

京都大学工学部 正員 山田 善一  
 京都大学大学院 学主員 古川 浩平  
 日本鋼管 正員 大石 博

## 1. まえがき

長大吊橋の設計において、山が国が地震国であること、また地震のときの経済的損失を考えると、耐震上の考慮が十分になさなければならぬ。長大吊橋において、特に耐震上重要であるタワー・ピアー系の振動特性については、これまで多くの人達により研究がなされ、耐震設計上有利な研究成果も、数多く報告されている。しかし、耐震設計の対象としての地震外力については、その複雑な非面性のため、不明な点が多く、合理的な耐震設計法が確立されるにはいたっていない。地震動を確率過程として取り扱う不規則振動論による耐震設計法は、地震動の非再現性による将来の予測の困難な問題を解決しようとする試みであるとともに、耐震安全法に関する定量的評価を求めることのできる。すなわち、ここでは、地震外力を確率過程としてとらえ、構造物（吊橋タワー・ピアー系）に対して不規則振動解析を行い、確率過程の文差問題および最大応答の確率分布を利用することにより構造物の破壊確率を求め、それを用いて構造物の最適設計を試みるものとする。

## 2. 地震動のモデル化

現在、最も一般的に採用されている確率過程としての地震動のモデル化の方法は、定常確率過程に従う $g(t)$ と、これを非定常確率過程にする確定関数 $\psi(t)$ との積で表わす方法である。ここでは、確定関数 $\psi(t)=1$ と置き、地震動を定常確率過程として取り扱う。定常確率過程 $g(t)$ は、平均値ゼロで、定常ガウス分布に従うと仮定し、そのパワースペクトル密度として、文献(1)に示されている数個のピークを持つパワースペクトル密度を用いる。

## 3. 地震動による構造物の応答

構造物の応答解析は、一般には自由度系に対しては、減衰項にある仮定を設けてモード分解し、各モード効果を重ね合わせて応答評価をする。地震外力が確率過程として扱われているので、応答値は、分散あるいは共分散として評価される。そしてここでは、応答としては、定常応答のみを考慮することにする。

## 4. 最大応答の確率分布

最大応答の確率分布は、これまで厳密解は求められていないが、種々の近似法が提案されている。ここでは、絶対応答値の最大値が一定値を越えりる確率、すなわち、最大応答値の確率分布関数は、ポアソン過程に従うとする。<sup>2)</sup>

$$P_S(\lambda, T) = P\{\max |x(t)| \leq \lambda; 0 \leq t \leq T\} = \exp\left\{-2 \int_0^T \psi^*(t) dt\right\}$$

ここで

$$\psi^*(t) = \int_0^\infty \lambda f_{xx}(\lambda, x, t) dx$$

$T$  及び、 $f_{xx}(\lambda, x, t)$  は、 $x(t)$  と  $\dot{x}(t)$  との同時確率密度関数である。

## 5. 問題の定式化

吊橋のタワー・ピアー系の設計が数個の設計変数で、 $T$  決定されるように簡略化する

必要がある。すなわちビアーは直交する方向の基礎を考慮、高土圧及び橋軸垂直方向の幅は、与えられているものとし、橋軸方向の幅をビアーの圧土土を決定する設計変数とする。タワー断面の圧土土は、高土圧方向に一定、圧土土は一定率で変化するとし、この断面性能を断面2次元モーメントで表わし、これをタワー断面を決定するための変数とする。

さて、目的関数を式で表わすことにする。

$$M = W_T + \rho_{TW} W_P$$

すなわち、 $W_T$ : タワーの重量、 $W_P$ : ビアーの重量、 $\rho_{TW}$ : タワーの単位重量とビアーの単位重量の比

次に、構造物の破壊モードとしては、種々考えられるが、ここでは、次の2つを考慮する。

① 地震時におけるタワーの傾点（ここでは、タワーを8傾点乗にモデル化している。）およびタワー最下点の各断面の縁応力が許容応力を越えるとき、

② 地震時におけるビアー頂点の水平変位がある限界値を越えるとき、

①と②に関して、不規則振動解析および最大応答の確率分布を用いて破壊確率を求める。そして、破壊モード間の相関性は無視し、各々の破壊モードは独立であると考える。タワービアー系の破壊確率を算定し、これを制約条件とする。目的関数、制約条件が定式化されると、あとは制約条件付き目的関数の最小化という問題になる。つまり、

「制約条件  $g_i(X) \geq 0$  を満足し、

目的関数  $f(X) \Rightarrow \text{minimum}$  にする  $X$  を求めよ。」

という形になる。ここでは、 $g_i(X)$ ,  $f(X)$  がともに非線形になるため非線形計画法を用いることにするが、Global最適を得る可能性の大きい SUMT 法を今回は用いた。

## 6. 計算例

計算例としては、神戸市が明石海峡橋の試案として設計した吊橋を用いた。種々の設計条件に照らして、地震動は、パワースペクトルを入力し、その最大加速度は、確率変数の最大値推定法により  $200 \text{ gal}$  とした。

## 7. 結論

- 1) 入力地震動のパワースペクトルの形状が変化すると、最大加速度は同じとする同一条件下においても、最適設計値および目的関数の値は、非常に変化する。
- 2) 単位比  $\rho_{TW}$  を小さくすると、最適設計値としてのビアー幅は大きくなり、反対にタワー断面2次元モーメントの値は小さくなる。そしてその破壊確率のうちのビアーの破壊確率(②)の割合は小さくなる。
- 3) 地震強度、ビアーの減衰定数は、ビアー幅の決定に非常に影響を及ぼす。
- 4) 設計変数を小さくすることにより、最大応答は望めず、変数の場合の手法の収束性の問題にからみ、ひきかには設計変数を小さくすると、よりよい最適設計にたどり着けないことがある。

参考文献 2) Takemura, H. "Studies on the Application of Random Vibration Theory to Earthquake Resistant Design of Civil Engineering Structures," Kyoto Univ. Doctoral Dissertation, 1973.

3) 星谷, 友次, 三川, "不規則振動論による地震最大応答、設計" 土木学会年次報告 1972