

弾性地盤上の剛な建物の地震応答

山原 浩
広瀬 道孝

§ 1. はじめに

最近「動的解析」という言葉が流行っている。それは地震時に建物や構造物がどんな運動をし、各部にどんな力を受けるのか定量的に計算し、それらの力に見合うだけの構造的耐力を与えようとする設計法である。

同じ構造物であっても、良質の地盤に建つ場合と軟弱な地盤に建つ場合とでは、地震時の挙動は全く異なる。

また同一地盤であっても、構造物の固有周期や減衰性によって、構造物の受ける力や変形は大幅に変化する。

これを単に構造物の重量だけに比例した水平力として設計することに、抵抗を感じる人もあるであろう。

「動的解析」の第1歩は、実際の建物なり構造物を計算のできるような理論モデルに置きかえることである。

一般に剛構造と呼ばれる実際の建物では、地震時の挙動に地盤の影響を大きく受ける。その傾向は建物の剛性が高いほど著しくなる。

そこで自然地盤のモデル化が要求される。

本研究は建物を剛体とし、各種自由度を持ったモデルについて、地震応答の計算法を示したものである。

また、平面的にかなりの拡がりをもった建物では、入力として与える地震を、両端において同位相、同振幅とみなすのはどうも現実的ではない。

少なくとも位相のずれは覚悟しなくてはならず、その

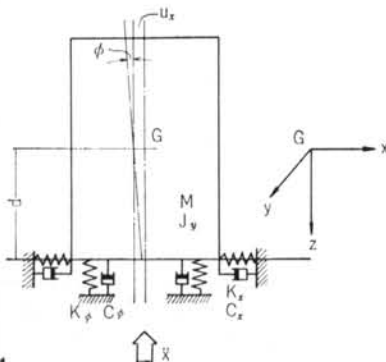


図-1

結果当然建物は振られることになる。

このような現象によって生ずる建物の振り振動について扱ってみた。

最近、原子力関係施設や高層アパート、橋脚や高炉のような土木構築物などでこの種の検討を要求される事例が増えてきた。

本研究はそのような要求に応え、できるだけ実際のモデルについて、地震応答の計算法と実例を示したものである。

§ 2. 水平一回転連成系

本例は最も一般的なもので、建物は水平と回転の2つの自由度を持って、2次元運動をする場合である。

建物が均質で円筒体とした場合は、本所報No. 6 P. 74に発表してある。

本章では、水平一回転連成系の一般的な場合として考えることにしよう。

運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{u}_x + C_x(\dot{u}_x - \dot{\phi}d) + K_x(u_x - \phi d) &= -M\ddot{x} \\ J_y\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} + K_\phi\phi - C_x(\dot{u}_x - \dot{\phi}d) - K_x(u_x - \phi d) &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、M：建物の質量、 J_y ：建物のy軸に関する慣性モーメント、 u_x ：水平変位、 ϕ ：回転角変位、 K_x ：地盤の水平ばね常数、 K_ϕ ：地盤の回転ばね常数、 C_x ：地盤の水平減衰係数、 C_ϕ ：地盤の回転減衰係数、 d ：建物の重心から接地面までの距離、 \ddot{x} ：入力地震加速度、である。

さて、

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \sqrt{\frac{K_x}{M}}, \quad \omega_\phi = \sqrt{\frac{K_\phi}{J_y}}, \quad \omega_\phi = \beta, \quad \frac{M}{J_y} = m, \\ \frac{C_x}{2\omega_x M} &= h_x, \quad \frac{C_\phi}{2\omega_\phi J_y} = h_\phi \end{aligned} \right\} (2)$$

とおけば、式(1)は

$$\begin{aligned} \ddot{u}_x + 2\omega_x h_x (\dot{u}_x - \dot{\phi}d) + \omega_x^2 (u_x - \phi d) &= -\ddot{x} \\ \ddot{\phi} + 2\beta\omega_x h_\phi \dot{\phi} + \beta^2\omega_x^2 \phi - 2m\omega_x h_x (\dot{u}_x - \dot{\phi}d)d - m\omega_x^2 (u_x - \phi d)d &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

加速度入力 $\ddot{x}(t)$ の時間軸を等分割する時間幅を τ とし、各変数の因子を次のようにデジタルな表現に置きかえる。
 $\ddot{u}_x \rightarrow \ddot{u}_{xn}$, $\ddot{u}_x \rightarrow \ddot{u}_{xn}$, $u_x \rightarrow u_{xn}$, $\ddot{\phi} \rightarrow \ddot{\phi}_n$, $\dot{\phi} \rightarrow \dot{\phi}_n$, $\phi \rightarrow \phi_n$

$$\omega_x \tau = \theta, \quad \omega_x^2 u_{xn} = U_{xn}, \quad \omega_x \dot{u}_{xn} = V_{xn}, \quad \ddot{u}_{xn} = A_{xn}, \quad \omega_x^2 \phi_n d = U_{\phi n}, \quad \omega_x \dot{\phi}_n d = V_{\phi n}, \quad \ddot{\phi}_n d = A_{\phi n} \quad (4)$$

式(4)を式(3)に代入し

$$\begin{aligned} A_{xn} + 2h_x V_{xn} + U_{xn} - U_{\phi n} - 2h_x V_{\phi n} &= -\ddot{x} \\ A_{\phi n} + (2\beta h_\phi + 2md^2 h_x) V_{\phi n} + (\beta^2 + md^2) U_{\phi n} - 2md^2 h_x V_{xn} - md^2 U_{xn} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

一方

$$\begin{aligned} V_{xn} &= V_{xn-1} + A_{xn-1} \frac{\theta}{2} + A_{xn} \frac{\theta}{2} & U_{xn} &= U_{xn-1} + V_{xn-1} \theta + A_{xn-1} \frac{\theta^2}{3} + A_{xn} \frac{\theta^2}{6} \\ V_{\phi n} &= V_{\phi n-1} + A_{\phi n-1} \frac{\theta}{2} + A_{\phi n} \frac{\theta}{2} & U_{\phi n} &= U_{\phi n-1} + V_{\phi n-1} \theta + A_{\phi n-1} \frac{\theta^2}{3} + A_{\phi n} \frac{\theta^2}{6} \end{aligned} \quad (6)$$

なる関係を式(5)に代入し、 A_{xn} , $A_{\phi n}$ について整理すると

$$A_{xn} = \begin{bmatrix} X_1 & -K_2 \\ X_2 & M_2 \\ K_1 & -K_2 \\ -M_1 & M_2 \end{bmatrix}, \quad A_{\phi n} = \begin{bmatrix} K_1 & X_1 \\ -M_1 & X_2 \\ K_1 & -K_2 \\ -M_1 & M_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

となる。

ただし

$$\begin{aligned} md^2 &= A, \quad \beta h_\phi + Ah_x = B, \quad \beta^2 + A = C, \\ 1 + h_x \theta + \frac{\theta^2}{6} &= K_1, \quad h_x \theta + \frac{\theta^2}{6} = K_2, \quad AK_2 = M_1, \\ 1 + B\theta + C \frac{\theta^2}{6} &= M_2, \quad 2h_x + \theta = P_1, \quad h_x \theta + \frac{\theta^2}{3} = P_2, \\ A = Q_1, \quad AP_1 &= Q_2, \quad AP_2 = Q_3, \quad C = Q_4, \quad 2B + C\theta = Q_5, \\ B\theta + C \frac{\theta^2}{3} &= Q_6 \quad \text{であり,} \\ X_1 &= -U_{xn-1} - P_1 V_{xn-1} - P_2 A_{xn-1} \\ &\quad + U_{\phi n-1} + P_1 V_{\phi n-1} + P_2 A_{\phi n-1} - \ddot{x} \\ X_2 &= Q_1 U_{xn-1} + Q_2 V_{xn-1} + Q_3 A_{xn-1} \\ &\quad - Q_4 U_{\phi n-1} - Q_5 V_{\phi n-1} - Q_6 A_{\phi n-1} \end{aligned}$$

である。

かくして、式(7)および式(6)を順次計算することによって、任意の地震入力 $\ddot{x}(t)$ に対する変位、速度および加速度の応答が計算される。

なお本計算における必要なデータは

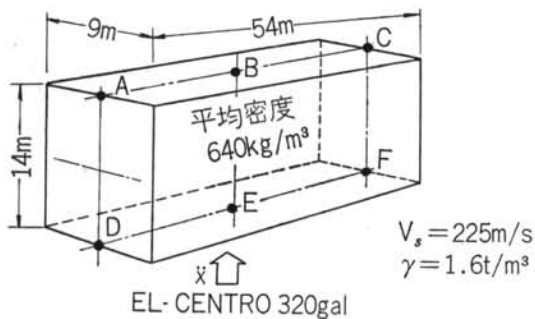


図-2

$M, J_y, K_x, K_\phi, C_x, C_\phi, d, x$

である。

図-3は図-2のようなモデルについて行なった試算例である注1)

もし建物が密度 ρ' 、半径 a なる均質な円筒体に置きかえられるとき、地盤の密度を ρ として

細高比 $k = d/a$

密度比 $n = \rho'/\rho$

水平の静的固有振動数 $\omega_x = 0.85 V_s / a \sqrt{nk}$

水平の減衰常数 $h_x = 0.29 / \sqrt{nk}$

回転の減衰常数 $h_\phi = 0.50 / \sqrt{nk(3+4k^2)}$

$\beta = 3.06 / \sqrt{3+4k^2}$

$md^2 = 12k^2 / (3+4k^2)$

となる。ただし V_s は横波の伝播速度である。

本結果を用い、図-4に示すような試験家屋について計算し、実測波形と比較したものを図-5に示した。

両者は極めて良く一致していることがわかる。

§ 3. 水平一回転一振り連成系

比較的細長い建物が、異種の基礎になっていたり、弾性的性質の異なる地盤をまたいで建っているような場合

注1) 図2のモデルに関する諸要素の計算

$$V_s = 225\text{m/s}, \quad \gamma = 1.6\text{t/m}^3, \quad \gamma' = 0.64\text{t/m}^3$$

$$\text{質量} : M = 8adl\gamma'/g = 4.40 \times 10^2 \text{t}^2/\text{m}$$

$$\text{慣性モーメント} : J_y = M(a^2 + d^2)/3 = 1.02 \times 10^4 \text{t}^2\text{m}$$

$$\text{等価半径} : (\text{水平動}) a_e = 2.25 \times 4.5 = 10.1\text{m}$$

$$(\text{回転動}) a_e = 1.50 \times 4.5 = 6.75\text{m}$$

$$\text{水平ばね常数} : K_x = 8a_e \gamma V_s^2 / (2-\nu)g = 3.81 \times 10^5 \text{t/m}$$

$$\text{回転ばね常数} : K_\phi = 8a_e^3 \gamma V_s^2 / 3(1-\nu)g = 9.02 \times 10^6 \text{tm}$$

$$\text{水平減衰係数} : C_x = \gamma V_s S / g = 1.80 \times 10^4 \text{ts/m}$$

$$\text{回転減衰係数} : C_\phi = \gamma V_s I_y / g = 2.08 \times 10^9 \text{tsm}$$

建物の重心と地盤反力による剛心が一致しないため、建物は振り運動の自由度を持つ。

この場合、建物は水平一回転一振りの3つの自由度を持つことになり、その理論モデルを図-6のように考えることができる。図-6において、ばねおよびダンパーの配置は考えている理論モデルとして適切ではないが、同図は水平一回転一振りの3つの自由度を持ち、それぞれ独立のばねおよびダンパーによって支持されていることを意味している。

運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{u}_x + C_x(\dot{u}_x - \dot{\phi}d) + K_x(u_x - \phi d) &= -M\ddot{x} \\ J_y\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} + K_\phi\phi - C_x(\dot{u}_x - \dot{\phi}d) - K_x(u_x - \phi d) &= 0 \\ J_z\ddot{\psi} + C_\psi\dot{\psi} + K_\psi\psi + C_D\dot{u}_x + K_D u_x &= 0 \end{aligned} \right\} (8)$$

ここで、 J_z ：建物のZ軸に関する慣性モーメント、 C_ϕ ：振りの減衰係数、 K_ϕ ：振りばね常数、 ψ ：振り角変位であり、その他の記号は§2と同じ意味を持つ。

また図-6より、 $C_x = C_{x1} + C_{x2}$ 、 $K_x = K_{x1} + K_{x2}$ 、 $C_D = C_{x1} - C_{x2}$ 、 $K_D = K_{x1} - K_{x2}$ （ただし $C_{x1} > C_{x2}$ 、 $K_{x1} > K_{x2}$ ）である。ここで

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \sqrt{\frac{K_x}{M}}, \quad \omega_\phi = \sqrt{\frac{K_\phi}{J_y}}, \quad \omega_\psi = \sqrt{\frac{K_\psi}{J_z}}, \quad \omega_D = \sqrt{\frac{K_D}{M}}, \quad \frac{\omega_\phi}{\omega_x} = \beta, \quad \frac{\omega_\psi}{\omega_x} = \gamma, \quad \frac{\omega_D}{\omega_x} = \delta, \quad \frac{C_x}{2\omega_x M} = h_x \\ \frac{C_\phi}{2\omega_\phi J_y} &= h_\phi, \quad \frac{C_\psi}{2\omega_\psi J_z} = h_\psi, \quad \frac{C_D}{2\omega_D M} = h_D, \quad \frac{M}{J_y} = m, \quad \frac{M}{J_z} = j \end{aligned} \right\} (9)$$

とおけば、式(8)は

$$\left. \begin{aligned} \ddot{u}_x + 2\omega_x h_x (\dot{u}_x - \dot{\phi}d) + \omega_x^2 (u_x - \phi d) &= -\ddot{x} \\ \ddot{\phi} + 2\beta\omega_x h_\phi \dot{\phi} + \beta^2\omega_x^2 \phi - 2m\omega_x h_x (\dot{u}_x - \dot{\phi}d) - m\omega_x^2 (u_x - \phi d) &= 0 \\ \ddot{\psi} + 2\gamma\omega_x h_\psi \dot{\psi} + \gamma^2\omega_x^2 \psi + 2j\delta\omega_x h_D \dot{u}_x + j\delta^2\omega_x^2 u_x &= 0 \end{aligned} \right\} (10)$$

となる。各変数をつぎのようにデジタルな表現に直し

$$\omega_x \tau = \theta, \quad \omega_x^2 u_{xn} = V_{xn}, \quad \omega_x \dot{u}_{xn} = \dot{V}_{xn}, \quad \ddot{u}_{xn} = A_{xn}, \quad \omega_x^2 \phi_n d = U_{\phi n}, \quad \omega_x \dot{\phi}_n d = V_{\phi n}, \quad \ddot{\phi}_n d = A_{\phi n}, \quad \omega_x^2 \psi_n l = U_{\psi n}, \quad \omega_x \dot{\psi}_n l = V_{\psi n}, \quad \ddot{\psi}_n l = A_{\psi n}$$

式(10)に代入すると

$$\left. \begin{aligned} A_{xn} + 2h_x V_{xn} + U_{xn} - 2h_x V_{\phi n} - U_{\phi n} &= -\ddot{x} \\ A_{\phi n} + (2\beta h_\phi + 2md^2 h_x) V_{\phi n} + (\beta^2 + md^2) U_{\phi n} - 2md^2 h_x V_{xn} - md^2 U_{xn} &= 0 \\ A_{\psi n} + 2\gamma h_\psi V_{\psi n} + \gamma^2 U_{\psi n} + 2jl^2 \delta h_D V_{xn} + jl^2 \delta^2 U_{xn} &= 0 \end{aligned} \right\} (11)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} V_{xn} &= V_{xn-1} + A_{xn-1} \frac{\theta}{2} + A_{xn} \frac{\theta}{2}, & U_{xn} &= U_{xn-1} + V_{xn-1} \theta + A_{xn-1} \frac{\theta^2}{3} + A_{xn} \frac{\theta^2}{6} \\ V_{\phi n} &= V_{\phi n-1} + A_{\phi n-1} \frac{\theta}{2} + A_{\phi n} \frac{\theta}{2}, & U_{\phi n} &= U_{\phi n-1} + V_{\phi n-1} \theta + A_{\phi n-1} \frac{\theta^2}{3} + A_{\phi n} \frac{\theta^2}{6} \\ V_{\psi n} &= V_{\psi n-1} + A_{\psi n-1} \frac{\theta}{2} + A_{\psi n} \frac{\theta}{2}, & U_{\psi n} &= U_{\psi n-1} + V_{\psi n-1} \theta + A_{\psi n-1} \frac{\theta^2}{3} + A_{\psi n} \frac{\theta^2}{6} \end{aligned} \right\} (12)$$

なる関係を式(11)に代入し、 A_{xn} 、 $A_{\phi n}$ 、 $A_{\psi n}$ について整理すると

$$A_{xn} = \begin{vmatrix} X_1 & -K_2 & 0 \\ X_2 & M_2 & 0 \\ X_3 & 0 & N_3 \end{vmatrix}, \quad A_{\phi n} = \begin{vmatrix} K_1 & X_1 & 0 \\ -M_1 & X_2 & 0 \\ N_1 & X_3 & N_3 \end{vmatrix}, \quad A_{\psi n} = \begin{vmatrix} K_1 & -K_2 & X_1 \\ -M_1 & M_2 & X_2 \\ N_1 & 0 & X_3 \end{vmatrix} \quad (13)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} md^2 &= A, \quad \beta h_\phi + A h_x = B, \quad \beta^2 + A = C, \quad jl^2 = D, \quad 1 + h_x \theta + \frac{\theta^2}{6} = K_1, \quad h_x \theta + \frac{\theta^2}{6} = K_2, \quad A K_2 = M_1, \quad 1 + B\theta + C \frac{\theta^2}{6} = M_2, \\ D(\delta^2 \frac{\theta^2}{6} + \delta h_D \theta) &= N_1, \quad 1 + \gamma h_\psi \theta + \gamma^2 \frac{\theta^2}{6} = N_3, \quad 2h_x \theta + \theta = P_1, \quad h_x \theta + \frac{\theta^2}{3} = P_2, \quad A = Q_1, \quad A P_1 = Q_2, \quad A P_2 = Q_3, \quad C = Q_4, \\ C\theta + 2B &= Q_5, \quad C \frac{\theta^2}{3} + B\theta = Q_6, \quad D\delta^2 = R_1, \quad R_1 \theta + 2D\delta h_D = R_2, \quad R_1 \frac{\theta^2}{3} + D\delta h_D \theta = R_3, \quad \gamma^2 = R_4, \quad 2\gamma h_\psi + \gamma^2 \theta = R_5, \\ \gamma h_\psi \theta + \gamma^2 \frac{\theta^2}{3} &= R_6 \quad \text{であり,} \end{aligned}$$

$$X_1 = -U_{xn-1} - P_1 V_{xn-1} - P_2 A_{xn-1} + U_{\phi n-1} + P_1 V_{\phi n-1} + P_2 A_{\phi n-1} - \ddot{x}$$

$$X_2 = Q_1 U_{xn-1} + Q_2 V_{xn-1} + Q_3 A_{xn-1} - Q_4 U_{\phi n-1} - Q_5 V_{\phi n-1} - Q_6 A_{\phi n-1}$$

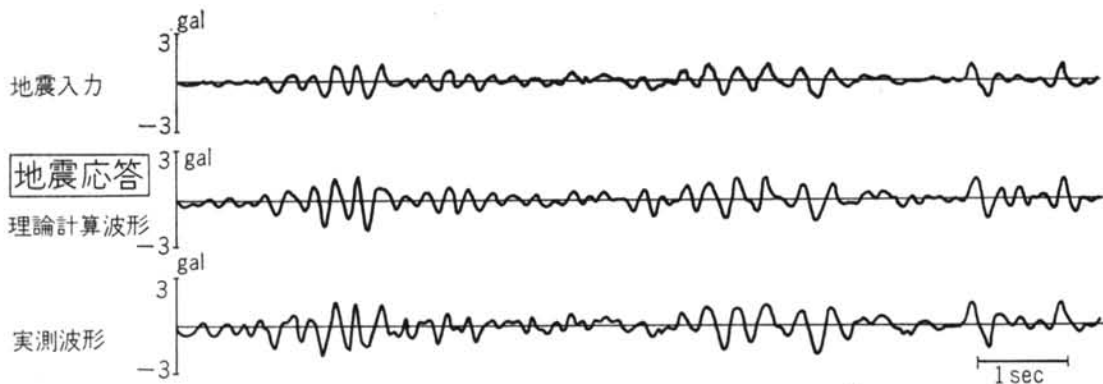


図-5

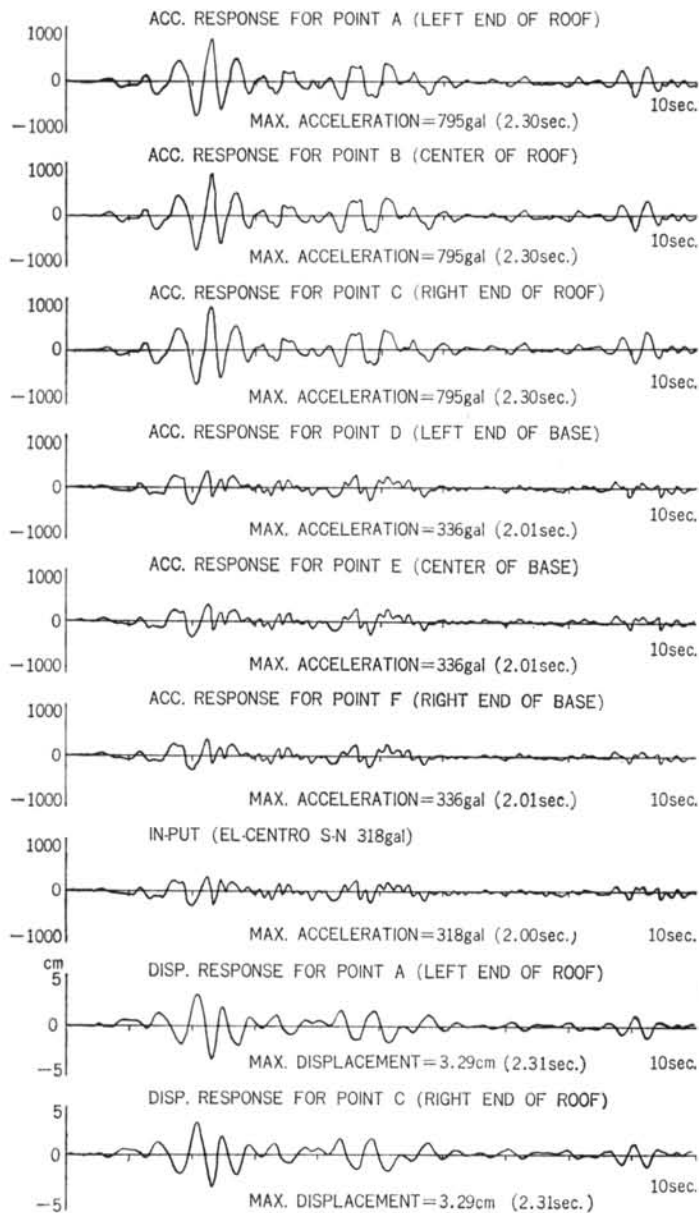


図-3

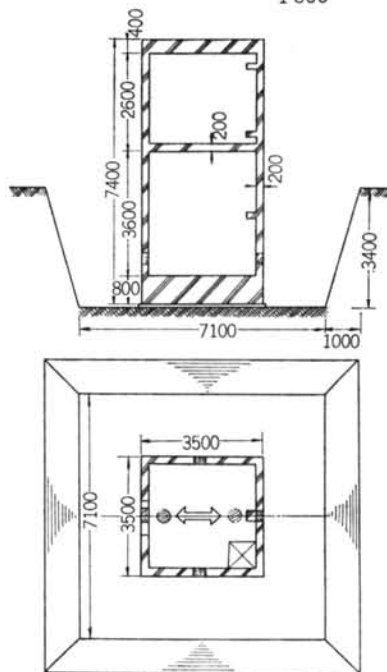


図-4

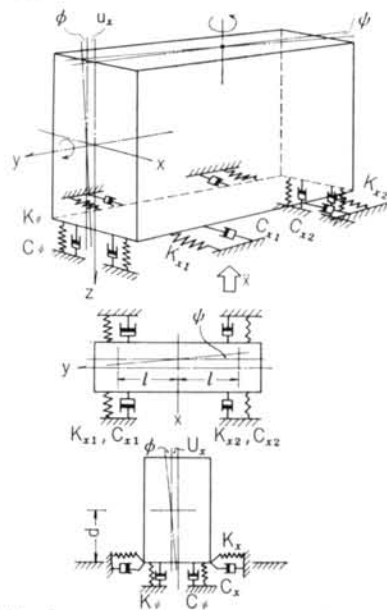


図-6

$$X_3 = -R_1 U_{xn-1} - R_2 V_{zn-1} - R_3 A_{xn-1} - R_4 U_{\phi n-1} \\ - R_5 V_{\phi n-1} - R_6 A_{\phi n-1}$$

である。

かくして、式(3)および式(2)を順次計算することによつて、任意の地震入力 $x(t)$ に対する応答が計算される。

なお、本計算に必要なデータは

$$M, J_y, J_z, C_1, C_2, C_\phi, C_\psi, K_1, K_2, K_\phi, K_\psi,$$

d, l, δ である。

本結果を用い、図-7に示すような建物について、EL-CENTRO (MAY. 8, 1940, 320gal) 地震による応答を試算し、その結果を図-8に示した^{注2)}。

一般に、均質と考えられる地盤であっても、地盤反力の特性は多少変化するであろう。そのため、地震入力を同位相等振幅としても建物は振られることになる。

このような建物の振りは、一般に設計時には考慮されていない。

特に振り変形に不安がある構造物、たとえばプレファブ建築等の耐震性の検討に、本結果が有効に利用されるものと思われる。

§ 4. 地動による振り強制力を受ける水平一回転一振り連成系

一般に建物の応答計算をするとき、建物が接する地盤がすべて同じ動きをすと仮定して行なわれている。

したがって、地震入力として1つの波形が用いられ、建物の1方向に関する応答が計算される。

注2) 図7のモデルに関する諸要素の計算

$$V_{s1} = 250 \text{ m/s}, V_{s2} = 200 \text{ m/s}, \gamma = 1.6 \text{ t/m}^3, \gamma' = 0.64 \text{ t/m}$$

$$\text{質量: (注1. と同じ)} M = 4.40 \times 10^5 \text{ t/m}$$

$$\text{慣性モーメント: (注1. と同じ)} J_y = 1.02 \times 10^4 \text{ t}^2 \text{ m}$$

$$J_z = M(9^2 + 54^2)/12 = 1.10 \times 10^5 \text{ t}^2 \text{ m}$$

等価半径:

$$\text{(水平動, 建物の半分)} a_e = 1.78 \times 4.5 = 8.01 \text{ m}$$

$$\text{(回転動, 建物全体)} a_e = 1.50 \times 4.5 = 6.75 \text{ m}$$

$$\text{(振り動, 建物全体)} a_e = 0.70 \times 27 = 18.9 \text{ m}$$

$$\text{水平ばね常数: } K_{x1} = 8a_e \gamma V_{s1}^2 / (2-\nu) g = 3.73 \times 10^6 \text{ t/m}$$

$$K_{x2} = 8a_e \gamma V_{s2}^2 / (2-\nu) g = 2.39 \times 10^6 \text{ t/m}$$

$$\text{回転ばね常数: } K_\phi = 8a_e^3 \gamma V_{s1}^2 / 3(1-\nu) g = 9.02 \times 10^6 \text{ t m}$$

$$\text{振りばね常数: } K_\psi = 8a_e^3 \gamma V_{s1}^2 / 3(1-\nu) g = 1.98 \times 10^4 \text{ t m}$$

(V_s は平均横波速度で、225 m/s とした)

$$\text{水平減衰係数: } C_{x1} = \gamma V_{s1} S / g = 9.90 \times 10^3 \text{ t/s m}$$

$$C_{x2} = \gamma V_{s2} S / g = 7.92 \times 10^3 \text{ t/s m}$$

$$\text{回転減衰係数: } C_\phi = \gamma V_p I_p / g = 2.08 \times 10^5 \text{ tms}$$

$$\text{振り減衰係数: } C_\psi = \gamma V_s I_p / g = 4.44 \times 10^6 \text{ tms}$$

しかし、建物には平面的にかなり大きな拡がりをもったものが多い。地震が波動による動きであることを考えれば、建物の両端部において地盤が全く同一の動きをするとは考え難い。

もし地表面を伝播する波動があり、その波長を100mとすれば、50m離れた2点では位相が180°ずれて振動することになる。

このような現象によって、実際の建物は地動そのものによって振られることになる。

本章では図-9に示すように、建物を剛体、地盤を均質とし、水平一回転一振りの3自由度を持つ系に、振り動を加えた地動による応答を考えることにした。図-9は図-6と同じように、建物が水平一回転一振りの3つの自由度を持ち、それぞれ独立にばねおよびダンパーによって支えられていることを意味している。

運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{u}_x + C_x(\dot{u}_x - \dot{\phi}d) + K_x(u_x - \phi d) &= -M\ddot{x}_G \\ J_y\ddot{\phi} + C_\phi\dot{\phi} + K_\phi\phi + C_x(\dot{u}_x + \dot{\phi}d) - K_x(u_x - \phi d)d &= 0 \\ J_z\ddot{\psi} + C_\psi\dot{\psi} + K_\psi\psi &= -J_z\frac{1}{l}\ddot{x}_D \end{aligned} \right\} (4)$$

ただし

$$\ddot{x}_G = \frac{\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2}{2}, \quad \ddot{x}_D = \frac{\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2}{2} \quad (5)$$

であり、 \ddot{x}_1 および \ddot{x}_2 はそれぞれ建物の両端部における地震加速度入力である。

その他の記号はすべて § 2. § 3. と同じである。

ここで

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \sqrt{K_x/M}, \quad \omega_\phi = \sqrt{K_\phi/J_y}, \quad \omega_\psi = \sqrt{K_\psi/J_z}, \quad \frac{\omega_\phi}{\omega_x} = \beta, \\ \frac{\omega_\phi}{\omega_x} &= \gamma, \quad \frac{M}{J_y} = m, \quad \frac{C_x}{2\omega_x M} = h_x, \quad \frac{C_\phi}{2\omega_\phi J_y} = h_\phi, \\ \frac{C_\psi}{2\omega_\psi J_z} &= h_\psi, \end{aligned} \right\} (6)$$

とおけば、式(4)は

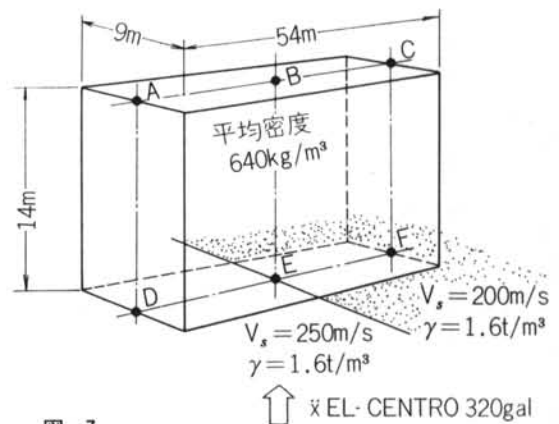


図-7

$$\left. \begin{aligned} \ddot{u}_x + 2\omega_x h_x (\dot{u}_x - \dot{\phi}d) + \omega_x^2 (u_x - \phi d) &= -\ddot{x}_G \\ \dot{\phi} + 2\beta\omega_x h_x \phi + \beta^2 \omega_x^2 \phi - 2m\omega_x h_x (\dot{u}_x - \dot{\phi}d) - m\omega_x^2 (u_x - \phi d) &= 0 \\ \ddot{\psi} + 2\gamma\omega_x h_x \dot{\psi} + \gamma^2 \omega_x^2 \psi &= -\ddot{x}_D/l \end{aligned} \right\} (17)$$

各変数をつぎのようにディジタルな表現に直し

$$\omega_x \tau = \theta, \quad \omega_x^2 u_{xn} = U_{xn}, \quad \omega_x \dot{u}_{xn} = V_{xn}, \quad \ddot{u}_{xn} = A_{xn}, \quad \omega_x^2 \phi_n d = U_{\phi n}, \quad \omega_x \dot{\phi}_n d = V_{\phi n}, \quad \ddot{\phi}_n d = A_{\phi n}, \quad \omega_x^2 \psi_n l = U_{\psi n}, \quad \omega_x \dot{\psi}_n l = V_{\psi n}, \quad \ddot{\psi}_n l = A_{\psi n} \quad \text{式(17)に代入すると}$$

$$A_{xn} + 2h_x V_{xn} + U_{xn} - 2h_x V_{\phi n} - U_{\phi n} = -\ddot{x}_G$$

$$A_{\phi n} + 2(\beta h_x + m d^2 h_x) V_{\phi n} + (\beta^2 + m d^2) U_{\phi n} - 2m d^2 h_x V_{xn} - m d^2 U_{xn} = 0$$

$$A_{\psi n} + 2\gamma h_x V_{\psi n} + \gamma^2 U_{\psi n} = -\ddot{x}_D$$

(18)

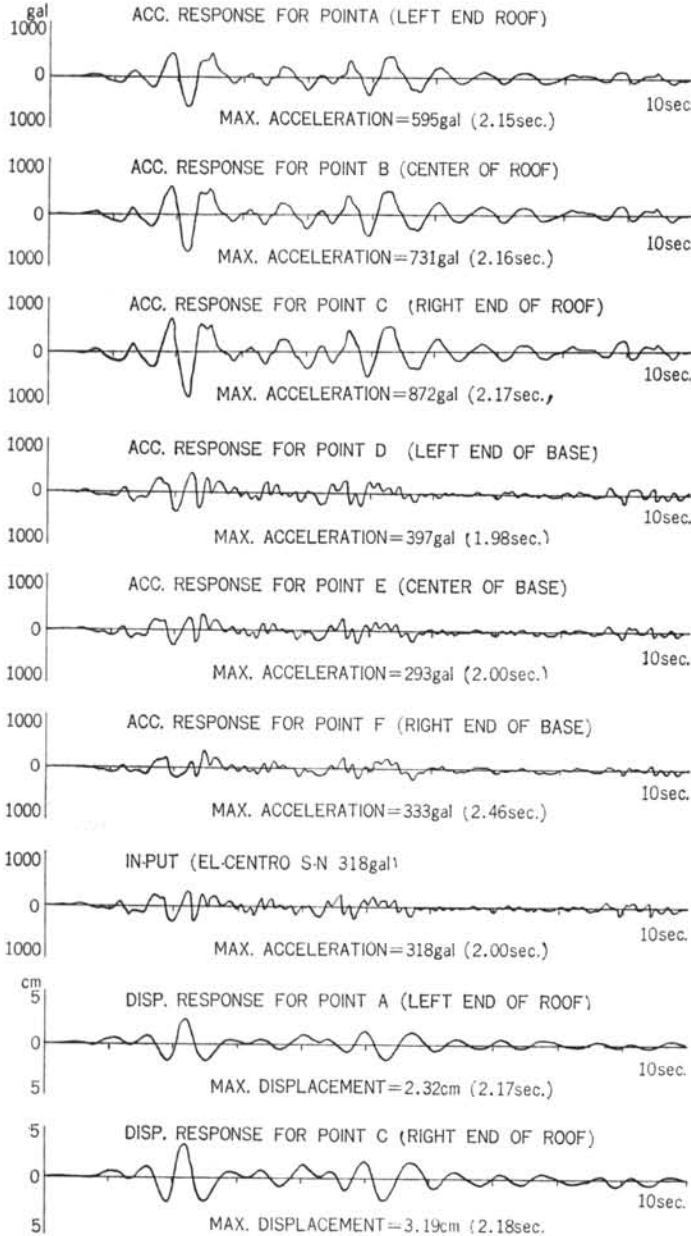


図-8

となる。ここで式(12)の関係を代入し、 A_{xn} , $A_{\phi n}$, $A_{\psi n}$ について整理すると

$$A_{xn} = \begin{vmatrix} X_1 & -K_2 & 0 \\ X_2 & M_2 & 0 \\ X_3 & 0 & N_3 \\ K_1 & -K_2 & 0 \\ -M_1 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \end{vmatrix}$$

$$A_{\phi n} = \begin{vmatrix} K_1 & X_1 & 0 \\ -M_1 & X_2 & 0 \\ 0 & X_3 & N^3 \\ K_1 & -K_2 & 0 \\ -M_1 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \end{vmatrix}$$

$$A_{\psi n} = \begin{vmatrix} K_1 & -K_2 & X_1 \\ -M_1 & M_2 & X_2 \\ 0 & 0 & X_3 \\ K_1 & -K_2 & 0 \\ -M_1 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 \end{vmatrix}$$

となる。ただし

$$\begin{aligned} m d_2 &= A, \quad \beta h_x - A h_x = B, \quad \beta^2 + A = C, \\ 1 + h_x \theta + \frac{\theta^2}{6} &= K_1, \quad h_x \theta + \frac{\theta^2}{6} = K_2, \quad A K_2 \\ &= M_1, \quad 1 + B \theta + C \frac{\theta^2}{6} = M_2, \quad 1 + \gamma h_x \theta \\ &+ \gamma^2 \frac{\theta^2}{6} = N_3, \quad 2h_x + \theta = P_1, \quad h_x \theta + \frac{\theta^2}{3} = P_2 \\ A &= Q_1, \quad A P_1 = Q_2, \quad A P_2 = Q_3, \quad C = Q_4. \end{aligned}$$

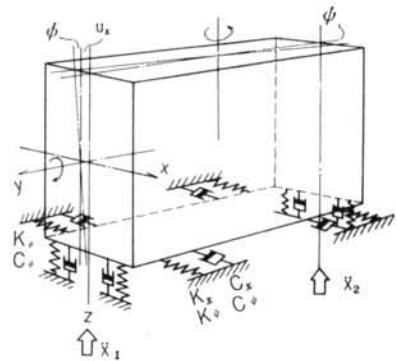


図-9

$$C\theta + 2B = Q_5, \quad C \frac{\theta^2}{3} + B\theta = Q_6, \quad \gamma^2 = R_1, \quad \gamma^2\theta + 2\gamma h_\phi = R_2, \\ \gamma^2 \frac{\theta^2}{3} + \gamma h_\phi \theta = R_3$$

であり、

$$X_1 = -U_{xn-1} - P_1 V_{xn-1} - P_2 A_{xn-1} \\ + U_{\phi n-1} + P_1 V_{\phi n-1} + P_2 A_{\phi n-1} - \ddot{x}_G \\ X_2 = Q_1 U_{xn-1} + Q_2 V_{xn-1} + Q_3 A_{xn-1} \\ - Q_4 U_{\phi n-1} - Q_5 V_{\phi n-1} - Q_6 A_{\phi n-1} \\ X_3 = -R_1 U_{\phi n-1} - R_2 V_{\phi n-1} - R_3 A_{\phi n-1} - \ddot{x}_D$$

である。

本計算に必要なデータは

$M, J_y, J_z, K_x, K_\phi, K_\psi, C_x, C_\phi, C_\psi, a, d, l, \ddot{x}_1, \ddot{x}_2$ である。

本結果を用い、図-10に示すモデルについて試算した結果を図-11および図-12に示した^{注3)}。

本計算では、地震入力として \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 をそれぞれ独立に与えることができる。

しかし同一地盤では地震波の周波数成分は極めて類似するのであるから、 \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 は同一地震波を位相をずらして与えるのが実際的である。

図-11は \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 に同一地震を用い、 \ddot{x}_2 は \ddot{x}_1 を 0.1 sec. だけ遅らせた場合である。

図-12は \ddot{x}_2 を地震波の卓越周期の $1/2$ すなわち 0.2sec. だけ遅らせて作用させたものである。

§ 5. 3種の理論モデルに関する応答計算結果の比較

前章までに、(1)水平一回転の2自由度連成系、(2)水平一回転一振りの3自由度連成系について重心と地盤反力による剛心が一致しない場合、(3)同じく3自由度連成系に地動による振り強制力を受ける場合、の3種の理論モデルについて地震応答の計算法を示した。

そして、それぞれの場合について同一建物、同一地盤条件、同一地震による応答を試算してみた。

ただし(2)の場合は、2つの地層にまたがっているが、その平均値が(1)および(3)の地層と等しくなるようにしてある。

本章において、それらの結果を比較することにして。

まず図-3は図-2に示すような剛な建物の、水平一回転2自由度連成系とした場合の応答波形である。

振り動の成分はなく、屋上の最大加速度は795galに達している。

これと全く同じ建物一地盤の条件で、図-10に示すように基礎の両端に加える地震入力を、0.1sec. だけ位相をずらして与えた場合の応答を図-11に示してある。

地動による振り強制力を受けるので、建物は当然振られることになり、各点の応答特性は甚だ複雑になる。

本例では、最大加速度は屋上のA点(最初に地震波が到来した側)に生じ、その値は892galで(1)の場合に比べて12%増えている。

しかし全般的に建物に対する短辺方向の地動が相殺されることになるので、建物の水平動および回転動は(1)の場合に比べて小さくなり、応答値そのものも減少する。

建物が振られるということで最も厳しい条件は、 \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 が地震波の卓越周期の $1/2$ だけ位相がずれた場合と想像される。

本試算例に使用した地震波の卓越周期はほぼ 0.4sec. であるので、その半分の 0.2sec. だけ位相をずらした場

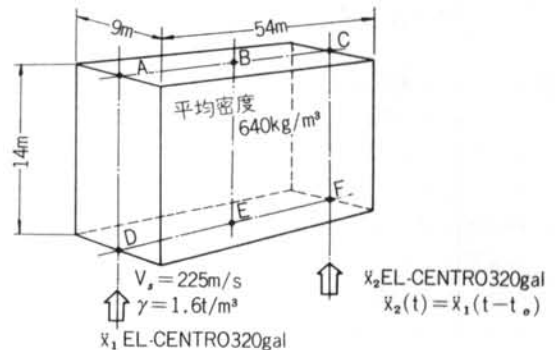


図-10

注3) 図10のモデルに関する諸要素の計算

$$V_s = 225 \text{ m/s}, \quad \gamma = 1.6 \text{ t/m}^3, \quad \gamma' = 0.64 \text{ t/m}^3$$

$$\text{質量: (注1.と同じ)} \quad M = 4.40 \times 10^6 \text{ ts/m}$$

$$\text{慣性モーメント: (注1.と同じ)} \quad J_y = 1.02 \times 10^4 \text{ ts}^2 \text{ m}$$

$$\text{(注2.と同じ)} \quad J_z = 1.10 \times 10^5 \text{ ts}^2 \text{ m}$$

等価半径:

$$\text{(水平動)} \quad a_e = 2.25 \times 4.50 = 10.1 \text{ m}$$

$$\text{(回転動)} \quad a_e = 1.50 \times 4.50 = 6.75 \text{ m}$$

$$\text{(振り動)} \quad a_e = 0.70 \times 27 = 18.9 \text{ m}$$

$$\text{水平ばね常数: (注1.と同じ)} \quad K_x = 3.81 \times 10^5 \text{ t/m}$$

$$\text{回転ばね常数: (注1.と同じ)} \quad K_\phi = 9.02 \times 10^6 \text{ tm}$$

$$\text{振りばね常数: (注2.と同じ)} \quad K_\psi = 1.98 \times 10^8 \text{ tm}$$

$$\text{水平減衰係数: (注1.と同じ)} \quad C_x = 1.80 \times 10^4 \text{ t/s/m}$$

$$\text{回転減衰係数: (注1.と同じ)} \quad C_\phi = 2.08 \times 10^5 \text{ tms}$$

$$\text{振り減衰係数: (注2.と同じ)} \quad C_\psi = 4.44 \times 10^6 \text{ tms}$$

合の応答を図-12に示した。

建物に対する水平動成分は、大部分が相殺されることになり、水平動および回転動は著しく減少している。その反面振り動が著しく、建物の中央部より両端部の方が大きく動いている。

建物-地盤系の振りの固有振動数が高いため、比較的短周期の波形が顕著に現われている。

屋上の最大加速度は 419gal. で(1)の場合の53%に減っているが、建物自体の受ける振り応力は最大になる。

つぎに屋上の変位応答を比較すると、最大は(1)の場合で3.29cm, 0.1sec. の位相遅れの場合が2.52cm, 0.2sec. の位相遅れの場合が1.07cmと、かなり小さくなっている。

つぎに図-7に示すように、3自由度系の重心と地盤反力による剛心が一致しないため、単一地震入力によって建物が振られる場合の応答を図-8に示した。

地盤条件が前記2つの場合と比べて、平均の V_s 値を等しくするようにしてあるが、必ずしも同一ではない。したがって直接の比較は意味がないかもしれないが、図-8より、建物の固有周期がやや伸び、最大加速度は872galと(1)の場合より約10%大きくなっている。

以上、同一建物について様々な理論モデルを想定し、それぞれの地震応答を調べてみた。

その結果、地盤の不均質性に起因する振り動や、地震波到来の時間的遅れによる振り動を考えると、建物の応答結果にかなり差異を生ずることがわかった。

$$\left. \begin{aligned} M_1 \ddot{u}_{1x} - C_{1x}(\dot{u}_{1x} - \dot{\phi}_1 d) + K_{1x}(u_{1x} - \phi_1 d) + K_j(u_{1x} - u_{2x}) &= -M_1 \ddot{x}_1 \\ J_1 \ddot{\phi}_1 + C_{1\phi} \dot{\phi}_1 + K_{1\phi} \phi_1 - C_{1x}(\dot{u}_{1x} - \dot{\phi}_1 d) - K_{1x}(u_{1x} - \phi_1 d) d &= 0 \\ M_2 \ddot{u}_{2x} + C_{2x}(\dot{u}_{2x} - \dot{\phi}_2 d) + K_{2x}(u_{2x} - \phi_2 d) - K_j(u_{1x} - u_{2x}) &= -M_2 \ddot{x}_2 \\ J_2 \ddot{\phi}_2 + C_{2\phi} \dot{\phi}_2 + K_{2\phi} \phi_2 - C_{2x}(\dot{u}_{2x} - \dot{\phi}_2 d) - K_{2x}(u_{2x} - \phi_2 d) d &= 0 \end{aligned} \right\} (20)$$

ここで、1. および2. なるサフィックスはそれぞれ建物1. および建物2. を意味する。 K_j は連結梁の水平ばね常数であり、その他の記号は前章までと同じ意味を持っている。

ここで

$$\left. \begin{aligned} \omega_{1x} &= \sqrt{K_{1x}/M_1}, \quad \omega_{1\phi} = \sqrt{K_{1\phi}/J_1}, \quad \beta_1 = \frac{K_j}{K_{1x}}, \quad \gamma_1 = \frac{\omega_{1\phi}}{\omega_{1x}}, \quad m_1 = \frac{M_1}{J_1}, \quad h_{1x} = \frac{C_{1x}}{2\omega_{1x}M_1}, \quad h_{1\phi} = \frac{C_{1\phi}}{2\omega_{1\phi}J_1}, \quad \omega_{2x} = \sqrt{K_{2x}/M_2}, \\ \omega_{2\phi} &= \sqrt{K_{2\phi}/J_2}, \quad \beta_2 = \frac{K_j}{K_{2x}}, \quad \gamma_2 = \frac{\omega_{2\phi}}{\omega_{2x}}, \quad m_2 = \frac{M_2}{J_2}, \quad \delta = \frac{\omega_{2x}}{\omega_{1x}}, \quad h_{2x} = \frac{C_{2x}}{2\omega_{2x}M_2}, \quad h_{2\phi} = \frac{C_{2\phi}}{2\omega_{2\phi}J_2} \end{aligned} \right\} (21)$$

とおけば、式(20)は

$$\left. \begin{aligned} \ddot{u}_{1x} + 2\omega_{1x}h_{1x}(\dot{u}_{1x} - \dot{\phi}_1 d) + \omega_{1x}^2(u_{1x} - \phi_1 d) + \beta_1\omega_{1x}^2(u_{1x} - u_{2x}) &= -\ddot{x}_1 \\ \ddot{\phi}_1 + 2\gamma_1\omega_{1x}h_{1\phi}\dot{\phi}_1 + \gamma_1^2\omega_{1x}^2\phi_1 - 2m_1\omega_{1x}h_{1x}(\dot{u}_{1x} - \dot{\phi}_1 d) - m_1\omega_{1x}^2(u_{1x} - \phi_1 d) d &= 0 \\ \ddot{u}_{2x} + 2\omega_{2x}h_{2x}(\dot{u}_{2x} - \dot{\phi}_2 d) + \omega_{2x}^2(u_{2x} - \phi_2 d) - \beta_2\omega_{2x}^2(u_{1x} - u_{2x}) &= -\ddot{x}_2 \\ \ddot{\phi}_2 + 2\gamma_2\omega_{2x}h_{2\phi}\dot{\phi}_2 + \gamma_2^2\omega_{2x}^2\phi_2 - 2m_2\omega_{2x}h_{2x}(\dot{u}_{2x} - \dot{\phi}_2 d) - m_2\omega_{2x}^2(u_{2x} - \phi_2 d) d &= 0 \end{aligned} \right\} (22)$$

各変数をデジタルな表現に直し、つぎのように置かえる。

$$\begin{aligned} \omega_{1x}\tau &= \theta, \quad \omega_{1x}^2 u_{1xn} = U_{1xn}, \quad \omega_{1x} \dot{u}_{1xn} = V_{1xn}, \quad \ddot{u}_{1xn} = A_{1xn}, \\ \omega_{1x}^2 \phi_{1n} d &= U_{1\phi n}, \quad \omega_{1x} \dot{\phi}_{1n} d = V_{1\phi n}, \quad \ddot{\phi}_{1n} d = A_{1\phi n}, \quad \omega_{1x}^2 u_{2xn} = U_{2xn}, \\ \omega_{1x} \dot{u}_{2xn} &= V_{2xn}, \quad \ddot{u}_{2xn} = A_{2xn}, \quad \omega_{1x}^2 \phi_{2n} d = U_{2\phi n}, \quad \omega_{1x} \dot{\phi}_{2n} d = V_{2\phi n}, \quad \ddot{\phi}_{2n} d = A_{2\phi n} \end{aligned}$$

実際にこれらの現象や効果は無視できないものであり、建物を単に直角2方向に関する2次元問題として応答解析するだけでは、場合によっては不十分であるといえよう。

構造物によっては構造物全体の振れに案外弱いものもあり、地震によって構造物は必ず振られることを考えれば、この種の検討も時には必要になるであろう。

§ 6. 任意の剛性を持つ部材で連結された2つの剛な建物による連成系

本章のモデルは、異種基礎に建つRC造アパートの地震時の挙動を検討する資料とするため作製したものである。

しかし実際にこの種のモデルは、橋梁やつなぎ廊下などに類似したものが多い。そこで参考までに計算方法を示すことにした。

考える理論モデルを図-13に示した。すなわち水平-回転の2つの自由度を持つ2つの剛な建物の重心間を、水平に K_j なるばね常数を持つ部材で連結してある。

地震入力は、2つの建物にそれぞれ独立に与えることにした。なお、 y 軸方向の運動については考えないことにした。

運動方程式は

これらを式(23)に代入し整理すると、

$$\begin{aligned}
 &A_{1xn} + 2h_{1x}V_{1xn} + (1 + \beta_1)U_{1xn} - \beta_1U_{2xn} - 2h_{1x}V_{1\phi n} - U_{1\phi n} = -\dot{x}_1 \\
 &A_{1\phi n} + (2\gamma_1h_{1\phi} + 2m_1h_{1x}d^2)V_{1\phi n} + (\gamma_1^2 + m_1d^2)U_{1\phi n} - 2m_1h_{1x}d^2V_{1xn} - m_1d^2U_{1xn} = 0 \\
 &A_{2xn} + 2\delta h_{2n}V_{2xn} + \delta^2(1 + \beta_2)U_{2xn} - \delta^2\beta_2U_{1xn} - 2\delta h_{2x}V_{2\phi n} - \delta^2U_{2\phi n} = -\dot{x}_2 \\
 &A_{2\phi n} + (2\delta\gamma_2h_{2\phi} + 2m_2\delta h_{2x}d^2)V_{2\phi n} + (\delta^2\gamma_2^2 + \delta^2m_2d^2)U_{2\phi n} - 2m_2\delta h_{2x}d^2V_{2xn} - m_2\delta^2d^2U_{2xn} = 0
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

一方

$$\begin{aligned}
 &V_{1xn} = V_{1xn-1} + \frac{\theta}{2}(A_{1xn-1} + A_{1xn}), \quad V_{1\phi n} = V_{1\phi n-1} + \frac{\theta}{2}(A_{1\phi n-1} + A_{1\phi n}) \\
 &U_{1xn} = U_{1xn-1} + V_{1xn-1}\theta + \frac{\theta^2}{3}A_{1xn-1} + \frac{\theta^2}{6}A_{1xn} \\
 &U_{1\phi n} = U_{1\phi n-1} + V_{1\phi n-1}\theta + \frac{\theta^2}{3}A_{1\phi n-1} + \frac{\theta^2}{6}A_{1\phi n}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

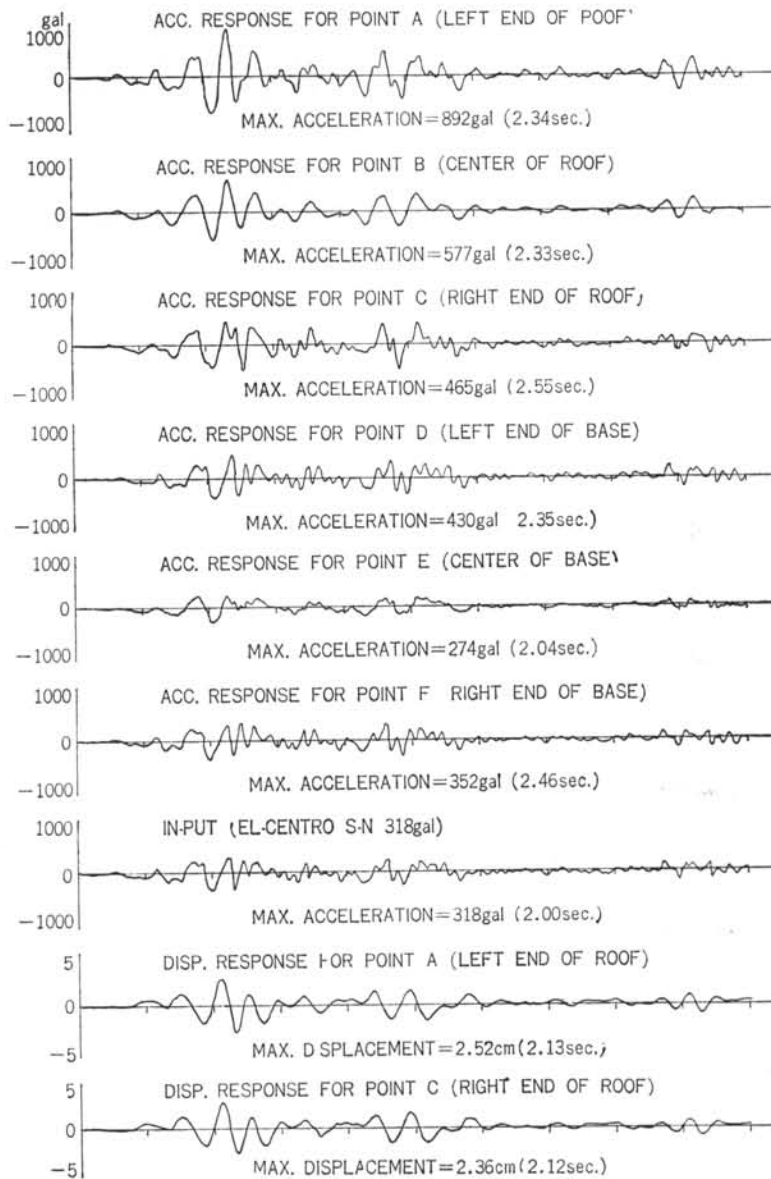
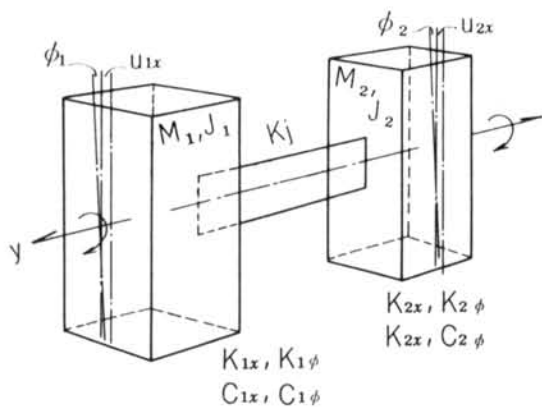


図-11



なる関係を式(2)に代入し、 A_{1xn} , $A_{1\phi n}$, A_{2xn} , $A_{2\phi n}$ について整理すると

$$\left. \begin{aligned}
 A_{1xn} &= \frac{\begin{bmatrix} X_1 - K_2 - K_3 & 0 \\ X_2 & L_2 & 0 & 0 \\ X_3 & 0 & T_3 & -T_4 \\ X_4 & 0 & -N_3 & N_4 \end{bmatrix}}{d}, & A_{1\phi n} &= \frac{\begin{bmatrix} K_1 & X_1 - K_3 & 0 \\ -L_1 & X_2 & 0 & 0 \\ -T_1 & X_3 & T_3 & -T_4 \\ 0 & X_4 & -N_3 & N_4 \end{bmatrix}}{d} \\
 A_{2xn} &= \frac{\begin{bmatrix} K_1 - K_2 & X_1 & 0 \\ -L_1 & L_2 & X_2 & 0 \\ -T_1 & 0 & X_3 & -T_4 \\ 0 & 0 & X_4 & N_4 \end{bmatrix}}{d}, & A_{2\phi n} &= \frac{\begin{bmatrix} K_1 - K_2 - K_3 & X_1 \\ -L_1 & L_2 & 0 & X_2 \\ -T_1 & 0 & T_3 & X_3 \\ 0 & 0 & -N_3 & X_4 \end{bmatrix}}{d}
 \end{aligned} \right\} (2)$$

ただし

図-13

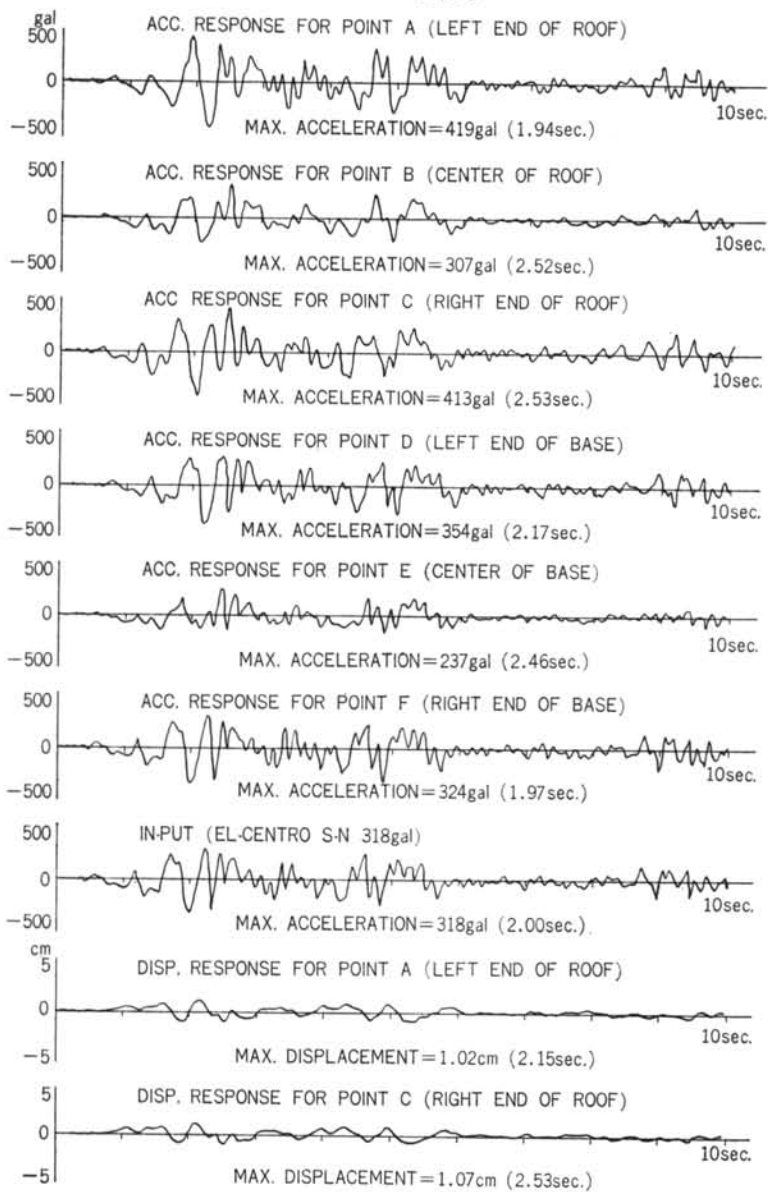


図-12

$$d = \begin{vmatrix} K_1 & -K_2 & -K_3 & 0 \\ -L_1 & L_2 & 0 & 0 \\ -T_1 & 0 & T_3 & -T_4 \\ 0 & 0 & -N_3 & N_4 \end{vmatrix}$$

である。またマトリックスの各素子は

$$m_1 d^2 = A, \quad m_2 d^2 = B, \quad 1 + \beta_1 = C_1, \quad 1 + \beta_2 = D, \quad \gamma_1^2 + A = E, \quad \gamma_2^2 + B = F, \quad \gamma_1 h_{1\phi} + A h_{1x} = G, \quad \delta h_{2x} = H, \quad \gamma_2 h_{2\phi} + B h_{2x} = I$$

$$P_1 = C, \quad P_2 = 2h_{1x} + C\theta, \quad P_3 = \theta(h_{1x} + \frac{\theta}{3}C), \quad P_4 = \theta + 2h_{1x},$$

$$P_5 = \theta(h_{1x} + \frac{\theta}{3}), \quad P_6 = \beta_1, \quad P_7 = \beta_1\theta, \quad P_8 = \beta_1\frac{\theta^2}{3},$$

$$Q_1 = A, \quad Q_2 = AP_4, \quad Q_3 = AP_5, \quad Q_4 = E, \quad Q_5 = E\theta + 2G, \quad \text{図-14}$$

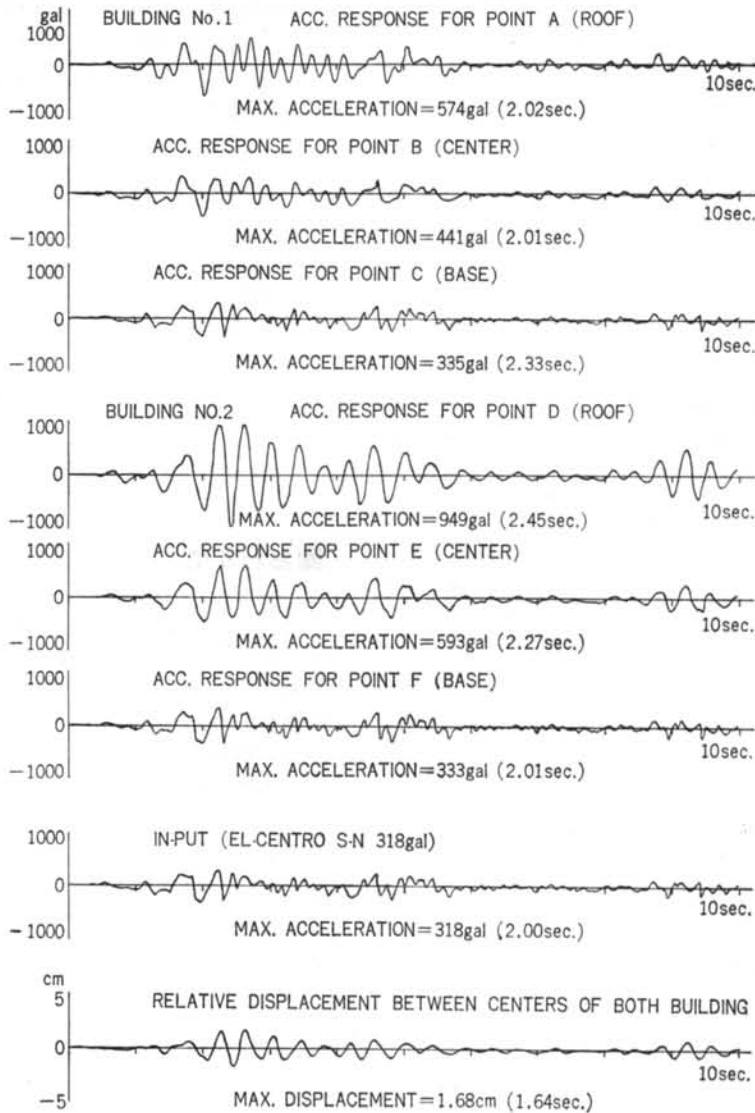
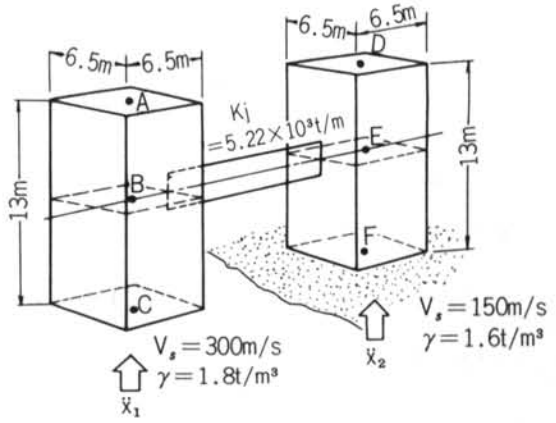


図-15

$$Q_6 = \theta(E\frac{\theta}{3} + G)$$

$$R_1 = \delta^2 \beta_2, \quad R_2 = R_1 \theta, \quad R_3 = R_1 \frac{\theta^2}{3}, \quad R_4 = \delta^2 D, \quad R_5 = R_4 \theta \\ + 2H, \quad R_6 = R_4 \frac{\theta^2}{3} + H\theta, \quad R_7 = \delta^2, \quad R_8 = R_7 \theta + 2H, \quad R_9 \\ = R_7 \frac{\theta^2}{3} + H\theta$$

$$S_1 = B\delta^2, \quad S_2 = S_1 \theta + 2BH, \quad S_3 = S_1 \frac{\theta^2}{3} + BH\theta, \quad S_4 = \delta^2 F,$$

$$S_5 = S_4 \theta + 2\delta I, \quad S_6 = S_4 \frac{\theta^2}{3} + \delta I \theta$$

$$K_1 = 1 + h_{1x} \theta + C \frac{\theta^2}{6}, \quad K_2 = h_{1x} \theta + \frac{\theta^2}{6}, \quad K_3 = \beta_1 \frac{\theta^2}{6}$$

$$L_1 = AK_2, \quad L_2 = I + G\theta + E \frac{\theta^2}{6}, \quad T_1 = \delta^2 \beta_2 \frac{\theta^2}{6}, \quad T_3 = I + H\theta \\ + \delta^2 D \frac{\theta^2}{6}, \quad T_4 = \delta \theta (h_{2x} + \delta \frac{\theta}{6}), \quad N_3 = BT_4, \quad N_4 = 1 + \delta I \theta \\ + \delta^2 F \frac{\theta^2}{6}$$

であり、

$$X_1 = -P_1 U_{1xn-1} - P_2 V_{1xn-1} - P_3 A_{1xn-1}$$

$$+ U_{1\phi n-1} + P_4 V_{1\phi n-1} + P_5 A_{1\phi n-1} \\ + P_6 U_{2xn-1} + P_7 V_{2xn-1} + P_8 A_{2xn-1} - \ddot{x}_1$$

$$X_2 = Q_1 U_{1xn-1} + Q_2 V_{1xn-1} \\ + Q_3 A_{1xn-1} - Q_4 U_{1\phi n-1} - Q_5 V_{1\phi n-1} - Q_6 A_{1\phi n-1}$$

$$X_3 = R_1 U_{1xn-1} + R_2 V_{1xn-1} + R_3 A_{1xn-1} \\ - R_4 U_{2xn-1} - R_5 V_{2xn-1} - R_6 A_{2xn-1} \\ + R_7 U_{2\phi n-1} + R_8 V_{2\phi n-1} + R_9 A_{2\phi n-1} - \ddot{x}_2$$

$$X_4 = S_1 U_{2xn-1} + S_2 V_{2xn-1} + S_3 A_{2xn-1} \\ - S_4 U_{2\phi n-1} - S_5 V_{2\phi n-1} - S_6 A_{2\phi n-1}$$

である。

かくして式(25)および式(24)を順次計算することによって任意の地動 \ddot{x}_1, \ddot{x}_2 に対する応答が計算される。

本結果を使い1例として図-14に示すようなモデルについて数値計算を行ないその結果を図-15に示した注4)。

なお、本例は異種基礎に建つRC造アパートの耐震性の検討に使用したものである。

図-15より、堅い地盤に建つ側 (Building No. 1) は短周期で振動し、軟かい地盤に建つ側 (Building No. 2) はかなり長い周期の応答を示している。加速度および変位は後者の方がはるかに大きく、両者の重心間の相対変位を同図の最下段に示しておいた。

この結果、相対変位の最大は16.8mmであることがわかる。

なお、本例は2つの建物に同位相の地震入力を与えた場合である。

注4) 図14のモデルに関する諸要素の計算

[モデル1.] $V_g = 300m/s, \gamma = 1.8t/m^3, \gamma' = 0.64t/m^3$
等価半径 $a_e = 0.55 \sqrt{S} = 35.8m$

質量 $M = 8a^2 d \gamma' / g = 35.9ts^2/m$

慣性モーメント $J_1 = M(a^2 + d^2) / 3 = 885ts^2/m$

水平ばね常数 $K_{1x} = 8a_e \gamma V_g^2 / (2-\nu)g = 2.71 \times 10^5 t/m$

回転ばね常数 $K_{1\phi} = 8a_e^3 \gamma V_g^2 / 3(1-\nu)g = 2.70 \times 10^6 tm$

水平減衰係数 $C_{1x} = \gamma V_g S / g = 2.33 \times 10^3 ts/m$

回転減衰係数 $C_{1\phi} = \gamma V_g I / g = 1.42 \times 10^4 tsm$

(水平—回転連成系の固有周期は0.22sec.になる)

[モデル2.] $V_g = 150m/s, \gamma = 1.6t/m^3, \gamma' = 0.64t/m^3$

a_e, M, J_1 はモデル1. と同じ

水平ばね常数 $K_{2x} = 0.60 \times 10^5 t/m$

回転ばね常数 $K_{2\phi} = 5.99 \times 10^5 tm$

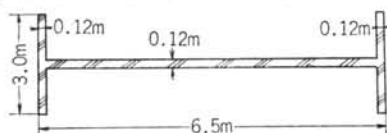
水平減衰係数 $C_{2x} = 1.03 \times 10^3 ts/m$

回転減衰係数 $C_{2\phi} = 0.63 \times 10^4 tsm$

(水平—回転連成系の固有周期は0.44sec.になる)

つなぎ梁の剛性は、本例の場合つぎのような断面を持つ長さ60mのコンクリート梁として考える。

$$K_j = 1 / (I^3 / 12EI + I/GA) = 5.22 \times 10^3 t/m$$



付 図

■おわりに

建物を支える地盤が、一様に震動したとしても、その弾性的性質が均質でなければ、建物の重心と地盤反力の剛心が一致しないため、建物の地震応答に振り動の成分が加わる。

また平面的に長い拡がりを持った建物では、地震波到来の時間的ずれによって、やはり建物は振られることになる。

建物によっては、このような建物全体の振れに案外もろい構造様式のものもある。地震によって建物は必ず振られることを覚悟し、不測の災害に備えるためこの種の検討も時には必要になることもあろう。