

高層建築物の火災崩落挙動に及ぼすアウトリガーシステムの効果

正会員 ○レティタイタン*
同 磯部 大吾郎**

アウトリガーシステム 火災崩落挙動 ASI-Gauss 法

1. 緒言

2001年9月11日にテロによって引き起こされたニューヨーク WTC ビルの崩壊について米国の研究調査機関 FEMA[1]と NIST[2]がまとめた報告書によると、風外力に対する補強システムとして設置されたアウトリガーシステムが、崩壊開始までの時間を稼ぐのに有効であった可能性を示唆している。また、WTC1号棟と2号棟で航空機の衝突箇所および火災範囲が異なっていたことが、それぞれの崩壊開始時間の差異につながったとしている。火災範囲が広範囲に渡ると、建物内の応力伝達経路が限られてくるため、集中した応力を冗長的に緩和することが困難となる。またその一方で、アウトリガーシステムが設置されていると応力伝達経路が増し、崩壊開始時間が延びることも十分に考えられる。いずれにしても、上記項目は高層建築物の火災対策にとって重要な問題であるため、一連のメカニズムを解明することが早急に求められている。

本稿では、高層建築物に大規模火災が発生した場合に、その火災範囲、部材接合部強度およびアウトリガーシステムが崩落挙動に及ぼす影響について数値解析を通じて検証した。解析には、大規模骨組構造の解析において最小限のコストで計算可能な ASI-Gauss 法[3]を用い、部材破断・部材同士の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、温度上昇に伴う部材の弾性係数・降伏応力低下曲線を NIST の報告書[2]から引用した。25層3スパン骨組構造に対して実施したパラメータ計算結果について報告する。

2. 部材破断と接触

解析では、次式に示すように要素毎に計算された曲率 κ_x 、 κ_y 、引張軸ひずみ 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した。

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

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

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[4][5]を用いた。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[6]で判定している。

3. 部材の耐力低下曲線

火災発生箇所では420sで温度が線形的に700℃まで上昇すると仮定し、また、NISTの報告書[2]から引用した弾性係

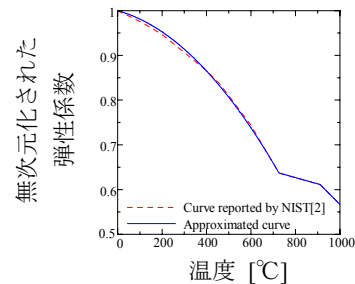


図-1 弾性係数低下曲線[2]

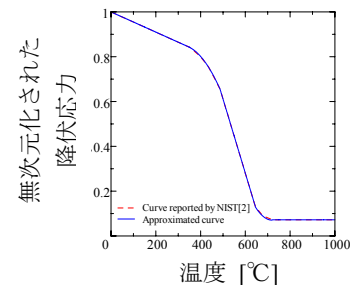


図-2 降伏応力低下曲線[2]

数および降伏応力の低下曲線(図-1, 図-2)に沿って部材が耐力低下するものと仮定した。これらの曲線は、鋼材に耐火被覆を施さない場合のもので、700℃において弾性係数は約60%、降伏応力は約15%まで低下することを示している。

4. 接合部強度

接合部強度係数 C_M を取り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。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{C_M M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{C_M M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (2)$$

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。

表1 部材材料定数

弾性係数	214 GPa
ポアソン比	0.3
密度	$7.9 \times 10^6 \text{ kg/mm}^3$
降伏応力	325 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}

5. モデルの構成

解析対象には高さ25層100m、幅・奥行き3スパン18mの骨組構造モデルを用いた。部材には JIS G 3136 の

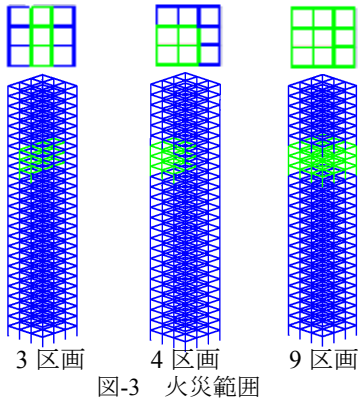


図-3 火災範囲

SN490B 鋼材を用いた。表 1、2 に部材材料定数および破断臨界値を示す。また、床スラブ等の固定荷重として各階層に 4.0 kN/m² の自重を加えた。断面寸法は、1 層部分の柱を BOX 鋼 □ -

430*430*13*13、梁を H331*825.7*18.4*13.2 とし、それらの太さを上層方向へ 5 層ごとに段階的に細くした。

構築したモデルに対し、火災範囲、接合部強度係数 C_M 、アウトリガーシステムの 3 つのパラメータを変化させて解析を行った。まず火災範囲は、WTC の火災を模擬して図-3 に示す 17~19 層とし、その範囲形状を対称 (3 区画)、非対称 (4 区画)、フロア全体 (9 区画) と設定した。次に、接合部強度の影響を比較するため、 C_M を 0.1~1.0 の範囲で変化させた。さらに、図-4 に示すようにモデルの最上層部にアウトリガーシステムを配置し、その有無およびアウトリガートラス部材の強度の相違による影響を調べた。ここでは、1 層部分の梁材に対するアウトリガートラス部材の強度比を 0.25 から 2.0 まで段階的に変化させた。

6. 解析結果

本稿では、火災範囲 3 区画において、接合部強度係数 C_M とアウトリガートラスの部材強度を変化させた場合の結果を示す。図-5、図-6 はそれぞれ接合部強度係数とアウトリガートラスの部材強度比を変化させた場合の崩壊開始時間の相違を示す。接合部強度係数 C_M が 0.1 から 0.3 に大きくなるにつれ、崩壊開始時間が遅くなる結果となった。 C_M が 0.4 以上の場合は崩壊しなかったため、プロットしていない。また、アウトリガートラスの部材強度比が大きくなるにつれ、一定の範囲内では崩壊開始時間が延びる傾向が見られたが、それ以上では再び崩壊開始時間が早まった。これは、強度が大き過ぎると変形を許容することができないため、ひずみエネルギーを吸収できずにシステムの効果が薄れたものと思われる。また、参考のために括弧内にアウトリガーシステム無しの場合の崩壊開始時間をプロットしたが、有る場合と比較しても崩壊開始時間に最大で 50 s 程度の差しかないことが分かる。

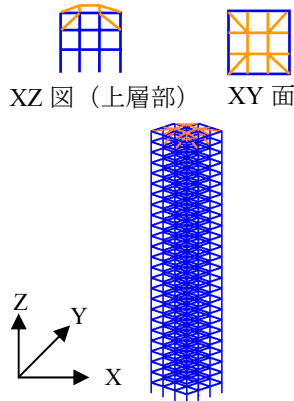


図-4 アウトリガーシステム

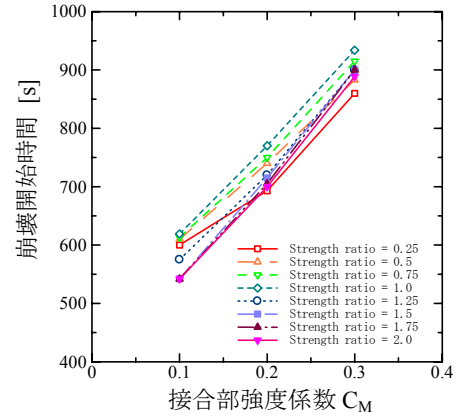


図-5 接合部強度係数による崩壊開始時間の相違

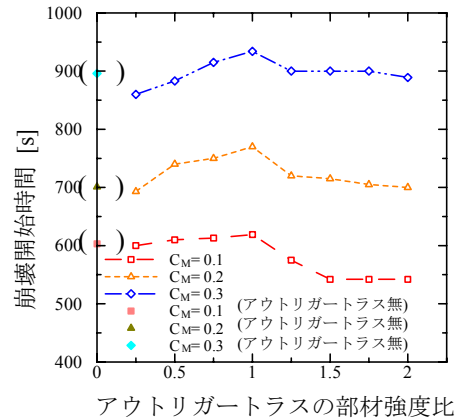


図-6 アウトリガートラスの部材強度による崩壊開始時間の相違

7. 結言

ASI-Gauss 法を用いて 25 層骨組構造の火災崩落解析を行った結果、アウトリガーシステムの効果はある程度見られたものの、崩壊開始を劇的に遅らせるような効果は見られなかった。一方、接合部強度の相違は崩壊開始時間に大きな影響を与えることが確認された。建物の規模や形状、火災範囲によってもこの傾向は変わることが考えられるため、今後は、WTC 全体モデルへの適用も含め、様々な観点からデータを整理していく予定である。

参考文献

- 1) ASCE/FEMA : World Trade Center Building Performance Study, (2002).
- 2) NIST : Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Towers, (2005).
- 3) 磯部, リン : 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 建論, 第 579 号, (2004), pp.39-46.
- 4) 藤本 他 : 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), 梗概集 A-2, (2006), pp.105-110.
- 5) 平島 他 : 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, 建論, 第 621 号, (2007), pp.175-180.
- 6) 久永, 磯部 : ASI-Gauss法を用いた衝突崩壊解析コードにおける破断・接触アルゴリズムの検討, 梗概集B-1, (2008), pp. 391-392.

* 筑波大学大学院生

** 筑波大学大学院准教授 博 (工)

* Graduate student, University of Tsukuba

** Dept. of Eng. Mech. and Energy, University of Tsukuba, Dr. Eng.