

低温域における橋梁免震装置の実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF A SEISMIC-ISOLATION DEVICE
UNDER LOW TEMPERATURE

小山田欣裕* 佐藤昌志** 谷本俊充*** 林亜紀夫****

Yoshihiro OYAMADA, Masashi SATO, Toshimitsu TANIMOTO and Akio HAYASHI

* 参与 北海道道路管理技術センター (〒060 札幌市北区北1条西2丁目)

** 構造研究室長 北海道開発局開発土木研究所 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

*** 構造研究員 北海道開発局開発土木研究所 (〒062 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

**** 首席研究員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒206 東京都多摩市関戸1丁目7番地)

The stiffness of a rubber seismic-isolation device is apt to increase when subjected to low temperatures. The increase of stiffness has to be confirmed exactly, because an increase would decrease the period shift and unexpectedly decrease the displacement of device. The decrease of the displacement would also causes a decrease of the hysteretic-dumping effect, that possibly might lead to serious side effects. So, a change in the characteristics of a rubber seismic-isolation device under low temperatures can become an issue when designing a seismically-isolated bridge in a climate in which there may be a wide range of temperatures.

For this paper, an experimental study on the characteristics of a seismic-isolation device under low temperature was carried out. A few trial designs were then made using the results of the experiment. Throughout this study, it was confirmed that the stiffness of the seismic-isolation device at -20°C shows an increase of 34~40% over the stiffness at normal temperatures. This change must be considered in the evaluation of a seismic-isolation device. It may be suggested that a comparatively soft device be made if there is requirement to design a seismic-isolated bridge that is effective for use of normal and low temperatures.

Key words: earthquake protective design, seismic-isolation, low temperature, experimental study

1. まえがき

橋梁の支承部分に免震装置を用いることによって慣性力を低減し、下部構造に伝達される水平力を分散するなど橋の耐震性を向上することが期待されるが、寒冷地においては解決すべき課題点が残されている。

寒冷地において最も懸念される課題点としては、鉛プラグ入りゴム支承および高減衰ゴム支承などの免震支承に用いられるゴム材料の低温下における物性値の変化、すなわち剛性の増加が挙げられる。^{1) 2)} 常温における載荷試験から得られる剛性の値のみを基に免震橋を設計した場合には、低温下において剛性が増加するので、固有周期は設計上の仮定値より短くなる。このことによって免震装置の変位および履歴曲線も変化するので、減衰率も変化する。その結果、慣性力低減の効果が設計時の期待通りに得られない可能性があり、低温が免震装置の特性値に与える影響を正確に把握することが必要とされる。また、長期間低温下におかれることによってゴムの一部が結晶化するなど物性にかかわる変化が起こることも懸念される。

本論文では、鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承をとりあげ、低温条件が特性に与える影響を実験によ

て確認した結果を報告する。低温条件が特性に与える影響すなわち低温の外気下における温度追従、等価剛性および等価減衰定数の変化、長期間低温下放置による変化を確認した。さらに、これらの実験結果から得られた等価剛性および等価減衰定数の変化が免震橋の設計に与える影響を検討した。

2. 実験に用いた免震装置と実験装置

供試体として用いた鉛プラグ入りゴム支承は、図-1に一般形状を示す温根沼大橋³⁾側径間部に適用するために設計製作されたものである。設計の際の計算⁴⁾では、震度法時において、免震装置の変位は3.7cm、橋の固有周期は0.92secであり、地震時保有水平耐力法時において免震装置の変位は15cm、橋の固有周期は1.18secである。高減衰ゴム支承は、常温で免震装置の変位が15cmの時に等価剛性が鉛プラグ入りゴム支承と一致するように設計されたものである。免震装置の寸法を図-2に、JIS-K6301に準拠して行ったゴム材料物性試験値を表-1に示す。載荷装置は、写真-1に示すように最大荷重150tfの鉛直載荷用油圧サーボ試験機および最大荷重50tf、最大変位振幅 $\pm 300\text{mm}$ のせん断載荷用アクチ

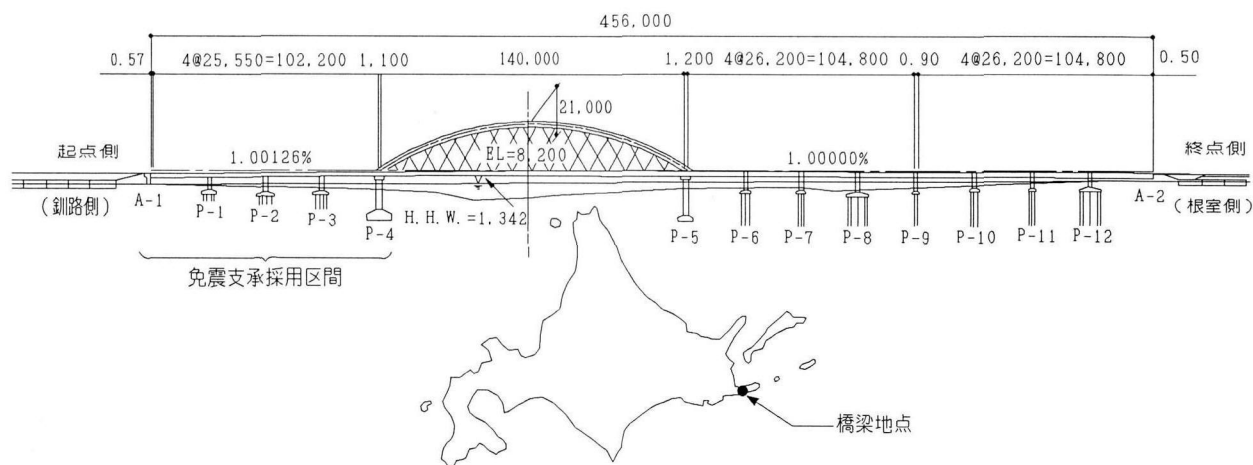


図-1 温根沼大橋一般形状および位置

表-1 供試体ゴム材料の物性試験結果

a) 鉛プラグ入りゴム支承

ゴム (天然ゴム) 物性		
調査項目	規格値	測定値
静的せん断弾性率 kgf/cm ²	8±1.0	8.4
引張強度 kgf/cm ²	150以上	229
伸び %	450以上	628
老化試験	25%伸長応力 変化率 %	-10~ + 30
	伸び変化率 %	-25以上
		-15.1
圧縮永久ひずみ率 %	25以下	22
耐オゾン層	きれつ無し	きれつ無し
接着試験	ゴム破裂	18.1(R100)

- ・ 上記結果は4供試体の平均値
- ・ 試験方法はJIS K 6301による。

b) 高減衰ゴム支承

内部ゴム (KL401) 物性		
調査項目	B社規格値	測定値
300%モジュラス kg/cm ²	37±6	34
引張強度 kg/cm ²	90以上	104
破断伸び %	650以上	755

被覆ゴム (AN920) 物性		
調査項目	B社規格値	測定値
引張強度 kg/cm ²	125以上	147
破断伸び %	650以上	838

- ・ 試験方法はJIS K 6301による。

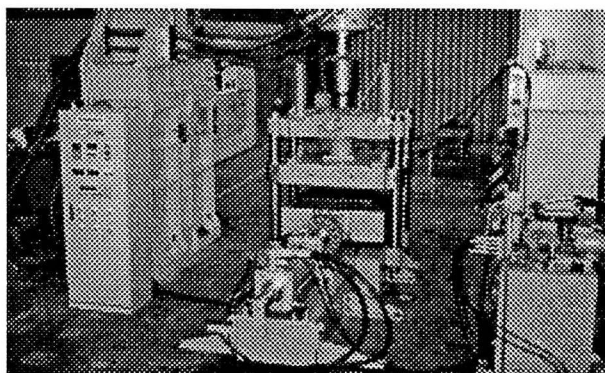
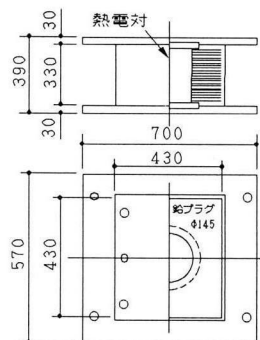


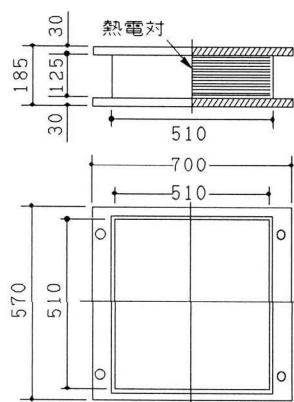
写真-1 載荷装置



a) 鉛プラグ入りゴム支承

LRB

- ゴム層
12mm×18層
- インサートプレート
430×430×3.2mm



b) 高減衰ゴム支承

HDR

- ゴム層
6.3mm×15層
- インサートプレート
510×510×2.2mm

図-2 実験に用いた免震装置供試体

ユエーターからなり、この載荷装置を低温槽で囲んで実験を行った。載荷装置のせん断方向の摩擦の影響を調べるために履歴特性を持たないゴム支承に鉛直荷重 92tf をかけ、せん断載荷を行って見たところ、摩擦によるせん断反力は 0.48tf 程度であり、無視し得る範囲であると考えた。

3 低温下における免震装置の動特性

3.1 等価剛性と等価減衰定数の変化

免震装置の温度を +30℃、0℃、-10℃、-20℃ および常温に保ち、上部構造の死荷重反力に相当する 92tf の鉛直荷重を載荷しながらせん断方向に変位振幅 15cm の交番載荷を行った。15cm の変位振幅が生じた際のゴムのひずみは、鉛プラグ入りゴム支承で 69.4%、高減衰ゴム支承で 158.7% である。せん断力-変位の履歴曲線の一例を図-4 に示す。履歴曲線は 1 サイクル目で最も反力が高く、交番載荷回数が増えるにしたがって反力は低下して 3 サイクル目でほぼ安定する。したがって本論文ではことわりのない限り 3 サイクル目の値を示すこととする。

図-3 および式(1)、式(2)によって求められる等価剛

性と等価減衰定数を表-2 に、免震装置の温度と、3 サイクル目の等価剛性および等価減衰定数の関係を図-5 に示す。

$$K_{eq} = \frac{AB}{CB} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{\pi W} \quad (2)$$

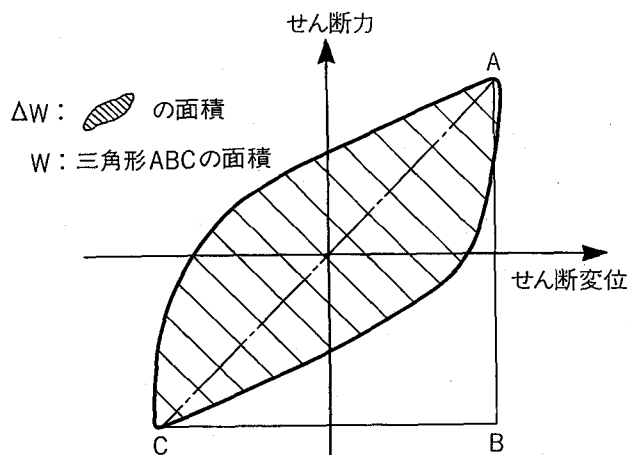


図-3 等価剛性と等価減衰定数の定義

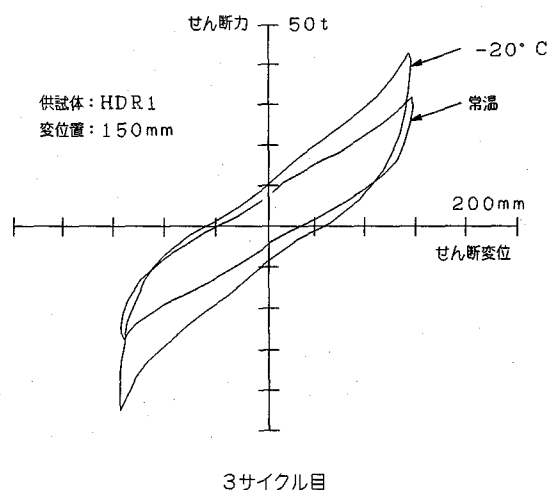
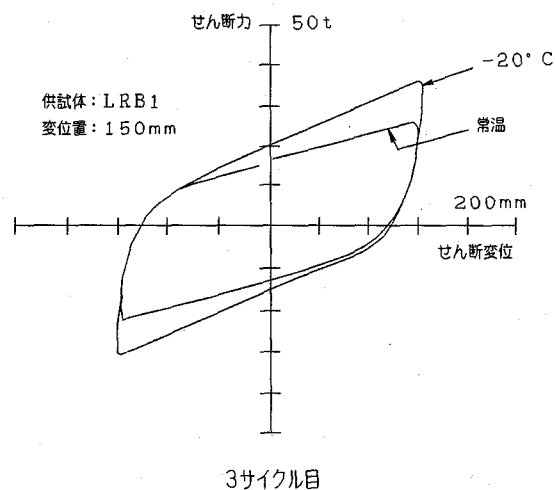
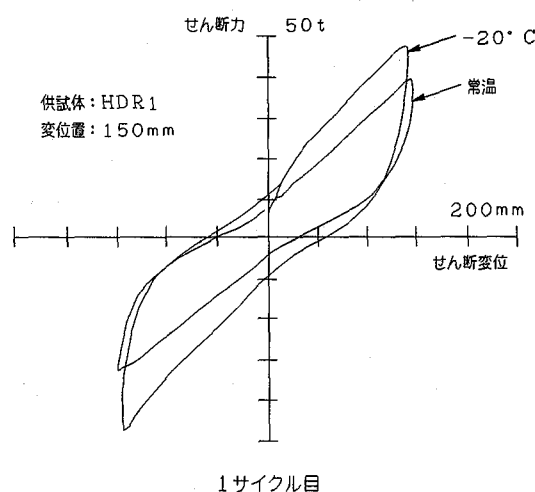
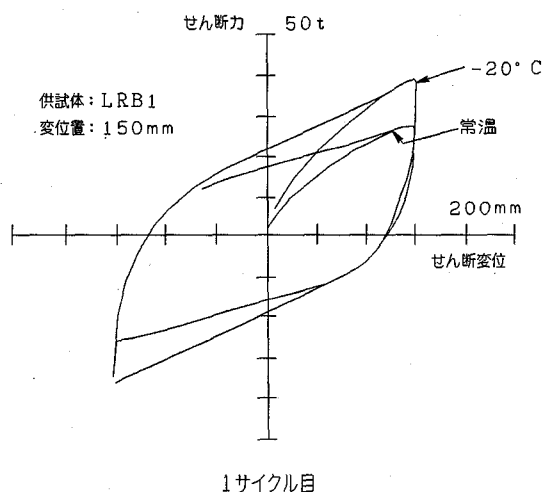
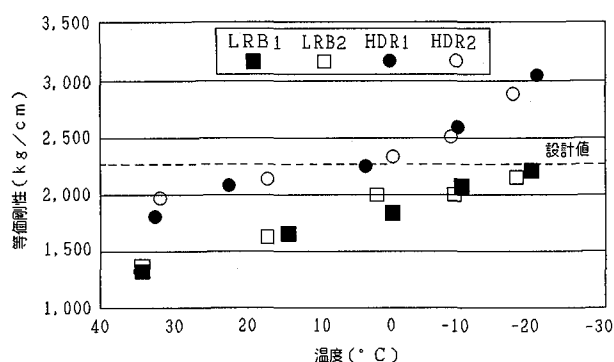


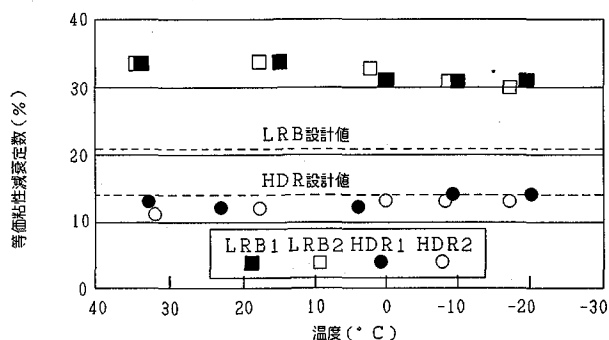
図-4 せん断力-変位の履歴曲線の例 (常温, -20℃)

表-2 各温度における免震装置の等価剛性と等価減数

供 試 体	温 度 ℃	1 サイクル目		3 サイクル目		等 価 粘 性 減 衰 定 数 h eq
		等 価 剛 性 K e (kg/cm)	+30℃時と -20℃時と の比	等 価 剛 性 K e (kg/cm)	+30℃時と -20℃時と の比	
LRB 1	+30	1480	1.669	1332	1.664	0.34
	常 温 (14.7)	1843		1645		0.34
	0	2096		1832		0.31
	-10	2309		2072		0.31
	-20	2515		2217		0.31
LRB 2	+30	1527	1.596	1346	1.601	0.34
	常 温 (14.7)	1836		1619		0.34
	0	2079		1994		0.33
	-10	2290		2005		0.31
	-20	2437		2155		0.30
LRB 3	常 温	1790		1558		0.35
LRB 4	常 温	1762		1477		0.36
HDR 1	+30	1968	1.704	1787	1.703	0.13
	常 温 (22.7)	2503		2079		0.12
	0	2608		2249		0.12
	-10	2965		2586		0.14
	-20	3353		3044		0.14
HRD 2	+30	2193	1.448	1944	1.478	0.11
	常 温 (17.3)	2618		2136		0.12
	0	2682		2340		0.13
	-10	2777		2515		0.13
	-20	3176		2874		0.13
HRD 3	常 温	2527		2082		0.12
HRD 4	常 温	2613		2143		0.12



a) 等価剛性



b) 等価減衰定数

図-5 免震装置の温度と、3サイクル目の動特性値

表および図中にLRBと表記したのは鉛プラグ入りゴム支承，HDRと表記したのは高減衰ゴム支承であり，それぞれ4体の供試体を使用した。

文献1)では，温度が-30℃の時と30℃の時の免震装置の等価剛性の比を1.5以下と規定することを提案しているが，表-2で-20℃の時と30℃の時の免震装置の等価剛性の比を見ると，1.5を越えるものがある。

3.2 くり返しせん断载荷による影響

供試体を低温庫に入れ，その温度を-20℃まで下げた後，上部構造の死荷重反力に相当する92tfの鉛直荷重を载荷しながらせん断方向に変位振幅15cmの交番载荷を50回行った。

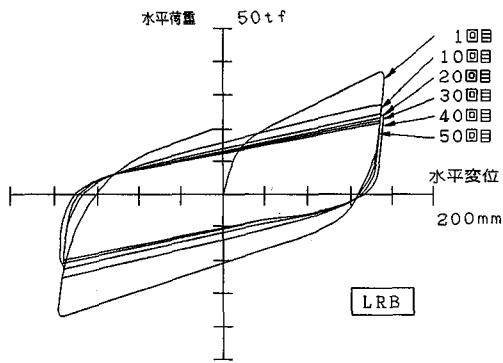
せん断力－変位の履歴曲線を図-6に，等価剛性とく

り返し回数の関係を図-7，等価減衰定数とくり返し回数の関係を図-8に示す。-20℃においては，鉛プラグ入りゴム支承と高減衰ゴム支承とで初回の等価剛性が異なるので，参考のために各载荷時の等価剛性と初回の等価剛性の比をとり，図-9に示している。供試体の温度とくり返し回数の関係を図-10に示す。

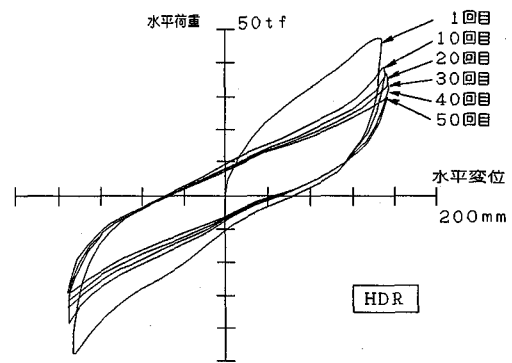
くり返し回数が増えるに従って等価剛性は低下し，初回と50回目の等価剛性の比は，図-9に見られるように，鉛プラグ入りゴム支承で64%，高減衰ゴム支承で56%となる。

図-8で等価減衰定数について見ると，くり返し回数が増えるに従って，鉛プラグ入りゴム支承では等価減衰定数は幾分増加し，高減衰ゴム支承では低下する。

供試体の温度は，くり返し回数が増えるに従って上昇



a) 鉛プラグ入りゴム支承



b) 高減衰ゴム支承

図-6 せん断力-変位の履歴曲線 (くり返しせん断载荷)

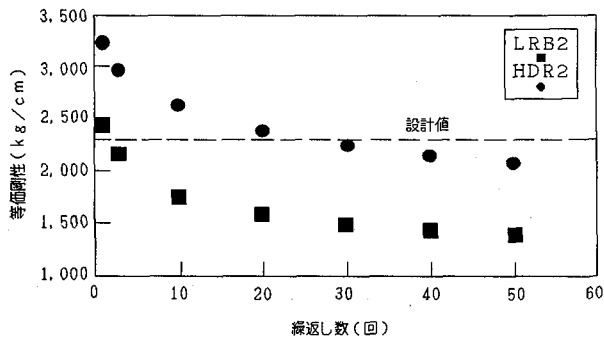


図-7 等価剛性とくり返し回数の関係

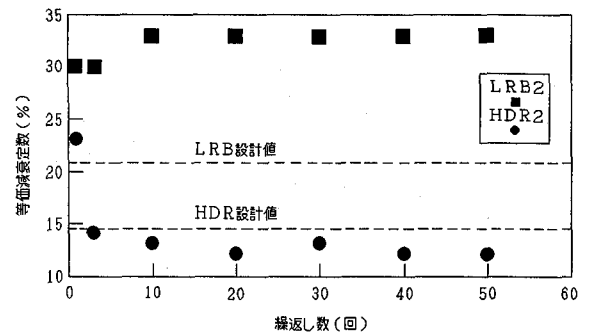


図-8 等価減衰定数とくり返し回数の関係

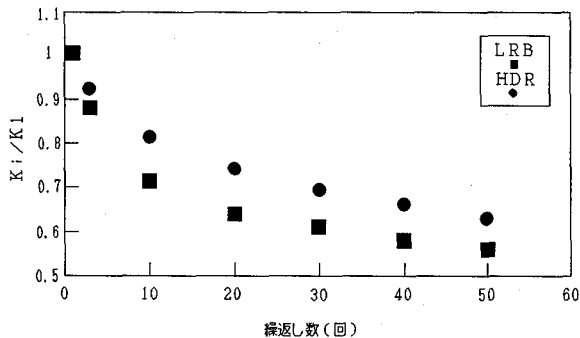


図-9 各载荷時の等価剛性と初回の等価剛性の比

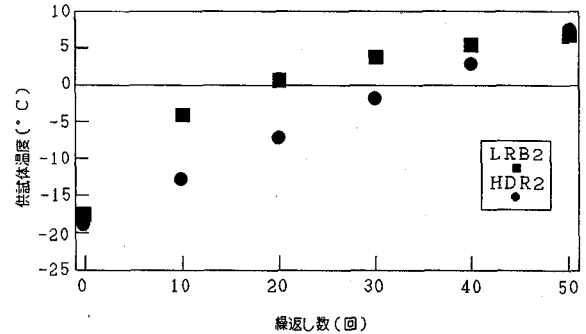


図-10 供試体の温度とくり返し回数の関係

し、50 回目には約 5℃になっている。

3.3 せん断履歴による等価剛性の変化

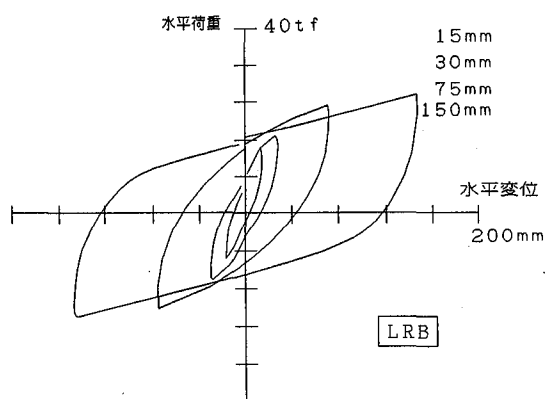
せん断方向の変位振巾を 1.5 cm, 3 cm, 7.5 cm, 15 cm と変化させて、それぞれ 3 サイクルの交番载荷を行いこれを第 1 段階とし、その直後に第 2 段階目として再度同じ载荷を行った。第 1 段階と第 2 段階の 3 サイクル目の等価剛性を表-3 に、せん断力-変位の履歴曲線を図-11 に示す。なお、载荷は常温下で行った。

鉛プラグ入りゴム支承、高減衰ゴム支承ともに第 2 段階における等価剛性は第 1 段階の値よりも小さな値を示すが、最大変位量 15 cm に達すると第 1 段階の値と第 2 段階の値はほぼ一致する。

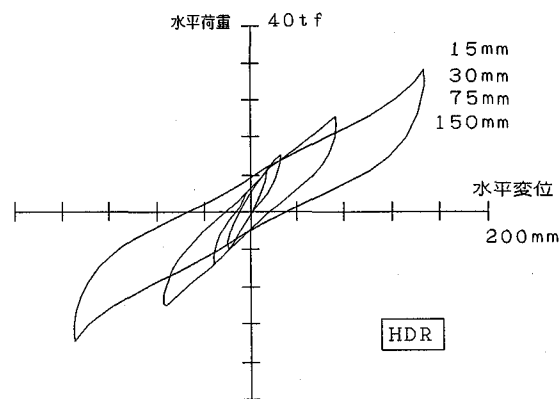
表-3 せん断履歴による等価剛性の変化

供試体	試験段階	3 サイクル目の等価剛性 K_{eq} (kg f/cm)			
		1.5 cm	3 cm	7.5 cm	15 cm
LRB 3	1	7753	5529	2943	1558
	2	6151	4689	2701	1543
HDR 3	1	9180	5680	2985	2082
	2	4301	4313	2201	1920

このことから、等価剛性は、過去にそれ以上のせん断変位を経験している場合にはその影響を受けて最初の载荷時に較べて低下し、処女荷重域に達すると等価剛性は回復すると考えられる。



a) 鉛プラグ入りゴム支承



b) 高減衰ゴム支承

図-11 セン断力-変位の履歴曲線 (変位振幅変化)

表-4 低温庫の庫内温度設定

庫内温度 (°C)	時間 (h)	累計 (h)
-20	32	32
-20→-30	6	38
-30	12	40
-30→-20	6	46
-20	12	58
-20→0	6	64
0	12	76
0→-30	6	82
-30	12	94
-30→0	6	100
0	3	103

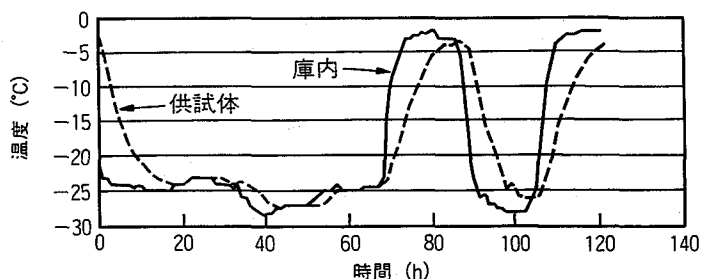


図-12 庫内温度と供試体内部温度の関係

4 低温下に放置されることによる影響

4.1 免震装置内部温度の追従

低温庫の庫内温度を表-4に示すように変化させた場合の、庫内温度と図-2に示した供試体内部熱電対によって測定した温度の関係を図-12に示す。

供試体内部の温度は緩慢に外気温に追従し、最初の20℃の温度差に追従するには約18時間を要している。

このことと考え合わせると、図-10に示したくり返しせん断载荷時の供試体の温度が1時間弱の载荷中に約25℃上昇したのは、せん断载荷によるひずみエネルギーが吸収され発熱した結果と推察される。

4.2 長期間低温下に放置された際の動特性

長期間低温下に放置されることによってゴムおよび鉛の特性が変化するか否かを確認する目的で、次のような試験を行った。

低温庫内で、供試体温度が-10℃になるまで冷却し、その直後に、せん断方向に変位振幅15cmの交番载荷を3回行った。供試体を再び低温庫内に戻し、-10℃で20日間保管した後、同様のせん断载荷を行った。冷却直後と低温下放置後の等価剛性を表-5に示す。

表-3に示した载荷履歴の影響に関する実験結果から、

表-5 長期間低温下放置時の等価剛性

(-10℃) 単位: kg f/cm

	LRB		HDR	
	初回	20日後	初回	20日後
1サイクル目	2309	1940	2965	2730
3サイクル目	2072	1686	2586	2370

過去に経験した変位振幅以内の変位においては、免震装置の等価剛性は载荷回数を経るに従って低下し、これが回復するまでには、かなり長時間を要することがわかっている。表-5の実験で、冷却前の载荷を行わなかったのは、過去の载荷履歴の影響が残ることを避けるためである。表-2の1サイクル目の値を参考に冷却前の等価剛性を推定し、表-5初回1サイクル目の値と比較すると、免震装置の等価剛性の上昇は冷却直後に発生していることがわかる。初回3サイクル目の値と20日後1サイクル目の値と比較すると、むしろ低下しており、载荷履歴の影響がなお持続していることがわかる。-10℃程度の低温の影響は、比較的早い時間で現れ、20日間程度の低温下放置の間にはさらに変化が進むことがないと考えられる。

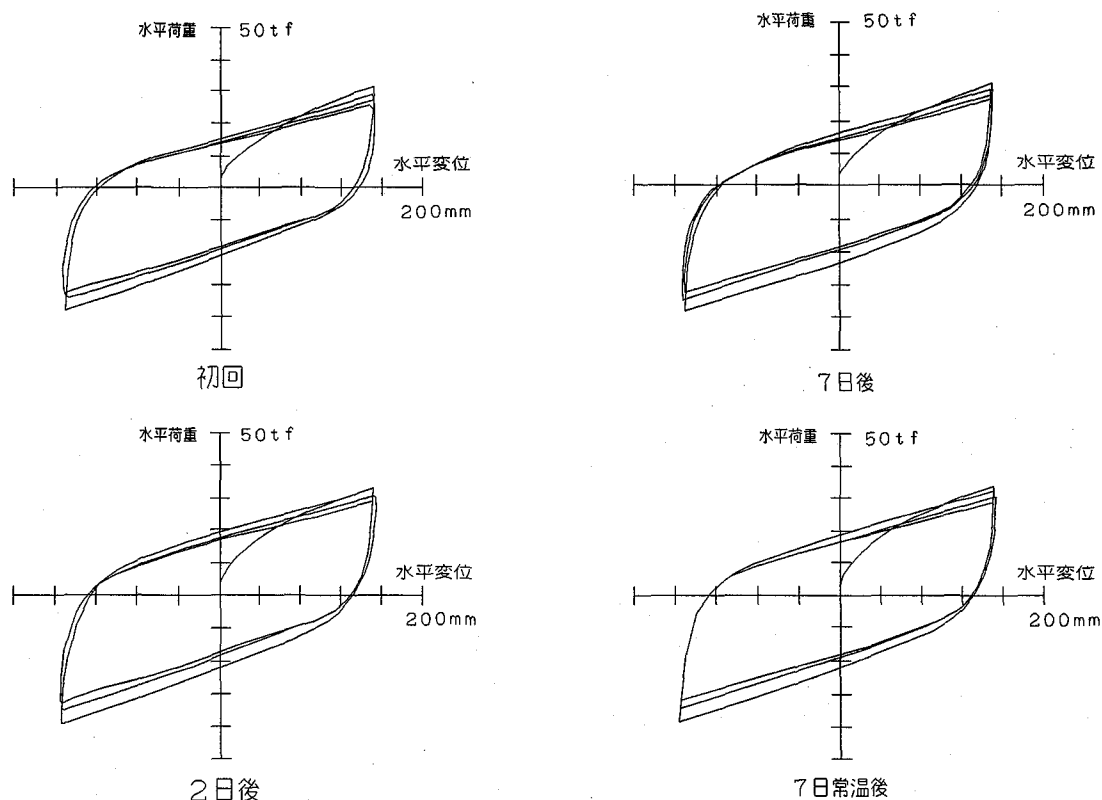


図-13 セン断力-変位の履歴曲線 (低温下放置時)

さらに温度を低く -20°C として、直後、2日後、7日後、および常温に戻した時点で、同様の交番载荷を行った。せん断力-変位の履歴曲線を図-13に、等価剛性と等価減衰定数を表-6に示す。 -20°C の低温では、7日後にも等価剛性の上昇が続いているようである。

表-6 低温下放置時の等価剛性および等価減衰定数
鉛プラグ入りゴム支承 (-20°C)

		初回	2日後	7日後	7日常温後
1	1 サイクル目	2313	2418	2326	2397
	3 サイクル目	2016	2079	2027	2058
	減衰定数 (%)	32	32	32	32
2	1 サイクル目	2073	2194	2147	2229
	3 サイクル目	1874	1974	1935	2036
	減衰定数 (%)	34	33	32	33

5. 低温時の剛性増加による免震効果の変化

表-2および図-5を見ると、 -20°C の時に鉛プラグ入りゴム支承の等価剛性は常温時に較べて平均34%増加している。常温時の等価剛性を基に設計された免震橋の免震効果が、この剛性増加によってどの程度まで変化するかを知るために図-14に示すモデルを用い、文献5)に提案される方法で試算を行った。

モデルは、温根沼大橋のP3橋脚の下部構造とP3橋脚が分担する部分の上部構造の質量454 tを設定したものである。橋脚柱は、頂部の質量103 t、ばね定数20,600 tf/m、減衰定数5%とし、基礎は、ばね定数37,000 tf/m、減衰定数15%とした。免震装置の等価剛性は、载荷試験による表-3の等価剛性と変位の関係を基に設定するものとした。等価線形法のくり返し計算の途上で、载荷試験ケースの変位に相当する以外の等価剛性を推定する際には文献5)に提案されている動特性算定式を用い、表-3の試験値に一致させるための補正係数を乗じて求めた。

約3cmの変位において、文献5)に提案されている動特性算定式による値は、载荷試験値の約36%増しの

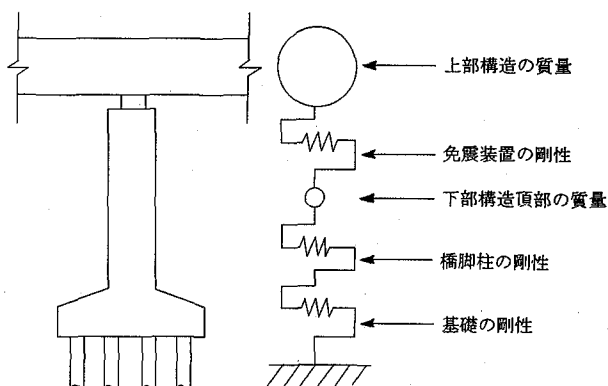


図-14 試算に用いたモデル

等価剛性を与えることがわかる。そこで、常温における免震装置の等価剛性は動特性算定式に36%減の補正係数を乗じて求め、 -20°C における免震装置の等価剛性は

常温時の 34 % 増しとした。

免震装置の剛性が増加することによる影響が大きいと考えられるケースとして、設計地震動は、文献 5) に提案されている震度法に用いる設計震度 (第 II 種地盤) を用いた。

その結果、常温時の動特性値を用いた計算では、免震装置の変位 4.26 cm, 固有周期 0.935 sec, 減衰定数 20.6 % となり、設計時の計算とほぼ一致する。

これに対して、低温 -20 °C の時に等価剛性が増加する効果を反映した計算では、等価線形法のくり返し計算の途上で、免震装置の変位が免震装置の降伏変位より小さくなり、第 1 勾配剛性部分に移行する。その結果、固有周期は相当に短くなり、しかも免震装置の応力履歴が扁平となって履歴減衰の効果が得られなくなる。等価線形法のくり返し計算の結果、免震装置の変位 3×10^{-5} cm, 固有周期 0.436 sec, 減衰定数 6.65 % となった。

この試算では、免震装置の変位が本論文の実験範囲に較べて小さいので、動特性の推定は外挿となり、計算の精度を厳密に求めることはできないが、免震装置の剛性増加が与える影響は大きいと推定される。低温時の免震効果を得ようとする場合には、さらに柔軟な免震装置を用いる必要が有ると考えられる。

6. 結論

載荷実験により得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 鉛プラグ入りゴム支承や高減衰ゴム支承のようにゴムを用いる免震装置は、低温下において等価剛性が増加することがわかった。本実験で 3 サイクル目の等価剛性を見ると、-20 °C の時の等価剛性は常温時に較べて、鉛プラグ入りゴム支承で平均 34% 増加、高減衰ゴム支承で平均 40% 増加している。
- 2) 等価減衰定数は、本実験で 3 サイクル目の値を見る限り、低温になることによって有意の変化を見せなかった。
- 3) 免震装置内部の温度が外気温に追従する速度を見ると、例えば 20 °C の温度差には約 18 時間で追従している。このことから推定すると、橋梁の支承として設置された免震装置は、ほぼ常に外気の温度に近い状態が保たれると考えられる。
- 4) 低温下に置かれることによって生じる免震装置の動特性の変化は、冷却後の比較的早い時期に現れ、その後は 20 日間経過しても変化が促進されることはなかった。
- 5) 交番せん断載荷の回数と等価剛性との関係を見ると、回数が増えるに従って等価剛性は低下し、10 サイ

クル目まで大きく変化するがその後は一定値に漸近していく。

- 6) 交番せん断載荷の回数と減衰定数との関係を見ると、鉛プラグ入りゴム支承の減衰定数は 10 サイクル目までに少し増加し、高減衰ゴム支承では 3 サイクル目までに減少するが、それ以後はほぼ一定値となる。
- 7) 過去に経験した最大変位量が等価剛性に与える影響が大きく、過去最大の変位量以下の振巾で載荷した際の剛性は最初にその変位に達した時の剛性に較べて小さく、処女荷重域に達すると再び増加する。同一の供試体を用いて、条件を変化させながら連続した載荷シリーズの試験を行う際にはこの点に注意が必要と考えられる。

今後はさらに荷重載荷速度とこれら特性との関係を明らかにしていくことが肝要と思われる。

低温時に、免震装置の等価剛性が増加することによって、その効果がどの程度まで変化するかを知るために、-20 °C の時に鉛プラグ入りゴム支承の等価剛性は常温時に較べて 34% 増加すると考えた試算を行った。その結果をまとめると、次のようである。

- 1) 常温時の等価剛性を基に設計された免震装置は、低温時、震度法において、免震装置の変位が降伏変位に達することがなく、履歴減衰の効果が得られない。
- 2) 上記を考慮すると、低温が予想される地域で用いる免震装置は、予め剛性の増加を見込んだ上で特性値を設定することが望まれる。

参考文献

- 1) Robinson, W: Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures during Earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, VOL. 10, pp.593-604, 1982.
- 2) (財) 国土開発技術研究センター: 道路橋の免震設計法ガイドライン (案), 1989
- 3) 佐藤昌志, 谷本俊充, 西弘明, 西村敦史, 林亜紀夫: 平成 6 年北海道東方沖地震時の免震橋 (温根沼大橋) の挙動, 第 23 回地震工学研究発表会, pp.497-500, 1995.
- 4) 西村敦史, 西弘明, 佐藤昌志, 小野裕二: 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 回年次学術講演会, pp.1276-1277, 1994-9
- 5) 建設省土木研究所他 28 社: 道路橋の免震設計法マニュアル (案), 官民連帯共同研究道路橋の免震構造システムの開発報告書, 1992.

(1995 年 9 月 18 日受付)