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

Development of hybrid simulation system for an isolated bridge under the low temperature environment

(Takehiko Saito)	齊滕削彦	〇正会員	工学部社会環境系	化見工業大学エ
(Yasunori Miyamori)	宮森保紀	正会員	工学部社会環境系	化見工業大学エ
(Yasuyuki Nakamura)	中村保之	正会員)化工品事業部	主友理工(株)
(Nobuhiro Yamazaki)	山﨑信宏	正会員)技術研究所	日本鋳造(株)

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震以降,従来の耐震構造に加 えて免震構造を採用する橋梁が増えており、 それに伴い 免震・制震デバイスの研究開発が盛んに行われている. このうち、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、本研究では低温環境下でゴム支承の載荷実験 が可能な実験設備を用いてハイブリッド実験システムを 構築した.ここではシステムの概要を述べるとともに、 モデルケースとして、免震ゴム支承を有する橋梁を対象 とした低温環境下でのハイブリッド実験を行った結果を 報告する.

2. 本研究のハイブリッド実験システムの概要

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 TDAPⅢ^の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
- でハイブリッド実験は行われる.
- 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⁾によるハイブリッド実験の実行.
- 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. 最適な待機時間は予備実験によって決定する. なお,実 験中の命令変位と測定変位は、画面上でリアルタイムに 確認するとともに、命令変位が設定値を超過する場合は 処理を停止させる.

著者らはこれまでに制震ダンパーを有する桁モデルの 地震時応答を計算するシステムを構築しており⁸⁾,載荷 装置には鉛直方向に載荷するアクチュエータを用いてい たが、本研究ではゴム支承を対象とするため、一定面圧 の元、水平方向に加振し、供試体にせん断変形を与える ことのできる載荷装置を用いる.

3. 低温環境下でのハイブリッド実験

3.1 対象橋梁

本研究では道路橋の耐震設計に関する資料⁹に記載さ れている免震ゴム支承を有する道路橋を対象とする.対 象橋梁の一般図を図-3 に示す.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 直接基礎となっており,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.なお,ゴム支承の種類とせん断弾性係数は本研 究で用いる供試体に合わせた.地盤はI種地盤である. 3.2 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、図-4 で示した橋脚を橋梁解析モデルとした.橋梁 解析モデルの全体図を図-5 に示す. 上部構造は 1 つの 質点とする.鉄筋コンクリート橋脚の破壊形態は曲げ破 壊先行型であるため曲げの非線形挙動を表現できる非線 形モデルとした.鉄筋コンクリート橋脚基部の塑性ヒン ジ区間に曲げモーメントー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. また, 塑性ヒンジ長は道路橋示方書¹⁾より算出した. そ の他の橋脚,フーチングは線形はり要素でモデル化し, 地盤は節点9と節点10を繋ぐ線形バネ要素,節点9と 節点 11 を繋ぐ回転バネ要素とし、等価線形バネでモデ ル化した.ゴム支承は載荷実験を行うため、モデル化し ていない.

ハイブリッド実験システムでは、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.

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 定とする.橋軸方向である X 軸方向は、地盤である節 点 10,節点 11 のみ固定とする. Rz 方向は、上部構造 (節点 5)、節点 10、節点 11 を固定とした.

3.3 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%、橋脚を2%、基礎一地 盤を10%とし、ひずみエネルギー比例型減衰率を考え る.その結果、1次モードの固有振動数0.724Hzに対し、 減衰定数0.016、2次モードの固有振動数3.500Hzに対 し、0.054とする.なお、固有振動数の算出において、 ゴム支承は+23℃でのせん断ひずみ175%の載荷実験に よる等価剛性を用いている.

実験の数値解析は α -OS 法 ⁿを用い,減衰パラメータ は α =0.00, β =0.25, γ =0.50 とした. これは Newmark β 法(β =0.25, γ =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



図-2 実験室と載荷装置

動(2-II-I-1)とする.計算ステップの時間刻みは 0.01sec とする.ただし、本研究では解析対象を振幅の



大きい,開始から 20 秒間とする. そのため実験のステ ップ数は 2000 である. ここで,2 章で説明した,各ス テップでアクチュエータを命令変位に追随させるための 待機時間は 0.8sec とした.

3.4 ゴム支承

実験の供試体の諸元を表-3 に示す.解析モデルの支 承よりも小さいため、ハイブリッド実験において、載荷 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、 ここでは 1 ケースとして-30℃のときの地震応答を検 討する. なお,供試体はバージン状態に対し,+23℃, せん断ひずみ 175%の正弦波で正負交番載荷 11 回によ るプレローディング試験を行い,その1週間後に実験し た. また,供試体は常温で保管し,実験の 18 時間前に 供試体を-30℃の実験室に入れ,同時に入れた内部温度 管理用供試体により,供試体の内部温度が-30℃である ことを確認している.

実験結果より,上部構造の変位を図-6,支承の荷重-変位関係を図-7,橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係 を図-8 にそれぞれ示す.図-7 より支承の最大せん断ひ ずみは 155%である.最大変形のあと,ループの荷重が 低下していることがわかる.図-8 では,非線形の履歴 特性を表現できていることがわかる.

插粘	せん断	平面	ゴノ	ム厚	形状	係数	供封休粉
1里大只	弾性係数	寸法	te (mm)	n (層)	S 1	S2	医时种数
HDReX	G12	170×170	7	3	6.07	8.10	1

4. 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、低温での載荷実験が可能な実験設備を用いるハ イブリッド実験システムを構築した.実験システムとし てはオープンソースの UI-SIMCOR を利用し、低温室内 の載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.

モデルケースとして,免震橋梁を対象に-30℃での実験の結果,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.

本研究のハイブリッド実験システムでは計算ステップ 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 を測定している.さらに、各ステップでの載荷速度を制 御していない.免震ゴム支承の力学的特性には速度依存 性を有するものもあり¹⁾、ハイブリッド実験の時間スケ ールが免震橋梁の応答評価に影響し得ることが示唆され ていることから¹⁰、実験速度に関する検討は今後の課 題である.

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

- 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,入江駿亮,中村保之,竹ノ内浩祐,宮 森保紀,山崎智之: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,土木学会論文集 A1(構造・地震工学),Vol.74,No.4(地震工学論文 集第37巻),pp.I_765-I_776,2018.
- 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.
- 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 (2019年12月2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) 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



図-8 橋脚基部の曲げモーメントー曲率

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.

- 日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
- (10) 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.

表-3 供試体諸元