

UBET の鍛造加工への応用に関する研究 II

——円管のすえ込み加工の解析——

Study on Application of UBET (Upper Bound Elemental Technique) to Forging II

木 内 学*・今 井 敏 博**・鄭 顕 甲***・柳 本 潤*

Manabu KIUCHI, Toshihiro IMAI, Hyun Kap CHUNG and Jun YANAGIMOTO

1. はじめに

筆者らは鍛造加工に関する UBET の応用につき一連の研究を行っている。前報¹⁾においては、中心軸を含めぬ変形要素に対する速度場を提案し、中空円板のすえ込み加工の解析を行った。本報では、この速度場を用いた変形解析に、型による拘束を加えた場合の例として、油井管の端部に施されるすえ込み加工(アプセット加工)をとりあげ、単純なモデル化をして解析を行い、実験と比較した。さらに、素管の寸法および拘束壁面の位置をさまざまに変化させた場合についてのシミュレーションを行い、型への充満過程の差につき検討を加えた。以下にその結果につき報告する。

2. 解析方法

解析に用いた速度場は、基本的には前報¹⁾と同一である。まず解析対象とする円管を図1に示すように、軸方向に n 個の要素に分割する。なお解析モデルには対称性を仮定し、上 $1/2$ 部分についてのみ考えることとする。

i 番目の要素 E_i に対する動的可容速度場の一般形を、 a_i, b_i, c_i, A_i, B_i の五個の未知係数を用いて、次式のように仮定する。

$$\dot{U}r^{(i)} = (a_i r - A_i/r)y + b_i r - B_i/r \quad (1)$$

$$\dot{U}y^{(i)} = -a_i y^2 - 2b_i y + c_i \quad (2)$$

要素境界面上における境界面垂直および平行方向の速度の連続条件は、次式で表される。

$$\dot{U}r^{(i)} = \dot{U}r^{(i+1)} \quad [Y = Y_{i+1}] \quad (3)$$

$$\dot{U}y^{(i)} = \dot{U}y^{(i+1)} \quad [Y = Y_{i+1}] \quad (4)$$

さらにパンチの圧下端面における速度境界条件より、

$$\dot{U}y^{(n)} = -\dot{U} \quad [Y = Y_{n+1}] \quad (5)$$

また対称条件より、

$$\dot{U}y^{(1)} = 0 \quad [Y = Y_1] \quad (6)$$

以上(1)~(6)式を組み合わせることにより、 $2n+1$ 個の自由度を持つ系全体に対する速度場が構成される。さらに本報に示す解析においては、拘束壁面が存在するため、以下の取り扱いが必要である。ある1個の節点 J (要

素 $j-1$ と要素 j とが自由表面上で共有する点)が垂直な拘束壁 $r=r_w$ により拘束される場合、その節点について次式が成立せねばならない。

$$\dot{U}r^{(j)} = (a_j r_w - A_j/r_w)y_j + b_j r_w - B_j/r_w = 0 \quad (7)$$

(7)式は拘束されている各節点に対し成り立つ必要があり、結局拘束節点数を m 個とした場合の系全体についての自由度は $2n+1-m$ 個となる。つまり内外自由表面上に合計 $2n+2$ 個ある節点のうち、最大 $2n+1$ 個の節点を拘束できるため、材料の型への充満問題の取り扱いが可能であることがわかる。

以上により構成された速度場を用いて、前報と同様の手順により、系全体に対する内部仕事率 $\dot{W}_I = \sum \dot{W}_i$ 、パンチ圧下端面における摩擦仕事率 \dot{W}_{fp} が計算できる。さらに、要素 E_i の辺と拘束壁が接触している場合、この面での摩擦仕事率は次式で表される。

$$\dot{W}_{fi} = m' / \sqrt{3} \cdot \sigma_0 |\Delta U y_i| S_c \quad (8)$$

ただし、 m' は拘束壁面上での摩擦定数(Friction Factor)、 σ_0 は初期降伏応力、 $\Delta U y_i$ は材料と壁面の相対速度、 S_c は拘束壁との接触面積である。

したがって全変形仕事率は次式で表される。

$$\dot{W}_T = \sum \dot{W}_i + \sum \dot{W}_{fi} + \dot{W}_{fp} \quad (9)$$

この \dot{W}_T を $2n+1-m$ 個の準独立変数について最小化することにより、ある形状に対応した系全体の速度場が求まり、その速度場を用いた形状の修正を繰り返すことにより、変形のシミュレーションを行う。最適化の手法としては、直接探索法の一つである F. P. S 法を用いた。

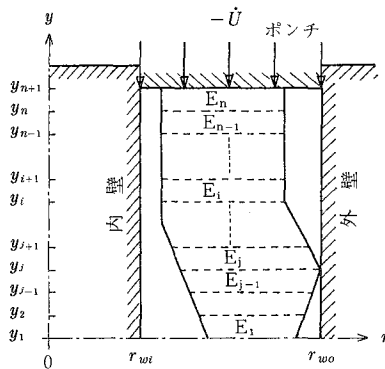


図1 解析モデルと要素分割

* 東京大学生産技術研究所 第2部

** 日本電装(株)

*** 韓国機械研究所

研究速報

なお、新たに接触する節点がある場合は、拘束壁面との干渉によるポンチの圧下量の増分の調整を行い、また、すでに接触している節点の、工具壁面からの離脱現象を取り扱うために、各ステップごとにまず拘束が無い場合につき計算を行い(Dummy Run)、その結果工具壁面内に侵入する速度を持つ節点に対して、拘束を行って再計

算する方法を用いて解析を行った。

3. 数値解析結果および考察

3-1 数値解析結果と実験との比較

数値解析結果の妥当性を検討するために、図2に示す工具を用いて、円管のすえ込み加工の実験を行い、UBETによる解析結果と比較した。素管の初期寸法は、当初、管内径側が内壁により拘束されている場合(以下内壁拘束と称す)は外径 $\phi 26\text{ mm}$ 、内径 $\phi 20\text{ mm}$ 、高さ 30 mm 、当初、管外径側が外壁により拘束されている場合(以下外壁拘束と称す)は外径 $\phi 30\text{ mm}$ 、内径 $\phi 24\text{ mm}$ 、高さ 30 mm である。なお拘束壁面の位置は、外壁は $r_{w0}=30\text{ mm}$ 、内壁は $r_{wi}=20\text{ mm}$ であり、上記両場合とも同一である。素管の材質はS25Cであり詳細は前報¹⁾を参照されたい。応力-ひずみ関係式は単軸引張り試験の結果から、次式で近似した。

$$\bar{\sigma} = 35.0(1 + 50.0\bar{\epsilon})^{0.228} \quad (10)$$

なお、解析は圧下端面での摩擦定数を $m=1.0$ とし、拘束壁面での摩擦定数 m' を $0.1, 0.3$ として行った。また、実験では潤滑剤としてグリースを用いている。図3に解析および実験により得られた変形状状、図4に圧下率-荷重曲線を示す。

内壁拘束の場合の変形状状は、圧下率20%において若干のずれが認められるものの、10%および30%においてはほぼ一致している。また、図には示していないが外壁拘束の場合は10~30%の範囲で、実験結果と解析結果がほぼ一致した。圧下率-荷重曲線の対応関係もほぼ同様

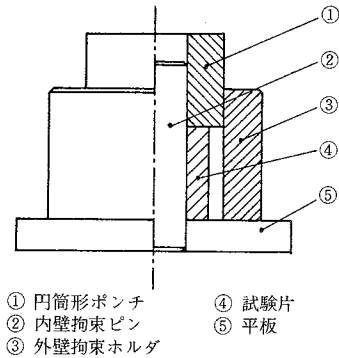


図2 実験に用いた工具形状

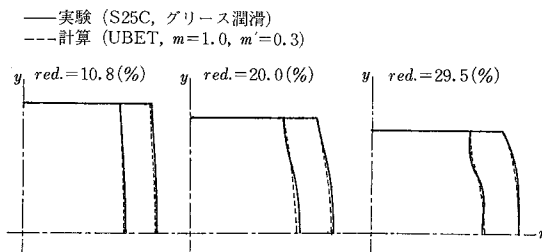
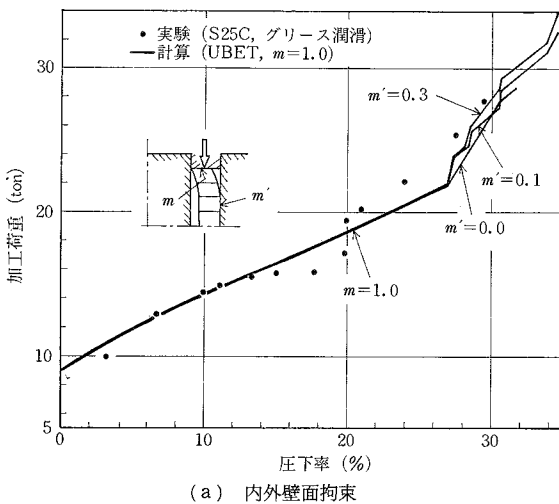
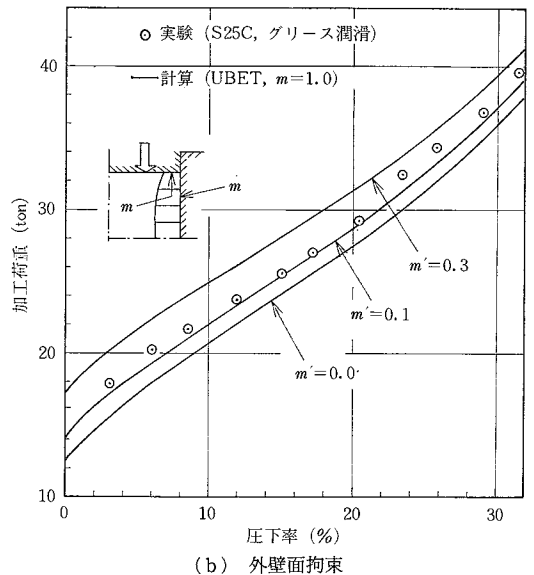


図3 素管の変形状状と実験結果との比較



(a) 内外壁面拘束



(b) 外壁面拘束

図4 解析と実験荷重曲線

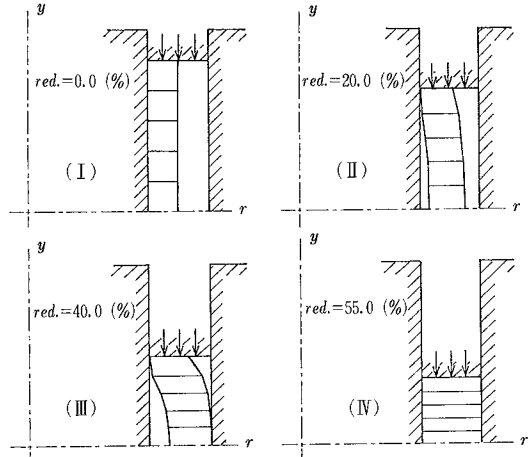
であり、内壁拘束の場合の圧下率 20% 付近を除き、両者により対応が見られる。以上の形状・荷重に関する比較において、内壁拘束の圧下率 20% 付近で見られるずれの原因は、次のように考えられる。本報の解析に用いた速度場は準平行速度場であり、管軸方向に垂直な面は、変形中も垂直性を保つ。したがって、内壁拘束の圧下率 20% における変形のように、自由表面のたわみが大きくなる場合には、この速度場はそれを過小評価する傾向を

持つ。一方、それ以外の型よりの拘束が大きい場合には、以上の問題が生じないために、本報に用いた単純な速度場でも相応の精度が確保されており、たとえば型への充満問題などへの適用には十分な妥当性を持つと考えられる。

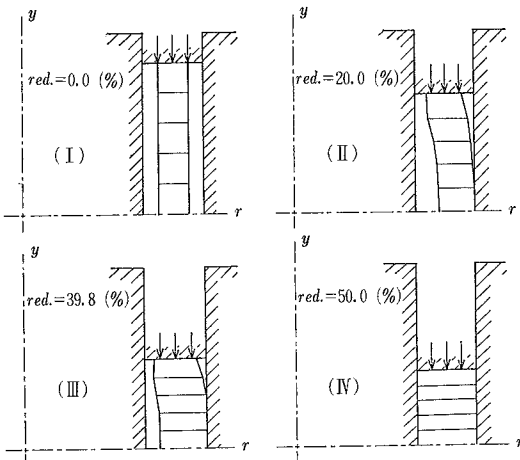
表 1 素管の寸法

単位: mm

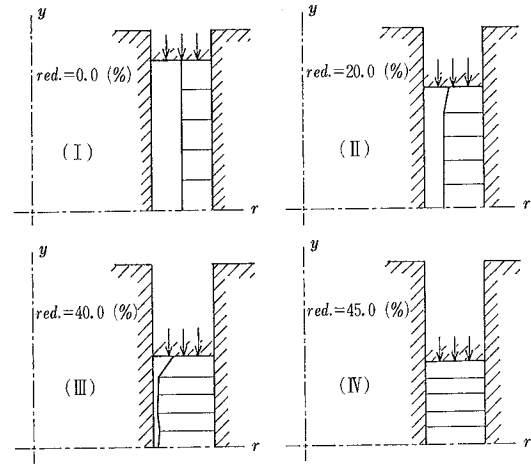
CASE	内径	外径	高さ	図
CASE a-1	80	100	100	図 5-(a)
CASE a-2	90	110	100	図 5-(b)
CASE a-3	100	120	100	図 5-(c)
CASE b-1	80	100	200	図 5-(d)
CASE b-2	90	110	200	図 5-(e)
CASE b-3	100	120	200	図 5-(f)



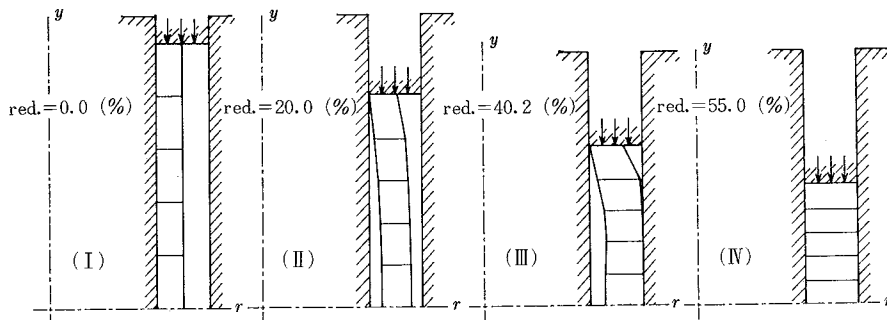
(a) CASE a-1



(b) CASE a-2



(c) CASE a-3



(d) CASE b-1

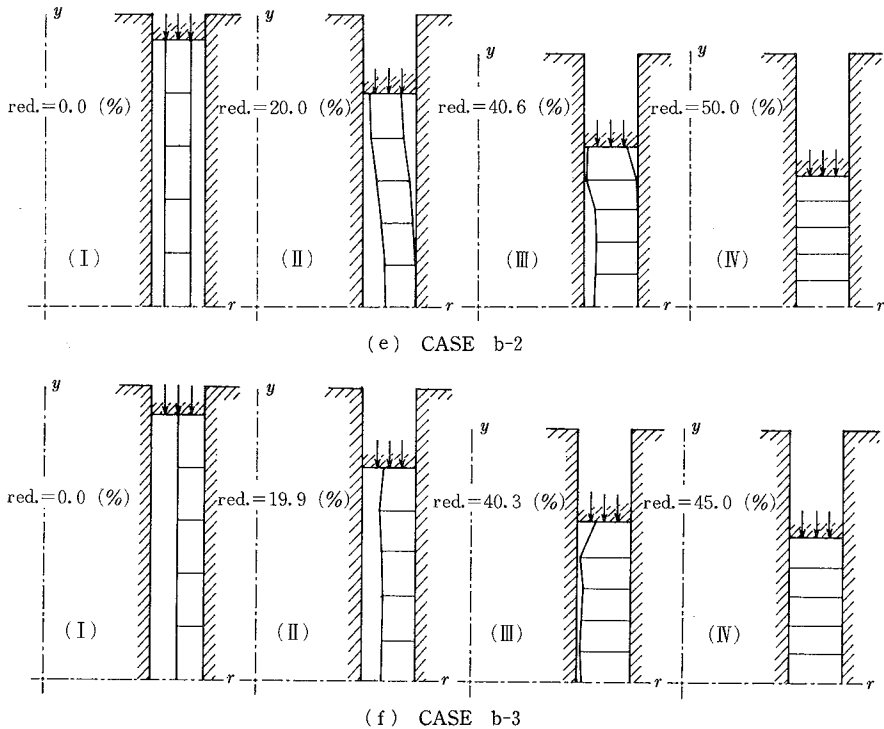


図5 素管の型への充填過程

3-2 材料の型への充填

表1に示す種々の素管寸法について、変形過程のシミュレーションを行った結果を図5(a)~(f)に示す。ただし、これらの場合、内壁面の径は80mm、外壁面の径は、120mmである。CASE a-1の場合(図5(a))は、当初、内壁面に接した状態から圧縮する場合であり、(I)~(IV)の過程で順次外壁面に接しつつ変形が進行する。一方、ポンチと接している面の内径は、内壁から離れないまま変形が進む。圧下率が約37%で材料の中央部の1個の節点が外壁面に接触し、以下、順次型に充填する。CASE a-2(図5(b))は素管が両壁面の中央にある場合であり、前報で示した中空円板の変形と類似の変形が進む。圧下率が約22%で素管中央部の節点が外壁面に接触し、以下、順次型に充填する。CASE a-3(図5(c))は、当初、外壁面に接している状態から圧縮を開始する場合であり、この場合は、素管の外周全体が外壁に拘束されたまま変形が進み、一様圧縮に近い変形状態を保ちつつ、順次型に充填する。CASE b-1~3はCASE a-1~3と同じ拘束条件で素管の高さを2倍にした場合であり、これらの結果より、壁面による拘束が同一であることもあって、高さが2倍になっても素管は、ほぼ同様な変形をすることがわかる。ただし、高さが増大すると、素管の

上部の変形が増し、管端部の肉厚が増大する傾向があることがわかる。また、図で示してあるように、シミュレーションCASE a-1~3および、CASE b-1~3共に、型内に素管が完全に充填し終わるまで行われた。

4. まとめ

本報では、UBET法により円管端部のすえ込み加工の際の変形のシミュレーションを試みた。これらの結果より中空円板のすえ込み加工の解析(前報¹⁾)で提案した速度場に壁面の拘束条件を組み合わせるにより、この種の変形に関するシミュレーションも、ある程度まで可能であることがわかった。ただし、本研究で用いた速度場には、まだ改善の必要性和余地があり、今後検討を進める予定である。

(1985年9月5日受理)

参考文献

- 1) 木内・今井・鄭・柳本：第36 鋳造連講論，437
- 2) Kudo, H: Int. J. Mech. Sci., 2, (1960), 102
- 3) B. Avitzur, F. Sauerwine: Trans. ASME, 100, (1978), 340
- 4) 木内・村田・矢吹：塑性と加工, 26, 290, (1985)
- 5) 久能木：科研報告, 30, (1954), 63
- 6) たとえば 川鉄技報, 16, (1984), 17