

# ASI-Gauss法を用いた地震応答解析コードの性能検証

Performance Validation of Seismic Response Analysis Code Using ASI-Gauss Technique

韓 元相<sup>1)</sup>, 磯部 大吾郎<sup>2)</sup>

Wonsang Han and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, s1021033@edu.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 博 (工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, we discuss on a seismic response analysis code using the ASI-Gauss technique which is developed as a verification tool for the E-simulator, an ongoing research project by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED). The purpose of the research is to verify and validate the numerical results of the code using the ASI-Gauss technique with the one obtained by the E-Simulator, and with an actual shaking test result obtained by the three-dimensional shaking table at E-Defense.

**Key Words:** ASI-Gauss Technique, E-Simulator, E-Defense, Seismic Response Analysis

## 1. はじめに

防災科学技術研究所では「地震に強い国土・社会を創る」ことを目的として、建築物や人間の行動など様々な要素が大地震発生時に示す挙動について検証するため、「地震災害時空間シミュレーション・システム」[1]の開発を進めている。その中で、構造物の被害を予測するための解析ソフトウェアとして数値震動台(E-Simulator)[2]を開発している。E-Simulatorは、詳細なモデル(ソリッド要素)を用い、建築、土木構造物の解析に必要な構成則や破壊則を組み込んだ汎用的な並列有限要素解析のためのソフトウェアである。E-Simulatorの開発には、実大モデルを用いた震動実験およびマクロモデルによる解析システムが検証用として必要となる。実大モデルの震動実験には、実大3次元震動破壊実験施設(E-Defense)[3]を用い、マクロモデルによる解析システムには当研究室で独自に開発しているASI-Gauss法を用いた地震応答解析コード[4]を使う。

本研究では、ASI-Gauss法を用いた地震応答解析コードについて、まず簡単なモデルの収束計算による性能検証を行い、次に、E-Simulatorによる31層モデル解析結果との比較・検証、E-Defenseで行われた4層モデル震動実験結果との比較・検証を実施した。

## 2. 解析手法

### (1) ASI-Gauss 法

当研究室で開発したASI-Gauss法[5]とは、通常の有限要素法に比べ少ない要素数でも高精度の収束解が得られる順応型Shifted Integration法(ASI法)[6]を改良したものである。線形チモシェンコはり要素を用いるASI法は弾性域で精度が落ちる欠点があるため、それを以下のように改良することで変位解の精度を向上させた。図1に示すように、2つの要素を1つのサブセット要素としてまとめ、ガウス積分点の位置に応力評価点を配置する。これは、ガウス積分

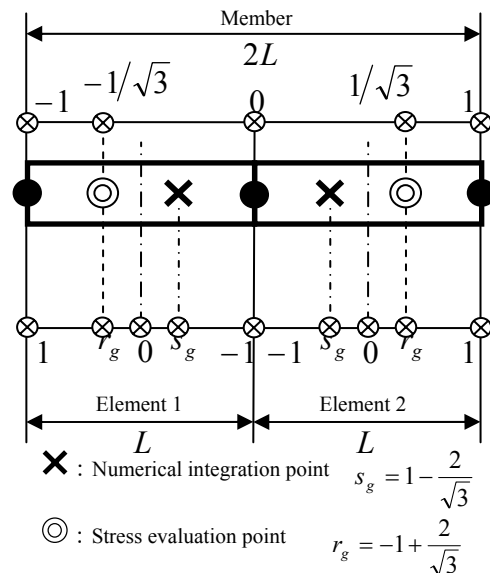


図1 ASI-Gauss 法における数値積分点と応力評価点の位置

点が2点積分法における最適な積分点位置であり、そこで評価される曲げ変形の精度が数学的に保証されることを利用している。この時の数値積分点位置 $s_g$ と応力評価点位置 $r_g$ は(1)式のようなになる。

$$s_g = -r_g \tag{1}$$

### (2) 支持点加振アルゴリズム

本研究で使う地震応答解析コードでは、構造の支持点へ地震波を入力している。支持点に任意の加振を受ける構造物に対する増分型の運動方程式は、次式のように表される。

$$[M_1]\{\Delta\ddot{u}\} + [M_2]\{\Delta\ddot{u}_b\} + [K_1]\{\Delta u\} + [K_2]\{\Delta u_b\} = 0 \quad (2)$$

ただし,  $[M_1]$ ,  $[M_2]$ ,  $[K_1]$ ,  $[K_2]$ はそれぞれ, 質量マトリックス, 剛性マトリックスであり, 下添字1は支持点でない点同士の連成項, 下添字2は支持点でない点と支持点の連成項であることを表す. また  $\{\Delta\ddot{u}\}$ ,  $\{\Delta u\}$ はそれぞれ, 節点加速度増分ベクトル, 節点変位増分ベクトルであり, 下添字  $b$ は支持点における成分であることを示す. この方程式を解くにあたり, 支持点でない変位増分  $\{\Delta u\}$ を, 準静的変位増分  $\{\Delta u_s\}$ と動的変位増分  $\{\Delta u_d\}$ の和で成り立っていると仮定する. 同様に加速度増分に関してこの仮定を適用すると, 以下の関係が得られる.

$$\{\Delta u\} = \{\Delta u_s\} + \{\Delta u_d\} \quad (3a)$$

$$\{\Delta\ddot{u}\} = \{\Delta\ddot{u}_s\} + \{\Delta\ddot{u}_d\} \quad (3b)$$

ここで, 式(2)において慣性力を無視した場合 ( $[M_1]\{\Delta\ddot{u}\} = 0$ ,  $[M_2]\{\Delta\ddot{u}_b\} = 0$  および  $\{\Delta u_d\} = 0$ )の解は, 次式のように求められる.

$$\{\Delta u_s\} = -[K_1]^{-1}[K_2]\{\Delta u_b\} \quad (4)$$

また, 支持点の加振成分  $\{\Delta\ddot{u}_b\}$ に対して抵抗がないと仮定すれば, 構造物の静的な挙動は剛体運動となるため,

$$\{\Delta\ddot{u}_b\} = \{\Delta\ddot{u}_s\} \quad (5)$$

の式が成り立つ. 式(3), (4), (5)を用いると, 式(2)は次式ようになる.

$$[M_1]\{\Delta\ddot{u}_d\} + [K_1]\{\Delta u_d\} = -([M_1] + [M_2])\{\Delta\ddot{u}_b\} \quad (6)$$

式(6)を用いると, 最初に支持点の節点加速度増分  $\{\Delta\ddot{u}_b\}$ を右辺に与えて相当荷重を求め, その後Newmarkの  $\beta$ 法を用いて計算することで, 変位解を得ることができる.

### 3. 解析結果

#### (1) 収束計算

まず, ASI-Gauss 法を用いた地震応答解析コードの有効性を確認するために収束計算を行った. 図2のような簡単な1層1スパン立体フレームに対し, 加速度データとして図3に示すJMA-Kobe波のEW成分原波150%をX軸方向に与え, 数値積分点を要素中央に配置する通常法

の解析結果と, ASI-Gauss 法を用いる地震応答解析コードの結果を比較する. その際, フレーム上面左手前の角におけるX軸方向の変位の推移を調べる. 図4は, 時刻5sから15sまでの結果を拡大したものである. 通常法は収束が遅く, 1部材32要素分割程度でようやく収束解が得られる(図4(a))が, ASI-Gauss 法は2要素分割でも収束解が得られた(図4(b)). また, ASI-Gauss 法の2要素分割の結果は通常法64要素分割の収束解に相当することが, 通常法とASI-Gauss 法の結果の比較から確認できた(図4(c)). 解析の計算時間はCPU: Intel Pentium4 3GHzのPCで通常法の64要素分割が約6,600s, ASI-Gauss 法の2要素分割が約10sであった.

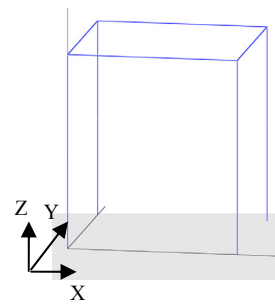


図2 モデルの形状

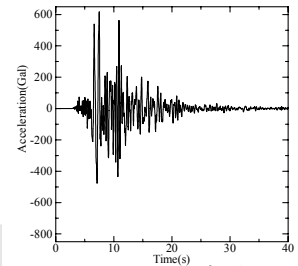
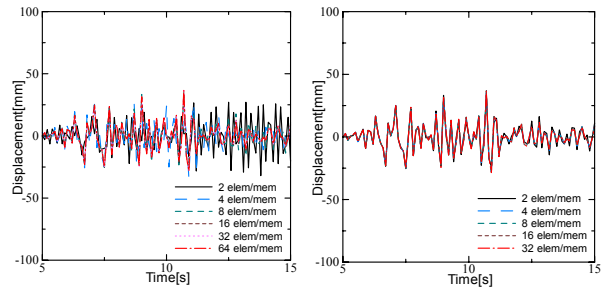
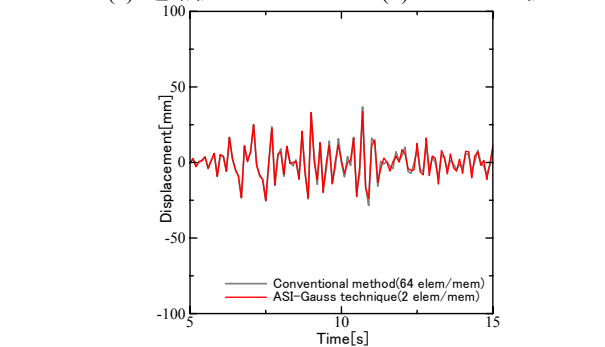


図3 入力波形 (JMA-KOBE 波 EW 成分 150%)



(a) 通常法

(b) ASI-Gauss 法



(c) 通常法収束解と ASI-Gauss 法による解の比較

図4 収束計算の結果

#### (2) E-Simulator の解析結果との比較・検証

前節では簡単なモデルを用い, ASI-Gauss 法の有効性を検証した. 本節では, E-Simulator で行った31層鋼構造モデルの解析結果と比較することで, ASI-Gauss 法を用いた地震応答解析コードの性能検証を行う. 図5(a)のモデルはE-Simulator で用いられているモデルで, ソリッド要素を使い, 床や柱とはりの接合部等も詳細に表現さ

れたものである[7]。図 5(b)は ASI-Gauss 法で用いるモデルで、はり要素のみを使うため、床や接合部は表現されていない。本節では両者の解析結果の比較を行う。加速度として与える地震波は、図 6 に示す 1995 年度兵庫県南部地震の JR 鷹取波の主要動を含む 10s の区間を抽出したものである。32 階(屋上)における隅柱中央の変位の推移を調べ、E-Simulator の結果と比較したものを図 7 に示す。両者は概ね良好に一致しているものの、変位に多少差が出ている。その理由としては、まず ASI-Gauss 法では塑性化領域を塑性ヒンジとしてモデル化している点が挙げられる。ソリッド要素で分割した詳細モデルを用いる E-Simulator に比べ、はり要素を使う ASI-Gauss 法では塑性化領域を正確に再現するのは難しい。また、ASI-Gauss 法の変位がやや大きくなる理由としては、減衰を考慮していない点と床の剛性が正確に考慮されていない点などが挙げられる。ただし、計算時間は E-Simulator が東大の T2K (CPU: AMD Quad Core Opteron 2.3GHz) で平均 12,312s/step となったのに対し、ASI-Gauss 法では一般の PC (CPU: Intel Core 2 1.86GHz) で解析終了まで 15,358s であり、ASI-Gauss 法が E-Simulator より大幅に短い時間で計算できることが確認できた。

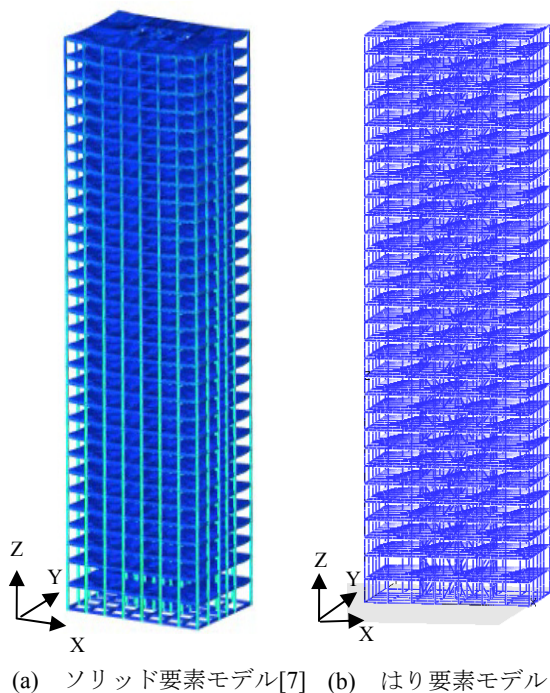


図 5 31 層鋼構造モデル

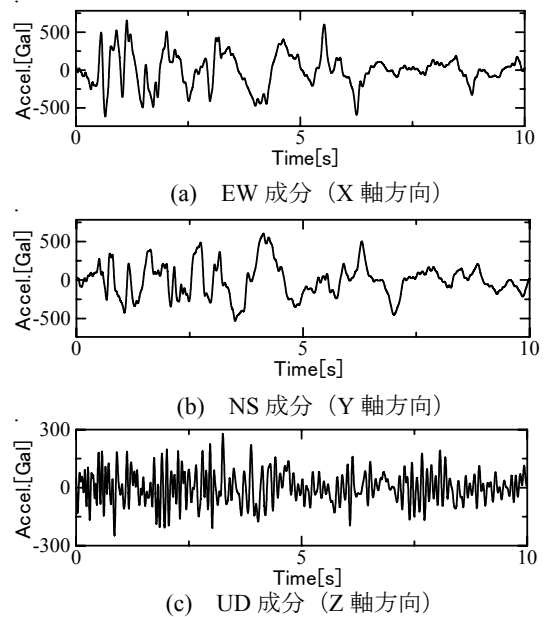


図 6 入力波形 (JR 鷹取波)

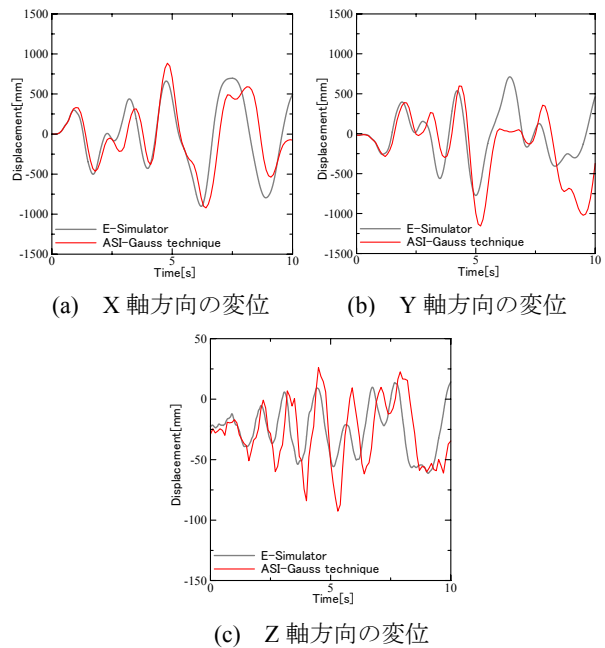
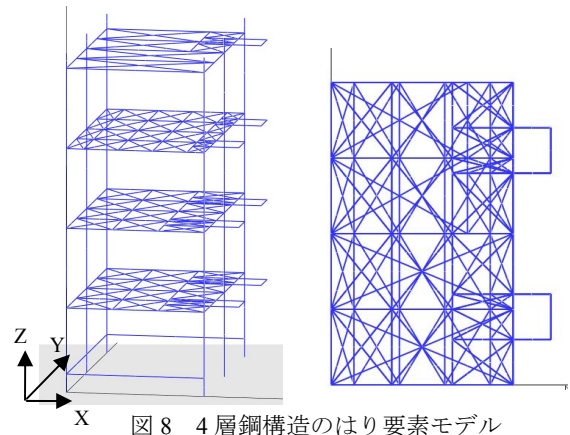


図 7 屋上階の変位時刻歴

### (3) E-Defense の実験結果との比較検証

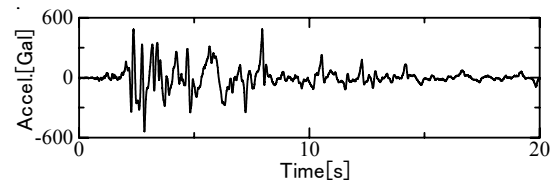
本節では、実大モデルによる E-Defense の震動実験結果と比較し、ASI-Gauss 法を用いた地震応答解析コードの性能検証を行った。対象の構造物は 4 層鋼構造モデルであり、これを線形要素でモデル化したものを図 8 に示す。床には周囲の梁と同じ剛性値の梁を斜めに入れ、床スラブを表現した。また、1 階の基礎柱の曲げ剛性は、基礎部の剛性を考慮に入れて通常の柱の 2 倍とした。入力地震波としては、JR 鷹取波 60% に対する実大試験における震動台上加速度 20s までのものを用いた (図 9)。減衰は前節と同様に考慮していない。解析の計算時間は CPU: Intel Xeon 2 GHz の PC で約 3,300s

であった。観測地点を各階床面の中心位置とし、1 層の X, Y 軸方向(EW,NS 成分)の層間変形角と層せん断力を出力した。その結果を E-Defense の実験結果と比較したものを図 10 および図 11 に示す。両者の結果は概ね良好に一致しているが、特に X 軸方向の結果で確認できるように、層間変形角や層せん断力の解析結果が実験結果に比べ小さくなる領域がある。これは、はり要素のみを用いる ASI-Gauss 法では、壁や梁と柱の接合部などを詳細にモデル化されていないため、実験で出現した現象を完全には再現できなかった可能性があると考えられる。また、全体的に剛性が低めとなり固有周期が長くなる傾向も図 10 および図 11 に出ている。

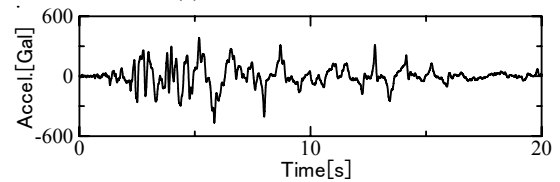


#### 4. おわりに

本稿は、数値震動台に対する比較・検証用ツールとしての ASI-Gauss法を用いた地震応答解析コードの性能検証を目的として、簡単なモデルから大規模なモデルまで解析を行った。その結果、ASI-Gauss法を用いることで、少ない要素数でも地震応答の評価ができ、短時間で高精度の解が得られることが確認できた。また、E-Defenseによる実地震動実験結果と比較した結果、概ね良好に一致することも確認できた。しかし、ソリッド要素による詳細解析結果に比べ、剛性が低めに評価されたり、塑性化領域の評価が粗いなどという問題点があるため、この点に注意して解析を進める必要がある。今後、減衰の考慮などを含め、モデル化の問題点を抽出し、再解析を行う予定である。



(a) EW 成分 (X 軸方向)



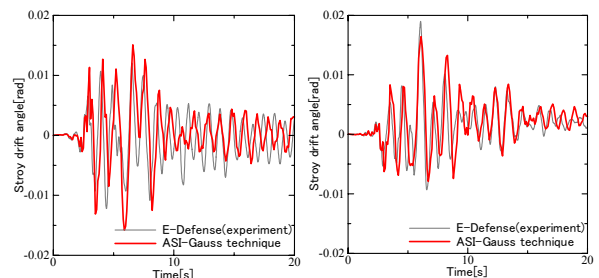
(b) NS 成分 (Y 軸方向)

図 9 入力波形

(JR 鷹取波 60%台上加速度 EW,NS 成分)

#### 参考文献

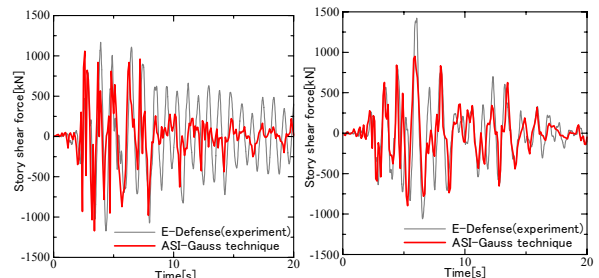
- [1] 「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」(諮問第 24 号)に対する答申の概要, [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/09/09/970906.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/09/09/970906.htm)
- [2] 堀宗朗, 野口裕久, 井根達比古, 秋葉博: 建築・土木構造物の大規模地震応答数値解析手法の開発, 日本地震工学会年次大会-2007 梗概集, pp.14.
- [3] 「実大三次元震動破壊実験施設」(E-ディフェンス), <http://www.bosai.go.jp/hyogo/>
- [4] 片平直樹, 磯部大吾郎, 井根達比古, 梶原浩一: マクロモデルを用いた骨組構造の地震崩壊解析コードの検証, 日本機械学会第21回計算力学講演会講演論文集 CD-ROM, No.08-33, (2008), pp.63-64.
- [5] 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 航空機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, (2004), pp. 39-46.
- [6] 都井裕, 磯部大吾郎: 骨組構造の有限要素崩壊解析における順応型Shifted Integration法, 日本造船学会論文集, 第171号, (1992), pp.309-317.
- [7] 宮村倫司, 磯部大吾郎, 小檜山雅之, 大崎純, 堀宗朗, 秋葉博, 梶原浩一, 井根達比古: E-Simulator による鋼構造超高層骨組の仮想震動実験と骨組解析の比較, 日本建築学会2010年度大会(北陸)学術講演梗概集.



(a) 1層の X 軸方向

(b) 1層の Y 軸方向

図 10 層間変形角



(a) 1層の X 軸方向

(b) 1層の Y 軸方向

図 11 層せん断力