

高橋脚を有する連続曲線橋の振動特性について

北海道大学工学部 正員 芳村 仁
新日本製鐵 〇正員 前田 博志

1. はしがき 従来、高橋脚橋梁の地震応答計算は、モーダル・ナリシスにより得られる線型微分方程式に実録地震加速度を入れし、数値解を求める方法（直接応答法）、または、あらかじめ求められている地震応答スペクトルから求める方法（応答スペクトル法）などによって行われてきた。ここでは、曲線部材をもつ高橋脚橋梁に対し、弦方向、弦直角方向および斜め方向から地震加速度が作用する場合の応答を、上記のこの方法によって計算してその結果を比較検討し、さらに曲線部材の曲率の変化が応答に及ぼす影響について考察した。この種の構造物の振動解析は既にいくつかなされているが、この報告では、さらに広範囲な解析を目的とした。

2. 直接応答法 振動の方程式を、自由振動に対する解（モード）を用いてモード分解し、その第 j 次の固有振動数 ω_j に対応する線型微分方程式を次式で表わす。

$$\ddot{q}_j - 2\zeta_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\beta_j \ddot{z}(t) \quad (1)$$

ここに、 q_j ；規準座標 β_j ；刺激係数 ζ_j ；減衰比
 $\ddot{z}(t)$ ；入る地震加速度

ただし、 β_j は座標系を図-1のようにとると、

$$\beta_j = \frac{\sum m_i \{ u_{ij} \sin(\alpha - \psi_i) + u_{n+i,j} \cos(\alpha - \psi_i) \}}{\sum m_i (u_{ij}^2 + u_{n+i,j}^2)} \quad (2)$$

ここに、 m_i ；質点質量

$u_{ij}, u_{n+i,j}$ ；第 j 質点の x, y 方向の第 j 次モード

(1)式に $\zeta_j, \omega_j, \beta_j$ の諸定数と加速度時系列 $\ddot{z}(t)$ を与えて数値積分（この報告では、ルンゲ・クッタ・ジル法を用いた）を行ない $q_j, \dot{q}_j, \ddot{q}_j$ を求め、モーダルマトリックス $[u_{ij}]$ を介して、変位、速度、加速度の応答を得ることができる。すなわち、応答値は以下になる。

$$q_i = \sum_j u_{ij} q_j, \quad \dot{q}_i = \sum_j u_{ij} \dot{q}_j, \quad \ddot{q}_i = \sum_j u_{ij} \ddot{q}_j \quad (3)$$

3. 応答スペクトル法 地震応答スペクトルを $S_D(\zeta_j, \omega_j), S_V(\zeta_j, \omega_j), S_A(\zeta_j, \omega_j)$ とすれば、応答値は以下のようになる。

$$q_i = \sum_j u_{ij} \beta_j S_D(\zeta_j, \omega_j), \quad \dot{q}_i = \sum_j u_{ij} \beta_j S_V(\zeta_j, \omega_j), \quad \ddot{q}_i = \sum_j u_{ij} \beta_j S_A(\zeta_j, \omega_j) \quad (4)$$

4. 解析例 図-2に示すような断面をもつ半径140mの5径間連続円弧曲線箱桁橋を解析例とした。上部構造は箱桁であり、下部構造は鋼管であるが、それを図-3に示すような22要素の立体ラーメンに置換し、各節点に水平2方向の動的自由度をもつ集中質量を配して振動解析を行なった。その第3次までの固有周期、固有モードを図-4に示す。

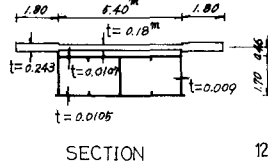


図-2 断面形

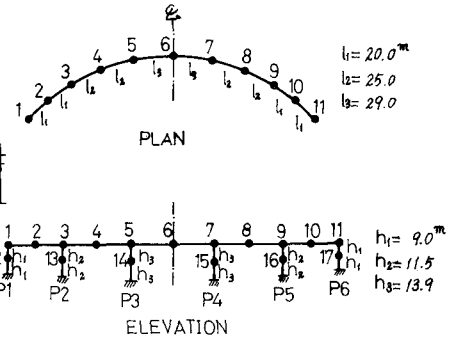


図-3 振動モデル

つぎに、十勝沖地震の加速度記録（'68.5.16 広尾N45°S成分）を用いて、橋の中心線と加速度の入射方向の角度が $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の場合に応答計算を行なった。計算に際しては、固有周期が0.1秒以上（第1次）

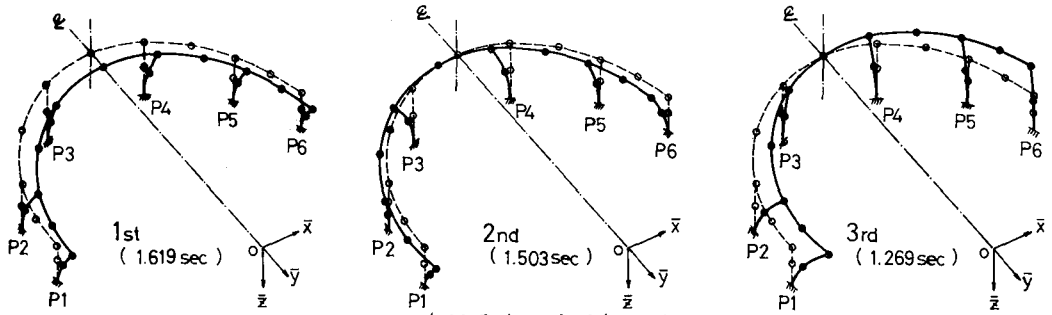


図-4 固有周期 および 固有モード

う第13次まで)のモードのみ考慮した。直接応答法における時間をガミは、 $\Delta t = 0.02 \text{ sec.}$ とした。応答スペクトル法で用いた十勝沖地震の応答スペクトルを図-5に示す。応答断面力の計算は、応答加速度による慣性力が各節点に動的に作用するものとして行なった。減衰比2%の場合の直接応答法によるある時刻の応答曲げモーメントおよび応答スペクトル法による応答曲げモーメントの分布を図-6($\alpha = 0^\circ$ の場合)、図-7($\alpha = 90^\circ$ の場合)、図-8($\alpha = 45^\circ$ の場合)に示す。図中の数字は上段が応答スペクトル法による応答値、下段が直接応答法による応答値である(単位 ton-m)。 $\alpha = 0^\circ, 90^\circ$ の場合は、いずれも応答形が橋の中心線に関して対称もしくは逆対称となるので片側のみ示した。

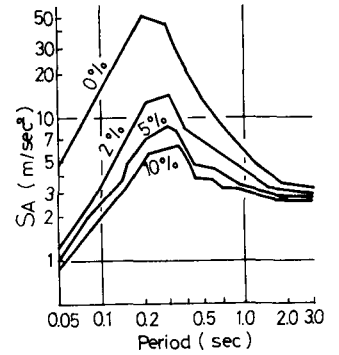


図-5 地震応答スペクトル

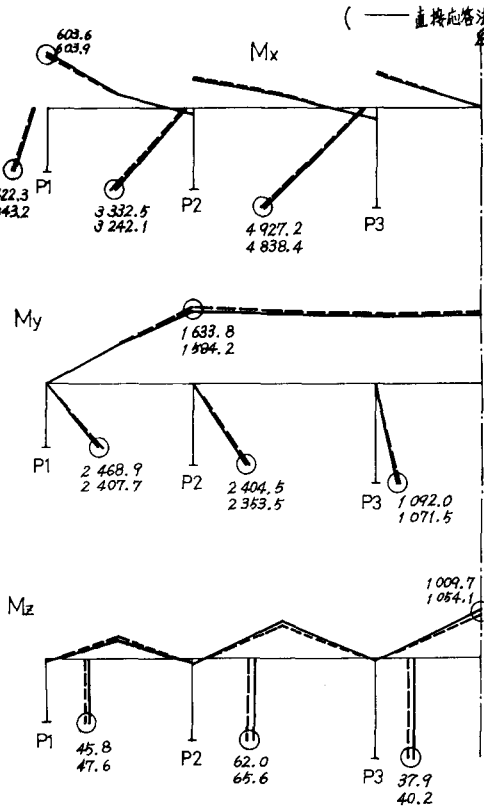


図-6 ($\alpha = 0^\circ$)

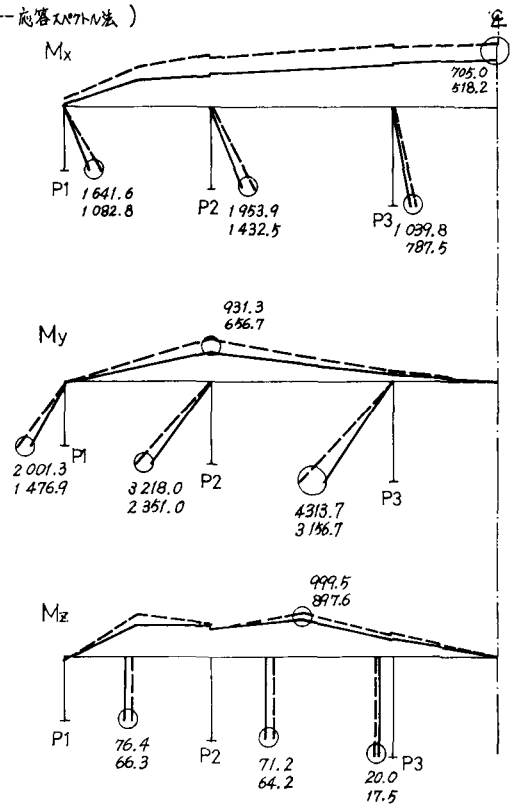


図-7 ($\alpha = 90^\circ$)

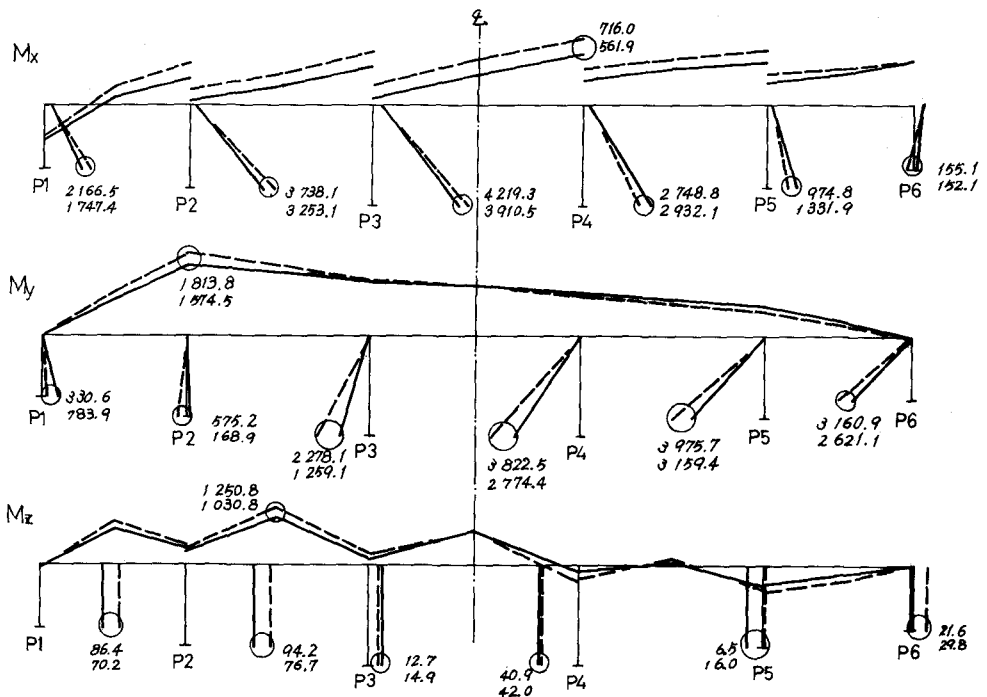


図-8 ($\alpha=45^\circ$)

5. 解析法による計算結果の比較 ①弦直角方向振動($\alpha=0^\circ$)では直接応答法、応答スペクトル法の両者はほぼ一致しているが、応答スペクトル法による結果がやや大きい。しかし、 M_z (桁では鉛直軸回りの曲げ、橋脚ではねじり)は直接応答法による結果がやや大きい。②弦方向振動($\alpha=90^\circ$)では応答スペクトル法による結果がかなり大きい。③斜め方向振動($\alpha=45^\circ$)では応答スペクトル法による結果が大きい。

②, ③の理由として考えられるのは、最大応答を求め、それを入力として用いることにより、振動の時間特性が失われるということである。したがって、応答スペクトル法は適当な地震応答スペクトルが得られれば簡便な方法ではあるが、過大な応答値を与える場合があることに注意しなければならない。

6. 直接応答法における計算結果の検討 ①桁のねじりモーメントは弦直角方向振動の場合に桁端において最大である。②桁の曲げモーメントは弦直角方向振動で最大である。③橋脚の曲げモーメントは弦直角方向振動で最大である。④橋脚のねじりモーメントは斜め方向振動でP1, P2において最大である。

以上の結果により、曲線橋の地震応答計算を行なう場合には、従来行なわれてきた弦方向、弦直角方向振動に加えて、斜め方向振動についても耐震性を検討する必要があることが分かった。

7. 曲率の変化による曲線橋の振動特性の考察 曲線橋の断面諸元および弧の長さを一定としたまま、曲率を種々変化させて、その場合の地震応答の変化を調べることは、直線橋と比較した場合の曲線橋の振動特性を明らかにする良いデータを与えるものと思われる。

7-1. 曲率が変化した場合の固有周期の変化 図-2の床版コンクリートを除いた断面をもつ構造について曲り桁全体の開きの角度が $1^\circ \sim 360^\circ$ と変化した場合の固有周期の変化を対称1次振動(Symm.1st)、逆対称1次および2次振動(Anti-symm.1st, 2nd)について図-9に示す。図中の点線は原構造に関する開きの角度を示

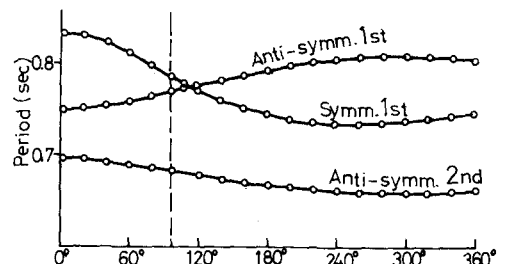


図-9 曲率の変化による固有周期の変化

す。

7-2. 曲率が変化した場合の最大応答曲げモーメントの変化
 十勝沖地震を入れし、減衰比が2%の場合の最大応答曲げモーメントを直接応答法により計算した結果を図-10に示す。これにより以下のことがわかる。
 ① 曲り桁に生ずるねじりモーメント (M_x) は、曲率が大きなるほど大である。
 ② 曲り桁に生ずる曲げモーメントのうち、水平軸回りの曲げモーメント (M_y) は曲率が大きなるほど大であるが鉛直軸回りの曲げモーメント (M_z) は、開きの角度が $180^\circ \sim 240^\circ$ の場合に弦直角方向振動 ($\alpha=0^\circ$) で最大である。
 ③ Pier 1 に生ずる曲げモーメントは弦直角方向振動では開きの角度が $180^\circ \sim 240^\circ$ の場合に最大であり、弦方向振動 ($\alpha=90^\circ$) では直線に近い方 (開きの角度が小さい方) で最大である。
 ④ Pier 2, 3 に生ずる曲げモーメントは直線に近い方で最大である。
 ⑤ Pier 3 に生ずるねじりモーメントは弦直角方向振動では開きの角度が $180^\circ \sim 240^\circ$ で大きく、弦方向振動、斜め方向振動 ($\alpha=45^\circ$) では開きの角度が 360° に近い方が大である。

したがって、曲率が変化した場合の曲線橋の振動特性の変化は、各部に生ずる曲げモーメント、ねじりモーメントの変化がかなり複雑となり、一概にはいえないが、傾向として以下の4点に特徴づけられよう。
 ① 曲り桁のねじりモーメントは曲率が大きなるほど大である。
 ② 曲り桁の鉛直軸回りの曲げモーメントは、ある曲率 (この構造では $180^\circ \sim 240^\circ$) の時に最大となる。

③ 橋脚に生ずる曲げモーメントは直線に近い方が大である。
 ④ 橋脚に生ずるねじりモーメントは曲率が大きい時 (この構造では 180° 以上) 大である。

8. 結 語
 曲線橋の振動特性を主に応答曲げモーメントの面から調べてみたが、結論として以下のことが言える。
 ① 曲線橋の応答曲げモーメントを求める際、従来は弦方向および弦直角方向の2方向の入力加速度のみに依っていたが、斜め方向振動の方が大きな応答値 (特に、曲り桁の曲げモーメントおよび橋脚のねじりモーメント) となる場合もあるので、その曲率によって1, 2の斜め方向の入力加速度による応答計算をも行なうのが望ましい。
 ② 曲線橋の曲率は主に外的要求 (道路交通上など) から決定されるが、できれば図-10 のようなデータにより、その断面に関し、応答値の比較的小さい曲率とあるのが望ましい。

なお、以上の計算は北海道大学大型計算機センターのFACOM 230-60/75 を使用して行なわれた。

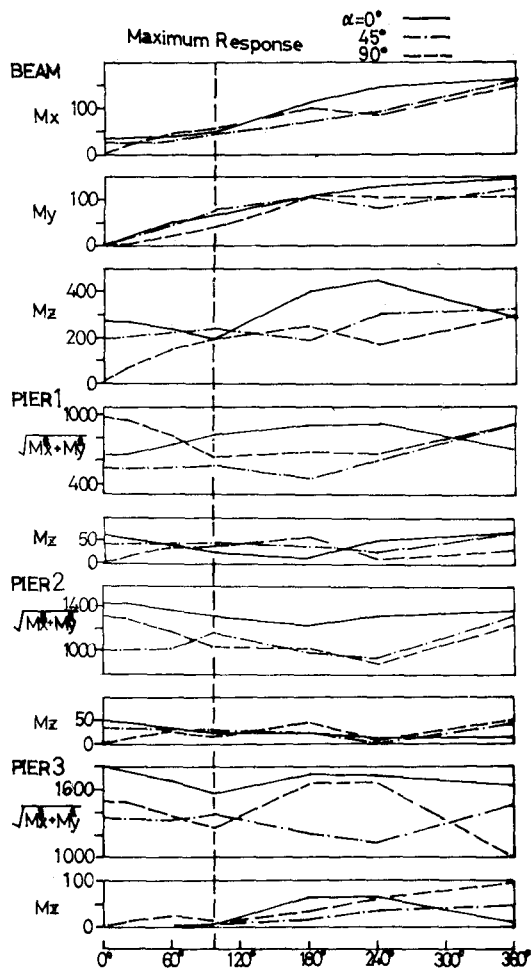


図-10 曲率の変化による最大応答曲げモーメントの変化

参考文献；①外崎、中村、田岡「五径間連続曲線ゲタ (無意根大橋) の水平方向ならびに動的地震力解析について」 (北海道開発局土木試験所報告第50号, S44.3)

②芳村、奥村、岩上「剛性マトリックス法による曲線橋を含む立体構造物の解析について」 (土木学会北海道支部研究発表会論文集第28号, S47.2)