

アルミニウム合金土木構造物
設計・製作指針
改訂試案 3

ALST 研究レポート 60

2021 年 1 月

大倉一郎
(工学博士)

著者は、本改訂試案を用いることによってもたらされた被害・損失、さらには本改訂試案を用いることによってもたらされたいかなる特許権および実用新案権の侵害に対しても責任を負わない。

概要

改訂試案 1 (ALST 研究レポート No.55)

「アルミニウム合金土木構造物 設計・製作指針 (案)」 [略称 学会指針 (案)] が、土木学会 鋼構造委員会 アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針作成検討小委員会によって 2015 年 3 月に制定された。学会指針 (案) では、押出型材の許容軸方向圧縮応力度は与えられたが、溶接および摩擦撈拌接合による組立て部材の許容軸方向圧縮応力度ならびに曲げ部材の許容圧縮応力度に関しては、十分なデータを揃えることができなかったため起草が見送られた。本改訂試案ではこれらの許容応力度が起草されている。

さらに、本改訂試案では、縦補剛された A6061-T6 両縁支持板の許容圧縮応力度およびウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の設計についても起草されている。これらにより、A6061-T6 の押出型材を摩擦撈拌接合で連結することによって部材を製作することが可能となった。

本改訂試案では、学会指針 (案) に新たに加筆した内容および学会指針 (案) を変更した内容を赤文字で表してある。

改訂試案 2

改訂試案 2 の主な変更は次の 2 点である。

- (1) 4.1 に関して、圧縮を受ける部材の全体と局部の連成耐荷力の評価を積公式から Q ファクター法に変更した。
- (2) 4.3 に関して、中間垂直補剛材を有する 5000 系アルミニウム合金桁の許容せん断応力度を与える式を修正した。

改訂試案 3

全体を読み返し、必要な修正を行った。

謝辞

石川敏之氏（関西大学），大島勤氏〔日軽エンジニアリング（株）〕および長尾隆史氏〔日本軽金属（株）〕には本改訂試案を通読していただき，有益なコメントをいただきました．長尾隆史氏には原稿を整えるとともに幾つかの図面を作成していただいた．ここに三氏に感謝の意を表す．

本改訂試案で新たに加筆した内容は，著者が大阪大学に在職していたとき，同大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 社会基盤工学部門の著者の研究室に所属した学生が著したALST研究レポート（<https://www.aluminum.or.jp/doboku/alst/index.html>）に依っている．彼らの協力なしに本改訂試案を起草することはできなかった．心から感謝したい．

さらに，日本アルミニウム協会のホームページに本改訂試案を掲載する調整をとっていただき川畑達哉氏（一般社団法人 日本アルミニウム協会）に感謝の意を表す．

目次

1章 総 則	1
1.1 適用範囲	1
1.2 使用材料	1
1.3 設計計算に用いる材料定数の値	3
1.4 供用中の限界温度	4
1.5 防食	4
参考文献	5
2章 設計の基本	6
2.1 安全性の照査	6
2.2 たわみの照査	6
2.3 腐食による断面減少	7
2.4 部材を構成する板要素の最小・最大板厚	7
2.5 部材の連結	7
参考文献	7
3章 許容応力度	8
3.1 母材の許容引張応力度と許容せん断応力度	8
3.2 溶接部の許容引張応力度と許容せん断応力度	9
3.3 摩擦撈拌接合部の許容引張応力度と許容せん断応力度	12
3.4 母材と接合部が存在する場合に対する許容引張応力度と許容せん断応力度	12
3.5 両縁支持板の許容圧縮応力度	14
3.6 自由突出板の許容圧縮応力度	17
3.7 縦補剛された A6061-T6 両縁支持板の許容圧縮応力度	21
参考文献	23
4章 部材の設計	25
4.1 圧縮部材の許容軸方向圧縮応力度	25
4.2 ウェブが無補剛の桁の許容曲げ圧縮応力度	31
4.3 桁の許容せん断応力度	36
4.4 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の設計	40
4.5 不等曲げモーメントを受ける桁の応力照査	46
4.6 曲げとせん断の組合せ荷重を受ける桁の応力照査	48
4.7 支点上の垂直補剛材および中間垂直補剛材の設計	50
4.7.1 支点上の垂直補剛材の設計	50
4.7.2 中間垂直補剛材の設計	51
参考文献	52
5章 溶接継手	54
5.1 溶接材料の選定および使用できる溶接継手	54
5.2 完全溶込み開先溶接継手の部分増厚	55

5.3	断面が異なる完全溶込み開先溶接継手	56
5.4	溶接部の理論のど厚と有効長	57
5.5	すみ肉溶接のサイズと最小有効長	58
5.6	軸力または／およびせん断力を受ける溶接継手の応力照査	58
5.7	曲げモーメントを受ける溶接継手の応力照査	61
	参考文献	63
6章	摩擦撹拌接合継手	64
6.1	一般	64
6.2	摩擦撹拌接合継手の部分増厚	64
6.3	摩擦撹拌接合部の理論のど厚と有効長	64
6.4	軸力または／およびせん断力を受ける摩擦撹拌接合継手の応力照査	64
7章	ボルト接合継手	65
7.1	適用範囲	65
7.2	高力ボルト摩擦接合継手	65
7.2.1	一般	65
7.2.2	高力ボルト	65
7.2.3	最小板厚	66
7.2.4	高力ボルトの許容力	67
7.2.5	摩擦接合用高力ボルトの設計	69
7.2.6	連結板および継手の母材の設計	71
7.2.7	純断面積の計算	72
7.2.8	ボルトの中心間隔および縁端距離	74
7.2.9	ボルトの最少本数	75
7.3	支圧接合継手	75
7.3.1	一般	75
7.3.2	ボルトの許容力	76
7.3.3	支圧接合用ボルトの設計	77
7.3.4	連結板および継手の母材の設計	77
7.3.5	純断面積の計算	77
7.3.6	ボルトの中心間隔および縁端距離	78
7.3.7	ボルトの最少本数	78
	参考文献	78
8章	疲労設計	79
8.1	適用範囲	79
8.2	安全係数	79
8.3	疲労照査のための前提条件	79
8.4	疲労照査	81
8.4.1	疲労限度に基づいた疲労照査	81
8.4.2	S-N 曲線に基づいた疲労照査	81
8.5	疲労強度	85
8.5.1	母材および摩擦撹拌接合継手の疲労強度等級	85
8.5.2	溶接継手の疲労強度等級	89
8.5.3	高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度等級	93
8.5.4	腐食影響係数	95

8.5.5	板厚影響係数	96
	参考文献	97
9 章	製 作	98
9.1	部材加工	98
9.2	溶 接	98
9.2.0	用語の定義	98
9.2.1	一般	99
9.2.2	溶接施工試験	99
9.2.3	試験方法と品質判定基準	101
9.2.4	材片のセッティング	103
9.2.5	仮付け溶接	103
9.2.6	溶接変形の矯正	104
9.2.7	製作	104
9.2.8	製品溶接部検査	105
9.2.9	補修	106
9.3	摩擦攪拌接合	107
9.3.0	用語の定義	107
9.3.1	一般	109
9.3.2	溶接施工試験	109
9.3.3	試験方法と品質判定基準	110
9.3.4	製作	113
9.3.5	製品接合部検査	114
9.3.6	補修	114
9.4	高力ボルト摩擦接合	115
9.4.1	一般	115
9.4.2	摩擦面の処理	115
9.4.3	ボルトの締付け	116
9.4.4	耐久性と防食	117
9.5	部材の精度	118
	参考文献	118
付録 A	アルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験方法	120
A.1	適用範囲	120
A.2	試験片	120
A.3	試験方法	122
A.4	すべり係数	123
	参考文献	124

1 章 総 則

1.1 適用範囲

- (1) 本指針は、一般のアルミニウム合金土木構造物の設計および製法について規定する。本指針の規定を変更して適用する場合、および本指針に規定されない事項を適用する場合には、当事者間で協議の上、その適用の可否を決める。
- (2) 本指針では、**設計**対象とする土木構造物に関連する設計基準で規定される、許容応力度設計法に対する荷重を設計荷重として使用する。
- (3) **設計**対象とする土木構造物に関連する設計基準で規定される要求性能を満たしていることを十分検討しなければならない。

アルミニウム合金土木構造物に関連する設計基準として次のものが挙げられる。

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 2) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979.
- 3) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，2008.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，2009.
- 5) 日本アルミニウム協会：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋 設計・製作・施工ガイドライン，2011.
- 6) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製橋梁検査車構造設計・製作指針案，1977.
- 7) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製水門設計製作指針（案），**2016**.
- 8) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製橋梁用外装板設計製作要領，2005.
- 9) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製照明ポール設計・製作要領，2005.
- 10) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製橋梁用防護柵設計要領，2010.

1.2 使用材料

土木構造物に使用できるアルミニウム合金材は、表-1.2.1 に示す日本**産業規格**（以下 JIS という）に適合したものでなければならない。10%以上の伸びを有するアルミニウム合金材を使用する。**A5083-H112** の押出形材に関しては、引張強さが **275N/mm²** 以上、かつ **0.2%耐力が 120 N/mm²** 以上あるものを使用する。

表-1.2.1 アルミニウム合金材

	アルミニウム合金	JIS
板材	A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, A6061-T651	JIS H 4000 ¹⁾
押出形材	A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, A6005C-T5, A6005C-T6	JIS H 4100 ²⁾
溶接材料	A5183, A5356	JIS Z 3232 ³⁾

JIS H 4000 および JIS H 4100 に規定されるアルミニウム合金の機械的性質を表-解 1.2.1 に示す。本規定の伸びは 50mm の標点距離に対する伸び A_{50mm} をいう。

JIS H 4100 が 2015 年に改正された際、押出型材の A5083-H112 の 0.2%耐力が「140N/mm² 以上」から「110N/mm² 以上」に変更された。これは、この JIS 規格を 1999 年に改正する際、A5083-H112 の 0.2%耐力を「110N/mm² 以上」とすべきところを、「140N/mm² 以上」と誤記したことによる（JIS H 4100 の 2015 年改正版の p.39 参照）。したがって、押出型材の A5083-H112 の 0.2%耐力に対する JIS の下限値は、1999 年以前は 110N/mm² であり、1999 年から 2015 年の間は 140N/mm² であった。

質別 O と H は、それぞれ焼きなましと加工硬化を表す。したがって、H 材の 0.2%耐力が O 材のそれを下回ることはない。しかし、JIS H 4100 の 2015 年改正版においては、押出型材の A5083-O の 0.2%耐力の下限値は、38mm 以下の板厚に対して 120N/mm² であり、A5083-H112 の下限値がこれを下回る。この様な状況で、国内のアルミニウム合金圧延メーカー 5 社から材料検査証明書（ミルシート）が収集され、A5083-H112 の押出型材の強度に関する統計調査が行われた⁴⁾。

調査された A5083-H112 の押出型材は、JIS における 0.2%耐力の下限値が 140N/mm² に対して製造されたものである。調査された A5083-H112 の押出型材の 0.2%耐力の最小値は 156N/mm² であり、JIS の下限値 140N/mm² を上回っていた⁴⁾。A5083-H112 の押出型材に対して、JIS における 0.2%耐力の下限値が 110N/mm² であった時期に実施された調査結果⁵⁾においては、最小値は 133N/mm² であった。したがって、本規定では、A5083-H112 の押出型材の 0.2%耐力の下限値を、押出型材の A5083-O の 0.2%耐力の下限値と同じに設定し、120N/mm² と規定している。

JIS H 4100 においては、押出型材の A5083-H112 の引張強さの下限値が 270N/mm² であり、押出型材の A5083-O の引張強さの下限値 275N/mm² より低い値となっている。調査された押出型材の A5083-H112 の引張強さの最小値は 280N/mm² であり⁴⁾、過去の調査では 276N/mm² であった⁵⁾。したがって、本規定では、A5083-H112 の押出型材の引張強さの下限値を、押出型材の A5083-O の引張強さの下限値と同じに設定し、275N/mm² と規定している。

表-解 1.2.1 に示すように、JIS には伸びに対する規定が 10%未満のアルミニウム合金がある。土木構造物に使用されるアルミニウム合金材に対して、脆性破壊防止の観点から 10%未満の伸びは低過ぎるので⁶⁾、JIS で伸びが 10%未満に規定されているアルミニウム合金材に対しては、10%以上の伸びを有するアルミニウム合金材を使用することを規定している。脆性破壊防止の観点からアルミニウム合金に要求される伸びの最小値をいくらにとるべきかについては今後の検討課題である。

表-解 1.2.1 アルミニウム合金の機械的性質 (JIS)

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	
					A_{50mm}	A
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 6.5$	275 以上	125 以上	12 以上	—
		$6.5 < t \leq 40$		125 以上		10 以上
		$40 < t \leq 75$		120 以上		10 以上
	A5083-O	$0.5 \leq t \leq 0.8$	275 以上 350 以下	125 以上 200 以下	16 以上	—
		$0.8 < t \leq 40$	275 以上 350 以下	125 以上 200 以下		14 以上
		$40 < t \leq 80$	270 以上 345 以下	115 以上 200 以下		14 以上
		$80 < t \leq 100$	260 以上	110 以上		12 以上
	A6061-T6	$0.4 \leq t \leq 0.5$	295 以上	—	8 以上	—
		$0.5 < t \leq 6.5$		245 以上	10 以上	
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 13$	295 以上	245 以上	10 以上	—
		$13 < t \leq 25$			9 以上	
		$25 < t \leq 50$			8 以上	
		$50 < t \leq 100$			6 以上	
押出形材	A5083-H112	$t \leq 130$	270 以上	110 以上	12 以上	12 以上
	A5083-O	$t \leq 38$	275 以上	120 以上	14 以上	—
		$38 < t \leq 130$	355 以下	110 以上	14 以上	—
	A6061-T6	$t \leq 6$	265 以上	245 以上	8 以上	7 以上
		$6 < t$	265 以上	245 以上	10 以上	—
	A6005C-T5	$t \leq 6$	245 以上	205 以上	8 以上	—
		$6 < t \leq 12$	225 以上	175 以上	8 以上	—
A6005C-T6	$t \leq 6$	265 以上	235 以上	8 以上	—	

注： A_{50mm} は 50mm の標点距離に対する伸び

A は、 S_0 を引張試験片の平行部の断面積として、 $5.65\sqrt{S_0}$ の標点距離に対する伸び

1.3 設計計算に用いる材料定数の値

設計計算に用いるアルミニウム合金の材料定数の値を表-1.3.1に示す。

表-1.3.1 アルミニウム合金の材料定数の値

材料定数の種類	値
密度	2.7×10^3 (kg/m ³)
(単位体積重量)	[26.5 (kN/m ³)]
ヤング係数	7.0×10^4 (N/mm ²)
せん断弾性係数	2.7×10^4 (N/mm ²)
ポアソン比	0.3
線膨張係数	24×10^{-6} (1/°C)

1.4 供用中の限界温度

アルミニウム合金土木構造物の供用中の温度は 80℃を超えてはならない。

1.5 防食

- (1) 通常の大気条件下においては、1.2 に記載されたアルミニウム合金材で製作された土木構造物は塗装を施さずに使用することができる。
- (2) アルミニウム合金材を鋼材など異種金属と組合せて使用する場合には、異種金属接触腐食を防止しなければならない。
- (3) モルタルあるいはコンクリートと接触するアルミニウム合金材の表面には塗装が施されなければならない。
- (4) 海洋環境に置かれた土木構造物の供用中の温度が 66℃を超える場合には、A5083-H112、A5083-O および溶接材料 A5183 と A5356 を使用してはならない。

- (1) アルミニウムは本来活性な金属であるが、その表面に数 nm の極めて薄い自然酸化皮膜が形成されるため、多くの自然環境中で優れた耐食性を発揮する。沖縄県嘉弥真島で大気暴露されたアルミニウム合金 A6005C-T5 の母材試験片および摩擦攪拌接合部を有する試験片の腐食の平均深さ（測定された 5 個の平均値）の経年変化を図-解 1.5.1 に示す^{7),8)}。同図から分かるように、腐食深さは、大気暴露開始から 1 年以降大きくならない。他方、兵庫県芦有ドライブウェイに架かる金慶橋（支間長 20m のアルミニウム合金製の活荷重合成桁橋）の主桁（5000 系アルミニウム合金）の腐食深さが、建設から 56 年経過後、0.1mm～0.2mm と浅く、2007 年から 2017 年の 10 年間で腐食はほとんど進行していないことが報告されている⁹⁾。このように、アルミニウム合金材に生じる腐食は軽微であり、アルミニウム合金製土木構造物に対しては、美観維持のために塗装が施されることはあるが、防食の意味での塗装は必要とされない。

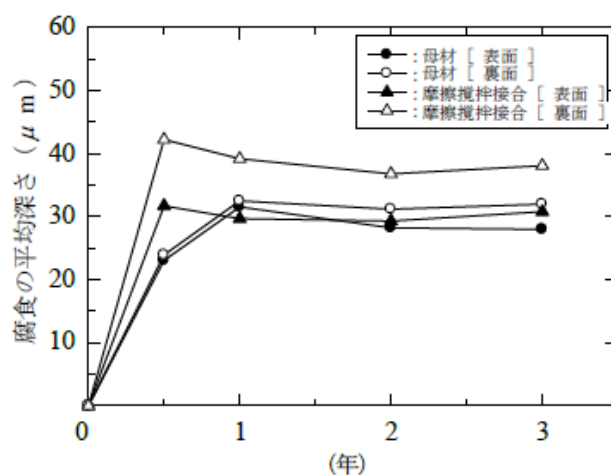


図-解 1.5.1 腐食の平均深さの経年変化

- (2) 異種金属接触腐食を防止する方法として、犠牲陽極作用の利用や、異種金属同士の電気的な絶縁がある。
- (3) 硬化しないモルタルおよびコンクリートは強アルカリ性であるため、アルミニウム合金がこれに接触すると溶解するが、これらが硬化すると、アルミニウム合金の溶解は止まる。しかし、硬化したモルタ

- ルおよびコンクリートが湿潤状態に置かれる場合には、アルミニウム合金が、遊離アルカリ分を含む水に接触するために、アルミニウム合金の溶解は続く。これを防ぐために、モルタルあるいはコンクリートと接触するアルミニウム合金材の表面には塗装を施す必要がある¹⁰⁾。
- (4) 3%以上の Mg を含有する 5000 系アルミニウム合金は、温度が 66°C より高くなると応力腐食割れに対する感受性が高くなり、特に、海洋環境で感受性が高くなる^{11)~13)}。

参考文献

- 1) JIS H 4000 : アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条, 2014.
- 2) JIS H 4100 : アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材, 2015.
- 3) JIS Z 3232 : アルミニウム及びアルミニウム合金の溶加棒及び溶接ワイヤ, 2009.
- 4) 大倉一郎, 川畑達哉 : アルミニウム合金材の強度に関する統計調査, ALST 研究レポート, No.46, 2016.
- 5) 国枝明, 中込忠男, 橋本篤秀, 緑川光正, 山田丈富, 原山浩一 : 金属系新素材・新材料の利用技術の開発 (建設省総合プロジェクト・新素材) その 91 「アルミニウム合金の機械的性質に関する統計調査」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C, 構造 II, pp.1211-1212, 1993.
- 6) Vigh, L.G. and Okura, I.: Fatigue behavior of friction stir welded aluminum bridge deck segment, Materials and Design, Elsevier, Vol.44, pp.119-127, 2013.
- 7) 萩澤亘保, 大倉一郎, 花崎昌幸, 大西弘志, 佐藤正典 : アルミニウム合金の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に腐食が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.478-488, 2006.
- 8) 萩澤亘保, 大倉一郎 : アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比と腐食が与える影響, ALST 研究レポート, No.2, 2007.
- 9) 伊藤義人, 守屋進, 長澤大介, 兼子彬, 川畑達哉 : 56 年経過したアルミニウム合金橋梁「金慶橋」の現状と耐久性, 橋梁と基礎, 建設図書, 第 51 巻, 第 9 号, pp.35-40, 2017.
- 10) 佐藤正典, 大西弘志, 大倉一郎, 萩澤亘保, 花崎昌幸 : アルミニウム合金のコンクリート中の腐食, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, 5-266, pp.529-530, 2004.
- 11) Eurocode 9 : Design of aluminium structures – Part1-1: General structural rules, 2007.
- 12) Aluminum Association: Aluminum Design Manual, PART I, Specification for Aluminum Structures, 2010.
- 13) 軽金属溶接構造協会 : アルミニウム合金構造物の溶接施工管理 (第 4 版) I, 材料, 2009.

2章 設計の基本

2.1 安全性の照査

(1) アルミニウム合金土木構造物の安全性の照査は、許容応力度設計法に従う。許容応力度に関しては、対象とする土木構造物に対して求められる安全性のレベルに応じて、次式で与えられる許容応力度を調整して使用する。

座屈が生じない部材に対して、

$$\sigma_a = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_{0.2}}{1.85}\right) \dots\dots\dots (2.1.1)$$

座屈が生じる部材に対して、

$$\sigma_a = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_u}{1.85}\right) \dots\dots\dots (2.1.2)$$

ここに、 σ_B : 引張強さ

$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力

σ_u : 座屈が生じる部材の場合、その耐荷力

$\min(x, y)$: x と y でどちらか小さい方の値を選択することを表す関数

(2) 疲労に対する安全性の照査は、8章による。

(1) 米国のアルミニウム協会が制定した、1994年版のアルミニウム構造物設計指針（略称 AA）¹⁾の許容応力度設計法編では、許容応力度は次式で与えられ、橋に対して $\nu_B = 2.2$ 、 $\nu_{0.2} = 1.85$ 、建築物に対して $\nu_B = 1.95$ 、 $\nu_{0.2} = 1.65$ が採用されている。

$$\sigma_a = \min\left(\frac{\sigma_B}{\nu_B}, \frac{\sigma_{0.2}}{\nu_{0.2}}\right) \dots\dots\dots (\text{解 } 2.1.1)$$

ここに、 ν_B : 引張強さに対する安全率

$\nu_{0.2}$: 0.2%耐力に対する安全率

日本アルミニウム協会（旧軽金属協会）が1998年に制定したアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案において、許容応力度を設定する際、1994年版 AA の橋に対する安全率を踏襲して、 $\nu_B = 2.2$ 、 $\nu_{0.2} = 1.85$ が採用された。式(2.1.1)の安全率は、このような経緯によるものである。

座屈が生じる部材に対しては、その耐荷力 σ_u の上限値が 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ になるので、式(2.1.1)の $\sigma_{0.2}$ を σ_u に置き換えて式(2.1.2)を与えている。

2.2 たわみの照査

対象とする土木構造物に関連する設計基準で規定される許容たわみを満たすように部材寸法を決める。

アルミニウム合金土木構造物に関連する設計基準が 1.1 の解説で挙げられている。

2.3 腐食による断面減少

アルミニウム合金土木構造物の設計においては、腐食による断面減少を考慮する必要はない。

この規定は、1.5(1)に対する解説で述べるように、アルミニウム合金材に生じる腐食が軽微であることによる。

2.4 部材を構成する板要素の最小・最大板厚

部材を構成する板要素の板厚は 3mm 以上、40mm 以下とする。ただし、接合部の板厚が部分的に増厚された箇所（5.2 と 6.3 参照）は、40mm 以下とする必要はない。

最小板厚は、米国で現在も使用されているアルミニウム合金製三角断面箱桁橋を構成する板の最小厚が 2.3mm²であることから 3mm としている。最大板厚は、これまでにアルミニウム合金土木構造物で使用された板厚の実績に基づいている。

2.5 部材の連結

- (1) 主要部材の連結については、作用力および部材の全強 [= (許容応力度) × (部材の総断面積)] の 75% の値のうち、大きい方の値に対して設計する。ただし、せん断力に対しては作用力を用いてよい。
- (2) 2次部材の連結については作用力に対して設計する。
- (3) 部材の連結構造は、次の事項を満たすように設計する。
 - 1) 応力の伝達が明確である。
 - 2) 連結部が部材軸に対してできる限り偏心しないようにする。
 - 3) 応力集中ができる限り生じないようにする。

参考文献

- 1) Aluminum Association: Aluminum Design Manual, PART I-A, Specifications for Aluminum Structures - Allowable Stress Design, 1994.
- 2) アルミ橋調査研究会：米国アルミニウム橋調査団報告書，2001.

3章 許容応力度

3.1 母材の許容引張応力度と許容せん断応力度

母材の許容引張応力度と許容せん断応力度を表-3.1.1に示す。

表-3.1.1 母材の許容引張応力度と許容せん断応力度

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	許容引張応力度 (N/mm ²)	許容せん断応力度 (N/mm ²)
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	68	39
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	68	39
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	132	76
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	132	76
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	65	37
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	65	37
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	120	70
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	111	64
		$6 < t \leq 12$	95	55
A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	120	70	

母材の許容引張応力度は、次式によって算出される（2.1 参照）。

$$\sigma_{ta} = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_{0.2}}{1.85}\right) \dots\dots\dots \text{(解 3.1.1)}$$

ここに、 σ_{ta} : 許容引張応力度
 σ_B : 引張強さ
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力

式(解 3.1.1)の引張強さ σ_B と 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ に対して、表-解 1.2.1 に示す JIS の下限値を使用している。ただし、押出型材の A5083-H112 の σ_B と $\sigma_{0.2}$ に対しては 1.2 の規定に従っている。許容引張応力度に対する 0.2%耐力の比、すなわち安全率 $\nu = \sigma_{0.2} / \sigma_{ta}$ の値を表-解 3.1.1 に示す。押出型材の A6061-T6 と A6005C-T6 は、式(解 3.1.1)の右辺の前項 $\sigma_B / 2.2$ で許容引張応力度が決まるので、安全率 ν は 1.85 より大きくなる。

欧州では、応力-ひずみ関係において明瞭な比例限度を示さない金属材料の比例限度として 0.01%耐力が用いられている¹⁾。一般に、アルミニウム合金材の応力-ひずみ関係は、次の Ramberg & Osgood 式によって与えられる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}}\right)^n \dots\dots\dots \text{(解 3.1.2)}$$

ここに、 ε : ひずみ
 σ : 応力
 E : ヤング係数
 n : ひずみ硬化パラメータ

したがって、0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ と 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の間には次の関係がある。

$$0.0001 = 0.002 \left(\frac{\sigma_{0.01}}{\sigma_{0.2}} \right)^n \dots\dots\dots (\text{解 3.1.3})$$

これより次式を得る.

$$\nu^* = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}} = \sqrt[n]{20} \dots\dots\dots (\text{解 3.1.4})$$

ひずみ硬化パラメータ n の値は、6000 系アルミニウム合金と A5083-O に対して、それぞれ 29.1 と 5.3 である²⁾。これらの値は、引張試験の結果に基づいて、非超過確率 5% に対する値である。 ν^* の値は、6000 系アルミニウム合金と A5083-O に対して、それぞれ 1.11 と 1.76 になる。

比例限度として 0.01% 耐力 $\sigma_{0.01}$ を採用すると、部材に塑性ひずみが生じないようにするためには、許容引張応力度 σ_{ta} が 0.01% 耐力 $\sigma_{0.01}$ 以下であることが求められる。 ν^* の値が ν の値より小さいので、 σ_{ta} は $\sigma_{0.01}$ より小さい。

許容せん断応力度は、von Mises の降伏条件に従って許容引張応力度の $1/\sqrt{3}$ 倍としている。

表-解 3.1.1 引張強さ σ_B ，0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ ，許容引張応力度 σ_{ta} ，安全率 ν の値

アルミニウム合金	板厚 t (mm)	σ_B (N/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	σ_{ta} (N/mm ²)	$\nu = \sigma_{0.2}/\sigma_{ta}$	
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	275	125	68	1.84
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	275	125	68	1.84
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	295	245	132	1.86
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	295	245	132	1.86
押出 形材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	275	120	65	1.85
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	275	120	65	1.85
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	265	245	120	2.04
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	245	205	111	1.85
		$6 < t \leq 12$	225	175	95	1.84
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	265	235	120	1.96

3.2 溶接部の許容引張応力度と許容せん断応力度

(1) 溶接による熱影響範囲（溶着金属と母材の熱影響部を合わせた部分）は、図-3.2.1 に示すように、突合せ溶接の場合、溶接中心から各側 25mm の範囲、すみ肉溶接の場合、溶接ルートから 25mm の範囲とする。

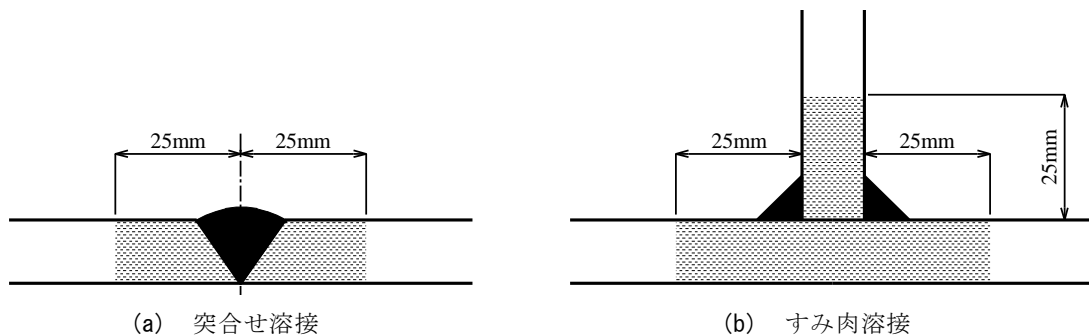


図-3.2.1 溶接による熱影響範囲

(2) 溶接による熱影響範囲の許容引張応力度と許容せん断応力度は、次式に示すように、熱影響部と溶接材料の許容応力度のうち小さい方の値とする。

$$\sigma_{wa} = \min(\sigma_{ha}, \sigma_{fa}) \dots\dots\dots (3.2.1)$$

$$\tau_{wa} = \min(\tau_{ha}, \tau_{fa}) \dots\dots\dots (3.2.2)$$

ここに、 σ_{wa}, τ_{wa} : それぞれ、熱影響範囲の許容引張応力度と許容せん断応力度
 σ_{ha}, τ_{ha} : それぞれ、熱影響部の許容引張応力度と許容せん断応力度
 σ_{fa}, τ_{fa} : それぞれ、溶接材料の許容引張応力度と許容せん断応力度

(3) 熱影響部の許容引張応力度と許容せん断応力度を表-3.2.1 に示す。表-3.2.1 に示す値は、MIG 溶接と1層のTIG 溶接に適用できる。

表-3.2.1 熱影響部の許容引張応力度と許容せん断応力度

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	許容引張応力度 (N/mm ²)	許容せん断応力度 (N/mm ²)
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	68	39
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	68	39
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	57	33
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	57	33
押出 形材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	65	37
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	65	37
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	57	33
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 12$	57	33
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	57	33

(4) 溶接材料の許容引張応力度と許容せん断応力度を表-3.2.2 に示す。

表-3.2.2 溶接材料の許容引張応力度と許容せん断応力度

溶接材料	許容引張応力度 (N/mm ²)	許容せん断応力度 (N/mm ²)
A5183	68	39
A5356	65	38

(1) 図-解 3.2.1 に示すように、溶着金属と熱影響部を合わせた部分を熱影響範囲と呼ぶ。熱処理によって強度が高められた6000系アルミニウム合金の熱影響部は、母材と比べて強度が低下する。MIG 溶接に対する熱影響範囲が溶接中心から各側 20~25mm であることが示されているので²⁾、本指針では、熱影響範囲に対して 25mm を採用している。AA³⁾では本指針と同様に熱影響範囲を溶接中心から各側 25mm、Eurocode 9⁴⁾では板厚および溶接の種類に応じて 20~40mm としている。

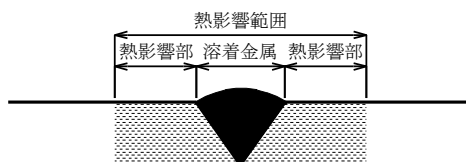


図-解 3.2.1 溶接による熱影響範囲

- (3) 熱影響部の引張強さおよび0.2%耐力は、表-解3.2.1(a), (b), (c)に示す海外の基準^{3),4),5)}を参考にして定めている。A6005C以外の6000系アルミニウム合金に対しては、AAの値を採用し、A6005Cについては、類似のアルミニウム合金であるA6005とA6005Aを参考にしてている。表-解3.2.1(d)の本指針の欄に示す引張強さ σ_B と0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ を式(解3.1.1)に用いて算出された値を熱影響部の許容引張応力度としている。熱影響部の許容せん断応力度は、母材と同様に、許容引張応力度の $1/\sqrt{3}$ 倍としている。
- (4) JIS Z 3232⁶⁾において、溶接材料A5183とA5356が使用された溶接継手の引張強さは、それぞれ275N/mm²以上、265N/mm²以上と規定されている。前者の引張強さはA5083-O材の引張強さと等しく、後者の引張強さはA5083-O材の引張強さより小さい。したがって、A5183の溶接材料の許容引張応力度は、表-3.1.1に示す板材のA5083-O材の許容引張応力度と同じ値とし、A5356の溶接材料に対しては、A5083-Oの許容引張応力度を0.96(=265/275)倍した値としている。溶接材料の許容せん断応力度は、許容引張応力度の $1/\sqrt{3}$ 倍としている。

表-解3.2.1 熱影響部の引張強さと0.2%耐力

指針	アルミニウム合金		板厚 t (mm)	σ_B (N/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)
(a) Eurocode 9	板材	A5083-O	$t \leq 50$	275	125
		A5083-H111	$50 < t \leq 80$	270	115
		A6061-T6 A6061-T651	$t \leq 80$	175	115
	押出型材	A5083-O A5083-H111 A5083-H112	$t \leq 200$	270	110
		A6061-T6	$t \leq 20$	175	115
		A6005A-T6	$t \leq 25$ (オープン断面)	165	115
$t \leq 10$ (ホロー断面)	165		115		
(b) AA	板材	A5083-O A5083-H116	$6.3 < t \leq 80$	270	115
		A6061-T6 A6061-T651	$0.25 < t \leq 100$	165	105
	押出型材	A5083-O A5083-H111	$t \leq 130$	270	110
		A6061-T6	—	165	105
		A6005A-T6	$t \leq 25$	165	105
(c) ISO/TR 11069	板材	A5083-H112	—	270	125
	押出型材	A6061-T6	—	195	120
		A6005A-T5	—	170	105
(d) 本指針	板材	A5083-O A5083-H112	$t \leq 40$	275	125
		A6061-T6 A6061-T651	$t \leq 40$	165	105
	押出型材	A5083-O A5083-H112	$t \leq 40$	275	120
		A6061-T6	$t \leq 40$	165	105
		A6005C-T5	$t \leq 12$	165	105
		A6005C-T6	$t \leq 6$	165	105

注：Eurocode 9の6000系アルミニウム合金に対する値は、板厚15mmまでのMIG溶接に対して適用され、板厚が15mmを超える場合には表中の値に0.8が乗じられた値が用いられる。TIG溶接に対しては、板厚が6mmまでは表中の値に0.8、6mmを超える場合には0.64が乗じられた値が用いられる。

3.3 摩擦攪拌接合部の許容引張応力度と許容せん断応力度

- (1) 摩擦攪拌接合による熱影響範囲（摩擦攪拌接合による攪拌部と母材の熱影響部を合わせた部分）は、図-3.3.1に示すように、接合中心から各側25mmの範囲とする。

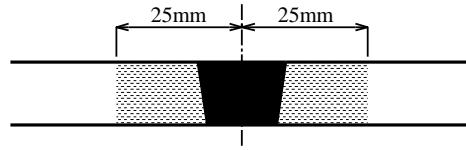


図-3.3.1 摩擦攪拌接合による熱影響範囲

- (2) 摩擦攪拌接合による熱影響範囲の許容引張応力度と許容せん断応力度は、それぞれ、表-3.2.1に示す、溶接による熱影響部の許容引張応力度と許容せん断応力度の値と同じとする。

図-解 3.3.1 に示すように、摩擦攪拌接合部の攪拌部と熱影響部を合わせた部分を熱影響範囲と呼ぶ。熱処理によって強度が高められた6000系アルミニウム合金の熱影響部の強度は、母材および攪拌部の強度より低い。

摩擦攪拌接合部の熱影響部の強度および熱影響範囲が文献 2), 7), 8) に示されている。摩擦攪拌接合は溶接に比べて入熱量が少ないので、熱影響部の強度低下および熱影響範囲は、溶接部のそれらより小さくなる。したがって、本指針では、摩擦攪拌接合部の強度と熱影響範囲を溶接部のそれらと同じとしている。

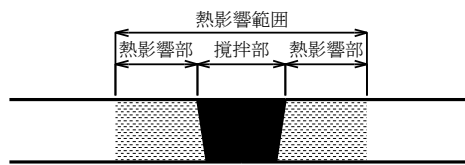


図-解 3.3.1 摩擦攪拌接合による熱影響範囲

3.4 母材と接合部が存在する場合に対する許容引張応力度と許容せん断応力度

- (1) 図-3.4.1に示すように、引張力またはせん断力を受ける部材に対して、断面の一部に溶接または摩擦攪拌接合による接合部が存在する場合の許容応力度を次に示す。

- 1) 接合線方向に引張力を受ける場合 [図-3.4.1(a)参照] ,

$$\sigma_{pa} = \sigma_{ta} - \frac{A_w}{A} (\sigma_{ta} - \sigma_{wa}) \dots\dots\dots (3.4.1)$$

- 2) 接合線に対して直角方向に引張力を受ける場合 [図-3.4.1(b)参照] , σ_{wa}

- 3) せん断力を受ける場合 [図-3.4.1(c)参照] , τ_{wa}

ここに、
 σ_{pa} : 接合部を有する部材の許容引張応力度
 σ_{ta} : 母材の許容引張応力度
 σ_{wa} : 熱影響範囲の許容引張応力度
 τ_{wa} : 熱影響範囲の許容せん断応力度

A : 部材の総断面積
 A_w : 熱影響範囲の断面積

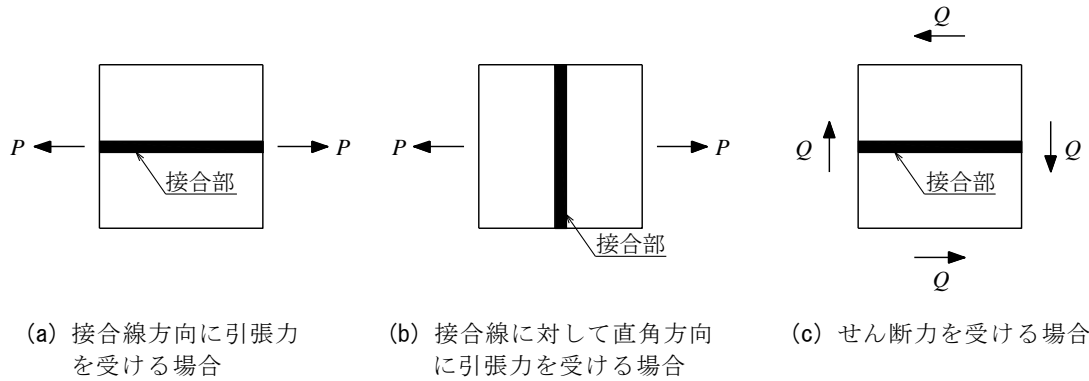


図-3.4.1 接合部を有する部材に作用する力

(2) 接合部が強度低下を起こす場合、5.2 または 6.2 の規定に従って接合部の板厚が部分的に増厚された接合部の許容引張応力度と許容せん断応力度は、それぞれ、母材の許容引張応力度と許容せん断応力度と同じにとることができる。ただし、この場合、部分的に増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとみなす。

(1) 図-3.4.1(a)に示す、接合線方向に引張力を受ける場合に対する安全性の照査は次式によってなされる。

$$P \leq \sigma_{ta}(A - A_w) + \sigma_{wa}A_w \dots\dots\dots (\text{解 3.4.1})$$

ここに、
 P : 引張力
 σ_{ta} : 母材の許容引張応力度
 σ_{wa} : 接合部の許容引張応力度
 A : 板の総断面積
 A_w : 接合部の断面積

式(解 3.4.1)は次式に変形できる。

$$\frac{P}{A} \leq \sigma_{ta} - \frac{A_w}{A}(\sigma_{ta} - \sigma_{wa}) \dots\dots\dots (\text{解 3.4.2})$$

作用引張応力度と許容引張応力度をそれぞれ

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (\text{解 3.4.3})$$

$$\sigma_{pa} = \sigma_{ta} - \frac{A_w}{A}(\sigma_{ta} - \sigma_{wa}) \dots\dots\dots (\text{解 3.4.4})$$

で定義すれば、式(解 3.4.1)の安全性の照査式は次式になる。

$$\sigma \leq \sigma_{pa} \dots\dots\dots (\text{解 3.4.5})$$

式(解 3.4.5)が示すように、式(3.4.1)で与えられる σ_{pa} は、作用引張応力度の計算に総断面積が使用された場合に対する許容引張応力度である。

3.5 両縁支持板の許容圧縮応力度

一様圧縮応力が作用する両縁支持板の許容圧縮応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = c_1 \eta \sigma_{cao} \dots\dots\dots (3.5.1)$$

ここに、 σ_{ca} : 一様圧縮応力が作用する両縁支持板の許容圧縮応力度
 σ_{cao} : 表-3.5.1 に示す、座屈が生じない場合に対する許容圧縮応力度
 c_1 : 表-3.5.1 に示す値
 η : 許容圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数

押出型材の A6061-T6 と A6005C-T6 に対して、式(3.5.1)の $c_1 \eta$ が 1 を超える場合には、その値を 1 とする。

許容圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数 η は次式で与えられる。

$$\eta = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.4 \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} & (R_1 < R < R_2) \\ 0.6 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (3.5.2a)$$

$$R = c_2 \frac{b}{t} \dots\dots\dots (3.5.2b)$$

ここに、 R_1, R_2, p : 表-3.5.2 に示す値
 c_2 : 表-3.5.1 に示す値
 b : 板幅 (図-3.5.1 参照)
 t : 板厚 (図-3.5.1 参照)

表-3.5.2 の部分増厚された接合板においては、5.2 または 6.2 の規定に従って接合部の板厚を部分的に増厚しなければならない。ただし、部分的に増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとみなす。

表-3.5.1 σ_{cao} および c_1 と c_2 の値

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	σ_{cao} (N/mm ²)	c_1	c_2
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	68	1	2.22×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	68	1	2.22×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	132	1	3.11×10^{-2}
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	132	1	3.11×10^{-2}
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	65	1	2.18×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	65	1	2.18×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	120	1.10	3.11×10^{-2}
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	111	1	2.85×10^{-2}
		$6 < t \leq 12$	95	1	2.63×10^{-2}
A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	120	1.06	3.05×10^{-2}	

表-3.5.2 R_1, R_2, p の値

アルミニウム合金	非接合板	部分増厚された接合板	接合板
5000系	B	-	C
6000系	A	A	-

識別記号	R_1	R_2	p
A	0.52	1.26	0.67
B	0.44	1.05	0.64
C	0.42	0.98	0.67

箱型断面部材のフランジとウェブおよび I 型断面部材のウェブの板幅の取り方を図-3.5.1 に示す。

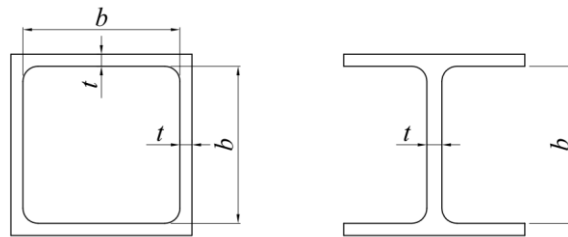


図-3.5.1 箱型断面部材のフランジとウェブおよび I 型断面部材のウェブ

本規定の両縁支持板の許容圧縮応力度は、次式によって算出される（2.1 参照）。

$$\sigma_{ca} = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_u}{1.85}\right) \dots\dots\dots (\text{解 } 3.5.1)$$

ここに、
 σ_{ca} : 一様圧縮応力が作用する両縁支持板の許容圧縮応力度
 σ_B : 引張強さ
 σ_u : 一様圧縮応力が作用する両縁支持板の耐荷力

式(3.5.1)の c_1 と式(3.5.2b)の c_2 は、それぞれ次式で与えられる。

$$c_1 = \frac{\sigma_{0.2}}{1.85\sigma_{cao}} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.5.2)$$

$$c_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{4} \frac{\sigma_{0.2}}{E}} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.5.3)$$

ここに、
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 σ_{cao} : 座屈が生じない場合に対する許容圧縮応力度
 E : ヤング係数
 μ : ポアソン比

表-3.5.1 に示す σ_{cao} の値は、表-3.1.1 に示す許容引張応力度と同じ値である。
 許容圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数 η は次式に基づいている⁹⁾。

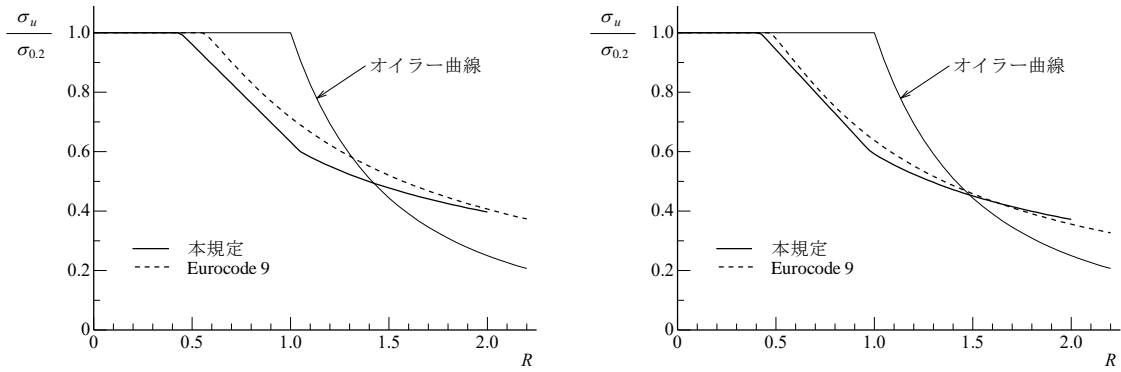
$$\eta = \frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.4 \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} & (R_1 < R < R_2) \\ 0.6 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(解 3.5.4a)}$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{4} \frac{\sigma_{0.2} b}{E t}} \dots\dots\dots \text{(解 3.5.4b)}$$

ここに、
 R : 幅厚比パラメータ
 R_1, R_2, p : 表-3.5.2 に示す値
 b : 板幅
 t : 板厚

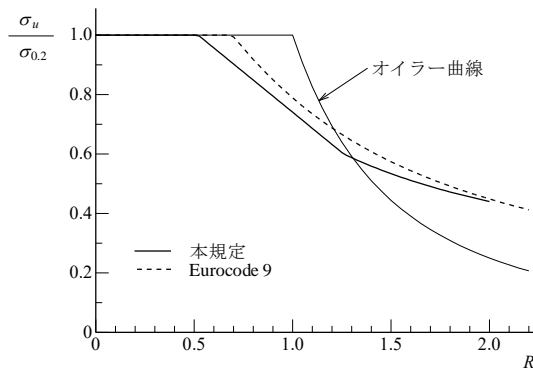
式(解 3.5.4)が与える圧縮耐荷力には、 $b/150$ の最大初期面外たわみが考慮されている。表-3.5.2 の 5000 系アルミニウム合金の接合板に対しては、両縁に溶接が施された場合の溶接残留応力が考慮されている。

本規定と Eurocode 9⁴⁾の耐荷力曲線の比較を図-解 3.5.1 に示す。Eurocode 9 の耐荷力曲線を式(解 3.5.5) に示す。本規定の耐荷力曲線が Eurocode 9 のそれより低い。これは、考慮された最大初期面外たわみの大きさが、本規定と Eurocode 9 との間で異なることによるものであることが文献 9)で指摘されている。



(a) 5000 系アルミニウム合金 (非接合板)

(b) 5000 系アルミニウム合金 (接合板)



(c) 6000 系アルミニウム合金 (非接合板)

図-解 3.5.1 本規定と Eurocode 9 の耐荷力曲線の比較

[Eurocode 9]

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_2}{R^2} & (R_1 < R) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(解 3.5.5)}$$

ここに、 R_1, Q_1, Q_2 : 表-解 3.5.1 に示す値

表-解 3.5.1 R_1, Q_1, Q_2 の値

アルミニウム合金	非接合板	接合板
5000 系	B	C
6000 系	A	B

識別記号	R_1	Q_1	Q_2
A	0.691	1.006	0.217
B	0.566	0.911	0.196
C	0.471	0.786	0.148

3.6 自由突出板の許容圧縮応力度

一様圧縮応力が作用する自由突出板の許容圧縮応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = c_1 \eta \sigma_{cao} \dots\dots\dots \text{(3.6.1)}$$

ここに、 σ_{ca} : 一様圧縮応力が作用する自由突出板の許容圧縮応力度

σ_{cao} : 表-3.6.1 に示す、座屈が生じない場合に対する許容圧縮応力度

c_1 : 表-3.6.1 に示す値

η : 許容圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数

押出型材の A6061-T6 と A6005C-T6 に対して、式(3.6.1)の $c_1 \eta$ が 1 を超える場合には、その値を 1 とする。

許容圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数 η は次式で与えられる。

$$\eta = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2 & (R_1 < R < R_2) \\ 0.65 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(3.6.2a)}$$

$$R = c_2 \frac{b}{t} \dots\dots\dots \text{(3.6.2b)}$$

ここに、 R_1, R_2, p : 表-3.6.2 に示す値

c_2 : 表-3.6.1 に示す値

b : 板幅 (図-3.6.1 参照)

t : 板厚 (図-3.6.1 参照)

表-3.6.2 の部分増厚された接合板においては、5.2 または 6.2 の規定に従って接合部の板厚を部分的に増厚しなければならない。ただし、部分的に増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとみなす。

表-3.6.1 σ_{cao} および c_1 と c_2 の値

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	σ_{cao} (N/mm ²)	c_1	c_2
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	68	1	6.82×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	68	1	6.82×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	132	1	9.55×10^{-2}
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	132	1	9.55×10^{-2}
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	65	1	6.68×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	65	1	6.68×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	120	1.10	9.55×10^{-2}
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	111	1	8.73×10^{-2}
		$6 < t \leq 12$	95	1	8.07×10^{-2}
A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	120	1.06	9.35×10^{-2}	

表-3.6.2 R_1 , R_2 , p の値

アルミニウム合金	非接合板	部分増厚された接合板	接合板
5000 系	B	-	B
6000 系	A	A	-

識別記号	R_1	R_2	p
A	0.60	1.24	0.16
B	0.40	1.02	0.20

I 型断面部材のフランジの板幅の取り方を図-3.6.1 に示す。

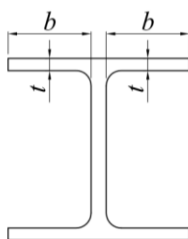


図-3.6.1 I 型断面部材のフランジ

本規定の自由突出板の許容圧縮応力度は、次式によって算出される (2.1 参照)。

$$\sigma_{ca} = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_u}{1.85}\right) \dots\dots\dots (\text{解 } 3.6.1)$$

ここに、 σ_{ca} : 一様圧縮応力が作用する自由突出板の許容圧縮応力度

σ_B : 引張強さ

σ_u : 一様圧縮応力が作用する自由突出板の耐荷力

式(3.6.1)の c_1 と式(3.6.2b)の c_2 は、それぞれ次式で与えられる。

$$c_1 = \frac{\sigma_{0.2}}{1.85\sigma_{cao}} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.6.2)$$

$$c_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{0.425} \frac{\sigma_{0.2}}{E}} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.6.3)$$

ここに、
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 σ_{cao} : 座屈が生じない場合に対する許容圧縮応力度
 E : ヤング係数
 μ : ポアソン比

表-3.6.1 に示す σ_{cao} の値は、表-3.1.1 に示す許容引張応力度と同じ値である。
 許容圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数 η は次式に基づいている¹⁰⁾。

$$\eta = \frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2 & (R_1 < R < R_2) \\ 0.65 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.6.4a)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{0.425} \frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{b}{t} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.6.4b)$$

ここに、
 R : 幅厚比パラメータ
 R_1, R_2, p : 表-3.6.2 に示す値
 b : 板幅
 t : 板厚

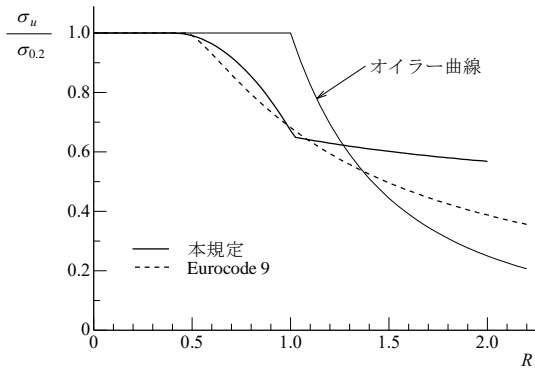
式(解 3.6.4) が与える圧縮耐荷力には、 $b/100$ の最大初期面外たわみが考慮されている。表-3.6.2 の 5000 系アルミニウム合金の接合板に対しては、支持縁に溶接が施された場合の溶接残留応力が考慮されている。

本規定と Eurocode 9⁴⁾ の耐荷力曲線の比較を図-解 3.6.1 に示す。Eurocode 9 の耐荷力曲線は式(解 3.5.5) と同じ形式で与えられ、 R_1, Q_1, Q_2 の値を表-解 3.6.1 に示す。本規定の耐荷力曲線は Eurocode 9 のそれよりかなり高い位置にある。

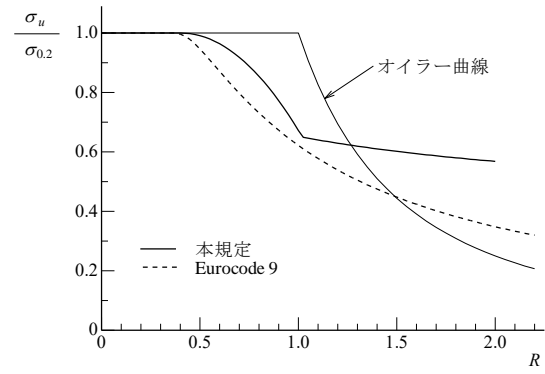
表-解 3.6.1 R_1, Q_1, Q_2 の値

アルミニウム合金	非接合板	接合板
5000 系	B	C
6000 系	A	B

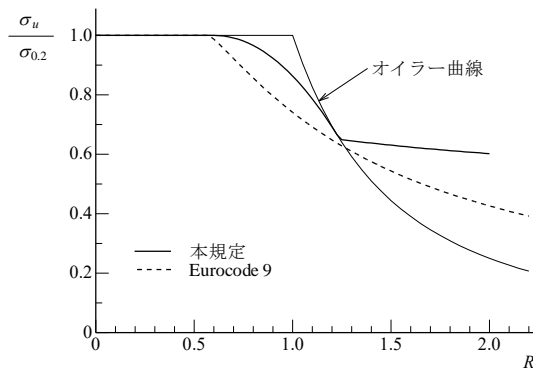
識別記号	R_1	Q_1	Q_2
A	0.579	0.964	0.223
B	0.482	0.868	0.186
C	0.386	0.771	0.149



(a) 5000系アルミニウム合金 (非接合板)



(b) 5000系アルミニウム合金 (接合板)



(c) 6000系アルミニウム合金 (非接合板)

図-解 3.6.1 本規定と Eurocode 9 の耐荷力曲線の比較

3.7 縦補剛された A6061-T6 両縁支持板の許容圧縮応力度

図-3.7.1 に示す，1 本の縦補剛材を有する，アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材の両縁支持板の許容圧縮応力度 σ_{ca} は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = \min(120, 132\eta) \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (3.7.1)$$

$$\eta = \begin{cases} 1 & \left(19 \leq \frac{b}{t} \leq 26\right) \\ 0.854 + 0.942R - 1.771R^2 + 0.877R^3 - 0.141R^4 & \left(26 < \frac{b}{t} \leq 129\right) \end{cases} \dots\dots\dots (3.7.2a)$$

$$R = \frac{b}{64.3t} \dots\dots\dots (3.7.2b)$$

ここに， b : 板幅 (図-3.7.1 参照)

t : 板厚 (図-3.7.1 参照)

式(3.7.1)の許容圧縮応力度を与える両縁支持板の断面形状は次式で与えられる。

$$\frac{t_r}{t} = 2.77 \times 10^{-3} \frac{b}{t} + 1.18 \left(19 \leq \frac{b}{t} \leq 129\right) \dots\dots\dots (3.7.3a)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \dots\dots\dots (3.7.3b)$$

ここに， b_r : 縦補剛材の板幅 (図-3.7.1 参照)

t_r : 縦補剛材の板厚 (図-3.7.1 参照)

式(3.7.3)が与える断面形状は，一様圧縮応力を受ける，1 本の縦補剛材を有するアルミニウム合金 A6061-T6 の長方形板の座屈強度を最大にするような形状である。

両縁支持板に作用する圧縮応力を算出する際には，縦補剛材の断面積を板の断面積に加える。

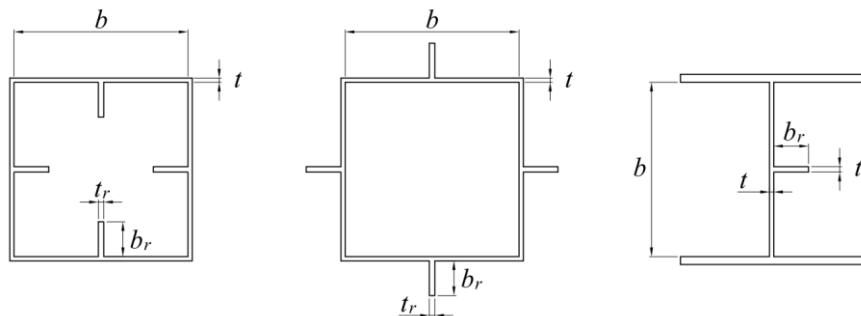


図-3.7.1 1 本の縦補剛材を有する両縁支持板

本規定の縦補剛材の許容圧縮応力度は，次式によって算出される (2.1 参照)。

$$\sigma_{ca} = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_u}{1.85}\right) \dots\dots\dots (\text{解 } 3.7.1)$$

ここに， σ_{ca} : 一様圧縮応力が作用する，縦補剛された A6061-T6 両縁支持板の許容圧縮応力度

σ_B : A6061-T6 材の引張強さ

σ_u : 一様圧縮応力が作用する，1 本の縦補剛材を有する A6061-T6 の両縁支持板の耐荷力
アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材の引張強さ σ_B は 265 N/mm² であり，耐荷力 σ_u は次式で与えられる¹⁾。

$$\sigma_u = 245\eta \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (\text{解 } 3.7.2)$$

ここに、 η : 式(3.7.2a)で与えられる係数

式(解 3.7.2)が与える耐荷力 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と縦補剛された両縁支持板の幅厚比 b/t の関係を図-解 3.7.1 に示す。 $\sigma_{0.2}$ は 0.2% 耐力であり、アルミニウム合金 A6061-T6 に対して 245 N/mm² である。同図には、次式で与えられる無補剛の両縁支持板の関係も示してある。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & \left(\frac{b}{t} \leq 17 \right) \\ 1.28 - 1.68 \times 10^{-2} \frac{b}{t} & \left(17 < \frac{b}{t} < 40 \right) \dots\dots\dots (\text{解 } 3.7.3) \\ \frac{7.16}{\left(\frac{b}{t} \right)^{0.67}} & \left(40 \leq \frac{b}{t} \leq 64 \right) \end{cases}$$

式(解 3.7.3)は、アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材に対して、式(3.5.2)によって与えられる。

式(解 3.7.2)が与える耐荷力は、縦補剛材と長方形板とが一体となって座屈するときの耐荷力であり、縦補剛材で区切られた板要素が局部座屈するときの耐荷力ではない。

式(3.7.3b)は、圧縮応力を受ける縦補剛材が局部座屈を起こさないようにするための条件であり、縦補剛材の幅厚比を、次式で与えられる、自由突出板が 0.2% 耐力を維持する限界の幅厚比に設定している。

$$\frac{b_r}{t_r} = \frac{R_1}{c_2} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.7.4)$$

式(解 3.7.4)は、式(3.6.2a)の最上段の式に基づき、アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材に対して、 $R_1 = 0.60$ と $c_2 = 9.55 \times 10^{-2}$ (表-3.6.1 と表-3.6.2 参照) である。

図-解 3.7.1 から分かるように、縦補剛された両縁支持板の耐荷力は、無補剛の両縁支持板の耐荷力よりかなり高い。

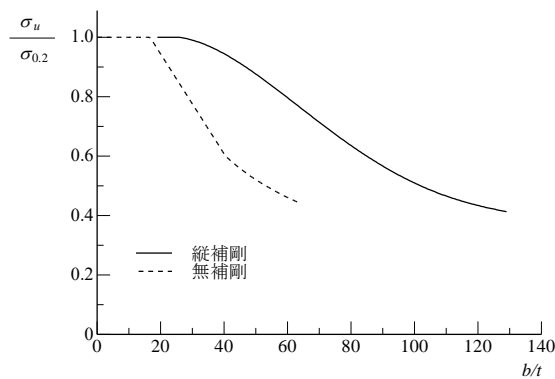


図-解 3.7.1 縦補剛された両縁支持板の耐荷力

縦補剛された両縁支持板の幅厚比 b/t には縦補剛材の断面積が考慮されていない。そこで、次式で定義される、縦補剛材の断面積を含めた長方形板の全断面積と同じ大きさの断面積を有する無補剛の両縁支持板の板厚、すなわち等価板厚を導入する。

$$t_e = \frac{A}{b} \dots\dots\dots (\text{解 } 3.7.5)$$

ここに、 t_e : 等価板厚

A : 縦補剛材の断面積を含めた両縁支持板の全断面積

この等価板厚を用いて、幅等価厚比 b/t_e が次式で定義される。

$$\frac{b}{t_e} = \frac{b^2}{A} \dots\dots\dots (解 3.7.6)$$

式(解 3.7.6)が示すように、幅等価厚比 b/t_e の値に対して、縦補剛材の断面積を含めた両縁支持板の全断面積は無補剛の両縁支持板の断面積と同じである。

式(3.7.3)で与えられる断面形状を有する両縁支持板の幅等価厚比 b/t_e と幅厚比 b/t の関係は次のように与えられる¹⁾。

$$\frac{b}{t_e} = 0.940 \frac{b}{t} - 5.78 \left(19 \leq \frac{b}{t} \leq 129 \right) \dots\dots\dots (解 3.7.7)$$

$\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と b/t_e の関係を図-解 3.7.2 に示す。同一の断面積に対して、縦補剛された両縁支持板の耐荷力は大きく上昇する。1本の縦補剛材を有する両縁支持板の耐荷力から2本の縦補剛材を有する両縁支持板の耐荷力の上昇は小さいので¹⁾、2本以上の縦補剛材を有する両縁支持板に対しては規定されていない。

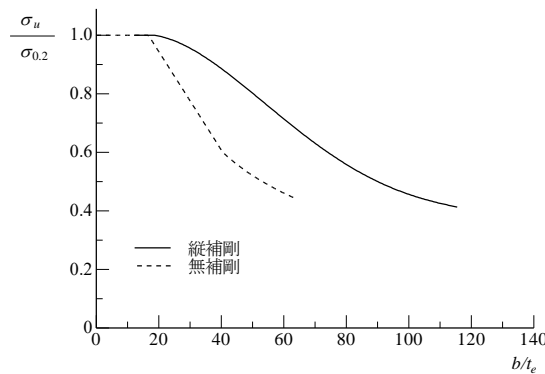


図-解 3.7.2 縦補剛された両縁支持板の $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と b/t_e の関係

参考文献

- 1) Mazzolani, F.M.: Aluminium Alloy Structures, Second edition, E & FN SPON, 1995.
- 2) 大倉一郎, 長尾隆史, 石川敏之, 萩澤亘保, 大隅心平: 構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008.
- 3) Aluminum Association: Aluminum Design Manual, PART I, Specification for Aluminum Structures, 2010.
- 4) Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part1-1 : General structural rules, 2007.
- 5) ISO/TR 11069: Aluminium structures – Material and design – Ultimate limit states under static loading, 1995.
- 6) JIS Z 3232 : アルミニウム及びアルミニウム合金の溶加棒及び溶接ワイヤ, 2009.
- 7) 大倉一郎, 萩澤亘保, 鳴尾亮, 戸田均: 摩擦攪拌接合で製作されたアルミニウム床版の疲労特性, 土木学会論文集, No.703, I-59, pp.255-266, 2002.
- 8) 萩澤亘保, 大倉一郎, 花崎昌幸, 大西弘志, 佐藤正典: アルミニウム合金の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に腐食が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.478-488, 2006.
- 9) 大倉一郎, 小笠原康二: 接合位置を考慮したアルミニウム合金板の圧縮耐荷力, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.111-121, 2010.
- 10) 西森文子, 大倉一郎: 圧縮を受けるアルミニウム合金自由突出板の耐荷力, ALST 研究レポート, No.34, 2014.

- 11) 西井智紀, 大倉一郎: 圧縮を受ける縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状と耐荷力, ALST 研究レポート, No.48, 2017.

4 章 部材の設計

4.1 圧縮部材の許容軸方向圧縮応力度

2軸対称断面のI型断面または箱型断面の圧縮部材の許容軸方向圧縮応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = c_1 Q \eta \sigma_{cao} \dots\dots\dots (4.1.1)$$

- ここに、
 σ_{ca} : 2軸対称断面の圧縮部材の許容軸方向圧縮応力度
 σ_{cao} : 表-4.1.1に示す、座屈が生じない場合に対する許容圧縮応力度
 c_1 : 表-4.1.1に示す値
 Q : 式(4.1.4)で与えられる係数
 η : 許容軸方向圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数

押出型材のA6061-T6とA6005C-T6に対して、式(4.1.1)の $c_1 Q \eta$ が1を超える場合には、その値を1とする。

許容軸方向圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数 η は次式で与えられる。

$$\eta = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda^3 + a_4 \lambda^4 & (\lambda_1 < \lambda \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (4.1.2a)$$

$$\lambda = c_2 \sqrt{Q} \frac{l}{r} \dots\dots\dots (4.1.2b)$$

- ここに、
 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$: 表-4.1.2に示す値
 c_2 : 表-4.1.1に示す値
 l : 圧縮部材の有効座屈長
 r : 圧縮部材の断面二次半径

表-4.1.2の部分増厚接合部を持つ部材においては、5.2または6.2の規定に従って接合部の板厚を部分的に増厚しなければならない。ただし、部分的に増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとみなす。

圧縮部材の有効座屈長 l は次式で与えられる。

$$l = KL \dots\dots\dots (4.1.3)$$

- ここに、
 K : 有効座屈長係数
 L : 部材の支持点間の長さまたは片持ち部材に対してはその長さ
 有効座屈長係数 K の値は、部材端の拘束状態に基づいて与えられる。

表-4.1.1 σ_{cao} および c_1 と c_2 の値

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	σ_{cao} (N/mm ²)	c_1	c_2
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	68	1	1.35×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	68	1	1.35×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	132	1	1.88×10^{-2}
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	132	1	1.88×10^{-2}
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	65	1	1.32×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	65	1	1.32×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	120	1.10	1.88×10^{-2}
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	111	1	1.72×10^{-2}
		$6 < t \leq 12$	95	1	1.59×10^{-2}
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	120	1.06	1.84×10^{-2}

表-4.1.2 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$ の値

アルミニウム合金	接合部を持たない部材	部分増厚接合部を持つ部材	接合部を持つ部材
5000系	B	-	C
6000系	A	A	-

識別記号	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	λ_1
A	1.01	-0.03	-0.30	-0.04	0.05	0.13
B	1.00	0.10	-1.13	0.72	-0.14	0.09
C	1.00	0.10	-1.33	0.88	-0.17	0.09

係数 Q は次式で与えられる.

$$Q = \frac{\sum \eta_i A_i}{\sum A_i} \dots \dots \dots (4.1.4)$$

ここに、 η_i : 圧縮部材を構成する板要素 i の許容圧縮応力度を与える係数

A_i : 圧縮部材を構成する板要素 i の断面積

両縁支持板, 自由突出板, 縦補剛された A6061-T6 両縁支持板に対して, それぞれ式(3.5.2), 式(3.6.2), 式(3.7.2)を係数 η_i に使用する.

本規定の 2 軸対称断面の I 型断面または箱型断面の圧縮部材の許容軸方向圧縮応力度は, 次式によって算出される (2.1 参照) .

$$\sigma_{ca} = \min \left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_u}{1.85} \right) \dots \dots \dots (\text{解 } 4.1.1)$$

ここに、 σ_{ca} : 2 軸対称断面の I 型断面または箱型断面の圧縮部材の許容軸方向圧縮応力度

σ_B : 引張強さ

σ_u : 2 軸対称断面の I 型断面または箱型断面の部材の圧縮耐荷力

式(4.1.1)の c_1 と式(4.1.2b)の c_2 は, それぞれ次式で与えられる.

$$c_1 = \frac{\sigma_{0.2}}{1.85\sigma_{cao}} \dots \dots \dots (\text{解 } 4.1.2)$$

$$c_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \dots \dots \dots (\text{解 } 4.1.3)$$

ここに、 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 σ_{cao} : 座屈が生じない場合に対する許容圧縮応力度
 E : ヤング係数

表-4.1.1 に示す σ_{cao} の値は、表-3.1.1 に示す許容引張応力度と同じ値である。

許容軸方向圧縮応力度 σ_{ca} を与える係数 η は次式に基づいている。

$$\eta = \frac{\sigma_u}{Q\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 & (\lambda_1 < \lambda \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(解 4.1.4a)}$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Q\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \dots\dots\dots \text{(解 4.1.4b)}$$

ここに、 λ : 細長比パラメータ
 Q : 式(4.1.4)で与えられる係数
 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$: 表-4.1.2 に示す値
 l : 部材の有効座屈長
 r : 部材の断面二次半径

$Q=1$ の場合、式(解 4.1.4)は、部材を構成する板要素の局部座屈の影響を考慮しない、2軸対称断面の I 型断面または箱型断面の圧縮部材の全体座屈に対する耐荷力を与える。最初に部材の全体座屈に対する耐荷力について述べ、続いて Q について述べる。

部材の全体座屈に対する耐荷力は、図-解 4.1.1 に示すように、板幅中央の位置（一点長鎖線で表示）で鉛直方向の変位が拘束された平板部材が、圧縮を受けて水平方向に座屈する場合に対して与えられたものである¹⁾。耐荷力には、平板部材の水平方向に部材長の 1/1000 倍の最大初期たわみが考慮されている。この耐荷力は、圧縮を受ける 2 軸対称の I 型断面および箱型断面の押出形材に対しても、その耐荷力を与えることが明らかにされている²⁾。

本規定と Eurocode 9³⁾の耐荷力曲線および AA⁴⁾の座屈強度曲線の比較を図-解 4.1.2 に示す。文献 5)で与えられている 5000 系アルミニウム合金および 6000 系アルミニウム合金の試験値が、それぞれ図-解 4.1.2(a)と(b)に記載されている。試験値は、圧縮を受ける I 型断面部材が弱軸回りに座屈する場合に対する耐荷力である。一つの細長比パラメータ λ の値に対して 9 体以上の試験結果の平均値および平均値 $\pm 2 \times$ 標準偏差の値が各図にプロットされている。他方、Eurocode 9 の耐荷力曲線および AA の座屈強度曲線を、それぞれ式(解 4.1.5)、式(解 4.1.6)に示す。Eurocode 9 では、圧縮を受けるアルミニウム合金部材の耐荷力の評価式として Perry-Robertson 式が採用されている。

図-解 4.1.2(a)と(b)の各図から分かるように、AA の座屈強度曲線は、本規定と Eurocode 9 の耐荷力曲線より高い位置にある。図-解 4.1.2(a)に示すように、5000 系アルミニウム合金に対して、細長比パラメータ λ が 0.5 以下の範囲を除いて、本規定と Eurocode 9 の耐荷力曲線は近い。図-解 4.1.2(b)に示すように、6000 系アルミニウム合金に対して、本規定の耐荷力曲線は、平均値 $-2 \times$ 標準偏差の試験値の近傍を通過する。Eurocode 9 は、6000 系のみならず 2000 系と 7000 系のアルミニウム合金の試験結果も含めて、平均値 $-2 \times$ 標準偏差の試験値の近傍を通過するように耐荷力曲線を設定している⁶⁾。したがって、Eurocode 9 の耐荷力曲線は本規定の耐荷力曲線より幾分低い位置にある。

表-4.1.2 の 5000 系アルミニウム合金の接合部を持つ部材の識別記号 C に対する $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$ の値は、4.2 の表-4.2.2 において、5000 系アルミニウム合金の接合桁に対する識別記号 C に対する値を採用している。

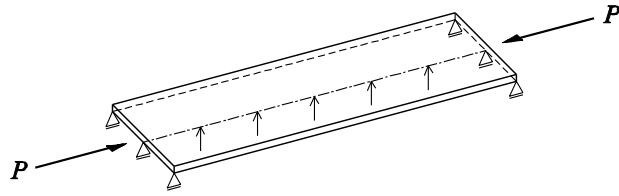
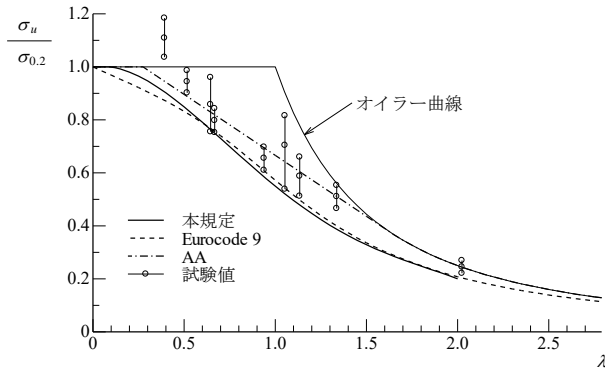
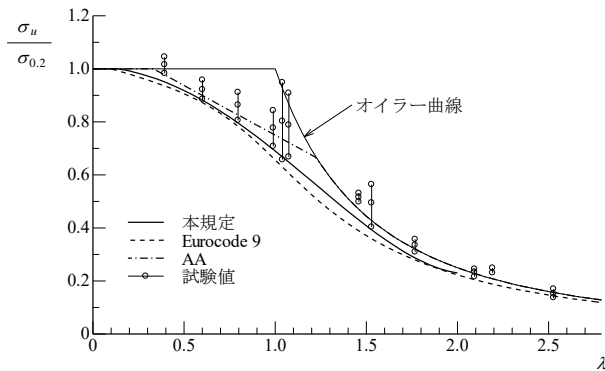


図-解 4.1.1 圧縮を受ける平板部材



(a) 5000系アルミニウム合金 (接合部を持たない部材)



(b) 6000系アルミニウム合金 (接合部を持たない部材)

図-解 4.1.2 本規定, Eurocode 9, AA の耐荷力曲線の比較

[Eurocode 9]

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_0) \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} & (\lambda_0 < \lambda) \end{cases} \dots\dots\dots (解 4.1.5)$$

ここに, $\phi = 0.5 [1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2]$
 λ_0, α : 表-解 4.1.1 に示す値

表-解 4.1.1 λ_0 と α の値

アルミニウム合金	λ_0	α
非熱処理合金	0.00	0.32
熱処理合金	0.10	0.20

[AA]

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} B_c - D_c \left(\frac{l}{r} \right) \leq \sigma_{0.2} & \left(\frac{l}{r} \leq S_2 \right) \\ \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{l}{r} \right)^2} & \left(\frac{l}{r} > S_2 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{解 4.1.6})$$

ここに、 σ_{cr} : 座屈強度

B_c, D_c, S_2 : 表-解 4.1.2 に示す値

E : ヤング係数 (5000 系および 6000 系アルミニウム合金に対して、それぞれ 7.17×10^4 N/mm², 6.96×10^4 N/mm²)

表-解 4.1.2 B_c, D_c, S_2 の値

アルミニウム合金	B_c	D_c	S_2
非熱処理合金	$\sigma_{0.2} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{6900}} \right)$	$\frac{B_c}{20} \sqrt{\frac{6B_c}{E}}$	$\frac{2B_c}{3D_c}$
熱処理合金	$\sigma_{0.2} \left(1 + \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{15510}} \right)$	$\frac{B_c}{10} \sqrt{\frac{B_c}{E}}$	$0.41 \frac{B_c}{D_c}$

$\sigma_{0.2}$ の単位 : N/mm²

有効座屈長係数 K の参考値を表-解 4.1.3 に示す。この値は、両端単純支持と異なる境界条件に対するオイラーの座屈強度を、両端単純支持の境界条件に対する座屈強度と等しくすることによって与えられる。この値が耐荷力に対して適用できるか否かが調べられ、表-解 4.1.3 の支持条件が 1 と 2 に対しては、同表の値を用いて耐荷力曲線を表すことができるが、支持条件 5 に対しては、A6061-T6 と A5083-O に対してそれぞれ 2.10, 2.19 を用いることにより、耐荷力を安全側に評価できることが示されている⁷⁾。

表-解 4.1.3 有効座屈長係数 K の参考値

支持条件		1	2	3	4	5	6
上端	回転	固定	自由	固定	自由	自由	固定
	水平変位	固定	固定	自由	固定	自由	自由
下端	回転	固定	固定	固定	自由	固定	自由
	水平変位	固定	固定	固定	固定	固定	固定
有効座屈長係数 K		0.5	0.7	1	1	2	2

注：各図の破線は、座屈波形の概略形状を表す。

圧縮を受ける部材の全体と局所の連成耐荷力の評価式として、AA 基準⁴⁾では次式が採用されている。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} \right)^{\frac{2}{3}} & \left(\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} > \frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} \right) \\ \frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} & \left(\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} \leq \frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} \right) \end{cases} \dots\dots\dots \text{(解 4.1.7)}$$

ここに、 σ_u : 部材の耐荷力
 σ_{gu} : 部材の全体座屈に対する耐荷力
 σ_{lu} : 部材の局部座屈に対する耐荷力

AA 基準では、部材を構成する板要素の耐荷力の中で最も小さいものを σ_{lu} に使用することが規定されている。

他方、Eurocode 9³⁾では、部材の連成耐荷力の評価式として次式で与えられる Q ファクター法が採用されている。

$$\frac{\sigma_u}{Q\sigma_{0.2}} = f(\lambda) \dots\dots\dots \text{(解 4.1.8)}$$

ここに、 Q : 無次元で表された短柱の圧縮耐荷力
 $f(\lambda)$: 部材の全体座屈に対する耐荷力を与える関数
 λ : 式(解 4.1.4b)で定義される細長比パラメータ

圧縮を受ける部材の全体と局所の連成耐荷力の評価式として、AA 基準の評価式と Q ファクター法のどちらが適切な評価を与えているか、2 軸対称断面の I 型断面および箱型断面の圧縮部材ならびに縦補剛された A6061-T6 の圧縮部材に対して調べられ、Q ファクター法が AA 基準の評価式より優れていることが示されている⁸⁾。したがって、本規定では Q ファクター法が採用されている。さらに、文献 8)では、無次元で表示された短柱の圧縮耐荷力 Q が式(4.1.4)で、安全側に評価できることが示されている。

式(4.1.4)の適用の仕方を図-解 4.1.3 の I 型断面部材を例として次に示す。

$$Q = \frac{2\eta_f A_f + \eta_w A_w}{2A_f + A_w} \dots\dots\dots \text{(解 4.1.9)}$$

ここに、 η_f, η_w : それぞれ、式(3.6.2)、式(3.5.2)で与えられる係数
 A_f, A_w : それぞれ、フランジとウェブの断面積

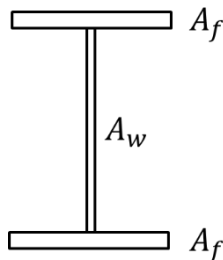


図-解 4.1.3 I 型断面部材

4.2 ウェブが無補剛の桁の許容曲げ圧縮応力度

ウェブが補剛されず、上下対称の I 型断面桁の許容曲げ圧縮応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = \sigma_{fa} g_w \dots\dots\dots (4.2.1a)$$

$$\sigma_{fa} = \min(\sigma_{fga}, \sigma_{fla}) \dots\dots\dots (4.2.1b)$$

$$\sigma_{fga} = c_1 \eta \sigma_{cao} \dots\dots\dots (4.2.1c)$$

- ここに、
 σ_{ca} : 上下対称の I 型断面桁の許容曲げ圧縮応力度
 σ_{fa} : 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮した、圧縮フランジの横倒れ座屈に対する許容圧縮応力度
 σ_{fga} : 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮しない、圧縮フランジの横倒れ座屈に対する許容圧縮応力度
 σ_{fla} : 圧縮フランジの局部座屈に対する許容圧縮応力度
 σ_{cao} : 表-4.2.1 に示す、局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する圧縮フランジの許容圧縮応力度
 g_w : 局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数
 c_1 : 表-4.2.1 に示す値
 η : 許容圧縮応力度 σ_{fga} を与える係数

押出型材の A6061-T6 と A6005C-T6 に対して、式(4.2.1c)の $c_1 \eta$ が 1 を超える場合には、その値を 1 とする。

許容圧縮応力度 σ_{fga} を与える係数 η は次式で与えられる。

$$\eta = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda^3 + a_4 \lambda^4 & (\lambda_1 < \lambda \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (4.2.2a)$$

$$\lambda = c_2 K \frac{l}{B_f} \dots\dots\dots (4.2.2b)$$

$$K = k_0 + k_1 \frac{A_w}{A_f} \left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right) \dots\dots\dots (4.2.2c)$$

- ここに、
 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$: 表-4.2.2 に示す値
 c_2 : 表-4.2.1 に示す値
 l : 圧縮フランジの固定点間距離
 B_f : 圧縮フランジの全幅 (図-4.2.1 参照)
 A_f : 圧縮フランジの断面積 (図-4.2.1 参照)
 A_w : ウェブの断面積 (図-4.2.1 参照)
 k_0, k_1 : 表-4.2.3 に示す値

表-4.2.2 の部分増厚接合されたウェブを有する桁においては、5.2 または 6.2 の規定に従ってウェブの接合部の板厚を部分的に増厚しなければならない。ただし、部分的に増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとみなす。すなわち、ウェブの断面積 A_w を求める際、部分的に増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとする。

表-4.2.1 σ_{cao} および c_1 と c_2 の値

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	σ_{cao} (N/mm ²)	c_1	c_2
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	68	1	4.66×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	68	1	4.66×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	132	1	6.52×10^{-2}
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	132	1	6.52×10^{-2}
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	65	1	4.57×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	65	1	4.57×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	120	1.10	6.52×10^{-2}
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	111	1	5.97×10^{-2}
		$6 < t \leq 12$	95	1	5.51×10^{-2}
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	120	1.06	6.39×10^{-2}

表-4.2.2 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$ の値

アルミニウム合金	非接合桁	部分増厚接合されたウェブを有する桁	接合桁
5000系	B	-	C
6000系	A	A	-

識別記号	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	λ_1
A	1.01	-0.03	-0.30	-0.04	0.05	0.13
B	1.00	0.10	-1.13	0.72	-0.14	0.09
C	1.00	0.10	-1.33	0.88	-0.17	0.09

表-4.2.3 k_0 と k_1 の値

アルミニウム合金	k_0	k_1
5000系	0.91	0.09
6000系	0.87	0.13

圧縮フランジの局部座屈に対する許容圧縮応力度 σ_{fa} は、片側の圧縮フランジを自由突出板とみなすことにより、3.6 で与えられる。ただし、片側の圧縮フランジの幅厚比は表-4.2.4 に示す値以下とする。

表-4.2.4 片側の圧縮フランジの最大幅厚比

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	b_f/t_f
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	17.5
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	17.5
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	12.5
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	12.5
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	17.9
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	17.9
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	12.5
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	13.7
		$6 < t \leq 12$	14.8
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	12.8

b_f : 片側の圧縮フランジの板幅 (図-4.2.1 参照)

t_f : 片側の圧縮フランジの板厚 (図-4.2.1 参照)

局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数 g_w は次式で与えられる。

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_w}{4A_f}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(\frac{b_w}{t_w} \leq \beta_0 \right) \\ 1 - \frac{\frac{A_w}{A_f} \frac{b_w - \beta_1}{t_w - \beta_1}}{12 \left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right) \beta_1 - \beta_0} & \left(\beta_0 < \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_2 \right) \dots\dots\dots (4.2.3) \\ \frac{1 + \frac{2A_w}{15A_f} \left(\beta_2 \frac{t_w}{b_w} \right)^p}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(\beta_2 < \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_3 \right) \end{cases}$$

ここに、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, p$: 表-4.2.5 に示す値
 b_w : ウェブの板幅 (図-4.2.1 参照)
 t_w : ウェブの板厚 (図-4.2.1 参照)

表-4.2.5 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, p$ の値

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	β_0	β_1	β_2	β_3	p
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	30	90	114	220	0.67
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	30	90	114	220	0.67
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	27	74	93	157	0.69
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	27	74	93	157	0.69
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	30	92	117	225	0.67
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	30	92	117	225	0.67
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	27	74	93	157	0.69
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	29	81	101	172	0.69
		$6 < t \leq 12$	32	87	110	186	0.69
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	27	75	95	160	0.69

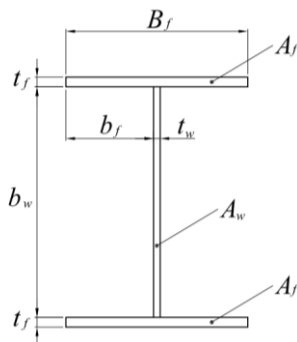


図-4.2.1 I型断面桁

曲げを受ける I 型断面桁の耐荷力は次式で与えられる^{9),10),11)}。

$$\frac{M_u}{M_y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} g_w \dots\dots\dots (\text{解 4.2.1a})$$

$$\sigma_{fu} = \min(\sigma_{fgu}, \sigma_{flu}) \dots\dots\dots (\text{解 4.2.1b})$$

ここに、
 M_u : 桁の終局曲げモーメント
 M_y : 桁の降伏曲げモーメント (= $\sigma_{0.2}W$)
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 W : 桁の弾性断面係数
 σ_{fu} : 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮した、圧縮フランジの横倒れ耐荷力
 σ_{fgu} : 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮しない、圧縮フランジの横倒れ耐荷力
 σ_{flu} : 圧縮フランジの局部座屈に対する耐荷力
 g_w : 局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数

本規定の上下対称の I 型断面桁の許容曲げ圧縮応力度は、式(解 4.2.1)に基づいて、次式によって算出される(2.1参照)。

$$\sigma_{ca} = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_{fu}}{1.85}\right) \times g_w \dots\dots\dots (\text{解 4.2.2})$$

ここに、
 σ_{ca} : 上下対称の I 型断面の桁の許容曲げ圧縮応力度
 σ_B : 引張強さ

式(4.2.1c)の c_1 と式(4.2.2b)の c_2 は、それぞれ次式で与えられる。

$$c_1 = \frac{\sigma_{0.2}}{1.85\sigma_{cao}} \dots\dots\dots (\text{解 4.2.3})$$

$$c_2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \dots\dots\dots (\text{解 4.2.4})$$

ここに、
 σ_{cao} : 局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する圧縮フランジの許容圧縮応力度
 E : ヤング係数

表-4.2.1 に示す σ_{cao} の値は、表-3.1.1 に示す許容引張応力度と同じ値である。

許容圧縮応力度 σ_{fgu} を与える係数 η は次式に基づいている^{9),10)}。

$$\eta = \frac{\sigma_{fgu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 & (\lambda_1 < \lambda \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{解 4.2.5a})$$

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \dots\dots\dots (\text{解 4.2.5b})$$

ここに、
 λ : 細長比パラメータ
 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$: 表-4.2.2 に示す値
 l : 圧縮フランジの固定点間距離
 B_f : 圧縮フランジの全幅 (図-4.2.1 参照)
 K : 式(4.2.2c)で与えられる係数

表-4.2.2 の 5000 系アルミニウム合金の接合桁に対しては、上下フランジとウェブがすみ肉溶接によって連結された場合の溶接残留応力が考慮されている¹⁰⁾。表-4.2.2 の $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \lambda_1$ の値は、表-4.1.2 と同じである。式(解 4.2.5b)の係数 K は式(4.2.2c)で与えられ、圧縮フランジの横倒れ耐荷力に、圧縮を受けるウェブの影響を考慮するための係数である^{9),10)}。

式(解 4.2.1b)は、3.6の式(解 3.6.4b)で与えられる幅厚比パラメータ R が 1.1925 以下の場合に適用できる¹¹⁾。 $R=1.1925$ に対して式(解 3.6.4b)を解いて得られる幅厚比 b_f/t_f の値が表-4.2.4に与えられている。

局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数 g_w は次式に基づいている^{9),10)}。

$$g_w = \frac{1 + \frac{A_w \sigma_{wu}}{6A_f \sigma_{0.2}}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} \dots\dots\dots (解 4.2.6)$$

ここに、 σ_{wu} : 弾性断面係数を基準とした、面内曲げを受ける長方形板の耐荷力
 A_f : 圧縮フランジの断面積 (図-4.2.1 参照)
 A_w : ウェブの断面積 (図-4.2.1 参照)

面内曲げを受ける長方形板の耐荷力 σ_{wu} は次式で与えられる^{9),10),12)}。

$$\frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (R \leq R_0) \\ 1.5 - 0.5 \frac{R - R_0}{R_1 - R_0} & (R_0 < R < R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (解 4.2.7a)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2} b_w}{23.9 E t_w}} \dots\dots\dots (解 4.2.7b)$$

ここに、 R : 幅厚比パラメータ
 R_0, R_1, R_2, p : 表-解 4.2.1 に示す値
 b_w : 長方形板の板幅
 t_w : 長方形板の板厚

表-解 4.2.1 R_0, R_1, R_2, p の値

アルミニウム合金	R_0	R_1	R_2	p
5000 系	0.27	0.82	1.04	0.67
6000 系	0.34	0.94	1.18	0.69

式(解 4.2.7)を式(解 4.2.6)に代入することにより、式(4.2.3)が与えられる。 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ は、それぞれ次式で与えられる。

$$\beta_0 = \pi \sqrt{\frac{23.9 E}{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2}}} R_0 \dots\dots\dots (解 4.2.8)$$

$$\beta_1 = \pi \sqrt{\frac{23.9 E}{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2}}} R_1 \dots\dots\dots (解 4.2.9)$$

$$\beta_2 = 1.4\beta_1 - 0.4\beta_0 \dots\dots\dots (解 4.2.10)$$

$$\beta_3 = 2\pi \sqrt{\frac{23.9 E}{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2}}} \dots\dots\dots (解 4.2.11)$$

4.3 桁の許容せん断応力度

(1) 中間垂直補剛材を持たない，両端単純支持された上下対称の I 型断面桁の許容せん断応力度は次式で与えられる．

$$\tau_a = c_1 \eta \tau_{cao} \dots\dots\dots (4.3.1)$$

ここに， τ_a : 上下対称の I 型断面桁の許容せん断応力度
 τ_{cao} : 表-4.3.1 に示す，座屈がウェブに発生しない場合に対する許容せん断応力度
 c_1 : 表-4.3.1 に示す値
 η : 許容せん断応力度 τ_a を与える係数

押出型材の A6061-T6 と A6005C-T6 に対して，式(4.3.1)の $c_1 \eta$ が 1 を超える場合には，その値を 1 とする．

許容せん断応力度 τ_a を与える係数 η は次式で与えられる．

$$\eta = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{a_1}{R} - \frac{a_2}{R^2} & (R_1 < R \leq R_2) \dots\dots\dots (4.3.2a) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 < R \leq 3) \end{cases}$$

$$R = \frac{c_2 F}{\sqrt{5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a_L}{b_w} \right)^2}}} \frac{b_w}{t_w} \quad \left(1 \leq \frac{a_L}{b_w} \right) \dots\dots\dots (4.3.2b)$$

$$F = 8.5 \times 10^{-3} \frac{A_w a_L}{A_f b_w} + 0.75 \leq 1 \quad \left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right) \dots\dots\dots (4.3.2c)$$

ここに， R_1, R_2, a_1, a_2, p : 表-4.3.2 に示す値
 c_2 : 表-4.3.1 に示す値
 b_w : ウェブの板幅 (図-4.3.1 参照)
 t_w : ウェブの板厚 (図-4.3.1 参照)
 F : フランジが桁のせん断耐荷力に及ぼす影響を考慮するための係数
 A_f : フランジ 1 枚の断面積 (図-4.3.1 参照)
 A_w : ウェブの断面積 (図-4.3.1 参照)
 a_L : 端補剛材間の距離 (図-4.3.2 参照)

端補剛材の設計は 4.7.1 の規定に従う．

表-4.3.1 τ_{ca0} および c_1 と c_2 の値

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	τ_{ca0} (N/mm ²)	c_1	c_2
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	39	1	3.38×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	39	1	3.38×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	76	1	4.73×10^{-2}
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	76	1	4.73×10^{-2}
押出 型材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	37	1	3.31×10^{-2}
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	37	1	3.31×10^{-2}
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	70	1.10	4.73×10^{-2}
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	64	1	4.33×10^{-2}
		$6 < t \leq 12$	55	1	4.00×10^{-2}
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	70	1.06	4.63×10^{-2}

表-4.3.2 R_1 , R_2 , a_1 , a_2 , p の値

アルミニウム合金	R_1	R_2	a_1	a_2	p
5000 系	0.53	0.92	1.02	0.26	0.76
6000 系	0.60	1.09	1.20	0.36	0.81

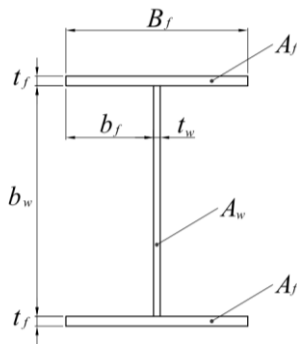


図-4.3.1 I型断面桁

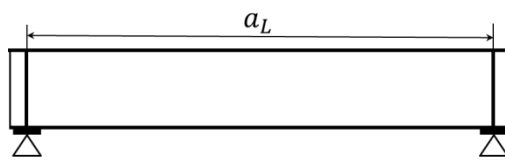


図-4.3.2 中間垂直補剛材を持たない桁

- (2) 6000 系アルミニウム合金材は、溶接部が強度低下を起こす。したがって、中間垂直補剛材を溶接で 6000 系アルミニウム合金のウェブに連結すると、溶接がウェブを横断し、桁全体の強度が低下するので、6000 系アルミニウム合金の桁に中間垂直補剛材を設けることはできない。
- (3) 5000 系アルミニウム合金の板材で、中間垂直補剛材を有する、両端単純された上下対称の I 型断面桁の許容せん断応力度 τ_a は次式で与えられる。

$$\tau_a = 39\eta \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (4.3.3a)$$

$$\eta = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.53) \\ \frac{1.02}{R} - \frac{0.26}{R^2} & (0.53 < R \leq 0.92) \\ \frac{0.75}{R^{0.76}} & (0.92 < R \leq 3) \end{cases} \dots\dots\dots (4.3.3b)$$

$$R = 3.38 \times 10^{-2} \frac{F}{\sqrt{k}} \frac{b_w}{t_w} \quad \left(\frac{b_w}{t_w} \leq 220 \right) \dots\dots\dots (4.3.3c)$$

$$F = \begin{cases} \left(0.022 \frac{A_w}{A_f} - 0.167 \right) \frac{a}{b_w} + 0.015 \frac{A_w}{A_f} + 0.875 & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1 \right) \\ \left(0.020 \frac{A_w}{A_f} - 0.009 \right) \frac{a}{b_w} + 0.017 \frac{A_w}{A_f} + 0.717 & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (4.3.3d)$$

$$\left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right)$$

$$k = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{b_w} \right)^2} & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1 \right) \\ 5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{b_w} \right)^2} & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (4.3.3e)$$

ここに、 k : 4辺単純支持された長方形板のせん断座屈係数
 a : 隣接する中間垂直補剛材の間隔 (図-4.3.3 参照)

端補剛材の設計は 4.7.1 の規定に従い、中間垂直補剛材の設計は 4.7.2 の規定に従う。

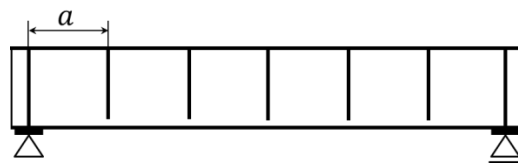


図-4.3.3 中間垂直補剛材を有する桁

本規定の上下対称の I 型断面桁の許容せん断応力度は、次式によって算出される (2.1 参照)。

$$\tau_a = \min \left(\frac{\sigma_B}{\sqrt{3} \times 2.2}, \frac{\tau_u}{1.85} \right) \dots\dots\dots (解 4.3.1)$$

ここに、 τ_a : 上下対称の I 型断面桁の許容せん断応力度
 σ_B : 引張強さ
 τ_u : 上下対称の I 型断面桁のせん断耐荷力

式(4.3.1)の c_1 と式(4.3.2b)の c_2 は、それぞれ次式で与えられる。

$$c_1 = \frac{\tau_{0.2}}{1.85\tau_{cao}} \dots\dots\dots (解 4.3.2)$$

$$c_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{12(1-\mu^2) \frac{\tau_{0.2}}{E}} \dots\dots\dots (解 4.3.3)$$

- ここに、
 $\tau_{0.2}$: 0.2%せん断耐力 (= $\sigma_{0.2}/\sqrt{3}$)
 τ_{cao} : 座屈が生じない場合に対する許容せん断応力度
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 E : ヤング係数
 μ : ポアソン比

表-4.3.1に示す τ_{cao} の値は、表-3.1.1に示す許容せん断応力度と同じ値である。
 許容せん断応力度 τ_a を与える係数 η は次式に基づいている^{13),14)}。

$$\eta = \frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{a_1}{R} - \frac{a_2}{R^2} & (R_1 < R \leq R_2) \dots\dots\dots (解 4.3.4a) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 < R \leq 3) \end{cases}$$

$$R = \frac{1}{\pi} F \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \tau_{0.2} b_w}{5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a_L}{b_w}\right)^2} E t_w}} \quad \left(1 \leq \frac{a_L}{b_w} \right) \dots\dots\dots (解 4.3.4b)$$

- ここに、
 R : ウェブの幅厚比パラメータ
 a_L : 端補剛材間の距離
 b_w : ウェブの板幅
 t_w : ウェブの板厚
 F : フランジが桁のせん断耐荷力に及ぼす影響を考慮するための係数 [式(4.3.2c)参照]

R_1, R_2, a_1, a_2, p : 表-4.3.2に示す値

係数 F は、ウェブの縦横比 a_L/b_w およびウェブとフランジの断面積 A_w/A_f が大きくなるに従って、ウェブのせん断座屈強度が 4 辺固定支持のせん断座屈強度から 4 辺単純支持のせん断座屈強度に近づくことを反映させる係数である¹³⁾。

式(4.3.3b)は、式(4.3.2a)の R_1, R_2, a_1, a_2, p に表-4.3.2の板材の 5000 系アルミニウム合金に対する値を代入することによって与えられる。式(4.3.3d)の係数 F は、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁に対する有限要素法による弾塑性有限変位解析の結果に基づいて与えられている¹⁵⁾。

4.4 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の設計

(1) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁

アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材を摩擦撹拌接合によって突合せ接合することによって製作され、ウェブが 3 本の縦補剛材によって等間隔に補剛された I 型断面桁を図-4.4.1 に示す。桁は上下対称である。縦補剛材の断面寸法は次式で与えられる。

$$\frac{t_r}{t_w} = 0.578 \left(\frac{b_w}{t_w} - 12.5 \right)^{0.148} \quad \left(44 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 294 \right) \dots\dots\dots (4.4.1a)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \dots\dots\dots (4.4.1b)$$

- ここに、
 b_r : 縦補剛材の板幅 (図-4.4.2 参照)
 t_r : 縦補剛材の板厚 (図-4.4.2 参照)
 b_w : ウェブの板幅 (図-4.4.2 参照)
 t_w : ウェブの板厚 (図-4.4.2 参照)

ウェブの摩擦撹拌接合部の板厚は、接合中心から各側 25mm、すなわち 50mm の範囲のウェブ厚をウェブ母材の厚さの 2.33 倍以上に増厚しなければならない (6.2 参照)。ただし、増厚された接合部の板厚は母材の板厚と同じとみなす。

フランジに作用する曲げ圧縮応力度を算出する際には縦補剛材の断面も考慮する。ウェブに作用するせん断応力度を算出する際には縦補剛材の断面は考慮しない。

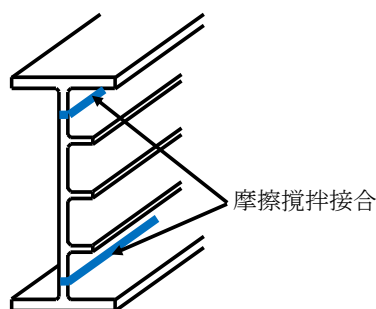


図-4.4.1 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁

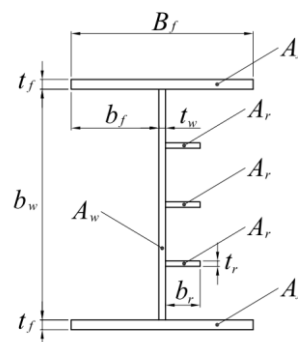


図-4.4.2 アルミニウム合金桁の断面

(2) 許容曲げ圧縮応力度

(1)で規定された、ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の許容曲げ圧縮応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = \min(120, 132\eta_g, 132\eta_i) \times g_w \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (4.4.2)$$

- ここに、
 σ_{ca} : 許容曲げ圧縮応力度
 η_g : 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮しない、圧縮フランジの横倒れ耐荷力を与える係数
 η_i : 圧縮フランジの局部座屈に対する耐荷力を与える係数
 g_w : 局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数

係数 η_g は次式で与えられる。

$$\eta_g = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq 0.13) \\ 1.01 - 0.03\lambda - 0.30\lambda^2 - 0.04\lambda^3 + 0.05\lambda^4 & (0.13 < \lambda \leq 2) \end{cases} \dots\dots\dots (4.4.3a)$$

$$\lambda = 6.52 \times 10^{-2} K \frac{l}{B_f} \dots\dots\dots (4.4.3b)$$

$$K = 0.97 + 0.07 \frac{A_{wr}}{A_f} \left(1 \leq \frac{A_{wr}}{A_f} \leq 4 \right) \dots\dots\dots (4.4.3c)$$

$$A_{wr} = A_w + \frac{3}{2} A_r \dots\dots\dots (4.4.3d)$$

- ここに、
 l : 圧縮フランジの固定点間距離
 B_f : フランジの全幅 (図-4.4.2 参照)
 A_f : フランジ 1 枚の断面積 (= $B_f t_f$) (図-4.4.2 参照)
 A_w : 縦補剛材の断面積を除いたウェブの断面積 (= $b_w t_w$) (図-4.4.2 参照)
 A_r : 縦補剛材 1 本の断面積 (= $b_r t_r$) (図-4.4.2 参照)

係数 η_l は次式で与えられる.

$$\eta_l = \begin{cases} 1 & \left(\frac{b_f}{t_f} \leq 6.3 \right) \\ 1.0 - 7.79 \times 10^{-3} \left(\frac{b_f}{t_f} - 6.3 \right)^2 & \left(6.3 < \frac{b_f}{t_f} \leq 12.5 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (4.4.4)$$

- ここに、
 b_f : 片側のフランジの板幅 (図-4.4.2 参照)
 t_f : フランジの板厚 (図-4.4.2 参照)

係数 g_w は次式で与えられる.

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_{wr}}{4A_f}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(44 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 62 \right) \\ 1 - \frac{\frac{A_{wr}}{A_f}}{1200 \left(1 + \frac{A_{wr}}{6A_f} \right)} \left(\frac{b_w}{t_w} - 162 \right) & \left(62 < \frac{b_w}{t_w} < 202 \right) \\ \frac{1 + \frac{2A_{wr}}{15A_f} \left(\frac{202}{b_w/t_w} \right)^{0.94}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(202 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 294 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (4.4.5)$$

(3) 許容せん断応力度

(1)で規定された、ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の許容せん断応力度は次式で与えられる.

$$\tau_a = \min(70, 76\eta_s) \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (4.4.6)$$

ここに、 τ_a : 許容せん断応力度
 η_s : 許容せん断応力度 τ_a を与える係数
 係数 η_s は次式で与えられる。

$$\eta_s = \begin{cases} 1 & (R \leq 1.12) \\ \frac{5.79}{R} - \frac{3.29}{R^2} - 1.55 & (1.12 < R \leq 1.57) \\ \frac{1.36}{R^{1.18}} & (1.57 < R \leq 3.5) \\ \frac{0.858}{R^{0.81}} & (3.5 < R \leq 6) \end{cases} \dots\dots\dots (4.4.7a)$$

$$R = \frac{4.73 \times 10^{-2} F}{\sqrt{5.34 + \frac{4}{(a_L/b_w)^2}}} \frac{b_w}{t_w} \left(\frac{a_L}{b_w} \geq 1 \right) \left(44 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 294 \right) \dots\dots\dots (4.4.7b)$$

$$F = 8.5 \times 10^{-3} \frac{A_w}{A_f} \frac{a_L}{b_w} + 0.75 \leq 1 \left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right) \dots\dots\dots (4.4.7c)$$

ここに、 a_L : 端補剛材間の距離 (図-4.4.3 参照)

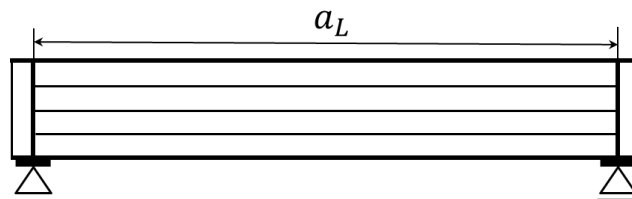


図-4.4.3 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁

(4) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の高力ボルト摩擦接合継手

図-4.4.4 に示すように、縦補剛材の上下面に連結板を設ける。縦補剛材のないウェブ面には、ウェブの板幅にわたって 1 枚の連結板を設ける。ウェブに摩擦攪拌接合が施された場合には、増厚部分 [図-6.3.1(b) 参照] の突出部分には連結板を設けない。ウェブに生じる垂直応力に対しては 2 面摩擦として設計し、ウェブに生じるせん断応力に対しては 1 面摩擦として設計する。

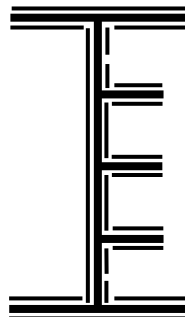


図-4.4.4 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の高力ボルト摩擦接合継手の断面 (図-4.4.1 参照)

(5) 異種アルミニウム合金桁

4.7.1(3)に従って、端補剛材の連結に高力ボルト摩擦接合継手を用いると、端補剛材を上下フランジに連結する高力ボルトの頭がフランジ表面に出ないように工夫が必要である。これを避けるために、図-4.4.5 に示す、A5083-O 桁を支承上に配置し、これと A6061-T6 桁とを高力ボルト摩擦接合継手によって連結する構造を用いることができる。A6061-T6 桁の縦補剛材の端は、高力ボルト摩擦接合継手の連結板の材縁近傍まで伸ばす。A6061-T6 桁のウェブに摩擦攪拌接合が施された場合には、連結板の下の増厚部分 [図-6.3.1(b)参照] の突出部分を除去し、平らにする。

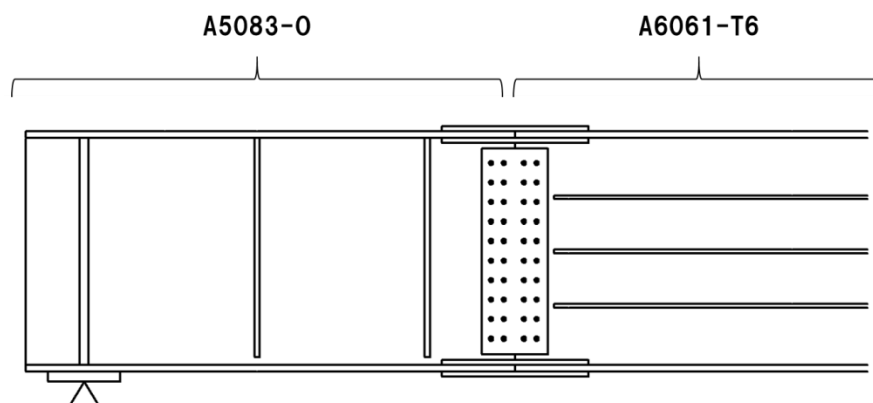


図-4.4.5 異種アルミニウム合金桁

(1) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁

これまでアルミニウム合金桁は歩道橋の桁に用いられ、その製作方法は、図-解 4.4.1 に示すように、鋼桁のそれと同じで、アルミニウム合金 A5083-O の圧延板を MIG 溶接によるすみ肉溶接で連結することにより製作される。しかし、道路橋は歩道橋より規模が大きく、作用する荷重も格段に大きくなるので、0.2% 耐力が 125 N/mm² の A5083-O を用いて道路橋の桁を設計することは困難である。したがって、道路橋の桁の設計には、0.2% 耐力が 245 N/mm² の A6061-T6 が使用されなければならない。しかし、アルミニウム合金 A6061-T6 は熱処理によって 0.2% 耐力が高められているので、MIG 溶接を施すと、溶接部の 0.2% 耐力が約半分まで低下する（表-解 3.2.1 参照）。図-解 4.4.1 に示す桁を A6061-T6 で製作すると、中間垂直補剛材をウェブに連結するすみ肉溶接の位置で強度が低下するので、桁全体としての強度も低下する。したがって、A6061-T6 を用いる場合、ウェブを横断する接合がない桁構造、すなわち、中間垂直補剛材が存在しない桁構造を考える必要がある。そこで、アルミニウム合金 A6061-T6 を活かす桁構造として、図-4.4.1 に示す、押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、ウェブが等間隔に縦補剛されたアルミニウム合金桁が提案された¹⁶⁾。この桁には中間垂直補剛材が存在せず、ウェブを横断する接合がないので、桁の一断面で強度が低下することはない。さらに、ウェブの摩擦攪拌接合部の板厚を、接合中心から各側 25mm、すなわち 50mm の範囲のウェブ厚をウェブ母材の厚さの 2.33 倍以上にすれば、摩擦攪拌接合による接合部の 0.2% 耐力に関する断面強度をウェブ母材のそれと同じにすることができる [5.2 の解説(1)参照]。

式(4.4.1)は、隣接する縦補剛材で区切られた板要素数が 4（縦補剛材の本数が 3）の場合、面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の座屈強度を最大にするような断面形状、すなわち最適断面形状を与える¹⁷⁾。縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力は板要素数の増加に伴って増加するが、板要素数が 4（縦補剛材の本数が 3）の面内曲げ耐荷力から板要素数が 5（縦補剛材の本数が 4）の面内曲げ耐荷力の増加はわずかである。縦補剛材はせん断力を担わないので、板要素が 5 の場合の長方形板のせん断強度 $\tau_{0.2bt}$ ($\tau_{0.2}$: 0.2% せん断耐力, b : 長方形板の板幅, t : 長方形板の板厚) は板要素数が 4 の場合のそれより大きく低下する。

したがって、縦補剛された長方形板を、曲げを受ける桁のウェブに適用する場合、板要素数 4（縦補剛材の本数 3）が最適である¹⁸⁾。

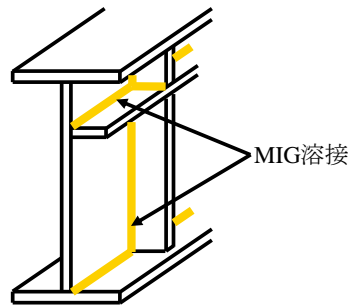


図-解 4.4.1 従来のアルミニウム合金桁

(2) 許容曲げ圧縮応力度

本規定の許容曲げ圧縮応力度は、4.2 の式(解 4.2.1b)と(解 4.2.2)に基づいて、次式によって算出される (2.1 参照)。

$$\sigma_{ca} = \min\left(\frac{\sigma_B}{2.2}, \frac{\sigma_{fgu}}{1.85}, \frac{\sigma_{flu}}{1.85}\right) \times g_w \dots\dots\dots (解 4.4.1)$$

- ここに、
- σ_{ca} : 桁の許容曲げ圧縮応力度
 - σ_B : 引張強さ
 - σ_{fgu} : 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮しない、圧縮フランジの横倒れ耐荷力
 - σ_{flu} : 圧縮フランジの局部座屈に対する耐荷力
 - g_w : 局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数

アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材の引張強さ σ_B は 265 N/mm² であり、耐荷力 σ_{fgu} と σ_{flu} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_{fgu} = 245\eta_g \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (解 4.4.2)$$

$$\sigma_{flu} = 245\eta_l \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots (解 4.4.3)$$

- ここに、
- η_g : 式(4.4.3)で与えられる係数
 - η_l : 式(4.4.4)で与えられる係数

係数 η_g は、式(4.2.2)において、A6061-T6 の押出型材に対する $c_2 = 6.52 \times 10^{-2}$ を代入し、 K に対して式(4.4.3c)で与えられる K に置換え、 A_w に対して式(4.4.3d)で与えられる A_{wr} に置換えることによって与えられる¹⁸⁾。

係数 η_l は、片側の圧縮フランジを自由突出板とみなすことにより、3.6 で規定される、A6061-T6 の押出型材に対する諸数値を式(3.6.2)に代入して与えられる。ただし、圧縮フランジの幅厚比は、表-4.2.4 の A6061-T6 の押出型材に対する最大幅厚比 12.5 以下である。

係数 g_w は、式(4.2.3)の A_w を式(4.4.3d)で与えられる A_{wr} に置換えた形式になる¹⁸⁾。

(3) 許容せん断応力度

本規定の許容せん断応力度は、次式によって算出される (2.1 参照)。

$$\tau_a = \min\left(\frac{\sigma_B}{\sqrt{3} \times 2.2}, \frac{\tau_u}{1.85}\right) \dots\dots\dots (解 4.4.4)$$

- ここに、
- τ_a : 桁の許容せん断応力度

σ_B : 引張強さ
 τ_u : 桁のせん断耐荷力

アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材の引張強さ σ_B は 265 N/mm² であり、桁のせん断耐荷力 τ_u は次式で与えられる。

$$\tau_u = 141\eta_s \text{ N/mm}^2 \dots\dots\dots \text{(解 4.4.5)}$$

ここに、 η_s : 式(4.4.7)で与えられる係数¹⁹⁾

係数 η_s は、(1)で規定された、ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁で、縦横比 $a_L/b_w = 8$ (図-4.4.3 参照) に対して行われた弾塑性有限変位解析の結果に基づいて作成されている¹⁹⁾。

ウェブが縦補剛されない A6061-T6 桁の係数 η_s は、式(4.3.2)より次式で与えられる。

$$\eta_s = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.60) \\ \frac{1.20}{R} - \frac{0.36}{R^2} & (0.60 < R \leq 1.09) \dots\dots\dots \text{(解 4.4.6)} \\ \frac{0.858}{R^{0.81}} & (1.09 \leq R \leq 6) \end{cases}$$

式(4.3.2)においては、 R の適用範囲が 3 以下であるが、アルミニウム合金 A6061-T6 に対しては、 R が 6 以下で式(4.3.2)が適用できることが確認されている¹⁹⁾。縦補剛されたウェブを有する桁と縦補剛されないウェブを有する桁のせん断耐荷力の比較を図-解 4.4.2 に示す。縦補剛されたウェブを有する桁のせん断耐荷力は、 R が大きくなると、縦補剛されないウェブを有する桁のせん断耐荷力と等しくなる。すなわち、 R が大きくなるに従って、せん断耐荷力に対する縦補剛材の効果は小さくなり、最終その効果はなくなる。

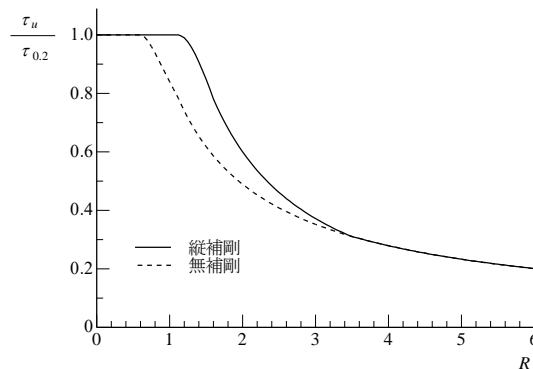


図-解 4.4.2 縦補剛されたウェブを有する桁とされない桁のせん断耐荷力の比較

(4) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の高力ボルト摩擦接合継手

ウェブに生じる垂直応力は、ウェブの両面に置かれた連結板および縦補剛材の上下面に置かれた連結板によって伝達されるが、ウェブに生じるせん断応力は、縦補剛材のないウェブ面に置かれた連結板のみによって伝達される。

(5) 異種アルミニウム合金桁

異種アルミニウム合金桁の耐荷力は文献 20)で明らかにされている。

4.5 不等曲げモーメントを受ける桁の応力照査

不等曲げモーメントを受ける桁の応力照査は次式によってなされる。

$$\sigma_1 \leq \sigma_{1ca} = \begin{cases} 1 & (1 \geq \kappa \geq -0.5) \\ \frac{0.6 + 0.4\kappa}{2.5} \sigma_{ca} & (-0.5 \geq \kappa \geq -1) \end{cases} \dots\dots\dots (4.5.1a)$$

$$\kappa = \frac{M_2}{M_1} (M_1 \geq M_2) \dots\dots\dots (4.5.1b)$$

ここに、 σ_1 : 大きい方の曲げモーメントが作用する位置のフランジ縁に生じる曲げ圧縮応力度

σ_{1ca} : 大きい方の曲げモーメントが作用する位置の許容曲げ圧縮応力度

σ_{ca} : 等曲げモーメントが作用する桁の許容曲げ圧縮応力度

M_1 : 大きい方の作用曲げモーメント

M_2 : 小さい方の作用曲げモーメント

等曲げモーメントが作用する桁の許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca} は式(4.2.1)または式(4.4.2)で与えられる。

さらに、フランジ縁に生じる曲げ圧縮応力度 σ_1 および次式によって与えられる、ウェブに生じる平均せん断応力度 τ は 4.6 の式(4.6.1)を満たさなければならない。

$$\tau = \frac{M_1 - M_2}{(b_w t_w) L} \dots\dots\dots (4.5.2)$$

ここに、 b_w : 桁ウェブの板幅

t_w : 桁ウェブの板厚

L : M_1 と M_2 の曲げモーメントが作用する位置の間隔

Austin は、不等曲げモーメントを受ける桁の横倒れ座屈に関して、不等曲げモーメントを等曲げモーメントに換算する式を提案した²¹⁾。不等曲げモーメントを受ける桁の横倒れ耐荷力に対しても Austin の式が成立すると仮定して、式(4.5.1)は次式に基づいている。

$$\frac{M_{1u}}{M_Y} = \begin{cases} \frac{1}{0.6 + 0.4\kappa} \frac{M_{0u}}{M_Y} & (1 \geq \kappa \geq -0.5) \\ \frac{M_{0u}}{2.5 M_Y} & (-0.5 \geq \kappa \geq -1) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{解 } 4.5.1)$$

ここに、 M_{1u} : 大きい方の曲げモーメント M_1 が作用する位置の桁の終局曲げモーメント

M_{0u} : 等曲げモーメントが作用する桁の終局曲げモーメント

M_Y : 桁の降伏曲げモーメント (= $\sigma_{0.2} W$)

$\sigma_{0.2}$: 0.2% 耐力

W : 桁の弾性断面係数

κ : 式(4.5.1b)で定義される曲げモーメント比

等曲げモーメントが作用する桁の終局曲げモーメント M_{0u} は式(解 4.2.1)で与えられる。

Austin の式は道路橋示方書²²⁾でも採用されている。Austin の式は、桁が弾性状態で、圧縮フランジとウェブに局部座屈が発生しない場合に適用できる。したがって、桁が非弾性状態で圧縮フランジとウェブに局部座屈が発生するような場合にも適用できるか否かについては今後の検討課題である。

式(解 4.5.1)が示すように、 κ が小さくなるに従って、 M_{1u} は大きくなるが、フランジが横倒れ座屈と局部座屈を起こさない場合に対する桁の耐荷力を超えることはない。したがって、フランジ縁に生じる曲げ圧縮応力度 σ_1 およびウェブに生じる平均せん断応力度 τ は 4.6 の式(4.6.1)を満たさなければならない。

次に、本規定の適用の仕方について述べる。図-解 4.5.1 に示すように、桁 AD が点 B と C で集中荷重を受けている。圧縮フランジの横方向の移動が点 A, B, C, D で拘束されている。点 C の曲げモーメント M_C が点 B の曲げモーメント M_B より大きいと仮定する。各区間で応力照査を行う諸量を表-解 4.5.1 に示す。表-解 4.5.1 の σ_1 の列は、各区間で大きい方の曲げモーメントが作用する位置のフランジ縁に生じる曲げ圧縮応力度、 τ の列は、各区間でウェブに生じる平均せん断応力度、 σ_{1ca} の列は、各区間で大きい方の曲げモーメントが作用する位置の許容曲げ圧縮応力度、 l の列は、各区間で、等曲げモーメントが作用する桁の許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca} を算出する際に用いる圧縮フランジの固定点間距離を与える。

区間 BC の σ_1 が最も大きく、 σ_{1ca} が最も小さくなるので、区間 BC の圧縮フランジの横倒れ座屈で、桁全体の安全性が決まる可能性がある。

各区の σ_1 と τ は 4.6 の式 (4.6.1) を満たさなければならない。この場合、区間 CD の τ が最も大きく、 σ_1 も最も大きいので、区間 CD の曲げとせん断の組合せ荷重に対して、桁全体の安全性が決まる可能性がある。

区間 BC の圧縮フランジの横倒れ座屈に対する安全性と区間 CD の曲げとせん断の組合せ荷重に対する安全性のうちどちらか低い安全性をもつ区間がこの桁全体の安全性を支配する。

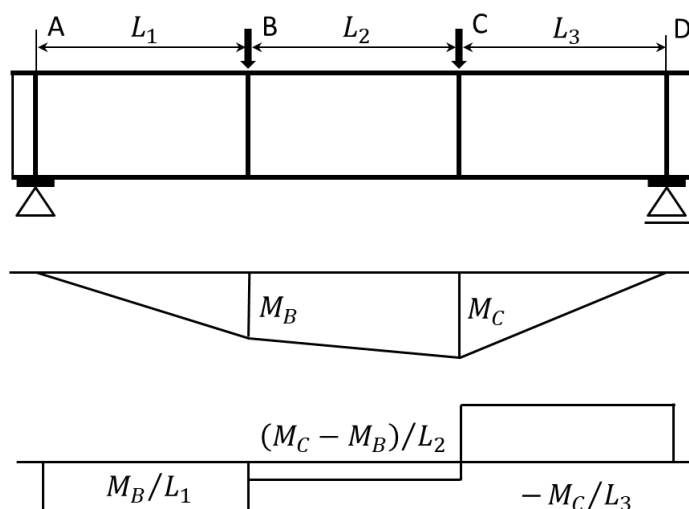


図-解 4.5.1 集中荷重を受ける単純支持桁

表-解 4.5.1 各区間で応力照査を行うための諸量

区間	σ_1	τ	σ_{1ca}	l
AB	$\frac{M_B}{W}$	$\frac{M_B}{(b_w t_w) L_1}$	$\frac{1}{0.6} \sigma_{ca} = 1.67 \sigma_{ca}$	L_1
BC	$\frac{M_C}{W}$	$\frac{M_C - M_B}{(b_w t_w) L_2}$	$\frac{1}{0.6 + 0.4(M_B/M_C)} \sigma_{ca}$	L_2
CD	$\frac{M_C}{W}$	$\frac{M_C}{(b_w t_w) L_3}$	$\frac{1}{0.6} \sigma_{ca} = 1.67 \sigma_{ca}$	L_3

W: 桁の弾性断面係数, b_w : ウェブの板幅, t_w : ウェブの板厚

4.6 曲げとせん断の組合せ荷重を受ける桁の応力照査

フランジが横倒れ座屈と局部座屈を生じない場合、曲げとせん断の組合せ荷重を受ける桁の応力照査は次式によってなされる。

$$\begin{cases} 0.81 \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{ca}} \right)^4 + \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right)^4 \leq 1 & \left(0.66 < \frac{\tau}{\tau_a} \leq 1 \right) \\ \frac{\sigma_1}{\sigma_{ca}} \leq 1 & \left(0 \leq \frac{\tau}{\tau_a} \leq 0.66 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (4.6.1)$$

ここに、 σ_1 : 大きい方の曲げモーメントが作用する位置のフランジ縁に生じる曲げ圧縮応力度

τ : ウェブに生じる平均せん断応力度

σ_{ca} : フランジが横倒れ座屈と局部座屈を生じない場合に対する、上下対称の I 型断面桁の許容曲げ圧縮応力度

τ_a : ウェブの許容せん断応力度

σ_{ca} は次式で与えられる。

$$\sigma_{ca} = \sigma_{cao} g_w \dots\dots\dots (4.6.2)$$

ここに、 σ_{cao} : 表-4.2.1 に示す、局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する圧縮フランジの許容圧縮応力度

g_w : 式(4.2.3)または式(4.4.5)で与えられる、局部座屈および横倒れ座屈が圧縮フランジに生じない場合に対する桁の終局曲げモーメントを与える係数

ウェブの許容せん断応力度 τ_a は、式(4.3.1)、式(4.3.3a)または式(4.4.6)で与えられる。

式(4.6.1)は、次式で与えられる曲げとせん断の組合せ荷重に対する耐荷力相関式に基づいている²³⁾。

$$\begin{cases} 0.81 \left(\frac{M_{1u}}{M_{0u}} \right)^4 + \left(\frac{V_u}{V_{0u}} \right)^4 = 1 & \left(0.66 < \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 1 \right) \\ \frac{M_{1u}}{M_{0u}} = 1 & \left(0 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 0.66 \right) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{解 } 4.6.1)$$

ここに、 M_{1u}, V_u : それぞれ、大きい方の曲げモーメント M_1 が作用する位置の桁の終局曲げモーメントと桁の終局せん断力

M_{0u}, V_{0u} : それぞれ、等曲げモーメントが作用する桁の終局曲げモーメントと純せん断力が作用する桁の終局せん断力

式(解 4.6.1)は、図-解 4.6.1 に示すように、張出し端に不等曲げを載荷させ、支点間の桁に曲げとせん断の組合せ荷重を生じさせる場合に対して与えられている²³⁾。 $M_1 \geq M_2$ であり、 M_{0u} と V_{0u} は、それぞれ次式で与えられる。

$$M_{0u} = g_w M_Y \dots\dots\dots (\text{解 } 4.6.2)$$

$$V_{0u} = \eta V_Y \dots\dots\dots (\text{解 } 4.6.3)$$

ここに、 g_w : 式(4.2.3)または式(4.4.5)で与えられる係数

M_Y : 桁の降伏曲げモーメント ($= \sigma_{0.2} W$)

η : 式(4.3.2a)、式(4.3.3b)または式(4.4.7a)で与えられる係数

V_Y : ウェブ断面全体が降伏するときのせん断強度 ($= \tau_{0.2} b_w t_w$)

$\sigma_{0.2}$: 0.2% 耐力

$\tau_{0.2}$: 0.2% せん断耐力 ($= \sigma_{0.2} / \sqrt{3}$)

W : 桁の弾性断面係数
 b_w : ウェブの幅
 t_w : ウェブの板厚

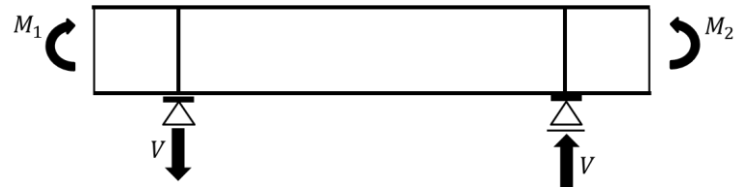


図-解 4.6.1 不等曲げ载荷

アルミニウム合金材の相違，ならびにウェブの幅厚比，ウェブとフランジの断面積比，中間垂直補剛材を持たない桁の場合には，上下フランジと支点上補剛材とで囲まれたウェブの縦横比，中間垂直補剛材を有する桁の場合には，上下フランジと隣接する中間垂直補剛材とで囲まれたウェブの縦横比，縦補剛されたウェブを有する桁の場合には，上下フランジと支点上補剛材とで囲まれたウェブの縦横比などの因子は，等曲げ载荷に対する耐荷力および純せん断载荷に対する耐荷力で考慮される^{20),23)}。

4.7 支点上の垂直補剛材および中間垂直補剛材の設計

4.7.1 支点上の垂直補剛材の設計

- (1) 支点上の垂直補剛材は、ウェブの両側に設け、軸方向圧縮力を受ける柱として設計する。柱としての有効断面積は、垂直補剛材の断面積および垂直補剛材の取付位置から両側にそれぞれウェブ厚の12倍までの範囲のウェブの断面積とし、有効断面積は垂直補剛材の断面積の1.7倍以下とする。柱の有効座屈長はウェブの板幅の1/2とする。次式で与えられる軸方向圧縮力を柱に作用させる。

$$V_a = \tau_{cao} b_w t_w \dots\dots\dots (4.7.1)$$

- ここに、 V_a : 柱に作用させる軸方向圧縮力
 τ_{cao} : 座屈がウェブに発生しない場合に対する許容せん断応力度 (表-4.3.1 参照)
 b_w : ウェブの板幅
 t_w : ウェブの板厚

ウェブの板厚中央回りおよび垂直補剛材の板厚中央回りについて許容軸方向圧縮応力度を求め、どちらか小さい方を許容軸方向圧縮応力度とする。

- (2) 支点上の垂直補剛材が局部座屈を起こさないようにするために、ウェブに関して片側の垂直補剛材の幅厚比を表-4.7.1に示す値以下とする。

表-4.7.1 支点上の垂直補剛材の最大幅厚比

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	b_s/t_s
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	5.87
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	5.87
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	6.28
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	6.28
押出形材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	5.99
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	5.99
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	6.28
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	6.87
		$6 < t \leq 12$	7.43
A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	6.42	

b_s : 支点上の垂直補剛材の片側の板幅

t_s : 片側の垂直補剛材の板厚

- (3) 支点上の垂直補剛材とウェブおよび上下フランジとの連結に対して、5000系アルミニウム合金の桁においては溶接を用い、6000系アルミニウム合金の桁においては高力ボルト摩擦接合継手を用いる。

- (1) 支点上の垂直補剛材の設計は道路橋示方書²⁴⁾に準拠している。道路橋示方書では、柱に作用させる軸方向圧縮力として全反力を採用しているが、本規定では、式(4.7.1)に示すように、座屈がウェブに発生しない場合の許容せん断応力度に対するせん断力としている。道路橋示方書では、ウェブの板厚中央回りに関してのみ許容軸方向圧縮応力度を求めることになっているが、本規定では、垂直補剛材の板厚中央回りについて

も許容軸方向圧縮応力度を求め、どちらか小さい方を許容軸方向圧縮応力度とすることを規定している。

- (2) 表-4.7.1 に示す値は、式(3.6.2a)の最上段の式に基づいて、次式で与えられる、自由突出板が 0.2%耐力を維持する限界の幅厚比である。

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{R_1}{c_2} \dots\dots\dots (解 4.7.1)$$

ここに、 b_s : ウェブに関して片側の垂直補剛材の板幅

t_s : 垂直補剛材の板厚

R_1 : 5000系アルミニウム合金の場合 0.40, 6000系アルミニウム合金の場合 0.60

c_2 : 表-3.6.1 に示す値

- (3) 6000系アルミニウム合金材は、溶接部が強度低下を起こすので、支点上の垂直補剛材を、溶接を用いてウェブに連結することはできない。

4.7.2 中間垂直補剛材の設計

- (1) 板材の 5000系アルミニウム合金の桁に対して中間垂直補剛材を設けることができる。

- (2) 中間垂直補剛材 1 個の断面二次モーメント I_v は次式を満たさなければならない。

$$I_v \geq \frac{b_w t_w^3}{11} \gamma_v \dots\dots\dots (4.7.2a)$$

$$\gamma_v = 8.0 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 \dots\dots\dots (4.7.2b)$$

ここに、 b_w : ウェブの板幅

t_w : ウェブの板厚

γ_v : 中間垂直補剛材の必要剛比

a : 隣接する中間垂直補剛材の間隔 (図-4.3.3 参照)

I_v に対して、中間垂直補剛材がウェブの片側に設けられる場合には、ウェブの表面に関する断面二次モーメントを用い、中間垂直補剛材がウェブの両側に設けられる場合には、ウェブの板厚中央に関する断面二次モーメントを用いる。

- (3) 中間垂直補剛材が局部座屈を起こさないようにするために、ウェブに関して片側の中間垂直補剛材の幅厚比を、次式で与えられる幅厚比以下の値とする。

$$\frac{b_v}{t_v} = 5.87 \dots\dots\dots (4.7.3)$$

ここに、 b_v : ウェブに関して片側の中間垂直補剛材の板幅

t_v : 中間垂直補剛材の板厚

- (4) 中間垂直補剛材は圧縮フランジに溶接で連結する。疲労亀裂が引張フランジに発生するのを防ぐために、中間垂直補剛材は、引張フランジに溶接で連結せず、引張フランジの表面から 35mm 程度離れた位置で止める。

- (1) 4.3(2)を参照されたい。

- (2) 中間垂直補剛材の断面二次モーメントに関する規定は道路橋示方書²⁴⁾に準拠している。

- (3) この規定は、4.7.1(2)に従い、表-4.7.1の板材の5000系アルミニウム合金の最大幅厚比の値と同じである。4.3(3)で規定される、中間垂直補剛材を有する5000系アルミニウム合金桁の許容せん断応力度は、式(4.7.2)と(4.7.3)を満たす中間垂直補剛材を有するA5083-O桁に対して行われた、有限要素法による弾塑性有限変位解析の結果に基づいている¹⁵⁾。

参考文献

- 1) 西森文子, 大倉一郎: アルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力, ALST 研究レポート, No.36, 2014.
- 2) 山田了平, 大倉一郎: 圧縮を受けるアルミニウム合金押出型材の耐荷力, ALST 研究レポート, No.37, 2014.
- 3) Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part1-1: General structural rules, 2007.
- 4) Aluminum Association: Aluminum Design Manual, PART I, Specification for Aluminum Structures, 2010.
- 5) Mazzolani, F.M.: Aluminum Alloy Structures, Second edition, E & FN Spon, 1995.
- 6) ISO/TR 11069: Aluminium structures – Material and design – Ultimate limit states under static loading, 1995.
- 7) 山田了平, 大倉一郎: アルミニウム合金押出型材の有効座屈長係数, ALST 研究レポート, No.38, 2014.
- 8) 高畑皇, 大倉一郎: 圧縮を受けるアルミニウム合金部材の全体と局部の連成耐荷力, ALST 研究レポート, No.57, 2020.
- 9) 鳥畑一博, 大倉一郎: 曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.93-101, 2016.
- 10) 鳥畑一博, 大倉一郎: 曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力, ALST 研究レポート, No.42, 2016.
- 11) 藤井裕基, 大倉一郎: フランジの局部座屈がアルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力に及ぼす影響, No.50, 2017.
- 12) 大倉一郎, 小笠原康二: 接合位置と板幅がアルミニウム合金板の曲げ耐荷力に与える影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.287-299, 2012.
- 13) 山中誠矢, 大倉一郎: せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力, ALST 研究レポート, No.49, 2017.
- 14) 大倉一郎, 寺川勝大: 面内せん断を受けるアルミニウム長方形板の耐荷力, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.491-504, 2013.
- 15) 岩倉弘幸, 大倉一郎: 中間垂直補剛材を有するアルミニウム合金 A5083-O 桁のせん断耐荷力, ALST 研究レポート, No.56, 2019.
- 16) 大倉一郎, 北村幸嗣, 赤崎圭輔, 卯瀧高久, ビッグ・ラズロ・ゲルゲリ, 三河克己: 新しいアルミニウム合金製補剛桁の提案, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.203-210, 2005.
- 17) 清水弘樹, 大倉一郎: 面内曲げを受ける縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状と耐荷力, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.15-25, 2019.
- 18) 清水弘樹, 大倉一郎: ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 桁の曲げ耐荷力, ALST 研究レポート, No.53, 2019.
- 19) 鶴見一恵, 大倉一郎: ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 桁のせん断耐荷力, ALST 研究レポート, No.54, 2019.
- 20) 岩倉弘幸, 大倉一郎: 異種アルミニウム合金桁の耐荷力, ALST 研究レポート, No.58, 2020.

- 21) W. J. Austin: Strength and design of metal beam-columns, ASCE, J. of the Structural Division, Vol.87, No. ST4, pp.1-32, 1961.
- 22) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, pp.131-136, 2012.
- 23) 山木陸呂宇, 大倉一郎：曲げとせん断の組合わせ荷重を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力, ALST 研究レポート, No.51, 2018.
- 24) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, pp.323-329, 2012.

5章 溶接継手

5.1 溶接材料の選定および使用できる溶接継手

(1) 溶接材料は、母材の組合せに対して、表-5.1.1に示すものを使用する。

表-5.1.1 母材の組合せに対する溶接材料

母材 母材	A5083-H112 A5083-O	A6061-T6 A6061-T651 A6005C-T5 A6005C-T6
A5083-H112 A5083-O	A5183	A5356
A6061-T6 A6061-T651 A6005C-T5 A6005C-T6	A5356	A5356

(2) 使用できる溶接継手は、次の各項目に従わなければならない。

- 1) 応力を伝える溶接継手には、完全溶込み開先溶接または連続すみ肉溶接を用いる。
- 2) 主要部材同士の連結には、完全溶込み開先溶接を用いる。
- 3) 主要部材に重ね継手を用いてはならない。
- 4) すみ肉溶接の T 継手と十字継手においては、板の両側にすみ肉溶接を配置しなければならない。
- 5) 材片の交角が 60° 未満の T 継手に対しては完全溶込み開先溶接を用いなければならない。

(1) 本指針では、実際の製作で一般に使用される母材の組合せと溶接材料を JIS Z 3604¹⁾から抽出している。

(2) T 継手の交角が 60° 未満のすみ肉溶接においては、図-解 5.1.1 に示すように、左側のすみ肉溶接のルートまで溶接金属が溶込まず、右側のすみ肉溶接の溶接金属の量が増える。これを避けるために、T 継手の交角が 60° 未満の場合には、完全溶込み開先溶接を用いる。

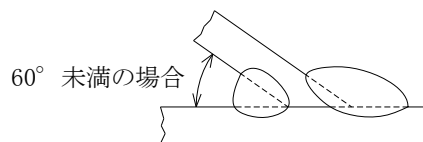


図-解 5.1.1 交角が 60° 未満の T 継手

5.2 完全溶込み開先溶接継手の部分増厚

(1) 押出型材を用いて、完全溶込み開先溶接継手の溶接部を部分的に増厚する場合には、図-5.2.1 に示すように、溶接中心から各側 25mm の熱影響範囲[3.2(1)参照]より広い範囲を、次式で与えられる厚さ以上に増厚する。

$$t_j = ct \dots\dots\dots (5.2.1)$$

ここに、 c : 板厚の増厚倍率 (表-5.2.1 参照)

t_j : 増厚された板厚

t : 母材の板厚

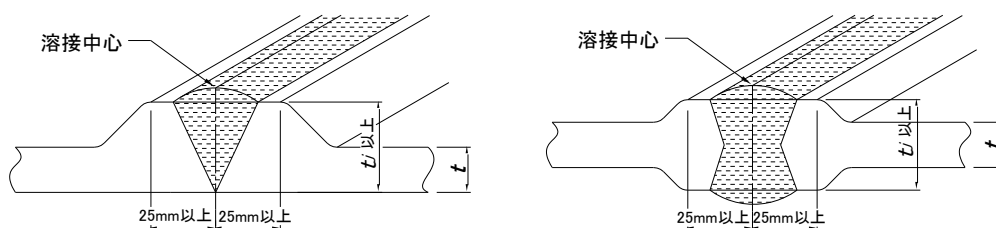


図-5.2.1 完全溶込み開先溶接継手の増厚範囲

表-5.2.1 板厚の増厚倍率

アルミニウム合金	板厚 t (mm)	増厚倍率 c
A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	2.33
A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	1.95
	$6 < t \leq 12$	1.67
A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	2.24

(2) 通常部と増厚部は 45° 以下の勾配で滑らかに連続させる。疲労の影響を受ける場合には、図-5.2.2 に示すように、曲率半径 40mm 以上の円弧を増厚部の端に設ける。

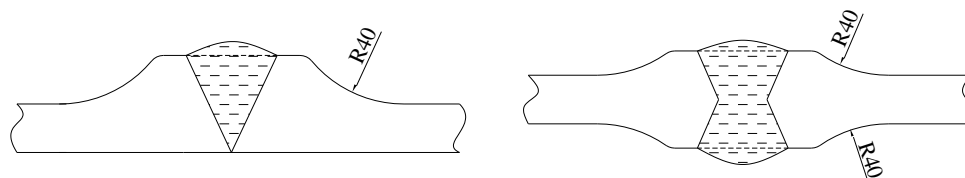


図-5.2.2 疲労の影響を受ける場合に対する増厚形状

(1) アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A6005C-T6 の完全溶込み開先溶接継手においては、溶接中心から各側 25mm の熱影響範囲[3.2(1)参照]の強度が低下する。次式で与えられる板厚を熱影響範囲の厚さに与えることによって、0.2%耐力に関して、熱影響範囲の断面強度は母材のそれと同じになる。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{w0.2}} t \dots\dots\dots (\text{解 } 5.2.1)$$

ここに、 t_j : 増厚された板厚
 t : 母材の板厚
 $\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2% 耐力 (表-解 1.2.1 参照)
 $\sigma_{w0.2}$: 熱影響範囲の 0.2% 耐力 [表-解 3.2.1(d) および 3.2 の解説(4) 参照]

板厚の増厚倍率 c は $\sigma_{0.2}/\sigma_{w0.2}$ の値である。

- (2) **A6005C-T5** の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度が調べられた研究²⁾で使用された疲労試験片において、平行部と掴み部の間に設けられた曲率半径 40mm の円弧に疲労亀裂が発生しなかったことに基づいて、疲労の影響を受ける場合に対して増厚部の端の形状が与えられている。

5.3 断面が異なる完全溶込み開先溶接継手

断面が異なる完全溶込み開先溶接継手においては、図-5.3.1 に示すように、厚さおよび幅を、長さ方向に 1/5 以下の勾配で徐々に変化させなければならない。

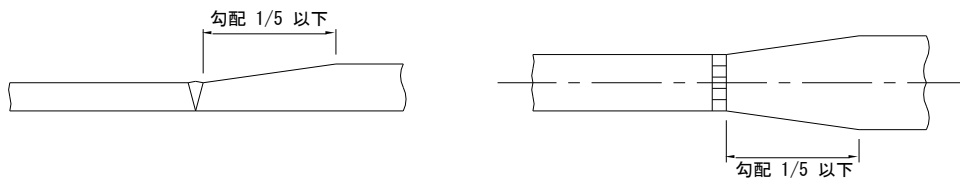


図-5.3.1 断面が異なる完全溶込み開先溶接継手

5.4 溶接部の理論のど厚と有効長

(1) 理論のど厚

1) 完全溶込み開先溶接

完全溶込み開先溶接の理論のど厚を図-5.4.1に示す。溶接部で左右の板の厚さが異なる場合には、薄い方の板厚を理論のど厚とする。部分的に増厚された板の場合には、増厚部の厚さを理論のど厚とする。

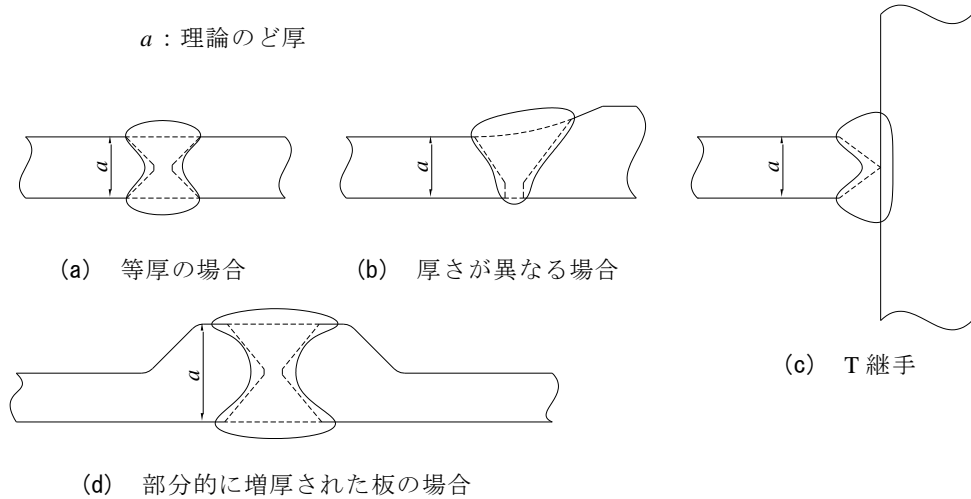


図-5.4.1 完全溶込み開先溶接の理論のど厚

2) すみ肉溶接

すみ肉溶接の理論のど厚とサイズを図-5.4.2に示す。

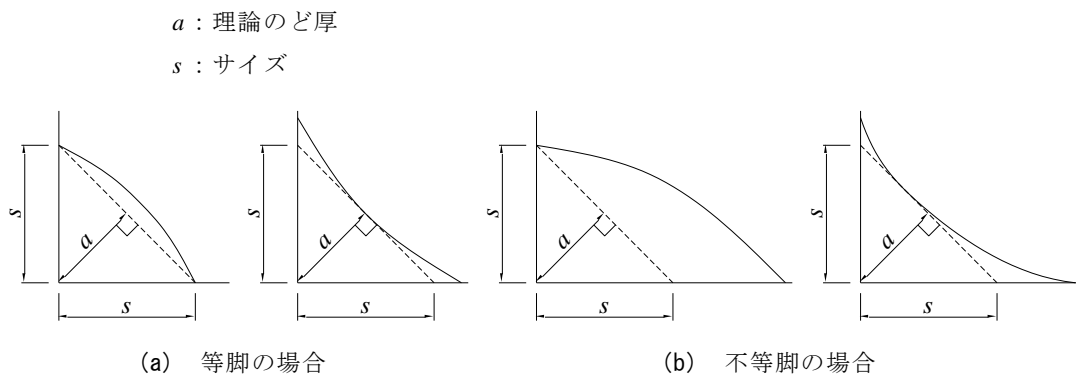


図-5.4.2 すみ肉溶接の理論のど厚とサイズ

(2) 有効長

1) 溶接部の有効長は、理論のど厚を有する溶接部の長さとする。溶接線に対して応力の作用方向が直角に作用しない場合には、応力の作用方向に対して直角な方向に投影した長さを有効長とする。

2) すみ肉溶接のまわし溶接の部分は有効長に含めない。

5.5 すみ肉溶接のサイズと最小有効長

- (1) 主要部材のすみ肉溶接は等脚とする。
- (2) 主要部材のせん断応力を伝えるすみ肉溶接のサイズは、理論のど厚の合計が母材の板厚以上になるようにする。
- (3) 主要部材のすみ肉溶接の最小有効長は、サイズの 10 倍または 80mm のいずれか大きいほうとする。

(2) 図-解 5.5.1 に示す、I 型断面の桁のウェブと下フランジのすみ肉溶接のサイズは、次のように与えられる。

$$t \leq 2a = 2 \frac{s}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}s$$

したがって、 $s \geq \frac{t}{\sqrt{2}}$ (解 5.5.1)

ここに s : すみ肉のサイズ
 a : 理論のど厚
 t : 母材の厚さ

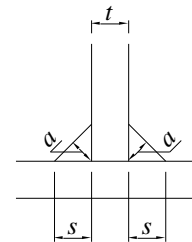


図-解 5.5.1 母材の厚さとすみ肉溶接のサイズ

5.6 軸力または／およびせん断力を受ける溶接継手の応力照査

(1) 完全溶込み開先溶接継手

1) 溶接線方向に対して直角な方向の軸力が作用する完全溶込み開先溶接継手の応力照査は次式による。

$$\sigma = \frac{T}{\Sigma al} \leq \sigma_{wa} \text{ (5.6.1)}$$

2) 溶接線方向に平行なせん断力が作用する完全溶込み開先溶接継手の応力照査は次式による。

$$\tau = \frac{Q}{\Sigma al} \leq \tau_{wa} \text{ (5.6.2)}$$

図-5.6.1 を参照して、

- σ : 溶接線方向に対して直角な方向の軸力によって、溶接部に生じる垂直応力度
- τ : 溶接線方向に平行なせん断力によって、溶接部に生じるせん断応力度
- σ_{wa} : 熱影響範囲の許容引張応力度 (3.2 参照)
- τ_{wa} : 熱影響範囲の許容せん断応力度 (3.2 参照)
- T : 溶接線方向に対して直角な方向の軸力
- Q : 溶接線方向に平行なせん断力
- a : 理論のど厚
- l : 溶接の有効長
- Σ : 有効長に関して総和をとることを表す記号

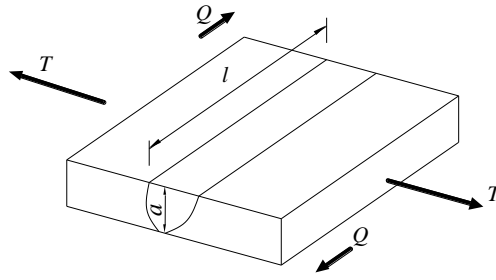


図-5.6.1 完全溶込み開先溶接継手に作用する力

3) 溶接線方向に対して直角な方向の軸力と溶接線方向に平行なせん断力が同時に作用する場合に対する完全溶込み開先溶接継手の応力照査は次式による。

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{wa}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{wa}}\right)^2 \leq 1.2 \dots\dots\dots (5.6.3)$$

ただし、 $\sigma \leq \sigma_{wa}$ 、 $\tau \leq \tau_{wa}$

4) アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A6005C-T6 の完全溶込み開先溶接継手において、5.2(1)の規定に従って、熱影響範囲を増厚した場合には、式(5.6.1)～(5.6.3)において、のど厚 a を母材の板厚 t に、熱影響範囲の許容引張応力度 σ_{wa} と許容せん断応力度 τ_{wa} を、それぞれ母材の許容引張応力度 σ_a と許容せん断応力度 τ_a にとることができる。

(2) すみ肉溶接継手

1) 溶接線方向に対して直角な方向の軸力が作用するすみ肉溶接継手の応力照査は次式による。

溶接部に対して、

$$\tau_{\perp} = \frac{T}{\Sigma a l} \leq \tau_{wa} \dots\dots\dots (5.6.4)$$

母材の熱影響範囲に対して、

$$\sigma = \frac{T}{tl} \leq \sigma_{wa} \dots\dots\dots (5.6.5)$$

図-5.6.2 を参照して、

- τ_{\perp} : 溶接線方向に対して直角な方向の軸力によって、溶接部に生じるせん断応力度
- τ_{wa} : 熱影響範囲の許容せん断応力度 (3.2 参照)
- σ : 溶接線方向に対して直角な方向の軸力によって、母材の熱影響範囲に生じる垂直応力度
- σ_{wa} : 熱影響範囲の許容引張応力度 (3.2 参照)
- T : 溶接線方向に対して直角な方向の軸力
- a : 理論のど厚
- l : 溶接の有効長
- t : 母材の板厚
- Σ : 有効長に関して総和をとることを表す記号

2) 溶接線方向に平行なせん断力が作用するすみ肉溶接継手の応力照査は次式による。
溶接部に対して、

$$\tau_{\parallel} = \frac{Q}{\Sigma a l} \leq \tau_{wa} \dots\dots\dots (5.6.6)$$

母材の熱影響範囲に対して、

$$\tau = \frac{Q}{t l} \leq \tau_{wa} \dots\dots\dots (5.6.7)$$

図-5.6.2 を参照して、

- τ_{\parallel} : 溶接線方向に平行なせん断力によって、溶接部に生じるせん断応力度
- τ_{wa} : 熱影響範囲の許容せん断応力度 (3.2 参照)
- τ : 母材の熱影響範囲に生じるせん断応力度
- Q : 溶接線方向に平行なせん断力
- a : 理論のど厚
- l : 溶接の有効長
- t : 母材の板厚
- Σ : 有効長に関して総和をとることを表す記号

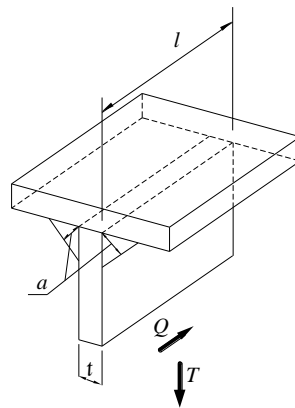


図-5.6.2 すみ肉溶接継手に作用する力

3) 溶接線方向に対して直角な方向の軸力と溶接線方向に平行なせん断力が同時に作用する場合に対するすみ肉溶接継手の応力照査は次式による。

溶接部に対して、

$$\left(\frac{\tau_{\parallel}}{\tau_{wa}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\perp}}{\tau_{wa}} \right)^2 \leq 1.0 \dots\dots\dots (5.6.8)$$

母材の熱影響範囲に対して、

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{wa}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{wa}} \right)^2 \leq 1.2 \dots\dots\dots (5.6.9)$$

ただし、 $\sigma \leq \sigma_{wa}$, $\tau \leq \tau_{wa}$

(2) アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A6005C-T6 のすみ肉溶接継手においては、図-解 5.6.1 に示すように、溶接ルートから 25mm の熱影響範囲の強度が低下する[3.2(1)参照]。したがって、すみ肉溶接継手においては、溶接部と母材の熱影響範囲の両方に対して応力照査を行う必要がある。

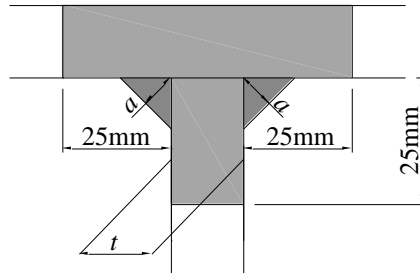


図-解 5.6.1 すみ肉溶接継手の熱影響範囲

5.7 曲げモーメントを受ける溶接継手の応力照査

(1) 完全溶込み開先溶接継手

曲げモーメントを受ける完全溶込み開先溶接継手の応力照査は次式による。

$$\sigma = \frac{M}{I_a} y_a \leq \sigma_{wa} \dots\dots\dots (5.7.1)$$

図-5.7.1 を参照して、

- σ : 曲げモーメントによって、溶接部に生じる垂直応力度
- σ_{wa} : 熱影響範囲の許容引張応力度 (3.2 参照)
- M : 完全溶込み開先溶接継手に作用する曲げモーメント
- I_a : 接合面の理論のど厚断面に対する中立軸回りの断面二次モーメント
- y_a : 接合面の理論のど厚断面に対する中立軸から応力度を算出する位置までの距離

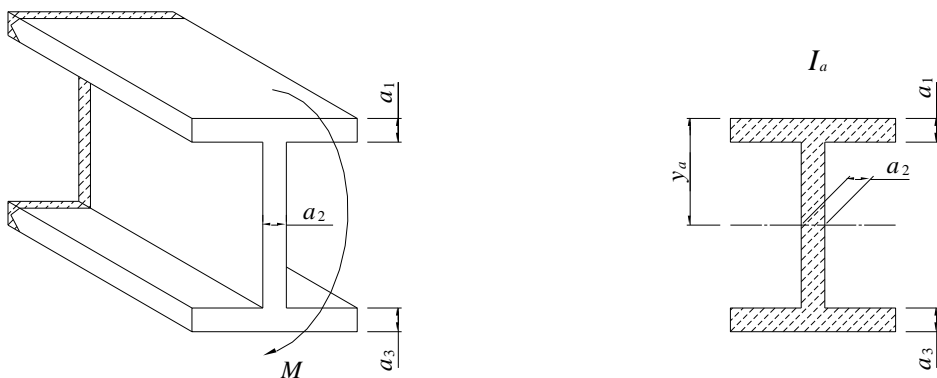


図-5.7.1 曲げモーメントを受ける完全溶込み開先溶接継手

(2) すみ肉溶接継手

曲げモーメントを受けるすみ肉溶接継手の応力照査は次による。

溶接部に対して、

$$\tau_{\perp} = \frac{M}{I_a} y_a \leq \tau_{wa} \dots\dots\dots (5.7.2)$$

母材の熱影響範囲に対して、

$$\sigma = \frac{M}{I} y \leq \sigma_{wa} \dots\dots\dots (5.7.3)$$

図-5.7.2を参照して、

- τ_{\perp} : 曲げモーメントによって、溶接部に生じるせん断応力度
- τ_{wa} : 熱影響範囲の許容せん断応力度 (3.2 参照)
- σ : 曲げモーメントによって、母材の熱影響範囲に生じる垂直応力度
- σ_{wa} : 熱影響範囲の許容引張応力度 (3.2 参照)
- M : すみ肉溶接継手に作用する曲げモーメント
- I_a : 接合面の理論のど厚断面に対する中立軸回りの断面二次モーメント
- y_a : 接合面の理論のど厚断面に対する中立軸から応力度を算出する位置までの距離
- I : 母材の断面二次モーメント
- y : 母材の中立軸から応力度を算出する位置までの距離

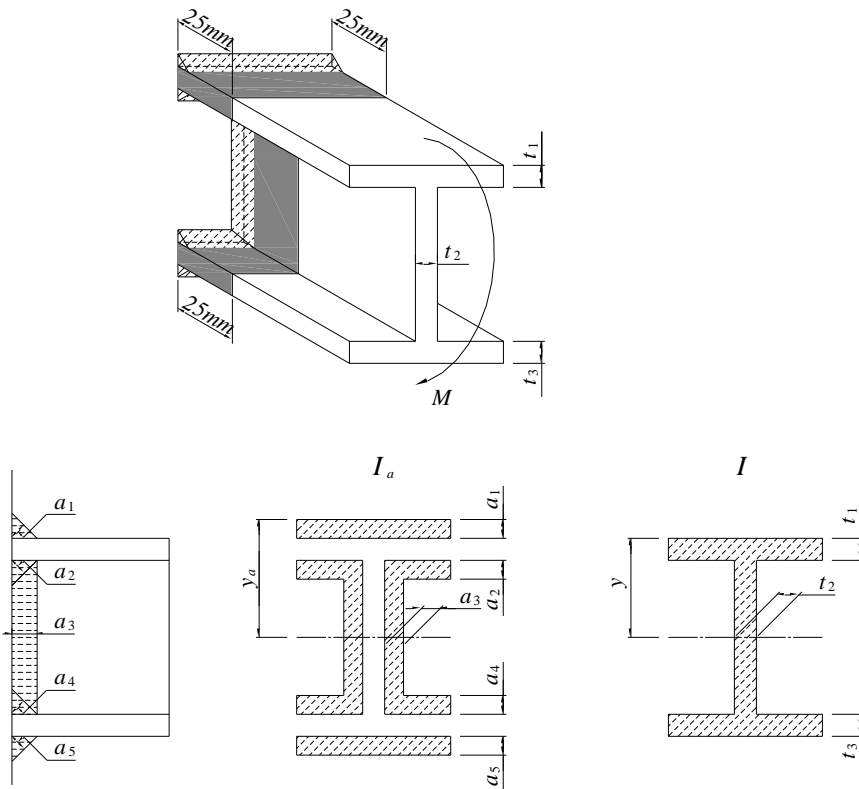


図-5.7.2 曲げモーメントを受けるすみ肉溶接継手

参考文献

- 1) JIS Z 3604 : アルミニウムのイナートガスアーク溶接作業標準, 2016.
- 2) 萩澤亘保, 大倉一郎 : アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.117-122, 2009.

6章 摩擦撹拌接合継手

6.1 一般

摩擦撹拌接合は突合せ継手に対して適用することができる。

摩擦撹拌接合に関しては、9.3を参照されたい。

6.2 摩擦撹拌接合継手の部分増厚

5.2に準ずる。

6.3 摩擦撹拌接合部の理論のど厚と有効長

(1) 理論のど厚

摩擦撹拌接合部の理論のど厚を図-6.3.1に示す。部分的に増厚された板の場合には、増厚部の厚さを理論のど厚とする。

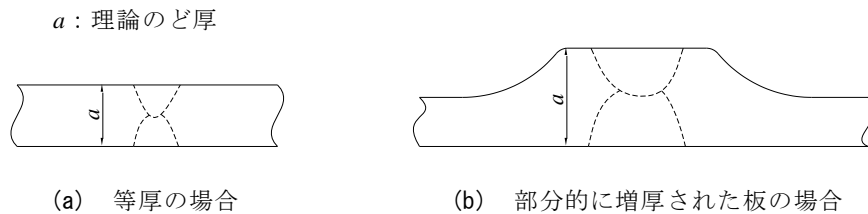


図-6.3.1 摩擦撹拌接合部の理論のど厚

(2) 有効長

5.4(2) 1)に準ずる。

6.4 軸力または／およびせん断力を受ける摩擦撹拌接合継手の応力照査

5.6(1)に準ずる。

7章 ボルト接合継手

7.1 適用範囲

本章は、常温・大気中で使用されるアルミニウム合金土木構造物およびそれを構成する部材の高力ボルト摩擦接合継手と支圧接合継手の設計について規定する。

7.2 高力ボルト摩擦接合継手

7.2.1 一般

- (1) アルミニウム合金板の高力ボルト摩擦接合継手には鋼製高力ボルトセットを使用する。
- (2) 高力ボルト摩擦接合継手の連結板に使用できるアルミニウム合金材は、A6061-T6 と A6061-T651 の板材および A6061-T6 と A6005C-T6 の押出型材である。これら以外のアルミニウム合金材は連結板に用いることができない。疲労荷重を受ける高力ボルト摩擦接合継手においては、母材に対してもこれら以外のアルミニウム合金材を用いることができない。
- (3) 高力ボルト摩擦接合継手の使用に際しては、鋼製高力ボルト自身の防錆とともに、鋼製高力ボルトとアルミニウム合金板との異種金属接触腐食を防止する必要がある。

- (2) 母材の両面に連結板を重ね、M22 の鋼製高力ボルトで F10T 相当の軸力を導入した試験¹⁾によると、連結板が A5083-O の場合、座金直下の板表面にへこみが発生したが、A6061-T6 の場合、そのようなへこみは発生しなかった。そこで、連結板には、0.2%耐力が 175N/mm^2 の A6005C-T5 材を除く、6000 系アルミニウム合金材を使用することを規定している。

7.2.2 高力ボルト

- (1) 鋼製高力ボルト、ナットおよび座金に対して、JIS B 1186²⁾に規定される第 2 種 (F10T) の呼び M12, M16, M20, M22, M24 を使用する。
- (2) 溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトとフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは、鋼製高力ボルト自身の防錆とともに、鋼製高力ボルトとアルミニウム合金板との異種金属接触腐食を防止できる高力ボルトとみなされる。
- (3) 摩擦接合用として使用できるフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは、9.4.2 に規定される摩擦面処理が施され、表-9.4.1 に示す F10T の設計ボルト軸力に対して 10%増しの初期導入ボルト軸力で締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手に対して、付録 A に従って実施されたすべり試験によって得られたすべり係数が 0.45 以上あるものとする。
- (4) 溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトの等級は F8T とする。
- (5) フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの等級は F10T とする。

- (2) アルミニウム合金板を締結する高力ボルトには、異種金属接触腐食の対策として、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトが用いられてきた。溶融亜鉛めっきは、鋼製ボルトの腐食を防止するだけでなく、表面に付着した亜鉛の犠牲陽極作用により、アルミニウム合金板と鋼製ボルトが接触した場合に起こる異種金

属接触腐食も防止することができる。溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトセットは JIS に規格化されておらず、国土交通大臣の認定を受けたメーカーの製品が用いられる。

フッ素樹脂表面皮膜は、鋼製ボルト自身の腐食を防止するだけでなく、電気的絶縁性能を有するので、アルミニウム合金板と鋼製ボルトが接触したときに起こる異種金属接触腐食も防止することができる。

- (3) フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトを使用する場合、アルミニウム合金板のクリープによつてのみならず、ボルト表面のフッ素樹脂被膜のクリープによつてもボルト軸力が低下する。本規定は、フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトを摩擦接合用として使用することができる条件を示している。

付録 A のすべり試験において、試験片のすべり係数の平均値が 0.45 以上あつても、一部の試験片のすべり係数が 0.45 未満の場合がある。本規定では、各試験片のすべり係数が 0.45 以上あることを要求している。

- (4) 一般に使用される摩擦接合用鋼製高力ボルトは F10T である。F10T は熱処理によつてその強度が得られ、焼戻し温度は約 420℃である。溶融亜鉛めっきは 480℃で実施されるのでその熱影響によつて F10T の強度が保証されない場合がある。したがつて、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトには F8T 相当の軸力が導入される。

- (5) フッ素樹脂コート鋼製ボルトの表面被膜の熱処理温度は 150~200℃であり、この温度は、F10T の焼戻し温度に影響しない。したがつて、フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの等級は、フッ素樹脂を処理する前の鋼製高力ボルトの等級と同じにとることができる。F10T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの使用本数に対して、F8T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの使用本数は多くなる。したがつて、F8T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトが現実に使用されることはないと考えられるので、F8T のフッ素樹脂コート鋼製ボルトを除外している。

7.2.3 最小板厚

- (1) 図-7.2.1 に示す、2 面摩擦を有する突合せ継手の母材と連結板の最小板厚は、次式で与えられる値とする。

$$t_1 = 0.4d \dots\dots\dots (7.2.1)$$

母材が A6005C-T5 材を除く、6000 系アルミニウム合金材の場合、

$$t_2 = 0.5t_1 \dots\dots\dots (7.2.2a)$$

母材が 5000 系アルミニウム合金材および A6005C-T5 材の場合、

$$t_2 = t_1 \dots\dots\dots (7.2.2b)$$

ここに、 t_1, t_2 : それぞれ、母材と連結板の板厚

d : ボルトの直径

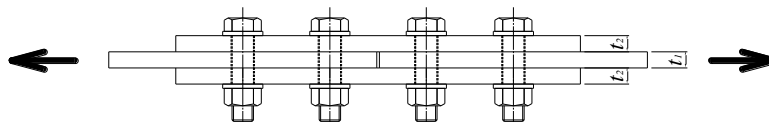


図-7.2.1 2 面摩擦を有する突合せ継手

- (2) 図-7.2.2 に示す、1 面摩擦を有する突合せ継手の母材と連結板の最小板厚は、次式で与えられる値とする。

$$t_1 = t_2 = 0.4d \dots\dots\dots (7.2.3)$$

ここに、 t_1, t_2 : それぞれ、母材と連結板の板厚

d : ボルトの直径

この継手においては、5000系アルミニウム合金材およびA6005C-T5材を母材に用いることができない。

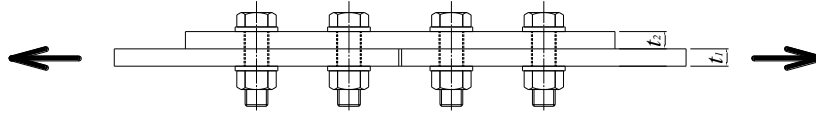


図-7.2.2 1面摩擦を有する突合せ継手

(3) 図-7.2.3に示す重ね継手の母材の最小板厚は、次式で与えられる値とする。

$$t_1 = 0.4d \dots\dots\dots (7.2.4)$$

ここに、 t_1 : 母材の板厚

d : ボルトの直径

この継手においては、5000系アルミニウム合金材およびA6005C-T5材を母材に用いることができない。

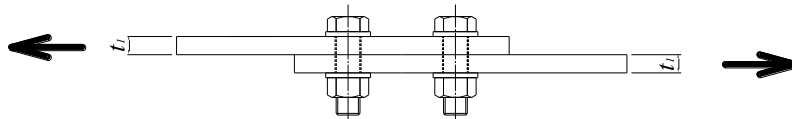


図-7.2.3 重ね継手

2面摩擦を有する突合せ継手において、鋼製高力ボルトに導入された軸力に対して、座金直下の連結板の表面にへこみを生じさせず、疲労荷重などの繰返し荷重に対してボルトにゆるみを生じさせない条件として、式(7.2.1)と(7.2.2a)が与えられている³⁾。連結板と母材の界面にも大きな接触面圧力が生じるので³⁾、母材が5000系アルミニウム合金材およびA6005C-T5材の場合、式(7.2.2b)に示すように、連結板の板厚を大きくとることによって、接触面圧力を低減することを図っている。1面摩擦を有する突合せ継手の母材と連結板の最小板厚、および重ね継手の母材の最小板厚は、式(7.2.1)と(7.2.2a)を参考にして決めている。

7.2.4 高力ボルトの許容力

摩擦接合用鋼製高力ボルト1本の許容力は次式で与えられる。

$$\rho_a = \rho_{0a} j \dots\dots\dots (7.2.5a)$$

$$j = \begin{cases} 1 & (1\text{面摩擦}) \\ 2 & (2\text{面摩擦}) \end{cases} \dots\dots\dots (7.2.5b)$$

ここに、 ρ_a : 摩擦接合用鋼製高力ボルト1本の許容力

ρ_{0a} : 摩擦接合用鋼製高力ボルト1本の1摩擦面あたりの許容力

摩擦接合用鋼製高力ボルト1本の1摩擦面あたりの許容力を表-7.2.1に示す。

表-7.2.1 摩擦接合用鋼製高力ボルト 1 本の 1 摩擦面あたりの許容力 ρ_{0a}

高力ボルトの等級	ボルトの呼び	ρ_{0a} (kN)	
		9.4.2 に規定される摩擦面処理が施された場合	摩擦面処理が施されない場合
F8T	M12	9.9	3.7
	M16	18.5	6.9
	M20	28.8	10.8
	M22	35.6	13.4
	M24	41.5	15.6
F10T	M12	12.3	4.6
	M16	22.9	8.6
	M20	35.8	13.4
	M22	44.2	16.6
	M24	51.5	19.3

摩擦接合用鋼製高力ボルト 1 本の 1 摩擦面あたりの許容力は次式で与えられる。

$$\rho_{0a} = \frac{1}{\nu} \mu N_d \dots\dots\dots (\text{解 7.2.1})$$

ここに、 ρ_{0a} : 摩擦接合用鋼製高力ボルト 1 本の 1 摩擦面あたりの許容力

ν : 継手のすべりに対する安全率 (1.85)

μ : すべり係数

9.4.2 に規定される摩擦面処理が施される場合 0.4

摩擦面処理が施されない場合 0.15

N_d : 設計ボルト軸力 = $\alpha \sigma_{S0.2} A_s \dots\dots\dots (\text{解 7.2.2})$

α : ボルトの 0.2% 耐力を低減するための比率

F8T に対して 0.85

F10T に対して 0.75

$\sigma_{S0.2}$: 摩擦接合用鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力

A_s : 摩擦接合用鋼製高力ボルトのねじ部の有効断面積

9.4.2 に規定される摩擦面処理が施され、表-9.4.1 に示す F10T の設計ボルト軸力の 10% 増しの初期導入ボルト軸力に対して、あるフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数が 0.45 を十分に超えることが示されている⁴⁾。さらに、すべり試験が実施された時のすべり荷重が、100 年後には 3.5% 低下することが示されている⁴⁾。

他方、鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手の温度が低下した場合、アルミニウム合金と鋼の線膨張係数の違いによってボルト軸力が低下する。M22 の鋼製高力ボルトに対して、単位温度の変化に対するボルト軸力の変化が 0.197 kN/°C であることが示されている¹⁾。したがって、30°C の温度低下に対して、ボルト軸力の低下は 5.91 kN になる。これは、M22 の設計ボルト軸力 205kN に対して 2.9% のボルト軸力の低下になる。

以上より、あるフッ素樹脂コート鋼製ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手に対して、100 年後に温度が 30°C 低下した場合、すべり試験が実施された時のすべり荷重が 6.4% 低下することになる。

7.2.2(3) の規定により、フッ素樹脂コート鋼製ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手が 0.45 以上のすべり係数を確保していたとしても、すべり試験が実施された時以降のボルト軸力の低下を考慮して、式(解 7.2.1) の計算では、すべり係数を 0.4 として高力ボルトの許容力を与えている。これは、す

べり試験が実施された時から 11%のボルト軸力の低下を見込んでいる。すなわち、前述したアルミニウム合金板摩擦接合継手で得られた 6.4%のボルト軸力の低下の約 2 倍のボルト軸力の低下を許容している。すべり試験が実施された時からのボルト軸力の低下が大きいことが懸念されるフッ素樹脂コート鋼製ボルトに対しては、付録 A の A.4 の解説に記載される方法により、すべり試験が実施された時以降のすべり係数を推定して、設計期間内のすべり係数が 0.4 以上あることを確認する必要がある。

摩擦面処理が施されていないとき、これまで、すべり係数に対して 0.2 が用いられてきた⁵⁾。しかし、前述と同様の考えに従って、すべり係数を 0.15 として高力ボルトの許容力を与えている。

9.4.2 に規定される摩擦面処理が施された場合および摩擦面処理が施されない場合に対して、式(解 7.2.1)によって計算される摩擦接合用鋼製高力ボルト 1 本の 1 摩擦面あたりの許容力を表-解 7.2.1 に示す。

表-解 7.2.1 摩擦接合用鋼製高力ボルト 1 本の 1 摩擦面あたりの許容力 ρ_{0a}

高力ボルトの等級	ボルトの呼び	ν	α	$\sigma_{50.2}$ (N/mm ²)	A_s (mm ²)	N_d (kN)	ρ_{0a} (kN)	
							9.4.2 に規定される摩擦面処理が施された場合 $\mu=0.4$	摩擦面処理が施されない場合 $\mu=0.15$
F8T	M12	1.85	0.85	640	84.3	45.9	9.9	3.7
	M16				157	85.4	18.5	6.9
	M20				245	133.3	28.8	10.8
	M22				303	164.8	35.6	13.4
	M24				353	192.0	41.5	15.6
F10T	M12	1.85	0.75	900	84.3	56.9	12.3	4.6
	M16				157	106.0	22.9	8.6
	M20				245	165.4	35.8	13.4
	M22				303	204.5	44.2	16.6
	M24				353	238.3	51.5	19.3

7.2.5 摩擦接合用高力ボルトの設計

(1) 図-7.2.4 に示すように、一様に分布する垂直応力が作用する摩擦接合継手の場合、次式を満たすようにボルト本数を決める。

$$\rho_P = \frac{P}{n} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.2.6)$$

ここに、 ρ_P : ボルト 1 本に作用する力
 P : 接合線の片側にある全ボルトに作用する力
 n : 接合線の片側にあるボルトの全本数
 ρ_a : ボルト 1 本の許容力

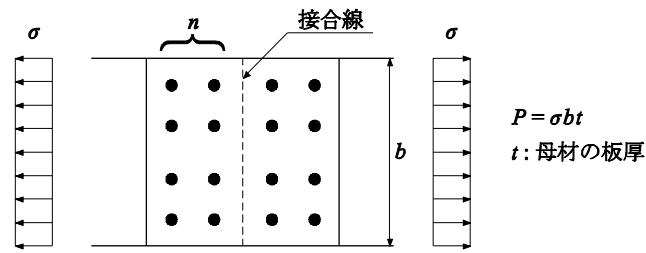


図-7.2.4 一様に分布する垂直応力が作用する摩擦接合継手

(2) 図-7.2.5 に示すように、一様に分布しない垂直応力が作用する摩擦接合継手の場合、次式を満たすように、各行のボルト本数を決める。

$$\rho_{Pi} = \frac{P_i}{n_i} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.2.7)$$

- ここに、
 ρ_{Pi} : i 行目のボルト 1 本に作用する力
 P_i : i 行目の、接合線の片側にある全ボルトに作用する力
 n_i : i 行目の、接合線の片側にあるボルトの全本数
 ρ_a : ボルト 1 本の許容力

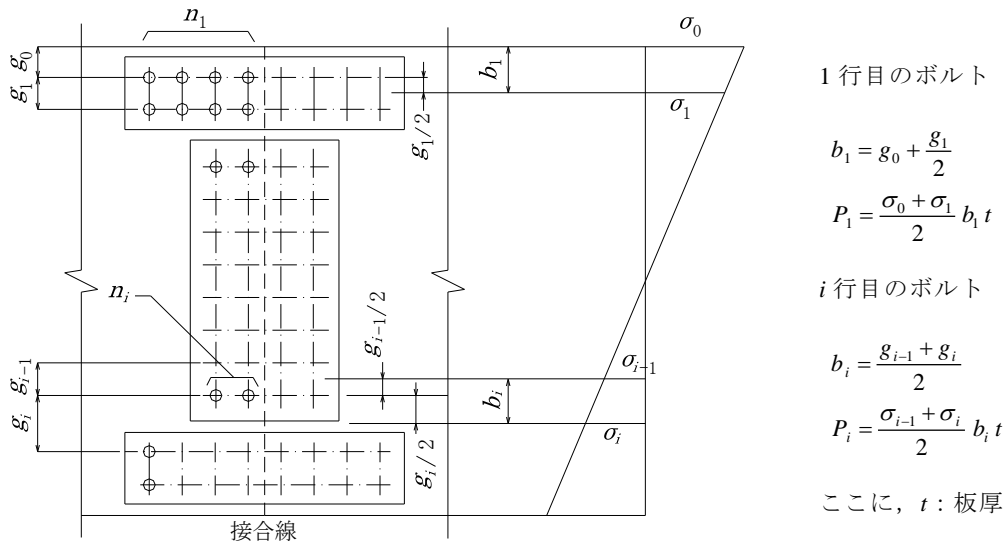


図-7.2.5 一様に分布しない垂直応力が作用する摩擦接合継手

(3) せん断力が作用する摩擦接合継手の場合、次式を満たすようにボルト本数を決める。

$$\rho_s = \frac{Q}{n} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.2.8)$$

- ここに、
 ρ_s : ボルト 1 本に作用する力
 Q : 接合線の片側にある全ボルトに作用する力
 n : 接合線の片側にあるボルトの全本数
 ρ_a : ボルト 1 本の許容力

(4) 垂直応力とせん断力が同時に作用する摩擦接合継手の場合、次式を満たすようにボルト本数を決める。

$$\rho = \sqrt{\rho_p^2 + \rho_s^2} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.2.9)$$

ここに、 ρ : ボルト 1 本に作用する力
 ρ_p : 垂直応力によってボルト 1 本に作用する力
 ρ_s : せん断力によってボルト 1 本に作用する力
 ρ_a : ボルト 1 本の許容力

(5) 図-7.2.6 に示すように、曲げによるせん断力を受ける板を水平方向に連結する摩擦接合継手の場合、次式を満たすようにボルト本数を決める。

$$\rho_H = \frac{QSp}{In} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.2.10)$$

ここに、 ρ_H : 水平方向に連結するボルト 1 本に作用する力
 Q : 曲げによるせん断力
 S : 接合線の外側の断面一次モーメント
 I : 母材の断面二次モーメント
 p : ボルトのピッチ
 n : 接合線直角方向のボルトの本数
 ρ_a : ボルト 1 本の許容力

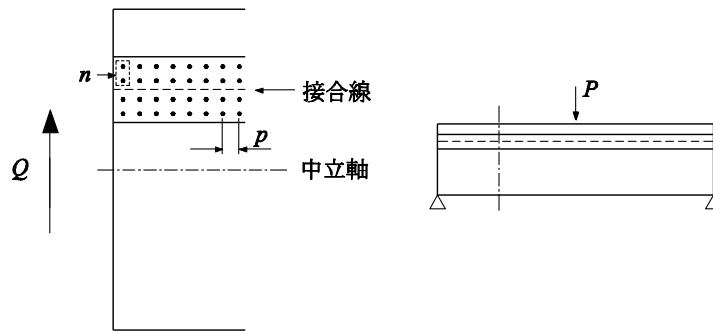


図-7.2.6 曲げによるせん断力を受ける板を水平方向に連結する摩擦接合継手

7.2.6 連結板および継手の母材の設計

- (1) 連結板には溶接または摩擦攪拌接合で接合された板を使用してはならない。
- (2) 2面摩擦を有する突合せ継手の連結板の厚さは等厚とする。
- (3) 引張力が作用する連結板は、7.2.7で規定される、純断面に生じる応力度が、3.1で規定される許容引張応力度以下になるように設計する。
- (4) 圧縮力が作用する連結板は、総断面に生じる応力度が、3.5で規定される、座屈の影響を考慮しない場合に対する許容圧縮応力度 σ_{cao} 以下になるように設計する。
- (5) 曲げモーメントが作用する連結板は、次式を満足するように設計する。

$$\sigma = \frac{M}{I} y \leq \sigma_a \dots\dots\dots (7.2.11)$$

ここに、 σ : 連結板の最外縁に生じる応力度
 M : 連結板に作用する曲げモーメント
 I : 部材の中立軸に関する、連結板の総断面に対する断面二次モーメント

- y : 部材の中立軸から連結板の最外縁までの距離
 σ_a : 3.1 で規定される許容引張応力度または 3.5 で規定される、座屈の影響を考慮しない場合に対する許容圧縮応力度 σ_{cao}

(6) 継手の母材の設計に関しては、連結板の設計と同様に、引張力が作用する場合、母材の純断面に生じる応力度が許容引張応力度以下になるように設計し、圧縮応力が作用する場合、総断面に生じる応力度が座屈の影響を考慮しない場合に対する許容圧縮応力度以下になるように設計する。

7.2.7 純断面積の計算

引張力が作用する板の純断面積の計算は次の各項に従う。

- (1) 純断面積は純幅と板厚との積である。板の純幅はその総幅からボルト孔により失われる幅を除いたものである。
- (2) 板の純断面積の算定に使用するボルト孔の直径は、ボルトの直径に 3mm を加えた値である。
- (3) 千鳥にボルト締めされた板の純幅は、着目断面の最初のボルト孔の直径を引き、順次、次式によって計算される w を各ボルト孔に対して差し引いたものとする。

$$w = D - \frac{p^2}{4g} \dots\dots\dots (7.2.12)$$

ここに、 D : ボルト孔の直径

p, g : それぞれ、ボルトのピッチとゲージ [図-7.2.8(b) 参照]

w の値が負の場合、ボルト孔の控除は無視する。

- (4) 山形および溝形の押出形材では、図-7.2.7 に示すように、展開断面に対して純断面積の計算を行う。展開断面の全幅は $a + b - t$ であり、ゲージ長 g は、山形断面の背面に沿って測ったボルト線間距離から厚さ t を差し引いた値である。

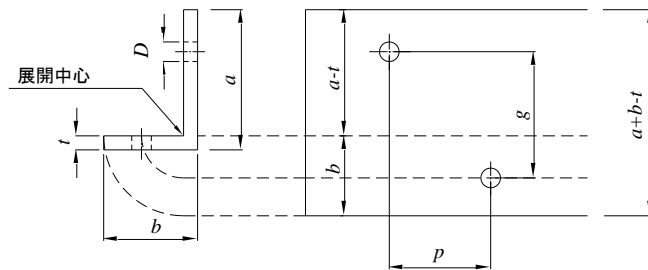


図-7.2.7 山形断面の展開

(3) 式(7.2.12)の使用方法について説明する。例として、図-解 7.2.1 に示す千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手の場合、三つの破断経路①(実線)、②(破線)、③(一点長鎖線)が考えられる。

破断経路①に対して、

$$b - 3D$$

破断経路②に対して、

$$b - D - \left(D - \frac{p^2}{4g}\right) - \left(D - \frac{p^2}{4g}\right) - \left(D - \frac{p^2}{4g}\right) - \left(D - \frac{p^2}{4g}\right) = b - 5D + \frac{p^2}{g}$$

破断経路③に対して,

$$b - D - \left(D - \frac{p^2}{4g}\right) - D - \left(D - \frac{p^2}{4g}\right) = b - 4D + \frac{p^2}{2g}$$

これら三つの値で最も小さな値が図-解 7. 2. 1 の純幅である。

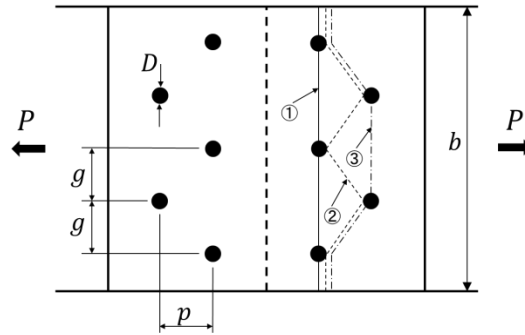


図-解 7. 2. 1 千鳥配置された高力ボルト摩擦接合継手

7.2.8 ボルトの中心間隔および縁端距離

(1) ボルトの最小中心間隔は表-7.2.2 に示す値とする。

表-7.2.2 ボルトの最小中心間隔

ボルトの呼び	最小中心間隔 (mm)
M12	40
M16	55
M20	65
M22	75
M24	85

(2) ボルトの最大中心間隔は表-7.2.3 に示す値とする。

表-7.2.3 ボルトの最大中心間隔

部材	p (mm)	g (mm)
圧縮部材	直列配置の場合 $8.5t$	$17t$
	千鳥配置の場合 $10t - \frac{3}{8}g$ ただし、 $8.5t$ 以下	
引張部材	直列配置の場合 $17t$	$17t$
	千鳥配置の場合 $2\left(10t - \frac{3}{8}g\right)$ ただし、 $17t$ 以下	

ここに、 t : 連結板の板厚

p と g : それぞれ、ボルトのピッチとゲージ (図-7.2.8 参照)

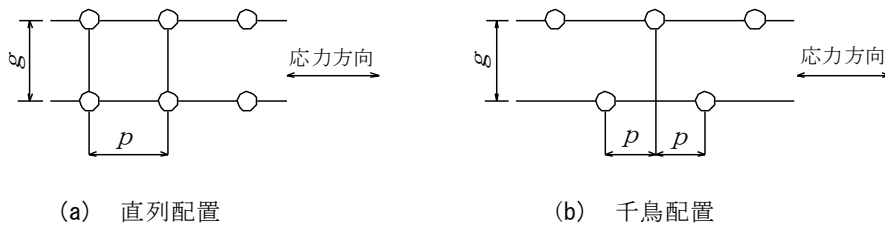


図-7.2.8 ボルトのピッチとゲージ

(3) 図-7.2.9 に示す、ボルトの縁端距離は以下の値とする。

- 1) ボルト孔の中心から材縁までの距離 (材縁距離) は、ボルト孔の直径の 1.5 倍以上とする。
- 2) ボルト孔の中心から部材端までの距離 (材端距離) は、ボルト孔の直径の 2 倍以上とする。
- 3) ボルト孔の中心からの材縁距離および材端距離の最大値は、連結板の板厚の 5.5 倍とする。ただし、90mm を超えてはならない。

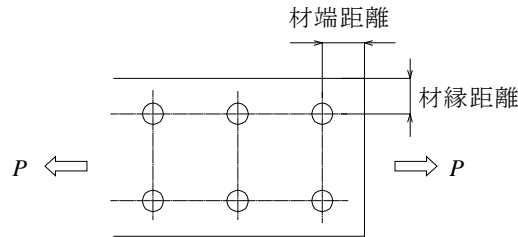


図-7.2.9 縁端距離

- (1) この規定は、支障なくボルト締め作業ができるために設けられたものであり、道路橋示方書⁶⁾および鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物⁷⁾に従っている。
- (2) この規定は、連結板の局部座屈を避けるために設けられたものであり、AASHTO⁸⁾に従っている。
- (3) この規定は、縁端部を破断させないこと、および板間の隙間から雨水などを浸入させないために設けられた規定である。1)は AA⁹⁾と Eurocode 9¹⁰⁾に、2)については Eurocode 9¹⁰⁾に、3)については AASHTO⁸⁾に従っている。

7.2.9 ボルトの最少本数

接合線の片側のボルトの最少本数は2本とする。

7.3 支圧接合継手

7.3.1 一般

- (1) 支圧接合継手は、防護柵、検査路などの付属物の製作に用いることができる。
- (2) アルミニウム合金板の支圧接合継手には、鋼製、ステンレス鋼製またはアルミニウム合金製で、強度が保証されたボルトセットを使用しなければならない。
- (3) 支圧接合継手の母材と連結板に使用できるアルミニウム合金材は、A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, A6061-T651 の板材および A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, **A6005C-T5**, **A6005C-T6** の押出型材である。
- (4) 鋼製またはステンレス鋼製ボルトの使用に際しては、ボルト自身の防錆とともに、ボルトとアルミニウム合金板との異種金属接触腐食を防止する必要がある。
- (5) **アルミニウム合金製リベット継手の設計も支圧接合継手の設計に準ずる。**

- (5) アルミニウム合金土木構造物に適用できるアルミニウム合金製の径リベットが開発されている¹¹⁾。

7.3.2 ボルトの許容力

(1) 支圧接合のボルト 1 本の許容力 ρ_a は、式(7.3.1)で与えられる許容せん断力 ρ_{Sa} と式(7.3.2)で与えられる許容支圧力 ρ_{Ba} のうち、**どちらか小さい方の値とする。**

$$\rho_{Sa} = m \frac{\pi d^2}{4} \tau_a \dots\dots\dots (7.3.1)$$

$$\rho_{Ba} = \min(dt_1\sigma_{1ba}, dt_{22}\sigma_{2ba}) \dots\dots\dots (7.3.2)$$

ここに、 ρ_{Sa} : ボルト 1 本の許容せん断力

ρ_{Ba} : ボルト 1 本の許容支圧力

m : せん断面の数

d : ボルトの直径

τ_a : ボルトの許容せん断応力度

t_1 : 母材の板厚

t_{22} : 連結板の総厚

σ_{1ba} : 母材の許容支圧応力度

σ_{2ba} : 連結板の許容支圧応力度

(2) ボルトのねじ部が、母材と連結板との間のせん断面にかからないようにしなければならない。

(3) ボルトの許容せん断応力度は、ボルトの保証強度に対して適切な安全率が確保されたものでなければならない。

(4) 母材および連結板に使用するアルミニウム合金材の許容支圧応力度は、表-7.3.1 に示す値とする。

表-7.3.1 アルミニウム合金材の許容支圧応力度

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	許容支圧応力度 (N/mm ²)
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	102
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	102
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	198
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	198
押出 形材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	98
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	98
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	180
	A6N01-T5	$3 \leq t \leq 6$	167
		$6 < t \leq 12$	143
A6N01-T6	$3 \leq t \leq 6$	180	

(4) アルミニウム合金材の許容支圧応力度は、道路橋示方書⁶⁾を参考にして、許容引張応力度の1.5倍としている。

7.3.3 支圧接合用ボルトの設計

(1) 軸力が作用する板を連結する場合、次式を満たすように設計する。

$$\rho_P = \frac{P}{n} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.3.3)$$

ここに、 ρ_P : ボルト 1 本に作用する力
 P : 軸力
 n : ボルト本数
 ρ_a : ボルト 1 本の許容力

(2) せん断力が作用する板を連結する場合、次式を満たすように設計する。

$$\rho_S = \frac{Q}{n} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.3.4)$$

ここに、 ρ_S : ボルト 1 本に作用する力
 Q : せん断力

(3) 曲げモーメントが作用する板を連結する場合、次式を満たすように設計する。

$$\rho_M = \frac{M}{\sum y_i^2} y_i \leq \frac{y_i}{y_n} \rho_a \dots\dots\dots (7.3.5)$$

ここに、 ρ_M : ボルト 1 本に作用する力
 M : 曲げモーメント
 Σ : 接合線の片側にあるボルトに対して総和をとることを表す記号
 y_i : ボルトから中立軸までの距離
 y_n : 最縁ボルトから中立軸までの距離。ただし、同一連結部のフランジをボルトで連結している場合には、中立軸からフランジの圧縮縁または引張縁までの距離。

(4) 軸力、せん断力および曲げモーメントが合わさって作用する板を連結する場合、次式を満たすように設計する。

$$\rho = \sqrt{(\rho_P + \rho_M)^2 + \rho_S^2} \leq \rho_a \dots\dots\dots (7.3.6)$$

ここに、 ρ : ボルト 1 本に作用する力

(5) 曲げによるせん断力を受ける板を水平方向に連結する場合、式(7.2.10)を満たすように設計する。

7.3.4 連結板および継手の母材の設計

支圧接合継手の連結板および継手の母材の設計は、7.2.6 に準ずる。

7.3.5 純断面積の計算

引張力が作用する板の純断面積の計算方法は 7.2.7 に準ずる。純断面積の算定に使用するボルト孔の直径は、ボルトの直径に 2mm を加えたものとする。

7.3.6 ボルトの中心間隔および縁端距離

7.2.8 に準ずる。

7.3.7 ボルトの最少本数

7.2.9 に準ずる。

参考文献

- 1) 大倉一郎，萩澤亘保，長尾隆史：アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下，構造工学論文集，Vol.56A，pp.827-837，2010.
- 2) JIS B 1186：摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット，2013.
- 3) 吉野浩祐，大倉一郎：アルミニウム合金板摩擦接合継手のボルト径と最小板厚の関係，ALST 研究レポート，No.33，2013.
- 4) 萩澤亘保，長尾隆史，大倉一郎：フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数，ALST 研究レポート，No.28，2012.
- 5) 日本アルミニウム協会（旧軽金属協会）：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第 1 次改定試案），1998.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，2009
- 8) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, 1994.
- 9) [Aluminum Association: Aluminum Design Manual, PART I, Specification for Aluminum Structures, 2010.](#)
- 10) Eurocode 9: Design of Aluminium Structures – Part 1-1: General Rules – General Rules and Rules for Buildings, 2007.
- 11) 萩澤亘保，大倉一郎，岩田節雄，北村幸嗣：2117 アルミニウム合金製大径リベットの開発とその強度特性，軽金属，第 56 巻，第 8 号，pp.441-447，2006.

8章 疲労設計

8.1 適用範囲

本章は、常温・大気中で使用される、アルミニウム合金土木構造物およびそれを構成する部材ならびに継手の疲労設計について規定する。

8.2 安全係数

疲労照査における安全性のレベルを調整する安全係数 ν は、1以上の値とする。設計対象とする部材または継手に疲労亀裂が発生したとき、冗長性（構造物全体の強度または機能に及ぼす影響）、重要性（構造物が疲労破壊したときの社会的影響）、検査性（構造物の供用中の定期点検によって疲労破壊に至る前に亀裂を発見する可能性）などを考慮して安全係数 ν の値を定める。

安全係数 ν は次式で与えられる。

$$\nu = \nu_b \nu_w \nu_i \dots\dots\dots \text{(解 8.2.1)}$$

ここに、 ν_b : 冗長度係数
 ν_w : 重要度係数
 ν_i : 検査係数

鋼構造物の疲労設計指針・同解説¹⁾においては、 ν_b 、 ν_w 、 ν_i の各係数に対して次の参考値が示されている。

ν_b : 対象とする部材または継手の疲労損傷が構造物全体の崩壊を引き起こす場合には1.10、構造物の強度あるいは機能に影響を及ぼす場合には、その程度により1.00～1.10、対象とする部材または継手に疲労損傷が生じて、構造物の強度および機能に特に問題が生じない場合には0.80。

ν_w : 構造物の重要度により0.80～1.10。

ν_i : 維持・管理のための検査が定期的に行われる場合には、その程度に応じて0.90～1.00、検査ができない場合には1.10。

鋼構造物の疲労設計指針・同解説¹⁾においては、 ν の上限値は1.25、下限値は0.80とされているが、本指針では、 ν の下限値を1としている。

8.3 疲労照査のための前提条件

(1) 摩擦撹拌接合継手

摩擦撹拌接合継手は、9.3の規定を満たす、両面摩擦撹拌接合によって製作された継手とする。

(2) 高力ボルト摩擦接合継手

高力ボルト摩擦接合継手は、7.2の規定を満たし、かつ、9.4.2に規定される摩擦面処理が施された2面摩擦を有する突合せ継手とする。

(3) 腐食の影響

無塗装で使用される部材または継手の疲労強度には、腐食の影響が考慮されなければならない。

(4) 疲労照査に用いる応力

疲労照査に用いる応力は、照査する断面に作用する公称応力（構造力学または骨組構造解析によって算出される応力）の範囲とする。

開口の縁など応力集中が生じる位置の疲労照査に用いる応力は、公称応力の範囲に、応力集中が生じる位置の弾性応力集中係数を乗じて得られる応力とする。

(5) 疲労照査の位置

同じ疲労強度等級の部材または継手が連続している場合には、応力範囲が最大となる位置で疲労照査を行う。

(6) 応力範囲の頻度分布

疲労設計荷重に対して、設計期間中に予想される、着目位置に生じる応力の変動を計算し、その波形に対してレインフロー法を適用して、応力範囲の頻度分布を求める。

(7) 組合せ応力

1) 膜応力と板曲げ応力の組合せ

膜応力と板曲げ応力が同時に作用する場合には、次式による垂直応力範囲を疲労照査で用いる。

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_m + \phi\Delta\sigma_b \dots\dots\dots (8.3.1)$$

ここに、 ϕ : 母材、摩擦攪拌接合継手、高力ボルト摩擦接合継手に対して 1、溶接継手に対して 0.8

$\Delta\sigma$: 垂直応力範囲

$\Delta\sigma_m$: 膜応力範囲

$\Delta\sigma_b$: 板曲げ応力範囲

2) 垂直応力とせん断応力の組合せ

垂直応力とせん断応力が同時に作用する場合には、主応力の範囲を応力範囲として疲労照査で用いる。接合線に対して主応力の作用方向が 45°以上 135°以下の場合、接合線直角方向の疲労強度を疲労照査で用いる。接合線に対して主応力の作用方向が -45°を超え 45°未満の場合、接合線方向の疲労強度を疲労照査で使用する。

(3) アルミニウム橋においては、厚さ 60 μ m 程度のエポキシ塗装の上に、厚さ 30 μ m 程度のポリウレタン塗装が、金属表面の美観を維持するために建設時に行なわれた後、再塗装は一般には行われ²⁾ない。したがって、アルミニウム合金の部材または継手は無塗装で使用されるのが普通であり、疲労強度には腐食の影響が考慮されなければならない。

(4) 弾性応力集中係数は、応力集中が生じる位置が弾性状態を保つとして計算される応力を公称応力で除した値である。開口の縁など応力集中が生じる位置の疲労照査において、公称応力の範囲に、応力集中が生じる位置の弾性応力集中係数を乗じて得られる応力を用いると、安全側の評価ができることが示されている³⁾。

(6) 疲労設計荷重の設定の仕方については、文献 1)と 4)が参考になる。

(7) 1) 疲労寿命が亀裂の伝播寿命に支配される溶接継手においては、板曲げ応力が板表面から板厚中央に向かって低下するので、板曲げ応力を受ける場合に対する亀裂の伝播速度は膜応力を受ける場合に対する亀裂の伝播速度より小さくなり、板曲げ応力に対する疲労寿命は、膜応力に対する疲労寿命より長くな

る。そこで、膜応力と板曲げ応力が同時に生じる場合、板曲げ応力は膜応力より小さく設定することができる。式(8.3.1)の $\phi = 0.8$ は、鋼構造物の疲労設計指針・同解説¹⁾に従っている。

摩擦撻拌接合継手は、溶接継手と比較して格段に滑らかである。したがって、摩擦撻拌接合継手の疲労寿命は、亀裂の発生寿命に支配される。亀裂の発生寿命には板表面に生じる応力が重要であり、これに対しては膜応力も板曲げ応力も同じであるので、 $\phi = 1$ としている。

(7) 2) 疲労照査で主応力範囲に対応する疲労強度に対して、主応力の作用方向が、接合線に対して $\pm 45^\circ$ を境として、接合線方向または接合線直角方向のものを使用することを規定している。適用する疲労強度の区分を $\pm 45^\circ$ とするこの妥当性については今後の検討課題である。

8.4 疲労照査

8.4.1 疲労限度に基づいた疲労照査

次式を満足する部材または継手は、疲労に対して安全であり、8.4.2 に規定される疲労照査を行う必要はない。

$$v\Delta\sigma_{\max} \leq Y_{c2}Y_t\Delta\sigma_{caf} \dots\dots\dots (8.4.1)$$

$$v\Delta\tau_{\max} \leq Y_{c2}\Delta\tau_{caf} \dots\dots\dots (8.4.2)$$

ここに、 v : 安全係数
 $\Delta\sigma_{\max}$, $\Delta\tau_{\max}$: それぞれ、設計期間中に予測される最大の垂直応力範囲とせん断応力範囲
 $\Delta\sigma_{caf}$, $\Delta\tau_{caf}$: それぞれ、垂直応力とせん断応力に**関**する、一定振幅応力に対する応力範囲の打切り限界
 Y_{c2} : 疲労限度に対する腐食影響係数 (8.5.4 参照)
 Y_t : 板厚影響係数 (8.5.5 参照)

8.4.2 S-N 曲線に基づいた疲労照査

設計対象とする部材または継手が式(8.4.1)または式(8.4.2)を満足しない場合には、次の(1)、(2)、(3)の中のどれかで疲労照査を行う。

(1) 累積疲労損傷比による疲労照査

次式を満足する部材または継手は、疲労に対して安全である。

$$D \leq \frac{1}{v^m} \dots\dots\dots (8.4.3)$$

ここに、 D : 累積疲労損傷比
 v : 安全係数
 m : S-N 曲線の傾きを表す値 (表-8.4.1 参照)

累積疲労損傷比 D は、次式で計算される。

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \dots\dots\dots (8.4.4)$$

ここに、 n_i : 応力範囲の頻度分布において、ある応力範囲成分 $\Delta\sigma_i$ または $\Delta\tau_i$ の頻度
 N_i : $\Delta\sigma_i$ または $\Delta\tau_i$ に対する疲労寿命
 k : 応力範囲の頻度分布の区分けの総数

垂直応力に関するある応力範囲成分 $\Delta\sigma_i$ またはせん断応力に関するある応力範囲成分 $\Delta\tau_i$ に対応する疲労寿命 N_i は、それぞれ次式で計算される。

$$N_i = \begin{cases} \frac{(Y_{c1}Y_t)^m c_a}{(\Delta\sigma_i)^m} & (\Delta\sigma_i > Y_{c2}Y_t\Delta\sigma_{vaf}) \\ \infty & (\Delta\sigma_i \leq Y_{c2}Y_t\Delta\sigma_{vaf}) \end{cases} \dots\dots\dots (8.4.5)$$

$$N_i = \begin{cases} \frac{Y_{c1}^m c_a}{(\Delta\tau_i)^m} & (\Delta\tau_i > Y_{c2}\Delta\tau_{vaf}) \\ \infty & (\Delta\tau_i \leq Y_{c2}\Delta\tau_{vaf}) \end{cases} \dots\dots\dots (8.4.6)$$

ここに、 m : S-N 曲線の傾きを表す値 (表-8.4.1 参照)
 c_a : 許容疲労抵抗 (表-8.5.1, 8.5.2, 8.5.5 参照)
 $\Delta\sigma_{vaf}$, $\Delta\tau_{vaf}$: それぞれ、垂直応力とせん断応力に関する、変動振幅応力に対する応力範囲の打切り限界
 Y_{c1} , Y_{c2} : それぞれ、S-N 曲線と疲労限度に対する腐食影響係数 (8.5.4 参照)
 Y_t : 板厚影響係数 (8.5.5 参照)

表-8.4.1 S-N 曲線の傾きを表す m の値

母材および摩擦攪拌接合継手		6.17
溶接継手	垂直応力を受ける場合	3
	せん断応力を受ける場合	5
高力ボルト摩擦接合継手		5.23

(2) 等価応力範囲による疲労照査

次式を満足する部材または継手は、疲労に対して安全である。

$$\nu\Delta\sigma_e \leq Y_{c1}Y_t\Delta\sigma_a \dots\dots\dots (8.4.7)$$

$$\nu\Delta\tau_e \leq Y_{c1}\Delta\tau_a \dots\dots\dots (8.4.8)$$

ここに、 ν : 安全係数
 $\Delta\sigma_e$: 垂直応力に対する等価応力範囲
 $\Delta\tau_e$: せん断応力に対する等価応力範囲
 $\Delta\sigma_a$: 垂直応力に対する許容応力範囲
 $\Delta\tau_a$: せん断応力に対する許容応力範囲
 Y_{c1} : S-N 曲線に対する腐食影響係数 (8.5.4 参照)
 Y_t : 板厚影響係数 (8.5.5 参照)

等価応力範囲 $\Delta\sigma_e$ と $\Delta\tau_e$ は、それぞれ次式で計算される。

$$\Delta\sigma_e = \left\{ \sum_{i=1}^k (\Delta\sigma_i)^m \frac{n_i}{N_T} \right\}^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (8.4.9)$$

$$\Delta\tau_e = \left\{ \sum_{i=1}^k (\Delta\tau_i)^m \frac{n_i}{N_T} \right\}^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (8.4.10)$$

ここに、 m : S-N 曲線の傾きを表す値 (表-8.4.1 参照)

$\Delta\sigma_i, \Delta\tau_i$: それぞれ、垂直応力とせん断応力に関する、応力範囲の頻度分布における応力範囲の一成成分

n_i : $\Delta\sigma_i$ または $\Delta\tau_i$ の頻度

$$N_T = \sum_{i=1}^k n_i \quad \text{: 設計期間中の全繰返し回数}$$

k : 応力範囲の頻度分布の区分けの総数

変動振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界 $Y_{c2}Y_t\Delta\sigma_{vaf}$ または $Y_{c2}\Delta\tau_{vaf}$ 以下の応力範囲に対して $n_i=0$ とする。ここで、 Y_{c2} は、疲労限度に関する腐食影響係数であり (8.5.4 参照)、 Y_t は板厚影響係数 (8.5.5 参照) である。

許容応力範囲 $\Delta\sigma_a$ と $\Delta\tau_a$ は、それぞれ次式で計算される。

$$\Delta\sigma_a = \left(\frac{c_a}{N_T} \right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (8.4.11)$$

$$\Delta\tau_a = \left(\frac{c_a}{N_T} \right)^{\frac{1}{m}} \dots\dots\dots (8.4.12)$$

ここに、 c_a : 許容疲労抵抗 (表-8.5.1, 8.5.2, 8.5.5 参照)

(3) 累積疲労損傷による疲労照査

次式を満足する部材または継手は、疲労に対して安全である。

$$v^m q_\sigma \leq (Y_{c1} Y_t)^m c_a \dots\dots\dots (8.4.13)$$

$$v^m q_\tau \leq Y_{c1}^m c_a \dots\dots\dots (8.4.14)$$

ここに、 v : 安全係数

m : S-N 曲線の傾きを表す値 (表-8.4.1 参照)

q_σ : 垂直応力に対する累積疲労損傷

q_τ : せん断応力に対する累積疲労損傷

c_a : 許容疲労抵抗 (表-8.5.1, 8.5.2, 8.5.5 参照)

Y_{c1} : S-N 曲線に関する腐食影響係数 (8.5.4 参照)

Y_t : 板厚影響係数 (8.5.5 参照)

累積疲労損傷 q_σ と q_τ は、それぞれ次式で計算される。

$$q_\sigma = \sum_{i=1}^k n_i (\Delta\sigma_i)^m \dots\dots\dots (8.4.15)$$

$$q_{\tau} = \sum_{i=1}^k n_i (\Delta \tau_i)^m \dots\dots\dots (8.4.16)$$

ここに、 $\Delta \sigma_i, \Delta \tau_i$: それぞれ、垂直応力とせん断応力に関する、応力範囲の頻度分布における応力範囲の一成分

n_i : $\Delta \sigma_i$ または $\Delta \tau_i$ の頻度

k : 応力範囲の頻度分布の区分けの総数

変動振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界 $Y_{c2} Y_t \Delta \sigma_{vaf}$ または $Y_{c2} \Delta \tau_{vaf}$ 以下の応力範囲に対して $n_i=0$ とする。ここで、 Y_{c2} は、疲労限度に関する腐食影響係数であり (8.5.4 参照)、 Y_t は板厚影響係数 (8.5.5 参照) である。

これまで、変動荷重を受ける部材または継手が疲労破壊する条件として、マイナーの線形累積損傷則および等価応力範囲が用いられてきた。累積疲労損傷による疲労照査がこれらより容易に行なえるので、本規定では、累積疲労損傷による疲労照査も示している。累積疲労損傷による疲労破壊条件はマイナーの線形累積損傷則を用いた疲労破壊条件と同等であることを次に示す⁵⁾。

マイナーの線形累積損傷則は次式で与えられる。

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \dots\dots\dots (解 8.4.1)$$

ここに、 n_i : 応力範囲の頻度分布において、ある応力範囲成分 $\Delta \sigma_i$ の頻度

N_i : $\Delta \sigma_i$ に対応する疲労寿命

k : 応力範囲の頻度分布の区分けの総数

$\Delta \sigma_i$ と N_i は S-N 曲線上にあるので、両者は次の関係を有する。

$$(\Delta \sigma_i)^m N_i = c_a \dots\dots\dots (解 8.4.2)$$

ここに、 m : S-N 曲線の傾きを表す値

c_a : 許容疲労抵抗

式(解 8.4.1)と(解 8.4.2)から N_i を消去して次式を得る。

$$\sum_{i=1}^k n_i (\Delta \sigma_i)^m = c_a \dots\dots\dots (解 8.4.3)$$

この式の左辺を q と置くと、部材が破壊する条件が次式で与えられる。

$$q = c_a \dots\dots\dots (解 8.4.4)$$

q を累積疲労損傷とよぶ。式(解 8.4.4)はマイナーの線形累積損傷則の式(解 8.4.1)から得られ、逆に式(解 8.4.4)から式(解 8.4.1)が導けるので、累積疲労損傷による疲労破壊条件はマイナーの線形累積損傷則を用いた疲労破壊条件と同等である。

8.5 疲労強度

8.5.1 母材および摩擦撹拌接合継手の疲労強度等級

6000 系アルミニウム合金の母材および摩擦撹拌接合継手の疲労強度等級を表-8.5.1 に示す。6000 系アルミニウム合金の母材および摩擦撹拌接合継手の疲労強度等級は 20 万回疲労強度 $\Delta\sigma_{20}$ で区分される。

表-8.5.1 6000 系アルミニウム合金の母材および摩擦撹拌接合継手の疲労強度等級

	疲労強度等級 $\Delta\sigma_{20}$ (N/mm ²)	許容疲労抵抗 c_a	一定振幅応力に対する応力範囲の打切り限界 $\Delta\sigma_{caf}$ (N/mm ²)	変動振幅応力に対する応力範囲の打切り限界 $\Delta\sigma_{caf}$ (N/mm ²)
母材	92	2.60×10^{17}	74.0	37.0
摩擦撹拌接合継手*	65	2.97×10^{16}	52.4	26.2

*：接合線方向および接合線直角方向ともに同じ疲労強度等級である。

溶接継手には 0.2%耐力に達する引張残留応力が生じるので、結果として、応力比の影響を考慮しないで、溶接継手の疲労強度は応力範囲のみで評価される。しかし、摩擦撹拌接合継手の場合、接合線直角方向の残留応力は小さな圧縮応力、接合線方向の残留応力は引張応力であるが、その大きさは接合部の 0.2%耐力に達しない^{6,7)}。したがって、摩擦撹拌接合継手の疲労強度の評価には、接合線直角方向および接合線方向ともに応力比の影響が考慮されなければならない。

A6005C-T5 の母材と摩擦撹拌接合部を有する引張試験片タイプの小型試験片の疲労試験が、-1, 0.1, 0.5 の応力比に対して実施され、表-解 8.5.1 に示す設計 S-N 曲線が提案された⁸⁾。提案曲線と疲労試験結果との比較を図-解 8.5.1 に示す。表-解 8.5.1(b) の摩擦撹拌接合継手の設計 S-N 曲線は、接合線直角方向に応力を受ける場合に対するものである。図-解 8.5.2 に示すように⁹⁾、接合線直角方向に応力を受ける場合に対する疲労強度が接合線方向に応力を受ける場合に対する疲労強度より低くなるので、表-解 8.5.1(b) の摩擦撹拌接合継手の設計 S-N 曲線が接合線方向に応力を受ける場合に対しても適用できるとしている。

前述したように、摩擦撹拌接合継手の疲労強度の評価には、応力比の影響が考慮されなければならないが、母材および摩擦撹拌接合継手の疲労設計に応力比を導入すると、疲労設計が非常に煩雑になる。そこで、本規定では、母材および摩擦撹拌接合継手ともに、表-解 8.5.1 の応力比 $R=0.5$ に対する設計 S-N 曲線と疲労限度に基づいて、表-8.4.1 の m の値および表-8.5.1 の c_a と $\Delta\sigma_{caf}$ の値を決めている。これは、道路橋および鉄道橋を考えた場合、死荷重と活荷重の全荷重によって生じる応力に対する、死荷重によって生じる応力の比は、概略 0.5 程度と想定したことによる。この応力比の値をいくりに設定するかは今後の検討課題である。

表-解 8.5.1 設計 S-N 曲線

(a) 母材

(b) 摩擦攪拌接合継手

設計 S-N 曲線		設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{21.447-6.15R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$	$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.486-6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{21.685-8.54R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$	$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \left(\frac{10^{20.692-8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.5 < R \leq 1$	$\Delta\sigma = \left\{ \frac{225(1-R)}{1.1879-0.1879R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}}$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822-2.0822R}{2.3758-0.3758R}}$	$0.5 < R \leq 1$	$\Delta\sigma = \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089-0.3089R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}}$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822-2.0822R}{2.3758-0.3758R}}$
疲労限度		疲労限度	
$-1 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{146(1-R)}{1.3244-0.6756R}$	$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{133(1-R)}{1.6786-0.3214R}$
		$0.1 < R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{99.0(1-R)}{1.2966-0.7034R}$

$\Delta\sigma$ と $\Delta\sigma_{caf}$ の単位 : N/mm²

$\Delta\sigma$ と $\Delta\sigma_{caf}$ の単位 : N/mm²

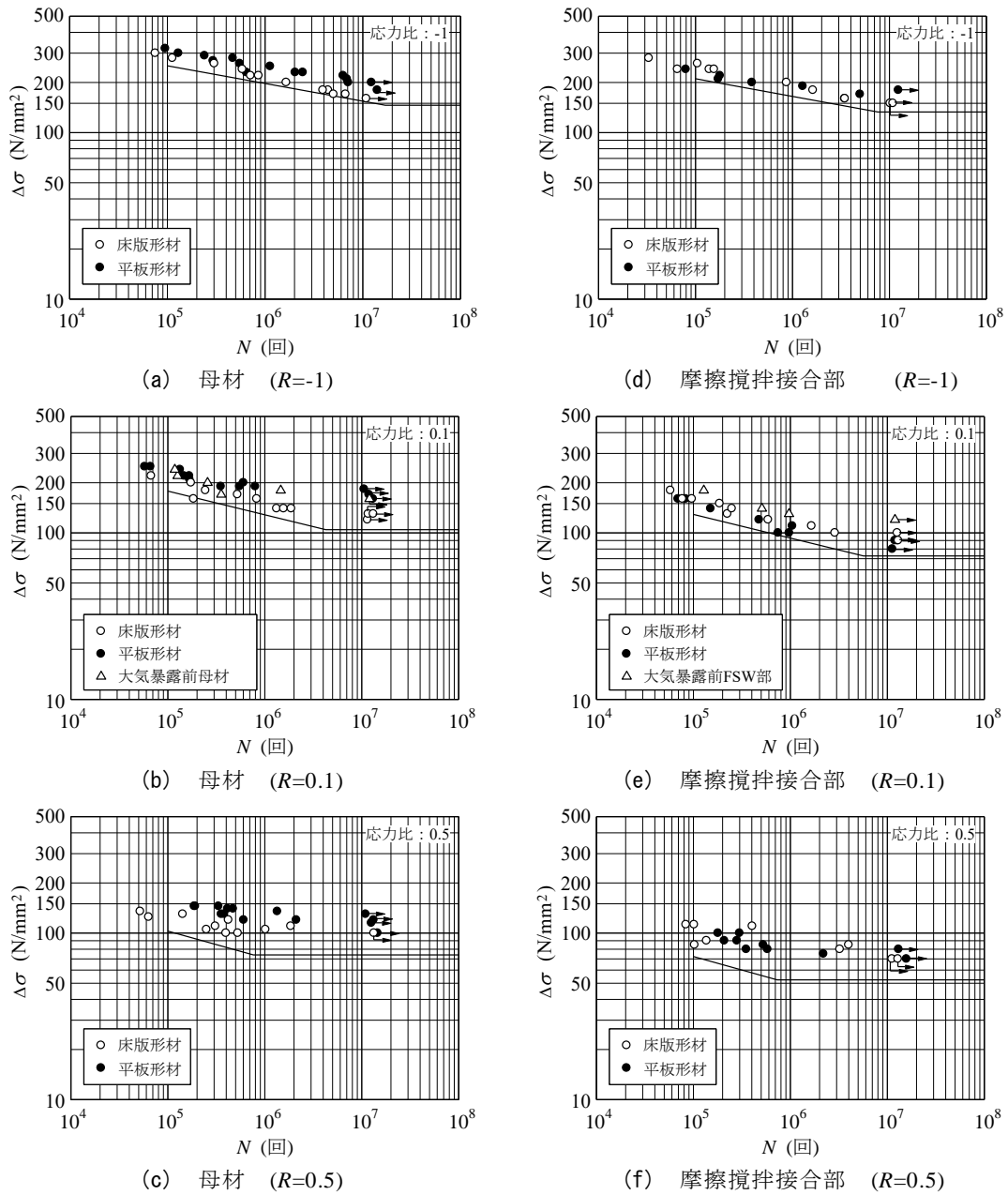


図-解 8.5.1 設計 S-N 曲線と疲労試験結果との比較

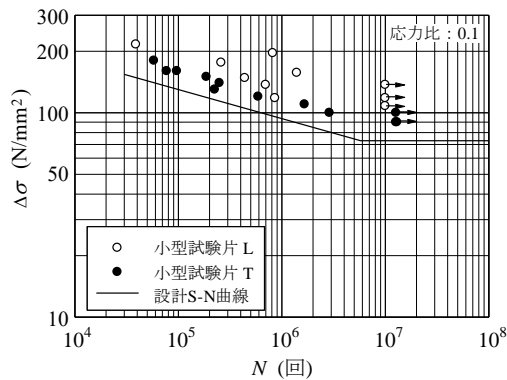


図-解 8.5.2 接合線直角方向 (T) と接合線方向 (L) の疲労強度の比較

母材に関して、本指針の設計 S-N 曲線と IIW 疲労設計指針¹⁰⁾のそれとの比較を図-解 8.5.3 に示す。IIW 疲労設計指針の設計 S-N 曲線は 5000 系および 6000 系アルミニウム合金の母材に適用できるとしているが、我国では 5000 系アルミニウム合金の母材の疲労試験が実施されておらず、5000 系と 6000 系アルミニウム合金の母材の疲労強度が同じになるという根拠もない。したがって、本指針では、規定の適用を 6000 系アルミニウム合金の母材と摩擦攪拌接合継手に限定している。

疲労寿命が亀裂の伝播寿命に支配される溶接継手の変動荷重を受けるとき、亀裂の伝播にともなって、一定振幅応力下で存在していた疲労限度がみかけ上消失したように見える¹¹⁾。疲労寿命が亀裂の発生寿命に支配される摩擦攪拌接合継手には、このような現象は現れないと考えられる。しかし、変動振幅応力が摩擦攪拌接合継手の疲労強度に与える影響は未だ明らかにされていない。したがって、本指針では、変動振幅応力が摩擦攪拌接合継手の疲労強度に与える影響に関して、8.5.2 の溶接継手の疲労強度等級で採用されている規定を踏襲し、変動振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界を、一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界の 1/2 としている。本指針の母材と摩擦攪拌接合継手の設計 S-N 曲線を図-解 8.5.4 に示す。

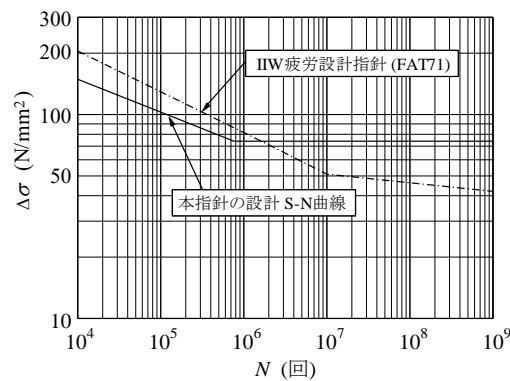


図-解 8.5.3 母材に関して、本指針と IIW 疲労設計指針の設計 S-N 曲線の比較

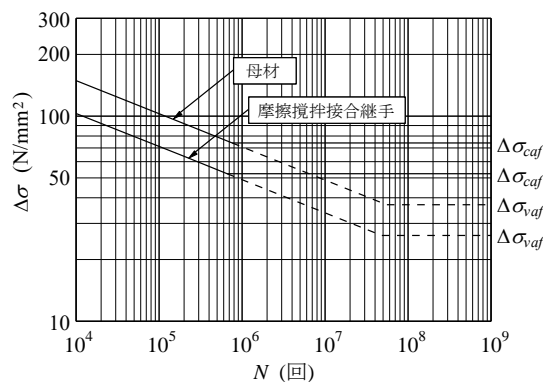


図-解 8.5.4 本指針の母材と摩擦攪拌接合継手の設計 S-N 曲線

8.5.2 溶接継手の疲労強度等級

(1) 溶接継手の疲労強度等級を表-8.5.2 に示す。溶接継手の疲労強度等級は 200 万回疲労強度 ($\Delta\sigma_{200}$ と $\Delta\tau_{200}$) で区分される。

表-8.5.2 溶接継手の疲労強度等級

(a) 垂直応力を受ける場合

疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)	許容疲労抵抗 c_a	一定振幅応力に対する 応力範囲の打切り限界 $\Delta\sigma_{caf}$ (N/mm ²)	変動振幅応力に対する 応力範囲の打切り限界 $\Delta\sigma_{vaf}$ (N/mm ²)
50	2.50×10^{11}	29.2	14.6
45	1.82×10^{11}	26.3	13.2
40	1.28×10^{11}	23.4	11.7
36	9.33×10^{10}	21.1	10.5
32	6.55×10^{10}	18.7	9.4
28	4.39×10^{10}	16.4	8.2
25	3.13×10^{10}	14.6	7.3
22	2.13×10^{10}	12.9	6.4
20	1.60×10^{10}	11.7	5.8
18	1.12×10^{10}	10.5	5.3

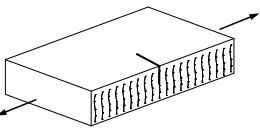
(b) せん断応力を受ける場合


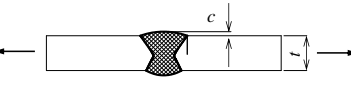
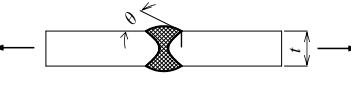
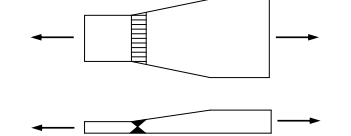
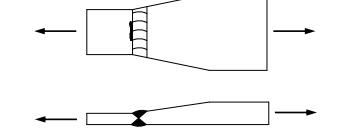
疲労強度等級 $\Delta\tau_{200}$ (N/mm ²)	許容疲労抵抗 c_a	一定振幅応力に対する 応力範囲の打切り限界 $\Delta\tau_{caf}$ (N/mm ²)	変動振幅応力に対する 応力範囲の打切り限界 $\Delta\tau_{vaf}$ (N/mm ²)
36	1.21×10^{14}	16.5	8.2
28	3.44×10^{13}	12.8	6.4

(2) 溶接継手の疲労強度等級を、垂直応力を受ける場合とせん断応力を受ける場合に対して、それぞれ表-8.5.3、8.5.4 に示す。

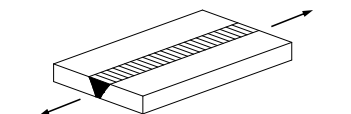
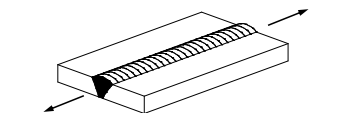
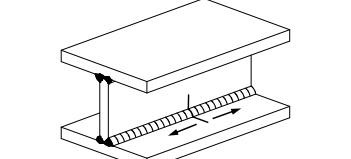
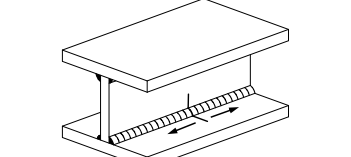
表-8.5.3 垂直応力を受ける溶接継手の疲労強度等級

(a) 横方向突合せ溶接継手

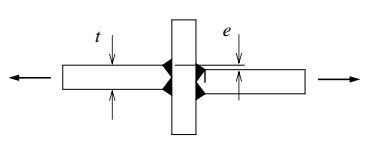
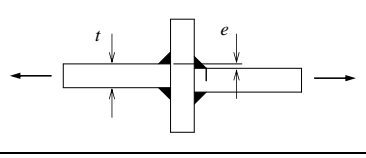
溶接継手の種類	備考	疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)
	切断 ・亀裂およびきずがないことを確認 ・角部に 0.5mm 以上の面取り	40

	<p>表面が平らにグラインダー仕上げされた横方向突合せ溶接継手 (X 開先または V 開先)</p>	45
	<p>下向き姿勢で、工場製作された横方向突合せ溶接継手 ・余盛り $c < 0.1t$</p>	36
	<p>板厚の 0.1 倍以上の余盛りを有する横方向突合せ溶接継手 ・止端角 $\theta \leq 50^\circ$ ・止端角 $\theta > 50^\circ$</p>	32 25
	<p>表面が平らにグラインダー仕上げされた、板厚および板幅が勾配 1:5 の遷移部を有する横方向突合せ溶接継手</p>	45
	<p>下向き溶接で工場製作された、板厚および板幅が勾配 1:5 の遷移部を有する横方向突合せ溶接継手</p>	32

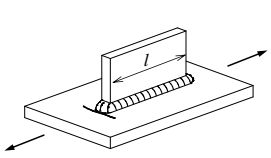
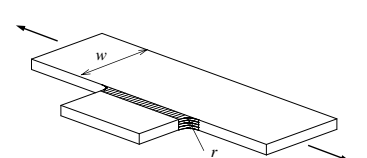
(b) 縦方向溶接継手

溶接継手の種類	備考	疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)
	<p>縦方向突合せ溶接継手 ・表裏面とも、平になるように、荷重方向と平行にグラインダー仕上げ</p>	50
	<p>縦方向突合せ溶接継手 ・溶接の棒継ぎなし ・溶接の棒継ぎあり</p>	45 36
	<p>棒継ぎなしの連続自動縦方向完全溶込み K 開先突合せ溶接継手 (フランジの応力で照査)</p>	50
	<p>棒継ぎなしの連続自動縦方向両側すみ肉溶接継手 (フランジの応力で照査)</p>	45

(c) 荷重伝達型の十字継手およびT継手

溶接継手の種類	備考	疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)
	十字継手およびT継手 ・K開先突合せ溶接 ・完全溶込み ・止端破壊 ・偏心 $e < 0.15t$ ・止端グラインダー仕上げ ・止端仕上げなし	28 25
	十字継手およびT継手 ・すみ肉溶接 ・止端破壊 ・偏心 $e < 0.15t$	22

(d) ガセット継手

溶接継手の種類	備考	疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)
	面外ガセットすみ肉溶接継手 ガセットの長さ l $l < 50\text{mm}$ $l < 150\text{mm}$ $l < 300\text{mm}$ $l \geq 300\text{mm}$	28 25 20 18
	板の縁および桁のフランジ縁に溶接された面内ガセット溶接継手 ・グラインダーで仕上げられた円弧状の遷移部 $r > 150\text{mm}$ または $r/w > 1/3$ $1/6 < r/w \leq 1/3$ $r/w \leq 1/6$	36 28 22

(e) 荷重非伝達型の十字継手およびT継手

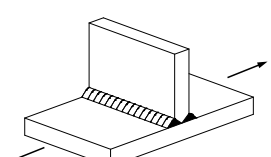
溶接継手の種類	備考	疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)
	付加板の板厚が主板の板厚より小さい十字継手およびT継手 ・K開先突合せ溶接, 止端グラインダー仕上げ ・両側すみ肉溶接, 止端グラインダー仕上げ ・溶接のままのすみ肉溶接 ・付加板の板厚が主板の板厚より大きい場合	36 36 28 25

表-8.5.4 せん断力を受ける溶接継手の疲労強度等級

溶接継手の種類	疲労強度等級 $\Delta\tau_{200}$ (N/mm ²)
母材, 完全溶込み開先溶接	36
すみ肉溶接	28

表-8.4.1 の溶接継手の m の値および表-8.5.2 の c_a と $\Delta\sigma_{caf}$ の値は, IIW 疲労設計指針¹⁰⁾で規定される設計 S-N 曲線に基づいている. IIW 疲労設計指針の設計 S-N 曲線概念を図-解 8.5.5 に示す. 図-解 8.5.5(a)に示すように, 垂直応力を受ける場合, 設計 S-N 曲線の傾きは 3 で, 繰返し回数 10^7 で傾きが 22 に変わる. 図-解 8.5.5(b)に示すように, せん断応力を受ける場合, 設計 S-N 曲線の傾きは 5 で, 繰返し回数 10^8 で傾きが 22 に変わる. 本指針では, 設計 S-N 曲線の傾きが変わる応力範囲, すなわち垂直応力を受ける場合, 繰返し回数 10^7 に対する垂直応力範囲を $\Delta\sigma_{caf}$, せん断応力を受ける場合, 繰返し回数 10^8 に対するせん断応力範囲を $\Delta\tau_{caf}$ の値に採用している. さらに, $\Delta\sigma_{caf}$ と $\Delta\tau_{caf}$ の 1/2 を, それぞれ $\Delta\sigma_{vaf}$ と $\Delta\tau_{vaf}$ としている. これは, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説¹⁾で, 変動振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界が, 一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界の約 1/2 であることに基づいている. 本指針の設計 S-N 曲線概念を図-解 8.5.6 に示す. 図中の変数の間には次の関係がある.

垂直応力を受ける場合

$$c_a = 2 \times 10^6 (\Delta\sigma_{200})^3 \dots\dots\dots (解 8.5.1)$$

$$\Delta\sigma_{caf} = 0.585 \Delta\sigma_{200} \dots\dots\dots (解 8.5.2)$$

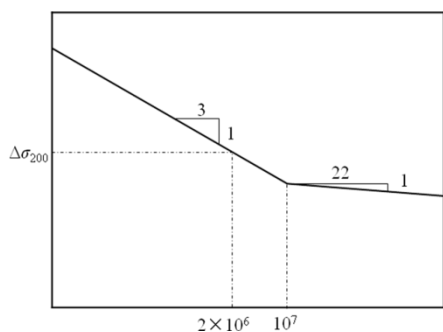
$$\Delta\sigma_{vaf} = \Delta\sigma_{caf} / 2 \dots\dots\dots (解 8.5.3)$$

せん断応力を受ける場合

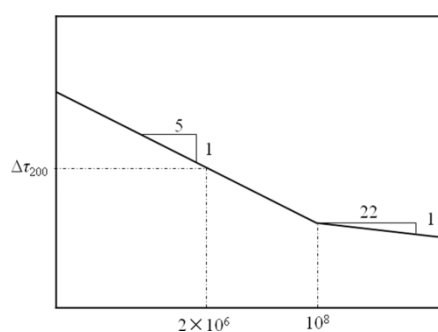
$$c_a = 2 \times 10^6 (\Delta\tau_{200})^5 \dots\dots\dots (解 8.5.4)$$

$$\Delta\tau_{caf} = 0.457 \Delta\tau_{200} \dots\dots\dots (解 8.5.5)$$

$$\Delta\tau_{vaf} = \Delta\tau_{caf} / 2 \dots\dots\dots (解 8.5.6)$$

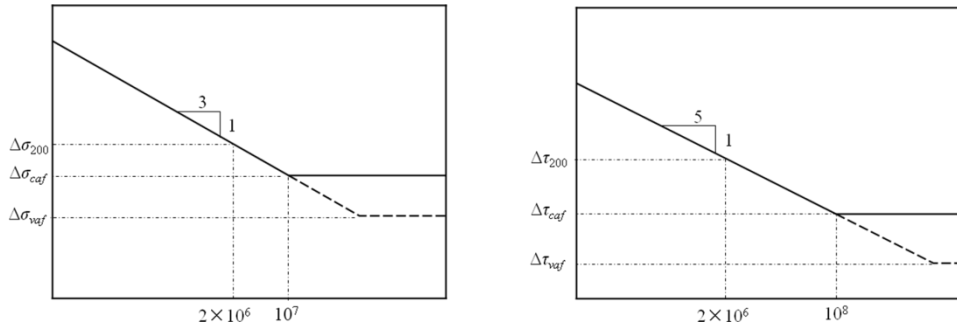


(a) 垂直応力を受ける場合



(b) せん断応力を受ける場合

図-解 8.5.5 IIW 疲労設計指針の設計 S-N 曲線概念



(a) 垂直応力を受ける場合 (b) せん断応力を受ける場合

図-解 8.5.6 本指針の設計 S-N 曲線の概念

8.5.3 高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度等級

高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度等級を表-8.5.5 に示す。高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度等級は 200 万回疲労強度 $\Delta\sigma_{200}$ で区分される。図-8.5.1 を参照して、連結板と母材の板厚比 t_2/t_1 を 1 以上とする。

表-8.5.5 高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度等級

疲労強度等級 $\Delta\sigma_{200}$ (N/mm ²)	許容疲労抵抗 c_a	一定振幅応力に対する 応力範囲の打ち切り限界 $\Delta\sigma_{caf}$ (N/mm ²)	変動振幅応力に対する 応力範囲の打ち切り限界 $\Delta\sigma_{vaf}$ (N/mm ²)
66	6.49×10^{15}	48.6	24.3

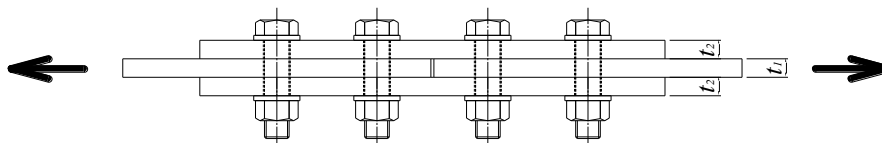


図-8.5.1 高力ボルト摩擦接合継手

高力ボルト摩擦接合継手においては、疲労亀裂はボルト孔の縁に発生するのではなく、ボルト孔周辺の連結板の表面または母材の表面に、こすれによって発生する¹²⁾。すなわち、フレットング疲労亀裂が発生する。連結板と母材が A6061-T6 の試験片の疲労試験結果に基づいて、表-解 8.5.2 に示す設計 S-N 曲線と疲労限度が提案されている¹³⁾。これらは、ボルトの導入軸力が F8T と F10T の両方に適用できる。設計 S-N 曲線と疲労試験結果との比較を図-解 8.5.7 に示す。ここで、図-解 8.5.7(a)の $\Delta\sigma_1$ と図-解 8.5.7(b)の $\Delta\sigma_2$ は、それぞれ母材と連結板に生じる応力範囲である。 $\Delta\sigma_1$ と $\Delta\sigma_2$ には次の関係がある。

$$t_1 \Delta\sigma_1 = 2t_2 \Delta\sigma_2 \dots\dots\dots (解 8.5.7)$$

ここに、 t_1 と t_2 : それぞれ、母材と連結板の厚さ

高力ボルト摩擦接合継手の継手全体としての許容応力範囲は、母材と連結板が与える許容応力範囲のどちらか低い方である。式(解 8.5.7)を用いて、連結板に生じる応力範囲を、母材に生じる応力範囲で表すと、表-解 8.5.2(b)に示すように、連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度を表す式に板厚比 t_2/t_1 に関する項が現れる。連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度は、 t_2/t_1 が大きくなるに従って上昇し、 t_2/t_1 が 0.81 以上になる

表-解 8.5.2 設計 S-N 曲線と疲労限度

(a) 母材

設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\log N = 16.365 - 0.937R - 5.225 \log(\Delta\sigma)$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\log N = 16.386 - 1.147R - 5.225 \log(\Delta\sigma)$
疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = -31.08R + 62.59$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma_{caf} = -27.20R + 62.20$

(b) 連結板

設計 S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\log N = 12.615 - 0.636R + 3.547 \log \frac{2t_2}{t_1} - 3.547 \log(\Delta\sigma)$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\log N = 12.629 - 0.775R + 3.547 \log \frac{2t_2}{t_1} - 3.547 \log(\Delta\sigma)$
疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{2t_2}{t_1} (-19.20R + 38.65)$
$0.1 < R \leq 0.5$	$\Delta\sigma_{caf} = \frac{2t_2}{t_1} (-16.73R + 38.41)$

$\Delta\sigma$: 母材に生じる応力で表された許容応力範囲 (単位: N/mm^2)

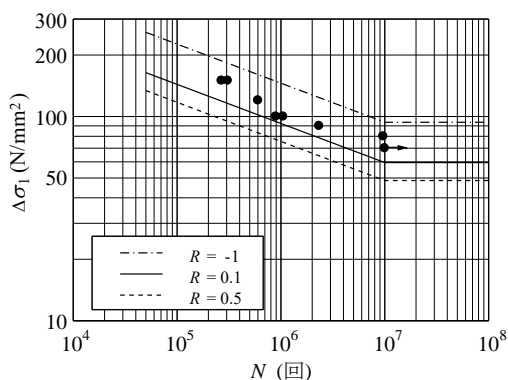
$\Delta\sigma_{caf}$: 疲労限度 (単位: N/mm^2)

R : 応力比

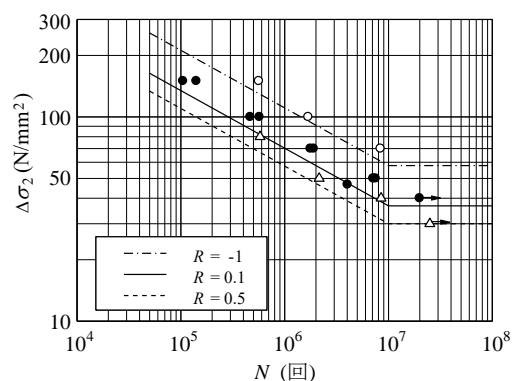
N : 繰返し回数

t_1 : 母材の厚さ

t_2 : 連結板の厚さ



(a) 母材



(b) 連結板

図-解 8.5.7 設計 S-N 曲線と疲労試験結果との比較

と、連結板の設計 S-N 曲線と疲労限度が母材のそれらより高くなる。

他方、連結板の厚さが母材の疲労強度に及ぼす影響が調べられ、 $R=0.1$ に対して、 t_2/t_1 が 1 以上の場合、表-解 8.5.2(a) の設計 S-N 曲線と疲労限度が、母材の疲労強度を安全側に評価することが示されている¹⁴⁾。したがって、 t_2/t_1 が 1 以上の場合、表-解 8.5.2(a) の母材の設計 S-N 曲線と疲労限度が、高力ボルト摩擦接合継手の継手全体としての設計 S-N 曲線と疲労限度を与える。本規定の設計 S-N 曲線と疲労限度は、8.5.1 の解説で述べたと同じ理由によって、表-解 8.5.2(a) において、 $R = 0.5$ に対するものを採用している。

表-解 8.5.2 の設計 S-N 曲線と疲労限度は、母材の厚さが 8mm の試験片の疲労試験結果に基づいて作成されているので、母材の厚さが 8mm と大きく異なる場合には、本規定の適用には注意が必要である。さらに、7.2.1 で規定されているように、**疲労荷重を受ける高力ボルト摩擦接合継手の母材と連結板**に使用できるアルミニウム合金材は、A6061-T6 と A6061-T651 の板材および A6061-T6 と **A6005C-T6** の押出型材のみであることに注意されたい。今後、母材と連結板の板厚、ボルト径、ボルト本数が高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度に与える影響が明らかにされなければならない。

8.5.4 腐食影響係数

無塗装で使用される部材または継手に対する腐食影響係数を表-8.5.6 に示す。 Y_{c1} と Y_{c2} は、それぞれ S-N 曲線と疲労限度に対する腐食影響係数である。

表-8.5.6 腐食影響係数

	Y_{c1} (S-N 曲線)	Y_{c2} (疲労限度)
母材	0.71	0.71
摩擦撈拌接合継手	0.87	0.87
溶接継手	1	0.85
高力ボルト摩擦接合継手	1	1

塗装などの防食処理が施された場合に対する腐食影響係数 Y_{c1} と Y_{c2} の値は、ともに 1 である。

A6005C-T5 の母材試験片および摩擦撈拌接合部を有する試験片が沖縄県嘉弥真島で大気暴露され、暴露期間 1 年、2 年、3 年後に回収され、その疲労試験が行われ、大気暴露による腐食が疲労強度に与える影響が明らかにされている^{15),16)}。図-解 8.5.8 に示すように、大気暴露による腐食に起因する、母材および摩擦撈拌接合部の疲労強度の低下は、大気暴露期間 1 年以降止まり（図-解 1.5.1 参照）、母材の疲労強度は元から 71.6% まで、摩擦撈拌接合部の疲労強度は元から 87.2% まで低下する。これに基づいて、本指針では、腐食影響係数 Y_{c1} と Y_{c2} の値を母材に対して 0.71、摩擦撈拌接合部に対して 0.87 を採用している。

同様に、**A6005C-T5** の MIG 溶接部の疲労強度に大気暴露による腐食が与える影響が調べられている¹⁷⁾。図-解 8.5.9 に示すように、大気暴露による腐食は S-N 曲線に影響しないが、疲労限度を元から 85.7% まで低下させる。これに基づいて、本指針では、溶接継手に対して、S-N 曲線に対する腐食影響係数 Y_{c1} を 1、疲労限度に対する腐食影響係数 Y_{c2} を 0.85 としている。

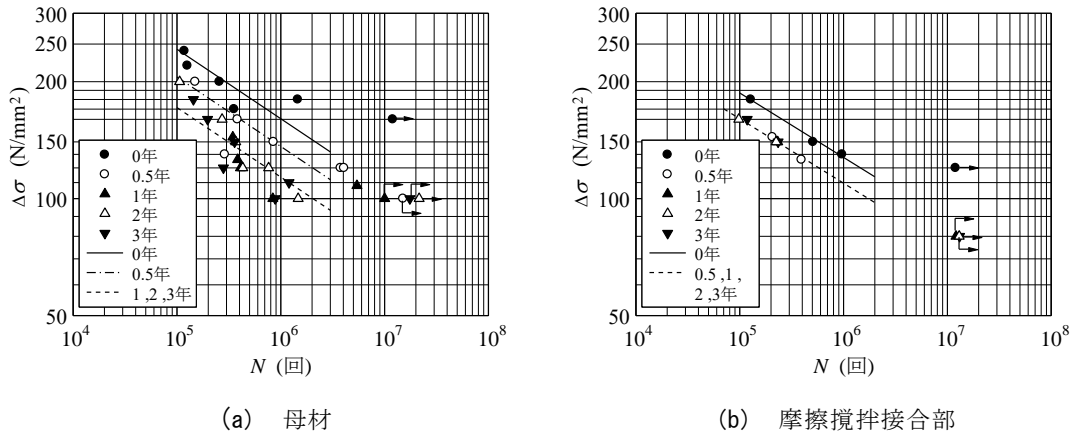


図-解 8.5.8 大気暴露による腐食が母材と摩擦撹拌接合部の疲労強度に与える影響 (R=0.1)

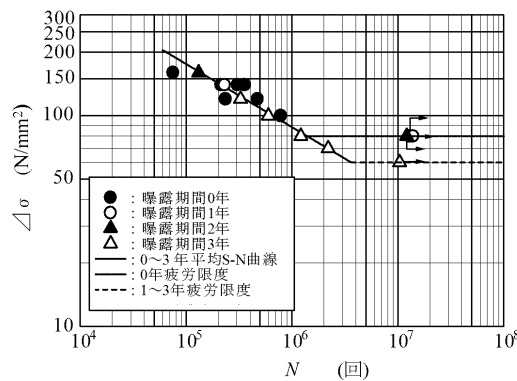


図-解 8.5.9 大気暴露による腐食が MIG 溶接部の疲労強度に与える影響 (R=0.1)

8.5.5 板厚影響係数

(1) 母材と摩擦撹拌接合継手

母材と摩擦撹拌接合継手の板厚影響係数 Y_t は 1 である。

(2) 溶接継手

表面を平らにグラインダー仕上げされた場合を除く横方向突合せ溶接継手，付加板の板厚が 12mm を超える荷重伝達型の十字継手および T 継手，付加板の板厚が 12mm を超える荷重非伝達型の十字継手および T 継手に対して，板厚影響係数 Y_t は次式で与えられる。

$$Y_t = \begin{cases} 1 & (t \leq 25\text{mm}) \\ \left(\frac{25}{t}\right)^{0.25} & (t > 25\text{mm}) \end{cases} \dots\dots\dots (8.5.1)$$

ここに， t : 板厚

上記以外の溶接継手の板厚影響係数 Y_t は 1 である。

(3) 高力ボルト摩擦接合継手

高力ボルト摩擦接合継手の板厚影響係数 Y_t は 1 である。

板厚効果は、板厚が厚くなるに従って、疲労強度が低下する現象であり、疲労寿命が亀裂の伝播寿命に支配される溶接継手に現れる¹⁸⁾。溶接継手に対する規定は、鋼構造物の疲労設計指針・同解説⁹⁾に準拠している。

摩擦撹拌接合継手は、溶接継手と比較して格段に滑らかである。したがって、摩擦撹拌接合継手の疲労寿命は、亀裂の発生寿命に支配され、摩擦撹拌接合継手に板厚効果は生じないと考えられる。

フレTTィング疲労亀裂が発生する高力ボルト摩擦接合継手の板厚効果については今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，2012.
- 2) 大倉一郎，萩澤亘保，花崎昌幸：アルミニウム構造学入門，東洋書店，pp.59-60，2006.
- 3) 大倉一郎，原田祐樹，萩澤亘保，長尾隆史：道路橋用アルミニウム床版の適用支間長，ALST 研究レポート，No.9，2009.
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.
- 5) 大倉一郎：鋼構造設計学の基礎，東洋書店，pp.107-109，2004.
- 6) 大倉一郎，萩澤亘保，鳴尾亮，戸田均：摩擦撹拌接合で製作されたアルミニウム床版の疲労特性，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.255-266，2002.
- 7) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隅心平：構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.789-805，2008.
- 8) 大倉一郎，牧山大祐，萩澤亘保：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦撹拌接合部の設計 S-N 曲線，ALST 研究レポート，No.6，2009.
- 9) 大倉一郎，牧山大祐：強度低下と残留応力を考慮した 6000 系アルミニウム合金材の摩擦撹拌接合部の疲労強度，ALST 研究レポート，No.19，2010.
- 10) Hobbacher, A.: IIW recommendations for fatigue design of welded joints and components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.
- 11) 大倉一郎：鋼橋の疲労，東洋書店，pp.42-46，1994.
- 12) 大倉一郎，西田貴裕：アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性，ALST 研究レポート，No.8，2009.
- 13) 吉野浩祐，大倉一郎：アルミニウム合金板摩擦接合継手の設計 S-N 曲線，ALST 研究レポート，No.31，2013.
- 14) 吉野浩祐，大倉一郎：連結板の厚さがアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労強度に与える影響，ALST 研究レポート，No.35，2014.
- 15) 萩澤亘保，大倉一郎，花崎昌幸，大西弘志，佐藤正典：アルミニウム合金材の母材と摩擦撹拌接合部の疲労強度に腐食が与える影響，土木学会論文集 A，Vol.62，No.3，pp.478-488，2006.
- 16) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6N01-T5 の母材および摩擦撹拌接合部の疲労強度に応力比と腐食が与える影響，ALST 研究レポート，No.2，2007.
- 17) 大倉一郎，石川敏之：アルミニウム合金 A6005C-T5 の MIG 溶接部の疲労強度に腐食が与える影響，ALST 研究レポート，No.32，2013.
- 18) 文献 11) の pp.89-92.

9章 製 作

9.1 部材加工

(1) 罫書きおよび切断

- 1) 部材の切断は、鋸切断、ウォータージェット、プラズマ、レーザー、シャーによって行う。
- 2) 切断後、罫書き線およびポンチマークが部材に残らないようにする。
- 3) 切断面に残されたバリあるいはノッチは、グラインダーなどによって平滑に仕上げる。
- 4) 塗装を施す場合および疲労の影響を考慮する場合には、材片の切断角部に 0.5mm 以上の面取りを施す。これら以外の場合には、外に露出する材片の切断角部のバリを取る。

(2) 孔あけ

1) ボルト孔の直径

ボルト孔の直径を表-9.1.1 に示す。ボルト孔の直径の許容差は、+0.5mm とする。

表-9.1.1 ボルト孔の直径

ボルトの呼び	摩擦接合 (mm)	支圧接合 (mm)
M12	14.5	13.5
M16	18.5	17.5
M20	22.5	21.5
M22	24.5	23.5
M24	26.5	25.5

- 2) 孔あけはドリルまたはドリルおよびリーマ通しの併用により行う。疲労の影響を考慮する必要がない部材で、かつ材片の厚さが 10mm 以下の場合には、押抜きによって孔をあけてもよい。
- 3) 孔あけによって孔周辺に生じたバリは除去する。

(3) 冷間曲げ加工

主要部材において冷間曲げ加工を行う場合には、表面の割れおよびしわを防ぐだけでなく、加工後の品質が要求性能を満していることを、冷間曲げ加工を模擬した試験片によって確認しなければならない。

9.2 溶接

9.2.0 用語の定義

(1) パス間温度

多層溶接において、次のパスを開始する直前の溶接ビードの温度。ここで、溶接線に沿って行う 1 回の溶接作業のことをパスという。

(2) ストロングバック

突合せ溶接において、板と板の目違いを修正、あるいは角変形（溶接によって部材または構造物に生じる横曲がり変形）およびねじれを防止するために、一時的に取り付け

るジグ。

(3) プリフロー

ガスシールドアーク溶接において、溶着金属への空気の巻き込みを防止するために、溶接を開始する前に、ある一定時間、シールドガスを放出すること。

(4) クレータ処理

クレータ（溶接において、ビード終端に凝固収縮によって生じるくぼみ）の発生を防止するために、ビード終端で溶接棒を一定時間保持すること。

(5) ガス炎加熱法

溶接変形を矯正する方法の一つで、ガス溶接用トーチを用いて局部加熱を行った後、水冷し、材料が局部的に熱収縮することによって変形をとる方法。

9.2.1 一般

(1) アルミニウム合金材の溶接は、MIG 溶接または TIG 溶接で行う。

(2) 酸化被膜、錆、塗料、油などが溶接個所にあってはならない。

(3) 酸化被膜の削除は、溶接の直前に行う。

(4) 溶接部近傍を十分に乾燥させて溶接を行う。

(5) 空気中の相対湿度が 80% 未満で溶接を行う。

(6) 予熱を行う場合、予熱温度は、A5083-O に対して 200℃ 以下、A5083-H112、A6061-T6、A6061-T651、A6005C-T5、A6005C-T6 に対して 100℃ 以下とする。

(5) 空気中の相対湿度が 80% 以上になるとブローホールの発生が急激に増える¹⁾。

(6) JIS Z 3604²⁾を参考にして本規定を設けている。

9.2.2 溶接施工試験

(1) 製作の前に溶接施工試験が行われなければならない。ただし、過去に溶接施工試験が行われ、かつ製作経験がある場合には、当事者間の協議で溶接施工試験を省略することができる。

(2) 溶接施工試験は表-9.2.1 に示す種類の試験を行う。

(3) 溶接は、実際の製作で用いる溶接条件で、実際に行う溶接姿勢で行う。

(4) 溶接施工試験で用いる供試体の材料と断面形状は、実際の製作で使用されるものと同じにする。ただし、同種のアルミニウム合金材で板厚が異なる継手は、板厚の薄い方のアルミニウム合金材で供試体を製作してもよい。

(5) 非破壊試験は、供試体から破壊試験用の試験片を採取する前に行う。目視検査と放射線透過試験は接合部の全線に対して行う。

(6) 完全溶込み開先溶接の供試体から、図-9.2.1 に示すように、引張試験片、曲げ試験片、マクロ観察試験片を採取する。試験片の数は、引張試験片 2、曲げ試験片 2、マクロ観察試験片 1 である。試験片を採取する際、試験片と試験片との間に約 10mm の間隔を設ける。

(7) すみ肉溶接のマクロ観察に用いる供試体を図-9.2.2 に示す。

(8) 非破壊試験および破壊試験の各試験方法ならびに品質判定基準は 9.2.3 の規定に従う。

表-9.2.1 溶接施工試験の種類

溶接継手の種類	試験の種類	
完全溶込み開先溶接継手	破壊試験	引張試験
		曲げ試験
		マクロ観察
	非破壊試験	目視検査
		放射線透過試験
すみ肉溶接継手	破壊試験	マクロ観察
	非破壊試験	目視検査

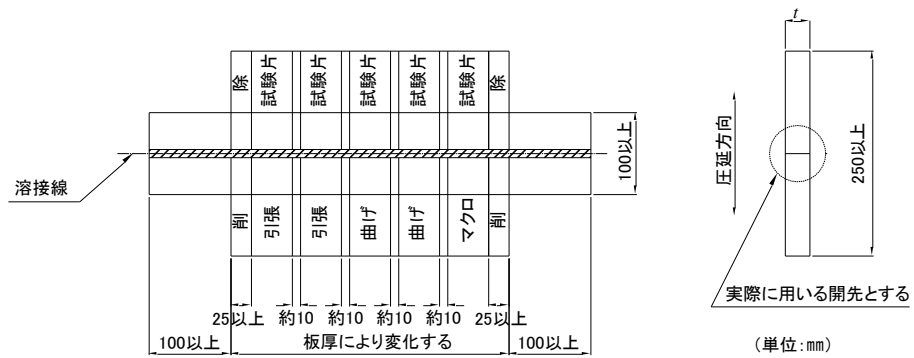


図-9.2.1 完全溶込み開先溶接の溶接施工試験に用いる供試体

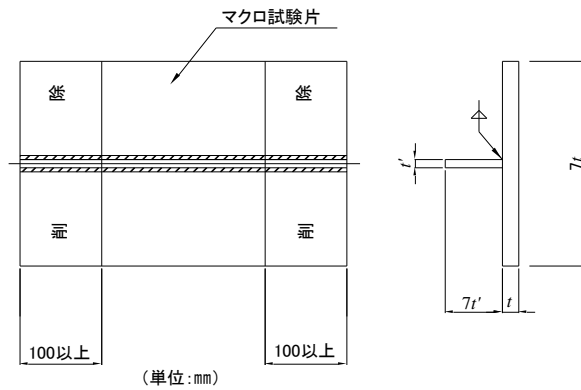


図-9.2.2 すみ肉溶接のマクロ観察に用いる供試体

9.2.3 試験方法と品質判定基準

(1) 非破壊試験

1) 目視検査

溶接部の表面欠陥の有無を目視により検査する。溶接部の表面欠陥の判定基準は、表-9.2.2による。

表-9.2.2 溶接部の表面欠陥の種類と判定基準

欠陥の種類	試験箇所	判定基準
割れ	全長	あってはならない。疑わしい場合には浸透探傷試験検査により確認する。
溶接ビード表面のピット (溶接部外表面に生じる小さなくぼみ)	主要部材の完全溶け込み 開先溶接継手	あってはならない。
	すみ肉溶接継手	1継手につき3個または継手長さ1mにつき3個まで許容する。ピットの大きさが1mm以下の場合には3個を1個として計算する。
溶接ビード表面の凹凸	全長	ビード長さ25mmの範囲における高低差が3mmを超えてはならない。
アンダーカット	主要部材を構成する材片に作用する一次応力に直交するビードの止端	許容深さ：0.3mm
	主要部材を構成する材片に作用する一次応力に平行なビードの止端	許容深さ：0.5mm
	二次部材のビードの止端	許容深さ：0.8mm
オーバーラップ	全長	あってはならない。
すみ肉溶接の大きさ	全長	サイズおよびのど厚は設計値を下回ってはならない。

2) 放射線透過試験

i) 試験方法は、JIS Z 3105³⁾に従う。

ii) 引張応力を受ける溶接部はきずの分類が1類および2類を合格とする。圧縮応力を受ける溶接部は3類以上とする。疲労の影響を受ける場合には、引張応力を受ける場合および圧縮応力を受ける場合ともに1類を合格とする。

(2) 破壊試験

1) 引張試験

i) 引張試験片は、JIS Z 3121⁴⁾に規定される試験片とする。引張試験片の平行部の中央に溶接部を置く。引張試験片の表裏面の仕上げは、製品と同じ仕上げとする。

ii) 引張試験方法は、JIS Z 2241⁵⁾に従う。引張試験片に作用する応力は、引張試験片の平行部の母材の断面積で**載荷荷重**を除いたものとして定義する。

iii) 試験片は2本とし、各引張試験片の引張強さと0.2%耐力が、表-9.2.3に示す値以上を合格とする。

表-9.2.3 溶接部の引張強さと0.2%耐力

アルミニウム合金		板厚 t (mm)	引張強さ (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/mm ²)
板材	A5083-H112	$4 \leq t \leq 40$	275	125
	A5083-O	$3 \leq t \leq 40$	275	125
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 6.5$	165	105
	A6061-T651	$6.5 \leq t \leq 40$	165	105
押出 形材	A5083-H112	$3 \leq t \leq 40$	275	120
	A5083-O	$3 \leq t \leq 38$	275	120
	A6061-T6	$3 \leq t \leq 40$	165	105
	A6005C-T5	$3 \leq t \leq 6$	165	105
		$6 < t \leq 12$	165	105
	A6005C-T6	$3 \leq t \leq 6$	165	105

2) 曲げ試験

i) 曲げ試験片の形状および寸法は、JIS Z 3122⁶⁾で規定される試験片のうち、板厚 19mm 未満の場合は裏曲げ試験片とし、19mm 以上の場合は側曲げ試験片とする。試験片の中央に溶接部を置く。曲げ金具に接触する試験片の表面は平らに仕上げる。試験対象となる表面の余盛を削除する。

ii) 曲げ試験方法は、JIS Z 3122⁶⁾で規定されるローラ曲げ試験、型曲げ試験、巻付け曲げ試験のいずれかによる。曲げ試験の曲げ金具の半径は次式で算出される値以下とする。

(a) A5083-H112 および A5083-O の場合

$$R = 2.88t \dots\dots\dots (9.2.1)$$

(b) A6061-T6, A6061-T651, A6005C-T5, A6005C-T6 の場合

$$R = 4.75t \dots\dots\dots (9.2.2)$$

ここに、 R : 曲げ金具の半径
 t : 曲げ試験片の厚さ

iii) 試験片は 2 本とし、各試験片ともに、疲労の影響を受けない場合には、長さが 3mm を超える表面割れがあってはならない。疲労の影響を受ける場合には、表面割れがあってはならない。

3) マクロ観察

i) 試験方法は、JIS Z 3422-2⁷⁾の 7.4.4 に従う。

ii) マクロ観察については、溶接部のマクロ組織に有害と認められる欠陥があってはならない。

(2) 2) ii) 曲げ試験の曲げ金具の半径は、9.3.3 の(2) 2) ii)の規定と同じである。

9.2.4 材片のセッティング

- (1) 材片のセッティングは、溶接不良を起こさせず、かつ溶接後の部材に偏心が生じないようにしなければならない。
- (2) 材片のセッティングは次による。
 - 1) 完全溶込み開先溶接継手
 - i) 開先形状およびルート間隔は、JIS Z 3604²⁾による。
 - ii) 図-9.2.3(a)に示す、板厚方向の材片の偏心 e は、板厚 t の10%以下とする。
 - iii) 図-9.2.3(b)に示す、裏当金と材片の密着度 e は、0.5mm以下とする。
 - 2) すみ肉溶接継手
 - i) 材片の密着度は、JIS Z 3604²⁾による。
 - ii) 図-9.2.3(c)に示す、十字継手およびT継手における材片の偏心 e は、板厚 t の15%以下とする。

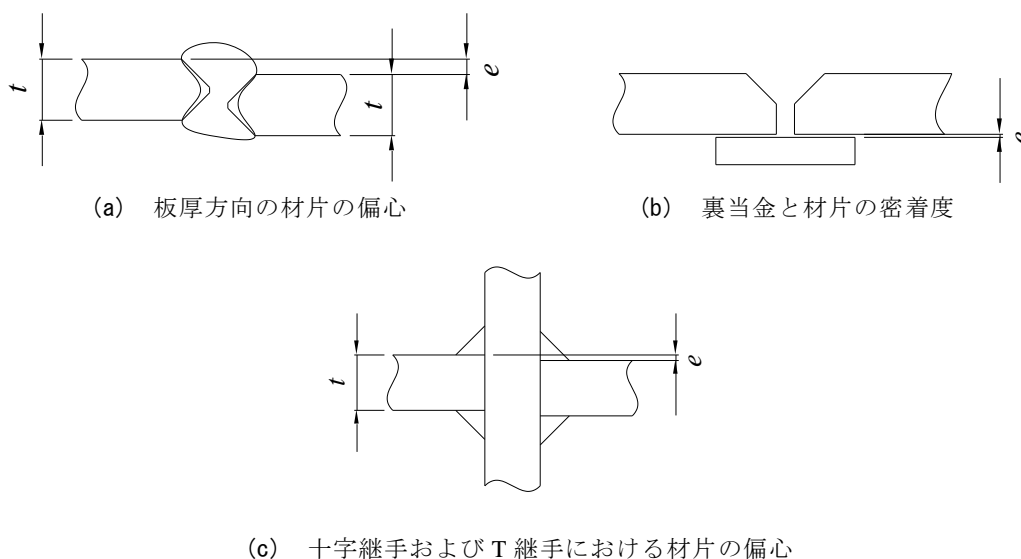


図-9.2.3 材片のセッティング

9.2.5 仮付け溶接

- (1) 部材の組立の際、補助治具を有効に利用して、条件の良い姿勢で仮付け溶接ができるようにする。支材およびストロングバックなどの異材を母材に仮付けすることはできるだけ避ける。
- (2) 仮付け溶接によって生じた黒粉と酸化被膜は、本溶接を行う前に除去する。
- (3) 仮付け溶接の長さとのど厚が過少にならないようにする。
- (4) 仮付け溶接を行う際、プリフローならびにクレータ処理を十分に行う。

- (3) アルミニウム合金構造物の溶接施工管理（第4版）IV 溶接施工¹⁾に仮付け溶接の寸法とピッチが示されている。

9.2.6 溶接変形の矯正

溶接によって生じる部材の変形は、プレス、油圧ジャッキまたはガス炎加熱法によって矯正する。ガス炎加熱法で部材の変形を矯正する場合、アルミニウム合金材に与えることができる最高加熱温度を表-9.2.4に示す。

表-9.2.4 最高加熱温度

A5083-O	450℃以下
A5083-H112	350℃以下
A6061-T6 A6005C-T5 A6005C-T6	250℃以下

ガス炎加熱法によってひずみを矯正する場合の最高加熱温度は、JIS Z 3604²⁾に規定される加熱限界温度としている。

9.2.7 製作

- (1) 製作では、溶接施工試験によって品質基準を満たすと判定された溶接条件が用いられなければならない。
- (2) パス間温度は、溶接施工試験で決定された温度以下とする。
- (3) 製作時には、9.2.8の規定に従って製品溶接部検査が行われなければならない。
- (4) 溶接部が製品溶接部検査の品質判定基準を満足しない場合には、9.2.9の規定に従って補修を行ってもよい。
- (5) エンドタブ
 - 1) 完全溶け込み開先溶接においては、母材と同じ材質で、母材と同じ開先形状を有するエンドタブを溶接の始端と終端に設ける。主桁のフランジとウェブのすみ肉溶接においては、母材と同じ材質で、母材と同じ断面形状を有するT型断面のエンドタブを溶接の始端と終端に設ける。エンドタブを設けることによって、溶接の始端と終端が部材に入らないようにする。
 - 2) 溶接後、エンドタブを切断除去し、除去箇所をグラインダーで研磨し、滑らかに仕上げる。
- (6) すみ肉溶接
 - 1) 棒継ぎをする必要がある場合には、クレータ処理を行う。棒継ぎ箇所に割れが観察された場合には、ビードの端部をはつり、欠陥のないことを確認した後、次の溶接を行う。
 - 2) 材片の隅角部では溶接を回す。
- (7) 完全溶け込み開先溶接の余盛りと仕上げ
仕上げ指定のない完全溶け込み開先溶接の余盛り高さは、表-9.2.5に従う。疲労の影響を受ける場合には、表-8.5.3(a), (b), (c)に示す余盛り高さとし仕上げに従う。

表-9.2.5 余盛り高さ

板厚 t (mm)	余盛りの高さ (mm)
$3 \leq t \leq 6$	2以下
$6 < t \leq 15$	$t/3$ 以下
$15 < t \leq 25$	5以下
$25 < t$	7以下

- (2) 多層溶接時にパス間温度が高いと、先行するビードに過度な熱が導入され、微小な割れが発生する場合がある。
- (7) 仕上げ指定のない完全溶け込み開先溶接の余盛り高さは、JIS Z 3604²⁾を参考にしている。

9.2.8 製品溶接部検査

- (1) 完全溶込み開先溶接継手およびすみ肉溶接継手の全線に対して目視検査を行う。
- (2) 完全溶込み開先溶接継手に対して、次の1)と2)に従って放射線透過試験を行う。
- 1) 工場溶接に対して、表-9.2.6に示す抜き取り検査を行う。

表-9.2.6 完全溶込み開先溶接継手の放射線透過試験

部 材		検査対象	撮影枚数	
引張部材		全継手	1枚 (端部を含める)	
圧縮部材		5継手中1継手以上*	1枚 (端部を含める)	
曲 げ 部 材	引張フランジ	全継手	1枚 (端部を含める)	
	圧縮フランジ	5継手中1継手以上*	1枚 (端部を含める)	
	ウ エ ブ	垂直応力に対して直角な方向の継手	全継手	1枚 (引張側)
		垂直応力に対して平行な方向の継手	全継手	1枚 (端部を含める)
アルミニウム床版		全継手	1枚 (端部を含める)	

*: 不合格となった場合には、残りの全継手に対して検査を行う。

- 2) 現場溶接に対して、継手全長にわたって検査を行う。
- (3) 目視検査と放射線透過試験の各試験方法および品質判定基準は9.2.3(1)の規定に従う。

9.2.9 補修

- (1) 目視検査で不合格となった継手に対して、(3)に従って補修を行ってもよい。補修部分は9.2.3(1) 1)の規定を満たさなければならない。
- (2) 放射線透過試験で不合格となった完全溶込み開先溶接継手は、その継手全長を放射線透過試験によって検査し、欠陥の範囲を特定し、(3)に従って補修を行ってもよい。補修部分は9.2.3(1) 2)の規定を満たさなければならない。
- (3) 欠陥の補修方法を表-9.2.7に示す。補修に用いる溶接のビード長さは40mm以上とする。

表-9.2.7 欠陥の補修方法

欠陥の種類	補修方法
割れ	割れを完全に除去し、溶接を行う。
気孔	削り取ってから溶接を行う。
オーバーラップ	グラインダーで削り、なめらかにする。
アンダーカット	程度に応じて、グラインダー仕上げのみ、または溶接後、グラインダー仕上げする。
溶接ビード表面のピット	必要に応じて表面を仕上げるか、溶接を行う。
溶接ビード表面の凸凹	グラインダー仕上げする。

9.3 摩擦攪拌接合

9.3.0 用語の定義

(1) 摩擦攪拌接合

図-9.3.1 に示すように、互いに突合せされた一对の母材の突合せ面にツールを挿入し、ツールの回転によって発生した摩擦熱によって軟化した母材を塑性流動させ、ツールを突合せ面に沿って移動させることによって継手が得られる接合。

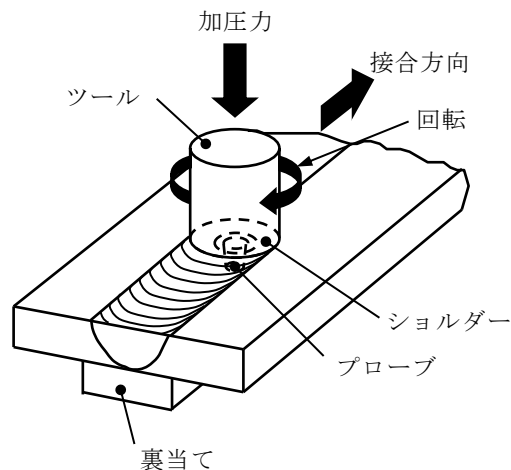


図-9.3.1 摩擦攪拌接合

(2) 両面摩擦攪拌接合

図-9.3.1 に示す摩擦攪拌接合を行った後、裏返して反対側の面からも摩擦攪拌接合を行うことによって継手が得られる接合。

(3) 接合条件

ツールの形状およびツールの回転速度、移動速度、傾きなどに関する、摩擦攪拌接合を行うときの条件。

(4) 接合部仕上げ条件

接合部の表面および裏面の仕上げ条件。

(5) ツール

回転により母材に摩擦熱を発生させ、母材に塑性流動を起こさせる工具で、プローブとショルダーから構成される（図-9.3.1 参照）。

(6) プローブ

母材の突合せ面に挿入され、母材に塑性流動を起こさせるツールの先端部分（図-9.3.1 参照）。

(7) ショルダー

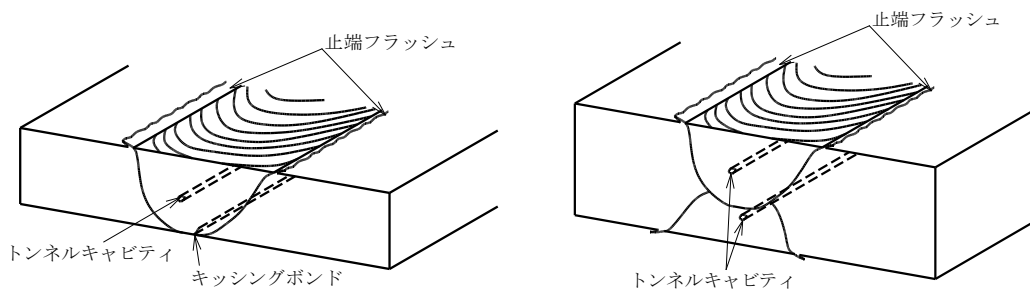
突合せ面に挿入されず、母材表面に接触するツールの一部（図-9.3.1 参照）。

(8) 裏当て

接合時に、母材の裏側に設ける支持材（図-9.3.1 参照）。

(9) 止端フラッシュ

接合部の表面の両脇に発生する返り（図-9.3.2 参照）。



(a) 図-9.3.1に示す摩擦攪拌接合

(b) 両面摩擦攪拌接合

図-9.3.2 摩擦攪拌接合部に生じる欠陥

(10) トンネルキャビティ

接合部の内部欠陥の一種で、接合線方向に沿って発生する細長いトンネル状の空洞（図-9.3.2参照）。

(11) キッシングボンド

摩擦攪拌接合の攪拌不足のために、プローブの先端付近に生じる接合不完全部〔図-9.3.2(a)参照〕。

(12) 摩擦攪拌接合ブロック

製作時において、同一方向の接合線を有し、摩擦攪拌接合をそれ以上施すことがないブロック（図-9.3.3参照）。

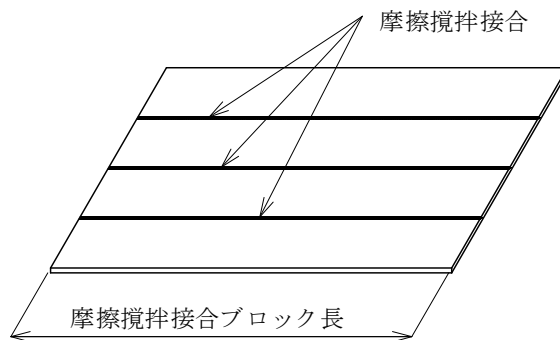


図-9.3.3 摩擦攪拌接合ブロック

(13) 摩擦攪拌接合ブロック長

摩擦攪拌接合ブロックの接合線方向の長さ（図-9.3.3参照）。

(14) 初回品

製作時において、最初に製作される摩擦攪拌接合ブロック。

(15) 表曲げ試験片

図-9.3.1に示す摩擦攪拌接合の場合、曲げ試験において、ツール挿入側と反対側の面が曲げ金具に接する試験片。両面摩擦接合の場合、曲げ試験において、1回目の摩擦攪拌接合でツール挿入側と反対側の面が曲げ金具に接する試験片。

(16) 裏曲げ試験片

図-9.3.1 に示す摩擦攪拌接合の場合、曲げ試験において、ツール挿入側の面が曲げ金具と接する試験片。両面摩擦接合の場合、曲げ試験において、1 回目の摩擦攪拌接合でツール挿入側の面が曲げ金具に接する試験片。

9.3.1 一般

- (1) 摩擦攪拌接合を行う場合、接合箇所酸化被膜を除去する必要はない。
- (2) 接合部の板厚は理論の板厚より小さくならない。
- (3) 疲労の影響を受ける場合には、両面摩擦攪拌接合を用いる。

- (2) 摩擦攪拌接合では、ツールが母材の突合せ面に垂直に挿入され、ツールのショルダーと接触する部分の板厚が減少する。しかし、接合部の板厚は理論の板厚より小さくならない。その対策として、図-6.3.1(a)に示す等厚の板の場合、理論の板厚より厚い板を使用する。図-6.3.1(b)に示す部分増厚された板の場合、増厚部の厚さを理論の板厚より厚くする。
- (3) 疲労の影響を受ける場合には、キッキングボンドの発生を排除しなければならない。両面摩擦攪拌接合は、キッキングボンドが排除される摩擦攪拌接合である。

9.3.2 溶接施工試験

- (1) 製作の前に溶接施工試験が行われなければならない。ただし、過去に溶接施工試験が行われ、かつ製造経験がある場合には、当事者間の協議で溶接施工試験を省略することができる。
- (2) 溶接施工試験では、目視検査、超音波探傷試験、放射線透過試験の非破壊試験、および引張試験、曲げ試験、マクロおよびミクロ観察の破壊試験を行う。疲労の影響を受ける場合には、これらの他に疲労試験も行う。
- (3) 溶接施工試験に用いる供試体の材料と断面形状は、実際の製作で使用されるものと同じにする。供試体の長さは、図-9.3.4 に示すように、製品の摩擦攪拌接合ブロック長以上の長さとする。
- (4) 非破壊試験は、供試体から破壊試験用の試験片を採取する前に行う。非破壊試験のうち、目視検査および超音波探傷試験は、余長が切断された供試体の接合部の全線に対して行う。放射線透過試験は、余長が切断された供試体の接合部に対して、摩擦攪拌接合の開始側の端部に対して行う。
- (5) 図-9.3.4 に示すように、余長が切断された供試体の両端部と中間部から、引張試験片、表曲げ試験片、裏曲げ試験片、マクロおよびミクロ観察試験片を摩擦攪拌接合の接合線直角方向に採取する。疲労の影響を受ける場合には、荷重が接合線直角方向に作用する場合、疲労試験片 T を採取し、荷重が接合線方向に作用する場合、疲労試験片 L を採取する。荷重が両方向に作用する場合、疲労試験片 T と L の両方を採取する。各部の試験片の数は、引張試験片 1、表曲げ試験片 1、裏曲げ試験片 1、疲労試験片 T と L に対して各 1、マクロおよびミクロ観察試験片 1 である。試験片を採取する際、試験片と試験片との間に約 10mm の間隔を設ける。

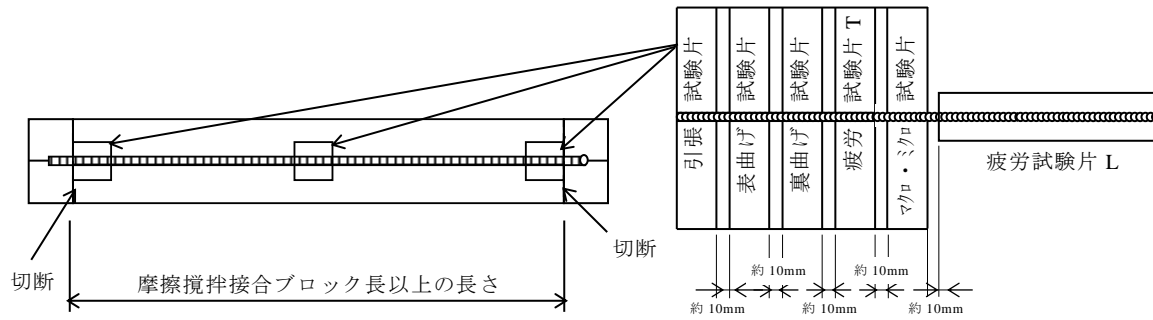


図-9.3.4 施工試験に用いる供試体

(6) 非破壊試験および破壊試験の各試験方法ならびに品質判定基準は 9.3.3 の規定に従う。

9.3.3 試験方法と品質判定基準

(1) 非破壊試験

1) 目視検査

摩擦攪拌接合終了後、接合部の表面欠陥の有無を目視により検査する。接合部の表面欠陥の判定基準は、当事者間の協議で決める。

2) 超音波探傷試験

i) 試験方法は、JIS Z 3080⁸⁾に従う。

ii) 疲労の影響を受けない場合には、きずの分類が C 種 1 類および 2 類のものを合格とする。疲労の影響を受ける場合には C 種 1 類を合格とする。

3) 放射線透過試験

i) 試験方法は、JIS Z 3105³⁾に従う。

ii) 疲労の影響を受けない場合には、きずの分類が 1 類および 2 類を合格とする。疲労の影響を受ける場合には 1 類を合格とする。

(2) 破壊試験

1) 引張試験

i) 引張試験片は、JIS Z 2241⁵⁾に規定される 14B 号試験片とする。引張試験片の平行部の中央に摩擦攪拌接合部を置く。引張試験片の表裏面の仕上げは、製品と同じ仕上げとする。

ii) 引張試験方法は、JIS Z 2241⁵⁾に従う。引張試験片に作用する応力は、引張試験片の平行部の母材の断面積で載荷荷重を除いたものとして定義する。

iii) 3 本の各引張試験片の引張強さと 0.2% 耐力が、表-9.2.3 に示す値以上を合格とする。

2) 曲げ試験

i) 表曲げ試験片と裏曲げ試験片の形状および寸法は、JIS Z 2248⁹⁾で規定される 1 号試験片とする。摩擦攪拌接合部を試験片の中央に置く。曲げ金具に接触する試験片の表面は平らに仕上げる。表曲げ試験片と裏曲げ試験片の試験対象となる表面の仕上げは、製品と同じ仕上げとする。元厚で試験片を曲げることが困難な場合には、表曲げ試験片は裏側を、裏曲げ試験片は表側を切削し、板厚 8mm の試験片とする。元厚が 8mm より小さいときは、元厚を試験片の厚さとする。

ii) 曲げ試験方法は、JIS Z 2248⁹⁾に規定される押曲げ法または巻付け法とする。曲げ試験の曲げ金具の半径は次式で算出される値以下とする。

(a) A5083-H112 および A5083-O の場合

$$R = 2.88t \dots\dots\dots (9.3.1)$$

(b) A6061-T6, A6061-T651, A6005C-T5, A6005C-T6 の場合

$$R = 4.75t \dots\dots\dots (9.3.2)$$

ここに、 R : 曲げ金具の半径

t : 曲げ試験片の厚さ

iii) 3本の表曲げ試験片および3本の裏曲げ試験片ともに、疲労の影響を受けない場合には、長さが3mmを超える表面割れがあってはならない。疲労の影響を受ける場合には、表面割れがあってはならない。

3) 疲労試験

i) 疲労試験片の形状および寸法は、図-9.3.5に示すものを標準とする。図-9.3.5(a)に示す疲労試験片Tでは、試験片の平行部の中央に、接合線が試験片の軸に対して直角に置く。図-9.3.5(b)に示す疲労試験片Lでは、接合線を試験片の軸方向に置き、接合中心を試験片の平行部の中心と一致させる。疲労試験片の表裏面の仕上げは、製品と同じ仕上げとする。疲労試験片の両側面は、条痕が試験片の長手方向に残るように仕上げる。疲労試験片Tの平行部の幅 w は板厚 t の2倍以上とする。疲労試験片Lの幅 w は、ショルダーの直径（両面摩擦攪拌接合において一回目の摩擦攪拌接合のショルダーの直径と二回目の摩擦攪拌接合のショルダーの直径が異なる場合には大きいほうの直径）に10mmを加えた値と、板厚 t を2倍した値とを比較して、大きい方の値以上とする。

ii) 疲労試験片に作用する応力は、載荷荷重を、母材の板厚に疲労試験片の平行部の幅を乗じて算出される断面積で除したものとして定義する。

iii) 3本の各疲労試験片に作用させる応力は、最大応力を133N/mm²、最小応力を13N/mm²とする。

iv) 3本の各疲労試験片の疲労寿命（疲労試験片が破断に至るまでの荷重の繰返し回数）が 1.7×10^5 回以上で、かつ2本の各疲労試験片の疲労寿命が 6.7×10^5 回以上ある場合を合格とする。

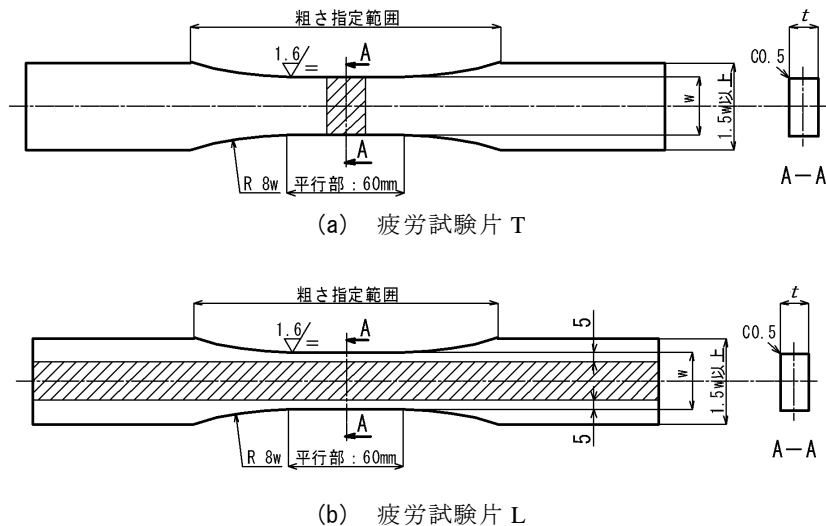


図-9.3.5 疲労試験片の形状および寸法

4) マクロおよびミクロ観察

- i) 観察方法は、JIS Z 3422-2⁷⁾の 7.4.4 に従う。
- ii) マクロ観察において、接合部のマクロ組織にトンネルキャビティおよびその他の有害と認められる欠陥があってはならない。

(1) 2) 放射線透過試験と比較して、超音波探傷試験はブローホールの検出に劣る。しかし摩擦攪拌接合部にはブローホールが生じないので、超音波探傷試験は放射線透過試験を代替する試験方法として用いることができる。ISO 25239-5¹⁰⁾においても、超音波探傷試験は放射線透過試験を代替する試験方法であることが規定されている。

(2) 2) i) と ii) 元厚の試験片で曲げることが困難な場合には、後述の式(解 9.3.1)に従って、試験片の厚さに応じて算出される D の最大直径を有する曲げ金具を使用すれば、任意の厚さに薄くすることができる。しかし、JIS Z 3811¹¹⁾では、板厚が 4~16mm の中程度の板厚に対する曲げ試験片の板厚を 8mm としているので、本指針では、試験片を薄くする場合には 8mm の厚さに統一している。

JIS Z 3422-2⁷⁾の 7.4.2 に、母材の伸びが 5% を超える場合の曲げ金具の最大直径が次式で規定されている。

$$D = \frac{t(200 - A)}{2A} \dots\dots\dots \text{(解 9.3.1)}$$

ここに、 D : 曲げ金具の最大直径 (mm)
 t : 曲げ試験片の厚さ (mm)
 A : 母材の伸び値 (%)

JIS H 4000¹²⁾および JIS H 4100¹³⁾で規定されるアルミニウム合金の伸びの中で、5000 系アルミニウム合金に対して A5083-O の 16%、6000 系アルミニウム合金に対して A6061-T6 の 10% を式(解 9.3.1)の A に用いて、直径を半径で表したものが式(9.3.1)と(9.3.2)である。

(2) 3) i) 図 9.3.5 に示す疲労試験片の形状および寸法は、JIS Z 3103¹⁴⁾を参考にしている。摩擦攪拌接合部の熱影響範囲はミグ溶接部と同程度で、接合部の中心から両側にそれぞれ 25mm (計 50mm) であることが示されている¹⁵⁾。疲労試験片 T では、50mm の熱影響範囲の両側に 5mm の余裕を設けて、疲労試験片の平行部の長さを 60mm としている。

接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労亀裂の発生位置は、ショルダーの回転跡の中央または止端フラッシュであることが報告されている¹⁶⁾。したがって疲労試験片 L では、試験片の平行部の幅を、ショルダーの直径 (両面摩擦攪拌接合において一回目の摩擦攪拌接合のショルダーの直径と二回目の摩擦攪拌接合のショルダーの直径が異なる場合には大きいほうの直径) に 10mm 加えた値と、板厚を 2 倍した値とを比較し、大きな値以上としている。

(2) 3) iii) と iv) 本規定の根拠となった S-N 曲線を図-解 9.3.1 に示す。図中の疲労試験データは文献 17) (図中の疲労データ A) および文献 18) (図中の疲労データ B) から引用している。文献 17) では母材が A6005C-T5 の場合、文献 18) では母材が A6005C-T6 の場合の摩擦攪拌接合部を対象としている。応力比 (=最小応力/最大応力) は、いずれも 0.1 である。

図-解 9.3.1 の実線は、文献 17) で提案された設計 S-N 曲線であり、次式で与えられる。

$$\log N = 19.86 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \dots\dots\dots \text{(解 9.3.2)}$$

$$\Delta\sigma_{caf} = 73 \dots\dots\dots \text{(解 9.3.3)}$$

ここに、 $\Delta\sigma$: 応力範囲 (N/mm²)
 N : 繰返し回数 (回)
 $\Delta\sigma_{caf}$: 疲労限度 (N/mm²)

図-解 9.3.1 の破線は、S-N 曲線の傾きを 7.03 として、文献 17) および 18) の疲労試験データに最小二乗法を適用して求められる平均的な疲労寿命を与える平均 S-N 曲線であり、次式で与えられる。

$$\log N = 20.5 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \dots\dots\dots (解 9.3.4)$$

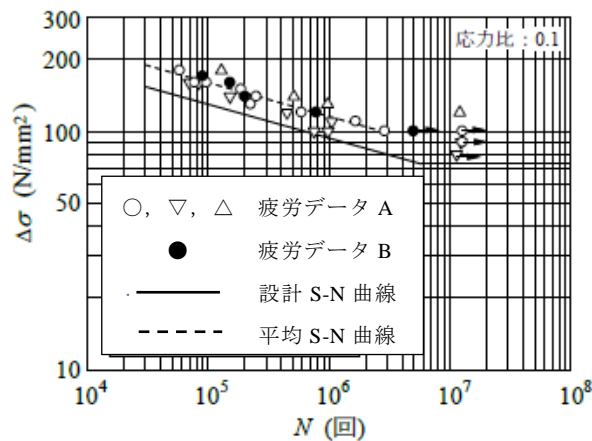


図-解 9.3.1 A6005C-T5 および A6005C-T6 の摩擦攪拌接合部の S-N 曲線

式(解 9.3.2)と式(解 9.3.4)が与える応力範囲と疲労寿命の関係を表-解 9.3.1 に示す。式(解 9.3.2)と式(解 9.3.4)は、それぞれ最小疲労寿命と平均疲労寿命を与える。(2) 3) iii)と iv)の規定は、表-解 9.3.1 の応力範囲 120N/mm²に対応している。疲労試験機の载荷能力に依存して、120N/mm²と異なる応力範囲で疲労試験を実施してもよい。

表-解 9.3.1 応力範囲と疲労寿命の関係

応力範囲 (N/mm ²)	最大応力 (N/mm ²)	最小応力 (N/mm ²)	最小疲労寿命 (回)	平均疲労寿命 (回)
100	111	11	6.3×10 ⁵	2.7×10 ⁶
110	122	12	3.2×10 ⁵	1.2×10 ⁶
120	133	13	1.7×10 ⁵	6.7×10 ⁵
130	144	14	9.9×10 ⁴	3.8×10 ⁵

9.3.4 製作

- (1) 製作では、溶接施工試験によって品質基準を満たすと判定された接合条件および接合部仕上げ条件が用いられなければならない。
- (2) 製作時には、9.3.5の規定に従って製品接合部検査が行われなければならない。
- (3) 製作時、ツールの磨耗、停電などによって、接合部が製品接合部検査の品質判定基準を満足しない場合には、9.3.6の規定を満たす場合に限り、補修を行ってもよい。補修は、溶接施工試験によって決定された接合条件および接合部仕上げ条件と同じ条件によって行われなければならない。
- (4) プロブが挿入される、摩擦攪拌接合の始端部およびプロブが引き抜かれる、摩擦攪拌接合の終端部を切除する。

(4) 通常、材端から 100～150mm の範囲が切除される。

9.3.5 製品接合部検査

- (1) 製品接合部検査では、目視検査と超音波探傷試験を行う。
- (2) 目視検査は接合部の全線に対して行う。
- (3) 超音波探傷試験の範囲は以下の通りとする。
 - 1) 初回品では、摩擦攪拌接合ブロックの接合部の全線。
 - 2) 初回品以降では、図-9.3.6 に示すように、**摩擦攪拌接合ブロックの両端部および中間部の200mmの範囲**。
- (4) 目視検査と超音波探傷試験の各試験方法および品質判定基準は9.3.3(1)の規定に従う。

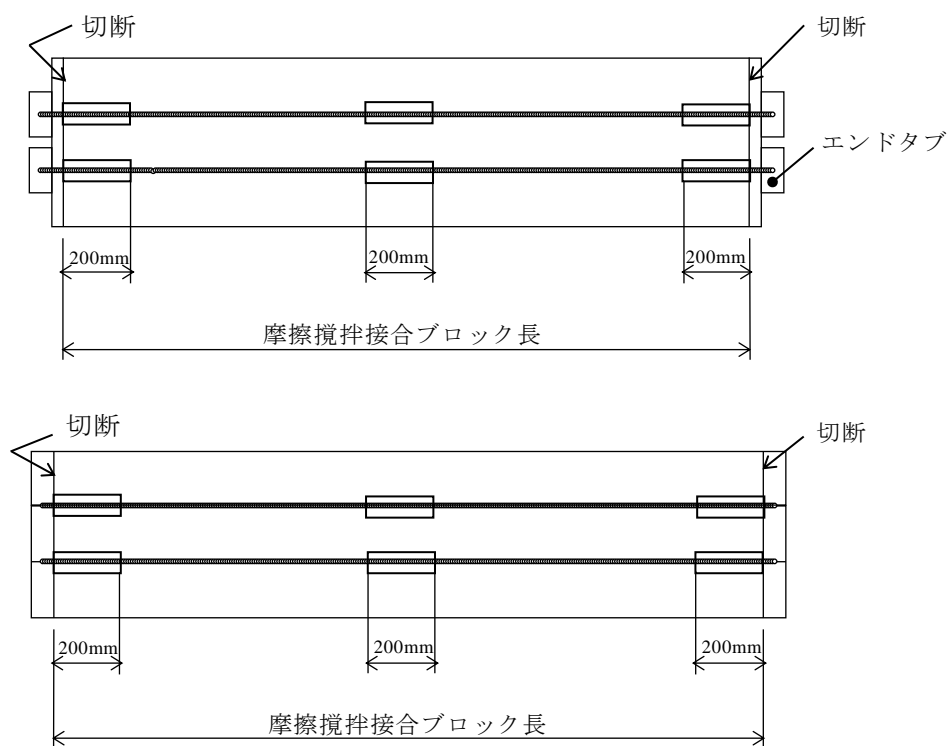


図-9.3.6 初回品以降の摩擦攪拌接合ブロックの超音波探傷試験の範囲

9.3.6 補修

- (1) 補修の際には、再入熱によって、接合部が強度低下を起こす可能性があるため、補修が行われた接合部が、9.3.3(2)の各種破壊試験に合格していることを**溶接施工試験**によって確認されなければならない。
- (2) 補修が行われた接合部の各種破壊試験に用いる試験片の供試体として、**溶接施工試験**に用いられた供試体(図-9.3.4 参照)で、破壊試験用の試験片が採取された後の余剰部分に再度、摩擦攪拌接合が行われたものを用いてもよい。
- (3) 補修が行われた接合部が9.3.3(2)の各種破壊試験に合格しない場合には、製品の補修はしてはならない。
- (4) 補修が行われた摩擦攪拌接合ブロックの製品接合部検査は、初回品と同じとする。

9.4 高力ボルト摩擦接合

9.4.1 一般

- (1) 部材を十分に締付けることができる長さを有する鋼製高力ボルトを使用する。
- (2) 一度使用した鋼製高力ボルトを再度使用してはならない。

9.4.2 摩擦面の処理

- (1) 母材と連結板が接触する面の相対する両方の摩擦面または一方の摩擦面に、表面粗さ $Rz20\mu m$ 以上の粗面となるようなブラスト処理を施す。
- (2) 連結板にブラスト処理を施す場合、連結板の材端および材縁から 5mm 入った内側の領域にブラスト処理を施す。

- (1) 本規定は、アルミニウム建築構造製作要領¹⁹⁾に記載される接合面の処理方法に従っている。連結板に対して本規定の摩擦面処理が施され、あるフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトに対して、表-9.4.1 に示す F10T の設計ボルト軸力の 10% 増しの初期導入ボルト軸力で締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数が 0.45 を十分に超えることが確認されている²⁰⁾。A6061-T6 の板へのブラスト処理条件の例を表-解 9.4.1 に示す。

表-解 9.4.1 Rz20 μm 以上の粗面が確保できるブラスト処理条件の例

ブラスト材	アルミナグリッド F60
空気圧力 (N/mm ²)	0.4
使用ノズルの内径 (mm)	9
吹付け距離 (mm)	150
吹付け角度 (°)	75
吹付け時間 (秒/cm ²)	0.37

- (2) 連結板の材縁までブラスト処理を施すと疲労強度が低下することが明らかにされている²¹⁾。これを避けるために本規定を与えている。ブラスト処理の範囲を図-解 9.4.1 に示す。

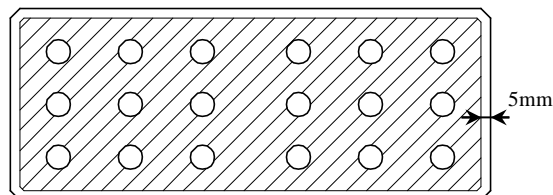


図-解 9.4.1 ブラストの範囲 (ハッチング部)

9.4.3 ボルトの締付け

(1) 摩擦接合継手に用いる鋼製高力ボルトの設計ボルト軸力を表-9.4.1に示す。

表-9.4.1 設計ボルト軸力

ボルトの等級	ボルトの呼び	設計ボルト軸力 (kN)
F8T	M12	45.9
	M16	85.4
	M20	133
	M22	165
	M24	192
F10T	M12	56.9
	M16	106
	M20	165
	M22	205
	M24	238

(2) 溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトの締付けは予備締めと本締めの2回に分けて行う。本締めは、F8Tの設計ボルト軸力が得られるようにナット回転法によって締付ける。

1) 予備締めの締付けトルクの値を表-9.4.2に示す。

表-9.4.2 予備締めの締付けトルクの値

ボルトの呼び	予備締めの締付けトルクの値 (N・m)
M12	約 50
M16	約 100
M20, M22	約 150
M24	約 200

2) 予備締め後、ナット、ボルト、座金および被締結材にわたってマーキングを行う。

3) 本締めは、予備締め完了後を起点としてナットを90°回転させる。

4) 本締めを完了した高力ボルトの回転角が、90°の回転量に対して+30°～-0°の範囲にあることを確認する。この範囲を超えて締付けられたものは取り替える。この範囲に満たないものに対しては、所要のナット回転量まで追い締めする。

5) ナットとボルトおよび座金が共まわりしているものについては取り替える。

(3) フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの締付けは予備締めと本締めの2回に分けて行う。本締めは、F10Tの設計ボルト軸力の10%増しの軸力が得られるようにトルク法によって締付ける。

1) 締付け作業の前に、使用するボルトセットのトルク係数を測定する。

2) 予備締めは、締付けボルト軸力の60%程度まで行う。

3) 予備締め後、ナット、ボルト、座金および被締結材にわたってマーキングを行う。

4) 本締めにおけるボルト軸力は、設計ボルト軸力の10%増しとする。

5) ナットとボルトおよび座金が共まわりしているものについては取り替える。

- 6) ボルト軸力の導入は、ナットをまわして行う。やむを得ず頭まわしを行う場合には、トルク係数の変化を確認する。
- (4) ボルトの締付けは、連結板の中央から端部に向かって行い、一連の予備締めを行った後に本締めを行う。

- (1) 表-9.4.1は、表-解7.2.1に示す設計ボルト軸力の値である。
- (2) 溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトの締付け法は、アルミニウム建築構造製作要領¹⁹⁾に準拠している。溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトの場合、めっきの付着厚さにばらつきが生じるので安定したトルク係数が得られない。このために、溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトの締付けにはナット回転法が用いられる。
- (3) フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトは、フッ素樹脂の膜厚が薄くて硬いので、安定したトルク係数が得られるので、その締付けにはトルク法が用いられる。設計ボルト軸力の10%増しのボルト軸力で締結された試験片のすべり試験の結果^{20), 22), 23)}に基づいて、7.2.4のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトの許容力が規定されている。

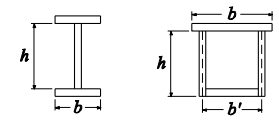
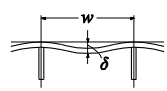
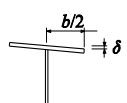
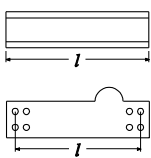
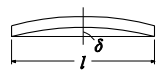
9.4.4 耐久性と防食

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手の耐久性と防食に関する性能は、構造物が置かれた環境および継手が構造物に設けられた場所を考慮して、当事者間の協議で決める。

9.5 部材の精度

部材の精度を表-9.5.1に示す.

表-9.5.1 部材の精度

項目		許容誤差 (mm)		備考	測定項目
フランジ幅 ウェブ高 ウェブ間隔	b (m) h (m) b' (m)	± 2 ± 3 ± 4	$b \leq 0.5$ $0.5 < b \leq 1.0$ $1.0 < b \leq 2.0$ $\pm(3+b/2)$ $2.0 < b$	左欄の b は b, h および b' を代表したものである.	プレートガーダー トラス弦材 
板の 平面度 δ (mm)	プレートガーダーおよびトラスなどの部材のウェブ	$h/250$		h : ウェブ高 (mm)	
	箱桁およびトラスなどのフランジ, 床版のデッキプレート	$w/150$		w : ウェブまたはリブの間隔 (mm)	
フランジの直角度 δ (mm)		$b/200$		b : フランジ幅 (mm)	
部材長 l (m)	プレートガーダー	± 3 ± 4	$l \leq 10$ $l > 10$		
	トラス, アーチなど	± 2 ± 3	$l \leq 10$ $l > 10$		
圧縮部材の変形 δ (mm)		$l/1000$		l : 部材長 (mm)	

参考文献

- 1) 軽金属溶接構造協会：アルミニウム合金構造物の溶接施工管理（第4版）IV 溶接施工，2009.
- 2) JIS Z 3604：アルミニウムのイナートガスアーク溶接作業標準，2016.
- 3) JIS Z 3105：アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法，2003.
- 4) JIS Z 3121：突合せ溶接継手の引張試験方法，2013.
- 5) JIS Z 2241：金属材料引張試験方法，2011.
- 6) JIS Z 3122：突合せ溶接継手の曲げ試験方法，2013.
- 7) JIS Z 3422-2：金属材料の溶接施工要領及びその承認—溶接施工法試験—第2部：アルミニウム及びアルミニウム合金のアーク溶接，2003.
- 8) JIS Z 3080：アルミニウムの突合せ溶接部の超音波斜角探傷試験方法，1995.
- 9) JIS Z 2248：金属材料曲げ試験方法，2014.
- 10) ISO 25239-5: Friction stir welding — Part 5: Quality and inspection, 2011.
- 11) JIS Z 3811：アルミニウム溶接技術検定における試験方法および判定基準，2000.
- 12) JIS H 4000：アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条，2014.
- 13) JIS H 4100：アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材，2015.
- 14) JIS Z 3103：アーク溶接継手の片振り引張疲れ試験方法，1987.

- 15) 大倉一郎, 長尾隆史, 石川敏之, 萩澤亘保, 大隅心平: 構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008.
- 16) 大倉一郎, 牧山大祐: 両面摩擦攪拌接合で接合された摩擦攪拌接合部の疲労強度, ALST 研究レポート, No.17, 2010.
- 17) 萩澤亘保, 大倉一郎: アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.117-122, 2009.
- 18) Kainuma, S., Katsuki, H., Iwai, I. and Kumagai, M.: Evaluation of fatigue strength of friction stir butt-welded aluminum alloy joints inclined to applied cyclic stress, International Journal of Fatigue, Vol.30, Issue 5, pp.870-876, 2008.
- 19) アルミニウム建築構造協議会: アルミニウム建築構造製作要領 アルミニウム建築構造物製作工場認定規程および基準・同解説, 2003.
- 20) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎: フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数, ALST 研究レポート, No.28, 2012.
- 21) 大倉一郎, 西田貴裕: アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性, ALST 研究レポート, No.8, 2009.
- 22) 萩澤亘保, 大倉一郎: 鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数と鋼製高力ボルトの軸力低下, ALST 研究レポート, No.7, 2009.
- 23) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎: アルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験におけるボルト本数が摩擦係数に与える影響, ALST 研究レポート, No.27, 2012.

付録 A アルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験方法

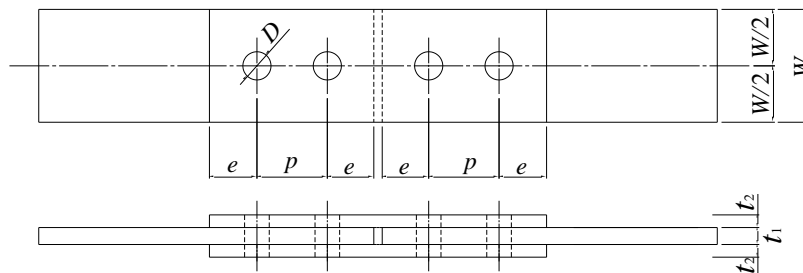
A.1 適用範囲

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数を求める試験方法について規定する。

A.2 試験片

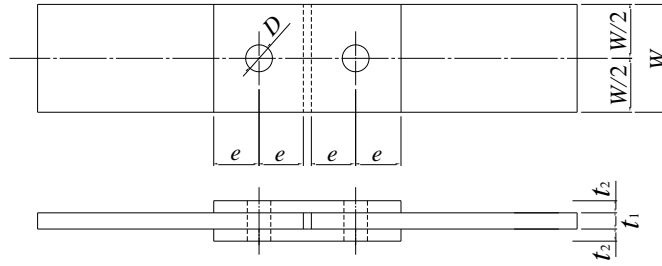
- (1) F10T のフッ素樹脂コート鋼製高力ボルトが用いられた試験片の形状と寸法の例を表-A.1 に示す。これは、A6061-T6 と A6061-T651 の板材および A6061-T6 と A6005C-T6 の押出型材が母材と連結板に使用される場合に対応する。試験片は2面摩擦接合とする。表-A.1(a) は、片側のボルト本数が2本の場合に対応し、表-A.1(b)は、片側のボルト本数が1本の場合に対応する。後者の場合には、試験片の軸線が直線となるようにボルト締結を行う。
- (2) 試験片の本数は5本以上とする。
- (3) 接合面の処理は、実際に使用される継手と同じにする。
- (4) ボルトの締結はトルク法によって行い、設計ボルト軸力（表-9.4.1 参照）を導入する。

表-A.1 試験片の形状と寸法の例
(a) 片側のボルト本数が2本の場合



ボルトの呼び径 d (mm)	ボルト孔の直径 D (mm)	母材の厚さ t_1 (mm)	連結板の厚さ t_2 (mm)	板幅 W (mm)	e (mm)	p (mm)
12	15	12	8	75	35	40
16	19	20	12	90	40	50
20	23	25	15	110	50	60
22	25	30	20	110	55	70
24	27	35	20	110	60	80

(b) 片側のボルト本数が 1 本の場合



ボルトの呼び径 d (mm)	ボルト孔の直径 D (mm)	母材の厚さ t_1 (mm)	連結板の厚さ t_2 (mm)	板幅 W (mm)	e (mm)
12	15	8	6	60	35
16	19	10	8	90	40
20	23	12	8	110	50
22	25	15	10	110	55
24	27	20	12	110	60

(1) 表-A. 1 に示す試験片の形状寸法は、次式で定義されるすべり耐力比 γ が 0.45~0.6 になるように設定されている。

$$\gamma = \frac{2\mu n N_d}{(W-D)t \sigma_{0.2}} \dots \dots \dots (\text{解 A. 1})$$

$$N_d = \alpha \sigma_{s0.2} A_s \dots \dots \dots (\text{解 A. 2})$$

- ここに、
- μ : すべり係数 (= 0.45)
 - n : 継手の片側のボルト本数 (= 2 または 1)
 - N_d : 設計ボルト軸力
 - D : ボルト孔の直径
 - W : 試験片の幅
 - t : 試験片の母材の板厚
 - $\sigma_{0.2}$: A6061-T6 の 0.2% 耐力 (=245N/mm²)
 - α : F10T の鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力を低減させる係数 (=0.75)
 - $\sigma_{s0.2}$: F10T の鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力 (=900N/mm²)
 - A_s : ボルトのねじ部の有効断面積

片側 2 本ボルトの試験片が与えるすべり係数と片側 1 本ボルトの試験片が与えるすべり係数は、平均値に関してほぼ等しいことが示されている¹⁾。したがって、すべり試験に用いる試験片として、片側 1 本ボルトの試験片も採用している。ただし、片側 1 本ボルトの試験片が与えるすべり係数のバラツキは、片側 2 本ボルトの試験片が与えるバラツキより大きい¹⁾。すべり係数に対して、片側 1 本ボルトの試験片が与えるバラツキを小さくするためには、ボルト締結を行う際、試験片の軸線が直線となるような工夫が必要である¹⁾。

A.3 試験方法

- (1) アルミニウム合金板とフッ素樹脂皮膜のクリープに起因する、ボルト締結直後のボルト軸力の急激な低下が終了した後にすべり試験を実施する。
- (2) ボルト締結からすべり試験を実施するまでの時間、およびボルト締結時の試験片の温度とすべり試験実施時の試験片の温度を計測する。
- (3) すべり試験実施時の試験片の温度とボルト締結時の試験片の温度の差を±10℃以内にす
る。
- (4) 荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係、荷重と引張試験機内蔵の変位計が
示す変位の関係または荷重と経過時間関係を記録する。各関係において、最初に荷重が
下がる直前の荷重をすべり荷重とする。

- (1) アルミニウム合金板とフッ素樹脂皮膜のクリープに起因するボルト軸力の低下は、ボルト締結直後急
激で、その後は非常に穏やかである²⁾。フッ素樹脂コートが施されない鋼製高力ボルトの場合、クリー
プに起因する急激なボルト軸力の低下はボルト締結後 30 時間で終了する¹⁾。フッ素樹脂コートが施され
た鋼製高力ボルトの場合、急激なボルト軸力の低下が終了するためにはさらに時間が必要である。この
時間は、使用されるフッ素樹脂被膜によって異なる。
- (3) すべり試験時とボルト締結時の温度差に起因するボルト軸力の変化に対して、式(解 A. 2)で与えられ
る設計ボルト軸力の 1%を許容した場合に対する、すべり試験時とボルト締結時の温度差に対する許容
値 ΔT_a (°C) が次式で与えられる^{1),2)}。

$$\Delta T_a = \pm \frac{N_d}{6.50 \times 10^{-2} A_s} \dots\dots\dots \text{(解 A. 3)}$$

ここに、 N_d : 設計ボルト軸力 (kN)
 A_s : ボルトの有効断面積 (mm²)

式(解 A. 2)を式(解 A. 3)に代入し、単位をそろえて次式を得る。

$$\Delta T_a = \pm \frac{\alpha \sigma_{s0.2}}{65} \dots\dots\dots \text{(解 A. 4)}$$

α と $\sigma_{s0.2}$ にそれぞれ 0.75 と 900 N/mm²を代入して、 $\Delta T_a = \pm 10.4$ °Cを得る。

- (4) 荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係から得られるすべり荷重は、荷重と母材・連結板
間の相対変位の関係から得られるすべり荷重とほぼ等しい¹⁾。したがって、荷重と母材・連結板間の相
対変位の関係から求める方法^{3),4)}に加えて、荷重と引張試験機のクロスヘッド間の変位差の関係からすべ
り荷重を求めることができる。これは、荷重と、引張試験機内蔵の変位計が示す変位の関係、または荷
重と経過時間関係からすべり荷重を求めてよいことになる。

A.4 すべり係数

各試験片のすべり係数を次式によって算出する.

$$\mu = \frac{P}{2nN_d} \dots\dots\dots (A. 1)$$

ここに、 μ : すべり係数
 P : すべり荷重
 n : 片側のボルト本数 (=1 または 2)
 N_d : 設計ボルト軸力

式(A.1)は、すべり試験が実施された時のすべり係数である。すべり試験が実施された時以降のすべり係数は、次のように予測することができる。

フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトに対して、ボルト締結後のボルト軸力と経過時間の関係が次式で与えられる²⁾。

$$\frac{N}{N_0} = 10^{-\alpha t^\beta} \dots\dots\dots (解 A. 5)$$

ここに、 N : ボルト締結後のボルト軸力
 N_0 : 初期導入ボルト軸力
 t : ボルト締結後の経過時間
 α, β : フッ素樹脂被膜によって異なる値を採る定数

すべり試験で得られたすべり荷重を用いて、すべり試験が実施された時以降のすべり荷重が式(解 A.5)から次式で与えられる。

$$P = P_1 10^{-\alpha(t^\beta - t_1^\beta)} \quad (t \geq t_1) \dots\dots\dots (解 A. 6)$$

ここに、 P : すべり試験が実施された時以降のすべり荷重
 P_1 : すべり試験で得られたすべり荷重
 t_1 : ボルト締結からすべり試験が実施された時までの時間

設計ボルト軸力 N_d に対する、ボルト締結から t 時間後のすべり係数 μ が式(解 A. 6)を用いて次式で与えられる。

$$\mu = \frac{P}{2nN_d} = \frac{P_1 10^{-\alpha(t^\beta - t_1^\beta)}}{2nN_d} \dots\dots\dots (解 A. 7)$$

ここに、 n : 片側ボルト本数 (=2 または 1)
 α と β の値は、フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトに貼付されたひずみゲージによって、ボルト軸力とボルト締結後の経過時間の関係を調べることによって決めることができる⁵⁾。

参考文献

- 1) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎: アルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり試験におけるボルト本数が摩擦係数に与える影響, ALST 研究レポート, No.27, 2012.
- 2) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎: フッ素樹脂コート鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数, ALST 研究レポート, No.28, 2012.
- 3) 土木学会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 2008.
- 4) Eurocode 9: Design of aluminium structures – Part1-1: General structural rules, 2007.
- 5) 大倉一郎, 萩澤亘保, 長尾隆史: アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.827-837, 2010.