

PCラーメン橋に対する動的解析の適用と 橋脚のじん性確保に関する一考察

猪熊 康夫¹・本間 淳史²・今福 克³

¹正会員 日本道路公団 静岡建設局 構造技術課 課長 (〒420-0857 静岡県静岡市御幸町 11-30)

²正会員 日本道路公団 静岡建設局 構造技術課 課長代理 (〒420-0857 静岡県静岡市御幸町 11-30)

³正会員 (株)日本構造橋梁研究所 設計第1部 設計第3課 (〒107-0062 東京都港区南青山 5-12-4)

1. はじめに

第二東名高速道路の橋梁は、耐震性の確保が重要な課題であり、下部構造のじん性の向上・せん断耐力の確保は、耐震性向上の最も重要な鍵である。

また静岡建設局が担当する146kmの区間は、第二東名高速道路の中でも比較的山岳地を通る区間であるため、高橋脚を有するPCラーメン橋が多く計画されている。

今回、中空橋脚を有するPCラーメン橋5橋について非線形動的解析を行い、大規模地震に対する耐震性能を検証した。その結果、曲げに対しては大規模地震に対して安全性を有していたが、せん断に対しては3橋でせん断耐力が不足しており、せん断耐力確保のための対策を行った。

2. 非線形動的解析によるPCラーメン橋の大規模地震に対する照査

(1) 対象橋梁

平成8年の道路橋示方法書改訂前に詳細設計が行われた第二東名高速道路のPCラーメン橋では、当時ラーメン橋面内方向の大規模地震に対する耐震性の評価手法が確立されていなかったため、それぞれの橋脚の上端・下端を照査断面とし、地震時保有水平耐力法を基にした照査を行っていた。

しかし、高橋脚を有する橋や橋脚高さが著しく異なる橋などでは、高次モードの影響が大きくなり、地震時保有水平耐力法の適用性が限定されるため、非線形動的解析にて照査を行う必要がある。

また橋脚断面が中空の場合、せん断補強に有効と見なせる鉄筋が限られるため、せん断耐力不足が懸

念される。

そこで今回、道示改訂前に詳細設計が行われた中空橋脚を有するPCラーメン橋（表-1）5橋を対象に、非線形動的解析を行った。

表-1 対象橋梁

	形式	橋長・径間(m)	橋脚高さ(m)
A橋	PC2径間連続 ラーメン箱桁橋	2@54.2=108.4	30.0
B橋	PC3径間連続 ラーメン箱桁橋	51.0+89.0+72.0=212.0	42.1, 43.9
C橋	PC3径間連続 ラーメン箱桁橋	62.5+106.0+62.5=231.0	33.0, 53.5
D橋	PC3径間連続 ラーメン箱桁橋	85.5+114.0+72.5=272.0	54.5, 37.5
E橋	PC6径間連続 ラーメン箱桁橋	59.5+4@97.0+59.5=507.0 ※P1,P2は支承支持	21.0~48.0

(2) 解析方法

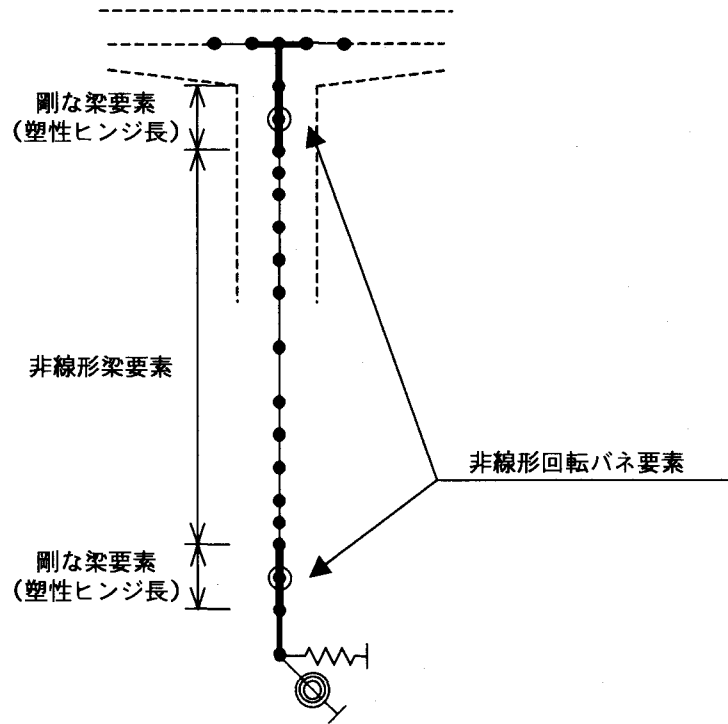
解析は、日本道路公団の「設計要領第二集 橋梁建設編」¹⁾に基づき、「道路橋の耐震設計に関する資料」²⁾を参考に行った。

a)面内（橋軸）方向

ラーメン橋の面内（橋軸）方向については、橋脚の上下端位置に塑性ヒンジの発生が想定されるので、橋脚の非線形特性を表すことが出来るように、塑性ヒンジを考慮した橋梁全体系をモデル化した。

解析は非線形静的解析を行い、水平震度と水平変位の関係を求め、許容塑性率を算出し、非線形動的解析を行い応答値の照査を行った。

履歴モデルには武田モデル、減衰マトリックスには、レーリー減衰を用いた。



図－ 1 非線形動的解析のモデル

入力地震動は、道路橋示方書に規定される標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するように、振幅調整された加速度波形を用い、TYPE I、TYPE II それぞれ3波解析し、応答値の平均値で照査を行った。

(ただし、D、E橋については1波づつのみ)

なお地盤種別は5橋ともI種地盤である。

安全性の評価は、応答変位、塑性ヒンジの回転角、応答せん断力、及び残留変位により行った。

塑性ヒンジ部の最大応答回転角については式(a)より算出される許容回転角以下であることを照査した。

$$\theta_{pa} = \theta_{py0} + \frac{\theta_{pu} - \theta_{py0}}{\alpha} \quad (a)$$

ここに、

- θ_{pa} : 許容回転角(rad)
- θ_{pu} : 終局時の回転角(rad)
- θ_{py0} : 初降伏時の回転角(rad)
- α : 安全係数、TYPE I の場合 $\alpha=1.5$ 、
TYPE II の場合 $\alpha=3.0$

最大応答せん断力については、せん断耐力以下であることを照査した。

残留変位の照査は、非線形動的解析時に地震動終了後10秒間の収束時間をもたせ、解析終了時の変位を残留変位とした。また許容残留変位は橋脚高さの1/100とした。

b)面外(橋軸直角)方向

面外(橋軸直角)方向については、通常の連続橋

と同様に考えることが出来るので、一本柱形式の鉄筋コンクリート橋脚としてモデル化した。解析は地震時保有水平耐力法及び非線形動的解析を行った。

(3) 解析結果

解析の結果は以下の通りであった。

なお表－2～5の配筋については図－2を参照。また、せん断照査断面については、橋脚下端より①、②…として、断面変化位置にて照査した。

a) A橋

A橋は、橋脚高さ30.0mのTラーメン橋である。表－2に示すとおり、応答変位、応答回転角、応答せん断力のいずれも相当の余裕をもって、許容値を満足した。これはTラーメン橋の場合、振動特性において高次モードの影響が少なく、地震時保有水平耐力法の適用に問題がなかったためと思われる。当初から非線形動的解析にて設計を行っていたら、断面を絞れた可能性がある。

b) B橋

B橋は、橋脚高さがほぼ等しい3径間連続ラーメン橋である。表－3に示すとおり、応答変位、応答回転角、応答せん断力いずれも許容値を満足した。また応答値はP1、P2橋脚で、ほぼ等しかった。残留変位についても問題なかった。

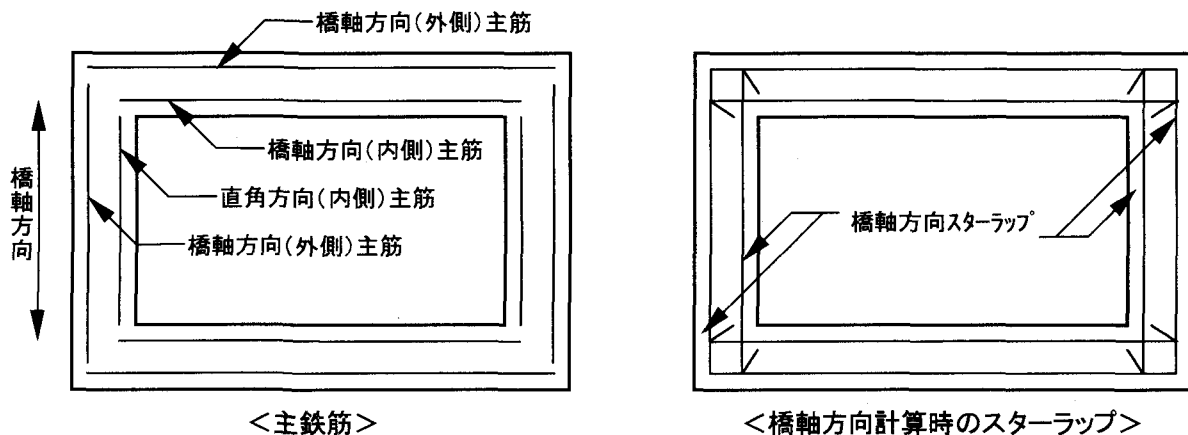


図- 2 中空橋脚の配筋

表- 2 A橋 動的解析結果

A橋			P1橋脚 (H=30.0m)			
			橋軸方向		直角方向	
橋脚幅 (m)			10.310		4.500	
壁厚 (m)			0.700		0.700	
主筋(外側)			D51-ctc150 1.5段		D51-ctc150 1.0段	
主筋(内側)			D32-ctc300 1.0段		D32-ctc300 1.0段	
スターラップ			D22-ctc150 4本		D22-ctc150 4本	
動的解析による照査			Type I	Type II	Type I	Type II
応答変位	δy (cm)		23.400	23.300	9.900	9.900
	δu (cm)		134.700	74.900	40.300	77.000
	α		3.0	1.5	3.0	1.5
	δa (cm)		60.500	57.700	20.033	54.633
	δd (cm)		24.800 ○	25.700 ○	13.400 ○	21.900 ○
残留変位	δRa (cm)		30.000	30.000	30.000	30.000
	δdR (cm)		0.400 ○	1.240 ○	0.836 ○	1.105 ○
回転角	上端	θa (rad)	9.00E-03	3.23E-02		
		θd (rad)	1.37E-03 ○	2.53E-03 ○		
	下端	θa (rad)	7.96E-03	2.89E-02	5.33E-03	1.81E-02
		θd (rad)	2.84E-03 ○	3.26E-03 ○	2.59E-03 ○	4.92E-03 ○
せん断	断面①	Ps (tf)	6754.783	6993.708	8481.305	8672.991
		Ps0 (tf)				
		Sd (tf)	3239.007 ○	3381.940 ○	3283.511 ○	3602.683 ○
	断面②	Ps (tf)	6157.879	6197.837	8128.207	8202.194
		Ps0 (tf)				
		Sd (tf)	3157.350 ○	3323.997 ○	3162.439 ○	3373.237 ○
	断面③	Ps (tf)	6157.879	6197.837	8128.207	8202.194
		Ps0 (tf)				
		Sd (tf)	3106.259 ○	3286.468 ○	3039.364 ○	3222.243 ○
	断面④	Ps (tf)	6754.783	6993.708	8481.305	8672.991
		Ps0 (tf)				
		Sd (tf)	2769.693 ○	2913.089 ○	2272.345 ○	2608.410 ○
	断面⑤	Ps (tf)			8481.305	8672.991
		Ps0 (tf)				
		Sd (tf)			2266.066 ○	2601.203 ○

c) C橋

C橋は、橋脚高さ比 0.6:1.0 の不等脚を有する 3 径間連続ラーメン橋である。表- 4 に示すとおり、TYPE II の応答変位については余裕があったが、TYPE I はかろうじて許容値を満足する結果であった。同様に応答回転角についても、橋軸、直角方向とも TYPE

I のほうが厳しく、特に直角方向の照査結果は O U T であったため、主鉄筋を変更し耐力の確保を行った。なお残留変位については問題なかった。

せん断については、橋脚高さの低い P1 橋脚橋軸方向で許容値を大幅に上回っており、また P2 橋脚でも許容値を満足したものの、余裕は無かった。

表－ 3 B橋 動的解析結果

B橋		P1橋脚 (H=42.1m)				P2橋脚 (H=43.9m)			
		橋軸方向		直角方向		橋軸方向		直角方向	
橋脚幅 (m)		10.310		5.000		10.310		5.500	
壁厚 (m)		1.000		1.000		1.000		1.000	
主筋(外側)		D51-ctc150 1.5段		D51-ctc150 1.0段		D51-ctc150 1.5段		D29-ctc150 1.0段	
主筋(内側)		D51-ctc300 1.0段		D51-ctc150 1.0段		D51-ctc300 1.0段		D29-ctc150 1.0段	
スターラップ		D19-ctc150 4本		D19-ctc150 6本		D19-ctc150 4本		D19-ctc150 6本	
動的解析による照査		Type I	Type II	Type I	Type II	Type I	Type II	Type I	Type II
応答変位	δy (cm)	24.200	24.200	20.000	20.000	24.200	24.200	21.500	21.500
	δu (cm)	65.500	108.300	52.700	87.000	65.500	108.300	53.700	88.300
	α	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5
	δa (cm)	37.967	80.267	30.900	64.667	37.967	80.267	32.233	66.033
	δd (cm)	36.000 ○	27.400 ○	23.300 ○	24.400 ○	36.000 ○	27.400 ○	29.100 ○	26.000 ○
残留	δRa (cm)	42.100	42.100	42.100	42.100	43.900	43.900	43.900	43.900
	δdR (cm)	3.560 ○	0.410 ○	1.885 ○	2.498 ○	3.560 ○	0.410 ○	2.153 ○	3.029 ○
回転角	上端 θa (rad)	5.99E-03	1.84E-02			6.69E-03	2.09E-02		
	θd (rad)	1.75E-03 ○	1.63E-03 ○			4.53E-03	2.75E-03 ○		
	下端 θa (rad)	5.31E-03	1.63E-02	1.10E-02	3.39E-02	5.81E-03	1.83E-02	4.39E-03	1.27E-02
	θd (rad)	5.19E-03 ○	2.87E-03 ○	3.36E-03 ○	3.61E-03 ○	5.20E-03	3.16E-03	4.34E-03	3.59E-03 ○
せん断	断面 ① Ps (tf)	4596.197	4871.748	4692.477	4922.125	4992.044	5262.689	5262.357	5494.731
	Sd (tf)	3491.888	3665.260	3826.149 ○	4308.463 ○	3569.163 ○	3659.362 ○	3346.382 ○	3932.846 ○
	断面 ② Ps (tf)	3950.001	4010.153	4315.455	4419.429	4373.381	4437.805	4876.730	4980.562
	Sd (tf)	3429.958 ○	3384.755 ○	3638.511 ○	4040.000 ○	3504.701 ○	3521.475 ○	3240.377 ○	3695.255 ○
	断面 ③ Ps (tf)	4596.197	4871.748	4692.477	4922.125	4992.044	5262.689	5262.357	5494.731
	Sd (tf)	2816.219 ○	2792.437 ○	2255.835 ○	2765.515 ○	3037.512 ○	3169.941 ○	2453.335 ○	2756.595 ○
	断面 ④ Ps (tf)			4692.477	4922.125			5262.357	5494.731
	Sd (tf)			2156.889 ○	2644.218 ○			2384.969 ○	2679.782 ○

表－ 4 C橋 動的解析結果

C橋		P1橋脚 (H=33.0m)				P2橋脚 (H=53.5m)			
		橋軸方向		直角方向		橋軸方向		直角方向	
橋脚幅 (m)		7.000		5.000		7.000		6.000	
壁厚 (m)		1.000		1.000		1.000		1.000	
主筋(外側)		D51-ctc150 2.0段		D51-ctc150 1.0段		D38-ctc150 2.0段		D38-ctc150 1.0段	
主筋(内側)		D38-ctc150 1.0段		D38-ctc150 1.0段		D29-ctc150 1.0段		D38-ctc150 1.0段	
スターラップ		D22-ctc150 6本		D22-ctc150 6本		D19-ctc150 6本		D19-ctc150 6本	
動的解析による照査		Type I	Type II	Type I	Type II	Type I	Type II	Type I	Type II
応答変位	δy (cm)	22.928	22.956	20.968	20.997	22.928	22.956	42.431	42.470
	δu (cm)	69.404	120.412	54.672	97.184	69.404	120.412	106.751	176.758
	α	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5
	δa (cm)	38.420	87.927	32.203	71.788	38.420	87.927	63.871	131.995
	δd (cm)	30.452 ○	27.746 ○	30.033 ○	23.725 ○	30.452 ○	27.746 ○	63.804 ○	34.451 ○
残留	δRa (cm)	33.000	33.000	33.000	33.000	53.500	53.500	53.500	53.500
	δdR (cm)	1.539 ○	0.920 ○	2.096 ○	1.863 ○	1.539 ○	0.920 ○	5.935 ○	3.000 ○
回転角	上端 θa (rad)	6.72E-03	2.33E-02			7.10E-03	2.35E-02		
	θd (rad)	4.60E-03 ○	3.40E-03 ○			1.46E-03	1.43E-03 ○		
	下端 θa (rad)	6.17E-03	2.15E-02	4.63E-03	1.64E-02	5.99E-03	1.97E-02	5.20E-03	1.78E-02
	θd (rad)	2.71E-03 ○	1.84E-03 ○	6.07E-03 ×	4.34E-03 ○	1.91E-03	1.51E-03 ○	5.93E-03 ×	2.61E-03 ○
せん断	断面 ① Ps (tf)	2841.409	3062.948	3712.883	3917.620	2566.788	2770.149	2857.365	3054.459
	Ps0 (tf)	3284.488	3284.488	4122.357	4122.357	2973.510	2973.510	3251.554	3251.554
	Sd (tf)	3502.753 ×	3514.465 ×	2340.128 ○	2343.353 ○	2165.089 ○	2298.474 ○	1157.654 ○	1158.723 ○
	断面 ② Ps (tf)	2367.229	2430.709	3347.626	3430.611	2176.325	2249.532	2512.750	2594.973
	Ps0 (tf)	2494.189	2494.189	3513.596	3513.596	2322.739	2322.739	2677.196	2677.196
	Sd (tf)	3409.499 ×	3431.759 ×	2340.128 ○	2343.353 ○	2092.723 ○	2210.407 ○	1157.654 ○	1158.723 ○
	断面 ③ Ps (tf)	2345.084	2408.178	3354.368	3437.484	2159.437	2232.175	2514.145	2596.404
	Ps0 (tf)	2471.272	2471.272	3520.600	3520.600	2304.912	2304.912	2678.662	2678.662
	Sd (tf)	3332.141 ×	3286.898 ×	2340.128 ○	2343.353 ○	1963.344 ○	1910.503 ○	1157.654 ○	1158.723 ○

表－ 5 D橋 動的解析結果

D橋			P1橋脚 (H=54.5m)				P2橋脚 (H=37.5m)			
			橋軸方向		直角方向		橋軸方向		直角方向	
橋脚幅 (m)			9.000		6.000		9.000		6.000	
壁厚 (m)			0.800		1.000		0.800		1.000	
主筋(外側)			D38-ctc150 1.0段		D38-ctc150 1.0段		D51-ctc150 2.0段		D51-ctc150 1.5段	
主筋(内側)			D38-ctc150 1.0段		D38-ctc150 1.0段		D38-ctc150 1.0段		D38-ctc300 1.0段	
スターラップ			D22-ctc150 4本		D22-ctc150 4本		D22-ctc150 6本		D22-ctc150 6本	
動的解析による照査			Type I	Type II	Type I	Type II	Type I	Type II	Type I	Type II
応答変位		δy (cm)								
		δu (cm)								
		α	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5	3.0	1.5
		δa (cm)	38.300	70.100			38.300	70.100		
		δd (cm)	29.400 ○	32.700 ○	43.100	26.100	29.400 ○	32.700 ○	27.500	23.500
残留		δRa (cm)	51.500	51.500	51.500	51.500	31.500	31.500	31.500	31.500
		δdR (cm)	1.300 ○	0.600 ○	0.500 ○	1.200 ○	1.300 ○	0.600 ○	0.400 ○	0.200 ○
回転角	上端	θa (rad)	7.51E-03	2.46E-02			6.57E-03	2.23E-02		
		θd (rad)	2.28E-03 ○	2.45E-03 ○			1.06E-03 ○	1.31E-03 ○		
	下端	θa (rad)	6.51E-03	2.14E-02	6.00E-03	1.90E-02	6.04E-03	1.98E-02	4.80E-03	1.41E-02
		θd (rad)	2.08E-03 ○	2.87E-03 ○	1.55E-03 ○	7.39E-04 ○	4.61E-03 ○	5.39E-03 ○	2.56E-03 ○	1.66E-03 ○
せん断	中空部	Ps (tf)	1935.700	1993.800	2944.500	3024.200	2855.400	2914.200	4344.600	4425.100
		Sd (tf)	3088.000 ×	3192.000 ×	2031.000 ○	1427.000 ○	6148.000 ×	6403.000 ×	4407.000 ×	3647.000 ○

また直角方向の応答変位が、TYPE I の場合 P1, P2 橋脚で倍半分違っており、上部構造の設計にこの影響を考慮する必要があると考えられる。

d) D橋

D橋もC橋と同様に、不等脚（橋脚高さ比 0.7:1.0）を有する、3径間連続ラーメン橋である。表－5に示すとおり、残留変位については問題なかった。

応答回転角については、橋脚高さの低い P2 橋脚が厳しいが（P1 橋脚の倍）、許容値は満足した。せん断については、橋軸方向で許容値を大幅に上回っており（許容値のほぼ倍）、直角についても橋脚高さの低い P2 橋脚が O U T であった。

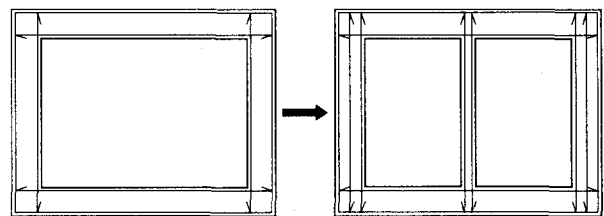
e) E橋

E橋は P1, P2 橋脚を弾性支承構造とした 6 径間連続ラーメン橋である。応答変位、応答回転角、残留変位については許容値を満足した。しかしせん断力について、支承構造の P1, P2 橋脚では、許容値を満足したものの、全ての橋脚がせん断破壊先行型（せん断耐力が終局水平耐力以下）となっており、全橋脚のじん性向上のため、せん断耐力確保の対策を行った。（解析結果表については省略、せん断耐力照査については次項参照）

(4) せん断耐力確保のための対策

非線形動的解析の結果、せん断耐力が不足してい

ると判断された C, D, E 橋については、せん断補強鉄筋の追加を行い、せん断耐力が終局水平耐力及び最大応答せん断力を上回るように配筋の修正を行った。



図－ 3 せん断補強鉄筋の配筋例

これは、橋脚のせん断耐力を確保するとともに、破壊形態を曲げ破壊先行型にすることによって、より安全性を高めるためである。

以下に E 橋の修正内容について説明する。

E 橋の橋軸方向のせん断耐力照査結果は、表－6に示すとおり、P1, P2 橋脚では応答せん断力は許容値を満足していたが、せん断耐力が終局水平耐力以下であったため、せん断破壊先行型となっていた。また P3, P4, P5 橋脚では、応答せん断力が許容値を満足していなかった。

元設計のせん断補強鉄筋の配筋は、全橋脚とも D25-4 本、部材軸方向配置間隔は 150mm であった。

表－ 6 セン断耐力照査結果（E橋 橋軸方向）

	スターラップ		地震波	せん断耐力			終局水平 耐力	破壊形態	最大応答 せん断力	照査
	径、本数	断面積		コンクリート	鉄筋	合計				
P1 H=21.0m	D25 4本	20.268	type I	98.5	1583.3	1681.8	1810.0	せん断先行	1016.7	×
			type II	131.3	1583.3	1714.6	1814.4	せん断先行	1236.5	×
	D29 4本 修正後	25.696	type I	98.5	2007.3	2105.8	1810.0	曲げ先行	1016.7	○
			type II	131.3	2007.3	2138.6	1814.4	曲げ先行	1236.5	○
P2 H=27.5m	D25 4本	20.268	type I	122.7	2200.1	2322.8	3314.3	せん断先行	1168.8	×
			type II	163.6	2200.1	2363.7	3314.3	せん断先行	1553.5	×
	D32 4本 修正後	31.768	type I	122.7	3448.4	3571.1	3314.3	曲げ先行	1168.8	○
			type II	163.6	3448.4	3612.0	3314.3	曲げ先行	1553.5	○
P3 H=36.5m	D25 4本	20.268	type I	146.7	2817.0	2963.7	7602.2	せん断先行	6021.2	×
			type II	195.7	2817.0	3012.7	7600.9	せん断先行	6826.2	×
	D32 8本 修正後	63.536	type I	183.4	8830.7	9014.1	7602.2	曲げ先行	6021.2	○
			type II	244.6	8830.7	9075.3	7600.9	曲げ先行	6826.2	○
P4 H=48.0m	D25 4本	20.268	type I	154.3	3022.6	3176.9	7099.5	せん断先行	5665.7	×
			type II	205.8	3022.6	3228.4	7098.1	せん断先行	6524.6	×
	D32 6本 修正後	47.652	type I	154.3	7106.4	7260.7	7099.5	曲げ先行	5665.7	○
			type II	205.8	7106.4	7312.2	7098.1	曲げ先行	6524.6	○
P5 H=36.5m	D25 4本	20.268	type I	146.7	2817.0	2963.7	8585.7	せん断先行	7149.8	×
			type II	195.7	2817.0	3012.7	8584.7	せん断先行	7455.6	×
	D32 8本 修正後	63.536	type I	241.2	8830.7	9071.9	8585.7	曲げ先行	7149.8	○
			type II	321.5	8830.7	9152.2	8584.7	曲げ先行	7455.6	○

せん断補強鉄筋の変更にあたり、最大径を D32 とし、8 本必要となる橋脚については、中間壁を入れてその中にせん断補強鉄筋を 2 本配置し、3 本＋2 本＋3 本と配置（図－3）した。

なお橋軸直角方向についても、橋軸方向と同様の照査をしたところ、せん断補強鉄筋が不足していたため、配筋の修正を行った。鉄筋径は橋軸方向と同じとした。

3. まとめ

T ラーメン橋など比較的地震時の挙動が複雑でない橋梁では、地震時保有水平耐力法の適用にあまり問題がないと思われ、むしろ地震時保有水平耐力法による照査結果は安全側となる傾向が見られた。非線形動的解析の結果で断面を決定することで、より経済的な設計になると思われる。

一部の橋脚を支承構造とした連続ラーメン橋においては、剛結構造の橋脚に荷重が集中するため、通常のラーメン橋よりも設計が厳しくなる可能性がある。

連続ラーメン橋では剛性の高い橋脚に荷重が集中し、動的解析による照査において、特にせん断耐力が不足する可能性が高いため、剛性のバランスに注意する必要がある。

橋脚高さが大きく異なる橋などでは、橋脚ごとの卓越する振動が別の振動モードとして発生しやすいため応答に大きな差が生じ、上部構造に大きな影響を与える可能性がある。

また直角方向においては、地震時保有水平耐力法では単柱モデルとしているため、橋脚ごとの地震時応答特性の差が再現できないので、立体モデルの非線形動的解析を行うなど特に注意が必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 設計要領第二集 橋梁建設編，平成 10 年 7 月，日本道路公団
- 2) 道路橋の耐震設計に関する資料，平成 10 年 1 月，社団法人 日本道路協会