

航空機衝突時の WTC ビルの動的挙動について

正会員 ○磯部 大吾郎*

WTC ビル	衝突解析	動的挙動
ASI-Gauss 法	有限要素法	

1. 緒言

2001 年 9 月のニューヨーク世界貿易センター (WTC) ビルの完全崩壊は、建築史上未曾有の出来事である。一連の調査結果は FEMA[1]によって 2002 年に、NIST[2]によって 2005 年に報告書としてまとめられた。いずれの報告書でも、大規模な火災による柱の耐力衰退が直接的な完全崩壊の要因であるとする公式見解を記しているが、この見解に疑問を抱く研究者、技術者は少なくない。

筆者らは現在、高層建築物の構造強度に与える大規模火災の影響、接合部強度の影響などを取り入れた数値解析を行い、多角的な視点から完全崩壊の要因について調査している。中でも、航空機が衝突したことによる動的作用が完全崩壊の直接的要因として働いた可能性を探るため、WTC ビルの全体モデルを用いた航空機衝突解析を実施している。その途中経過として、航空機衝突時の WTC2 号棟の動的挙動について興味深い知見が得られたので、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 2890 MN と許容積載荷重 740 MN 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 142.5 t (うち燃料は 30 t) 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 262 m/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 ビル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

解析結果を図 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、四隅のコア柱のうち、突入した機首に一番近い柱 (柱番号: 1001) 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。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

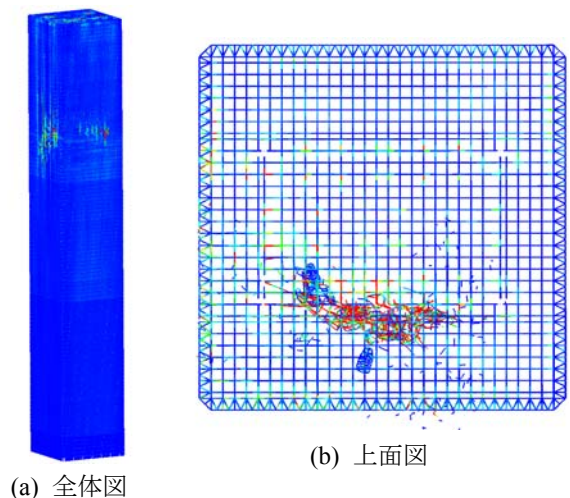


図-1 解析結果 (衝突後 0.28 s)

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		

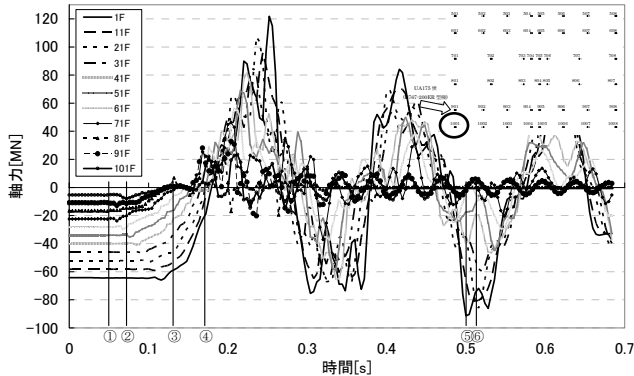


図-2 コア柱(No.1001)に作用する軸力の推移

向へと伝播する。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0.2sの間に約25cmもの上下動が生じていた（図3参照）。

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。図4に示すように、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ことが考えられる。コ

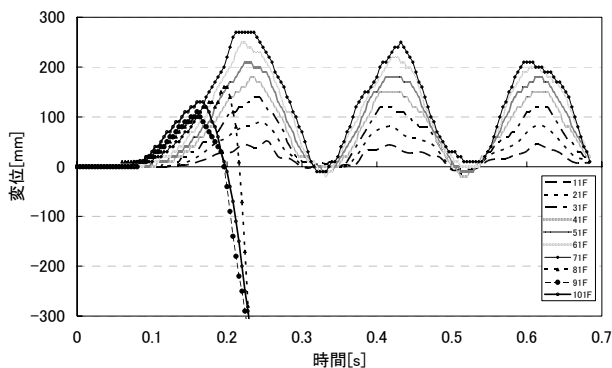


図-3 コア柱 (No.1001) の軸方向変位

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応的に起こり、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可能性がある。

4. 結言

接合部の力学特性を建物の崩壊解析に取り入れることは大変重要であり、実験および理論解析を含め、今後のこの分野の発展が望まれる。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、引き続き航空機衝突の影響を検証している。

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（研究代表者：筑波大学鈴木弘之教授，課題番号：16206055）から一部援助を得た。また、卒業生の佐々木嗣音氏には解析と図の作成などで多大なる貢献を受けた。併せてここに謝意を表す。

参考文献

- 1) ASCE/FEMA, World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation and Recommendations, 2002.
- 2) 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.

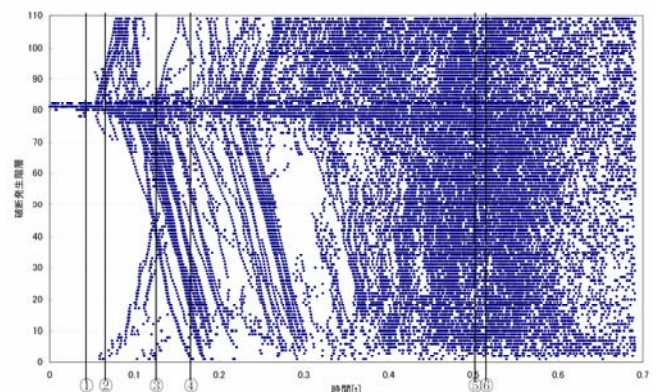


図-4 ダブルトラス接合部破断箇所の推移