

### 例題3

#### 3-1 検討計算

3次元PCラーメン曲線橋の解析例題である。

検討計算は、表3. 1. 1に示すとおりとした。

表3. 1. 1 検討計算

検討計算	検討内容
動的解析	・動的非線形解析(タイプⅡ)

### 3-2 解析モデル

本例題は、図3. 2. 1に示す3次元PCラーメン橋を対象とした解析例を示す。

部材のモデル化としては、上部構造および下部構造部分を3次元骨組み構造にモデル化した。

骨組みモデルの節点番号、要素番号は、図3. 2. 2に示すとおりとした。

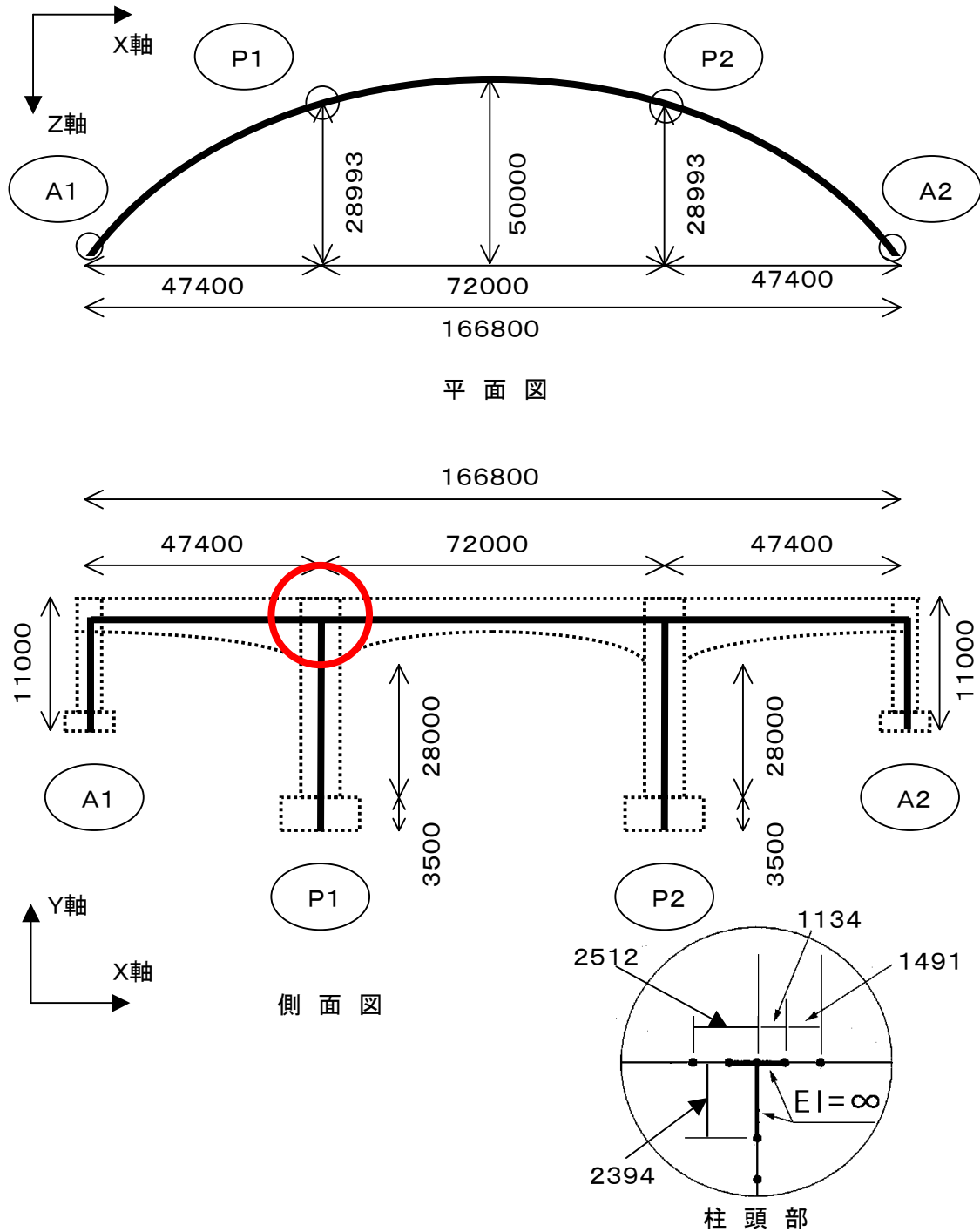
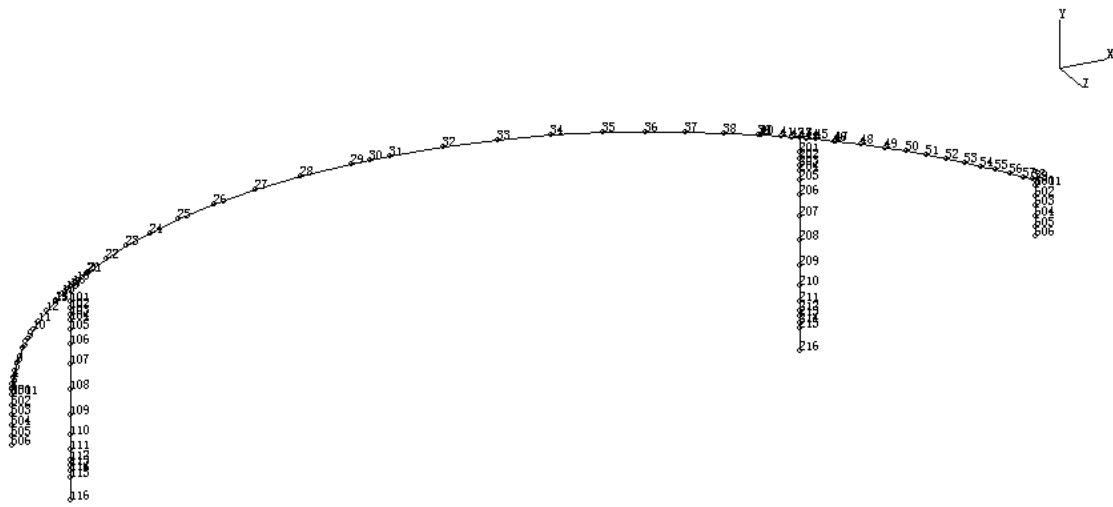
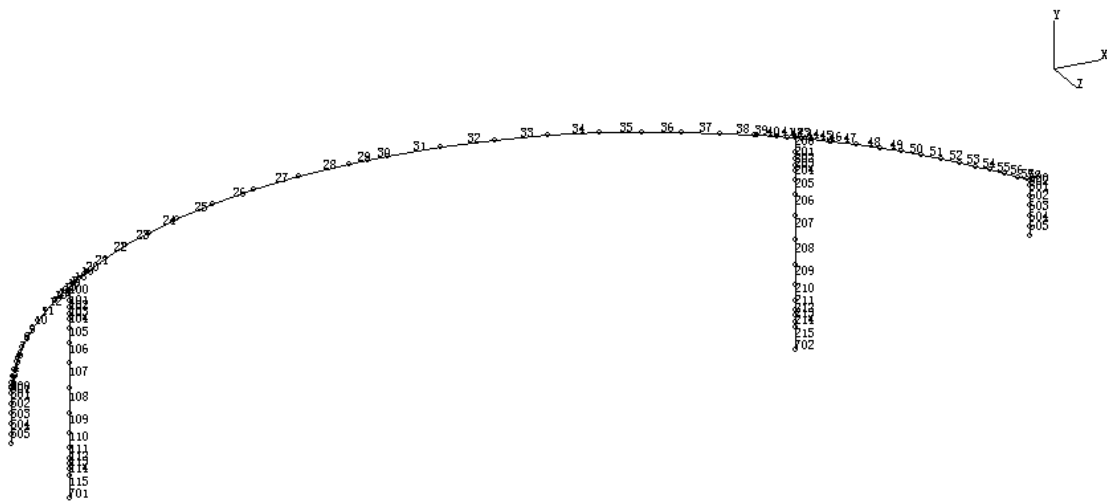


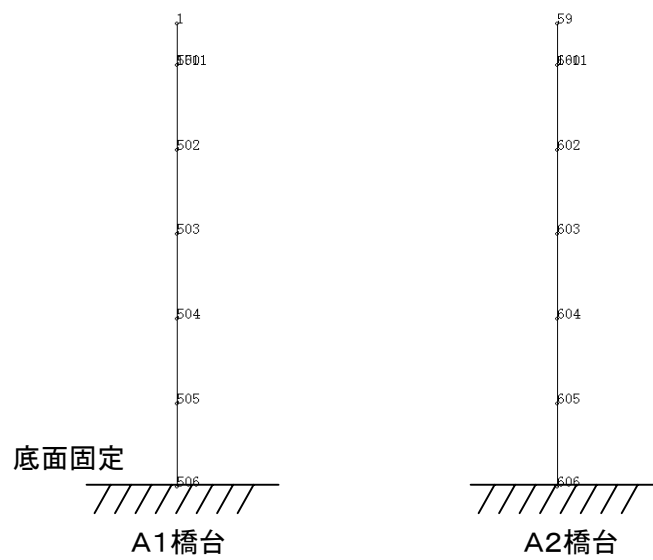
図3. 2. 1 3次元骨組み構造モデル



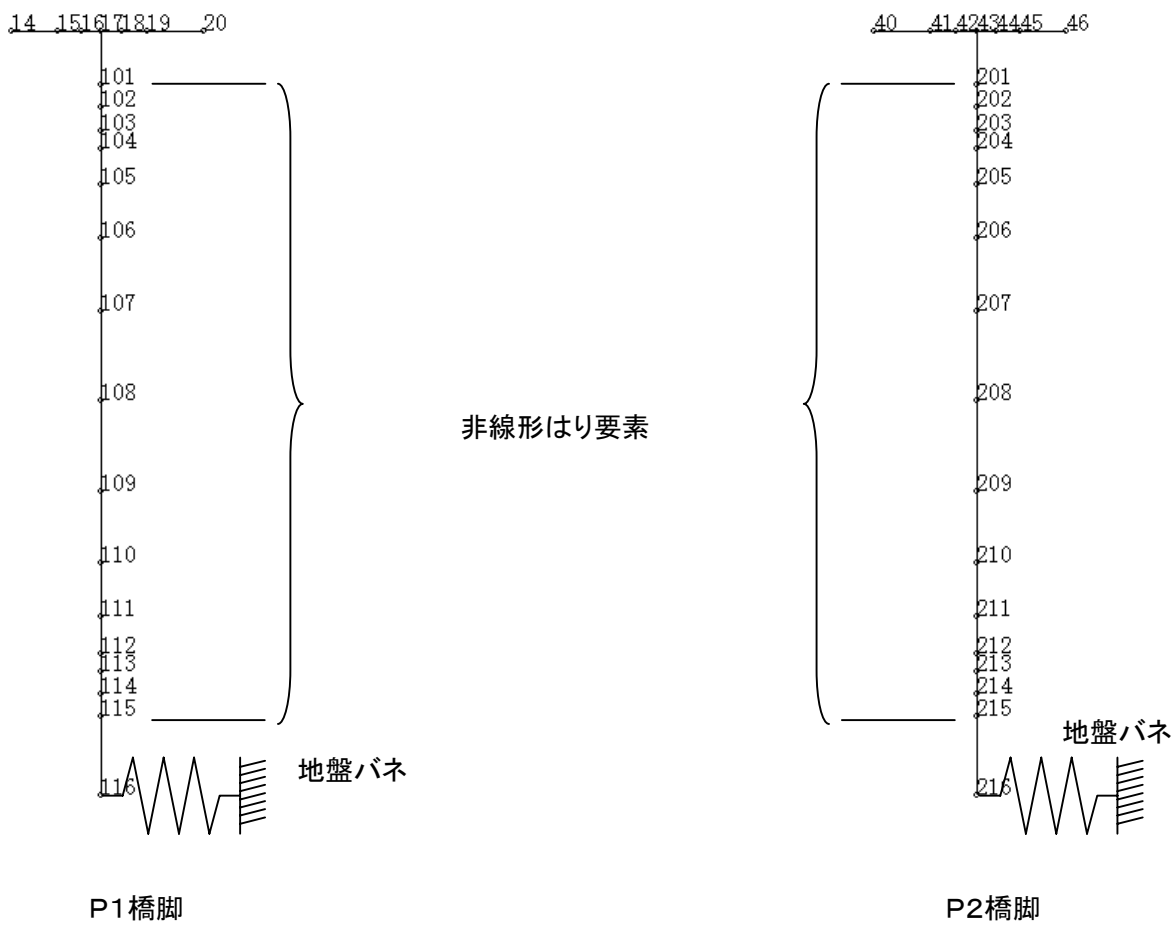
(a) 節点番号図



(b) 要素番号図



(c) A1橋台、A2橋台節点番号図



(d) P1、P2橋脚節点番号図

図3. 2. 2 節点、要素番号図

### 3-3 解析諸元

上部構造 : 線形部材でモデル化した。(表3. 3. 6参照)

下部構造 : P1、P2橋脚は、非線形部材でモデル化し、A1、A2橋台は、線形部材でモデル化した。(表3. 3. 7参照)

非線形梁要素は、下に示すように、トリリニア型のスケルトンカーブとし、剛性劣化型トリリニア(修正武田)でモデル化した。

非線形特性としては、表3. 3. 8に示すように軸力変動を考慮した。

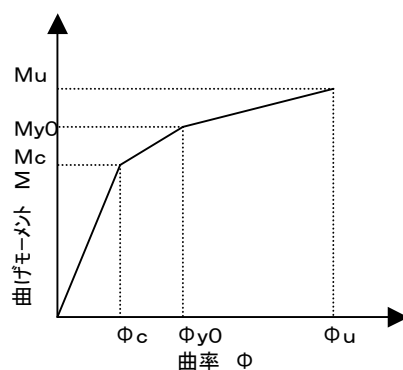
ひび割れ面、降伏面に関しては、図3. 3. 1に示す。

基礎 : 表3. 3. 2に示す。

支承条件 : 表3. 3. 3に示す。

材料減衰 : 表3. 3. 4に示す。

使用材料 : 表3. 3. 1に示す。



非線形梁要素の曲げモーメント-曲率の関係

表3. 3. 5に各節点の座標値および重量を示す。

表3. 3. 1 上部構造、下部構造の使用材料

	コンクリート kgf/cm <sup>2</sup>	鉄筋	ヤング率 tf/m <sup>2</sup>	せん断弾性係数 tf/m <sup>2</sup>
上部構造	400	SD345	3.10E+06	1.35E+06
下部構造	240	SD345	2.50E+06	1.09E+06

表3. 3. 2 地盤ばね定数

			P1, P2橋脚
部材端節点番号			116,216
水平バネ(橋軸方向)	$K_H$	tf/m	2.227E+05
水平バネ(直角方向)	$K_H$	tf/m	2.014E+05
鉛直バネ	$K_V$	tf/m	6.679E+05
回転バネ(直角方向軸まわり)	$K_\theta$	tf・m/rad	1.225E+07
回転バネ(橋軸方向軸まわり)	$K_\theta$	tf・m/rad	7.482E+06

A1、A2橋台部は、橋脚下端部固定

表3. 3. 3 支承部のモデル化

	橋軸方向	橋軸 直角方向	鉛直方向	橋軸回り	橋軸 直角回り	鉛直 軸回り
A1、A2橋台部	自由	拘束	拘束	拘束	自由	自由

表3. 3. 4 各構造要素の減衰定数

	減衰定数
上部構造	0.03
下部構造	0.02
基礎	0.10

表3.3.5 各節点の座標値および重量

節点番号 No.	橋軸方向 X(m)	鉛直方向 Y(m)	橋軸 直角方向 Z(m)	重量 W(tf)	節点番号 No.	橋軸方向 X(m)	鉛直方向 Y(m)	橋軸 直角方向 Z(m)	重量 W(tf)
1	0.000	0.000	0.000	58.300	101	23.974	-2.394	-28.993	30.000
2	0.282	0.000	-0.525	50.660	102	23.974	-3.394	-28.993	60.000
3	1.015	0.000	-1.850	80.150	103	23.974	-4.394	-28.993	54.000
4	2.164	0.000	-3.834	86.300	104	23.974	-5.194	-28.993	72.000
5	3.469	0.000	-5.960	80.390	105	23.974	-6.794	-28.993	120.000
6	4.846	0.000	-8.076	78.280	106	23.974	-9.194	-28.993	168.000
7	6.406	0.000	-10.333	82.040	107	23.974	-12.394	-28.993	216.000
8	8.178	0.000	-12.736	95.900	108	23.974	-16.394	-28.993	240.000
9	10.195	0.000	-15.292	90.180	109	23.974	-20.394	-28.993	216.000
10	12.192	0.000	-17.655	89.470	110	23.974	-23.594	-28.993	168.000
11	14.436	0.000	-20.134	94.600	111	23.974	-25.994	-28.993	120.000
12	16.960	0.000	-22.723	100.850	112	23.974	-27.594	-28.993	72.000
13	19.799	0.000	-25.414	55.880	113	23.974	-28.394	-28.993	54.000
14	20.015	0.000	-25.609	38.690	114	23.974	-29.394	-28.993	60.000
15	22.042	0.000	-27.388	52.500	115	23.974	-30.394	-28.993	740.500
16	23.113	0.000	-28.288	31.360	116	23.974	-33.894	-28.993	710.500
17	23.974	0.000	-28.993	275.680					
18	24.861	0.000	-29.700	31.360	201	142.826	-2.394	-28.993	30.000
19	26.039	0.000	-30.614	52.540	202	142.826	-3.394	-28.993	60.000
20	28.527	0.000	-32.449	38.740	203	142.826	-4.394	-28.993	54.000
21	28.815	0.000	-32.653	56.130	204	142.826	-5.194	-28.993	72.000
22	33.088	0.000	-35.504	101.470	205	142.826	-6.794	-28.993	120.000
23	37.840	0.000	-38.300	95.470	206	142.826	-9.194	-28.993	168.000
24	43.087	0.000	-40.976	90.580	207	142.826	-12.394	-28.993	216.000
25	48.832	0.000	-43.455	99.410	208	142.826	-16.394	-28.993	240.000
26	55.981	0.000	-45.937	90.600	209	142.826	-20.394	-28.993	216.000
27	63.682	0.000	-47.921	83.240	210	142.826	-23.594	-28.993	168.000
28	71.816	0.000	-49.288	79.700	211	142.826	-25.994	-28.993	120.000
29	80.219	0.000	-49.946	54.250	212	142.826	-27.594	-28.993	72.000
30	83.400	0.000	-50.000	37.410	213	142.826	-28.394	-28.993	54.000
31	86.581	0.000	-49.946	54.250	214	142.826	-29.394	-28.993	60.000
32	94.984	0.000	-49.288	79.700	215	142.826	-30.394	-28.993	740.500
33	103.118	0.000	-47.921	83.240	216	142.826	-33.894	-28.993	710.500
34	110.819	0.000	-45.937	90.600					
35	117.968	0.000	-43.455	99.410	501	0.000	-0.800	0.000	40.14
36	123.713	0.000	-40.976	90.580	502	0.000	-2.425	0.000	56.19
37	128.960	0.000	-38.300	95.470	503	0.000	-4.050	0.000	56.19
38	133.712	0.000	-35.504	101.470	504	0.000	-5.675	0.000	56.19
39	137.985	0.000	-32.653	56.130	505	0.000	-7.300	0.000	90.06
40	138.273	0.000	-32.449	38.740	506	0.000	-8.900	0.000	124.80
41	140.761	0.000	-30.614	52.540					
42	141.939	0.000	-29.700	31.360	601	166.800	-0.800	0.000	40.14
43	142.826	0.000	-28.993	275.680	602	166.800	-2.425	0.000	56.19
44	143.687	0.000	-28.288	31.360	603	166.800	-4.050	0.000	56.19
45	144.758	0.000	-27.388	52.500	604	166.800	-5.675	0.000	56.19
46	146.785	0.000	-25.609	38.690	605	166.800	-7.300	0.000	90.06
47	147.001	0.000	-25.414	55.883	606	166.800	-8.900	0.000	124.80
48	149.840	0.000	-22.723	100.854					
49	152.364	0.000	-20.134	94.597	橋台と桁との結合用節点				
50	154.608	0.000	-17.655	89.468	1501	0.000	-0.800	0.000	
51	156.605	0.000	-15.292	90.180	1601	166.800	-0.800	0.000	
52	158.622	0.000	-12.736	95.900					
53	160.394	0.000	-10.333	82.040					
54	161.954	0.000	-8.076	78.280					
55	163.331	0.000	-5.960	80.390					
56	164.636	0.000	-3.834	86.300					
57	165.785	0.000	-1.850	80.150					
58	166.518	0.000	-0.525	50.660					
59	166.800	0.000	0.000	58.300					

表3.3.6 動的解析に用いる上部構造部材の断面定数

要素番号 No.	部材端節点番号		断面積 A(m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント		ねじり定数 J(m <sup>4</sup> )
	I端	J端		Iz(m <sup>4</sup> )	Iy(m <sup>4</sup> )	
1	1	2	8.23	7.32	49.87	13.33
2	2	3	7.81	6.98	48.73	12.88
3	3	4	6.82	5.91	45.91	11.23
4	4	5	6.25	5.18	44.24	10.02
5	5	6	6.26	5.26	10.99	10.14
6	6	7	6.41	5.64	12.13	10.74
7	7	8	6.96	2.59	12.81	12.90
8	8	9	7.81	3.29	14.09	16.45
9	9	10	8.49	4.32	16.01	19.99
10	10	11	8.98	5.75	17.24	23.73
11	11	12	9.66	7.73	58.41	28.64
12	12	13	10.41	24.75	61.94	34.63
13	13	14	10.74	28.07	63.55	38.00
14	14	15	10.91	30.57	64.59	40.46
15	15	16	11.05	32.85	65.53	42.69
16	16	17	∞	∞	∞	∞
17	17	18	∞	∞	∞	∞
18	18	19	11.05	12.31	65.53	42.69
19	19	20	10.92	11.62	64.68	40.68
20	20	21	10.77	10.45	63.74	38.46
21	21	22	10.46	8.79	62.28	35.39
22	22	23	9.75	6.84	16.32	29.86
23	23	24	9.09	5.15	15.32	25.26
24	24	25	8.63	4.06	15.14	21.74
25	25	26	7.97	3.68	14.32	18.28
26	26	27	7.11	3.06	13.35	14.61
27	27	28	6.56	6.73	12.66	12.34
28	28	29	6.40	6.33	12.3	11.74
29	29	30	6.39	6.26	12.29	11.63
30	30	31	6.39	6.26	12.29	11.63
31	31	32	6.40	6.33	12.3	11.74
32	32	33	6.56	6.73	12.66	12.34
33	33	34	7.11	3.07	13.35	14.61
34	34	35	7.97	3.71	14.32	18.28
35	35	36	8.63	4.09	15.14	21.74
36	36	37	9.09	5.06	15.32	25.26
37	37	38	9.75	6.84	16.32	29.86
38	38	39	10.46	8.79	62.28	35.39
39	39	40	10.77	10.45	63.74	38.46
40	40	41	10.92	11.62	64.68	40.68
41	41	42	11.05	12.31	65.53	42.69
42	42	43	∞	∞	∞	∞
43	43	44	∞	∞	∞	∞
44	44	45	11.05	32.85	65.53	42.69
45	45	46	10.91	30.57	64.59	40.46
46	46	47	10.74	28.07	63.55	38.00
47	47	48	10.41	24.75	61.94	34.63
48	48	49	9.66	7.73	58.41	28.64
49	49	50	8.98	5.75	17.24	23.73
50	50	51	8.49	4.32	16.01	19.99
51	51	52	7.81	3.29	14.09	16.45
52	52	53	6.96	2.59	12.81	12.9
53	53	54	6.41	5.64	12.13	10.74
54	54	55	6.26	5.26	10.99	10.14
55	55	56	6.25	5.18	44.24	10.02
56	56	57	6.82	5.91	45.91	11.23
57	57	58	7.81	6.98	48.73	12.88
58	58	59	8.23	7.32	49.87	13.33



表3. 3. 7 動的解析に用いる下部構造部材の断面定数

要素番号 No.	部材端節点番号		断面積 A(m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント		ねじり定数 J(m <sup>4</sup> )
	I端	J端		Iz(m <sup>4</sup> )	Iy(m <sup>4</sup> )	
100	17	101	∞	∞	∞	∞
101	101	102	24.00	37.699	81.568	66.90
102	102	103	24.00	37.699	81.568	66.90
103	103	104	24.00	37.699	81.568	66.90
104	104	105	24.00	37.734	81.568	66.90
105	105	106	24.00	37.745	81.568	66.90
106	106	107	24.00	37.734	81.568	66.90
107	107	108	24.00	37.701	81.568	66.90
108	108	109	24.00	37.722	81.568	66.90
109	109	110	24.00	37.753	81.568	66.90
110	110	111	24.00	37.743	81.568	66.90
111	111	112	24.00	37.752	81.568	66.90
112	112	113	24.00	37.752	81.568	66.90
113	113	114	24.00	37.752	81.568	66.90
114	114	115	24.00	37.752	81.568	66.90
115	115	116	162.40	2652.50	1821.05	3346.48
200	43	201	∞	∞	∞	∞
201	201	202	24.00	37.699	81.568	66.90
202	202	203	24.00	37.699	81.568	66.90
203	203	204	24.00	37.699	81.568	66.90
204	204	205	24.00	37.734	81.568	66.90
205	205	206	24.00	37.745	81.568	66.90
206	206	207	24.00	37.734	81.568	66.90
207	207	208	24.00	37.701	81.568	66.90
208	208	209	24.00	37.722	81.568	66.90
209	209	210	24.00	37.753	81.568	66.90
210	210	211	24.00	37.743	81.568	66.90
211	211	212	24.00	37.752	81.568	66.90
212	212	213	24.00	37.752	81.568	66.90
213	213	214	24.00	37.752	81.568	66.90
214	214	215	24.00	37.752	81.568	66.90
215	215	216	162.40	2652.50	1821.05	3346.48
500	1	1501	∞	∞	∞	∞
501	501	502	19.76	5.94	178.10	20.97
502	502	503	19.76	5.94	178.10	20.97
503	503	504	19.76	5.94	178.10	20.97
504	504	505	19.76	5.94	178.10	20.97
505	505	506	62.40	187.2	562.43	440.30
600	59	1601	∞	∞	∞	∞
601	601	602	19.76	5.94	178.10	20.97
602	602	603	19.76	5.94	178.10	20.97
603	603	604	19.76	5.94	178.10	20.97
604	604	605	19.76	5.94	178.10	20.97
605	605	606	62.40	187.2	562.43	440.30

表3.3.8 動的解析に用いる非線形特性

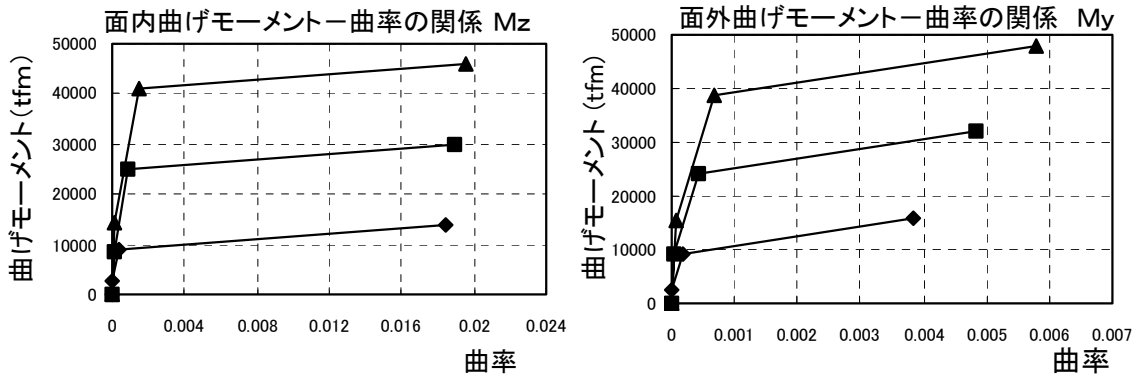
下部構造各部材の断面定数、曲げモーメントー曲率の関係

タイプⅡの地震動に対する設計

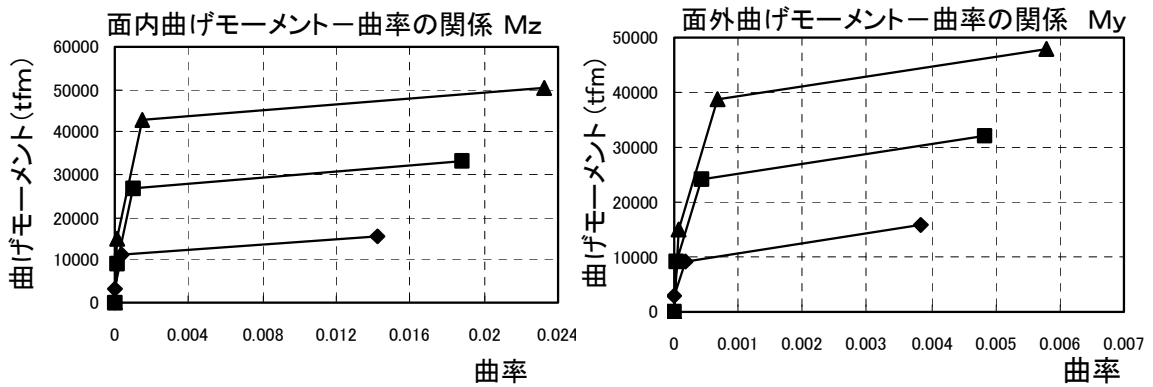
要素番号 No.		軸力 N (tf)	Z軸回り曲げモーメント					
P1橋脚	P2橋脚		第1折点		第2折点		第3折点	
			$\phi_c$ (1/m)	$M_c$ (tf・m)	$\phi_{y0}$ (1/m)	$M_{y0}$ (tf・m)	$\phi_u$ (1/m)	$M_u$ (tf・m)
101	201	0.0	0.0000265	2500.0	0.0003515	9000.0	0.0184000	14000.0
~	~	2000.0	0.0000902	8500.0	0.0009151	25000.0	0.0189636	30000.0
105	205	4000.0	0.0001538	14500.0	0.0014787	41000.0	0.0195272	46000.0
106	206	0.0	0.0000318	3000.0	0.0004208	11000.0	0.0142804	15666.7
~	~	3000.0	0.0000954	9000.0	0.0009707	27000.0	0.0187901	33000.0
110	210	6000.0	0.0001591	15000.0	0.0015205	43000.0	0.0232997	50333.3
111	211	0.0	0.0000353	3333.3	0.0004200	11370.4	0.0159322	17185.2
~	~	3700.0	0.0001007	9500.0	0.0010102	28500.0	0.0183502	35000.0
114	214	7000.0	0.0001589	15000.0	0.0015365	43777.8	0.0205067	50888.9

要素番号 No.		軸力 N (tf)	Y軸回り曲げモーメント					
P1橋脚	P2橋脚		第1折点		第2折点		第3折点	
			$\phi_c$ (1/m)	$M_c$ (tf・m)	$\phi_{y0}$ (1/m)	$M_{y0}$ (tf・m)	$\phi_u$ (1/m)	$M_u$ (tf・m)
101	201	0.0	0.0000130	2647.0	0.0001852	9333.3	0.0038421	16000.0
~	~	2000.0	0.0000441	9000.0	0.0004305	24000.0	0.0048187	32000.0
105	205	4000.0	0.0000753	15353.0	0.0006758	38666.7	0.0057954	48000.0
106	206	0.0	0.0000147	3000.0	0.0001778	9333.3	0.0038347	16000.0
~	~	3000.0	0.0000441	9000.0	0.0004305	24000.0	0.0048187	32000.0
110	210	6000.0	0.0000736	15000.0	0.0006831	38666.7	0.0058027	48000.0
111	211	0.0	0.0000155	3157.9	0.0001640	8925.9	0.0038006	15555.6
~	~	3700.0	0.0000441	9000.0	0.0004305	24000.0	0.0048187	32000.0
114	214	7000.0	0.0000697	14210.5	0.0006681	37444.4	0.0057268	46666.7

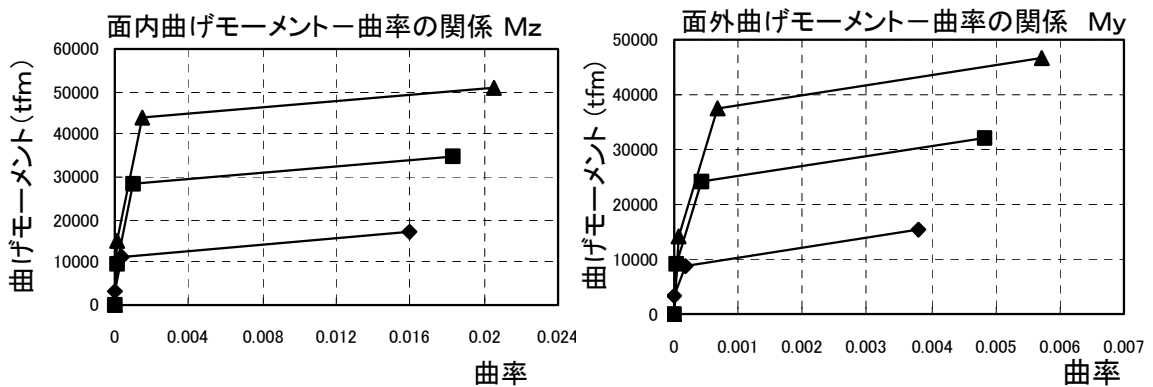
要素番号 (P1橋脚: 101~105、P2橋脚: 201~205)



要素番号 (P1橋脚: 106~110、P2橋脚: 206~210)

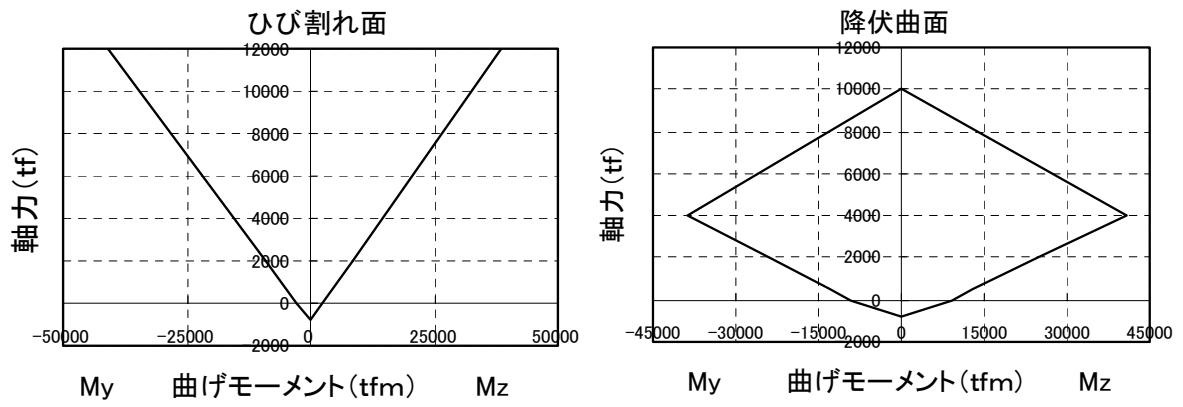


要素番号 (P1橋脚: 111~114、P2橋脚: 211~214)

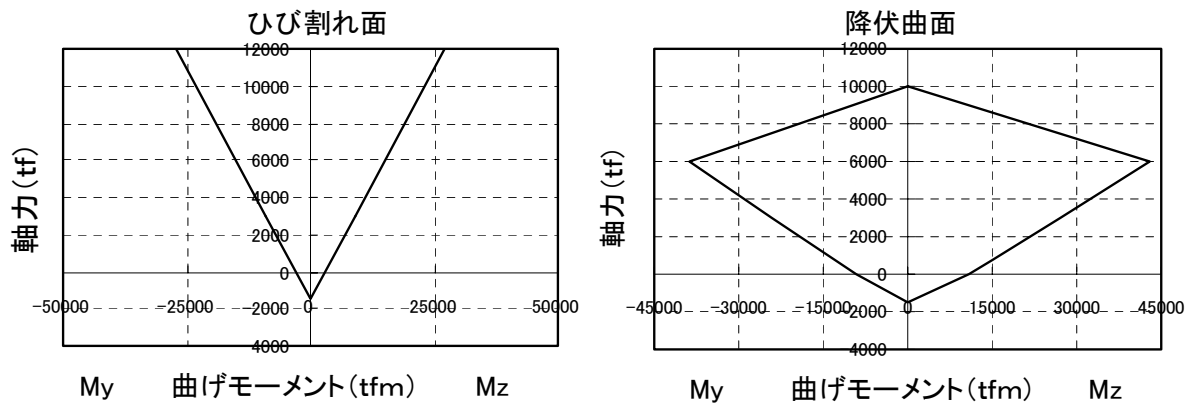


(a) 橋脚の曲げモーメント-曲率

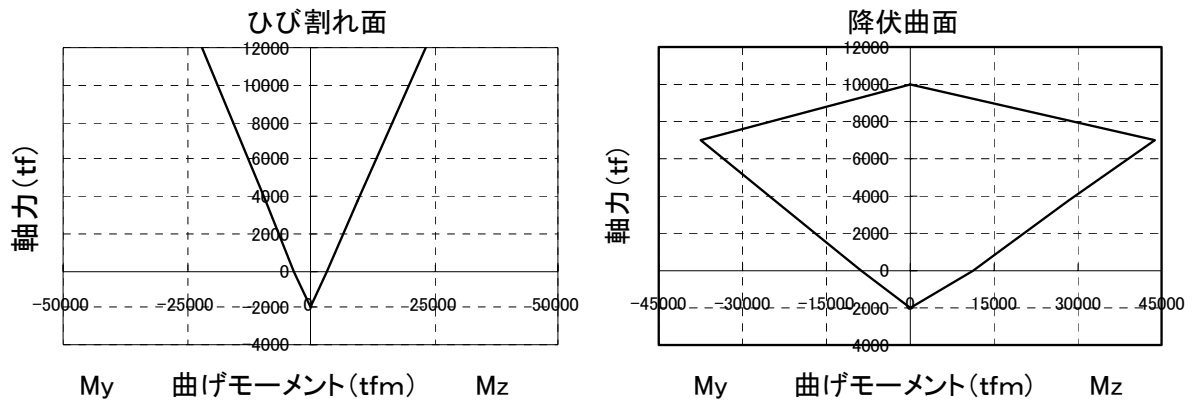
要素番号(P1橋脚:101~105、P2橋脚:201~205)



要素番号(P1橋脚:106~110、P2橋脚:206~210)



要素番号(P1橋脚:111~114、P2橋脚:211~214)



(b) 橋脚のひび割れ面、降伏面

図3. 3. 1 橋脚の非線形特性

### 3-4 動的解析結果

#### (1)固有値解析結果

図3. 4. 1に橋軸方向の固有値解析結果によるモード図を、表3. 4. 1に固有値解析結果の一覧を示す。

動的解析では、レーリー減衰を用いた。

レーリー減衰の係数に関しては、図3. 4. 2に示すように、卓越する振動モードから算出した。

#### (2)初期断面力

地震動が作用する前の初期断面力として自重のみ考慮した。(図3. 4. 3参照)

#### (3)入力地震波

入力地震波としては、タイプⅡ-I-1を採用した。(図3. 4. 4参照)

入力方向は、図3. 4. 5に示すようにP1橋脚の橋軸方向に入力した。

#### (4)動的解析結果

解析手法 : 非線形直接積分法

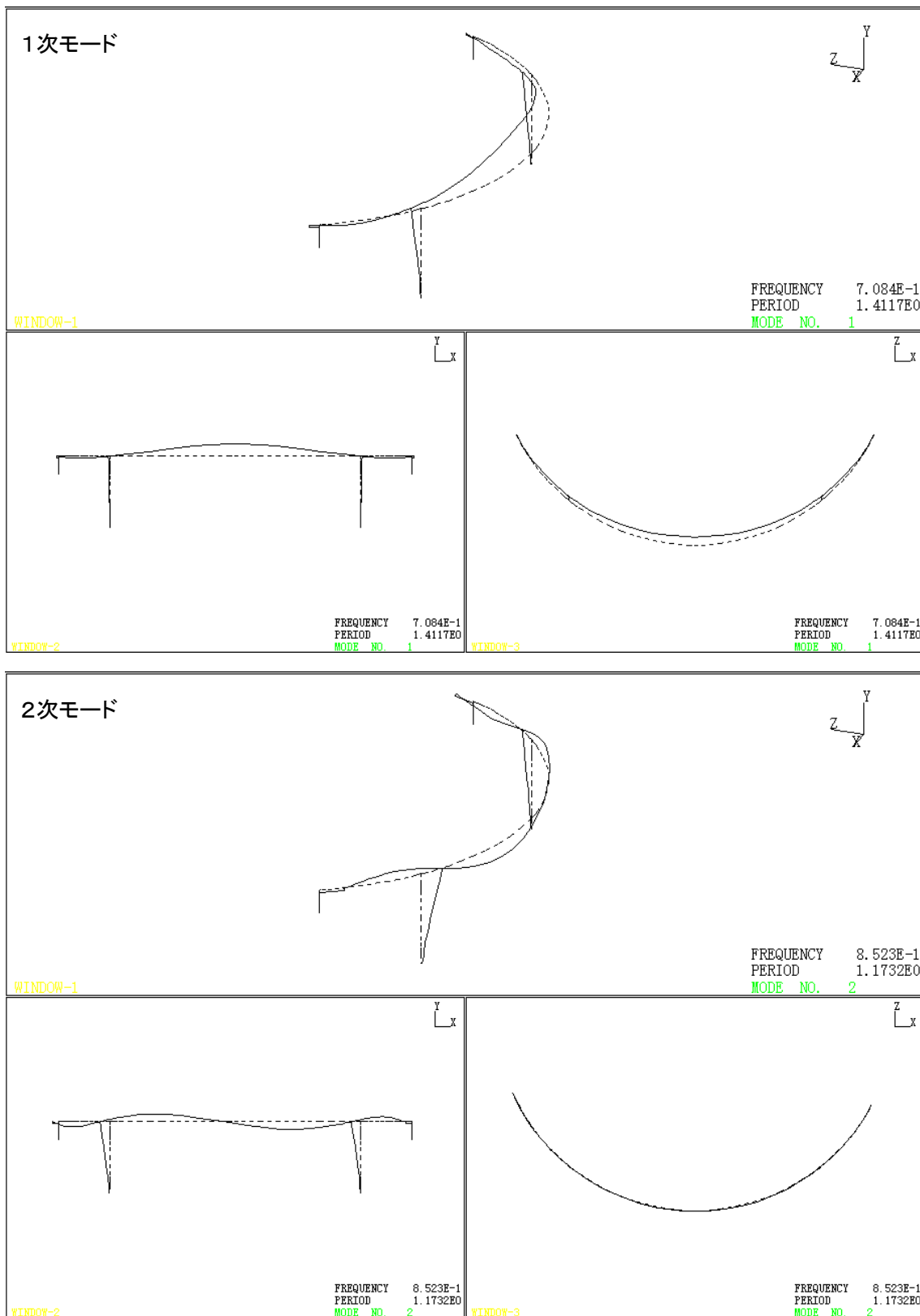
数値積分法 : Newmark  $\beta$  法 ( $\beta = 1/3$ )

積分時間間隔 : 0. 002秒

減衰種類 : レーリー減衰(レーリー減衰の係数に関しては、図3. 4. 2参照)

動的解析結果は、図3. 4. 6に示す。

## 固有値解析結果



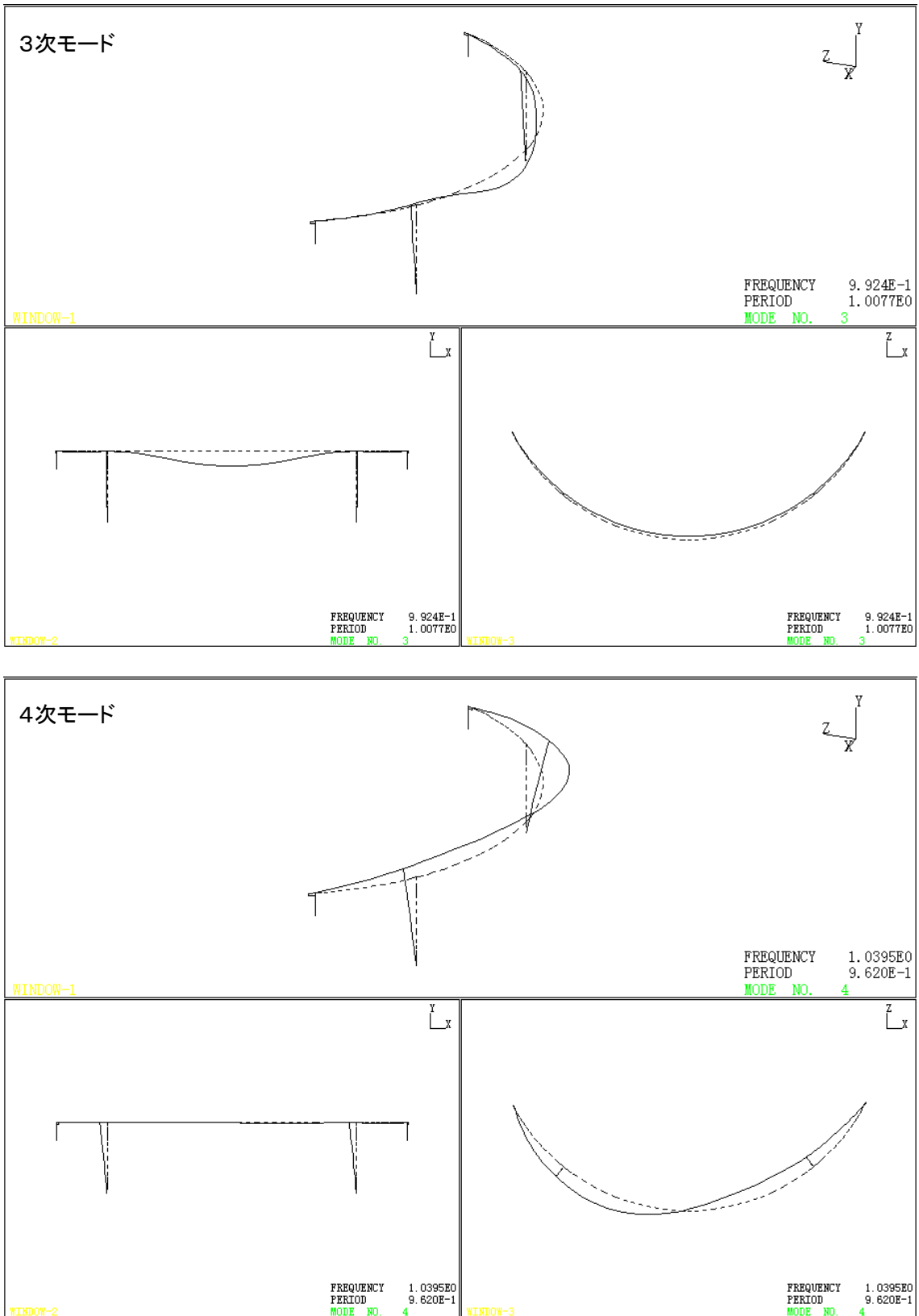


図3.4.1 固有振動モード

表3. 4. 1 固有値解析結果

モード	振動数 (1/sec)	周期 (sec)	有効質量比			ひずみエネルギー比例減衰
			X	Y	Z	
1	0.7084	1.4117	0.000	0.020	0.379	0.051999
2	0.8524	1.1732	0.339	0.000	0.000	0.055851
3	0.9924	1.0077	0.000	0.063	0.217	0.040553
4	1.0395	0.9620	0.213	0.000	0.000	0.059263
5	1.7665	0.5661	0.000	0.001	0.050	0.040008
6	2.1172	0.4723	0.038	0.000	0.000	0.032874
7	3.2563	0.3071	0.055	0.000	0.000	0.030122
8	3.4869	0.2868	0.000	0.035	0.041	0.039518
9	3.8293	0.2611	0.047	0.000	0.000	0.043483
10	4.3794	0.2283	0.000	0.320	0.007	0.041761
11	4.8928	0.2044	0.000	0.004	0.017	0.037761
12	5.0324	0.1987	0.084	0.000	0.000	0.082358
13	5.0482	0.1981	0.000	0.000	0.108	0.075851
14	5.4397	0.1838	0.086	0.000	0.000	0.073513
15	5.5044	0.1817	0.000	0.075	0.102	0.071459
16	6.2411	0.1602	0.026	0.000	0.000	0.06952
17	6.6679	0.1500	0.000	0.381	0.003	0.078344
18	7.0994	0.1409	0.017	0.000	0.000	0.032932
19	7.6258	0.1311	0.002	0.000	0.000	0.047269
20	8.7708	0.1140	0.000	0.000	0.001	0.037495

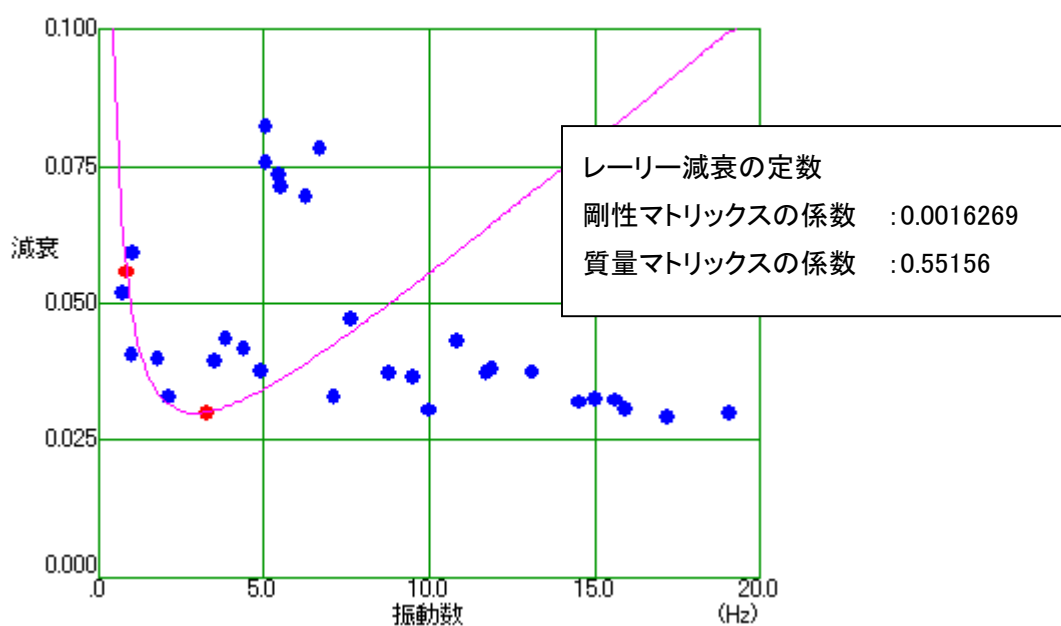
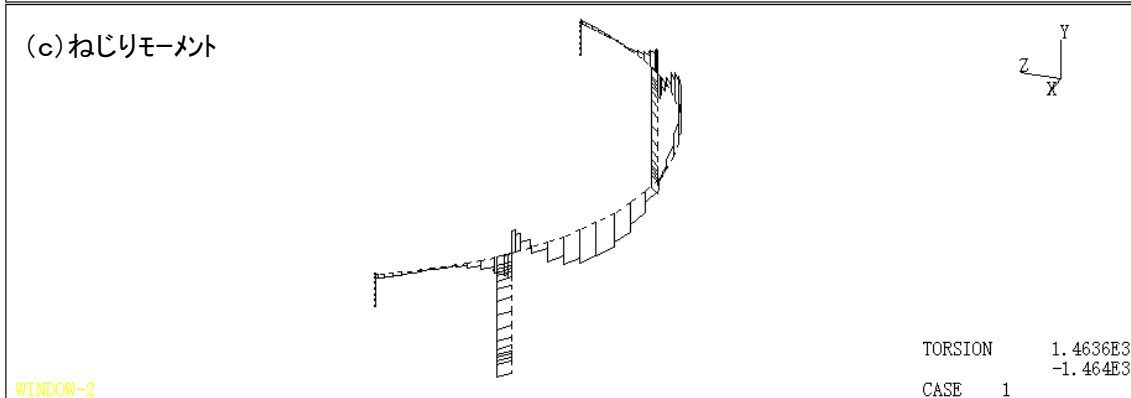
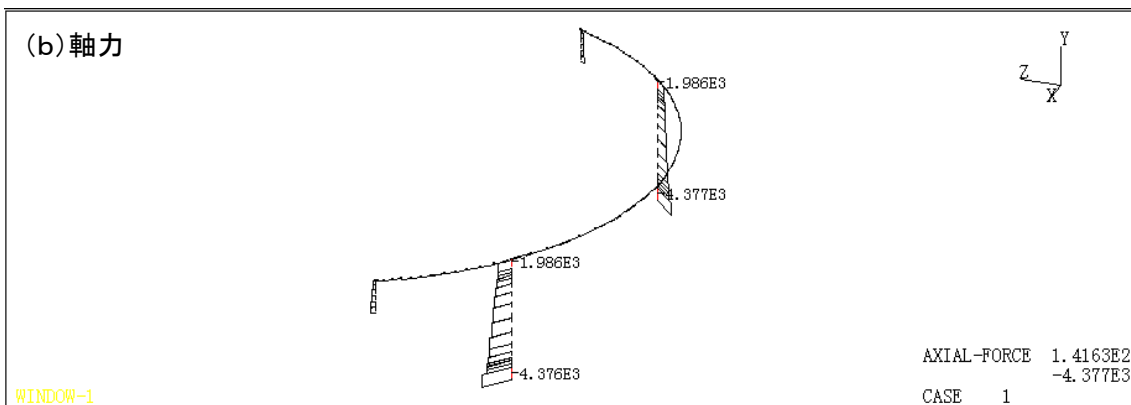
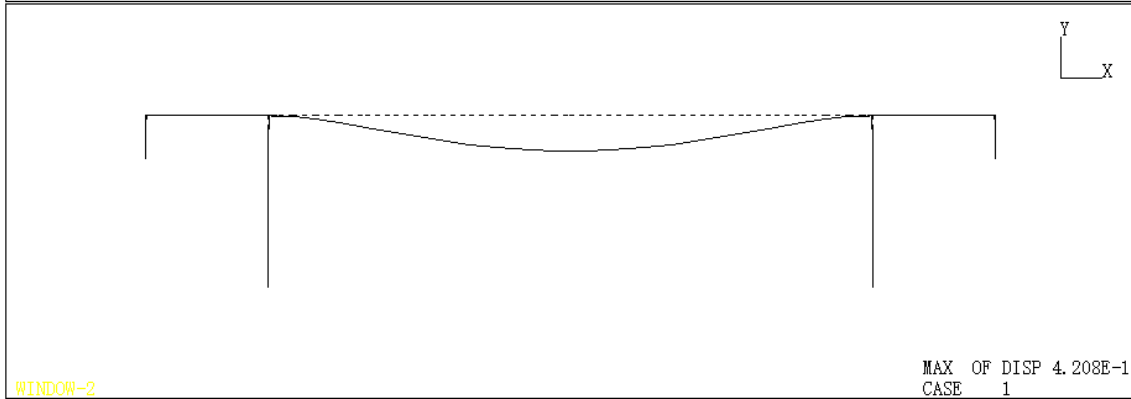
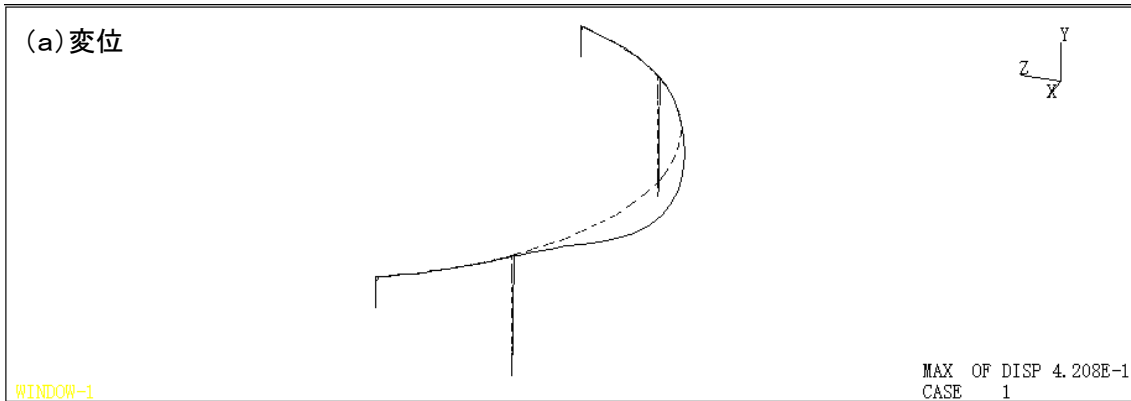


図3. 4. 2 動的解析に用いた減衰と振動数の関係



自重解析結果



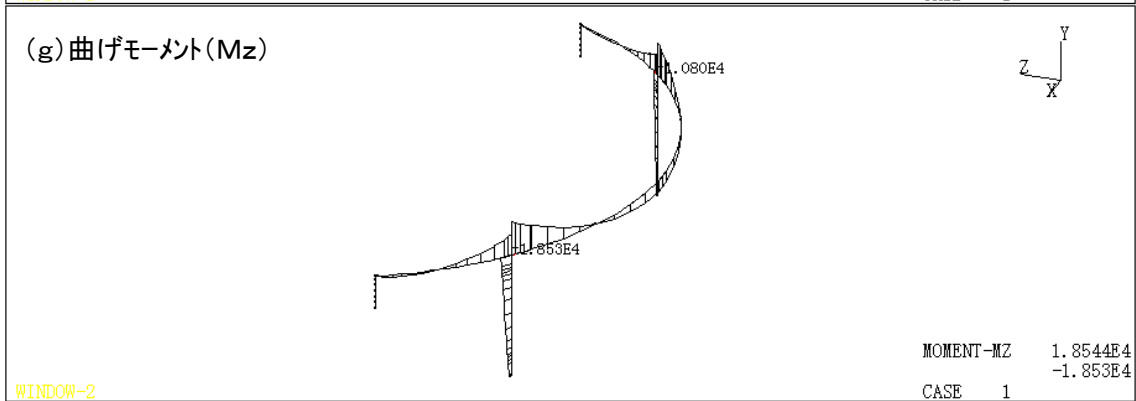
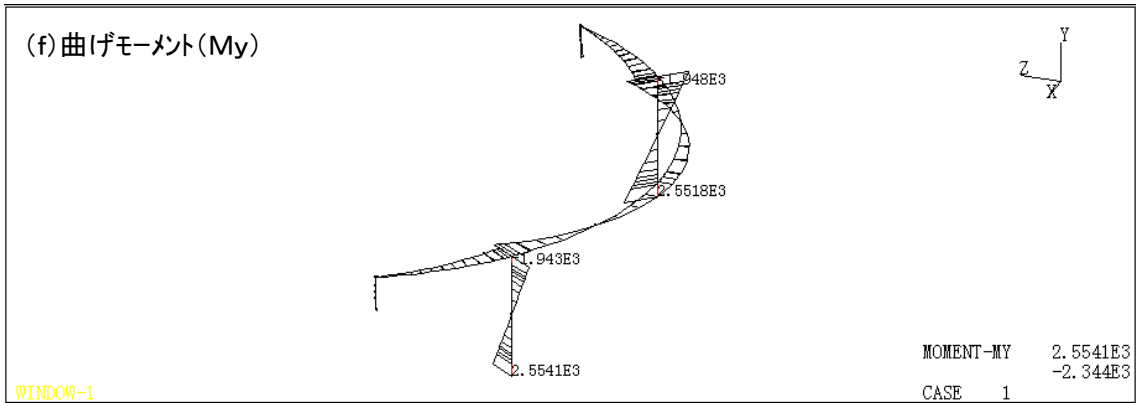
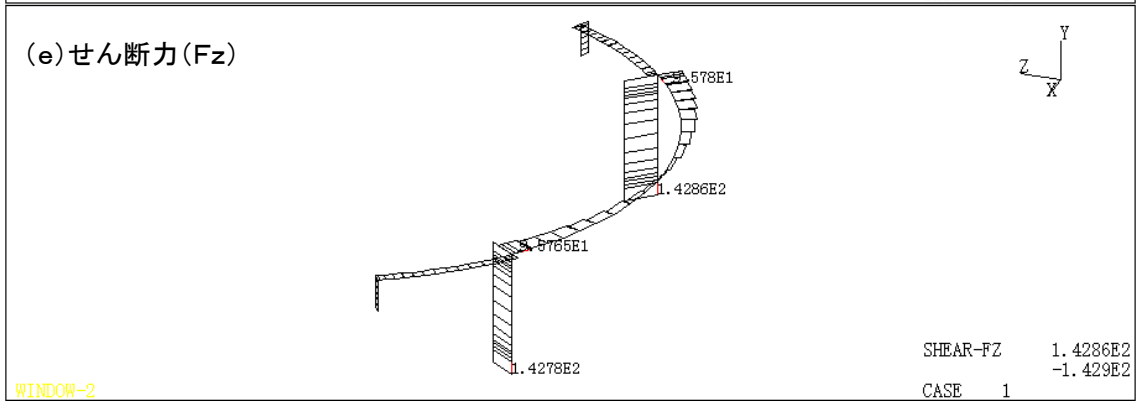
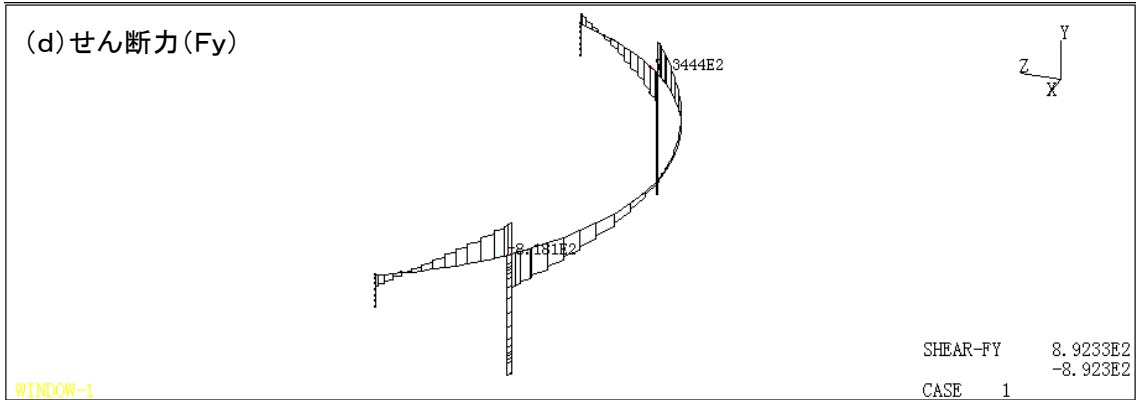
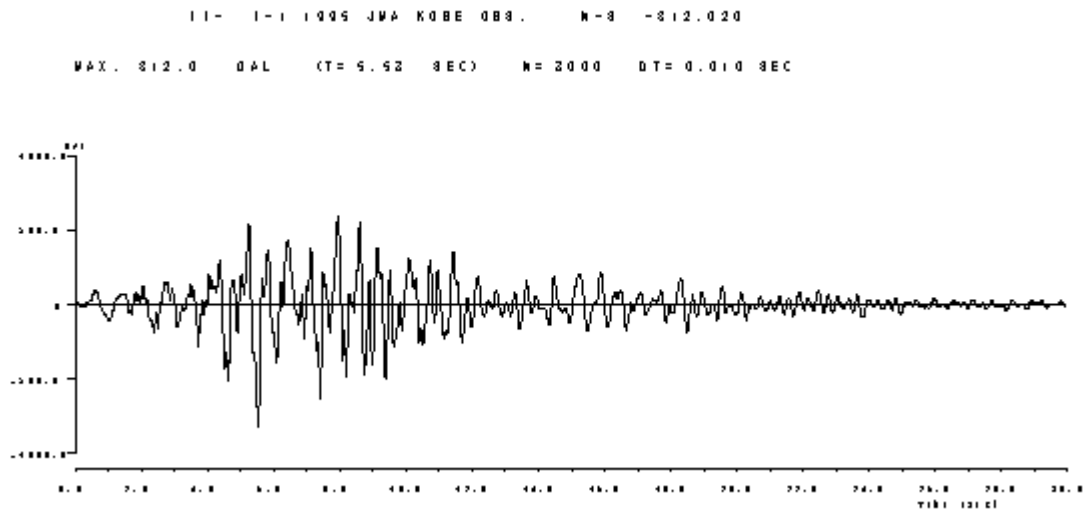
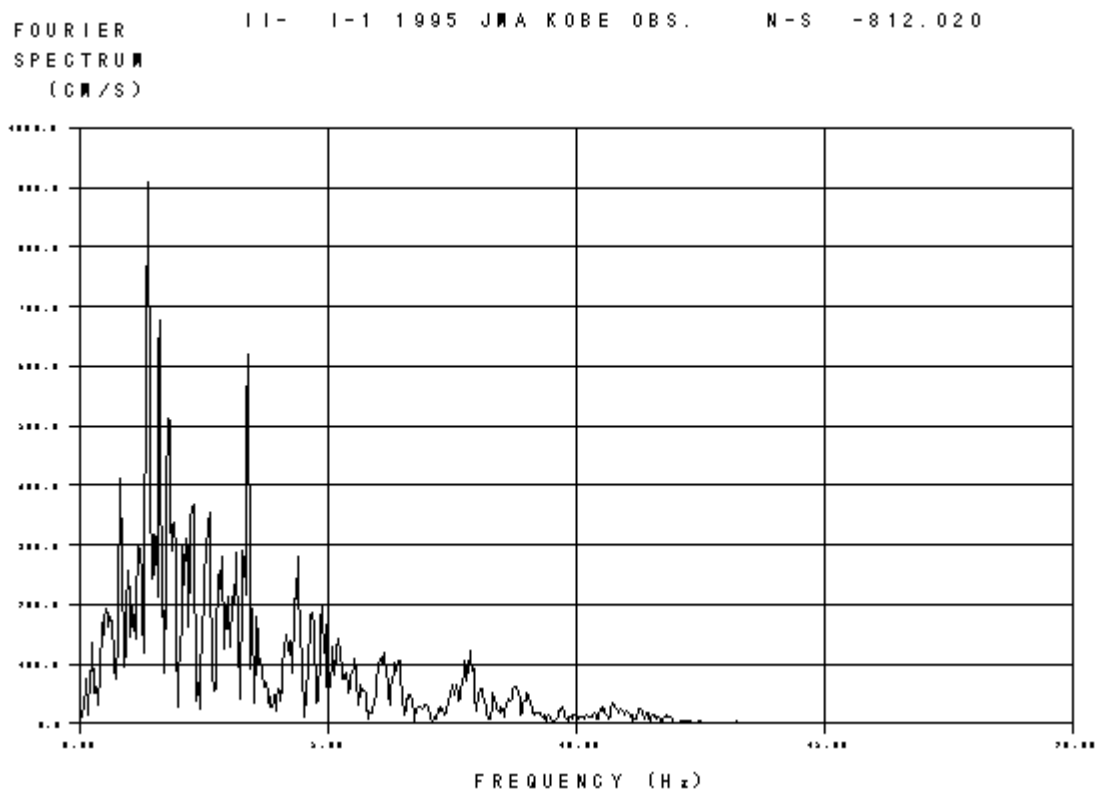


図3. 4. 3 死荷重の断面力

入力地震動(タイプⅡ-I-1)



(a)入力地震動



(b)フーリエスペクトル

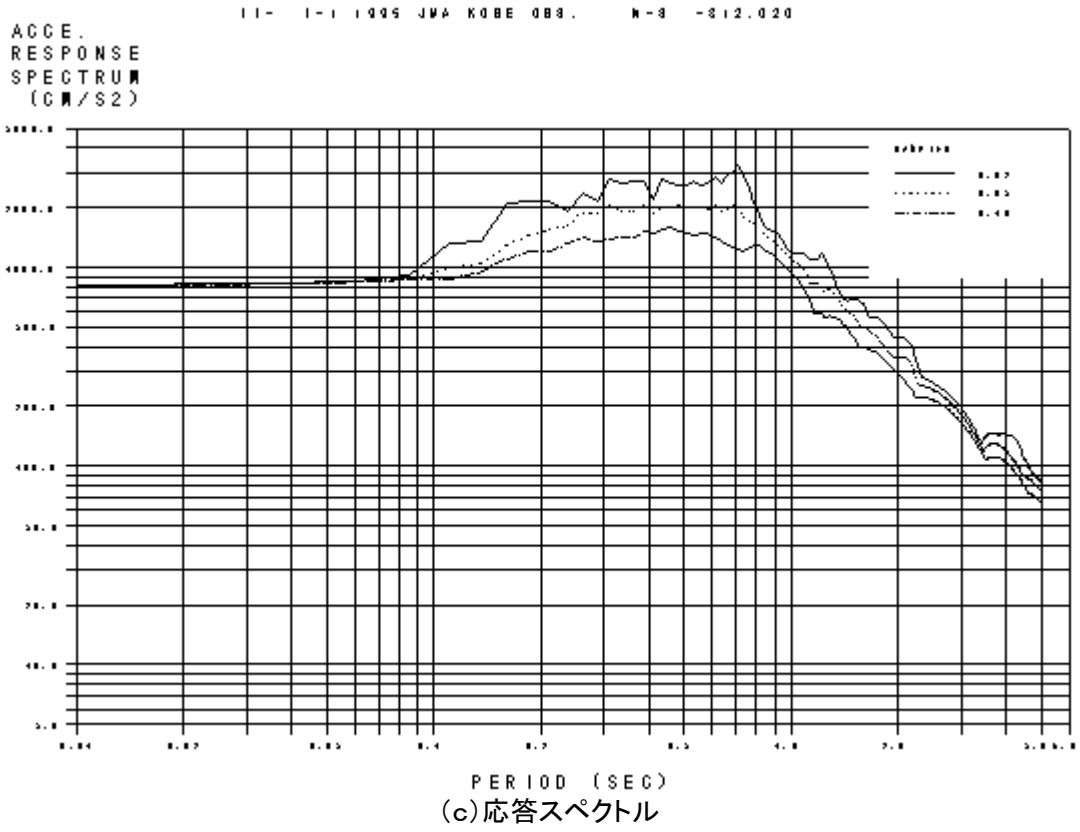


図3. 4. 4 入力地震動(タイプⅡ-I-1)

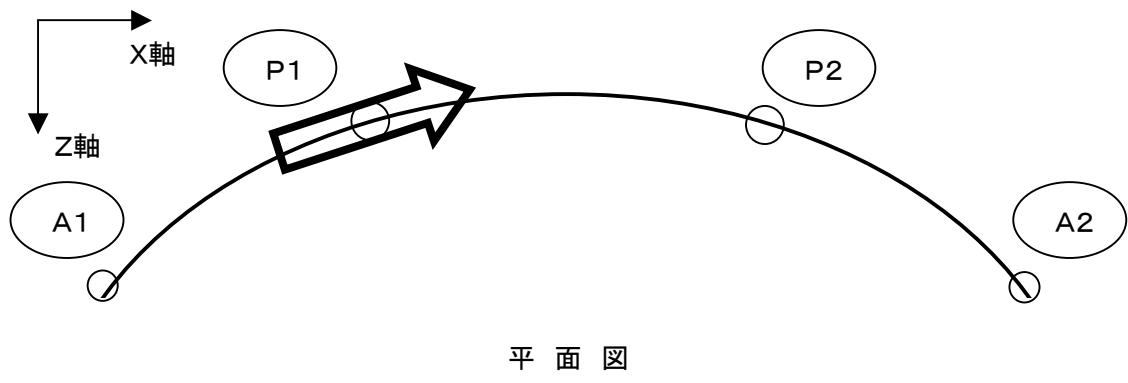
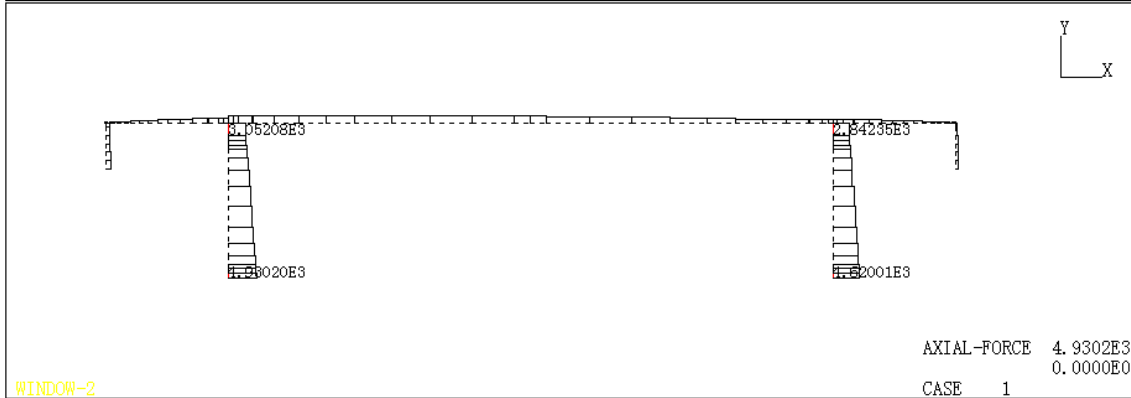
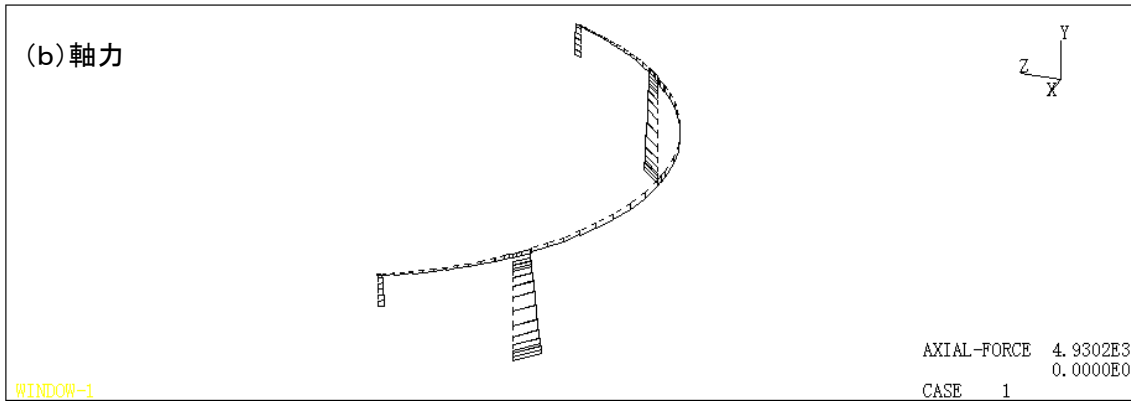
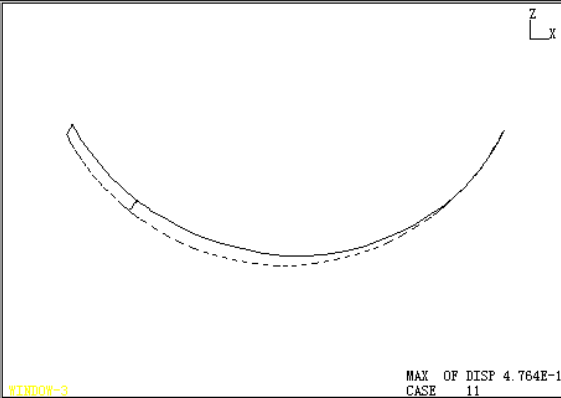
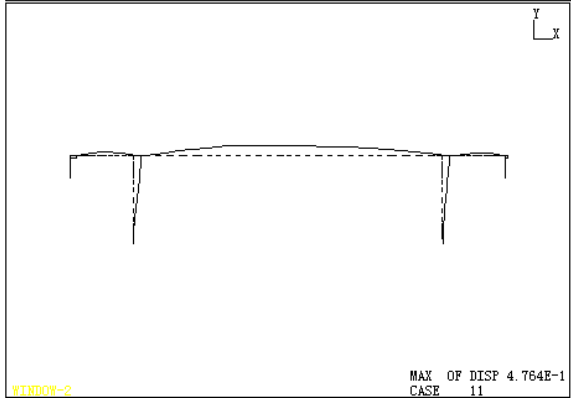
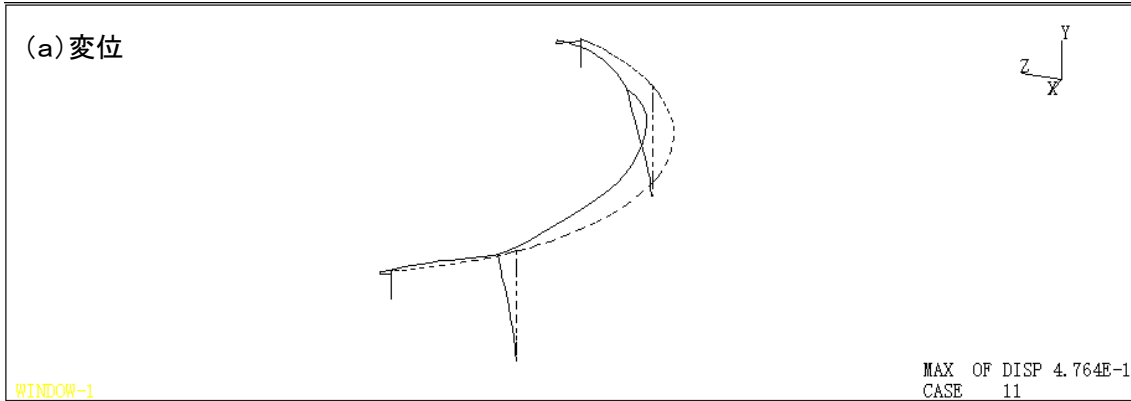
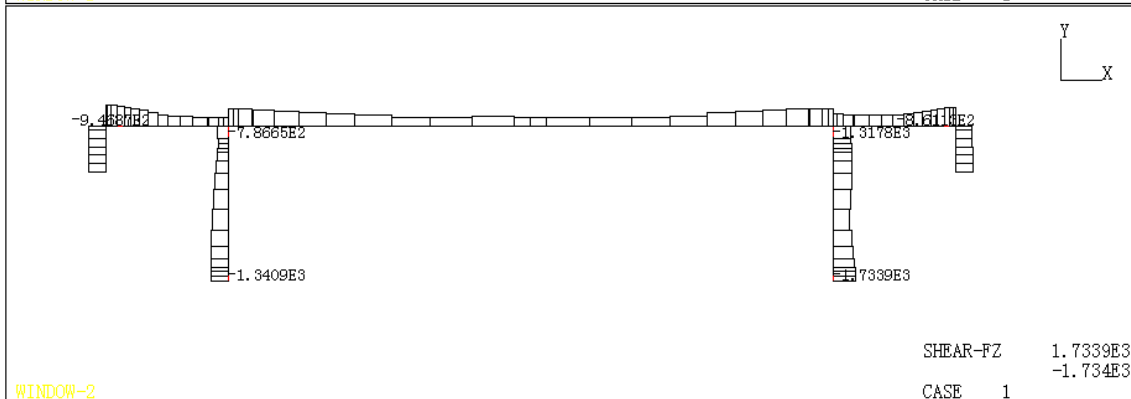
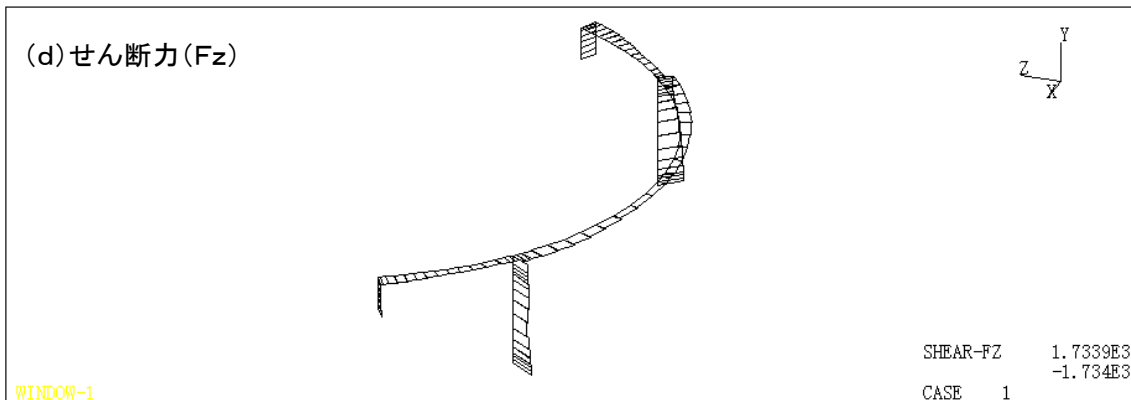
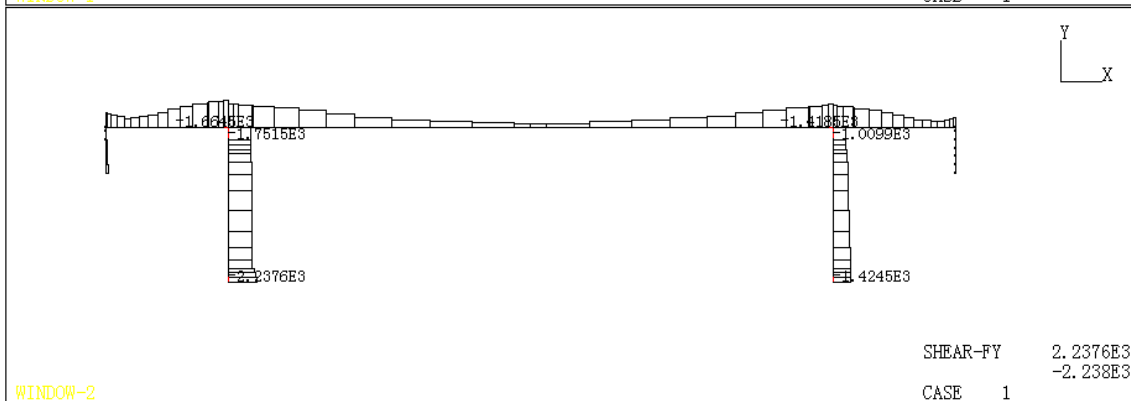
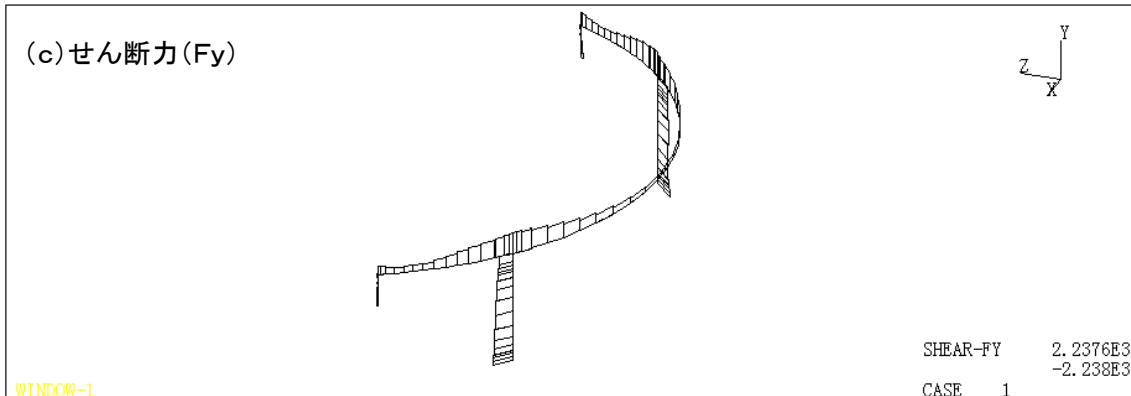
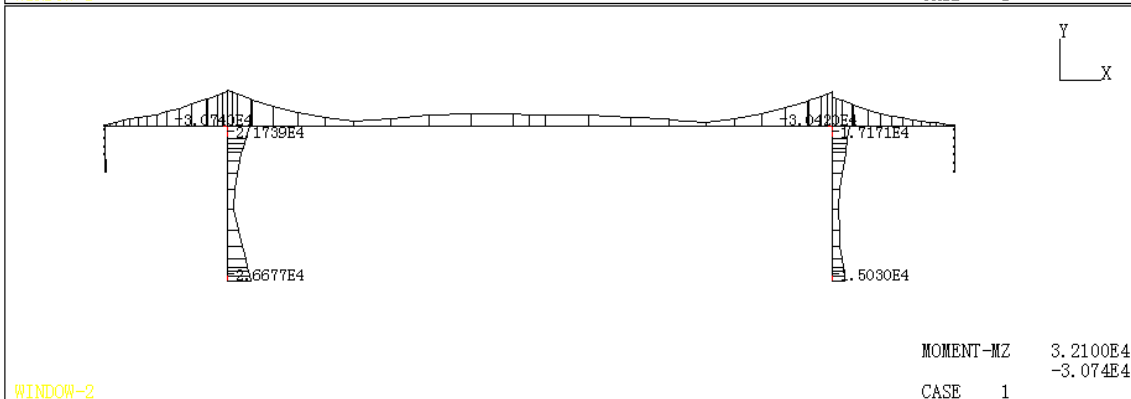
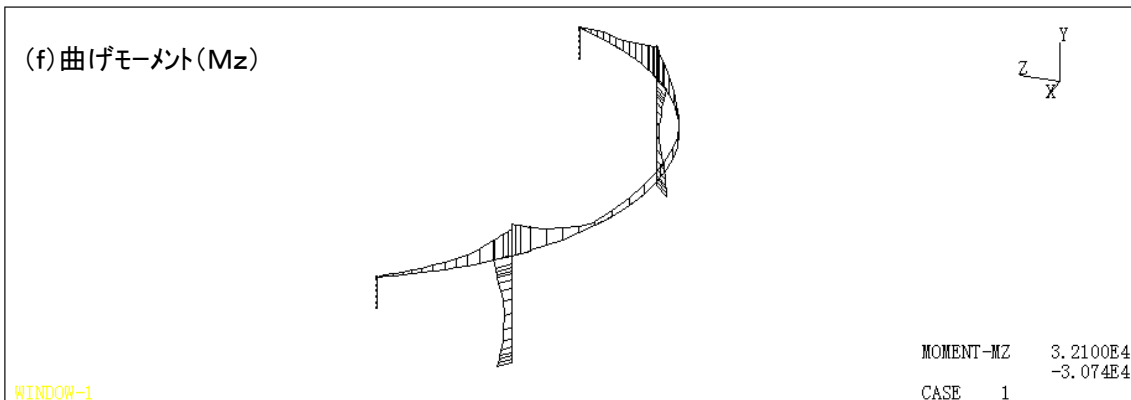
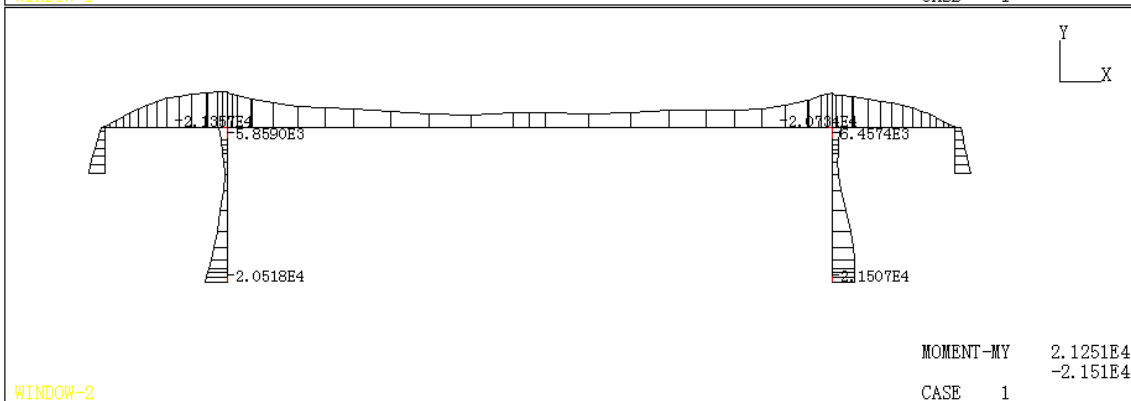
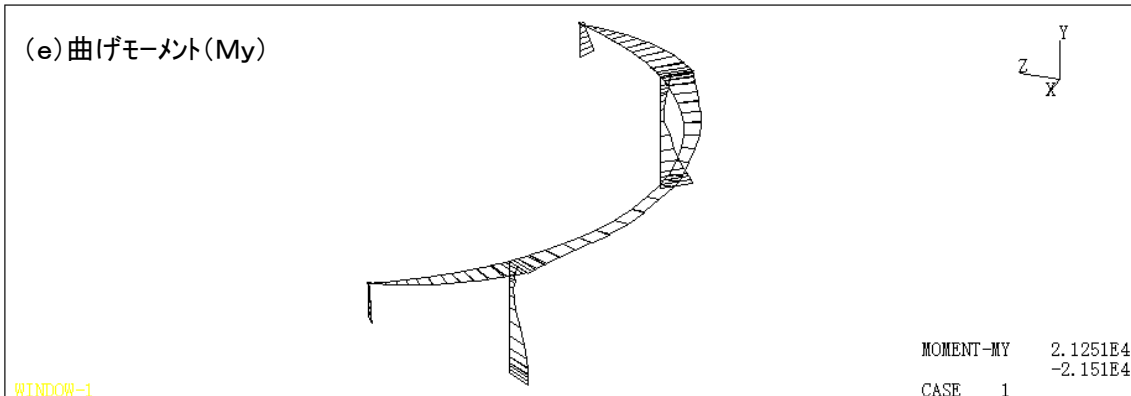


図3. 4. 5 入力荷重の方向

動的解析結果タイプIIの地震動に対する結果

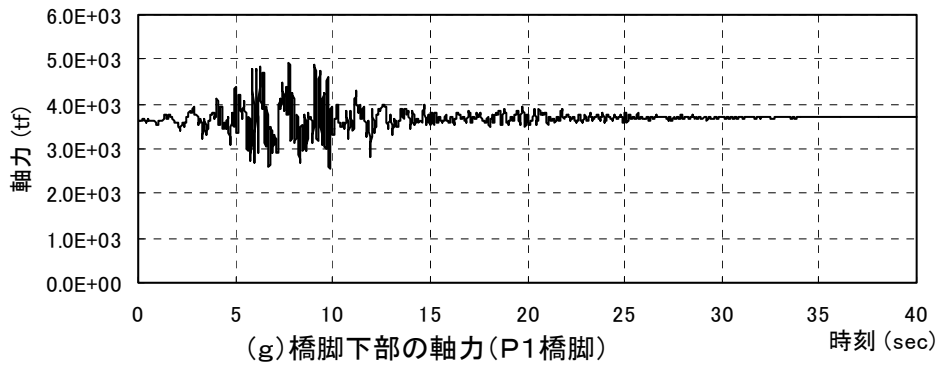




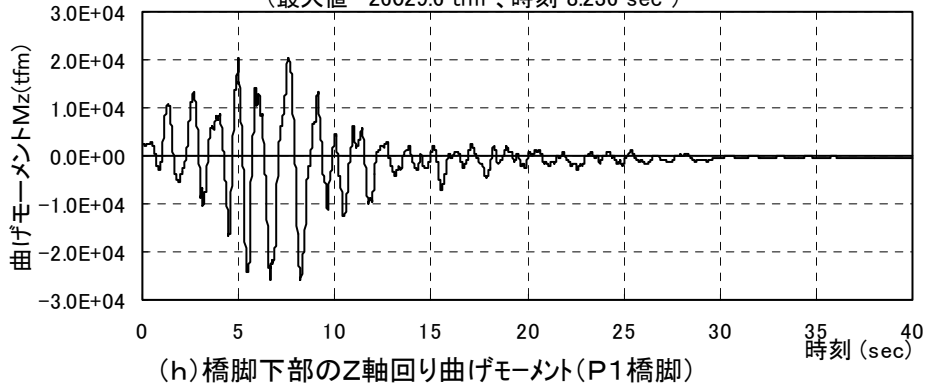


(e) 曲げモーメント (My)

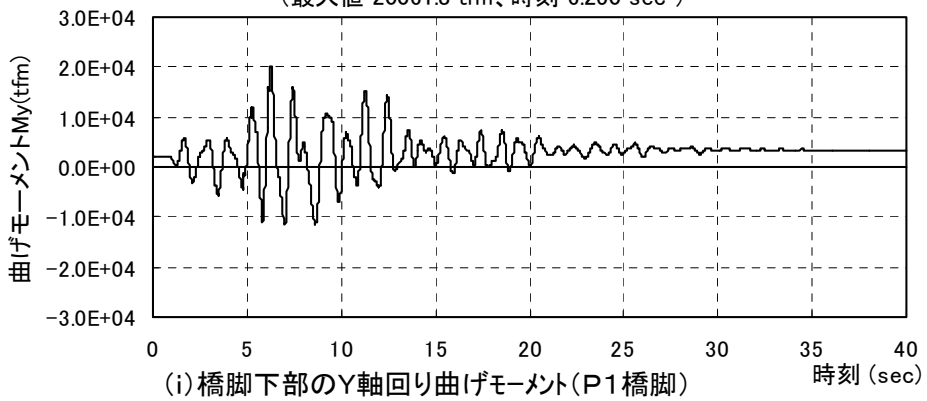
軸力変動 P1橋脚下部要素の軸力  
(最大値 4930.2 tf、時刻 7.760 sec)



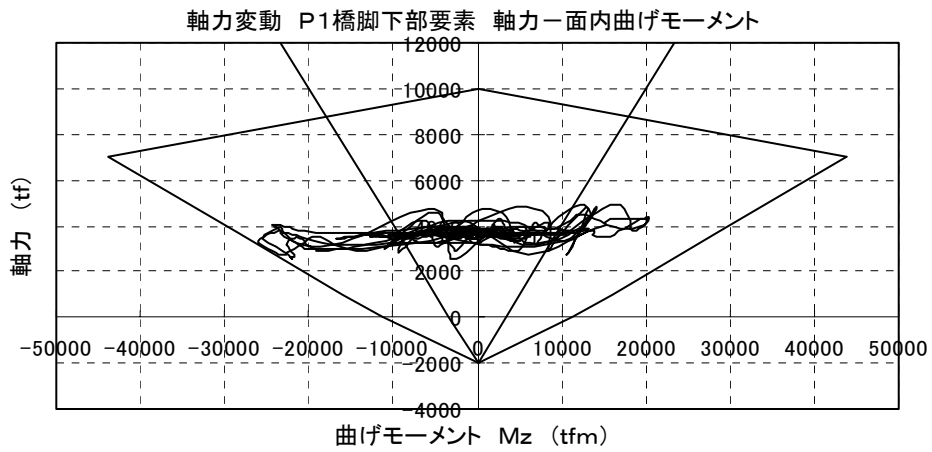
軸力変動 P1橋脚下部要素の面内曲げモーメント  
(最大値 -26029.6 tfm、時刻 8.236 sec)



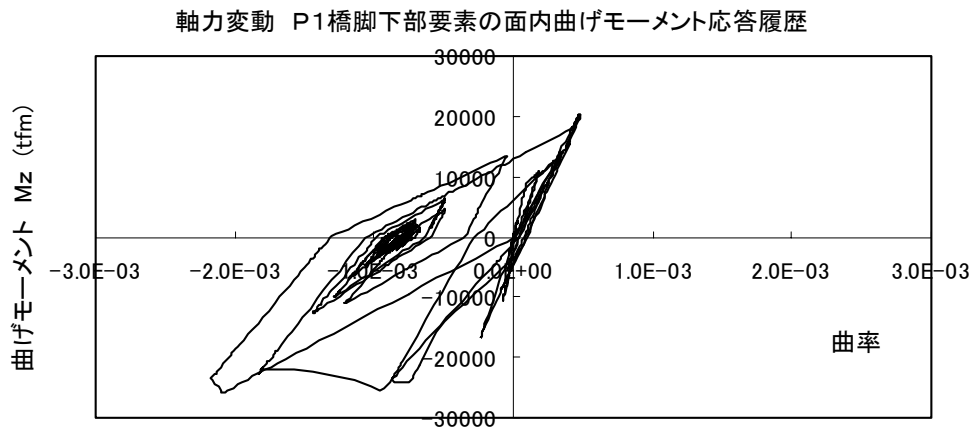
軸力変動 P1橋脚下部要素の面外曲げモーメント  
(最大値 20061.8 tfm、時刻 6.250 sec)



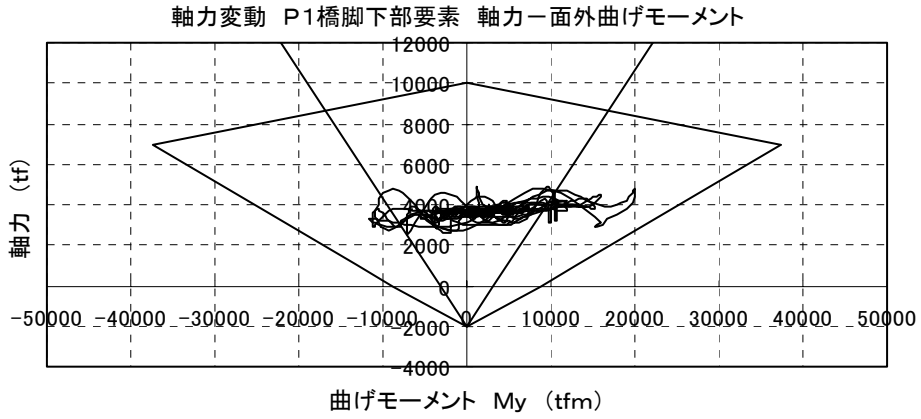




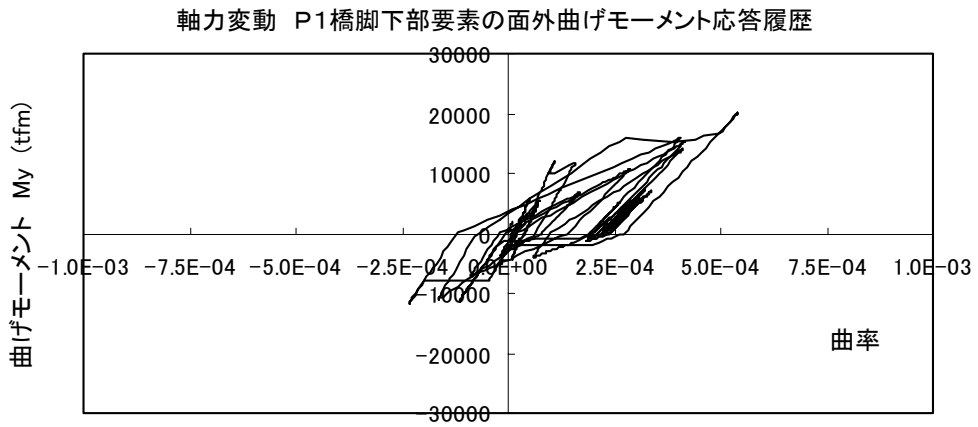
(j) 橋脚下部の軸力-Z軸回り曲げモーメントによる相関図(P1橋脚)



(k) 橋脚下部のZ軸回り曲げモーメント-曲率による応答履歴(P1橋脚)



(l) 橋脚下部の軸力-Y軸回り曲げモーメントによる相関図(P1橋脚)



(m) 橋脚下部のY軸回り曲げモーメント-曲率による応答履歴(P1橋脚)

図3. 4. 6 動的解析による最大応答値(タイプII-I-1)