

## 斜張橋の地震応答解析 (石狩川河応橋の場合)

正 員 宮 本 裕\*

### 1. ま え が き

斜張橋に水平成分と垂直成分とを同時に持つ地震波が働く時の、斜張橋の変形と断面力の時々刻々の応答を計算したのが本報告である。計算は大量にわたるもので、大型計算機を十分活用した。また、断面力の応答値について、釣合いのチェックをして、時々刻々の変形と断面力の応答値の正しいことを確めた。

### 2. 架橋地点に発生すべき地震波の推定

架橋地点の最大地震加速度  $\ddot{z}_{\max}$  は次の金井博士の式で与えられる。

$$\ddot{z}_{\max} = \frac{1}{T} \times \frac{10^{0.61M - P \log x + Q}}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_g}\right)^2\right\}^2 + \left\{\frac{0.2}{\sqrt{T_g}} \left(\frac{T}{T_g}\right)\right\}^2}} \quad (1)$$

ここで、 $T$ : 地震時の基盤の波の周期 (sec)

$T_g$ : 地盤の固有周期 (sec)

$x$ : 震源地からの距離 (km)

$M$ : マグニチュード

であり、



図-1 石狩川河口橋

$$P = 1.66 + \frac{3.60}{x}, \quad Q = 0.167 - \frac{1.80}{x}.$$

である。

架橋地点の最大地震加速度を決めるには、地図で見るとわかるように、震源地が日本海側にある場合と太平洋側にある場合について比較するとよい。すなわち、(1) 日本海側に震源地がある場合、 $M=6$ ,  $x=200$  km,  $T_g=0.4$  sec と (2) 太平洋側に震源地がある場合、 $M=8$ ,  $x=300$  km,  $T_g=0.4$  sec である。

この計算結果を図にあらわしたものが図-2である。この結果から、架橋地点の最大地震加速度  $\ddot{z}_{\max}=63$  gal とする。

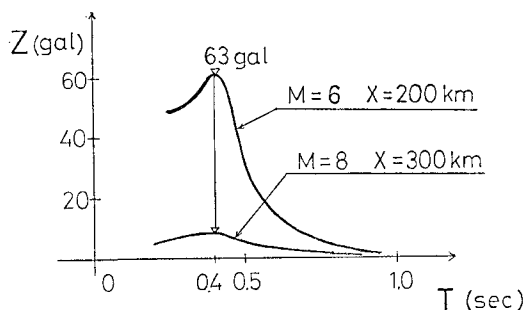


図-2

また、架橋地点の地盤の固有周期は、実測の結果 0.4 sec であったから、同じ固有周期を持つ El Centro 地震波を架橋地点の地盤表面に発生すべき地動加速度波形とする。

ただし、El Centro 波の最大加速度は 313 gal であるから、これを最大 63 gal に縮小して用いる。(図-3 参照)

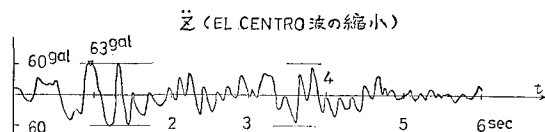


図-3 El Centro 地震波 (加速度  $\ddot{z}(t)$ )  
6 秒間、1/100 秒きざみで入力とした

### 3. 多質点系構造物の地震応答解析理論

図-4 のような、それぞれ水平方向のみと垂直方向のみに変位する 2 自由度系構造物を考える。質量  $m_1$ ,  $m_2$ , 減

\* 北海道大学大学院 博士課程

衰定数  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$  とし, 各質点の相対変位  $y_1$ ,  $y_2$ , 地震加速度が水平方向に  $\ddot{z}_x$ , 垂直方向に  $\ddot{z}_y$  働くとする, 振動の連立微分方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_x \\ \ddot{z}_y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

ここで, 質量  $m_1$  のところに水平力  $1\text{ kg}$  を働かせたときの質点  $m_1$  の水平変位を  $\alpha_{11}$ , 質点  $m_2$  の垂直変位を  $\alpha_{21}$  とし, 質点  $m_2$  のところに垂直力  $1\text{ kg}$  を働かせたときの質点  $m_1$  の水平変位を  $\alpha_{12}$ , 質点  $m_2$  の垂直変位を  $\alpha_{22}$  とすると,  $[k]$  は次のように  $[\alpha]$  の逆行列として求められる。

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (3)$$

また, 垂直地震加速度と水平地震加速度とには次の関係があるから,

$$\ddot{z}_y = 0.5\ddot{z}, \quad \ddot{z}_x = \ddot{z}. \quad (4)$$

式(2)は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & 0.5m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

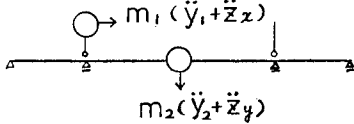


図-4

$$\ddot{z}_y = 0.5\ddot{z}_x$$

いま, 各質点の相対変位を基準座標  $[\xi_i]$ , 固有ベクトル  $[X_{ij}]$  を用いて次のように表わす。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 \left[ \frac{-1}{\omega_1 \sqrt{1-h_1^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-h_1 \omega_1 (t-\tau)} \sin \left\{ \sqrt{1-h_1^2} \omega_1 (t-\tau) \right\} d\tau \right] \\ \beta_2 \left[ \frac{-1}{\omega_2 \sqrt{1-h_2^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-h_2 \omega_2 (t-\tau)} \sin \left\{ \sqrt{1-h_2^2} \omega_2 (t-\tau) \right\} d\tau \right] \end{bmatrix} \quad (13)$$

これらを,  $t$  で 2 度微分することによって, 次の式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 + \beta_1 \ddot{z} = \beta_1 \left[ \frac{\omega_1}{\sqrt{1-h_1^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-h_1 \omega_1 (t-\tau)} \cos \left\{ \sqrt{1-h_1^2} \omega_1 (t-\tau) + \tan^{-1} \frac{2h_1^2-1}{2h_1 \sqrt{1-h_1^2}} \right\} d\tau \right] \\ \ddot{\xi}_2 + \beta_2 \ddot{z} = \beta_2 \left[ \frac{\omega_2}{\sqrt{1-h_2^2}} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-h_2 \omega_2 (t-\tau)} \cos \left\{ \sqrt{1-h_2^2} \omega_2 (t-\tau) + \tan^{-1} \frac{2h_2^2-1}{2h_2 \sqrt{1-h_2^2}} \right\} d\tau \right] \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(13), 式(14)は,  $\Delta\tau$  時間ごとのインパルス  $-\beta\ddot{z}(\tau) \cdot \Delta\tau$  に分けて, ステップごとにたたきこんでやる場合の応答であって, 応答曲線は  $\Delta\tau$  時間ずつずれながら発生し, これらの応答曲線の縦距がすべて集計された形で求まる。

ここで,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  は次の行列式を 0 とおいて求められる解である。

式(6)を式(5)に代入し,  $[X_{ij}]$  の転置マトリックス  $[X_{ij}]^T$  を左からかけると, 固有ベクトルの直交性から, 次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi}_1 \\ \dot{\xi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 X_{11} & 0.5m_2 X_{21} \\ m_1 X_{12} & 0.5m_2 X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

ここで, 特に固有ベクトルを

$$\sum_{r=1}^2 m_r X_{r1}^2 = 1, \quad \sum_{r=1}^2 m_r X_{r2}^2 = 1. \quad (8)$$

となるよう決め,

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \sum_{r=1}^2 \sum_{s=1}^2 C_{rs} X_{r1} X_{s1}, & C_2 &= \sum_{r=1}^2 \sum_{s=1}^2 C_{rs} X_{r2} X_{s2}, \\ K_1 &= \sum_{r=1}^2 \sum_{s=1}^2 k_{rs} X_{r1} X_{s1}, & K_2 &= \sum_{r=1}^2 \sum_{s=1}^2 k_{rs} X_{r2} X_{s2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

とする。

いま, 固有値を  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , 減衰定数を  $h_1$ ,  $h_2$  とすれば

$$\left. \begin{aligned} \omega_1^2 &= K_1, & \omega_2^2 &= K_2, \\ h_1 &= \frac{C_1}{2\omega_1}, & h_2 &= \frac{C_2}{2\omega_2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

であり,

$$\left. \begin{aligned} m_1 X_{11} + 0.5m_2 X_{21} &= \beta_1, \\ m_1 X_{12} + 0.5m_2 X_{22} &= \beta_2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

とおくと, 式(7)は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\xi}_1 + 2h_1 \omega_1 \dot{\xi}_1 + \omega_1^2 \xi_1 &= -\beta_1 \ddot{z}, \\ \ddot{\xi}_2 + 2h_2 \omega_2 \dot{\xi}_2 + \omega_2^2 \xi_2 &= -\beta_2 \ddot{z}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

したがって, 式(2)の 2 自由度系の連立微分方程式は, 式(6)の基準座標  $[\xi_i]$  を媒介として, 式(12)の 1 自由度系微分方程式 2 本に独立分離された。

式(12)はそれぞれ独立に解くことができ, 応答変位  $\xi_i$  は次のようになる。

$$\begin{vmatrix} \left( \alpha_{11} m_1 - \frac{1}{\omega^2} \right) & \alpha_{12} m_2 \\ \alpha_{21} m_1 & \left( \alpha_{22} m_2 - \frac{1}{\omega^2} \right) \end{vmatrix} = 0. \quad (15)$$

また,  $X_{11}, X_{12}$  は次の式を解いて求められる。

$$\left. \begin{aligned} \left( \alpha_{11} m_1 - \frac{1}{\omega_1^2} \right) X_{11} + \alpha_{12} m_2 X_{12} &= 0, \\ \alpha_{21} m_1 X_{11} + \left( \alpha_{22} m_2 - \frac{1}{\omega_1^2} \right) X_{12} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$X_{21}, X_{22}$  は次の式を解いて求められる。

$$\left. \begin{aligned} \left( \alpha_{11} m_1 - \frac{1}{\omega_2^2} \right) X_{21} + \alpha_{12} m_2 X_{22} &= 0, \\ \alpha_{21} m_1 X_{21} + \left( \alpha_{22} m_2 - \frac{1}{\omega_2^2} \right) X_{22} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

このようにして, 式(13)の左辺が求まると, 式(6)より真の応答変位は次式より求めることができる。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

また

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \ddot{z}_x \\ \ddot{z}_y \end{bmatrix} &= \ddot{z} \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \ddot{z} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

の関係があるから

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_1 + \ddot{z}_x \\ \ddot{y}_2 + \ddot{z}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 + \beta_1 \ddot{z} \\ \ddot{\xi}_2 + \beta_2 \ddot{z} \end{bmatrix}.$$

となり, 式(14)の左辺が求まれば, この式より真の絶対応答加速度  $(\ddot{y}_1 + \ddot{z}_x), (\ddot{y}_2 + \ddot{z}_y)$  を求めることができる。

ここで式(5)の右辺について重要な事があるのでふり返っておこう。それは水平地震加速度の数値を外力に用い, かつ, 水平方向に振動する質点はそのままの質量を, 垂直方向に振動する質点は半分の質量を用いて振動方程式を立てることである。

このようにして求めた応答絶対加速度に質量をかけた, 慣性力  $m_1(\ddot{y}_1 + \ddot{z}_x), m_2(\ddot{y}_2 + \ddot{z}_y)$  を構造物にはたらく荷重と考え, 橋の任意の点のたわみ, 曲げモーメント, せん断力, 軸力の影響線に乗ずることにより, その任意の点のたわみ, 曲げモーメント, せん断力, 軸力を計算することができる。

たとえば, 図-5のように, 質点  $m_1$  のところに水平力  $1 \text{ kg}$  を働かせたときの質点  $m_1$  の曲げモーメントを  $M_{11}$ ,

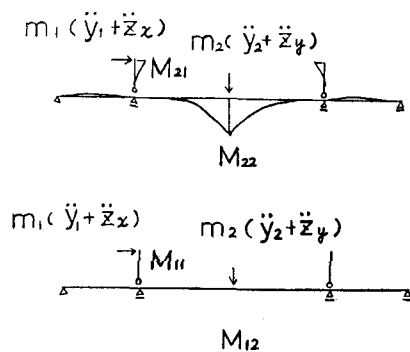


図-5

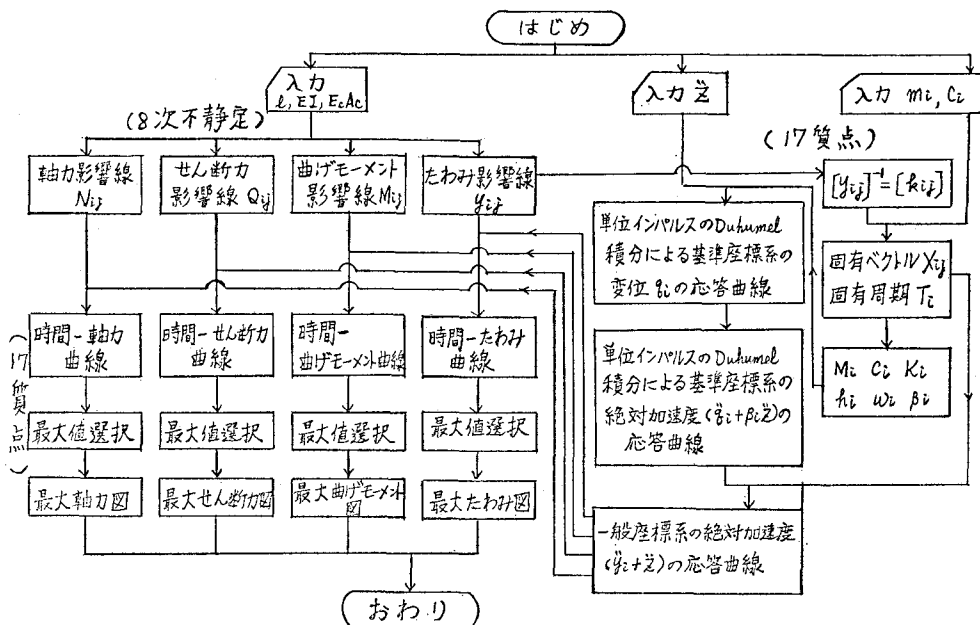


図-6 デジタル・コンピューターのフローチャート

質点2の曲げモーメントを  $M_{21}$  とし、質点  $m_2$  のところに垂直力  $1\text{ kg}$  を働かせたときの質点  $m_1$  の曲げモーメントを  $M_{12}$ 、質点  $m_2$  の曲げモーメントを  $M_{22}$  とすれば、地震外力による質点  $m_1$  の曲げモーメント  $M_1$ 、質点  $m_2$  の曲げモーメント  $M_2$  は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{M_{11}} & \overrightarrow{M_{12}} \\ \overrightarrow{M_{21}} & \overrightarrow{M_{22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1(\ddot{y}_1 + \ddot{z}_x) \\ m_2(\ddot{y}_2 + \ddot{z}_y) \end{bmatrix} \tag{21}$$

ここで  $(M_{11}, M_{12})$  と  $(M_{21}, M_{22})$  はそれぞれ質点1と質点2の曲げモーメントの影響線である。  
 以上の計算の手続きをまとめたのが 図-6 のフロチャートである。

#### 4. 石狩川河口橋の一般図と断面諸元

石狩川河口橋の一般図と断面諸元は 図-7 のとおりである。また質量分布は 図-8 のようにした。

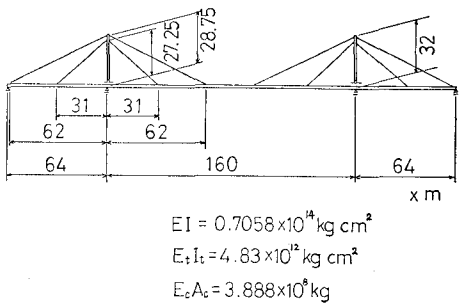
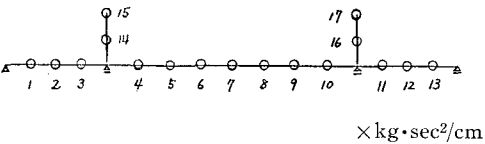


図-7



|       |     |          |     |          |     |          |     |
|-------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|
| $m_1$ | 126 | $m_6$    | 163 | $m_{11}$ | 126 | $m_{16}$ | 128 |
| $m_2$ | 129 | $m_7$    | 157 | $m_{12}$ | 129 | $m_{17}$ | 81  |
| $m_3$ | 126 | $m_8$    | 163 | $m_{13}$ | 126 |          |     |
| $m_4$ | 157 | $m_9$    | 161 | $m_{14}$ | 128 |          |     |
| $m_5$ | 161 | $m_{10}$ | 157 | $m_{15}$ | 81  |          |     |

図-8 質量分布

#### 5. 影響線

斜張橋の塔の任意の点のたわみ、曲げモーメント、せん断力、軸力の影響線、および主桁の任意の点のたわみ、曲げモーメント、せん断力、軸力の影響線、および支点反力の影響線、および斜索軸力の影響線を計算したが、紙面に制限があるため主桁の支間中央点のたわみ、曲げモーメント、せん断力、軸力の影響線と塔の中央点のたわみ、曲

げモーメント、せん断力、軸力の影響線のみを図示する。(図-9から 図-16 まで参照)

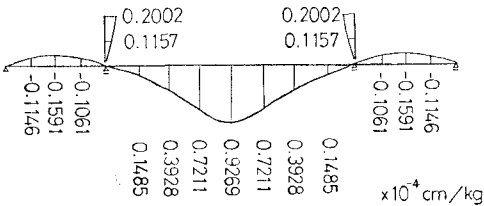


図-9 支間中央のたわみ影響線

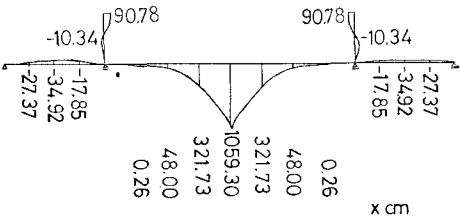


図-10 支間中央の曲げモーメント影響線

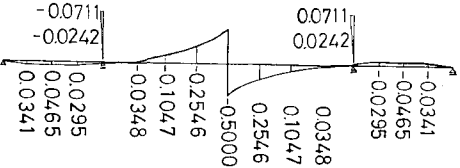


図-11 支間中央のせん断力影響線

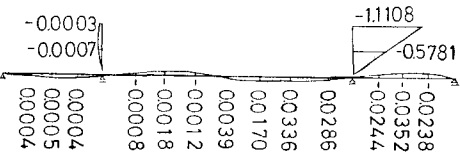


図-12 支間中央の軸力影響線

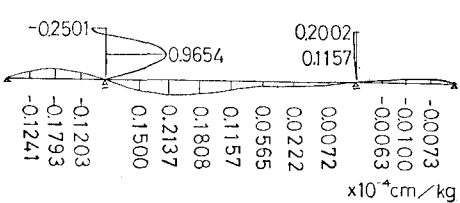


図-13 左の塔中央のたわみ影響線

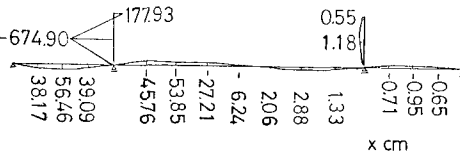


図-14 左の塔中央の曲げモーメント影響線

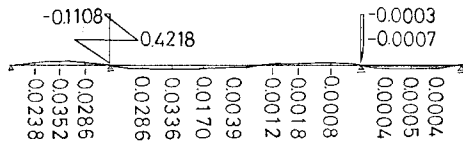


図-15 左の塔中央のせん断力影響線

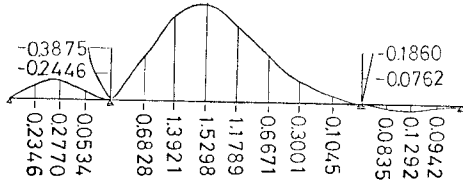
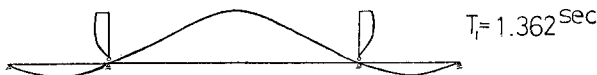


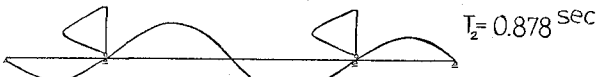
図-16 左の塔中央の軸力影響線

## 6. 固有周期とモード

計算されたたわみ影響線  $[a]$  と質量  $[m]$  を与えると、式 (15) から固有振動数が計算され、 $T=2\pi/\omega$  で固有周期がわかる。また式 (16) と式 (17) から固有ベクトルつまり固有モードが計算される。17 質点の場合は、1 次から 17 次まで



第 1 次振動モード



第 2 次振動モード

図-17 17 質点系における振動モードと固有周期

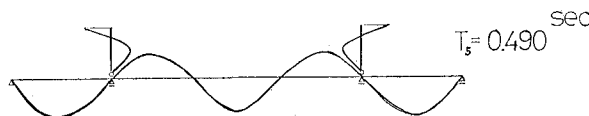


第 3 次振動モード

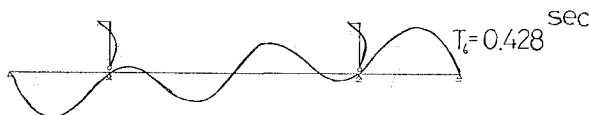


第 4 次振動モード

図-18



第 5 次振動モード



第 6 次振動モード

図-19

の固有周期とそのときのモードが求められる。ここでは、6 次までの固有周期とモードを図-17 から図-19 までの図によって示す。

## 7. 時間一応答曲線

各質点の時間一絶対加速度応答曲線、および斜張橋の任意の点の時間一変位応答曲線、時間一曲げモーメント応答曲線、時間一せん断力応答曲線、時間一軸力応答曲線、および時間一支点反力応答曲線、時間一斜索軸力応答曲線を

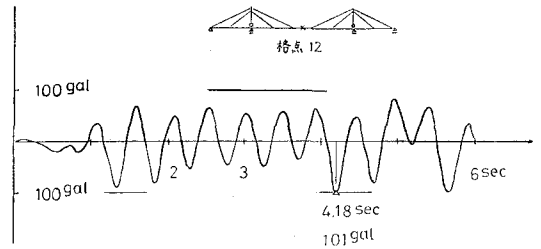


図-20 時間一絶対加速度応答曲線

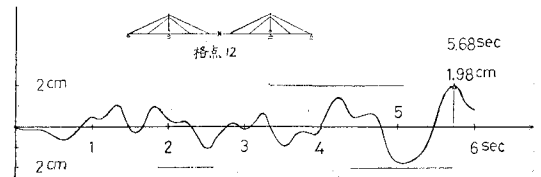


図-21 時間一変位応答曲線

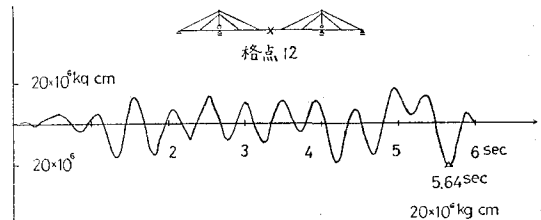


図-22 時間一曲げモーメント応答曲線

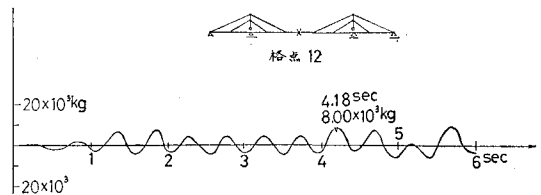


図-23 時間一せん断力応答曲線

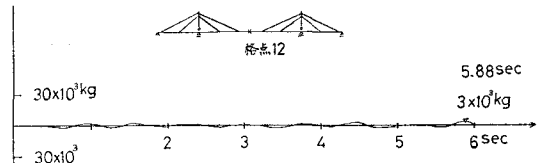


図-24 時間一軸力応答曲線

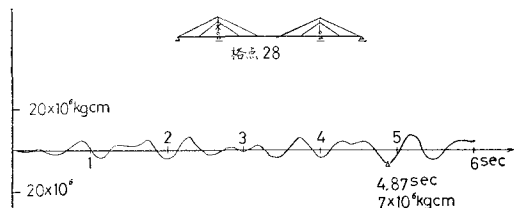


図-25 時間一曲げモーメント応答曲線

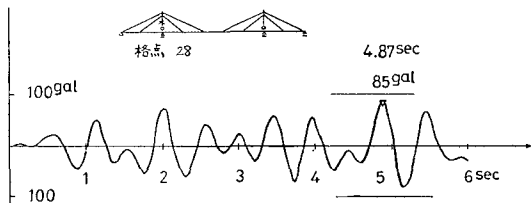


図-26 時間一絶対加速度応答曲線

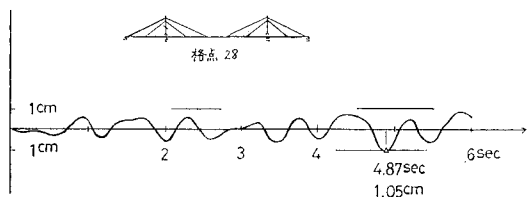


図-27 時間一変位応答曲線

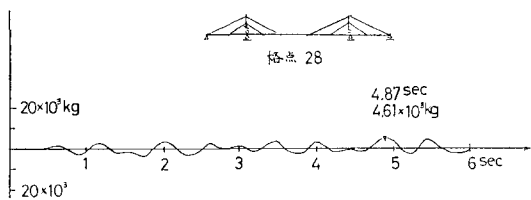


図-28 時間一せん断力応答曲線

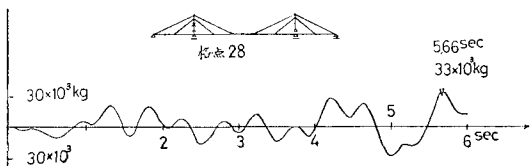


図-29 時間一軸力応答曲線

計算したが、紙面の都合で主桁の径間中央点の時間一変位応答曲線、時間一絶対加速度応答曲線、時間一曲げモーメント応答曲線、時間一せん断力応答曲線、時間一軸力応答曲線、および、塔の中央点の時間一変位応答曲線、時間一絶対加速度応答曲線、時間一曲げモーメント応答曲線、時間一せん断力応答曲線、時間一軸力応答曲線を図示する。(図-20 から 図-29 まで参照) (なお、 $h=0.008$  とした。)

## 8. 釣合いの検算

以上の地震応答理論および計算した応答値の正しいことを確かめるため、ある瞬間における質点の慣性力、反力、

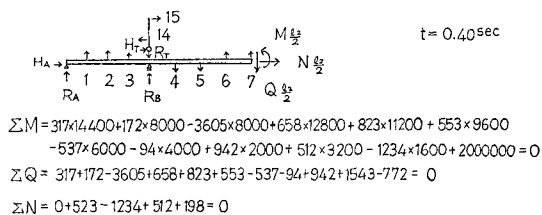


図-30

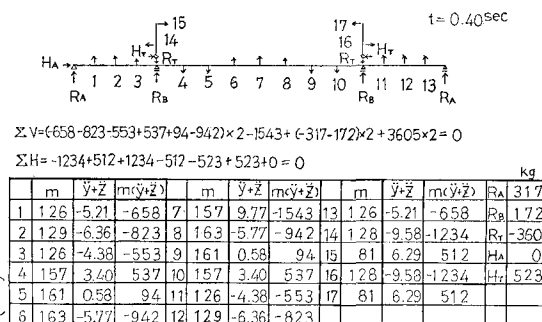


図-31 ある時刻における力の釣合いの検算

斜索軸力、断面力の応答値を取り出し、それらの間に釣合いのチェック行なった。

図-30 は  $t=0.4 \text{ sec}$  の時に主桁の支間中央で切って、慣性力、反力、切断点の曲げモーメント、せん断力、軸力の間に釣合いが成立することを示している。

また、図-31 は  $t=0.4 \text{ sec}$  の時に慣性力と反力が水平方向にも、垂直方向にも、釣合いがとれていることを示している。

## 9. ある時刻における変形図と断面力図

橋の各点の応答曲線を描いて、これからある時刻についての応答値をひろい、橋全体についてまとめると、ある時刻における斜張橋のたわみ図、曲げモーメント図、せん断力図、軸力図などが描ける。これらのうち、ある時刻におけるたわみ図と曲げモーメント図を図示したものが 図-32 から 図-35 までである。

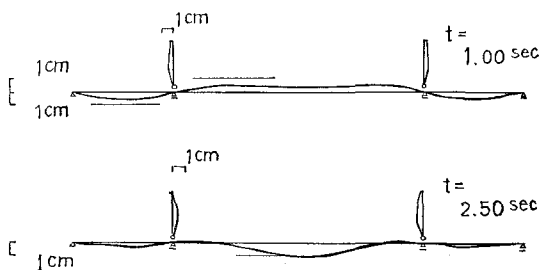


図-32 ある時刻におけるたわみ図

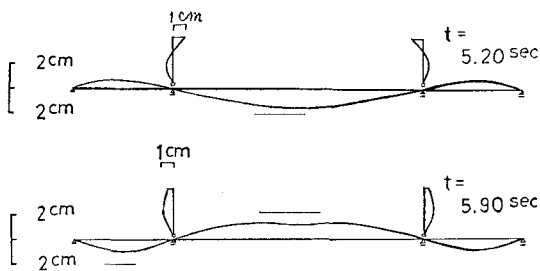


図-33 ある時刻におけるたわみ図

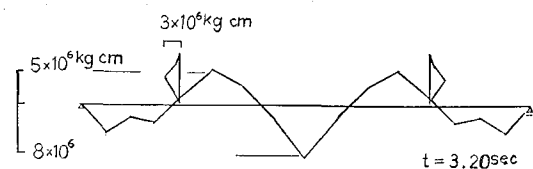
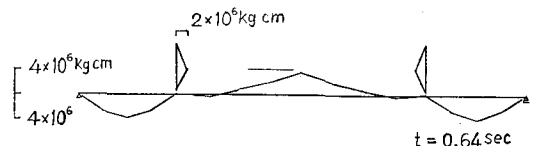


図-34 ある時刻における曲げモーメント図

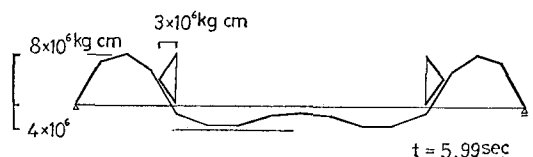
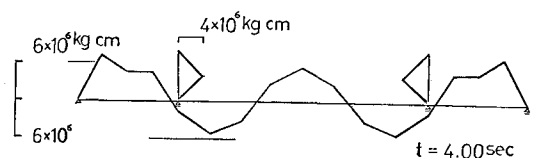


図-35 ある時刻における曲げモーメント図

## 10. 最大値

図-21 から  $t = 5.68 \text{ sec}$  において最大値が  $1.98 \text{ cm}$  であるように、各点ごとの変位応答曲線から最大値をひろい、それを斜張橋全体についてまとめたのが 図-36 のような最

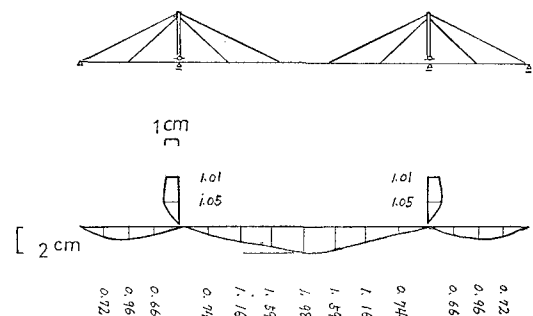


図-36 最大のたわみ図

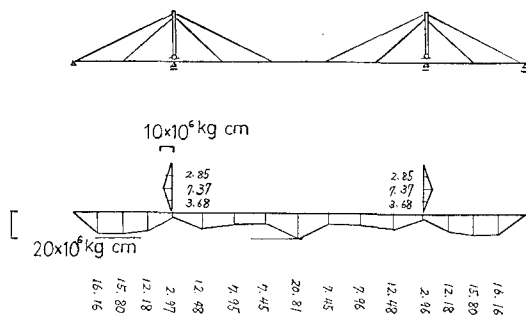


図-37 最大曲げモーメント図

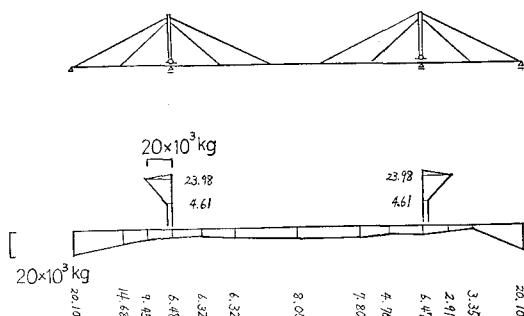


図-38 最大せん断力図

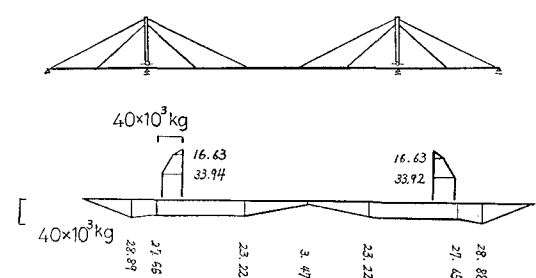


図-39 最大軸力図

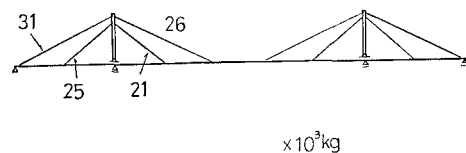


図-40 最大斜索軸力

大たわみ図である。同様に、曲げモーメント応答曲線の最大値をひろって最大曲げモーメント図、せん断力応答曲線の最大値をひろって最大せん断力図、主桁と塔の軸力応答曲線の最大値をひろって最大軸力図、斜索軸力の応答曲線の最大値をひろって最大斜索軸力図が書ける。図-36 から 図-40 までがこれらの図である。

ただし、図-38 において、支点での値は支点反力の最大値をあらわしている。

## 11. あとがき

本論文において行なった主なる事項を列挙すれば、次のとおりである。

(i) 塔と主桁の連成されたときの振動方程式を新しく立て、式(14)で絶対加速度応答を新しく求めることができた。

(ii) 絶対加速度がわかったので、それぞれの質点が刻々どのような慣性力を持ち、どのように動くかを示す厳密解が与えられた。

(iii) 橋の任意の場所の影響線を使うことを新しく考えたので、その影響線に正しい慣性力を乗ずることにより、その任意の場所における瞬間瞬間の正しいたわみ、曲げモーメント、せん断力、軸力の時間一応答曲線を求めることができた。

(iv) この時間一応答曲線の中から最大値を拾うことによって、最大たわみ図、最大曲げモーメント図、最大せん断力図、最大軸力図が求められた。

(v) 以上のような厳密解析法が確立されたことによって、従来の近似応答計算法の近似度を比較数量的に論ずることができるようになった。

おわりに、本論文を書くにあたって終始助言をいただいた、北大工学部橋梁研究室渡辺昇教授に謝意を表します。

## 参考文献

- 亘理 厚：機械振動(丸善)。  
田治見宏：建築振動学(コロナ社)。  
渡辺 昇：タイ基礎橋脚の地震応答解析(橋梁と基礎，Vol. 3, No. 6, 1969)。  
川口雄常：多自由度系構造物の地震応答解析法に関する研究(北海道大学大学院工学研究科昭和44年度修士論文)。  
渡辺・宮本・川口・多田：タワーと補剛桁とを一体とした斜張橋の振動応答解析(土木学会第24回年次学術講演会講演集)。  
渡辺・多田・宮本：斜張橋の構造特性について(土木学会北海道支部昭和42年度研究発表会論文集第24号)。  
渡辺・多田・宮本：斜張橋の構造特性について(第2報)(土木学会第23回年次学術講演集)。  
宮本 裕：斜張橋の構造特性について(北海道大学大学院工学研究科昭和42年度修士論文)。