

# 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

## Mechanical and Structural Properties of Aluminum Decks Fabricated by Friction Stir Welding

大倉一郎\*, 鳴尾亮\*\*, Vigh, Laszlo Gergely\*\*\*, 萩澤亘保\*\*\*\*, 戸田均\*\*\*\*\*

Ichiro OKURA, Makoto NARUO, Laszlo Gergely VIGH, Nobuyasu HAGISAWA and Hitoshi TODA

\*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)

\*\*大阪大学大学院学生 (博士前期課程) 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*大阪大学特別聴講学生 工学部地球総合工学科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*\*工修 日本軽金属(株) 技術・開発本部 グループ技術センター 構造解析グループマネージャー (〒421-3291 庵原郡蒲原町蒲原 1-34-1)

\*\*\*\*\*石川島播磨重工業(株) 橋梁事業部建設部計画グループ 課長代理 (〒135-8322 東京都江東区毛利 1-19-10)

The change of design vehicle load from 196kN to 245kN urges concrete slabs and girders of existing bridges to be reinforced. To cope with this issue, we have an idea of reducing the weight of the slab itself by replacing concrete slabs with aluminum decks. For the suspension bridges with longer span over the Akashi-Kaikyo bridge, it is required that the roadway should be light, and we think that the use of aluminum decks will serve this purpose. These motivations made us actually fabricate an aluminum deck, using Friction Stir Welding (FSW), a solid phase welding. In this paper, we investigate the material properties and the structural behavior of the aluminum deck by static loading tests, fatigue tests and FEM analysis.

Key Words: aluminum deck, friction stir welding, fatigue, ultimate strength

### 1. はじめに

現在米国では、非常に多くの橋が大掛かりな補修や耐荷力向上の必要性に迫られている。そして、その実施に際して基礎やその他の支持構造を変えることなく、これを解決できないかとの要望があり、これに対処するために、既存のコンクリート床版を、軽量であることを特徴とするアルミニウム床版で取り換えることが試みられている<sup>1)</sup>。

わが国においては設計自動車荷重が196kNから245kNに変更され、橋梁のコンクリート床版や桁の補強が急がれている。これに対して、米国と同様、アルミニウム床版の導入により、床版そのものの重量を減らすことによって対処できないかとの要望が出されている。さらに明石海峡大橋を越えるような次世代の超長大吊橋においては床版が軽いことが必須であり、アルミニウムで床版ができないかとの意見も出されている。

この様な背景で、今回摩擦撹拌接合によりアルミニウム床版を作製した。本研究は、この床版の静的載荷試験、疲労試験さらにはFEM解析により、その材料特性および構造特性を明らかにする。

### 2. アルミニウム床版の製作

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、押出型材を平行に並べ、それらを連結することにより作ら

れる。鋼床版において疲労亀裂が溶接部に発生したことが既に報告されている<sup>2)</sup>。したがって押出型材の連結にMIG溶接を用いると、溶接部に疲労亀裂の発生が懸念されたので、摩擦撹拌接合(Friction Stir Welding, 略称FSW)によって、押出型材を連結した<sup>3), 4)</sup>。摩擦撹拌接合では余盛りができないため、連結部の疲労強度がMIG溶接による溶接部の疲労強度より高いと予想された。

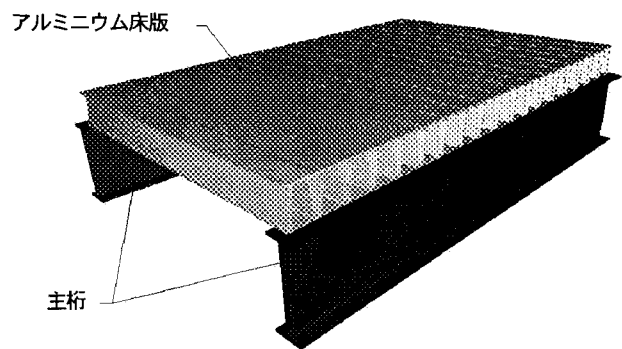


図-1 主桁上に置かれたアルミニウム床版

摩擦撹拌接合は固相接合法の一種で、イギリスの溶接研究所で1991年に考案された<sup>5)</sup>。摩擦撹拌接合の概念を図-2に示す。先端にピンを持つツールを回転させながらピンを接合面に挿入する。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。

図-3の押出形材の上下フランジを、図-4に示すように摩擦攪拌接合で連結することにより、図-5に示す床版を作製した。接合面の板厚は12mmである。用いたアルミニウム材はA6N01S-T5である。

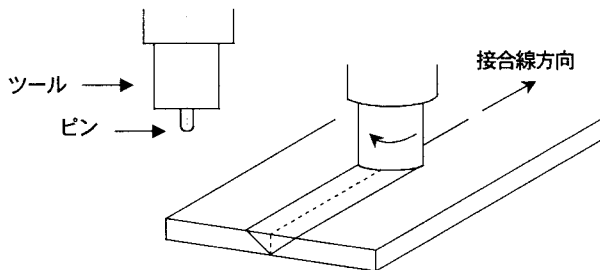


図-2 摩擦攪拌接合の概念

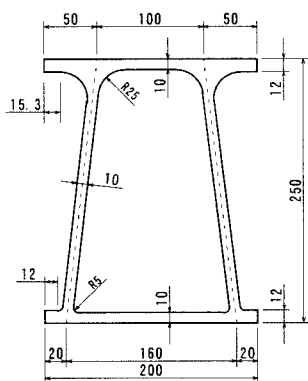


図-3 押出形材の断面

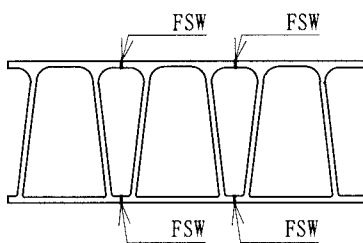


図-4 摩擦攪拌接合による連結

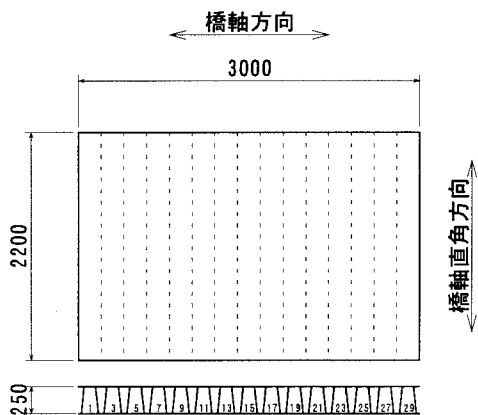


図-5 アルミニウム床版

### 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、図-6に示すように、2本の押出形材を摩擦攪拌接合で連結し、これから各種試験片を採取した。図-6の試験体の長さは1700mmである。

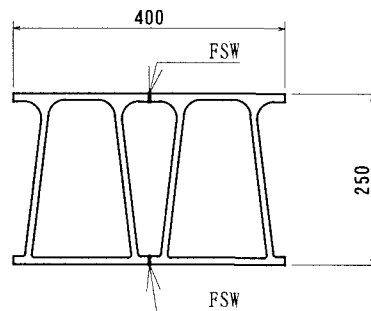


図-6 2本の押出形材の摩擦攪拌接合による連結

上フランジの摩擦攪拌接合部のビッカース硬さの分布を図-7に示す。摩擦攪拌接合により強度低下が生じる範囲は、接合線を中心として左右それぞれ20mmである。従来の溶接で強度低下が起こる範囲が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、摩擦攪拌接合では強度低下が起こる範囲が狭い。

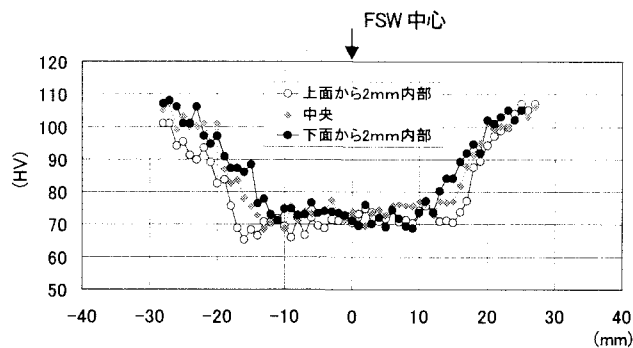


図-7 摩擦攪拌接合部のビッカース硬さの分布【上フランジ】

母材と摩擦攪拌接合部の引張試験の結果を表-1に示す。引張試験片はJIS 14B号であり、母材については押出形材の長手方向、摩擦攪拌接合部については接合線方向と接合線直角方向から試験片を採取した。摩擦攪拌接合部は引張強度の低下に比べて、比例限と0.2%耐力の低下が大きい。さらに摩擦攪拌接合部の比例限は接合線方向と接合線直角方向で大きく異なっている。攪拌摩擦接合部の接合線直角方向の試験片の破断箇所は熱影響部であった。

表-1 母材と摩擦攪拌接合部の引張試験の結果

部位	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	比例限 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	
母材	70.5	0.31	221.3	245.7	269.9	7.9	
FSW	接合線方向	69.1	0.34	83.7	127.5	218.2	29.8
	接合線直角方向	69.3	0.33	56.7	111.2	216.8	—

摩擦攪拌接合部の接合線方向と接合線直角方向の残留応力を図-8に示す。試験体の長手中央の上下フランジの外表面にひずみゲージを貼り、切断法により応力を開放し、残留応力を測定した。摩擦攪拌接合部に生じた残留応力は、接合線方向が引張り、接合線直角方向が圧縮である。溶接では、溶接線方向、溶接線直角方向とも残留応力は引張りであることを考えると、摩擦攪拌接合部の接合線直角方向の残留応力が圧縮であることは疲労の観点から注目に値する。

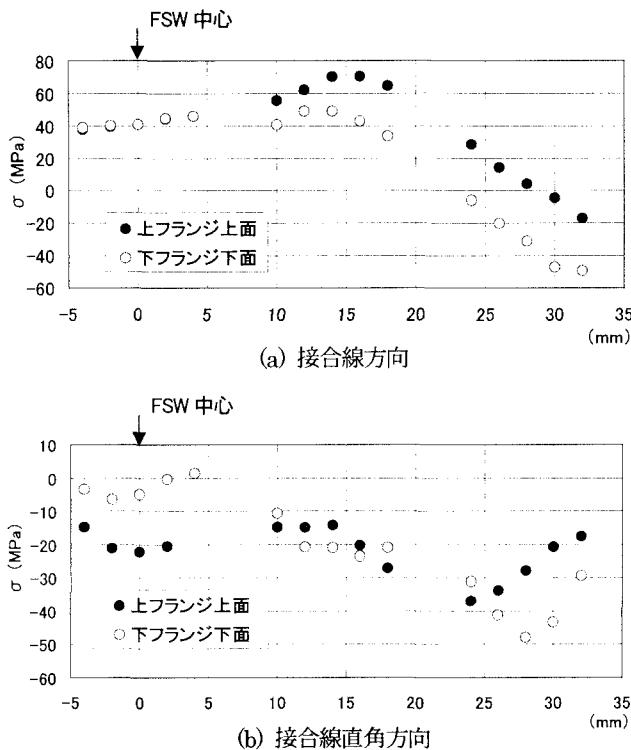


図-8 摩擦攪拌接合部の残留応力分布

母材と摩擦攪拌接合部の引張疲労試験の結果を図-9に示す。母材については押出型材の長手方向、摩擦攪拌接合部については接合線に直角な方向から試験片を採取した。図-9のS-N曲線は次式で与えられる。

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

( $\Delta\sigma$ の単位MPa)

ここで、 $\log c$ と $m$ および任意の $\log(\Delta\sigma)$ に対する $\log N$ の標準偏差 $\xi_N$ を表-2に示す。摩擦攪拌接合部の疲労破断箇所は熱影響部が18本、ナゲット部(摩擦攪拌接合のピンにより攪拌される領域)が3本であった。

表-2  $\log c$ ,  $m$ ,  $\xi_N$ の値

応力比 R	部位	$\log c$	$m$	$\log N$ の標準偏差 $\xi_N$
-1	母材	23.9	7.66	$7.33 \times 10^{-2}$
	FSW	25.9	8.74	$1.477 \times 10^{-1}$
0.1	母材	20.3	6.58	$2.14 \times 10^{-1}$
	FSW	20.1	6.84	$1.328 \times 10^{-1}$

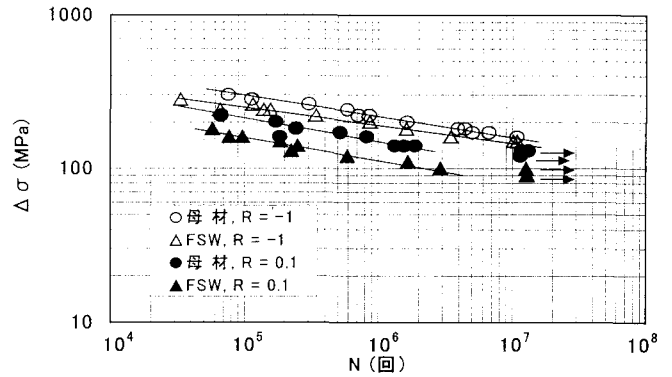


図-9 S-N曲線

## 4. 構造特性

### 4.1 アルミニウム床版の静的載荷試験

図-5のアルミニウム床版の静的載荷試験の概略を図-10に示す。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与えた。20cm×50cmの形状は、道路橋示方書<sup>6)</sup>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。ここで橋軸方向と橋軸直角方向は図-5に示す通りである。

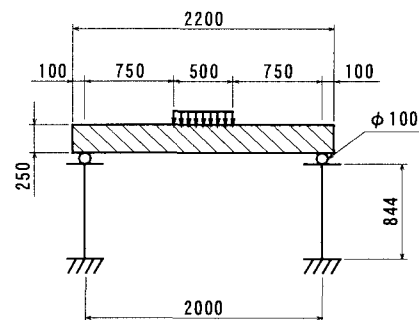
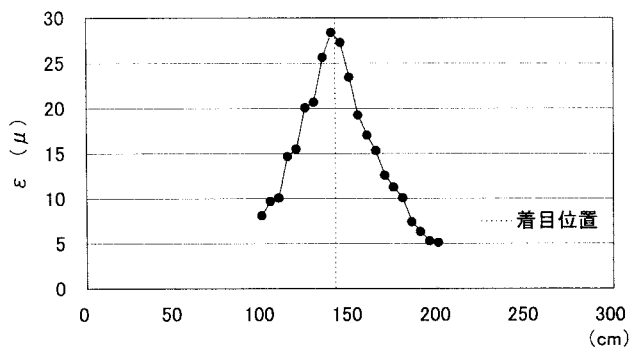
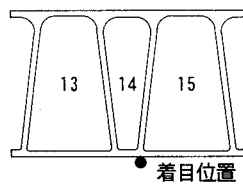


図-10 アルミニウム床版の静的載荷試験の概略

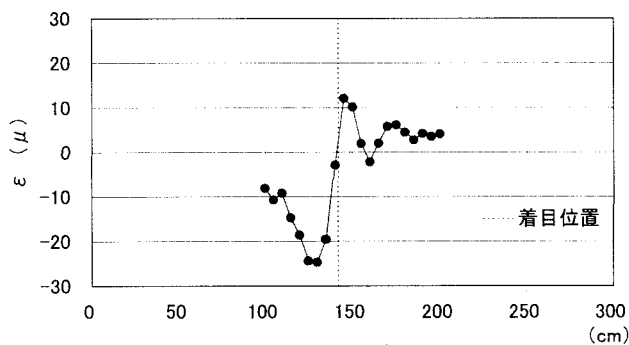
この静的載荷試験で得られた橋軸直角方向ひずみと橋軸方向ひずみの影響線を図-11に示す。この結果は荷重9.8kNに対応している。図から、アルミニウム床版は、荷重の移動に対して、橋軸直角方向の応力は正負交番しないが、橋軸方向の応力は正負交番する。

### 4.2 アルミニウム床版の疲労試験

疲労荷重の載荷位置とその大きさを図-12に示す。疲労試験ケース1では摩擦攪拌接合がないセル上、疲労試験ケース2,3では摩擦攪拌接合が存在するセル上に荷重を載荷している。床版はかなり大きな初期変形を有しており、同一平面を形成していなかった。したがって49.0kN以下の荷重では、床版の下フランジ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たたため、疲労試験の遂行が危険と感じられたので、下



(a) 橋軸直角方向ひずみ



(b) 橋軸方向ひずみ

図-11 下フランジ下面のひずみの影響線

限荷重を 49.0kN とした。

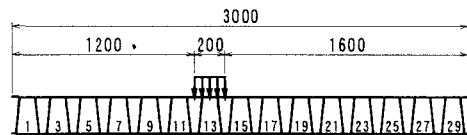
疲労試験ケース 1 では、たわみ範囲やひずみ範囲の変化が認められず、目視観察でも疲労亀裂の発生が認められなかったので、繰返し回数 200 万回で疲労試験を終了した。

疲労試験ケース 2 では、繰返し回数 100 万回で、上フランジの摩擦撓拵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が認められず、さらに目視観察でも疲労亀裂の発生が認められなかったので、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。

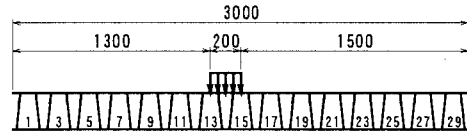
疲労試験ケース 3 では、繰返し回数 10.2 万回で上フランジの摩擦撓拵接合の接合線上のひずみ範囲が変化した。しかしたわみ範囲に変化がなかったので疲労試験を続行した。繰返し回数 100 万回で、荷重直下の上フランジの摩擦撓拵接合の接合線に沿って全長 48cm の疲労亀裂を発見した。上フランジ上面に塗布した染色浸透探傷剤が上フランジ下面に現れたので、疲労亀裂は既に貫通亀裂になっていた。しかしたわみ範囲に変化がなかったので疲労試験を続行し、繰返し回数 200 万回で疲労試験を終了した。このとき接合線に沿う疲労亀裂の全長は 62cm であった。

疲労試験ケース 3 で発見したときの亀裂の規模とそれが既に貫通亀裂であったことから判断して、疲労亀裂は既に疲労試験ケース 2 の繰返し回数 100 万回で発生していたと想像する。疲

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) 疲労試験ケース 1



(b) 疲労試験ケース 2,3

図-12 疲労荷重と載荷位置

疲労亀裂は摩擦撓拵接合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。

次章の FEM 解析で示すように、橋軸方向応力は、ゴム板中心の位置で、荷重範囲 137.3kN に対して、上フランジの下面で 60.9MPa、上面で -55.9MPa になる。すなわち上フランジの橋軸方向応力は板曲げ応力であり、上フランジ下面は引張応力になる。したがって疲労亀裂は摩擦撓拵接合の上フランジ下面から発生した。

引張試験片タイプの疲労強度を表した図-9 において、摩擦撓拵接合部の応力比が 0.1 の S-N 曲線は、 $N = 100$  万回に対して  $\Delta\sigma = 115$  MPa である。床版の応力範囲は前述の 60.9MPa である。3 章で述べたように、摩擦撓拵接合部の接合線直角方向の残留応力は圧縮である。したがって床版においては摩擦撓拵接合部の接合線直角方向に圧縮の残留応力が残されている。圧縮の残留応力は疲労強度を上げる方向に働く。しかし床版の疲労強度は引張試験片タイプの疲労強度の約半分である。60.9MPa には FEM 解析による推定誤差が含まれているとしても、この値は引張試験片タイプの疲労強度と比較して低過ぎる。疲労試験終了後、床版の上フランジを切出し、摩擦撓拵接合部の断面を観察した。その結果、ピンの先端側の接合面に約 0.25mm の未接合が存在し、そこから疲労亀裂が伝播していることを確認した。したがってこの未接合が疲労強度を下げた原因である。

#### 4.3 棒タイプの試験体の静的載荷試験と疲労試験

アルミニウム床版の支持間隔は 200cm であった。これより広い支持間隔のアルミニウム床版の橋軸直角方向の構造特性を明らかにするために、図-6 の断面と図-13 の断面を持つ棒タイプの試験体の静的載荷試験と疲労試験を行った。図-13 の断面の試験体は、アルミニウム床版の疲労試験終了後、床版を橋軸直角方向に切断することによって作製した。

図-6 の断面の試験体を 1.5m の間隔で支持し、試験体の中央に荷重を線荷重として静的に与えた。荷重と試験体中央の鉛直

たわみの関係を図-14 に示す。最大荷重は 1152kN である。母材と摩擦撻拌接合部の接合線方向の 0.2%耐力を降伏応力として、図-6 の断面に対する全塑性モーメントは 391543kN・mm になる。この全塑性モーメントに対応する荷重は 1044kN である。荷重 1044kN は試験で得られた最大荷重 1152kN の 91%である。したがってアルミニウム床版の橋軸直角方向の終局強度は、その方向の断面に対する全塑性モーメントで安全側に推定することができる。

図-6 の断面の試験体と図-13 の断面の試験体の疲労試験の結果を図-15 に示す。図-6 の断面の試験体の支持間隔は 1.5m、図-13 の断面の試験体の支持間隔は 2m である。両者とも試験体の中央の 10cm の幅に疲労荷重を与えた。下フランジの摩擦撻拌接合の下フランジ下面に疲労亀裂が発生し、それが試験体を横断する方向に伝播し、脆性破壊によって試験体が 2 つに破断した。疲労亀裂が発生した位置の下フランジに生じる応力範囲と試験体が破断した時の繰返し回数をそれぞれ図-15 の縦軸と横軸にとっている。S-N 曲線を決めるにはさらに疲労試験データが必要である。

## 5. FEM 解析

アルミニウム床版の構造特性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 MARC<sup>®</sup>を用いた。要素分割を図-16 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左側半分が要素分割されている。試験体の下フランジが左端で鉛直支持され、試験体の右側断面に対称の境界条件を与えた。図-12 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、集中荷重として各節点に与えた。アルミニウムのヤング率とポアソン比をそれぞれ 70.5GPa, 0.31 として、弾性範囲で計算した。

フランジ応力の橋軸直角方向分布を図-17 に示す。これは 137.3kN の荷重に対する結果である。試験値は FEM 値に近い値を示している。橋軸直角方向応力は、荷重直下の上フランジで大きな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、上下フランジとも膜応力である。橋軸方向応力は上下フランジとも板曲げ応力である。特に荷重直下の上フランジの橋軸方向応力は大きな板曲げ応力になっている。しかもこの板曲げ応力は荷重の載荷領域内でほぼ一様に分布している。このことは、4.2 節で述べたように、疲労亀裂を発見したとき、亀裂の長さか既に 48cm であったことと呼応している。

フランジ応力の橋軸方向分布を図-18 に示す。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は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。

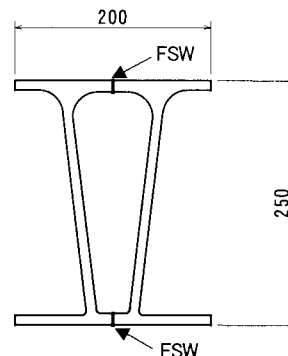


図-13 棒タイプの試験体の断面

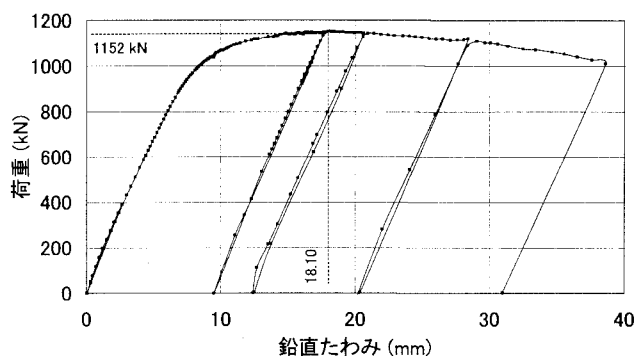


図-14 荷重と鉛直たわみの関係

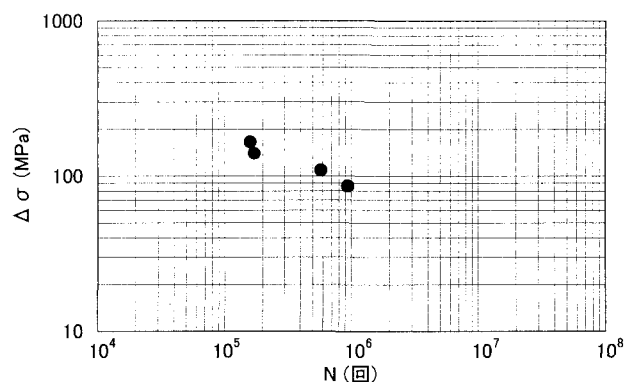


図-15 S-N 関係

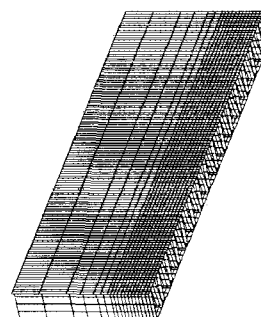
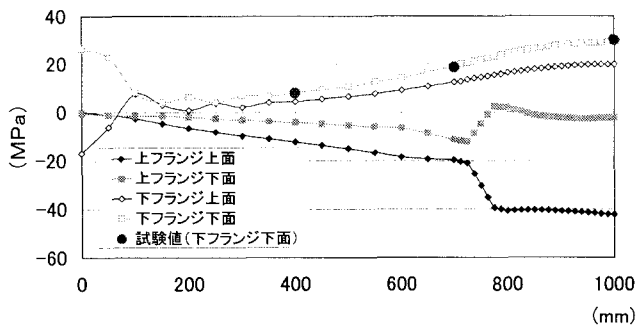
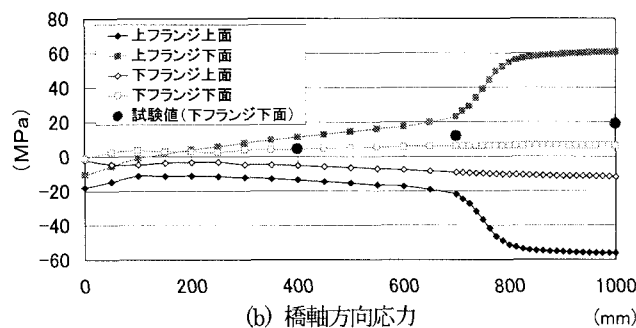


図-16 要素分割

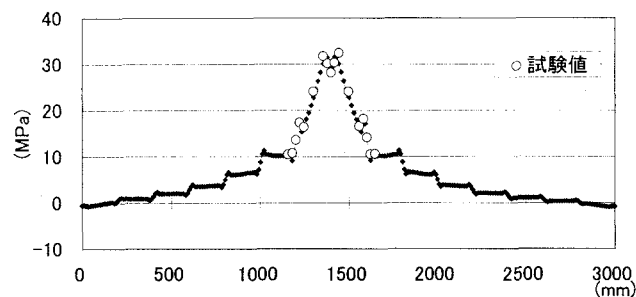


(a) 橋軸直角方向応力

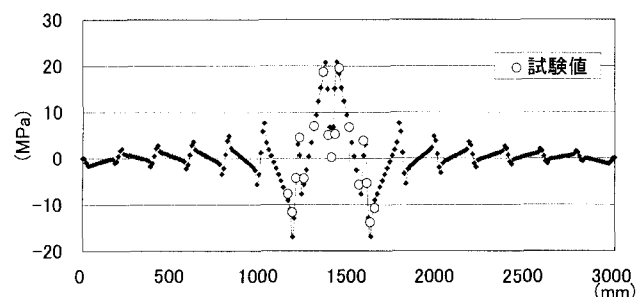


(b) 橋軸方向応力

図-17 フランジ応力の橋軸直角方向分布



(a) 下フランジ下面の橋軸直角方向応力



(b) 下フランジ下面の橋軸方向応力

図-18 フランジ応力の橋軸方向分布

## 6. 結論

摩擦撻拌接合で作製されたアルミニウム床版の静的載荷試験、疲労試験、FEM解析を行い、その材料特性および構造特性を明

らかにした。主な結論は次の通りである。

- (1) 摩擦撻拌接合部で強度が低下する範囲は、接合線を中心として左右それぞれ20mmである。
- (2) 摩擦撻拌接合部は引張強度の低下に比べて、比例限と0.2%耐力の低下が大きい。
- (3) 摩擦撻拌接合部に生じる残留応力は、接合線方向が引張り、接合線直角方向が圧縮である。
- (4) 引張試験片タイプの疲労試験により、母材の疲労強度と摩擦撻拌接合部の接合線直角方向のS-N曲線を与えた(式(1)と表-2参照)。
- (5) アルミニウム床版は、荷重の移動に対して、橋軸直角方向の応力は交番しないが、橋軸方向の応力は交番する。
- (6) アルミニウム床版の橋軸直角方向の終局強度は、その方向の断面に対する全塑性モーメントで安全側に推定することができる。
- (7) アルミニウム床版の上フランジの摩擦撻拌接合の接合線に沿って疲労亀裂が発生した。この疲労亀裂は、上フランジに生じる橋軸方向の板曲げ応力によって起こされる。
- (8) アルミニウム床版の支持間隔が広くなると、下フランジの摩擦撻拌接合の接合線直角方向に疲労亀裂が発生する可能性がある。この疲労亀裂は、下フランジに生じる橋軸直角方向の膜応力によって起こされる。

今回の研究では、アルミニウム床版の摩擦撻拌接合部のピンの先端側の接合面に約0.25mmの未接合が発生し、これが摩擦撻拌接合の疲労強度を低くした。したがってこのような未接合が生じない摩擦撻拌接合技術の確立が望まれる。

## 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。

## 参考文献

- 1) Civil Engineering: New Aluminum Decks Cut Loads, Add Life, ASCE, p.12, August, 1996.
- 2) 大倉一郎：鋼橋の疲労，東洋書店，pp.336-339，1994.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) <http://www.twi.co.uk/bestprac/datashts/fswintro.html>
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通片 II 鋼橋編，丸善(株)，1996.
- 7) 日本マーク(株)：MARC，K.7，1997.