

世界貿易センタービルのリダンダンシーに関する数値解析的研究

A Numerical Research on Redundancy of the World Trade Center Towers

○非 久永 哲也 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Tetsuya HISANAGA, 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

2001年9月11日、テロによってニューヨーク世界貿易センター(WTC)ビルが完全崩壊したことは、人々に衝撃を与えた。その際に崩壊したWTC2は、飛行機衝突から崩壊までに1時間弱を要した。米国政府調査局であるFEMA[1]とNIST[2]がまとめた報告書によると、風荷重に対する補強システムとして設置されたアウトリガートラスシステムが応力伝達経路を確保することとなり、リダンダンシーが生まれ、崩壊までの時間を稼ぐのに有効であった可能性を示唆している。

本研究の目標は、衝突から崩壊までの一連の事象を検証することである。現在、飛行機の衝突時におけるアウトリガートラスシステムの作用や全体挙動に与える影響を検証するため、WTC全体モデルの飛行機衝突解析を行っている。その後、衝突解析で得られる破壊されたモデルに火災を発生させることで、アウトリガートラスシステムの効果を検証することが可能となる。解析にはASI-Gauss法[3]を用いる。本手法は、骨組構造物の衝突崩壊解析を行う場合に有効な手法の1つであり、通常の有限要素法に比べ格段に少ない要素数で、高精度の収束解が得られる順応型Shifted Integration(ASI法)[4]を改良し、弾性解の精度を向上させたものである。

本稿では、風荷重の载荷による静的解析を行い、風荷重下におけるアウトリガートラスシステムの効果を検証する。

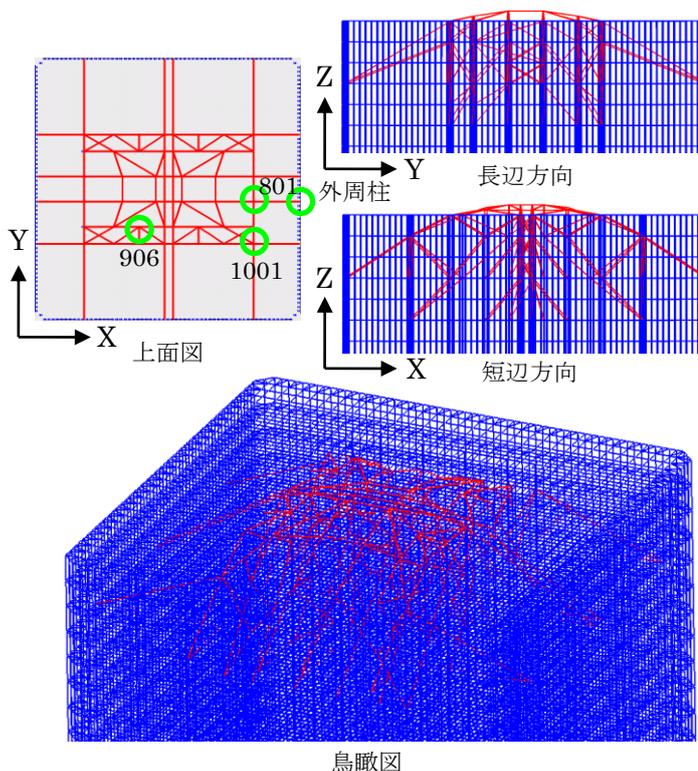


図1 アウトリガートラスシステムのモデル化

2. 降伏関数

解析に際し、要素の塑性状態を決定するために、以下の降伏関数 f_y を用いる。また、接合部の脆弱性を表現するため、降伏関数には接合部強度係数 $C_M(0.0\sim 1.0)$ を導入した。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{C_M \times M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{C_M \times M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (1)$$

ここで M_x 、 M_y は x 、 y 軸方向の曲げモーメント、 N は軸力を表しており、下添字“0”は、各断面力成分が単独で部材断面に作用した場合の全断面塑性値であることを示す。

3. 解析モデルの構成

モデルの各部材の決定は日本建築学会による報告[5]を基本とし、FEMAやNISTによる報告も参考にした。WTCの構造的特徴として、外周部とコア部からなるチューブ構造であることが挙げられる。そして外周部とコア部を繋ぎ、風荷重に抵抗するためのアウトリガートラスシステムが上層部に設置されている。コア部は建物重量の約60%の鉛直荷重を支持し、外周部は鉛直荷重の残り約40%の支持と水平力に対する抵抗を受け持つ。コア柱の接合はエンドプレートでボルト接合するものであり、その曲げ強度は部材の20~30%とされている[1]。これを表現するために、上記の接合部強度係数 C_M を0.3とした。外周柱はボルト接合、下層部においては補強溶接を行っていた。

解析にASI-Gauss法を用いるため1部材を2要素で表現した。モデルの全要素数は605314、全節点数は435394である。アウトリガートラスシステムを形成しているブレースは106階から110階に設置され、短辺方向に6フレーム、長辺方向に4フレームある。上部には、四辺からの力を伝えるため、四辺と中央を結ぶブレースや109階から110階にかけて斜め方向にブレースが入っている。図1にWTCモデルの上層部の長辺方向・短辺方向・上面図・鳥瞰図を示す。アウトリガートラスシステムを赤色で示している。

4. 自重解析

構築したモデルに自重を载荷する解析を行った。その結果を図2に示す。図示する柱は図1の上面図に示す柱801と1001である。他の構造と同時にアウトリガートラスシステムを設置し自重解析すると、特に上層部の内力の値に不自然なばらつきが見られる。これは、実際には後付け施工であるアウトリガートラスシステムを初めに設置してしまうことで、建物の自重によりブレース接合部間に内力が発生してしまうからである。本来、初期状態のブレースには内力はなく、接合される柱などにも影響を与えないはずである。そこで、この不自然な挙動を是正するために、初めにアウトリガートラスシステム以外の構造自重を計算し、その後、アウトリガートラスシステムの自重を载荷した。その結果、上層部の内力値のばらつきはなくなった。以後は、他の構造に対しアウトリガートラスシステムを後付けする形で解析を行う。

5. 風荷重解析

WTC 設計荷重である風荷重 220 kg/m^2 を一様に建物全高さにわたり与え[6] 静的解析を行った。図 3 にアウトリガートラスシステムの有無による降伏関数値の変化をコンター図で示す。カラーレンジは降伏関数値を表しており、ここではその最大値を 0.05 としている。図 3(a)は風荷重を載荷する前の自重載荷時のもの、図 3(b)は風荷重載荷時のものである。風荷重は矢印に示すように X 軸方向に与えた。図 3 より、アウトリガートラスシステムを設置した方が外周部における降伏関数値が若干大きくなっていることがわかる。

次に、軸力・曲げモーメントの分布を求めた。図 4, 5 に各階の軸力分布、図 6, 7 に各階床部の曲げモーメント分布を示す。各値は、それぞれの全断面塑性値で割ることで無次元化したものであり、図 1 の緑色の印で示すコア柱 906 と外周柱のものである。図 4, 5 から分かるように、下層部ではアウトリガートラスシステムの有無による軸力変化は微小であるが、上層部では風荷重載荷時にコア柱に対する軸力の負担が増している。一方、外周柱での負担は若干減少している。本来は風下側の負担が増すところを、システムが風上側へ効果的に軸力を分散させていることが分かる。また、図 6, 7 の曲げモーメント分布は、外周柱ではほとんど差異が認められないが、上層部のコア柱において大きな変化が見られる。特に風荷重載荷時には、アウトリガートラスシステムが上層部の曲げモーメント緩和に貢献していることが分かる。全体的に、システムが存在することで上層部の剛性が増し、特に風上側・上層部のコア柱において内力分布が変化し、風下側の負担を軽減させていることが分かった。

6. 結言

本稿では、WTC 全体モデルの自重および風荷重に対する静的解析を行った。アウトリガートラスシステムを WTC 本体の自重解析の後に考慮することで、上層部における軸力や曲げモーメントのばらつきが解消された。風荷重に対する剛性を建物に付与するために設置したとされるアウトリガートラスシステムの効果は、柱の位置によって異なるが、確かに存在することが確認できた。特に風下側から風上側へ軸力を分散させる効果は絶大で、恐らく 9.11 の際も、航空機の衝突に伴う損傷を避けるような応力伝達経路が自然に生まれたことは、容易に想像できる。今後は、WTC モデルに対し飛行機衝突解析を行い、その際のアウトリガートラスシステムの存在有無による内力変化、建物本体へのリダンダンシーの寄与がどの程度あるのか調べる予定である。

参考文献

- [1] ASCE/FEMA : World Trade Center Building Performance Study, (2002).
- [2] NIST : Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Towers, (2005).
- [3] 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.
- [4] 都井 裕, 磯部 大吾郎: 骨組構造の有限要素崩壊解析における順応型 Shifted Integration 法, 日本造船学会論文集, 第 171 号, (1992), pp.363-371.
- [5] 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).
- [6] 鋼構造デザイン資料集成 階層建築の実例と紹介 世界貿易センタービル, 鹿島出版, (1978), pp.162-164.

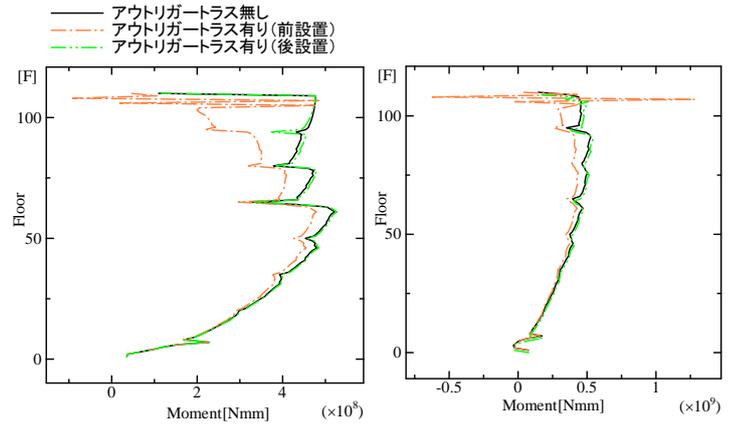


図 2 アウトリガートラスの設置順序による内力分布の相違

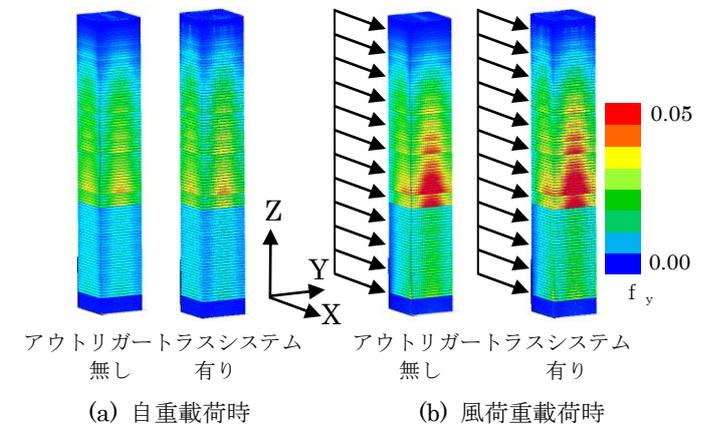


図 3 降伏関数値の変化

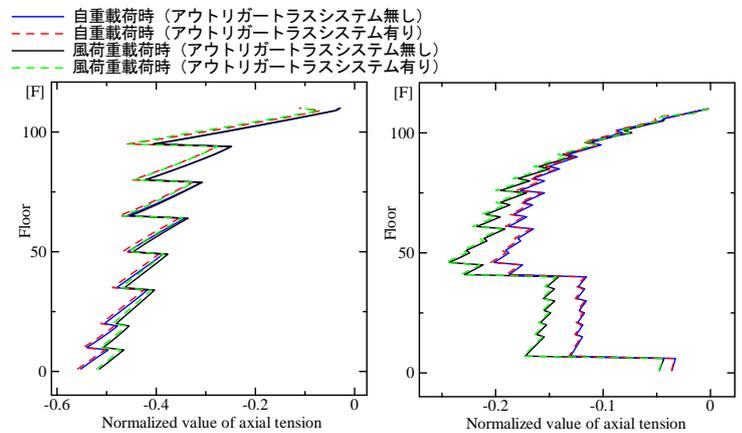


図 4 柱 906 の軸力

図 5 外周柱の軸力

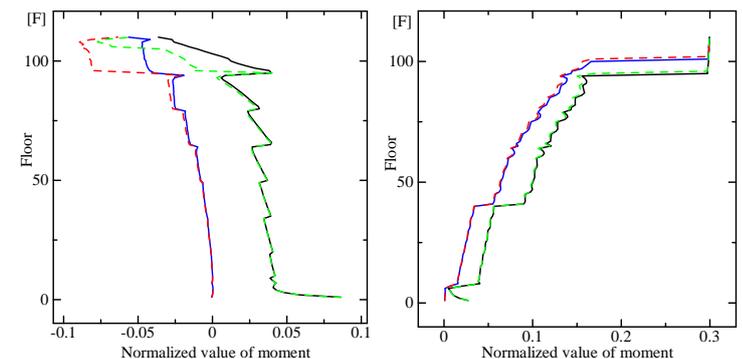


図 6 柱 906 の曲げモーメント

図 7 外周柱の曲げモーメント