

## 曲線ラーメン橋の地震応答における交角の影響について

本間 雅裕<sup>1</sup> ・ 伊津野 和行<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 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)

<sup>2</sup>正会員 工博 立命館大学助教授 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、ネットワークの充実を目標とし、国土開発幹線自動車道の整備が進められている。それに伴い、高速道路ランプ部やジャンクション等では、多くの曲線連続橋が建設されている。このような曲線連続橋では、直線連続橋とは異なり、地震時における挙動が複雑になることが予想される<sup>1)</sup>。道路橋示方書<sup>2)</sup>においては、その耐震性照査に際して、地盤バネや部材の非線形性を考慮した動的解析によるものが望ましいと述べられており、三次元非線形動的解析による構造物の挙動把握が重要となってくる。

曲線ラーメン橋は、どの方向にもラーメンとして水平力に抵抗するため、三次元的な広がりを持った全体系として考える必要があり、直線ラーメン橋とは異なった扱いが必要となる。直線橋であれば橋軸方向と橋軸直角方向と別々に解析した結果と、両方を同時に考慮して解析した結果とで、大きな差は生じないと予測される。一方、曲線橋であれば三次元的な解析が必要となる。しかし、曲率がどの程度であれば、便宜上、直線橋とみなした解析が可能なのか、明確な判断基準がない。

そこで本研究では、曲線連続ラーメン橋の交角の変化に伴う挙動の違いを把握するため、上部構造が異なった交角を有する、橋脚高さの等しい7径間連続ラーメン橋を例として、三次元非線形地震応答解析を行い、その挙動について考察を行った。

### 2. 解析モデル・解析方法

解析モデルは、桁長347m、スパン長39m~54m(表-1)の鋼箱桁と橋脚高さ15m、直径4mのRC円形単柱橋脚とが剛結された7径間連続ラーメン橋梁を用い、各スパンをそれぞれのケースで等しくしたまま交角を変化

表-1 スパン長

	p0-p1	p1-p2	p2-p3	p3-p4	p4-p5	p5-p6	p6-p7
スパン長 (m)	39	40	54	54	53	54	53

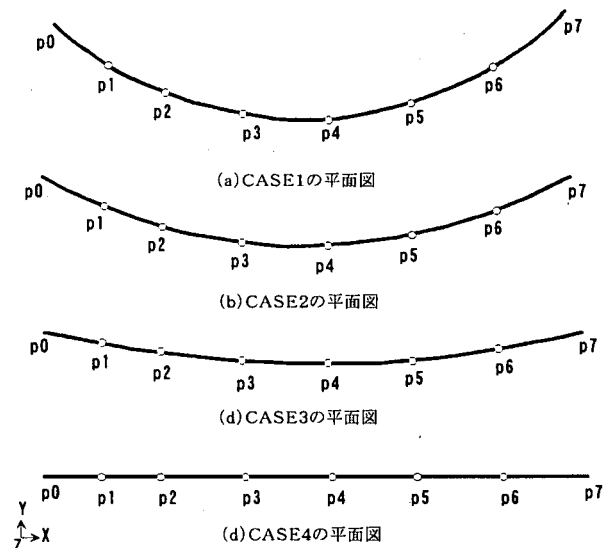


図-1 解析モデル

させた①交角90度[曲率半径221m] (CASE1)②交角120度[曲率半径331m] (CASE2)③交角150度[曲率半径663m] (CASE3)④交角180度 (CASE4)の4モデルを用いた。

また、p0、p7ともに隣接橋の橋脚で支持されているものとし、Z軸方向を拘束、橋軸方向は自由、橋軸直角方向には、橋軸回りと連成するバネで拘束した。なお、X軸を、橋梁端部P0、P7を結ぶ方向に設定し、Y軸をX軸に直行する水平方向、Z軸を鉛直方向に設定した。

モデルは、集中質量系による三次元骨組構造を用いて作成し、上部・下部構造ともはり部材とし、地盤の影響も連成バネで考慮している。また、非線形性に関しては、

表-2 振動モード特性

	振動次数	固有周期 (SEC)	刺激係数 X	刺激係数 Y	刺激係数 Z	有効質量比 X(%)	有効質量比 Y(%)	有効質量比 Z(%)
CASE1	1	0.69	13.21	18.29	3.20	11.1	21.2	0.7
	2	0.63	27.22	16.07	1.25	47.0	16.4	0.1
	3	0.61	9.72	14.36	4.09	6.0	13.1	1.1
CASE2	1	0.71	13.28	12.08	4.71	11.2	9.3	1.4
	2	0.64	16.05	25.03	1.61	16.4	39.8	0.2
	3	0.61	23.19	8.49	5.76	34.1	4.6	2.1
CASE3	1	0.73	12.96	5.99	6.15	10.7	2.3	2.4
	2	0.64	8.37	28.74	0.02	4.4	52.4	0.0
	3	0.61	27.29	5.70	6.02	47.3	2.1	2.3
CASE4	1	0.74	13.10	0.00	6.41	10.9	0.0	2.7
	2	0.64	0.00	30.00	0.00	0.0	57.1	0.0
	3	0.62	28.29	0.00	6.28	50.8	0.0	2.5

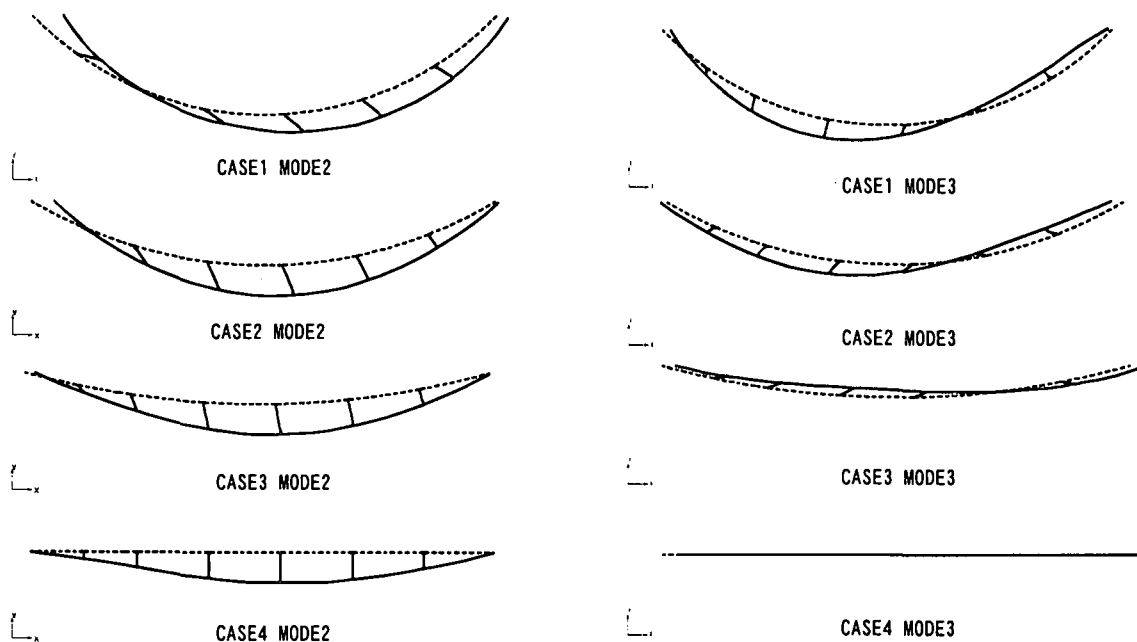


図-2 固有振動モード

橋脚要素の橋軸・橋軸直角方向に修正武田モデルを適用した。その他の部材は線形部材としている。

減衰定数は、上部工 2%、橋脚 5%、基礎 20%とし、ひずみエネルギー比例型減衰を仮定した。

また、入力地震波は、日本道路協会の標準地震入力例<sup>3)</sup>のレベル 2 タイプ II 波形を用い、X、Y 方向にそれぞれ波形 1、波形 2 を入力した。

### 3. 固有値解析結果

曲線ラーメン橋は複雑な挙動が予想されるため、その構造物の振動特性を把握することが特に重要となる。そこで、各ケースにおいて、固有値解析を行った。

表-2 に各次の主要な固有周期、刺激係数、及び有効質量比を示す。これによれば、どのケースにおいても 1 次から 3 次の振動モードの有効質量比が大きい。CASE1 以

外では、特に 2 次と 3 次の振動モードが卓越することがわかる。しかしながら、1, 2, 3 次における有効質量比の合計は X 方向で、60%前後、Y 方向で 50%前後となっており高次の振動モードもかなり影響してくると思われる。また、Z 方向の卓越するのは高次の振動モードで、どのケースにおいても同じような振動モードとなった。

CASE4 の直線橋では、1 次と 3 次振動モードにおける Y 軸方向の刺激係数がゼロであり、2 次振動モードでは X 軸方向がゼロである。よって、X 軸（この場合橋軸）方向と Y 軸（橋軸直角）方向を別々に解析しても、ほぼ正しい結果が得られる。CASE3 も、どちらかの方向の刺激係数が他方向に比べて大きい。よって、それぞれの軸方向に対する解析によって、全体挙動を推定できる可能性がある。しかし、CASE1 と CASE2 では、両方向の刺激係数が 1 次、2 次モードで同じオーダーであり、それぞれの軸方向での解析を適用することには無理がある。

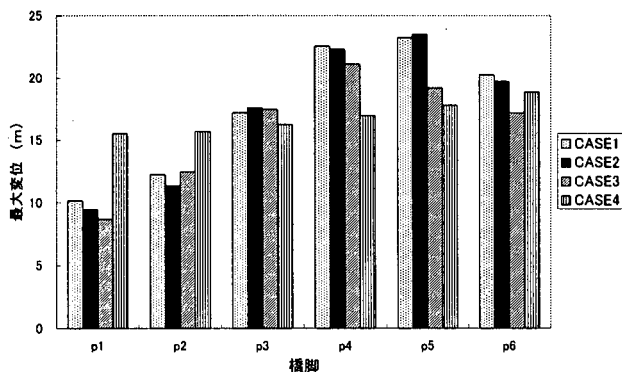


図-3 橋軸方向最大変位

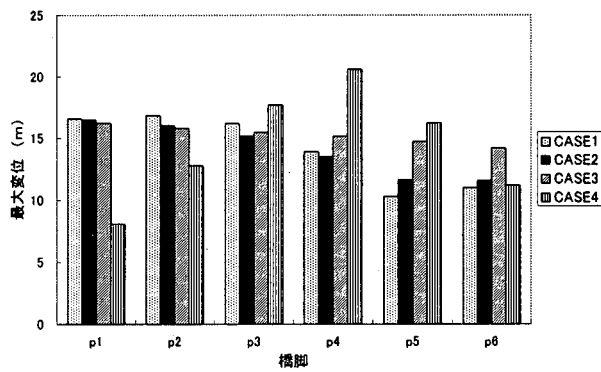


図-4 橋軸直角最大変位

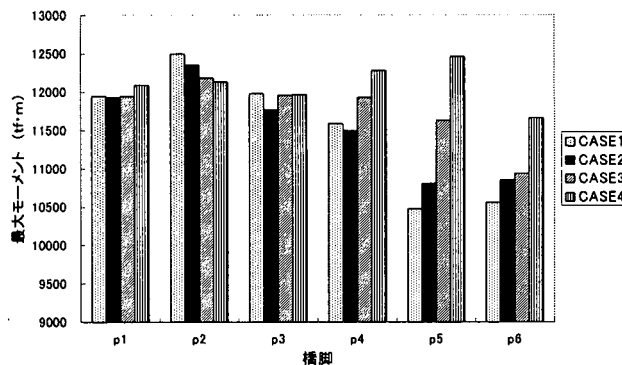


図-5 橋軸直角回りのモーメント

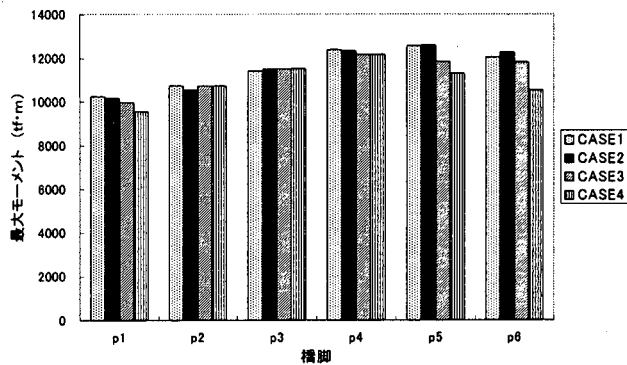


図-6 橋軸回りのモーメント

それぞれのケースにおける有効質量比の大きい2次振動モード、3次振動モードの形状を図-2に示した。CASE4では、橋軸直角方向に橋全体として同じ方向に振動しているのに対し、CASE3、CASE2、CASE1と交角が小さくなるにつれて橋の左端と右端の振動方向が逆となるねじれが発生している。このねじれの発生が橋の挙動に大きな影響を与える要因の1つであると考えられる。

端部の橋脚に比べて中央部の応答が大きい。2次振動モードの影響を強く受けていると考えられる。

また、他の3ケースを比較してみると、CASE3はどの橋脚においてもほぼ同じような値となっている。また、CASE1とCASE2は、p5橋脚のあたりで最大変位量が小さくなっているのが分かる。これは、図-2の固有振動モードの3次振動モードの形状と比較的傾向が似ている。3次振動モードは、ねじれが卓越しており、この影響が表れているものだと考えられる。

以上のことから考えると、今回の解析においては、CASE4では、橋軸方向、橋軸直角方向の最大変位が、それぞれ3次振動モード、2次振動モードの影響を受けているのに対し、CASE1とCASE2ではねじれが発生し、橋脚ごとに違った挙動をするため、橋脚によって最大変位に差が生じたものと考えられる。

#### 4. 非線形応答解析結果

##### (1) 最大応答変位

まず、各橋脚天端における橋軸方向の最大応答変位を図-3に示す。

CASE4は、他のケースと違って、どの橋脚においてもほぼ同じ値を示している。その他のケースでは、橋脚によってかなりのばらつきがでており、CASE1では最大で約13cm、CASE2で約14cmの差が生じている。これは、ねじれの発生の影響により、橋脚ごとに異なった挙動をしているためであると考えられる。

また、p4やp5といった中央部の橋脚では、曲線橋(CASE1~CASE3)の応答が直線橋(CASE4)よりも大きくなった。

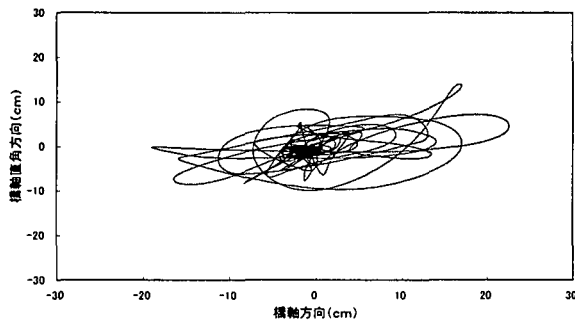
次に、橋脚天端における橋軸直角方向の最大応答変位を図-4に示す。

CASE4が、他のケースのものとは傾向が違っており、

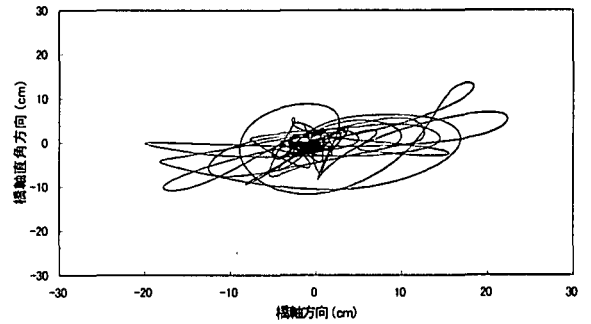
##### (2) 最大応答モーメント

橋脚基部における橋軸直角回りの最大応答モーメントを図-5に示す。

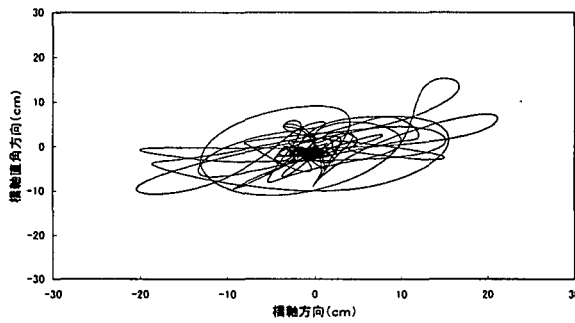
まず、橋軸直角回りの最大応答モーメントを見てみると、どの橋脚でもほぼ同様の値であった。しかし、CASE1、CASE2、CASE3では、橋脚によってかなりの差が生じていた。CASE1では最大で約2000tf・m、CASE2で約1500tf・mの差が生じた。この結果から、交角が小さくなるほど橋軸直角回りのモーメントの差は大きくなる傾向



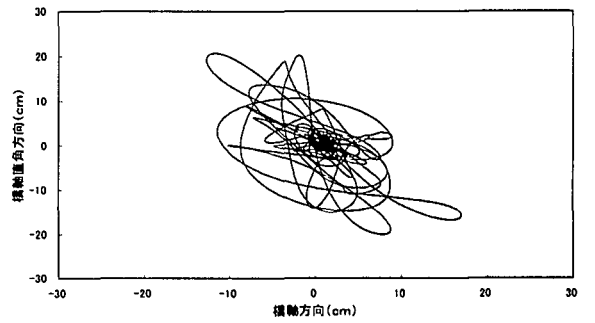
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4

図-7 p4 橋脚における橋脚天端の挙動

があることがわかる。

次に、橋軸回りの最大応答モーメントを図-6に示す。どのケースにおいてもほぼ同じ値である。

図-3, 4の変位応答と傾向が違ふことから、高次振動モードの影響も大きいことが伺える。

### (3) 橋脚天端の挙動

今まで見てきたように、曲線ラーメン橋の挙動は大変複雑なものであり、実際にどのような挙動をしているのか把握するのは難しい。そこで、応答変位が比較的大きいp4橋脚を例として用い、その天端の挙動を表した図を図-7に示した。

この図から、直橋であるCASE4は橋脚が円を描くように、どの方向にも振動している様子がわかる。

それに比べて、CASE1、CASE2、CASE3は、橋軸方向の揺れが卓越して楕円状の軌道を描きながら振動している様子がわかる。

なお、本計算例では、円形断面の橋脚をモデル化したため、断面形状による振動の卓越方向はない。しかし、矩形断面では、橋軸、橋軸直角方向の曲げ剛性が異なる場合もありその挙動に注意を要する。

## 5. まとめ

今回の交角を変化させた7径間連続曲線ラーメン橋の解析結果から、以下に述べるような結果が得られた。

- (1) 固有値解析の結果から、交角が小さくなるほど有効質量比の大きい卓越する振動モードがなく、同程度の刺激係数をもつ振動モードが増える傾向にあった。
- (2) 曲線橋の固有振動モードは、桁部のねじれが特徴的であり、その傾向は交角が小さくなるほど顕著であった。
- (3) 最大変位は、交角が小さくなると、橋脚によって差が生じた。橋軸方向では、中央部の橋脚で直線橋の最大変位より大きな値となった。
- (4) 中央部の橋脚の橋脚天端の挙動は、直線橋では橋軸方向、橋軸直角方向ともほぼ同じような変位であるため、円を描くように振動するが、曲線橋では、橋軸方向に大きく楕円を描くように振動した。

### 参考文献

- 1) 伊津野和行, 桑尚輔, 林江利子, 中園明広, 高橋章, 廣瀬彰則, 坂本真徳: 曲線ラーメン橋梁の耐震設計手法に関する検討, 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム, pp.123~126, 1998年
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書, V耐震設計編, 1996年12月.
- 3) 日本道路協会: 時刻歴応答解析に用いる標準地震入力例, 1996年