

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

Evaluation of fatigue-durability of aluminum deck by movable truck-tires loading test

大倉一郎*, 長尾隆史**, 萩澤亘保***
 Ichiro Okura, Takashi Nagao and Nobuyasu Hagusawa

* 工博, 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)

** 工修, 日本軽金属(株) グループ技術センター (〒421-3291 静岡市清水区蒲原 1-34-1)

*** 工修, 日本軽金属(株) グループ技術センター (〒421-3291 静岡市清水区蒲原 1-34-1)

A movable truck-tires loading test is conducted for a full-scale aluminum deck fabricated by the friction stir welding to evaluate its fatigue-durability. Fatigue cracks are not observed in the aluminum deck for 1.217 million round-trips of the movable truck-tires loading machine loaded at 138 kN. The comparison of the stresses produced in the base material of the aluminum deck, the friction stir welded joints and the friction joints by high-strength steel bolts with the respective S-N curves shows that each part has a sufficient fatigue-durability.

Key Words: aluminum deck, fatigue-durability, movable truck-tires loading test

キーワード: アルミニウム床版, 疲労耐久性, 移動トラックタイヤ載荷試験

1. はじめに

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ている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なされてきた. 当初, 押出形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発明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

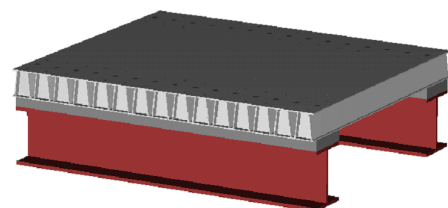


図-1 閉断面アルミニウム床版

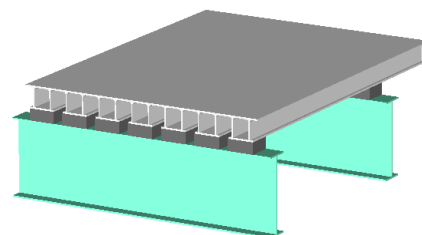


図-2 開断面アルミニウム床版

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⁾、摩擦撹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),14)}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。

2. 試験体

移動トラックタイヤ載荷試験に使用した試験体を図-3 に示す。橋軸方向 7.05m、橋軸直角方向 3m 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。

図-4 に示すように、アルミニウム床版は、床版形材および鋼製高力ボルト摩擦接合継手用の側辺接合形材の 2 種類の押出形材から構成されている。前者は過去の研究⁹⁾で開発された形材であり、上フランジと下フラン

ジは、衝撃係数 0.4 を考慮した T 荷重が橋軸直角方向に可能な限り載荷された場合に対して、発生応力が許容応力を超えないように設計されている。後者の側辺接合形材は本研究で新たに設計された形材であり、ボルトの頭が上面から突出しないように片側の上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載荷試験で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トラックタイヤ載荷ユニット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、舗装を基層まで打ち換えする際のはつり作業の施工性を考慮し、この側辺接合形材が使用される。

図-5 に示すように、2 本の床版形材の両側に、側辺接合形材を 1 本ずつ配置し、形材同士を摩擦撹拌接合で連結することにより、長さが 1400mm の床版ユニットを製作した。アルミニウム合金土木構造物の摩擦撹拌接合部の品質検査指針(案)⁵⁾に従って、摩擦撹拌接合部に対して両面摩擦撹拌接合を適用した。

他方、図-3 の鋼桁には、後述のアルミニウム床版を

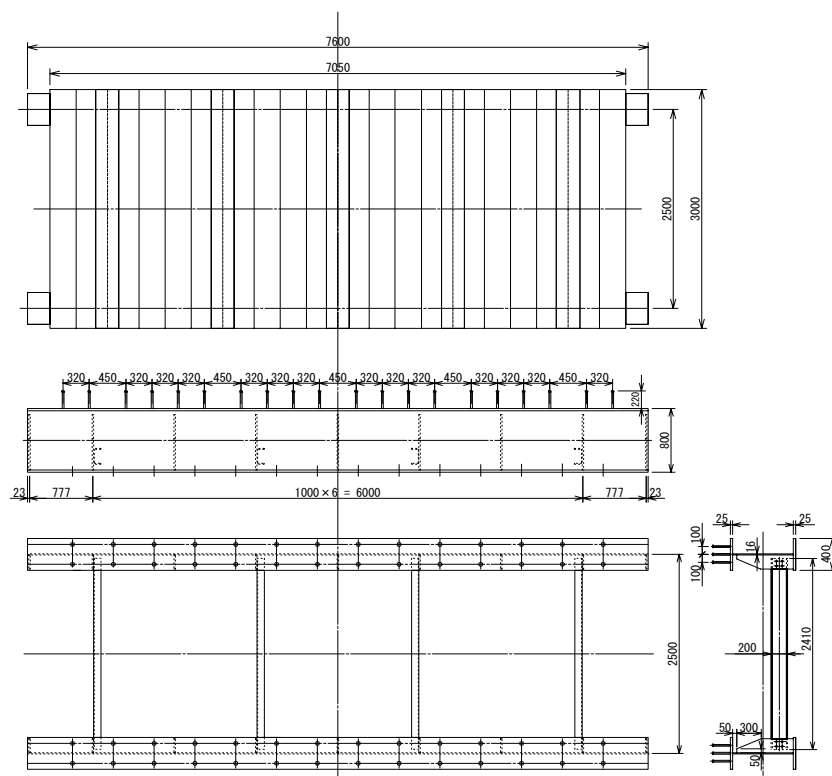
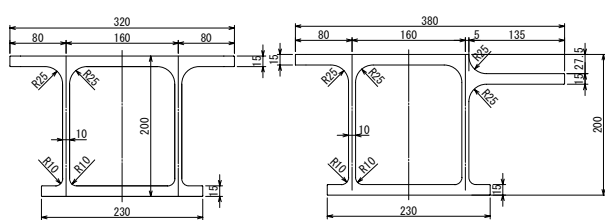


図-3 試験体



(a) 床版形材

(b) 側辺接合形材

図-4 形材の断面形状

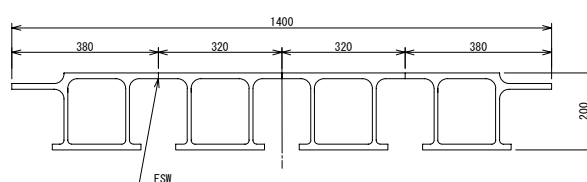


図-5 床版ユニット

鋼桁に連結するために使用する $\phi 22 \times 220\text{mm}$ の頭付き鋼製スタッドが、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されている。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。

床版ユニットおよび鋼桁を製作した後、図-6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。

鋼製高力ボルト摩擦接合による側辺継手を図-7に示す。アルミニウム合金と鋼の接触腐食を防ぐためにフッ素樹脂コートされた鋼製高力ボルトを使用した。ボルト本数は、摩擦攪拌接合部の全強に対して必要とされる本数の1.7倍の本数とした。添接板は、その総厚が母材の板厚以上の型材を選んだ。過去の研究¹⁵⁾に基づいて、添接板の摩擦面に $30 \sim 40 \mu\text{m}$ のブラスト処理が施されている。M20 (F10T)の鋼製高力ボルトに設計ボルト軸力165kNの1割増しの182kNの初期導入軸力を与えた。

側辺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-8に示す。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」¹⁶⁾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設置した。その後、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。最後に、側辺継手の凹部にエポキシ樹脂系の接着剤を塗布し、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により補修した。

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¹⁷⁾を表-1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¹⁷⁾を表-2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-3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。



図-6 アルミニウム床版の位置決め

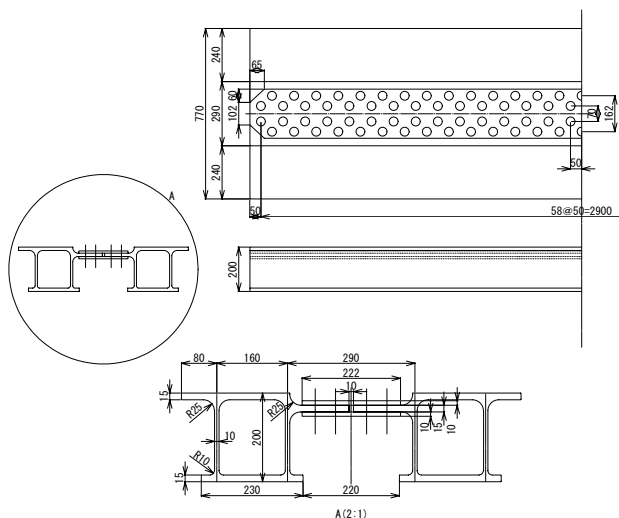


図-7 側辺継手

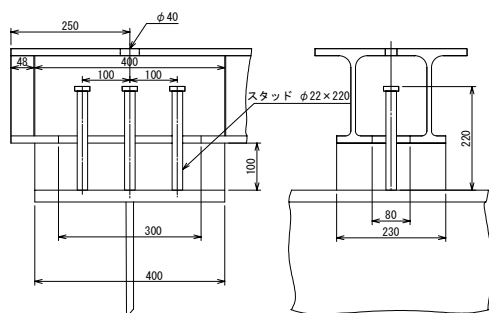
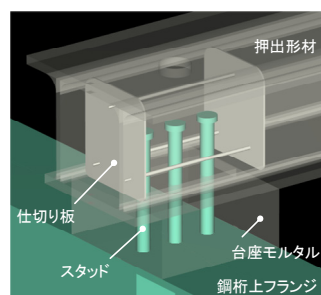


図-8 アルミニウム床版と鋼桁の連結部



表－1 押出型材の化学成分

押出型材	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
側辺接合型材	0.66	0.19	0.34	0.01	1.0	0.08	0.01	0.02
添接板型材	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－2 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
側辺接合型材	314	262	21
添接板型材	308	287	19
JIS 規格値	265 以上	245 以上	10 以上

表－3 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	—

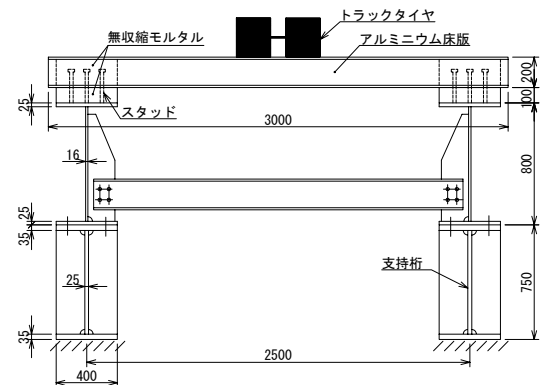
3. 移動トラックタイヤ載荷試験

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（㈱高速道路総合技術研究所所有）を用いて行なった。図－9 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。

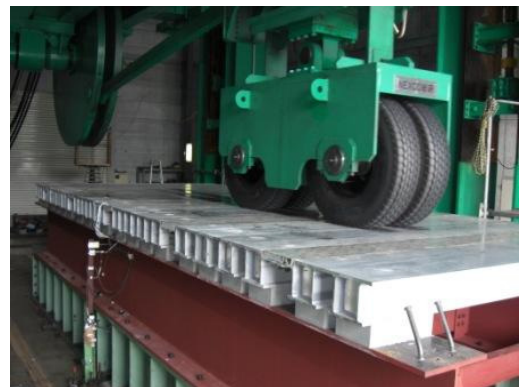
試験状況を図－10 に示す。トラックタイヤ載荷ユニットは、実際の大型トラックの後輪 2 軸の片側を模して、ダブルタイヤのタンデム軸配置（軸間隔 1400mm）である。トラックタイヤ載荷ユニットの移動距離は 3000mm である。図－11 に示す黒の四角形の部分はアルミニウム床版に対するタイヤの接地位置を表し、左の 4 つはトラックタイヤ載荷ユニットが左端に移動した時、右の 4 つはそれが右端に移動した時の接地位置である。トラックタイヤ載荷ユニットが N 回往復すると、左右 1400mm の走行範囲で $2N$ 回、中央部 1600mm の走行範囲で $4N$ 回の繰り返し回数になる。

載荷条件を表－4 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－11 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。

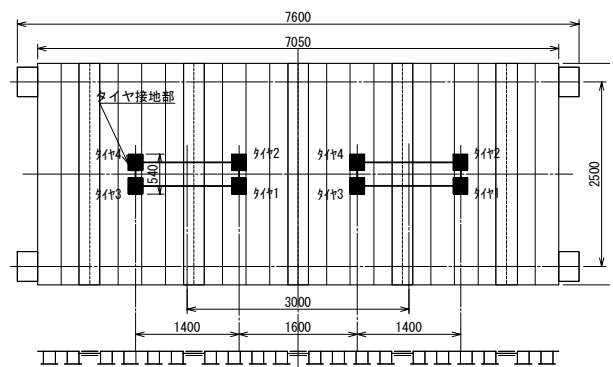
疲労試験の開始前と終了時に、タイヤの接地形状および空気圧の測定を行った。タイヤの接地形状の測定には、FUJIFILM 社製の極超低圧用プレスケールを用いた。タイヤとアルミニウム床版の間にプレスケールを設置した後、138kN まで静的に載荷し、除荷後に変色した部分が、タイヤがアルミニウム床版に接触した跡である。疲労試験開始前のタイヤの接地形状の一例を図－12 に示す。タイヤの接地形状は樽形の形状をしている。疲労試



図－9 設置された試験体



図－10 試験状況



図－11 トラックタイヤ載荷ユニットの走行範囲

表-4 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

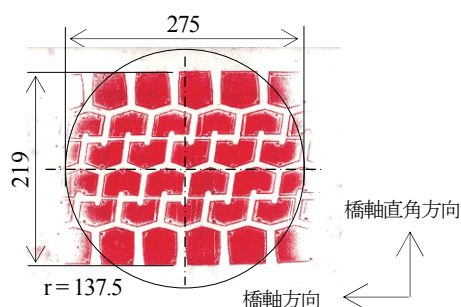
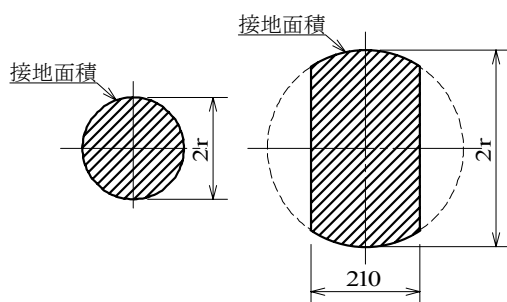


図-12 タイヤ1の接地形状 (疲労試験開始前)



(a) 円形

(b) 楕円形

図-13 タイヤの接地半径

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。

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¹⁸⁾。

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

$$r = \frac{1000P_1}{487.5(\alpha_3 P_1 + \alpha_4)} \quad (P_{1cr} \leq P_1 \leq 50\text{kN}) \quad (2)$$

ここに、図-13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楕円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 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 および臨界荷重 P_{1cr} の値を表-5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(2)より、アルミニウム床版の開

表-5 係数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ および臨界荷重 P_{1cr}

	開断面上载荷時	閉断面上载荷時
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-6 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



図-14 台座モルタルのひび割れ

断面上载荷時および閉断面上载荷時に対する接地半径 r 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(2)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-6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から若干低下した。

载荷速度15.5rpmで合計121.7万回往復の繰返し载荷（中央部では486.8万回の繰返し载荷）を行った。この間、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、飛散することはなかった。

他方、1.5万回往復時（中央部では6万回の繰返し载荷時）に、試験体の中央付近の台座モルタルの内側に、図-14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100万回の繰返し载荷時）には、トラックタイヤ载荷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、トラックタイヤ载荷ユニットが通過する際、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-15に示すように、試験体中央の側辺継手を中心としてその右側の部分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の測定位置は、側辺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）、下フランジ下面（ライン③、④）である。台座モルタルとスタッドのひずみは、ライン③と④の支持部である。たわみはライン③と④の下フランジ下面である。

4. アルミニウム床版の疲労耐久性評価

4.1 アルミニウム床版の疲労照査

側辺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-16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。

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y) \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} (\mu \varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (4)$$

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。

$$\sigma_y = E \varepsilon_y \quad (5)$$

図-16(a)から分るように、側辺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-17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-16(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

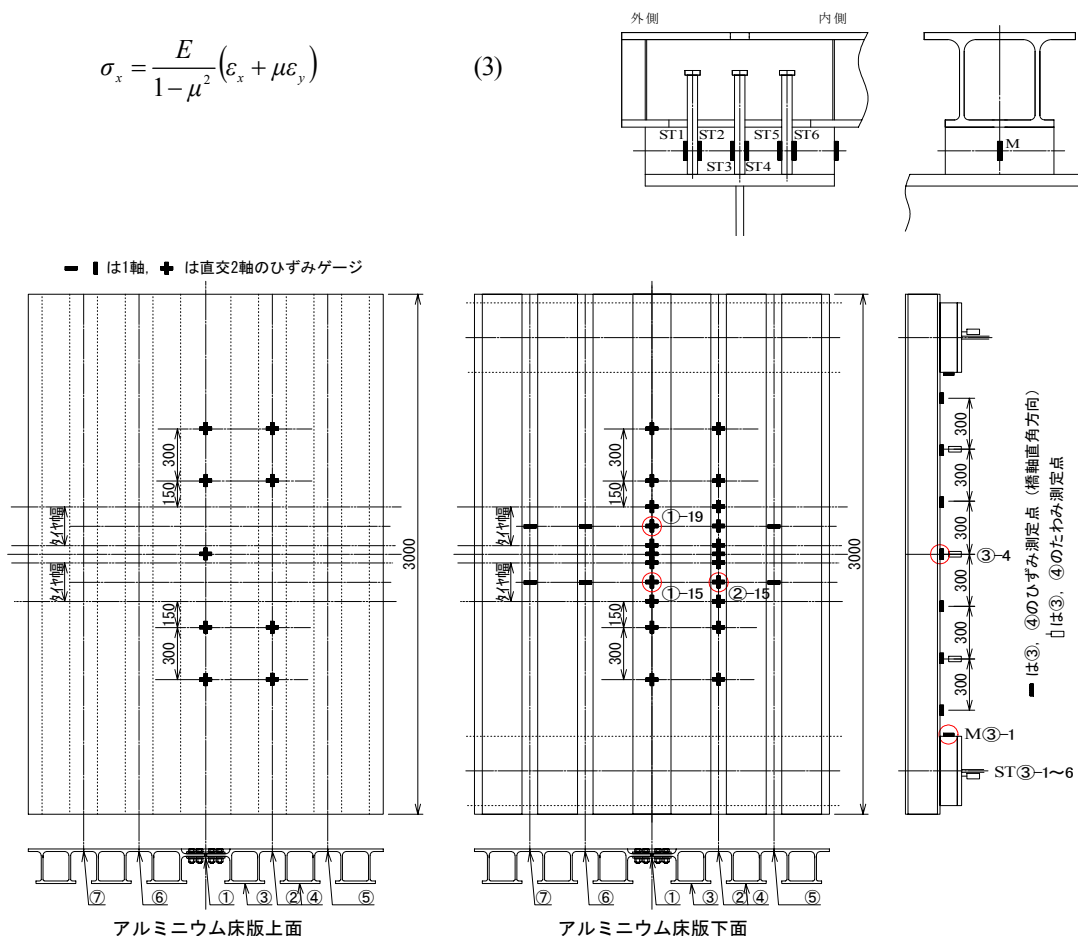
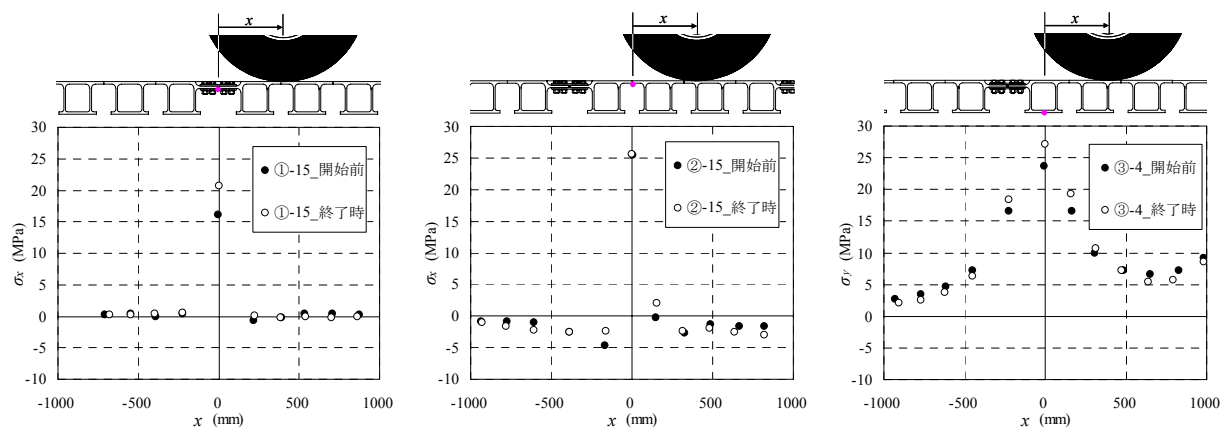


図-15 アルミニウム床版、スタッドおよび台座モルタルのひずみと変位の測定位置



(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-16 アルミニウム床版各部の影響線

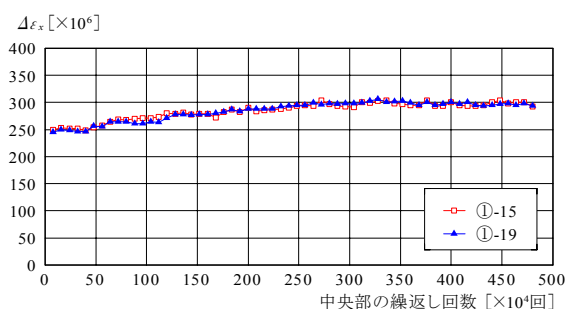
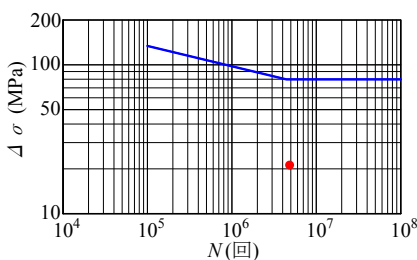


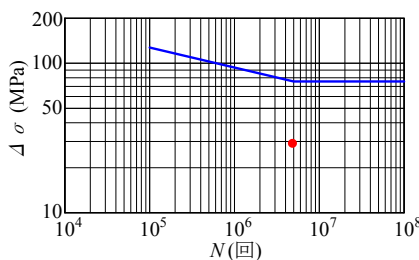
図-17 下添接板下面のひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_x$ の推移

表-7 疲労試験開始前と終了時の各位置の応力

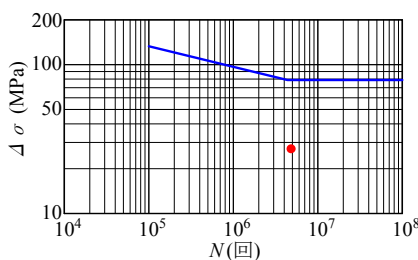
測定位置	下添接板 下面		摩擦攪拌接合部 下面		下フランジ 下面	
応力	σ_x		σ_x		σ_y	
測定時	開始前	終了時	開始前	終了時	開始前	終了時
最大応力 (MPa)	16.5	20.6	25.4	25.9	23.7	27.1
最小応力 (MPa)	-1.3	-0.5	-4.6	-3.1	0.0	0.0
応力範囲 (MPa)	17.8	21.1	30.0	29.0	23.7	27.1
応力比	-0.08	-0.02	-0.18	-0.12	0	0



(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-18 S-N 曲線と応力範囲の関係

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き、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¹⁸⁾。したがって、4.3 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-16(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点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、4.3 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。

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-7 に示す。アルミニウム合金 A6005C-T5 に対する S-N 曲線^{11,12)}と疲労試験終了時の発生応力との関係を図-18 に示す。同図の 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。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、

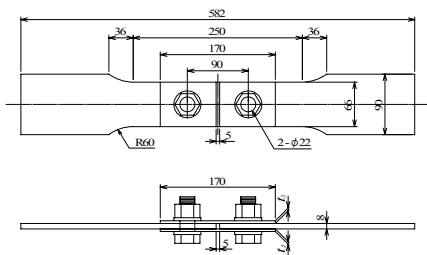
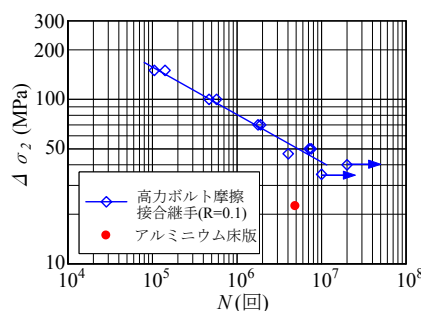
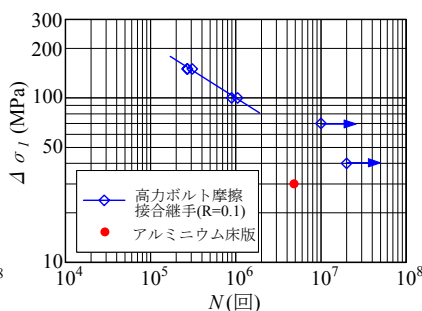


図-19 高力ボルト摩擦接合継手



(a) 添接板



(b) 母材

図-20 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-8 側辺継手に生じる応力 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
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

側辺継手の下添接板、摩擦撚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载荷試験において、側辺継手の下添接板、摩擦撚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。

4.2 側辺継手の疲労照査

図-19 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ティング疲労亀裂が発生することが明らかにされている^{9),19)}。この疲労試験で得られた S-N 関係を図-20 に示す。応力比は $R = 0.1$ である。図-20(a) に示すように、添接板のフレッティ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-20(b) に示すように、母材のフレッティ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。

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \frac{t_2}{t_1} \quad (7)$$

ここに、 σ_x : 下添接板下面の橋軸方向応力 (式(3)で算出)、 σ_y : 下添接板下面の橋軸直角方向応力 (式(4)で算出)、 t_1 : 母材の板厚 (=15mm)、 t_2 : 添接板の総厚 (=20mm)。

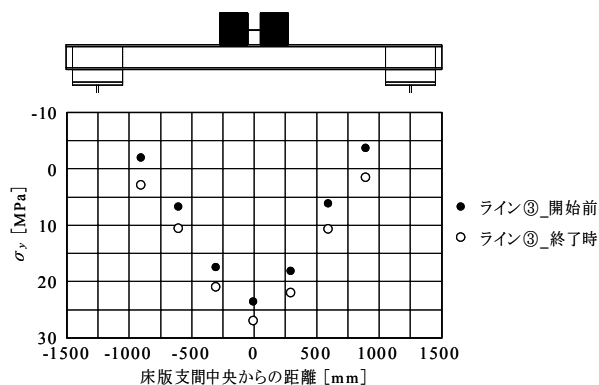


図-21 下フランジ下面の σ_y の応力分布

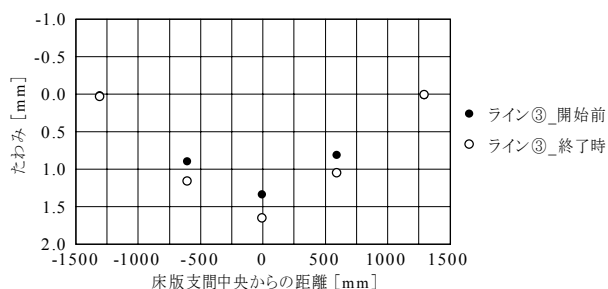


図-22 下フランジのたわみ分布

σ_2 と σ_1 の値を表-8 に示す。タイヤがライン①の直上に乗ったとき、式(6)と(7)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-20 にプロットしている。アルミニウム床版の側辺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継手は十分な疲労強度を有していると考えられる。

4.3 下フランジの応力とたわみ

タイヤ 1 と 2 (図-11 参照) をライン③の閉断面直上に载荷したときの、下フランジ下面の橋軸直角方向応力 σ_y の分布を図-21、下フランジのたわみ分布を図-22 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-14 に示した台座モルタルのひび

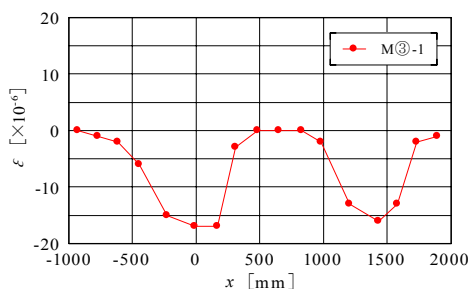
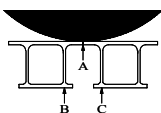
割れにより、アルミニウム床版と鋼桁の連結度が低下したためと考えられる。

4.4 アルミニウム床版上板のたわみ

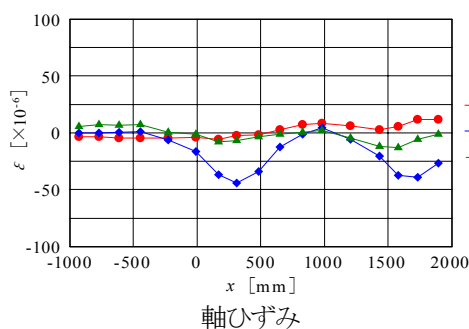
表－9 は、24.5 万回往復時、タイヤ 1 と 2 をアルミニウム床版のライン⑤（図－15 参照）の開断面中央の直上に載荷した場合に対する、同表の挿入図の点 A、B、C の位置のたわみの測定結果を示す。点 A、B、C は、アルミニウム床版の支間中央である。上フランジとウェブの交差点のたわみが下フランジとウェブの交差点のたわみと等しいと仮定すると、アルミニウム床版の面外たわみは 0.08mm となり、これはウェブ間隔 160mm に対して 1/2000 になる。

表－9 アルミニウム床版上板の面外たわみ

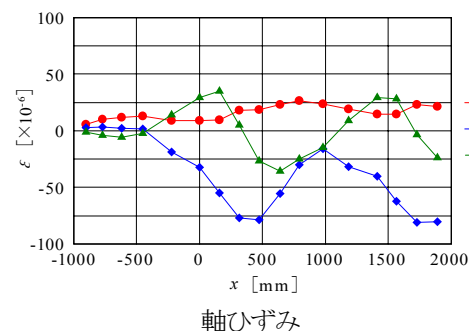
変位 (mm)			面外たわみ(mm)
A	B	C	$A-(B+C)/2$
1.44	1.31	1.41	0.08



(a) 台座モルタルの影響線



(b) スタッドの影響線 (疲労試験開始前)



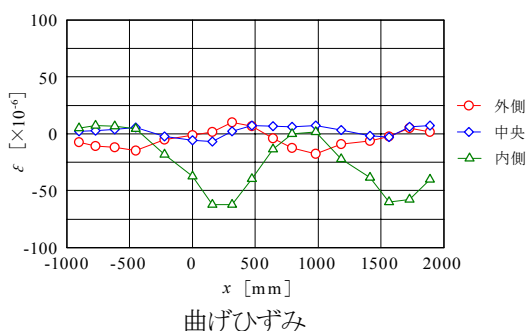
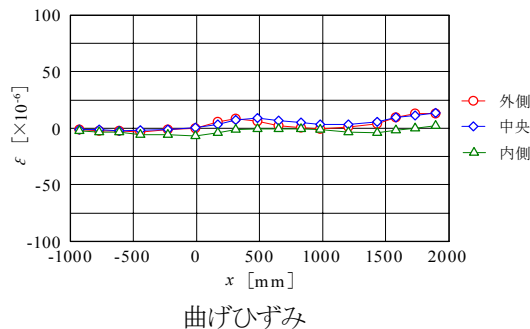
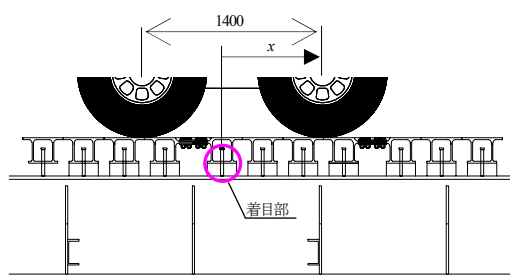
(c) スタッドの影響線 (疲労試験終了時)

図－23 台座モルタルおよびスタッドの影響線

4.5 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－15 参照）の、疲労試験開始前のひずみ ε の影響線を図－23(a)に示す。台座モルタルには図－14 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－23(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-14 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。

5. 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) 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、摩擦撚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。
- (2) アルミニウム床版の母材、摩擦撚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。
- (3) 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ったが、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。

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。

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 巻，第 9 号，pp.380-387，2004。
- 4) 大倉一郎，萩澤亘保，鳴尾亮，戸田均：摩擦撚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撚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 巻，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撚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 の母材と摩擦撚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) 大倉一郎，原田祐樹：道路橋用アルミニウム床版の適用支間長，土木学会，第 64 回年次学術講演会，No.I-360，pp.719-720，2009。
- 15) 萩澤亘保，大倉一郎：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すべり係数と鋼製高力ボルトの軸力低下，ALST 研究レポート，No.7，2009。
- 16) JHS 312：無収縮モルタル品質管理試験方法，1999。
- 17) JIS H 4100：アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材，2006。
- 18) 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。
- 19) 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。

(2009 年 9 月 24 日受付)