

I—8 耐震設計

—主に曲線橋に関する一試例—

㈱ 橋梁設計事務所 正会員 松井義孝

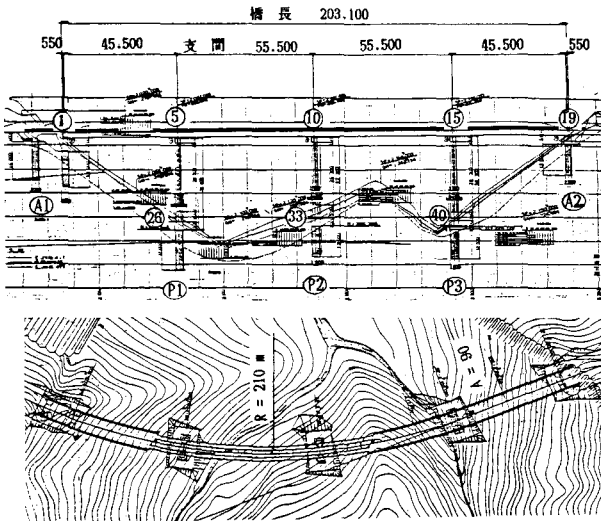
㈱ 橋梁設計事務所 下川俊克

1、はじめに

最近、橋梁設計に於いても、動的振動解析が注目されつつ設計者としても避けて通れない過程である。動的解析では設計工程なり、電算原価なり、計り知れないものがある。今回の曲線橋については、データも少なく、下記に種々検討し今後の設計の判断材料として合理的方法を見い出そうと試みた。

2、検討方針とモデル

本例は急峻なV字型地形に架かる橋梁で、曲線半径 $R=210\text{m}$ (一部クロソフ区間 $A=90$)の曲線橋である。



上部構造は4径間連続曲線箱桁、下部構造はRCフレキシブル橋脚 ($H=40.0\text{m}$)の深礎杭基礎である。

解析において下記の3ケースの方法について検討した。

(1) 修正震度法

(静的平面骨組解析)

(2) 動的平面解析

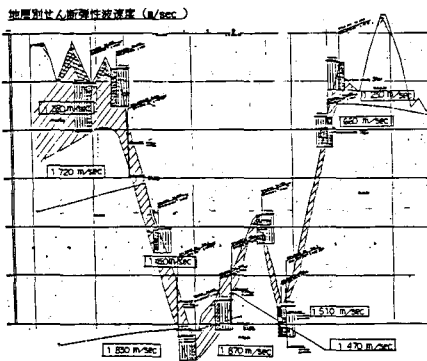
(曲線支間を直線モデルとした)

① 橋軸方向
(面内4径間連続ラーメン構造)

② 橋軸直角方向
(面外4径間連続ラーメン構造)

(3) 動的立体解析

動的解析は、モーダルアナリシス法を用いた応答スペクトル法により、構造は多質点系モデルとし、各振動モードの応答値から合成して最大応答値を求めた。



減衰定数は、上部工 0.02、下部工 0.05 とした。

支点条件は 面内解析について ① 回転可能な固定支点、② 回転と水平移動可能な支点、③ ④ 固定支点、⑤ ⑥ ⑦ はヒンジ支点、面外解析については ① ② ③ ④ ⑤ は固定支点とした。

表-1 せん断弾性波による地盤の基本固有周期 (T_g)

せん断弾性波	層 厚	基本固有周期
Vsi (m/sec)	H1 (m)	T _g (sec)
min 660	10.000	0.061
	20.000	0.121
	30.000	0.182
max 1870	10.000	0.021
	20.000	0.042
	30.000	0.064

表-2 動的解析結果による構造物の固有振動周期とその比較

	方 向	振 動 周 期	
		次 数	構造物 (sec) 地 盤 (sec)
橋 軸 方 向 (案内)	X	5	0.333 0.021 ~ 0.182
	Y	4	0.337 #
橋軸直角方向 (案内)	Z	1	0.408 #
	X	3	0.488 #
立 体 解 析	Y	3	0.489 #
	Z	8	0.339 #

表-3 修正震度法による構造物固有振動周期 (単位)

	方 向	固有振動周期 T (sec)		
		P 1 橋脚	P 2 橋脚	P 3 橋脚
橋 軸 方 向 (案内)	X	0.335	0.253	0.281
橋軸直角方向 (案内)	Z	0.640	0.568	0.610

4. 固有周期

固有周期は表-3 に「道示 (V)」の修正震度法による、各橋脚の固有周期を算出した。動的解析は、各振動モードの有効質量の累計が全質量の 95 % になる迄か、各振動モードの固有周期が 0.10 秒以下になる迄のいずれか一方を満足する迄の次数についてモードの重ね合わせを行ない精度を上げた。

表-2 は各ケースの構造物に大きく影響を与える、刺激係数の最大時の固有周期を上げて地盤との比較を行った。

3. 地震波の設定と地盤との整合

入力地震波は、架橋地点の関係から留萌沖及び十勝沖地震が選択され比較の結果、最大加速度を 85gal とした。

地質及び地層については、新第三紀中新世層のレキ岩を基盤とし、上層は砂岩、泥岩の互層から成る。ここで表-1 にあるように、地盤の固有振動周期 (T_g) をせん断弾性波 (S 波) より計算し、表-2 にて構造物及び地盤の固有周期が一致しない事を確認し構造物のモデルを決定した。

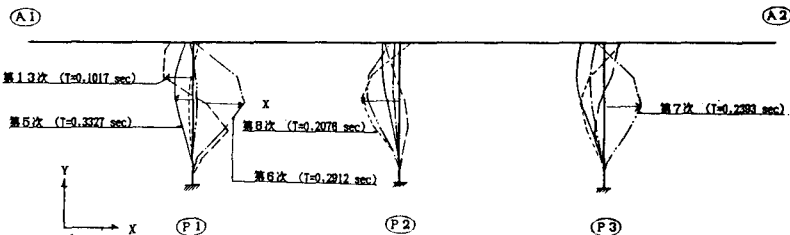
表-4 案内解析 (橋軸方向)

次数	固有周期	制 動 係 数		有効質量とその累計		モ ー ド の 主 な 特 徴
MODE	PERIOD	MODAL PARTICIPATION FACTOR		EFFECTIVE MASS (%) (SUMMATION)		
NO	(sec/s)	X	Y	X	Y	
1	0.6714	-0.000	-0.001	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	上部工鉛直方向モード(+,Y)
2	0.5043	-0.000	-0.397	0.00 (0.00)	0.03 (0.03)	# (#)
3	0.3817	0.000	-0.018	0.00 (0.00)	0.00 (0.03)	# (#)
4	0.3372	-0.000	11.737	0.00 (0.00)	22.95 (22.97)	# (Y)
5	0.3327	-20.209	-0.000	67.42 (67.42)	0.00 (22.97)	下部工水平方向モード(-X)
6	0.2912	1.902	-0.000	0.60 (68.01)	0.00 (22.97)	# P1(+X)
7	0.2383	-2.404	-0.000	0.85 (68.87)	0.00 (22.97)	# P2(-X),P3(+X)
8	0.2076	-2.773	0.000	1.27 (70.24)	0.00 (22.97)	# P2,P3(-X)
9	0.1742	-0.000	-0.003	0.00 (70.24)	0.00 (22.97)	上部工鉛直方向モード(+,Y)
10	0.1456	-0.000	-0.302	0.00 (70.24)	0.02 (22.98)	# (#)
11	0.1161	0.000	0.022	0.00 (70.24)	0.00 (22.98)	# (#)
12	0.1127	0.000	-1.531	0.00 (70.24)	0.38 (23.38)	# (#)
13	0.1017	-1.937	0.000	0.62 (70.88)	0.00 (23.38)	下部工水平方向モード(+,-X)

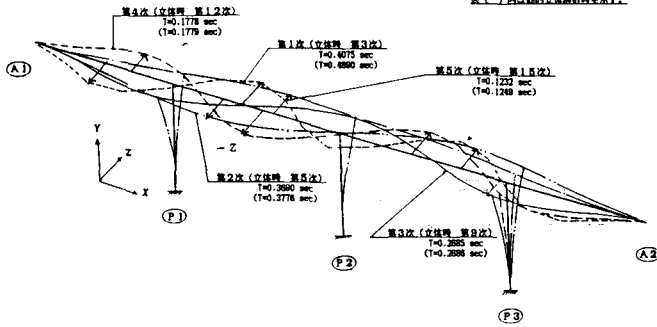
表-5 案内解析 (橋軸直角方向)

次 数	固有周期	刺激係数	有効質量とその累計		モードの 主な特徴
			MODAL PERIOD	MODAL PARTICIPATION FACTOR	
MODE NO	(sec/s)	Z			
1	0.4075	17.681	52.13	(52.13)	全体的に (+Z) 方向モード
2	0.3990	1.486	0.37	(52.49)	P2 を変曲点に (+, Y) 方向モード
3	0.2685	-5.973	5.94	(58.44)	P1, P3 (-Z), P2 (+Z) 方向モード
4	0.1778	-0.073	0.00	(58.44)	P2 を変曲点に (+, -Z) 方向モード
5	1.1232	-5.403	4.86	(63.30)	#

主橋軸方向固有モード図
(動的案内解析)



片假面立橋の固有モード図 (動的解析用)



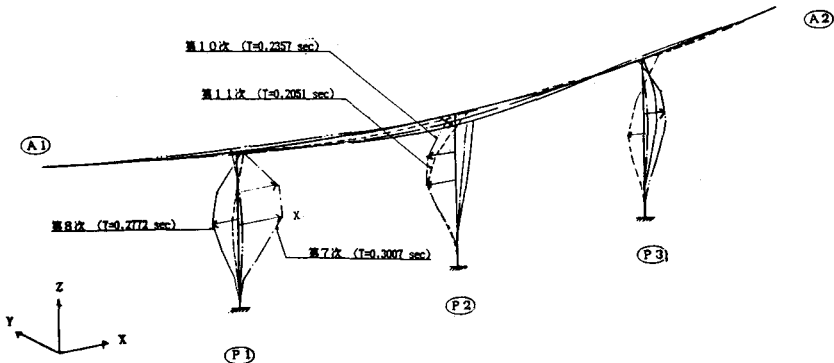
※()内は動的立橋解析時を指す。

表-8 立橋解析

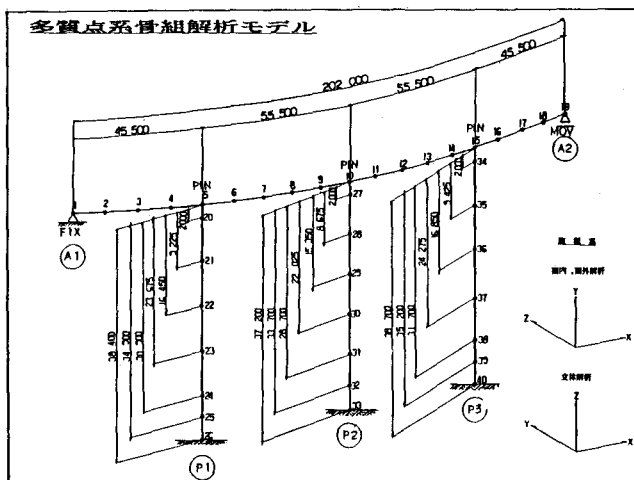
MODE NO	固有周期 PERIOD (sec/n)	制振係数 MODAL PARTICIPATION FACTOR			有効質量とその累計 EFFECTIVE MASS (%) (SUMMATION)			モードの主な特徴
		X	Y	Z	X	Y	Z	
1	0.6789	-0.007	-0.037	-0.022	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	上部工鉛直方向モード(+,-)
2	0.5060	-0.019	-0.088	-0.434	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.03 (0.03)	"
3	0.4880	-12.270	-14.079	0.006	24.85 (24.85)	32.72 (32.72)	0.00 (0.03)	全体的に水平方向モード(-Y)、橋軸直角方向1次モードと類似
4	0.3854	-0.366	0.348	0.267	0.02 (24.88)	0.02 (32.74)	0.01 (0.04)	上部工鉛直方向モード(+,-)
5	0.3776	-6.496	6.376	-0.039	6.97 (31.84)	6.72 (39.46)	0.00 (0.04)	上部工水平方向(+,-Y)、下部工水平方向P2,P3(+Y)、橋軸直角方向2次モードに類似
6	0.3392	-0.004	-0.008	-11.720	0.00 (31.84)	0.00 (39.46)	22.91 (22.96)	上部工鉛直方向モード(-Z)
7	0.3007	12.030	-4.774	-0.005	22.93 (55.77)	3.76 (43.22)	0.00 (22.96)	上部工(P1→P3間 水平方向(-Y))、下部工水平方向 P1,P2(+X)
8	0.2772	6.351	-2.514	-0.003	6.66 (62.43)	1.04 (44.26)	0.00 (22.96)	上部工(P1→P3間 水平方向(-Y))、下部工水平方向 P1(-X),P2,P3(+X)
9	0.2586	-5.808	7.461	0.009	4.83 (67.25)	9.24 (53.50)	0.00 (22.96)	P2を支点として水平方向モード(+,-Y)、橋軸直角方向3次モードに類似
10	0.2367	-3.828	3.553	0.002	2.42 (69.67)	2.06 (55.56)	0.00 (22.96)	下部工水平方向モード P2(-X),P3(+X)
11	0.2051	-1.412	-4.208	-0.002	0.33 (70.00)	2.92 (58.51)	0.00 (22.96)	下部工水平方向モード P2(-X),P3(+X)
12	0.1778	-1.540	-0.779	-0.000	0.39 (70.39)	0.10 (58.61)	0.00 (22.96)	全体的にP2を軸としてS字型水平モード、橋軸直角方向4次モードに類似
13	0.1752	-0.006	0.006	-0.015	0.00 (70.39)	0.00 (58.61)	0.00 (22.96)	上部工鉛直方向モード(+,-)
14	0.1462	0.002	-0.003	-0.294	0.00 (70.39)	0.00 (58.61)	0.01 (22.97)	上部工鉛直方向モード(+,-)
15	0.1249	0.830	4.870	0.000	0.11 (70.51)	3.92 (62.53)	0.00 (22.97)	全体的にP2を軸としてS字型水平モード、橋軸直角方向5次モードに類似
16	0.1164	0.001	-0.001	0.116	0.00 (70.51)	0.00 (62.53)	0.00 (22.97)	上部工鉛直方向モード(+,-)
17	0.1130	-0.000	0.003	1.521	0.00 (70.51)	0.00 (62.53)	0.39 (23.36)	"
18	0.1005	1.36	-1.391	-0.000	0.31 (70.81)	0.32 (62.85)	0.00 (23.36)	橋軸直角3次モードに類似

動力学的立橋解析モード図

※ 第 3, 5, 9, 12, 15 次は橋軸直角方向モード図を参照。



5、解析別断面力の抽出



面内解析 (座標方向)

POINT NAME	静的解析			静的解析 (修正風度法)		
	MX	QY	HZ	MX	QY	HZ
NO - 1	554.623	-	-	402.611	-	-
3	548.931	-	-	375.129	-	-
5	470.737	-	-	347.647	-	-
7	444.891	-	-	270.911	-	-
10	223.685	-	-	230.685	-	-
13	256.928	-	-	137.532	-	-
15	35.578	-	-	110.715	-	-
17	41.308	-	-	27.482	-	-
19	0	0	0	0	0	0
22	-	6.198	357.174	-	15.608	256.844
26	-	71.904	963.962	-	137.219	1088.279
29	-	12.238	235.232	-	17.606	239.945
33	-	74.445	1102.950	-	153.062	1291.842
36	-	17.601	495.985	-	21.216	256.211
40	-	112.054	1650.981	-	153.162	1326.953

[MX: 軸力(t), QY: 面内せん断力(t), HZ: 面内曲げモーメント(tm)]

立体解析 (座標方向)

POINT NAME	静的立体解析					
	MX	QY	HZ	MY	MZ	
NO - 1	241.483	43.204	1.184	7.783	0.231	787.090
3	240.441	16.948	1.189	7.468	15.548	203.853
5	195.737	38.569	1.031	5.498	20.638	319.219
7	185.237	18.735	0.567	5.390	7.251	526.452
10	135.848	36.307	0.508	7.388	6.842	438.536
13	111.174	20.224	0.855	6.823	6.080	406.006
15	42.985	5.084	1.880	5.421	17.774	313.575
17	19.755	24.797	0.209	5.473	16.805	139.474
19	8.014	27.608	1.252	5.473	0.040	590.781
22	2.984	104.885	86.159	62.914	589.068	1346.992
26	2.993	110.509	112.328	62.914	1487.282	3713.367
29	0.398	148.675	28.073	78.309	220.779	1838.714
33	0.399	157.127	48.871	78.309	887.445	5188.864
36	2.707	92.318	42.829	52.504	328.908	1118.624
40	2.715	98.962	67.114	52.504	948.978	3206.355

[MX: 軸力(t), QY: 面内せん断力(t), HZ: 面内曲げモーメント(tm), MY: 面内モーメント(tm), MZ: 面外モーメント(tm)]

面内解析 (座標直角方向)

POINT NAME	静的解析			静的解析 (修正風度法)		
	QZ	MX	MY	QZ	MX	MY
NO - 1	34.305	8.338	719.943	51.409	8.651	912.334
3	17.654	8.338	239.906	23.927	8.651	55.898
5	42.858	5.960	350.195	9.903	8.651	103.628
7	19.402	5.960	538.627	2.204	1.888	383.983
10	48.430	6.956	576.165	46.140	1.888	498.054
13	24.471	6.956	421.731	1.823	2.177	352.802
15	10.348	6.638	329.844	31.188	2.177	26.847
17	27.076	6.638	223.735	23.316	8.299	51.798
19	31.880	6.638	618.634	50.798	8.299	894.834
22	104.603	76.279	1462.216	121.358	57.146	1357.462
26	125.037	76.279	4139.704	271.032	57.146	5255.153
29	200.194	23.121	2701.390	179.262	1.497	2159.348
33	234.11	23.121	7694.098	335.575	1.497	7399.802
36	97.033	79.282	1374.482	136.450	66.976	1537.499
40	117.067	79.282	3885.851	298.824	66.976	5886.378

[QY: 面外せん断力(t), MX: ねじりモーメント(tm), MY: 面外曲げモーメント(tm)]

立体解析 (座標直角方向)

POINT NAME	静的立体解析					
	MX	QY	HZ	MY	MZ	
NO - 1	201.889	45.959	1.208	8.851	0.257	895.267
3	200.905	21.506	1.209	8.409	15.913	177.445
5	182.348	40.917	1.057	6.255	21.193	380.575
7	175.091	21.790	0.586	6.046	8.210	567.573
10	136.473	40.508	0.550	7.380	7.050	546.396
13	108.056	23.629	0.888	6.801	6.948	437.475
15	47.999	9.318	1.922	5.925	18.044	385.892
17	22.029	31.109	0.221	5.974	16.971	187.199
19	8.841	35.765	1.276	5.974	0.043	673.931
22	3.024	119.736	28.448	63.283	252.233	1502.490
26	3.024	126.762	48.612	63.283	642.790	4208.541
29	0.575	149.369	31.365	75.476	286.125	1894.630
33	0.577	157.206	59.332	75.476	795.284	5245.496
36	2.793	102.682	41.290	56.635	329.209	1212.658
40	2.748	109.942	66.895	56.635	933.955	3539.174

[MX: 軸力(t), QY: 面外せん断力(t), HZ: 面内せん断力(t), MY: 面内モーメント(tm), MZ: 面外モーメント(tm)]

6、計算結果とその比較

(1) 固有周期

(イ) 修正震度法 (T) と動的平面解析 (T') では (P1) (T=0.335 sec) に対して (T'=0.333 sec) と同程度であるが、(P2) (T=0.253 sec)、(P3) (T=0.281 sec) と約 20% の差が出ている。

動的立体解析で、水平方向への影響度の大きい

第 3 次モード T=0.489 sec (刺激係数 X = -12.27, Y = 14.08, 有効質量 X = 25%, Y = 33%) であり、面外直角モードでは第 1 次モード T = 0.408 sec (刺激係数 Z = 17.69, 有効質量 53%) であった。これは修正震度法の T = 0.568~0.640 sec と比較すると 72%~76% の短周期であった。

(ロ) 動的立体解析と動的橋軸直角方向解析での固有値モードを比較の結果、右上の表の各次数が非常に類似している事がわかった。

動的橋軸直角方向解析	動的立体解析
第 1 次	第 3 次
第 2 次	第 5 次
第 3 次	第 9 次
第 4 次	第 12 次
第 5 次	第 15 次

(2) 部材力応答値

修正震度法と動的解析では、全般的に修正震度法による方が大きな値を示している。例えば、各橋脚基部で見ると下表の様である。

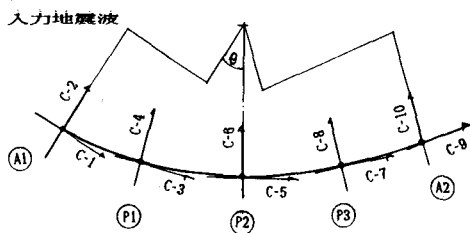
単位 : t-m

			静 的 解 析	動 的 解 析			
			修 正 震 度 法	平 面	立 体	平 面 解 析	立 体 解 析
P ₁ (pt 26)	橋軸直角方向	MY	5255	>	>	4140	4209
	橋 軸 方 向	MZ	1088	>	<	994	1487
P ₂ (pt 33)	橋軸直角方向	MY	7400	<	>	7694	5245
	橋 軸 方 向	MZ	1282	>	>	1103	795
P ₃ (pt 40)	橋軸直角方向	MY	5896	>	>	3866	3539
	橋 軸 方 向	MZ	1327	<	>	1651	949

※ [MY : 橋軸(面内)方向曲げモーメント, MZ : 橋軸直角(面外)方向曲げモーメント]

(3) 動的立体解析時の地震波の入射角

曲線線形をなす場合の入射角を一義的に決定する事は非常に難しく、下図の方向から検討してみた。



入射角は各橋台、橋脚に着目し、その接線、法線方向として各ケースの断面力(右表)を抽出した。

立体解析(地震波入射方向別 橋脚基部面内、面外曲げモーメント)

	POINT 26 (P1)		POINT 33 (P2)		POINT 40 (P3)	
CASE NO	MY	MZ	MY	MZ	MY	MZ
C-1	1608	3156	759	3722	1052	4045
2	200	4641	727	6370	816	2538
3	1599	3345	724	4345	1014	3723
4	263	4507	761	5963	863	2991
5	1487	3713	687	5489	949	3206
6	642	4202	795	5245	933	3539
7	1289	4091	665	5882	881	2678
8	981	3842	813	4454	998	3953
9	1258	4136	663	5957	872	2616
10	1020	3793	815	4353	1005	3995

ここに、橋脚基部の (P1) (Pt 26) , (P2) (Pt 33) , (P3) (Pt 40) の各ケースの曲げモーメント (MY : 橋軸方向曲げモーメント , MZ : 橋軸直角方向曲げモーメント) を比較すると、(A1) 着目の C-1 , C-2 , (P2) 着目の C-5 , C-6 方向で良いと思われるが、曲線半径が小さくなると一概に言えないようである。(昭和 50 年参考文献 3) より) しかし、曲線半径と最適入射角の関係は 7、(2) に述べる様に今後の検討によって見い出されるものと思う。

7、今後の展望

- (1) 動的解析の必要性については、今回の様な橋梁規模 (橋長 203.0 m , 曲率半径 R=210 m , 橋脚高 H=40.00m ~ 3 基) で地震の最大加速度が 85 gal 程度であれば、修正震度法による解析で良いと思われるが、今後、曲率及び最大加速度を変え種々検討し、その方向性の判断図の様なものを見い出したいものである。
- (2) 曲線橋の地震波の入射角について 6、にて述べたが、昭和 50 年参考文献 3) で R=140m にて弦方向のほかに、更に斜め方向からの入射波が必要とあるので、おお旨 R=140m ~ 210m、そして橋脚高との関係から更に種々検討を行えば地震波の設定法が見い出されるはずである。
- (3) 本論の曲線橋に関する特性とは異なるが、今回の深礎杭基礎の様な場合の地盤、構造物との一体化設計については、深礎杭設計法特有の地盤の塑性化を考慮した杭の水平バネが刻々と変化して行く計算過程を考えるならば、一体化モデルでの計算は過酷な作業であり、現状では難しいものと思われるが、今後、適格な方法が見い出される事を期待する。

8、あとがき

設計者が動的振動解析を行う場合、解析の捕らえ方、結果の判定等について苦慮するものであるが、曲線橋の高橋脚を有する場合のデータ等が少なく、少しでも関係各位の参考になれば幸いと考えた次第である。尚、末筆ではあるが本設計に御指導、御助言を頂いた北海道開発局留萌開発建設部、開発局土木試験所構造研究室、関係各位の皆様には感謝の意を表し謝辞と致します。

9、参考文献

- 1) 道路橋示法書 (日本道路協会)
- 2) 耐震設計に関する調査研究 (高速道路調査会)
- 3) 吉村、前田「高橋脚を有する連続曲線橋の振動特性について」(土木学会北海道支部研究発表論文集 S 50)
- 4) 清崎、杉山、高木、塚田「釧平大橋の耐震設計」(橋梁と基礎 1980, 5 月号)