低温環境下で載荷されるゴム支承の内部温度と力学的特性の検討

The relationship between internal temperature and mechanical characteristics of rubber bearing under the low temperature environment

北見工業大学	正会員	齊藤剛彦 (Takehiko Saito)	北見工業大学	学生会員	○入江駿亮	(Shunsuke Irie)
住友理工(株)	正会員	中村保之 (Yasuyuki Nakamura)	北見工業大学	正会員	宮森保紀	(Yasunori Miyamori)
北見工業大学	正会員	山崎智之 (Yomoyuki Yamazaki)	住友理工(株)	正会員	竹ノ内浩祐	(Kosuke Takenouchi)

1. はじめに

積層ゴムを用いた免震支承は橋梁の耐震性能を向上さ せる有力な選択肢の一つであるが、免震ゴム支承に使用 されるゴム材料の剛性やせん断特性には温度依存性があ り、特に高減衰ゴム支承は天然積層ゴム支承(NR)と比 べると温度依存性が大きいことが知られている¹⁾.著者 ら(引用)は特に低温環境下での力学的特性に着目し、ゴ ム支承の温度依存性確認試験を実施した.このとき、温 度依存性について履歴曲線が安定するサイクルすなわち NR は3サイクル目、高減衰ゴムは5サイクル目の値か ら得られる変化率を、実験前の試験体温度(雰囲気温 度)で整理した.

しかし、ゴム支承は変形するたびに内部温度が上昇す ることから、評価サイクル時点での内部温度は雰囲気温 度とは異なり、温度が高いため、温度依存性を正しく評 価できていない可能性が指摘されている³.

そこで、本研究では、雰囲気温度で整理していた温度 依存性試験の結果を内部温度で整理することを試みる. 具体的には、代表的な実験で実測した内部温度から、加 振中の内部温度の変化の傾向を探る.また、その内部温 度の実測値から、既往の研究³⁾を参考に内部温度の推定 値を算出する.そして、推定された内部温度で温度依存 性について整理し、雰囲気温度での傾向との比較を行う.

2. 加振時の内部温度の測定

既往の温度依存性確認実験²⁾では住友理工株式会社製 HDR-S, HDReX, NR の□170 の供試体を用いた実験の うち、23℃, -20℃の G8 バージン載荷時に,供試体内 部に入れた熱電対 (T型クラス 2) で加振時の内部温度 を測定している.測定位置は図-1 に示すように 3 層あ るゴム層のうち,最上層の中心部分である.サンプリン グ周波数は 1Hz で取得する.

図-2 に 23℃, -20℃での内部温度の時刻歴波形をそれ ぞれ示す. HDR-S と HDReX は 11 回加振のため 22 秒ま で, NR は 4 回加振のため 8 秒まで加振しており, 加振 が終わると内部温度は徐々に雰囲気温度に近づく. なお, -20℃での実験では NR で 8 秒での値が欠損した.

NR と HDR-S では最初の温度上昇が大きく,徐々に 傾きが小さくなる.一方,HDReX は時間経過に伴うそ の傾きの変化が小さい.この違いは-20℃でより顕著で ある.HDR-S と HDReX を比較すると,23℃では,概 ね同様に温度が上昇し,開始から10秒までは HDR-Sの 方が温度が高く,17 秒以降では HDReX の方が温度が



4-1 內部溫度の側正位直

高い.一方,-20℃では、開始間もなく HDR-S の温度が 急激に上昇している.両者の温度差は徐々に縮まるもの の、加振終了時でも HDR-S の方が 9℃高い.また、温 度依存性確認実験で力学的特性を評価した 5 サイクル目 である 10 秒での温度差は 15℃である.

ここで、ゴム層の温度上昇はエネルギー吸収量である 履歴曲線の面積との相関があると考えられる.そこで、 サイクルごとのエネルギー吸収量と内部温度変化 ΔT の 関係を図-3 に示す.各雰囲気温度でサイクル数に応じ、 NR は 4 点、HDR-S と HDReX は 11 点を図示した.た だし、NR の-20℃では、4 サイクル目にあたる 8 秒での データが欠損したため、3 点となっている.

ゴム種ごとにエネルギー吸収量と ΔT の関係をみると、 すべてのゴム種でエネルギー吸収量の最も大きい1サイ クル目を除き概ね直線的な傾向がある.1 サイクル目に ついては初期載荷の影響で、エネルギー吸収量と ΔT の 関係が他のサイクルと異なっている可能性がある.

ここで、エネルギー吸収量と ΔT の関係をそれぞれ直 線 y=ax+bで回帰式を作成すると、その係数は**表**-1 のよ うになる.ただし、1 サイクル目の値は除外して作成し た.まず、傾き a に着目すると、HDR-S と HDReX は あまり変わらず、NR はそれより 5~6 倍大きい.しか し、NR のエネルギー吸収量は HDR-S や HDReX よりも 小さいため、 ΔT に大きな違いはない.次に、切片 bに 着目すると、ゴム種ごとに雰囲気温度によって異なる. その切片の差は HDReX が小さい.

図-2 から, HDR-S も HDReX もエネルギー吸収量に 対する温度上昇は直線だが,図-1(b)をみると HDR-S は 最初の温度上昇が大きく,徐々に傾きが小さくなる.一



図-3 エネルギー吸収量と内部温度変化の関係

方, HDReX は時間経過に伴うその傾きの変化が小さい. これは, HDR-S の方が, サイクルを重ねるにつれて, エネルギー吸収量がより大きく減少するためである.

このように内部温度の上昇はエネルギー吸収量で線形 近似できるが、その傾きはゴム種によって異なり、その 切片は同じゴム種でも雰囲気温度によって異なる.

しかし、今回の温度測定ではサンプリング周波数が低く、特に-20℃では測定のタイミングが加振周期である 2 秒の周期からずれてしまっていることや、測定した温 度条件が少ないことから、より詳細な検討が必要だと考 えている.

3. 内部温度の推定

奥井ら³⁾ではエネルギー吸収量と内部温度の上昇量の 関係から内部温度の上昇量を算出する式を作成し,内部 温度を推定している.これを参考に,前章で述べた内部 温度の実測値と計算値を比較し,推定可能か検討する.

本研究での内部温度の推定式は以下のとおりとする.

$$\Delta T = \frac{\Delta W \cdot V_r}{m_r \cdot C_{pr}} \tag{1}$$

表-1	エネルギー吸収量と内部温度変化の回帰式の
	係数

ゴム種	温度	а	b	R^2	
ND	23°C	0.0110	-4.7610	0.9406	
INK	-20°C	0.0124	-14.262	1	
	23°C	0.0023	-3.1489	0.9958	
HDK-5	-20°C	0.0020	-5.1648	0.9827	
UDDaV	23°C	0.0018	-2.4513	0.9853	
пркех	-20°C	0.0016	-2.9600	0.9756	

ここで、 ΔW はエネルギー吸収量で履歴曲線の面積、 V_r はゴム部分の体積、 m_r はゴム部分の質量、 C_{pr} はゴムの 比熱である.

文献 3)の式と比較すると、鋼板の影響を除いている. これでは上下鋼板と内部鋼板が内部ゴムから熱を奪わな いということになるが、後述のとおり、高減衰ゴムの雰 囲気温度 23℃での実験において、内部温度の実測値と 概ね整合することから、推定式は式(1)とする.

式(1)のパラメーターのうち, HDR-S, 鋼板の密度と 比熱は文献 3)の値を用いる. HDReX は密度,比熱の値

平成29年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第74号



図-5 雰囲気温度-20℃の内部温度実験値と計算値

を測定していないため、ここでは、密度は HDR-S と同 じ値を用い、内部温度の実験値と合う比熱の値を仮定す る.NR の密度と比熱は文献 3)で被覆ゴムに用いられて いる値とする.

図-4 に雰囲気温度 23℃,図-5 に-20℃での内部温度の 実験値と計算値をゴム種ごとにそれぞれ示す.

まず,文献 3)でも検討されている HDR-S について実 験値と計算値について,図-4(b)から 23℃で実験値と計 算値が概ね整合した.しかし,図-5(b)から-20℃では 9 サイクル目まで整合しない.これは,図-3 においてエ ネルギー吸収量と温度上昇量の関係が,雰囲気温度で一 直線上にないことと整合する.このことについて,本研 究で内部温度を測定した実験はバージン載荷であるため, バージン状態特有の影響が低温下で現れたのではないか と推測している.

図-4(c), 5(c)から, HDReX について, 密度は HDR-S と同じ 1146kg/m³ と仮定した場合, 比熱を 2.25 kJ/(kg*K)と設定すると概ね内部温度の実験値と計算値 が整合した. なお, HDReX では-20℃でも整合する. HDReX でも HDR-S のように図-3 において, エネルギ 一吸収量と温度上昇量の関係が雰囲気温度で一直線上に ないが, HDR-S よりもその差 (**表**-1 に示す回帰式の切 片 b の差) が小さいことから, 整合すると考えられる.

NR については文献 3)で被覆ゴムの値として用いられ

ている値を用いたが,図-4(a),5(a)から 23℃,-20℃両 方で,実験値と計算値が整合しない.これは,NR は図-3 での傾きが大きいことから,供試体で用いられた実際 の密度と比熱の値が異なるとすると,その影響をより強 く受けるためと考えている.

以上のように、内部温度が推定できている場合とでき ていない場合があるが、温度上昇に基づく力学的特性の 変化について定性的な検討はできると考え、本研究では 以上の方法で内部温度を算出する.

4. 温度依存性を内部温度で検討

式(1)で算出した内部温度による等価剛性の変化率を 図-6 に、等価減衰定数の変化率を図-7 にそれぞれ示す.

既往の温度依存性確認実験²⁾では等価剛性や等価減衰 定数は評価サイクルでの値を用いていたが,特に等価剛 性はサイクルごとの値が内部温度と相関があることがわ かる. HDR-S と HDReX を比較すると,内部温度は HDR-S の方が上昇しているが等価剛性の変化率は HDR-S の方が大きい.内部温度が上昇することにより,等価 剛性は下がる傾向にあるが,温度上昇の小さい HDReX の方が等価剛性の変化率が小さいため,HDReX は温度 上昇によって等価剛性の温度依存性を軽減しているわけ ではないと言える.

等価減衰定数について、図-7からNRでは内部温度



図-6 内部温度による等価剛性の変化率

と相関が見られるが, HDR-S と HDReX では, 内部温 度よりもサイクル数に相関があるように見える.

5. まとめ

本研究では、これまで雰囲気温度で検討してきたゴム 支承の力学的特性に関する温度依存性を、内部温度を推 定することによって内部温度で検討した.内部温度の計 算値は実測値と整合しない場合もあるが、等価剛性につ いては概ね内部温度の変化との相関が見られた.等価減 衰定数については全サイクルの値を算出したところ、高 減衰ゴムではサイクル数に相関があるような結果が得ら れた.



参考文献

- 日本ゴム協会 免震用積層ゴム委員会:設計者の ための免震用積層ゴムハンドブック,2000.
- 2) 入江駿亮、中村保之、齊藤剛彦、宮森保紀、山崎 智之、竹ノ内浩祐:低温環境下におけるゴム支承 の温度依存性に関する実験的研究、土木学会第72 回年次学術講演会、I-581, 2017.
- 奥井義昭,尾上修浩,佐藤京,今井隆:自己発熱の影響を考慮した高減衰ゴム支承の温度依存特性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 1, pp.165-173, 2017.