

I-A73

引張鋼部材の3次元塑性不安定解析

東北大学 正会員 岡澤 重信¹ 名古屋大学 フェロー 宇佐美 勉²
 名古屋大学 学生員 佐竹 洋一³ 岐阜大学 藤井 文夫⁴

1. 序論

引張力が作用する鋼材において発生するくびれ挙動は典型的な塑性不安定現象である。塑性不安定現象は塑性変形の局所化などの材料不安定挙動ひいては構造不安定挙動を引き起こす根本的な原因となる。よってこの塑性不安定現象を詳細に解明することは、鋼材の終局的挙動の把握や、構造物の耐震安全性評価等においても重要である。

従来の塑性不安定解析ではそのほとんどで平面ひずみ状態を仮定した2次元解析が行われてきた。平面ひずみ状態では、金属材料として一般的な構成方程式である硬化型の J_2 流れ則を用いた場合には、くびれの初期の段階つまり拡散くびれしか発生せず、破断の直接的原因となる挙動を再現できないことが広く知られている[1,2]。また平面応力状態では、拡散くびれに続く×状のせん断型の局部くびれが発生するものの[3]、平面応力状態という特性上その適用は極めて薄い材料への適用に限定される。そのため、通常の流れ理論ではない変形理論による構成方程式[1,2]や軟化型構成方程式[4]が塑性不安定解析において用いられてきたという経緯がある。これらの構成方程式を用いることによって破断をシミュレートできない有限要素解析においても、平面ひずみ状態での破断を示すようなせん断帯を発生させることができる。しかし、軟化型構成方程式では材料レベルでの強度を意図的に低下させているのは明確であり、また変形理論における構成方程式は、縦弾性係数よりもせん断弾性係数の低下率が大きくなり、せん断帯を発生しやすくなると考えられることが、最近の研究[5]によって報告されている。平面ひずみ状態でのせん断帯を発生させるという観点だけを考えた場合、これらの構成方程式が作為的なものと考えられないこともない。

また2次元状態における塑性不安定解析に比べて、3次元解析の研究例[4]は極めて少ないのが実状である。しかし鋼材などの固体物体というものは基本的には3次元状態であり、その形状が塑性不安定挙動に及ぼす影響はかなり大きいはずである。よって塑性不安定現象を詳細に解明するためには鋼材の幾何学的な形状を考慮した3次元解析が必要不可欠である。

本研究の目的は、金属材料として一般的な硬化型の J_2 流れ則のみを用いた3次元塑性不安定解析によって、拡散くびれのあとの破断直前の終局的状態にどこまで近づけるかを検証することである[6]。ここでは計算結果の正当性を確認するために、実際に鋼材の引張試験を行いその破断直前の変形状態との比較も行う。

2. 弾塑性分岐解析法 [6,7]

塑性不安定現象におけるくびれの発生は、荷重極大点直後の分岐現象として取り扱うことが可能である。本研究では幾何学的な初期不整等を混入させた不完全系を扱うのではなく、一貫して完全系からの分岐現象としての塑性不安定解析を扱うものとする。

分岐点における分岐方向の変位予測子は、主経路方向の解とクリティカルな固有ベクトルの線形結合で表せられる。塑性不安定解析のような極めて細かな要素分割が要求される有限要素解析において、固有ベクトルを求めるために固有値解析を行うことは膨大な計算時間、容量を有するため実用的ではない。よって固有値解析を行わなくても、分岐解析によって必要となるクリティカルな固有ベクトルの近似値を精度よく求める方法[7]を用いた。弾性問題においてはこの固有ベクトルのスケールリングは試行錯誤的に決定される。しかし弾塑性問題においては、分岐点において降伏している積分点のうち中立負荷となる1点を除いて降伏が続行するようにこのスケールリングを選択することによって、それを一意に決定することができる[8]。

3. 解析結果

弾塑性構成方程式としては、大ひずみ解析においても対称な接線剛性マトリクスが得られるように、相対 Kirchhoff 応力の Jaumann 速度による J_2 流れ則を用いた。そして塑性域では文献[3,9]と同様な硬化型の応力-ひずみ関係を仮定した。材料定数としてヤング係数 $E=200(\text{GPa})$ 、ポアソン比 $\nu=1/3$ である。計算対象とした引張力を受ける鋼部材は図-1であるが、対称性から1/8部分のみを取り出して計算を行った。ただし $L/W=3.0$ とした。有限要素としては8節点のアイソパラメトリック要素を用いて、volumetric ロッキングを回避するために選択型低減積分を用いた。引張力を与えても均一変形となるような境界条件を用いて、端部の軸方向変位が一樣となるように拘束し、図-1の斜線部分の Z 軸方向に荷重を作用させた。

本研究では幅と厚さの比(以後、幅厚比 W/t)を1.0から20まで変化させた8種類の部材の塑性不安定解析を行ったが、本論文では、幅厚比が10及び4の結果のみを示す。すべての部材は分岐直後に拡散くびれが発生し、さらにその分岐経路を追跡し続けることによって終局的挙動へと変形が移行していった。

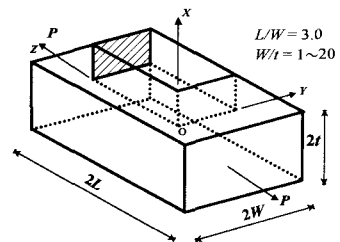


図-1 引張力を受ける鋼部材モデル
(解析は1/8について行う)

Key Words : necking, plastic instability, bifurcation, finite element analysis

¹ 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 TEL 022-217-7419 FAX 022-217-7418

² 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 TEL 052-789-4617 FAX 052-789-5461

³ 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 TEL 052-789-3726

⁴ 〒501-1112 岐阜市柳戸 TEL 058-293-2404 FAX 058-293-2404

幅厚比 10 のモデルはほぼ平面応力状態であり、図-2 に示すように、平面応力状態での2次元解析[3]と極めて似通った×状のせん断型の局部くびれが発生している。このモデルでは分岐することによって除荷が端部から始まって中心部に進展した後に、今度は中心部から再び除荷が発生して塑性部分が挟まれる格好となる。そして残された×状の塑性部分のみに変形が集中して×状の局部くびれを形成する。写真-1 は幅厚比 10 の鋼材において、塑性不安定現象により発生した×状のせん断型の局部くびれであり、図-2 とよく一致している。

幅厚比 4 の試験片においては、×状のせん断型の局部くびれの代わりに、図-3 に示すような試験片の長手方向とは垂直に板厚方向の狭い領域がくびれる局部くびれが発生する。幅厚比の大きな試験片で発生する×状のせん断型の局部くびれに対して、いわゆる集中型の局部くびれが発生する理由は、分岐経路上での除荷域の進展具合にある。分岐によって端部から除荷が発生するということは幅厚比 10 のものと大差はないが、次の段階で、幅厚比 10 の場合のように金属片中心部から除荷が始まるのではなく、端部からの除荷領域がさらに広がり試験片中央の塑性域を楕円上に包み込む。そして、残された塑性域に変形が集中することによって集中的な局部くびれが発生する。写真-2 は、幅厚比 4 を有する鋼材の破断直前の状態である。この写真からは図-3 の計算結果と似通った集中型局部くびれモードが観察できる。このくらいの幅厚比の鋼材は JIS の引張試験において推奨されている幅厚比であり、このような集中型局部くびれは実際の引張試験において観察されているにもかかわらず、2次元解析においては全くシミュレート不可能な塑性不安定現象である。

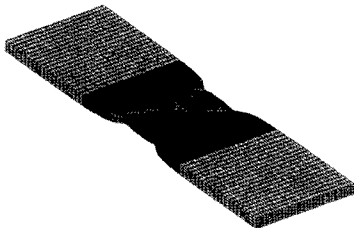


図-2 幅厚比 10 の部材の×状のせん断型局部くびれ(解析)

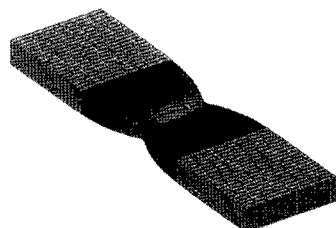


図-3 幅厚比 4 の部材の集中型局部くびれ(解析)

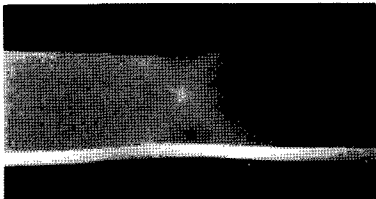


写真-1 ×状のせん断型局部くびれ(実験)

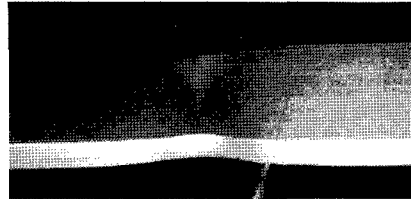


写真-2 集中型局部くびれ(実験)

4. 結論

金属材料として一般的な硬化型の J_2 流れ則のみを用いて3次元塑性不安定解析を行った。荷重極大点後に分岐が発生し、分岐直後は拡散くびれを示しているということは薄肉・厚肉部材を問わず共通の挙動である。そしてその分岐経路をさらに追跡することによって薄い部材はせん断型の×状の局部くびれ、厚い部材は集中型局部くびれの終局的挙動へと変形が移行する。拡散くびれへの分岐が発生した後は2度目の分岐は発生しないものの、拡散くびれの分岐がその発端になっているという観点からすると、拡散くびれから局部くびれへの終局的挙動は一連の構造的な分岐現象として認識することが可能である。

このように硬化型の J_2 流れ則だけでも、3次元解析を行えば破断直前までの終局的挙動をシミュレートすることができる。有限要素解析の性格上、破断までをシミュレートすることは不可能であるが、薄い部材の場合はせん断型の×状の局部くびれがいわばせん断帯となり破断条件になっていると考えられる。厚い部材においてはせん断型の局部くびれではないため、それ自身が破断条件になっていると言いが、部材中央部の1番くびれた部分から破断に至ると考えることもできる。厚い部材でせん断変形の卓越した破断状態を有限要素解析でシミュレートするには、変形理論における構成方程式等の適用を試みるべきであろう。

参考文献

- [1]Budiansky, B. : A Reassessment of Deformation Theories of Plasticity, J. Appl. Mech., ASME, 26, pp.259-264, 1959.
- [2]Christoffersen, J. and Hutchinson, J.W. : A Class of Phenomenological Corner Theories of Plasticity, J. Mech. Phys. Solids, 25, pp.465-487, 1979.
- [3]川井謙一 : 平面応力引張りに関するベンチマークテスト, 塑性と加工, 32, pp.560-564, 1991.
- [4]Zbib, H.M. and Jubran, J.S. : Dynamic Shear Banding : A Three-Dimensional Analysis, Int. J. of Plasticity, 8, pp.619-641, 1992.
- [5]石崎 仁 : 非共軸項を付加したひずみ硬化弾塑性構成式による2次元局所化変形解析, 土木学会論文集, 603, pp.113-127, 1998.
- [6]岡澤重信 : 弾塑性分岐解析による固体のくびれ・せん断帯挙動に関する研究, 名古屋大学博士学位論文, 1999.
- [7]Okazawa, S., Noguchi, H. and Fujii, F. : Scaled Corrector and Branch-Switching in Necking Problems, International Conference on Computational Engineering Science, Atlanta/USA, Modeling and Simulation Based Engineering, Tech Science Press, pp.419-424, 1998.
- [8]Hutchinson, J.W. : Post-Bifurcation Behavior in the Plastic Range, J. Mech. Phys. Solids, 21, pp.163-190, 1973.
- [9]川井謙一 : 軸対称および平面ひずみ引張りに関するベンチマークテスト, 塑性と加工, 32, pp.553-559, 1991.