

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15069

研究課題名（和文）リアルタイムハイブリッド実験による極低温環境下の免震橋梁の地震応答の解明

研究課題名（英文）The hybrid simulation of a seismic isolation bridge under the low temperature environment

研究代表者

齊藤 剛彦（SAITO, Takehiko）

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70646984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：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ハイブリッド実験を行った。ハイブリッド実験システムにはオープンソースのプログラムや汎用構造解析ソフトを用いることで、汎用性の高いシステムを構築した。免震橋を対象として、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

室温を-30℃から+50℃の範囲で制御することができる実験室の載荷装置と、オープンソースプログラムや汎用構造解析ソフトを用いたハイブリッド実験システムを構築した。構築したシステムにより、低温環境下での免震橋梁を対象としてハイブリッド実験を行い、低温による免震ゴム支承の特性の変化を取り込んだ地震応答解析を実現した。これにより、千島海溝沿いで近い将来に発生が懸念されている巨大地震が北海道の冬期に発生した場合の、免震橋梁の地震応答を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to reflect the change of the hysteresis characteristic of the high damping rubber bearings to the seismic response, a hybrid simulation system using experimental equipment capable of loading test at low temperature was developed. The hybrid simulation system was developed by using open source. To enhance the usability of the system, a 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.

研究分野：地震工学

キーワード：高減衰ゴム支承 温度依存性 ハイブリッド実験

1. 研究開始当初の背景

北海道太平洋側東部に位置する千島海溝沿いではマグニチュード 9 クラスの巨大海溝型地震の発生が想定されている。北海道の場合は、冬は最低気温が-30 になる地域があり、本州以南では考えられないような積雪寒冷地特有の状況への対応が必要である。

橋梁の地震対策として、免震ゴム支承を用いる橋梁が増えているが、このような免震ゴム支承について、これまでに低温環境下で載荷実験を行った結果、剛性が増加するなど、特性が変化することがわかっている。そのため、北海道の冬期に巨大地震が発生した場合の免震橋梁の被害を考えるうえで、この特性の変化を考慮したときの、橋梁全体の耐震性能を評価する必要がある。

免震ゴム支承の特性は載荷実験によって評価され、その結果を基に数値解析モデルが作成される。そして、地震応答解析によって橋梁全体の耐震性が評価されている。これは低温の場合も同様で載荷実験と地震応答解析で評価されている。この方法ではゴム支承のモデルは 1 つであるため、地震前の状態を取り込んでいる。しかし、ゴム支承は揺れによって温度が上昇し、その特性も刻々と変化するため、数値解析ではこの変化を含めることができていない。

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ハイブリッド実験が挙げられる。ハイブリッド実験は、数値解析に必要なモデル化が複雑な部分を載荷実験に置き換えて、時間刻みごとに数値解析によるゴム支承の命令変位を計算し、載荷実験による応答を得る。その応答を数値計算に入力計算する。ハイブリッド実験はこのように逐次応答解析を行う手法である。

2. 研究の目的

本研究では免震ゴム支承を有する橋梁の低温環境下での地震応答を想定して、数値解析に載荷実験を組み合わせたハイブリッド実験を行う。ゴム支承の載荷実験を低温環境下で行える設備は非常に限られている。ハイブリッド実験は海外で多く研究されている手法であるが、特に、力学的特性に温度依存性を有する免震ゴム支承で温度に着目して実験を行うことによって、これまで明らかにできなかった地震応答を解明できると考えている。

3. 研究の方法

ハイブリッド実験システムには、オープンソースの分散型サブストラクチャ仮動的実験用ソフトウェア UI-SIMCOR を用いている。UI-SIMCOR では統括プログラムを中心に、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 III 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。システム構成を図-1 に示す。

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に与えながら、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ーは荷重 ±200kN、変位 ±100mm の動的

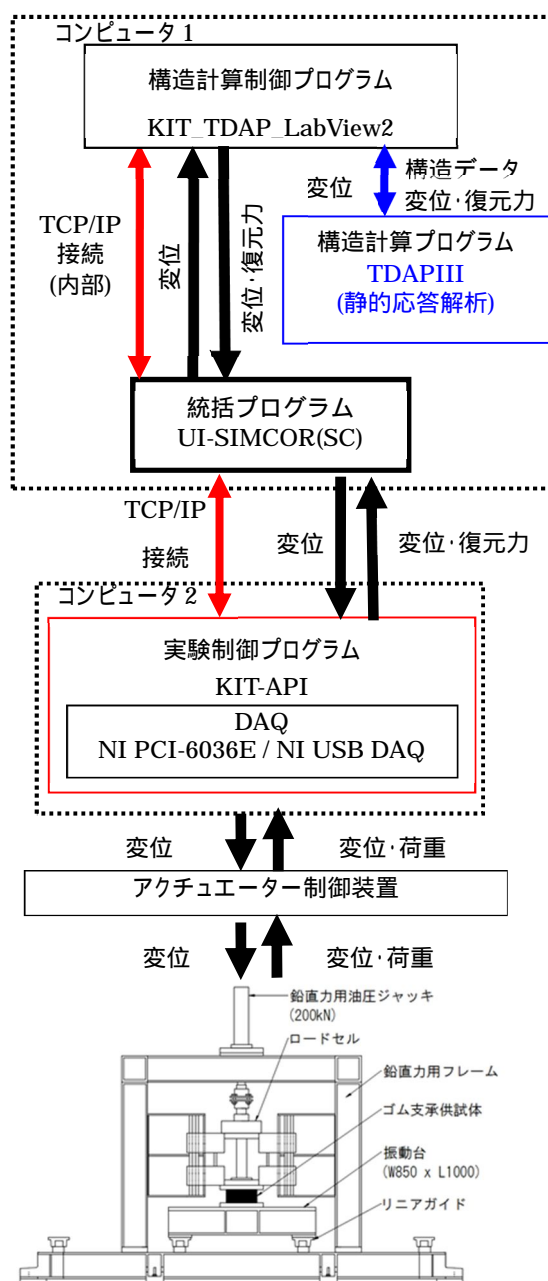


図-1 システム構成

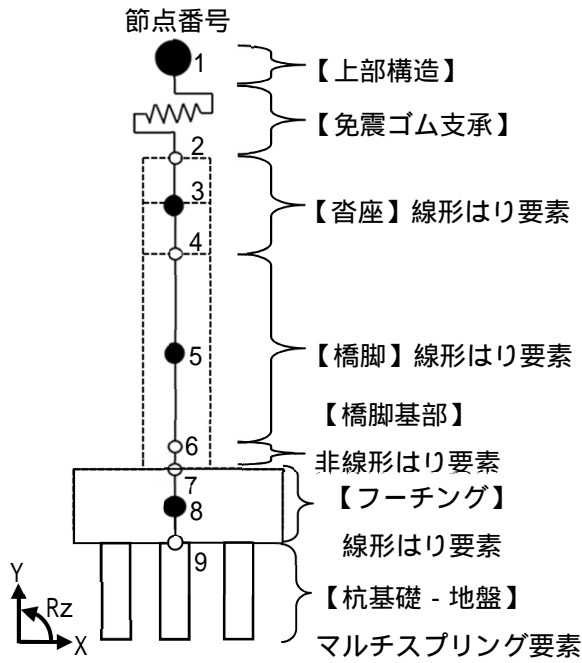


図-2 解析モデル

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。

本研究では、橋梁解析モデルを図-2 のように作成した。鉄筋コンクリート橋脚基部は塑性ヒンジ区間に武田モデルを適用し、橋脚の曲げ非線形挙動を表現した。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、TDAPIII による静的応答解析を行い、橋脚頂部より上部を実験モジュールとして、載荷装置による実験を行う。

4. 研究成果

+23 と-20 で実験を行った。実験結果のうち、支承の履歴曲線、橋脚基部の履歴曲線の代表的な結果を図-3, 4 に示す。

図-3 の支承の履歴曲線について、最大せん断ひずみを比較すると、+23 に対し-20 で 0.56 倍に減少した。低温によりゴム支承の剛性が大きくなったため、最大せん断ひずみが小さくなったと考えられる。

図-4 の橋脚基部の履歴曲線について、橋脚基部の最大塑性率を比較すると、+23 に対し-20 で 1.08 倍に増加した。これは、図-2 から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。

以上の結果、支承の最大せん断ひずみは、+23 に対し-20 で減少した一方、剛性は+23 に対し-20 で増加したことから、低温環境下で支承の剛性が大きくなり、せん断ひずみが減少したと考えられる。これまでに一定振幅による載荷実験で確認されていた、支承の温度依存性による力学的特性の変化が、仮動的実験においても示された。橋脚基部の応答塑性率は+23 に対し-20 では大きくなった。支承の温度依存性によって、低温下では橋脚基部の応答塑性率が大きくなることが示された。このことから、本研究の実験結果は対象橋梁に対する一例であるものの、低温環境下での橋梁の耐震設計に関して検討する必要性が示されたと考えている。

本研究の実験結果は対象橋梁に対する一例であり、橋梁の設計条件による影響は今後検討する必要がある。

また、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ハイブリッド実験が可能である。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ハイブリッド実験が可能である。

一方で、本実験システムはハイブリッド実験の中でも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ことから、実験システムのリアルタイム化は今後の課題である。

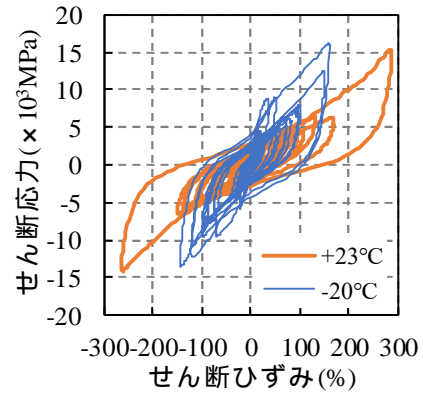


図-3 支承の履歴曲線

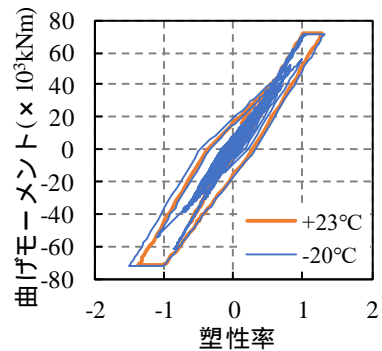


図-4 橋脚基部の履歴曲線

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 齊藤剛彦, 宮森保紀, 中村保之, 竹ノ内浩祐, 山崎信宏	4. 巻 78, 4
2. 論文標題 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	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) (登載決定)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 齊藤剛彦, 宮森保紀, 中村保之, 竹ノ内浩祐, 山崎信宏, 高岡陽	4. 巻 23
2. 論文標題 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	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 223-230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 T. Saito, A. Takaoka, Y. Miyamori, Y. Nakamura, K. Takenouchi, N. Yamazaki
2. 発表標題 DEVELOPMENT OF HYBRID SIMULATION SYSTEM FOR THE RUBBER BEARINGS UNDER THE LOW TEMPERATURE ENVIRONMENT
3. 学会等名 The 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高岡陽, 齊藤剛彦, 宮森保紀, 山崎智之
2. 発表標題 載荷装置の性能と仮動的実験に要する時間の検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤剛彦, 宮森保紀, 中村保之, 山崎信宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和2年度土木学会北海道支部論文報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡陽, 齊藤剛彦, 宮森保紀, 中村保之, 竹ノ内浩祐, 山崎信宏
2. 発表標題 高減衰ゴム支承を用いた橋梁のサブストラクチャハイブリッド実験システムの構築
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤 剛彦, 宮森 保紀, 中村 保之, 山崎 信宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和元年度第76回年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------