# 複数の制震ダンパーを有する構造物の 遠隔・低温域サブストラクチャハイブリッド実験

Remote and low-temperature sub-structured hybrid seismic experiment of a structure with multiple seismic dampers

北見工業大学(	◯正会員	宮森保紀	(Yasunori Miyamori)
八千代エンジニヤリング	正会員	齋藤樹里	(Juri Saito)
北見工業大学	学生員	多賀優冶	(Yuya Taga)
オイレス工業		入澤祐太	(Yuta Irisawa)
オイレス工業	正会員	河内山修	(Osamu Kochiyama)

# 1. はじめに

橋梁の耐震性能を向上させる手法としては,1996(平 成8)年の道路橋示方書で地震時保有水平耐力法が全面 的に導入されたことで,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<sup>1)</sup>. 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 ようとする方法が広まりつつある<sup>2)</sup>.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.

構造物の地震時挙動を把握するための手法としては, 大型の振動台を用いて構造物を実際に振動させる動的載 荷実験,コンピュータ上に構造物を数値モデル化して地 震時挙動を把握する数値解析が挙げられる.しかし,振 動台実験では実物大の供試体を製作するには費用と規模 の制約があり,縮小模型を用いる場合にはパラメータご とに相似比が異なり実物を完全に再現することはできな い.数値解析は,兵庫県南部地震以降の 20 年間で格段 に発展したが,非線形部材や温度依存性のある部材など で復元力が複雑な要素を含む構造物においては,結果の 精度が低下してしまうなどの問題点が挙げられる.そこ で,これらの問題を解決し得る手法として,構造実験と 数値解析を併用するサブストラクチャハイブリッド実験 が考案され,数多くの研究がなされている<sup>3),4)</sup>.

著者らは、これまでに小型バネを用いたデスクトップ 型ハイブリッド実験システム、実大の制震ダンパーを用 いた低温域ハイブリッド実験システム 5)を構築し、これ らの実験システムをソフトウェア,ハードウェアの両面 から適切かつ安全に動作することを段階的に確認できる 実験環境を構築した の. さらに, 現実に即した検討を行 うためには、複数の制震部材などに対応させるための実 験システムを構築する必要があり、デスクトップ型ハイ ブリッド実験システムにおいて開発を行ってきた 7.本 研究では、これらの検討の最終段階として、複数の構造 実験部分を、インターネットを介して接続する遠隔・低 温域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.構築した実験システムの動作を確認するため、両 端に低温性能が既知のダンパーを取り付けた桁部材につ いてハイブリッド実験を行ったのでその結果を報告する ものである.



図-1 システムの構成

# 2. 遠隔・低温サブストラクチャハイブリッド実験 2.1 ハイブリッド実験の概要

本研究では、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<sup>8)</sup>を用いて いる. UI-SIMCOR では統括プログラム(Simulation Coordinator: SC)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.本研究では SC と連携する各プログラムを以 下のように作成した.構造実験部分では MATLAB によ り載荷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 TDAPIII<sup>9</sup>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(図-1).

実験は SC によって制御され,最初に地震応答解析に 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.設定を読み込 み,システムを初期化した後,次の手順でハイブリッド 実験は行われる.

- 1. モジュールとの接続の確立
- 2. 初期剛性マトリクスの作成
- 3. α-OS 法によるハイブリッド実験の実行
- 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 接続で通信を行い,変位や断面力の情報の交換は LabView2 プロトコルを用いる.SC に対して各モジュールを 代表するものが本研究で作成した構造計算制御プログラム や実験制御プログラムである.

#### 2.2 遠隔・低温ハイブリッド実験システム

図-1 にシステムの構成を示す.本システムは 3 台の コンピュータと図-2 に示す 2 か所の構造実験部分(実 験供試体と載荷装置)によって構成される.構造 A で は数値解析が妥当な桁部分を対象として数値モデルによ って構造物を再現している.構造 B および構造 C の実 験供試体は制震ダンパー(オイレス工業製 BM-S)であ り,構造 B を北見工業大学社会連携推進センターの低 温室に,構造 C をオイレス工業足利事業場に設置した. 構造 B については保温箱に収納した状態で実験を行う. 実験時の温度は,常温では+15℃,低温では-22℃に設定 した.また,構造 C を制御するコンピュータ 3 から統 括側のコンピュータ1への接続は無線データ通信を用い, また遠隔地との1対1通信を安全に行うため VPN によ って接続している.

ハイブリッド実験では、まずコンピュータ1の統括プ ログラム SC が各構造へ命令変位を送る.その後、構造 A に対する構造計算制御プログラムでは、TDAPIIIバッ チ版静解析により、命令変位を強制変位として与え、節 点自由度ごとの応答変位と復元力を得る.コンピュータ 2 およびコンピュータ3では、命令変位に対して静的載 荷を行い構造 B および構造 C の応答変位と荷重を得る. これら3つの構造に対する数値解析・構造実験を同時並 行に制御し、その都度 SC が各構造から変位と復元力を 受け取り、応答を計算する.

# 2.3 α-OS 法による応答計算

本研究で使用した  $\alpha$ -OS 法について概要を説明する.  $\alpha$ -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  $\alpha$  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 <sup>10-12</sup>.

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)は復元カベクト ル,f(t)は外カベクトルである.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 $\alpha$ -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'は仮動的試験に先立って各自由度に静的に荷重を載



図-2 制震ダンパー 左:構造B(北見),右:構造C(足利)

荷することで求めた.初期剛性マトリックス K<sup>1</sup> 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

 $\hat{M} = M + \gamma \Delta t (1 + \alpha)C + \beta \Delta t^2 (1 + \alpha)K^1$  (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.本研究では α=1/4, β=1/4, γ=1/2 とす 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、 $\hat{d}$  は予測子変位、 $\hat{r}$  はこれに対応する復元 力である.

- 3. 外力*f*<sub>n+1</sub>を入力する
- 予測子変位 *d*<sub>n+1</sub> と予測子速度 *v*<sub>n+1</sub> を式(3), (4)により 算出する

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

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

5. 実験供試体および数値解析モデルへ予測子変位 d<sub>n+1</sub>

を入力し,復元力 $\widetilde{r}_{\scriptscriptstyle n+1}^{\scriptscriptstyle m}$ と変位 $\widetilde{d}_{\scriptscriptstyle n+1}^{\scriptscriptstyle m}$ 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  $K^{I}$ 

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

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

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

(6)

8. 式(7)から加速度 a "+1 を求める

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

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)



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

10. 次に n=n+1, として手順3 に戻る. ここに示した手順と 2.2 節および図-1 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 は構 造 A, B, C でそれぞれ, 手順 6~9 は再び SC で行うもの となる.

# 3.2 つの制震ダンパーを有する単純桁モデルの ハイブリッド実験

#### 3.1 単純桁モデル

本研究では、図-3 に示す解析モデルを用いる. 両端 を免震支承で支持した1径間の桁の端部にダンパーを取 り付けている. 桁部材と免震支承は構造 A, ダンパーは 構造 B と C に対応しており、構造 A は汎用構造解析ソ フト TDAPⅢによりモデル化している. 表-1 に構造 A の諸元を示す.構造 A の桁部材は鋼製の線形部材とす る. 部材上の黒点と白点は節点を表しており, 節点 20 と 21 は完全固定, 1-17 は x 軸方向と v 軸方向および回 転方向に自由度を設けている. ハイブリッド実験全体で は,黒点のみを解析対象として全体系の質量,剛性,減 衰の各マトリクスを構成する.構造 A に対する静解析 では、黒白両方の節点を有するモデルについて解析を行 い黒点の応答を SC に送信する.黒点にはそれぞれ質量 10.60×10<sup>3</sup>kgを設定している.

減衰については、本研究では橋軸方向の応答に着目し ているので、事前に固有振動解析を行い 1.106Hz に橋軸 方向の有効質量比が大きいモードを確認しており, レー リー減衰としてこの表-2 のように卓越モードに対して 減衰定数を 0.1969 とする.

#### 3.2 時刻歷応答解析

図-4 に実験に用いる地震波を示す.最大加速度 318gal の ElCentro 波をモデルの橋軸方向に入力する. 積分時間間隔は 0.01 秒刻みで 30 秒間, 3000 ステップの 解析を行う.実際の試験では、コンピュータ上での計算、 通信,載荷装置の動作に時間を要するため,1 ステップ に約1.2秒を要する.

なお,使用した載荷装置は、メーカーや仕様が異なる がそれらの動作を同等とするため、アクチュエータのゲ インや制御命令発出から変位・荷重値の測定までの待機 時間をそれぞれ調節する予備実験を、本実験に先立ち実 施している.

#### 4. 結果と考察

実験結果の一例として図-5 に数値モデルである構造 A の節点 1 の時刻歴応答変位を,図-6 と図-7 に制震ダ ンパーである構造 B,構造 C の変位-荷重関係を示す. 各図において赤線は常温時,青線は低温時の結果である.

粉値モデル(構造∧)の酵量

<b>⊉</b> -1		「(悟道 A) の相九	
部材	断面積	断面2次モーメント	
	$A[m^2]$	$I[m^4]$	
桁	0.1115	Z 軸: 0.0581	
免震 支承	等価剛性:3.0019×10 <sup>6</sup> N/m		

表-2 減衰の設定

Reyleigh 減衰	
第1基準振動数	1.106 Hz
減衰定数	0.1969
第2基準振動数	1.107Hz
減衰定数	0.1969



なお、本実験では常温、低温とも同条件で3回実験を行 ったが、ほぼ同じ結果を得ている.実験に要した時間は どの実験でも約 34 分間であった.また、常温・低温と も実験中にダンパーの表面温度は約2℃上昇した.

図-5 より、両波形ともに変位の増減が入力地震波の 振幅の変化と対応し、構造の地震時応答が計算できてい る. 応答変位について, 常温時の最大変位は-18.4mm, 低温時は-19.2mm であり、解析時間全体の振幅もほぼ一 致している.本研究で対象としたダンパーは既往の研究 13)で温度による特性の変化がほとんどないことが明らか なことから、この結果は妥当であり、また載荷装置が低 温時でも適切に動作していることが確認できた.

図-6,図-7の履歴曲線では、本ダンパーの摩擦履歴型 の履歴曲線が得られていることが確認できる.構造 B および構造 C における常温と低温の相違は図-5 と同様 に小さい. 一方, 構造 B と構造 C では履歴曲線の形状 がやや異なる.これは、アクチュエータの動作特性の相 違が主な原因と考えられる.本研究では予備実験によっ てアクチュエータの動作を調整したが、その制御方法そ のものについても今後の検討課題である.

# 5. おわりに

本研究では、2 箇所の構造実験部分に対応した遠隔・ 低温域ハイブリッド実験システムを構築し、その動作を 確認するため、単純桁構造の両端にダンパーを2つ取り 付けたモデルに対しハイブリッド実験を実施した.結果 として、2 つのアクチュエータの動作を調整することで、 適切な地震応答を得ることができた.

今後の研究の方向性としては、ハイブリッド実験は載 荷装置を断続的に作動させる疑似的な動的実験のため、 速度依存性を有する供試体について、より実応答に近い 実験が行えるようにシステムの制御方法や動的特性の改 良を行うことが必要である.同時に本システムを、低温 特性が常温と異なるデバイスに適用することで、免震・ 制震構造物の寒冷環境下での地震応答の解明に取り組む 必要がある.

### 参考文献

- 1) 大塚久哲:実践耐震工学,共立出版, 2004.
- 2) 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.
- 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、第356号,pp1-10,1985.
- Victor Saouma and Mettupulayam Sivaselvan.: Hybrid Simulation: Theory, Implementation and Applications, Taylor & Francis, 2008.
- 5) 宮森保紀, 湯村美紀, 藤生重雄, 樋口匡輝, 山崎智之, 三上修一, 大島俊之: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.
- 6) 宮森保紀,齋藤樹里,山崎智之,三上修一,齊藤剛 彦: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,土木学会北 海道支部平成24年度論文報告集第69号,A-54,2012.
- 7) 齋藤樹里,宮森保紀,山崎智之,三上修一,齊藤 剛彦:複数の制震ダンパー有する構造物の遠隔・低 温域サブストラクチャハイブリッド地震応答解析の ためのデスクトップ実験,土木学会北海道支部平成 25 年度論文報告集第70号,A-62,2013.
- Oh-Sung Kwon, Amr. S. Elnashai, and Billie F. Spencer: UI-SimCor, http://nees.org/resources/3363, 2011.
- 9) 株式会社アーク情報システム:TDAPⅢ, 2011. http://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/index.html
- 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) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.



図-7 構造Cの変位-荷重関係