日本建築学会大会学術講演梗概集
（近畿） 2005年 9 月

ASI-Gauss 法を用いた世界貿易センタービルの飛行機衝突解析

正会員 ○磯部 大吾郎*
同 Kyaw Myo Lynn **

WTC ビル　衝突解析　ASI-Gauss 法
ASI 法　有限要素法

1. 緒言

骨組構造体の衝突崩壊問題に有効な有限要素解析手法として，ASI-Gauss 法が開発された[1]．本手法は，少数要素で高精度の解を与える順応型 Shifted Integration 法(ASI 法)[2]に対し改良を加えたものである．2 つの要素をサブセット要素として考え，そのガウス積分点に相当する位置に応力評価点を配するように数値積分点をシフトすることで，弾性変位解の精度を向上させている．また，要素内の数値積分点をシフトし，同時に断面力を解放することで破断を表現し，幾何学的な位置関係に基づいて要素間をギャップ要素で拘束することで接触を表現可能とした．解法の詳細については他文献[1]に譲り，本報告では，可能な限り実情報に基づいてモデル化された世界貿易センタービル 2 号棟（WTC2）に対し，ボーイング 727-200ER 型航空機が衝突した際の挙動についての解析結果を報告する．

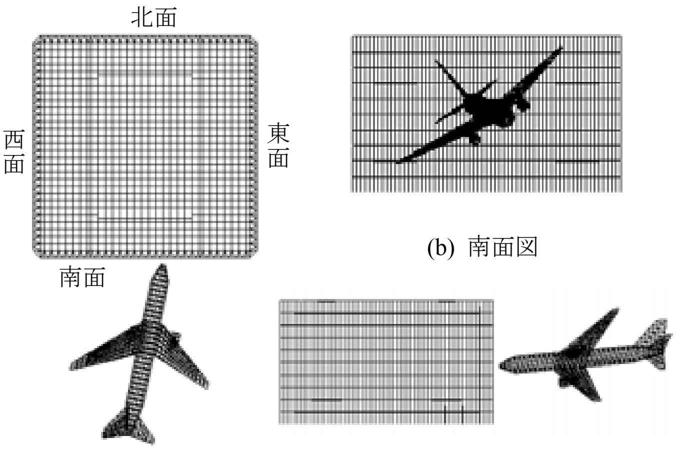
2. WTC2 のモデル化と解析条件

飛行機が衝突した階付近の 77 階から 86 階の部分を線形チモシェンコはり要素によってモデル化した．1 部材当り 2 要素で構成され，モデル全体では総要素数 54740，総節点数 47267, 総自由度数 281880 である．77 階下部と 86 階上部の境界条件を水平ローラーとし，床部には平均 8.29 kN/m^2 の重量を載荷した．B727-200ER 型機も同様に線形チモシェンコはり要素でモデル化し，総要素数 4322, 総節点数 2970, 総自由度数 17820 とした．部材の断面形状を箱型断面とし，超々ジュラルミンの材料定数値を用いた．機体の総重量を 142.5 t とし，このうち燃料の重量は 30 t，個々のエンジンの重量は 19.315 t とした．

図 1 に解析モデル全体の概観と飛行機の初期位置を示す．衝突直前に飛行機の頭が 11.5° 東，5° 鉛直下方向へ向き，主翼が 35° 傾斜していたものと仮定した，また，262 m/s の速度で WTC2 の 81 階に衝突したものと仮定した．ソルバーには共役傾斜法（CG 法），非線形増分理論には updated Lagrangian Formulation，時間積分には陰解法（Newmark の β 法， δ =5/6， β =4/9）を用いた．また本解析では，減衰は考慮していない．実現象の時間 0.8 s に対し，時間増分 0.2 ms として 3.3GHz P4 CPU, 2GB RAM の PC で 23 時間の計算時間を要した．

3. 解析結果

南面に飛行機が突入する様子を図 2 に示す．図では，部材の降伏関数値によって色の濃淡を付け，破断した要素は削除して描いている．衝突の瞬間から鉛直方向へ色が行き来する様子が観察される．衝撃波が伝播し，設計段階では想定されていない特異な応力状態に構造物がさらされていた可能性があることが確認された．また，機



(a) 上面図　(b) 南面図　(c) 西面図

図-1 解析モデル

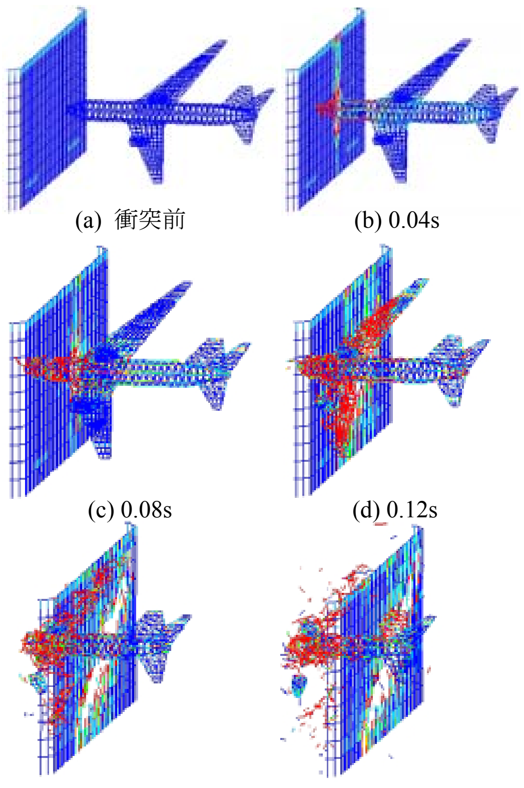
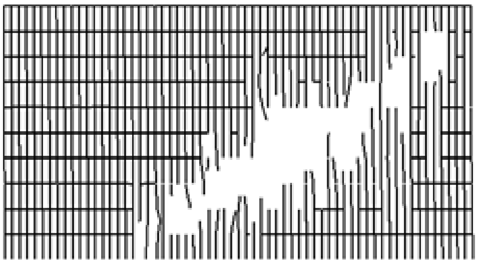

(a) 衝突前　(b) 0.04s　(c) 0.08s　(d) 0.12s　(e) 0.16s　(f) 0.20s

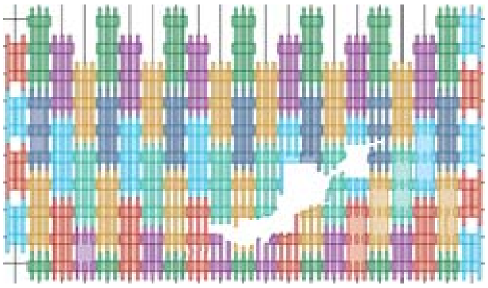
図-2 南面への衝突の様子

Aircraft Impact Analysis of World Trade Center Tower by Using ASI-Gauss Technique

Daigoro ISOBE and Kyaw Myo Lynn

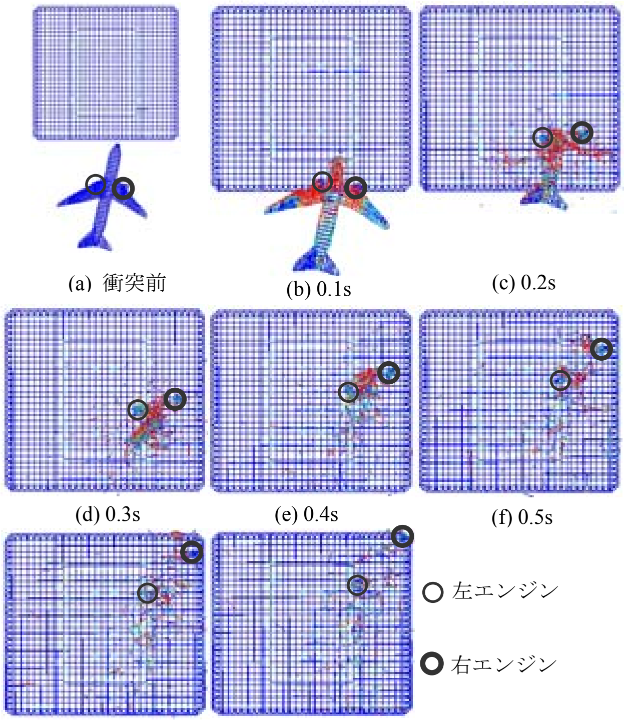


(a) 解析結果



(b) 観測された様子 [3]

図-3 南面の損傷の様子



(a) 衝突前　(b) 0.1s　(c) 0.2s
(d) 0.3s　(e) 0.4s　(f) 0.5s
(g) 0.6s　(h) 0.7s

図-4 衝突後の機体およびエンジンの動き

体により建物南面の外柱とスパンドレルが切断され，大規模な穴が形成されている．飛行機のエンジンは形状を保ったまま，粉々となった機体から瞬時に離脱している様子が分かる．図 3 には，南面の損傷の様子を示す．観測された損傷状況より解析結果は大きめになっているが，これは上下面を水平ローラーとして拘束しているため，境界近辺で応力の集中および伝播が起き，壊れやすくなったものと思われる．次に，上面から見た機体および左右のエンジンの動きを図 4 に示す．左エンジンは強固なコア構造を直撃するため，急激に減速していることが分かる．コア部の損傷は，主に左エンジンと機体によって引き起こされたものと考えられる．機体の一部は北面から飛び出している．他方，右エンジンはコア部を避けて通っているため，建物の外壁まで貫通し，衝突後 0.617 s に北東の角から外へ飛び出している．図 5 には，右エンジンの速度曲線を示す．衝突後，特に外柱と接触する区間で急激に速度を落とし，北東の角から飛び出る瞬間には 53 m/s まで減速している．エンジンの飛び出した位置および速度は，観測データ[3]とほぼ一致した．

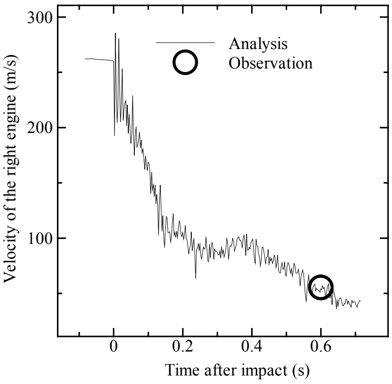


図-5 右エンジンの速度曲線

4. 結言

本研究では，ASI-Gauss 法を WTC2 の飛行機衝突解析に適用し，衝撃波の伝播する様子，機体と左右エンジンの挙動および建物の損傷状況を調べた．ともに観測データと良好に一致し，本解法が実用的であることが確認された．その一方で，モデルの境界条件により想定外の応力集中や衝撃波の伝播が生じる可能性は否定できない．そこで今後は，WTC2 の全体モデルによる解析を実施し，併せて火災による耐力低下を考慮した進行性崩壊解析を実施する予定である．衝突前後から崩落に至るまでの現象を時系列で調査することで，事件の全貌を明らかにできるものと期待している．

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（課題番号：16206055）から一部援助を得た．ここに謝意を表す．

参考文献

1) 磯部大吾郎，チョウ ミョウ 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.
2) Y. Toi and D. Isobe: Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures. Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 36, 1993, pp.2323-2339.
3) ASCE/FEMA: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observation, and Recommendations, (2002).

*筑波大学大学院助教授 工博
** 筑波大学大学院生
* Dep. of Eng. Mech. and Energy, University of Tsukuba, Dr. Eng.
** Graduate student, University of Tsukuba