

(34) 表層地盤の最大地動の実験的推定

武蔵工業大学	片田 敏行
武蔵工業大学大学院	中田 隆博
静岡工業高校	芹沢 宏芳
京王建設㈱	森田 実

1. まえがき

土木構造物は地表、あるいは地中に建設される。このため、その耐震性を検討する際には表層地盤の震動特性を明らかにすることが必要となる。例えば、震度法で耐震設計を行なうためには地表の最大加速度を推定することが必要である。

地震時において基盤震動が大きくなると、表層地盤は非線形な挙動を示すようになる。すなわち、基盤震動が大きくなるにつれて表層地盤の非線形性が進行し、その応答特性は変化して行く。地表加速度応答特性に着目して考えると、伝達系である表層地盤の非線形性が進行するため地表最大加速度は低下することが予想される。一方で、基盤入力が大きくなると地表最大加速度は大きくなることが予想される。

本研究は上記のような伝達系の非線形の進行による最大応答加速度の低下と、入力加速度の増大による最大応答加速度の上昇との結果、最大応答加速度がどのように変化するかを明らかにしようとするものである。

今まで、表層地盤の非線形震動特性は振動方程式、波動方程式を用いて解析されている。しかし、これらの表層地盤の非線形震動特性は解析時に用いられる非線形復元力特性を表わす数学モデルによって解析結果が違ってくる。現在非線形復元力特性を表わす数学モデルとして、バイリニアモデル、修正Hardin-Drnevichモデル、Ramberg・Osgoodモデルなどがよく使われている。これらは数学モデルであるため、モデル化に伴う仮定や近似は避けることができず、同じ入力条件のもとで解析を行なっても用いるモデルにより異なった解析結果が得られる。したがって、どの復元力モデルが真の値を表わしているのか判断するのは非常に難しい。

これに対して、片田らによって提案された実復元力を用いて表層地盤の非線形震動解析を行なうプログラム制御オンライン実験方法にはこのような困難さが伴わない。すなわち、この実験方法は実復元力を用いて行なうため、モデル化に伴う仮定や近似を避けることができる。このため、表層地盤の非線形挙動を明らかにするうえで、数学モデルを用いた解析方法より真の値に近い解析結果が得られると思われる。

本研究は、この実復元力を用いる非線形震動解析方法により、表層地盤の最大地動のひとつである加速度応答特性を明らかにしようとするものである。つまり、入力である基盤震動が大きくなるにつれて、表層地盤の応答特性がどのような変化を示すか明らかにし、表層地盤の非線形挙動を考察しようとするものである。本来、表層地盤は多自由度系で表わされなければいけないが、本研究では研究の第一段階として1自由度系で表層地盤はモデル化する。また、解析例としては液状化を伴う飽和砂層地盤を取り上げた。

2. 解析理論及び解析装置

実復元力を用いた非線形地盤応答解析理論と解析装置の詳細については参考文献(1)、(2)を参照願いたい。ここではその概略のみにとどめる。

1自由度系の振動方程式は次式で与えられる。

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

$x(t)$: 質点の変位, β : 減衰定数, ω_0 : 1自由度系の固有円振動数, m : 質点の質量, $R(x, t)$: 非線形復元力, $y(t)$: 基盤入力加速度

本研究ではマイコンを用いてプログラムによる応答計算を行なう。つまり(1)式を線形加速度法を用いてプログラミングして演算を行なう。入力加速度波により計算された応答変位をD/Aコンバータを用いてアナログ化し、振動三軸試験機に強制変位として加えられる。それによって得られた反力をA/Dコンバータを用いてデジタル化し、マイコンに取り入れ次のステップの応答計算に必要な復元力として用いられる。

また、解析装置は実復元力を得るための振動三軸試験機と応答計算をするためのマイクロコンピュータ(PC9801F2)の2つから成っている。

解析装置の概要及び構成図を図-1、図-2に示す。

3. 飽和砂層地盤のモデル化

飽和砂層地盤は研究の第1段階として1自由度系でモデル化を行なう。この時の地盤の固有振動数を2 Hz、減衰定数を0.1と仮定した。実験で用いる供試体は高さ10 cm、直径5 cmで、その応力状態を $\sigma_1 = \sigma_3 = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$ とし、試料砂には豊浦標準砂(比重 $G_s = 2.63$, $e_{\min} = 0.619$, $e_{\max} = 0.993$)を用いた。また、試料砂の相対密度は平均26~27%程度の緩詰状態である。

4. 解析結果及び考察

4-1 表層地盤の非線形共振曲線

飽和砂層地盤の伝達系を明らかにするために非線形共振曲線を示めた。入力加速度の最大を100 galとした正弦波を用い、その振動数を1.5 Hz~6 Hzまで変化させて実験を行なった。実験により得られた共振曲線を図-3に示す。また実験結果との比較検討のために、数学モデルとして修正Hardin-Drnevichモデルを用いて数値的に求めた共振曲線も示した(最大せん断剛性率 $G_{\max} = 913 \text{ kg/cm}^2$, 粘性減衰定数0.10)。図-3を見てもわかるように、実復元力を用いた実験の場合にはピークがはっきりせず、2~4 Hzの領域においては修正H-Dモデルの応答倍率より若干低くなっている。これは、修正H-Dモデルは間隙水圧を考慮していないのに対し、実復元力を用いた実験の場合には加振により間隙水圧が上昇して、その結果剛性が低下することによるからだと思われる。

4-2 表層地盤の非線形加速度応答特性

表層地盤の非線形応答特性を知るために入力加速度の大きさによって、加速度応答倍率がどのように変化するか調べた。入力としては正弦波(振動数1 Hz)及びランダム波

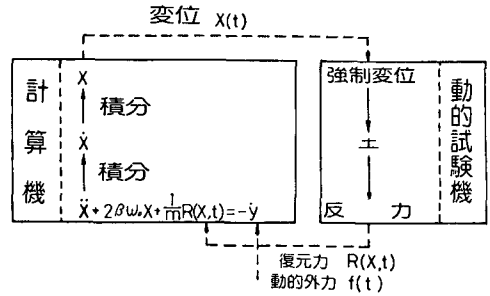


図-1 解析装置の概要

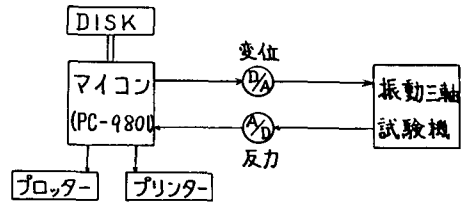


図-2 解析装置の構成

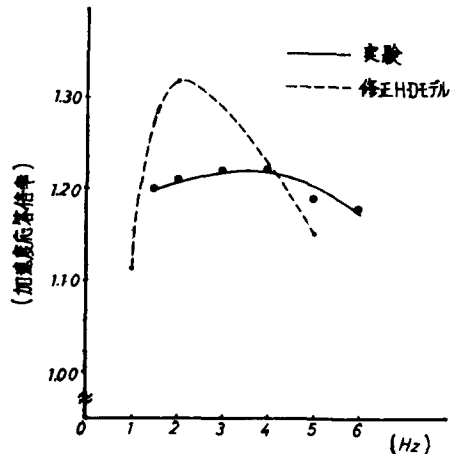


図-3 非線形共振曲線

を使い入力加速度を50 gal～400 galまで変化させて実験を行なった。実験で得られた入力加速度と加速度応答倍率の関係を図4、5に示す。

入力波が正弦波（振動波1 Hz）の場合には100 galを越えると完全液状化状態となり、ランダム波入力の場合には150 galを越えると完全液状化した。

入力波が正弦波、ランダム波を問わず入力加速度が大きくなり液状化すると加速度応答倍率は急激に低下した。これは液状化時に間隙水圧の上昇により供試体の剛性が低下したためと思われる。入力が200 galを越えるとそれほど応答倍率は変化しなくなる。これは入力の強さに対する飽和砂層地盤の応答値の限界を示しているかもしれない。

5. あとがき

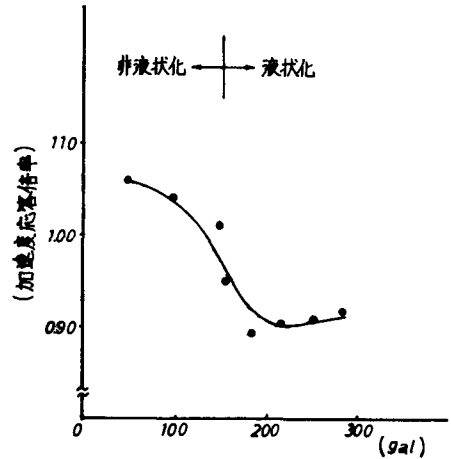
本研究は実復元力を用いた表層地盤の非線形振動解析手法により、飽和砂層地盤の最大地動の実験的推定を試みたものである。なお、市販の振動三軸試験機は応力制御方式で目標動的荷重が達成できるように調整してある。このため変位制御方式では長周期入力波（2秒以上）に対して応答特性が悪い。そこで油圧サーボコントローラーを改良して、変位制御方法でも良好な応答特性が得られるように改良した。この装置を使った解析結果については次回の機会に発表したい。今後、地盤を多自由度系でモデル化を行ない実地震波を用いて解析を試みたいと考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたり本学土質・基礎研究室の神山教授、成山講師及び目黒技士には数々の便宜をいただいている。また、東大地震研伯野教授と誠研舎（株）・上戸氏には数々の有益な助言をいただいた。記して感謝する次第です。

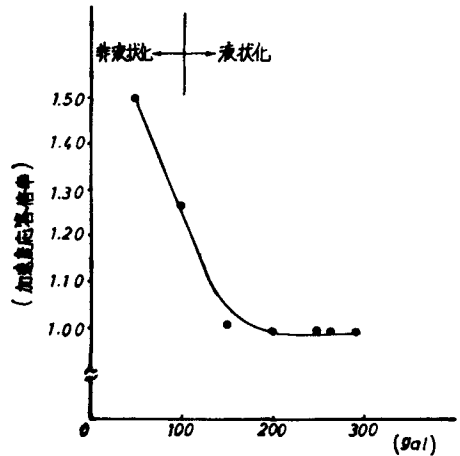
参考文献

- (1) 片田，他：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，第19回土質工学研究発表会講演集，pp539～540，昭和59年6月
- (2) 片田，他：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，昭和60年4月
- (3) Katada, T, et al: Nonlinear Analysis of Surface Ground Motion By Digital Control On-line Experimental Method, 第8回世界地震工学会議講演集，pp 1033～1040，1984，7
- (4) 高梨，他：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，日本建築学会論文報告集，No. 299，pp 77～83，1975，3
- (5) 山田，家村，他：履歴吸収エネルギーによるRC橋脚モデルの耐震性評価，第17回地震工学研究発表会講演概要集，pp 231～234，1983，7



図－4 加速度応答倍率

（ランダム波を用いた場合）



図－5 加速度応答倍率

（正弦波, 1 Hzを用いた場合）