

ASI-Gauss法を用いたRC骨組構造の地震崩壊解析コードの開発と適用例

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

恩田 江理¹⁾, 磯部 大吾郎²⁾
Eri Onda 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, e0611326@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 study, a new seismic collapse analysis code for reinforced concrete (RC) framed structures using the ASI-Gauss technique is developed. The degrading-tri-linear type model for an RC member is implemented into the code and some static and dynamic numerical tests are carried out to verify the code. We also carried out a seismic collapse analysis to investigate the collapse behavior of the CTV building, which totally collapsed in the New Zealand earthquake on February 22, 2011.

Key Words: ASI-Gauss Technique, Seismic Collapse Analysis, RC Framed Structures

1. はじめに

現在は地震に対して、新たに建造されるものだけでなく、既存の構造物にも高い耐震性が求められている。耐震性の高い構造物を設計・建造するためには、力が加わった状態で構造物がどのように挙動を示すか把握する必要がある。そのために行われている構造解析の中でも、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性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、既存の ASI-Gauss 法を用いた解析ツールに RC 構成則を導入し、RC 部材に対する ASI-Gauss 法の有効性を検証した。RC 部材をモデル化し、静的・準静的解析による実験値との定量的な比較を行った。次に、ASI-Gauss 法を用いた RC 構造物の動的解析を行った。2011年2月22日にニュージーランド南島の最大都市クライストチャーチで発生した M6.3 の地震で倒壊したカントベリーテレビ (CTV) ビルに対し、写真などから寸法や柱配置を推定してモデル化し、その崩壊挙動について検証した。推定値に基づいた解析のため、あくまでも定性的な評価にとどまるが、建物の北側側面に構造的に強いエレベータ部分が配置されていたためにそれを中心に建物全体に大きな振れ振動が生じ、各階の柱が一気に水平耐力限界を超えて崩壊に至ったことを裏付ける結果となったのでここに報告する。

2. RC構造物の静的・準静的解析

単純支持柱をモデル化し、静的および準静的な荷重を加える解析を行い、ASI-Gauss 法に RC 構成則を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

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

◇曲げ降伏強度

・柱

① $N_{min} \leq N < 0$ のとき

$$M_y = 0.5(a_g\sigma_y + N)g_1D \quad (2a)$$

② $0 \leq N \leq N_b$ のとき

$$M_y = 0.5a_g\sigma_yg_1D + 0.5ND\{1 - N/bDF_c\} \quad (2b)$$

③ $N_b < N \leq N_{max}$ のとき

$$M_y = \{0.5a_g\sigma_yg_1D + 0.24(1 + g_1)(3.6 - g_1)bD^2F_c\} \times (N_{max} - N)/(N_{max} - N_b) \quad (2c)$$

ここで、

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

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

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

・はり

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

◇せん断ひび割れ強度

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

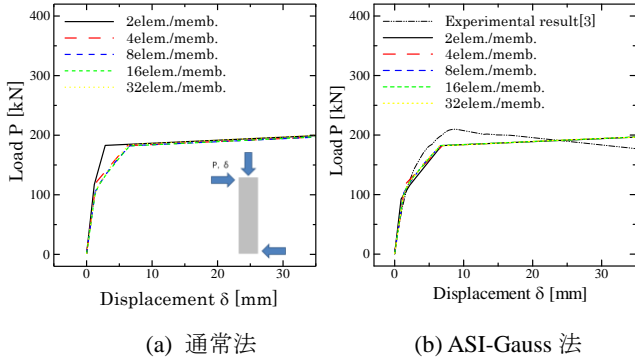


図1 RC 単純支持柱の静的解析結果
(ケース A)

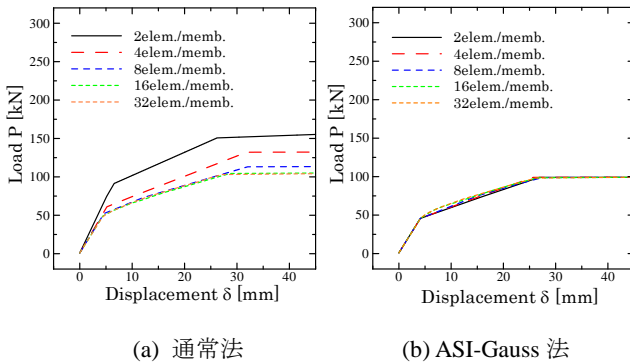


図2 RC 単純支持柱の静的解析結果
(ケース B)

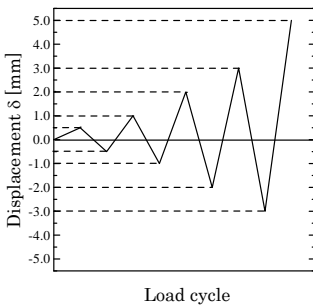


図3 荷重サイクル

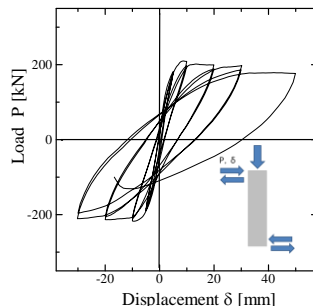


図4 実験値[3]

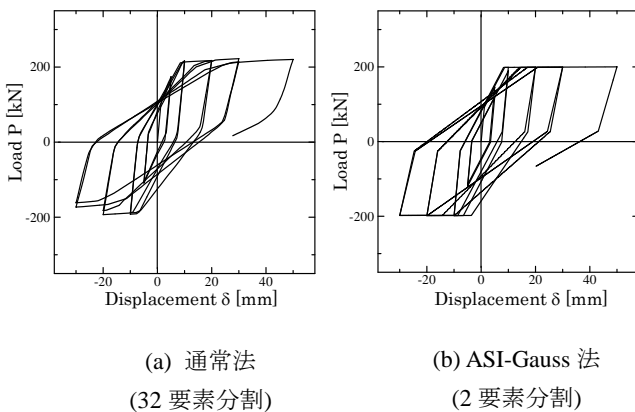


図5 RC 単純支持柱の繰り返し荷重下における
準静的解析結果

◇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_l : 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、 f_y : 引張鉄筋降伏応力度、 f_{yw} : 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。

図 1 に示すせん断破壊先行型の柱 (ケース A, 短柱 $h=100[\text{cm}]$) をモデル化し、通常有限要素法 (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剛性低下が生じた後にせん断終局に至っている。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収束解に大きな差異は見られない。これは、せん断力は部材内のどの位置でも同じ値を取るため、数値積分点の数および位置に依存しないためである。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といえる。次に、図 2 に示す曲げ破壊先行型の柱 (ケース B, 長柱 $h=200[\text{cm}]$) 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、図 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、図 4 に示す実験値[3]と図 5(a)に示す通常法による収束解との比較から、図 5(b)に示す ASI-Gauss 法の 2 要素分割による tri-linear 型部材モデル[4]の妥当性が示された。

3. 部材破断および接触アルゴリズム

(1) 部材破断判定

本解析で使用する部材破断判定式には、部材を構成する各要素の曲率、引張軸ひずみおよびせん断ひずみによる次式を用いた。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \text{ or } \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1 \quad (8)$$

$$\left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1$$

表 1 解析モデル部材リスト (柱)

	断面寸法(mm)	配筋
エレベータ部分	800×800	16-D35 2-D10@100
4~6 階	400×400	8-D29 2-D10@200
2, 3 階	500×500	8-D29 2-D10@200
1 階	500×500	16-D29 2-D10@200

表 2 解析モデル部材リスト (はり)

	断面寸法(mm)	配筋
1~6 階, エレベータ部分	400×600	4-D22 2-D10@200

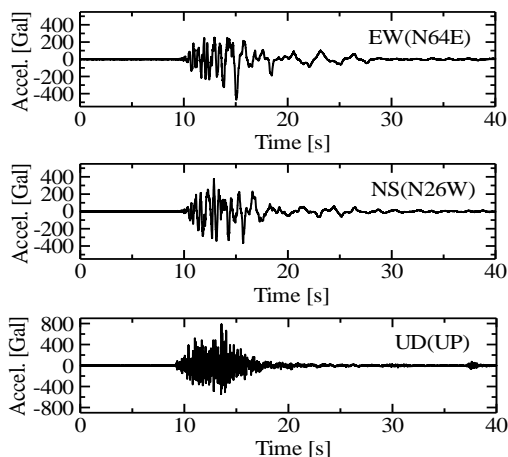


図 12 入力地震波(CCCC 波)

5. 解析結果

地震崩壊解析に用いた入力加速度は、CTV ビル近辺で観測された CCCC 波 (図 12) である。波形入力後、13[s]程からエレベータ部分を中心に徐々に揺れ振動が増大し、その際にビル前面の柱に大きく負担がかかった。その後、25[s]付近で生じた 3 階での層崩壊を起点として建物が一気に倒壊する様子が確認できた。

6. おわりに

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。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アルゴリズムを導入することで、RC 建造物の崩壊解析を可能とし、クライストチャーチでの CTV ビルの地震崩壊解析を行った。内部構造や部材寸法等を推定して建造物をモデル化しているため、定量的にその倒壊要因を特定できたとは言えないが、構造的に強い箇所を中心に偏心運動が起これ、それがきっかけとなって倒壊に至ったことを裏付ける結果を得ることができた。

謝辞

本研究で用いた入力波について、筑波大学構造エネルギー工学専攻の境有紀教授より助言を頂いた。また、解析モデルの構築にあたり、筑波大学大学院博士前期課程 1 年の賀鐘輝君に協力して頂いた。ここに記して謝意を示したい。

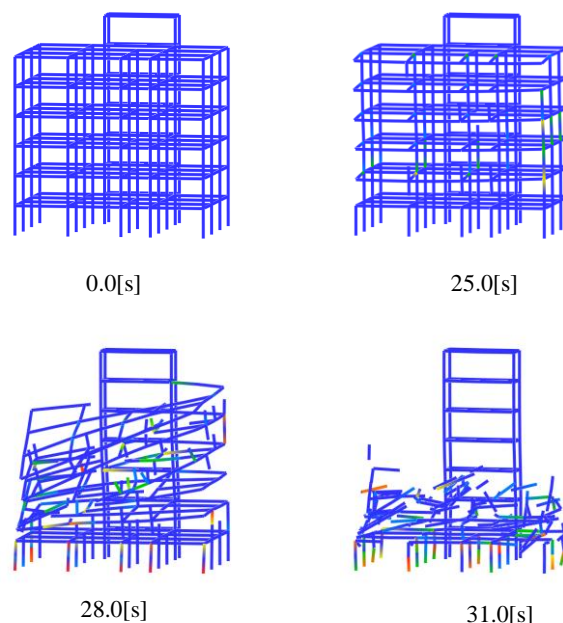


図 13 CTV ビルの崩壊挙動

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型耐震設計指針 (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.