

近接する根入れ構造物相互連成系の地震応答について

小堀 鐸二・日下部 馨

EARTHQUAKE RESPONSES OF CROSS-INTERACTION SYSTEM BETWEEN TWO EMBEDDED STRUCTURES

By *Takuji* KOBORI and *Kaoru* KUSAKABE

Synopsis

Both the vibrational characteristics and the earthquake responses of a cross-interaction system between two building structures embedded in a visco-elastic soil stratum are investigated in this paper. First, the steady-state coupled responses of two building structures which consist of a lumped mass and embedded cylindrical basement are presented by making use of the Finite Element Method. Next, the transient coupled responses of two building structures are calculated by using the Fast Fourier Transform techniques. The effects of cross-interaction on the earthquake responses are discussed for various parameters associated with depth of basement, separation distance and natural frequency of lumped mass system.

1. ま え が き

建築構造物は一般に広い敷地内に只一つポツと建っていることは稀で、その周囲に他の多くの建築物が建ち並んでいるのが実情である。このような建築物が動的な荷重、たとえば、地震等に見舞われると単独に孤立している建物の応答とは異なった挙動を示すことは明らかである。筆者等は同一支持地盤上に構造物自体は離れているが互いに近接して建設されている構造物同士が地盤を介して連成する場合の振動特性を明らかにする目的で、理論および実験の両面から構造物の相互連成振動に関する研究を行ってきた^{1)~6)}。殊に、前報⁵⁾では波動論と有限要素法を併用して、水平方向には無限に拡がりをもつ3次元の地盤モデル内に根入れされた円筒形構造物同士の連成振動特性を基礎に力を作用させたカー変位伝達関数の形で解析している。

本報は、上記の根入れ構造物相互連成振動に関する一連の研究として、地震波のように基盤から入射する入力を対象に、地下室部分または基礎を円筒形、上部構造物を剪断型質点系と想定した相互連成構造物モデルの振動特性および過渡応答を解析して、地震時における根入れ構造物相互の連成効果を明らかにすると同時に、隣接構造物の影響を考慮した建築構造物の耐震設計に対する基礎資料を提供しようとするものである。

2. 運動方程式およびその解

ここでは、Fig. 1 に示すように、2つの構造物が水平方向に無限に拡がりをもつ層地盤内に根入れされているモデルを想定する。すなわち、地盤は剛基盤上に層厚 D のような Voigt 型の粘弾性地盤から構成されるものとし、その中にそれぞれ D_{I1} 、 D_{I2} まで根入れされている円筒形基礎をもつ多質点系の剪断型構造物が距離 D_s だけ離れて2棟建っているとす。ここで、2つの円筒形基礎 ($K=I, II$) の半径をそれぞれ R_I 、 R_{II} とし、各質点系各階の高さを H_k^j ($j=1, 2, \dots, N_K$, N_K : 第 K 構造物の階数)、質量を M_k^j 、慣性モーメントを I_k^j とする。解析の都合上、円筒形基礎下の円筒柱も含めて、各基礎の部分を、それぞれ Block I, Block II と名付け、それらを囲む地盤を Block 0 と定義する。解析方法は前報⁵⁾と同様に、地盤と根入れ部分を水平面で分割し、地盤一構造物モデルは L 層の薄層地盤から構成されているものとする。

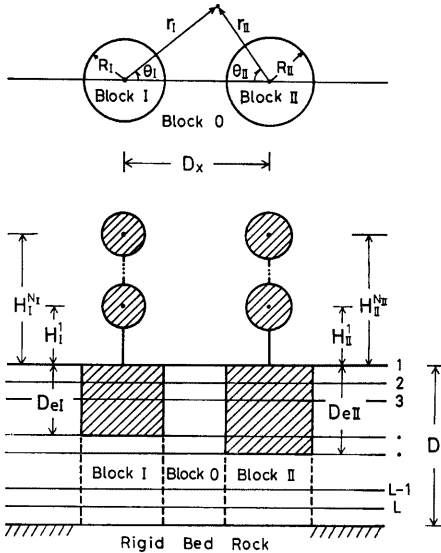


Fig. 1 Description of the model.

地盤の取扱いは、水平方向には波動論を、鉛直方向には有限要素法を適用する。外力は鉛直下方から水平方向に振動する正弦平面波が入射するものと考えて、基礎を水平方向に harmonic に加振する。ここで、入射波の振動成分は 2 棟の構造物が並んでいる方向に一致しているものとする。

解析にあたり、次の仮定をおく。

- (1) 基礎およびその下の土柱 (Block I および Block II) の水平断面は常に円形を保持する。
- (2) 各層における地盤 (Block 0) は等質等方な粘弾性体である。
- (3) 各々の薄層における変位は深さ方向に対し直線的に変化する。
- (4) 基礎と周辺地盤とは常に密着しており、すべりは起こらない。
- (5) 水平方向加振の場合、基礎の上下方向の振動成分を無視する。(ただし、水平軸に関する回転は起こり得る)

以上の仮定のもとに、2 棟の近接根入れ

構造物が互いに連成する場合の振動特性を解析する。

2.1 基礎からの入射波がない円筒基礎の相互連成振動

この場合の解は、前報³⁾で行なった解析と全く同じであるため、解の誘導は前報を参照して頂たくとして、結果のみを書くとして下式となる。

$$([F] + [P] - \omega^2 [M]) \{V\} = \{Q\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $[F]$ 、 $[M]$ は 2 つの円筒基礎および土柱に対する剛性マトリックスおよび質量マトリックス、 $[P]$ は円筒基礎の側面に働く地盤の反力マトリックス、 $\{V\}$ は円筒基礎の変位ベクトル、 $\{Q\}$ は各円筒基礎に作用する外乱ベクトルであり、 ω は円振動数である。

上式の誘導において、地盤の扱いは Fig. 1 に示す各薄層要素に対し、円筒座標 (r, θ, z) に関する次の運動方程式を考えている。

$$\begin{aligned} & \left\{ (\lambda + 2\mu) + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial}{\partial t} \right\} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{2}{r} \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial \theta} + 2 \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \\ & \left\{ (\lambda + 2\mu) + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial}{\partial t} \right\} \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} - 2 \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial z} + 2 \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} \quad \dots (2) \\ & \left\{ (\lambda + 2\mu) + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial}{\partial t} \right\} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{2}{r} \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{w}_\theta) + \frac{2}{r} \left(\mu + \mu' \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial \theta} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \end{aligned}$$

ここに、

λ, μ : Lamé の常数, λ', μ' : λ, μ に対応する粘性常数

$\{u_r, u_\theta, u_z\}$: $\{r, \theta, z\}$ 方向の変位, ρ : 密度

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z}, & 2\bar{w}_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} - \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \\ 2\bar{w}_\theta &= \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial r}, & 2\bar{w}_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、円筒基礎 (Block I, Block II) では、薄い層に分割しているため、円筒のたわみ振動において断面の回転角をも考慮することが必要となり、各要素に対する運動方程式は下式を用いている。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_i \left(G + G' \frac{\partial}{\partial t} \right) A \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{w}{R} \right) \right] &= \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{E + E' \frac{\partial}{\partial t}}{R} \right) I \frac{\partial w}{\partial z} \right] - \kappa_i \left(G + G' \frac{\partial}{\partial t} \right) A \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{w}{R} \right) &= \frac{\rho I}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 A, I は断面積および慣性モーメント、 R は半径、 ρ は密度、 E, G, E', G' は Young 係数、剪断剛性およびそれらに対応する粘性常数、 κ_i は形状に関する係数で円形の場合は $\kappa_i = 0.85$ である。(2)式および(4)式において、仮定(3) [各々の薄層における変位は深さ方向に対し直線的に変化する]のもとに、有限要素法を適用して、(1)式が導かれる。

2.2 基盤からの入射波による影響

成層地盤の基盤に水平な地動 $u_g e^{i\omega t}$ が作用すると、その波は円筒基礎および地盤内を透過あるいは反射を繰り返しながら上昇あるいは下降し、波動の伝播により円筒基礎が振動すると同時に周辺地盤の振動により円筒基礎がその側面から加振されることになる。したがって、基盤に水平な地動 $u_g e^{i\omega t}$ が入射するときの円筒基礎の運動方程式は(1)式に円筒基礎の慣性力項と側面からの加振力項を加えて次のように与えることができる。

$$([F] + [P] - \omega^2 [M]) \{V\} = u_g \omega^2 [M_{\#}] \{E\} + [P] \{V_G\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $[M_{\#}]$ は円筒基礎の水平振動のみを考慮した質量マトリックスで各薄層要素に対しては

$$[M_{\#}]^* = \begin{pmatrix} [M_1]^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [M_2]^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad [M_K]^* = \frac{\rho_K A_K H}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (K=I, II)$$

$\{E\}$ は水平成分に対しては1で、回転成分に対しては零となるベクトルで次式となる。

$$\{E\} = \left(\frac{1}{L}, \dots, \frac{1}{L}, 0, \dots, 0, \frac{-1}{L}, \dots, \frac{-1}{L}, 0, \dots, 0 \right)^T$$

$\{V_G\}$ は基盤に入射する地動によりひき起される水平無限遠における各薄層地盤の水平変位で、下式より求まる。

$$\begin{aligned} ([G_s] - \omega^2 [M^*]) \{V_G\} &= u_g \omega^2 [M^*] \{1\} \\ [M^*]^* &= \frac{\rho H}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [G_s]^* = \begin{bmatrix} \mu/H & -\mu/H \\ -\mu/H & \mu/H \end{bmatrix} \\ \{1\} &= (1, \dots, 1)^T \end{aligned}$$

2.3 上部構造が基礎の運動に及ぼす影響

Fig. 2 に示す剪断型質点系が基礎に与える曲げモーメント M_K および剪断力 S_K は次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} M_K &= -\sum_{j=1}^{N_K} (H_K^j - H_K^{j-1}) \omega^2 \sum_{n=1}^{N_K} M_K^n \bar{u}_K^n - \omega^2 \sum_{j=1}^{N_K} I_K^j \bar{\varphi}_K \\ &= -\omega^2 \sum_{j=1}^{N_K} (H_K^j - H_K^{j-1}) \sum_{n=1}^{N_K} M_K^n (\kappa G_{B_n} \bar{u}_K^n + \kappa G_{B_n} \bar{\varphi}_K) - \omega^2 \sum_{j=1}^{N_K} I_K^j \bar{\varphi}_K \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} S_K &= K_K (\bar{u}_K - \bar{u}_K^* - H_K \bar{\varphi}_K) = -\omega^2 \sum_{j=1}^{N_K} M_K^j \bar{u}_K^j \\ &= -\omega^2 \sum_{j=1}^{N_K} M_K^j (\kappa G_{B_j} \bar{u}_K^j + \kappa G_{B_j} \bar{\varphi}_K) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

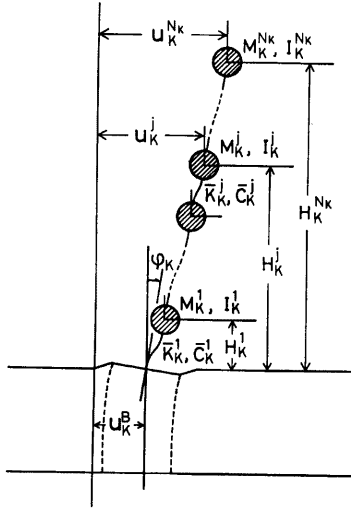


Fig. 2 K-th structure system considered.

ここに,

$K_k^j = \bar{K}_k^j + i\omega \bar{C}_k^j$: 第 K 構造物第 j 層の複素剛性

H_k^j : 第 K 構造物第 j 質点の高さ

M_k^j : 第 K 構造物第 j 質点の質量

I_k^j : 第 K 構造物第 j 質点の慣性モーメント

ω : 円振動数, $i = \sqrt{-1}$: 虚数単位

u_k^j : 第 K 基礎上端の水平変位

ϕ_k : 第 K 基礎上端の回転角

$${}_K G_{\beta u}^j = ([K]_K - \omega^2 [M]_K)^{-1} \{\chi_u\}_K$$

: 第 K 構造物における基礎の変位入力に対する第 j 層質点の変位伝達関数

$${}_K G_{\beta \phi}^j = ([K]_K - \omega^2 [M]_K)^{-1} \{\chi_\phi\}_K$$

: 第 K 構造物における基礎の回転入力に対する第 j 層質点の変位伝達関数

$$[K]_K = \begin{pmatrix} K_K^{N_K} & -K_K^{N_K} & & & & \\ -K_K^{N_K} & K_K^{N_K} + K_K^{N_K-1} & -K_K^{N_K-1} & & & 0 \\ & \dots & \dots & \dots & & \\ 0 & & & -K_K^3 & K_K^3 + K_K^2 & -K_K^2 \\ & & & -K_K^2 & K_K^2 + K_K^1 & \\ & & & & & \end{pmatrix}$$

: 第 K 構造物の剛性マトリックス

$$[M]_K = \begin{pmatrix} M_K^{N_K} & & & & & \\ & M_K^{N_K-1} & & & & 0 \\ & & \dots & & & \\ & & & & & \\ 0 & & & & M_K^2 & \\ & & & & & M_K^1 \end{pmatrix}$$

: 第 K 構造物の質量マトリックス

$$\{\chi_u\} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ K_K^1 \end{pmatrix} \quad \{\chi_\phi\} = \begin{pmatrix} K_K^{N_K} (H_K^{N_K} - H_K^{N_K-1}) \\ K_K^{N_K-1} (H_K^{N_K-1} - H_K^{N_K-2}) - K_K^{N_K} (H_K^{N_K} - H_K^{N_K-1}) \\ \vdots \\ K_K^2 (H_K^2 - H_K^1) - K_K^3 (H_K^3 - H_K^2) \\ K_K^1 H_K^1 - K_K^2 (H_K^2 - H_K^1) \end{pmatrix} \tag{8}$$

したがって、(6)式および(7)式を(5)式の運動方程式に接続すると上部質点系を含む根入れ構造物の運動方程式が得られる。

3. 数値計算および考察

3.1 解析モデルおよびパラメータ

解析の対象とするモデルは Fig. 3 に示すように距離 D_x 離れた 2 棟の根入れ構造物とする。ここで、地盤モデルとしては一様な深さ D の成層地盤を考え、地盤係数のパラメータは密度を ρ 、剪断剛性およびヤング係数をそれぞれ G および E 、粘性係数を $\eta \equiv \eta_s = \eta_p$ (定義は後で述べる) とし、その地盤を等間隔に L 層に分割する。各構造物は、上部構造を質量 M_K 、固有振動数 ω_K 、減衰比 ζ_K 、質点高さ H_K の 1 質点系とし、質点の慣性モーメント I_K は無視する。ここで $K = \text{I, II}$ で、構造物の番号を示す。また、下部構造はその半径が $R_1 = R_{\text{II}} \equiv R_0$ と等しく、深さ $D_{s1} = D_{s\text{II}}$ まで根入れされている円筒形とし、それらのパラメータは密度を ρ_{bK} 、剪断剛性およびヤング係数を G_{bK}, E_{bK} 、粘性係数を η_{bK} とする。円筒土柱のパラメータは下部構造のパラメータの添字 b を g に交替して示す。計算にあたり、円筒の共通半径 R_0 を長さの規準量、地盤の剪断剛性 μ を剛性の規準量、密度 ρ を重さの規準量として下の無次元パラメータを採用する。

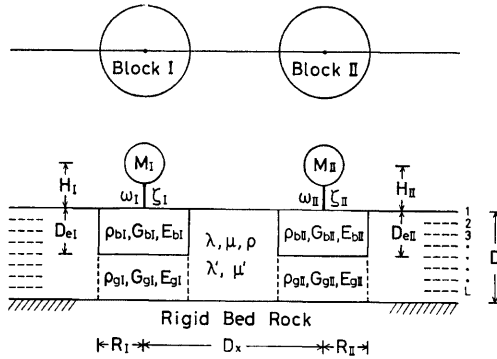


Fig. 3 Two-structures-soil system.

$$a_0 = \frac{R_0}{V_s} \omega = R_0 \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \cdot \omega : \text{入力円振動数 } \omega \text{ の無次元量}$$

$$\tau = \frac{V_s}{R_0} t : \text{無次元時間}$$

$$\eta_s = \frac{V_s}{R_0} \cdot \frac{\mu'}{\mu}, \quad \eta_p = \frac{V_s}{R_0} \cdot \frac{\lambda' + 2\mu'}{\lambda + 2\mu} : \text{S 波, P 波に対応する粘性係数}$$

$$m_K = \frac{M_K}{\rho R_0^3} : \text{無次元質量}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} : \text{ポアソン比}$$

$$h = H_I / R_0 = H_{\text{II}} / R_0 : \text{上部構造の無次元高さ}$$

$$e = D_{s1} / R_0 = D_{s\text{II}} / R_0 : \text{構造物の無次元根入れ深さ}$$

$$d = D / R_0 : \text{粘弾性層地盤の無次元層厚}$$

$$x = D_x / R_0 : \text{2 棟の構造物間の無次元距離}$$

$$\omega_K : \text{上部構造のみの無次元固有振動数}$$

$$\zeta_K : \text{上部構造のみの臨界減衰比}$$

ただし、

$$R_0 : \text{長さの規準量}, \quad \mu : \text{地盤の剪断剛性}, \quad \rho : \text{地盤の密度}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} : S \text{ 波, } P \text{ 波の速度}$$

ここで採用したパラメータの値を **Table** に示す。この **Table** で示される地盤のヤング係数と剪断剛性の比が 2.5 というのは、ポアソン比 $\nu=0.25$ に相当する。

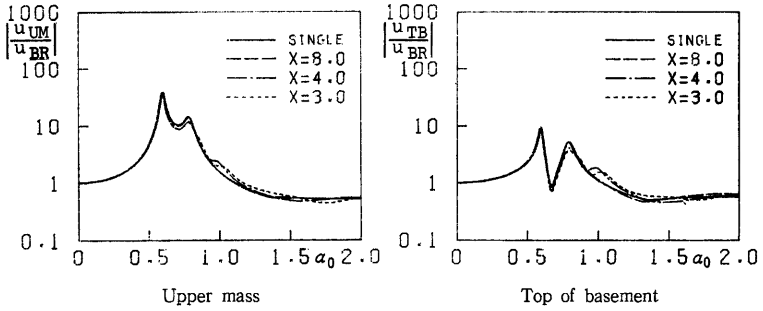
Table Values of parameters.

		$K=I$	$K=0$	$K=II$
Upper mass	m_K	1.0		1.0
	I_K	0		0
	ω_K	variable		variable
	ζ_K	0.05		0.05
	H_K/R_0	1.0		1.0
Basement	ρ_{sK}/ρ	0.4	1.0	0.4
	G_{sK}/μ	6.0	1.0	6.0
	E_{sK}/μ	14.0	2.5	14.0
	η_{sK}	0.1	0.1	0.1
	$e=D_{sK}/R_0$	variable		variable
Under ground	ρ_{gK}/ρ	1.0	1.0	1.0
	G_{gK}/μ	1.0	1.0	1.0
	E_{gK}/μ	2.5	2.5	2.5
	η_{gK}	0.1	0.1	0.1
	$d=D/R_0$	2.0		
	L	8		
	$x=D_s/R_0$	variable		

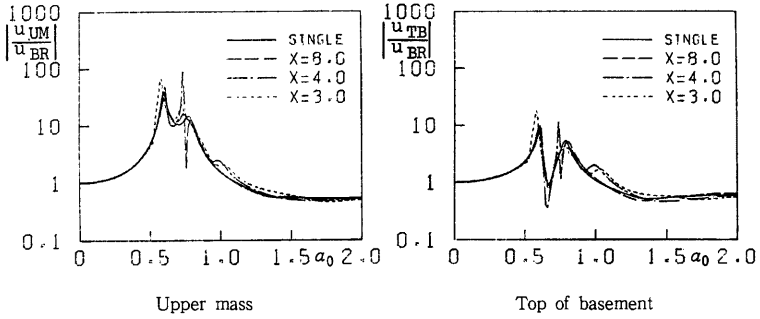
3.2 振幅特性

まず、基盤の変位入力に対する上部質点および基礎上端における変位応答の振幅特性（増幅率の絶対値； $\left| \frac{u_{UM}}{u_{BR}} \right|, \left| \frac{u_{TB}}{u_{BR}} \right|$ ）を **Figs. 4~8** に示す。これらの図で、横軸はすべて無次元振動数 $a_0 (= \frac{\omega R_0}{V_s})$ としている。

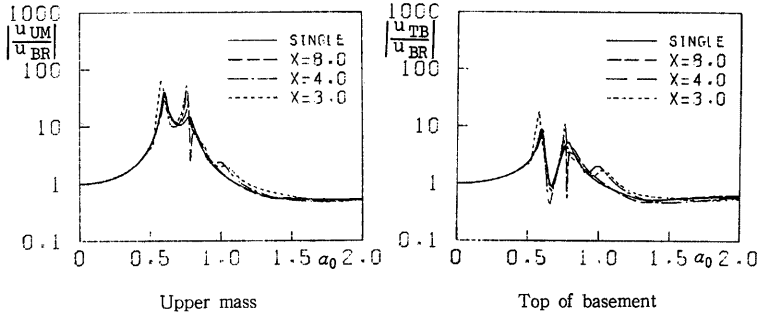
Figs. 4~6 は層厚 $d=2.0$ 、根入れ深さ $e=1.0$ とし、2棟の構造物間距離 x をパラメータとした振幅特性を示す。図の番号 **Figs. 4, 5** および **6** はそれぞれ上部質点系のみをとりだしたときの固有振動数 $\omega_1=\pi/4$, $\pi/2$ および π をもつ構造物の振幅特性を対象としており、図の (a), (b), (c) は隣接構造物の種類に対応し、それぞれ上部質点系の固有振動数 $\omega_{11}=\pi/4$, $\pi/2$, π をもつ構造物が隣りに存在する場合である。図中、点線は構造物間距離 $x=3$ 、1点鎖線は $x=4$ 、破線は $x=8$ の場合の振幅特性を示す。一方、連成をしない単独構造物の振幅特性を同時に実線で示す。同じ種類の構造物が2つ並んで連成する場合、固有振動数の低い構造物 ($\omega_1=\omega_{11}=\pi/4$) では $x=8$ まで離れると単独構造物の振幅特性と殆んど変わらないが、固有振動数が高くなると ($\omega_1=\omega_{11}=\pi/2, \pi$)、 $x=8$ まで離れても、共振振動数近傍では振幅特性に差異が認められる。ところが、固有振動数の低い相等しい構造物相互の連成であっても、距離が $x=4$, $x=3$ と近づくにつれ、振幅特性の連成効果による相違は大きくなり、それも x が小さくなる程広振動数帯域にわたり相互連成による影響が現われる。異なった種類の構造物相互の連成振動における振幅特性は相等しい構造物相互の場合よりも隣接構造物の影響を大きく受け、距離 $x=8$ まで離れていても振幅特性は振動数に対し急激な変化を示し、単独構造物の振幅特性とは似ても似つかぬ性状となることが判る。単独構造物の振動特性との相



(a) $\omega_1 = \pi/4$ and $\omega_{11} = \pi/4$

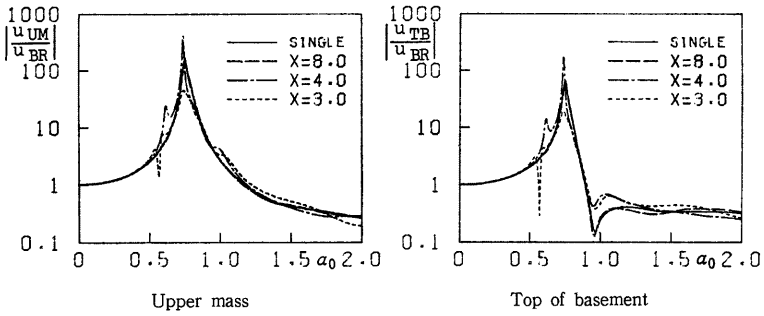


(b) $\omega_1 = \pi/4$ and $\omega_{11} = \pi/2$

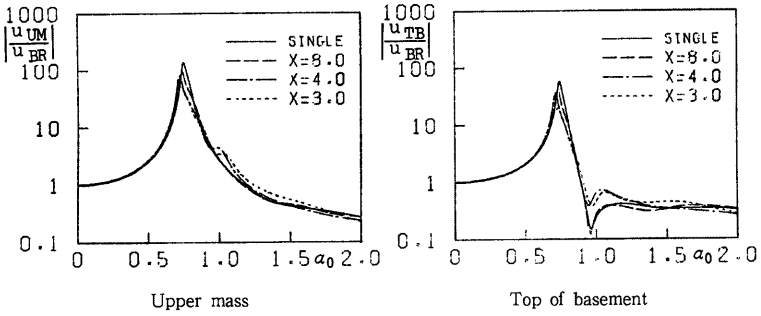


(c) $\omega_1 = \pi/4$ and $\omega_{11} = \pi$

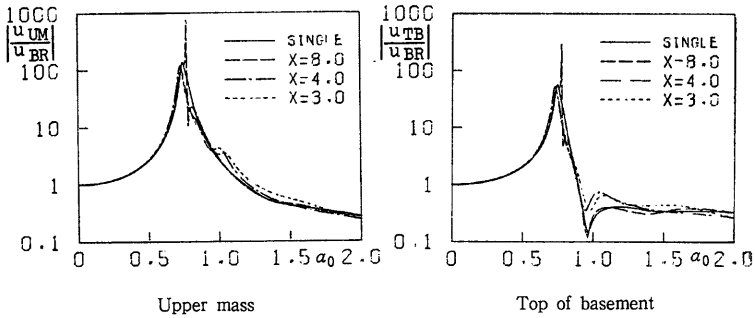
Fig. 4 Magnification factor of cross-interaction system, $d=2$, $e=1$.



(a) $\omega_1 = \pi/2$ and $\omega_{11} = \pi/4$

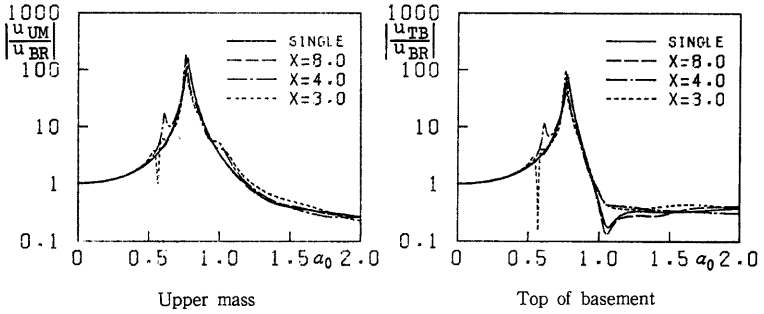


(b) $\omega_1 = \pi/2$ and $\omega_{11} = \pi/2$

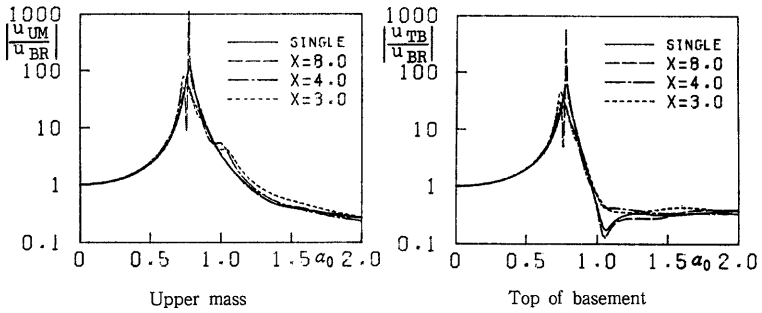


(c) $\omega_1 = \pi/2$ and $\omega_{11} = \pi$

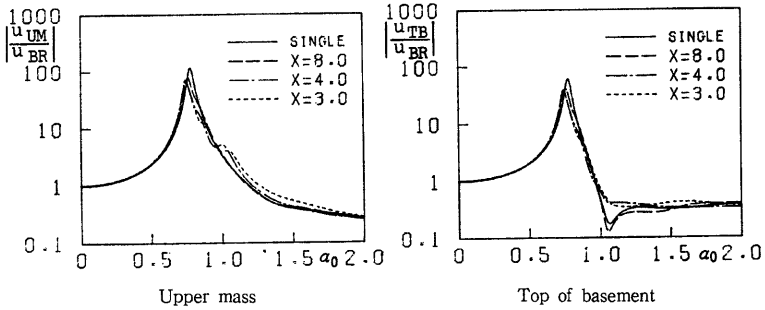
Fig. 5 Magnification factor of cross-interaction system, $d=2, e=1$.



(a) $\omega_I = \pi$ and $\omega_{II} = \pi/4$

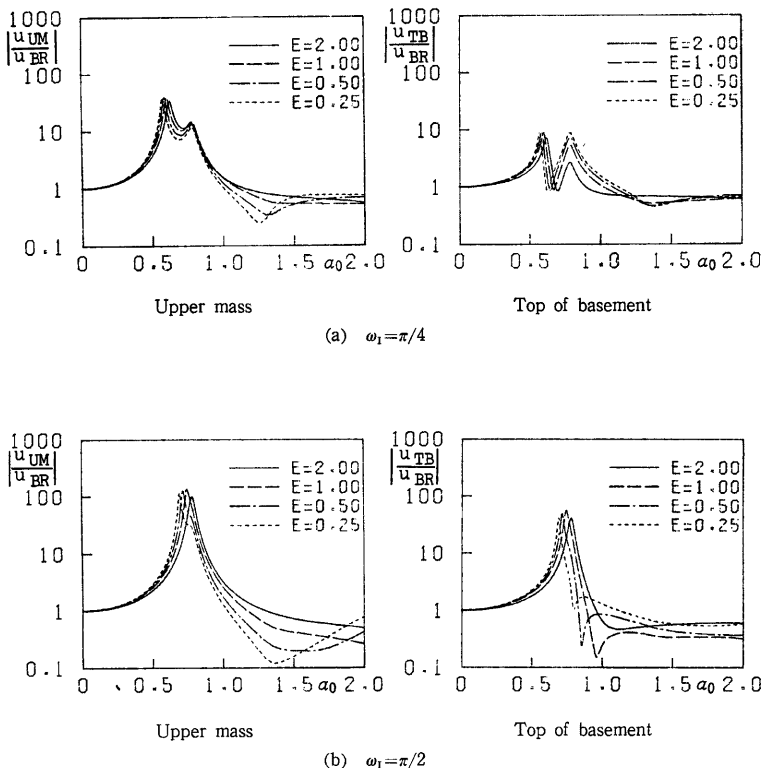


(b) $\omega_I = \pi$ and $\omega_{II} = \pi/2$



(c) $\omega_I = \pi$ and $\omega_{II} = \pi$

Fig. 6 Magnification factor of cross-interaction system, $d=2$, $e=1$.

Fig. 7 Magnification factor of single structure, $d=2$.

違点についての法則性を敢てあげるならば、隣接構造物の系全体（地盤—基礎—構造物系）としての共振振動数近傍および対象としている構造物系の共振振動数近傍で相互連成の影響が顕著に現われるといえる。

Fig. 7, 8 は根入れ深さ e が振幅特性に与える影響を調べる意味で、 e をパラメータとして示した図である。Fig. 7 の (a) および (b) はそれぞれ上部質点系の固有振動数を $\omega_1 = \pi/4$, $\omega_1 = \pi/2$ とした単独構造物の振幅特性であり、Fig. 8 は (a) $\omega_1 = \omega_{11} = \pi/4$, (b) $\omega_1 = \omega_{11} = \pi/2$ と相等しい 2 棟の構造物相互連成系 ($x=6$) の振幅特性である。これらの図より、根入れ深さ e が大きくなると共振振動数は高くなり、地盤による拘束力が大きく働らくことがわかる。また、 e が大きいと上部質点の振幅特性は、 $\alpha_0 = 1.4$ 近傍での減少が少なくなり、なだらかになる傾向もある。

3.3 地震応答

先に解析した基盤の変位入力に対する上部質点の変位応答の振動特性を系の複素伝達関数とし、地震記録波形の振動数領域への Fourier 変換値との積を Fast Fourier Transform (FFT) を用いて Fourier 逆変換

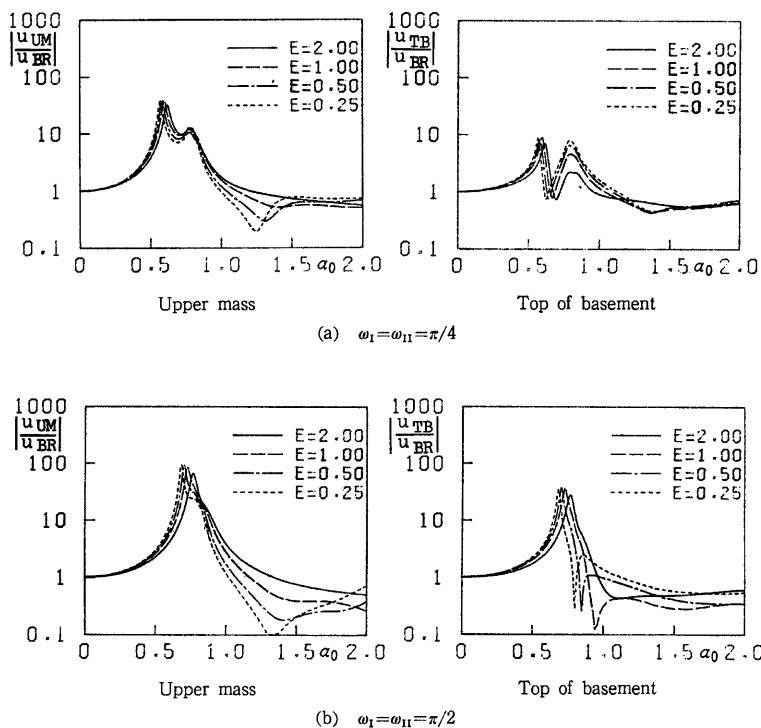


Fig. 8 Magnification factor of two identical structures, $d=2$, $\alpha=6$.

することにより、構造物相互連成系の地震入力に対する過渡応答を計算することができる。Figs. 9~13 は Fig. 3 および Table に示した構造物相互連成系モデルの上部質点 (図中では TOP の記号で表示)、基礎上端 (1F)、基礎底面 (BASE) における地震応答解析結果で、加速度応答の時間履歴曲線および入力に用いた加速度地震記録 (INPUT) を示す。ここで用いた地震記録は El Centro, May, 18, 1940 の水平 2 成分および TAFT, July, 21, 1952 の水平 2 成分の計 4 つの加速度波形²⁾である。Sampling time は 0.02 秒で継続時間はすべて 16 秒用い、応答は 20 秒までで示している。FFT の標本数は 8192 とする。地震記録は実時間の有次元量であるが、構造物モデルは無次元量を用いているため、それらを結合パラメータとして S 波の速度と基礎半径の比 V_s/R_0 (図中では V/B で示す、単位: 1/sec) を導入し、この例では $V_s/R_0=20$ (1/sec) の場合を示す。この V_s/R_0 は地盤の剛さおよび構造物規模に対応するパラメータである。また、入力地震波形の最大加速度を 1.0 としている。

Figs. 9~12 は 2 棟の相等しい構造物同士が連成する場合で、根入れ深さ $e=1.0$ 、構造物上部質点系の固有振動数 $\omega_1=\omega_{11}=\pi/2$ で、構造物間距離を $x=3.0, 4.0, 6.0$ および 8.0 とし、入力地震波がそれぞれ El Centro NS (S00E), El Centro EW (S90W), TAFT N21E および TAFT S69E の解析結果を示す。これらの図から、同じ構造物が 2 つ並んでいても隣りの構造物が近づくとつれ、構造物の応答時間履歴は変化し、隣接構造物の影響が大きく現われることがうかがえる。Figs. 13 (a), (b) は固有振動数が $\omega_1=\pi/2$,

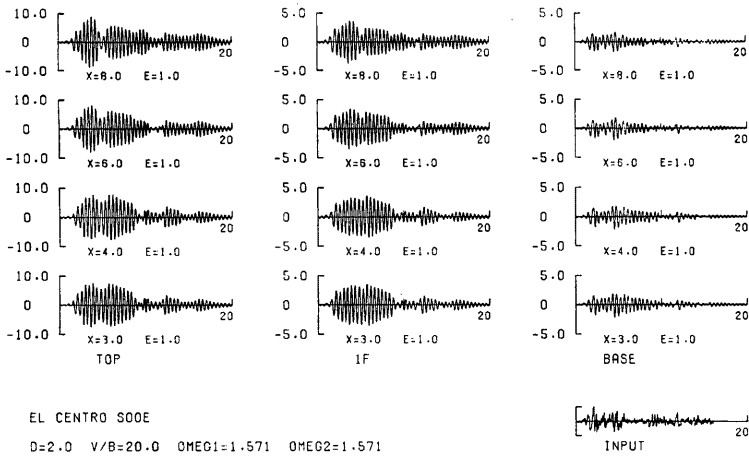


Fig. 9 Time histories of two identical structures due to El Centro NS earthquake ground motion.

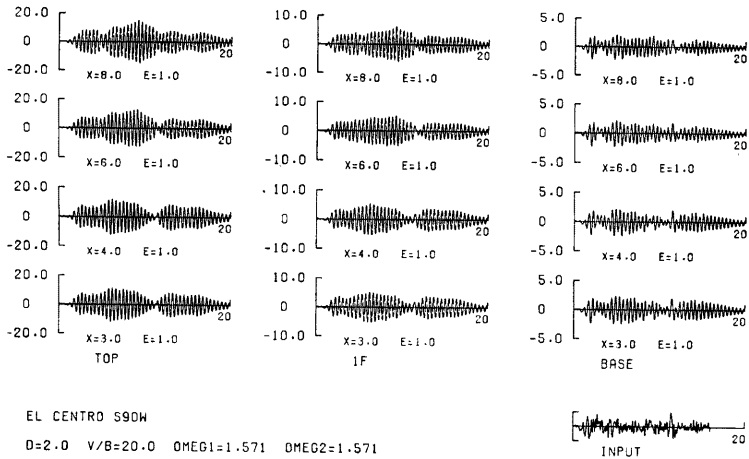


Fig. 10 Time histories of two identical structures due to El Centro EW earthquake ground motion.

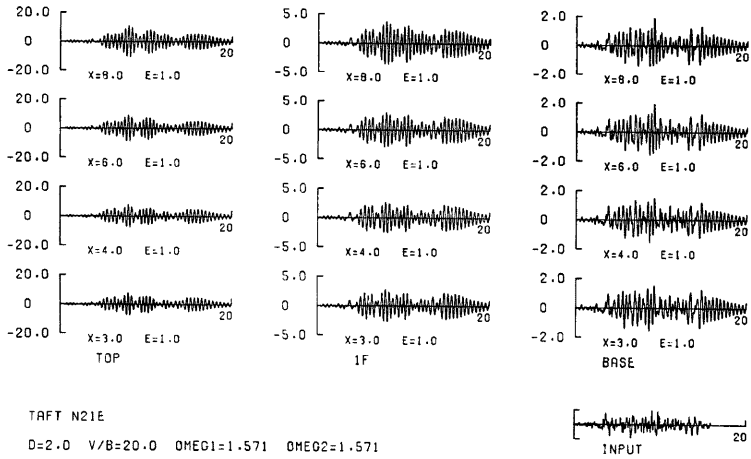


Fig. 11 Time histories of two identical structures due to Taft N21E earthquake ground motion.

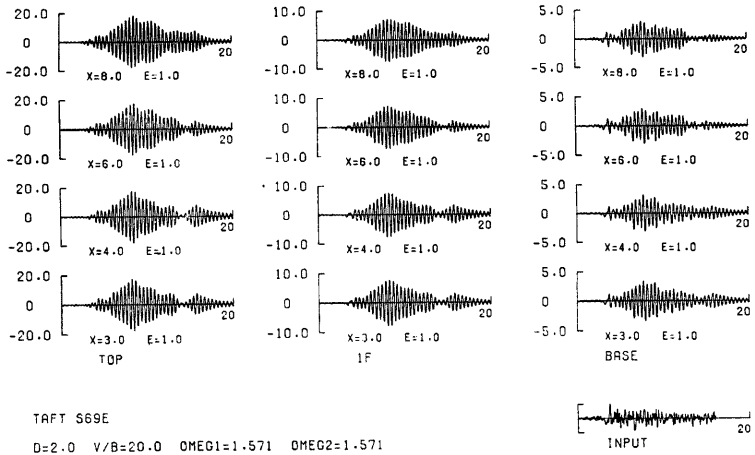
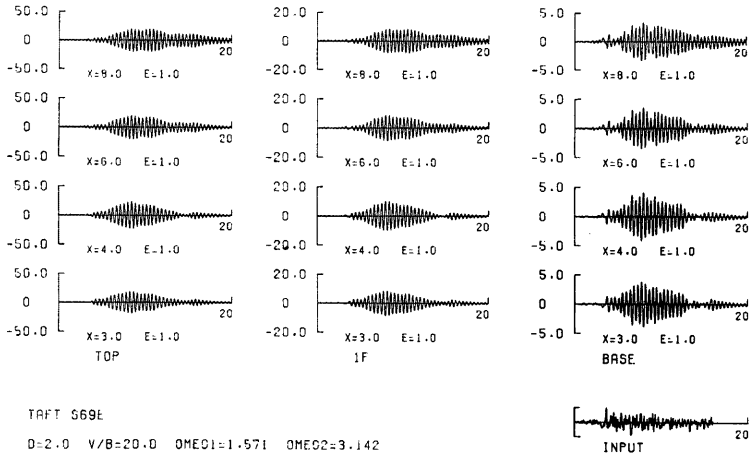
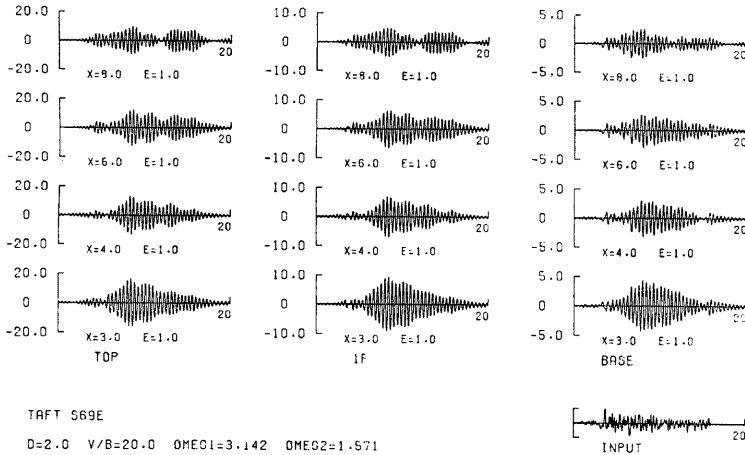


Fig. 12 Time histories of two identical structures due to Taft S69E earthquake ground motion.



(a) $\omega_1 = \pi/2$ and $\omega_{11} = \pi$



(b) $\omega_1 = \pi$ and $\omega_{11} = \pi/2$

Fig 13 Time histories of two different structures due to Taft S69E earthquake ground motion.

$\omega_{11}=\pi$ と相異なる 2 棟の構造物が並んでいる場合の TAFT S69E の入力地震波に対する加速度応答時間履歴で、他のパラメータは Fig. 12 と同じである。

Figs. 14~21 は上記 4 つの地震波入力を考え、相互連成構造物における加速度応答の最大値を示したグラフである。Figs. 14~17 は 2 棟の相等しい構造物を対象として、横軸に根入れ深さ e/d をとり、構造物間距離 x をパラメータとして構造物の根入れ深さが地震応答に如何なる影響を与えるかを調べようとするものである。図の番号 14, 15, 16 および 17 は入力地震波の違いで、それぞれ、El Centro NS, El Centro EW, TAFT N21E および TAFT S69E の地震を対象とするもので、(a), (b), (c) は地盤の S 波の速度と基礎半径の比 V_s/R_0 をそれぞれ $V_s/R_0=10$ (1/sec), 20 (1/sec) および 40 (1/sec) としたもので、さらに、左の図は上部質点系の固有振動数が $\omega_1=\omega_{11}=\pi/4$ の場合、右は $\omega_1=\omega_{11}=\pi/2$ の場合である。これらの図から共通して言えることは、相等しい 2 棟の構造物が連成すると、一般に構造物間距離 x が小さくなる程最大応答は小さくなる傾向にある。しかるに、根入れ深さ e/d が最大応答に及ぼす影響は構造物の種類、入力地震波の種類により一概には言えないが、本計算例では根入れ深さ e/d が $1/4$ あるいは $1/2$ のときに一番大きく、根入れ深さ e/d が $1/8$ と浅くなるとかえって応答が小さくなる傾向にある。

Figs. 18~21 は構造物間距離、隣接構造物の種類が相互連成応答に及ぼす影響を検討するためのグラフで、構造物間距離 x を横軸とし、隣接構造物の固有振動数 ω_{11} をパラメータとして、層厚 $d=2.0$ 、根入れ深さ $e=1.0$ の場合における相互連成系上部質点の最大応答値を示している。図番号 18, 19, 20 および 21 はそれぞれ、El Centro NS, El Centro EW, TAFT N21E および TAFT S69E の地震を入力として、(a) $V_s/R_0=10$ (1/sec), (b) $V_s/R_0=20$ (1/sec) の解析結果を示す。また、各グラフは左から順に $\omega_1=\pi/4$, $\omega_1=\pi/2$ および $\omega_1=\pi$ の固有振動数をもつ構造物の最大応答値であり、図中の実線は隣接構造物の固有振動数が $\omega_{11}=\pi/4$ 、破線は $\omega_{11}=\pi/2$ 、点鎖線は $\omega_{11}=\pi$ の場合である。さらに、隣接構造物が無い場合、すなわち、構造物が孤立しており、隣りの構造物と連成しない場合の結果を点線で示している。これらの図から、構造物間距離 x が大きいと、連成しない点線の値に近づき、 $x=4$, $x=3$ と 2 つの構造物が互いに接近すると隣接構造物との連成により最大応答値が単独の応答結果と異なった値を示す。構造物の種類による影響は、同種の構造物が連成する場合には相互連成により一般に最大応答値は小さくなる傾向にあり、大きくなるにしても単独構造物の応答値を数パーセント上回るに過ぎない。ところが、異種の構造物同士が互いに連成すると、最大応答値は連成による影響を大きく受け、入力地震動および構造物の種類によっては単独構造物より数十パーセントも大きくなることしばしばある。

Fig. 22 は単独構造物に対する連成構造物の最大応答の比、すなわち、相互連成による最大応答の増幅率を 1.20 倍以上、1.05~1.20, 1.00~1.05, 0.95~1.00, 0.80~0.95 および 0.80 倍以下の 6 つの段階に分け、上記 4 つの地震入力のうち増幅率の一番大きい値を構造物の種類、構造物間距離に対して示している。この図の見方は、直線で結んだ円が一对の連成構造物モデルを示し、それが中心から遠ざかるに従って x が大きくなり、2 つの構造物が離れることを示す。また、中央の ω の値は構造物上部質点系の固有振動数を示すもので、2 つの円が同一振動数内にあるときは相等しい構造物の相互連成系であり、2 つの振動数域にまたがるものは異なる構造物が 2 棟並んでいることを示す。これらの図から、構造物間距離 $x=8$ では殆んどの場合連成による増幅率は 0.95~1.05 の範囲にあり、相互連成による影響は 5% 以内となっているが、距離が近づくとつれ、連成による増幅率が 1.20 倍以上になるもの、また、0.80 倍以下となるもの等、連成による影響が強く現われることが判る。殊に、異種の構造物同士が連成する場合には、 $\omega_1=\pi/4$ の構造物に多くみられるように、最大応答は 1.20 倍以上、すなわち、相互連成により 20% 以上も増加することがある。ところが、同種の構造物同士では、一部、 $\omega_1=\omega_{11}=\pi/4$, $x=4$ かつ $V_s/R_0=40$ (1/sec) および $\omega_1=\omega_{11}=\pi$, $x=4$ かつ $V_s/R_0=20$ (1/sec) では 1.05~1.20 の増幅範囲にあるものの、他の場合は不利なときであっても 5% 以内の増加にとどまっており、ほとんどの場合、隣りの建物と連成することにより最大応答値は単独構造物の応答より小さくなり、場合によっては、80% にも達しないことがある。

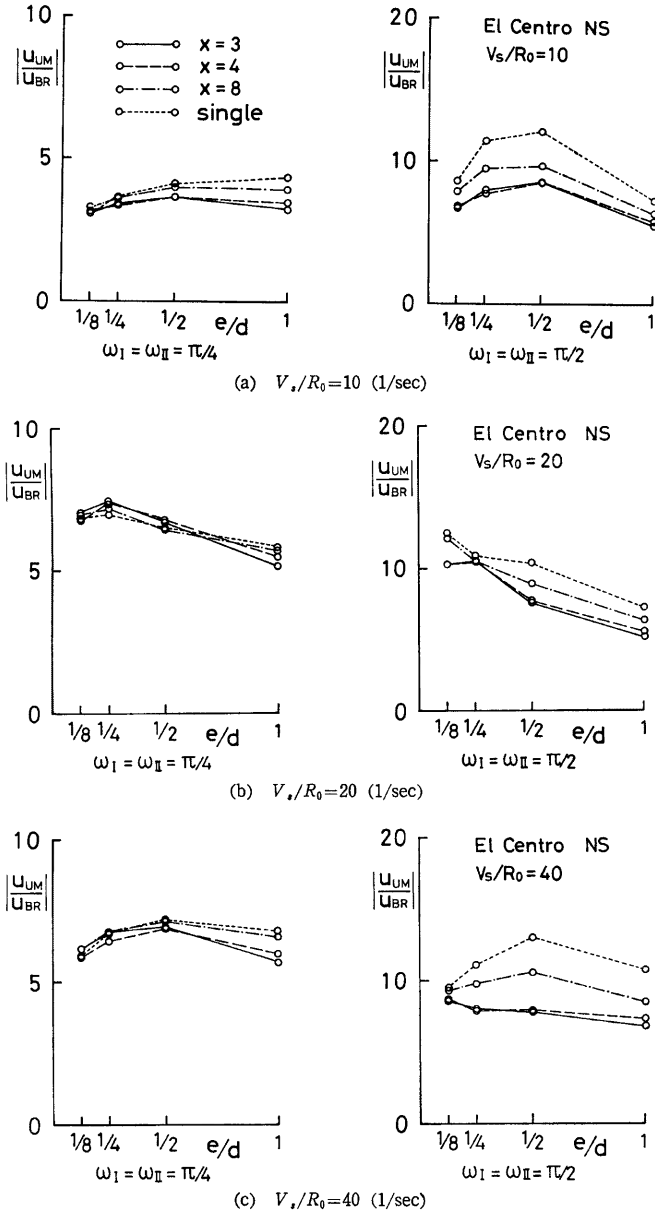


Fig. 14 Maximum responses of upper mass against depth of basement, El Centro NS, $d=2$.

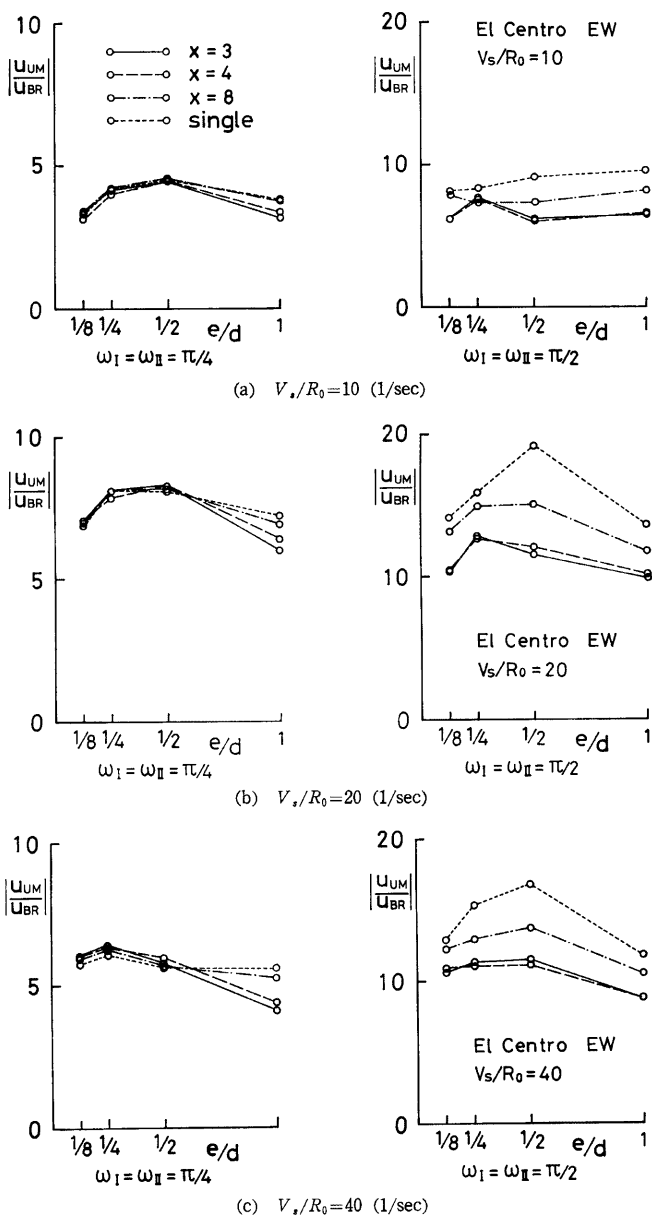


Fig. 15 Maximum responses of upper mass against depth of basement, El Centro EW, $d=2$.

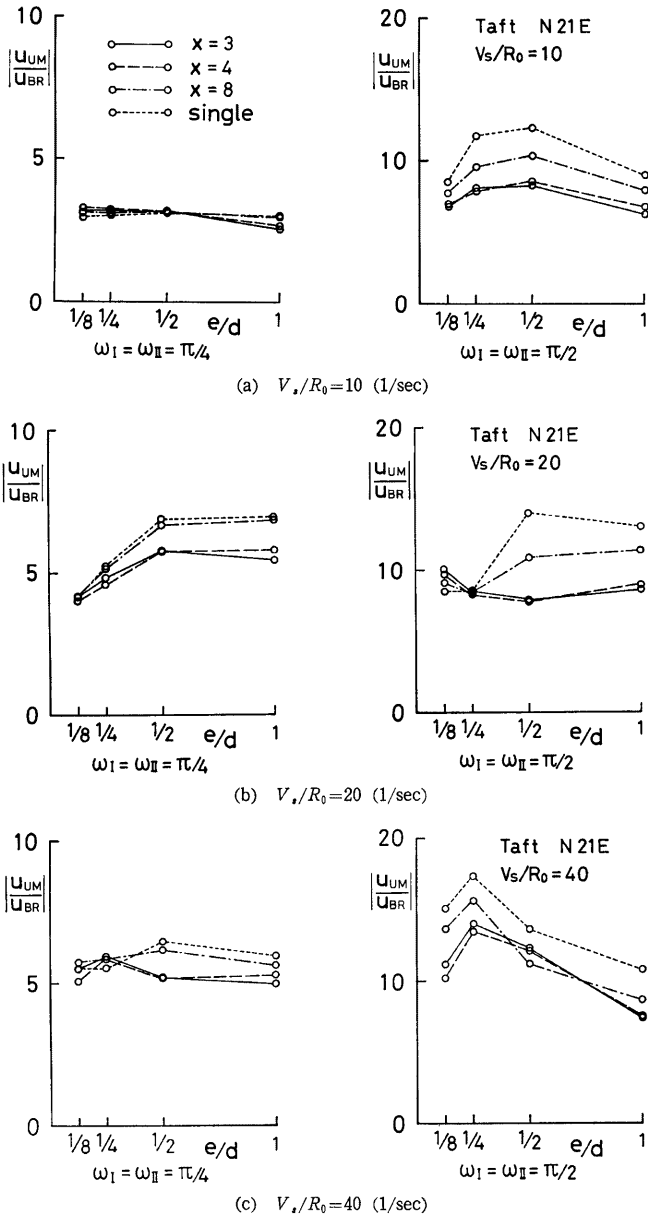


Fig. 16 Maximum responses of upper mass against depth of basement, Taft N21E, $d=2$.

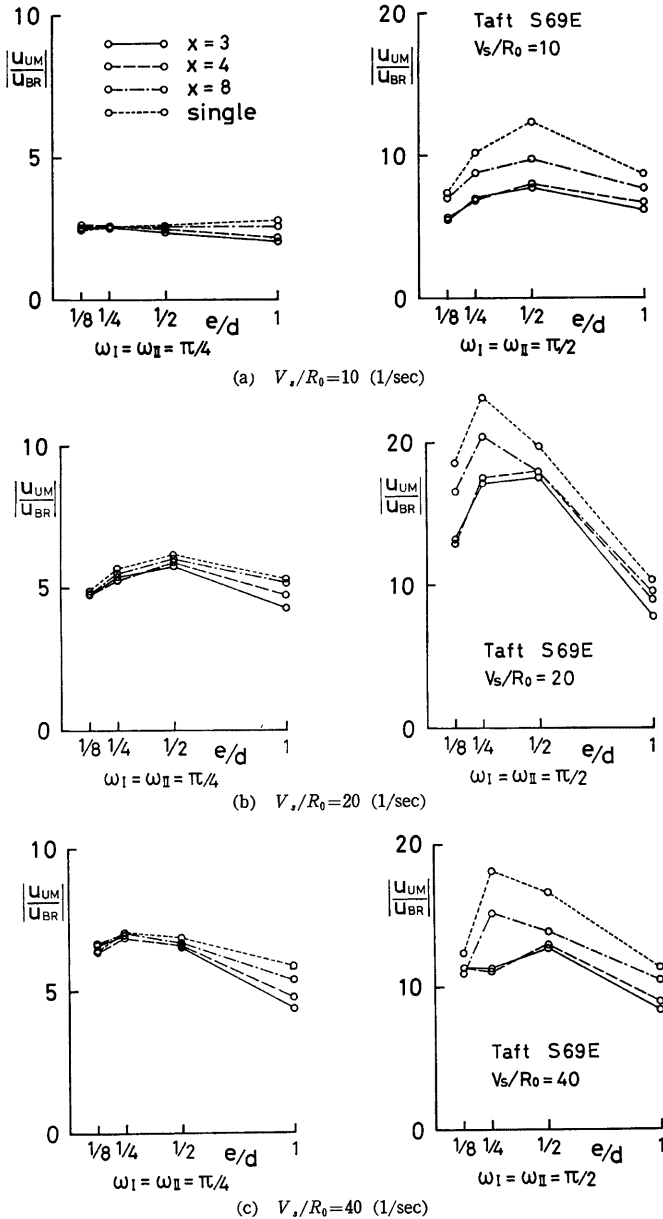


Fig. 17 Maximum responses of upper mass against depth of basement, Taft S69E, $d=2$.

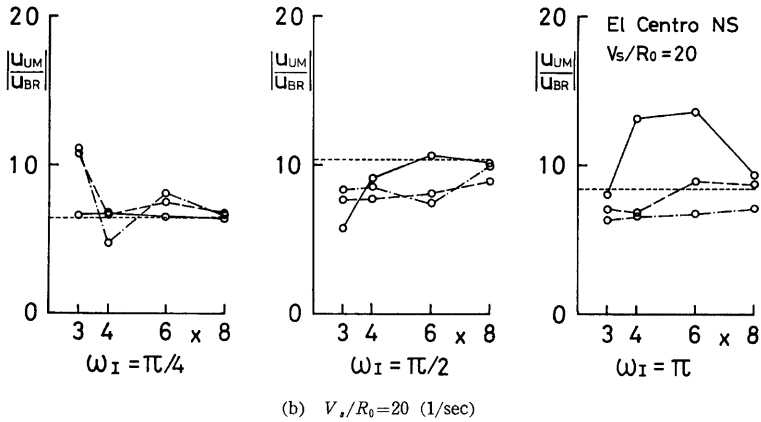
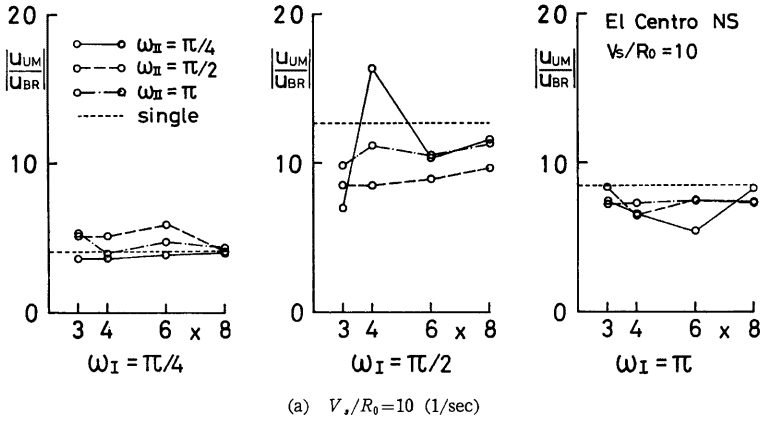
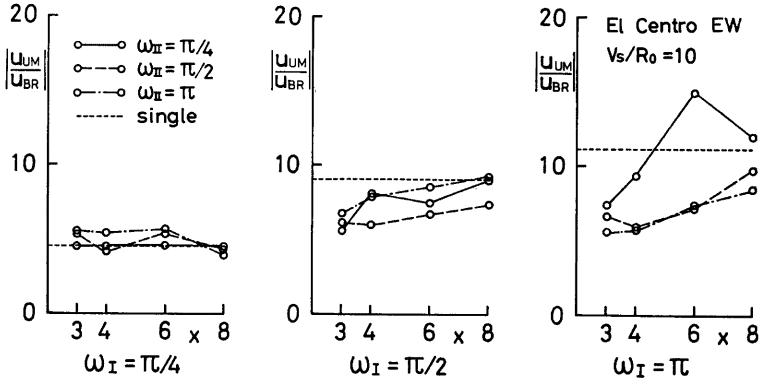
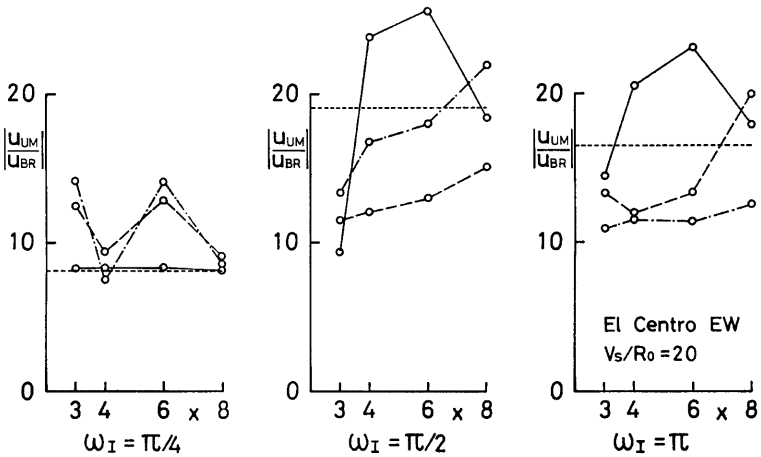


Fig. 18 Maximum responses of upper mass against separation distance, El Centro NS, $d=2$, $e=1$.



(a) $V_s/R_0=10$ (1/sec)



(b) $V_s/R_0=20$ (1/sec)

Fig. 19 Maximum responses of upper mass against separation distance, El Centro EW, $d=2$, $e=1$.

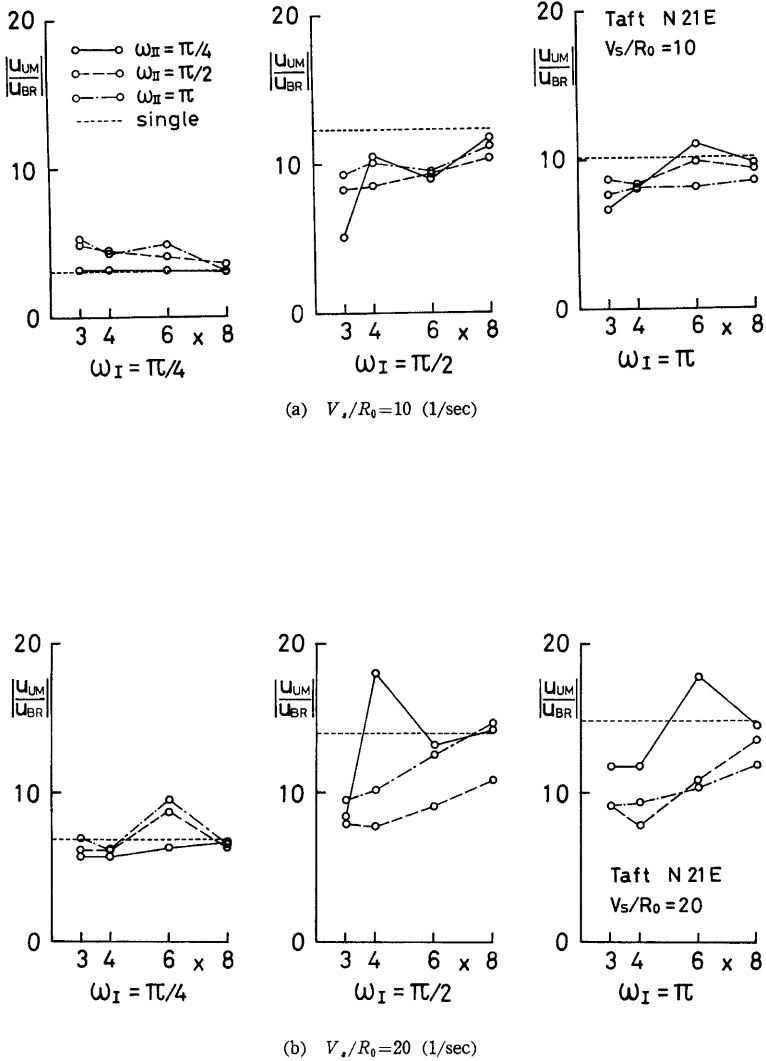


Fig. 20 Maximum responses of upper mass against separation distance. Taft N21E, $d=2$, $e=1$.

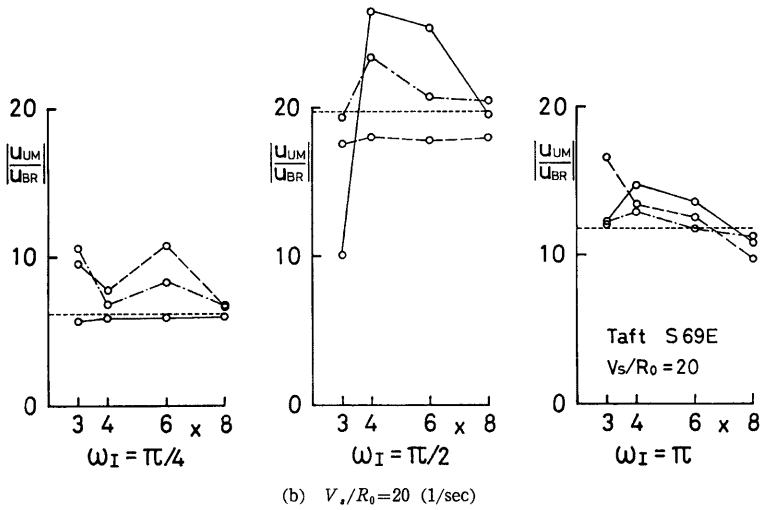
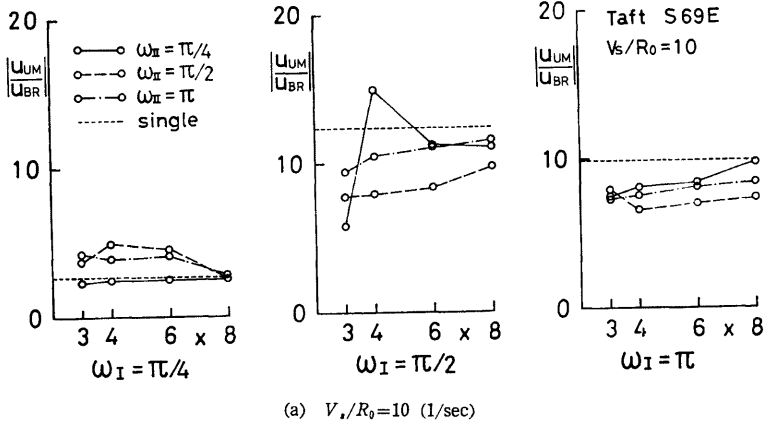


Fig. 21 Maximum responses of upper mass against separation distance, Taft S69E, $d=2$, $e=1$.

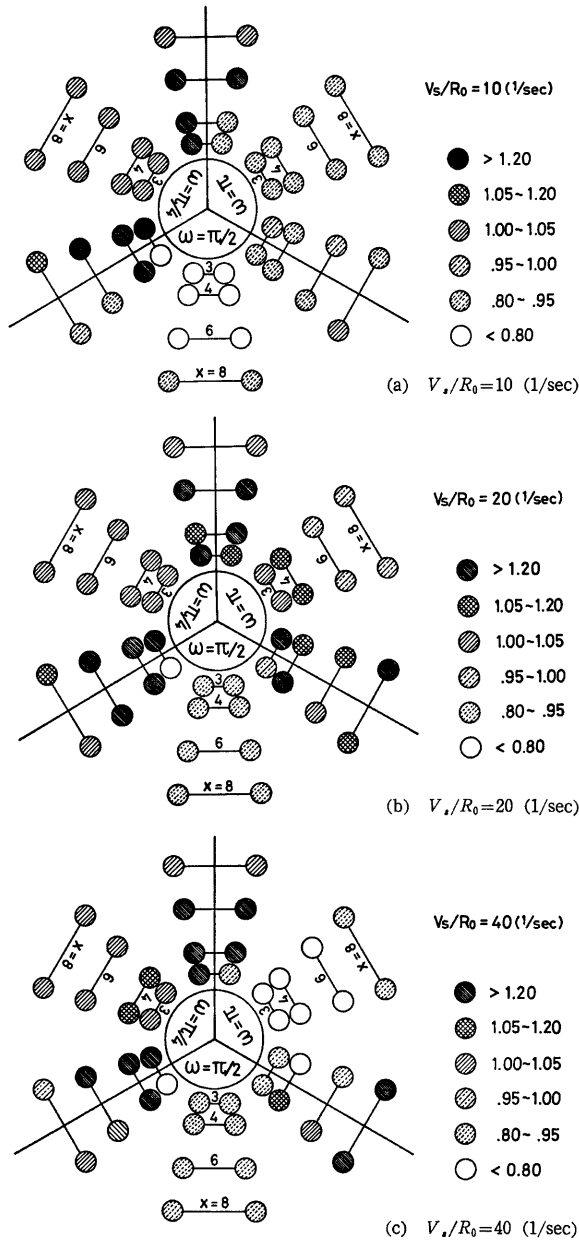


Fig. 22 Ratios of maximum response for two coupled structures to that for single structure, $d=2, e=1$.

4. ま と め

近接する2棟の根入れ構造物同士が連成する場合の振動特性および地震応答を限られた成層地盤モデル、円筒形基礎をもつ質点系構造物モデルおよび入力地震波に対してではあるが解析した。これらの解析結果から得られた知見を以下にまとめる。

まず、振動特性に関しては、

(1) 相等しい構造物相互の連成に対しては、共振振動数近傍で相互連成振動の影響が現われるが、構造物間距離が基礎半径の8倍まで離れると隣接構造物の影響は殆んどなくなる。一方、根入れ深さが増すと共振振動数は高くなり、構造物が周囲の地盤によって拘束されることになる。

(2) 異種の構造物相互の連成に対しては系の共振振動数近傍および隣接構造物の共振振動数近傍で相互連成による影響が現われ、構造物間距離が基礎半径の8倍まで離れても隣接構造物による影響が残っていることが多くある。

つぎに、最大地震応答に関しては、

(3) 相等しい構造物の場合、隣りの構造物と連成することにより最大応答は小さくなることが多く、大きくなるにしても高々5%程度である。根入れ深さによる影響は、必ずしも根入れが深くなる程最大応答が小さくなるとは限らず、根入れが殆んどない場合の方がかえって小さくなることもあり得る。

(4) 異種の構造物相互の連成に対しては、隣りの構造物の種類により最大応答の増幅率が変わり、不利な場合には単独構造物の応答の数十パーセントも大きな応答を示すことが往々にしてある。しかし、構造物間距離が基礎半径の8倍まで離れると隣接構造物の影響は殆んどなく、最大応答の増減は殆んどの場合数パーセント以内におさまっている。

以上の結果から、同種の構造物が近接して建っている場合は、相互連成により地震時には有利に作用することが多いが、異種の構造物が近接して存在する場合には、相互連成により最大応答が危険側になる。同種の建築構造物が建ち並んでいる例としては、団地内の高層住宅にみられる程度で、一般に多くの建築構造物は異種の建築物に囲まれている。したがって、隣接構造物と連成すると建築構造物は一般に危険側に作用することが多く、耐震設計において構造物同士の相互連成振動は注意の怠れない問題となろう。

最後に、数値計算は京都大学大型計算機センターの FACOM M-190 を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 小堀鐸二・南井良一郎・日下部馨：弾性地盤上の剛体系の連成振動について，日本建築学会近畿支部研究報告集，構造・材料・施工，昭和46年5月，pp. 13~16.
- 2) Kobori T., R. Minai and K. Kusakabe : Dynamical Characteristics of Soil-Structure Cross-Interaction System, The Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Vol. 22, Feb., 1973, pp. 111~151.
- 3) 小堀鐸二・南井良一郎・鈴木有・日下部馨：起振機試験による基礎構造の振動特性——(その2)隣接基礎の影響について——，京都大学防災研究所年報，第17号 B，昭和49年4月，pp. 139~156.
- 4) Kobori T., R. Minai and K. Kusakabe : Dynamical Cross-Interaction between Two Foundations, Proc. of the 6th World Conference on Earthquake Engineering, Session 4, Jan., 1977, pp. 31~36.
- 5) 小堀鐸二・日下部馨：近接する根入れ構造物相互の連成振動特性について，京都大学防災研究所年報，第21号 B-1，昭和53年4月，pp. 249~276.
- 6) Kobori T. and K. Kusakabe : Dynamic Cross-Interaction between Two Embedded Structures, Proc. of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium-1978, Nov., 1978, pp. 521~528.
- 7) Trifunac M. D., A. G. Brady and D. E. Hudson : Strong Motion Earthquake Accelerograms, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Feb., 1973.