

武蔵工業大学土木工学科 片田敏行
 武蔵工業大学大学院 勝田博敏
 ツルミ技術㈱ 板谷裕二

1. まえがき

液状化する砂層地盤や超軟弱な地盤など特にその非線形性が大きい場合には数式による土の非線形復元力特性のモデル化を行なわないオンライン実験による解析が有効であると考えられる。

オンライン実験による地盤の非線形振動解析及び土の非線形復元力特性の解析は片田・伯野によって初めて試みられている。その結果、動的外力によって完全に液状化するまでの飽和砂の応力-ひずみ曲線が初めて得られている。従来の応力制御方法による動的試験では液状化により砂の反力が減少すると、目標値を維持するため変位振幅が大きくなり、完全な液状化状態まで加振することができなかった。片田・伯野の解析では地盤を1自由度系でモデル化している。このため、土の非線形復元力特性の解析としては問題がないと思われる。だが実復元力を用いた地盤の非線形振動解析としては1自由度という地盤のモデル化が単純すぎるきらいがある。

そこで、本論文では多層地盤の地震時挙動を非線形波動方程式で表現し、動的試験機より実復元力の提供を受けて解析を行なうことにする。非線形波動方程式で表現することにより多層地盤の挙動をより正確に解析することができよう。解析例として飽和砂層を有する多層地盤の非線形波動解析を行なうことにする。

2. 解析理論

地盤の挙動を表わす非線形波動方程式の数値解析理論として本研究では藤野・伯野の方法を用いることにする。この解析理論は非線形波動方程式を差分方程式で表現した上で、境界条件や地下透散減衰を考慮する差分式を加えている。以下に用いた式を示しておく。

表層地盤のせん断波動を表わす非線形波動方程式は次式で与えられる。

$$\rho = (\partial U / \partial x) = \partial \sigma / \partial x \quad ; \quad \rho: \text{土の密度}, \sigma: \text{土のせん断応力}, U: \text{水平変位} \quad (1)$$

(1)式を中心差分により差分形に変形すると次式が得られる。

$$U_{n,m+1} = 2U_{n,m} - U_{n,m-1} + (1/\rho) \cdot (dt^2/\Delta x) \cdot (\sigma_{n+1} - \sigma_n) \quad ; \quad m: \text{時刻}, n: \text{距離} \quad (2)$$

さらに、境界条件として地表では $\sigma=0$ であるから、 $U_0 = U_1$ (3)である。

層の境界変位は波動インピーダンスによる透過率と反射率を考慮して次式で与えられている。

$$U_{n,m} = (1+\alpha_0)U_{n+1,m-1} + (1-\alpha_0) \cdot U_{n-1,m-1} - U_{n,m-2} \quad ; \quad n: \text{境界における格子点番号}, \alpha_0: \text{透過率} \quad (4)$$

さらに地下透散減衰を考慮して、基盤層の変位は次式で与えられている。

$$U_{n-1,m+1} = U_{n-2,m} + F(m) - F(m-2) \quad ; \quad F: \text{入力変位} \quad (5)$$

本研究では地震動により液状化する飽和砂層を有する平行層地盤を取扱うことにする(図-1)。解析に用いる振動三軸試験機は一台であるから、提供される実復元力も一種類である。そこで非線形性が最も大きく、地盤全体の応答特性に与える影響も大きいと考えられる飽和砂層に関して実復元力を用いることにする。他の層の土の非線形復元力モデルは従来提案されている非線形復元力モデルとしてバイリニアモデルを用いた。また地層の物性値は(図-1)に示してある。実復元力を得る振動三軸試験には豊浦標準砂を用

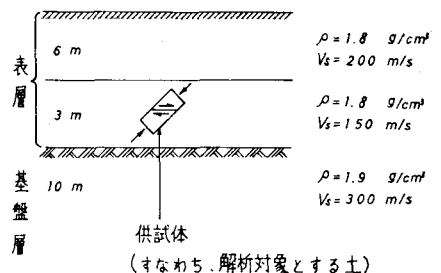


図-1 表層地盤と供試体の関係

いた。

3. 実験装置の概要

本研究では、NEC社製のマイコンPC8001を用いた。実験装置のブロック図を(図-2)に示す。計算機として乗算速度の速いものを使うほど液状化による飽和砂の物性の急激な変化に対してリアルタイムで演算が可能となる。マイコンのプログラムは、(2)~(5)式に示される非線形波動差分方程式による応答計算と、実復元力のA/D変換と変位応答値のD/A変換に伴う制御部分より成っている。これらをすべてマシン語でプログラミングして解析に用いた。

4. 解析結果及び考察

図-1に示した地盤のモデルと表面、境界、地下近散減衰の3条件を満足する非線形波動差分方程式を用いた解析結果(入力変位波が最大値1.3cmのランダム変位波)を図-3に示す。上から入力変位波、地表変位応答波、地表加速度応答波及び液状化した層における間隙水圧の変化である。加振により飽和砂層が液状化すると若干の時間遅れを伴って地表面はそれほど大きく振動しなくなる。これは地表と基盤とはさまれた飽和砂層が液状化するとセン断波が伝播しないためと考えられる。図-4はこの飽和砂層の復元力曲線である。加振により剛性が徐々に低下して行き最後はほぼ変位のみの曲線となっている。これより液状化するとセン断波が伝わらないことがわかる。また、完全液状化状態になる直前の不完全液状化時に大きな地表応答加速度と大きな履歴ループが見られる(図-3,4)。このような不完全液状化時の応答特性、復元力特性の解明を今後の課題としたい。

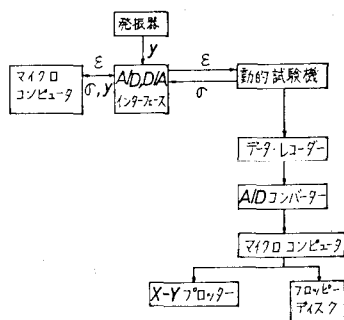


図-2 実験装置の構成図

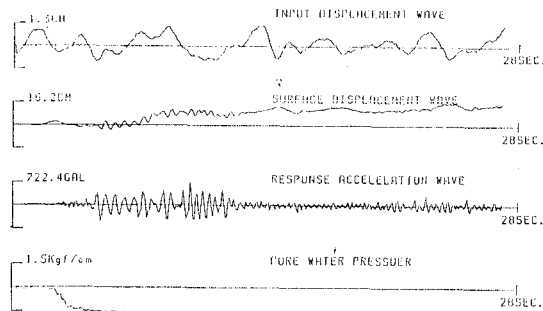


図-3 地表面の非線形応答特性

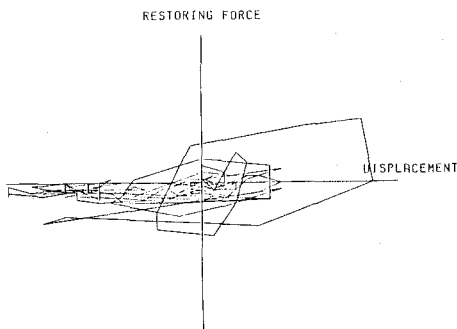


図-4 液状化層の非線形復元力曲線

謝辞 実験装置であるインターフェイスの製作及びプログラムの開発に当り、堀内路雄氏(アストロデザイン社)の多大の援助を受けています。本学土質・基礎研究室の神山教授、成山講師、目黒技士には種々の有益な助言と便宜を受けています。研究費の一部には文部省科研費(57年度、58年度奨励研究・研究代表者 片田敏行)の補助を受けています。記して謝意を表する次第です。東大地震研究所伯野元彦教授には日頃より数々の便宜を賜わり、深謝する次第です。

参考文献 (1)片田・伯野：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、NO.318

PP.21-28, 1982.2. (2)片田、他：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、昭和58年5月、(3)篠野・伯野：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年8月