

## E-Simulator による 4 層鋼構造骨組の仮想震動実験と骨組解析の比較

E-Simulator	E-Defense	ソリッド要素	正会員	○宮村 倫司 <sup>*1</sup>	正会員	磯部 大吾郎 <sup>*2</sup>
並列計算	弾塑性解析	非線形有限要素法	同	大崎 純 <sup>*3</sup>	同	小檜山 雅之 <sup>*4</sup>
崩壊解析	骨組解析	鋼構造	同	堀 宗朗 <sup>*5</sup>	同	秋葉 博 <sup>*6</sup>
			同	山下 拓三 <sup>*7</sup>	同	梶原 浩一 <sup>*8</sup>

## 1. はじめに

防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター (E-Defense) で開発が進められている数値震動台 (E-Simulator)<sup>1)</sup>は、建築、土木構造物の解析に必要な構成則や破壊法則を組み込んだ汎用的な並列有限要素解析ソフトウェアとなる。E-Simulator の開発は、並列有限要素解析コード ADVENTURECluster<sup>2)</sup>をベースとして進められている。本研究では、E-Simulator による 4 層鋼構造骨組 (図 1) の仮想震動実験 (地震応答解析) の結果<sup>3)</sup>と、骨組解析の結果を比較する。

## 2. E-Simulator による 4 層鋼構造骨組の仮想震動実験

ここでは文献 3) に示した仮想震動実験の概要を示す。

## 2.1 解析モデル

平成 19 年 9 月に E-Defense で実施された 4 層鋼構造骨組完全崩壊実験<sup>4)</sup>の結果を仮想震動実験により再現するために、ブラインド解析コンテストにおける公開データを用いて六面体ソリッド一次要素による有限要素モデルを作成した。このメッシュの要素数は 5,181,880、節点数は 7,523,295、自由度数は 22,569,885 である。H 形鋼のウェブ、フランジ等の板材の要素分割は、板厚方向に 2 層としている。各層のスラブの形状は平板として、要素分割は板厚方向 2 層とする。フランジとスラブを接続するスタッドのモデル化は省略し、フランジ上部の節点とスラブの節点を共有節点として接続する。

柱脚については 2 種類のモデルを作成している。固定モデル (Case 1) ではベースプレートと柱を一体としてメッシュを切り、ベースプレート下面を固定している。回転ばねモデル (Case 2a) では建築学会規準に一部準拠した弾性回転ばね (ばね定数:  $4.886 \times 10^4$  kNm) を用いる。地面に垂直な軸周りの回転ばねの係数は、他の軸のばねの係数の 10 倍とする。柱の下面とベースプレート上面の柱が取り付けられる部分には、多点拘束条件 (MPC) で表された剛体プレートを取り付け、それぞれの中心を回転ばねで接続している。

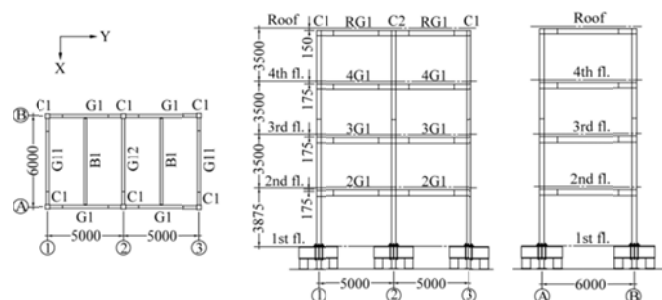


図 1 4 層鋼構造骨組

非構造材である各層の外壁パネルを、上下層の梁を結ぶ弾塑性のせん断ばね要素でモデル化し、その構成則のパラメータを文献 5) に基づき同定している。これを Case 2a のモデルに取り付けている。

## 2.2 構成則と密度

鋼材の構成則には非線形 (区分線形) 等方硬化則を用い、ブラインド解析で公開された単軸引張試験結果によって硬化係数を定める。スラブのコンクリートについては、バイリニアの移動硬化則とする。スラブ以外の各部材は全て鋼であり、密度は  $7.86 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> とする。一方、非構造材や防護装置の重量を含む積載荷重は、スラブ密度  $2.3 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> を積載荷重に相当する密度で割り増すことで表現する。

## 2.3 固有値解析, 減衰, 計算環境

固有値解析の結果から Case 2a の 4 次までの固有周期は 0.8303, 0.8203, 0.5555, 0.2700 秒となった。静的な自重載荷解析の後に、ブラインド解析で公開された JR 鷹取波 (0.6 倍) に対する実大実験における震動台上加速度の EW, NS, UD 成分を 3 方向に入力 (Case 1: 20 秒, Case 2a: 18 秒) して、時刻歴応答解析を行った。減衰はレイリー減衰とし、減衰定数は 1 次と 4 次 (X 方向の 1 次と 2 次) に対して 0.02 とした。解析には防災科学技術研究所の SGI Altix 4700 (CPU: Intel Itanium 1.66 GHz, 使用コア数: 1 node × 256 core/node = 256 core) を用いた。自重載荷解析の計算時間は 2,414 秒、地震応答解析の 1 ステップの計算時間は平均 1,106 秒となった。

## 3. ASI-Gauss 法による骨組解析

E-Simulator によるソリッド要素を用いた解析結果との比較のために、梁要素による解析を実施する。梁要素による解析には、大規模骨組構造の構造解析において最小限のコストで計算可能である ASI-Gauss 法<sup>6)</sup>を使用した。これは、梁要素の数値積分点を材料性状に合わせて順応的にシフトすることにより、最小限の要素分割で高精度な解析を実現した手法である。スラブは等価な剛性および密度の梁要素でモデル化し、合成梁効果は考慮しない。柱脚は固定とする。鋼材の構成則はバイリニア型の等方硬化則とする。また、減衰は考慮しない。モデルの規模は 4,158 自由度となる。20 秒間の入力に対して、CPU: Intel Xeon 2 GHz × 1 の計算機で約 55 分の計算時間となる。ASI-Gauss 法による解析を以下では骨組解析と呼ぶ。

## 4. 実大実験, 仮想震動実験, 骨組解析の比較

4 層鋼構造骨組の E-Defense による実大実験, E-Simulator による仮想震動実験, ASI-Gauss 法による骨組解析について、1 層の層間変形角 (X 方向, Y 方向) の比較を図 2~5 に示す。図 2, 4 は仮想震動実験の Case 1, 図 3, 5 は Case 2a との比較で

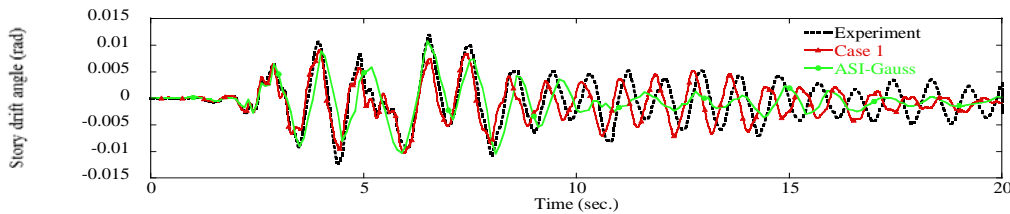


図2 1層層間変形角(X方向)  
Case1との比較

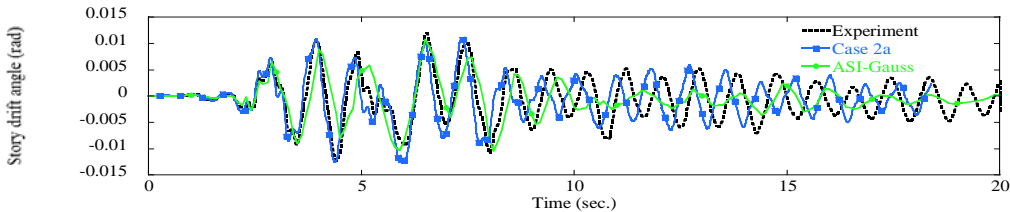


図3 1層層間変形角(X方向)  
Case2aとの比較

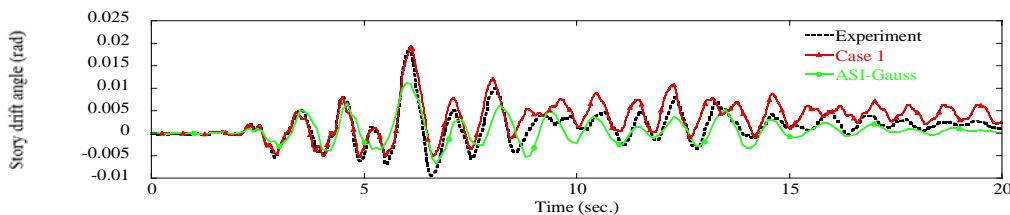


図4 1層層間変形角(Y方向)  
Case1との比較

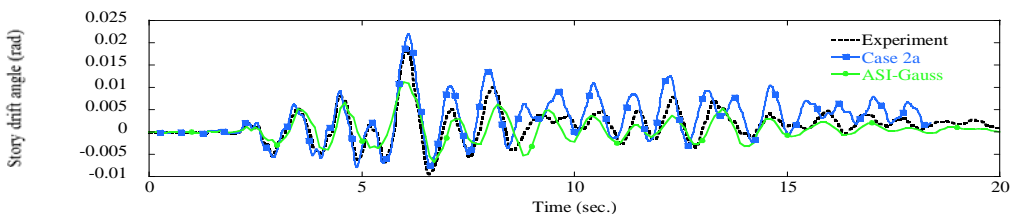


図5 1層層間変形角(Y方向)  
Case2aとの比較

ある。どちらの方向においても、約3秒から8秒において層間変形角が大きい。この区間においてE-SimulatorのCase 2aはX方向、Y方向共に実験結果をよく再現している。それに対して、骨組解析では、X方向については良好な結果であるものの、Y方向についてはかなり小さい変形角となっている。一方、約8秒以降の層間変形角が小さい区間では、X方向についてはE-Simulatorの結果の方が、Y方向では骨組解析の結果の方が実験結果に近い。この区間では弾性振動となっているため、その振幅は8秒付近の応答に影響されると考えられる。

## 5. おわりに

4層鋼構造骨組に対して、E-Defenseによる実大実験、E-Simulatorによる仮想震動実験、ASI-Gauss法による骨組解析の結果を比較した。柱脚に回転ばねを入れたCase 2aモデルを用いたE-Simulatorによる解析は、層間変形角が大きい約8秒までの応答を骨組解析よりも良好に再現している。現在、E-Simulatorの解析モデルを更に高精度化するために、合成梁、柱脚、外壁をより精密にモデル化したメッシュを作成し、ま

た、鋼材に対して複合硬化則を基本としimplicitなルールを用いた構成則を開発している。

## 謝辞

本研究は、(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター・数値震動台研究開発分科会(委員長:堀宗朗(東京大学))における成果である。E-Simulatorによる解析とモデル作成を担当された恩田邦蔵氏、湯山喜芳氏、大山知信氏(株式会社アライドエンジニアリング)をはじめとする関係各位、ASI-Gauss法による解析を担当された韓元相氏(筑波大学大学院システム情報工学研究科)に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 堀, 野口, 井根, 土木学会地震工学論文集, 2007
- 2) (株)アライドエンジニアリング, <http://www.alde.co.jp/>
- 3) 宮村他, 日本機械学会計算力学部門第22回計算力学講演会講演論文集, No. 09-21 (CD-ROM), No. 1808, 2009
- 4) 吹田他, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, 2009
- 5) 赤澤他, 建築学会近畿支部研究報告集, 48, 構造系, 2008
- 6) 磯部, チョウ, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, 2004

\*1 日本大学工学部情報工学科 専任講師・博士(工)  
(防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 客員研究員)  
\*2 筑波大学大学院構造エネルギー工学専攻 准教授・博士(工)  
\*3 広島大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工)  
\*4 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 准教授・博士(情報)  
\*5 東京大学地震研究所 教授・Ph. D.  
\*6 株式会社アライドエンジニアリング 社長・博士(工)  
\*7 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 契約研究員・博士(工)  
\*8 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 主任研究員・博士(工)

\*1 Lecturer, Dept. of Computer Science, Nihon University, Dr. Eng.  
(Visiting Researcher, NIED)  
\*2 Assoc. Prof., Dept. of Eng. Mech. and Energy, University of Tsukuba, Dr. Eng.  
\*3 Prof., Dept. of Architecture, Hiroshima Univ., Dr. Eng.  
\*4 Assoc. Prof., Dept. of System Design Eng., Keio University, Dr. Informatics  
\*5 Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Ph. D.  
\*6 President, Allied Engineering Corporation, Dr. Eng.  
\*7 Contract Researcher, NIED, Dr. Eng.  
\*8 Senior Researcher, NIED, Dr. Eng.