

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

大倉一郎¹・萩澤亘保²・鳴尾亮³・戸田均⁴

¹正会員 工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

²正会員 工修 日本軽金属(株)グループ技術センター企画室部長 (〒421-3291 庵原郡蒲原町蒲原 1-34-1)

³正会員 工修 石川島播磨重工業(株)愛知事業所橋梁設計部 (〒478-8650 知多市北浜町 11-1)

⁴石川島播磨重工業(株)橋梁事業部建設部課長代理 (〒135-8322 東京都江東区毛利 1-19-10)

アルミニウム中空押出型材を摩擦攪拌接合で接合することによりアルミニウム床版を製作した。本研究の目的は、このアルミニウム床版の疲労特性を明らかにすることである。最初に床版に用いたアルミニウム押出型材の母材と摩擦攪拌接合部の材料特性を調べる。次にアルミニウム床版の疲労試験を行い、上板の局部変形によって起こされる板曲げ応力によって、上板の荷重直下の摩擦攪拌接合の接合線に沿って疲労亀裂が発生することを示す。さらに梁タイプの試験体の疲労試験を行い、床版の支持間隔が大きくなった場合には、曲げモーメントに起因して下板に生じる膜応力によって、下板の摩擦攪拌接合の接合線に直角な方向に疲労亀裂が発生することを示す。

Key Words : aluminum alloy, deck, friction stir welding, extrusion, fatigue

1. はじめに

わが国においては、平成6年の道路構造令による設計自動車荷重の196kNから245kNへの変更があったため、既存のコンクリート床版や桁の補強が急がれている。この対策として、既存のコンクリート床版を軽量のアルミニウム床版で置換えることによって、床版自身の重量を低減化することが考えられる。さらに、明石海峡大橋を超えるような次世代の超長大吊橋では、床版の軽量化が必須であり、ここにもアルミニウム床版の適用が考えられる。

一方、米国では老朽化により非常に多くの橋が、大掛かりな補修や補強による耐荷力向上の必要性に迫られている。この対策の一つとして、基礎や支持構造を変えことなく、既存のコンクリート床版をアルミニウム床版で取り換える試みがなされており、その実績も出つつある¹⁾。

このような背景から、本研究では、アルミニウム中空押出型材を摩擦攪拌接合で接合することによりアルミニウム床版を製作し、摩擦攪拌接合部の材料特性を明らかにするとともに、静的載荷試験、疲労試験さらに

はFEM解析により、このアルミニウム床版の疲労特性を明らかにする。

2. 試験体の製作

(1) アルミニウム床版

アルミニウム床版の概念図を図-1に示す。アルミニウム床版は、アルミニウム合金押出型材を平行に並べ、それらが連結された構造を有しており、押出型材

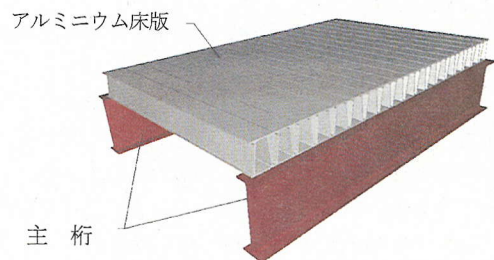


図-1 主桁の上に置かれたアルミニウム床版

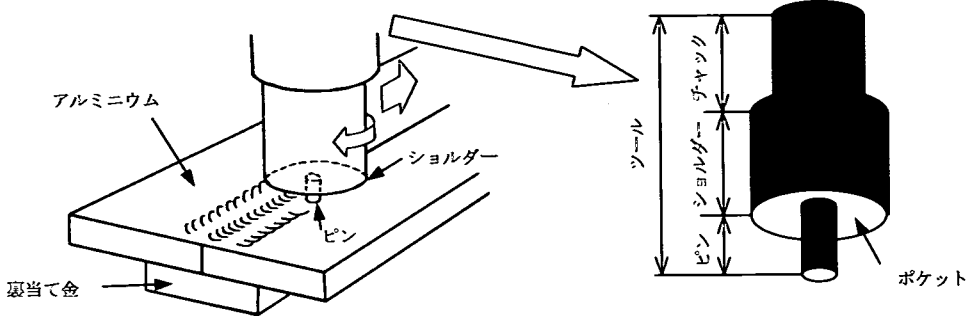


図-2 摩擦撹拌接合の概念

の長手方向が主桁間に渡される。これまで、アルミニウム合金押出形材を用いた床版の FEM 解析²⁾および押出形材同士を嵌合によって連結したアルミニウム床版の開発が行われてきた³⁾。しかし、嵌合により連結された床版は、高いせん断力を伝達するものの、曲げモーメントの伝達能力が低いという問題があった。

嵌合に代わる連結方法として溶接を考えたが、鋼床版において既に溶接部に疲労亀裂が発生していることが報告されており⁴⁾、押出形材の連結に MIG 溶接を用いた場合にも溶接部に疲労亀裂の発生が懸念された。

そこで、摩擦撹拌接合 (Friction Stir Welding, 略称 FSW) によって押出形材を連結することを考えた^{5)~8)}。摩擦撹拌接合では余盛りができないため、接合部の疲労強度が MIG 溶接による溶接部の疲労強度より高いと予想した。

(2) 摩擦撹拌接合

摩擦撹拌接合は、英国の溶接研究所で 1991 年に考案された⁹⁾。図-2 に示すように、アルミニウム材を突合せ、裏当て金の上に固定する。先端にピンを持つ鋼製のツールを回転させながら、ショルダーがアルミニウム材の表面に接するまで接合面に挿入する。接合面は摩擦熱により軟化し、ツールの回転に引きずられて撹拌される。ツールを接合線に沿って移動させることによって接合面は一体化する。撹拌されているアルミニウムは熔融状態にないため、摩擦撹拌接合は固相接合法の一種である。

回転ツールのショルダー底面には、ピンの体積に相当する、撹拌されたアルミニウムを一時的に溜める、皿を逆さにした形状のポケットが設けられている。

摩擦撹拌接合部は、図-3 に示すように、ピンの形状に相当する撹拌部、その両側の塑性流動域および熱影響部から成る。接合線の両脇にはショルダーから排出されたアルミニウムによって返りが発生する。

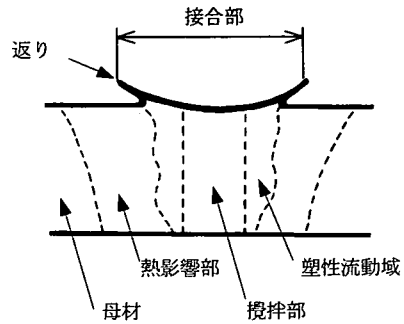


図-3 摩擦撹拌接合部の組織

(3) アルミニウム押出形材

アルミニウム床版に用いた押出形材の断面寸法を図-4 に示す。図-4(a) は設計断面であり、図-4(b) は実測断面である。押出形材の高さは、一般的な鉄筋コンクリート床版の厚さと同じ程度の 250mm とした。

押出形材の幅は、押出ダイスの大きさの制限から 200mm とした。押出形材の肉厚は、押出長さの確保と既往の FEM 解析の結果²⁾から 10mm としたが、摩擦撹拌接合部の肉厚は、接合による強度低下を考慮して 12mm とした。水平力に対して抵抗するように、押出形材のウェブを傾斜させた。

使用した押出形材は、押出性が良いこと、焼入れ性が良いので急冷が不要で寸法精度が高いことを考慮して A6N01-T5 (JIS H 4100 アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材) とした。

(4) 摩擦撹拌接合による製作方法

摩擦撹拌接合に用いた回転ツールのショルダー径は 25mm、ピン径は 6mm で、接合条件はツールの回転数が 1200rpm、移動速度が 350mm/分であった。摩擦撹拌接合後の接合部の肉厚の実測値は 11.7mm から 12.1mm で、平均値は 11.9mm であった。

摩擦撹拌接合による試験体の製作法を図-5 に示す。

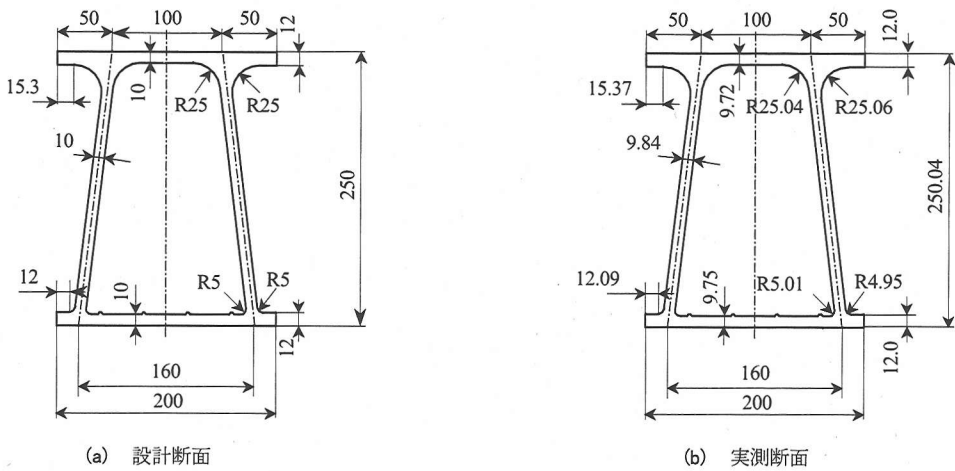


図-4 押出形材の断面寸法

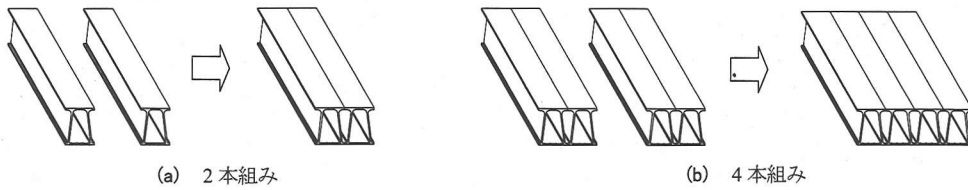


図-5 摩擦攪拌接合による製作方法

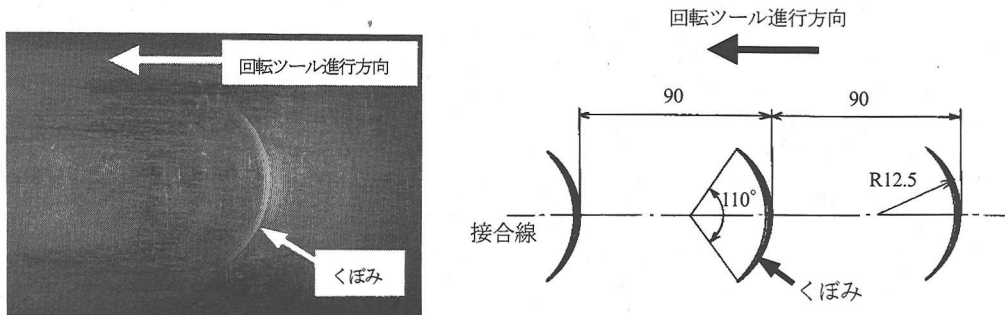


図-6 摩擦攪拌接合部のくぼみ

最初2本の押出形材を接合して2本組みを製作する。次に2本組み同士を接合して4本組みを製作する。さらに4本組み同士を接合して8本組みを製作する。このようにして、順次大きなパネルを製作した。摩擦攪拌接合を行なう際には、隣合う押出形材の上下フランジ同士を突合わせ、その上下フランジの間隔を保持すると同時に裏当て金になる鋼製の板を挿入し、一方の表面を接合した後、反転して他方の表面を接合した。所定のパネルが出来上がった後、接合線の両脇に生じた返りをグラインダーで削り落とした。

摩擦攪拌接合部の一部に、図-6 に示すような深さが0.2mmから0.3mmのくぼみが約9cmの間隔で観察された。このくぼみは、図-2 に示すツールのポケットのへこみが大きすぎたため、ピンによって攪拌された塑性流動状態のアルミニウムがこの部分に溜り、溜まったメタルがツール進行方向と逆のショルダー部の軟化した接合部表面から周期的に排出されることによってできたものである。これは、ポケットの深さを浅くして必要量以上のアルミニウムがポケットの内部に止まるのを避けることによって発生を防ぐことができる。

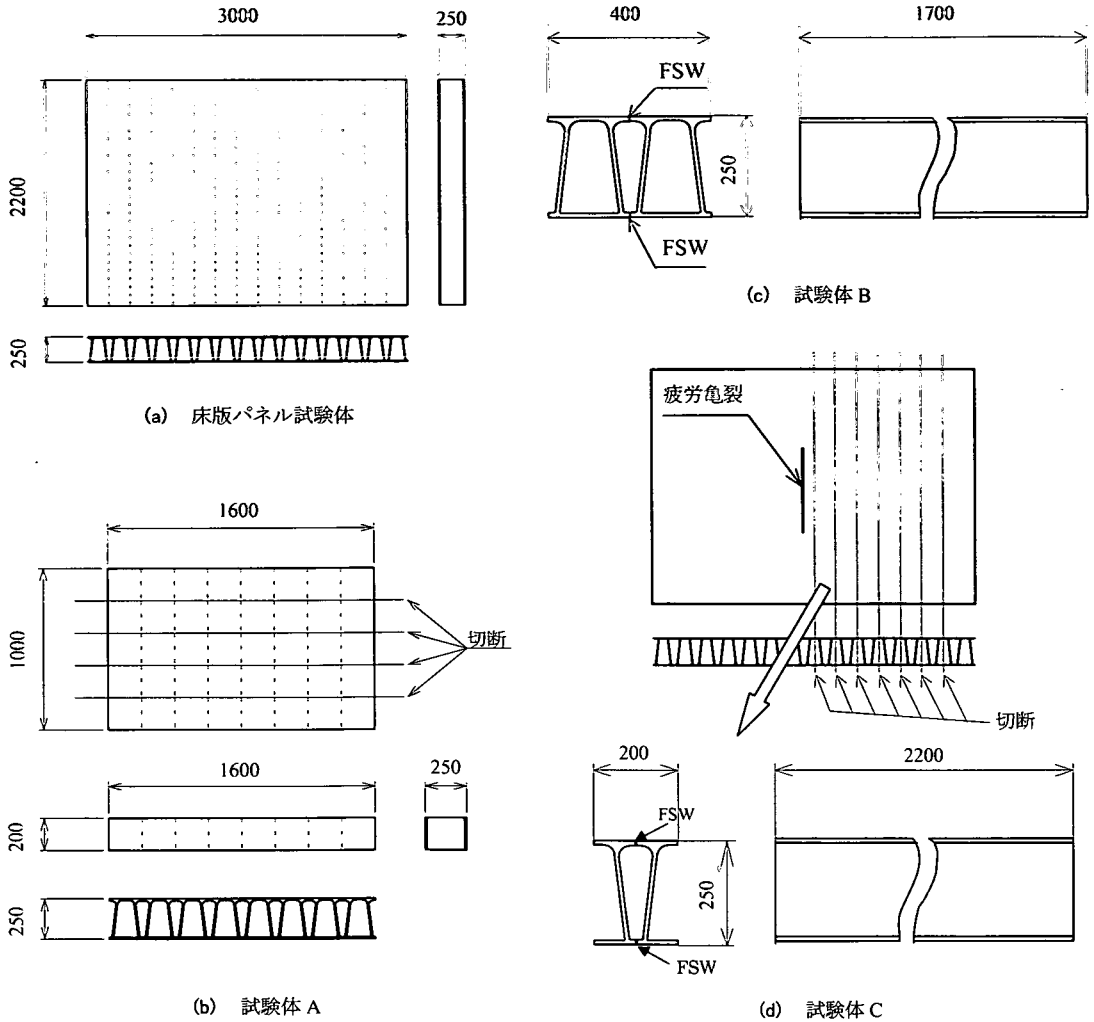


図-7 試験体

パネルが大きくなるに従って、摩擦攪拌接合によるパネル変形が大きくなるため、左右のパネルの接合面の平面開きと鉛直目違いが大きくなる。これが原因で、パネルが大きくなるに従って、回転ツールのピン先端に5章の摩擦攪拌接合部の断面マクロ写真に示す未接合が形成される可能性が高くなる。

(5) 試験体

床版パネル試験体、試験体 A、試験体 B、試験体 C の4種類の試験体を製作した。床版パネル試験体は、図-7(a)に示すように、長さ 2.2m の押出形材15本から成る試験体である。試験体 A は、図-7(b)に示すように、長さ1mの押出形材8本から成るパネルを200mmの幅で切断した試験体である。試験体 B は、図-7(c)

に示すように、長さ 1.7m の押出形材 2 本から成る試験体である。試験体 C は、図-7(a)の床版パネル試験体の疲労試験が終わった後、図-7(d)に示すように、床版パネル試験体を切断することによって製作した試験体である。

3. 材料特性

床版パネル試験体の母材および摩擦攪拌接合部の材料特性を知るために、試験体 B から各種試験片を採取した。床版形材に使用した A6N01 合金の化学成分測定結果を表-1 に示す。表-1 には A6N01 合金の JIS 規格化学成分値も併せて示す。

表-1 床版用押出型材 AGN01 の化学成分

項目	化学成分 (mass %)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
測定値	0.51~0.53	0.16	0.08~0.09	0.14~0.15	0.69	0.01	0.01	0.02~0.03
JIS規格値	0.04~0.9	0.35以下	0.35以下	0.50以下	0.40~0.8	0.30以下	0.25以下	0.10以下

表-2 母材と摩擦撓拌接合部の引張試験の結果

部位	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	比例限 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	破断伸び (%)
母材	270	246	221.3	70.5	0.31	7.9
FSW	FSW-L	218	128	83.7	69.1	29.8
	FSW-T	217	111	56.7	69.3	

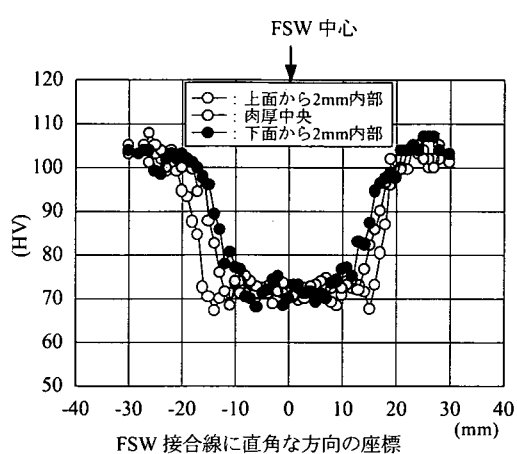


図-8 摩擦撓拌接合部のビッカース硬さ [上フランジ]

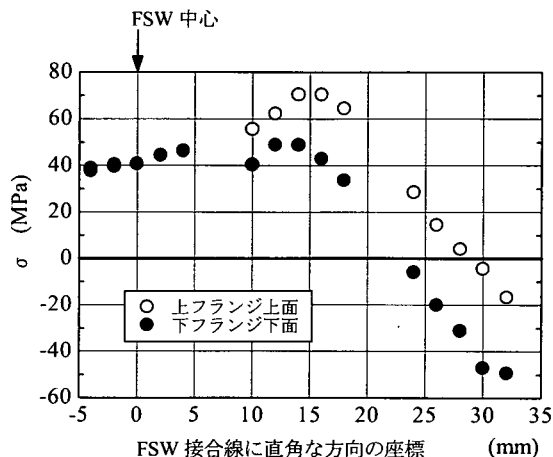
(1) 熱影響範囲

摩擦撓拌接合部の熱影響範囲を知るために、摩擦撓拌接合部の硬さを調べた。上フランジの摩擦撓拌接合部のビッカース硬さを図-8 に示す。下フランジの摩擦撓拌接合部も図-8 と同様な結果が得られた。図-8 から、摩擦撓拌接合により強度低下が生じる熱影響範囲は、接合線を中心として左右それぞれ 20mm である。熱影響範囲は、接合時の入熱量に依存するが、MIG 溶接で強度低下が起こる範囲は溶接線を中心として左右それぞれ 25mm であることを考えると¹⁰⁾、本床版の摩擦撓拌接合部では強度低下が起こる熱影響範囲は MIG 溶接より狭い。

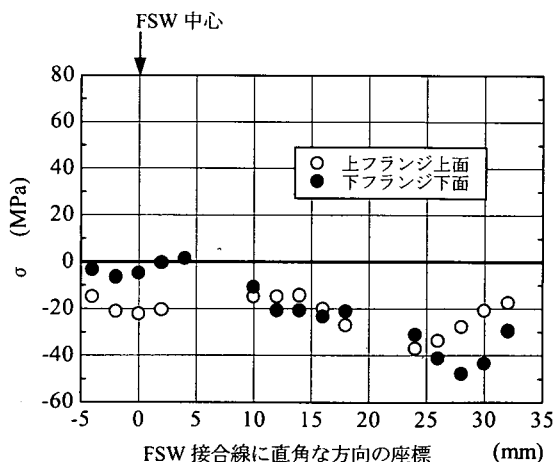
(2) 引張特性

母材と摩擦撓拌接合部の引張試験の結果を表-2 に示す。引張試験片は JIS 14B 号である。0.2%耐力を求める際の伸び測定には、ゲージ長 5mm のひずみゲージを用いた。

母材については押出型材の長手方向から 7 本、摩擦撓拌接合部については接合線方向(FSW-L)から 6 本と、接合線に直角な方向(FSW-T)から 7 本の試験片



(a) 接合線方向残留応力



(b) 接合線直角方向残留応力

図-9 摩擦撓拌接合部のピン挿入側表面の残留応力

を採取した。

引張強さ、0.2%耐力および比例限の母材に対する FSW-L の比率は、それぞれ 81%、52%、38%である。同様に、母材に対する FSW-T の比率は、それぞれ 80%

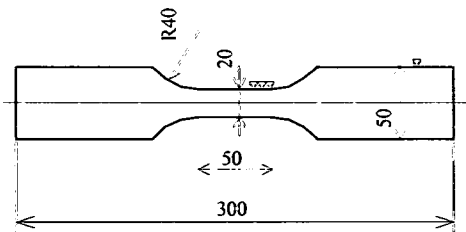


図-10 疲労試験片

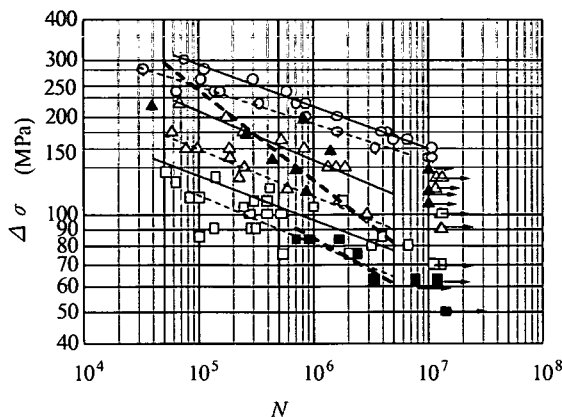


図-11 S-N線図

表-3 log c, m および ξ_N の値

部 位	応力比	m	log c	ξ_N
母 材	-1	7.66	23.9	0.073
	0.1	6.58	20.3	0.214
	0.5	7.31	20.5	0.366
FSW-T	-1	8.74	25.9	0.148
	0.1	6.84	20.1	0.133
	0.5	6.70	18.8	0.525
FSW-L	0.1	3.58	13.6	0.439
	0.5	4.91	15.5	0.163

	R	記号	S-N曲線
母 材	-1	○	—————
	0.1	△	
	0.5	□	
FSW-T	-1	○	-----
	0.1	△	
	0.5	□	
FSW-L	0.1	▲	- - - - -
	0.5	■	

45%, 26%である。摩擦撹拌接合部は引張強さの低下に比べて、0.2%耐力と比例限の低下が大きい。摩擦撹拌接合部の比例限は FSW-L と FSW-T で大きく異なっている。FSW-T の試験片の破断箇所は図-3 に示す熱影響部であった。

引張強さと0.2%耐力の母材に対する MIG 溶接部の比率は、それぞれ 74%, 56%である¹⁰⁾。したがって引張強さに関しては、摩擦撹拌接合部の強度低下は MIG 溶接部のそれより小さいが、0.2%耐力に関しては、摩擦撹拌接合部の強度低下は MIG 溶接部のそれより大きい。

(3) 残留応力

摩擦撹拌接合部の接合線方向と接合線に直角な方向の摩擦撹拌接合ツールのピン挿入側表面の残留応力を図-9 に示す。試験体の長手中央の上下フランジの外表面に5連の2軸ひずみゲージを貼り、切断法により応力を開放して残留応力を測定した。摩擦撹拌接合部のピン挿入側表面に生じた残留応力は、接合線方向が引張り、接合線に直角な方向が圧縮である。

(4) 疲労特性

図-10 に示す試験片による疲労試験の結果を図-11

に示す。疲労荷重は軸力である。母材は押出型材の長手方向、摩擦撹拌接合部は接合線方向(FSW-L)と接合線に直角な方向(FSW-T)から試験片を採取した。

摩擦撹拌接合線部から採取した試験片に関しては、2章(4)節で述べたくぼみが試験片中央の20mmの幅の平行部に来ないようにした。FSW-T の試験片の破断箇所は、破断した34本のうち熱影響部が23本で、撹拌部と塑性流動域が11本であった。

図-11 から、疲労強度は、各応力比において、母材が最も高く、FSW-L、FSW-T の順で低下する傾向が見られる。図-11 の S-N 曲線は式(1)で与えられる。

$$\log N = \log c - m \log(\Delta \sigma) \quad (1)$$

ここに、N は繰返し回数、c と m は定数、 $\Delta \sigma$ は応力範囲である。

応力範囲を独立変数、繰返し数を従属変数とした最小自乗法によって決定された m と log c の値および任意の $\log(\Delta \sigma)$ に対する $\log N$ の標準偏差 ξ_N の値を表-3 に示す。母材と FSW-T の S-N 曲線の傾きは互いに近いが、FSW-L の S-N 曲線の傾きは、母材と FSW-T のそれらと異なっている。これは、FSW-L の試験結果が、繰返し回数が少ない範囲において少なかったためであり、この範囲の試験結果が増えれば、FSW-L の S-N 曲線の傾きも母材および FSW-T のそれらに近い値を示すものとする。

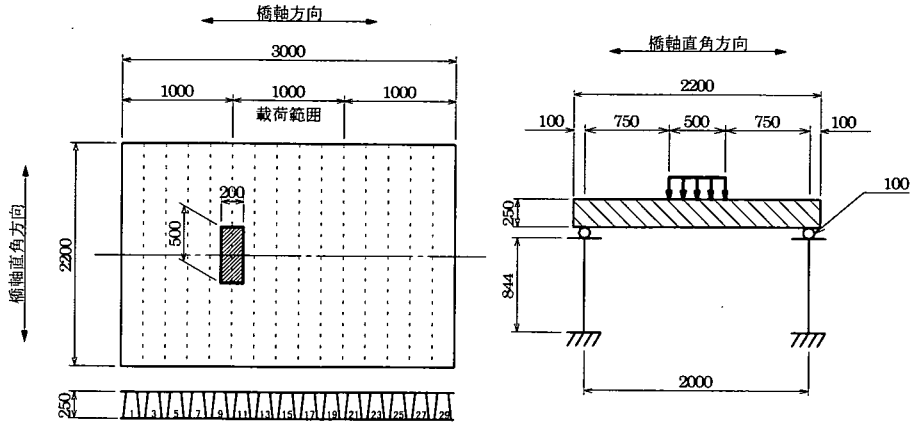


図-12 アルミニウム床版の静的載荷試験

4. アルミニウム床版の疲労試験と FEM 解析

(1) 静的載荷試験

図-7(a)に示した床版パネル試験体の静的載荷試験の概略を図-12に示す。以後、連結された上下フランジをそれぞれ上板、下板と呼ぶ。高さ 84.4cm×長さ 400cm の鋼桁の上に直径 10cm の丸鋼を置き、その上に床版を置いた。床版の支持間隔は 200cm である。荷重は 20cm×50cm×1.5cm の硬質ゴム板を介して上板に与えた。20cm×50cm の形状は、道路橋示方書¹¹⁾で規定される自動車荷重の T 荷重(トラックの輪荷重)の載荷面の形状と同じである。床版を橋軸方向に 5cm ずつ移動させ、弾性範囲内で静的載荷試験を行った。

この静的載荷試験で得られた橋軸直角方向と橋軸方向のひずみの影響線を図-13に示す。これは、荷重 9.8kN に対応する結果である。図-13 から、アルミニウム床版は荷重の移動に対して、橋軸方向の応力は正負交番するが、橋軸直角方向の応力は正負交番しない。

(2) 疲労試験

疲労荷重の載荷位置とその大きさを図-14に示す。橋軸方向に関しては、疲労試験ケース 1 では摩擦撓接合がないセル上、疲労試験ケース 2, 3 では摩擦撓接合が存在するセル上に荷重を載荷した。橋軸直角方向に関しては、疲労試験ケース 1, 2, 3 共に図-12の右図に示す静的載荷試験と同じ位置に荷重を載荷した。床版は、摩擦撓接合による初期変形により同一平面を形成していなかったため 49.0kN 以下の荷重では、床版の下板と丸鋼との間に隙間が生じ、繰返し荷重に対して床版が丸鋼を叩くため、下限荷重を 49.0kN とした。

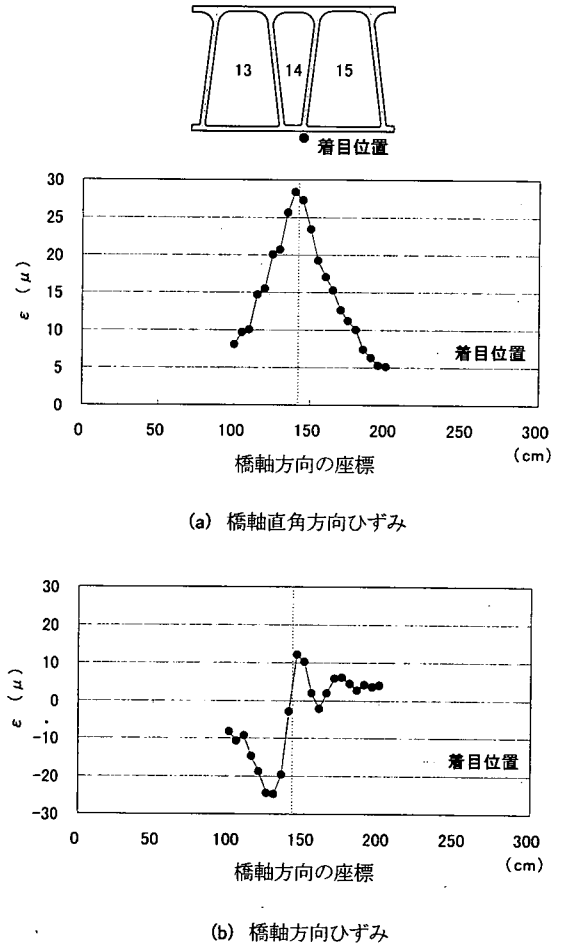
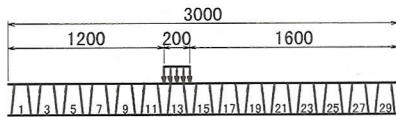
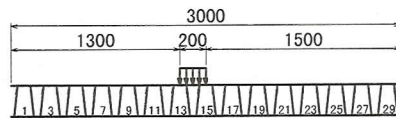


図-13 下フランジ下面のひずみの影響線

疲労試験 ケース	下限荷重 (kN)	上限荷重 (kN)	荷重範囲 (kN)
1	49.0	186.3	137.3
2	49.0	186.3	137.3
3	49.0	268.7	219.7



(a) 疲労ケース 1



(b) 疲労ケース 2 と 3

図-14 疲労荷重と載荷位置

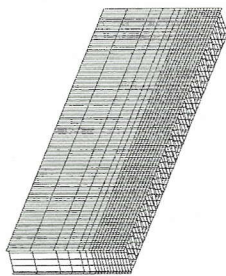
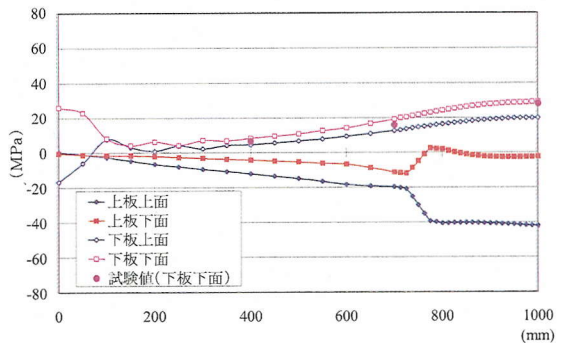


図-15 要素分割

疲労試験ケース 1 では、たわみ範囲やひずみ範囲の変化は認められず、目視観察でも疲労亀裂の発生は認められなかったため、繰返し回数 200 万回で疲労試験を終了した。

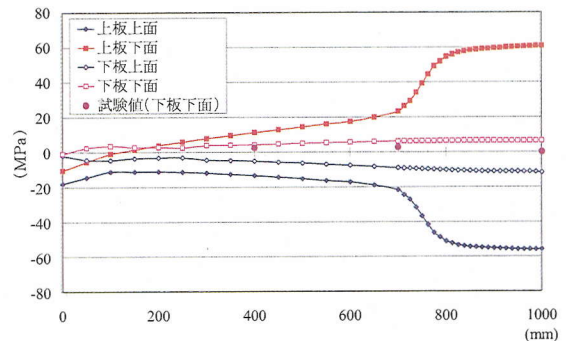
疲労試験ケース 2 では、繰返し回数 100 万回で、上板の摩擦撻拌接合の接合線上のひずみ範囲が変化した。しかし、たわみ範囲に変化は認められず、さらに目視観察でも疲労亀裂の発生は認められなかったため、疲労試験を続行し、繰返し回数 200 万回で疲労試験を終了した。

疲労試験ケース 3 では、繰返し回数 10.2 万回で上板の摩擦撻拌接合の接合線上のひずみ範囲が変化し始めたがたわみ範囲に変化がなかったため疲労試験を続行した。繰返し回数 100 万回で、硬質ゴム板を取除いて観察したところ疲労亀裂を発見した。この疲労亀裂の接合線に沿う長さは 48cm であった。上板の上面に塗布した染色浸透探傷剤が上板下面に現われたので、疲労亀裂は既に貫通亀裂になっていた。しかし、たわ



支点から幅中央までの橋軸直角方向の座標

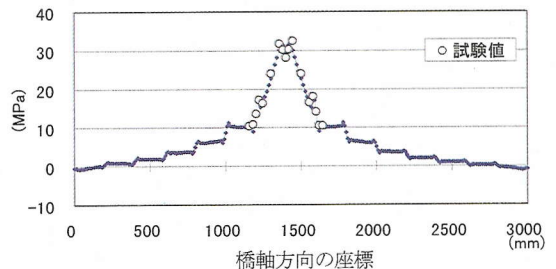
(a) 橋軸直角方向応力



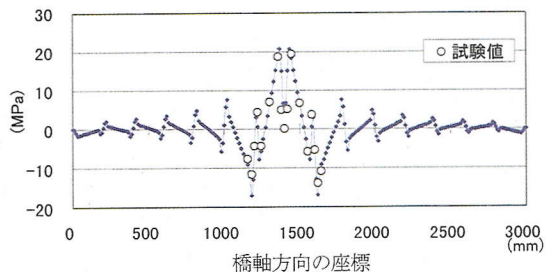
支点から幅中央までの橋軸直角方向の座標

(b) 橋軸方向応力

図-16 荷重直下の橋軸直角方向ラインの応力分布



(a) 橋軸直角方向応力



(b) 橋軸方向応力

図-17 下板下面の荷重直下の橋軸方向ラインの応力分布

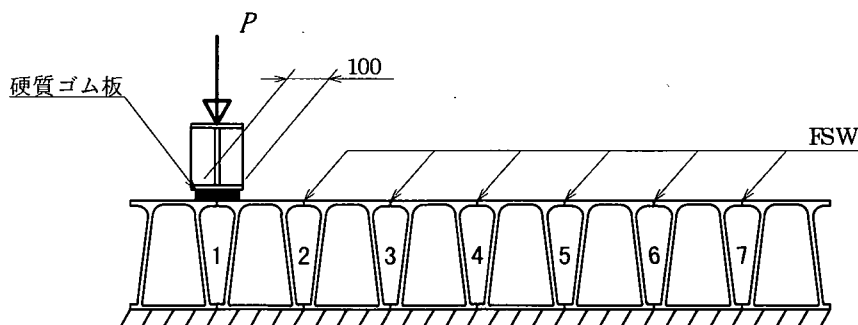


図-18 試験体 A の疲労試験

み範囲に変化がなかったため疲労試験を続行し、繰返し回数 200 万回で疲労試験を終了した。この時、接合線に沿う疲労亀裂の全長は 62cm であった。以後この疲労亀裂をタイプ 1 の疲労亀裂と呼ぶ。

タイプ 1 の疲労亀裂は摩擦撓接合部の接合線に沿って伝播したので、この疲労亀裂を発生させた応力は橋軸方向応力である。

(3) FEM 解析

アルミニウム床版の構造特性およびタイプ 1 の疲労亀裂を発生させた応力の特徴を明らかにするために、床版の FEM 解析を行った。FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム MARC¹²⁾を用いた。解析モデルの要素分割を図-15 に示す。使用した有限要素は 8 節点厚肉曲面シェル要素(MARC の要素タイプ 22)である。

試験体の対称性を考慮して試験体の半分が要素分割されている。図-15 の左辺の下板を鉛直支持し、右辺の断面に対称の境界条件を与えた。図-14 の疲労試験ケース 2、3 の荷重載荷位置に、等分布荷重を面積配分して集中荷重として各節点に与えた。アルミニウムのヤング係数とポアソン比をそれぞれ 70.5GPa、0.31 とし、弾性範囲で計算した。

上板と下板の荷重直下の橋軸直角方向ラインの応力分布を図-16 に示す。これは 137.3kN の荷重に対する結果である。横軸は支持点を原点とする橋軸直角方向の座標である。試験値は FEM 値に近い値を示している。

図-16(a) に示す橋軸直角方向応力は、荷重直下の上板で板曲げ応力になっている。この部分を除いて、橋軸直角方向応力は上板、下板ともに膜応力が支配的である。

図-16(b) に示す橋軸方向応力は上板、下板ともに板曲げ応力である。上板の板曲げ応力は、荷重の載荷領域内で高く、荷重の載荷領域外で急激に減少している。したがって上板の板曲げ応力は、荷重直下の上板の局

部分的な面外変形に起因し、床版支間の大きさに関係なく生じる応力である。すなわちタイプ 1 の疲労亀裂は床版支間の大きさに関係なく発生する疲労亀裂である。上板の上面が板曲げ応力の圧縮、下面が板曲げ応力の引張りになるので、タイプ 1 の疲労亀裂は上板の下面から発生し、上面に伝播する。

下板下面の荷重直下の橋軸方向ラインの応力分布を図-17 に示す。これは 137.3kN の荷重に対する結果である。横軸は図-15 の上辺を原点とする橋軸方向の座標である。試験値は FEM 値に近い値を示している。橋軸直角方向応力と橋軸方向応力とともに荷重載荷位置の前後 50cm の範囲で生じている。すなわち、アルミニウム床版は荷重載荷位置前後の限られた範囲で荷重を支持する構造である。

5. タイプ 1 の亀裂の疲労強度

タイプ 1 の亀裂の疲労強度を得るために、試験体 A の疲労試験を行った。図-18 に示すように、試験体 A の下板を試験床に固定し、上板の摩擦撓接合部の上に、奥行き 25cm×幅 10cm×厚さ 1.5cm の硬質ゴム板を介して荷重を与えた。一つの摩擦撓接合部が疲労により破断した後、隣の摩擦撓接合部に荷重を移動させて疲労試験を行った。載荷中の荷重が隣の摩擦撓接合部の疲労強度に影響するようないずれも起こしていないことを確認した。

疲労試験の結果を図-19 に示す。応力比は 0.1 である。Δσは上板の下面の摩擦撓接合部の応力範囲であり、ひずみゲージによる測定結果から算出した。N は破断までの繰返し回数である。さらにこの図には、3 章(4)節で述べた引張試験片タイプの母材と FSW-T の、応力比が 0.1 の疲労試験の結果、ならびに Eurocode 9¹³⁾で規定される MIG 溶接の設計 S-N 曲線も示してある。MIG 溶接の設計 S-N 曲線は、突合

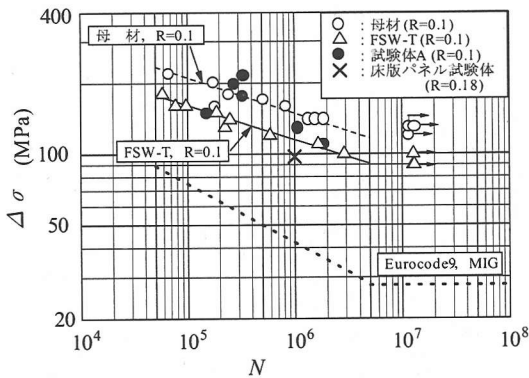


図-19 タイプ1の亀裂の疲労強度

せ溶接において非仕上げの、応力が溶接線に直角な方向に作用する場合のものである。

図-19 から、上板の摩擦攪拌接合部の疲労強度は MIG 溶接と比べて非常に高いことが分かる。上板の摩擦攪拌接合部の疲労強度は、引張試験片タイプの FSW-T の疲労強度より全体的に高いが、バラツキが大きい。これは、上板の摩擦攪拌接合部の疲労試験が曲げ疲労試験であるためである。2 章(4)節で述べたように、パネルが大きくなるに従って、回転ツールのピン先端に未接合が形成される可能性が高くなる。これが、上板の摩擦攪拌接合部の疲労強度のバラツキを大きくした原因である。疲労試験後、試験体 A の中央の摩擦攪拌接合部で、図-20 の断面マクロ写真に示す深さ 0.25mm の未接合が観察された。

図-19 には床版パネル試験体の疲労試験の結果も示してある。床版パネル試験体の疲労試験ケース 3 において、繰返し回数 100 万回で、上板の摩擦攪拌接合部の疲労亀裂の長さが 48cm であった。この長さは荷重の載荷幅 50cm にほぼ等しいので、試験体 A の疲労寿命と比較するための床版パネル試験体の疲労寿命としては 100 万回を採用した。応力範囲は、4 章(3)節で述べた FEM 解析から求められた床版パネル試験体の疲労試験ケース 3 の荷重範囲 219.7kN に対する、荷重直下の上板下面の橋軸方向の応力範囲で 97.4MPa である。

床版パネル試験体の応力比は 0.18 で、試験体 A の応力比 0.1 より大きい。しかし、これを考慮しても、床版パネル試験体の疲労強度は、試験体 A の疲労強度より幾分低い位置にある。床版パネル試験体のタイプ 1 の疲労亀裂が発生した摩擦攪拌接合部には深さ 0.5mm の未接合が観察された。これは、試験体 A の

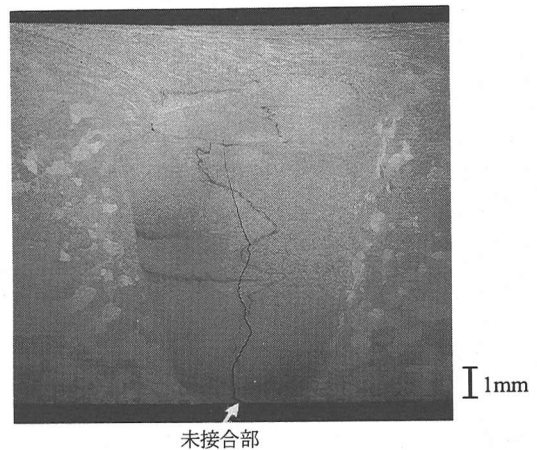


図-20 疲労試験後の試験体 A 摩擦攪拌接合部断面マクロ写真

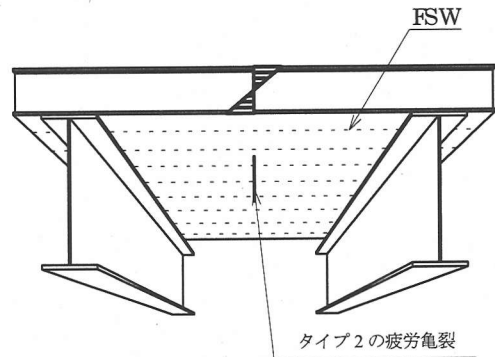


図-21 タイプ2の疲労亀裂

摩擦攪拌接合部の未接合深さ 0.25mm より長い。このことが、床版パネル試験体の疲労強度が試験体 A のそれより幾分低い理由である。

6. タイプ2の亀裂の疲労強度

床版パネル試験体の疲労試験では下板に疲労亀裂が発生しなかった。これは床版パネル試験体の疲労試験では支持間隔が 200cm と短かったためである。しかし、これより長い支持間隔においては、図-21 に示すように、曲げモーメントによって下板に生じる橋軸直角方向の膜応力によって、下板の摩擦攪拌接合部に橋軸方向に疲労亀裂が発生することが予想される。以後、この疲労亀裂をタイプ2の疲労亀裂と呼ぶ。タイプ2の亀裂の疲労強度を得るために、試験体 B と C の疲労試験を行った。

図-22 に示すように、試験体の両端をローラー支持

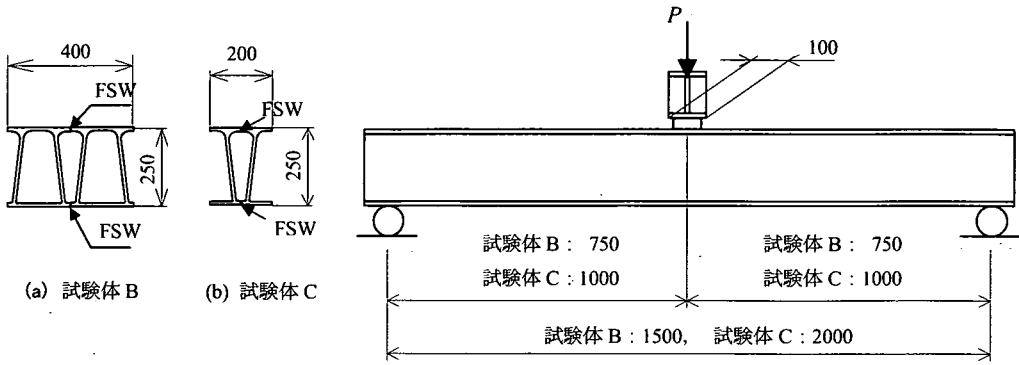


図-22 試験体 B と C の疲労試験

し、中央の 10cm の幅に疲労荷重を与えた。試験体 B の支持間隔は 150cm、試験体 C の支持間隔は 200cm である。床版パネル試験体の疲労試験で採用した荷重が試験体 C の疲労強度に影響するようなひずみを起こしていないことを、床版パネル試験体のひずみの測定値と 4 章(3)節の FEM 解析値で確認した。

試験体の下板下面の摩擦攪拌接合部にタイプ 2 の疲労亀裂が発生し、それが試験体を横断する方向に伝播し、最終的に脆性破壊によって試験体が二つに破断した。破断した 5 本の試験体のうち、3 本の試験体において、2 章(4)節で述べたくぼみから亀裂が発生した。

疲労試験の結果を図-23 に示す。応力比は 0.1 である。 $\Delta\sigma$ は、下板で疲労亀裂が発生した箇所の応力範囲であり、破断した箇所の両側に貼付したひずみゲージの値の直線補間によって求めた。 N は破断までの繰返し回数である。さらにこの図には 3 章(4)節で述べた引張試験片タイプの母材と FSW-L の、応力比が 0.1 の疲労試験の結果、ならびに Eurocode 9¹³⁾ で規定される MIG 溶接の設計 S-N 曲線も示してある。MIG 溶接の設計 S-N 曲線は、突合せ溶接において非仕上げの、応力が溶接線に平行な方向に作用する場合のものである。

図-23 から、試験体 B と C の疲労強度は MIG 溶接と比べて非常に高いことが分かる。しかし試験体 B と C の疲労強度は、引張試験片タイプの FSW-L の疲労強度より低い。これは、摩擦攪拌接合部に残されたくぼみと、3 章(3)節で述べたように、摩擦攪拌接合部の接合線方向の残留応力が引張りであることが原因である。

7. 結論

本研究では模擬床版である床版パネル試験体、お

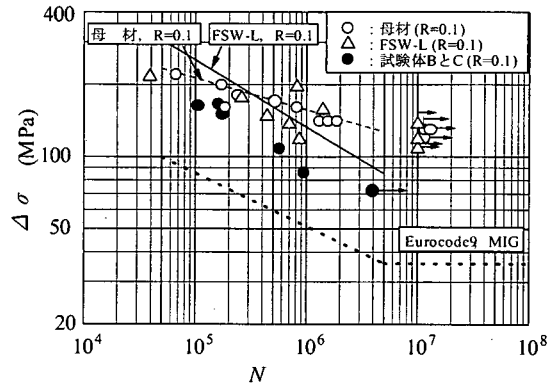


図-23 タイプ 2 の亀裂の疲労強度

よびこれに関連する 3 種類の試験体の材料試験、静的載荷試験、疲労試験および FEM 解析により、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を明らかにした。主な結論を以下に示す。

- (1) 摩擦攪拌接合による熱影響範囲は、接合線を中心として左右それぞれ 20mm である。
- (2) 摩擦攪拌接合部は引張強度の低下に比べて、0.2% 耐力と比例限の低下が大きい。
- (3) 摩擦攪拌接合部のツールのピン挿入側表面に生じる残留応力は、接合線方向が引張り、接合線に直角な方向が圧縮である。
- (4) 引張試験片タイプの疲労試験により、母材ならびに摩擦攪拌接合部の接合線方向と接合線に直角な方向に対して S-N 曲線を与えた。
- (5) アルミニウム床版は、荷重の移動に対して、橋軸方向の応力は交番するが橋軸直角方向の応力は交番しない。
- (6) アルミニウム床版は、荷重載荷位置の前後の限られた範囲で荷重を支持する構造である。

- (7) アルミニウム床版の上板の摩擦撹拌接合の接合線に沿って疲労亀裂が発生した(タイプ 1 の疲労亀裂と呼ぶ)。タイプ 1 の疲労亀裂は、上板に生じる橋軸方向の板曲げ応力に起因する。この板曲げ応力は、荷重直下の上板の局部的な面外変形によって発生し、床版支間の大きさに関係なく生じる応力である。すなわちタイプ 1 の疲労亀裂は床版支間の大きさに関係なく発生する疲労亀裂である。タイプ 1 の亀裂の疲労強度は、Eurocode 9 に規定される、非仕上げの突合せ溶接において応力が溶接線に直角な方向に作用する場合の MIG 溶接と比べて非常に高い。
- (8) アルミニウム床版の床版支間が長くなると、下板の摩擦撹拌接合部に橋軸方向に疲労亀裂が発生する(タイプ 2 の疲労亀裂と呼ぶ)。タイプ 2 の疲労亀裂は、曲げモーメントに起因して下板に生じる橋軸直角方向の膜応力によって発生する。タイプ 2 の亀裂の疲労強度は、Eurocode 9 に規定される、非仕上げの突合せ溶接において応力が溶接線に平行な方向に作用する場合の MIG 溶接と比べて非常に高い。

謝辞：本研究は、工業技術院の補助事業として、日本アルミニウム協会に 1999 年度設置された「アルミニウム床版委員会」で行われた研究成果である。有益なコメントをいただいた委員各位に感謝の意を表わします。試験体 B と C の疲労試験に際しては、ブダペスト工科大学から大阪大学への交換留学生 Vigh, Laszlo Gergely 君と大阪大学 大学院生 中原太樹君の協力を得た。

参考文献

- 1) Civil Engineering : New Aluminum Decks Cut Loads, Add Life, ASCE, p.2, August, 1996.
- 2) 日本アルミニウム連盟：公共土木資材のアルミニウム化による社会資本の長寿命化に関する調査研究報告書, 1997.
- 3) 日本アルミニウム連盟：良質な社会資本のストックに関する調査研究報告書, 1998.
- 4) 大倉一郎：鋼橋の疲労, pp.336-339, 東洋書店, 1994.
- 5) 日本アルミニウム協会：アルミニウム床版に関する基礎データベース調査研究報告書, 2000.
- 6) 大倉一郎：アルミニウムの橋梁への適用および将来展望, 軽金属学会 第 59 回シンポジウム, pp.19-31, 2000.
- 7) 大倉一郎, 鳴尾亮, Vigh Laszlo Gergely, 萩澤亘保, 戸田均：摩擦撹拌接合で製作されたアルミニウム床版の材料・構造特性, 土木学会 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.131-136, 2000.
- 8) Okura, I., Naruo, M., Vigh, L.G., Hagisawa, N. and Toda, H. : Fatigue of aluminum deck fabricated by friction stir welding, *Proceedings of 8th International Conference on Joints in Aluminum, Munich, Germany*, pp.4.1.1-4.1.12, 2001.
- 9) <http://www.twi.co.uk/bestprac/datashts/fswintro.html>
- 10) 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), 2000.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 丸善, 1996.
- 12) 日本マーク(株) : MARC-K.7, 1997.
- 13) Eurocode 9 : Design of Aluminum Structures, Part 2 Structures Susceptible to Fatigue, *prENV 1999-2*, 1997.

(2001. 7. 31 受付)

FATIGUE BEHAVIOR OF ALUMINUM DECK FABRICATED BY FRICTION STIR WELDING

Ichiro OKURA, Nobuyasu HAGISAWA, Makoto NARUO and Hitoshi TODA

An aluminum deck is fabricated by joining hollow extrusions with the friction stir welding (FSW). The purpose of this study is to understand the fatigue behavior of the deck. The material properties of the FSW region are investigated. A fatigue test is carried out for the deck, to show that a fatigue crack is initiated along the FSW-joining line of the top plate just under the load. The plate-bending stress produced by the local deformation of the top plate causes it. More fatigue tests are done for the beam-type specimens provided by cutting the deck in the transverse direction. The tests reveal that where the supporting interval of the deck becomes large, a fatigue crack is caused at the FSW of the bottom plate by the membrane stress due to the global bending moment, and that it propagates in the transverse direction to the FSW-joining line.