

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

NONLINEAR WAVE PROPAGATION ANALYSIS OF LIQUEFYING MULTI-LAYERED SURFACE GROUND BY USING REAL RESTORING FORCE

片田敏行*・板谷裕二**・勝田博敏***

By Toshiyuki KATADA, Yuji ITAYA and Hirotohi KATSUTA

This paper describes an analytical theory and method to compute the nonlinear surface ground motion by using a real restoring force. A surface ground motion is mathematically expressed in a wave propagation equation or vibration equation. A restoring force function of soil is given in mathematical model. The most important point of the analytical method suggested in this paper is to use real restoring force for a shearing stress necessary for calculation. The authors don't use a mathematical model but a physical model to represent a restoring force characteristics of soil. The analytical apparatus is a micro-computer connected a dynamic triaxial soil testing machine. We have got the nonlinear response characteristics of surface ground motion in liquefaction process.

1. ま え が き

土木構造物や建築構造物の耐震性を検討する際には、その構造物を支えている表層地盤の地震時挙動を明らかにしておく必要がある。通常、地震時における表層地盤の振動性状は、この振動システムを数学モデルで記述し、デジタル計算機で数値シミュレーションすることにより明らかにされる。すなわち、地震基盤より入力する地震動に対する表層地盤の振動を振動方程式あるいは波動方程式で表現し、これを数値的に解析して表層地盤の地震時挙動を明らかにしている。このとき必要となる土の動的復元力特性は数式でモデル化された復元力関数が用いられる。

表層地盤の地震動を厳密に解析するためには、地震動による過剰間隙水圧の発生およびこれに伴う剛性の変化、あるいは土の復元力の非線形性を考える必要がある。このとき表層地盤の挙動は次式のような連立方程式で表わされる。

間隙水圧発生状況に関する非定常方程式： g

$$\left. \begin{aligned} u &= g(\sigma, \epsilon, p, e) \\ \text{動的外力と変形に関する非線形方程式：} & f \dots (1) \\ f(\sigma, \epsilon, p, e, u) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

ただし、 e ：間隙比、 p ：拘束圧、 u ：間隙水圧、 σ ：せん断応力、 ϵ ：せん断ひずみ

定性的に式(1)のように表現される表層地盤の地震動に関する振動システムをすべて数式で記述して数値解析する方法には以下のような困難さが伴うと考えられる。

まず、第1に式(1)のような非線形でかつ非定常な方程式を厳密に精度よく解くにはプログラミングの困難と膨大な計算時間を要する。第2に式(1)に含まれる土の非線形復元力関数および間隙水圧上昇関数にしても、動的試験結果よりモデル化に伴いかなりの近似が避けられない。また、第3に動的試験に関しても、通常は目標荷重を一定として供試体の変位を測定し復元力特性を求める応力制御方法によって行われる。しかし、応力制御方法では飽和砂の液状化のように加振によりその復元力が急激に減少し、ほとんどゼロになるような場合には完全液状化状態まで動的試験が行えない。さらに、強制変位を目標値とする変位制御方法も考えられる。動的試験において、応力制御方法と変位制御方法とによって得られる復元力曲線は互いに異なる。どちらが真にその物性の非線形復元力特性を明らかにしているかはわからない。

* 正会員 工博 武蔵工業大学講師 土木工学科

** (株)ツルミ技術

*** 学生会員 武蔵工業大学(修士課程)土木工学専攻

(〒158 世田谷区玉堤 1-28-1)

以上のような点を考えると、地盤振動解析においてすべてを数学モデルで記述するのではなくて、地盤を構成する土より成る物理モデルをも導入することが考えられる。そこで、地盤より直径5 cm、高さ10 cmの土のサンプルを採取して、これを供試体という形で振動解析システムに組み込む。実際に地盤を構成する土より成る供試体は地盤の動的復元力特性（過剰間隙水圧が発生した場合にはこれを含めて）を表わす物理モデルといえる。このように、実際の土よりリアルタイムで、その動的復元力を取り入れる振動解析を行う方が解析精度が向上すると思われる。

上記のような実際の構造部材より成る物理モデルを用いた非線形振動解析方法により伯野はりの動的な非線形復元力解析を行っている¹⁾。振動システムは振動方程式を解くアナログ計算機と非線形復元力を取り出す動的試験機より成り、両者を電氣的に結合している。この意味で、伯野はこの解析方法をオンライン・リアルタイム実験方法とよんでいる²⁾。

以上のようなオンライン実験方法を簡単にいえば実復元力を用いた非線形応答解析法であるといえる。しかも、同時に物理モデルである構造部材に加わる力とそれによる構造部材の変形量を動的試験機において測定することにより非線形復元力が明らかにできる。構造部材の復元力が非線形領域に入るに伴い、剛性が低下し、履歴減衰が生じるため構造系全体の固有周期と減衰特性が変化する。オンライン実験方法では、このような非線形性の程度に応じて構造部材に加わる力も変化するという実際現象と同じ状態で動的な非線形復元力を明らかにしようとしている。この点が一定の動的荷重を載荷する応力制御方法の場合と大きく異なる。

このようなオンライン実験方法による非線形復元力解析方法の特徴を利用して種々の材料、種々のタイプの構造部材についてその解析結果が報告されている。建築の分野では岡田・関が鉄筋コンクリート骨組の地震時における非線形復元力特性と非線形応答特性を明らかにしている^{13)~17)}。さらに、高梨らにより鉄骨フレームや高力ボルトで摩擦接合された骨組などについてもオンライン実験が行われている^{18)~22)}。土木の分野でも家村らによりRC橋脚の模型を用いたオンライン実験が行われている^{20)~31)}。

オンライン実験方法による地盤の非線形振動解析および土の非線形復元力解析は、片田・伯野によって試みられている³⁾。

その結果、動的外力によって完全に液化化するまでの飽和砂の応力-ひずみ曲線が得られている。また、完全液化化状態までの地表の加速度応答、速度応答、変位応答、間隙水圧なども得られている。

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、本論文では実復元力を用いた地盤応答解析に主眼を置いて、その解析方法を提案することにする。具体的には、多層地盤の地震時挙動を非線形波動方程式で表現し、動的試験機により実復元力の提供を受けて非線形波動解析を行うことにする。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うことにする。

2. 解析理論

(1) 非線形波動方程式

線形の波動方程式の解析理論としては周波数領域で行うマトリックス方法²⁶⁾、あるいは時間領域で行う小林・鏡味の方法²⁷⁾などがあり、それぞれよく使われている。しかし、本研究では復元力が非線形である。しかも動的試験機よりリアルタイムで提供される実復元力である。それゆえ非線形波動方程式の数値解析理論としては演算速度が速いことが重要である。さらに、地表面と地層間の境界条件および地下逸散減衰なども考慮されなければならない。

以上のような必要条件を満たす数値解析理論として藤野・伯野の方法²⁶⁾があり、本研究ではこの数値解析理論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うえで境界条件や地下逸散減衰を考慮する差分式を加えている。

以下に用いた式のみを記しておく。

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。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x}(\sigma) \dots \dots \dots (2)$$

式(2)を中心差分により差分形に変形すると次式が得られる。

$$u_{n,m+1} = 2u_{n,m} - u_{n,m-1} + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t^2}{\Delta x} (\sigma_{n+1} - \sigma_n) \dots \dots \dots (3)$$

さらに境界条件として、地表では $\sigma = 0$ より

$$u_1 = u_{-1} \dots \dots \dots (4)$$

ただし地表面の変位を u_0 とする。

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。

$$u_{k,m} = (1 + \alpha_0) \cdot u_{k+1,m-1} + (1 - \alpha_0) \cdot u_{k-1,m-1} - u_{k,m-2} \dots \dots \dots (5)$$

さらに地下逸散減衰を考慮して、基盤層の変位は次式で与えられる。

$$u_{n-1,m+1} = u_{n-2,m} + F(m) - F(m-2) \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 F ：入力変位波、 k ：深さ方向距離ステップ、 m ：時間ステップ、 n ：深さ方向距離ステップ、 t ：時間、 x ：深さ方向座標、 α_0 ：透過率、 Δt ：時間刻み、 Δx ：格子点間隔、 ρ ：地盤の密度、 σ ：せん断応力

(2) 地盤のモデル化

本研究では地震動により液状化する飽和砂層をはさむ3層地盤を取り扱うことにする(図-1)。

解析に用いる振動三軸試験機は1台であるから提供される実復元力も1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。また、飽和砂層内でも場所により液状化性状は異なると思われるが、本研究では、飽和砂の復元力特性を供試体の復元力で代表させている。他の層については従来提案されている非線形復元力モデルを用いることにする。本研究では土の非線形復元力モデルとしてバイリ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

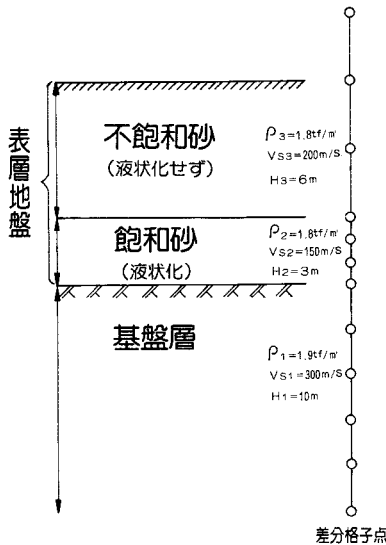


図-1 解析に用いた地盤モデル

表-1 試料土の物理的性質

豊浦標準砂		
比重 G_s	2.63	
間隙比 e	最大 e_{max}	0.992
	最小 e_{min}	0.619
均等係数	1.58	
曲率係数	1.12	
D_{50}	0.18	

率は0.4とした。基盤層は弾性体と仮定して計算を行った。

また、地盤の物性値は図-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いた。その物理的性質を表-1に示す。なお、層間において間隙水のやりとりはないものと仮定した。

3. 実験装置の概要

(1) 実験装置のブロックダイアグラム

実復元力を得る土の動的試験機としては市販の振動三軸試験装置(誠研舎製)を用いた。

片田・伯野の土質用オンライン実験では、計算機としてアナログ計算機を、動的試験機としては振動三軸試験機を用いている。その後、計算機としてより安定性に優れた加算型のデジタル積分素子を用いた演算回路を用いて軟弱地盤の非線形振動特性と非線形復元力特性の解析を試みている。

本研究では、NEC社製のマイコンPC 8001を用いた。実験装置のブロック図を図-2に示す。計算機として演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。

PC 8001はそのインタプリンターなどのコントロール・プログラムが最もよく知られており、解説書も数多く市販されている。それゆえ、A/D変換およびD/A変換によるデータの受渡しなどのプログラム部分をマシン語にプログラミングするのに便利であった。しかも非常に安価である。なお、A/D、D/A変換は10ビットである。

結果的には、実復元力を用いて差分方程式を1ステップを演算するのにマシン語によるプログラムで約0.08秒と物性の変化に対してほぼリアルタイムの演算が可能であった。

(2) マイコンと振動三軸試験機の結合

本研究では地盤の非線形復元力を表わす物理モデルとして、実際の土より成る高さ10cm、直径5cmの円筒

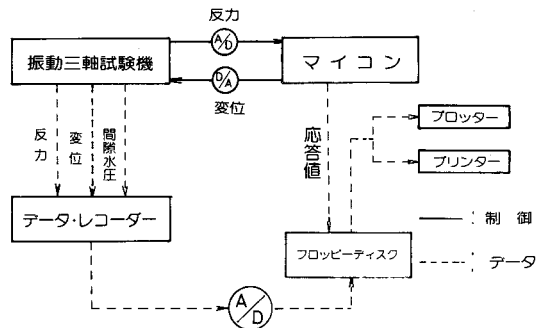


図-2 実験装置のブロック図

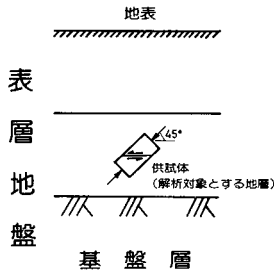


図-3 物理モデルとしての供試体と表層地盤の関係

形供試体を用いている。このため供試体の反力-垂直変位の関係と表層地盤のせん断復元力-せん断変位の関係を考へて、マイコンと振動三軸試験機を結合させる必要がある。すなわち、振動三軸試験において、供試体は地盤中で水平方向に対して45°の傾きをなす位置にあるとみなされる(図-3)。このような表層地盤と供試体の関係より、供試体反力 $p(t)$ と地盤のせん断応力 σ_s との関係は次式で与えられる。

$$\sigma_s = \frac{\sigma_v}{\sin 45^\circ}$$

$$= \frac{1}{\sin 45^\circ} \cdot \frac{p(t)}{S} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 σ_v : 供試体の垂直応力 (kg/cm²)

S : 供試体の断面積 (cm²)

また、供試体に加える強制変位についても、マイコンで求められた応答変位 x の数値は表層地盤のせん断変位を表わしている。供試体と表層地盤の関係より、表層地盤にせん断変位 x を生じさせるためには

$$x_v = x \cdot \sin 45^\circ \dots \dots \dots (8)$$

なる垂直変位 x_v を供試体に加える必要がある。

これらの関係を考慮すれば、マイコンと振動三軸試験機は図-4のように結合される。この結果、電算機による通常の応答計算と同じように、出力される数値がそのまま地盤の応答値を表わしている。アナログ・コンピュータを用いた場合には電圧で演算が行われるので、出力結果の数値は電圧変化を表わし、地盤の応答値と同じではない。いわば、現象の相似形が明らかになるにすぎない。この点がデジタル・コンピュータを用いた場合との大きな相違点である。

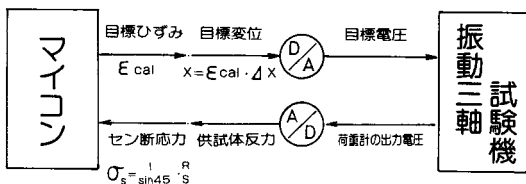


図-4 マイコンと振動三軸試験機の結合

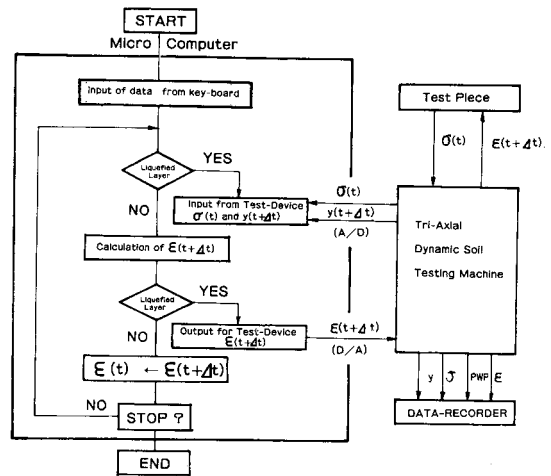


図-5 制御および応答計算プログラムのフローチャート

(3) 計算、制御プログラムの概要

マイコンのプログラムは式(3)~(6)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た。本研究で用いたプログラムのフローチャートを図-5に示す。

4. 解析結果および考察

図-1に示したモデル地盤に対して表面、境界、地下逸散減衰の3条件を満足する非線形波動方程式を用いて、飽和砂層を含む多層地盤の非線形波動解析を行った。このとき液状化する飽和砂層のせん断復元力は動的試験機よりリアルタイムでコンピュータに取り入れて応答解析を行い、地盤の非線形挙動を解析した。その結果、液状化する砂層を含む多層地盤の地表応答、液状化層における非

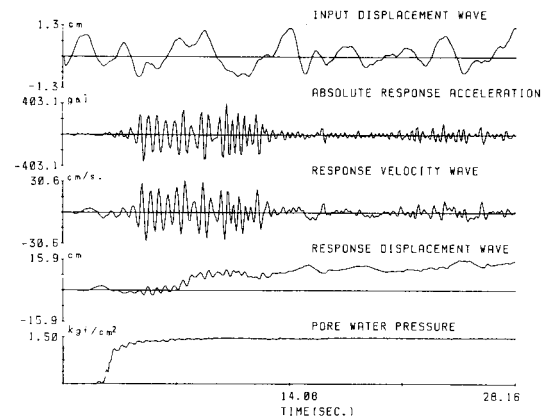


図-6 基盤入力変位波、地表の応答解析結果、および飽和砂の間隙水圧記録

線形復元力特性が明らかになった。以下に解析結果とその考察を述べる。

(1) 地表応答特性

図-6に入力変位波、地表の変位応答波、速度応答波、加速度応答波を示す。同時に飽和砂層の間隙水圧の変化も示す。飽和層は地中-6m~-9mのところにあるので、地表に波動が到達する以前より間隙水圧は上昇し始めている。図-6をみて直感的にわかることは飽和砂層が完全液状化すると地表の動的応答が非常に小さくなってしまふことであろう。このことは図-1に示したモデル地盤において、中間層である飽和砂層が液状化したことにより、地震波動がこれより上層に伝播しにくくなっていることを示している。しかし、地表変位応答をみると、10cm強の永久変位が残っている。すなわち、地盤が液状化すると、動的応答はなくなるが静的応答である永久変位が地表に生じる可能性があることがわかる。

さて、入力変位波を微分した入力速度波と地表の応答速度波の周波数特性をみるために、そのフーリエ・スペクトルを求めた。図-7は入力速度波の、図-8は地表

応答速度波のフーリエスペクトルである。入力速度波は0.6Hzに最も高いピークをもち、そのほかにも0.2Hz、0.4Hzなどの卓越振動数をもっている。これに対して、地表応答速度は、1.9Hzに最も高いピークをもち、そのほか2.7Hzにも卓越振動数をもっている。図-6に示す地表応答をみてもわかるように、地表から2層目の飽和砂層(図-1)の間隙水圧が上昇して液状化し始めると地表速度応答波形には、2Hz前後の成分波が卓越してくる。それゆえ、フーリエスペクトルにみられる1.9Hzあるいは2.7Hzなどの卓越周期は、液状化してゆく層を含む表層全体の固有周期ではないかと考えられる。

(2) 液状化層の復元力特性

液状化する飽和砂層のせん断ひずみとせん断応力の関係は、振動三軸試験機にセットした飽和供試体よりリアルタイムで得られる。この供試体は実際の飽和砂層と同じ材料より成り、実物のスモール・スケールの物理モデルであると考ええる。この物理モデルより得られたせん断応力、せん断ひずみ、間隙水圧の変化を図-9に示す。当然のことながら、波動により間隙水圧が上昇するにつれて飽和砂層のせん断応力は急速に低下し、完全液状化状態には、ほぼゼロとなってしまう。

また、せん断ひずみをみると、不完全液状化時に大きな応答が生じている。このとき、同時にせん断応力も大きくなっている。さらに、液状化が進行するとせん断ひずみが小さくなっていく。しかし、完全液状化状態になると大きく変動している。これは液状化のためにせん断応力がほぼゼロで飽和砂層が不安定となり、大きくひずんだものと考えられる。

供試体より得られたこのせん断応力とせん断ひずみを用いて描いたのが図-10の応力-ひずみ曲線である。振れ始め直後はほぼ線形的な動きをする。しかし、これは

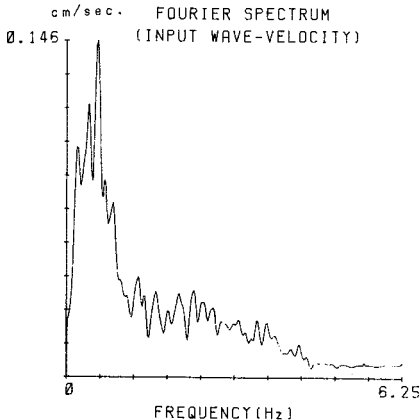


図-7 入力速度波のフーリエ・スペクトル

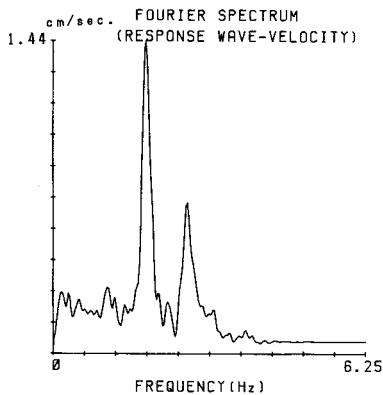


図-8 地表応答速度波のフーリエ・スペクトル

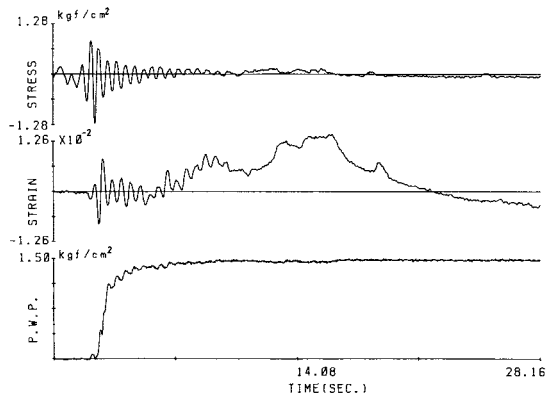
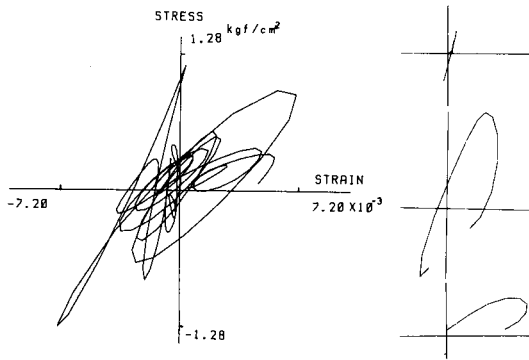


図-9 飽和砂層における応力とひずみの変化 (供試体の相対密度: $D_r=26\%$)



図一10 飽和層における応力-ひずみ曲線 図一11 応力-ひずみ曲線の変化図

きわめて短時間で終わり、液状化の過渡状態において大きなループを描く。その後は液状化の進行とともにループの傾きは徐々に低下しているのがわかる。しかし、入力変位波がランダム波であるので、履歴曲線はそれほどきれいな楕円形を描いていない。

応力-ひずみ曲線の変化をさらにわかりやすくするために、時間を追ってプロットしたのが図一11である。上記のような応力-ひずみ曲線の変化については、間隙水圧の上昇過程と応力、ひずみ(図一9)の関連をみるに、間隙水圧が急激に上昇する不完全液状化時に応力とひずみは大きな値を示している。この大きな値により、過渡状態において大きなループを描いている。それゆえ、過渡状態における復元力特性や地表応答特性が構造物にどのような影響を与えるかを明らかにすることが必要になってくるかもしれない。今後に残された課題であろう。

5. あとがき

本研究では地盤応答解析にあたって、すべてを数学モデルで記述するのではなく、地盤を構成する土より成る物理モデルを導入した地盤応答解析方法を提案している。

提案した応答解析手法を用いた解析例として、飽和砂層を含む多層地盤の液状化過程における非線形応答特性を取り上げた。多層地盤の挙動は非線形波動方程式で表現され、飽和砂層の復元力のみが動的試験機からリアルタイムで計算機に提供される。

解析の結果、地表の加速度応答、速度応答、変位応答および飽和砂層の応力、ひずみ、間隙水圧の変化などが明らかになっている。解析結果の妥当性を検証するためには、実地盤での観測結果が不可欠である。しかし、現在まで基盤に入力する地震加速度、地盤の間隙水圧の変化、地表の応答などをすべて同時に記録したものはない。このため、本研究で提案した解析方法によって得られた結果を検証するのは難しい。しかし、加振に伴う間隙水

圧の上昇、せん断応力の低下など物理的に納得がゆく結果が得られている。また従来より行われている有効応力解析の結果との比較検討をすることも考えられる。

今後の問題点として、本論文では地盤応答解析手法の提案に主眼を置いているので任意の多層地盤について非線形性が大きくなる強震時にどのような応答特性を示すかを解析することが残されている。

謝 辞：実験装置のインターフェイスの製作およびプログラムの開発にあたっては堀内路雄氏(アストロデザイン社)の助言を受けています。また、上戸利明氏(誠研舎)には数々の便宜と助言をいただきました。本学土木工学科、土質・基礎研究室神山教授、成山講師、目黒技士には種々の便宜を受けています。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と有益な助言を賜わり、深謝する次第です。研究費の一部には文部省科学研究費(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。謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 片田敏行・石原正志・鈴木考典：オンライン実験方法による粘性土の動的な非線形復元力特性の実験的解析，第10回土木学会関東支部講演会，Ⅲ-14，pp. 105～106，1983.1.12.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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回年次学術講演会講演概要集第1部，pp. 641～642，1983-9.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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）。
 - 11) 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。
 - 12) 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。
 - 13) 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. 280，pp. 77~84，1979-5。
 - 14) 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. 280，pp. 77~84，1979-5。
 - 15) 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。
 - 16) 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。
 - 17) 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。
 - 18) 高梨晃一・宇田川邦明・関松太郎・岡田恒男・田中 尚：電算機一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. 299，pp. 77~83，1975-3。
 - 19) 宇田川邦明・高梨晃一・田中 尚：電算機一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）はり崩壊型一層一スパン鋼フレーム，日本建築学会論文報告集，No. 268，pp. 49~59，1978-6。
 - 20) 宇田川邦明・高梨晃一・田中 尚：電算機一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。
 - 21) 谷口英武・高梨晃一・田中 尚・田中淳夫：電算機一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。
 - 22) 谷口英武・高梨晃一・田中 尚：電算機一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。
 - 23) 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。
 - 24) 岡田恒男・関松太郎・伊藤秀男：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。
 - 25) 戸川隼人：有限要素法による振動解析，pp. 34~41，サイエンス社。
 - 26) 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. 24，pp. 1~9，1975-8。
 - 27) 小林啓美：建築構造大系-地震工学-建物の地震応答解析と耐震設計，彰国社，pp. 165~168。
 - 28) 佐藤泰男・嶋 悦三・小竹美子：地表の軟弱地盤を取り除くことが地盤の振動レスポンスに与える影響について，土木学会論文報告集，No. 198，pp. 37~45，1972-2。
 - 29) Iemura, H. and Kato, T. and Kawamura, Y.: Hybrid Experiments on Earthquake Response of Original and Repaired RC Members Proceedings of the Sixth Japan Earthquake Engineering Symposium-1982, Dec. 1982.
 - 30) 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集，pp. 231~234，土木学会耐震工学委員会，1983. 7. 20~22
 - 31) 西村一郎・山田善一・家村浩和：エネルギー分担率によるRC橋脚模型の耐震性評価，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集第1部，I-348，pp. 695~696，1983-9。

(1984. 8. 10・受付)