

地震動を受けるつり橋塔基礎系の最適設計

京都大学工学部 正員 山田善一
 同上 正員 渡辺英一
 鹿島建設 正員 坂本良夫

1. まえがき

電子計算機の普及により高速計算が可能になり構造物設計の分野においても計算機は欠くことのできないものとなって来た。そこで長大つり橋の塔および基礎の耐震安全性を考慮して最適設計を試みることにする。つり橋において、補剛桁と塔の固有周期を比べると別々に考えてよく、耐震設計を行なうにあたっては塔基礎系を独立させて考慮してよいことが従来の研究で明らかにされている。これまで塔基礎系の地震による動的応答解析は数多くなされてきたが、そこにおいては設計寸法が与えられることが前提であり、設計された構造物の安全性の検討に値するものであった。また塔と基礎の固有周期が充分分離するように塔基礎の寸法を決定して、塔に対する基礎の運動の影響を考慮しないという考え方もあるが、塔基礎の建造費はその規模が非常に大きいことおよび固有周期の分離が必ずしも塔に対する基礎運動の影響をなくするとは限らないことを考えるとき、このような方法は得策とは思えない。ここでは塔基礎系を一体として動的解析をおこなう計算機によって自動的に塔基礎の寸法を決定してみる。

2. 問題の定式化

吊橋の塔基礎系の設計が数個の設計変数でもって決定されるように簡略化する必要がある。基礎は直方体のケーソン基礎を考え、基礎の高さおよび基礎の橋軸直角方向の幅は与えられるものとし、橋軸方向の幅を基礎の大きさ決定する設計変数とする。また塔断面の大きさは高さ方向に一定であると考え、その断面性能も断面二次モーメントで表わしこれを塔断面を決定するための変数とする。ここで断面が局部座屈を起こさず、また曲げモーメント、軸力、剪断力などの断面力に効果的に抵抗するように断面係数 A 、断面係数 W と断面二次モーメント I との間に次の関係を考える。

$$\begin{aligned} W &= A I^{3/4} & \text{ここに } A &= 0.78 \\ A &= b I^{1/2} & b &= 0.80 \end{aligned}$$

塔基礎系が地震動を受けても破壊しないという条件を付けるために、与えられた地震動を受ける時の塔の最大変位、最大応力、および基礎の最大回転角などを求める必要がある。そこで塔基礎系を 9 自由度にモデル化してモード解析をおこない、応答スペクトル図を利用して、モード別の最大応答を求め、それらの二乗和平方根を最大応答とした。

さて評価関数を次式で表わすことにする。

$$M = W_T + k_w W_P$$

ここに W_T ; 塔の重量, W_P ; 基礎の重量, k_w ; 基礎のコンクリートの単位重量当りの単価と塔の剛桁の単位重量当りの単価の比,

次に構造物が破壊しない条件として次のような制約条件を考える。

- (1) 圧縮力 P によって塔が全体としての座底を起こしてはならない。
- (2) 平常時（地震が発生していない時の意）における塔基部での圧縮力が許容応力を越えてはならない。
- (3) 地震時における塔の質点の各断面での繰圧縮力が降伏応力を越えてはならない。
- (4) 基礎の回転振動による基礎頂の最大変位が与えられた許容限度を越えてはならない。
- (5) 地震時に基礎底面の端において地盤に対する圧縮力が地盤の降伏応力を越えてはならない。
- (6) 地震加速度により基礎が転倒してはならない。

これらを設計変数を用いて表す。そして評価関数、制約条件が定式化されると、あとは制約条件付き評価関数の最小化という問題になる。つまり条件

$$f_j(x_1, x_2) \leq 0$$

のもとに評価関数の

$$M(x_1, x_2) \Rightarrow \min$$

ということになる。ここでは f_j , あるいは M は設計変数 x_1, x_2 に関して非線形となる。非線形の最適化問題の解析法はいろいろあるが、設計変数が少なく制約式の数が多い場合には、Alternate step method が有効である。

3. 数値計算

計算例として用いた中橋は本田連絡橋のセンタースパン 1100 m の石レンジブリ橋である。種々の設計条件を加えて、入力地震の最大加速度は 200 gal とし、本田連絡橋耐震合同研究会報告の岩盤を想定した応答スペクトル曲線を用いて計算した。その結果について述べる。基礎頂許容変位が 10 cm の場合、基礎の大きさは基礎頂変位の制約で決定され、基礎頂許容変位 15 cm の場合、塔基部の破壊に対する制約で決定される。また塔の大きさは地盤が軟いと塔基部破壊条件により決まり、固いと塔の全体座底（安全率 2）あるいは平常時圧縮応力の制限（安全率 1.5）によって決定する。一般に地盤が軟らかいと曲げモーメントによる塔基部破壊がクリティカルな制約になるが、地盤弾性係数がほぼ $2.5 \times 10^4 \text{ t/m}^2$ 以上になると、塔の全体座底あるいは平常時圧縮応力の制約の方が先にクリティカルになることがわかる。そこで塔基部を増大した修正型の塔を用いると、塔断面の大きさは下に何かって漸増する必要はなく、塔基部のみ増大すればよいことがわかる。また評価関数の値は身断面に比べて約 90% に減少している。

4. あとがき

以上、経済性を指標にし、最適設計の概念を応用して地震動をうける吊橋の塔基礎系の一義的な設計を試みた。さらにいろいろな問題が改良されれば実際の設計に一つの参考資料を与えることばできると思う。

流れ図

