

低温時高減衰ゴム支承を用いた免震橋のハイブリッド実験

党紀¹, 談雨晴², 五十嵐晃³, 姫野岳彦⁴, 濱田由記⁵, 鶴野禎史⁶

¹正会員 工博 埼玉大学准教授 環境社会デザイン学科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²学生会員 京都大学大学院博士後期課程 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 工博 川金コアテック 技術本部 (〒332-0015 埼玉県川口市川口2-2-7)

⁵非会員 川金コアテック 技術本部 (〒307-0017 茨城県結城市若宮8-43)

⁶正会員 オフィス・ユータック (〒545-0022 大阪市阿倍野区播磨町1丁目4-28)

1. はじめに

寒冷地における橋梁の耐震性能向上において、免震ゴム支承を使用した免震設計が有効な手法の一つであるものの、高減衰ゴム支承（以下HDR-S）の低温時における履歴特性が常温時と異なり、その温度依存性を適切に評価することが必要である。今まで、HDR-Sの低温時における載荷実験が精力的に行われ、剛性と履歴減衰の変化に伴い、自己発熱による内部温度影響も存在することが明らかにされていた。

このように、時間と伴った動的な温度履歴非線形特性は、今までのない複雑な挙動を示しており、その影響は単純に繰り返し載荷で解明される範囲を超えており、その地震時挙動をより明確に示し、かつ将来の解析モデルを検証するための基礎として、低温環境下のハイブリッド実験の実施が望ましい。

本研究では、常温時載荷に使われるより標準的な寸法の試験体を用い、低温チャンバーにおいた状態の載荷装置を整備し、下部構造を考慮したサブストラクチャハイブリッド実験システムを構築した。低温及び常温時における繰り返し載荷とハイブリッド実験で、HDR-Sの履歴特性の変化、およびそれによる免震橋の地震時応答の変化を比較検討した。

2. 実験計画

(1) 試験体

本研究で用いるHDR-Sの試験体は、図-1に示しているように、外型寸法250mmの標準サイズの試験体

であり、内部に5mmのせん断係数 $G=1.2\text{N/mm}$ のゴム6層で構成され、ゴム総厚 $t_g=30\text{mm}$ となっている。ただし、被覆ゴム5mmに覆われ、有効面積が $240 \times 240\text{mm}^2$ である。1次形状係数は $S1=12$ 、2次形状係数は $S2=8$ となっている。

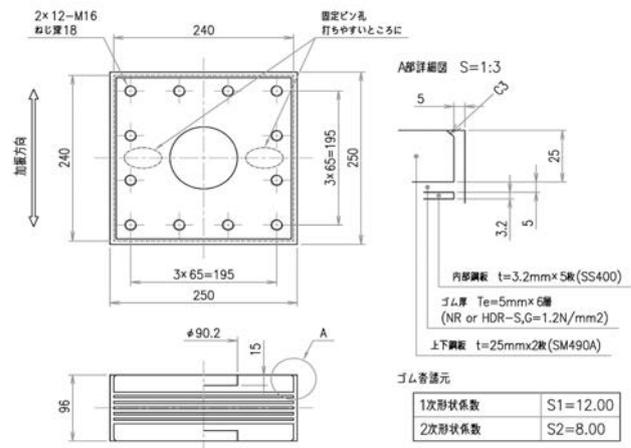


図-1 HDR-S試験体詳細図

(2) 載荷装置

今回用いる動的載荷装置は、図-2に示す2軸試験機である。水平方向の最大荷重が $\pm 400\text{kN}$ 、最大変位が $\pm 200\text{mm}$ 、鉛直方向は最大荷重が圧縮で 2000kN 、引張で 1000kN 、最大変位が $\pm 150\text{mm}$ である。試験体は載荷台に乗せ、載荷位置に送り込む。鉛直方向のアクチュエータは所定の鉛直荷重(6Mpa)を一定として維持するように荷重制御され、固定の位置で試験体に荷重を与える。試験体下の載荷台は可動であり、水平方向のアクチュエーターにより動かし、水平方向に変位制御で載荷される。



図-2 载荷装置外観(試験機)

(3) 低温環境制御

実験にあたっては、試験体の内部温度が実験条件温度まで冷却されるように温度を制御する必要があり、また载荷時にも外部温度に影響されないようにするため、図-3に示すように、試験体周りに簡易に断熱材で低温チャンバーを構築している。隙間の部分はテープで封じ込み、実験時ではテープを外せば、チャンバーは試験体を守りながら载荷台とともに水平方向に移動する、試験体との間に十分なクリアランスを設けており、载荷しながらも雰囲気温度を保持することができる。

図に示すように、簡易低温チャンバーの右側に、冷却機が設置され、チャンバーとの間に2本のパイプでつながっている。送気パイプが冷却機から冷気を吹き込み、試験体の周囲に回り、排気パイプから空気を冷却機に戻る。

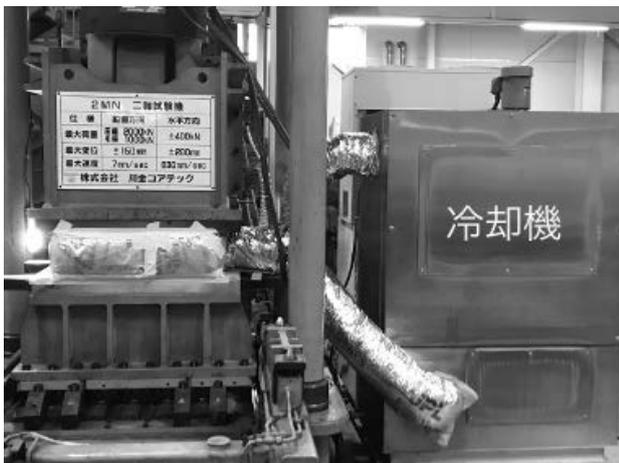


図-3 低温環境の制御

なお、载荷装置も室温とほぼ同温度であり、熱を上下鋼板から伝わることを阻むため、図-4に示す高強度セメント系断熱板(図中灰色部分)を試験体上下に設置している。ただし、せん断力を確実に伝えるためのせん断キーを中央部に設置しており、せん断キーの上にもスポンジゴムを敷いている。



図-4 断熱プレート(試験体上)

試験体の温度を随時に制御し、内部も所定の温度に冷却されるまで、24時間以上の温度制御を行っている。試験体内部に、図-5に示すように、4箇所の熱電対を設置している。図に示すように熱電対P1、P2はゴム内部に設置し、熱電対S1、S2は試験体の側面表面の中央部に貼り付けている。計測された温度は、以下で試験体内部温度と外部温度と呼ぶ。

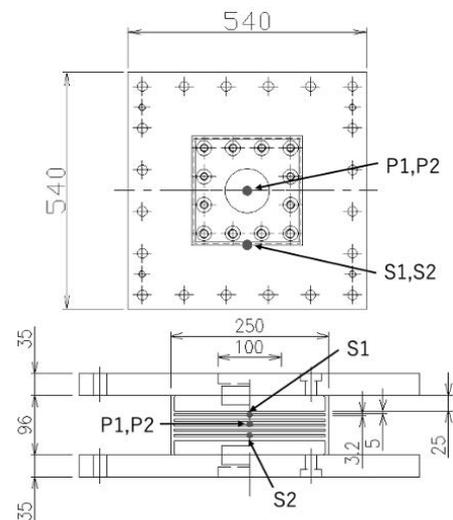


図-5 熱電対配置図

(4) 载荷スケジュール

HDR-Sは天然ゴムで作られたゴム支承（NR）と同様にMullins効果があり，初期载荷時に履歴曲線において，荷重が最初の1サイクルだけ大きい特性がある．本研究の目的である，HDR-Sの低温時の地震応答の影響を調べるために，Mullins効果も考慮する必要がある．なお，効率的に実験を実施するため，一つの試験体を用いて複数回に渡り载荷を行う必要もあり，Mullins効果の有無を念頭において，実験の実施順序を考慮したスケジュールを表-1に示している．

0°Cと-20°Cのハイブリッド実験では初期载荷の状態であったためMullins効果の影響を受け、23°Cでは初期载荷ではなかったため違う試験体で初期载荷の条件でハイブリッド実験を再び行った．各温度でのMullins効果ありでのハイブリッド実験の結果を比較できるとともに，Mullins効果の有無で応答に与える影響も比較することができるように3温度でのハイブリッド実験を2回ずつ行った．

表-1 载荷計画

日付	実験内容	試験体	初期载荷
11月13日	23°C 準静的実験	HDR-S No.1	No
11月14日	23°C ハイブリッド実験	HDR-S No.1	No
12月17日	-20°C ハイブリッド実験	HDR-S No.2	Yes
12月24日	-20°C 準静的実験	HDR-S No.2	No
1月16日	0°C ハイブリッド実験	HDR-S No.3	Yes
1月24日	23°C ハイブリッド実験	HDR-S No.4	Yes
1月28日	0°C 準静的実験	HDR-S No.3	No
1月30日	-20°C ハイブリッド実験	HDR-S No.2	No
2月4日	0°C ハイブリッド実験	HDR-S No.3	No

3. 準静的実験

(1) 载荷方法

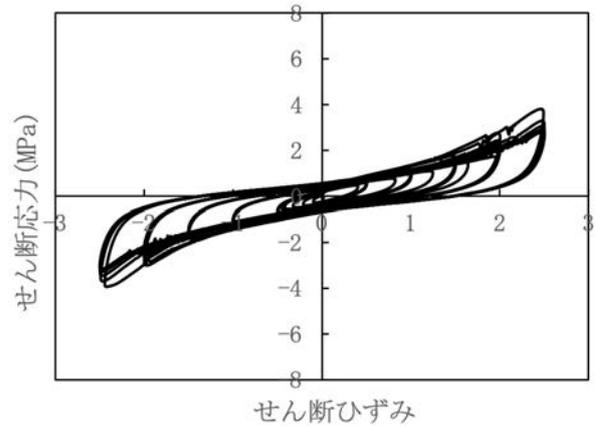
準静的実験では，一定面圧6Mpaの鉛直荷重を維持しながら，水平方向にゴム支承のせん断ひずみが50%，100%，150%，175%，200%，250%となる変位正負交番で，各6サイクルを繰り返し载荷していた．

载荷条件温度は，前述のようにそれぞれ23°C，

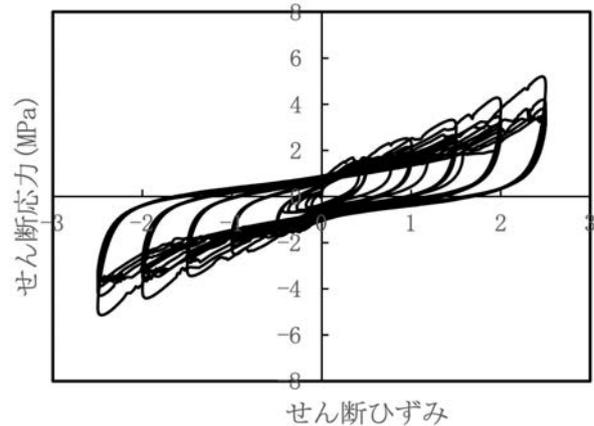
0°C，-20°Cとして実施していた．

(2) 各温度条件下の復元力履歴

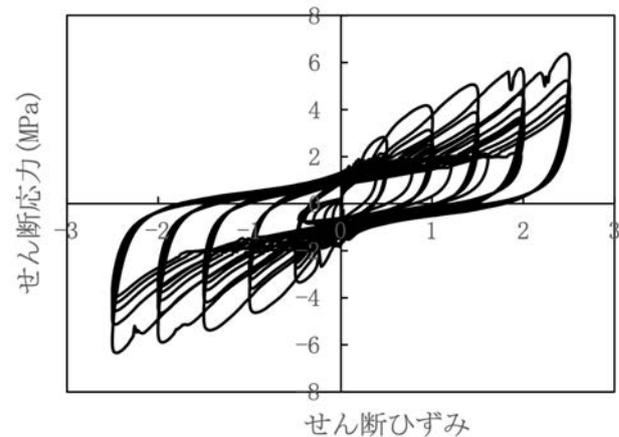
各温度条件で得られた準静的载荷の履歴曲線を図-6に示す．従来の研究で得られた知見と合致して，低温時における载荷では，剛性が大きく，履歴減衰も大きくみられている．



(a) 23°C 準静的実験



(b) 0°C 準静的実験



(c) -20°C 準静的実験

図-6 各温度条件下の復元力履歴

実験計画で説明されていたように、ハイブリッド実験を優先に初回の载荷とした結果、図に示した準静的実験は初期载荷ではないものの、载荷にともなう履歴ループの軟化、すなわち剛性と履歴ループ面積の減少が見られている。このような傾向は特に低温時に顕著であることが確認できる。

(3) 履歴特性の温度依存性

実務設計で使われる等価剛性係数 G_e 、一次剛性係数 G_1 、二次剛性係数 G_2 、载荷振幅ごとにまとめ、温度とひずみによる変化を図-7に示す。载荷では同じ振幅で6サイクルの载荷を実施しており、履歴特性もサイクルごとに変化しているため、本研究では、最適化計算でもっとも代表される値を算出して、近似的に全てのサイクルの平均値とみなす。

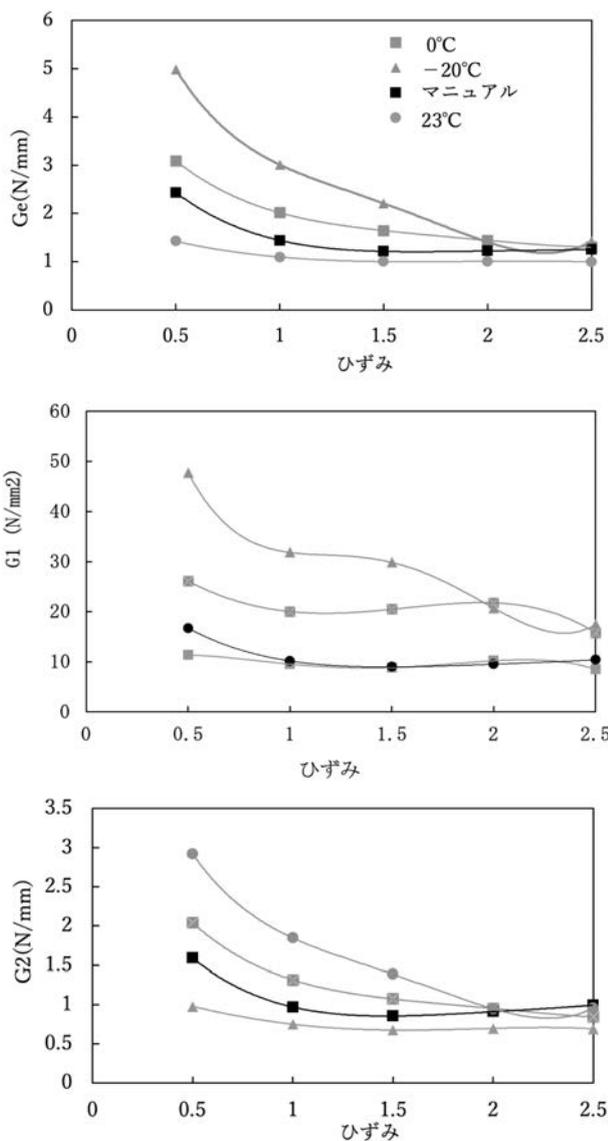


図-7 角温度条件下の復元力履歴

なお、免震設計マニュアル⁹⁾では、今までの実験から得られたパラメータをせん断ひずみの近似多項式で表しており、その結果も図に併記した。その結果、本研究で23°Cで得られた実験と近い結果となっているものの多少の差が見られている。これは今までの実験では、必ずしも内部温度を確実に測定していたとは限らない影響も考えられる。今後の非寒冷地におけるゴム支承の耐震設計においても、温度を考慮した実験で設計パラメータを決める必要性を示唆している。

(4) 自己発熱の影響

図-7に示したように、50%の载荷では低温時と常温時の差が大きいものの、250%において、各パラメータの差が小さくなっている。その原因は、図-6の履歴曲線も確認できるように、最初にゴム支承の内部温度は雰囲気温度、すなわち実験の条件温度と同じものの、载荷に伴い内部温度が上昇しており、その後の履歴特性は名義上-20°Cであるものの、内部温度が上昇した後の値を示していると考えられる。

奥井らは、水平せん断を繰り返してゴム支承に与える実験では、履歴エネルギーが熱に変換されるため、自己発熱は低温時の履歴特性に顕著な影響を与えることを提示し、履歴特性をそのままに使うことができず、内部温度補正が必要と指摘している⁵⁾。従来ではMullins効果と混同した履歴曲線の変化も、その本質は内部温度の影響と思われる。

したがって、静的実験で得られたパラメータを用いて、動的解析しても、正しく免震橋梁の地震時挙動を推定できないと考えられる。

4. ハイブリッド载荷実験

(1) 実験方法

本研究で行うハイブリッド実験では、図-8に示すような連続桁橋を対象として、解析を簡略化するために、桁各支点と各橋脚が同じ断面を持つものとし、二方向载荷の相互作用を無視し、2自由度モデルと仮定する。

また、一つの橋脚にHDR-Sは2つ設置されるとして、橋梁モデルのゴム支承数が8台としている。図に示すように、 m_1 は上部工質量、 k_1 がゴム支承、 m_2 を橋脚上部質量、 k_2 は橋脚バネを表している。試験体の寸法、面圧、実験機のストロークなどの性能を考慮し、構造モデルの諸元を表-2のように設定した。

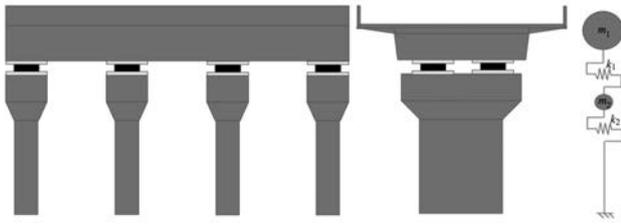


図-8 ハイブリッド実験の解析モデル

表-2 橋梁モデル諸元

上部工質量 m_1	10156 (ton)
橋脚質量 m_2	3385 (ton)
ゴム支承初期剛性 K_1	376 (kN/mm)
橋脚剛性 K_2	400 (kN/mm)
減衰比 h	0.05
固有周期 T_1	1.047 (s)
固有周期 T_2	0.274 (s)

なお、試験体は橋梁モデルより6倍縮小したものとし、すなわち相似率 $S=6$ とした。表に示すように、ゴム支承の初期剛性で計算した固有周期は約1秒である。ここのゴム支承の初期剛性は、常温時で行われた175%の予備荷重で得られた支承の履歴特性で同定したものであり、実験全体を安定に実施するために設定したものである。

実験では、ゴム支承のバネだけを実験要素とし、実験中では、荷重ステップごとに、アクチュエータから得られた荷重フィードバックで構造の非線形応答の修正を行なっている。構造の他の部分は解析中のみに考慮し、橋脚バネは線形弾性バネとしている。

入力地震動として、兵庫県南部地震JR鷹取駅記録のNS成分（レベル2タイプIIの2種地盤設計地震動）を用いた。

(2) 低温環境下の地震応答

温度による地震応答の変化を観察するために、23℃、0℃、-20℃で荷重されたハイブリッド実験で得られた結果を図-9、10に示す。図-9では、横軸にせん断ひずみ、縦軸にせん断応力度（MPa）で表したHDR-Sの復元力履歴特性である。

負方向の最大せん断ひずみは温度が下がるにつれて小さくなっていて、最大せん断応力度は上がっている。正方向に関しては、23℃と比べて0℃、-20℃で最大せん断ひずみが大きくなり、200%あたりまで増加している。

図-10では、支承部の応答変位を表すせん断ひずみの時刻歴を示している。温度が低いほど変位が大きくなっていて、これは荷重序盤から地震ピークまで顕著に表れている。

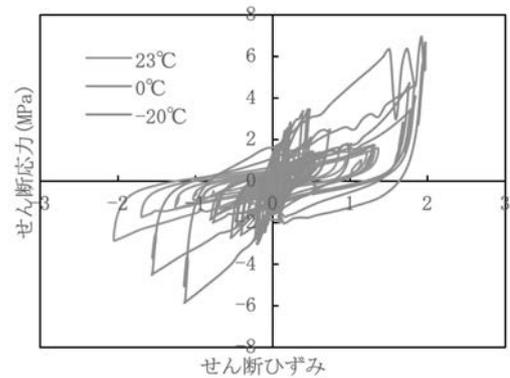


図-9 ハイブリッド実験で得られた復元力履歴曲線

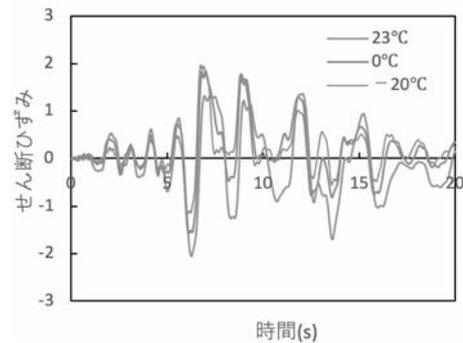


図-10 支承バネの応答(せん断ひずみ)時刻歴

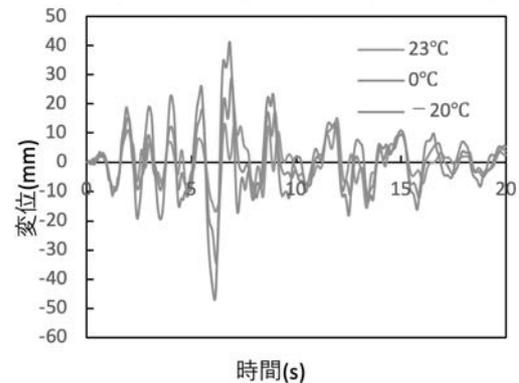


図-11 橋脚バネの応答変位時刻歴

一方、橋脚バネの地震応答変位について、図-11に示すように、低温になると応答変位の増大が確認されている。低温時の橋脚地震応答変位は、常温時に比べて約2倍大きく増大した。この原因は、図-9に示すように、ゴム支承の剛性の増大に伴い、下部構造に伝わった上部構造の慣性力が大きくなったことと思われる。

(3) Mullins効果による地震応答の影響

初期荷重と初期荷重ではない場合のハイブリッド実験を、それぞれ23℃、0℃、-20℃の温度で行った。その比較を図-12に示すように、荷重における差が多少あるものの、応答変位において顕著な相違が見

られていない。

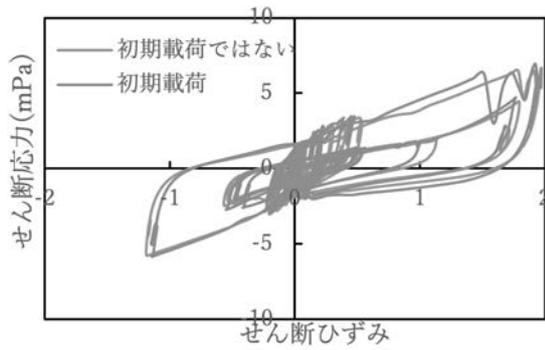
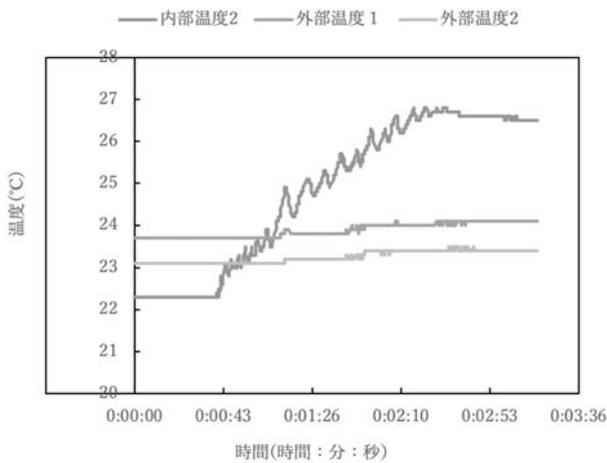
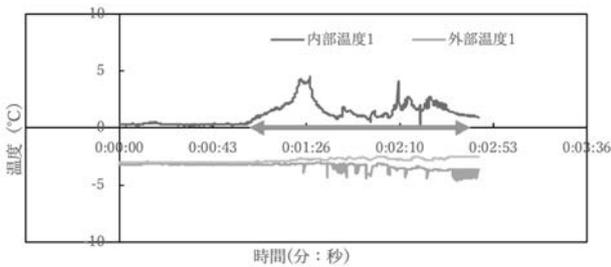


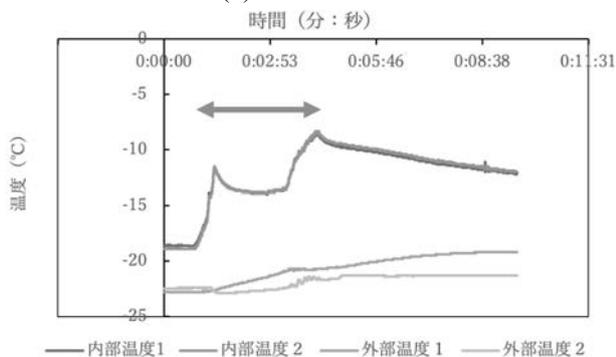
図-12 初期荷重による応答の相違



(a) 23°C荷重時



(b) 0°C荷重時



(c) -20°C荷重時

図-13 ハイブリッド荷重による内部温度の変化

5. HDR-Sの内部温度

地震時荷重を模擬したハイブリッド実験で得られたゴム支承の内部温度を図-13に示す。実験開始の前から、実験終了後の温度が低下するまで計測を続けた。ただし、0°Cの内部温度結果は上昇していたが、実験の途中から上がったりがったり下がったりした結果を示している。その原因として、熱電対が途中で荷重によって剥がれていたと思われる。その他の実験結果から見られるように、荷重に伴い、温度が持続的に上昇しており、23°C荷重では約5°C、-20°Cでは約10°Cの温度上昇が見られる。

ハイブリッド実験で得られたエネルギー吸収量は、試験体の荷重で得られる変位と荷重履歴から得られる、その時刻歴を図-14に示す。地震応答の荷重に伴い、最大応答変位が生じる約6秒の時刻において、エネルギー温度の急上昇が見られる。

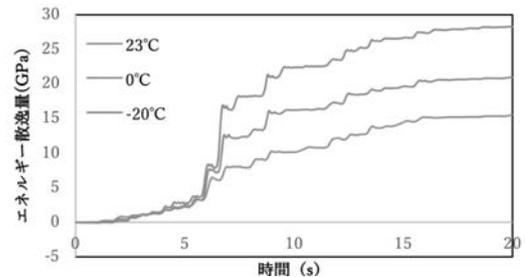


図-14 ハイブリッド荷重によるエネルギー吸収

なお、温度の上昇において波紋状な温度波形や、荷重停止後の温度低下も見られる。これは内部発熱に伴い、ゴム支承の内部におけるゴムと鋼板の間も温度分布があり、その内部の熱伝導が存在することやせん断キー部などに経由した熱の散逸なども考えられる。

6. まとめ

本研究では、HDR-Sを対象にして、寒冷地における免震橋梁において、地震応答特性に対する影響を解明するために、準静的荷重とハイブリッド荷重実験を行った。実験で得られた知見は以下のようにまとめる。

1. 準静的実験では、HDR-Sの各温度における基本的な履歴特性を得られた。温度が低いほどHDR-Sの剛性が高く、履歴減衰能力も高くなることが確認された。
2. 漸増的荷重では、荷重に伴い、ゴム支承試験体

の内部温度も上昇するため、静的実験で得られたパラメータで補正せずに、地震応答解析で得られた結果に誤差が存在しており、直接に地震応答を得られることが難しい。

3. ハイブリッド実験の結果より、低温であるほどHDR-Sの負方向の荷重が上がり変位が小さくなった。一方で、正方向はピーク時の履歴曲線が低温であるほど大きくなる傾向が見られた。
4. 温度が低温であるほど橋脚の変位・加速度は増加し、橋脚への負担が大きくなる事が確認できた。
5. Mullins効果の影響は、23°Cと-20°Cで得られた地震応答に大きな差が見られなかった。
6. ハイブリッド実験では、低温時と常温時とともに、载荷に伴う内部温度の上昇が確認された。内部温度の推定において、ゴム支承内部の温度分布、熱伝導、温度の散逸などを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様, 1995.
- 2) 竹内孝徳, 水野豪, 鈴木森昌, 青木徹彦, 前野裕文, 森下宣明：ゴム支承のせん断変形性能に関する実験的研究, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 26, pp. 1101-1104. 2001.
- 3) 篠原聖二, 榎本武雄, 井上崇雅, 星隈順一, 岡田慎哉, 西弘明, 高橋良和：ゴム支承のせん断特性の評価手法に関する研究土木学会, 構造工学論文集 Vol. 62A, 2016.
- 4) 道路橋示方書, V耐震設計編, pp. 280~281, 2012.
- 5) 奥井義昭, 尾上修浩, 佐藤京, 今井隆：自己発熱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 A1Vol173No. 1, 2017.
- 6) 袁涌, 家村浩和, 五十嵐晃, 青木徹彦, 山本吉久：実時間ハイブリッド実験による高減衰免震ゴム支承の耐震性能の評価, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 1, pp. 265-276, 2007.
- 7) 伯野元彦, 四俵正俊, 原司：計算機により制御されたはりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, 第171号, pp. 1-9, 1969.
- 8) 家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来, 土木学会論文集, 第356号 1-3, pp. 1-14, 1985.
- 9) 財団法人土木研究センター：道路橋の免震・制震設計法マニュアル(案), pp. 6. 32-6. 37, 2011.