



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	地震波動による構造物の立体振動に関する研究
Author(s)	酒井, 良男; Sakai, Yoshio; 羽沢, 昭宗 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 51, 19-29
Issue Date	1968-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40916
Type	departmental bulletin paper
File Information	51_19-30.pdf



地震波動による建造物の立体振動に関する研究

酒井良男*

羽沢昭宗*

(昭和43年5月31日受理)

A Study on Torsional Vibration of Structure by Seismic Waves

Yoshio SAKAI

Akimune HAZAWA

(Received May 31, 1968)

Abstract

It is well-known that at the time of earthquakes a vibration accompanied by torsion in eccentric structures appears giving rise to unfavorable stresses in some parts of the structure.

In this paper, to obtain data on the mode of selection of the shearing corrective coefficient with special consideration to the dynamic eccentricity in the planning of structures, an equation of vibration was proposed. These theoretical results were compared with the shearing corrective coefficient based on the present statical eccentricity and calculations were made on a one-story-single-span-structure.

It was found that the dynamic eccentricity showed a much higher increase over that of the statical eccentricity.

The present paper is a first step towards establishing the mode of selection of the shearing corrective coefficient.

§1. 序

慣性力の作用点(重心)と反力の作用点(剛心)が不一致の建造物では、地震を受けた場合、重心と剛心との間に偶力が生じるため捩れを伴った振動(立体振動)が起る。重心と剛心の不一致は耐力壁の配置や平面形、立面形が不規則であると必ず生じるもので、地震時には、この建造物の一部に不利な応力が生じる。

本報告は前半で偏心を有する建物について下記の仮定に基づき振動方程式及びその解を示し、後半で単純な建物について正弦波地動を受けた場合の“動的効果を考慮したせん断力補正係数”と現行の静的設計法で用いられている“偏心によるせん断力補正係数”とにつき数例を

* 建築工学科

あげて比較検討した。

仮 定

- 1) 床版の変形を無視しこれを剛体とみなす。
- 2) 各部の質量は床版位置に集中するものとみなす。
- 3) 柱の伸縮を無視し床版は水平方向のみに動き得るものとする。
- 4) 以上の仮定に従い多層建築物の振動を弾性的に連結された剛体系のせん断振動として取り扱う。

使用記号

特記がない場合には下記の記号を使用する。

x : x 方向絶対変位 y 軸より右を正とする。

y : y 方向絶対変位 x 軸より上を正とする。

φ : 回 転 角 時計回りを正とする。

z : 重心より回転半径の距離にある点の変位。 φ なる回転に伴う

i : 回 転 半 径

e : 偏 心 量 y 軸より左及び x 軸より下を正とする。

ε : 重心の上層との位置差 y 軸より左及び x 軸より下を正とする。

e' : e を i で除したもの

ε' : ε を i で除したもの

M : 質 量

Q : x 方向に単位変位を与えるのに必要な力

R : y 方向に単位変位を与えるのに必要な力

\mathcal{M} : 単位回転角を与えるのに必要なモーメント

$C_{xy}^{\%}$: 影響係数 (x 方向変位に対する y 方向影響量)

u, v, w : 各々 x 方向, y 方向, z 方向固有関数

q : 時刻関数

n : 円振動数

X, Y, Z : 各々基礎に対する x 方向, y 方向, z 方向の相対変位

r_I : 内部摩擦係数

r_E : 外部摩擦係数

添字 x, y, z : 各々 x 方向, y 方向, z 方向を示す。

m : 最 上 層

n, i : 一 般 層

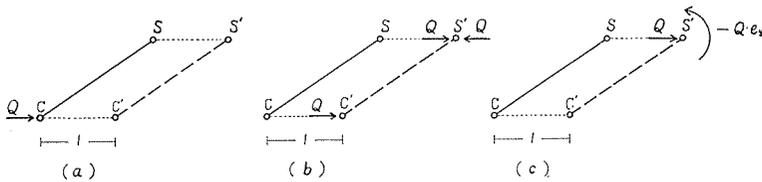
1: 最 下 層

0: 基 礎

§2. 振動方程式及び解

2.1 弾力係数

○ x 方向に単位変位を与えた場合



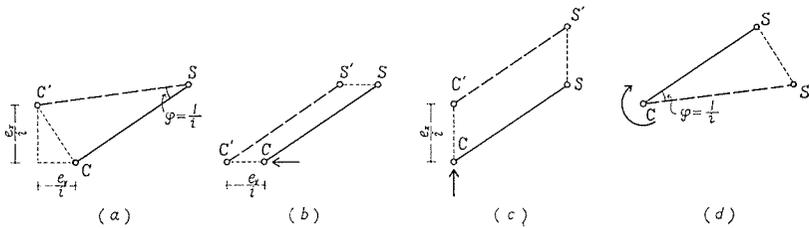
第 1 図

x 方向に単位変位を与えるには、剛心(C)に Q なる力を加えればよい。これを重心(S)での力及びモーメントとして表わせば、第1図により力は Q 、モーメントは $-Q \cdot e_y$ となる。

○ y 方向に単位変位を与えた場合

x 方向の場合と同様に考えて重心での力は R 、モーメントは $R \cdot e_x$ となる。

○ z 方向に単位変位を与えた場合



第 2 図

z 方向の単位変位を第2図のように分解して考える。すなわち (a) は (b), (c), (d) を合成したものである。

(b) 図 剛心を x 方向に $-e_y/i$ 変位させるには重心に

$$-\frac{e_y}{i} Q \quad \frac{e_y^2}{i} Q$$

(c) 図 剛心を y 方向に e_x/i 変位させるには重心に

$$\frac{e_x}{i} R \quad \frac{e_x^2}{i} R$$

(d) 図 剛心を $1/i$ 回転させるには重心に

$$\frac{\mathfrak{M}}{i}$$

なる力及びモーメントが必要である。

以上をまとめると第1表の通りとなる。

第 1 表 弾力係数

力の方向		x 方向	y 方向	z 方向**
単位変位	x 方向	Q	0^*	$-e'_y Q$
	y 方向	0^*	R	$e'_x R$
	z 方向	$-e'_y Q$	$e'_x R$	$e'_x{}^2 R + e'_y{}^2 Q + \frac{\mathfrak{M}}{i^2}$

注 * 剛性の主軸が x, y 両軸に一致すれば 0 となる。

** モーメントを i で除し重心から i なる距離の力として表わした。

2.2 振動方程式

床版の変形を無視した場合、構造物は第 3 図のように剛心を軸とした振動系として表わすことができる。

前項の方法で単位変位を与えた場合の弾力係数を求めると、任意の偏心を有する多層建築物の一般層のせん断振動方程式は次のようになる。

一般層について

x 方向

$$\begin{aligned}
 & Q_{n+1}(x_n - x_{n-1}) + Q_n(x_n - x_{n-1}) \\
 & - Q_{n+1} \left\{ \left(\varepsilon'_{yn} + e'_{yn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) z_n - e'_{yn+1} z_{n+1} \right\} \\
 & - Q_n \left\{ e'_{yn} z_n - \left(\varepsilon'_{yn-1} + e'_{yn} \frac{i_n}{i_{n-1}} \right) z_{n-1} \right\} = -M_n \ddot{x}_n
 \end{aligned}$$

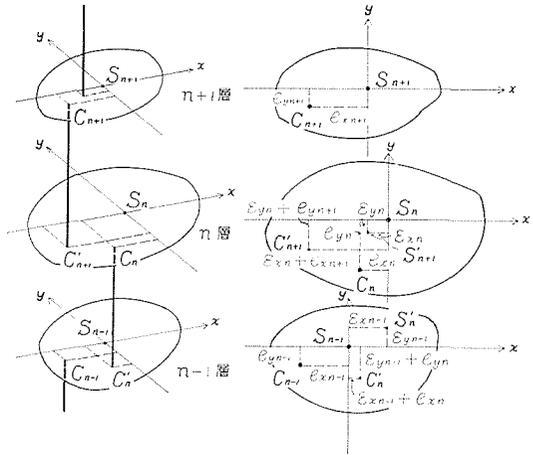
y 方向

$$\begin{aligned}
 & R_{n+1}(y_n - y_{n+1}) + R_n(y_n - y_{n-1}) \\
 & + R_{n+1} \left\{ \left(\varepsilon'_{xn} + e'_{xn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) z_n - e'_{xn+1} z_{n+1} \right\} \\
 & + R_n \left\{ e'_{xn} z_n - \left(\varepsilon'_{xn-1} + e'_{xn} \frac{i_n}{i_{n-1}} \right) z_{n-1} \right\} = -M_n \ddot{y}_n
 \end{aligned}$$

z 方向

$$\begin{aligned}
 & \frac{\mathfrak{M}_{n+1}}{i_{n+1}^2} \left(\frac{i_{n+1}}{i_n} \right)^2 \left(z_n - z_{n+1} \frac{i_n}{i_{n+1}} \right) + \frac{\mathfrak{M}_n}{i_n^2} \left(z_n - z_{n-1} \frac{i_n}{i_{n-1}} \right) \\
 & + Q_{n+1} \left\{ \left(\varepsilon'_{yn} + e'_{yn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) z_n - e'_{yn+1} z_{n+1} \right\} \left(\varepsilon'_{yn} + e'_{yn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) \\
 & + Q_n \left\{ e'_{yn} z_n - \left(\varepsilon'_{yn-1} + e'_{yn} \frac{i_n}{i_{n-1}} \right) z_{n-1} \right\} e'_{yn} \\
 & + R_{n+1} \left\{ \left(\varepsilon'_{xn} + e'_{xn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) z_n - e'_{xn+1} z_{n+1} \right\} \left(\varepsilon'_{xn} + e'_{xn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) \\
 & + R_n \left\{ e'_{xn} z_n - \left(\varepsilon'_{xn-1} + e'_{xn} \frac{i_n}{i_{n-1}} \right) z_{n-1} \right\} e'_{xn} \\
 & - Q_{n+1}(x_n - x_{n+1}) \left(\varepsilon'_{yn} + e'_{yn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) - Q_n(x_n - x_{n-1}) e'_{yn} \\
 & + R_{n+1}(y_n - y_{n+1}) \left(\varepsilon'_{xn} + e'_{xn+1} \frac{i_{n+1}}{i_n} \right) + R_n(y_n - y_{n-1}) e'_{xn} \\
 & = -M_n \ddot{z}_n
 \end{aligned}$$

(1)



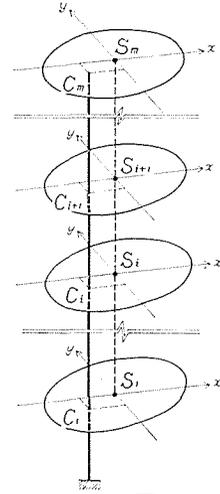
第 3 図 構造物のモデル化

2.3 Holzer 法の拡張

第4図のように重心及び剛心の位置が各層で各々同じ位置にありかつ各層の回転半径が等しい場合、次のような方法で振動数と振動型が求まる。このときの振動方程式は(1)式で

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x_n} &= \varepsilon_{x_{n-1}} = \varepsilon_{y_n} = \varepsilon_{y_{n-1}} = 0 \\ e'_{x_{n+1}} &= e'_{x_n} = e'_{x_{n-1}} = e_x \\ e'_{y_{n+1}} &= e'_{y_n} = e'_{y_{n-1}} = e_y \\ i_{n+1} &= i_n = i_{n-1} = i\end{aligned}$$

とおけば次のようになる。



第4図

$$\left. \begin{aligned} Q_{n+1}(x_n - x_{n+1}) + Q_n(x_n - x_{n-1}) - e'_y Q_{n+1}(z_n - z_{n+1}) \\ - e'_y Q_n(z_n - z_{n-1}) &= -M_n \ddot{x}_n \\ R_{n+1}(y_n - y_{n+1}) + R_n(y_n - y_{n-1}) + e'_x R_{n+1}(z_n - z_{n+1}) \\ + e'_x R_n(z_n - z_{n-1}) &= -M_n \ddot{y}_n \\ - e'_y Q_{n+1}(x_n - x_{n+1}) - e'_y Q_n(x_n - x_{n-1}) \\ + e'_x R_{n+1}(y_n - y_{n+1}) + e'_x R_n(y_n - y_{n-1}) \\ + \left(e'^2_y Q_{n+1} + e'^2_x R_{n+1} + \frac{\mathfrak{M}_{n+1}}{i^2} \right) (z_n - z_{n+1}) \\ + \left(e'^2_y Q_n + e'^2_x R_n + \frac{\mathfrak{M}_n}{i^2} \right) (z_n - z_{n-1}) &= -M_n \ddot{z}_n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

いま

$$\begin{aligned}x_n &= u_n q \\ y_n &= v_n q \\ z_n &= w_n q \\ q &= A \cos nt + B \sin nt\end{aligned}$$

とおくと(2)式の固有関数方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} Q_{n+1}(u_n - u_{n+1}) + Q_n(u_n - u_{n-1}) - e'_y Q_{n+1}(w_n - w_{n+1}) \\ - e'_y Q_n(w_n - w_{n-1}) &= M_n n^2 u_n \\ R_{n+1}(v_n - v_{n+1}) + R_n(v_n - v_{n-1}) + e'_x R_{n+1}(w_n - w_{n+1}) \\ + e'_x R_n(w_n - w_{n-1}) &= M_n n^2 v_n \\ - e'_y Q_{n+1}(u_n - u_{n+1}) - e'_y Q_n(u_n - u_{n-1}) \\ + e'_x R_{n+1}(v_n - v_{n+1}) + e'_x R_n(v_n - v_{n-1}) \\ + \left(e'^2_y Q_{n+1} + e'^2_x R_{n+1} + \frac{\mathfrak{M}_{n+1}}{i^2} \right) (w_n - w_{n+1}) \\ + \left(e'^2_y Q_n + e'^2_x R_n + \frac{\mathfrak{M}_n}{i^2} \right) (w_n - w_{n-1}) &= M_n n^2 w_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 式より次の関係を得る。

$$\left. \begin{aligned} w_n &= w_{n+1} - \frac{i^2}{\mathfrak{M}_{n+1}} \sum_{n=n+1}^m Z_n \\ u_n &= u_{n+1} - \frac{1}{Q_{n+1}} \sum_{n=n+1}^m X_n - e'_y \frac{i^2}{\mathfrak{M}_{n+1}} \sum_{n=n+1}^m Z_n \\ v_n &= v_{n+1} - \frac{1}{R_{n+1}} \sum_{n=n+1}^m Y_n + e'_x \frac{i^2}{\mathfrak{M}_{n+1}} \sum_{n=n+1}^m Z_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{ただし } Z_n = M_n n^2 (w_n + e'_y u_n - e'_x v_n)$$

$$X_n = M_n n^2 u_n$$

$$Y_n = M_n n^2 v_n$$

基礎では $n=0$ とおいて

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= u_1 - \frac{1}{Q_1} \sum_{n=1}^m X_n - e'_y \frac{i^2}{\mathfrak{M}_1} \sum_{n=1}^m Z_n \\ v_0 &= v_1 - \frac{1}{R_1} \sum_{n=1}^m Y_n + e'_x \frac{i^2}{\mathfrak{M}_1} \sum_{n=1}^m Z_n \\ w_0 &= w_1 - \frac{i^2}{\mathfrak{M}_1} \sum_{n=1}^m Z_n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(5) 式の右辺は各式とも u_m, v_m, w_m の 1 次関数である。ここで $u_m=1$ とおくと (5) 式は v_m, w_m の関数となる。基礎では $u_0=v_0=w_0=0$ であるので、(5) 式の右辺が各々 0 となるような v_m, w_m が定まるように振動数 n を仮定して繰り返し計算を行なえばよい。

2.4 減衰を考慮した一般式とその解法

(1) 式に

$$x_i - x_0 = X_i$$

$$y_i - y_0 = Y_i$$

$$z_i - z_0 = Z_i$$

を代入し減衰を考慮した式にあらためると次のようになる。

減衰を考慮した一般層の方程式

$$\left. \begin{aligned} -M_i \ddot{X}_i - r_{Ei} \dot{X}_i &= \sum_{j=1}^m C_{xji}^x \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) X_j \\ &\quad + \sum_{j=1}^m C_{zji}^x \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) Z_j + M_i \dot{x}_0 + r_{Ei} \dot{x}_0 \\ -M_i \ddot{Y}_i - r_{Ei} \dot{Y}_i &= \sum_{j=1}^m C_{yji}^y \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) Y_j \\ &\quad + \sum_{j=1}^m C_{zji}^y \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) Z_j + M_i \dot{y}_0 + r_{Ei} \dot{y}_0 \\ -M_i \ddot{Z}_i - r_{Ei} \dot{Z}_i &= \sum_{j=1}^m C_{xji}^z \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) X_j \\ &\quad + \sum_{j=1}^m C_{yji}^z \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) Y_j + \sum_{j=1}^m C_{zji}^z \left(1 + r_I \frac{d}{dt}\right) Z_j \\ &\quad + M_i \dot{z}_0 + r_{Ei} \dot{z}_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし $i = 1, 2, \dots, m$

(6) 式の解は地動 y_0, z_0 を

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= f(t) x_0 \\ z_0 &= g(t) x_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

とおくと $3m$ 質点の振動方程式の解と同様の方法で求めることができるので省略する。

§3. 動的せん断力補正係数と静的せん断力補正係数

現行の静的設計法で用いられている“偏心によるせん断力補正係数”に対応して“動的効果を取り入れたせん断力補正係数”を次のように定義することができる。

$$a\alpha = \frac{Y_{\max}}{Y_{C\max}} \quad (8)$$

ただし $a\alpha$: 動的せん断力補正係数

Y_{\max} : ある点の最大変位

$Y_{C\max}$: 剛心の最大変位

この動的せん断力補正係수에等しい静的せん断力補正係数を与える仮定の偏心比を $a'e'$ で表わし動的偏心比とよぶ。このときの偏心の増加率を D とすると、この動的偏心比と実際の偏心比との間には次の関係がある。

$$a'e' = (1+D)e' \quad (9)$$

従って D は

$$D = \frac{a'e'}{e'} - 1 \quad (10)$$

となる。

次に単純な建物について計算した結果について示す。

振動モデル

振動モデルは第5図に示す1層1軸偏心正方形スパン建物である。

$$y \text{ 方向剛性} \quad R_A + R_B = R$$

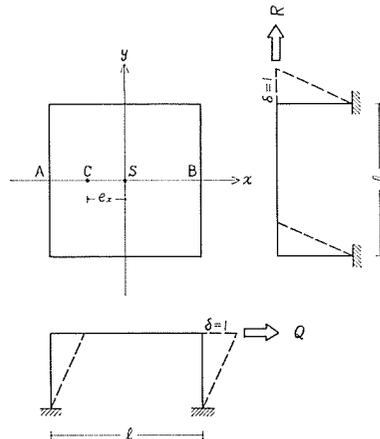
$$x \text{ 方向剛性} \quad Q = \alpha R$$

$$\text{回転半径} \quad i = \frac{l}{\sqrt{6}}$$

偏心量 e_x を R, R_B で表わすと

$$e_x = \frac{1}{2}l - \frac{R_B}{R_A + R_B} = \left(\frac{1}{2} - \frac{R_B}{R}\right)l$$

となる。また、振れ剛性 α は次のように定まる。



第5図 振動モデル

$$\mathfrak{M} = 2 \times \frac{1}{2} Q \left(\frac{l}{2} \right)^2 + R_A \left(\frac{l}{2} - e_x \right)^2 + R_B \left(\frac{l}{2} + e_x \right)^2 = R l^2 \left(\frac{\alpha}{4} + \frac{1}{4} - \frac{e_x^2}{l^2} \right)$$

$$\therefore \frac{\mathfrak{M}}{l^2} R = \left(\frac{3}{2} \alpha + \frac{3}{2} - e_x^2 \right)$$

振動方程式

$$\left. \begin{aligned} R \left(1 + r_l \frac{d}{dt} \right) Y + e'_x R \left(1 + r_l \frac{d}{dt} \right) Z &= M (\ddot{Y} - \ddot{y}_0) \\ e'_x R \left(1 + r_l \frac{d}{dt} \right) Y + \frac{3}{2} (\alpha + 1) R \left(1 + r_l \frac{d}{dt} \right) Z &= -M (\ddot{Z} + \ddot{z}_0) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

動的せん断力補正係数

$$\text{A点} \quad {}_d\alpha_A = \frac{\text{A点の最大変位}}{\text{剛心の最大変位}} = \frac{Y_{A \max}}{Y_{C \max}} \quad (12)$$

$$\text{B点} \quad {}_d\alpha_B = \frac{\text{B点の最大変位}}{\text{剛心の最大変位}} = \frac{Y_{B \max}}{Y_{C \max}} \quad (13)$$

なお、静的せん断力補正係数は次式で与えられる。

$${}_s\alpha = 1 + \frac{\sum D_y \cdot e_x}{J_x + J_y} x$$

すなわち

$$\text{A点} \quad {}_s\alpha_A = 1 - \frac{e'_x \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - e'_x \right)}{\frac{3}{2} (\alpha + 1) - e_x'^2} \quad (14)$$

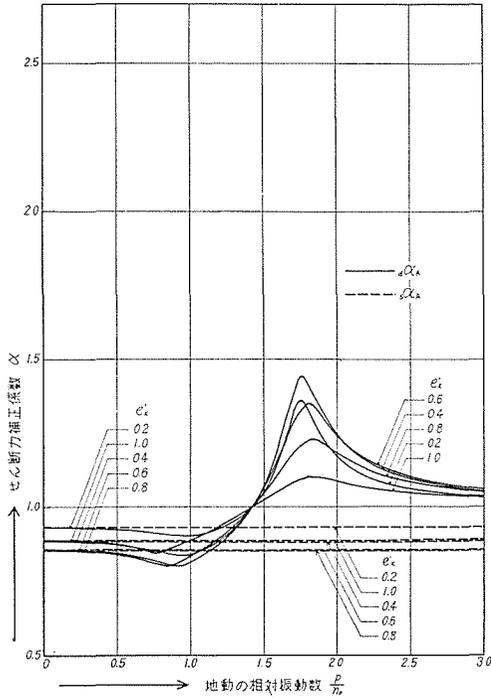
$$\text{B点} \quad {}_s\alpha_B = 1 + \frac{e'_x \left(\frac{\sqrt{6}}{2} + e'_x \right)}{\frac{3}{2} (\alpha + 1) - e_x'^2} \quad (15)$$

第6図、第7図に $\alpha=1$, $r_l=0.04/n$, $y_0=\sin pt$, $z_0=0$ の場合について計算した動的せん断力補正係数(実数)と静的せん断力係数(破線)を示す。また、偏心増加率は第8図、第9図の通りになる。図中線がきれている部分は動的補正係数に対応する静的補正係数を与える偏心がないことを意味する。

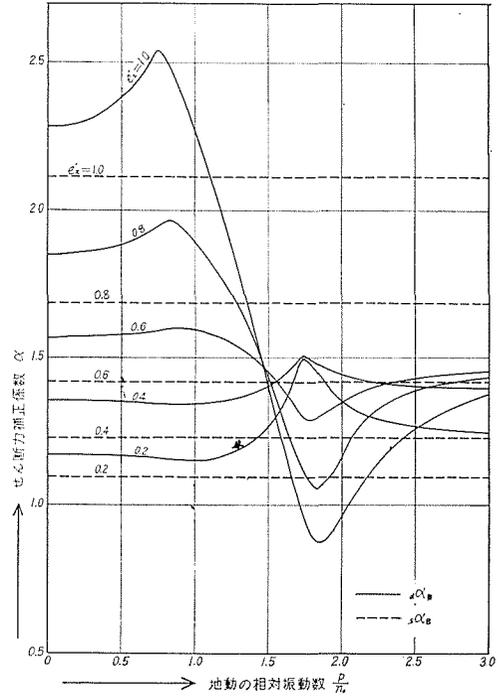
なお、参考までに、偏心がない場合の y 方向振動数 $n_0=\sqrt{R/M}$ を基準にして振動数比を示すと次表の通りで、1次振動型は並進が、2次振動型は回転が卓越している。

第2表 振動数比

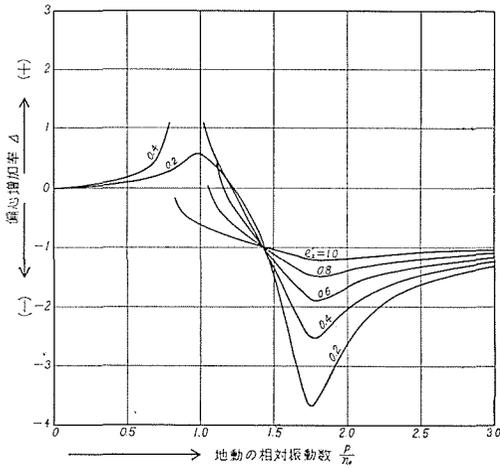
偏心比 e'	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1次 n/n_0	1.0000	0.9899	0.9607	0.9131	0.8482	0.7654
2次 $2n/n_0$	1.7320	1.7378	1.7541	1.7794	1.8112	1.8477



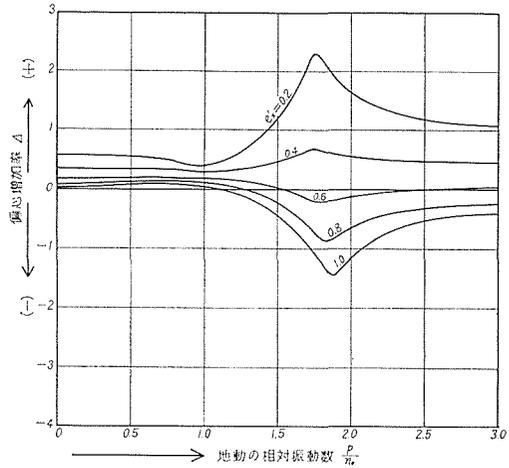
第6図 せん断力補正係数 (A点)



第7図 せん断力補正係数 (B点)



第8図 偏心増加率 (A点)



第9図 偏心増加率 (B点)

注 p : 正弦波地動の振動数

$n_0 = \sqrt{R/M}$: 偏心がない場合の建物の y 方向振動数 (振れない並進振動の場合)

計算結果の検討

(1) p/n_0 が小なるとき (すなわち地動の周期が建物の固有周期に較べて長い場合)

A 点 各々の偏心比について動的せん断力補正係数は静的せん断力補正係数とほぼ同じ値を示している。

B 点 動的せん断力補正係数は静的せん断力補正係数よりも大きな値を示しており、偏心が小さいほど偏心の増加率は大きく、 $e'_x=0.2$ の場合には 50% 以上となっている。

(2) p/n_0 が 1 次振動数比に近いとき (すなわち p/n_0 が 0.7~1.0 前後の場合)

A 点 いずれの偏心の場合にも、動的せん断力補正係数は静的せん断力補正係数よりも小さくなっており、 e'_x が 0.2 以外のときにはその値を静的設計法では求めれないほど小さい値を示している。

B 点 $e'_x=0.2, 0.4$ では p/n_0 が小なるときに較べ動的せん断力補正係数は小さくなっているが、静的せん断力補正係数よりは大きい。 $e'_x=0.6, 0.8, 1.0$ では逆に p/n_0 が小なるときに較べ動的せん断力補正係数は大きい。

(3) p/n_0 が 2 次振動数比に近いとき (すなわち p/n_0 が 1.7~1.9 前後の場合)

A 点 回転性の振動が強く現われるために動的せん断力補正係数は 1 以上の値となっており、偏心の増加率は e'_x が小さいほどその絶対値が大きくなっている。

B 点 $e'_x=0.2, 0.4$ では動的せん断力補正係数は静的せん断力補正係数よりも大きい、 $e'_x=0.6, 0.8, 1.0$ ではその逆となっており、特に $e'_x=1.0$ のときには 1 以下になっていることが注目される。

(4) p/n_0 が大きいとき (すなわち地動の周期が建物の固有周期に較べて短い場合)

A 点 全ての偏心について動的せん断力補正係数は 1 に近づく。

B 点 $e'_x=0.2, 0.4, 0.6$ の場合、動的せん断力補正係数は静的せん断力補正係数よりも大であるが、 $e'_x=0.8, 1.0$ の場合にはその逆である。また、偏心が小さいほど増加率は大きくなっており $e'_x=0.2$ では 1 を越えている。

(5) 以上の計算は 1 次の振動型が並進性の場合であるので、1 次の振動型が並進性である 1 階建の建物のついて考えてみる。1 階建の建物の固有周期は 0.1 秒前後であるので、地動の周期を 0.1 秒以上と考えれば、動的効果を考慮したせん断力補正係数を求めるには (1) で述べたことに注意すればよい。すなわち、A 点側の補正係数は静的偏心をそのまま用いて計算した結果を、B 点側では静的偏心の大きさによって決る増加率分だけ増した動的偏心を用いて計算した結果を用いればよい。

§ 4. 結

§ 3. の計算例の結果は、通状の場合 1 階建の建物では、動的偏心が静的偏心よりも大きくなることを示しており、設計に際してのせん断力補正係数の採り方を示唆している。実際にど

のような数値を採用すればよいかは、現在、模型実験・地震記録を用いての計算等で研究中である。

本研究にあたり協力を惜まなかった青木助手、長能助手に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 武藤 清：耐震設計シリーズ 4. 構造物の動的解析.
- 2) 梅村 魁：建築学大系 19 卷. 建築耐震論.
- 3) 武藤 清・高橋正元：建築学会論文集. No. 21, 23, 24, 一層建築物の立体振動.
- 4) 志賀敏男：建築学会研究報告. No. 20, 二層建築物の立体振動.
- 5) 志賀敏男：建築学会研究報告. No. 22, 27, 立体振動の模形実験.
- 6) 志賀敏男：建築学会研究報告. No. 24, L型平面形建築の強制立体振動.