

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

萩澤 亘保¹，大倉一郎²

¹正会員 日本軽金属株式会社 グループ技術センター（〒421-3291 静岡市清水区蒲原 1-34-1）

²正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 吹田市山田丘 2-1）

要旨

本ガイドラインは、アルミニウム合金土木構造物に摩擦攪拌接合を適用する場合の接合部の品質検査方法と品質判定基準に対する指針を与えるものであり、日本アルミニウム協会から2010年9月に発刊された第3版を対象としている。摩擦攪拌接合部の品質検査は、製品の製造に先立って接合条件が適切であることを確認する施工試験、および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製品接合部検査から構成される。施工試験においては、目視検査、超音波探傷試験、放射線透過試験による非破壊試験、および引張試験、曲げ試験、マクロ・ミクロ観察による破壊試験を行う。製品が疲労の影響を受ける場合には、荷重が作用する方向から採取した試験片による疲労試験も行う。製品接合部検査においては、目視検査と超音波探傷試験を行う。さらに、品質検査に合格しなかった場合の製品の補修についての指針も示している。

キーワード：アルミニウム合金，摩擦攪拌接合，FSW，品質検査，疲労

1. はじめに

摩擦攪拌接合には、ミグ溶接やティグ溶接と比べて疲労強度が高い、接合欠陥が発生しにくい、接合前の準備が簡便である、接合中に煙や粉塵が発生せずシールドガスが不要であるなどの有利な点がある。そのため、ロケットの燃料タンクや車輛などの接合に用いられており、その適用範囲も広がりつつある。

一方、土木構造物の分野では、摩擦攪拌接合は歩道橋用および道路橋用のアルミニウム床版に用いられるようになってきた。前者では疲労の影響を考慮する必要はないが、後者では疲労の影響を考慮しなければならない。前述のように、摩擦攪拌接合には接合欠陥が発生しにくいという特長があるが、それを保証するための検査が必要である。

そのため、日本アルミニウム協会では、2004年に「アルミニウム合金土木構造物の摩擦攪拌接合の品質検査指針（案）」¹⁾の初版を発刊した。初版の適用範囲は、歩道橋用アルミニウム床版などの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であった。その後、道路橋用アルミニウム床版などの疲労の影響を受ける構造物に適用できるよう拡張が図られ、第2版²⁾として2008年に発刊された。さらに、疲労試験と曲げ試験についての見直しを行い、「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」³⁾と改題して、第3版が2010年に発刊された。

本紙では、これらのうちの最新版である第3版の「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」の内容について述べる。

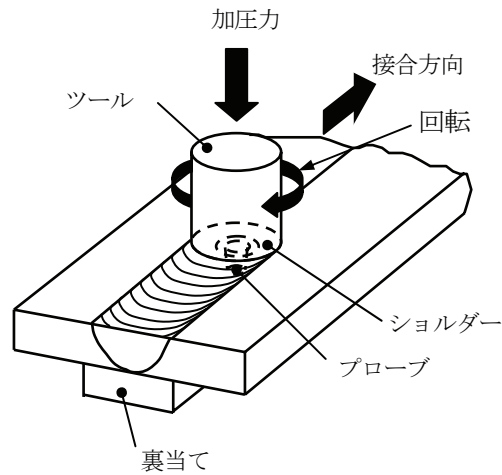


図-1 摩擦攪拌接合

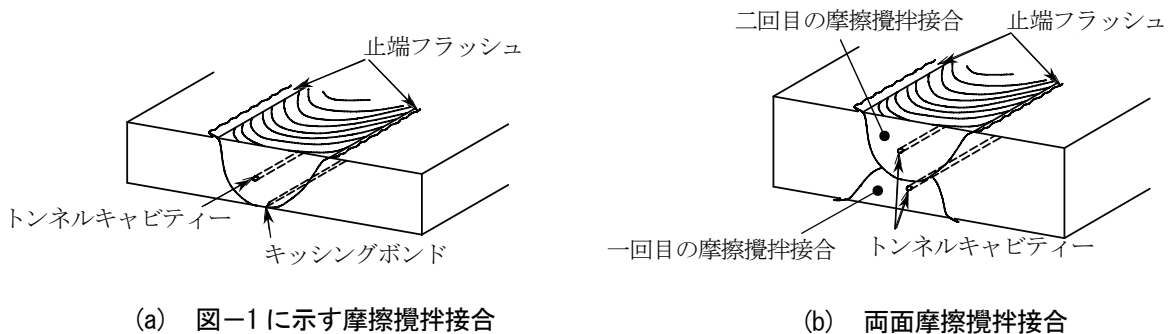


図-2 摩擦攪拌接合部に生じる欠陥

2. 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding)は、1991年に英国の溶接研究所(TWI)で考案された新しい接合法である。摩擦攪拌接合は、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法である。

摩擦攪拌接合における代表的な欠陥として、図-2(a)に示すキッシングボンドおよびトンネルキャビティーがある。キッシングボンドは摩擦攪拌接合特有の継手裏面に現れる欠陥である。トンネルキャビティーは、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である。これらの欠陥は、接合線に直角な力が作用する場合、疲労亀裂の発生原因になる。同図に示す止端フラッシュは、接合部の表面の両脇に発生する返りであり、欠陥ではないが接合線に直角な力が作用する場合、その根元から疲労亀裂が発生する可能性がある。

図-1に示すように、片側の表面だけから摩擦攪拌接合を行うと、図-2(a)に示すキッシングボンドが発生する可能性がある。キッシングボンドの発生を防ぐには、図-2(b)に示す両面摩擦攪拌接合を行えばよい。本ガイドラインでは、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している。両面摩擦攪拌接合でも、不適切な接合条件ではトンネルキャビティーが発生する。また、いずれの摩擦攪拌接合でも止端フラッシュをなくすことはできない。

3. ガイドラインの適用範囲

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」⁴⁾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」⁵⁾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。

4. 品質検査

品質検査は施工試験と製品接合部検査によって行われる。施工試験は、摩擦攪拌接合の接合条件および接合部の仕上げ条件が適切であることを確認するために、製品を製造する前に行う試験である。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。

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の仕上げ条件を用い、製品接合部検査を行わなければならない。製品接合部検査は、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である。

製造時に、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、補修を行ってもよい。

(1) 施工試験

施工試験では、目視検査、超音波探傷試験、放射線透過試験による非破壊試験、および引張試験、曲げ試験、マクロおよびミクロ観察による破壊試験を行う。製品が疲労の影響を受ける場合には、この他に疲労試験も行う。

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-3**に示す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を使用する。摩擦攪拌接合ブロック長とは、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、**図-4**に示すブロックの接合線方向の長さである。

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。破壊試験用の試験片は、**図-3**に示す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、疲労試験片、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から採取する。疲労の影響を受ける場合には、荷

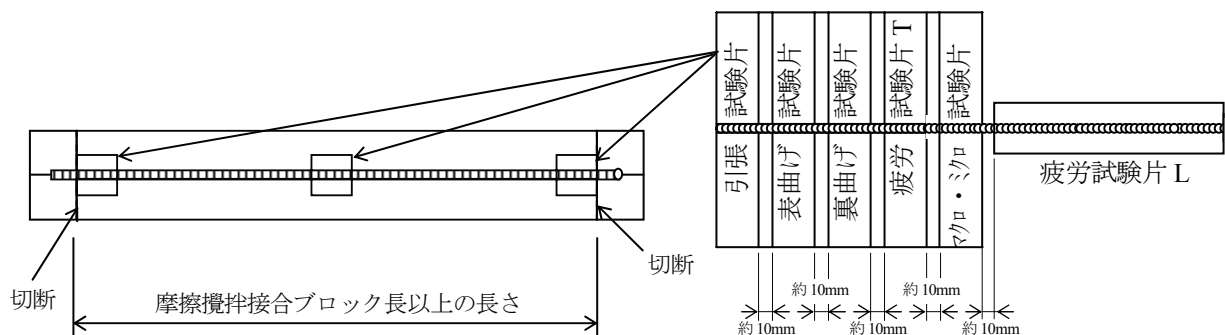


図-3 施工試験に用いる供試体

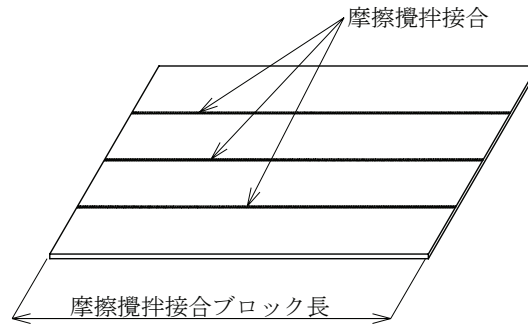


図-4 摩擦攪拌接合ブロック

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には、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には、試験片と試験片の間に約10mmの間隔を設ける。

以下に、施工試験で行う各種試験の方法と品質判定基準を示す。

a) 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。検査は、余長を切断した接合部の全線に対して行う。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。

b) 超音波探傷試験

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」⁶⁾に従う。試験は、余長を切断した接合部の全線に対して行う。疲労の影響を受けない場合の判定基準は、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の判定基準はC種1類を合格とする。

c) 放射線透過試験

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」⁷⁾に従う。試験範囲は、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。疲労の影響を受けない場合の判定基準は、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の判定基準は1類を合格とする。

d) 引張試験

引張試験片は、JIS Z 2201「金属材料引張試験片」⁸⁾に規定される14B号試験片とする。引張試験片では、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。引張試験方法は、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」⁹⁾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して定義する。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 形材	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

e) 曲げ試験

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」¹⁰⁾に規定される1号試験片とする。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部の表面の仕上げは、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より薄いときは、元厚を試験片の厚さとする。

曲げ試験方法は、JIS Z 2248「金属材料曲げ試験方法」¹¹⁾に規定される押曲げ法、または巻付け法とする。曲げ試験に用いる曲げ金具の半径は次の通りとする。

・ A5083-H112 および A5083-O の場合 $R = 2.88t$ (1)

・ A6061-T6, A6063-T5 および A6N01-T5 の場合 $R = 4.75t$ (2)

ここに、 R は曲げ金具の半径、 t は曲げ試験片の厚さである。

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。

f) 疲労試験

疲労試験片の形状および寸法は、図-5に示すものを標準とする。図-5 (a)に示す疲労試験片Tでは、試験片の平行部の軸方向中央に、接合線を試験片の軸に対して直角に置く。図-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。

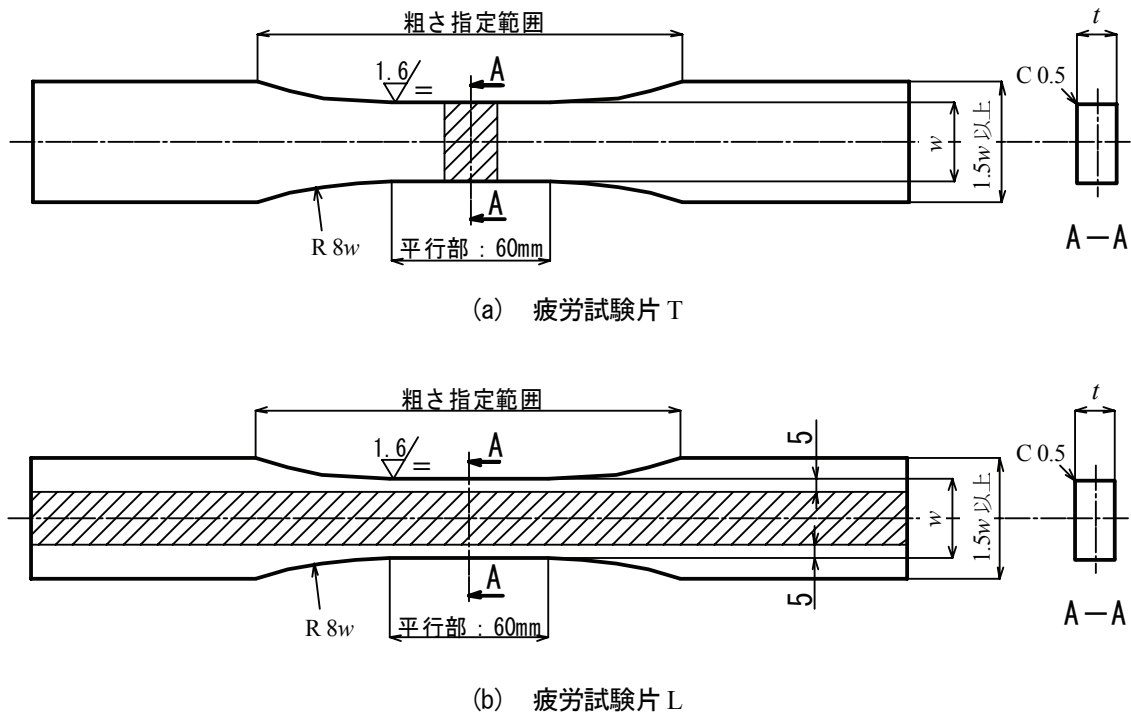


図-5 疲労試験片の形状および寸法

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定義する。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、疲労試験機の載荷能力により選定する。

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。

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

g) マクロおよびミクロ観察

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ク溶接」¹²⁾の7.4.4項に従う。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。

(2) 製品接合部検査

製品接合部検査では、目視検査と超音波探傷試験を行う。製品接合部検査で行う目視検査と超音波探傷試験の方法および品質判定基準を以下に示す。

a) 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。目視検査は接合部の全線に対して行う。

b) 超音波探傷試験

超音波探傷試験の方法と品質判定基準は施工試験に準ずる。製品接合部検査における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-6に示す全接合線において、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。

(3) 補修

補修とは、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のことをいう。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に対して、(1)節の施工試験で述べたd)～g)の各種破壊試験に合格することを確認しなければならない。

補修が行われる接合部の各種破壊試験に用いる試験片採取用の供試体には、施工試験に用いられた図-3に示す供試体から破壊試験用の試験片が採取された後の余剰部分を用いてもよい。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で行わなければならない。補修が行われた接合部が上記の各種破壊試験に合格しない場合には、さらに製品の補修をしてはならない。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。この製品接合部試験に不合格の場合には製品を廃棄する。

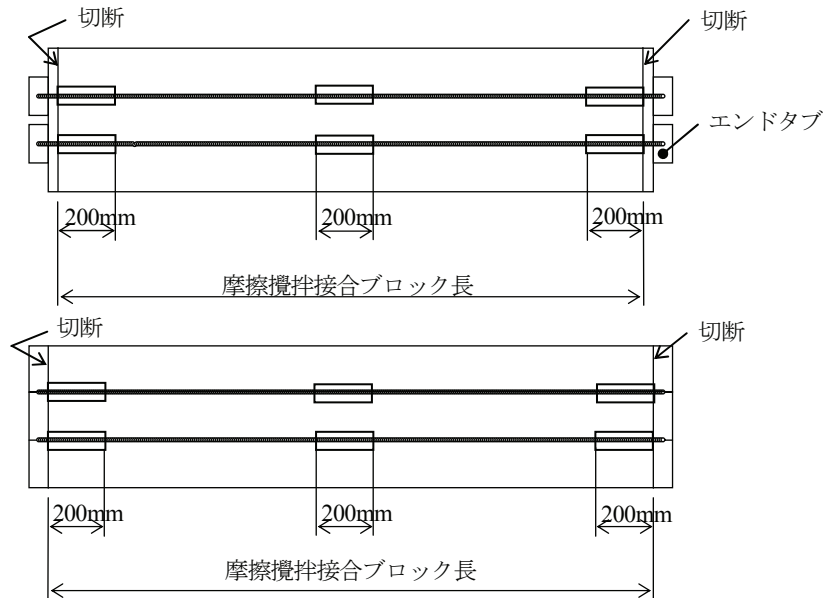


図-6 製品の初回品以降の摩擦攪拌接合ブロックの超音波探傷試験の範囲

5. 補足説明

(1) 摩擦攪拌接合部の引張強さと0.2%耐力

表-1に示す摩擦攪拌接合部の引張強さと0.2%耐力値は、「アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案」¹³⁾で規定される溶接熱影響範囲の許容応力を与えるための基準強度としての引張強さと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」には、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14) (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。

(2) 曲げ試験

本ガイドラインの平成20年3月版²⁾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¹⁵⁾、本ガイドラインでは、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(3)に従って、試験片の厚さに応じて算出される最大直径 D 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。JIS Z 3811「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」¹⁶⁾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、本ガイドラインでも、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カ溶接」¹²⁾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。

$$D = \frac{t(200 - A)}{2A} \quad (3)$$

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」⁴⁾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」⁵⁾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(3)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。

(3) 疲労試験

本ガイドラインの平成20年3月版²⁾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、後述する式(6)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¹⁷⁾。そこで、本ガイドラインでは、荷重の作用方向に応じた方向から疲労試験片を採取することに変更している。

図-5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」¹⁸⁾を参考にしている。文献14)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¹⁷⁾。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。

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関係を図-7に示す。図中の疲労試験データは文献19)および20)から引用している。文献19)では母材がA6N01-T5の場合、文献20)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。

図-7の実線は、文献19)で提案された設計S-N曲線であり、次式で与えられる。

$$\log N = 19.86 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{caf} = 73 \quad (5)$$

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)

図-7の破線は、S-N曲線の傾きを7.03として、文献19)および20)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。

$$\log N = 20.5 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \quad (6)$$

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(4)と式(6)から得られる疲労寿命である。

文献19)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。

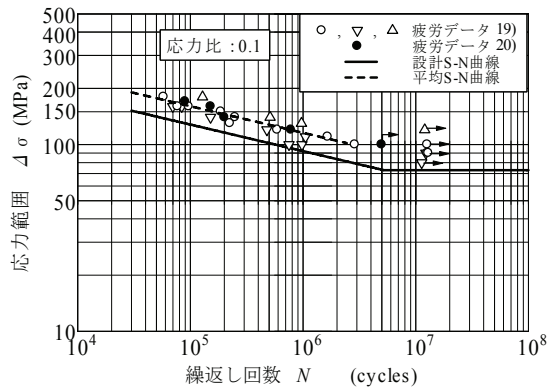


図-7 A6N01-T5 および A6N01S-T6 の摩擦攪拌接合部の S-N 曲線

6. 結論

(1) 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の手順は図-8 に示すとおりである。

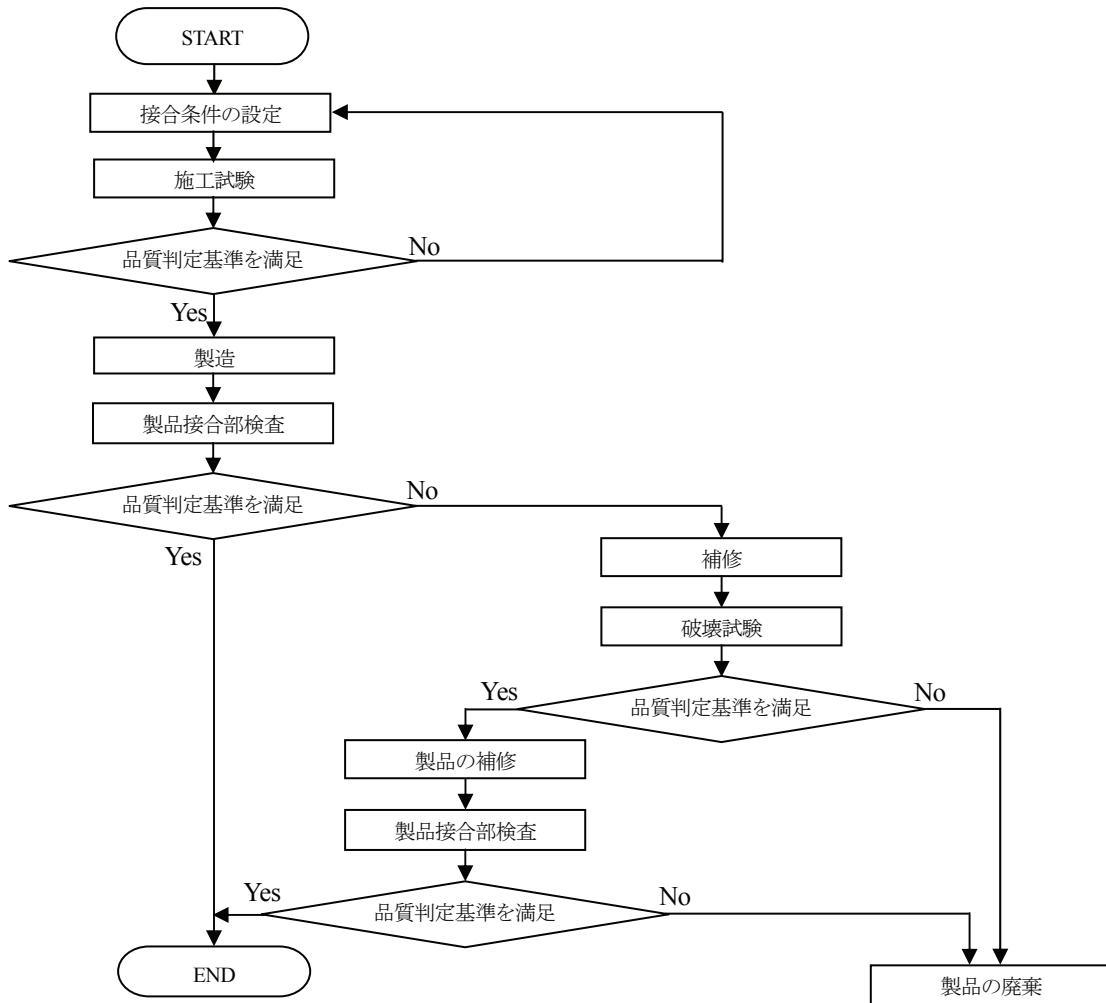


図-8 施工試験，製造，製品接合部検査，および補修の流れ

(2) 施工試験および製品接合部検査で実施する試験は表-3 に示すとおりである。

表-3 施工試験および製品接合部検査で実施する試験

品質検査	品質検査で実施する試験	
施工試験	非破壊試験	目視検査, 超音波探傷試験, 放射線透過試験
	破壊試験	引張試験, 曲げ試験, 疲労試験, マクロおよびマイクロ観察
製品接合部検査	非破壊試験	目視検査, 超音波探傷試験

(3) 施工試験および製品接合部検査で実施する試験の試験方法と品質判定基準は表-4 に示すとおりである。

表-4 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	目視による検査	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-6 に示す範囲	疲労の影響を受けない場合には, きずの分類はC種 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。
	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, きずの分類は 1 類を合格とする。
破壊試験	引張試験	JIS Z 2241	図-3 に示す箇所から採取した, 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 の式(1)と(2)	図-3 に示す箇所から採取した, 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つてはならない。 疲労の影響を受ける場合には, 表面割れがあつてはならない。
	疲労試験	本ガイドライン 4 章(1)節 f) 項	図-5 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が, 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 マイクロ観察	JIS Z 3422-2 の 7.4.4 項	図-3 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つてはならない。

謝辞：本ガイドラインは、日本アルミニウム協会 土木構造物委員会 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で作成された。本ガイドラインの作成に多大な努力を払われた分科会委員各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金の摩擦攪拌接合部の品質検査指針（案），2004.1
- 2) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金の摩擦攪拌接合部の品質検査指針（案），2008.3
- 3) 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，http://www.aluminum.or.jp/doboku/files/guideline100912_02.pdf，2010.9
- 4) JIS H 4000：アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条，2006.
- 5) JIS H 4100：アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材，2006.
- 6) 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.
- 7) JIS Z 3105：アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法，2003.
- 8) JIS Z 2201：金属材料引張試験片，1998.
- 9) JIS Z 2241：金属材料引張試験方法，1998.
- 10) JIS Z 2204：金属材料曲げ試験片，1996.
- 11) JIS Z 2248：金属材料曲げ試験方法，2006.
- 12) 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ケ溶接，2003.
- 13) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第1次改訂試案），1998.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) JIS Z 3811：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，2000.
- 17) 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.
- 18) JIS Z 3103：アーケ溶接継手の片振り引張疲れ試験方法，1987.
- 19) 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.
- 20) 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.