

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・大島 俊之⁵

¹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 6 階)

Email: m.higuchi@oiles.co.jp

⁵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実験ソフトウェア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性があると考えられる。

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

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、温度依存性の考慮が必要な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⁾。

北海道や東北などの北日本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いる。一方、最近ではゴム支承や制震ダンパーなど、一般には温度依存性を有することが多い装置を構造物に取り付ける事例が増えている。このような状況を考慮すると、寒冷地域での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-SIMCOR^{4, 5)}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⁶⁾。UI-SIMCORは数値計算部において、いくつかの構造解析ソフトウェアと連携するためのプログラム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。そこで、本研究では、汎用構造解析プログラムTDAP III⁷⁾を仮動的実験システムと連携して用いることができるようなプログラムも作成した。こ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

2.1 実験システム

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-SIMCOR^{4, 5)}を利用した。UI-SIMCOR では構造物は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れ、構造実験部分は UI-SIMCOR と通信可能な実験制御プログラムにて任意のシステムを構築できる。数値解析部分については UI-SIMCOR では、ABAQUS, OpenSees, Fedea Lab, ZEUS-NL などとの連携が提供されているが、これらのソフトウェアは我が国の地震時応答解析の実務ではあまり一般的とは考えられない。そこで、本研究のモデル化と構造計算は汎用構造解析ソフト TDAP III⁷⁾を用いて行った。

UI-SIMCOR の中核となるシミュレーションコーディネータ(SC)が解析全体の制御と質点の質量データにもとづく慣性力の計算を行なう。構造解析プログラムおよび構造実験部は各要素の復元力と変位を計算する。図-1にシステム構成図を示す。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。本研究では前述のように構造解析プログラムとして TDAP IIIの静的解析機能を用いた。各計算ステップで SC から受け取った入力変位データに基づき入力データファイルを生成し、数値解析を行ったあと、出力データファイルを読み込み応答変位と各自由度に作用する復元力を SC に送信する。

コンピュータ 2 は実験供試体に対する仮動的載荷実験を担当する。SC から受け取った目標変位を DAQ (Data Acquisition) カードを通して、アクチュエータ制御装置の外部入力に送信する。反対に、油圧アクチュエータの変位と荷重および室温などの温度を、外部接続端子と DAQ カードを通して取得する。取得した測定変位と荷重を SC に送信する。

本研究で用いた油圧アクチュエータは低温室内に設置しており、最大 400kN の静的載荷能力を有する。動

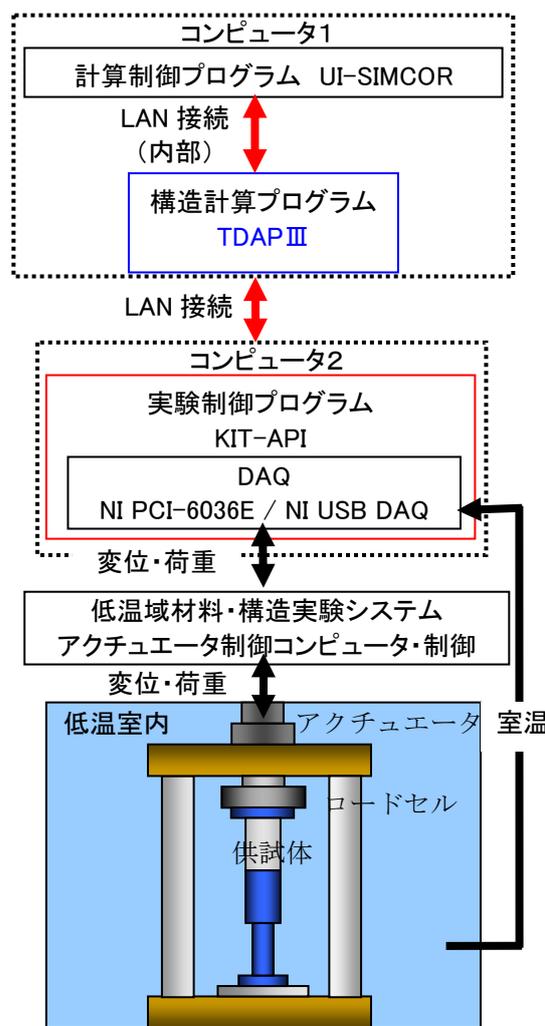


図-1 システム構成

的載荷については 200kN まで対応可能であるが、載荷可能振動数は 1Hz 程度である。また、低温室は+30℃から-30℃まで温度設定可能である。

2.2 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⁸⁻¹⁰⁾。

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。仮動的実験は 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に利用され、実験での復元力の測定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。

また、本研究で K^l は仮動的実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 \mathbf{K}^l は手順 6 で復元力を修正するために使われ、手順 1 で等価質量マトリックスを構成している。この等価質量マトリックスは手順 8 にて次ステップの加速度の算出に使われる。

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 γ と β 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} は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 を測定する

6. 式 (5) により復元力 \tilde{r}_{n+1} を算出する

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

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

3. ダンパーを有する単純桁の仮動的実験

3.1 単純桁モデル

図-2 には本研究で用いた単純桁の解析モデルを示

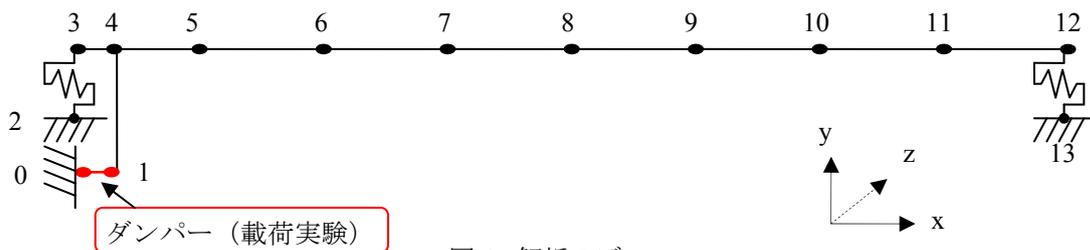


図-2 解析モデル

表-1 節点座標 [m]

節点番号	x	y
0	0.0	0.0
1	1.0	0.0
2	0.0	0.6
3	0.0	1.8
4	1.0	1.8
5	5.0	1.8
6	10.0	1.8
7	15.0	1.8
8	20.0	1.8
9	25.0	1.8
10	30.0	1.8
11	35.0	1.8
12	40.0	1.8
13	40.0	0.6

表-2 部材の諸元

部材	断面積: A [m ²]	断面 2 次モーメント: I [m ⁴]	
		Y	Z
剛な仮想部材	5.00	233	4.00
桁	0.12	7.5×10^{-3}	0.19×10^{-3}
線形バネ支承	バネ定数 (橋軸方向): 1.64×10^3 kN/m		

表-3 節点質量 [kg]

節点番号	質量
1	50
3	1.570×10^3
4	6.279×10^3
5~11	15.70×10^3
12	7.851×10^3

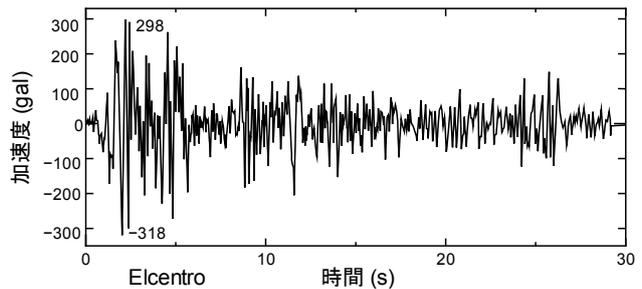


図-3 入力地震波形

す。このモデルは線形バネ支承とダンパーを有する支間 40m の単純桁である。モデル上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。節点番号 0-1 間は実験供試体であるダンパーを設置する。ダンパー以外の節点番号 1~13 間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 TDAPIII 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 3~12 は桁、節点 1-4 間は剛な仮想部材、節点 2-3、12-13 間は支承バネである。桁および剛な仮想部材は鋼部材であり、部材の弾性係数は 2.0×10^5 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 2、13 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。ダンパーはオイレス工業製の BM-S を使用し、質量 50kg、最大ストローク ± 100 mm、抵抗力 150kN (0.5m/sec 時)、全長 835mm、最大外形寸法 120mm である¹¹⁾。

本研究では橋軸方向の応答に着目するが、ダンパー以外の桁部分の数値解析モデルに対する固有振動解析では、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モードに対して 0.05 を設定する。

3.2 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析は、 α -OS 法を用い、応答の安定性を考慮して減衰パラメータ α は 0.25 とする。積分時間間隔は 0.01 秒で 30 秒間解析を行う。地震波は図-3 に示す最大加速度 318gal の Elcentro 波を橋軸方向に設定する。

本研究では低温 (-27°C) で仮動的実験を行い、実験システムの適用性について検討する。

4. 実験結果と考察

図-4 に節点 1 の時刻歴応答変位、図-5 はダンパーの変位と荷重の関係をそれぞれ示す。

時刻歴応答変位では、入力地震波の増減と連動しながら振動している状況を確認できる。卓越振動数は約 2Hz であり、上述の固有振動モードの振動数とは異なる。数値解析モデルはダンパーを有さないが、比較のためダンパーの初期剛性と同じバネ定数を有する線形バネをダンパー位置に挿入したモデルを作成して固有振動解析を行ったところ、2.1Hz の固有振動モードが得られた。このことから図-4 の卓越振動数はこのモードの応答であると考えられる。

図-5 のダンパーの変位-荷重曲線は既往の研究¹¹⁾で行った動的載荷実験と同様の摩擦履歴型となっている。本研究の仮動的実験では静的載荷を間欠的に繰り返しながら変位と荷重を測定しているが、これによる荷重の不安定な低下は見受けられない。以上より本システムは適切に動作していると考えられる。

本研究で用いた載荷装置では、本来このような振動数域での載荷は対応できないが、仮動的実験とすることで比較的高い振動数の応答も求めることができた。

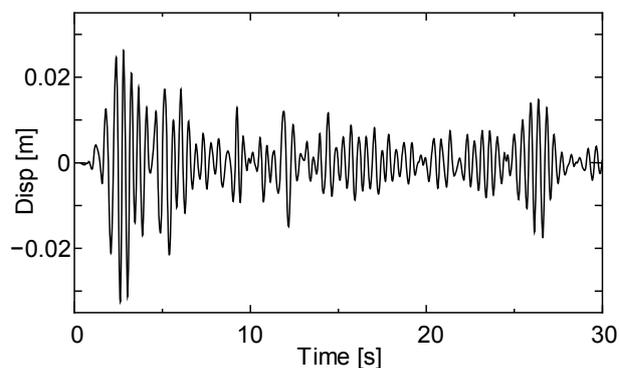


図-4 時刻歴応答変位 (節点 1)

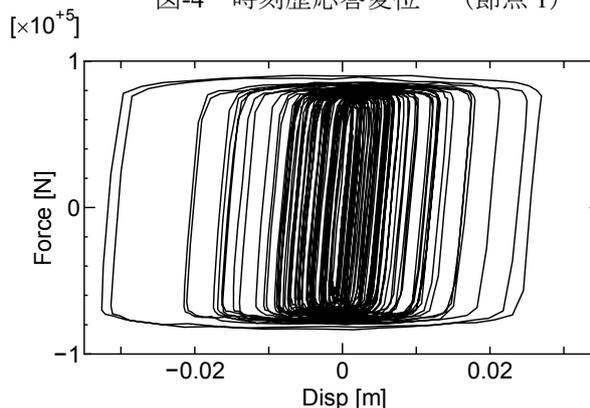


図-5 変位-荷重 (ダンパー)

5. おわりに

本研究では低温環境下における制震ダンパーの仮動的実験を行うために、載荷装置を動作させるプログラムを開発した。また、数値解析部においては汎用構造解析プログラムを適用し、汎用構造解析プログラムとのデータ入出力を行うプログラムも開発した。

制震ダンパーを含む構造モデルに対して行った実験では、摩擦履歴型の非線形特性を有するダンパーの応答を構造全体の一部として計算することができた。

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) V. Saouma and M. Sivaselvan (Ed.): Hybrid Simulation Theory, Implementation and Applications, Taylor & Francis, pp.157-167, 2008.
- 4) O. S. Kwon, N. Nakata, K. S. Park, A. Elnashai and B. Spencer: User Manual and Examples for UI-SIMCOR v2.6 NEES-SAM v2.0, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- 5) O. S. Kwon, A. S. Elnashai and B. F. Spencer: UI-SimCor, <http://nees.org/resources/3363>
- 6) 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.
- 7) JIP テクノサイエンス：TDAP III , <http://www.jip-ts.co.jp/tdap/index.html>
- 8) 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.
- 9) O. S. Kwon, N. Nakata, A. Elnashai and B. Spencer: 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.
- 10) D. Combescure, P. Pegon: α -Operator Splitting time integration technique for pseudodynamic testing error propagation analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.16, pp427-443, 1997.
- 11) 宮森保紀、宮崎充、藤生重雄、山崎智之、挾間藍、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.
- 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。

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

Yasunori MIYAMORI, Miki YUMURA, Shigeo FUJII,
Masaki HIGUCHI 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 existence 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 its displacement-force curve is stable. Hence, the system is able to work properly as a substructured pseudo-dynamic simulation facility at a low-temperature environment.