

ASI-Gauss 法による鉄骨構造の動的地震崩壊解析（その 1）

— 動的地震崩壊解析コードの開発（定式化を中心に） —

正会員 ○井根達比古*¹ 同 磯部大吾郎*² 準会員 片平直樹*³ 正会員 梶原浩一*⁴

2. 構造・3 応用力学・構造解析

数値震動台、梁要素、非線形 FEM、ASI-Gauss 法、地震崩壊、鉄骨構造

1. 序

数値震動台の整備については、旧科学技術庁の諮問機関への第 24 号答申、「地震防災研究基盤の効果的な整備のあり方について」（平成 9 年 9 月 3 日）にその必要性が述べられている。すなわち、都市部の地震災害は社会的影響が大きく「地震に強い国土・社会を創ること」が必須であること、そのため中核目標として「地震災害時空間シミュレーションシステム」の開発が必要であり、とりわけ数値震動台の開発が重要であることが強調されている。

地震時における構造崩壊過程の物理現象解明には、実大 3 次元震動破壊実験施設（Eーディフェンス）による実験が必要である[1]。数値震動台の開発では、地震時崩壊過程の物理現象を厳密に追跡することが必要であり、実大 3 次元震動破壊実験結果に基づく数値モデルを基礎として構築されるべきである。数値震動台の最終形態は、統合的な各種数値モデル体系となることが想定されており、従来型マクロモデル[2] から超精密超大規模のミクロモデル[3]、およびミクロ・マクロモデルによるマルチスケールモデル[4]などがその構成要素となる。

マクロモデルは、3 次元固体力学問題を 1 次元力学特性のみに縮約した梁理論、同じく、2 次元に縮約したシェル理論に見られるような、ある方向の応力や歪み成分を無視することで数学的に簡略化した力学モデルと言える。また、広義には柱梁接合部を含む部分架構を 1 つの要素とするような、いわば簡易型計算モデルも含むものであるが、数学的簡略化のため適用範囲に制限があるものの、構造の全体崩壊挙動を予測するには有効な手段である[1,5-7]。そのため、災害予測の高度化、効率化、高速化を実現するためのマクロモデル解析の高精度化は、地震減災費用低減技術開発の面からも重要である。

そこで、本論文では、マクロモデルとして梁要素を用いた鉄骨構造の動的崩壊解析アルゴリズムについて述べる。ここでは、計算における時間増分を大きく出来ることから陰的時間積分法を採用し、幾何学非線形は更新ラ

グランジェにより考慮した。塑性崩壊解析を効率よく行えることから、都井が開発した ASI 法[7]を基に、磯部が改良、発展させた ASI-Gauss 法[5, 6]を使用する。以下、第 2 章では ASI-Gauss 法による崩壊解析アルゴリズム、第 3 章では数値例、最後に、第 4 章で結言を述べる。

2. ASI-Gauss 法による崩壊解析アルゴリズム

2.1 要素及び解析座標系

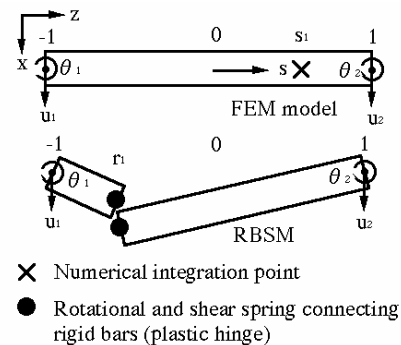


図 1 線形 Timoshenko 梁要素と RBSM の物理的等価性

ASI-Gauss 法は、線形 Timoshenko 梁要素を 2 要素で 1 つのサブセット要素とし、弾性域ではその応力評価点をガウス積分点に置く方法である。

図 1 に本有限要素モデルと要素座標系を剛体バネモデル（Rigid Body Spring Model : RBSM と略称する）との物理的等価性を対比して示した。2 種類の梁要素の歪みエネルギーの等価性から数値積分位置と塑性ヒンジ発生点位置の関係は、

$$s_1 = -r_1 \quad (1)$$

と表される。ここに、 s_1 と r_1 はそれぞれ、図 1 の要素座標系において数値積分位置と塑性ヒンジ位置を示す。弾性域での応力評価点の最適位置は、通常の ASI 法では梁要素中央点であるが、ASI-Gauss 法ではサブセット要素内で 3 次梁要素と同様に図 2 に示される位置となる。

$$s_g = -r_g \quad (2)$$

ここで、 s_g と r_g はそれぞれ ASI-Gauss 法の弾性域にお

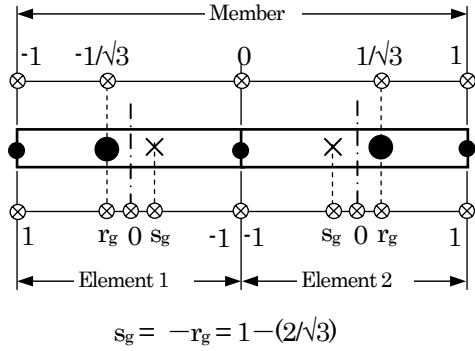


図2 ASI-Gauss 法の数値積分点と応力評価点位置

ける数値積分位置と応力評価点位置である。

2.2 形状関数と変位自由度

要素節点は x, y, z 軸のそれぞれに関し並進変位と回転変位の 6 自由度を持ち、参照面上の任意点座標、変位増分など形状関数 N_I を用いて以下のように近似する。

$$\{\Delta u_I\} = [\Delta u_{xI} \ \Delta u_{yI} \ \Delta u_{zI} \ \Delta \theta_{xI} \ \Delta \theta_{yI} \ \Delta \theta_{zI}]^T \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_i &= \sum N_I \Delta u_{iI} \\ \Delta \theta_i &= \sum N_I \Delta \theta_{iI} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 N_I は形状関数で下式による。

$$N_I = \frac{1}{2}(1 + \xi_I \xi) \quad (5)$$

2.3 変位・歪み関係

要素座標系を参照して、歪み増分を変位増分により表すと以下ようになる。

ひずみ増分ベクトルは次のように表すことができる。

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B] \{\Delta u_I\} \quad (6)$$

ここで、ひずみ増分ベクトル $\{\Delta \varepsilon\}$ 、節点増分ベクトル $\{\Delta u_I\}$ とし、歪み・変位行列 B を次のように定義する。

$$B_I = \frac{\partial N_I}{\partial z} \quad (7)$$

即ち、

$$\{\Delta \varepsilon(r_g)\} = [B(s_g)] \{\Delta u\} \quad (8)$$

2.4 応力と歪みの関係

$$\{\Delta \sigma(r_g)\} = [D_e(r_g)] \{\Delta \varepsilon(r_g)\} \quad (9)$$

2.5 要素剛性方程式

仮想仕事の原理より、要素剛性行列は 1 点積分を前提

に下式により表せる。

$$[K] = L [B(s_g)]^T [D_e(r_g)] [B(s_g)] \quad (10)$$

2.6 要素内応力場の仮定と降伏判定

梁理論によれば、曲げモーメントと剪断力は次の釣り合い式を満たす。

$$V_x = -\frac{dM_x}{dz}, \quad V_y = -\frac{dM_y}{dz} \quad (11)$$

曲げモーメントおよび剪断力の要素内の分布は、増分形表示により、

$$\begin{aligned} \Delta M_x(s) &= \Delta M_x(s_g) - \Delta V_y(s_g) \frac{L}{2}(s + s_g) \\ \Delta M_y(s) &= \Delta M_y(s_g) - \Delta V_x(s_g) \frac{L}{2}(s + s_g) \end{aligned} \quad (12)$$

と表される。上式は、要素内に分布荷重が存在しない場合、曲げモーメントが線形に変化し要素両端 ($s = \pm 1$) の何れかで絶対値が最大となることを示している。曲げモーメント以外の断面力 (一般化応力) は要素内で一定値を取ると仮定し、下記の降伏関数から要素内の塑性化の位置 (全塑性化位置) を判定する。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{px}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{py}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_p}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_{pz}}\right)^2 - 1 = 0 \quad (13)$$

ここで、 M_x, M_y, M_z, N は、それぞれ、 x, y 軸周りの曲げモーメント、 z 軸周りの振りモーメント、軸力を示す。右下添え字の p は、全断面塑性値を意味する。ここでは、降伏に対する剪断力の影響を無視した。

梁要素の両端のいずれかが塑性化または破断した直後の増分計算ステップでは、要素内の積分点を(1)式に従って移動(Shift)する。例えば、全塑性状態の断面が要素の右端($s_1=1$)に発生した場合、数値積分点は要素の左端($s_1=-1$)に移動させる。同様に、全塑性断面が要素の左端($s_1=-1$)に発生したら数値積分点は右端($s_1=1$)へ移動させればよい。この時、要素剛性行列、一般化歪み増分ベクトル、一般化応力 (断面力) 増分ベクトルは、ASI 法と同様に下式で与えられる [5,6]。

$$[K] = L [B(s_1)]^T [D_p(r_1)] [B(s_1)] \quad (14)$$

$$\{\Delta \varepsilon(r_1)\} = [B(s_1)] \{\Delta u\} \quad (15)$$

$$\{\Delta \sigma(r_1)\} = [D_p(r_1)] \{\Delta \varepsilon(r_1)\} \quad (16)$$

ここで、 $[D_p]$ は塑性の応力・歪み関係行列である。

以上の積分点の移動操作（シフト操作）を順応的に行うことで、最小限の要素数で塑性崩壊解を求めることが出来る。メモリの消費量を節約するため線形連立方程式のソルバーに共役傾斜法（CG法）を使用した。動的問題の質量行列は、整合質量行列を採用し、前述のように陰解法（Newmarkの β 法、 $\beta=4/9$ ）を用いた。また、減衰は無視した。

3. 数値例

3.1.1 層1スパン（x、y方向）建物の1軸方向支持点加振による応答解析

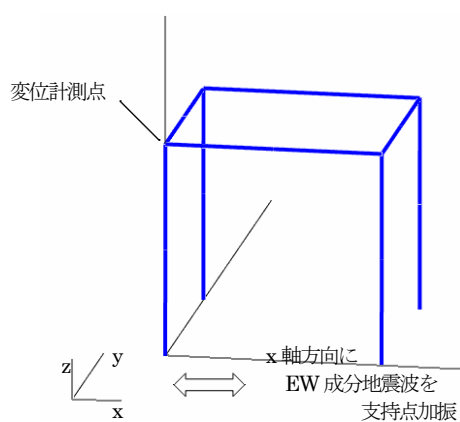


図3 解析モデル

ヤング係数E：206 GPa ポアソン比：0.3
 密度：7900 kg/m³
 降伏応力度：245 MPa 接線係数：0.0E
 加振入力波：JMA-Kobe (EW成分、1軸加振)
 時間増分：5 ms
 計算ステップ数：8000 step
 合計加振時間 = 40 s
 部材長：L = 2.0 m
 部材断面積：A = 2500 mm²
 部材断面2次モーメント：I_x=I_y=5.21×10⁵ mm⁴

図4 解析諸元

立体骨組みが1軸の支持点加振を受ける場合について弾塑性解析を実施した（図3,4）。図5に時間軸を1/2倍した加振入力（加速度、JMA-Kobe, EW成分）の時刻歴、図6に層間変位の時刻歴応答を示した。通常法やASI法に比してASI-Gauss法は収束性、弾性域の精度ともに良好である。

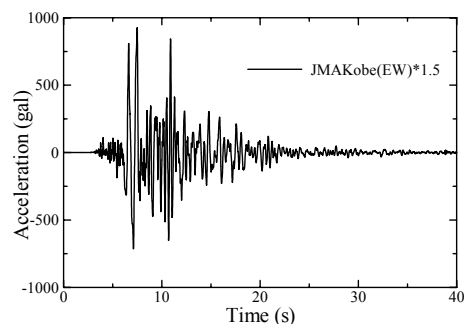
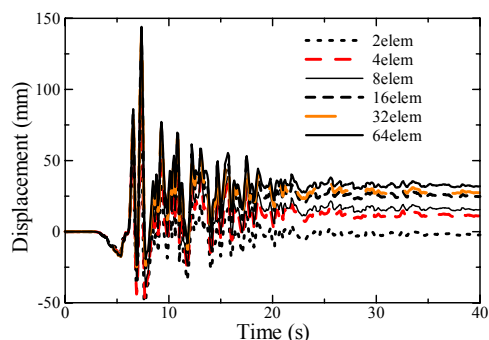
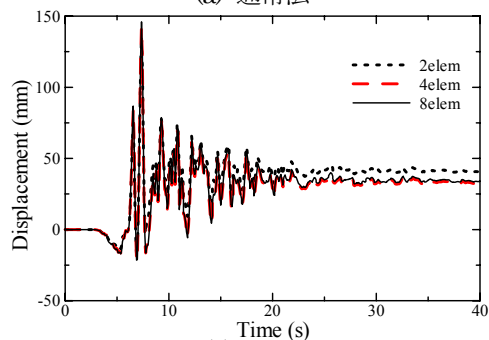


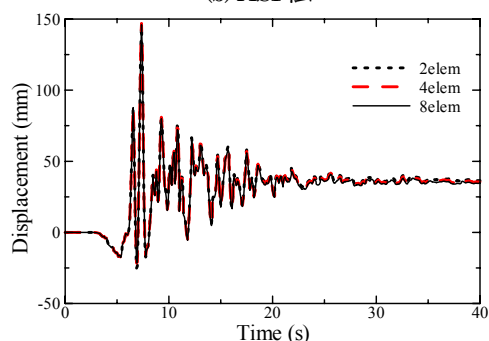
図5 加振入力波



(a) 通常法



(b) ASI法



(c) ASI-Gauss法

図6 層間変位の時刻歴応答計算結果

3.2 1層1スパン（x、y方向）建物の3軸方向支持点加振による応答解析

3.1節の例題と同じモデル（図3,4）で、3軸加振入力波による応答計算を行った。加振入力波としては、図5(EW成分)に加え、図7のJMA-KobeのNSおよびUD成分を加えた。3軸加振の場合も、ASI-Gauss法は他の方法と比し

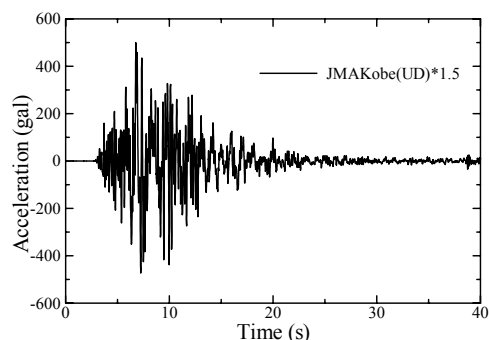
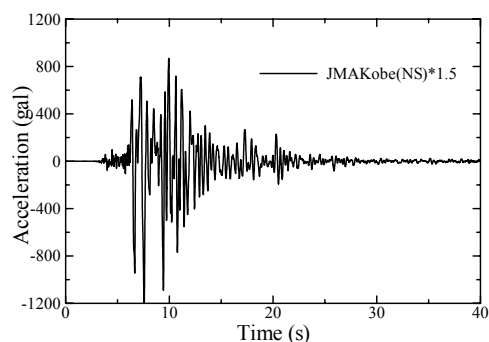
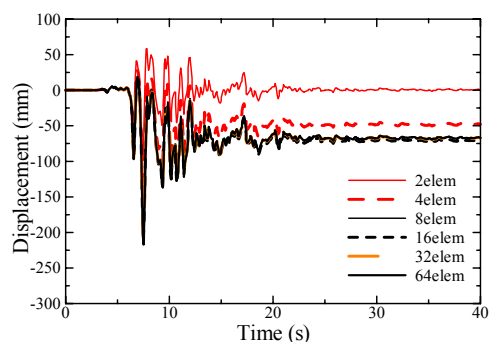
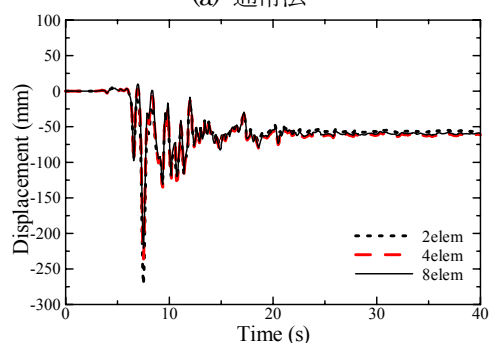


図7 加振入力波 [JMA-Kobe NS, UD成分]



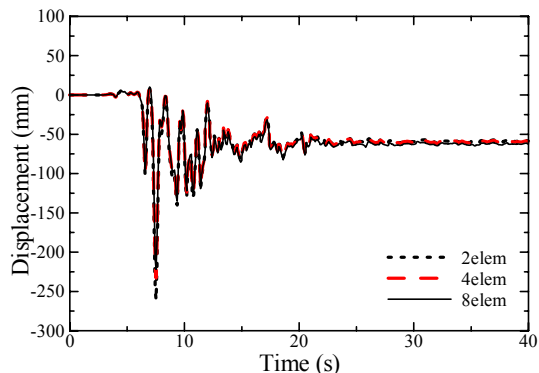
(a) 通常法



(b) ASI法

図8 層間変位時刻歴応答 [JMA-Kobe NS成分]

て収束性に優れることが分かる。



(c) ASI-Gauss法

図8 層間変位時刻歴応答 [JMA-Kobe NS成分] 続き

4. 結言

本研究で得られた結論は以下のとおり。

- 1) ASI-Gauss法を用いた線形 Timoshenko 梁要素による鉄骨骨組み構造の崩壊解析ソフトを作成した。
- 2) 数値例を通じて、本解析アルゴリズムの妥当性を確認し、通常法など他の方法に比して収束性に優れることを示した。

今後の研究として、引き続き本シミュレータによる鉄骨2層骨組みの地震崩壊解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 井根、他、有限要素法による鉄骨構造の動的崩壊解析(その1、2)、2006年日本建築学会九州支部研究発表会、2007.3
- 2) 都井、他、構造要素の衝突破壊強度に関する基礎的研究(その1)、日本造船学会論文集、第159号、昭和61年5月
- 3) 渡邊、他、脳震盪限界に関する頭部衝撃シミュレーション、計算工学講演会論文集、Vol.11、日本計算工学会、2006年6月
- 4) Guedes J.M. and Kikuchi N., Preprocessing and postprocessing for Material Based on the Homogenization Method with Adaptive Finite Element Methods, *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engrn.*, 83 (1990), 149-198
- 5) 磯部、他、飛行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年5月
- 6) K.M. Lynn and D. Isobe, Finite element code for impact collapse problems of framed structures, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, in press.
- 7) Y. Toi and D. Isobe, Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 36, 2323-2339, 1993.

*1 (独) 防災科学技術研究所 招聘研究員・博(工)
 *2 筑波大学大学院 助教授・博(工)
 *3 筑波大学工学システム学類
 *4 (独) 防災科学技術研究所 主任研究員・博(工)

Invited Research Fellow, NIED, Dr. Eng.
 Associate Professor, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.
 Student, University of Tsukuba
 Senior Researcher, NIED, Dr. Eng.