

(63) アルミニウム床版－鋼桁橋の合成挙動 および温度変化応力

石川 敏之¹, 高木 眞広², 大倉 一郎³, 武野 正和⁴

¹正会員 名古屋大学助教 大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: ishikawa@civil.nagoya-u.ac.jp

²学生会員 大阪大学 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)
E-mail: m-takagi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 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)
E-mail: okura@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴正会員 元大阪大学 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)
現(株)新日本製鐵 建材事業部建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)
E-mail: takeno.masakazu@nsc.co.jp

損傷した鉄筋コンクリート床版を取替える場合、現行の道路橋示方書を適用すると、床版が厚くなることによって死荷重が増加するため鋼桁の補強が必要になる場合がある。これに対して、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考えが出されている。

アルミニウム床版はスタッドによって鋼桁に連結されるため、アルミニウム床版と鋼桁との間には合成作用が生じる。さらに、アルミニウム合金と鋼の線膨張係数は2倍異なるため、温度変化を受けるアルミニウム床版－鋼桁橋には、温度変化応力が生じる。

本研究では、弾性合成理論によって、アルミニウム床版－鋼桁橋の合成度および温度変化応力を明らかにする。

Key Words : aluminum deck, steel girder, composite behavior, thermal stress

1. はじめに

損傷した鉄筋コンクリート床版(以後RC床版と呼ぶ)を取替える場合、現行の道路橋示方書¹⁾を適用すると、床版が厚くなることによって死荷重が増加するため鋼桁の補強が必要になる場合がある。これに対して、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考えが出されている²⁾。アルミニウム床版は軽量であるため、地震による上部工の慣性力の低減、小型重機の使用による工期の短縮および高い耐食性によるライフサイクルコストの削減などの利点がある。

これまで、アルミニウム押出形材が摩擦攪拌接合(FSW)により連結された開閉断面アルミニウム床版を開発してきた³⁾。アルミニウム床版はRC床版に対して約1/5の重量であるため、死荷重の大幅な低減が期待される。アルミニウム床版を有する鋼桁橋、すなわちアルミニウム床版－鋼桁橋のイメージ図を図-1に示す。

アルミニウム床版と鋼桁の連結構造⁴⁾を図-2に示す。

既設のRC床版をアルミニウム床版へ取り替える場合、RC床版を撤去すると、RC床版の重量に対して設けられていた鋼桁のキャンバーが開放されるため、鋼桁は上向きに反る。アルミニウム床版－鋼桁橋では、この反りが鋼桁上フランジの上に台座コンクリートを打設することによって調整される。さらに、鋼桁に溶植されたスタッドをアルミニウム床版の開断面内へ挿入し、モルタルを充填することによって、アルミニウム床版と鋼桁とが結合される。したがって、アルミニウム床版－鋼桁橋は合成挙動を示すと考えられる。

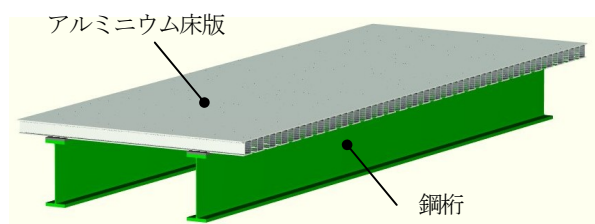


図-1 アルミニウム床版－鋼桁橋

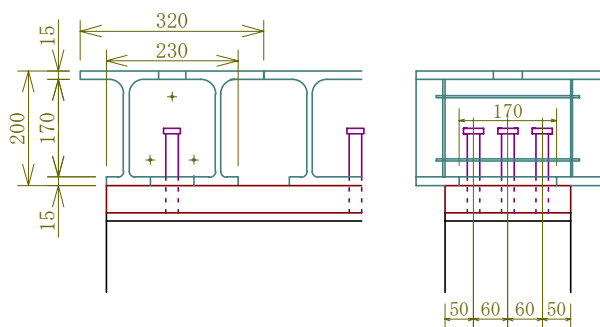
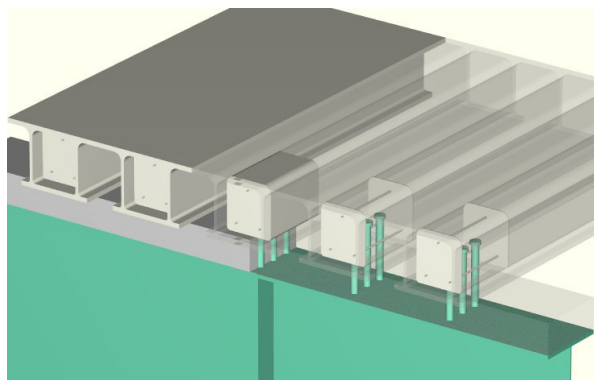


図-2 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

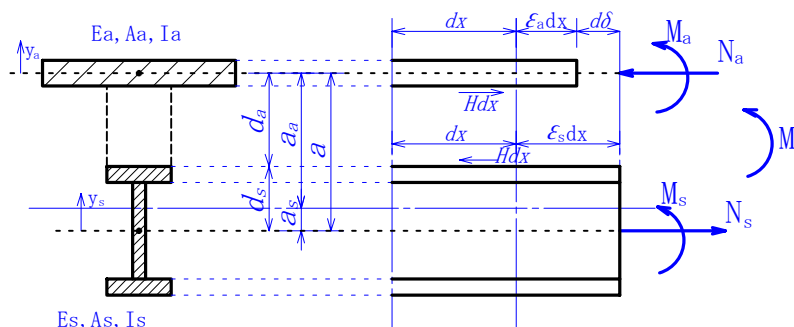


図-3 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる断面力

アルミニウム床版と鋼桁が合成挙動を示すと、アルミニウム合金の線膨張係数が鋼のそれの約2倍であるため、温度変化によりアルミニウム床版および鋼桁に内部応力、すなわち温度変化応力が生じる。温度変化応力の大きさは、アルミニウム床版と鋼桁の寸法およびその合成度に依存する。

以上より、本研究では、非合成として設計された鋼桁へアルミニウム床版を設けた場合の、アルミニウム床版と鋼桁の合成度および温度変化応力を、弾性合成理論を適用することにより明らかにする。

2. アルミニウム床版－鋼桁橋の弾性合成理論

アルミニウム床版－鋼桁橋においては、アルミニウム床版と鋼桁との間に水平ずれが生じるため、両者の関係は不完全合成になる。不完全合成は弾性合成理論によって説明される。そこで、アルミニウム床版－鋼桁橋に弾性合成理論を適用する。

図-2 に示すように、アルミニウム床版では、上板が橋軸方向に連続している。アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる断面力を図-3 に示す。アルミニウム床版上板と鋼桁との結合を、同じ強さの連続した弾性ばねに置き換えて考える。この弾性ばねのばね定数を k とし、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の水平ずれ δ と水平せん断力 H に対し、次式に示す比例関

係を仮定する。

$$H = k\delta \quad (1)$$

鋼桁上フランジ上面でのアルミニウム床版と鋼桁のずれ量 $d\delta$ は、次式で与えられる。

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{1}{k} \cdot \frac{dH}{dx} = \epsilon_{ss} - \epsilon_{as} + \Delta_T \quad (2)$$

ここに、

$$\epsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} d_s \quad (3)$$

$$\epsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} - \frac{M_a}{E_a I_a} d_a \quad (4)$$

$$\Delta_T = (\alpha_s - \alpha_a) \Delta T \quad (5)$$

$\epsilon_{ss}, \epsilon_{as}$: 鋼桁上フランジ上面の位置での、それぞれ鋼桁およびアルミニウム床版に生じる、外力によるひずみ

Δ_T : 鋼桁とアルミニウム床版の温度ひずみ差

E_s, E_a : それぞれ鋼およびアルミニウムの弾性係数

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

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

d_s, d_a : 鋼桁上フランジ上面から、それぞれ鋼桁の重心およびアルミニウム床版上板の重心までの距離
 α_s, α_a : それぞれ鋼およびアルミニウム合金の線膨張係数
 ΔT : 温度の変化量 (温度上昇を正, 温度低下を負とする.)

水平方向の力の釣り合いから、次式が得られる.

$$N_s = N_a = N \quad (6)$$

アルミニウム床版と鋼桁のたわみに関する曲率が同じであるので、次式が成立する.

$$\frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{M_a}{E_a I_a} \quad (7)$$

全モーメント M は次式で与えられる.

$$M = Na + M_a + M_s \quad (8)$$

ここに,

a : アルミニウム床版の重心と鋼桁の重心の間の距離

式(7)と(8)からアルミニウム床版および鋼桁に生じる曲げモーメントがそれぞれ次式で与えられる.

$$M_a = \frac{E_a I_a}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (9)$$

$$M_s = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (10)$$

式(6), (9), (10)を式(3)と(4)に代入して、次式を得る.

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N}{E_s A_s} - \frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} d_s \quad (11)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N}{E_a A_a} - \frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} d_a \quad (12)$$

アルミニウム床版の微小区間 dx に生じる水平方向の力の釣り合いから、次式が与えられる.

$$H = dN/dx \quad (13)$$

式(11), (12), (13)を式(2)に代入して、軸力に関する2階の微分方程式が次のように導出される.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -rM + k\Delta T \quad (14)$$

ここに,

$$\lambda = \sqrt{\frac{kaI_v}{a_s E_s A_s (I_s + I_a/n_a)}} \quad (15)$$

$$r = \frac{ka}{E_s (I_s + I_a/n_a)} \quad (16)$$

$$n_a = E_s/E_a \quad (17)$$

$$A_a + n_a A_s = n_a A_v \quad (18)$$

$$a_a = \frac{A_s}{A_v} a \quad (19)$$

$$\frac{A_v}{a} = \frac{A_a}{n_a a_s} = \frac{A_s}{a_a} \quad (20)$$

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n_a} + A_v a_s a_a \quad (21)$$

a_a, a_s : アルミニウム床版と鋼桁の関係が完全合成とした場合の断面の中立軸から、それぞれアルミニウム床版の重心および鋼桁の重心までの距離

曲げによる桁のたわみに関する微分方程式は次式で与えられる.

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{M_s}{E_s I_s} = -\frac{M_a}{E_a I_a} \quad (22)$$

ここに,

v : 合成桁のたわみ

式(9)または(10)を式(22)に代入して、次式が与えられる.

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} \quad (23)$$

3. アルミニウム床版—鋼桁橋の合成挙動

(1) 合成度の定義

アルミニウム床版と鋼桁の合成度を、次式で定義される ϕ で評価する.

$$\phi = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_\infty} \quad (0 \leq \phi \leq 1) \quad (24)$$

ここに,

ϕ : 合成度

v_∞ : 完全合成の場合に対する桁のたわみ

v_0 : 非合成の場合に対する桁のたわみ

ϕ が 0 に近いとき、アルミニウム床版と鋼桁の関係は非合成に近く、 ϕ が 1 に近いとき、両者の関係は完全合成に近い. 本研究では、支間中央に集中荷重が載荷された単純支持桁の支間中央のたわみを v , v_∞ および v_0 に使用する.

支間長 L のアルミニウム床版—鋼桁に対して、支間中央に集中荷重 P が載荷された場合、 $0 \leq x \leq L/2$ の曲げモーメントは次式で与えられる.

$$M = \frac{P}{2} x \quad (25)$$

ここに,

x : 支点からの距離

式(25)を式(14)へ代入し、 $\Delta T = 0$ のとき、式(14)は次式になる.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -r \frac{P}{2} x \quad (26)$$

$x = 0$ で $N = 0$ および $x = L/2$ で $dN/dx = 0$ の境界条件に対して、式(26)の解は次式で与えられる.

$$N = \frac{A_s a_s}{I_v} \cdot \frac{P}{2} \left\{ x - \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right\} \quad (27)$$

式(25)と(27)を式(23)に代入して、次式を得る。

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{P}{2(E_s I_z + E_a I_a)} \times \left\{ \left(1 - \frac{A_v a_s a_a}{I_v} \right) x + \frac{A_v a_s a_a}{I_v} \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right\} \quad (28)$$

$x = 0$ で $v = 0$ および $x = L/2$ で $dv/dx = 0$ の境界条件に対して式(28)を解き、支間中央のたわみが次式で与えられる。

$$v = v_\infty + v_0 \cdot \frac{A_v a_s a_a}{I_v} \cdot \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} \quad (29)$$

ここに、

$$v_\infty = PL^3 / (48E_s I_v) \quad (30)$$

$$v_0 = \frac{PL^3}{48(E_s I_s + E_a I_a)} \quad (31)$$

式(29), (30), (31)を式(24)に代入して、合成度 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = 1 - \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} \quad (32)$$

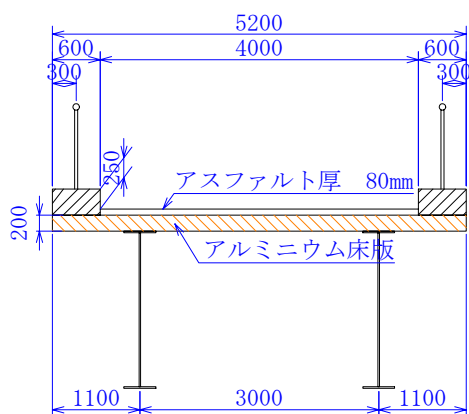
(2) アルミニウム床版－鋼桁橋の合成度の算定

アルミニウム床版－鋼桁橋の断面を図－4 に示す。アルミニウム床版－鋼桁橋はこれまでに存在しない。したがって、鋼桁の断面は、以下の条件に対して、「非合成鉄桁の概略設計計算プログラム」⁵⁾を用いて決定した。

- i) アルミニウム床版と鋼桁は非合成とする。
- ii) 設計活荷重はB活荷重とする。
- iii) 表－1 に示す死荷重を設計に用いる。アルミニウム床版の単位面積当たりの重量は、図－2 に示す断面に対するものである。
- iv) 道路橋示方書に規定される、鉄筋コンクリート床版以外の床版を持つプレートガーダーに対する、衝撃を考慮しない活荷重によるたわみの許容値として、支間中央のたわみに対して $L/500\text{mm}$ とする。
- v) 鋼材は SM490Y 材を使用する。
- vi) 鋼桁断面は橋軸方向に対して一定とする。
- vii) フランジ幅を、ウェブ高の 1/3 以下とする。
- viii) フランジおよびウェブの板厚を 9mm 以上 40mm 以下とする。
- ix) 建設コストが最小となる鋼桁高さとする。

上記の条件に対して、支間長が 15m, 20m, 30m および 40m の各場合に対して得られた鋼桁断面の寸法を表－2 に示す。

ばね定数 k は、アルミニウム床版と鋼桁との結合の強さを表す。本研究では、既往の研究⁶⁾ で求められた、図



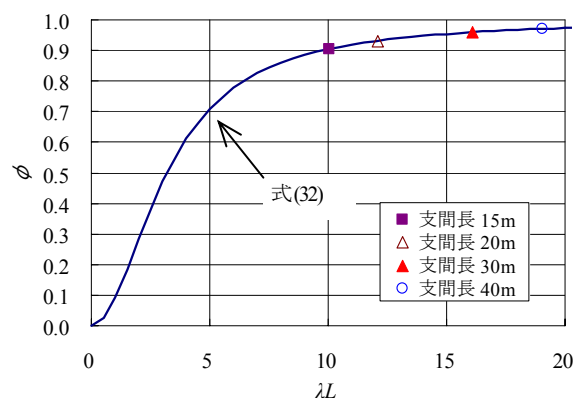
図－4 アルミニウム床版－鋼桁橋の断面

表－1 死荷重

高欄	0.5 kN/m
舗装	22.5 kN/m ³
アルミニウム床版	1.016 kN/m ²
地覆	24.5 kN/m ³

表－2 鋼桁断面の寸法

支間長 L [m]	15	20	30	40
上フランジ				
幅[mm]	280	280	280	290
厚さ[mm]	12	14	16	32
下フランジ				
幅[mm]	250	260	260	280
厚さ[mm]	13	14	17	33
ウェブ				
高さ[mm]	1300	1700	2500	2600
厚さ[mm]	9	9	9	9
アルミニウム床版の有効幅[mm]	2278	2368	2467	2519
λ [1/mm]	6.71 $\times 10^{-4}$	6.04 $\times 10^{-4}$	5.36 $\times 10^{-4}$	4.76 $\times 10^{-4}$



図－5 ϕ と λL の関係

－2 に示す連結構造において、台座コンクリート厚さ 30mm に対して得られた 0.304kN/mm^2 を k に用い、さらに、アルミニウム床版の有効幅が、道路橋示方書¹⁾の RC 床版を有する桁構造の床版の有効幅の規定に従うとして、式(15)から λ の値を算出した。各支間長に対する λ の値を表－2 に示す。合成度 ϕ と λL の関係を図－5 に示す。この図から、各支間長に対する合成度は 0.9 から 1.0 の

表-3 アルミニウム床版-鋼桁橋の温度変化応力と支間中央の相対たわみ

		不完全合成				完全合成			
支間長 L [m]		15	20	30	40	15	20	30	40
アルミニウム床版	上板上面[MPa]	-6.7	-7.9	-9.6	-12.0	-6.8	-8.0	-9.6	-12.0
	上板下面[MPa]	-7.0	-8.1	-9.7	-12.1	-7.1	-8.1	-9.7	-12.1
鋼桁	上フランジ上面[MPa]	43.4	42.8	40.8	35.1	44.0	43.0	40.8	35.1
	下フランジ下面[MPa]	-17.3	-16.9	-15.7	-10.8	-17.6	-17.0	-15.7	-10.8
アルミニウム床版-鋼桁橋のたわみ v_T [mm]		-5.90	-7.94	-11.57	-15.70	-6.40	-8.40	-11.94	-16.06
$\frac{v_T}{L}$		$\frac{1}{2542}$	$\frac{1}{2520}$	$\frac{1}{2593}$	$\frac{1}{2547}$	$\frac{1}{2344}$	$\frac{1}{2382}$	$\frac{1}{2513}$	$\frac{1}{2491}$

間にあり、図-2 に示す連結構造を有するアルミニウム床版-鋼桁橋の合成度は完全合成に近いといえる。

(34)へ $x = L/2$ を代入して、支間中央の軸力 N が次式で与えられる。

$$N = N_\infty \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(\lambda L/2)} \right\} \quad (38)$$

4. アルミニウム床版-鋼桁橋の温度変化によって生じる応力とたわみ

(1) 温度変化によって生じる応力

式(14)に $M = 0$ を代入して、アルミニウム床版-鋼桁の温度変化によって生じる軸力 N に関する微分方程式は次式となる。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = k \Delta_T \quad (33)$$

$x = 0$ で $N = 0$ および $x = L/2$ で $dN/dx = 0$ の境界条件に対して、式(33)の解は次式で与えられる。

$$N = N_\infty \left[1 - \frac{\cosh\{\lambda(L/2 - x)\}}{\cosh(\lambda L/2)} \right] \quad (34)$$

ここに、

$$N_\infty = - \frac{a_s E_s A_s (I_s + I_a/n_a)}{a I_v} \Delta_T \quad (35)$$

N_∞ は完全合成時の温度変化によって生じる軸力である。

温度変化を受けるアルミニウム床版および鋼桁に生じる応力は次式で与えられる。

$$\sigma_a = N \left(-\frac{1}{A_a} + \frac{E_a a}{E_s I_s + E_a I_a} y_a \right) \quad (36)$$

$$\sigma_s = N \left(\frac{1}{A_s} + \frac{E_s a}{E_s I_s + E_a I_a} y_s \right) \quad (37)$$

ここに、

y_a, y_s : それぞれアルミニウム床版上板の中立軸および鋼桁の中立軸からの座標(図-3 参照)

表-2 の鋼桁断面を有するアルミニウム床版-鋼桁橋に対して、温度変化応力を試算する。冬期に施工されたアルミニウム床版-鋼桁橋において、夏期に 30℃の温度上昇が生じたと仮定する。

温度変化応力は支間中央において最大となるので、式

式(36)と(37)に式(38)を代入して得られる、支間中央の断面に生じる温度変化応力を表-3 に示す。表には、アルミニウム床版と鋼桁が完全合成の場合に生じる温度変化応力も示されている。表-3 から分かるように、不完全合成の場合と完全合成の場合で、温度変化応力はほぼ同じ値となる。

表-3 から、支間長が長くなると、アルミニウム床版に生じる圧縮応力は増加し、鋼桁上フランジに生じる引張応力および鋼桁下フランジに生じる圧縮応力は減少することが分かる。

A6061S-T6 材に対する許容応力は 120MPaである⁷⁾。表-3 から、アルミニウム床版に生じる応力は、許容応力の 5%~10%である。他方、SM490Y材に対する許容応力は 210MPaである¹⁾。表-3 から、鋼桁上フランジに生じる応力は、許容応力の 16%~20%である。

(2) 温度変化によって生じるたわみ

式(34)を式(23)に代入し、 $M = 0$ として、次の温度変化によるたわみに関する 2階微分方程式を得る。

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = - \frac{A_s a_s}{I_v} \left[1 - \frac{\cosh\{\lambda(L/2 - x)\}}{\cosh(\lambda L/2)} \right] \Delta_T \quad (39)$$

$x = 0$ で $v = 0$ および $x = L/2$ で $dv/dx = 0$ の境界条件に対して式(39)を解き、支間中央のたわみが次式で与えられる。

$$v_T = v_{T\infty} \left[1 - \frac{2}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(\lambda L/2)} \right\} \right] \quad (40)$$

ここに、

$$v_{T\infty} = \frac{A_s a_s}{I_v} \cdot \frac{L^2}{8} \Delta_T \quad (41)$$

$v_{T\infty}$ はアルミニウム床版と鋼桁が完全合成された場合に対する温度変化による支間中央のたわみである。

各支間長に対して、式(40)から算出される、30℃の温

度上昇により支間中央に生じるたわみ v_T およびたわみを支間長で割った相対たわみ v_T/L を表-3に示す。表には、アルミニウム床版と鋼桁が完全合成の場合に対して、温度変化によって生じる支間中央のたわみおよび相対たわみも示されている。表-3から分かるように、温度上昇に対して、アルミニウム床版-鋼桁橋は上方向にたわむ。温度変化によって生じる支間中央のたわみは、完全合成の場合のそれに近い。相対たわみ v_T/L は、支間長に関わらず約1/2500である。

5. 結論

本研究では、弾性合成理論を適用して、アルミニウム床版-鋼桁橋の合成度および温度変化によって生じる応力およびたわみを算出した。主な結果を以下に示す。

- 1) アルミニウム床版と鋼桁の合成度を評価する式として式(32)を与えた。
- 2) 図-2に示す、これまでに開発された連結構造を有するアルミニウム床版-鋼桁橋の合成度は完全合成に近い。
- 3) 図-2に示す連結構造を有するアルミニウム床版-鋼桁橋の温度変化応力は、両者の関係を完全合成とした場合の温度変化応力に近い。
- 4) 支間長が長くなると温度変化応力は、アルミニウム床

版では増加し、鋼桁では減少する。

- 5) 30℃の温度変化による、アルミニウム床版の温度変化応力はアルミニウム合金 A6061S-T6 材の許容応力の5%~10%であり、鋼桁上フランジの温度変化応力は、鋼種 SM490Y 材の許容応力の16%~20%である。
- 6) 30℃の温度変化による、支間長に対するたわみの比 v_T/L は、支間長に関わらず約1/2500である。

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) 大倉一郎：アルミニウム合金の橋への適用，軽金属溶接構造協会誌，Vol.41，No.10，pp.1-6，2003。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) ドルフィーソフトウェア：Ezy Bridge 1「非合成鋼桁箱桁の概略自動設計」取扱説明書，ドルフィーソフトウェア，2002。
- 6) 武野正和，高木真広，大倉一郎：アルミニウム床版と鋼桁の合成作用，土木学会，第61回年次学術講演概要，I-142，2006。
- 7) 日本アルミニウム協会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案(第1次改定試案)，1998。

COMPOSITE BEHAVIOR AND THERMAL STRESSES OF ALUMINUM DECK-STEEL GIRDER BRIDGES

Toshiyuki ISHIKAWA, Masahiro TAKAGI, Ichiro OKURA and Masakazu TAKENO

In aluminum deck-steel girder bridges, since stud shear connectors are used for the connection of aluminum decks to steel girders, composite effects are produced between both in the bridge-longitudinal direction. The composite effects induce thermal stresses when temperature changes, because the coefficient of thermal expansion of aluminum is two times larger than that of steel.

In this study, the composite behavior of aluminum deck-steel girder bridges is investigated, using the elastic composite theory. It is shown that the composite degree between an aluminum deck and a steel girder is almost complete, and that the thermal stresses due to temperature change of 30 degrees are 5% to 10% of the allowable stress of aluminum alloy A6061S-T6 and 16% to 20% of that of steel SM490Y.