

低温域サブストラクチャ・ハイブリッド地震応答解析のための 段階的実験環境の構築

A development of a phased testing environment for low-temperature sub-structured hybrid seismic simulation

北見工業大学社会環境工学科 ○正 員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学社会環境工学科 齋藤樹里 (Juri Saito)
北見工業大学社会環境工学科 正 員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学社会環境工学科 正 員 三上修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学社会環境工学科 正 員 齋藤剛彦 (Takehiko Saito)

1. 研究の背景と目的

構造物の地震時挙動を把握する手法としては、一般に振動台実験や数値解析が用いられる。振動台実験ではE-defense¹⁾などの大型振動台が開発されているが、橋梁では依然として規模の制約などの課題がある。数値解析については、兵庫県南部地震以降に実務で利用可能な汎用プログラムも多数供給されるようになり、材料非線形性や幾何学的非線形性への対応も進んでいるが、温度依存性がある場合や新材料を用いた場合などにはモデル化に十分な検討が必要となる。上記の手法に対して、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ハイブリッド実験や仮動的実験などと称され、これまでも多くの研究が進められている^{2), 3)}。さらに、構造物を複数の要素に分割して、地震時挙動が複雑な一部には構造実験を行い、それ以外は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・ハイブリッド実験も行われている⁴⁾。しかしながら、これらの実験手法は数値解析とハードウェア制御に関する両方の知識の習得が必要なことや、汎用的なシステムやソフトウェアが普及していないなどの理由で、あまり一般的にはなっていない。このような状況に対して、米国のNEESプロジェクトでは協調分散型サブストラクチャ仮動的実験システムが開発され、システムが公開・配布されている⁵⁾。

橋梁の耐震性能を向上させる手法としては、地震時保有水平耐力法が導入されたことで、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⁶⁾。さらに最近は免震・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⁷⁾。一方、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し、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。

著者らは既存の低温構造実験装置を利用し、サブストラクチャ・ハイブリッド実験（仮動的実験）を低温環境下で行える実験システムの開発を行ってきた⁸⁾⁻¹⁰⁾。この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-SIMCOR¹¹⁾を利用し、UI-SIMCORの制御下で低温室での載荷実験が行えるようなプログラムを開発した。UI-SIMCORはABAQUS, OpenSees, Fedees Labなどの数値計算ソフトウェアとの連携が提供されて

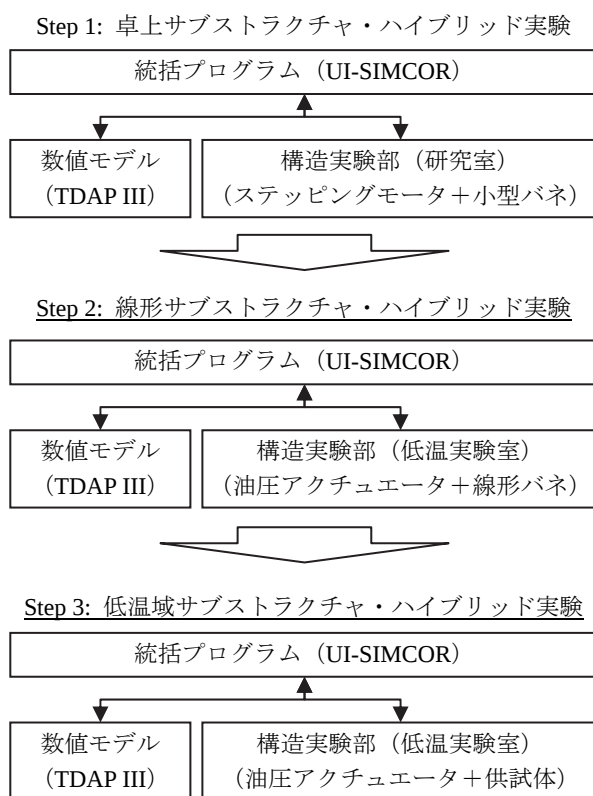


図-1 段階的サブストラクチャ・ハイブリッド実験

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 III¹²⁾をハイブリッド実験に適用するための制御プログラムを作成した。

ハイブリッド実験の構造実験部分に用いられるのは主に非線形部材や温度依存性のある部材である。しかし、ハードウェアの設定上の問題やトラブルによって予期しない変位が供試体に与えられた場合、供試体を破壊してしまう恐れがある。供試体の破壊までは至らなくても何らかの理由で実験が中断した場合、温度依存性のある部材では供試体を実験前の温度に戻すために時間を要するという問題がある。これらに対して、供試体の代わりにダミーとなる部材を用いて予備的なハイブリッド実験ができれば、数値モデルとシステムの安定性を事前に検証することができる。さらに、低温実験室での実験に先立って、研究室で卓上でより小規模な実験ができれば、

システム開発や数値モデル検証の効率性が向上する。また、このような卓上規模の実験システムは、移動も容易であり教育ツールとしても活用が期待できる。

本研究では、以上のような背景から低温域でのサブストラクチャ・ハイブリッド実験をより効率的かつ安全に実施するために、図-1 のような段階的実験環境を構築したのでその概要を報告する。

2. 段階的サブストラクチャ・ハイブリッド 実験システム

本研究では、米国 NEES プロジェクトで開発された分散型サブストラクチャ仮動の実験用ソフトウェア UI-SIMCOR¹¹⁾を利用した。UI-SIMCOR では統括プログラム(Simulation Coordinator: SC)を中心に、解析対象構造物を、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、任意の载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、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、载荷装置には低温室内に設置された低温域材料・構造実験システムならびに予備実験用の卓上型の実験装置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。

2.1 低温域実験システム¹⁰⁾

図-2 にシステム構成図を示す。これは図-1 の Step3 に対応するものである。本システムは統括プログラム(SC)を中心に複数のプログラム群から構成される。SC では、地震応答解析における入力地震動や、時間刻みと計算ステップ数、構造モデル全体の節点質量と減衰マトリックスに必要な諸数値などを設定ファイルから読み込む。さらに、分散化した構造要素(モジュール)の IP アドレス、各モジュールの節点と自由度の配置なども読み込む。

ハイブリッド実験は次の手順で行われる。

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 法による仮動の実験の実行
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、TDAP III 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

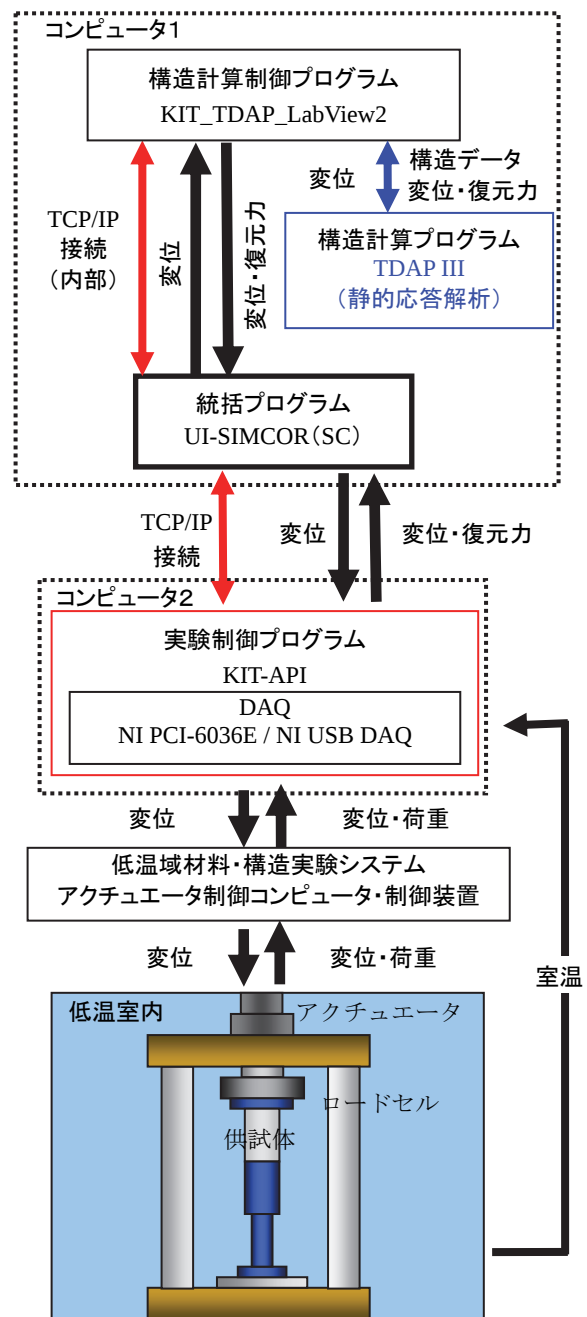


図-2 システム構成



写真-1 低温域材料・構造
実験システム

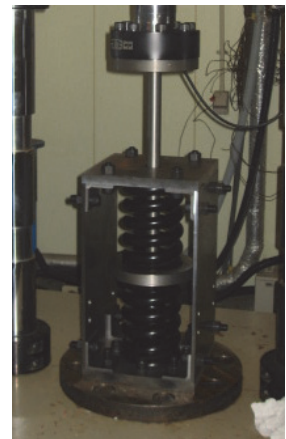


写真-2 線形バネ試験部材

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。また、熱電対を用いて室温や供試体などの温度も測定できる。

初期剛性マトリックスの作成と α -OS 法によるハイブリッド実験の実行については文献 5), 10), 13) で詳述されている。 α -OS 法とは、履歴に依存する非線形な剛性を、履歴に独立な線形部分の剛性と履歴に依存する非線形部分の剛性に分離し、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¹³⁾⁻¹⁵⁾。

ハードウェアとしての本システムは、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。コンピュータ 2 は実験供試体に対する載荷試験を担当する。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う。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^{5), 8)}。本研究で用いた載荷装置は島津製作所製油圧アクチュエータ(写真-1)で、最大 300kN の静的載荷能力を有する。低温室内は $\pm 30^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度設定できる。

2.2 線形バネによる予備実験

本研究では、非線形部材を用いる実験に先立って、載荷装置に写真-2 のような線形バネを設置して予備実験を行えるようにした⁹⁾。この予備実験用のダミー部材は圧縮・引張両方向で同じ復元力特性を得られるように、同じバネ定数を有する圧縮バネ 2 本を用いてフレームで固定している。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：800 kN/m である。フレームは SS400 材を用いており奥行きは 300mm ある。

この予備実験は、図-1 における Step 2 に対応しており、図-2 の供試体を写真-2 のバネと入れ替えたものである。構造実験部以外の計算モデルやシステム全体は目標とする Step 3 の実験と同じ環境が構成できる利点がある。さらに、このバネ部材は温度依存性も無いため、予備実験を常温環境下で実施することでエネルギー消費の低減にも効果がある。

2.3 卓上装置による予備実験

前節の予備実験は、低温実験室における載荷装置を利用して、いわば「本番の一步前」の環境で実験を行うものである。これに対して、数値モデルの適否を判断する必要がある場合や、構造計算プログラムや実験制御プログラムそのものに変更を加えた場合などは、システムが適切に動作することをより入念に検討する必要がある。このため、システムの動作について基本的な検討を行うために、研究室の卓上に設置可能なデスクトップ型サブストラクチャ・ハイブリッド実験システムを構築した。これは図-1 の Step 1 に相当し、Step 2,3 とは構造実験部全体のハードウェアおよびソフトウェアのうちハードウェアの操作に関わる部分が異なる。図-2 ではコンピュータ 2 より下部の構成が入れ替わることになる。なお、NEES プロジェクトでは同様の目的で板バネとステッピ

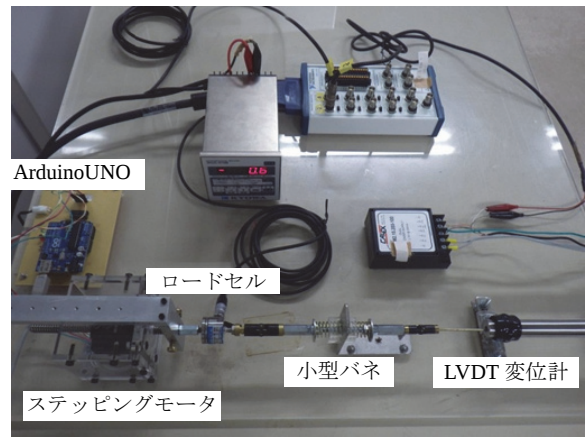


写真-3 デスクトップ型実験システム

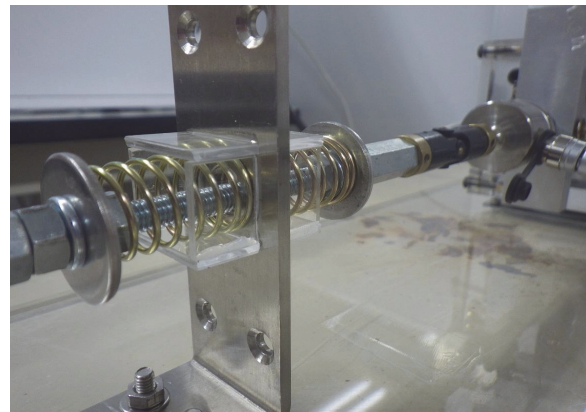


写真-4 小型バネ部材

ングモータからなる Mini-MOST¹⁶⁾を開発しており、本研究ではこれを改造して Step 2 のバネ部材をより直接的に表現した小型バネを用いた。

写真-3 はデスクトップ型サブストラクチャ・ハイブリッド実験システムの外観である。本システムは載荷装置としてステッピングモータ (HIS, Size 23 Non-Captive Linear Actuator) を用い、ストロークは $\pm 7.5\text{cm}$ 、送り量は 0.0127mm/step である。ステッピングモータの操作には、汎用マイコン基盤 ArduinoUNO とステッピングモータ用ドライバ IC を介してシリアル接続で構造実験部を司るコンピュータに接続する。部材の応答は小型ロードセル (共和電業, LUX-500N) と LVDT 変位計 (Schaeffers, 3000 DCEC LVDT) で測定する。写真-4 は実験供試体に相当する小型バネで、写真-2 と同様に 2 本の圧縮バネ (WAKI, SR-2019) で構成されている。バネの寸法は線径 $\phi=1.2\text{mm}$ 、外径 17mm、自由長 28mm である。Step 2 の線形バネとの比較では、小型バネの圧縮量に制約があるため、小型バネへの命令変位と応答変位に同じ係数を乗除して調整している。また、小型バネのバネ定数は 21N/mm であり線形バネのバネ定数 (800 kN/m) と異なるが、ロードセルで得られた数値に 38.1×10^3 倍することで、等価なバネを模擬できる。

3. 予備実験の実施例

本章では予備実験の実施例を説明する。図-3 は単純桁の解析モデルで、バネ支承とダンパーを有する構造を想定しているが、ダンパー部分をバネ部材に置き換えた

もので、節点3で桁と接続する。バネ部材以外の支承や桁は数値解析モデルとし、表-2, 3 のような諸元である。本例では橋軸方向の応答に着目し、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 を設定する。α-OS 法のパラメータは $\alpha=0$, $\beta=0.25$, $\gamma=0.5$ とし、積分時間間隔は 0.01 秒で 30 秒間解析を行う。入力地震波は最大加速度 318gal の Elcentro 波を 1/4 倍して橋軸方向に入力する。小型バネの変位制限については、小型バネへの変位入力時には命令変位を 1/1.5 倍し、LVDT の測定値を 1.5 倍して応答変位としている。

上記の設定の実験を Step 1 と Step 2 で実施した。結果の一例として、節点 2 の橋軸方向変位を図-4 に示す。両者の結果はほぼ一致しており、両実験が等価であることが確認できる。これらの予備実験の結果に基づいて、載荷装置に本来の検討対象である非線形性や温度依存性のある供試体を設置して、低温域サブストラクチャ・ハイブリッド実験 (Step 3) に進むことができる。同様の設定で実施した低温域サブストラクチャ・ハイブリッド実験の結果は文献 10) で報告している。

4. おわりに

本研究では、低温域サブストラクチャ・ハイブリッド実験を効率的かつ安全に行うとともに、ハイブリッド実験技術の習得にも役立つ段階的な実験環境を構築した。

近年の橋梁は免震支承の一般化に伴い、免震支承と制震ダンパーを組み合わせるなど複数の非線形部材を有するより複雑な構造系になってきている。このため、今後は複数の構造実験を同時並行的に進める場合のネットワーク環境の整備や、ハイブリッド実験に関する教育・研修システムの開発が課題である。

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。研究の開始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。北見工業大学ロボコン研究会の黒沼猛之氏には卓上型装置の開発に協力いただきました。各実験システムの開発には、研究室に在籍した、岩上隆志氏、青山圭介氏、高田昌延氏、湯村美紀氏、園部司明氏、仁義水緒氏の貢献がありました。各位に謝意を表します。

参考文献

- 防災科学技術研究所：兵庫耐震工学研究センター，<http://www.bosai.go.jp/hyogo/>
- 家村：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.
- Saouma and Sivaselvan ed.: Hybrid Simulation: Theory, Implementation and Applications, Taylor & Francis, 2008.
- 中島，石田，安藤：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.
- Kwon, Nakata, Park, Elnashai and Spencer: User Manual and Examples for UI-SIMCOR v2.6 NEES-SAM v2.0, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- 大塚：実践耐震工学，共立出版，2004.
- 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.
- 宮森，坪田，岩上，青山，平沢：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.

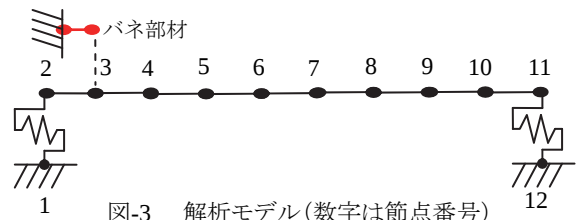


図-3 解析モデル (数字は節点番号)

表-1 節点座標 [m]

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

表-2 節点質量 [$\times 10^3$ kg]

節点	T_x	T_y	R_z
2, 3	31.4	31.4	31.4
4~11	7.85	7.85	7.85

表-3 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]
桁(鋼)	0.12	0.19×10^{-3}
バネ支承	バネ定数(橋軸方向): 1.64×10^3 kN/m	

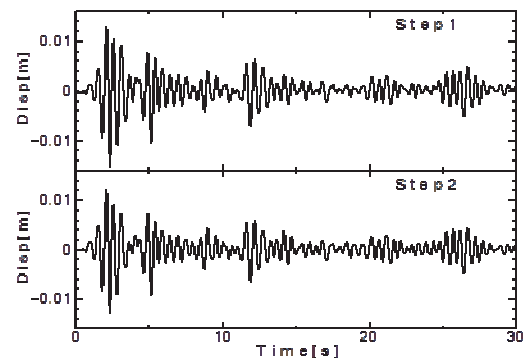


図-4 時刻歴応答変位 (節点 2)

- 宮森，湯村，園部，山崎，三上，大島：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.
- 宮森，湯村，藤生，樋口，山崎，三上，大島：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，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)，I_608-I_616, 2012.
- Kwon, Elnashai, and Spencer: UI-SimCor, <http://nees.org/resources/3363>, 2011.
- JIP テクノサイエンス：TDAPIII, <http://www.jip-ts.co.jp/tdap/index.html>, 2011.
- 中島，赤澤，阪口：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.
- Kwon, Nakata, Elnashai and Spencer. Technical note; A framework for multi-site distributed simulation and application to complex structural systems, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.9, No.5, pp.741-753, 2005.
- Combesure and Pegon: α-Operator Splitting time integration technique for pseudodynamic testing error propagation analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.16, pp427-443, 1997.
- Nakata, Yang and Spencer: System Requirements for Mini-MOST Experiment, http://www.neesgrid.org/mini-most/Mini_MOST_requirements_revised3.pdf