鋼板の軟ろう接せん断強度に関する研究*

末 澤 芳 文**

Study on Pb-Sn Soldered Joint Strength of Steel Plates

by

Yoshifumi SUEZAWA

(College of Science and Technology, Nihon University, Tokyo)

This paper presents some experimental data concerning the relation between the shearing strength and roughness of base metal (mild steel) surface soldered with Pb-Sn eutectic alloy. The specimens used in this experiment were made according to the configuration of JIS Z3192, and had the same shape as designed by F. M. Miller and R. L. Peaslee.

To make various degrees of roughness on the base metal, the specimens were finished by means of abrasive paper (60, 120, 240, 400 and 600 mesh) polishing, milling cutting or WA 60 and WA 80 wheel grinding. The soldering operation of these specimens was conducted using a 0.3 kW resistance solder bath, and the joint clearance of each specimen was adjusted at the cementing fixture. To obtain the tensile-shearing strength of these specimens, a 50 tons tensile testing machine was used in this experiment. The results were as follows:

(1) As regards to the relation between the shearing strength of soldered joint and the roughness of soldering surface of base metal, it was clear that the shearing strength of a soldered specimen having a small roughness value was greater than that of the one having a large roughness value.

(2) The maximum shearing strength for the soldered specimens was obtained at the joint clearance of about 0.2~0.3 mm.

(3) It was clear that the shearing strength of a specimen having a long brazed joint length was lower than that of the one having a short soldered joint length.

(4) Most of the specimens fractured at the weak part near by the interface of the soldered joint which had a different composition than the original Pb-Sn eutectic composition, but no specimen ruptured in the base metal.

(Received July 6, 1976)

1 緒 言

金属のろう接技術は古くから活用され、エジプト時代にすでに武器、農具などの接合に使用された事実があり、人類が最も早くから開発した金属接合法の一つである。現在では電子機器はじめ各種精密機器部品から宇宙開発機器にいたるまで各方面で低温度で簡易に金属の接合ができるものとして活用分野を拡大しつつある。

しかしその接合機構の解明については古くは R. H. Leach, L. Edelson¹⁾ および N. Bredz²⁾ などの研究をはじめ、G. L. J. Bailey³⁾、川崎^{4,5)} および美馬⁶⁾ ら内外で数多くの研究がなされているにもかかわらずまだ解明されないまま残されている問題がある。とくにろう接強度に最も影響を与えるであろうと思われる母材ろう接面の形状、接合寸法および表面あらさについては殆

んど研究が見当たらない。これまでの研究で扱われてきたろう接面の問題とは主としてろう接面の極端な凹凸の平坦化あるいは平滑化および酸化物その他ろう接に障害となる異物の除去などを目的としたもので、表面あらさを数量的に規定してろう接強度との関係を明らかにすることを目的としたものではない。このような見地から本研究ではろう接強度に与えるろう接面状態の影響を研究対象に選び、Pb-Sn 共晶ハンダで重ね接合された薄鋼板接手のせん断強度と接合部の形状、寸法、とくに表面あらさとの関係を明らかにし、Pb-Sn 系ろう材による接手のせん断強度に対する母材ろう接面の最適条件を求めることを目的としたものである。

2 実 験

2・1 供試材料

2・1・1 母材

(1) 材質: SS41

(2) 成分: C 0.15, Si 0.02%, Cu 0.04%, Mn 0.45%

* 原稿受理 昭和51年7月6日

** 正 会 員 日本大学理工学部 東京都千代田区神田駿河台

Fig. 1. Schema of shearing specimen.

(3) 寸法および形状：Fig. 1 のごとくである。

この試験片は F. M. Miller と R. L. Peaslee が考案したもので JIS Z-3192 で 1 号試験片として規定されている。この試験片を採用した理由は単に鋼板を 2 枚重ねた single lap joint では引張せん断荷重をかけた場合、接合部に曲げモーメントがかかり純粋のせん断荷重が作用しない欠点があるが、この Miller-Peaslee 型試験片は Fig. 1 からわかるごとく試料の中心線上に接合部があり引張せん断荷重をかけた際に上記の欠陥は排除できる。しかも試験片形状が比較的簡単で再現性にも優れており誤差の少ない測定結果が得られるからである。

(4) 母材ろう接面に与えた表面あらさ

母材ろう接面の表面あらさは研摩紙仕上と機械仕上の 2 とおりの方法で設定した。研摩紙仕上の場合には 60, 120, 240, 400, 600 mesh の 5 とおりの研摩紙でろう接面を板厚方向に研摩したものであり、機械仕上の場合には研摩紙仕上の場合と同一方向にフライス仕上、WA 60 砥石および WA 80 砥石による平面研削したもの 3 とおり、合計 8 とおりの加工法であらさを設定した。これらの方法で設定した表面あらさの値は Table I および Table II のごとくであり、それぞれのあらさ曲線は Fig. 2 (研摩紙仕上) および Fig. 3 (機械仕上) のごとくである。これらはいずれも触針式あらさ計で縦方向 2000 倍、横方向 20 倍で測定したものである。また Fig. 4 は 120 mesh 研摩紙仕上した試料の断面写真である。(倍率 40 倍)

(5) 表面処理

母材ろう接面をそれぞれの加工法で加工しあらさを設定した後、トリクレン→アセトン洗滌で脱脂清浄化

Fig. 2. Various roughness of base metal (polished by emery papers).

Table I. Various roughness of base metal polished by emery papers.

Emery No (mesh)	60	120	240	400	600
$R_{\max} (\mu)$	15	11	5	1	0.6
Roughness (JIS)	18-S	15-S	6-S	1.5-S	0.8-S

Table II. Various roughness of base metal machined by mechanical processes.

Machining process	Milling	No 60 mesh grinding	No 80 mesh grinding
$R_{\max} (\mu)$	14	1.6	0.8
Roughness	18-S	3-S	1.5-S

しろう接部への異物の混入を防止した。

2・1・2 ろう材

- (1) 材質：Pb-Sn 共晶ハンダ
- (2) 成分：Pb 38.1%，Sn 61.9%
- (3) 試料 1 個当りの使用量：1 gr
- (4) 表面処理：トリクレン→アセトン洗滌

Fig. 5 は Pb-Sn 共晶ハンダの光顕写真である。(× 100)

2・1・3 フラックス

- (1) 成分： $\text{ZnCl}_2\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 重量比 3 : 1 : 1
融点：185℃
- (2) 試料 1 個当りの使用量：0.1 gr

Fig. 3. Various roughness of base metal (machined by mechanical process).

Fig. 4. Surface condition of base metal polished by 120 mesh emery paper.

Fig. 5. Microstructure of Pb-Sn eutectic alloy.

2・2 ろう接方法

容量 0.3 kW の自動温度調節装置付抵抗加熱ハンダ浴槽 (直径 150 mm × 高さ 120 mm) 中で共晶ハンダを溶解した上、温度を 250℃ に保持しておき、その中に 200℃ に予熱し、かつ前記フラックスを塗布した試料の接合部を浸せきし 5 分間経過後引出し、すみやかに Fig. 6 のごとき治具上で接合しハンダ接合を完了した。各試料のろう接間げきは 0.08~0.5 mm までとし、その設定は各試料ともろう接前のあらさ加工の際にあらかじめ母材を間げき量だけ削除しておきろう接時に治具上で調節して行った。また各試料のろう接長さは 2~20 mm までとし前記治具上でハンダの凝固前に速やかに調節してそれぞれ所定のろう接長さの試料を作成した。Fig. 7 は完成した試験片である。

Fig. 6. View of soldering fixture.

2・3 せん断試験および結果

ろう接を終了した各試料は接合部周辺の余剰のろう材その他の異物を除去した後、ろう接間げきおよびろう接長を測定し、つぎに容量 50 ton の材料試験機で引張りによるせん断試験を行いそれぞれの破断強度を次式から求めた。

$$\tau = \frac{W}{b \cdot L} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

τ : ろう接部のせん断強度 (kg/mm²)

W : 破断荷重 (kg)

Fig. 8. Shearing stress plotted as a function of overlap distance (polished by 60 mesh emery paper).

Fig. 7. View of shearing specimen.

b : ろう接部の母材板厚 (mm)

L : ろう接長さ (mm)

これらの結果は Fig. 8~17 のごとくである。Fig. 8~

Fig. 9. Shearing stress plotted as a function of overlap distance (polished by 240 mesh emery paper).

Fig. 10. Shearing stress plotted as a function of overlap distance (polished by 600 mesh emery paper).

Fig. 11. Shearing stress plotted as a function of overlap distance (machined by milling cutter).

Fig. 12. Shearing stress plotted as a function of overlap distance (ground by WA60 grinding wheel).

10は研摩紙仕上の場合の各接合間げきにおけるハンド
接合長さとせん断強度との関係を示したものであり、
Fig. 11~13 は機械仕上の場合を示したものである。
Fig. 14 および 15 は研摩紙仕上の場合の各間げきにお
ける表面あらさとせん断強度との関係を示したもので
Fig. 16 および 17 は機械仕上の場合を示したもので

Fig. 13. Shearing stress plotted as a function of overlap distance (ground by WA80 grinding wheel).

Fig. 14. Relation between the shearing stress and the roughness of base metal ($L=2$ mm polished by emery papers).

Fig. 15. Relation between the shearing stress and the roughness of base metal ($L=16$ mm polished by emery papers).

Fig. 16. Relation between the shearing stress and the roughness of base metal ($L=2$ mm machined by mechanical processes).

Fig. 17. Relation between the shearing stress and the roughness of base metal ($L=16$ mm machined by mechanical processes).

ある。これらの結果から大要次のことが明らかになった。

(1) Pb-Sn 共晶ハンダによる鋼板接手のせん断強度に対する表面あらさの影響については各仕上方法ともに表面あらさの細かい方が強く、あらがが粗くなるに従ってせん断強度が低下する傾向が認められた。例えばろう接長さ 2 mm, ろう接間げき 0.2 mm の場合 60 mesh 研摩紙仕上ではせん断強度が約 5.9 kg/mm^2 であるが, 600 mesh では約 10.1 kg/mm^2 の値を示した。

(2) ろう接間げきとせん断強度との関係は研摩紙仕上, 機械仕上ともに間げきが 0.2~0.3 mm の場合に強度が最大になり, 間げきが大きくなるに従ってゆるやかに低下し, 間げきが約 0.12 mm 以下になると急激に低下する傾向が認められた。

(3) 各試料のせん断強度はろう接長さによって変化し, 他のろう接条件が同一でもろう接長さが長い方が各仕上方法ともに短い方より強度が低下することが認められた。また機械仕上の方がわずかながら研摩紙仕上より強度が大であった。

(4) 各試料の破断はハンダ接合界面近傍に生成する本来の共晶組成から外れた弱い部分において起っており, 母材で破断することは全くなかった。

3 考 察

以上の結果を考察するに Pb-Sn 共晶ハンダによる鋼板のろう接接手のせん断強度は, まず母材ろう接面の表面あらさによって異なることが認められた。すなわち研摩紙仕上, 機械仕上ともに母材ろう接面あらさの細かい方が粗い方より強い傾向があった。これについては次のごとく考えることができる。すなわちハンダ成分中の Sn は Pb より Fe に対して親和性が強く, 合金化し易い傾向があり, したがってろう接時に母材との接合界面において母材の Fe 成分と反応して Sn 成分が母材側に偏り, そこで FeSn または FeSn_2 なる合金層を作り⁸⁾, 全体として界面近傍では厚さ約 10μ ~ 20μ の Sn 濃度の高いハンダ層ができることが考えられる。したがってその成分では本来の共晶ハンダの

組成からはずれたハンダ組成になっていると考えられ, 接手の機械的強度低下の一因をなしているものと思われる。⁹⁾ Fig. 18, 19 および 20 は研摩紙仕上の場合の

Fig. 18. Electron probe microanalysis of SS41 Pb-Sn soldered joint (polished by 60 mesh emery paper).

Fig. 19. Electron probe microanalysis of SS41 Pb-Sn soldered joint (polished by 240 mesh emery paper).

Fig. 20. Electron probe microanalysis of SS41 Pb-Sn soldered joint (polished by 600 mesh emery paper).

Pb-Sn 共晶ハンダによる鋼板のろう接界面における EPMA による線分析の結果である。Fig. 18 は 60 mesh の場合、Fig. 19 は 240 mesh の場合、Fig. 20 は 600 mesh 研磨紙仕上の場合で図中の濃黒色の線は Sn 成分、淡黒色は Pb 成分の分析線である。これから明らかなごとく、いずれも母材との界面側に大きく Sn の析出が認められ明らかにこの部分での Pb-Sn の成分比は本来の共晶成分比から外れていることがわかる。しかもろう接面あらさが細くなるに従って界面における Sn の析出量が少なくなっていることが認められる。これは母材の表面あらさの粗い場合はその実表面積が大きく、したがって Fe と Sn の反応面積が大きくなり、Sn の析出量が大きくなるものと思われる。したがって界面におけるハンダの組成は表面あらさの細かい場合より共晶組成から外れる割合が大きくなり接合強度が低下するものと思われる。一般に Pb-Sn 系ハンダの強度は引張強さ、せん断強度ともに共晶組成において最大になり、共晶組成から外れるに従っていずれの強度も低下するので前述の結果のごとく表面あらさの粗い場合は細かい場合よりせん断強度が低下するものと思われる。

またろう接間げきが 0.2~0.3 mm で各あらさともせん断強度が最大になることについては次のごとく考えることができる。Fig. 21 は間げきが 0.1, 0.3 および 0.5 mm におけるろう接破断面の Sn, Pb 両成分の X 線分析の結果で、これから明らかなごとく、0.1 mm の場合は他の二つの場合に比べて破断面における Pb, Sn の成分比が本来の共晶組成比から大きく外れていることが認められる。したがって他の二つの場合に比べてせん断強度が低下するものと思われる。しかし間げきが大きくなるに従ってハンダ層が大きくなり、界面における成分比の変化現象が緩和され、次第に本来の共晶成分比の部分が多くなり強度が次第に増加し、0.2~0.3 mm で遂に最大になるものと考えられる。しかし間げきがさらに増加するとせん断強度は再び低

Fig. 21. Electron probe microanalysis at the ruptured surface of SS41 Pb-Sn soldered joint.

下する傾向がみられた。これについての説明はなかなかむづかしく他のろう接研究にも同様の報告がみられるが、いずれも明解な説明はなされていない。ただ力学的見地から接着構造物について中尾¹⁰⁾, 畑¹¹⁾の研究があり、また接着ハンドブックにその解説があり、それぞれ Newton モデル、Voigt モデル、および Maxwell モデルなどによって接着部のせん断強度は厚みの増加と共に低下することを証明している。接合材が金属と非金属とで異り、これらの説明をそのまま本実験に適用することは若干問題があるかとも思われるが、構造的にやや共通点もあり、おおむね前述の現象を理解することができるものと思われる。

またこの実験でろう接長さによってせん断強度が異なることが認められたが、これについては N. Bredzs¹³⁾らが示しているごとく、ろう接継手に引張りによるせん断荷重を与えたときせん断応力は継手の両端部周辺に集中し中央部では両端部に比べて応力が小さくなる傾向があり、したがってろう接長さが大きくなると単位面積当りのせん断強度が低下するものと思われる。

また研磨紙仕上と機械仕上では僅かに機械仕上の方がせん断強度が大であったが、これについては表面あらさの R_{max} の値が同一でも表面の形状係数が異れば表面状態は異なるものと考えられ、一般に形状係数の小さい場合は凹凸状態が鋭く激しい変化をしており、ハンダ層が両母材間で激しく噛み合った状態になっているものと思われ研磨紙仕上に比べてわずかではあるが強度の増加をきたしたものと思われる。Fig. 22 はフリス仕上面の顕微鏡写真である。Fig. 23 は 600 mesh 研磨紙仕上の場合の破断試料の外観、Fig. 24 はその破断面、また Fig. 25 は同破断面上のハンダ層部の走査電顕写真である。(×3 000)

Fig. 22. Surface condition of machined by milling cutter.

Fig. 23. View of ruptured shearing specimen.

Fig. 24. View of ruptured surface of shearing specimen.

Fig. 25. Scanning electron microfractograph of the solder layer on the ruptured surface.

4 結 論

以上のごとく軟鋼板を Pb-Sn 共晶ハンダでろう接した場合のせん断強度について大要次のごとき結論が得られた。

(1) ろう接部のせん断強度とろう接面あらさとの関係については表面あらさの細かい方が強く、600 mesh 研摩仕上の場合、 $t=0.2\text{ mm}$ で約 10.1 kg/mm^2 ($L=2\text{ mm}$) の値を示し、表面あらさの粗くなるに従って強度が低下する傾向が認められた。

(2) ろう接間げきとせん断強度との関係は $t=0.2\sim 0.3\text{ mm}$ で最大強度を示し、間げきが増加するに従って次第に低下した。また間げきが約 0.12 mm 以下では各あらさともに急激に低下する傾向が認められた。

(3) ろう接面の仕上方法については研摩紙仕上、機械仕上ともろう接部のせん断強度に対しては細い方が強いことが認められたが、両者にあまり顕著な差はなく、ごく僅か機械仕上の方が優れている程度であった。

(4) ろう接部のせん断強度には試料の寸法効果があり、ろう接長さが短い方がせん断強度が大になり、長くなれば次第に単位面積当たりのせん断強度が低下する傾向が認められた。

(5) 各試料の破断はハンダ接合界面近傍に生成する本来の共晶組成から外れた弱い部分において起ることが多く、母材で破断することは全くなかった。

(昭和51年5月21日 日本材料学会第25期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Leach, R. H., and L. Edelson, Journal of Soc. Naval Engrs., **51**, 66 (1939).
- 2) Bredzs, N., Welding J., 545S~563S (1954).
- 3) Bailey, G. L. J., J. of the Institute of Metal, **80**, 57 (1951).
- 4) 川崎頼雄, 溶接学会誌, **29**, No. 2 (1960).
- 5) 川崎頼雄, 溶接学会誌, **29**, No. 4 (1960).
- 6) 美馬源次郎, 倉貫好雄, 日本金属学会誌, **22**, p. 92 (1964).
- 7) Miller, F. M., Welding J., 481S (1968).
- 8) 川勝一郎, 大沢 直, 溶接学会誌, **40**, 90 (1971).
- 9) ろう接便覧編集委員会編, ろう接便覧, 112, 56~57 (1967).
- 10) 中尾一宗, 日本接着協会誌, **6**, 419 (1970).
- 11) 畑 敏雄, 中尾一宗, 日本接着協会誌, **6**, 430 (1970).
- 12) 日刊工業新聞社編, “接着ハンドブック”, p. 58, 138 (1971).
- 13) Bredzs, N., and F. M. Miller, Welding J., 144S (1958).
- 14) 川勝一郎, 末澤芳文, 溶接学会誌, **40**, 65 (1971).