

I-63 寒冷地における免震橋の試設計と動的特性

開発土木研究所 正員 西村 敦史

開発土木研究所 正員 西 弘明

開発土木研究所 正員 佐藤 昌志

1. はじめに

我が国は、世界第1級の地震国であり、構造物の設計に当たっては耐震性に対する十分な配慮が必要とされている。特に公共土木施設は、被災した場合復旧に多大な日数を要するため、地震後の復旧、救助活動を円滑に進めるために十分な耐震性が要求されている。

建築分野では、早くから耐震設計に代わり免震設計の研究が進められてきたが、土木の分野ではニュージーランドにおいて1970年代に橋梁に免震設計法が取り入れられて以来、免震装置及び免震設計法の開発が強震地震動の研究の発展により進められるようになってきた。我が国でも近年橋梁構造物において免震設計の研究が組織的に進められるようになってきており、建設省土木研究所を中心に多くの研究成果が発表されている他、道路橋示方書においても地震時の慣性力を低減させる方法が記載されている。

このことから、北海道開発局では、平成元年に「道路橋の免震設計法ガイドライン」が作成されたことから、根室半島に位置する温根沼大橋の一部に免震設計の考え方を取り入れ、免震橋として建設している。

平成5年釧路沖地震に始まり北海道南西沖地震、北海道東方沖地震と、約1年半の間に3度の大規模地震が北海道沖において発生した。この地震により多数の橋梁構造物にも被害が発生し、これまでも増して安全性に対する関心は高まってきている。

しかしながら、免震設計を行う場合、「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」では免震支承の温度依存性に言及されているものの、北海道の様な極寒冷地における動的挙動については研究の余地が多く残されていると考えられ、動的挙動の検討により静的設計の妥当性や免震効果の確認を行うことが必要である。そこで、筆者らはこれまでの経験を基に多径間連続免震橋について支承の低温時特性を考慮した試設計を行うにあたり、動的挙動の検討等を行ったので報告する。

2. 研究のねらいと問題点

道路橋の免震設計法マニュアル(案)*⁽¹⁾(以下、マニュアル(案))において、適用温度領域は $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ として扱っている。しかし、北海道の様に冬季は -40°C にもなる寒冷地での免震支承の使用を考えた場合、低温下におけるゴム材料の物性値の変化などの問題が懸念される。ここで当研究室では、平成3年、4年と低温域における免震支承の研究を行ってきた。

本研究ではマニュアル(案)*⁽¹⁾を基本に低温域(-30°C)における試設計を行いながら、以下の問題点を検討していく。

- ①マニュアル(案)*⁽¹⁾に即した手法で低温域問題としてどんな補則的適用法があるか。
- ②平成4年における低温域繰返しせん断試験*⁽²⁾から得られた免震支承の等価剛性を用いて低温域のバイリニア型免震支承の1次剛性、2次剛性値を常温時レベルに比して係数的評価方法を検討する。
- ③常温時における静的解析を基本に常温時、低温時における動的挙動を S_1 、 S_2 標準地震波を用いてその影響を検討する。

3. 試設計モデルの基本条件

- 上部形式：14径間連続 P C 箱桁形式
- 下部形式：逆 T 式橋台及び壁式橋脚
- 基礎形式：直接基礎(第 I 種地盤)
- 支間割：14@40.20m=562.80m
- 幅員：9.75m
- 免震装置：鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)

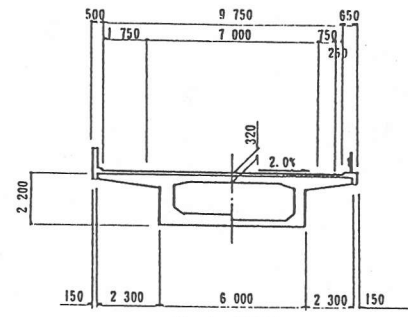


図-1 断面図

4. 解析モデルと解析手法

解析には、構造物の解析プログラムDYNA2Eを用いている。解析手順は図-2に示すとおり、静的解析2ケース、動的解析4ケース(常温時2ケース低温時2ケース)について検討している。さらに常時の温度応力による支承せん断力の影響についても検討を行っている。

動的解析にあたり、図-3に示す2次元のパネーマス系でモデル化する。解析モデルは、図-4に示す14径間連続上下部一体系モデルを用いている。

入力地震波形には図-5、図-6に示す千代田大橋(Ⅰ種地盤)の強震記録を用い、基盤層より入力した。

解析に用いている剛性の考え方は、次のとおりであり、表-1に剛性を示した。

- ①上部工は、P C 箱桁全断面有効とする。
- ②下部工は、 L_1 レベルは全断面有効剛性を用い、 L_2 レベルは地震時保有水平耐力法から降伏剛性を用いて計算している。その考え方は、水平力と橋脚および橋台の変位の関係(P- δ 曲線)を図-7に示す。これより、下部構造の降伏剛性と等価の断面2次モーメント(I)は式-1で算定される。

$$I = P_y h^3 / 3 E \delta_y \dots\dots\dots (式-1)$$

ここに、 h = 橋脚下端から上部構造慣性力の作用位置までの高さ(m)
 P_y = 橋脚の降伏耐力(tf)
 δ_y = 橋脚の降伏変位(m)
 E = 弾性係数(tf/m²)

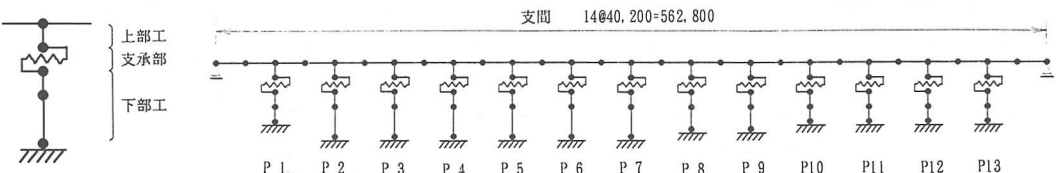


図-3 パネーマスモデル

図-4 モデル図

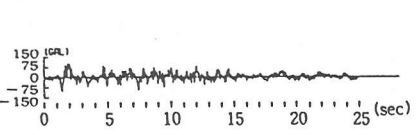


図-5 L_1 標準波(Ⅰ種地盤)

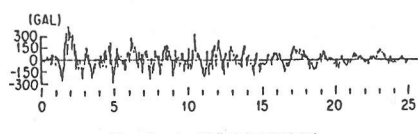


図-6 L_2 標準波(Ⅰ種地盤)

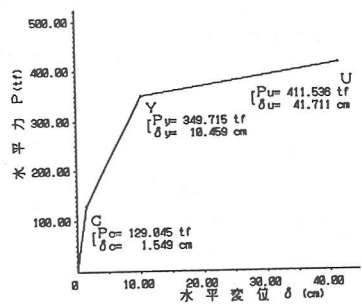


図-7 保有耐力時の水平力-変位図(P 7)

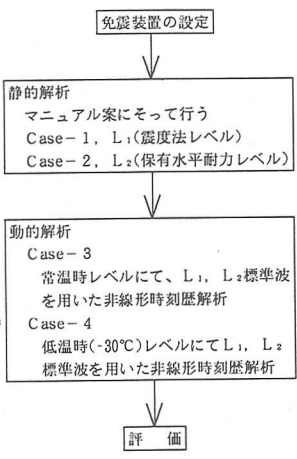


図-2 解析検討の流れ

表-1 橋脚高さと剛性

	高さ(m)	L_1 (m ⁴)	L_2 (m ⁴)
P 1	15.0	5.32	4.00
P 2	22.0	5.32	4.97
P 3	22.5	5.32	4.97
P 4	23.5	5.32	4.92
P 5	23.0	5.32	4.92
P 6	21.5	5.32	4.71
P 7	20.5	5.32	4.71
P 8	18.5	5.32	3.67
P 9	17.0	5.32	3.78
P10	16.0	5.32	4.00
P11	15.0	5.32	4.00
P12	13.0	5.32	3.88
P13	12.0	5.32	3.88

③免震装置は、鉛プラグ入り積層ゴム支承を用い、等価固有周期は計算固有周期の2倍以上として支承特性を決定する。

④低温時の全体解析における免震装置の1次、2次剛性は、表-2に示す当研究室による繰返しせん断試験⁽²⁾より得られた等価剛性結果を利用して、解析値に入力剛性として用いる1次剛性、2次剛性を式-2、式-3のとおり提案する。

表-2 各温度における等価剛性(常温～-30℃)⁽²⁾

供試体	温度(℃)	等価剛性(tf/m)
L R B	常温	131.9
	-20	190.2
	-25	194.6
	-30	208.9

$$K_{1ei} = K_{2ei} \times 85.0 \quad \text{.....(式-2)}$$

$$K_{2ei} = \alpha \cdot K_{Bei} - Q_{di} / U_{Bi} \quad \text{.....(式-3)}$$

ここに、

K_{1ei} = 低温時の i 番目の下部構造の支承第1次有効剛性(tf/m)

K_{2ei} = 低温時の i 番目の下部構造の支承第2次有効剛性(tf/m)

α = 低温時(-30℃)の等価剛性/常温時の等価剛性

K_{Bei} = 常温時の免震支承の等価剛性(tf/m)

Q_{di} = 免震装置の降伏荷重(tf)

U_{Bi} = 免震装置の設計変位(m)

表-3 固有周期の比較

モード次数	静的解析		動的・L ₁ レベル			
			-30℃		常温	
	L ₁	L ₂	-30℃	常温	-30℃	常温
第1次	1.27	2.06	1.19	0.97	1.25	1.51
第2次	(Kh=0.18)	(Kh=0.38)	0.45	0.45	0.45	0.45
第3次			0.45	0.45	0.45	0.45
第4次			0.40	0.40	0.40	0.40
第5次			0.38	0.38	0.38	0.38
第6次			0.36	0.36	0.36	0.36
第7次			0.35	0.35	0.35	0.35
第8次			0.33	0.33	0.33	0.33
第9次			0.30	0.30	0.30	0.30
第10次			0.28	0.28	0.28	0.30

単位(Sec)

5. 解析結果

解析結果を以下の様に要約する。

(1)固有周期

①静的解析における免震支承特性値としてL₁レベルでT=1.27(sec)、Kh=0.18であり、L₂レベルではT=2.06(sec)、Kh=0.38である。

②動的解析では、L₁レベル、L₂レベルとも第1次モード時が卓越し、第1次モードにおいてその比率(低温時/常温時)は、L₁レベルで0.82、L₂レベルで0.83で約20%、Tが短くなる。

第2次モード以降では常温時と低温時の固有周期は同程度である。

(2)低温時剛性に関する影響

①等価剛性は常温時と低温時(-30℃)の比率で1.5837倍の実験値を与えた。これをもとに1次剛性を決定する際、ゴム部分に1.5837倍を乗じたが、鉛部分は降伏時にその依存性が生じないので、その1次剛性比率(低温時/常温時)は、表-4に示すとおりL₁レベルで2.21～2.58、L₂レベルで1.81～1.85となった。

(3)応答値

①橋脚下端部の曲げモーメントは、表-5よりL₁、L₂レベル共、静的解析に比べて動的応答値が小さい。又、動的解析の低温時(-30℃)/常温時の比率はL₁レベルで1.26～1.43、L₂レベルで1.17～1.22倍である。

②表-6に示すとおり上部工慣性力の有効な水平分散効果がみられた。

表-4 低温(-30℃)時免震部剛性値

単位 変位: m, 剛性: tf/m					
L ₁ レベル(降伏値Qd=38.45tf, α=1.5837)					
橋脚	有効設計変位	有効等価剛性	有効2次剛性	有効1次剛性	常温時有効1次剛性
P1	0.053	1365	1439	9351	4171
P2	0.038	1690	1666	10831	4419
P3	0.037	1731	1694	11010	4441
P4	0.034	1824	1755	11409	4487
P5	0.035	1775	1723	11201	4334
P6	0.039	1652	1641	10666	4397
P7	0.042	1586	1596	10371	4354
P8	0.047	1482	1523	9899	4277
P9	0.050	1423	1481	9627	4226
P10	0.052	1392	1458	9478	4197
P11	0.053	1365	1439	9351	4171
P12	0.056	1325	1408	9155	4128
P13	0.057	1310	1397	9081	4111

L ₂ レベル(降伏特性値Qd=38.45tf, α=1.5837)					
橋脚	有効設計変位	有効等価剛性	有効2次剛性	有効1次剛性	常温時有効1次剛性
P1	0.281	483	628	4079	2248
P2	0.240	517	659	4282	2320
P3	0.240	517	659	4282	2320
P4	0.231	527	668	4340	2342
P5	0.231	527	668	4340	2342
P6	0.249	508	650	4227	2300
P7	0.249	508	650	4227	2300
P8	0.255	503	646	4197	2289
P9	0.267	493	637	4138	2267
P10	0.281	483	628	4079	2248
P11	0.281	483	628	4079	2248
P12	0.290	477	622	4046	2237
P13	0.290	477	622	4046	2237

(4) 常時の温度応力に関する影響

表-7に示すように、地震時のせん断力に比べ温度応力の影響はあまり大きくはならないと考えられる。

6. まとめ

以上、本研究においてまとめとしてここに要約する。

(1) 低温時の免震設計解析にあたり、免震装置におけるゴム部分の温度依存の扱いが重要である。ここに当研究室にて行なった、低温時繰返しせん断試験により得られた等価剛性から α (低温時等価剛性/常温時等価剛性)を設定し、2次剛性の計算の中に乗じることによって、マニュアル(案)⁽¹⁾を一部補足する手法として活用することもある有効であると考えられる。

(2) 今回の試設計では、断面力レベルでみるならば、静的解析が動的解析を上回っている。断面力値ではあたかも静的解析で問題ないとみえるが、例えば常温域～低温域へと温度変化するときには当然複数の固有周期が現れる。これら各々の温度状態で卓越する複数の周期が、支承の非線形剛性の設定にあたって寒冷地レベルでどう適合すべきかを非線形動的解析の中でさらに検討中であり、この種の問題では動的解析は必要不可欠である。

(3) 多径関連連続免震橋梁は、ノージョイント化により走行性、除雪の施工性等に良好である。また、表-7でみるように上部工慣性力の水平分散効果も発揮している。更に常時においても温度応力の影響はゴム部分の剛性のみに影響されると考えられ、高減衰ゴムシューと同程度のせん断力になることが推測され、有効な構造形式であるといえる。

(4) 低温域における免震設計では、温度依存に敏感な支承剛性の考慮は最も重要である。免震設計の基本は「アイソレーター」と「ダンパー」としての機能性が主眼にある。本研究における多径関連連続免震橋では、低温条件から発する北海道の地震動の地域特性や構造減衰などの観点からも寒冷地における支承剛性等の適用についての総合的妥当性を図っていきたいと考えている。

表-5 橋脚下端最大曲げモーメント

橋脚	単位($\times 10^3$ tf・m)					
	静的解析		動的・L ₁ レベル		動的・L ₂ レベル	
	L ₁	L ₂	常温	-30℃	常温	-30℃
P 1	-3.17	-7.05	-2.06	-1.49	4.68	-3.96
P 2	-4.66	-9.38	-2.68	-2.10	7.11	-6.07
P 3	-4.74	-9.54	-2.70	-2.12	7.41	-6.20
P 4	-4.91	-9.71	-2.70	-2.15	7.81	-6.46
P 5	-4.82	-9.55	-2.71	-2.11	7.69	-6.34
P 6	-4.55	-9.24	-2.65	-2.09	6.82	-5.88
P 7	-4.36	-8.90	-2.55	-1.99	-6.71	-5.61
P 8	-3.94	-7.96	-2.33	-1.80	-6.01	-4.93
P 9	-3.61	-7.61	-2.27	-1.74	5.40	-4.52
P10	-3.38	-7.44	-2.20	-1.63	5.00	-4.23
P11	-3.16	-7.01	-2.06	-1.56	4.69	-3.96
P12	-2.70	-6.21	-1.77	-1.26	-4.28	-3.40
P13	-2.47	-5.74	-1.61	-1.12	-4.02	-3.13

表-6 反力分散

橋脚	単位(tf)					
	静的解析		動的・L ₁ レベル		動的・L ₂ レベル	
	L ₁	L ₂	-30℃	常温	-30℃	常温
P 1	167	376	119	88	310	226
P 2	146	288	99	82	286	217
P 3	144	283	96	81	285	216
P 4	139	266	91	78	286	213
P 5	141	271	93	78	286	215
P 6	147	295	100	82	284	216
P 7	151	306	100	83	296	219
P 8	158	314	110	84	299	219
P 9	162	341	114	84	305	222
P10	164	365	117	86	306	224
P11	166	373	183	87	310	226
P12	169	396	121	87	314	228
P13	170	402	122	88	317	229

表-7 温度応力による支承せん断力

橋脚	単位(tf)	
	常温時	低温時(-30℃)
P 1, P13	118	187
P 2, P12	98	156
P 3, P11	78	124
P 4, P10	59	93
P 5, P 9	39	62
P 6, P 8	20	31
P 7	0	0

参考文献

- 1) 建設省土木研究所及び民間28社：道路橋の免震設計法マニュアル(案)、建設省土木研究所共同研究報告書、平成4年3月
- 2) 開発土木研究所構造研究室：低温域における免震支承に関する研究報告書(免震支承実験報告及び、免震橋梁の解析)、構造研究室資料第15号、平成4年4月
- 3) 開発土木研究所構造研究室：低温域における免震支承の実験的研究報告書、構造研究室資料第14号、平成3年4月
- 4) 西村、西、佐藤、小野：低温下における免震支承の適用性に関する考察、土木学会第49回年次学術講演概要集、平成6年9月
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、丸善株式会社、平成2年2月