

低温環境下で実施可能な仮動的実験システムによる 高減衰ゴム支承を用いた橋梁の地震応答解析

Seismic response analysis of bridges used high damping rubber bearings by pseudo dynamic simulation at low temperature environment

北見工業大学工学部社会環境系 ○正会員 齊藤剛彦 (Takehiko Saito)
北見工業大学工学部社会環境系 正会員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
住友理工(株)化工品事業部 正会員 中村保之 (Yasuyuki Nakamura)
日本鑄造(株)鋼構造技術部 正会員 山崎信宏 (Nobuhiro Yamazaki)

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¹⁾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り、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。そのため、これまでに低温環境下での载荷実験によって温度依存性について検討されている²⁾。

このような温度による力学的特性の変化を、橋梁全体の地震応答解析に取り込む方法として、著者ら³⁾は、構造実験と数値解析を併用するサブストラクチャハイブリッド実験⁴⁾に着目し、低温環境下での载荷実験が可能な実験設備を用いる仮動的実験システムを構築した。

そこで、本研究では高減衰ゴム支承の温度依存性に着目し、低温環境下において橋梁の仮動的実験を行った。具体的には、2種類の高減衰ゴム支承に対して、常温と低温で仮動的実験を行い、支承や橋脚基部の応答を比較する。また、支承のエネルギー吸収量から支承の内部温度の上昇量を推定し、支承の内部温度を検討する。

2. 実験条件

2.1 仮動的実験システム

本研究の仮動的実験システムは、NEES プロジェクトの一環として、イリノイ大学で開発された分散型サブストラクチャ仮動的実験用ソフトウェア UI-SIMCOR⁵⁾を用いる。UI-SIMCOR では統括プログラム (Simulation Coordinator : SC) を中心に、モデルを構造実験を実施する部分と数値解析を行う数値モデル部分に分割して応答計算を行う。構造実験部分では MATLAB により構造実験装置を制御するプログラムを作成し、供試体の応答を測定する。数値解析部分では MATLAB に汎用構造解析ソフト TDAP III⁶⁾パッチ版の静解析プログラムを組み込むことで解析を行う。

実験設備は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で実施した。この実験室では冷却装置により、载荷装置を含めた実験室全体の室温を -30°C から $+50^{\circ}\text{C}$ の範囲で、供試体が外気温の影響を受けずに载荷実験ができる。载荷装置は下向きの鉛直力による面圧を供試体に与えながら、振動台を水平方向に加振するこ

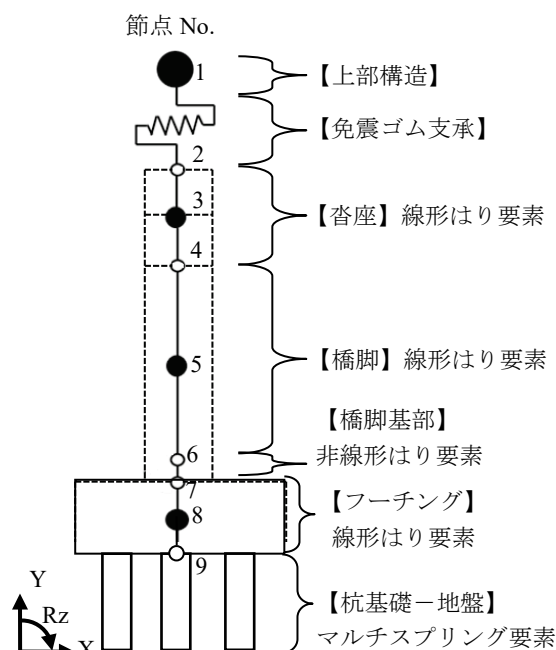


図-1 解析モデル

とで、供試体にせん断変形を与えられる2軸载荷装置である。水平のアクチュエーターは荷重 $\pm 200\text{kN}$ 、変位 $\pm 100\text{mm}$ の動的载荷能力がある。鉛直力用油圧ジャッキは荷重 200kN の静的载荷能力がある。

本システムはハイブリッド実験の中でも仮動的実験にあたる。そのため、アクチュエーターは命令変位を受け取ってから载荷が完了するまでに時間を要する。その待機時間は予備実験を実施した際の応答速度から、 0.7 秒とした。また、SCが応答変位、応答荷重を受け取り、次のステップの命令変位を計算、送信するまで、アクチュエーターは静止している。その結果、計算部分を含めた1ステップに必要な時間は $0.8\sim 0.9$ 秒であった。

2.2 対象橋梁

本研究では、文献7～9)を参考に、II種地盤上の多径間連続桁の免震橋を対象とする。解析を単純化するために、1基の下部構造とそれが支持する上部構造を1つの設計振動単位と考え、橋梁解析モデルを図-2のように作成した。

免震ゴム支承には住友理工(株)製の2種類の高減衰

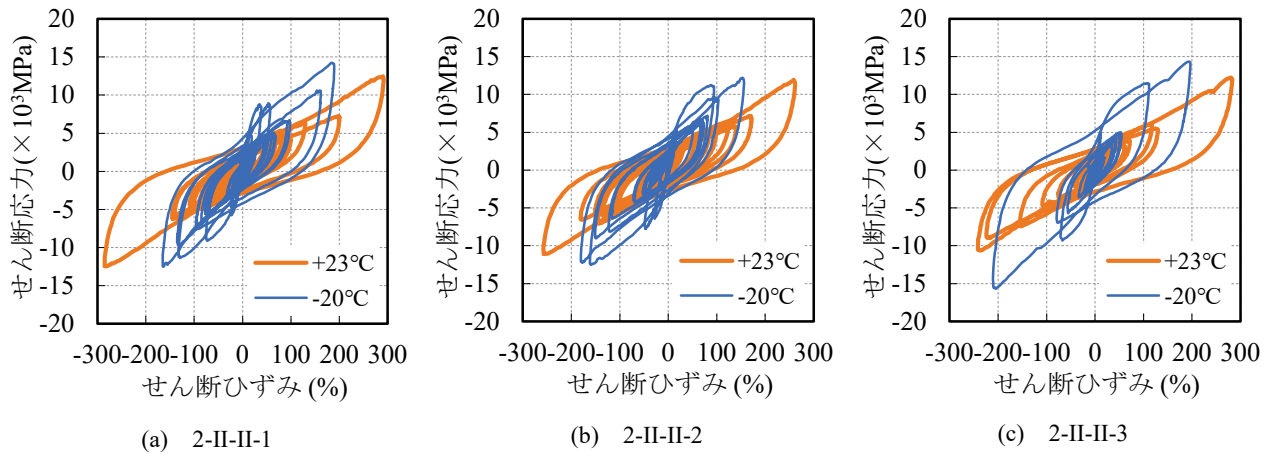


図-2 HDRex, 支承の履歴曲線

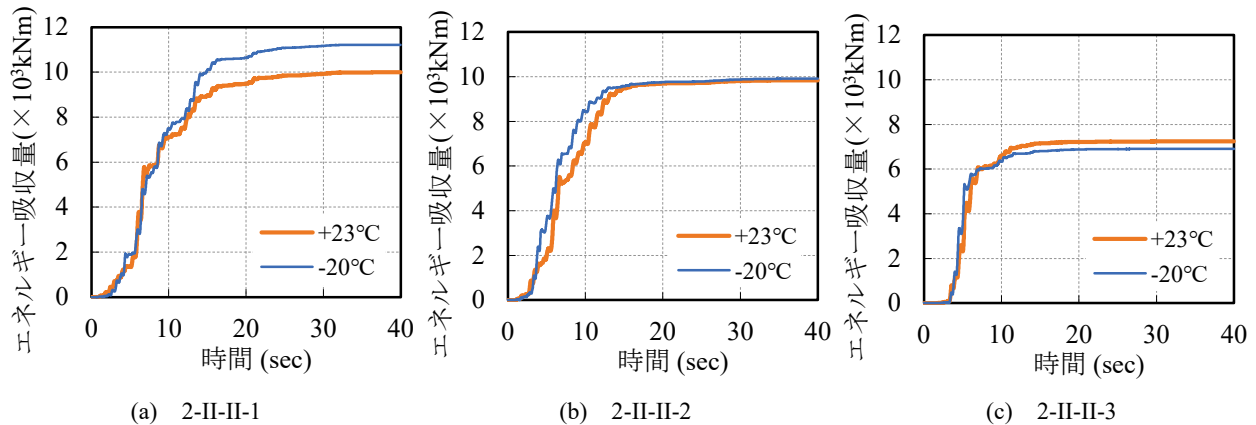


図-3 HDRex, 支承のエネルギー吸収量

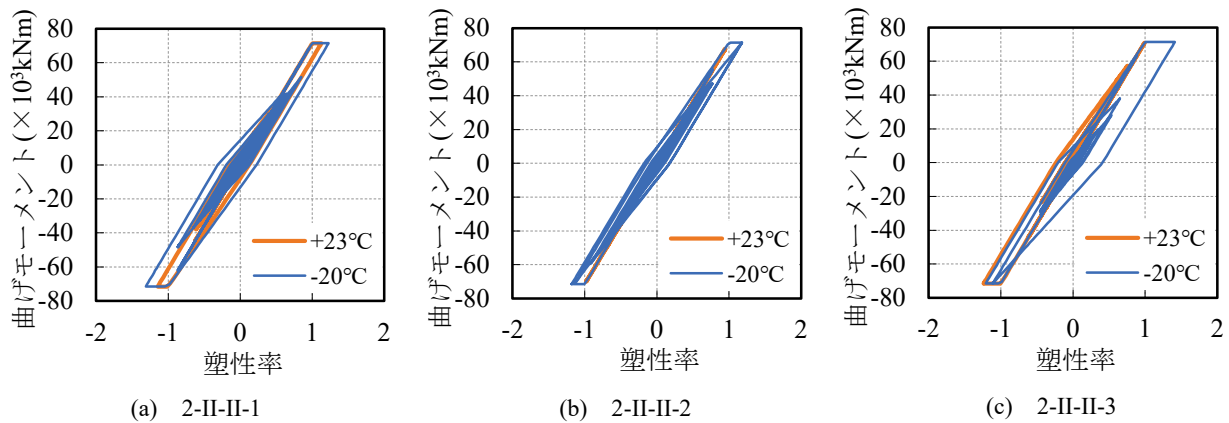


図-4 HDRex, 橋脚基部の履歴曲線

ゴム支承 HDRex と HDR-S を用いる。HDR-S は天然系のポリマーを用い、減衰性能を付与する添加剤を配合することで、長周期化と地震エネルギーの吸収による応答の低減を目的とし、すでに実用化されている。HDRex は天然系よりもガラス転移点の低いポリマーを用いており、HDR-S に比べて温度依存性の低減とハードニングの低減、減衰性能の向上を目的とし、現在開発が進められている。

入力地震動は道路橋示方書¹⁾のレベル2タイプII地震動3波とする。ただし、本研究では、支承の最大せん断ひずみを限界状態2,3に相当する250%とするため、

入力の加速度を1.3倍とする。計算ステップの時間刻みは0.01secとする。

3. 実験結果

図2～4にHDRexを用いた場合の支承の履歴曲線、エネルギー吸収量、橋脚基部の履歴曲線を、図5～7にHDR-Sを用いた場合の支承の履歴曲線、エネルギー吸収量、橋脚基部の履歴曲線をそれぞれ示す。

+23°Cでの結果をゴム種で比較すると、HDRexでは高ひずみ領域でのハードニングがHDR-Sよりも低減されており、その結果として最大ひずみが大きくなったと

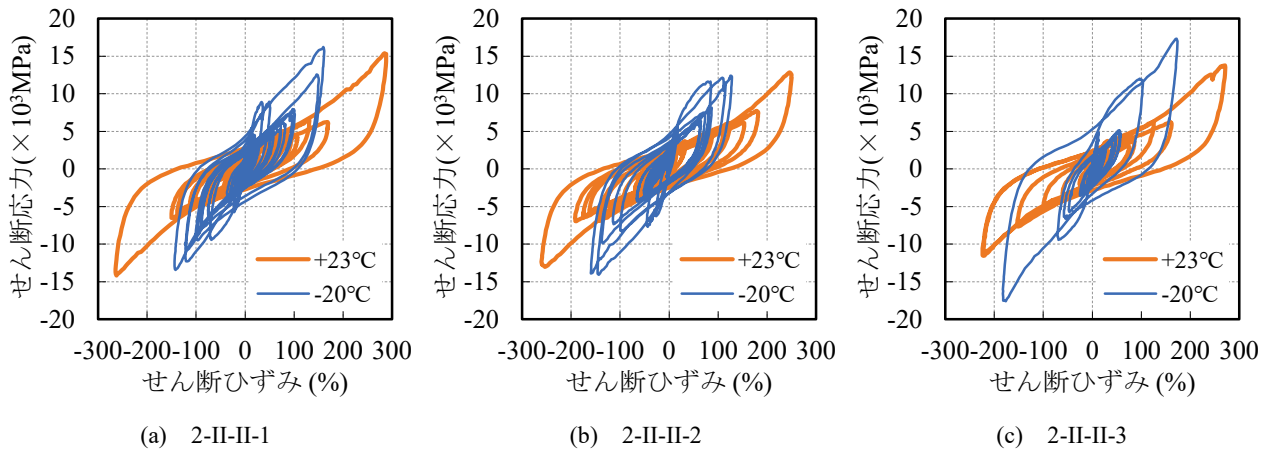


図-5 HDR-S, 支承の履歴曲線

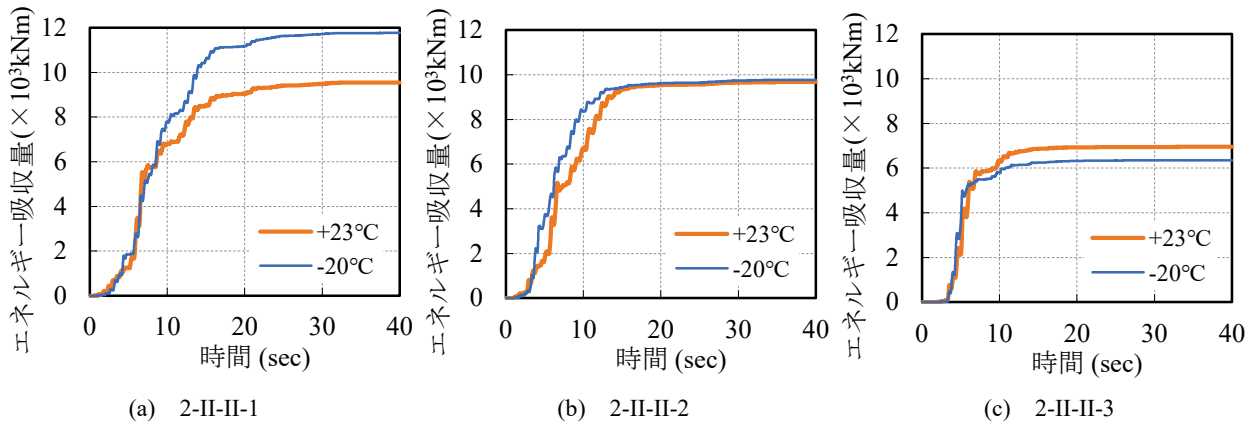


図-6 HDR-S, 支承のエネルギー吸収量

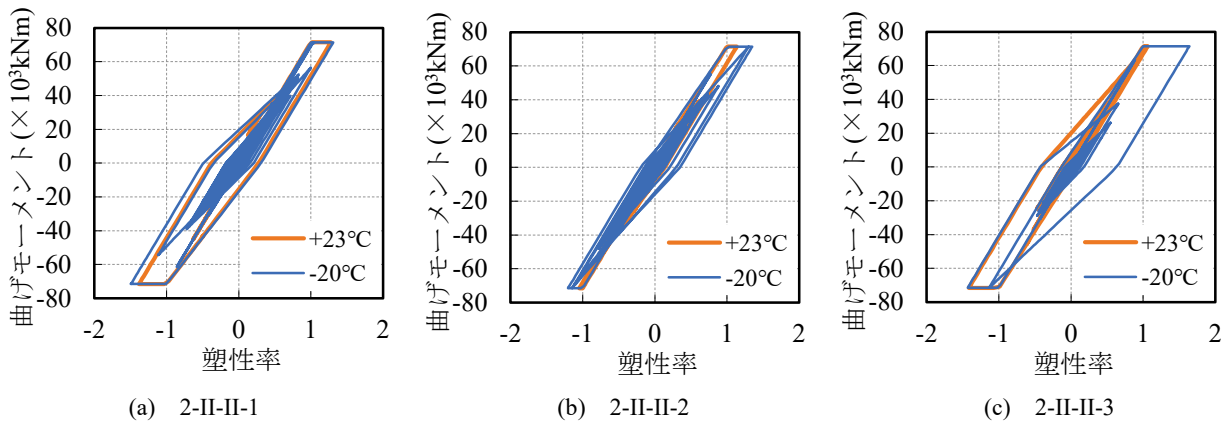


図-7 HDR-S, 橋脚基部の履歴曲線

考えている。また、支承のエネルギー吸収量が HDRex の方が大きいことから、橋脚基部の応答塑性率が小さいと考えられる。

-20℃での結果を+23℃と比較すると、支承の最大ひずみが小さくなっている。これは低温でゴム支承の剛性が大きくなったためと考えられる。また、橋脚基部の応答塑性率は大きくなっている。しかしながら、支承のエネルギー吸収量は-20℃の方が大きいことから、エネルギー吸収量の違いでは説明することができない。

-20℃での結果をゴム種と比較すると、HDRex では支承の最大ひずみが大きい。これは HDRex の特徴として、

高ひずみ領域でのハードニングの低減に加え、温度依存性の低減によって、低温環境下でも剛性が大きく変化しないことによるものと考えている。また、橋脚基部の応答塑性率は HDRex の方が小さい。しかしながら、支承のエネルギー吸収量の大小に統一的な傾向がなく、低温環境下での橋脚基部の応答への影響については今後の課題である。

4. 支承の内部温度の推定

免震ゴム支承の温度依存性について検討するには、雰囲気温度だけでなく内部温度を検討することが重要であ

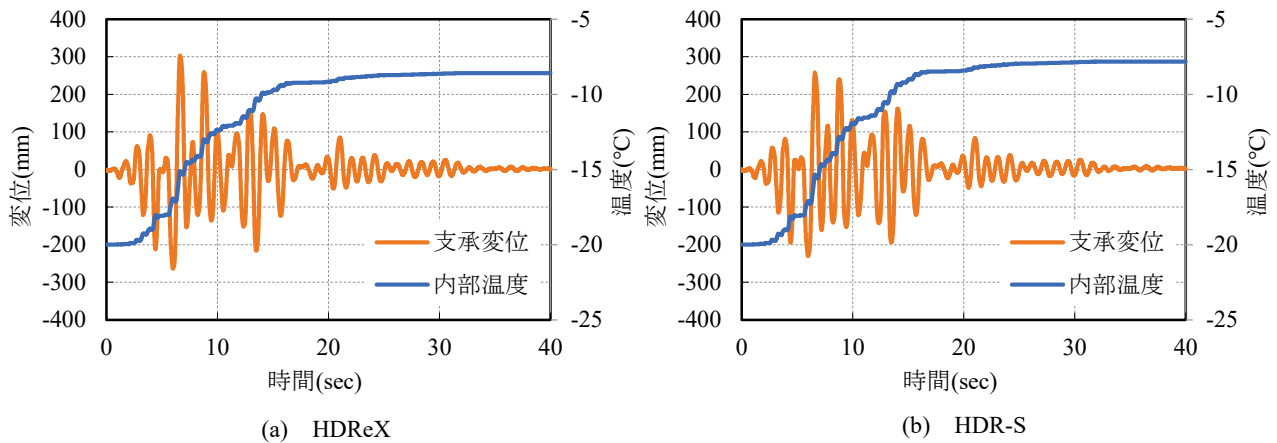


図-8 -20°Cでの2-II-II-1地震動の実験結果から計算した支承の内部温度

る。しかし、本研究は仮動的実験のため、プログラムが計算中にはアクチュエーターが静止してしまい、その間に内部温度が下がってしまう。そのため、供試体に熱電対を挿入して実験中の内部温度を測定したとしても正しく計測できない。一方で、奥井ら¹⁰⁾によって、エネルギー吸収量から内部温度の上昇量を簡易的に推定できる計算式が提案されている。そのため、この計算式を用いて加振中の内部温度を推定する。

-20°Cでの実験のうち、最もエネルギー吸収量が大きくなった2-II-II-1を入力地震動とした実験結果から計算した内部温度の時刻歴を図-8に示す。併せて支承の変位の時刻歴も示す。実験終了時のエネルギー吸収量がHDR-Sのほうが大きいため、内部温度も高くなっている。両ゴム種とも内部温度は約12°C上昇しているが、せん断ひずみ175%での載荷実験のときの内部温度と比較すると、2サイクル程度である。また、最大変位が発生した時間での内部温度は約-15°Cであり、低温の免震ゴム支承が大きな力を受けていると考えられる。

5. まとめ

本研究ではゴム支承の履歴特性を地震応答に反映させるため、免震橋梁を対象に低温環境下での仮動的実験を行った。

その結果、加振が進むにつれて支承の履歴曲線が変化することを応答解析に取り込むことができた。また、橋脚基部の非線形履歴特性を表現することができた。-20°Cでの実験では+23°Cに比べて支承の最大ひずみは小さくなり、橋脚基部の応答塑性率は大きくなった。免震ゴム支承には速度依存性を有するものもあり、本研究の仮動的実験では速度依存性を考慮することはできないものの、その条件の下で温度依存性を取り込んだ橋梁の地震時応答を求めることができた。

エネルギー吸収量から内部温度を計算した結果、内部温度の上昇量は載荷実験での2サイクル程度であった。これまでの載荷実験での結果を橋梁全体の地震時応答にどう取り込むべきかの検討が必要である。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 JP19K15069 の助成を受けたものです。

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，2017。
- 2) 齊藤剛彦，中村保之，竹ノ内浩祐，山崎信宏，宮森保紀，山崎智之：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，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol. 76, No. 4(地震工学論文集第39巻)，pp.I_507-I_515，2020。
- 3) 齊藤剛彦，宮森保紀，中村保之，山崎信宏：免震ゴム支承を有する橋梁を対象とした低温環境下におけるハイブリッド実験システムの構築，令和元年度土木学会北海道支部論文報告集，第76号，A-10，2020。
- 4) 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，pp.1-10，1985。
- 5) Oh-Sung Kwon, Narutoshi Nakata, Kyu-Sik Park, Amr Elnashai, and Bill Spencer: User Manual and Examples for UI-SIMCOR v2.6 NEES-SAM v2.0, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007。
- 6) 株式会社アーク情報システム：TDAP III，<https://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/tdap3/index.html>（2020年11月27日閲覧）。
- 7) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997。
- 8) 内藤伸幸，松田泰治，宇野裕恵，川神雅秀：鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)のMullins効果とハードニングが耐震性に及ぼす影響，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.73, No.4(地震工学論文集第36巻)，pp.I_499-I_510，2017。
- 9) 内藤伸幸，松田泰治，宇野裕恵，川神雅秀：鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の地震時の応答増大に着目した耐震性評価に関する一考察，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.73, No.4(地震工学論文集第36巻)，pp.I_522-I_536，2017。
- 10) 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。