

I-43

コンクリート曲線箱桁橋の免震設計

中神土木設計 正 員 林 和虎 北見工業大学 学生員 久保 和子
 北見工業大学 フェロー会員 大島 俊之 北見市役所 村田 捷次
 北見工業大学 正 員 山崎 智之 中神土木設計 横山 佐人志

1. まえがき

本橋は、北見市の国道39号線と並行し、市街地から東西へ抜ける幹線道路（3・3・8号夕陽ヶ丘通道路）である。橋梁設置箇所は15%程度の急勾配をもつ沢地形となっており、冬期には一方通行となる為整備が必要である。また橋下には市道もあり、周辺が公園であることから、当橋梁の耐震性が重要となっている。設計の流れとしては、平成5年に予備設計を行い、橋梁形式を比較設計しているが、その後、実施設計中において、道路橋示方書の改定がなされたため、本橋においても新示方書に準じて設計を行うこととなる。橋梁形式は基本的には変更せず、免震支承を用いて耐震設計を行うこととした。

なお、北見市は北海道でも有数の寒冷地であり、気温が-30℃まで下がる日が数日ある。免震支承を用いる場合、環境温度の低下により免震装置の性能の変化がどの程度影響するかを検討する必要がある。ここでは、北見工業大学で行われた実験結果をもとに検討した。

2. 野付牛高架橋の設計概要

2-1 橋梁形式

- ・橋長 120m 曲線橋 R=150m ・支間長 33.8m+50.0m+33.8m
- ・上部工形式 3径間連続ポステン方式2室箱桁橋
- ・下部工形式 橋台（逆T式・箱式）、橋脚（壁式2基）
- ・基礎工形式 鋼管杭中掘り工法セメントミルク噴出攪拌方式

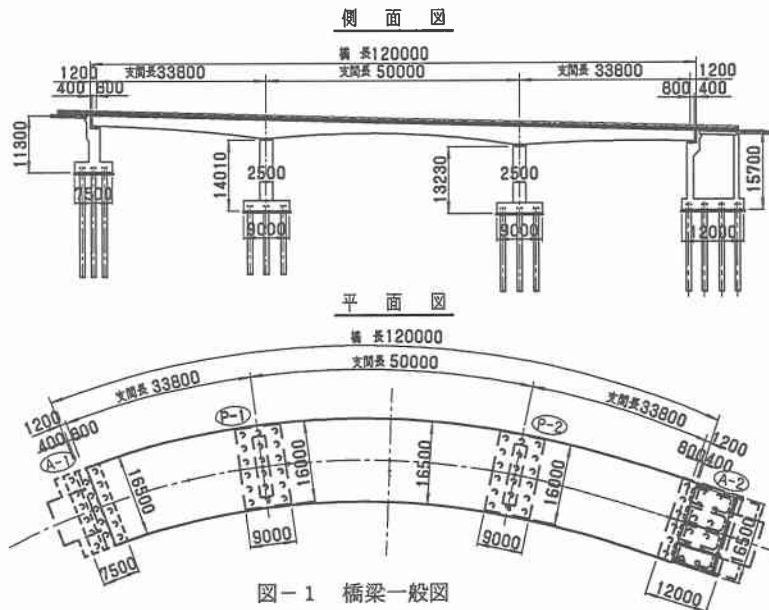


図-1 橋梁一般図

Isolation Design of Concrete Curved Box Girder Bridge

by Kazutora HAYASHI, Toshiyuki OSHIMA, Tomoyuki YAMAZAKI, Kazuko KUBO, Syoji MURATA
 Satoshi YOKOYAMA.

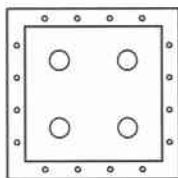
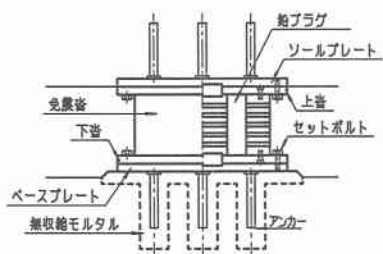
2-2 免震設計

免震設計を採用するにあたり、本橋においては、下部工の剛性が高く、支承条件を全固定とみなした時の地震時保有水平耐力法に用いる固有周期が0.514秒と短く、また、3径間連続であることから道示V耐震設計編にある『免震設計が適する橋』とみなせるため免震設計を行い、長周期化と減衰性能の向上により、慣性力の低減を図っている。本橋の方針としては、曲線橋であるため橋軸方向、橋軸直角方向全て免震化とし、橋軸方向としては曲線方向に橋軸中心線とみなし設計を行う。

新示方書 耐震設計編および 道路橋の免震設計法マニュアル(案)に従い選定した鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の形状およびその特性値と耐震設計結果をそれぞれ図-2、表-1に示す。

表-1 LRBの特性値と耐震設計結果

		震 度 法				地震時保有水平耐力法タイプⅠ				地震時保有水平耐力法タイプⅡ				備 考
		A-1	P-1	P-2	A-2	A-1	P-1	P-2	A-2	A-1	P-1	P-2	A-2	
橋	上部構造変位 δ (cm)	4.04				11.6				17.6				
	橋の固有周期 T (s)	0.881				1.17				1.33				
	橋の減衰定数 h (%)	26.6				24.1				23.1				
	設計水平震度 k_{hcm}	0.21				0.72				1.24				
	等価水平震度 k_{hem}	-				0.34				0.40				
	下部構造の等価剛性 (tf/m)	209601	63589	77780	456312	209601	20560	25110	456312	209601	20560	25110	456312	
	橋脚の減衰定数 (%)	10	20	20	10	10	20	20	10	10	20	20	10	
	基礎構造の剛性 (tf/m)	169086	585700	310100	651800	169086	585700	310100	651800	169086	585700	310100	651800	
	基礎の減衰定数 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	設計変位 u_B (cm)	4.0	3.4	3.5	4.0	9.2	8.9	8.8	9.3	17.4	16.9	16.8	17.4	
方	有効設計変位 u_{Be} (cm)	2.8	2.4	2.4	2.8	6.4	6.2	6.2	6.5	12.2	11.8	11.8	12.2	
	免震支承の等価剛性 $3K_B$ (tf/m)	2304	12401	12401	2304	1867	7527	7558	1855	1174	5084	5093	1170	
	等価減衰定数 h_B	27.3	27.3	27.3	27.3	25.8	25.1	25.2	25.8	24.2	22.7	22.7	24.1	
	鉛直ひずみ γ_o (%)	48.7	62.8	61.7	47.4	49.2	63.1	62.0	47.8	49.8	63.5	62.4	48.5	
	せん断ひずみ γ_s (%)	22.2	28.2	29.0	22.4	61.1	68.8	72.5	64.0	94.5	114.4	118.6	97.7	<150(震度法) <250(保耐法)
	局部せん断ひずみ (%) $\gamma_r (= \gamma_o + \gamma_s)$	70.9	91.0	90.7	69.8	110.4	131.8	134.4	112.0	144.3	177.7	180.9	146.2	<278(震度法) <417(保耐法)
	慣性力の分担率	0.089	0.404	0.417	0.090	0.106	0.390	0.396	0.108	0.103	0.394	0.400	0.104	
	上部構造変位 δ (cm)	3.6				9.3				17.5				
	橋の固有周期 T (s)	0.83				1.05				1.28				
	橋の減衰定数 h (%)	27.2				25.1				23.0				
直	設計水平震度 k_{hcm}	0.21				0.72				1.42				
	等価水平震度 k_{hem}	-				0.34				0.43				
	下部構造の等価剛性 (tf/m)	7065106	667241	778159	5945748	7065106	182900	212900	5945748	7065106	182900	212900	5945748	
	橋脚の減衰定数 (%)	10	20	20	10	10	20	20	10	10	20	20	10	
	基礎構造の剛性 (tf/m)	169086	585700	310100	651800	169086	585700	310100	651800	169086	585700	310100	651800	
	基礎の減衰定数 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
	設計変位 u_B (cm)	3.6	3.5	3.5	3.6	9.2	8.9	8.8	9.3	17.4	16.9	16.8	17.4	
	有効設計変位 u_{Be} (cm)	2.5	2.5	2.5	2.5	6.4	6.2	6.2	6.5	12.2	11.8	11.8	12.2	
	免震支承の等価剛性 $3K_B$ (tf/m)	2304	12401	12401	2304	1867	7527	7558	1855	1174	5084	5093	1170	
	等価減衰定数 h_B	27.3	27.3	27.3	27.3	25.8	25.1	25.2	25.8	24.2	22.7	22.7	24.1	
角	鉛直ひずみ γ_o (%)	48.7	62.8	61.7	47.4	49.2	63.1	62.0	47.8	49.8	63.5	62.4	48.5	
	せん断ひずみ γ_s (%)	19.8	29.3	29.3	19.8	51.2	73.8	73.4	51.7	96.4	140.5	140.0	96.9	<150(震度法) <250(保耐法)
	局部せん断ひずみ (%) $\gamma_r (= \gamma_o + \gamma_s)$	68.5	92.1	91.0	67.2	100.4	136.8	135.3	99.5	146.2	204.0	202.4	145.4	<278(震度法) <417(保耐法)
	慣性力の分担率	0.079	0.420	0.421	0.079	0.103	0.397	0.397	0.103	0.096	0.404	0.403	0.096	



	A 1, A 2	P 1, P 2
平面形状	70cm×70cm	130cm×130cm
有効形状	68cm×68cm	128cm×128cm
ゴム厚	1.5cm×12層	3.0cm×4層
鉛プラグ	φ10m×4本	φ19m×4本
支承数	3基	3基

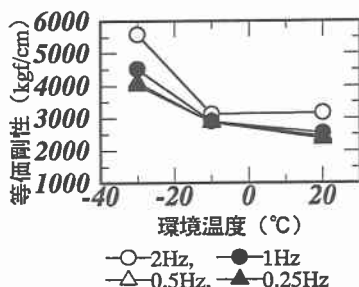
図－2 LRBの形状と一般図

3. 免震支承の低温特性

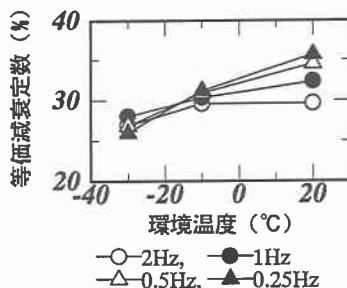
環境温度の低下に伴って免震装置の免震効果がどのように変化していくのか、ここでは、LRBの極低温条件(−30℃)を含めた低温時の振動特性のうち等価剛性と等価減衰定数に着目した実験的研究についてまとめる。実験の主な内容は、①周波数の影響②鉛直荷重の影響③振幅の影響④低温条件下の支承内部の温度変化の4つである。結論から述べると、

- (1) 周波数の違いによる免震装置の振動特性への影響は余り見られなかった。
- (2) 鉛直荷重の大きさが異なる場合、等価剛性にはその影響が余り見られなかったが、等価減衰定数では鉛直荷重が大きくなるとその値も多少大きくなる傾向が見られた。
- (3) 加振振幅の大きさが異なる場合、振幅の小さい方が環境温度の影響を受けやすい傾向が見られた。
- (4) 加振振幅が大きいと免震装置の温度上昇も大きくなる。また加振後の温度低下を含めて免震装置の温度特性が得られた。
- (5) 環境温度が低下してゴムの剛性が増加しても免震装置の免震効果は大きく低下しない。

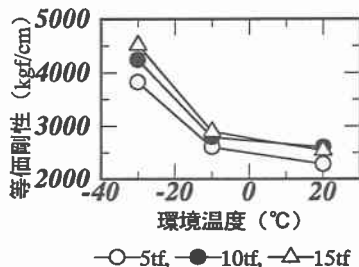
という結果を得ている。しかし環境温度の違いによる剛性の増加および減衰定数の低下は明らかのため、これらに対する検討が必要であると思われる。以下に環境温度と等価剛性(図－3, 図－4), 環境温度と等価減衰定数(図－5, 図－6)のグラフを示す。



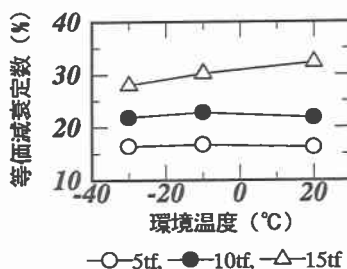
図－3 周波数が異なる場合の等価剛性



図－5 周波数が異なる場合の等価減衰定数



図－4 鉛直荷重が異なる場合の等価剛性



図－6 鉛直荷重が異なる場合の等価減衰定数

以上の結果と等価剛性および等価減衰定数の振幅依存性などを総合的に判断して、低温時（－３０℃）の等価剛性増加比率 $\alpha = 1.5$ 、等価減衰定数の減少比率 $\beta = 0.9$ として以降設計上でも検討していく。

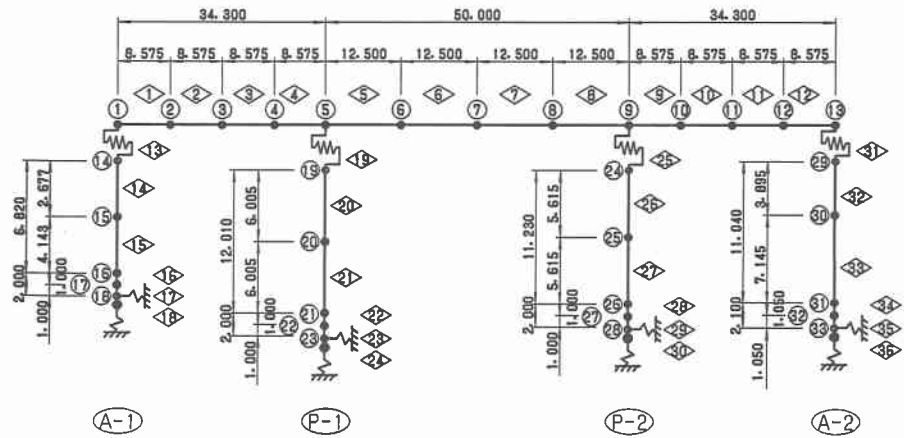
4. 動的応答解析

本橋は、免震設計を採用していることから、道示V耐震設計編に明記されている『地震時保有水平耐力法で耐震設計した結果を動的解析により照査するのが望ましい橋』に相当するため、これに準拠し照査を行った。また、3. 免震支承の低温特性 で記述した実験結果より、常温時（＋２０℃）における橋の挙動と低温時における橋の挙動を動的解析により比較を行い4－3に示す。

4-1 設計条件

解析は、DYNA2Eを用いて行った。解析モデルは、図－7に示す様に橋軸方向の2次元フレーム解析とした。動的解析を行う上で固有値解析をハウスホルダー法、直接積分の方法としてNewmarkの β 法を用いた。減衰は道示V耐震設計編に従い、ひずみエネルギー比例減衰とした。また、上部工、橋台、橋脚フーチング部を線形要素とし、橋脚躯体の非線形性を武田モデルの非線形要素とした。免震支承は、バイリニアモデルの非線形とし、地盤ばねは杭基礎を考慮した水平ばね、回転ばね、水平回転の連成ばねを設置した。

入力地震波は、「道路橋の耐震設計に関する資料」（社団法人 日本道路協会 発行）の2種地盤用のTYPE IIの振幅調整波、T2-II-1 JR西日本鷹取駅NS、T2-II-2 JR西日本高鷹駅EW、T2-II-3 大阪ガス豊合供給所N27Wの3波形を用いた。



図－7 解析骨組モデル図

4-2 解析結果および照査

以上の様に解析して得られた、桁の変位、橋脚天端の変位、免震支承の変位、橋脚基部の曲げモーメント、慣性力を表－2に示す。また、静的解析における橋脚の保有水平耐力照査（表－3）と、動的解析による照査（表－4）を以下に示す。図－8に免震支承のバイリニアモデルを示す。

表－2 動的解析による応答値

	T2-II-1	T2-II-2	T2-II-3	平均値		T2-II-1	T2-II-2	T2-II-3	平均値
A 桁の変位 (m)	0.332	0.338	0.361	0.343	P 桁の変位 (m)	0.331	0.338	0.361	0.343
1 橋脚天端の変位 (m)	0.012	0.011	0.012	0.012	1 橋脚天端の変位 (m)	0.097	0.094	0.120	0.104
1 免震支承の変位 (m)	0.320	0.325	0.349	0.331	1 免震支承の変位 (m)	0.234	0.242	0.241	0.239
橋脚基部の曲げモーメント (t/m)	—	—	—	—	橋脚基部の曲げモーメント (t/m)	12683	12819	13565	13023
A 桁の変位 (m)	0.331	0.338	0.361	0.343	P 桁の変位 (m)	0.331	0.338	0.361	0.343
1 橋脚天端の変位 (m)	0.015	0.094	0.120	0.076	1 橋脚天端の変位 (m)	0.080	0.079	0.098	0.086
2 免震支承の変位 (m)	0.316	0.242	0.241	0.266	2 免震支承の変位 (m)	0.251	0.257	0.263	0.257
橋脚基部の曲げモーメント (t/m)	—	—	—	—	橋脚基部の曲げモーメント (t/m)	11804	11964	13559	12442

表-3 静的解析による保有耐力の照査

	P-1			
	タイプI	タイプII	タイプI	タイプII
破壊形態	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ
地震時保有水平耐力 P_a (tf)	908.811	908.789	3385.688	3386.935
(等価水平耐力) × (等価重量) (tf)	763.858	777.414	842.298	1015.934
終局水平耐力 (tf)	908.811	908.789	3385.688	3386.935
せん断耐力 (tf)	2233.231	2391.978	4451.366	4554.557
等価水平変位 $K_h c m e$	0.34	0.34	0.35	0.42
許容塑性率 μ_a	2.051	5.059	1.546	3.337
設計水平変位 $K_h c m$	0.50	0.87	0.50	0.99
等価固有周期 T (s)	1.26	1.37	1.12	1.24
等価重量 W (tf)	2246.641	2286.512	2406.565	2418.890
許容残留変位 δ_{ra} (cm)	12.010	12.010	15.610	15.610
残留変位 δ_r (cm)	0.70	5.03	0.00	0.00
応答塑性率 μ_r	1.26	2.90	0.56	0.75
降伏変位 δ_v (cm)	4.42	4.42	1.85	1.85
	P-2			
	タイプI	タイプII	タイプI	タイプII
破壊形態	曲げ	曲げ	曲げ	曲げ
地震時保有水平耐力 P_a (tf)	967.208	967.249	3548.061	3549.255
(等価水平耐力) × (等価重量) (tf)	767.392	780.934	833.408	1005.450
終局水平耐力 (tf)	967.208	967.249	3548.061	3549.255
せん断耐力 (tf)	2233.231	2391.978	4451.366	4554.557
等価水平変位 $K_h c m e$	0.34	0.34	0.35	0.42
許容塑性率 μ_a	2.135	5.407	1.534	3.285
設計水平変位 $K_h c m$	0.50	0.87	0.50	0.99
等価固有周期 T (s)	1.26	1.37	1.12	1.24
等価重量 W (tf)	2257.036	2286.866	2381.166	2393.929
許容残留変位 δ_{ra} (cm)	11.230	11.230	14.830	14.830
残留変位 δ_r (cm)	0.42	3.78	0.00	0.00
応答塑性率 μ_r	1.18	2.63	0.56	0.72
降伏変位 δ_v (cm)	3.85	3.85	1.67	1.67

表-4より、支承については表-1の静的解析の値と比べて数値は大きい、許容値は満足していることがわかる。橋脚については保有水平耐力を越えているが、柱の鉄筋をD29からD32にあげることで対処できる。

4-3 低温時に関する検討

3. 免震支承の低温特性 で示した α 、 β を用いて、低温時における等価剛性および、等価減衰定数を求め、常温時(+20℃)と低温時(-30℃)のときの橋の固有周期、慣性力作用位置での加速度および水平力を比較した。ここでも、4-2と同様に、標準3波形を用いた解析値の平均値による。結果を表-5に示す。また、それぞれの動的解析による照査を表-6、表-7に示す。

表-3において、常温時と低温時の単純な比較では、加速度は1.2倍になっているものの橋脚に作用する水平力は1.02倍程度と低温化の影響は少ないものにとることができる。また、それぞれの照査結果をみると、表-6で、P-2橋脚の支承のせん断ひずみが許容値を越えているが、これは支承を線形モデルとして解析したためと思われる。常温時については、4-2で非線形性を考慮して解析しているため、設計に影響はないものとして進める。常温時と低温時を比べると、低温時では、支承の剛性が高くなることで支承の変位は小さくなるが、逆に橋脚先端での変位が大きくなり橋脚の応答塑性率に影響することがわかった。表-7をみると、応答塑性率が常温時の約1.5倍程度増加しているが、許容値は満足している。

表-4 動的解析による保有耐力の照査

		A-1	P-1	P-2	A-2
免震支承の照査	応答変位の平均値 (m)	0.331	0.239	0.257	0.266
	せん断ひずみ	1.841	1.992	2.142	1.480
	許容せん断ひずみ	2.5	2.5	2.5	2.5
橋脚の照査	降伏変位 (m)	-	0.044	0.039	-
	応答変位の平均値 (m)	-	0.104	0.086	-
	応答塑性率	-	2.345	2.225	-
	許容塑性率	-	5.059	5.407	-
	応答慣性力の平均値 (tf)	-	1084.3	1108.0	-
	地震時保有水平耐力 (tf)	-	908.8	967.2	-

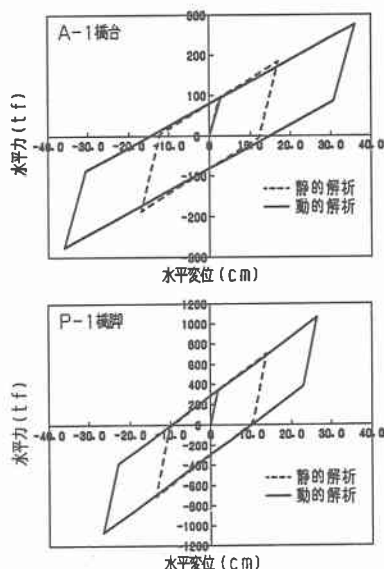


図-8 免震支承のバイリニアモデル

表-5 免震支承の低温特性による比較

+20℃		A-1	P-1	P-2	A-2
等価剛性KB (tf/m)		765	4077	4053	765
等価減衰定数hB (%)		0.153	0.164	0.151	0.154
橋の固有周期 (sec)		1.54			
加速度 (cm/s ²)		626.7			
水平力 (tf)		313.0	962.0	1018.2	948.7

-30℃		A-1	P-1	P-2	A-2
等価剛性KB (tf/m)		1147	6116	6080	1147
等価減衰定数hB (%)		0.138	0.148	0.136	0.139
橋の固有周期 (sec)		1.30			
加速度 (cm/s ²)		773.5			
水平力 (tf)		413.3	976.4	1036.7	994.1

表－6 動的解析による照査（常温時）

		A-1	P-1	P-2	A-2
免震支承 の照査	応答変位の平均値 (m)	0.413	0.279	0.302	0.410
	せん断ひずみ	2.294	2.325	2.517	2.290
	許容せん断ひずみ	2.5	2.5	2.5	2.5
橋脚 の照査	隆伏変位 (m)	-	0.044	0.039	-
	応答変位の平均値 (m)	-	0.145	0.122	-
	応答塑性率	-	3.289	3.177	-
	許容塑性率	-	5.059	5.407	-
	応答慣性力の平均値 (tf)	-	1122.2	1199.6	-
	地震時保有水平耐力 (tf)	-	908.8	967.2	-

表－7 動的解析による照査（低温時）

		A-1	P-1	P-2	A-2
免震支承 の照査	応答変位の平均値 (m)	0.374	0.173	0.188	0.330
	せん断ひずみ	2.078	1.439	1.569	1.831
	許容せん断ひずみ	2.5	2.5	2.5	2.5
橋脚 の照査	隆伏変位 (m)	-	0.044	0.039	-
	応答変位の平均値 (m)	-	0.216	0.200	-
	応答塑性率	-	4.879	5.195	-
	許容塑性率	-	5.059	5.407	-
	応答慣性力の平均値 (tf)	-	1139.1	1221.4	-
	地震時保有水平耐力 (tf)	-	908.8	967.2	-

5. まとめ

寒冷地における免震橋の挙動を把握するため、実験的データをもとに動的解析を行った結果、免震支承の低温化による特性の変化が、橋脚に作用する水平力には大きな影響を及ぼさないが、橋脚の変位に影響することがわかった。本論文では、環境温度が -30°C に低下する場合を含めた免震設計を実施したもので、低温時の動的解析は等価剛性の増加と等価減衰定数の減少により考慮した。照査の結果、設計条件を満足することが確かめられた。今後の課題としては、支承周辺の実際の温度条件の把握や橋軸直角方向の詳細な検討などを考えている。

謝辞

本設計の解析にあたりましては、開発工営社の青地知也さんの多大なるご協力を得ましたことをここに記します。また、本論文を進める上で、北見工業大学：三上助教授、オイレス工業：川原氏、佐藤氏、その他多くの方々のご協力、助言がありましたことに謝意を表します。

[参考文献]

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ～Ⅴ，1996.12
- 2) (財) 土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル（案），1994.10
- 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) 大島俊之，三上修一，山崎智之，久保和子，池永雅良，斉藤隆行，本間美樹治，村田捷次：免震支承の耐寒性の実験および免震橋梁設計，第13回 寒地技術シンポジウム，1997.11
- 5) 大島，三上，山崎，池永，松井，久保：低温条件における免震装置の機能確認実験，構造工学論文集 Vol. 44A，1998.3
- 6) 林亜紀夫：橋梁への免震機構の適用性に関する研究，学位論文（東京都立大），1997.3
- 7) 小山田欣祐，佐藤昌志，谷本俊充，林亜紀夫：低温域における橋梁免震装置の実験的研究，構造工学論文集，pp. 707-714，1996.3
- 8) 久保，松井，大島，池永，高橋：鉛プラグ入り積層ゴム支承の低温環境における使用性，土木学会第52回年次学術講演会概要集，Ⅰ－B 349，1997.9
- 9) 戸原晴彦編：改訂新版 防震ゴム，現代工学社，1975
- 10) 大島，三上，山崎，久保，長谷川，松井：免震装置の低温条件における免震効果のシミュレーション，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，土木学会耐震工学委員会，1996.11
- 11) 小山田，谷本，佐藤，林：免震橋の地震時挙動について温根沼大橋における事例，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，土木学会耐震工学委員会，1996.11
- 12) 小山田，佐藤，谷本，別所：幾何学特性を利用した免震装置の開発，第1回免震・制震コロキウム講演論文集，土木学会耐震工学委員会，1996.11
- 13) (財) 日本建築センター：免震構造建築物－その技術開発と地震観測結果－，平成4年11月
- 14) 林，高橋，大島，目黒，本間，内林：土木学会北海道支部 論文報告集 第53号(A)，1997.2