I-92　高橋脚連続曲線桁橋の地震応答解析

熊本大学　正員　吉村虎蔵
佐世保重工　正員　○官村重範

〔1〕まえがき

筆者等はさきに高橋脚の連続直線桁橋の地震応答を動的に解析し、静的震度法による解析結果との比較などについて発表したが、ここでは高橋脚の連線曲線桁橋の地震応答の立体解析の方法と，その解析結果と静的解析結果の比較などについて報告する。

〔2〕解析理論の概要

A.　固有値の解析　高橋脚の連線曲線桁橋は，通常、橋脚と桁部とが橋脚上でピン結されて橋脚は弾性可動支承として働き、桁は支承上ではその軸線方向にのみ回転可能で、軸線と直角方向に橋脚上で固定されているので、橋脚と桁部を一体の構造として取扱わなければならない。このとき三次元構造解析が必要で、二次元解析では不都合が生じることがある。また連続体としての解析は道路線形などの関係で困難が伴うので、短い直線要素の結合よりなるとみなして解くことが多い。後者の場合振動解析は集中質量法を用いることになる。いま、骨組構造のx, y, z方向変位のたわみ性行列を$\mathbb{F}$とし、変形と外力のベクトルをそれぞれ$\mathbb{D}, \mathbb{P}$とすると，　$\mathbb{D}=\mathbb{F}\mathbb{P}$　(1)

この構造が自由振動しているときの変位を$\mathbb{D}=\phi \sin\omega t$とすると$\mathbb{P}$は次式でおきかえることができる。

$\mathbb{P}=-m_1\mathbb{M}\ddot{\mathbb{D}}=m_1\omega^2\mathbb{M}\phi\sin\omega t$　ここに$m_1\mathbb{M}$は質量行列で対角行列である。

いま$\sin\omega t=1$の時刻をとると式(1)は

$$(\mathbb{F}\mathbb{M}-\lambda\mathbb{I})\phi=0 \qquad (2)$$

ここに$\lambda=1/m_1\omega^2$，$\mathbb{I}$は単位行列，よって振動数方程式は次式となる。

$$\det|\mathbb{F}\mathbb{M}-\lambda\mathbb{I}|=0 \qquad (3)$$

行列$\mathbb{F}\mathbb{M}$は一般に対称行列でないので，固有値を求めるにはDanilevski-Newton法などによればよい。しかし式(2)は次のように変えることができる。

$$(\mathbb{M}^{\frac{1}{2}}\mathbb{F}\mathbb{M}^{\frac{1}{2}}-\lambda\mathbb{I})\mathbb{M}^{\frac{1}{2}}\phi=0 \qquad (4)$$

行列$\mathbb{F}$は対称行列であるからカッコ内の才一項は対称行列である。ゆえに振動数方程式

$$\det|\mathbb{M}^{\frac{1}{2}}\mathbb{F}\mathbb{M}^{\frac{1}{2}}-\lambda\mathbb{I}|=0 \qquad (5)$$

はJacobi法で解く事ができる。このときモードベクトルの計算では$\mathbb{M}^{\frac{1}{2}}\phi=\overline{\Phi}$が求まるので$\phi=\mathbb{M}^{-\frac{1}{2}}\overline{\Phi}$から求めなければならない。

B.　三次元応答解析　Modal Analysisによれば、動的応答は各振動次数についての応答値の和として求められる。いま地震加速度$[\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0]^t=[a, b, c]^t\ddot{d}_0$をうける多質点系立体骨組の変位応答値のうち$x, y, z$方向の変位を，本邦地震平均応答スペクトルを用いて求めることにする。m次振動については次式が得られる。

$$D_{m,i}=\gamma_m\beta_m\ddot{d}_0\phi_{m,i}$$

ここに$D_{m,i}=[D^x_{m,i}, D^y_{m,i}, D^z_{m,i}]^t$すなわち$m$次振動による$i$点の変位ベクトル。$\gamma_m$は$m$次振動の一質点系の最大地震加速度$\ddot{d}_0=1gal$の地震による最大変位応答。また$\phi_{m,i}=[\phi^x_{m,i}, \phi^y_{m,i}, \phi^z_{m,i}]^t$すなわち$m$次振動

におけるi点の振動モードベクトル。β_mは次式で示される。

$$\beta_m=\frac{\phi_m^t M'\mathbb{B}}{\phi_m^t M''\phi_m}=\frac{\sum_i m_i' \phi_{m,i}^t \mathbb{A}}{\sum_i m_i'' \phi_{m,i}^t \phi_{m,i}}=\frac{\sum_i m_i'(\phi_{m,i}^x a+\phi_{m,i}^y b+\phi_{m,i}^z c)}{\sum_i m_i''\{(\phi_{m,i}^x)^2+(\phi_{m,i}^y)^2+(\phi_{m,i}^z)^2\}} \tag{6}$$

ここに、$\mathbb{A}=[a,b,c]^t$ すなわち地震加速度のx,y,z成分ベクトル、$\mathbb{B}=[\mathbb{A},\mathbb{A},\cdots\mathbb{A}]^t$、$M'$, M''は質量行列であるが橋脚を一質点におきかえるとき，上式の分子と分母では橋脚上の質量が異なる値をとるので区別して示した。連続体としての解析の場合は骨組全体に沿っての積分となるからである。i点の最大変位応答は Root Mean Square 法により次式となる。

$$D_i^x=[\sum_m(g_m\beta_m\phi_{m,i}^x\ddot{d}_0)^2]^{\frac{1}{2}},\quad D_i^y=[\sum_m(g_m\beta_m\phi_{m,i}^y\ddot{d}_0)^2]^{\frac{1}{2}},\quad D_i^z=[\sum_m(g_m\beta_m\phi_{m,i}^z\ddot{d}_0)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

［3］ 解析例

解析モデルとして大谷橋を取り上げた。本橋は非合成鋼箱桁の6径間連続桁で $30+4@36+30^m$の径間，橋脚は$17\sim30^m$の高さの中空鉄筋コンクリート円形，曲率半径40^mの円弧とクロソイドよりなっている。これを35節点で分けて静的に立体解析して求めた変位の影響係数のうちから，x,y,z変位のみをとり、まず、橋脚上に選んだ7質点系として式(3)で固有値を解いた。鉛直変位は橋脚上では微小であるから無視すると行列式の次数は $7\times2=14$である。別に，各径間中央の桁中点に質点を加えて，13質点系を式(5)で固有値を求めた。このときの行列式の次数は$14+6\times3=32$である。7質点系と13質点系の固有値の比較を表-1に示す。前者の振動モードを図-1に示す。固有値が殆ど差がないので4次までのモードは一致する。設計基準震度 0.15に対して最大地震加速度 147 gal に対する橋脚上の最大変位応答を、地震の方向 I, II, III, $\cdots$ について計算し、図-2に○印で示す。なお道路公団の震度規定による静的応答値を●印で同図中に記入して比較してある。動的解析では減衰係数比 $h=5\%$をとった。

むすび。

$P_2\sim P_8$の橋脚高が高いので、各次の固有周期が近い。高い橋脚ほど応答が大。$h=5\%$の動的最大応答は静的解よりやや大きい。

Y-方向に地震が働くときのX-方向応答、X-方向に地震が働くときのY-方向応答が動的と静的では大いに異なる。

表-1 sec.

m	T (7質点系)	T (13質点系)
1	1.229	1.223
2	1.146	1.155
3	1.002	0.995
4	0.830	0.828
5	0.732	0.757
6	0.639	0.714
7	0.581	0.615
8	0.466	0.601

図-1

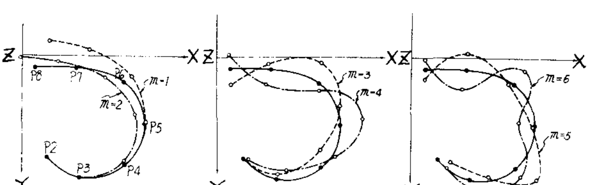

図-2