

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 18

2010年6月

日本軽金属(株)グループ技術センター

萩澤亘保, 長尾隆史

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎

概要

これまで開発してきた道路橋用アルミニウム床版の実物大レベルの試験体を製作し、移動トラックタイヤ載荷試験を行い、その疲労耐久性を明らかにする。

荷重の大きさが 138kN で 121.7 万回往復（アルミニウム床版の中央部では 486.8 万回の繰返し載荷）の移動トラックタイヤ載荷試験において、アルミニウム床版の母材、摩擦攪拌接合部および鋼製高力ボルト摩擦接合継手に疲労亀裂は観察されなかった。アルミニウム床版の母材、摩擦攪拌接合部および鋼製高力ボルト摩擦接合継手の各部位に発生する応力と S-N 曲線を比較することにより、各部位は十分な疲労耐久性を有していることを示す。

本研究レポートは、次の論文に加筆するとともに、過去の研究の概要、ならびに、押出型材の摩擦攪拌接合と同接合部の品質検査および側辺現場継手の設計について新たに記述している。

大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷試験による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1217-1226，2010.

謝辞

本研究は、科学技術振興機構(JST)の平成 19 年度独創的シーズ展開事業委託開発の下で行われた。試験体の疲労試験は、静岡県富士市の施工技術総合研究所に設置されている移動トラックタイヤ載荷装置(株高速道路総合技術研究所所有)で行なわれた。疲労試験にご協力をいただいた関係者各位に感謝の意を表す。

目次

第1章 序論	1
第2章 過去の研究の概要	2
2.1 押出形材	2
2.2 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造	3
2.3 試験体	4
2.4 側辺現場継手	5
第3章 試験体の製作	7
3.1 鋼桁	8
3.2 押出形材	8
3.3 摩擦攪拌接合と接合部の品質検査	9
3.4 側辺現場継手の設計と施工	15
3.5 アルミニウム床版と鋼桁の連結部の施工	17
3.6 側辺現場継手の平坦化	18
3.7 材料特性	19
第4章 移動トラックタイヤ載荷試験	20
4.1 移動トラックタイヤ載荷装置	20
4.2 トラックタイヤの接地形状	23
4.3 ひずみと変位の計測	25
4.4 試験経過	26
第5章 アルミニウム床版の疲労耐久性評価	27
5.1 アルミニウム床版の疲労照査	27
5.2 側辺現場継手の疲労照査	31
5.3 下フランジの応力とたわみ	33
5.4 アルミニウム床版上板のたわみ	34
5.5 台座モルタルおよびスタッドに生じるひずみ	34
第6章 結論	36
参考文献	37

付録 A 摩擦攪拌接合部の超音波探傷試験結果

付録 B 摩擦攪拌接合部の放射線透過試験結果

第1章 序論

我が国では1950年代に建設された多くの道路橋が高齢化、老朽化し、損傷した鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と呼ぶ）の補修・補強ならびに取り替えが行なわれ始めている。さらに、1993年の道路構造令の改正において設計自動車荷重が196kNから245kNに変更されたことにより、RC床版の取り替え時に現行の道路橋示方書¹⁾を適用すると、床版厚が厚くなるために主桁の補強が必要になる場合がある²⁾。これに対して、RC床版を軽量なアルミニウム床版に取り替えることによって問題を解決できないかとの考えが出された³⁾。アルミニウム床版を用いることにより、RC床版と比較して床版重量を約1/5に減らすことができ、従来よりも小型の架設重機で工事が行えるため、施工時の道路占有面積を抑え、事業を早期に完了することができる。

このような背景で道路橋用アルミニウム床版に関する研究が行なわれてきた。当初、押出型材を摩擦攪拌接合で接合することにより、**図1**に示すような閉断面アルミニウム床版が開発された⁴⁾。摩擦攪拌接合とは、1991年に英国の溶接研究所で開発された固相接合法の一種である。しかし、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)⁵⁾では摩擦攪拌接合部を目視検査することが規定されており、閉断面アルミニウム床版では摩擦攪拌接合部の裏面を目視検査することができなかった。これを解決するために、**図2**に示す開閉断面アルミニウム床版が開発された⁶⁾。この床版においては、開断面で摩擦攪拌接合が行われるので、摩擦攪拌接合部の両面を目視検査することが可能である。その後、アルミニウム床版と鋼桁との連結構造⁷⁾、現場継手^{8),9)}、地覆定着¹⁰⁾、摩擦攪拌接合部の疲労強度^{11),12)}およびアルミニウム床版の適用支間長¹³⁾に関する研究が行われてきた。

本研究では、橋軸方向7.05m、橋軸直角方向3.0mの実物大レベルの開閉断面アルミニウム床版を製作し、同床版の移動トラックタイヤ載荷試験を行い、その疲労耐久性を明らかにする。

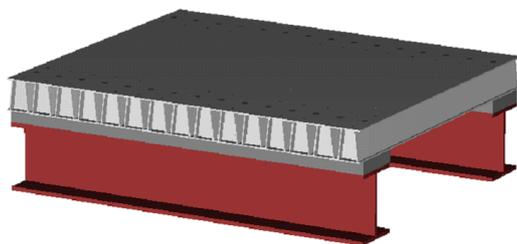


図1 閉断面アルミニウム床版

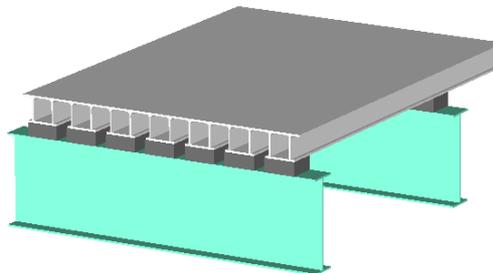


図2 開閉断面アルミニウム床版

第 2 章 過去の研究の概要

2.1 押出型材

アルミニウム床版は押出型材で構成される。図 3 に示すように、押出型材の上フランジの張出した端が突合わされ、摩擦攪拌接合される。したがって、摩擦攪拌接合部の表裏を目視検査することができる。押出型材の材質と調質は A6061S-T6 である。アルミニウム床版の断面形状は、4m 以下の鋼主桁間隔に適用できるように設計された。押出型材の品質および摩擦攪拌接合装置の能力のために、押出型材の板厚は 15mm を超えないことが条件とされた。

上フランジの設計では、図 3 に示す板厚 t_u と間隔 B_c 、 B_o が次の条件を満たすように決定された。

- (1) 道路橋示方書¹⁾に規定されるトラックの輪荷重 137.3kN によって上板に生じる応力の最大値が許容応力を超えない。輪荷重 137.3kN は、静荷重 98.1kN と衝撃荷重 39.2kN の合計である。輪荷重の載荷形状は 500mm×200mm の長方形である。
- (2) 輪荷重の移動によって、上板に生じる応力範囲が疲労強度を超えない。
- (3) アスファルト舗装に悪影響を及ぼさないようにするために、輪荷重によって上板に生じる面外たわみを $B/300$ 以下とする¹⁾。ここで、 B はウェブ間隔 B_c または B_o である。

下フランジとウェブの設計では、図 3 に示す下フランジの板厚 t_l およびウェブの板厚 t_w と高さ H が次の条件を満たすように決定された。

- (1) 高さ H は押出ダイスの寸法制限を受ける。
- (2) 摩擦攪拌接合を裏から行うために、隣り合う下フランジの間隔を 90mm 以上とする。
- (3) 道路橋示方書¹⁾に規定されるトラック荷重によって下フランジに生じる応力の最大値が許容応力を超えない。橋軸直角方向に可能な限りトラックを載荷する。
- (4) (3)で得られた最大応力が疲労強度を超えないようにする。
- (5) アルミニウム床版の過度な鉛直たわみを防ぐために、下フランジの鉛直たわみは $L/300$ 以下にする。ここで、 L は鋼桁の間隔であり、4m 以下とする。

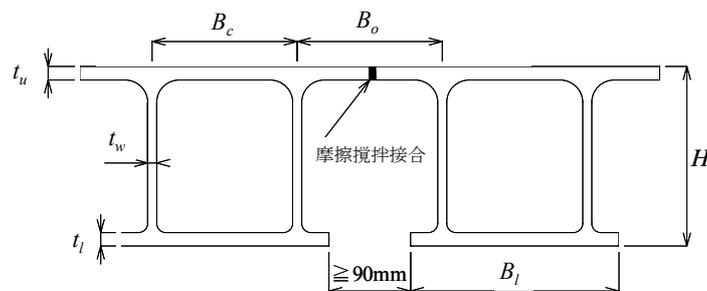


図 3 押出型材の上フランジの張出し端の摩擦攪拌接合

図4に示すアルミニウム床版のFEM解析により、図5に示す押出型材の断面形状が得られた⁶⁾。押出型材は、高さが200mm、上下フランジ厚が15mm、ウェブ厚が10mmである。上フランジとウェブのコーナー部にはR25mm、下フランジとウェブのコーナー部にはR10mmのフィレットが設けられている。

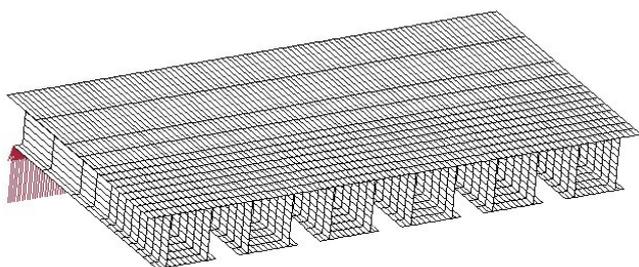


図4 アルミニウム床版の要素分割

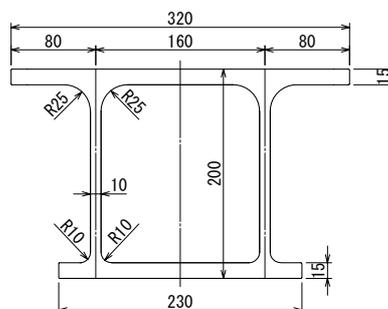


図5 床版型材の断面形状

2.2 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図6に示す⁷⁾。押出型材の中空部には、対向するアルミニウム合金製の仕切り板が設置されており、底面にはスタッドを挿入するための四角形の開口が、上フランジにはモルタルを充填するための孔が設けられている。連結の手順は、最初、鋼主桁の上フランジに軸径22mmの頭付き鋼スタッドを橋軸直角方向に3本溶接する。次に鋼主桁の上フランジと押出型材の下フランジの間に台座モルタルを設けるために、スタッドを囲むように型枠を設置する。最後に押出型材の中空部にスタッドが挿入されるように押出型材を載せ、押出型材の上フランジに設けられた孔から無収縮モルタルを充填する。この連結構造の静的および疲労挙動が調べられ、この連結構造は剛結に近いことが明らかにされた⁷⁾。台座モルタルは、既存のコンクリート床版をアルミニウム床版に架け替える際に生じる鋼主桁の上反りを、モルタルの厚さを変えることによって吸収する役割を持つ。さらに、アルミニウム押出型材と鋼主桁との接触を避け、異種金属接触腐食を防ぐ役割を持つ。

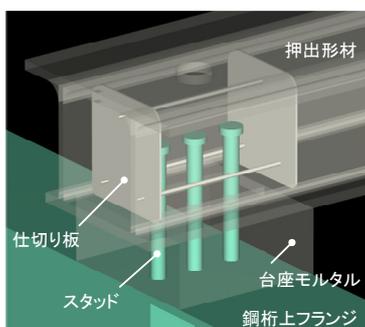


図6 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

2.4 側辺現場継手

図9に示す側辺現場継手の疲労試験が実施された⁹⁾。側辺現場継手に使用される押出型材は、図5の床版型材と比較して上フランジの片側が延長されている。アルミニウム合金板摩擦接合継手の締結に鋼製高力ボルトが使用される場合、異種金属接触腐食を防ぐために溶融亜鉛めっき鋼製高力ボルトが使用される^{14),15)}。一般に使用される摩擦接合用鋼製高力ボルトはF10Tである。F10Tは熱処理によりその強度が得られ、焼き戻し温度は約430℃であるが、溶融亜鉛めっきは約500℃で実施されるので、熱影響によりF10Tの強度が保障されない場合がある。したがって側辺現場継手においては、M22 (F10T) の高力ボルトにF8T相当の軸力が導入された。ボルトは図9に示すように直列に配置された。側辺現場継手試験体の疲労試験の様子を図10に示す。開断面上および閉断面上の各場合、荷重範囲50kNで200万回繰返し载荷した後、荷重範囲70kNで500万回载荷された。疲労試験の結果、開断面上载荷および閉断面上载荷ともに疲労亀裂は観察されなかった。

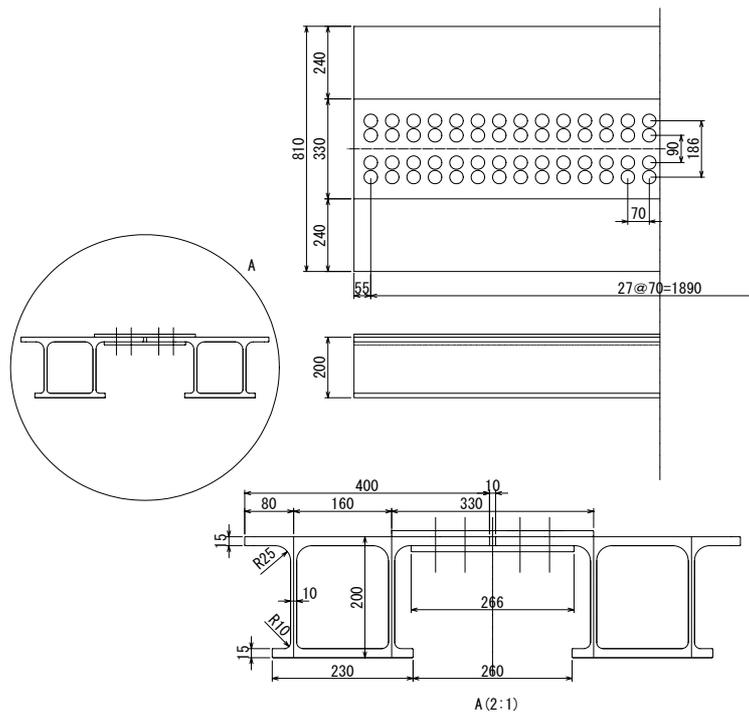


図9 側辺現場継手



図 10 側辺現場継手の疲労試験

第3章 試験体の製作

移動トラックタイヤ載荷試験に使用した試験体を図11に示す。橋軸方向7.05m、橋軸直角方向3.0mmのアルミニウム床版が間隔2.5mの鋼桁の上に置かれている。次に試験体の製作について述べる。

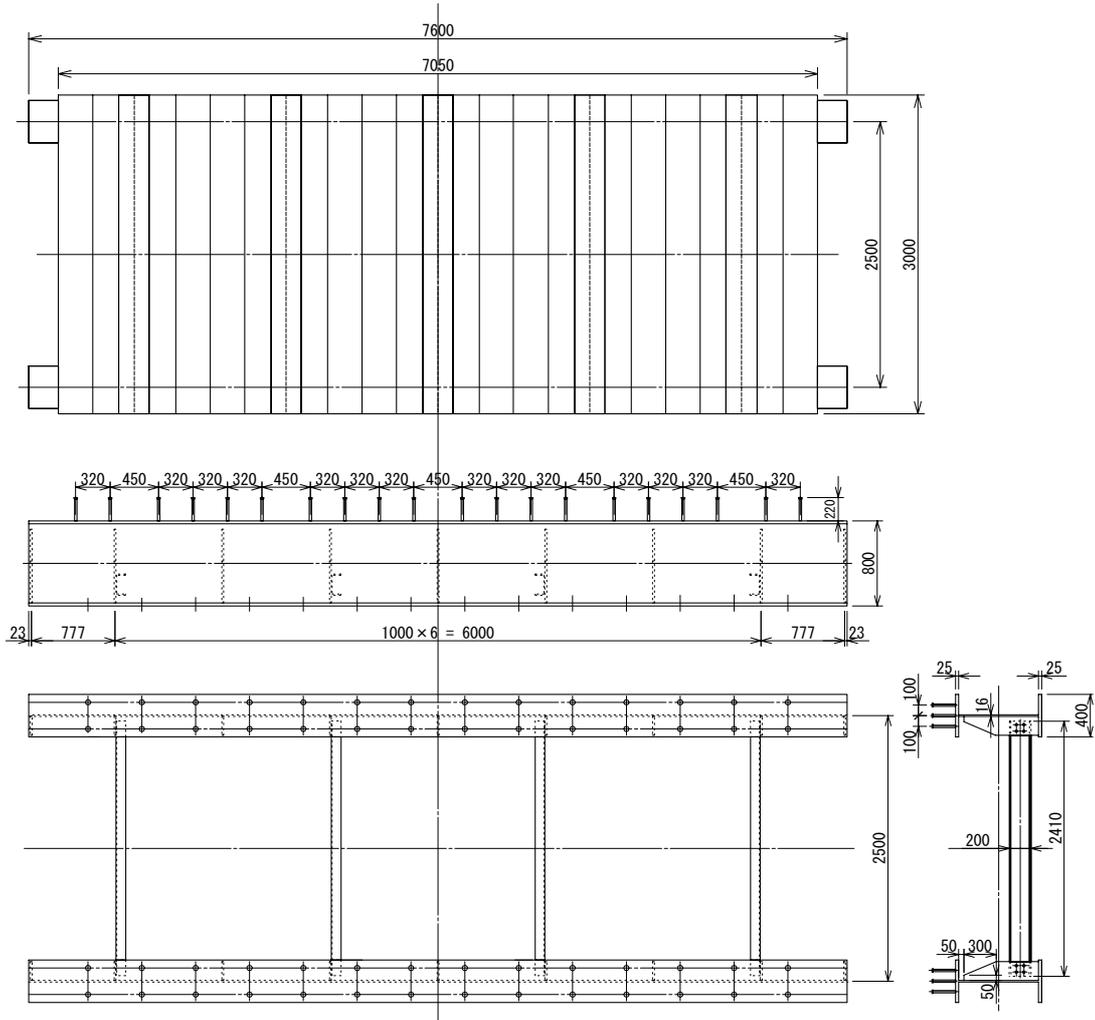


図11 試験体

3.1 鋼桁

鋼桁を図 12 に示す。鋼桁には後述のアルミニウム床版を鋼桁に連結するために使用される $\phi 22 \times 220\text{mm}$ の頭付き鋼製スタッドを、長手方向に 320mm 間隔、幅方向に 100mm 間隔で 3 本ずつ鋼桁上フランジに溶接した。図 13 に示すように、JIS Z 3145¹⁶⁾に従って頭付きスタッド溶接部の曲げ試験を行い、溶接部に割れの発生がないことを確認した。試験体の輸送中および移動トラックタイヤ載荷試験中、鋼桁が外に開かないようにするために、 $200 \times 90 \times 8 \times 13.5\text{mm}$ の溝形鋼で鋼桁を連結した。



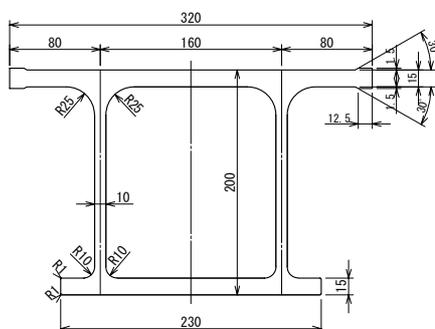
図 12 鋼桁



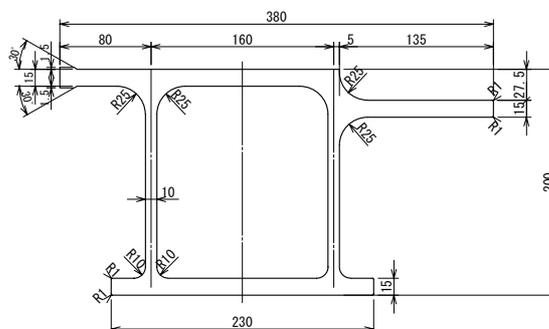
図 13 頭付きスタッド溶接部の曲げ試験

3.2 押出型材

試験体に用いられた押出型材の断面形状を図 14 に示す。床版型材は、上フランジの先端が少し厚くしてあることを除いて、2.1 節で述べられた押出型材⁶⁾と同じである。上フランジの先端が少し厚くしてある理由は 3.3 節で述べる。側辺現場継手型材は今回新たに設計された押出型材である。側辺現場継手型材は、高力ボルトの頭が上面から突出しないように片側のフランジが下方に置かれている。これは、移動トラックタイヤが高力ボルト上を走行する際に、タイヤへの損傷、床版への衝撃および移動トラックタイヤの安定走行が阻害されるなどの懸念に対処するためである。実橋においても、アスファルト舗装を基層まで打ち換えする際にはつり作業の施工性を考慮し、この側辺現場継手型材が使用される。



(a) 床版型材



(b) 側辺現場継手型材

図 14 押出型材の断面形状

3.3 摩擦攪拌接合と接合部の品質検査

試験体は繰返し荷重を受けるので、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)⁵⁾(QIFSW 指針と呼ぶ)に従って、両面摩擦攪拌接合を採用した。これは、キッシングボンドと呼ばれる接合不完全部の発生を防ぐために、始め片側から摩擦攪拌接合を行った後、裏返して反対側からも摩擦攪拌接合を行う方法である。試験体では、押出型材の固定のしやすさから、始めに押出型材の上フランジの裏面の摩擦攪拌接合を行い、次に表面の摩擦攪拌接合を行った。最初、床版型材と側辺現場継手型材を両面摩擦攪拌接合で連結し、次に、床版型材の上フランジを左右に配置し、両面摩擦攪拌接合で連結することにより、図 15 に示すような、長さが 1400mm の床版ユニットを製作した。摩擦攪拌接合ではバリが生じた分、接合部の板厚が減少するので、図 14 に示すように、上フランジの端部を少し厚くしておき、接合後にエンドミルでバリを削除した後に、上フランジに段が残らないようにグラインダーで段を削り取った。摩擦攪拌接合部の様子を図 16 に示す。

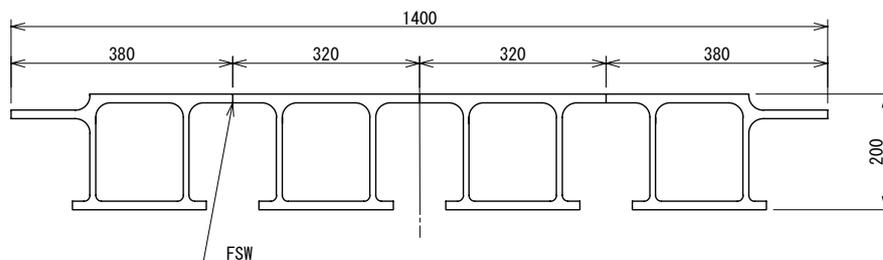


図 15 床版ユニット



(a) 表面

(b) 裏面

図 16 摩擦攪拌接合部

QIFSW 指針で規定される施工試験と製品接合部検査を実施した。施工試験として、図 17 に示す供試体に対して、目視検査、超音波探傷試験、放射線透過試験、引張試験、曲げ試験、疲労試験およびマクロ・ミクロ観察を実施した。製品接合部検査として、各床版ユニットに対して目視検査と超音波探傷試験を実施した。

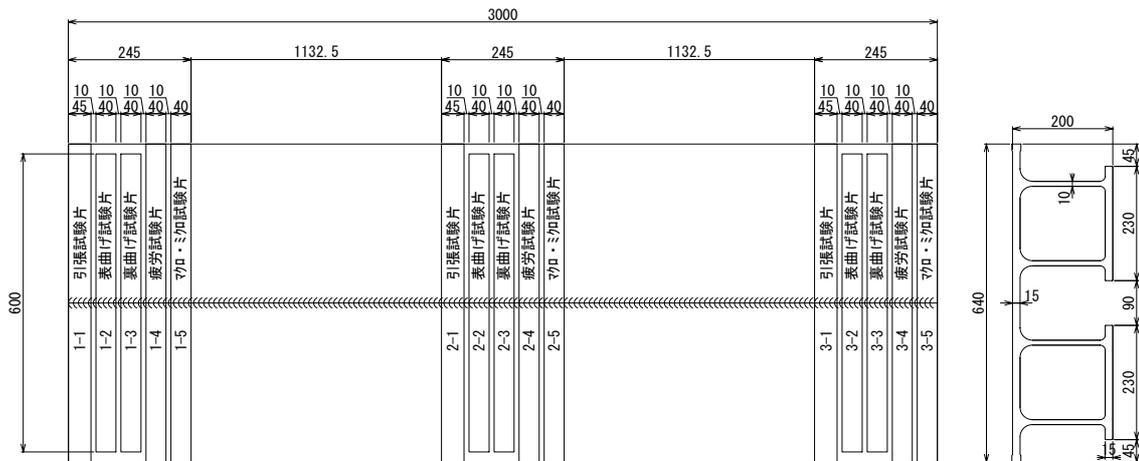


図 17 施工試験に用いられた供試体

QIFSW 指針の 8.2.1 項に従って実施した引張試験の結果を表 1 に示す。QIFSW 指針では、摩擦攪拌接合の前端部，中間部および後端部から 1 本ずつ採取された合計 3 本の引張試験片の引張強さと 0.2%耐力が規定値以上であるとき合格であるとしている。試験結果は規定値を上回っている。

表 1 引張試験の結果

部位	引張強さ(MPa)	0.2%耐力(MPa)
前端部 1-1	263	178
中間部 2-1	263	186
後端部 3-1	264	184
規定値	177	108

QIFSW 指針の 8.2.2 項に従って曲げ試験を実施した。ローラ曲げ試験の雄型ジグの先端の半径が次式により決めることが QIFSW 指針で規定されている。

$$R = 4.75t \quad (1)$$

ここに、 R ：ローラ曲げ試験の雄型ジグの先端の半径， t ：板厚

曲げ試験片の板厚が 15mm であるので 71.25mm の半径を有する雄型ジグに対するローラ曲げ試験を実施した。図 18 に示すように、雄型ジグに沿って試験片を曲げることができず、試験片が折れ曲がるように変形したため、表曲げ、裏曲げともに、図 19(a) に示すように、摩擦攪拌接合のツールのショルダーの外側の熱影響部に表面割れが発生した。

試験片の板厚が小さいと雄型ジグに沿って曲げやすいと考え、試験片の板厚を 8mm まで切削し、これに対してローラ曲げ試験（この場合、雄型ジグの先端の半径 38mm）を実施したが、この場合も、試験片が折れ曲がるように変形したため、表曲げ、裏曲げともに、図

19 (b)に示すように、摩擦攪拌接合のツールのショルダーの外側の熱影響部に表面割れが発生した。

代替方法として、JIS Z 2248¹⁷⁾で規定される巻付け法による曲げ試験を実施した。試験片は、図 17 の施工試験に用いられた供試体の残部から、表曲げ試験片と裏曲げ試験片をそれぞれ 5 本ずつ切出した。巻付け曲げでは、図 20 (a)に示すように、板厚 8mm の試験片を半径 38mm の中央の軸と外側の軸との間に置き、試験片の片側をピン（図 20 (a), (b), (d) で、矢印で指示）で固定する。試験片を中央の軸と外側の軸の間に挟み、外側の軸を回転させながら試験片を曲げたが、図 20 (b)に示すように、外側の軸が接合部を通り過ぎた当たりで、試験片と軸との間に隙間が生じた。そこで、図 20 (c)に示すように、万力で試験片を中央の軸に押さえながら試験片を曲げた結果、図 20 (d)に示すように、試験片は軸に沿って変形した。この様にして曲げられた試験片の表面の一例を図 21 に示す。表曲げおよび裏曲げ試験片ともに表面割れは見られず、QIFSW 指針の規定を満足した。

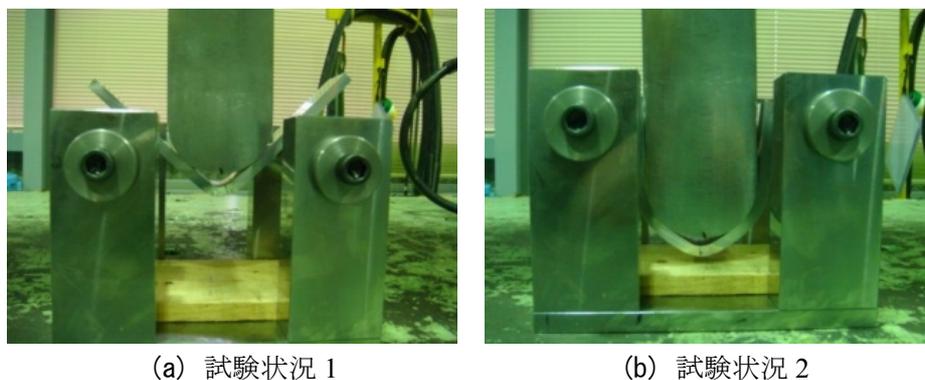


図 18 ローラ曲げ試験（板厚 15mm）

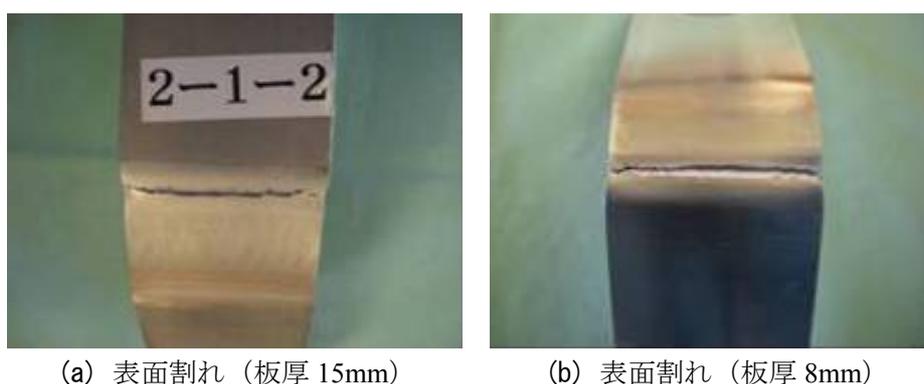
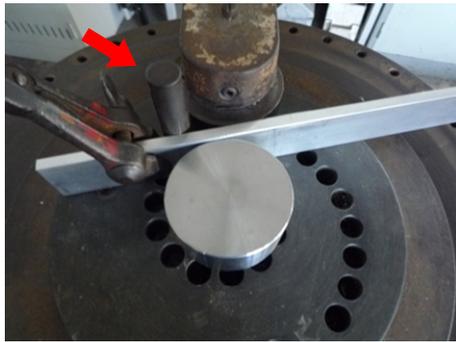


図 19 ローラ曲げ試験後の試験片表面



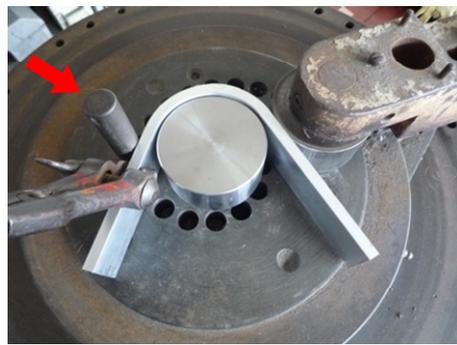
(a) セッティング



(b) 試験片と曲げ治具の間の隙間



(c) 試験片の固定

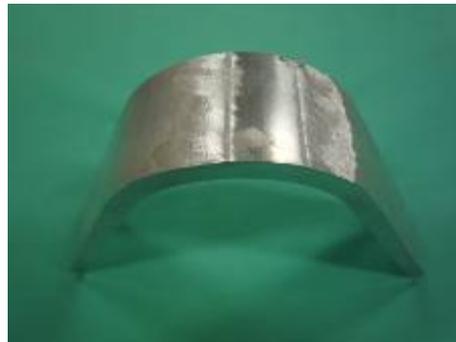


(d) 曲げ試験後の試験片形状

図 20 巻付け曲げ試験



(a) 表曲げ試験片



(b) 裏曲げ試験片

図 21 巻付け曲げ試験後の試験片表面

QIFSW 指針の 8.2.3 項に従って疲労試験を実施した。QIFSW 指針では、摩擦攪拌接合の前端部、中間部および後端部から 1 本ずつ合計 3 本の疲労試験片を採取し、応力範囲を 100, 110, 120, 130MPa のうちのどれかの応力範囲で疲労試験を実施し、3 本が最小疲労寿命以上で、かつ 2 本が平均疲労寿命以上であるとき合格であると規定されている。疲労試験の様子を図 22 に示す。疲労試験は応力範囲 130MPa に対して実施され、その結果を表 2 に示す。疲労試験結果は、全ての試験片が QIFSW 指針に定められた平均疲労寿命以上である。



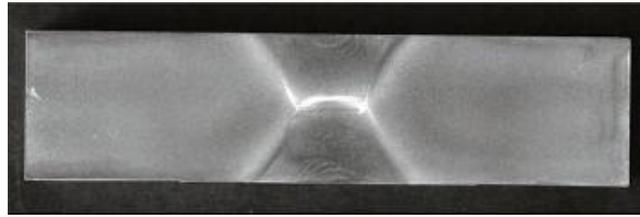
図 22 疲労試験

表 2 疲労試験の結果

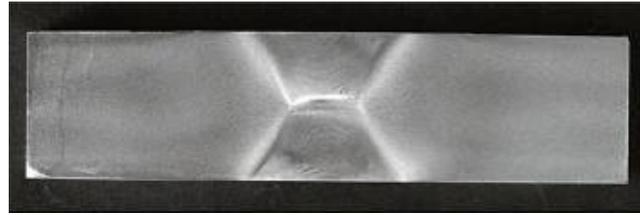
部位	$\Delta \sigma$ (MPa)	N (回)	破断の 有無	最小疲労 寿命 (回)	平均疲労 寿命 (回)
前端部 1-4	130	1.02×10^7	無	9.9×10^4	3.8×10^5
中間部 2-4		3.77×10^6	無		
後端部 3-4		3.85×10^6	無		

QIFSW 指針の 8.2.4 項に従って、マクロおよびミクロ観察を実施した。QIFSW 指針では、接合部のマクロ組織に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）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と記載されている。マクロ組織および接合部中央のミクロ組織写真を図 23 と 24 に示す。マクロ観察およびミクロ観察からトンネルキャビティやキッシングボンドなどの欠陥は認められなかった。

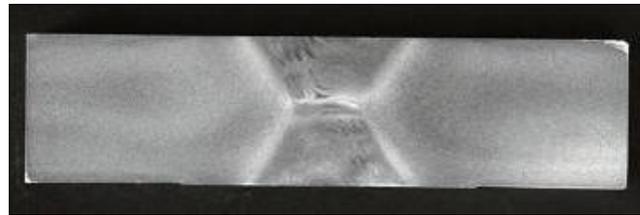
QIFSW 指針の 8.1.1 から 8.1.3 項に従って、目視検査、超音波探傷試験および放射線透過試験を実施した。QIFSW 指針では、疲労の影響を受ける場合、きずの分類が超音波探傷試験は C 種 1 類、放射線透過試験は 1 類を合格としている。超音波探傷試験および放射線透過試験の結果、両試験とも QIFSW 指針に記載される品質判定基準を満足した。施工試験に用いられた供試体および床版ユニットに対して実施された超音波探傷試験と放射線透過試験の結果をそれぞれ付録 A と B に示す。



(a) 前端部



(b) 中間部



(c) 後端部

図 23 マクロ組織写真



(a) 前端部



(b) 中間部



(c) 後端部

図 24 ミクロ組織写真

3.4 側辺現場継手の設計と施工

アルミニウム合金と鋼製高力ボルトとの電食を防ぐために、フッ素樹脂でコートされたボルト M20 (F10T) を使用した。添接板の摩擦面の処理には、すべり係数 0.45 を確保するために、アルミニウム建築構造製作要領¹⁸⁾に従って、30~40 μm のブラスト処理を施した。ブラスト条件を表 3 に示す。

表 3 ブラスト条件

項目	条件
ブラスト材	アルミナ #46
使用ノズル	内径 9.9mm

ボルト 1 本 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力は次式で与えられる。

$$\rho_a = \frac{1}{v} \mu N \quad (2)$$

ここに、 ρ_a : ボルト 1 本 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力、 v : 安全率、 μ : すべり係数、 N : 設計ボルト軸力

設計ボルト軸力 N の大きさは、道路橋示方書において M20 (F10T) に対して規定される 165kN である。すべり係数 μ は 0.45 である。安全率 v は $1.85 \times 1.5 = 2.775$ とした。1.85 は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案¹⁵⁾で規定される値である。

アルミニウム合金板の摩擦面の表面粗さとすべり係数の関係、アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下と経過時間の関係、鋼製高力ボルトの軸力変化と温度変化の関係および鋼製高力ボルトの初期導入軸力とアルミニウム合金板の表面の変形特性の関係が明らかにされている¹⁹⁾。しかし、フッ素樹脂でコートされた鋼製高力ボルトにおいてフッ素樹脂のクリープが明らかにされていないこと、すべり係数を 0.45 にとって施工された実績が少ないこと、さらに、実際の側辺現場継手においては、舗装を介してボルトの直上をトラックタイヤが通過することなどを考慮して、1.85 の基本安全率に対して 1.5 倍を採用した。したがって、式(2)より、M20 (F10T) のボルト 1 本 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力は 26.8kN となる。

ボルト本数はアルミニウム床版上板の全強に対して決めた。アルミニウム床版上板の全強を計算する際、摩擦攪拌接合部の許容応力として、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案¹⁵⁾の MIG 溶接部の許容応力 59MPa を採用した。したがって、アルミニウム床版上板の幅が 3000mm、板厚が 15mm であるので、

$$n = \frac{59 \times (3000 \times 15)}{26800 \times 2} = 49.9 \Rightarrow 59 \text{ 本} \quad (3)$$

鋼製高力ボルト摩擦接合による側辺現場継手を図 25 に示す。

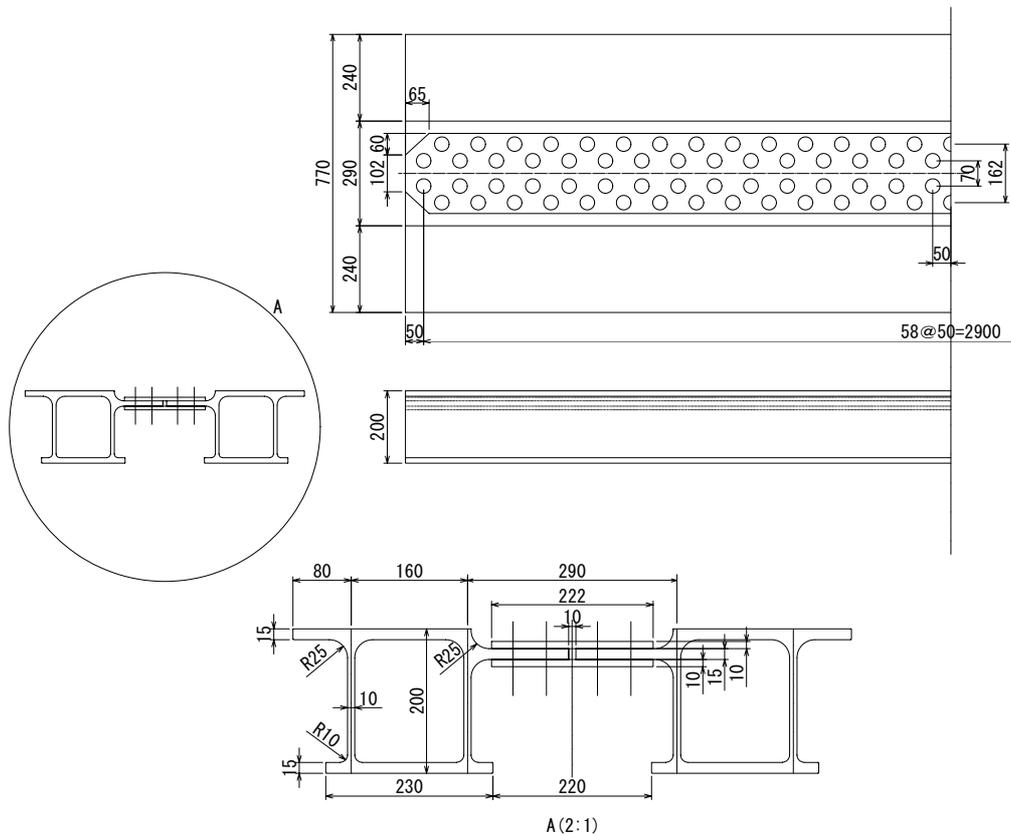


図 25 側辺現場継手

床版ユニットおよび鋼桁を製作した後、図 26 に示すように、モルタル台座の空間を確保するためにスペーサーを鋼桁の上フランジに置き、押出型材底面に設けられた開口にスタッドを挿入し、床版ユニットを載せ、アルミニウム床版の位置を決めた。ボルトの締め付けでは、設計ボルト軸力 165kN の 1 割増しの 182kN の初期導入軸力を与えた。ボルト接合時の様子を図 27 に示す。



図 26 床版ユニットの位置決め



図 27 ボルト接合

3.5 アルミニウム床版と鋼桁の連結部の施工

側辺現場継手のボルト締結後、アルミニウム床版と鋼桁の連結を行った。アルミニウム床版と鋼桁の連結部を図 28 に示す。図 29 に示すように、アルミニウム床版がモルタルに接触する部分には、アルミニウムのアルカリ腐食を防ぐために塗装を施した。アルミニウム床版と鋼桁の連結作業の前に、無収縮モルタル（大阪住友セメント フィルコン R）のコンシステンシー試験を行った。試験方法は日本道路公団規格「無収縮モルタル品質管理試験方法」²⁰⁾に従って、J14 ロートによるモルタル流下時間が 8.6 秒と 8.0 秒であり、規格値の 8 ± 2 秒の範囲内にあることを確認した。モルタルの練り上がり温度は 28 度であった。

鋼桁上フランジとアルミニウム床版の下フランジの間に台座モルタル用の型枠を図 30 に示すように設置した。その後、図 31 に示すように、アルミニウム床版の上フランジに開けられた孔から、鋼桁上フランジと床版下フランジとの間および押出型材中空部の仕切り板間に無収縮モルタルを充填し、アルミニウム床版と鋼桁を連結した。型枠を取り外した時の台座モルタルの状況を図 32 に示す。

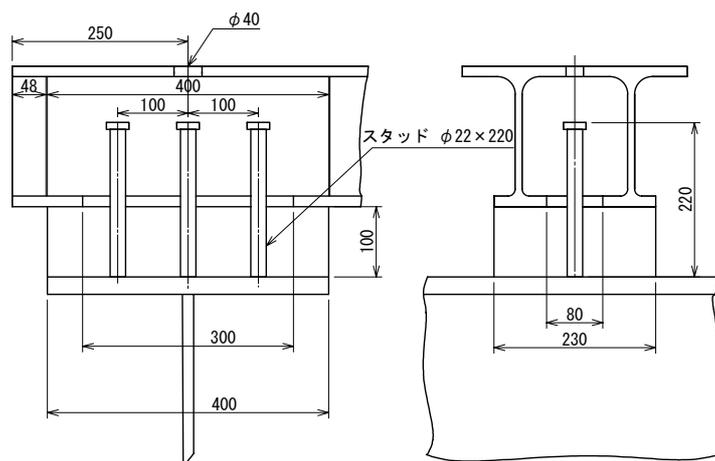


図 28 アルミニウム床版と鋼桁の連結部

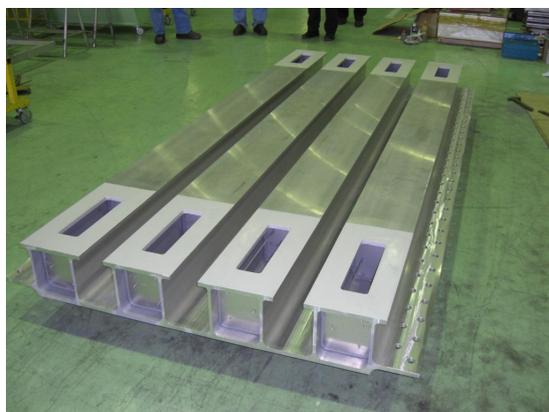


図 29 モルタル接触部の塗装



図 30 台座モルタル用の型枠の設置



図 31 無収縮モルタル注入の様子



図 32 硬化した台座モルタル

3.6 側辺現場継手の平坦化

最後に、図 33 に示すように、側辺現場継手の凹部にエポキシ樹脂系の接着剤（鹿島道路 KS ボンド）を塗布し、その上から無収縮モルタルを充填して凹部を平らにした。後日、乾燥収縮による細かなクラックが無収縮モルタルに観察されたため、それをエポキシ浸透接着剤（アルファ工業 アルファテック 380）により補修した。



(a) 接着剤の塗布



(b) 無収縮モルタルの流し込み

図 33 側辺現場継手部の平坦化

3.7 材料特性

アルミニウム床版の押出型材に使用した材料は A6061S-T6 である。その化学成分の測定値と JIS 規格値²¹⁾を表 4 に示す。各押出型材から引張試験片 (JIS 5 号試験片) を採取し、引張試験を実施した。各押出型材の機械的性質と JIS 規格値²¹⁾を表 5 に示す。

無収縮モルタルの圧縮強度試験を、直径 50mm×高さ 100mm の円柱試験片を用いて、モルタル充填後の材齢 3 日、7 日、28 日に実施した。試験結果を表 6 に示す。アルミニウム床版と鋼桁の連結部のモルタル充填後 17 日後、そして側辺現場継手のモルタル充填による平坦化後 9 日後、移動トラックタイヤ載荷試験を開始した。

表 4 押出型材の化学成分

A6061	化 学 成 分 (%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
床版型材	0.65	0.18	0.33	0.01	1.0	0.08	0.01	0.02
側辺現場継手型材	0.66	0.19	0.34	0.01	1.0	0.08	0.01	0.02
添接型材	0.65	0.19	0.33	0.02	1.0	0.06	0.00	0.01
JIS 規格値	0.40～ 0.8	0.7 以下	0.15～ 0.4	0.15 以下	0.8～ 1.2	0.04～ 0.35	0.25 以下	0.15 以下

表 5 押出型材の機械的性質

押出型材	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)
床版型材	322	283	22
側辺現場継手型材	314	262	21
添接型材	308	287	19
JIS 規格値	265 以上	245 以上	10 以上

表 6 無収縮モルタルの圧縮強度

材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	
	現場空中養生	標準水中養生
3	40.6	31.8
7	43.2	38.1
28	50.4	—

第4章 移動トラックタイヤ載荷試験

4.1 移動トラックタイヤ載荷装置

試験体の疲労試験は、図 34 に示す静岡県富士市の施工技術総合研究所に設置されている移動トラックタイヤ載荷装置（株高速道路総合技術研究所所有）を用いて行なった。載荷装置の性能を表 7、トラックタイヤの規格値を表 8 に示す。図 35 に示すように、試験体を試験場の支持桁に乗せ、試験体の鋼桁下フランジと支持桁を高力ボルトで接合した。支持桁の下フランジは試験場の床にアンカーボルトで固定され、試験体の鋼桁と支持桁はたわまない。

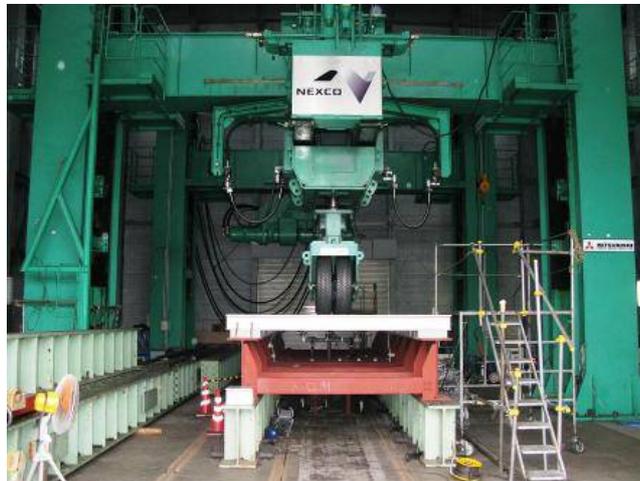


図 34 移動トラックタイヤ載荷装置

表 7 移動トラックタイヤ載荷装置の性能

供試験体最大寸法	幅 7m×長さ 15m
載荷点移動装置	鉛直方向：床面より 1.5～4m 幅方向：試験機中心より±1.5m
移動載荷最大荷重	490kN
移動載荷方式	単輪載荷，一軸載荷，二軸載荷
移動載荷ストローク	±1.5m
移動載荷最大速度	20 往復/分
動的定点最大荷重	980kN
動的繰返し速度	2Hz（±1mm 時）
静的定点最大荷重	2940kN
静的載荷最大ストローク	200mm
繰返し載荷波形	正弦波，三角波，可変台形波，任意波

表 8 トラックタイヤの規格値

FALKEN 製	MI-577
	10.00R20 14PR
タイヤ構造	チューブタイプ
タイヤ外形(mm)	1055
タイヤ総幅(mm)	279

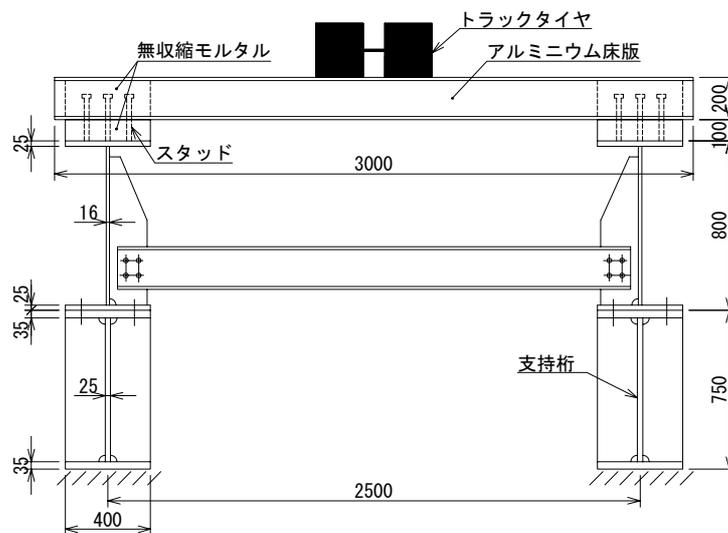


図 35 設置された試験体

試験状況を図 36 に示す。トラックタイヤ載荷ユニットは、実際の大型トラックの後ろ 2 軸の片側を模して、ダブルタイヤのタンデム軸配置（軸間隔 1400mm）である。トラックタイヤ載荷ユニットの移動距離は 3000mm である。図 37 に示す黒の四角形の部分はアルミニウム床版に対するタイヤの接地位置を表し、左の 4 つはトラックタイヤ載荷ユニットが左端に移動した時、右の 4 つはそれが右端に移動した時の接地位置である。トラックタイヤ載荷ユニットが N 回往復すると、左右 1400mm の走行範囲で $2N$ 回、中央部 1600mm の走行範囲で $4N$ 回の繰返し回数になる。

載荷条件を表 9 に示す。道路橋示方書¹⁾で規定される輪荷重(T 荷重)は 100kN であるが、実際の道路では車両制限令により輪荷重は 50kN（軸重で 100kN）である。そこで本試験では衝撃係数 0.4 を考慮して輪荷重を 69kN とし、2 軸合計で 138kN を、図 37 に示すように、床版支間の中央を走行させた。138kN の荷重載荷を可能とするために、タイヤの空気圧はメーカー標準値の 700kPa より大きい 800kPa に設定した。



図 36 試験状況

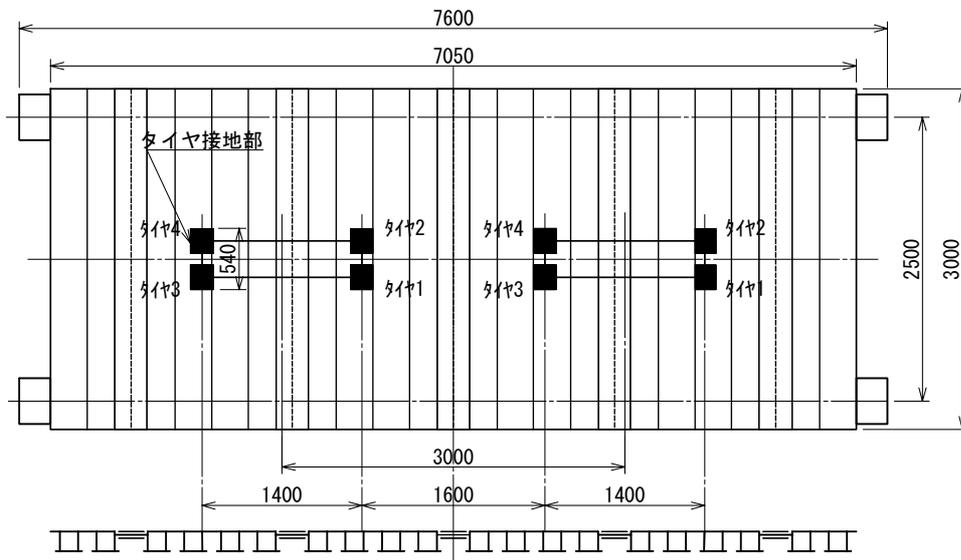


図 37 トラックタイヤ载荷ユニットの走行範囲

表 9 载荷条件

载荷方法	ゴム製ダブルタイヤを用いた 2 軸 2 輪载荷 (ダブルタイヤを前後 2 軸に配置)
载荷荷重	138kN
移動距離	3m
移動速度	15.5rpm (22320 往復/日)
軸間距離	1400mm
タイヤサイズ	10.00R20-14PR
制御波形	一定荷重 (荷重制御)
タイヤ空気圧	800kPa

4.2 トラックタイヤの接地形状

疲労試験の開始前と終了時に、タイヤの接地形状および空気圧の測定を行った。タイヤの接地形状の測定には、FUJIFILM社製の極超低压用プレスケールを用いた。タイヤとアルミニウム床版の間にプレスケールを設置した後138kNまで静的に載荷して一定時間保ち、除荷後に変色した部分がタイヤの接地形状である。測定状況を図38に示す。疲労試験開始前のタイヤの接地形状の一例を図39に示す。タイヤの接地形状は樽形の形状をしている。疲労試験開始前と終了時でタイヤの接地形状は変化しておらず、橋軸直角方向のタイヤの接地幅は、4輪の間で217mm～220mm、橋軸方向のタイヤの接地長さは、4輪の間で272mm～276mm（タイヤの幅中心）であった。



図38 タイヤの接地形状の測定状況

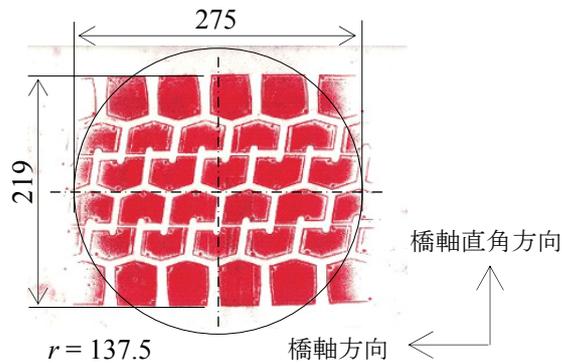


図39 タイヤ1の接地形状（疲労試験開始前）

タイヤ荷重とタイヤ接地半径の関係が次式で与えられている²²⁾。

$$r = \sqrt{\frac{\alpha_1 P_1 + \alpha_2}{\pi}} \quad (2.5\text{kN} \leq P_1 \leq P_{1cr}) \quad (4)$$

$$r = \frac{1000P_1}{487.5(\alpha_3 P_1 + \alpha_4)} \quad (P_{1cr} \leq P_1 \leq 50\text{kN}) \quad (5)$$

ここに、**図 40** を参照して、 r : タイヤの接地半径、 P_1 : タイヤ荷重(kN)、 P_{1cr} : タイヤの接地形状が円形から樽形に変化する臨界荷重(kN)、 $\alpha_1 \sim \alpha_4$: 係数

タイヤの空気圧 800kPa に対する係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ および臨界荷重 P_{1cr} の値を**表 10** に示す。本試験では 1 輪当りのタイヤ荷重 P_1 が 34.5kN であり、臨界荷重 P_{1cr} より大きい。したがって式(5)より、アルミニウム床版の開断面上載荷時および閉断面上載荷時に対する接地半径を求めると、それぞれ 132.1mm、132.8mm になる。プレスケールによる測定から得られた接地半径 r は 136mm~138mm であり、式(5)から計算される値に近い。

疲労試験終了時のタイヤの空気圧の測定結果を**表 11** に示す。疲労試験終了時の 4 輪の空気圧の平均は約 770kPa であり、疲労試験開始前の設定空気圧 800kPa から若干低下していた。

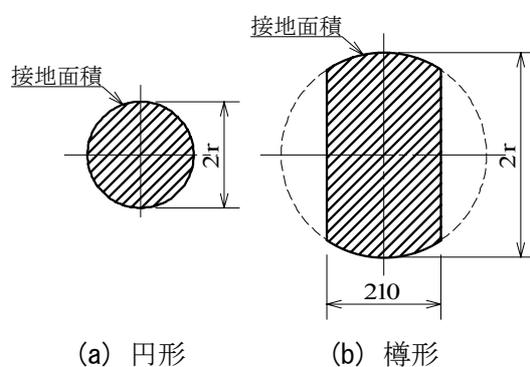


図 40 タイヤの接地半径

表 10 係数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ および臨界荷重 P_{1cr}

	開断面上載荷時	閉断面上載荷時
α_1	1471	1471
α_2	3134	3428
α_3	7.394×10^{-3}	7.478×10^{-3}
α_4	0.467	0.459
P_{1cr} (kN)	21.6	21.3

※ 空気圧 800kPa

表 11 疲労試験終了時のタイヤの空気圧

タイヤ番号	空気圧 (kPa)
タイヤ 1	780
タイヤ 2	760
タイヤ 3	800
タイヤ 4	750

4.3 ひずみと変位の計測

疲労試験開始前と終了時において、**図 41** に示す位置のアルミニウム床版、台座モルタルおよびスタッドのひずみ、およびアルミニウム床版のたわみを測定した。アルミニウム床版のひずみは、側辺現場継手の下添接板下面（ライン①），摩擦攪拌接合部下面（ライン②，⑤，⑥，⑦），下フランジ下面（ライン③，④）を測定した。台座モルタルは内側の鉛直方向ひずみ（ライン③と④の支持部両側），スタッドは軸方向のひずみ（ライン③と④の支持部片側），たわみは下フランジ下面（ライン③と④）を測定した。さらに，疲労試験1万回往復ごとに，側辺現場継手の下添接板下面，摩擦攪拌接合部下面，台座モルタルおよびスタッドのひずみの動的計測を実施した。

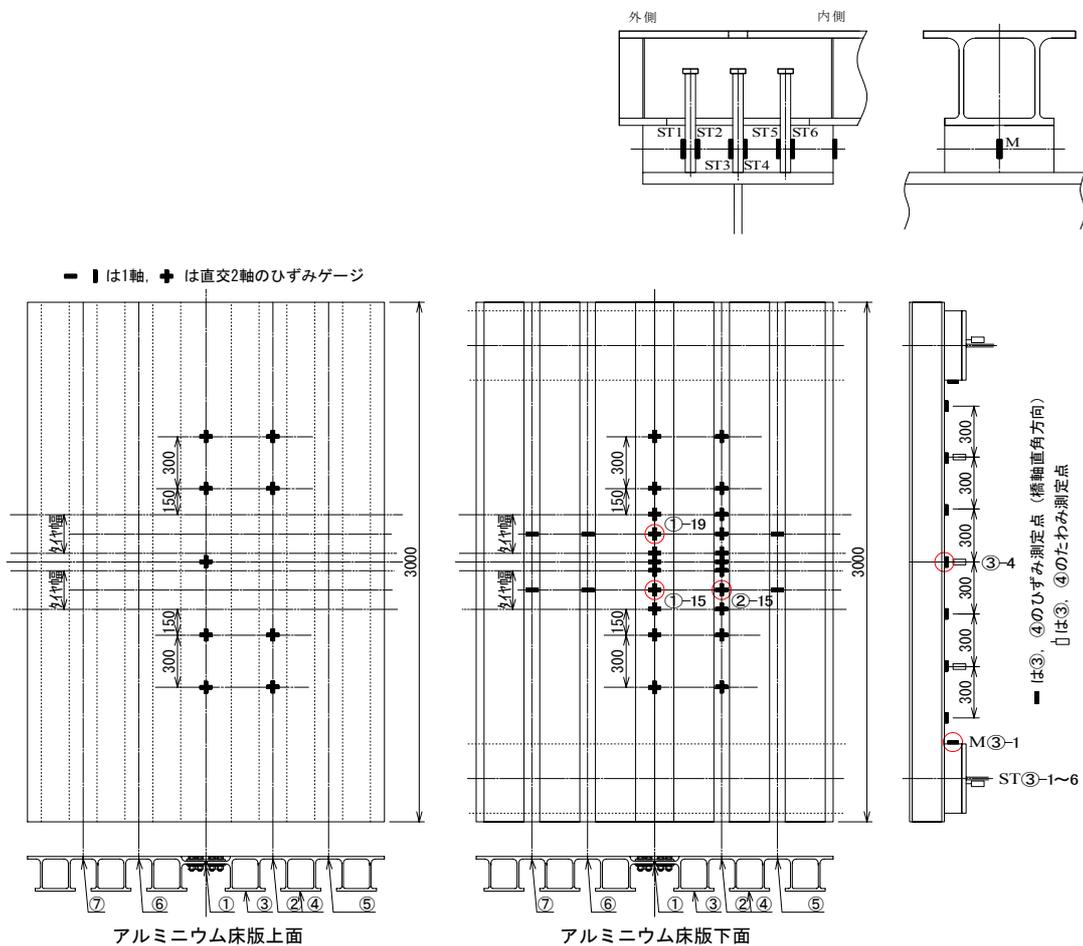


図 41 アルミニウム床版，スタッドおよび台座モルタルのひずみと変位の測定位置

4.4 試験経過

疲労試験は2008年7月31日～9月29日までの間、荷重速度15.5rpmで合計121.7万回往復の繰返し荷重（中央部では486.8万回の繰返し荷重）を行った。この間、1日1回の頻度で摩擦攪拌接合部の亀裂、添接部の高力ボルトのゆるみ、モルタルのひび割れおよびアルミニウム床版上面の異常の有無について調査を行った。合計121.7万回往復の繰返し荷重の結果、アルミニウム床版に疲労亀裂の発生は認められなかった。側辺現場継手の高力ボルトのゆるみはなく、同継手の上面のモルタルに格子状のひび割れが生じたが、飛散することはない。

他方、1.5万回往復時（中央部では6万回の繰返し荷重時）に、試験体の中央付近の台座モルタルの内側に、**図42**に示すような微細なひび割れ（0.1mm以下）が縦に生じているのを観察した。25万回往復時（中央部では100万回の繰返し荷重時）には、トラックタイヤ荷重ユニットが移動する範囲の全ての台座モルタルの内側に同様なひび割れを観察した。さらに試験体の中央付近の台座モルタルにおいては、トラックタイヤ荷重ユニットが通過する際、**図43**に示すように、アルミニウム床版の下フランジ下面と台座モルタル上面との間に肌隙が生じているのを観察した。しかし、台座モルタルの縦ひび割れおよびアルミニウム床版の下フランジ下面と台座モルタル上面との肌隙が疲労試験を遂行する上で問題になるようなものではなかった。



図42 台座モルタルの縦ひび割れ



図43 台座モルタル上面の肌隙

第5章 アルミニウム床版の疲労耐久性評価

5.1 アルミニウム床版の疲労照査

側辺現場継手の下添接板下面①-15の橋軸方向応力 σ_x 、摩擦攪拌接合部下面②-15の橋軸方向応力 σ_x および下フランジ下面③-4の橋軸直角方向応力 σ_y について、疲労試験開始前と疲労試験終了時の影響線を図44に示す。着目点①-15と②-15の直上をダブルタイヤの片方のタイヤが通過する。アルミニウム床版に生じる橋軸方向応力 σ_x および橋軸直角方向応力 σ_y は、測定された橋軸方向ひずみ ε_x および橋軸直角方向ひずみ ε_y を用いて次式より算出した。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}(\mu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (7)$$

ここに、 E ：アルミニウム合金のヤング係数(=70GPa)、 μ ：ポアソン比(=0.3)

下フランジ下面には単軸のひずみゲージを貼付したので、下フランジ下面③-4の橋軸直角方向応力 σ_y は次式より算出した。

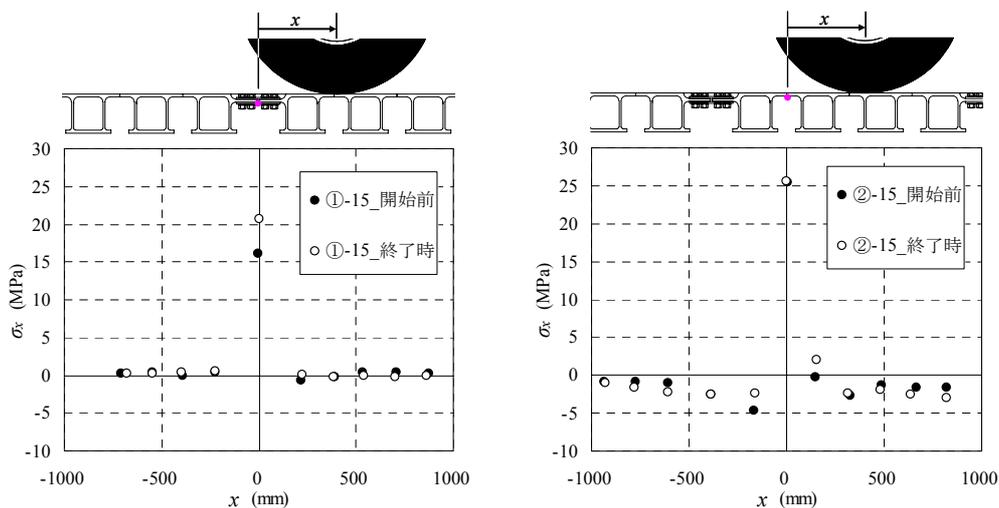
$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (8)$$

図44(a)から分るように、側辺現場継手の下添接板下面では、タイヤが着目点の直上に乗った時、疲労試験開始前16MPa、疲労試験終了時21MPaの引張応力が生じている。1万回往復ごとに実施した動的計測から得られた、下添接板下面の橋軸方向ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_x$ の推移を図45に示す。 $\Delta\varepsilon_x$ は、疲労試験開始から300万回前後まで漸増し、その後は一定となっている。 $\Delta\varepsilon_x$ の漸増は、側辺現場継手上面を平坦化するために使用したモルタルにひび割れが発生したことによるものと考えられる。

図44(b)から分るように、摩擦攪拌接合部下面では、疲労試験開始前と疲労試験終了時で応力の変化はほとんどなく、タイヤが着目点の直上に乗った時、25MPaの引張応力が生じている。タイヤが摩擦攪拌接合部に近づくと、摩擦攪拌接合部には小さな圧縮応力が生じ、タイヤが摩擦攪拌接合部の直上に乗ると引張応力に転じる。摩擦攪拌接合部下面に発生する応力は、アルミニウム床版の上板がタイヤを直接支持することによる局所的な面外変形によって起こされる板曲げ応力であり、アルミニウム床版の全体変形に起因するものではない²²⁾。したがって、5.3節で述べるように、台座モルタルのひび割れによってアルミニウム床版の下フランジの応力とたわみが増加しても、摩擦攪拌接合部下面に発生する応力はこの影響を受けず、疲労試験開始前と疲労試験終了時で応力の変化はなかったと考えられる。

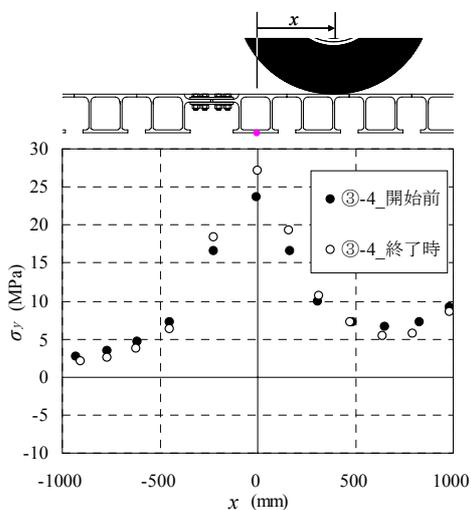
図44(c)から分るように、下フランジ下面では、タイヤが着目点の直上に乗ったとき、疲労試験開始前24MPa、疲労試験終了時27MPaの引張応力が生じている。図の右側で応力が

再度上昇し始めるのは、図の左側にある隣のタイヤが着目部に近づくためである。下フランジ下面の応力が疲労試験開始前より疲労試験終了時で増加した理由は、5.3節で述べるように、台座モルタルのひび割れにより、アルミニウム床版と鋼桁の連結度が低下したためと考えられる。



(a) 下添接板下面

(b) 摩擦攪拌接合部下面



(c) 下フランジ下面

図 44 アルミニウム床版各部の影響線

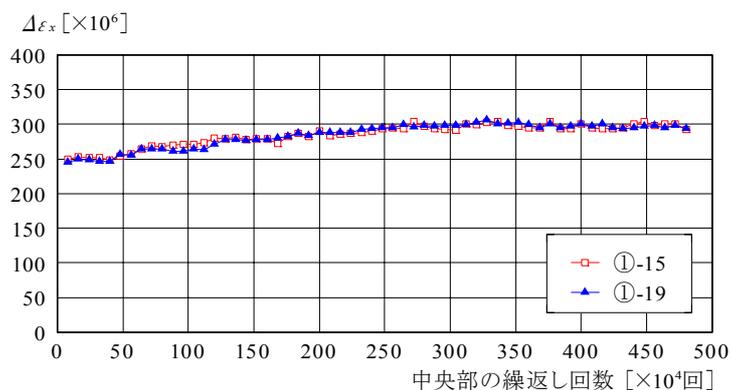


図 45 下添接板下面のひずみ範囲 $\Delta\epsilon_x$ の推移

影響線載荷で得られた各位置の最大応力，最小応力，応力範囲および応力比を表 12，アルミニウム合金 A6005C-T5 に対する S-N 曲線²³⁾を表 13，疲労試験終了時の発生応力と S-N 曲線の間接関係を図 46 に示す。表 13 および図 46 の S-N 曲線は，平均寿命を与える S-N 曲線を標準偏差の 2 倍ほど負方向に移動させた，短寿命を与える S-N 曲線であり，アルミニウム合金の腐食の影響も考慮されている。図 46 には，疲労試験終了時の中央部の繰返し回数 486.8 万回に対して応力範囲がプロットされている。S-N 曲線における疲労限度は，側辺現場継手の下添接板，摩擦攪拌接合部および下フランジでそれぞれ 80MPa，76MPa，79MPa であり，測定された応力範囲はその 1/2 より低い。したがって移動トラックタイヤ載荷試験において，側辺現場継手の下添接板，摩擦攪拌接合部および下フランジに疲労亀裂が発生しなかったと考えられる。

表 12 疲労試験前後の各部の応力

測定位置	下添接板 下面		摩擦攪拌接合部 下面		下フランジ 下面	
	σ_x		σ_x		σ_y	
測定時	開始前	終了時	開始前	終了時	開始前	終了時
最大応力 (MPa)	16.5	20.6	25.4	25.9	23.7	27.1
最小応力 (MPa)	-1.3	-0.5	-4.6	-3.1	0.0	0.0
応力範囲 (MPa)	17.8	21.1	30.0	29.0	23.7	27.1
応力比	-0.08	-0.02	-0.18	-0.12	0	0

表 13 S-N 曲線と疲労限度

(a) 母材

S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \alpha \left(\frac{10^{21.447-6.15R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.1 \leq R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \alpha \left(\frac{10^{21.685-8.54R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.5 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma = \alpha \left\{ \frac{225(1-R)}{1.1879-0.1879R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}}$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822-2.0822R}{2.3758-0.3758R}}$
疲労限度	
$-1 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{146(1-R)}{1.3244-0.6756R}$

α : 腐食の影響を受けない場合 1, 腐食の影響を受ける場合 0.716 $\Delta\sigma$ と $\Delta\sigma_{caf}$ の単位 : MPa

(b) 摩擦攪拌接合部

S-N 曲線	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma = \alpha \left(\frac{10^{20.486-6.38R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.1 \leq R \leq 0.5$	$\Delta\sigma = \alpha \left(\frac{10^{20.692-8.44R}}{N} \right)^{\frac{1}{7.25-2.16R}}$
$0.5 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma = \alpha \left\{ \frac{167(1-R)}{1.3089-0.3089R} \right\} \left(\frac{10^5}{N} \right)^{\frac{1}{m}}$ $m = \frac{0.8823}{\log \frac{4.0822-2.0822R}{2.3758-0.3758R}}$
疲労限度	
$-1 \leq R \leq 0.1$	$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{133(1-R)}{1.6786-0.3214R}$
$0.1 \leq R \leq 1$	$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{99(1-R)}{1.2966-0.7034R}$

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

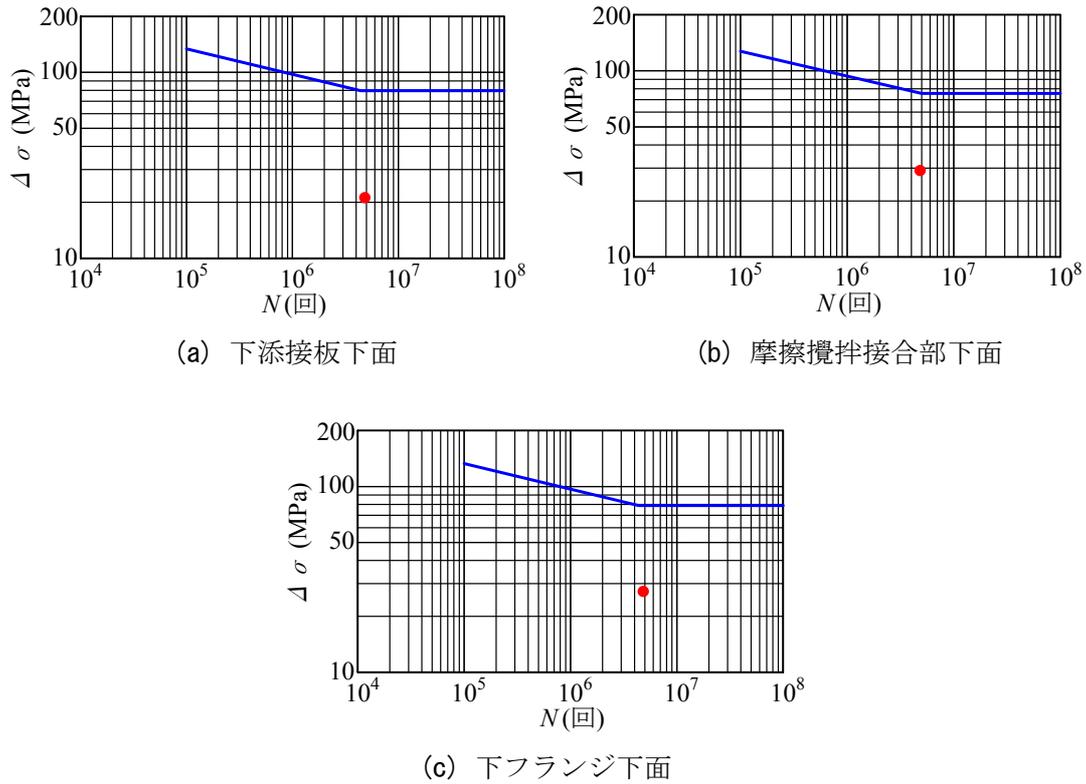


図 46 S-N 曲線と発生応力の関係

5.2 側辺現場継手の疲労照査

図 47 に示す鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験により、アルミニウム合金板にはフレットング疲労亀裂が発生することが明らかにされている^{9),24)}。この疲労試験で得られた S-N 関係を図 48 に示す。応力比は $R=0.1$ である。

図 48(a) に示すように、添接板のフレットング疲労に対する疲労強度は、荷重を 2 枚の添接板の総断面積で除して得られる添接板の公称応力範囲 $\Delta\sigma_2$ で表される。他方、図 48(b) に示すように、母材のフレットング疲労に対する疲労強度は、荷重を母材の断面積で除して得られる母材の公称応力範囲 $\Delta\sigma_1$ で表される。アルミニウム床版の側辺現場継手に対して、添接板の応力 σ_2 と母材の応力 σ_1 をそれぞれ次式で算定した。

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (9)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \cdot \frac{t_2}{t_1} \quad (10)$$

ここに、 σ_x : 添接板下面の橋軸方向応力、 σ_y : 下添接板下面の橋軸直角方向応力、 t_1 : 母材の板厚 (=15mm)、 t_2 : 添接板の総厚 (=20mm)

σ_1 、 σ_2 の計算値を表 14 に示す。タイヤがライン①の直上に乗ったとき、式(9)と(10)より算出される応力を最大応力とし、これを応力範囲と見なして図 48 にプロットしている。ア

アルミニウム床版の側辺現場継手の添接板と母材の応力範囲は、高力ボルト摩擦接合継手のS-N関係が与える疲労限度より低く、アルミニウム床版の側辺現場継手は十分な疲労強度を有していると考えられる。

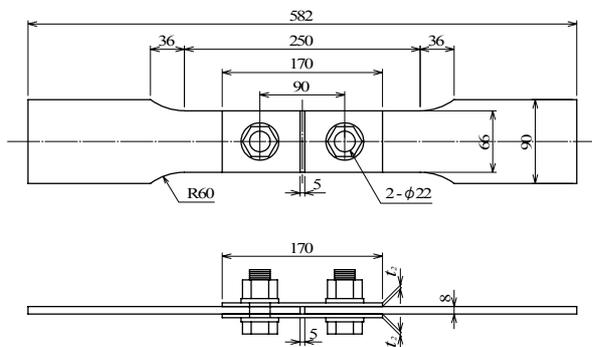


図 47 摩擦接合継手の疲労試験体

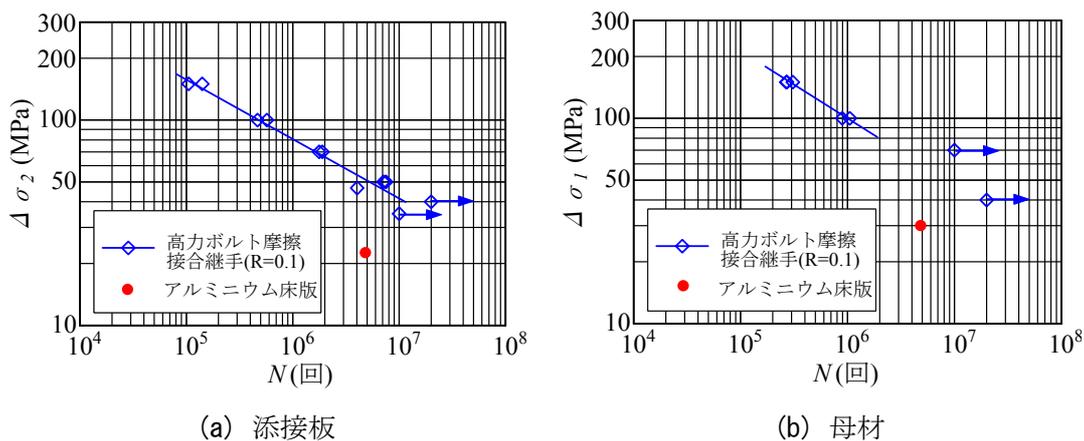


図 48 高力ボルト摩擦接合継手の S-N 関係と添接板に発生する応力

表 14 側辺現場継手に生じる応力 σ_2 と σ_1

	添接板 σ_2		母材 σ_1	
	開始前	終了時	開始前	終了時
測定時				
最大応力(MPa)	17.8	22.5	23.7	29.9
最小応力(MPa)	0	0	0	0
応力範囲(MPa)	17.8	22.5	23.7	29.9
応力比	0	0	0	0

5.3 下フランジの応力とたわみ

タイヤ 1 と 2 (図 37 参照) をライン③の閉断面直上に載荷した時の、下フランジ下面の橋軸直角方向応力 σ_y の分布を図 49、下フランジのたわみ分布を図 50 に示す。疲労試験終了時の σ_y は、疲労試験開始前よりも増加し、鋼桁で支持されている付近の下フランジ下面の応力が圧縮応力から引張応力に転じている。疲労試験終了時の下フランジのたわみも、疲労試験開始前より増加している。これは、図 42 に示した台座モルタルのひび割れにより、アルミニウム床版と鋼桁の連結度が低下したためと考えられる。

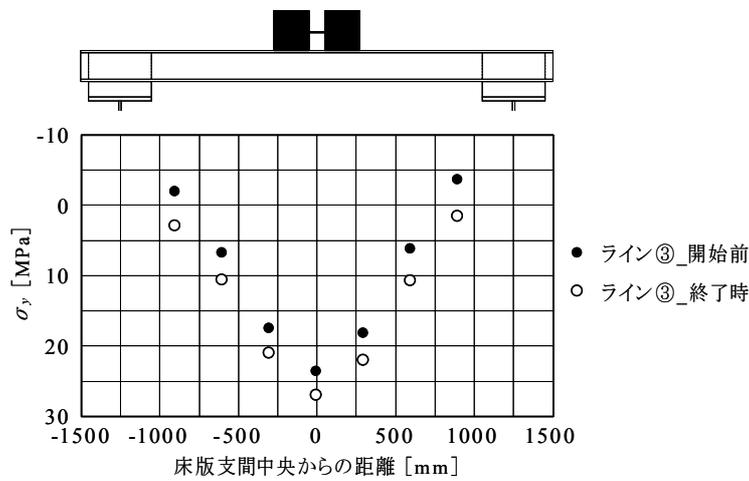


図 49 下フランジ下面の橋軸直角方向の応力分布

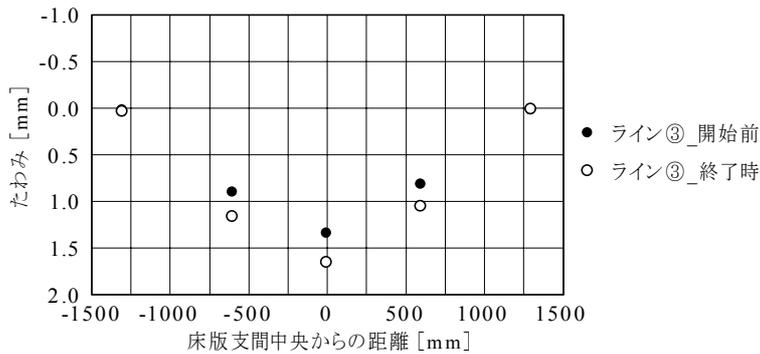


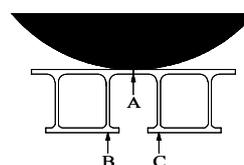
図 50 下フランジのたわみ分布

5.4 アルミニウム床版上板のたわみ

表 15 は、24.5 万回往復時、タイヤ 1 と 2 をアルミニウム床版のライン⑤（図 41 参照）の開断面中央の直上に載荷した場合に対する、同表の挿入図の点 A、B、C の位置のたわみの測定結果を示す。点 A、B、C は、アルミニウム床版の支間中央である。上フランジとウェブの交差点のたわみが下フランジとウェブの交差点のたわみと等しいと仮定すると、アルミニウム床版の面外たわみは 0.08mm となり、これはウェブ間隔 160mm に対して 1/2000 になる。

表 15 上板の面外たわみ

変位 (mm)			面外たわみ(mm)
A	B	C	$A - (B+C)/2$
1.44	1.31	1.41	0.08

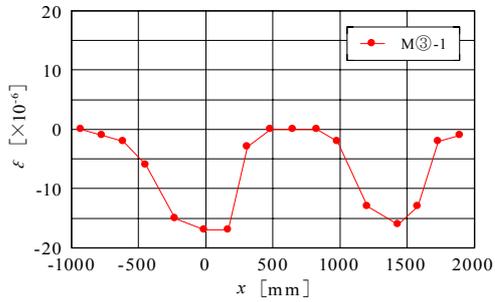


5.5 台座モルタルおよびスタッドに生じるひずみ

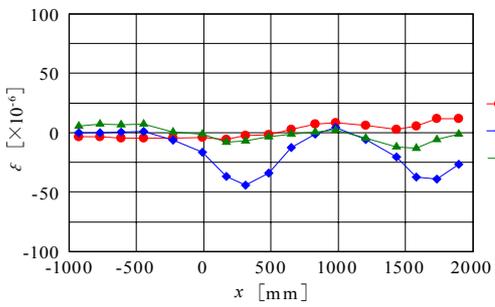
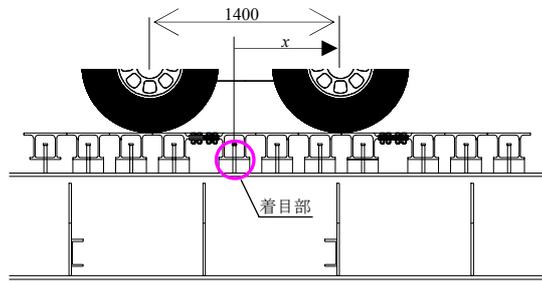
ライン③の台座モルタル M③-1（図 41 参照）の、疲労試験開始前のひずみ ε の影響線を図 51(a) に示す。台座モルタルには図 42 に示したひび割れが疲労試験の途中に発生し、ひずみゲージが断線したので、疲労試験終了時のひずみの影響線は与えられてない。台座モルタルには、最大で 17μ の圧縮ひずみが発生している。

台座モルタル M③のスタッドのひずみ ε の影響線を図 51(b) と (c) に示す。スタッドの軸中心に関して対称に貼られた 2 枚のひずみゲージの値から得られる軸ひずみ (2 枚のひずみゲージの値の平均値) および曲げひずみ (2 枚のひずみゲージの値の差を 2 で除した値) をプロットしている。疲労試験開始前、中央のスタッドに 45μ の圧縮の軸ひずみが生じ、内側および外側のスタッドの軸ひずみは小さい。そして内側、中央、外側のスタッドの曲げひずみも小さい。疲労試験終了時、中央のスタッドの圧縮の軸ひずみは 80μ になり、疲労試験開始前よりも大きくなっている。内側のスタッドには 35μ の圧縮および引張の軸ひずみが生じている。外側のスタッドには 25μ の引張の軸ひずみが生じている。さらに内側のスタッドには 60μ の曲げひずみが発生している。中央と外側のスタッドに生じる曲げひずみは小さい。スタッドのひずみが増加したのは、図 42 に示したひび割れが台座モルタルに発生したために、スタッドに流入する力が増えたためと考えられる。

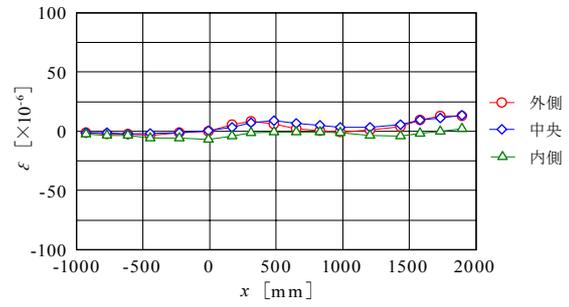
台座モルタルのひび割れによるスタッドのひずみの増加は、スタッドの疲労から問題となるような値ではない。しかし台座モルタルのひび割れは台座モルタル自身の劣化およびスタッドを腐食させる可能性があるので、繊維入りモルタルを使用するなどして、このひび割れを防止する工夫を考えなければならない。



(a) 台座モルタルの影響線

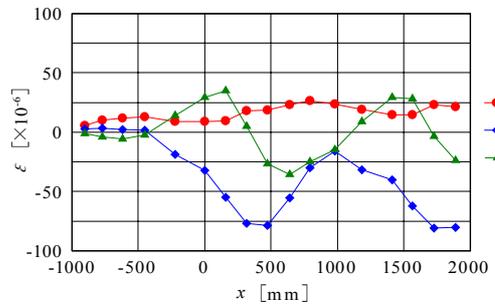


軸ひずみ

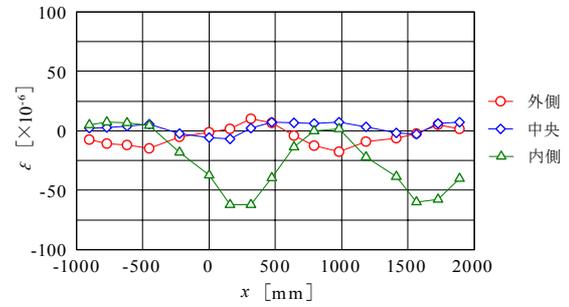


曲げひずみ

(b) スタッドの影響線 (疲労試験開始前)



軸ひずみ



曲げひずみ

(c) スタッドの影響線 (疲労試験終了時)

図 51 台座モルタルおよびスタッドの影響線

第 6 章 結論

本研究では、橋軸方向 7.05m、橋軸直角方向 3.0m の実物大レベルの開閉断面アルミニウム床版を製作し、同床版の移動トラックタイヤ載荷試験を行い、その疲労耐久性を明らかにした。主な結論を以下に示す。

- (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指針(案)⁵⁾に従って押出型材を両面摩擦攪拌接合することにより、アルミニウム床版を製作した。製作されたアルミニウム床版は、目視検査、超音波探傷試験、放射線透過試験、マクロ・ミクロ観察、引張試験および疲労試験について同指針に規定される品質判定基準を満足した。曲げ試験については、同指針で規定されるローラ曲げ試験法では雄型ジグに沿って試験片を曲げることができなかつたため巻き付け曲げ試験法により、万力で試験片を中央の軸に押さえながら曲げることににより、試験片を軸に沿って曲げることができた。巻き付け曲げ試験法によって曲げられた試験片に表面割れは発生しなかつた。
- (2) 138kN の荷重で 121.7 万回往復（アルミニウム床版の中央部では 486.8 万回の繰返し載荷）の移動トラックタイヤ載荷に対して、アルミニウム床版の母材、摩擦攪拌接合部および鋼製高力ボルト摩擦接合継手に疲労亀裂は観察されなかつた。
- (3) アルミニウム床版の母材、摩擦攪拌接合部および鋼製高力ボルト摩擦接合継手の各部位に発生する応力と S-N 曲線を比較することにより、各部位は十分な疲労耐久性を有していることが明らかにされた。
- (4) 1.5 万回往復でアルミニウム床版と鋼桁の連結部の台座モルタルに微細な縦ひび割れが発生した。台座モルタルの縦ひび割れは疲労試験を遂行する上で問題になるようなものではなかつたが、これは台座モルタル自身の劣化およびスタッドを腐食させる可能性がある。繊維入りモルタルを使用するなどの、ひび割れを防止する工夫が今後の課題として残された。

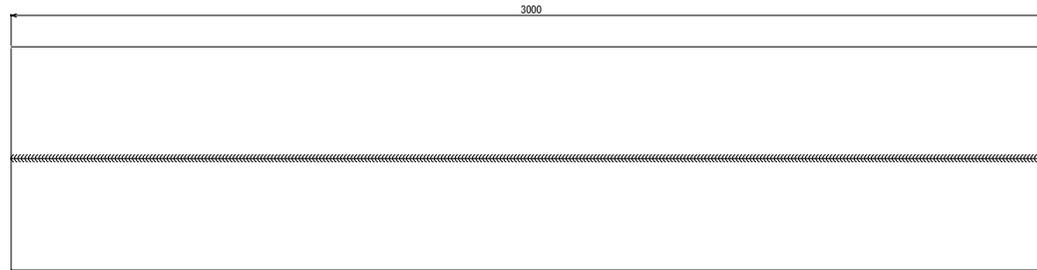
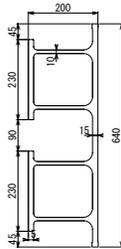
参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説， I 共通編Ⅱ鋼橋編， 2002.
- 2) 河合徳雄， 前島真二：鋼合成桁橋梁の床板取替えと主桁補強～乙津橋補強工事～， 川田技法， Vol.25， pp.54-59， 2006.
- 3) 大倉一郎， 萩澤亘保， 岩田節雄， 北村幸嗣：アルミニウム橋実現のための技術開発， 軽金属， 軽金属学会， 第 54 卷， 第 9 号， pp.380-387， 2004.
- 4) 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/ I -59， pp.255-266， 2002.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 大倉一郎， 萩澤亘保， 中原太樹， 岡田理， 山口進吾：アルミニウム床版と鋼主桁との連結部の静的および疲労挙動， 鋼構造年次論文報告集， 第 11 卷， pp.199-206， 2003.
- 8) 筒井将仁， 萩澤亘保， 大倉一郎：アルミニウム床版の摩擦接合継手の開発， 土木学会， 第 61 回年次学術講演会， No. I -365， pp.727-728， 2006.
- 9) 大倉一郎， 西田貴裕：アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性， ALST 研究レポート， No.8， 2009.
- 10) 大倉一郎， 筒井将仁：地覆定着のためのアルミニウム床版の引抜強度， ALST 研究レポート， No.4， 2008.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 大倉一郎， 原田祐樹， 萩澤亘保， 長尾隆史：道路橋用アルミニウム床版の適用支間長， ALST 研究レポート， No.9， 2009.
- 14) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造設計規準・同解説， 2003.
- 15) 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（第一次改訂試案）， 1998.
- 16) JIS Z 3145：頭付きスタッド溶接部の曲げ試験方法， 1981.
- 17) JIS Z 2248：金属材料曲げ試験方法， 2006.
- 18) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造製作要領 アルミニウム建築構造物製作工場認定規程および基準・同解説， pp.39-50， 2003.

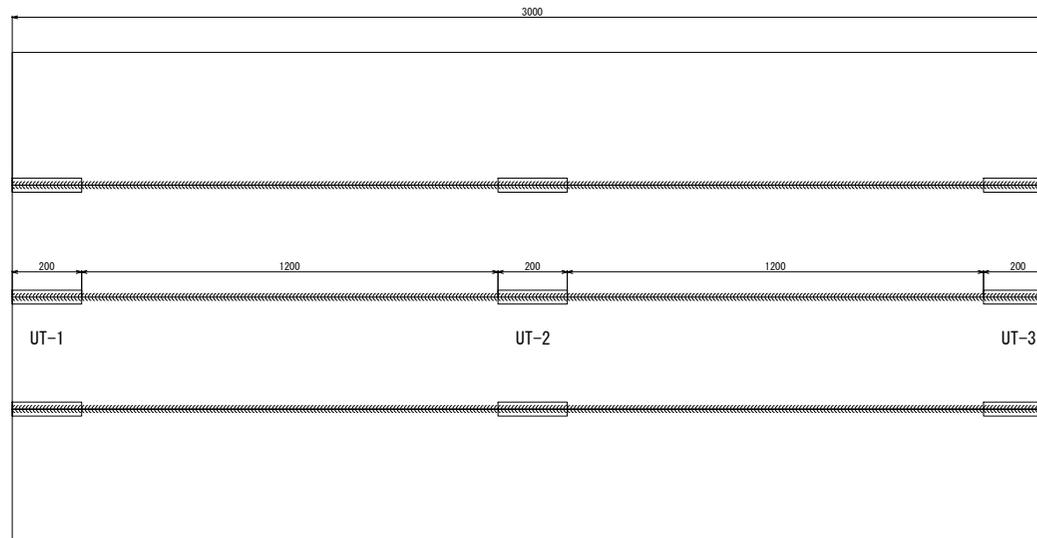
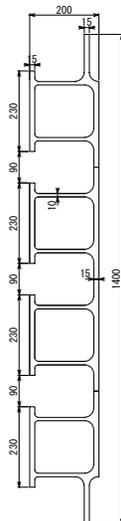
- 19) 大倉一郎, 萩澤亘保, 長尾隆史: アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.827-837, 2010.
- 20) JHS 312: 無収縮モルタル品質管理試験方法, 1999.
- 21) JIS H 4100: アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材, 2006.
- 22) 大倉一郎, 石川敏之, 筒井将仁, 大澤章吾: トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.655-666, 2007.
- 23) 大倉一郎, 牧山大祐, 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.
- 24) 西田貴裕, 大倉一郎: アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性, 第 64 回年次学術講演会, No.I-179, pp.357-358, 2009.

付録 A 摩擦攪拌接合部の超音波探傷試験結果

超音波探傷試験範囲
〈施工試験〉（全線）



〈製品接合部検査〉



FSW製品 履歴管理/検査記録表

製品名称		記号	A										B										C									
		素材形番	EG348171										EG368011										EG36802									
床版 トラックタイヤ載荷試験体		オーダーNo.	GA1093-55										GA1093-44										GA1093-39									
工番	3957	長さ	3,040										3,040										3,040									
加工日		子番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		在庫数																														
初期設定条件記録		※上記オーダー以外の素材を使用する場合、特記事項に明記する事。																														

接合日 超音波探傷検査 検査者 古俣

接合No.	時間	気温	曲げ	マクロ	引張	子番/記号と子番を記入	日/直	検査日	全線	接合特記事項	備考
1 3957①	10:40	25°C				A09 B06	6/23 朝	6/26	合	施工試験体	
	13:40	24°C					6/23 朝				

接合No.	時間	気温	曲げ	マクロ	引張	子番/記号と子番を記入	日/直	検査日	UT1	UT2	UT3	接合特記事項	備考
2 3957③	23:00	22°C				B01 C01	6/23 夜	7/3	合	合	合		
	23:00	21°C					6/25 夜						
3 3957④	2:40	22°C				B01 C01	6/23 夜	7/3	合	合	合		
	22:15	22°C					6/25 夜						
4 3957⑤	3:40	22°C				B03 C01	6/23 夜	7/4	合	合	合		
	21:35	22°C					6/25 夜						
5 3957⑥	5:30	22°C				B03 C01	6/23 夜	7/4	合	合	合		
	18:05	23°C					6/25 朝						
6 3957⑦	6:25	21°C				B05 C01	6/23 夜	7/4	合	合	合		
	17:20	23°C					6/25 朝						
7 3957⑧	7:40	22°C				B05 C01	6/27 夜	7/4	合	合	合		
	16:20	23°C					6/25 朝						
8 3957⑨	9:30	22°C				B04 C01	6/24 朝	7/4	合	合	合		
	14:45	24°C					6/25 朝						
9 3957⑩	11:10	24°C				B04 C01	6/24 朝	7/4	合	合	合		
	13:20	24°C					6/25 朝						
10													

条件MC3.5で再設定済み

注：接合 No.3957①は施工試験，接合 No.3957③～⑩は製品接合部検査

FSW製品 履歴管理/検査記録表

製品名称		記号	A					B					C																			
		素材形番	EG348171					EG368011					EG36802																			
床版 トラックタイヤ載荷試験体		オーダーNo.	GA1093-55					GA1093-44					GA1093-39																			
工番	3957	長さ	3,040					3,040					3,040																			
加工日		子番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		入庫数																														

初期設定条件記録

※上記オーダー以外の素材を使用する場合、特記事項に明記する事。

接合No.	時間	気温	曲げ	マクロ	引張	子番/記号と子番を記入	接合日		超音波探傷検査			検査者 古俣	
							日/直	検査日	UT1	UT2	UT3	接合特記事項	備考
1	3957⑪	13:00	24			B02 C01	6/24 朝	7/4	合	合	合		
		12:25	24				6/25 朝						
2	3957⑫	14:00	24°C			B02 C01	6/24 朝	7/4	合	合	合		
		0:10	21°C				6/24 夜						
3	3957⑬	10:10	24°C			A09 3957④	6/26 朝	7/3	合	合	合		
		13:45	26°C				6/28 朝						
4	3957⑭	13:00	24°C			A10 3957③	6/26 朝	7/3	合	合	合		
		12:40	26°C				6/28 朝						
5	3957⑮	15:30	24°C			A10 3957⑤	6/26 朝	7/4	合	合	合		
		10:35	25°C				6/28 朝						
6	3957⑯	17:00	24°C			A11 3957⑥	6/26 朝	7/4	合	合	合		
		9:20	24°C				6/28 朝						
7	3957⑰	18:30	23°C			A11 3957⑦	6/26 朝	7/4	合	合	合		
		7:30	22°C				6/27 夜						
8	3957⑱	22:50	22°C			A1 3957⑧	6/26 夜	7/4	合	合	合		
		3:50	20°C				6/27 夜						
9	3957⑲	1:00	22			A1 3957⑪	6/26 夜	7/4	合	合	合		
		1:20	21				6/27 夜						
10	3957⑳	2:10	22			A07 3957⑫	6/26 夜	7/4	合	合	合		
		0:15	22				6/27 夜						

条件MC3.5で再設定済み

注：接合 No.3957①は施工試験，接合 No.3957③～⑫は製品接合部検査

FSW製品 履歴管理/検査記録表

製品名称		記号	A										B										C																
		素材形番	EG348171										EG368011										EG36802																
床版 トラックタイヤ載荷試験体		オーダーNo.	GA1093-55										GA1093-44										GA1093-39																
工番	3957	長さ	3,040										3,040										3,040																
加工日		子番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
		在庫数																																					
初期設定条件記録		※上記オーダー以外の素材を使用する場合、特記事項に明記する事。																																					

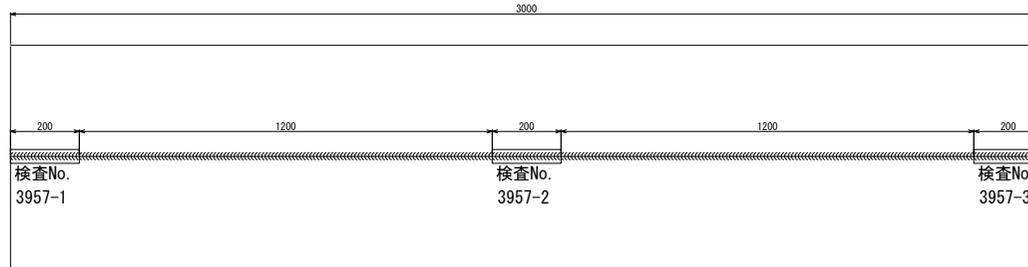
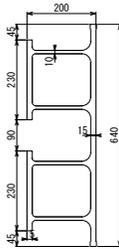
		接合日										超音波探傷検査			検査者 古俣	
接合No.	時間	気温	曲げ	マクロ	引張	子番/記号と子番を記入		日/直	検査日	UT1	UT2	UT3	接合特記事項	備考		
1	3957 21	3:50	21				A07 3957⑨	6/26 夜	7/4	合	合	合				
		15:45	24					6/27 朝								
2	3957 22	5:50	21°C				A08 3957⑩	6/26 夜	7/4	合	合	合				
		9:30	23°C					6/27 朝								
3	3957 23	0:20	21°C				3957⑳ 3957⑲	6/30 夜	7/4	合	合	合				
		15:05	26°C					7/2 朝								
4	3957 24	7:35	20°C				3957⑯ 3957⑮	6/30 夜	7/4	合	合	合				
		18:20	26°C					7/2 朝								
5	3957 25	16:45	24°C				3957⑱ 3957⑰	7/1 朝	7/4	合	合	合				
		16:45	27°C					7/2 朝								
6	3957 26	7:30	20°C				3957⑭ 3957⑬	7/1 夜	7/3	合	合	合				
		12:25	27°C					7/2 朝								
7																
8																
9																
10																

条件MC3.5で再設定済み

注：接合 No.3957①は施工試験，接合 No.3957③～⑥は製品接合部検査

付録 B 摩擦攪拌接合部の放射線透過試験結果

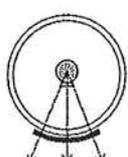
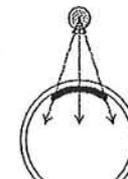
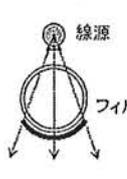
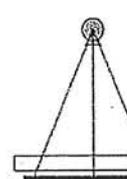
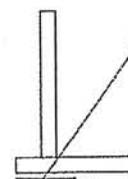
放射線透過試験範囲
〈施工試験〉



検査報告書

工事番号	_____										
工事名	FSW品非破壊試験										
最終客先	日軽新潟株式会社										殿
	御担当者：古俣										殿
施工者											殿
	御担当者：										殿
検査依頼者	日軽新潟株式会社										殿
	御担当者：古俣										殿
実施日(期間)	2008年6月24日										
実施場所	新潟検査工業株式会社工場内										
検査対象物	品番：3957-1	サイズ L3000×t15									
	材質：アルミニウム	数量：3									
検査の目的	<input checked="" type="checkbox"/> 溶接時検査	<input type="checkbox"/> 製造時検査	<input type="checkbox"/> 保守検査	<input type="checkbox"/> 施工試験							
	<input type="checkbox"/> 補修時検査	<input type="checkbox"/> 素材検査	<input type="checkbox"/> 調査	<input type="checkbox"/>							
適用法規 ・基準	<input type="checkbox"/> 消防法	<input type="checkbox"/> ガス事業法	<input type="checkbox"/> 圧力容器構造規格	<input type="checkbox"/>							
	<input type="checkbox"/> 電気事業法	<input type="checkbox"/> 高圧ガス保安法	<input type="checkbox"/> ボイラー構造規格	<input type="checkbox"/>							
試験種目	<input checked="" type="checkbox"/> 放射線透過試験	<input type="checkbox"/> 目視・外観試験	<input type="checkbox"/> 沈下測定	<input type="checkbox"/> 機械試験(引張り)							
	<input type="checkbox"/> 超音波探傷試験	<input type="checkbox"/> 真空漏洩試験	<input type="checkbox"/> 金属組織試験(マイクロ)	<input type="checkbox"/> 機械試験(曲げ)							
	<input type="checkbox"/> 磁粉探傷試験	<input type="checkbox"/> 脚長測定	<input type="checkbox"/> 金属組織試験(マクロ)	<input type="checkbox"/> 機械試験(シャルピー衝撃)							
	<input type="checkbox"/> 浸透探傷試験	<input type="checkbox"/> 角度測定	<input type="checkbox"/> 微加圧試験(地下タンク)	<input type="checkbox"/>							
	<input type="checkbox"/> 超音波厚さ測定	<input type="checkbox"/> 底板形状測定	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>							
検査技術者		氏名	保有資格								
			JIS Z2305(NDIS0601)				個人番号	その他			
	検査責任者	椎谷 浩	RT-3	UT-3	MT-2	PT-2	P00154974	X,γ主任	WES-2	鉄骨UT	圧接UT
	作業責任者	野上 賢次郎	RT-2	—	MT-2	PT-2	P00543880	X線主任			
	検査員										
	及び 作業員										
検査結果	合格										
特記事項											

放射線透過試験(RT) 報告書

工事番号						
工事名	FSW品非破壊試験					
試験条件	適用規格	<input type="checkbox"/> 適用法規・基準による <input type="checkbox"/> JIS Z3104(1995) <input type="checkbox"/> JIS Z3106(2001) <input checked="" type="checkbox"/> JIS Z3105(2003)				
	判定基準	<input type="checkbox"/> 適用法規・基準による <input checked="" type="checkbox"/> 1類以上 <input type="checkbox"/> 2類以上 <input type="checkbox"/> 1種・4種:2類以上、2種:1類以上				
	試験範囲	撮影箇所数: 3 箇所	撮影枚数: 3 枚	<input type="checkbox"/> 全線・全周 <input checked="" type="checkbox"/> 抜取り (枚 / 箇所)		
	試験時期	<input checked="" type="checkbox"/> 溶接完了後 <input type="checkbox"/> 初層溶接後 <input type="checkbox"/> 点検時 <input type="checkbox"/> 素材時 <input type="checkbox"/> 溶接完了24時間後				
	線源・感光材料	線源: X線	フィルム: フジX100	増感紙: 鉛箔増感紙	サイズ: 3・1/3×12インチ	
	使用装置	管理番号	RX105			
		形式	RIX-200NM			
		製造者	トーレック			
		定格	200Kvp 3mA			
		焦点寸法	1.5×1.5mm			
		定期点検日	2008/1/9			
	露出条件(X線)	管電圧: 115 Kvp	露出時間: 30 SEC			
	露出条件(γ線)	強さ: ~ GBq	露出時間: ~ SEC	放射性同位元素の種類:		
	透過度計・階調計	<input type="checkbox"/> F02 <input type="checkbox"/> F04 <input type="checkbox"/> F08 <input type="checkbox"/> F16 <input type="checkbox"/> F020 <input type="checkbox"/> F025 <input type="checkbox"/> F032 <input type="checkbox"/> F040 <input checked="" type="checkbox"/> 15形 <input type="checkbox"/> 20形 <input type="checkbox"/> 25形				
		<input type="checkbox"/> S01 <input type="checkbox"/> S02 <input type="checkbox"/> S04 <input type="checkbox"/> S08 <input type="checkbox"/> A02 <input checked="" type="checkbox"/> A04 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> I形 <input type="checkbox"/> II形 <input type="checkbox"/>				
撮影配置	L1+L2 (FFD): 600 mm	L3: 220 mm (~ 分割)				
	L2: <input checked="" type="checkbox"/> 板厚+1 <input type="checkbox"/> 管径+5 mm	透過度計の配置: <input type="checkbox"/> 線源側 <input checked="" type="checkbox"/> フィルム側 <input type="checkbox"/> 使用せず				
溶接継手・撮影方法	<input type="checkbox"/> 鋼管の円周溶接継手(下記) <input checked="" type="checkbox"/> 鋼板の突合せ溶接継手(F) <input type="checkbox"/> 鋼板のT溶接継手(T)					
	<input type="checkbox"/> 内部線源撮影法(IS) <input type="checkbox"/> 内部フィルム撮影法(IF) <input type="checkbox"/> 二重壁片面撮影法(WS) <input type="checkbox"/> 二重壁両面撮影法(WW)					
現像条件	現像方法: 自動現像機	現像温度: 30 °C	現像液: スーパードール			
	現像器: FIP4000 (FUJI)	現像時間: 自現機による	定着液: スーパーフィックス			
像質	<input checked="" type="checkbox"/> A級 <input type="checkbox"/> B級 <input type="checkbox"/> P1級 <input type="checkbox"/> P2級 <input type="checkbox"/> F級 <input type="checkbox"/> 普通級 <input type="checkbox"/> 特級 <input type="checkbox"/>					
必要条件の確認	観察器の種類: <input checked="" type="checkbox"/> D35形 <input type="checkbox"/> D30形 <input type="checkbox"/>		観察条件: 暗所及び固定マスク使用			
	試験部の濃度: 1.3 ~ 4.0		階調計の値: <input checked="" type="checkbox"/> 合 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 適用外 <input type="checkbox"/> 一部適用外			
	透過写真の合否: <input checked="" type="checkbox"/> 合 <input type="checkbox"/> 否		識別最小線径: <input checked="" type="checkbox"/> 合 <input type="checkbox"/> 否 <input type="checkbox"/> 適用外 <input type="checkbox"/> 一部適用外			
試験結果	合格 (詳細は、試験成績書参照)					
特記事項 (試験位置図等)						
溶接継手・撮影配置						
<input type="checkbox"/> 内部線源撮影法 (IS) 	<input type="checkbox"/> 内部フィルム撮影法 (IF) 	<input type="checkbox"/> 二重壁片面撮影法 (WS) 	<input type="checkbox"/> 二重壁両面撮影法 (WW) 	<input checked="" type="checkbox"/> 鋼板の突合せ溶接継手 (F) 	<input type="checkbox"/> 鋼板のT溶接継手 (T) 	
フィルム紙に記載の記号の説明	Cr : 割れ(クラック) IP : 溶込み不良 LF : 融合不良	SI : スラグ巻き込み P : パイプ BH : ブローホール	T : タングステン巻き込み UC : アンダーカット 凹 : 凹み			

放射線透過試験 成績書

FSW品非破壊試験

	フィルムマーク		板厚 (mm)	撮影日	分類結果							総合 分類	判定	撮影 方法	備考
					無	1種	4種	共存	2種	混在	3種				
1	3957-1	No.-1	15	6/24	1							1	合格	F	
2	3957-1	No.-2	↓	↓	1							1	合格	↓	
3	3957-1	No.-3	↓	↓	1							1	合格	↓	
4	-----														
5	-----														
6	-----														
7	-----														
8	-----														
9	-----														
10	-----														
11	-----														
12	-----														
13	-----														
14	-----														
15	-----														
16	-----														
17	-----														
18	-----														
19	-----														
20	-----														
21	-----														
22	-----														
23	-----														
24	-----														
25	-----														
26	-----														
27	-----														
28	-----														
29	-----														
30	-----														
31	-----														
32	-----														
33	-----														
34	-----														
35	-----														
36	-----														