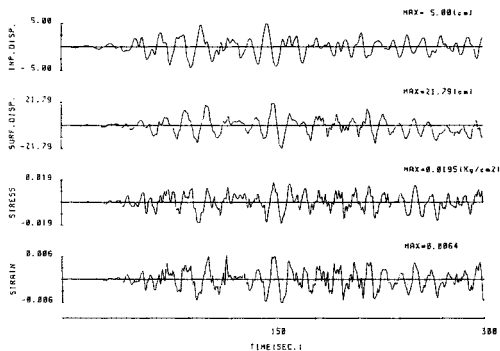
(3) 応答解析結果および考案

基盤に対する入力変位波には、1968年十勝沖地震の新潟における気象庁1倍強震記録(南北変位成分)を最大5 cmに修正して用いた。

基盤入力変位波と応答解析の結果得られた地表応答変位波、供試体の応力波形、ひずみ波形の時刻歴を図-9に示す。



図—9 応答解析結果（実復元力を用いた場合）



図—10 応答解析結果（すべての復元力をバイリニア・モデルで与えた場合）

振動を始めると入力波のもつ卓越成分波は伝わらず、地盤の固有周期と思われる長周期の波が現われている。その後、徐々に永久変位していく。すなわち、基盤の動的挙動を契機として、超軟弱な表層地盤が振動するというよりも、塑性流動していく。

次に、実復元力を用いず、表層地盤の復元力をすべてバイリニア・モデルで与えた場合の応答解析結果を図—10に示す。解析に用いたバイリニア・モデルの物性値は実復元力を用いた解析と同じ弾性限界ひずみ0.001、弾性傾斜率0.4である。

図—10をみてわかるように入力波である基盤入力変位波に存在する短周期成分が地表応答変位波にもみられる。また、その波形には永久変位が顕著にはみられない。さらに、地表の最大応答変位はすべてをバイリニア・モデルで表現した場合には約21.8 cmと、実復元力を用いた場合の約5.7倍となっている。

これらのことから、実復元力を用いた場合（図—9）にみられる長周期成分と永久変位がカオリン粘土の非線形動的復元力特性によるものであると推察される。すなわちせん断波がカオリン粘土のために地表まで伝播せずカオリン粘土により地表が永久変位していくものと考えられる。

この解析結果は、非常に軟弱なカオリン粘土より得られたものであるが、実際の超軟弱な表層地盤の地震時挙動を推測する1つの手がかりとなるであろう。すなわち、海底に堆積したヘドロや軟弱な粘土より成る海底地盤は、地震時に硬い基盤層より軟らかい表層地盤に波動が伝わらず、振動しない。しかし、基盤層の振動により徐々に塑性変形していくことが予想される。

（4）実験結果の解釈をするにあたっての留意点

図—9に示した実験結果を解釈するにあたって解析精度に影響を与えたと思われる点を述べることにする。

振動三軸試験において想定した地盤の応力状態は、側圧および垂直荷重を供試体に加えることにより再現される。

本研究で行っているような等方圧密状態を実現するには、側圧および垂直荷重の精度が問題となる。今回の解析で用いた市販の振動三軸試験機の側圧計は kgf/cm^2 の単位をもち、最小目盛は 0.05 kgf/cm^2 である。また、垂直荷重計は最大 50 kgf で、最小目盛が 0.1 kgf である。供試体の直径が 5 cm で、断面積 19.625 cm^2 であるから最小目盛は、 0.005 kgf/cm^2 となり精度で10倍の違いが生じる。

このため、側圧計と荷重計の表示によって等方圧密状態となるように載荷したつもりでも実際には完全な等方圧密状態になっていない可能性がある。このことが解析精度に影響を与えていることも考えられる。

また、2.(4)でも述べたように油圧サーボ制御のための電気回路にも問題がある。変位制御において加振のためにピストンを動かすとき、目標動的荷重を実現するための電圧と目標動的変位を実現するための電圧とを足し合わせた電圧を油圧サーボに加える。この後、目標値が実現されているかを判断するため、変位計と荷重計の出力をアナログフィルターによって動的成分と静的成分に分離して、フィードバックされる（図—5）。このためアナログフィルターの性能によっても応答特性に影響されることになる。

4. 今後に残された課題

本研究の当初の目的は、オンライン実験システムにおける複雑かつ多量の計算に伴う応答計算時間の短縮をめざして、大型電子計算機を用いるところであった。すなわち、TSSシステムによって振動三軸試験機を大型電子計算機と結合させ、より汎用的なオンライン実験装置の開発を試みた。その結果得られた1ステップにかかる時間は、ほぼ0.6秒と通常の応答計算で用いる0.01秒よりは、かなり粗いものとなった。実際の応答計算自体は、東京大学大型計算機センターのM280Hを使用しており、計算時間は無視できる程度であると考えられる。

それにもかかわらず計算時間がかかる理由としては、まず通信システムにかかる時間が挙げられる。著者らは通信システムに関しては素人であるので自己流で装置を開発した。このため、本実験装置が最適であるとはいえない。著者らが考えられる範囲での改善点を以下に示す。

第1に音響カプラーの性能をグレードアップする。具体的には、現在の音響カプラー(1200 BPS)を9600 BPSのモデム等に変更する。ただし、これには専用回線が必要である。第2に大型計算機側で全二重通信方式をサポートしている計算機を用いる。本研究で使用したM280Hは、半二重通信方式でしかなく東京大学大型計算機センターでいえば、VAX 11の使用も考えられる。第3に入出力にかかる時間であるが、これまでにTSSを本研究のような形でデータ通信に用いた例がないので何ともいえないが、計算機センターでのプロトコル上の改良も必要であろう。また、端末装置側でもRS-232CやGP-IB制御プログラムを改良することによってのスピードアップも可能である。

結局、基本的には本研究におけるシステムの個々の部分をグレードアップすることにより、より汎用性のあるオンライン実験装置の開発およびそれを用いた地盤応答解析が可能となるであろう。

5. あとがき

従来、土質用オンライン実験においてマイクロコンピュータが使われてきた。しかし、地盤の挙動をより現実的な形でモデル化したり、定式化して解析するには、マイクロコンピュータでは計算機の能力に限界が生じていた。

この計算機の限界を克服する方法として、TSS回線を介して大型計算機をオンライン実験装置の計算機として用いることが考えられる。本研究はこのアイデアを具体化し、TSS回線による大型計算機を用いたオンライン実験装置を開発し、その実用性を立証している。また、そのシステムの構成と制御方法、および制御プログラムの概要などについて述べている。さらに、解析例として地震時の挙動がよくわからないヘドロや非常に軟らかい粘土より成る海底地盤の地震時挙動を取り上げた。すなわち、ヘドロのような非常に軟らかいカオリン粘土を用いて超軟弱な表層地盤の地震時挙動をオンライン実験により解析した。

謝辞：本学土木工学科、土質・基礎研究室の神山教授、成山講師、目黒技士には種々の便宜を受けています。また、解析に用いた入力波(気象庁1倍強震記録)は、東京大学工学部土木工学科の篠泉助手より提供してもらいました。謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 伯野元彦・四枝正俊・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) Hakuno, M. : Hybrid Failure Test on A Structural Member, Proc. of 5th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.1, pp.799~802, June 1973.
- 5) 片田敏行・伯野元彦：オンライン実験方法による地盤の非線形振動解析，土木学会第35回年次学術講演会，1980.9.
- 6) 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振動解析，土木学会論文報告集，No.318，pp.21~28，1982.2.
- 7) Katada, T. and Hakuno, M. : On-line Experimental Analysis of Surface Ground in Liquefaction Process, Third International Earthquake Microzonation Conference, June 28-July 1, 1982, University of Washington, Seattle.
- 8) 片田敏行・浅野 敦・小泉 享：オンライン実験方法により得られる正弦波入力に対する砂の非線形復元力特性，地盤と基礎の地震災害に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.45~48，1983.5.
- 9) 片田敏行：オンライン実験方法によるカオリン粘土の動的性質の実験的解析，第18回土質工学研究発表会，pp.509~510，1983.6.
- 10) 片田敏行・石原正志・鈴木孝典：オンライン実験による軟弱粘土地盤の非線形地震動の実験的解析，第17回地震工学研究発表会，土木学会耐震工学委員会，1983.7.
- 11) 片田敏行・浅野 敦・小泉 享：正弦波入力に対する砂層地盤の実復元力を用いた非線形応答解析，土木学会第38回年次学術講演概要集第1部，pp.641~642，1983.9.
- 12) 片田敏行・板谷裕二・阿部幸樹・勝田博敏：マイコンを用いたプログラム制御オンライン実験方法により得られる液状化砂の非線形復元力特性の解析，第19回土質工学研究発表会，土質工学会，1984.6. 松山
- 13) Katada, T. and Hakuno, M. : Nonlinear Analysis of Surface Ground Motion by Digital Controlled On-line Experimental Method, 8th W. C. E. E., San Francisco, July 21~28, 1984.
- 14) 片田敏行・勝田博敏・板谷裕二：実復元力を用いた多層地盤の非線形波動解析，土木学会第39回年次学術講演会，1984.10.
- 15) 片田敏行・勝田博敏：実復元力を用いた飽和砂層を含む多層地盤の非線形波動解析，自然災害科学総合シンポジウム，1984.10.
- 16) 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，No.356/I-3，pp.475~481，1985.4.
- 17) 高梨晃一・宇田川邦明・関松太郎・岡田恒男・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非線形地震応答解析(その1)システムの内容，日本建築学

- 会論文報告集, No. 229, pp. 77~83, 1975. 3.
- 18) 宇田川邦明・高梨晃一・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非線形地震応答解析(その2)はり崩壊型一層スパン鋼フレーム, 日本建築学会論文報告集, No. 268, pp. 49~59, 1978. 6.
 - 19) 宇田川邦明・高梨晃一・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非線形地震応答解析(その3)二層鉄筋フレームの解析例, 日本建築学会論文報告集, No. 288, pp. 115~125, 1980. 2.
 - 20) 谷口英武・高梨晃一・田中 尚・田中淳夫：電算機-試験機オンラインシステムによる構造物の非線形地震応答解析(その4)高力ボルト摩擦接合部にすべりが生ずる骨組の地震応答解析例, 日本建築学会論文報告集, No. 291, pp. 33~43, 1980. 5.
 - 21) 谷口英武・高梨晃一・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非線形地震応答解析(その5)高力ボルト摩擦接合部にすべりが生ずる多層骨組の地震応答解析例, 日本建築学会論文報告集, No. 295, pp. 71~83, 1980. 9.
 - 22) 岡田恒男・関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その1)目的及び方法論, 日本建築学会論文報告集, No. 275, pp. 25~31, 1979. 1.
 - 23) 岡田恒男・関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その2)オンライン応答実験-1, 日本建築学会論文報告集, No. 279, pp. 77~84, 1979. 5.
 - 24) 岡田恒男・関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その3)オンライン応答実験-2, 日本建築学会論文報告集, No. 280, pp. 79~89, 1979. 6.
 - 25) 岡田恒男・関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その4)地震応答特性の検討, 日本建築学会論文報告集, No. 282, pp. 57~64, 1979. 8.
 - 26) 岡田恒男・関松太郎：電算機アクチュエータオンラインシステムによる鉄筋コンクリート骨組の地震応答実験(その5)等価線形化法による検討および結論, 日本建築学会論文報告集, No. 284, pp. 79~84, 1979. 10.
 - 27) 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.
 - 28) Iemura, H. : Earthquake Failure Criteria of Deteriorating Hysteretic Structures, Proc. of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 5, pp. 81~88, Sept. 1980.
 - 29) Yamada, Y. and Iemura, H. : Hybrid Analysis on Earthquake Response of Deteriorating Hysteretic Structures, Proceeding of Sino-American Symposium on Bridge and Structural Engineering, Part 1, pp. 4-13-1~4-13-14, Sept. 1982.
 - 30) 山田善一・家村浩和・中西伸二・四方敏明：マイクロコンピュータによるRC構造物のハイブリッド地震応答実験, 第7回電算機利用に関するシンポジウム講演概要, 土木学会計算機利用委員会, pp. 77~80, 1982. 10.
 - 31) Iemura, H., Kato, T. and Kawatani, Y. : Hybrid Experiment on Earthquake Response of Original and Repaired RC Members, Proceedings of the Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 852~832, December, 1982.
 - 32) 山田善一・家村浩和・西村一郎：履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価, 第17回地震工学研究発表会講演概要, pp. 231~234, 1983. 7.
 - 33) Iemura, H. : Hybrid Experiment on Earthquake Failure Criteria of Reinforced Concrete Structures, Proceedings of 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. VI, pp. 103~110, July 1985.
 - 34) 山田善一・家村浩和・水元義久・伊津野和行：鉄筋コンクリート柱模型の修復・補強と地震応答載荷実験, 第21回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 93~96, 1984. 10.
 - 35) 山田善一・家村浩和：強震動による劣化履歴構造物の損傷度判定と修復法に関する研究, 第19回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集, pp. 217~218, 1982. 11.
 - 36) 梅村 魅・加藤 勉・渡部 丹：日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)1-鉄骨造実大6層建物の耐震実験(その1. 全体計画), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1173~1174, 1983. 9.
 - 37) 山内泰之・緑川光正・西山 功：日米共同大型耐震実験研究(鉄骨造)2-鉄骨造実大6層建物の耐震実験(その2. 試験体の設計および概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1175~1176, 1983. 9.
 - 38) 山内泰之・西山 功・山崎利次・三田大輔・高田正則：日米共同大型耐震実験(鉄骨造)4-鉄骨造実大6層建物の耐震実験(その4. 加力および計測計画), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1983. 9.
 - 39) 伯野元彦・藤野陽三：地盤の非線形性を考慮した地震動特性, 土木学会論文報告集, No. 240, pp. 1~9, 1975. 8.
 - 40) 古賀義亮・藤原君恵・石塚日出子：マイコンとマイコンをつなぐ法, 日本実業出版社
 - 41) PC-9801 F BASIC REFERENCE MANUAL, NEC
 - 42) PC-9801 F USER'S MANUAL, NEC
 - 43) 坂本朝治：TSS入門 東京大学大型計算機センターニュース, Vol. 17, No. 6, pp. 17~50, 1985.
 - 44) インテリジェント漢字TSS端末プログラムマニュアル, (株)アカデミービジネスサービス
 - 45) R 488-AD GP-IB 12 Bit 8ch A/D コンバータ, R 488-DA GP-IB 12 Bit 4ch D/A コンバータ, 取扱説明書, (株)アドテックシステムサイエンス
 - 46) Finn, W.D.L. and Bhatia, S. : Endochronic theory of sand liquefaction, Proc. 7th World Conf. on Earthquake Eng. Istanbul, pp. 149~153, 1980.
 - 47) 国生剛治・桜井彰雄：Modified Hardin-Drenevich モデルについて, 土木学会第33回年次学術講演会概要集第Ⅲ部, 1978.
 - 48) Ishihara, K. and Towhata, I. : Effective stress method in one-dimensional soil response analysis, Proc. 7th World Conf. on Earthquake Eng. Istanbul, pp. 73~80, 1980.