

塑性加工の複合数値解析に関する研究 第1報

—管端のアプセット加工の解析(1)—

Study on Combined Numerical Analysis 1st. Report

—Numerical Analysis of Upsetting of Pipes. PART 1—

木内 学*・柳本 潤*

Manabu KIUCHI and Jun YANAGIMOTO

1. はじめに

鍛造加工は加工形態の複雑性から、従来、加工中の被加工材の変形の予測が困難な分野とされてきたが、最近の計算機の高速度・大容量化、および数値解析手法の発達を受けて、さまざまな変形形態に対する数値予測が可能になりつつある。現在は主に、FEMまたはUBETを用いた大規模なシミュレーションプログラムの開発¹⁾²⁾、およびそれを用いての解析が行われ成功を収めつつあるが、両者はそれぞれ固有の長所・短所を有する。たとえば、FEMは詳細なシミュレーションが可能であるが、反面計算機のハード面およびコストの制約をうけ、UBETは安価・簡便なシミュレーションが可能な反面、解析精度をあまり期待できない場合が多い。これら個々の解析法の欠点を解決し、適用範囲を広げる努力は今後もなされていくであろうが、さらに拡張した解決法として、これら両解析法の利点を生かしつつ複合し、詳細な解析を効率的に行う方法が考えられる。すなわち、解析対象とする領域を、UBETを適用する部分とFEMを適用する部分に分け、この両領域間の境界において、解析パラメータ(速度と仕事率、またはそれに準ずる関数)を相互に交換しつつ解析を実行する方法であり、これを複合数値解析と名付ける(図1参照)。

たとえば、図2に示す側方フラッシュを有する製品の鍛造過程の解析を行う場合を例にとると、変形の自由度

を多く必要とする領域(フラッシュ部分)にはFEM、それ以外の領域にはUBETを適用し、この両者間で前述の解析パラメータの交換を行いつつ、全体領域の解析を行う。このような方法をとることにより、UBETの持つ経済性・FEMの持つ高精度という特徴を兼ね備えた解析が可能となる。筆者らはこの複合数値解析につき研究を行っており、幾つかの興味深い結果を得ているが、詳細については今後報告することとし、本報および次報ではその予備的研究として、生産現場で多くの問題を生じている管端のアプセット加工を例としてとりあげ、これの剛塑性FEMによる解析法・解析例と、別報³⁾に示したUBETによる解析との比較・検討結果につき述べる。

複合数値解析

概要

- 異なった二種の解析法(UBET, RFEM)をそれぞれの特色を生かしつつ複合化
- 解析対象とする領域を分割
変形の複雑な領域—RFEM
それ以外 —UBET
- 両解析法間での解析パラメータの分割境界での交換
UBET→RFEM 境界速度
RFEM→UBET 仕事率(またはそれに準ずる関数)

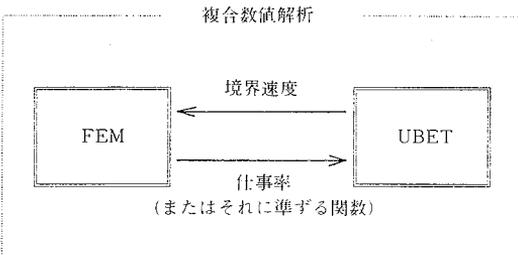


図1 複合数値解析の概要

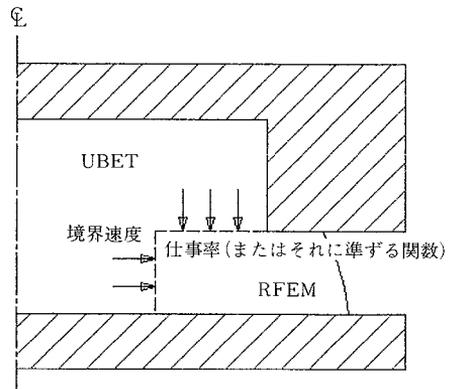


図2 複合数値解析の適用例

* 東京大学生産技術研究所 第2部

2. 管端のアブセット加工とその問題点

油井管のアブセット加工は、管端部の強度向上を目的として、管端部をすえ込み、増肉させる加工法であるが、座屈変形にともなう形状不整・表面または内部欠陥が加工上の大きな問題となる。したがって最適な加工条件を見いだすための変形の事前予測が重要であるが、従来の研究は実験的に数例行われているのみであり³⁾、加工条件の選択は経験に頼らざるをえないのが実情である。筆者らは、この加工時の素管の変形予測の手法として UBET を用いた解析⁴⁾、および剛塑性 FEM による解析を行い、両解析法の特徴・可能性等を検討した。

3. 剛塑性 FEM 解析

解析法はラグランジュ未定乗数法による剛塑性 FEM⁵⁾ であり、要素は双一次リング要素を用いている。また、必要な解析精度を確保するため、積分は 2×2 のガウス積分を用いた。解析例は、外側増肉のアブセット加工 (図 3 参照) を対象としており (結果の詳細は次報参照)、工具形状により定めた面 P より上部の変形域について、面 P における管軸方向単純支持の条件のもとで解析を行っている。また、このアブセット加工においては、素管の工具への接触・充満現象のほかに、素管が工具より離れる現象をパンチ側壁面上で生じるために、節点の離脱というかたちでこれを再現し、適正な境界条件のもとに解析を実行する必要がある。工具と節点の離脱については、森ら⁶⁾による後方押し出しのひけの解析に適用されているが、本解析においては、下記に示す節点の離脱判別条件を用いて境界条件の自動修正をおこないつつシミュレーションを実行した。なお離脱判別条件は節点と工具の接触関係により次の二種に分類される。

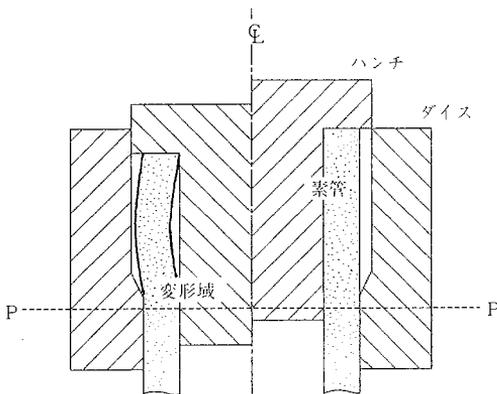


図 3 管端のアブセット加工(外側増肉)

A) 工具と要素の辺が接触している場合

ある N 番目のステップ (以後 N ステップと記す) において求めた収束解に対応する要素の接触辺中点における、工具面垂直方向応力 σ_N と、両側の節点 I, J における工具面垂直方向節点力 F_{NI}, F_{NJ} を計算し、 σ_N, F_{NI}, F_{NJ} すべてが引張り力となった場合には、この辺は工具面より離脱するものと考え、節点 I, J 双方の境界条件を修正して、次の $N+1$ 番目のステップ (以後 $N+1$ ステップと記す) を実行する (図 4 (a))。

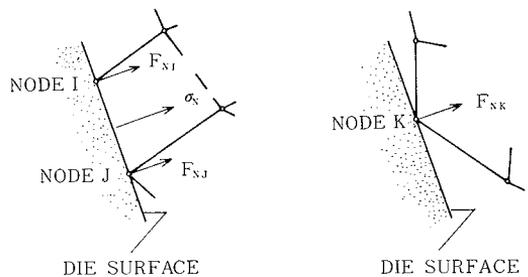
B) 工具と一つの節点のみが接触している場合

ある N ステップにおいて求めた収束解に対応する接触節点 K の工具面垂直方向節点力 F_{NK} が引張り力となった場合には、この節点 K は工具面より離脱するものと考え、その境界条件を修正して、 $N+1$ ステップを実行する (図 4 (b))。

以上 A), B) の判別基準により境界条件を修正した節点については、 $N+1$ ステップにおける収束解が求めた時点で、離脱側の節点速度を持つことを確認し、持たぬ場合は境界条件を再修正し、そのステップを再計算する必要がある (図 5 (a))。この手続きは、離脱側への境界条件修正が、 $N+1$ ステップとは厳密には境界条件の異なる N ステップの収束解に対応する力学量をもとに、 $N+1$ ステップの開始時 (収束計算の開始前) に限定して行われていることを補正するものである。 $N+1$ ステップにおける力学量をもとに境界条件の修正を行いつつ $N+1$ ステップの収束計算を行えば (図 5 (b) 参照)、このような境界条件の再修正手続きは不要となるが、その場合、収束演算中の安定性が悪化し計算時間の増大を招く恐れがある。なお、本解析の方法によっても、解析中における境界条件の再修正はほとんど不要であり、十分な精度での解析が可能である。

4. 平行板による管の圧縮の解析

解析法の妥当性を検討するために、平行板による管の



(a)

(b)

図 4 節点の離脱基準

研究速報

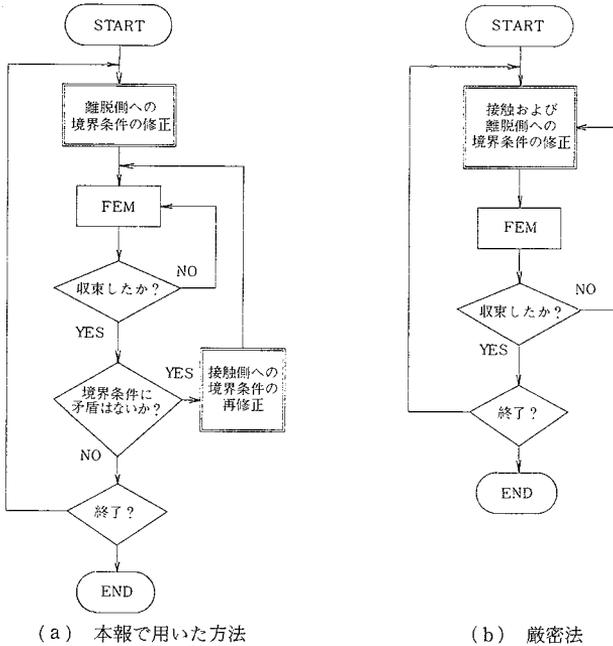


図5 離脱側への境界条件の修正手順

圧縮問題の解析を行い、実験と比較した。材料の初期寸法は外径 $\phi 30$ mm, 内径 $\phi 24$ mm, 材質は S 25 C であり、相当応力-相当ひずみ関係式は、単軸引張試験の結果より次式で近似した。

$$\sigma = 35.0(1 + 50.0 \epsilon)^{0.228} \text{ [kgf/mm}^2\text{]} \quad (1)$$

図6に、計算および実験による変形を、図7に圧下率-荷重線図を示す。実験は、工具端面無潤滑条件のもとで行ったが、その際、端面での材料-工具間の相対すべりがほとんど観察されなかったために、解析は、端面拘束条件のもとで行った。実験により得られた変形は、久能木⁷⁾による1.5次の座屈に対応しており、計算結果とよく一致している。圧下率-荷重線図については、多少のずれが認められるものの、実験により得られた極大点を持つ荷重変化が再現されており、妥当な結果といえる。

5. ま と め

本報では、管端のアブセット加工を対象として、剛塑性FEMによる解析法、およびそれに関連して、工具壁面からの材料の離脱現象を取り扱う方法を示した。また、平行板による管の圧縮を例にとり、解析と実験との比

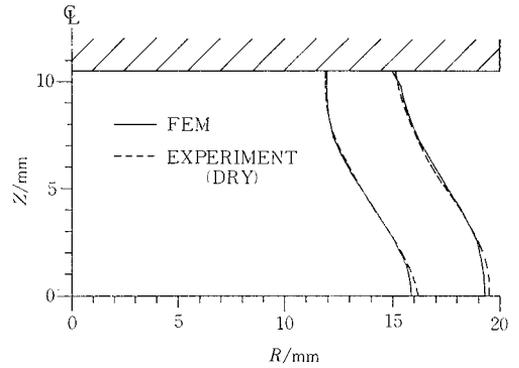


図6 変形形状の比較(圧下率30%)

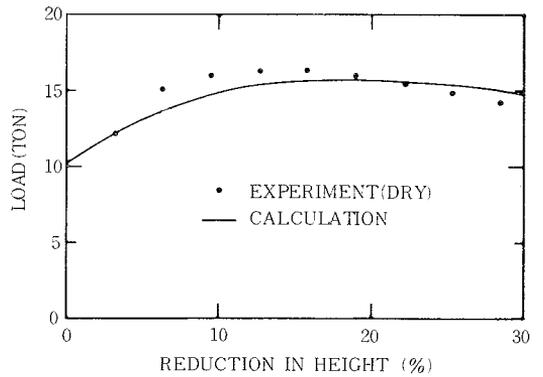


図7 圧下率-荷重線図の比較

較・検討を加えた結果、剛塑性FEMによる座屈現象のシミュレーションが、十分な妥当性を持つことが判明した。次報では、本報に示した解析法を用いて、管端のアブセット加工の解析を行い、この加工プロセスの特性につき詳細な検討を加える。とともに、UBETによる解析結果との比較・検討を行う。(1986年1月6日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば S. I. OH et. al.: Proc. 1st. ICTP, (1984), 1051
- 2) たとえば 木内・村田: 塑性と加工, 22-244, (1981), 495
- 3) たとえば 川鉄技報16, (1984), 17
- 4) 木内・今井・鄭・柳本: 第36 塑加連講論, 441
- 5) C. H. LEE・S. KOBAYASHI: Trans. ASME. J. Eng. Ind., (1973), 865
- 6) 森・小坂田: 第31 塑加連講論, 231
- 7) 久能木: 科研報告, 30, (1954), 63