有限要素法と単純圧縮実験を組合わせた等温変形抵抗の算出*

加田 修^{*1}, 三木 武司^{*1}
戸田 正弘^{*1}, 小坂田 宏造^{*2}Calculation of Isothermal Flow Stress by the Combination
of FEM and a Simple Compression TestOsamu KADA, Takeshi MIKI
Masahiro TODA and Kozo OSAKADA

In forging of parts with complicated shapes or of high strength materials, it is important to predict the accurate load and the tool pressure, and thus it is essential to evaluate the exact flow stress of materials. In the practice, nominal flow stress calculated from a simple compression test, which is derived by dividing the load by the cross-sectional area, is often used for approximate evaluation of forming load. This nominal flow stress contains the effects of the frictional force, the change in temperature caused by plastic deformation, and the heat transfer between the tool and the material. These effects are especially significant in a high strain range. To obtain an accurate flow curve, the rigid-plastic FEM-analysis is carried out by using the approximate value of flow stress obtained from a simple compression test and the effects of friction and heat transfer are eliminated. Then, isothermal flow stress which corresponds to the strain, strain rate and temperature at each point of material is derived from this result. It is concluded that the ratio of nominal stress to isothermal flow stress ranges from 0.75 to 2.0.

Key Words: Constitutive Equation, Iron and Steel, Finite Element Method, Plastic Working, Forging, Flow Stress

1. 緒 論

複雑形状部品の鍛造においては工具負荷あるいは材料流動等の正確な予測が重要となる。今日、この目的には有限要素法などの数値解析によるCAEが多く用いられるが、その解析精度を高めるには材料の正確な加工硬化特性を知る必要がある。冶金現象を定式化して変形抵抗を定める手法が実用化されている^{(1)~(3)}が、温・熱間変形抵抗の実測には、多くの困難を伴う。例えば、摩擦の影響を除去するために、圧縮試験片の端部に潤滑剤を封じ込める手法は古くから使われている^{(4), (5)}ものの、対数ひずみ0.6から0.8程度しか追従できないし、中速度の鍛造プレスを用いた温・熱間鍛造工程に見合ったひずみ速度(1~10 s⁻¹)では熱移動、発熱による誤差が無視できなくなる。

鍛造時の素材ひずみは、1.0以上に及ぶので、このひずみ域まで実用のひずみ速度下の変形抵抗を精度

良く測定する必要がある。

さらに、鍛造加工においては変形中の素材各部位の温度、ひずみ、ひずみ速度が時々刻々変化するのであるから、熱解析を伴うFEMでシミュレーションを行う場合には、変形中の温度をある一定値で整理した等温変形抵抗が、各ひずみ速度に対応して与えられていることが望ましい。坪内らは中空薄肉試験片のねじり試験によって、変形による発熱、熱移動等を生じた結果としての温度を測定して、その時のせん断応力と対応させることにより等温変形抵抗曲線を求めた⁽⁶⁾。これは精度の高い測定法であるが、専用の高速ねじり試験装置を備えたとともに、中空薄肉試験片を用いなければならず、鍛造材のように異方性も含めて中実材全体の特性を評価するには必ずしも向いていない。

五十川らは冷間圧縮に関するOsakadaらの方法⁽⁷⁾を用いて、温・熱間圧縮試験結果から変形抵抗を算出するとともに、断熱変形を仮定して平均温度上昇を見積もり、上記の等温変形抵抗を求める手法を提案している⁽⁸⁾。しかしながら、この方法は外部への熱移動が無視できない比較的小さいひずみ速度下、ひずみの大

* 原稿受付 1997年10月17日。

^{*1} 正員, 新日本製鉄(株)鉄鋼研究所(〒293 8511 富津市新富20-1)。^{*2} 正員, 大阪大学基礎工学部(〒560 0043 豊中市待兼山町1-3)。

きいところでは誤差が大きくなる。

ここでは、特殊な試験機を必要とせず、摩擦発生や温度変化を容認した単純円柱圧縮試験にFEMを援用して、等温変形抵抗を大ひずみ域まで高精度で求める、実用上極めて簡易な手法を提案する。

2. 等温変形抵抗算出の考え方

等温変形抵抗算出の具体的な考え方は、圧縮試験結果に対して、熱連成剛塑性有限要素法による変形解析から、摩擦力及び加工発熱、熱移動の影響を取り除くことにより、一定温度下の変形抵抗を抽出するものである。

いま、ある温度下に加熱された円柱試験片を上下二つの圧盤によって圧縮する場合を考える。こうした実験を用いて、試験片の最大断面積で荷重を除いた見かけの変形抵抗を求めることがよく行われる。ところが、それは工具と素材間の摩擦力、加工発熱、熱移動などの影響が含まれたものであり、ことに高ひずみ域においては精度低下が著しい。そこでまず、求めようとする全ひずみ域において、ある一定温度における変形抵抗を単純圧縮の実験値を元に仮定する。その等温変形抵抗を用いてFEMにより、摩擦や発熱、熱移動を考慮した単純圧縮を再現して、その結果から見かけの変形抵抗を算出すれば、最初仮定した等温変形抵抗と、この見かけの変形抵抗の差異は摩擦、発熱および熱移動によって生じるものであるといえる。そこでこれらの比を算出しておけば、その値を用いて実験によって求められる見かけの変形抵抗から、本来の一定温度下の等温変形抵抗が逆算されることになる。

この等温変形抵抗は、初期温度は問わず、素材が変形中に所定の温度になった時の変形抵抗を各ひずみに対して求めて、つなぎ合わせた形になっている。従って、この曲線そのものは実在の材料における変形中の変形抵抗を追跡したものではなく、あくまで仮想曲線であることに注意が必要である。

なお、変形抵抗を、ひずみ速度や温度の関数として定式化することがしばしば試みられる⁽⁹⁾が、ここでは行わない。その理由は、定式化することによって使用者に便利になるものの、多くの未知数に関して回帰が行われるため精度低下が免れないからである。即ち、ひずみ速度一定の下に等温状態の、より精度の高い応力-ひずみ関係を個々に求める手法を示す。

3. 等温変形抵抗の算出手順

3.1 等温変形抵抗の第一次近似 (図1(A), (B))

図1に等温変形抵抗算出の流れを示す。

まず、後述する実験方法に従って円柱の単純圧縮試験を行い、次式より見かけの変形抵抗を求める。

$$\text{圧縮率: } e = (h_0 - h) / h_0 \times 100 (\%) \cdots (1)$$

$$\text{見かけの変形抵抗: } \bar{\sigma}_{b, EXP} = P_{max} / S_{max} \cdots (2)$$

ただし、 h_0 : 試験片初期高さ、 h : 試験後高さ、 S_{max} : 試験片最大断面積、 P_{max} : 最大荷重

後述する図2に示すように、実験から求めた見かけの変形抵抗は変形初期に一時的な減少があり、それ以後摩擦などの影響により急激に増加する。この変形初期に見られるピークは圧縮率20%前後のひずみの小さい領域に現れ、摩擦、加工発熱、熱移動の影響が比較的小さいので、ここでは仮にこの値を等温変形抵抗の第一次近似として与える。また、等温変形抵抗 $\bar{\sigma}_a$ はひずみ量によらず一定値をとるものとする。この等温変形抵抗の第一次近似を、実際の鍛造の温度範囲を含み、その上下の広い範囲の温度に渡って求めておく。

Fig.1 Flow chart for calculation of isothermal flow stress

3.2 摩擦係数の測定 (図1(C)) 摩擦による変形拘束の影響を見積もるため、リング圧縮試験によって摩擦係数の測定を行う⁽¹⁰⁾。摩擦係数校正曲線の算出には塑性仕事を熱量に変換し、工具と素材間の熱伝導を考慮した剛塑性有限要素法を用い、変形抵抗には第一次近似の等温変形抵抗を用いる。なお、3.1で行う単純圧縮試験において、摩擦条件を固着状態として実施すれば、摩擦係数の算出は必要ない。どちらを選択するかは実験の都合で判断できるが、一般的には摩擦係数の小さい方がひずみの不均一が小さくなり、後述の修正係数の誤差も小さくなると考えられる。

3.3 圧縮率と平均ひずみの関係 (図1(D), (E))

3.1で近似した等温変形抵抗を素材の変形抵抗と考

えて、この値を用いて、単純圧縮試験片の変形中における摩擦力、加工発熱、熱移動の影響を定量化するため、3・2と同様の方法を用いて摩擦係数は一定としたときの熱連成剛塑性FEM計算を行う。なお、この場合の変形条件は3・1の実験と一致させる。

単純圧縮試験の高さ減少率で定義した圧縮率をひずみに換算するために、次式⁽¹⁾によりエネルギー消散率で重みをつけて、平均相当ひずみを求める。

$$\bar{\epsilon} = \sum_i^n (\dot{W}_i \cdot \epsilon_{eqi}) / \dot{W} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $\dot{W}$: 全エネルギー消散率
 $\dot{W}_i$: 各要素のエネルギー消散率
 ϵ_{eqi} : 各要素の相当ひずみ
 $\sum \dot{W}_i / \dot{W} = 1$

この結果を用いて、図2の実験による圧縮率 e と見かけの変形抵抗 $\bar{\sigma}_{b,EXP}$ の関係を、平均相当ひずみ $\bar{\epsilon}$ と見かけの変形抵抗の関係に置き換えておく。

3・4 修正係数 g の算出(図1⑥) つぎに、FEM計算によって、(2)式と同様の見かけの変形抵抗を算出し、これを平均相当ひずみとの関係において求める。ここで算出した見かけの変形抵抗と、3・1で近似した等温変形抵抗の差は、摩擦力、加工発熱、熱移動によって生じたものである。第一次近似の等温変形抵抗を $\bar{\sigma}_a$ 、FEM計算で求めた見かけの変形抵抗を、 $\bar{\sigma}_{b,FEM}$ として、対応する平均相当ひずみについて比をとったものを修正係数 g とする。

$$g = \bar{\sigma}_{b,FEM} / \bar{\sigma}_a \dots \dots \dots (4)$$

3・5 実験値の修正(図1⑦) 3・4で求めた平均相当ひずみと修正係数 g の関係をj用いて、実験で得られる見かけの変形抵抗 $\bar{\sigma}_{b,EXP}$ を g で割れば、摩擦力、加工発熱、熱移動の影響を取り除いた状態の等温変形抵抗が求まる。

4. 実際の材料を用いた等温変形抵抗の測定

3章で述べた手法を機械構造用炭素鋼S45C(C:0.44, Si:0.20, Mn:0.67mass%)圧延材を用いて実施し、図11の結果のみS20C(C:0.21, Si:0.13, Mn:0.46mass%)圧延材を用いた。

4・1 等温変形抵抗の第一次近似 $\phi 20 \times 30$ の試験片を、高周波加熱炉を用いアルゴンガス雰囲気中にて所定の温度まで加熱した。また圧縮には490kN油圧サーボプレスを用いて平均ひずみ速度 $2s^{-1}$ で定速加圧した。圧盤は表面粗さ $R_{max} 0.6\mu m$ 以下に機械加工し、無潤滑圧縮を行った。

図2に、S45Cを用いて圧縮開始温度を1043K、1233K、1423Kとし、(1)、(2)式で整理

した圧縮率と見かけの変形抵抗の関係を示す。

等温変形抵抗の第一次近似 $\bar{\sigma}_a$ として図2の変形初期のピーク値を用い、温度と等温変形抵抗 $\bar{\sigma}_a$ の関係を図3のように近似した。なお厳密には実際に発生するひずみ速度範囲を網羅した実験によって変形抵抗を求める必要があるが、ここではひずみ速度は一定とした場合の議論を進める。

4・2 摩擦係数の測定

試験片には、外径21.0mm、内径10.5mm、高さ7.0mmに機械加工したリング状のものを用い、前出のサーボプレスで圧縮を行った。圧縮条件は単純圧縮試験の場合と同様、圧盤を予加熱し、無潤滑で行った。試験片を高周波加熱炉から取り出して圧縮開始までにかかる5秒後の試験片温度を測定したところ、圧盤予加熱温度573Kにおいて試験片内温度差は10K以下であり、較正曲線を算出する際の初期の温度分布は一樣とし、パンチ

Fig.2 Nominal flow stress obtained by simple compression test, T_s : Starting temperature in compression

Fig.3 Temperature dependence in the first approximation of isothermal flow stress

温度 2 8 3 K, 外気温度 2 8 3 K とした. 実験及び解析結果は, 圧縮率に (1) 式を用い, 最小内径比は次式により整理した.

$$\text{最小内径比} = d/d_0 \dots\dots\dots (5)$$

ただし, d_0 : 初期内径, d : 最小内径

圧縮開始温度が 1 4 2 3 K の場合について, 較正曲線と実験結果を図 4 に示す. 図 2 より摩擦力が変形抵抗に影響を及ぼすのは圧縮率が 5 0 % 以上であることから, 図 4 より摩擦係数 0.35 一定とした. また, 他の圧縮開始温度についても同様の結果が得られた.

Fig.4 Frictional coefficient measured by ring test,
 T_s : Starting temperature in compression; 1423K

4.3 圧縮率と平均ひずみの関係 図 3 の等温変形抵抗の第一次近似値を用いて, 単純圧縮を FEM により再現した. 加圧直前での, 素材内部の温度分布は 1 4 2 3 K 一様分布とし, 圧盤温度を 5 7 3 K, パンチ温度を 2 8 3 K, 外気温度を 2 8 3 K とした. (3) 式を用いて求めた圧縮率と平均ひずみの関係を図 5 に示す. 圧縮率が 5 0 % 以上の範囲において温度によって差を生じているが, その量はわずかである.

4.4 修正係数 g の算出 圧縮開始温度が, 1 4 2 3 K についての, FEM によって再現した単純圧縮について平均相当ひずみと見かけの変形抵抗 $\bar{\sigma}_{b, FEM}$ の関係を図 6 に示す.

平均ひずみの増加とともに $\bar{\sigma}_{b, FEM}$ は低下し与えられた等温変形抵抗より低くなる. この理由を断面内の応力分布から考察する. 図 7 は平均相当ひずみ 0.4 のときの最大断面積部の FEM 応力分布を示す. 軸方向圧縮応力は, 初期値として与えた 1 4 2 3 K の時の第一次近似等温変形抵抗 7 5 MPa に対し r^2 が 8 5 以上の範囲で絶対値が低くなっている. 荷重は r^2 と応力の積に比例するので, これにより軸圧縮応力の平均値は等温変形抵抗より低くなることが理解される. すなわち, 不均一変形により周辺部に円周方向の引張

Fig.5 Relation between reduction in height and average equivalent strain,
 T_s : Starting temperature in compression

Fig.6 Nominal flow stress calculated by FEM with the first approximation of isothermal flow stress,
 T_s : Starting temperature in compression; 1423K

張応力が生じており, このため軸方向圧縮応力は低下したものと判断される.

いっぽう, 図 6 に示すように, 平均相当ひずみが増して 1.0 以上となると, $\bar{\sigma}_{b, FEM}$ は急増し $\bar{\sigma}_a$ よりはるかに大きくなる. これは, 図 8 に見られるように, 平均相当ひずみ 1.6 のとき軸方向圧縮応力は, r^2 が 3 7 0 以内では与えられた第一次近似等温変形抵抗より高くなる. これは端面において摩擦や温度低下が生じたため, 内部の変形が拘束されて半径方向や円周方向応力が大きな圧縮応力になったためである. こうして軸方向応力の平均値は第一次近似等温変形抵抗より高くなることになる.

図 6 の $\bar{\sigma}_a$ と $\bar{\sigma}_{b, FEM}$ を用いて (4) 式から求めた平均相当ひずみと修正係数の関係を各温度につき図 9 に示す. 温度によって差が生じるのは高温ほど冷却されやすく不均一が助長されるためと考えられる. この修正係数の範囲は平均相当ひずみ 0.6 ~ 0.7 のときの

0.75 から、平均相当ひずみ 1.6 以上のときの約 2.0 以上の間で変化する。この図から、従来、実験から求められる見かけの変形抵抗を近似値として用いてきたが、その値は低ひずみ域においても、かなり誤差の大きいことが分かる。とくに、修正係数が 1.0 以下のときは、本来の変形抵抗より、見かけの変形抵抗の方がかなり低く見積もられることになることに注目する必要がある。すなわち、このことは見かけの変形抵抗を用いて、近似的に鍛造工程における機械の負荷を予測すると、それは実際の負荷より 25% 程度低い値となり、機械破損の危険を生じることを意味している。

4.5 実験値の修正 図 2 の圧縮率と見かけの変形抵抗の関係を、図 9 を用いて摩擦力、加工発熱、熱移動の影響を取り除き、平均相当ひずみと等温変形抵抗の関係に変換したものが図 10 である。最初は一ひずみとともに急増した後、一定に近くなる。

Fig.7 Calculated axial compressive stress distribution on the central cross-section under simple compression, Average equivalent strain; 0.4

Fig.8 Calculated axial compressive stress distribution on the central cross-section under simple compression, Average equivalent strain; 1.6

Fig.9 Relation between average equivalent strain and correction factor g ,
 T_s : Starting temperature in compression

Fig.10 Calculated isothermal flow stress of S45C

Fig.11 Calculated isothermal flow stress of S20C

また同様の手法を S 2 0 C について適用した結果を図 1 1 に示す。いずれの場合も図 2 に見られた変形抵抗が上昇後に低下して再上昇する傾向と異なり、単調上昇となっている。

なお、算出された等温変形抵抗を用い、さらに3・2から3・5を繰り返すことにより、その精度は向上するが、実用上、1回目と2回目の差は極めて少なく、それ以上の繰返し計算は必要なかった。

5. リング圧縮試験による検証ならびに考察

前章で推定した等温変形抵抗曲線(図10)を用いて、圧縮開始温度が1423Kにおけるリング圧縮時の荷重予測を行った。圧盤温度などの解析条件は、4・2と同様である。

解析結果と実験結果を図12に示す。同図より、ここで算出した等温変形抵抗を用いることにより、単純圧縮と変形モードの異なるリング圧縮試験の荷重を精度良く推定できることがわかる。

Fig.12 Prediction of forming load of ring test with derived isothermal flow stress,
Ts: Starting temperature in compression; 1423K

本法の特徴は、鍛造材に近い単純圧縮試験片を用いて、実工程の加工速度で、熱移動が問題となる小型試験片を用いても高精度で変形抵抗を求められることにあり、CAEで殊に必要となる、温度、ひずみ、ひずみ速度がある瞬間の変形抵抗を提供するものである。

なお、実際の鍛造においても、ひずみ経路が単純圧縮と大きく異なる場合、例えば軸圧縮と方向の異なる横据込みなどの素材に異方性があるときは、圧縮試験片を素材の軸と直角方向に採取すれば精度を確保できる。

ただ、今回の実験では、単純圧縮もリング圧縮ともに初期温度と最終温度の差が30K以内と小さかったため、前者の結果を用いて算出した変形抵抗から、後者の荷重予測が高精度で可能となったことが考えられる。

すなわち、初期温度と最終温度の差が大きい時は変

形抵抗が途中の温度、ひずみなどの履歴の影響を受けるので、本法を単純圧縮と異なるひずみ、温度履歴を辿る加工条件に用いると誤差が大きくなると考えなければならない。したがって、本法の適用範囲は単純圧縮試験で加工の履歴をほぼ再現できる場合に限定すべきであろう。

例えば、温度が低下から上昇に逆転するような場合は、単純圧縮では履歴を再現できない。ただし、実際の鍛造工程は、温度やひずみがほぼ単調変化する場合が多いので、実際には本法の適用範囲はかなり広いと考えられる。

6. 結 論

- 1) あるひずみ速度で変形する鍛造材の大ひずみ温・熱間等温変形抵抗を、変形中に時々刻々変化するひずみ、温度に対応して求めるために、単純圧縮実験から摩擦力、加工発熱、熱移動の影響を理論計算によって除去する手法を提案した。
- 2) 本手法により算出された単純圧縮の見かけの変形抵抗は、素材の初期温度の下での等温変形抵抗に対して、平均相当ひずみ0.6~0.7くらいまでは、低くなり、それ以上では高くなる。その範囲はおおよそ0.75~2.0である。
- 3) 本手法を用いて求めた等温変形抵抗からリング圧縮時の荷重予測を実施し、十分な精度を有していることを確認した。
- 4) この方法は、温度変化しやすい小さな試験片、また一般の圧縮試験機、あるいは実際の鍛造機械を用いて容易に実験でき、簡単な計算により等温変形抵抗を算出できるものである。

文 献

- (1) 矢田浩・瀬沼武秀：塑性と加工，27-300(1986)，34-44.
- (2) Marciniak, Z. and Konieczny, A.: J. Mechanical Working Technology, 15(1987), 15-37.
- (3) Schindler, I., Kliber, J. and Boruta, J.: Materials Science and Technology, 4-4(1988), 354-360.
- (4) 日本鉄鋼協会編：圧延理論とその応用，(1969)，94-164，誠文堂新光社，.
- (5) Herbertz, R. and Wiegels, H.: Stahl und Eisen, 101-24(1981), 47-52.
- (6) 坪内昌生・工藤英明：塑性と加工，9-88(1968)，332-344.
- (7) Osakada, K., Kawasaki, T. and Mori, K.: Ann. C.I.R.P., 30-1(1981), 135-138.
- (8) 五十川幸宏・森勇夫・戸澤康壽：塑性と加工，38-436(1997)，480-485.
- (9) 金丸信夫・津田統：軽金属，43-12(1993)，688-693.
- (10) 小坂田宏造・白石光信・村木重節・徳岡雅康：機論，55-516, C(1989)，2213-2218.