

平面曲線を有する複合ラーメン橋の耐震設計

原田政彦¹・脇坂哲也²・北浦直子³

¹正会員 大日本コンサルタント 北陸支社 技術部 (〒930-0175 富山県富山市願海寺 633)

²大日本コンサルタント 北陸支社 技術部 (〒930-0175 富山県富山市願海寺 633)

³大日本コンサルタント 北陸支社 技術部 (〒930-0175 富山県富山市願海寺 633)

1. まえがき

近年、維持管理上の有利性、耐震性の向上から鋼主げたとRC橋脚を剛結した複合ラーメン橋の採用事例が多くなりつつある。この形式は、ジャンクション部でのランプ橋のように幅員が狭く、小さな曲線半径を有する曲線橋においては、支承部でのねじり拘束やけた下空高の確保などのメリットが期待できる。

この曲線ラーメン橋は、地震時における挙動が複雑になることが予想されることから、動的解析法による耐震設計が必要となる。しかし、任意の地震入力方向を対象に3次元立体モデルを使用した非線形解析では、解析ケースが非常に多く、試行錯誤的に断面を決定する過程においては、計算機が発達した現在でもあまり現実的ではない。さらに、橋脚の保有水平耐力から基礎の設計地震力を決める場合、動的解析の適用のみでは設計が困難となることも考えられる。そこで筆者らは、図-1に示す橋梁の設計において、非線形静的解析(push-over 解析)結果にエネルギー—変位則を適用して応答値を簡略的に推定す

る方法を採用し、橋脚柱および基礎の断面寸法を決定した。この後、最終的な照査として非線形動的解析を合わせて実施した。

本稿では、複合ラーメン橋の詳細設計において採用した耐震設計方法を紹介し、その解析値の照査として行った非線形動的解析結果と比較することにより、適用した設計方法の妥当性を評価するとともに、曲線ラーメン橋の設計方法と耐震設計上の問題点について考察する。

2. 対象橋梁

対象橋梁は、図-1に示す6径間連続複合ラーメン橋である。上部構造は平面曲線半径200m、交角98°、総幅員約10mの曲線鋼箱げた橋、下部構造は高さ13.8~21.5mに変化する径5mのRC円柱式橋脚、基礎構造は径7m、径7.5mの大口径深礎杭で構成されている。地盤は、基盤面が地表面下7~22mに位置するⅡ種地盤である。

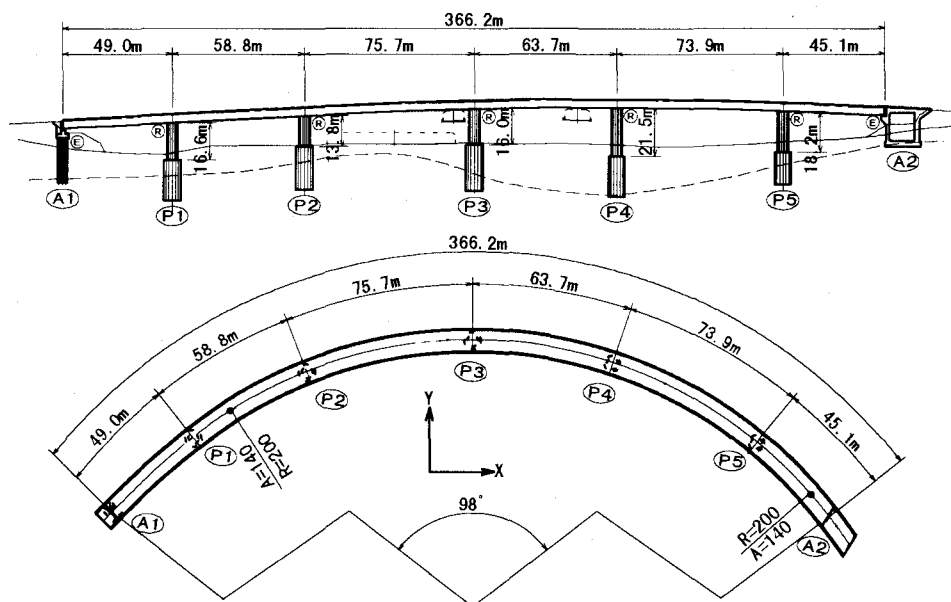


図-1 対象橋梁全体一般図

3. 耐震設計

下部構造の設計は、図-2に示す手順により行った。断面力は全て立体骨組モデルにより算出するものとした。

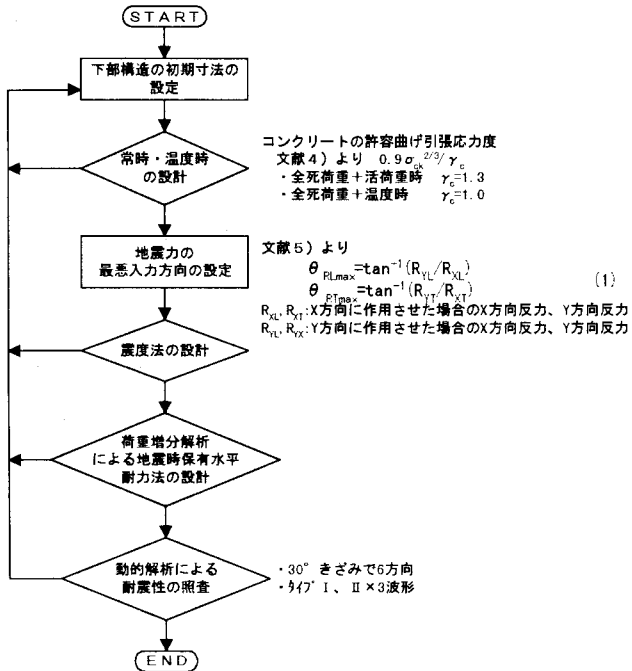


図-2 設計手順

(1) 地震力の最悪入力方向の設定

直線橋の耐震設計では、地震力の作用方向は橋軸方向と直角方向の2方向について考慮すれば良いとされている。一方、曲線橋では着目部材の応答に最大の影響を及ぼす地震入力方向を設定する必要がある。このため、図-1に示すようなX、Y軸を設定し、その2方向に自重と同等の慣性力を作用させ、式(1)によって最大応答値の方向を算出した。解析結果より、この各橋脚の最大応答値の方向は、設定したX軸、Y軸にほぼ一致することから、設計での断面力はこの2方向について算出するものとした(図-5参照)。

(2) 橋脚柱の設計

橋脚柱は、立体骨組モデルに水平震度を作用させ、これを漸増させる荷重増分法による非線形静的解析により設計を行った。X、Y軸の両方向ともラーメン構造とし、想定した複数の塑性ヒンジのうち1つが降伏に達する時を初降伏、1つが終局に達する時を全体構造系の終局とした。柱の断面はY軸方向が支配的となるが、破壊形態の判定はX軸方向で決定された。その破壊形態の判定に際しては、表-1に示すように、式(2)による値と静的解析における柱下端塑性ヒンジ位置でのせん断力に対してせん断耐力との比較を行ったが、全て静的解析のせん断力が支配した。これは、式(2)で算出される値には橋脚柱の

慣性力が考慮されていないためであり、橋脚高によって12~33%の差が生じている。

$$P_u = \frac{M_{uv} - M_{ul}}{h_s} \quad (2)$$

ここで、 P_u は水平耐力、 M_{uv} 、 M_{ul} は柱上下端部の終局曲げモーメント、 h_s は柱上下端部の塑性ヒンジ間距離である。

破壊の順序は、ラーメン構造の影響の大きいX軸方向では柱の下端降伏~上端降伏~下端終局となるが、両端のP1、P5橋脚の柱上端は曲線の影響により降伏には至らなかった(図-3参照)。

表-1 破壊形態の判定に使用するせん断力の比較

	P1	P2	P3	P4	P5	
水平耐力 P_u (tf)	2711	3411	2874	2236	2475	
X軸	解析値 S_x (tf)	3243	3810	3367	2984	3077
	S_x/P_u	1.20	1.12	1.17	1.33	1.24
Y軸	解析値 S_y (tf)	2983	2469	1812	1982	2634
	S_y/P_u	1.10	0.72	0.63	0.89	1.06

注) S_x , S_y ; 静的解析による柱下端のX、Y軸方向の作用せん断力

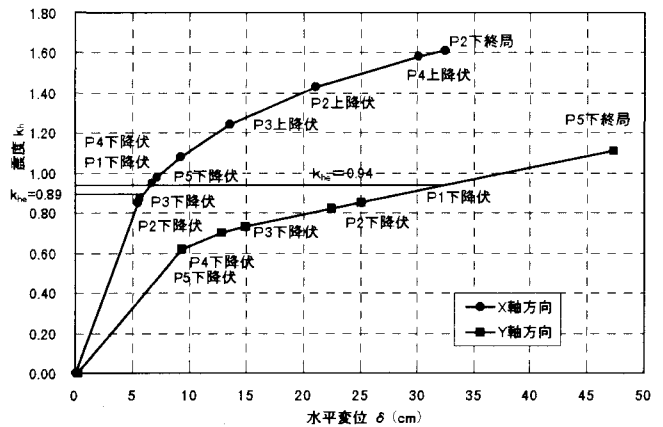


図-3 水平震度と上部構造水平変位の関係

(3) 深礎杭の設計

深礎杭の設計地震力は、橋脚柱の保有水平耐力と同等以上の耐力を有するように、非線形静的解析で求められる橋脚柱下端の断面力に1.1倍したものをを使用した。橋脚が円柱であることから終局曲げ耐力は全方向同じ値であるが、せん断力が方向によって変化する。このため、せん断力は、橋脚柱の破壊形態の判定と同じ、X軸方向での解析結果を使用した。

橋脚柱の断面はY軸方向で決定するため、X軸方向には余裕のある断面となるが、深礎杭はその余裕のある断面の耐力によって決定されることになる。曲線橋ということで方向性のない円柱を採用しているが、基礎は破壊の順序を確保するために決定され、過大な断面となる傾向にある。

4. 動的解析による照査

(1) 解析モデルおよび解析条件

非線形静的解析による耐震設計の照査を行うため、非線形時刻歴応答解析を実施した。解析モデルは、集中質点系による立体骨組モデルとし、基礎を並進-回転 (S-R) バネにモデル化した。粘性減衰定数は、上部構造 2%、橋脚 5%、基礎 20%とした。非線形部材となる橋脚柱の履歴特性モデルは、コンクリートのひびわれ、鉄筋の降伏を考慮した剛性低下型トリリニアモデル (武田型) 用いた。

入力地震動は、II種地盤における標準波を用い、その解析結果は地震動3波の平均とした。地震動の入力方向は、0°から30°刻みに150°までの6方向とした。

解析手法は、Newmarkの β 法による直接積分法とし、 $\beta=0.25$ 、および積分間隔0.001秒を用いた。

(2) 固有周期および振動モード

主要な固有振動モードを図-4に示す。X軸方向では5次モードが有効質量の36.8%を、Y軸方向では1次モードが有効質量の29.2%を占めており、他のモードより大きくなっている。卓越する振動モードが明確で無く、高次モードの影響が大きいことが予想される。

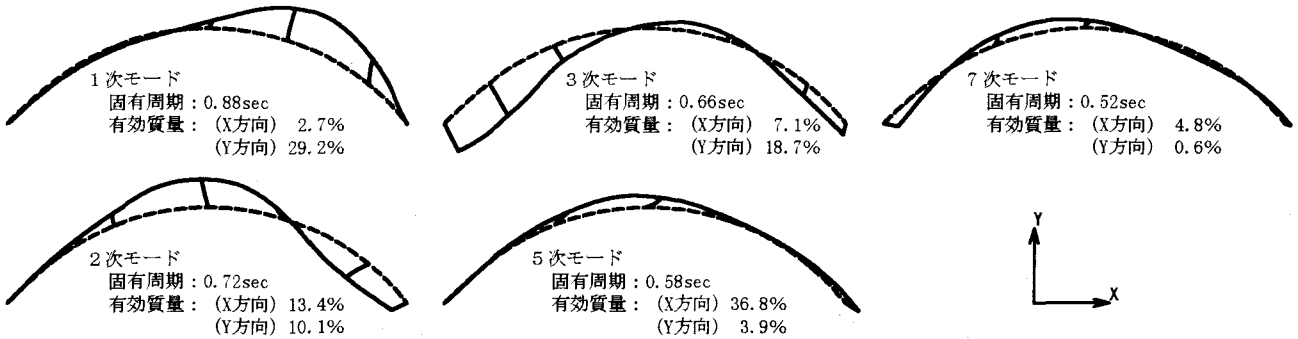


図-4 固有振動モード

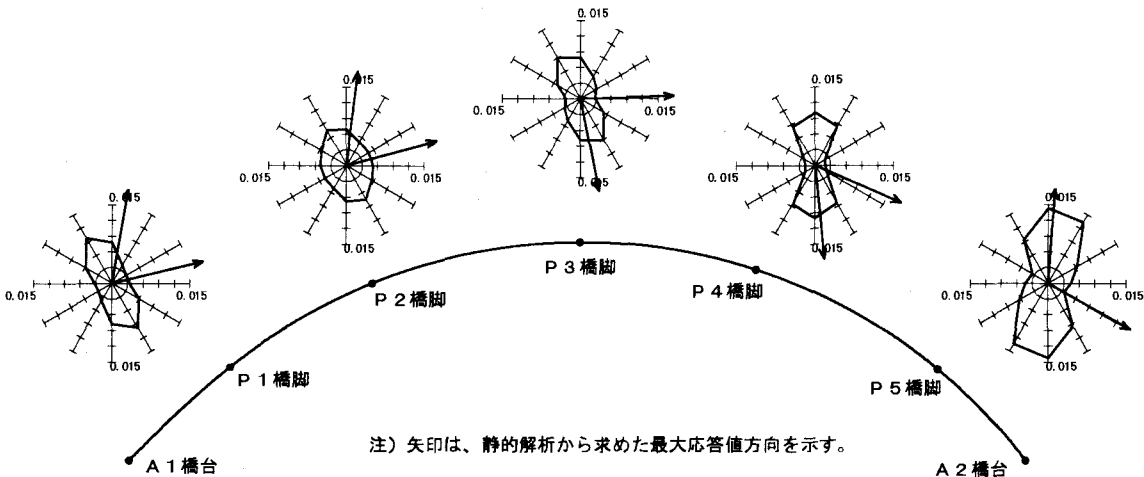


図-5 動的解析による地震動の入力方向と橋脚柱基部の最大回転角

(3) 解析結果

動的解析では、非線形静的解析により決定した断面に対して、360°を網羅するように6方向の解析を行い、回転角による曲げ耐力、せん断耐力、残留変位の照査を行った。その中で、地震動の入力方向90°(Y軸方向)、タイプIでのP5橋脚柱基部の回転角がもっとも安全率が低くなったが、すべての部材において許容値を満足した。

5. 静的解析と動的解析の比較

(1) 地震力の最大応答値方向

動的解析による入力方向ごとの、柱基部最大回転角の分布を図-5に示す。X、Y軸方向の静的解析結果より求めた最悪入力方向を合わせて示すが、ほぼ一致している。

(2) 固有振動性状

固有値解析による固有周期と、静的解析から式(3)で求められる固有周期を表-2に示す。Y軸方向ではほぼ近い値を示しているが、卓越したモードが明確ではないX軸方向では差が大きくなっている。

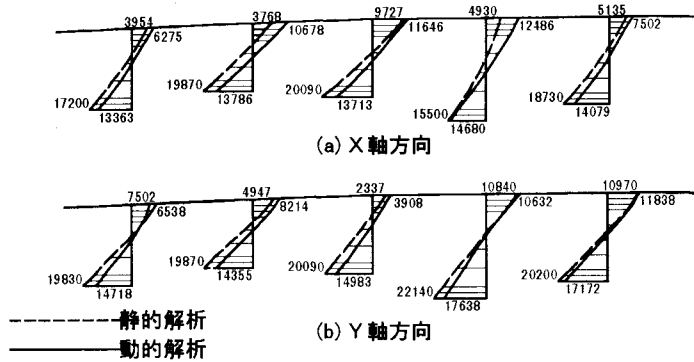


図-6 最大曲げモーメントの比較

表-2 固有周期

	X軸方向	Y軸方向
静的解析	0.72s	0.84s
固有値解析	0.58s	0.88s

$$T = 2.01 \sqrt{\frac{\sum(W_i u_i^2)}{\sum(W_i u_i)}} \quad (3)$$

ここで、 W_i 、 u_i はそれぞれ位置*i*における自重および静的たわみである。

(3) 断面力

静的解析での等価設計震度による断面力と、動的解析の最大断面力を表-3、図-6に示す。柱断面を決定する上で支配的となるY軸方向においては、柱基部の断面力では0~20%程度、静的解析が安全側の値を示しており、エネルギー一定則の精度も高いと言える。図-7に示す、P5橋脚に最大曲げが作用する時の動的解析による変形図と静的解析での終局時の変形図の比較においても、Y軸方向ではよく近似している。しかし、ラーメン構造の影響の大きいX軸方向においては変形図は近似しているものの、断面力においてはバラツキが大きくなっている。

6. まとめ

本橋梁では、静的解析により設計を行い、動的解析により照査を行う方法が妥当であったと言える。これは、ラーメン面外と言えるY軸方向が支配的となる柱断面であったためであり、エネルギー一定則の精度も高いことが既往の研究などでも証明されている。しかし、エネルギー一定則の精度が高くないラーメン面内が支配的となる柱断面であれば、静的解析での設計だけでは困難と考えられる。

曲線橋では、橋脚に円柱を採用することが多いが、その断面はラーメン面外で決定され、ラーメン面内では余裕があるものとなる。基礎構造は、破壊順序の確保から

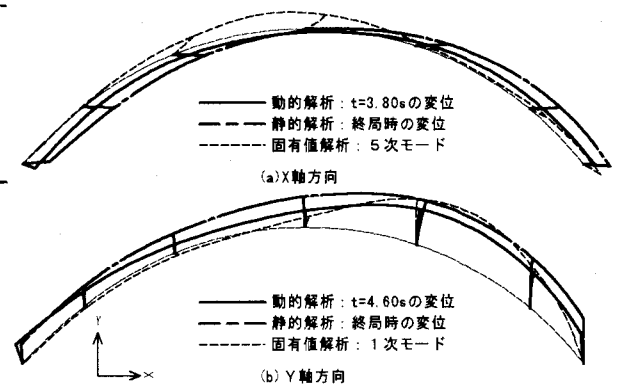


図-7 変形図

表-3 静的解析と動的解析の断面力の比較

		P1	P2	P3	P4	P5	
X軸方向	曲げモーメント 〔上部〕	静的解析	3954	3768	9727	4930	5135
		動的解析	6275	10678	11646	12486	7502
		比率	0.63	0.35	0.84	0.39	0.68
	曲げモーメント 〔基部〕	静的解析	17200	19870	20090	15500	18730
		動的解析	13363	13786	13713	14680	14079
		比率	1.29	1.44	1.46	1.06	1.33
せん断力 〔基部〕	静的解析	1806	2366	2531	1519	1891	
	動的解析	1670	2549	2292	1772	1687	
	比率	1.08	0.93	1.10	0.86	1.12	
Y軸方向	曲げモーメント 〔上部〕	静的解析	7502	4947	2337	10840	10970
		動的解析	6538	8214	3908	10632	11838
		比率	1.15	0.60	0.60	1.02	0.93
	曲げモーメント 〔基部〕	静的解析	19830	19870	20090	22140	20200
		動的解析	14718	14355	14983	17638	17172
		比率	1.35	1.38	1.34	1.26	1.18
せん断力 〔基部〕	静的解析	2112	2006	1721	1802	2278	
	動的解析	1795	1718	1499	1505	2237	
	比率	1.18	1.17	1.15	1.20	1.02	

ラーメン面内の柱の耐力により設計される。このため、必要以上の耐力を有する基礎構造となり、このことが常時および温度時の断面力の増加につながり、ラーメン構造が成り立たなくなる傾向にある。最適な柱断面形状、その地震時の解析方法等、今後検討する必要がある。

また、解析においては、道路橋示方書で導入されている塑性ヒンジ長の設定が問題と考えられる。曲線ラーメン橋では、地震動の入力方向によって橋脚ごとにインフレーションポイントが変化し、ラーメン構造としての終局に至っても柱上端が降伏しない橋脚も存在する。その場合、どのような塑性ヒンジ長を設定するか問題となってくる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1996。
- 2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997。
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料—PCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例—，1998。
- 4) 日本道路公団：設計要領 第二集，1990。
- 5) 土木研究センター：建設省 道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992。