

キーエレメント指標と火災時の建物の損傷度合いの関連性について

Relevance of Key Element Index and Damage Extent of Buildings under Fire

○非 大井 康平 (筑波大院)
Kohei OI, Graduate School, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

正 磯部 大吾郎 (筑波大)
Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

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、一般的な鋼構造建築物に対して様々な火災条件における火災崩落解析を行い、キーエレメント指標(以下 KI)と火災時の建物の損傷度合いとの関連性を調査した。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。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

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全ての柱の KI を足し合わせたものと定義し、以下のように表す。

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

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

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 積算値と建物の損傷度合いとの関連性について考察する。

3. 火災崩落解析

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 10 層 5×3 スパンの鋼構造建築物とし、全高 40[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。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・面内位置・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・面内位置・火災が発生する階層の 3 つのパラメータを変化させた。設定した火災の規模と面内位置を図 2 に示す。1x1 スパンを 1 ブロックと定義し、4, 6, 9, 12, 15 ブロックの範囲

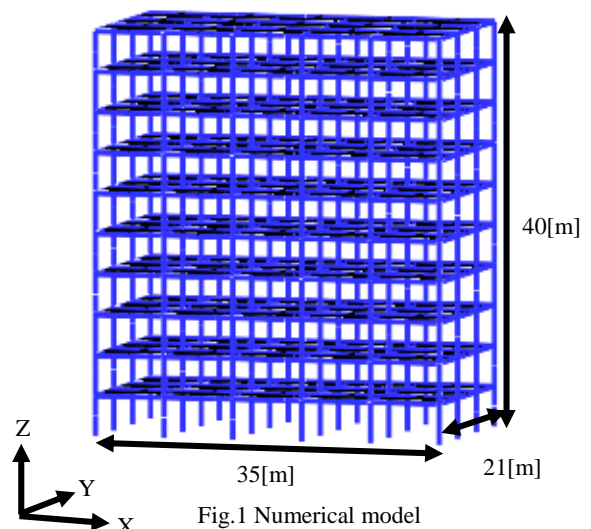


Fig.1 Numerical model

で計 7 パターンを設定した．火災発生階層は 1 階から 10 階までの計 10 パターンとし，合計 70 パターンの火災崩落解析を実施した．

4. 解析結果

70 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，火災発生箇所により建物に生じる変形や建物の挙動が異なることがわかった．火災崩落解析の一例を図 3 に示す．この図では，火災範囲が図 2(f) (4×3 ブロック)，火災階層が 4 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 390[s]の時 (図 3(a))，火災範囲内に存在する柱のうち，左端の位置に存在する柱が圧縮変形を始めた．その後，建物全体が左方向に傾くように変形が進み，火災発生から 494[s]の時 (図 3(b)) に火災範囲内の柱の一部が破断した．そして，建物は急激に沈み込み，4 階の梁，床部材と 3 階の梁，床部材が接触する様子が確認された．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にはなかった (図 3(c))．

火災発生階層が異なり，図 2 における火災発生箇所が同一である場合の解析結果を比較した結果，火災発生階層に依らず建物に生じる挙動は大きく変化しなかったが，大きな範囲の火災が建物の下層に発生する場合，建物が全体崩壊する危険性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，建物の全体挙動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にある構造の荷重が火災発生箇所に集中してしまうことが原因だと考えられる．

5. KI 積算値と残存物高さの和の関係

本稿では，火災崩落解析が終了した時点において，残存物を構成する全ての節点の Z 座標の和を残存物高さの和と定義し，これを用いて建物の損傷度合いを評価する．70 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の対応する KI 積算値の関係を示したグラフを図 4 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．

図 4 のグラフから，全ての火災階層において， KI 積算値がおよそ 12 以下の火災範囲では残存物高さの和はほぼ変化せず， KI 積算値が 12 以上の火災範囲では残存物高さの和が減少し始め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，どの階層においても同じ値で存在することが予測できる．

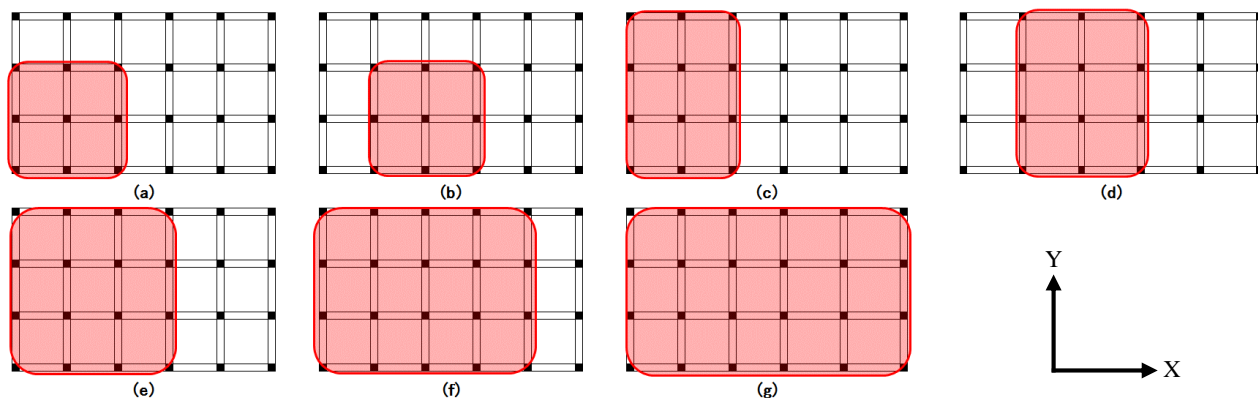


Fig.2 Assumed fire patterns

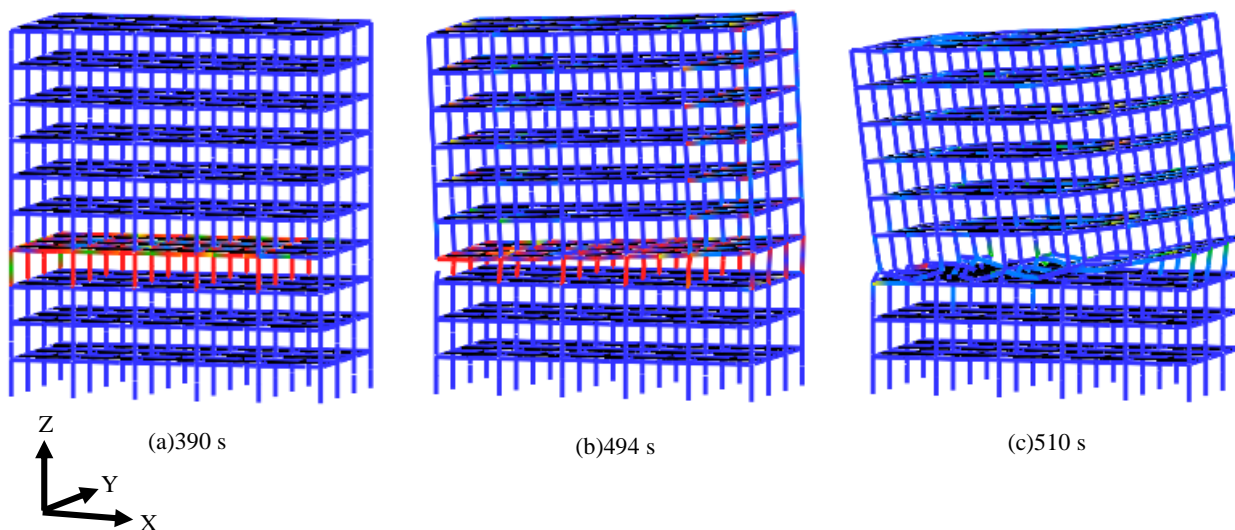


Fig.3 Fire-induced collapse behavior of 10-story 5-span building with 4×3 blocks on fire at 4th floor

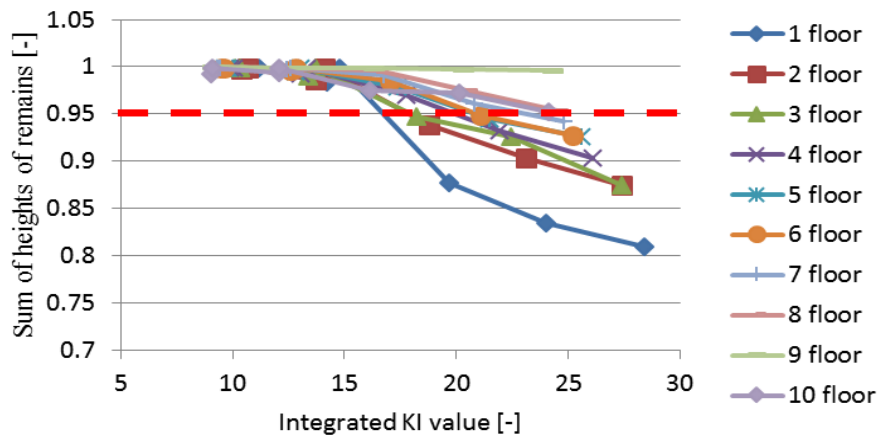


Fig.2 Relationship between integrated key element index value and the sum of heights of remains

また、 KI 積算値が12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9階、10階、8階、7階、6階、5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、2つのことがわかる。1つ目は、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である。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量を5%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がわかる。2つ目は、8階より下層については残存物高さの和が減少する割合が上層から順番に大きくなっているのに対し、10階と9階では順番が入れ替わっていることである。このことについて、次のように考えられる。建物の9階より下層に火災が発生した場合、火災発生箇所の上部には柱や梁が存在する。そのため、それらの部材による懸垂機構が作用し、階層の沈み込みが抑制される。しかし、建物の最上層に火災が発生した場合、火災発生箇所の上部に部材が存在しないため、崩壊が進行しやすい状況となったものと思われる。

6. 結言

本稿では、火災範囲における KI 積算値を利用して、建物の損傷度合い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12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示唆された。

また、火災範囲内における 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。すなわち、火災崩落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、下層になるにつれて火災範囲内における KI 積算値の許容量は小さくなる。そのため、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ことが分かる。

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.