

(1) P C ラーメン橋の耐震検討

㈱錢高組土木本部生産システム部 ○布下 浩
 阪神高速道路公団交通環境室環境技術課 古池 正宏
 阪神高速道路公団大阪第二建設部設計課 米澤 康夫
 ㈱錢高組土木本部生産システム部 正会員 山花 豊

1. はじめに

現在、阪神高速道路公団では、「兵庫県南部沖地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」(以下、復旧仕様と記す)に基づき既設橋脚の耐震照査、及びその補強工事を実施している。今回照査対象としたP C 3 径間連続ラーメン橋(図-1)に関しては、全体系としての照査が必要とされるが、検討事例もほとんどなく、また、復旧仕様にも具体的な手法が示されていないため、その評価方法が問題となった。

このため、以下の目的で立体骨組モデルによる耐震性能の照査を行った。

- ①主桁、橋脚等各部材の地震時弾塑性応答特性の把握
- ②橋梁全体系としての動特性より、合理的な補強設計を図る
- ③また、一本柱モデルによる検討との比較により、同形式橋梁の応答値を推定し、その耐震性能照査の可能性を検討する。

表-1 基本条件

構造形式	上部工 P C 3 径間連続ラーメン橋 下部工 R C 矩形断面橋脚 基礎工 杭基礎
橋長	276.000m
支間長	72.000m+125.000m+79.000m
橋脚形状	(橋脚高×橋軸方向幅×直角方向幅) P26橋脚; 16.6m×4.5m×4.0m P27橋脚; 16.9m×7.0m×7.8~6.0m P28橋脚; 17.2m×7.0m×8.9~6.0m P29橋脚; 17.2m×4.5m×4.5m
地盤種別	Ⅱ種地盤
使用材料	コンクリート 上部工 $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$ 橋脚 $\sigma_{ck}=270\text{kgf/cm}^2$ 基礎工 $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ P C 鋼材 SBPR 930/1180 $\phi 32$ 鉄筋 SD345

2. 解析条件

2-1 解析モデル

本橋の構造形式および基本設計条件を表-1に示す。また解析モデルは図-1に示す立体ラーメンモデルにおいて、橋脚は非線形部材、基礎及び上部工は線形部材とし、非線形時刻歴地震応答解析を行う。支点条件としては、橋脚下端部は杭基礎を周辺地盤を考慮したバネに評価し鉛直、水平、回転ともバネ支持とした。また、桁端のゴム支承部は橋軸及び鉛直の2方向をバネ、回転方向をフリーとし橋軸直角方向は固定とした。地震応答解析は橋軸方向と橋軸直角方向について検討し、それぞれの検討方向に入力地震動を作用させるものとする。

2-2 部材の非線形特性

鉄筋コンクリート橋脚部材は曲げによる非線形特性を考慮した。この際、コンクリートの応力-ひずみ曲線は復旧仕様5.2¹⁾によるものとし、死荷重状態での軸力を考慮して算出した。また復元力特性はひびわれ点、降伏点、

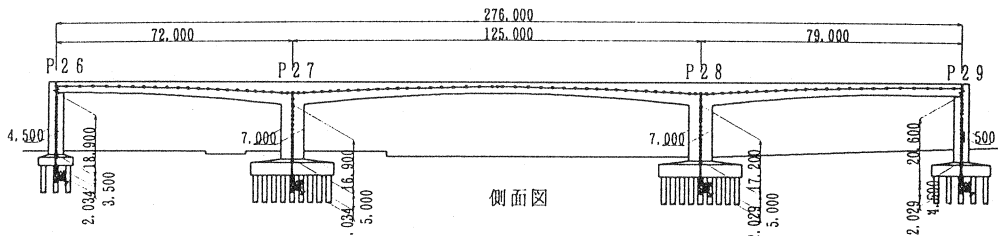
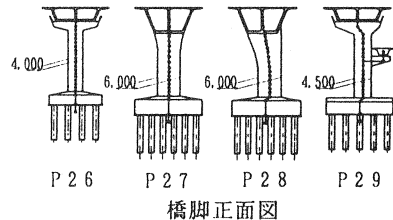


図-1 解析モデル図

終局点を3本の折れ線で表したディグレーディングトリニア型の武田モデルを用いた。

段落し部の鉄筋の有効位置は定着端より30Dとし、断面内に有効に配置されるすべての軸方向鉄筋を考慮した。P27橋脚、P28橋脚基部のM-φ関係を図-2に示す。

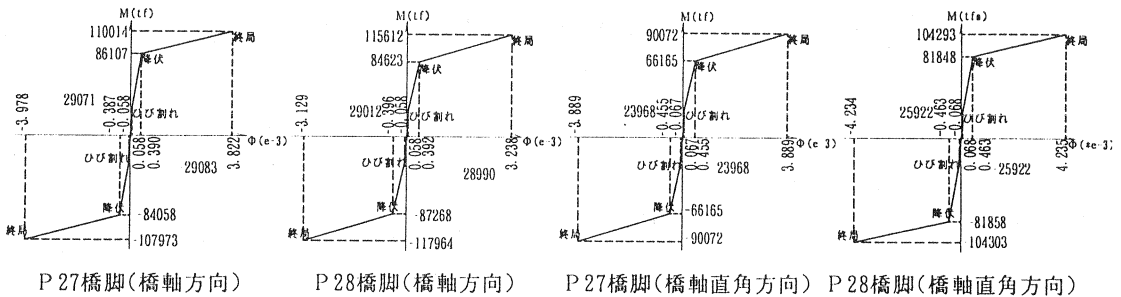


図-2 橋脚基部非線形特性

2-3 入力地震波

支持地盤への入力地震波としては、対象地域の地盤種別がII種地盤であるためJR西日本鷹取駅観測地震波(EW:最大加速度666gal)を採用し、基礎工を含む地盤バネを介して本体構造物に伝達させるものとした。図-3に入力地震波のJR西日本鷹取駅観測地震波(EW)の時刻歴地震波形と応答スペクトル図を示す。

減衰常数は道路橋示方書V耐震設計編6.2.2(動的解析モデル)の参考値から表-2の値とし、要素剛性比例型減衰として用いた。なお、橋軸方向の解析では応答断面力が弾性領域を大きく超えることがなかったため線形動解析における減衰常数の参考値を用いた。

表-2 減衰定数

	橋軸方向	橋軸直角方向
上部構造	5%	3%
下部構造	7%	2%
基礎構造	20%	20%

3. 解析結果

3-1 応答変位および応答加速度

固有値解析の結果を表-3に示す。立体モデルによる解析の結果、表中の刺激係数より橋軸直角方向の主要モードは1次モードで固有周期は0.82秒、橋軸方向の主要モードは4次モードで固有周期は0.65秒となっている。

P27、P28橋脚柱頭部の水平変位の時刻歴応答波形を図-4に示す。橋軸方向の最大応答変位はP27橋脚が6.3cm、P28橋脚が6.4cmとほぼ同じであり変位の応答波形も同位相であることから構造系全体が一体挙動していると判断される。橋軸直角方向の最大応答変位はP27橋脚が39.2cm、P28橋脚が36.0cmと柱剛性が若干低いP27橋脚の変位が大きくなっている。しかし変位の応答波形はほぼ同位相であり、両橋脚が互いに及ぼす影響は少ないと判断される。

主桁の最大応答加速度は橋軸方向、橋軸直角方向とも700~800gal程度の応答を示しており

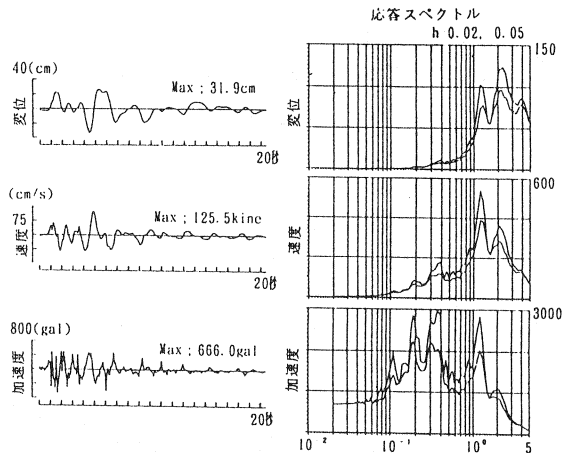


図-3 入力地震波 (II種地盤)

表-3 固有値解析結果

モード No	固有周期 (秒)	刺激係数		
		Tx	Ty	Tz
1	0.818	0.0282	1.7872	-0.0669
2	0.784	0.0202	-0.3941	0.0426
3	0.743	0.0044	0.8647	0.0168
4	0.649	-1.2680	0.0356	-0.1713
5	0.640	-1.1897	0.1123	0.9757

入力地震波の最大加速度(666gal)に比べほとんど増加していない。一方、図-3に示す入力地震波の加速度応答スペクトルから橋軸方向(固有周期0.65秒)では約1000gal、橋軸直角方向(固有周期0.85秒)では約1500galが読みとれる。この違いは、柱部材が非線形領域に入り剛性低下に伴う固有周期の長周期化、履歴減衰による減衰効果が大きくなったことにより橋軸直角方向の加速度応答値が増大しなかったものと判断される。

3-2 応答断面力

3-2-1 応答曲げモーメント

P27橋脚、P28橋脚基部のM-φ応答履歴曲線を図-5に、時刻歴応答曲げモーメントを図-6に示す。橋軸方向、橋軸直角方向ともに橋脚基部で塑性域に達している。しかし、橋軸方向は降伏点を僅かに超えた程度であるのに対し、橋軸直角方向は終局曲げモーメントに近い応答を示し許容曲げ耐力を超えている。また、橋軸方向の応答履歴から最初にP28橋脚が降伏点を超え、次の応答でP27橋脚が降伏点を超えている。これは初期断面力と構造物の応答変位の方向により降伏に至る時刻にずれが生じたものである。これに対し橋軸直角方向では各橋脚がほぼ同時刻に降伏点を超え、また応答最大曲げモーメントも同様の挙動を示している。

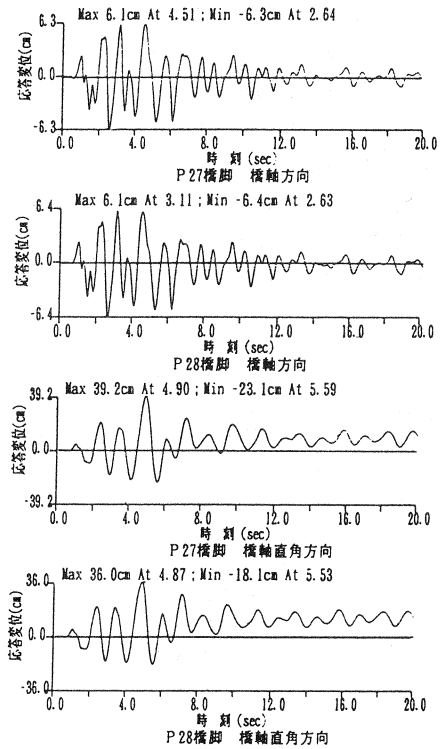


図-4 時刻歴応答変位図

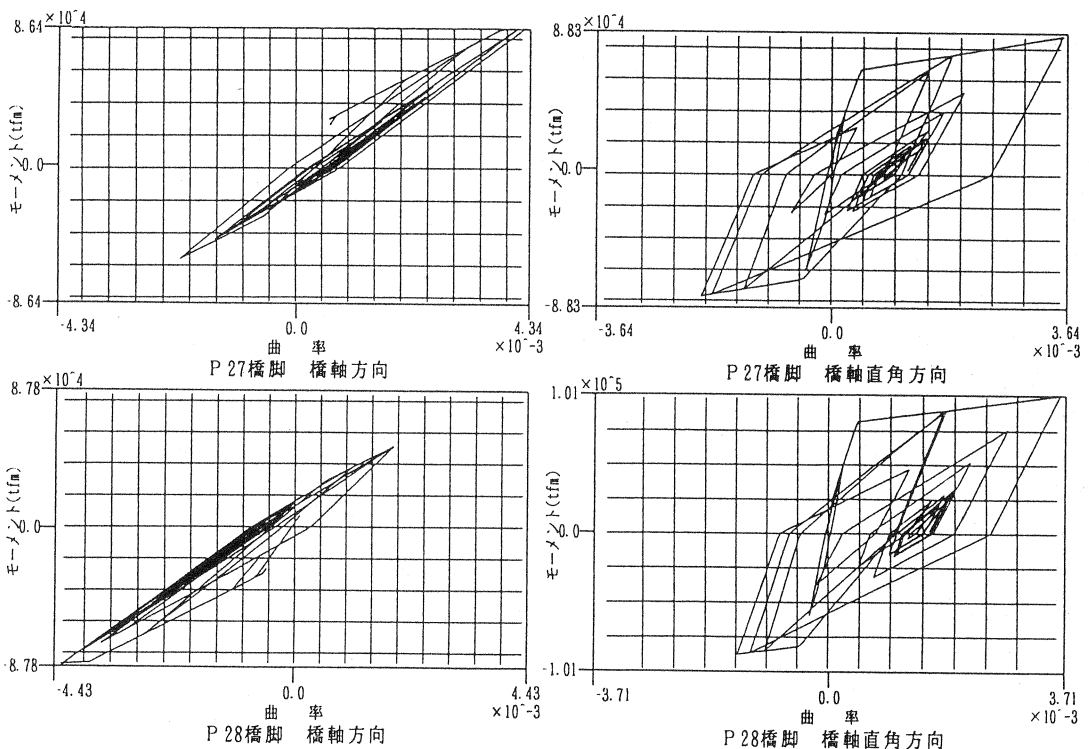


図-5 橋脚基部 M-φ 応答履歴曲線

3-2-2 応答せん断力

P27橋脚, P28橋脚基部の時刻歴応答せん断力を図-7に示す。橋軸方向と橋軸直角方向の最大応答せん断力の比は、P27橋脚で1.4:1.0、P28橋脚で1.2:1.0となっている。橋軸方向応答せん断力は死荷重時に作用するせん断力が加算されるためせん断耐力を上回る結果となる。下部工詳細設計時の静解析による結果と地震応答解析の結果を表-4に示す。表-4から本検討では詳細設計時に考慮した地震力の約3倍に相当する地震力が作用したものと評価される。

表-4 静解析とのせん断力の比較

		地震応答解析	静解析(Kh=0.25)	比率
P27 橋 脚	上端	6659.4 tf	2016.2 tf	3.3
	中間	6958.2 tf	2153.3 tf	3.2
	基部	7581.6 tf	2472.2 tf	3.1
P28 橋 脚	上端	5314.8 tf	1904.7 tf	2.8
	中間	5991.9 tf	2231.3 tf	2.7
	基部	6293.5 tf	2411.8 tf	2.6

4. 一本柱モデルによる解析

冒頭で述べたようにラーメン橋では、特に橋軸方向の場合、全体構造系での解析を行わなければ耐震性の評価が困難であるが、一本柱にモデル化出来れば橋脚耐震性能の照査が比較的容易に実施することが可能となる。ここでは、P27橋脚を対象として一本柱モデルでの地震応答解析を行い、立体ラーメンモデルでの応答値と比較する。また、設計条件、部材諸元、非線形特性等は立体ラーメンモデルと同様の値を用いる。

4-1 橋軸直角方向の検討

解析モデルを図-8に示す。橋脚天端に作用させる主桁質量は静解析で橋軸直角方向に主桁自重、橋面荷重を載荷して求めた橋脚天端での水平方向反力に相当する質量とする。橋脚基部でのM-φ履歴曲線、応答断面力の時刻歴応答波形、橋脚天端での水平変位の時刻歴応答波形を図-9, 10に示す。また立体モデルと一本柱モデルの応答値の比較を表-5に示す。

最大応答断面力、橋脚基部の最大応答曲率はほぼ同値を示し橋軸直角方向の検討に対し正当なモデル化がなされたと判断できる。但し、最大応答変位は立体モデルの方が大きい応答を示し、一方向にややシフトした挙動をしている。つまり、隣接する偏心橋脚の影響が主桁を介して伝達されたものと判断される。

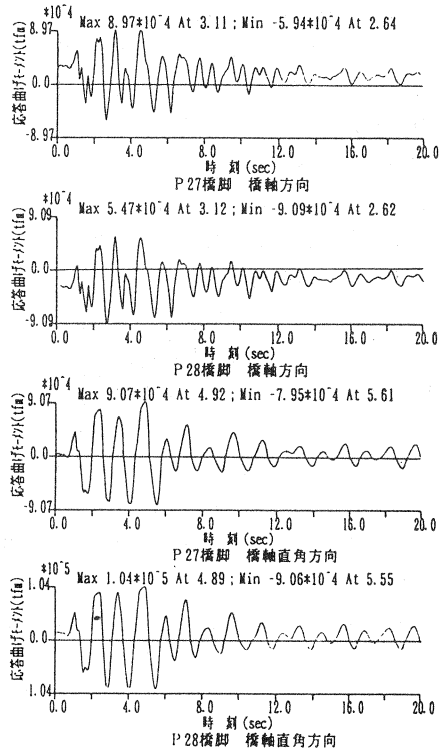


図-6 橋脚基部 時刻歴応答曲げモーメント

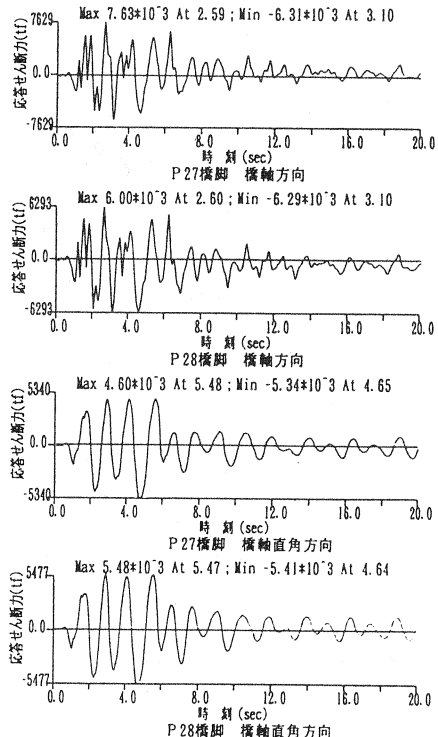


図-7 橋脚基部 時刻歴応答せん断力

表-5 応答値比較表 (橋軸直角方向)

	橋脚天端	橋脚基部	
	変位	曲げモーメント	せん断力
立体モデル	39.2 cm	90654 tfm	5340 tf
一本柱モデル	32.4 cm	88452 tfm	5564 tf

表-6 応答値比較表 (橋軸方向)

	橋脚天端	橋脚基部	
	変位	曲げモーメント	せん断力
立体モデル	6.3 cm	89668 tfm	7629 tf
一本柱モデル; 中間	8.8 cm	91830 tfm	6730 tf
一本柱モデル; 天端	27.9 cm	107590 tfm	6000 tf

4-2 橋軸方向の検討

橋軸方向では、橋脚に発生する応答曲げモーメントは、上部工部材に分配されるため、橋脚に作用する主桁の水平力の作用位置を橋脚天端ではなく橋脚中間点とする一本柱モデルで検討する。本検討では、主桁水平力の作用位置は図-13の解析モデルに示す位置とする。橋脚基部でのM-φ履歴曲線、応答断面力の時刻歴応答波形、橋脚天端での水平変位の時刻歴応答波形を図-11, 12に示す。また立体モデルと一本柱モデルの応答値の比較を表-6に示す。一本柱モデルの応答値は主桁水平力を橋脚天端に作用させた場合も同時に比較する。

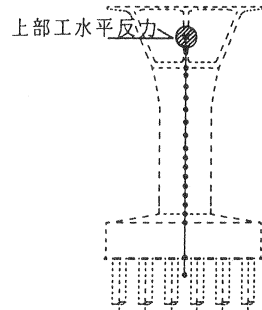


図-8 橋軸直角方向一本柱モデル

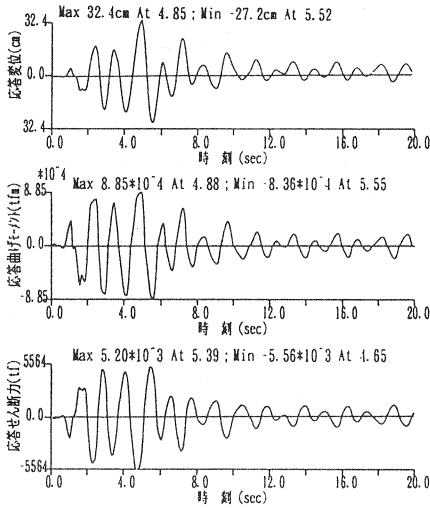


図-9 一本柱モデル時刻歴応答波形 (橋軸直角方向)

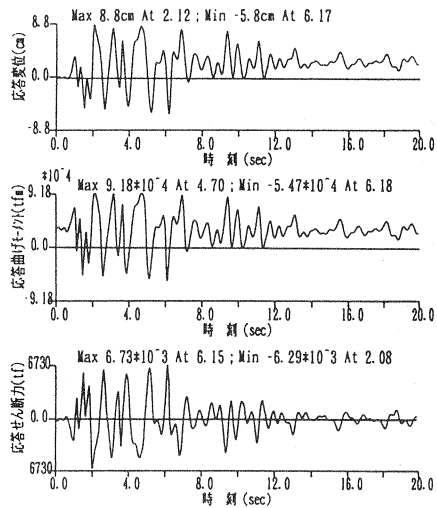


図-11 一本柱モデル時刻歴応答波形 (橋軸方向)

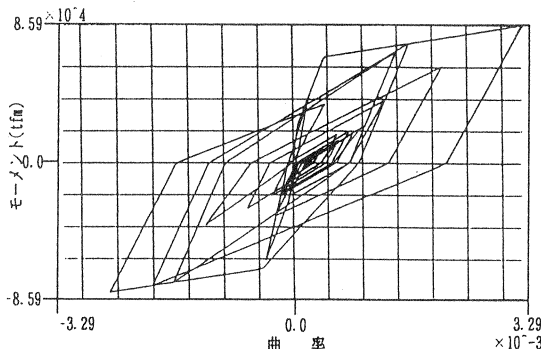


図-10 一本柱モデル M-φ履歴曲線 (橋軸直角方向)

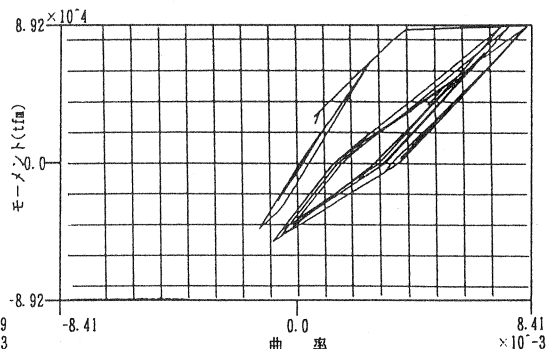


図-12 一本柱モデル M-φ履歴曲線 (橋軸方向)

解析の結果、表-6にみる応答断面力は、ほぼ同じような値を示しているが、図-5(P27橋脚橋軸方向)と図-12とを比べると、橋脚基部の最大応答曲率は一本柱モデルが立体モデルの約2倍となり、最大応答変位も大きく、本モデルは橋軸方向の検討に対し正当なモデル化がなされていないと判断される。これは、立体モデルの場合、全体構造系が一体として挙動するが、一本柱モデルは橋脚基部が塑性化領域に達すると一方向に回転変位として残留するためである。

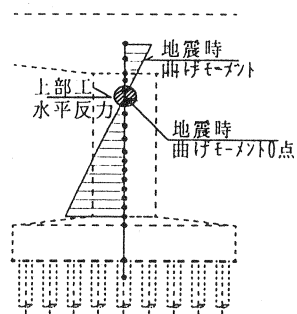


図-13 橋軸方向一本柱モデル

5. 補強設計

橋脚補強は曲げ耐力制御式鋼板巻立て工法により行った。補強量は、橋軸方向のせん断耐力に相当する鋼板厚を算出し、鋼板巻きによる靱性と曲げ耐力の向上を評価した検討を行い、橋軸直角方向の曲げ耐力不足を補うフーチング定着アンカー量を算出する。なお、表-7に橋脚補強量を示す。

また、本橋脚形状は脚頭部で3次元的に変化するため、曲線区間は鋼板と同等の強度を有する横方向の炭素繊維シートによる補強とした。

表-7 橋脚補強量

	鋼板厚	アンカー筋	炭素繊維シート
P27橋脚	14mm	D51ctc260(22本)	9層(横方向)
P28橋脚	11mm	D51ctc260(22本)	7層(横方向)

6. まとめ

以上の検討から推察される本橋と同等、同型式のPCラーメン橋の耐震特性を以下に記す。

- ①橋軸方向は橋軸直角方向や連続桁構造に比べ、せん断破壊が先行しやすい構造であるといえる。
 - 1)橋軸直角方向では地震荷重時水平力を4本すべての橋脚で受け持つのに対し、橋軸方向では2本の橋脚でしか受け持たず、設計地震力が増加した場合せん断力の負担が大きくなる。
 - 2)ラーメン構造であるため橋脚上端で上部工部材と曲げモーメントの分配が行われ、同等の水平力が作用した場合、橋脚基部での曲げモーメントは一本柱モデルや連続桁形式の橋脚に比べ小さくなる。
- ②橋軸直角方向では、一本柱モデルや復旧仕様に示される非線形動解析の簡便法により橋脚の耐震性能を把握することができる。
- ③橋軸方向については、主桁水平力作用位置を換算した一本柱モデルを検討することにより破壊形態の判定程度は可能である。また、せん断耐力のみの照査であれば静解析による地震時断面力に入力加速度比を乗じることで動解析での応答せん断力を推定することも可能である。

7. おわりに

一般に、PC連続ラーメン橋は耐震性能が高いと考えられているが、本検討から言えることは、本橋のように比較的橋脚高さが低い場合、これまでの示方書に基づいて十分な耐震設計がなされた橋梁においても、大規模地震時には橋軸方向のせん断耐力が不足する傾向にあり、せん断破壊先行型の破壊特性を有している。橋軸直角方向については一本柱モデルによる非線形動解析または簡便法による照査でほぼ十分であるといえるが、橋軸方向については破壊形態の推定にとどまり、モデル化等さらなる検討が必要とされる。

今後、この種の耐震照査において本検討が一助となれば幸いである。

参考文献

- 1)社団法人 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)、参-9-10、1995.6