

アウトリガートラス構造を有する高層建築物の火災時崩壊開始時間に関する考察

正会員 ○レティ タイ タン*¹
同 磯部 大吾郎*²

火災崩落 アウトリガートラス構造 崩壊開始時間

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、総合的に対応できる低コストの構造対策を構築するのは困難である。世界中を震撼させた 9.11 事件によるニューヨーク世界貿易センター (WTC) ビルの完全崩壊については、米国の研究調査機関 FEMA[1]と NIST[2]がまとめた報告書で、風外力に対する補強システムとして上層階に設置されたアウトリガートラス構造が、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。また同時に、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。その一方で、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、外力が緩和され、崩壊開始までの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も重要な問題であるため、一連のメカニズムを解明する必要がある。

本稿では、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、柱の軸力比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、アウトリガートラス構造が火災による完全崩壊を防止する、あるいは遅延させること、さらには火災範囲の相違や柱の軸力比が建物の崩壊開始時間に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判定を用いている。これらの破断臨界値は実験結果[4]など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。接触と判定された要素同士については、節点間に 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、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。接触解除された要素は再び接触アルゴリズムを通り、再接触判定を行う。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°C 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°C 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。

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 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。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{C_m M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{C_m M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (1)$$

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シェンコ梁要素でモデル化した。上層階にアウトリガートラス構造を配置し、コアの 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、外周部をコア部で懸垂することを想定したシステムである。モデルおよびアウトリガートラス構造の概要を図 1 に示す。積載荷重、床スラブ、壁荷重を含んだ設計用床荷重を 10.0 kN/m² と想定した。部材には SN490 の鋼材を用い、弾性係数、降伏応力、ポアソン比、密度はそれぞれ 214 GPa ; 325 MPa ; 0.3 ; 7.9 × 10⁻⁶ kg/mm³ とした。部材断面寸法は、1 層部分の柱を BOX 鋼口-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、柱の軸力比の4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、アウトリガートラス構造によって確保される応力伝達経路の影響を調べるため、図2に示す21階～24階の中央火災と外火災の2種類を設定した。次に、接合部強度の影響を比較するため、 C_m を0.1～0.6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。さらに、建物の構造強度による影響を調べるため、図2の○で囲まれるコア柱の1階の軸力比を0.15～0.50の範囲で変化させた。解析結果から、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）を求める。

4. 解析結果

図3は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による崩壊開始時間の相違を示す。図4は、2種類の火災範囲に対するアウトリガートラス構造が有る場合（部材強度比：1.0）および無い場合の軸力比による崩壊開始時間の相違を示す。

図3および図4より、外火災より中央火災の方が崩壊開始時間は長くなる傾向が見られる。これは、中央火災が対称火災であるため、非対称火災である外火災と比べ、構造の懸垂能力と応力伝達経路が増し、崩壊開始を遅らせたものと考えられる。次に、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（図3(a)）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（図3(b)）においては外周構造の耐力が全て低下するため、アウトリガートラス構造の機能が発揮されず、 C_m が0.1以上では崩壊開始時間がほとんど変わらない結果となった。また図4より、柱の軸力比が大きくなるにつれ崩壊開始時間が早くなること、軸力比が小さい領域ではアウトリガートラス構造が崩壊開始時間を延ばす傾向があることが確認できた。

5. 結言

本稿では、ASI-Gauss法を用いて、30層7スパンのチューブ骨組構造の火災崩壊解析を行った。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も確認できた。今後は、WTC全体モデルでの検証を通じ、建物の火災崩壊防止に対する検討を進めていきたいと考えている。

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 直之, 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.

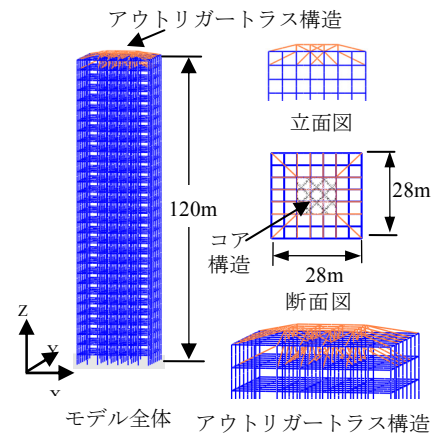


図1 モデルの概要

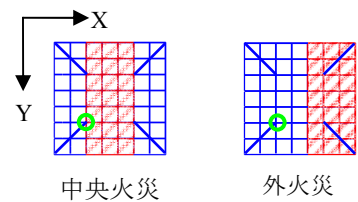


図2 火災範囲

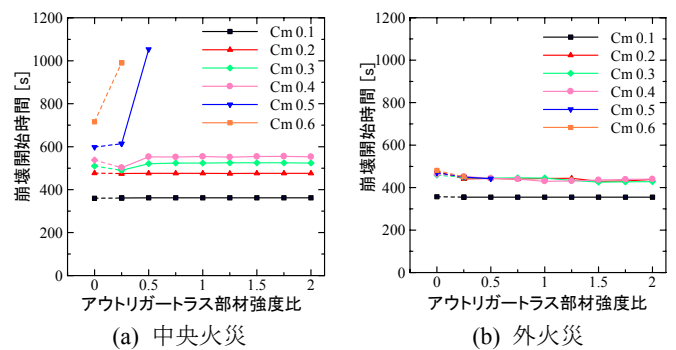


図3 接合部強度係数およびアウトリガートラス部材強度比による崩壊開始時間の相違

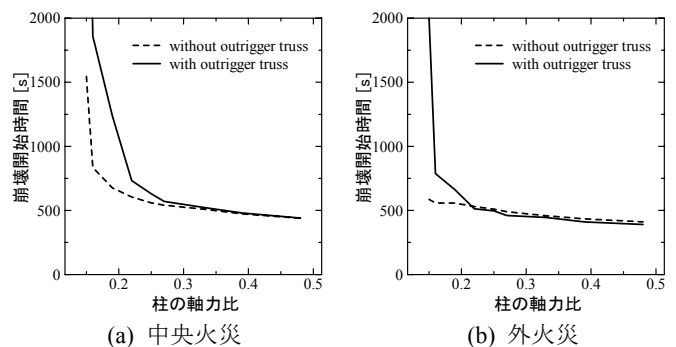


図4 軸力比による崩壊開始時間の相違

*1: 筑波大学大学院生

*2: 筑波大学大学院准教授 博(工)

*1: Graduate student, University of Tsukuba

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