特別寄稿

日本のアルミニウム合金による静的および動的に 高い荷重を受ける溶接構造の強度計算*

工学博士 アレキシス・ノイマン**

Festigkeitsberechnung geschweisster statisch dynamisch hochbeanspruchter Tragwerke aus japanischen Aluminiumlegierungen*

by Prof. Dr.-Ing habil Alexis Neuman**

0. 緒 言

ドイツのアルミニウム合金による静的および動的に高い荷重を受ける溶接継手の強度計算について、著者は最初の提案を1962年にしている¹⁾²⁾。

それ以来、アルミニウム合金による溶接継手の静的および動的強度に関して、いくつもの広範囲な研究を行なってきた^{3),4),5),6)}。

ただしこれらの研究は一つの始まりを示すのみで、これまでにまだ多くの問題が答えられないままに残されて

は、しだいに多くの国で採用されてきている。

日本では、ヨーロッパと同様のアルミニウム合金が溶接構造に使用されている。このことはとくに名古屋の住友軽金属工業株式会社の製品についても認められるところである。

以下においては、日本のアルミニウム合金にもとづいて溶接構造の計算に関する提案をしたものである。溶接技術の点からいえば、前提となる被包ガス溶接法 (MIG および TIG) が日本でもドイツ民主主義共和国と同様に用いられているのでこの提案が出来る。個々の項目に

表-1 日本の溶接構造用のアルミニウム合金の代表例

合 金	処 理 状 態 (在庫時の)	σ_B kp/mm ² *	$\sigma_{0.2}$ kp/mm ² *	クリープ係数 (δ) 1000時間引張荷重	
				+20°C	+100°C
耐食アルミニウム合金 1	軟 質 (O)	18	6	0.9	0.6
	半硬質 ($\frac{1}{2}$ H)	23	18	0.9	0.6
	硬 質 (H)	27	20	—	—
耐食アルミニウム合金 2	軟 質 (O)	25	11	0.9	0.7
	硬 質 (H)	30	20	0.9	0.6
高力アルミニウム合金 (AlZnMg)	T 6	34	20	—	—

* 訳者註：重力の加速度は地球上の緯度によって異なるので、緯度45°の地球上水面における質量 1000 g の物体の重さを 1000 Pond とする。p は Pond の略である。

いる。しかしながらこれまでに得られた結果から、実用上の計算の基礎を導き出すことは出来る。

このような計算の基礎を、軽金属構造物すなわち高層建築、橋梁、運搬装置、起重機、そのほかさらに機械構造物や車両構造物へアルミニウム合金を使用する場合に対して導いた⁷⁾。アルミニウム合金による静的および動的に高い荷重を受ける溶接構造の計算基礎に関する提案

表-2 表1に示した日本の代表的な溶接構造用アルミニウム合金の化学組成

合 金	対応する DIN	化 学 成 分 (%)			
		Zn	Mg	Mn	Cr
耐食アルミニウム合金 1	AlMg3	—	2.5	—	0.25
耐食アルミニウム合金 2	AlMg5	—	5.2	0.1	0.1
高力アルミニウム合金 (AlZnMg)	AlZnMg1	3.5~5.0	1.0~2.5	0.2~0.9	0.35

* 原稿受付 昭和42年6月6日

** 推薦会員 カール・マルクス市工科大学教授 Guest Member, Technische Hochschule Karx-Stadt (DDR)

ついては、以下さらに詳述する。

1. 材 料

数多くのアルミニウム展伸材の中で、溶接構造用として契められるものはごくわずかである。

日本における普通のアルミニウム合金の中から、二、三のものを表-1 および表-2 に選び出し、これらの静的および疲れ強さの値を以下の計算基礎に差当り用いた。

この他のアルミニウム合金についても、むろんこの計算基礎のやり方である。

2. 施行等級

突合せ継手の製作条件を一つの基準にしたがって統一しておいたほうがよい。これには表-3 に挙げた施行等級がちょうどよい。これは板厚 3 mm 以上の材料の溶融溶接に適用されるものである。この等級判定は 5 段階に分類されている。

表-3 突合せ溶接継手の施行等級 (二、三の作成案件の異なるものについての例)

施行等級	X 線透過試験	仕 上 げ	裏 溶 接
IA	引 張 部 分 100%	板厚まで 機械加工	全体に 裏溶接をした ルート
IP	(最低欠陥等級 2)	な し	
IIA	抜 取 り 検 査 (最低欠陥等級 3)	な し	
IIB	抜 取 り 検 査 (最低欠陥等級 4)	な し	完全溶け込みにし 裏溶接 をしないルート
III	な し	な し	異論のない不完全 とけ込みのルート

3. 公称応力の決定

公称応力を決めるには断面積の計算が必要である。構造部材の断面積の計算は既知と仮定する。

アルミニウム合金の溶接継手の断面積は鋼の場合と同様に周知のごとく単純化して計算する。

溶接継手の強さを出すには、次のように断面を決めて行なう (図-1)。

断面 A : 溶接によって影響されない断面

断面 B : 溶接によって影響される断面

断面 C : 溶接部の断面

断面 B の場合、すなわち表-4 に示すように熱影響によって強度低下が生ずる範囲では、溶接継手の強さは断面 B の強度が決め手になる。図-2 には断面のその他の例を挙げる。

動的なくり返し荷重を受ける場合の強さを出すには、上限、下限および平均応力ならびに応力比 (σ_m/σ_0) を求

図-1 強度計算に用いる断面

表-4 熱影響による強度低下の範囲 (図 1 参照)

合 金	S (mm)	b_t (mm)
耐食アルミニウム合金 1	≤ 10	50
	> 10	5.s
耐食アルミニウム合金 2	≤ 10	60
	> 10	6.s

- 側面すみ肉継手による連結
- 溶接によって取り付けられた長手方向の補剛材
- 溶接によって取り付けられた横方向の補剛材
- 溶接によって取り付けられたフランジをもつシャフト

図-2 強度計算に用いる断面

応力の時間変化 応力 時間					
応力の範囲	純 両 振 り	部 分 両 振 り	純 片 振 り	部 分 片 振 り	静 的
Bach による荷重の種類	Ⅲ		Ⅱ		Ⅰ
機械構造物にける応力比 $\frac{\sigma_m}{\sigma_0}$	-1.0	中間の値	0	中間の値	+1.0
鋼構造物における応力比 $\alpha = \frac{\sigma_m}{\sigma_0}$	0	中間の値	+0.5	中間の値	+1.0
Festigkeits- bzw. Dauerfestigkeitswerte	σ_W 両振り疲労限	—	σ_S 片振り疲労限	—	σ_B 引張り強さ

図—3 荷重の種類と応力の時間変化

めることが必要である。これらの応力の表現は図—3 から理解される通りである。

4. 耐力（構造物の強度）

静的および動的な荷重をうける溶接構造部材について測定すべき基礎は耐力（疲れ強さ） σ_{tr} または τ_{tr}

（ σ_{Da} または τ_{Da} ）である。これらの応力は、それぞれ破断または塑性流動なしにその構造部材が耐える最大の応力である。動的（繰り返し）荷重の場合、耐力は疲れ強さ σ_{Da} または τ_{Da} で表わされる。静的荷重の場合には、短時間の荷重と長時間の荷重とで異なる。短時間荷重の場合には、 σ_B および $\sigma_{0.2}$ の値が安全率を求める基

代表的な計算値 [kp/cm²]

水平線	1	2	3	4	5
σ	2000	1800	600	480	360

$\frac{\sigma_m}{\sigma_0}$	線					
	a	b	c	d	e	f
0	510	285	235	190	150	125
0.5	880	500	410	325	250	210

図—4 耐力 (σ); 耐食アルミニウム合金 1

水平線	6	7	8
τ	1160	1040	350

$\frac{\tau_m}{\tau_0}$	線		
	b	f	f
0	285	125	
0.5	500	270	

図—5 耐力 (τ); 耐食アルミニウム合金 1

代表的な計算値 [kp/cm²]

水 平 線	1	2	3	4	5	
	H	1/2 H	O	II A	II B	
σ	2000	—	1100	880	660	
$\frac{\sigma_m}{\sigma_0}$	線					
	a	b	c	d	e	f
0	510	285	235	190	150	125
0.5	930	515	420	335	260	220

図-6 耐力 (σ) ; 耐食アルミニウム合金 2

代表的な計算値 [kp/cm²]

水平線	6	7	8
	H	1/2 H	O
τ	1160	—	630
$\frac{\tau_m}{\tau_0}$	線		
	b	f	
0	285	125	
0.5	510	220	

図-7 耐力 (τ) ; 耐食アルミニウム合金 2

代表的な計算値 [kp/cm²]

水 平 線	1	4	5	6		
σ, τ	2000	1900	1200	1160		
$\frac{\sigma_m}{\sigma_0}, \frac{\tau_m}{\tau_0}$	線					
	a	b	c	d	e	f
0	510	285	235	190	150	125
0.5	930	515	420	335	260	220

図-8 耐力 (σ, τ) ; 高力アルミニウム合金
 $\tau 6(\text{AlZnMg})$

礎になる。長時間荷重の場合には、これらの値は、その時々々のクリープ係数を乗ずることにより小さくなり、クリープ限が計算の基礎となる。

安全率を求め、許容応力を計算するためには耐力が前提となる。通常用いられる溶接継手に対して、 $\text{ertr } \sigma$ および $\text{ertr } \tau$ は、施行等級 (第2節参照) により、単純化した Smith の疲れ限度線図 (図-4, 5, 6, 7, 8) によって表わされる。これらの図は、3 mm 以上の板厚の材料の引張り、圧縮およびせん断荷重に対して求められたものである。

表-5 は AlMg 3, AlMg 5 および AlZnMg の溶接継手について耐力の線図上の位置を示してある。

疲れ強さは、 10^7 回繰返しで理想的な正弦波形の振動荷重の値が取ってある。繰返し数 $N < 5000$ の場合には、静的荷重の場合の耐力を用いることができる。疲れ強さは、統計的处理をしないで単純なヴェラー曲線の結果から求めたものである。

耐力の値の決め方と関連した報告については、文献を緒言で示してある。

耐力は疲れ限度線図の中で施行等級 I および II についてのみ与えられている。施行等級 III に対しては次のような値になる。

表-5 各溶接継手の疲れ限度線図上の位置 (その1)

No	構 造 要 素 (*1: 熱影響部に注目して)	図 の 説 明	疲 れ 限 度 線 図 上 の 位 置						
			耐食アルミニウム合金 1		耐食アルミニウム合金 2		高力アルミニウム合金		
			質 別	断 面			断 面		
				A	B	C	A	B	C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		圧延のままの平滑母材	O ½H H	a3 a2 a1			a1		
2		丸みをつけない板を側面に溶接した母材	O ½H H		e3 e2 e1			e1	
3		荷重の方向に直角方向の、施行等級 IB の突合せ継手	O ½H H		b3 b3 b3	b3 b3 b3		b1	b1
4		荷重の方向に直角方向の施行等級 IIA の突合せ継手	O ½H H		d4 d4 d4	d4 d4 d4		d4	d4
5		負荷の方向と直角方向の、施行等級 IIB の突合せ継手	O ½H H		e5 e5 e5	e5 e5 e5		e5	e5
6		横方向にすみ肉継手をもった母材 例えば、スティフナーを取付けた曲げを受ける桁	O ½H H		c3 c3 c3			c1	
7		例えば、連続両側すみ肉継手をもった、曲げをうける桁	O ½H H		b3 b2 b1			b1	
8		例えば、継続両側すみ肉継手をもった曲げを受ける桁	O ½H H		e3 e2 e1			e1	
9		長手方向の金周すみ肉溶接継手をもつ母材	O ½H H		c3 c2 c1			c1	
10		前面および側面すみ肉継手をもったカバープレート端での母材	O ½H H		e3 e3 e3			e1	
11		長いすみ肉継手	O ½H H		e3 e3 e3			e1	
12		連結板の場合の短いすみ肉継手 (l≦50・a) ならびにその影響をうける母材	O ½H H		f3 f3 f3	f8 f8 f8		f1	f6
13		連結板の場合の短いすみ肉断手 (l≦50・a) ならびにその影響をうける母材	O ½H H		f3 f3 f3	f8 f8 f8		f1	f6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14		母材にせん断応力がかかっている場合	O ½H H	b8 b7 b6			b6		
15		突合せ継手にせん断応力がかかっている場合	O ½H H		b8 b7 b6	b8 b8 b8		b6	b6
16		長いすみ肉継手 ($l \geq 50 \cdot a$) にせん断応力がかかっている場合	O ½H H			b8 b8 b8			b6

突合せ継手 $\sigma_{schw} = 2/3 \times (\text{施行等級 II A の } \text{ertr} \sigma_{shw})$

すみ肉継手 $\sigma_{schw} = 2/3 \times (\text{施行等級 II B の } \text{ertr} \sigma_{schw})$

曲げに対する耐力は、引張りおよび圧縮に対するそれと同様に扱った。

5. 強さの安全率の求め方

強度の求め方に対しては、一定の断面における直応力とせん断応力との組合せ限界値と荷重の種類（応力比）とが重要である。

公称応力の計算上の安全率は、耐力に対応して、静的および動的荷重について求めておかねばならない。安全率を求める基礎式としては、いまの応力比 (σ_m/σ_0) に対して与えられる：

$$\text{実際の安全率 } S = \frac{\text{ertr } \sigma}{\sigma} \geq \text{必要安全率 } S'$$

ここで $\text{ertr } \sigma$: 耐力

σ : 計算応力

S' : 必要な安全率

6. 必要な安全率に対する提案

6.1 一般

以下の各節で述べる必要な安全率の値は、この提案の第 4 節で述べた耐力（疲れ強さ）または同様な観点から求められた耐力に対してのみ有効である。

せん断応力 (τ) に対しては後述するものが有効である。

6.2 静的荷重の場合に必要な安全率

静的応力を知っておけば静的な、すなわち主として静止した荷重の母材および溶接継手の許容限度以上の伸びあるいは破断に対してじゅう分な安全率を求めるのに役立つ。

溶接継手の場合には二つの構造部材等級に区別される。それらは構造物の変形に及ぼす溶接継手の伸びおよ

び $\sigma_{0.2}$ 耐力の影響を考慮したものである。

構造部材等級 I:

基本的には、構造部材等級 II に入れられないすべての構造物

構造部材等級 II:

溶接部の局部的塑性変形が静的な作用系に何らの影響をも持たないで、溶接継手が力の方向に対して直角にある間隔すなわち

時効硬化型合金の場合 1.0 m

析出硬化型合金の場合 1.5 m

離れているすべての構造部材の特別な場合。

6.2.1 短時間荷重

100°C までの短時間荷重の場合の強度計算で、母材および溶接継手の耐力（疲れ強さ）はそれぞれ次の値によって決める。

σ_B —最小の引張強さ

$\sigma_{0.2}$ —最小の耐力

（これらの値は第 1 節の表 1 に示しある。）

これらの値に対し安全率は種々に変えられるのであるから、強度計算に際しては、力の配分に対して、それより不都合なところをもっとも重要に考えるべきである。

短時間の荷合の場合には必要な安全率として次の値を選ぶべきである：（例外 6.2.3 参照）

母材の場合

σ_B に対して：必要な安全率 $S_B' = 2.4$

$\sigma_{0.2}$ に対して：必要な安全率 $S_{0.2}' = 1.5$

備考： σ_B および $\sigma_{0.2}$ はその時の使用された材料の供給状態すなわち「軟質」、「半硬質」、「硬質」によって定まるものである。

溶接継手の場合：構造部材等級 I

σ_{BS} に対して：必要な安全率 $S_B' = 2.4$

$\sigma_{0.2S}$ に対して：必要な安全率 $S_B' = 1.5$

備考： σ_{BS} および $\sigma_{0.2S}$ は供給状態「軟

質」によって定まるものである。

溶接継手の場合：構造部材等級 II

σ_{BS} に対して：必要な安全率 $S_B' = 2.4$

備考： σ_{BS} は、供給状態「軟質」によって定まるものである。

$\sigma_{0.2}$ に対して：必要な安全率 $S_{0.2}' = 1.5$

備考： $\sigma_{0.2}$ はそれぞれの最初の母材の使用状態、「軟質」、「半硬質」、「硬質」によって定まるものである。

6.2.2 長時間荷重

100°C 以下で1000時間以下の長時間荷重の場合の強度計算で、母材および溶接継手の耐力（疲れ強さ）はそれぞれのクリープ限度の値によって決まる。すなわち：

$$\sigma_{B11000} = K \cdot \sigma_B \quad (\text{破断限界})$$

$$\sigma_{0.2/1000} = \sigma_{0.2} \quad (\text{表形限界})$$

（溶接継手の場合は、 $\sigma_{B/1000S}$ と $\sigma_{0.2/1000S}$ とする）

上記クリープ係数は第1節、表1の各温度の1000時間の荷重に対する値から求められる。

さらに長時間の荷重の場合にはクリープ係数Kは実験によって求めなければならない。

$\sigma_{B/1000}$ および $\sigma_{0.2/1000}$ の値に対して安全率はいろいろ考えられるのであるから、ここでも強度計算には、力の配分に対して、それぞれより都合の悪いところで決めるべきである。

適当に小さい安全率での長時間荷重の強度計算が、（必要な場合には）短時間荷重の強度計算（6.2.1 項参照）につけ加えられることがある。いずれにしても計算は形の上で弱くなるところで行なうべきである。

長時間荷重の場合の必要な安全率としては次のように選定すべきである：（例外 6.2.3 参照）

母材の場合

$\sigma_{B/1000}$ に対して 必要安全率 $S_{BK}' = 2.1$

$\sigma_{0.2}$ に対して 必要安全率 $S_{0.2K}' = 1.33$

溶接継手の場合：構造部材等級 I

$\sigma_{B/1000S}$ に対して 必要安全率 $S_{BK}' = 2.1$

$\sigma_{0.2/1000S}$ に対して 必要安全率 $S_{0.2K}' = 1.33$

溶接継手の場合：構造部材等級 II

$\sigma_{B/1000S}$ に対して 必要安全率 $S_{BK}' = 2.1$

$\sigma_{0.2/1000S}$ に対して 必要安全率 $S_{0.2K}' = 1.33$

疲れ強さ（耐力）の各値に値する備考として 6.2.1 節を参照されたい。

6.2.3 必要安全率の例外

6.2.1 および 6.2.2 節で述べた必要安全率は使用状況でのすべての荷重が厳密にわかっている場合には、特に小さく取ることができる。

この場合には次のように小さい安全率でよい：

σ_B （短時間）の場合

必要安全率 $S_B = 2.4$ の代りに必要安全率 $S_B = 2.1$ を取ることができる。

$\sigma_{B/1000}$ （長時間）の場合

必要安全率 $S_{BK}' = 2.1$ の代りに必要安全率 $S_{BK} = 1.8$ を取ることができる。

$\sigma_{0.2}$ （短時間）の場合

必要安全率 $S_{0.2}' = 1.5$ の代りに必要安全率 $S_{0.2} = 1.33$ を取ることができる。

$\sigma_{0.2/1000}$ （長時間）の場合

必要安全率 $S_{0.2K}' = 1.33$ の代りに必要安全率 $S_{0.2K} = 1.25$ を取ることができる。

6.3 動的荷重の場合の必要安全率

疲れ強さを知っておけば、度々繰り返される片振りまたは両張りの荷重を受ける母材または溶接継手の破壊に対してじゅう分な安全率を求めるのに役立つ。

このような動的振動荷重の場合には、強度計算で、母材および溶接継手（第3節、断面 A,B および C）の耐力（疲れ強さ）は、それぞれの σ_{DG} または $\sigma_{DG\ schw}$ によって決まる。（この値は第4章の図から得られる。）

動的荷重の場合の必要安全率としては、一般に σ_{DG} および σ_{DGS} に対して次のような値を取る。

必要安全率 $S_D = 2.0$ （たとえば機械車輛の場合）

二次応力を含めて荷重が正確にわかっている場合には例外として、動的荷重の σ_{DG} および σ_{DGS} に対して、

最小必要安全率 $S_D' = 1.3$ （例えば橋梁、クレン、鉄道車輛の場合）

を取ることができる。

7. 総括と結論

日本のアルミニウム合金による溶接構造部材の強度に関する研究のこれまでの結果にもとづいて、溶接構造の強度計算に対する推奨値を与えた。必要安全率については、静的な短時間および長時間の荷重および動的（振動）荷重の場合に対し細目にわたる提案をした。

これらの計算基礎の推奨値は、溶接継手の強度に関する詳細な研究の今後の結果によって、将来さらに補足され、改善されるであろう。ことに次のような研究がなされている：

複合荷重の場合の静的強さ、

長時間荷重の場合の静的強さ、

統計的方法による時間強さおよび疲労限、

不規則繰返し荷重による疲れ強さ；

構造物その他の変形に及ぼす溶接部の耐力 $\sigma_{0.2}$ の影響。

これらの推奨値が実際に利用され、それらを集めた経

験が検討されることを望んで止まない。

文 献

- 1) A. Neumann "Festigkeitsberechnung statisch und dynamisch hochbeanspruchter Leichtmetallschweißverbindungen"
Aluminium Düsseldorf, 38 Jahrg. 1962, Heft 1 S. 31-32
- 2) A. Neumann "Erste Vorschläge für zulässige Spannungen" ZIS-Mitteilungen 3 (1961) Heft 7 S. 466-476
- 3) A. Neumann "Dauerfestigkeitsversuche mit geschweißten Biegeträgern und Fachwerkträgern aus AlMg 5 und AlMg 3"
Schweißtechnik Berlin 13 (1963) Heft 5 S. 215-219
- 4) A. Neumann u. M. Schmidt "Stumpfstöße in Aluminiumkonstruktionen" ZIS-Mitteilungen 5 (1963) Heft 10 S. 1228-1250
- 5) A. Neumann u. M. Schmidt "Dauerfestigkeitsversuche mit geschweißten Bauteilen aus AlMg-Legierungen" ZIS-Mitteilungen 6 (1964) 10 S. 1554-1580
- 6) A. Neumann "Rechnerische Ermittlung von Zeit- und Dauerfestigkeitswerten bei der Auswertung von Dauerfestigkeitsversuchen an Schweißverbindungen aus Stählen und Al-Legierungen" Schweißtechnik Berlin 15 (1965) Heft 1 S. 25-30
- 7) A. Neumann u. M. Schmidt "Festigkeitsberechnung geschweißter Tragwerke aus Al-Legierungen im Maschinen- und Straßenfahrzeugbau" Schweißtechnik Berlin 15 (1965) Heft 12 S. 543

(訳 益本 功, 佐藤邦彦)

『ろう 接 便 覧』

ろう接便覧を通読して、これはよい本だと思った。便覧という形はとにかく、各編各章ばらばらで読みにくいものになりがちであるが、この便覧は、編集委員長の大西先生の序文によれば、「数多くの会議を重ね、熱心な討議の結果、本書の内容が骨組みされ、それぞれもっとも適任と思われる執筆者が選ばれ」ただけあって、全体として統一され、内容が豊かで、読者に読みやすく、便覧として利用しやすく編集されている。

ろう接に関するまとまった本の出版は各方面で長くから待たれていた。筆者の住む地方でも昔は自転車産業、最近では電子、電気工業あるいは自動車部品を中心にろう接に対する関心が高く、10年近く前に AWS の *Brazing manual* という本を有志の人達と訳したことがあるが、この本の深みがない点が物足らなく、わが国での資料を探したが、それもはなはだ少ないように感ぜられた。ろう接の本という現実的なことが先に立ち、理論めいたことは二の次になるが、ろう接の理論はろう接の実際と無縁のように扱われがちであったが、この便覧は現在のろう接に関するもっとも高い理論的理解を助け、同時に実際のにも使いやすく、役立つように編集されている。

もっとも適当と思われる執筆者が理想的なチーム・ワークで作上げた産物がこの便覧ではなからうかと思われる。

内容は第Ⅰ編総論でろう接の基礎とろうおよびフラックスあるいはろう接の方法、設計、施工に関する基本的なことが記述され、第Ⅱ編の各論では各種金属のろう接について母材、ろうおよびフラックス、施工が応用例を含めて具体的に述べられている。第Ⅲ編にろう接用語とろう接に関する内外の規格が集められているのも、この編集者の配慮がうかがわれる。ただ、ろう接とろう付と両方の言葉が使われているが、どちらかに統一した方がよいであろう。

とに角、無条件に推せんしたい良書である。

(益本 功)