

R C ラーメン橋の地震時保有水平耐力法の適用性に関する検討

小川富士夫¹・松村英樹²・緒方紀夫³

¹ 非会員 工修 新構造技術株式会社 東京支店 土木設計部（〒136-0071 東京都江東区亀戸1-42-20）

² 正会員 工修 新構造技術株式会社 本社 総合技術本部（〒136-0071 東京都江東区亀戸1-42-20）

³ 正会員 工修 日本道路公団 十和田管理事務所（〒018-5336 青森県鹿角市十和田錦木字赤沢田19）

1. はじめに

兵庫県南部地震では多くのコンクリート構造物が甚大な被害を受け、従来耐震性が優れていると考えられてきたラーメン構造の橋脚やラーメン橋も被害を受けた。この反省から平成8年12月に改定された道路橋示方書ではR C ラーメン橋脚についても地震時保有水平耐力法で耐震設計を行うように改められた。ただし、門型のR C ラーメン橋脚を対象としており、他のR C ラーメン構造への準用も可能とされているが、準用できる範囲が明確でない。一方、実際のR C ラーメン構造の橋梁は、都市内の比較的橋脚高が低い連続ラーメン高架橋から、山岳部の橋脚高や断面形状が異なる連続ラーメン橋など様々な形式が存在している。このようなR C ラーメン橋の地震時の挙動は、形式、規模、部材相互の剛比の違いにより変化するものと考えられる。本文は、実際に用いられている数種の構造物を対象にして、大規模地震の挙動を比較し、地震時保有水平耐力法の適用性について

検討するものである。

2. R C ラーメン構造の特徴

R C ラーメン構造における一本柱橋脚との相違点は次のようなものである。

- ① 一本柱橋脚で塑性ヒンジが発生する位置は橋脚基部のみであるが、ラーメン構造の場合には橋脚基部および各接点部に複数の塑性ヒンジが発生する可能性がある。
- ② ラーメン構造の場合には、上部工の水平方向の慣性力により橋脚の軸力が変動する。
- ③ 一本柱橋脚で卓越する振動モードは1次がほとんどであるが、ラーメン構造では高次の振動モードが卓越する可能性がある。
- ④ 不等柱高のラーメン橋、または、等柱高のラーメン橋においても柱断面形状、柱主鉄筋比が異なる場合には、降伏時期が大きく異なる。このことがラーメン全体の振動性状に影響を与える可能性がある。

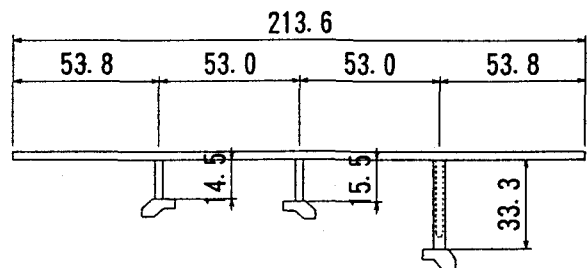
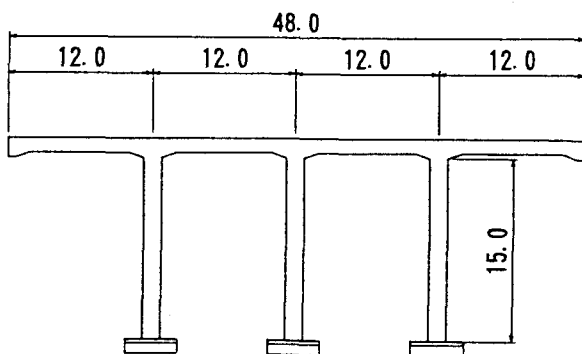


図-1 検討対象橋梁例

表-1 検討対象橋梁概要

検討モデル	単位	タイプ1 RC2方向ラーメン橋 等柱高・等柱断面			タイプ2 PCラーメン橋 等柱高 不等柱断面	タイプ3 RC2方向ラーメン橋 不等柱高 等柱断面	タイプ4 PCラーメン橋 不等柱高 不等柱断面
		タイプ1-1	タイプ1-2	タイプ1-3			
橋長	(m)	4@12.0=48.0	4@12.0=48.0	4@12.0=48.0	104.0+126.0+148.0 +126.0+89.0=593.0	4@12.0=48.0	53.8+53.0+53.0 +53.8=213.6
柱高さ	(m)	5.0, 5.0, 5.0	8.4, 8.4, 8.4	15.0, 15.0, 15.0	51.0, 49.0, 49.0, 50.5	7.0, 4.0, 4.0	14.5, 15.5, 33.0
柱断面寸法	(m)	1.0×1.0 矩形	1.5×1.65 矩形	1.0×1.5 矩形	14.85×6.5 (h=51.0) 14.40×6.5 8角形 中空式	1.0×1.0 矩形	3.0×6.0 矩形 4.5×6.0 (h=33.0) 矩形 中空式
軸方向鉄筋比	(%)	0.92	1.41	1.39	3.29, 3.19, 3.23, 3.20	0.92	2.82, 2.39, 2.33
横拘束筋 の体積比	(%)	0.96	1.11	1.29	0.74, 0.86, 0.86, 0.74	0.96	1.61, 1.61, 0.51
コンクリート 設計基準強度	(N/mm ²)	24	24	24	40(主桁) 24(柱)	24	40(主桁) 24(柱)
使用鉄筋		SD295	SD295 SD345(補強部)	SD295	SD295	SD295	SD295

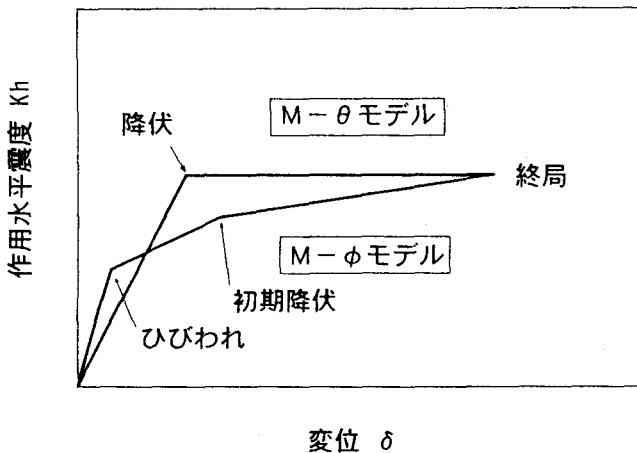


図-2 M-θモデル、M-φモデルの概念図

3. RCラーメン構造の解析モデル

各種ラーメン構造の特性を検討するために、図-1、表-1に示すような規模および橋脚高さなどのタイプの異なるラーメン橋をモデルとした。タイプ1-1から1-3は等柱高で等柱断面であるが柱高さが異なっている。また、タイプ1-2は復旧仕様レベルで補強されている。タイプ2はPCラーメン橋であり、等柱高で不等柱断面の大規模なラーメン橋である。タイプ3はタイプ1とほぼ同程度の規模であるが、不等柱高で等柱断面である。タイプ4は大規模なPCラーメン橋であり、不等柱高、不等断面である。

4. 解析モデルの検討

RCラーメン橋の耐震設計に用いる解析モデルを検討するために、道示Vの塑性ヒンジを考慮し

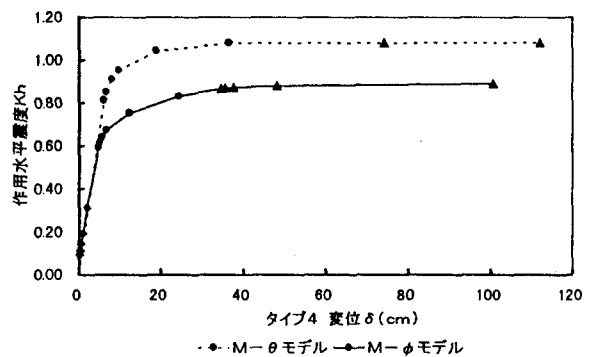
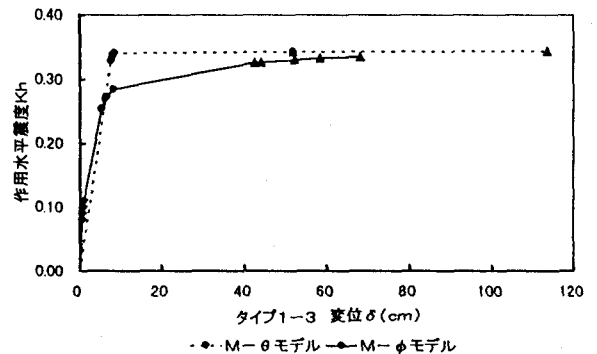


図-3 モデルによる解析結果の相違

たバイリニアのM-θモデル¹⁾とトリリニアのM-φモデル²⁾(図-2参照)を用いて分布荷重の荷重漸増法解析を行って比較した。ラーメン橋の終局の定義は、柱のすべての上下端が終局に至ったときであり、解析値が終局モーメントを超えた場合には、曲げモーメントは増加せず曲率の増加のみ考慮した。検討対象モデルは、等柱高のタイプ1-3と不等柱高のタイプ4である。比較した結果を図-3に示す。これによると、等柱高の場合は、降伏時の作用水平震度はM-φモデルが小さ

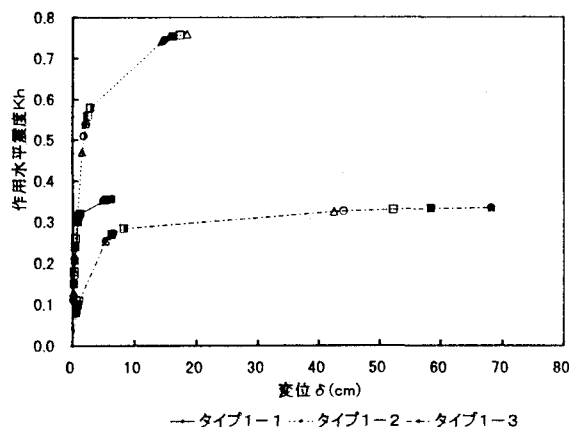


図-4 Kh- δ 曲線 (タイプ1)

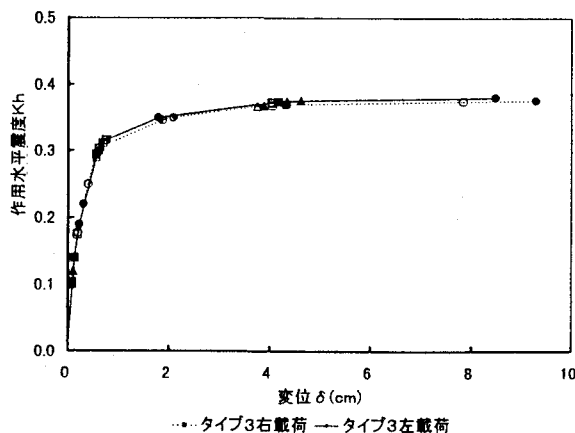


図-5 Kh- δ 曲線 (タイプ3)

いが終局時の作用水平震度は両モデルともほぼ等しい。しかし、終局時の変位はM- θ モデルがかなり大きい。柱高の異なる場合には、終局変位はほぼ同じであるが、作用水平震度がかなり異なる。この理由は、M- ϕ モデルの方が厳密解に近く、M- θ モデルは簡易的な手法であり、耐力は両モデルの降伏点および柱高の取り方の違い、変位は両モデルの算定法および降伏後の勾配の違いによるものと考えられる。

以上のことから、タイプ4のような不等柱高のラーメン構造では、道示Vの完全弾塑性モデル(M- θ モデル)による解析結果は、水平耐力、変形性能を過大評価するものと考えられる。したがって、以下の検討においてはトリリニアのM- ϕ モデルを用いるものとする。

5. ラーメン橋の静的解析

表-1のような特徴を持つラーメン構造が水平力を受けた場合の破壊に至る挙動を検討するために、柱の材料的非線形特性を考慮した2次元骨組みモデルを用いて柱の変動軸力によるM- ϕ 関係の変化を考慮した荷重増法解析を行った。

図-4は柱高、断面寸法および軸方向鉄筋比が等しいタイプ1の作用水平震度Khと桁の変位 δ との関係を示したものであり、同図には各柱のひび割れ、降伏および終局時を示す。これによると、柱高、断面寸法、軸方向鉄筋比の違いにより各タイプのKh- δ 曲線に違いはあるものの、どれも作用軸力の小さい柱からひび割れ、降伏、終局の順で生じているが、その差は小さく、各柱上下端ではほぼ同時に塑性化現象が生じている。よって柱の軸力の影響が小さいことがわかる。

図-5は、断面寸法および軸方向鉄筋比は同じであるが、柱高が異なるタイプ3のKh- δ 曲線である。载荷方向の影響の可能性があるので、両方向から载荷した。これから、载荷方向により軸力が変化するので塑性化の順序が少し異なるが、Kh- δ 曲線はほとんど影響がない。柱高の等しいタイプ1と比較すると柱高の低い橋脚から順に塑性化しており柱高の影響が大きい。

6. エネルギー一定則の適用性

RCラーメン橋に対する静的解析の適用性を検討するために、荷重増法解析結果から最大応答変位 δ_s を推定し、非線形時刻歴応答解析の結果 δ_d と比較することによって検討した。非線形時刻歴応答解析には、兵庫県南部地震で記録された神戸海洋気象台N-S成分を振幅調整した入力地震波³⁾を用いた。さらに、RCラーメン橋の特徴を把握するために、地震時保有水平耐力法で行っている単柱形式の橋脚との違いも検討した。

(1) 全体構造での降伏剛性と最大応答値の推定法

RCラーメン橋に対する地震時保有水平耐力法を検討する場合、柱高が異なるような場合の降伏剛性の仮定が問題となる。そこで、柱高が異なり、規模も大きく異なるタイプ3、4を対象にして、降伏剛性の仮定法を検討した。タイプ3は、2基の柱高が等しく1基が異なる。タイプ4は、2基の柱高がほぼ等しく1基が異なる橋梁である。検討法は、考えられる降伏剛性の仮定と、より厳密な解析である非線形時刻歴応答解析の結果と比較することによって行った。ラーメン橋の塑性ヒンジが発生する箇所は、柱の上下端および上部工の

表-2 降伏剛性の仮定と応答変位

				最大応答変位(cm)			固有周期 降伏剛性 (sec)
				動的解析 δd	静的解析 δs	$\delta s / \delta d$	
ラー メン 橋	タイプ3 H=7.0, 4.0, 4.0	2脚目 降伏時	左載荷	8.750	12.080	1.381	0.293
			右載荷	8.750	10.190	1.165	0.274
		平均降伏	左載荷	8.750	14.050	1.606	0.316
			右載荷	8.750	13.670	1.562	0.307
		3脚目 降伏時	左載荷	8.750	26.090	2.982	0.450
			右載荷	8.750	28.000	3.200	0.462
	タイプ4 H=14.5, 15.5, 33.0	2脚目 降伏時	左載荷	11.310	30.390	2.687	0.570
			右載荷	11.310	32.670	2.889	0.600
		平均降伏	左載荷	11.310	33.840	2.992	0.628
			右載荷	11.310	35.060	3.100	0.637
		3脚目 降伏時	左載荷	11.310	37.500	3.316	0.795
			右載荷	11.310	38.730	3.424	0.734

表-3 等価減衰定数と最大応答変位

			柱高さ h(m)	1サイクル 間に減衰力 のなした 仕事 ΔW	等価 ポテンシャル エネルギー W_e	等価減衰定数 h	最大応答変位 δ (cm)
ラー メン 橋	タイプ1-3	全体		31.472	13.300	0.188	15.050
		P1	15.0	10.267	4.433	0.184	
		P2	15.0	10.631	4.299	0.197	
		P3	15.0	10.256	4.444	0.184	
	タイプ3	全体		20.67	9.947	0.165	8.750
		P1	7.0	3.267	1.965	0.132	
		P2	4.0	8.668	3.915	0.176	
		P3	4.0	8.813	4.074	0.172	
単柱 形式	タイプ1-3		8.1	11.592	5.587	0.165	19.150
	タイプ3	P1	2.85	5.703	3.952	0.115	12.080
		P2	2.3	9.524	5.037	0.150	12.010

柱との接続部であるが、静的解析の結果をみると構造全体の非線形性は柱基部が降伏するとき大きなのがよいと考えられる。そこで、柱2基が降伏する時、柱3基が降伏する時、および3基の柱の平均値と考えた時の3種類を比較した。結果を表-2に示す。これから、2基が降伏した時が一番精度が良いという結果となっているが、平均値でもほとんど変わらない。これから、降伏剛性の仮定は、一般性を持たせるため各柱の平均降伏剛性を用いるのがよいと考えられる。

さらに、ラーメン橋の場合は降伏後の勾配が大きいので、二次剛性を考慮した道示Vの11.4の基礎工の場合の地震時保有水平耐力法と同様に考え

れば良いと考えられる。

(2) ラーメン橋の耐震特性

ラーメン橋の耐震性を把握するために単柱形式との比較を行った。表-3の単柱形式タイプ1-3、タイプ3はそれぞれラーメン橋タイプ1-3、タイプ3と比較するために、同断面、同配筋で負担重量を等しくし、周期を合わせるために柱高さを調節したものである。ラーメン橋と調整した単柱形式の $Kh-\delta$ 関係は図-6、7のように降伏点の作用水平震度および降伏後の性状に差があるが、これがラーメン橋と単柱形式の構造特性の違いである。

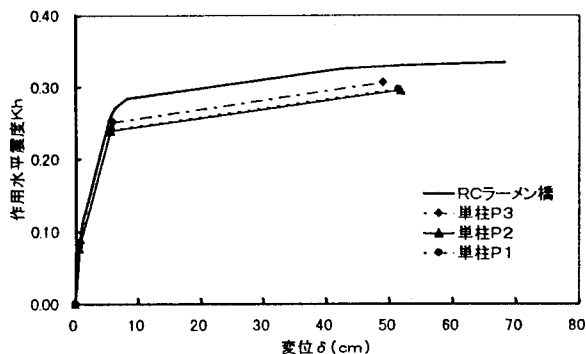


図-6 Kh-δ曲線 (タイプ1-3)

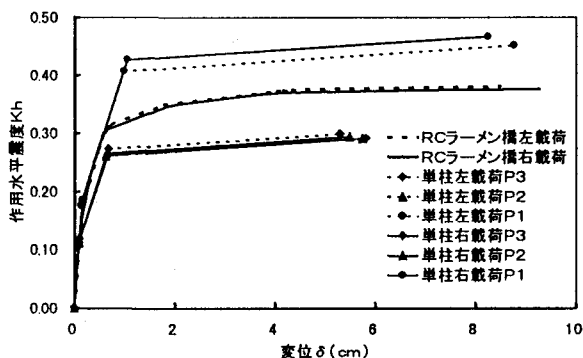


図-7 Kh-δ曲線 (タイプ3)

表-4 最大応答変位の厳密解と推定値

				最大応答変位(cm)			固有周期 降伏剛性 (sec)
				動的解析 δ d	静的解析 δ s	δ s / δ d	
ラーメン橋	タイプ1-1		H=5.0	10.500	17.300	1.648	0.354
	タイプ1-2	補強	H=8.4	4.500	14.940	3.320	0.405
	タイプ1-3		H=15.0	15.050	70.950	4.714	0.954
	タイプ3 H=7.0,4.0,4.0	平均降伏	左載荷	8.750	14.050	1.606	0.316
			右載荷	8.750	13.670	1.562	0.307
単柱形式	タイプ1-1		H=2.7	12.920	19.128	1.480	0.350
	タイプ1-2	補強	H=6.0	11.014	15.481	1.406	0.408
	タイプ1-3		H=8.1	19.150	73.640	3.845	0.959
	タイプ3	P2橋脚	H=2.3	12.010	16.044	1.336	0.315
		P1橋脚	H=2.85	12.080	11.355	0.940	0.312

この両者に対して非線形時刻歴応答解析を行った。応答最大の時の減衰定数および最大応答変位を比較したものが表-3である。減衰定数は次式で算出した。

$$h = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta W}{We} \right)$$

ここに、

h : 等価減衰定数

ΔW : 最大履歴ループ1サイクルの仕事

We : 等価ポテンシャルエネルギー

これから単柱形式に比べラーメン橋の方が減衰定数が高く、地震時の応答変位も小さいことがわかる。これは、ラーメン橋は柱に複数の塑性ヒンジが発生することによるものと考えられる。

7. RCラーメン橋の地震時保有水平耐力法の適用性

ラーメン橋の静的な荷重漸増法解析で求めた $Kh-\delta$ 曲線を用いて最大応答変位を求める方法の適用性を非線形時刻歴応答解析と比較することによって検討した。また、エネルギー一定則は周期の依存性があるので、単柱形式の場合も同様に比較した。表-4にラーメン橋と単柱形式の地震時保有水平耐力法で求めた最大応答変位と非線形時刻歴応答解析で求めた最大応答変位を示す。

これからRCラーメン橋の地震時保有水平耐力法による推定変位は動的応答解析に対して、1.56～4.71倍となっており、長周期になるほど推定値の精度が落ちている。単柱形式の場合は、同様に0.94～3.85倍であり、周期の依存性も同様であり、両形式とも推定の精度は同程度である。また、ラーメン橋は単柱形式に比べ減衰が大きくなることから、応答変位も小さくなり、設計としては単柱形式の場合よりも安全側の設計になるものと考えられる。したがって、ラーメン橋に対しても地震時保有水平耐力法は適用可能と考えられる。

8. まとめ

RCラーメン橋の耐震設計に関する地震時保有水平耐力法の適用性を明らかにするために、構造形式の異なる4タイプのラーメン橋について静的特性や動的特性について検討した。その結果次のようなことが明らかになった。

- ①ラーメン橋の水平力-変位曲線には、橋脚の高さなどの構造特性が大きく影響しているが、軸力の変動の影響は少ない。
- ②RCラーメン橋は、単柱形式に比べ減衰が大きく、応答変位は小さくなる傾向にある。
- ③RCラーメン橋の地震時保有水平耐力法で推定した応答変位は、単柱形式の場合とほぼ同程度の精度で求められる。

以上のことより、RCラーメン橋の耐震設計に地震時保有水平耐力法を用いても安全側であり、特に問題はないと考えられる。ただし、この検討では十分に検討できなかったが、高次の振動モードが支配的になる可能性がある構造物は、本来地震時保有水平耐力法の範疇外と考えられるため、動的解析で照査を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編 1996.12
- 2) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案） 1995.6
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料 1997.3
- 4) 柴田明德：最新耐震構造解析、森北出版 1995