

低温動的載荷実験による高減衰ゴム支承の 力学的特性の検討

齊藤 剛彦¹・入江 駿亮²・中村 保之³
竹ノ内 浩祐⁴・宮森 保紀⁵・山崎 智之⁶

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

² 学生会員 北見工業大学大学院博士前期課程 工学研究科社会環境工学専攻
(〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³ 正会員 住友理工株式会社 化工品事業部免制振デバイス技術部免震技術課
(〒485-8550 愛知県小牧市東 3 丁目 1 番地)
E-mail: yasuyuki.nakamura@jp.sumitomoriko.com

⁴ 正会員 住友理工株式会社 化工品事業部免制振デバイス技術部免震技術課
(〒485-8550 愛知県小牧市東 3 丁目 1 番地)
E-mail: kosuke.takenouchi@jp.sumitomoriko.com

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

⁶ 正会員 北見工業大学助教 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)
E-mail: yamazatm@mail.kitami-it.ac.jp

本研究ではゴム材料の異なる 2 種類の高減衰ゴム支承と、天然積層ゴム支承に対して、実験室全体を低温に保った状態で載荷実験を実施し、低温環境下における繰り返し載荷および破壊までの力学的特性について検討した。低温環境下に対する等価剛性の変化率は HDR1 が最も大きく、HDR2 は概ね NR と同等であった。加振時の内部温度の上昇はエネルギー吸収量と直線的な関係があるが、その傾きや切片はゴム種、雰囲気温度によって違いが見られた。設計許容変位での繰り返し載荷実験を行った結果、等価剛性とエネルギー吸収量のサイクルごとの変化率は HDR1 が大きく、低温の場合により顕著であった。設計許容変位の 1.2 倍での繰り返し載荷実験、さらに単調載荷による破断実験の結果、低温環境下でも設計許容変位に対する安全率が 1.2 以上であることを確認した。

Key Words: high damping rubber bearing, cyclic loading test, ultimate limit state, low temperature environment, temperature dependency

1. はじめに

ゴム支承は、1995 年兵庫県南部地震以降急速に普及し、橋梁の耐震性能を左右する重要な役割を担っている。このうち、免震ゴム支承では、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と比べると温度依存性が大きいことが知られている¹⁾。このため、寒冷地域でゴム支承を用いる場合には、架橋地域の温度影響に対する性能が評価された材料を用いる必要がある²⁾。また、支承の選定では、架橋地点の外気温に対応した支承内部温度における、支承の特性を把握することが望ましい。この支承

の特性を確認するためには、ゴム支承供試体に対する載荷試験が行われる。

ゴム支承の低温環境下での特性への影響については、文献 2) にまとめられている。その他、低温環境下での載荷実験を実施している研究には例えば大島ら³⁾、大島ら⁴⁾、高橋ら⁵⁾、奥井ら⁶⁾がある。

道路橋支承便覧⁷⁾では新しい支承の適用のための試験項目として、温度依存性試験が挙げられており、使用環境の温度域における性能変化を確認しておくことは重要であるとされている。特に、北海道などの寒冷地での適用のためには上述のように低温環境下での特性を把握することは重要である。このとき、載荷装置も所定温度に

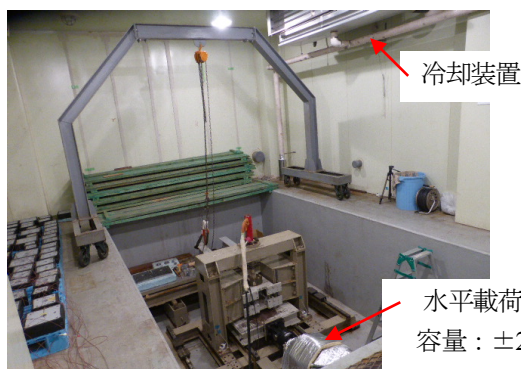


図-1 実験室

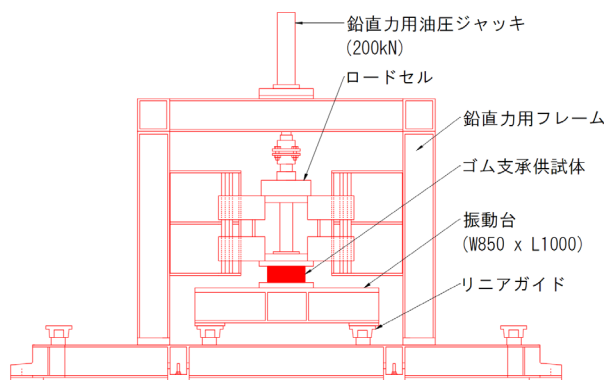


図-2 載荷装置

表-1 温度依存性実験の供試体諸元

種類	せん断 弾性係数	平面 寸法	ゴム厚		形状係数		供試体数
			te (mm)	n (層)	S1	S2	
NR	G8	□170	7	3	6.07	8.10	2+1 [※]
	G12						2
HDR1	G8	□170	7	3	6.07	8.10	2+3 [※]
	G12						2+3 [※]
HDR2	G8	□170	7	3	6.07	8.10	2+3 [※]
	G10						2+3 [※]
	G12						2+3 [※]

※NRはG8の-20℃, HDR1, HDR2は各Gの-10～-30℃でバージン载荷を実施

表-2 温度依存性実験の载荷条件

種類	せん断 弾性係数	雰囲気温度	面圧	波形	加振 振動数	せん断 ひずみ	加振 回数
NR	G8	23℃→-10℃ →-20℃→-30℃	6MPa	正弦波	0.5Hz	±175%	4回
	G12						
HDR1	G8	23℃→-10℃ →-20℃→-30℃	6MPa	正弦波	0.5Hz	±175%	11回
	G12						
HDR2	G8	23℃→-10℃ →-20℃→-30℃	6MPa	正弦波	0.5Hz	±175%	11回
	G10						
	G12						

して供試体が外気温の影響を受けない恒温室内で载荷試験をすることが求められている⁸⁾。

そこで、本研究では低温室内に設置した载荷装置を用いて、2種類の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载荷実験を行い、それらの繰り返し载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う。

2. 温度依存性確認実験

(1) 実験概要

载荷実験は文献8)の方法に準じて、北見工業大学社会連携推進センターの低温室にある载荷装置(図-1, 2)で

実施した。

温度依存性確認実験に用いる供試体はすべて住友理工株式会社製で、ゴム材料の異なる2種類の高減衰ゴム支承「HDR-S (以降 HDR1 と呼ぶ)」と「HDRex (以降 HDR2 と呼ぶ)」と、天然積層ゴム支承「NR」の3種類を使用する。供試体を図-3 に、供試体諸元を表-1 にそれぞれ示す。

実験条件を表-2 に示す。温度は 23℃, -10℃, -20℃, -30℃の4つとし、加振方法は振動数 0.5Hz の正弦波で完全両振り、繰り返し回数 11 回 (NR のみ 4 回) で行う。また、せん断ひずみは 175% とし、面圧は 6MPa とする。

ゴム支承の力学的特性の評価方法として、図-4 に示すような、実験より得られた水平変位-水平力の履歴曲線から等価剛性、等価減衰定数を算出する。

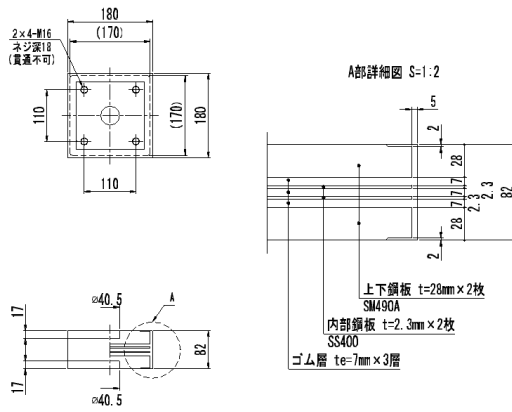


図-3 温度依存性実験の供試体

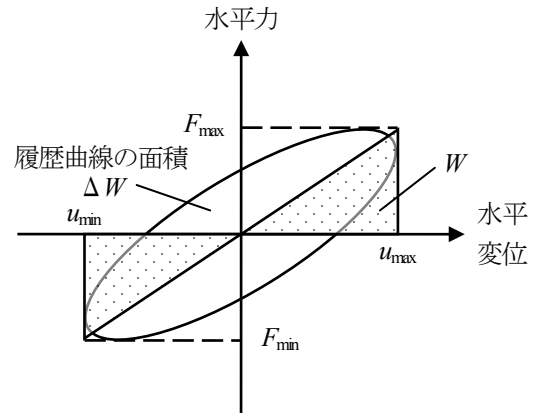


図-4 履歴曲線の例

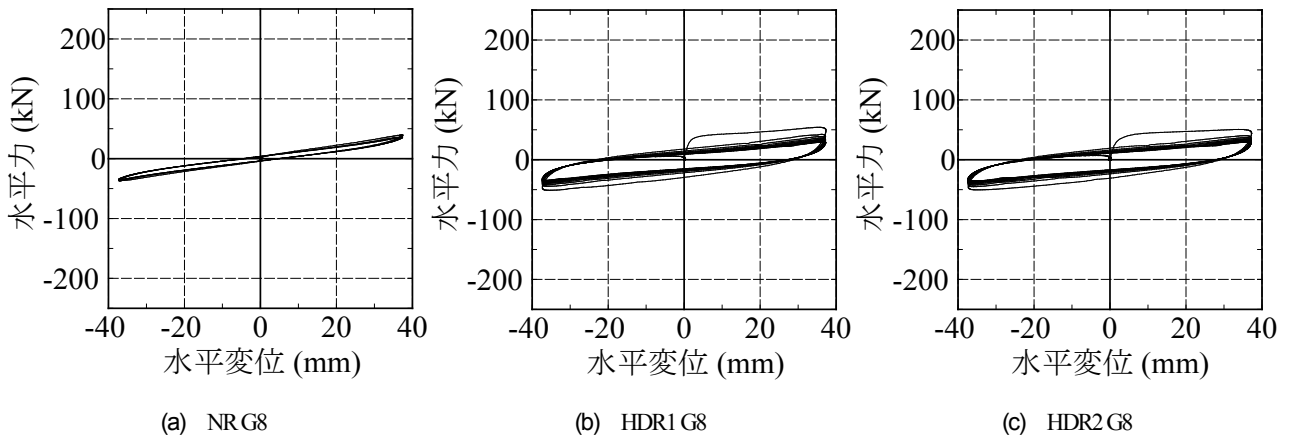


図-5 23°Cの履歴曲線

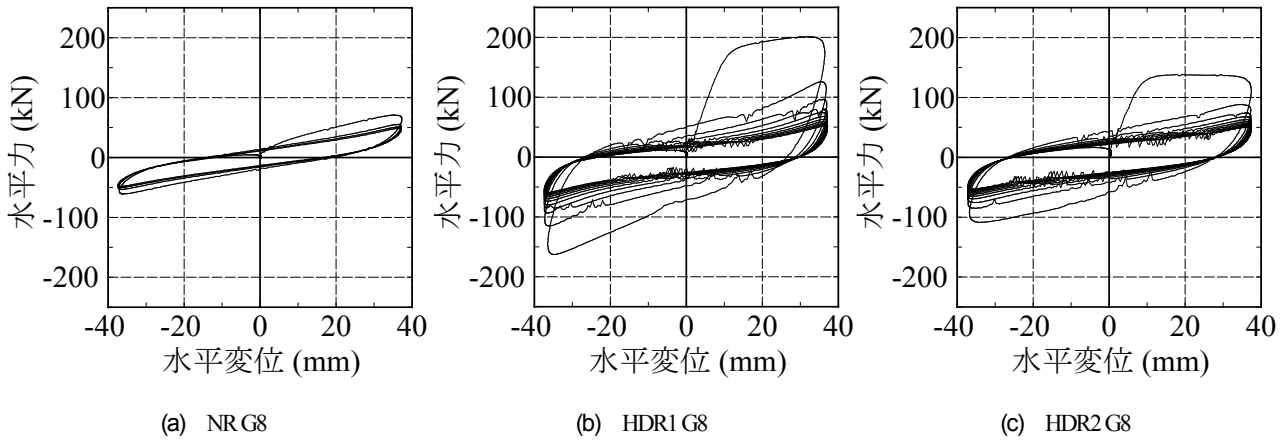


図-6 -30°Cの履歴曲線

$$K_B = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}$$

$$h_B = \frac{\Delta W}{2\pi W}$$

ここで、 K_B は等価剛性、 $F_{\max}$ は最大水平力、 $F_{\min}$ は最小水平力、 $u_{\max}$ は最大水平変位、 $u_{\min}$ は最小水平変位、 h_B は

- (1) 等価減衰定数、 ΔW はエネルギー吸収量で履歴曲線の面積、 W は弾性エネルギーで、図-4に示す2つの三角形の面積である。本研究では等価剛性、等価減衰定数は絶対バネの考え方をを用いる。上記の値の算出は、NRでは3サイクル目、高減衰ゴム支承では5サイクル目の実験結果で行う。

本実験では23°Cでの実験を载荷履歴のないバージン状態で行い、同じ供試体で-10°C、-20°C、-30°Cと順に行

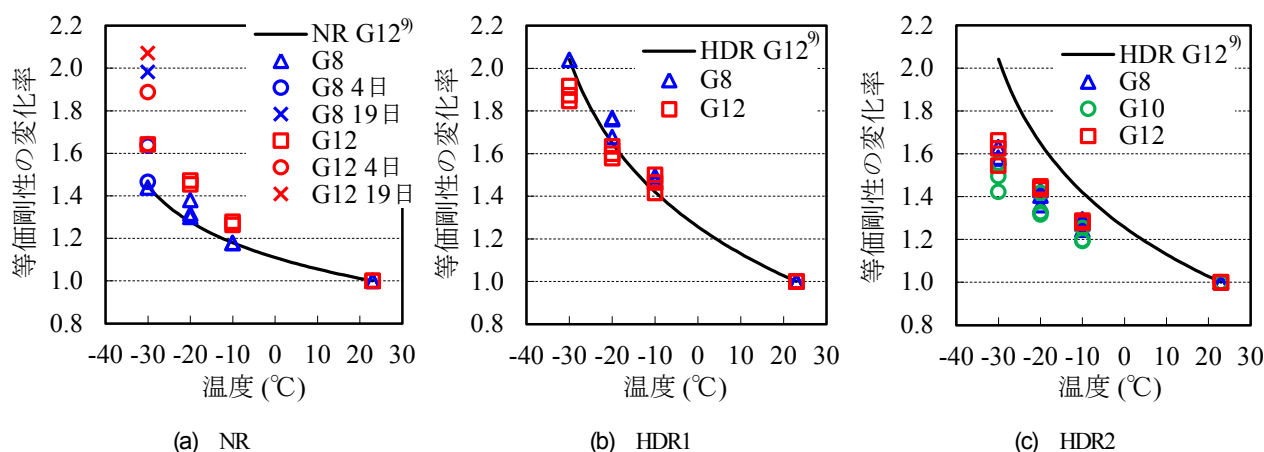


図-7 温度による等価剛性の変化率

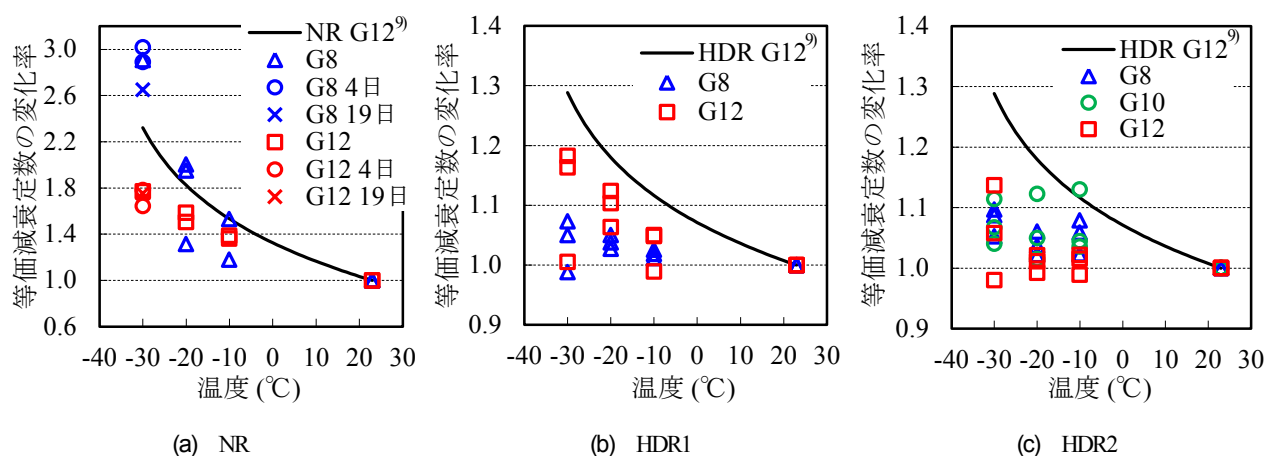


図-8 温度による等価減衰定数の変化率

う。そのため、実験回数の違いによる影響を補正する必要がある。その履歴補正は 23°C で専用の供試体で複数回実験し、等価剛性、等価減衰定数の変化率の近似関数を求め、実験回数に応じて補正を行う。ただし、比較のため、HDR1 と HDR2 は -10°C ~ -30°C で、バージン状態の供試体を用意し、バージン载荷を行っている。NR は G8 の -20°C のみバージン载荷を行っている。同じ供試体で複数回実験するときは、実験後、24 時間以上空けて、供試体の内部温度が雰囲気温度と一致するようにしている。また、温度を変えて実験するときは内部温度確認用の供試体の内部温度が雰囲気温度に一致したことを確認してから実験をしている。

以上、実験回数は 100 回で、これらに対応して 37 体の供試体を用いる。

(2) 実験結果と考察

実験結果の一例として 23°C、-30°C におけるせん断弾性係数 G8 の各ゴム供試体の履歴曲線を図-5, 6 に示す。

履歴曲線の形状について、NR は図-5(a), 6(a) より 23°C よりも -30°C におけるエネルギー吸収量が大きい。HDR1 では図-5(b), 6(b) より、低温になることで 1 サイクル目の

最大荷重が約 4 倍になるとともに、2 サイクル目以降の荷重も大きくなっている。HDR2 について図-5(c), 6(c) を比較すると HDR1 と同様の傾向だが、低温時の 1 サイクル目および 2 サイクル目以降の荷重は HDR1 より小さくなっている。

次に、等価剛性と等価減衰定数の温度依存性を検討するため、図-7, 8 に供試体別に等価剛性と等価減衰定数の 23°C に対する変化率を示す。併せて参考として文献 9) で示された式を曲線で示す。

図-7(a), 8(a) の NR においては、供試体を -30°C の実験室内に静置する期間によって等価剛性が大きく異なったため、静置期間を 19 日間、4 日間、-30°C 到達直後と変化させて実験を行った。なお、常温の測定室から -30°C の実験室に供試体を移して供試体内部の温度が -30°C に達するまで約 5 時間であった。NR において -30°C での静置期間が長いと等価剛性がかなり大きくなっているが、これはゴムの結晶化⁷⁾が原因であると考えられ、静置期間を短くすると -10°C、-20°C での傾向と同様になった。

図-7(b), 8(b) より HDR1 は NR と比べると等価剛性の変化率が大きくなっている。-10°C から変化率が大きくなることから HDR1 は低温になるとゴムが硬化しやすいと

考える。

図-7(c), 8(c)より HDR2 についても他の供試体と同様に温度が下がるにつれて剛性が増加するが、 -30°C での変化率が HDR1 より小さく、結晶化が進んでいない NR と同等である。

図-7 から、各供試体の G8 で 23°C と -30°C での等価剛性の変化率は、NR は 164%, HDR1 は 221%, HDR2 は 174%となった。このように、低温環境下での等価剛性の変化率は文献 9)の式のような曲線の傾向があり、温度依存性は HDR1 が最も高く、次いで HDR2、最も低いのは NR という結果になった。また、せん断弾性係数による各供試体の等価剛性の変化率の傾向は大きな差がない。なお、HDR1, HDR2 の -30°C での静置期間は供試体によって 1~2 週間の差があるが、NR の結晶化のような等価剛性の大きな違いは見られない。

等価減衰定数は、図-8 より NR は低温になると大きくなっている。これは NR はもともとエネルギー吸収量が小さいため HDR1, HDR2 に比べ変化率の大きいと考えられる。HDR1 と HDR2 では変化率が小さい。さらに、HDR2 では文献 9)の式のような曲線の傾向は見られない。また、せん断弾性係数による等価減衰定数の変化率の傾向は変わらない。

3. 加振時の内部温度の測定

温度依存性確認実験では 23°C 、 -20°C 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-9 に示すようにゴム最上層の中心である。サンプリング周波数は 1Hz で取得する。

図-10 に 23°C 、 -20°C での内部温度の時刻歴波形をそれぞれ示す。HDR1 と HDR2 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°C での実験では NR で 8 秒での値が欠損した。

NR と HDR1 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、HDR2 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°C でより顕著である。

HDR1 と HDR2 を比較すると、 23°C では、概ね同様に温度が上昇し、開始から 10 秒までは HDR1 の方が温度が高く、17 秒以降では HDR2 の方が温度が高い。一方、 -20°C では、開始間もなく HDR1 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 HDR1 の方が 9°C 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°C である。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

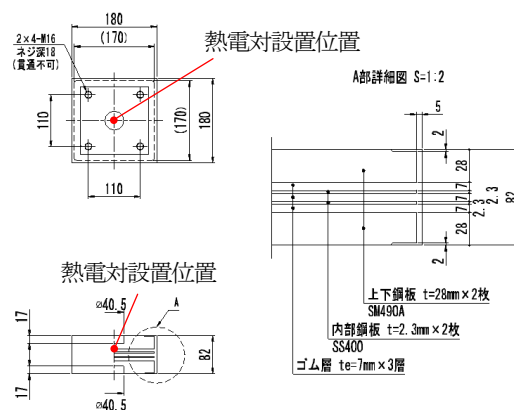


図-9 内部温度の測定位置

HDR2 の方が等価剛性の変化率が小さいため、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。

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-11 に示す。各雰囲気温度でサイクル数に応じ、NR は 4 点、HDR1 と HDR2 は 11 点を図示した。ただし、NR の -20°C 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。

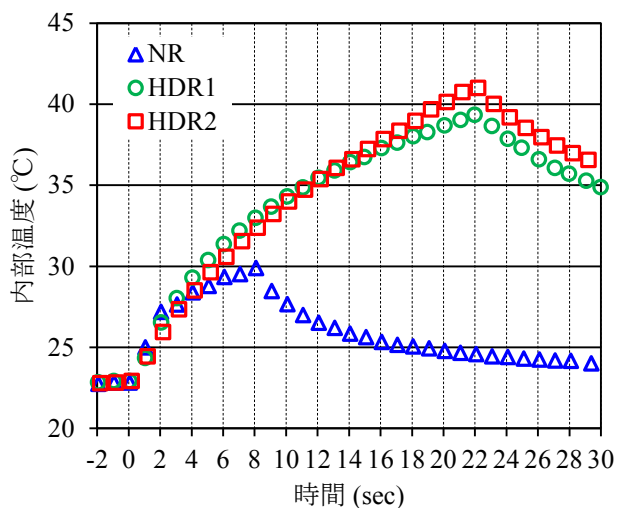
ゴム種ごとにエネルギー吸収量と ΔT の関係をみると、すべてのゴム種でエネルギー吸収量の最も大きい 1 サイクル目を除き概ね直線的な傾向がある。1 サイクル目については初期載荷の影響で、エネルギー吸収量と ΔT の関係が他のサイクルと異なっている可能性がある。

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-3 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、HDR1 と HDR2 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 HDR1 や HDR2 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 HDR2 で小さい。

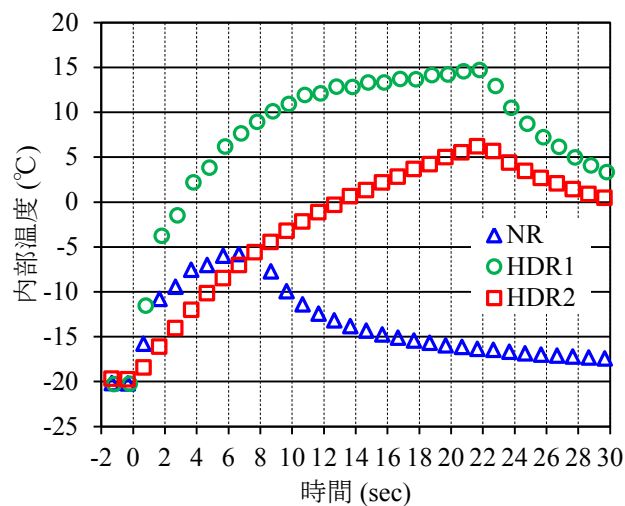
図-11 から、HDR1 も HDR2 もエネルギー吸収量に対する温度上昇は直線だが、図-10(b)をみると HDR1 は最初の温度上昇が大きく、徐々に傾きが小さくなる。一方、HDR2 は時間経過に伴うその傾きの変化が小さい。これは、HDR1 の方が、サイクルを重ねるにつれて、エネルギー吸収量がより大きく減少するためである。

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°C では測定のタイミングが加振周期である 2

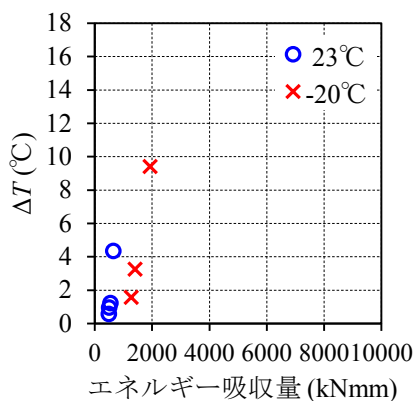


(a) 雰囲気温度 23°C

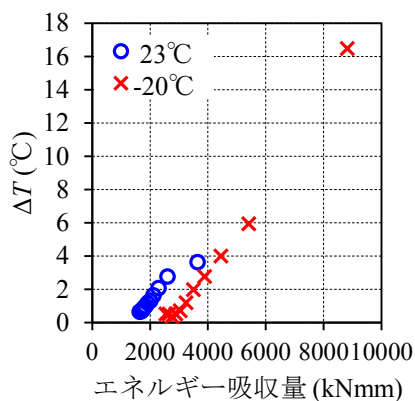


(b) 雰囲気温度 -20°C

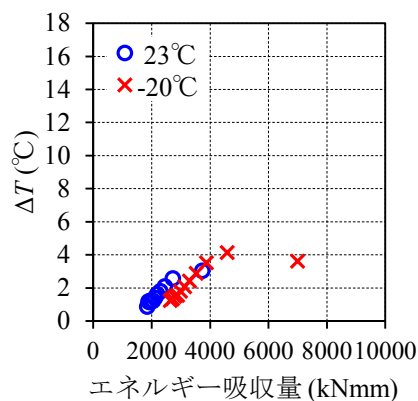
図-10 内部温度の時刻歴波形



(a) NR



(b) HDR1



(c) HDR2

図-11 エネルギー吸収量と内部温度変化の関係

表-3 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	a	b	R^2
NR	23°C	0.0110	-4.7610	0.9406
	-20°C	0.0124	-14.262	1
HDR1	23°C	0.0023	-3.1489	0.9958
	-20°C	0.0020	-5.1648	0.9827
HDR2	23°C	0.0018	-2.4513	0.9853
	-20°C	0.0016	-2.9600	0.9756

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。

4. 終局限界実験

(1) 実験概要

道路橋示方書¹⁰⁾では支承部の機能が失われる状態が明らかであり、その状態に対する安全性が確保できること

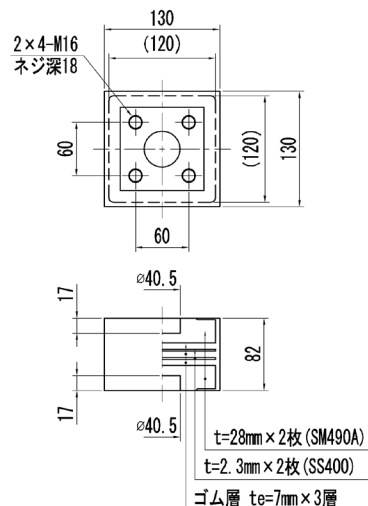


図-12 終局限界実験の供試体

と、供用期間中に発生する地震による作用に対して安定して挙動するという力学的特性が明らかでなければならないとされている。そこで、低温環境下においてこれら

表-4 終局限界実験の供試体諸元

種類	せん断 弾性係数	平面 寸法	ゴム厚		形状係数		供試体数
			te (mm)	n (層)	S1	S2	
NR	G12	□120	7	3	4.29	5.71	3
HDR1	G12	□120	7	3	4.29	5.71	3
HDR2	G12	□120	7	3	4.29	5.71	3

表-5 終局限界実験の载荷条件

载荷 ステップ	雰囲気温度	面圧	波形	振動数 または速度	せん断 ひずみ	加振 回数
1	23℃	6MPa	正弦波	0.5Hz	±175%	4 or 11 回
2	23℃, -20℃, -30℃			0.2Hz	±250%	6 回
3	23℃, -20℃, -30℃				±300%	3 回
4	23℃, -20℃, -30℃		片押し	8mm/s	破断まで	1 回

の力学的特性を明らかにするために、地震時の繰り返し载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実験を行う。

終局限界実験に用いた供試体を図-12 に、供試体の諸元を表-4 示す。ゴム種は温度依存性確認実験と同様に NR, HDR1, HDR2 の 3 種類とする。

本実験の载荷条件を表-5 に示す。まず、基準温度 23℃での基本性能確認実験を行う。次に、23℃、-20℃および-30℃における地震時の繰り返し荷重に対する挙動を確認するために設計許容変位（せん断ひずみ 250%）の繰り返し载荷を行う。そして、支承部の機能が失われる状態に対する安全性が確保されていることを確認するために、許容変位の 1.2 倍に相当する変位（せん断ひずみ 300%）の繰り返し载荷実験を行う。最後に単調载荷による破断実験を行う。また、各実験において供試体の内部温度を雰囲気温度に合わせるために、各実験のインターバルは 24 時間以上とする。

(2) 実験結果

各温度における地震時の繰り返し荷重に対する挙動を確認するために、等価剛性、等価減衰定数およびエネルギー吸収量の変化率を整理する。せん断ひずみ 250%の結果を図-13～15 に示す。なお、1 サイクル目の履歴特性は初期载荷の影響により 2 サイクル目以降と大きく異なるため、文献 10)に従い 2 サイクル目の履歴特性を基準に 6 サイクル目までの挙動を比較する。

等価剛性、エネルギー吸収量はすべての実験でサイクル数が増えるにつれて減少する傾向にある。また、等価減衰定数は変化が少ないが、目立った傾向がなく、ゴム種や温度によっても異なる。

2 サイクル目と 6 サイクル目の等価剛性の変化率に着目すると、NR が最も小さくその変化率は-20℃で-18%、-30℃で-22%であった。一方、高減衰ゴムでは HDR1 の

変化率が-20℃で-36%、-30℃で-38%であるのに対して、HDR2 は-20℃で-24%、-30℃で-28%と HDR1 に比べて等価剛性の変化率が小さい。

同様にエネルギー吸収量の変化率に着目すると、HDR1 の変化率が-20℃で-37%、-30℃で-40%であるのに対して、HDR2 は-20℃で-30%、-30℃で-29%と HDR1 に比べてエネルギー吸収量の変化が小さい。

次に、せん断ひずみ 300%での結果を図-16～18 に示すが、概ね 250%のときと同様に、等価剛性、エネルギー吸収量のサイクルごとの変化率が HDR1 で大きい。

これらの結果より、高減衰ゴムと比較すると、HDR2 は HDR1 に比べてサイクルによる変化率が小さく、特に低温時の繰り返し载荷に対して安定していると言える。これは、ゴム材料の違いから温度依存性により生じる剛性差やハードニングの差によると考えている。

なお、NR については-30℃で 250%の実験をするまでの静置期間が 8.5 日であったため、結晶化が進んでいる可能性がある。しかし、-20℃のときより等価剛性、エネルギー吸収量の変化率の傾きが大きくなっているものの、その他の供試体での結果と同様の傾向である。

最後に、単調载荷による破断実験結果を図-19 および表-6 に示す。ここで、表-6 の「破断せず」は载荷装置の最大変位まで载荷したが破断しなかったことを指す。

全てのゴム種において破断ひずみが 300%以上となり、許容変位に対して安全率が 1.2 倍以上であることを確認された。また、NR と HDR1 はせん断ひずみ 175%付近からハードニングが生じ水平力が急増するが、HDR2 はせん断ひずみ 250%付近まで水平荷重の急増はなく、それ以降のひずみ領域においても著しい増加は見られない。また、表-6 から、各ひずみ時の水平力は HDR2 が最も小さい。なお、基本特性確認実験（表-5 载荷ステップ 1）の結果から、各供試体の剛性は設計値に対して NR, HDR1 は-10～-15%で、HDR2 は-5～-7%であったため、

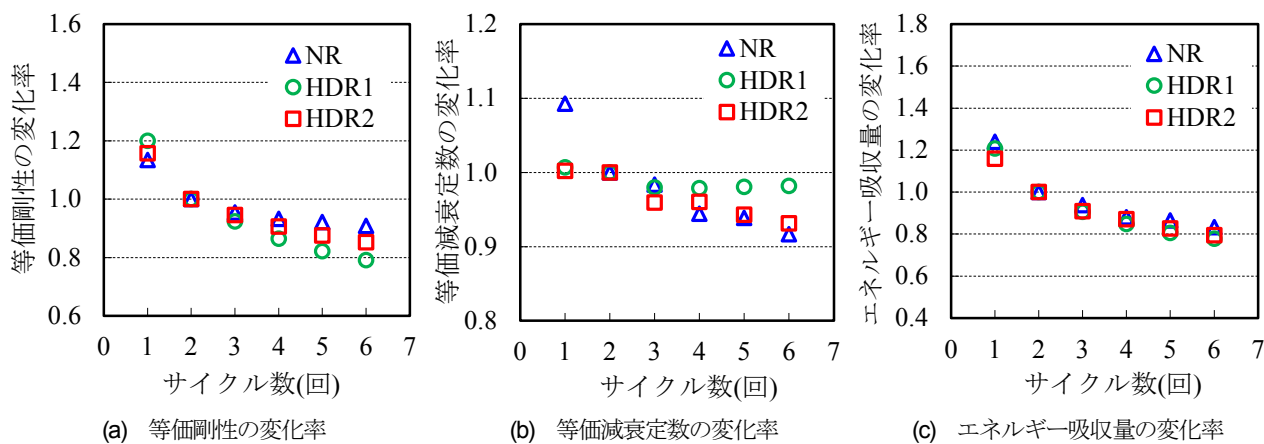


図-13 23°C, せん断ひずみ 250%でのサイクルごとの変化率

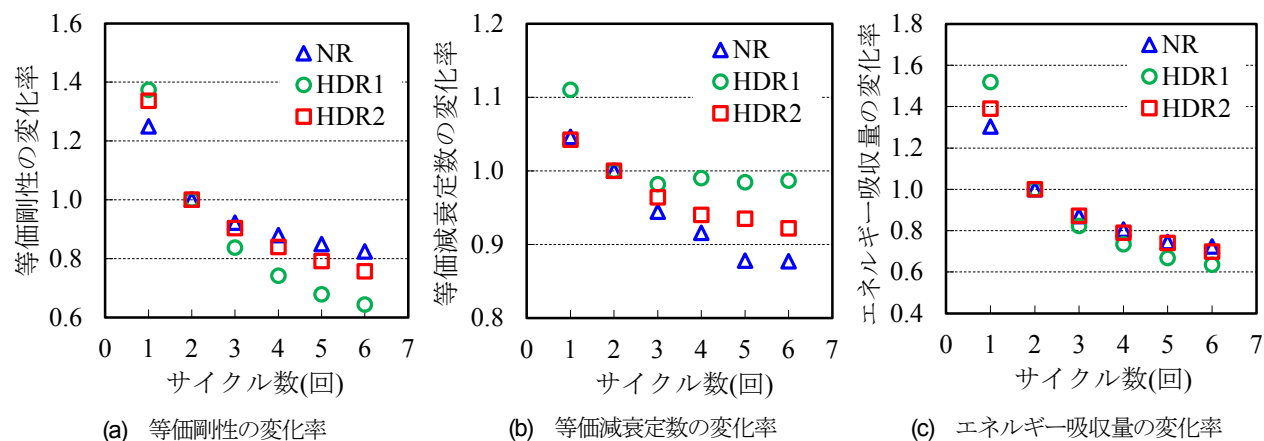


図-14 -20°C, せん断ひずみ 250%でのサイクルごとの変化率

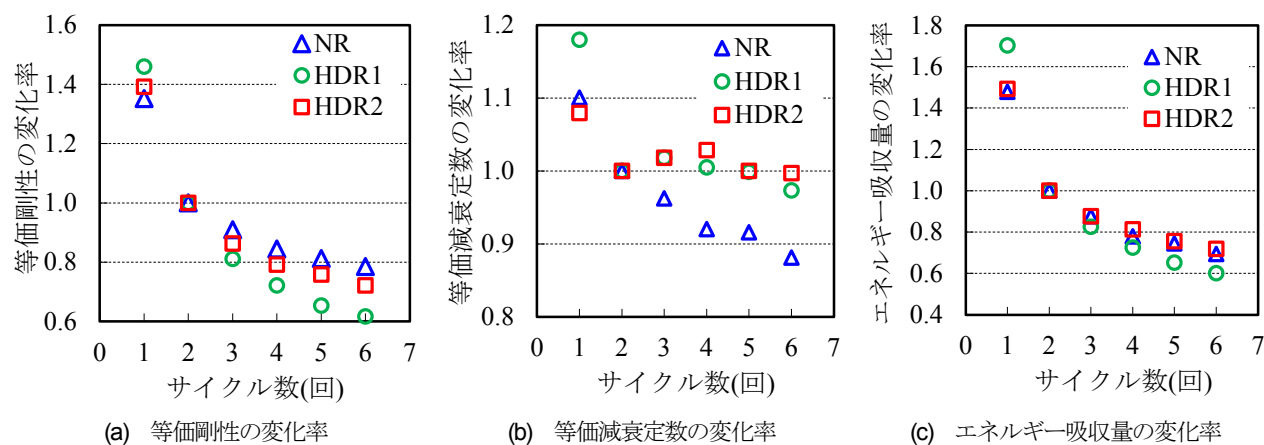


図-15 -30°C, せん断ひずみ 250%でのサイクルごとの変化率

HDR2 の水平力が小さいのはゴム材料の特性によるものと考えている。

5. まとめ

2 種類の高減衰ゴム支承と、天然積層ゴム支承に対し、実験室ごと低温にすることによって供試体の内部温度を

低温に保った状態で載荷実験を行った。繰り返し載荷実験の結果、等価剛性の変化率は HDR1 が一番高く、HDR2 と NR は同じか、HDR2 の方が若干高くなった。また、長期間-30°Cに静置した NR の結晶化など低温下特有の現象も確認した。

加振時の内部温度はエネルギー吸収量と直線的な関係があるが、その傾きはゴム種によって異なる。さらに、同じゴム種でも切片が雰囲気温度によって異なる。

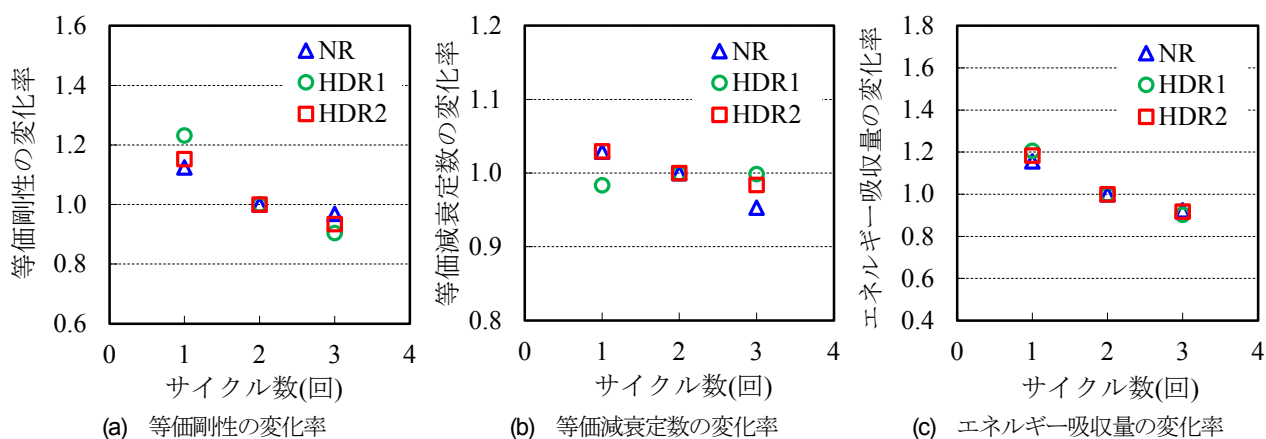


図-16 23°C, せん断ひずみ 300%でのサイクルごとの変化率

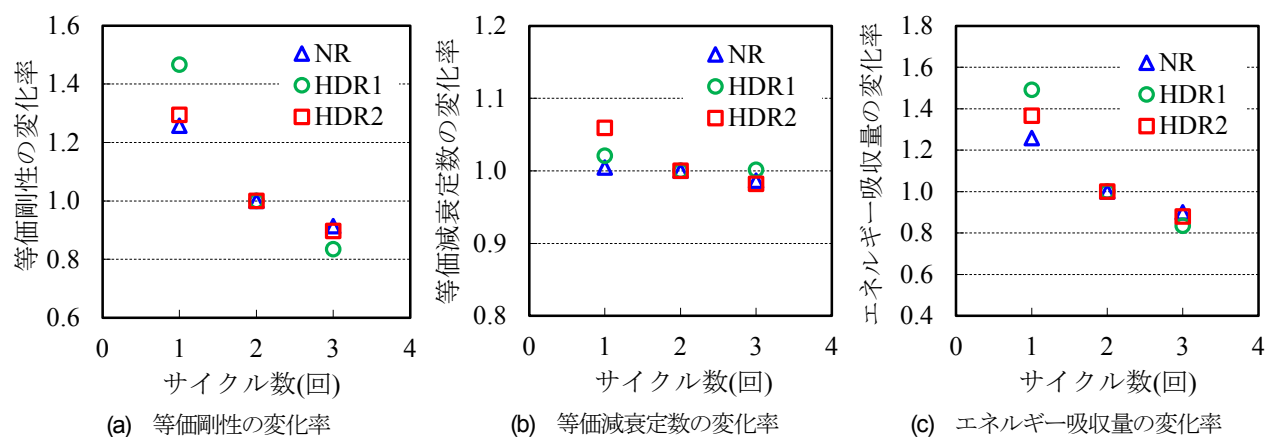


図-17 -20°C, せん断ひずみ 300%でのサイクルごとの変化率

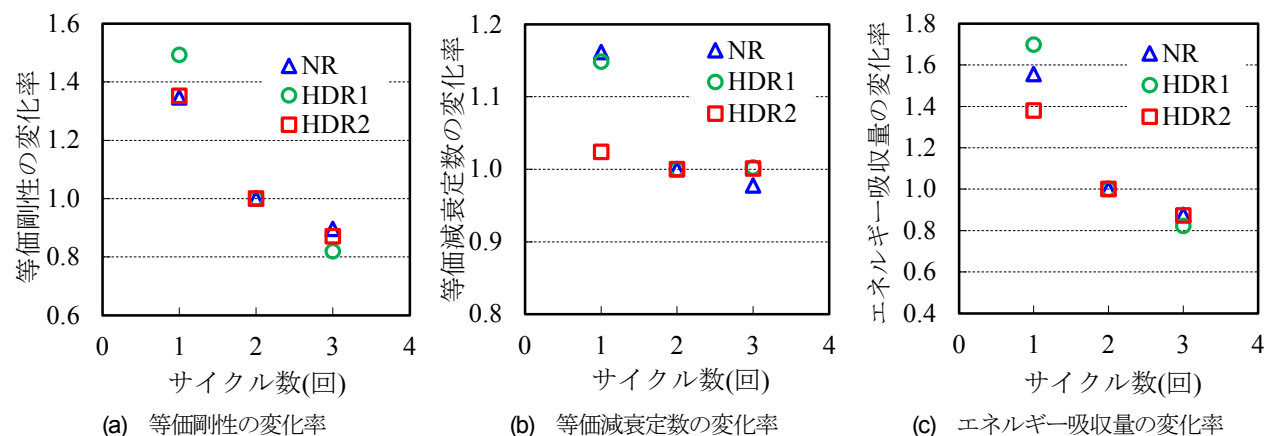


図-18 -30°C, せん断ひずみ 300%でのサイクルごとの変化率

供用期間中に発生する地震時の安定挙動の確認のため、設計許容変位での繰り返し载荷実験を行った結果、等価剛性とエネルギー吸収量のサイクルごとの変化率はHDR1が大きく、低温の場合により顕著であった。

支承部の機能が失われる状態に対する安全性が確保されていることを確認するために、実施した設計許容変位の1.2倍での繰り返し载荷実験、さらに単調载荷による破断実験の結果、低温環境下でも設計許容変位に対する

安全率が1.2以上であることを確認した。また、高ひずみ領域においてハードニング現象が始まるひずみの値や水平力の増加の傾向に違いが見られた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、北見工業大学大学院博士後期課程 Zhang Youqi 氏、博士前期課程小川大智氏、北見工業大学4年桑原直登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。

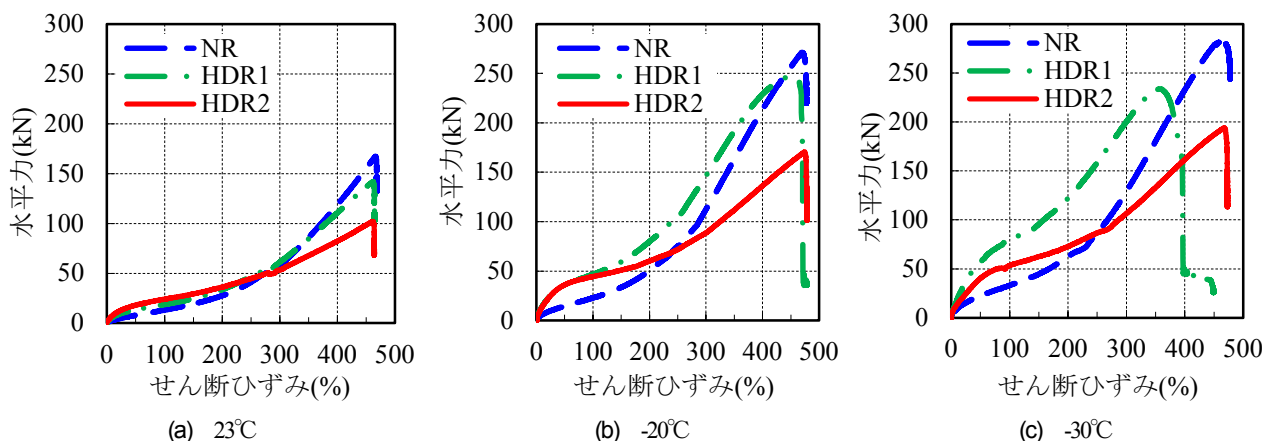


図-19 単調載荷実験のせん断ひずみ-水平力関係

参考文献

- 1) 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) 北海道土木技術会：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，2012.
- 3) 大島俊之，三上修一，山崎智之，池永雅良，松井義孝，久保和子：低温条件における免震装置の機能確認実験，構造工学論文集，Vol. 44A，pp.753-760，1998.
- 4) 大島俊之，中村昌弘，山崎智之，潤田久也：低温環境下で加振される高減衰ゴム支承内部温度分布の解析，土木学会論文集 A，Vol. 64，No. 2，pp.408-420，2008.
- 5) 高橋徹，姫野岳彦，吉田雅彦，大島俊之，山崎智之：低温冷却施設を用いた免震ゴム支承の性能検証実験，土木学会第 66 回年次学術講演会，I -374，pp.747-748，2011.
- 6) 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.
- 7) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2004.
- 8) 北海道土木技術会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針[第2編]維持管理編 [第3編]資料編，2012.
- 9) 北海道土木技術会：北海道における鋼道路橋の設計および施工指針の改定（2014年10月22日），<http://www.koudourokyo.net/news/403/>（2017年4月2日閲覧）.

表-6 単調載荷実験結果

23°C			
ゴム種	水平力 (kN)		破断ひずみ
	250%時	300%時	
NR	41	58	破断せず
HDR1	47	61	破断せず
HDR2	45	53	破断せず
-20°C			
ゴム種	水平力 (kN)		破断ひずみ
	250%時	300%時	
NR	75	113	破断せず
HDR1	105	146	455%
HDR2	72	89	破断せず
-30°C			
ゴム種	水平力 (kN)		破断ひずみ
	250%時	300%時	
NR	87	129	破断せず
HDR1	158	201	359%
HDR2	87	107	破断せず

- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2012.

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS BY DYNAMIC LOADING TESTS UNDER THE LOW TEMPERATURE ENVIRONMENT

Takehiko SAITO, Shunsuke IRIE, Yasuyuki NAKAMURA, Kosuke TAKENOUCHI, Yasunori MIYAMORI and Tomoyuki YAMAZAKI

This study discusses the mechanical characteristics of high damping rubber bearings (HDRBs) by dynamic loading tests under the low temperature environment. Fundamental cyclic loading tests at different temperatures are conducted using 2 types of HDRBs and a natural rubber bearing (NR). In these tests, 175% shear strain of rubber thickness are given by loading facility in cold room. Equivalent stiffness of

all specimens increase under low temperature and its ratio depends on type of rubber. Specially equivalent stiffness of HDR1 is significantly larger than other types because of its material characteristic. Internal temperatures of rubber bearings have linear relationship with energy loss. Gradients and intercepts of the linear functions also depend on rubber type and ambient temperature. In cyclic loading tests under allowable design displacement (250%), the rate of change of the equivalent stiffness and energy loss of HDR1 significantly increase specially in -30°C . Finally, all specimens do not break under cyclic loading test of 120% allowable design displacement under any temperature cases.