

ポリエチレンの摩擦圧接現象

長谷川 正義*

Friction Welding Phenomena of Polyethylene

Masayoshi HASEGAWA*

(Received June 9, 1998)

The effect of friction welding conditions on the friction welding phenomena was investigated with a brake type friction welding machine for metal, using polyethylene.

The experimental results are as follows ;

- 1) The initial torque increased by increases of friction pressure and decreases of rotational speed. This phenomena was the same manner as steel.
- 2) The total loss increased remarkably with increases of friction pressure, but the effect of upset pressure was not recognized. This phenomena was different from the steel. It was considered that this mechanism was mainly caused by small softening area of interface with small heat conductivity.
- 3) The time from friction start till initial torque decreased with increases of friction pressure.
- 4) The good appearances and sound welded joints were obtained by low friction pressure and high rotational speed in comparison with steel.

Keywords : polyethylene, friction welding phenomena, friction torque, total loss, initial torque, time from friction start till initial torque, friction welding condition

1. 緒 言

近年、自動車および家電産業を中心としたあらゆる産業で高機能化および高性能化が求められ、それにこたえる材料として、耐食性に優れ、しかも軽くて成形性に富むプラスチックが用いられている。

プラスチックを生産量から見れば、ポリ塩化ビニル、ポリエチレン、ユリア樹脂およびスチロール樹脂が全体の半数以上を占めているが、これらが積極的に用いられる理由の一つに、溶接性に優れていることがあげられ、熱風溶接法、熱板溶接法、摩擦溶接法および超音波溶接法などの種々の熔融溶接法が開発されてき

た¹⁻³⁾。

一方、釧路沖地震および阪神大震災をはじめとする相次ぐ震災により、生活基盤であるガス管及び水道管の破損は大きな社会問題となり、それらの震災においても損傷の少なかったポリエチレン管に注目が集まり、最近敷設された低圧ガス支管の90%以上がすでにポリエチレン管であり、管の直径も年々大きくなっている⁴⁾。その結果、ガス及び水道などの導管の主流は鋼管からポリエチレン管へと変化し、今まで主流であった鋼管はポリエチレン管で対応ができない高温箇所などに用いられる特殊管となりつつある。

ポリエチレン同士の接合は接着剤では不可能であるから溶接あるいは機械的に行われている。したがって、

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

溶融溶接による接合の研究が種々行なわれてきた⁵⁻¹⁰⁾が、現在、ポリエチレン管の接合は接合部を電熱線で加熱することにより溶融接合するエレクトロフュージョン法(EF法)および接合部に加熱した熱板をあてて溶融接合するヒートフュージョン法(HF法)が主に採用されている。しかし、前者は接合部に電熱線をあらかじめ埋め込んだ高価な溶着継手を必要とするためにコストの点で、また、後者は接合部の温度管理の困難さから、接合強度の安定の点で問題がある。

現在、わが国におけるガス用ポリエチレン管の接合法は接合部の信頼性の高さを重視し、コストが高いエレクトロフュージョン法を採用している。しかし、前述のようにポリエチレン管が特殊管として用いられていた当時は、敷設距離が短く、溶着継手個数もわずかであったため、コストの高さも大きな問題とはならなかったが、鋼管にかわって大量に使用されると、敷設距離が膨大となり、それに伴い、当然、継手個数も飛躍的に増加し、直径の大形化と相俟って、接合に要する費用も膨大となってきた。また、この方法を実施する場合に、接合部をあらかじめ清浄にする作業が必要となるが、この作業にかかる費用も大きな問題となっている。したがって、ポリエチレン管の大量使用に対処するためには低コストで、しかも高信頼度の継手が容易に得られる接合法の開発が望まれる。

摩擦圧接法は電熱線や熱板のような外部からの熱供給を必要としないのみならず、摩擦により接合面が常に清浄であり、しかも接合に要する時間も短いので、ポリエチレン管の接合法としては最適な方法の一つと考えられる。

しかしながら、プラスチックの摩擦圧接法についての研究はわずかで¹¹⁾、ポリエチレンに限れば、報告はほとんど見当たらない。また、摩擦圧接法を採用したわずかな報告も金属用摩擦圧接機を用いたもので、プラスチック専用の摩擦圧接機を用いたものはないようである。

プラスチックの軟化温度、熱伝導率、摩擦係数および変形抵抗などの諸物性が金属とは異なるので、当然、圧接現象も異なった結果を示すものと考えられる。したがって、プラスチックの摩擦圧接を効率良く行うには、推力、摩擦圧力および寄り速度などが微小調整できるプラスチック専用の摩擦圧接機の開発が急務である。しかし現在、摩擦圧接機の開発に必要な基礎データ、すなわち、圧接現象が解明されていないのが現状である。

そこで本研究ではポリエチレン中実丸棒を用い、摩擦圧接現象に及ぼす圧接条件の影響を調べると共に、この結果を既知の鋼材摩擦圧接における諸現象と比較

検討した。それらの結果について報告する。

2. 実験方法

供試母材は市販の中密度ポリエチレン中実丸棒で直径50, 30および15mmの3種類を用いた。また、ポリエチレンの圧接現象を鋼材のそれと比較するため、直径15mmの機械構造用炭素鋼S25C中実丸棒を用いた。

摩擦圧接機には金属用のブレーキ式を用い、予備実験の結果から、摩擦時間 $t_1=10\text{sec}$ およびアプセット時間 $t_2=60\text{sec}$ を一定とし、摩擦圧力 $P_1=0.2\sim 3.0\text{MPa}$ 、摩擦速度 $N=30\sim 60\text{S}^{-1}$ 並びにアプセット圧力 $P_2=0.2\sim 10\text{MPa}$ の種々の圧接条件のもとで実験を行った。なお、ポリエチレンと鋼材の摩擦トルク曲線および全寄り代を比較した実験(図1)並びに温度曲線を比較した実験(図2)では、それぞれの図中に示す条件を用いたが、それら以外はいずれも $P_2=P_1$ および $t_2=60\text{sec}$ とした。この $t_2=60\text{sec}$ の条件はヒートフュージョンの圧着時間が直径75mmで60secとなっているので¹²⁾、これを参考にしたものである。また、この $t_2=60\text{sec}$ という値は、一般の鋼材の場合の $t_2=2\text{sec}$ 程度に比べると著しく長い時間であるが、ポリエチレン接合部の場合、融点から冷却して固化し、さらに硬化して十分な機械的強度を有するまでに要する時間が鋼材に比べ著しく長いためである。

3. 実験結果とその検討

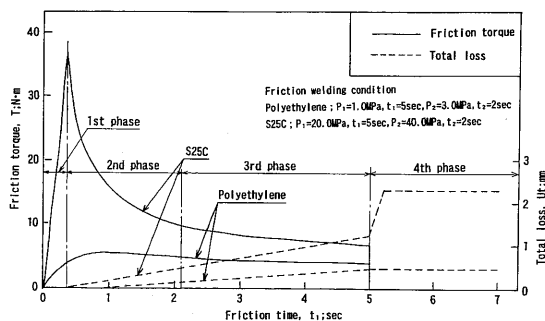


図1 ポリエチレンとS25Cにおける摩擦トルク曲線および全寄り代の比較

図1は予備実験の結果、ポリエチレン接合部の外観検査から外観が良好(ばりの高さおよび幅がほぼ揃っていて、しかもばり表面に適度の光沢を示すもの)となる摩擦圧接条件を用いて圧接を行った場合の摩擦トルクおよび全寄り代の時間的变化を調べた結果をS25Cの場合と比較して示したものである。同図中に示す第1位相から第3位相までの摩擦トルクおよび寄り代の時間的变化はポリエチレンの場合と鋼材の場合

とでは定性的にほぼ同様な傾向を示すことが認められる。すなわち、いずれの場合も摩擦トルクは母材接合面の接触開始から短時間で極大値を示した（以下、このトルクを初期トルクという）後に減少し、定常域に達している。また、寄り代も初期トルク到達時に発生し、その後は時間の経過と共にほぼ一様に増大することが認められる。しかし、アプセット圧力を付与した後の第4位相における寄り代はポリエチレンの場合にはほとんど認められないの 비해、鋼材の場合には大きなアプセット寄り代が生じている。この点については後述の図5において、その主因について述べる。

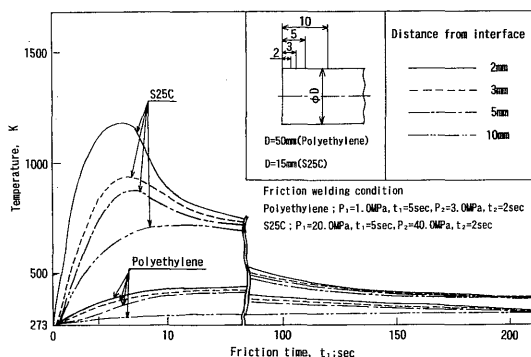


図2 ポリエチレンとS25Cにおける温度曲線の比較

図2はポリエチレン接合部表面の摩擦圧接時における温度曲線をS25Cの場合と比較して示したものである。ポリエチレンの場合には接合面から軸方向に2mm離れた箇所表面温度は摩擦開始と同時に上昇を示し、摩擦開始から9sec後に最高温度（約430K）に到達しているが、接合面から10mm離れた箇所の温度は極めて低く、しかも摩擦開始から約200sec後も温度はわずかに上昇し続けていることが認められる。これに比べ、S25Cの場合には接合面から2, 3, 5および10mm離れたいずれの箇所も摩擦開始と同時に温度上昇し、約12sec以内に最高温度に到達後、低下していることが認められる。このように、接合面から10mm離れた箇所における温度曲線の様相がポリエチレンとS25Cとで著しく異なるのは両者の熱伝導率が異なっていることによるものと考えられる。すなわち、ポリエチレンの熱伝導率は0.29kcal/m.hr.kで、鋼材のそれ(43~52kcal/m.hr.k)に比べ、著しく小さい(1/148~1/179)ため、接合面で摩擦発熱した熱が接合面から10mm離れた箇所に伝導するにはかなり長い時間を要するためと思われる。この点はポリエチレンの接合現象と鋼材のそれとが著しく異なる要因の一つと考えられる。

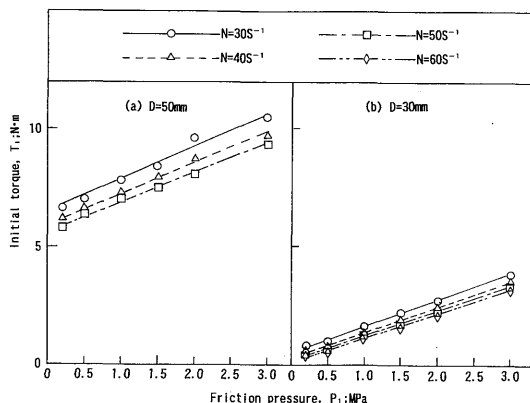


図3 初期トルクに及ぼす摩擦圧力の影響

図3は試験片直径D=50および30mmのポリエチレン丸棒を用いた場合の初期トルク T_i に及ぼす摩擦圧力 P_i の影響を種々の摩擦速度 N について比較して示したものである。いずれの N の場合も T_i は P_i の増加と共にほぼ直線的に増大する傾向が認められる。また、同一 P_i における T_i の値を N について比較すれば、 T_i は N が低いほど高い値を示すことが認められる。これらの傾向はいずれの D の場合も同様であるが、同一 P_i における T_i の値はD=50mmの方が30mmよりもかなり高い値を示している。なお、D=50mmの場合には $N=60\text{ S}^{-1}$ の実験も行ったが、この場合には摩擦発熱量が多すぎて、ポリエチレンの軟化が著しく、液状化したポリエチレンが摩擦圧接時の回転に伴う遠心力により飛散し、ばりの形成が困難であったため、圧接不可能としてデータから除去した。このように接合部が液状化する現象は鋼材の場合には見られないが、この点はポリエチレン特有の現象であると思われる。

図4は初期トルク T_i に及ぼす摩擦速度 N の影響を調べた結果を示したものである。いずれの D および P_i の場合も T_i は N の増加と共に減少する傾向が認められる。

図5は全寄り代 U_i に及ぼす摩擦圧力 P_i の影響を調べた結果を種々の摩擦速度 N について示したものである。本来、 U_i は P_i による寄り代 U_1 とアプセット圧力 P_2 による寄り代 U_2 とを加えたものであるが、ここでは横軸に P_i のみを用いた。これは後述のように、 P_2 による U_2 の発生はほとんど認められないことが実験により明らかであり、 P_i のみで整理しても差し支えないからである。同図によれば、D=50および30mmのいずれの場合も U_i は P_i の増大と共にほぼ直線的に増加する傾向が認められる。また、 U_i の値は N および D の増加により増大する傾向が認められる。なお鋼材の摩擦圧接においては、通常、 P_2 は P_i の約2倍の値が採用されており、

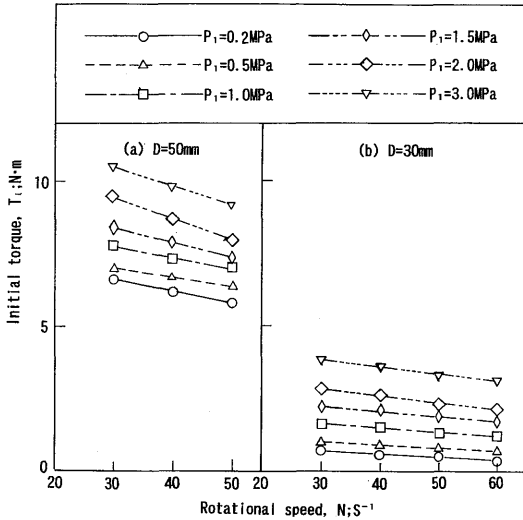


図4 初期トルクに及ぼす摩擦速度の影響

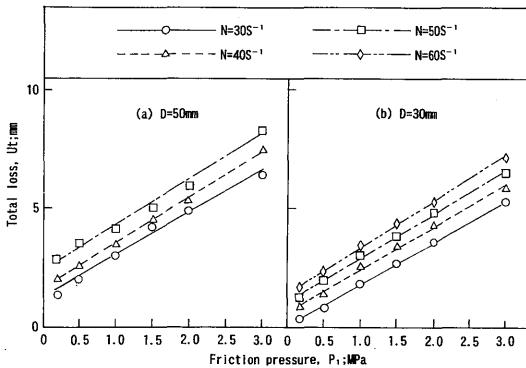


図5 全寄り代に及ぼす摩擦圧力の影響

この P_2 を付与することにより U_2 が発生し、継手強度も著しく増加するのであるが、ポリエチレンにおいては P_1 に対して約10倍の P_2 を付与しても U_2 はほとんど発生しなかった。この点は鋼材に比べ著しく異なる現象であるが、この主因の一つに両者の熱伝導率の相違が考えられる。すなわち、ポリエチレンの熱伝導率は鋼材のそれに比べ、著しく小さく、したがって、接合面で発生した摩擦熱は摩擦時間 $t_i=10\text{sec}$ の間に接合面から軸方向にほとんど伝導しないため、軟化部が接合面の極近傍のみに限定され、その結果、 P_2 を付与してもそれによる塑性流動が発生しないため、 U_2 も発生しないものと考えられる。

以上の実験結果から、ポリエチレンと鋼材の圧接現象を比較すれば、トルクと摩擦時間との関係、初期トルクに及ぼす摩擦圧力および摩擦速度の影響は既知の

鋼材の場合の圧接現象とほぼ同様であるが、全寄り代の発生機構は異なることが明らかとなった¹³⁾。

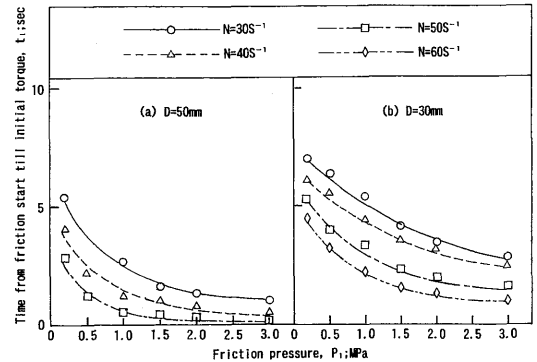


図6 摩擦開始から初期トルクに至るまでに要する時間に及ぼす摩擦圧力の影響

図6は摩擦開始から初期トルクに至るまでに要する時間 t_i に及ぼす摩擦圧力 P_1 の影響を調べた結果を示したものである。いずれの D の場合も t_i は P_1 の増大と共に減少する傾向が認められる。また、 D について同一 P_1 における t_i を比較すれば、 t_i は $D=30\text{mm}$ の方が 50mm の場合よりも増加する傾向が認められる。

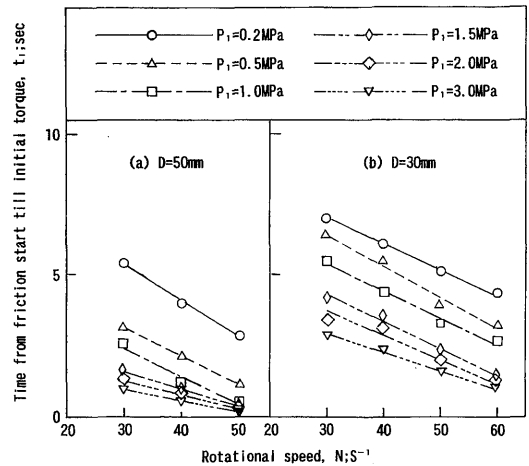


図7 摩擦開始から初期トルクに至るまでに要する時間に及ぼす摩擦速度の影響

図7は初期トルクに至るまでに要する時間 t_i に及ぼす摩擦速度 N の影響を調べた結果を示したものである。 $D=50$ および 30mm のいずれの場合も t_i は N の増大と共にほぼ一様に減少する傾向が認められる。

図8は初期トルクに至るまでに要する時間 t_i に及ぼす周速度 V の影響を調べたものである。なお、 V は D

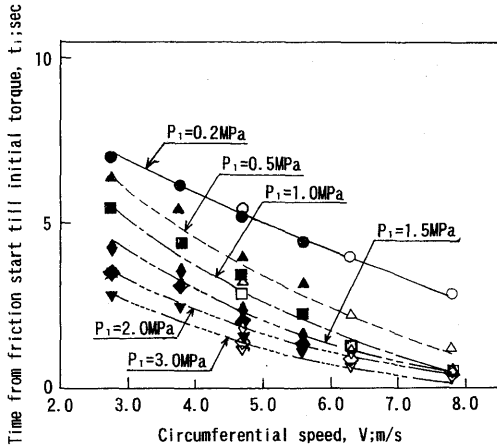


図8 摩擦開始から初期トルクに至るまでに要する時間に及ぼす周速度の影響

から計算で求めたものを用いた。同図中の白抜きは $D=50$ および黒塗りは 30mm の場合の結果である。いずれの P_f による場合も 50mm の結果と 30mm の結果をプロットしたものは互いに連結し、一本のなだらかな線となっていることが認められる。すなわち、 t_i は V に支配されていることが明らかとなった。

しかし、この結果がポリエチレン特有の現象であるのかあるいは鋼材でもこのような現象が見られるのかについては、現在、比較する研究結果が見当たらない。そこでこの点を検討するため、S25Cについても同様な実験を行い、その結果を図9に示した。同図は試験片直径 $D=12\text{mm}$ の場合の初期トルクに至るまでに要する時間 t_i に及ぼす試験片の周速度 V の影響を調べた結果を白抜きで示したものである。この実験結果と $D=10$ および 15mm の結果である黒塗りおよび半黒塗りの結果はいずれも $D=12\text{mm}$ の白塗りの実験結果の線の上にプロットされている。したがって、鋼材の場合にもポリエチレンの場合と同様に t_i は V によって支配されていることが確認された。

図10はばりの高さ h に及ぼす摩擦圧力 P_f の影響を調べた結果の一例を摩擦速度 $N=40\text{S}^{-1}$ について示したものである。ポリエチレンの摩擦圧接時に発生するばりは摩擦発熱量に大きく支配されることが明らかとなった。すなわち、発熱量が小さい場合にはポリエチレンの軟化不足から接合面が削られてできた微小粒あるいは綿状のものがばりに付着しその結果、光沢のないばりとなり、逆に、発熱量が大きい場合にはポリエチレンが液状化し、それが顕著な場合には遠心力により飛散したり、あるいは軸方向に流れて母材表面に付着し、鋼材のような接合面を対称軸としたカールを持つばり

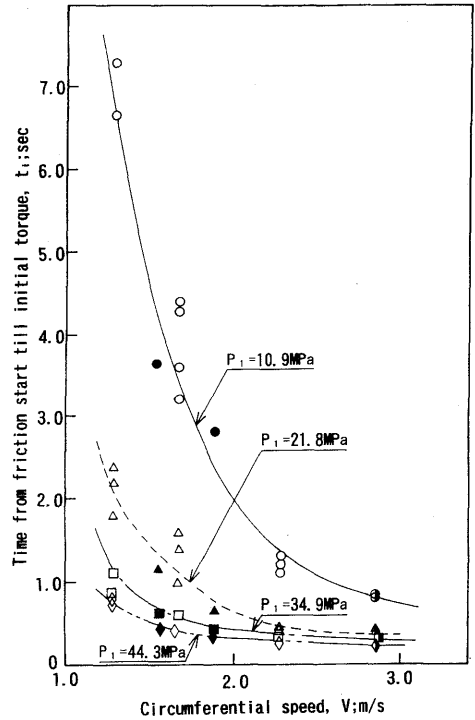


図9 S25Cにおける摩擦開始から初期トルクに至るまでに要する時間に及ぼす周速度の影響

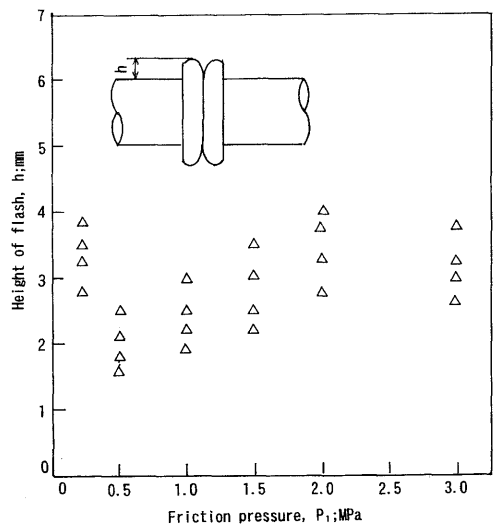


図10 ばりの高さに及ぼす摩擦圧力の影響

は得られなかった。したがって、適正な発熱量が得られる圧接条件を除き、ばりの高さ h および後述の図11に示すばりの幅 W は測定箇所により大きなばらつきが見られるので、同図では接合部の円周を4等分し、

各箇所ごとに h および W を測定し、その値をそのまま示したものである。同図によれば、 h は $P_1=0.2\text{MPa}$ の場合には約 $2.8\sim 3.8\text{mm}$ の値を示し、 $P_1=0.5\text{MPa}$ になると約 $1.5\sim 2.5\text{mm}$ に減少し、その後、 $P_1=2.0\text{MPa}$ までは P_1 の増大と共に h も増加するが、 P_1 がそれを越えると h は低下の傾向を示す複雑な様相を示している。これは摩擦速度および摩擦圧力が小さい場合には摩擦発熱が不足し、光沢のないばりで、軸方向にほとんど流動しないため、 h も高い値を示しているが、 $P_1=0.5\text{MPa}$ 以上になると摩擦発熱量も増加し、軟化するので h も減少するものと考えられる。そして図5に示したように、 P_1 の増大と共に U_1 も増大するので、 $P_1=2.0\text{MPa}$ までは P_1 の増大と共に h も増大するものと思われる。なお、これらのばり表面はロウを溶かしたように光沢のあるばりとなり、軸方向に流れて付着していることが観察されることから、 h は接合部の軟化状況に大きな影響を受けているものと考えられる。また、 $P_1=2.0\text{MPa}$ を越えると h が低下するのは、軟化が著しく、ばりは軸方向に激しく流れていることが観察され、この結果、 h は高くならないものと考えられる。

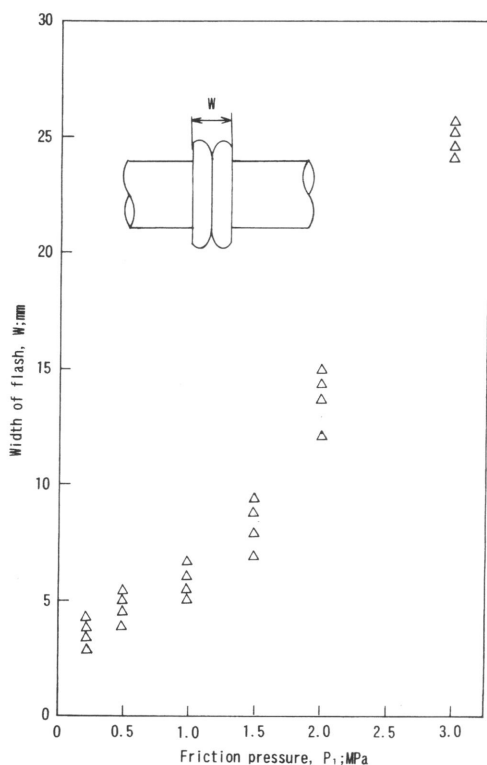


図11 ばりの幅に及ぼす摩擦圧力の影響

図11はばりの幅 W に及ぼす摩擦圧力 P_1 の影響を示したものである。同一 P_1 におけるばりつきはかなり大きいですが、傾向から見れば、 $P_1=1.0\text{MPa}$ までは P_1 の増大と共に W もわずかに増加する傾向が見られるが、 P_1 がそれを越えると P_1 の影響は顕著であることが認められる。この原因は P_1 が 1.0MPa を越えると軟化が顕著で、ばりが軸方向に流れるためと思われる。

このように、ポリエチレンではばりが軸方向に流れて母材表面に付着する現象並びにばり高さおよび幅が測定箇所により大きく異なる現象などが見られるが、この現象は鋼材の摩擦圧接では見られない特異な現象である。これらの相違は熱伝導率および融点近傍での流動性に起因しているものと考えられる。

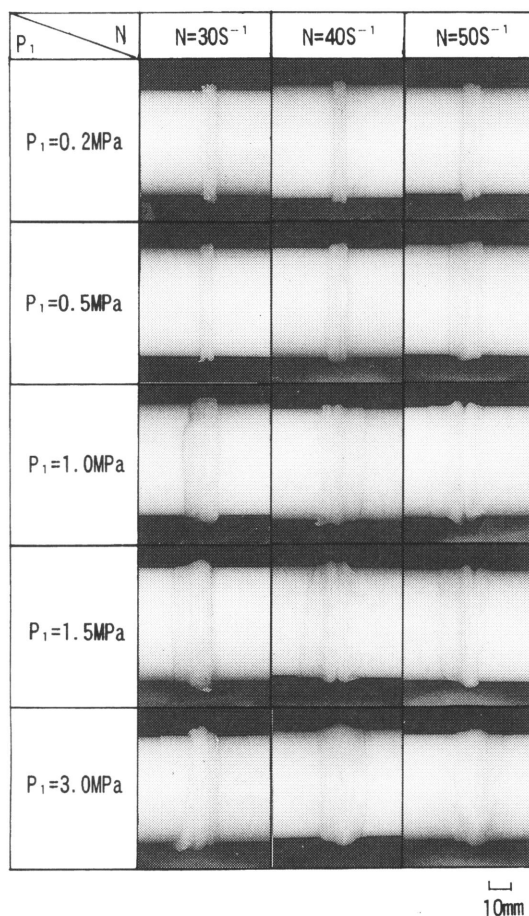


図12 摩擦圧接継手の外観 ($D=50\text{mm}$)

図12は直径 $D=50\text{mm}$ の場合の摩擦圧接継手の外観に及ぼす摩擦圧力 P_1 および摩擦速度 N の影響を調べた結果を示したものである。外観に及ぼす P_1 および N の影響は顕著で、 $N=30\text{S}^{-1}$ で、 $P_1=0.2$ および 0.5MPa の場合には、摩擦発熱不足から接合部のポリエチレンが

軟化せず、ポリエチレンが削られてできた微小粒が表面に付着し、表面の光沢は認められない。しかし、 $N=40$ および 60S^{-1} の場合には P_f がいずれの場合も表面は著しく軟化し、ロウ状の光沢のあるばりが発生することが観察された。また、 P_f が 1.0MPa を越えると、いずれの N の場合もばりの幅が極端に広くなり、しかも場所によって不揃いであることが観察された。

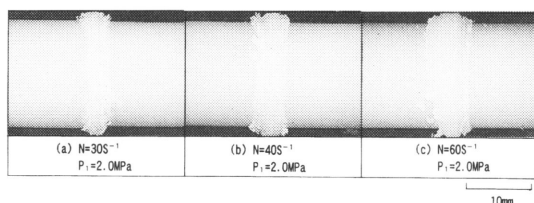


図13 摩擦圧接継手の外観 (D=15mm)

図13は直径 $D=15\text{mm}$ の場合の外観の一例を示したものである。 $P_f=2.0\text{MPa}$ と高い値にもかかわらず、いずれの N の場合も軟化不足で、ポリエチレンが削られた微小粒あるいは綿状のものがばりに付着しており、良好な外観は得られなかった。

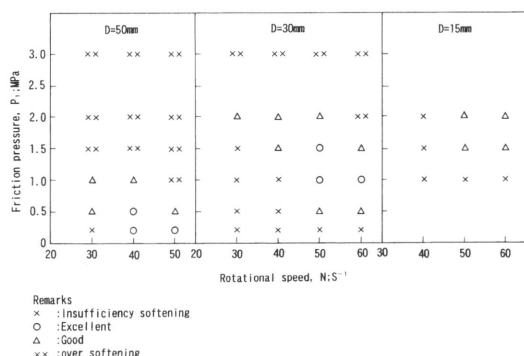


図14 摩擦圧接継手の外観に及ぼす摩擦速度および摩擦圧力の影響

図14は直径 $D=50, 30$ および 15mm の試験片を用いて摩擦圧接を行った場合の継手外観に及ぼす摩擦圧力 P_f および摩擦速度 N の影響を調べた結果をまとめて示したものである。なお、同図中で示す $\times$ 印は発熱不足でばりが軟化せず、光沢がない場合で、 $\times\times$ 印は逆に軟化しすぎて液状化し、ばりが流れて外観がそれぞれ不良となった場合である。同図によれば、 $\circ$ で示す良好な外観が得られる範囲はかなり狭く、しかも D が減少すると共に、良好な外観を得るためには、より高い P_f および N を必要とすることが認められた。また、 $D=15\text{mm}$ の場合には $N=60\text{S}^{-1}$ においても発熱不足で、 $\circ$

に相当する外観が得られなかった。

このようにポリエチレンでは N および P_f の適正条件範囲が狭く、その範囲を超えると、ばりは不揃いとなる現象が見られるが、これは鋼材の場合には見られない現象である。またこの結果は、ポリエチレン継手の外観は N よりも V に大きく影響されることを示唆しているものであり、したがって一般的に、鋼材の場合の圧接条件は N で示されるが、ポリエチレンの場合には V で示す方が妥当であると考えられる。

4. 結 言

ポリエチレン中実丸棒を用いて摩擦圧接における諸現象を調べると共に鋼材のそれらと比較検討を行った。得られた結果は次のとおりである。

- 1) 摩擦トルクは摩擦圧力の増大および摩擦速度の減少と共に増加する。この現象は鋼材の場合と同様である。
- 2) 全寄り代に及ぼす摩擦圧力の影響は顕著であるが、アプセットによる寄り代はほとんど認められない。この現象は鋼材の場合と著しく異なる。
- 3) 摩擦開始から初期トルクに至るまでに要する時間は摩擦圧力の増加と共に減少する
- 4) 良好な外観のポリエチレン継手を得るための摩擦圧力は鋼材に比べて、著しく低く、また摩擦速度は逆に大きい。

参 考 文 献

- 1) 木村博；プラスチックの溶接(1)，溶接学会誌，34-11 (1965)，p1140~1157
- 2) 木村博；プラスチックの溶接(2)，溶接学会誌，34-12 (1965)，p1221~1242
- 3) 大西巖；プラスチック溶接の概要およびわが国における発展，溶接学会誌，40-6 (1971)，p489~500
- 4) 千葉裕司；200mmPF (ポリエチレン管) の導入について，配管技術，94-12 (1994)，p106~109
- 5) 木村博，井町正樹，坪井正和；ポリエチレンの溶接性および接着性に及ぼす放射線照射の影響，溶接学会誌，40-9 (1971)，p861-867
- 6) 木村博，山口拓治，坪井正治；ガラス繊維強化ポリエチレンの溶着生に関する研究 (第1報)，溶接学会誌，4-1 (1973)，p40~47
- 7) 木村博，山口拓治，坪井正治，島田正治；ポリエチレン溶接部の低温特性に関する研究，溶接学会誌，43-12 (1974)，p1174~1182
- 8) 井町正樹；溶融ポリエチレンのぬれと接着性について，溶接学会誌，45-3 (1976)，p215~221

- 9) 井上敏雄；プラスチック系配管の熱融着継手，
空気調和，衛生工学，66-7（1992），p21～25
- 10) 長谷文夫；プラスチック系配管の電気融着継手，
空気調和，衛生工学，66-7（1992），p27～30
- 11) 中原征治，青柳祥昭，矢野光男，中村虔一；摩
擦圧接に関する研究（第3報），機械技術研究所
報，28-6（1974），p224～232
- 12) 日本ガス協会編；ガス用ポリエチレン管技術資
料，日本ガス協会，平成7年，p39
- 13) 摩擦圧接協会編；摩擦圧接，コロナ社，昭和57
年，p28～46