汎用 FEM 解析ソフトを利用した低温環境用仮動的実験システムの構築 Development of Substractured Pesude-Dynamic Simulation Systems used FEM software for Low-temperature Environment

北見工業大学	正会員	宮森	保紀
北見工業大学	学生員	湯村	美紀
オイレス工業株式会社	正会員	藤生	重雄
オイレス工業株式会社	正会員	樋口	匡輝
北見工業大学	フェロー	大島	俊之

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 考慮などより複雑な条件では十分な対応が進んでおらず、新 しく開発されたデバイスを含む構造系で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が、構造物に 取り付けられ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-SIMCOR⁴⁾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、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TDAPIII⁵⁾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-SIMCOR⁴⁾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。数値解析モ デルは構造計算プログラムで構築し UI-SIMCOR に対応させ る。UI-SIMCOR では、ABAQUS, OpenSees, Fedeas 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 T-DAPIII⁵⁾を用いて行った。

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 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。構造計算制御プログラ ムは構造計算プログラムと SC の媒介となっている。また、構造 計算プログラムに対して解析の実行を指示している。構造計 算プログラムに対して解析の実行を指示している。構造計 算プログラムは TDAPIIIを用い、SC からの命令変位に対して 静的解析を行う。コンピュータ 2 は実験供試体に対する仮動 的載荷試験を担当する。SC から受け取った命令変位を 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(図-2)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。

図-3 は株式会社島津製作所製のアクチュエータ制御装置 (島津サーボパルサ 4880 型)である。この高速制御装置が各 ステップの変位を制御し、アクチュエータが載荷している。

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')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 ⁶⁻⁸。

運動方程式は次のように示される。

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

 $M \geq C$ 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'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'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



図-2 低温域材料・構造実験システムと ダンパー供試体

量マトリックスを構成している。この等価質量マトリクスは手順8 にて次ステップの加速度の算出に使われる。

 時間刻み△tを設定し、式(2)で等価な質量マトリックスを 求める

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

 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

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

ここで、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

 予測子変位 d
_{n+1} と予測子速度 v
_{n+1} を式(3), (4)により算出 する

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

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

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 *テ*^{,m}_{n+1} と変位 *d*^{,m}_{n+1} を得る

6. 式(5)により修正子復元力 r. よを算出する

線形部分の復元力は線形部分の剛性マトリックス K⁴ 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

$$\tilde{r}_{n+1} = \tilde{r}^{m}_{n+1} - K' (\tilde{d}_{n+1}^{m} - \tilde{d}_{n+1})$$
7. 等価外力ベクトルを式により算出する
(5)

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

8. 式(7)から加速度 a "+1 を求める

$$\hat{\mathbf{M}}a_{n+1} = \hat{f}_{n+1} \tag{7}$$

9. 変位、速度を式(8), (9)から算出する
$$d_{n+1} = \tilde{d}_{n+1} + \Delta t^2 \beta a_{n+1}$$
 (8)

(9)

 $v_{n+1} = \tilde{v}_{n+1} + \Delta t \gamma a_{n+1}$ 10. 次に n=n+1、として手順 3 に戻る

なお、上に示した計算、測定等の手順は、手順 1~4 が SC で、手順 5 はアクチュエータと TDAPIIIで、手順 6~9 は SC で 行っている。

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-4 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。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。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 3 には実験供試体であるダンパーを桁上に接続 する。ダンパーはオイレス工業製の橋梁ビンガムストッパー (BM-S)を使用した。諸元は質量 50kg、最大ストローク ±100mm、抵抗力 150kN(0.5m/sec 時)、全長 835mm、最大外 形寸法 120mm であり⁹⁾、載荷装置の載荷可能限界に合わせ て選定した。また、このダンパーのシリンダーの中にはピストン と特殊充填材が入っており摩擦履歴型の応答を示す。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 T-DAPIII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 2.0×10⁵ 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、桁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 0.05 を設定する。

3.2 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析は、2 章で説明した 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。入力地震波は図-5 に示 す最大加速度 318gal の Elcentro 波を 5 倍して橋軸方向に設 定する。

本研究は-28℃の低温環境下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。

表-1 節点座標 [m]

節点番号	Х	у
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

表-2 部材の諸元

部材	断面積:	断面2次モーメント:
	A [m ²]	I [m ⁴]
桁	0.12	0.19×10 ⁻³
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
2	15.70×10^3
3	15.70×10^{3}
4~7	23.55×10^{3}

4. 実験結果と考察

図-6 にダンパーを接続した節点 3 の時刻歴応答変位を示 す。上図はダンパー無しの場合、下図はダンパー有りの場合 の時刻歴応答変位である。上図では、入力地震波の増減と連 動しながら振動している状況が確認できる。下図ではダンパー によるエネルギー吸収効果が発揮され変位が 82%低減した。

図-7 はダンパーの変位と荷重の関係を示しており、ダンパーの変位-荷重曲線は既往の研究 ⁹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、これによる荷重の一時的な低下はわずかである。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。

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



図-4 解析モデル

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

- 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.
- 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.
- O. S. Kwon, A. S. Elnashai and B. F. Spencer: UI-SimCor, http://nees.org/resources/3363
- 5) JIP テクノサイエンス: TDAPIII, http://www.jipts.co.jp/tdap/index.html
- 6) 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.
- 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.
- 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.
- 9) 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。

