

低入熱摩擦圧接における摩擦時間、摩擦トルクと継手特性の関係*

—摩擦圧接の接合メカニズムに関する研究 (第3報)—

木村 真晃**, 日下 正広**, 瀬尾 健二**, 富士 明良***

Relationship between the Friction Time, Friction Torque, and Joint Properties of Friction Welding for the Low Heat Input Friction Welding Method*

—Study of Joining Mechanism of Friction Welding (Report 3)—

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

In the previous reports 1 and 2, the authors have clarified the joining mechanism in the first phase of friction stage during friction welding process. The present paper describes the relationship between the friction time, friction torque, and joint properties of friction welding for a low heat input friction welding method. The materials joined were mild steels (same materials), and a brake type friction welding machine was used for joining. In actual experiment, i.e., the low heat input friction welding method (LHI method), the electromagnetic clutch was used in order to exclude braking deformation at rotation stopping.

The following are concluded.

- (1) The joints obtained only in the first stage (up to initial peak torque) had 100% joint efficiency and 90 degrees bend ductility with no crack. It was determined that friction welded joints with 100% joint efficiency and good bend ductility could be obtained by using only the friction stage up to initial peak torque and without the need for the forging (upsetting) stage.
- (2) The fracture occurred at the substrates (not at the welded interface) in welded joints when friction torque was close to initial peak torque. It was clarified that those joints has less width of heat affected zone and less width of hardening.
- (3) It was clarified that the friction welded joints without using the forging stage (the friction welded joints by using the LHI method) have same mechanical properties as those welded by the conventional friction welding process including that stage. The LHI method has more advantages, i.e., less burn-off and less burr.

Key Words: Friction welding, Friction torque, Initial torque, Friction time, Joint strength, Relative speed, Burn-off, Burr, Low heat input friction welding method

1. 緒 言

摩擦圧接法は、異種材料の接合が容易、接合条件の管理が容易であるなどの利点から、自動車産業を中心に様々な分野で有効な接合手段として利用されている溶接方法として知られている。

著者らは、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おり、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てきた¹⁻³⁾。その結果、圧接面外周部から擦れ加工が生じて中央部へと拡大し、圧接面全面が擦れ加工状態となる。そして、中央部から焼付きを生じてこの部分が接合され、これが外周部へと拡

がって全面が接合された後に初期トルクに到達するという接合現象が明らかになった¹⁾。また、初期トルクの値は、圧接面全面が焼付く温度と、その温度における母材のせん断破壊強さにより推定できることを明らかにした^{2,3)}。

これらの結果を踏まえると、従来のように第1位相から第4位相までの接合過程を経ずに初期トルク到達時点において摩擦圧接を終了させても、論理的には十分な継手強度が得られる可能性がある。もしそうであれば、多くの実際施工で行われているアプセット過程、いわゆる第4位相までを経ずに摩擦圧接を終了させることになり、圧接面から排出するバリを減少させることが可能となる。すなわち、圧接後の加工やコストの低減などが可能になる。さらに、従来法に比較して短時間で接合が完了できることから溶接入熱を低くすることができ、調質材に対して有効な接合法となりうる可能性がある。これまでに、セラミックスと各種非鉄金属との組み合わせにおける摩擦時間と継手強度の関係⁴⁾、S55C炭素鋼同士における摩擦寄り速度ならびに入熱と継手強度との関係⁵⁾などが調べられているものの、初期トルク近傍の摩擦時間で摩擦圧接を終了しようとの観点

*原稿受付 平成14年5月20日 平成13年度秋季全国大会で発表、平成14年3月第153回溶接構造研究委員会で発表

**正 員 姫路工業大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Himegi Institute of Technology

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

から、低入熱状態での摩擦時間、摩擦トルクと継手強度との関係は著者らの知る限り検討されていない。

そこで本報告では、摩擦過程中的どの段階で摩擦圧接を終了すれば最も合理的か、すなわち初期トルク近傍の短い摩擦時間に注目して、摩擦時間、摩擦トルクと継手特性との関係について検討した。そして、従来法に比べ、低入熱の摩擦圧接で十分な継手強度を得られる可能性を示した。

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、S15CK 機械構造用炭素鋼の外径16 mmの市販丸棒を用いた。供試材料の化学成分ならびに機械的性質を Table 1 に示す。Fig. 1(a)に示すように接合端面直

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material.

(a) Chemical composition (mass %)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.29	0.41	0.012	0.019

(b) Mechanical properties

T.S. (MPa)	Y.S. (MPa)	El. (%)
420	315	37.0

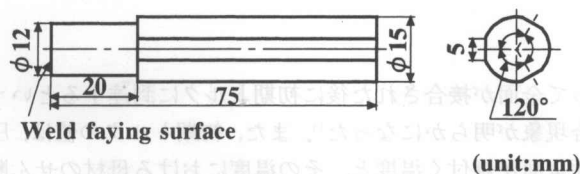


Fig. 1 Shape and dimension of the friction welding specimen.

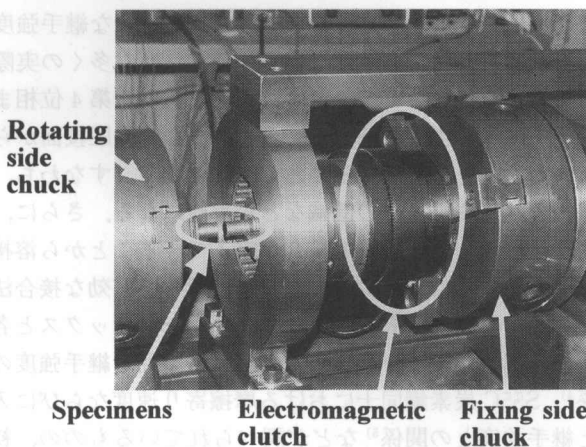
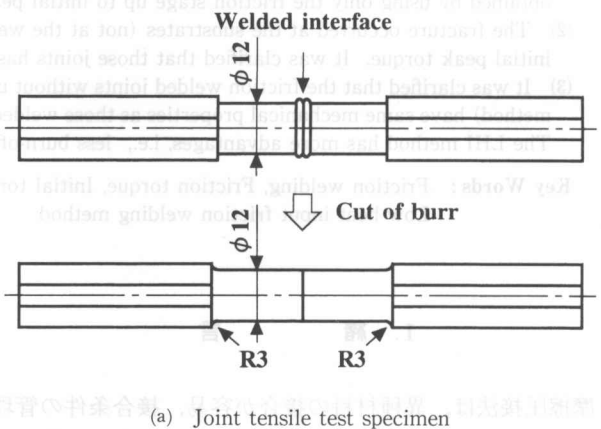


Fig. 2 General view of simultaneous break system.

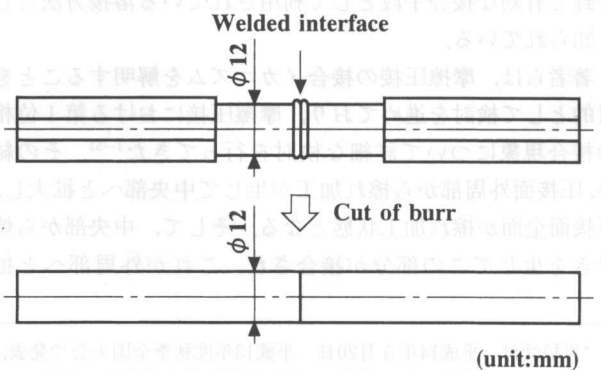
径を12 mmに旋盤加工し、チャック内での回転を防止するためにつかみ部の3方向を平削加工したものを試験片とした。なお、表面粗さを一定にするために、前報¹⁾と同様に旋盤加工後の接合端面を平面研削盤で研磨している。接合直前にアセトンにより脱脂してから実験に供した。

2.2 圧接条件および接合方法

接合には、摩擦トルク測定装置を取り付けた前報¹⁾と同じブレーキ式摩擦圧接機を用い、圧接条件は摩擦圧力30 MPa、摩擦速度 27.5 s^{-1} の一定として実験を行った。ところで、ブレーキ式摩擦圧接機では、ブレーキを掛け始めてから停止までの制動時間中においても圧接面では接合現象が進行している。また、ブレーキを掛けることで、試験片にはブレーキの反力となる負荷が生じ、この負荷によって摩擦過程とは異なった変形が生じる。摩擦過程中的接合現象と継手強度を検討するためには、接合現象を瞬時に停止した接合部を得る必要がある。そこで、前報¹⁾と同様、すなわち Fig. 2 に示すように電磁クラッチを用い、摩擦圧接開始後の任意時刻において電磁クラッチを遮断し、摩擦圧力を加えたまま瞬時に固定側試験片を回転側試験片と同速回転させ、圧接面同士の相対回転速度を零にさせた接合実験



(a) Joint tensile test specimen



(b) Joint bending test specimen

Fig. 3 Preparation process at joint tensile test specimen and joint bending test specimen.

を行った。なお、圧接面同士の相対速度が零となるまでの時間は、本圧接条件下において試験片同士が約1回転する摩擦時間0.04sよりも短い時間、すなわち撮影能力1コマ1/30秒のデジタルビデオカメラで観察できない時間であり、本報告では瞬時であると判断した。また、電磁クラッチ自体にも慣性モーメントがあるため、回転側から伝達するトルクの減少が考えられる。予備実験により電磁クラッチを使用した場合と使用しない場合における摩擦トルクを比較したところ、両者に差異は認められなかったことから、本報告では電磁クラッチ自体の慣性モーメントによる影響はほとんど無いものと判断した。

接合後、継手の寄り代の測定、ならびに引張試験および曲げ試験、圧接面近傍の断面マクロ観察および硬さ分布の測定を行った。なお、各方法については後述の通りである。

2.3 継手の引張および曲げ試験方法

種々の摩擦時間で瞬時に相対回転速度を零にすることにより摩擦圧接を終了した複数の継手を得、継手の外観観察ならびに寄り代の測定を行った後に、継手の引張試験ならびに曲げ試験を行った。得られた継手を旋盤によってFig. 3(a)に示す様に圧接面から排出されたバリを除去してJIS Z 3143⁶⁾に準じた引張試験片を作製した。なお、圧接面からバリが排出されなかった継手については、そのままの状態を引張試験片とした。一方、曲げ試験片はFig. 3(b)に示すように引張試験片と同様にバリを除去、さらにチャックのつかみ部を除去して作製した。引張試験はJIS Z 2241⁷⁾にもとづいて行い、曲げ試験では、JIS Z 3122⁸⁾にもとづきFig. 4に示すように3点曲げ試験とし、圧接面に荷重が作用するようにして行った。いずれの試験も油圧式万能試験機を用い、室温にて行った。

2.4 圧接面近傍の断面マクロ観察、熱影響部幅測定方法

圧接面近傍の断面マクロ観察は、前報¹⁾と同様の方法で行った。すなわち、これらの圧接面から回転側、固定側の軸方向へそれぞれ10 mm離れた位置を切断し、さらに圧接面に垂直な軸方向で、かつ圧接面の中心線である軸心部を通る面で切断を行い、観察面にバフ研磨を施して圧接面近傍の断面マクロ観察に供した。腐食液には、ピクリン酸

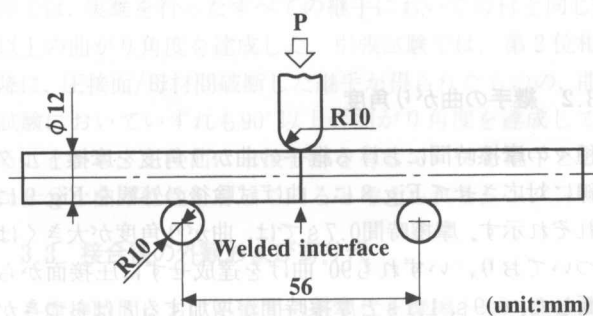


Fig. 4 Method of bending test.

4%、エタノール96%組成のピクリン液を用い、約120s間腐食させた後に洗浄、観察した。また、圧接面を横切る軸心部と外表面の中心である1/2 R部(以下、1/2 R部という)の熱影響部の幅を測定した。

2.5 圧接面近傍の硬さ分布測定方法

圧接面近傍の硬さ分布には、断面マクロ観察を行った試験片を用いた。測定にはマイクロビッカース硬さ計を用い、測定荷重を9.8 N (1 kgf)とした。測定位置は圧接面を垂直に横切る1/2 R部の軸方向線上とし、その線上において圧接面より対称に0.2 mm (200 μm)の間隔で5 mmの位置まで測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 継手の引張強さ

種々の摩擦時間で摩擦圧接を終了させた継手の引張強さを摩擦トルク曲線に対応させてFig. 5に、引張試験後の外観例をFig. 6に示す。なお、摩擦トルク曲線は前報¹⁾と同じである。第1位相、焼付過程の始まる摩擦時間0.7sでは、Fig. 5に示すように引張強さが大きくばらついており、いずれもFig. 6に示すように圧接面から破断した。摩擦時間が0.9s、1.1sと増加すると、ばらつきが減少して引張強さが増加、母材と同等の継手強度を達成し、破断位置も圧接面から圧接面/母材間破断、母材破断へと変化した。そして、初期トルク直前の1.3sでは、破断位置にばらつきがあるものの母材強度を達成し、初期トルク到達直後の1.5sとなると、実験を行ったすべての継手が母材破断した。このため、初期トルク到達時点において、継手は十分に接合されていると思われる。第2位相から第3位相となる摩擦時間2.0s以降となると、母材強度を有しているものの、再び圧接面/母材間破断した継手がいくつか得られた。このように、バ

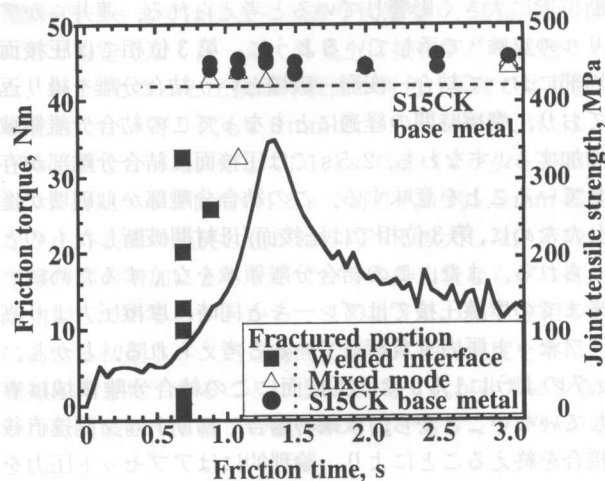


Fig. 5 Relationship between the friction time, friction torque, and joint tensile strength.

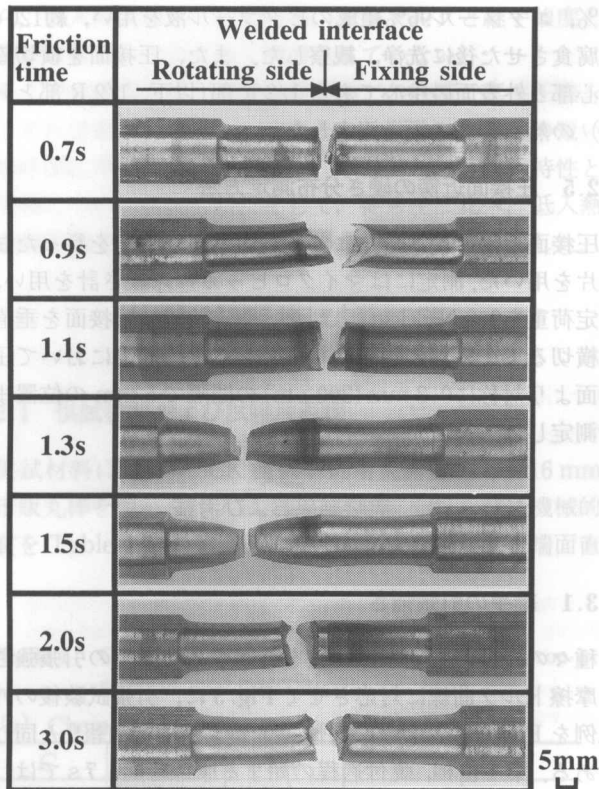


Fig. 6 Appearance of joint tensile test specimens after testing.

りが排出している第2位相から第3位相にかけて圧接面/母材間破断した継手が得られた原因を明らかにするため、第1位相中で初期トルク到達直後の1.5sと、第3位相にあたる2.5sの継手について、圧接面近傍の断面マクロ観察を行った。その結果を、Fig. 7に示す。2.5sの摩擦時間の場合には、圧接面の継手外周部から軸心に向かって矢印で示すように接合されていない部分(写真では黒色)、すなわち未接合部が認められた。しかし、1.5sの圧接面には未接合部がみられなかった。したがって、この未接合部の存在が破断位置に大きく影響していると考えられる。蓮井らがアクリルの実験⁹⁾で示しているように、第3位相では圧接面外周部において結合—変形—破壊という結合分離を繰り返しており、摩擦時間の経過にともなってこの結合分離領域が増加する。すなわち、2.5sでは圧接面に結合分離部が存在していることを意味する。この結合分離部から破壊が進行したために、第3位相では圧接面/母材間破断したものと考えられる。また、この結合分離領域をなくするために、従来までの摩擦圧接ではブレーキと同時に摩擦圧力より高いアセット圧力を負荷していると考えられる。しかし、Fig. 7のように1.5sでは圧接面にこの結合分離領域は存在していないことから、軟鋼の場合、初期トルク到達直後で接合を終えることにより、論理的にはアセット圧力を増加させることなく母材強度を有する継手を得ることができると考えられる。

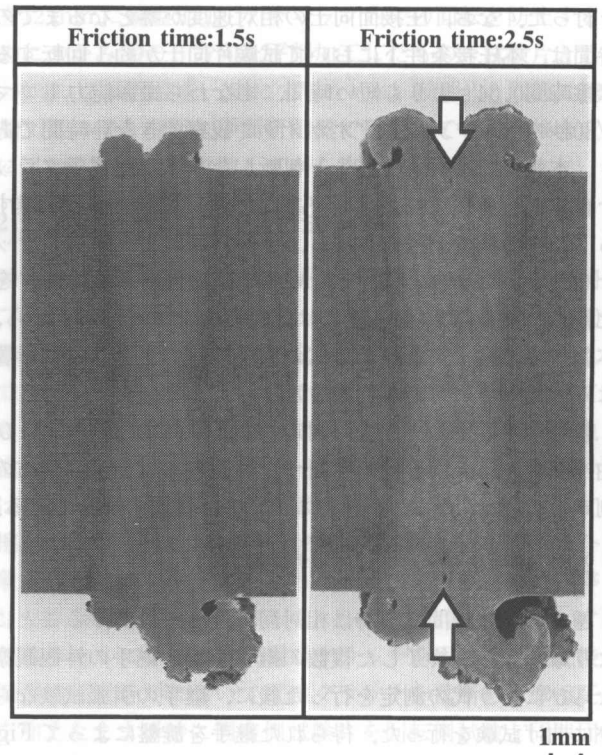


Fig. 7 Cross-sectional appearances of welded interface region at various friction times.

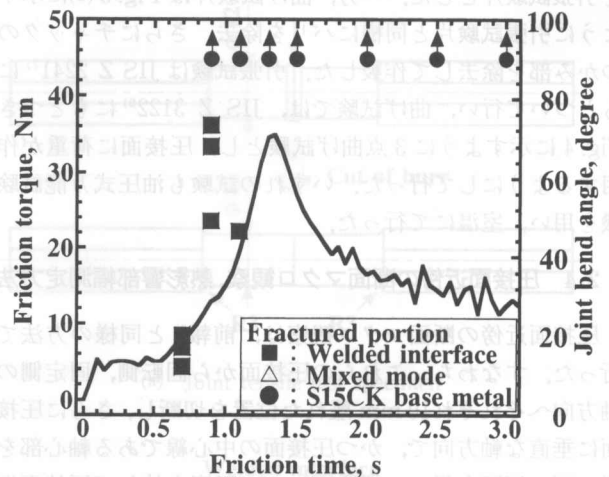


Fig. 8 Relationship between the friction time, friction torque, and joint bend angle.

3.2 継手の曲がり角度

種々の摩擦時間における継手の曲がり角度を摩擦トルク曲線に対応させてFig. 8に、曲げ試験後の外観をFig. 9にそれぞれ示す。摩擦時間0.7sでは、曲がり角度が大きくばらついており、いずれも90°曲げを達成せずに圧接面から破断した。0.9s、1.1sと摩擦時間が増加するとばらつきが減少して曲がり角度が増加し、初期トルク到達後の1.5s以

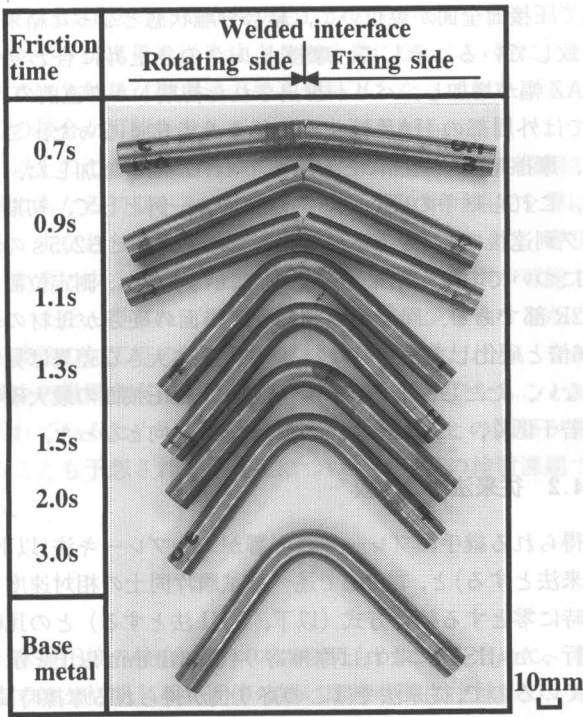


Fig. 9 Appearance of joint bend test specimens after testing.

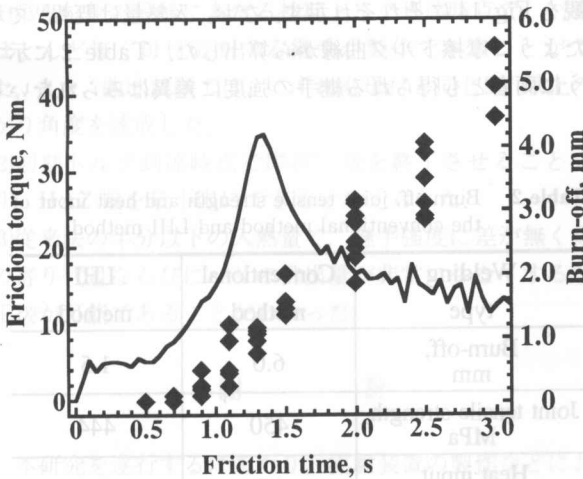


Fig. 10 Relationship between the friction time, friction torque, and burn-off.

降では、実験を行ったすべての継手において母材と同じ90°以上の曲がり角度を達成した。引張試験では、第2位相以降に、圧接面/母材間破断した継手が得られたものの、曲げ試験においていずれも90°以上の曲がり角度を達成していることから、圧接面に未接合部を有していても継手としては十分な曲げ延性を有していると考えられる。

3.3 接合後の外観および寄り代

各摩擦時間における継手の寄り代を摩擦トルク曲線に対応させて Fig. 10 に、接合後の外観を Fig. 11 にそれぞれ示

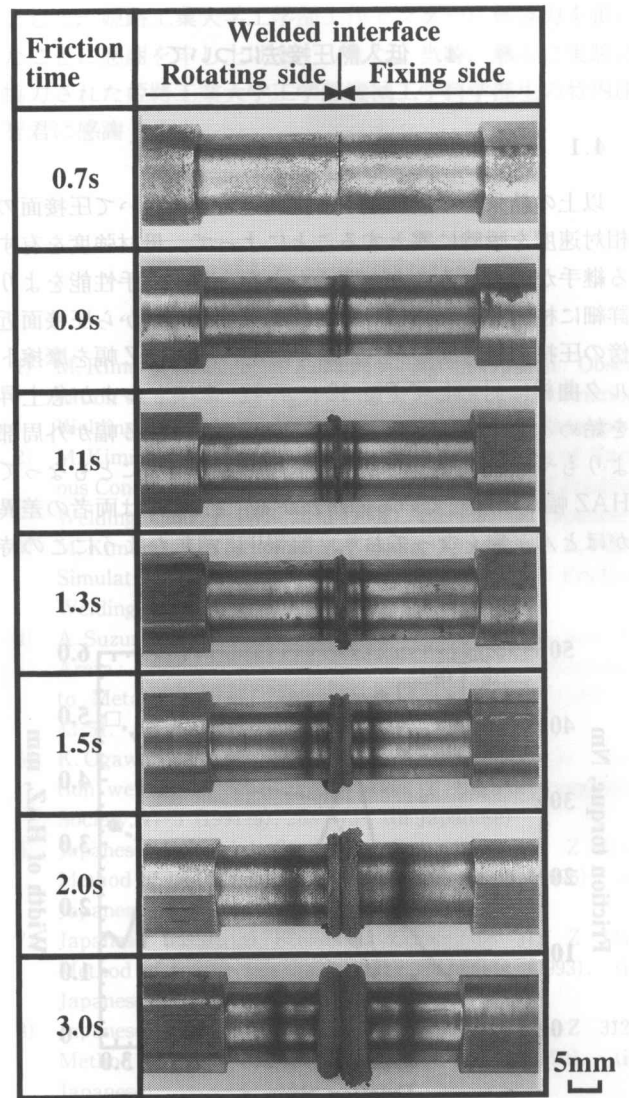


Fig. 11 Appearances of weld joints after welding.

す。Fig. 10 に示すように若干のばらつきがあるものの、摩擦時間0.7sまではほとんど寄り代はなく、Fig. 11 のようにバリも全くなく、一応、外見上は接合された状態であった。0.9s となると圧接面外表面が青色 (写真では黒色) に変色したが、寄り代も0.5mm 以下でバリの排出はほとんどみられなかった。そして、1.1s ではバリが少し排出しており、初期トルク直前の1.5s で寄り代が約1.5mm 程度となり、外表面の焼戻し色が軸方向へと拡大した。その後、摩擦時間の増加にともなってバリの排出量ならびに寄り代が増加しているのがわかる。このように、第1位相の最後にあたる初期トルク到達時点で瞬時に相対速度を零にして摩擦圧接を終了することによって、寄り代が非常に少なく、かつ母材破断する継手の製作が可能であることがわかる。

4. 低入熱圧接法について

4.1 圧接面近傍の熱影響部および硬さ分布

以上の結果から、初期トルク到達時点において圧接面の相対速度を瞬時に零とすることによって、母材強度を有する継手が得られることが明らかとなった。継手性能をより詳細に検討するために、断面マクロ観察結果から圧接面近傍の圧接面軸方向のHAZ幅を測定した。HAZ幅を摩擦トルク曲線に対応してFig. 12に示す。摩擦トルクが急上昇を始める摩擦時間0.7sまでは、軸心部のHAZ幅が外周部よりもやや広くっており、摩擦時間の増加にともなってHAZ幅が増加しているのがわかる。1.1sでは両者の差異がほとんど無くなっており、前報¹⁾に示したようにこの時

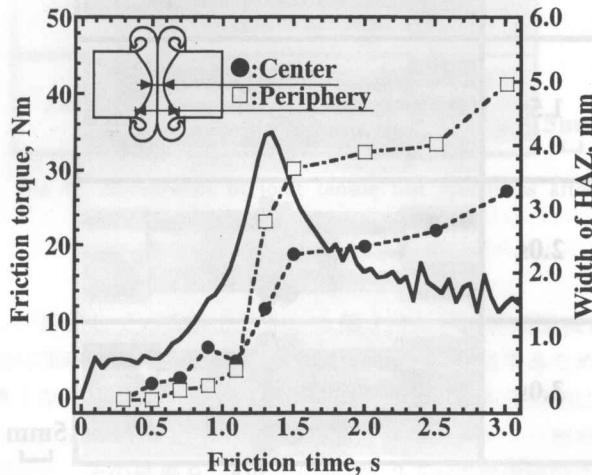


Fig. 12 Relationship between the friction time, friction torque, and width of HAZ.

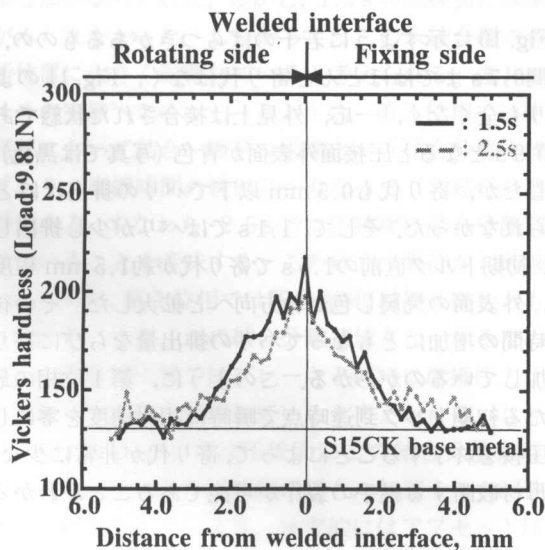


Fig. 13 Vickers hardness distribution across the welded interface region.

点で圧接面全面が焼付いて、結合分離状態となった結果に一致している。そして、摩擦トルクの急上昇に合わせてHAZ幅が増加し、バリが排出された初期トルク直前の1.3sでは外周部のHAZ幅が軸心部よりも広がった。この後、摩擦時間の増加にともなってHAZ幅が増加した。また、これら継手の硬さ分布測定結果の一例として、初期トルク到達後である1.5sと定常トルク域にあたる2.5sの継手についての測定結果をFig. 13に示す。なお、測定位置は1/2R部である。両摩擦時間とも圧接面の硬さが母材の約1.6倍と硬化しているものの、硬さ分布に大きな差異は見られない。ただし、摩擦時間が長くなると圧接面の最大硬さが若干低く、また硬化部が幅広くなる傾向となった。

4.2 従来法との比較

得られる継手にブレーキの影響が入るブレーキ法(以下、従来法とする)と、2.2節で述べた試験片同士の相対速度を瞬時に零とする接合方式(以下、LHI法とする)との比較を行った。JIS¹⁰⁾によれば摩擦寄り代が3.0mm以上と示されているので、従来法ではこの寄り代が得られる摩擦時間、すなわち2.5sとし、ブレーキングタイム約0.4s、アプセット圧力を負荷しない圧接条件とした。得られた継手の寄り代、継手引張強さ、および入熱量をTable 2に、接合後の外観をFig. 14にそれぞれ示す。なお、入熱量は既報⁹⁾で示したように摩擦トルク曲線から算出した。Table 2に示すように両者とも得られる継手の強度に差異はみられないも

Table 2 Burn-off, joint tensile strength and heat input of the conventional method and LHI method.

Welding type	Conventional method	LHI method
Burn-off, mm	6.0	1.5
Joint tensile strength, MPa	450	444
Heat input, kJ	8.9	3.6

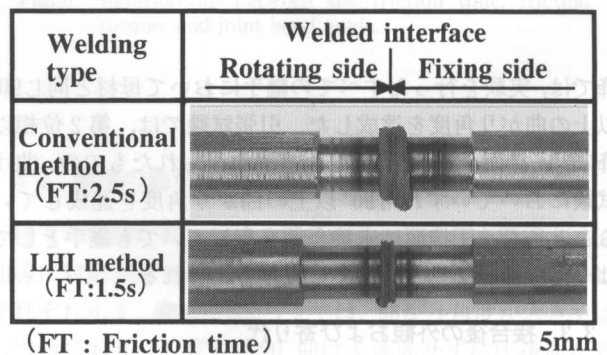


Fig. 14 Appearances of welded joints after welding by the conventional method and LHI method.

の、LHI法では寄り代が約1.5mmであり、Fig. 15のようにバリ排出量も従来法よりも非常に少ない。特に、LHI法では入熱量が従来法の約半分以下となっており、低入熱での接合が可能となっていることがわかる。

以上のことから、軟鋼同士の接合の場合、第1位相の最後にあたる初期トルク到達時点で瞬時に相対速度を零にする、すなわち摩擦圧接を終了させることによって、寄り代が非常に少なく、かつ母材破断する継手の製作が可能である。また、得られる継手のバリ排出量が少なくなるため、圧接後の加工等の簡略化が可能であると思われる。なお、鋼中の炭素含有量が増加すると溶接が難しくなることが知られているため¹¹⁾、摩擦トルクと継手強度との関係が異なることも予想される。これについては今後の検討課題である。

5. 結 言

摩擦圧接の接合メカニズムを明らかにするために、本報告では、初期トルク近傍の短い摩擦時間に注目して、摩擦時間と継手特性との関係について検討した。そして、従来法に比べ、低入熱の摩擦圧接で十分な継手強度を得られる可能性について検討した。得られた知見を以下に要約する。

- (1)第1位相の最後にあたる初期トルク到達時点で、バリがほとんど無く母材破断する継手が製作できることができた。また、曲げ試験では、いずれも母材と同じ90°以上の曲がり角度を達成した。
- (2)初期トルク到達時点で摩擦圧接を終了させることにより、HAZ幅を最小限にできると考えられた。
- (3)従来法の半分以下の入熱量で、継手強度に差が無く継手の寄り代量ならびにバリの排出量が非常に少なくする摩擦圧接が可能であることがわかった。

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、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学科学部生の竹内康智君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) M. Kimura, H. Mioh, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji: Observation of the Joining Phenomena in First Phase of Friction Welding, Quar. J. JWS, 20-3 (2002), 425-431. (in Japanese)
- 2) M. Kimura, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji: Effect of Various Conditions on Friction Torque in First Phase of Friction Welding, Quar. J. JWS, 20-3 (2002), 432-438. (in Japanese)
- 3) M. Kimura, K. Yoshioka, M. Kusaka, K. Seo and A. Fuji: Simulation of Friction Torque in First Phase of Friction Welding, Quar. J. JWS, in printing.
- 4) A. Suzumura, T. Onzawa, Budhi, K., A. Ohmori and Y. Arata: Joining Mechanism in Friction Welding of Ceramics to Metals, J. High Temperature Society, 13-1 (1987-1), 43-51. (in Japanese)
- 5) K. Ogawa, H. Yamaguchi, Y. Suga and K. Sakaguchi: Friction welding of S55C carbon steel, J. High Temperature Society, 17-5 (1991-9), 263-273. (in Japanese)
- 6) Japanese Industrial Standards Committee: JIS Z 3143 Method of test for butt pressure welded joints, (1996). (in Japanese)
- 7) Japanese Industrial Standards Committee: JIS Z 2241 Method of tensile test for metallic materials, (1993). (in Japanese)
- 8) Japanese Industrial Standards Committee: JIS Z 3122 Method of bend test for butt welded joint, (1990). (in Japanese)
- 9) A. Hasui and S. Fukushima: On the Torque in Friction Welding, J. JWS, 44-12 (1975), 1005-1010. (in Japanese)
- 10) Japanese Industrial Standards Committee: JIS Z 3607 Recommended practice for friction welding of carbon steel, (1994). (in Japanese)
- 11) N. Iguchi: JISによる機械材料の特性と選び方, Shokodo (1978), 31. (in Japanese)