

低温環境下における高減衰ゴム支承を有する 橋梁の仮動的実験

齊藤 剛彦¹・宮森 保紀¹・中村 保之²・竹ノ内 浩祐²・山崎 信宏³・
高岡 陽⁴

¹正会員 工博 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）

²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）

³正会員 工博 日本鑄造株式会社 鋼構造技術部（〒210-9567 神奈川県川崎市川崎区白石町2番1号）

⁴学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科博士前期課程社会環境工学専攻
（〒090-8507 北海道北見市公園町165番地）

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。ゴム支承の力学的特性は一定振幅に対する正負交番繰返し載荷実験によって得られる¹⁾。地震応答解析において、免震ゴム支承は5回目の載荷における履歴曲線から、バイリニアモデルでモデル化されることが多い^{1, 2)}。これまでの研究からゴム支承の力学的特性には温度依存性があることが知られている³⁾。載荷実験の結果、低温のときは常温に比べて等価剛性が大きくなる。また、ゴム支承は一般に一定振幅の載荷を繰返すことにより水平力が徐々に低下する特性を示すが、低温の場合はこの変化が大きくなる。低温環境下の橋梁の地震応答を評価する目的で地震応答解析を行うとすると、5サイクル目の温度による履歴特性の違いはバイリニアモデルでも表現できるが、加振が進むにつれて水平力が徐々に低下する特性は表現できない。このような、時々刻々と変化する履歴特性を地震応答解析に取り込む方法として、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が挙げられる⁴⁾。

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。

2. 本研究の仮動的実験システムの概要

(1) 仮動的実験システム

本研究では、NEES (George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation) 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⁾を用いている。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 TDAPIII⁶⁾ バ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。

システムの構成を図-1に示す。実験は SC によって制御され、まず以下の設定を読み込む。

- ・地震応答解析における入力地震動や積分パラメータ、時間刻みと計算ステップ数。
- ・構造モデル全体に関する節点質量とレイリー減衰マトリクスに必要な固有周期と減衰定数。
- ・分散化した構造要素(モジュール)の IP アドレスと通信プロトコル、各モジュールの節点と自由度の配置。
- ・初期剛性を求める際に入力する変位量と回転角。

設定を読み込み、システムを初期化した後、次の手順で仮動的実験は行われる。

1. モジュールとの接続の確立.
2. 初期剛性マトリクスの作成.
3. α -OS 法⁷⁾による仮動的実験の実行.
4. モジュールとの接続の解除.

UI-SIMCOR では、ネットワーク上の各モジュールと TCP/IP 接続で通信する。SC に対して各モジュールを代表するものが構造計算制御プログラムや実験制御プログラムである。構造計算制御プログラムでは、SC から受信する命令変位に応じて、TDAPⅢの入力データファイルを書き換えて静的応答解析機能を実行する。その後、解析結果ファイルから部材断面力を読み込み、各自由度の復元力に変換して、応答変位とともに SC に送り返す。この処理を計算ステップ分繰り返す。実験制御プログラムでは、命令変位に応じてアクチュエータの変位を変更し、変位と荷重を測定する。計算ステップごとにアクチュエータを動作させるが、アクチュエータの動作よりプログラムの動作が速いため、動作命令後に一定の待機時間を設けて、待機時間経過後に変位と荷重を測定する。

このように、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。アクチュエータの動作における待機時間は、予備実験を実施した際の応答速度から、0.7 秒とした。その結果、計算部分を含めた 1 ステップに必要な時間は 0.8~0.9 秒であった。

(2) 実験設備

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。載荷装置は下向きの鉛直力による面圧を供試体を与えながら、振動台を水平方向に加振することで、供試体にせん断変形を与えられる 2 軸載荷装置である。水平のアクチュエータは荷重 ±200kN、変位 ±100mm の動的載荷能力がある。鉛直力用油圧ジャッキは荷重 200kN の静的載荷能力がある。

3. 実験条件

(1) 対象橋梁

本研究では、文献 8-10)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。この橋梁は 1996(平成 8)年版道路橋示方書に基づいて試設計された分散橋を LRB を用いた免震橋に設定し直され

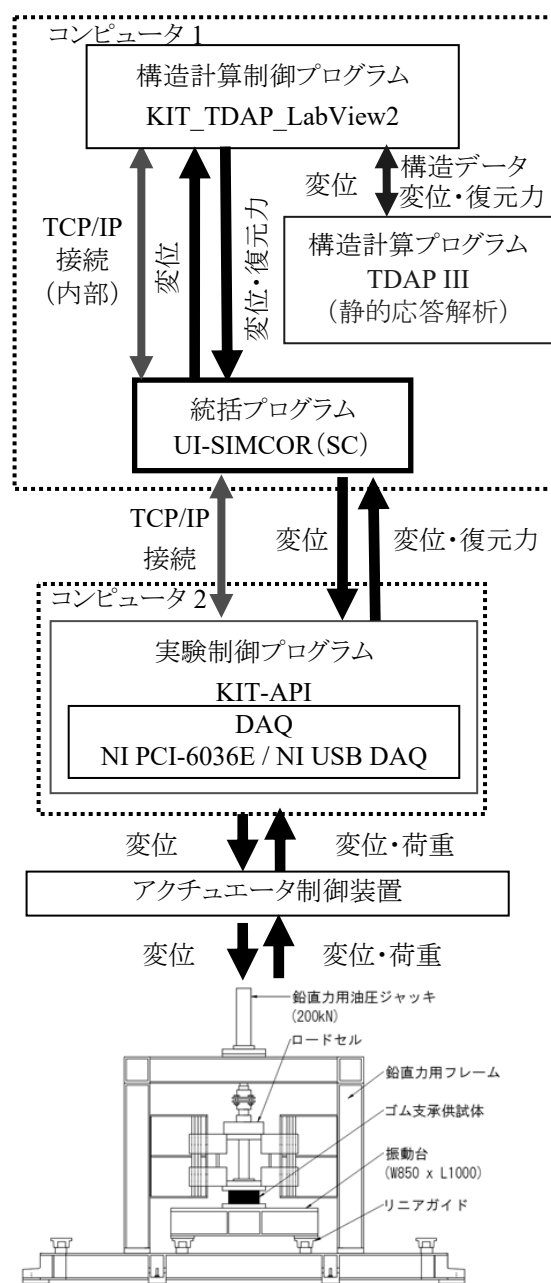


図-1 システム構成

たものである。本橋は橋長 200m、5 径間連続鋼 I 桁橋であり、鉄筋コンクリート橋脚を用いている。下部構造は T 型橋脚で杭基礎となっており、1 基の下部構造に対して免震ゴム支承が 5 基設置されている。

ゴム支承の諸元を表-1 に示す。本研究で用いるゴム支承は高減衰ゴム支承であるが、文献 9)で用いられている LRB と同程度の特性を持つものとしている。本研究では住友理工 (株) 製の 2 種類の高減衰ゴム支承 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

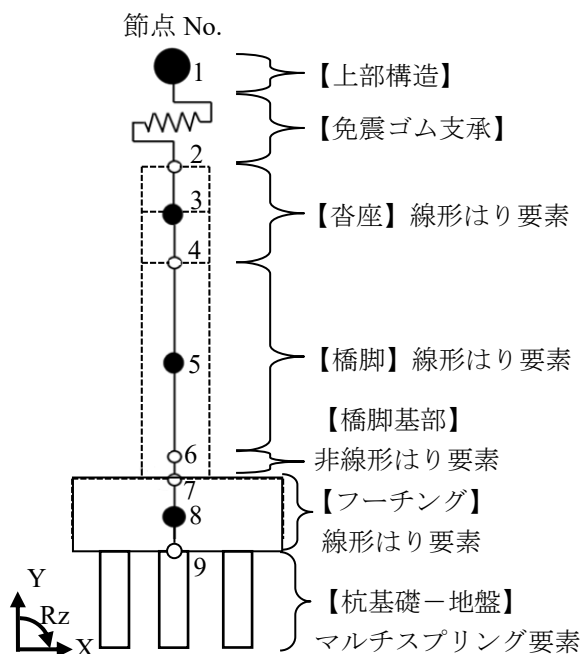


図-2 解析モデル

表-1 対象橋梁の支承諸元

種類	高減衰ゴム支承
せん断弾性係数	G10
平面寸法	780mm×780mm
ゴム厚	32mm×5 層
橋脚 1 基当たりの 支承の個数	5 基

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。

(2) 解析モデル

本研究では，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．橋梁解析モデルの節点の座標，質量を表-2 に示す．質量は，上部構造と，沓座，橋脚，フーチングの各部材の重心位置に設けた．本研究では橋軸方向の水平 1 方向の加振であるため，X 軸方向，Rz 方向以外はすべて固定とし，上部構造(節点 1)のみ，Rz 方向も固定とする．解析モデルの要素特性を表-2，3 にそれぞれ示す．鉄筋コンクリート橋脚基部は塑性ヒンジ区間に曲げモーメント-曲率関係の完全弾塑性型の骨格曲線を有する非対称最大点指向型バイリニア（武田型）モデルを適用し，橋脚の曲げ非線形挙動を表現した．橋脚基部の履歴モデルは文献 10)を参考に図-3 のように設定した．その他の橋脚，フーチングは線形はり要素でモデル化し，フーチング底面の基礎の地盤ばね定数は文献 8)を参考に，節点 9 に設定した．

表-2 解析モデルの座標と質量

節点 No.	座標	質量	
		X 軸方向 (t)	Z 軸回転 (t・m)
1	10	656.0	-
2	10	-	-
3	8.9	140.0	-
4	7	-	-
5	3.75	206.3	-
6	0.861	-	-
7	0	-	-
8	-1.1	397.4	2553
9	-2.2	-	-

表-3 解析モデルのはり要素の特性

要素 (節点番号)	減衰 定数	E(kN/m ²)	A(m ²)	I(m ⁴)
2-3	0	4,722,200	26.4	10.65
3-4	0	4,722,200	18.7	7.45
4-5	0.05	4,722,200	11	4.44
5-6	0.05	4,722,200	11	4.44
6-7	0.02	4,722,200	11	4.44
7-8	0	4,722,200	45.5	435
8-9	0	4,722,200	45.5	435

表-4 解析モデルのばね要素特性

要素 (節点番号)	減衰 定数	Kss(kN/m)	Ksr(kN/m)
		Krs(kN/m)	Krr(kN/m)
9	0.2	2.71056*10 ⁶	-4.3600*10 ⁶
		-4.3600*10 ⁶	3.8403*10 ⁷

仮動的実験システムでは，橋脚頂部より下部を計算モジュールとして，図-1 のコンピュータ 1 において TDAPIII による静的応答解析を行う．橋脚頂部より上部を実験モジュールとして，コンピュータ 2 と制御装置を介して載荷装置による実験を行う．

(3) 解析条件

支承以外の減衰は全体レイリー減衰を用いる．各部材の減衰定数を，ゴム支承を 0%，橋脚は張出部，フーチングは 0%，線形要素は 5%，非線形要素は 2%，杭基礎-地盤を 20%とし，ひずみエネルギー比例型減衰率を考える．また，固有振動数の算出に

において、ゴム支承のせん断弾性係数は、+23℃では呼び G の値とする。-20℃では、载荷実験の結果³⁾から+23℃のせん断弾性係数を HDReX では 1.5 倍、HDR-S では 1.7 倍とする。固有振動解析の結果を表-5 に示す。レイリー減衰の設定には 1 次モードと 2 次モードをそれぞれ用いる。

実験の数値解析は α -OS 法⁷⁾を用い、減衰パラメータは $\alpha=0.00$ 、 $\beta=0.25$ 、 $\gamma=0.50$ とした。これは Newmark β 法 ($\beta=0.25$ 、 $\gamma=0.50$) と一致するものとしている。

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、支承にバイリニアモデルを適用した地震応答解析の結果から、入力加速度を 1.3 倍とする。計算ステップの時間刻みは 0.01sec とする。

(4) ゴム支承供試体

実験で用いる供試体の諸元を表-6 に示す。供試体は解析モデルの支承よりも小さいため、ゴム支承のスケール効果はないものとし、仮動的実験において、载荷装置への命令変位、システムへの応答変位、応答荷重を、ゴム支承のせん断ひずみ、せん断応力が整合するように平面寸法と個数、層厚で調整する。

供試体に与える面圧は、上部構造の質量と橋梁の支承のサイズから算出し、 2.1N/mm^2 とする。

まず、実験前にプレローディングを実施する。プレローディングの条件は、温度+23℃、面圧 6MPa で、加振振動数 0.5Hz の正弦波でせん断ひずみ 175% の一定振幅による正負交番繰返し载荷を繰返し回数 11 回で行う。プレローディング後は常温の測定室で供試体を保管し、1 週間後に実験している。温度管理については、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。

4. 実験結果

(1) +23℃での実験結果

+23℃での実験結果として、支承の履歴曲線、支承のエネルギー吸収量の時刻歴、橋脚基部の履歴曲線を図4～9にそれぞれ示す。比較として、支承をバイリニアモデルでモデル化した際の地震応答解析の結果を併せて示す。

バイリニアモデルを用いた結果と比較すると、実

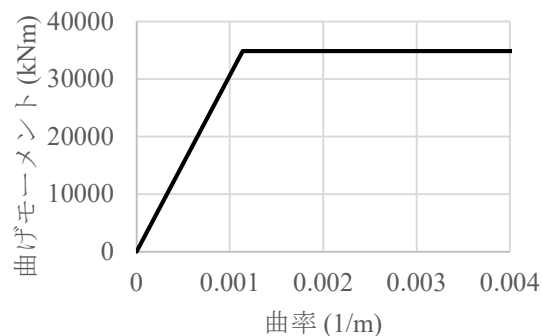


図-3 橋脚基部の履歴モデル

表-5 固有振動解析結果

+23℃	固有振動数 (Hz)	減衰定数	累積有効質量比(%)
1 次	0.73	0.022	53
2 次	3.88	0.064	67

HDReX -20℃	固有振動数 (Hz)	減衰定数	累積有効質量比(%)
1 次	0.83	0.029	55
2 次	4.14	0.058	67

HDR-S -20℃	固有振動数 (Hz)	減衰定数	累積有効質量比(%)
1 次	0.86	0.031	56
2 次	4.25	0.056	67

験では支承の最大ひずみが大きくなっている。これは、本研究は仮動的実験であることから、免震ゴム支承の速度依存性の影響により、実験では剛性が低くなってしまったためにひずみが大きくなったと考えている。また、支承のエネルギー吸収量は実験で大きくなっている。このように実験では支承が揺れのエネルギーをより多く吸収したために、橋脚基部の応答塑性率が小さくなったと考えられる。

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。

(2) -20℃での実験結果

-20℃での実験結果として、支承の履歴曲線、支承のエネルギー吸収量の時刻歴、橋脚基部の履歴曲線を図10～15にそれぞれ示す。

+23℃と比較すると、支承の最大ひずみが小さく

表-6 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	
HDRex	G10	170×170	7	3	6.07	8.10	6
HDR-S							6

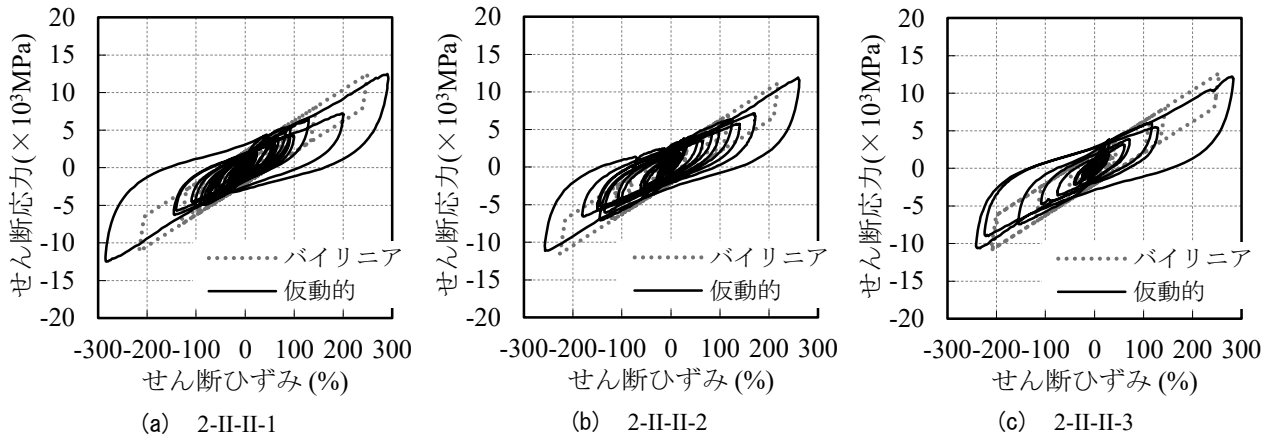


図-4 +23°C, HDRex, 支承の履歴曲線

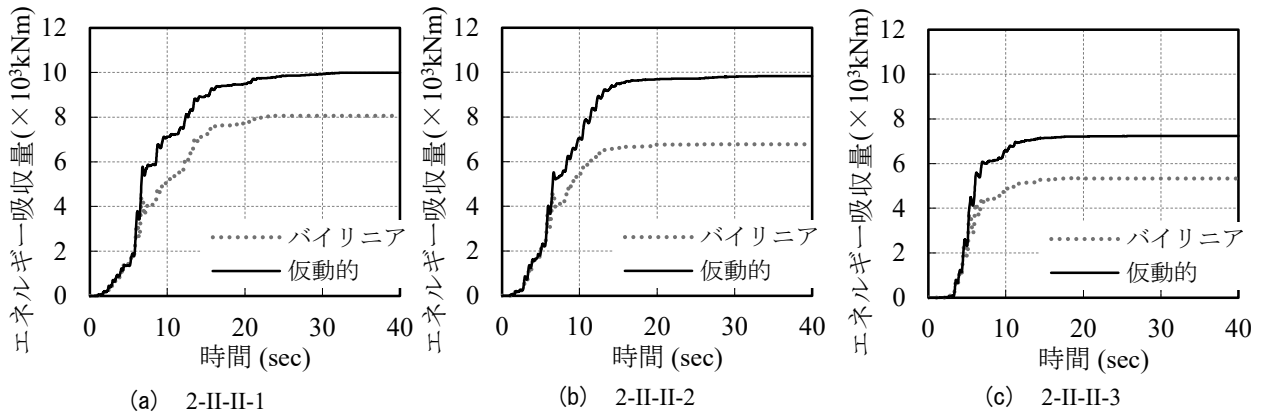


図-5 +23°C, HDRex, 支承のエネルギー吸収量

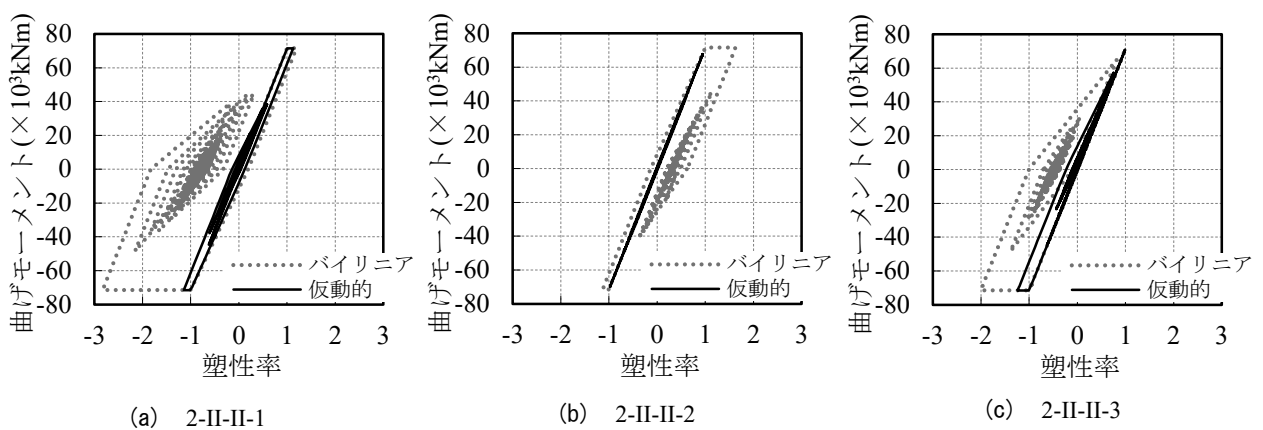


図-6 +23°C, HDRex, 橋脚基部の履歴曲線

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°C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。

ゴム種で比較すると、HDRexでは支承の最大ひずみが多い。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

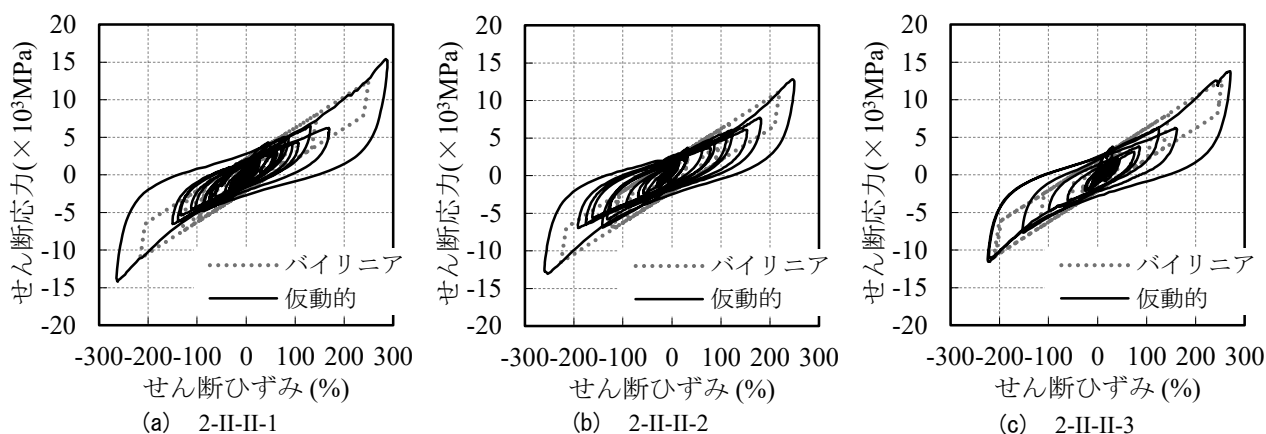


図-7 +23°C, HDR-S, 支承の履歴曲線

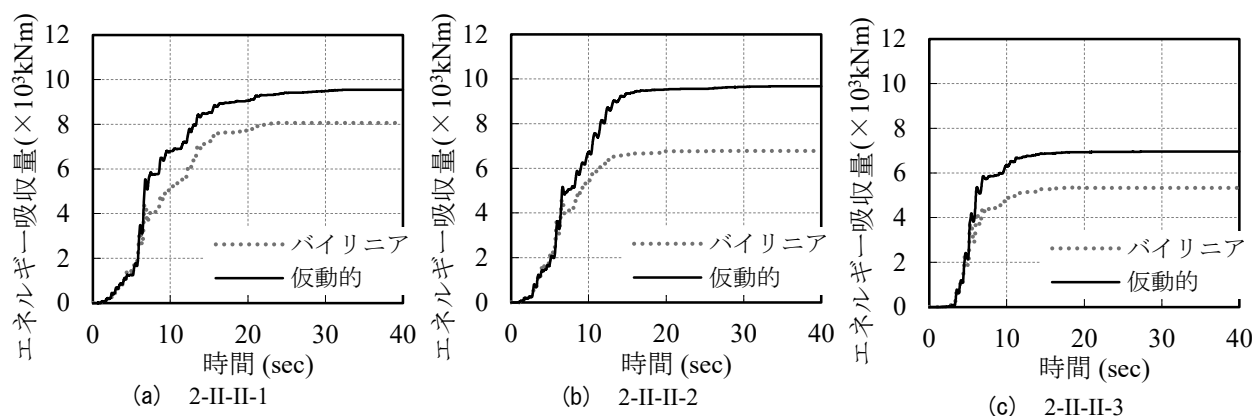


図-8 +23°C, HDR-S, 支承のエネルギー吸収量

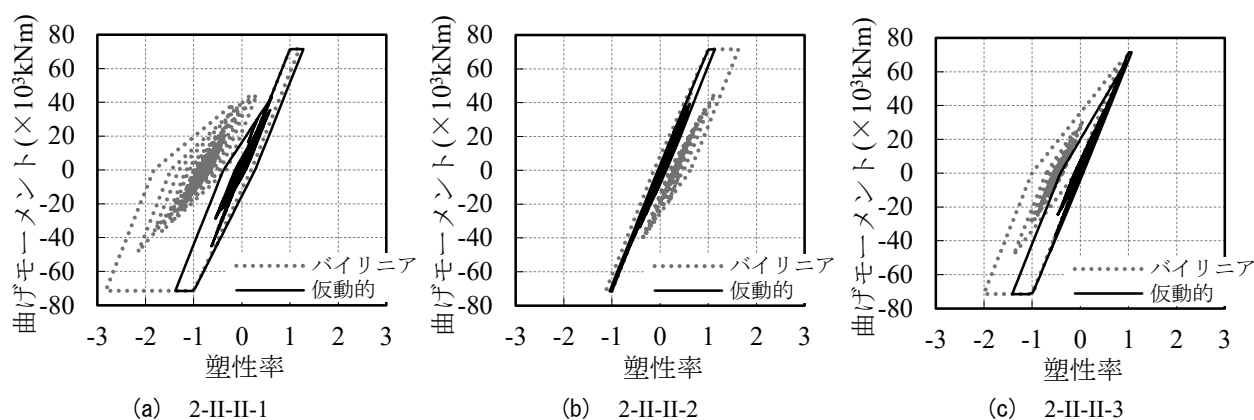


図-9 +23°C, HDR-S, 橋脚基部の履歴曲線

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。

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。

実験システムとしてはオープンソースのUI-SIMCORを利用し、温度制御可能な実験室内の载荷装置を動作させるプログラムと組み合わせることで構築した。本研究の仮動的実験システムでは、支承の力学的特性が持つ速度依存性の影響が応答結果に含まれてしまうものの、その範囲内で免震ゴム支承の温度依存性による地震時応答の影響を比較した。

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

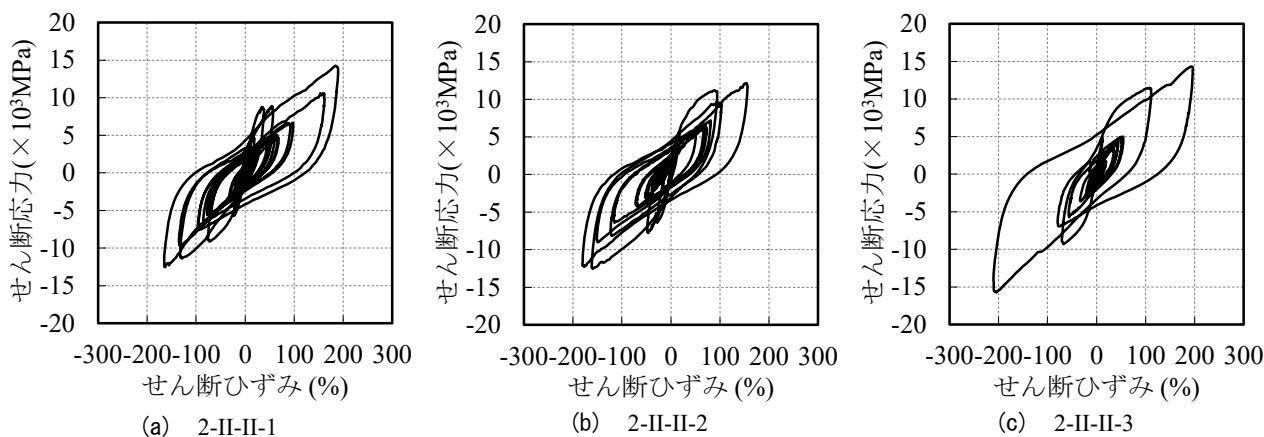


図-10 -20°C, HDRex, 支承の履歴曲線

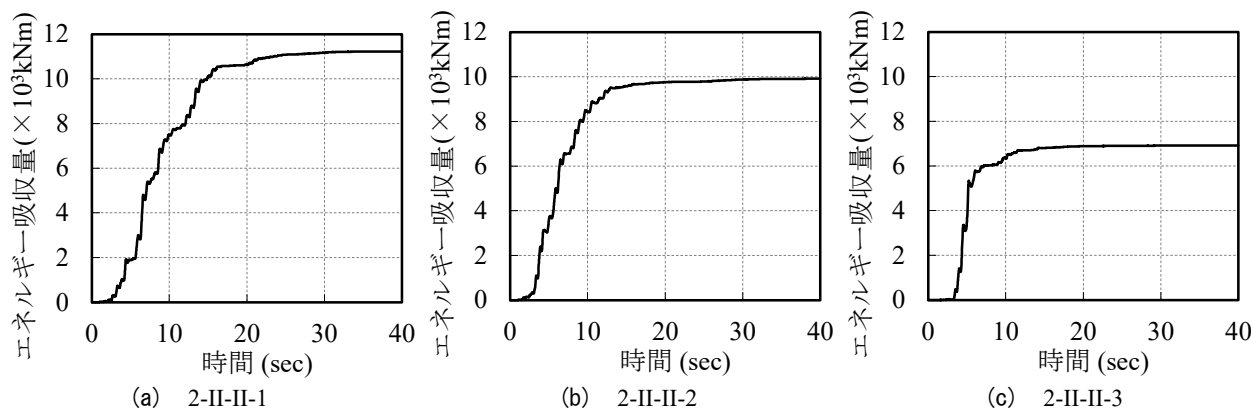


図-11 -20°C, HDRex, 支承のエネルギー吸収量

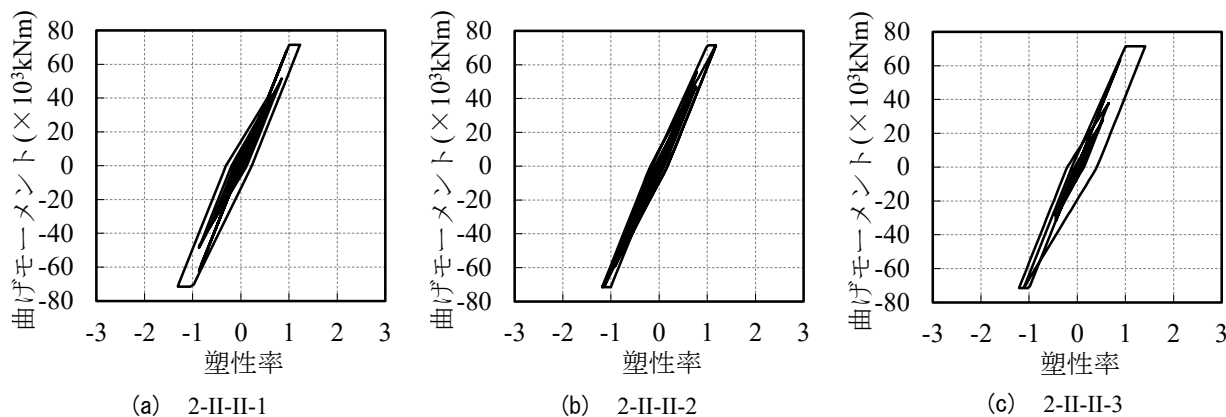


図-12 -20°C, HDRex, 橋脚基部の履歴曲線

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。

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) 日本道路協会：道路橋支承便覧，丸善，2018。
- 3) 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。

- 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：TDAPⅢ，

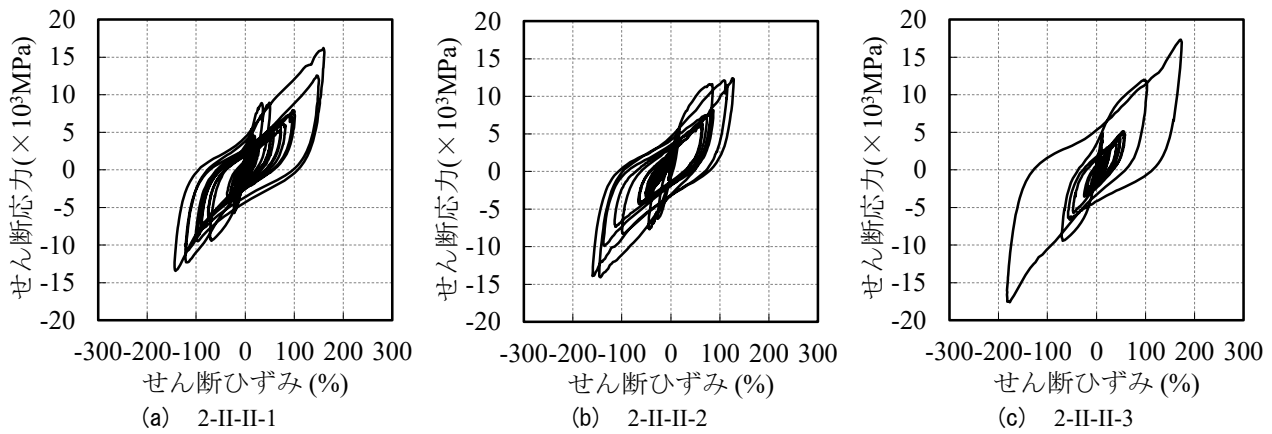


図-13 -20°C, HDR-S, 支承の履歴曲線

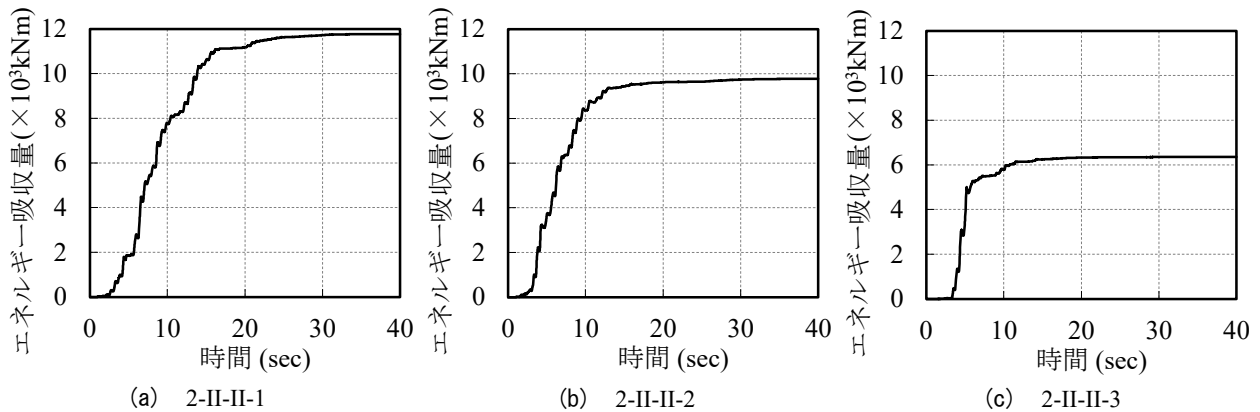


図-14 -20°C, HDR-S, 支承のエネルギー吸収量

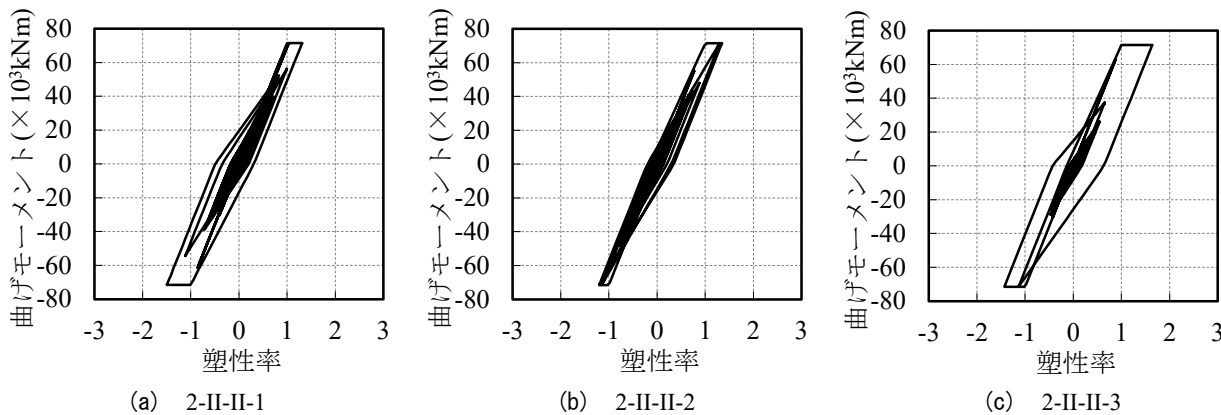


図-15 -20°C, HDR-S, 橋脚基部の履歴曲線

<https://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/tdap3/index.html> (2020年11月27日閲覧)。

- 7) 中島正愛, 赤澤隆士, 阪口理: 実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第454号, pp.61-71, 1993.
- 8) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
- 9) 内藤伸幸, 松田泰治, 宇野裕恵, 川神雅秀: 鉛プ

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.

- 10) 内藤伸幸, 松田泰治, 宇野裕恵, 川神雅秀: 鉛プ

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.