

# 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋 設計・製作・施工ガイドライン

大倉 一郎<sup>1</sup> 長尾 隆史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 大阪大学准教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

<sup>2</sup>正会員 日本軽金属株式会社 グループ技術センター (〒421-3203 静岡県静岡市清水区蒲原 1-34-1)

## 要旨

これまで、アルミニウム合金は土木構造物の主要部材にはほとんど使用されていなかったが、耐食性に優れ、軽量であることから近年道路橋用アルミニウム床版などの研究が行われるようになってきた。アルミニウム床版とは、アルミニウム合金の押出型材を摩擦攪拌接合で繋いだものである。RC床版の1/5という軽量さと耐食性に優れるといった特徴がある。これについては、2011年に日本アルミニウム協会から道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋設計・製作・施工ガイドラインが発刊された。本文ではガイドラインの概要を説明する。

**キーワード：**アルミニウム合金，床版，摩擦攪拌接合，疲労設計

## 1. はじめに

アルミニウム合金はこれまで橋の高欄や道路の防護柵など付属品的な用途以外に土木構造物の主要部材として用いられることはほとんどなかった。しかし耐食性に優れ、軽量であることから、土木構造物にアルミニウム合金の適用が期待されるようになってきた。

この様な状況で、道路橋用アルミニウム床版の開発が始められた。当初考案されたアルミニウム床版<sup>1)</sup>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つたので、これを解決するアルミニウム床版として開閉断面のものが提案された<sup>2)</sup>。これに対して構造解析、載荷試験、疲労試験<sup>3)~8)</sup>などが実施され、アルミニウム床版の基本データの収集が行われた。さらに、実物大のアルミニウム床版に対してトラックタイヤ移動載荷疲労試験が実施され、同床版には疲労亀裂が発生しないことが実証されている<sup>9)</sup>。

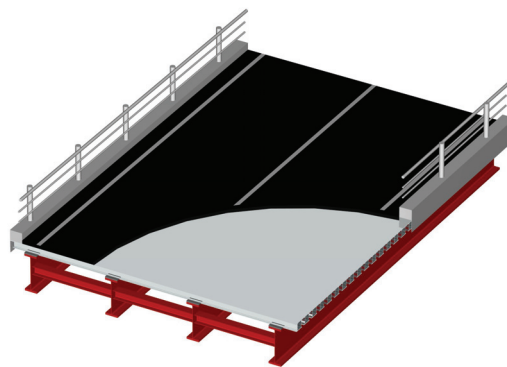
道路橋用アルミニウム床版の重量は、RC床版の1/5と軽量である。したがって、老朽化したRC床版の取替え用として利用し、主桁や下部工の負荷を軽減する、あるいは死荷重を増加させずに拡張するといった利用法が考えられる。また、上路式アーチ橋やトラス橋などに利用し、耐震性を向上させるといったことも考えられる。さらに、耐食性に優れることから塗装が不要であり、厳しい塩害環境下の橋梁に利用するとメンテナンスが大幅に軽減できるといったメリットもある。

道路橋用アルミニウム床版については、これまでの研究成果をもとに、2011年3月に日本アルミニウム協会から道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋設計・製作・施工ガイドライン<sup>10)</sup>が発刊されている。本文ではガイドラインの概要を紹介する。

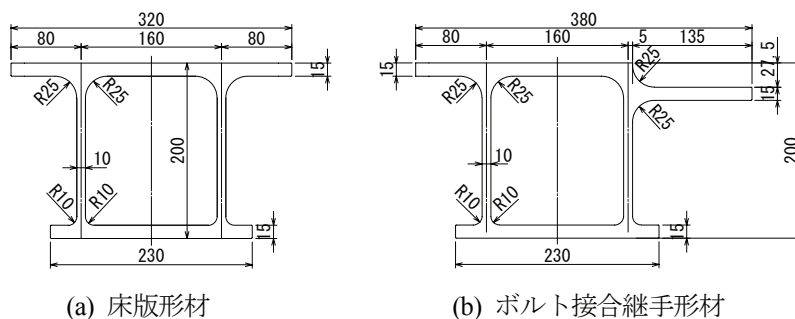
## 2. 道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋の概要

道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋のイメージを図－1に示す。アルミニウム合金の中空の部材が橋軸直角方向に並ぶような形式で、鋼主桁上にアルミニウム床版が設置される。アルミニウム合金の中空の部材は押出型材と呼ばれる。押出型材の材質はA6061-T6であり、断面形状は図－2に示す通りである。この押出型材の上板どうしを突き合わせ、工場で摩擦攪拌接合(FSW)することにより、例えば図－3に示すような断面のアルミニウム床版のユニットが製作される。アルミニウム床版のユニット間の現場接合には鋼製高力ボルトが用いられる。そのため、アルミニウム床版のユニットの両端部には図－2(b)に示すボルト接合継手用の押出型材が配置されている。

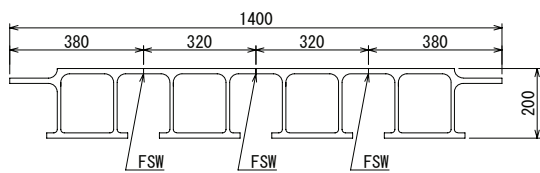
アルミニウム床版と鋼桁の連結部の構造を図－4に示す。鋼桁に溶接された頭付きスタッドをアルミニウム床版の中空部へ挿入し、仕切り板に挟まれた中空部内をモルタルで充填することにより、アルミニウム床版と鋼桁とが連結される。



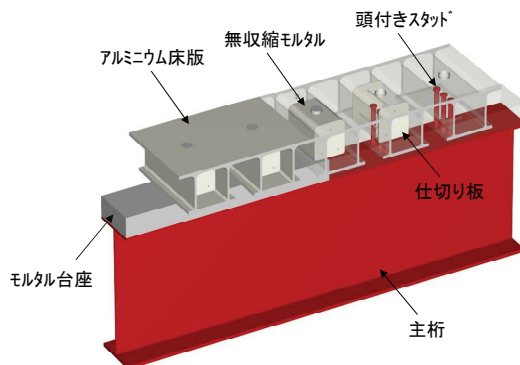
図－1 道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋



図－2 押出型材の断面形状



図－3 床版ユニット



図－4 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

### 3. アルミニウム床版の設計

#### (1) 荷重

アルミニウム床版の設計では、死荷重と活荷重による応力照査、疲労照査およびたわみに対する照査が行われる。それぞれの照査に対して用いられる荷重を次に示す。

##### a) 活荷重

図-5 に示すように、活荷重は道路橋示方書<sup>11)</sup>に従った T 荷重である。衝撃係数 0.4 を考慮し、1 つの載荷面に対する荷重は 140kN である。

##### b) 疲労設計荷重

トラックタイヤを直接支持するアルミニウム床版の上板に生じる応力はタイヤの接地形状の影響を受ける<sup>9)</sup>。したがって、アルミニウム床版の上板の疲労照査には、図-6 に示すようにダブルタイヤの接地形状を考慮した荷重が用いられる。疲労設計荷重は、トラックの後輪 2 軸をモデル化し、道路運送車両法に従う道路運送車両の保安基準（国土交通省令第 67 号）に従って前軸と後軸の間隔を 1300mm としている。道路橋示方書の T 荷重の総計 100kN に対して、タイヤ 1 輪当たりの荷重は 25kN になる。鋼道路橋の疲労設計指針<sup>12)</sup>に従って、道路橋示方書で規定される衝撃係数 0.4 の半分の 0.2 を考慮して、タイヤ 1 輪の荷重を 30kN としている。トラックタイヤを直接支持するアルミニウム床版の上板以外に生じる応力はタイヤの接地形状の影響を受けないので、図-7 に示す疲労設計荷重が使用される。

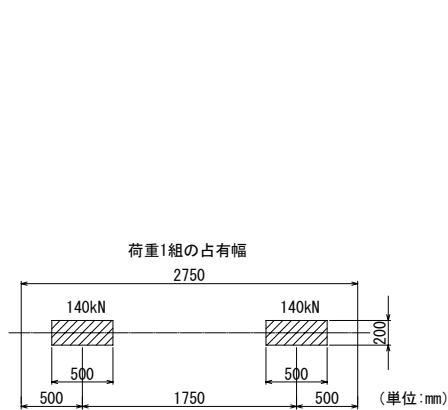


図-5 活荷重

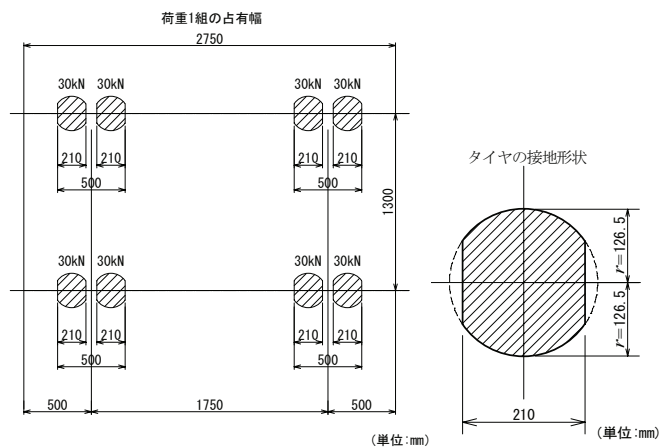


図-6 床版の上板に対する疲労設計荷重

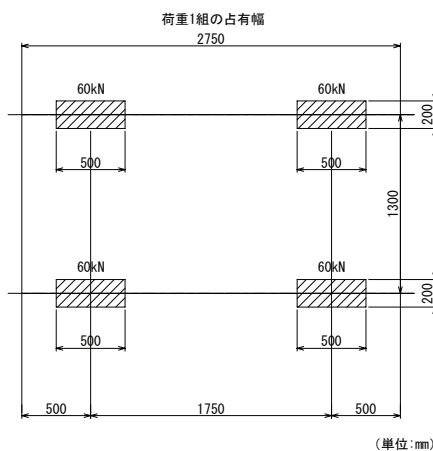


図-7 床版の上板以外に対する疲労設計荷重

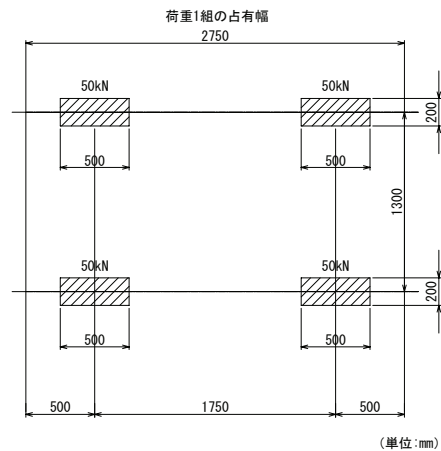


図-8 たわみ照査荷重

### c) たわみ照査荷重

道路橋示方書には床版のたわみに関する規定はないが、床版のたわみが大きいと床版が振動を起こすことが懸念されるため、アルミニウム床版に対してたわみに対する規定が設けられている。アルミニウム床版のたわみを照査する際に使用する荷重を図-8に示す。疲労設計荷重と同様に、トラックの後輪2軸をモデル化している。衝撃を考慮しないことから1つの載荷面に対する荷重は50kNである。

## (2) 許容応力, 疲労限度, 許容たわみ

### a) 許容応力

アルミニウム床版の材質はA6061-T6であり、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（JAA指針）<sup>13)</sup>の規定に従って、その許容応力は120MPaである。アルミニウム床版の上板には摩擦攪拌接合部があり、その熱影響範囲の強度は低下する。したがって、次式によってその強度低下が考慮される<sup>14)</sup>。

$$\sigma_{pa} = \sigma_a - \frac{A_j}{A} (\sigma_a - \sigma_{ja}) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{pa}$  : 部材軸方向に摩擦攪拌接合されている部材の許容応力

$\sigma_a$  : 母材の許容応力

$\sigma_{ja}$  : 摩擦攪拌接合部の熱影響範囲の許容応力

$A$  : 部材の全断面積

$A_j$  : 摩擦攪拌接合部の熱影響範囲の断面積

摩擦攪拌接合部の熱影響範囲は1インチルール<sup>14)</sup>に従い、接合中心から左右各側25mmである。摩擦攪拌接合部の熱影響範囲の許容応力に対しては、JAA指針で規定されるMIG溶接部の熱影響範囲に対する許容応力である59MPaが採用されている。

### b) 疲労限度

アルミニウム床版の耐用年数を100年とした場合、床版を通過する車軸数は非常に多いので、アルミニウム床版の疲労設計は疲労限度に対して行われる。6000系アルミニウム合金の母材の疲労限度は、6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦攪拌接合部の疲労設計ガイドライン<sup>15)</sup>に従い、次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{146(1-R)}{1.3244 - 0.6756R} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{caf}$  : 疲労限度 (単位: MPa)

$R$  : 応力比

$\alpha$  : 腐食影響係数 (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)

6000系アルミニウム合金の摩擦攪拌接合部の疲労限度は応力を受ける方向によって異なる。接合線直角方向に応力を受ける場合に対して、疲労限度は次式で与えられる<sup>15)</sup>。

$-1 \leq R \leq 0.1$  に対して、

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R} \quad (3)$$

$0.1 < R \leq 1$  に対して、

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034} \quad (4)$$

ここに、 $\alpha$  : 腐食影響係数 (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)

6000系アルミニウム合金の、接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労限度は、実物大の疲労試験<sup>1)</sup>の結果より、 $-1 \leq R \leq 0.1$  に対して次式で与えられている。

$$\Delta\sigma_{caf} = 60\alpha \quad (5)$$

ここに、 $\alpha$  : 腐食影響係数 (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)

### c) 許容たわみ

たわみ照査荷重に対するアルミニウム床版の許容たわみには、道路橋示方書に規定されるコンクリート床版以外の床版を有する鋼桁のたわみの許容値を準用している。鋼桁のたわみの許容値は、単純桁に対して  $L/500$  ( $L$  は桁支間長)、ゲルバー桁の片持部に対して  $L/300$  ( $L$  はゲルバー桁の片持長さ) である。したがって、アルミニウム床版の許容たわみは、主桁間に対して  $L/500$  ( $L$  は主桁間隔)、張出し部に対して  $L/300$  ( $L$  は張出し長) とされている。

### (3) アルミニウム床版の断面形状

図-2 に示すアルミニウム床版の断面形状は、図-6 に示す疲労設計荷重に対して生じる橋軸方向応力に対して、摩擦攪拌接合部に疲労亀裂が生じないように設計され<sup>2)</sup>、移動トラックタイヤ載荷試験によって疲労亀裂が発生しないことが実証されている<sup>9)</sup>。

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、アルミニウム床版のウェブとウェブとの間の上板の面外変形を抑制する必要がある。図-2 に示すアルミニウム床版の断面形状は、道路橋示方書の鋼床版のデッキプレートの最小板厚の規定に付随する解説に従い、アルミニウム床版の上板の面外変形が  $B/300$  以下 ( $B$  はアルミニウム床版のウェブとウェブとの間の間隔) となるように設計されている<sup>2)</sup>。

### (4) アルミニウム床版の適用支間長

アルミニウム床版の橋軸直角方向の応力およびたわみは、主桁間隔および張出し長が長くなるに従って大きくなるので、適用支間に限界が存在する。図-2 に示す断面形状(材料 A6061S-T6)を有するアルミニウム床版に対しては FEM 解析が行われ、図-9 に示すように、主桁間隔は、2 主桁橋で 4m 以下、多主桁橋で 3.3m 以下、張出し部の適用張出し長は、地覆幅 0.6m を含めた長さで 1.35m 以下であることが示されている<sup>8)</sup>。

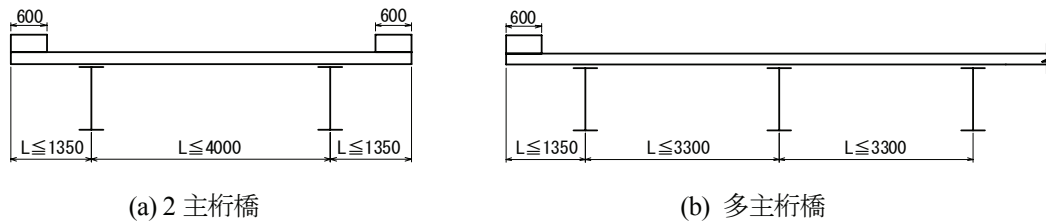


図-9 アルミニウム床版の適用支間長

### (5) アルミニウム床版のボルト継手の設計

アルミニウム床版の現場継手には鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手を使用される。鋼製高力ボルトには、アルミニウム合金と鋼との異種金属接触腐食を防止するためにフッ素樹脂でコーティングされたものが使用される。フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力は次式で与えられる。

$$\rho_a = \frac{1}{\nu} \mu N \quad (6)$$

$$N = 0.75 \sigma_{s0.2} A_e \quad (7)$$

ここに、 $\rho_a$  : フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト 1 本 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力  
 $\nu$  : 安全率  
 $\mu$  : 摩擦面のすべり係数  
 $N$  : 設計ボルト軸力  
 $\sigma_{s0.2}$  : 鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力  
 $A_e$  : 鋼製高力ボルトの有効断面積

表-1 フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの許容荷重伝達力

等級	ねじの呼び	$\sigma_{s0.2}$ (MPa)	$A_e$ (mm <sup>2</sup> )	$N$ (kN)	$\nu$	$\mu$	$\rho_a$ (kN)
F10T	M12	900	84.3	56.9	2.78	0.45	9.2
	M16		157	106			17.2
	M20		245	165			26.7
	M22		303	205			33.2

アルミニウム建築構造製作要領<sup>16)</sup>においては、摩擦接合継手において、一つのせん断面の相対する両方の摩擦面、または一方の摩擦面をブラスト処理により表面粗さ Rz 20 $\mu$ m 以上の粗面とすることによって、すべり係数 0.45 が確保されるとしている。これが正しいことが追認試験で明らかにされ<sup>17)</sup>、アルミニウム床版の設計においてもすべり係数  $\mu$  に 0.45 が採用されている。

フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト継手の許容荷重伝達力に対する安全率には、JAA 指針で規定される基本安全率 1.85 の 1.5 倍の 2.78 が採用されている。大きめの安全率としている理由は、フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトのフッ素樹脂皮膜のクリーブが明らかにされていないこと、フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの施工実績が少ないこと、およびアルミニウム床版のボルト接合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からである。

フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの許容荷重伝達力に対して式(6)が与える値を表-1 に示す。アルミニウム床版のボルト接合継手に使用されるボルトの必要本数はアルミニウム床版上板の全強を伝達することができる本数とされ、全強を計算する際に使用する許容応力は摩擦攪拌接合部の許容応力であり、A6061-T6 の場合 59MPa である。

#### 4. 鋼桁の設計

アルミニウム床版を有する鋼桁橋における、鋼桁設計のポイントは以下の通りである。

- ・アルミニウム床版と鋼桁との間には桁軸方向に合成作用が生じるが、死荷重、活荷重、衝撃荷重などの主荷重に対して鋼桁を設計する際にはアルミニウム床版と鋼桁との合成作用は考慮せず、鋼桁は非合成桁として設計する。
  - ・アルミニウム合金の線膨張係数 ( $23 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ) は鋼の線膨張係数 ( $12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ) に対して約 2 倍あるため、温度変化によりアルミニウム床版と鋼桁に内部応力、すなわち温度変化応力が生じる。アルミニウム床版-鋼桁橋においては、温度変化応力を設計で考慮する。
  - ・活荷重に対する鋼桁のたわみを照査する際には、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮する。
- 以下に、アルミニウム床版と鋼桁との合成理論および鋼桁の設計法について説明する。

##### (1) アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に関する理論

鉄筋コンクリート床版を有する鋼桁の合成作用に関する理論では、鉄筋コンクリート床版が変形後も平面を保持すると仮定されている。しかし、開閉断面アルミニウム床版にはモルタルが充填されていない部分が存在するため、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間には変形後、平面を保持していないことが明らかにされている<sup>18)</sup>。このことを考慮してアルミニウム床版と鋼桁との合成理論では、図-10 を参照して、鋼桁上フランジの上面の位置の鋼桁の水平変位とアルミニウム床版上板の中立面の位置のアルミニウム床版上板の水平変位との差と、水平せん断力との関係に次式を仮定している。

$$H = k(u_f - u_a) \quad (8)$$

ここに、 $H$  : アルミニウム床版上板の下面および鋼桁上フランジの上面に生じる水平せん断力  
 $k$  : 水平せん断バネ

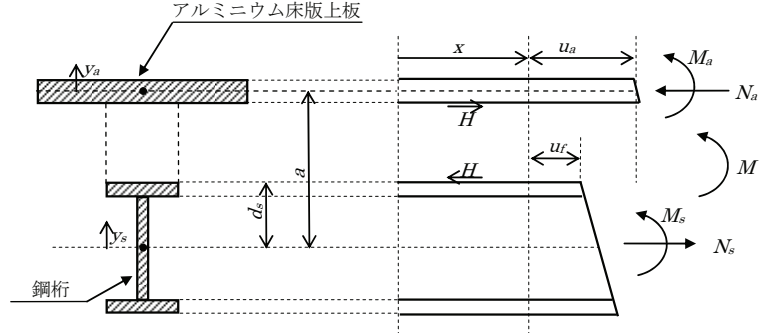


図-10 アルミニウム床版上板と鋼桁の変形

$u_f, u_a$  : それぞれ、鋼桁上フランジの上面の水平変位およびアルミニウム床版上板の中立面の位置の水平変位

鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる応力によるひずみは次式で表される<sup>18)</sup>。

$$\varepsilon_{ss} = \left( \frac{1}{E_s A_s} + \frac{a y_s}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{y_s}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (9)$$

$$\varepsilon_{as} = \left( -\frac{1}{E_a A_a} + \frac{a y_a}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{y_a}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (10)$$

ここに、 $\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{as}$  : それぞれ、鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる、応力によるひずみ

$E_s, E_a$  : それぞれ、鋼およびアルミニウム合金のヤング係数

$A_s, A_a$  : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板の断面積

$I_s, I_a$  : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板の断面二次モーメント

$N_s, N_a$  : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる軸力 ( $N = N_s = N_a$ )

$M$  : 全モーメント ( $M = Na + M_s + M_a$ )

$M_s, M_a$  : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる曲げモーメント

$a$  : アルミニウム床版上板の中立面と鋼桁の中立軸との間の距離

前述の仮定に基づき、軸力  $N$  に関する微分方程式が次のように導出される<sup>18)</sup>。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -c \lambda^2 M + k \Delta \varepsilon_T \quad (11)$$

$$\lambda = \sqrt{k \frac{\left( A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right)}} \quad (12)$$

$$c = \frac{A_s \frac{A_a}{n} d_s}{\left( A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \quad (13)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_T$  : 温度変化による鋼桁とアルミニウム床版上板とのひずみ差 ( $= \alpha_s \Delta T_s - \alpha_a \Delta T_a$ )

$\alpha_s, \alpha_a$  : それぞれ、鋼およびアルミニウム合金の線膨張係数

$\Delta T_s, \Delta T_a$  : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板の温度変化 (温度上昇を正とする)

$d_s$  : 鋼桁の中立軸から鋼桁上フランジ上面までの距離

$n$  : ヤング係数比 ( $= E_s / E_a$ )

境界条件に対して式(11)を解くことで、鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる応力が式(9)と(10)から算出できる。開閉断面アルミニウム床版においては、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの連結構造が同一であっても、水平せん断バネ  $k$  の値は、アルミニウム床版と鋼桁の断面寸法および鋼桁の支間長によって変化することが明らかにされている<sup>18)</sup>。水平せん断バネ  $k$  はFEM解析によって算定することができる。

## (2) アルミニウム床版の有効幅

アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考える際に用いるアルミニウム床版の有効幅として、道路橋示方書で規定される有効幅が使用できることが明らかにされている<sup>19)</sup>。アルミニウム床版の全有効幅は次式で与えられる。

$$B_e = \begin{cases} b_0 + b_{e1} + b_{e2} & \dots \text{外桁} \\ b_0 + 2b_{e2} & \dots \text{中桁} \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 $B_e$  : アルミニウム床版の全有効幅

$b_0$  : アルミニウム床版と鋼桁との連結部の仕切り板の間隔

$b_{e1}, b_{e2}$  : 片側有効幅

図-11を参照して、片側有効幅  $b_{e1}$  と  $b_{e2}$  は次式で算出することができる。

$$b_e = \begin{cases} b & \frac{b}{L} \leq 0.05 \\ \left(1.1 - 2\frac{b}{L}\right)b & 0.05 < \frac{b}{L} < 0.30 \\ 0.15L & 0.30 \leq \frac{b}{L} \end{cases} \quad (15)$$

ここに、 $b_e$  :  $b_{e1}$  または  $b_{e2}$

$b$  :  $b_1$  または  $b_2$

$L$  : 単純支持桁の支間長

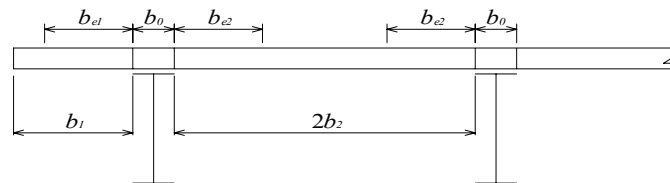


図-11 アルミニウム床版の有効幅

## (3) 温度変化に対する鋼桁の応力照査

式(11)に  $M = 0$  を代入して、アルミニウム床版と鋼桁との温度変化によって生じる軸力  $N$  に関する微分方程式が次式で与えられる。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = k \Delta \varepsilon_T \quad (16)$$

$x = 0$  で  $N = 0$  および  $x = L/2$  で  $dN/dx = 0$  の境界条件に対して、式(16)の解が次式で与えられる。

$$N = N_T \Delta \varepsilon_T \left[ 1 - \frac{\cosh\left\{\lambda\left(\frac{L}{2} - x\right)\right\}}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (17)$$

ここに,

$$N_T = -\frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left( A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \quad (18)$$

$N_T \Delta \varepsilon_T$  は、アルミニウム床版と鋼桁とが完全合成の場合に対する、温度変化によって生じる軸力である。温度変化応力は鋼桁の支間中央で最大になるので、 $x = L/2$  を式(17)に代入して、鋼桁の支間中央に生じる軸力が次式で与えられる。

$$N = N_T \Delta \varepsilon_T \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (19)$$

式(19)の右辺の{…}は1以下になるので、不完全合成の場合に対しても、完全合成の場合に対する  $N_T \Delta \varepsilon_T$  が最も大きな軸力を与える。したがって、温度変化によって生じる軸力として  $N_T \Delta \varepsilon_T$  を採用している。式(9)と(10)の  $N$  に  $N_T \Delta \varepsilon_T$  を代入し、さらに  $M = 0$  と置いて、温度変化によって、鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる応力がそれぞれ次式で与えられる<sup>20)</sup>。

$$\sigma_{sT} = E_s \varepsilon_{ss} = \left( \frac{1}{A_s} + \frac{E_s a}{E_s I_s + E_a I_a} y_s \right) N_T \Delta \varepsilon_T \quad (20)$$

$$\sigma_{aT} = E_a \varepsilon_{as} = \left( -\frac{1}{A_a} + \frac{E_a a}{E_s I_s + E_a I_a} y_a \right) N_T \Delta \varepsilon_T \quad (21)$$

温度変化に対する鋼桁の応力照査は、次式によって行われる。

$$\sigma_{sD} + \sigma_{sL} + \sigma_{sT} \leq \sigma_{sa} \quad (22)$$

ここに、  
 $\sigma_{sD}$  : 死荷重によって鋼桁に生じる応力  
 $\sigma_{sL}$  : 活荷重によって鋼桁に生じる応力  
 $\sigma_{sT}$  : 温度変化によって鋼桁に生じる応力  
 $\sigma_{sa}$  : 鋼桁の許容応力

死荷重によって鋼桁に生じる応力は、アルミニウム床版と鋼桁が非合成として算出される値である。活荷重に対しては、実際には合成作用が働くが、非合成として算出される安全側の値が用いられる。温度変化によって鋼桁に生じる応力は、式(20)によって算出される値である。鋼桁の許容応力には、道路橋示方書の鉄筋コンクリート床版に対する合成桁における床版と鋼桁との温度差に対する鋼桁の許容応力の割増し係数を準用し、鋼桁の上フランジに対して30%、下フランジに対して15%の許容応力の割増しが適用される。

#### (4) 温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査

温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査は、次式によって行われる。

$$\sigma_{AD} + \sigma_{AL} + \sigma_{AT} \leq \sigma_{Aa} \quad (23)$$

ここに、  
 $\sigma_{AD}$  : 舗装、地覆、高欄の死荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力  
 $\sigma_{AL}$  : 活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力  
 $\sigma_{AT}$  : 温度変化によってアルミニウム床版上板に生じる応力  
 $\sigma_{Aa}$  : アルミニウム床版上板の許容応力（摩擦攪拌接合部の許容応力）

死荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力および活荷重によってアルミニウム床版上板に生じ

る応力は、次の方法で算出する。アルミニウム床版と鋼桁が完全合成，すなわちアルミニウム床版上板中立面のひずみと鋼桁上フランジ上面のひずみが等しくなる条件のもとで，式(9)と(10)から算出される，鋼桁下フランジの下面に生じるひずみに対するアルミニウム床版上板の上面に生じるひずみの比を求めると次のようになる。

$$\frac{\varepsilon_{as}}{\varepsilon_{ss}} = -\frac{\frac{t_a}{2d_s E_s A_s} + \left(1 + \frac{t_a}{2d_s}\right) \frac{1}{E_a A_a}}{\left(1 + \frac{y_l}{d_s}\right) \frac{1}{E_s A_s} + \frac{y_l}{d_s E_a A_a}} \quad (24)$$

死荷重および活荷重に対して，アルミニウム床版と鋼桁とが非合成として算出された鋼桁下フランジの下面に生じる応力 $\sigma_{sD} + \sigma_{sL}$ によって生じるひずみ $(\sigma_{sD} + \sigma_{sL})/E_s$ を式(24)の $\varepsilon_{ss}$ に用いて，死荷重および活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力 $\sigma_{AD} + \sigma_{AL}$ が次式で与えられる。

$$\sigma_{AD} + \sigma_{AL} = -\frac{\frac{t_a}{2d_s E_s A_s} + \left(1 + \frac{t_a}{2d_s}\right) \frac{1}{E_a A_a}}{\left(1 + \frac{y_l}{d_s}\right) \frac{1}{E_s A_s} + \frac{y_l}{d_s E_a A_a}} \frac{\sigma_{sD} + \sigma_{sL}}{n} \quad (25)$$

式(25)によって算出される値は，合成作用を考慮して算出される値より大きくなり，安全側になる。

温度変化によってアルミニウム床版上板に生じる応力 $\sigma_{AT}$ は，式(21)によって算出される値である。温度変化に対する鋼桁の応力照査と同様に，温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査に対しても許容応力の割増しが考慮される。道路橋示方書の鉄筋コンクリート床版に対する合成桁における床版と鋼桁との温度差に対するコンクリートの許容応力の割増し係数と同じ，15%の許容応力の割増しが適用される。

## (5) 鋼桁のたわみ

アルミニウム床版－鋼桁橋における鋼桁の許容たわみには，道路橋示方書に規定される鉄筋コンクリート床版を有する鋼桁に対するたわみの許容値が準用されている。これは，アルミニウム床版の適用支間長の解析において，アルミニウム床版が単純支持された境界条件が適用されており，鋼桁の不等沈下に起因する付加曲げモーメントが考慮されていないためである。

活荷重に対する鋼桁のたわみを照査する際には，アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が考慮される。そこで，アルミニウム床版と鋼桁との合成度が次の $\phi_v$ で評価される<sup>18),20)</sup>。

$$\phi_v = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_\infty} \quad (0 \leq \phi_v \leq 1) \quad (26)$$

ここに， $v_\infty$ ：完全合成の場合に対する鋼桁のたわみ

$v_0$ ：非合成の場合に対する鋼桁のたわみ

$v$ ：不完全合成の場合に対する鋼桁のたわみ

アルミニウム床版と鋼桁の関係は $\phi_v$ が0に近いとき非合成に近く， $\phi_v$ が1に近いとき完全合成に近い。両端単純支持の条件において，合成度 $\phi_v$ および $v$ は次式で与えられる<sup>18),20)</sup>。

$$\phi_v = 1 - \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} \quad (27)$$

$$v = \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{I_s + \frac{I_a}{n}}{I_v} \right) \phi_v \right\} v_0 \quad (28)$$

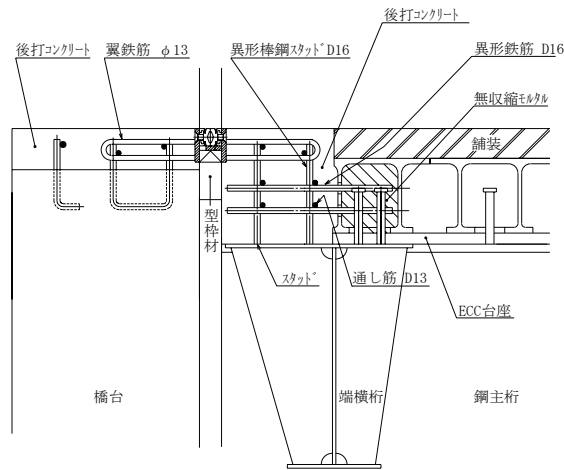


図-12 桁端部の構造

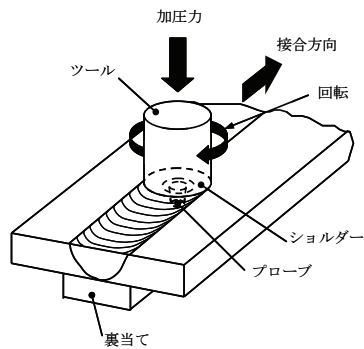


図-13 摩擦攪拌接合

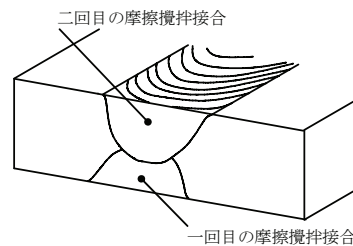


図-14 両面摩擦攪拌接合

アルミニウム床版を用いた鋼桁橋における鋼桁のたわみは、まず水平せん断バネ $k$ をFEM解析によって算出し、次に式(12)および式(27)から $\lambda$ と合成度 $\phi$ を求め、最後に鋼桁が非合成として別途算出された鋼桁のたわみ $v_0$ を用いて式(28)から算出することができる。

## (6) 桁端部の構造

桁端には端横桁と端ブラケットを設け、図-12に示すように端横桁と端ブラケットの上フランジ上に、アルミニウム床版の端部と伸縮装置が連結される。したがって、端横桁と端ブラケットの上フランジ幅は、アルミニウム床版と伸縮装置が定着できる幅でなければならない。端横桁と端ブラケットのウェブには、上フランジの鉛直変形を抑制するために鉛直リブが0.5~1mの間隔で設けられる。

## 5. アルミニウム床版の製作

### (1) 摩擦攪拌接合

アルミニウム床版は、押出形材を摩擦攪拌接合することによって製作される。摩擦攪拌接合とは、図-13に示すように、互いに突合された一対の母材の突合せ面に鋼製のツールを挿入し、ツールの回転によって発生した摩擦熱によって軟化した母材を塑性流動させ、ツールを突合せ面に沿って移動させることによって継手が得られる最新の接合技術である。溶加材が不要であり、溶接のような熔融凝固を伴わない

ので接合部の結晶粒が粗大化しにくく、機械制御で接合されるため品質が安定しているといった特徴がある。

摩擦攪拌接合では、接合時に攪拌が不足すると、図-13 に示すプローブの先端付近には、キッシングボンドと呼ばれる接合不完全部が生じる。キッシングボンドは疲労強度低下の原因となるため、これの発生を防止するために、アルミニウム床版の製作では両面摩擦攪拌接合の使用が規定されている。両面摩擦攪拌接合とは、図-14 に示すように、一回目の摩擦攪拌接合を行った後、裏返して反対側の面から二回目の摩擦攪拌接合を行うことによって継手が得られる方法である。

アルミニウム床版ユニットの摩擦攪拌接合部は、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ガイドライン<sup>21)</sup>に規定される各種品質検査に合格しなければならない。

## (2) 塗装

モルタルと接触するアルミニウム合金面は、モルタルが乾燥し、以後湿潤状態が続かない限りアルカリ腐食を起こすことはない。しかし、モルタルが乾燥するまではアルカリ腐食を起こすので、これを防止するために、モルタルと接触するアルミニウム合金面、すなわちアルミニウム床版の中空部内面の仕切り板間、アルミニウム床版下フランジのモルタル台座と接触する部分、およびアルミニウム床版上板のコンクリート製地覆と接触する部分に塗装が施される。

## 6. アルミニウム床版の施工

### (1) モルタル台座の施工

アルミニウム床版の施工フローを図-15 に示す。アルミニウム床版が鋼桁に接触することによって生じる異種金属接触腐食を防止するために、アルミニウム床版と鋼桁との間にモルタル台座が設けられる。モルタル台座には高靱性セメント複合材料 ECC (Engineered Cementitious Composite) が使用される。モルタル台座の厚みは、一般部で 30mm 以上が標準とされ、鋼桁の上フランジにボルト接合継手が存在する場合、ボルト頂部から 12mm 以上のかぶりを確保できる厚さが必要とされる。

モルタル台座にはアルミニウム床版からの繰返し支圧力に耐えることが求められるが、疲労試験において ECC にひび割れが発生しないことが報告されている<sup>22)</sup>。

### (2) アルミニウム床版の据付とボルト接合

アルミニウム床版ユニットは、押出型材の長手方向を橋軸直角方向に向け、モルタル台座の上に置かれる。その際、頭付きスタッドの位置がアルミニウム床版下フランジの開口部の中央に合わせられる。

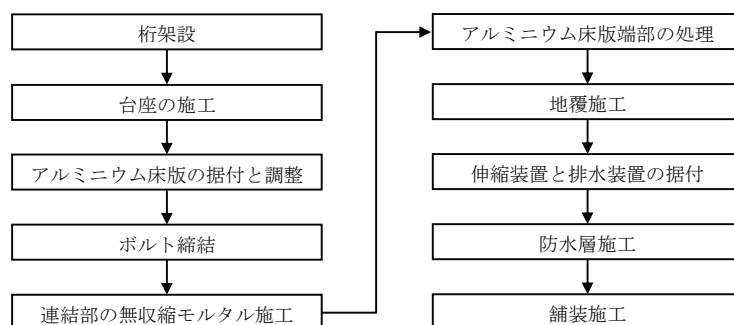


図-15 アルミニウム床版の施工フロー

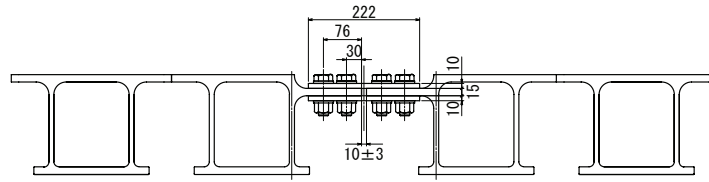


図-16 アルミニウム床版ユニットのボルト接合継手

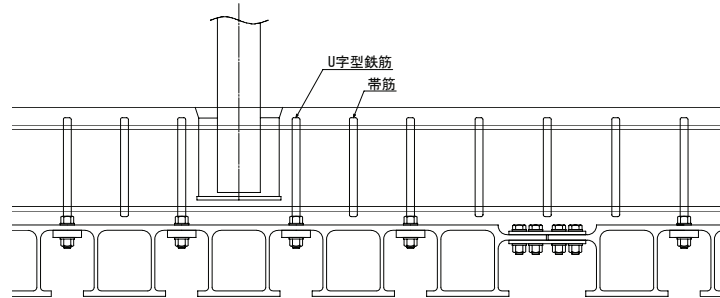


図-17 地覆部

アルミニウム床版ユニットのボルト接合継手を図-16 に示す。ボルトは頭締めで行われる。ボルトの締付けでは、フッ素樹脂皮膜を破壊する恐れがあるので電動インパクトレンチを使用してはならない。

### (3) 連結部の無収縮モルタルの注入

アルミニウム床版ユニットのボルト締結終了後、アルミニウム床版の中空部の仕切り板に挟まれた空間に無収縮モルタルを注入し、鋼桁とアルミニウム床版を連結する。無収縮モルタルは、アルミニウム床版の上板に開けられた注入孔から注入される。アルミニウム床版ユニットの下フランジとモルタル台座の隙間からの無収縮モルタルの漏れを防ぐために、注入前に適切なシール処理が必要である。

### (4) アルミニウム床版端部の処理

鳥による害を防ぐために、地覆外側面の下の床版端部を 2~5mm のアルミ板で塞ぐ。取付けには M3~M5 程度のステンレス製のねじを用いる。

### (5) 地覆

アルミニウム床版の地覆の定着部の構造を図-17 に示す。地覆部のアルミニウム床版の開断面部の上板には、鋼製高力六角ナットと鋼製座金を用いて D22 の U 字型鉄筋を取り付ける。その間隔は押出型材の幅 320mm であり、その間隔の 1/2 に帯筋が配置される。ボルト接合継手付近は U 字型鉄筋の間隔が 450mm になるので、この箇所には帯筋が 3 本配置される。図-17 において、防護柵に車両が衝突し、防護柵の支柱に水平力が作用すると、地覆の右端を支点として回転モーメントが生じ、U 字型鉄筋の左側の鉄筋に引抜力が発生する。このときアルミニウム床版に残留変形を残さないようにするために、下側の鋼製ナットとアルミニウム床版の上板との間にはアルミニウム板 (A6061-T6 材) が挿入される。この引抜力に対する U 字型鉄筋の先端のアルミニウム床版上板の締結部の抵抗強度、すなわち引抜強度は 244kN である<sup>9)</sup>。橋梁用防護柵の支柱の間隔は一般に 2m であるが、アルミニウム床版の場合、支柱が取付く地覆の U 字型鉄筋の間隔は 320mm であり、ボルト接合継手部にはこの鉄筋が配置できない。したがって支柱の両側に主鉄筋が配置されるように、アルミニウム床版ユニットの配置を考慮して支柱の間隔を決定する必要がある。排水装置は、図-18 に示すように地覆に排水管を貫通させる構造とする。

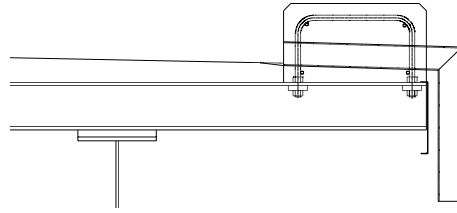


図-18 排水装置

#### (6) 伸縮装置

図-12 に示すように、伸縮装置を定着するために異形棒鋼スタッドが端横桁の上フランジに溶接される。舗装と後打ちコンクリートとの合わせ目が開かないようにするために、アルミニウム床版のウェブの孔から異形鉄筋をアルミニウム床版の中空部に挿入し、アルミニウム床版の中空部全長にわたって無収縮モルタルが充填される。伸縮装置から橋軸方向に突き出された鉄筋を異形棒鋼スタッドに溶接し、コンクリートを打ち、伸縮装置を固定する。

#### (7) 舗装および防水層

鋼床版の舗装の基層には通常グースアスファルトが使用されるが、施工時の温度が 240℃程度と高いため、180℃付近から軟化し始めるアルミニウム床版に使用することはできない。アルミニウム床版に適用できる基層の舗装材料としては、施工時温度を抑えられるエポキシアスファルト混合物などがある<sup>23)</sup>。

アルミニウム床版には他の床版と同様に防水層が設けられるが、加熱型アスファルト系防水材は施工時の材料温度が高くなるので使用できない。

### 7. おわりに

アルミニウム床版を用いた鋼桁橋は、これまでにない新しい形式の橋梁であり、他にはない特徴を有している。今後、その特徴を活かせる現場で活用されることを期待する。

謝辞：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋設計・製作・施工ガイドラインの作成に多大な御協力を頂いたアルミニウム協会 土木構造物委員会およびガイドライン作成分科会の皆様に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, 2007.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷疲労試験による疲労耐久性評価, 構造工学論文集, Vol.56A, 2010.

- 10) 日本アルミニウム協会, 土木構造物委員会: 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋 設計・製作・施工ガイドライン, 2011.
- 11) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 2002.
- 12) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
- 13) 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設計・製作指針案 (第1次改定試案), 1998.
- 14) 大倉一郎, 萩澤亘保, 花崎昌幸: アルミニウム構造学入門, 東洋書店, 2006.
- 15) 日本アルミニウム協会, 土木構造物委員会: 6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦攪拌接合部の疲労設計ガイドライン, 2010年9月版.
- 16) 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定および基準・同解説, pp.39-50, 2003.
- 17) 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.
- 18) 大倉一郎, 稲見豪: アルミニウム床版と鋼桁との合成作用, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.870-880, 2009.
- 19) 大倉一郎, 高木真広, 石川敏之: アルミニウム床版-鋼桁橋の合成作用および温度変化により応力と反り, ALST 研究レポート, No.5, 2008.
- 20) 大倉一郎, 稲見豪: 開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との合成作用, ALST 研究レポート, No.13, 2010.
- 21) 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ガイドライン, 2010.
- 22) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎: 道路橋用アルミニウム床版の ECC 台座のひび割れ抵抗試験および疲労試験, ALST 研究レポート, No.20, 2010.
- 23) 近藤俊行, 北山暢彦, 大隈心平, 岡本信人, 大倉一郎: アルミニウム床版に適用する舗装材料の性能確認実験, アルミニウム橋研究会, 2006年度講演概要集, 2006.