(昭和 40 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

耐食アルミニウム合金加工硬化材の軟化部 をもつ溶接継手の強度に関する研究

正員 秋 田 好 雄*

正員 簗 田 和 之*

On the Strength of Welded Joints with Softened Zone of the Work-Hardened
Corrosion-Resisting Aluminium Alloy

By Yoshio Akita, *Member*

Kazuyuki Minoda, *Member*

Summary

Recently, aluminium alloy has increasing been adopted to the welded structure, the more widely use of the higher-strength work-hardened Al-Mg alloy (such as 5083-1/4 H or 1/2 H) would contribute to the weight-reduction of the structures.

One of the most important problems in the adoption of these alloy to the welded structures is the reduction of joint efficiency due to the softening of heat affected zone.

The width of softened zone of the welded work-hardened alloy varies with welding conditions ; it is reduced by using small welding heat.

From another point of view, the knowledge of the characteristics of these softened zone, would make it possible to cover the decrease of strength due to softened zone by using suitable joint design.

In this report the author made clear the followings ;

- ① The fundamental nature of welded joints with softened zone by inquiring after the factors most connected with softened of welds and the relation between the width of softened zone and welding heat or tensile strength of welded joint of the work-hardened aluminium alloy, as well as
- ② The possibility of increasing the strength of structural member including weld softened zone by adopting the appropriate joint design, from the results of tensile tests on longitudinal transverse and combined of shifted cross joints, and the stress analyses there of.

1. 緒 言

最近アルミニウム合金の構造物への応用例が多くなるにしたがい加工硬化により強度を高めた Al-Mg 合金の利用が盛んになると考えられる。しかしながら加工硬化材を溶接構造物に用いるにあたっては、溶接熱影響部の軟化を生じ継手効率を低下させることが問題となつている。

加工硬化材の溶接による軟化部の幅は溶接条件によつて変化し、小入熱の溶接を行なつて軟化部の幅を小さくすることも可能であると思われる。またたとえ軟化部が存在しても、その性質が明らかであれば適当な継手の設計によつてこの欠点を補うことも可能となろう。そこで本研究では、①加工硬化材の溶接部の軟化に係する要素や、軟化幅と入熱および継手強度の関係を調べ、軟化部をもつ溶接継手の基本的性質を明らかにし、さらに②横継手、縦継手および縦横の継手を適当に移動した混用継手の引張試験を行ない、それぞれの継手形式について応力と歪の状態を考察し、適当な継手の設計によつて、軟化部をもつ溶接部材の強度を高めることができることを確めた。

原稿受付 昭和 40 年 7 月 10 日

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所

2. 第1部 溶接継手軟化部の基本的性質

2.1 実験の方法および内容

(1) テーパ硬さ試験

この試験では溶接時の加熱冷却速度が軟化に及ぼす影響を調べた。供試材は耐食アルミニウム合金 A2P7-1/4 H (Hv≒110) 板厚 25mm で、その化学成分と機械的性質は表1のとおりである。試験片は図1のごとく厚さ

表1 供試材の化学成分と機械的性質 (ミルシートによる)

供試材種類	板厚mm	化 学 成 分										機 械 的 性 質		
		Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al		$\delta_{0.2}^{1/2mm}$	$\delta_B^{1/2mm}$	Elmg%
A2P7-0材	6.0	0.03	0.11	0.20	0.57	4.5	0.21	0.01	Tr	Re		16.1	30.2	30.5
A2P7-1/4H	3.5	0.07	0.11	0.20	0.54	4.3	0.22	0.02	0.01	Re		27.9	36.9	16.5
	6.0	0.06	0.10	0.21	0.55	4.4	0.21	0.02	Tr	Re		26.5	36.6	17.5
	12.0	0.05	0.08	0.19	0.52	4.5	0.20	0.02	Tr	Re		22.9	32.7	22.0
	25.0	0.07	0.11	0.20	0.54	4.3	0.22	0.02	0.01	Re		30.6	37.1	12.0
NP3/6-1/2H	6.0	0.02	0.13	0.21	0.60	4.24	0.24	0.02		Re		36.3		22.0
規格値	0材	0.10 max	0.40 max	0.40 max	0.30 ~1.0	3.8 ~4.8	0.50 max	0.10 max	0.20 max	Re		13	27	18
	1/4H	*	*	*	*	*	*	*	*	*		23	31	12

注) 1/4H材のJIS規格は板厚6mm以下、3/4Hについては規格がない。

3~25mm のテーパ加工し、TIG 溶接 (入熱大)、MIG 溶接 (入熱小) によりビードを置いた。テーパ試験片では溶接条件を一定にしたビードを置くことと板厚の差によつて種々の加熱冷却速度を得ることができる。溶接に際しては図1に示す a, b, c の各断面 (t8.5, 15.5, 23mm) において板表面下 1mm の位置にアルメルクロメル熱電対を取付けビード直角方向に分布する熱サイクルを記録し、溶接後同じ位置の硬さ分布を測定した。

(2) 突合せ溶接試験

この試験では A2P7-0, 1/4H, 1/2H 材を用いて突合せ溶接を行ない、材料の加工度 (硬さ) および溶接入熱が軟化に及ぼす影響を、さらに軟化が継手強度に及ぼす影響を調べた。また軟化部の微小引張試験を行なつて、微小部分の硬さと耐力、引張強さの関係を調べた。

供試材の化学成分と機械的性質を表1に、製作した試験板の種類と番号および溶接条件を表2に示す。突合せ

図1 テーパ試験片、試験片寸法および測定位置

図2 突合せ継手試験板寸法および各試験片採取位置

表 2 突合せ溶接試験板の種類と番号および溶接条件一覧表

試験片 No.	母材	板厚 mm	電流 I amp	電圧 V volt	溶接速度 v mm/min	ガス流量 l/min	入熱 Q joule/cm	溶加材	溶接法
1	5083-1/4H	3.5	190	22	840	25	3,000	5556-16*	MIG
2	"	6	270	26	800	25	5,300	"	"
3	"	12	350	31	500	40	13,000	"	"
4	"	25	400	32	400	60	19,200	" - 24*	"
5	5083-0	6	270	25	800	27	5,100	" - 16*	"
6	5083-1/2H	6	265	26	700	25	5,900	"	"
7	"	6	240	25	150	25	24,000	"	TIG
8	5083-1/4H	6	140	22	1,240	28	1,500	5183-12*	MIG ()
9	"	6	135	20	1,240	28	1,300	"	"
10	"	12	230	25	520	28		"	"
11	"	12	235	25	830	28		"	"
12	"	6	240	25	150	25		5556-16	TIG

(注) No. 8, 9, 10, 11 は V 開先 MIG 多層盛, 他はすべて I 開先表裏 1 層 MIG または TIG.

溶接試験板の形状寸法, 各試験片の採取位置などは図 2 に示すとおりである。溶接に際し試験板中央断面において板厚中心部で溶接線の直角方向に分布する熱サイクルを記録し, 溶接後同じ位置の硬さ分布を測定した。継手引張試験片は図 3 のごとく製作した (溶接部はすべて余盛のままとした) また溶着金属, ボンド, 軟化部, 母材

図 3 継手引張試験片

図 4 微小引張試験片

の各部から図 4 に示す微小引張試験片を採取し, X-Y レコーダー (G. L. 25 mm) を用いて荷重—伸びを記録した。

2.2 実験結果ならびにその考察

(1) 加熱冷却速度が軟化に及ぼす影響

テーパ試験片を板厚の小さい方から大きい方へ溶接条件の変らないビードを置くと, 溶接による加熱冷却速度は順次速くなる。この試験片から種々の板厚のところで熱サイクルと硬さ分布を測定すれば, 冷却速度が軟化に与える影響を知ることができる。

テーパ試験片の溶接熱サイクルの一例を図 5 に示す。軟化部の 350°C における冷却速度を各板厚, ビード

図 5 テーパ試験片の熱サイクル ($t=15.5$ mm において)

図6 350°Cにおける冷却速度と板厚の関係

図7 350°Cにおける冷却速度と硬さの関係

(TIG および MIG) ごとにとつてみると図6のようになる。

いずれの場合も板厚の増大につれて冷却速度は早くなるが同一板厚でも MIG 溶接は TIG 溶接の約4倍の冷却速度であつた。一方軟化部の 350°C における冷却速度を横軸にとり、それぞれ最高到達温度が 300°C, 350°C, および 400°C における硬さを縦軸にとると図7のようになる。この図でみると一定の最高到達温度でも冷却速度が極めて遅い場合、わずかながら軟化が進む傾向が認められる。しかしながらその差は僅少で、普通に用いられる溶接条件の範囲内では、冷却速度は軟化の度合に有意な影響を及ぼさないことがわかる。

(2) 入熱と軟化幅

テーパ試験の結果から冷却速度はほとんど軟化に影響しないことがわかつた。したがつて軟化と最も密接な関係を有するのはその点の最高到達温度であると考えられる。図8は材料の加工度、板厚、溶接入熱を異にする突

図8 最高到達温度と硬さの関係

合せ溶接試験板の熱サイクルと硬さ分布から整理した、最高到達温度と硬さの関係を示したものである。ここで Hv が 90~100 程度の 1/4H 材では、最高到達温度が 300°C 付近から軟化し始め、450°C 付近で完全軟化点に達している。一方 Hv が 110 程度の 1/4H 材および 1/2H 材では約 150°C で軟化が始まり、おおよそ 450°C で完全軟化点に達している。すなわち加工硬化材の溶接入熱による軟化はその点の最高到達温度と、材料の加工度によつて決まり、加工度の高い材料ほど低い温度で軟化し始めるので同一入熱でも軟化幅は広がる。一般にアルミニウムの加工度は内部歪の回復 (recovery) と再結晶温度に大きな影響を与えるが、溶接入熱による軟化

の開始から完全軟化までの経過は材料の加工度の相異 (1/4H, 1/2H) に基づく内部歪の回復と再結晶に密接な関係があることが知られる。

溶接入熱と軟化幅について、尾崎氏は移動熱源の熱伝導理論から、その計算式を誘導した(文献1)。すなわち

$$h = E \cdot (VI)^2 / t^2 v \quad (1)$$

ここで h = 軟化域の幅 (cm)

V = 溶接電圧 (volt)

I = " 電流 (Amp.)

v = " 速度 (cm/sec)

t = 板厚 (cm)

$E = (D/\theta)^2$, θ = 最高到達温度 (軟化曲線から決まる)

D = (材料の定数) $\times$ (アーク効率)

いま 1/4H 材 (硬さ Hv 90~100 の材料) と 1/2H 材 (Hv 110 の材料) で (1) 式により軟化幅を計算する。この場合、軟化部の幅はボンドから測つて、軟化を始めた点と完全軟化に達する点の平均までをとり、これを軟化幅 (h) と定義する (図9)。

$$h = E \cdot (VI)^2 / t^2 v, \quad h = (h_1 + h_2) / 2,$$

$$h_1 = E_1 \cdot (VI)^2 / t^2 v, \quad h_2 = E_2 \cdot (VI)^2 / t^2 v$$

1) 1/4H 材の場合

$$E = (E_1 + E_2) / 2 = \{ (D/\theta_1)^2 + (D/\theta_2)^2 \} / 2$$

$$= 0.98 \times 10^{-8}$$

ここで、定数 $D = 3.5 \times 10^{-2}$

軟化開始温度 $\theta_1 = 300^\circ\text{C}$

完全軟化温度 $\theta_2 = 450^\circ\text{C}$

2) 1/2H 材の場合

$$\theta_1 = 150^\circ\text{C}, \theta_2 = 450^\circ\text{C}, E = 3.02 \times 10^{-8} \text{ を得}$$

る。

1/4H 材と 1/2H 材のそれぞれ軟化曲線から実測した軟化部の幅 h を溶接条件 $(VI)^2 / t^2 v$ をパラメータとしてプロットすると図10を得る。この図で前述の定数 E の値を適当に定めれば実験値と計算値とはかなりよく一

図9 軟化幅 h の定義

図10 入熱と軟化幅の関係

致することがわかる。なお本実験では、同一板厚同一入熱の場合 1/2H 材の軟化幅は 1/4H 材の約3倍となっている。

(3) 軟化部の硬度と強度

溶接継手各部の硬度とその部分の微小引張試験から得られた耐力と引張強さの分布は図11のとおりである。この図から軟化微小部分の硬さと耐力、引張強さの関係を示すと図12のようになり、それらの間には 1/4H 材および 1/2H 材ともほぼ正確な比例関係が認められる。すなわち

(a) 1/4H 材では、 $\sigma_{0.2} = 0.6(\text{Hv} - 55)$, $\sigma_B = 0.5(\text{Hv} - 21)$

図 11 溶接継手各部の硬さおよび微小引張試験による耐力と引張強さ

図 12 微小引張試験における硬さと耐力引張強さの関係

(b) 1/2H 材では, $\sigma_{0.2} = 0.43(\text{Hv} - 45)$, $\sigma_B = 0.18(\text{Hv} + 93)$

となつてゐる。なお 0 材では入熱による軟化はほとんどないので熱影響部の強度は母材とほとんど変わらない。

1/4H と 1/2H とで硬度和強度の関係が多少相違するのは (2) 項に述べたと同じ理由で、元材料の加工度と製造履歴の差にもとづくものと思われる。いずれにしても溶接熱を受けた部分の硬さ分布は、継手の機械的性質に密接な関係をもつことが知られる。

(4) 軟化部をもつ継手の引張強さ

溶接軟化部は一般にその継手強度低下の原因となる。Bakshi 等は軟化域をもつ溶接継手の静的引張強さについて理論を導き、丸棒での実験結果とよく合うことを報告している (文献 2)。Bakshi 等の理論をアルミニウム加工硬化材の溶接軟化部をもつ継手に応用し、平板の場合についても理論と実験とは比較的よく合うことを確めた (平板の場合について理論を誘導すると付 1 のようになる)。

幅 h の軟化部を持つ板厚 t の継手引張強さは次式であらわされる。

$$\sigma_B = \frac{2\sigma_y^u}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{1}{4X} \right) \quad (2)$$

ここで σ_y^u は軟化部の耐力

$$X = h/t$$

いま X すなわち h/t が小となると σ_B は増加し, σ_B が母材の極限強さ σ_u^p に近づくと、すなわち母材で破断するとすれば

$$\sigma_B = \frac{2\sigma_y^u}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{1}{4X} \right) = \sigma_u^p \quad (3)$$

$$X_{Cr}^u = \frac{1}{4 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sigma_u^p}{\sigma_y^u} - 1 \right)} \quad (4)$$

X すなわち h/t が大となると σ_B は低下し, その下限は軟化部の極限強さ σ_u^m である。すなわち軟化部の強度で破断するとすれば

$$\sigma_B = \frac{2\sigma_Y^m}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{1}{4X} \right) = \sigma_u^m \quad (5)$$

$$X_{Cr} = \frac{1}{4 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sigma_u^m}{\sigma_Y^m} - 1 \right)} \quad (6)$$

軟化部をもつ平板の引張強さは X すなわち軟化部の幅と板厚の比によつて決まり、その値 σ_B の上限は母材の引張強さ σ_u^p であり、そのときの X を X_{Cr}^p とし、また σ_B の下限は軟化部の引張強さ σ_u^m であり、そのときの X を X_{Cr}^m とすれば

- i) $X > X_{Cr}^p$ のとき、軟化部で破断し、 $\sigma_B = \sigma_u^m$ となる。
- ii) $X < X_{Cr}^m$ のとき、母材で破断し、 $\sigma_B = \sigma_u^p$ となる。
- iii) $X_{Cr}^m < X < X_{Cr}^p$ のとき、破断応力は $\sigma_u^p > \sigma_B > \sigma_u^m$ となり、その値は(2)式すなわち $\sigma_B = 2\sigma_Y^m / \sqrt{3} (1 + 1/4X)$ で与えられる。

実験に用いた A2P7-1/4H 材、 $t=6\text{mm}$ の引張試験および軟化部の微小引張試験結果より、それぞれ平均値として次の値が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma_u^p &= 36.5 \text{ kg/mm}^2 & \sigma_u^m &= 32.0 \text{ kg/mm}^2 \\ \sigma_Y^p &= 26.2 \text{ kg/mm}^2 & \sigma_Y^m &= 18.0 \text{ kg/mm}^2 \\ X_{Cr}^p &= 0.33 & X_{Cr}^m &= 0.46 \end{aligned}$$

おのおのの試験板の硬度の測定結果から、軟化部の幅 h を図9と同様に実測し、 h/t と継手引張試験結果の関係は図13のようになり、実験値と理論値は比較的良好に合っている。実際の溶接継手ではその溶接条件(VI)²⁾

図 13 軟化幅と引張強さの関係

i^2v から軟化部の幅 h が予測でき、 σ_B と X すなわち h/t の関係で、その継手の強度を推定することができる。また $X = h/t = E \cdot (VI)^2 / t^3 v$ として、溶接条件からただちに X が求まり、引張強さ σ_B を予測することも可能である。

(5) 結 論

i) 加工硬化材の溶接熱によつて軟化する度合は母材の加工度と最高到達温度によつて決まり、冷却速度はほとんど影響しない。なお 1/4H, 1/2H 材ともにその溶接条件がわかれば尾崎氏の理論を用いてその軟化幅を予測することができる。供試材の場合同一板厚、同一入熱の場合、1/2H 材は 1/4H 材の約3倍の軟化幅となつた。

ii) 軟化微小部分の硬さと耐力、引張強さの間には母材の加工度に応じ、ほぼ比例関係が認められる。

iii) 溶接継手の軟化部の幅の大小は継手強度に関係し、 $X = h/t$ が X_{Cr} (供試材 1/4H, $t=6\text{mm}$ の場合、0.46)以上のときは軟化部で破断、軟化部の引張強さと同一となる。 X が X_{Cr}^p (供試材 1/4H, $t=6\text{mm}$ の場合、0.33)以下では母材で破断、母材の引張強さと同一となる。 $X_{Cr}^m < X < X_{Cr}^p$ のときは、 $\sigma_B = 2\sigma_Y^m / \sqrt{3} (1 + 1/4X)$ で求められる。なお溶接条件がわかればただちに継手の強度を予測することができる。

iv) A2P7-1/4H 材においては板厚が 10mm 程度以下となると溶接条件(TIG, MIG)を Control して X の値を X_{Cr} 以下にすることは困難であるが厚板では多層盛りなどの方法で X の値を小さくすることも可能である、ただし余り実用的でない。したがつて一般の溶接施工条件では、TIG, MIG いずれを用いても、継手の引張

強さはほとんど一定で、その値は軟化部の引張強さで決まる。

3 第2部 縦横継手混用部材の引張強度

3.1 実験の方法および内容

第1部でアルミニウム合金加工硬化材の溶接継手軟化部の基本的性質について考察した。ここでは実際の溶接構造物に加工硬化材を応用する場合を考え、継手形式と強度の関係について、横継手、縦継手および縦横の継手を適当に移動した構造模型（以下混用継手という）の引張試験を行ない、それぞれの継手形式について応力の状態を考察し、継手形式がその引張強度に及ぼす影響を調べた。

供試材は全て A2P7-1/4H で、厚板は 6mm とした、その化学成分と機械的性質は表1に示すとおりである。

試験片の種類形状寸法を図14に示す。継手は全てI型開先とし、MIG溶接により表裏各一層ずつ溶接した。（なお溶接部は全て余盛りのままとした）

図 14a 試験片形状寸法

図 14b 試験片形状寸法

引張試験に際して、それぞれ G.L. 200mm 間の伸びをダイヤルゲージにより各荷重ごとに測定した。なお代表的な各試験片に荷重と直角方向の軟化部断面（溶接部近傍）の表裏にストレンゲージを貼布し、試験片の歪分布について調査した。

3.2 試験結果ならびにその考察

(1) 試験片の歪分布

各荷重ごとに測定した各種試験片の歪分布の一例を図15に示す、この図で試験片の幅方向（荷重直角方向）

図 15 試験片の歪分布

の歪分布がその継手形式にかかわらずほとんど同様であることを示している。

(2) 縦継手の引張強度

試験結果は図 16 に示すとおりで、試験片幅が広いものでは(幅 $b=240$ mm) 継手の耐力、引張強さともには

図 16 縦継手引張試験片の幅と強度

ほとんど母材と同等の値を示している。縦継手の引張では軟化部、溶着金属および母材をともに引張ることになり、このとき各部分の荷重に対する歪は同じである。全断面積を A とすれば各部の荷重の分担は、溶着金属を含めた軟化部の断面積を A_1 、その応力を σ_1 とし母材部分をそれぞれ $A-A_1$ 、 σ_2 とすると、

$$\text{荷重 } P = A\sigma_2 - A_1(\sigma_2 - \sigma_1) \quad (7)$$

すなわち全体の断面積 A に対して軟化部の断面積 A_1 が小さいときは軟化部分は無視してよいことになる。試験結果は $A_1/A = l_1/b = 1/10$ 程度以下では $P \approx A\sigma_2$ となることを示している (l_1 : 軟化幅)

第 1 部で得た軟化部の耐力、引張強さ、ならびに溶接条件から継手の軟化幅を推定し ($l_1=20$ mm, 第 1 部参照) (7) 式を用いて計算すると図 16 のようになり、計算値と、実験値は比較的よく合っている。

(3) 横継手の引張強度

この試験片は軟化幅が広いのでその引張強さは軟化部のそれであり、軟化部で破断する(第 1 部参照)。試験片長手方向の荷重に対する歪は、軟化部では軟化材の応力-歪線図にのり、軟化してない部分では母材のそれにとすれば、その分布は模型的に図 17 のごとくである。標点距離 l をとつたとき $A-B$ の間の応力-歪線図は、母材および軟化材(第 1 部、微小引張試験より)を基にして図 18 の破線で示すように求められる。すなわち荷重 P に対する試験片各部の歪は、 $\epsilon =$ 標点距離 l 間の平均歪、 $\epsilon_1 =$ 軟化部の歪、 $\epsilon_2 =$ 母材部の歪として、

$$\epsilon = 1/l \{ \epsilon_1 l_1 + (l - l_1) \epsilon_2 \} = \epsilon_2 + l_1/l (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (8)$$

図 17 横継手試験片の歪分布模型

図 18 横継手試験片の平均応力-歪図

図 19 横継手試験片の応力-歪

となる。実験で得た横継手の標点距離 $l=200$ mm の応力-歪線図を図 19 に示す、図の破線は (8) 式を用いて計算した値で、実験値とほぼ一致している。

(4) 縦横混用継手の引張強度

shift および insert 形の継手部材引張試験では、载荷時の歪分布が荷重直角方向にはほぼ一定であるとすれば、荷重に対する試験片の荷重方向の歪分布は模型的に横継手同様図 20 のようになる。このとき軟化部を含む部分 l_1 間の歪に対する平均応力は、

$$P/A = 1/A \{ \sigma_s A_1 + \sigma_M (A - A_1) \} = \sigma_M - A_1/A (\sigma_M - \sigma_s) \quad (9)$$

ここで A = 軟化部を含む部分 (l_1 部) の全断面積

A_1 = 軟化部の断面積

σ_M = 母材部 (p) の応力

σ_s = 軟化部 (m) の応力

いま図 21 に示すように、母材と軟化材の応力-歪線図を基に、(9) 式を用いて各歪に対する平均応力の値を

図 20 混用継手試験片の歪分布模型

図 21 混用継手 l_1 間の平均応力-歪図

plot すれば l_1 間の平均応力-歪線図が同図の破線のように求まる。

またこの部分の歪が同図で σ_B となると母材部分の応力 σ_M が破断応力に達するため、ここから破断する。標点距離を l としたときの $A-B$ 間の平均応力-歪線図は、母材および l_1 間の平均応力-歪線図を基にして横継手のときと同様に、荷重に対する歪は (8) 式により求められる。

図 22 は G.L. 200 mm で得た実験値と、計算による応力-歪線図を示す。実験値と計算値はほぼ一致している。

図 22 混用継手試験片の応力-歪

なお shift 形試験片では shift の量が小さくなると引張強度は低下しており、完全に cross した継手の実験値は耐力、引張強さ、伸びともに小さく、横継手よりも劣る値を示した。

図 23 に各種継手の引張強度と伸びを比較して示した。

図 23 各種継手の引張強度 (実験値と計算値の比較)

(5) 結 論

i) 縦継手の引張強度は、板幅 (b) が溶接軟化幅 (l_1) に対して大きければ母材強度に近づき $l_1/b < 0.1$ では母材とはほぼ同等となる。

ii) 横継手の引張強さは (軟化幅が極めて小さい場合を除き第 1 部参照) 軟化部のそれであり、耐力の読みは標点距離が大きくなるにつれて増大し、母材の耐力に近づく。供試材の場合では引張強さが母材の 90% 程度であり、G.L. 200 mm の耐力が同じく 85% 程度であつた。

iii) insert および shift 形 (shift 量が十分な場合) 部材の引張強度は、母材と軟化材の間であり、軟化部を含む断面における母材部と軟化部の面積の比によつて決まる。

実験ではこの面積比が 1:1 の場合で母材に対して引張強さは 94% 程度であり、耐力は G.L. 200mm で 90% 程度であつた。

iv) 母材および軟化部材の応力-歪線図が得られていれば近似的に本報の (7), (8), (6) 式を用いて継手の強度を計算することができる。

4 総 括

(1) 加工硬化材の溶接熱によつて軟化する度合は、母材の初期冷間加工度と最高到達温度によつて決まり、冷却速度はほとんど影響しない。

(2) 溶接横継手の軟化部の幅の大小は継手強度に関係し X (軟化幅/板厚) が小ならば、母材の値に近付き、ある値 (X_{cr}) 以下では母材破断となる。しかし一般の MIG, TIG 溶接では、この範囲まで軟化幅を小さくすることは実用的に困難である。したがつて一般的には継手の引張強度はほとんど一定でその値は軟化部の強度で決まる。

(3) 加工硬化材の母材の加工度と溶接条件がわかれば、継手の軟化幅および引張強さを予測することができる。

(4) 縦継手の引張強度は、板幅が溶接軟化幅に対して大きければ母材強度に近づく。

(5) 縦横混用継手 (insert および shift 型継手) 材部の引張強度は、母材と軟化材の間であり、軟化部を含む断面における母材部と軟化部の面積の比によつて決まる。したがつて溶接構造物にアルミニウム加工硬化材を用いる場合、溶接線を Shift した継手形式を採用すると加工硬化材の Merit を活かした有利な設計ができる。

謝 辞

この研究を行なうにあたり多くのご教示をいただいた大阪大学、寺沢一雄教授に深く感謝いたします。また実験および解析に多大のご協力をいただいた当技研、谷山君をはじめ構造実験課、ならびに構造研究室の諸君に心から感謝の意を表します。なお本研究は軽金属溶接技術会、WA 委員会 (委員長阪大寺沢教授) の研究の一部として行なわれたものであることを付記する。

参 考 文 献

- (1) 尾崎秋男：耐食アルミニウム合金加工硬化材の MIG 溶接における軟化域，溶接学会誌，1965，Vol. 34，No. 3
- (2) O. A. Bakshi and Other：The static tensile strength of welded joints with a soft interlayer，Svar. Proiz. 1962，No. 5
- (3) Unkssov, E. P.：The plastic theory in engineering, Mashgiz, 1959

〔附〕1 軟化域をもつ溶接継手の静的引張強さ

Bakshi 等の理論 (文献 2) をアルミニウム加工硬化材に応用するに当つて、平板の場合について理論を導き、その妥当性を確かめた。

図 24

図 25

- 条件, (1) 弾性係数は軟化部, 母材ともに同一とする。
 (2) 完全な弾塑性体とし, 歪硬化はないものとする。
 (3) 溶接残留応力は無いものとする。
 (4) 板幅方向の応力分布は一定とする。

x 方向, y 方向の力の釣合から

$$d\sigma_x/dx + d\tau_{xy}/dy = 0, \quad d\tau_{xy}/dx + d\sigma_y/dy = 0$$

$$\int_0^{h/2} \frac{d\sigma_x}{dx} dy + \int_0^{h/2} \frac{d\tau_{xy}}{dy} dy = 0$$

σ_x は y に無関係と仮定して

$$\left[\frac{d\sigma_x}{dx} \cdot y \right]_0^{h/2} + \tau_{xy} \Big|_0^{h/2} = 0$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2\tau}{h} = 0 \quad (1)$$

Mises の降伏条件式

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 = 2(\sigma_Y^m)^2 \quad (2)$$

ここで σ_Y^m = 軟化部の耐力

平面変位 (z 方向の主ひずみが 0, $\epsilon_z = 0$)

$$\epsilon_z = 1/E \cdot \{\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\} = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (4)$$

(4) を (2) に代入して

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\nu(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 2\nu^2(\sigma_x + \sigma_y)^2 = 2(\sigma_Y^m)^2$$

塑性範囲で $\nu = 1/2$

$$\sigma_x + \sigma_y = \pm 2/\sqrt{3} \cdot \sigma_Y^m \quad (5)$$

$$\sigma_y > 0, \quad \sigma_x < 0$$

$$\sigma_y = \sigma_x + 2/\sqrt{3} \cdot \sigma_Y^m \quad (6)$$

(1) 式より

$$d\sigma_x = -2\tau/h \cdot dx$$

$$\sigma_x = -2\tau/h \cdot x + c$$

$$x = t/2, \quad \sigma_x = 0$$

$$\sigma_x = \tau/h \cdot (t - 2x)$$

$$\tau = \tau_K = \sigma_Y^m / \sqrt{3} \quad (\text{Mises 降伏条件})$$

$$\sigma_x = \frac{2\sigma_Y^m}{\sqrt{3}h} \left(\frac{t}{2} - x \right) \quad (7)$$

(6), (7) 式より

$$\sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_Y^m \left\{ 1 + \frac{1}{h} \left(\frac{t}{2} - x \right) \right\} \quad (8)$$

平均破断応力: σ_B

$$\sigma_B = \frac{1}{Bt} \cdot 2 \int_0^{t/2} \sigma_y \cdot B dx$$

$$= \frac{2}{Bt} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_Y^m \cdot B \left[x + \frac{1}{h} \left(\frac{t}{2} x - \frac{x^2}{2} \right) \right]_0^{t/2}$$

$h/t = X$ とおくと

$$\sigma_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_Y^m \left(1 + \frac{1}{4X} \right) \quad (9)$$