

## 2. 解析上の問題点

### 2-1 解析手法および解析条件

#### (1) 解析手法

解析手法としては、モード解析にもとづいたスペクトル応答解析手法を用いた。

これは、地震時の運動方程式

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = -[M] \{\ddot{z}\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$  = 質量マトリクス

$[C]$  = 減衰マトリクス

$[K]$  = 剛性マトリクス

$\{x\}$  = 構造物の変位ベクトル

$\{\ddot{z}\}$  = 地盤の加速度ベクトル

において、非減衰自由振動の式より求まるモーダルマトリクス $[\Phi]$ を用いて減衰マトリクスが対角化できると仮定し、

$$\{\ddot{q}\} + 2[h_i \omega_i] \{\dot{q}\} + [\omega_i^2] \{q\} = -\beta_x \{\ddot{z}_x\} \quad (2)$$

ここに、 $\{q\}$  = 一般化変位ベクトル； $\{x\} = [\Phi] \{q\}$

$h_i$  =  $i$ 次モードの減衰定数

$\omega_i$  =  $i$ 次モードの円振動数

$\beta_x$  =  $x$ 方向の刺激係数

と変形する。次に、(2)式は1自由度系の運動方程式の集まりであるので、それぞれについて次節に示す本州四国連絡橋公団の応答スペクトル曲線を用いてモードごとに応答値を求める。そしてそれらの値を重ね合わせることによって各質点の変位応答値を求めるのである。

応答値の重ね合わせ方法にもいろいろな方法が提案されている。現在実際の橋梁の動的解析に用いられているのは、R. M. S法とC. Q. C法である。R. M. S法はモードの直交性が成立している場合は正当な応答値を与える。これに対し、C. Q. C法は最近応用されはじめた手法で、連成振動のように異なるモードの振動が影響し合う場合も取扱える利点がある。

今回の検討では、実績の多いR. M. S法によることとした。

## (2) 解析条件

応答値としてモードごとの値を重ね合わせる場合、何次モードまで重ね合わせるかが問題となる。本四耐震設計基準では有効質量比の累計で95%以上と規定されているが、今回の解析では30次までで打ち切りとし、有効質量比の累計を参考値として記載することとした。応答値の中で変位のように低次モードに支配されるものについては全く問題はない。また曲げモーメントについては高次モードの影響が全く無視できるとは言えないが、着目しているのが主塔であり、これについては遊動円木振動の占める割合が圧倒的に大きいので、問題ないと判断した。

## 2-2 減衰率の評価

### (1) はじめに

構造物の応答解析で、モード解析をもとにしたスペクトル応答解析を採用した場合、減衰の評価が容易ではない。

特に今回のように複合構造物を取扱う場合、鋼とコンクリートでは当然異なる減衰性能を有すると考えられ、それに伴う応答値の特性も注目しているところであるから、これをどのように評価すればよいか検討を行った。

前項(2)式の*i*次モードの減衰定数 $h_i$ をどのように定めるかについては、次の2つの方法のいずれかを用いることが多い。

運動エネルギー比例減衰

ひずみエネルギー比例減衰

この考え方と応答値の差違を検討することとした。

### (2) 運動エネルギー比例減衰

これは、系の各質点に蓄えられた運動エネルギーの一部が減衰エネルギーの一部として消滅するという考え方にもとづく計算法である。

まず、各質点ごとに減衰特性を与え、次に各質点の運動エネルギーを求め、全運動エネルギーとの比を用いて各次モードの減衰定数を計算する。

$$h_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_j \{\phi_i\}^T m_j \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\}} \quad (3)$$

ここに、

$C_j$  = 質点  $j$  の減衰定数

$\{\phi_i\}$  =  $i$  次のモードベクトル

$m_j$  = 質点  $j$  の質量

### (3) ひずみエネルギー比例減衰

これは、系の各要素に蓄えられるひずみエネルギーの一部が減衰エネルギーとして消滅するという考え方にもとづく計算法である。

(2) と同じく、まず各部材ごとに減衰特性を与え、次に各部材のひずみエネルギーを求め、全ひずみエネルギーとの比を用いて各次モードの減衰定数を計算する。

$$h_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_j \{\phi_i\}^T [K_j] \{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\}} \quad (4)$$

ここに、

$C_j$  = 要素  $j$  の減衰定数

$[K_j]$  = 要素  $j$  の剛性マトリクス

### (4) 複合構造物の減衰特性

ところでこの2つの計算法は、一般的にはその計算結果は大差を生じないと推定できる。なぜなら、一般に最も大きく振動している部材は最も大きなひずみを持つはずであり、運動エネルギーとひずみエネルギーの総和は一定であるという保存則にもとづいて考えると大差がないと考えられるからである。

ところが、今回解析する複合斜張橋では、例えば遊動円木振動モードにおいて2つの計算法により結果として大差を生じる場合があるので注意を要する。一例として主塔がコンクリート、主桁は主径間が鋼、側径間がコンクリートのフローティングタイプの複合斜張橋をモデルに2つの計算法による減衰定数の鋼の分担比率を計算してみると下表のようになる。

	次 数	周 期 (秒)	鋼 の 分 担 比 率 (%) ( 減 衰 定 数 )		モ ー ド 形 状
			運 動 エ ネ ル ギ ー 法	ひ ず み エ ネ ル ギ ー 法	
複合斜張橋	1	6.39	36.40 ( 3.9%)	9.43 ( 4.7%)	遊 動 円 木

この理由については次のように考えられる。この例では主桁は剛体運動をしており、1サイクルの振動の中で運動エネルギーが最大となる瞬間には主桁に大きな運動エネルギーが蓄積されているのに対し、ひずみエネルギーが最大となる瞬間には逆に主塔に主にひずみエネルギーが蓄積されている。このように減衰特性の異なる構成部分である主桁と主塔の間でエネルギーのやりとりが行なわれる振動では大きな差が生じると推定される。

#### (5) 計算法の決定

このように計算法により、減衰定数の値にかなりの差が生ずることがわかった。しかしながら今回の検討では、差が生ずることの確認にとどめ、選択としては本四耐震設計基準にならって、運動エネルギー法を用いることとした。運動エネルギー法は、対角行列である質量マトリクスを用いる計算法であるため計算が容易で、より多くのプログラムが利用できる利点がある。

どちらの計算法がより妥当性があるかについての判断は今後の実験的研究にゆだねたい。