

# キーエレメント指標を用いた 火災時の建物の崩壊危険性予測

Collapse Risk Prediction of Buildings under Fire  
Using Key Element Index

大井康平<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>  
Kohei Oi 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: kohei.0010@gmail.com)  
2) 博(工) 筑波大学教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

The purpose of this study is to predict collapse risks of buildings under fire using a key element index. We investigated the relationship between the integrated values of key element index in the fire range and the sum of the height of remains after collapse. We applied the numerical code using the ASI-Gauss technique. It is confirmed that the threshold of key element index is present when buildings start to collapse and the capacity of the integrated value of key element index becomes smaller as the fire range increases.

**Key Words** : Steel Framed Buildings, Fire Induced Collapse, Key Element Index, ASI-Gauss Technique, Structural Collapse Analysis

## 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り、その際の建築物に残存する余剰強度について系統的に議論することは困難である。過去において、建築物に大規模火災が発生した際の崩壊挙動として次のものが挙げられる。アメリカ同時多発テロ事件におけるニューヨーク世界貿易センタービル(WTC-7)のように、7時間程度燃え続けた後に完全崩壊してしまった例と、2005年にマドリードのWindsorビルで発生した大火災のように、ビルが全焼したにも関わらず骨組だけは残存し、丸一日を経ても全体崩壊には至らなかった例である。高層建築物に大規模火災が発生し長時間燃え続けた、という状況は同じであるにもかかわらず、建物の崩壊挙動は異なっている。他方、米国の研究調査機関NISTが9.11事件についてまとめた報告書[1]では、火災によって建物のキーエレメントとなる柱が損壊したことがWTC-7の崩壊の要因となった可能性が示唆された。

建築物の火災崩壊を予防する観点から、建築物の様々な構造パラメータや火災発生箇所・範囲と、火災時の崩壊挙動の関係性について調べる必要がある。本稿では、前述の調査結果を踏まえ、キーエレメント指標(以下KI)と火災崩壊形態の関連性を調査することにした。ここで、KIとは、本研究室で考案された、建物の強度に対する柱の寄与度を数値化したものである。

建築物の火災崩壊に関する先行研究として、磯部ら[2]による、「火災範囲」「接合部強度」「アウトリガーシステム」「柱の軸力比」の4つに着目して火災崩落解析を行ったものがある。その結果、これら4つの要因全てが建物の崩壊開始時間や崩壊挙動に大きく影響を与えること

が明らかになった。

KIに関する研究として、日下ら[3]による発破解体に関する研究が行われている。この研究では、建物を発破解体する際、発破箇所を定量的に選定する指標としてKIを用い、これを足し合わせた積算値と崩壊形態の関連性について議論した。その結果、KIの積算値と発破解体時の崩壊形態の相関関係が示された。

本稿は、KIを用いて火災発生時の建物の崩壊危険性を予測することを目的とする。まず、一般的な鋼構造建築物を1つモデル化し、すべての柱のKIを算出する。次に、様々な火災条件下における建物の崩壊形態をキーエレメント指標を用いて評価する。最後に、建物の崩壊形態とKIの関連性を調査し、火災発生時における建物の崩壊危険性を予測することを目指す。なお、崩壊形態を定量的に表す指標として、本稿では火災発生後の残存物高さの和を用いることとする。また、数値解析には火災崩落解析において実績のあるASI-Gauss法[2]を用いた。

## 2. キーエレメント指標

### (1) キーエレメント指標の定義

KIとは、建物の強度に対する柱の寄与度を数値化したものである。まず、健全な状態の建物の全柱梁接合部に対し、鉛直方向に荷重増分を与え、建物最下層部のいずれかの柱部材に降伏現象が起きた際の荷重を用い、降伏限界荷重 ${}_0P_G$ として求める。任意の*i*層内の柱番号*a*を除去した状態の建物の降伏限界荷重にも、同様に鉛直方向に荷重増分を与え、*i*層以下のいずれかの柱部材に降伏現象が起きた際の荷重を用い、 ${}_1P_G(i, a)$ と表す。以上より、この柱番号*a*のKIを以下のように定義する。

$$KI_{i,a} = {}_0P_G / {}_1P_G(i, a) \quad (1)$$

添え字の0は、 $KI$ を算出する際に、健全な状態の建物の降伏限界荷重を用いることを表す。すなわち、健全な建物の強度に対する柱1本の寄与度を得ることを表す。また、添え字の1は、柱を1本除去した状態の建物の降伏限界荷重を用いることを表す。

式(1)より、 $KI$ が大きい柱部材ほど、建物全体の荷重支持能力に対して影響の大きい柱部材であることがわかり、建物の構造を支える上で重要な柱を定量的に求めることができる。このように算出された $KI$ を用い、建物の強度に対する火災範囲内に存在する柱の重要度を定量的に表す。

### (2) キーエレメント指標の積算値

本稿において、キーエレメント指標の積算値(以下 $KI$ 積算値)を火災範囲内に存在するすべての柱の $KI$ を足し合わせたものと定義し、以下のように表す。

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{l_i} [KI_{i,m(i,j)}] \quad (2)$$

$$= KI_{1,m(1,1)} + KI_{1,m(1,2)} + \dots + KI_{1,m(1,l_1)} + KI_{2,m(2,1)} + \dots + KI_{R,m(R,l_R)}$$

ここで、 $R$ 、 $l_i$ 、 $m(i, j)$ はそれぞれ建物の全層数、 $i$ 層で火災発生箇所に存在する柱の本数、およびその $j$ 本目の柱番号を表す。本稿では、設定した火災範囲における $KI$ 積算値と建物の崩壊形態の関連性について考察する。

## 3. 火災崩落解析

### (1) 解析モデル

本稿では、1つのモデルに対して異なる火災範囲を設定し、火災崩落解析を行う。解析モデルは6層3×3スパンの鋼構造建築物とし、全高24[m]、階高は各層4[m]、幅および奥行きのスパン長は全て7[m]とした。解析モデルの鳥瞰図を図-1に示す。

建物の柱部材にはSM490の鋼材を用いた角形鋼管、梁部材にはSS400の鋼材を用いたH型鋼を使用した。各鋼材の物性値を表-1に示す。床については面内変形を許容しない剛床仮定とした。モデルを設計する際、建物には固定荷重と積載荷重を足し合わせた単位床面積あたり800[kgf/m<sup>2</sup>]の荷重が作用するものとした。柱や梁の断面寸法は、ベースシア係数 $C_b$ に基づき建物に必要とされる水平耐力を満たす断面を用いた[4]。ここでベースシア係数 $C_b$ は以下のように定義される。

$$C_b = Z \cdot D_s \cdot R_t \cdot C_0 \quad (3)$$

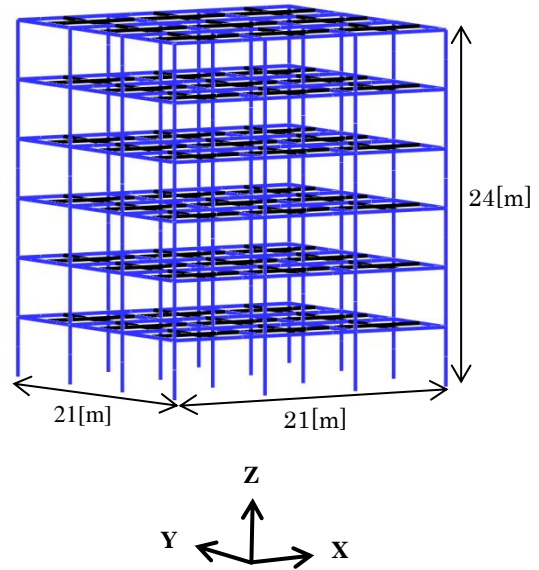


図-1 解析モデル鳥瞰図

表-1 鋼材の物性値

	ヤング率 [GPa]	降伏応力 [MPa]	ポアソン 比	密度 [kg/mm <sup>3</sup> ]
SS400	206	245	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$
SM490	206	325	0.3	$7.9 \times 10^{-6}$

式中の $Z$ は地震地域係数、 $D_s$ は構造特性係数、 $R_t$ は振動特性係数、 $C_0$ は標準せん断力係数である。これらの係数から、本稿で用いる建物のベースシア係数 $C_b$ を計算すると、 $C_b = 0.248$ となる。

火災崩落解析を実施する際、柱は1部材2要素分割、梁は1部材4要素分割し、床は十字状の梁要素でモデル化したものを4要素で分割した。

床に用いられているコンクリートスラブは、ひび割れた後に降伏するという鋼材とは異なる挙動を示す。この挙動を再現するため、RC構成則であるTri-linear型モデルのスケルトンカーブを導入した。

### (2) 解析モデルにおけるキーエレメント指標の算出

前述した $KI$ の算出方法に従って、本稿で用いる解析モデルにおける $KI$ をプッシュダウン解析により算出した。

算出した $KI$ を図-2に示す。この図では、柱1本に対する $KI$ の値を□の中に表している。全体的な傾向として、四隅の柱は $KI$ の値が小さく、中央部の柱は $KI$ の値が大きい。つまり、四隅の柱は建物の強度に対する寄与度が比較的低い柱であること、中央部の柱は寄与度が比較的高い柱であることを表している。

### (3) 火災条件の設定

火災による解析モデルの変形は、火災の規模・平面位置・階層・延焼の有無など、様々なパラメータにより変化する。そこで本稿では、1層の区画火災に限定し、火災の規模・平面位置・火災が発生する階層の3つのパラメータを変化させて火災崩落解析を実施した。

設定した火災の規模と平面位置を図-3に示す。1×1スパン

6F			
1.0083	1.0212	1.0212	1.0083
1.0212	1.0239	1.0239	1.0212
1.0212	1.0239	1.0239	1.0212
1.0083	1.0212	1.0212	1.0083
5F			
1.0013	1.0699	1.0699	1.0013
1.0699	1.0644	1.0644	1.0699
1.0699	1.0644	1.0644	1.0699
1.0013	1.0699	1.0699	1.0013
4F			
0.9991	1.1218	1.1218	0.9991
1.1218	1.1218	1.1218	1.1218
1.1218	1.1218	1.1218	1.1218
0.9991	1.1218	1.1218	0.9991
3F			
1.0004	1.1647	1.1647	1.0004
1.1647	1.1832	1.1832	1.1647
1.1647	1.1832	1.1832	1.1647
1.0004	1.1647	1.1647	1.0004
2F			
1.0013	1.2098	1.2098	1.0013
1.2098	1.2430	1.2430	1.2098
1.2098	1.2430	1.2430	1.2098
1.0013	1.2098	1.2098	1.0013
1F			
1.0026	1.2731	1.2731	1.0026
1.2731	1.3256	1.3256	1.2731
1.2731	1.3256	1.3256	1.2731
1.0026	1.2731	1.2731	1.0026

図-2 キーエレメント指標の算出結果

ンを1ブロックと定義し、1,2,3,4,6,9ブロックの範囲で変化させる。火災規模が1ブロックの場合は3パターン、2,3ブロックの場合はそれぞれ2パターン、4,6,9ブロックの場合はそれぞれ1パターンの計10パターンを設定した。火災階

層は1階から6階まで計6パターンとし、合計60パターンの火災条件で火災崩落解析を実施する。

本解析で温度上昇させる部材は、柱と火災範囲内見上げ側の梁と天井スラブの引張鉄筋とする。火災範囲内の見下げ側の梁は、遮熱性の高いコンクリートスラブにより温度上昇が小さいと予測できることから、本稿では温度上昇をさせないこととした。

柱および梁の温度上昇の履歴は、JIS A 1304の耐火曲線を線形近似することで設定した。これは、一般的な火災温度である700℃まで線形的に上昇させ、それ以降は700℃で一定になると仮定したものである。引張鉄筋の最高温度は600℃と設定した。これは、引張鉄筋の被り厚を20[mm]とし、床の耐火基準である2時間後における引張鉄筋の温度を理論式および実験値[5]から算出したものである。最高温度までの上昇時間は420[s]とした。また、温度上昇の履歴は、柱および梁と同様に線形的に温度上昇し、420[s]で最高温度の600℃になった後に一定になるとする。

#### (4) 火災の表現方法

温度上昇に伴う部材の膨張は、建物に大きな影響を及ぼす。本稿では温度上昇する柱および梁に、熱ひずみを加える事により熱膨張を表現する。熱ひずみと温度の関係は、次式のように示される。

$$\Delta \varepsilon_T = \alpha \Delta T \quad (4)$$

ここで $\Delta \varepsilon_T$ 、 $\Delta T$ および $\alpha$ はそれぞれ、熱ひずみ増分、温度増分、線膨張係数である。また、機械的ひずみと熱ひずみの関係は次式のように示される。

$$\varepsilon_m = \varepsilon - \varepsilon_T \quad (5)$$

ここで $\varepsilon_m$ および $\varepsilon$ はそれぞれ、機械ひずみ、全体ひずみである。

次に、火災による強度・耐力低下の表現について記述する。構造用鋼剤の融点は、一般的な火災温度よりも高く、火災による加熱を受けても部材の溶解は比較的少ない。しかし、温度上昇にともなう部材の強度・耐力低下が著しく起こるため、比較的低い応力で部材の変形が発生し、建物に多大な影響を及ぼす。本稿では、温度上昇に伴う降伏応力・弾性係数の低下率をNIST[1]のものを近似した曲線を使用し、この現象を表現する。この式は鋼材に耐火被覆を施さない場合のものであり、700℃近辺において、弾性係数は常温時の約60%、降伏応力は常温時の約10%まで低下する。

#### (5) 火災崩落解析の結果

温度上昇に伴う解析モデルの変形の様子を図-4に示す。この図では、火災範囲が図-3(i) (2×3ブロック)、火災階層が2階の場合における解析モデルの概観を示している。火災発生から420[s]の時、火災範囲内の部材温度が700℃

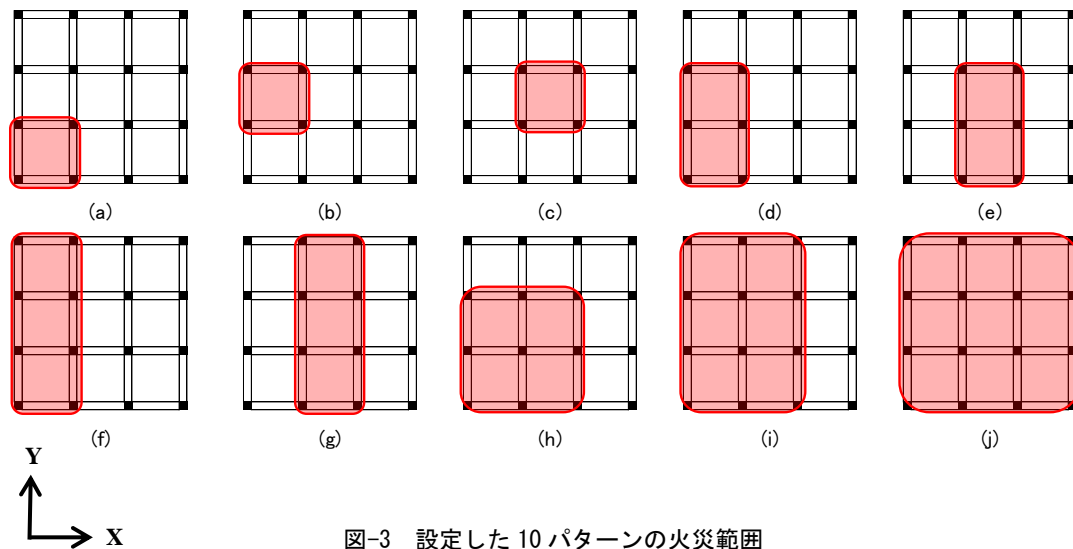


図-3 設定した10パターンの火災範囲

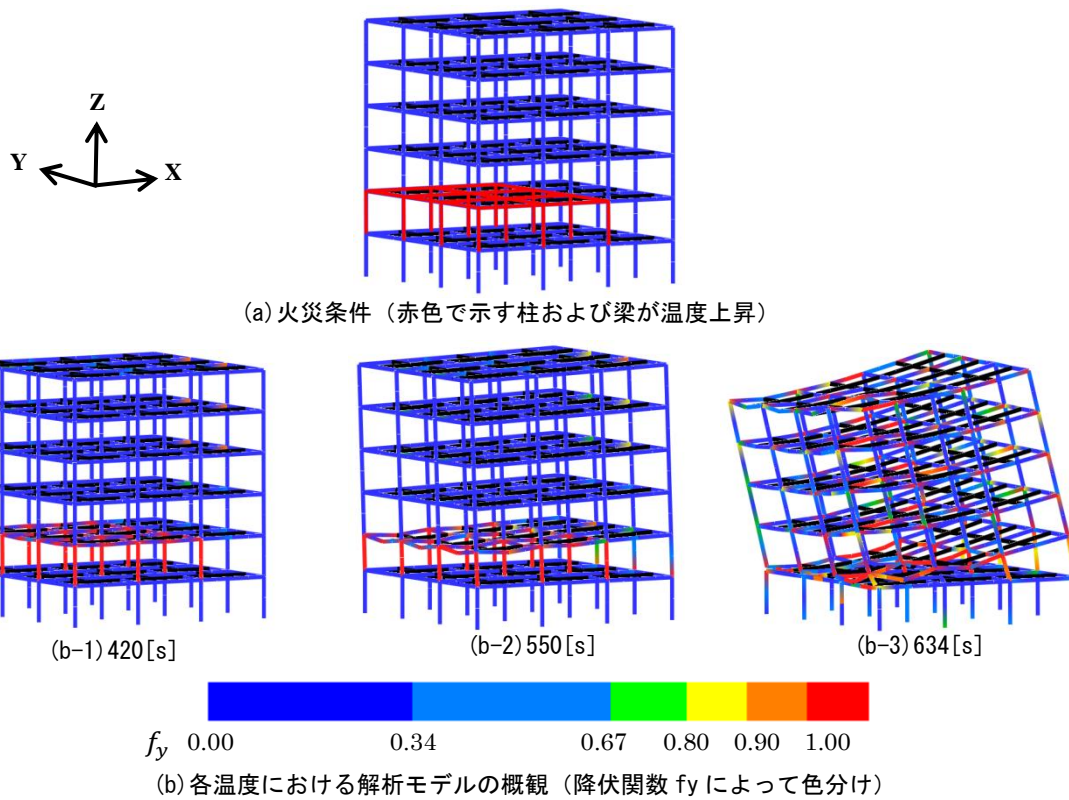


図-4 温度上昇に伴う解析モデルの変形  
(火災範囲：(i)，火災階層：2階)

に達するあたりで火災範囲内の梁部材がたわみ始めた。その後、建物全体が $-X$ 軸方向に傾くように柱部材が座屈し、634[s]の時に座屈していた柱が破断した。建物の2階部分が潰れ、3階の梁、床部材と2階の梁、床部材が接触する様子が確認された。3階の部材と2階の部材が接触した後は建物の崩壊挙動が落ち着き、それ以上崩壊が進行することはなかった。

60パターンの火災崩落解析を行った結果、火災階層や火災範囲、火災発生箇所によって建物に生じる変形が異なることがわかった。火災階層が異なり、火災発生箇所が同一である場合、建物に生じる挙動は大きく変化しな

いが、範囲の大きい火災が下層に発生する場合、建物が全体崩壊する危険があることが確認できた。また、建物の中心部に発生する火災に比べ、建物の端部に発生する火災の方が、建物の構造部材に与える影響が大きかった。これは、建物の端部に存在する構造部材の耐力が低下することによって建物全体のバランスが崩れ、火災発生箇所より上部の構造部材の荷重が火災発生箇所に集中してしまうことが原因と考えられる。

#### (6) $KI$ 積算値と残存物高さの和の関係

60パターンの火災崩落解析から得られた建物の残存物高さの和と、それぞれの火災範囲に対応する $KI$ 積算値の

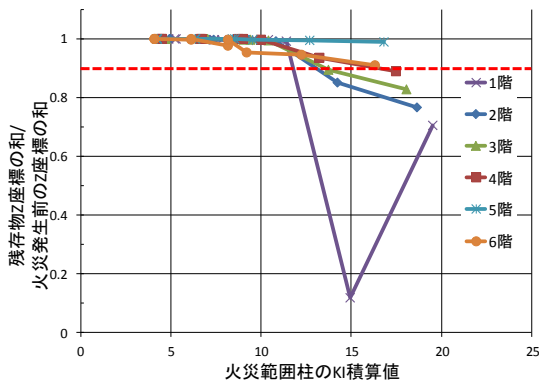


図-5 KI積算値と残存物高さの和の関係

関係を示したグラフを図-5に示す。なお、縦軸の値には、残存物高さの和を健全状態の建物の高さの和で割ることによって無次元化したものを用いている。

グラフから、6階を除いた全ての火災階層において、KI積算値が10以下の範囲では残存物高さの和はほぼ変化せず、KI積算値が10以上の範囲では残存物高さの和が減少するという傾向が見られた。このことから、建物に火災が発生した場合、建物が崩壊を開始するようなKI積算値のしきい値が存在することが予想できる。また、KI積算値が10以上の範囲において、残存物高さの和が減少する傾きが階層により異なる。その傾きは5階、6階、4階、3階、2階、1階の順で急になった。これは、火災階層が上層から下層に移るにつれて、残存物高さの和が減少する割合が大きくなっていくことを示している。このことから、火災発生後の建物の残存物高さの和の減少をある割合までに抑えるという条件を設けた場合、火災階層が下層に移るにつれて、その条件を満たすKI積算値は小さくなるのがわかる。そのため、建物の下層には上層より重点的に防火対策を施し、火災範囲におけるKI積算値を抑える必要があると考えられる。赤色破線は、一例として火災発生後の建物の残存物高さの和の減少を10%に抑えるという条件を表している。グラフから、この条件を満たすKI積算値は1階が一番小さく、階層が上昇するにつれて許容するKI積算値が大きくなるのがわかる。

火災階層が6階の場合に残存物高さの和が減少し始めるKI積算値が小さく、また減少する傾きが5階の傾きより大きい理由は、次のように推測できる。火災崩落解析の結果、火災により火災範囲の部材の耐力が低下し変形を始めると、火災範囲の上層部に存在する部材がその変形を抑えるように建物全体を吊り上げるという挙動が見られた。このことから、最上階である6階には上層の部材が少ないため、崩壊が早まった可能性がある。また、火災階層が1階で火災範囲が図-3(i)(2×3ブロック)の場合に残存物高さの和が急激に減少している原因は、建物の構造に与える影響が大きい最下層に生じた広範囲の火災であり、かつ非対称な位置に生じた火災であったため、建物が全体崩壊したためであると考えられる。

#### 4. 結言

本稿では、火災範囲におけるKI積算値を使用して、建物の崩壊危険性を予測することを目的とし、1つの建物に対し様々な火災条件を設定した後、火災範囲におけるKI積算値と残存物高さの和の関係について調査した。

解析結果から、火災範囲におけるKI積算値がある値以下の範囲では建物の残存物高さの和が減少せず、その値を超えたところから残存物高さの和の減少が始まることを確認した。すなわち、建物が崩壊を開始するようなKI積算値のしきい値が存在することが考えられる。ただし、本稿で用いた解析モデルと異なる強度を有する解析モデルの場合では、KI積算値のしきい値が異なることが予想される。

また、火災範囲におけるKI積算値が大きくなるにつれて建物の残存物高さの和が減少すること、火災階層が上層から下層に移るにつれて、建物の残存物高さの和が減少する傾きが急になることを確認した。このことから、火災による建物の残存物高さの和の減少率に上限を設けた場合、火災範囲におけるKI積算値の許容量が下層に移るにつれて小さくなるため、下層ではKI値の大きい柱を中心に重点的に防火対策を施す必要がある。

#### 参考文献

- [1] 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 Collapses of the World Trade Center Towers, (2005).
- [2] 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, (2011), pp.1659-1664.
- [3] 日下善輝, 磯部大吾郎: 建物の発破解体計画と残存物形態との関係, 日本機械学会第27回計算力学講演会講演論文集CD-ROM, No.14-14, (2014).
- [4] 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, (2006), pp.157-164.
- [5] 原田昌利: 合成スラブの保有耐火時間計算法, 日本建築学会学術講演梗概集A-2, (2002), pp.71-74.