

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

宮森 保紀¹・湯村 美紀²・藤生 重雄³・樋口 匡輝⁴
山崎 智之⁵・三上 修一⁶・大島 俊之⁷

¹正会員 北見工業大学准教授 工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

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

²学生会員 北見工業大学大学院 工学研究科 土木開発工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

Email: mcv10018@std.kitami-it.ac.jp

³正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 技術開発部 (〒326-0327 足利市羽刈町 1000)

Email: fujiu@oiles.co.jp

⁴正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 技術開発部 (〒108-0075 東京都港区港南 1-6-34 品川イースト 6F)

Email: m.higuchi@oiles.co.jp

⁵正会員 北見工業大学助教 工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: yamazatm@mail.kitami-it.ac.jp

⁶正会員 北見工業大学教授 工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: mikamisi@mail.kitami-it.ac.jp

⁷フェロー 北見工業大学教授 工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Email: oshima@mail.kitami-it.ac.jp

本研究では、低温環境下にてサブストラクチャ仮動的実験を行うための実験システムを構築し、この実験システムの検証実験を制震ダンパーを用いて行った。サブストラクチャ仮動的実験システムとしては、オープンソースの仮動的試験ソフトウェア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仮動的実験を可能にした。さらに、構造解析部では汎用構造解析ソフトの導入によりモデル化を容易にした。実験結果からはダンパーの非線形な応答を含め、解析モデル全体の応答が得られた。これらのことから本検討で対象とした仮動的実験システムは、低温下での汎用的な仮動的実験システムとして有効であると考えられる。

Key Words: substructured pseudo-dynamic simulation, FEM software, low temperature environment

1. はじめに

構造物の地震時挙動を把握するための手法としては、一般的に振動台実験や数値解析が用いられている。橋梁などの大型構造物では、振動台実験では規模の制約や縮小模型使用時の相似比の問題などがある。数値解析については、兵庫県南部地震以降、急速に研究開発が進展し、実務で利用可能な汎用プログラムも多数供給されている。数値解析における非線形性の取り扱いなども研究が進んでいるが、温度依存性がある場合などのより複雑な条件では十分な対応が進んでおらず、新材料を用いたデバイスなどを含む場合はモデル化に十分な検討が必要となる。

このような場合に、静的載荷実験を逐次行い数値計算と組み合わせる手法は仮動的実験などと称され、これまでに多くの研究が進められている¹⁾。さらに、構造物を複数の構造要素に分割した上で、地震時挙動が複雑な

一部の部材には構造実験を行い、それ以外の部分を数値モデル化して構造物全体の運動方程式を解くサブストラクチャ仮動的実験も行われている²⁾。しかしながら、これらの実験手法は、これまでに相当の研究の蓄積があるにも関わらず、数値解析や振動台実験ほどには構造物の地震時挙動を把握する手法として一般的にはなっていない。その理由の一つとして、汎用的なシステムあるいはソフトウェアの存在が無いことが挙げられるが、最近では米国の NEES プロジェクトで協調分散型のサブストラクチャ仮動的実験システムが開発され、公開されるなどしている³⁾。

橋梁の耐震性能を向上させる手法としては、震度法から地震時保有水平耐力法が導入されたことによって、橋脚など損傷の発見と修復が容易な部材にエネルギー吸収を行わせるようになった⁴⁾。さらに最近では、免震・制震設計により、デバイスにエネルギー吸収を行わせ主要構造部材に生じる塑性変形を小さくしようとする考え方

が広まりつつある⁵⁾。一方、免震・制震設計で使われるゴム支承や制震ダンパーなどは一般には温度依存性を有することが多い。北海道や東北などの我が国北部および千島列島やアラスカなどの北太平洋沿岸部においては、たびたび大規模な地震が発生しており、寒冷地域で免震・制震設計を採用した構造物の地震時挙動をより正確に把握することの必要性は高い。

そこで本研究では、既存の低温構造実験装置を利用し、サブストラクチャ仮動的実験を低温環境下で行える実験システムを開発した。サブストラクチャ仮動的実験を統括するシステムとしては、NEESプロジェクトで開発されたUI-SIMCOR⁶⁾を利用し、UI-SIMCORの制御下で載荷実験が行えるようなプログラムを開発した。UI-SIMCORは数値計算部において、ABAQUS, OpenSees, Fedea Lab, ZEUS-NLなどとの連携が提供されているが、わが国で多く用いられている地震応答解析用の汎用プログラムにはあまり対応していない。このため、汎用構造解析プログラムTDAP III⁷⁾を仮動的試験システムとも連携して用いることができるような制御プログラムを作成した。

以上のようなサブストラクチャ仮動的実験システムに対して、制震ダンパーを有する単純桁の多自由度モデルを対象に、制震ダンパーには低温室内での載荷実験、桁部には数値解析を適用し仮動的実験を行ったので、その結果を報告する。

2. サブストラクチャ仮動的実験システム

(1) 実験システム

a) 概要

本研究では、米国 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-SIMCOR⁶⁾を利用した。UI-SIMCOR では統括プログラム (Simulation Coordinator: SC)を中心に、構造モデルを構造実験を実施する部分と数値モデル化する部分とに分割させて応答計算を行う。UI-SIMCOR と通信可能な制御プログラムを媒介とすることで、載荷装置や構造計算プログラムをこのシステムに組み込むことができる。

本研究では、載荷装置には既存の低温域材料・構造実験システムを、構造計算プログラムとしては汎用構造解析ソフト TDAP III を利用することとし、媒介となる制御プログラムを作製した。

b) 計算システム

図-1 にシステム構成図を示す。本システムはオブジェクト指向プログラミングが採用され、Simulation Coordinator(SC) と呼ばれる統括プログラムを中心に多数のプログラム群から構成される。SC や構成プログラムの多くは MATLAB で作成され、オープンソースとなっている。SC を起動させると、インターフェイス画面が起動し、設定ファイルが読み込まれる。設定ファイルには以下のような情報が記述される。

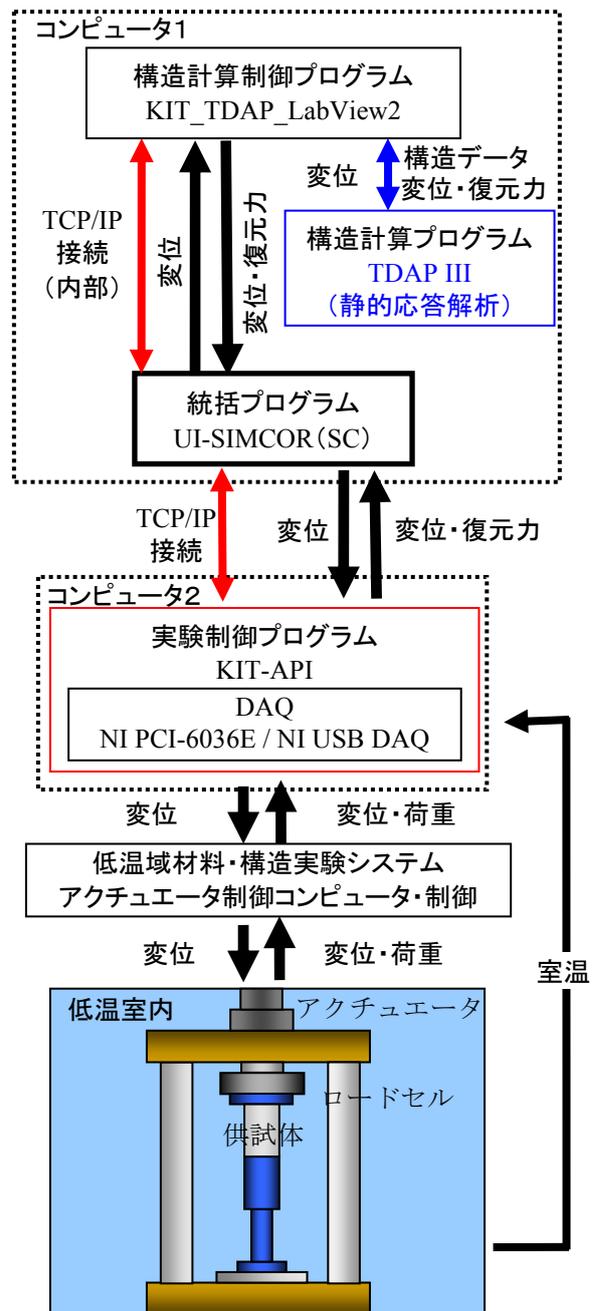


図-1 システム構成

- 地震応答解析における入力地震動や計算パラメータ、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ーリー減衰マトリックス作成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
- 設定ファイルを読み込み、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. 初期剛性マトリックスの作成
3. α -OS 法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。変位や断面力の情報を交換する通信プロトコルは複数の方法に対応可能であるが、本研究では Labview2 プロトコルと呼ぶ方法を利用する。SC に対して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ので、これらも同時に起動する。

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、構造計算プログラム TDAP III の入力データファイルを書き換えて、TDAP III の静的応答解析機能を実行する。その後、TDAP III の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、SC から受信する命令変位に応じて、アクチュエータの変位を変更し、変位と荷重を測定する。アクチュエータの操作やデータ取得は制御装置の外部端子を利用することとし、MATLAB の Data Acquisition Toolbox を用いた。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。本研究で対象としたダンパーなどを用いる場合は、アクチュエータが動作して変位を保持する間に、荷重が低下する。このため待機時間はアクチュエータが命令変位に達するまでの必要最低限の時間である必要がある。最適な待機時間は予備実験によって決定することとし、命令変位と測定変位の差を解析時間全体で極小になるように調整した⁸⁾。なお、実験中のアクチュエータへの命令変位と実際の測定変位は、UI-SIMCOR に含まれるシミュレーションモニターでリアルタイムに確認するとともに、命令変位が設定した最大変位を超過する場合は処理を停止させる。また、熱電対を用いて室温などの温度も測定する。

初期剛性マトリックスの作成と α -OS 法による仮動的実験の実行については計算手法を次節で説明するが、初期剛性マトリックス K^I は各モジュールのそれぞれの自由度に、設定ファイルで定義した変位量を順に作用させることで求める。SC とモジュール間における具体的なデータの流については参考文献 3) に詳しい。

c) ハードウェア

本システムは役割の異なる複数のコンピュータとそれに接続された各種の機器から構成される。コンピュータ1では SC と数値モデルに対する構造計算プログラムが動作する。本研究では、IBM ThinkPad R60 (CPU: Intel Core2Duo T5500 1.66GHz)を用いている。

コンピュータ 2 は実験供試体に対する载荷試験を担当する。アクチュエータ制御装置とのデータ送受信は制御装置の外部端子に対してアナログ電圧を入出力することで行っており、A/D 変換ボードとして National Instruments 社(NI)の PCI-6036E(分解能 16bit)を使用した。温度測定には NI の USB6008(分解能 12bit)を用いた。コンピュータは IBM ThinkCentre A50 (CPU: Intel Celeron 2.40GHz)である。

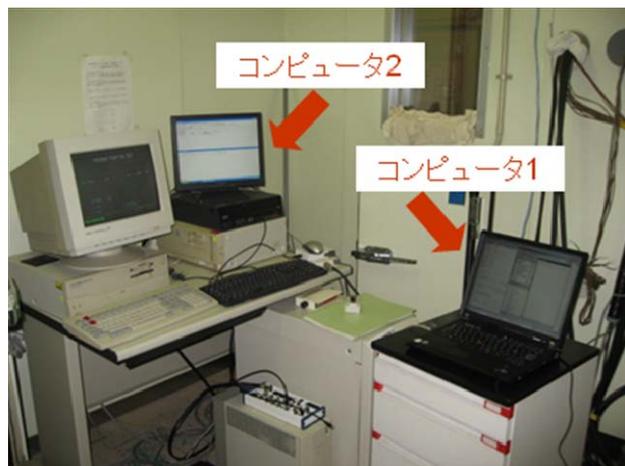


写真-1 コンピュータ配置



写真-2 低温域材料・構造実験システム



写真-3 アクチュエータ制御装置

コンピュータ間は TCP/IP 通信ができればよく, SC および構造計算プログラムが動作するコンピュータを, 実験供試体を操作するコンピュータに対して遠隔配置することが可能である^{3),9)}. 本研究では通信時間を短くするため, **写真-1** のように 2 台のコンピュータを同一の計測室内に設置しており, ネットワーク的にも近くなっている.

本研究で用いた島津製作所製油圧アクチュエータは低温室内に**写真-2** のように設置しており, 最大 300kN の静的载荷能力を有する. 動的载荷については 200kN まで対応可能であるが, 载荷可能振動数は 1Hz 程度である. また, 低温室は+30°Cから-30°Cまで温度設定可能である. **写真-3** はアクチュエータ制御装置(島津サーボパルサ 4880 型)である. この制御装置は通常, 内部のマイクロコンピュータと GPIB 接続された PC によってアクチュエータの制御や測定データの処理を行い, 制御装置内部に 12bit の A/D 変換器を有する. 一方, 外部端子を介してアナログ電圧の入出力にも対応している. すなわち, ロードセルと変位計からの出力電圧をトランスデューサ・アンプで増幅して直接取り出すことと, 変位制御のためのアナログ電圧を入力することが可能である. 本研究ではこの外部端子と A/D 変換ボードを介して上述のコンピュータ 2 を接続した. なお, トランスデューサ・アンプの計測精度は, 荷重に対しては測定値の±1%またはレンジフルスケール(300kN)の±0.2%以内で, 変位に対してはレンジフルスケール(100mm)の±1.0%以内である.

(2) 計算手法

本研究で使用した α -OS 法について概要を説明する. α -OS 法とは, 履歴に依存する非線形な剛性(K_n, K_{n+1})を履歴に独立な線形部分の剛性(K^l)と履歴に依存する非線形部分の剛性(K_n^E, K_{n+1}^E)に分離し線形部分には α 法を, 非線形部分には予測子-修正子法を用いて積分するものである¹⁰⁾⁻¹²⁾.

運動方程式は次のように示される.

$$Ma(t) + Cv(t) + r(t) = f(t) \quad (1)$$

M と C は質量, 減衰マトリックス, $r(t)$ は復元力ベクトル, $f(t)$ は外力ベクトルである. このシステムでは, n ステップの応答から $n+1$ ステップでの既知の応答を求め, さらに, 未知の値は仮定してそれぞれ変位, 速度, 加速度を求められる. 仮動的試験は α -OS 法を用いて既知の応答, もしくは仮定した応答が実験供試体に入力され, 実験で測定された復元力が未知の応答を求めるのに利用される. 具体的な手順は以下に示す. なお, 本研究で K^l は仮動的試験に先立って各自由度に静的に荷重を載荷することで求めた. 初期剛性マトリックス K^l は手順 1 で等価質量マトリックスを構成し, 手順 6 で復元力を修正するために使われている.

1. 時間刻み Δt を設定し, 式(2)で等価な質量マトリックスを求める

$$\hat{M} = M + \gamma \Delta t(1 + \alpha)C + \beta \Delta t^2(1 + \alpha)K^l \quad (2)$$

α は数値減衰を制御するパラメータで β と γ は次のように設定される

$$\beta = \frac{(1 - \alpha)^2}{4}, \quad \gamma = \frac{1 - 2\alpha}{2}$$

2. $n=0$ において以下の初期値を設定する

$$\tilde{d}_0, \quad d_0 = \tilde{d}_0, \quad v_0, \quad a_0, \quad \tilde{r}_0, \quad f_0$$

ここで, \tilde{d} は予測子変位, \tilde{r} これに対応する復元力である

3. 外力 f_{n+1} を入力する
4. 予測子変位 \tilde{d}_{n+1} と予測子速度 \tilde{v}_{n+1} を式(3), (4)により算出する

$$\tilde{d}_{n+1} = d_n + \Delta t v_n + \frac{\Delta t^2}{2}(1 - 2\beta)a_n \quad (3)$$

$$\tilde{v}_{n+1} = v_n + \Delta t(1 - \gamma)a_n \quad (4)$$

5. 実験供試体および数値解析モデルへ予測子変位を入力し, 復元力 \tilde{r}_{n+1}^m と変位 \tilde{d}_{n+1}^m を得る
6. 式(5)により修正子復元力 \tilde{r}_{n+1} を算出する

線形部分の復元力は線形部分の剛性マトリックス K^l と測定変位, 予測子変位より求められるが, ここでは特に非線形部分の復元力を求めている

$$\tilde{r}_{n+1} = \tilde{r}_{n+1}^m - K^l(\tilde{d}_{n+1}^m - \tilde{d}_{n+1}) \quad (5)$$

7. 等価外力ベクトルを式により算出する

$$\hat{f}_{n+1} = (1 + \alpha)f_{n+1} - \alpha f_n + \alpha \tilde{r}_n - (1 + \alpha)\tilde{r}_{n+1} + \alpha C \tilde{v}_n - (1 + \alpha)C \tilde{v}_{n+1} + \alpha(\gamma \Delta t C + \beta \Delta t^2 K^l)a_n \quad (6)$$

8. 式(7)から加速度 a_{n+1} を求める

$$\hat{M}a_{n+1} = \hat{f}_{n+1} \quad (7)$$

9. 変位, 速度を式(8), (9)から算出する

$$d_{n+1} = \tilde{d}_{n+1} + \Delta t^2 \beta a_{n+1} \quad (8)$$

$$v_{n+1} = \tilde{v}_{n+1} + \Delta t \gamma a_{n+1} \quad (9)$$

10. 次に $n=n+1$, として手順 3 に戻る

ここに示した手順と 2(1)節で説明した計算システムの対応を示すと, 手順 1~4 は SC, 手順 5 はアクチュエータと TDAP III, 手順 6~9 は再び SC で行うものとなる.

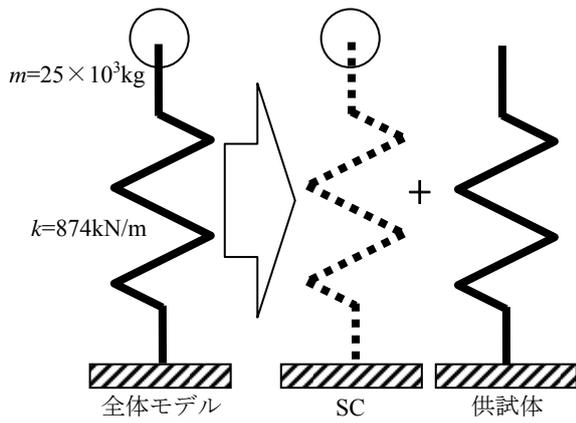
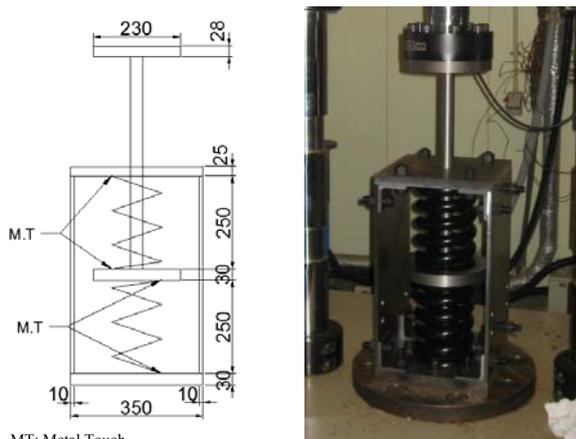


図-2 1自由度線形バネモデル



MT: Metal Touch

図-3 線形バネ供試体 写真-4 バネ設置状況

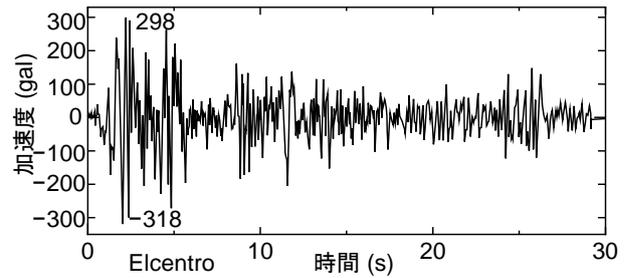


図-4 入力地震波

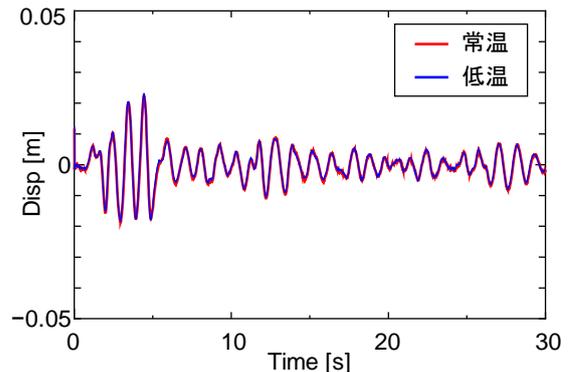


図-5 バネの時刻歴応答変位

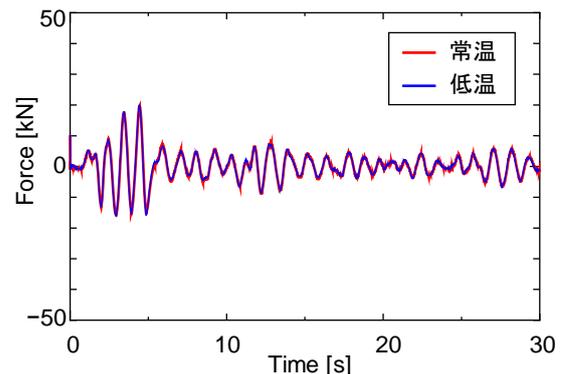


図-6 バネの時刻歴応答荷重

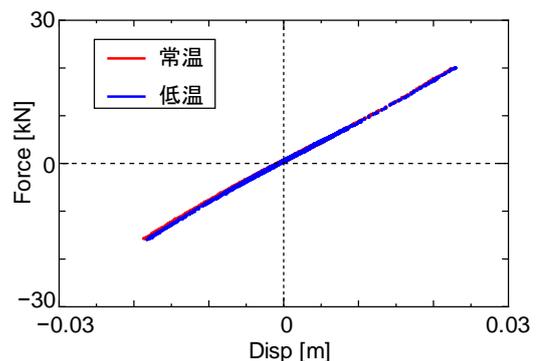


図-7 バネの変位-荷重関係

3. 線形バネを用いた仮動的実験

(1) 1自由度線形バネモデル

本研究では、システムの成立性検証のためまず、線形バネモデルを製作し実験を行った⁸⁾。このモデルは図-2のように線形バネの上端に質点を1つ設けたもので、線形バネは実験供試体とし、質量部分は節点質量 $25 \times 10^3 \text{kg}$ を SC に入力した。供試体は図-3のように、同じバネ定数を有する圧縮バネ2本を用い、載荷装置からの伸びるロッド下端の円盤をバネで挟みフレームで固定している。バネは両端を接触させるのみで接合せず、圧縮と引張の両方で同じ復元力特性を有する。バネ1本の諸元は、材料：バネ鋼鋼材 SUP10、線径： $\phi = 32 \text{mm}$ 、中心径 132mm、自由長 250mm、バネ定数：874 kN/m である。フレームは SS400 材を用いており奥行きは 300mm である。設置状況は写真-4 に示す。

(2) バネモデルの仮動的実験

仮動的実験における数値解析は 2(2)節で説明した α -OS 法を用いる。線形モデルであることから減衰パラメータ $\alpha = 0.00$ とし、 $\beta = 0.25$ 、 $\gamma = 0.50$ とする。積分時間間隔は 0.01 秒で 30 秒間解析を行う。入力地震波は図-4 に示す最大加速度 318gal の Elcentro 波を鉛直方向に入

力する。式(2)における初期剛性マトリックス \mathbf{K}^I を求めるため仮動的実験に先だてて静的変位を与えるが、この実験では $d^I = 0.01 \text{m}$ とした。また、2(1)節で説明した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、各ステップで 0.1s とした。

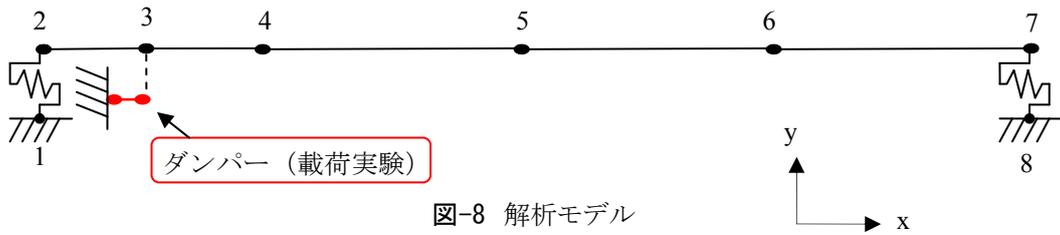


図-8 解析モデル

実験は低温時と常温時でそれぞれ行う。低温時の低温室内の温度は -28°C 、常温時は 18°C であり、日本工業規格(JIS Z 8703)で定める常温の範囲内(15級)である。

(3) バネモデルの実験結果

図-5 はバネ上端の時刻歴応答変位、図-6 は時刻歴荷重を低温時と常温時でそれぞれ比較したものである。温度依存性のない供試体であるため常温時と低温時の応答が一致している。図-7 は変位-荷重関係だがほぼ線形の関係となっている。これより本実験システム自体は温度による载荷性能の変化などは無く、同一条件の実験を繰り返した場合でも結果に差異がなくシステムの信頼性があると考えられる。

表-1 節点座標 [m]

節点番号	x	y
1	0.0	0.0
2	0.0	1.0
3	5.0	1.0
4	10.0	1.0
5	20.0	1.0
6	30.0	1.0
7	40.0	1.0
8	40.0	0.0

4. ダンパーを有する単純桁の仮動的実験

(1) 単純桁モデル

図-8 には本研究で用いた単純桁の解析モデルを示す。このモデルはバネ支承とダンパーを有する支間40mの単純桁である。ダンパーは実験供試体で、それ以外は数値モデルである。解析モデルは橋軸方向をx、鉛直方向をyとする2次元モデルである。図-8の番号は節点番号を表しており、表-1には節点座標を示す。

節点3に実験供試体であるダンパーを接続する。ダンパーは写真-5、図-9のオイルス工業製の橋梁ビンガムストッパー(BM-S)を使用した。载荷装置の能力を考慮して諸元を決定し、質量50kg、最大ストローク $\pm 100\text{mm}$ 、抵抗力 150kN (0.5m/sec 時)とした。このダンパーはシリンダー内に特殊充填材を封入したもので摩擦履歴型の応答を示す。既往の研究¹³⁾で得られた温度による摩擦履歴特性の変化を図-10に示す。低温時と常温時の履歴特性はほぼ同等である。

ダンパー以外のバネ支承や桁は数値解析モデルとしている。数値解析モデルについては、汎用解析ソフトTDAP IIIを用いてモデル化しており、部材の諸元を表-2のように設定した。節点2~7間は桁、節点1-2間、7-8間は支承バネである。桁は鋼部材であり、弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}$ 、ポアソン比は0.30の線形部材とする。固定条件は節点1, 8を完全固定としている。節点質量については、表-3の値をSCに入力した。なお、本研究のモデルは、ダンパーを有する単純桁橋梁を想定しているが、モデルの断面諸元はダンパー供試体の減衰力に対応する値としている。

本研究では橋軸方向の応答に着目するが、固有振



写真-5 ダンパー設置状況

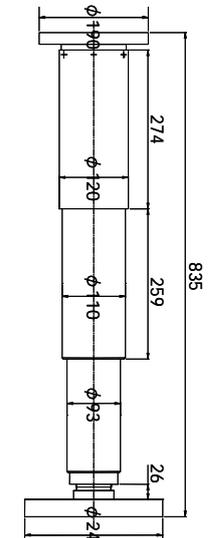


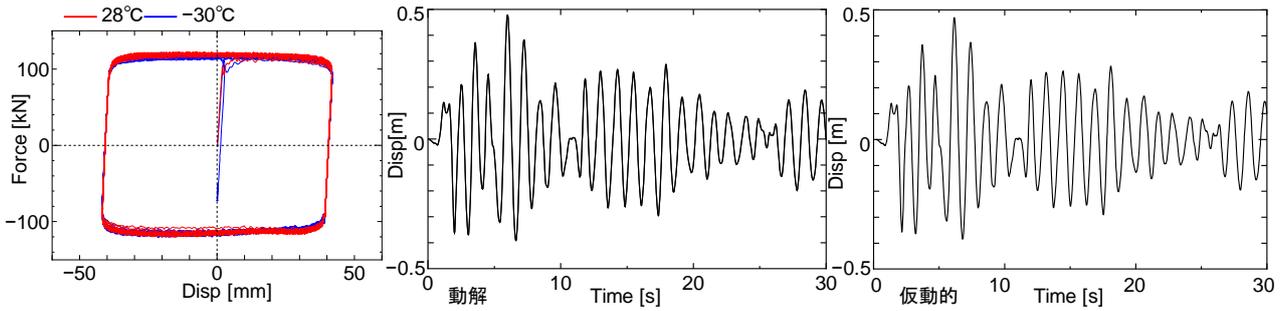
図-9 ダンパー供試体

表-2 部材の諸元

部材	断面積: $A [\text{m}^2]$	断面2次モーメント: $I [\text{m}^4]$
桁	0.12	0.19×10^{-3}
バネ支承	バネ定数(橋軸方向): $1.64 \times 10^3 \text{ kN/m}$	

表-3 節点質量 [kg]

節点番号	質量
2	15.70×10^3
3	15.70×10^3
4~7	23.55×10^3



0.1Hz 正弦载荷, 文献 13)から抜粋
 図-10 ダンパーの履歴曲線

図-11 動的応答解析との比較
 (節点3時刻歴応答変位)

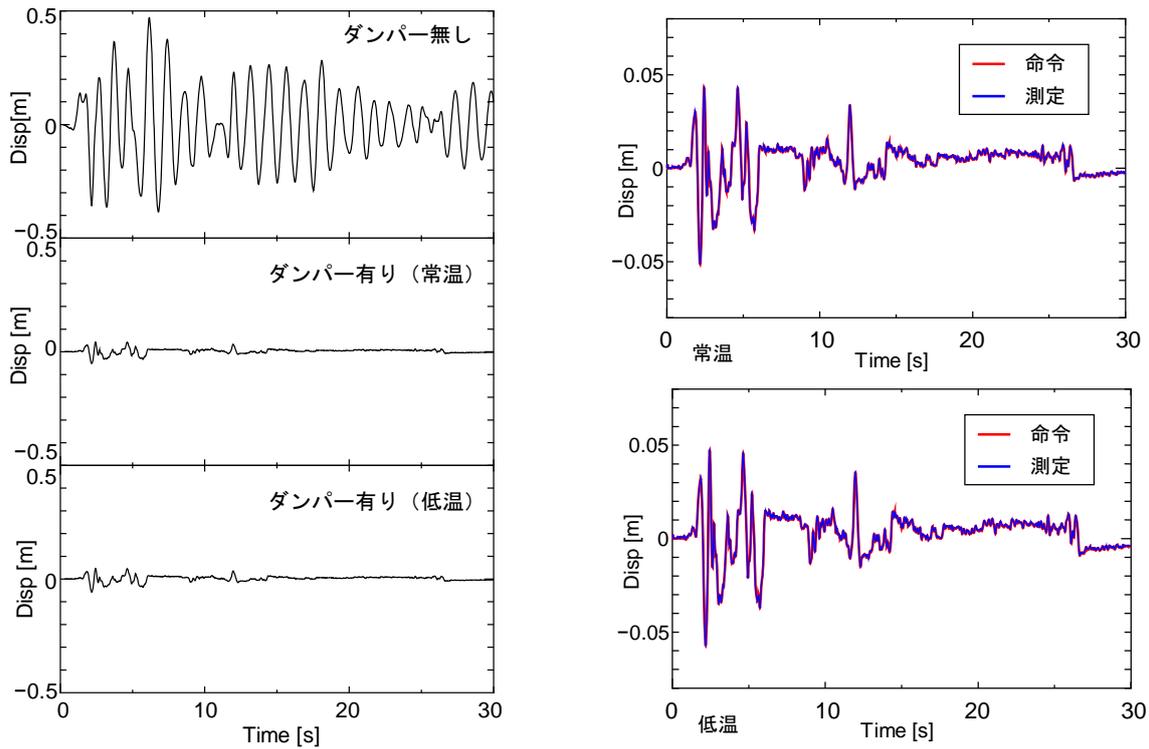


図-12 時刻歴応答変位 (節点3)

動解析においては 0.81Hz に橋軸方向の有効質量比が最も大きいモードがある。減衰マトリックスは、レーリー減衰としてこの卓越モードに対して減衰定数 0.05 とする。

(2) 仮動的実験

仮動的実験における数値解析は 2(2)節で説明した α -OS 法を用いる。応答の安定性を考慮して減衰パラメータ $\alpha = -0.25$ とし, $\beta = 0.39, \gamma = 0.75$ となる。積分時間間隔は 0.01 秒で 30 秒間解析を行う。地震波は図-4 に示す最大加速度 318gal の Elcentro 波を橋軸方向に入力する。

式(2)の K' を求めるための静的変位はダンパーが 2 次剛性に変化する変位 0.0025m を考慮して $d' = 0.002m$ とした。また, 2(1)節の待機時間は各ステップで 0.5s とした。

実験は低温時と常温時でそれぞれ行う。低温時の低温室内の温度は -28°C, 常温時は 18°C であった。さらにダンパーによる応答低減効果を確認したり通常の動的

応答解析結果との比較を行うために, ダンパーを接続しない場合についても計算を実施した。この場合はダンパー供試体に载荷は行わず, 構造計算プログラムだけを用いる。

(3) 実験結果と考察

まず, UI-SIMCOR と本研究で開発した構造計算制御プログラムの組み合わせが適切に動的応答を計算していることを確認する。すなわち図-8 からダンパーを除いたモデルについて, 仮動的試験の構造計算プログラム (TDAP III の静的解析機能) のみで計算した結果と TDAP III の動的応答解析機能を用いた結果との比較を行う。動的応答解析は Newmark β 法を用いており係数 $\beta = 0.25$ とした。計算時間や入力地震波などの条件は前節と同じである。図-11 は節点 3 の時刻歴応答変位で, 左図は TDAP III の動的応答解析結果, 右図は本システムの結果である。計算結果は一致しており構

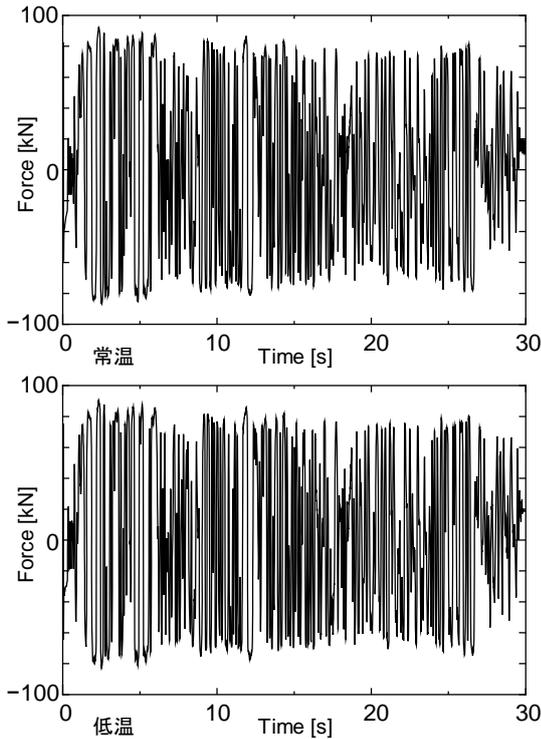


図-13 ダンパーの時刻歴荷重

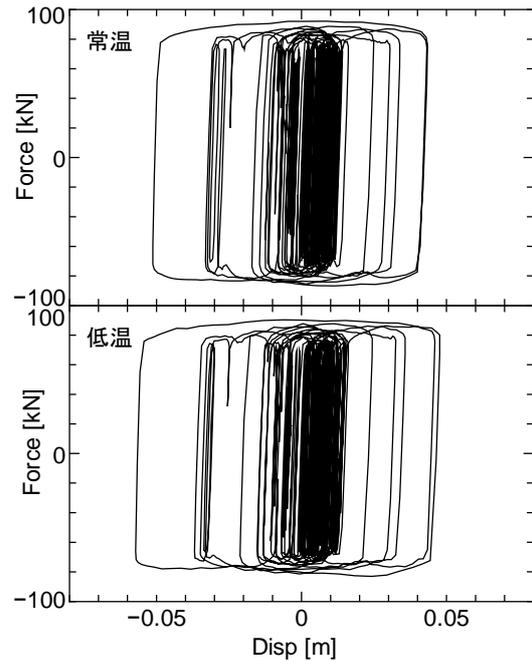


図-14 ダンパーの変位-荷重関係

造計算制御プログラムは適切に動作していると判断できる。

次に仮動的実験におけるダンパーの有無による比較と、ダンパー有りの時における常温と低温の比較を行う。図-12の左図はダンパー無し、ダンパー有りで常温と低温の場合の、ダンパーを接続した節点3の時刻歴応答変位である。また、右図はダンパー有りの場合の常温と低温について、左図の縦軸を拡大して表示した。右図中の赤線はSCからの命令変位で、青線はアクチュエータの測定変位である。図-13はダンパーの時刻歴荷重を常温と低温で比較したものであり、図-14はダンパーの変位-荷重関係である。

まず、応答変位は図-12の入力地震波の増減と連動しながら振動している状況が確認できる。ダンパー有りの場合はダンパーによるエネルギー吸収効果が発揮され最大応答変位が約80%低減した。ダンパー無しに対して常温時も低温時もいずれも高いエネルギー吸収効果が確認できる。縦軸を拡大した右図においては、まず測定変位は命令変位と一致しており、本システムの変位制御は適切に行われている。常温と低温の比較では、低温時のピーク値が最大で0.01mほど常温時より大きくなっている。この差異の原因は、ダンパーの温度による若干の減衰力の差や、载荷時のアクチュエータの微妙な挙動の違い、変位や荷重の測定誤差が α -OS法の計算にフィードバックされ影響を与えたものと推測されるが、その影響を個別に評価することは困難であり、またダンパー無しとの比較を考慮すると実用上は十分な精度で解析が行われたものと考えられる。

図-13のダンパーの時刻歴荷重および図-14の荷重-変位関係は、図-10のようなダンパーの摩擦履歴型の

特性を反映しており、仮動的実験においてもダンパーの動的挙動を表現できている。図-14では、ダンパーが変形し荷重が一定値となっている個所で、一時的に荷重が低下している。仮動的実験では静的载荷を間欠的に繰り返しながら、SCおよび構造解析プログラムにおける計算やコンピュータ間の通信を行っているが、アクチュエータが停止している間にダンパーの荷重が低下する。本研究では、予備実験によって動作間隔(待機時間)を調整し、このような荷重の一時的な低下を軽減したが、今後は動作間隔を動的に調整したり、処理速度そのものを高速化するような改良を検討する必要がある。

以上より、本研究で開発した仮動的実験システムにより、汎用構造解析ソフトを利用しながら、低温下での構造物の動的挙動を把握することができることを確認した。

5. おわりに

本研究では、低温環境下にてサブストラクチャ仮動的実験を行うための実験システムを構築し、この実験システムの検証実験を制震ダンパーを用いて行った。

サブストラクチャ仮動的実験システムとしては、オープンソースの仮動的試験ソフトウェア UI-SIMCOR を利用し、低温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仮動的実験を可能にした。さらに、構造解析部では汎用構造解析ソフトの導入によりモデル化を容易にした。

構築したサブストラクチャ仮動的実験システムにおいて、線形パネモデルでシステムの成立性を確認したうえで、制震ダンパーを有する桁モデルの地震時応答を計

算した。ダンパーを有さない場合の計算では、汎用構造解析ソフトを用いた時刻歴応答解析結果と応答が良く一致した。ダンパーを実験供試体に用いた実験では、ダンパーの減衰力により桁の応答変位は大幅に減少し、ダンパーの変位-荷重曲線はダンパーの有する摩擦履歴型の特性を確認できた。また、常温時と低温時の比較では両者の応答にほとんど変化がないことを確認した。一方、本研究のようなダンパーを対象とした場合により精度よく応答を求めるためには、载荷速度の制御などを導入する必要があり、今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金 若手研究(B) (課題番号 18760341)により実施しました。また、システム開発に際してはイリノイ大学アーバナシャンペイン校の B.F Spencer Jr. 教授、ジョンズ・ホプキンス大学の中田成智助教授から貴重な助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, 356/I-3号, pp.1-10, 1985.
- 2) 中島正愛, 石田雅利, 安藤和博:サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法 サブストラクチャ法を用いた仮動的実験の開発, 日本建築学会構造系論文報告集 第417号, pp. 107-117, 1990.
- 3) Kwon, O. S., Nakata, N., Park, K. S., Elnashai, A. and Spencer, B.: User Manual and Examples for UI-SIMCOR v2.6 NEES-SAM v2.0, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- 4) 大塚久哲:実践耐震工学, 共立出版, 2004.
- 5) 土木研究センター:道路橋の免震・制震設計法マニュアル案, 2011.
- 6) Kwon, O. S., Elnashai, A. S., and Spencer, B. F.: UI-SimCor, <http://nees.org/resources/3363>, 2011.
- 7) JIP テクノサイエンス: TDAPIII, <http://www.jip-ts.co.jp/tdap/index.html>, 2011.
- 8) 宮森保紀, 湯村美紀, 園部司明, 山崎智之, 三上修一, 大島俊之:低温環境下における線形バネ供試体を用いたサブストラクチャ仮動的実験, 土木学会北海道支部平成22年度論文報告集 第67号, A-29, 2011.
- 9) 宮森保紀, 坪田豊, 岩上隆志, 青山圭介, 平沢秀之:遠隔サブストラクチャ仮動的実験の通信処理速度に関する一考察, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.313-316, 2008.
- 10) 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.
- 11) Kwon, O. S., Nakata, N., Elnashai, A. and Spencer, B.: Technical note; A framework for multi-site distributed simulation and application to complex structural systems, *Journal of Earthquake Engineering*, Vo.9, No.5, pp.741-753, 2005.
- 12) Combescure, D. and Pegon, P.: α -Operator Splitting time integration technique for pseudodynamic testing error propagation analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.16, pp427-443, 1997.
- 13) 宮森保紀, 宮崎充, 藤生重雄, 山崎智之, 挟間藍, 大島俊之:橋梁耐震補強用ストッパーの寒冷地における特性の検討, 土木学会地震工学論文集, 29巻, pp. 1244-1249, 2007.

(2011. 12. 16 受付、2012. 3. 9 修正、2012. 3. 14 受理)

DEVELOPMENT OF PSEUDO-DYNAMIC SIMULATION SYSTEM WITH A GENERAL FEM SOFTWARE AT LOW-TEMPERATURE ENVIRONMENT

Yasunori MIYAMORI, Miki YUMURA, Shigeo FUJII, Masaki HIGUCHI, Tomoyuki YAMAZAKI, Shuichi MIKAMI and Toshiyuki OSHIMA

In this study, A substructured pseudo-dynamic simulation system for low-temperature environment is developed. The developed system utilizes an open-source pseudo-dynamic system UI-SIMCOR and a sub-program which can cooperate with existent loading facility in a cold room is developed. To enhance usability of the system, another sub-program is also developed for application of general FEM software.

A simulation for a simple girder model with seismic damper is performed. Dynamic response of the damper is obtained as a part of whole structure and friction type displacement-force hysteresis curve is properly obtained. The maximum displacement is reduced 80% by energy dissipation of the damper. The result of the simulation is not affected by low temperature because the damper is stable to lowtemperature as shown in previous studies.

Hence, the system is able to work properly as a substructured pseudo-dynamic simulation facility at a low-temperature environment. For farther development, velocity control of loading equipment will improve accuracy of simulation results.