

縦断勾配を有する連続曲線ラーメン橋梁の 動的設計に関する基礎的検討

藤澤 満維¹・桑 尚輔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 正会員 工修 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原 1-8-29)

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、道路交通網の充実を目指し、国土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¹⁾。そのため、道路橋示方書V耐震設計編²⁾では耐震性照査に際して地盤ばね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、3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。

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て、動的設計で考慮すべき基礎的な特性について検討した。各橋脚の配筋が異なるモデルを作成し、それぞれ静的解析、固有値解析、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。そのうえで、各橋脚の非線形特性が異なることが、どのように地震応答特性に影響を及ぼすか考察を行った。

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120度の曲率半径約280mの曲率を持ち、各橋脚は円形断面とする。桁長347m、スパン長49m、縦断勾配2%を有し、橋脚高が10m~16mと変化している。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。

橋梁端部を結んだ方向を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。

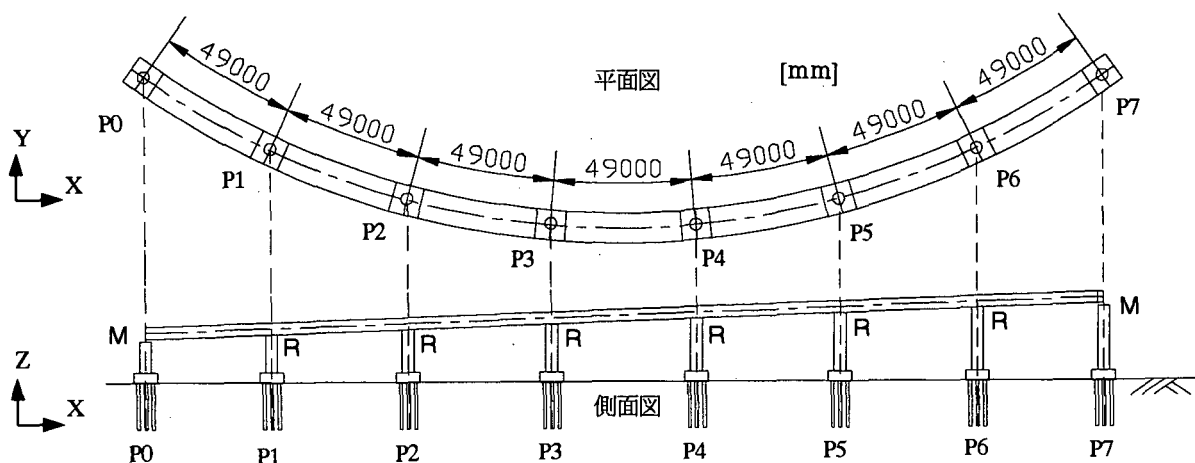


図-1 解析対象橋梁

(2) 解析モデル

上部・下部構造をはり部材、地盤を線形ばねとしてモデル化し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。また地盤ばね定数も、道路橋示方書に従って算出した数値を適用した。

橋脚の軸方向鉄筋の配筋の違いにより、次の3つのモデルを作成した。

- ・モデル1：高橋脚側（P4～P6）の耐力が大きいモデル
- ・モデル2：すべての橋脚の耐力が等しいモデル
- ・モデル3：低橋脚側（P1～P3）の耐力が大きいモデル

3. 静的解析結果

曲線ラーメン橋梁では、地震時保有耐力法によってブッシュオーバー解析をする場合、どのように静的荷重を載荷するかによって、大きく力を負担する橋脚が異なってくる。それを検証するため、次の2つの方法で載荷し、結果を比較した。

- ・各橋脚天端に同じ水平力を全体座標のX方向あるいはY方向に載荷
- ・P6橋脚天端のみに水平力を全体座標のX方向あるいはY方向に載荷

静的非線形解析では、両載荷方法ともに、いずれかの橋脚が終局に達するまで載荷した。両載荷方法ともにY方向載荷の方が小さな力で終局に達しており、またY方向載荷では橋軸直角方向で終局に達している。そのため、両載荷方法ともに、Y方向に載荷したモデル1、2、3の、橋軸直角方向の曲げモーメントー曲率関係を示して考察を行った。

(1) 各橋脚天端に同じ水平力を載荷した場合

図-2に、すべての橋脚が線形部材だと仮定した場合の静的線形解析の、各橋脚に作用する最大曲げモーメントを示す。この場合には、各橋脚の天端に同じ力が作用することによって、不等橋脚を有するラーメン橋梁であっても、それぞれの橋脚基部に同程度の曲げモーメントが作用している。全体座標のY方向に水平力を作用した場合の結果であるため、各橋脚の橋軸方向の曲げモーメントよりも、橋軸直角方向の曲げモーメントが大きくなっている。

図-3に、橋脚の非線形性を考慮した場合の各橋脚橋軸直角方向における曲げモーメントー曲率関係を示す。この場合、高橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル1では9.4 MN、全橋脚を同じ配筋を施したモデル2では10.0 MNで、低橋脚側P1橋脚が終局に達した。

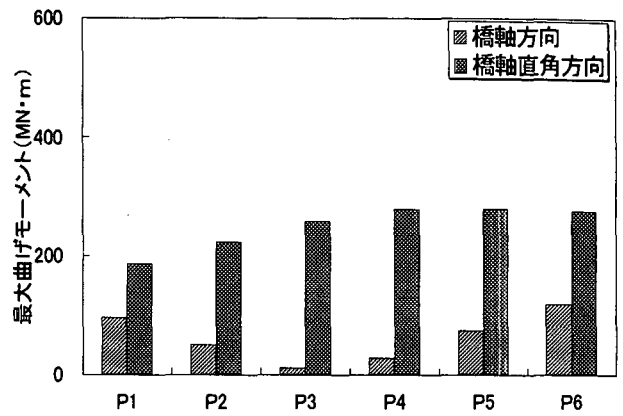


図-2 各橋脚に均等載荷した場合の線形解析における最大曲げモーメント

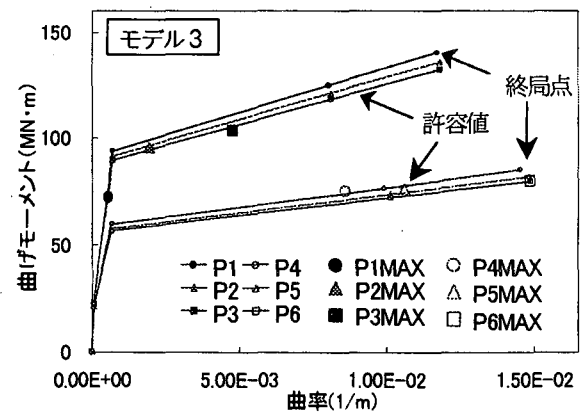
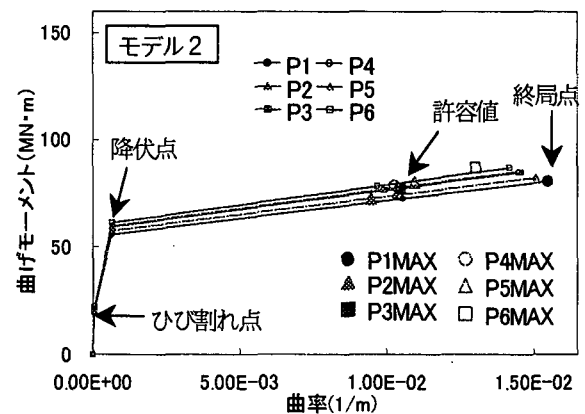
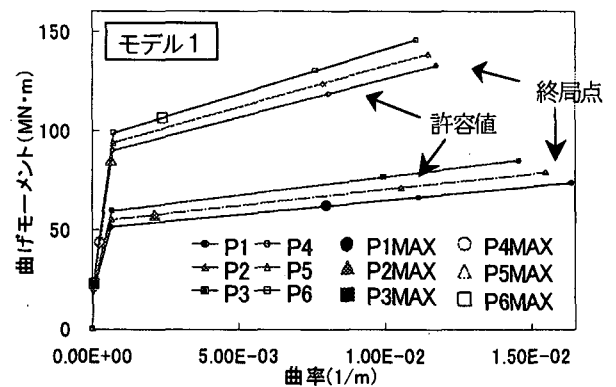


図-3 各橋脚に均等載荷した場合の非線形解析における最大曲げモーメントと最大曲率

しかし、低橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル3では7.8 MN で高橋脚側 P6橋脚が終局に達した。

これらの結果から、各橋脚天端に均等に载荷する方法では、各橋脚に作用する力がほぼ同じか、あるいは高橋脚側の橋脚に作用する力が多少大きくなるため、高橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル1または全橋脚で同じ配筋を施したモデル2が有利だと判断されることになる。

(2) 高橋脚側 P6橋脚天端のみに载荷した場合

図－4に、すべての橋脚が線形部材だと仮定した場合の静的線形解析の、各橋脚に作用する最大曲げモーメントを示す。この場合には、低橋脚側 P1橋脚の橋軸直角方向の最大曲げモーメントが非常に大きくなっている。桁の水平剛性が比較的高く、ラーメン橋梁の一角に水平力を作用させた場合の構造力学的考察より推察される曲げモーメント分布となっている。この载荷方法では、必ず低橋脚側の負担が大きくなる。

また図－5の非線形解析の結果では、全橋脚を同じ配筋を施したモデル2では33.2 MN で低橋脚側 P1橋脚が終局に達しており、低橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル3では27.8 MN で同じくP1橋脚が終局に達している。しかし、高橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル1では18.2 MN でP1橋脚が終局に達した。

これらの結果から、P6橋脚天端のみに载荷する方法では、低橋脚側橋脚の最大曲げモーメントが比較的大きくなるため、低橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル3または全橋脚で同じ配筋を施したモデル2が有利だと判断されることになる。

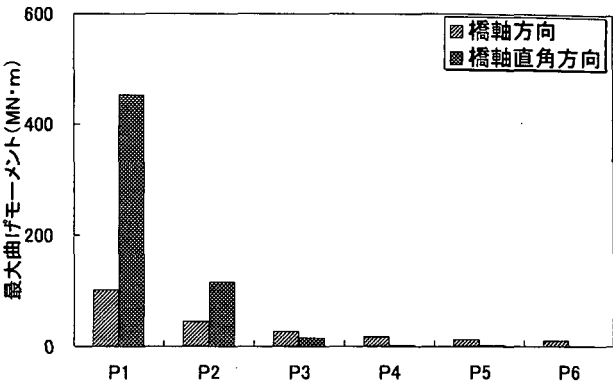
このように、载荷方法によって力のかかる橋脚が異なるのが、連続ラーメン橋の特徴である。

4. 固有値解析結果

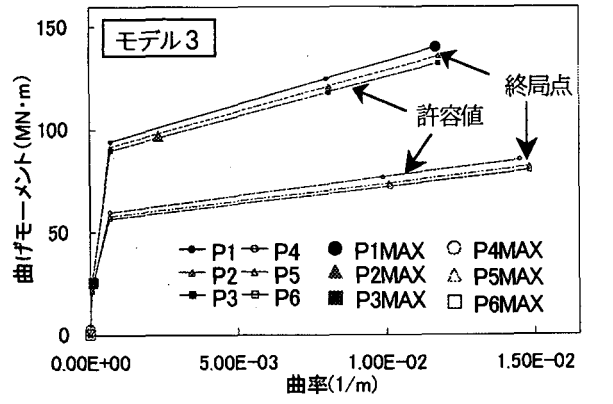
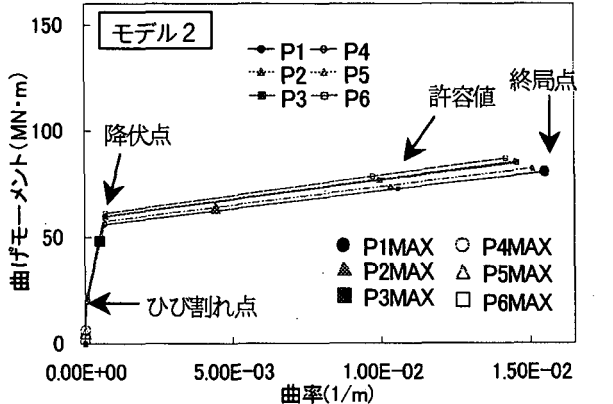
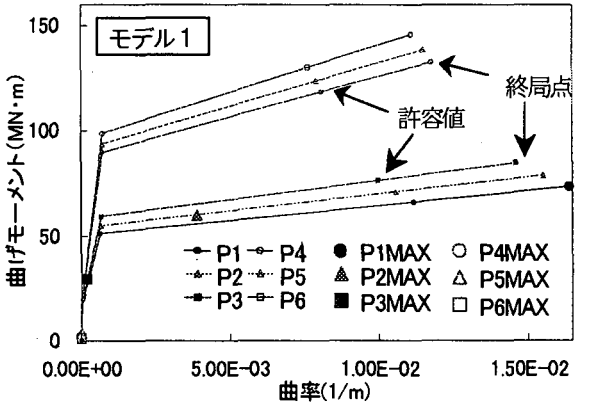
固有値解析結果は橋脚の非線形特性の異なる各モデルでもほぼ同じ結果になる。表－1に各次の振動数、固有周期および有効質量比を示す。1次から4次の振動モードの有効質量比が大きくなっている。なお、鉛直方向が卓越するのは17次モード以上（4Hz以上）である。

表－1 固有値解析結果

振動モード	振動数 (Hz)	周期 (秒)	有効質量比		
			X 方向	Y 方向	Z 方向
1	0.86	1.16	1%	43%	0%
2	0.99	1.01	3%	25%	0%
3	1.18	0.84	0%	15%	0%
4	1.22	0.82	78%	1%	0%



図－4 高橋脚 P6橋脚のみに载荷した場合の線形解析における最大曲げモーメント



図－5 高橋脚 P6橋脚のみに载荷した場合の非線形解析における最大曲げモーメントと最大曲率

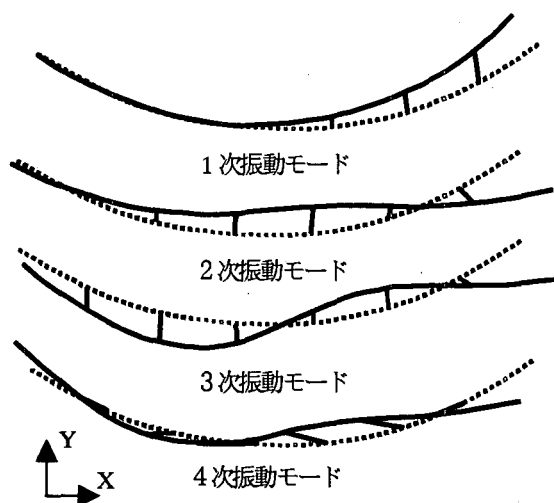


図-6 固有振動モード図

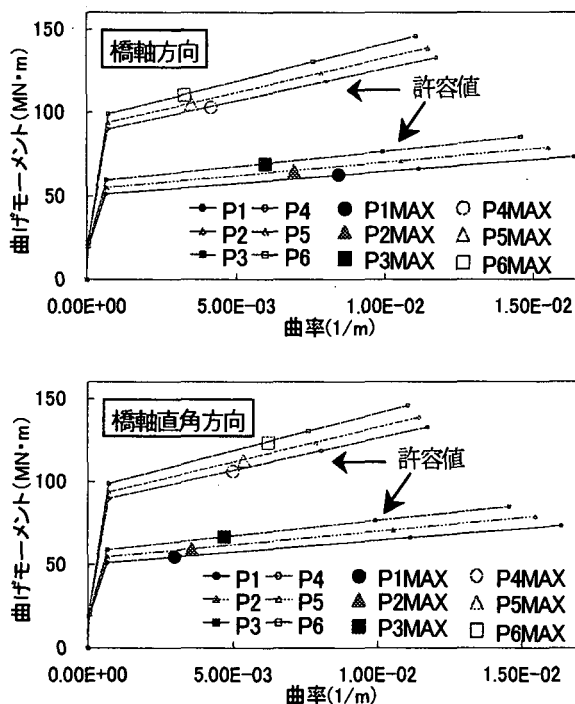


図-7 モデル1の地震応答解析結果

図-6に振動モード図を示す。1次から3次の振動モードでは橋梁が全体座標のY方向に、4次振動モードでは全体座標のX方向に倒れこむ形になっている。

5. 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、積分間隔を0.002秒とした。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有効質量比の卓越する2つの振動モードとして、1次と4次の固有振動数とモード減衰定数を用いて算出した。

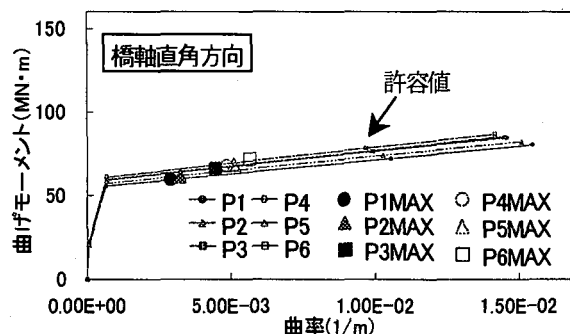
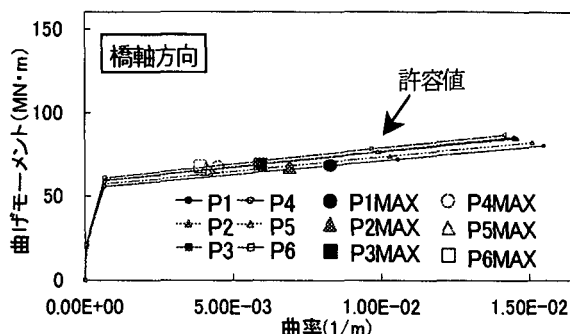


図-8 モデル2の地震応答解析結果

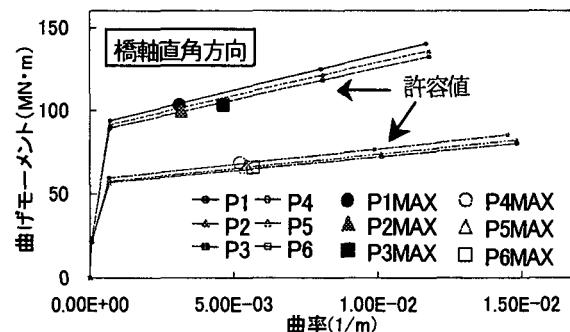
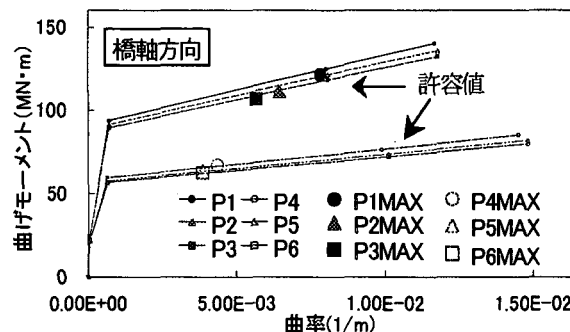
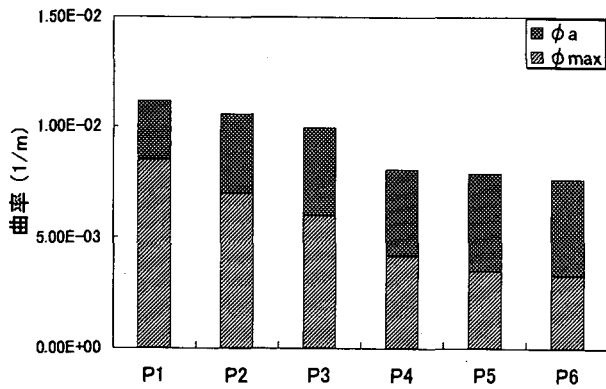


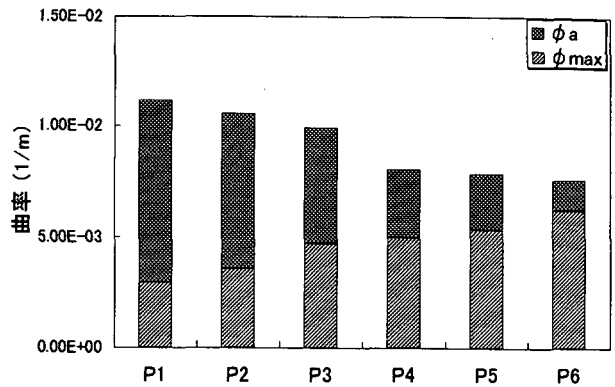
図-9 モデル3の地震応答解析結果

入力地震動は道路橋示方書に基づく標準地震入力波形のうち、II種地盤用波形であるレベル2タイプ2の2種類の波形をそれぞれ水平X方向(波形1)、Y方向(波形2)に入力した。なお、数値計算にあたっては、市販の動的解析ソフトウェア DYNA-2E を用いた。

図-7, 8, 9に、各橋脚の最大応答曲率および許容曲率のグラフを示す。モデル1, 2, 3のいずれのモデルにおいても、最大応答値(図中の大きな印)が許容値内に収まった。

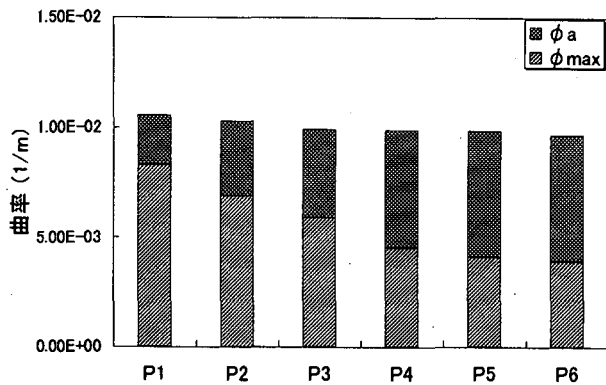


(a) 橋軸方向

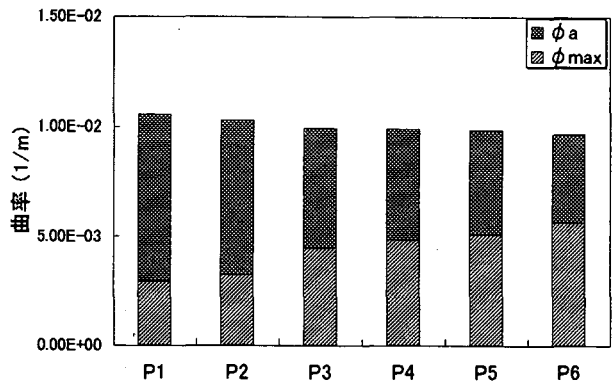


(b) 橋軸直角方向

図-10 モデル1の最大応答曲率 ϕ_{max} と許容曲率 ϕ_a

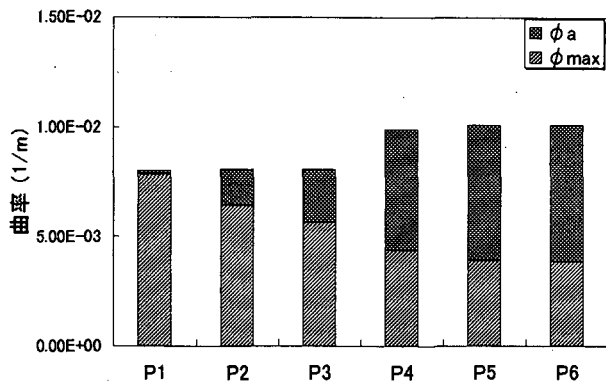


(a) 橋軸方向

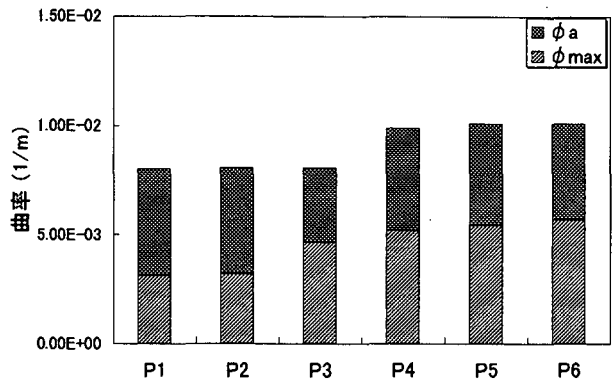


(b) 橋軸直角方向

図-11 モデル2の最大応答曲率 ϕ_{max} と許容曲率 ϕ_a



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-12 モデル3の最大応答曲率 ϕ_{max} と許容曲率 ϕ_a

これらの結果は、連続曲線ラーメン橋梁の設計における自由度の大きさを示しており、適切な動的解析によって最適断面を決めることの重要性が高いことがわかる。

次に、低橋脚側と高橋脚側とで、応答結果にどのような違いがあるのかについて検討する。図-10, 11, 12に、各モデルにおける地震応答解析結果の最大応答曲率 ϕ_{max} と、許容曲率 ϕ_a との関係を示す。橋軸直角方向ではどのモデルにおいても高橋脚側で応答曲率が大きくなっている。これは、有効質量比の大きな4次振動モードまでに、図-6のように高橋脚が橋軸直角方向に倒れ込む振動形が多いためである。逆に橋軸方向の応答を

見ると、低橋脚側で応答曲率が大きくなっており、これも振動モード形状から推察される傾向である。

例えばモデル2を基本として考えた場合、図-11(a)の橋軸方向では低橋脚側 P1がクリティカルになるため、モデル3のように低橋脚側の鉄筋を増やした配筋も考えられる。しかし逆に低橋脚側 P1橋脚にさらに力が作用することになり、図-12(a)のように低橋脚側 P1橋脚の余裕がなくなる。図からわかるように、配筋を変えても最大応答曲率はそれほど大きく変化しない。これは、配筋を多少変えても、卓越する振動モード形状にそれほど大きな変化が生じないためである。よって、クリティカ

ルになる橋脚のじん性を向上させるか、それ以外の橋脚に力を分散させることが望ましい。一つの解としては、クリティカルになる橋脚以外の橋脚（この例では高橋脚側）を増やすモデル1のような配筋が、図-10(a)のように低橋脚P1にとっては望ましい配筋となる。

しかし、この場合には図-10～12(b)の橋軸直角方向において逆の傾向もあり、やはり動的解析をせずに一般論的な結論を出すことは困難である。入力地震動の方向（どの方向に入力すればよいのか）、および、用いる地震波の種類（各方向に別々の標準波を入力するのか、同じ波形を入力するのか、実地震波を入力するのか等）についても、さらに検討を進める必要がある。曲線連続ラーメン橋では、特に振動モードに十分注意して設計を行うことが必要である。

また、本解析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耐力や変形能を有していた。矩形断面橋脚の場合には、地震動の入力方向に対して、より敏感に応答が変化することが考えられ、入力地震動に関する詳細な検討が必要であろう。

6. まとめ

各橋脚の非線形特性の異なる7径間連続曲線ラーメン橋梁の解析結果から、以下に述べるような結果が得られた。

(1) 静的線形解析では載荷方法により、最大曲げモーメントが大きく作用する橋脚が異なる。

(2) 静的非線形解析において、各橋脚天端に均等に水平力を載荷する方法では、すべての橋脚基部でほぼ同じ曲げモーメントが作用するか、あるいは多少高橋脚側の橋脚の橋軸直角方向で大きくなるため、高橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデルまたは全橋脚を同じ配筋を施したモデルが有利だと判断される。

(3) 静的非線形解析において、高橋脚天端のみに水平力を載荷する方法では、低橋脚側の橋脚の橋軸直角方向で最大曲げモーメントが大きくなるため、低橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデルまたは全橋脚で同じ配筋を施したモデルが有利だと判断される。

(4) 時刻歴応答解析の結果より、高橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデル、全橋脚を同じ配筋を施したモデル、低橋脚側の橋脚の軸方向鉄筋が多いモデルともに、最大曲率と最大曲げモーメントが許容値内に収まった。連続曲線ラーメン橋梁の設計における自由度は大きく、適切な動的解析によって最適な断面を決めることが重要である。

参考文献

- 1) 伊津野和行, 桑 尚輔, 林 江利子, 中藺明広, 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, 土木学会, pp.123-126, 1998年1月.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計編, 2002年.