

耐震設計が施された建物の火災崩落解析

FIRE-INDUCED COLLAPSE ANALYSIS OF BUILDINGS WITH EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN

レティタイタン¹⁾, 磯部 大吾郎²⁾

Le Thi Thai Thanh and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, e0712356@esys.tsukuba.ac.jp)

2) 博 (工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Fire-induced collapse behaviors of high-rise buildings likely depend on the structural strength of members, fire patterns and the temperature rise rate. In this study, the ASI-Gauss technique is applied to the fire-induced collapse analysis of two models with different building designs: earthquake-resistant design and non earthquake-resistant design, as well as several types of fire patterns and the temperature rise rate for each one. By comparing the collapse behaviors, we can conclude that the behaviors depend strongly on the mentioned factors.

Key Words: Fire-induced collapse, Earthquake-resistant design, ASI-Gauss technique

1. はじめに

2001年9月のニューヨーク世界貿易センター (WTC) ビルの完全崩壊は、世界中を震撼させた。FEMA[1]およびNIST[2]の調査報告書では、WTCビルの崩壊は航空機衝突後の大規模火災が原因で起きたとしているが、例えば延焼範囲の規模や柱・はりの変形挙動がタワー全体の強度に与えた影響や、崩壊時の落下速度が飽和速度に近いとされた原因について、調査が十分に行われたとは言い難い。一方、2005年にマドリッドのWindsorビルで起きた大火災のように、ビルが全焼したにも関わらず骨組だけが残存し、全体崩壊に至らなかった例もある。この違いは、地域特性に伴う構造強度の相違が引き起こした可能性がある。ニューヨークでは地震がほとんど起きないため、WTCビルに耐震設計が施されていなかったのに対し、Windsorビルは地震発生地域に建てられていたため、比較的頑強に設計されていた。本稿では、耐震設計が施された建物とそうでない建物との崩落挙動を比較することで、耐震設計が建物の火災崩落挙動に与える影響について検証した。耐震設計手法の一つであるフロアモーメント分配法[3][4]を用いて15層建物をモデル化し、骨組構造の崩壊解析に有効なASI-Gauss法[5]による火災崩落解析を実施した。設計強度、火災パターン、火災による部材の温度上昇速度を変化させて解析を実施した結果、耐震設計が火災による崩落を防止する、あるいは遅らせること、さらには温度上昇速度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次式を用いた。

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

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

ここで、 $\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ は要素における x 軸・ y 軸回りの曲率、引張軸ひずみ、 x 軸・ y 軸方向のせん断ひずみであり、添字 0 は破断臨界値であることを示す。これらの破断臨界値は実験結果[6]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[7]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。

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あるが、火災の一般的な温度である700°C近辺において、ヤング率 (図1(a)) は常温時の約60%、降伏応力 (図1(b)) は約15%まで低下することを示している。部材の温度上昇の時刻歴には、図2に示すようにJIS A 1304の耐火曲線を線形近似した曲線を用

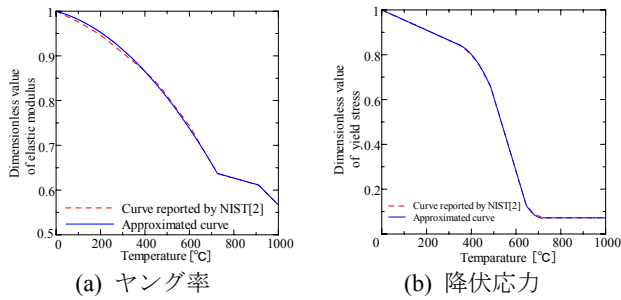


図1 鋼材の耐力低下曲線[2]

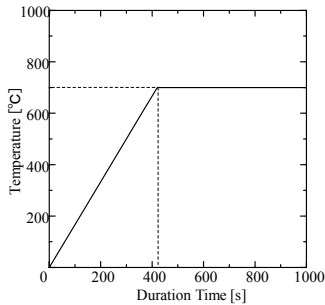


図2 温度上昇時刻歴

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。

3. モデルの構成

15層3スパン構造物の解析モデルは、線形チモシェンコはり要素で構築し、全高54m、一層当たりの階高は3.6m、1スパン当たり6mの梁を幅・奥行き方向にそれぞれ3スパンで構成されるモデルとした。総要素数1200、総節点数856である。柱はBox型SM490鋼、梁はH型SS400鋼を使用し、床荷重は4.0kN/m²と想定した。耐震モデルと非耐震モデルの2種類のモデルを作成した。

耐震モデルは次のように断面形状を決めた。まず、ベースシア係数を次式より計算する。

$$C_b = Z \times D_s \times R_t \times C_0 \quad (2)$$

ここで、Zは地震地域係数（低減係数）、D_sは構造特性係数（塑性変形能力に応じた低減係数）、R_tは振動特性係数（建築物の固有周期地盤の卓越周期に応じた低減係数）、C₀は標準せん断力係数を示し、本研究では、Z=1.0; D_s=0.25; R_t=0.6; C₀=1.0の値を用いた。したがって、ベースシア係数はC_b=0.15となる。梁と柱の断面を決定する際、フロアモーメント分配法[3][4]を用い、また、柱梁耐力比を1.5とした。その結果、1層部分の柱と梁の断面がそれぞれBOX 鋼 □-486×18、H型鋼H-241×602×13.4×9.6となる。柱と梁の太さは上層方向へ段階的に細くなり、15層部分の柱と梁の断面は□-486×18とH-241×602×13.4×9.6となる。柱の降伏軸力比を0.28以下程度に設定した。

非耐震モデルについては、1層から15層の梁と柱に耐震モデルの15層部分の梁と柱と同じ部材を使用した。柱の降伏軸力比は0.82以下に設定した。比較的脆弱な建物である。

表1 部材の剛性と破断臨界値

部材の剛性と破断臨界値	柱	梁
降伏応力 [Mpa]	325	235
弾性係数 [GPa]	206	
ポアソン比	0.3	
塑性化後の接線係数 [GPa]	2.06	
鋼材の密度 [kg/mm ³]	7.9×10 ⁻⁶	
破断臨界曲率	3.33×10 ⁻⁴	
破断臨界ひずみ、せん断ひずみ	1.70×10 ⁻¹	

解析に用いた部材の剛性と破断臨界値[6]を表1に示す。

4. 火災崩落解析結果

(1) 耐震設計の影響

耐震設計を施した建物および施されていない建物について、共に上層部と下層部に火災を発生させ、420sで温度を700°Cまで上昇させた。

上層部火災：10～12階×9区画

下層部火災：3階、4階×9区画

火災発生箇所(黒色)を図3に示す。

モデル2種類に対し火災パターン2種類を与えた計4種類の

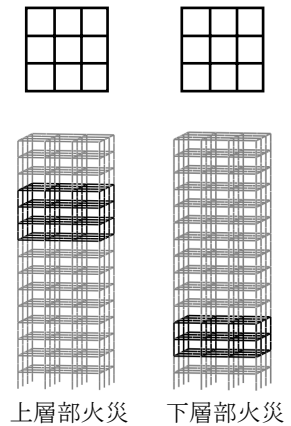


図3 火災パターン

表2 火災崩落解析結果

		耐震モデル	非耐震モデル
上層部 火災	崩壊有無	崩壊せず	火災層とその上が崩壊
	崩壊開始	—	411s
	現象等	火災層以外では特に目立った変形は無し	崩壊による衝撃力が下層部へ伝播するものの、完全崩壊には至らず
下層部 火災	崩壊有無	火災層が圧壊	完全崩壊
	崩壊開始	750s	404s
	現象等	温度上昇に伴う耐力低下および上層部の重量の影響で、3、4層部分の柱が沈み込みながら座屈、火災層以外の箇所には大きな損傷は無し	崩壊開始時温度：670°C 温度上昇に伴う耐力低下の影響が著しくなり、完全崩壊

火災崩落解析を行った。解析結果を表2にまとめる。また、一例として、耐震モデルの下層部に火災が発生した場合の崩壊挙動を図4に示す。

以上の結果をまとめると、作成した耐震モデルでは構造強度が十分に確保されるため、進行性崩壊あるいは完全崩壊には至らず、火災層以外のほとんどの箇所は健全な状態で残存した。これに対し、非耐震モデルでは、火災が発生してから崩壊開始までの時間が短くなり、さらに火災パターンによっては部分崩壊または完全崩壊の相違はあるものの、いずれも火災層以外に損傷が確認された。

(2) 温度上昇速度による火災崩落挙動の相違

前節では、420sで最高温度（700℃）に達するように設定したが、実際には、火災が発生してから最高温度に達するまでの時間（最高温度到達時間）は条件により変動するものと考えられる。また、WTCの事例では、航空機衝突直後の急激な温度上昇が崩壊開始時間に影響を及ぼした可能性も示唆されている[1][2]。そこで、温度上昇速度が火災崩落挙動にどのような影響を及ぼすか、以下のように検討を行った。

下層部火災を対象とし、耐震モデルと非耐震モデルの両方について、温度上昇速度を変えて解析を行った。具体的には、温度が150sで700℃に達するものから4000sで700℃に達するものまで、温度上昇速度の異なる19通りのケースを実施した。速度の異なる温度上昇時刻歴曲線の一部を図5に示す。ここで、温度が700℃に達する時間から建物が崩壊を開始するまでの時間を「崩壊遅延時間」と定義する。図6に420sで700℃に達する場合の概念図を示す。解析結果より、最高温度到達時間と崩壊遅延時間の関係をまとめたものを図7に示す。図において、ひし形と三角形はそれぞれ耐震モデル（ERD model）、非耐震モデル（Non-ERD model）の解析結果を示したものである。図より、温度上昇速度を小さくすると、崩壊遅延時間が短くなる傾向が見られる。特に非耐震モデルの場合には、温度上昇が緩やかなほど、崩壊遅延時間がマイナス側に線形的に大きくなる。これは、最高温度到達時間に達する前に建物が崩壊するだけでなく、温度上昇速度が小さいほど崩壊開始時間が徐々に早くなることを示す。耐震モデルの場合にも非耐震モデルと同様の傾向が見られるが、温度上昇速度の影響は比較的顕著ではない。図8には非耐震モデルの場合の温度上昇速度と供給熱エネルギー比の関係を示す。ここで、供給熱エネルギー比を次のように定義する。建物の崩壊開始時までに与える熱エネルギーを Q とし、次式により計算する。

$$Q = c \times m \times T \quad (3)$$

ここで、 c 、 m 、 T はそれぞれ鋼材の比熱、質量、崩壊開始時の鋼材温度である。十分に遅い速度で温度上昇をさせた場合の崩壊開始時温度を T_0 （本解析例では588℃）、この際の供給熱エネルギーを Q_0 とする。このとき、供給熱エネルギー比を Q/Q_0 （ $=T/T_0$ ）と表す。図に示すように、温度上昇速

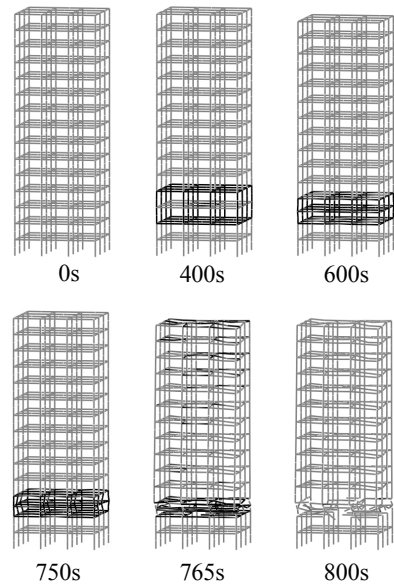


図4 下層部火災の場合（耐震モデル）

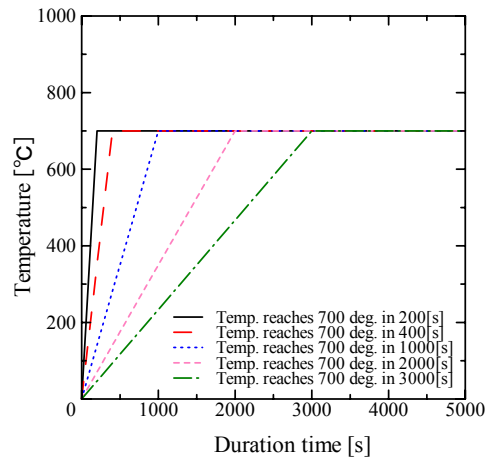


図5 速度の異なる温度上昇時刻歴

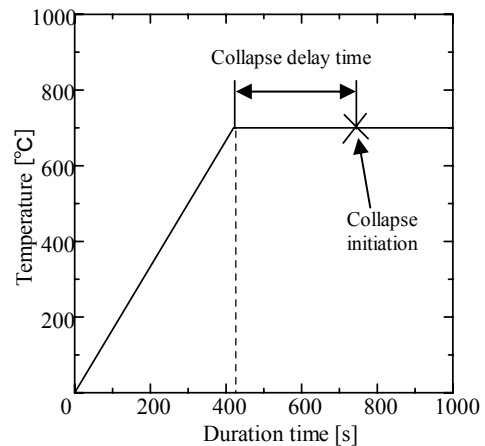


図6 崩壊遅延時間の定義

度が大きいほど供給熱エネルギー比は大きくなり、逆に速度が小さいほど比は小さくなる。すなわち、温度を緩やかに上昇させると、建物に供給される熱エネルギーが増大し、建物全体に蓄えられるひずみエネルギーも増大する。火災層の部材はもちろん、他の箇所の多くの部材も変形が増大、あ

るいは断面力の上昇によりダメージを受ける。その結果、崩壊遅延時間が短くなるものと考えられる。また、耐震モデルの場合、応力を緩和する応力伝達経路が複数存在し、

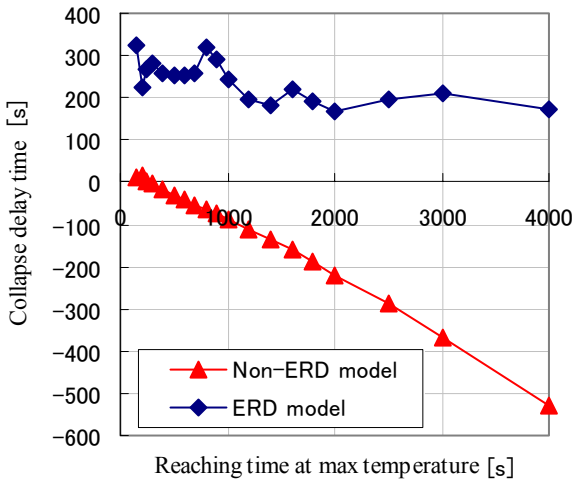


図7 温度上昇速度と崩壊遅延時間の関係

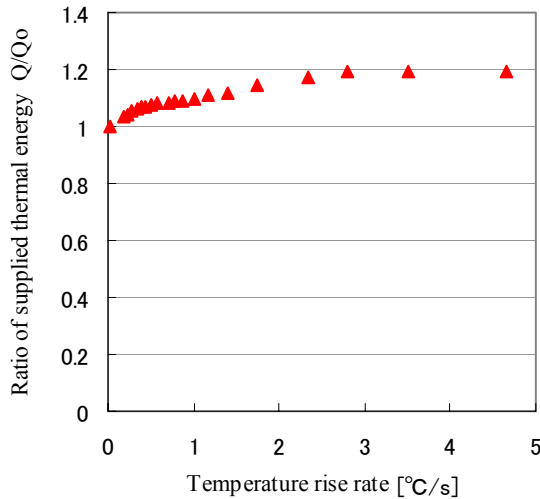


図8 温度上昇速度と供給熱エネルギー比の関係 (非耐震モデル)

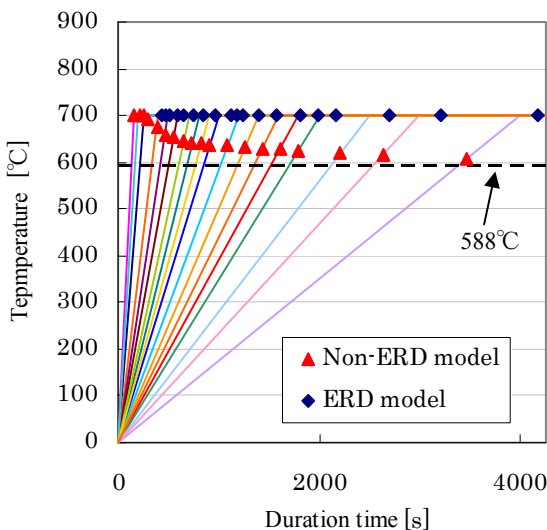


図9 温度上昇速度と崩壊開始時温度の関係

また、状況の相違によって時々刻々応力伝達経路が変わるため、崩壊遅延時間の変化が線形的でなくなるものと考えられる。最後に、図9に温度上昇速度と崩壊開始時温度の関係を示す。図より、非耐震モデルの場合、温度上昇速度が小さくなるとともに崩壊開始時温度が減少し、特定の値（前述のように本解析例では588°C）に収束する傾向が確認できる。耐震モデルの場合は、図7で崩壊遅延時間が常に正であることと関連し、崩壊開始時温度が最高設定温度である700°Cを保つ。

5. おわりに

本研究ではASI-Gauss法を火災崩落解析に適用し、耐震モデルと非耐震モデルの火災崩落挙動を比較・検討した。また、温度上昇速度の大小による火災崩落挙動の相違も検証した。その結果、設計強度および火災パターンは崩壊モードに、温度上昇速度は崩壊開始時間にそれぞれ大きな影響を与えることが判明した。

耐震モデルでは、火災が発生した場合、部材の耐力低下によって火災層が崩壊しても他の層へ影響を及ぼすことは無かった。一方、非耐震モデルの場合、火災のみによって完全崩壊する可能性があることが確認された。両モデルとも火災による温度上昇が緩やかなほど崩壊遅延時間が短くなり、特に非耐震モデルについては、比較的低い温度で崩壊する傾向があることが分かった。

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 World Trade Center Disaster: Final Report of the National Construction Safety Team on the Collapse of the WTC Tower, 2005.
- 3) 井上 一郎, 吹田啓一郎: 建築鋼構造—その理論と設計, 鹿島出版社, 2007.
- 4) 鈴木 淳一, 阿部 修太郎, 鈴木 弘之, 他: 火災時における鋼架構の崩壊温度とリダンダンシー, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, 2006, pp. 157-164.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.