

WTCの崩壊要因究明を目指した航空機衝突シミュレーション

Aircraft Impact Simulation of the WTC tower for Investigation on True Cause of the Total Collapse

○ 磯部大吾郎¹⁾, 佐々木嗣音²⁾

Daigoro Isobe and Zion Sasaki

1) 工博 筑波大学大学院助教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

2) 工修 (株) サンケイエンジニアリング (〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜2-14-2)

Although some official statements have been reported from FEMA and NIST, the 9/11 tragedy of the New York World Trade Center (WTC) towers still remains as an unresolved mystery. The progressive collapse sequence of the towers was unnaturally rapid, and various theories regarding this issue have been deployed among engineers, scientists, and citizens. We sought the true cause of the collapse by performing full-model, dynamic collapse analyses of WTC towers due to aircraft collision. The numerical results show instant disconnections between the core columns and the main double trusses during the impact, and a spring-back phenomenon of the core columns due to a very rapid unloading is observed. The spring-back phenomenon is fatal enough to produce gigantic tensile force to the columns, which might have triggered some connections to become totally fractured, and thus, eventually, have led to a total collapse of the towers.

Key Words: World Trade Center Towers, 9/11, Dynamic Unloading, Spring-Back, ASI-Gauss Technique, FEM

1. はじめに

2001年9月の米国同時多発テロでは、2機の航空機がNY世界貿易センタービルのツインタワーに突入し、大規模な火災の末にビルが完全崩壊するという悲劇が起きた。事件の詳細な時系列およびビルの崩壊要因については、米国政府調査局のFEMA[1]が2002年に、NIST[2]が2005年に報告書としてまとめた。FEMAの報告書[1]では、ジェット燃料が広範囲に広がり、これによって生じた火災がコア構造の耐力を衰退させ、結果的に全体崩壊を引き起こしたとしている。NISTの報告書[2]では詳細なモデルによる数値解析が行われ、大規模火災が生じなければ、あるいは耐火被覆に被害がなければ崩壊が生じなかった可能性もある、と結論付けている。しかし、いずれの報告書でも、ツインタワーがコア構造までを含めて地上まで完全に倒壊してしまった直接的な要因については詳細な考察や検討がなされておらず、未だに多くの疑問が残っているのが現状である。

筆者らは、航空機の衝突そのものが完全崩壊の要因となった可能性を検討するため、WTC 2の全体モデルを用いた航空機衝突解析を実施し、衝突の瞬間におけるタワー全体の挙動の再現を試みた。その中で、ツインタワーの真の崩壊要因を示唆するような結果が出るに至ったのでここに報告する。

2. 解析手法とモデル

解析では、大規模骨組構造の構造解析において最小限のコストで計算が可能である、ASI-Gauss法[3]を基に独自開発した有限要素解析コードを使用した。全体モデルは、調査報告書[1,2]の情報を基に、可能な限り忠実に構造部材の選定および配置を行い、タワー全体と航空機を線形要素で構築した。WTC 2モデルは総要素数604780、総節点数435117である。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、プレート鋼で構成した。タワービルの断面形状は、外周部が風荷重を受け持ち、内側のコア構造と外周部を連結するダブルトラス材が床荷重を支え、これをコア構

造に伝達する構造となっている。タワー全体に設計固定荷重2890MNと許容積載荷重740MNの約40%を自重として作用させ、コア構造と外周構造におよそ6:4の割合[1]で負荷がかかるように設定した。

航空機モデルは総要素数4322、総節点数2970である。航空機モデルに用いた部材断面形状は箱型で、材料には超々ジュラルミンを用いた。エンジンについては、その重量を考慮するため密度を増加させた。タワー突入時の姿勢や速度に関しては様々な情報があるが、ここでは報告書[1]に基づいて総重量を142.5t(うち燃料は30t)とし、モデルの初期位置を機首が東に11.5°、鉛直下方向へ5°、機体軸が35°傾倒した状態とし、速度262m/sで南面81階に衝突するものと仮定した。

WTCタワービルの柱の継手は主に板厚34mmのエンドプレート方式で、接合部には4~6本のボルト接合が施されていた。そのため、この接合部は曲げ、せん断力に対して弱く、その耐力は、柱の曲げ塑性耐力の20%から30%程度とされている[1]。ダブルトラスなどのはり接合部についても、同様に簡易な接合方式が採られていた。日本の建物では部材と同等の強度が接合部に求められており、その観点ではWTCは比較的脆弱であったと言える。現段階では以下のような破断判定式を解析に取り入れ、接合部の脆弱性を表現している[3]。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{fx}} \right| - 1 \geq 0 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{fy}} \right| - 1 \geq 0 \quad \text{or} \quad \left(\frac{\epsilon_z}{\epsilon_{fz}} \right) - 1 \geq 0 \quad (1)$$

ここで、 κ_x , κ_y はx, y軸回りの曲率、 ϵ_z は引張り軸ひずみ、 κ_{fx} , κ_{fy} , ϵ_{fz} はそれぞれの破断臨界値である。動的加力下の破断臨界値については信頼できるデータが存在しないため、実際の解析では、衝突部の被害状況およびエンジンの動きを観測情報と比較することで、適切と思われる値を設定した。また、降伏応力に対するひずみ速度の影響を考慮し、解析のソルバーには共役傾斜法(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, 時間増分を 0.2 ms とした. HPC (1.4GHz Itanium×2, 8GB RAM) による計算時間は約 2 ヶ月であった.

3. 解析結果

航空機衝突時の全体図を図 1 に, 機体およびエンジンの衝突タイムラインを表 1 に示す. また, コア柱 2 本について, 1 階から 110 階まで 10 階おきの箇所に作用する軸力の推移を図 2 に示す. 航空機の機首がコア柱に到達する(図の①)までは自重の作用で一定の圧縮軸力が発生しているが, それ以降は, 柱の破断に起因する“うねり”が水平および鉛直方向へと伝播する. 特に, 衝突によって破断した柱(柱番号 1001)の衝突階より上の箇所では軸力の作用が瞬時になくなり, ゼロ近辺で小さく振動する. 衝突階より下の箇所では, 左エンジンがコア構造に接触(図の③)した後に軸力が急速に引張り側に転じ, 大振幅で振動を始める. 自重による圧縮軸力の大きさを見ても分かるように, この引張り力は非常に大きい. しかも注目すべき点は, 下層階になるほどその絶対値が大きいことである. 上層階が切り離されたのみでは, これほど大規模な除荷は起こらないはずである. またその結果, 例えば 1001 番のコア柱には, 60 階付近で 0.2 s の間に約 25 cm もの上下動が生じていた.

大きな引張り力と変位が柱に生じた原因を探るため, ダブルトラス接合部の破断箇所の推移を調べた. その結果, 81 階付近から破断箇所が上階, 下階へと伝播し, 時には屋上階やロビー階で別の柱に反射し, 次々とダブルトラス接合部を破壊している様子が観察された. つまり, 次のような現象が起きたものと思われる. コア柱にはダブルトラスを介して床荷重がかかっていたが, 航空機の衝突で一部のダブルトラスが破壊されたために応力再配分が行われ, コア柱に中規模の除荷が生じた. その除荷による変形で他のダブルトラス接合部が破断し, コア柱がさらに除荷された. このようなダブルトラス接合部の破断とコア柱の除荷が連鎖反動的に起こり, 数多くのコア柱に, 圧縮されていたバネが解放されて跳ね上がるようなスプリングバック現象が起きた. これは, 設計段階で引張り力が作用することを想定していないコア柱の接合部にとっては, 致命的な作用である. 特に下層階になるほど引張り力は大きく, 接合部の被害が大きかったものと思われる. つまり WTC 2 は, 航空機が衝突した瞬間, すでにきっかけがあれば簡単に倒壊してしまうような“積み木”状態に達していた可能性があるのである.

4. おわりに

今回の解析で用いた接合部の力学特性には仮定や推論が多く, 厳密な取り扱いをしたとは言えない. そこで現在, 部材接合部自体の強度と破断臨界値を陽に取り入れた解析を進め, 引き続き多角的な視点から航空機衝突の影響を調査している.

参考文献

- [1] ASCE/FEMA, World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation and Recommendations, 2002.
- [2] NIST NCSTAR 1, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2005.

- [3] K.M. Lynn and D. Isobe, Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol.69, No.12, 2007, pp.2538-2563.

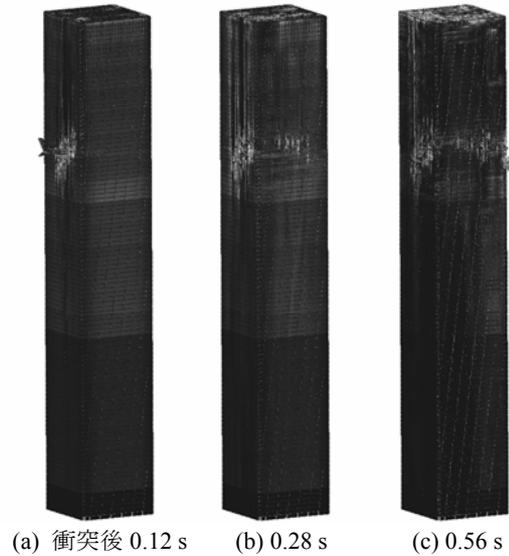
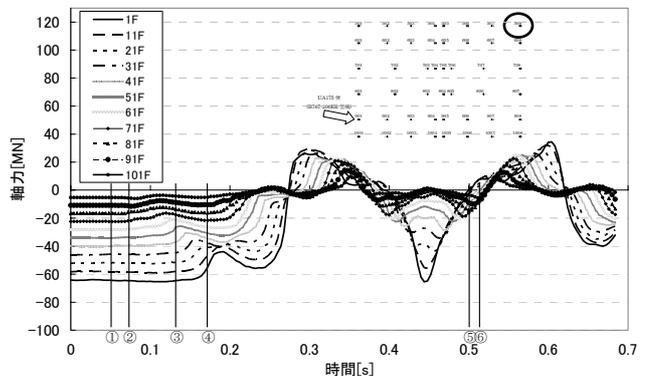


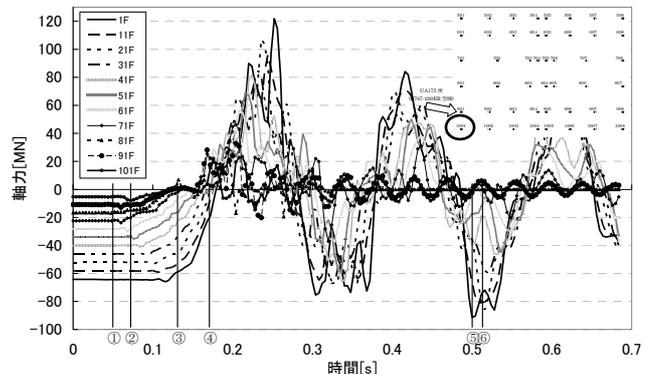
図 1 解析結果 (明色は降伏関数値大を表す)

表 1 機体の衝突タイムライン

時間 [s]	機体の部位		
	左エンジン	右エンジン	機首
0	機首が外周壁に接触		
① 0.048			コア構造に接触
0.072	外周壁に接触		
② 0.076		外周壁に接触	
③ 0.128	コア構造に接触		
④ 0.168		柱902に接触	
⑤ 0.504	柱903に接触		
⑥ 0.512		進行方向右の外周壁に接触	



(a) コア柱 (番号: 508)



(b) コア柱 (番号: 1001)

図 2 コア柱に作用する軸力の推移