

RC二柱式橋脚(剛構造)を有するPRC連続ラーメン 中空床版橋の橋軸直角方向に関する耐震性能の検討

足立 敏明¹・鳥奥 博良²・奥田 敏康³・森崎 静一⁴・宮原 啓匡⁵

建設省 近畿地方建設局 奈良国道工事事務所 課長 (〒630-8115 奈良市大宮町 3-5-11)

建設省 近畿地方建設局 奈良国道工事事務所 専門職(〒630-8115 奈良市大宮町 3-5-11)

正会員 ㈱オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 総合技術部(〒532-0003 大阪市淀川区宮原 3-3-31)

㈱オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 総合技術部(〒532-0003 大阪市淀川区宮原 3-3-31)

㈱オリエンタルコンサルタンツ 中国支社 総合技術部(〒732-0827 広島県広島市南区稲荷町 5-18)

1. はじめに

兵庫県南部地震以来、大規模地震に対し橋梁の耐震性能の向上と維持管理の効率化、コスト縮減等を目的として連続ラーメン橋の採用が増加する傾向にある。特にPRC(あるいはPC)連続ラーメン中空床版橋は、その経済的な有利性から、平地部や山岳部、都市部を問わず比較的採用実績の多い橋梁形式であると言える。

一般に、同形式で採用されている下部工形式は、ほとんどが壁式橋脚であり、中でも景観性への配慮から銀杏型が多く用いられている。しかし、この形式は橋軸直角方向の剛性が高く、じん性に乏しい構造である。本来橋軸直角方向にもじん性に富んだ構造形態が望まれるが、これに合致する形式として二柱式橋脚(剛結)が挙げられる。二柱式橋脚は通常、ラーメン橋脚として支承を有した連続桁で採用されており、上部工と剛結された構造での事例は少ない。しかし、上記の単柱(壁式橋脚)と比べて、橋軸直角方向においても不静定構造となることから、相対的にじん性が高く、耐震性の優れた形式であることが容易に予想される。

本稿は、このような二柱式に関する観点から、同下部工形式を採用した場合の耐震性に対する有意性、及び設計手法について検討した結果を報告するものである。

2. 検討対象橋梁

本検討では、検討対象橋梁として近畿地方建設局管内の橋梁から、PRC3径間連続ラーメン中空床版橋を選定した。同橋梁の構造概要を図-1に、材料規格を表-1に示す。概要図からも明らかのように、当該橋梁は橋脚高が低く、ほぼ等脚高に近い構造である。このため設計要領二集¹⁾1-2にもあるように、橋軸直角方向の振動単位は橋脚単体と考え、大規模地震に対する解析は非線形静的解析(荷重漸増法)によるものとした。また、対象橋脚としてはP2橋脚を選定した。

表-1 使用材料規格

使用材料	コンクリート	上部工 $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$
		地覆・高欄 $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
		下部工 $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
	PC鋼材	SWPR7B 12S12.7
	鉄筋	SD345

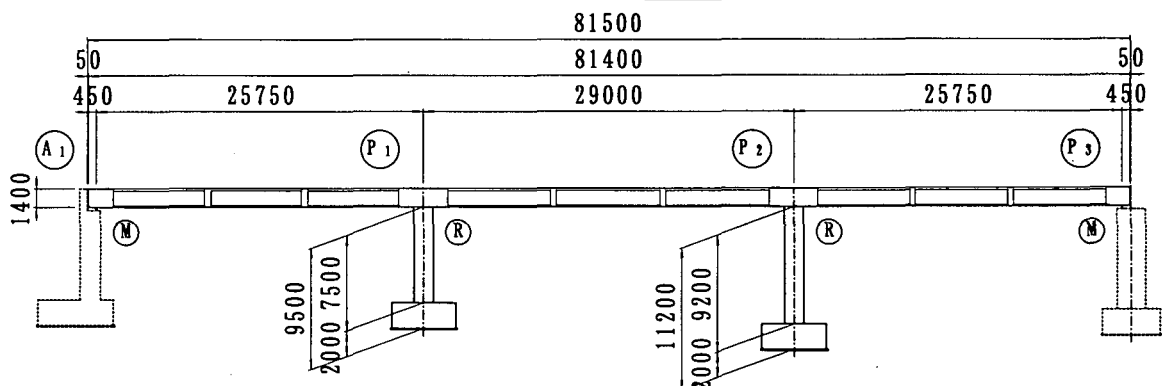


図-1 対象橋梁構造概要図

3. 検討基本方針

本検討における基本方針を以下に示す。

- ① 橋脚を単体としてとらえ、非線形静的解析により壁式橋脚との耐震性の相違を明らかにする。
- ② 上記①のモデル化を行う際に、問題となる柱頭部横桁の剛域設定に関する確認行為として、橋脚部を非線形部材とした立体FEM解析を行う。

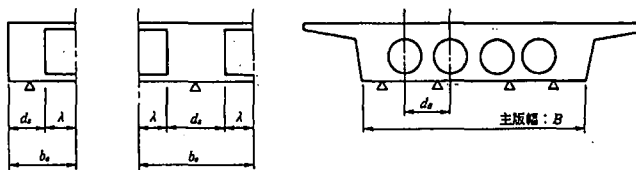
4. 柱式橋脚と壁式橋脚の非線形静的解析

(1) 解析モデル及び解析条件

二柱式橋脚における非線形静的解析のモデルは、図-2のように上部工の主版、及びこれに一体化した横梁を梁とする門型ラーメンモデルとした。しかしこの時、梁部材としてモデル化する上部工の剛性については次のような問題が生じる。

【モデル化に際しての問題点】

- ① 上部工の有効幅に関する評価としては、コンクリート道路橋設計便覧²⁾に示されている下式が挙げられる。しかし、同式は鉛直力に対する評価式であり、水平力に対する評価とは本質的に異なるものと考えられる。このため、仮定した有効幅についての確認行為が必要となる。



$$b_e = d_c + k \cdot \lambda$$

$$\lambda = \frac{n \cdot d_B}{6}$$

b_e : 桁の有効幅

k : 端支点の場合 $k=1$, 中間支点の場合 $k=2$ とする

n : 円形中空部の数

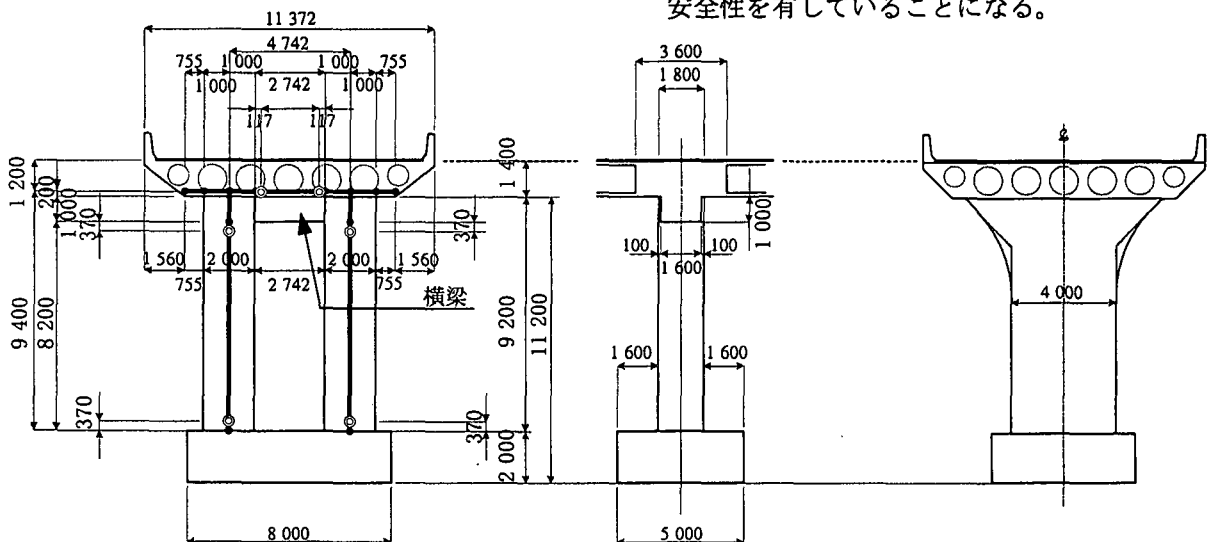


図-2 二柱式橋脚(モデル図)及び壁式橋脚の構造

- ② 予備検討の結果、二柱式橋脚では上部工の中空床版のみを梁部材とした場合、解析時に初降伏が生じてしまい、所要の耐震性能が満足されない結果となった。このため、同部位については何らかの補強部材が必要であると考えられた。

本検討では上記の問題に対し、次のように対処(仮定)した。

- 1) 上部工の有効幅については後述の立体FEMによる確認を前提として、柱頭部の充実断面部(支点部横桁)を有効幅と仮定した。
- 2) 上部工と一体となって抵抗させるため、主版下面に横梁を設け、(上部工)+(横梁)をモデル化の際の梁部として仮定した。

解析は道路橋示方書V³⁾9.8に準拠して行うものとし、梁及び柱の塑性ヒンジをモデルに考慮した。曲げモーメント-曲率関係は、完全弾塑性型のバイリニアモデルを用い、終局時は各橋脚部材の上下端に設定した塑性ヒンジがすべて終局に達した状態(梁部は初降伏を生じさせない)とした。なお、壁式橋脚は道路橋示方書V第9章により、一本柱のRC橋脚として非線形静的解析を行った。

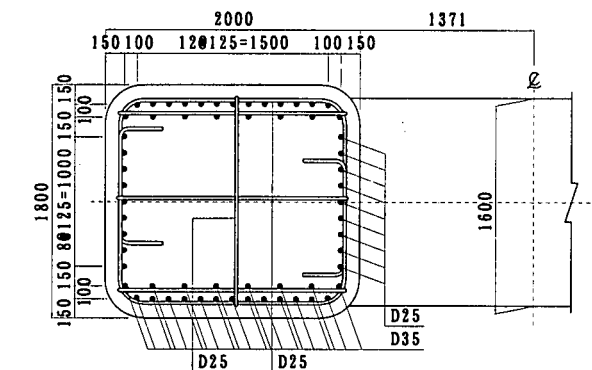
(2) 解析結果

表-2に解析結果の集計を示す。また、図-3に二柱式橋脚で必要となる橋脚並びに上部工横桁配筋を示すとともに、両形式のP-δ図を図-4に示す。これらの結果より次のことが明らかとなった。

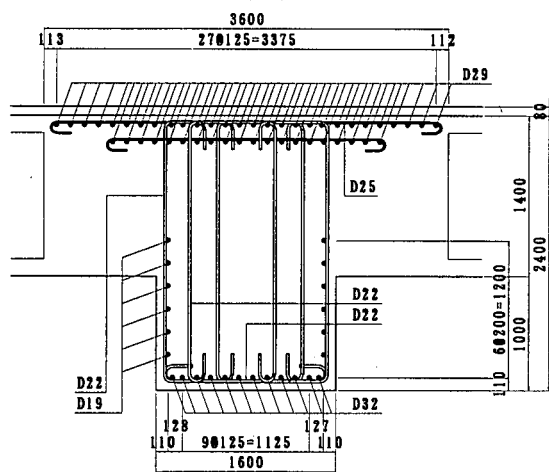
- ① 二柱式橋脚は、壁式橋脚に比して等価水平震度が低く、特にタイプIIの地震力($K_{he}=0.47$)に対しては壁式橋脚の60%程度となっている。
- ② 上記①は、地震時保有水平耐力照査における安全性の比率(P_a/P)に置き換えると、二柱式橋脚の方が約2倍程度($2.206/1.162=1.90$)の安全性を有していることになる。

これは、図-4からも明らかに言えることであり、不静定構造としての特性が顕著に現れている。

- ③経済的にも二柱式橋脚は、壁式橋脚とそれ程大差のない構造形式である。
- ④二柱式橋脚の横桁をRC部材とした場合、必要となる配筋は図-3のように比較的煩雑なものとなり、配筋方法や配筋時の手順に配慮が必要となる。



a) 橋脚配筋図



b) 上部工横桁配筋図

図-3 二柱式橋脚の橋脚及び横桁配筋図

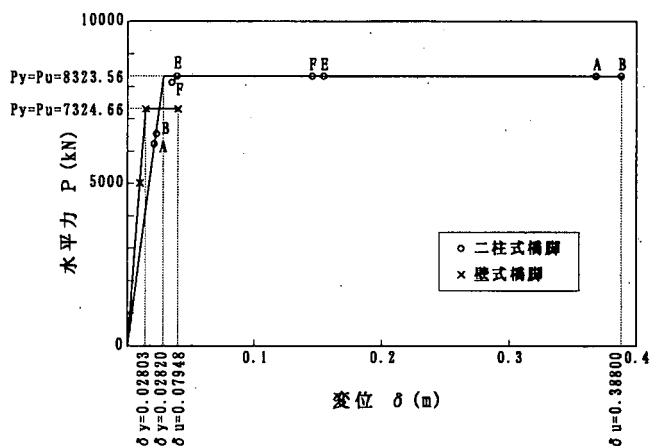


図-4 二柱式橋脚と壁式橋脚のP-δ

5. 二柱式橋脚の立体FEM解析

二柱式橋脚における非線形静的解析時（非線形動的解析時も同様）の柱頭部横桁に対する有効幅を確認するため、部材の非線形性を加味した立体FEM解析を行った。

(1) 解析モデル及び解析条件

立体FEM解析モデルを図-5に示す。本検討では、P2橋脚における橋脚中心での対象モデルを用いている。解析は前述の非線形静的解析と同様に、ソリッド要素化した非線形構造モデルに対して荷重を漸増させ、上部工に生じる橋軸直角方向のコンクリート応力度分布（ σ_{yy} ）より有効幅を確認する。

本解析モデルでは、コンクリート（ソリッド要素）以外に鉄筋（面要素）を考慮しており、初期状態として橋体自重及び橋軸方向の有効プレストレスを与えている。

表-2 二柱式橋脚と壁式橋脚の非線形静的解析結果

		二柱式橋脚		壁式橋脚(銀杏型)	
		タイプ I	タイプ II	タイプ I	タイプ II
許容塑性率	μa	2.784	9.498	1.612	3.733
設計水平震度	Khc	0.7	2.0	0.7	2.0
等価水平震度	Khe	0.4	0.47	0.47	0.79
等価重量	W(kN)	8029.1	8029.1	8011.8	8011.8
地震時保有水平耐力	Pa(kN)	8296.6	8323.6	7324.7	7353.6
作用水平力	P(kN)	3211.6	3773.7	3765.6	6329.3
安全性比率	(Pa/P)	2.583	2.206	1.945	1.162
判定	(Pa ≥ P)	OK	OK	OK	OK
応答塑性率	μR	0.729	2.361	0.793	1.59
残留変位	$\delta R(m)$	0.005	0.023	0	0.032
許容残留変位	$\delta Ra(m)$	0.100	0.100	0.096	0.096
判定	($\delta R \leq \delta Ra$)	OK	OK	OK	OK
破壊形態		曲げ破壊	曲げ破壊	曲げ破壊	曲げ破壊
経済性(下部工1基当たり)及び比率		8,254千円/基(比率1.002)		8,241千円/基(比率1.000)	

解析に際して設定したコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみモデルを図-6～8に示す。同モデルは、コンクリート標準示方書⁴⁾(設計編)より引用しており、これによって部材の降伏状態やひび割れ時の剛性低下を考慮している。また、図-5のA～Hの各点は、前述の骨組みモデルにおける塑性ヒンジ領域に対応させるために設定した着目点を示している。

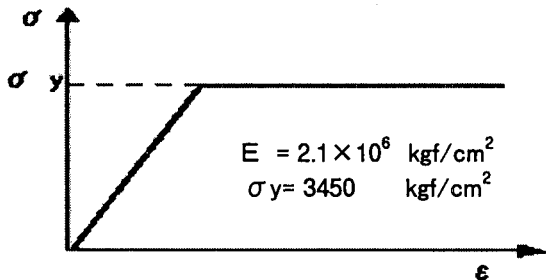


図-6 鉄筋の応力-ひずみモデル

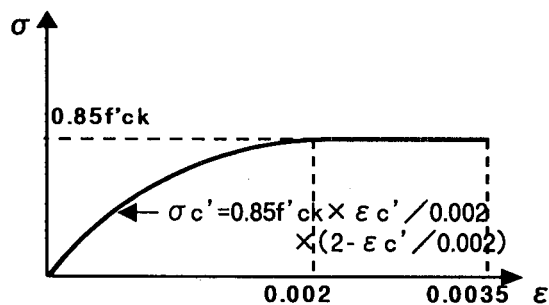


図-7 コンクリート(圧縮側)の応力-ひずみモデル

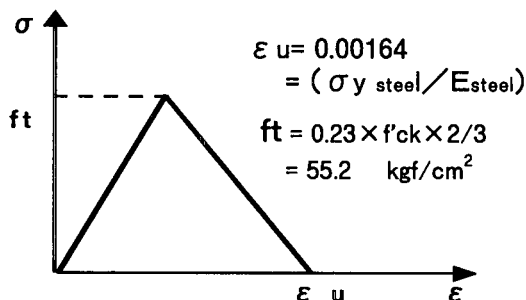


図-8 コンクリート(引張側)の応力-ひずみモデル

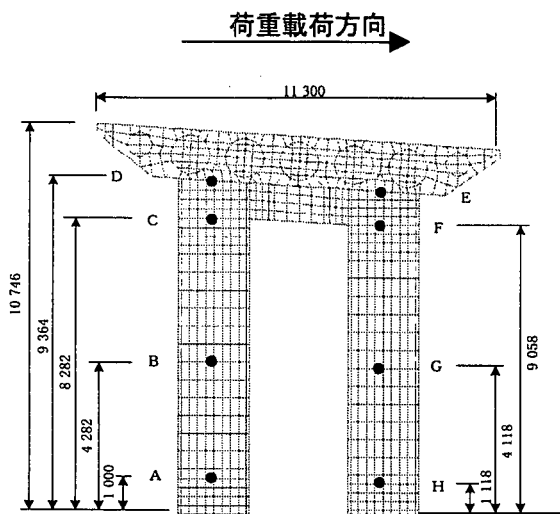


図-5 立体FEM解析モデル

(2) 解析結果

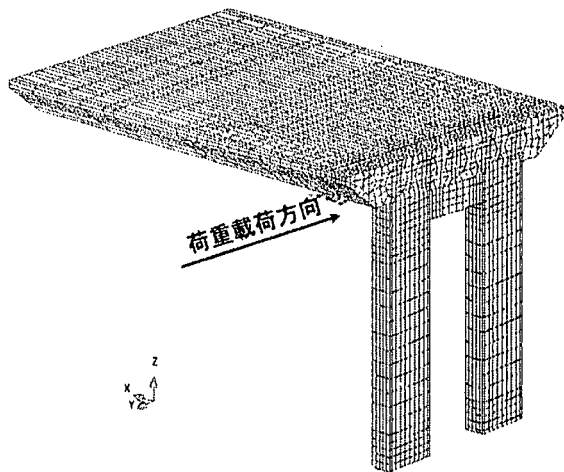
橋軸直角方向への荷重漸増によって得られた主版上面のコンクリート応力分布(σ_{yy})、及び変位図を図-9に示す。同図は、橋脚が漸増荷重により終局状態($K_h=1.46$)となるまでのうち、主要な荷重ステップ($K_h=0.903, 1.30$)での状態を示している。また、構造物中心(上部工主版中心)におけるP- δ 図、及び終局状態までに生じたひび割れ箇所の集計図をそれぞれ図-10、図-11に示す。

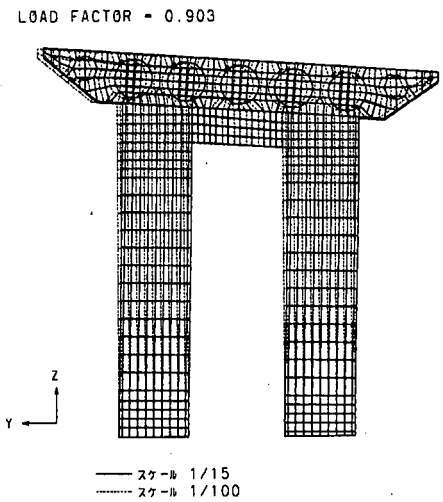
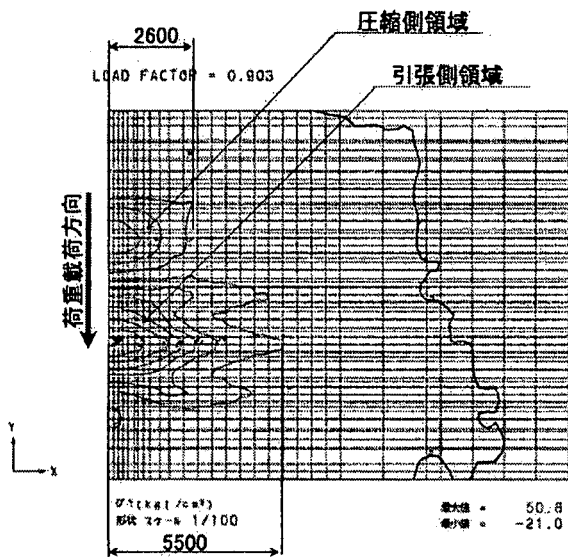
1) 上部工横桁の有効幅に対する確認

前述したコンクリート道路橋設計便覧の有効幅算出式では、本橋での有効幅は $b_e=6.0\text{m}$ となる。これに対し立体FEM解析での有効幅は、図-9より圧縮領域については $2.6\text{m} \sim 3.6\text{m}$ ($b_e=5.2\text{m} \sim 7.2\text{m}$)、引張領域では $5.5\text{m} \sim 5.7\text{m}$ ($b_e=11.0\text{m} \sim 11.4\text{m}$)であった。従って安全側の評価として圧縮側領域に着目し、有効幅を狭く設定するとすれば $b_e=5.2\text{m}$ 程度(仮定値の1.4倍)となる。このことから上部工横桁の有効幅に対しては次のことが言える。

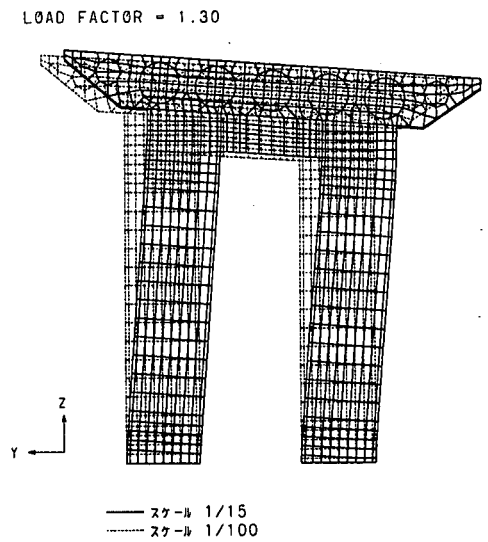
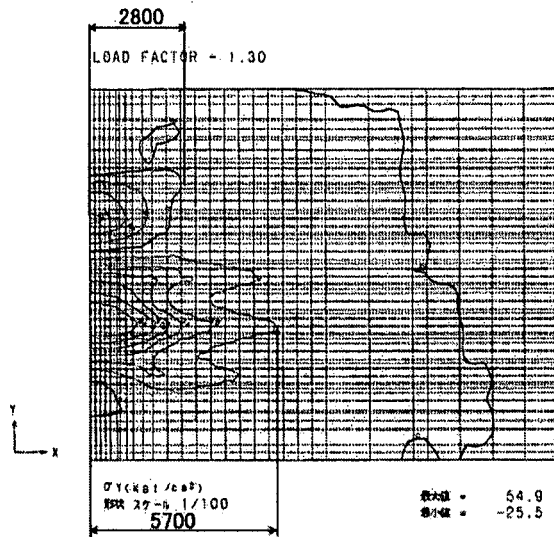
①骨組みモデルで仮定した有効幅 $b_e=3.6\text{m}$ (上部工横桁幅)は、立体FEM解析結果による有効幅 $b_e=5.2\text{m}$ 程度と比べ、安全側の仮定値であることが明かとなった。

②有効幅を立体FEM解析結果による値までと仮定した場合でも、前掲図-3のように梁部において初降伏を生じさせないための配筋が必要となる。従ってこの場合は、床版厚の薄いボイド部にも引張鉄筋やせん断補強筋を配置することとなるため、中間支点部に配置しているPC鋼材を早めに曲げ下げる、あるいは配筋を充実部のみに限定する等の配慮が必要となる。

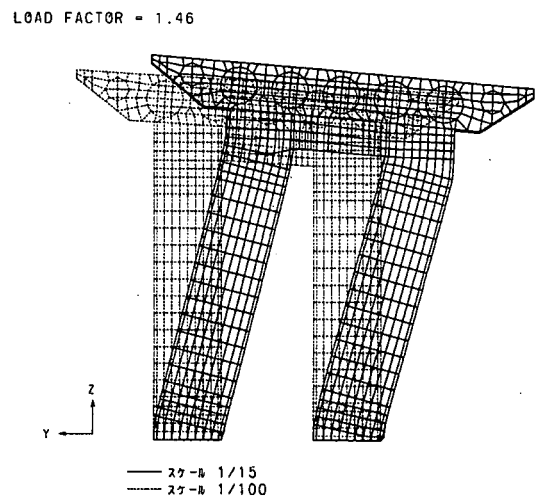
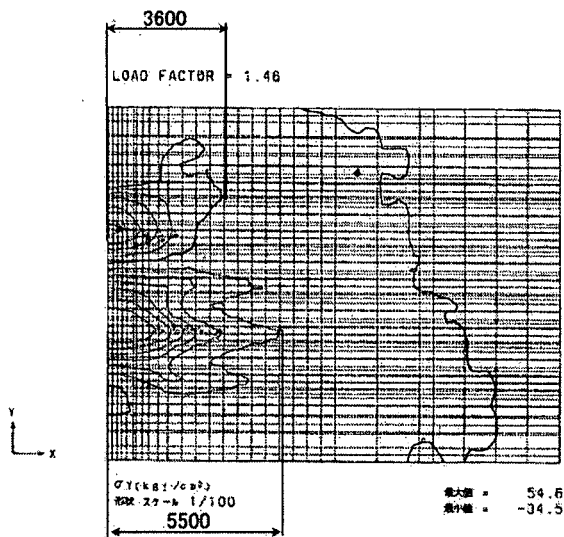




a) 荷重ステップ $K_h=0.903$ での応力分布及び変位



b) 荷重ステップ $K_h=1.30$ での応力分布及び変位



c) 荷重ステップ $K_h=1.46$ での応力分布及び変位

図-9 各主要荷重ステップでの応力分布 (σ_{yy}) 及び変位

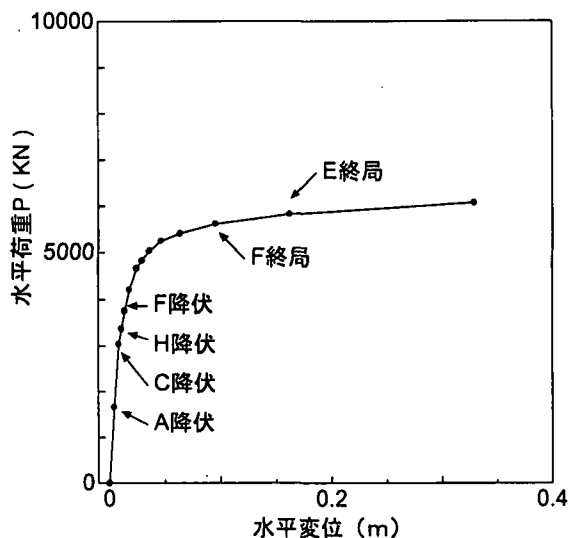


図-10 立体FEM解析によるP-δ図

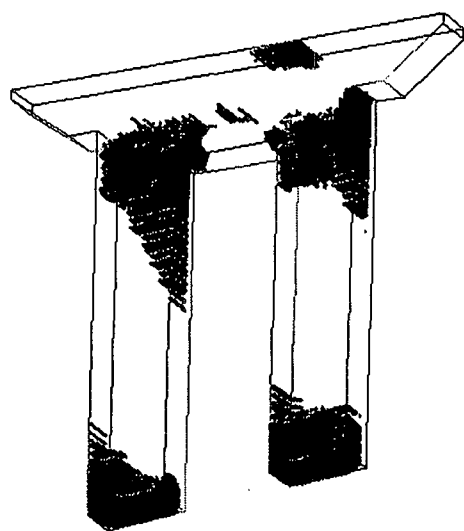


図-11 終局状態でのひび割れ分布図

2) 骨組みモデルを用いた非線形静的解析手法に対する確認

図-10の立体FEM解析によるP-δ図、及び図-11のひび割れ分布図より、骨組みモデルを用いた非線形静的解析手法の妥当性について次のような事項が確認された。

- ①橋脚部で降伏する順序はA→C→H→Fであり、骨組みモデルでの降伏順序と一致している。また、P-δ図の変化については前掲図-4と比べ、数値的な相違は見られるものの、バイリニア型に近い傾向を示している。
- ②終局時でのひび割れは、橋脚の上下端に顕著な形で集中しており、骨組みモデルにおける塑性ヒンジ領域の設定は妥当であることが明かである。

6. まとめ

本検討では、P R C連続ラーメン中空床版橋における二柱式橋脚（剛結）の適用性について、従来採用されてきた壁式橋脚との耐震性に関する比較、及びソリッド要素を用いた立体FEM解析による設計手法の確認等を踏まえ、検討を行った。その結果をまとめると、次のとおりである。

(1) 二柱式橋脚は従来の壁式橋脚に比して、同等の経済性を有しながら、橋軸直角方向の耐震性に優れた下部工形式であることが明らかとなった。

(2) 上記の耐震性を確保するため、二柱式橋脚では設計上梁部となる上部工横桁に、①横梁を付加する、②引張鉄筋やせん断補強筋を配置する等、断面耐力を確保することが必要となる。このため、柱頭部では比較的煩雑な配筋を伴うこととなり、配筋方法、配筋手順等、設計上の配慮が必要である。

(3) 二柱式橋脚の非線形静的解析時に問題となる上部工横桁の有効幅は、立体FEM解析の結果、仮定した充実部幅3.6mよりも1.4倍広い5.2mであったが、①コンクリート応力分布より端部剛性の寄与する度合いは低い、②端部ではP C鋼材や鉄筋配置上の問題が生じ易い等、から設計上、充実部を有効幅として仮定しても差し支えないと判断できる。

以上のように、P R C連続ラーメン中空床版橋において二柱式橋脚を採用することは、耐震性のさらなる向上という面から非常に有意であることが明らかとなった。今回の検討では、非線形動的解析との比較を行っていないが、今後この比較を行うことによって、設計手法の妥当性を確認したいと考えている。また、このような下部工形式を含めた多柱式橋脚（剛構造）の採用は、近年増加しつつある高架橋の桁下利用や道路、河川等の交差物件を有する等、厳しい架橋条件下においても、経済的で、安全性の高い連続ラーメン橋の可能性を示しているものと考えられる。

最後に、本稿が今後の橋梁における耐震設計の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集 平成10年7月
- 2) 日本道路協会：コンクリート橋設計便覧 平成6年2月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）平成8年12月
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）平成8年