

# 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 17

2010年5月

大阪大学大学院工学研究科  
大倉一郎，牧山大祐

## 概要

『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)』(日本アルミニウム協会 土木構造物委員会)(QIFSW 指針)においては、疲労の影響を受ける場合は、キッシングボンドの発生を排除しなければならないと規定され、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見なされている。しかし、QIFSW 指針の中の疲労試験に関する規定は、片面からのみ実施された片面摩擦攪拌接合に対する疲労試験結果に基づいて作成されている。

両面摩擦攪拌接合で接合された接合部の疲労強度はまだ明らかにされていない。本研究は、両面摩擦攪拌接合で製作された試験体から採取された試験片の疲労試験を実施し、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を明らかにする。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B) (研究期間 2007 年度～2008 年度, 課題番号 19360202, 研究課題名: アルミニウム床版による軽量橋の実現) の研究費補助金を受けた。

## 目次

第1章 序論	1
第2章 疲労試験片	2
第3章 疲労試験結果	5
第4章 過去の疲労試験結果との比較	8
第5章 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との比較	9
第6章 結論	11
参考文献	12
付録 A 過去の疲労試験結果	13
付録 B 床版形材の疲労試験結果	14
付録 C 平板形材の疲労試験結果	16
付録 D 大気暴露前の摩擦攪拌接合部の疲労試験結果	18
付録 E 接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の設計疲労限度と設計 S - N 曲線	19

## 第1章 序論

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)<sup>1)</sup>(以後、QIFSW 指針と呼ぶ)においては、疲労の影響を受ける場合は、キッシングボンドの発生を排除しなければならないと規定され、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見なされている。ここで、キッシングボンドとは、摩擦攪拌接合部の裏面に発生し、浸透探傷試験で浸透指示模様を検出されず、裏曲げ試験で割れが発生する強度が低い部分である。両面摩擦攪拌接合は、ある面に対して摩擦攪拌接合が行なわれた後、被接合体を裏返して反対側の面からも摩擦攪拌接合を行なうことによって継手が得られる接合である。

QIFSW 指針の中の疲労試験に関する規定は、片面からのみ実施された片面摩擦攪拌接合に対する疲労試験結果<sup>2)~4)</sup>から、キッシングボンドから疲労亀裂が発生した疲労試験結果を排除したデータに基づいて作成されている。両面摩擦攪拌接合で接合された接合部の疲労強度はまだ明らかにされていない。本研究は、両面摩擦攪拌接合で製作された試験体から採取された試験片の疲労試験を実施し、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を明らかにする。

## 第2章 疲労試験片

疲労試験片が採取された試験体を図1に示す。試験体は、開閉断面のアルミニウム床版の開発<sup>5)</sup>で得られた押出型材2本を両面摩擦攪拌接合で連結したものである。試験体の平面図と断面図を図2に示す。試験体の材料はA6061S-T6である。摩擦攪拌接合の接合条件を表1に示す。図2の断面図に示すように、押出型材の上フランジを突合せ、最初、上フランジの裏側をプローブ長さ6mmで接合した後、天地を逆にして、表側をプローブ長さ10mmで接合した。表側を接合する際、裏当の支持を完全にするために、裏側のショルダー回転跡を切削した。したがって裏側のショルダー回転跡の高さは表側のそれより低い。他方、摩擦攪拌接合の際、表1に示すように、裏側で0.6mm、表側で0.5mmのショルダーの押し込みが行なわれている。したがって第3章の図5~7に示すように、接合部の板厚が減少している。

図2に示すように、試験体の中空部の上フランジの長手方向から母材の引張試験片を採取し、接合線直角方向に摩擦攪拌接合部に対する引張試験片を採取した。さらに接合線方向に摩擦攪拌接合部に対する疲労試験片を採取した。引張試験片の形状は、図3(a)に示すJIS14B号である。図3(b)に示す疲労試験片の形状はQIFSW指針に従っている。引張試験片と疲労試験片の板厚はそれぞれ15mmである。図2に示す試験体を3体用意し、そのうちの1体から、同図に示すように母材と摩擦攪拌接合部の引張試験片を各3本、疲労試験片を6本製作し、残り2体の試験体から疲労試験片を各6本製作した。



図1 試験体

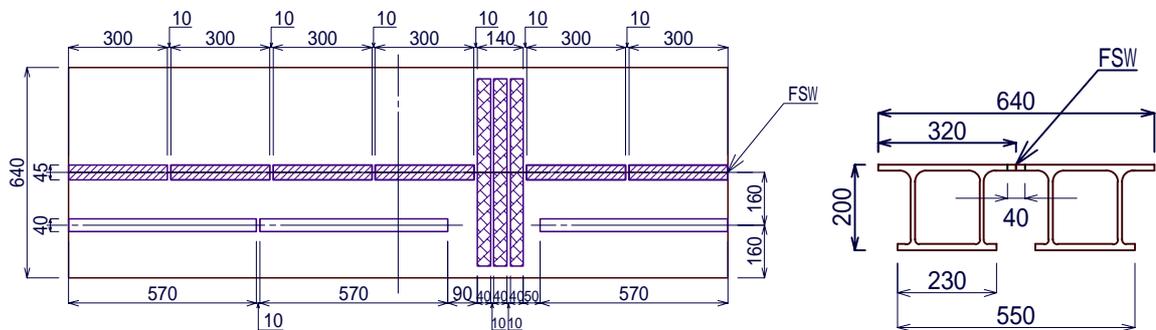


図2 試験体の平面図と断面図

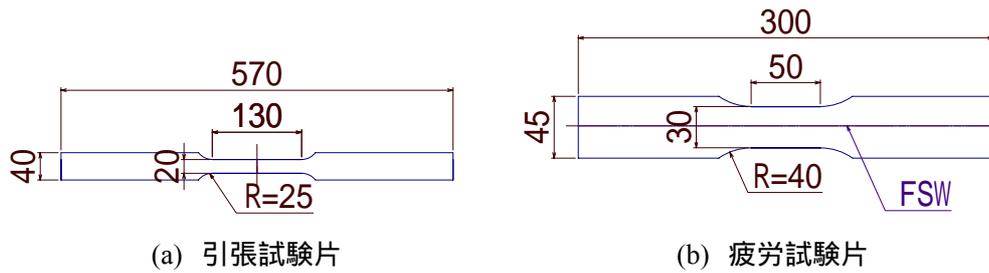


図3 試験片の形状

表1 摩擦攪拌接合の接合条件

対象	ツール			押込量 (mm)	回転数 (rpm)	送り速度 (mm/min)
	ショルダー (mm)	プローブ径 (mm)	プローブ長さ (mm)			
裏側	$\phi 17.5$	上端 下端 $\phi 8 - \phi 6$	6	0.6	-	-
表側	$\phi 20$	上端 下端 $\phi 10 - \phi 6$	10	0.5	-	-

試験体に使用された A6061S - T6 の化学成分を表 2、母材と摩擦攪拌接合部の引張試験結果を表 3 に示す。摩擦攪拌接合部のヤング係数が、70GPa を大きく上回っているのは、試験体の製作の際、摩擦攪拌接合の過程で試験体に変形が生じ、変形した状態の試験体から引張試験片を採取したため、図 4 に示すように、引張試験片の表面の応力 - ひずみ関係と裏面の応力 - ひずみ関係がかなり異なったためである。

表2 試験体(A6061S - T6)の化学成分

項目	化 学 成 分 (質量%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
ミルシート値	0.66	0.19	0.33	0.02	1.0	0.08	0.01	0.01
JIS 値	0.40~0.8	0.7 以下	0.15~0.40	0.15 以下	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25 以下	0.15 以下

表3 試験体(A6061S - T6)の機械的特性

部位	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	伸び (%)
母材	317	288	71.4	0.32	13.4
摩擦攪拌接合部	269	174	74.6	0.34	4.5

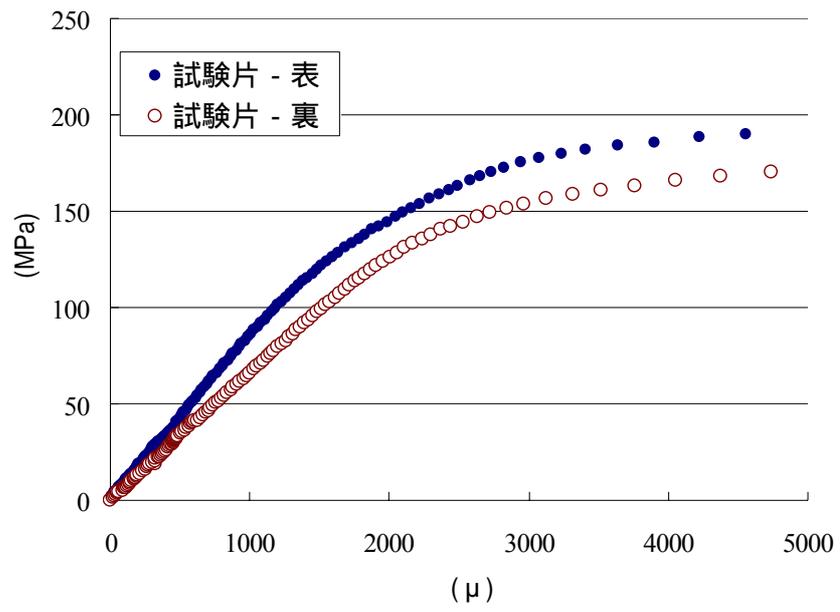


図4 摩擦攪拌接合部の応力 - ひずみ関係

### 第3章 疲労試験結果

接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労試験結果を表4に示す。第2章で述べたように、摩擦攪拌接合部の板厚が減少しているが、表4の $\Delta\sigma$ に対して、板厚を15mmとして算出された応力範囲を採用している。疲労亀裂の様子を図5~7に示す。図5は表面のショルダー回転跡の中央に発生した例、図6は裏面のショルダー回転跡の中央に発生した例、図7は表面のバリに発生した例を示している。試験片の裏面は、ショルダー回転跡が切削されたにもかかわらず、表4から分るように、疲労亀裂は裏面から多く発生している。この原因は不明である。

表4 疲労試験結果

(a)  $R = -1.0$

試験片	$\Delta\sigma$ (MPa)	$N$ (回)	亀裂の発生位置
A1	250	$1.01 \times 10^5$	表面のショルダー回転跡の中央
A2	200	$2.58 \times 10^5$	裏面のショルダー回転跡の中央
A3	160	$3.29 \times 10^5$	表面のショルダー回転跡の中央
A4	140	$1.99 \times 10^6$	チャック部で破断

(b)  $R = 0.1$

試験片	$\Delta\sigma$ (MPa)	$N$ (回)	亀裂の発生位置
B1	190	$6.56 \times 10^4$	裏面のショルダー回転跡の中央
B2	160	$7.91 \times 10^4$	裏面のショルダー回転跡の中央
B3	130	$1.83 \times 10^5$	裏面のショルダー回転跡の中央
B4	110	$7.20 \times 10^5$	裏面のショルダー回転跡の中央
B5	100	$1.21 \times 10^6$	チャック部で破断
B6	90	$1.00 \times 10^7$	発生せず
B6'	120	$2.19 \times 10^5$	裏面のショルダー回転跡の中央 (試験片6で再試験)

(c)  $R = 0.5$

試験片	$\Delta\sigma$ (MPa)	$N$ (回)	亀裂の発生位置
C1	105	$1.91 \times 10^4$	裏面のショルダー回転跡の中央
C2	90	$2.32 \times 10^4$	裏面のショルダー回転跡の中央
C3	80	$6.02 \times 10^5$	チャック部で破断
C4	80	$3.51 \times 10^5$	裏面のショルダー回転跡の中央
C5	70	$6.56 \times 10^5$	裏面のショルダー回転跡の中央
C6	60	$5.05 \times 10^6$	表面のバリ
C7	55	$1.00 \times 10^7$	発生せず



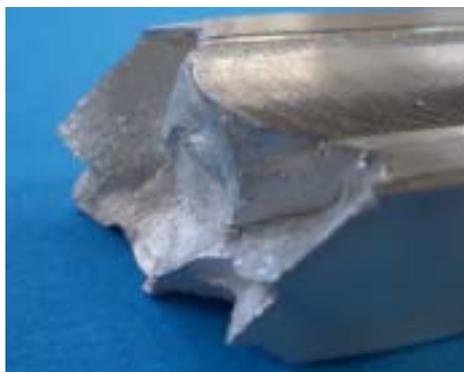
図5 試験片 A3 に発生した疲労亀裂



(a) 裏側



(b) 表側



(c) 断面

図6 試験片 B4 に発生した疲労亀裂



図 7 試験片 C6 に発生した疲労亀裂

## 第 4 章 過去の疲労試験結果との比較

$R=0.1$  に対する今回の疲労試験結果と過去の疲労試験結果<sup>2)</sup>(数値データは付録 A 参照)との比較を図 8 に示す。過去の疲労試験結果は、接合線方向に応力を受ける場合に対する結果である。今回の疲労試験結果の疲労強度は、過去の疲労試験結果の疲労強度より明らかに低い。これに対する理由として次が考えられる。

- (1) 今回の試験片の材料は A6061S-T6 であり、過去の試験片の材料は A6005C-T5 である。したがって材料が異なること。
- (2) 両面摩擦攪拌接合と片面摩擦攪拌接合における入熱量が違うこと。両面摩擦攪拌接合においては裏面と表面のプローブ長さが異なること。
- (3) 両面摩擦攪拌接合では両面で接合部の板厚が減少する。したがって両面摩擦攪拌接合の方が片面摩擦攪拌接合より板厚減少が大きいこと。

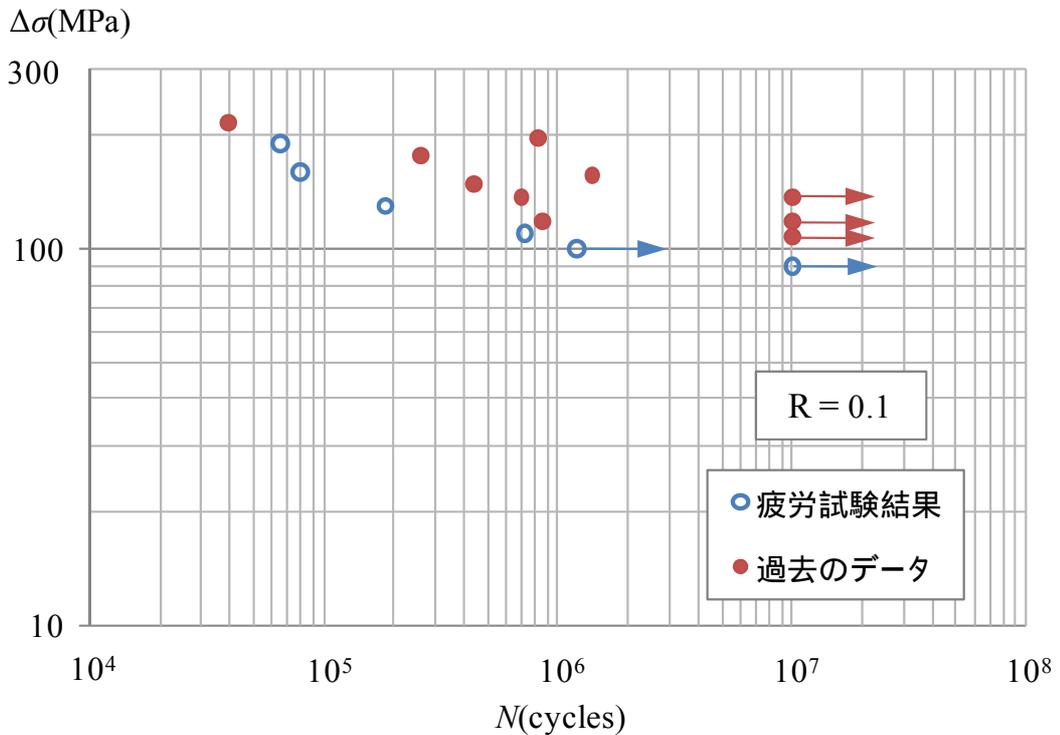


図 8 過去の疲労試験結果との比較

## 第5章 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との比較

今回の疲労試験結果と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<sup>2)~4)</sup> (数値データは付録B~D参照)との比較を図9に示す。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にはキッキングボンドから疲労亀裂が発生したデータは含まれない。図9には設計S-N曲線および設計疲労限度<sup>6)</sup>も描かれている(付録E参照)。

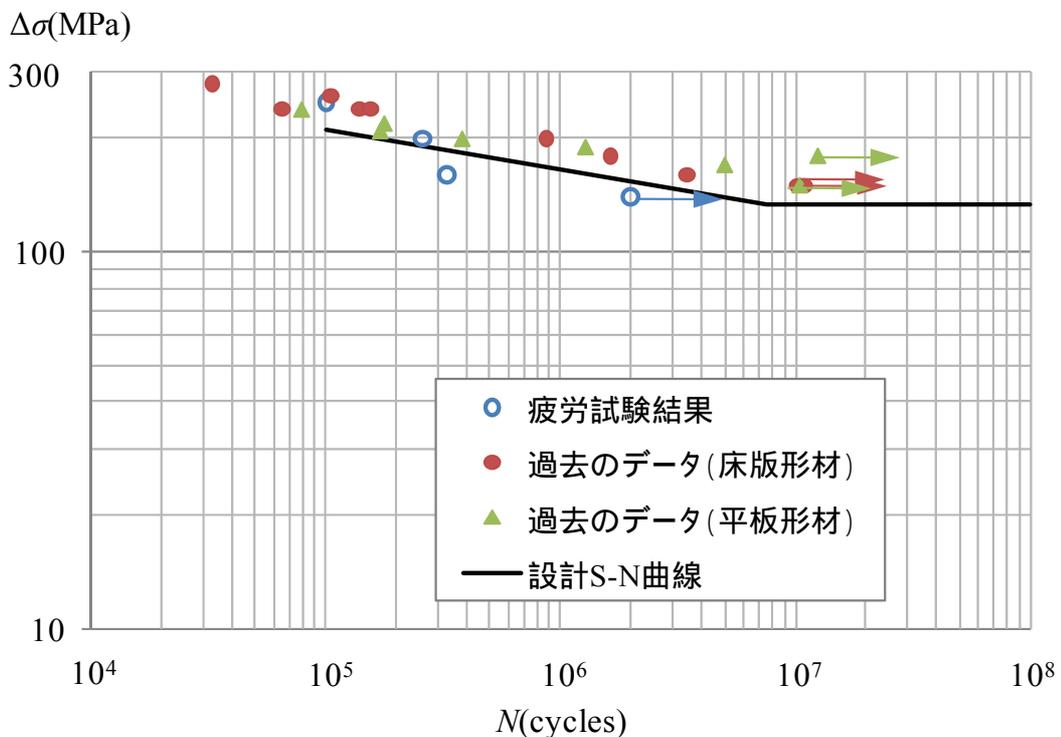
図9(b)の破線は、QIFSW 指針の解説で記載されている、 $R=0.1$ に対して平均的な疲労寿命を与える平均S-N曲線であり、次式で与えられる。

$$\log N = 20.5 - 7.03 \log(\Delta\sigma) \quad (1)$$

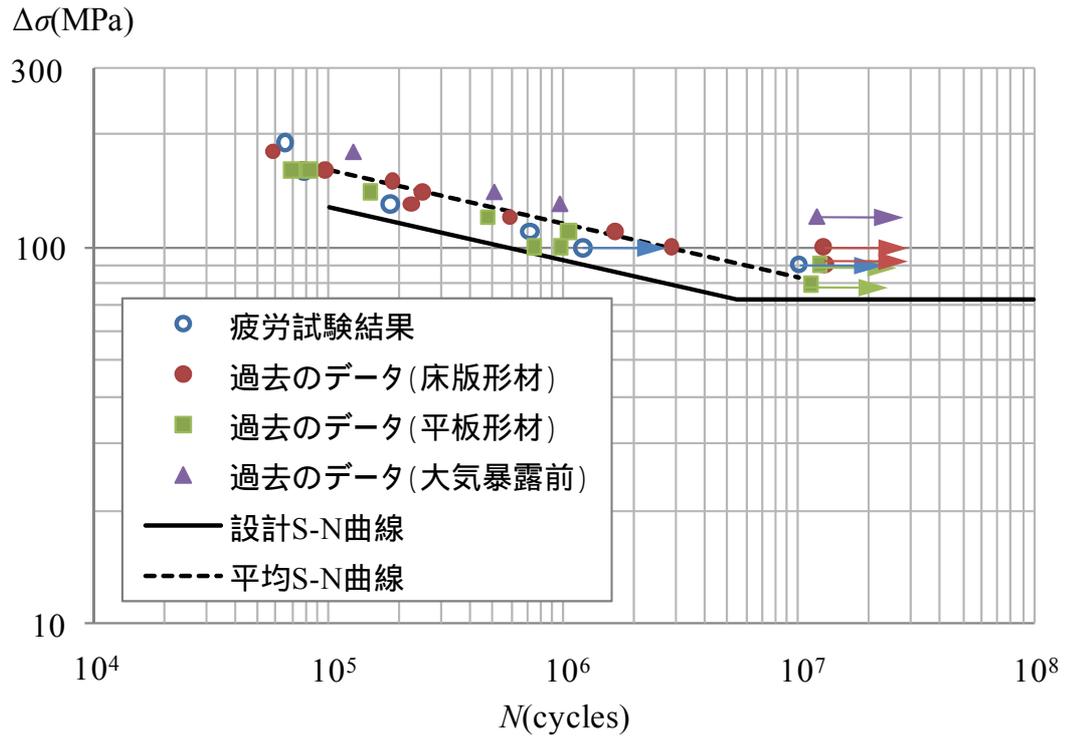
QIFSW 指針では、施工試験において、3本の疲労試験片の疲労寿命が設計S-N曲線が与える疲労寿命より長く、しかも2本の疲労試験片の疲労寿命は式(1)が与える平均疲労寿命より長いとき合格としている。今回の疲労試験結果は設計S-N曲線が与える疲労寿命より長いが平均疲労寿命より短い。

QIFSW 指針においては、接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労強度が、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い。今回の疲労試験結果がQIFSW 指針の規定を満足しなかったため、荷重が作用する方向に対応して摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施することをQIFSW 指針に提案する。

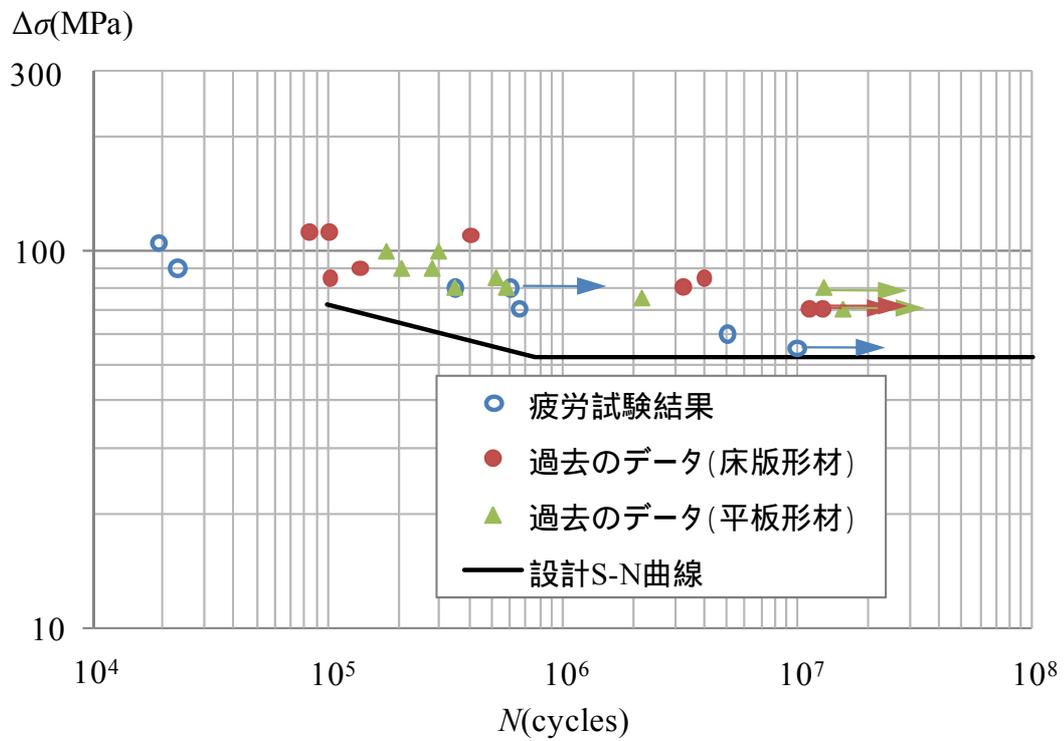
すなわち、接合線直角方向に応力を受ける場合、接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施、接合線方向に応力を受ける場合、接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施、接合線の両方向に応力を受ける場合、両方向に対して疲労試験を実施することを提案する。



(a)  $R = -1$



(b)  $R = 0.1$



(c)  $R = 0.5$

図9 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との比較

## 第 6 章 結論

本研究では、表裏両面から摩擦攪拌接合(両面摩擦攪拌接合)された試験体から、接合線方向に試験片を採取し、それに対して接合線方向に応力を受ける疲労試験を実施した。得られた疲労強度と片面のみから摩擦攪拌接合(片面摩擦攪拌接合)された場合に対する過去の疲労試験データとの比較により、次の結論を得た。

- (1) 片面摩擦攪拌接合で発生するキッシングボンド(摩擦攪拌接合部の裏面に発生し、浸透探傷試験で浸透指示模様が検出されず、裏曲げ試験で割れが発生する強度が低い部分)を防ぐために、両面摩擦攪拌接合が考案され、両面摩擦攪拌接合の疲労強度が片面摩擦攪拌接合のそれより大きいことが想定されていたが、両面摩擦攪拌接合の疲労強度が片面摩擦攪拌接合のそれより低かった。
- (2) 両面摩擦攪拌接合の疲労強度が片面摩擦攪拌接合のそれより低かった理由として次が考えられる。
  - 1) 今回の試験片の材料は A6061S-T6 であり、過去の試験片の材料は A6005C-T5 である。したがって材料が異なること。
  - 2) 両面摩擦攪拌接合と片面摩擦攪拌接合における入熱量が違うこと。両面摩擦攪拌接合における裏面と表面のプローブ長さが異なること。
  - 3) 両面摩擦攪拌接合では両面で接合部の板厚が減少する。したがって両面摩擦攪拌接合の方が片面摩擦攪拌接合より板厚減少が大きいこと。
- (3) 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)(QIFSW 指針)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い。今回の疲労試験結果が QIFSW 指針の規定を満足しなかったため、荷重が作用する方向に対応して摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施することを QIFSW 指針に提案する。すなわち、接合線直角方向に応力を受ける場合、接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施、接合線方向に応力を受ける場合、接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労試験を実施、接合線の両方向に応力を受ける場合、両方向に対して疲労試験を実施する。

## 参考文献

- 1) 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指針(案)，2008．
- 2) 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/ -59，pp.255-266，2002．
- 3) 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．
- 4) 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．
- 5) 大倉一郎，岡田理，萩澤亘保，大澤章吾：開閉断面のアルミニウム床版の開発，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1219-1227，2005．
- 6) 大倉一郎，牧山大祐，萩澤亘保：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の設計 S - N 曲線，ALST 研究レポート，No.6，2009．

付録 A 過去の疲労試験結果<sup>2)</sup>

R=0.1

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
216	$3.90 \times 10^4$	
176	$2.60 \times 10^5$	
148	$4.40 \times 10^5$	
137	$7.00 \times 10^5$	
196	$8.20 \times 10^5$	
118	$8.60 \times 10^5$	
157	$1.40 \times 10^6$	
108	$1.00 \times 10^7$	未破断
118	$1.00 \times 10^7$	未破断
137	$1.00 \times 10^7$	未破断

付録 B 床版形材の疲労試験結果<sup>2)</sup>

(a)  $R=-1$

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
280	$3.31 \times 10^4$	
240	$6.53 \times 10^4$	
260	$1.05 \times 10^5$	
240	$1.39 \times 10^5$	
240	$1.56 \times 10^5$	
200	$8.71 \times 10^5$	
180	$1.63 \times 10^6$	
160	$3.46 \times 10^6$	
160	$3.48 \times 10^6$	
150	$1.02 \times 10^7$	未破断
150	$1.09 \times 10^7$	未破断

(b)  $R=0.1$

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
180	$5.81 \times 10^4$	
160	$7.72 \times 10^4$	
160	$9.69 \times 10^4$	
150	$1.87 \times 10^5$	
130	$2.25 \times 10^5$	
140	$2.50 \times 10^5$	
120	$5.92 \times 10^5$	
110	$1.66 \times 10^6$	
100	$2.89 \times 10^6$	
100	$1.27 \times 10^7$	未破断
90	$1.27 \times 10^7$	未破断
90	$1.30 \times 10^7$	未破断

(c)  $R=0.5$ 

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
112.5	$8.40 \times 10^4$	
112.5	$1.02 \times 10^5$	
85	$1.03 \times 10^5$	
90	$1.37 \times 10^5$	
110	$4.06 \times 10^5$	
80	$3.25 \times 10^6$	
85	$4.01 \times 10^6$	
70	$1.12 \times 10^7$	未破断
70	$1.29 \times 10^7$	未破断

付録 C 平板形材の疲労試験結果<sup>4)</sup>

(a)  $R=-1$

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
210	$1.72 \times 10^5$	
150	$1.04 \times 10^7$	未破断
170	$4.99 \times 10^6$	
200	$3.83 \times 10^5$	
180	$1.24 \times 10^7$	未破断
220	$1.79 \times 10^5$	
190	$1.28 \times 10^6$	
240	$7.97 \times 10^4$	

(b)  $R=0.1$

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
140	$1.51 \times 10^5$	
100	$7.50 \times 10^5$	
80	$1.13 \times 10^7$	未破断
90	$1.23 \times 10^7$	未破断
120	$4.77 \times 10^5$	
100	$9.76 \times 10^5$	
160	$8.36 \times 10^4$	
110	$1.05 \times 10^6$	
160	$6.96 \times 10^4$	

(c)  $R=0.5$ 

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
100	$1.80 \times 10^5$	
80	$3.52 \times 10^5$	
80	$1.31 \times 10^7$	未破断
90	$2.82 \times 10^5$	
90	$2.09 \times 10^5$	
85	$5.27 \times 10^5$	
100	$3.00 \times 10^5$	
80	$5.83 \times 10^5$	
75	$2.20 \times 10^6$	
70	$1.58 \times 10^7$	未破断

付録 D 大気暴露前の摩擦攪拌接合部の疲労試験結果<sup>3)</sup>

$R=0.1$

応力範囲 (MPa)	繰返し数	破断の有無
140	$5.09 \times 10^5$	
180	$1.28 \times 10^5$	
120	$1.20 \times 10^7$	未破断
130	$9.68 \times 10^5$	

付録 E 接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の設計疲労限度と

設計 S - N 曲線<sup>6)</sup>

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

$\alpha$  : 腐食の影響を受けない場合 1 , 腐食の影響を受ける場合 0.872

$\Delta\sigma_{caf}$  と  $\Delta\sigma$  の単位 : MPa