

火災による耐力低下を考慮した骨組構造の崩落解析

正会員 小室 友暢*
同 磯部 大吾郎**

火災崩落解析 部材耐力低下 崩壊モード
ASI-Gauss 法 有限要素法 時間増分制御

1. 緒言

構造用の材料として広く利用される鋼材は溶解点が極めて高く、火災過熱を受けても部材の溶解は比較的少ないが、部材温度の上昇に伴い粘性が増加して比較的低い温度と低い応力度で部材の変形を誘発し、構造物に多大な影響を及ぼすことが分かっている[1]。だが、その影響の与え方は様々で、例えば 2005 年にマドリードの Windsor ビルで起きた大火災においては、ビルが全焼したにも関わらず骨組だけは残存し全体崩壊には至らなかった。その一方で、2001 年の米国同時多発テロの際に、世界貿易センタービル(WTC)群の一つである WTC7 のように火災によって進行性崩壊を起こしたケースもある。火災に起因する建物の崩壊を防ぐ上でも、これらの結果の違いを引き起こした構造的要因について調べる必要がある。

そこで本研究では、建物の火災崩落現象を解析するためのシステムを開発した。火災という長時間の現象を動的に解析するには長い計算時間を要するため、最小限の計算コストで解析可能な ASI-Gauss 法[2]を適用した。また、準静的領域と動的領域を両立して解くため、部材の急速な変形の有無によって時間増分を変化させる制御アルゴリズムを導入した。さらに、柱同士が接触する際には軸剛性のみを持つヒンジ要素を形成させ、実現象に即した崩壊挙動の再現を試みた。本稿では、部材破断、要素間接触および温度上昇における部材の耐力低下曲線を導入し、10 層 2 スパン骨組構造の火災崩落解析を実施した。そして、火災が生じた階層や床範囲などの初期条件に対する崩壊モードの相違を調べた。

2. 部材の耐力低下曲線

火災により構造物の鋼材の温度が上昇すると耐力は著しく低下し、本来の機能が失われる。このような鋼材の温度上昇が構造物に及ぼす影響を考慮するため、温度上昇の時刻歴と部材耐力との関係を近似し、解析で使用し

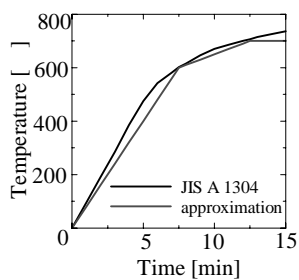


図-1 温度上昇曲線

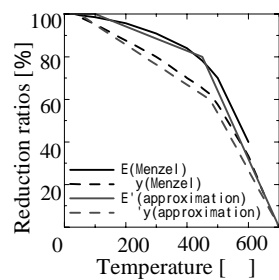


図-2 部材の耐力低下曲線

た。温度上昇の時刻歴には、JISA1304 に示される耐火曲線[3](図 1)を線形近似したものをを用いる。また、部材の耐力低下曲線には Menzel の曲線[1] (図 2)を用いた。図中で E , y はそれぞれヤング率および降伏応力の低下曲線値、 E' , y' はそれらの近似値である。剛性および降伏応力は約 700 °C でほぼゼロとなるため、700 °C までの近似とした。

3. 火災による骨組構造の崩落解析

解析対象は幅、奥行き 2 スパン 12 m、高さ 10 層 36 m の骨組構造とし、部材定数としては柱、梁共に SN490B 鋼材のものを使用した。解析に用いた破断臨界曲率 f_x , f_y は共に 2.0×10^{-4} 、破断臨界軸ひずみ ϵ_x は 0.05 で、自重は外力として各節点に加えた。なお、床と壁は考慮していない。火災発生条件は 4 つの場合(Case 1~4)を想定した。Case 1 では、8 層部分全体に火災が発生し、同時刻に柱と梁の温度が上昇する。同様に、Case 2 は 8 層の片側部分で火災が発生した場合、Case 3 は 6~8 層部分全体で火災が発生した場合、Case 4 は 6~8 層の片側部分で火災が発生した場合である。

図 3 に解析結果を示す。Case 1 においては、火災により 8 層部分で柱が降伏し、上層部が鉛直に落下する様子が観察できる。その際に大きな衝撃力の発生が確認されたが、進行性崩壊を引き起こすまでには至らず、8 層部分が潰れたのみで建物全体は原型に近い状態で留まった。Case 2 では、最終的に上層部分が片側に傾いたのみだった。これは、火災発生側の 9 層と 6 層が接触し、反対側の柱が降伏せず引張りに耐えているからである。Case 3 では、上層部が落下した衝撃により下層部のみならず上層部までが変形し、多数の部材が下方に落下している。これは、落下した層の運動エネルギーが Case 1 と比較して大きいことを示している。Case 4 では、Case 3 の場合と比較して構造物全体の軸力分布が大きく偏る。部材耐力が低下し崩壊していく中で、片側の 3 層部分がほぼ同時に潰れるため、反対側の柱により大きな曲げモーメントがかかる。そのため、形状を留めていることが困難となり、上層部が横倒しになっている。このように、火災が多層に渡って片側部分で発生した場合には周囲への危険が伴うだけでなく、建物自体にも局所的に多大な力が加わり、不安定な状態であることが分かる。解析は PC(Pentium4, 2.26 GHz CPU, 384 Mbyte RAM)上で行い、1000 s の現象を解析するのに Case 4 においては総ステップ数 57166 step、計算時間は約 3 時間を要した。

4. 結論

本稿では、ASI-Gauss 法を用い、火災による耐力低下を

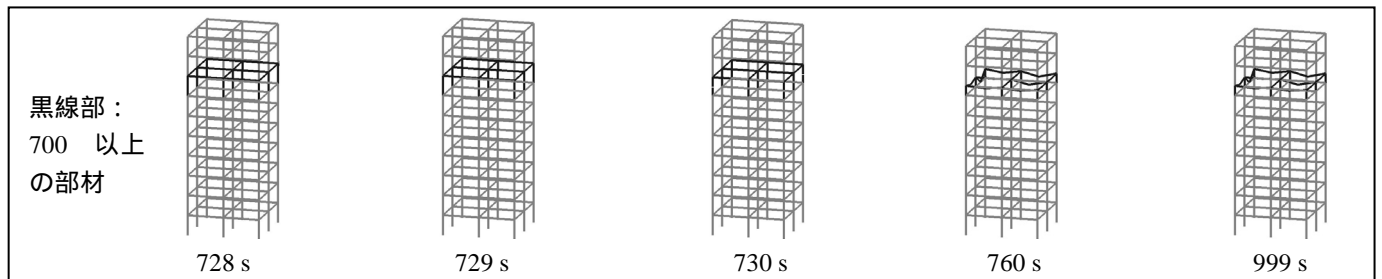
考慮した骨組構造の崩落解析を行った。解析結果より、火災発生条件が変わることで崩壊モードの相違を引き起こすことが確認できた。また、火災が発生した際に比較的低い温度で部材の耐力が低下し、部材の融点よりも早く骨組構造物全体が崩落に至ることが確認できた。今回行った解析のパターンに限らず、火災発生条件の相違から様々な崩壊モードが発生することが考えられる。今後は、火災の延焼などの条件を加えた上で、進行性崩壊現象までを含めた大型構造物の崩落解析を行っていく予定である。

謝辞

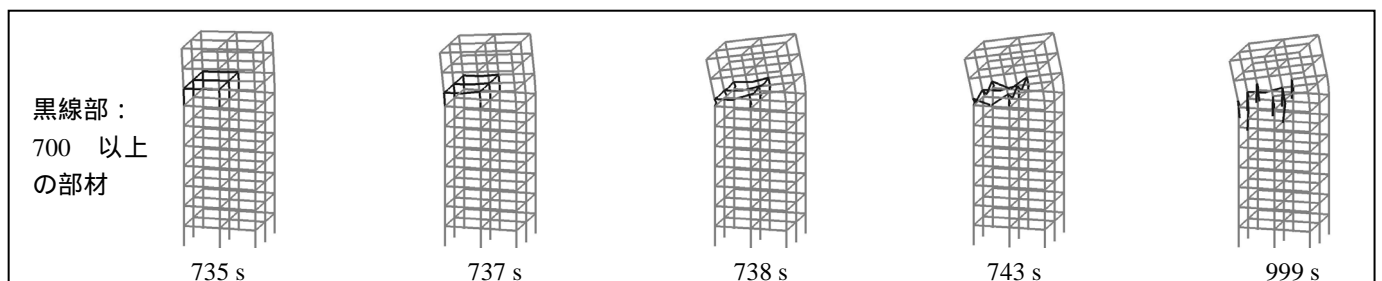
本研究を遂行するにあたり、独立行政法人日本学術振興会の科学研究費補助金基盤研究 A1 (課題番号: 16206055) から一部援助を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

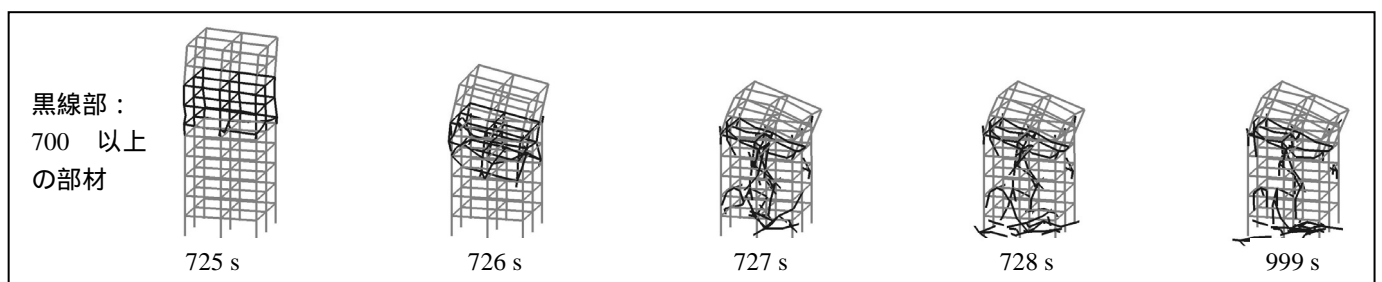
- 1) 原田 有: 建築耐火構法, 工業調査会
- 2) 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, (2004), pp.39-46.
- 3) JISA1304 「建築構造部分の耐火試験方法」



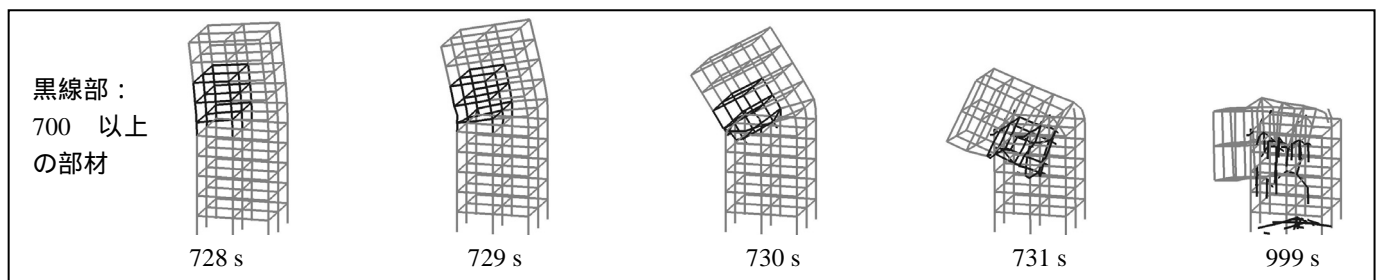
Case 1



Case 2



Case 3



Case 4

図-3 解析結果

* 筑波大学大学院生

**筑波大学大学院助教授 博(工)

* Graduate student, University of Tsukuba

** Dep. of Eng. Mech. and Energy, University of Tsukuba, Dr. Eng.