

橋梁用ゴム支承の低温時特性評価結果に与える実験時 雰囲気温度の影響

佐藤 京¹・西 弘明¹・今井 隆²・奥井義昭³

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34）

²正会員 ゴム支承協会（〒107-0051 東京都港区元赤坂1-5-26 東部ビル1F）

³正会員 埼玉大学 大学院理工学研究科（〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255）

1. はじめに

支承を有する橋梁の耐震性を適切に評価するためには、環境条件に応じた支承の抵抗特性やエネルギー吸収能、また破壊メカニズムを把握する必要がある。特に動的載荷速度や温度などの雰囲気により力学的性能が依存する材料を有する場合は、各条件下での評価試験が重要である。温度依存性のあるゴム支承の場合、低温時性能を評価するためには恒温室内において低温供試体を低温雰囲気中で載荷することが最適である。

しかしながら、実施機関毎に機材や供試体の制約があることが考えられ、環境依存を考慮した場合の試験、特に改訂された道路橋示方書¹⁾に示されたように終局性能を把握する試験を実施する場合には、評価精度に対する信頼性を確保することが難しい課題と思われる。そこで、信頼性のある橋梁用ゴム支承の低温時特性評価手法を確立するために特性評価試験における課題の明確化とその対応に関する基礎的検討を実施した。

2. 試験手法別特性試験

試験は、天然ゴム系積層ゴム(RB)、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)、高減衰ゴム支承(HDR)を用いて実施し、実験時雰囲気温度の違いにより確認された特性に対する影響について述べる。

(1) 供試体構造

内部温度-30℃のゴム支承に対する試験が可能な試験機能力および道路橋支承便覧²⁾、ISO22762-1³⁾の中から試験体サイズを選定した。データの信頼性を

向上させるために、各種ゴム支承を複数社で製造したものをを用いた。

平面寸法及び積層構造は図-1に示す□240mm×240mmのゴム5mm×6層とした。試験方法による違いに加えて、剛性の違いも確認するため、G10、G12の2種類の異なる弾性係数の試験体をそれぞれ14体、28体を準備した。表-1に支承種別内訳と合わせて示す。

(2) 試験装置

JIS K6411:2012⁴⁾に示されているせん断特性試験に従った手法として、冷却に用いた恒温室内での試験（以下、恒温室試験）とゴム支承表面温度を管理しながら行う室温での試験（以下、室温試験）の2つの条件により水平加振を行った。使用した試験機の仕様を下記に示す。

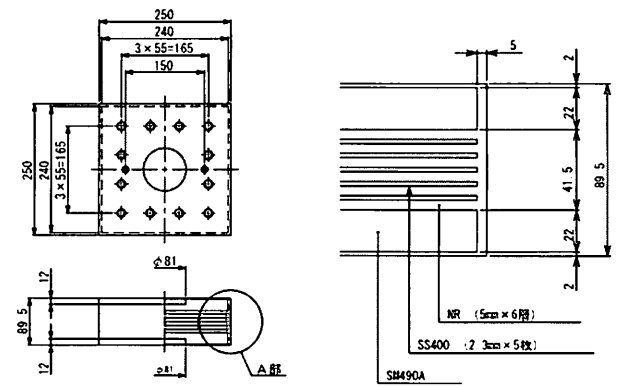


図-1 試験体の構造図（一例）

表-1 試験体（単位：体）

弾性係数	RB	LRB	HDR-S	total
G10	4	4	6	14
G12	8	8	12	28

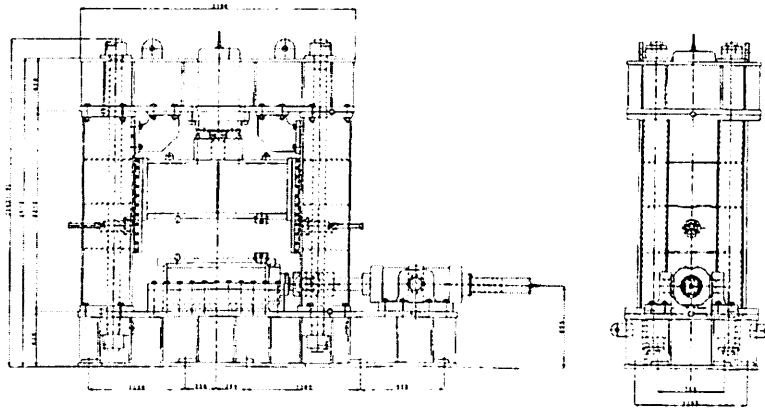


図-2 試験機 A 構造図

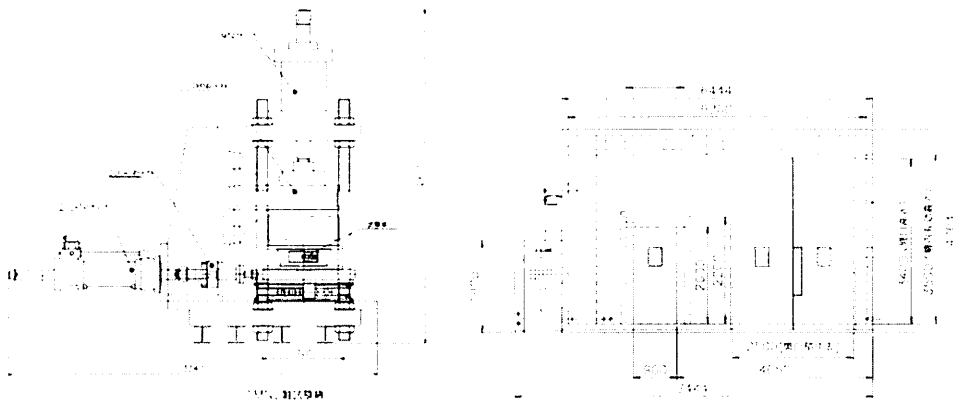


図-3 試験機 B 構造図および恒温室構造図

〈試験機A〉(図-2参照) ; 室温室試験

鉛直荷重 ; 圧縮2000kN, 引張500kN
 水平荷重 ; $\pm 1000\text{kN}$
 ストローク ; 鉛直300mm, 水平 $\pm 250\text{mm}$
 水平加振速度 ; $\max 1200\text{mm/sec}$
 入力波形 ; Sin, Cos, Square

〈試験機B〉(図-3参照) ; 恒温室試験

鉛直荷重 ; $\pm 1000\text{kN}$
 水平荷重 ; 静的 $\pm 300\text{kN}$, 動的 $\pm 200\text{kN}$
 ストローク ; 水平 $\pm 200\text{mm}$
 入力波形 ; Sin, Cos, Square, Random
 設定温度範囲 (恒温室) ; $-30^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$
 設定湿度範囲 (恒温室) ; $30\% \sim 95\%$

表-2 試験条件

振動数 (Hz)	せん断 ひずみ(%)	面圧 (N/mm ²)	入力波	冷却時間 (hr)
0.5	175	6.0	sin波	12

る特性の違いについて着目する。本報告では、G12に対する各種ゴム支承の履歴曲線を $+23^{\circ}\text{C}$ と 30°C を一例として図-2、図-3に示す。凡例で示した記号は、ゴム剛性、ゴム種別、温度、試験機を指し、実線が試験機Aの結果を、破線が試験機Bの結果である。

$+23^{\circ}\text{C}$ における試験結果では、初期履歴に試験機による差が確認できるが、ゴム種によらず、試験機AとBとの間に有意な差はなく、雰囲気温度や試験機による影響はないものと評価できる。これに比較して図-3に示した -30°C の結果では、いずれのゴム支承も $+23^{\circ}\text{C}$ の剛性よりも高い結果となり、低温環境下の影響が顕著であることがわかる。さらに、試験機AとBとの違いによる荷重-変位の関係に大きな違いが確認できる。実線で示した試験機Aでの室温室試験の結果では、所定の変位まで加振できたのに対して、試験機Bを用いた恒温室試験では、初期から3サイクル目程度まで、目的の変位に対して数%~70%もの小さな変形で試験機Aの加振性能を上回るような剛性になっていることが確認できる。

(3) 試験条件

低温影響に対する試験は、ゴム支承内部温度が -30°C 、 -20°C 、 -10°C 、 $+23^{\circ}\text{C}$ 、 $+40^{\circ}\text{C}$ の5種である。試験体の内部温度管理は、熱電対を配置したダミー試験体の各ゴム支承により行った。表-2にせん断特性試験における条件を示す。

(4) 試験結果

せん断試験実施時の雰囲気温度の影響により生じ

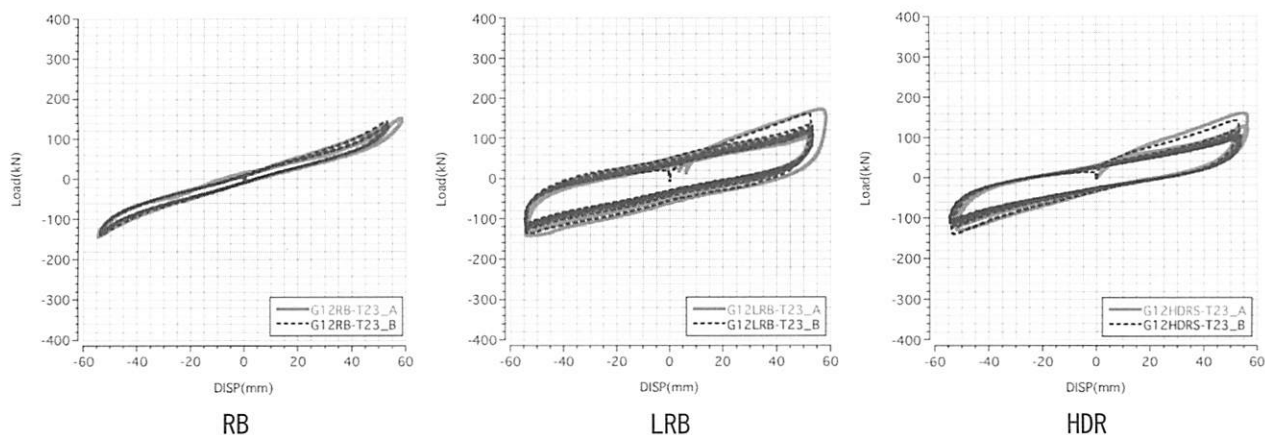


図-2 履歴曲線 (+23°C)

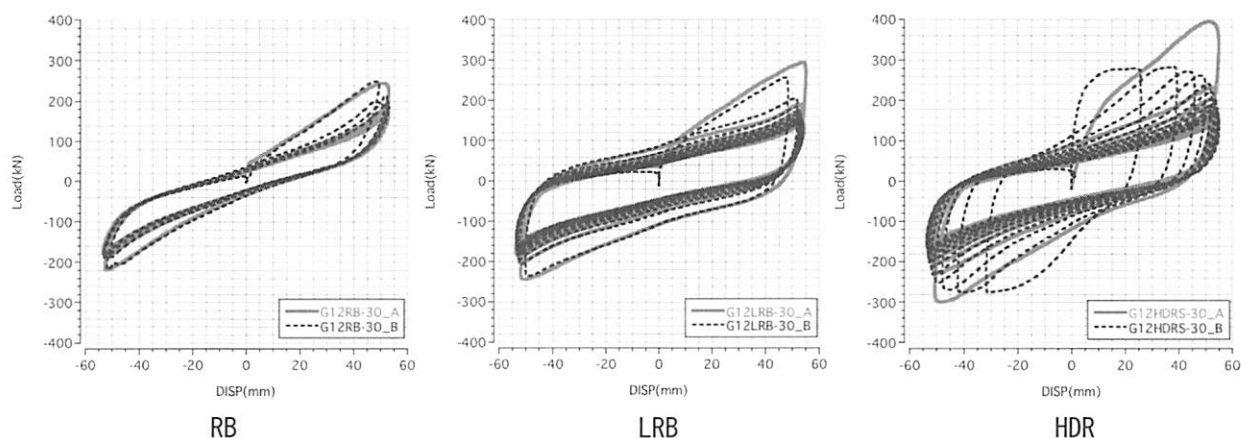


図-3 履歴曲線 (-30°C)

図-2の結果よりA, B両試験機は, +23°Cの環境下で必要十分な加振性能を有しているが, 図-3の結果より-30°Cでの恒温試験を実施するには, +23°Cの結果と比較して30%を超える大きな載荷能力を必要とした。これは, 試験機の違いではなく, 室温試験と恒温試験によって生じたゴム内部の温度に大きな違いが想定される結果である。

3. ゴム支承内部温度分布確認試験

ゴム支承の内部温度分布については, 潤田らによる研究報告⁵⁾がある。しかし, 温度依存による性能試験のような急激な温度変化による影響を論じているものはない。そこで, 室温試験と恒温試験により生じた試験結果の違いについて, 温度管理手法による影響と想定し, RB, LRBとHDR系の各1体に対して, 支承内部温度, 上下鋼版などの試験体以外にも着目して内部温度分布計測を実施した結果を示す。試験体構造は, 前述と同じである。

(1) 試験条件

RB, LRB, HDRの各1体に対して, 熱電対を図-4のように配置し, 冷却後, 室温試験および恒温試験を実施するまでの温度変化を測定した。ゴム支

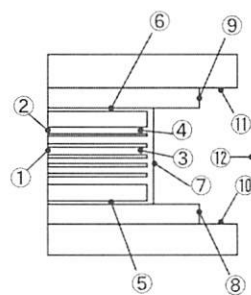


図-4 熱電対配置図

承の内部温度は, +23, -20, -30°Cの3種である。室温試験で用いる試験体は, 恒温室から搬出したのち, 19°C~28°Cの空気および試験体固定テーブルに接触する。表-2に試験時の雰囲気温度と水平載荷までの経過時間を示す。

(2) 試験方法

恒温室にてゴム支承が目的の温度になったことを試験体内部に配置した熱電対により確認してから, 試験機に設置して水平加振する。室温試験では, 恒温室より室温に搬出し, 試験機まで搬送, 固定, 載荷開始を概ね900秒間で実施した。

ゴム支承および試験機の試験体固定テーブルに配置した熱電対を図-4に示す。(以下, 測定点については, 図に示した番号の前に< no >を付記して示

表-2 測定時雰囲気温度および载荷開始時間

支承種別	試験条件	ゴム支承温度		
		-30 (degC)	-20 (degC)	+23 (degC)
RB	室温室試験	+23.8(deg C), 950.85(s)	+19.5(deg C), 900.00(s)	+26.9(deg C), 552.95(s)
	恒温室試験	-29.4(deg C), 911.10(s)	-20.5(deg C), 927.50(s)	—
LRB	室温室試験	+22.0(deg C), 955.80(s)	+19.7(deg C), 911.00(s)	+26.8(deg C), 498.40(s)
	恒温室試験	-29.1(deg C), 913.70(s)	-20.7(deg C), 942.00(s)	—
HDR	室温室試験	+20.3(deg C), 938.90(s)	+19.7(deg C), 928(.00s)	+27.3(deg C), 539.9(0s)
	恒温室試験	-29.2(deg C), 917.15(s)	-20.6(deg C), 911.35(s)	—

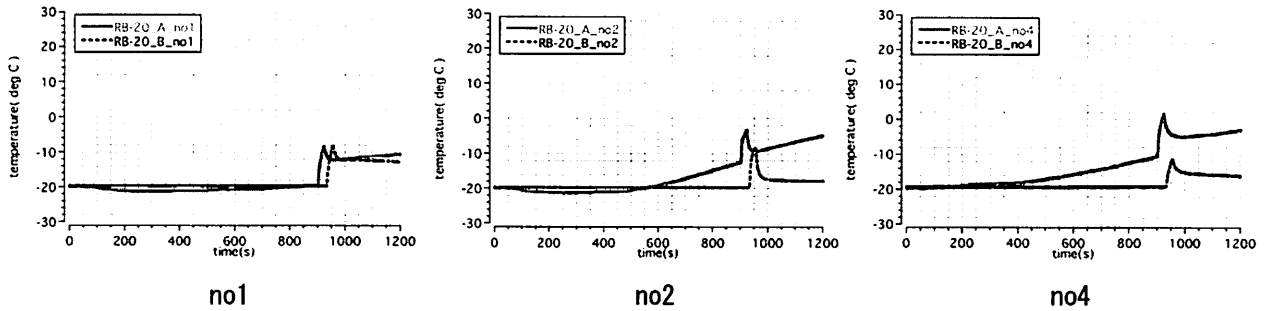


図-5 ゴム支承内部温度変化 (RB ; -20°C試験)

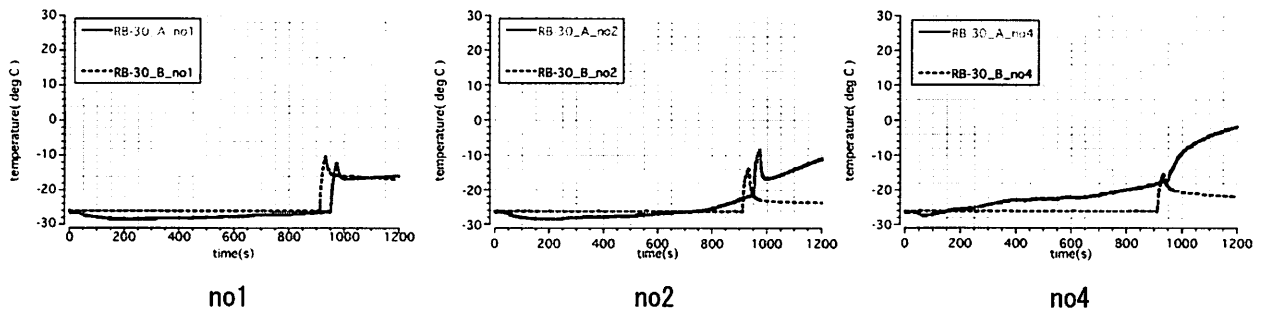


図-6 ゴム支承内部温度変化 (RB ; -30°C試験)

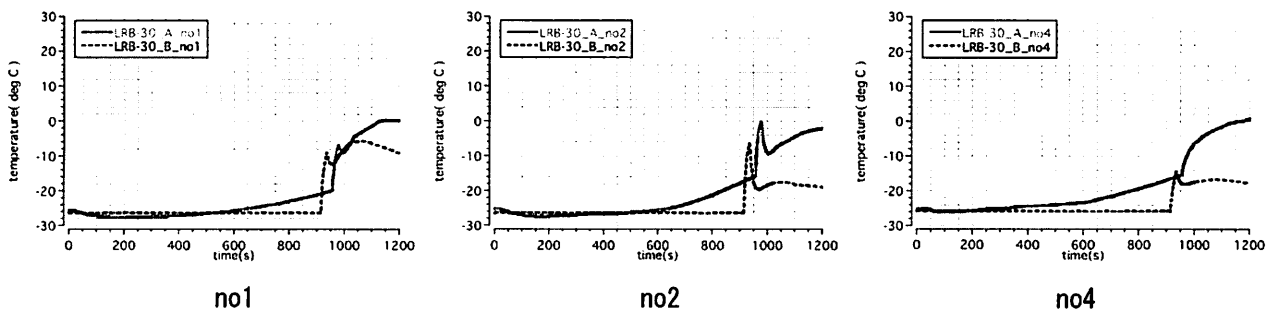


図-7 ゴム支承内部温度変化 (LRB ; -30°C試験)

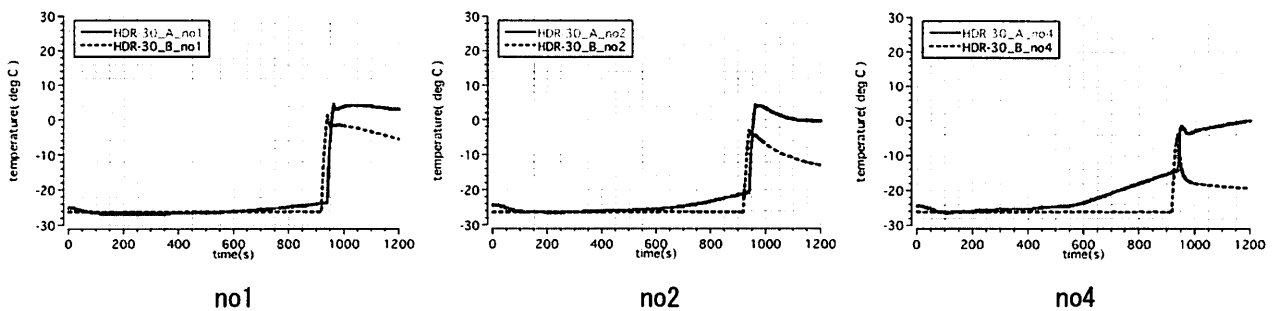
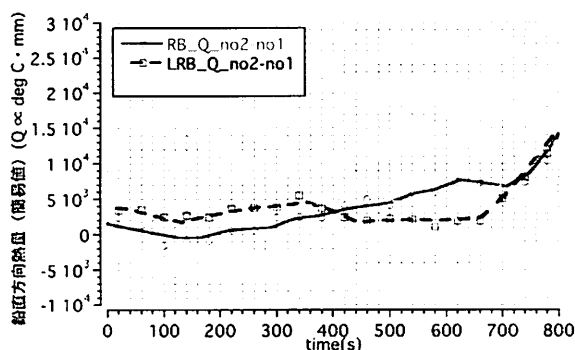


図-8 ゴム支承内部温度変化 (HDR ; -30°C試験)

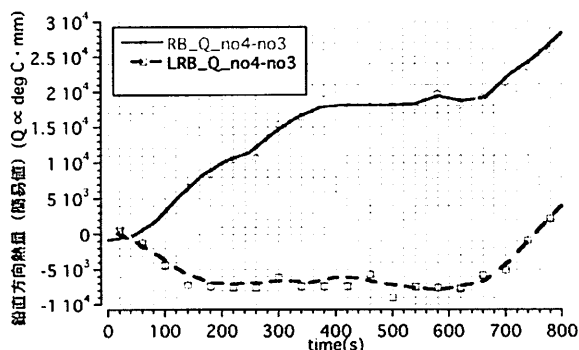
す。) 10および11が試験機側の固定テーブルを, 12は雰囲気温度測定を示している。なお, 測定サンプリングは20Hzである。

(3) 試験結果

温度計測結果を時刻歴図として図-5から図-8に示す。各図では, ゴム内の温度分布を確認するため支

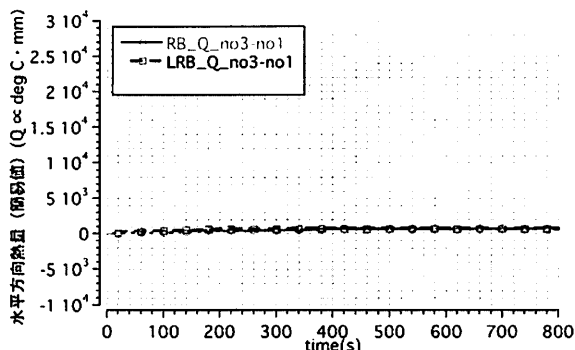


(a) no2-no1 間の熱移動

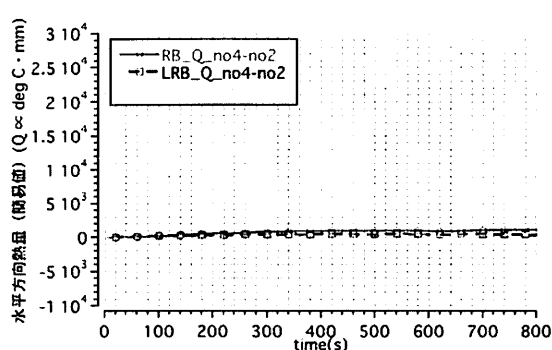


(b) no4-no3 間の熱移動

図-9 ゴム支承内部温度伝達（鉛直方向）



(a) no3-no1 間の熱移動



(b) no4-no2 間の熱移動

図-10 ゴム支承内部温度伝達（水平方向）

承芯部ゴム温度no1，ゴム支承芯部表面でかつ上鋼板に近いゴム温度no2とゴム支承側面端部のゴム温度no4の結果を併記して示す。実線は室温試験，破線は恒温試験の結果を示す。なお，概ね900(s)で確認される急激な温度上昇は，水平载荷を開始し内部発熱の影響と想定している。

(a) 試験温度による温度履歴比較

図-5と図-6により同一ゴム支承における試験初期温度の違いによる時刻歴温度推移を比較する。

初期温度による差は明確ではなく，no2およびno4において温度上昇の変化点が確認できる。いずれの初期温度においても約600(s)付近より温度上昇している。これは，室温に配置された試験機の固定テーブルに試験体を設置した時刻と一致していること確認しており，搬出搬送時の室温気体と比べて，固定テーブルの影響が非常に大きい結果といえる。

(b) ゴム種別による温度履歴

次に，図-6，図-7，図-8に着目してゴム種の違いを確認する。各ゴム種別で-30℃試験の結果のみを示している。

芯部にあるno1では，RBとHDRの時刻歴は同様の傾向を示し，载荷開始まで概ね初期温度を保持している。これに対してLRBは，約600(s)よりゴムの温度が上昇していることが確認できる。上昇するタイミングは，試験機の固定テーブルに設置したと同時

刻と読み取れ，他のゴム支承との異なる要因としては，鉛によりゴム支承内部の熱伝達率が大きくなっていることが疑われる。

(c) 内部温度伝達

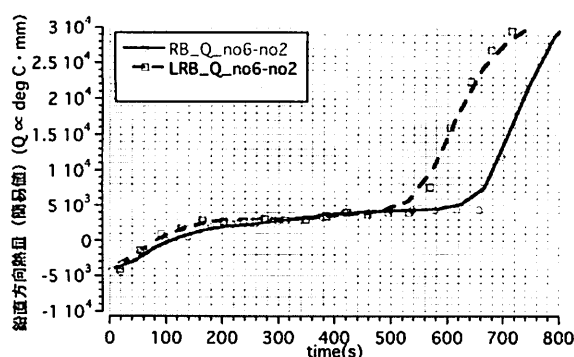
室温試験では，恒温より搬出することによって雰囲気温度の急激な変化をゴム支承が受けて内部温度が短時間で上昇する傾向が確認され，適切な温度管理または高い精度の内部温度評価が求められる。

内部温度上昇については，雰囲気温度の影響を受けて，平衡状態に向かう非定常熱伝導現象がおきたことによるものと考えられる。固体内部における熱伝達では，式(1)に示すように熱伝導率と熱の流れる方向の温度勾配と断面積に比例している⁶⁾など。概略で考えると式(2)に示すように流れる熱量 Q は，温度差 $(T_n - T_{n+1})$ と面積 A に比例し，温度差を求めた断面の距離 Δx に反比例する関係といえる。

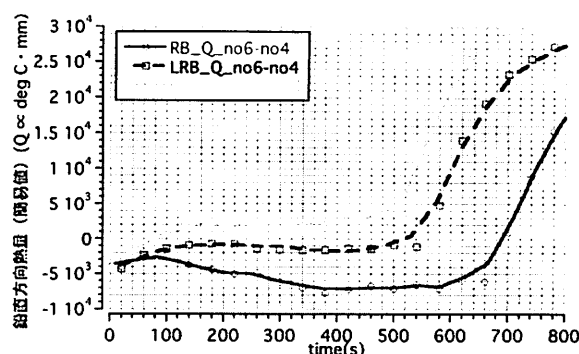
$$Q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) A \cdots \cdots (1)$$

$$Q \propto \frac{(T_n - T_{n+1})}{\Delta x} A \cdots \cdots (2)$$

この試験結果では，試験機の固定プレートに設置した時刻より内部温度の上昇が大きくなっていることから，式(2)の関係より熱移動の卓越方向に着目した。ゴム支承の水平面および鉛直面の表面積と温度



(a) no6-no2 間の熱移動



(b) no6-no4 間の熱移動量

図-11 上鋼版-積層ゴム間の温度伝達

測定点間距離を用いて簡易的な熱移動量を算定し、時刻歴を図-9から図-11に整理した。

図-9および図-10は、積層ゴム内の鉛直および水平方向への熱移動について、ゴム支承の芯部と端部の結果を支承別に整理した。鉛直方向の熱移動と比較すると水平方向への熱移動は非常に小さいことがわかる。鉛直方向においては、時刻経過とともに値が大きくなる傾向がある。概ね室温状態にある試験機の固定プレートへの接触後、増加傾向にある。

これは、図-2に示すゴム+鋼版+上下鋼版からなる平板積層構造となっていること、ゴムと鋼版における熱伝達係数は概ね150倍ほどの違いがあること、ゴムの表面積が約 $1.0 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ 、上下鋼版の表面積が $2 \times 2.4^2 \times 10^4 (\text{mm}^2)$ と10倍も大きいことから想定される熱移動の卓越方向が鉛直方向と調和的である。

図-11には、積層ゴムと上鋼版間の熱移動を時刻歴で示している。(a)の結果から搬送時における鋼版-ゴム間の熱移動は一定であるが、試験機の固定プレートに設置したのち、急激な増加がみられ、ゴム支承内部の熱移動が鉛直方向に卓越する要因であることが想定される。

5. まとめ

信頼性のある橋梁用ゴム支承の低温時特性評価手法を確立するための基礎検討として、せん断特性試験時の雰囲気温度がゴム支承に与える影響について考察した。さらに、試験時の雰囲気温度の違いから

内部温度への影響について試験を行った結果、以下のことが明確となった。

- ・ ゴム支承の低温時せん断特性試験を行う場合、室温試験では、内部温度が上昇するため、目的とする温度での特性値と異なる可能性がある。
- ・ ゴム支承内部では、水平方向への熱移動より、上下鋼版のある鉛直方向への熱移動が卓越する傾向にある。

今後は、簡易な管理方法や簡便で高精度の内部温度の推定手法を確立するための試験および解析的検討を進める。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説書 耐震設計編 平成24年3月，丸善，2012.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004.
- 3) ISO 22762-1 Elastomeric isolators-Part1: Test methods, 2005.
- 4) 日本工業標準調査会：道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム一試験方法 JIS K6411, 日本規格協会, 2012.3.
- 5) 潤田久也, 山崎智之, 大島俊之, 中村昌弘: 寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材内部温度の応答確認実験および数値解析, 土木学会論文集, No.773, I69, pp113-123, 2004.10.
- 5) 小林清志, 飯田嘉宏: 新版 移動論, 朝倉書店, 1989
- 6) 甲藤好郎: 伝熱概論, 養賢堂, 1983