

# 火災崩落解析による高層建築物の崩壊開始時間に関する検証

## Verification on Collapse Initiation Times of High-Rise Buildings by Fire-Induced Collapse Analysis

○非 レティタイタン（筑波大院） 正 磯部 大吾郎（筑波大）

Thi Thai Thanh LE, 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

高層建築物の火災を引き起こす要因や火災規模は様々であるため、総合的かつ効率的に対応できる構造対策を構築するのは困難である。また、9.11 事件で倒壊したニューヨーク世界貿易センター（WTC）ビルのように、飛行機衝突の際にジェット燃料が拡散して大規模火災の要因となった事例も存在する。このような大規模かつ複雑な現象が絡み合う問題に対し様々なパラメータスタディを行う上で、高精度で効率的な数値解析手法が求められている。

一方、9.11 事件に対し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 WTC ビルの上層階に設置されたアウトリガートラス構造が、その崩壊開始までの時間を稼ぐのに有効であった可能性が示唆された。チューブ構造上部にアウトリガートラス構造が設置されていると応力伝達経路が増し、内力が緩和され、崩壊開始までの時間が延びることは十分に考えられる。また報告書では、WTC1 と WTC2 で航空機の衝突箇所および火災範囲が異なったことが、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。高層建築物においては、火災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になると考えられる。いずれにしても、これらの事項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、引き続き調査を進める必要がある。

本稿では、ASI-Gauss 法に基づく解析手法に建築物の崩壊挙動をリアルに表現できる新たなアルゴリズムを導入し、モデル化した 30 層 7 スパンのチューブ骨組構造に大規模火災が発生した場合に、その火災範囲、アウトリガートラス構造の強度、接合部強度が建物の崩壊開始時間や崩壊挙動に及ぼす影響について数値解析を通じて検証した。その結果、火災範囲および構造強度が建物の崩壊開始時間に明らかな影響を与えることが確認されたので、ここに報告する。

### 2. 解析手法

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。部材破断の判定条件としては、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ものを用いている。これらの破断臨界値は実験結果[4]から入手できるため、信頼性の高い判定を行うことが可能である。接触判定には内分ベクトル型接触アルゴリズムを用い、接近する 2 本の要素の節点間距離および節点の幾何学的位置関係により判定を行った。接触が判定された要素同士については、節点間を計 4 つのギャップ要素（接合要素）によって拘束する。この過程により、部材が衝突する際に運動エネルギーが伝達される。ギャップ要素は近接する他の要素と同じ断面形状を持つと仮定した。また本研究では、接

触により蓄積されている 4 つのギャップ要素の変形量がある割合以下になったときに接触を解除するアルゴリズムを導入した。接触解除された要素は再び接触アルゴリズムを通り、接触判定を行う。これを繰り返すことで、何度でも部材の接触表現が可能となった。さらに、接触解除後すぐに接触判定されないように、接触回避時間を設けることで部材の跳ね返りなども再現可能とした。

部材の温度上昇の時刻歴には、JIS A 1304 の耐火曲線を線形近似した曲線を用い、特定の時間で一般的な火災温度である 700℃まで線形的に上昇するものと仮定した。温度上昇に伴う鋼材の耐力低下曲線には、NIST[2]のものを近似した曲線を使用した。これは、鋼材に耐火被覆を施さない場合のもので、火災の一般的な温度である 700℃近辺において、弾性係数は常温時の約 60%、降伏応力は約 10%まで低下するものである。また、温度上昇に伴う鋼材の熱膨張は熱ひずみを加えることにより考慮した。熱ひずみと温度の関係を次式に示す。

$$\Delta \varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (1)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_T$ 、 $\Delta T$  および  $\alpha$  はそれぞれ、熱ひずみ増分、温度増分、線膨張係数である。また、機械的なひずみと熱ひずみの関係は次式のように示される。

$$\varepsilon_m = \varepsilon - \varepsilon_T \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_m$ 、 $\varepsilon_T$  および  $\varepsilon$  はそれぞれ、機械的ひずみ、熱ひずみ、全体ひずみである。

柱の曲げ塑性耐力に対する強度比を陽に表す接合部強度係数  $C_M$  (0.0~1.0) を定義し、これを取り入れた以下の降伏関数を用いて接合部の脆弱性を直接的に表現した。

$$f_y = \left( \frac{M_x}{C_M M_{x0}} \right)^2 + \left( \frac{M_y}{C_M M_{y0}} \right)^2 + \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (3)$$

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。

### 3. モデルの構築と解析条件

解析対象として、30 層 7 スパンのチューブ構造をチモンエンコ梁要素でモデル化した。モデルは総要素数 9360、総節点数 6644、自由度数 39600 である。上層階にアウトリガートラス構造を配置し、コア部の 30 階にあるフレームにブレースを付ける。これは、架構の剛性を高め、転倒モーメントに対抗し、外周部をコア部で吊り上げることを想定したシステムである。設計用床荷重として 5.0 kN/m<sup>2</sup>、10.0 kN/m<sup>2</sup> の 2 種類を想定した。部材には SN490 の鋼材を用い、弾性係数、降伏応力、ポアソン比、密度をそれぞれ 214 GPa ; 325 MPa ; 0.3 ; 7.9×10<sup>-6</sup> kg/mm<sup>3</sup> とした。部材断面寸法は、1 層部分の柱を BOX 鋼□-700×28、梁を H-700×300×13×24 とし、こ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  $C_M$ 、アウトリガートラスの部材強度比の3つのパラメータを変化させて解析を行った。まず火災範囲の影響を調べるため、21階～24階の対称火災である中央火災と非対称火災である外火災の2種類を設定した。解析モデル、火災範囲およびアウトリガートラス構造の概要を Fig.1 に示す。次に、接合部強度の影響を比較するため、 $C_M$  を 0.1～0.6 の範囲で変化させた。また、アウトリガートラス構造の有無およびその部材強度の相違による影響を調べるために、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。火災発生時刻から建物が崩壊を開始する時刻までの時間（崩壊開始時間）を解析結果より求め、上記3つのパラメータとの関連性を調べた。

#### 4. 解析結果

建物の火災崩落挙動の一例として、設計用床荷重 10.0 kN/m<sup>2</sup> のアウトリガートラス構造付きモデルに対し外火災が発生した場合を挙げ、Fig.2 に示す。なお、建物が崩壊終了するまでの解析時間はおよそ8時間 (CPU: 2.93 GHz Xeon) であった。

まず、設計用床荷重 10.0 kN/m<sup>2</sup> の条件において、2種類の火災範囲に対する接合部強度係数およびアウトリガートラス部材強度比と崩壊開始時間との関係を Fig.3 に示す。但し、設定解析時間 2000 s でモデルが崩壊しない場合には、図に結果をプロットしていない。Fig.3 より、中央火災の方が外火災より崩壊開始時間が長くなる傾向が見られる。これは、中央火災の場合には、非対称火災である外火災と比べて構造の懸垂能力と応力伝達経路が増すため、崩壊開始が遅れたものと考えられる。また、接合部強度係数  $C_M$  が 0.1 から 0.6 に大きくなるにつれ、中央火災では崩壊開始時間が延びる結果となった。さらに、 $C_M$  が 0.5 以上になると、アウトリガートラスの部材強度比が 0.5 以上のもので建物が崩壊しなくなる結果となった。しかし、外火災においては外周構造の片面が全面的に耐力低下し、アウトリガートラス構造の懸垂能力が早く限界を超えるため、 $C_M$  が 0.1 以上では  $C_M$  の値に依らず崩壊開始時間がほとんど変わらない結果となった。

次に、設計用床荷重 5.0 kN/m<sup>2</sup> の条件において、同様の解析を行った。解析結果を Fig.4 に示す。Fig.4 より、中央火災の方が外火災に比べ崩壊開始時間が長くなる傾向も確認できた。また、どちらの火災範囲においても、アウトリガートラス構造を付けることで崩壊開始時間が延びる結果となった。さらに、接合部強度係数やアウトリガートラス部材強度比が大きくなると、建物の崩壊開始時間が延びる、もしくは崩壊が防止されるなどの効果が確認できた。

#### 5. 結言

本稿では、新たなアルゴリズムを導入した ASI-Gauss 法を用いて、30 層 7 スパンのチューブ骨組構造を対象に火災崩落解析を行った。その結果、火災範囲、構造強度によって崩壊開始時間が異なることと、火災に対してアウトリガートラス構造が崩壊開始時間を延ばすあるいは防止する効果を確認できた。今後は、WTC 全体モデルに対し、飛行機衝突から火災崩落までの連続的な挙動解析を行う予定である。

#### 参考文献

[1] ASCE/FEMA, World Trade Center Building Performance Study, 2002.

[2] NIST NCSTAR 1: Federal Building and Fire Safety Investigation of the WTC Disaster, 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, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, 2004, pp. 39-46.

[4] 濱田, 他: 高力ボルト継ぎ手の耐火性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 2006, pp. 105-110.

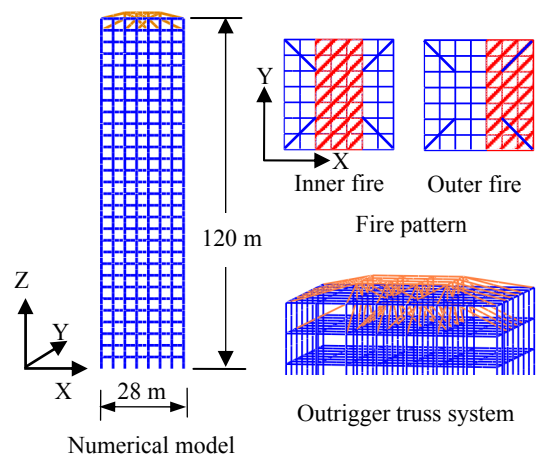


Fig.1 Overview of numerical model, fire patterns and outrigger truss system

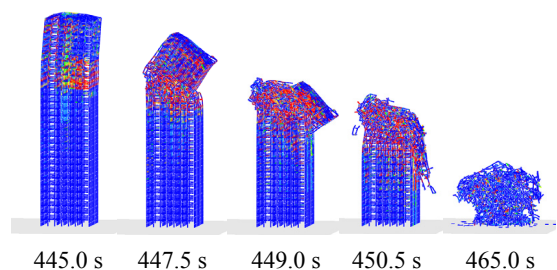


Fig.2 Fire-induced collapse behaviors (floor load: 10.0 kN/m<sup>2</sup>, model with outrigger truss system, outer fire)

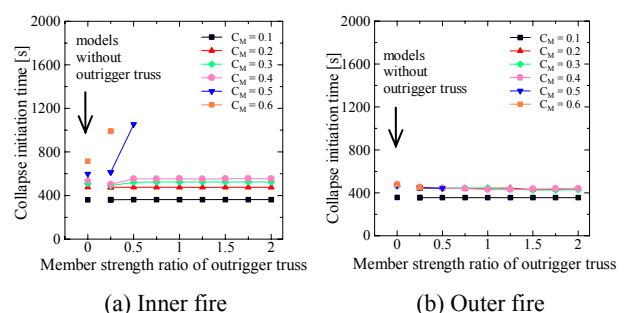


Fig.3 Relations among joint strength ratio, member strength of outrigger truss & collapse initiation time (FL: 10.0 kN/m<sup>2</sup>)

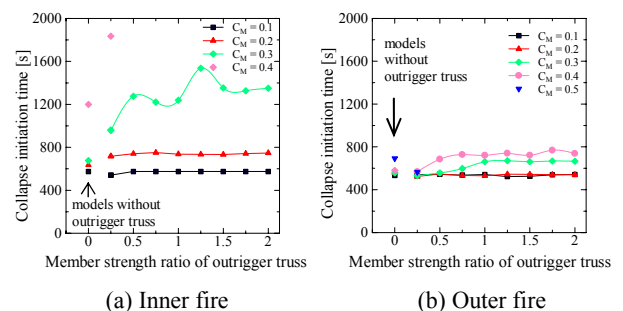


Fig.4 Relations among joint strength ratio, member strength of outrigger truss & collapse initiation time (FL: 5.0 kN/m<sup>2</sup>)