フランジヘッダー試験による線材用 潤滑皮膜評価法の提案

伊藤 樹一* 吉田 広明**

五十川 幸宏** 堂田 邦明*

Proposed Tribosimulator for Drawing-Wire Lubrication Film via Flange Header Test

Shigekazu ITO*, Hiroaki YOSHIDA,
Sachihiro ISOGAWA and Kuniaki DOHDA
(Received on March 22, 2007)

In the production of fasteners, the lubrication of wire films plays an important role in determining formability and die life. Zinc phosphate is one of the most popular lubricants for wires because of its high performance in terms of lubrication and cost. A one-liquid lubricant has been developed and an attempt has been made to apply it in place of conversion lubricants such as zinc phosphate. However, the performance of the one-liquid lubricant is generally unstable, thus; its improvement is strongly desired. The lubrication of wire films is enhanced by gluing powdered metal soap together at the time of drawing. Therefore, a tribosimulator at the side face of a testpiece is desired. Thus, we designed the shape via finite element (FE) simulation. This tribosimulator test was named the “flange header test”. In this test, forging load is increased at a point known as the lubrication limit. In addition, from the measurement of knockout load, the test enables us to evaluate the galling of a lubricant. Moreover, the test simulates the tendency to bring about die damage as in the case of mass production by continuous forging.

Key words: forging, numerical analysis, tribology, lubricity, friction test

1. 緒 言

ボルトなどのファスナー類は、高速な横型鍛造機により線材を切断し、成形されている。この冷間鍛造時の潤滑性は、装置内で噴射される潤滑油よりも、線材表面に施されたリン酸亜鉛(ボンデ)などの皮膜の効果が支配的である。通常、線材皮膜は線引き前にリン酸亜鉛皮膜処理され、粉末状の金属石鹸をまぶしながら線引きして石鹸を圧着される。近年、スラッジの発生や廃液処理性などの環境問題により、ボンデ皮膜の使用が困難になりつつある。また、ボンデ皮膜中のリンによる遅れ破壊が指摘されはじめ、高強度ボルトではボンデ皮膜の使用を禁止する動きがみられる。しかし、ボンデ皮膜の性能、取り扱い性は極めて良好であり、一方、積極的に開発が進められている一液タイプの潤滑皮膜に切り替えた場合、肉張り性や焼付きによる金型寿命が問題となるケースが多い。そのため、一液潤滑剤の性能改善が強く望まれている。

潤滑皮膜開発のための潤滑皮膜評価方法として、リング圧縮試験¹⁾、スパイクテスト²⁾やテーパカップ試験^{3,4)}が提案され、活用されているが、それらは試験片端面で評価するため、線材のように側面に圧着した金属石鹸の影響を

含めた評価ができない問題を有している。また、試験片側面の潤滑性を評価する方法として、局所引抜き形⁵⁾があるが、試験片評価部の表面積拡大比が4程度と低いため、鍛造用潤滑剤に対しては、やや不足している。

そこで本研究では、ファスナー類の成形条件をカバーできる線材皮膜のトライボ特性評価方法を、FE(有限要素)解析を活用することによって設計し、新たに構築することを試みた。また、線材のトライボ特性評価方法としての有効性を確認する実験を実施した。

2. FE 解析による評価方法の検討

ファスナー類で金型の損傷が発生する部位は、フランジボルトの座面にあたる部位といわれている。この部位は表面積拡大比が高いため、潤滑皮膜が破れやすいと考えられる。そこで、量産されているフランジボルトの表面積拡大比をFE解析により算出した。FE解析コードは汎用のMSC software 社の SuperForm2004 を用いた。試験片の変形抵抗(Fig.1)は、端面拘束圧縮試験法により測定し、加工発熱を補正した⁶⁾。なお、FE解析は、熱連成・弾塑性解析とし、金型と被加工材間のせん断摩擦係数を0.1、接触熱伝達係数を30kW/(m²・K)、各初期温度を20とした。また、変形が大きいため、自動リメッシング機能を用いた。表面積拡大比の算出は、解析コードのパーティクルトラッキング機能

* 名古屋工業大学 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

** 大同特殊鋼㈱ 〒457-8545 名古屋市南区大同町2-30

を用い、初期の節点座標と、解析後の節点座標から計算した。成形が厳しいフランジボルト⁷⁾を計算した結果、フランジ部座面で表面積拡大比が約15であった。この部位は、一液潤滑剤の場合に焼付きが発生しやすい位置である。そこで、評価方法の目標値としては表面積拡大比を15以上とした。また、線材の場合、端面に潤滑被膜は存在しないため、側面部における評価方法とした。さらに、評価において荷重を評価指標の1つとして用いるため、成形中に試験片が割れない評価方法とする必要がある。そこで、Fig.2に示す評価方法について検討することとした。成形部の詳細をFig.3に示す。ここで、 X および θ の値を検討する。また、上下の端面は拘束し、試験片側面で大きく変形させて評価する。試験片(変形体)形状をFig.4(a)に示す。左側面の点は、FE解析により表面積拡大比を求めるためのマーキングであり等間隔(0.252mm)に配置した。大きな加工をした場合に、割れが発生する危険性がある。そのため、式(1)に示すCockcroft値⁸⁾の改良式から割れを予測した。

$$\int_0^{\epsilon_{eq}} \frac{\sigma_{max}}{m} d\epsilon_{eq} = C(\text{破壊値}) \quad (1)$$

ここで、 σ_{max} は最大主応力、 m は相当応力、 ϵ_{eq} は相当

Fig.1 Flow stress of test piece(S48BC)

Fig.2 Schematic illustration of flange header test

ひずみである。この材料は端面拘束圧縮試験の限界圧縮率から、破壊値が0.7を超えると割れることがわかった。そこで、各条件について、破壊値の最大値が0.7となるまでパンチを押し込み(Fig.5)、表面積拡大比を算出した。表面拡大の例をFig.4(b)に示す。最適なパンチ形状をもとめるため、Fig.3の X と θ を変えて解析し、ダイスに接した側の最大表面積拡大比をFig.6に示す。 X が4mm以下であれば目標の表面積拡大比が得られることがわかった。簡便な評価とするため、研磨しやすいダイス側での評価とし、研磨しにくいパンチ側での焼き付きは発生させたくない。そのため、パンチ側の表面積拡大比を小さくした。パンチ側の表面積拡大比をFig.7に示す。パンチ側の表面積拡大比を2以下、ダイス側の表面積拡大比15以上を満たす条件は、 $\theta=30^\circ$ 、 $X=4\text{mm}$ であった。この数値をパンチ形状とした。

Fig.3 Dimension of punch and die in flange header test

Fig.4 Surface expansion calculated by FE analysis

Fig.5 Distribution of Cockcroft value by FE analysis

ダイス側のせん断摩擦係数を変えた場合の成形荷重を Fig.8 に示す。パンチストロークで 13mm 以降において成形荷重差が認められ、すなわち、潤滑能の差が明確になる。

Fig.6 Relationship between surface expansion ratio of die side and taper length by FE analysis

Fig.7 Relationship between surface expansion ratio of punch side and taper length by FE analysis

Fig.8 Relationship between forging load and punch stroke by FE analysis

Fig.9 に、フランジヘッダー試験における表面積拡大比の最大値とパンチストロークとの関係を示す。フランジヘッダー試験は、パンチストロークを変化させることによって、表面積拡大比を調整することが可能である。また、被加工材の硬さを変えることで、工具に加わる垂直応力を変化させることが可能である。つぎに、今回算出した FE 解析結果を検証するため、比較実験を実施した。

Fig.9 Relationship between surface expansion ratio and punch stroke by FE analysis

3. 試験条件

3.1 被加工材

試験片は Table1 に示す化学成分の S48BC 炭素鋼を球状化焼なましして、Fig.4 に示す形状に機械加工した。球状化焼なまし処理は 745 に 5 時間保持後、650 まで 20 /h の速度で冷却し、その後空冷した(供試材の硬さは HRB で 70 程度)。なお、機械加工後の試験片表面粗さは Rz で 1.6 から 3.2 の間とした。また、連続鍛造試験においては、S15C 炭素鋼の線引きされた線材をフォーマーにて切断して評価を実施した。

Table 1 Chemical composition / mass %

	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
S48BC	0.47	0.07	0.28	0.007	0.013	0.14	add
S15C	0.14	0.23	0.35	0.008	0.011	0.10	-

3.2 潤滑剤

供試潤滑剤は、代表的な冷間鍛造用であり、その主成分と潤滑膜厚さ(磁石式により測定)を Table 2 に示す。Lub.A は機械加工後の試験片を脱脂、酸洗して、リン酸亜鉛皮膜処理を施したものである。Lub.B はホウ酸カリウムが主成分である市販の一液乾燥皮膜型の水溶性白色潤滑剤である。皮膜処理は、水溶液を 80 程度に加熱し、試験片を浸漬後に乾燥させた。Lub.C は硫化油脂を主成分とした鍛造用潤滑油であり、ダイスにハケで塗布した。また、線材を用いた連続鍛造試験においては、Lub.A と、ケイ酸塩を主成分とした市販の Lub.D の引抜き線材を用いた。なお、鍛造用潤滑油 Lub.C の有無についても影響を調査した。

Lub.B および Lub.D は ,Lub.A を代替する潤滑剤とし開発されたものであるが,実機による評価では Lub.A より性能が低いと言われている. また, Lub.C はさらに性能が低いと言われている. なお,参考として, Table 2 にリング圧縮試験における摩擦係数を示す. 表面積拡大比が 2 程度と小さいリング圧縮試験において,潤滑剤間の差はほとんどみられない.

Table 2 Lubricants used for test

name	type	principal ingredient	thickness $Th / \mu\text{m}$	friction* m
Lub.A	conversion	zinc phosphate	3	0.12
Lub.B	aqueous	potassium borate	25	0.11
Lub.C	oily	grease sulfide	-	0.11
Lub.D	aqueous	Silicate	12	0.11

* : Shear friction coefficient in ring compression test

3.3 評価試験方法

評価には最大荷重 6000kN のクランクプレスを用いた. 金型概要図を Fig.2 に示す. 成形荷重を測定するロードセルと,ロックアウト荷重を測定するロードセルを設置した. 試験片の温度は全て室温とした. 金型の形状は FE 解析と同一形状(Fig.3)とし, $\alpha = 30^\circ$, $X=4\text{mm}$ のパンチを用いた. 試験時,鍛造荷重の増加にともない,プレスフレームや金型が弾性変形するため,試験片高さを測定してパンチストロークを補正した.

4. 実験結果

4.1 機械加工試験片の評価結果

機械加工した試験片について 潤滑剤の評価を実施した. 試験後のダイス側の外観写真を Fig.10 に示す. 表面積拡大比が高い位置で, Lub.C は変色しているが,明確なカジリは認められない. 成形荷重およびロックアウト荷重の最大値を Fig.11 に示す. 成形荷重には Fig.8 に示す通り摩擦係数が反映されているため,成形荷重が低いほど優れた潤滑剤であることを示す. また,同様にロックアウト荷重についても,低いほど優れた潤滑剤である. 潤滑性はボンデ皮膜の Lub.A が最も良好であり,つぎに一液潤滑剤の Lub.B,そして油の Lub.C という順に悪化している. フランジヘッダー試験では,多くのユーザー評価と同様に潤滑剤の性能差を示すことができた.

成形中の荷重とパンチストロークとの関係を Fig.12 に示す. なお,図の表面積拡大比は FE 解析から求めたダイス側の値である. Fig.12 と Fig.8 とを重ね合わせて比較すると,成形時におけるせん断摩擦係数変化が求められる可能性がある. すなわち, Lub.A の成形荷重とストロークの線図は,せん断摩擦係数 0.1 とほぼ一致するため,表面積拡大比 19 まで,摩擦係数が一定であることがわかる. それに対し, Lub.B の成形荷重は表面積拡大比 7 までは変わらないが,それ以上では,摩擦係数が増加していると考えられる. Lub.C は成形荷重の増加が表面積拡大比 4 程度から潤滑膜切れが発生したと思われる. このように,フランジヘッダー試験は潤滑剤の摩擦係数が変化する点を,成形荷重から考察することが可能である. なお,パンチストローク 16mm を超えた場合には,シミュレーションで予測されたように,試験片側面に割れが発生した.

Fig. 10 Samples after flange header test

Fig. 11 Relationship between knock out load and forging load in flange header test

Fig. 12 Relationship between forging load and punch stroke in flange header test

4.2 線材皮膜の連続評価結果

フランジヘッダー試験は線材皮膜の評価を目的に考案した. そこで,潤滑皮膜処理した引抜き線材を長さ 24mm に切断して評価に用いた. 線材皮膜の評価は,実機と同条件とするため,連続して 50 個フランジヘッダー試験を行い,その時の荷重の変化を記録した. 成形荷重の最大値を測定した結果を Fig.13 に示す. ダイスへの油(+Lub.C)塗布の有無にかかわらず, Lub.A の荷重は低く,また,鍛造個数が増加するに従い,成形荷重は若干減少する. それに対して, Lub.A の代替皮膜として開発された Lub.D は,鍛造個数が増加すると成形荷重が増加する傾向が認められる. また,

同様にロックアウト荷重も Lub.D が増加していく (Fig.14) . このように成形荷重から, Lub.D よりも Lub.A の線材皮膜が良好な潤滑性であることがわかる. この結果は, 実機による評価結果と一致する. なお, 線材皮膜単独よりも, ダ

Fig. 13 Variable forging load in wires lubricant film evaluation

Fig. 14 Variable knock out load in wires lubricant film evaluation

Fig. 15 Outlook of die surface and surface roughness after wires lubricant film evaluation

イスへ油(+Lub.C)を塗布した場合の荷重が高い傾向となった理由は Fig.12 から Lub.C の性能が低いと思われる.

連続 50 個評価後のダイス表面の写真とラジアル方向の表面粗さ(試験前は $Ra=0.069\mu m$)を Fig.15 に示す. ダイスへの油塗布の有無にかかわらず, Lub.A のダイスに損傷は見られない. Lub.D のダイスにはスジ状の損傷が見られる. このスジは鍛造個数 20 個目程度から, 明確に観察された. さらに詳しく調べるため, 試験後のダイス表面を光学顕微鏡を用いて観察した. Lub.A のダイス表面 (Fig.16(a)) は平滑であるが, Lub.D のダイス表面 (Fig.16(b)) はダイスが削られたようなキズが見られ, 研削摩耗となっていた. この現象は量産においても発生しており, フランジヘッダー試験の連続鍛造によって, 量産を模擬できることが示された.

Fig. 16 Surface observation of dies after wire lubricant film evaluation

5. 結論

線材のトライボ特性評価方法の有効性について確認した結果を以下に示す.

- 1) FE 解析を用いて開発したフランジヘッダー試験は, フランジボルトを超える表面積拡大比であり, 割れを発生させることなく, 試験片側面におけるトライボ特性評価法を確立できた.
- 2) フランジヘッダー試験は成形荷重とロックアウト荷重を測定することで, 潤滑特性の評価が可能である. また, 成形荷重が増加した点から潤滑限界の把握が可能である.
- 3) フランジヘッダー試験による連続鍛造において, フランジボルトの量産時と同様な金型損傷が発生しており, 量産を模擬した線材皮膜のトライボ特性試験であることが示された.

参考文献

- 1) 堂田邦明: 塑性と加工, **34**-393(1993), 1091-1099.
- 2) 五十川幸宏・遠藤祐介・木村篤良・戸澤康寿: 42 回塑加連講論, (1991), 623-626.
- 3) 吉田広明・伊藤樹一・五十川幸宏: 53 回塑加連講論, (2002), 369-370.
- 4) 土井善久・伊藤樹一・吉田広明・五十川幸宏: 56 回塑加連講論, (2005), 611-612.
- 5) 済木弘行・丸茂康男・阮立群・Gracious E. Ngail: 塑性と加工, **41**-477(2003), 1036-1040.
- 6) 五十川幸宏・森勇夫・戸澤康寿: 同上, **39**-444(1998), 41-45.
- 7) 小川淑勝: 同上, **28**-320(1987), 931-936.
- 8) 大矢根守哉: 同上, **13**-135(1972), 265-270.