

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

正会員 ○久永哲也*
正会員 磯部大吾郎**ASI-Gauss 法 衝突崩壊解析 有限要素法
部材破断 部材接触

1. 緒言

骨組構造物の衝突崩壊解析を行う場合、有効な手法の1つに ASI-Gauss 法[1]がある。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(ASI 法)[2]を改良し、弾性解の精度を上げたものである。ASI-Gauss 法を用いた解析の破断判定には、曲率と軸ひずみ[1]、曲げひずみと軸ひずみ[3]を用いた2種類のものがあった。前者は破断臨界値の設定に仮定が入り、後者は部材側面のひずみを曲げひずみとしているため、接合部等における局所的な破断が表現できなかった。また接触判定には、平面判定型[1]と楕円体判定型 [3]の2種類があった。前者は2つのパラメータを任意に仮定する必要があるため、パラメータ依存性が高く、後者は要素を細かく分割することで厳密性は高くなるが、計算コストが大きくなっていった。

大規模構造物の衝突崩壊現象を表現するためには、計算コストが小さく、部材の破断と要素の接触を正確に表現する必要がある。そこで、先行実験[4][5]のデータにより得られた破断臨界値を用いた破断アルゴリズムと、接触を陽に表現できる接触アルゴリズムの開発を行い、ASI-Gauss 法を用いた衝突崩壊解析コードに組み込んだ。本稿では、これらの破断・接触アルゴリズムについて解説し、検討結果について報告する。

2. 破断アルゴリズム

本研究では、これまでの破断判定式よりもパラメータ数は多くなるが、実験データに即した判定を行うことのできる判定式を考案した。実現現象では、部材または接合部が破断する際にせん断変形が生じると考えられる。そこで、引張り試験により得られる「引張り軸ひずみ(ε_z)」、接合部のような局所的な破断を判定するための「曲率(κ_x, κ_y)」に加え、せん断変形時に発生する「せん断ひずみ(γ_{xz}, γ_{yz})」を判定に用いた。その関係を以下に示す。

$$\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \quad (1)$$

添え字0はそれぞれの破断臨界値を示し、本研究で用いる破断臨界値を、引張り軸ひずみは鋼材 SN400B の引張り試験から、せん断ひずみを平島らの実験[4]から、曲率は濱田らの実験[5]から得た値を用い、それぞれ $\varepsilon_z=0.17$ 、 $\gamma_{xz}=\gamma_{yz}=1.3 \times 10^2$ 、 $\kappa_{x0}=\kappa_{y0}=3.33 \times 10^4$ とした。

3. 接触アルゴリズム

本研究では、計算コストを抑えつつも厳密性を損なわないものとして、内分ベクトル型接触判定法を開発した。まず、衝突要素の近傍に他の要素が存在するかを調べる。衝突要素と被衝突要素の中間距離が2つの要素長の和の半分より小さくなったとき接触判定を行う。次に、衝突要素と被衝突要素の最短距離dを求め、部材幅と比較を行う。dが部材幅以下となったとき接触の可能性が極めて高いとし、接触判定を継続する。最後に、dを決める際に求めた被衝突要素の内分点Mを用いて角度の計算を行う。このとき衝突要素の節点における、点Mと衝突要素のなす角が両側とも鋭角なら接触と判定し、それ以外の場合は接触を回避する。

接触が判定された要素の組は、4つの節点を4本のギャップ要素で結合する。この操作によって衝突要素の節点力がギャップ要素を通して被衝突要素の節点に伝わり、要素同士の接触を表現することが可能になる。なお、ギャップ要素には、本研究では他の要素と同じ物性値を用いる。

4. 解析例

破断・接触アルゴリズムの有効性を検証するため、図1に示すような箱型物体が壁に衝突する解析を行った。箱型の衝突体に初速度70m/sを与え、上下左右端を固定した壁に衝突させた。どちらのモデルも1部材の長さは1.0m、断面積は $2.5 \times 10^3 \text{ m}^2$ である。時間積分法には Newmark のβ法を用い、数値減衰を考慮するため $\beta=4/9$ とした。ギャップ要素は、弾性解析においては「接触開始から変位の最大値をとるまでの2倍の時間」で解放し、弾塑性解析で要素が破断した場合には、その要素が他の要素の挙動に影響を与えないと仮定し、破断した瞬間に解放するものとした。

図2は弾性解析におけるエネルギー量の推移を示す。図の曲線は、それぞれ運動エネルギー(KE)・位置エネルギー(PE)・ひずみエネルギー(SE)を表す。数値減衰により衝突後に総エネルギー量が若干減っているが、実際の現象では衝突時にエネルギーが熱や光に変換され減衰することを考慮すると、解析結果は数値的にも安定し、妥当なものだといえる。このときの挙動を図3に示す。色は部材の降伏関数値 f_y を示す。また、破断要素に関しては図から削除した。次に、破断を考慮した弾塑性解析結果を図4に示す。箱型物体が壁に接触するに依り双方の部材が降伏・破断し、結果的に物体が壁を貫通する様子が観察された。

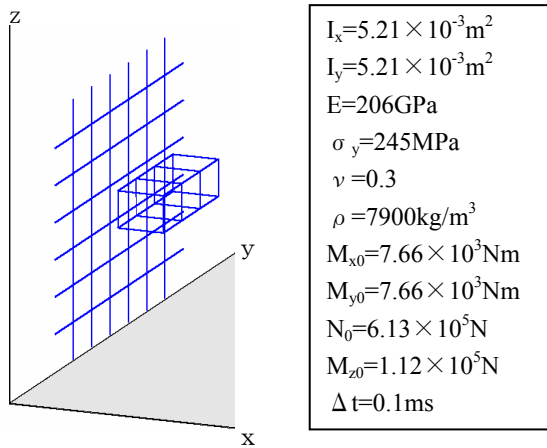


図-1 衝突モデル

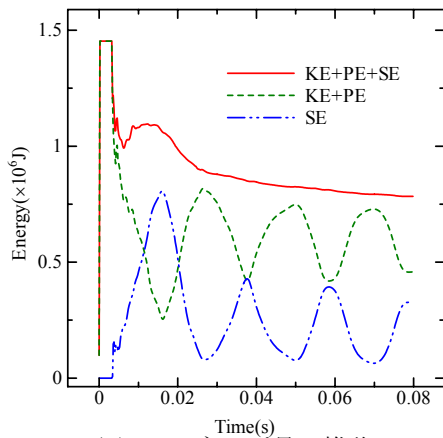


図-2 エネルギー量の推移

5. 結言

本稿では ASI-Gauss 法を用いた衝突崩壊手法における破断・接触アルゴリズムの検討を行った。その結果、接触・破断アルゴリズムは正常に機能し、弾性解析においては跳ね返りを表現可能であり、破断を考慮した弾塑性解析においては貫通の表現も可能であることが確認できた。今後は簡単なモデルでの解析と実験を比較・検証し、大規模構造物モデルに対して衝突崩壊解析を行う予定である。

参考文献

- [1]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)、pp39-46.
- [2]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)、pp363-371.
- [3]片平 直樹、磯部 大吾郎、井根 達比古、梶原 浩一：ASI-Gauss 法を用いた大規模骨組構造の地震崩壊解析、日本建築学会 2007 年度大会（九州）学術講演梗概集 B-1、(2007)、pp.259-260.
- [4]平島 岳夫、他：高温時における高力ボルトのせん断変形状に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 621 号、(2007)、pp175-180.
- [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)、pp105-110.

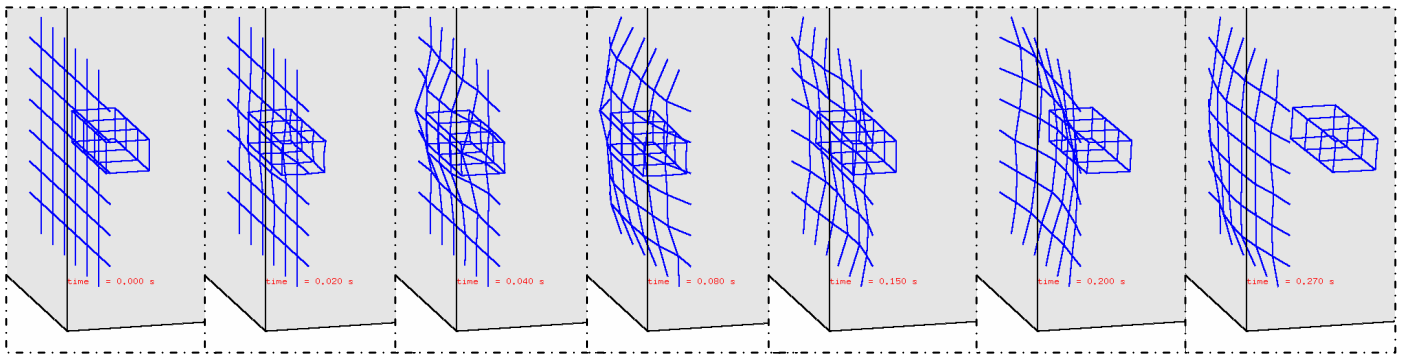


図-3 弾性解析の結果

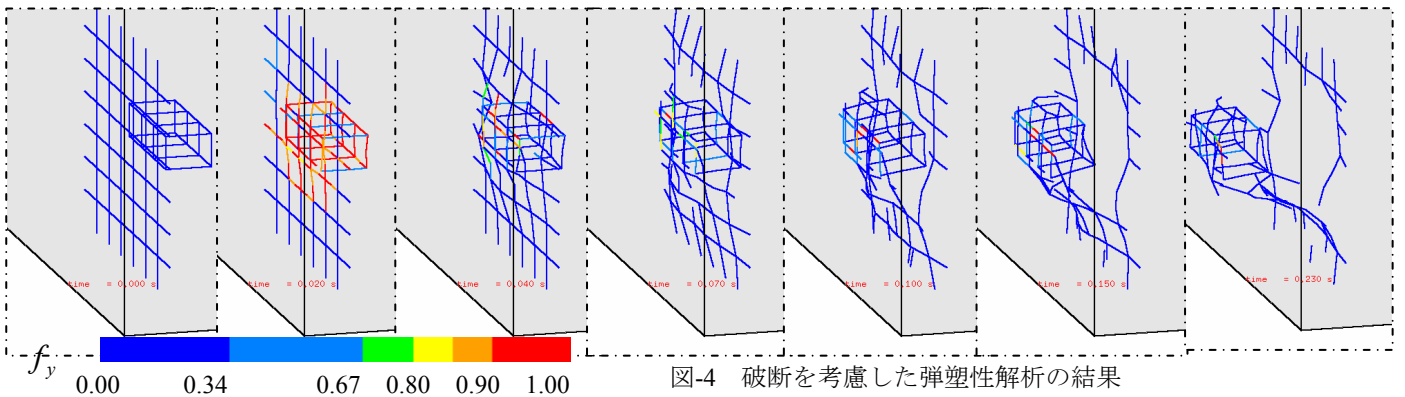


図-4 破断を考慮した弾塑性解析の結果

*筑波大学大学院

**筑波大学大学院准教授 博（工）

* Graduate student, University of Tsukuba

** Dept. of Eng. Mech. and Energy, University of Tsukuba, Dr. Eng.