

ASI-Gauss 法を用いたミニ WTC モデルの火災崩落解析

Fire-Induced Collapse Analysis of Miniature WTC Models using ASI-Gauss Technique

○非 横田 仁 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Hitoshi YOKOTA, 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

2001 年、2 機の航空機が世界貿易センタービル (WTC) に突入し、大規模な火災の末にビルが完全崩壊するという悲劇が起きた。FEMA[1]や NIST[2]の報告書によると、ビルの進行性崩壊を引き起こした主な要因は、ジェット燃料によって引火した火災であるとしている。しかし、これらの報告書では、ビルがコア構造までを含めて地上まで完全に崩壊してしまった直接的な要因については詳細な検討や考察がなされておらず、この件についてはまだ多くの疑問が残っているのが現状である。筆者の研究グループでは、WTC の崩壊要因を特定するべく、様々な観点から検証を行っている。具体的には、i) 動的な外的要因の観点から航空機の衝突と崩壊現象との因果関係を調べるため、WTC 全体モデルによる飛行機衝突解析[3]、ii) 静的な外的要因の観点から大規模火災と崩壊現象との因果関係を調べるため、火災崩落解析を行っている。解析モデルは、i) では、飛行機の衝撃力がビル全体に及ぼす影響を調べるため、全体モデルを用いている。そのため、膨大な計算コストを要する。一方 ii) では、様々なパラメータスタディを実施する上で、省計算コストを実現する必要があるため、縮約したモデルを用いることとした。本稿では、ii) の観点から、WTC ビルを縮約した 25 層モデルに対し、火災発生時の構造物の挙動を解析した。モデルには、風に対する剛性を建物に付与することを目的とし、ダイアゴナルブレースによって上層部に構成された、アウトリガーシステム[1]を配置した。解析には最小限のコストで計算可能な ASI-Gauss 法[4]を用い、部材破断と接触を効率よく表現するためのアルゴリズムを導入した。また、温度上昇における部材の弾性係数・降伏応力低下曲線を NIST の報告書[2]から引用した。これらを用いてミニ WTC モデルの火災崩落解析を行った。

2. 部材の耐力低下曲線

鋼材の温度上昇が構造物に及ぼす影響を考慮するため、図-1 に示す温度上昇の時刻歴を仮定した。一般的な火災を想定し、700°C まで上昇するものとする。また、NIST の報告書から引用した弾性係数および降伏応力の低下曲線を図-2、図-3 に示す。これは、鋼材に耐火被覆を施さない場合のもの

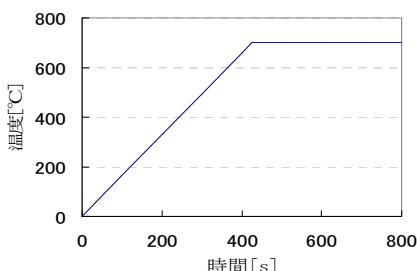


図-1 温度上昇時刻歴

で、700°C においては弾性係数、降伏応力の元の値に対する比はそれぞれ 0.6、0.14 程度となり、特に降伏応力は著しく低下する。

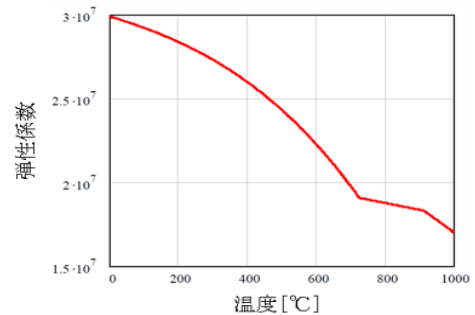


図-2 弾性係数低下曲線[2]

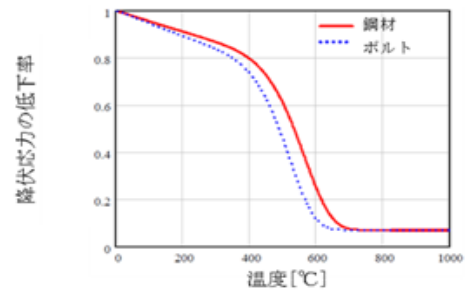


図-3 降伏応力低下曲線[2]

3. 部材破断と接触

要素毎に計算された曲率 κ_x 、 κ_y 、引張り軸ひずみ ε_z およびせん断ひずみ γ_{xz} 、 γ_{yz} のいずれかが臨界値を超えた場合に破断とみなす。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| = 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| = 1 \quad \text{or} \quad \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \right) = 1 \quad (1)$$
$$\text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| = 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| = 1$$

ここで、添え字“0”が付いた値はその臨界値を示す。破断臨界値には継手の静的加力試験データ[5][6]を用いた。破断した要素は強度上の影響を及ぼさないと仮定し、剛性を 0 にした。要素の接触については、各々の要素の幾何学的な位置関係に基づいて内分ベクトル型アルゴリズムで判定している。

4. 部材接合部強度

接合部強度係数 C_M を入れた以下の降伏関数を用い、接合部の脆弱性を直接的に表現した。

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

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比を陽に表す。

5. ミニ WTC モデルの火災崩落解析

解析対象は高さ 25 層約 100[m]、幅・奥行き 16[m]の骨組構造である。モデルの断面形状は、外周部が風荷重を受け持ち、内側のコア構造と外周部を連結する部材が床荷重を支え、これをコア構造に伝達する構造となっている。断面寸法は、25 階において柱が実物の最上階部分の約 1/3 とし、下層方向へ段階的に大きくした。部材定数には JIS G 3136 の SN490B 鋼材のものを用いた。表 1、2 に部材材料定数および破断臨界値を示す。梁は H 型鋼とし、床荷重はコア構造に $2.2[\text{kN/m}^2]$ 、外周構造に $1.5[\text{kN/m}^2]$ と想定した。解析では、アウトリガー、火災範囲、接合部強度の影響を調べるために、以下の 6 パターンを採用した。

- i) アウトリガー有り、WTC2 を想定した火災、 $C_M=0.3$
 - ii) アウトリガー無し、WTC2 を想定した火災、 $C_M=0.3$
 - iii) アウトリガー有り、WTC2 を想定した火災、 $C_M=1.0$
 - iv) アウトリガー有り、WTC1 を想定した火災、 $C_M=0.3$
 - v) アウトリガー無し、WTC1 を想定した火災、 $C_M=0.3$
 - vi) アウトリガー有り、WTC1 を想定した火災、 $C_M=1.0$
- アウトリガーシステムは 24、25 層部分に図-4 のように配置した。火災は i) ~ iii) では 17~19 階の図-5 に示す領域に、iv) ~ vi) では 20~22 階の図-6 に示す領域に発生させた。また、曲げ強度比は日本の建築物と WTC の接合部強度の相違を比較するため、 $C_M=1.0$ 、 $C_M=0.3$ の 2 つの場合について解析する。

時間積分には Newmark の β 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

表 1 部材材料定数

ヤング率	214.0[Gpa]
ポアソン比	0.3
密度	$7.9 \times 10^{-6}[\text{kg/mm}^3]$
降伏応力	325.0[Mpa]

表 2 破断臨界値

κ_{x0}	3.3×10^{-4}
κ_{y0}	3.3×10^{-4}
ε_{z0}	1.7×10^{-1}
γ_{xz0}	1.3×10^{-2}
γ_{yz0}	1.3×10^{-2}

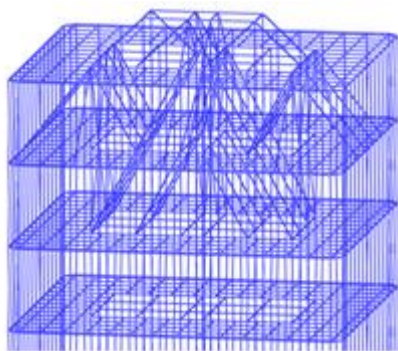


図-4 アウトリガーシステム

は 1.0 ms となるように設定した。

6. 結言

ASI-Gauss 法を用いて 25 層のミニ WTC モデルの火災崩落解析を行い、アウトリガーシステム、火災範囲、部材接合強度が火災崩落過程にどのような影響を与え得るか確認し、WTC の崩壊要因を究明していく予定である。結果については講演会会場で発表する。

参考文献

[1] ASCE/FEMA : World Trade Center Building Performance Study : Data Collection, Preliminary Observation and Recommendations, 2002.

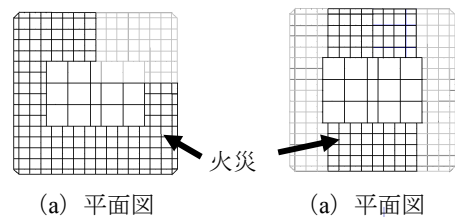
[2] NIST : Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Towers, 2005.

[3] 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, Vol. 12, No.2, pp.1551-1554, 2007.

[4] 磯部大吾郎, チョウミョウリン : 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.

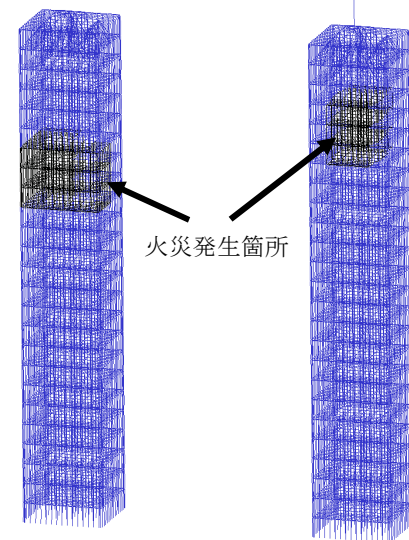
[5] 藤本健太郎, 濱田直之, 瀬川紘史, 平島岳夫, 上杉英樹, 安部武雄 : 高力ボルト継手の耐火性に関する実験的研究 (その 1~その 3), 日本建築学会大会講演梗概集, A-2, (2006), pp.105-110.

[6] 平島岳夫, 濱田直之, 尾崎文宣, 安部武雄, 上杉英樹 : 高温時における高力ボルトの剪断変形状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 621 号, (2007), pp.175-180.



(a) 平面図

(a) 平面図



(b) 解析モデル

(b) 解析モデル

図-5 ミニ WTC2

図-6 ミニ WTC1