

## 連続鋼鉄桁橋におけるRC橋脚の耐震設計手法について

坂東 邦彦<sup>1</sup>

平岡 良彦<sup>2</sup>

則武 邦具<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 三井共同建設コンサルタント (株) 橋梁部 橋梁第三室 室長 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場1-4-15

<sup>2</sup> (株) 日本構造技術研究所 技術部 課長

〒169-0075 東京都文京区千石1-14-10

<sup>3</sup> (株) 日本構造技術研究所 技術部 社長 (土木学会F10-会員)

〒169-0075 東京都文京区千石1-14-10

### 1. はじめに

本橋は17(15)径間連続高架橋である。その構造形式は、上部工がPC床版を有する鋼鉄桁橋、橋脚は橋梁中央部に剛結合とした鋼製橋脚、他は反力分散沓を設置したRC橋脚(橋軸直角方向に3柱式円柱RC橋脚)より成り、基礎は鋼製橋脚基礎がケーソン基礎、RC橋脚基礎がPCウェル基礎である。

図1に本橋の一般形状図を図2に代表的なRC橋脚及び鋼製橋脚の形状図をまた、表1に本橋の構造諸元を示す。道路橋示方書・同解説V 耐震設計編(平成8年度)(以後現行道示・耐震編という)では、複数の固定支承、ヒンジ支承、もしくはゴム支承で支持された連続けた橋の橋軸方向の場合、橋梁全体として極端に慣性力の分担が小さい橋脚が存在する橋脚がある可能性があり、橋梁全体として極端に耐力の小さい橋脚があることは望ましくないことを考慮し、慣性力の下限值として以下の規定を設けている。

「支承部に作用する死荷重反力に震度法耐震計算では設計水平震度を、また、地震時保有水平耐力法による耐震計算では、等価設計水平震度を乗じた値の2/3を下回ってはならない」

しかし、この規定は、支承を介する連続高架橋を念頭においており、本橋のような剛結合橋脚と沓設置橋より構成される複合連続高架橋の場合には、耐震構造の中心は、剛結合されている鋼製橋脚であり、橋軸方向の上部工慣性力のほとんどを鋼製橋脚で受け持ち、大規模地震においても沓が設置されているRC橋脚にはさほど断面力が発生しないと推定され、現行道示・耐震編のこの規定を適用するとRC橋脚に対しては、過大な設計となる可能性がある。

本稿は、以上のことを踏まえ、橋梁全体での静的非線形解析を用いて保有水平耐力法による耐震安全性の評価を行なうことによって、本橋のような剛結合橋脚と沓設置橋より構成される複合連続高架橋の沓設置橋脚の

耐震設計に対する手法を提案するものである。

表1 本橋の構造諸元

形式	17 径間連続鋼鉄桁連続高架橋 (床版: PC 床版)
橋長	710.0 m
桁長	709.8 m
全幅員	15.8 m
支間割り	29.5 m + 8 @ 42.5 m + 42.0 m + 43.0 m + 5 @ 42.5 m + 41.9 m
橋脚形式	3 または 4 柱式 RC 橋脚 (反力分散沓設置) T 張出しまたは門型鋼製橋脚
基礎形式	RC 橋脚: PC ウェル 鋼製橋脚: ケーソン
地盤種別	Ⅲ種地盤
地域区分	A 地域

(注) 表の数値は、今回の検討に用いたBラインの数値を示す。

### 2. 検討手法

検討は、上部工慣性力の下限値の規定を適用した場合としなかった場合の両者の手法でRC橋脚を設計(主鉄筋を決定)し、橋軸方向の固有値解析、反力分担解析及び静的非線形解析を行い、以下の項目を比較することによって本橋のような剛結合橋脚と沓設置橋脚より構成される複合連続高架橋の沓設置橋脚であるRC橋脚の設計手法を提案する。

- ① 振動性状の比較
- ② 鋼製橋脚とRC橋脚の反力分担の割合
- ③ 終局震度、保有水平耐力に対する安全性及び残留変位

なお、検討は、Aライン(15径間連続)Bライン(17径間連続)との振動性状の相違はあまり無いものと推定され、Bライン(17径間連続)の1/2橋モデルにて行

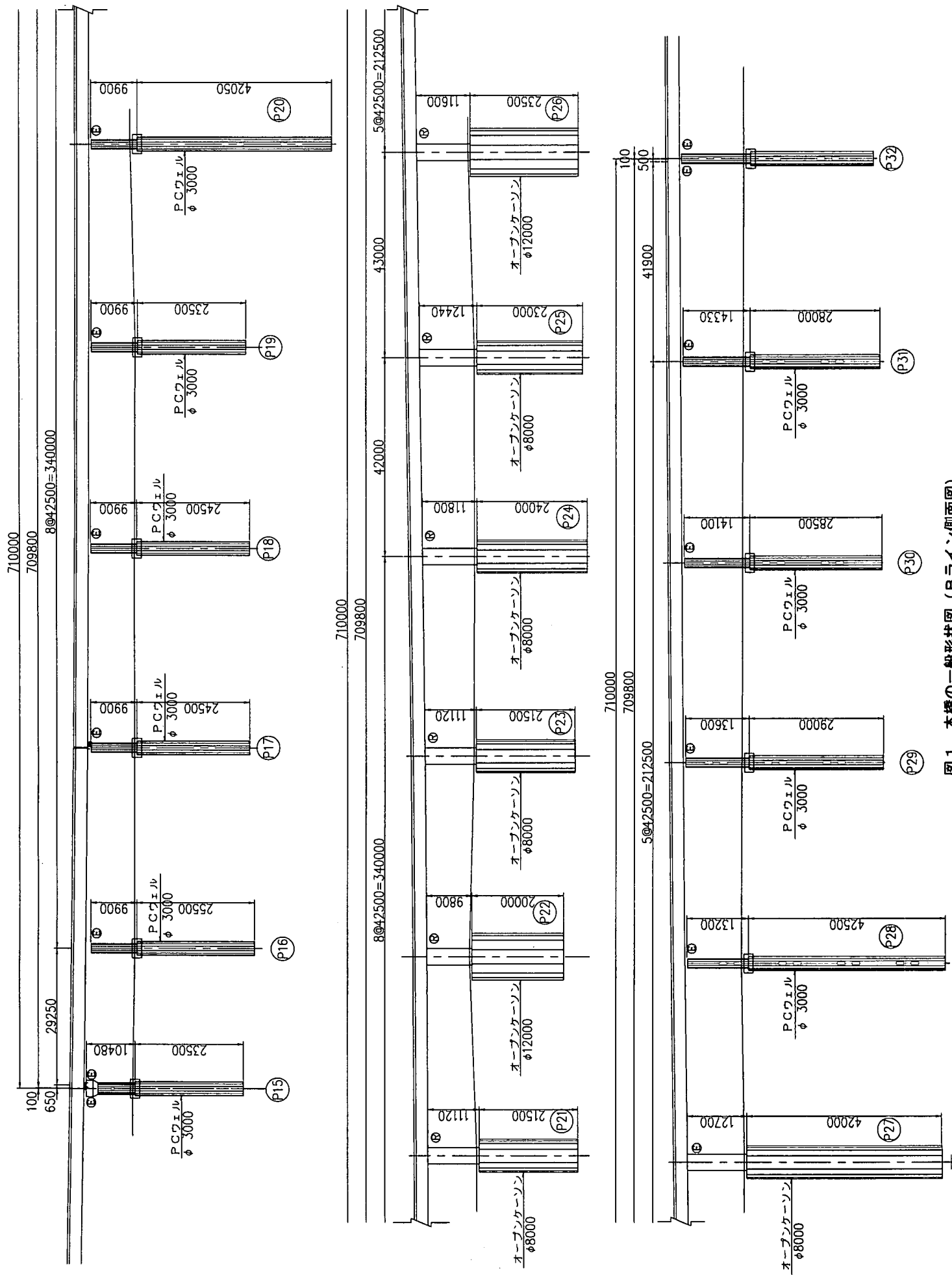
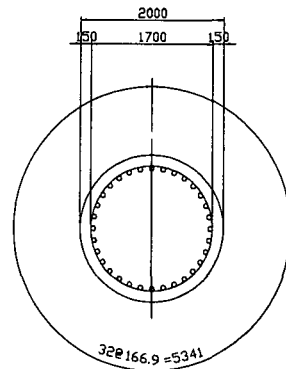
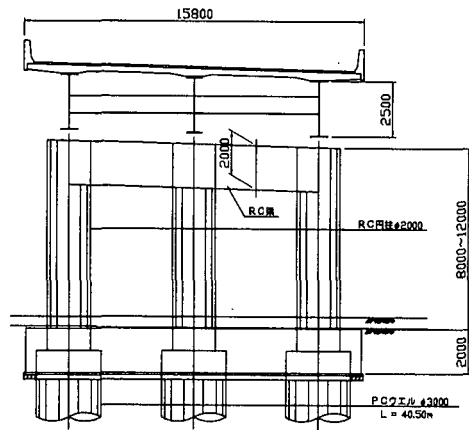
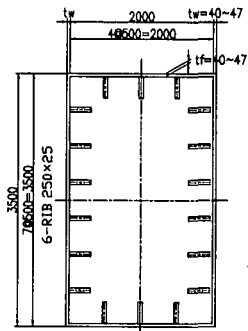
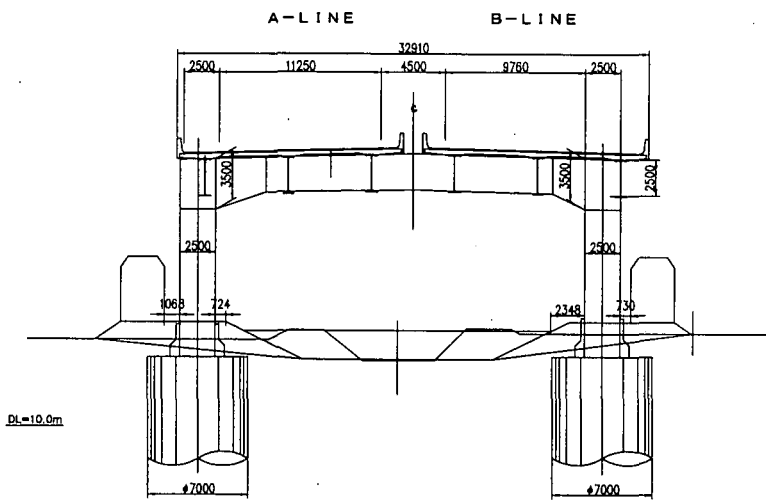


図 1. 本構の一般形状図 (Bライン側面図)



(断面図)

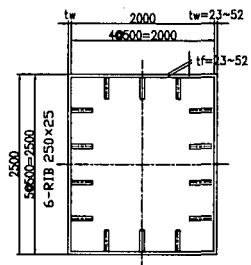
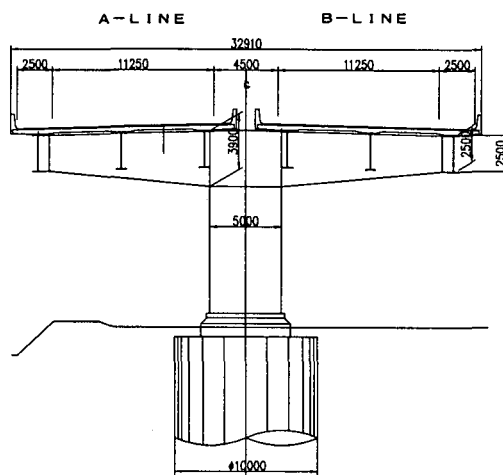
R C 橋脚



3-RIB 250x25

(断面図)

T 張出し鋼製橋脚



3-RIB 250x25

(断面図)

門型鋼製橋脚

図2 代表的なRC橋脚及び鋼製橋脚形状図

表 2 固有値解析及び静的非線形解析条件

	固有値解析・反力分担解析用	静的非線形解析用
上部工	床版の剛性を合成した全断面有効剛性を有する線形要素	M- $\theta$ 、M- $\phi$ は道示に規定のバイリニア関係
RC橋脚	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天端梁 抵抗剛性として期待せず、荷重のみ橋脚天端に与えた。</li> <li>・柱 降伏剛性</li> <li>・地中梁 剛性無限大の線形要素とし、荷重を梁中心に与えた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天端梁 抵抗剛性として期待せず、荷重のみ橋脚天端に与えた。</li> <li>・柱 下端にM-<math>\theta</math>関係を有する塑性ヒンジ点を、塑性領域間はM-<math>\phi</math>関係を有する非線形部材 (注) M-<math>\theta</math>、M-<math>\phi</math>は設計要領第2集に規定のトリリニア関係</li> <li>・地中梁 剛性無限大の線形要素とし、荷重を梁中心に与えた。</li> </ul>
鋼製橋脚	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天端梁 抵抗剛性として期待せず、荷重のみ橋脚天端に与えた。</li> <li>・柱 降伏剛性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天端梁 抵抗剛性として期待せず、荷重のみ橋脚天端に与えた。</li> <li>・柱 M-<math>\phi</math>関係を有する非線形部材 (注) M-<math>\phi</math>は現行道示Vに規定のバイリニア関係</li> </ul>
基礎バネ	固有値解析用動的集約バネ	

なった。

また、RC橋脚の主鉄筋は、上部工の慣性力の下限值を設定しなかった場合には、震度法レベルでの断面力にて試算し、上部工の慣性力の下限值を設定した場合には保有水平耐力法の試算にて求めた。

後者の場合、以下の2ケースの手法が考えられるが、方法2の場合には、RC橋脚柱直径を $\phi$  2.2 mとする必要があるため、今回の検討では、方法1にて主鉄筋を算出した。結果を表3に示す。

方法1：各橋脚毎に等価設計水平震度を求め、その最大等価設計水平震度にて設計。この場合、当該橋脚が支持している上部工重量として2/3 Rdを用い、固有周期は、全体系で得られた固有周期を用いる。

方法2：系全体の静的非線形解析より得られる許容塑性率を用い、当該橋脚が支持している上部工重量として2/3 Rdを用いた場合の1本柱としての設計。また、固有周期は、全体系で得られた固有周期を用いる。

表 3 RC橋脚主鉄筋状態

	P15~P20	P27~P31
慣性力の下限值を設定した場合	D38, 2段	D51, 2段
慣性力の下限值を設定しなかった場合	D29, 1段	D35, 1段

### 3. 解析モデル及び解析条件

解析モデルは、図3に示す骨組みモデルとした。固有値解析、反力分担解析並びに静的非線形解析における各部材要素条件を表2に示す。

### 4. 固有値解析及び反力分担解析結果

#### (1) 固有値解析結果

静的非線形解析に先立って、構造系の振動性状の把握及び各橋脚の上部工慣性力の分担を把握するため、各橋脚を降伏剛性とした場合の固有値解析及び反力分担解析を行った。

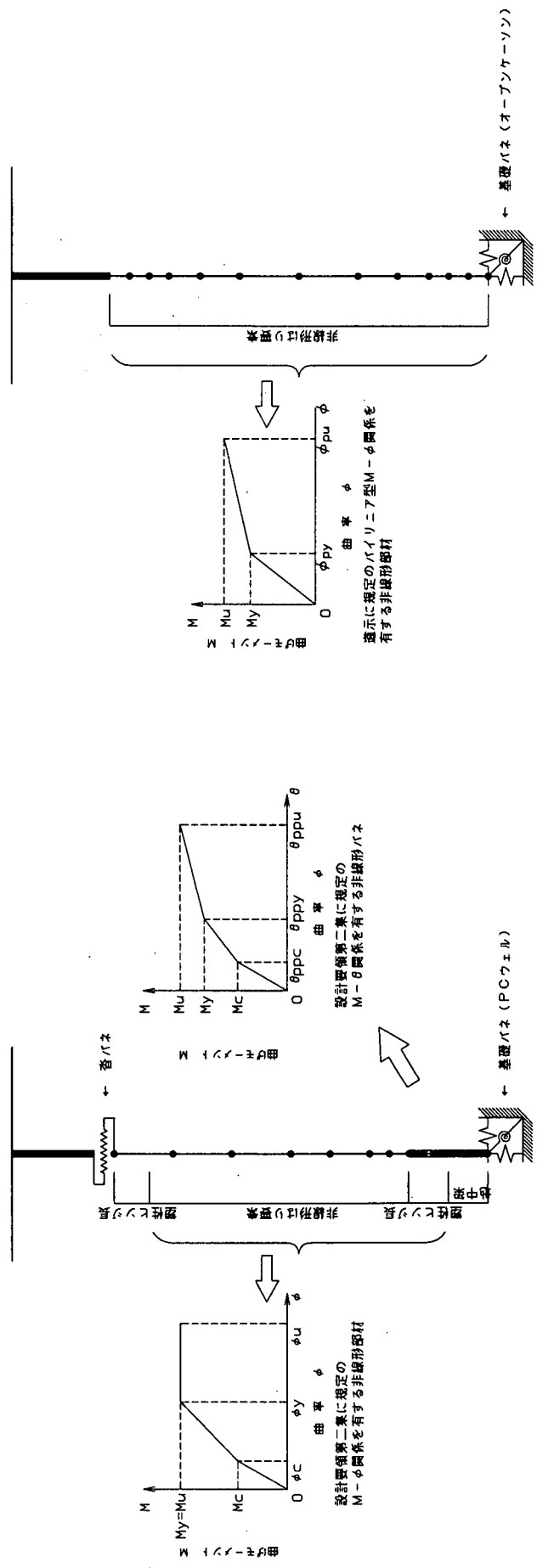
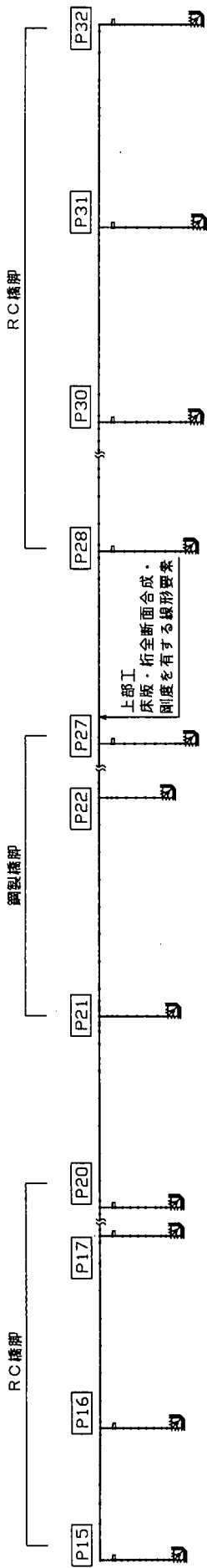
表4に固有値解析結果を示す。この表から、本橋の反力の1次固有周期は上部工の慣性力の規定を適用した場合は、0.72秒、上部工の慣性力の規定を適用しなかった場合は、0.90秒と異なるが、保有水平耐力の照査に必要な設計水平震度レベルで見ると両者ともタイプI地震動で1.0、タイプII地震動で1.5と、同一の設計水平震度を与える。また、図4に各々の場合の主要な振動モード図を示すが、この図から1次で全体系の振動モードが出現し、高次モードにおいて各橋脚卓越モードが出現していることがわかる。以上のことから両者の振動性状の相違は無いと考えられる。

#### (2) 反力分担解析結果

各橋脚の上部工慣性力の分配を確認するため、反力分担解析を行った。その結果を表5に示す。

この表からわかるように鋼製橋脚とRC橋脚の反力分担は全鋼製橋脚で約133,000kNであるのに対し、全RC橋脚は約9,000kNと鋼製橋脚の数%であり、いずれにしても上部工の慣性力のほとんどを鋼製橋脚が負担していることがわかる。換言すれば、RC橋脚は上部工の慣性力のほとんどを負担しない。

#### (3) 静的非線形解析結果及び保有耐力照査結果



鋼製橋脚解析モデル

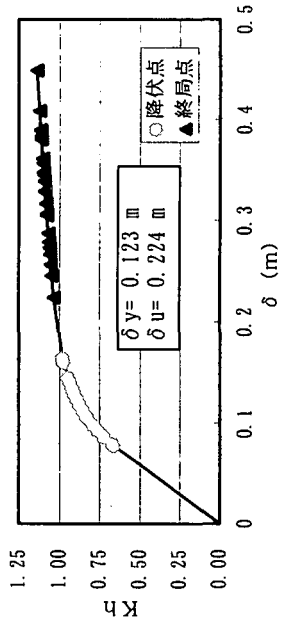
RC橋脚解析モデル

図 3. 解析モデル図

表 6 静的非線形解析結果

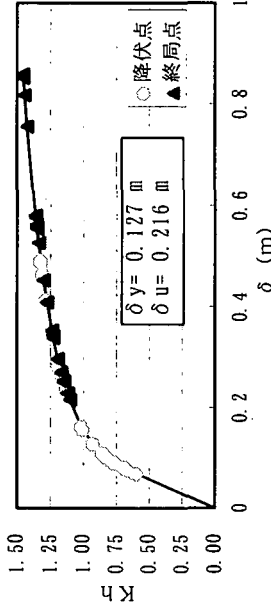
ケース 1 : (慣性力の下限値を設定しない)

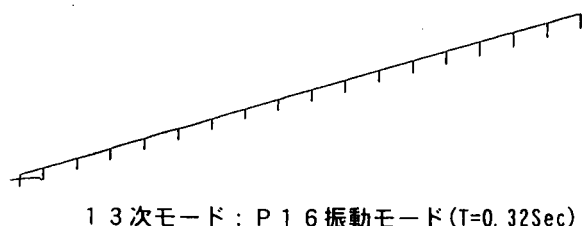
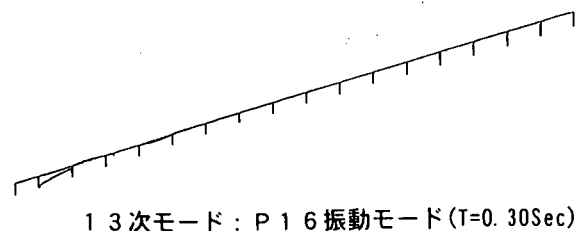
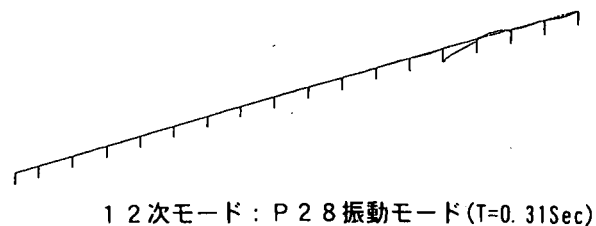
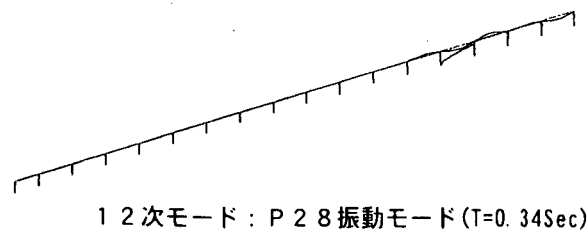
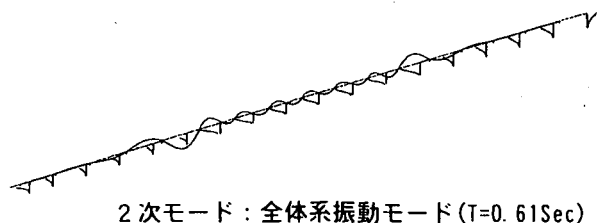
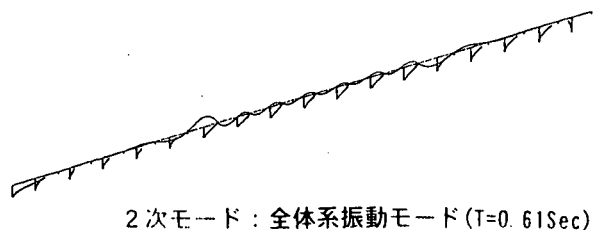
橋脚の状態	Kh- $\delta$ 曲線	
	水平変位 $\delta$ (m)	水平震度 kh
上部構造及び橋脚 躯体に作用させる 水平震度 - 上部工 慣性力作用位置に における水平変位 の関係	1	0.665
	2	0.672
	3	0.726
	4	0.763
	5	0.791
	6	0.793
	7	0.826
	8	0.837
	9	0.852
	10	0.853
	11	0.876
	12	0.885
	13	0.894
	14	0.909
	15	0.919
	16	0.924
	17	0.936
	18	0.937
	19	0.940
	20	0.945
	21	0.975
	22	0.979
	23	0.981
	24	1.039
保耐照査結果	終局震度	1.039
	許容塑性率	1.55
	設計水平震度	1.50
	等価設計水平震度	1.036
残留変位照査結果	降伏震度	1.039
	応答塑性率	1.54
	残留変位	$\delta = 4 \text{ cm} < 10.0 \text{ cm} = \delta R$



ケース 2 : (慣性力の下限値を設定する)

橋脚の状態	Kh- $\delta$ 曲線	
	水平変位 $\delta$ (m)	水平震度 kh
上部構造及び橋脚 躯体に作用させる 水平震度 - 上部工 慣性力作用位置に における水平変位 の関係	1	0.598
	2	0.666
	3	0.693
	4	0.754
	5	0.762
	6	0.785
	7	0.786
	8	0.829
	9	0.839
	10	0.856
	11	0.927
	12	1.005
	13	1.010
	14	1.016
	15	1.104
保耐照査結果	終局震度	1.104
	許容塑性率	1.47
	設計水平震度	1.50
	等価設計水平震度	1.077
残留変位照査結果	降伏震度	1.104
	応答塑性率	1.42
	残留変位	$\delta = 3 \text{ cm} < 10.0 \text{ cm} = \delta R$





(1) CASE 1の振動モード図

(2) CASE 2の振動モード図

図 4 主な振動モード図

表 4 固有値解析結果

	固有周期	設計水平震度	
		タイプ I	タイプ II
慣性力の下限值設定した場合	0.72 秒	1.0	1.5
慣性力の下限值設定しなかった場合	0.90 秒	1.0	1.5

表 5 反力分担解析結果

	全鋼製橋脚反力 (kN)	全RC橋脚反力 (kN)
慣性力の下限值設定した場合	132858	8052
慣性力の下限值設定しなかった場合	136075	4835

表 6 に上部工の慣性力の規定を適用した場合としなかった場合のタイプIIにおける静的非線形解析結果及び保有耐力照査結果並びに残留変位照査結果を示す。上部工の慣性力の規定を適用し場合には、前述の各橋脚1本柱としての保耐設計にて設計は終了するが、全体構造系での終局状態を把握するため、この場合の静的非線形解析を行なった。この表から上部工の慣性力の下限値の規定の適用の有無に係わらず、保耐及び残留変位の照査結果は問題が無い。

力と保有水平耐力、応答回転角と終局回転角の比較結果及び各RC橋脚が終局になるときの震度を表 7 に示す。この表から構造全体系の終局時のRC橋脚の各応答値には許容値に対して十分余裕があることがわかる。また、各RC橋脚を終局に至らしめるには構造系の終局震度の約1.2～1.3倍の震度が必要である。

#### (4) 上部工の慣性力下限値の規定を適用してRC橋脚を設計した場合のRC橋脚の状態

上部工の慣性力の下限値の規定を適用してRC橋脚を設計した場合の終局時の橋脚下端塑性ヒンジ点での水平

#### 5. まとめ

検討の結果、以下のことがわかった。

- 1) 鋼製橋脚を剛結合とし、RC橋脚を沓設置橋脚とした複合連続高架橋の場合、沓設置橋脚であるRC橋脚はほとんど上部工の慣性力を負担しない。
- 2) 上部工の慣性力の下限値の規定を設定してRC橋脚

表 7 上部工の慣性力下限値を設定してRC橋脚を設計した場合のRC橋脚の状態

橋脚	構造系終局時の 下端水平力 (kN)	保有水平耐力 (kN)	構造系終局時 下端回転角 (rad)	終局回転角 (rad)	各橋脚の終局震度
P16	5 0 5 5	6 1 8 3	0. 0 0 1 7	0. 0 3 9 7	1. 3 6 3
P17	5 1 5 5	6 1 8 3	0. 0 0 1 6	0. 0 3 9 8	1. 3 6 2
P18	5 3 6 7	8 1 8 3	0. 0 0 1 7	0. 0 3 9 7	1. 3 5 3
P19	5 3 5 3	6 1 8 3	0. 0 0 1 6	0. 0 3 9 9	1. 3 5 6
P20	5 3 8 6	6 1 8 3	0. 0 0 1 9	0. 0 3 9 7	1. 3 4 0
P28	5 9 0 4	6 5 4 5	0. 0 0 1 4	0. 0 3 2 5	1. 4 2 5
P29	5 5 4 5	6 5 4 5	0. 0 0 1 3	0. 0 3 2 5	1. 4 4 4
P30	5 4 3 8	6 5 4 5	0. 0 0 1 3	0. 0 3 2 6	1. 4 5 4
P31	5 4 0 9	6 5 4 5	0. 0 0 1 3	0. 0 3 2 6	1. 4 5 6

を設計した場合としなかった場合での両者の振動性状の相違はあまり無く、上部工の慣性力の下限値の規定全体系での保有水平耐力の耐震安全性、残留変位は問題は無い。

- 3) 上部工の慣性力の下限値の規定を適用してRC橋脚を設計した場合、構造系の終局段階では、RC橋脚は終局状態に対して十分余裕があり、当該RC橋脚を終局に至らしめるには構造系の終局震度の約1.2～1.3倍の震度が必要である。

以上のことから、本橋のような剛結合と沓設置橋脚より構成される複合連続高架橋の場合の沓が設置されているRC橋脚の設計において上部工の慣性力の下限値の規定を設定して、RC橋脚を設計した場合、過大な設計となり、慣性力下限値の規定は適用しなくても良いと考えられる。本橋の場合、上部工の慣性力の下限値の規定を適用してRC橋脚を設計した場合とその規定を適用しなかった場合のRC橋脚の主鉄筋量は、約3倍程度の相違となり、また、基礎PCウェルは約1.5倍の工事費増となる。

#### 参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編  
(社) 日本道路協会, 平成8年12月
- 2) 設計要領第二集, 日本道路公団 平成10年4月