

# 地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルへの地震エネルギーの入力メカニズム MECHANISM OF EARTHQUAKE ENERGY INPUT TO CONNECTED BUILDING MODELS CONSIDERING SOIL STIFFNESS

坂口 和 大\*, 竹 脇 出\*\*  
*Kazuhiro SAKAGUCHI and Izuru TAKEWAKI*

The mechanism of earthquake energy input to connected building models on flexible soil is clarified. The earthquake input energies to super-structures, connecting dampers, soil-foundation systems and total system are obtained by taking the corresponding appropriate free bodies into account and defining the energy transfer functions. It has been made clear that, when the soil becomes softer, the effectiveness of connection dampers decreases. This phenomenon can be confirmed by the change of properties of energy transfer functions. It has further been disclosed that the maximization of the area (input energy to connecting dampers) of the energy transfer function for connecting dampers is a good index for determination of connecting damper quantity.

**Keywords :** *Vibration control via building connection, Viscous damper, Earthquake input energy, Energy transfer function, Sway-rocking model, Soil-structure interaction*  
連結制振, 粘性ダンパー, 地震入力エネルギー, エネルギー伝達関数, スウェイ・ロッキングモデル,  
構造物・地盤相互作用

## 1. 序

地震動に対する有効な建物制振機構として、特性の異なる2棟の建物をダンパーやばねで連結する場合や、建物とアウトフレームとの連結を考える連結制振構造がある<sup>1-18)</sup>。また、実際の建物などへの適用事例も存在する<sup>14, 20, 21)</sup>。このような連結制振構造の有効性を示すものとして、変位や加速度の低減効果を用いる場合が多いが<sup>たとえ</sup>ば<sup>5, 10, 14, 16, 17)</sup>、それぞれの建物やダンパーに入力されるエネルギーを取り扱った研究もわずかに存在する<sup>6, 9, 10)</sup>。

従来の連結制振に関する研究の多くは、連結する建物間の最適な固有周期比や、連結機構の最適特性を明らかにすることを主目的としている。既往の連結制振に関する理論的研究の代表的なものとして、定点理論<sup>22)</sup>を用いたものが存在する<sup>3-5, 8)</sup>。しかしながら、定点理論の対象モデルは構造減衰を有しないモデルに限定される。

蔭山らは、2棟の耐震性能の向上を目的として、定点理論を用いた研究を展開している<sup>3-5)</sup>。ダンパーのみで2棟の構造物を連結するときの構造モデルとしては、連結制振の理想系である双方の系の定点の伝達率の高さが等しくなるモデル(質量比と剛性比が反比例の関係となるモデル<sup>5, 13, 18)</sup>)を主に扱っており、その質量比と剛性比による制約を緩和するために、連結ばねとダンパーを併用したモデルを扱っている。楊ら<sup>8)</sup>は、1質点系にモデル化した2棟の建物を接合ばねと接合ダンパーで連結した場合について、主構造物の伝達関数のピークを最小にする最適接合ばね剛性と最適ダンパー減衰係

数の決定方法を検討し、定点理論に基づく理論を展開している。質量比、周波数比で定義される領域を3つに区分して、各領域での最適パラメータ決定法を提案している。友澤らは、建物の塑性化を考慮した上で、連結効果(非連結時との変位比、入力エネルギー比)を向上させる建物および連結部材のパラメータ特性をパラメトリック解析により明らかにしている<sup>10)</sup>。竹脇と辻らは、連結制振建物について、連結ダンパー量の決定法に加えて、主構造物と副構造物の動特性の決定法について論じている<sup>11, 12, 15)</sup>。

連結制振建物に関する既往の研究で十分検討されていない点として、地震エネルギーによる検討および地盤や基礎の影響を考慮した検討が挙げられる。連結制振建物への地震エネルギーの入力メカニズムは、これまで基礎固定モデルに対して検討されているが<sup>6, 9, 10)</sup>、地盤剛性がそれに及ぼす影響については詳細な検討がなされていない。本論文では、地震入力と対象モデルへの入力エネルギーを関連付ける所謂「エネルギー伝達関数」を用いた振動数領域での定式化<sup>23-27)</sup>によりその検討を行い、地盤剛性が連結制振効果に及ぼす影響や連結ダンパー減衰係数の有効な値の決定方法について検討を行う。

本論文では損傷限界レベルを想定し、建物・地盤ともに弾性挙動として扱う。

## 2. 地動を受ける地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルのシステム全体への入力エネルギー

\* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生  
\*\* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.  
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

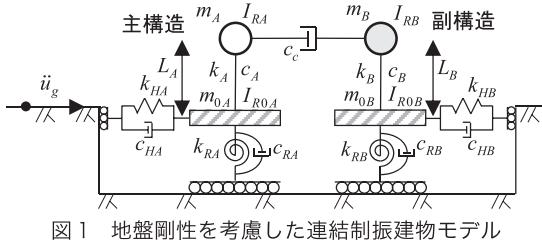


図1 地盤剛性を考慮した連結制振建物モデル

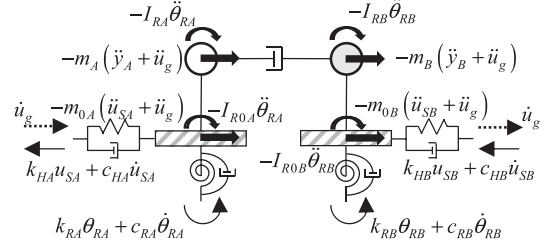


図2 システム全体の自由体

図1のような自由地表面加速度入力  $\ddot{u}_g(t)$  を受ける地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルを考える。本論文では中低層建物をオイルダンパー等で連結する連結制振を想定する。オイルダンパーでは取付け部等の剛性を考慮してばねとダッシュポットを直列にモデル化することも考えられるが<sup>15)</sup>、本論文では地盤による影響を解明する基礎理論を扱うことを主目的としているため、ダッシュポットのみでモデル化する。尚、直列モデルを採用した場合でも、表現は複雑となるものの同様の定式化を行うことは可能である。ここでは基本的考え方の簡潔な提示のため基礎間の連成効果は考えない。基礎と上部の質量をそれぞれ  $m_0, m$ 、基礎と上部のそれぞれの重心まわりの回転慣性を  $I_{R0}, I_R$  で表し、上部構造の剛性および構造減衰係数を  $k, c$  で表す。上部質点の基礎からの高さを  $L$  とする。地盤による基礎の水平と回転に関するばね剛性とダッシュポット減衰係数を  $k_H, k_R, c_H, c_R$  で表す。また、連結部材の減衰係数を  $c_c$  で表す。自由地表面に対する基礎の水平変位(スウェイ)を  $u_s$ 、回転(ロッキング)を  $\theta_r$  で表し、ロッキングを含まない基礎に対する上部質点の相対変位を  $u$  で表す。ここでは、主構造をA、副構造をBで表し、上記の諸量 ( $c_c$  以外) にA、Bを追記して表す。

このモデルに対する運動方程式は次式となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_c)\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここで、

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_B \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} m_A & m_A & L_A m_A \\ m_A & m_A + m_{0A} & L_A m_A \\ L_A m_A & L_A m_A & L_A^2 m_A + I_{RA} + I_{R0A} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_B = \begin{bmatrix} m_B & m_B & L_B m_B \\ m_B & m_B + m_{0B} & L_B m_B \\ L_B m_B & L_B m_B & L_B^2 m_B + I_{RB} + I_{R0B} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \text{diag}(k_A, k_{HA}, k_{RA}, k_B, k_{HB}, k_{RB})$$

$$\mathbf{C} = \text{diag}(c_A, c_{HA}, c_{RA}, c_B, c_{HB}, c_{RB}) \quad (\text{構造減衰と地盤減衰})$$

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{cA} & -\mathbf{C}_{cAB} \\ -\mathbf{C}_{cAB}^T & \mathbf{C}_{cB} \end{bmatrix} \quad (\text{連結部材による減衰マトリクス})$$

$$\mathbf{C}_{cA} = \begin{bmatrix} c_c & c_c & L_A c_c \\ c_c & c_c & L_A c_c \\ L_A c_c & L_A c_c & L_A^2 c_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{cB} = \begin{bmatrix} c_c & c_c & L_B c_c \\ c_c & c_c & L_B c_c \\ L_B c_c & L_B c_c & L_B^2 c_c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{cAB} = \begin{bmatrix} c_c & c_c & L_B c_c \\ c_c & c_c & L_B c_c \\ L_A c_c & L_A c_c & L_A L_B c_c \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = (u_A, u_{SA}, \theta_{RA}, u_B, u_{SB}, \theta_{RB})^T, \quad \mathbf{r} = (0, 1, 0, 0, 1, 0)^T \quad (2a-k)$$

本論文では主構造と副構造の質点の基礎からの高さは等しいとする ( $L_A = L_B = \bar{L}$ )。このとき、連結部材による減衰マトリクスは次のようになる。

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{C}}_c & -\bar{\mathbf{C}}_c \\ -\bar{\mathbf{C}}_c & \bar{\mathbf{C}}_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{cA} = \mathbf{C}_{cB} = \mathbf{C}_{cAB} = \bar{\mathbf{C}}_c = \begin{bmatrix} c_c & c_c & \bar{L}c_c \\ c_c & c_c & \bar{L}c_c \\ \bar{L}c_c & \bar{L}c_c & \bar{L}^2 c_c \end{bmatrix} \quad (3a, b)$$

また、地盤に対する上部構造の水平変位  $y_A, y_B$  を次のように表す。

$$y_A = u_A + u_{SA} + \bar{L}\theta_{RA}, \quad y_B = u_B + u_{SB} + \bar{L}\theta_{RB} \quad (4a, b)$$

本モデルのシステム全体に入力されるエネルギーを考える。図2にシステム全体を取り出した自由体を示す。 $\blackrightarrow$ は慣性力を、 $\blackrightarrow$ は境界力を、 $\cdots\blackrightarrow$ は境界での速度を表す。地面がシステムに対して為す仕事は、境界力がシステム全体の自由体に対して為す仕事  $E_I^A$  として次のように表現できる。

$$E_I^A = \int_0^\infty \{ -(k_{HA}u_{SA} + c_{HA}\dot{u}_{SA}) - (k_{HB}u_{SB} + c_{HB}\dot{u}_{SB}) \} \dot{u}_g dt \quad (5)$$

また、図2のシステム全体の自由体の水平方向の力の釣り合いより

$$\{ -(k_{HA}u_{SA} + c_{HA}\dot{u}_{SA}) - (k_{HB}u_{SB} + c_{HB}\dot{u}_{SB}) \} = m_{0A}(\ddot{u}_{SA} + \ddot{u}_g) + m_A(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) + m_{0B}(\ddot{u}_{SB} + \ddot{u}_g) + m_B(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) \quad (6)$$

(6)式を(5)式に代入することで次式を得る。

$$E_I^A = \int_0^\infty \left\{ m_{0A}(\ddot{u}_{SA} + \ddot{u}_g) + m_A(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) + m_{0B}(\ddot{u}_{SB} + \ddot{u}_g) + m_B(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) \right\} \dot{u}_g dt \quad (7)$$

(7)式はマトリクスとベクトルを用いてより簡潔に表現することができる。ベクトルの転置を  $( )^T$  で表す時、 $\dot{\mathbf{u}}^T$  を(1)式に前掛けして、 $0 \sim \infty$  の区間で積分すると次式となる。

$$\int_0^\infty \dot{\mathbf{u}}^T \{ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_c)\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} \} dt = - \int_0^\infty \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g dt \quad (8)$$

(8)式の右辺を部分積分し、 $\dot{u}_g(0) = \dot{u}_g(\infty) = 0$  の条件と、 $\mathbf{M}, \mathbf{u}, \mathbf{r}$  の具体的な表現を代入して変形すると次のようになる。

$$\begin{aligned} - \int_0^\infty \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g dt &= - \left[ \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\mathbf{r}\dot{u}_g \right]_0^\infty + \int_0^\infty \ddot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\mathbf{r}\dot{u}_g dt \\ &= \int_0^\infty \left\{ m_{0A}(\ddot{u}_{SA} + \ddot{u}_g) + m_A(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) + m_{0B}(\ddot{u}_{SB} + \ddot{u}_g) + m_B(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) \right\} \dot{u}_g dt \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式の最下式は(7)式の表現と一致する。つまり、 $E_I^A$  はマトリクスとベクトルを用いて次のように表現することができる<sup>26)</sup>。

$$E_I^A = - \int_0^\infty \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g dt \quad (10)$$

システムの応答を線形弾性に限定すれば、地震入力エネルギーは時間領域のみならず振動数領域でも表現することができる<sup>23-27)</sup>。 $u, u_s, \theta_r, y, u_g$  のフーリエ変換を  $U, U_s, \Theta_r, Y, U_g$  で表し、 $u, u_s,$

$\theta_R, y$  の  $\ddot{u}_g$  に対する伝達関数を次のように表す。主構造を A、副構造を B で表し、それぞれの諸量に追記して表す。 $\omega$  は、外乱振動数である。

$$U/\ddot{U}_g = H(\omega), U_S/\ddot{U}_g = H_S(\omega), \Theta_R/\ddot{U}_g = H_R(\omega), Y/\ddot{U}_g = H_Y(\omega) \quad (11a-d)$$

$\dot{u}_g$  の特性 ( $t < 0$  のとき  $\dot{u}_g = 0$ ) から (7) 式の積分の上下限を  $\infty, -\infty$  に拡張して (7) 式を逆フーリエ変換し、(11) 式の実部を用いると次のようになる。ここで、 $(\cdot)^*$  は共役複素数、 $\text{Re}[\cdot]$  は実部、 $i$  は虚数単位を表す。

$$E_I^A = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ m_{0A}(\ddot{U}_{SA} + \ddot{U}_g) + m_A(\ddot{Y}_A + \ddot{U}_g) + m_{0B}(\ddot{U}_{SB} + \ddot{U}_g) + m_B(\ddot{Y}_B + \ddot{U}_g) \right\} \dot{u}_g e^{i\omega t} dt d\omega$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{\pi} \text{Re} \left[ \frac{1}{i\omega} \left\{ m_{0A}(\omega^2 H_{SA} - 1) + m_A(\omega^2 H_{YA} - 1) + m_{0B}(\omega^2 H_{SB} - 1) + m_B(\omega^2 H_{YB} - 1) \right\} \right] |\ddot{U}_g|^2 d\omega \quad (12)$$

(12) 式の  $E_I^A$  の振動数領域での表現は、(10) 式のマトリクス表現を用いても表現することができる。(12) 式ではスウェイ・ロッキングによる変位を含む  $H_{YA}, H_{YB}$  を用いているが、以下のマトリクス表現ではそれを用いず  $H_A, H_B$  により表現する。

$$E_I^A = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{\mathbf{U}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}}_g e^{i\omega t} dt d\omega = \int_0^{\infty} \left\{ -\frac{1}{\pi} \text{Re} [i\omega \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{r}] \right\} |\ddot{U}_g|^2 d\omega \quad (13)$$

ここで、

$$\mathbf{H} = \{H_A \ H_{SA} \ H_{RA} \ H_B \ H_{SB} \ H_{RB}\}^T \quad (14)$$

(12), (13) 式の  $E_I^A$  を次のように置く。

$$E_I^A = \int_0^{\infty} F_A(\omega) |\ddot{U}_g|^2 d\omega \quad (15)$$

$F_A(\omega)$  をシステム全体のエネルギー伝達関数と呼ぶ。 $F_A(\omega)$  は、具体的表現及びマトリクスとベクトルを用いて次のように表される。

$$F_A(\omega) = \frac{1}{\pi} \text{Re} \left[ \frac{1}{i\omega} \left\{ m_{0A}(\omega^2 H_{SA} - 1) + m_A(\omega^2 H_{YA} - 1) + m_{0B}(\omega^2 H_{SB} - 1) + m_B(\omega^2 H_{YB} - 1) \right\} \right] \quad (16a)$$

$$F_A(\omega) = -\frac{1}{\pi} \text{Re} [i\omega \mathbf{H}^T \mathbf{M} \mathbf{r}] \quad (16b)$$

### 3. 地動を受ける地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルの部分ごとの入力および吸収エネルギー

本モデルの部分ごとの入力および吸収エネルギーを考える。

#### 3.1 連結部材の吸収エネルギー

図 3 に連結部材を取り出した自由体の概要を示す。連結部材の自由体において境界力が為す仕事は、左端では境界力と境界での変位速度は同じ向きであり、右端では逆向きであるため次のようになる。

$$E_I^c = \int_0^{\infty} \left\{ c_c(\dot{y}_A - \dot{y}_B)(\dot{y}_A + \dot{u}_g) - c_c(\dot{y}_A - \dot{y}_B)(\dot{y}_B + \dot{u}_g) \right\} dt$$

$$= \int_0^{\infty} c_c(\dot{y}_A - \dot{y}_B)^2 dt \quad (17)$$

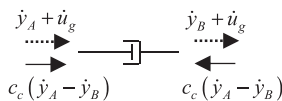
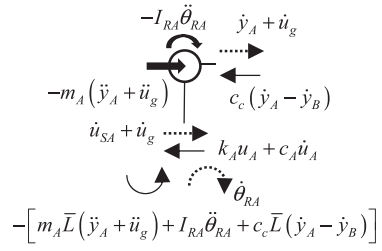
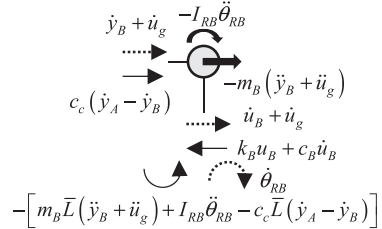


図 3 連結部材の自由体 (—▶ : 境界力、- - -▶ : 境界速度)



(a) 主構造上部



(b) 副構造上部

図 4 主構造上部および副構造上部の自由体

連結部材には質量もばね要素も存在しないため、この自由体に為される仕事  $E_I^c$  はすべて連結部材で吸収されると考えられる。 $E_I^c$  は、マトリクスとベクトルを用いて次のように表すことができる。

$$E_I^c = \int_0^{\infty} \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{u}} dt \quad (18)$$

$E_I^c$  についても、(12) 式と同様に振動数領域で表現することができる。

$$E_I^c = \int_0^{\infty} \frac{1}{\pi} c_c \omega^2 |H_{YA} - H_{YB}|^2 |\ddot{U}_g|^2 d\omega \quad (19)$$

また、マトリクスとベクトルを用いると次のようになる。

$$E_I^c = \int_0^{\infty} \frac{1}{\pi} \text{Re} [ \omega^2 \mathbf{H}^T \mathbf{C}_c \mathbf{H} ] |\ddot{U}_g|^2 d\omega \quad (20)$$

ここで  $E_I^c$  を次のように置く。

$$E_I^c = \int_0^{\infty} F_c(\omega) |\ddot{U}_g|^2 d\omega \quad (21)$$

$F_c(\omega)$  は連結部材のエネルギー伝達関数である。 $F_c(\omega)$  は、具体的表現およびマトリクス表現を用いて次のように表される。

$$F_c(\omega) = \frac{1}{\pi} c_c \omega^2 |H_{YA} - H_{YB}|^2, \quad F_c(\omega) = \frac{1}{\pi} \text{Re} [ \omega^2 \mathbf{H}^T \mathbf{C}_c \mathbf{H} ] \quad (22a, b)$$

#### 3.2 主構造上部および副構造上部に入力されるエネルギー

図 4 に主構造上部と副構造上部を取り出した自由体の概要を示す。

主構造上部および副構造上部の自由体において、境界力が為す仕事はそれぞれ次のようになる。

$$E_I^{SA} = \int_0^{\infty} \left\{ -(k_A u_A + c_A \dot{u}_A) (\dot{u}_{SA} + \dot{u}_g) + \int_0^{\infty} \left\{ -c_c(\dot{y}_A - \dot{y}_B) (\dot{y}_A + \dot{u}_g) \right\} dt \right. \\ \left. + \int_0^{\infty} \left[ m_A \bar{L}(\ddot{y}_A + \ddot{u}_g) + I_{RA} \ddot{\theta}_{RA} + c_c \bar{L}(\dot{y}_A - \dot{y}_B) \right] \dot{\theta}_{RA} dt \right\} dt \quad (23)$$

$$E_I^{SB} = \int_0^{\infty} \left\{ -(k_B u_B + c_B \dot{u}_B) (\dot{u}_{SB} + \dot{u}_g) + \int_0^{\infty} c_c(\dot{y}_A - \dot{y}_B) (\dot{y}_B + \dot{u}_g) dt \right. \\ \left. + \int_0^{\infty} \left[ m_B \bar{L}(\ddot{y}_B + \ddot{u}_g) + I_{RB} \ddot{\theta}_{RB} - c_c \bar{L}(\dot{y}_A - \dot{y}_B) \right] \dot{\theta}_{RB} dt \right\} dt \quad (24)$$

主構造上部および副構造上部に入力されるエネルギー  $E_I^{SA}, E_I^{SB}$  についても (12) 式と同様に振動数領域で表現することができる。

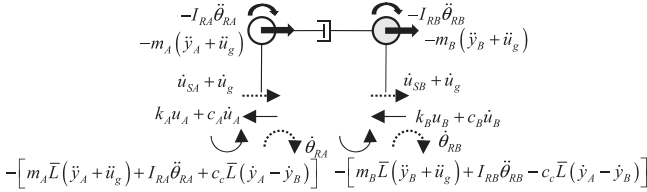


図5 上部構造全体の自由体

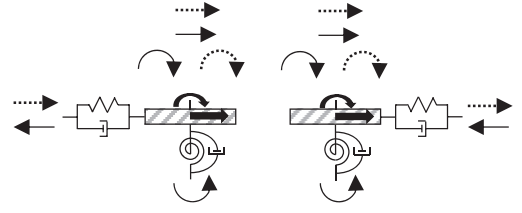


図6 基礎地盤系の自由体

$$E_I^{SA} = \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_A + i\omega c_A) H_A \left( i\omega H_{SA}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$+ \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ c_c (H_{YA} - H_{YB}) (1 - \omega^2 H_{YA}^*) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$+ \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ i\omega \{ m_A \bar{L} (\omega^2 H_{YA} - 1) + \omega^2 I_{RA} H_{RA} - i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RA}^* \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (25)$$

$$E_I^{SB} = \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_B + i\omega c_B) H_B \left( i\omega H_{SB}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$- \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ c_c (H_{YA} - H_{YB}) (1 - \omega^2 H_{YB}^*) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$+ \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ i\omega \{ m_B \bar{L} (\omega^2 H_{YB} - 1) + \omega^2 I_{RB} H_{RB} + i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RB}^* \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (26)$$

$E_I^{SA}$  および  $E_I^{SB}$  をそれぞれ次のように置く。

$$E_I^{SA} = \int_0^\infty F_{SA}(\omega) |\dot{U}_g|^2 d\omega, \quad E_I^{SB} = \int_0^\infty F_{SB}(\omega) |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (27, 28)$$

$F_{SA}(\omega)$ ,  $F_{SB}(\omega)$  はそれぞれ主構造上部、副構造上部のエネルギー伝達関数であり、次のように表される。

$$F_{SA}(\omega) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_A + i\omega c_A) H_A \left( i\omega H_{SA}^* + \frac{1}{i\omega} \right) + c_c (H_{YA} - H_{YB}) (1 - \omega^2 H_{YA}^*) \right. \\ \left. + i\omega \{ m_A \bar{L} (\omega^2 H_{YA} - 1) + \omega^2 I_{RA} H_{RA} - i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RA}^* \right] \quad (29)$$

$$F_{SB}(\omega) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_B + i\omega c_B) H_B \left( i\omega H_{SB}^* + \frac{1}{i\omega} \right) - c_c (H_{YA} - H_{YB}) (1 - \omega^2 H_{YB}^*) \right. \\ \left. + i\omega \{ m_B \bar{L} (\omega^2 H_{YB} - 1) + \omega^2 I_{RB} H_{RB} + i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RB}^* \right] \quad (30)$$

### 3.3 上部構造全体に入力されるエネルギー

図5に上部構造を取り出した自由体の概要を示す。上部構造全体の自由体に対して境界力が為す仕事は次のようになる。

$$E_I^S = \int_0^\infty \{ -(k_A u_A + c_A \dot{u}_A) \} (\dot{u}_{SA} + \dot{u}_g) dt + \int_0^\infty \{ -(k_B u_B + c_B \dot{u}_B) \} (\dot{u}_{SB} + \dot{u}_g) dt \\ + \int_0^\infty [m_A \bar{L} (\dot{y}_A + \dot{u}_g) + I_{RA} \ddot{\theta}_{RA} + c_c \bar{L} (\dot{y}_A - \dot{y}_B)] \dot{\theta}_{RA} dt \\ + \int_0^\infty [m_B \bar{L} (\dot{y}_B + \dot{u}_g) + I_{RB} \ddot{\theta}_{RB} - c_c \bar{L} (\dot{y}_A - \dot{y}_B)] \dot{\theta}_{RB} dt \quad (31)$$

(31)式においては、図5の自由体に対する境界力の為す仕事を考えているため、連結部材の境界力は陽に現れない。連結部材で吸収されるエネルギー、主構造上部および副構造上部に入力されるエネルギーを加えると、上部構造全体に入力されるエネルギーと一致する。

$$E_I^S = E_I^{SA} + E_I^{SB} + E_I^c \quad (32)$$

上部構造全体に入力されるエネルギーについても(12)式と同様にして振動数領域で表現することができる。

$$E_I^S = \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_A + i\omega c_A) H_A \left( i\omega H_{SA}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$+ \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_B + i\omega c_B) H_B \left( i\omega H_{SB}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$+ \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ i\omega \{ m_A \bar{L} (\omega^2 H_{YA} - 1) + \omega^2 I_{RA} H_{RA} - i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RA}^* \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega$$

$$+ \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ i\omega \{ m_B \bar{L} (\omega^2 H_{YB} - 1) + \omega^2 I_{RB} H_{RB} + i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RB}^* \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (33)$$

(33)式の  $E_I^S$  を次のように置く。

$$E_I^S = \int_0^\infty F_S(\omega) |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (34)$$

$F_S(\omega)$  を上部構造全体のエネルギー伝達関数と呼び次式となる。

$$F_S(\omega) = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_A + i\omega c_A) H_A \left( i\omega H_{SA}^* + \frac{1}{i\omega} \right) + (k_B + i\omega c_B) H_B \left( i\omega H_{SB}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right. \\ \left. + i\omega \{ m_A \bar{L} (\omega^2 H_{YA} - 1) + \omega^2 I_{RA} H_{RA} - i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RA}^* \right. \\ \left. + i\omega \{ m_B \bar{L} (\omega^2 H_{YB} - 1) + \omega^2 I_{RB} H_{RB} + i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RB}^* \right] \quad (35)$$

### 3.4 基礎地盤系に入力されるエネルギー

図6に基礎地盤系を取り出した自由体の概要を示す。基礎地盤系の自由体に対して境界力が為す仕事は次のようになる。

$$E_I^F = \int_0^\infty \{ -(k_{HA} u_{SA} + c_{HA} \dot{u}_{SA}) \} \dot{u}_g dt + \int_0^\infty \{ -(k_{HB} u_{SB} + c_{HB} \dot{u}_{SB}) \} \dot{u}_g dt \\ + \int_0^\infty (k_A u_A + c_A \dot{u}_A) (\dot{u}_{SA} + \dot{u}_g) dt + \int_0^\infty (k_B u_B + c_B \dot{u}_B) (\dot{u}_{SB} + \dot{u}_g) dt \\ - \int_0^\infty [m_A \bar{L} (\dot{y}_A + \dot{u}_g) + I_{RA} \ddot{\theta}_{RA} + c_c \bar{L} (\dot{y}_A - \dot{y}_B)] \dot{\theta}_{RA} dt \\ - \int_0^\infty [m_B \bar{L} (\dot{y}_B + \dot{u}_g) + I_{RB} \ddot{\theta}_{RB} - c_c \bar{L} (\dot{y}_A - \dot{y}_B)] \dot{\theta}_{RB} dt \quad (36)$$

基礎地盤系に入力されるエネルギーと、システム全体、上部構造全体に入力されるエネルギーには次のような関係がある。

$$E_I^F = E_I^A - E_I^S \quad (37)$$

基礎地盤系に入力されるエネルギーについても(12)式と同様にして振動数領域で表現することができる。

$$E_I^F = \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{i\omega} \left[ \{ m_{0A} (\omega^2 H_{SA} - 1) + m_A (\omega^2 H_{YA} - 1) \} \right. \right. \\ \left. \left. + \{ m_{0B} (\omega^2 H_{SB} - 1) + m_B (\omega^2 H_{YB} - 1) \} \right] \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \\ - \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_A + i\omega c_A) H_A \left( i\omega H_{SA}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \\ - \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ (k_B + i\omega c_B) H_B \left( i\omega H_{SB}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \\ - \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ i\omega \{ m_A \bar{L} (\omega^2 H_{YA} - 1) + \omega^2 I_{RA} H_{RA} - i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RA}^* \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \\ - \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[ i\omega \{ m_B \bar{L} (\omega^2 H_{YB} - 1) + \omega^2 I_{RB} H_{RB} + i\omega c_c \bar{L} (H_{YA} - H_{YB}) \} H_{RB}^* \right] |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (38)$$

(38)式の  $E_f^f$  を次のように置く。

$$E_f^f = \int_0^{\infty} F_f(\omega) |\dot{U}_g|^2 d\omega \quad (39)$$

$F_f(\omega)$  を基礎地盤系のエネルギー伝達関数と呼び次式となる。

$$F_f(\omega) = \frac{1}{\pi} \text{Re} \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{i\omega} \{m_{0A}(\omega^2 H_{SA} - 1) + m_A(\omega^2 H_{YA} - 1)\} \\ + \frac{1}{i\omega} \{m_{0B}(\omega^2 H_{SB} - 1) + m_B(\omega^2 H_{YB} - 1)\} \\ - (k_A + i\omega c_A) H_A \left( i\omega H_{SA}^* + \frac{1}{i\omega} \right) - (k_B + i\omega c_B) H_B \left( i\omega H_{SB}^* + \frac{1}{i\omega} \right) \\ - i\omega \{m_A \bar{L}(\omega^2 H_{YA} - 1) + \omega^2 I_{RA} H_{RA} - i\omega c_c \bar{L}(H_{YA} - H_{YB})\} H_{RA}^* \\ - i\omega \{m_B \bar{L}(\omega^2 H_{YB} - 1) + \omega^2 I_{RB} H_{RB} + i\omega c_c \bar{L}(H_{YA} - H_{YB})\} H_{RB}^* \end{array} \right] \quad (40)$$

### 3.5 エネルギー伝達関数の面積

地動入力加速度のフーリエスペクトルが振動数に関して一定の場合（これを以下ではホワイトノイズ的な入力と呼ぶ）には、エネルギー伝達関数の面積にフーリエスペクトルの2乗を乗じたものが入力エネルギーに対応する。このような入力に対して連結部材が吸収するエネルギーを最大化する場合を最適な連結部材量と定義すれば、連結部材に関するエネルギー伝達関数の面積を最大化する場合が最適な連結部材量となる。これは、従来の定点理論<sup>5, 22)</sup>（1質点で非減衰のモデルに限定）による最適ダンパー量の定義よりも一般的な定式化を可能とする。この具体的な適用例については数値例題において示す。

## 4. 想定建物

想定建物として、図7のような5層建物をオイルダンパーで連結する場合を考える。主構造および副構造の基礎固定時の1次固有周期を0.525s、0.175sとする。1層当たりの質量は、主構造は5.12

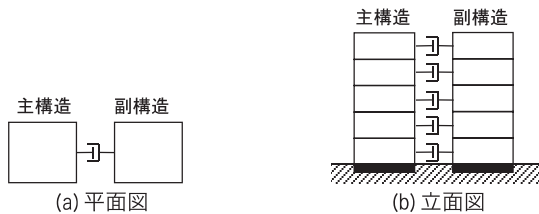


図7 想定建物

表1 解析モデル諸元

	主構造 (A)	副構造 (B)
1次固有周期 (基礎固定)	0.525s	0.175s
1次固有円振動数 (基礎固定)	11.97rad/s	35.90rad/s
質量 (1次等価質量)	2.09×10 <sup>5</sup> kg	2.62×10 <sup>5</sup> kg
階高 (1次等価高さ)	12.8m	12.8m
基礎の質量	1.54×10 <sup>5</sup> kg	1.92×10 <sup>5</sup> kg
1次構造減衰	0.02	0.03
回転慣性	1.12×10 <sup>6</sup> kgm <sup>2</sup>	1.40×10 <sup>6</sup> kgm <sup>2</sup>
基礎の回転慣性	0.819×10 <sup>6</sup> kgm <sup>2</sup>	1.024×10 <sup>6</sup> kgm <sup>2</sup>

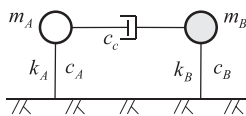


図8 連結制振モデル (基礎固定)

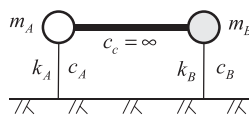


図9 剛連結モデル (基礎固定)

×10<sup>4</sup>kg、副構造は6.40×10<sup>4</sup>kgとし、階高は3.5mとする。主構造と副構造をそれぞれの質点せん断モデルでモデル化し、主構造および副構造を1次の等価質量および等価高さを用いてそれぞれ1質点せん断モデルに縮約する。その際、剛性は1次モード直線形で設定し（基礎固定）、減衰は剛性比例型とする。構造減衰や基礎の質量、回転慣性なども含んだ解析に用いるモデルの諸元を表1に示す。

地盤のばね剛性とダッシュポット減衰係数は、次のように簡略化されたものを用いる<sup>28)</sup>。

$$\begin{aligned} k_H &= (6.77 / (1.97 - \nu)) Gr, \quad k_R = (2.52 / (1.00 - \nu)) Gr^3 \\ c_H &= (6.21 / (2.54 - \nu)) \rho V_s r^2, \quad c_R = (0.136 / (1.13 - \nu)) \rho V_s r^4 \end{aligned} \quad (41-a-d)$$

地盤の密度とポアソン比は  $\rho = 1.8 \times 10^3$  (kg/m<sup>3</sup>)、 $\nu = 0.35$  とし、基礎盤の等価半径は  $r = 4$  (m) とする。地盤のせん断波速度  $V_s$  は、200(m/s) (第1種地盤)、133(m/s) (第2種地盤)、100(m/s) (第3種地盤) とする。また、以下の数値例題では基礎固定 (図8) の場合との比較も行う。

連結ダンパー減衰係数が大きくなると図9のように2棟が剛に連結されるモデルに近づく。剛連結モデルの固有円振動数  $\omega_g$  は次のように表される。

$$\omega_g = \sqrt{\frac{k_A + k_B}{m_A + m_B}} \quad (42)$$

ここで扱うモデルでは、 $\omega_g = 27.93$  (rad/s) である。

## 5. 数値例題

### 5.1 エネルギーの伝達メカニズム

図10~17には、システム全体、上部構造全体、連結部材、基礎地盤系、主構造上部、副構造上部のエネルギー伝達関数およびエネルギー伝達関数と横軸で囲まれた面積（以下では、エネルギー伝達関数の面積と呼ぶ）を示す。ただし、基礎固定時は、上部構造全体はシステム全体と同じで、基礎地盤系は存在しない。連結部材の減衰係数は、基礎固定時に定点理論<sup>5, 22)</sup>を用いて決定される最適減衰係数（主構造の伝達関数のピークを最小にする減衰係数）を参考に設定する。定点理論による最適減衰係数は  $1.9 \times 10^6$  (Ns/m) であるため、連結ダンパー減衰係数  $c_c$  は  $0, 2.0 \times 10^5, 2.0 \times 10^6$  (Ns/m) の3通りについて示す。尚、基礎固定の場合のみ  $4.0 \times 10^6$  (Ns/m) の場合も示す。エネルギー伝達関数の面積は、ホワイトノイズ的な入力が入力したときの入力エネルギー（吸収エネルギー）を意味する。この時、地盤種別が変化しても自由地表面での入力と同じとしている（自由地表面での入力加速度のフーリエ振幅が同じとなるように調整している）。

以下に基礎固定モデルに対する考察をまとめる。

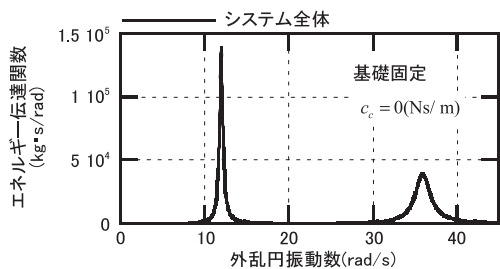
(1) 連結ダンパー減衰係数が変化するとシステム全体のエネルギー伝達関数のピークとなる振動数やピークの値は変化するが (図10)、エネルギー伝達関数の面積は一定である (図11)。これは文献6)でも示されており、建物の総質量が不変であれば、総入力エネルギーが安定した量であることと関係している。

(2) 連結ダンパー減衰係数がある値までは、システム全体および連結部材のエネルギー伝達関数のピークは2つあるが、連結ダンパー減衰係数が大きくなるとピークは1つになりピークの振動数は剛連結モデルの固有円振動数に近づく (図10)。すなわち、連結ダンパ

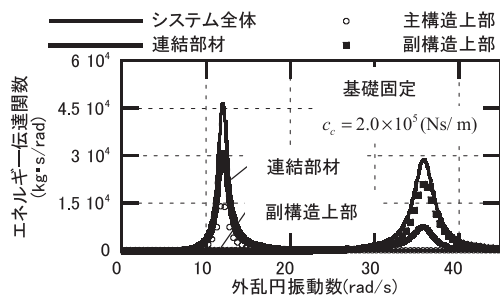
一減衰係数が大きくなると剛連結モデルに近づき、主構造と副構造が一体となって振動するようになることが理解できる。

(3) システム全体のエネルギー伝達関数と連結部材のエネルギー伝達関数のピークとなる振動数は一致している。しかし、システム全体および連結部材と主構造上部や副構造上部のエネルギー伝達関数のピークとなる振動数にはずれが生じている（連結ダンパー減衰係数が小さい範囲ではほぼ同じ）。

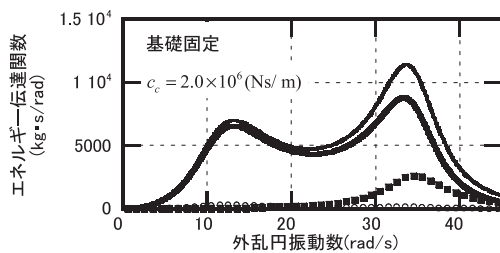
(4) 連結ダンパー減衰係数が小さい範囲 ( $2.0 \times 10^5$ (Ns/m)) では 1 次固有円振動数付近で吸収されるエネルギーが 2 次付近で吸収されるエネルギーよりも大きい（図 10(b)）、連結ダンパー減衰係数が大きい範囲 ( $2.0 \times 10^6$ (Ns/m)) ではほぼ同じエネルギーが吸収される（図 10(c)）。さらに大きい範囲 ( $4.0 \times 10^6$ (Ns/m)) ではピークが 1 つになり、幅広い振動数範囲でエネルギーが吸収される（図 10(d)）。



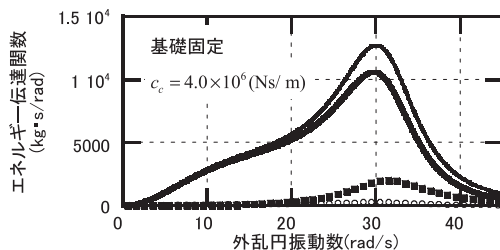
(a)  $c_c = 0$ (Ns/m) (非連結時)



(b)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)



(c)  $c_c = 2.0 \times 10^6$  (Ns/m)



(d)  $c_c = 4.0 \times 10^6$  (Ns/m)

図 10 エネルギー伝達関数（基礎固定）

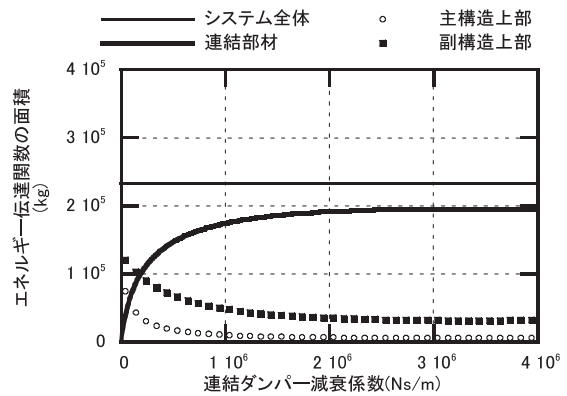


図 11 エネルギー伝達関数の面積（基礎固定）

(5) 粘性ダンパーで連結された系では連結ダンパーでの吸収エネルギーが最大となるダンパー減衰係数が存在し、その領域では主構造上部と副構造上部で吸収されるエネルギーが小さくなる（図 11）。

次に、第 1~3 種地盤モデルに対する考察を述べる。ただし、ここでは地盤種別が変化しても自由地表面での入力と同じとしている。(1) 連結ダンパー減衰係数が変化するとシステム全体のエネルギー伝達関数がピークとなる振動数やピークの値は変化するが（図 12, 14, 16）、エネルギー伝達関数の面積は地盤種別に関係なく一定である（図 13, 15, 17）。これは、基礎固定と同じである。

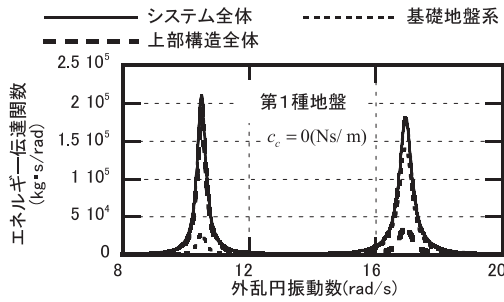
(2)  $c_c = 0$  の非連結時のとき、第 1 種地盤においては主構造の系では入力されたエネルギーを主構造上部でほぼ吸収するのに対して、地盤剛性が低下するに従い基礎地盤系で吸収するエネルギーが増加する（図 12, 14, 16）。

(3)  $c_c = 0$  の非連結時のとき、副構造の系では入力されたエネルギーを基礎地盤系でほとんど吸収していることが分かる（図 12, 14, 16）。これは、副構造は剛性が高い建物（主構造に対する副構造の固有周期比は 1/3）であることに起因すると考えられる。

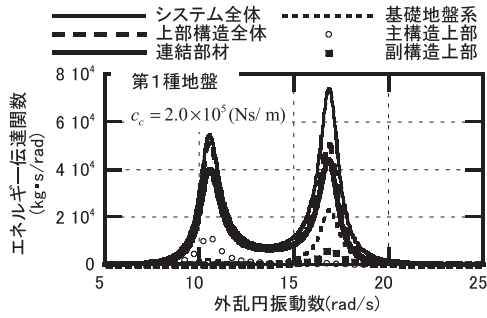
(4) 連結ダンパー減衰係数が大きくなると上部構造全体（正確には連結部材）への入力エネルギーが大きくなるため基礎地盤系で吸収するエネルギーは減少するが、ある連結ダンパー減衰係数から上昇に転じる。地盤剛性が小さいほど上昇に転じる連結ダンパー減衰係数の値は小さい（図 13, 15, 17）。また、地盤剛性が小さくなると基礎地盤系での吸収エネルギーが増大し上部構造全体の吸収エネルギーは減少する（図 13, 15, 17）。

(5) 粘性ダンパーで連結された系では連結ダンパー減衰係数が大きくなると主構造上部と副構造上部ともに入力エネルギーが小さくなるが、主構造上部の方が大きく入力エネルギーが減少する（図 13, 15, 17）。これは基礎固定と同じである。しかし、地盤剛性が低下すると小さい連結ダンパー減衰係数で主構造上部および副構造上部に入力されるエネルギーは上昇に転じる。これは、地盤剛性が低下することで連結部材の効果が小さくなるためである。地盤剛性の変化に対する連結制振効果については後述する。

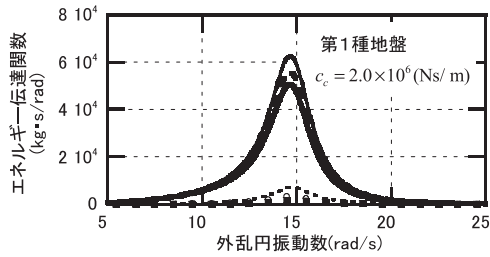
(6) 基礎固定では、主構造上部よりも副構造上部の方が入力されるエネルギーは大きい。これは、副構造は地盤剛性に対して剛な建物であるため、副構造系では基礎地盤系でエネルギーがほとんど吸収されることが原因であると考えられる。



(a)  $c_c = 0$  (Ns/m) (非連結時)



(b)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)



(c)  $c_c = 2.0 \times 10^6$  (Ns/m)

図 12 エネルギー伝達関数 (第 1 種地盤)

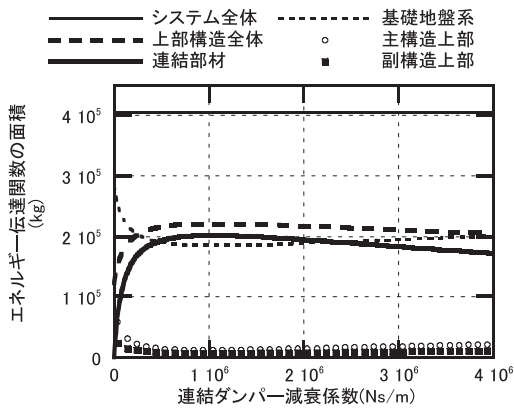
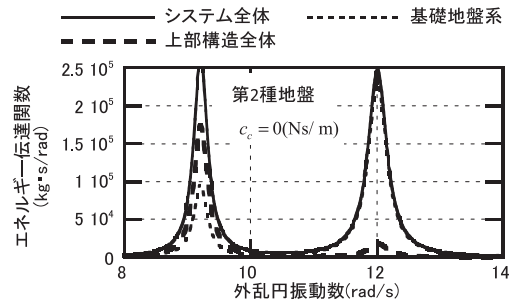


図 13 エネルギー伝達関数の面積 (第 1 種地盤)

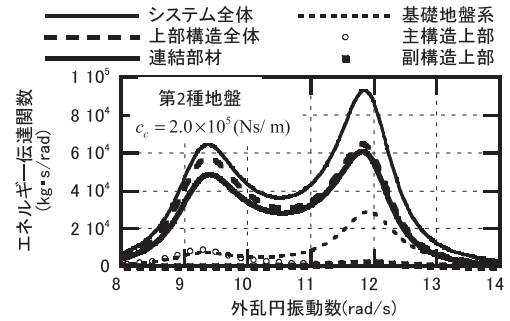
(7) 基礎固定では定点理論による最適減衰係数で連結部材のエネルギー伝達関数の面積はほぼ最大となっているのに対して、地盤剛性を考慮した場合には、定点理論による最適減衰係数よりも小さい減衰係数で最大となっている。これは地盤剛性を考慮したことにより 2 棟の固有周期差が小さくなることが原因であると考えられる。

## 5.2 地盤剛性の変化に対する連結制振効果

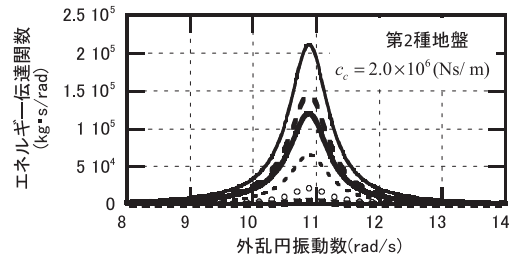
図 18 には、連結ダンパー減衰係数を変化させた時のシステム全



(a)  $c_c = 0$  (Ns/m) (非連結時)



(b)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)



(c)  $c_c = 2.0 \times 10^6$  (Ns/m)

図 14 エネルギー伝達関数 (第 2 種地盤)

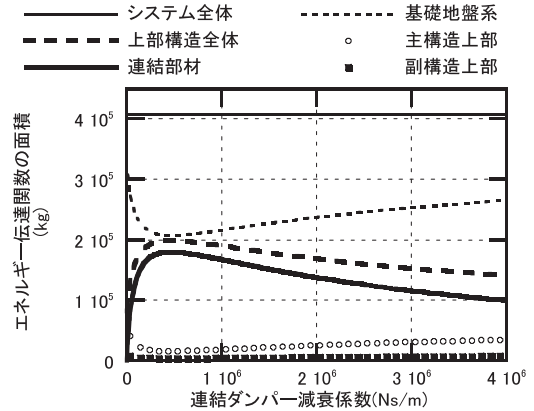
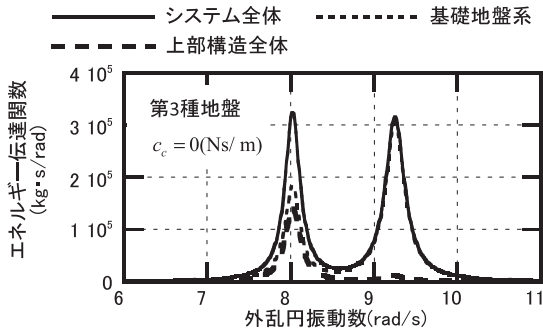
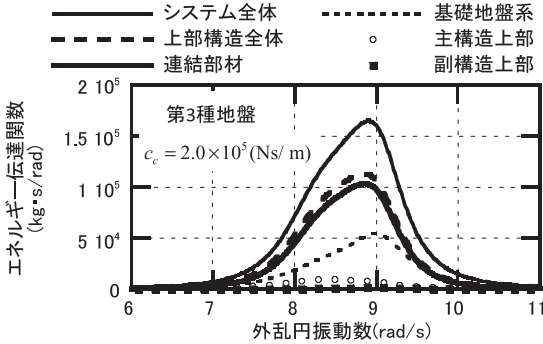


図 15 エネルギー伝達関数の面積 (第 2 種地盤)

体および連結部材のエネルギー伝達関数の面積  $\int_0^\infty F_A(\omega) d\omega$ 、 $\int_0^\infty F_C(\omega) d\omega$  を示す (Appendix 参照)。システム全体および連結部材のエネルギー伝達関数の面積は、ホワイトノイズの入力が作用したときのシステム全体への入力エネルギーおよび連結部材での吸収エネルギーを意味する。ここでは地盤剛性が変化しても自由地表面では入力と同じとしている。図 19 には地盤剛性が変化したときのシステム全体のエネルギー伝達関数を、図 20 には連結部材のエネルギー伝達関数を示す。以下に考察をまとめる。



(a)  $c_c = 0$  (Ns/m) (非連結時)



(b)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)

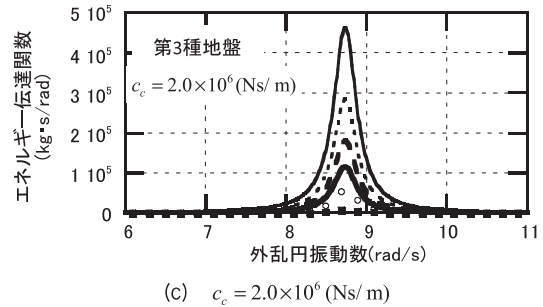


図 16 エネルギー伝達関数 (第3種地盤)

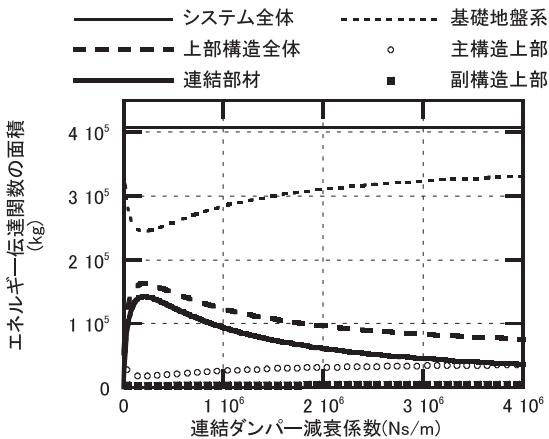


図 17 エネルギー伝達関数の面積 (第3種地盤)

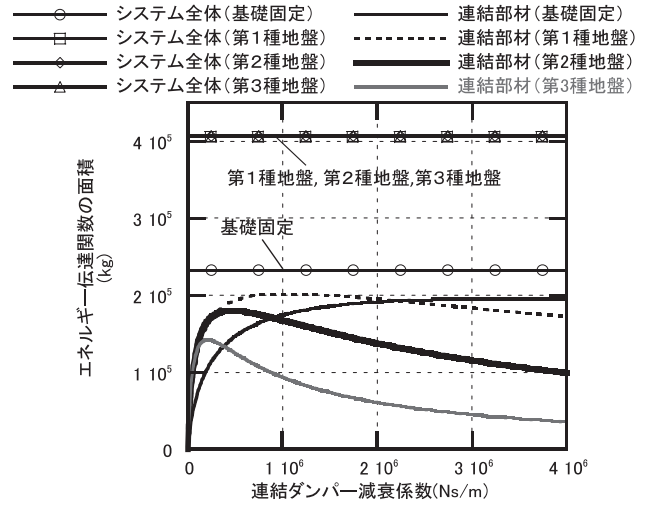
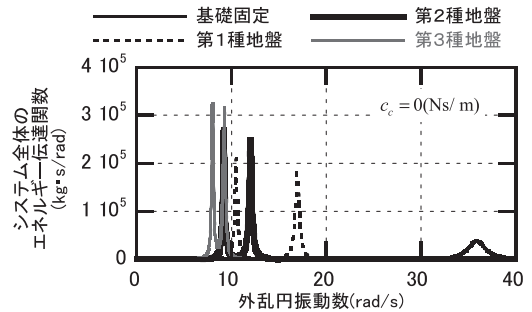
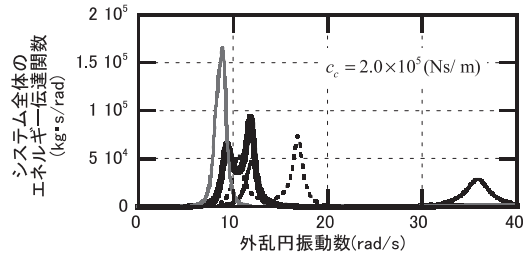


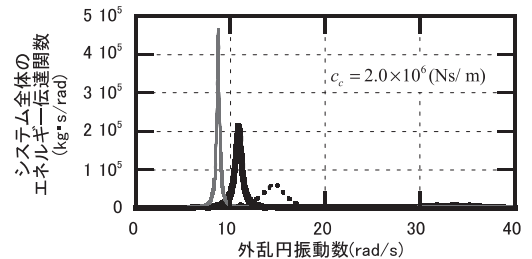
図 18 エネルギー伝達関数の面積 ( $\int_0^\infty F_A(\omega)d\omega$ ,  $\int_0^\infty F_c(\omega)d\omega$ )



(a)  $c_c = 0$  (Ns/m)



(b)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)



(c)  $c_c = 2.0 \times 10^6$  (Ns/m)

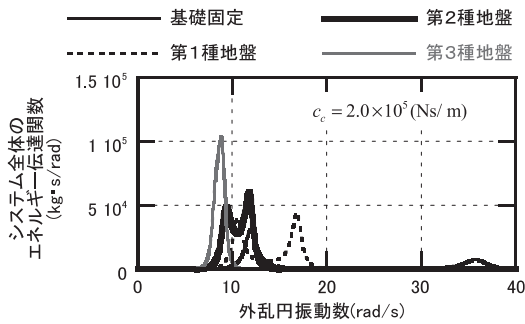
図 19 システム全体のエネルギー伝達関数

(1) ホワイトノイズ的な入力に対しては、地盤種別に関係なくシステム全体への入力エネルギーは一定であり、連結ダンパー減衰係数が変化してもその値は変化しない。同様のことは基礎固定モデルについては5.1節および文献6)で示されている。

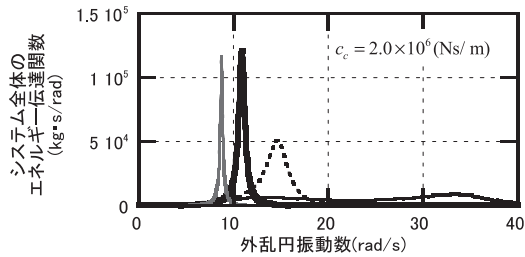
(2) ホワイトノイズ的な入力に対しては、地盤剛性が小さいほど連

結部材で吸収する最大エネルギーは小さくなる。つまり、地盤剛性が小さいほど連結ダンパーによる制振効果は小さい。これは、地盤剛性が小さいほど連結部材の効きが悪くなることや、主構造と副構造の基礎地盤系を含めた固有周期差が小さくなることが原因である



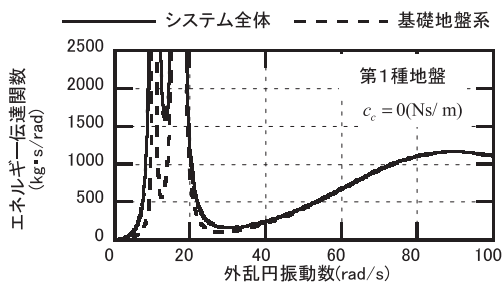


(a)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)

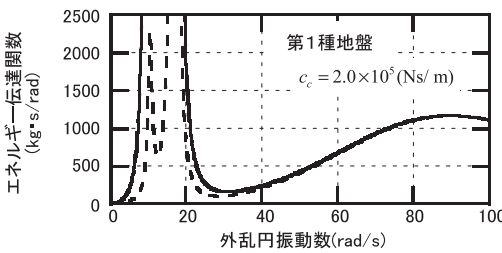


(b)  $c_c = 2.0 \times 10^6$  (Ns/m)

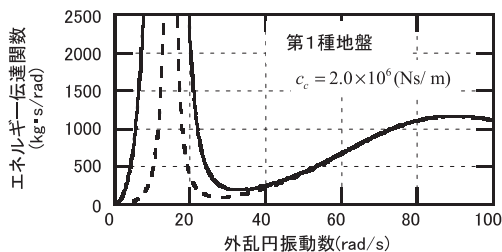
図 20 連結部材のエネルギー伝達関数



(a)  $c_c = 0$  (Ns/m)



(b)  $c_c = 2.0 \times 10^5$  (Ns/m)



(c)  $c_c = 2.0 \times 10^6$  (Ns/m)

図 21 システム全体および基礎地盤系のエネルギー伝達関数 (第1種地盤)

と考えられる。地盤剛性が小さくなるほど固有周期差が小さくなることは図 19 から理解される。また、地盤剛性が小さいほど連結部材のエネルギー伝達関数の面積を最大にする減衰量(最適減衰量)は小さくなる。

### 5.3 高振動数領域のエネルギーの伝達システム

図 21 は、第1種地盤に対するシステム全体および基礎地盤系のエネルギー伝達関数を示す。図 21 は図 12 を拡大したものである。地盤剛性を考慮すると、主構造上部と副構造上部の応答が卓越する振動数領域より高い振動数領域でエネルギーの入力が見られる。これは、基礎の並進振動の影響と考えられ、連結ダンパー減衰係数が変化してもほとんど変化しない。また、高い振動数領域で入力されるエネルギーは全体に入力されるエネルギーと比べると僅かである。一方、低い振動数領域では基礎地盤系のエネルギー伝達関数は連結ダンパー減衰係数が変化するとその性質が大きく変化する。これは、連結ダンパーによるエネルギー吸収が大きくなると、基礎地盤系のエネルギー入力特性に影響が及ぶことに起因すると考えられる。

### 6. 結論

本論文では、中低層建物同士をオイルダンパーで連結した連結制振建物を扱い、ダンパーはダッシュポットによりモデル化した。入力地震動は損傷限界レベルを想定し、建物・地盤ともに弾性挙動の範囲とした。

本論文において以下の成果を得た。

- 1) 連結制振建物では基礎や地盤の剛性がその制振効果に大きな影響を及ぼすことが想定されるため、地盤剛性を考慮した連結制振建物モデルを考え、システム全体や部分ごとに入力されるエネルギーを振動数領域で評価する方法を提示した。
- 2) システム全体や部分の境界に作用する境界力を考え、それらが対応する変位に対して為す仕事を評価することにより 1) の操作が実行できることを示した。その際、エネルギー伝達関数という特性量を定義することにより統一的にエネルギー入力を定義することができることを明らかにした。
- 3) システム全体や部分ごとのエネルギーの入力メカニズムやエネルギーの伝達のメカニズムを解明した。基礎固定モデルだけでなく地盤剛性を考慮した場合でも、自由地表面での入力と同じとした場合、ホワイトノイズ的な入力によりシステム全体に入力されるエネルギーは、連結ダンパー減衰係数が変化しても地盤種別に関係なく一定である。ただし、基礎固定モデルと地盤剛性を考慮したモデルではその値は異なる。
- 4) 粘性ダンパーで連結された系では連結ダンパーでの吸収エネルギーが最大となる連結ダンパー減衰係数が存在し、その領域では主構造上部と副構造上部に入力されるエネルギーが小さくなる。
- 5) 地盤剛性が低下すると連結ダンパーの有効性が低下する。これは、地盤剛性が低下すると主構造と地盤との連成システムと副構造と地盤との連成システムの固有周期が近接するようになり、連結制振効果が低下することに起因すると考えられる。この事実は、エネルギー伝達関数の形状(両ピークの振動数間隔が狭まる)により視覚的に理解することができる。

- 6) 連結部材で消費されるエネルギーの観点から連結制振建物の連結ダンパー減衰係数の最適値を導く方法を提示した。本手法では、定点理論による方法では考慮できない様々な要因（構造減衰、地盤との相互作用、多自由度系への適用など）を考慮することができる。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤(A)）による。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 井川望, 山田祐司, 横山浩明, 橋英三郎: 2棟連結による制振システムに関する研究, アクティブ制振(震)シンポジウム論文集, pp.333-340, 1992
- 2) J. E. Luco and F. C. P. De Barros: Optimal Damping Between Two Adjacent Elastic Structures, Earthquake Engrg. Struct. Dyn., 27(7), pp.649-659, 1998
- 3) 蔭山満, 安井謙, 背戸一登: 連結制振の基本モデルにおける連結バネとダンパー最適解の誘導, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp.97-104, 2000.3
- 4) 蔭山満, 安井謙, 背戸一登: 多モード連結制振を対象とした連結バネとダンパーの最適配置に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 538 号, pp.79-86, 2000.12
- 5) 蔭山満: 定点理論による連結制振を対象としたパッシブ系の多モード最適制振の設計法に関する研究, 日本大学学位論文, 2005
- 6) 竹脇出, 辻聖晃: 連結制振ダンパーを有する構造物群へ入力される地震エネルギーの基本特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, pp.81-87, 2007.6
- 7) 辻聖晃, 竹脇出: 外付けフレームとのダンパー連結による低層既存建物の耐震補強構法, 日本建築学会構造系論文集, 第 612 号, pp.55-62, 2007.2
- 8) 楊貴君, 岩崎良二, 高田毅士: 連結構造物における定点理論に基づく質量比 $\Omega$ 周波数比空間の領域分類と最適パラメータの誘導, 日本建築学会構造系論文集, 第 617 号, pp.71-76, 2007.7
- 9) I.Takewaki, Earthquake Input Energy to Two Buildings Connected by Viscous Dampers, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.133, No.5, pp.620-628, 2007
- 10) 友澤裕介, 岩崎良二, 高田毅士: 制振効果を最大化する連結特性の特定, 日本建築学会構造系論文集, 第 631 号, pp.1529-1534, 2008.9
- 11) 伊藤宰, 辻聖晃, 吉富信太, 竹脇出: アウトフレーム連結制振構法による既存建物耐震補強の逆問題アプローチ, 日本建築学会構造系論文集, 第 627 号, pp.725-732, 2008.5
- 12) 伊藤宰, 辻聖晃, 吉富信太, 竹脇出: アウトフレーム連結制振耐震補強のための連結ダンパーの合理的決定法, 日本建築学会構造系論文集, 第 636 号, pp.273-281, 2009.2
- 13) 大淵充紀, 辻聖晃, 竹脇出: 連結制振構法を用いた建物の固有振動および減衰に関する基本特性, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 49 号, pp.73-76, 2009
- 14) 林篤, 大迫勝彦, 和田章, 高梨晃一, 岩崎和明, 鈴木勇: 連結制振構造を適用した線路上空建築物の設計と実測による性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 648 号, pp.299-307, 2010.2

- 15) 辻聖晃, 中川大輔, 吉富信太, 竹脇出: アウトフレーム型連結制振構法におけるアウトフレーム及び連結ダンパーの応答低減率マップを用いた設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第 648 号, pp.337-346, 2010.2
- 16) 半田潤, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出: 建物の平面配置効果を考慮した 2 棟連結制振構法の特長解析, 構造工学論文集, Vol.57B, pp.319-327, 2011
- 17) H. Roh, GP. Cimmellaro and D. Lopez-Garcia, Seismic Response of Adjacent Steel Structures Connected by Passive Device, Advances in Structural Engineering, Vol. 14, No. 3, pp.499-5170, 2011
- 18) 満田衛資, 大淵充紀, 辻聖晃, 竹脇出: 連結制振構法を用いた建物の固有振動および減衰に関する基本特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 696 号, pp.227-236, 2014.2
- 19) 坂口和夫, 満田衛資, 辻聖晃, 竹脇出: 連結制振建物のダンパー量振動展開による地震時応答特性, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.423-431, 2014
- 20) T. Kobori, T. Yamada and T. Takenaka, Effect of Dynamic Tuned Connection on Reduction of Seismic Response –Application to Adjacent Office Building–, Proc.9WCCE, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.V, pp.773-778, 1988
- 21) 連結制振構法を共同住宅の耐震改修工事へ適用, 建築技術, 第 682 号, pp.54, 2006.11
- 22) J. P. Den Hartog: Mechanical vibrations, 4th edition, McGraw-Hill, pp.87-106, 1956
- 23) 大井謙一, 田中尚, 高梨晃一: 地震動による構造物へのエネルギー入力の統計量予測に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 347 号, pp.47-55, 1985.1
- 24) Ordaz, M., Huerta, B., and Reinoso, E., Exact computation of input- energy spectra from Fourier amplitude spectra. Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., 32, pp.597-605, 2003
- 25) 竹脇出: 多様な減衰分布を有する構造物に入力される地震エネルギーの限界値, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp.65-72, 2003.10
- 26) 竹脇出: スウェイ・ロッキングモデルに入力される地震エネルギーの限界値, 日本建築学会構造系論文集, 第 576 号, pp.71-78, 2004.2
- 27) 竹脇出, 大淵邦之, 山崎雅弘: 構造物一杭一地盤連成系への地震入力エネルギー, 日本建築学会構造系論文集, 第 583 号, pp.39-46, 2004.9
- 28) RA.Parmelee, The influence of foundation parameters on the seismic response of interaction systems, Proc. of the 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol.3, pp.49-56, 1970
- 29) I.Takewaki and K.Fujita, Earthquake input energy to tall and base-isolated buildings in time and frequency dual domains, J. of The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol.18, No.6, pp.589-606, 2009

#### Appendix システム全体のエネルギー伝達関数の面積

文献 29)によると、非比例減衰モデルについてもシステム全体のエネルギー伝達関数の面積は、モデルの総質量の半分として与えられる。基礎固定モデルでは上部質量のみであり、地盤剛性を考慮したモデルでは上部質量に基礎の質量を加えたものが総質量となる。従って、基礎固定モデルと地盤剛性を考慮したモデルでは、システム全体のエネルギー伝達関数の面積は異なる値となる。

# MECHANISM OF EARTHQUAKE ENERGY INPUT TO CONNECTED BUILDING MODELS CONSIDERING SOIL STIFFNESS

*Kazuhiro SAKAGUCHI\* and Izuru TAKEWAKI\*\**

\* Grad. Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

\*\* Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

The vibration control system using building connection is one of the most popular methods for passive damper control of building structures. Most of the previous researches on this vibration control deal with displacement and acceleration as major performance indices and only buildings on rigid soil have been treated. However, the effect of soil flexibility on the control effectiveness seems significant.

The mechanism of earthquake energy input to connected building models on flexible soil is clarified. The earthquake input energies to super-structures, connecting dampers, soil-foundation systems and total system are obtained by taking the corresponding appropriate free bodies into account and defining the energy transfer functions (characteristic function relating the input Fourier transform with the input energy) in the frequency domain.

It has been shown that the area (indicator of total input energy to white-noise-like input) of the energy transfer function for the total system is constant with respect to the damping coefficient of the connecting damper and takes the same value irrespective of the soil stiffness. It has also been made clear that, when the soil becomes softer, the effectiveness of connection dampers decreases. This phenomenon can be confirmed by the change of properties of energy transfer functions, i.e. the decrease of distance between the fundamental natural frequencies of the elastically supported main structure and the elastically supported substructure. It has further been disclosed that the maximization of the area (input energy to connecting dampers) of the energy transfer function for connecting dampers is a good index for determination of connecting damper quantity. It has been shown finally that, while the fixed-point theory can be used only for the undamped models (null structural damping) with a single-degree-of-freedom system, the proposed method using the maximization of the area of the energy transfer function for connecting dampers is a general method extendable to multi-degrees-of-freedom damped models.

(2014年6月30日原稿受理, 2014年10月17日採用決定)

---