アルミニウム床版一鋼桁橋の合成作用 および温度変化による応力と反り

ALST 研究レポート 5

2008年3月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎,高木眞広

名古屋大学大学院環境学研究科

石川敏之

概要

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および鋼に反りが発 生する.

本研究は、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って生じる応力と 鋼桁の反りに関して次の研究を行なう.

- 1) アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の程度を評価する指標を与える.
- 2) 鋼桁に対して不完全合成であるアルミニウム床版の有効幅を明らかにする.
- 3) 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に対して,アルミニウム 床版と鋼桁に生じる温度変化応力および鋼桁の反りを明らかにする.

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B)(研究課題名:アルミニウム床版による軽量 橋の実現、課題番号 19360202,研究期間 2007~2008)の研究費補助金を受けた.

アルミニウム床版 - 鋼桁の弾性合成理論の構築にご協力をいただいた,研究当時大阪大 学大学院工学研究科博士前期課程の学生であった武野正和氏(現株式会社新日本製鐵) に感謝致します.

さらに、アルミニウム床版の有効幅に関して有益な助言をいただいた、アルミニウム橋 研究会 会長 倉西茂先生(東北大学名誉教授)ならびに委員の皆様に感謝致します. 目 次

第1章	序論	1
第2章	アルミニウム床版-鋼桁の弾性合成理論	
第3章	アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の評価指標	6
第4章	アルミニウム床版の有効幅	8
4.1.	道路橋示方書で規定される有効幅	8
4.2.	モデル桁	9
4.3.	弾性合成理論	9
4.4.	FEM 解析	11
4.5.	弾性合成理論による応力と FEM 解析による応力の	り比較13
第5章	アルミニウム床版-鋼桁橋の温度変化によって生	じる応力と反り27
5.1.	アルミニウム床版-鋼桁橋の試設計	27
5.2.	温度変化によって生じる応力	29
5.3.	温度変化によって生じる反り	
第6章	結論	
	参考文献	

第1章 序 論

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,床版が厚くなるため死荷重の増加によって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)によって連結された開閉断面アル ミニウム床版が開発されてきた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床版を撤去する際,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設けられた台座コンクリート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閉断面内へ挿入し,無収縮モルタルを充 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.

RC 床版と鋼桁が合成桁として設計された場合のスタッドの配置間隔を考慮すると,図2 に示す,スタッドの配置が320mmの等間隔では,アルミニウム床版と鋼桁の合成の程度は 不完全合成であると考えられる.そこで,本研究では,最初に,アルミニウム床版と鋼桁 の合成作用の程度を定量的に評価する指標を与える.

アルミニウム床版 - 鋼桁橋の設計を行なうとき、アルミニウム床版と鋼桁に生じる応力 および鋼桁のたわみは、有効幅を用いたアルミニウム床版 - 鋼桁に生じる応力およびたわ みによって評価される.そこで、本研究では、鋼桁に対して不完全合成であるアルミニウ ム床版の有効幅を明らかにする.

アルミニウム床版と鋼桁が合成作用を示すと、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、温度変化によって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とともに、鋼桁に反りが発生する.温度変化応力および反りの 大きさは、アルミニウム床版と鋼桁の寸法および両者の合成の程度に依存する.そこで、 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に対して、ア ルミニウム床版と鋼桁に生じる温度変化応力および鋼桁の反りを明らかにする.

1



図1 アルミニウム床版 一鋼桁橋



図2 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

第2章 アルミニウム床版 一鋼桁の弾性合成理論

序論で述べたように、アルミニウム床版と鋼桁の合成の程度は不完全合成であると考え られる.不完全合成は弾性合成理論によって説明される⁵⁾.そこで、アルミニウム床版-鋼 桁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として、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ると水平せん断力Hに対して、次式に示す比例関係を仮定する.

(1)

 $H=k\delta$



図3 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる断面力

鋼桁上フランジ上面の位置でのアルミニウム床版と鋼桁とのずれ量*d*δが次式で与えられる.

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

ここに,

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} d_s \tag{3}$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} - \frac{M_a}{E_a I_a} d_a \tag{4}$$

$$\Delta_T = (\alpha_s - \alpha_a) \Delta T \tag{5}$$

 $\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{as}$: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_r: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.

 $N_s = N_a = N$

(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.

$$\frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{M_a}{E_a I_a} \tag{7}$$

全モーメント*M*が次式で与えられる.

$$M = Na + M_a + M_s \tag{8}$$

ここに,

a : アルミニウム床版の図心と鋼桁の図心との間の距離

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.

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

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

式(6), (9), (10)を式(3)と(4)に代入して次式を得る.

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

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

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.

$$H = \frac{dN}{dx} \tag{13}$$

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.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -rM + k\Delta_T \tag{14}$$

ここに,

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

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

$$n_a = \frac{E_s}{E_a} \tag{17}$$

$$a = \frac{n_a A_v}{A_a} a_s = \frac{A_v}{A_s} a_a \tag{18}$$

$$A_{\nu} = \frac{A_a}{n_a} + A_s \tag{19}$$

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n_a} + A_v a_s a_a \tag{20}$$

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図心および鋼桁の図心までの距離

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{M_s}{E_s I_s} = -\frac{M_a}{E_a I_a}$$
(21)

ここに,

v : 合成桁のたわみ

式(9)または(10)を式(21)に代入して次式が与えられる.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a}$$
(22)

アルミニウム床版および鋼桁に生じる応力が次式で与えられる.

$$\sigma_a = -\frac{N}{A_a} - \frac{M_a}{I_a} y_a \tag{23}$$

$$\sigma_s = \frac{N}{A_s} - \frac{M_s}{I_s} y_s \tag{24}$$

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距離 式(6)と(9)および式(6)と(10)をそれぞれ式(23)と(24)に代入して次式を得る.

$$\sigma_a = \left(-\frac{1}{A_a} + \frac{E_a a y_a}{E_a I_a + E_s I_s}\right) N - \frac{E_a y_a}{E_a I_a + E_s I_s} M$$
⁽²⁵⁾

$$\sigma_s = \left(\frac{1}{A_s} + \frac{E_s a y_s}{E_a I_a + E_s I_s}\right) N - \frac{E_s y_s}{E_a I_a + E_s I_s} M$$
(26)

第3章 アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の評価指標

$$\phi = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_\infty} \qquad \left(0 \le \phi \le 1\right) \tag{27}$$

ここに,

- v。:完全合成の場合に対する鋼桁のたわみ
- v₀:非合成の場合に対する鋼桁のたわみ
- v : 不完全合の場合に対する鋼桁のたわみ

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 $\leq x \leq L/2$ の範囲の曲げモーメントが次式で与えられる.

$$M = \frac{P}{2}x\tag{28}$$

ここに,

x :支点からの距離

この式を式(14)へ代入し、 $\Delta_T = 0$ に対して式(14)は次式になる.

$$\frac{d^2N}{dx^2} - \lambda^2 N = -r\frac{P}{2}x\tag{29}$$

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(29)は次のように解かれる.

$$N = \frac{PA_s a_s}{2I_v} \left\{ x - \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right\}$$
(30)

式(28)と(30)を式(22)に代入して次式を得る.

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ \left(1 - \frac{A_v a_s a_a}{I_v}\right) x + \frac{A_v a_s a_a}{I_v} \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right\}$$
(31)

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(31)を解き,支間中央のたわみが次式で与えられる.

$$v = v_{\infty} + \frac{A_{\nu}a_{s}a_{a}}{I_{\nu}} \cdot \frac{3}{(\lambda L/2)^{2}} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} v_{0}$$

$$\Xi \subseteq k\mathbb{Z},$$
(32)

$$v_{\infty} = \frac{PL^3}{48E_s I_v} \tag{33}$$

$$v_0 = \frac{PL^3}{48(E_s I_s + E_a I_a)}$$
(34)

式(32), (33), (34)を式(27)に代入して, アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の評価指標 ¢ が次式で与えられる.

$$\phi = 1 - \frac{3}{\left(\lambda L/2\right)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{\left(\lambda L/2\right)} \right\}$$
(35)

この式から分るように、アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の程度は無次元パラメータ *LL*に支配される.式(35)が与える *¢* と *LL*の関係を図4に示す. *LL*が10以上のとき、*¢*は 0.9 より大きく、アルミニウム床版と鋼桁の関係は完全合成に近い.



図4 $\phi \geq \lambda L$ の関係

第4章 アルミニウム床版の有効幅

4.1 道路橋示方書で規定される有効幅

アルミニウム床版 - 鋼桁橋の設計を行なうとき、アルミニウム床版と鋼桁に生じる応力 および鋼桁のたわみは、有効幅を用いたアルミニウム床版 - 鋼桁に生じる応力およびたわ みによって評価される.有効幅は、図5に示すように、フランジに生じる実際の応力分布 に対して、ウェブ直上の最大応力が一様分布すると仮定して、両分布の面積が等しくなる ときの幅として定義される.すなわち、図5の片側有効幅*b*。は次式によって与えられる.

$$b_e = \frac{\int_0^b \sigma \, dx}{\sigma_{\max}}$$

ここに,

b_e : 片側有効幅

b : フランジの突出幅

σ : フランジに生じる応力

 σ_{max} :ウェブ直上の最大応力



道路橋示方書¹⁾では、単純支持桁に対する有効幅として次式が規定されている.

$$b_{e} = \begin{cases} b & \left(\frac{b}{L} \le 0.05\right) \\ \left\{1.1 - 2\frac{b}{L}\right\}b & \left(0.05 < \frac{b}{L} \le 0.30\right) \\ 0.15b & \left(0.30 < \frac{b}{L}\right) \end{cases}$$
(37)

ここに, L:単純支持桁の支間長

(36)

道路橋示方書で規定される有効幅は完全合成桁に対するものであり, RC 床板と鋼桁が合成桁として設計される場合, RC 床版の有効幅として使用される.

アルミニウム床版と鋼桁の合成作用は不完全合成である.したがって本章では,アルミ ニウム床版-鋼桁に関して一つのモデル桁を設定し,式(37)が与える有効幅を用いたアルミ ニウム床版-鋼桁に対して弾性合成理論によって算出される応力と,モデル桁全体に対し て FEM 解析によって算出される応力を比較することにより,アルミニウム床版の有効幅と して式(37)が使用できるか否かを調べる.

4.2 モデル桁

式(37)から、有効幅は b/L の値が大きくなると小さくなる. そこで、モデル桁では有効幅 が小さくなるように、支間長を 15m、アルミニウム床版の片幅を 2m とする. 第5章の表4 に示す支間長 15mに対するアルミニウム床版 – 鋼桁橋の鋼桁断面をモデル桁の鋼桁に使用 する. FEM 解析を容易にするために、アルミニウム床版に関して、橋軸方向に連続してい る上板のみを考慮し、アルミニウム床版の上板を鋼桁の上フランジの上面に弾性ばねで結 合する. モデル桁の断面形状を図 6 に示す. モデル桁は両端で単純支持され、支間中央に 100kN の集中荷重載荷および 10kN/m の等分布荷重載荷に対して計算する. アルミニウム床 版と鋼桁のヤング率をそれぞれ 70GPa、200GPa、ポアソン比を両者とも 0.3 とする.



図6 モデル桁の断面形状

4.3 弾性合成理論

図 6 に示すモデル桁のアルミニウム床版の片側有効幅 b_e は、アルミニウム床版と鋼桁の 合成作用が完全合成と仮定した場合、式(37)より 1584mm となるので、全有効幅 B_e は、片 側有効幅 *b_e*の 2 倍に,鋼桁上フランジの幅 280mm を加えて 3448mm になる.全有効幅 *B_e*を 用いたアルミニウム床版 - 鋼桁の断面形状を図 7 に示す.



図7 全有効幅 B_eを用いたアルミニウム床版 - 鋼桁の断面形状

アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の程度を評価する ϕ と λL の関係を表す図 4 において, $\lambda L = 5$, 10, 15, 20, 25, ∞ の各場合に対応する弾性ばねを考慮する. L = 15 m に対して λ の値が算出され,次式から弾性ばね k の値が算出される.

$$k = \frac{a_s E_s A_s (I_s + I_a/n_a)}{a I_v} \lambda^2$$
(38)

この式は,式(15)をkについて解いたものである. $\lambda L = 5$,10,15,20,25,∞に対して, それぞれk = 0.107kN/mm²,0.427kN/mm²,0.960kN/mm²,1.707kN/mm²,2.667kN/mm², ∞kN/mm²になる. $\lambda L \ge k$ の値に対応して,表1に示すような計算ケースの識別を行う. 表1(a)は集中荷重載荷に対する計算ケースの識別であり,表1(b)は等分布荷重載荷に対す る計算ケースの識別である.

計算ケース	λL	$k (kN/mm^2)$				
C5	5	0.107				
C10	10	0.427				
C15	15	0.960				
C20	20	1.707				
C25	25	2.667				
C∞	~	∞				

表1 計算ケースの識別 (a) 集中荷重載荷

計算ケース	λL	$k (kN/mm^2)$
U5	5	0.107
U10	10	0.427
U15	15	0.960
U20	20	1.707
U25	25	2.667
vU	×	8

(b) 等分布荷重載荷

集中荷重載荷に対する曲げモーメント*M*および軸力*N*はそれぞれ式(28), (30)で与えられる.

等分布荷重が載荷された場合,曲げモーメントは次式で与えられる.

$$M = -\frac{q}{2}x^2 + \frac{qL}{2}x$$
 (39)

ここに,

q :単位長さ当たりの荷重の大きさ

x : 支点からの距離

式(39)を式(14)へ代入し、 $\Delta_T = 0$ として式(14)は次式になる.

$$\frac{d^2N}{dx^2} - \lambda^2 N = r \left(\frac{q}{2}x^2 - \frac{qL}{2}x\right)$$
(40)

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(40)が次のように解かれる.

$$N = \frac{A_s a_s}{I_v} \left(-\frac{q}{2} x^2 + \frac{qL}{2} x \right) \left\{ 1 - \frac{2}{x(L-x)\lambda^2} \left(\frac{\cosh\{\lambda(L/2-x)\}}{\cosh(\lambda L/2)} \right) \right\}$$
(41)

曲げモーメント*M* および軸力*N*を式(25)と(26)に代入して,アルミニウム床版と鋼桁に 生じる応力が求められる.

4.4 FEM 解析

図6の断面形状を有するモデル桁の全体解析は,汎用有限解析プログラムMARC⁶による FEM 解析によって行なった.要素分割を図8に示す.支間中央に関する対称性より,支間 の半分を要素分割した.使用した要素は,アルミニウム床版および鋼桁上フランジに対し て20節点立体要素(MARCの要素タイプ21),鋼桁ウェブおよび下フランジに対して8節点 厚肉曲面シェル要素(MARCの要素タイプ22)である.図8の拡大図に示すように,鋼桁ウ ェブと鋼桁上フランジの交差部では,鋼桁上フランジの20節点立体要素を15節点に縮退 化させた立体要素にウェブの8節点シェル要素を結合させた.

アルミニウム床版下面と鋼桁上フランジ上面に2重節点を設け、2重節点のx、z方向の

変位を同一にした.さらに鋼桁上フランジの両縁の2重節点に対してはy方向をばね要素で 結合した.前述の弾性ばねkの値の半分に節点間の距離を乗じた値をばね要素の剛性とした. 集中荷重載荷では支間中央の鋼桁ウェブの,ウェブ高の1/2の位置に集中重を載荷し,等 分布荷重載荷では鋼桁ウェブの,ウェブ高の1/2の位置に等分布荷重を載荷した.



12

4.5 弾性合成理論による応力と FEM 解析による応力の比較

弾性合成理論による応力と FEM 解析による応力の比較を,表1(a)の解析ケース C5~C ∞に対して図9~14 に示し,表1(b)の解析ケース U5~U∞に対して図15~20 に示す.各図 の図(a),(b),(c)は,それぞれアルミニウム床版上板の応力,鋼桁上フランジの応力,鋼 桁下フランジの応力を表す.さらに,支間中央における,アルミニウム床版上の応力,鋼 桁上フランジの応力,鋼桁下フランジの応力ならびに弾性合成理論による応力に対する FEM 解析による応力の比を表2に示す.表2(a)は集中荷重載荷に対する結果であり,表2(b) は等分布荷重載荷に対する結果である.図9~20 および表2から次のことがわかる.

- 集中荷重載荷に対して、支間中央付近のアルミニウム床版上板の応力に関して、弾性合成理論値が FEM 解析値より小さくなるが、これ以外の領域では両者の値はほぼ一致している。鋼桁上フランジおよび鋼桁下フランジの各応力に関しては、全領域で弾性合成理論値と FEM 解析値はほぼ一致している。
- 2) 等分布荷重載荷に関して、アルミニウム床版上板、鋼桁上フランジおよび鋼桁下フランジの各応力に関して、全領域で弾性合成理論値と FEM 解析値はほぼ一致している.

したがって式(37)が与える有効幅は、アルミニウム床版と鋼桁の合成作用が不完全合成で あるアルミニウム床版の有効幅として使用しても問題はないと考える.すなわち道路橋示 方書で規定される有効幅はアルミニウム床版の有効幅として使用して問題はないと考える.

















支間(mm)

鋼桁下ランジ

計算ケース C15

(c)

図 11



(a) アルミニウム床版上板













(a) アルミニウム床版上板



(c) 鋼桁下ランジ図 14 計算ケース C∞



(a) アルミニウム床版上板



(b) 鋼桁上フランジ





(a) アルミニウム床版上板







(a) アルミニウム床版上板







(a) アルミニウム床版上板







(a) アルミニウム床版上板







(a) アルミニウム床版上板





(a) 集中荷重載荷 計算ケース C5 C15 C20 C25 C10 С∞ アルミニウム床版上板 (MPa) -3.54 -4.55 -4.94 -5.15 -5.28 -6.00 FEM 値 上フランジ (MPa) -22.76 -20.16 -16.18 -30.82 -18.96 -18.30 鋼桁 下フランジ (MPa) 47.76 45.69 45.06 44.78 44.64 44.28 アルミニウム床版上板 (MPa) -3.27 -4.25 -4.59 -4.76 -4.86 -5.24 弹性合成理論值 上フランジ (MPa) -30.84 -18.84 -22.92 -20.20 -18.02 -14.31 鋼桁 下フランジ (MPa) 47.56 45.40 44.66 44.29 44.07 43.36 アルミニウム床版上板 1.08 1.07 1.08 1.08 1.09 1.15 FEM値 上フランジ 0.99 1.00 1.00 1.01 1.02 1.13 弹性合成理論值 鋼桁 下フランジ 1.00 1.01 1.02 1.01 1.01 1.01

表2 支間中央のアルミニウム床版上板,鋼桁上フランジ,鋼桁下フランジの応力

(b)	等分布荷重載荷
-----	---------

計算ケース				U10	U15	U20	U25	$\infty \mathrm{U}$
FEM 値	アルミニウム床版上板 (MPa)		-2.89	-3.51	-3.65	-3.70	-3.72	-3.77
	鋼桁	上フランジ (MPa)	-19.09	-13.07	-11.63	-11.11	-10.86	-10.38
		下フランジ (MPa)	34.80	33.20	32.81	32.67	32.61	32.48
	アルミニウム床版上板 (MPa)		-2.92	-3.63	-3.79	-3.85	-3.88	-3.93
弾性合成理論値	鋼桁	上フランジ (MPa)	-18.94	-13.25	-11.93	-11.46	-11.25	-10.73
		下フランジ (MPa)	34.87	33.28	32.91	32.77	32.71	32.52
EEM/dd	アノ	レミニウム床版上板	0.99	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96
$\Gamma EMI 個 — — — — — — — — — — $	细粒	上フランジ	1.01	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97
	¥ጦባነ1]	下フランジ	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

第5章 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 と反り

5.1 アルミニウム床版 - 鋼桁橋の試設計

アルミニウム床版-鋼桁橋の断面形状を図21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,鋼桁の断面寸法は,以下の条件に対して,「非合成鈑桁の 概略設計計算プログラム」⁷⁾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3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) 衝撃を考慮しない活荷重によるたわみの許容値を支間中央のたわみに対して L/500mm とする.これは,道路橋示方書において,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規定である.
- v) 鋼材は SM490Y 材を使用する.
- vi) 鋼桁断面は橋軸方向に沿って一定とする.
- 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 の各アルミニウム床版 – 鋼 桁橋に対して得られる鋼桁断面の寸法を**表 4** に示す.

図2に示す連結構造の弾性ばね*k*は、台座コンクリート厚さが30mmのとき0.304kN/mm²である⁸⁾. アルミニウム床版の有効幅は式(37)に従う. このとき、式(15)によって算出される、各支間長のλの値を表4に示す. 表4の各支間長に対する λLの値を図4にプロットした結果を図22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一鋼桁橋の合成作用の程度は完全合成に近いといえる.



図21 アルミニウム床版 - 鋼桁橋の断面形状

表 3 死 荷	訂重
----------------	----

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4 鋼桁断面の寸法

支間長	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		2279	22(9	24(7	2510
全有効幅[mm]		2278	2308	2467	2519
λ[1/mm]		6.71×10 ⁻⁴	6.04×10 ⁻⁴	5.36×10 ⁻⁴	4.76×10 ⁻⁴



5.2 温度変化によって生じる応力

式(14)より,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 式が次式で与えられる.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = k \Delta_T \tag{42}$$

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(42)の解が次式で与えられる.

$$N = N_{\infty} \left[1 - \frac{\cosh\{\lambda(L/2 - x)\}}{\cosh(\lambda L/2)} \right]$$
(43)

ここに,

$$N_{\infty} = -\frac{a_s E_s A_s (I_s + I_a / n_a)}{a I_v} \Delta_T$$
(44)

N_∞は完全合成の場合の温度変化によって生じる軸力である.

表4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.アルミニウムと鋼の線膨張係数をそれぞれ2.4×10⁻⁵ 1/℃と1.2×10⁻⁵ 1/℃とする.

温度変化応力は支間中央において最大となるので,式(43)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.

$$N = N_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(\lambda L/2)} \right\}$$
(45)

式(45)を式(25)と(26)に代入して得られる,支間中央の断面に生じる温度変化応力を表 5 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.この表から分かるように,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.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⁹⁾. 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 であり¹⁾, 鋼桁上フランジに生じる応力は許容応力の 16%~20%である.

5.3 温度変化によって生じる反り

式(43)を式(22)に代入し, *M*=0として, 次の温度変化による反りに関する 2 階微分方程 式を得る.

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = -\frac{A_s a_s}{I_v} \left[1 - \frac{\cosh\{\lambda(L/2 - x)\}}{\cosh(\lambda L/2)} \right] \Delta_T$$
(46)

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(46)を解いて、支間中央のたわみが次式で与えられる.

$$v_T = v_{T\infty} \left[1 - \frac{2}{\left(\lambda L/2\right)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(\lambda L/2)} \right\} \right]$$
(47)

ここに,

$$v_{T\infty} = \frac{A_s a_s L^2}{8I_v} \Delta_T \tag{48}$$

 $v_{T\infty}$ 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(47)から算出される、30[°]Cの温度上昇により支間中央に生じる反り v_T および反りを支間長で割った相対反り v_T/L を表5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反りおよび相対反り も示されている.温度上昇に対して、アルミニウム床版ー鋼桁橋は上方向に反る.温度変 化によって生じる支間中央の反りは、完全合成の場合のそれに近い.相対反り v_T/L は、支 間長に関わらず約 1/2500 である.

		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 – 鋼桁橋の反り v_T [mm]		-5.90	-7.94	-11.57	-15.70	-6.40	-8.40	-11.94	-16.06
$\frac{v_T}{L}$		$\frac{1}{2542}$	$\frac{1}{2520}$	$\frac{1}{2593}$	$\frac{1}{2547}$	$\frac{1}{2344}$	$\frac{1}{2382}$	$\frac{1}{2513}$	$\frac{1}{2491}$

表5 アルミニウム床版 一鋼桁橋の温度変化応力と支間中央の相対反り

第6章 結 論

本研究では、アルミニウム床版 - 鋼桁橋の合成作用を明らかにし、温度変化によって生じる応力と反りを算出した.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作用の程度を評価する指標として式(35)を与えた.
- 2) 道路橋示方書で規定される有効幅がアルミニウム床版の有効幅に使用できる.
- 3) 図2に示す連結構造を有するアルミニウム床版 鋼桁橋の合成作用の程度は完全合成に 近い.
- 4) 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.
- 5) 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増加し、鋼桁で減少する.
- 6) 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.
- 7) 30℃の温度変化による,支間長に対する反りの比*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.
- 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) 0. シュタインハルト, A. ハウラネック (訳) 橘義雄, 小松定夫: 鋼橋の理論と計算, 山海堂, pp. 470-477, 1965.
- 6) 日本エムエスシー: MSC. MARC2005 日本語オンラインマニュアル, 日本エムエスシー, 2005.
- 7) ドルフィーソフトウエア: Ezy Bridge 1「非合成鈑桁箱桁の概略自動設計」取扱説明書, ドルフィーソフトウエア, 2002.
- 8) 武野正和,高木眞広,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.
- 9) 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.