

ASI-Gauss 法を用いた RC 構造物に対する地震崩壊解析コードの開発

Development of Seismic Collapse Analysis Code for RC Framed Structures Using ASI-Gauss Technique

○非 恩田 江理 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Eri ONDA, Graduate School, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

1. 緒言

1950年代以降,日本中に広まった鉄筋コンクリート(RC)構造物に対して,大地震の被害を受ける度に様々な解析が行われてきた.骨組構造物の解析を行う際には従来から多様な解析ツールが用いられ,中でも有限要素法(FEM)による解析は,その汎用性と簡便性から多く利用されている.しかし,動的荷重下において部材破断や部材間接触を伴うような強非線形かつ不連続性の高い現象を十分に把握することは困難であり,計算効率の高い高精度な動的解析手法が必要とされていた.そこで,解析する上で計算コストを最小限に抑え,多種多様なパラメータ計算を可能とした ASI-Gauss 法[1]が開発され,構造物の柱やはりなどの部材レベルまでの動的挙動の把握が可能となった.

本稿では,解析の対象を RC 構造物とする.既存の ASI-Gauss 法を用いた地震応答解析アルゴリズムに対し RC 構成則を導入し,静的・準静的・動的解析を行いアルゴリズムの有効性を検証した.さらに,地震応答解析コードに部材破断および部材間接触アルゴリズムを導入し,地震崩壊解析を実施した.

2. RC 構造物の静的・準静的解析

単純支持柱に静的および準静的な荷重を加える解析を行い,RC 構成則を ASI-Gauss 法に導入した場合の有効性および解析結果の妥当性を検証した.RC 部材のひび割れ強度および降伏強度として使用した諸式[2]を以下に示す.

◇曲げひび割れ強度

$$M_c = 1.8\sqrt{F_c} \cdot Z_e + \frac{N Z_e}{A_c} \quad (1)$$

◇曲げ降伏強度

・柱

① $N_{\min} \leq N < 0$ のとき

$$M_y = 0.5(a_g \sigma_y + N)g_1 D \quad (2a)$$

② $0 \leq N \leq N_b$ のとき

$$M_y = 0.5a_g \sigma_y g_1 D + 0.5ND\{1 - N/bDF_c\} \quad (2b)$$

③ $N_b < N \leq N_{\max}$ のとき

$$M_y = \{0.5a_g \sigma_y g_1 D + 0.24(1 + g_1)(3.6 - g_1)bD^2 F_c\} \times (N_{\max} - N)/(N_{\max} - N_b) \quad (2c)$$

$$N_{\min} = -a_g \sigma_y \quad (3a)$$

$$N_{\max} = bDF_c + a_g \sigma_y \quad (3b)$$

$$N_b = 0.22(1 + g_1)bDF_c \quad (3c)$$

・はり

$$M_y = 0.9a_t \sigma_y \quad (4)$$

◇せん断ひび割れ強度

$$Q_c = \left(1 + \frac{N}{150bD}\right) k(500 + F_c) \frac{0.085}{M/Qd + 1.7} \quad (5)$$

◇せん断終局強度

$$Q_y = \left[\frac{0.115k_u \cdot k_p(180 + F_c)}{M/Qd + 0.115} + 2.7\sqrt{p_w \cdot s f_{wy}} + 0.1 \frac{N}{bD} \right] bj \quad (6)$$

◇降伏時の剛性低下率

$$\alpha_y = \left(0.043 + 1.65n \cdot p_t + 0.043 \frac{M}{Qd} + 0.33\eta_0\right) \left(\frac{b}{D}\right)^2 \quad (7)$$

ここで, b : 柱幅, D : 柱せい, h_0 : 柱の内法高さ, d : 有効せい, g_1 : 主筋重心間距離, A_c : RC 部材の断面積= bD , F_c : コンクリートの圧縮強度, σ_y : 鉄筋の降伏強度, $s f_y$: 引張鉄筋降伏応力度, $s f_{wy}$: せん断補強筋の引張降伏応力度, Z_e : 鉄筋を考慮した断面係数= $1.1Z = 1.1bD^2/6$, n : コンクリートと鉄筋のヤング率比, N : 軸方向力, M/Qd : せん断スパン比, η_0 : 軸力比= $N/A_c F_c$, j : 応力中心間距離= $7d/8$, k_c : 部材せいの係数= 0.7 , k_u : 部材寸法の係数= 0.7 , k_p : 引張鉄筋比の補正係数= $0.82p_t^{0.23}$, p_t : 引張鉄筋比= a_t/bD , p_w : せん断補強筋比= a_w/bx , a_t : 引張鉄筋断面積, a_g : 全主筋断面積, a_w : せん断補強筋 1 組の断面積, x : せん断補強筋の間隔である.

Fig.1 に示すせん断破壊先行型の柱(caseA, 短柱)をモデル化し,通常の有限要素法(以下,通常法)および ASI-Gauss 法を用いて静的解析を実施した.通常法の 2 要素分割解析では,数値積分点並びに応力評価点が常に要素の中心にあるため,弾性域で起こる曲げひび割れを表現できず,せん断ひび割れのみが生じ,最後にせん断終局に至っている.しかし,その他の要素分割数での解析では通常法および ASI-Gauss 法のどちらについても解に大きな差異は見られない.これは,せん断力が部材内のどの点でも同じ値を取るためである.また,実験値[3]と比較してもほぼ一致しており,用いた構成則の妥当性が示された.次に, Fig.2 に示す曲げ破壊先行型の柱(caseB, 長柱)では,通常法において収束解を得るために要素分割数を多く必要とするのに対し,ASI-Gauss 法では 1 部材あたり 2 要素分割で収束解を得ることが可能であることが示された.また, Fig.3 に示す繰り返し荷重下における準静的解析を実施した結果, Fig.4 に示す実験値[3]と Fig.5 に示す通常法の収束解および ASI-Gauss 法の 2 要素分割解との比較により,後者の解および用いた Degrading tri-linear 型部材モデル[4]が妥当であることが示された.

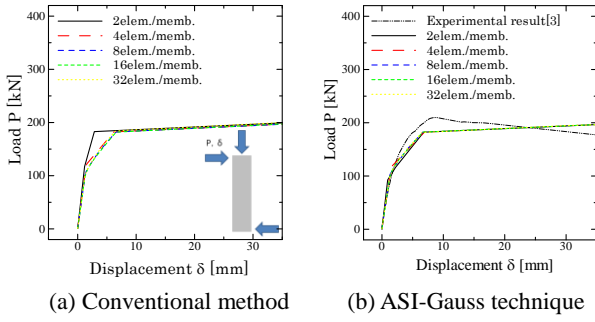


Fig.1 Simply supported column subjected to axial force and shear force (case A)

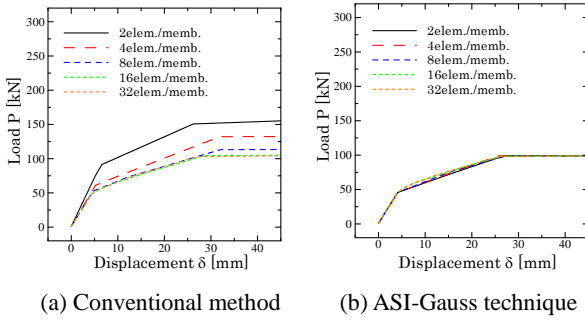


Fig.2 Simply supported column subjected to axial force and shear force (case B)

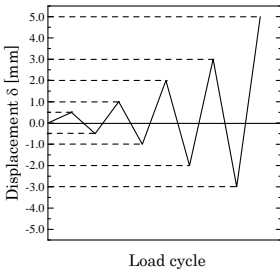


Fig.3 Applied load cycle

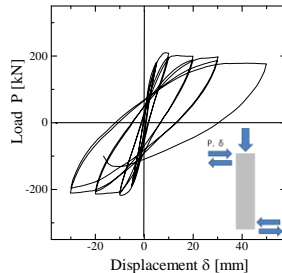


Fig.4 Experimental result[3]

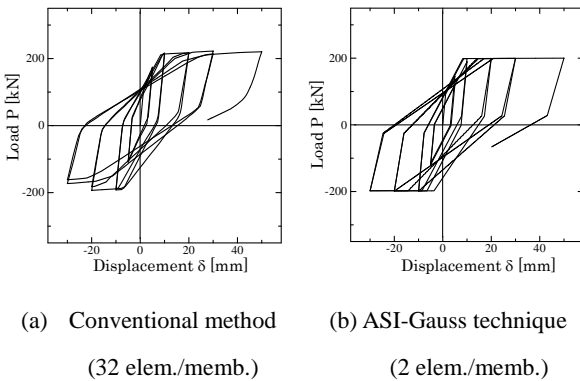


Fig.5 RC column under repeated quasi-static load

3. 支持点加振アルゴリズム

前節では、静的・準静的な荷重を受ける RC 骨組構造の弾

塑性解析において ASI-Gauss 法の有効性を検証し、妥当な解析結果が得られることを確認した。本節では動的問題に拡張し、ASI-Gauss 法による解析の妥当性を検証する。ここでは支持点加振アルゴリズムについて説明する。

本研究では、構造支持点を加振することで地震動を表現している。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。

$$[M_1]\{\Delta\ddot{u}\} + [M_2]\{\Delta\ddot{u}_b\} + [K_1]\{\Delta u\} + [K_2]\{\Delta u_b\} = 0 \quad (8)$$

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、節点変位増分であり、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ついてもこの仮定を適用すると、以下の関係が得られる。

$$\{\Delta u\} = \{\Delta u_s\} + \{\Delta u_d\} \quad (9a)$$

$$\{\Delta\ddot{u}\} = \{\Delta\ddot{u}_s\} + \{\Delta\ddot{u}_d\} \quad (9b)$$

ここで、式(8)において慣性項を無視した場合($[M_1]\{\Delta\ddot{u}\}=0$ 、 $[M_1]\{\Delta\ddot{u}_b\}=0$ 、 $\{\Delta u_b\}=0$)の解は、次式のように求められる。

$$\{\Delta u_s\} = -[K_1]^{-1}[K_2]\{\Delta u_b\} \quad (10)$$

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、

$$\{\Delta\ddot{u}_b\} = \{\Delta\ddot{u}_s\} \quad (11)$$

の式が成り立つ。式(9)、(10)、(11)を用いると、式(8)は次式のようにになる。

$$[M_1]\{\Delta\ddot{u}_d\} + [C_1]\{\Delta\dot{u}_d\} + [K_1]\{\Delta u_d\} = -([M_1] + [M_2])\{\Delta\ddot{u}_b\} \quad (12)$$

上記の式を解くには最初に加速度増分 $\{\Delta\ddot{u}_d\}$ を右辺に与え、相当荷重を求め、その後 Newmark の β 法を用いて速度や変位の計算を行う。

4. 部材破断および接触を考慮した地震崩壊解析

ASI-Gauss 法を用いて S 造構造物に対する地震崩壊解析を実施する場合、低計算コストで精度の高い解析が実施可能であった。本研究では、この解析コードを RC 構造物用に拡張し、また崩壊現象をより詳細に表現するために、部材破断および部材間接触アルゴリズムを導入した。まず、破断に至る過程および破断の際のアルゴリズムについて説明する。部材が破断する時の塑性率として破断塑性率を定め、その値を柱では 5.0~10.0、はりでは 10.0~20.0 の範囲で適宜設定することとした[5]。破断臨界値としては、部材の破断塑性率 df_{xexp} 、 df_{yexp} および破断せん断ひずみ γ_{xexp} 、 γ_{yexp} を使用し、このうち一つでも以下に示す条件式を満たした場合に断面力を解放することで部材の破断を表現する。

$$\frac{df_x}{df_{xexp}} - 1 \geq 0 \text{ or } \frac{df_y}{df_{yexp}} - 1 \geq 0 \quad (13)$$

$$\frac{\gamma_x}{\gamma_{xexp}} - 1 \geq 0 \text{ or } \frac{\gamma_y}{\gamma_{yexp}} - 1 \geq 0 \quad (14)$$

次に、部材間接触アルゴリズムについて説明する。要素間距離が入力値として与えた部材幅以下であった場合に節点を結ぶ線分の角度を調べ、その角度が鋭角であったとき接

触するものと判定し、関係する節点間を計4本のギャップ要素で結ぶことで接触を表現する。

以上のアルゴリズムを用い、8層RC骨組構造に対する地震崩壊解析を実施した。入力加速度にはFig.6に示すSCT波を振幅方向に150%にしたものを用いた。Fig.7に構造強度の異なる2種類のモデルの崩壊挙動を示す。赤色は塑性化した要素を表し、灰色は破断した要素を示す。Fig.7(a)では建築基準が1980年以前のRC構造物を模擬しており、地震動がピークを迎える前に、中層部から崩壊した。Fig.7(b)は(a)のモデルより部材幅・部材定数など強固に設定したものである。こちらにおいては、地震動のピーク時に低層部の柱が破断し、完全崩壊に至った。

5. 結言

本稿では、ASI-Gauss法を用いたRC骨組構造の地震崩壊解析コードを開発した。本手法は、材料性状に合わせて数値積分点をシフトする点が従来の手法とは異なる。既存の有限要素解析コードへの導入は比較的容易ではあるが、RC部材の特性を精度良く表現するために数値積分点位置について検証する必要があった。静的・準静的解析を行い、せん断変形・曲げ変形が卓越する場合において、ASI-Gauss法が通常法に比べて収束性が優れていることを確認した。さらに、本

手法に部材破断および部材間接触のアルゴリズムを導入し、RC構造物の地震崩壊挙動を良好に再現することを可能とした。

今後は、大型構造物での地震崩壊解析を行い、実現象との比較をすることで安定したアルゴリズムの開発を目指すとともに、地震波の伝播位相差が構造物に与える影響を考慮し、隣接する建物の棟間衝突解析を実施する予定である。

参考文献

- [1] 磯部 大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 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, pp. 39-46.
- [2] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証がた耐震設計指針(案)・同解説, 日本建築学会, 1997.
- [3] 金久保 利之, 園部 泰寿: 高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第441号, 1992, pp.63-72.
- [4] 梅村 魁: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法, 中層編, 技報堂出版, 1982.
- [5] 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 日本建築学会, 1990.

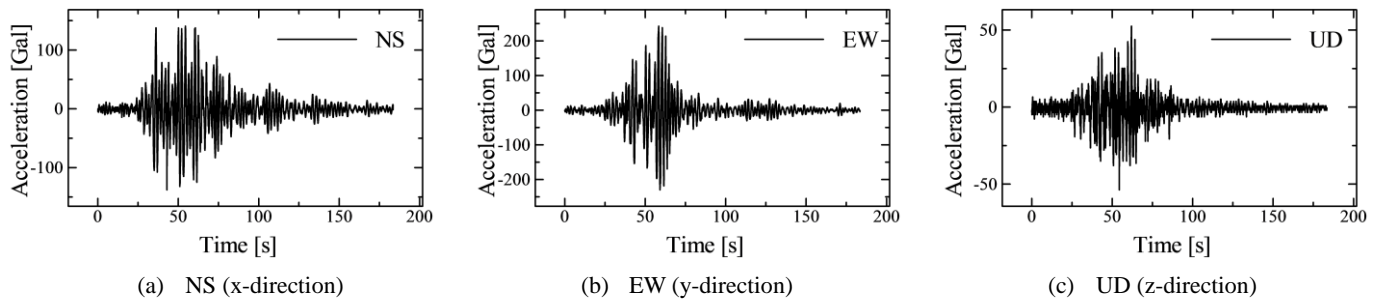


Fig.6 SCT seismic wave

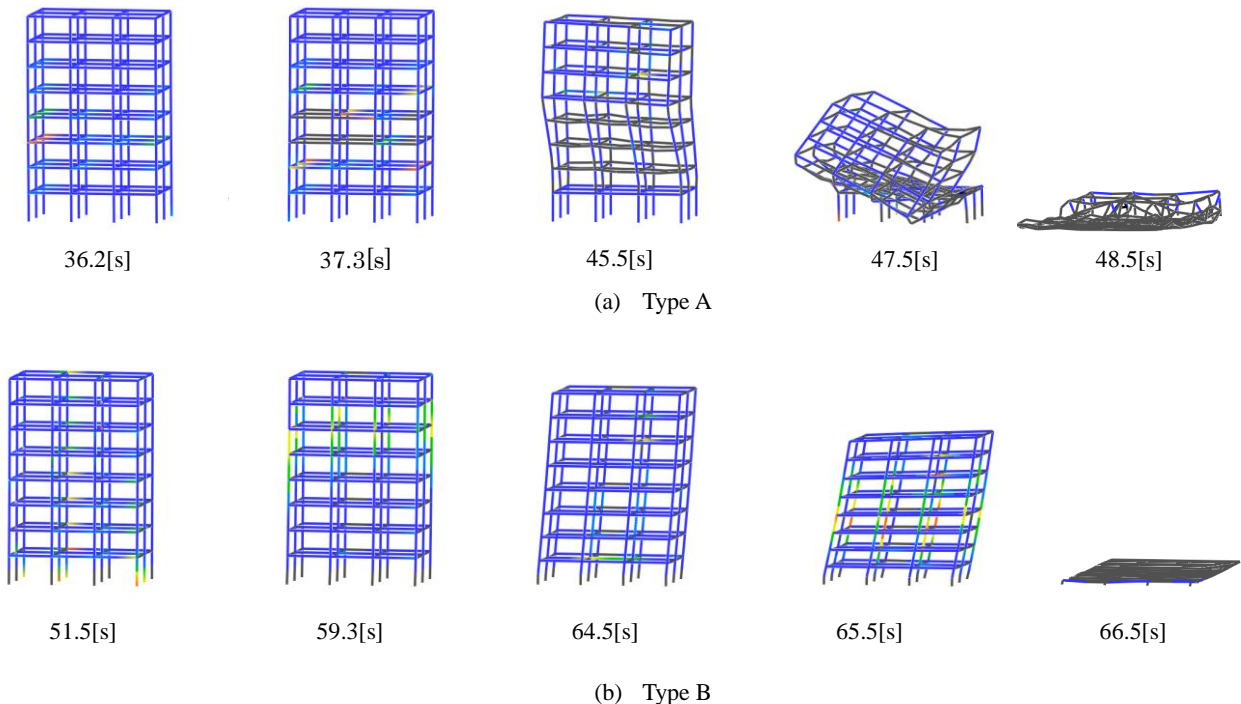


Fig.7 Seismic collapse analysis of RC building model