摩擦圧接における第1位相の摩擦トルクに及ぼす各種条件の影響*

— 摩擦圧接の接合メカニズムに関する研究 (第2報) —

木村 真晃**, 日下 正広**, 瀬尾 健二**, 富士 明良***

Effect of Various Conditions on Friction Torque in the First Phase of Friction Welding*

— Study of Joining Mechanism of Friction Welding (Report 2) —

by KIMURA Masaaki**, KUSAKA Masahiro**, SEO Kenji** and FUJI Akiyoshi***

In the previous report 1, the authors have clarified the joining mechanism of the first phase of friction stage during friction welding process. The present paper describes the effects of various conditions on friction torque in the first phase during friction stage for joining of carbon steels. The various conditions included friction pressure, friction speed, weld faying surface diameter and yield strength properties of both substrates, and pre-heat of them.

The following are concluded.

(1) The initial torque and the elapsed time for initial torque to it were affected by friction pressures and friction speeds described above for joining of same yield strength properties and weld faying surface diameter substrates. That is, the initial torque increased with increasing the friction pressure and it decreased with increasing the friction speed, and the elapsed time for initial torque decreased with increasing the friction pressure and the friction speed.

(2) In spite of the weld faying surface diameter in both substrates, the initial torque and the elapsed time for initial torque hardly changed.

(3) In spite of the yield strength property in both substrates, the initial torque and the elapsed time for initial torque hardly changed.

(4) The initial torque and the elapsed time for initial torque decreased with increasing of pre-heat temperature. Especially, the wear stage rapidly decreased when pre-heat temperature exceeded approximately 473 K (200°C).

Key Words: Friction welding, First Phase, Friction torque, Friction pressure, Friction speed, Weld faying surface diameter, Yield strength property, Pre-heat, Initial torque, Elapsed time for initial torque

1. 緒 言

摩擦圧接法は、溶融溶接の困難な材料の組み合わせについても適用できる場合が多く、その用途が増大している溶接方法である。しかし、摩擦圧接の接合メカニズムは十分明らかにされているとはいえず、試行錯誤により圧接条件の設定を行っているのが現状である。

前報¹⁾では、摩擦圧接の接合メカニズムを解明するための第一歩として、軟鋼材を用い、摩擦圧接における第1位相の接合現象について詳細な検討を行った。その中で、圧接面外周部から擦れ加工状態となり、全面が擦れ加工状態となった後に中央部から焼付きを生じ、この焼付きが外周部へと広がって全面が接合されることが観察された。また、これらの観察結果にもとづいて、第1位相の接合メカニ

ズムをモデル化することができ、第1位相を擦れ過程と焼付過程とに分けて考えることが合理的であることを示した。

ところで、前報¹⁾のように第1位相を分けた場合、前者の擦れ過程では、圧接面同士の発熱、温度上昇、これらにともなう母材変形能の変化、さらに擦れ加工による新生面の創成などがお互いに連成し、刻々と変化している。一方、後者の焼付過程では、両母材の圧接面の温度および相対速度に支配された瞬間的な焼付きと、その焼付部分の瞬間的なねじり破断、これにともなう発熱、温度上昇、そして再びの焼付きという一連の現象が繰り返されている。このような現象に対して、圧接条件、母材変形能である接合端面直径や母材降伏特性、予熱温度がどのように影響を及ぼすかを明らかにしておくことが必要である。特に、初期トルクの値にこれらがどのように影響するかは、実用にあたって摩擦圧接機の必要性能を推定するためにおいては重要な問題である。これまでに、沖田ら²⁾が異径丸棒を組み合わせた場合の接合端面の直径比と接合現象との関係を明らかにしているものの、第1位相の摩擦トルクについてはあまり検討されていない。また、蓮井ら³⁾が、異種材料を組み合わせる摩擦圧力と摩擦トルク、圧接面温度との関係を明らかにしているものの、母材降伏特性についてはあまり検

*原稿受付 平成13年10月1日 平成9年度秋季全国大会で発表

**正 員 姫路工業大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Himeji Institute of Technology

***正 員 北見工業大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology

討されておらず、さらに、接合現象と予熱温度の関係についてはほとんど検討されていない。

本研究では、摩擦圧接の接合メカニズムを解明することを目的として検討を進めている。本報告では、第1位相における摩擦トルクに及ぼす支配因子を明らかにするために、圧接条件である摩擦圧力および摩擦速度、接合端面の直径差、母材降伏特性および予熱温度の影響について検討した。

2. 供試材料および実験方法

2.1 供試材料および試験片形状

供試材料には、市販されているS15CK機械構造用炭素鋼の外径16mmの丸棒を用いた。以下、これを基準母材という。また、これとは別に、基準母材とはほぼ同じ引張強さおよび降伏強さを有する外径20mmと22mmの丸棒を用い、接合端面直径差の影響を検討した。さらに、各母

Table 1 Mechanical properties of materials used.

Material	T.S.[MPa]	Y.S.[MPa]	El.[%]
S15CK	445	318	32
S35C	598	379	24
S55C	825	526	15

Fig. 1 Shapes and dimensions of the friction welding specimens.

- (a) $\phi 12$ mm specimen
(b) $\phi 16$ mm specimen
(c) $\phi 20$ mm specimen

材の降伏特性の影響を検討するためにS35C炭素鋼およびS55C炭素鋼の外径16mmの丸棒を用いた。これら供試材料の機械的性質をTable 1に示す。Fig. 1に示すように、外径16mmの供試材料は接合端面直径を12mmに、外径20mmと22mmの供試材料はそれぞれ16mm、20mmに旋盤加工し、チャック内での回転を防止するためにつかみ部の3方向に平削加工を行い、旋盤加工後の接合端面を#240エメリー紙で研磨を施して表面粗さを一定とさせた試験片を準備した。接合直前にアセトンにより脱脂してから実験に供した。

2.2 圧接条件および接合方法

接合には、前報¹⁾と同様に摩擦トルク測定装置を取り付けたプレーキ式摩擦圧接機を用いた。なお、第1位相における接合メカニズムの解明を行うことを目的としているため、アプセット圧力は負荷していない。Fig. 1で示した各試験片をTable 2に示すように組み合わせて実験を行った。その詳細を以下に述べる。

①基準母材(S15CK)について接合端面直径を12mmの一定とし、圧接条件を摩擦圧力10, 20, 30MPa, 摩擦速度17.5, 27.5, 33.3s⁻¹と変化させる実験。

②圧接条件は摩擦圧力30MPa, 摩擦速度27.5s⁻¹の一定とし、基準母材について固定側母材直径を12mmの一定として回転側母材直径を変化させる実験。

③上記一定とした圧接条件で、接合端面直径を12mmの一定とし、基準母材と組み合わせる回転側母材を種々変化させる実験。

④上記一定とした圧接条件、接合端面直径を12mmの一定とし、母材の組み合わせを種々変化させる実験。

⑤上記一定とした圧接条件、接合端面直径、基準母材について、接合端面の初期温度、すなわち予熱温度を変化させる実験。

このうち、⑤の実験では、試験片を摩擦圧接機に取り付

Table 2 Experimental combination of specimens.

Exp. series	Rotating side		Fixing side	
	Base metal	Diameter	Base metal	Diameter
①	S15CK	$\phi 12$	S15CK	$\phi 12$
②	S15CK	$\phi 12$ $\phi 16$ $\phi 20$	S15CK	$\phi 12$
③	S15CK S35C S55C	$\phi 12$	S15CK	$\phi 12$
④	S15CK S35C S55C	$\phi 12$	S15CK S35C S55C	$\phi 12$
⑤*	S15CK	$\phi 12$	S15CK	$\phi 12$

*⑤ : in pre-heat

け後、接合端面の間隔を0.5 mmとして回転側を回転させ、両母材の接合端面近傍をガス炎によって数秒間から数十秒間予熱した後に実験を行った。また、予熱温度は、接合端面が接触した時の圧接面の外表面における温度とし、温度測定には非接触放射温度計を使用、放射率は常温における鋼の一般的な値である0.3を用いた⁴⁾。

なお、各実験で得られた継手を以下のように示す。すなわち、②では、 $\phi 12/\phi 12$ 、 $\phi 16/\phi 12$ 、 $\phi 20/\phi 12$ 、③および④では、S15CK/S15CK、S35C/S15CK、S55C/S15CK、S35C/S35C、S55C/S55Cと記す。

3. 実験結果

3.1 初期トルクおよび初期トルク到達時間に及ぼす圧接条件の影響

摩擦トルクに及ぼす圧接条件の影響、すなわち①の実験を行ったときの各摩擦トルク曲線をFig. 2に示す。摩擦圧力ならびに摩擦速度が異なる場合、摩擦トルク曲線が大きく異なった。特に、前報¹⁾で示したように、第1位相中の擦れ過程の時間が圧接条件により大きく変化している、すなわち、摩擦圧力が低く、摩擦速度が低いほど擦れ過程が長くなっていることがわかる。そこで、初期トルク到達時間および初期トルクの値を摩擦圧力で整理した結果を

Fig. 3に示す。なお、初期トルク到達時間とは、初期トルクに達するまでに経過した摩擦時間、すなわち第1位相の摩擦時間のことである。Fig. 3 (a) より、初期トルク到達時間は摩擦圧力および摩擦速度の増加にともなって減少しているのがわかる。低摩擦圧力、低摩擦速度の場合、圧接面同士の摩擦による発熱量が少ないため、圧接面同士が焼付きを生じる温度まで時間がかかったためと考えられる。すなわち、Fig. 2の各摩擦トルク曲線に示すように擦れ過程では圧接条件が大きく影響するため、初期トルク到達時間が大きく変化したものと考えられる。一方、Fig. 3 (b) の初期トルクの値に注目すると、同じ摩擦速度の場合では摩擦圧力の減少にともなって若干減少し、同じ摩擦圧力の場合では摩擦速度が速いほど短くなった。初期トルクの値は、前報¹⁾で示したように焼付過程における現象に大きく影響されと考えられるため、摩擦圧力が低く、摩擦速度が高いほど高温にならなければ圧接面同士は焼付かない。そのため圧接面同士のせん断強度が低下し、初期トルクの値が低くなったものと推察できる。

3.2 接合端面直径差の影響

摩擦圧力 30 MPa、摩擦速度 27.5s^{-1} の一定条件で、相手側母材の直径を変化させた、すなわち②の実験で得られた摩擦トルク曲線の一例として、 $\phi 20/\phi 12$ の結果をFig. 4 (a) に示す。摩擦トルク曲線は、前報¹⁾に示した $\phi 12/\phi 12$

Fig. 2 Friction torque curves under various friction pressures and friction speeds (Exp. series ①).

(a) Elapsed time for initial torque

(b) Initial torque

Fig. 3 Effect of friction pressure on elapsed time for initial torque and initial torque (Exp. series ①).

(a) Elapsed time for initial torque

(b) Initial torque

(a) Friction torque curve

(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

Fig. 4 Friction torque parameter at similar materials/different diameter joints(Exp. series ②).

(a) Friction torque curve

(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

と大きな差異は認められない。また、データは示していないが、 $\phi 16/\phi 12$ も同様な摩擦トルク曲線であり、いずれも圧接面中央部から発光し始め、接合端面直径が変化しても接合は圧接面中央部から生じたことが観察された。また、各継手における初期トルクの値、初期トルク到達時間を大径側の母材直径（以下、大径直径という）で整理した結果を Fig. 4 (b) に示す。Fig. 4 (b) より、大径直径の増加にともなって初期トルクの値が若干増加しているようにも思えるものの、ばらつきを考慮すると実験を行った範囲では初期トルクの値および初期トルク到達時間に差異は認められない。すなわち、相手側母材の直径は、初期トルクの

値および初期トルク到達時間に影響しない。摩擦トルクは、接合面の接線方向の摩擦抵抗と回転中心からの距離との積の総和と考えられるので⁵⁾、接触部の面積に依存する。また、焼付過程における摩擦トルクは、焼付部のせん断強さと考えることができ、異径の場合、その値は小径側の寸法に支配されるために、初期トルクの値にほとんど差異がみられなかったものと思われる。一方、初期トルク到達時間も小径側に支配されるために変化しなかったものと思われる。

3.3 母材の降伏特性の影響

摩擦圧力 30 MPa、摩擦速度 27.5s^{-1} の一定とし、回転側

母材の材質を変化させた③の実験で得られた摩擦トルク曲線の一例として、S55C/S15CKの結果をFig. 5 (a)に示す。摩擦トルク曲線は、前報¹⁾に示したS15CK/S15CKと比較しても大きな差異は認められなかった。また、データは示していないが、S35C/S15CKも同様な摩擦トルク曲線で、いずれの継手も圧接面中央部から発光し始め、母材の降伏特性に差があっても、鋼の場合は圧接面中央部から接合が生じたことが観察された。一方、各継手の初期トルクの値および初期トルク到達時間をFig. 5 (b)に示す。Fig. 5 (b)において、若干のばらつきはあるものの、初期トルクの値とともに初期トルク到達時間にあまり差異は認

められなかった。これは、固定側はすべて同じS15CKであるため、常温時における母材降伏応力が低くなる母材に依存し、初期トルクの値ならびに初期トルク到達時間に影響を及ぼさなかったものと思われる。さらに固定側母材の材質も変化させた④の実験結果の一例として、S55C/S55Cの摩擦トルク曲線をFig. 6 (a)に示す。Fig. 5 (a)と同様にS15CK/S15CKと比較して大きな差異は認められなかった。S35C/S35C、S55C/S55Cの初期トルクの値および初期トルク到達時間をFig. 6 (b)に示す。いずれもS15CK/S15CKとほぼ同じ値となり、Fig. 6 (b)の結果では差異が認められなかった。これらの結果より、実験を行った範

(a) Friction torque curve

(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

Fig. 5 Friction torque parameter at dissimilar materials/same diameter joints (Exp. series ③).

(a) Friction torque curve

(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

(a) Friction torque curve

(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

Fig. 6 Friction torque parameter at similar materials/same diameter joints (Exp. series ④).

(a) Friction torque curve

(b) Initial torque and elapsed time for initial torque

図において、初期トルクの値および初期トルク到達時間は、常温における母材降伏特性の影響を受けないと思われる。

3.4 予熱温度の影響

接合端面の初期温度、すなわち予熱温度を変化させた⑤の実験結果の一例として、常温、約473K (200℃)、約743K (470℃)、約1193K (920℃)の各予熱温度における摩擦トルク曲線をFig. 7に示す。予熱した場合の摩擦トルク曲線は常温の場合とは明らかに異なっており、特に常温の場合でみられた摩擦時間約0.7sまでのほぼ一定値を示したトルク域、すなわち擦れ過程がほとんどないことがわかる。また、予熱温度が変化すると摩擦トルク曲線に大きな差異が認められた。そこで、初期トルクの値および初期トルク到達時間と予熱温度との関係をFig. 8に示す。初期トルクの値は、予熱温度の上昇にともなって約873K (600℃)まで緩やかに減少してその後急激に減少、初期トルク到達

Fig. 7 Friction torque curve in pre-heat (Exp. series ⑤).

Fig. 8 Relationship between initial torque, elapsed time for initial torque and pre-heat temperature (Exp. series ⑤).

時間は、予熱温度が約473Kで急激に減少してその後予熱温度の上昇にともなって緩やかに減少した。約873K以後における初期トルクの値の急激な減少は、母材の高温におけるねじり強さの低下と考えられる。また、前報¹⁾の結果より、圧接面中央部から焼付き始め、摩擦トルクが急上昇したことを考慮すると、約473Kの予熱温度で初期トルク到達時間が急激に減少したのは、圧接面中央部が約473Kで焼付いたと考えられる。

4. 考 察

第1位相中の摩擦トルクについて検討したところ、初期トルクの値ならびに初期トルク到達時間は、摩擦圧力および摩擦速度の影響を大きく受けるものの、同一圧接条件下では接合端面の直径差および母材降伏特性の影響をほとんど受けず、予熱温度には影響されることが明らかとなった。

ところで、3.3節の結果において、常温時の各母材降伏特性が異なるにも関わらず初期トルクの値および初期トルク到達時間に差異がみられない。この理由をさらに検討するため、各母材の高温引張試験を行い、降伏強度の温度依存性について検討を行った。高温引張試験片には平滑部直径9mm、平滑部長さ55mmのJIS Z2201 14号試験片を用いた。実験では、電気炉をつけた万能引張試験機を用い、20 K/minで昇温させ試験片が設定温度に達した後にクロスヘッドの移動量を0.5 mm/minとして大気中にて引張試験を行った。なお、加熱中において各母材が焼鈍されている状態とみなすことができるので、各母材の焼鈍温度までは降伏強さをそのまま降伏強度とし、その温度以上で引張りを行った母材については引張強さを降伏強度、各母材の融点を降伏強度0MPaとした。得られた各母材の降伏強度と温度との関係をFig. 9に示すが、各母材とも温度の増加にともなって降伏強度が低下しているのがわかる。また、A点のように常温における各母材間の降伏強度差は大きいものの、温度上昇にともなって降伏強度は小さくなり、B点付近の高温となるとほぼ同じ値となっている。このため、Fig. 5, 6に示したように、初期トルクの値ならびに初期トルク到達時間に差異がみられなかったものと考えられる。

以上より、初期トルクの値ならびに初期トルク到達時間は、摩擦圧力、摩擦速度および予熱温度に大きく影響を受け、接合端面直径差および母材降伏特性にほとんど影響を受けないことが明らかとなった。今後、前報¹⁾で示したモデルにもとづいて、第1位相の摩擦トルクのシミュレーションについて検討する予定である。

5. 結 言

摩擦圧接の接合メカニズムを解明するために、本報告で

Fig. 9 Relationship between yield strength and temperature of materials used.

は、第1位相における摩擦トルクに及ぼす各種因子の影響として、圧接条件である摩擦圧力および摩擦速度、接合端面の直径差、母材降伏特性、予熱温度の影響について検討した。得られた知見を以下に要約する。

(1) 初期トルクの値および初期トルク到達時間は圧接条件により異なり、高摩擦圧力、低摩擦速度になると初期トルクの値は大きくなり、高摩擦圧力、高摩擦速度になると初期トルク到達時間は短くなった。

(2) 組み合わせる接合端面直径を変化させた場合、初期トルクの値および初期トルク到達時間にほとんど差異が認められなかった。

(3) 母材降伏特性の差異に関わらず初期トルクの値および初期トルク到達時間にほとんど差異が認められなかった。

(4) 予熱温度を変えて接合を行った場合、予熱温度の増加とともに初期トルクの値が減少し、初期トルク到達時間が短くなった。特に、約473K以上の予熱温度では、擦れ過程の時間が急激に短くなった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験装置の製作などにおきまして、姫路工業大学工学部工作センターに御協力を頂いたことに感謝を申し上げます。また、各母材の高温引張試験の一部に関しては、姫路工業大学工学部機械工学科 山下正人助教授、ならびに住友金属工業株式会社総合技術研究所材料研究部 藤原知哉副主任研究員、安達裕行テクニカルリーダーのご協力を受けましたことに感謝します。さらに、当時、熱心に実験に協力された姫路工業大学工学部機械工科学部生の中林康平君、山本鉄平君、大口勝之君、櫻井大輔君、濱田仁寛君、長富泰久君の諸君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) M. Kimura, H. Mioh, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji: Observation of the Joining Phenomena in 1st Phase of Friction Welding, in contributing.
- 2) K. Okita, M. Aritoshi, W. Kishimoto, S. Yamada and H. Hira: Study on the Friction Welding of Different Diameter Bars (Report 1), J. JWS, 50-2 (1981), 189-195. (in Japanese)
- 3) A. Hasui, M. Ogawa and K. Okada: Friction Welding of Malleable Cast Iron and Carbon Steel, J. JWS, 46-5 (1977), 258-264. (in Japanese)
- 4) Japan Society of Mechanical Engineers: JSME Mechanical Engineers' Handbook A6: Thermal Engineering, Maruzen (1993), A6-181. (in Japanese)
- 5) Japan Friction Welding Association: Friction Welding, Corona Publishing (1979), 32. (in Japanese)