

# 衝突荷重下における骨組構造体の崩壊解析

## Structural Collapse Analysis of Framed Structures under Impact Loads

○正 磯部大吾郎 (筑波大)    チョウ ミヨウ リン (筑波大院)

Daigoro ISOBE, Inst. of Eng. Mechanics and Systems, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai Tsukuba-shi, Ibaraki  
 Kyaw Myo Lynn, Graduate student, Univ. of Tsukuba

*Key Words: Structural Collapse Analysis, ASI-Gauss technique, Finite Element Method (FEM)*

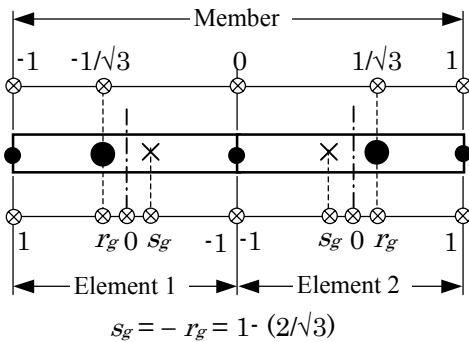
### 1. 序論

2001年9月の米国同時多発テロによるニューヨーク世界貿易センタービル(WTC)の崩壊は、世界中を震撼させた。衝突した飛行機の燃料による火災が構造耐力を低下させ、最終的に漸次的な崩落現象を引き起こしたという説が有力である[1]。その一方で、飛行機が衝突した瞬間に床スラブを連結するジョイントが破壊され、構造的にはいつ崩落しても良い状態に達してしまい、必要なのはその引き金だけだったということも考えられる。いずれにせよ、今後の高層建築設計の指針に反映させる上で、数値解析による被害状況の詳細な検討が必要である。

そこで本研究では、骨組構造の有限要素解析手法でありながら部材破断の考慮を可能とする順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法) [2] に対し、弾性域の精度を増す工夫を施した ASI-Gauss 法を開発した。さらに、破断後の要素が他要素と接触する際の接触アルゴリズムをエネルギー保存の観点から検証し、これらを 10 層 4 スパン 奥行き 4 スパン骨組構造体に飛行機が衝突する際の崩壊解析に適用した。

### 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 法では、弾性挙動をする線形チモシェンコはり要素の数値積分点を要素中央点に配置した。一方、本研究で提案する ASI-Gauss 法は線形チモシェンコはり要素を 2 要素単位で考え、弾性要素では応力評価点がガウス点に一致するように数値積分点を配置する。図 1 は 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。これは、ガウス点で評価される曲げ変形の精度が数学的に保証され、その点が 2 点積分における最適位置であることを利用している。単



× Numerical integration point    ● Stress evaluation point

Fig.1 Numerical integration points and stress evaluation points for Timoshenko beam element in ASI-Gauss technique

純なフレーム構造を用いた静的解析・動的応答解析を実施した結果、ASI-Gauss 法は ASI 法と比較して弾性変位解の精度が向上し、1 部材辺り 2 要素分割で解がほぼ収束することが確認された。

### 3. 要素接触アルゴリズムとその検証

部材破断のみを考慮した解析では、破断した部材が他の部材をすり抜ける等の挙動を示すため、衝突エネルギーが構造物に適切に伝達されない可能性がある。また、衝突時の力を節点力のみで入力すると、構造物に対する局所的な作用となってしまう。大きな構造物どうしの衝突現象を表現するには無理が生じる。そこで、衝突要素と他の要素との空間内位置関係により要素間の接触を判定するアルゴリズムを採用した。要素間の接触は、(i) 接近する要素どうしが特定の距離内に在ること、(ii) それらの 4 つの節点が同一平面上、またはそれに近い状態に在ること、の 2 つの条件によって判定する。接触を判定された 2 つの要素については、節点間を計 4 本のギャップ要素で拘束する。ギャップ要素には他の要素と同一の材料定数および幾何形状パラメータを使用した。また、エネルギーの伝達時間を考慮して接触から 0.5ms 後にモデルから削除し、跳ね返り等の現象を再現可能とした。さらに、衝突時のエネルギー

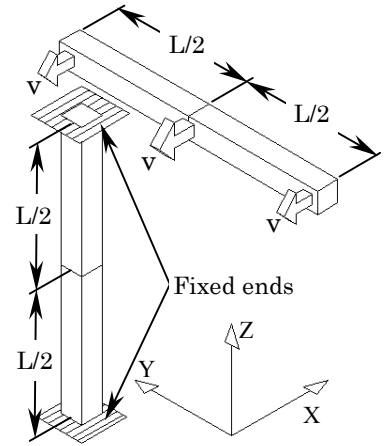


Fig.2 Analyzed two-beam model

ギロスは無いと仮定した。

図 2 に示すような簡単な 2 部材モデルの衝突解析を行った。一方の部材は両端を固定し、他方の部材は 50m/s の初速度を与えて自由運動をさせた。図 3 にモデル全体のエネルギー量の推

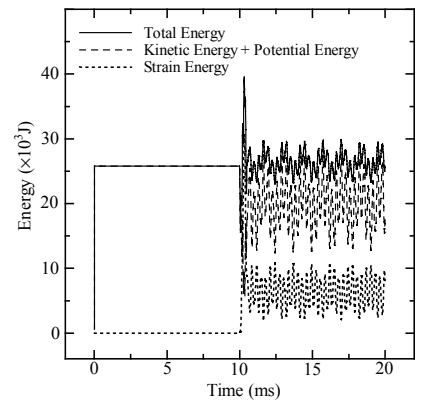


Fig.3 Time histories of kinetic, potential and strain energies

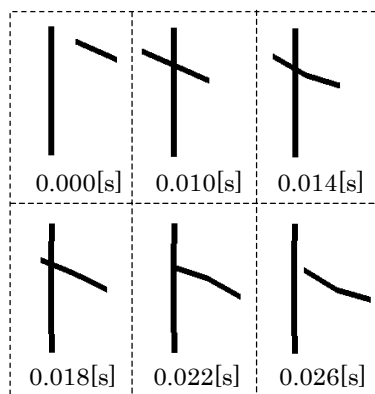


Fig.4 Collision analysis of a two-beam model

移を示す。衝突前は、自由運動をする部材が有する運動エネルギーと位置エネルギーが総エネルギーを占めるが、10msで2部材が衝突した後は、図4に示すように部材は振動による変形を繰り返す。そのため

部材内にはひずみエネルギーが発生し、運動エネルギーと位置エネルギーの和が減少するのが確認できる。図3中に応力波の発生によるものと思われる振動が見られるが、総エネルギー量は保存され、ほぼ一定であることが確認された。

#### 4. 飛行機の衝突に伴う骨組構造体の崩壊解析

ASI-Gauss法を用い、10層4スパン奥行き4スパンの骨組構造体に飛行機が衝突する際の崩壊解析を行った。1部材は2要素で分割した。モデル全体の要素数は1698、全自由度数は7308である。構造体は鉄鋼によって生まれ、飛行機はジュラルミン製であると仮定する。床材等の重量を考慮し、自重に対して20倍の重量を構造物全体に加えた。一方、飛行機の重量は自重のみが一樣に分布するものとした。構造体は最下階で固定され、飛行機は自由運動をする。飛行機には仰角0度の方向に初速度を与えた。非線形増分理論にはupdated Lagrangian formulation (ULF)、ソルバーにはCG法、時間積分法にはNewmarkの $\beta$ 法( $\beta=0.4$ )を使用[2]し、時間増分を10 $\mu$ s、総ステップ数を25000step(0.25s)とした。また、簡単のため減衰は無視した。解析はPC(2.4GHz CPU, 256Mbyte RAM)上で行い、計算には約9時間を要した。図5に飛行機の航行速度を440kmph、翼幅を15m、重量を15tonとした場合の解析結果を示す。飛行機の衝突点から構造物内を衝撃波が急速に広がり、様々な箇所での降伏の危険度が上昇している様子が観察できる。さらに、衝撃波は柱を伝わって最下階まで達した後、地面で跳ね返って何度も往復する様子が確認できた。最下階でも降伏の危険度が上がる瞬間があり、衝突のもたらす衝撃力の大きさを物語っている。飛行機はほぼ全壊するが、中には骨組構造体を突き抜ける構成部材も存在した。次に、衝突から250ms後の上層5階部分の被害状況を図6に示す。内部の柱はほぼ全て失われ、被害は6階付近にまで達していることが分かる。また、比較のために、飛行機の航行速度を320kmphとした場合の被害状況(図7参照)を調べると、衝突前の速度の減少によって被害の規模が小さくなることが確認できた。

#### 5. 結論

本研究では、飛行機の衝突に伴う骨組構造体の崩壊過程を連続的に解析可能な有限要素解析ツールを開発することを目的とし、ASI法に対して弾性域の精度を向上させるASI-Gauss法を開発した。ASI-Gauss法に部材破断および要素接触アルゴリズムを導入し、骨組構造体に対して飛行機が衝突する際の崩壊解析を実施した結果、飛行機の航行速度に応じて被害の

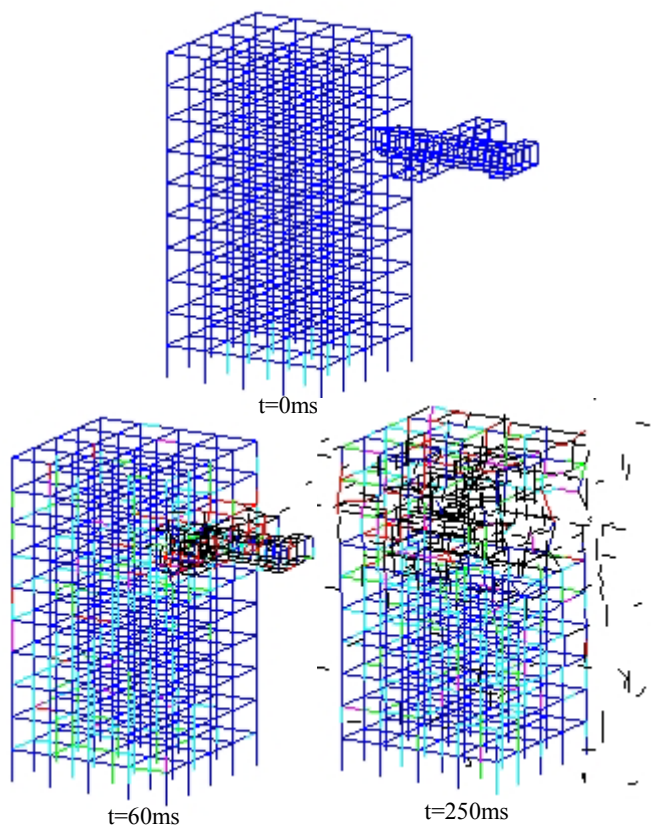


Fig.5 Structural collapse analysis of a framed structure due to aircraft collision

規模が変化することが確認された。また、衝突直後に構造物内を衝撃波が伝播し、地面で反射する様子等も確認された。衝撃波が床スラブのジョイント部等に悪影響を及ぼすことも考えられるため、今後、減衰効果等も導入し、さらに詳細な検討が必要である。

最小限の要素数で高精度を保证する本解法は、小型PCレベルで短時間で解析を可能とし、WTC等のような大規模骨組構造に対する解析でも効力を発揮するものと思われる。今後、火災による耐力低下を伴う崩壊解析への適用も含め、本解法をWTC崩壊過程の調査のために役立てていく予定である。

#### 参考文献

- [1] FEMA/ASCE: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations, FEMA403, (2002).
- [2] 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.

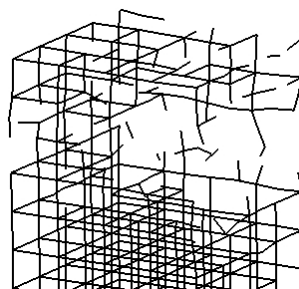


Fig.6 Impact damage (v=440kmph)

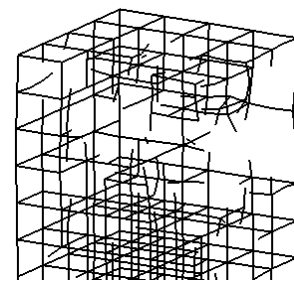


Fig.7 Impact damage (v=320kmph)