摩擦圧接のアプセット量に関する研究*

(第1報, 同種SC材のアプセット量実験式)

小林 明 発^{*1}, 岩 瀬 晃 一^{*2}
忠 内 邦 男^{*3}, 桜 井 俊 明^{*4}

Study on the Amount of Upset of Friction Welding (1st Report, Experimental Equation on the Amount of Upset of Same Kind SC Steel)

Akiyoshi KOBAYASHI, Kouichi IWASE,
Kunio TADAUCHI, and Toshiaki SAKURAI

The amount of upset during friction welding is a quite important criterion of optimum friction welding conditions because it closely concerns the mechanical properties of a welded specimen. However, it is very difficult to estimate the amount of upset before friction welding, because the friction welding process is extremely complicated. If the amount of upset during friction welding can be estimated beforehand, it is expected to extend the usefulness and application limits of friction welding. In this study, first of all, a nonuniform upsetting process during friction welding under various friction welding conditions were correctly measured. Next, the formulation of experimental equations for the amount of upset in connection with friction welding conditions and kinds of steel(SC steel) was made. Two experimental equations were calculated. One is based on the amount of upset considering a nonuniform state during friction welding, and the other is based on the total amount of upset after friction welding. Both equations agreed well with experimental results.

Key Words: Friction Welding, Amount of Upset, Experimental Equation, Nonuniform Upsetting Process, SC Steel, Welding Conditions

1. ま え が き

摩擦圧接において、摩擦圧接過程中的のアプセット量は圧接材の機械的性質と密接に関係するといわれており⁽¹⁾⁽²⁾、著者らも圧接時のアプセット量が摩擦圧接材の機械的性質と密接に関連することを確かめた⁽³⁾⁽⁴⁾。このため、摩擦圧接におけるアプセット量は、適正摩擦圧接条件の判断基準すなわち圧接材の機械的強度を保証する重要な目安となる。しかしながら、摩擦圧接による圧接過程は、圧接過程中的の非定常な加熱冷却状態とそれに伴う素材の変形過程が極めて複雑であるため、適正摩擦圧接条件の判断基準となるアプセット量を容易に求めることはできず、現在においても良好な機械的強度を得るための摩擦圧接条件は、圧接材の材質および圧接寸法形状ごとに試行錯誤的、経験的にしか定め得ないのが現状である。したがって、各種材料の適正摩擦圧接条件すなわちそれと密接な関係をもつ摩擦圧接過程におけるアプセット量を事前に知ること

ができれば、摩擦圧接の有用性およびその適用範囲はさらに広がることが期待される。

そこで本研究は、摩擦圧接材として比較的使用頻度の高い機械構造用炭素鋼鋼材(SC材)について、その鋼種と摩擦圧接条件を広範に変化させ、各摩擦圧接条件における非定常なアプセット過程を精確に測定することにより、適正摩擦圧接条件の判断基準となるアプセット量の実験式を、摩擦圧接条件およびSC材材種との関連で算出することを試みた。アプセット量の実験式の算出に際し、まずブレーキ法における摩擦圧接の実態に則しその非定常性を考慮したアプセット量の実験式すなわち摩擦圧接過程中的の摩擦圧接過程およびアプセット圧力過程におけるアプセット量の変化をそれぞれ考慮したアプセット量の実験式を求めた。ついで、工業的実用性がより高いと考えられる摩擦圧接後の全アプセット量に基づく実験式も算出した。いずれの実験式も広範な摩擦圧接条件および鋼種との関連で実験結果とよい一致をみたので、これらの結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

摩擦圧接実験は、最大推力10tfの市販の摩擦圧接機に摩擦圧接過程中的のトルク、スラストおよびアプセ

* 昭和63年3月12日 北海道支部第29期総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月28日。

^{*1} 正員、名城大学理工学部(〒468 名古屋市天白区塩釜口)。

^{*2} 河村電器産業(株)(〒489 瀬戸市京町)。

^{*3} 東海理化電機(株)(〒480-01 愛知県大口町)。

^{*4} オーエスジー(株)(〒441-12 愛知県宝飯郡)。

ット量の変化過程が測定可能なように図1に示すような固定試験片側の装置を作成して行った。

実験に使用した試験片の種類およびその化学成分を表1に示す。試験片形状は、回転側および固定側試験片とも直径20 mmで長さをそれぞれ55, 65 mmとしている。また固定側試験片は、図1に示すようにボルト締めによる固定であるため、摩擦圧接中滑りを生じないように圧接面から中心距離で35 mmの位置で深さにして1.5 mmだけ3面を落とした形状としている。また直径公差は、回転側試験片が ± 0.1 mm, 固定側試験片は -0.01 mmである。いずれも全面旋削仕上げとした。また今回は固定側、回転側とも同種のSC材を用いて実験を行なった。

摩擦圧接条件を表2に示す。今回の実験では回転数は2000 rpmで一定とし、またアプセット圧力は50 MPa, アプセット時間3 sで一定としている。摩擦圧

表1 試験片の種類と化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S15C	0.15	0.24	0.40	0.014	0.015	0.09	0.04	0.07
S25C	0.24	0.21	0.49	0.023	0.013	0.04	0.01	0.02
S45C	0.48	0.24	0.73	0.026	0.016	0.01	0.02	0.12
S55C	0.53	0.23	0.68	0.019	0.018	0.09	0.05	0.08

表2 実験条件

n min ⁻¹	2000			
P_1 MPa	18	30	36	42
P_2 MPa	50			
t_1 s	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20
t_2 s	3			

n : Rotational speed t_1 : Friction time
 P_1 : Friction pressure t_2 : Upset time
 P_2 : Upset pressure

1 Rotary test piece	10 Bolt
2 Fixed test piece	11 Plate
3 Shaft	12 Chuck
4 Bracket	13 Table
5 Base	14 Bed
6 Bearing	15 Stopper
7 Key	A Strain gage
8 Nut	B Variable resistor
9 Nut	

図1 実験装置の概要

力を4とおりに変化させ、それぞれの摩擦圧力に対してさらに摩擦時間を4とおりでずつ変化させた。

3. 実験結果

図2は、図1Bの可変抵抗器で測定された摩擦圧接過程中的アプセット量の変化過程を示した一例である。摩擦圧接過程中的摩擦圧力過程におけるアプセット量の摩擦時間に対する増加過程は、図3に一例を示すように圧接条件および鋼種によりいくぶん異なった傾向を示すが、アプセット圧力過程を含む摩擦圧接過程全体ではいずれも類似した変化過程を示した。そこで、各摩擦圧接条件により得られた図2に示すような実験データすべてに対し、まず摩擦圧力過程におけるアプセット量（以下この過程におけるアプセット量を U_1 とする）の変化を、摩擦圧接の開始点より摩擦圧力過程の終了点まで2.5 sごとに測定し、摩擦圧力時間 t_1 の増加に伴う摩擦圧力過程のアプセット量 U_1 の変化過程を求めた。図3(a), (b)は、その一例としてS25CおよびS55Cの摩擦時間20 sの場合の結果を示す。なお同じ鋼種では、摩擦時間20 s以下における各摩擦時間による同一圧接条件での摩擦圧力過程におけるアプセット量の変化過程は、摩擦時間20 sの結果にほぼ重ね合わせることができることを確認している。

アプセット圧力過程におけるアプセット量（以下この過程におけるアプセット量を U_2 とする）は、いずれの摩擦圧接条件においても直線的に増加した。

以上のような結果から、SC材同士のブレーキ法による摩擦圧接中の全アプセット量 U の変化過程をモデル化すると図4となる。すなわち摩擦圧力過程は、零点より摩擦圧力過程の設定時間 t_1 [s] (点 a_1)まで摩擦時間の増加に伴いアプセット量 U_1 まで増加する。その後 a_1 点よりアプセット圧力 P_2 が働きアプセット圧力過程に入る。アプセット圧力過程においては、圧接中の t_2 [s] (点 a_2)間でアプセット量 U_2 まで直線的に増加するが、それ以降はアプセット圧力が作用してい

図2 アプセット量の変化過程の測定例

でもアブセット量は生じない。つまりアブセット圧力過程で得られるアブセット量は a_2 点で終了することから、SC 材同士の摩擦圧接中におけるアブセット量は $0 \rightarrow a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_3$ という変化過程を示す。この結果摩擦圧接で得られる全アブセット量 U は式(1)のようになる。

$$U = U_1 + U_2 \dots\dots\dots (1)$$

4. アブセット量実験式

4.1 摩擦圧接の非定常性を考慮した実験式 3章の式(1)で表されるブレーキ法による摩擦圧接におけるアブセット量 U のうち、本節では摩擦圧接過程におけるアブセットの非定常性を考慮したアブセット量の実験式を算出する。そこでまず摩擦圧力過程におけるアブセット量 U_1 に関する実験式を算出する。摩擦圧力過程におけるアブセット量 U_1 は、図3に一例を示したように摩擦時間 t_1 との関係において t_1 の二次式の形となることから、 U_1 と t_1 との間には次式のような関係がなりたつ。

$$U_1 = \alpha t_1^2 + \beta t_1 + \gamma \dots\dots\dots (2)$$

式(2)中の係数 α, β, γ を摩擦圧接条件および鋼種(炭素量 $C[\%]$) との関連で算出する。(鋼種との関連で実験式を算出する際 SC 材の炭素量 $C[\%]$ に注目したのは、 $C[\%]$ が SC 材の機械的性質にもっとも大きく影響すると考えたからである。事実、後述のように各係

数と $C[\%]$ の間には強い相関関係がみられた。)

図5は、各摩擦圧接条件および鋼種(炭素量 $C[\%]$) に対し得られた係数 α の値と摩擦圧力 P_1 の関係を示したものである。図5より、 α と P_1 の関係は次式のように表すことができる。

$$\alpha = (\alpha_1 e^{\alpha_2 P_1} - 1) \times 10^{-2} \dots\dots\dots (3)$$

式(3)中の係数 α_1 , 指数 α_2 を炭素量 $C[\%]$ との関係において求めた結果、 α_1, α_2 はともに炭素量 C の二次式で表すことができ、それぞれ次式のような関係を得た。

$$\alpha_1 = 0.96C^2 - 0.1C + 0.14 \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha_2 = -0.13C^2 + 0.053C + 0.057 \dots\dots\dots (5)$$

以上より、式(2)中の係数 α は

$$\alpha = \{ (0.96C^2 - 0.1C - 0.14) e^{(-0.13C^2 + 0.053C + 0.057)P_1} - 1 \} \times 10^{-2} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

図6は、図5の α の結果と同様に各摩擦圧接条件および鋼種に対して得られた係数 β の値と摩擦圧力 P_1 の関係を示したものである。図6より、 β は P_1 の二次式で表され次式のようなになる。

$$\beta = \beta_1 P_1^2 + \beta_2 P_1 + \beta_3 \dots\dots\dots (7)$$

式(7)中の係数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ と炭素量 $C[\%]$ との関係は

(a) S25C

(b) S55C

図3 摩擦圧力過程のアブセット量と摩擦時間の関係

図4 アブセット量の変化過程の模型図

図5 係数 α と P_1 の関係

求めた結果, β_1, β_2 は C に無関係に一定値を示しそれぞれ次のようになった。

$$\beta_1 = -0.0001 \dots \dots \dots (8)$$

$$\beta_2 = 0.0023 \dots \dots \dots (9)$$

β_3 は炭素量 $C[\%]$ と関係があり, C の一次式で表すことができ次式のようになる。

$$\beta_3 = -0.65C + 0.49 \dots \dots \dots (10)$$

以上より, 式(2)中の係数 β は

$$\beta = \{-0.0001P_1^2 + 0.0023P_1 + (-0.65C + 0.49)\} \dots \dots \dots (11)$$

図7は, 図5, 6と同様係数 γ と摩擦圧力 P_1 の関係を示す。図7より, γ は P_1 の二次式で表され

$$\gamma = \gamma_1 P_1^2 + \gamma_2 P_1 + \gamma_3 \dots \dots \dots (12)$$

式(12)中の係数 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ はそれぞれ炭素量 $C[\%]$ と関係があり, 炭素量 C の二次式で表すことができ次式のようになる。

$$\gamma_1 = 0.0016C^2 - 0.0009C \dots \dots \dots (13)$$

$$\gamma_2 = -0.0087C^2 + 0.0046C + 0.0035 \dots \dots \dots (14)$$

$$\gamma_3 = 0.914C^2 - 0.47C - 0.11 \dots \dots \dots (15)$$

以上より, 式(2)中の係数 γ は

$$\gamma = (0.0016C^2 - 0.0009C)P_1^2 + (-0.0087C^2 + 0.0046C + 0.0035)P_1 + 0.914C^2 - 0.47C - 0.11 \dots \dots \dots (16)$$

図6 係数 β と P_1 の関係

図7 係数 γ と P_1 の関係

次に, アプセット圧力過程中的のアプセット量 U_2 を求める。アプセット時間 t_2 は, いずれの実験においても 3 s に設定した。しかし実験を行った結果, どの実験条件においても約 0.5 s でアプセットが完了し, それ以降はアプセット圧力 P_2 を加えてもアプセット量は生じなかった。また3章で述べたごとくこの過程におけるアプセット量は直線的に増加した。図8は, アプセット圧力 P_2 と摩擦圧力 P_1 の圧力差とアプセット過程におけるアプセット量 U_2 の関係の一例として摩擦時間 $t_1 = 5$ s の場合の結果を示したものである。 U_2 は, 圧力差 $(P_2 - P_1)$ の影響はほとんど受けない。すなわち U_2 はほとんど P_2 のみと鋼種 (炭素量 $C[\%]$) および図9に示すように摩擦時間 t_1 により決定される。図9より, U_2 は t_1 の一次関数となり, 次式のように表される。

$$U_2 = (\delta t_1 + \varepsilon) t_2 \dots \dots \dots (17)$$

式(17)において, アプセット時間 t_2 はアプセット条件によって定まる定数として規定され, 今回の摩擦圧接条件では上述のごとく $t_2 = 0.5$ である。係数 δ, ε に関しては, 図9の関係から得られた炭素量 C との関係から, δ および ε はそれぞれ次のように表される。

$$\delta = 0.026C + 0.086 \dots \dots \dots (18)$$

$$\varepsilon = -1.75C + 1.7 \dots \dots \dots (19)$$

図8 圧力差 $(P_2 - P_1)$ とアプセット圧力の関係

図9 U_2 と摩擦時間の関係

以上のような手法により式(1), (2), (17)中の係数は既知となり, SC 材の摩擦圧接における非定常性すなわち摩擦圧力過程およびアプセット圧力過程におけるアプセット量変化をそれぞれ考慮したアプセット量を摩擦圧接条件と鋼種 (炭素量 C) との関連で求めることができ, アプセット量 U は次式ようになる。

$$\begin{aligned}
 U = & [(0.96C^2 - 0.1C - 0.14)e^{(-0.13C^2 + 0.053C + 0.057)P_1} \\
 & - 1]10^{-2}]t_1^2 + (-0.001P_1^2 + 0.0023P_1 \\
 & \times -0.65C + 0.49)t_1 + (0.0016C^2 - 0.0009C)P_1^2 \\
 & + (-0.0087C^2 + 0.0046C + 0.0035)P_1 \\
 & + 0.914C^2 - 0.47C - 0.11 \\
 & + \{(0.026C + 0.086)t_1 - 1.75C + 1.7\}t_2 \dots (20)
 \end{aligned}$$

(a) S15C

(b) S55C

図 10 全アプセット量と摩擦時間の関係

 図 11 係数 A と P_1 の関係

4.2 全アプセット量による実験式

4.1 節において, プレーキ法による摩擦圧接の非定常性を考慮したアプセット量の実験式を算出した。本節では, 式(20)に比し工業的により利便性が高いアプセット量実験式を求めるため, 摩擦圧接中の非定常な過程を無視した摩擦圧接後の全アプセット量 U_t によるアプセット量実験式を, 摩擦圧接条件および鋼種 (炭素量 C [%]) との関連で算出する。

図 10 は, 全アプセット量 U_t と摩擦時間 t_1 の関係の一例として S15C および S55C の結果を示す。図 10 より, 全アプセット量 U_t は摩擦時間 t_1 の二次式で表され, 次式ようになる。

$$U_t = At_1^2 + Bt_1 \dots (21)$$

式中の係数 A, B を 4.1 節と同様に摩擦圧接条件および鋼種 (炭素量 C [%]) との関連で算出する。

図 11 は, 図 10 のような関係から得られた係数 A と摩擦圧力 P_1 の関係を示したものである。図 11 より, A は次式のように表される。

$$A = (A_1 e^{A_2 P_1} - 1) \times 10^{-2} \dots (22)$$

式(22)中の係数 A_1 と炭素量 C [%] との関係を調べた結果, A_1 は C の一次式で表され次式のような関係となった。

$$A_1 = 0.19C + 0.15 \dots (23)$$

また係数 A_2 は炭素量に関係なく一定値を示し,

$$A_2 = 0.055 \dots (24)$$

となる。以上より, 式(22)の係数 A は

$$A = \{(0.19C + 0.15)e^{0.055P_1} - 1\} \times 10^{-2} \dots (25)$$

係数 B は, 摩擦圧力 P_1 とは無関係であり炭素量 C [%] との間に図 12 に示すような関係があった。図 12 より B は C の一次式で表され, 次式のようになる。

$$B = -0.72C + 0.57 \dots (26)$$

以上の結果から, 摩擦圧接における全アプセット量 U_t による実験式は次式のようになる。

 図 12 係数 B と炭素量 (%) の関係

図 13 実験値と計算値の比較

$$U_t = \{[(0.19C + 0.15)e^{0.055P_1} - 1] \times 10^{-2} \times t_i^2 + (-0.72C + 0.57)t_i\} \dots (27)$$

4・3 実験結果と実験式の比較 4・1, 4・2 節で算出したアプセット量の実験式すなわち式(20)の U および式(27)の U_t のそれぞれと実測値とを比較検討した。図 13 は、一例として S15C、摩擦圧力 $P_1=18$ MPa の場合を示す。式(27)の全アプセット量 U_t に基づく計算結果は、摩擦時間が増加するほど実測値との差が大きくなる傾向にあるが、摩擦時間 20 s においてもその差は 0.32 mm である。ブレーキ法による摩擦圧接の非定常性を考慮したアプセット量実験式〔式(20)の U 〕に基づく計算結果は、摩擦時間 10 s 程度において実測値との差が最大となるが、その差は 0.2 mm 程度である。その他の鋼種および摩擦圧接条件に

おいてもほぼ同様な結果を得た。一般的に、直径 20 mm 程度の SC 材の摩擦時間 t_i は 5s 程度以下と考えられるので、両方ともより誤差の小さい範囲で使用されることから、いずれの実験式も十分実用に供することができるものと考えられる。

5. ま と め

摩擦圧接において、アプセット量およびその変化過程は圧接材の機械的性質と密接に関係するが、これまでは圧接材の材質や寸法・形状ごとに試行錯誤的・経験的にしか定め得なかった。本研究では摩擦圧接材として比較的使用頻度が高い機械構造用炭素鋼 (SC 材) のアプセット量を、摩擦圧接条件と SC 材材種との関連で事前に推定可能な実験式を算出した。実験式は、ブレーキ法による摩擦圧接の非定常性を考慮した式と、工業的により利便性が高いと考えられる圧接後の全アプセット量に基づく実験式の両方を算出した。両実験式とも広範な摩擦圧接条件および鋼種との関連で実測値とよい一致をみた。

文 献

- (1) 蓮井・福島, 金属材料研究所研究報告, 7-3 (昭 39), 47.
- (2) 蓮井・福島, 金属材料研究所研究報告, 7-5 (昭 39), 92.
- (3) 藤吉・小林, 名城大学理工学部研究報告, 16 (昭 51), 42.
- (4) 藤吉・小林, 名城大学理工学部研究報告, 19 (昭 54), 122.

討 論

〔質問〕 恩 沢 忠 男〔東京工業大学工学部〕

(1) 実験式が実測値とよい一致をみたという結論は全く当たり前で、一致しなかったら導出方法がまちがっていることになる。この実験式の有効性を確かめるには他のデータに適用できるかどうかによって行うべきではないか。

(2) 表 2 の実験条件内で表 1 のすべての炭素鋼の継手は十分な強度が得られる確認が必要ではないか。もしこの範囲内で十分な強度が得られないなら、実験式は意味を失うことになるのではないか。

(3) 式(20)および式(27)で U および U_t はいずれも P_1 のみを変数になっているが、 P_2 も本来大きな変数となると考えられる。この点はいかがか。

〔回答〕 (1) 実験式に関する見解はご指摘のとおりであると考え。しかしながら、これまでその圧接過程が極めて複雑で試行錯誤的にしか定め得なかった摩擦圧接におけるアプセット量を、種々の同種 SC

材材種と圧接条件との関連ではほぼ実用に供することができると考えられる実験式が得られた点でその導出方法がまちがっておらず、本実験式の有効性はあると考えている。

(2) 摩擦圧接におけるアプセット量は、圧接材の機械的性質と密接な関係があることが明らかにされている。たとえば圧接材の引張強さは、大体はアプセット量がある値 (5 mm 程度) を超えると安定するといわれている〔文献(1), (2)〕が、アプセット量が小さい範囲でも引張強さが高い場合がある〔文献(3)〕など複雑な関係にある。そのため本実験式は、まず基礎的な段階として、機械的強度が十分得られる範囲ばかりでなくより広範な範囲でアプセット量と圧接条件との関係を求めたものである。

(3) ご指摘のように、アプセット量はアプセット圧力 P_2 によっても影響を受けることが考えられる。しかしながらアプセット量の大半すなわち圧接過程で試

験片が加熱軟化された部分の大半は、図3と図10の比較からも明らかなごとく摩擦圧力過程中に生じている。また図9から明らかなごとく、アブセット圧力過程のアブセット量 U_2 は摩擦圧力過程の摩擦時間 t_1 の影響をより顕著に受けている。これらの結果から、アブセット圧力 P_2 のアブセット量 U あるいは U_1 に及ぼす影響は比較的小さいと考えられるが、アブセット

圧力過程のアブセット量に及ぼす影響を考慮し、式(17)中に t_2 を変数として取扱っている。今回の条件では t_2 は定数0.5として扱ってよいことが明らかになっているが、アブセット圧力過程のアブセット量が直線的に変化することもあり P_2 の影響はこの t_2 の値が変化すればするものと考えている。