

5. 高橋脚の耐震設計

1. 日本道路公団の耐震設計基準

日本道路公団（以下「JH」）の橋梁構造物に関する設計基準として整備されている設計要領第二集のうち、新設橋梁を対象とした「橋梁建設編」は、平成10年4月に全面改正された。

主な改正点は、平成8年12月に改訂された道路橋示方書および河川法などの国の基準との準拠、JHの適用を明確化したこと、公共工事コスト縮減の社会的要請を受け、JHとして技術開発してきた新技術・新工法に関する設計基準を整備したことなどである。

耐震設計基準に関する改正要点は、橋梁形式選定などの計画段階から、橋梁構造物の耐震性への配慮や、設計では動的解析の積極的な採用、あるいは、高橋脚に対する設計基準の追加などが挙げられる。また、全般に、直接設計とは関係ないが、耐震設計を行ううえで理解しておく事が必要と思われる関連事項についても極力解説を加えており、耐震に関する知識が深められるよう配慮されている。ここでは、高橋脚に関する事項を中心に、JHの高橋脚に関する耐震設計基準の現状と、設計事例を紹介する。なお、一般の橋脚設計と共通している設計手法などについての記述は省略する。

2. 耐震設計の基本

2.1 構造形式の選定

橋梁構造の形式選定にあたっては、地形・地質・地盤条件や立地条件などを総合的に考慮して、耐震性に優れた構造形式を選定するよう規定されている。耐震性に優れた構造形式としては、多径間連続ラーメン橋が望ましいとしている。橋脚の形式・構造の選定では、施工性・経済性・維持管理・耐震安全性などを総合的に判断して選定する。

山岳部の路線では、高橋脚となる場合が多く、このような場合は、上部構造を合わせた橋梁全体として、施工法を含めて検討したうえで構造や形式を選定する必要がある。

JHでは、このような観点から、高橋脚については鋼管・コンクリート複合構造橋脚を標準としている。ただし、高橋脚を有する多径間連続ラーメン橋などでは、完成時と施工時とで構造系が異なる場合があり、施工時の耐震安全性や耐風安定性に十分な配慮を加えることも必要であるとしている。また、高橋脚の下部構造では施工に際して、移動式型わくなど、下部工施工時の安全性に配慮した、形状や形式を選定する必要もあるとしている。さらに、高橋脚の場合は、一般に上部構造の施工に多くの架設機材や、特殊な架設工法が用いられるため、これらについての配慮も必要となる。

構造形式の選定にあたっては、震度法による耐震設計結果のみを考慮して、従前の感覚で形式選定すると、詳細な設計段階で、大規模地震に対する設計を実施した場合に、完成時あるいは施工時に耐震性に対する問題や、経済性の問題が生じる場合もある。

このため、JHでは、構造形式に応じて、形式選定の段階から、動的解析法による検討を加え、耐震性に優れた最適な構造形式を選定するよう努めている。

2. 2 耐震計算手法

高橋脚を有する橋は、地震時保有水平耐力法の適用性が限定される地震時の挙動が複雑な橋に該当するため、動的解析による耐震設計を行う必要がある。

地震時保有水平耐力法の慣性力は橋脚頭部に集中させているが、高橋脚では上部構造重量に比して橋脚躯体重量の影響が大きくなり、応答に主たる影響を与える振動モードが、橋脚の上端から下端で大きく変化するため、「橋の応答に主たる影響を及ぼす振動モードが静的解析で想定する振動モードと著しく異なる場合」に該当する。

また、高橋脚は高次の振動モードの影響が大きくなる。さらに、橋の1次固有周期が長くなり、むしろ、橋の高次固有振動の周期が地震動の卓越周期と一致して、その振動モードの影響が大きくなることが多く、「橋の応答に主たる影響を与える振動モードが1つではなく、高次振動モードが影響する場合」に該当するためである。

2. 3 地震時保有水平耐力の照査

地震時保有水平耐力法による橋脚の耐震設計では、当該部材の地震時保有水平耐力法が、等価水平震度に構造物の等価重量を乗じて求められる地震力を上回るように設計することが道示に示されている。しかし、高橋脚のような場合などでは、上部構造慣性力に比して、下部構造慣性力が、上部構造慣性力作用位置の変位に及ぼす影響が大きく、下部構造慣性力の分布の影響を考慮して、非線形静的解析により水平震度と変位の関係を算定する場合の、等価重量の算定方法が不明であるので、道示に示された判定式を用いることができない。

JHでは、高橋脚などの下部構造慣性力の分布の影響をより正確に考慮することが望ましい構造系の場合の、地震時保有水平耐力の照査は、水平震度を直接比較する判定形式を用いている。

(1) 橋脚の地震時保有水平耐力の照査は以下のように行う。

(a) 上部構造慣性力が下部構造の耐震性に支配的な影響を及ぼす構造系の場合

$$P_a \geq k_{hc} W \quad \dots\dots\dots \text{式(3-3-5)}$$

(b) 下部構造慣性力の分布の影響をより正確に考慮することが望ましい構造系の場合

$$k_{hy} \geq k_{hc} \quad \dots\dots\dots \text{式(3-3-6)}$$

ここで、

P_a : 地震時保有水平耐力

W : 等価重量 ($= W_0 + c_p W_p$)

k_{hc} : 等価水平震度 ($= \frac{k_{hc}}{\sqrt{2\mu_a - 1}}$)

k_{hy} : 降伏水平震度

k_{hc} : 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度

W_0 : 当該橋脚が支持している上部構造部分の重量

c_p : 等価重量算出係数

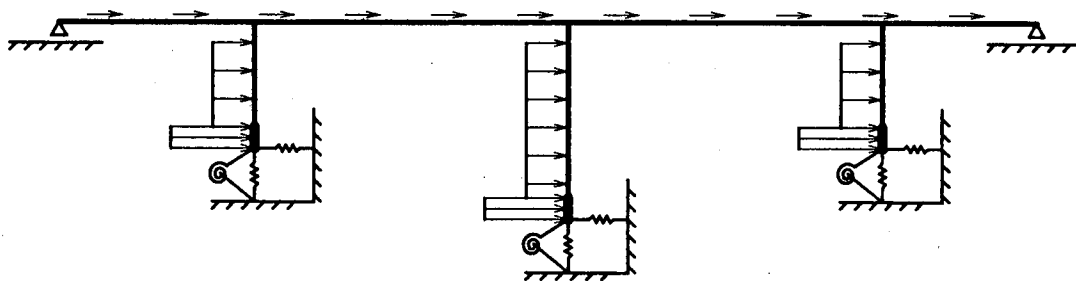
W_p : 橋脚躯体の重量

2. 4 非線形静的解析による耐震設計

高橋脚を有するラーメン橋などでは、大規模地震を考慮した地震動に対する耐震設計を、複数の下部構造を含む全体系で行う必要がある場合は、非線形静的解析による耐震設計が原則となる。このような構造系に対する非線形静的解析による設計実績が少なく、解析結果の判断が難しい。JHでは、このような構造系に対する非線形静的解析は、部材の非線形性を考慮したモデルに対し、上部構造と下部構造の重量に水平震度を乗じることによって得られる慣性力を作用させ、その荷重（水平震度）を漸増させることによって変位・断面力、および部材の非線形化の程度を算定し、この解析結果を用いて、

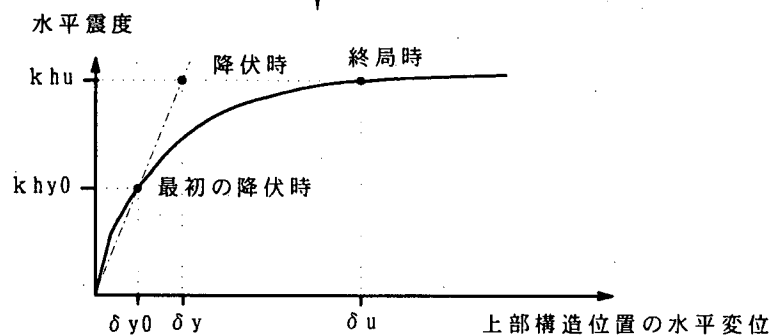
- ①許容変位の算定
- ②構造系の降伏水平震度
- ③基礎の耐震設計に用いる荷重を算出するための設計水平震度の算定を行い、
- ④地震力による軸力変動の影響に対する検討
- ⑤地震時の水平変位に伴う付加モーメントに関する検討を行う。

これらの検討を行うことにより、降伏から終局までの機構を把握し、動的解析結果を総合的に判断する基礎資料として用いる。このような解析では、最初の一つの塑性ヒンジが終局に達してから、全ての塑性ヒンジが終局に達するまでの、個々の塑性ヒンジの関係が明確となり、また、ラーメン構造としての地震時保有水平耐力や変形性能を把握することができる。なお、橋脚高さの大きく異なるラーメン橋などでは、個々の塑性ヒンジの耐力バランスについて配慮しておく必要がある。



自重を地震力方向に載荷

荷重を増加させる



水平震度と変位の関係

図 2. 4. 1 非線形静的解析の概念（ラーメン橋の橋軸方向）

2. 5 非線形静的解析

橋脚高さの低いラーメン橋などの非線形静的解析のみを行う橋梁では、柱の剛性は降伏時剛性を用い、コンクリートにひび割れが生じる以前の全断面有効剛性を無視するとした、道示の規定に基づく解析モデルを用いることができるが、高橋脚のラーメン橋のように、非線形静的解析に加えて、非線形動的解析を行う必要がある橋では、コンクリートのひび割れ発生以前の全断面有効の剛性をも考慮した解析を行い、非線形静的解析と非線形動的解析に用いる解析モデルは、同一のモデルを用いることができるとしている。

これは、以下の事項を配慮したものである。

- ① 高橋脚などの動的解析の対象となるような橋の振動実験から得られる固有振動数は、全断面を考慮した解析値と近くなる。
- ② RC部材の動的解析に一般に用いられる履歴特性モデルは、コンクリートのひび割れ発生以前を考慮している。
- ③ 曲げ耐力が大きい部材では、非線形動的解析の応答値が降伏点程度となることもあり、このような場合に、コンクリートひび割れ発生以前の挙動を考慮しなければ、応答値の誤差が大きいものとなる。

地震時保有水平耐力法による設計で、許容塑性率の算定を1基の下部構造とそれが支持する上部構造からなる設計振動単位で行う場合や、ラーメン高架橋のように上部構造重量の影響が支配的な場合には、道示V9.2に示された方法で慣性力の影響を考慮することができる。しかし、高橋脚のように、橋梁重量を集中して考慮しがたいような場合では、下部構造の慣性力分布の影響を考慮する必要がある。この場合には、上部構造・下部構造の重量に同一の水平震度を乗じることにより、慣性力の分布を考慮している。

3. 高橋脚の耐震設計

3. 1 橋脚高さが20m～30m程度の高橋脚

橋脚高さ20m以上の橋を耐震設計する際の流れを、ラーメン橋の橋軸方向の場合を例にとり示すと図3.1.1のようになる。

まず、震度法の設計により断面形状を決定し、大規模地震を考慮した地震動に対しては、非線形動的解析により耐震設計を行う。なお、非線形動的解析の結果が、許容値に対して余裕があっても、震度法の設計を同時に満足していることが必要であるため、断面の変更は行わない。大規模地震を考慮した地震動に対する設計は、モデル化の構造単位を決定し、非線形静的解析、あるいは、道示V9.3「降伏時および終局時の水平耐力と水平変位」の規定に基づいて、降伏水平震度を算定し、橋の地震時保有水平耐力が過度に小さくならない事を確認する。

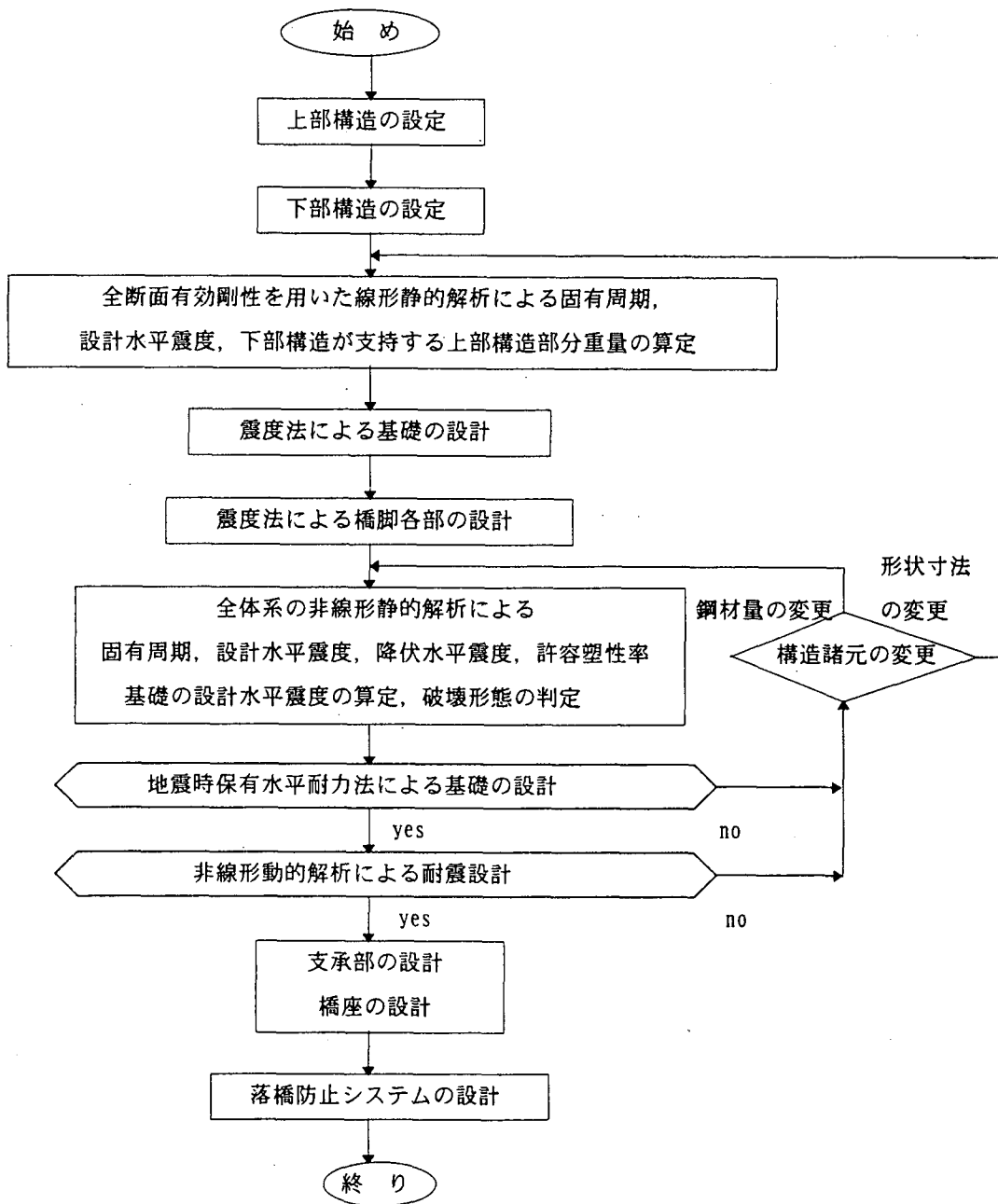


図 3. 1. 1 耐震設計の流れ

また、非線形静的解析と地震時保有水平耐力法で挙動を把握する。その手法は、前述したとおりである。

現段階では、多質点モデルでの非線形動的解析法の適用事例が少ないことを勘案し、非線形動的解析結果に基づいて求めた最大変位は、非線形動的解析結果を評価するうえでの参考値として用いている。

高橋脚を有する橋梁では、地震時の水平変位が大きく、この変位に伴う上部構造の死荷重による付加モーメントの影響が懸念される。また、ラーメン橋の橋軸方向に対する地震では、地震力により軸力の変動が生じ、この軸力変動が曲げ耐力に影響を及ぼす。これらの影響は、非線形静的解析やこれに基づく予備的な耐震性の評価を行うことにより推定することが可能である。

3. 2 橋脚高さ30m以上の高橋脚

橋脚高さが30mを超えるような橋では、大規模地震を考慮した地震動に対し、動的解析により耐震設計すると、経済的な断面とすることが可能であるが、耐力が過度に小さくなる恐れがある。震度法で設計された高さ50m程度の橋脚の橋軸方向の降伏水平震度は、0.25前後となることを考慮して、橋脚高さが30mを超える高橋脚の降伏水平震度は、 $Khy \geq (0.2 \sim 0.3) Cz$ となるようにすることが望ましい。また、降伏水平震度の下限値を設定するにあたっては、桁の最大応答変位と桁かかり長 S_E や遊間などの関係にも配慮するとともに、橋脚の主鉄筋をD51の1段以上の配置とすることを目安とする。

このように、橋脚高さが20m～30mの高橋脚と、30m程度以上の高橋脚の降伏水平震度の下限値を設定しているのは、橋脚高さの違いによる設計法の違いが、橋脚断面寸法に大きな差が生じないように擦り付けしたものである。

4. 施工時の耐震設計

4. 1 耐震性の照査

高橋脚を有する橋梁は、一般に、上部構造の施工は支保工による架設が行えなえず、片持ち張出し架設工法などにより施工される。このような片持ち張出し架設を行うラーメン橋の橋軸方向のように、施工時と完成時の構造系が著しく異なり、施工中に地震が発生した場合に、不安定となる恐れのある構造形式を有する橋梁については、施工時の耐震性を照査する必要がある。

4. 2 施工時の耐震性目標

施工時の耐震性照査は、中規模地震を考慮した地震動に対して震度法により耐震設計し、健全性を損なわないことを目標とし、大規模地震を考慮した地震動に対しては、耐震設計を行わなくてもよいとしている。これは、完成時以降の供用期間に比べて架設中の期間が短期間であることや、震度法に基づき耐震設計されていれば、耐力が確保されており、大規模地震を考慮した地震動を受けた場合でも、崩壊しにくいことを考慮したためである。

ただし、架設期間が非常に長期に渡るような場合や、交差物件が重要な交通路であるなどの場合では、架設中に大規模地震を考慮した地震動を受けた場合に大きな影響を与える恐れがあり、大規模地震を考慮した地震動に対し耐震性を確保する必要性が生じることも考えられる。このような橋の場合は、1次周期が長周期となり高次振動の影響も無視できない場合が多くあるため、非線形動的解析により耐震設計を行うこととしている。この場合の、大規模地震を考慮した地震動を受けた時の耐震性能としては、崩壊または落橋しないことを目標とし、許容塑性率を算定する際の安全係数は1.0とし、残留変位の照査は省略できるものとしている。

また、基礎の施工時における耐震性の照査は省略している。片持ち張出し架設を行うラーメン橋の橋軸方向のような場合では、施工時の構造系が一本柱形式の橋脚となり、曲げモーメントの分布の違いから、慣性力作用位置が完成時の位置より約2倍の高さとなることに相当しており、地震時保有水平耐力法としては完成時と比べて小さくなるためである。

なお、施工時の耐震性照査は、施工中に生じるアンバランスモーメントや、片持ち架設

用移動作業車などの工事用荷重を考慮して、施工中の各施工段階において最も厳しい条件において検討しなければならない。

4. 3 設計水平震度

施工時の耐震性照査を行う場合の震度法に用いる設計水平震度は、道示に示される設計水平震度の標準値 (Kh0) により算定している。従来、施工時の耐震性照査は、完成時の設計水平震度の 1/2 を基本とし、その下限値は完成系地震時と同様に 0.10 として行われてきた。しかし、高橋脚のラーメン橋などの施工時の構造系は、固有周期が長く地震による応答加速度は小さいため、設計水平震度の下限値 0.10 を、施工時の構造系にまで適用することは不合理であると判断し、JH設計要領では設計水平震度の下限値を設けていない。

5. 鋼管・コンクリート複合構造高橋脚の耐震設計事例

この橋梁は、橋長 941m の PC10 径間連続ラーメン橋で、P2～P7 橋脚の橋脚高さは 60～70m の高橋脚であり、橋脚構造は、鋼管・コンクリート複合構造が採用されている。さらに、地形条件から P1、P8、P9 橋脚は、橋脚高さが 10m 前後と、中間橋脚と比べて極端に橋脚高さが低く、支承部構造にゴム支承を用いた構造系となっている。

このような高橋脚を有する橋梁は、弾性時においても周期が 2 秒以上となり地震時の挙動が複雑となることが予測された。このため、設計の実施に際して、非線形動的解析により地震時保有水平耐力法の地震動に相当する、大規模地震を考慮した地震動に対する耐震性について検討している。

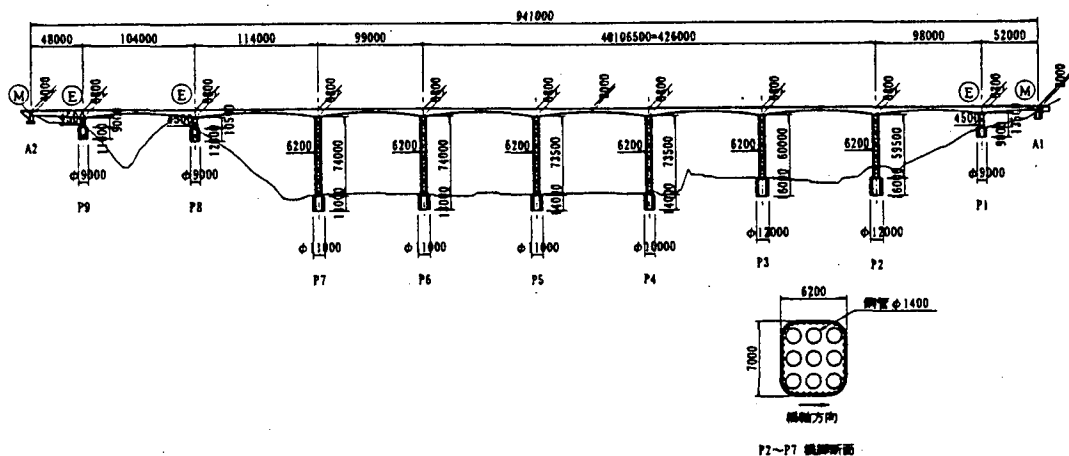


図 5. 1 一般図

5. 1 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデル

橋軸方向の非線形動的解析に用いたモデルを図5. 1. 1に示す。

モデル化に当たっては、A1橋台およびA2橋台の支承条件は可動であることから、桁両端部の支持条件を水平方向可動のピンとし、橋台を省略している。P1、P8、P9橋脚は、弾性バネで上部構造と連結している。

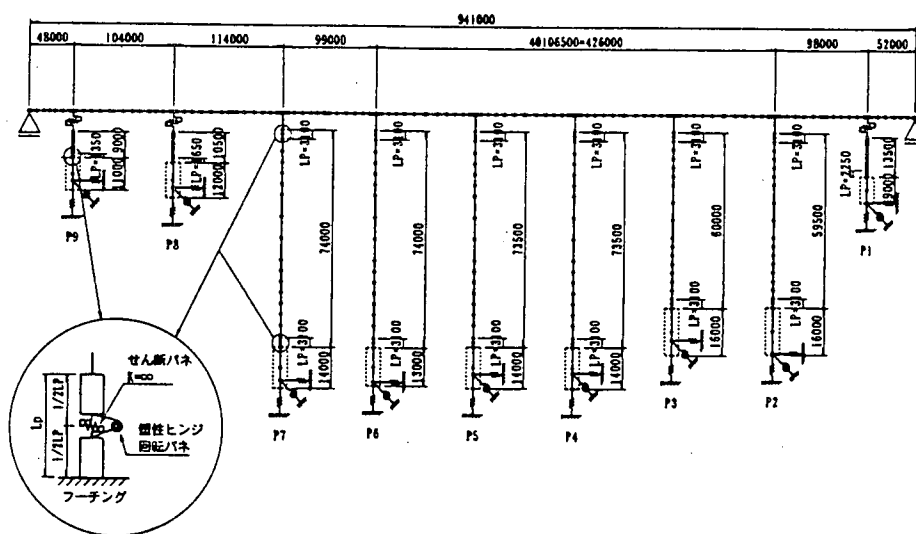


図5. 1. 1 動的解析モデル（橋軸方向）

a) 橋脚部材のモデル化

塑性ヒンジが発生すると予測される橋脚部材に弾塑性回転バネ要素($M-\theta$)を設けるとともに、それ以外の橋脚部材は部材断面の曲げモーメントと曲率の関係を非線形とした梁要素($M-\phi$)でモデル化している。

塑性ヒンジは上部構造と剛結するP2～P7橋脚の上下端部、および、バネで連結する、P1、P8、および、P9橋脚の下端部に設けている。

b) 鋼管・コンクリート複合構造橋脚部材断面のモーメントー曲率関係

鋼管・コンクリート複合構造橋脚部材の非線形解析に用いる、曲げモーメントと曲率との関係($M-\phi$)は、鋼管を鉄筋と見なし、道示V9. 3に基づいて、通常のRC梁理論により算出した($M-\phi$)関係データを基に設定している。

鋼管・コンクリート複合構造橋脚の終局曲げ耐力は、鋼管とコンクリートとの付着挙動に左右されることが、実験により明らかとなっている。一般には、作用せん断応力度が大きくなるにつれて鋼管を鉄筋と見なして算定した終局曲げ耐力に比して低下する。模型載荷実験および解析結果から、安全側を考慮して、終局曲げ耐力を、通常のRC梁理論により算出した最大モーメントの90%としている。

鋼管コンクリート複合構造橋脚の曲げモーメントー曲率関係の概念を図5. 1. 2に示す。

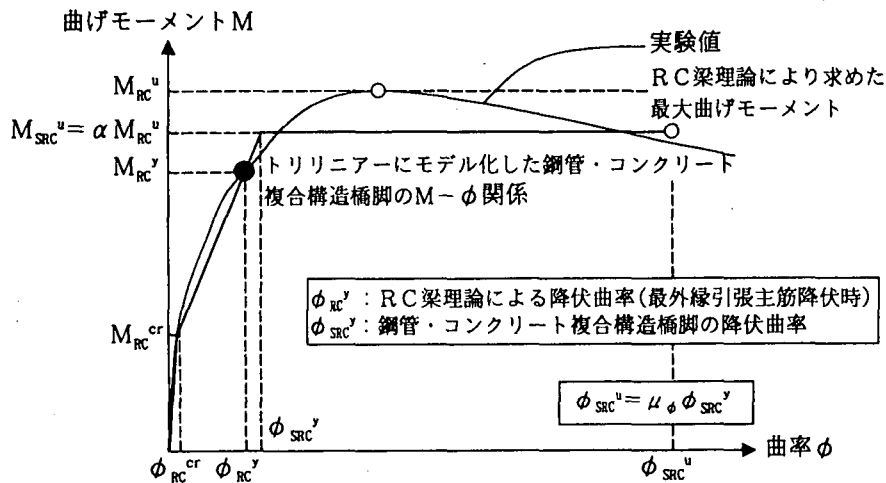


図5. 1. 2 鋼管コンクリート複合構造橋脚の曲げモーメントー曲率関係の概念

(2) 非線形動的解析の条件

非線形動的解析の条件を表5. 1に示す。非線形動的解析は、震度法に基づいて決定した鋼管・コンクリート複合構造橋脚断面に対して行う。入力地震動波は「道路橋の耐震設計に関する資料」(日本道路協会)に示された、タイプI、タイプIIの地震動の波形を用いて、3波平均の応答値により橋梁の耐震性を評価している。

表5. 1 非線形動的解析の条件

項目	解析条件
慣性力	自重、橋面荷重
減衰定数	上部構造3%、ゴム支承2%、橋脚2%、基礎10%
入力地震動	タイプI、タイプII
地盤種別	第1種地盤
減衰マトリクス	Rayleigh型
履歴特性	武藤型
積分間隔	0.002秒
初期断面力	死荷重による断面力(クリープ・乾燥収縮終了時)を与える

5. 2 固有値解析結果

橋脚剛性を全断面有効とした場合の固有値解析結果を図5. 2. 1に示す。橋軸方向の振動で、応答に寄与する振動モードは、1次、2次、11次の振動である。上部構造の水平振動が卓越している1次振動の周期は、2. 2秒である。

なお、橋脚の剛性を降伏剛性とした場合、この振動の周期は、2. 85秒となっていた。

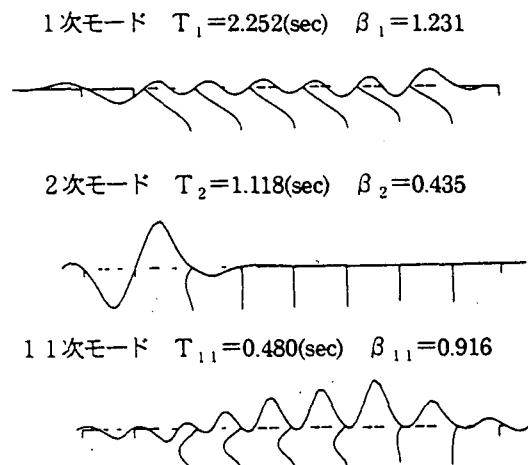


図5. 2. 1 橋軸方向の固有振動解析

5. 3 破壊形態

鋼管・コンクリート複合構造橋脚のP2～P7橋脚、一般の鉄筋コンクリート橋脚のP1、P8、P9橋脚ともに、せん断耐力は曲げ耐力を上回る結果となっており、橋脚の破壊形態は「曲げ破壊型」となっていた。

表5. 3 破壊形態の判定

	P1	P2	P3	P4	P5	
Pu(tf)	1,159 (1,161)	3,039 (3,081)	2,836 (2,878)	2,076 (2,107)	2,226 (2,261)	
Su(tf)	23,714 (24,972)	42,599 (42,702)	42,574 (42,668)	42,583 (42,678)	42,583 (42,678)	
	P6	P7	P8	P9		上段： タイプI 下段（ ）： タイプII
Pu(tf)	2,207 (2,241)	2,129 (2,161)	1,892 (1,894)	1,278 (1,282)		
Su(tf)	42,583 (42,678)	42,583 (42,678)	29,055 (30,313)	3,783 (5,041)		

5. 4 解析結果

(1) 地震動の違いによる応答値の差

入力地震動タイプ別ごとの最大応答値を表5. 5に示す。本橋梁の場合、水平振動が卓越する1次固有周期は2秒以上と長く、この周期における入力地震動の加速度応答スペクトル値は、タイプIIに比してタイプIが大きい。このため、タイプIの地震動を入力した結果の方が、最大応答変位、および、橋脚部材の最大応答曲げモーメントが大きくなっている。

ただし、最大応答せん断力は、タイプIIの地震動を入力した方が大きな値を示す橋脚もある。これは、高次振動に影響された応答せん断力として現れたためである。

このようなことから、本橋梁の耐震性評価に際しては、タイプIの地震動を用いて行うこととしている。

表5. 4. 1 動的解析による最大応答値

項目	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
天橋変位 (cm)	74.4 46.9	69.4 43.1	71.6 44.1	7236 45.7	72.4 45.3	73.6 47.1	73.2 45.6	77.6 48.5	77.9 48.6
基部曲げ (tf)	11,116 10,248	102,869 72,081	99,303 87,241	81,449 80,545	88,300 82,808	88,246 85,889	72,118 54,562	9,802 7,173	7,664 5,899
基部せん断 (tf)	938 1,031	3,535 3,037	3,307 3,727	2,614 3,486	2,894 3,154	3,033 3,440	2,629 3,343	1,025 815	936 804

(2) 耐震性の照査

a) 変位に対する安全性の照査

橋軸方向地震において、震度法の荷重分布で地震力を漸増させた非線形静的解析を行い、作用水平震度と上部構造の水平変位との関係を図5. 4に示す。

P3剛結橋脚下端の塑性ヒンジが、震度0. 23で最初に降伏している。次いで、剛結橋脚であるP2～P7橋脚の塑性ヒンジが降伏域に達し、バネ連結橋脚基部の塑性ヒンジがP1、P9、P8の順序で終局して行き、以降、剛結橋脚の塑性ヒンジが終局に至っている。

バネ連結橋脚の塑性ヒンジの降伏点と終局点が近似している原因は、橋脚高さが4.5mと低く、橋脚躯体のじん性能が小さいためである。

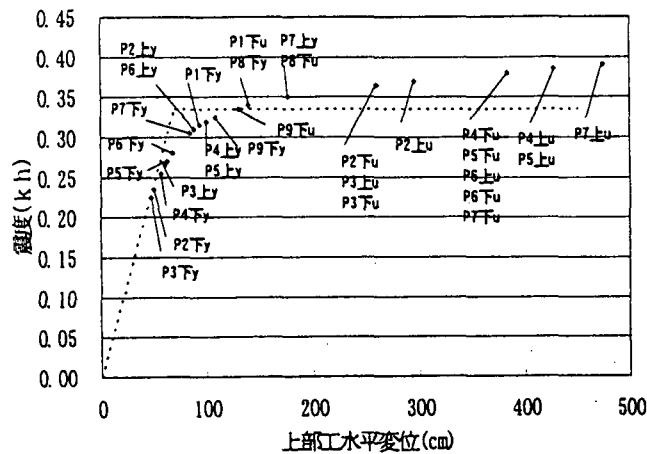


図 5. 4 非線形静的解析の水平震度と変位の関係

本橋では、安全性を考慮して、最初に終局するP9橋脚下端の塑性ヒンジに対する震度(0.34)を橋梁の終局と仮定している。初降伏震度(0.23)と終局震度(0.34)から、許容変位は $\delta a = 90.7\text{cm}$ となる。この許容変位と動的解析による上部構造の最大応答変位と比較すると、すべてにおいて許容値以内となっている。

b) 橋脚躯体の塑性ヒンジに対する照査

非線形動的解析の結果、P3、P4、P6橋脚の上下端、および、P2、P5橋脚下端の塑性ヒンジが降伏域に達し塑性化している。しかし、各橋脚の弾塑性回転バネの回転角は、許容回転角を下回っており、塑性ヒンジの照査を満足している。

表 5. 4. 2 動的解析による塑性ヒンジの安全性判定

		P3	P4	P5	P6	P7
上端	$\theta_{\max}/\theta_{pa}$	0.54	0.18	0.15	0.17	0.14
	θ_{\max}/θ_y	3.37	1.13	0.93	1.03	0.85
下端	$\theta_{\max}/\theta_{pa}$	0.62	0.33	0.21	0.21	0.14
	θ_{\max}/θ_y	3.87	2.07	1.33	1.32	0.87

c) 橋脚躯体のせん断力に対する照査

橋脚躯体に生じる最大応答せん断力と、橋脚躯体のせん断耐力を比較すると、橋脚躯体に生じている最大応答せん断力は、橋脚躯体のせん断耐力を下回っており、十分安全である。

5. 5 耐震設計結果

鋼管・コンクリート複合構造橋脚を有する多径間連続ラーメン橋の耐震性を検討した結果、下部構造の耐力には問題がないと判断された。なお、鋼管・コンクリート複合構造橋脚は、その特性として、鋼管とコンクリートの付着性状に支配される。このため、鋼管の配置方法や本数が、付着性状に及ぼす影響が大きい。このような構造系に対する耐震性の

評価手法は未解明な点も残されているため、現在までの載荷実験や解析などにより得られた知見の範囲を逸脱するような構造の場合は、別途載荷実験などを実施し、その特性を十分に把握したうえで、耐震設計に反映させなければならない。

参考資料

- 1) 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成8年12月，日本道路協会
- 2) 道路橋の耐震設計に関する資料，平成9年3月，日本道路協会
- 3) 鋼管・コンクリート複合構造橋脚の設計法に関する検討報告書，平成9年3月，財団法人高速道路技術センター
- 4) 設計要領第2集 橋梁建設編，平成10年4月，日本道路公団
- 5) 水口和之・芦塚憲一郎・田尻丈晴・石橋裕・御園生静栄・岡田稔規・小澤理絵
高橋脚を有する多径間連続ラーメン橋の耐震設計，1999年12月，第2回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集

(執筆者：多久和 勇)