

I-B 262 高脚式構造物における地震力計算方法に関する研究

パシフィックコンサルタンツ 正会員 朱 兵

1. まえがき

土木技術者は阪神大震災に倒壊した阪神高速道路高架橋に何を学ぶのか、倒壊の原因はいったい何であろうかなど、いろいろな課題を完全に解決してはじめて、耐震設計のレベルアップが実現できる。

本研究は、高架橋倒壊の原因の検討をはじめとして、動的システム理論の視点により、高脚式構造物における地震力の計算方法を新たに提案する。

2. 高架橋倒壊の原因

高架橋倒壊の原因は橋脚に働く曲げモーメントの作用であったと考える。理由は以下の2つである。

(1) 倒壊の状態

現場の状況により、倒壊した橋脚はほとんど橋脚の基部（地面付近）で折れたことがわかり、それは曲げモーメントによる破壊であった。水平力が単柱式橋脚の重心に働く場合に、重心から下へ橋脚のすべての断面に、その水平力に抵抗する曲げモーメントが生じる。そして、地面付近の曲げモーメントが最も大きいので、橋脚はほとんど基部で折れた。

(2) 応力度の比較

水平力が重心に働くと、曲げ破壊が先行する。一般にひびわれが発生する前に、せん断応力より曲げ応力の方が強度極限に近く、ひびわれがあったら、曲げ応力の増加がせん断応力より速いからである。式(1)は曲げ応力とせん断応力の比である。

$$\xi = \sigma_b / \tau = 8R/d \quad (1)$$

ここに、 R ：重心高； d ：橋脚直径

重心高 R は定数であるので、橋脚にひびわれが発生する（橋脚直径 d が小さくなる）と、 ξ が増える。すなわち、曲げ圧縮応力の増加がより速い。よって、曲げ破壊がやはり先行する。

3. 震度法に関する思考

震度法の設計震度 kh は水平方向の地震加速度 a と重力加速度 g の比であり、 $a=kh \cdot g$ である。震度法を用いて橋脚の水平耐力を照査するのは、橋脚が破壊するかどうかを瞬間の地震加速度によって判断することである。その時刻までの地震加速度を考慮しない。言い換えれば、瞬間の地震加速度 a は前もって決めた加速度 $kh \cdot g$ 以下であれば、橋脚の水平耐力を超えないので倒壊するわけではなく、地震加速度 a は $kh \cdot g$ 以上となれば、橋脚の水平耐力が不足であるので倒壊は当然である。

しかしながら、阪神大震災の被災区域では地震の最大水平加速度がほぼ 350cm/s^2 ($kh=0.36$ 相当)を超えた。橋脚の水平耐力がそれほど強くないので、もし震度法を用いて計算すれば、倒壊がもっと多かったわけであるが、実際の状況はそうではなかった。特に 800cm/s^2 以上の地震水平加速度が観測された三宮付近に深江地区のような高架橋倒壊の事故はなかった。よって、震度法による結論は実際の状況からかなり外れていると言える。その原因は、震度法は瞬間の地震加速度のみを考慮するからであると考えられる。

4. 動的システムの視点による地震力の計算方法

入力と出力の関係により、システムは静的システムおよび動的システムの2種類に分けられる。静的システムとは、 t 時刻にシステムの出力（応答）はその時刻の入力に決められるものであるが、動的システムとは、 t 時刻にシステムの出力（応答）は $t-1$ 時刻以前の入力に影響を及ぼされるものである。

地震時に、地盤振動の周波数が極めて高く、そして橋脚の応答に遅延が存在しているので、橋脚が動的

システムに該当すると考える。また、 $t=0$ 時刻に地震が発生していなく、高架橋が静止状態にあり、 $t=1$ 時刻に地震が発生すると仮定すれば、 t 時刻に橋脚に働く力は図1、図2に示す。

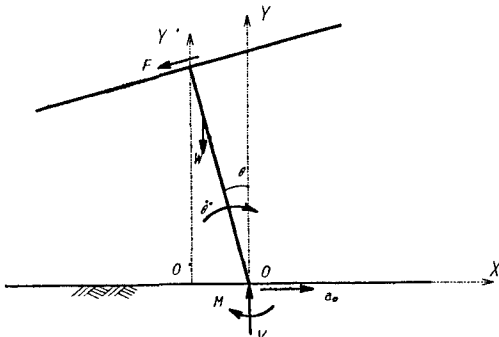


図1 単柱式橋脚に働く力

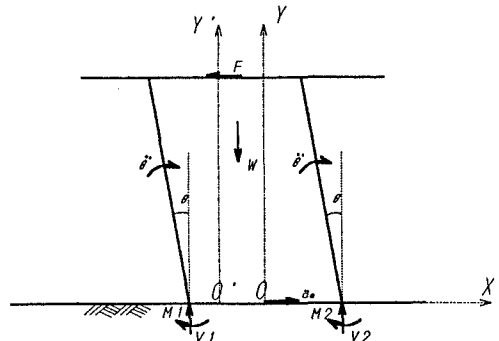


図2 門型橋脚に働く力

本文は水平方向の地震力、地震加速度のみ考慮し、それに橋軸方向の隣区間が同期振動をしないものとする。よって、図1に示す力学モデルのつり合い方程式は式(2)～(4)である。

$$-F \cos \theta + P(t-1) + p(t) = mR\ddot{\theta} \cos \theta + mR\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2)$$

$$-F \sin \theta - W + V = mR\ddot{\theta} \sin \theta - mR\dot{\theta}^2 \cos \theta \quad (3)$$

$$Fh + WR \sin \theta - M(t) = -mR^2 \ddot{\theta} \quad (4)$$

ここに、 F ：隣区間の引張り力、 $P(t-1)$ ： $t-1$ 時刻までの地震力の合力、 $p(t)$ ： t 時刻の地震力、

m ：橋体の質量、 R ：重心高、 W ：橋体の重量、 V ：鉛直方向の支持力、 h ：力 F の作用高、

$M(t)$ ： t 時刻橋脚基部に働く曲げモーメント、 θ ：橋脚軸線と鉛直線となす角

式(2)～(4)を整理すると、式(5)となる。

$$M(t) = F(h - R) + mR \sum_{i=1}^{t-1} a_0(i) + mRa_0(t) \quad (5)$$

ここに、 $a_0(t)$ ： t 時刻に地盤の水平方向の加速度

式(5)は、 t 時刻に橋脚基部の断面に生じる曲げモーメント $M(t)$ は隣区間の引張り力及び $t-1$ 時刻までの地震力の合力、 t 時刻の地震力からなることを表わす。もし F を定数として考えれば、橋脚の断面に生じる曲げモーメントは時間にわたる地震力の合力に決められる。すなわち、橋脚は破壊するかどうかは瞬間の地震力によることでなく、ある時間以内に発生する地震力の合力によるものである。

門型の橋脚（図2参照）であれば、曲げモーメントの方程式は式(6)となる。

$$M(t) = F(h - R) + mR \sum_{i=1}^{t-1} a_0(i) + mRa_0(t) - V_1 b \quad (6)$$

ここに、 V_1 ：圧縮側の橋脚の地盤支持力、 b ：橋脚の間隔

式(5)と異なるところは等号の右側に第4項である。それは橋脚断面力を減す役割があるものである。したがって、単柱式より門型の方が水平力に抵抗することに適合すると言える。

5. 結論

(1) 震度法のように瞬間の地震力によって高脚式構造物の水平耐力を判断する方法はあまり正確な結論が得られない。

(2) 地震時に、橋脚の断面に生じる曲げモーメントは遅延時間にわたる地震力の合力による。

(3) 耐震設計上、橋脚を動的システムとして地震力を計算する必要がある。

(4) 水平地震力に対する耐力が構造の形式によって異なる。