

全体モデルによる WTC2 の飛行機衝突解析

準会員 ○佐々木 嗣音*
正会員 磯部 大吾郎**

WTC2 衝突解析 ASI-Gauss 法
全体モデル 有限要素法

1. 緒言

2001 年, 世界貿易センタービル(WTC)ビルが完全崩壊に至った大きな要因は, 火災による部材耐力の低下であったとされている[1]. 一方, 局所解析や静的解析による調査も多く行われているが, 飛行機衝突の影響で構造物に発生したであろう特異な応力状態については, 全体モデルによる動的解析を行い詳細に調査する必要があると考える. 本稿では, 実情報に基づき可能な限り詳細に構築した WTC2 の全体モデルを使用し, ボーイング 767-200ER の衝突解析を実施した結果について報告する.

2. ASI-Gauss 法

解析には, 当研究室で開発した有限要素解析手法である ASI-Gauss 法[2]を用いた. 本手法では, 図 1 に示すように 1 部材を線形形モーションコはり要素 2 つで表し, 以下の式に従い応力評価点(ガウス積分点位置に相当)と数値積分点をシフトする.

$$s_g = -r_g \quad \text{or} \quad r_g = -s_g \quad (1)$$

部材の弾塑性・破断性状に応じて要素内の数値積分点を順応的にシフトすることで, 少ない要素数で高精度の解を得ることができ, 従来の手法よりも計算コストを大幅に削減することが可能である.

3. WTC2 のモデル化と解析条件

図 2 に飛行機を含む解析モデル全体の概観を示す. WTC2, 飛行機共に線形形モーションコはり要素でモデル化した. WTC2 全体では要素数 604780, 節点数 435117, 自由度数 2608980 である. モデル化にあたり, 事件の調査報告[3]を参考に部材の断面定数と材料定数を設定した. 定数が特定できない部材については, 断面積が近くなるような H 形鋼でモデル化した. 床荷重については, 床部分のはりの部材密度に盛り込む形で付加した.

飛行機は要素数 4322, 節点数 2970, 自由度数 17820 と

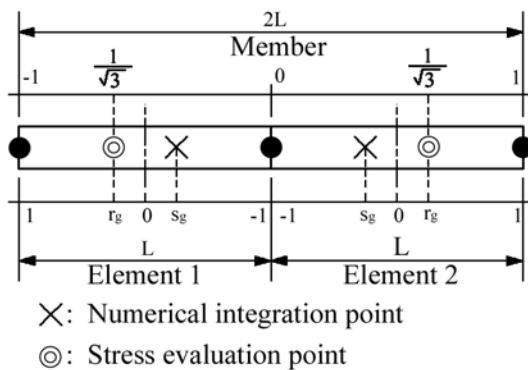


図-1 弾性領域での数値積分点と応力評価点の位置

した. 部材の断面形状を箱型断面とし, 超々ジュラルミンの材料定数値を用いた. 機体の総重量を 142.5 t とし, このうち燃料の重量は 30 t, 個々のエンジンの重量は 19.315 t とした. 飛行機の初期位置は, 機首が 11.5° 東, 5° 鉛直下方向へ向き, 進行方向へ反時計回りで 35° 回転していると仮定した. 速度は, 秒速 262 m で WTC2 の 81 階に衝突したものと仮定した.

ソルバーには共役傾斜法 (CG 法), 非線形増分理論には Updated Lagrangian Formulation, 時間積分には Newmark の β 法を用い, 数値減衰を目的に $\delta=5/6$, $\beta=4/9$ という値を導入した. 構造減衰は考慮していない. また, ギャップ要素を用いて接触を考慮した. 実現象の時間 1.2 s に対し時間増分を 0.2 ms とし, CPU 1.4GHz Itanium Processor $\times 2$, RAM 8GB の PC で約 2 ヶ月の計算時間を要した.

4. 解析結果

図 3 に衝突時の様子を示す. 図の左列は全体を東面から見た様子, 右列は同視点の飛行機が衝突する部分を拡大した図である. 部材降伏の度合いを色の濃淡で表し, 破断要素は描画していない. 飛行機が衝突したことによって, 部材の色が激しく変化の様子が観察できた. 衝突によって発生した衝撃波は, 柱や梁を伝播し衝突した階から離れた階にも影響している. また, 大きな穴が生じたことで自重が他の部材へ負担される応力再配分が動的に起こっていることも確認できた. このように, 構造物に発生する特異な応力状態の時々刻々の変化を捉えることができた.

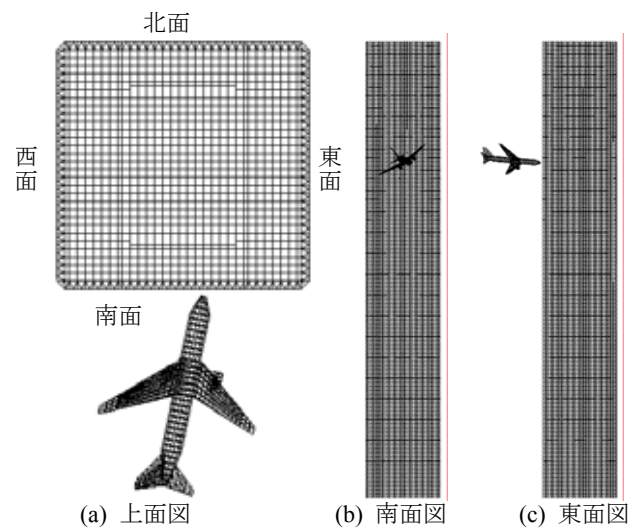


図-2 解析モデル

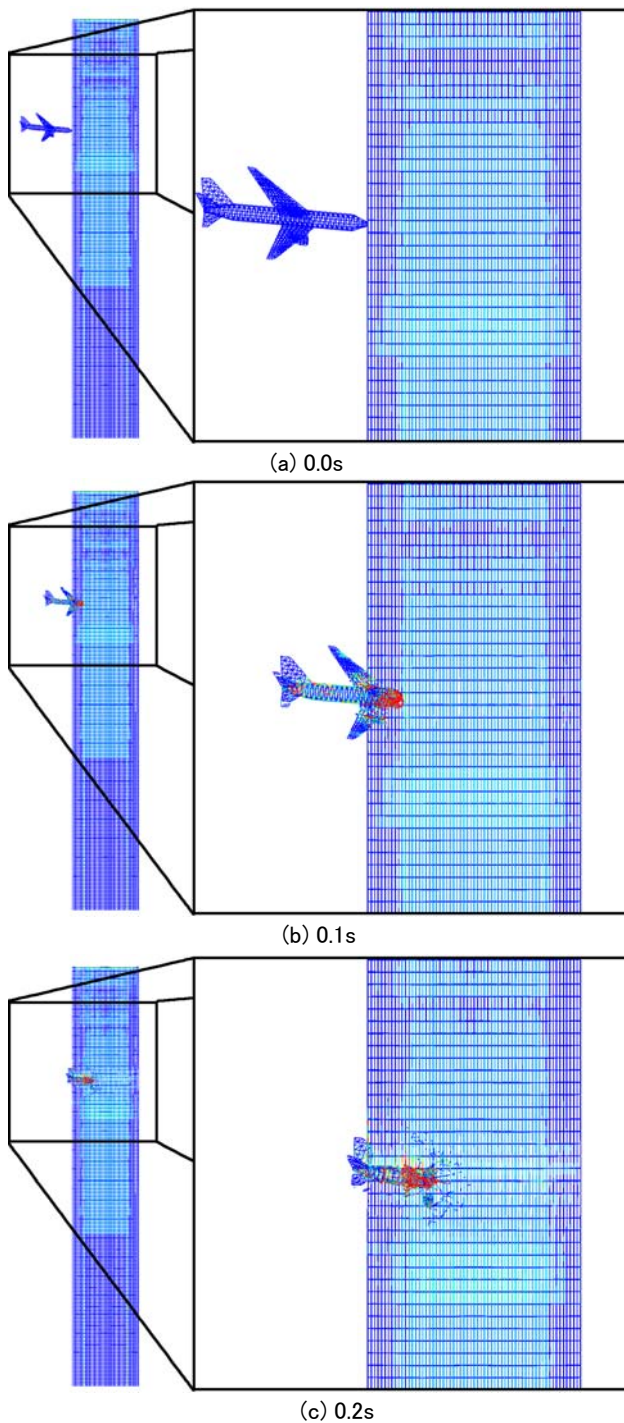
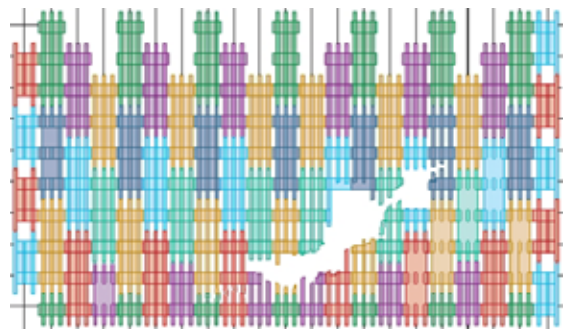
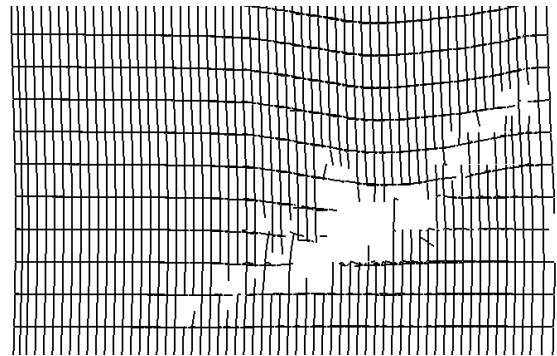


図-3 衝突時の様子

図 4 に南面の損傷の様子を示す。図 4 (b) に示す解析結果からは、飛行機衝突によって外周の柱やスパンドレル梁が切断されて大規模な穴が構成している様子が観察できる。解析結果は図 4 (a) に示す観測結果[1]と良好に一致している。前報告の衝突部付近の局所モデルによる解析[4]では、その境界条件の影響によって境界近辺での応力集中や衝撃波の伝播が起き、観測結果よりも広範囲の損傷が起こったが、本報告では観測結果により近い結果を得ることができた。



(a) 観測結果[1]



(b) 解析結果

図-4 被害状況の比較

5. 結言

本研究では、全体モデルによる WTC2 の飛行機衝突解析を行った。その結果、衝撃波がコア柱内を伝播していく様子や、応力再配分が動的に起こっている様子など、局所モデルで行った場合よりもさらに詳細な情報が得られた。また被害状況についても、局所解析結果より良好に観測結果と一致した。一方では、情報の少ない部分のモデル化を見直すことで、より正確な実現象を解明できる余地が残されている。今後はそれに取り組みつつ、火災崩落解析へつなげることで事件の全貌を明らかにすることを目指す。

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) ASCE/FEMA: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation, and Recommendations, (2002).
- 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の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, (2004), pp.39-46.
- 3) 日本建築学会 WTC 崩壊特別調査委員会: 世界貿易センタービル崩壊特別調査委員会報告書, (2003).
- 4) 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン: ASI-Gauss 法を用いた世界貿易センタービルの飛行機衝突解析, 日本建築学会 2005 年度大会(近畿)学術講演梗概集 B-1 構造 I, (2005), pp.327-328.

* 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.