

構造物とその基礎の相互作用を反映させる 振動台の制御

小長井 一男¹・野上 仁昭²・勝川 藤太³・鈴木 猛康⁴・三神 厚⁵

¹正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第1部 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

²Ph. D., シンシナティ大学教授 土木環境工学科 (Cincinnati, OH 45221, U. S. A.)

³正会員 熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼が窪1043)

⁴正会員 工博 熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市市鬼が窪1043)

⁵正会員 東京大学助手 生産技術研究所第1部 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

振動台は入力地震動を再現する加振装置であるが、実際意図した波形を忠実に再現することは容易ではない。これは模型が振動台の質量に比べ無視し得ない質量を持ち、例えば模型の共振振動数に一致するような入力を与えられた場合、振動台の加振力が不足することが起こり得るからである。このため入力を補正して結果として振動台の動きが意図された地震動に近づくようなイタレーションがしばしば行われる。しかしながら実際、対象とする構造物がその基礎や地盤と相互作用を起こすことを考慮する場合には、この制御方法は必ずしも適切ではない。ここでは対象構造物とその基礎部あるいは地盤との相互作用を反映させる振動台の制御方法を示し、この手法の効果を確認する基礎実験の成果を紹介する。

Key Words : dynamic soil-structure interaction, shaking table, model experiment

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機に、次々に大規模な振動台の構想が具体化されつつある。しかしながら有限なサイズと質量を持つテーブル上で、時としてこれを大幅に上回る規模の構造物模型を、想定された波形で忠実に加振することは技術的に大きな困難を伴う。構造物模型が振動台を揺すりかえすことで振動台の動きが変化する相互作用が生じるからである。特に構造物模型が共振する振動数で振動モードの節にあたる振動台を動かそうとすることは著しく困難で、振動台の能力を大幅に越える制御を行うことにもなりかねない。

振動台が入力波形を忠実に再現できることは、言うまでもなく、振動台にとって必要な基本性能である。このため従来のイタレーションによる入力信号の補正に加え、実時間補正(adaptive control)に関する様々な試みも進められている^{1), 2)}。しかしながら一方で、地震動を忠実に振動台で再現することが、いかなる場合においても適切とあるは言い難いことも認識しておく必要がある。振動台と構造物模型の間の相互作用に類する現象は、実は現実の地盤と構造物の間でも生じているからである。この地盤と構造物の相互作用は、構造物に与えられたエネルギーの一部が、基礎を介して地盤に逸散していく現象である。したがって、この相互作用をむしろ積極的にかつ適切に振動台の上で再現できれば、振動台の能

力を超えて、構造物の振動モードの節を強制的に加振し必要以上に破壊を進行させることなく、合理的な実験を進めることが可能になると考えられる。またこの過程で、構造物模型に加えられるエネルギー、振動台が表現する“仮想の地盤”へ逸散していくエネルギー、そしてその差である構造物模型の運動と破壊に費やされるエネルギーをも計測することが可能になるであろう。

以下に示すように、相互作用によって生じる構造物基礎部分の変位の変動分はアナログ回路あるいはデジタルシグナルプロセッサ(DSP)で精度良く再現できる。そしてこの信号を振動台への入力波形に加算することで、地盤模型を置くことなくリアルタイムに相互作用を反映させる振動台実験が可能になる。本論文では、この研究の初段として、地盤を線形として、相互作用の影響をアナログ回路を用いて模擬する手法を紹介する。

2. フレキシビリティ関数の近似

地震時の構造物と地盤の相互作用場を説明する上で、ここでは便宜的に図-1に示すように基礎を含む地盤と、その上部の構造物に分割して考える。この分割面が振動台のテーブルに該当する。構造物と地盤の相互作用の影響を受けた変位 $\{u\}$ は図-1に示す

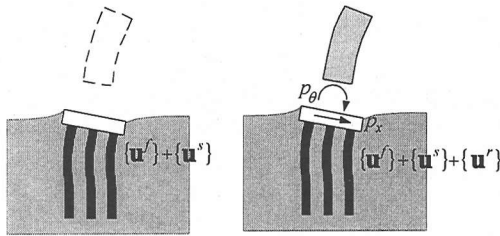


図-1 地盤と構造物の動的相互作用場

ように、(1)自然地盤としての応答 $\{u^f\}$ 、(2)基礎の存在による応答の変化 $\{u^s\}$ 、そして(3)上部構造物が慣性力で振動することによって放射される波動場 $\{u^r\}$ (慣性力相互作用) の和として以下のように表現される。

$$\{u\} = \{u^f\} + \{u^s\} + \{u^r\} \quad (1)$$

ここでアナログ回路を用いて表現しようとするものはいわゆる上部構造物が基礎・地盤を揺すりかえすことによる変位 $\{u^r\}$ である。すなわち上部構造物が存在しない場合の有効入力動 $\{u^f\} + \{u^s\}$ については、あらかじめこれを求めておくことが前提になる。いま地盤中の基礎上端が図-1に示すように、仮にスウェイとロッキング(x, θ)の自由度を持つものとし、この周波数領域(s)でのフレキシビリティ関数(コンプライアンス)が $\mathbf{H}(s)$ と与えられているものとする。このとき上部構造物からの力 $\{p\}$ が与えられると $\{u^r\}$ は以下のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} u_x^r \\ u_\theta^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{x\theta} \\ H_{\theta x} & H_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_x \\ p_\theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、

$$\{u_x^r \ u_\theta^r\}^T = \{u^r\}: \text{慣性力相互作用による変位} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} H_{xx} & H_{x\theta} \\ H_{\theta x} & H_{\theta\theta} \end{bmatrix} = [\mathbf{H}]: \text{フレキシビリティ} \quad (3b)$$

$$\{p_x \ p_\theta\}^T = \{p\}: \text{上部構造物からの相互作用力} \quad (3c)$$

$$s = i \cdot \omega \quad (3d)$$

ただし、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\omega =$ 円振動数である。ここでフレキシビリティ $[\mathbf{H}]$ の各要素 H_{xx} 、 $H_{x\theta}$ 、 $H_{\theta x}$ 、 $H_{\theta\theta}$ と等価な伝達関数を電氣的に設計できれば、振動台を図-2に示すようなシステムで制御することで相互作用の影響を実時間で反映することが可能になる。本章の以下の議論は、応答の方向(x, θ)を問わず成立するのでフレキシビリティの各要素の添字は省略する。

この $H(s)$ をどのように近似するかが当面の問題となる。Meek, Wolf^{3), 4)} は半無限地盤上の直接基礎について、また Konagai, Nogami^{5), 6)} は剛な基盤上の水平成層地盤内の埋設基礎のインパルス応答関数が

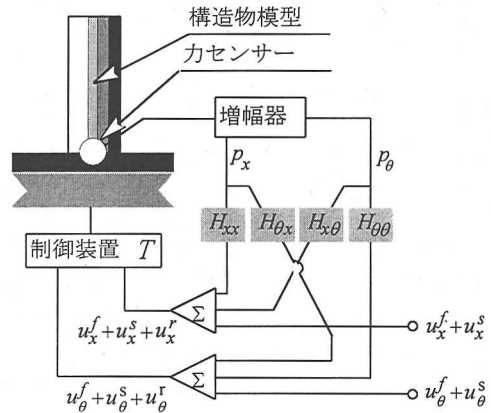


図-2 相互作用を反映させる実験システム

指数関数、あるいは指数的に減衰する n 個の三角関数の和で精度良く近似できることを示した。すなわち、

$$h(t) \equiv \sum_j^n A_j h_j(t) \quad (4)$$

ここに、 A_j は未定係数、 t は時間、そして

$$h_j(t) = e^{-\alpha_j t} \cos(\omega_j t - \phi_j) \quad (5)$$

で、 α_j^{-1} は各々の関数の時定数、 ω_j は0も含む円振動数、 ϕ_j は位相差である。式(5)はこれをラプラス変換すると以下のように表現される。

$$H_j(s) = \frac{(s + \alpha_j) \cos \phi + \omega_j \sin \phi}{(s + \alpha_j)^2 + \omega_j^2} \quad (6)$$

式(6)から式(4)のラプラス変換 $H(s)$ は結果的に制御の分野で一般的な以下の有理形式⁷⁾で近似できることになる。

$$H(s) \equiv \frac{a_m s^m + \dots + a_1 s + H(0)}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + 1} \quad (7)$$

ここに、 a_j ($j=1, \dots, m$)、 b_j ($j=1, \dots, m$) は未定係数、そして $m \leq 2n$ である。式(4)、(6)から式(7)中の a_m は0であることが知れるが、より広範な応用を考え、 $a_m s^m$ の項は残すことにした。式(7)で $H(s)$ を近似することは、同式の $2m$ 個の未定係数を求める問題に帰着する。式(7)は以下のように書き直せる。

$$\{\mathbf{S}\} \{\mathbf{a}\} = H(0) - H(s) \quad (8)$$

ただし、

$$\{\mathbf{S}\} = \{s^m \ \dots \ -s \ s^m H(s) \ \dots \ s H(s)\} \quad (9a)$$

$$\{\mathbf{a}\} = \{a_m \ \dots \ a_1 \ b_m \ \dots \ b_1\}^T \quad (9b)$$

式(8)は $H(s)$ の実部、虚部のそれぞれで成立しなければならない。したがって近似したい周波数領域 $s (=i\omega)$ 内で $H(s)$ の実部、虚部に異なる点を $2m$ 個取り、それぞれの点で式(8)を成立するような $2m$ 元連立方程式を構築し、これを解くことで未定係数(式(9b))を求め得る。

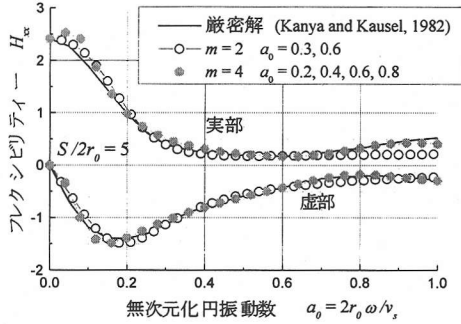
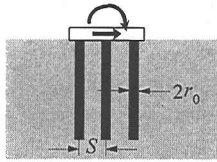


図-3 群杭(3×3)の水平方向フレキシビリティ関数

一例として図-3に示すような半無限弾性地盤内部の群杭基礎の、水平方向のフレキシビリティ (Kanya and Kausel⁷⁾) の近似を行ってみる。この図では $m=2$ と $m=4$ の2ケースについての近似解を厳密解とともに示してある。 $m=2$ では無次元化振動数 $a_0 (= 2r_0\omega/v_s)$ が0.3, 0.6の2点, また $m=4$ の場合は $a_0 = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の4点で式(8)を成立させている。ただし r_0 は杭の半径, v_s は地盤のせん断波速度である。当然 m が大きくなるほど近似の度合いが高くなるので, どの程度の m で打ち切るかの判断が求められるが Meek, Wolf^{3, 4)} は例えば剛体直接基礎について $0 \leq a_0 \leq 5$ の範囲で, また Konagai, Nogami⁵⁾ は単独の剛体埋設基礎について $0 \leq a_0 \leq 5$ の範囲で $m=4$ ($n=2$) で実用上十分な精度が得られることを示している。

3. 実験システム

(1) 伝達関数回路の構成

式(7)と等価な伝達関数を有する回路を構成するにあたって, 最も基本的な構成要素となる回路は (a) 加算回路, (b) 係数増幅回路, (c) 積分回路である (図-4)。これらはいずれもアナログ回路の最も重要な要素であるオペアンプ (operational amplifier) と受動素子である抵抗, コンデンサーを組み合わせて構成される。(a) の加算回路と (b) の係数増幅回路は本来加算増幅回路が有する機能を分割して表示したものである。したがってこれらをまとめて一つの回路で表現できるが, 説明を簡便にする上であえてこれを2つに分けておく。

式(7)と等価な回路が構成されたとすると, 入力

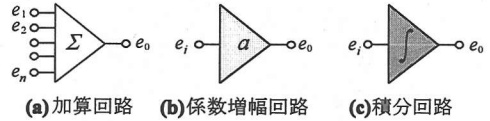
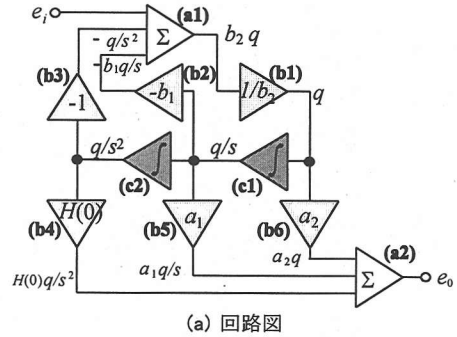
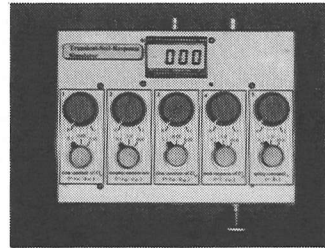


図-4 基本回路



(a) 回路図



(b) 試作装置外観

図-5 フレキシビリティ関数模擬回路

電圧 e_i と出力電圧 e_o の間に以下の関係が成立することになる。

$$\frac{a_{m-1}s^{m-1} + \dots + a_1s + H(0)}{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + 1} = \frac{e_o}{e_i} \quad (10)$$

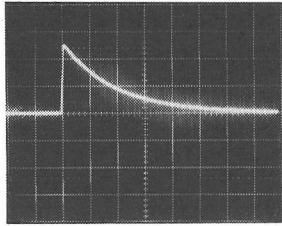
ここに未知量 q を導入することで式(10)は以下のようになり2つの式に分離できる。

$$e_o = a_{m-1} \frac{q}{s} + \dots + a_1 \frac{q}{s^{m-1}} + H(0) \frac{q}{s^m} \quad (11a)$$

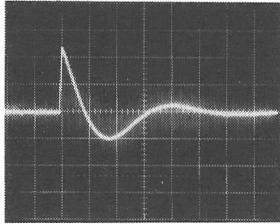
$$e_i = b_m q + b_{m-1} \frac{q}{s} + \dots + b_m \frac{q}{s^{m-1}} + \frac{q}{s^m} \quad (11b)$$

周波数領域で q を s^j で割ることは q を j 回積分することと同義である。したがって式(11a), (11b)は図-4に示すような, (a) 加算, (b) 係数増幅, (c) 積分という基本操作を組み合わせることで表現できる⁸⁾。

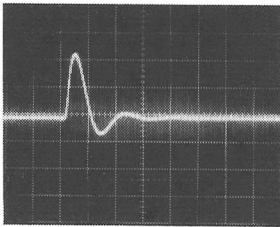
一例として $m=2$ としたときの回路を図-5(a), (b)に示す。この装置に継続時間10msのインパルスを e_i として加えたときの出力電圧 e_o の例 (式(5)で $\alpha_j = 5.5 \text{ s}^{-1}$, $\omega_j = 15.7 \text{ s}^{-1}$) を図-6(a)-(c)に示す。係数の調整で式(5)の応答関数を容易に作り出せることが示されている。



(a) $e^{-\alpha_n t}$



(b) $e^{-\alpha_n t} \cos \omega_n t$



(c) $e^{-2\alpha_n t} \sin 2\omega_n t$

図-6 フレキシビリティ関数模擬回路にインパルスを入力して得られた出力例 (0.1 s/div.)

(2) 振動台の制御回路

図-2に示すシステムでは、振動台の制御装置にされた信号 $\{u\}$ 、すなわち $\{u^f\} + \{u^s\} + \{u^r\}$ に忠実に振動台が駆動されることが前提となっている。しかしながら振動台の変位はその制御装置(controller)の周波数特性 T の影響を受け、必ずしも入力信号を忠実に再現する保証がない。一般の制御装置は、ローパスフィルタ的な伝達特性 T を持つので、周波数応答の平坦な低い振動数領域で実験を行うことが通例である。しかしながらこの周波数領域内でも周波数にほぼ比例する位相遅れ $e^{-i\omega \Delta t}$ が生じており、これは換言すれば、振動台が力に対しほぼ一定時間 Δt の遅れで応答することを意味している。この影響は原理的には T^{-1} を前出の地盤のフレキシビリティ H に乗じて補正できはずである。仮に基礎・地盤系の水平方向に関する H_{xx} が一自由度のバネ (K_x)・ダンパー (C_x)・質点系 (M_x) で図-7に示すように近似できるものとする

$$H_{xx} = \frac{1}{K_x - \omega^2 M_x + i\omega C_x} \quad (12)$$

となるので、応答の補正は、

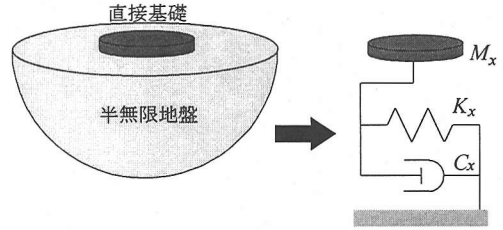
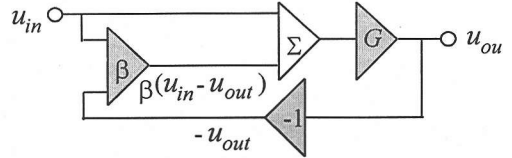
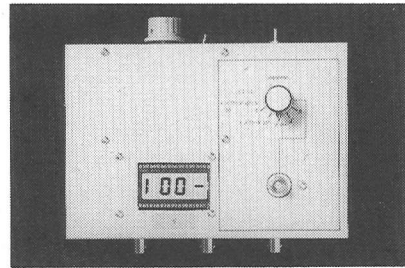


図-7 直接基礎を支える地盤と等価な離散パラメータモデル



(a) 回路図



(b) 装置外観

図-8 試作サーボアンプ

$$H_{xx} \cdot T^{-1} = \frac{e^{i\omega \Delta t}}{K_x - \omega^2 M_x + i\omega C_x} \quad (13a)$$

という手順で実行できる。式(13a)はさらに、 $\omega \cdot \Delta t$ が小さい場合、以下のように書き換えられる。

$$H_{xx} \cdot T^{-1} \cong \frac{1}{K_x - \omega^2 (M_x - \Delta M_x) + i\omega (C_x - \Delta C_x)} \quad (13b)$$

ただし、

$$\Delta M_x = C_x \cdot \Delta t, \quad \Delta C_x = K_x \cdot \Delta t \quad (14a), (14b)$$

したがって式(13b)は、時間遅れ Δt によって、基礎・地盤系の等価モデルの質量 M_x 、減衰定数 C_x がそれぞれ ΔM_x 、 ΔC_x だけ減少することを意味している。当然この減少分は M_x 、 C_x より小さくしなければならぬので、

$$\frac{\Delta M_x}{M_x} = 4\pi^2 \frac{t_c \Delta t}{t_0^2} < 1, \quad (15a)$$

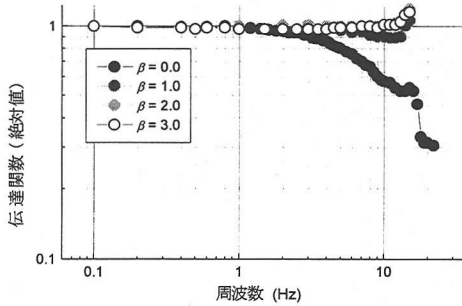
$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta t}{t_c} < 1 \quad (15b)$$

なる不等式が満たされることが安定な実験を行う上での必要条件になる。ただしここに、

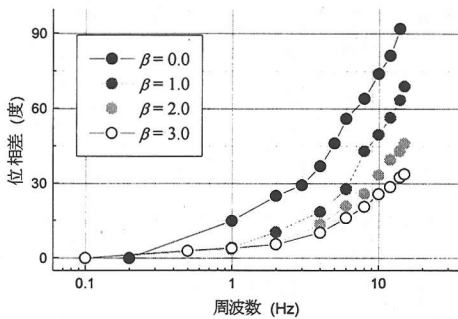
$$t_c = C_x / K_x : \text{等価モデルの減衰の時定数} \quad (16a)$$

$$t_0 = 2\pi \sqrt{M_x / K_x} : \text{等価モデルの周期} \quad (16b)$$

である。多くの動的相互作用に関する問題では、波



(a) 振幅



(b) 位相差

図-9 サーボ制御のゲイン β による振動台の入力信号追従性の変化

動逸散の効果が大きく現われることから、この条件が満たされる場合が多いが、仮にこの条件が満たされない場合には、時間遅れ Δt を極力小さくする必要があります。また振動台制御装置の伝達特性 T は、第1章にも述べたように上載する模型の影響を受けて変化し、模型が大きいとその影響が無視し得ない場合もある。したがってこれらに対処するためには、振動台のサーボアンプの目的追従性能をできる限り上げることが必要になる。図-8に示すサーボアンプにおいて u_m 、 u_{out} はそれぞれ振動台への入・出力信号、 G は振動台の制御装置の持つ伝達関数、 β は入力と実現値との偏差 ($u_m - u_{out}$) をフィードバックする度合いである。図-8のような回路の信号間には以下の式が成立する。

$$u_{out} = G(u_m + \beta(u_m - u_{out})) \quad (17)$$

これを書き換えることで制御回路への入力信号に対する出力信号の比 G' が以下のように求められる。

$$G' = \frac{u_{out}}{u_m} = \frac{G + G\beta}{1 + G\beta} \quad (18)$$

したがって β を十分大きくすることで G の如何に関わらず $G' \approx 1$ とすることが可能になる。

図-9の●印は一次元油圧振動台の G' を計測したも

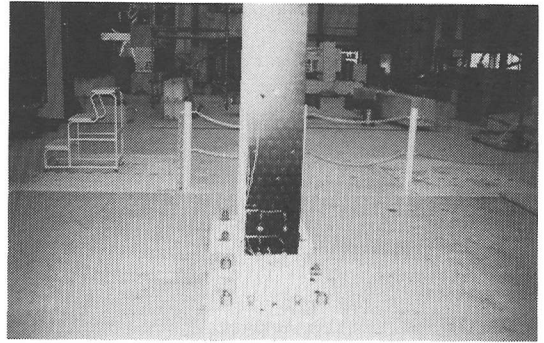


図-10 振動台上にたてられた片持ち梁

表-1 片持ち梁の諸元

幅 (m)	高さ (m)	厚さ (m)	曲げ剛性 EI 計測値 (Nm ²)	密度 ρ (kg/cm ³)
0.3	1.8	0.008	2132.5	0.00801

表-2 地盤の諸元

密度 ρ_s (kg/cm ³)	せん断波速度 v_s (m/s)	Poisson 比
0.0016	4.8	0.5

表-3 直接基礎の諸元

半径 r_0 (m)	厚さ d (m)	密度 ρ_c (kg/cm ³)
0.8	0.1	0.0025

のである。製造後20年が経過した機種で、周波数平坦が保証される周波数領域が狭い。ここに図-8の制御回路を付加したときの効果を測定したものを同じく図-9に示す。振幅、位相ともに平坦な領域が拡大し、振動台の追従性能が改善される様子が示されている。しかしながら β を大きくすることは反面、システムの安定性の阻害に繋がるので両者を妥協させる適当な値に β を調整する必要がある。

4. 実験例

この実験システムを用いて、直立した片持ち梁状の柱(図-10)の加振実験を行った⁹⁾。このような構造の実験では基部に比較的大きな転倒モーメントがかかるので、ロッキングが可能な6自由度の振動台が用いられることになった。この梁は2000 mm×300 mm×1 mmの鋼板を8枚貼り合わせて、これを50 mm間隔の千鳥格子状にビス止めしたものである。この梁の諸元の計測値は表-1に示す通りである。このように柔らかい梁を用いたのは、一つには相互作用力である p_x 、 p_θ を後に示すように梁の基部にゲージを貼って計測するため、その出力を大きくして

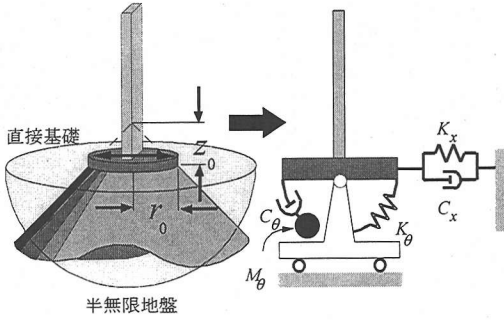


図-11 模型基礎を支える地盤と等価な離散パラメータモデル³⁾

計測精度を上げることを意図したからである。また低い振動数の挙動を観測することになるので、使用した振動台の応答遅れ Δt の影響が大きく現れないこともその理由である。この振動台の場合、式(18)の β に該当する値は水平(x)方向で0.53、回転(θ)方向で0.41に設定されており、 Δt はいずれの方向でも2 Hzで5 ms程度に押さえられている。片持ち梁状の柱の曲げ剛性を小さく設定したため、この梁は仮想的にせん断波速度4.8 m/sという極めて軟弱な半無限地盤(表-2)上に載せられている直接剛体基礎(半径 $r_0 = 0.8$ m、厚さ $d = 0.1$ m; 表-3)の上に固定させられているものと想定された。Meek, Wolf³⁾は、半無限地盤上の半径 r_0 の円形剛体フーチングを支える地盤のフレキシビリティは半無限の円錐台端部のそれとほぼ等しく、その値は図-11に示すような離散パラメータモデルのフレキシビリティで近似できることを示した。このフーチングを支える地盤(離散パラメータモデル)の水平(x)方向のフレキシビリティ関数 $H_{xx}(s)$ は以下のように表現できる。

$$H_{xx}(s) = \frac{1}{sC_x + K_x} \quad (19)$$

ただし、

$$K_x = \frac{\rho_s v_s^2 \cdot \pi r_0^2}{z_0} \quad (20a)$$

$$C_x = \rho_s v_s \cdot \pi r_0^2 \quad (20b)$$

ここに、 v_s はコーン内部を伝播していくせん断波の速度である。また z_0 は円錐台端面から頂点までの距離(apex height)でフーチング(円錐台端部)の半径 r_0 との比(aspect ratio)は以下のようにPoisson比 ν の関数として与えられる。

$$\frac{z_0}{r_0} = \frac{\pi}{8} (2 - \nu) \quad (20c)$$

一方フーチングのロッキングに対する地盤のフレキシビリティ関数 $H_{\theta\theta}(s)$ の近似解は、以下のように与えられる。

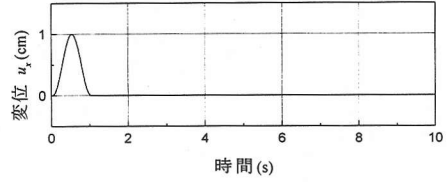


図-12 基礎入力動, $u_x^f + u_x^s$

$$H_{\theta\theta}(s) = \frac{\frac{1}{C_\theta} s + \frac{1}{M_\theta}}{s^2 + \frac{K_\theta}{C_\theta} s + \frac{K_\theta}{M_\theta}} \quad (21)$$

ここに

$$K_\theta = \frac{3\rho_s v_s^2 I_0}{z_0} \quad (22a)$$

$$C_\theta = \rho_s v_s I_0 \quad (22b)$$

$$M_\theta = \rho_s z_0 I_0 \quad (22c)$$

ただし、

$$I_0 = \frac{\pi r_0^4}{4} \quad (22d)$$

ν はPoisson比が1/3以下では縦波速度と同一であるが、Poisson比が1/3以上では $\nu = 2\nu_s$ とされる。また z_0 は水平方向の場合と異なり以下の式で与えられる。

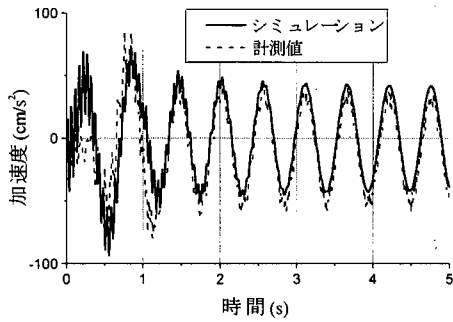
$$\frac{z_0}{r_0} = \frac{9\pi}{32} (1 - \nu) \left(\frac{\nu}{\nu_s} \right)^2 \quad (22e)$$

図-2のシステムでは、このほかに $H_{x\theta}$ および $H_{\theta x}$ を求めることになるが、ここでは水平動、回転動のカップリングは無視している。式(19)および(21)は、式(7)において $m=2$ 以内で等価回路が構成できる場合であることを示している。

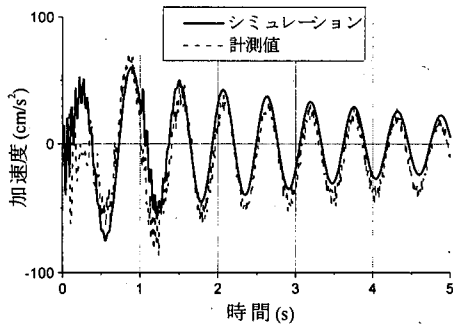
柱の基部には上下に10 cm離してひずみゲージを貼り付け、この2点での曲げモーメントとその差、すなわちせん断力を検出する。さらにこれらの力の成分から、基礎部の加速度 \ddot{u}_x 、 \ddot{u}_θ の計測値にそれぞれ基礎として想定される質量 $M_x (= \rho_c \pi r_0^2)$ と慣性モーメント $M_p (= \rho_c I_0 d + M_{trap})$ を乗じた慣性力の信号を差し引いて、これを等価フレキシビリティ回路に入力している。ただし、ここで M_{trap} は回転動に対する付加慣性モーメントでポアソン比が1/3以上の場合に以下の式で与えられる。

$$M_{trap} = 1.2 \left(\nu - \frac{1}{3} \right) \rho_s I_0 r_0 \quad (23)$$

振動台に図-12に示すようなインパルス(変位)を基礎入力動、 $u_x^f + u_x^s$ 、として入力し、柱の加速度応答を計測した結果を図-13a、13bに示す。図-13aは、回路を挿入し相互作用を反映させたときの結果で、13bは相互作用を反映させない場合の応答である。この図には差分法による数値計算結果を併



(a) 相互作用なし



(b) 相互作用有り

図-13 片持ち梁状柱の頂部の水平方向加速度

記している。この差分法は図-11に示す離散パラメータモデルについて行われたものである。数値計算結果は実験値とよく符合し、この実験が想定した相互作用を的確に表現している様子を示している。この実験では、相互作用が反映された場合、周期が若干長くなり減衰が大きくなるという傾向が現れている。

既に述べたように基礎入力動には水平動の成分しか存在しない。しかしながら相互作用の結果、転倒モーメントが生じるために基礎部分には回転動 u_θ' が発生する。図-14は、この回転動 u_θ' の実測値と計算値を比較したものである。

ここで用いた鉄板のように減衰の著しく小さな模型実験にこのシステムを用いる場合、ノイズの増幅が生じることがある。これは音響学で言うハウリングと同等の現象で、センサーで検出されたノイズが再び振動台に戻されることから必然的に生じる問題である。振動台が安定な動作状態に至る前に、ハウリングが重畳された波形が観測されたのでこれを図-15に示す。この場合のハウリングの卓越振動数は12Hzで、この片持ち梁模型の4次の固有振動数にほぼ等しい。ハウリングが実験の対象とする周波数領域外であればこれをフィルターで除去できるが、そうでない場合にはエコーキャンセラー¹⁰⁾などの回路

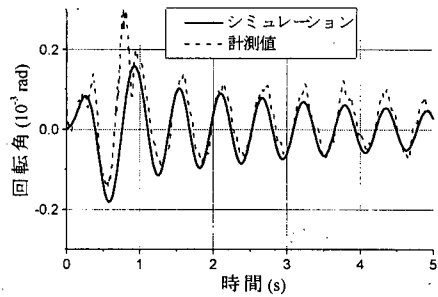


図-14 振動台の回転, u_θ'

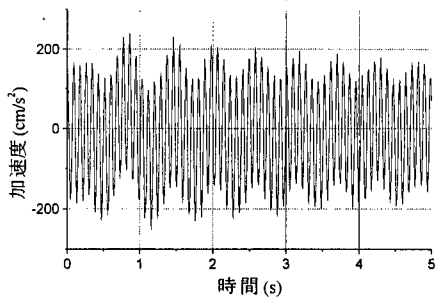


図-15 片持ち梁状柱の頂部の水平方向加速度 (ハウリングが発生した状況)

を付加する必要がある。一方でローパスフィルターの付加は振動台の応答遅れ時間 Δt を増加させるので、でき得る限り切断周波数を高くとる必要がある。

5. まとめ

地盤と構造物、あるいは上部構造物と下部構造物の動的相互作用をアナログ電子回路で模擬し、これを振動台での模型実験に反映させる振動台の制御手法を提示した。この研究で得られた結論は以下のようまとめられる。

(1) 様々な地盤構成や基礎の形式で変化する相互作用はアナログ回路の諸パラメータを変化させることで容易に表現でき、このため振動台上に大掛かりな地盤や基礎の模型を置くことなく、波動の地下逸散効果をも取り込んだ実験が可能になる。

(2) このシステムでは、振動台の制御装置(controller)に入力された信号に忠実に振動台が駆動されることが前提となっている。しかしながら振動台の変位はその制御回路の周波数特性や上載する模型とテーブルの相互作用で必ずしも入力信号を忠実に再現する保証がない。そこで振動台制御システムの伝達関数 T の逆数 T^{-1} を、基礎・地盤のフレキシビリティ関

数 H に乗ずることによってその影響を補正することができる。しかしこの補正は、基礎・地盤系と等価な離散パラメータモデルの質量と減衰定数を減ずることになるので、これらが正の値に留まる場合に限り適用できる。一方、サーボアンプの目的追従性能を上げてその周波数特性を大きく改善することも可能であるが、安定性への余裕が減少することに留意しなければならない。

(3) 振動台上に直立した片持ち梁状の構造模型を置き、基礎部のスウェイとロッキングの自由度についての振動実験を行ったところ、減衰の増大、振動の長周期化など相互作用の影響として知られている効果が現れることが確認できた。また構造模型そのものの減衰が小さい場合にはハウリング的なノイズの増幅について注意する必要があることも示された。

謝辞：本研究の理論構築、基礎回路の試作は文部省科学研究費（萌芽的研究、09875109研究代表者小長井一男）の補助を受けて行われた。また試作回路の試験、基礎実験にあたっては東京大学生産技術研究所片桐俊彦技官、日本道路公団上村治氏（当時大学院学生）の協力をいただいた。ここに記して深謝する。

参考文献

1) 堀内敏彦, 中川正紀, 菅野正治, 今野隆雄: 加振機の応答遅れを補償した実時間ハイブリッド実験システムの開発, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 61, No. 584, pp. 64-72, 1995.

2) Stoten, D.P. and Gomez, E.: Recent Application: Results of Adaptive Control on Multi-Axis Shaking Tables, *Proc., 6th SECED Int. Conf., Seismic Design Practice into the Next Century*, Booth (ed.), pp. 381-387, 1998.

3) Meek, J. W. and Wolf, J. P.: Cone models for homogeneous soil, *J. geotechnical eng., ASCE*, Vol. 118, No. 5, pp. 667-685, 1992.

4) Meek, J. W. and Wolf, J. P.: Cone models for embedded foundation, *J. geotechnical eng., ASCE*, Vol. 120, No. 1, pp. 60-80, 1992.

5) Konagai, K. and Nogami, T.: Simulation of Soil-Structure Interaction on a Shaking Table, "Numerical and Physical Modeling for Dynamic Soil/Structure Interaction Phenomenon", *Geotechnical Special Technical Publication, ASCE*, No. 64, pp. 91-106, 1997.

6) Konagai, K. and Nogami, T.: Analog Circuits for Simulating Soil-Structure Interaction on a Shaking Table, *Intrn. Jour., Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, accepted for publication, 1997.

7) Kanya, A.M. and Kausel, E.: Dynamic Behavior of Pile Groups, *Proc., 2nd International Conf., Numerical Methods of Offshore Piling*, Austin, TX, pp. 509-532, 1982.

8) Zadeh, L. A. and Desoer, C. A.: *Linear System Theory*, McGraw-Hill Book Co., 1963.

9) Konagai, K. and Katsukawa, T.: Real time control of a shaking table for soil-flexible structure interaction, *Bull., Earthquake Resistant Structure Research Center, IIS, Univ. of Tokyo*, No. 30, pp. 69-77, 1997.

10) Sondhi, M. M.: An Adaptive Echo Chanceller, *Bell Syst. Tech. Jour.*, Vol. 46, No. 3, p.497, 1967.

(1997. 8. 6 受付)

REAL TIME CONTROL OF SHAKING TABLE FOR SOIL-STRUCTURE INTERACTION SIMULATION

Kazuo KONAGAI, Toyooki NOGAMI, Tota KATSUKAWA,
Takeyasu SUZUKI and Atsushi MIKAMI

This paper introduces an idea of controlling a shaking table so that soil-structure interaction effect is incorporated. In order for the interaction effect to be reflected in a shaking table test, the signal equivalent to the soil-structure interaction motion is added to the input base motion. It is shown herein that a variety of flexibility functions of bases or soil mediums overlaid with structures are closely approximated by rational functions of imaginary circular frequency, s . These rational functions are easily simulated by means of analog circuits. To all intents and purposes, an analog circuit loses no time in responding to its input signal. This method thus has the potential to be applied to a variety of experiments of soil-structure interaction without preparing any physical soil model.