

縦断勾配を有する連続曲線ラーメン橋梁の 動的挙動に関する基礎的検討

藤澤 満維¹・加藤 明²・伊津野 和行³

¹学生員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²学生員 立命館大学 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

1. はじめに

現在、国土幹線自動車道の整備に伴い、高速道路ランプ部やジャンクションなどでは、連続曲線ラーメン橋が建設される場合がある。ランプ部橋梁のように不等橋脚を有する曲線橋では地震時挙動が複雑になることが予想されることから、非線形動的解析による耐震設計が必要である。しかし、曲線橋ではどの方向に地震波形を入力すべきかという課題があり、その最適方法について統一された見解がない。

そこで、本研究では縦断勾配を有する7径間連続曲線ラーメン橋梁を対象橋梁とし、動的設計で考慮すべき基礎的な特性について検討した。地震波入力角度を様々設定して3次元非線形動的解析を行うことにより、その地震応答特性について比較検討を行った。

2. 解析対象橋梁および解析モデル

(1) 解析対象橋梁

解析対象橋梁として図-1 に示す7径間連続曲線ラーメン橋梁を用いた。上部構造に交角約 110 度、曲率半径約 280mの曲率を持ち、各橋脚は円形断面である。桁長 343m、スパン長 49m、縦断勾配 2%を有し、橋脚高が 10m~15mとなっている。各橋脚の名称は左の低い橋脚から P1, P2, P3, P4, P5, P6 とする。橋桁両端では別橋脚 (P0 および P7) 上で可動支承により単純支持されている。各橋脚の軸方向鉄筋は表-1 に示す配筋と全て同じ配筋とした。

橋梁端部を結んだ方向を全体座標の X 方向、それに直行する方向を Y 方向、鉛直方向を Z 方向とする。

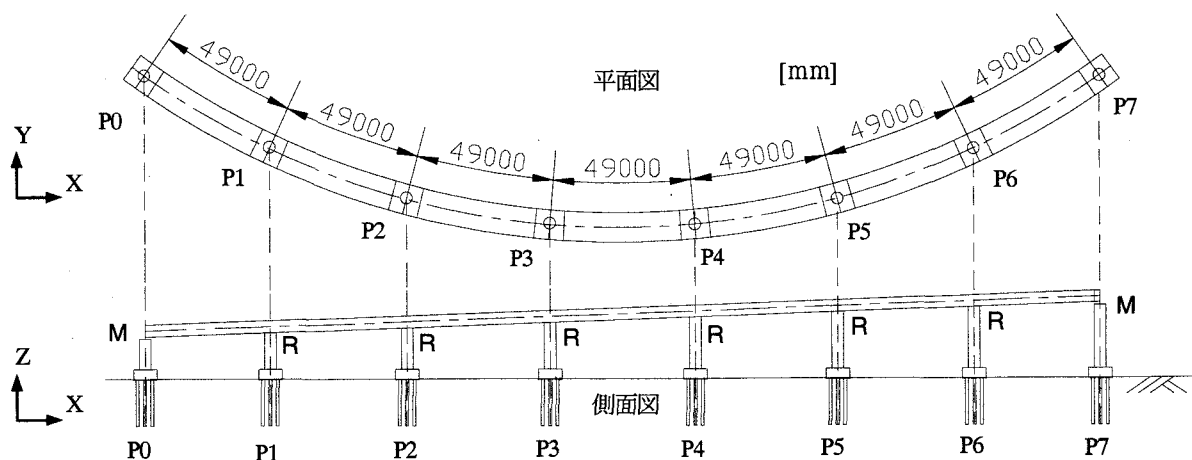


図-1 解析対象橋梁

(2) 解析モデル

上部・下部構造をはり部材、地盤を固定としてモデル化し3次元的に構成した。橋脚の非線形特性は道路橋示方書に従って軸力を考慮して求めた。本対象橋梁の橋脚は円形断面であり、橋軸方向も橋軸直角方向も同じ非線形特性を与えた。履歴復元モデルとしては、修正武田モデルを採用した。

3. 固有値解析結果

有効質量比の卓越した振動モード（以下、主要な振動モード）の振動特性を表-2に、主要な振動モードの振動モード形状を図-2に示した。

5次振動モードは低橋脚部を中心として振り子のような形状、11次振動モードは橋梁全体が全体座標系のX方向に倒れ込むような形状、12、13次振動モードは全体座標系のY方向に倒れ込むような形状になっている。

4. 時刻歴応答解析結果

各部材の減衰定数は上部構造を2%、橋脚部材を5%、基礎部材を20%とした。数値積分法として Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) を用い、積分時間間隔を0.001秒または0.01秒とした。時間間隔の違いによる影響については後述する。減衰特性には Rayleigh 減衰を用いた。Rayleigh 減衰の係数は、固有値解析結果より X 方向の有効質量比がもっとも卓越する11次振動モードを選択し、もう1つは全振動モードの減衰をなるべく反映させるよう、減衰曲線がすべての振動モードの減衰に近くなるよう最小二乗法によって振動モードを選択した。

(1) 地震波入力方法及び解析方法

神戸海洋気象台で実測された EW 波、NS 波による2方向加振を行った。EW 波と NS 波をそれぞれ全体座標系のX方向とY方向に設定し、その地震波の最大加速度が全体座標系のX方向上 (0°) にくるように回転させたものを0度のケースとした。(図-3に示す)

この2つの地震波をそれぞれ反時計回りに 0 度~170度まで 10 度毎に回転させ解析を行った。

(2) 積分時間間隔に関する考察

積分時間間隔は一般的に細かい方がよいと考えられるため、まず 0.001 秒間隔で実施した。その場合、図-4のように、地震波の入力角度によって大きく異なる応答を示す場合があった。例えば、入力角度 20 度の場合に、10 度や 30 度の場合とかなり違いがある。

20 度のケースの応答解析が正しく実行されていない可能性があるため、入力角度を 19.9 度にした場合の計算

表-1 橋脚の配筋 (円形断面：直径 400cm)

1段目			2段目		
本数	鉄筋	直径(cm)	本数	鉄筋	直径(cm)
68	D51	370	34	D51	344

表-2 振動特性 (固有値解析結果)

振動モード	振動数 (Hz)	周期 (s)	有効質量比		モード減衰
			Tx(%)	Ty(%)	
5 次	2.40	0.42	1	32	0.045
11 次	2.87	0.35	52	0	0.040
12 次	3.05	0.33	5	18	0.044
13 次	3.52	0.28	0	7	0.034

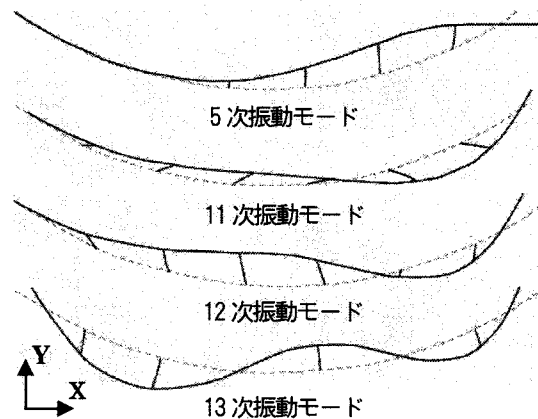


図-2 振動モード形状

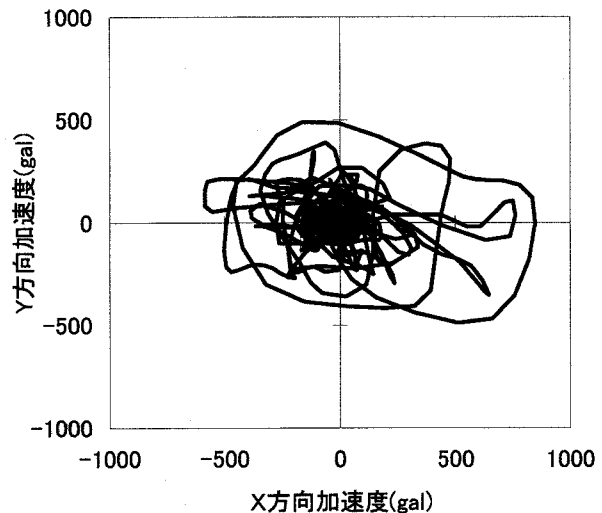


図-3 入力地震波の水平面内での軌跡

を行ったところ、10 度のケースと 30 度のケースの最大応答値の中間の値となった。そのため、20 度のケースでは応答解析に不具合があったことが予測される。

20 度のケースと 19.9 度のケースで、橋脚下端の曲げモーメント応答波形を一部拡大したのが図-5 である。20 度のケースでは、応答波形に一部パルス状の応答が見られる。このように細かく見ればおかしい点があるが、

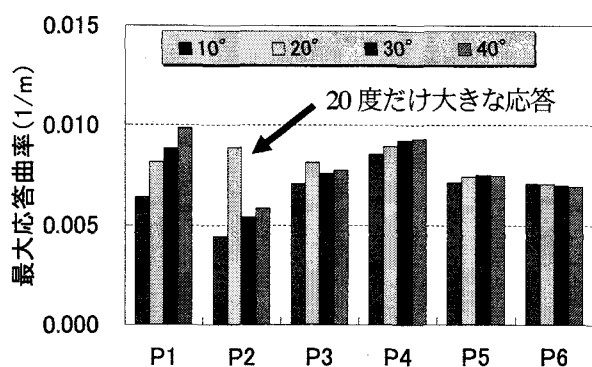


図-4 各橋脚の最大応答曲率 (10度～40度)

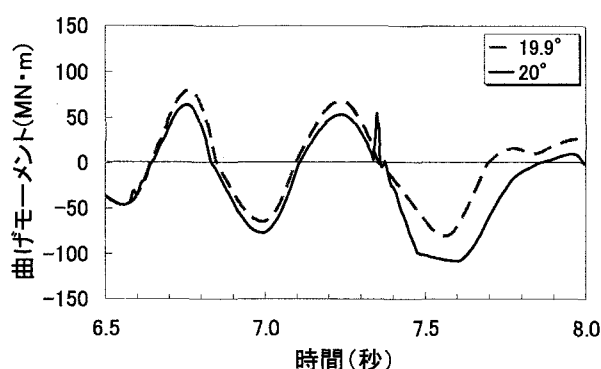
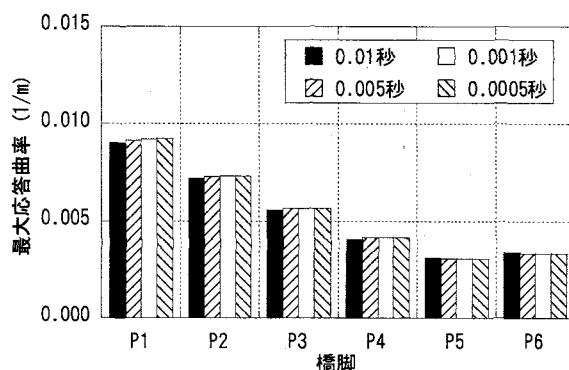
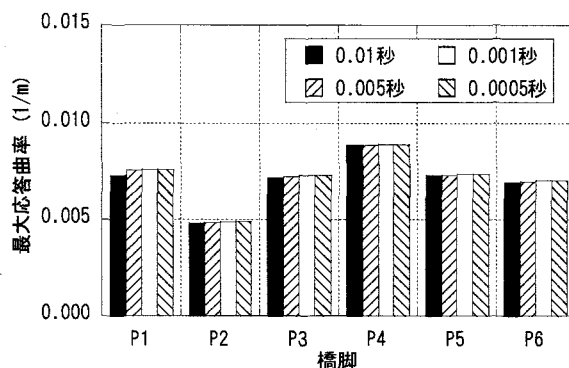


図-5 わずかな入力角度の違いによる応答の差

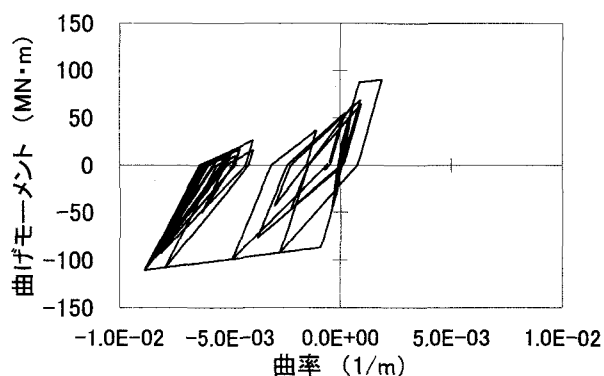


(a) 橋軸方向

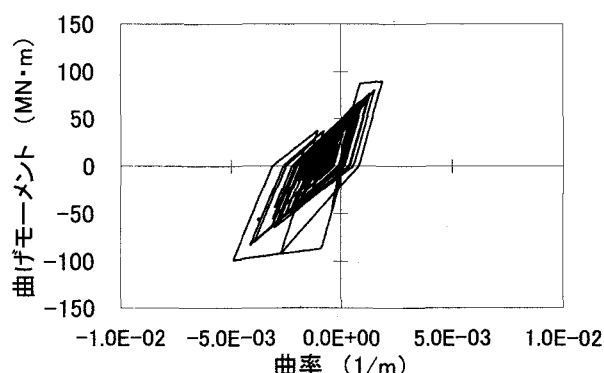


(b) 橋軸直角方向

図-7 積分時間間隔の違いと最大応答曲率の差



(a) 20度のケース



(b) 19.9度のケース

図-6 入力角度の違いによる履歴応答の差

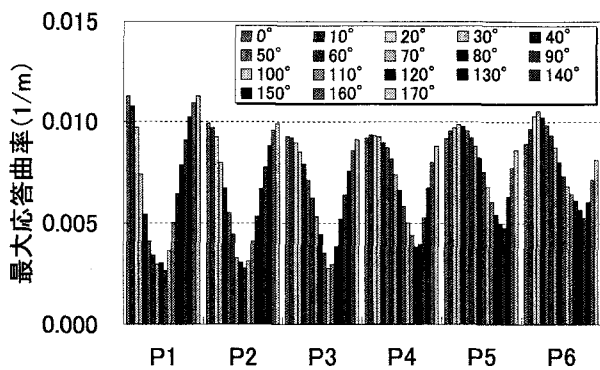
このケースのみの応答解析を行い、最大応答値を見ただけでは不具合に気づかない可能性がある。このわずかな曲げモーメント応答の差によって、全体的な曲げモーメントと曲率の関係は、降伏後の二次剛性が低いため、かなり異なったものになる可能性がある。P2 橋脚の履歴応答波形を図-6 に示す。

また、積分時間間隔を 0.01 秒と広くした場合には、応答結果の精度には 0.001 秒のケースと比較して差があるが、0.001 秒の 20 度のケースのような不具合は生じなかった。精度に関しては、図-7 に示すとおり、0.001 秒間隔で計算した結果と、さらに細かく 0.0005 秒間隔で計算した結果には差がないが、0.01 秒間隔で計算した場合には、それらの値に比べて最大 4% 程度応答結果に差が見られた。

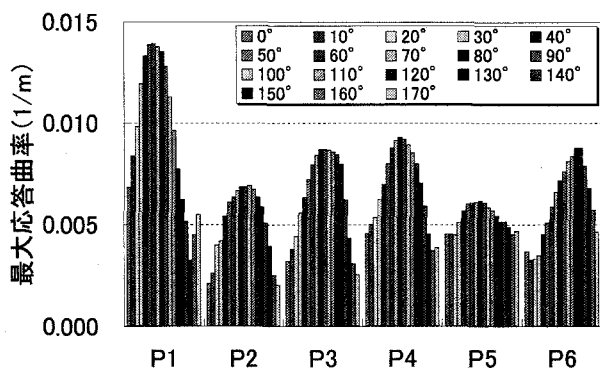
これらの結果は、使用するソフトウェアの特性にも影響され、一般的な結論ではないが、曲線ラーメン橋のように、動的挙動が複雑で、わずかな条件の違いが結果に大きく影響する構造では、解析結果の評価を慎重にする必要がある。

(3) 地震波入力角度に関する考察

図-8 に、入力角度を 10 度ずつ変えた場合における各橋脚下端の最大応答曲率を示す。(a) が各橋脚の橋軸方向、(b) が橋軸直角方向である。



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-8 各橋脚の最大応答率

最大値を示す地震波入力角度は、橋脚ごとに違っており、例えば、P1橋脚の橋軸直角方向の最大値（入力波回転角度50度）と最小値（入力波回転角度160度）では約5倍の違いがある。また、同じ橋脚であっても、橋軸方向と橋軸直角方向とで異なる場合がある。

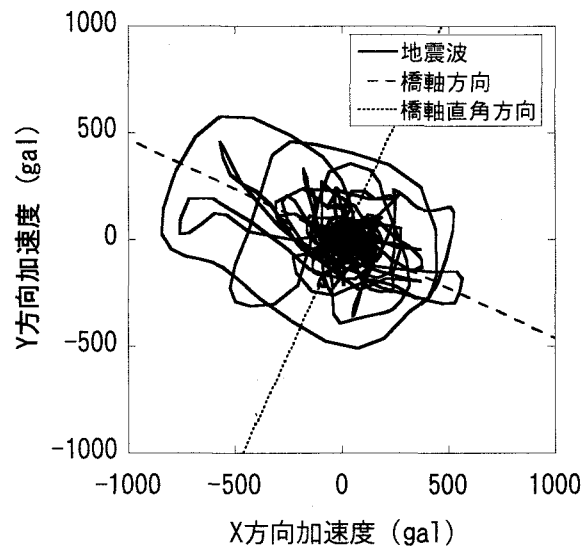
このように、曲線橋において2方向加振で解析する場合、入力波を一定角度毎に回転させて検討することが必須である。どれだけ細かく回転させるかは、対象構造物にもよると考えられるが、この例では、例えば30度ごとの回転では、最大応答値とかなり異なった値を示す可能性が高い。入力地震波を回転させて2方向に合成・分解するのは容易であるため、ルーチン化してしまえば異なる波形を準備して応答計算をすることは、煩雑ではあるが難しくはない。入力波形を細かく回転しない場合には、安全率を考慮して結果を評価する等の工夫が必要であろう。

図-8では、橋軸方向・直角方向ともにP1橋脚が最も大きい値を示している。ここで、P1橋脚の橋軸方向・直角方向で最も大きな最大応答率を示す地震波を図-9に示した。図-9中の破線・点線はそれぞれP1橋脚の橋軸方向・直角方向を示している。橋軸方向では170度のケース、橋軸直角方向で60度のケースである。

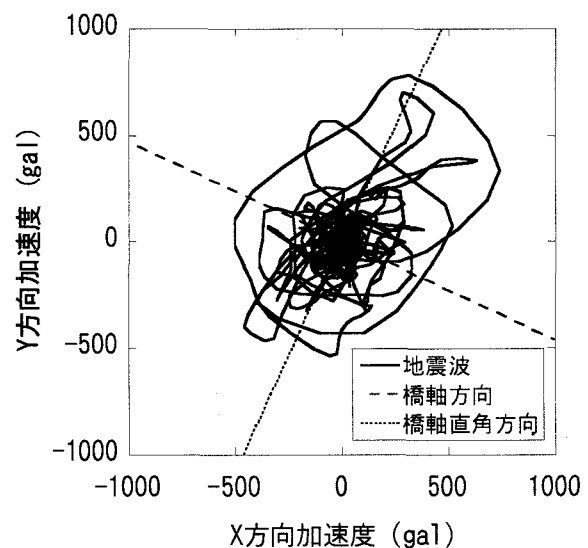
図-9より、P1橋脚の最大応答率で最も大きな値を示した波は、地震波の主要な振動方向と橋軸・橋軸直角方向とがほぼ一致している。しかし、まったく一致してい

るわけではなく、それぞれ170度と60度のケースと、その差も90度になっていない。これは、ラーメン橋では他の橋脚の応答の影響も受けるためであり、桁部剛性の大きさによっても傾向は異なる。

この例では、橋梁全体として絶対座標系X方向に倒れ込む振動形状を示す11次振動モードがP1橋脚の橋軸方向応答に影響し、橋梁全体として絶対座標系Y方向に倒れ込む振動形状を示す12次振動モードが橋軸直角方向の応答に影響していることが考えられる。



(a) P1橋軸方向で最大値を示したケース



(b) P1橋軸直角方向で最大値を示したケース

図-9 最大応答率を示した入力地震波

5. まとめ

縦断勾配を有する連続曲線ラーメン橋梁の動的挙動について基礎的な検討を行った。わずかな条件の違いが大きく応答結果に影響するため注意を要する。