

構造物基礎の非定常履歴復元力の模式化と応答について

京都大学工学部 正員 後藤尚男, 京都大学工学部 正員 ○北瀬 勝

1. はしがき 地震時における構造物基礎—地盤系の動的挙動においては周知のように、系の慣性力、減衰力、復元力特性および入力としての地震動の特性が応答に大きな影響を及ぼす。したがって、系の耐震解析に当ってその妥当性を高め、いくためには以上の4つの要素をいかにモデル化するかということが重要な課題と言えるが、とりわけ基礎と地盤の相互作用と密接に関わり合っている復元力特性については未だ実験を通じて現象を把握することから始めなければならない問題点も多い。その1つに非定常なランダム外力が作用したときの構造物基礎—地盤系の復元力特性を明らかにするという課題がある。従来鋼やコンクリートの構造部材、構造要素、耐震壁などについては繰り返し荷重を加えて復元力特性を調べる試みが多くなされており、また結果を巨視的に把えて応答解析に使用するのに便利な復元力モデルも数多く提案されている¹⁾。基礎—地盤系の復元力特性に関しても静的交番載荷実験や起振機による正弦波加振実験、振動台を用いた模型実験などが実施されているが、地震動のようにランダムな外力に対する復元力特性については実験例が多くないこともあって、不明な点も少なくない。このような観点から本研究は、(1)地盤中に根入れされた構造物基礎模型の頂部に静的交番や正弦波的、ランダム振動的な強制変位を与え、その時に生ずる地盤反力にはば釣り合っているものと考えられる強制外力と、与えた強制変位との関係より構造物基礎—地盤系の復元力、特にランダム波に対する非定常な履歴復元力を推定すること、(2)復元力の模式化および非定常履歴復元力の制御法と新たに開発すること、(3)(2)で得られた復元力特性を有する系の応答解析も行なうとともに、実験結果との比較・検討を通じて本模式化の妥当性を確かめること、の三者を目的としたものである。

2. 実験の概要 図-1に実験の概要を示す。実験に用いた基礎模型は短型断面(50mm×225mm)を持つ高さ600mm、重さ38.7kgの鋼製模型で、その底部にヒンジを設け振動方向にのみ回転しうる1自由度系とした。

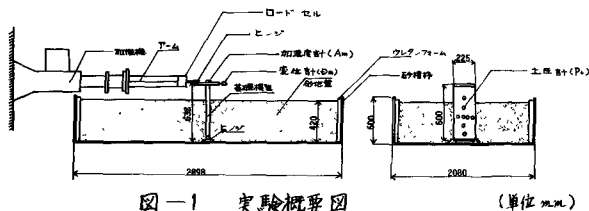


図-1 実験概要図 (単位 mm)

模型側面には土圧計、模型頂部には加速度計、変位計の各ピックアップを設置し、模型頂部はヒンジを介して加振機のアームと剛結した。また加振機アームと模型頂部ヒンジの間にはロードセルを設け、頂部に作用する地盤による全反力を測定した。模型地盤としては土の持つ物理的諸特性を生かすため、実砂3mを真空中自然乾燥の状態にして用いた。本研究で構造物基礎—地盤系の復元力特性が得られると考えられるのは以下の理由による。すなわち本実験で対象とするような底にヒンジ部を有する剛体の基礎模型の運動は、ヒンジを回転中心とする回転運動のみの1自由度の運動方程式として次式で表わせる。

$$J_0 \ddot{\varphi} + C(\dot{\varphi}) + M(\varphi) = P(\omega) \times \varphi \quad \text{----- (1)}$$

ここに J_0 : 基礎模型の回転中心まわりの慣性モーメント, φ : 回転中心まわりの回転角, $C(\dot{\varphi})$: 減衰力による回転中心まわりのモーメント, $M(\varphi)$: φ のみによる狭義の復元力による回転中心まわり

のモーメント、 $P(x)$ ：模型頂部に強制変位を作用させることにより生じた地盤による全反力、 r ：回転中心と強制変位作用点との距離。 J や $\dot{\varphi}$ が小さくて $J\dot{\varphi}$ が式(1)の他の項に比べて無視しうるときには、左辺第2項と第3項の和すなわち広義の復元力による回転中心まわりのモーメントは $P(x) \times r$ として求められる。また本方法では $C(\varphi)$ と $M(\varphi)$ の大きさの比は明らかでないが、一般には $M(\varphi)$ の方がかなり大きい⁴⁾ので以下においては $C(\varphi)$ は一応考えないものとする(本研究では変位と φ 、復元力と $M(\varphi)$ はそれぞれ比例関係にあるので、以下では変位や復元力という)。

3. 実験結果 基礎模型に作用する振動上圧の大きさやその分布形状などが頂部強制変位の振幅や加振振動数との関連において明らかとなり、基礎に働く復元力特性に関して次の各結果が得られた。

(1) 定常正弦波入力に対する復元力曲線の形状はいわゆる摩擦型であり、変位が一定であり、加振振動数 f が比較的lowければ(本実験の範囲では約10Hz以下)その形状は f によらずほぼ同じ形状を保つ(図-2(a)参照)。(2) 強制変位の振幅を種々に変えて得られる定常履歴曲線の最大点を連ねた曲線(=最大点曲線)は軟化ばね型である。(3) 最大変位 D_{max} と最大復元力で無次元化された定常履歴曲線は D_{max} や f により若干変化するが、この系に固有な形状(=固有履歴ループ)となる(図-3)。(4) 振幅漸变的正弦波や振幅一定振動数漸变的正弦波による加振実験より得られる履歴曲線にも、定常履歴ループとはほぼ同様の特徴が見られるが、定常正弦波加振時よりも地盤が乱されてゆるくなるこ

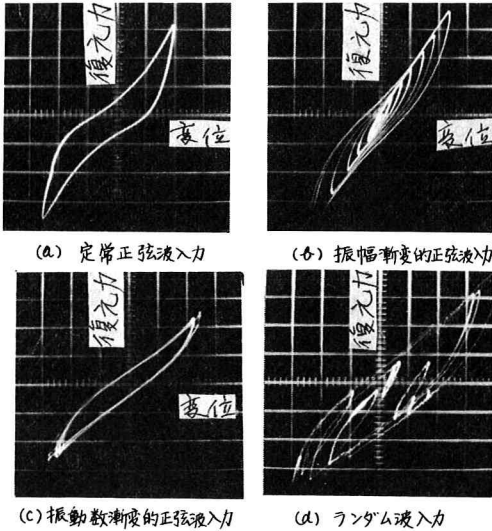


図-2 復元力曲線

とを反映して履歴曲線における加力方向逆転直前の剛性や最大点曲線の剛性がやや小さい(図-2(b),(c))。(5) ランダム波加力時の復元力曲線にも最大点曲線や固有履歴ループが存在するとみなしうるが、その形状は(4)に近い(図-2(d))。(6) ランダム加力時には復元力曲線はある履歴ループから異なる

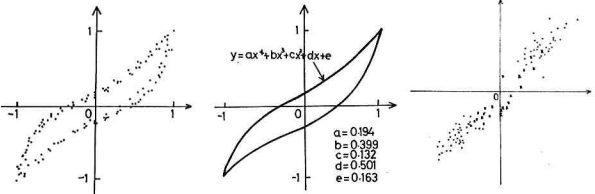


図-3 実験より求めた固有履歴ループ

図-4 式(4)なる4次式で近似した固有履歴ループ

図-5 荷重方向逆転直後の勾配

レベルの履歴ループへ最大点曲線を介して滑らかに乗り移っていく。(7) 履歴ループを描いている途中で荷重方向が逆転する場合には履歴ループはその直前で荷重方向が逆転した点を目指す。(8) 逆転直後の履歴ループの勾配は直前のそれよりも大きい。また逆転直後の勾配のうち振動中立軸付近で逆転する場合の勾配は他の領域で逆転する場合のそれに比べてやや小さい(図-5参照、図中・印と×印はそれぞれ逆転直後の勾配が比較的大きいあるいは比較的小さい履歴ループの存在した点)。

4. 履歴復元力曲線の模式表示 本実験で得られた復元力曲線には最大点曲線と固有履歴ループが存在することから次のように復元力曲線を模式表示する⁵⁾。

$$M(x/x_0) = f_0(x/x_0) \cdot g(x/x) \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 $M(x/x_0)$: 復元力曲線、 $k(x/x_0)$: 最大点曲線、 $g(x/x)$: 固有履歴ループ、 x : 変位、 x_0 : 規準変位、 X : 固有履歴ループの最大変位。 $k(x/x_0)$ 、 $g(x/x)$ はそれぞれ次のように模式表示する。

$$k(x/x_0) = A(x/x_0)^m \quad (3)$$

$$g(x/x) = \pm a\left(\frac{x}{x_0}\right)^4 + b\left(\frac{x}{x_0}\right)^3 \pm \left(\frac{m-1}{2} - 2a - b\right)\left(\frac{x}{x_0}\right)^2 + (1-b)\left(\frac{x}{x_0}\right) + \left(\frac{m-1}{2} - a - b\right) \quad (4)$$

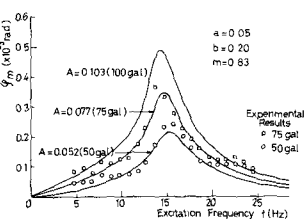


図-6 共振曲線

ここに、 A 、 m 、 a 、 b : パラメータ、複号は順に固有履歴ループの上枝、下枝曲線を表わす。図-3の実験値に式(4)を用いて模式表示したものが図-4である。両者はかなり一致しているといえよう。

5. 応答解析 式(2)~(4)で表わされる復元力曲線と、3.で見られた非定常時の履歴曲線の挙動とともに新たに開発した復元力の制御法とを用い、応答解析を行なって、得られた結果の数例を以下に示す。

筆者らが本研究とは別に振動台を用いて実施した加振実験から得られる共振曲線と、式(1)の $M(\varphi)$ に式(2)を代入し、右辺に正弦波外力と作用させて得られる式に変数徐変化法を適用して求めた共振曲線の両者を図示したものが図-6 (A は入力レベル) である。両者の共振振動数や曲線全体の形状は包括的にはよく近似しており、復元力曲線の模式表示の妥当性を裏づけていよう。また図には、復元力曲線のうちの固有履歴ループよりも最大点曲線の形状が強く影響して、入力レベルの増大に伴う共振振動数の低下など軟化ばね型の特徴が現われている。図-6 が定常正弦波に対する応答であるのに対して、図-7 は入力の加速度振幅を一定としたまま、加振振動数を漸増および漸減させて得られた応答の相対加速度と相対変位の時間曲線と表わしている(いわゆる Sweep Test)。同図(a)は継続時間20(微小振動時の系の固有周期を1とする)の間に正弦波の加振振動数 η を0から3まで漸増させたものであり、(b)は逆に漸減させたものである。図より応答の最大値は η が1(微小振動時に共振となる条件)となる時刻よりも後に発生すること、軟化ばね型非線形系の跳躍現象によるものと考えられるが変位応答の最大値は(b)の方が約20%大きく、加速度応答のそれは共振振動数の大小が2乗で効くことを反映し

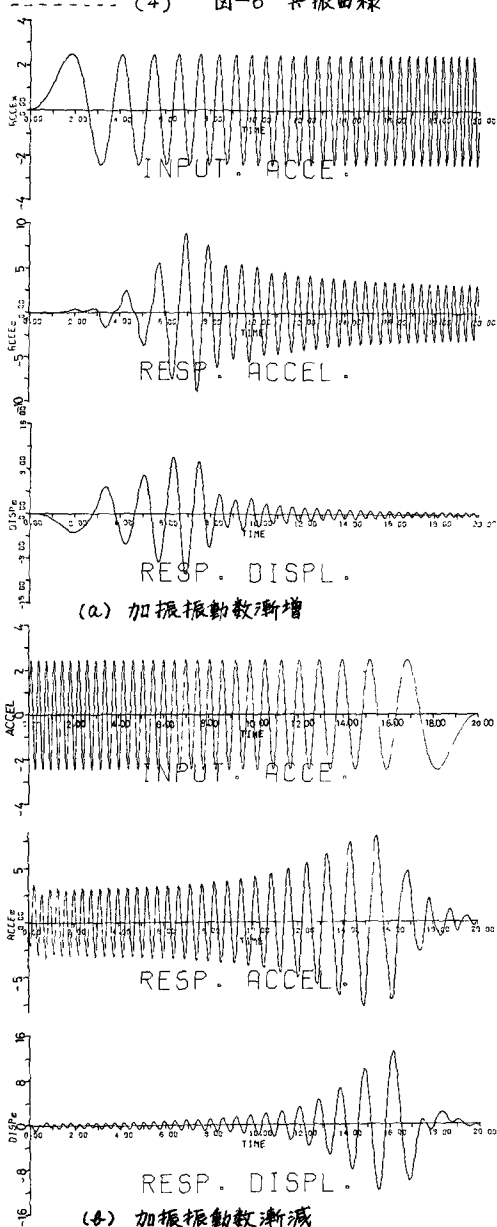


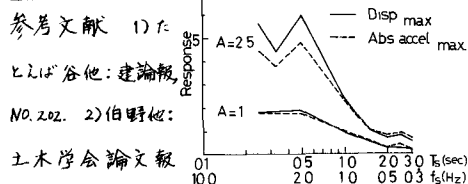
図-7 振動数漸变的正弦波に対する応答

て逆に (a) の方が 15% 程度大きい。図-8 は振幅漸变的正弦波加振時の復元力曲線であり、図-2(b) の実験結果と比較的よく対応している。次に El Centro 1940, N-S 成分を入力としたときの本復元力系および bi-linear 系の時間応答曲線と復元力曲線の時間的变化 (図中の t は時間 (単位秒) を表わす) を図示したものが図-9 である。両

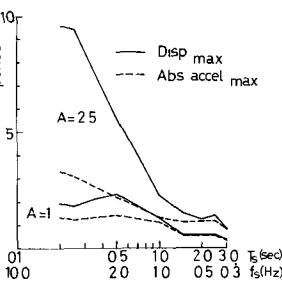
振動系の微小振動時の固有振動数がほぼ等しい (約 4 Hz) のことを反映し、応答の包絡線は似かよっている。

したが、また両系の復元力曲線の図-8 振幅漸变的正弦波加振時の復元力時間応答も似ているとみなしうる点もあり、あるパラメータ範囲では本復元力系を bi-linear 系に置換することも可能であろう。本図においては bi-linear 系の応答の方が大きく、したがって固有周期

の伸びも著しい。図-10 (a), (b) は同じ地震波を入力としたときの本系と bi-linear 系の最大変位応答と最大絶対加速度応答へのクトルである。両図の傾向は $A=1$ の場合には比較的よく対応しているが、 $A=2.5$ の場合にはその差が大きくなっている。このことは応答レベルの増加につれて、本復元力系の特徴がより顕著に現われているのであらうと考えられる。最後に本実験実施に協力いただいた北川 隆氏、太田正一氏に深謝する次第である。

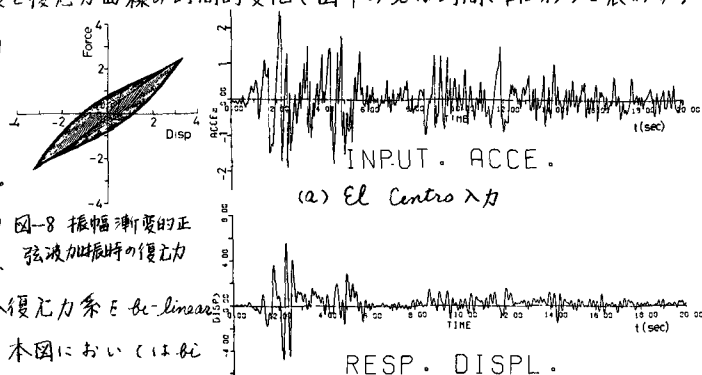


(a) 本復元力系

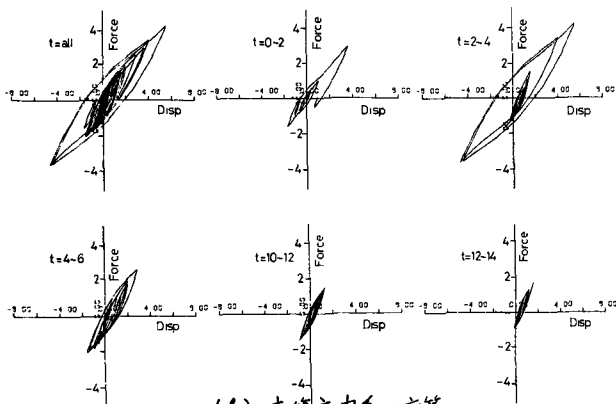


(b) bi-linear 系

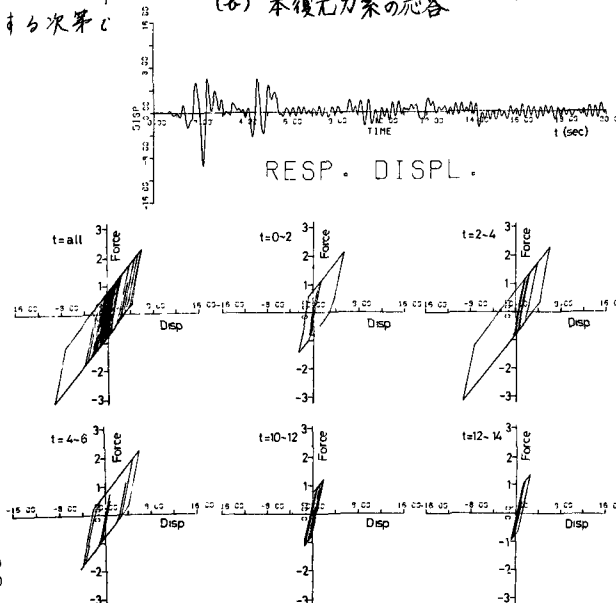
図-10 最大応答スペクトル



(a) El Centro 入力



(b) 本復元力系の応答



(c) bi-linear 系の応答

図-9 El Centro 入力に対する応答と復元力の時間的变化