

順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の 爆破解体挙動の有限要素解析

—その1 理論—

Finite Element Analysis of Explosive Demolition of Framed Structures by using the ASI Technique
—Part 1 Theories—

磯部 大吾郎*・都井 裕**

Daigoro ISOBE and Yutaka TOI

1. 序

近年、米国などではダイナマイトの連続爆破による建築構造物の爆破解体が盛んに行われているが、最近では日本でもその技術が取り入れられ、琵琶湖の畔のホテルなどの解体に活用されている。この解体技術には経験的なノウハウが多く含まれ、誰もが利用できる汎用性に富む技術であるとは言い難い。また特に、周辺に他の構造物が存在する狭い空間での高層建築構造物の爆破解体は失敗が許されず、事前のコンピュータによるシミュレーション解析の必要性が問われている。

個別要素法 (DEM)¹⁾ や不連続変形法 (DDA)²⁾ などの手法を用いた爆破解体解析や地震崩壊解析などの数値例は過去にも存在する^{3)~5)} が、従来の有限要素解析コードでは、このような強非線形性・不連続性を持つ問題を解くには非常に複雑なプロセスが必要となり、爆破解体・地震崩壊の解析例は稀少である。

本速報では、微小変形・大変形、静的・動的、単調負荷・繰り返し負荷の如何に関わらず、骨組構造の有限要素解析において有効であることが立証されている順応型 Shifted Integration 法 (ASI 法)^{6)~10)} を骨組構造の爆破解体に応用することを考え、その理論を紹介する。

ASI 法とは、弾性要素における数値積分点は線形解析に対する最適位置 (3 次はり要素の場合はガウス積分点、線形チモシェンコはり要素の場合は中央点) に置き、全塑性断面の発生直後に、その点に正確に塑性ヒンジが形成されるように数値積分点をシフトする手法で、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解が得られ、また従来の有限要素解析コードへのインプリメントが容易であることが大きな特徴である。

本速報で用いたアルゴリズムでは、数値積分点をシフトすることにより、ある要素の特定の断面に仮想ヒンジを発生させ、それと同時にその要素の断面力を解放し、爆破および破断を表現する。この操作により、爆破解体のように部材が破断し飛散するような問題も解析が可能となる。

以前の研究では主に 3 次はり要素を用いて解析を行ってきたが、ある要素の一端の断面に爆破および破断を表現するためには、横たわみの連続性を仮定した剛体・ばねモデルと等価な 3 次はり要素は使用できない。そこで、数値積分点を 1 つだけ持ち、横たわみの不連続性を許容する剛体・ばねモデルと等価な線形チモシェンコはり要素^{6),7)} を用いることにする。すなわち、1 部材は最低 2 つの線形チモシェンコはり要素によって構成されることになる。この有限要素において断面力を解放することにより、要素の一端の断面の破断を表現することが可能となる。

非線形解析のための増分理論として、一般には Total Lagrangian Formulation (以下、T.L.F. と表記) あるいは Updated Lagrangian Formulation (以下、U.L.F. と表記) が使用されているが、爆破解体解析では、骨組構造が倒壊する段階で部材の回転が増大することが予想されるため、本速報では主に計算効率の観点より、後者の理論を使用することにした。U.L.F. による定式化においては、T.L.F. のように固定された要素座標系を終始用いるのとは異なり、要素回転とともに移動する要素座標系を仮定しており、各増分ステップにおいて計算された Updated Kirchhoff 応力増分は Euler 応力の Jaumann 微分形に変換される。同様に、U.L.F. においては毎ステップごとに要素座標系が更新されるので、大変形問題においても初期ひずみ項を含む [B] マトリックスを必要としない。

本速報 (その 1) では、U.L.F. に基づく中心差分法を用いた陽的非線形解析アルゴリズムについて述べ、さらに爆破解体解析へ適用する ASI 法のアルゴリズムを示す。

*筑波大学構造工学系

**東京大学生産技術研究所 第 2 部

タのメモリも相当量使用することになる。

3. ASI法の爆破解体解析への適用

本節では、爆破解体解析にASI法を適用した場合の計算アルゴリズムについて解説する。

Fig. 1に示すように、線形チモシェンコはり要素における数値積分点位置と塑性ヒンジ発生点位置の関係は

$$s_1 = -r_1 \text{ または } r_1 = -s_1 \quad (12)$$

と表現される^{6),7)}。ここに、 s_1 および r_1 はそれぞれ、数値積分点位置および塑性ヒンジ・破断の位置である。

要素全体が弾性変形状態にある場合は、要素の中央点が最適な積分点位置であり、時間 $t = t_n$ のステップで計算される要素内力は、次式で表される。

$$\{ {}^n F \} = \int_{nl} [{}^0 T]^T \cdot [{}^u T]^T \cdot [{}^n \bar{B}_L(0)]^T \cdot \{ {}^n \bar{R} \} dl \quad (13)$$

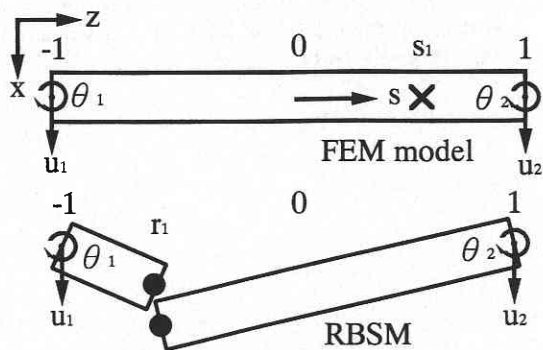
ここで、 $[{}^n \bar{B}_L]$ の括弧内の数値は数値積分点位置、 $\{ {}^n \bar{R} \}$ の括弧内の数値は物理的な応力評価点位置を示す。

はり理論に従えば、曲げモーメント \bar{R}_1 、 \bar{R}_2 とせん断力 \bar{R}_5 、 \bar{R}_6 の関係は

$$\bar{R}_5 = - \frac{d\bar{R}_2}{dz} \quad (14a)$$

$$\bar{R}_6 = - \frac{d\bar{R}_1}{dz} \quad (14b)$$

と与えられる。よって、曲げモーメント増分 $\Delta_n \bar{R}_1(s)$ および $\Delta_n \bar{R}_2(s)$ の要素長方向分布は、要素中央点における曲げモーメント増分 $\Delta_n \bar{R}_1(0)$ 、 $\Delta_n \bar{R}_2(0)$ およびせん断力増分 $\Delta_n \bar{R}_5(0)$ 、 $\Delta_n \bar{R}_6(0)$ を用いて、次式により近似すること



- × Numerical integration point
- Rotational spring connecting rigid bars (Plastic hinge)

Fig. 1 Linear Timoshenko beam element and its physical equivalent

ができる。

$$\Delta_n \bar{R}_1(s) = \Delta_n \bar{R}_1(0) - \frac{\Delta_n \bar{R}_6(0) \cdot nl}{2} \quad (15a)$$

$$\Delta_n \bar{R}_2(s) = \Delta_n \bar{R}_2(0) - \frac{\Delta_n \bar{R}_5(0) \cdot nl}{2} \quad (15b)$$

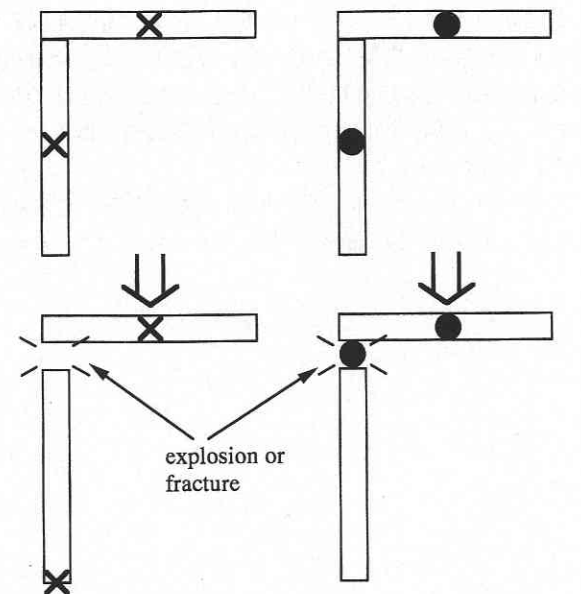
ここで、 nl は時間 $t = t_n$ における要素長である。(15)式は、曲げモーメントが要素内で線形に変化し、2つの端点 ($s = \pm 1$) のどちらかで、最大絶対値をとることを示している。曲げモーメントを除く諸量は要素内で定数値をとるので、要素両端の断面力を(15)式などで算定し、それらの値を降伏関数に代入することにより塑性化を判定する。

要素両端のどちらか一端 (ここでは左端を仮定) が塑性化または破断した直後の増分ステップにおいては、要素内の数値積分点を(12)式に従ってシフトする。すなわち、次式のように表される内部応力が生じ、要素が破断した場合には、次のステップで解放力としてその要素に作用する。

$$\{ {}^n F \} = \int_{nl} [{}^0 T]^T \cdot [{}^u T]^T \cdot [{}^n \bar{B}_L(1)]^T \cdot \{ {}^n \bar{R}(-1) \} dl \quad (16)$$

同様に、要素の右端が塑性化または破断した場合には、数値積分点位置は-1となり、応力評価点位置は1となる。

Fig. 2に、線形チモシェンコはり要素と、応力あるいは



- × Numerical integration point
- Rotational and shear springs connecting rigid bars

(a) Linear Timoshenko beam element (b) RBSM model

Fig. 2 Explosive demolition analysis using ASI technique

研究速報

塑性ヒンジ形成位置が陽に与えられている物理モデルである剛体・ばねモデルにおける、爆破および破断の際の数値積分点およびばねの位置を示す。

爆破または破断の際には、上記のアルゴリズムに従って要素内の数値積分点を要素中央点から破断面と反対の端にシフトし、仮想ヒンジを破断面に発生させる。爆破や破断の瞬間に断面力を一気に解放することは縦波を発生させるので必ずしも得策ではなく、また、骨組構造部材が一気に破断を起こすことは考えにくい。そこで、計算の安定化向上のために、徐々に断面力を解放する方法や人工粘性を考慮する方法などを採用することも考えられるが、本速報では簡単のために一気に解放する方法を用いた。また、節点が地面に接触した場合、その点の鉛直方向の自由度のみを拘束し、本解析ではバウンドまたは地面への潜り込みなどは無視することにした。

ポスト処理をする際には、以下の点に注意する必要がある。すなわち、計算の中では依然、要素や節点などは連続体として取り扱われているため、ポスト処理の段階において、爆破または破断した要素の破断面については仮想節点を新しく設け、以後は剛体棒の挙動に基づき描画することに注意しなければならない。

4. 結 語

本速報(その1)では、U.L.F.に基づく陽的非線形解析アルゴリズムを構築し、さらに、塑性ヒンジまたは破断を要素の端に正確に表現することが可能なASI法の長所を生かし、本手法を用いた骨組構造の爆破解体解析アルゴリズムを確立した。

速報(その2)では、本アルゴリズムを用いて実際に行ったいくつかの数値例を示す。(1996年2月5日受理)

参 考 文 献

- 1) P. A. Cundall: A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system, Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, II-8, (1971), 129-136.
- 2) G. H. Shi and R. E. Goodman: Discontinuous deformation analysis, Proceedings of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, (1984), 269-277.
- 3) 目黒公郎, 伯野元彦: 地震による構造物崩壊被害のシミュレーション, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第15巻, (1991), 325-330.
- 4) M. Ito, N. Yoshida, N. Utogawa, I. Kondo: Simulation of blast demolition of reinforced concrete buildings, Proceedings of the Third World Congress on Computational Mechanics, (1994), 1152-1153.
- 5) M. Y. Ma, P. Barbeau and D. Penumadu: Evaluation of active thrust on retaining walls using DDA, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 1, (1995), 820-827.
- 6) 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), 363-371.
- 7) 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), 2323-2339.
- 8) 都井 裕, 磯部大吾郎: 順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の座屈崩壊挙動の有限要素解析, 日本造船学会論文集, 第174号, (1993), 469-477.
- 9) 都井 裕, 磯部大吾郎: 順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の動的崩壊挙動の有限要素解析, 日本造船学会論文集, 第175号, (1994), 299-306.
- 10) 都井 裕, 磯部大吾郎: 順応型 Shifted Integration 法による大規模骨組構造の耐震強度解析, 生産研究, 第46巻, 第10号, (1994), 27-30.
- 11) 都井 裕, 梁 洪鐘: 骨組構造の崩壊シミュレーション(その1. 定式化および簡単な数値例), 日本造船学会論文集, 第166号, (1989), 285-294.