

アルミニウム合金土木構造物の摩擦攪拌接合部の
品質検査ガイドライン

2010年9月版

社団法人 日本アルミニウム協会
土木構造物委員会

まえがき

「アルミニウム合金土木構造物の摩擦攪拌接合部の品質検査指針（案）」の初版は 2004 年に発刊された。初版では、歩道橋および歩道用アルミニウム床版など、疲労の影響を受けない土木構造物の摩擦攪拌接合部の品質検査が適用範囲であった。

その後、当協会では道路橋用アルミニウム床版の開発が進められ、アルミニウム床版の製作に摩擦攪拌接合が用いられることになった。道路橋用アルミニウム床版は疲労の影響を受けるので、疲労に対する規定を新たに追加し、第 2 版を 2008 年に発刊した。

第 2 版では、摩擦攪拌接合部から接合線直角方向に採取した試験片の疲労試験の実施を規定していたが、今回の版では、荷重の作用方向に応じて、接合線直角方向、および／または接合線方向に試験片を採取し、疲労試験を実施することを規定している。さらに、曲げ試験片の形状と寸法および曲げ試験方法の見直しを行い、「アルミニウム合金土木構造物の摩擦攪拌接合部の品質検査ガイドライン」と改題して発刊するに至った。

本ガイドラインが、土木技術者のみならず、摩擦攪拌接合に係わる技術者および研究者に活用されることを期待する。

最後に、本ガイドラインの作成に多大な努力を払われた大倉一郎分科会委員長をはじめとする委員各位に心からの感謝の意を表する次第である。

2010 年 9 月

社団法人日本アルミニウム協会
土木構造物委員会
委員長 依田照彦

土木構造物委員会

顧問 藤原 稔 元 海峡横断道路調査会
委員長 依田照彦 早稲田大学 理工学術院
委員 大倉一郎 大阪大学 大学院工学研究科
大隅心平 ㈱住軽日軽エンジニアリング 設計技術部
春日 昭 ㈱IHIインフラシステム 技術本部
櫻井勝好 日立造船㈱ 機械・インフラ本部
萩澤亘保 日本軽金属㈱ グループ技術センター
福田敏彦 住友軽金属工業㈱ 研究開発センター

事務局 上田健次 (社)日本アルミニウム協会

アルミニウム合金土木構造物の摩擦攪拌接合部の 品質検査ガイドライン作成分科会

- 委員長 大倉一郎 大阪大学 大学院工学研究科
- 委員 石川敏之 京都大学 大学院工学研究科
- 岩井一郎 昭和電工(株) アルミニウム事業部門 技術センター
- 大隅心平 (株)住軽日軽エンジニアリング 設計技術部
- 貝沼重信 九州大学 大学院工学研究院
- 春日 昭 (株)IHI インフラシステム 技術本部
- 北側彰一 日立造船(株) 事業・製品開発本部
- 櫻井勝好 日立造船(株) 機械・インフラ本部
- 土屋和之 (株)IHI テクノソリューションズ 技術開発センター
- 時末 光 日本大学 名誉教授
- 萩澤亘保 日本軽金属(株) グループ技術センター
- 福田敏彦 住友軽金属工業(株) 研究開発センター
- 事務局 上田健次 (社)日本アルミニウム協会

目次

1. 適用範囲	1
2. 引用規格	1
3. 用語と記号の説明	1
3.1 用語の説明	1
3.2 記号の説明	3
4. 一般事項	3
5. 施工試験	4
6. 製品接合部検査	4
7. 補 修	5
8. 試験方法と品質判定基準	5
8.1 非破壊試験	5
8.1.1 目視検査	5
8.1.2 超音波探傷試験	5
8.1.3 放射線透過試験	6
8.2 破壊試験	6
8.2.1 引張試験	6
8.2.2 曲げ試験	6
8.2.3 疲労試験	7
8.2.4 マクロおよびミクロ観察	8
解説	9

1. 適用範囲

本ガイドラインでは、アルミニウム合金土木構造物の突合せ摩擦攪拌接合部の品質検査の方法を示す。

本ガイドラインが対象とするアルミニウム合金は、JIS H 4000「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」および JIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」に規定される A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, A6063-T5 および A6N01-T5 (A6N01-T5 の名称は、近い JIS H 4100 の改正の際に A6005C-T5 に変更される予定) である。これらのアルミニウム合金は、疲労の影響を受けない場合に対して適用できる。A6061-T6 と A6N01-T5 については、疲労の影響を受ける場合に対しても適用できる。

2. 引用規格

以下に示す規格は、引用されることによって、本ガイドラインの一部を構成する。

JIS H 4000	(2006)	「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」
JIS H 4100	(2006)	「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」
JIS Z 2201	(1998)	「金属材料引張試験片」
JIS Z 2204	(1996)	「金属材料曲げ試験片」
JIS Z 2241	(1998)	「金属材料引張試験方法」
JIS Z 2248	(2006)	「金属材料曲げ試験方法」
JIS Z 3080	(1995)	「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」
JIS Z 3105	(2003)	「アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法」
JIS Z 3422-2	(2003)	「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」

3. 用語と記号の説明

3.1 用語の説明

摩擦攪拌接合

図1に示すように、互いに突合せら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。

両面摩擦攪拌接合

図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。

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

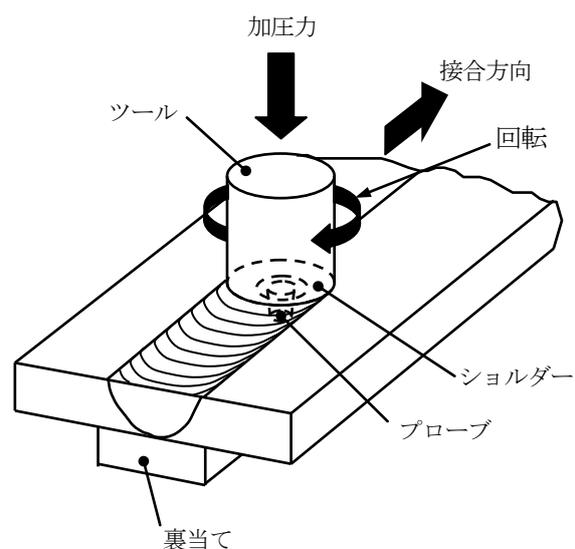


図1 摩擦攪拌接合

きの条件.

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.

施工試験

摩擦攪拌接合の接合条件および接合部仕上げ条件が適切であることを確認するために、製造の前に行う試験.

製品接合部検査

摩擦攪拌接合によって製造された製品に対して、接合部の品質が健全であることを確認するために行う検査.

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1参照).

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1参照).

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1参照).

裏当て

接合時に、母材の裏側に設ける支持材(図1参照).

止端フラッシュ

接合部の表面の両脇に発生する返り(図2参照).

トンネルキャビティ

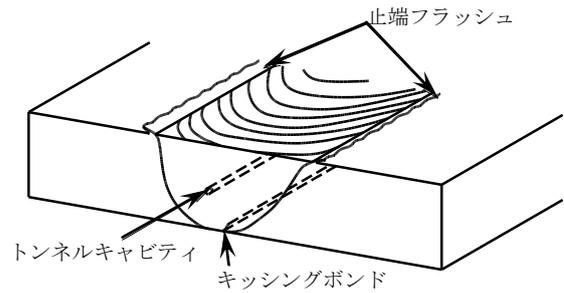
接合部の内部欠陥の一種で、接合線方向に沿って発生する細長いトンネル状の空洞(図2参照).

キッシングボンド

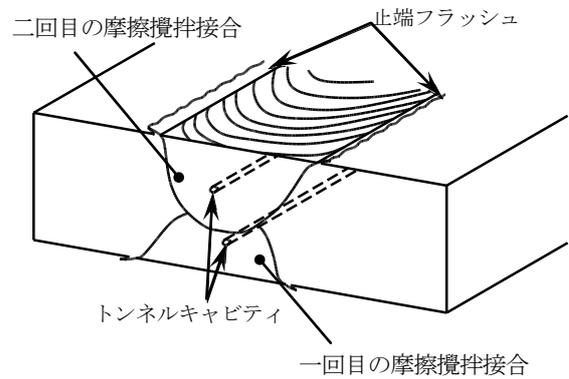
摩擦攪拌接合の攪拌不足のために、プローブの先端付近に現われる接合不完全部(図2(a)参照).

摩擦攪拌接合ブロック

製造時において、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3参照).



(a) 図1に示す摩擦攪拌接合



(b) 両面摩擦攪拌接合

図2 摩擦攪拌接合部に生じる欠陥

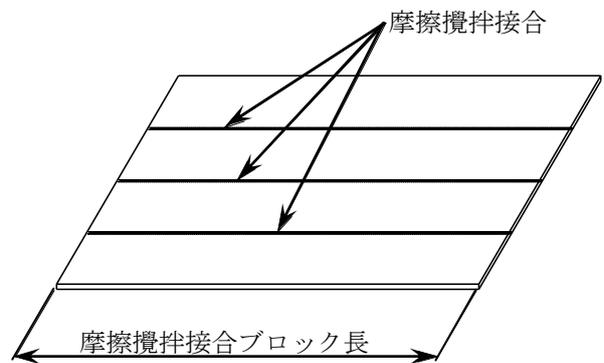


図3 摩擦攪拌接合ブロック

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3参照)。

初回品

製造時において、最初に製造される摩擦攪拌接合ブロック。

補修

製造時において、製品接合部検査の品質判定基準を満たさない場合、再度実施する摩擦攪拌接合。

曲げ金具

曲げ試験片を所定の半径で曲げるための金型。

表曲げ試験片

図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、最初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。

裏曲げ試験片

図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、最初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。

応力範囲

疲労試験において、繰返し応力の最大値と最小値の代数差。

疲労寿命

疲労試験において、疲労試験片が破断に至るまでの荷重の繰返し回数。

3.2 記号の説明

R : 曲げ試験における曲げ金具先端の半径

t : 表曲げ試験片と裏曲げ試験片の板厚または疲労試験片の板厚

w : 疲労試験片の平行部の幅

4. 一般事項

- (1) 疲労の影響を受ける場合には、キッシ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、キッシングボンドが排除される摩擦攪拌接合とみなされる。
- (2) 疲労の影響を受ける場合には、8.2.3項の疲労試験を実施しなければならない。
- (3) 製造の前に施工試験が行われなければならない。ただし、過去に施工試験が行われ、かつ製造経験がある場合には、当事者間の協議で施工試験を省略することができる。
- (4) 製造では、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。
- (5) 製造時には製品接合部検査が行われなければならない。
- (6) 製造時、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、7章の条件を満たす場合に限り、補修を行ってもよい。補修は、製造の前に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。
- (7) 超音波探傷試験および放射線透過試験は、有資格者によって行われなければならない。

5. 施工試験

- (1) 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、マクロおよびマイ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、この他に疲労試験も行う。
- (2) 施工試験に用いる供試体は、製造で使用する母材および断面形状と同じ材料を用い、図 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を有するものとする。
- (3) 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、余長を切断した接合部の全線に対して行う。放射線透過試験は、余長を切断した接合部の、摩擦攪拌接合の開始側の端部に対して行う。
- (4) 破壊試験用の試験片は、図 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、マクロおよびマイクロ観察試験片を、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、マクロおよびマイクロ観察試験片 1 である。試験片を採取する際、試験片と試験片の間に約 10mm の間隔を設ける。
- (5) 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 8 章に従う。

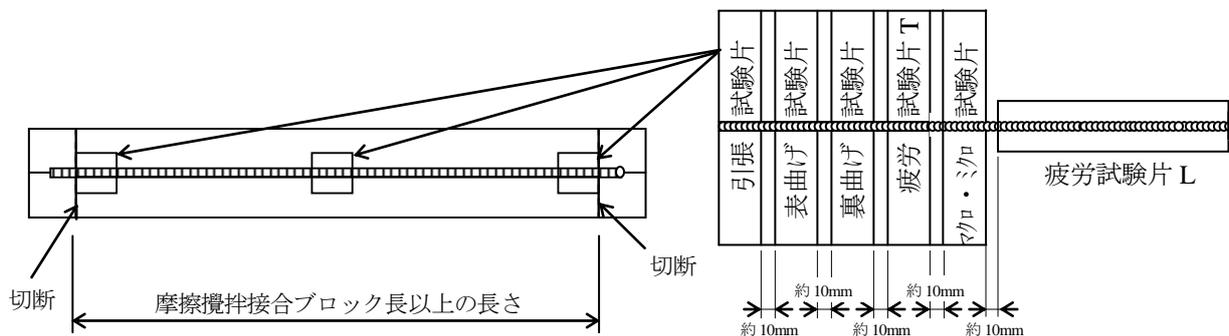


図 4 施工試験に用いる供試体

6. 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。
 - a) 初回品では、摩擦攪拌接合ブロックの接合部の全線。
 - b) 初回品以降では、図 5 に示すように、全接合線において、エンドタブや余長が切断された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 8 章に従う。

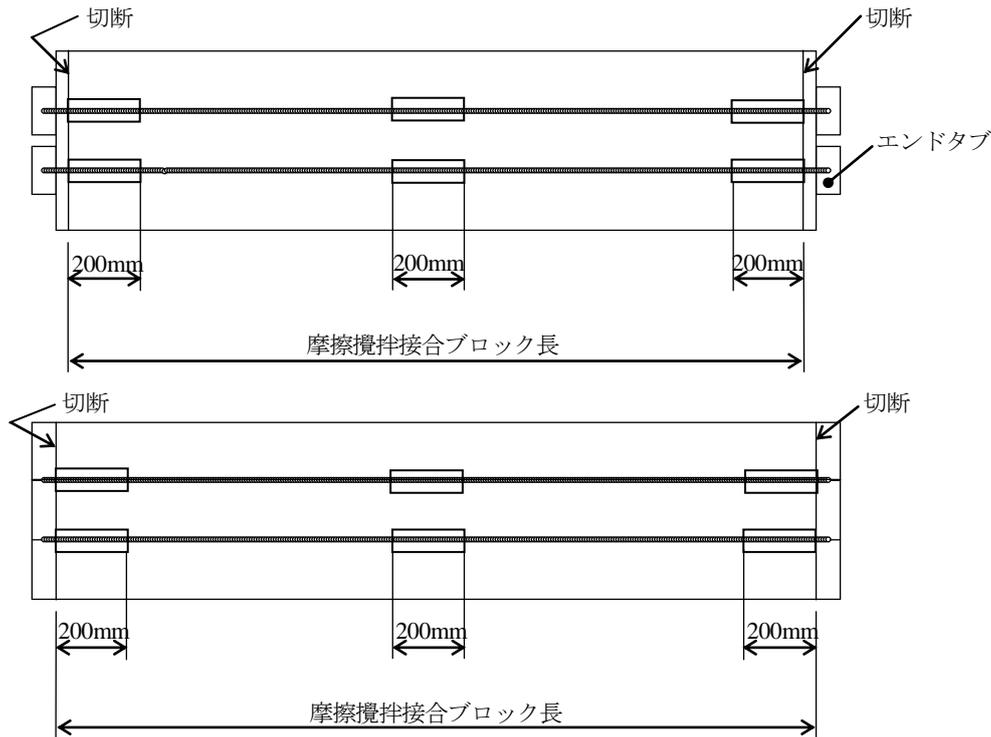


図5 初回品以降の摩擦攪拌接合ブロックの超音波探傷試験の範囲

7. 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は、8.2節の各種破壊試験に合格していることを確認しなければならない。
- (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、施工試験に用いられた供試体(図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8.2節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。

8. 試験方法と品質判定基準

8.1 非破壊試験

8.1.1 目視検査

- (1) 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。

8.1.2 超音波探傷試験

- (1) 試験方法は、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」に従う。
- (2) 超音波探傷試験については、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。

8.1.3 放射線透過試験

- (1) 試験方法は、JIS Z 3105「アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法」に従う。
- (2) 放射線透過試験については、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。

8.2 破壊試験

8.2.1 引張試験

- (1) 引張試験片は、JIS Z 2201「金属材料引張試験片」に規定される14B号試験片とする。摩擦攪拌接合部を引張試験片の平行部の中央に置く。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。
- (2) 引張試験方法は、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に従う。引張試験片に作用する応力は、載荷荷重を引張試験片の平行部の母材の断面積で除したものと定義する。
- (3) 3本の各引張試験片の引張強さと0.2%耐力は、表1に示す値以上を合格とする。

表1 摩擦攪拌接合部の引張強さと0.2%耐力

アルミニウム合金		板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)
板材	A5083P-H112 A5083P-O	40 以下	275	127
	A6061P-T6	6.5 以下	206	108
押出 型材	A5083S-H112 A5083S-O	40 以下	275	118
	A6061S-T6	25 以下	177	108
	A6063S-T5	25 以下	118	59
	A6N01S-T5	6 以下	177	108
6 を超え 12 以下		167	98	

8.2.2 曲げ試験

- (1) 表曲げ試験片と裏曲げ試験片の形状および寸法は、JIS Z 2204「金属材料曲げ試験片」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。
- (2) 曲げ試験方法は、JIS Z 2248「金属材料曲げ試験方法」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の通りとする。
 - (a) A5083-H112 および A5083-O の場合 $R = 2.88t$ (1)
 - (b) A6061-T6, A6063-T5 および A6N01-T5 の場合 $R = 4.75t$ (2)
ここに、 R : 曲げ金具の半径, t : 曲げ試験片の厚さ
- (3) 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。

8.2.3 疲労試験

- (1) 疲労試験片の形状および寸法は、図6に示すものを標準とする。図6(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6(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は大きいほうの直径）に10mm加えた値と、板厚 t を2倍した値を比較し、大きい方の値以上とする。
- (2) 疲労試験片に作用する応力は、载荷荷重を、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。
- (3) 3本の疲労試験片の応力範囲は同一とし、疲労試験に用いる応力範囲は、表2に示す100 MPa, 110 MPa, 120 MPa, 130 MPaの中の一つを、疲労試験機の载荷能力により選定する。
- (4) 3本の疲労試験片の疲労寿命は、表2に示す各応力範囲に対応する最小疲労寿命以上で、かつ2本の疲労試験片の疲労寿命が平均疲労寿命以上である場合を合格とする。

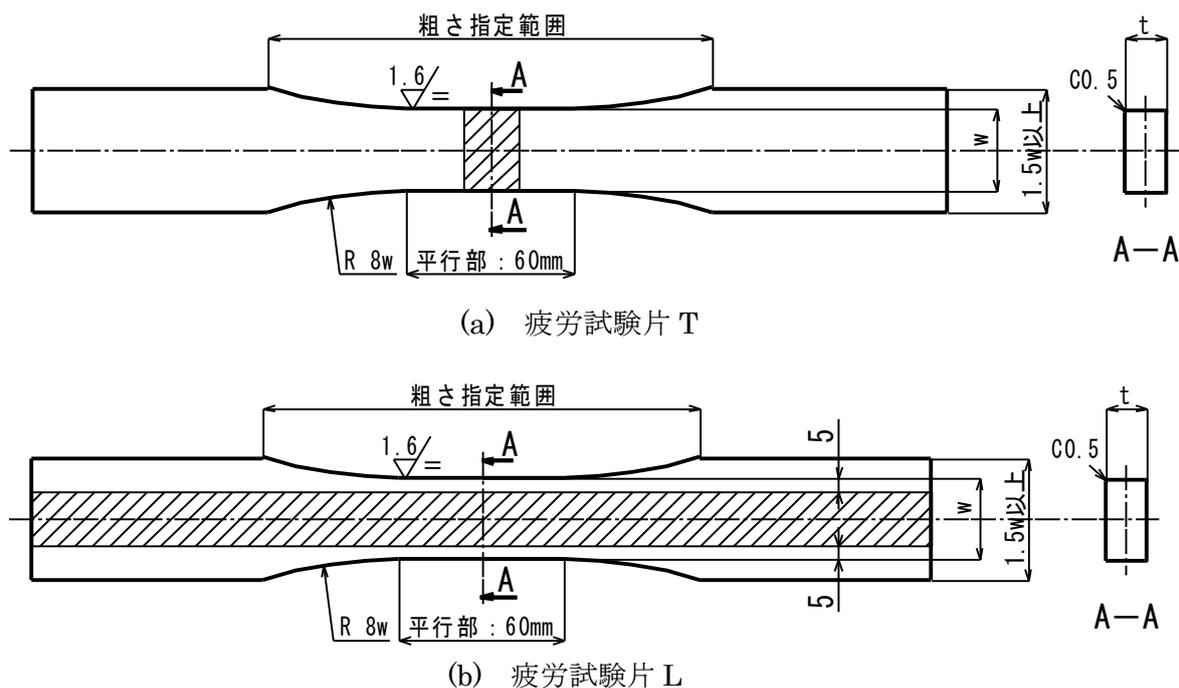


図6 疲労試験片の形状および寸法

表2 応力範囲および疲労寿命

応力範囲 (MPa)	最大応力 (MPa)	最小応力 (MPa)	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

8.2.4 マクロおよびマイクロ観察

- (1) 観察方法は、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カ溶接」の7.4.4項に従う。
- (2) マクロ観察については、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。

解説

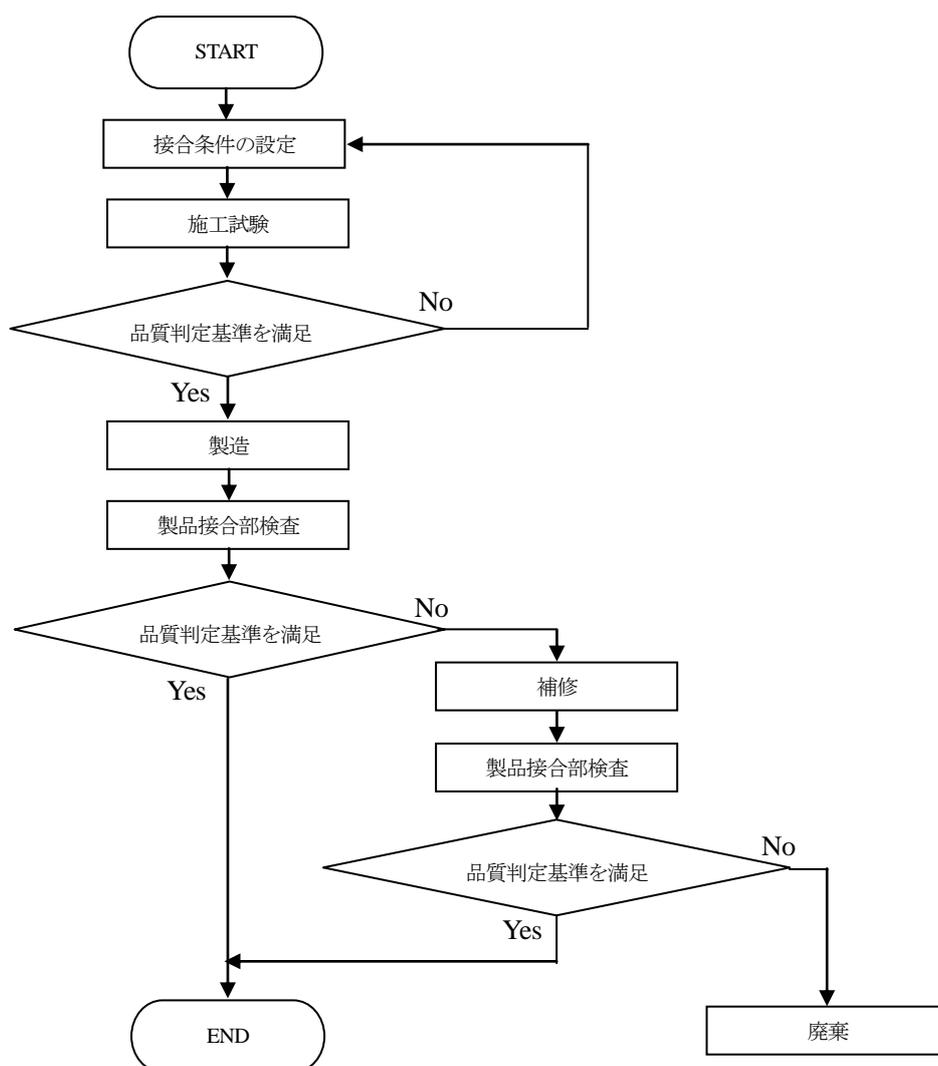
1. 適用範囲

本ガイドラインは、「アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案」に規定されるアルミニウム合金 A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, A6063-T5, A6N01-T5 を対象としている。

現在、摩擦攪拌接合部の疲労強度が明らかにされているのは、A6N01-T5 を母材とする摩擦攪拌接合部だけである。解説 8.2.3 (3) および (4) で述べるように、A6061S-T6 を母材とする摩擦攪拌接合部の疲労強度は、A6N01-T5 を母材とする摩擦攪拌接合部の疲労強度を下回ることはないと考えられるので、本ガイドラインでは、母材が A6061S-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部に適用できるとしている。

4. 一般事項

施工試験、製造、製品接合部検査、および補修の流れを解説図 1 に示す。



解説図 1 施工試験、製造、製品接合部検査、および補修の流れ

5. 施工試験

(4)

本ガイドラインの平成20年3月版では、接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労強度は、接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労強度より高いことを想定して、接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部に対して疲労試験を規定していなかった。しかし接合線方向に応力を受ける両面摩擦攪拌接合の疲労強度が、後で述べる式(解説4)が与える平均的な疲労寿命を満足しない場合が報告された¹⁾。そこで、今回の版では、荷重の作用方向に応じて、摩擦攪拌接合部の接合線直角方向、および／または接合線方向に疲労試験片を採取することに変更している。

8. 試験方法と品質判定基準

8.2.1 引張試験

(3)

表1に掲載される値は、「アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案」で規定される溶接熱影響範囲の許容応力を与える引張強さと0.2%耐力の値である。「アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案」では、摩擦攪拌接合部の許容応力はまだ規定されていない。文献2) (p.19, 表-3.2)によれば、一部を除いて、摩擦攪拌接合部の引張強さと0.2%耐力は、ミグ溶接の場合より高い。したがって、引張試験による摩擦攪拌接合部の引張強さおよび0.2%耐力が表1に示す値以上になる場合を合格としている。

8.2.2 曲げ試験

(1)および(2)

本ガイドラインの平成20年3月版では、曲げ試験方法として押曲げ法のみを規定していた。しかし押曲げ法では、曲げ金具に沿って試験片を曲げることができない場合があることが判明したので³⁾、今回の版では、巻付け法も曲げ試験方法として採用している。元厚の試験片で曲げることが困難な場合、後述の式(解説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 3811(2000)「アルミニウム溶接技術検定における試験方法及び判定基準」では、板厚が4~16mmの中程度の板厚における曲げ試験片の板厚を8mmとしているので、本ガイドラインでは、試験片を薄くする場合は8mmの厚さに統一している。

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ーク溶接」の7.4.2項に、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。

$$D = \frac{t(200 - A)}{2A} \quad (\text{解説1})$$

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 : 母材の規定最低伸び値 (%)

JIS H 4000「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」およびJIS H 4100「アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材」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(解説1)のAに用いて、直径を半径で表したものが式(1)と(2)である。

8.2.3 疲労試験

(1)

図6に示す疲労試験片の形状および寸法は、JIS Z 3103 (1987)「アーク溶接継手の片振り引張疲れ試験方法」を参考としている。文献2)において、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。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¹⁾。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は大きいほうの直径)に10mm加えた値と、板厚を2倍した値を比較し、大きな値以上としている。

(3) および (4)

疲労試験における応力範囲および疲労寿命を規定する表2の算出根拠となったS-N関係を解説図2に示す。図中の疲労試験データは文献4)および5)から引用している。文献4)では母材がA6N01-T5の場合、文献5)では母材がA6N01-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。

解説図2の実線は、文献4)で提案された設計S-N曲線であり、次式で与えられる。

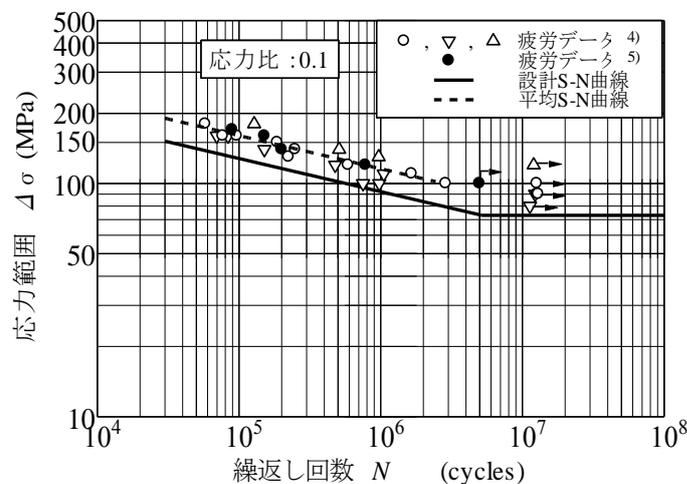
$$\log N = 19.86 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \quad (\text{解説 2})$$

$$\Delta\sigma_{caf} = 73 \quad (\text{解説 3})$$

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

解説図2の破線は、S-N曲線の傾きを7.03として、文献4)および5)の疲労試験データから求められる繰返し回数 N に対する応力範囲 $\Delta\sigma$ の回帰直線である。これは、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。

$$\log N = 20.5 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \quad (\text{解説 4})$$



解説図2 A6N01-T5 および A6N01-T6 の摩擦攪拌接合部の S-N 曲線

表 2 の最小疲労寿命と平均疲労寿命は、各応力範囲に対して、それぞれ式(解説 2)と式(解説 4)から得られる疲労寿命である。

文献 4) では、引張強さあるいは 0.2%耐力が高い母材の疲労強度が、それらが低い母材の疲労強度に比べて高くなることが示されている。アルミニウム合金 A6061S-T6 の引張強さおよび 0.2%耐力は、アルミニウム合金 AN01S-T5 の場合より高い。したがって、A6061S-T6 を母材とする摩擦攪拌接合部の疲労強度は、A6N01S-T5 を母材とする摩擦攪拌接合部の疲労強度を下回ることはないと考えられるので、本ガイドラインでは、母材が A6061S-T6 の摩擦攪拌接合部にも適用できるとしている。

本ガイドラインの試験方法および品質判定基準のまとめを解説表 1 に示す。

解説表 1 試験方法と品質判定基準

試験名	試験方法	試験箇所または試験片	判定基準
非破壊試験	目視検査	接合部の全線	表面欠陥がないこと。表面欠陥の判定基準は当事者間の協議で決める。
	超音波探傷試験	JIS Z 3080	施工試験および製造初回品においては接合部の全線、初回品以降の製品接合部検査においては図 5 に示す範囲
	放射線透過試験	JIS Z 3105	施工試験において、摩擦攪拌接合を開始した側の端部に対して 1 枚 疲労の影響を受けない場合には、きずの分類は 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、C 種 1 類を合格とする。
破壊試験	引張試験	JIS Z 2241	図 4 に示す箇所から採取される、JIS Z 2201 に規定される 14B 号試験片 3 本の各引張試験片の引張強さと 0.2%耐力は、表 1 に示す値以上を合格とする。
	曲げ試験	JIS Z 2248 および 本ガイドラインの 8.2.2 項の式(1)と(2)	図 4 に示す箇所から採取される、JIS Z 2204 に規定される 1 号試験片 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。
	疲労試験	8.2.3 項	図 6 に示す試験片 疲労試験片 T および L の各場合について、3 本の疲労試験片の疲労寿命は、表 2 に示す最小疲労寿命以上で、かつ 2 本の疲労試験片の疲労寿命が平均疲労寿命以上である場合を合格とする。
	マクロおよびミクロ観察	JIS Z 3422-2 の 7.4.4 項	図 4 に示す箇所 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。

参考文献

- 1) 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.
- 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-ひずみ関係の定式化および MIG 溶接と摩擦攪拌接合によって発生する残留応力の定式化, ALST 研究レポート, No.1, 2007.
- 3) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎 : 移動トラックタイヤ載荷試験による道路橋用アルミニウム床版の疲労耐久性評価, ALST 研究レポート, No.18, 2010.
- 4) 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.
- 5) S.Kainuma, H.Katsuki, I.Iwai and M.Kumagai : 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.

2004年1月 初版発行

2008年3月 改訂（疲労の影響を受ける場合に対する規定の追加）

2010年8月 改訂（摩擦攪拌接合部の接合線方向の疲労試験の追加，ならびに曲げ試験片の形状と寸法および曲げ試験方法の見直し）