

滑動を伴う2質点系モデルの動的応答

Dynamic Responce of 2 DOF System with Isolation Mechanism

小坂 郁*, 井浦 雅司**, 松井 邦人***, 佐々木 利視****

by Iku KOSAKA, Masashi IURA, Kunihito MATSUI, and Toshimi SASAKI

Two types of structural models which consist of two rigid bodies and have an isolation mechanism are considered. The governing equations of motion for two models are nonlinear due to phase transition. It turns out that these equations are linear in each phase and can be solved in closed forms. A careful treatment of the expressions for the solutions leads to the reductions of the number of parameters. A new set of parameter is introduced to present an amount of sliding displacements and acceleration transmissibility to the superstructures. Several earthquake waves are used to investigate the effects of the parameters on the dynamic responses of the models.

1. はじめに

地震時において、地盤から上部構造に伝わる力を軽減するために様々な方法がこれまで提案されている。その中で最も古典的な方法として、基礎と上部構造との間に滑動を許すメカニズムを導入することにより、地盤から上部構造へ伝わる力を一定限度に抑えようとするものや、部分的滑動によって地震時のエネルギーをいくらかでも消散させようとするものなどが挙げられる。本研究は前者の方法に関するものであり、2質点系モデルを対象として、特に上部構造物への加速度伝達率と滑動変位について考察を行い、パラメトリック解析に適した新たなパラメータを提案している。

これまでの論文においては、図-1 (a),(b) に示されている2質点系のモデルが多く用いられている。WestermoとUdwadia¹⁾は図-1 (a) のモデルを用い、調和加振を受ける時の定常状態におけるslip-stickの発生条件や、最大相対変位を理論的に求めている。しかし、slip-slipの発生条件や最大滑動変位については述べられていない。また、MostaghelとTadjbakhsh²⁾³⁾は同様のモデルを用いて調和加振や地震入力を受ける場合の、加速度伝達率や最大滑動変位を数値計算によって解析しているが、加速度伝達率や最大滑動変位の影響因子であると考えられる、入力波形やその最大加速度の影響については述べていない。図-1 (b) のモデルについては、YounisとTadjbakhsh⁴⁾が調和加振を受ける系の応答を数値計算によって考察している。著者ら⁵⁾も、図-1 (b) のモデルを用いて、調和加振を受けて定常振動する時の、上部剛体のslip-stick及びslip-slipの発生条件を陽な形で求め、さらに、数値積分を用いることなく理論的に最大滑動変位を求めている。また、LinとTadjbakhsh⁶⁾及びLiau, Tian, Cheung⁷⁾らは、鉛直振動をも考慮した場合について解析を行い、数値積分を用いてその応答を考察している。

* 東京電機大学 大学院理工学部建設工学専攻 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

** 工博 東京電機大学 助教授 理工学部建設工学科 (同上)

*** Ph.D 東京電機大学 教授 理工学部建設工学科 (同上)

**** 東京電機大学 講師 理工学部建設工学科 (同上)

このような滑動機構を有するモデルの利点は、地震時において上部構造への加速度伝達率が低減することであるが、その際にどの程度滑動変位が生じるかを知ることが耐震設計上とても重要なことである。図-1 (a),(b) の両モデルにおいて、加速度伝達率と滑動変位に影響を与えるパラメータとしては、剛体 I, II の質量比、摩擦係数、系の固有周期、非滑動時の減衰定数、入力波形（調和加振の場合には、円振動数 θ ）とその最大加速度が考えられる。これまでの研究では、これらのパラメータを別々に扱っているため、それらの影響を調べるには膨大な計算が必要であった。本研究の目的は、図-1 (a),(b) の両モデルについて、パラメータ解析を行う際に、有効な無次元パラメータを見出すことにある。上記のモデルの次元解析を行うと、調和外力を受ける時、無次元変位は5個の無次元パラメータによって表され、これは従来の研究と比べるとパラメータの数は2個減少していることになる。また、地震外力を受ける時、無次元変位は4個の無次元パラメータにより表され、従来の研究と比べるとパラメータの数は2個減少する。しかしながら、次元解析だけでは、数値解析に有効な無次元パラメータを決定することは難しい。そこで、次元解析の結果に基づき、パラメータ解析に適した無次元パラメータを求めるため、従来の解析解を見直した。その結果、周期外力を受ける場合には系の固有円振動数 ω と外力の円振動数 θ の比 θ/ω が1つのパラメータとして、更に、外力の最大加速度 a_0 と摩擦係数 μ の比 $a_0/\mu g$ が1つのパラメータとして扱えることが明かとなった。一方、地震外力の様な非周期外力を受ける場合には外力の最大加速度 A_{max} と摩擦係数 μ の比 $A_{max}/\mu g$ が1つのパラメータとして扱えることが明かとなり、数値計算を通してこれらのパラメータの影響を調べている。本研究では滑動変位及びそれによる加速度伝達率の低減について考察するために、鉛直方向の外力は無視しているが、今後その影響についても考慮していく予定である。

2. 解析モデルと運動方程式

図-1(a) のモデルは、質量 m_1 と m_2 の2つの剛体からなり、剛体 II は、バネとダンパーで剛体 I に接続されている。剛体 I と基盤との間に生じるせん断力が $(m_1 + m_2)\mu g$ を越えると、剛体 I, II は基盤上を滑動する。一方、図-1(b) のモデルは質量 M_1 と M_2 の2つの剛体からなり、剛体 I はバネとダンパーで基盤に支持されている。剛体 I と剛体 II との間に生じるせん断力が $M_2\mu g$ を超えると剛体 II は剛体 I の上を滑動する。なおここでは既往の論文と同様に、静摩擦係数と動摩擦係数は等しいものと仮定している。以上の条件下でこれら2つのモデルの運動方程式は以下のように書ける。

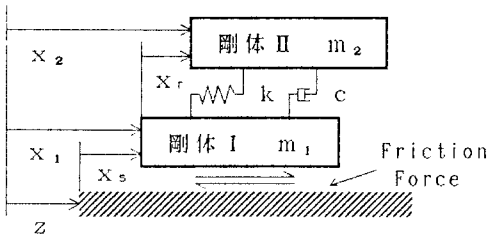


図-1 (a) Model 1

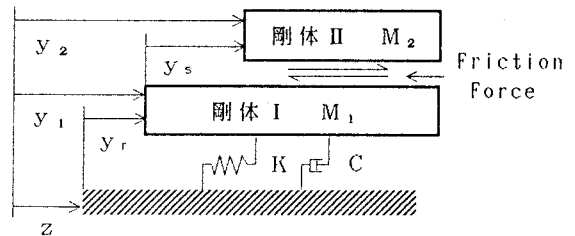


図-1 (b) Model 2

2.1 モデル 1

(1) 非滑動時

$$\ddot{x}_r + 2\xi_0\omega_0\dot{x}_r + \omega_0^2 x_r = -\ddot{z}(t) \quad (1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_2}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{km_2}}, \quad \gamma_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

$$\text{非滑動条件: } |\gamma_1 \ddot{x}_r + \ddot{z}| \leq \mu g \quad (2)$$

(2) 滑動時

$$\ddot{x}_r + 2\xi\omega_1\dot{x}_r + \omega_1^2 x_r = -\frac{\mu g}{1-\gamma_1} \text{sgn}(\dot{z} - \dot{x}_1) \quad (3)$$

$$\ddot{x}_1 = \mu g \text{sgn}(\dot{z} - \dot{x}_1) - \gamma_1 \ddot{x}_r \quad (4)$$

$$\omega_1 = (1-\gamma_1)^{-\frac{1}{2}}\omega_0, \quad \xi_1 = (1-\gamma_1)^{-\frac{1}{2}}\xi_0$$

$$\text{滑動条件: } |\gamma_1 \ddot{x}_r + \ddot{z}| \geq \mu g \quad (5)$$

$$\text{滑動停止条件: } \dot{x}_1 = \dot{z}, \quad |\gamma_1 \ddot{x}_r + \ddot{z}| \leq \mu g \quad (6)$$

2.2 モデル 2

(1) 非滑動時

$$\ddot{y}_r + 2\eta_0\psi_0\dot{y}_r + \psi_0^2 y_r = -\ddot{z}(t) \quad (7)$$

$$\psi_0 = \sqrt{\frac{K}{M_0}}, \quad \eta_0 = \frac{C}{2\sqrt{KM_0}}, \quad \gamma_2^2 = \frac{M_1}{M_0}, \quad M_0 = M_1 + M_2$$

$$\text{非滑動条件: } |\ddot{y}_r + \ddot{z}| \leq \mu g \quad (8)$$

(2) 滑動時

$$\text{剛体 I: } \ddot{y}_r + 2\eta_1\psi_1\dot{y}_r + \psi_1^2 y_r = -\ddot{z}(t) - \mu g \frac{1-\gamma_2^2}{\gamma_2^2} \text{sgn}(\dot{y}_1 - \dot{z}) \quad (9)$$

$$\text{剛体 II: } \ddot{y}_2 - \mu g \text{sgn}(\dot{y}_1 - \dot{z}) = 0 \quad (10)$$

$$\psi_1 = \sqrt{\frac{K}{M_1}} = \frac{\psi_0}{\gamma_2}, \quad \eta_1 = \frac{C}{2\sqrt{KM_1}} = \frac{\eta_0}{\gamma_2}$$

$$\text{滑動条件: } |\ddot{y}_2| = |\ddot{y}_r + \ddot{z}| \geq \mu g \quad (11)$$

$$\text{滑動停止条件: } \dot{y}_1 = \dot{y}_2, \quad |\ddot{y}_1 + \ddot{z}| \leq \mu g \quad (12)$$

3. 基本運動方程式とその一般解

本研究で用いたモデルの運動方程式は、非滑動時及び滑動時に分けられ、それぞれモデル 1 については式 (1),(3),(4) で、モデル 2 については式 (7),(9),(10) で表された。これらの運動方程式は全て同一の形となり、以下の様な微分方程式で表される。

$$\ddot{u} + 2h\omega u + \omega^2 u = -f(t) - \mu g d \quad (13)$$

ここに、 $f(t)$ は外力を示し、 d は定数である。次に、 $f(t)$ が周期関数と任意関数の場合に分け、それぞれの場合における一般解を示す。

3.1 $f(t) = a_0 \sin \theta t$ の時

式 (13) の一般解は次式のように求まる。

$$u(t) = S_H(t) + \frac{a_0}{\omega^2} S_P(t) \quad (14)$$

$$S_H(t) = e^{-h\omega(t-t_0)} \left[\left\{ \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'(t-t_0) + \cos \omega'(t-t_0) \right\} u(t_0) + \frac{1}{\omega\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'(t-t_0) \dot{u}(t_0) \right] \quad (15)$$

$$S_P(t) = e^{-h\omega(t-t_0)} \left[- \left\{ \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'(t-t_0) + \cos \omega'(t-t_0) \right\} \left(b - \frac{\mu g}{a_0} d \right) - \frac{a}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'(t-t_0) \right] + a \sin \theta(t-t_0) + b \cos \theta(t-t_0) - \frac{\mu g}{a_0} d \quad (16)$$

ここで、 S_H は同次解を、 S_P は特殊解を示している。初期条件として与えられる初期変位と初期速度は通常零となることから、 $t=0$ においては $S_H(0)=0$ となり、非滑動時から滑動時へ移る時の変位は $u(t_0) = \frac{a_0}{\omega^2} S_P(t_0)$ となる。よって、連続条件より、滑動時の S_H には、 $u(t_0)$ と $\dot{u}(t_0)$ の中にそれぞれ a_0/ω^2 と a_0/ω が含まれることが分かり、それ以降の運動については a_0/ω^2 で式 (14) の右辺がくられることになる。このことより、変位 u の無次元量として $\omega^2 u/a_0$ を用いる有効性が示されたことになる。なお、式 (15), (16) において $\omega' = \omega\sqrt{1-h^2}$ であり、さらに a, b は次式で与えられる。

$$a = - \frac{(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2}) \cos \theta t_0 + 2h \frac{\theta}{\omega} \sin \theta t_0}{(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2})^2 + (2h \frac{\theta}{\omega})^2}, \quad b = - \frac{(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2}) \sin \theta t_0 - 2h \frac{\theta}{\omega} \cos \theta t_0}{(1 - \frac{\theta^2}{\omega^2})^2 + (2h \frac{\theta}{\omega})^2} \quad (17)$$

以上のことから、無次元変位 $\omega^2 u/a_0$ は5個のパラメータの関数となり以下のように表すことができる。

$$\frac{\omega^2}{a_0} u = U_N \left(\frac{a_0}{\mu g}, \gamma, h, \frac{\theta}{\omega}, \theta t \right) \quad (18)$$

一方、これまでの研究では変位 u は無次元化されることなく以下のような形で表されている。

$$u = U_D(a_0, \mu, \gamma, h, \omega, \theta, t) \quad (19)$$

式 (19) から明らかなように、従来の研究では7個のパラメータを用いて変位が表されているのに対し、本研究では5個のパラメータで無次元変位が表されることになり、このことはパラメトリック解析上非常に有効なことと思われる。なお、加速度伝達率及び無次元滑動変位も式 (18) と同様の形で表されることは明かである。

3.2 $f(t)$ が任意関数のとき

$f(t)$ の最大値を A_{max} とおけば、式 (13) の一般解は次式のように求まる。

$$u(t) = R_H(t) + \frac{A_{max}}{\omega^2} R_P(t) \quad (20)$$

$$R_H(t) = e^{-h\omega(t-t_0)} \left[\left\{ \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'(t-t_0) + \cos \omega'(t-t_0) \right\} u(t_0) + \frac{1}{\omega\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'(t-t_0) \dot{u}(t_0) \right] \quad (21)$$

$$R_P(t) = - \frac{1}{1-h^2} \int_{t_0}^t \left\{ \frac{f(\tau)}{A_{max}} + \frac{\mu g}{A_{max}} d \right\} e^{-h\omega(t-\tau)} \{ \cos \omega'(\tau-t_0) \}' d\tau \quad (22)$$

ここでも、 $t=0$ の時の初期条件として $u(0)=\dot{u}(0)=0$ とすれば、 $R_H(0)=0$ となることから、3.1で示したように、全ての運動に関して式(20)の右辺は $\frac{A_{max}}{\omega^2}$ で与えられることが分かる。これより、 $u(t)$ に ω^2/A_{max} を掛けた無次元量が有効であることがわかる。次に、地震外力を想定すれば外力 $f(t)$ は図-2に示すような線形変化するものと仮定できる。Duhamel 積分を用いて式(20)を解くと、 $t_0=t_n, t=t_{n+1}=t_n+\Delta t$ と置くことにより以下の漸化式が得られる。

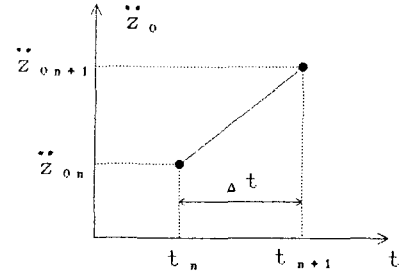


図-2 折れ線で表された入力加速度

$$R_H(t_{n+1}) = e^{-h\omega\Delta t} \left[\left\{ \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'\Delta t + \cos \omega'\Delta t \right\} u(t_n) + \frac{1}{\omega\sqrt{1-h^2}} \sin \omega'\Delta t \dot{u}(t_n) \right] \quad (23)$$

$$\begin{aligned} R_P(t_{n+1}) = & - \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-h^2}} (\lambda_3 - \frac{\lambda_4}{\omega\Delta t}) \sin \omega'\Delta t - (\lambda_1 - \frac{\lambda_2}{\omega\Delta t}) \cos \omega'\Delta t \right\} \frac{\ddot{z}_{on}}{A_{max}} \\ & - \left\{ \frac{e^{-h\omega\Delta t}}{\omega\Delta t\sqrt{1-h^2}} (\lambda_4 \sin \omega'\Delta t - \lambda_2 \cos \omega'\Delta t) \right\} \frac{\ddot{z}_{on+1}}{A_{max}} \\ & - \frac{1}{\sqrt{1-h^2}} e^{-h\omega\Delta t} (\lambda_3 \sin \omega'\Delta t - \lambda_1 \cos \omega'\Delta t) \frac{\mu g}{A_{max}} d \end{aligned} \quad (24)$$

ここで

$$\lambda_1 = e^{h\omega\Delta t} \{ (h \sin \omega\Delta t - \sqrt{1-h^2} \cos \omega'\Delta t) + \sqrt{1-h^2} \} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 = & \omega\Delta t e^{h\omega\Delta t} (h \sin \omega'\Delta t - \sqrt{1-h^2} \cos \omega'\Delta t) \\ & - [e^{h\omega\Delta t} \{ (2h^2 - 1) \sin \omega'\Delta t - 2h\sqrt{1-h^2} \cos \omega'\Delta t \} + 2h\sqrt{1-h^2}] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\lambda_3 = e^{h\omega\Delta t} (\sqrt{1-h^2} \sin \omega'\Delta t + h \cos \omega'\Delta t) - h \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \lambda_4 = & \omega\Delta t e^{h\omega\Delta t} (\sqrt{1-h^2} \sin \omega'\Delta t + h \cos \omega'\Delta t) \\ & - [e^{h\omega\Delta t} \{ (2h^2 - 1) \cos \omega'\Delta t + 2h\sqrt{1-h^2} \sin \omega'\Delta t \} - 2h\sqrt{1-h^2}] \end{aligned} \quad (28)$$

以上のようにランダム波においても、調和外力を受ける場合の解と同様の無次元量で表すことができ、無次元変位は以下のように表せる。

$$\frac{u}{T_0^2 A_{max}} = V_N \left(\frac{A_{max}}{\mu g}, \gamma, h, T_0^{-1} t \right) \quad (29)$$

ここに、 $T_0 = \frac{2\pi}{\omega}$ である。一方、既往の研究では変位が以下のように表されている。

$$u = V_D(A_{max}, \mu, \gamma, h, T_0, t) \quad (30)$$

式(30)に示されているように、既往の研究では、ランダム波を受ける時には、6個のパラメータにより変位が表されているが、本研究では4個のパラメータにより無次元変位が表されている。また、3.1で述べたようにランダム波を受ける場合の、加速度伝達率及び無次元滑動変位も、式(29)で示されたパラメータで表すことができる。

4. パラメータの定義

本研究で解析の対象とする加速度伝達率と最大滑動変位を次のように定義する。

(M.1.1) 調和加振を受ける Model 1 の加速度伝達率 T_{HA} 及び無次元滑動変位 T_{HS}

$$\text{加速度伝達率：} \left| \frac{\ddot{x}_{2max}}{a_0} \right| = T_{HA} \left(\frac{a_0}{\mu g}, \xi_0, \gamma_1, \frac{\theta}{\omega_0} \right) \quad (31)$$

$$\text{無次元滑動変位：} \left| \frac{\omega_0^2}{a_0} x_{s,max} \right| = T_{HS} \left(\frac{a_0}{\mu g}, \xi_0, \gamma_1, \frac{\theta}{\omega_0} \right) \quad (32)$$

(M.1.2) 地震外力を受ける Model 1 の加速度伝達率 T_{RA} 及び無次元滑動変位 T_{RS}

$$\text{加速度伝達率：} \left| \frac{\ddot{x}_{2max}}{A_{max}} \right| = T_{RA} \left(\frac{A_{max}}{\mu g}, \xi_0, \gamma_1, T_0 \right) \quad (33)$$

$$\text{無次元滑動変位：} \left| \frac{x_{s,max}}{T_0^2 A_{max}} \right| = T_{RS} \left(\frac{A_{max}}{\mu g}, \xi_0, \gamma_1, T_0 \right) \quad (34)$$

(M.2.1) 調和外力を受ける Model 2 の加速度伝達率 L_{HA} 及び無次元滑動変位 L_{HS}

$$\text{加速度伝達率：} \left| \frac{\ddot{y}_{2max}}{a_0} \right| = L_{HA} \left(\frac{a_0}{\mu g}, \eta_0, \gamma_2^2, \frac{\theta}{\psi_0} \right) \quad (35)$$

$$\text{無次元滑動変位：} \left| \frac{\psi_0^2}{a_0} y_{s,max} \right| = L_{HS} \left(\frac{a_0}{\mu g}, \eta_0, \gamma_2^2, \frac{\theta}{\psi_0} \right) \quad (36)$$

(M.2.2) 地震外力を受ける Model 2 の加速度伝達率 L_{RA} 及び無次元滑動変位 L_{RS}

$$\text{加速度伝達率：} \left| \frac{\ddot{y}_{2max}}{A_{max}} \right| = L_{RA} \left(\frac{A_{max}}{\mu g}, \eta_0, \gamma_2^2, T_0 \right) \quad (37)$$

$$\text{無次元滑動変位：} \left| \frac{y_{s,max}}{T_0^2 A_{max}} \right| = L_{RS} \left(\frac{A_{max}}{\mu g}, \eta_0, \gamma_2^2, T_0 \right) \quad (38)$$

(M.1.1),(M.2.1) に示すように、調和加振を受ける場合の滑動変位は、系の固有円振動数で無次元化し、加速度伝達率については、基盤の力がどれだけ上部構造に伝わったかを知るため、基盤の最大加速度で無次元化した。また、図示する際にはその無次元量を縦軸に、円振動数比を横軸にとることにより、パラメータは $a_0/\mu g$ 、非滑動時の減衰定数、質量比の3つとなった。地震外力を受けるときには、(M.1.2), (M.2.2) に示すように系の固有周期 T_0 で滑動変位を無次元化し、加速度伝達率は調和外力を受けるときと同様の理由で基盤の最大加速度で無次元化した。これも、図示する際にはその無次元量を縦軸にとり、横軸に系の固有周期をとることにより、パラメータは $A_{max}/\mu g$ 、非滑動時の減衰定数、質量比及び入力波形となる。本研究で用いた地震波形は、El.Centro 1940 NS Imperial Valley Earthquake, Taft 1952 S69E Arvin Tahachapi Earthquake, Hachinohe 1968 NS 十勝沖地震, Tohoku Univ. 1978 EW 宮城県沖地震の4波である。

5. 解析結果

5.1 調和外力を受けるときの系の応答

モデル1が調和加振を受ける時の、無次元滑動変位 T_{HS} と加速度伝達率 T_{HA} を図-3(a),(b) に示し、モデル2が調和加振を受ける場合の無次元滑動変位 L_{HS} と加速度伝達率 L_{HA} を図-4(a),(b) に示した。いずれの場合にも縦軸に無次元量 $T_{HS}, T_{HA}, L_{HS}, L_{HA}$ をとり、横軸に円振動数比をとっている。また、パラメータである非滑動時の減衰定数と質量比を固定し、 $a_0/\mu g$ を変化させた。無次元滑動変位 T_{HS}, L_{HS} は円振動数比が1より大きくなると、ほぼ零となることがわかり、また、それ以下の値でも類似した曲線が得られている。このように、全く別のモデルを扱っているにも拘らず類似した傾

向が得られることは興味深い。また、加速度伝達率に注目すると、モデル1の加速度伝達率 T_{HA} は、円振動数比が1と2の間でピークが生じているのに対し、モデル2の加速度伝達率 L_{HA} は、その機構上、摩擦以上外力を伝えないため、滑動が生じている範囲では加速度伝達率が一定となり、このことは、図よりも明かである。

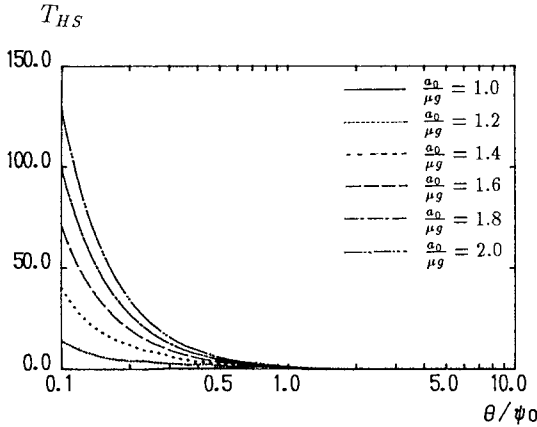


図-3 (a) 無次元滑動変位 T_{HS} ($\gamma_1 = 0.5, \xi_0 = 0.1$)

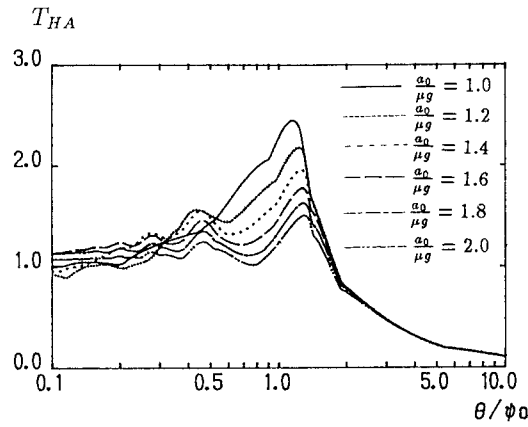


図-3 (b) 加速度伝達率 T_{HA} ($\gamma_1 = 0.5, \xi_0 = 0.1$)

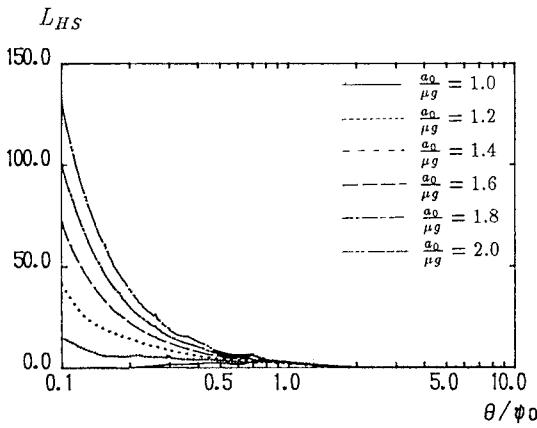


図-4 (a) 無次元滑動変位 T_{HS} ($\gamma_2^2 = 0.5, \eta_0 = 0.1$)

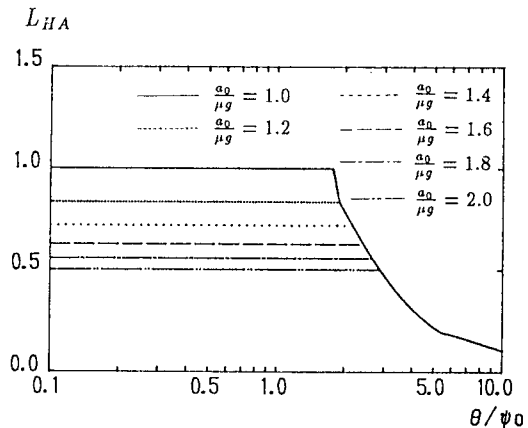


図-4 (b) 加速度伝達率 L_{HA} ($\gamma_2^2 = 0.5, \eta_0 = 0.1$)

5.2 地震外力を受ける時の系の応答

まず最初に滑動変位について注目する。モデル1にEl.Centro波を入力した場合の無次元滑動変位 T_{RS} を図-5(a),(b),(c)に示した。図-5(a),(b)は、無次元滑動変位 T_{RS} を縦軸にとり、横軸に固有周期 T_0 をとっており、パラメータである非滑動時の減衰定数と質量比を固定し、 $A_{max}/\mu g$ を変化させている。これより、 $A_{max}/\mu g=1$ を境に無次元滑動変位の応答曲線が全く異なった傾向を示していることが分かる。図-5(c)は、パラメータである $A_{max}/\mu g$ と非滑動時の減衰定数を固定し、質量比を変化させ無次元滑動変位に与える影響を調べている。これより、上部剛体の質量が下部剛体の質量に比べて大きい時の方が滑動変位が大きくなることが分かる。これまでは入力波形としてEl.Centro波を用いていたが、入力波形の影響を見るためそれぞれのパラメータを固定し、入力波形としてEl.Centro

波、Taft 波、八戸波、宮城沖波を用いた時の無次元滑動変位 T_{RS} を図-5 (d) に示した。入力波形によって無次元滑動変位 T_{RS} の大きさも、ピークの発生地点も異なり、それぞれの地震波の特徴によって L_{RS} の波形も変化する。また、一般に長周期成分が卓越しているとされている八戸、宮城沖の地震波の方が無次元滑動変位が大きくなっている。

モデル 2 に El.Centro 波を入力した場合の無次元滑動変位 L_{RS} を図-6 (a),(b),(c) に示した。ここでは、図-5 (a),(b),(c) と同様のパラメータを用いており、それぞれの (a),(b),(c) と対応している。図-6 (a),(b) に示されている曲線の傾向は、図-5 (a),(b) と類似しており、パラメータ $A_{max}/\mu g$ が系の応答に与える影響は、両モデルにおいて非常に似ていることが分かる。しかし、モデル 1 においては、無次元滑動量は質量比の影響を大きく受けているのに対して、図-6(c) に示されるようにモデル 2 ではあまり大きな影響を受けていないことが分かる。

次に、加速度伝達率について考察する。図-7(a),(b) はモデル 1 における加速度伝達率 T_{RA} を示している。図-7(a) では、質量比と非滑動時の減衰定数を固定し、 $A_{max}/\mu g$ を変化させており、一方、図-7(b) では、 $A_{max}/\mu g$ と非滑動時の減衰定数を固定し、質量比を変化させている。滑動は、 $A_{max}/\mu g$ と質量比 γ_1 の値が大きい程生じ易いことから、これらの図より、滑動が発生した時には加速度伝達率が低下していることが分かる。最後に、モデル 2 の加速度伝達率 L_{RA} を図-8 に示す。モデル 2 の場合、加速度伝達率は本論文で提案したパラメータ $A_{max}/\mu g$ の逆数の値を越えることはなく、このことは図-8 よりも明らかである。

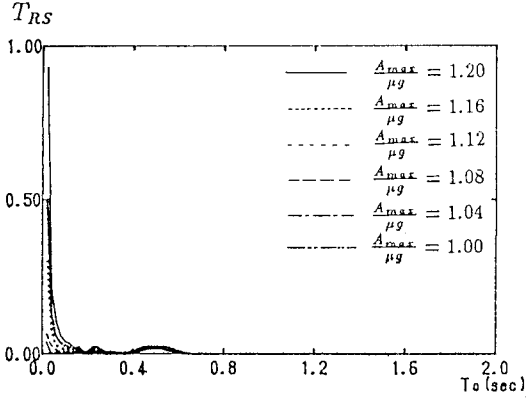


図-5 (a) 無次元滑動変位 T_{RS} ($\gamma_1 = 0.5$, $\xi_0 = 0.1$)

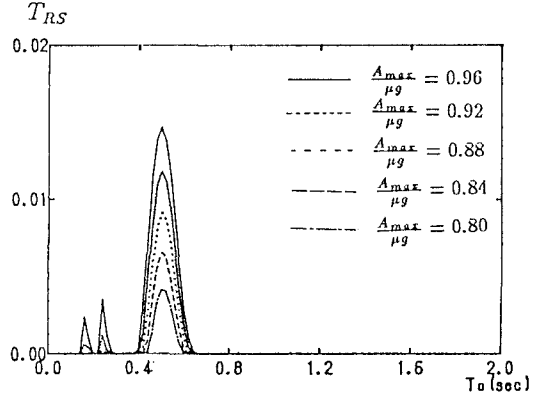


図-5 (b) 無次元滑動変位 T_{RS} ($\gamma_1 = 0.5$, $\xi_0 = 0.1$)

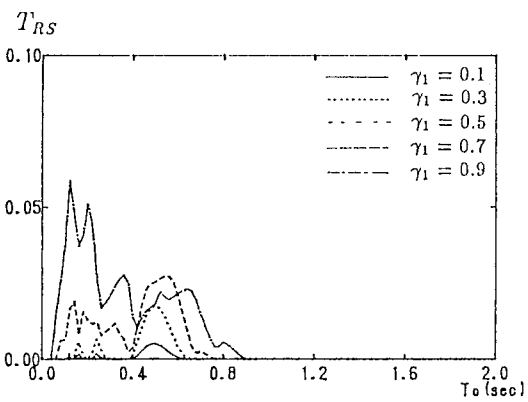


図-5 (c) 無次元滑動変位 T_{RS} ($\frac{A_{max}}{\mu g} = 1.0$, $\xi_0 = 0.1$)

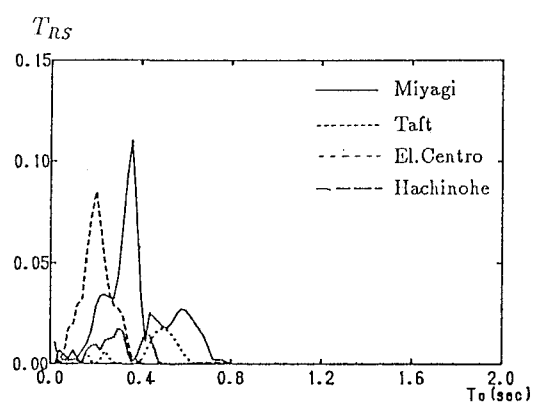


図-5 (d) 無次元滑動変位 T_{RS}
($\frac{A_{max}}{\mu g} = 1.0$, $\xi_0 = 0.1$, $\gamma_1 = 0.5$)

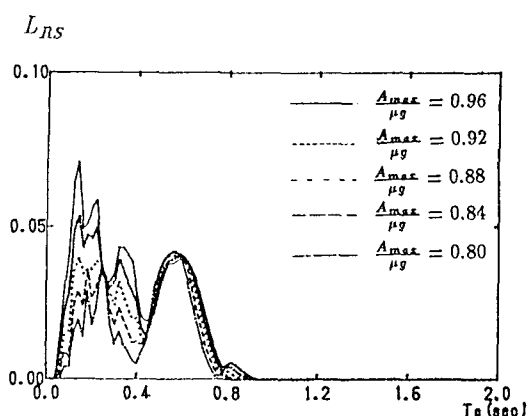
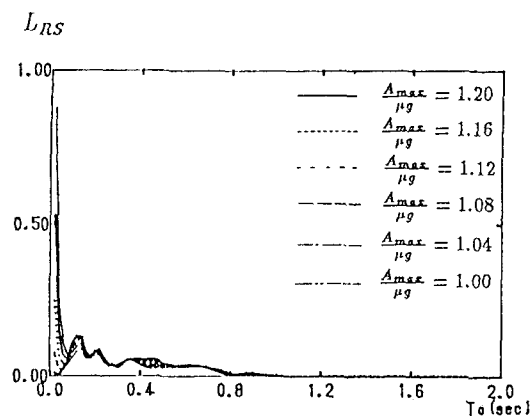


図-6 (a) 無次元滑動変位 L_{RS} ($\gamma_2^2 = 0.5, \eta_0 \approx 0.1$) 図-6 (b) 無次元滑動変位 L_{RS} ($\gamma_2^2 = 0.5, \eta_0 \approx 0.1$)

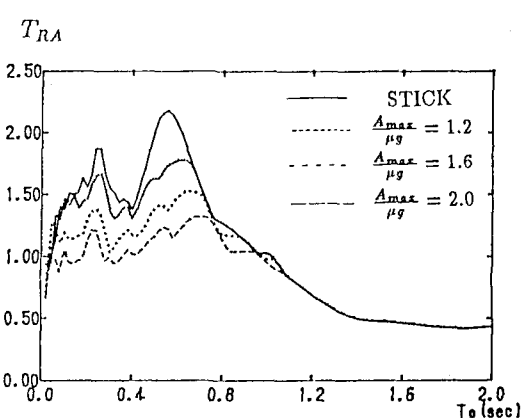
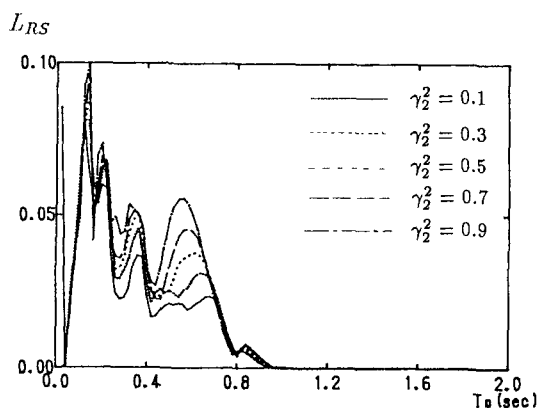


図-6 (c) 無次元滑動変位 L_{RS} ($\frac{A_{max}}{\mu g} = 1, \eta_0 \approx 0.1$) 図-7 (a) 加速度伝達率 T_{RA} ($\gamma_1 = 0.5, \xi_0 = 0.1$)

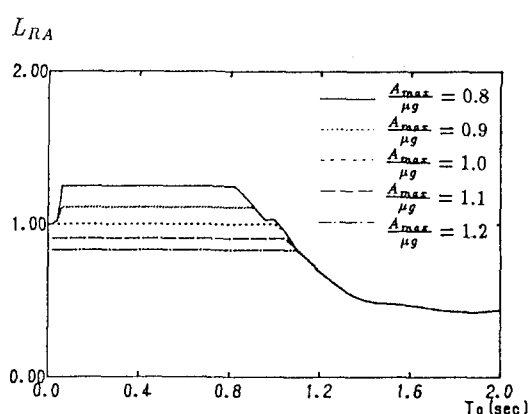
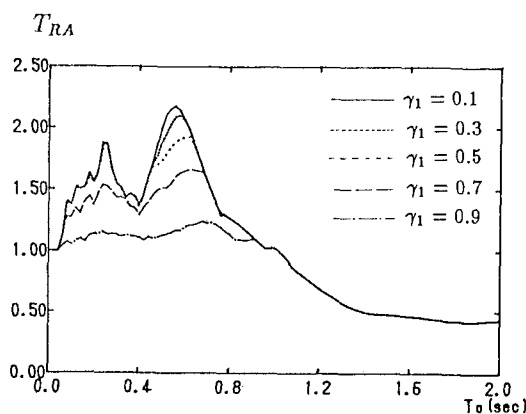


図-7 (b) 加速度伝達率 T_{RA} ($\frac{A_{max}}{\mu g} = 1.0, \xi_0 = 0.1$) 図-8 加速度伝達率 L_{RA} ($\gamma_2^2 = 0.5, \eta_0 \approx 0.1$)

6. まとめ

本研究では、滑動を伴う2つの2質点系モデルについて、従来の解析解を見直し、パラメトリック解析に適した新たなパラメータを提案した。また、そのパラメータを用い上部構造物への加速度伝達率と滑動変位について考察を行った。本研究で使用する2質点系モデルは、過去においてそれぞれ独立に研究されていたが、ここで導入したパラメータを用いることにより、質量比以外のパラメータの影響については多くの共通点が存在することが明らかとなった。

7. 謝辞

本研究は、東京電機大学総合研究所から補助を受けて行った研究（課題番号 Q63-S11）の一部である。また本文作成にあたり、種々の協力を提供して頂いた東京電機大学建設工学科卒研究生 河合善寿君と山下誠司君に深く感謝します。なお、次元解析に関して有益な御意見を頂いた査読者に謝意を表します。

参考文献

- 1) Westermo,B.and Udawadia,F. : Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, pp.135-146,1983.
- 2) Mostaghel,N.,Hejazi,M.and Tabankuchi,J. : Response of sliding structures to harmonic support motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11,pp.355-366,1983.
- 3) Mostaghel,N. and Tanbakuchi,J. : Response of sliding structures to earthquake support motion,Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11,pp.729-748,1983.
- 4) Younis,C.J. and Tadjbakhsh,I.G. : Response of sliding rigid structure to base excitation, Journal of Engineering Mechanics, ASCE,Vol. 110,No.3,pp.417-432,March,1984.
- 5) 松井、井浦、佐々木、小坂： 調和加振される剛体とフーチングの定常振動、構造工学論文集、Vol.36A- II, pp.633-644,1990年3月.
- 6) Lin,C.J. and Tadjbakhsh,I.G. : Effect of vertical motion of friction-driven isolation systems,Earthquake Engineering and Structural Dynamics,Vol.14,pp.609-622,1986.
- 7) Liauw,T.C.,Tian,Q.L. and Cheung,Y.K. : Structures on sliding base subject to horizontal and Vertical Motions,Journal of Structural Engineering,ASCE,Vol,114,No.9, pp.2119-2129,September,1988.

(1990年10月12日受付)