

F013004

建築物の崩壊解析手法の開発とその適用例

Development of a Collapse Analysis Code of Buildings and Its Applications

○正 磯部 大吾郎^{*1}Daigoro ISOBE^{*1}^{*1} 筑波大学 University of Tsukuba

A finite element code to analyze large-scale collapse behaviors of buildings was developed. It was achieved with a use of an ASI (Adaptively Shifted Integration)-Gauss technique, which dramatically reduces computational cost when solving large-scale problems. One of the applications of the code was a fire-induced collapse analysis of a high-rise tower, which was carried out for an investigation seeking for the true cause of the total collapse of New York World Trade Center (WTC) towers collapsed in 2001. A seismic pounding analysis of the Nuevo Leon buildings, in which two out of the three collapsed completely in the 1985 Mexican earthquake, showed that the difference of natural periods between the north and the center buildings may have triggered the collision, followed by the collapse. Other applications are also shown in the presentation.

Key Words : Collapse analysis, Buildings, ASI-Gauss code, FEM, Applications

1. 緒 言

今日までに、建築物の崩壊現象を再現するための数値シミュレーション技術がいくつか開発されている。中でも、個別要素法 (DEM) ⁽¹⁾ や不連続変形法 (DDA) ⁽²⁾ はその適用範囲が多岐に渡っており、建築物の地震崩壊解析⁽³⁾ や岩盤崩落解析⁽⁴⁾ などで多くの成果が出ている。DEM や DDA は物体を剛体としてモデル化し、その間をバネやダッシュポットで連結することで不連続な変形を模擬する手法で、物体が破断したり壊れたりする挙動を再現することを得意とする。しかし、パラメータの設定が個々の問題やモデルに依存するという不連続体力学特有の性質を持つため、3次元建築物モデルで弾性から塑性、破断状態までに渡る連続的な解析を実施することは難しい。そこで筆者らの研究グループは、連続体力学の性質を持ち、部材レベルの弾性状態から塑性、破断状態まで連続的に解析可能で、計算コストが低く一般のパソコン上でも建築物の崩壊現象を再現可能な有限要素解析手法を開発した。本稿では、この手法、ASI-Gauss 法を用いた解析コードおよびその適用例について概説する。

2. ASI-Gauss 法を用いた崩壊解析コード

ASI-Gauss 法を用いた解析コードでは、建築物をはり要素で分割してモデル化する。各々のはり要素は、剛性や曲げ変形などを評価するための数値積分点を持っており、従来の有限要素法ではこの数値積分点を要素中央に固定したまま使用するが、都井はこの点を移動 (シフティング) するとはり要素が面白い性質を示すことを発見した⁽⁵⁾。つまり、例えば図 1 に示すように数値積分点を要素の右端に移動すると、左端に回転関節が配置された剛体ばねモデル⁽⁶⁾ と同様の性質を示すということが分かった。この性質は数学的にも証明され、部材性状に合わせて数値積分点の位置を適切に操作し、部材の弾性・塑性状態を精度良く表現できる順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法) が開発された⁽⁷⁾。ASI-Gauss 法は、この ASI 法をさらに発展させ、部材が弾性状態にある際に数値積分点が配置される位置を工夫し、精度をさらに高めたものである (図 2 参照)。この手法では、線形チモシェンコはり要素による分割数として最小の、1 部材 2 要素でほぼ収束解を得ることが可能である。1 本の部材を少ない要

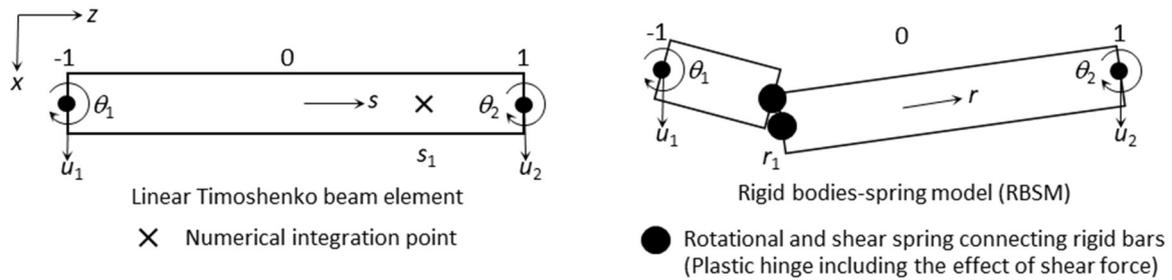


Figure 1 Linear Timoshenko beam element and its physical equivalence to RBSM

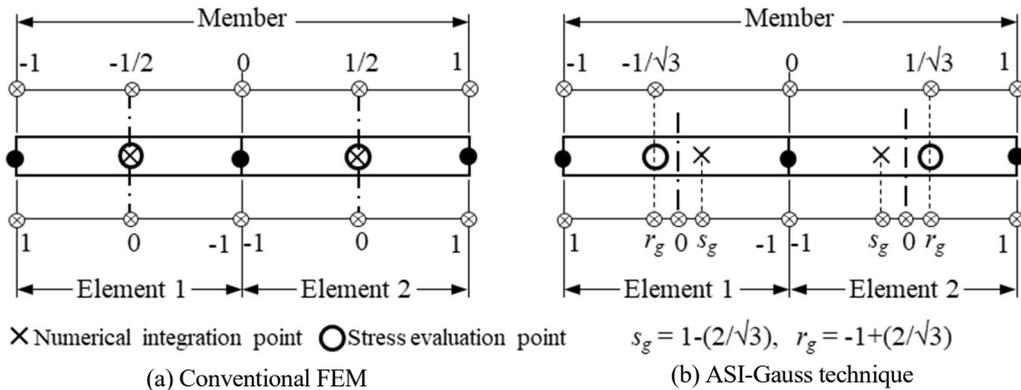


Figure 2 Locations of the numerical integration and stress evaluation points in the elastic range

素分割数で高精度に表現できるこの性質は、コンピュータの使用メモリを減らす上でもとても有用な特長となっている。

また、任意の位置に回転関節を表現できる ASI-Gauss 法は、建築物の崩壊現象を再現する上で不可欠な、部材の破断現象を再現する上でも優位性を持つ。前述のように、はり要素内の中央点に対し、回転関節とは反対側に数値積分点を配置すれば、あたかも回転関節の位置に塑性ヒンジがあるような挙動を再現できる。さらにその点の部材断面に発生している断面力を解放すれば、破断面を表現できる。部材の破断は、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り判定し、その判定に使用する破断臨界値には、部材の引張試験やせん断試験などから得られた情報を用いる。

次に、建築物が衝突・崩壊した時に部材が重なり合うような現象を再現するためには、部材接触・接触解除アルゴリズムが必要となる。接触判定には内分ベクトル型接触アルゴリズム⁽⁸⁾を用い、接近する 2 つの要素の節点間距離および節点の幾何学的位置関係により判定を行う。接触を判定された要素同士については、節点間に計 4 つのギャップ要素（接合要素）を新たに結合する。この結合により、部材同士が衝突する際の運動エネルギーの伝達を可能とする。さらに接触解除判定には、接触開始から現時刻までの、ギャップ要素によって拘束されている 4 つの節点の相当変位量を用い、その変位が適度に減少した時点でギャップ要素を削除し、接触解除を表現する。

ASI-Gauss 法を基に開発された解析コードは、精度は落とさずに部材の挙動を最小限の要素数で表現するため、メモリ消費量を少なく抑えることができ、一般のパソコン上で大規模な建築物の崩壊挙動を再現することが可能である。この手法および解析コードの詳細、その適用例などについては文献^{(9)・(15)}に記す。

3. 崩壊解析コードの適用例

本節では、ASI-Gauss 法を基に開発された崩壊解析コードの適用例をいくつか紹介する。

図 3 に 9/11 の際に 2 機目の航空機が WTC2 号棟に突入した際の挙動を再現した結果を示す。配色は要素の塑性化状態のレベルを示す。例えば赤色は要素が完全に降伏したことを示している。この解析結果より、航空機が衝突した際にビル内のコア構造の柱に大規模な除荷現象、いわゆる“スプリングバック現象”が発生したことが分かった。この現象により柱の継ぎ手が大きく引っ張られて破壊し、全体崩壊につながったことが予想される。

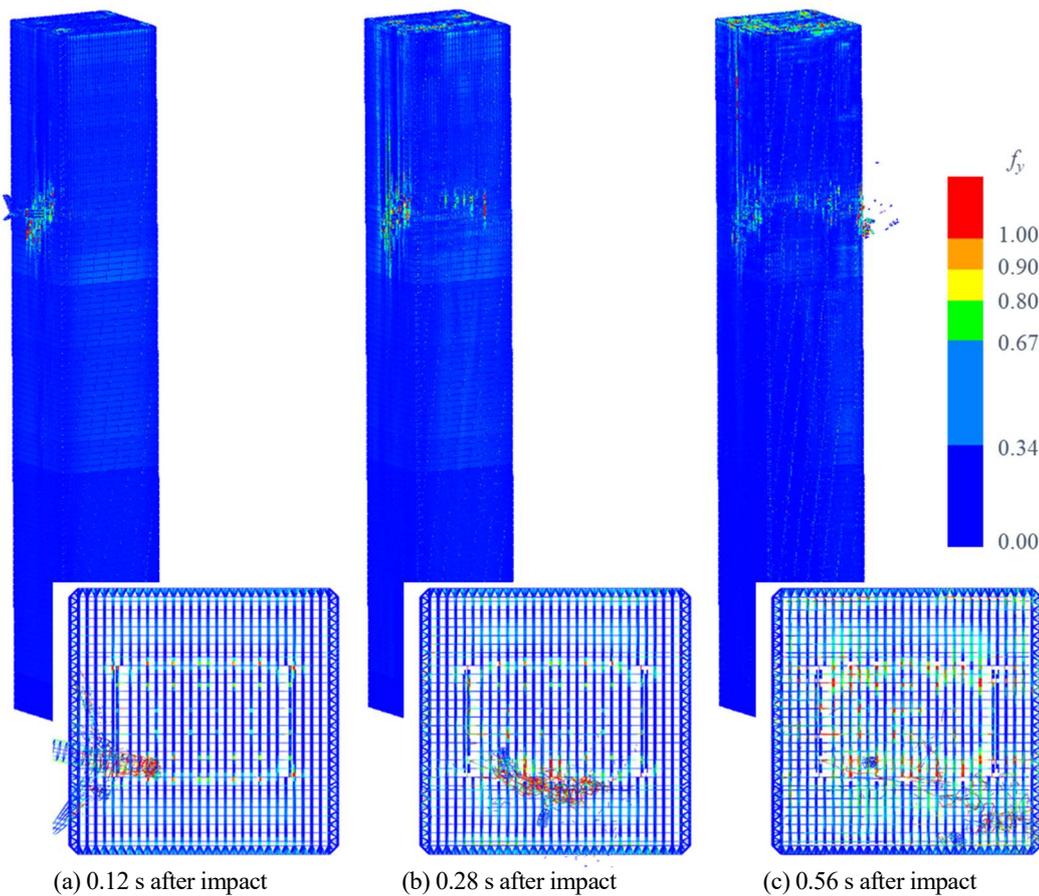


Figure 3 Bird view and upper view of the WTC 2 during aircraft collision

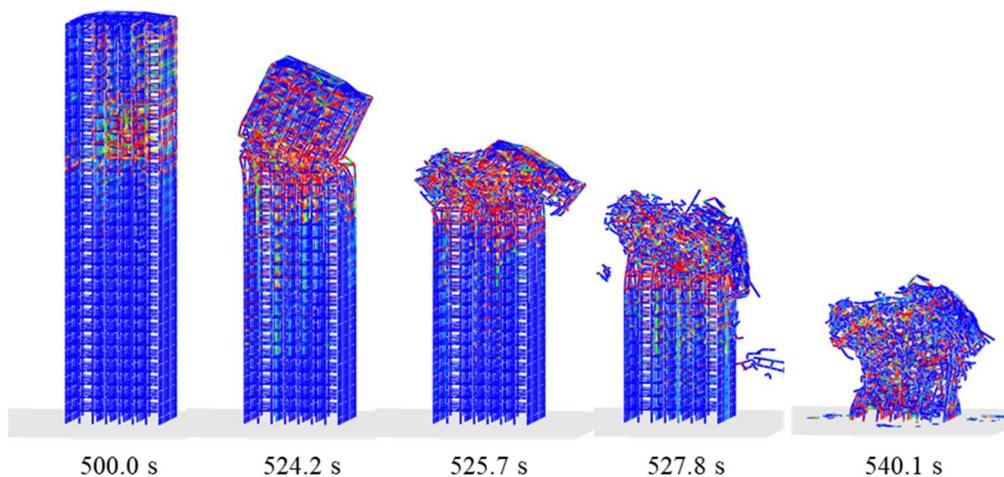


Figure 4 Progressive collapse sequence of a high-rise tower with an outrigger truss system

図4には、最上階付近にアウトリガートラスと呼ばれる補強機構を設置した超高層ビルの火災崩落解析結果を示す。この結果より、アウトリガートラス機構への応力伝達経路が十分確保されるような火災発生個所の場合については、崩壊開始までの時間を稼げる可能性が高いことが示された。

図5には、本解析コードを用いた発破解体解析例を示す。実際には、解体対象に隣接する建築物に被害を与えないよう、敷地内に上部構造を落とすように発破箇所およびタイミングを綿密に計画する必要がある。解析結果では隣接するコンコースには被害が出なかったが、残骸が高く積み上がってしまった。これでは、この後の残骸の撤去が困難となることが予想される。

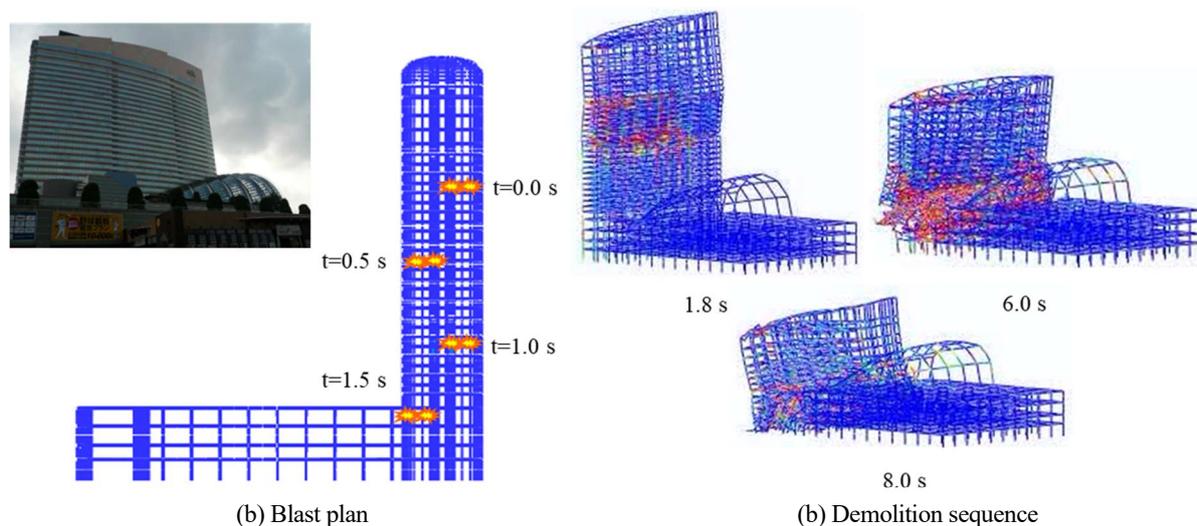


Figure 5 Blast demolition sequence of a high-rise tower

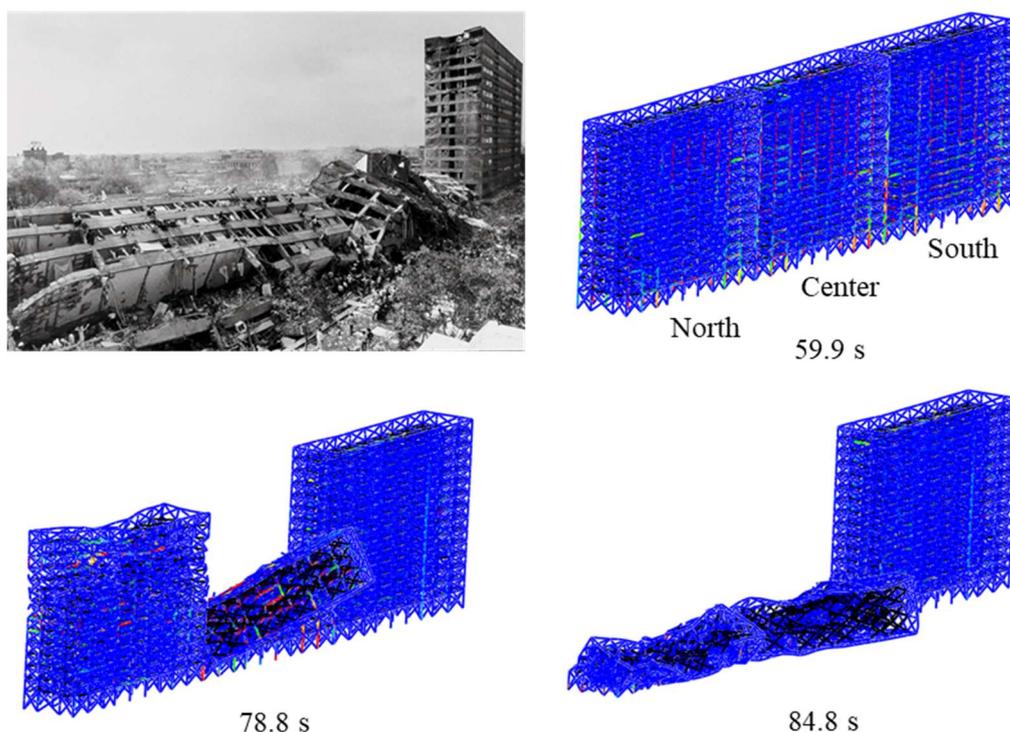


Figure 6 Collapse behaviors of the Nuevo Leon buildings under long-period ground motion

図6には、1985年メキシコ地震で倒壊したメキシコ市のNuevo Leon棟の解析結果を示す。Nuevo Leon棟は3つの同じ型の建築物がエクспанション・ジョイントで連結されたものである。長周期地震動により南棟を残し他の2棟が完全に倒壊してしまったため、本解析はその建築構造上の崩壊要因を調査したものである。過去に経験した地震により3つの建築物の固有周期が25%ほど異なっていたことが観測されたため、その条件を導入した結果、同様の崩壊過程が再現された。

4. 結 語

建築物の老朽化が進み、その一方で自然の猛威が年々増している。今後、人命の安全を守る上でも、建築物の崩壊過程まで検証可能な数値シミュレーション技術がますます必要となることが予想される。

文 献

- (1) Cundall, P.A., “A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movement in Blocky Rock System”, *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, II-8 (1971), pp. 129-136.
- (2) Shi, G.H. and Goodman, R.E., “Discontinuous Deformation Analysis”, *Proceedings of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, (1984), pp. 269-277.
- (3) Tosaka, N., Kasai, Y., and Honma, T., “Computer Simulation for Felling Patterns of Building”, *Demolition Methods and Practice*, (1988), pp. 395-403.
- (4) Ma, M.Y., Barbeau, P., and Penumadu, D., “Evaluation of active thrust on retaining walls using DDA”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 1 (1995), pp. 820-827.
- (5) 都井 裕, “骨組構造および回転対称シェル構造の有限要素解析における Shifted Integration 法について”, 日本造船学会論文集, 第 168 号 (1990), pp. 357-369.
- (6) Kawai, T., “Some Considerations on the Finite Element Method”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.16, (1980), pp. 81-120.
- (7) 都井 裕, 磯部大吾郎, “骨組構造の有限要素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.
- (8) 磯部大吾郎, レティタイタン, “高層建築物の火災時崩壊挙動に関する数値解析的検証”, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 667 号 (2011), pp. 1659-1664.
- (9) 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ リン, “ASI-Gauss 法による世界貿易センタービルの飛行機衝突解析”, 日本建築学会構造系論文集, 第 600 号 (2006), pp. 83-88.
- (10) Lynn, K.M., and Isobe, D., “Finite Element Code for Impact Collapse Problems of Framed Structures”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.69, No.12 (2007), pp. 2538-2563.
- (11) Lynn, K.M., and Isobe, D., “Structural Collapse Analysis of Framed Structures under Impact Loads using ASI-Gauss Finite Element Method”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.34, No.9 (2007), pp. 1500-1516.
- (12) Isobe, D., Han, W.S., and Miyamura, T., “Verification and Validation of a Seismic Response Analysis Code for Framed Structures using the ASI-Gauss Technique”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.42, No.12 (2013), pp. 1767-1784.
- (13) Isobe, D., “An Analysis Code and a Planning Tool Based on a Key Element Index for Controlled Explosive Demolition”, *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol.3, No.4 (2014), pp. 243-254.
- (14) Isobe, D., Ohta, T., Inoue, T., and Matsueda, F., “Seismic Pounding and Collapse Behavior of Neighboring Buildings with Different Natural Periods”, *Natural Science*, Vol. 4, No. 8A (2012), pp. 686-693.
- (15) Isobe, D., *Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications*, Elsevier, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2017.