

# 高減衰ゴム支承のひずみ量と面圧の違いによる 温度依存性の実験的検討

齊藤 剛彦<sup>1</sup>・中村 保之<sup>2</sup>・竹ノ内 浩祐<sup>3</sup>・山崎 信宏<sup>4</sup>・  
宮森 保紀<sup>5</sup>・山崎 智之<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境系 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)  
E-mail: saitota@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 住友理工株式会社 化工品事業部化工品技術部免震技術課  
(〒485-8550 愛知県小牧市東 3 丁目 1 番地)  
E-mail: yasuyuki.nakamura@jp.sumitomoriko.com

<sup>3</sup>正会員 住友理工株式会社 化工品事業部化工品技術部免震技術課 (同上)  
E-mail: kosuke.takenouchi@jp.sumitomoriko.com

<sup>4</sup>正会員 日本鑄造株式会社 技術研究所 (〒210-9567 神奈川県川崎市川崎区白石町 2 番 1 号)  
E-mail: n\_yamazaki@nipponchuzo.co.jp

<sup>5</sup>正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境系 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)  
E-mail: miyamoya@mail.kitami-it.ac.jp

<sup>6</sup>正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境系 (同上)  
E-mail: yamazatm@mail.kitami-it.ac.jp

橋梁に用いられている免震支承には、その力学的特性に温度依存性があることが知られており、特に低温環境下でのその影響を評価することが重要である。そこで本研究では、高減衰ゴム支承の力学的特性に対する温度依存性を載荷実験により検討する。まず、基本的な温度依存性を確認したのち、ひずみ量の違い、面圧の違いにそれぞれ着目して検討する。

実験の結果、等価剛性とエネルギー吸収量は低温になるにつれて変化率が大きくなったが、等価減衰定数には明確な温度依存性は見られなかった。ひずみ量の大きい方が等価剛性、エネルギー吸収量の変化率が小さくなった。面圧の違いによる変化率の傾向の違いは見られなかった。

**Key Words:** *high damping rubber bearing, temperature dependency, cyclic loading test*

## 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り、広く用いられている。道路橋示方書<sup>1)</sup>によると、免震ゴム支承にはひずみ依存性、速度依存性、面圧依存性、温度依存性等の特性を有するものもあるため、その性能を評価することは重要である。特に、北海道のような寒冷地では温度依存性を評価することが重要である。

免震ゴム支承の低温環境下における温度依存性に関する研究はこれまでも行われている。道路橋支承便覧<sup>2)</sup>には、基本的な温度依存性を確認するための試験方法が記載されている。また、実験の結果は北海道土木技術会<sup>3)</sup>にまとめられている。これによると、等価剛性、等価

減衰定数ともに、低温になると上昇するが、等価剛性の方が変化率が大きい。奥井ら<sup>4)</sup>は、高減衰ゴム支承 (HDR) について内部温度を測定していない載荷実験でも内部温度が推定できるように、履歴曲線から内部温度の上昇量の推定式を作成した。そして、これまでゴム支承の温度依存性は実験開始時の温度 (雰囲気温度) で整理されていたが、この方法を用いて内部温度で温度依存性を整理した。

こうした中、著者ら<sup>5)</sup>においても、低温室内に設置した載荷装置を用いて、高減衰ゴム支承と天然積層ゴム支承に対して、特に低温環境下に対する温度依存性に着目して載荷実験を行い、それらの繰り返し載荷に対する力学的特性および破壊までの力学的特性について検討を行った。文献5)では基本的な温度依存性を検討したが、本

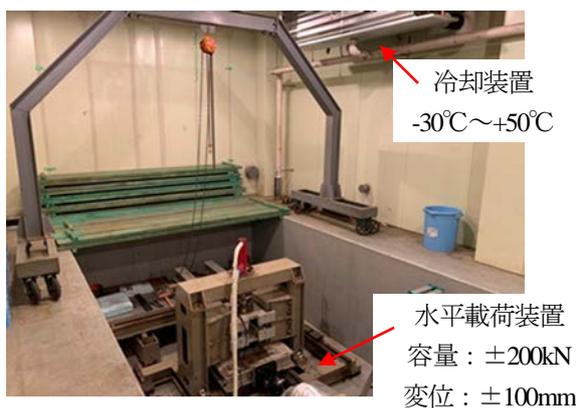


図-1 実験室

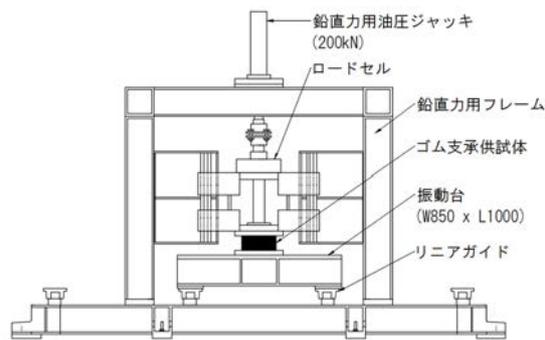


図-2 載荷装置

表-1 実験条件

実験 No.	ゴム種	寸法 (mm)	ゴム厚 (mm)	層数	形状係数		せん断 ひずみ (%)	面圧 (MPa)	温度 (℃)
					S1	S2			
①	HDRex, HDR-S	□170	7	3	6.07	8.10	175	6	-30, -20, -10, +23, +40
②	HDRex, HDR-S	□120	5	3	6.00	8.00	175	6	-30, -20, -10, +23
③	HDRex, HDR-S	□120	5	3	6.00	8.00	250	6	-30, -20, -10, +23
④	HDRex	□170	7	3	6.07	8.10	175	1	-30, -20, -10, +23

研究では、ひずみ量の違いや面圧の有無による温度依存性への影響を載荷実験により検討する。また、文献5)では1つの供試体を繰り返し実験する方法と、バージン載荷による方法を用いたが、本研究ではプレローディング後に実験している。そのため、文献5)との比較により実験方法の違いによる影響についても検討する。

## 2. 実験条件

実験は北見工業大学社会連携推進センターの低温室にある載荷装置(図-1, 2)で実施した。この実験室では冷却装置により、載荷装置を含めた実験室全体の室温を-30℃から+50℃の範囲で制御することができ、供試体が外気温の影響を受けずに載荷実験ができる。水平のアクチュエーターは荷重±200kN、変位±100mmの動的載荷能力があり、本研究で使用した加振振動数0.5Hzの正弦波では±40mmで加振できる。

本研究では、まず、基本的な温度依存性を確認したのち、ひずみ量の違い、面圧の違いにそれぞれ着目した検討を行う。このために4つの条件で実験を行う。実験条件を表-1に示す。実験①で基本的な温度依存性実験、実験②と③でひずみ量の違いによる実験の比較、実験①と④で面圧の違いによる実験の比較を行う。

供試体は住友理工(株)製の高減衰ゴム支承 HDRex,

HDR-Sの2種類とし、せん断弾性係数はすべてG12である。両ゴム種の違いはポリマー特性であり、HDR-Sは天然系のポリマーを用いているが、HDRexは非天然系のポリマーを用いている。供試体の寸法、ゴム厚は載荷装置の能力を考慮し、実験条件に応じて2種類を使い分けることとする。実験②では供試体のサイズを実験③に合わせる。実験①、④で用いる供試体の図面を図-3に示す。加振方法はすべての実験で、振動数0.5Hzの正弦波で一定振幅による正負交番繰り返し載荷、繰り返し回数11回で行う。各実験条件の違いは、実験①と②はせん断ひずみ175%、面圧6MPa、実験③はせん断ひずみ250%とする。実験④は面圧を1MPaとする。なお、面圧1MPaは、本載荷装置で安全に実験できる最低の面圧である。以上の実験を+23、-10、-20、-30℃の温度条件で行う。その他、実験①は+40℃でも実施する。また、実験④はHDRexのみで行う。

すべての実験でそれぞれ別の供試体を用意する。また、各実験回数は1回であるため、供試体の個体差による結果のばらつきが懸念されるが、各供試体は製造時に一括して作成することにより個体差を少なくしている。実験回数は供試体の種類と温度条件により、表-2のように合計30回であり、供試体の個数は内部温度管理用の4つを加えて計34個用意する。

本研究では各供試体にプレローディング(+23℃、せん断ひずみ175%、面圧6MPa)を実施後、24時間以上

経過したのち実験している。+23°Cの実験以外はプレローディング後、供試体を常温の測定室に保管し、実験前に温度管理用の供試体と同時に実験室に入れ、所定の温度にする。各実験は供試体を所定の温度の実験室に入れてから約 16 時間後で、同時に入れた温度管理用の供試体の内部温度が所定の温度に達してから概ね 12 時間以内に実験している。

実験結果は 5 サイクル目の履歴曲線から、等価剛性、等価減衰定数、エネルギー吸収量をそれぞれ算出し、+23°Cを基準とした変化率で検討する。

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 基本的な温度依存性実験

まず、実験①による等価剛性、等価減衰定数、エネルギー吸収量の変化率を図-4 にそれぞれ示す。

等価剛性については両ゴム種とも、低温になるにつれて変化率が大きくなっている。ゴム種による比較では HDR-S の方が変化率が大きい。これは、HDR-S は天然系のポリマーを用いているが、HDReX は天然系よりもガラス転移点が低い材料を用いているため、低温で結晶化しにくいことから、変化率に差が見られると考えている。なお、高温の+40°Cではゴム種による違いは見られない。

等価減衰定数の変化率は両ゴム種とも-30°Cでも 1.1 を下回っており、明確な温度依存性は見られない。

エネルギー吸収量は等価剛性と同様に、低温になるにつれて変化率が大きくなっており、その割合はエネルギー吸収量の方が若干大きい。

ここで、文献 5)の結果と比較するため、HDReX、HDR-S の変化率を図-5、6 にそれぞれ示す。ここで、文献 5)では、バーजन载荷による検討と、履歴補正を用いた検討の 2 種類行っており、凡例の V はバーजन载荷による結果を示す。

等価剛性については、今回と文献 5)との傾向に違いはない。両ゴム種で概ね今回の方が変化率は大きくなっている。

一方、等価減衰定数については、変化率の幅は小さいものの、履歴補正の方では低温になるにつれて変化率が大きくなっているが、バーजन载荷では-30°Cで変化率が低下しており、傾向が一致せずばらつきがある。今回の結果はばらつきの範囲内にある。なお、等価減衰定数の分母に関係する等価剛性と分子であるエネルギー吸収量について、-30°Cで比較するとエネルギー吸収量の方が変化率のばらつきが大きい。

今回の実験と文献 5)の実験では、供試体の諸元、実験条件は同じだが、実験の手順、温度管理と保管方法の 2

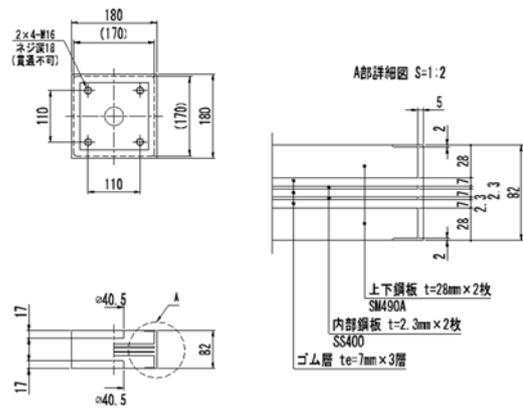


図-3 実験①、④の供試体

表-2 実験回数

実験	供試体	温度条件	実験回数
①	2種類	5	10
②	2種類	4	8
③	2種類	4	8
④	1種類	4	4
計			30

点が異なる。

まず、実験の手順としては、今回の実験ではすべての実験で新しい供試体を+23°Cでプレローディングを行ったのち、各温度で実験している。一方、文献 5)の実験では、履歴補正を用いた場合とバーजन载荷による 2 種類の方法で実験している。履歴補正を用いた場合では、まず+23°Cの実験をバーजन载荷で行い、同じ供試体を -10°C、-20°C、-30°Cと続けて実験している。この場合、载荷履歴による特性の変化が含まれてしまうため、別の供試体で+23°Cで複数回実験し、その結果から実験回数による特性の変化を求めて、実験結果を補正している。実験回数に対する影響を確認する実験で、バーजन载荷に対し 4 回目の実験では、等価剛性についてはすべてのゴム種で 95%程度、等価減衰定数については 80%程度に低下するという結果が得られた。この影響を補正して変化率を算出している。しかしながら、高減衰ゴム支承に含まれている添加剤が低温環境下では硬化する特徴があり、この添加剤の特徴による影響をこの履歴補正の方法では表現しきれていない可能性が考えられる。また、バーजन载荷による実験では、各温度でバーजन状態の供試体で実験している。

次に、供試体の保管について、今回の実験ではプレローディング後に常温の部屋に保管している。その後、実験前に供試体を実験室に入れて所定の温度になってから実験している。一方、文献 5)では、供試体は実験期間中、常に実験室に保管している。そのため、温度管理用の供試体で内部温度が所定の温度に達していることは確認し

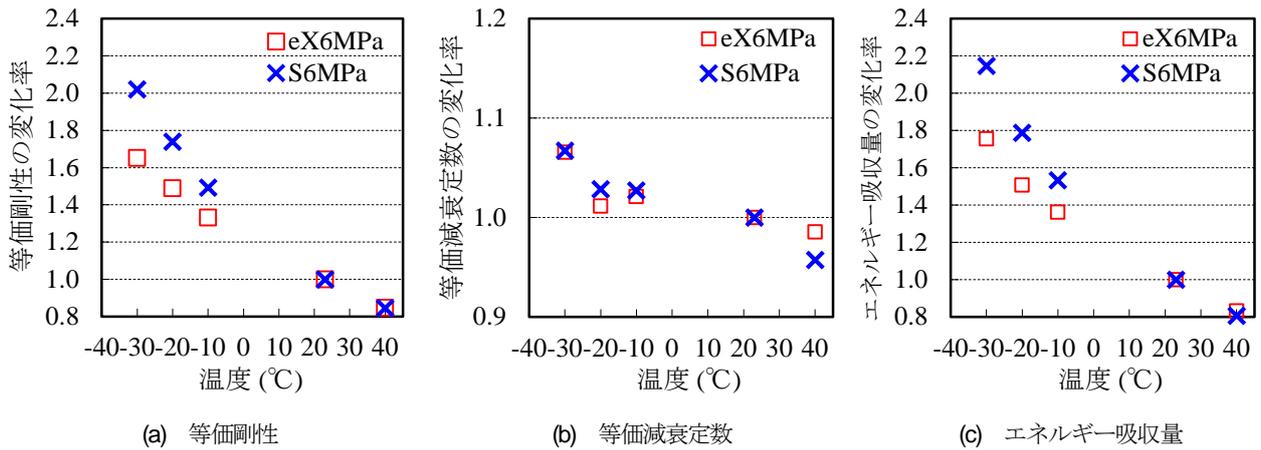


図4 実験①の温度による力学的特性の変化率

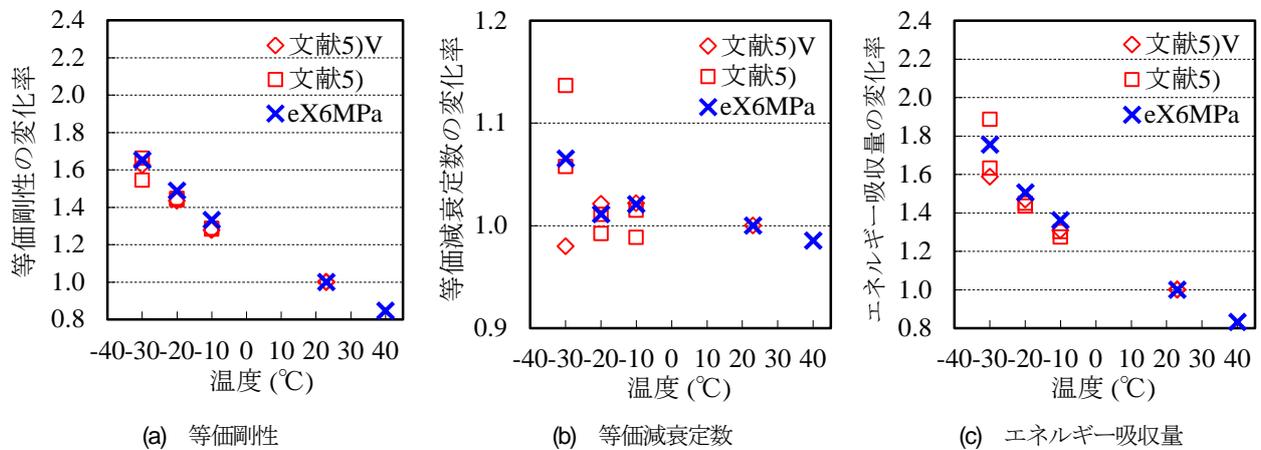


図5 HDReXにおける実験①と文献5)の変化率

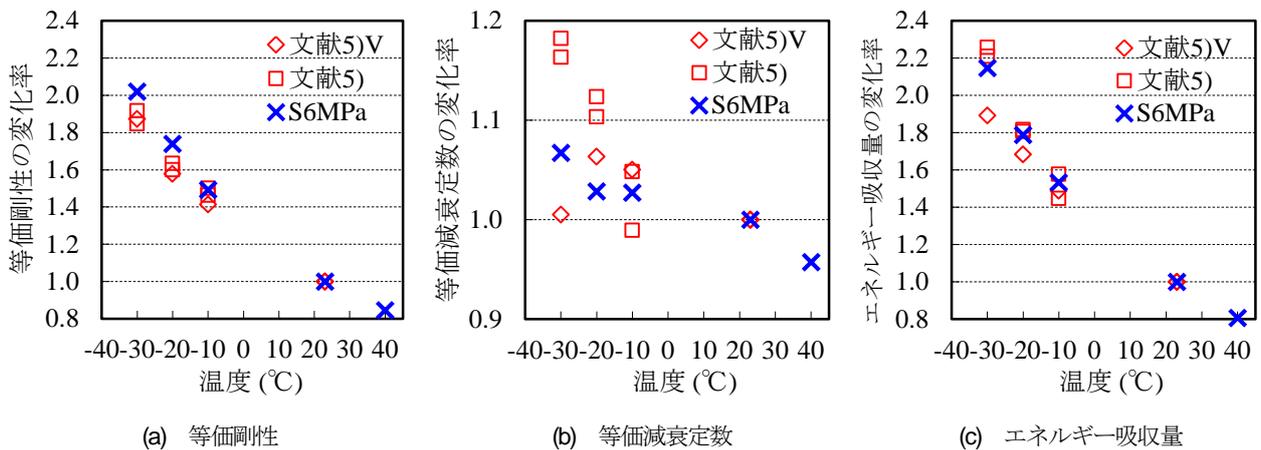


図6 HDR-Sにおける実験①と文献5)の変化率

ているものの、低温での冷却期間が非常に長い。また、履歴補正を用いた実験の供試体は、実験後もそのまま低温の実験室内で保管し、次の実験に使用している。道路橋支保便覧<sup>2)</sup>によると、温度依存性実験に用いる供試体の温度調整時間は6~24時間確保することが標準的とされていることから、長期間冷却した影響があるかもしれ

ない。

したがって、文献5)の等価減衰定数の変化率のばらつきについては繰り返し実験することに対する補正の方法と、供試体の温度管理、保管方法が影響している可能性がある。

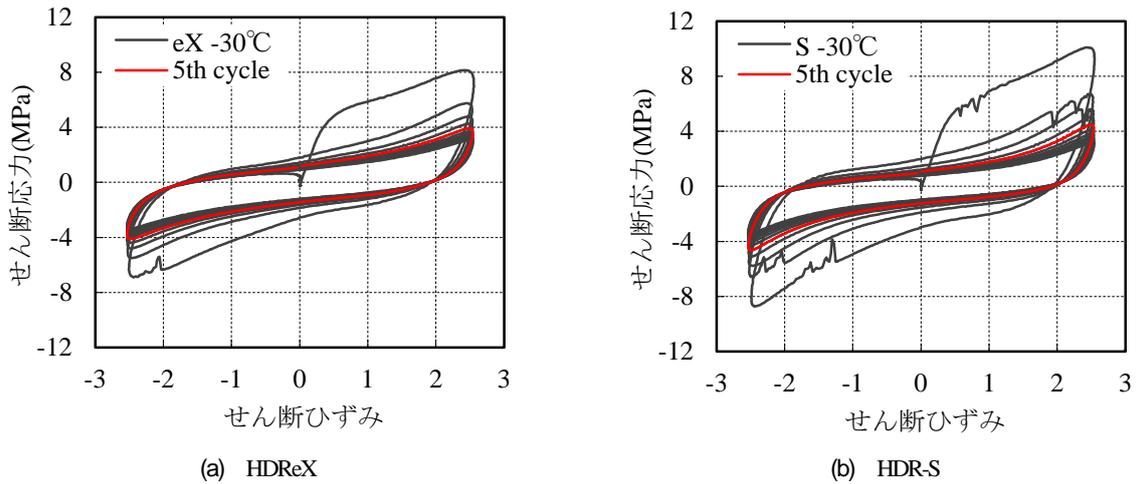


図-7 -30°C, せん断ひずみ250%の履歴曲線

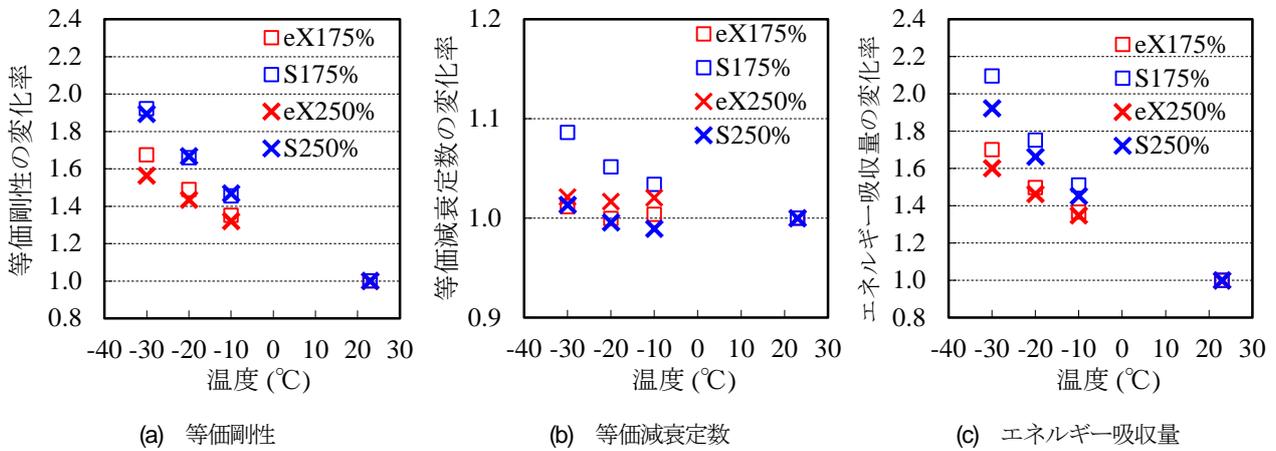


図-8 せん断ひずみの違いによる変化率

(2) ひずみ量の違い

ひずみ量の違いによる比較について、温度-30°C、せん断ひずみ 250%での履歴曲線を図-7 に示し、変化率を図-8 に示す。

等価剛性については HDReX で 250%の方が変化率が多少下回っている。HDR-S では図-8(a)ではひずみ量による変化率に差はない。しかし、図-4(a)に示す実験①の結果では変化率が実験②より大きいことから、HDReX と同様に、250%の方が変化率が小さい可能性がある。

等価減衰定数については、250%ではほぼ 1.0 である。HDR-S の 175%でやや変化率が大きくなる傾向が見られるものの、変化率は 1.1 以下と小さいため、ひずみ量の違いによる明確な違いがあるとは考えにくい。

エネルギー吸収量では、両ゴム種とも 250%の方が概ね変化率が小さい。

図-7 の履歴曲線を比較すると、-30°Cのとき、HDR-S の方が、高ひずみ領域でハードニングが顕著に現れている。ゴム支承が低温で剛性が高くなるのは、分子の結晶化などによって運動性が束縛されることにより柔軟性が

低下するためと考えられる。また、高ひずみ領域でハードニング (伸長結晶化) が発生する。今回使用した 2 種類の高減衰ゴム支承について、HDR-S は天然系のポリマーを用いているが、HDReX は非天然系のポリマーを用いており、ポリマーの違いがハードニングの部分の違いに現れていると考える。

(3) 面圧の違い

面圧の違いによる比較について、温度-30°Cでの履歴曲線を図-9 に示し、変化率を図-10 に示す。

等価減衰定数の-20°Cで傾向が異なるように見えるものの、その差は 0.05 と小さく、等価剛性、等価減衰定数、エネルギー吸収量いずれも、面圧の違いによる変化率の傾向に違いは見られない。

図-9 の履歴曲線を比較すると、面圧の大きい 6MPa の方が履歴曲線の面積がわずかに大きい。

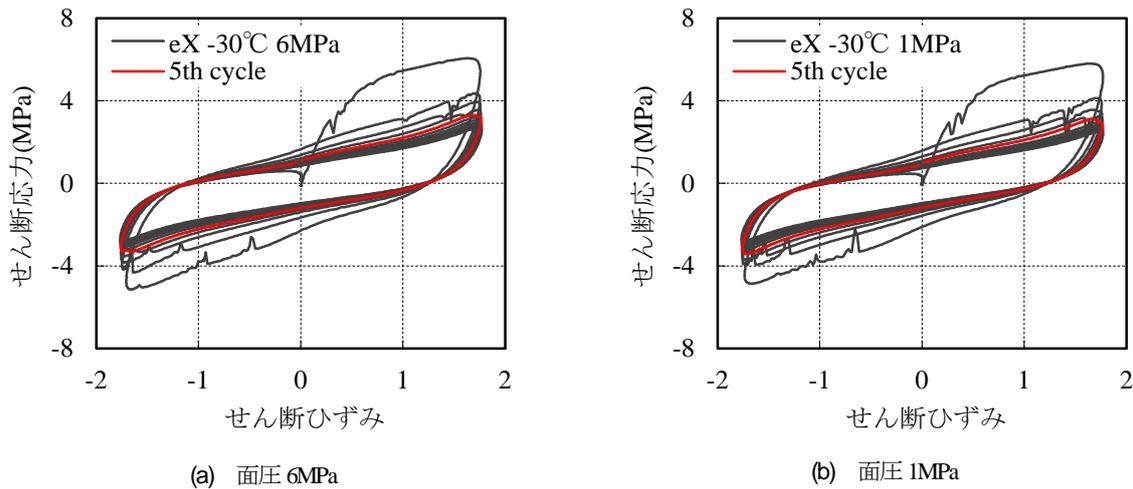


図-9 -30°Cにおける面圧の違いによる履歴曲線

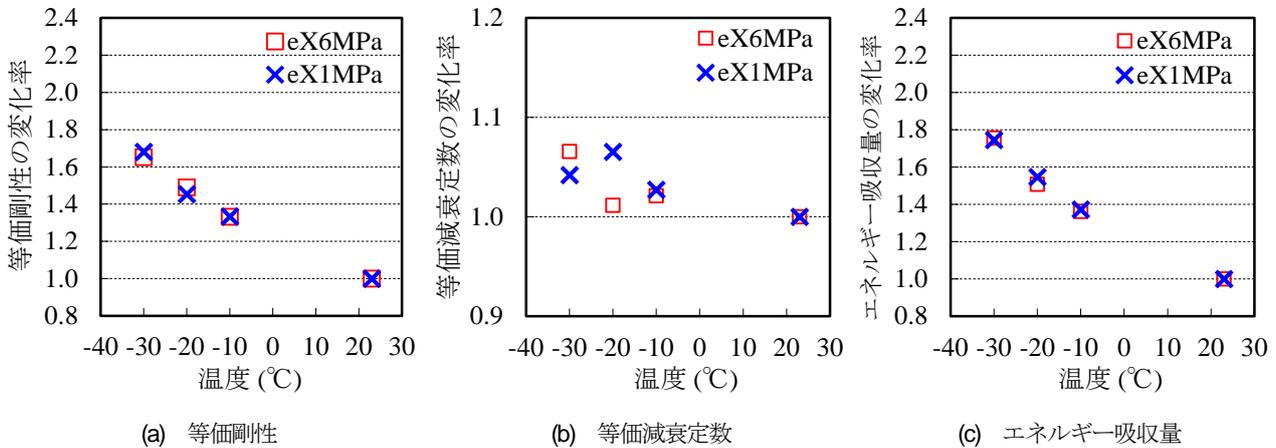


図-10 面圧の違いによる変化率

#### 4. 内部温度の測定, 検討

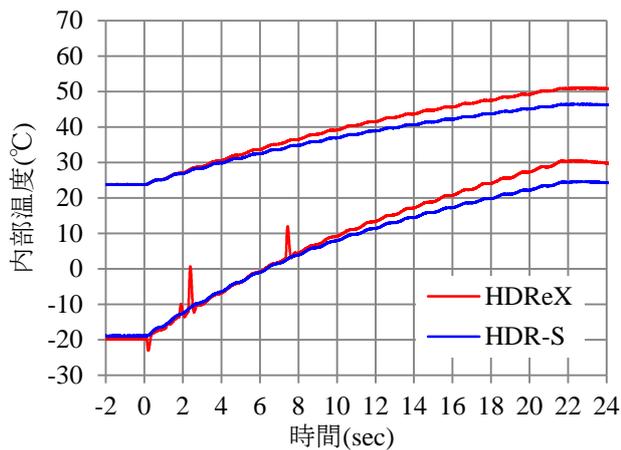
高減衰ゴム支承は揺れにより変形することによってエネルギーを吸収し、熱に変換する。したがって、繰り返し荷重を受けるにつれて内部温度が上昇することから、上述の実験のうち、代表的なケースで加振中の内部温度を測定し、検討する。

内部温度は熱電対 (T 型クラス 2) を供試体内部に埋め込むことで測定する。測定箇所はゴム層の中央層の中心の 1 箇所とする。熱電対は、供試体の加振時に水平方向に埋め込むこととする。ここで、熱電対が支承内部にあることによりその部分のゴムの動きが異なってしまうため、これまでの実験とは別に供試体を用意し、内部温度を測定することのみに使用した。

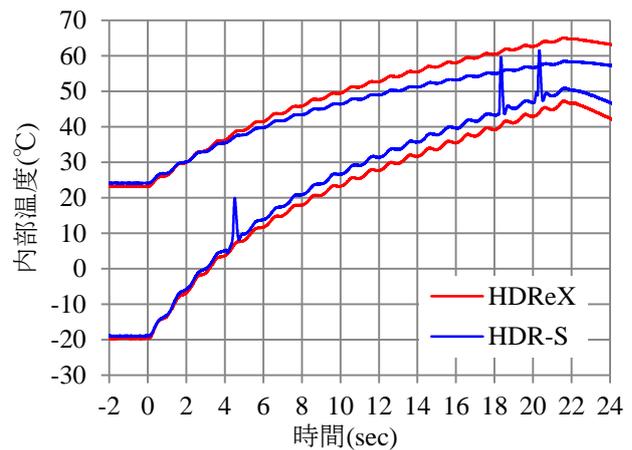
内部温度を測定した実験は実験①, ③の+23°C, -20°Cであり、各 1 回ずつ実験する。なお、ここではプレローディングは行わず、バージン荷重とし、変位、荷重と時刻同期でサンプリング周波数 250Hz で取得する。

実験①, ③の+23°C, -20°Cの内部温度の時刻歴変化を図-11にそれぞれ示す。なお、実験①は□170の7mm×3層、実験③は□120の5mm×3層と、供試体の寸法が異なるために、単純に比較できないことに留意されたい。また、一部瞬間的に温度が上昇している部分は測定不具合と考えている。

内部温度は加振周期 2 秒の荷重に合わせて上昇するところとキープするところが交互に現れている。図-11(a)の実験①の内部温度を見ると、+23°C, -20°Cともに HDReX の方が内部温度が上昇している。ここで、今回用いたゴム材料の比熱を表-3に示す。比熱はゴム種によって若干異なり、また、温度によっても異なる。内部温度の上昇の違いにはゴム材料の比熱とエネルギー吸収量が関係していると考えられるが、ゴム種の比較では、HDReX の方が比熱は若干大きいものの、エネルギー吸収量が大きいので、HDReX の方がより温度が上昇したものと考えられる。また、初期温度が+23°Cと-20°Cでは、-20°Cの方が温度上昇が大きい。これは、両ゴム種とも、

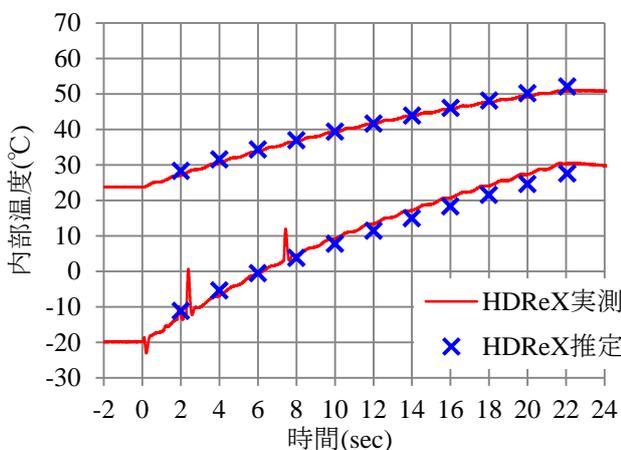


(a) 実験① (□170, せん断ひずみ 175%)

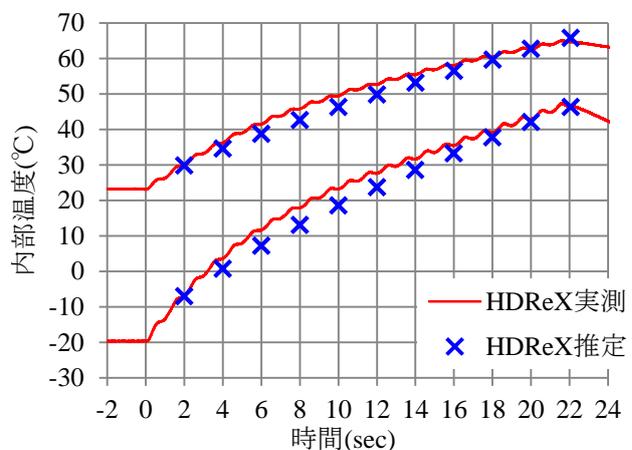


(b) 実験③ (□120, せん断ひずみ 250%)

図-11 加振中の内部温度



(a) 実験① (□170, せん断ひずみ 175%)



(b) 実験③ (□120, せん断ひずみ 250%)

図-12 HDReXにおける内部温度の実測と推定の比較

-20°Cの方が比熱が小さくなることと、エネルギー吸収量が大きいためと考えられる。

実験③については+23°Cでは実験①と同様であるが、-20°Cのときに、HDR-Sの方が温度上昇している。ゴムの比熱やエネルギー吸収量の関係は実験①と同様だが、温度上昇の傾向が異なるため、追加実験等の検討が必要と考えている。

ここで、内部温度の上昇量はエネルギー吸収量と関係があり、奥井ら<sup>4)</sup>によると、以下の式で各サイクルの内部温度の上昇量  $\Delta T$  が簡易的に推定できるとされている。

$$\Delta T = \frac{DV_r}{m_r C_{pr} + m_s C_{ps}} \quad (1)$$

ここで、 $D$  はエネルギー吸収量、 $V_r$  は内部ゴムの体積、 $m_r$  は内部ゴムの質量、 $C_{pr}$  は内部ゴムの比熱、 $m_s$  は内部鋼板の質量、 $C_{ps}$  は内部鋼板の比熱である。そこで、HDReXについて、内部温度を算出した結果を図-12に示

表-3 ゴム材料の比熱 (J/(g・°C))

温度	HDReX (G12)	HDR-S (G12)
-20°C	1.123	1.093
+23°C	1.282	1.241

す。実験①では実測と推定の差は、+23°Cでは最大 1.3°C、-20°Cでは最大 2.7°Cであり、5 サイクル目終了時の 10 秒では+23°Cでは 0.2°C、-20°Cでは 1.5°Cと、概ね整合している。しかし、実験③では、実測と推定の差は 4、5 サイクル目が最大で、+23°Cでは 3.1°C、-20°Cでは 4.7°Cであり、载荷の最初と最後のサイクルでは整合するものの、それ以外のサイクルで差が大きくなっている。

## 5. まとめ

本研究では、高減衰ゴム支承を対象にその力学的特性について基本的な温度依存性を確認したのち、ひずみ量

と面圧の違いによる温度依存性の評価を行った。その結果、等価剛性とエネルギー吸収量は低温になるにつれて変化率が大きくなったが、等価減衰定数には温度依存性が見られなかった。ひずみ量と面圧を変えて同様に温度依存性について検討した結果、ひずみ量の大きい方が等価剛性エネルギー吸収量の変化率が下回る傾向にあった。面圧の違いによる傾向には明確な差は見られなかった。設計ではこれらの特性を考慮することが必要である。

加振中の内部温度は载荷に合わせて波打つ形状で上昇する結果が得られた。各サイクルの内部温度を簡便に評価できる既往の推定式を用いて実測と比較すると、概ね整合するものの、せん断ひずみ 250%では実測との差が大きくなった。

**謝辞**：本研究を遂行するにあたり、実験当時北見工業大学工学部社会環境工学科 4年増田悠希氏に実験を手伝っていただきました。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2017.
- 2) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2018.
- 3) 北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針[第 1 編]設計・施工編，[第 2 編]維持管理編，[第 3 編]資料編，2012.
- 4) 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.
- 5) 齊藤剛彦，入江駿亮，中村保之，竹ノ内浩祐，宮森保紀，山崎智之：低温動的载荷実験による高減衰ゴム支承の力学的特性の検討，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol. 74，No. 4(地震工学論文集第 37 卷)，pp.L\_765-L\_776，2018.

## EXPERIMENTS ABOUT THE TEMPERATURE DEPENDENCY OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS DUE TO THE DIFFERENCES OF SHEAR STRAIN AND VERTICAL COMPRESSIVE STRESS

Takehiko SAITO, Yasuyuki NAKAMURA, Kosuke TAKENOUCI, Nobuhiro YAMAZAKI, Yasunori MIYAMORI and Tomoyuki YAMAZAKI

According to past researches, the mechanical characteristics of rubber bearings which used as seismic isolation devices in bridges depend on temperature. To use the devices in cold region, it is important to evaluate about the temperature dependency of the mechanical characteristics of rubber bearings. Therefore, this study discusses the mechanical characteristics of HDRBs by dynamic loading tests under the low temperature environment. Fundamental cyclic loading tests at different temperatures were conducted using 2 types of HDRBs (HDR<sub>e</sub>X and HDR-S). The specimens were tested under shear deformation with a constant vertical compressive stress of 6MPa. Sine waves were applied in the horizontal direction to the specimens. The period of the sine wave was 2.0 sec, and the shear strain was 175%. In these tests, Equivalent stiffness and energy loss of all specimens increased under low temperature and its ratio depended on type of rubber. In the case of increasing shear strain, the temperature dependencies of the equivalent stiffness and energy loss were lower than the result of the fundamental tests. And in the case of decreasing vertical compressive stress, the temperature dependencies were equivalent to the fundamental tests.