

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 ON FIRE USING KEY ELEMENT INDEX

大井 康平*, 磯部 大吾郎**

Kohei OI and Daigoro ISOBE

The purpose of this study is to predict the collapse risks of steel framed buildings on fire using a key element index. Some numerical analyses using the adaptively shifted integration (ASI) - Gauss technique were performed on a ten-story steel framed building model with various fire patterns. We investigated the relationship between the sum of key element index values and the sum of the heights of remains after various cases of fire-induced collapse. The numerical results indicated the presence of specific threshold of the sum of key element index values that relates to the initiation of a large scale collapse.

Keywords : Fire-induced collapse, Key element index, Risk prediction, Steel framed buildings, ASI-Gauss technique

火災崩落, キーエレメント指標, 危険性予測, 鋼構造建物, ASI-Gauss 法

1. はじめに

高層建築物が火災を引き起こす要因や火災規模は様々であり, その際に建物が崩壊する危険性を系統的に予測することは困難である. 建物に大規模火災が発生した崩壊事例としては, 9.11 事件の際にニューヨーク世界貿易センタービル 7 号棟(WTC-7)が 7 時間程度燃え続けた後に完全崩壊してしまった例が挙げられる. 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重要な柱が損壊したことが WTC-7 の主要な崩壊要因となった可能性が示唆された. 一方, 2005 年にマドリードの Windsor ビルで発生した大規模火災のように, ビルの大部分が長時間燃え続けたにも関わらず骨組が残存し, 全体崩壊を免れた例も存在する.

火災による建物の崩壊を防止するためには, 火災範囲・発生階層と建物の構造パラメータとの関連性を調べ, その崩壊挙動への影響を知ることが重要である. 先に磯部ら²⁾は, 火災範囲, 部材の接合部強度, 柱の軸力比, アウトリガートラスシステムの 4 つに注目し, 火災範囲の非対称性が崩壊開始時間に大きく影響を与えることや, 接合部の脆弱性が建物の完全崩壊を引き起こす要因の一つとなることを明らかにした. また, 火災発生後に応力伝達経路が十分に確保されるような場合は, 風外力に対する補強システムとして最上層に設置されたアウトリガートラスシステムが懸垂能力を発揮し, 建物の余剰強度が増すことが定性的に示された. しかし, 建物の構造パラメータや火災範囲から建物の崩壊規模を推定し, 全体崩壊のような危険な崩壊形態を引き起こす火災条件を定量的に予測するまでには至っていない.

そこで本研究では, 建物の全体強度に対して個々の柱の寄与度を数値化した指標を用い, 火災範囲内で耐力低下した柱の指標積算値

と建物の崩壊規模との相関関係について調査し, 火災時の崩壊危険性を予測することを試みた. 続く第 2 章では, キーエレメント指標の定義と算出方法について述べる. 第 3 章では, ASI-Gauss 法³⁾に建物の火災崩落挙動を表現するアルゴリズムを導入した数値解析手法について述べる. 第 4 章で解析モデルと解析条件を示した後, 第 5 章で解析結果と考察を記す. 最後の第 6 章では結論を述べる.

2. キーエレメント指標

2.1 キーエレメント指標の概念

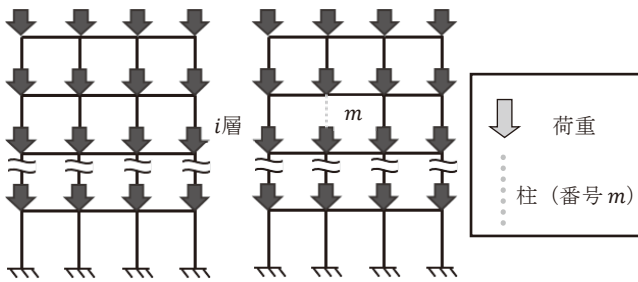
WTC-7 ビルの大規模火災に対する詳細な調査の結果, 建物のキーエレメントとなる柱が損壊したことが崩壊要因の一つとなった可能性が示唆された¹⁾. 建物の構造を支える上で重要な柱部材が燃焼・耐力低下することにより, 建物全体の強度が低下し, 崩壊しやすくなることは十分に考えられる. その一方で, 建物の強度に直接的な影響が及びにくい柱が損壊しても, 建物全体の強度はあまり低下せず, 崩壊に至らない場合もあると考えられる. 火災による建物の崩壊危険性を予測する上で, 建物の全体強度に対する柱の寄与度を定量的に示すことはとても重要である.

磯部は, 建物の効率的な発破解体手法の開発に関する先行研究⁴⁾において, Frangopol ら⁵⁾ や大井ら⁶⁾ が示した構造物の鉛直荷重支持能力に対する部材感度に着目し, 構造物における重要部材 (Key element) を数値的に探索するためのキーエレメント指標 (以下, *KI* と記す) を考案した. この指標は建物の全体強度に対する個々の柱の寄与度を数値化したものであり, 数値が高いほどその柱の建物の全体強度に対する寄与度が大きいことを示す. 本稿では, 火災発生箇所に存在する柱の寄与度を定量的に示す手段としてこの *KI* を用

* アイシン精機(株)(元筑波大学大学院生)

** 筑波大学 教授・博士(工学)

Aisin Seiki Co., Ltd. (Former Graduate Student, Univ. of Tsukuba)
Prof. Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.



(a) 健全な建物 (b) 任意の柱 (番号*m*) を除去した建物

図1 建物に対する荷重

いることとした。

2.2 キーエレメント指標の定義

キーエレメント指標*KI*は次式に示すように定義される⁴⁾。

$$KI(\text{Key element Index}) = \frac{\text{健全な状態の建物の降伏限界荷重}}{\text{任意の柱部材を除去した状態の建物の降伏限界荷重}} \quad (1)$$

健全な状態の建物の降伏限界荷重には、図1に示すように健全な建物の全柱梁接合部に対し鉛直下方に荷重増分を与え、最下層のいずれかの柱部材が降伏した瞬間の荷重を用い、 ${}_0P_G$ と表す。また、任意の*i*層内の柱(番号*m*)を除去した状態の建物にも、同様に鉛直下方に荷重増分を与える。その際に*i*層以下のいずれかの柱部材が降伏した瞬間の降伏限界荷重を ${}_1P_G(i, m)$ とし、*i*層内の柱(番号*m*)の*KI*を以下のように定義する。

$${}_0KI_{i,m} = {}_0P_G / {}_1P_G(i, m) \quad (2)$$

ここで、添え字の0は、健全な状態の建物の降伏限界荷重であることを示し、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であることを示す。上式より、*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寄与度の大きい柱部材であり、建物の構造を支える上で重要な柱部材であることが分かる。

なお、柱梁接合部に対して与える鉛直方向への荷重増分は、全ての柱梁接合部に対して一定値を与える方法が考えられる。しかし、建物層内に存在する柱部材ごとに負担する床荷重は等しいとは限らないため、床荷重の負担量に応じて荷重増分を与えることが必要であると考えられる。そこで、*i*層の柱(番号*m*)に鉛直下方へ以下の荷重増分 $\Delta F_{i,m}$ を与える。

$$\Delta F_{i,m} = \alpha_{i,m} \times \Delta F \quad (3)$$

ここで、 ΔF は任意の荷重増分である。 ΔF に乗じた $\alpha_{i,m}$ は鉛直荷重増分に関する重み値であり、次式に示すように上部構造の総重量に対する柱部材1本の負担比率と定義する。

$$\alpha_{i,m} = N_{i,m} / \sum_{m=1}^M N_{i,m} \quad (4)$$

ここで、*i*層の柱(番号*m*)の軸力を $N_{i,m}$ とし、1層の柱部材の本数を*M*とする。

2.3 キーエレメント指標の積算値

本稿では、火災範囲内に存在する柱部材全ての*KI*を足し合わせた

ものを*KI*積算値と定義し、解析結果から得られる建物の崩壊規模との相関関係について調査を行った。*KI*積算値は以下の式で表される。

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{l_i} [KI_{i,m(i,j)}] \quad (5)$$

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

ここで、*R*, *l_i*, *m(i, j)*はそれぞれ建物の全層数、*i*層の火災範囲内に存在する柱の本数およびその*j*本目の柱番号を表す。

例えば、ある建物の*i*層の柱(番号*a*, *b*, *c*)が火災により燃焼し耐力低下したとする。上式より*KI*積算値は以下のように求められる。

$$KI\text{積算値} = {}_0KI_{i,a} + {}_0KI_{i,b} + {}_0KI_{i,c}$$

$$= \frac{{}_0P_G}{{}_1P_G(i, a)} + \frac{{}_0P_G}{{}_1P_G(i, b)} + \frac{{}_0P_G}{{}_1P_G(i, c)}$$

$$= {}_0P_G \left(\frac{1}{{}_1P_G(i, a)} + \frac{1}{{}_1P_G(i, b)} + \frac{1}{{}_1P_G(i, c)} \right) = \frac{{}_0P_G}{P} \quad (6)$$

ここで、

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{{}_1P_G(i, a)} + \frac{1}{{}_1P_G(i, b)} + \frac{1}{{}_1P_G(i, c)} \quad (7)$$

である。式(7)の右辺第1項の分母 ${}_1P_G(i, a)$ は、*i*層の柱(番号*a*)を除去したモデルの降伏限界荷重であり、第2項および第3項の分母も同様に*i*層の柱(番号*b*)、*i*層の柱(番号*c*)を除去したモデルの降伏限界荷重である。すなわち、式(7)は直列ばねの合成ばね定数の算出方法と同様であり、各モデルを個別のシステムとして捉え、それらを直列に接続した合成システムの降伏限界荷重*P*を算出していると考えられる。すなわち、式(6)の*KI*積算値は、柱部材が欠損したそれぞれのシステムを直列に接続した合成システムの強度に対する、健全な建物の降伏限界強度の比を表している。本稿では、この*KI*積算値を用いることで火災発生箇所の柱が建物の構造へ寄与する度合いを定量的に評価することが可能であるか検証する。

3. 数値解析手法

数値解析手法には、大規模骨組構造の構造解析を最小限の計算コストで高精度に行うことが可能なASI-Gauss法に、火災崩落解析に必要なアルゴリズムを導入した有限要素解析コードを使用した。ASI-Gauss法は、部材性状に合わせて要素内の数値積分点を順応的にシフトすることで、計算コストを低く抑えることが可能な順応型Shifted Integration法(ASI法)⁷⁻¹⁰⁾をさらに改良したものであり、実験との比較を行うことで解析結果の妥当性が示されている^{4),11)}。ASI-Gauss法に関する詳細については他文献²⁾⁻⁴⁾に譲り、本稿では火災崩落解析を行う上で必要なアルゴリズムについて記述する。

火災による温度上昇に伴い、部材には熱ひずみが生じる。温度上昇に伴う鋼材の熱膨張は、次式に示す熱ひずみを加えて表現した。

$$\Delta \epsilon_T = \alpha \Delta T \quad (8)$$

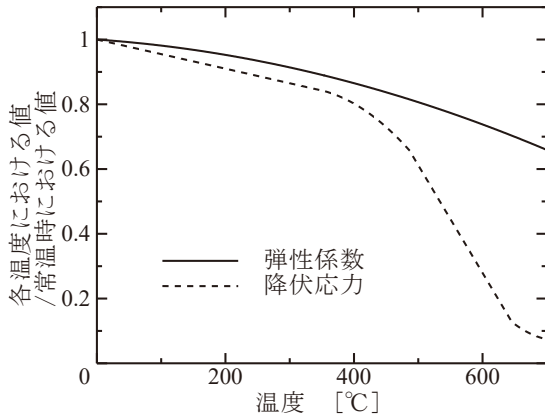


図2 温度上昇に伴う鋼材の弾性係数・降伏応力の低下曲線

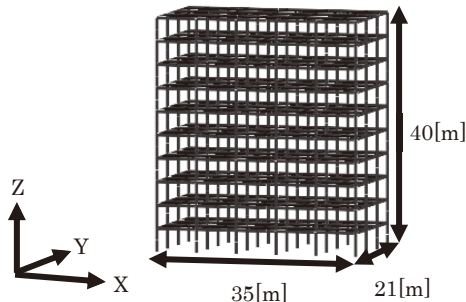


図3 解析モデル鳥瞰図

ここで、 $\Delta\varepsilon_T$ 、 ΔT および α 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。

$$\varepsilon_m = \varepsilon - \varepsilon_T \quad (9)$$

ここで、 ε_m 、 ε_T 、 ε はそれぞれ機械的ひずみ、熱ひずみ、全ひずみである。

鋼材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その溶融は比較的少ない。しかし、温度上昇に伴って部材の耐力低下が著しく起こるため、比較的小さい力で変形が生じ、建物に多大な影響を及ぼす。本稿では、図2に示すような温度上昇に伴う鋼材の弾性係数・降伏応力の低下率¹⁾を近似した曲線を設定し、この現象を表現した。この低下曲線は、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%まで低下するものである。

火災が発生した構造物の挙動は、崩壊が始まる前の準静的領域と崩壊開始後の動的領域に分けることができ、これらを両立して解析を行うことは計算コストを抑える上で重要である。そこで、1ス

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 ³]
SM400	206	245	0.3	7.9×10 ⁻⁶
SM490	206	325	0.3	7.9×10 ⁻⁶

テップ当たりの全節点の変位が微小な場合には準静的領域にあると考え、時間増分を1.0sと設定した。また、崩壊が始まって節点の変位が大きくなり、1ステップあたりの変位増分が部材断面寸法より大きくなった場合に動的領域に移ったと判定し、時間増分を1msに変更して解析を行った。運動方程式の時間積分にはNewmarkのβ法を用い、本稿では $\beta = 4/9$ 、 $\delta = 5/6$ とすることにより数値解析の際に発生する高周波成分を数値的に減衰させ、計算の安定性向上を図った。物理的な減衰定数は温度に依らずh=2%で一定と設定した。

4. モデルと解析条件

4.1 解析モデル

解析対象として、10層5×3スパンの鋼構造建築物を線形チモンエンコはり要素でモデル化した。全高は40m、階高は各層4m、幅および奥行きのスパン長は全て7mとした。解析モデルの鳥瞰図を図3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SM400の鋼材を用いたH形鋼を使用した。各鋼材の物性値を表1に示す。床は部材の断面2次モーメントを調整することで、面内変形を許容しないが、面外変形を許容する強度に設定した。また、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当たり800kgf/m²の荷重が作用するものとした。柱や梁の断面寸法は、

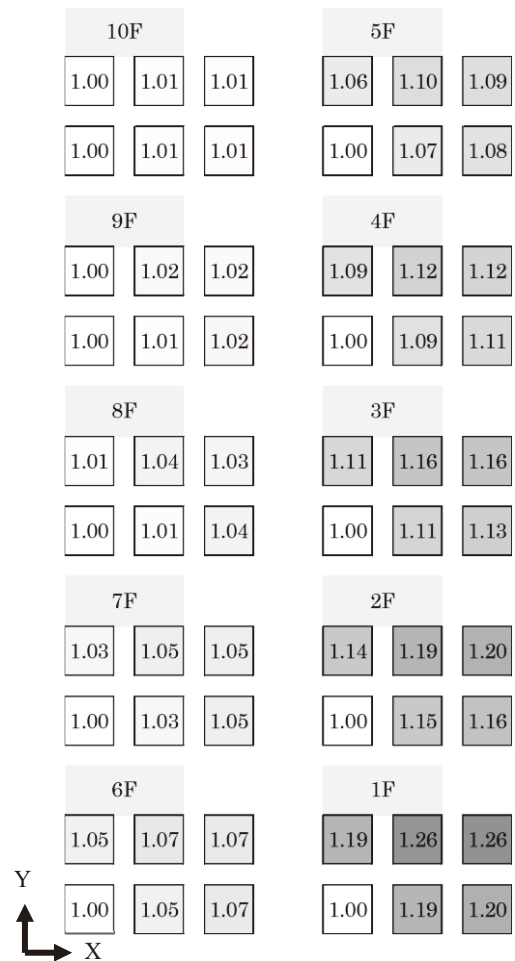


図4 解析モデルにおけるKIの算出結果
(各階層左下1/4のみ表示)

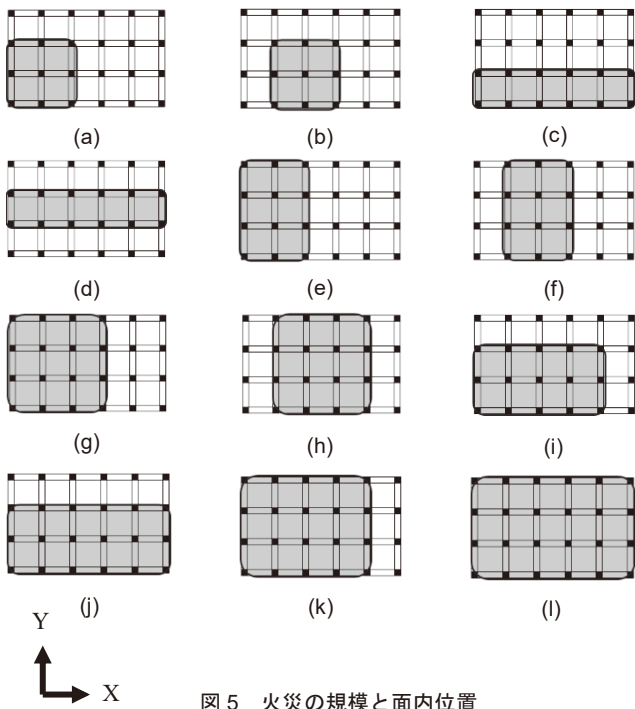


図5 火災の規模と面内位置

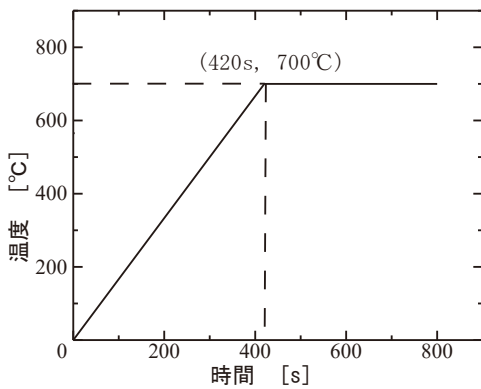


図6 部材温度履歴曲線

ベースシア係数を $C_b=0.2$ とし、建物に必要とされる水平耐力を満たす断面を算出した結果¹²⁾を用いた。柱は1部材2要素分割、梁は1部材4要素分割とし、床ははり要素で十字状にモデル化(計8要素)した。このモデルの総要素数は3,200、総節点数は2,394である。この建物のX軸方向における1次モードの固有周期は1.54s、Y軸方向における1次モードの固有周期は1.69sであった。

次に、第2章で記述した KI の算出方法に従い、モデル内の全ての柱の KI をブッシュダウン解析により算出した。算出した KI を図4に示す。なお、本研究で用いた解析モデルはX軸方向、Y軸方向において対称な構造であり、 KI 値は対称に分布した。そのため、図では各層において24本の柱のうち左下の6本のみを記載している。図では、個々の柱に対する KI の値を四角の中に示している。また、算出した KI を全層内で比較し、 KI の大小に応じて濃淡を付けている。色が濃いほど KI 値が高く、色が薄いほど KI 値が低いことを示す。全体的な傾向としてこのモデルでは四隅の柱の KI が小さく、中央部の柱の KI が大きくなった。すなわち、四隅の柱は建物の強度に対する

寄与度の低い柱であり、中央部の柱は寄与度の高い柱であることが分かる。また、建物の上層部より下層部の方が層内での KI の差が大きく、下層部では建物の強度に対する柱の寄与度の高低差が顕在化していた。

4.2 解析条件

火災による建物の変形挙動は、火災の規模、発生階層、面内位置、延焼の有無など、様々なパラメータにより変化することが考えられる。本稿では、火災が発生する層数を単層のみ、連続した2層、連続した3層の3種類に設定し、いずれも延焼は起こさないものと仮定した。また、火災の規模、発生階層、面内位置の3つのパラメータを変化させ、火災条件を設定した。設定した火災の規模と面内位置を図5に示す。1×1スパンを1ブロックと定義し、4、5、6、8、9、10、12、15ブロックの規模で計12種類を設定した。これらの火災条件を解析に適用し、計324種類の火災崩落解析を実施した。

解析上で温度を上昇させる部材は、柱と火災範囲内見上げ側の梁とした。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、本研究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¹³⁾を線形近似し、図6に示すように設定した。これは、一般的な火災温度である700°Cまで420sで線形的に上昇させ、それ以降は700°Cで一定になると仮定したものである。鋼材の温度の上限を700°Cと設定した理由は、図2に示した降伏応力の低下曲線において、降伏応力は700°C近辺で常温時の10%程度に一定となるからである。以上の条件で火災範囲内の鋼材の温度を上昇させ、図2の低下曲線に従って弾性係数および降伏応力を低下させた。

火災崩落解析を行う際の解析終了時刻は、部材に大変形が生じず準静的領域にある場合は火災発生時刻から800sとし、部材に大変形が生じ動的領域に移った場合は火災発生時刻から450sとした。

5. 解析結果

温度上昇に伴う建物の崩壊の様子を図7(a)から図7(d)に示す。図7(a)は、火災範囲が図5(k)、火災発生階層が2階の単層火災における崩壊挙動を示す。火災発生から380s時に火災範囲内の柱が圧縮方向に大変形を起こし始めた。その後、建物全体が左方向に傾くように変形が進み、432.4sには2階の梁・床部材と1階の梁・床部材が接触する様子が確認された。その後、火災発生階層の下側の柱が上層部の重量を支えきれずに圧潰したため、上層部がバランスを崩し左側へ倒壊した。

図7(b)は、火災範囲が図7(a)と同じ図5(k)で、火災発生階層が6階の単層火災における崩壊挙動を示す。この火災条件では、火災発生から392s時に火災範囲内の柱が圧縮方向に大変形を開始した。その後、火災発生階層の6階が緩やかに沈み込み、466.8sには6階の梁・床部材と5階の梁・床部材が接触した。接触した後は建物の変形が止まり、それ以降は崩壊が進行しなかった。

図7(c)は、火災範囲が図5(g)、火災発生階層が2、3階の2層火災における崩壊挙動を示す。この火災条件では、395sに2、3階の柱が大変形を開始し、596.8sには2階の梁・床部材が1階の梁・床部材と接触した。その後、上層部が大きくバランスを崩し、左側へ滑り落ちるように倒壊した。その際、火災発生階層の下側の柱は、

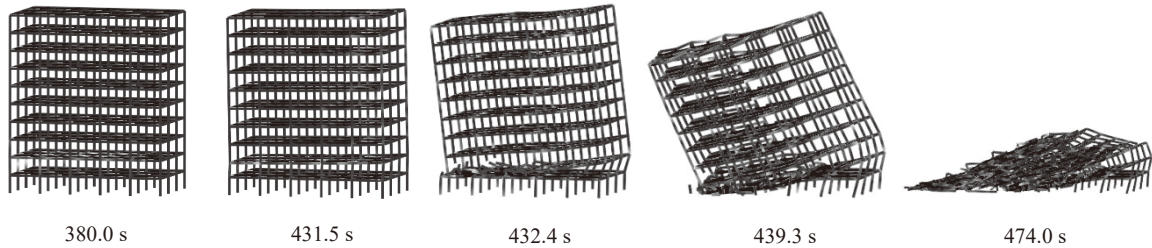


図 7(a) 建物の崩壊挙動（火災発生階層：2 階，火災条件：(k)）

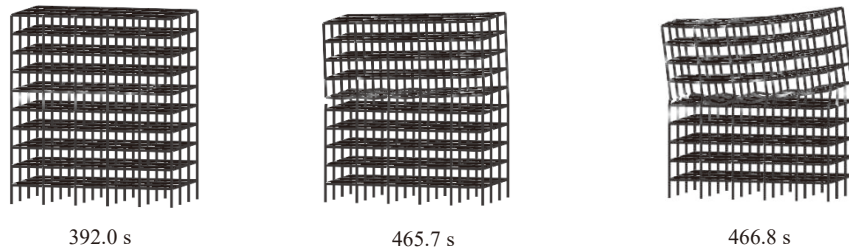


図 7(b) 建物の崩壊挙動（火災発生階層：6 階，火災条件：(k)）

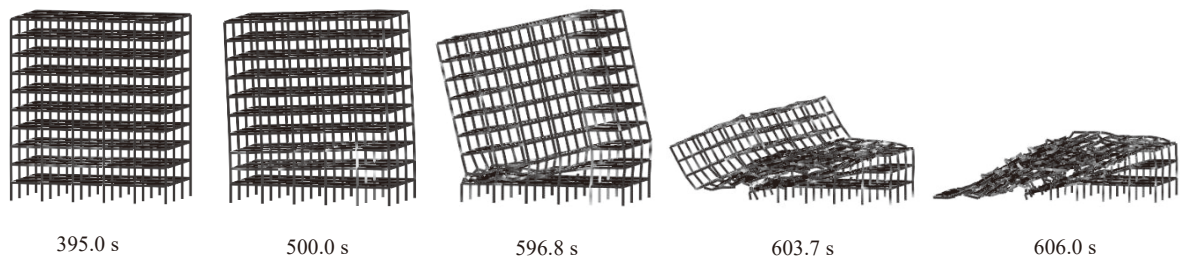


図 7(c) 建物の崩壊挙動（火災発生階層：2,3 階，火災条件：(g)）

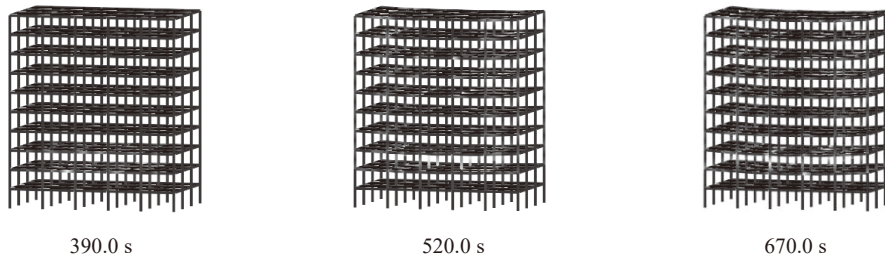


図 7(d) 建物の崩壊挙動（火災発生階層：2,3 階，火災条件：(h)）

図 7(a)の火災条件の場合とは異なり，小さな損傷に留まった。

図 7(d)は，火災範囲が図 5(h)，火災発生階層が 2，3 階の 2 層火災における崩壊挙動を示す。この火災条件では，390 s に火災範囲内の柱が圧縮方向に大変形を開始したが，火災発生階層の沈み込みは小さく留まり，火災発生からおよそ 670 s 時に崩壊の進行が止まった。

324 種類の火災崩落解析を行った結果，図 7(a)や図 7(c)に示す火災条件のように，広範囲の火災が下層部に発生する場合には建物が全体崩壊を起こす危険性が高まることが確認された。一方，図 7(b)に示すように，広範囲の火災でも発生階層が上層である場合は，建物の崩壊は比較的小規模に収まり，全体崩壊までは至らなかった。

また，図 7(c)に示すような建物の端部に発生する火災は，図 7(d)に示すような中央部に発生する火災と比較すると，建物の全体挙動に与える影響が大きいことが分かった。これは，後者は火災発生箇所 の両側にそれぞれ応力伝達経路を確保できるが，前者は応力伝達経路を片側にしか確保できないことに起因する。すなわち，応力伝達経路を複数確保できるような火災条件の場合は，応力伝達経路上に存在する柱が火災範囲の部材を吊り上げる懸垂効果を発揮し，建物の崩壊進行を抑制していることが考えられる。以上より，崩壊形態とその規模は，火災発生階層と火災の面内位置に大きく依存することが分かった。

次に，火災崩落解析が終了した時点における，残存物を構成する

全ての節点の高さ方向の座標値の和を残存物高さの和と定義し、建物の崩壊規模を定量的に評価した。計 324 種類の火災崩落解析から得られた残存物高さの和と、それぞれの火災条件に対応するKI積算値との関係を示したグラフを図 8(a)~(c)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。これらのグラフより、火災範囲のKI積算値が大きくなるにつれて残存物高さの和が小さくなり、崩壊の規模が大きくなっていることが分かる。一方、KI積算値によって残存物高さが一意に定まるとは限らなかった。すなわち、KI積算値がほぼ同一となる2つの火災条件において、一方は小さな崩壊に留まり、もう一方は全体崩壊となる場合があった。これは、建物の崩壊形態と規模に火災発生位置の対称性や火災発生階層が大きく影響することが要因であると考えられる。図 8(a)において、残存物高さの和が極端に減少している2つの点は、建物が横倒しになるように全体崩壊を起こした火災条件である。また、図 8(b)(c)において、斜め方向へ直線状に並ぶデータ群が見られるが、同一の直線状に位置するデータは、それぞれ図 5 で示した火災の面内位置が同一であり、火災発生階層のみが異なる火災条件のものである。さらに、KI積算値がある値を超えるまでは残存物高さの和はほとんど変化せず、ある値を超えると残存物高さの和が急激に減少を始めるという傾向が確認できる。そこで、今回設定した解析モデルの最上層が完全に圧壊した場合、残存物高さの和が90%となるが、この程度の崩壊を起こした場合を危険な崩壊形態の一つの目安にすることとし、残存物高さの和が健全な建物の高さの和の90%を下回った火災条件の中で最も小さいKI積算値を「建物の崩壊閾値」と定義する。この定義に従い、単層火災における閾値を求めた結果、図 8(a)に示すように19.14となった。この場合の火災条件は、火災発生階層：1階、火災面内位置：図 5(g)であった。同様に、2層火災、3層火災における閾値はそれぞれ32.06(図 8(b))、46.21(図 8(c))と求められた。火災条件は、それぞれ火災発生階層：5,6階、火災面内位置：図 5(i)(2層火災)、火災発生階層：7,8,9階、火災面内位置：図 5(i)(3層火災)であった。これらの結果から、建物が崩壊する境界であると判定される火災条件は、火災発生層数に依らず火災の面内位置が非対称である場合であることが確認された。また、単層火災では下層部に発生する火災条件が崩壊の境界となっているが、2層火災や3層火災では中層部から上層部に発生する火災条件が崩壊の境界となっていることが確認された。そのため、建物が危険な崩壊形態となることを防ぐためには、上層部への延焼を防ぐとともに、建物の端部や下層部に火災が発生することを防止することが重要である。

建物の崩壊閾値は、その構造や強度、火災の規模によって変化するが、個々の条件に応じた値を求めておけば、既存建物の防火対策や新設する建物の防火設計に应用することが可能であると考えられる。例として、柱の位置に応じて防火扉を配置し延焼を食い止め、火災範囲におけるKI積算値が崩壊閾値を上回らないような対策を施すことで、建物が大規模な崩壊を引き起こすことを防ぐことが可能となるものと思われる。

6. 最後に

本稿では、火災範囲内の柱のKI積算値を用いて建物の崩壊危険性を予測することを目的とし、10層 5×3 スパンの鋼構造建築物モデ

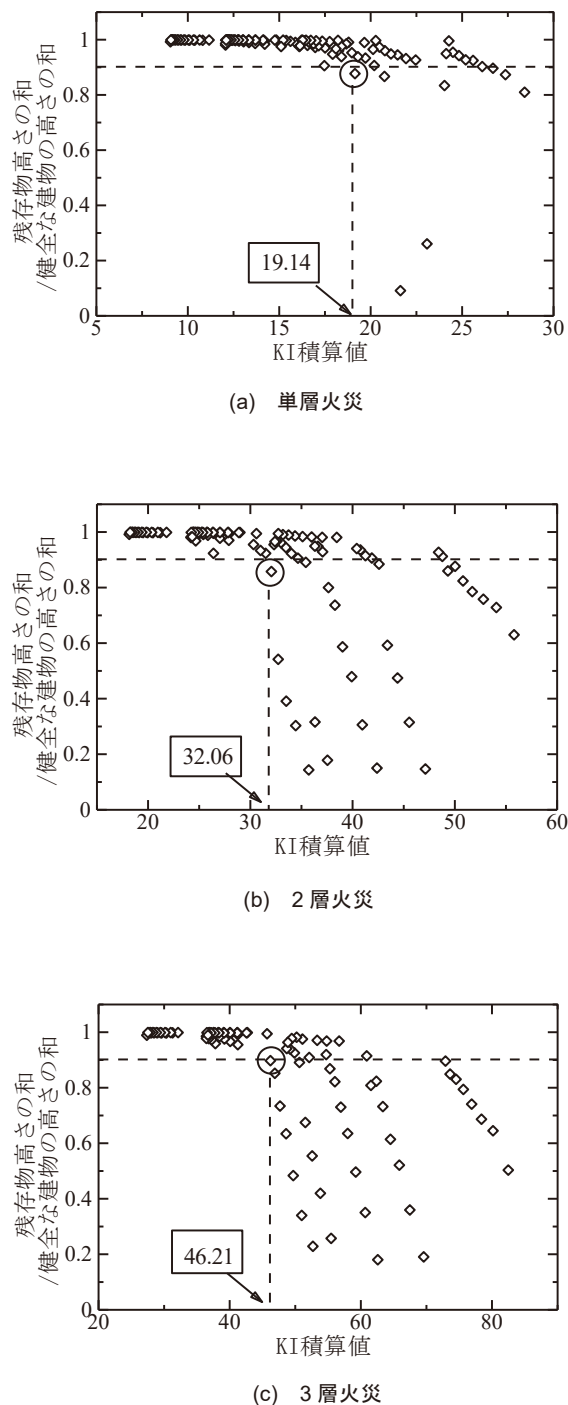


図 8 KI 積算値と残存物高さの和の関係

ルに対して様々な火災条件を設定し、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。その結果、建物の崩壊形態や規模は火災発生階層と面内位置に大きく依存することが分かった。また、KI積算値と残存物高さの和の関係から、建物が大規模な崩壊を開始するKI積算値の閾値が存在することが示唆された。この崩壊閾値を利用することで、想定する火災範囲から建物の崩壊危険性を予測することや、柱の配置に応じた細かな防火対策が可能となるものと思われる。今後は、解析対象とする建物の構造や強度を変更し、崩壊閾値の変化について検証する予定である。

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, pp. 1659-1664, 2011. 9.
- 3) 磯部大吾郎, チョウ ミョウ 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, pp. 39-46, 2004. 5.
- 4) Isobe, D.: An Analysis Code and a Planning Tool Based on a Key Element Index for Controlled Explosive Demolition, International Journal of High-Rise Buildings, Vol. 3, No. 4, pp. 243-254, 2014.
- 5) Frangopol, D. M. and Curley, J. P.: Effects of Damage and Redundancy on Structural Reliability, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 7, pp. 1533-1549, 1987.
- 6) 大井謙一, 伊藤拓海, 李正林: 部材消失に対する骨組構造の荷重支持能力感度, 理論応用力学講演会講演論文集, Vol. 54, pp. 249-250, 2005. 4.
- 7) Toi, Y. and Isobe, D.: Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 36, pp. 2323-2339, 1993.
- 8) Toi, Y. and Isobe, D.: Finite Element Analysis of Quasi-Static and Dynamic Collapse Behaviors of Framed Structures by the adaptively Shifted Integration Technique, Computers and Structures, Vol. 58, No. 5, pp. 947-955, 1996.
- 9) Isobe, D. and Toi, Y.: Analysis of Structurally Discontinuous Reinforced Concrete Building Frames Using the ASI Technique, Computers and Structures, Vol. 76, No. 4, pp. 471-481, 2000.
- 10) Isobe, D. and Tsuda, M.: Seismic Collapse Analysis of Reinforced Concrete Framed Structures Using the Finite Element Method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, No. 13, pp. 2027-2046, 2003.
- 11) Isobe, D., Han, W. S. and Miyamura, T.: Verification and Validation of a Seismic Response Analysis Code for Framed Structures using the ASI-Gauss Technique, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 42, No. 12, pp. 1767-1784, 2013.
- 12) 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, pp. 157-164, 2006. 10.
- 13) JIS A 1304, 建築構造部分の耐火試験方法, (財)日本規格協会, 1994.

COLLAPSE RISK PREDICTION OF BUILDINGS ON FIRE USING KEY ELEMENT INDEX

*Kohei OI** and *Daigoro ISOBE***

* Aisin Seiki Co., Ltd. (Former Graduate Student, Univ. of Tsukuba)

** Prof., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

It is difficult to estimate the redundant strength remaining in a building on fire, since the fire conditions such as their ranges and locations may be different in each case. A large-scale fire occurred on the New York World Trade Center 7 (WTC-7) after the 9.11 terrorist attacks in 2001. The building continued to burn for 7 hours, and ended in a total collapse. The official report on the collapse investigation of WTC-7, released by the National Institute of Standards and Technology (NIST) in 2005, had suggested that the total collapse was triggered by a severe damage of an important column of the building called the key element. On the other hand, there is also an example of a high-rise building on fire that avoided a total collapse, regardless of its main structure continuously heated by fire for a long time; the Windsor building of Madrid in 2005. From the viewpoint of preventing the fire-induced collapse of buildings, it is necessary to clarify the relationship between various structural parameters of buildings, fire locations, their ranges, and the scale of collapse.

The purpose of this study is to predict collapse risks of buildings on fire using a key element index (KI). The KI is defined as the ratio of the ultimate yield strengths of the structure with one column eliminated and the initial, undamaged structure. It indicates the contribution of a structural column to the vertical capacity of the structure. We investigated the relationship between the sum of KI values in various cases of fire range and the sum of the height of remains after the collapse. We applied an adaptively shifted integration (ASI) - Gauss code utilizing linear Timoshenko beam elements to investigate the collapse behaviors of a ten-story steel framed building model with various fire patterns. Fracture contact, contact release and re-contact algorithms were implemented in the code. The reduction curves of elastic modulus and yield strength of steel related to elevated temperature, shown by NIST, were adopted to consider the heat effect of fire. Thermal expansion of materials was also considered.

From the numerical results of the fire-induced collapse analyses, it is found that the scale of collapse highly depends on fire ranges and locations. The risk of total collapse tends to increase when a large range of fire occurs in the lower layer. In addition, the risk increases much higher in those cases when fire occurs at the peripheral area of the building, compared to those cases at the inner area. The sum of heights of remains seems to depend on the sum of KI values, and there is a specific threshold of the sum of KI values that relates to the initiation of a large scale collapse. Therefore, the sum of KI values may be used to predict and take measures to avoid the risk of collapse under various fire conditions.

(2016年10月28日原稿受理, 2017年4月24日採用決定)