

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 22 日現在

機関番号：82113

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760541

研究課題名(和文)火災を受けた鋼架構の機能維持および再使用性評価技術の開発

研究課題名(英文)Assessment for reusability and functional preservation of steel structures after a fire

研究代表者

鈴木 淳一 (Suzuki, Junichi)

独立行政法人建築研究所・防火研究グループ・主任研究員

研究者番号：10453846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：建築物の耐火設計では、火災時における部分架構・部材の崩壊温度を終局耐力に基づき推定している。一般的な設計では、火災時の構造体の崩壊に対する安全性については検討するが、火災後の再使用性までは検討しておらず、火災後の損傷等を設計段階で想定していない。本研究では、火災後における構造体の機能維持・再使用性と損傷の関係に着目し、火災時の加熱冷却過程における鋼架構の力学的挙動を分析し、火災時の架構の加熱冷却過程における残留変形・残留応力、火災後の地震時における架構の構造特性、残留応力の解放メカニズム、火災時に構造体に生じる変形と構造部材・非構造部材の接合部破断などによる損傷や脱落等の関係が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research project is to assess fire damage of steel construction buildings and re-usability. Residual stress and deformation in structural steel elements were examined to understand the performance of structures after a fire. Damage estimation for the relation between damage of building's structures and non-structural elements was also conducted in this study. The severe damage of outer columns and beams largely affect the fall of exterior walls; however, some exceptions where severe damages of inner structure affect the fall of exterior walls were observed. Localization of a fire was the most effective measure to mitigate degradation of stiffness of structures and residual stress in structures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：火災 火害 再使用性 鋼構造 非構造部材 熱応力 耐火設計 加熱冷却

### 1. 研究開始当初の背景

火災時における建築物の安全性、特に、火災時における建築物の構造安全性を対象とする構造耐火に関する研究は、積極的に進められているが、海外では火災による建築物の構造崩壊が散見される状況にある。火災時に日本の高層建築物も倒壊に至るか否かについて、具体的な研究は行われておらず、その可能性を即座に否定できる状況にもなかったが、常時荷重のみならず地震外力に対しても設計がなされている剛接架構では、常時荷重に対する冗長性が高く、単部材の耐力劣化・崩壊したとしてもその劣化分を周辺部材が補うことによって、応力再配分が可能となることがわかってきた。一方、耐火設計における火災時の構造安全性を評価する指標である崩壊温度は、部材が十分な塑性変形能力を有していることを前提として、熱応力が解放された構造体の終局状態における力学的釣合・単純塑性理論に基づいて誘導されている。架構自身が保有する応力再配分能力を積極的に活用した崩壊温度ではなく、応力再配分能力を安全マージンとして捉え、熱応力の影響を無視した比較的単純な部分架構や部材単体に対して崩壊温度を与えているが、設計体系が終局強度に基づくものであるがゆえ、設計限界として与えられる崩壊温度は安全限界であり、火災後に補修などによって再使用できるかどうかは十分に明らかとなっていない。今後、建築物の供用期間の長期化や既存ストックの活用といった社会的な要求に対応するためには、再使用性をも視野に入れた耐火設計技術を構築していく必要がある。

### 2. 研究の目的

建築物の耐火設計では、火災加熱中に耐えられる部分架構・部材の最高温度を終局耐力に基づき推定し、崩壊温度として設計限界に用いているため、火災に対する構造体の損傷制御や再使用性を見据えた設計指標に与えるには至っていないのが現状である。安全限界のみを設計目標とする場合、適切に安全率を確保しておかないと、建築物に火災が生じた場合には架構に大きな変形が生じる恐れがあり、火災発生後の建築物の再使用を断念せざるを得ない恐れもある。つまり、現状では火災加熱を受ける最中の構造体の崩壊に対する安全性は要求するが、加熱・冷却過程を経た火災後の再使用性までは要求していないため、崩壊を免れた構造体の損傷等を想定できない。そこで本研究では鋼架構の火災後の再使用性を検討するに必要となる鋼構造架構の挙動および性能を定量化することを目的とした。

### 3. 研究の方法

火災後における構造体の機能維持・再使用性と損傷・塑性変形の関係を明らかにするため、火災時の加熱と常温に戻る冷却という全

過程における鋼部材・架構の力学的挙動を把握し、損傷の程度を定量化するための検討を行った。

#### (1)火災加熱・冷却時の構造体の挙動の把握

建築物の一室で発生した火災は、収納可燃物が燃え尽きるまで継続し、その後火災温度は下降する。この典型的な外力に対して、鋼材の温度も上昇、低下を伴いながら複雑な挙動を示す。火災時における架構内の部材の鉛直荷重や他部材の熱膨張、剛性・耐力低下による塑性化、熱変形を再現し、その荷重の大きさ、変形量を定量化することとした。また、火災時の構造体の変形が非構造部材(外壁)に与える影響についても検討した。

#### (2)火災後の構造体の構造耐力と残留応力の解放メカニズム

火災後の構造体の再使用性を明らかにするため、残留応力が作用した状況下における火災加熱・冷却後の層剛性、保有水平耐力の変化を分析した。また、冷却過程で生じる残留応力の解放メカニズムとその方法について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1)火災加熱・冷却時の構造体のモデル化

図 1a), b)に示す部材単体の構造モデルに対して高温時応力ひずみ関係、弾塑性実験等に基づく熱応答解析を行い、代表温度時(100、200、...、700°C)の梁単体の軸方向の荷重変形関係( $N-x$  関係)を得る。また、加熱冷却過程における荷重変形関係のモデルを図 2 に示す。図 2 には代表温度下  $T_{RT}$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ における梁単体の  $N-x$  関係、架構の荷重変形関係が記載されている。これを用いて架構中の挙動、部材の塑性変形量等を分析した。

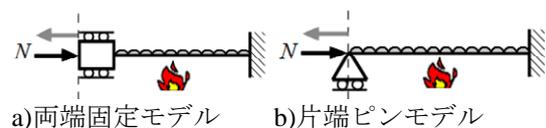


図 1 鋼材の構造モデル

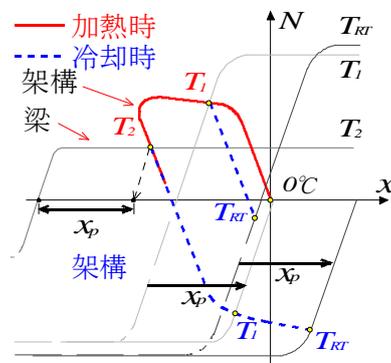


図 2 荷重変形関係のモデル

火災被害を想定する鋼構造架構は 12 層 3 スパン(図 3、4、階高 4 m、スパン長 10 m、6m)とし、フロアモーメント法により設計用

地震力を伝達できる必要最小断面の部材(SS400)を配した。梁上荷重、柱梁耐力比、ベースシア係数はそれぞれ、48.0kN/m、1.5、0.17とした。

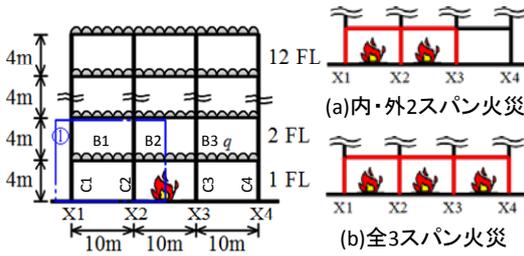


図3 架構立面図

図4 火災範囲

想定する火災は内側スパン火災、外側スパン火災とした。加熱される部材の最高履歴温度  $T_{max}$  を、100～崩壊の直前温度の範囲において100℃刻みで設定した。解析では部材温度を  $T_{max}$  まで温度上昇させた後、常温(20℃)まで温度を下降させた。解析には有限要素法による弾塑性熱応答解析を用いた。火災室に面する部材は柱・梁共に一様に温度上昇し、火災区画外への熱伝導はないものとした。また非火災室への延焼、鋼部材の接合部の破断は考慮していない。

(2) 火災・冷却時の架構の変形と残留応力

内側スパン火災と外側スパン火災時の架構の変形と残留応力の典型的な挙動は以下の通りである。図5は火災加熱を受ける柱の柱頭水平変位  $x$  と梁の軸力比  $N/N_y$  ( $N$ : 作用軸力、 $N_y$ : 常温時降伏軸力) の関係である。柱の柱頭水平変位は内側スパン火災では柱(C2)、外側スパン火災では柱(C1)と柱(C2)の柱頭水平変位の差である。これは加熱を受ける梁の軸方向の変形量を表す。また図6は加熱を受ける梁の温度変形関係である。

内側スパン火災の加熱過程においては、図5、図6に示すように、部材温度が200℃程度までは梁の伸び出しにより、C2の水平変位が増加している。200℃を超えると周辺の架構が塑性化し、 $N/N_y$  が約0.6で停滞する。約300℃を超えると熱膨張する梁が塑性化するため、軸縮み量が増加し、 $x$  は約-1.5cmで停滞する。500℃を超えると、梁の強度の低下に伴い、柱が弾性除荷され、 $x$  は約-1.2cmまで戻る。約550℃に至ると柱が塑性的に沈下し始めて  $N/N_y$  が低下していく。その後、約620℃で柱が座屈し、梁を拘束する力が弱まり再び柱頭は外側に移動する。 $N/N_y$  はさらに低下し、約750℃で崩壊する。

外側スパン火災の加熱過程では、約200℃から架構が塑性化し、 $N/N_y$  が約0.3で停滞する(図7)。梁の軸縮みも小さい(図8)。外側スパン火災では外柱(C1)の拘束力が弱いため、 $x$  は梁の熱膨張と同等程度となる。約550℃で柱が沈下し、座屈すると  $N/N_y$  が低下する。その後約620℃で柱(C2)、約680℃で柱(C1)が座屈し約700℃で崩壊した。

火災後冷却過程に入ると、 $x$  は梁が熱収縮するため火災区画側に戻り始める。内側スパン火災では、300℃以降に梁の塑性的な軸縮みが増加しているため、 $x$  は火災区画側に引

き込まれる(図6)。外側スパン火災では梁の塑性変形量が小さいため、梁の熱膨張分が戻るのみとなり、柱頭の水平変位は外側に留まる。本解析では柱頭の水平変形は、内側・外側スパン火災ともに、残留部材角は1/200に至っていない。

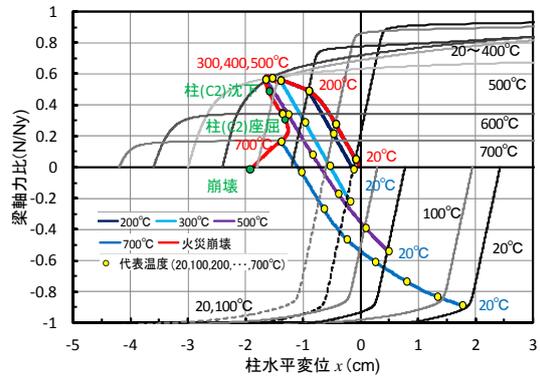


図5 内側火災-荷重変形関係 ( $T_{max}=200,300,500,700^{\circ}\text{C}$ )

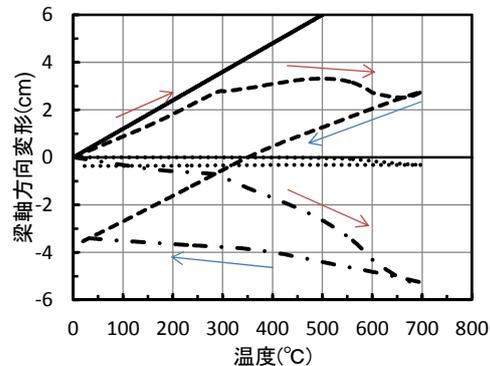


図6 B2の温度変形関係(内側火災)

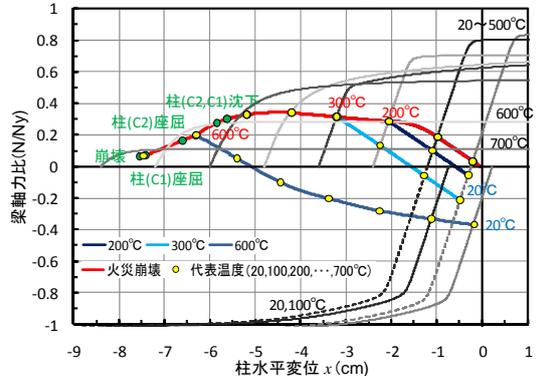


図7 外側火災-荷重変形関係 ( $T_{max}=200,300,600^{\circ}\text{C}$ )

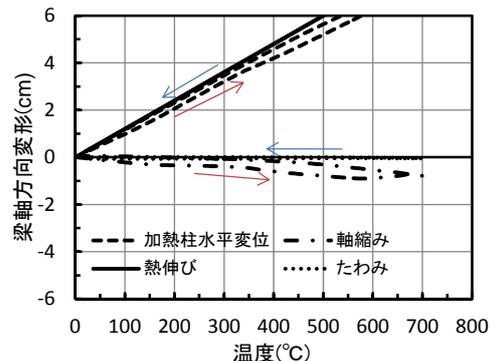


図8 B1の温度変形関係(外側火災)

図1、2の構造モデルを用いて、構造体の

挙動を分析する。図 5 において温度  $T_1$  では  $N-x$  関係の弾性域にあり、温度  $T_2$  では塑性域に入る。温度  $T_1$  が最高履歴温度  $T_{max}$  であれば、冷却過程にも  $N-x$  関係に一致する。温度  $T_2$  が  $T_{max}$  となると、塑性変形量  $x_p$  をオフセットすると単梁の  $N-x$  関係と架構の荷重変形関係は概ね一致すると考えられ、 $T_{max}$  が温度  $T_1$  では残留応力が小さく、温度  $T_2$  では残留応力が大きくなる。これに基づき図 5 に梁単体の  $N-x$  関係を記している。図 5 に  $T_{max}$  が 500、700°C の際の塑性変形量  $x_p$  を、図 7 には  $T_{max}$  が 600°C の際の  $x_p$  をオフセットした単梁の  $N-x$  関係を示している。図 5 より内側スパン火災では、加熱過程では単梁の荷重変形関係と代表温度時の架構の変形量が一致することがわかる。また、冷却過程においても  $T_{max}=200, 300^\circ\text{C}$  の場合にはオフセット前の  $N-x$  関係と概ね一致する。300°C を超えると  $N-x$  関係は塑性域に入り、 $T_{max}$  が 700°C になると梁の塑性変形も大きく、冷却後の梁の軸力比は約 -0.9 となる。一方、外側スパン火災では  $T_{max}$  が高温でも残留応力は比較的小さい。

図 9、10 に示す最高履歴温度  $T_{max}$  による残留変形・残留応力の変化からも、 $T_{max}$  が高いほど残留変形・応力が大きくなることわかる。解析では、内側スパン火災において  $T_{max}$  が約 500°C を超えるとたわみが梁長の 1/300 を超える結果となった。

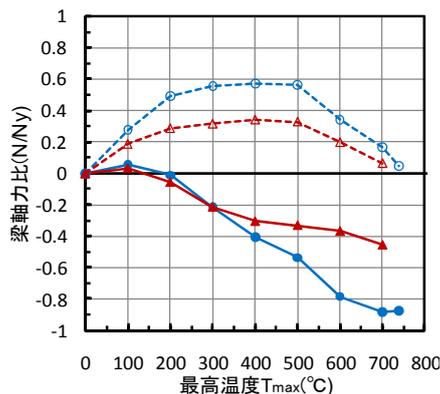


図 9 梁軸力比・残留応力

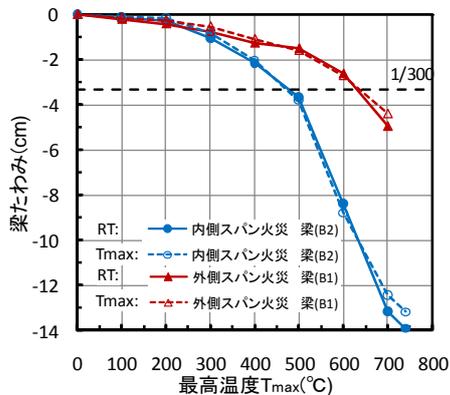


図 10 梁たわみ・残留変形

同様に i)外側スパン火災(X1-X2)、ii)内側スパン火災(X2-X3)、iii)内・外側 2 スパン火災(X1-X3)、iv)全 3 スパン火災(X1-X4)時の梁の最大応力と冷却後の残留応力の値を梁の軸力比について見ると、火災時の梁の熱応力と

冷却後の軸力比は、外側スパンの梁 B1、B3 よりも内側スパンの梁 B2 の方が、i)の火災を除いて大きくなる。また、i)か iv)の火災を比較すると、加熱範囲が大きく、最高履歴温度が高いほど、残留応力も大きく、極一部を除き、いずれの梁も iv)の火災(X1-X4)時が最も残留応力が大きくなる。i)の火災では、加熱を受ける B1 以外の梁の火災時の熱応力は、火災スパンから離れるほど小さくなり、冷却後の軸力比は B2 で約 -0.1、B3 で -0.05 以下に留まる。ii)の火災では、加熱を受ける B2 が大きく塑性化する  $T_{max}=400^\circ\text{C}$  以下であれば、非火災室の梁 B1、B3 に残留応力が生じにくいこともわかる。iii)の火災時は非火災室を除き、梁の残留応力は iv)の火災の場合と大きな差はない。

### (3) 火災後の架構の力学的特性

火災により、損傷を受けた鋼架構の力学的特性を把握するため、 $A_i$  分布に基づく水平力を作用させたプッシュオーバー解析により、加熱冷却過程を経た架構の耐力・剛性を分析した。図 11 に  $T_{max}$  の異なる内側スパン火災後の架構に水平力を加えた際の 1 層の荷重変形関係を示す。図より  $T_{max}$  は保有水平耐力には大きな影響を与えていないが、 $T_{max}$  の上昇に伴い剛性の低下が認められる。これは  $T_{max}$  が大きいほど火災後の部材に大きな残留変形・応力が生じているためである。また、図 12 は、加熱冷却過程を経た架構の層剛性を示している。図より、架構の層剛性は、加熱温度の上昇および加熱範囲の拡大に応じて低下する傾向があることがわかる。i)の火災を被った架構の剛性が最も高く、iv)の火災を被った架構の剛性が最も低い。これは、図 9 に示した梁の残留軸力の大きさが影響しており、残留応力が大きい部材が多いほど水平加力時に塑性化が生じ易いことも要因となっている。また、火災後に残留応力として作用していた梁の軸力は地震力が作用し変形することで、応力が再配分され低下し、層間変形角が 1/100 になると約 0.6、架構が崩壊に至るときにはほぼ 0 となる。

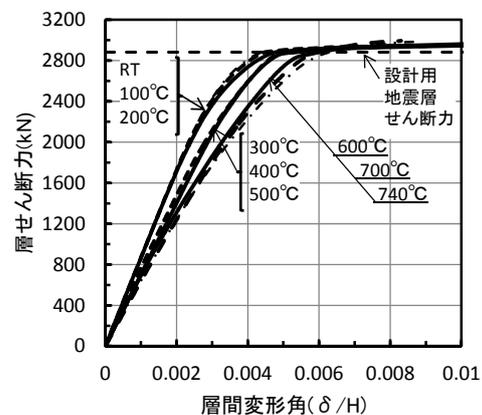


図 11 地震時荷重変形関係

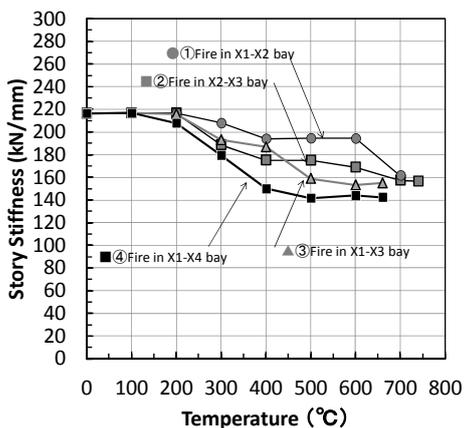


図 12 火災温度と層剛性

(4) 火災後の残留応力解放方法

火災後に架構に生じる残留応力を解放する方法およびその効果について検討する。図 3 の架構から火災加熱を受ける部分を図 13 の分解架構として抽出する。当該架構の内側スパン火災を想定し、架構が  $T_{max}=600^{\circ}\text{C}$  まで加熱を受けて常温まで冷却した後、残留応力の解放を目的として梁の中央部分を局部的に  $800^{\circ}\text{C}$  まで再加熱する。図 14 は当該架構の火災後と再加熱後の曲げモーメント分布図である。火災後に生じていた曲げモーメントが大きく低減しており、再加熱による残留応力の解放が期待できることがわかる。

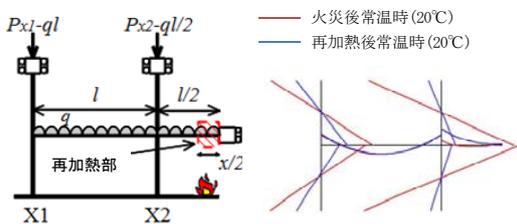


図 13 分解架構 図 14 モーメント分布図

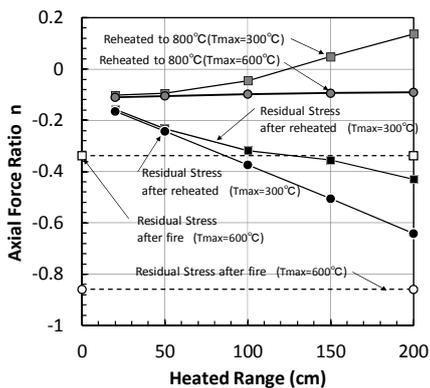


図 15 再加熱範囲と残留軸力

図 15 は、梁の中央部分を再加熱した後、常温まで冷却される過程の梁の軸力比と変形関係を再加熱部の長さ  $x$  をパラメータとして示したものである。図より再加熱することにより、 $T_{max}=600^{\circ}\text{C}$  の火災では火災後に比べて  $1/3$  程度に残留応力が低減していることがわかる。図には  $T_{max}=300^{\circ}\text{C}$  の結果もプロット

しているが、 $T_{max}$  の大きさによらず  $x$  が短い方が残留応力は低減することがわかる。これは再加熱した部分の局部的に塑性化により応力が解放されるためである。しかし、 $T_{max}=300^{\circ}\text{C}$  のように、比較的残留応力が小さい場合に  $x=200\text{cm}$  程度の広範囲を再加熱すると、再加熱前よりも、残留応力が大きくなることもある。これより残留応力の解放には、局所的な加熱を複数箇所で行うことが効果的であることがわかる。

(5) 火災時における構造体の変形と非構造部材および周囲への飛散状況

火災時における部材の高温化は、構造体の損傷のみならず、非構造部材に対しても損傷をもたらし、脱落・落下、周囲への飛散する恐れがある。火災による損傷の影響を局所化し、本来の機能を維持するためには、損傷の拡大する温度、変形限界を明らかとする必要がある。ここでは、ASI-Gauss 法を用いた火災時における鋼架構の熱応答解析をに構造体および外壁の接合部破断条件等を適用し、図 16、17 に示す架構の構造体の変形に伴う損傷の程度を把握した。

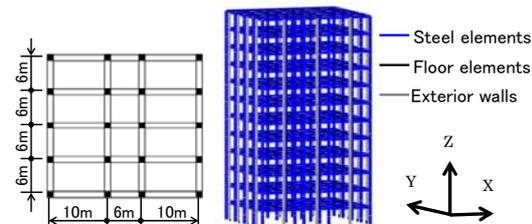


図 16 架構平面 図 17 架構内の部材配置

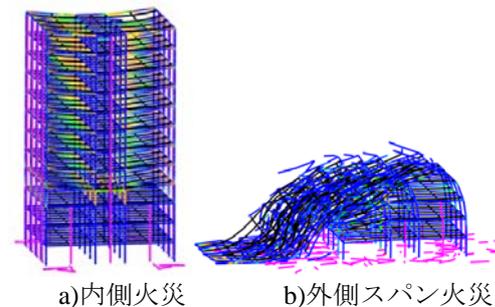


図 18 部材の損傷

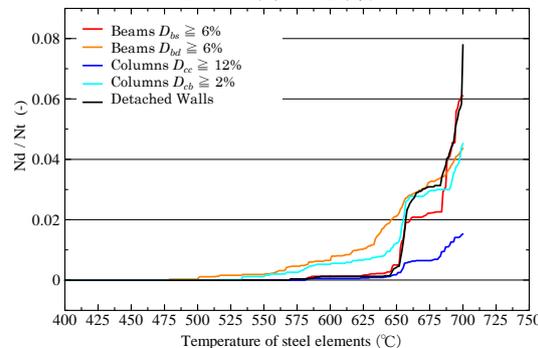


図 19 部材の損傷と鋼材温度

その結果、梁の中央がたわむよりも、柱の座屈・収縮によって梁が傾く変形のほうが外壁の落下を誘発しやすいことがわかった(図 18、19)。また、外壁は火災建物近傍に落下す

る傾向があるが、構造体等との接触によって水平速度が付加されるのが大半であった。図20のとおり、大半の外壁は水平速度3m/sの放物線で包含されるが、一部の外壁は落下高さの1/3まで飛散する可能性があることが明らかとなった。

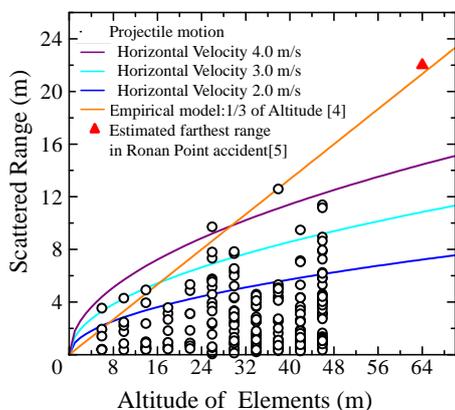


図20 非構造部材の高さと飛散範囲.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) 除村 直樹、鈴木 淳一、磯部大吾郎: 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、計算工学講演会論文集CD-ROM、第18巻、(2013)

〔学会発表〕(計4件)

(1) J. Suzuki, N. Yokemura and D. Isobe: Damage Estimation of Steel Frame Buildings under Fire Using Collapse Analysis, Extended Abstracts of the 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2014), (2014), pp. 436-439, Sendai, Japan.

(2) 火災時における非耐力壁の落下飛散範囲に関する数値解析的検討: 除村直樹、鈴木淳一、磯部大吾郎、日本建築学会学術講演梗概A-2分冊、p. 71-72、2013

(3) 火災を受けた鋼架構の機能維持・再使用性に関する研究 複数スパン火災時の挙動と残留応力解放メカニズム: 鈴木淳一、日本火災学会研究発表概要集、pp 373-374、2013.6

(4) 火災を受けた鋼架構の機能維持・再使用性に関する研究: 鈴木淳一、古山智史、日本火災学会研究発表概要集、pp 46-47、2012.5

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 淳一 (JUN-ICHI SUZUKI)

独立行政法人 建築研究所・主任研究員

研究者番号: 10 453846