

鋼構造建築物の火災時における 非構造材飛散に関する研究

Study on Scattered Area of Non-Structural Elements of Steel Construction Buildings under Fire

除村直樹¹⁾, 鈴木淳一²⁾, 磯部大吾郎³⁾

Naoki Yokemura, Jun-ichi Suzuki 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, E-mail: s1220917@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工)(独)建築研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地, E-mail: jsuzuki@kenken.go.jp)

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

In this paper, we discuss on scattered area of non-structural components of steel construction buildings under fire. Strength reduction of raw steel with increasing temperature and conditions for the separation of non-structural components are implemented in the ASI-Gauss code. From the numerical results, it is confirmed that the fire patterns and the scale of fire do not show insignificant effects on the scattered area.

Key Words : ASI-Gauss technique, Fire response analysis, Non-structural component, Steel construction building

1. はじめに

鋼構造建築物の構造部材が火災によって高温化すると、強度・剛性が低下し、建築物全体が変形する。変形が大きくなると、非耐力壁などの非構造部材にも損傷が及び、建築物の周囲へ部材が落下・飛散する恐れがある。そのため、火災時における周囲への被害防止や安全性を確保するために、飛散した部材の挙動を明らかにし、落下・飛散物による被害の及ぶ恐れのある範囲を検証する必要がある。しかし、高層建築物において非耐力壁などの重量物が落下・飛散した場合の挙動については研究されていない。さらに、この現象を実験的に検証することは困難である。そこで本研究では、崩壊を含む構造解析に実績のあるASI-Gauss法[1]に、高温化に伴う強度・剛性低下アルゴリズムを導入し、さらに非耐力壁の分離条件を設定して火災応答解析を行う。本稿では、同一の建築物モデルに対し火災の発生する範囲、平面位置、階数をパラメータとした火災応答解析を行うことで、火災による建築物の変形、損傷の程度および非耐力壁の飛散挙動について検証した結果を報告する。

2. 火災の表現

一般的な火災では鋼構造部材が熱せられても、融点以上になることはほとんど無い。しかし、温度上昇に伴い熱ひずみが発生し、さらに部材の剛性と耐力が低下する。その結果、高温化した構造部材は積載荷重・自重によって変形し、建築物全体も変形する可能性がある。

本研究では、高温化に伴い構造部材に発生する熱ひずみ、さらに高温化に伴う縦弾性係数と降伏応力の低下を導入することで火災を表現する。火災が発生した部屋で

は、柱と天井側の梁のみが高温化することとし、床側の梁は、床によって遮熱されるため高温化しないと仮定する。構造部材の温度は、耐火被覆材による断熱効果等の影響は無視し、時間経過とともに線形的に上昇して420[s]で700[°C]になり、その後は一定の温度を保つこととする。高温時における鋼材の応力-歪関係は図1のようにバイリニア型で近似し、鋼材の縦弾性係数、降伏強度はNIST[2]によるものを参考にした。そして、常温時の縦弾性係数、降伏強度に対する高温時のそれらが図2に示す残存率となるように設定した。

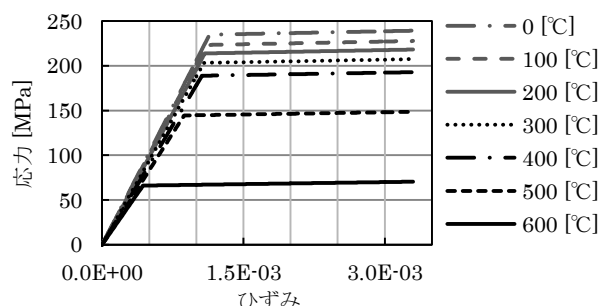


図-1 高温時における鋼材の応力-歪関係

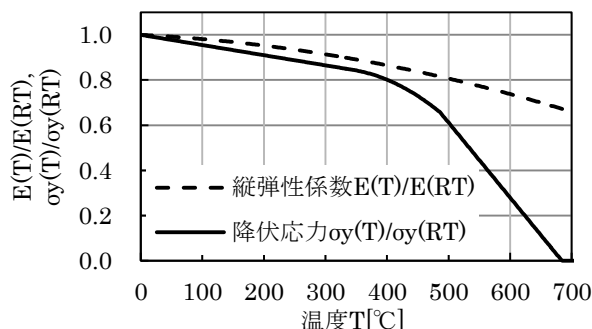


図-2 高温時における鋼材の強度残存率

3. 解析条件

3.1 想定建築物

想定する鋼構造建築物は、表 1 に示す条件で、ベースシア係数を 0.167 として設計した。柱は角形鋼管、梁は H 形鋼であり、各寸法は建築物に必要とされる保有水平耐力を満足する断面とした[3]。そして、表 2 に示す条件で建築物の外周部に非耐力壁である軽量気泡コンクリートパネルを設けた。非耐力壁は、L アンクルを介して梁に取り付けられており、250[mm]張り出している。なお、L アンクルの断面寸法は 75x75x9（一部 75x75x12）とし、材質は SS400 とする。

3.2 解析モデル

想定建築物を全て線形要素でモデル化する（図 3(a)）。ASI-Gauss 法では、1 部材当り 2 要素のモデル化でも、弾塑性解析において高い精度で解析が行えることが確認されている。しかし、1 部材当り 2 要素でモデル化すると、床と非耐力壁を梁に接続することができない。そのため、構造部材を 1 部材当り 4 要素で分割し、非耐力壁とそれを梁につなぐ結合部材を 1 部材当り 2 要素で分割する。床は剛床を仮定し、図 3(b)に示すように、十字状に要素を配置しモデル化する。非耐力壁は図 3(c)に示すように、各スパンの中央に 1 枚ずつモデル化し、破断するまでは弾性体として扱う。

3.3 破断条件

火災によって建築物が変形すると、非耐力壁の落下や構造部材の破断が発生することが考えられる。そこで、本解析では部材の種類ごとに破断条件を設定する。構造部材については、参考文献[1]と同様に高力ボルト継手の曲げ試験や引張試験などの実験結果を参考にして破断条件を設定する。非耐力壁は軽量気泡コンクリートパネルの曲げ試験[3]を参考にし、終局時の引張りひずみ・圧縮ひずみ・曲率を設定する。結合部材の破断条件は、実大 4 層鉄骨構造物の振動台実験での結果[4]を参考にし、非耐力壁の面内・面外回転角が 0.05[rad]以上になった場合と設定する。結合部材が破断することで非耐力壁と構造部材が分離する。なお、図 4(a)に示すように、建築物の水平方向の変位によって、結合部材がねじれるように非耐

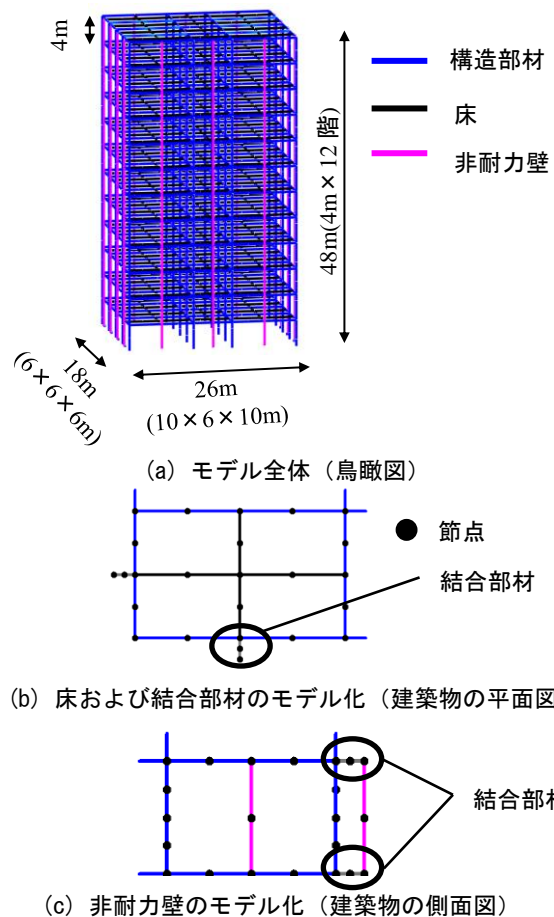


図-3 解析モデルの概要

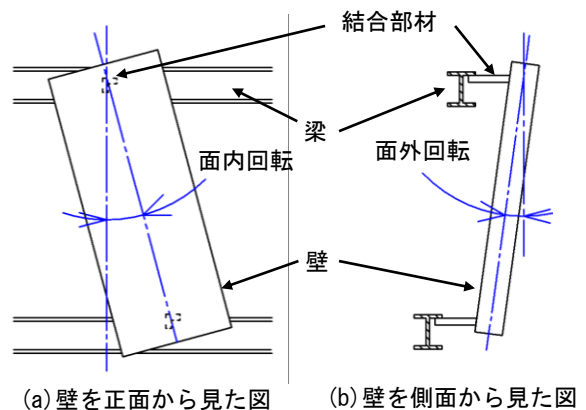


図-4 回転角の設定

表-1 建築物の条件	
階数(階高[m])	12 (4)
x方向スパン [m]	10x6x10
y方向スパン [m]	6x6x6x6
床荷重 [kgf/m ²]	800
材質	SS400

表-2 非耐力壁の条件	
種類	軽量気泡コンクリートパネル
断面寸法 [mm]	125x600
長さ [mm]	4000
質量[kg]	180
取り付け構法	ロッキング構法

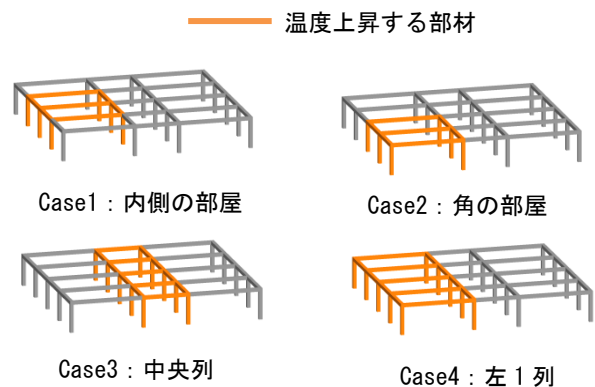


図-5 火災範囲の設定

力壁が回転することを面内回転とし、図 4(b)に示すように非耐力壁が建築物の外側に押し出されるように回転することを面外回転とする。

3.4 火災条件

火災による非耐力壁の飛散範囲は、火災範囲や火災が生じた階などによって変化するものと考えられる。そこで本研究では、簡単のために火災範囲を1階層に限定し、位置や範囲が異なる4種類の火災を設定した。各火災範囲・位置と呼称を図5に示す。さらに、火災が発生する階を1, 4, 8, 12階に変えることで計16パターンの火災条件で解析を行う。そして、危険側に想定するために、降伏応力が0になるまで部材温度(685℃以上)を上昇させた。なお、火災室外にある構造部材の温度上昇、火災範囲の変化、複数階層に亘る火災は考慮しない。

4. 解析結果

4.1 解析の終了時における建築物の概観

解析結果の1例として、火災が発生した階が4階の場合について図6に示す。この図において、床は黒色、非耐力壁は紫色で表示している。構造部材の色は、次式に示す関数 f_y によって変化し、赤色に近いほど降伏が進んでいることを示している。

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

ここで、 M_x , M_y は要素における x , y 軸回りのモーメント、 N は軸力である。また、添字 0 はその断面力の全断面塑性値を意味している。

火災範囲が比較的狭い Case1 と Case2 では、建築物の変形があまり見られなかった。しかし、Case2 では火災範囲にある非耐力壁が落下した。一方、火災範囲が広い Case3 と Case4 では、火災が生じた階より上層の階に変形が見られた。Case3 では、温度が上昇した柱が塑性座屈し、それに伴い多くの梁の両端に塑性ヒンジが形成され、火災室が鉛直方向に沈下するように変形した。また、建築物の手前側と奥側にあった非耐力壁が数多く落下した。Case4 では、火災範囲内で柱が座屈した後に、火災室の天井側の梁と床側の梁が接触するほど変形し、建築物の上層部全体が左側に傾き、倒壊に至った。

4.2 建築物の損傷

建築物の損傷度合いを比較するために、全ての構造部材(2448要素)中の降伏した要素の割合を求めた。その結果を表3に示す。火災範囲が狭い Case1 と Case2 では、降伏した部材は高温化した部材とその周囲の部材に限られ、全体の3.5~5.2%に留まる。また、火災が発生した階の違いによる影響は小さかった。これは、火災範囲が狭い場合には、火災によって高温化し耐力を喪失した構造部材に作用する荷重が周辺の部材群に再配分されたためと考えられる。一方、火災範囲が比較的広い Case3 と Case4 では、火災が発生した階が低くなるにつれて降伏比率が大きくなった。これは、火災範囲が広い場合には、

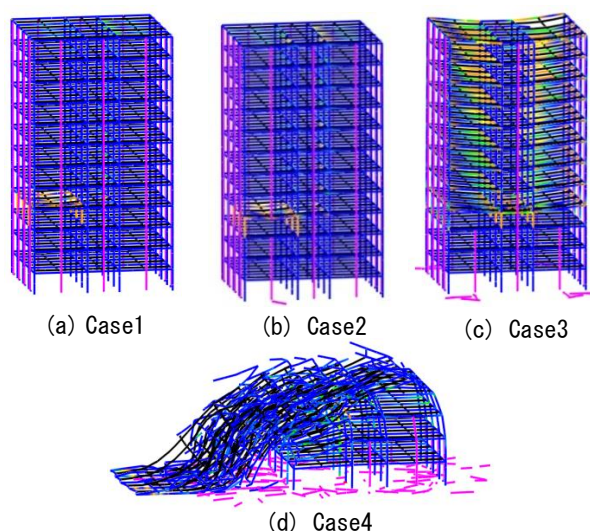


図-6 解析の終了時における鳥瞰図(4階での火災)

表-3 各火災条件における構造部材の降伏比率[%]

	Case1	Case2	Case3	Case4
1階	3.9	3.5	14.1	96.4
4階	4.7	3.5	15.9	91.5
8階	4.2	3.6	11.0	58.1
12階	3.9	5.2	6.3	6.5

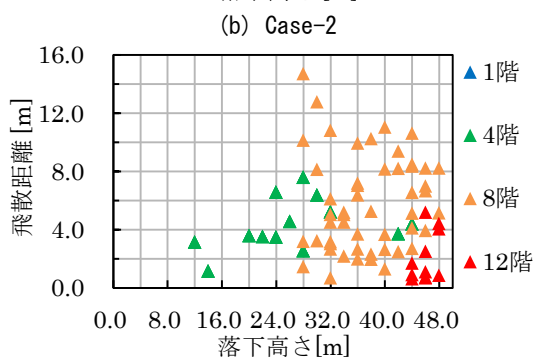
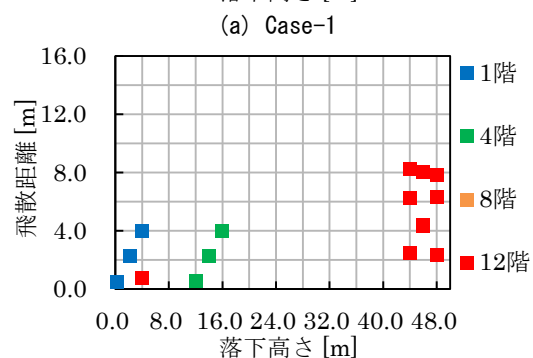
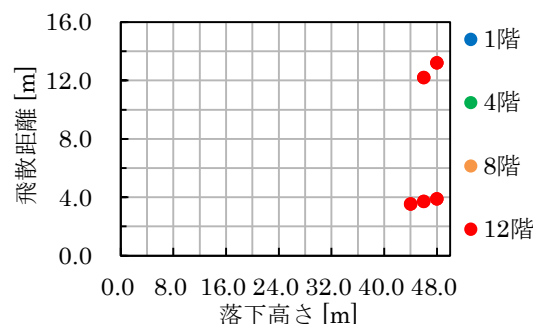


図-7 落下高さと飛散距離の関係

表-4 水平方向の速度と飛散距離の関係

	No.1	No.2	No.3
落下高さ [m]	30.0	34.0	38.0
飛散距離 [m]	11.4	4.4	3.5
水平方向の速度 [m/s]	4.4	1.7	0.7

降伏する構造部材が火災の周辺だけではなくその上層にも広がるためである。しかし、火災階の下階の部材は上層階の部材に比べて降伏する割合が小さいことも図 6 よりわかる。これは、建築物の部材断面は下層ほど大きいことが一つの要因である。

4.3 非耐力壁の飛散

建築物から落下した非耐力壁の飛散距離を、地表面レベルに達した非耐力壁要素の節点の座標で評価する。なお、落下した非耐力壁はその節点の変位を拘束することで接地を表現する。図 7 に、落下した非耐力壁から建築物の側面までの最短距離（飛散距離とする）と、非耐力壁が落下する前の節点の高さ（落下高さとする）との関係を示す。なお、Case4 では建築物が倒壊しており、その他の火災条件の場合とは建築物の挙動が大きく異なるため、対象外とした。図 7 より、火災範囲外が広い Case3 では多くの非耐力壁が落下していること分かる。一方で、各火災の条件で最大飛散距離を比較すると、Case1 では約 14[m]、Case2 では約 8[m]、Case3 では約 15[m]であった。非耐力壁の長さが 4[m]であることを考慮すると、火災条件によって最大飛散距離に大きな変化はないと考えられる。

図 7(c)より、落下高さが大きくなるにつれて飛散距離が長くなる傾向があることが分かる。しかし、落下高さが大きい場合でも飛散距離が短い場合がある。この違いは、非耐力壁の落下中に構造部材などと接触することで生じた、水平方向の速度（建築物の側面に垂直な方向の速度）が影響していると考えられる。そこで、8 階 Case3 での解析において落下した 3 つの非耐力壁の、落下高さ・飛散距離・水平方向の速度を求めた。その結果を表 4 に示す。非耐力壁 No.1 は飛散距離が最も長い、落下した高さが最も低い。しかし、水平方向の速度が最も大きい。

一方、非耐力壁 No.3 については逆のことが言えるため、飛散距離は落下高さだけでなく水平方向の速度に大きく依存することが確認できた。

5. おわりに

本稿では、ASI-Gauss 法を用いた解析コードに火災による強度・剛性低下アルゴリズムと非耐力壁の分離条件を導入し、3 次元的な火災応答解析を行った。火災範囲が小さい場合は建築物の変形と損傷は少なく、非耐力壁が落下した数も少なかった。一方、火災範囲が大きい場合は、火災階層より上層が変形し、倒壊する場合もみられた。倒壊しない場合でも、多くの非耐力壁が建築物の周囲に落下した。その飛散距離は非耐力壁が落下する高さと落下中の水平方向の速度に依存し、火災範囲は飛散距離の最大値にあまり影響しないことが示された。

参考文献

- [1] 磯部大吾郎, レティタイタン: 高層建築物の火災時崩壊挙動に関する数値解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第667号, pp.1659-1664, 2011.
- [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 World Trade Center Tower, 2005.
- [3] 鈴木 淳一, 阿部 修太郎, 鈴木 弘之, 大宮 喜文, 若松 孝旺: 火災時における鋼架構の崩壊温度とリダンダンシー 耐震設計が耐火性能に与える効果, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, 157-164, 2006.
- [4] 松村 晃: オートクレープ養生軽量気泡コンクリート (ALC) 部材の基本的曲げ強度性状 オートクレープ養生軽量気泡コンクリート部材の強度性状の研究 その1, 日本建築学会論文報告集, 第366号, pp.42-52, 1984.
- [5] 松岡祐一, 吹田啓一郎, 山田哲, 島田侑子, 赤澤資貴, 松宮智央: 実大4層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐力性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第641号, pp.1353-1361, 2009.