

2層式RCラーメン壁式橋脚の耐震設計

中島 進¹・徳川 和彦²・松浦 功²

¹パシフィックコンサルタンツ(株) 中部本社第一技術部 (〒451-0046 名古屋市西区牛島町2番5号)

²正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 中部本社第一技術部 (〒451-0046 名古屋市西区牛島町2番5号)

1. はじめに

地震時保有水平耐力法は、1次モードの卓越する1質点の振動系を対象としているため、2層構造で2質点を支持する橋脚に対しては、その適用性が限定されることが考えられる。

本稿では、図-1の橋梁一般図に示すような橋梁形式のP3橋脚に着目して、下記の耐震設計の課題について整理を行った。

- 1) 上層をRC門型ラーメン構造、下層をRC壁式構造とした2層橋脚（以下、2層式RCラーメン壁式橋脚という）に2質点を支持させた場合の振動特性の把握
- 2) 2層式RCラーメン壁式橋脚の非線形静的解析の手法（2質点が同一方向に加振すると仮定）
- 3) 2層式RCラーメン壁式橋脚の非線形動的解析の結果

結果

対象としたP3橋脚の正面図を図-2に示す。

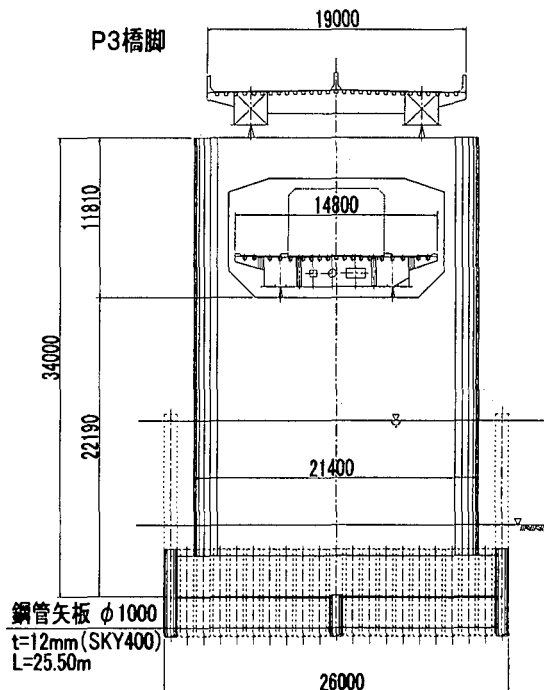


図-2 設計対象橋脚

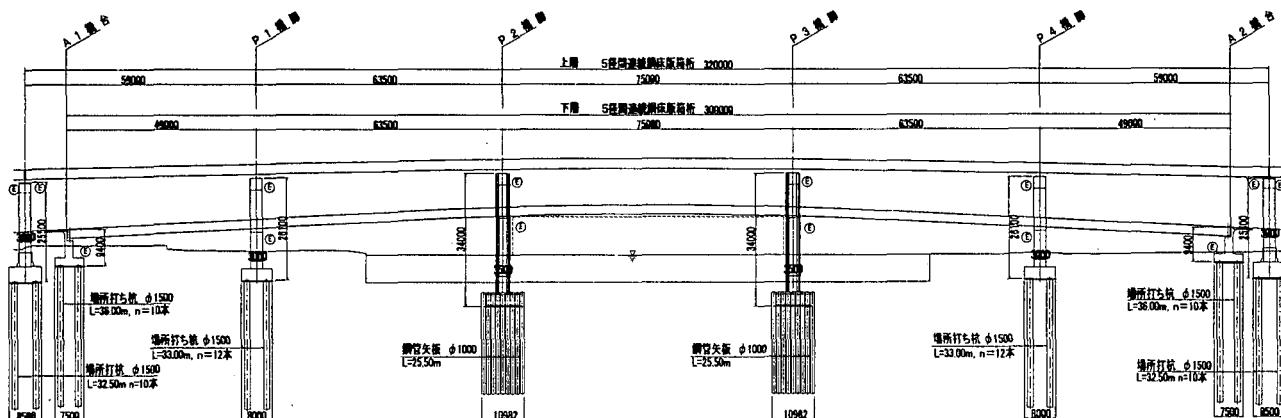


図-1 橋梁一般図

2. 振動特性の把握

(1) 橋脚のモデル化

図-3に示す立体骨組モデルにおいて、固有値解析を行った。なお、壁部と門柱部との境界は、壁図心から門柱図心間に水平な仮想部材（剛性 ∞ ）を設定し、モデル化を行った。支承については、等価剛性を用いた。基礎バネは、動的地盤バネに対する値とした。

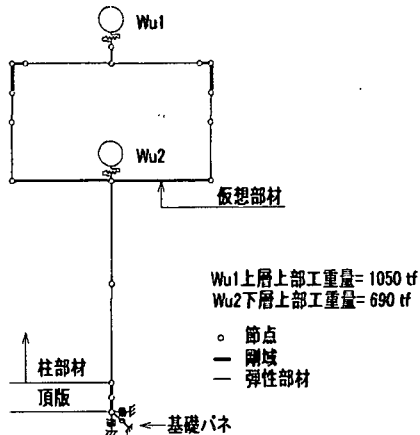


図-3 解析モデル

(2) 固有値解析結果

固有値解析により地震時の振動特性を把握した。固有値一覧および主要モード図を以下に示す。

表-1 固有値解析結果一覧

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	制振係数							減衰率	
			(Tx)		(Ty)		(Tz)				
			有効質量(累積有効質量比 %)								(%)
			(Tx)	(%)	(Ty)	(%)	(Tz)	(%)			
1	0.578	1.729	1.567E+01		-9.348E-17		-7.730E-29				
			2.457E+02	(30)	8.739E-33	(0)	5.975E-57	(0)	11.416		
2	0.755	1.324	3.497E-15		1.079E+01		4.624E-13				
			1.223E-29	(30)	1.164E+02	(14)	2.138E-25	(0)	15.397		
3	0.961	1.041	7.899E+00		3.290E-14		3.130E-27				
			6.240E+01	(37)	1.082E-27	(14)	9.796E-54	(0)	23.588		
4	1.944	0.514	1.003E+01		-6.310E-12		-1.336E-18				
			1.006E+02	(50)	3.981E-23	(14)	1.784E-36	(0)	13.374		
5	4.233	0.236	-2.209E-22		1.670E+01		1.770E-11				
			4.878E-44	(50)	2.788E+02	(48)	3.134E-22	(0)	9.491		
6	5.245	0.191	-1.582E+01		1.615E-23		-1.033E-14				
			2.502E+02	(80)	2.609E-46	(48)	1.067E-28	(0)	7.847		
7	6.489	0.154	7.729E-13		-1.623E-11		1.768E+01				
			5.974E-25	(80)	2.634E-22	(48)	3.126E+02	(38)	6.909		
8	8.765	0.114	7.805E-11		-6.377E-22		-1.242E-13				
			6.092E-21	(80)	4.067E-43	(48)	1.542E-26	(38)	5.216		
9	9.295	0.108	3.542E-18		-1.937E+01		-9.183E-13				
			1.255E-35	(80)	3.751E+02	(94)	8.432E-25	(38)	14.334		
10	10.712	0.093	-1.250E+01		5.498E-22		-6.432E-13				
			1.564E+02	(99)	3.023E-43	(94)	4.137E-25	(38)	16.466		

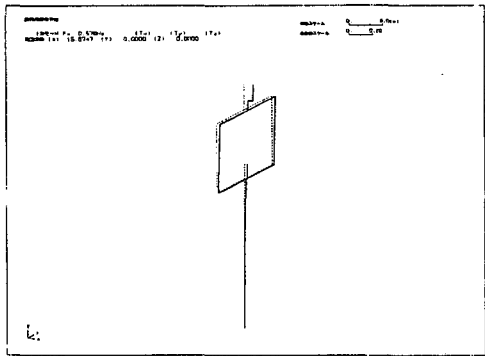


図-4 (a) 1次モード

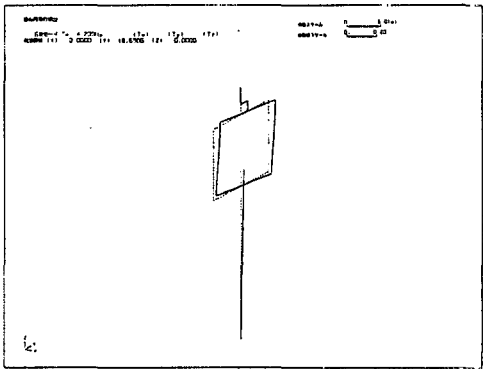


図-4 (b) 5次モード

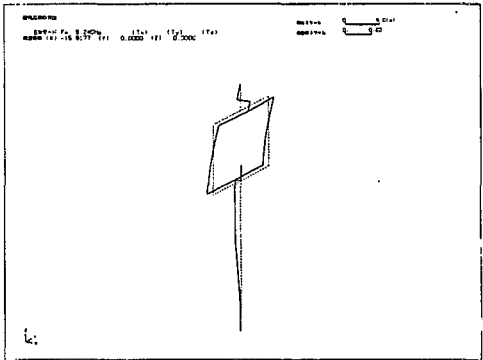


図-4 (c) 6次モード

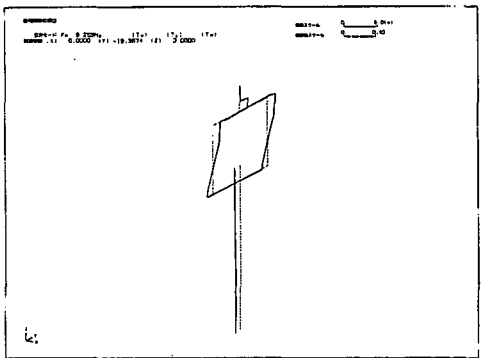


図-4 (d) 9次モード

(3) 振動特性の把握

固有値解析結果より、橋軸方向については1次モード(有効質量比 30%)と6次モード(30%), 直角方向については5次モード(34%)と9次モード(46%)が主要なモードとなると考えられる。

橋軸方向については1次、直角方向については5次モードでは上下層の質点ともに同一方向に振動するモードである。しかし、6次、9次モードは上下層の質点が逆位相となるモードである。そのため、2質点の振動特性による影響を受ける壁基部の設計については、2質点の同一加振を考える水平漸増荷重載荷による非線形静的解析と動的解析による照査を実施し、その比較を行うこととした。

3. 非線形静的解析手法について

当該橋脚の橋軸、直角方向の骨組モデルに静的漸増荷重を同一方向へ一律に作用させて非線形静的解析を行った。

(1) 橋軸方向の解析

a) 解析の仮定

橋軸方向については、図-5に示すモデルに水平漸増荷重を同一方向に作用させて解析を行った。

上層ラーメン柱については、上層上部工作用位置の変位に対して、ラーメン基部の回転変形角の影響を除荷した $\delta 1$ の変位に着目した。壁部については、壁天端の変位 $\delta 2$ に着目した。

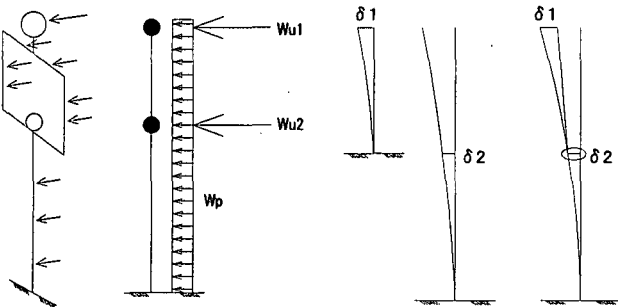


図-5 橋軸方向解析モデル

照査方法は、水平漸増荷重を載荷した場合に得られる水平震度-変位関係から、式1による耐震性能を照査する。

$$\theta_p < \theta_a \quad (\text{式1})$$

θ_a : 許容回転角 (安全率 α を考慮)

θ_p : δ_p に対する壁基部塑性ヒンジの回転角

δ_p : 弾性応答による変位を、エネルギー一定則に基づき弾塑性応答させた変位

b) 解析結果

上層ラーメン部および下層壁部について各々の天端変位を対象とした水平震度-変位関係を図-6に示す。

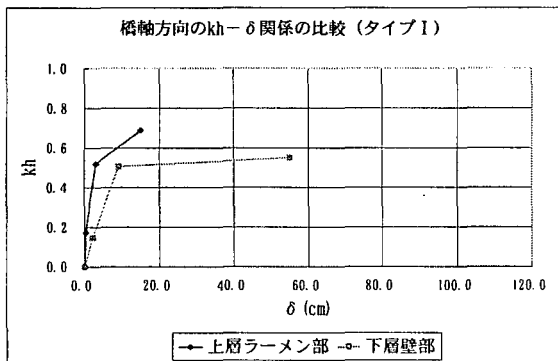


図-6(a) 橋軸方向のkh- δ 関係 (タイプI)

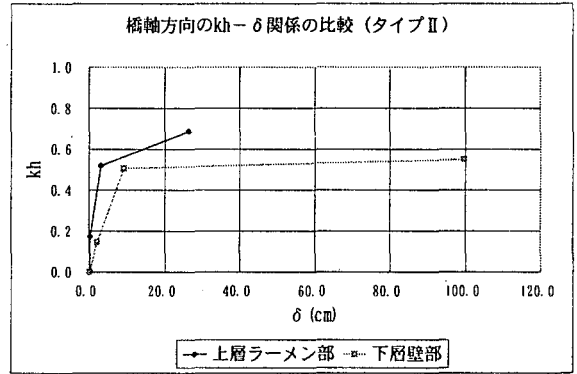


図-6(b) 橋軸方向のkh- δ 関係 (タイプII)

図-6より、橋軸方向については、下層壁部が若干早く降伏を迎える。終局耐力は、上層ラーメン部が水平震度で0.2程度大きくなるが、上下層の逆位相も考えられるため、上下層両方に着目し解析を行った。

上層ラーメン部および下層壁部各々の解析結果を以下に示す。

『上層ラーメン部』

表-2 橋軸方向 上層ラーメン部結果一覧

(tf,m)

		タイプI	タイプII
破壊形態		曲げ破壊	曲げ破壊
許容塑性率	μ_a	1.89	4.67
設計水平震度	khc	1.00	1.39
等価水平震度	khe	0.60	0.48
等価重量	W	1325.6	1325.6
地震時保有水平耐力	Pa	913.2	915.8
作用水平力	P	795.4	636.3
判定($P \leq Pa$) [P/Pa]		OK [0.87]	OK [0.69]
応答塑性率	μ_R	1.55	2.52
残留変位	δ_R	0.014	0.034
許容残留変位	δ_{Ra}	0.118	0.118
判定 ($\delta_R \leq \delta_{Ra}$)		OK	OK

『下層壁部』

・タイプI

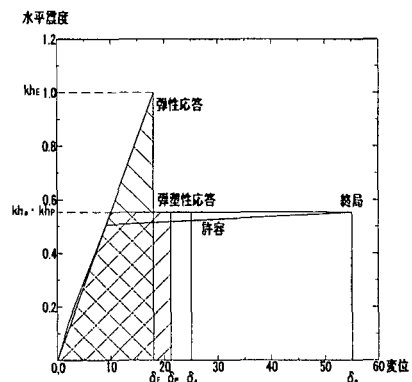


図-7 kh- δ 関係図 (タイプI)

表-3 結果一覧 (タイプⅠ)

	kh	δ (cm)	θ (rad)
弾性応答 _E	1.000	17.94	—
弾塑性応答 _P	0.553	21.18	7.58E-3
許容 _a	0.553	24.98	9.60E-3
判定 ($\theta_P \leq \theta_a$) ($\delta_P \leq \delta_a$)	OK [$\theta_P / \theta_a = 0.79$] [$\delta_P / \delta_a = 0.85$]		

・タイプⅡ

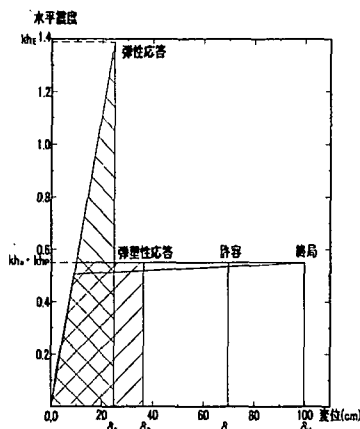


図-8 kh-δ関係図 (タイプⅡ)

表-4 結果一覧 (タイプⅡ)

	kh	δ (cm)	θ (rad)
弾性応答 _E	1.390	24.92	—
弾塑性応答 _P	0.550	36.42	1.56E-2
許容 _a	0.550	69.79	3.37E-2
判定 ($\theta_P \leq \theta_a$) ($\delta_P \leq \delta_a$)	OK [$\theta_P / \theta_a = 0.46$] [$\delta_P / \delta_a = 0.52$]		

(2) 直角方向の解析

a) 解析の仮定

直角方向のモデルは、上層ラーメン部と下層壁部に分離して考える。上層ラーメン部の破壊形態は、上層の梁で支持される質点に対して支配的となると考え、ラーメン柱基部を固定と考えた1層ラーメン橋脚として解析した。

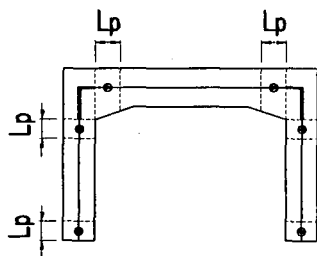


図-9 直角方向上層ラーメン部のモデル

下層の壁部については、上下層の上部工2質点を考慮するため、図-5に示す多質点系骨組モデルでの水

平漸増荷重載荷による静的解析より耐震性能の照査を行うこととする。

b) 解析結果

上層ラーメン部および下層壁部について、各々の天端変位を対象とした水平震度-変位関係を図-10に示す。

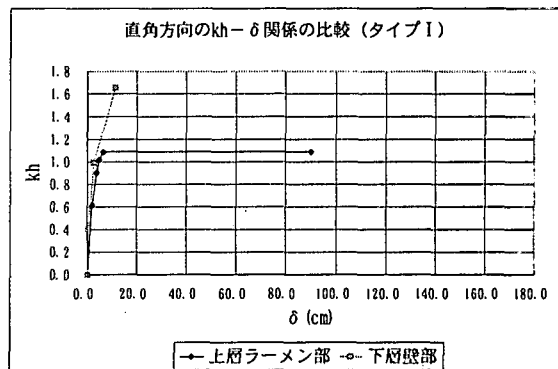


図-10(a) 直角方向のkh-δ関係 (タイプⅠ)

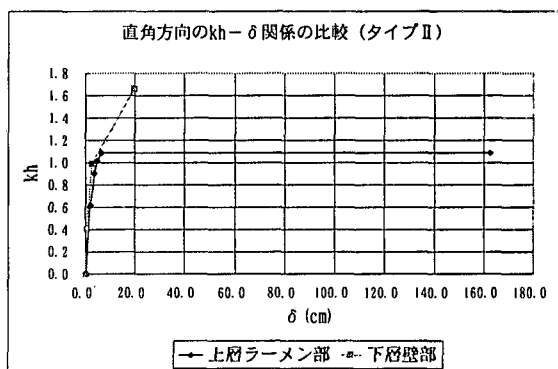


図-10(b) 直角方向のkh-δ関係 (タイプⅡ)

図-10より、直角方向については、下層壁部の終局水平耐力が大きく、明らかに上層ラーメン部が先に降伏、終局を迎えることから、上層ラーメン部に着目し解析を行った。

表-5 直角方向 上層ラーメン部結果一覧

(tf,m)

		タイプⅠ	タイプⅡ
破壊形態		曲げ破壊	曲げ破壊
許容塑性率	μ_a	10.86	37.09
設計水平震度	khc	1.00	1.50
等価水平震度	khe	0.40	0.40
等価重量	W	1486.6	1486.6
地震時保有水平耐力	Pa	1617.6	1616.5
作用水平力	P	594.6	594.6
判定($P \leq Pa$) [P/Pa]		OK [0.37]	OK [0.37]
応答塑性率	μ_R	0.92	1.32
残留変位	δ_R	0.001	0.006
許容残留変位	δ_{Ra}	0.145	0.145
判定 ($\delta_R \leq \delta_{Ra}$)		OK	OK

4. 非線形動的解析について

非線形静的解析による設計結果に対し、上下層2質点の振動特性による影響を受ける下層壁基部に着目し、動的解析による照査（橋軸方向）を実施する。

(1) 解析条件

a) 解析モデル

解析モデルを図-11に示す。入力地震動は、参考文献2) III種地盤の標準加速度波形から、タイプI、タイプIIそれぞれ3波を用いた。

減衰は、固有値解析より算出される歪みエネルギー比例減衰を用いた Rayleigh 減衰を考慮した。基準としたモードは、橋軸方向は1次、6次モードとし、直角方向は5次、9次モードとした。

上部構造：質点

支承構造：非線形バネモデル（バイリニア）

（実際には、LRB 支承を採用している）

柱・壁部：線形梁モデル（降伏剛性）

塑性ヒンジ：非線形バネモデル

（M- θ 、完全弾塑性型武田モデル）

基礎構造：線形バネモデル

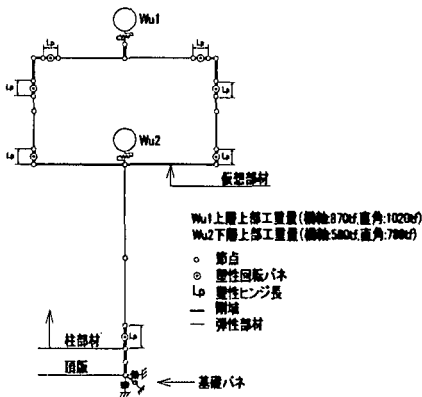


図-11 動解モデル図

b) 塑性回転バネ

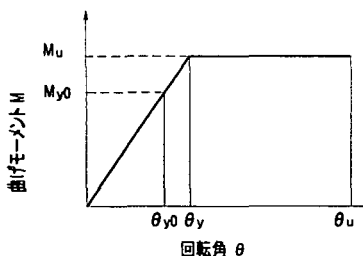


図-12 M- θ 関係図

表-6 M- θ 関係一覧

橋軸方向	降伏		終局		初期剛性 K My0/θy0	θy Mu/K
	My0	θy0	Mu	θu		
タイプI門柱	4057.12	5.283E-04	5392.63	4.582E-03	7.679E+06	7.022E-04
タイプI壁	46086.14	1.274E-03	50814.25	2.592E-02	3.618E+07	1.405E-03
タイプII門柱	4057.12	5.283E-04	5408.04	8.696E-03	7.679E+06	7.042E-04
タイプII壁	46086.14	1.274E-03	50827.07	5.026E-02	3.618E+07	1.405E-03

c) 支承バネ

静的解析では免震支承を用いた分散設計としたが、動的解析では免震支承として非線形にモデル化し履歴減衰を考慮した。

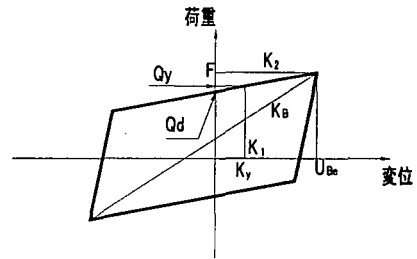


図-13 支承バネモデル

表-7 支承バネ定数（LRB）

橋軸方向	上層		下層	
	タイプI	タイプII	タイプI	タイプII
K1	17944	11880	11668	10539
K2	2761	1828	1795	1621
KB	4896	2605	3644	3222

(3) 照査結果および評価

動的解析により、下記項目に対し耐震安全性の照査を行った。

a) 塑性回転角の照査

橋軸方向に対し、各塑性ヒンジ部の応答回転角が許容回転角以下であることを照査した。照査の結果、門柱基部および壁基部の最大応答回転角 θ_{max} は、許容回転角 θ_a を下回る結果となり、塑性回転角による照査においては耐震安全性を確認できた。なお、壁基部と門型基部の塑性ヒンジ両方で塑性化する結果となった。

以下に照査結果および履歴図の一部を示す。

表-8 塑性回転角照査結果

橋軸方向		タイプI			タイプII		
		最大回転角	許容値	比率	最大回転角	許容値	比率
		θ_{max}	θ_a	θ_{max}/θ_a	θ_{max}	θ_a	θ_{max}/θ_a
P3橋脚	門	1.79E-03	2.00E-03	0.90	4.37E-03	6.03E-03	0.72
	壁	1.29E-03	5.45E-03	0.24	1.76E-03	1.77E-02	0.10

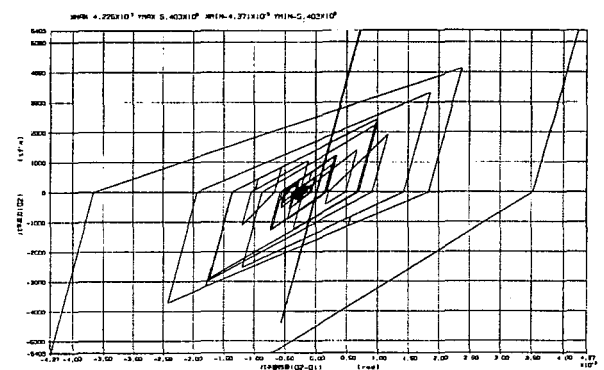


図-14 上層ラーメン柱基部履歴図

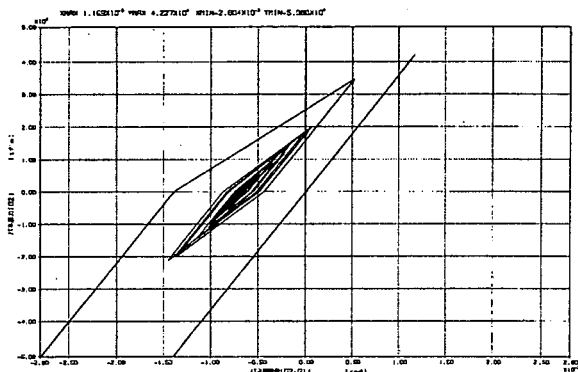


図-15 下層壁基部 履歴図

b) 残留変位の照査

上層門型ラーメンの天端位置における残留変位が許容残留変位以下であることを照査した。残留変位は、地震動が終了した後継続して 10 秒間の自由振動解析を行って求めた。照査の結果、全ての橋脚の残留変位は、許容値に対して十分余裕があることから、残留変位照査での耐震安全性は確保できていると考えられる。

表-10 残留変位照査結果

	橋軸方向		許容値
	タイプⅠ	タイプⅡ	
P3橋脚	0.12	0.49	31.00

(4) 非線形静的解析との比較

上下層 2 質点系の振動特性により、壁基部の耐震性能については静的解析と動的解析に相違が生じると考えられる。以下に壁基部における安全率の比較を示す。

表-11 安全率の比較

	タイプⅠ		タイプⅡ	
	静的解析	動的解析	静的解析	動的解析
橋軸方向 (θ_p/θ_s)	0.79	0.24	0.46	0.10

上表より、静的解析に比べ動的解析はかなり余裕のある結果となる。これは、1 次モードの振動系で解析を行う静的解析に比べ、動的解析は他のモードの影響を受け 1 次モードの寄与率が低くなるためと考えられる。なお、上層ラーメン部は、静的解析、動的解析ともにタイプⅠで 0.9 程度、タイプⅡで 0.7 程度の安全率となっている。

5. おわりに

地震時の挙動が複雑と考えられる 2 層 2 質点構造の橋脚に対し、固有値解析による振動特性の把握をした上で、非線形静的解析および非線形動的解析による

耐震設計を行った。その結果、耐震設計における課題に対し下記の結論を得た。

(1) 2 層式 RC ラーメン橋脚の振動特性

固有値解析結果より、橋軸方向は、1 次と 6 次、直角方向は 5 次と 9 次のモードが大きい有効質量比となった。ただし、6 次と 9 次モードは、上下層の 2 質点が逆方向に振動するモードであった。

(2) 非線形静的解析の手法

2 層式 RC ラーメン壁式橋脚に対し、橋軸、直角方向それぞれについて非線形静的解析を行った。壁部に対しては、上下層の 2 質点が同一方向へ振動する場合を想定した多質点系モデルによる水平漸増荷重を載荷させる手法を提案し、壁天端変位に着目したエネルギー一定則より、許容値の設定および耐震照査を行った。

(3) 非線形動的解析の結果

2 層 2 質点系の振動特性の影響が大きいと考えられる壁基部に対する耐震照査として非線形動的解析を実施した。その結果、動的解析による応答は非線形静的解析による結果よりも大きく余裕のある値となった。

以上より、本対象のような 2 層 2 質点系の橋脚の耐震設計においては、逆位相モードの影響により 1 次モードの寄与率が低くなるため、同一方向への慣性力を考慮する非線形静的解析は、下層壁部に対してはかなり安全側の手法であると考えられる。そのため、本設計では、非線形静的解析により耐震設計を行い動的解析による照査を行ったが、今後、動的解析による耐震設計についても検討する必要があると考える。また、提案した非線形静的解析について改良を加え、動的解析とより近似な解析となるような手法について今後、検討していく予定である。

参考文献

- (社) 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
- (社) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成 9 年 3 月