

# ASI-Gauss法を用いた骨組構造の火災崩落解析

Fire-Induced Collapse Analysis of Framed Structures Using ASI-Gauss Technique

○ 磯部大吾郎<sup>1)</sup>, 小室 友暢<sup>2)</sup>  
Daigoro Isobe and Tomonobu Omuro

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

2) 修 (工) (株) ケンウッド (〒192-8525 東京都八王子市石川町2967-3)

An adaptive finite element code using linear Timoshenko beam elements called the adaptively shifted integration (ASI) technique and its modified version, the ASI-Gauss technique, have been applied to various numerical simulations on the collapse of framed structures. One of its recent applications was a full model simulation of the aircraft impact with the New York World Trade Center (WTC) Tower 2 in 9/11 terrorist attack in 2001. According to the simulation, springback phenomena due to rapid unloading occurred in the core columns during the impact, which might have caused the destruction of member joints. In this paper, we performed another simulation to investigate the effect of fire occurred in a high-rise tower. The results clearly show the effect of the weak member joints, which were reported to be 20 to 30 % of the strength of the members in WTC towers, and also the effect of the strength reduction due to elevated temperatures.

**Key Words:** Fire-Induced Collapse, World Trade Center Towers, ASI-Gauss Technique, FEM

## 1. はじめに

2001年9月のNY世界貿易センター(WTC)ビルの完全崩壊は、世界中を震撼させた。FEMA[1]およびNIST[2]の調査報告書では、WTCビルの崩壊は航空機衝突後の大規模火災が主原因で起きたとしているが、例えば延焼範囲の規模や柱・はりの変形挙動がタワー全体の強度に与えた影響や、崩壊時の落下速度が飽和速度に近いとされた原因について、調査が十分に行われたとは言い難い。本研究では、骨組構造の崩壊解析に有効なASI-Gauss法を火災崩落解析に適用し、建物全体の設計強度や部材接合強度、火災の発生範囲などがその後の崩壊挙動にどのような影響を与えるか検証した。破断判定には、実験データに基づいた部材接合部の破断臨界値を採り入れた。また、火災による温度上昇に伴う熱膨張および部材耐力(ヤング率、降伏応力)の低下を考慮した。設計強度(柱の太さ2種類)、部材接合部強度(強弱2種類)、火災パターン(3種類)を組み合わせ、25層高層モデルで火災崩落解析を実施した結果、強度が弱いと崩壊しやすいこと、火災パターンによっては強度が強くても崩壊する可能性があることなどが確認されたので、ここに報告する。

## 2. 解析手法とモデル

解析には、大規模骨組構造の構造解析において最小限のコストで計算が可能である、ASI-Gauss法[3]を基に独自開発した有限要素解析コードを使用した。25層3スパン構造物の解析モデルは、線形チモシェンコはり要素で構築した。総要素数2000、総節点数1416である。構造強度による相違を比較するため、2種類のモデルを作成した。1つ目は1層部分の柱をBOX鋼□-600\*600\*18\*18、2つ目は□-430\*430\*13\*13とし、その太さを上層方向へ5層ごとに段階的に細くした。梁はH型鋼とし、床荷重は4.0 kN/m<sup>2</sup>と想定した。

ところで、WTCビルの柱の継手は主に板厚34mmのエンドプレート方式で、接合部には4~6本のボルト接合が施されていた。そのため、この接合部は曲げ、せん断力に対して弱く、その耐力は、柱の曲げ塑性耐力の20%か

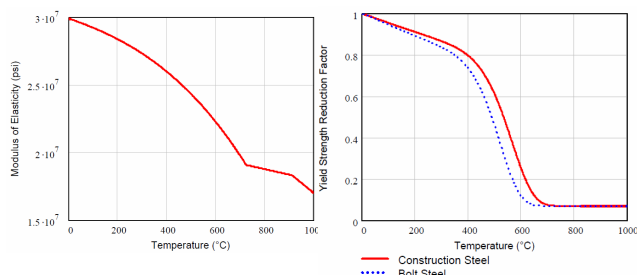
ら30%程度とされている[1]。ダブルトラスなどのはり接合部についても、同様に簡易な接合方式が採られていた。日本の建物では部材と同等の強度が接合部に求められており、その観点ではWTCは比較的脆弱であったと言える。本研究では接合部強度係数 $C_M$ を入れた以下の降伏関数を用い、接合部の脆弱性を表現した。

$$f = \left( \frac{M_x}{C_M M_{x0}} \right)^2 + \left( \frac{M_y}{C_M M_{y0}} \right)^2 + \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 + \left( \frac{M_z}{M_{z0}} \right)^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

ここで、 $M_x, M_y$ は $x, y$ 軸回りの曲げモーメント、 $N$ は軸力、 $M_z$ はねじりモーメントである。下添え字“0”は、各断面力成分が単独で部材断面に作用した場合の全断面塑性値であることを示す。 $C_M$ は0.0~1.0の値をとり、柱の曲げ塑性耐力に対する強度の比を陽に表す。本研究では、日本の建物とWTCの接合部強度の相違を比較するため、 $C_M=1.0$ と $C_M=0.2$ の場合について考察した。また、破断判定式としては以下の式を用いた。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{fx}} \right| - 1 \geq 0 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{fy}} \right| - 1 \geq 0 \quad \text{or} \quad \left( \frac{\epsilon_z}{\epsilon_{fz}} \right) - 1 \geq 0 \\ \text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{fzx}} \right| - 1 \geq 0 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{fyz}} \right| - 1 \geq 0 \quad (2)$$

ここで、 $\kappa_x, \kappa_y$ は $x, y$ 軸回りの曲率、 $\epsilon_z$ は引張り軸ひずみ、 $\gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ は $x, y$ 軸方向のせん断ひずみ、 $\kappa_{fx}, \kappa_{fy}, \epsilon_{fz}, \gamma_{fzx}, \gamma_{fyz}$ はそれぞれの破断臨界値である。破断臨界値には、継ぎ手の静的加力実験データ[4]を使用した。温度上昇に伴う鋼材の耐力低下曲線としては、図1に示すNIST[2]のものを使用した。これは、鋼材に耐火被覆を施さない場合のものであるが、火災の一般的な温度である700℃付近において、ヤング率(図1(a))は常温時の約60%、降伏応力(図1(b))は約15%まで低下することを示している。解析では、飛行機の衝突により耐火被覆が剥離し、区画の柱・はりが図2に示すように約7分間で線形的に700℃の温度まで上昇するように想定した。また、解析の



(a) ヤング率 (b) 降伏応力  
図1 鋼材の耐力低下曲線[2]

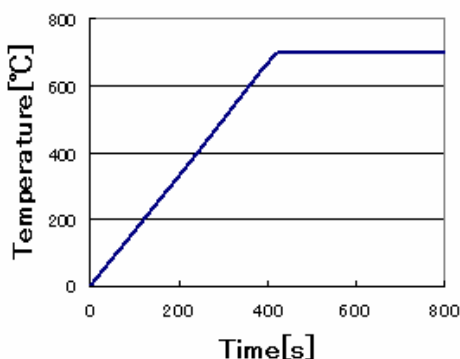


図2 温度上昇時刻歴曲線

ソルバーには共役傾斜法 (CG 法), 非線形増分理論に Updated Lagrangian Formulation (ULF), 時間積分には Newmark の  $\beta$  法 (数値減衰を目的に  $\delta=5/6, \beta=4/9$  に設定) を用いた. さらに, 各ステップにおける変位増分を監視し, それに合わせて時間増分を制御するアルゴリズムを導入し, 初期増分を 1.0 s, 崩壊時などの動的領域では 1.0 ms となるように設定した. 崩壊の有無で多少変化するが, PC (1.86GHz Intel Core2, 3.92GB RAM) による計算時間は約 3 時間 (約 8000 ステップ) であった.

### 3. 解析結果

図 3 に解析結果の一例を示す. 1 層部分の柱が  $\square$ -430\*430\*13\*13 で, 上層方向へ順次細くなるモデルに対し, 17~19 階の 3 層全区画分が同時に火災を起こした状態を想定している. 図 3(a)は接合部強度が大きい場合 ( $C_M=1.0$ ), 図 3(b)は小さい場合 ( $C_M=0.2$ ) の結果である. 破

断要素は図より削除した. 接合部強度が大きい場合には上層部が崩壊した際に下層部は耐えたが, 接合部強度が小さい場合には上層部崩壊時の衝撃力により下層部が連鎖反応的に破壊され, 最終的には完全崩壊に至った.

一連の解析結果から, 以下のことが分かった. すなわち, 柱が細く, 接合部強度が小さい場合には, 余剰強度が小さいために崩壊する危険性が高い. また, 柱が太く, 接合部強度が大きい場合にも, 火災パターンによっては崩壊する危険性がある. 崩壊する場合には接合部強度が小さい場合の方が完全崩壊に至る可能性が高く, さらに, 上層部崩壊時の落下速度は, 下層部でエネルギーが吸収されるため飽和速度よりはゆっくりとした速度であった.

### 4. おわりに

今回の解析では, 飽和速度に近い速度で崩壊してしまうケースは無く, その意味では下層部に大きなダメージを与えた可能性がある飛行機の衝突[5]が, WTC1, 2 の高速崩壊現象の複合的な要因として裏付けられたとも言える. 今後は, 全体モデルによる検証を行う予定である.

### 参考文献

- [1] ASCE/FEMA, World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation and Recommendations, 2002.
- [2] NIST NCSTAR 1, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2005.
- [3] K.M. Lynn and D. Isobe, Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol.69, No.12, 2007, pp.2538-2563.
- [4] 藤本 健太郎, 濱田 直之, 瀬川 紘史, 平島 岳夫, 上杉 英樹, 安部 武雄: 高力ボルト継手の耐火性に関する実験的研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, (2006), pp.105-110.
- [5] 磯部大吾郎: WTCの崩壊要因究明を目指した航空機衝突シミュレーション, 計算工学, 日本計算工学会, 12(2), pp.1551-1554, 2007.

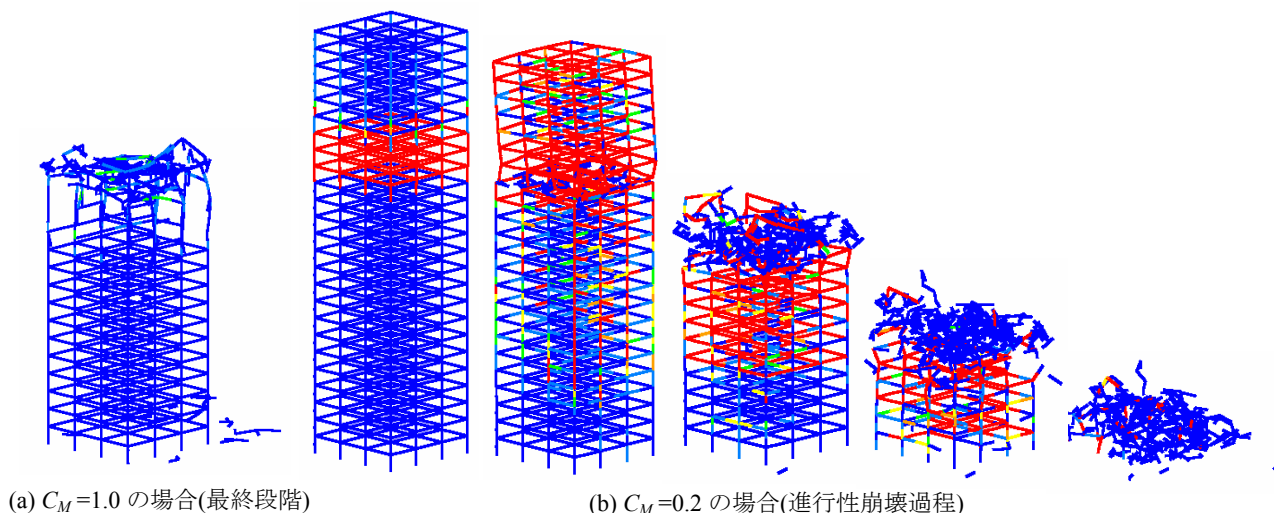


図3 火災崩落解析結果 (細柱モデル, 3 層全区画火災)