

アウトリガートラス構造が高層建築物の火災崩落挙動に与える影響

Influence of Outrigger Truss System on Fire-Induced Collapse Behavior of High-Rise Buildings

○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

2001年9月11日の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。高層建築物において、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、WTCビルもその一例だが、チューブ構造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必要があると考えられる。

本稿では、チューブ式高層建築物を模擬した30層7スパン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が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により建物の崩壊開始時間が異な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

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式[4]を用いている。これらの破断臨界値は実験結果[5]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[4]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計4つのギャップ要素(接合要素)を結合しそれらを拘束した。この過程により、部材が衝突する際の運動エネルギーの伝達を表現することができる。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。

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、図1に示す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(図1(a))は常温時の約60%、降伏応力

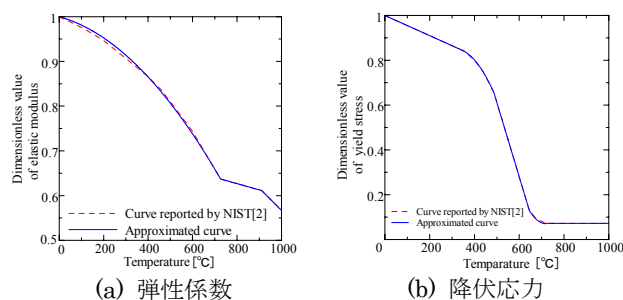


図1 鋼材の耐力低下曲線[2]

(図1(b))は約10%まで低下することを示している。

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。 C_M にはWTCビルの接合部強度係数を想定した値を用い、0.3とした[1]。

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、コアの30階にあるフレームにブレースを付ける。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2に示す。床荷重は5.0 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。部材断面は日本建築学会がまとめた世界貿易センタービル崩壊に関する報告書[6]を参考にした。その部材断面寸法を表1に示す。また、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3に示す3つの火災パターンを設定した。パターン1は対称火災で、21階~24階の全てのコア柱が火災によって耐力低下してしまう場合である。パターン2は非対称火災であるが、21階~24階の一部のコア構造と外周構造が残存する場合である。また、パターン3も非対称火災で、21階~24階の外周構造が全て燃えてしまう場合である。

アウトリガートラス構造有無の2種類のモデルに対し、上記の3つの火災パターンを与えた計6種類の火災崩落解

析を行い、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

解析結果を表 2 にまとめ、崩壊挙動の一例として火災パターン 2 のアウトリガートラス付きモデルの場合を挙げ、図 4 に示す。

まず崩壊開始時間については、アウトリガートラス構造の有無に関わらず火災パターン 3 の場合が最も早かった。これは、非対称火災であり、かつ 21 階～24 階の外周構造が全て耐力低下するため、上層部を支える強度が限界を超えてしまい、崩壊開始時間が早まったものと考えられる。火災パターン 2 の場合、一部のコア構造と外周構造が残存するために応力伝達経路が確保され、崩壊開始時間が最も遅くなった。次に、アウトリガートラス構造を配置すると、崩壊開始時間が延びる傾向を確認できた。これは、アウトリガートラス構造により上層部の剛性および応力伝達効果が高められたためと考えられる。火災パターン 1 とパターン 2 の場合はアウトリガートラス構造により崩壊開始時間が 2 倍程度に伸びた。しかし、火災範囲パターン 3 の場合はその効果が若干確認されたものの、外周構造の広範囲に火災が発生するためにその懸垂能力を超えてしまい、崩壊開始時間を劇的に遅らせるまでには至らなかった。

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効果があることを確認できた。しかし、この効果も火災範囲に依存し、特にコア構造と外周構造の両方が残存すると、応力伝達経路が確保されるため、崩壊開始時間が劇的に延びることが確認された。今後は、WTC の全体モデルで検証する予定である。

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 WTC Disaster: Final Report of the NCST on the Collapse of the WTC Tower, 2005.
- [3] 磯部 大吾郎, チョウ ミヨウ 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.
- [4] 久永 哲也, 磯部大吾郎: 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, 日本建築学会 2008 年度大会 (中国) 学術講演梗概集 B-1, 2008, pp. 391-392.
- [5] 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(高力ボルト梁継ぎ手の高温時における純曲げ実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 2006, pp. 105-110.
- [6] 世界貿易センタービル崩壊特別調査委員会報告書ーWTC 崩壊・ペンタゴンの被害・教訓ー, 2003 年 9 月, 日本建築学会 WTC 崩壊特別調査委員会.

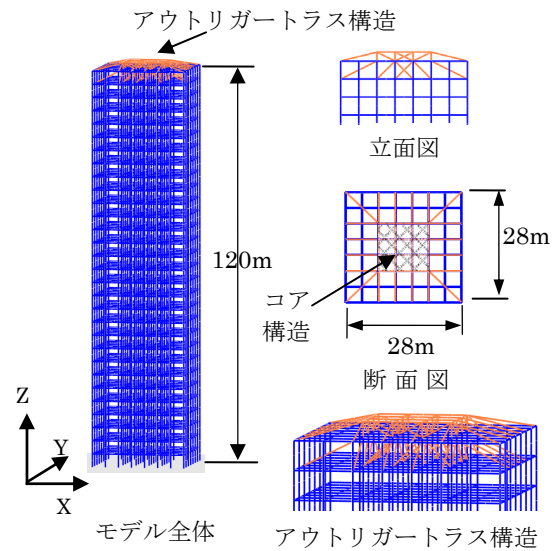


図 2 モデルおよびアウトリガートラス構造の概要

表 1 部材断面寸法

梁の断面		柱の断面	
階	断面寸法	階	断面寸法
1~10	H-700×300×13×24	1~5	Box-700×28
11~20	H-700×250×12×22	6~10	Box-600×25
21~30	H-700×200×12×22	11~15	Box-500×24
		16~20	Box-400×23
		21~30	Box-350×20

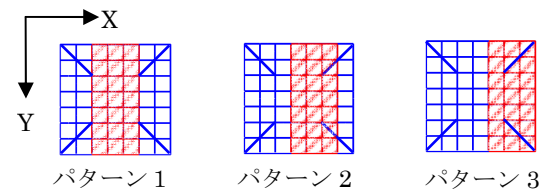


図 3 火災範囲

表 2 火災パターンによる崩壊開始時間の相違

	火災パターン 1	火災パターン 2	火災パターン 3
アウトリガートラス構造無	718 [s] 部分崩壊	779 [s] 部分崩壊	582 [s] 完全崩壊
アウトリガートラス構造有	1400 [s] 部分崩壊	1531 [s] 部分崩壊	662 [s] 部分崩壊

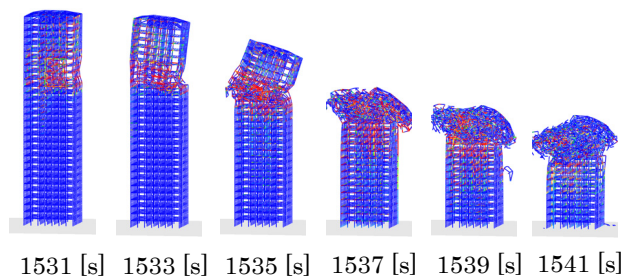


図 4 火災崩落挙動(アウトリガートラス構造有り, 火災パターン 2)