

地盤と構造物の相互作用を反映させる 振動台の実時間制御手法

小長井 一男¹、片桐 俊彦²、勝川 藤太³、鈴木 猛康⁴、

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

²正会員 東京大学 生産技術研究所第1部 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

³正会員 熊谷組技術本部技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

⁴正会員 工博 熊谷組技術本部技術研究所 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

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決して容易ではない。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、これが振動台の能力を大幅に超えることが往々にして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支持構造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提案し、この手法の効果を確かめる基礎実験の成果を紹介する。

Key Words : *Dynamic soil-structure interaction, inertia interaction, shaking table, model experiment*

1. はじめに

様々な構造物の地震時挙動を検証する上で振動台実験の果たす役割は大きい。しかしながら有限なサイズと質量を持つテーブル上で、これに匹敵する大きさにもなりかねない構造物全体の模型を加振することは時に困難で、このため部分模型のみを加振することもある。全体模型を用いる場合も、部分模型を加振する場合も、これらを支える実際の下部構造あるいは基礎・地盤系が完全な剛体でないことから、振動台が表現する運動は相互作用の影響を受けて対象構造物が存在しない場合のそれとは異なってくる。対象構造物の挙動が非線型性を示す場合には、これらの相互作用の影響を前もって予知し、振動台への入力波形を事前に求めておくことは現実的に不可能である。

本報告では下部構造あるいは地盤と対象構造物との相互作用をアナログ回路で精度良く再現できることを示し、これを振動台への入力波形に加算することでリアルタイムに相互作用を反映させた振動台の制御手法を提案する。

2. フレキシビリティ関数の近似

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慣性力相互作用である。キネマティッ

ク相互作用についてはあらかじめその影響を解析し入力波形を補正しておくことが可能だからである。いま対象構造物を支える部分（地盤あるいは下部構造物）の周波数領域でのフレキシビリティ関数が $H(s)$ と与えられているものとする。ここに、

$$s = i \cdot \omega \quad (1)$$

ただし、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\omega =$ 円振動数である。ここでこの $H(s)$ を以下の形で近似する。

$$H(s) \cong \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + 1} \quad (2)$$

ここに、 a_j, b_j ($j = 0, 1, \dots, n$) は未定係数であるが、ここで $a_0 = H(0)$ が成立することは明らかである。さらに式(2)は以下のように書き直せる。

$$\{\mathbf{S}\} \{\mathbf{a}\} = H(0) - H(s) \quad (3)$$

ただし、

$$\{\mathbf{S}\} = \{s^n \quad \dots \quad s \quad s^n H(s) \quad \dots \quad s H(s)\} \quad (4a)$$

$$\{\mathbf{a}\} = \{a_n \quad \dots \quad a_1 \quad b_n \quad \dots \quad b_1\}^T \quad (4b)$$

式(3)は言うまでもなく実部、虚部のそれぞれで成立する必要がある。したがって近似したい周波数領域 $s (= i\omega)$ で異なる点を n 個取ってそれぞれの点で式(3)を成立するようにして $2n$ 元連立方程式を構築し、これを解くことで未定係数 (式(4b)) を求めることができる。

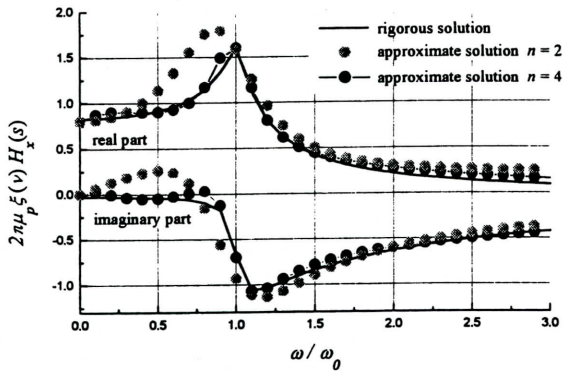
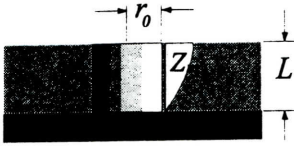


Fig. 1 Flexibility function for rocking motion of an embedded cylinder ($L/r_0 = 2.0$)

一例として Fig. 1 に示すような埋設円筒基礎の側方地盤のフレキシビリティの近似を行ってみる。この図では $n=2$ と $n=4$ 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。 $n=2$ の場合は $\omega = \omega_0$, $\omega = 2\omega_0$ の 2 点で、また $n=4$ の場合は $\omega = 0.5 \cdot \omega_0$, $\omega = \omega_0$, $\omega = 1.5 \cdot \omega_0$, $\omega = 2\omega_0$ の 4 点で式 (3) を成立させている。当然 n 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 n で打ち切るかの判断が求められる。Konagai, Nogami¹⁾ は直接基礎、埋設基礎など様々な基礎の時間領域でのフレキシビリティが指数関数、あるいは指数的に減衰する正弦、余弦関数の和で精度良く近似できることを示している。すなわち、

$$h(t) \cong \sum_{j=1}^l \left(A_{e,j} h_{e,j}(t) + A_{c,j} h_{c,j}(t) + A_{s,j} h_{s,j}(t) \right) \quad (5)$$

ここに、

$$\begin{aligned} h_{e,j}(t) &= e^{-\alpha_{e,j}t} \\ h_{c,j}(t) &= e^{-\alpha_{c,j}t} \cos \omega_{c,j}t \\ h_{s,j}(t) &= e^{-\alpha_{s,j}t} \cos \omega_{s,j}t \end{aligned} \quad (6a)-(6c)$$

式 (6a) ~ (6c) は周波数領域では以下のように表現される。

$$\begin{aligned} H_{e,j}(s) &= \frac{s + \alpha_{c,j}}{s^2 + 2\alpha_{c,j}s + \alpha_{c,j}^2} \\ H_{c,j}(s) &= \frac{s + \alpha_{c,j}}{s^2 + 2\alpha_{c,j}s + \alpha_{c,j}^2 + \omega_{c,j}^2} \end{aligned}$$

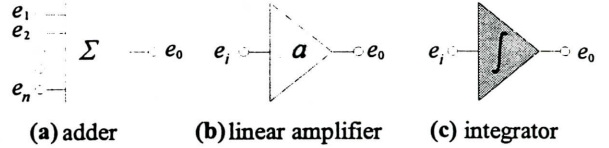


Fig 2 Key circuits

$$H_{s,j}(s) = \frac{\omega_{c,j}}{s^2 + 2\alpha_{c,j}s + \alpha_{c,j}^2 + \omega_{c,j}^2} \quad (8a)-(8c)$$

式 (8a) - (8c) はすべて式 (2) の形式で $n=2$ とおいた場合に相当している。Konagai, Nogami¹⁾ は単独の埋設基礎や直接基礎では式 (5) で合成する基本的応答関数の個数はおよそ 2 つで実用上十分な精度が得られるとしているが、これは $n=2$ とした式 (2) を 2 つ加え合わせた形であり、結果的に式 (2) 単独で $n=4$ とした場合と一致する。

3. 回路の構成

式 (3) 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 (Fig. 2)。これらはいずれもアナログ回路の最も重要な能動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、構成された回路全体の機能の理解を容易にするため、あえてこれを 2 つに分けておく。

式 (3) と等価な回路が構成されたとすると、入力電圧 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。

$$\frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + 1} = \frac{e_o}{e_i} \quad (9)$$

ここに未知量 q を導入することで式 (9) は以下のように 2 つの式に分離できる。

$$\begin{aligned} e_o &= a_n q + a_{n-1} \frac{q}{s} + \dots + a_1 \frac{q}{s^{n-1}} + a_0 \frac{q}{s^n} \\ e_i &= b_n q + b_{n-1} \frac{q}{s} + \dots + b_1 \frac{q}{s^{n-1}} + \frac{q}{s^n} \end{aligned} \quad (10a), (10b)$$

周波数領域で q を s^m で割ることは q を m 回積分することと同義である。したがって式 (10a), (10b) は容易に Fig. 2 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ことになる。

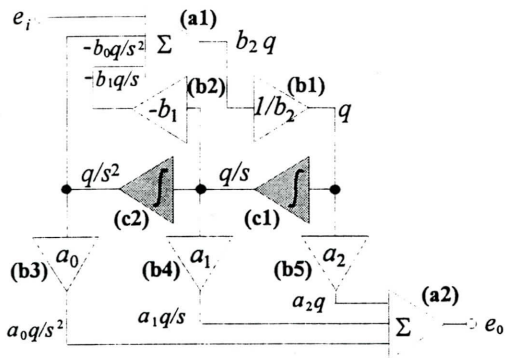


Fig 3 Present analog circuit ($n = 2$)

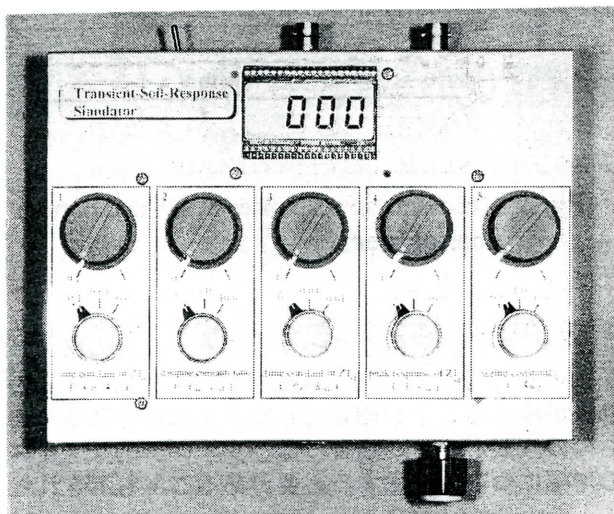
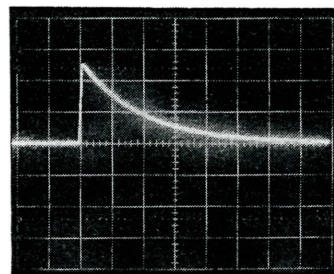


Fig. 4 Fig. 3-equivalent circuit

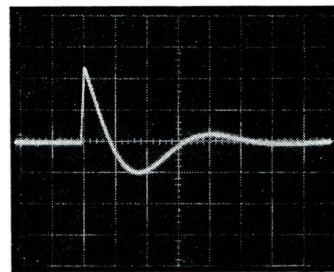
一例として $n = 2$ としたときの回路を Figs. 3, 4 に示す。Fig. 4 に示す 5 つのノブは Fig. 3 の回路図の 5 つの係数 (a_2, a_1, a_0, b_2, b_1) 調整のためのものである。この装置に継続時間 10ms のインパルス e_i として加えたときの出力電圧 e_o の例を Figs. 5a-5c に示す。係数の調整で式 (6a)~(6c) の応答関数を容易に作り出せることが示されている。

4. 実験例

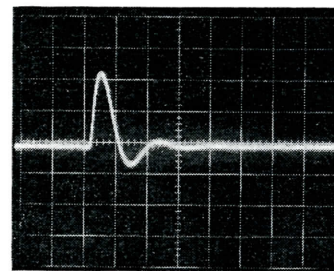
この回路を用いて、2000 mm × 300 mm × 8 mm の片持ち梁状の直立した鉄板 (Fig. 6) の加振実験を行った^{1), 2)}。この鉄板が半無限地盤上の円形フーチング上に固定されているとして Meek, Wolf^{3), 4)} のコンモデルで当該フーチングのフレキシビリティの近似解を誘導した。これは指数的に減衰する調和振動であるので、 $n = 2$ で完全な等価回路が構成できる。柱の基部にはひずみゲージを 4 枚貼り付け、基部で



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



(b) $e^{-\alpha_j t} \cos \omega_j t$



(c) $e^{-\alpha_j t} \sin 2\omega_j t$

Fig. 5 Basic response functions generated by the present analog circuit (0.1 s/div.)

の曲げモーメントとせん断力を検出し、これを等価回路に入力して相互作用によって生じる変位を出力し、これが入力波形に加算されて振動台にフィードバックされる (Fig. 7)。なおこの図ではスウェイとロッキングのカップリングは考慮されていないが、これを組み込むことも容易である。

振動台に Fig. 8 に示すようなインパルス (変位) を入力し、柱の加速度応答を計測した結果を Fig. 9 に示す。実線が回路を挿入し、相互作用を反映させたときの結果で、破線が相互作用を反映させない場合の応答である。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周知の傾向が明瞭に現れる。

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、ノイズの増幅が問題となることがある。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現象である。図中で $7\text{ s} < t < 8\text{ s}$ にこのハウリング

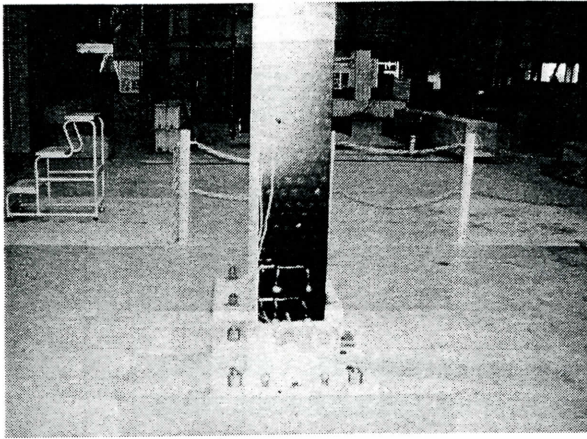


Fig. 6 Upright cantilever on a shaking table

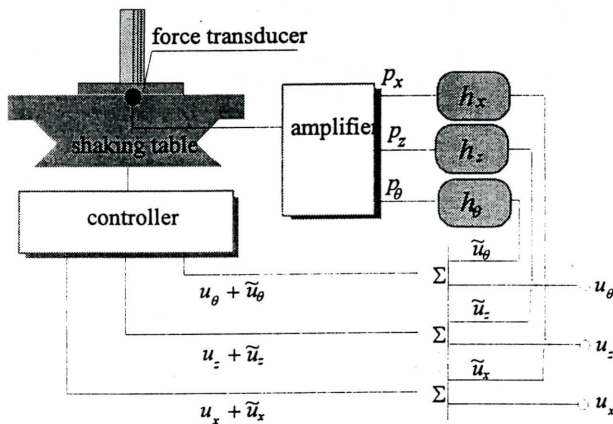


Fig. 7 Simulation of soil-structure interaction

が重畳された波形を示す。増幅されるノイズ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するか、そうでなければエコーキャンセラー⁵⁾などの回路を付加しておく必要がある。

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シミュレートし、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。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った。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クイングの自由度

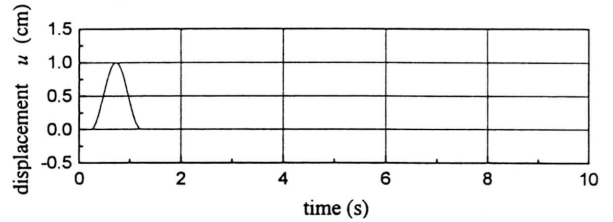


Fig. 8 time history of applied displacement

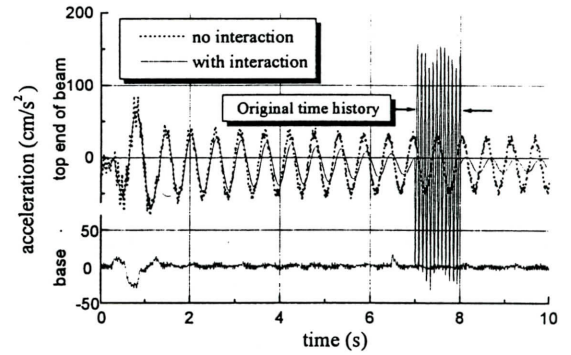


Fig. 9 Acceleration responses at top and bottom ends of beam

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周知の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。

参考文献

- 1) Konagai, K. and T. Nogami: Simulation of Soil-Structure Interaction on a Shaking Table, "Numerical and Physical Modeling for Dynamic Soil/Structure Interaction Phenomenon", Geotechnical Special Technical Publication, ASCE, 1997, in press.
- 2) 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*, **30**, 69-78, 1997.
- 3) Meek, J. W. and Wolf, J. P.: Cone Models for Homogeneous Soil, *J. geotechnical eng., ASCE*, **118(5)**, 667-685, 1992.
- 4) Meek, J. W. and Wolf, J. P.: Cone Models for Embedded Foundation, *J. geotechnical eng., ASCE*, **120(1)**, 60-80, 1992.
- 5) Sondhi, M. M.: An Adaptive Echo Canceller, *Bell System Technical J.*, **46(3)**, 497, 1967.