

## 低温条件における免震装置の機能確認実験

EXPERIMENT OF FUNCTIONAL CONFIRMATION ON LEAD RUBBER BEARING (LRB)  
UNDER LOW TEMPERATURE

大島俊之\* 三上修一\*\* 山崎智之\*\*\* 池永雅良\*\*\*\* 松井義孝\*\*\*\*\* 久保和子\*\*\*\*\*

Toshiyuki OSHIMA, Shuichi MIKAMI, Tomoyuki YAMAZAKI, Masayoshi IKENAGA,  
Yoshitaka MATSUI, and Kazuko KUBO

\*工博 北見工業大学教授 (〒090-0015 北海道北見市公園町 165 番地)

\*\*博士(工学) 北見工業大学助教授 (〒090-0015 北海道北見市公園町 165 番地)

\*\*\*北見工業大学助手 (〒090-0015 北海道北見市公園町 165 番地)

\*\*\*\*オイレス工業(株) (〒252-0081 神奈川県藤沢市桐原町 8 番地)

\*\*\*\*\* (株) 開発工営社 (〒060-0004 北海道札幌市中央区北 4 条西 5 丁目 1 番地アスティ 45 ビル 13 階)

\*\*\*\*\*修士(工学) (株) 構造技研(〒532-0011 大阪市淀川区西中島 4 丁目 9 番 28 号太陽センタービル)  
(研究当時北見工業大学大学院生)

It is a important task for a designer to evaluate the vibration characteristics of Lead Rubber Bearing (LRB) when it is used in severe cold environment. That is because the stiffness of rubber increases some how when the temperature decreases less than  $-10^{\circ}\text{C}$ . So that the experiment was done in low room temperature up to  $-30^{\circ}\text{C}$  on LRB specimen with different frequencies, amplitudes and vertical forces. Results show that if we take its small changes of vibration characteristics of LRB into account, there is no problem for designer to use LRB up to  $-30^{\circ}\text{C}$  environment.

Key Words: LRB, Low temperature, Experiment

## 1. まえがき

本論文では鉛プラグ入り積層ゴム支承 (Lead Rubber Bearing, LRB) の極低温条件 ( $-30^{\circ}\text{C}$ ) を含めた低温時の振動特性のうち、等価剛性と等価減衰に着目して、実験的研究を行ったのでその結果を報告している。

橋梁の免震設計については平成 4 年に公表された建設省の「道路橋の免震設計法マニュアル(案)」<sup>9)</sup>によって本格的に実用化できる指針が示された。また建築の分野では免震構造の実例が多く<sup>10)</sup>、阪神大震災でもその効果が発揮された。さらに平成 8 年 11 月に出版された新しい道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>1)</sup>では免震設計を推奨しており、今後ますます構造物の免震化が進められるものと思われる。一方、環境条件が低温になると、ゴムのせん断剛性が増加することが知られている。<sup>5), 9)</sup>その増加の程度は  $-30^{\circ}\text{C}$  で常温の 2 倍程度、 $-50^{\circ}\text{C}$  になると 1000 倍程度にまで増加する。文献<sup>1)</sup>では低温環境として  $-10^{\circ}\text{C}$  までについて述べられており、それより低温の  $-20^{\circ}\text{C}$ 、 $-30^{\circ}\text{C}$  の範囲については実際の実験結果などを根拠として実用化されるべきものとなっている。したがって低温下での実証データが必要である。低温条件の厳しい

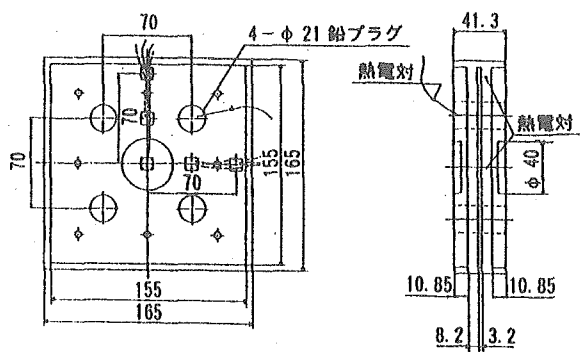
北海道においてはこれまでに、建築の分野ですでに帯広の寺院や釧路の病院の建物等に 13 箇所の施工事例があり、橋梁の分野でも検討が必要となっている。

本研究の実験では大型低温実験室に振動台を設置し、実際の現象を正確に再現できるシステムを用いて、 $-30^{\circ}\text{C}$  までの低温条件について様々な実験を実施したのでその結果について報告する。結論的には  $-30^{\circ}\text{C}$  程度までの低温条件に対して LRB の特性の変化を考慮した上で設計すれば所要の免震効果を期待できるものと思われる。

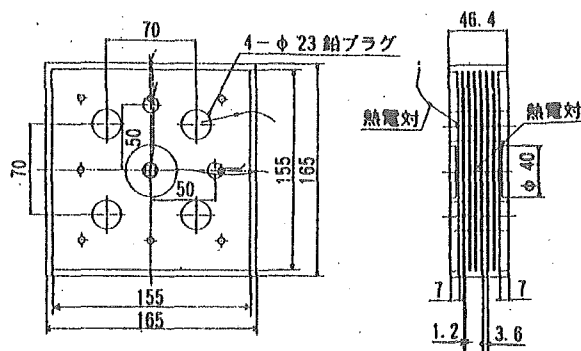
## 2. 実験概要

## 2. 1 供試体

供試体は現在北海道北見市において建設を計画している 3 径間連続コンクリート曲線箱桁橋の免震装置を対象として、図 1 の(a)と(b)に示す二種類の鉛プラグ入り積層ゴム支承を用いて実験を行った。供試体(a)は、ゴム層  $8.2\text{mm} \times 2$  層であり振動させたことによって内部温度がどのように変化するか調べるために熱電対を鉛プラグとゴムの内部と外側に付けた。供試体(b)はゴム層  $3.6\text{mm} \times 7$  層で熱電対を鉛プラグとゴムの内部に付けた。供試



(a) ゴム層 8.2mm×2層



(b) ゴム層 3.6mm×7層

図1 供試体(a), (b)

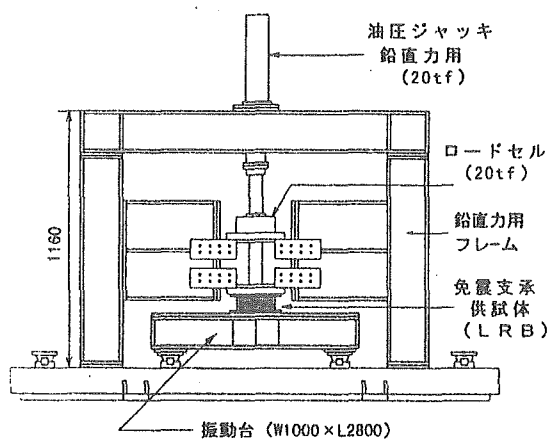


図2 実験装置

体の目標設計値は、実験装置の容量等を考慮に入れて、せん断歪 $\gamma=175\%$ 、等価剛性 $K_{eq}=1227\text{kgf/cm}$ 、等価減衰定数 $h_{eq}=19.3\%$ 、降伏荷重 $Q_d=1177\text{kgf}$ 、 $K_1$ （第1剛性） $=5313\text{kgf/cm}$ 、 $K_2$ （第2剛性） $=817\text{kgf/cm}$ と決定した。実際の設計計算においては動的応答解析の結果から1箇所の支承位置において合計で1000tf程度（中間橋脚上）の分担力となっている。

## 2. 2 実験装置

図2に示す実験装置に供試体を設置し、供試体の上部を固定して鉛直荷重をかけ振動台を水平方向に加振する方法で行った。実験の種類については表1に示すように、供試体(a)についてはせん断歪 $\gamma=60\%$ 、175%で種々条件を変えて実験するとともに、供試体(b)については長期冷却試験を実施した。上載荷重として表1に示すように鉛直荷重5, 10, 15tfを用いたが、面圧に換算してそれぞれ20.8, 41.6, 62.4 $\text{kgf/cm}^2$ である。

## 2. 3 低温室及び温度条件

冬期に橋梁が冷却された時の状態を想定して供試体を実験装置に設置し鉛直荷重をかけた状態で実験室内の温度の調節を行い冷却を行った。环境温度等の条件を表1に示している。実験は供試体の温度が环境温度と余り差が無くなってから行った。また、供試体(b)のみ冷却時間

表1 実験条件

	供試体 (a)			供試体 (b)	
せん断歪	60%			175%	
环境温度 (°C)	+20 -10 -30			+20 0 -10	-20 -30
周波数 (Hz)	2 1 0.5 0.25	1	1	1	1
鉛直荷重 (tf)	15	5 10 15	15	15	15
実験番号	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)

が長くなることによって等価剛性、等価減衰定数にどのような影響が及ぼされるのか調べるために10日間連続で冷却を行った。この間実験室及び免震装置の温度は一定である。

## 2. 4 計測システム

実験装置に振動制御装置を接続し、載荷試験用コンピュータを通じて正弦波をセットし、セットされた正弦波が振動制御装置を経て供試体に加振される。加振された供試体の温度データは熱電対でCard Scope II（共和電業製）により記録した。せん断変位とせん断力のデータは振動制御装置を通じて直接データレコーダに記録した。

## 3. データ解析内容

### 3. 1 等価剛性

等価剛性の値は道路橋示方書<sup>9)</sup>にしたがってせん断変位、せん断力の正負の最大点を結ぶ斜辺からなる三角形の辺の比によって求める。

### 3. 2 等価減衰定数

等価減衰定数は履歴曲線によって囲まれる面積 $\Delta W$ を数値積分によって求め、上記の三角形の面積を $W$ として $\Delta W/\pi W$ により求める。

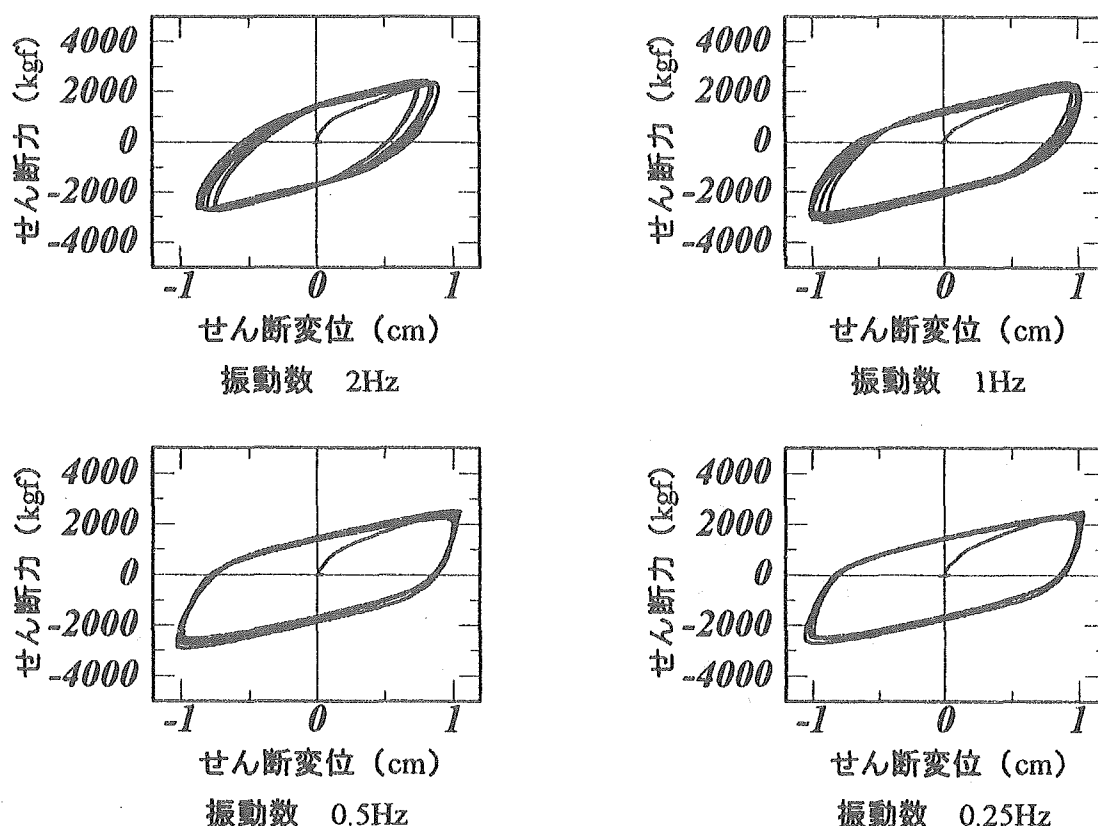


図3 +20°Cの場合の履歴特性

### 3. 3 内部温度

免震装置の加振前から加振停止後のゴムと鉛の温度変化を熱電対により連続的に計測した。熱電対の先端はゴム層および鉛プラグ中に埋め込んでいる。また環境温度が低下することによって免震装置の温度変化にどのような変化があるのかについても調べた。

## 4. 低温条件下の等価剛性

### 4. 1 周波数の影響

表1の(Ⅰ)の実験条件で、周波数の違いによる、温度変化に伴う等価剛性の変化を比較した。常温時の履歴特性を図3に、環境温度を下げていった場合の等価剛性の変化を図4に示す。

図4より等価剛性の値は周波数 2Hz 以外では周波数の違いによる差は余り見られない。これは図3より周波数 2Hz では機械の追随性の関係から設定変位よりも小さい変位で振動する傾向が見られたための影響と考えられる。

周波数 2Hz の場合以外の等価剛性の値は、環境温度が +20°C から -10°C と低下した場合は +20°C の場合より少し大きくなる程度であるが環境温度が -10°C から -30°C と低下すると先程と異なり大きな値を示すようになる。このことから環境温度が -10°C 以下となる地域で免震装置を用いる場合には特に剛性の増加に対する配慮が必要である。

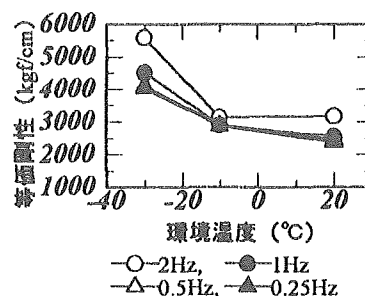


図4 周波数が異なる場合の等価剛性

### 4. 2 鉛直荷重の影響

表1の(Ⅱ)の条件で、鉛直荷重の大きさの違いによる、温度変化に伴う等価剛性の変化を図5に示す。

図5より鉛直荷重が大きい方が僅かに大きめの等価剛性を示しているが、鉛直荷重の大きさの違いによる等価剛性の差は -30°C で 10% 程度で、全体としては小さい。また鉛直荷重の大きさに関わらず環境温度が +20°C から -10°C と低下した場合、等価剛性はあまり変化しなかったが環境温度が -10°C から -30°C と低下した場合、多少大きな値を示す傾向になっているが、この実験結果のみから結論づけるには無理がある。また、実際の免震装置の設計においては鉛直荷重の面圧を 60kgf/cm<sup>2</sup> 程度にしているものが多いようである。

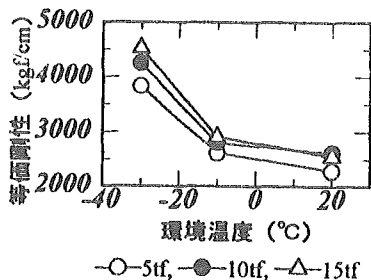


図5 鉛直荷重が異なる場合の等価剛性

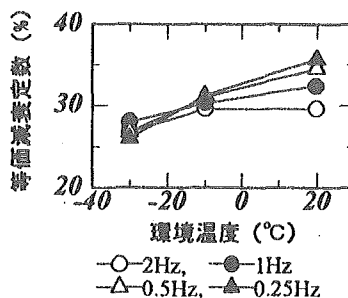
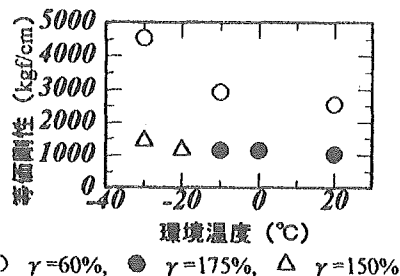


図7 周波数が異なる場合の等価減衰定数

#### 4. 3 振幅の影響

表1の(Ⅲ)、(Ⅳ)の条件で、振幅の大きさの違いによる、温度変化を伴う等価剛性の変化を図6に示す。

図6よりせん断変位の大きい方が等価剛性は小さい値を示す。また環境温度が+20℃から-10℃低下した場合、せん断変位の大小に関わらず等価剛性は+20℃の場合とあまり変わらない。また、環境温度が-10℃から-30℃と低下した時、せん断変位の小さい場合の方が等価剛性に増加の傾向が見られる。なお、図中の△印は表1の実験条件(V)、(Ⅵ)に対する結果であり、供試体(b)に関する結果であるが参考までに表示した。



(○, ●: 供試体(a), △: 供試体(b))

図6 振幅が異なる場合の等価剛性

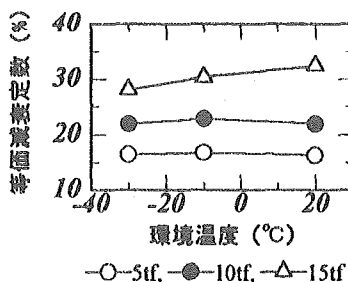


図8 鉛直荷重が異なる場合の等価減衰定数

#### 5. 2 鉛直荷重の影響

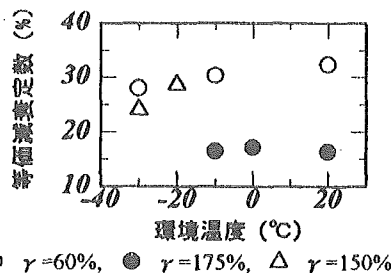
表1の(Ⅱ)の条件で、鉛直荷重の大きさの違いによる、温度変化に伴う等価減衰定数の変化を図8に示す。

図8より鉛直荷重が大きくなると等価減衰定数も大きくなる傾向が見られ、鉛直荷重の大きさは減衰効果に大きく影響すると考えられる。また、鉛直荷重が15tfの場合は環境温度が低下するに伴って等価減衰定数が減少しているがその変化は小さい。

#### 5. 3 振幅の影響

表1の(Ⅲ)、(Ⅳ)の条件で、振幅の大きさの違いによる、温度変化を伴う等価減衰定数の変化を図9に示す。

図9より供試体(a)の場合においてはせん断変位が大きい場合(γ=175%)に40%程度等価減衰定数が低下する傾向となっており、同様に温度依存性はあまり見られない。また図6と同様、供試体(b)に関する結果を参考までに△印で表示した。



(○, ●: 供試体(a), △: 供試体(b))

図9 振幅が異なる場合の等価減衰定数

## 6. 低温条件下の供試体内部の温度変化

### 6. 1 環境温度-30℃の場合

表1の(Ⅲ)の条件(鉛直荷重15tf、周波数1Hz、せん断歪 $\gamma=60\%$ )で加振した場合の免震装置の温度変化を図10に示した。

図10より加振すると鉛の温度がまず上昇を始め次にゴムの温度が上昇を始めている。また鉛は5℃以上温度上昇しているのに対してゴムは外側は1℃弱、内部は2.5℃程上昇しており加振してもゴムの温度上昇は少ない。

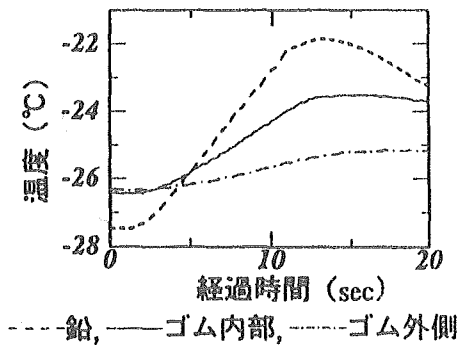


図10 環境温度-30℃の場合のLRBの温度変化

### 6. 2 環境温度-20℃の場合

表1の(V)の条件(鉛直荷重15tf、振動数1Hz、せん断歪 $\gamma=150\%$ )で加振した場合の免震装置の温度変化を図11に示した。

図11より加振するとまず鉛が温度上昇を始めているがゴム内部も大きく温度上昇を始めている。鉛は40℃以上の温度上昇になっており、ゴムも30℃以上の温度上昇になっている。これはせん断変位が大きかったために鉛とゴム内部の温度上昇が大きくなったと思われる。

図10と図11の結果では経過時間2secから12secまで10サイクル(10sec)加振した後、静止して温度変化を計測している。加振振幅および環境温度の違いによって振動停止後の免震装置の内部温度が変化する状況が得られている。

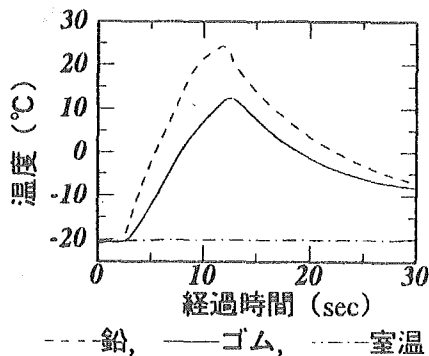


図11 環境温度-20℃の場合のLRBの温度変化

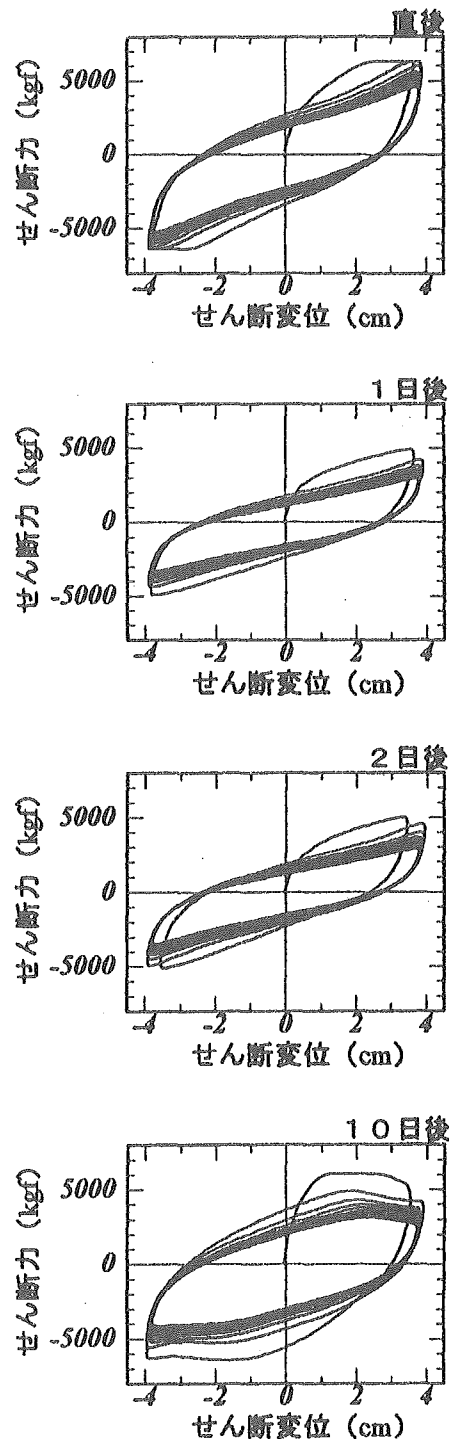


図12 環境温度-30℃の場合の履歴特性

## 7. 低温条件下の耐寒性試験

表1の(V)、(VI)の条件で加振した。免震装置の温度が設定した環境温度と余り差が無くなった時を直後とし、1日後、2日後、10日後と実験を行った。環境温度-30℃の場合の履歴特性を図12に、等価剛性の変化を図13に、等価減衰定数の変化を図14に示した。

図13と図14の値は、図12の履歴曲線における5サイクル目の値である。

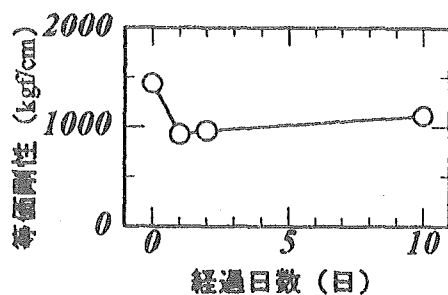


図 1 3 環境温度-30°Cの場合の等価剛性

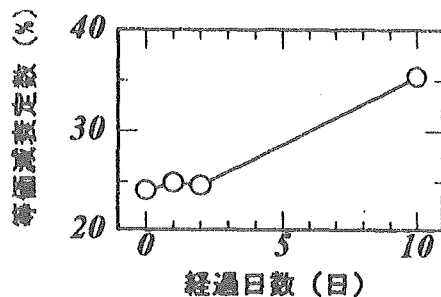


図 1 4 環境温度-30°Cの場合の等価減衰定数

図 1 2 より環境温度が-30°Cの場合、せん断力が1日後は直後より1000kgfほど小さくなっており履歴曲線の幅も細くなっており冷却時間が長くなるに伴って等価減衰定数がわずかに低下しているように思われる。10日後には履歴特性の形が楕円のように膨らみを持ち加振し始めたときのせん断力が2サイクル以降のせん断力より少し大きくなっている。しかし、初期剛性  $K_1$  は13000kgf/cm<sup>2</sup>程度であり変わらない。また、図 1 3 より免震装置の温度が環境温度-30°Cまで低下した直後から1日後の間では等価剛性は小さくなっているが1日後以降はほとんど変化は見られないので免震装置は長期間冷却される事によって等価剛性が極端に大きくなる事は無いと思われる。

図 1 4 より冷却後2日後までの等価減衰定数はほとんど変化が無いが10日後になると急に大きくなっている。なので減衰と言う点では長期間冷却することによって効果が減少することはない。なお、実験条件(VI)の環境温度が-30°Cの場合には、低温経過日数が10日後の場合に、等価剛性は変化しないが等価減衰定数が増加する結果となっており、何らかの免震装置の内部構造的変化が発生した可能性はある。次に述べる環境温度-20°Cの場合にはこれらの影響は見られない。

図 1 5 には環境温度-20°Cの場合の耐寒性試験の結果を示している。試験装置のせん断荷重の容量の関係からこの試験の場合、低温日数の増加につれて履歴曲線のせん断変位が変化する結果となった。この繰り返し荷重による変化の状況を図 1 6 に示している。左側の図が等価剛性、右側の図が等価減衰定数である。以上の結果より

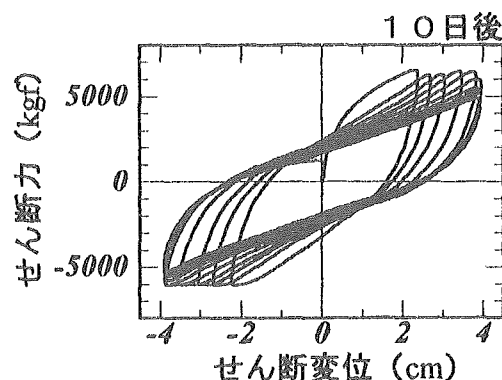
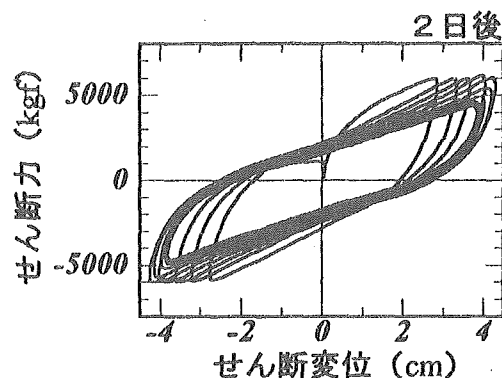
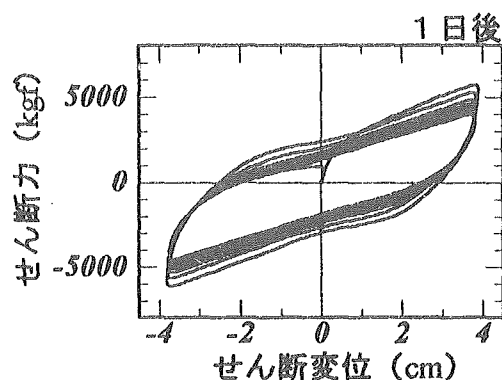
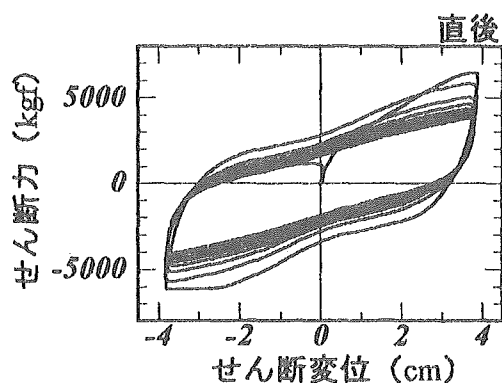


図 1 5 環境温度-20°Cの場合の履歴特性

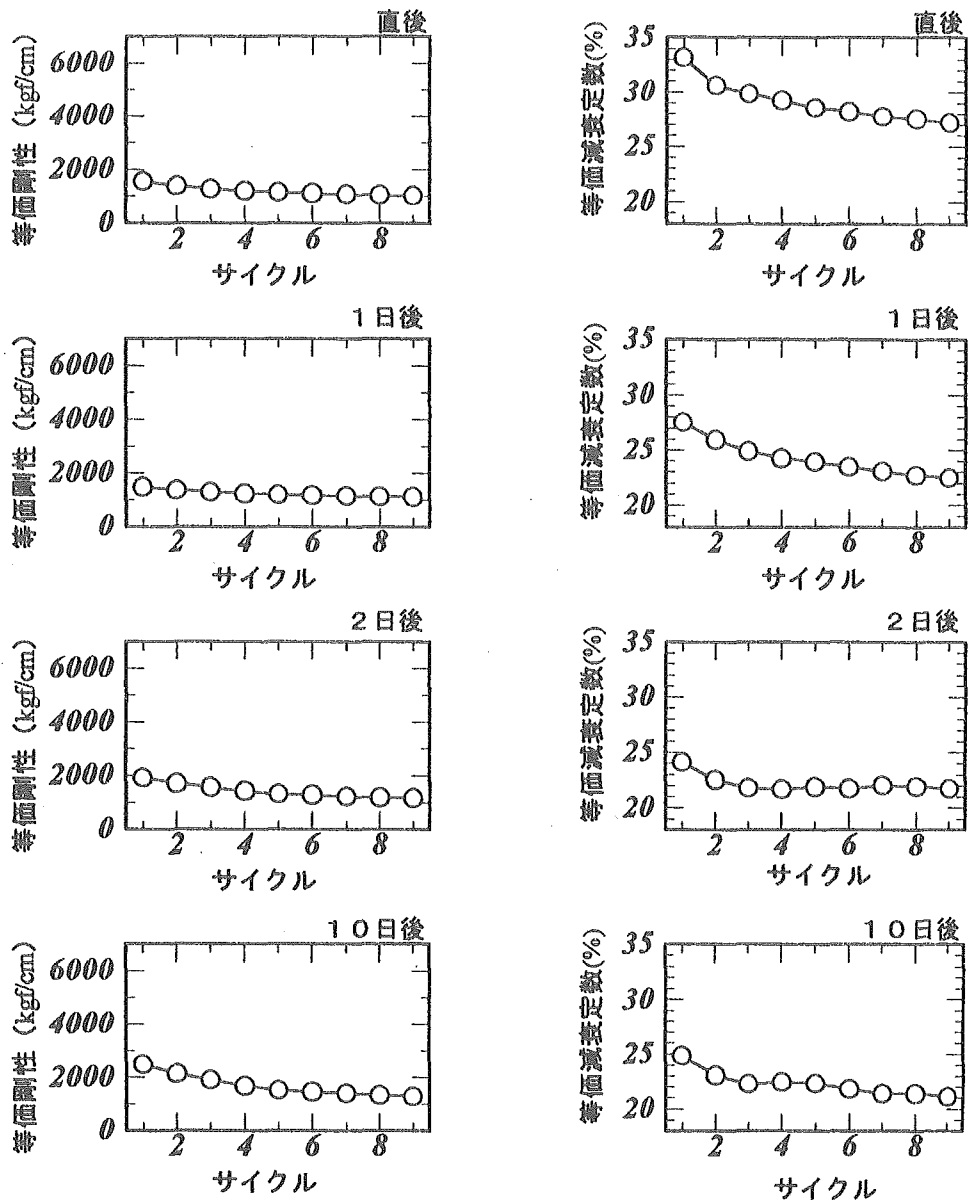


図16 環境温度-20℃の場合の繰り返し荷重による変化

表2 気象観測結果

年	月	最低気温 (℃) (日数)	最低地温 (℃)	
			-1m	-5m
1994-1995	12	-18.6	+5.7	+9.8
	1	-20.2 (1日)	+4.3	+9.8
	2	-22.1 (3日)	+3.5	+9.6
	3	-21.1 (2日)	+2.7	+9.1
1995-1996	12	-18.5	+5.8	+10.1
	1	-21.8 (3日)	+4.7	+10.0
	2	-20.6 (2日)	+3.9	+9.6
	3	-18.5	+3.1	+9.2
1996-1997	12	-18.6	+5.2	+9.3
	1	-20.2 (1日)	+4.2	+9.3
	2	-21.5 (1日)	+3.6	+9.1
	3	-18.9	+2.8	+8.7

繰り返しによる変化はあるものの供試体の設計で目標とした値（等価剛性  $K_{eq}=1227\text{kgf/cm}$ 、等価減衰定数  $h_{eq}=19.3\%$ ）が低温下の条件でも得られている。

さて建設を予定している地点の最近の気象観測結果<sup>11)</sup>を表2に示している。これは北見工業大学の気象観測システムで得られた信頼性のあるデータであり、架橋地点から2km離れた地点でのデータである。まず気温が $-20^{\circ}\text{C}$ を下回る日数（カッコ内日数の合計）はこの2、3年平均で5～6日程度であり、24時間観測の結果から $-20^{\circ}\text{C}$ を下回っても継続時間は深夜の2時間程度（午前1時～3時頃）であることが知られている。またこの場合でも日中は $0^{\circ}\text{C}$ 前後の温度となる。さらに橋脚の温度は地温と関係が深い。表2には地表より地下1mと-5mの位置の温度を示している。一般に地温の変化は季節1つぐらわずれている傾向にあることが知られており、表2の地温には秋のぬくもりがまだ保存されている。したがってこれらの結果より支承が設置されるRC橋脚天端の温度を正確には予測できないものの、少なくとも地温の効果により気温よりは高い温度になることが想定できるとともに、支承を断熱材などで被覆すれば風による冷却からも防止できるのでさらに効果があるものと考えられる。4月以降は気温が大きく上昇するので地温も表2の値より下がることはない。以上の検討および考察より架橋地点の気象条件を考慮すれば前述の耐寒性試験はより厳しい条件で実験しており鉛プラグ入り積層ゴム支承の実用には支障ないものと判断される。

## 8. 結論

環境温度の低下に伴って免震装置の等価剛性、等価減衰定数がどのように変化していくのか実験を行い得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1)周波数の違いによる免震装置の振動特性への影響は小さい。
- (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大きくなる傾向がある。
- (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ある。

(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 $-30^{\circ}\text{C}$ 程度に低下してゴムの剛性が増加しても免震装置の振動特性は大きく変化しない。

以上より $-30^{\circ}\text{C}$ までの低温環境における鉛プラグ入り積層ゴム支承の振動特性が得られた。しかし、本格的に実橋に活用していくためには更に低温（ $-50^{\circ}\text{C}$ 程度）の場合の特性や他の種類の免震装置との比較など、今後検討すべき課題も多い。

本研究においてはオイレス工業の長谷川治氏の絶大なご協力がありましたので感謝申し上げます。

## 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，1996.12
- 2) 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
- 3) (財)土木研究センター：道路橋の免震設計法マニュアル，1994.10
- 4) 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-B349，1997.9
- 5) 戸原晴彦編：改訂新版 防震ゴム，現代工学社，1975
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) (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
- 10) (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
- 11) 北見工業大学寒地実験室：寒地気象観測月報，1994-1997

(1997年9月26日受付)