

高減衰ゴム支承の温度依存性に着目した 免震橋梁の仮動的実験

齊藤 剛彦¹・宮森 保紀²・中村 保之³・竹ノ内 浩祐⁴・山崎 信宏⁵

¹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: saitota@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 北見工業大学准教授 工学部社会環境系 (同上)

E-mail: miyamoya@mail.kitami-it.ac.jp

³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

⁴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

⁵正会員 日本鋳造株式会社 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)

E-mail: n_yamazaki@nipponchuzo.co.jp

高減衰ゴム支承の温度依存性や加振が進むにつれて水平力が徐々に低下する特性を含めて、橋梁全体の地震時応答を検討するため、低温実験室に整備した載荷装置を用いた仮動的実験を行った。仮動的実験システムにはオープンソースの UI-SIMCOR を使い、構造計算部分には汎用構造解析ソフト TDAPIII を用いることで、汎用性の高いシステムを構築した。対象橋梁は II 種地盤上の免震橋とし、温度を+23℃と-20℃で実験した。実験の結果、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。+23℃と比較して-20℃では支承の最大せん断ひずみが 0.6 から 0.7 倍に減少し、橋脚基部の最大塑性率は 1.14 から 1.16 倍に増加した。

Key Words: high damping rubber bearing, temperature dependence, pseudo-dynamic simulation

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⁾。

高減衰ゴム支承を用いたハイブリッド実験の研究は、袁ら⁵⁾は実時間ハイブリッド実験のシステムを開発し、ゴム支承の免震性能の違いを免震橋梁の地震時応答によって検討している。高橋ら⁶⁾は高減衰ゴム支承の初期載荷の特性の影響に着目し、ハイブリッド実験によって検討している。党ら⁷⁾は低温でのハイブリッド実験を行っている。

こうした中で著者らは低温環境下での汎用的な仮動的実験システムに着目して、システムの構築と制震ダンパーを用いた検証実験を行ってきた⁸⁾。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

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-SIMCOR⁹⁾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 TDAPIII¹⁰⁾ 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¹¹⁾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 (構造計算制御プログラムおよび実験制御プログラム) と TCP/IP 接続で通信する。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。

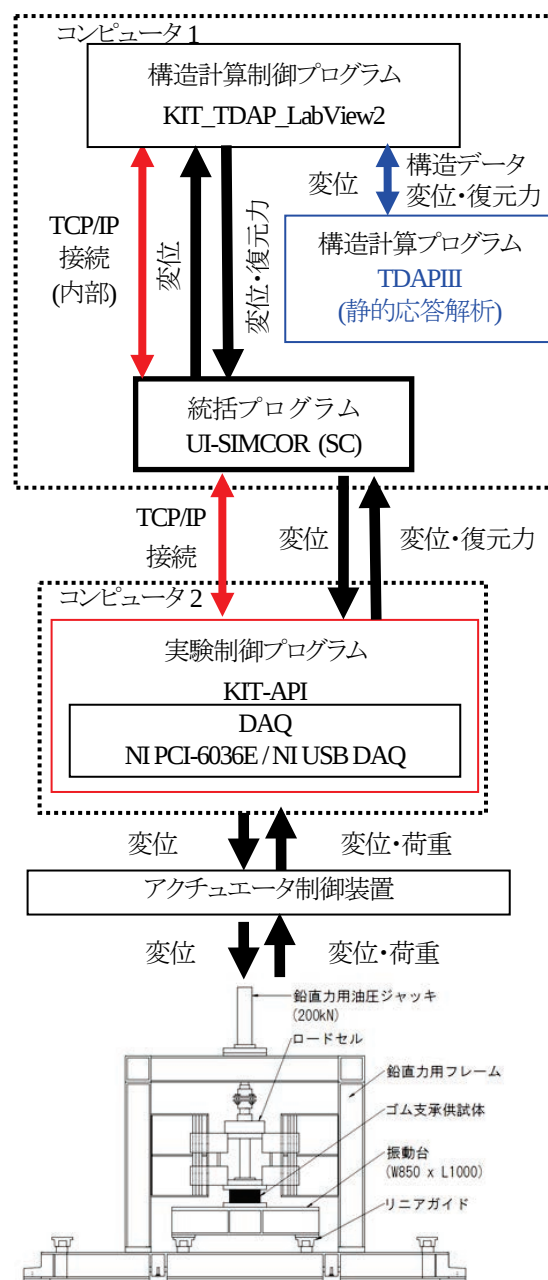


図-1 システム構成

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一定の面圧を供試体を与えながら、振動台

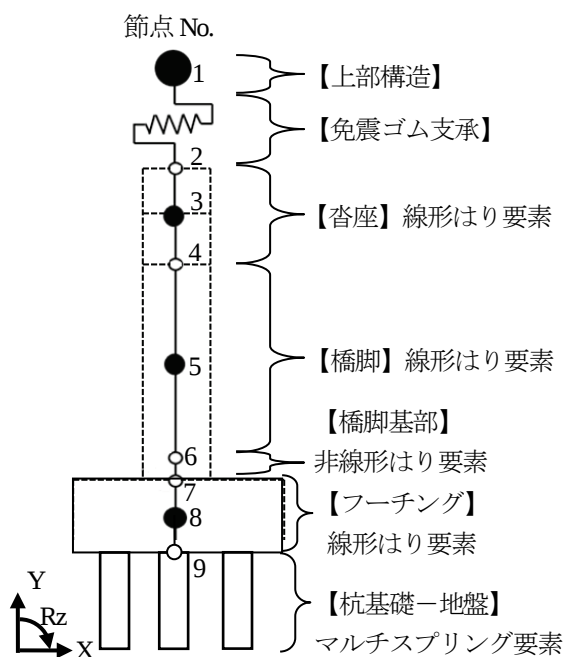


図-2 解析モデル

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 軸载荷装置である。水平のアクチュエーターは荷重±200kN、変位±100mm 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。

3. 実験条件

(1) 対象橋梁

本研究では、文献 12-14)を参考に、Ⅱ 種地盤上の多径間連続桁の免震橋梁を対象とする。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梁を LRB を用いた免震橋梁に設定し直されたものである。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 形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。

(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-1 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

表-1 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-2 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-3 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)	Kn(kN/m)
9	0.2	2.71056×10^6	-4.3600×10^6
		-4.3600×10^6	3.8403×10^7

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。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 12)を参考に、節点 9 に設定した。

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载荷装置による実験を行う。

表-5 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	170mm× 170mm	7	3	6.07	8.10	6
HDR-S							6

(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。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⁹⁾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。

(4) 対象橋梁の支承とゴム支承供試体

対象橋梁のゴム支承の諸元を表-4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。

実験で用いる供試体の諸元を表-5に示す。载荷装置の载荷能力により、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、仮想的実験において、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平面寸法から算出し、 2.1N/mm^2 とする。

表-4 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

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℃と-20℃の実験結果の比較

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ゴム種別に図 3-8 に示す。併せて、各実験ケースの支承の最大せん断ひずみ、支承の最大せん断応力、支承のエネルギー吸収量、橋脚基部の最大塑性率を表-6に示す。ここで、支承のエネルギー吸収量は支承の履歴曲線の面積を時々刻々と計算し、累積することで算出した。

+23℃と-20℃で比較すると、-20℃では支承の最大ひずみが小さくなっている。3 波平均で比較すると、HDR-S で 0.61 倍、HDRex では 0.69 倍に減少した。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、橋脚基部の最大塑性率は大きくなっている。3 波平均で比較すると、HDR-S で 1.14 倍、HDRex では 1.16 倍に増加した。これは、支承のエネルギー吸収量では-20℃の方が大きいものの、支承の最大せん断応力が-20℃の方が大きいことから、橋脚に作用する荷重も大きく、塑性化が進行したのではないかと考えている。

-20℃での 2-II-II-3 地震動では最大せん断ひずみが最も大きい、履歴曲線のひとつのループが卓越して大きいためであり、応答全体の支承のエネルギー吸収量は他の

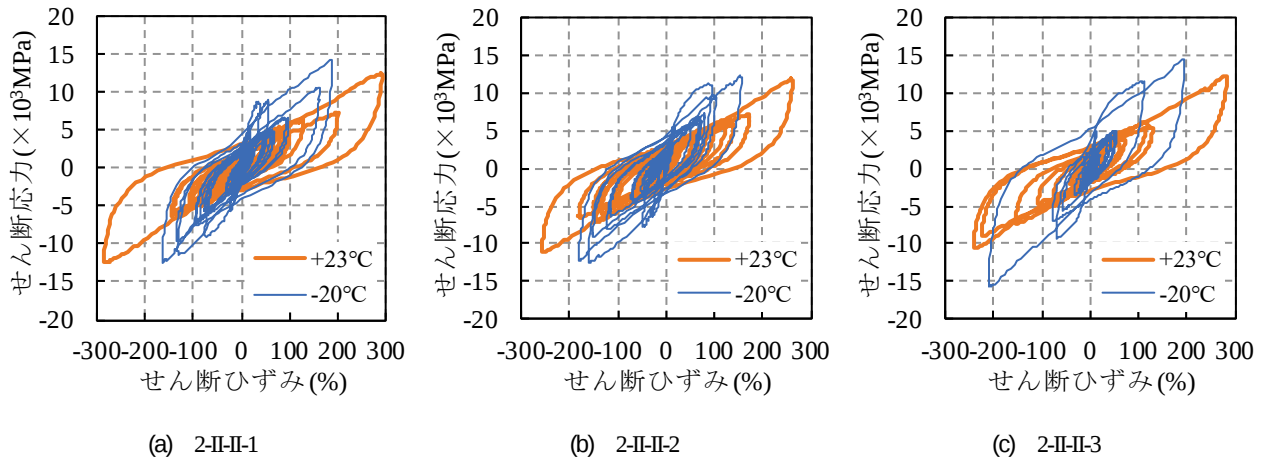


図-3 HDRexを用いたときの支承の履歴曲線

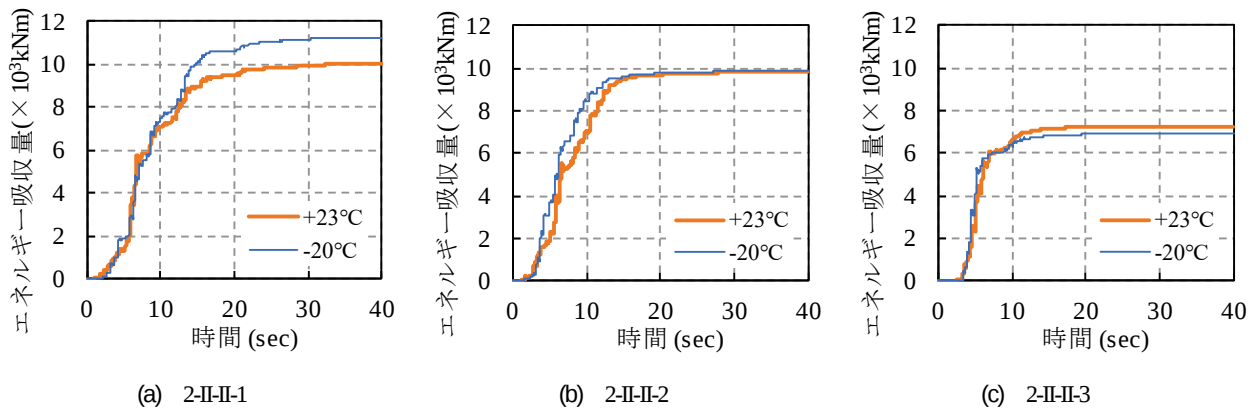


図-4 HDRexを用いたときの支承のエネルギー吸収量

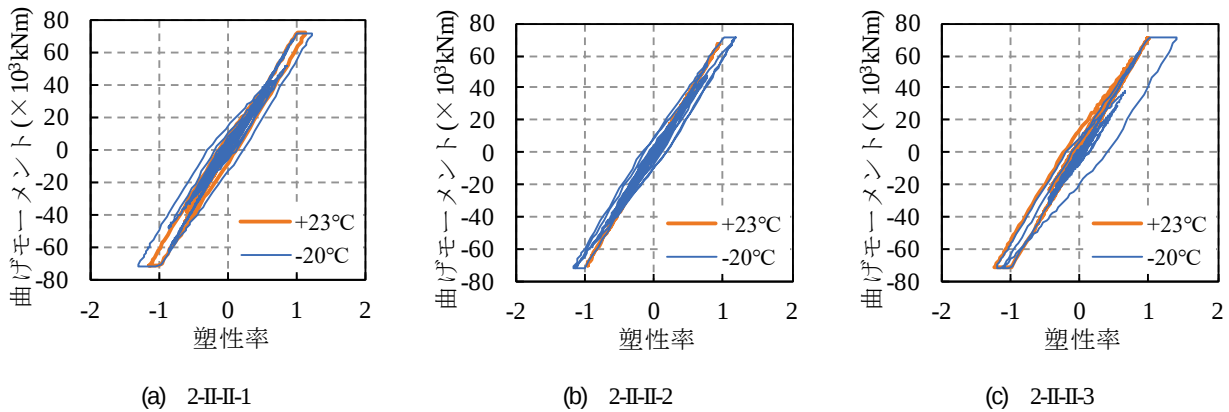


図-5 HDRexを用いたときの橋脚基部の履歴曲線

地震動を入力した場合よりも小さい。ここで、 -20°C における、2-II-II-3地震動を入力したときの、開始から20秒までの支承のせん断ひずみと橋脚基部の塑性率の時刻歴波形を図-9に示す。支承のせん断ひずみが大きい時間に橋脚基部の塑性率も大きいことが確認できる。

(2) ゴム種による比較

実験結果をゴム種で比較すると、最大せん断ひずみの3波平均で、HDRexの方が $+23^{\circ}\text{C}$ で1.02倍、 -20°C で1.15倍と大きい。これは、HDRexはHDR-Sと比較して高ひずみ

領域でのハードニングが低減される特徴を有しているためと考えられる。加えて、 -20°C については低温環境下でも剛性が大きく変化しないことを目的として開発されており、一定振幅による载荷実験ではこれらの特徴が現れている。これらの特徴が仮動的実験においても結果に現れたものと考えられる。

また、橋脚基部の最大塑性率は3波平均でHDRexの方が $+23^{\circ}\text{C}$ で0.85倍、 -20°C で0.87倍と小さい。温度による比較と同様に、支承の最大せん断応力が小さいことか

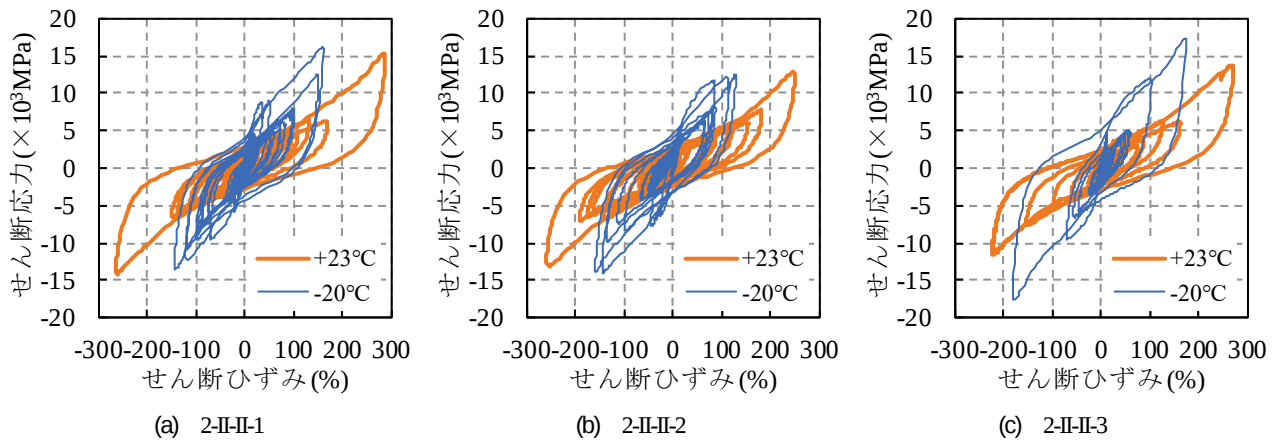


図-6 HDR-Sを用いたときの支承の履歴曲線

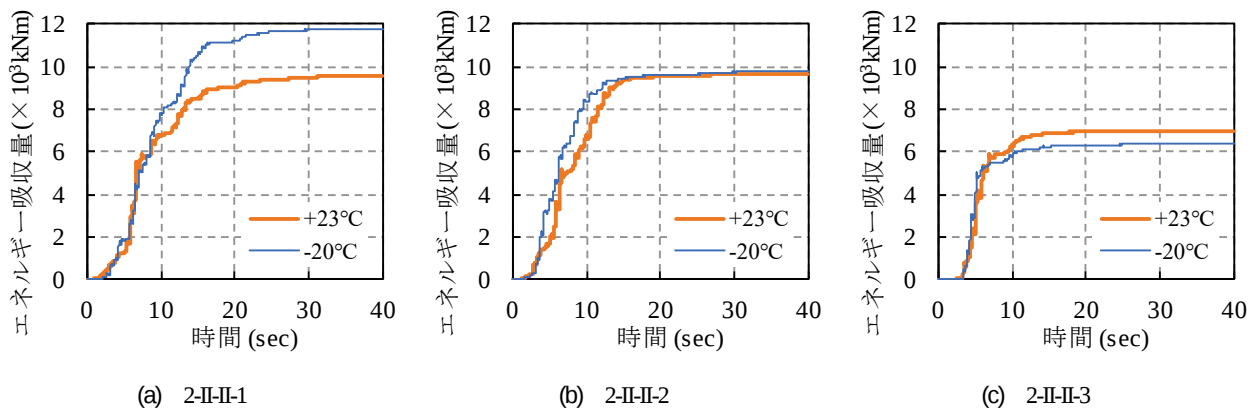


図-7 HDR-Sを用いたときの支承のエネルギー吸収量

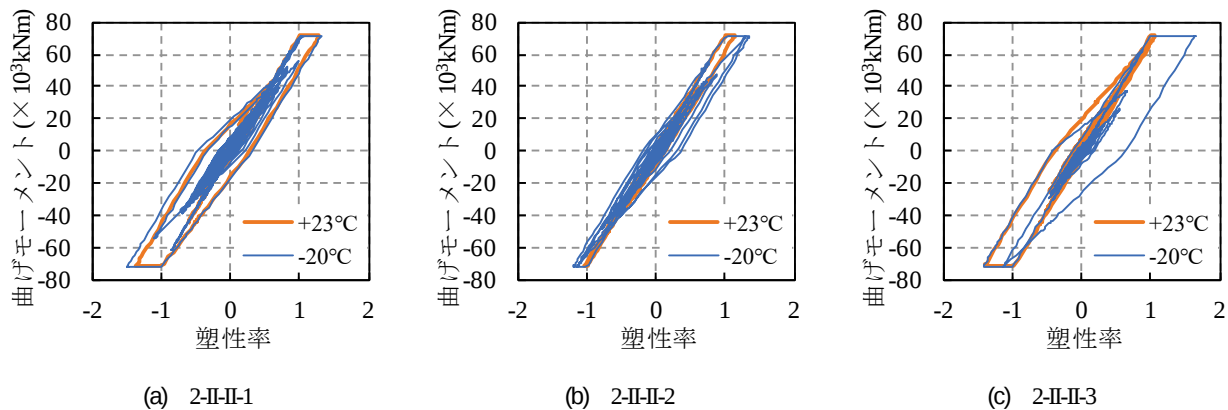


図-8 HDR-Sを用いたときの橋脚基部の履歴曲線

ら、橋脚に作用する荷重も小さいためと考えている。

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。本研究の実験システムの特徴を以下にまとめる。

(1) 本実験システムは仮動的実験であるため、実時間では実験できず、デバイスの速度依存性を考慮することが

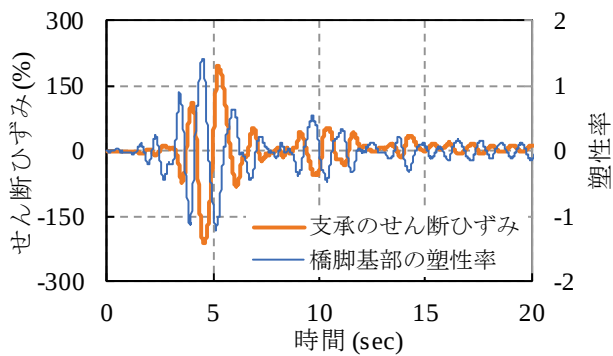
できない。免震ゴム支承には速度依存性を有するものもあり、本研究の仮動的実験では速度依存性を考慮することはできないものの、その条件の下で温度依存性を取り込んだ橋梁の地震時応答を求めることができた。

(2) ハイブリッド実験のシステムはオープンソースの仮動的実験ソフトウェアを用いている。

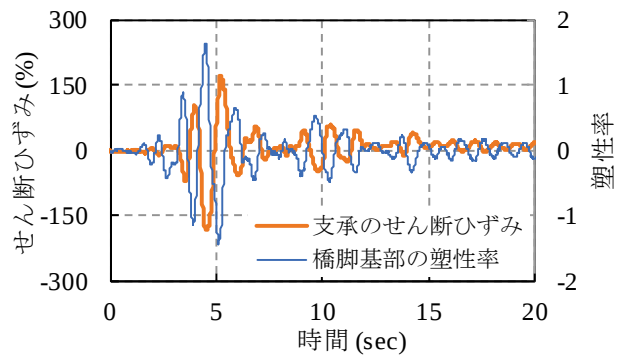
(3) 構造計算プログラムに汎用構造解析ソフト TDAPIII を用いている。そのため、構造実験部分で用いるデバイスを除いた構造解析モデルは TDAPIII で作成できるためにモデル化を容易にしている。

表-6 実験結果

ゴム種	項目	+23°C				-20°C			
		2-II-II-1	2-II-II-2	2-II-II-3	平均	2-II-II-1	2-II-II-2	2-II-II-3	平均
HDR-S	支承の最大せん断ひずみ(%)	288	260	271	273	161	160	182	168
	支承の最大せん断応力(MPa)	15409	13043	13787	14080	16220	14091	17605	15972
	支承のエネルギー吸収量(kNm)	9552	9676	6953	8727	11767	9773	6352	9298
	橋脚基部の最大塑性率	1.38	1.14	1.41	1.31	1.49	1.35	1.64	1.49
HDReX	支承の最大せん断ひずみ(%)	292	262	283	279	189	180	211	193
	支承の最大せん断応力(MPa)	12469	11928	12232	12210	14260	12536	15713	14170
	支承のエネルギー吸収量(kNm)	9996	9837	7241	9025	11222	9912	6910	9348
	橋脚基部の最大塑性率	1.14	0.98	1.24	1.12	1.31	1.18	1.41	1.30



(a) HDReX



(b) HDR-S

図-9 2-II-II-3地震動を入力したときの支承のせん断ひずみと橋脚基部の塑性率

(4) 既往のハイブリッド実験では2質点系など、比較的簡易なモデルを用いているが、本研究では地震応答解析による研究で用いられてきた多質点系モデルでの仮動的実験が可能である。併せて、橋脚基部など構造計算部分の要素に非線形要素を用いて仮動的実験が可能である。

(5) 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°C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载荷実験ができる。

(6) 载荷装置の载荷能力から供試体の寸法を決定したが、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、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、せん断応力が対象橋梁の支承と供試体で整合するように平面寸法と個数、層厚で調整した。

実験の結果、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。

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，竹ノ内祐祐，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) 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.
 - 6) 高橋良和, 鶴野禎史, 朝倉康信, 加藤亨二, 山田博, 兼子一弘: 初期載荷状態の高減衰ゴム支承を用いたハイブリッド地震応答実験, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp.372-379, 2014.
 - 7) 党紀, 談雨晴, 五十嵐晃, 姫野岳彦, 濱田由記, 鶴野禎史: 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, 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム, pp.215-221, 2021.
 - 8) 宮森保紀, 湯村美紀, 藤生重雄, 樋口匡輝, 山崎智之, 三上修一, 大島俊之: 汎用構造解析ソフトを利用した低温環境下における仮動的実験システムの構築, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第31-b巻), pp.I_608-I_616, 2012.
 - 9) 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.
 - 10) 株式会社アーク情報システム: TDAPIII, <https://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/tdap3/index.html> (2021年8月23日閲覧) .
 - 11) 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.
 - 12) 日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
 - 13) 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.
 - 14) 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.

THE PSEUDO-DYNAMIC SIMULATION OF A SEISMIC ISOLATION BRIDGE ABOUT THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF HIGH DAMPING RUBBER BEARINGS

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

In this study, in order to reflect the change of the hysteresis characteristic of the high damping rubber bearings to the seismic response, a pseudo-dynamic simulation system using experimental equipment capable of loading test at low temperature was developed. The pseudo-dynamic simulation system was developed by using open source UI-SIMCOR. To enhance the usability of the system, sub-program for static response analysis was also developed for the application of a versatile FEM software. As the results, it was possible to incorporate into the response analysis that the hysteresis loop of the bearing changed as the vibration progressed. And the nonlinear hysteresis characteristic of the pier bottom can be expressed.