

振動台とアナログ電子回路を用いた地盤と構造物の 動的相互作用の新シミュレーション手法

Simulation on a Shaking Table of Soil-Structure Interaction using Analog Circuits

小長井 一 男*

Kazuo KONAGAI

1. はじめに

振動台を用いた実験では、あらかじめ設定した波形を振動台で忠実に再現することで構造模型を加振するのが常である。しかしながら現実の地震時の構造物と地盤の動きを考えてみると構造物の応答が構造物を支える地盤の動きに変化を与えている。したがってこうした相互作用分を加えた波形で振動台は動かさなければならない。しかしながら例えば構造物の破壊挙動を検討する場合には、構造物の非線形応答による相互作用を前もって予測し振動台の制御波形を事前に求めておくことは現実的に不可能である。本速報では地盤と構造物の時刻歴における相互作用がアナログ電子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の影響を取り込んだ模型実験手法を提案する。

2. 基礎・地盤の相互作用の時刻歴における表現

地盤と構造物の動的相互作用の検討の多くが、周波数領域で行われている。これは基礎を支える地盤の剛性あるいはその逆数であるフレキシビリティが周波数の関数として与えられるからである。しかしながら振動台上で相互作用を取り入れた模型実験を行うのであれば、地盤のフレキシビリティの時間領域における表現、すなわちインパルス応答が必要となる。直接基礎や埋め込み円筒基礎などいくつかの典型的な基礎形式に対してこれを支える地盤のインパルス応答を詳細に検討すると、いずれの応答も以下に示すように $h_{e,m}(t)$, $h_{c,m}(t)$, および $h_{s,m}(t)$ なる三つの基本応答関数の線型和として近似できる^{1)~3)}。

$$h(t) = \sum_{m=1}^n (A_{e,m} h_{e,m}(t) + A_{c,m} h_{c,m}(t) + A_{s,m} h_{s,m}(t)) \quad (1)$$

ここで、 $A_{e,m}$, $A_{c,m}$ および $A_{s,m}$ は未定係数であり、3つの基本応答関数は、それぞれ指数関数、指数減衰していく余弦、および正弦関数として以下のように表現できる。

$$h_{e,m}(t), h_{c,m}(t), h_{s,m}(t) = \begin{cases} e^{-\alpha_{e,m}t}, e^{-\alpha_{c,m}t} \cos \omega_{c,m}t, e^{-\alpha_{s,m}t} \sin \omega_{s,m}t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

加え合わせる項数が多ければ多いほど精度は増すが、通常、耐震工学で問題となる振動数範囲では多くとも3つの項で実用上十分な精度が得られる。

式(2)で示される基本応答関数のフーリエ変換は以下のようになる。

$$\mathcal{F}(h_{e,m}(t)) = H_{e,m}(s) = \frac{s + \alpha_{e,m}}{s^2 + 2\alpha_{e,m}s + \alpha_{e,m}^2}$$

$$\mathcal{F}(h_{c,m}(t)) = H_{c,m}(s) = \frac{s + \alpha_{c,m}}{s^2 + 2\alpha_{c,m}s + \alpha_{c,m}^2 + \omega_{c,m}^2}$$

$$\mathcal{F}(h_{s,m}(t)) = H_{s,m}(s) = \frac{\omega_{s,m}}{s^2 + 2\alpha_{s,m}s + \alpha_{s,m}^2 + \omega_{s,m}^2}$$

(3a), (3b), (3c)

ここで、 $s = i\omega$, $i = \sqrt{-1}$ であり、また ω は加振円振動数である。式(3a), (3b), (3c)を比較すると、いずれも分母が s の2次式、分子は s の1次式で表わされる点で共通する。

ここで図1に示すような3つのばね、 k_{a1} , k_{a2} , k_b と2つのダッシュポット c_{a1} , c_{a2} からなる力学モデルを考える。このモデルのフレキシビリティは

*東京大学生産技術研究所 第1部

研究速報

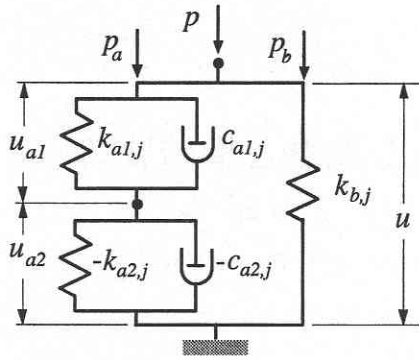


図1 基本応答関数を発生する力学モデル

$$H(s) = \frac{(c_{a2} + c_{a1})s + (k_{a2} + k_{a1})}{c_{a1}c_{a2}s^2 + |k_{a1}c_{a2} + k_{a2}c_{a1} + k_b(c_{a2} + c_{a1})|s + k_{a1}k_{a2} + k_b(k_{a2} + k_{a1})} \quad (4)$$

となり、式 (3a), (3b) および (3c) とその形式が一致する。たとえばダッシュポットの粘性減衰定数の積 $c_{a1}c_{a2}$ を -1 と設定し、式 (4) の分母分子の各項を、式 (3a) の項と等しく置くことで、図1の5つのパラメーター k_{a1} , k_{a2} , k_b , c_{a1} , c_{a2} は以下のように実数で与えられる。

$$k_{a1} = 0.618\alpha_{e,m} \quad (5a)$$

$$k_{a2} = -1.618\alpha_{e,m} \quad (5b)$$

$$k_b = 0 \quad (5c)$$

$$c_{a1} = 0.618 \quad (5d)$$

$$c_{a2} = -1.618 \quad (5e)$$

同様に式 (3b) については

$$k_{a1} = (0.618\alpha_{c,m} + \omega_{c,m}) \quad (6a)$$

$$k_{a2} = -(1.618\alpha_{c,m} + \omega_{c,m}) \quad (6b)$$

$$k_b = -2.236\omega_{c,m} \quad (6c)$$

$$c_{a1} = 0.618 \quad (6d)$$

$$c_{a2} = -1.618 \quad (6e)$$

さらに式 (3c) から

$$k_{a1} = \alpha_{s,m} - \frac{\omega_{s,m}}{2} \quad (7a)$$

$$k_{a2} = -\alpha_{s,m} - \frac{\omega_{s,m}}{2} \quad (7b)$$

$$k_b = 1.25\omega_{s,m} \quad (7c)$$

$$c_{a1} = 1 \quad (7d)$$

$$c_{a2} = -1 \quad (7e)$$

を得る。図1のモデルが現実のばねやダッシュポットを組み合わせるのであれば、モデルを構成するパラメーターの値は必ず正でなければならない。しかしながらこのような力学モデルの構築はアナログ電子回路を組み上げることとまさに等価であり、アナログ電子回路を用いる場合にはこ

れらのパラメーターが負になる場合も許される。全てのパラメーターの値の設定に制約がないわけではない。たとえば図1の k_{a1} と c_{a1} から構成されるサブエレメントでは k_{a1} と c_{a1} の符号は共通でなければならない。これはサブエレメントに相応する回路の応答が正負を問わず時間とともに減衰し、発散することのないようにしなければならないからである。式 (7d) が1に設定されているので式 (7a) も正でなければならない。よって $\alpha_{s,m} > \omega_{s,m}/2$ となるが、一般に地盤への地下逸散が大きなことから、この条件は相互作用解析で考えられる多くの場合にほぼ例外なく成立する。

3. 等価回路の構成

図1と等価な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基本応答関数 $h_{e,m}(t)$ 、すなわち (a) 指数関数を発生させる回路と (b) 反転加算回路 (scaled-adder) である (図2)。両者と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。指数関数発生回路についてはいくつかの回路が考えられるが、回路によって市販の受動素子で実現できる指数関数の時定数に差異があることに注意が必要である。反転加算回路の基本的機能は図にもあるように複数の入力電圧を加算し、その値に負の係数をかけてこれを出力するものである。これらの回路構成の詳細は成書⁴⁾に譲る。

図2の基本回路を組み合わせると図1の力学モデルと等価な回路を構成すると図3に示すようになる。図1のモデルで明らかのように、外力 p はこのモデルの2つの部分、すなわち直列にされた Voigt モデルとばね k_b によって支えられる。これらの2つの部分に分担される力をそれぞれ、 p_a , p_b とすると、

$$p = p_a + p_b \quad (8)$$

$$\text{または } -1 \cdot (p - p_b) = -p_a$$

となる。このモデルの変形はモデルの左右の部分で等しく $u = u_{a1} + u_{a2} = p_a \cdot (h_{e,a1} - h_{e,a2})$ (モデル左側) (9a)

$$u = \frac{1}{k_b} p_b \quad (\text{モデル右側}) \quad (9b)$$



$$v_{out} = - \int_{-\infty}^t h_{e,m}(\tau) v_{in}(t-\tau) d\tau$$

(a) 指数関数発生回路

$$v_{out} = -a \sum_j^n v_{in,j}$$

(b) 反転加算回路

図2 基本回路

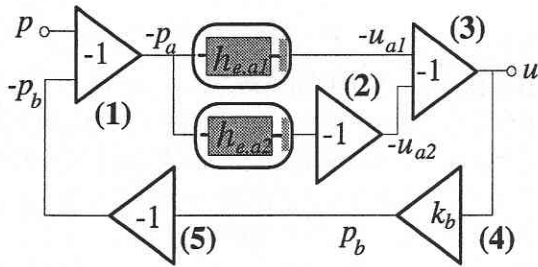


図3 図1のモデルと等価な回路

と表現される. ここで式 (9a) 中の \cdot はコンボリューション演算を表している. これらの式をもとに図3の回路を考える.

まずこの係数 -1 に設定された反転加算回路 (1) に外力に相当する入力電圧 p が $-p_b$ とともに加えられ, この結果 $-p_a$ が出力される (式 (8) 参照). この p_b がばね k_b によって分担される力と等価であることは後に示される. 次にこの $-p_a$ は図1のサブエレメントである2つの Voigt モデルの応答を模擬する指数関数発生回路 $h_{e,a1}$ ならびに $h_{e,a2}$ に加えられる. $h_{e,a2}$ の出力は下段の Voigt モデルを構成する $k_{a,2}, c_{a,2}$ がともに負であることから反転加算回路 (2) によって -1 倍され $-u_{a,2}$ となり, 係数 -1 の反転加算回路 (3) によって $h_{e,a1}$ の出力 $-u_{a,1}$ とともに加えられ $u_{a,1} + u_{a,2}$, すなわちこの力学モデルの応答 u となる. この変位を係数 k_b に設定した反転加算回路 (4) に入力し, さらにこれを反転増幅回路 (5) で -1 倍すれば式 (8) から $-p_b (= -k_b u)$ を得ることができる. ばね値 k_b は式 (6c) の場合 ($h_{c,m}$ を発生させる場合) には負値であるので図3にしめす設定で良いが, 式 (7c) では正であるので, この場合には反転加算回路 (5) を省略して $-p_b$ を得ることになる. この $-p_b$ は再び反転加算回路 (1) にフィードバックされて全体回路の論理が完結する.

図4は図3の回路を実装した試作装置の外観である. この装置についている5つの調整つまみは図1のモデルの5つのパラメータの調整のためのものである. この装置にインパルス (+5 V, 継続時間12 ms) を加えた場合の応答例を図5に示す. パラメータの設定を変えるだけで, $h_{e,m}(t), h_{c,m}(t)$ および $h_{s,m}(t)$ の基本応答関数を容易に出力できることが示されている.

4. 振動台実験システム

図4の装置を所要台数用意することで様々な地盤中の基礎の形態に応じたインパルス応答を模擬できる. 図6はこれらの装置を用いた振動台実験の概念図を示す. 地上構造

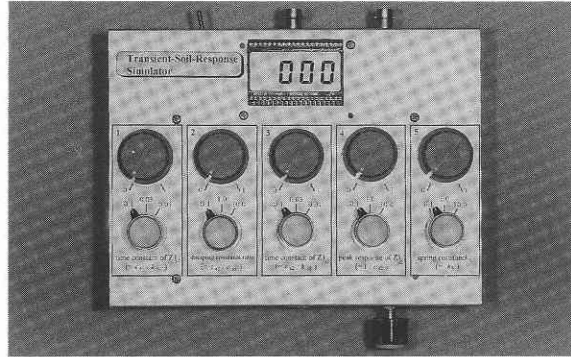
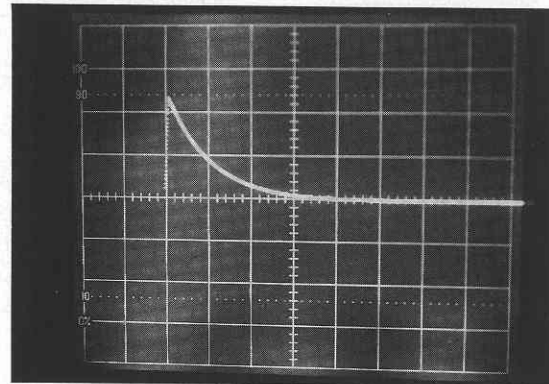
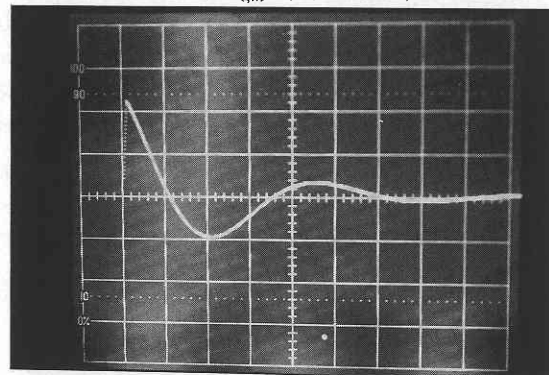


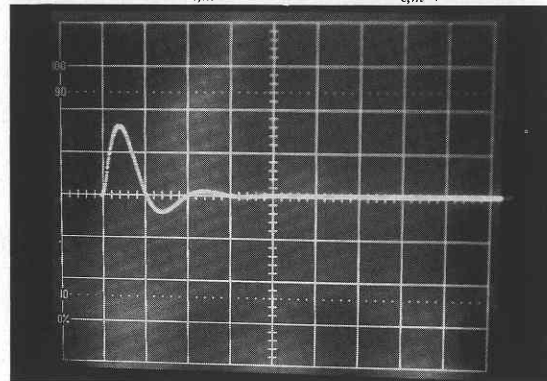
図4 試作装置外観



(a) $h_{e,m}(t) (= e^{-\alpha_{c,m} t})$



(b) $h_{c,m}(t) (= e^{-\alpha_{c,m} t} \cos \omega_{c,m} t)$



(c) $h_{s,m}(t) (= e^{-\alpha_{s,m} t} \sin \omega_{s,m} t)$

図5 基本応答関数の出力例 (0.1 s/div.)

5. ま と め

地盤と構造物の相互作用効果をアナログ電子回路でシミュレートし、これを反映させる構造模型振動実験手法を提示した。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ーを変化させることで表現でき、このため振動台上に地盤模型を置くことなく、波動の地下逸散による減衰効果などをも取り込んだ実験が可能になる。既に1次元振動台を用いた基礎実験で全体システムの動作確認を行っているが、今後基礎実験を重ねその成果を報告する予定である。

なお本試作装置の性能試験を行うにあたって、片桐俊彦技官、熊谷組技術本部技術研究所勝川藤太氏の協力を得た。(1996年8月5日受理)

参 考 文 献

- 1) Konagai, K. and Nogami, T., 'Simulation of Dynamic Soil-Structure Interaction in Model Tests by Using Analog Circuits', Earthquake eng. struct. Dyn., under review.
- 2) Konagai, K., 'Time Domain Expression of Soil-Embedded Body Interaction for Model Experiments', Earthquake eng. struct. Dyn., under review.
- 3) Veletsos, A. S. and Verbic, B.: Basic Response Functions for Elastic Foundations, J. eng. mech. ASCE, 100 (2), 189-201, (1974).
- 4) Holman, J. P., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, (1978).

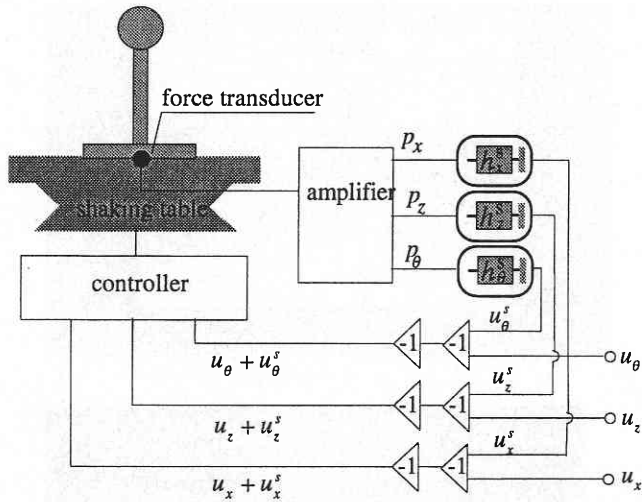


図6 振動台実験装置構成

物の模型は地盤模型を用意することなく振動台に力センサーを介して直置きされる。この力センサーは構造物から基礎に働く力の並進、上下、回転 (x, y, θ) の3成分 p_x, p_z, p_θ を検知する。この信号は増幅器を介して提案する回路で構成されたインパルス応答発生装置 h_x^s, h_z^s, h_θ^s に入力され、構造物から基礎に加わる力によって生じる3方向の応答 u_x^s, u_z^s, u_θ^s を得る。この応答は2段の反転加算回路でそれぞれ上部構造物のない状態での基礎部の地震動 u_x, u_z および u_θ に加えられ、 $u_x + u_x^s, u_z + u_z^s, u_\theta + u_\theta^s$ となって、振動台の制御装置に入力される。この結果相互作用の影響 u_x^s, u_z^s, u_θ^s が取り込まれた形で振動台の制御が可能になる。