

多柱式ラーメン高架橋における耐震解析事例

槻宅健司¹・石橋謙治¹・松浦寛司²・園田龍正²・松本直樹³

¹社団法人 水産土木建設技術センター松江支所(〒690-0873 松江市内中原町20-1)

²正会員 (株)エイトコンサルタント 松江支社 技術一部(〒690-0001 松江市東朝日町151-34)

³正会員 (株)エイトコンサルタント 本社 技術本部技術開発部(〒700-8617 岡山市津島京町3-1-21)

1. まえがき

平成7年1月に発生した阪神大震災以降、耐震設計は以前にも増して重要な部分となっており、各種の構造設計で盛んに非線形解析が行われて来ている。ここでは、道路橋示方書Ⅴ耐震設計編に基づき、多柱式ラーメン高架橋の耐震照査を行った例を示す。

多柱式ラーメン高架橋のような構造物は、地震時に複数箇所に塑性ヒンジが発生する場合があります、また地震時挙動も複雑になることから、非線形解析を主体とした振動解析を行うのが望ましいと考えられる。

このようなことから、まず非線形静的解析により構造物の耐力を評価し、さらに非線形時刻歴応答解析を行い、耐震性能の照査を行った。

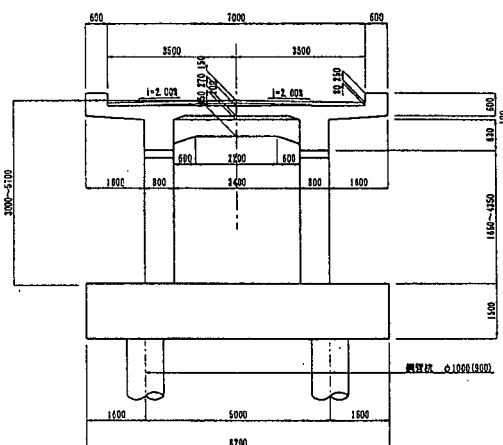


図-2 構造図

杭となっている。

2. 対象構造物の概要

図-1に一般図を、図-2に構造図を示す。図-1の中で今回事例として紹介するのは、アプローチ部に位置する第3ブロックである。このラーメン構造物は上部スラブ、6本の角柱(800×800)、底版スラブ、6本の鋼管杭(L=15.0m、φ1000、t=16mm、SKK400)から構成される。また海上構造物であることより、杭頭5m部分が突出

3. 解析モデル

(1) 非線形静的解析モデル

非線形静的解析における骨組みモデルは、杭基礎をはり要素、地盤を水平ばね要素にてモデル化したものと、杭をモデル化しない(バネに置換)もの計2つのモデルにて橋軸方向、橋軸直角方向の解析を行った。図-3および図-4にモデル図を示す。

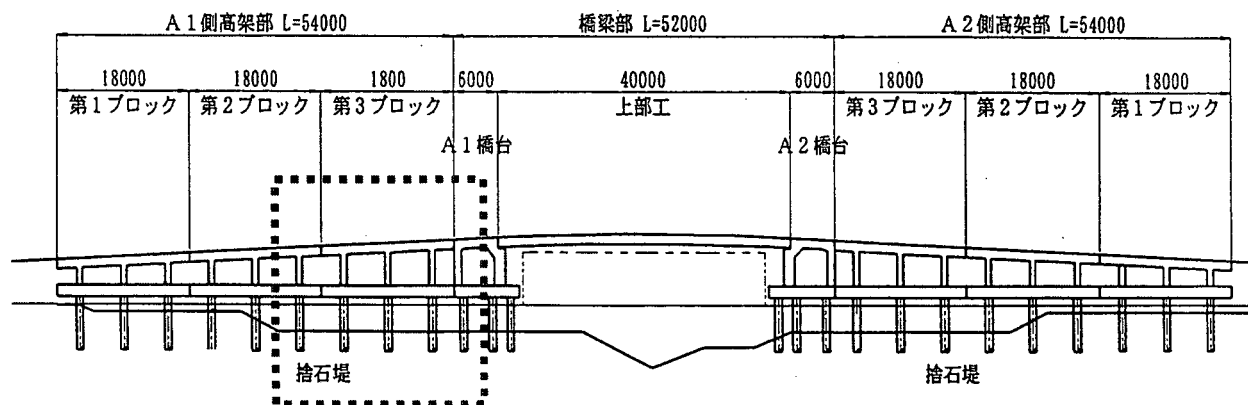


図-1 対象橋梁一般図

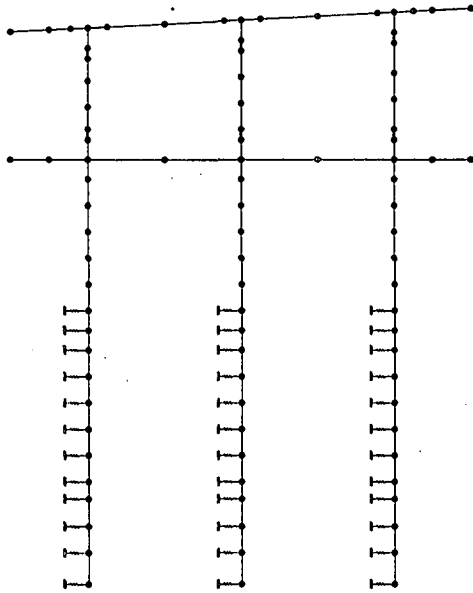


図-3 橋軸方向モデル

表-1 橋脚の構造諸元

	柱1	柱2	柱3
断面寸法(mm)	800×800	800×800	800×800
柱の高さ(mm)	3800	4100	4400
コンクリート(N/mm ²)	24		
鉄筋	SD295A		
軸方向鉄筋	D29-24本	D19-24本	D29-24本
帯鉄筋	D13@100	D13@100	D13@100
引張主鉄筋比	0.0138	0.0061	0.0138

注)モデル図の向かって左から1,2,3

橋脚については、柱上端部、柱下端部に塑性ヒンジを想定した非線形回転バネを設け、その他の部材は非線形はり要素とし、非線形特性はバイリニアモデルとした。

杭については、非線形はり要素とし、非線形特性は杭種が鋼管杭であることよりバイリニアモデルとした。

なお、床版スラブ、フーチングは剛体として設定し、解析結果より降伏に達しないことを確認している。

(2)非線形時刻歴応答解析モデル

非線形時刻歴応答解析については、杭をモデル化した立体骨組みモデルとした。図-5 にモデルを示す。

非線形静的解析と同様に橋脚については、上端部、下端部に塑性ヒンジを想定した非線形回転バネを設け、その他の部材は非線形はり要素とし、非線形特性はバイリニアモデルとした。減衰はレーリー減衰を使用した。

杭については、非線形静的解析と同様とした。

また地盤ばねについてはバイリニア型の非線形性を考慮した。

なお、床版スラブ、フーチングは非線形静的解析と同様である。

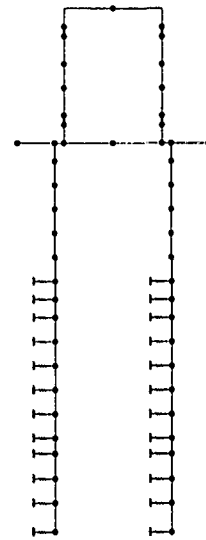


図-4 橋軸直角方向モデル

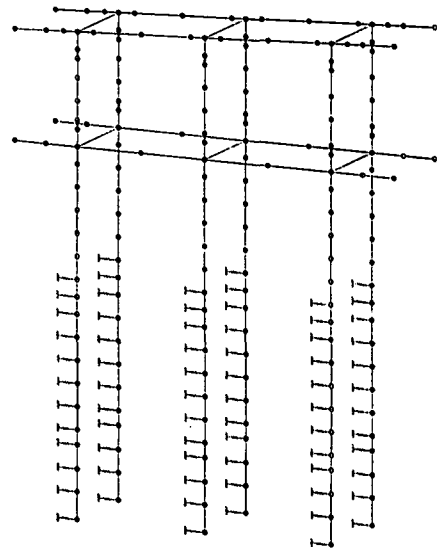


図-5 時刻歴応答解析モデル

表-2 地盤条件

	土質	層厚(m)	平均N値	単位体積重量 (kN/m ³)	水中単位体積重量 (kN/m ³)	変形係数 ED(kN/m ²)	動的ポアソン比
1	砂質土	6.5	7	20	11	143385	0.5
2	砂質土	0.65	4	18	9	88863	0.5
3	砂質土	2.05	17	18	9	233156	0.5
4	軟岩	1.2	50	20	11	496351	0.4

(3)構造諸元

橋脚に関する構造諸元を表-1 に示す。

(4)地盤条件

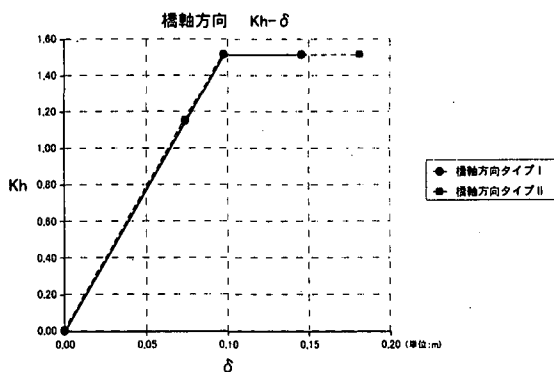
地盤条件をまとめたものを表-2 に示す。表-2 の条件より地盤ばねを設定した。

(5)軸力変動

軸力変動については、ツール等の制約により時刻歴応答解析のみ考慮した。

表-3 固有周期

固有周期	橋軸方向	橋軸直角方向
非線形静的解析(2D)	0.478	0.572



状態	橋軸方向タイプ I			
1つ目の塑性ヒンジ発生	khyo	1.149	δ_{yo}	0.07385
降伏時	khy	1.515	δ_y	0.09736
終局時	khu	1.515	δ_u	0.1454

状態	橋軸方向タイプ II			
1つ目の塑性ヒンジ発生	khyo	1.153	δ_{yo}	0.07407
降伏時	khy	1.515	δ_y	0.09736
終局時	khu	1.515	δ_u	0.18124

図-6 橋軸方向 $Kh-\delta$

表-4 橋軸方向保有耐力照査結果

			タイプ I の地震動	タイプ II の地震動
等価水平震度	khe	—	0.54	0.81
終局水平震度	khu	—	1.515	1.515
判定			$khe \leq khu$ OK	$khe \leq khu$ OK
応答塑性率	μ_R	—	0.613	0.984
許容塑性率	μ_a	—	1.400	2.205
判定			$\mu_R \leq \mu_a$ OK	$\mu_R \leq \mu_a$ OK

(6) 入力地震波形

非線形時刻歴応答解析に用いた地震波形は、Ⅱ種地盤用タイプⅠ波形3波、タイプⅡ波形3波計6波を使用した。なお、ここでは地表面波形のまま振幅調整は行わず使用した。

4. 非線形静的解析結果

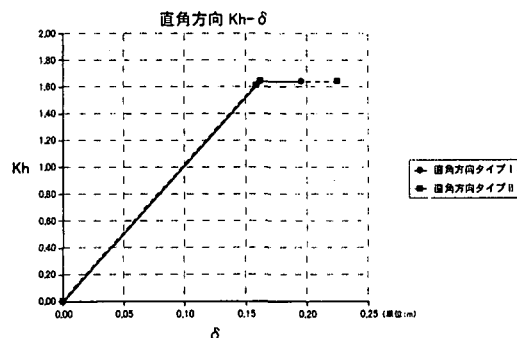
(1) 固有周期

図-3 および図-4 のモデルにおける固有周期を表-3 に示す。橋軸方向、直角方向ともに 0.5 秒程度の短周期な構造物である。

(2) 橋軸方向結果

図-6 に杭モデル無しのタイプⅠ、タイプⅡの解析結果を示す。なおこのラーメン構造物の終局の判定は、柱上端部、柱下端部に設けた計6つの塑性ヒンジが終局状態に達した時としている。

橋軸方向は終局時の耐力が $Khu=1.515$ となっており、



状態	直角方向タイプ I			
1つ目の塑性ヒンジ発生	khyo	1.613	δ_{yo}	0.15879
降伏時	khy	1.644	δ_y	0.16187
終局時	khu	1.644	δ_u	0.19552

状態	直角方向タイプ II			
1つ目の塑性ヒンジ発生	khyo	1.612	δ_{yo}	0.15867
降伏時	khy	1.643	δ_y	0.16177
終局時	khu	1.643	δ_u	0.22508

図-7 直角方向 $Kh-\delta$

表-5 直角方向保有耐力照査結果

			タイプ I の地震動	タイプ II の地震動
等価水平震度	khe	—	0.67	1.16
終局水平震度	khu	—	1.644	1.643
判定			$khe \leq khu$ OK	$khe \leq khu$ OK
応答塑性率	μ_R	—	0.596	0.911
許容塑性率	μ_a	—	1.085	1.324
判定			$\mu_R \leq \mu_a$ OK	$\mu_R \leq \mu_a$ OK

等価水平震度 Khe に対して2倍～3倍の耐力を有している。表-4 にエネルギー一定則による保有耐力照査結果を示す。

表-4 より、橋軸方向に関して柱の耐震安全性は十分であると判定された。

(3) 橋軸直角方向

図-7 に杭モデル無しのタイプⅠ、タイプⅡの結果を示す。構造物の終局の判定は、柱上下端計4つの塑性ヒンジが終局状態に達した時としている。

直角方向の終局時の耐力は $Khu=1.644$ となっており、橋軸方向に比し1.1倍の耐力を有しており、また等価水平震度 Khe に対して2.5～1.4倍の耐力を有している。表-5 にエネルギー一定則による保有耐力照査結果を示す。

表-5 より直角方向に関しても柱の耐震安全性は十分であると判定された。

(4) 杭基礎の耐力

杭基礎をはりモデルにて考慮したモデルについて、同じく非線形静的解析を行った。解析の結果、橋軸方向、直角方向ともに杭基礎先行破壊型であることが判明した。そこで、杭基礎が非線形応答することを前提とし、非線形静的解析により杭基礎の降伏耐力を算出し、降

表-6 杭基礎の塑性率照査

Case1減衰定数別補正係数を見込んだ場合				
	KhyF	KhcF	μ FR	判定
橋軸方向	0.61	0.99	1.82	< 4 OK
橋軸直角方向	0.70	0.99	1.50	< 4 OK
Case2減衰定数別補正係数を見込まない場合(突出杭に配慮)				
	KhyF	KhcF	μ FR	判定
橋軸方向	0.61	1.49	3.48	< 4 OK
橋軸直角方向	0.70	1.49	2.77	< 4 OK

表-7 固有周期

固有周期	橋軸方向	橋軸直角方向
時刻歴応答解析(3D)	0.473	0.586

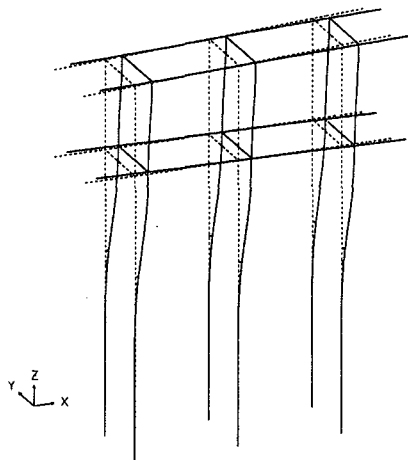


図-8 1次モード図(橋軸方向)

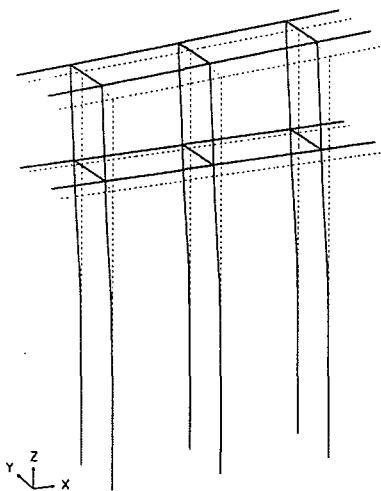


図-9 1次モード図(直角方向)

伏耐力より杭基礎の応答塑性率を求め、応答塑性率が許容塑性率以内であることを確認することで耐震安全性の照査とすることとした。

なお、応答塑性率については、突出杭に配慮し、道示V編11.4に基づき、周辺地盤の減衰の影響による減衰定数別補正係数を考慮した場合と、考慮しない場合の両方にて照査を行っている。また、許容塑性率についても同様に道示V編11.4より、塑性率4以下としている。表-6に塑性率照査の結果を示す。なお、塑性率算

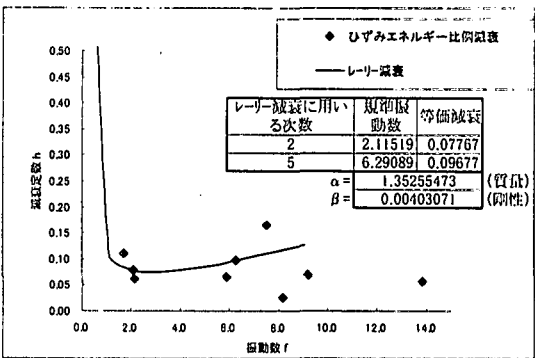


図-10 レーリー減衰(橋軸方向)

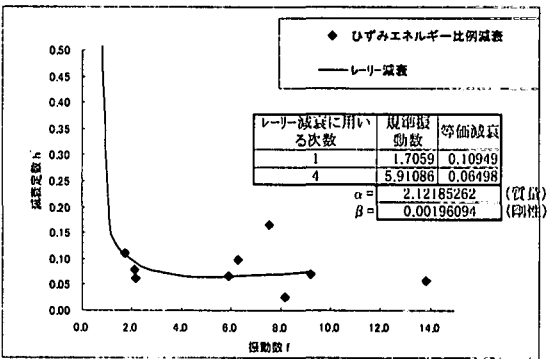


図-11 レーリー減衰(直角方向)

出に関しては、タイプⅡの方が支配的となるため、ここではタイプⅡの Khc より算出している。また杭の降伏時は、水平変位が急増し始めた時とした。

表-6に示すとおり、Case1 および Case2 ともに許容塑性率以内に収まっている。塑性率については、あとで述べる非線形時刻歴応答解析でも照査を行い、許容値以内であることを確認した。また、ここでは示さないが、押し込み支持力に関する照査も行っており、許容値以内であることを確認している。

5.非線形時刻歴応答解析結果

(1)固有周期

固有値解析により固有周期を算定した。表-7に固有周期算定結果を示す。また、図-8、図-9に橋軸方向、直角方向それぞれの1次モードを示す。

(2)レーリー減衰

固有値解析結果より算出した各モード毎のひずみエネルギー比例減衰から時刻歴応答解析に用いる減衰としてレーリー減衰を設定した。

図-10に橋軸方向、図-11に直角方向のレーリー減衰を示す。

橋軸方向に関しては、刺激係数の高い2次モード、5次モードを選択、また直角方向に関しても同様に、刺激係数の高い1次モード、4次モードを選択した。

表-8 応答せん断力照査

タイプⅠせん断力(KN)	橋軸方向					直角方向				
	せん断耐力	最大応答値	比率	判定		せん断耐力	最大応答値	比率	判定	
P1	上端部	858.9	347.2	0.40	OK	858.9	278.8	0.32	OK	
	下端部	858.9	373.4	0.43	OK	858.9	299.5	0.35	OK	
P2	上端部	831.9	185.7	0.22	OK	831.9	164.3	0.20	OK	
	下端部	831.9	214.5	0.26	OK	831.9	186.8	0.22	OK	
P3	上端部	858.9	214.6	0.25	OK	858.9	278.8	0.32	OK	
	下端部	858.9	245.6	0.29	OK	858.9	304.0	0.35	OK	
タイプⅡせん断力(KN)	橋軸方向					直角方向				
	せん断耐力	最大応答値	比率	判定		せん断耐力	最大応答値	比率	判定	
P1	上端部	917.7	675.8	0.74	OK	917.7	555.6	0.61	OK	
	下端部	917.7	714.6	0.78	OK	917.7	576.9	0.63	OK	
P2	上端部	881.7	363.6	0.41	OK	881.7	303.3	0.34	OK	
	下端部	881.7	407.9	0.46	OK	881.7	323.8	0.37	OK	
P3	上端部	917.7	409.3	0.45	OK	917.7	548.1	0.60	OK	
	下端部	917.7	456.3	0.50	OK	917.7	586.1	0.64	OK	

注)モデル図の左からP1、P2、P3

表-9 応答回転角照査

タイプⅠ曲げモーメント(KNm) 回転	橋軸方向					直角方向				
	最大応答値	降伏M	応答値/降伏M	判定		最大応答値	許容回転角	応答値/許容角	判定	
P1	上端部	529.3	1353.2	0.39	線形	0.000557	0.004580	0.12	OK	
	下端部	581.2	1365.4	0.43	線形	0.000819	0.005261	0.12	OK	
P2	上端部	335.5	679.3	0.49	線形	0.000608	0.006814	0.09	OK	
	下端部	342.1	693.1	0.49	線形	0.000619	0.007460	0.08	OK	
P3	上端部	404.1	1353.3	0.30	線形	0.000430	0.004595	0.09	OK	
	下端部	444.4	1367.4	0.33	線形	0.000478	0.005260	0.09	OK	
タイプⅡ曲げモーメント(KNm) 回転	橋軸方向					直角方向				
	最大応答値	降伏M	応答値/降伏M	判定		最大応答値	許容回転角	応答値/許容角	判定	
P1	上端部	1024.1	1352.4	0.76	線形	0.001078	0.012071	0.09	OK	
	下端部	1124.4	1364.4	0.82	線形	0.001197	0.015775	0.08	OK	
P2	上端部	653.5	680.8	0.96	線形	0.001181	0.017887	0.07	OK	
	下端部	680.8	695.0	0.95	線形	0.001195	0.022441	0.05	OK	
P3	上端部	760.3	1352.5	0.56	線形	0.000809	0.012085	0.07	OK	
	下端部	844.0	1366.3	0.62	線形	0.000907	0.015742	0.06	OK	
タイプⅢ曲げモーメント(KNm) 回転	橋軸方向					直角方向				
	最大応答値	降伏M	応答値/降伏M	判定		最大応答値	許容回転角	応答値/許容角	判定	
P1	上端部	439.1	1353.2	0.32	線形	0.000462	0.004580	0.10	OK	
	下端部	453.3	1365.4	0.33	線形	0.000483	0.005261	0.09	OK	
P2	上端部	291.4	679.3	0.43	線形	0.000527	0.006814	0.08	OK	
	下端部	305.5	693.1	0.44	線形	0.000553	0.007460	0.07	OK	
P3	上端部	529.0	1353.3	0.39	線形	0.000563	0.004595	0.12	OK	
	下端部	548.3	1367.4	0.40	線形	0.000590	0.005260	0.11	OK	
タイプⅣ曲げモーメント(KNm) 回転	橋軸方向					直角方向				
	最大応答値	降伏M	応答値/降伏M	判定		最大応答値	許容回転角	応答値/許容角	判定	
P1	上端部	873.5	1352.4	0.65	線形	0.000920	0.012071	0.08	OK	
	下端部	891.4	1364.4	0.65	線形	0.000949	0.015775	0.06	OK	
P2	上端部	535.0	680.8	0.79	線形	0.000967	0.017887	0.05	OK	
	下端部	549.7	695.0	0.79	線形	0.000995	0.022441	0.04	OK	
P3	上端部	1037.3	1352.5	0.77	線形	0.001104	0.012085	0.09	OK	
	下端部	1089.8	1366.3	0.78	線形	0.001150	0.015742	0.07	OK	

注)モデル図の左からP1、P2、P3

表-10 応答塑性率照査

タイプⅠ 塑性率	橋軸方向					判定
	降伏変位(m)	最大応答変位	応答塑性率	許容塑性率		
タイプ1-2-1	0.035	0.042	1.19	4	OK	
タイプ1-2-2	0.034	0.050	1.46	4	OK	
タイプ1-2-3	0.034	0.045	1.34	4	OK	
平均	0.034	0.046	1.33	4	OK	
タイプⅡ 塑性率	橋軸方向					判定
	降伏変位(m)	最大応答変位	応答塑性率	許容塑性率		
タイプ2-2-1	0.034	0.078	2.30	4	OK	
タイプ2-2-2	0.033	0.090	2.69	4	OK	
タイプ2-2-3	0.034	0.094	2.74	4	OK	
平均	0.034	0.087	2.58	4	OK	
タイプⅠ 塑性率	直角方向					判定
	降伏変位(m)	最大応答変位	応答塑性率	許容塑性率		
タイプ1-2-1	線形応答	0.049	1以下	4	OK	
タイプ1-2-2	0.034	0.053	1.58	4	OK	
タイプ1-2-3	線形応答	0.049	1以下	4	OK	
平均	0.034	0.053	1.58	4	OK	
タイプⅡ 塑性率	直角方向					判定
	降伏変位(m)	最大応答変位	応答塑性率	許容塑性率		
タイプ2-2-1	0.050	0.140	2.82	4	OK	
タイプ2-2-2	0.050	0.120	2.41	4	OK	
タイプ2-2-3	0.055	0.149	2.71	4	OK	
平均	0.052	0.137	2.64	4	OK	

表-11 断面力比較

橋軸方向		タイプⅠ		タイプⅡ		タイプⅢ		タイプⅣ	
		フラッシュオーバー 時刻歴	時刻歴/フラッシュオーバー	フラッシュオーバー 時刻歴	時刻歴/フラッシュオーバー	フラッシュオーバー 時刻歴	時刻歴/フラッシュオーバー	フラッシュオーバー 時刻歴	時刻歴/フラッシュオーバー
P1上端	せん断力(KN)	847.41	347.22	0.41	848.85	675.83	0.80		
	曲げモーメント(KNm)	1355.29	529.26	0.39	1354.50	1024.14	0.76		
P1下端	せん断力(KN)	920.58	373.41	0.41	920.024	714.57	0.78		
	曲げモーメント(KNm)	1387.43	581.15	0.42	1386.47	1124.37	0.82		
P2上端	せん断力(KN)	363.02	185.68	0.51	364.10	363.61	1.00		
	曲げモーメント(KNm)	674.49	335.48	0.50	676.05	653.51	0.97		
P2下端	せん断力(KN)	443.32	214.50	0.48	444.40	407.86	0.92		
	曲げモーメント(KNm)	688.23	342.13	0.50	690.31	660.57	0.96		
P3上端	せん断力(KN)	696.89	214.63	0.31	696.22	408.25	0.59		
	曲げモーメント(KNm)	1355.34	404.07	0.30	1354.48	760.28	0.56		
P3下端	せん断力(KN)	784.12	245.59	0.31	783.64	456.30	0.58		
	曲げモーメント(KNm)	1369.37	444.40	0.32	1368.40	844.04	0.62		

注)モデル図の左からP1、P2、P3

(3) 柱のせん断力

最大応答せん断力が応答断面諸元により決定するせん断耐力以下であることを確認した。

表-8 に示すとおり、最大応答値はせん断耐力に対して最大で 80%程度であり、許容値以内に収まっている。

(4) 柱の曲げモーメントと回転角

最大応答曲げモーメントについて、降伏曲げモーメントに対する比率を算出し、応答回転角について許容回転角以内であることを確認した。表-9 に結果を示す。応答値はすべて降伏曲げモーメント以内、つまり線形応答の範囲であることがわかる。これは、想定される地震動に対して十分耐震性能を有しており、先の非線形静的解析の結果を裏付ける結果となっている。

(5) 杭基礎の塑性率

先の非線形静的解析と同様に、杭基礎の塑性率について照査を行った。時刻歴応答解析での塑性率については、杭体が降伏モーメントに達したときの上部構造の慣性力作用位置の変位を降伏変位とし、降伏変位と上

部構造の慣性力作用位置の最大応答変位との比とした。表-10 に結果を示す。非線形時刻歴応答解析における塑性率もすべて許容値以内に収まっている。これは非線形静的解析においても同様の結果を示しており、両方の結果を踏まえて、想定される地震動に対しては、杭基礎は許容塑性率 4 以下の応答であり、エネルギー吸収を期待してもよいと判断した。柱の解析結果においても、柱に対する応答に着目すると、線形範囲の応答であり、これは杭基礎の塑性化によるエネルギー吸収の効果が出ていると評価しても良いのではないかとと思われる。

6. 非線形静的解析と非線形時刻歴応答解析の結果比較

(1) 断面力の比較

ここでは断面力の結果を比較する。なお、橋軸方向の結果についてのみ比較をしている。表-11 に示すとおり、タイプⅠ、タイプⅡともに非線形時刻歴応答解析の結果が非線形静的解析での結果の 30~100%程度と

表-12 塑性率比較

橋軸方向	タイプⅠ			タイプⅡ		
	フラッシュオーバー パー	時刻歴	時刻歴／ フラッシュオーバー	フラッシュオーバー パー	時刻歴	時刻歴／ フラッシュオーバー
タイプ1-2-1	1.20	1.19	0.99	3.48	2.26	0.65
タイプ1-2-2		1.46	1.22		2.69	0.77
タイプ1-2-3		1.34	1.12		2.74	0.79
平均		1.33	1.11		2.56	0.74
直角方向	タイプⅠ			タイプⅡ		
	フラッシュオーバー パー	時刻歴	時刻歴／ フラッシュオーバー	フラッシュオーバー パー	時刻歴	時刻歴／ フラッシュオーバー
タイプ2-2-1	1.03	線形応答	-	2.77	2.82	0.81
タイプ2-2-2		1.56	1.51		2.41	0.69
タイプ2-2-3		線形応答	-		2.71	0.78
平均		-	-		2.65	0.76

小さめになっている。これは非線形時刻歴応答解析での結果が線形応答範囲内であるためである。また、タイプⅠの応答よりも、タイプⅡ地震波のほうがより整合が取れており、タイプⅠに比し支配的である結果となっている。

(2) 杭基礎塑性率の比較

非線形静的解析結果よりエネルギー一定則に基づいて算出した塑性率と、非線形時刻歴応答解析での応答塑性率を比較した。橋軸方向、直角方向両方の結果とし、非線形静的解析での塑性率は、減衰定数別補正係数を見込まない場合の塑性率としている。表-12 に結果を示す。

表-12 のとおり、非線形時刻歴応答解析での結果は非線形静的解析に対して、タイプⅠ地震動に対しては時刻歴応答解析が大きめに評価しているのに対して、タイプⅡ地震動では時刻歴応答解析の場合の塑性率が 20%程度小さく評価されている。これは、想定されるタイプⅡ地震動に対して構造物の耐力が十分であることを示している。

7.まとめ

今回解析を行った構造物は、杭基礎先行破壊であり、杭基礎が非線形応答することを前提として塑性率照査を行った。その結果、非線形静的解析、非線形時刻歴応答解析ともに許容塑性率以内であること、また非線形時刻歴応答解析の結果、主たる塑性ヒンジが発生すると思われた柱の応答は線形応答範囲内であり、総じて耐震安全性は確保できていると判断した。

8.今後の検討課題

今回は、地震時の挙動が複雑になると予想された構造物に対して、非線形静的解析および非線形時刻歴応答解析によって照査を行った。メインとして非線形静的解析、その結果の検証として非線形時刻歴応答解析を用いた。特に非線形時刻歴応答解析においては、地盤ばねに非線形特性を考慮した。しかし、今回行ったモ

デル化以外に、地盤を平面ひずみ要素にモデル化した FEM 時刻歴応答解析による検討や、構造物地点での入力地震波を作成し解析に使用する場合や、また部材非線形ではなく、材料非線形特性でのファイバー要素モデルによる解析などがあり、これらの検討を行った場合に、どのような結果になるのかを今後の検討課題とする。

参考文献

- 1) (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
- 2) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編、平成 8 年 12 月
- 3) (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
- 4) (社)日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料、平成 10 年 1 月
- 5) (財)土木研究センター:平成 9・10 年耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書
- 6) (社)地盤工学会:新編 土と基礎の設計計算演習、平成 12 年 11 月
- 7) (社)地盤工学会:地盤・基礎構造物の耐震設計、平成 13 年 1 月
- 8) (株)アーク情報システム:TDAPⅢ理論説明書