計算工学講演会論文集　Vol.27 (2022年6月)　計算工学会

延焼を伴う大規模火災時の建物の崩壊危険性評価

Collapse Risk Evaluation of Buildings due to Large-Scale Fire Spread

板倉加奈[1)]，磯部大吾郎[2)]

Kana Itakura and Daigoro Isobe

1) 筑波大学工学システム学類（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: itakura.kana.as@alumni.tsukuba.ac.jp）

2) 博(工) 筑波大学 システム情報系 教授（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp）

In this paper, collapse analyses of a steel framed building under large-scale fire spread were performed. We used the ASI-Gauss code, which can stably compute non-linear phenomena such as member fracture, as a numerical code in this research. Based on the numerical result, we investigated the collapse risk of the building using relationship between integrated values of key element index and heights of the building. It was confirmed that the building begun to collapse when the integrated value of key element index of the columns in the fire range reached a specific threshold.

Key Words : *Collapse, Fire spread, Key element index, ASI-Gauss code*

1.　はじめに

高層建築物で火災が生じると，崩壊などの甚大な被害が生じる可能性がある．実際，2001年9月11日に起きたアメリカ同時多発テロ事件（9.11事件）により高層ビル3棟が大規模火災後に完全崩壊したという事例がある．この事件では，ニューヨーク世界貿易センタービル（WTC）1号棟と2号棟において，航空機衝突によるジェット燃料の拡散から大規模火災が発生し，その後，進行性崩壊に至った．また，同敷地内のWTC7号棟でも下層部で大規模火災が発生し，その約7時間後に完全崩壊した．2008年11月に発表されたNISTによるWTC7号棟に関する報告書[1]によると，破片による損傷よりも，その後に発生した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，主な崩壊要因となった可能性が示唆されている．

火災による建物の崩壊を防止するためには，火災範囲や発生階層などの火災条件に応じた建物の崩壊形態を予測することが重要である．大井ら[2]は，火災平面位置，火災発生階層，火災発生層数の3種類の火災条件を変更し，火災による構造部材の耐力低下を表現した火災崩落解析を行っている．また，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キーエレメント指標（KI）[3]を用い，火災範囲内で耐力低下した柱のKI積算値と建物の崩壊規模との相関関係が調査された．その結果，KI積算値がある閾値を超えると崩壊を開始することを見出し，KIにより建物の崩壊危険性を定量的に予測できることを示した．しかしこの研究では，火災範囲内の柱の耐力を同時に低下させており，火災条件に延焼を考慮していない．現実では火災発生箇所から徐々に延焼することが考えられるため，延焼を伴う火災時の建物の崩壊危険性を予測することが求められる．

そこで本研究では，延焼を考慮した火災崩落解析を行い，延焼の進行による建物の崩壊危険性を定量的に評価することを目的とする．解析対象，解析方法，火災の表現方法，また建物の崩壊危険性の評価方法は大井らの研究[2]で用いられた方法と同様のものを用いる．解析対象は10層の鋼構造建築物とし，最小限の要素分割で高精度な解を得ることができるASI-Gauss法[4]を用いて解析を行った．

2.　火災の表現

建物に火災が発生した際，建物を構成する部材には熱膨張と，温度上昇に伴う強度や耐力の低下が生じる．本研究では，これらの 2 つの現象を解析モデルに導入し火災を表現する．

まず，温度上昇する柱および梁に次式に示す熱ひずみを加えることにより熱膨張を表現する．

$$\Delta\varepsilon_T = \alpha\Delta T \tag{1}$$

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．

$$\varepsilon_m = \varepsilon - \varepsilon_T \tag{2}$$

ここで，ε_mおよびεはそれぞれ機械ひずみと全体ひずみである．

次に，火災による強度・耐力低下の表現について記す．鋼材の融点は一般的な火災温度よりも高いため，火災に

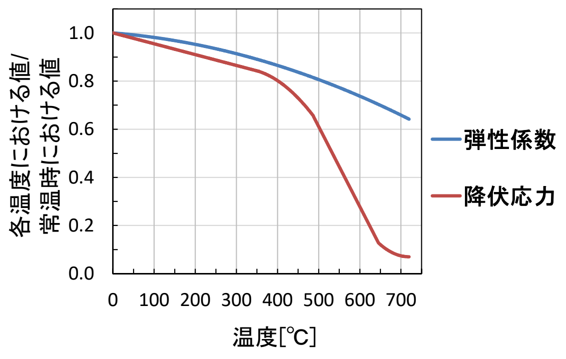


図 1　鋼材の弾性係数・降伏応力の低下曲線

よる加熱を受けてもその溶解は比較的少ないが，温度上昇に伴って部材の耐力は著しく低下する特徴がある．本研究では，図 1 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]を近似した曲線を用い，この現象を表現した．この低下曲線は鋼材に耐火被覆を施さない場合のものであり，一般的な火災温度である 700℃近辺になると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．

3．　キーエレメント指標

WTC7 号棟の大規模火災による崩壊要因の一つとして，建物のキーエレメントとなる柱の損壊である可能性が挙げられている[1]. 建物を支えている重要な柱(キーエレメント)が燃焼することにより，建物全体の強度低下につながり，崩壊しやすするなることは十分に考えられる．一方，建物全体の強度にあまり寄与していない柱が損壊しても，崩壊には至らない場合も考えられる．延焼による建物の崩壊危険性を評価する上で，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重要である．

先に磯部らは，建物の効率的な発破解体手法の開発に関する研究[3]において，Frangopol[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，構造物におけるキーエレメントを定量的に示すためのキーエレメント指標（Key element index, KI）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，値が大きいほどその柱の建物の全体強度に対する寄与度が高いことを示す．本研究では，延焼範囲に存在する柱の寄与度を定量的に示す手段としてKIを用いることとする．KIは，次式に示すように定義される[3].

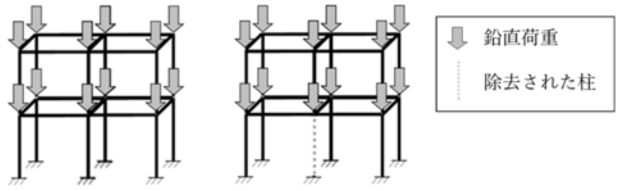
$$KI(Key\ element\ Index) = \frac{\text{健全な状態の建物の降伏限界荷重}}{\text{任意の柱部材を除去した状態の建物の降伏限界荷重}} \quad (3)$$

ここで，健全な状態の建物の降伏限界荷重には，図 2 に示すように健全な建物の全柱梁接合部に対して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る．この荷重を ${}_0P_G$と表す．次に，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．

$$ {}_1^0KI_{i,m} = {}_0P_G / {}_1P_G\,(i,m) \quad (4)$$

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．

柱梁接合部に対して与える鉛直下方への荷重増分は，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．この場合，ある瞬間における柱梁接合部への鉛直荷



(a)健全状態　　(b)柱(番号: m)を除去した状態

図 2 KIの算出過程におけるプッシュダウン載荷

重値は全て同一の値となる．しかし，柱部材が負担する床荷重は建物層内の位置により異なるため，床荷重の負担量を考慮した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層内の柱（番号:m）に与える鉛直下方への荷重増分$\Delta F_{i,m}$には，次式に示す値を用いることとした．

$$\Delta F_{i,m} = \alpha_{i,m} \times \Delta F \quad (5)$$

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を表し，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される．

$$\alpha_{i,m} = N_{i,m} \Big/ \sum_{m=1}^{M} N_{i,m} \quad (6)$$

ここで，i層内の柱（番号:m）の軸力を$N_{i,m}$とし，i 層内の柱部材の本数をMとする．

本研究では，先行研究[2]と同様に，延焼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積算値と定義する．KI積算値は次式で表される．

$$\sum_{i=1}^{R}\sum_{j=1}^{l_i}\left[KI_{i,m(i,j)}\right] = KI_{1,m(1,1)} + KI_{1,m(1,2)} + \cdots + KI_{1,m(1,l_1)} + KI_{2,m(2,1)} + \cdots + KI_{R,m(R,l_R)} \quad (7)$$

ここで，R，l_i，$m(i,j)$はそれぞれ建物の全層数，i層の延焼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．

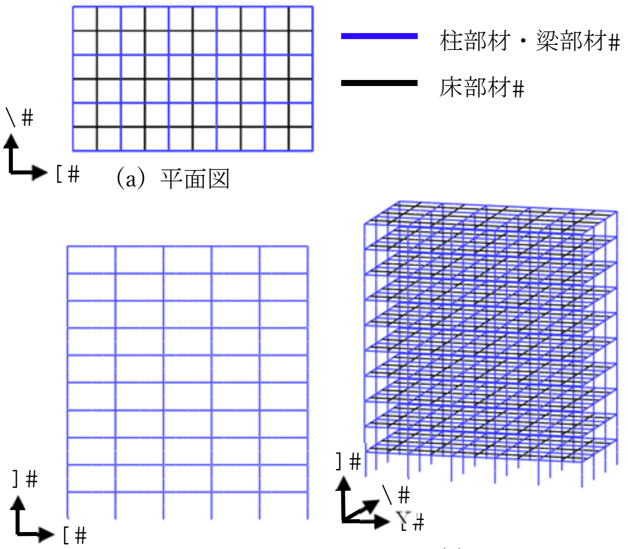
例えば，ある建物のi層の柱（番号a，b，c）が火災の延焼により耐力低下を起こすとする．上式よりKI積算値は以下のように求められる．

$$\begin{aligned} KI\text{積算値} &= {}_1^0KI_{i,a} + {}_1^0KI_{i,b} + {}_1^0KI_{i,c} \\ &= \frac{{}_0P_G}{{}_1P_G(i,a)} + \frac{{}_0P_G}{{}_1P_G(i,b)} + \frac{{}_0P_G}{{}_1P_G(i,c)} \\ &= {}_0P_G\left(\frac{1}{{}_1P_G(i,a)} + \frac{1}{{}_1P_G(i,b)} + \frac{1}{{}_1P_G(i,c)}\right) \\ &= \frac{{}_0P_G}{P} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで，

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{{}_1P_G(i,a)} + \frac{1}{{}_1P_G(i,b)} + \frac{1}{{}_1P_G(i,c)} \quad (9)$$

となる．式(9)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(9)は直列に接続されたばねの合成ばね定数を算出する式と同様であるため，式(8)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．



(a) 平面図　(b) 正面図　(c) 鳥観図

図 3 解析モデル

表 1 鋼材の物性値

鋼材#	弾性係数 ^JSd`#	降伏応力 ^P Sd`#	ポアソン比#	密度 ^nj2p p⁶`#
VV733#	539#	578#	316#	:1k×43⁰⁹#
VP 7<3#	539#	658#	316#	:1k×43⁰⁹#

4. 鋼構造建物の火災崩落解析

(1) 解析モデル

本研究では、線形 Timoshenko はり要素を用いて 10 層 5×3 スパン鋼構造建物をモデル化し解析を行った．図 3 に解析モデルの概要を示す．全高は 40 m，階高は各層 4 m，スパン長は 7 m とし，各部材の使用材料は，柱部材に SM490 を用いた角形鋼管，梁部材には SS400 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．柱や梁の断面寸法は，ベースシア係数を$C_b = 0.2$とし，建物に必要な水平耐力を満たす値として算出した．床部材にはコンクリートスラブを使用し，その弾性係数，圧縮強度，ポアソン比はそれぞれ 23 GPa，30 MPa，0.2 とした．また，面内変形を許容しない剛床と仮定している．柱は 1 部材 2 要素分割，梁は 1 部材 4 要素分割とし，床は図 3(a)に示すように十字状として中央を接続し，上下左右 2 要素ずつの計 8 要素分割でモデル化した．外壁のモデル化は行わず，その重量を密度に換算し，壁面を構成する上下の梁部材に半分ずつ足し入れることで表現した．外壁は ALC 板を想定し，約 980 N/m^2 の重量であると仮定した．また，建物の固定荷重と積載荷重は全て密度に換算し，梁部材と床部材の密度に足しこみ，合わせて 7,840 N/m^2 とした．このモデルの総要素数は 3,200，総節点数は 2,394 である．

初めに，前節で述べたように解析モデルにプッシュダウン解析を行い，建物を構成する各柱のKIを算出した．その結果を図 4 に示す．図内の四角は柱を示しており，

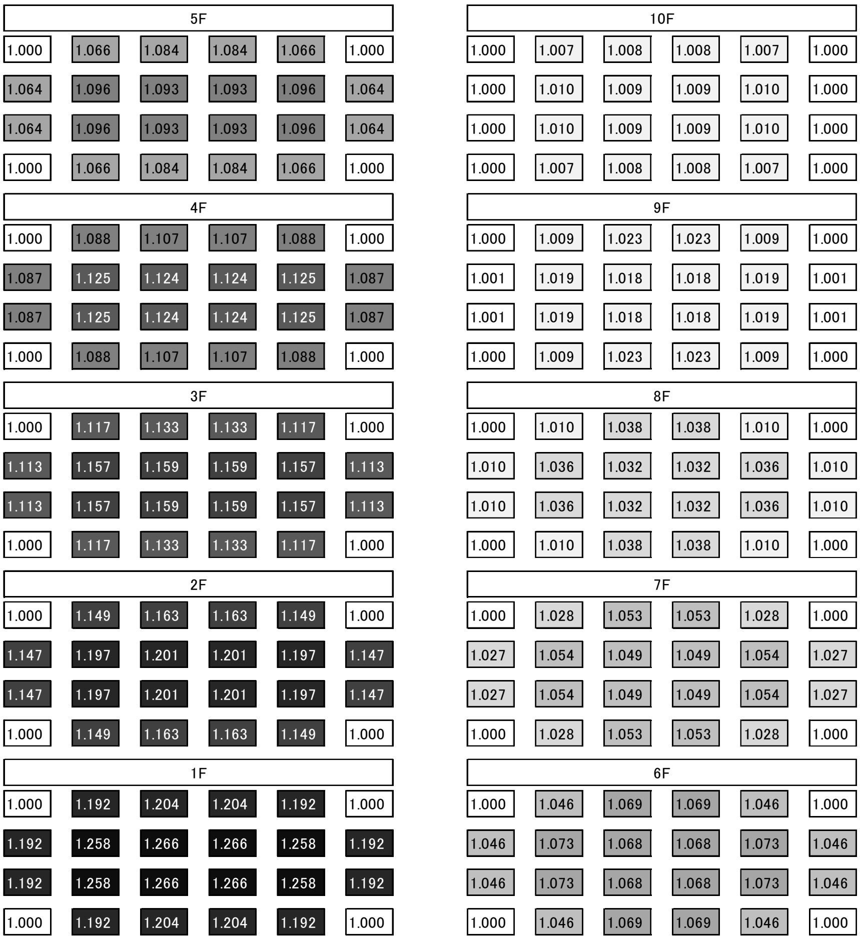


図 4 解析モデルの KI 分布

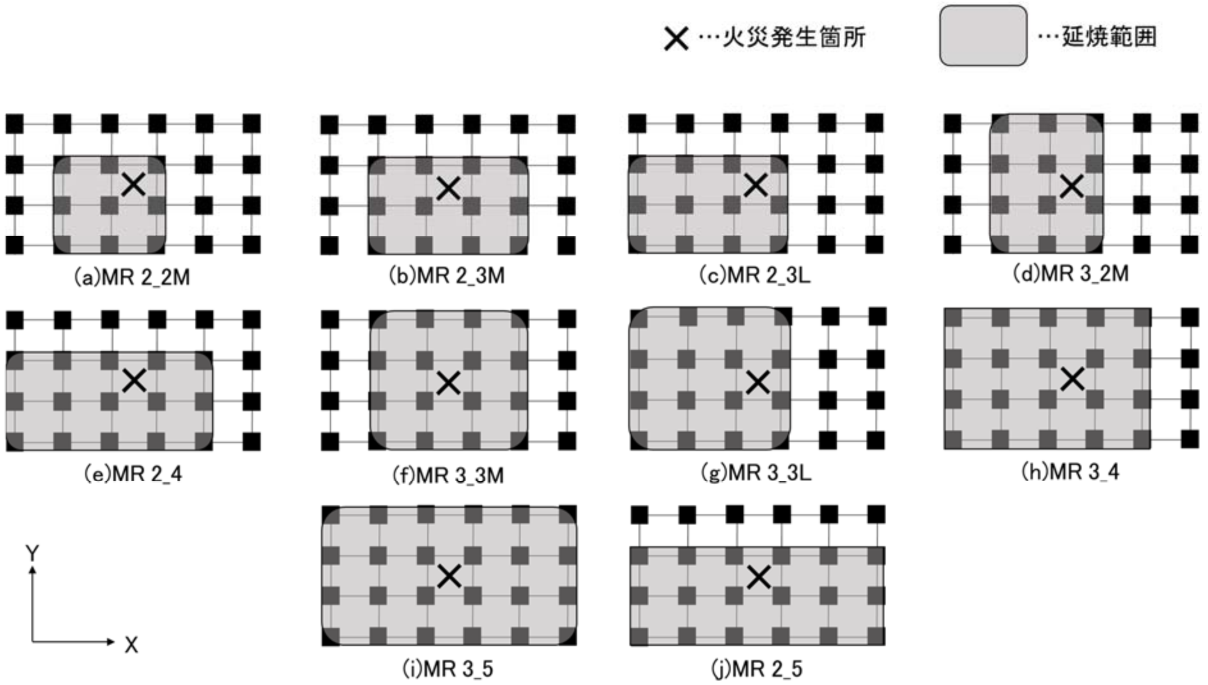


図 5 火災発生個所と延焼範囲（MR）

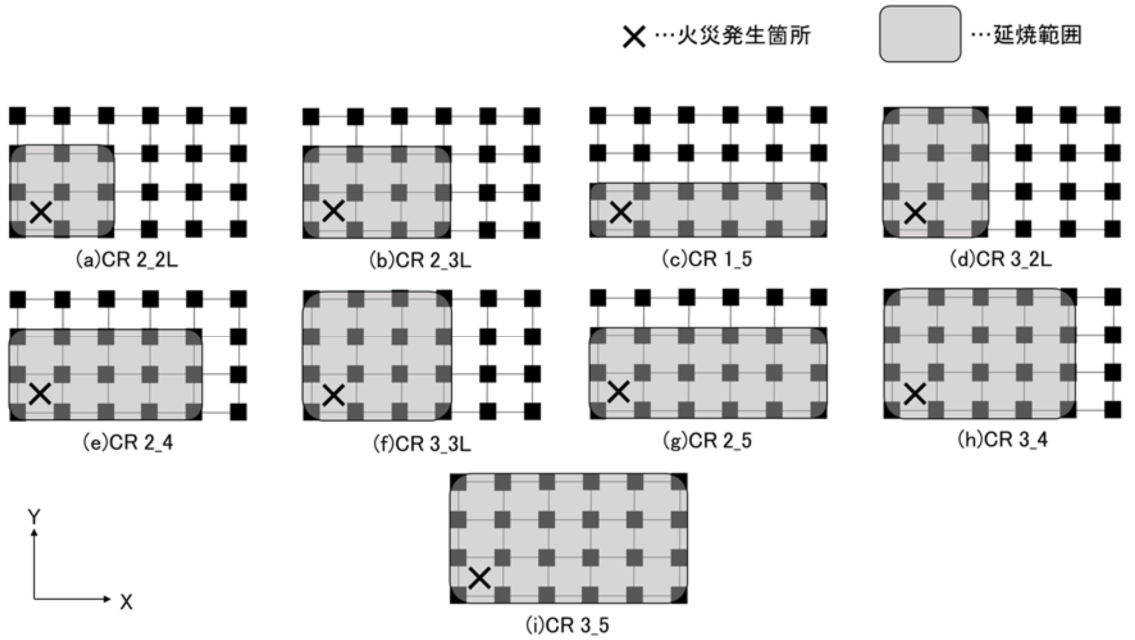


図 6 火災発生個所と延焼範囲（CR）

*KI*が大きいほど色を濃く，小さいほど薄くしている．この図から，四隅の柱は*KI*が小さく，中央の柱は*KI*が大きくなっており，また上層部から下層部にかけて*KI*が大きくなるという傾向が分かる．すなわち，四隅より中央の柱の方が建物全体の強度に対する寄与度が高く，また下層部の柱ほど寄与度が高い．

(2) 火災条件

本解析では，1×1スパンを1部屋と定義し，火災発生箇所を*KI*の大きな柱を含む中央の部屋（Middle Room，以後MR）と，*KI*の小さな柱を含む角の部屋（Corner Room，以後CR）の2種類とした．延焼範囲は，図5および図6に示すように火災発生箇所を含め4，5，6，8，9，10，12，15部屋の規模を設定した．図のMR2_3Lなどの記載は，火災発生箇所，部屋の数（縦_横），位置（M:真ん中，L:左寄り）を示す．なお，建物の崩壊挙動にほとんど影響を与えなかった延焼範囲は除いている．火災発生階層は，最下層である1階から最上層である10階まで1階ずつとし，-1Fなどを付してその階層を表している．

次に，解析で温度を上昇させる部材は，延焼範囲内の柱と見上げ側の梁のみとした．JIS A 1304の耐火曲線[7]に基づき，延焼範囲内のこれらの部材の温度を図7に示す履歴で上昇させ，図1の低下曲線に従って弾性係数と降伏応力を低下させ火災を表現した．

火災発生箇所から火災が始まり，一定時間経過するごとに隣接する部屋へ延焼が進むと仮定した．延焼時間については，保野ら[8]によって提唱された延焼速度式を参考に決定した．図8は，耐火建物の1区画100㎡における延焼面積の時刻歴を表したものである[8]．解析モデルの1部屋の床面積が49㎡であるため，図より1部屋全てが燃え尽きる時間を13分と決めることができる．そこで，図7より

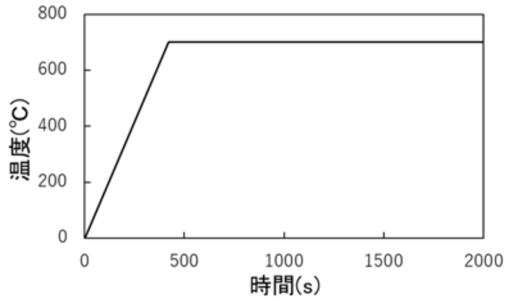


図 7 部材の温度履歴

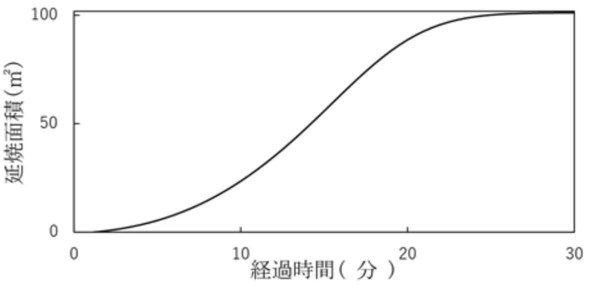
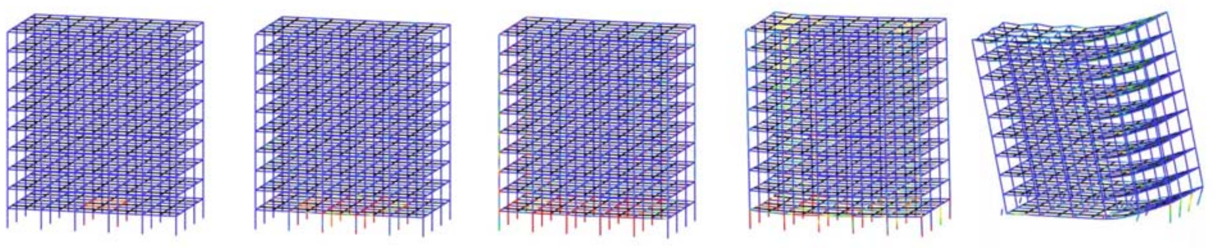
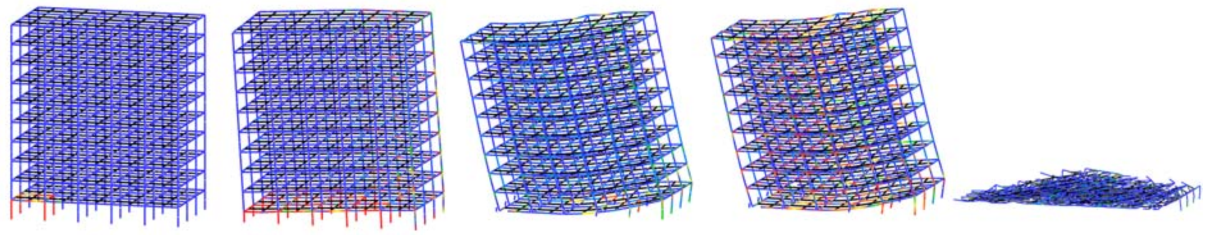


図 8 耐火建物内 100 ㎡における延焼面積の時刻歴[8]



(a) 420 s　(b) 840 s　(c) 1260 s　(d) 1595 s　(e) 1601 s

図 9 延焼と崩壊の様子（MR3_4-1F）



(a) 420 s　(b) 1660 s　(c) 1700 s　(d) 2400 s　(e) 2439 s

図 10 延焼と崩壊の様子（CR3_4-1F）

部材が火災温度の700℃に達する時間が7分であることから，1部屋が完全燃焼する約半分の時間で最高温度に達し，隣接する部屋へ燃え移ると仮定した．解析上では，火災が発生してから7分後に隣接する部屋の部材の耐力を低下させ始めることとした．

(3) 解析結果

前節に記述した条件で行った190種類の火災崩落解析のうち，MR3_4-1FおよびCR3_4-1Fの結果を図9と図10に示す．図中の要素は降伏関数値により色分けしており，部材が降伏状態に近付くにつれて青色から赤色へ変化する．図9に示すように，全体崩壊には至らなかったものの，1層分が崩壊する挙動は下層部で大規模な延焼範囲の場合で多く見られた．他にも部材が破断しない場合，図10のように建物全体が崩壊する場合があり，大きく分けて3種類の崩壊挙動が見られた．同じ延焼範囲であっても，下層部で火災が発生する場合に崩壊危険性が高く，より大規模な崩壊を引き起こす可能性が高かった．また，CRのように火災発生箇所が建物の端部にあり，より非対称に延焼が進む場合に全体崩壊する危険性が高まることが確認された．これは，建物の中央部で火災が発生するMRでは，延焼過程においても応力伝達経路を複数確保できるのに対し，建物の端部で火災が発生するCRでは応力伝達経路が限定的になることに起因する．

(4) キーエレメント指標を用いた崩壊危険性評価

次に，延焼範囲内の*KI*積算値と，火災崩落解析結果から得られる建物の崩壊規模との関係について述べる．建物の崩壊規模を定量的に示す指標として，延焼範囲内の部屋が全て燃え尽き，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高さ方向の座標値の和として定義される残存物高さの和を用いた．

図11には，MRの場合の全ての火災条件における残存物高さの和と，延焼範囲内の柱の*KI*積算値との関係を示す．なお，縦軸の残存物高さの和は健全状態の建物の高さの和で割ることで無次元化している．図より，*KI*積算値が16~17より小さい場合には，全ての火災条件で残存物高さの和が大きい傾向が見られた．これは，延焼範囲の柱に大きな変形が生じず，崩壊がほとんど生じなかったことを意味する．一方，*KI*積算値が16～17を超えた辺りから，各延焼範囲において，火災発生階層が下層部になるにつれ健全状態に対する残存物高さの割合が減少する傾向が見られた．

本研究では，建物の1層分が圧潰した状態を危険な状態と想定し，健全状態に対する残存物高さの和の割合が1層分（10層建物なので本研究では0.9）を下回った場合のうち，*KI*積算値の最小値を建物の崩壊閾値と定義する．図11に示すように火災発生箇所がMRの場合の閾値は19.16となり，図12に示すように火災発生箇所がCRの場合でも18.27であった．これは，およそ柱1本分未満の差である．以上より，*KI*積算値が概ね18以上で建物が危険な状態と

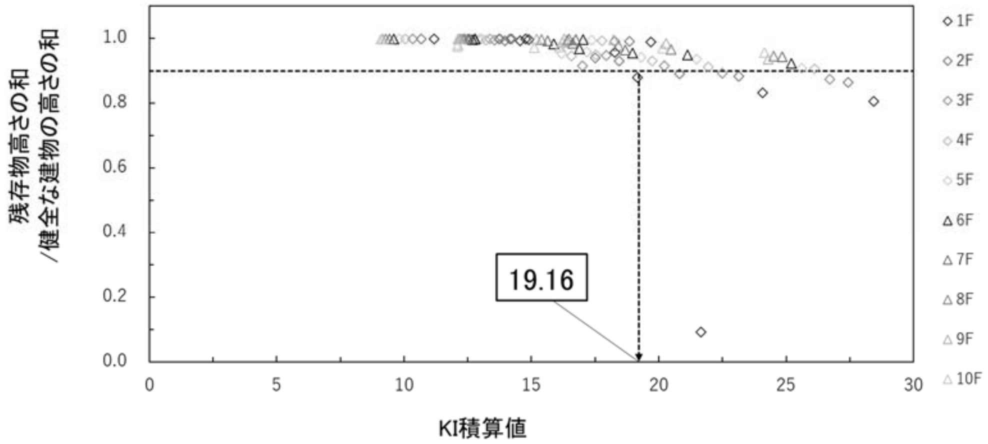


図 11 最終状態における残存物高さの和と *KI* 積算値の関係（MR の場合）

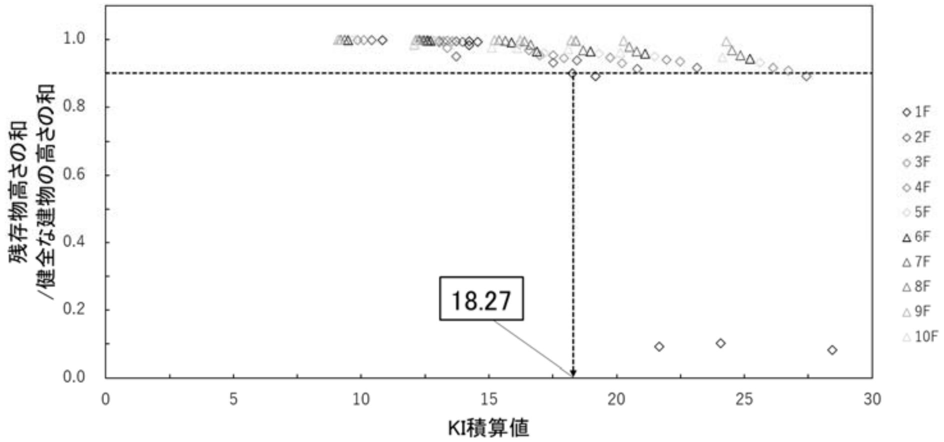


図 12 最終状態における残存物高さの和と *KI* 積算値の関係（CR の場合）

なることが分かった．

5. 結論

本研究では，延焼の進行による建物の崩壊危険性を定量的に評価することを目的とした．解析対象として10層5×3スパンの鋼構造建築物モデルを使用し，火災発生箇所を中央および端部に設定し，火災発生階や火災範囲が異なる様々な条件下で延焼を考慮した火災崩落解析を行った．得られた解析結果に対し，延焼範囲内の*KI*積算値と残存物高さの和の関係を求めた，その結果，以下の知見が得られた．

- 延焼による建物の崩壊規模は火災発生箇所，延焼範囲および火災発生階層に依存する．低層部でかつ延焼範囲が広範囲であるほど建物の崩壊規模は大きくなる．
- 火災発生箇所によって延焼が非対称に進行する場合，全体崩壊を引き起こす可能性が高まる．一方，延焼範囲が広範囲であっても上層部での火災であれば，崩壊規模は比較的小規模となる．
- 火災発生箇所に依らず，*KI*積算値の崩壊閾値は概ね一意に定まる．

以上より，*KI*積算値を用いることで建物の崩壊危険性を概ね評価可能であることが示された．今後は，延焼が不規則に進行する火災条件や，WTCなどの超高層建物においても*KI*積算値を用いて崩壊危険性を評価可能か検証する必要がある．

参考文献

[1] NIST NCSTAR 1A: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Final Report on the Collapse of World Trade Center Building 7, 2008.

[2] 大井康平, 磯部大吾郎: 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, 日本建築学会構造系論文集，第82巻，第738号, pp. 1213-1220, 2017.

[3] 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.

[4] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで, 丸善出版, 2020.

[5] Frangopol DM and Curley JP: 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.

[7] JIS A 1304, 建築構造部分の耐火試験方法, (財）日本規格協会, 1994.

[8] 保野健治郎,難波義郎: 新しい延焼速度式による火災危険度予測，季刊 消防防災の科学, No.15, pp.12-16, 1998.