

# WTCのリダンダンシーに関する検証解析

## Analytical Verification on Redundancy of the World Trade Center Towers

恩田 江理<sup>1)</sup>, 久永 哲也<sup>2)</sup>, 磯部 大吾郎<sup>3)</sup>

Eri Onda, Tetsuya Hisanaga and Daigoro Isobe

- 1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, e0611326@esys.tsukuba.ac.jp)
- 2) 九州電力株式会社
- 3) 博 (工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

At the September 11, 2001 incident, the New York World Trade Center (WTC) towers did not collapse immediately after the aircraft impacts. It was generally reported that the outrigger truss systems placed on roof tops made structural redundancy and helped elongating the collapse initiation times of the towers. In this paper, ASI-Gauss technique is applied to an aircraft impact analysis to investigate the redundancy produced by outrigger truss system at the moment of impact. It is shown that the outrigger truss system had clearly affected the redundancy of the WTC tower under dynamic load particularly in upper floors.

**Key Words:** ASI-Gauss technique, WTC tower, Redundancy, Outrigger truss system

### 1. はじめに

2001年9月の米国同時多発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、世界中を震撼させた。その際に崩壊したWTC2は航空機衝突後から崩壊までに1時間を要し、崩壊の進行速度は自由落下速度に近かったことが観測されている。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、WTCビルが崩壊した主な要因は、航空機が積んでいたジェット燃料に引火し発生した火災による建物の耐力低下であるとしているが、風荷重に対する補強システムとしてビル上層部に設置されたアウトリガートラスシステムにより応力伝達経路が確保され、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も示唆している。しかし、航空機衝突時のように、瞬時に動的な力が加わった場合に、アウトリガートラスシステムがどのような働きをしたのかについては検証されていない。

本研究の目的は、航空機衝突時におけるアウトリガートラスシステムの作用や建物全体の挙動に与える影響を数値解析により検証することである。使用するモデルには線形要素を用い、少ない要素分割数で高精度な解が得られるASI-Gauss法[3]を適用し、WTC2の航空機衝突解析を実施した。

### 2. 解析手法

#### (1) ASI-Gauss 法

解析には、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。本手法は、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法 (ASI法) [4]を改良し、弾性域での解の精度を向上させたものである。

#### (2) 部材破断判定

本解析で使用する部材破断判定式には、部材を構成する各要素の曲率、引張軸ひずみおよびせん断ひずみによる次式を用いた。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1 \quad (1)$$

$$\left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \quad \text{or} \quad \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1$$

ここで、 $\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$  は要素における  $x$  軸・ $y$  軸回りの曲率、引張軸ひずみ、 $x$  軸・ $y$  軸方向のせん断ひずみであり、添字 0 は破断臨界値であることを示す。これらの破断臨界値は実験結果[5]などから入手できるため、信頼性の高い判定を行うことが可能である。

#### (3) 要素接触アルゴリズム

次に、本研究で使用した要素接触アルゴリズム[6][7]について述べる。接触判定には内分ベクトル型アルゴリズムを用いた。この手法では、例えば図1における2つの要素を2つの線分と考え、それぞれの要素の中点間距離  $l$  と2つの要素の平均長  $l'$  を計算し、 $l < l'$  となったとき、衝突要素の近傍に他の要素が存在するとみなし、図2のように衝突要素に垂直な平面に他方の要素を投影する。そして、線分  $A_1A_2$  と線分  $B_1B_2$  との最短距離をとる内分点  $M$  を次式により導出する。

$$(x_M, y_M, z_M) = \frac{n(x_1, y_1, z_1) + m(x_2, y_2, z_2)}{m + n} \quad (2)$$

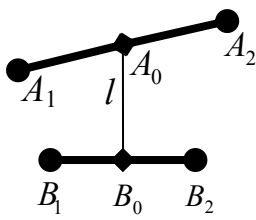


図1 要素の midpoint 間距離

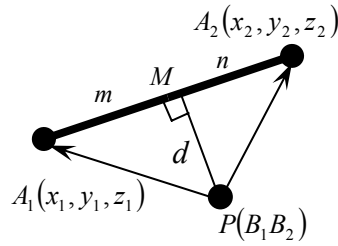
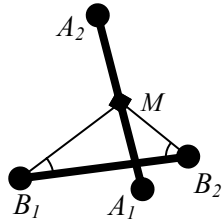
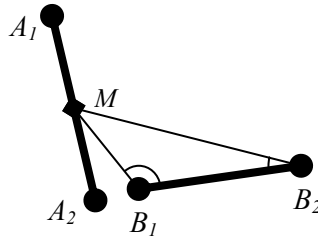


図2 衝突要素  $B_1B_2$  と被衝突要素  $A_1A_2$  間の最短距離



(a) 要素の位置関係 (鋭角)



(b) 要素の位置関係 (鈍角)

図3 角度による接触判定

ここで  $(x_M, y_M, z_M)$  は内分点  $M$  の座標,  $(x_1, y_1, z_1)$  および  $(x_2, y_2, z_2)$  は端点  $A_1, A_2$  の座標である. 次に図3のように衝突要素  $B_1B_2$  をなす2節点  $B_1, B_2$  と線分  $A_1A_2$  の内分点  $M$  の3点からなる三角形を考える.  $\angle MB_1B_2$  および  $\angle MB_2B_1$  が鋭角か鈍角かを次式に従って調べる.

$$\overline{B_1M}^2 \leq \overline{B_2M}^2 + \overline{B_1B_2}^2 \quad (3)$$

$$\overline{B_2M}^2 \leq \overline{B_1M}^2 + \overline{B_1B_2}^2 \quad (4)$$

式(3), (4)がどちらも満たされた場合, 図3(a)のように  $\angle MB_1B_2$  および  $\angle MB_2B_1$  はどちらも鋭角となり, 2要素は接触していると判定され, 節点間を計4本のギャップ要素で結ぶ.

#### (4) 再接触アルゴリズム

次に, 再接触アルゴリズムについて述べる. これには接触した要素の組を拘束するギャップ要素を解除する処理, そして再び同じ組での接触を表現する処理が含まれる. 1組4本のギャップ要素に蓄積されている要素座標系  $x$  軸・ $y$  軸回りの曲げひずみエネルギー和  $BSE$  を次式に従って計算する.

$$BSE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \{ \sigma_j \}_i \{ \varepsilon_j \}_i L_i \quad (5)$$

ここで,  $\{ \sigma \}$  は一般化応力ベクトル,  $\{ \varepsilon \}$  は一般化ひずみベクトル,  $L$  はギャップ要素長である. この式で得たギャップ要素の曲げひずみエネルギーが最小になったときに解除するのが理想的であるが, ギャップ要素の曲げひずみエネルギーは細かく振動する傾向があり, 最適なタイミングで接触を解除することは困難である. そこで, ギャップ要素の曲げひずみエネルギーと連動しており, 値の

振動の少ない変位情報を用いることにした. ここで述べている変位情報とは, ギャップ要素によって拘束させている4つの節点の接触開始ステップから現ステップまでの相対変位値である. この情報を用いて次式に従って相当変位  $|u|$  を計算する.

$$|u| = \sum_{i=1}^4 \left\{ \sqrt{(X_i + \Delta X_i)^2 + (Y_i + \Delta Y_i)^2 + (Z_i + \Delta Z_i)^2} \right\} \quad (6)$$

$X_i, Y_i, Z_i$  はそれぞれ接触開始から現在までの全体座標系  $X, Y, Z$  方向の変位,  $\Delta$  は増分を表す.  $|u|$  がその最大値のある割合以下になったとき接触を解除する. この割合を接触解除判定比と定義し, 今後の解析に用いる. ただし,  $|u|$  の最大値が一定の値以下では接触を解除しない」とする下限値を設定し, 非常に弱い接触において過度に判定を繰り返さないように処理した.

さらに, 接触解除後すぐに接触判定を行うと, 解除した瞬間に再接触する可能性がある. これでは跳ね返りが表現できないため, 接触解除後一定時間は接触しないよう接触回避時間を設定した. この接触回避時間は, 接触解除判定比の割合に比例して大きくする必要がある.

接触解除判定比と下限値, 接触回避時間を適切に設定し, 最適な位置で接触を解除した場合, 再び内分ベクトル型接触アルゴリズムを通る. これを繰り返すことで何度でも接触表現が可能となり, 部材の跳ね返りや部材同士の重なりが再現できる.

### 3. 解析モデルの構成

モデルの各部材の決定には日本建築学会による報告[8], 並びにFEMAやNISTによる報告書[1][2]を参考にした. 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た. コア部は建物重量の約60%の鉛直荷重を支え, 外周部は残りの約40%の重量支持と水平力に対する抵抗を受け持っていた. コア柱の接合はエンドプレートでボルトで接合するものであり, その曲げ強度は部材の20~30%であった[1]. この接合部の脆弱性を表現するために, 以下の降伏関数  $f_y$  に接合部強度係数  $C_M$  を導入し, その値を0.3とした.

$$f_y = \left( \frac{M_x}{C_M M_{x0}} \right)^2 + \left( \frac{M_y}{C_M M_{y0}} \right)^2 + \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (7)$$

ここで,  $M_x, M_y$  は  $x, y$  軸回りの曲げモーメント,  $N$  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.

解析にASI-Gauss法を用いるため1部材を2要素で表現した. WTCビル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階にかけて斜めの方向にブレースが入っている．

#### 4. 航空機衝突解析

WTC 全体モデルにアウトリガートラスシステムを付加したモデル[9]を作成し，衝撃的な破壊が生じた際の，アウトリガートラスの有無による軸力や変位の変化を調べるために，航空機衝突解析を行った．本解析において時間増分は 0.2ms とし，計算時間短縮のために，建物の要素同士・航空機の要素同士のように，全体の挙動に大きな影響を与えないものと思われる接触は考慮しないものとした．衝突の様子を図 4 に示す．航空機の機首が 81 階外壁に衝突し，破壊しながら WTC 内へ侵入する．0.048s で機首が図 5 に示すコア柱 901 に接触し，その後柱 901 は 81 階部分で破断する．

衝突開始から 0.100s までの柱 901 の 101 階での軸力推移を図 6 に示す．アウトリガートラスシステムを設置したモデルでは，その重量分だけ下方へシフトしている．まず，衝突開始直後から 0.07s 近辺までの間では，アウトリガートラスシステムを設置していないモデルでは外壁が破壊された際に圧縮力が増しているが，アウトリガートラスシステムを設置したモデルではあまり変化が見られない．次に，0.07s 近辺以降の軸力推移を見ると，アウトリガートラスシステムを設置したモデルは設置していないモデルと比べ，変動幅が比較的小さいことが分かる．

次に，破断していないコア柱に対するアウトリガートラスシステムの影響を調べるために，図 5 に示す柱 701，1001，1004 について上層階と下層階の軸力推移の検証を行った．まず，上層階（101 階）での各コア柱の軸力推移を図 7 に示す．この場合にも，アウトリガートラスシステムを設置しているモデルでは，設置していないモデルに比べ軸力の変動幅が小さくなっている．次に，下層階（41 階）での各コア柱の軸力推移を図 8 に示す．下層階のコア柱では，どちらのモデルの場合でも軸力の変動幅に大きな差が見られないことが分かる．

以上のことから，アウトリガートラスシステムが設置されたことによりリダンダンシーが生まれ，上層階においては軸力を分散していることが分かった．これに対し，

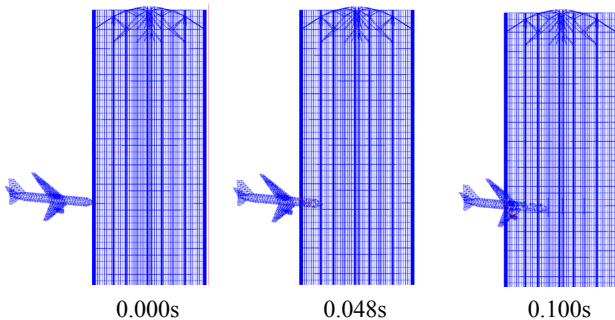


図 4 航空機突入の様子

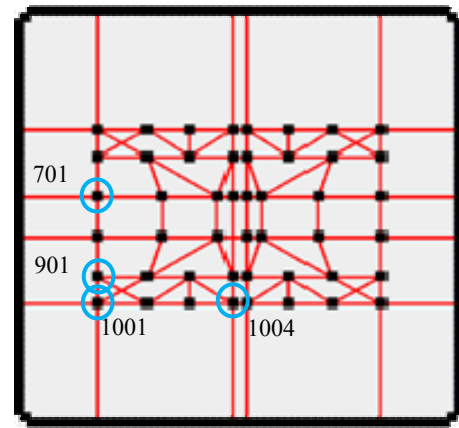


図 5 コア柱の配置

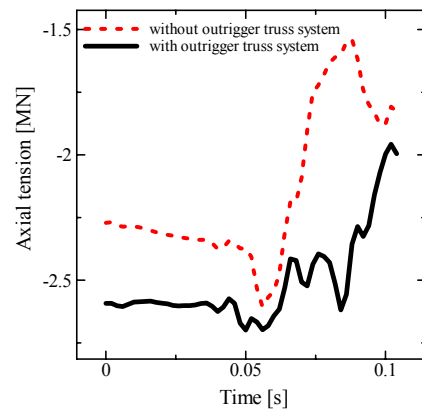
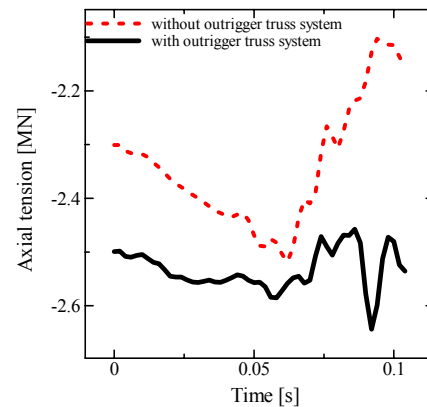
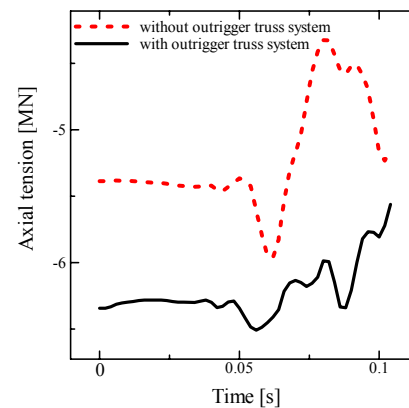


図 6 101 階における柱 901 の軸力推移



(a) 柱 701



(b) 柱 1001

図 7 101 階における軸力推移

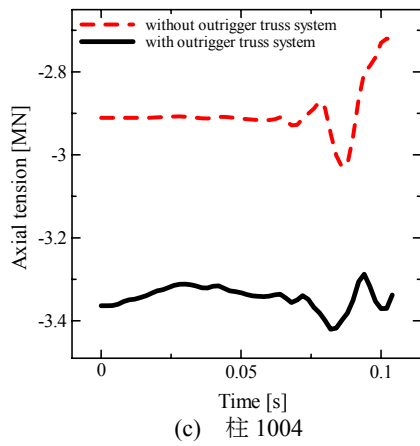


図7 101階における軸力推移(続き)

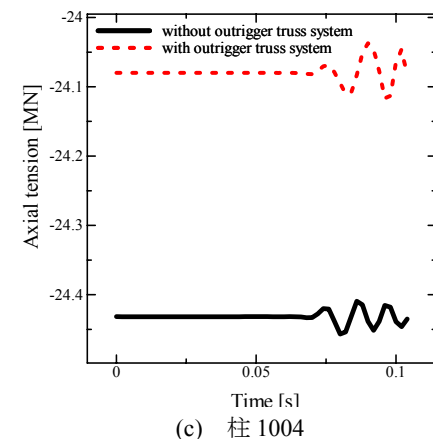
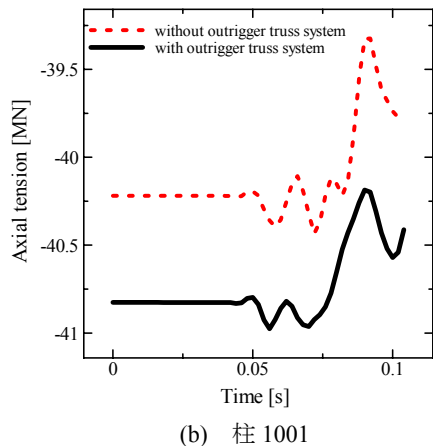
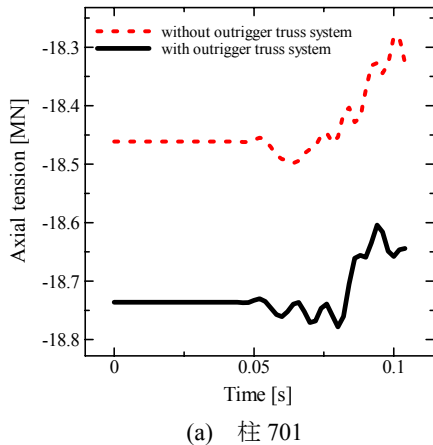


図8 41階における軸力推移

下層階ではアウトリガートラスシステムによるリダンダンシーの効果はあまり見られなかった。

## 5. おわりに

本稿では、WTC全体モデルの航空機衝突に対する動的解析を行い、アウトリガートラスシステムがもたらす影響について検証した。その結果、アウトリガートラスシステムを設置しているモデルの方が、設置していないモデルと比較して上層階においては軸力の変動が小さいことが確認できた。しかし、下層階においては両モデルの軸力変動幅に差がなかった。つまり、動的な外力に対し、上層階においてはアウトリガートラスシステムの応力再配分能力が発揮されたものの、下層階においてはあまり効果がなかったものと考えられる。

本研究の最終目標は、航空機衝突から崩壊までの一連の挙動を検証することである。今後は、航空機が建物の構造を破壊していく過程を知るために引き続き解析を行い、機体貫通後においてもアウトリガートラスシステムの有無によるリダンダンシーへの影響を検証する予定である。

## 参考文献

- 1) ASCE/FEMA, World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation and Recommendations, 2002.
- 2) 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 Collapse of the WTC Tower, 2005.
- 3) 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 航空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.309-317.
- 5) 濱田直之, 他: 高力ボルト継ぎ手の耐火性に関する実験的研究(高力ボルト梁継ぎ手の高温時における純曲げ実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, 2006, pp. 105-110.
- 6) 久永哲也, 磯部大吾郎: ASI-Gauss法を用いた衝突崩壊解析コードにおける破断・接触アルゴリズムの検討, 日本建築学会2008年度大会(中国)学術講演梗概集B-1, 2008, pp. 391-392.
- 7) 勝拓也, 磯部大吾郎: 高層建築物の発破解体計画システムの開発, 日本機械学会第22回計算力学講演会CD-ROM論文集, 2009, pp.153-154.
- 8) 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.
- 9) 久永哲也, 磯部大吾郎: 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, 日本機械学会第22回計算力学講演会CD-ROM論文集, 2009, pp.149-150.