

ASI-Gauss 法による骨組構造の進行性崩壊解析

Progressive Collapse Analyses of Framed Structures by Using ASI-Gauss Technique

非 今西 健介 (筑波大院) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Kensuke IMANISHI, Graduate School, Univ. of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki

Daigoro ISOBE, University of Tsukuba, Tennodai 1-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki

1. はじめに

2001年の米国同時多発テロによる世界貿易センター(WTC)の崩壊は、複数階での火災による部材の強度低下が主な原因であるという説が有力となっている⁽¹⁾。しかし、それはあくまで崩壊へ至る最終的な要因であり、それ以外の様々な要因も関係していたと考えられる。本研究の主な目的は、進行性崩壊に影響を与えたと推測される要因を数値解析によって検証し、最終的には進行性崩壊現象を解明するものである。本稿では、「部材接合強度の違い」と「上層の落下形態の違い」の2つを検証する。前者は、飛行機の衝突による衝撃力が部材接合部を弱体化させたのではないかと推測に基づいた要因であり、WTCの接合部が風荷重しか想定していなかった比較的簡素な構造であったことを根拠としている。後者は、WTC崩壊の記録映像から浮かび上がった要因であり、具体的には、被災階から上層の部分がWTC1ではほぼ垂直に落下したのに対し、WTC2では大きく傾きながら落下したという相違がある。

これらの検証には、構造物の情報を部材単位で捉えつつ構造全体を動的に数値解析する手法が有効であると考えられ、これに該当するものには有限要素法が挙げられる。しかし、解析対象の空間的・時間的規模の大きさに起因する膨大な計算コストや、部材破断・部材同士の衝突といった強非線形性・不連続性が障害となり、実際に解析を行ったという例は少ない。また、進行性崩壊現象についてはエネルギー論的に扱う研究報告例が多いが、これは現象の大勢を把握するのに有効な反面、上記のような要因を特定することはできない。そこで本研究では、最小限のコストで計算が可能であるASI-Gauss法を用いることで、計算時間の短縮化を図った。ASI-Gauss法の詳細については他文献⁽²⁾に譲り、本稿では、10層1スパン骨組構造に対し上記2つの要因について検討した結果を報告する。

2. 部材破断と部材同士の接触

進行性崩壊解析において破断と接触の表現は必要不可欠であり、本研究ではこれらを表現するためのアルゴリズムを導入している。破断は、要素毎に計算された曲率 κ_x, κ_y および軸ひずみ ε_z のいずれかが予め設定された臨界値を超えた場合に、その時の塑性ヒンジ点で生じるものと判定される⁽²⁾。その判定式は

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{xc}} \right| - 1 \geq 0 \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{yc}} \right| - 1 \geq 0 \text{ or } \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{zc}} \right) - 1 \geq 0 \quad (1)$$

で与えられ、添え字cが付いた値はその臨界値を示す。また、本研究ではこれらの臨界値を部材接合強度のパラメータと

しても利用している。要素間の接触については、要素近傍の空間を楕円体で近似し、そこに別の要素が侵入した場合にこれらの2要素が接触したと判定する。判定された要素同士については、各々の節点間を計4つのギャップ要素(接合要素)で結合する⁽²⁾。また、1組のギャップ要素毎に軸ひずみの平均値を算出し、その値が正となった場合にギャップ要素を全て削除し、衝突による跳ね返りなどを表現可能としている。なお、ギャップ要素の物性値・断面係数については、密度を他の通常要素の1000分の1としている以外は実際の値に準じたものを使用した。

3. 骨組構造の進行性崩壊解析

解析対象は、高さ10層36[m]、幅・奥行き各1スパン6[m]の骨組構造であり、断面は柱:BOX型、梁:H型、材料はJIS G 3136のSN490Bとした。また、実際の構造物の載荷状態を模擬するために、床スラブ等の固定荷重として各階層に約105[tf]の自重を加えた。解析の安定化のために、時間積分法には数値減衰を導入したNewmarkの法($\alpha=5/6, \beta=4/9$)を用いた。被災階を8階と想定し、柱を強制的に破断することで上層を落下させる。強制破断した要素は接触判定から外し、他の要素に影響を与えることは無いこととした。上層の落下形態はCase1:垂直落下、Case2:傾斜落下の2種類を設定し、部材接合強度の弱体化は、8階に近いほどその度合いを大きくした。解析は、上層の落下形態2種類に各々部材接合強度の大小2種類を与え、計4種類を行った。結果を図-1~4に示す。

まず、図-1と図-3から上層の落下形態の違いについて比較する。Case1では、上層部が下層部に衝突した後、崩壊速度が極端に減じる約1.5[s]の“静止時間”が確認された。この間は、構造物全体が沈み込む様な挙動をするものの、目立った破壊は見られなかった。一方、Case2ではその様な挙動は確認されず、ほぼ連続的に崩壊している。また、共通点としては下層部の決定的な崩壊が低層から起きていることが挙げられる。次に、図-1と図-2、図-3と図-4から部材接合強度の違いについて比較する。Case1、Case2共に影響が見られるが、特に前者の場合について顕著であることが確認できる。図-2が示す崩壊はWTCの進行性崩壊に酷似しており、崩壊時にWTCの部材接合部が保持していた強度はとても弱いものであったと予想できる。以上をまとめると、傾斜落下は垂直落下に比べて接合強度の影響は受けにくい、崩壊・破壊が起きやすいことが分かる。これは、オフセット衝突とフルラップ衝突の違いに相当すると考えられる。

4. 結論

本稿では、ASI-Gauss 法を用いて骨組構造の進行性崩壊解析を行った。その結果、上層の落下形態と部材接合強度の違いといった、エネルギー論だけでは議論できない要素が崩壊過程全体に影響を与える可能性があることが確認された。今後、より大規模な構造物についても同様の解析を行うことで、進行性崩壊現象を解明していきたいと考えている。

参考文献

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

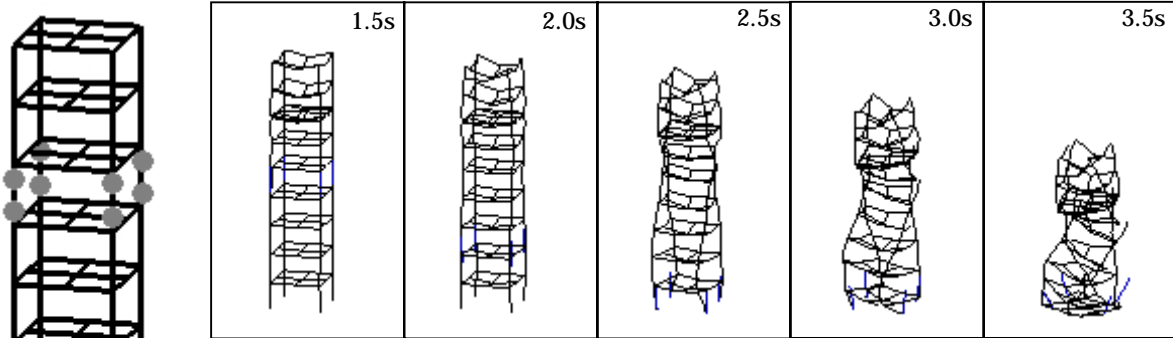


図-1 解析結果(Case 1 部材接合強度 大)

Case 1
(部で強制破断)

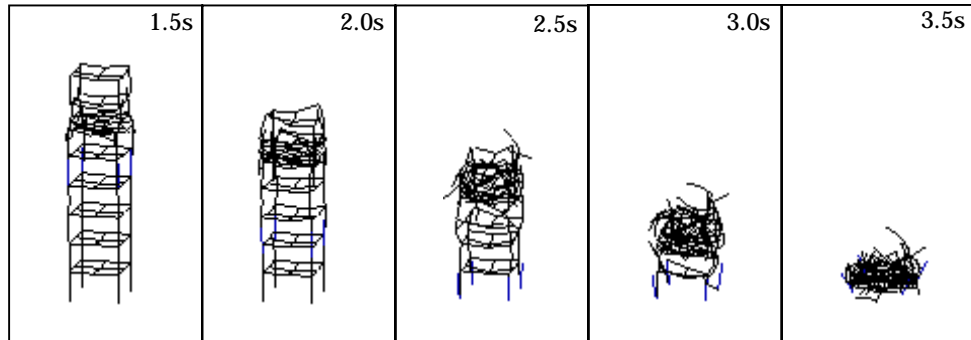


図-2 解析結果(Case 1 部材接合強度 小)

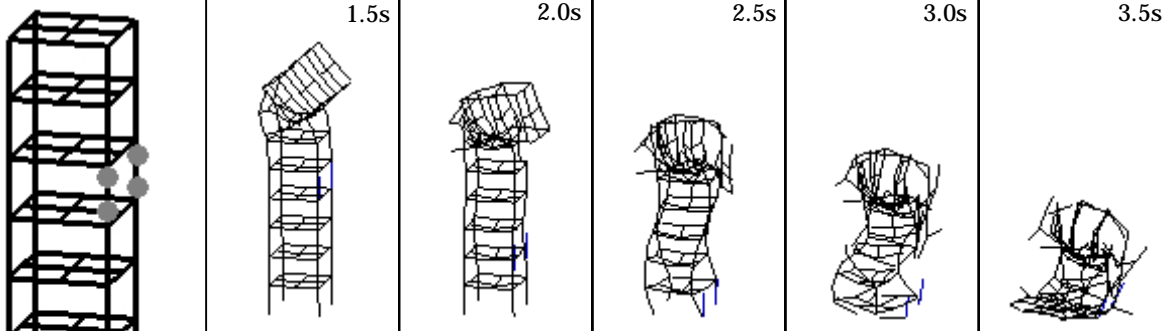


図-3 解析結果(Case 2 部材接合強度 大)

Case 2
(部で強制破断)

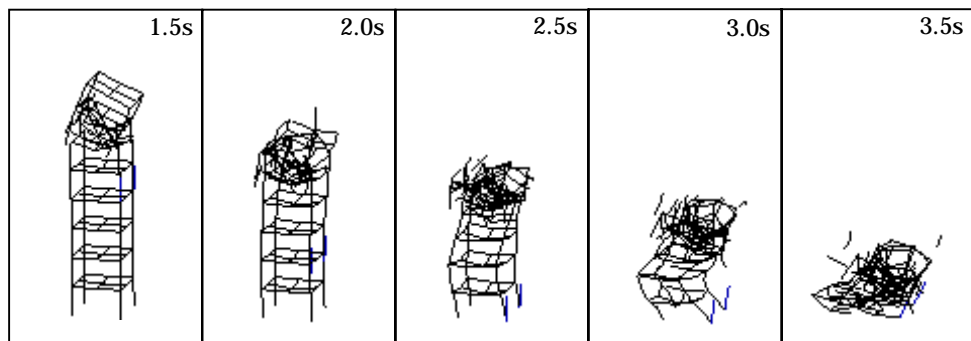


図-4 解析結果(Case 2 部材接合強度 小)