

名古屋大学 学生員 ・ 大石法男

正会員 梶田建夫

1. まえがき

斜張橋や吊橋などの長大橋の地震応答解析は、たとえばEl Centro地震の加速度記録を外力として基礎の各点に入力される場合がよく行なわれているが、特定の地震波に対する構造物の応答特性は得られても、その特性は一般的なものとはいえない。そこで、確定的な地震波を与えるかわりに種々の地震動周波数特性を与えて確率論的手法により人工地震波を発生させ、これを外力とした解析が考えられる。F. Leonhardtの研究によれば大スパンでも斜張橋は吊橋に競合できるとしている。¹⁾このような大スパンの斜張橋の場合には入力の位相差を考慮することが必要となる。本研究は、人工地震波を用いてこれらの影響を検討したものである。

2. 解析法

基礎の各点で異なる地動を受ける構造物の運動方程式は、強制変位を受ける質点と残りの質点とに分割して集中質量系でつぎのように表わされる。

$$\begin{bmatrix} M_{rr} & 0 \\ 0 & M_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{rr} & C_{rs} \\ C_{sr} & C_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{rr} & K_{rs} \\ K_{sr} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_r \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_s \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

ここに、添字rは入力点を、sは応答点を示す。また $\{F_s\}$ はs個の点で $\{x_s\}$ の方向に働く未知反力を表わす。式(2-1)は、つぎの2式に分解することができる。

$$[M_{rr}]\{\ddot{x}_r\} + [C_{rr}]\{\dot{x}_r\} + [K_{rr}]\{x_r\} = -([C_{rs}]\{\dot{x}_s\} + [K_{rs}]\{x_s\}) \quad (2-2)$$

$$[M_{ss}]\{\ddot{x}_s\} + [C_{ss}]\{\dot{x}_s\} + [K_{ss}]\{x_s\} = \{F_s\} - ([C_{sr}]\{\dot{x}_r\} + [K_{sr}]\{x_r\}) \quad (2-3)$$

式(2-2)を実際に解く場合には、未知変位 $\{x_r\}$ と動的変位 $\{X_r\}$ と基礎の境界条件を満足する静的変位に分離する。²⁾すなわち

$$\{x_r\} = \{X_r\} + [D_{rs}]\{x_s\} \quad (\text{ただし } [D_{rs}] = -[K_{rr}]^{-1}[K_{rs}]) \quad (2-4)$$

ここに、 $[D_{rs}]$ は基礎の単位強制変位に対する変位の影響マトリックスである。式(2-4)を式(2-2)に代入すると、 $\{X_r\}$ を未知量とする運動方程式を得る。

$$[M_{rr}]\{\ddot{X}_r\} + [C_{rr}]\{\dot{X}_r\} + [K_{rr}]\{X_r\} = [M_{rr}][K_{rr}]^{-1}[K_{rs}]\{\ddot{x}_s\} - ([C_{rr}][K_{rr}]^{-1}[K_{rs}] - [C_{rs}])\{\dot{x}_s\} \quad (2-5)$$

式(2-5)は、入力データとして地震加速度 $\{\ddot{x}_s\}$ および速度 $\{\dot{x}_s\}$ が知られれば解くことができ、これより求めた変位 $\{X_r\}$ と地動変位 $\{x_s\}$ により、式(2-4)から変位応答が求められる。また、変位以外の応答量についても式(2-4)と同様の仮定によって求めることができる。

おのおのの基礎の地震波に位相差がある場合は、入力地震波形は同一としてつぎの式を用いる。

$$\ddot{x}_{ss}(t) = \ddot{x}(t), \quad \ddot{x}_{ss}(t) = \ddot{x}(t-\tau_1), \quad \ddot{x}_{ss}(t) = \ddot{x}(t-\tau_1-\tau_2) \quad (2-6)$$

ここに、 $\tau_1, \tau_2, \dots$ は橋梁の各基礎間と地震波が伝播するに要する時間で、これらの地震波を用いて式(2-5)が解かれる。

3. 人工地震波について

人工地震波の周波数特性を与える数学モデルは、多くの研究者によって提案されているが、ここではB.N. Iyengarの提案している式を用いる³⁾。これによれば、パワースペクトル密度関数は、つぎの式で表わされる。

$$G(\omega) = A_1 e^{-\omega^2 C^2} + A_2 \omega^2 e^{-4\omega^2 C^2} \quad (3-1)$$

ここに、 A_1 , A_2 , C^2 はある地震波に特有な諸定数であり、各定数値により図-1のように変化する。式(3-1)の周波数特性を有する非定常確率ガウス過程をシミュレーションするために、確率過程をつぎのようにかく。

$$\ddot{x}(t) = \{ (a_1 + a_2 t) e^{-\beta t} \} \ddot{x}_s(t) \quad (3-2)$$

上式で $\ddot{x}_s(t)$ は定常確率ガウス過程で、三角級数和により発生させる。また $\{ \}$ 内は一種のフィルターの役割をする確定関数である。サンプル波を図-2に示す。得られた地震波から速度波および変位波を求めるために、数種の方法が提案されているが、ここではフーリエ変換手法を用いた。与えられた地動加速度のフーリエ振幅スペクトルを $F(\omega)$ 、フーリエ位相スペクトルを $\phi(\omega)$ とすると、つぎのフーリエ変換により求められる⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) / \omega \cdot \sin \{ \omega t - \phi(\omega) \} d\omega \\ x(t) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -F(\omega) / \omega^2 \cdot \cos \{ \omega t - \phi(\omega) \} d\omega \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

4. 数値計算

解析の対象は図-3に示す斜張橋で、塔はヒンジ塔とし、ケーブルは曲げに抵抗しないトラス部材と仮定した。質量行列はランプトマスを用い、桁および塔の単位重量は4.704 t/mとしケーブルの質量は無視した。人工地震波は、図-1に示すパワースペクトルに対してそれぞれ20のサンプル波を発生させた。解析に用いた地震波は、同一の地震波を2つの塔のヒンジ支点から橋軸直角鉛直方向に入力し、位相差は0.5, 1.0, 1.5, 2.0秒の場合と考え位相差のない場合の応答と比較し、各質点の最大変位と最大曲げモーメントおよび中央スパン、側スパン中点の時間応答を求めた。なお、応答計算は各次の減衰定数をすべて0.05とし、時間刻み Δt を0.01 secとし、斜張橋の振動次数を7次まで採りModal Analysis法により行なった。図-3の斜張橋は、29質点系に置換したものであるが、中央スパン長の大まな斜張橋についても計算を行なう予定であり、現在整理中の結果とあわせて当日発表する。

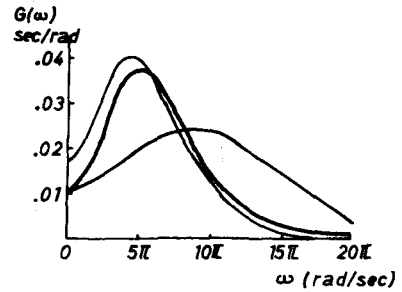


図-1 パワースペクトル密度関数

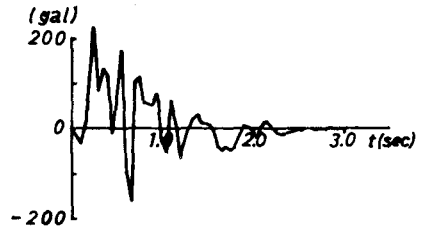


図-2 人工地震波
サンプル No. 1

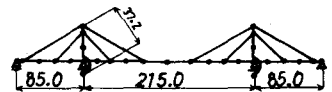


図-3 斜張橋

- 1) 成田, 松川, 伊藤共訳: F. Leonhardt und W. Zellner "スパンが600mを越える吊橋と斜張橋の比較", 橋梁と基礎, Vol. 8, No. 12, 1974, pp. 37-46.
- 2) R.D. Mindlin, L.E. Goodman: "Beam Vibrations with Time-Dependent Boundary Condition", J. of Appl. Mech., Dec., 1950.
- 3) R.N. Iyengar and K.T. Iyengar, "A Nonstationary Random Process Model For Earthquake Accelerograms", Bulletin of S.S.A., Vol. 59, No. 3, 1969, pp. 1163-1188.
- 4) 中村, 野波, 松田, "地動が基礎の各点で異なる構造物の応答解析 (入力地動が1次元)", 建築学雑誌, 第232号, 1975, pp. 51-61.