

飛行機衝突時における高層建築物の動的挙動解析

Dynamic Behavior Analysis of High Rise Building due to Aircraft Collision

○学 佐々木 嗣音 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Zion SASAKI, Graduate School, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

1. 緒言

高層建築物の設計において、あらゆる状況下で崩壊に至らない設計を行うことが重要である。しかし 2001 年 9 月 11 日に起こった世界貿易センタービル(WTC)崩壊事件は、それまでの設計基準の安全性に疑問を投げかけた。今後新たな設計基準を確立していくにあたり、まずビルが崩壊に至った原因を特定することが急務である。既にいくつかの機関によって事件に関する調査や解析がなされ、飛行機衝突が構造物に与えた影響や崩壊を引き起こした要因等の検証結果が報告されている^{[1][2][3]}。しかし解析について言えば、行われたほとんどが局所モデルによるものである。飛行機の衝突が構造物全体をどのような応力状態に至らしめたかは分かっておらず、全体モデルを用いた動的解析による検証が必要である。

そこで本研究では WTC2 への飛行機衝突事件を対象として全体モデルを構築し、ASI-Gauss 法^[4]を用いて動的挙動解析を行った。本解法は骨組構造の衝突・崩壊問題に有効で、一般的な有限要素解析に比べ大幅な計算コスト削減が可能である。解法の詳細は他文献^[4]に譲り、本稿では解析によって得られた構造物全体の動的挙動および調査報告との比較について述べる。

2. モデル化と解析条件

図-1 に構築した WTC2 および B767-200ER 型航空機の解析モデル概観を示す。両者共に全て線形要素のみでモデル化した。

WTC2 全体モデルの構築は、建築学会による事件調査報告^[5]をもとに行なった。総要素数 604780、総節点数 435117 である。主に風荷重を支える外周部と自重を支える内周部が

らなるチューブ構造について、柱部材と外周はり部材の性状を層方向へ段階的に変化させ、H 型鋼、BOX 鋼、プレート鋼でモデル化した。これらチューブ構造を接続するはり部材については、内周コア部を H 型鋼 1 種で、内周構造と外周構造を接続する床部材を 4 種の H 型鋼でモデル化した。モデルの重量は、設計固定荷重 2890 MN と、許容積載荷重 740 MN の約 50% を負荷し、総重量 3240 MN とした。このうち鋼材を除いた重量差分を床部材の密度を増加させることで考慮している。ASI-Gauss 法を用いた解析システムでは、部材の破断を軸ひずみと曲率によって判定しているが、WTC2 で部材接合に多用されていたボルトの接合強度の相違を表現するため、破断臨界曲率値 κ_c の大きさをコア柱 > 外周柱 > はり部材と変化させている。

B767-200ER 型機のモデルは総要素数 4322、総節点数 2970、総自由度数 17820 である。モデル化に用いた部材断面形状は箱型で、材料定数は超々ジュラルミンの値を用いた。エンジン部材に関しては、エンジンの重量を考慮するため密度を増加させている。FEMA の報告書^[6]に基づいて、飛行機モデルの総重量を 142.5 t (内燃料を 30 t) とし、モデルの初期位置を衝突直前に飛行機の機首が東に 11.5°、鉛直下方向へ 5°、機体軸が 35° 回転した状態とし、速度 262 m/s で 81 階南面に衝突するものと仮定した。

解析条件は時間増分を 0.2 ms とし、ソルバーに共役傾斜法(CG 法)、非線形増分理論に Updated Lagrangian Formulation (ULF)、時間積分には Newmark の β 法(数値減衰を目的に $\delta=5/6$ 、 $\beta=4/9$ に設定)を用いた。

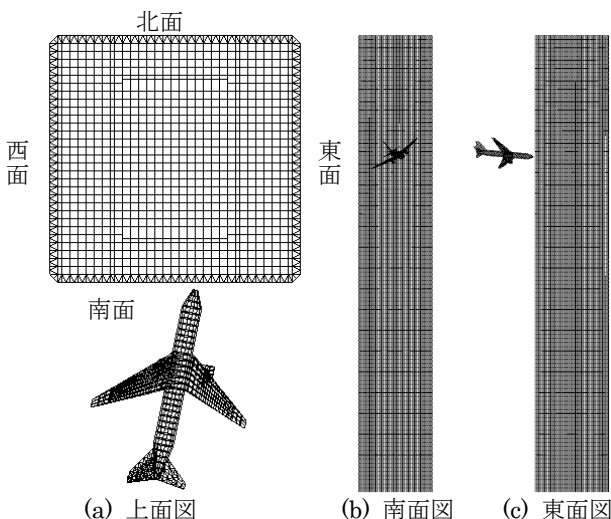


図-1 解析モデル

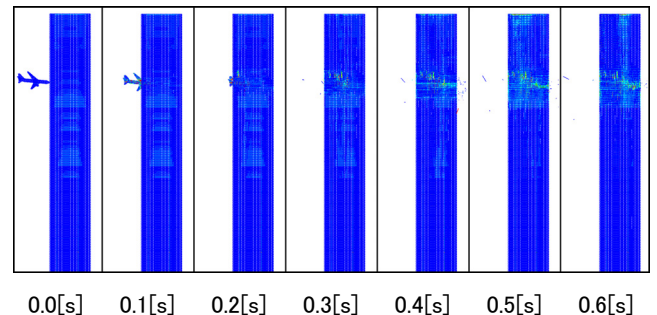


図-2 解析結果(全体図)

3. 解析結果

図-2 は解析結果を東面からの視点で全体を描画し、時系列で並べたものである。図-3 は同時系列で衝突の様子をビル上方からの視点で描画したものである。なお、描画の際に部材の応力状態を色の濃淡で表している。飛行機の衝突によって各部材の応力状態が瞬時に変化し、衝撃波が柱やはりを伝播して衝突部から離れた箇所まで及んでいるのが分かる。

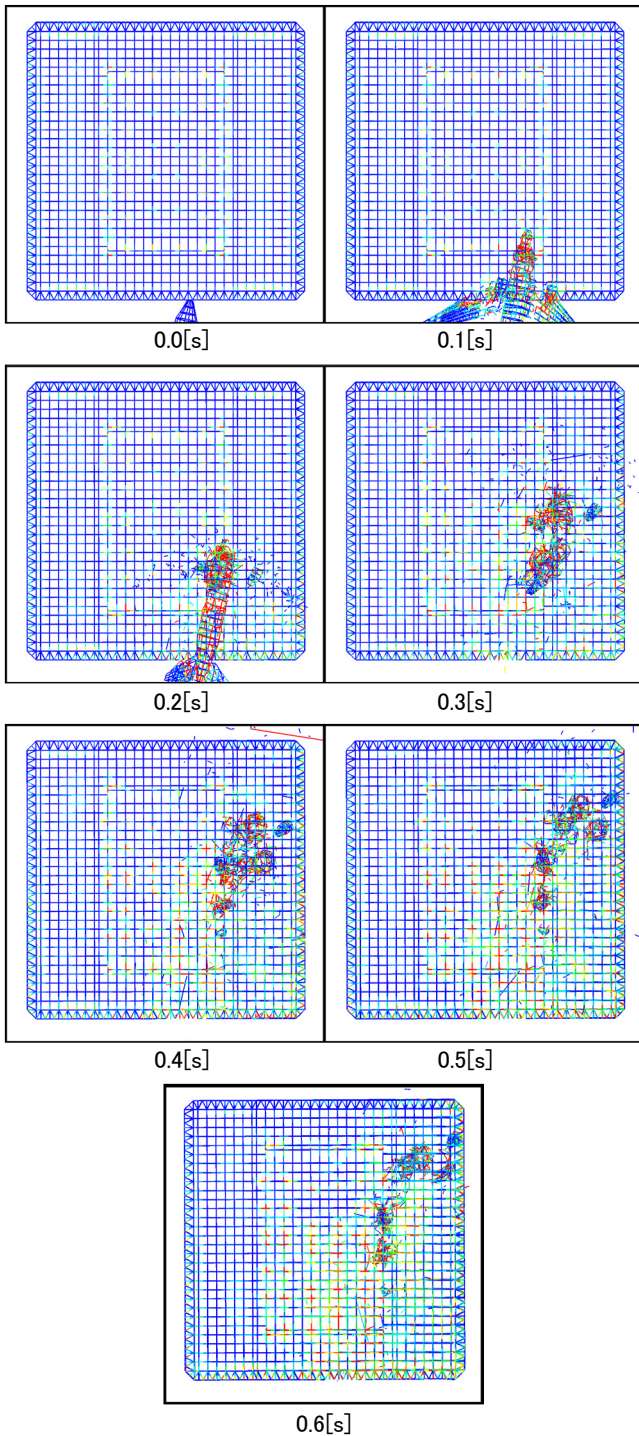
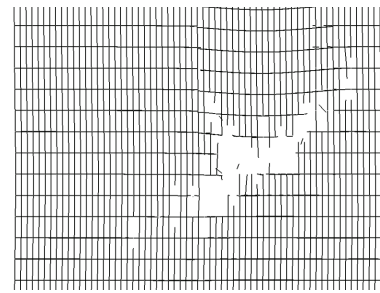


図-3 解析結果(上面図)

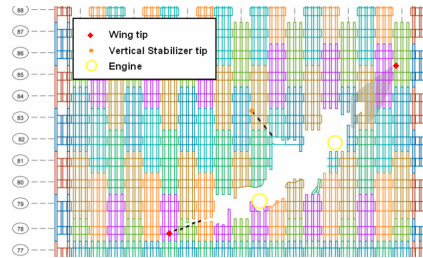
また、建物の応力配分が時々刻々変化する様子が観察できる。

衝突面の損傷状況を比較したものを図-4 に示す。(a)が解析結果から得られた損傷状況、(b)が調査機関による報告^[3]である。構造物に生じた損傷の様子が良好に一致した。

図-5 には、解析結果より得られた右エンジンの速度曲線を示す。なお、機体の衝突時をゼロ点としている。観測報告^[4]によれば、機体の衝突から約 0.6 s で右エンジンが建物を貫通し、落下した地点から算出した貫通時の速度が 55 m/s であるという。しかし解析において、0.6 s の時点では右エンジンは建物を貫通しておらず、速度も報告より 30 % ほど遅い結果となった。これは、衝突によってエンジンと接触する部材の破断臨界曲率 κ_c が若干大きかったためと考えられ、今後のさらなる検討が必要である。



(a) 衝突面の損傷(解析結果)



(b) 衝突面の損傷(報告^[3])

図-4 衝突面の損傷状況の比較

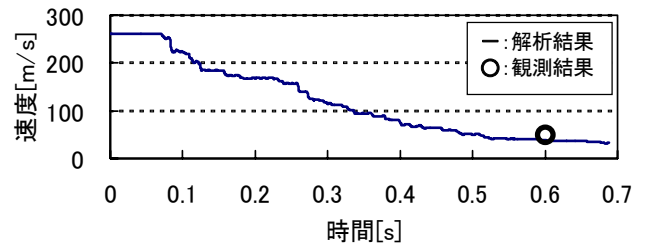


図-5 右エンジンの速度曲線

4. 結言

本研究では、高層建築物全体の動的挙動に焦点を当て、WTC2 への飛行機衝突解析を行った。その結果、衝突による衝撃波が構造物全体に伝播していく様子や、応力再配分が動的に起こる様子といった構造物全体に渡る動的挙動を捉えることができた。また、衝突面の損傷について、観測報告と良好に一致する結果も得られた。しかし、右エンジンの挙動が観測報告と一致しなかったため、今後、部材定数に関する詳細なデータのさらなる見直しが必要であると考えられる。

今後は、飛行機の衝突によって損傷した全体モデルを用いて火災崩落解析を行い、ビルが進行性崩壊に至った直接的な要因を探索していく予定である。

参考文献

- 1) ASCE/FEMA: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation, and Recommendations, (2002).
- 2) 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).
- 3) NIST NCSTAR 1: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Final Report of the National Construction Safety Team on the Collapses of the World Trade Center Tower, (2005).
- 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.