

## 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

正会員 ○大井 康平\*  
同 磯部 大吾郎\*\*鋼構造建築物 火災崩落 キーエレメント指標  
ASI-Gauss 法 崩壊解析

## 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<sup>1)</sup>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。そこで本稿では、キーエレメントとなる柱の影響を調べるため、キーエレメント指標（以下KI）と火災崩壊形態の関連性を示し、火災発生時の建物の崩壊危険性を予測することを試みた。

## 2. キーエレメント指標

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、健全な状態の建物の降伏限界荷重であることを示す。また、添え字の 1 は、柱を 1 本除去した状態での建物の降伏限界荷重であることを示す。すなわちこの場合のKIは、健全な建物の強度に対する柱 1 本の寄与度を表す。

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。

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。

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{l_i} [KI_{i,m(i,j)}] \\ = KI_{1,m(1,1)} + KI_{1,m(1,2)} + \dots + KI_{1,m(1,l_1)} + \\ KI_{2,m(2,1)} + \dots + KI_{R,m(R,l_R)} \quad (2)$$

ここで、*R*、*l<sub>i</sub>*、*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

数値解析には、火災崩落解析において実績のある ASI-Gauss 法<sup>2)</sup>を用いた。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

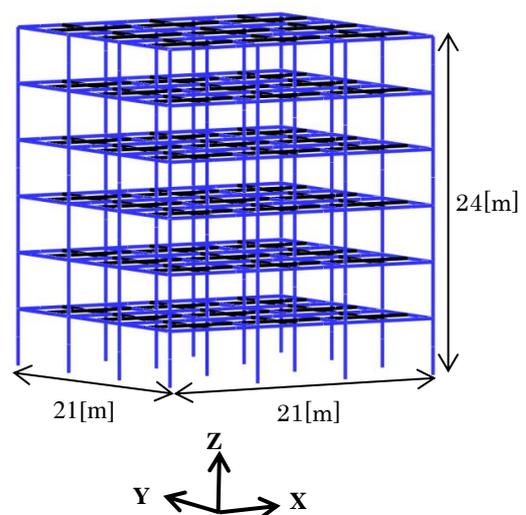


図-1 解析モデルの鳥瞰図

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．床については面内変形を許容しない剛床仮定とした．

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．本稿では，延焼を考慮しない単層火災とし，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，合計 60 パターンの火災崩落解析を実施した．

#### 4. 解析結果

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いことがわかった．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．

#### 5. 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 積算値の関係を示したグラフを図-2 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ことわかる．そのため，建物の下層には上層よ

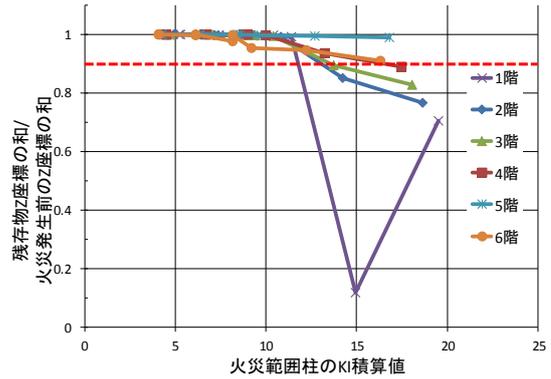


図-2 KI積算値と残存物高さの和の関係

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量を 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上限の KI 積算値が大きくなることわかる．

#### 6. 結言

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．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 積算値の上限値が下層に移るにつれて小さくなることわかった．本手法を用いると，KI 積算値を用いて重点的に損壊を防ぐ必要がある範囲を特定し，防火対策に役立てることも可能であると考えられる．

#### 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.

\* 筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生

\*\* 筑波大学教授 博士（工学）

\* Graduate Student, University of Tsukuba

\*\* Professor, University of Tsukuba, Dr. Eng.