

低炭素鋼同種摩擦圧接継手の衝撃強度特性

加賀谷 忠治*, 加藤 政則**, 川口 幸宏***

Impact Strength of Friction Welded Butt Joints Manufactured by 0.15 % C Carbon Steel

Chuji KAGAYA*, Masanori KATO** and Yukihiro KAWAGUCHI***

(Received May 30, 1991)

In order to make clear the transition and fracture behavior of a friction welded joint, instrumented Charpy impact tests have been carried out at various temperatures from -100°C to 200°C , using 0.15 % C carbon steel specimens with butt joint. The main results obtained are as follows: (1) The ductile-brittle transition curve of the weld interface by the friction welding condition used in this experiment shifts to the lower temperature side than that of the base metal. The impact value at the transition region is more than that of the base metal. (2) The ductile-brittle transition temperature is respectively -21°C in base metal and -39°C in weld interface. These temperatures and the fracture appearance transition temperature agree in most cases. (3) The crack propagation energy in the weld interface at the lower position of the transition region is extremely large in comparison with that of the base metal. (4) The impact bending strength is in the order of the weld interface and base metal, regardless of the test temperature, but these strengths become the maximum around the highest temperature, where 100 % brittle fracture occurs.

1. 緒言

摩擦圧接法を機械・構造物部品の製作に適用する場合には、その接合面の強度特性が問題となる。静的および疲労強度については、一般に母材の場合と同等もしくは母材の強度を上回る^{1)~9)}。しかし、室温あるいは遷移域における衝撃値は、母材の値に比較して著しく低下することが指摘されている¹⁾²⁾¹⁰⁾¹¹⁾。これは圧接接合に固有な

現象とされているが¹¹⁾¹²⁾、材料や圧接条件によりかなり相違することが推察される。したがって、衝撃強度の観点から、接合面の延性-ぜい性遷移温度を評価し、また、その衝撃挙動に関して詳細に調査することは、摩擦圧接継手の強度設計上重要な課題であると考えられる。しかるに従来の研究では、シャルピー衝撃値の温度依存性や破断挙動などに対する系統的な検討は、ほとんど行われていない。

そこで本研究では、実用に供せられることの多い低炭素鋼同種摩擦圧接継手を取り上げ、接合面の衝撃値と試

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**生産技術開発センター (Innovation Center for Production Engineering)

***極東開発工業 (Kyokuto Kaihatsu Kogyo Co. LTD)

験温度との関係求めた。また遷移曲線および破面に基づく遷移温度、き裂の発生・進展に対する吸収エネルギー、衝撃曲げ強度などについて調査するとともに、母材の衝撃挙動との関連で圧接継手の衝撃強度特性について検討した。

2. 実験方法

実験に使用した素材は、機械構造用炭素鋼 S15CK の熱間引抜き丸棒材 (φ16 mm) で、その化学成分および機械的性質を表1、表2に示す。

表1 素材の化学成分 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.27	0.47	0.024	0.012

表2 素材の機械的性質

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Vickers hardness (0.98N)
300	466	45.3	70.3	136

表3 摩擦圧接条件

Heating pressure (MPa)	49.9
Heating time (sec)	5.0~6.0
Upsetting pressure (MPa)	117.6
Upsetting time (sec)	2.0
Number of revolution (rpm)	2350

衝撃試験片は、圧接継手の接合面に切欠を加工したものと、素材に加工したもの (以後母材と呼ぶ) の2種類である。圧接試験片の場合は、素材の端面どうしを突合せ、表3に示す摩擦圧接条件により、全寄りしろを8 mmに規制して接合した後、この丸棒継手の中心部より採取し、図1に示す形状・寸法の JIS 4号衝撃試験片を作製した (以後接合面と呼ぶ)。ただし、切欠位置については、接合部分に電解研磨・エッチングを施して組織を観察し、図2に示したように、両母材に組織変化が認められる部分の中央に切欠を施した。

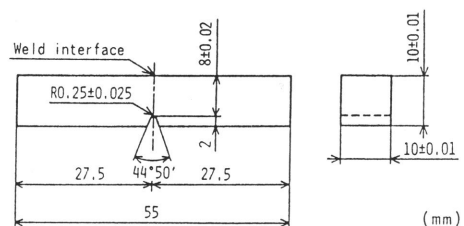


図1 衝撃試験片の形状・寸法

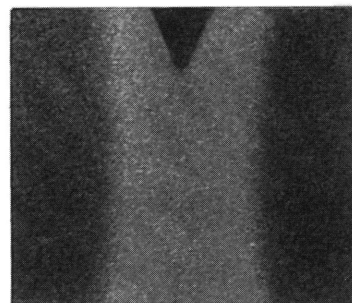


図2 接合面と切欠位置

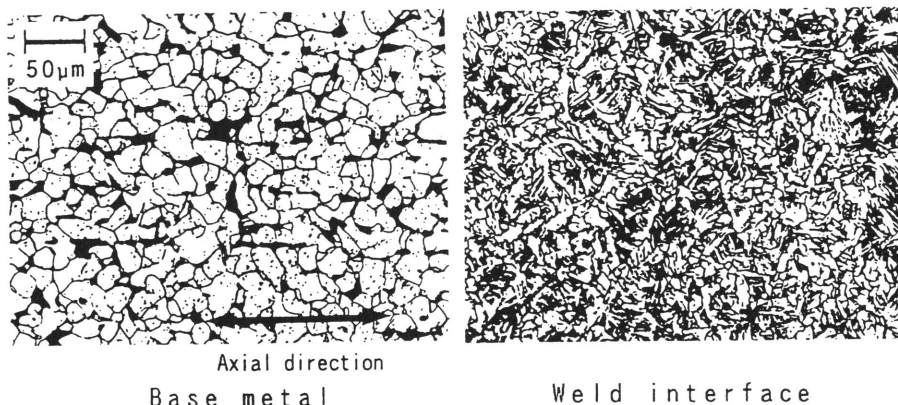


図3 母材および接合面の切欠底の組織

図3には、切欠底の顕微鏡組織を示した。接合面では1000℃以上の温度¹³⁾で塑性加工を受け、空冷されるため、母材の結晶粒の破壊と再結晶により、フェライト、パーライトは母材に比較して著しく微細化し、耐衝撃性の向上が示唆される。これは本実験で採用した加熱圧力、アプセット圧力が比較的高いので、摩擦熱によって過熱された部分が順次ばりとして排出されるためと考えられる。また、切欠底の軸方向の硬度分布を図4に示す。硬度は

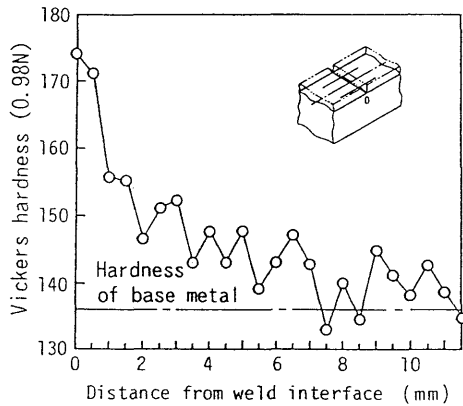


図4 圧接試験片の硬度分布

接合面が最も高く、母材に対して約30%の上昇になる。

衝撃試験には、コンピュータ援用計装化シャルピー式衝撃試験機(294 J)を用いた。試験温度は-100℃~0℃の低温域では、液体窒素蓄冷方式の低温槽を使用し、高温域の50℃~200℃に対してはシリコン油を加熱して調整した。試験温度の測定に際しては、CA熱電対を封入した温度測定用試験片を用い、所定の温度に20 min以上保持してから実験を行った。ただし、試験片を気・液槽中から取り出してから打撃までの時間は5 sec以内である。

3. 実験結果および考察

3.1 延性-ぜい性遷移温度

図5は、母材および接合面の衝撃値と試験温度との関係を示したものである。図から明らかなように、延性-ぜい性遷移曲線はいずれも低温側、高温側ではほぼ一定値を呈し、これらの中間の温度域では遷移現象を示すのは同じであるが、接合面の遷移曲線は低温側に移行している。遷移域におけるこれらの曲線の傾きは母材の炭素含有量が少ないため、S45C材¹⁴⁾に比べてかなり急激である。また、接合面の全吸収エネルギーは同じS15CK材を用いて、圧接条件を種々に変化した場合の従来値¹⁰⁾よりも格段に大きい。これは、圧接条件や試験片の断面

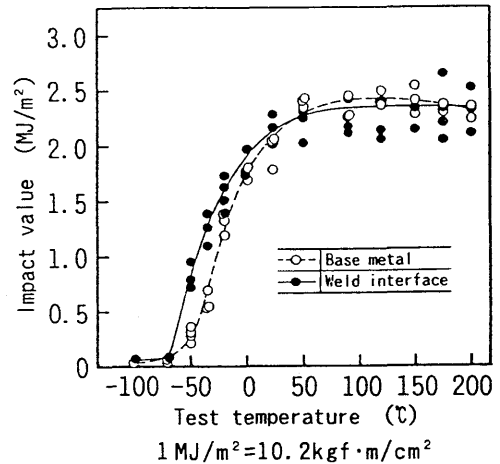


図5 延性-ぜい性遷移曲線

形状が本実験の場合とは異なるためと考えられる。

図において、母材、接合面の衝撃値を比較すれば、上部棚では両者の値に顕著な差異はないが、遷移域の下部では著しく相違し、-35℃では接合面のほうが母材のものよりも2倍以上高くなる。

そこで、これらの線図から、上部棚における最高衝撃値の1/2の値に相当する温度として、延性-ぜい性遷移温度を求めると、母材の場合が-21℃、接合面の場合には-39℃となる。このことは、接合面の遷移温度は母材の場合より低く、接合面では母材に比べてぜい性破壊が生じにくいことを示すものである。

3.2 衝撃破断挙動

図6には、計装化衝撃試験による荷重-変位線図の一

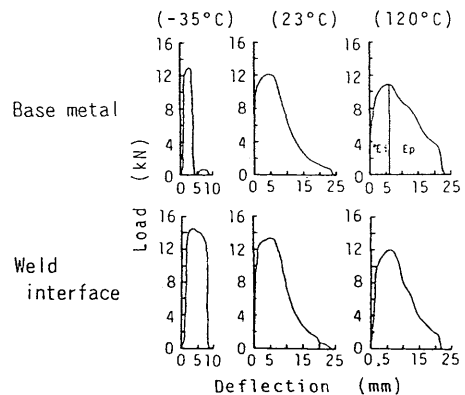


図6 荷重-変位遷図

例を示した。図から明らかなように、母材、接合面の線図は23℃では類似し、全吸収エネルギーもほぼ同等である。しかし、-35℃においては吸収エネルギーはいずれも減少し、その度合は母材において顕著である。一方、これとは対比的に120℃では吸収エネルギーが増加し、それは母材において最大になる。

そこで、120℃における母材の全吸収エネルギーを基準にとって、最大荷重に達するまでに吸収したエネルギー、 E_i (Crack initiation energy) と、最大荷重以後破断までに吸収したエネルギー、 E_p (Crack propagation energy) のそれぞれの度合を試験温度との関係で調べ、結果を図7に示した。図示のように、試験温度の低下に

のである。強度は計装化試験で得られた最大荷重を用いて、三点曲げのはりとして求めたが、切欠による応力集中は無視した。図から明らかなように、曲げ強度は試験温度の低下に伴っていずれも上昇し、母材の場合が-35℃、接合面の場合が-50℃で最大となるが、それ以後では急激に低下する。これは切欠底では、試験温度の低下につれて硬度が増し¹⁵⁾、塑性変形に対する拘束も強くなるので、ぜい性破壊が一層促進されるためと考えられる。事実、後述のように、これらの最大値を示す温度以下における衝撃破面は、すべて100%のぜい性破面率を呈している。したがって、曲げ強度には温度と硬度あるいは引張強度で定まる限界値が存在し、強度はぜい性破面率がほ

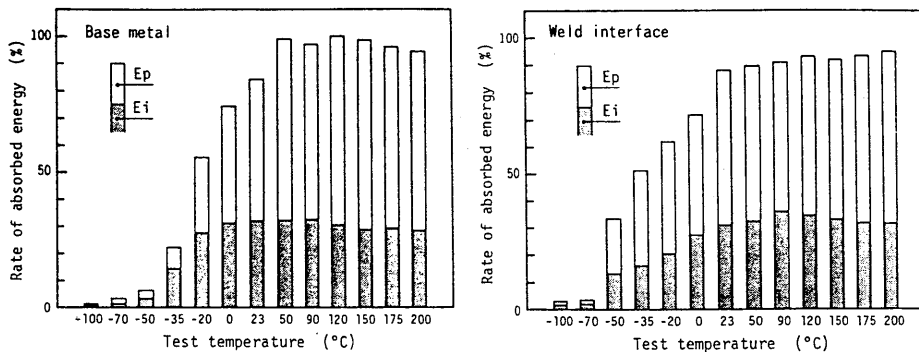


図7 E_i および E_p と試験温度との関係

つれて E_i 、 E_p の両方が減少するのは母材、接合面とも同様であるが、接合面の E_p の減少度合は遷移域の下部付近で格段に少ない。このことは、接合面では母材に比較してき裂の発生および進展が抑制されるが、とりわけ、き裂の進展抵抗が大きいことを示している。これについては、主に結晶粒の微細化が寄与しているものと推察される。

図8は、衝撃曲げ強度と試験温度との関係を示したも

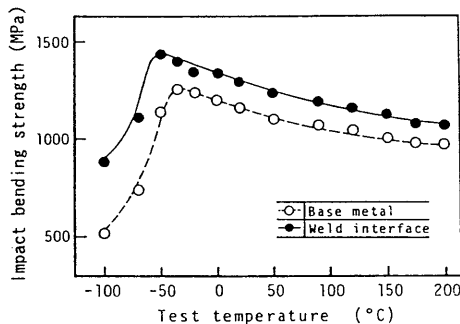


図8 衝撃曲げ強度と試験温度との関係

とんど100%に近い場合に最大となるようであるが、衝撃値とは対応しない。また、曲げ強度が試験温度にかかわらず接合面において高くなるのは、切欠底の硬度の差異によるものと考えられる。

3.3 衝撃破面

図9は、各試験温度における巨視的衝撃破面の一例を示したものである。試験温度の低下につれて母材、接合面ともぜい性破壊が支配的となるが、遷移域における破壊の様相は両者でかなり異なっている。すなわち、接合面のぜい性破面率は、母材の場合に比較していずれも小さく、シャーリップがより顕著で、かつ断面の変形も著しい。一方、両者の延性破面率が100%となる最低温度は23℃である。したがって、接合面ではじん性が増加し、遷移温度は室温より低いことが推察される。そこで、これらの破面から、ぜい性破面の面積が破面全面積の50%を呈する温度として、破面遷移温度を推定すると、母材の遷移温度は-20℃、接合面の場合には-35℃と-20℃の間となる。これらの温度は衝撃値から求めた遷移温度ともほぼ一致する。

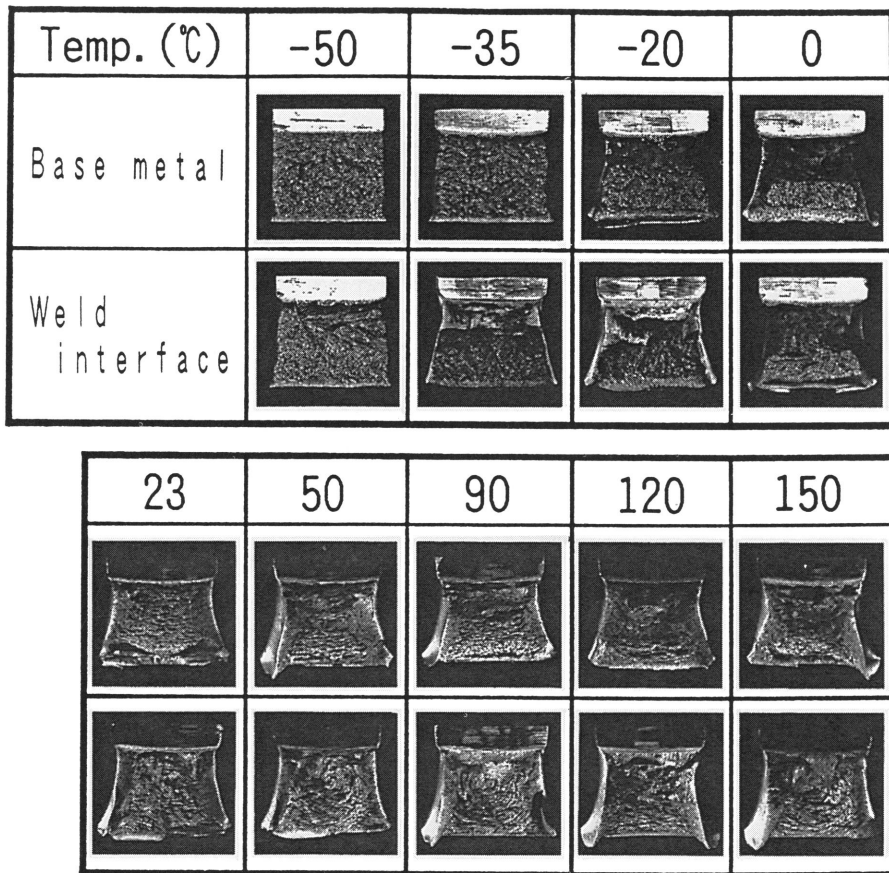


図9 母材および接合面の衝撃破面

4. 結 言

低炭素鋼同種摩擦圧接継手を対象に計装化衝撃試験を行い、接合面の遷移・破断挙動などについて調査するとともに、母材の衝撃挙動と比較し、検討した。結果を要約すると次のようになる。

- (1) 本実験で用いた圧接条件による接合面の延性－ぜい性遷移曲線は、母材の場合よりも低温側に移行し、遷移域における衝撃値は母材の値を上回る。
- (2) 延性－ぜい性遷移温度は母材の場合が -21°C 、接合面の場合が -39°C となり、破面から推定される遷移温度とほぼ一致する。
- (3) 遷移域の下部における接合面のき裂進展エネルギーは、母材のものに比較して著しく大きい。
- (4) 衝撃曲げ強度は、試験温度にかかわらず接合面、母材の順に高くなるが、それらはぜい性破面率が100%となる最高温度付近で最大値を示す。

参 考 文 献

- 1) 蓮井 淳・福島貞夫, 金属材料技術研究所報告, 7-3 (1964), 194.
- 2) 塩谷敏祐・山田鏡一・葛谷 豊, 溶接学会誌, 34-11 (1965), 1197.
- 3) 田崎義男・安藤国輔・平井幸男・塩谷敏祐・小堀 滋, 名古屋工業技術試験所報告, 15-4 (1966), 111.
- 4) 中村虔一・中原征治・青柳祥昭・矢野光男, 機械試験所報告, 24-4 (1970), 185.
- 5) 時末 光・加藤数良・日本大学生産工学部報告, 5-2(1972), 1.
- 6) 大西欣一・石塚鎮夫・加賀谷忠治・江上 登, 材料, 27-299 (1978), 793.
- 7) 加賀谷忠治・加藤政則, 材料, 28-313 (1979), 941.
- 8) 小川恒一・中山英明・大橋義夫・蓮井 淳, 材料, 37-421 (1985), 1209.
- 9) 加賀谷忠治・加藤政則, 中部大学工学部紀要, 26 (1990), 23.

- 10) 馬込正勝・前島 順・小川恒一, 自動車技術会論文集, 6-8 (1975), 66.
- 11) 塩谷敏祐・山田銑一・樽谷 豊, 溶接学会誌, 35-1 (1966), 65.
- 12) Eberhard, B. J., Schaft, B. W. and Wilson, A. D., *Welding Journal*, 62-7 (1983), 171-s.
- 13) 蓮井 淳・福島貞夫, 材料科学, 6-2 (1969), 100.
- 14) 加賀谷忠治・加藤政則・川口幸宏, 日本機械学会論文集, 57-542, A (平 3), 2495.
- 15) 田沼, 低温, 実験物理学講座15, (1981), 270, 共立出版.