

火災による耐力低下を考慮した骨組構造の崩落解析

Collapse Analysis of Framed Structures Considering Strength Reduction Caused By Fire

○非 清水 和典 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Kazunori SHIMIZU, University of Tsukuba, Tennodai1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki

Daigo ISOBE, University of Tsukuba, Tennodai1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki

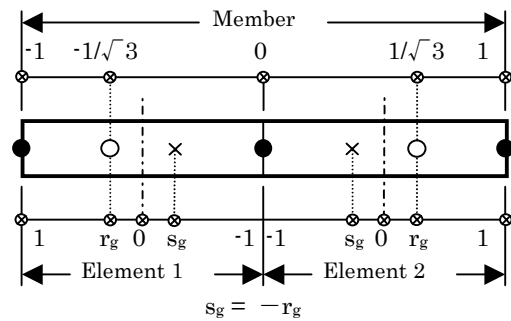
1. はじめに

構造用の材料として広く利用されている鋼材は、融融点が高く、火災加熱を受けても部材の溶解は比較的少ない。しかしながら、火災が構造物内で発生した場合、加熱温度の上昇に伴って比較的低い温度と低い応力度で部材の変形が発生し、構造物に多大な影響を及ぼすことがわかっている⁽¹⁾。火災は、実際に 2001 年の同時多発テロによる世界貿易センタービルの崩壊の大きな要因としてあげられており、特に WTC 7 は WTC1 や WTC2 のように外からの衝撃をほとんど受けておらず、完全に火災のみの影響により崩落に至ったと考えられている。この事件をきっかけに、構造物の耐火強度や、それが構造物の崩落に至るまでの時間に与える影響などについて事前に調査するための手法が求められるようになってきた。

従来から、骨組構造の解析には有限要素法(FEM)が広く用いられるが、部材破断などの強非線形性・不連続性を有する問題を解く場合には困難が多かった。そこで、線形解・非線形解共に高精度の収束解が得られる順応型 Shifted Integration 法(ASI 法)が考案された⁽²⁾⁽³⁾。本手法を用いることにより、通常の FEM に比べ少数の要素で高精度な崩壊荷重解が得られるだけでなく、部材破断が容易に表現可能となった。しかし、ASI 法に用いられる線形チモシェンコはり要素は 1 点積分法により剛性および応力が評価されるため、少数要素では弾性変位解が硬めに算出されてしまうという問題点があった。一方、火災が骨組構造物に与える影響を調査するような長時間の変化を解析する場合、より少ない計算コストが求められる。そこで、線形チモシェンコはり要素に弾性変位解の精度を向上させるために改良が加えられ、ASI-Gauss 法が開発された⁽⁴⁾。本稿では、最小限の要素数で高精度な解が得られる 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実施した結果について報告する。解析では部材の線膨張率を考慮し、さらに部材破断と接触のアルゴリズムを導入することにより、構造物が崩落に至る挙動をリアルにシミュレート可能とした。

2. ASI-Gauss 法

ASI 法とは、部材内に全塑性断面が発生した直後に、その断面に正確に塑性ヒンジが形成されるように数値積分点をシフトする手法である。ASI 法で用いられる線形チモシェンコはり要素は、弾性範囲において数値積分点が中央点に配置されている。これは、1 点積分法での数値積分点の最適位置が中央点であるためだが、曲げ変形に対する精度が十分ではないという欠点が存在する。そこで ASI-Gauss 法では、弾



× Numerical integration point
○ Stress evaluation point

Fig.1 Linear Timoshenko beam element with stress evaluation points at Gaussian integration points

性範囲では 2 つの要素を 1 組として考え、2 点積分法に対する最適位置のガウス積分点で応力が評価されるように、隣接する 2 要素内で数値積分点を配置した⁽⁴⁾。すなわち、擬似的に 2 点積分法を適用し、曲げ変形精度の向上を図るのである。Fig.1 に ASI-Gauss 法における数値積分点と応力評価点の位置関係を示す。

単純なフレーム構造の静的・動的応答解析を実施した結果、ASI-Gauss 法は ASI 法と比較して格段に少ない要素分割数で高精度の弾性変位解を与え、1 部材 2 要素分割で解がほぼ収束することが確認されている⁽⁴⁾。

3. 部材耐力低下の近似

本研究で用いた部材耐力低下の近似について述べる。温度上昇の時刻歴は、JIS A 1304 に示される耐火試験用の火災曲線を直線で近似したものをを用いた(Fig.2)。また、温度と部材耐力の関係も Menzel の降伏点および弾性係数の低下曲線⁽¹⁾を直線で近似したものをを用いた(Fig.3)。ただし、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。

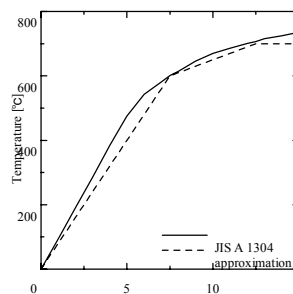


Fig.2 Elevation curve of temperature

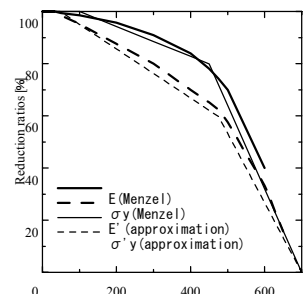


Fig.3 Menzel's curves

4. 部材破断と接触

本解析では、より現実的な骨組構造体の挙動をシミュレート可能とするため、部材破断と接触のアルゴリズム⁽⁴⁾を導入した。破断の判定条件としては、部材の破断曲率臨界値 κ_{xexp} 、 κ_{yexp} および破断ひずみ臨界値 ε_{zexp} を設け、一般化ひずみ κ_x 、 κ_y 、および ε_z を次式のような条件式に代入し、どれか一つでも条件が満たされた場合にその要素を破断させるように設定した。

$$\left(\frac{\kappa_x}{\kappa_{xexp}}\right) - 1 \geq 0, \left(\frac{\kappa_y}{\kappa_{yexp}}\right) - 1 \geq 0, \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{zexp}}\right) - 1 \geq 0 \quad (1)$$

接触においては、接近する 2 本の要素の節点間距離および節点の幾何学的位置関係により接触の判定を行った。接触と判定された要素同士については節点間に計 4 つのギャップ要素（接合要素）を結合しそれらを拘束した。ギャップ要素は他の要素と同じ断面形状を持つと仮定した。

5. 火災による耐力低下を考慮した骨組構造の崩落解析

Fig.4 に示す 3 層 2 スパンの骨組構造体（総要素数 78、総節点数 63）に対し、火災による耐力低下を考慮した崩落解析を行った。部材の材料定数および各パラメータは Table1 に示す値を用い、鋼材の温度上昇に伴う膨張（線膨張率： $1.15 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ）⁽⁶⁾を考慮した。1 部材当たりの要素分割数は 2 とした。また、非線形増分理論として Updated Lagrangian Formulation (ULF)、時間積分法として Newmark の β 法 ($\beta = 0.4$)⁽⁶⁾、ソルバーとして共役傾斜法 (CG 法) を使用した。時間増分は 740.0 秒まで $\Delta t = 1.0$ [s]、以降 $\Delta t = 20.0$ [ms] として計 12740 ステップの計算を行った。

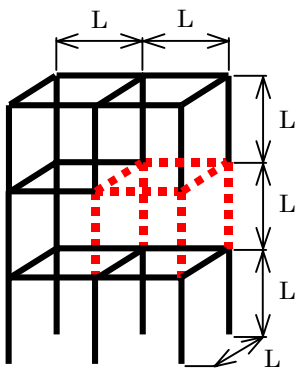


Fig.4 Analyzed space frame

Fig.4 において、破線で示される部屋での火災発生を仮定した。解析によって得られた変形、崩落の様子を Fig.5 に示す。約 12 分で大きな変形が開始、その後約 1 分ほどで中間層が圧壊したことが確認できる。また、崩落後も梁材の変形が進み、破断して落下する様子が確認できた。本

解析の計算に要した時間は、PC (CPU: Intel Pentium III

Table1 Parameter of member

E	2.058×10^{11} [Pa]	A	2.187×10^{-2} [m ²]
ν	0.3	I_x	6.660×10^{-5} [m ⁴]
σ_y	2.400×10^8 [Pa]	I_y	2.2400×10^{-5} [m ⁴]
ρ	172.0 [kg/m]	Z_x	3.330×10^{-3} [m ³]
L	4.0 [m]	Z_y	1.120×10^{-3} [m ³]
$\kappa_{xexp}, \kappa_{yexp}$	6.0×10^{-3}	ε_{zexp}	3.0×10^{-1}

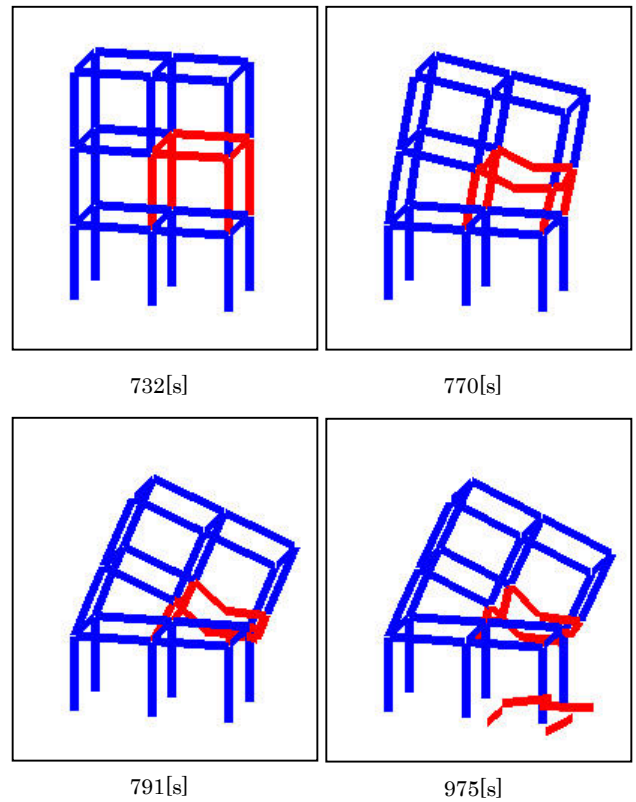


Fig.5 Fire collapse analysis of 3-story 2-span space frame

800 MHz, メモリ: 128 MB RAM) 上で約 11 分だった。

6. 結論

本報告では、火災による耐力低下を考慮した骨組構造の崩落解析に ASI-Gauss 法を適用した。その結果、3 層 2 スパンの骨組構造体が火災により崩落していく様子を比較的少ない計算コストでリアルにシミュレートすることができた。火災発生位置や延焼条件などの相違により、様々な崩落パターンが考えられる。今後は、世界貿易センタービルなどの実例に対する検証を行っていく予定である。

参考文献

- (1) 原田 有：建築耐火構法, 工業調査会
- (2) Y.Toi and D.Isobe : Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures, Int.J.Numer.Methods Eng., Vol.36, (1993), pp.2323-2339.
- (3) D.Isobe and Y.Toi : Analysis of Structurally Discontinuous Reinforced Concrete Building Frames Using the ASI Technique, Computers and Structures, Vol.76, No.4, (2000), pp.471-481.
- (4) 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の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, (2004), pp.39-46.
- (5) 日本金属学会：金属材料の強度と破壊
- (6) 磯部 大吾郎, 森下 真臣： ASI 有限要素法による大規模宇宙骨組構造のデブリ衝突解析, 日本機械学会論文集, (A 編), 第 64 巻, 第 627 号, (1998), pp.2726-2733.