

コンクリートラーメン橋の地震時保有水平耐力法の検討

御園生 静栄¹・土田 貴之²・泉 和伸³・須田 隆文⁴・為広 尚起⁵・藤江 和久⁶

¹ 正会員 八千代エンジニアリング(株) 耐震保全部 (〒153 東京都目黒区中目黒 1-10-21)

² 正会員 (株)建設技術研究所 東京支社 道路本部 技術第4部 (〒103 東京都中央区日本橋本町 4-9-11)

³ (株)CRC総合研究所 科学システム事業部 耐震技術部 第1課 (〒136 東京都江東区南砂 2-7-5)

⁴ 日本電子計算(株) 科学技術事業部 建設技術営業部 システム第2課 (〒135 東京都江東区東陽 2-4-24)

⁵ (株)構造計画研究所 解析営業部 (〒164 東京都中野区本町 4-38-13)

⁶ 川田テクノシステム(株) 開発部 開発2課 (〒135 東京都荒川区西日暮里 2-40-3)

1. まえがき

従来の道路橋示方書では、不静定構造物は一般に十分な耐力および変形性能があるので、地震時保有水平耐力法の照査は省略されてきた。しかし、平成7年の兵庫県南部地震において、ラーメン橋脚にも被害が生じたため、平成8年道路橋示方書V耐震設計編に、初めて不静定橋脚（1層ラーメン橋脚）の地震時保有水平耐力法の手法が示された。この手法では、各柱部材の曲げモーメントー曲率関係が軸力に影響されることを考慮に入れている。また、ラーメン橋についても、挙動が複雑ではない場合には同規定を準用できるとしている。これらから、次のようなコンクリートラーメン橋の地震時保有水平耐力法における検討項目が挙げられる。

- ①地震時保有水平耐力法におけるモデル化の影響
- ②軸力変動が水平耐力～水平変位関係に与える影響
- ③地震時保有水平耐力法における地震荷重の載荷法以上の問題点に着目して、本論文では、コンクリートラーメン橋モデルを用いて、地震荷重を水平方向に入力した非線形静的解析を行い、その変形性能を検討することを目的としている。

2. モデル化の影響

ラーメン橋では、塑性ヒンジの発生位置に留意すれば、単柱式橋脚におけるモデル化を準用することができると考えられる。表-1および図-1は、対

象としたラーメン橋のモデル化の一例である。対象橋梁は、5径間PCラーメン橋であり、橋脚躯体部高さは25mと50mである。M- θ モデルは、道示の塑性ヒンジの考え方を導入して橋脚上下端の塑性ヒンジ区間を弾塑性回転バネでモデル化しており、この位置に塑性ヒンジが発生することが予想された構造である。また、M- ϕ モデルは、塑性ヒンジを用いず、塑性ヒンジ区間を弾塑性はり要素でモデル化したものである。解析には軸力変動の影響は考慮せず、荷重は上部構造位置に載荷した。これらのモデルによる非線形静的解析の結果を、図-2に示す。コンクリート橋脚の変形性能は作用水平力とその位置の水平変位で示されるが、ここでは載荷荷重に対応した水平震度と水平変位の関係で表す。同図は塑性ヒンジの一つが終局に達するまでを示している。これから、各モデルの最初の降伏時、最初の終局時の作用震度と水平変位に差が生じている。これは、M- θ モデルとM- ϕ モデルの降伏点の定義と、終局点の判定位置の違いによると考えられる。具体的には、以下のような違いがある。

- ①M- ϕ モデルの降伏は、道路橋示方書の初降伏に相当し、M- θ モデルの降伏は原点と初降伏点を結んだ線が終局耐力と交差する点（降伏点）に相当する。
- ②終局の判定は、M- ϕ モデルは橋脚の上・下端部の要素が終局に達した時に、M- θ モデルは塑性ヒンジ長の区間が終局に達した時に行っている。また、初めての終局状態での水平変位は約120cm発生しているが、このような降伏以後の終局時の変

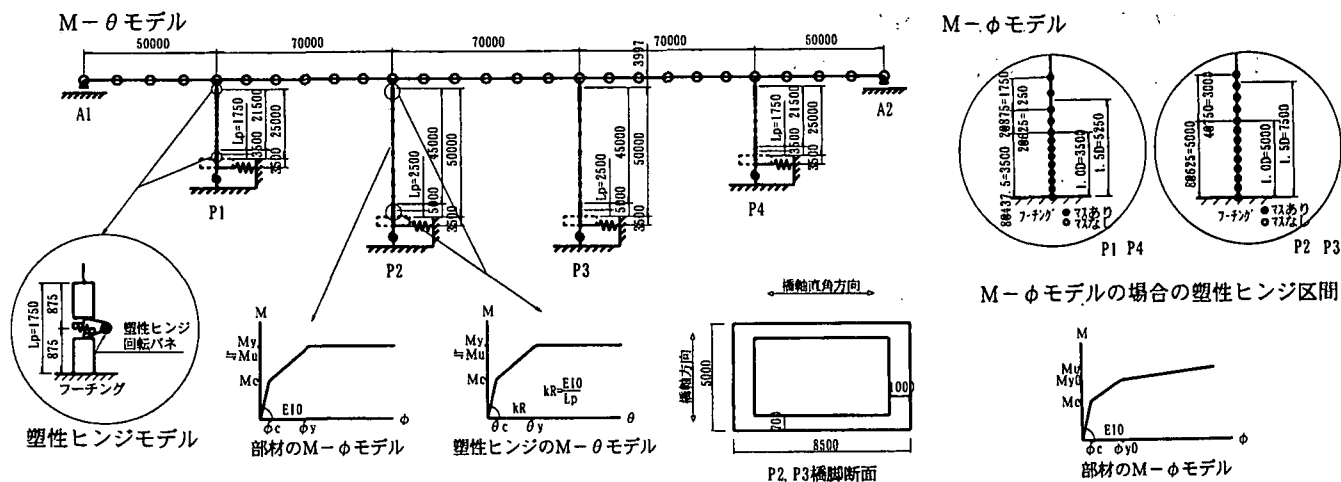


図-1 コンクリートラーメン橋の解析モデル

表-1 コンクリートラーメン橋のモデル化の一例

部位	モデル化	弾塑性回転バネ (M-θモデル)		弾塑性はり要素 (M-φモデル)	
		要素	骨格	要素	骨格
塑性ヒンジが発生すると予想される橋脚の上下端 (塑性ヒンジ領域)	M-θ		高さhの片持ち梁の降伏変位が道路橋示方書のそれに等しくなるように定めたトリリニア (第3次勾配k3=0.0)	M-φ	初降伏点と終局点を結ぶトリリニアモデル
塑性ヒンジ領域以外の橋脚部材	M-φ		初降伏点と終局点を結ぶトリリニアモデル	M-φ	初降伏点と終局点を結ぶトリリニアモデル

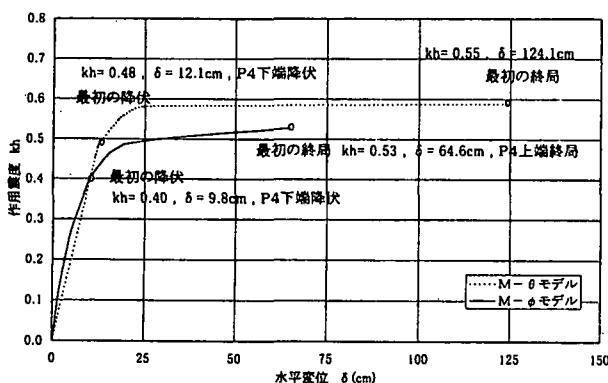


図-2 解析モデルが $kh \sim \delta$ 関係に与える影響

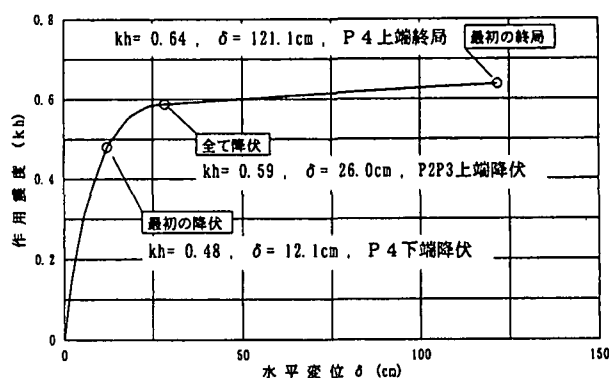


図-3 軸力変動の影響を考慮しない場合の $kh \sim \delta$ 関係

位は3次勾配 k_3 の影響を強く受けるので、数値の妥当性の検証は、今後の実験的研究を必要とする。

3. 軸力変動の影響

道路橋示方書では、ラーメン橋脚の地震時保有水平耐力法において、軸力-曲げモーメント相関関係を用いて軸力の変動による終局曲げ耐力の変化 (軸力変動の影響) を考慮している。ラーメン橋は、ラーメン橋脚よりもその橋脚高さが高いために、必ずしも軸力変動の影響が大きいとは言えない。そこで、軸力変動の影響をM-θモデルを用いた非線形静的解析によって検討する。まず、ラーメン橋の軸力変動の大きさを明らかにする。図-3は、M-θモデル

表-2 各塑性ヒンジの降伏順序

発生順序	1	2	3	4
塑性ヒンジ領域の降伏の発生順序	P4 下端	P1 下端	P4 上端	P1 上端

発生順序	5	6	7	8
塑性ヒンジ領域の降伏の発生順序	P2, P3 下端		P2, P3 上端	

表-3 軸力変動の結果

イベント	常時軸力に対する軸力の増減の割合	
	P1, P4	P2, P3
最初の降伏	-8.1% ~ +7.9%	-5.6% ~ +6.1%
全て降伏	-11.6% ~ +11.6%	-5.0% ~ +6.0%
最初の終局	-12.4% ~ +12.3%	-5.9% ~ +6.9%

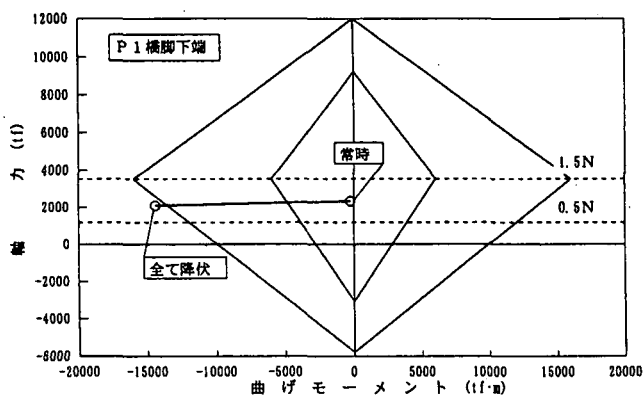


図-4 軸力の変化と曲げ耐力の関係

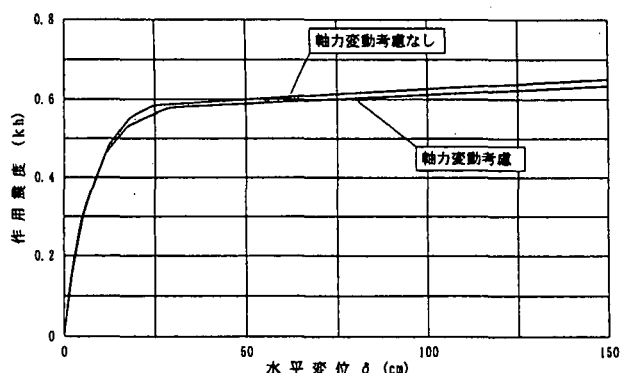


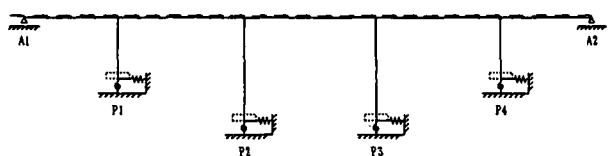
図-5 軸力変動が $k \sim \delta$ 関係に与える影響

ルを用いた軸力変動の影響を考慮しない解析の作用震度～水平変位関係の、上部構造のみに慣性力を載荷した解析結果である。ここで、この結果は表-1の3次勾配 K_3 を弾性時剛性の $1/1,000$ に仮定した場合のものである。また、2章のモデル化の影響を検討した時の $M-\theta$ モデルの解析は、3次勾配を $1/10,000$ と更に小さくした場合の結果であり、最初の終局の時の変位にはほとんど差が見られないが、水平震度は $1/1,000$ のモデルの方が大きい結果になっている。表-2は、各橋脚上下端の塑性ヒンジの降伏に至る順序をまとめたものである。高い方の橋脚 (P1およびP4) から降伏に至ること、下端から先に降伏することが分かる。また、表-3は、図-3の各イベントにおける軸力の増減を常時の軸力との比率(%)で表したものである。これより、最初の塑性ヒンジが終局に至った時の軸力変動はP1、P4橋脚で常時の±13%程度になることが分かった。ここで、曲げモーメントと軸力の解析値をP1橋脚下端の $N-M$ 相関関係図にプロットしたも

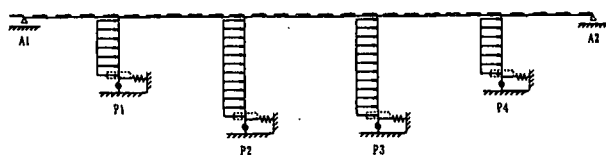
のを図-4に示す。菱形に見える内側の実線はひび割れの境界を、外側の実線は降伏、終局の境界を示しており、軸力が変化するに従って、ひび割れ、降伏、終局状態に至る曲げモーメントも増減することを表している。全て降伏時の曲げモーメントの解析値が、降伏、終局の境界より外側になることは、塑性ヒンジの $M-\theta$ 関係の3次勾配 K_3 が僅かながら値をもつことによる。このように、本解析モデルではラーメン橋の最初の塑性ヒンジが終局に至る時程度の軸力変動があったとしても、その増減の割合は少なく、降伏、終局曲げモーメントに与える影響は小さいことが分かった。そこで、さらに厳密な検討として、図-4の $N-M$ 相関関係を用いて軸力変動の影響を考慮した同様の解析を行い、その結果を比較して表したものが図-5である。同図より、軸力変動の影響を考慮した場合には、耐力が少し小さくなることが分かるが、地震時保有水平耐力法における変形性能には、ほとんど影響がないと考えられる。また、この他に幾何学的非線形性を考慮した解析も行ったが、ほぼ同一の変形性能を示す結果が得られたので、本論文では省略した。

4. 地震荷重の載荷方法による影響

一般的な橋脚高さを有する単柱形式の橋脚の地震応答は、上部構造の慣性力作用位置の変位が大きく、橋脚下端に向かって変位が小さくなるような1次の固有振動モードが支配的であるため、地震時保有水平耐力法の慣性力も上部構造の慣性力作用位置のみに作用させればよいとしている。しかし、ラーメン橋のような橋梁は、その地震応答が複数の固有振動モードによって決定されるので、応答加速度分布や固有振動モード形に基づいた地震荷重の載荷方法が考えられる。本論文では、図-6に示すようにコンクリートラーメン橋の地震時保有水平耐力法における地震荷重の載荷方法として、①上部構造物のみに慣性力を載荷した場合、②上部と下部構造物の両方に慣性力を載荷した場合の2ケースを考えた。これらは、基本的には1次の固有振動モード形に着目したものである。解析には $M-\theta$ モデルを用いた。図-7は、各橋脚基部の曲げモーメントの合計と上部構造位置における水平変位の関係の両ケースの載荷方法による解析結果を比較したものである。同図



上部構造のみに荷重を載荷



上部および下部構造に荷重を載荷

図-6 荷重載荷方法のケース

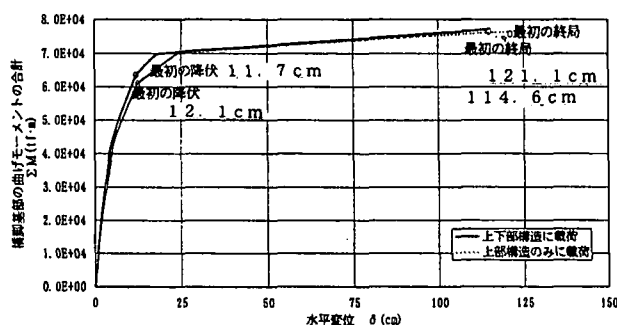


図-7 荷重載荷条件が $k_h \sim \delta$ 関係に与える影響

より、各荷重載荷条件の変形性能に差が生じていることが分かる。また、各塑性ヒンジが降伏に至る順番は、上部および下部構造に荷重を載荷した場合、全ての橋脚の下端の塑性ヒンジが降伏してから上端が降伏に至る結果が得られている。これは、表-2に示した上部構造のみに荷重を載荷した場合の順番とは異なっている。ここでは、地震荷重の載荷手法によって生じる、変形性能の差を求めたものである。しかし、地震時に作用する荷重分布は、ここで対象としたケース程単純ではなく、今後はラーメン橋の固有振動特性や地震時の加速度分布によって合理的な地震時保有水平耐力法の荷重載荷法を検討する必要がある。

5. まとめ

本論文は、コンクリートラーメン橋に地震時保有水平耐力法を用いる場合に問題となる項目をまとめ、ラーメン橋モデルを用いて水平方向に慣性力を入力する非線形静的解析を行うことにより、その変

形性能を検討したものである。検討項目および結果をまとめると、以下になる。

①地震時保有水平耐力法におけるモデル化の影響

1) 塑性ヒンジの考え方を導入した $M-\theta$ モデルと、塑性ヒンジを用いず、橋脚すべてを弾塑性はり要素でモデル化した $M-\phi$ モデルについて非線形静的解析をおこなった場合、各モデルの最初の降伏時、最初の終局時の水平震度と水平変位に差が生じている結果となった。

2) これは、両モデルの降伏点の定義と、終局時点の判定位置の違いなどによるものと考えられる。

②軸力変動が水平耐力～水平変位関係に与える影響

1) コンクリートラーメン橋の橋脚の軸力変動の大きさは、本解析モデルの場合、最初の塑性ヒンジが終局に至った時で、常時軸力の $\pm 13\%$ 程度になる。

2) この範囲の軸力変動では、 $N-M$ 相関関係より、その降伏、終局曲げモーメントに与える影響は少ないと考えられる。

3) さらに厳密な検討として、 $N-M$ 相関関係を用いて軸力変動の影響を考慮した解析を行ったが、地震時保有水平耐力法における変形性能には、ほとんど影響がない結果が得られた。

③地震時保有水平耐力法における地震荷重の載荷法

1) ラーメン橋のような橋梁は、その地震応答が複数の固有振動モードによって決定されるので、応答加速度分布や固有振動モード形に基づいた地震荷重の載荷方法が考えられる。

2) 本論文では、上部構造物のみに慣性力を載荷した場合と、上部と下部構造物の両方に慣性力を載荷した場合の2ケースについて解析を行った。

3) その結果、最初の降伏、最初の終局時の変位に差が生じた。また、塑性ヒンジの降伏順序も、両モデルで異なる結果が得られた。

4) しかし、地震時に作用する荷重分布は、ここで対象とした2つの荷重載荷ほど単純ではなく、ラーメン橋の固有振動特性や地震時の加速度分布等によって、合理的な地震時保有水平耐力法の荷重載荷法を検討する必要がある。

また、ここで報告した内容は、(財) 土木研究センター内に設置された耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会(座長: 川島一彦東京工業大学教授)で検討されたものの一部である。