

ASI-Gauss 法および E-Simulator による 4 層鋼構造骨組の 地震応答解析の V&V について

On the Verification and Validation of Seismic Response Analyses of the 4-Story Steel Frame Using ASI-Gauss Code and E-Simulator

○ 正 宮村 倫司 (日大, 防災科研) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Tomoshi Miyamura (Nihon University, 1 Tamura-machi Koriyama 963-8642, Japan)

Daigoro Isobe (University of Tsukuba)

Key Words: ASI-Gauss Code, E-Simulator, E-Defense, Parallel FE Analysis, Steel Frame, Collapse Analysis

1. はじめに

著者等¹⁾は, 世界最大の震動台である E-Defense で実施された 4 層鋼構造骨組完全崩壊実験²⁾の結果 (60%加震) と, ASI-Gauss 法³⁾および数値震動台 (E-Simulator)⁴⁾による地震応答解析の結果を比較した. 本研究では, ASI-Gauss 法による骨組解析モデルを更に高精度化し, 同様な比較を行う. また, 異なる解析コードの比較による解析モデルの検証 (verification) と, E-Defense 実験結果との比較による解析の妥当性の確認 (validation) について検討する.

2. E-Simulator による 4 層鋼構造骨組の地震応答解析⁵⁾

4 層鋼構造骨組を六面体ソリッド要素によりモデル化する. 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. モデルの詳細は文献 5) を参照するものとしてここでは省略する.

3. E-Simulator による合成梁のコンポーネント解析

4 層鋼構造骨組の合成梁や外壁等の部品 (コンポーネント) に対する要素実験が行われている. そこで, E-Simulator によるコンポーネントの解析を行い, 要素実験との比較を実施している⁶⁾. 合成梁の解析では, 梁の上のスラブの位置, コンクリートスラブの構成則だけでなく, 柱側面とスラブの接触を考慮することで, 実験結果とよく対応することが明らかになった. しかし, 現状では接触を考慮した動的解析の計算コストが高く, 2 節で述べた 4 層鋼構造骨組の解析モデルでは接触を考慮せず, 貫通としている.

4. ASI-Gauss 法による 4 層鋼構造骨組の地震応答解析

ASI-Gauss 法³⁾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の計算を可能とした手法である. 本手法では, 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で, 最小限の要素分割で高精度な解析を実現している.

骨組構造を全て 1 部材当り 2 個の線形チモシェンコ梁要素でモデル化する. スラブは等価な剛性および密度の要素でモデル化し, 合成梁効果は考慮しない. 階段や壁などは重量のみを考慮し, 床荷重として与える. 柱脚は固定とする. また, 鋼材の構成則はパイリニア型の等方硬化則とする. 材料定数は実大実験のブラインド解析コンテストで公開されたデータに基づいて決定した. モデルの規模は 5,970 自由度となる. 文献 1) のモデルとの違いは以下の通りである.

- 質量減衰を考慮する.
- ASI-Gauss 法では本来, 節点位置での曲げモーメントを評価するが, 今回は部材の厚みを考慮して接合部の根元

位置での曲げモーメントを評価する.

- スラブが梁の上に配置されるように, 梁要素によりオフセットを設定する.

計算時間については, 20 秒間の入力に対して, CPU: Intel I7 2.93 GHz × 1 の計算機で約 150 分であった.

5. 解析コードおよび解析モデルの検証と妥当性の確認

近年, 数値解析における V&V, すなわち, 解析コードの検証 (code verification) や計算の検証 (calculation verification), 妥当性の確認 (validation) の必要性が指摘されている. ここでは, 4 層鋼構造骨組に対して, ASI-Gauss 法に基づく骨組解析コードと E-Simulator という二種類の解析コードの結果と, E-Defense による実大実験の結果から, 主に解析モデルの verification と validation を行うことを考える. ASI-Gauss 法は, 連続体の近似理論である梁理論と塑性ヒンジモデルをベースとした手法である. 一方, ソリッド要素によるメッシュを用いる E-Simulator は, 連続体理論を離散化した手法に基づく解析コードである. 両者を比較することにより, 解析モデルの verification を相互に行うことができる.

建築構造物の解析では, 一般には実物に対する実験は不可能であるため, 通常, validation は材料試験レベル, あるいは, コンポーネント実験レベルで行う. E-Simulator では材料試験による validation だけで高精度な解析を実現することを目指している. しかし, 現状では E-Defense の実験結果に基づく構造物レベルでの validation の重要性は高い.

6. 実大実験, E-Simulator と ASI-Gauss 法による解析の比較

4 層鋼構造骨組の E-Defense による実大実験, E-Simulator による解析, ASI-Gauss 法による解析により得られた 1 層の層間変形角, 層せん断力の比較を図 1~4 に示す. X (短辺) 方向層間変形角については, E-Simulator による結果は 7 秒付近までの変位のピークを良好に計算している. しかし, それ以降の振幅が小さくなってからの応答については, 位相, 振幅共にずれがみられる. それに対して, ASI-Gauss 法による結果は, 実験結果を良好に再現している. Y (長辺) 方向層間変形角に関しても, E-Simulator による結果は 6 秒付近のピークはうまく捉えているものの, その後は変形角が正方向にドリフトしている. それに対して, ASI-Gauss 法は 6 秒付近のピークを除き, 非常に良好な結果となっている. 層せん断力についても層間変形角と似た傾向である. すなわち, 6 秒付近のピークは E-Simulator による解析の方がうまく捉えているものの, その後の挙動は ASI-Gauss 法の方が良好な結果である.

E-Simulatorの解析モデルの改良が進められており、最新の解析結果では、鋼材の構成則として複合硬化則に基づく構成式を導入すると、図2のようなドリフトが起こらず、非常に良好な結果が得られている⁷⁾。しかし、ドリフトが起こっていないASI-Gauss法の解析モデルでは複合硬化を考慮しておらず、応答に影響する要因について更なる検討が必要である。

X方向およびY方向の変形の比較を図5に示す。E-Simulatorの結果の方が平面内のねじれが大きいことがわかる。一方、文献5)に示した外壁のないE-Simulatorの解析モデルではねじれが小さい。ASI-Gauss法による解析モデルでは、外壁の剛性を考慮しておらず、ねじれは小さい。E-Defense実験におけるねじれの状況については更なる分析が必要である。

7. 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とASI-Gauss法による解析結果を比較した。解析モデルの検証 (verification) と妥当性の確認 (validation) について検討した。

謝辞 本研究の一部は、(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における成果である。また、データ等の整理には元筑波大院生の韓元相氏に協力していただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 宮村他, 建築学会大会梗概集B1, 2011, 233-234
- 2) 吹田他, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, 2009
- 3) 磯部, チョウ, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, 2004
- 4) 堀, 野口, 井根, 土木学会地震工学論文集, 2007
- 5) Miyamura et al., PNST, 日本原子力学会, 2, 2011, 651-656
- 6) 山下他, 建築学会大会梗概集 B1, 2011, 309-310
- 7) 山下他, 建築学会大会梗概集 B1, 2012 (発表予定)

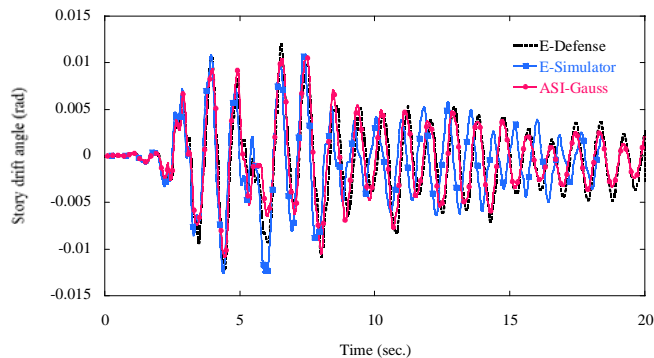


Fig. 1 The interstory drift angle on the 1st floor (X dir.)

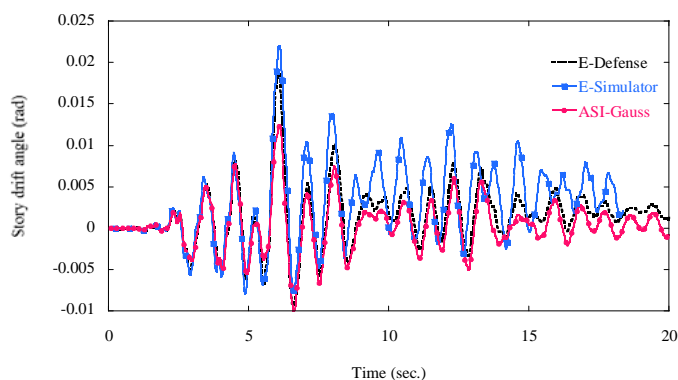


Fig. 2 The interstory drift angle on the 1st floor (Y dir.)

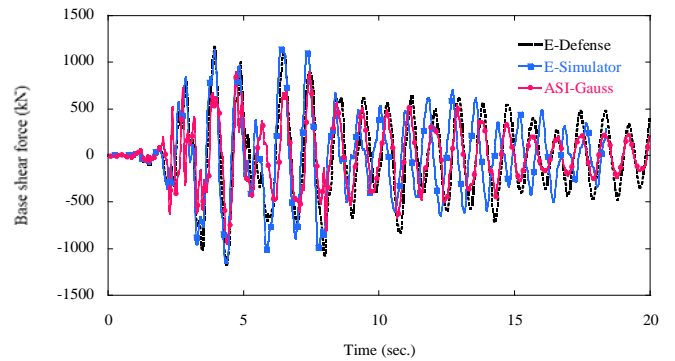


Fig. 3 The shear force on the 1st floor (X dir.)

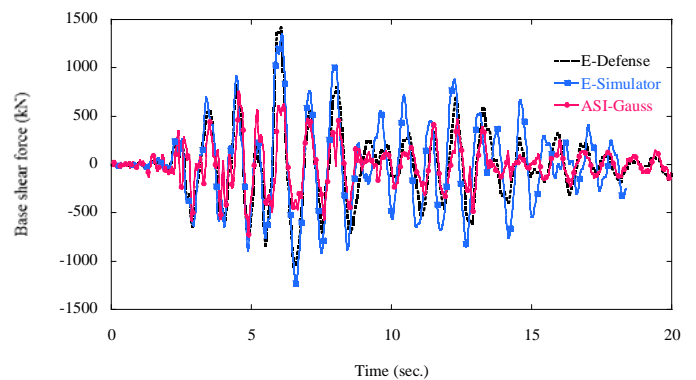


Fig. 4 The shear force on the 1st floor (Y dir.)

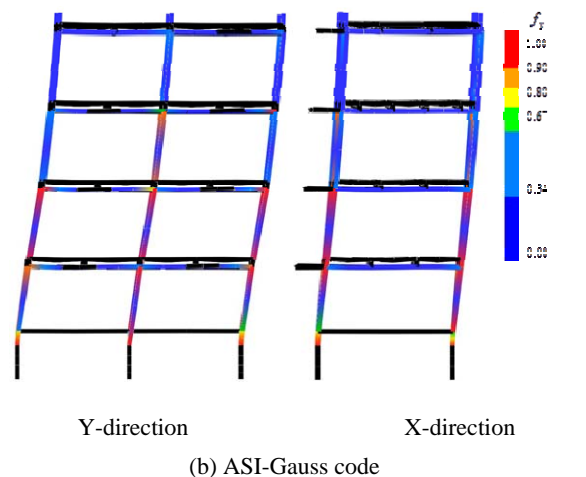
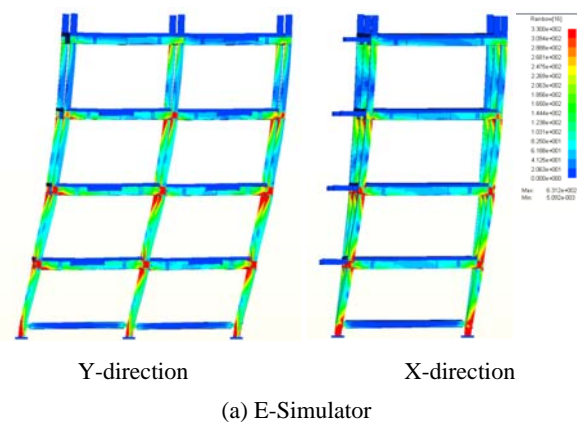


Fig. 5 Deformation (magnified 10 times) and distribution of the equivalent stress (E-Sim) or yield function value (ASI-G) at 6.0 s