

アルミニウム床版と鋼桁との連結部
の水平せん断バネの特性および
実橋の合成度

ALST 研究レポート 24

2012 年 7 月

大阪大学大学院工学研究科
北里龍馬，大倉一郎

概要

本研究は、三次元 FEM 解析によって、アルミニウム床版上板と鋼桁下フランジとの連結部の水平せん断バネの特性を調べる。さらに、三次元 FEM 解析によって得られた水平せん断バネの値を用いて、実橋のアルミニウム床版と鋼桁との合成度を明らかにする。

目次

第1章	序論	…1
第2章	三次元 FEM 解析	…7
	2.1 解析モデル	…7
	2.2 解析値と試験値の比較	…9
	2.2.1 たわみ	…9
	2.2.2 ひずみ	…9
第3章	コンクリート台座がアルミニウム床版と鋼桁との合成作用に及ぼす影響	…13
	3.1 コンクリート台座の影響	…13
	3.2 解析モデルと解析結果	…13
第4章	水平せん断バネの特性	…17
	4.1 水平せん断バネの算出方法	…17
	4.2 コンクリート台座の高さが水平せん断バネに与える影響	…18
	4.3 アルミニウム床版の幅が水平せん断バネに与える影響	…23
	4.4 頭付きスタッドの本数が水平せん断バネに与える影響	…24
第5章	実橋の合成度	…26
	5.1 合成度	…26
	5.2 実橋の合成度	…26
	5.3 アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の平面保持の影響	…28
	5.4 アルミニウム床版を有する鋼桁橋の設計法への提案	…31
第6章	結論	…32
	参考文献	…33

第 1 章 序論

国土交通省の道路整備の中期ビジョン(案)¹⁾によれば、2006年現在、橋長15m以上の橋梁が約14万橋あり、そのうち建設後50年以上経過した橋梁が2006年現在約8900橋、2016年および2026年にはそれぞれ約28400橋、約66300橋に達することが予想されている。これらの橋梁の中には補修の必要な橋梁が数多く出てくることが予想され、鉄筋コンクリート床版の取り換えが必要な橋梁も出てくることが予想される。他方、1993年の道路構造令の改正により、設計自動車荷重が196kNから245kNに変更されたことにより、鉄筋コンクリート床版を取り換える場合、現行の「道路橋示方書²⁾」を適用すると床版厚を厚くしなければならぬ橋梁も出てくる。床版が厚くなれば自重が増加するため、鋼桁や下部工への荷重が増加し、耐震性にも問題が出てくる。そこで、鉄筋コンクリート床版の重量に対して約1/5のアルミニウム床版で取り換えることにより、これらの問題を解決することができないかと考えられた³⁾。新設の際にも、建設重機を小型化できることによる工期短縮、下部工の小型化、耐食性の良さからライフサイクルコストの削減にもつながるなどの利点が挙げられる。

このような背景で、2000年頃、道路橋用アルミニウム床版に関する研究が開始された⁴⁾。道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋のイメージを図-1.1、アルミニウム床版の断面形状を図-1.2に示す。図-1.2に示す中空の部材が橋軸直角方向に並ぶような形式で、複数の鋼主桁上にアルミニウム床版が設置される。材料はA6061-T6であり、幅320mm、高さ200mmの中空押出型材を摩擦撚拌接合で接合することによってアルミニウム床版が製作される⁵⁾。アルミニウム床版と鋼桁との連結構造⁶⁾、現場継手⁷⁾、地覆定着⁸⁾、摩擦撚拌接合部の疲労強度^{9),10)}に関する研究が行われ、2008年、静岡県富士市にある施工技術総合研究所において、図-1.3に示す道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験の公開実験が行われた。床版支間長2500mmのアルミニウム床版に対して、トラックタイヤによって138kNの荷重が121.7万回往復載荷されたが、疲労亀裂は発生せず、アルミニウム床版の疲労耐久性が高いことが実証された¹¹⁾。

その後、「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¹²⁾」が日本アルミニウム協会から発刊され、2011年4月には、図-1.4に示す道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設された¹³⁾。

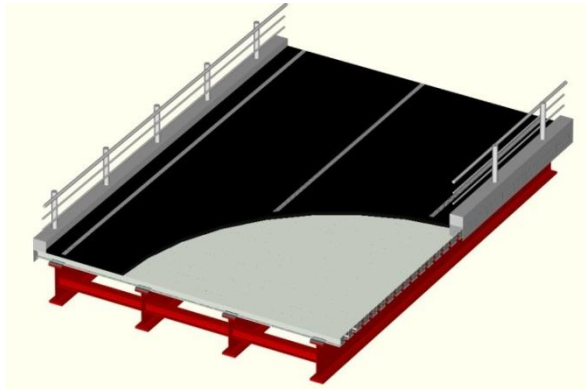


図-1.1 道路橋用アルミニウム床版を用いた
鋼桁橋のイメージ

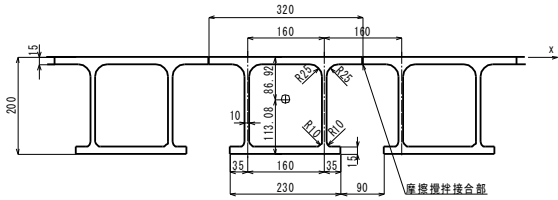


図-1.2 アルミニウム床版の断面形状



図-1.3 道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験



図-1.4 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図-1.5 に示す。鋼桁上フランジに溶接された頭付きスタッドが、アルミニウム床版の下フランジに設けられた開口から閉断面内に挿入され、対向するアルミニウム仕切り板の間を無収縮モルタルで充填することにより、アルミニウム床版が鋼桁に連結される。したがって、アルミニウム床版と鋼桁との間には合成作用が生じる。アルミニウム合金の線膨張係数は鋼桁のその約 2 倍あるため、温度変化によって、アルミニウム床版と鋼桁のそれぞれに内部応力が生じる。

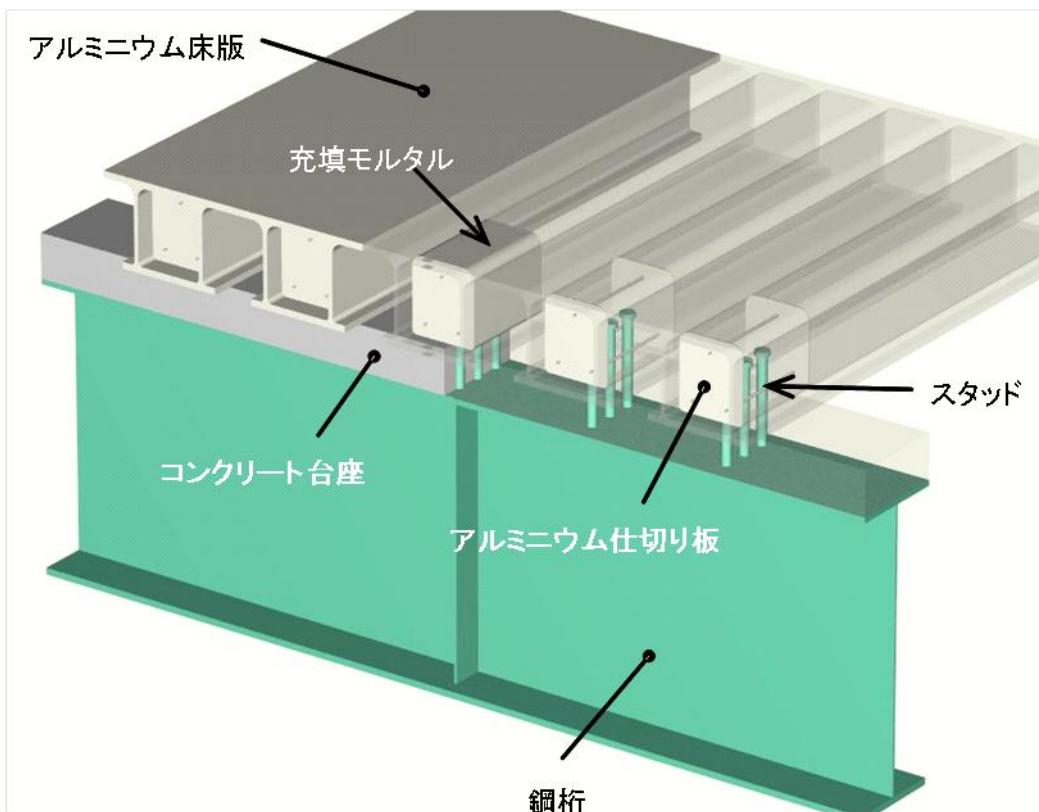


図-1.5 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を明らかにするために、図-1.6 に示す、アルミニウム床版と鋼桁から成る試験体の静的載荷試験が実施された¹⁴⁾。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に生じる水平せん断力と両者の水平変位差との関係に対して次式が仮定された。

$$H = k^*(u_f - u_a^*) \quad (1.1)$$

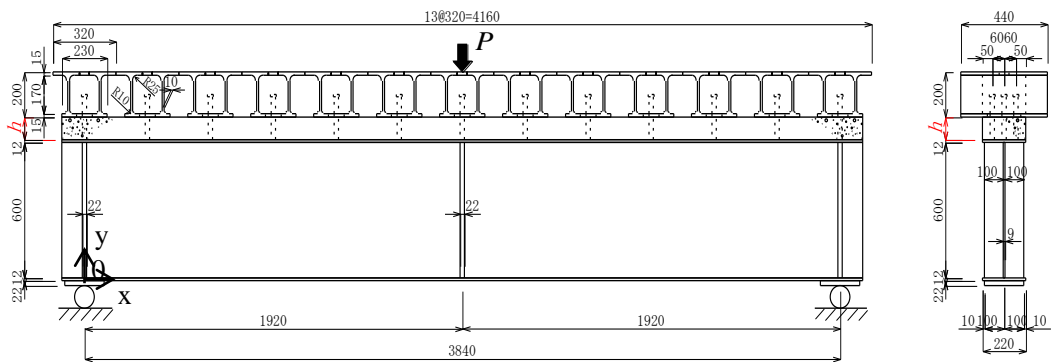
ここに、図-1.7 を参照して、

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

u_f, u_a^* : それぞれ, 鋼桁上フランジの上面の変位およびアルミニウム床版上板の, 鋼桁上フランジの上面の位置での変位

式(1.1)から, アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる軸力 (図-1.7 の N_a と N_s) に関する微分方程式が誘導された. しかし, 試験体に対して得られた水平せん断バネの値は, コンクリート台座の高さ (図-1.6 の h) と規則的な関係を示さなかった¹⁴⁾.



試験体	h (mm)
II	30
III	60
IV	100

図-1.6 試験体

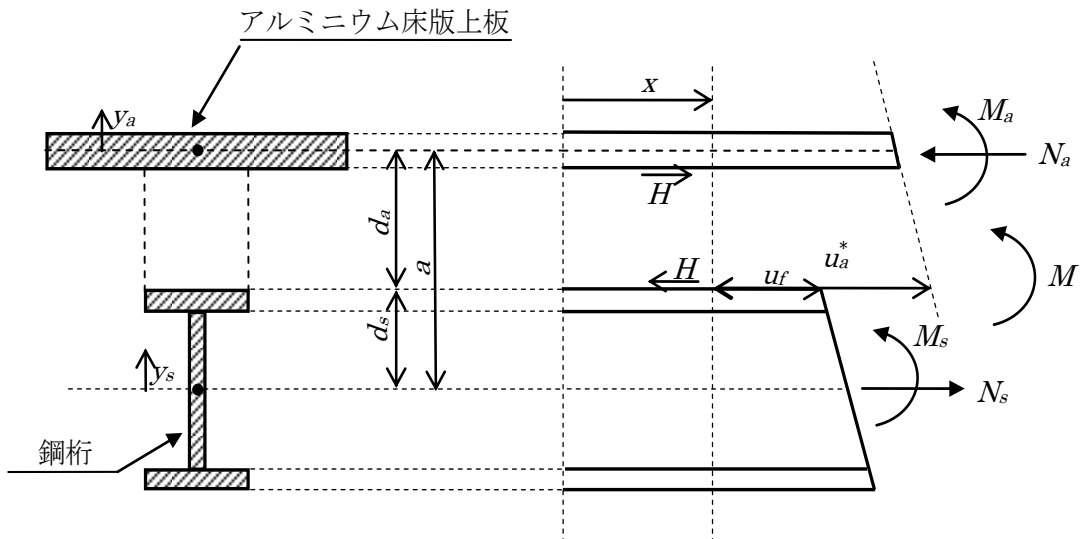


図-1.7 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる水平せん断力と水平変位

試験体に対して得られた水平せん断バネの値が, コンクリート台座の高さと規則的な関係を示さなかった原因として, 図-1.6 から分かるように, アルミニウム床版には無収縮モ

ルタルが充填されていない断面が存在するので、式(1.1)において、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けることの妥当性が疑われた。そこで式(1.1)は次式に修正された¹⁵⁾。

$$H = k(u_f - u_a) \quad (1.2)$$

ここに、**図-1.8**を参照して、

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

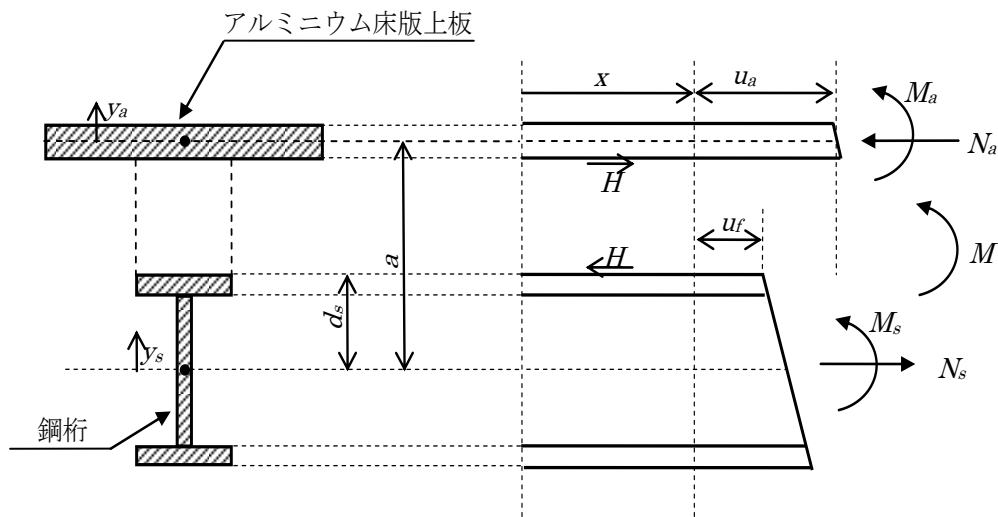


図-1.8 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる水平せん断力と水平変位

式(1.2)は式(1.1)に似ているが、式(1.2)では、鋼桁上フランジの上面の水平変位とアルミニウム床版上板の中立面の水平変位の差がとられているので、両者の間に平面保持の仮定は設けられていない。式(1.2)によって定義された水平せん断バネは、コンクリート台座の高さが高くなるに従って低下することが示された¹⁵⁾。

式(1.2)によって定義される水平せん断バネの推定には、**図-1.9**に示す、二次元 FEM 解析による結果が使用された。奥行きは平面要素の厚さで考慮され、アルミニウム床版下フランジと頭付きスタッドが交差する部分の平面要素の厚さは、アルミニウム床版下フランジの奥行きに、アルミニウム合金のヤング率を鋼のヤング率で除した比率を掛けた長さを頭付きスタッドの奥行きに加えたものが使用された。実構造では、頭付きスタッドはアルミニウム床版下フランジに設けられた開口に挿入され、頭付きスタッドはアルミニウム床版

下フランジに連結されていない。したがって、二次元 FEM 解析による結果を用いて推定された、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの連結部の水平せん断バネの値の精度に関しては疑いが残る。

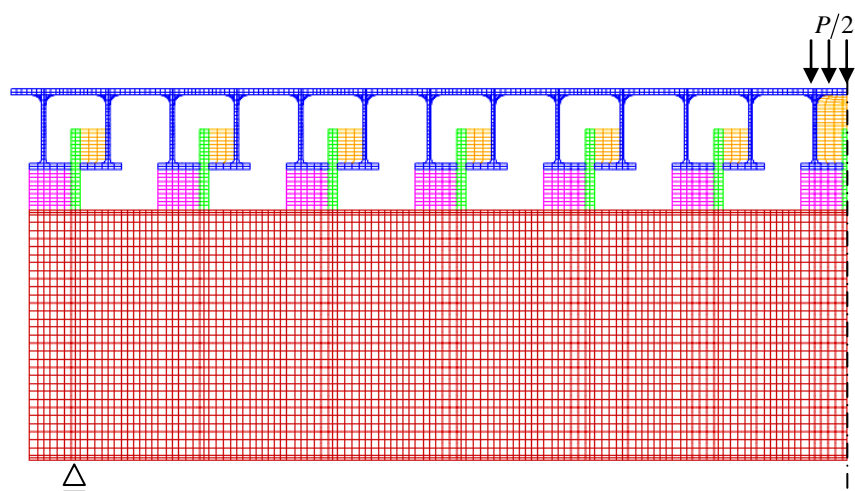


図-1.9 二次元 FEM 解析モデル

本研究は、三次元 FEM 解析によって、アルミニウム床版上板と鋼桁下フランジとの連結部の水平せん断バネの特性を調べる。さらに、三次元 FEM 解析によって得られた水平せん断バネの値を用いて、実橋のアルミニウム床版と鋼桁との合成度を明らかにする。

第 2 章 三次元 FEM 解析

2.1 解析モデル

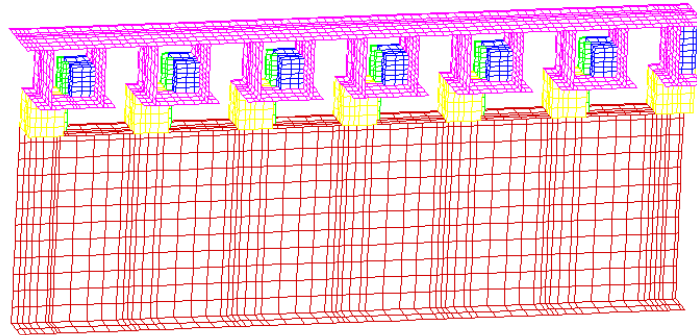
三次元 FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA¹⁶⁾を使用する。コンクリート台座の高さ $h=100\text{mm}$ の試験体IVに対する要素分割を図-2.1 に示す。支間中央および鋼桁ウェブの板厚中央に関する対称性より、試験体の 1/4 の部分が要素分割されている。有限要素は、アルミニウム床版と鋼桁に対して 4 節点平面シェル要素(Q20SF)、コンクリート台座、充填モルタル、頭付きスタッドに対して 8 節点アイソパラメトリック・ソリッド・ブロック要素(HX24L)である。支間中央のアルミニウム床版上板に、荷重 $P/4=122.5\text{kN}$ を集中荷重として与える。アルミニウム床版、鋼桁、充填モルタル、コンクリート台座のヤング率とポアソン比に対して表-2.1 に示す材料試験値を使用する。直径 22mm で高さ 200mm の頭付きスタッドのヤング率とポアソン比はそれぞれ 200GPa, 0.3 とする。

頭付きスタッドの右側のアルミニウム床版下フランジはコンクリート台座から離れるので¹⁵⁾、頭付きスタッドの右側のコンクリート台座を無視する。アルミニウム床版上板と鋼桁との間に生じる水平せん断力は、頭付きスタッドと、頭付きスタッドの右側のアルミニウム床版ウェブとの間に挟まれた充填モルタルに生じる圧縮力によって伝達されるので、頭付きスタッドの左側の充填モルタルを無視する。円柱の頭付きスタッドをブロック要素で分割するには多くの要素を必要とするので、直径 22mm の頭付きスタッドを正四角柱に置き換える。式(1.2)が示すように、水平せん断力は、鋼桁上フランジの上面の水平変位とアルミニウム床版上板の水平変位に関連付けられるので、円柱の頭付きスタッドと正四角柱の断面二次モーメントが等しくなるように、正四角柱断面の一辺の長さを 19.27mm とする。

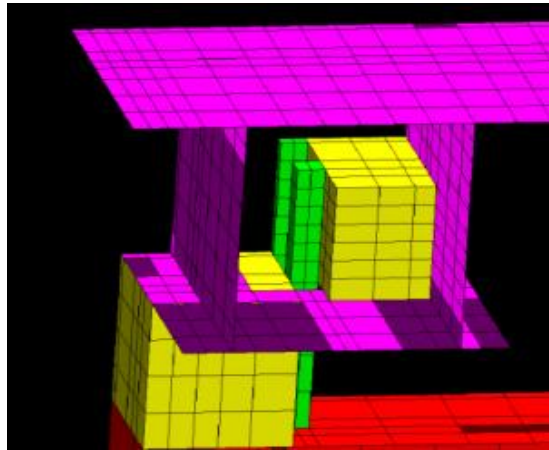
アルミニウム床版と鋼桁との連結部の要素分割を図-2.1 (b) に示す。頭付きスタッドは、アルミニウム床版下フランジの開口に挿入され、両者は連結されていない。

アルミニウム床版上板とウェブが交差する部分およびウェブと下フランジが交差する部分のフィレットは、図-2.2 に示すように、各板厚をフィレットの弧の midpoint まで厚くすることによって考慮する。

アルミニウム床版、頭付きスタッド、充填モルタル、コンクリート台座、鋼桁の異種材料間の界面の節点をすべて共有させる。アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面では、それぞれ水平方向にずれることが予想される。この影響は第 3 章で明らかにする。



(a) 全体

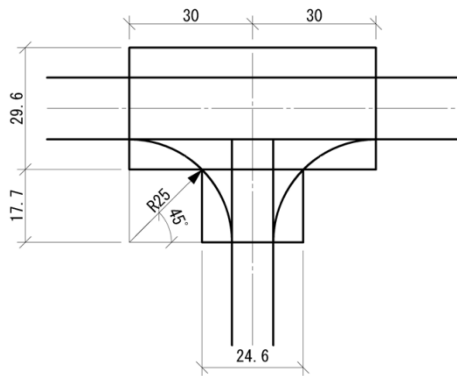


(b) 連結部

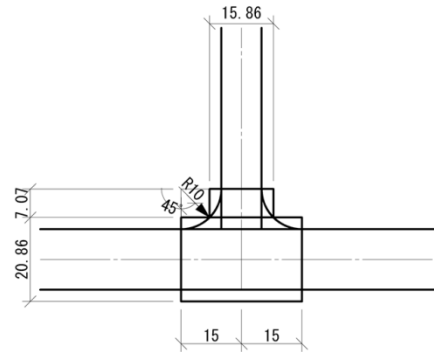
図-2.1 要素分割 (試験体IV)

表-2.1 試験体の材料試験値

	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
アルミニウム合金材	70.6	0.312
鋼材(ウェブ)	210	0.285
鋼桁(フランジ)	202	0.283
コンクリート台座	21.5	0.172
充填モルタル	26.8	0.222



(a) 上板とウェブのフィレット



(b) ウェブと下フランジのフィレット

図-2.2 アルミニウム床版のフィレットのモデル化

2.2 解析値と試験値の比較

2.2.1 たわみ

試験体の支間中央の鋼桁下フランジの下面のたわみに関して、解析値と試験値の比較を表-2.2に示す。試験体Ⅱ，Ⅲ，Ⅳは、図-1.6に示すように、コンクリート台座の高さ h が異なる。さらに、アルミニウム床版上板とウェブが交差する部分およびウェブと下フランジが交差する部分のフィレットが考慮されない解析値も示す。フィレットが考慮された解析値は、フィレットが考慮されない解析値より試験値に近い。したがって、アルミニウム床版のフィレットを考慮する。

表-2.2 試験体の支間中央のたわみ

試験体	試験値 (mm)	解析値	
		フィレット考慮 (mm)	フィレット考慮なし (mm)
Ⅱ ($h=30$ mm)	4.104	4.046	4.422
Ⅲ ($h=60$ mm)	3.696	3.952	4.400
Ⅳ ($h=100$ mm)	3.765	4.044	4.490

2.2.2 ひずみ

試験体の鋼桁下フランジの下面、鋼桁上フランジの下面、アルミニウム床版上版の上面に生じるひずみに関して、解析値と試験値の比較を、試験体Ⅱ，Ⅲ，Ⅳに対してそれぞれ図-2.4，2.5，2.6に示す。各図の横軸は、支点からの水平距離である。各試験体において、解析値は試験値に近い値を示している。したがって、アルミニウム床版を有する鋼桁の構造解析に三次元 FEM 解析を使用する。

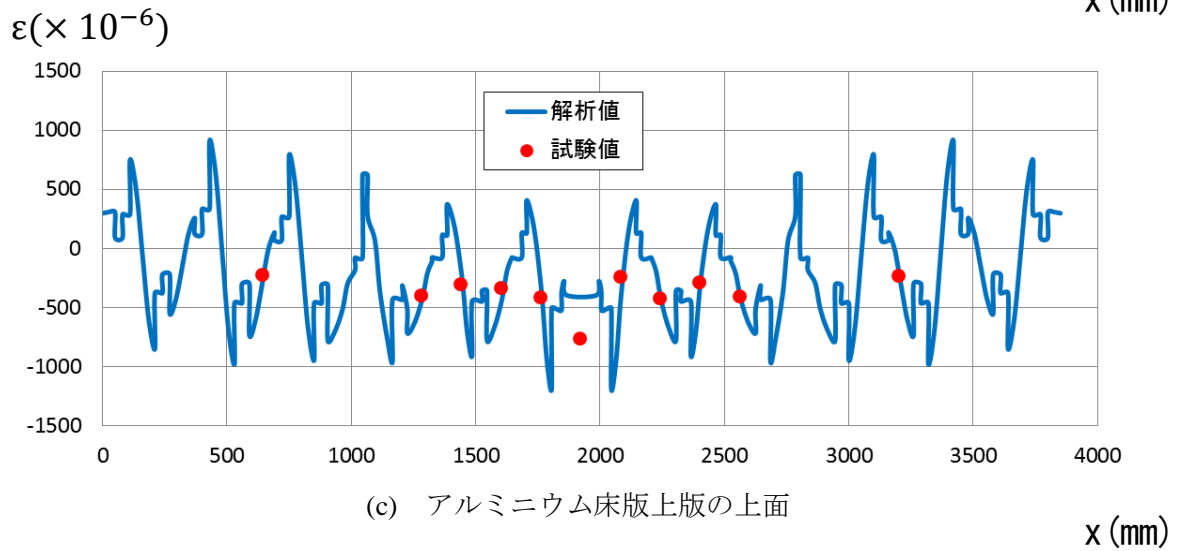
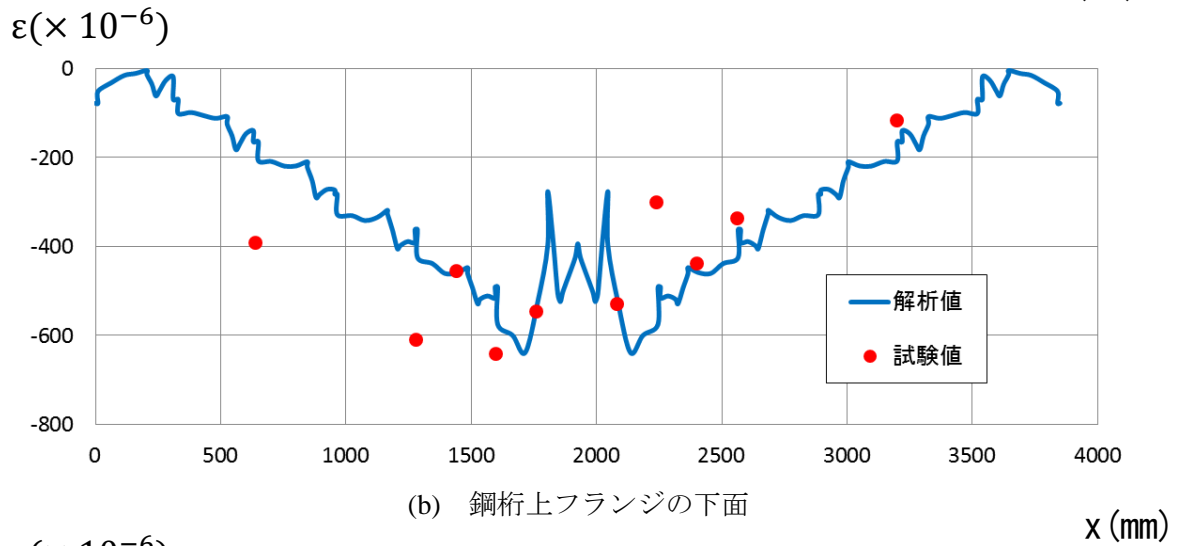
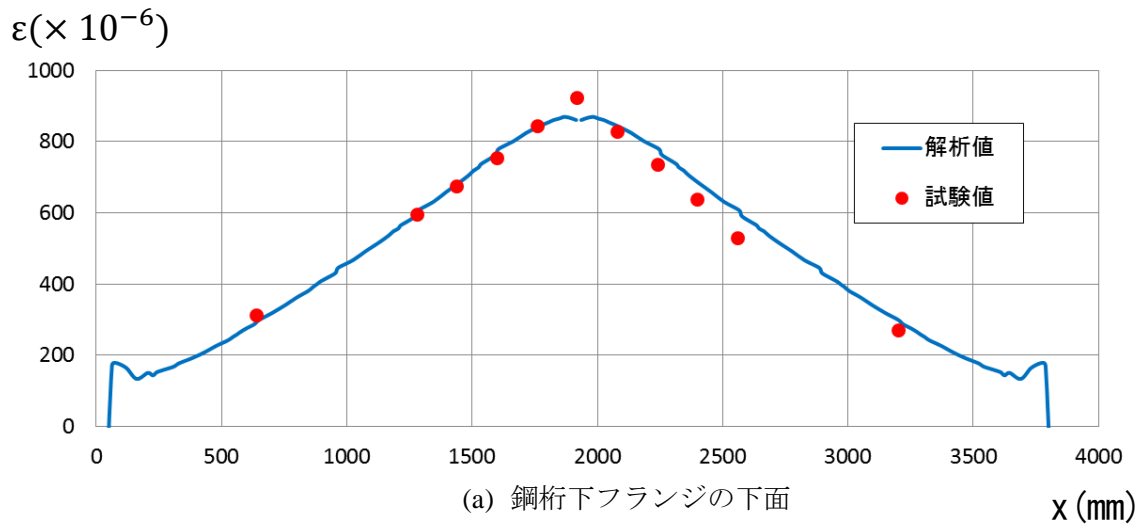


図-2.4 試験体Ⅱに生じるひずみ

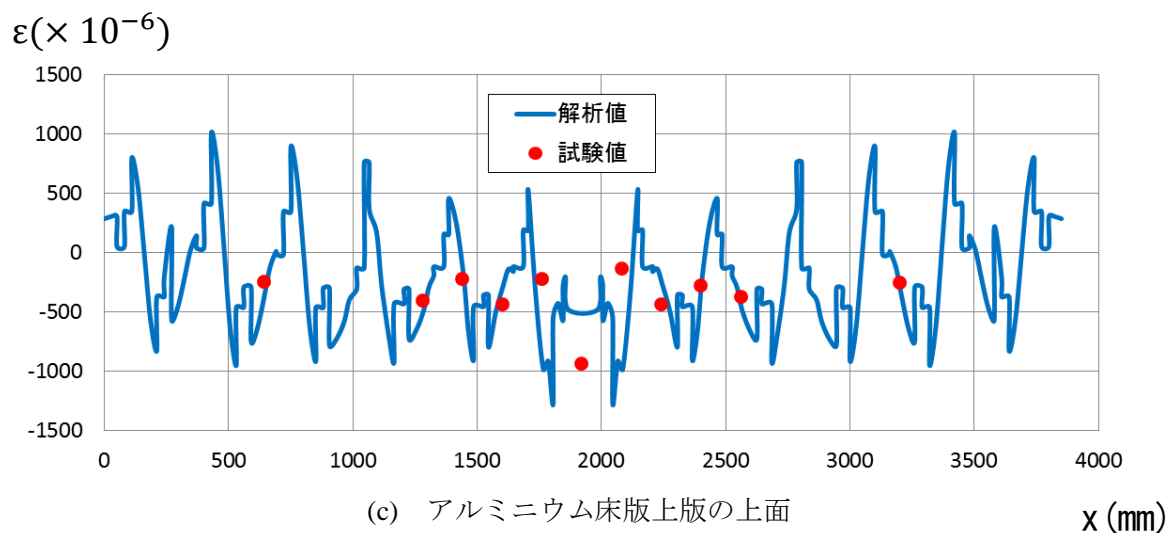
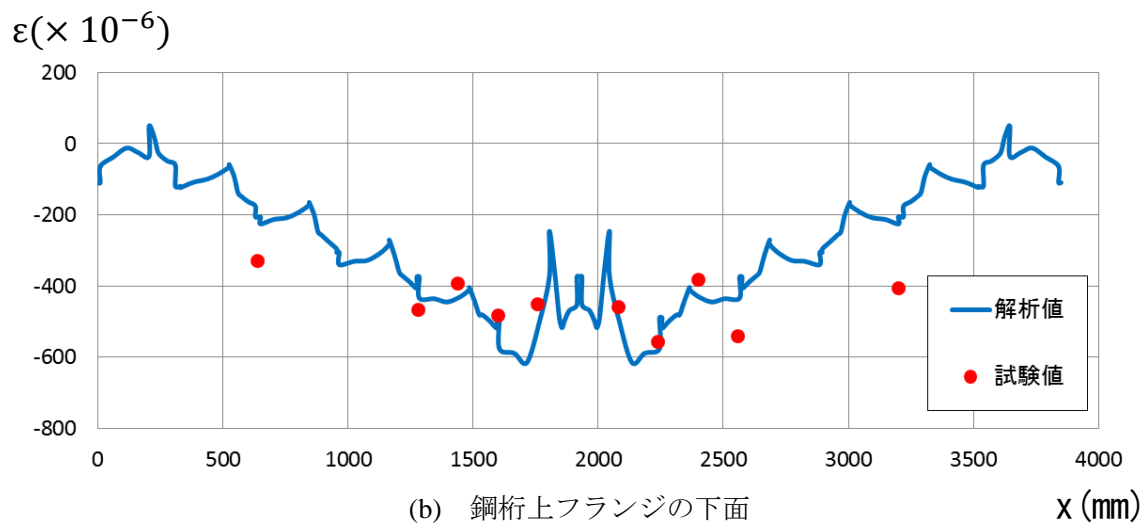
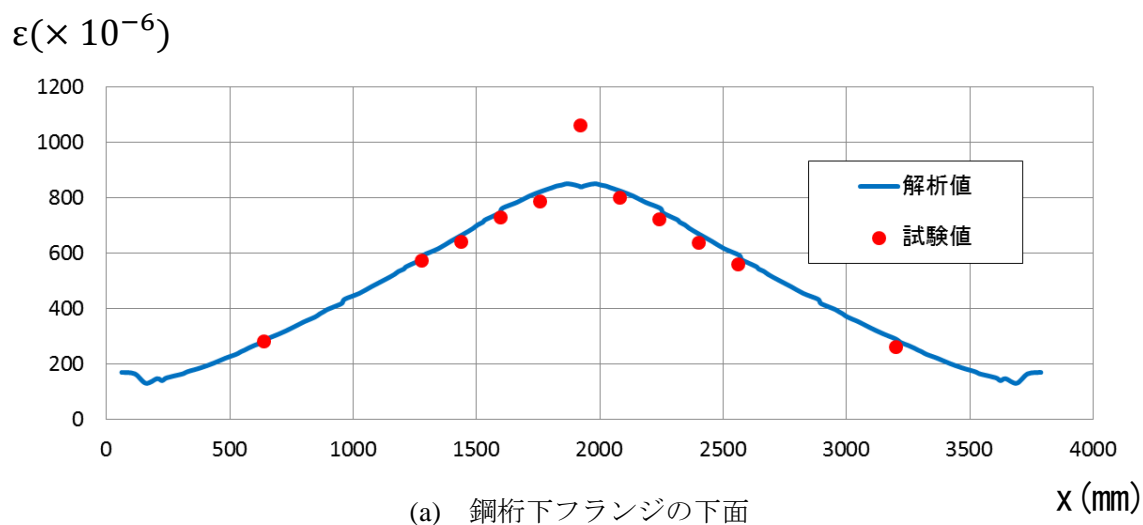


図-2.5 試験体Ⅲに生じるひずみ

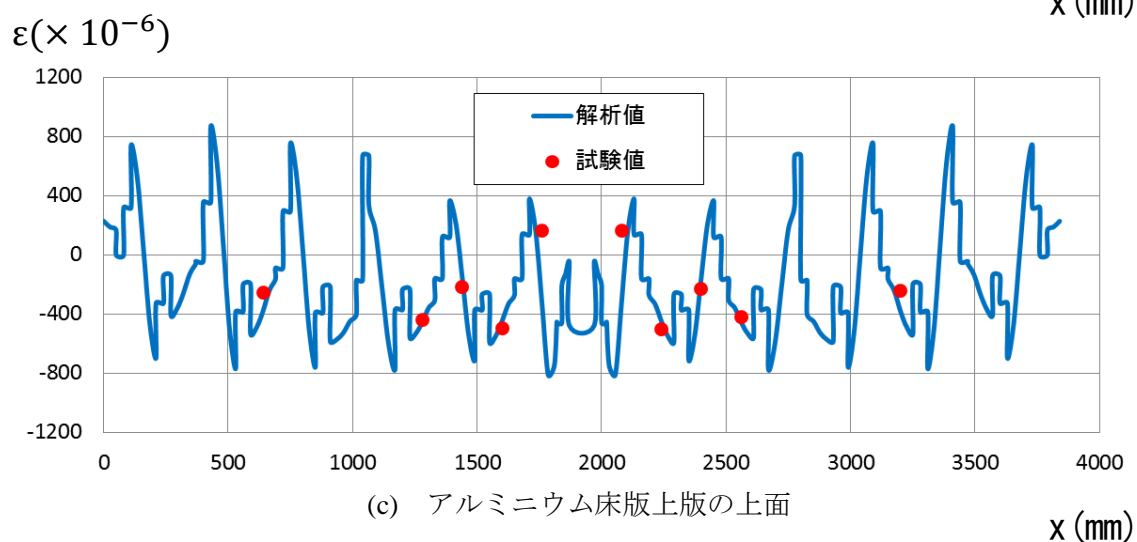
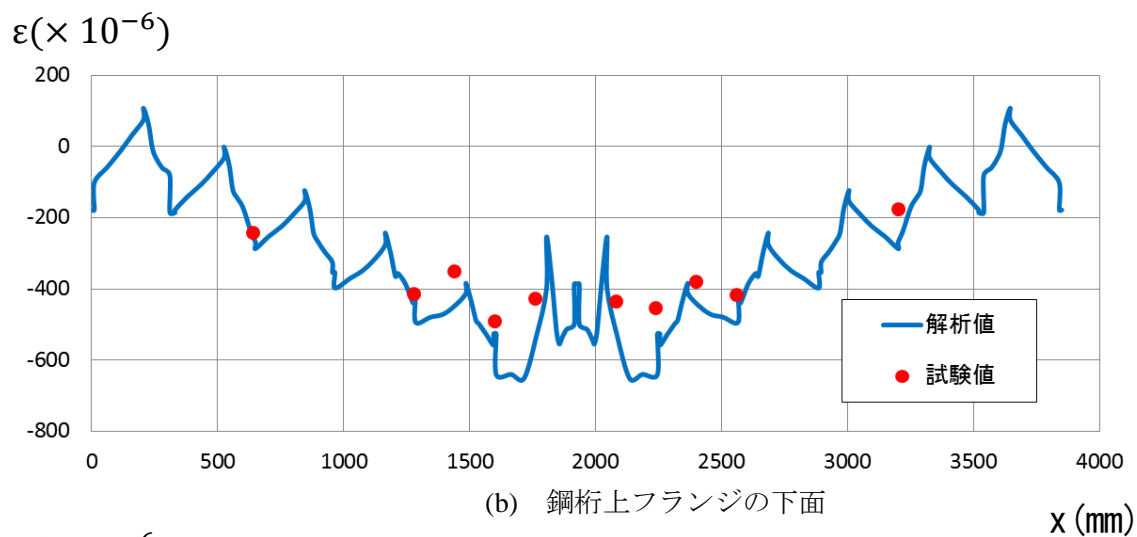
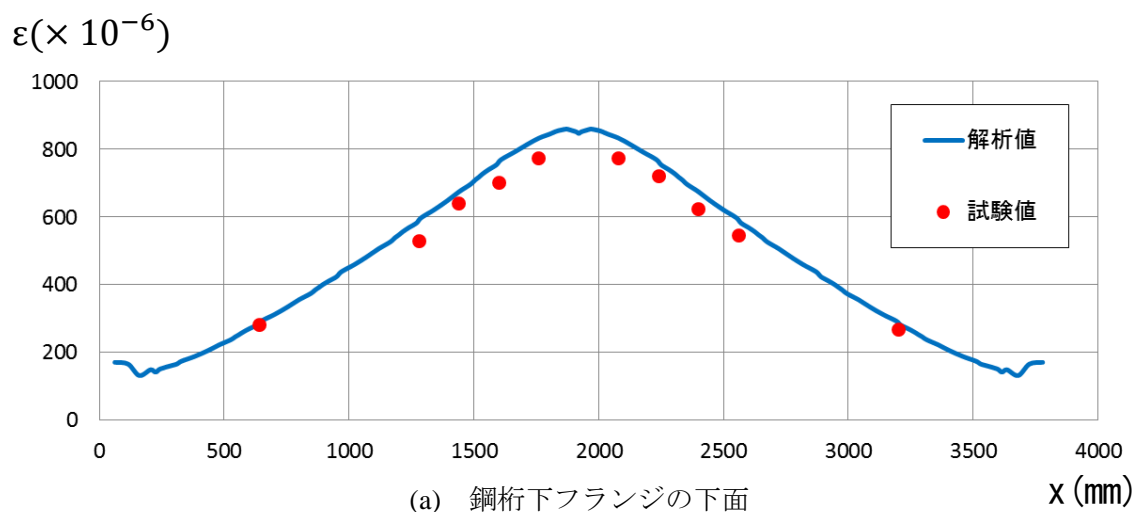


図-2.6 試験体IVに生じるひずみ

第3章

コンクリート台座がアルミニウム床版と鋼桁との 合成作用に及ぼす影響

3.1 コンクリート台座の影響

単純支持された試験体の支間中央に集中荷重が作用するとき、アルミニウム床版と鋼桁との連結部において、頭付きスタッドの位置から、桁支間中央に向かう側のアルミニウム床版下フランジはコンクリート台座から離れる¹⁵⁾。しかし、これとは反対側のアルミニウム床版下フランジはコンクリート台座を押し、鉛直方向の支圧力をコンクリート台座に生じさせる。この鉛直方向の支圧力は、アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面に摩擦力を生じさせる。さらに、これらの界面には付着力が存在している。摩擦力と付着力は、アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の間の水平方向ずれ、およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの間の水平方向ずれを抑制するが、その程度は不明である。さらに、コンクリート台座によってアルミニウム床版下フランジを支持することが、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用にどの程度影響しているのか不明である。

3.2 解析モデルと解析結果

コンクリート台座がアルミニウム床版と鋼桁との合成作用に及ぼす影響を明らかにするために、三種類の解析モデルを考える。解析モデル A は、アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面の節点を共有させる。これは、第2章で示した解析モデルと同じである。

解析モデル B は、アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面に重複節点を設け、鉛直方向の変位を同一にし、水平方向の変位を自由にする。これは、各界面に生じる摩擦力と付着力がゼロであると仮定したモデルである。

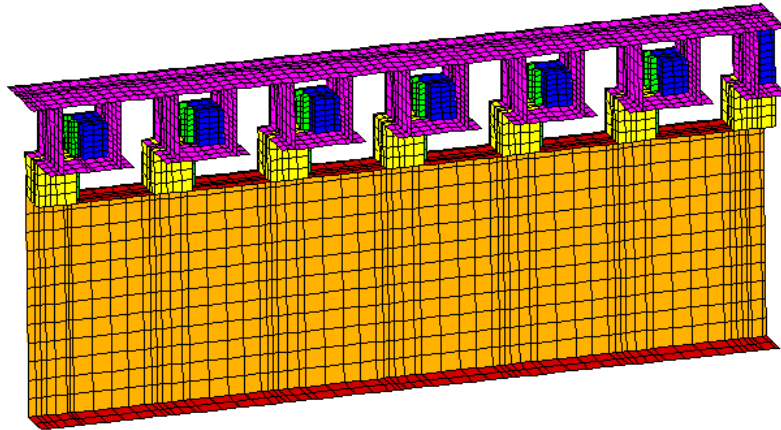
解析モデル C は、コンクリート台座を考慮しないモデルである。これは、アルミニウム床版下フランジの変形に対してコンクリート台座の支圧抵抗を考慮しないモデルである。

図-1.6 に示す試験体IV ($h=100\text{mm}$) に対する、解析モデル A, B, C に対する要素分割を図-3.1 に示す。解析モデル A と B は同じ要素分割であるが、解析モデル B では、アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面に重複接点が設けられている。

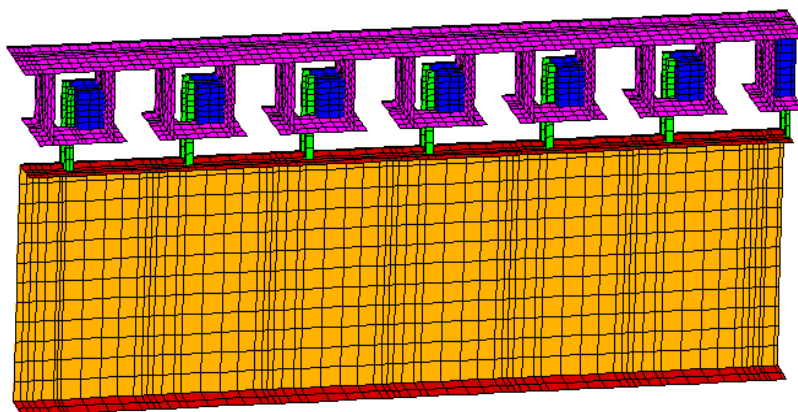
支間中央のアルミニウム床版上板に、荷重 $P/4=122.5\text{kN}$ を集中荷重として与える。解析モ

モデル A, B, C が与える鋼桁下フランジのたわみ分布を図-3.2 に示す. 解析モデル A と B が与えるたわみの差は小さい. したがって, アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面に作用する摩擦力と付着力の大きさが, アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に与える影響は小さい. しかし, 解析モデル C が与えるたわみは, 解析モデル A と B が与えるたわみよりかなり大きい. したがって, アルミニウム床版下フランジの変形に対するコンクリート台座の支圧抵抗は, アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に大きく影響している.

桁の変形を図-3.3 に示す. 解析モデル A と B においては, アルミニウム床版の閉断面内の充填モルタルとコンクリート台座の境において, 頭付きスタッドのせん断変形が水平せん断力に抵抗する. 他方, 解析モデル C においては, コンクリート台座が存在しないので, アルミニウム床版下フランジと鋼桁上フランジの間において, 頭付きスタッドの曲げ変形が水平せん断力に抵抗する.



(a) 解析モデル A と B



(b) 解析モデル C

図-3.1 要素分割

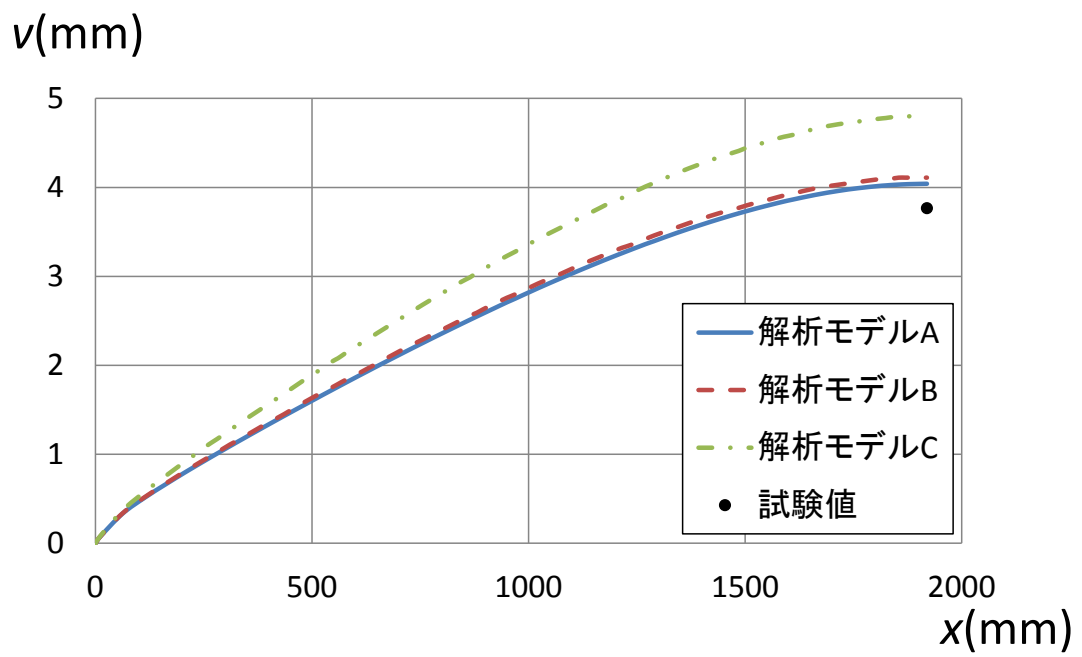
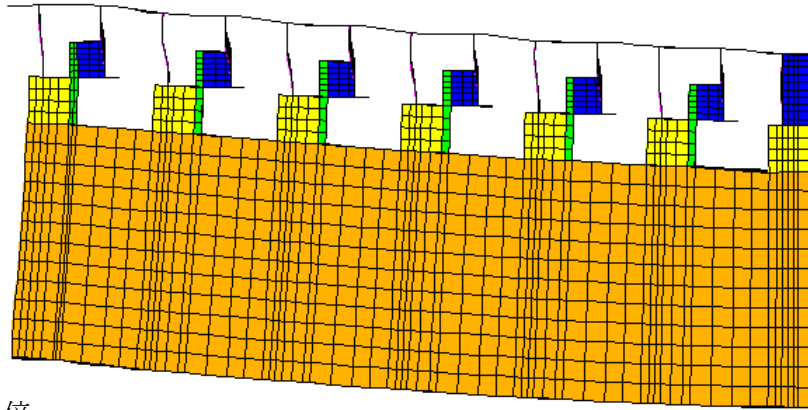
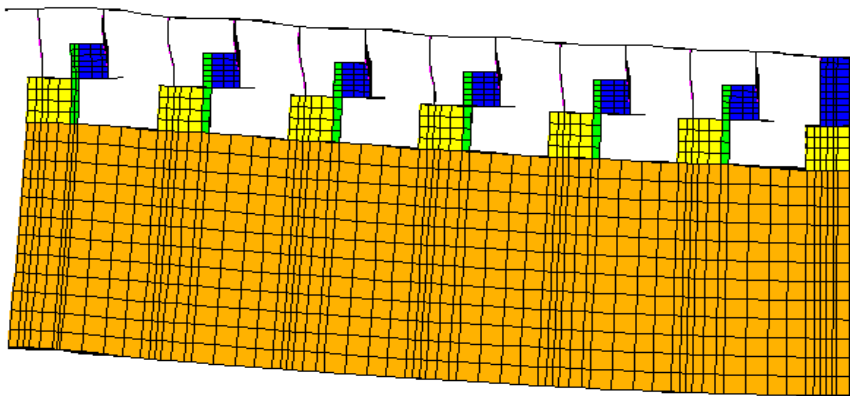


図-3.2 鋼桁下フランジのたわみ分布



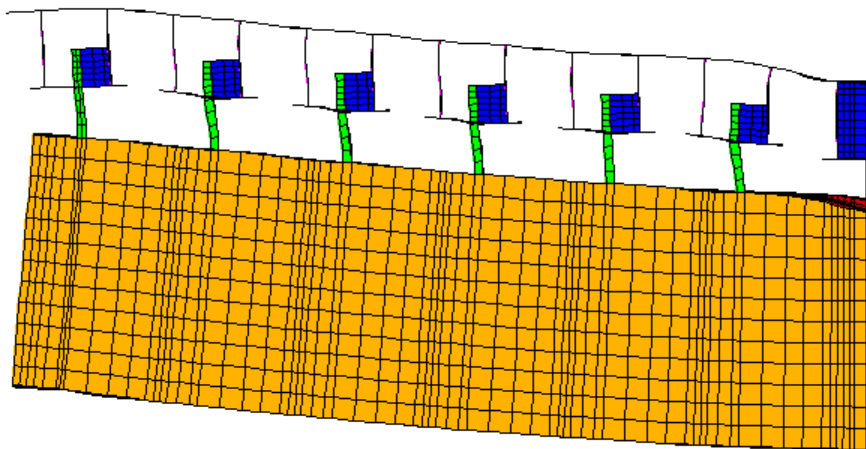
変形倍率 30 倍

(a) 解析モデル A



変形倍率 30 倍

(b) 解析モデル B



変形倍率 30 倍

(c) 解析モデル C

図-3.3 桁の変形

第 4 章 水平せん断バネの特性

4.1 水平せん断バネの算出方法

支間中央に集中荷重 P が作用する、アルミニウム床版を有する鋼桁のたわみが次式で与えられている¹⁵⁾.

$$v(x) = v_m(x) + v_q(x) \quad (4.1)$$

$$v_m(x) = \frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ -\frac{1-ca}{6} x^3 + \left(\frac{1-ca}{8} L^2 + \frac{ca}{\lambda^2} \right) x - ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda^3 \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.2)$$

$$v_q(x) = \frac{P E_s I_s}{2 G_s A_{sw} (E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ (1-ca)x + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.3)$$

$$\lambda = \sqrt{k \frac{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}} \quad (4.4)$$

$$c = \frac{A_s \frac{A_a}{n} d_s}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \quad (4.5)$$

$$n = \frac{E_s}{E_a} \quad (4.6)$$

ここに、

- $v(x)$: 鋼桁のたわみ
- $v_m(x)$: 曲げモーメントによる鋼桁のたわみ
- $v_q(x)$: せん断力による鋼桁のたわみ
- k : 水平せん断バネ

さらに、図-4.1 を参照して、

- A_a, A_s : それぞれ、アルミニウム床版上板と鋼桁の断面積
- A_{sw} : 鋼桁ウェブの断面積
- E_a, E_s : それぞれ、アルミニウム合金と鋼のヤング係数
- G_s : 鋼のせん断弾性係数

- I_a, I_s : それぞれ, アルミニウム床版上板と鋼桁の断面二次モーメント
 d_s : 鋼桁の中立軸から鋼桁上フランジ上面までの距離
 a : アルミニウム床版上板の中立軸から鋼桁の中立軸までの距離
 L : 桁の支間長

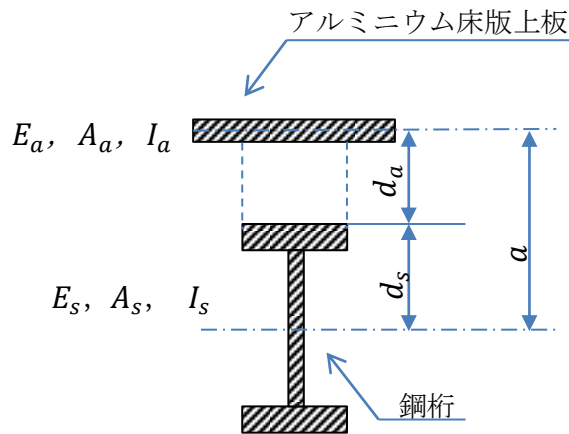


図-4.1 断面諸量

式(4.1)~(4.3)は, $0 \leq x \leq L/2$ の範囲で成立する.

水平せん断バネの値の求め方は次の通りである¹⁵⁾. 三次元 FEM 解析によって得られた, x の位置の鋼桁の中立軸の位置のたわみを式(4.1)の左辺に用い, このたわみを満たす λ の値を数値計算により求める. 得られた λ の値を次式に代入して水平せん断バネ k の値を求める.

$$k = \frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \lambda^2 \quad (4.7)$$

式(4.7)は, 式(4.4)を k について解くことによって与えられる. この様にして, 位置 x に対する水平せん断バネ k の分布が与えられる. この分布において, 直線性を示す部分を支間中央に向かって直線外挿し, 支間中央の位置の値を水平せん断バネの値として採用する.

4.2 コンクリート台座の高さが水平せん断バネに与える影響

図-1.6 に示す試験体を三次元 FEM 解析によって解き, 得られた鋼桁のたわみを用いて, 4.1 節で述べた方法により得られる各試験体の水平せん断バネの値を表-4.1 に示す. コンクリート台座の高さが 30mm と 60mm の場合, 水平せん断バネの値はほぼ等しいが, コンクリート台座の高さが 100mm になると, 水平せん断バネの値は大きく低下する.

三次元 FEM 解析値と表-4.1 の水平せん断バネ k の値を式(4.1)~(4.3)に用いて算出されるたわみの理論値を, 試験体 II, III, IV に対して, それぞれ図-4.2(a), 4.3(a), 4.4(a)に示

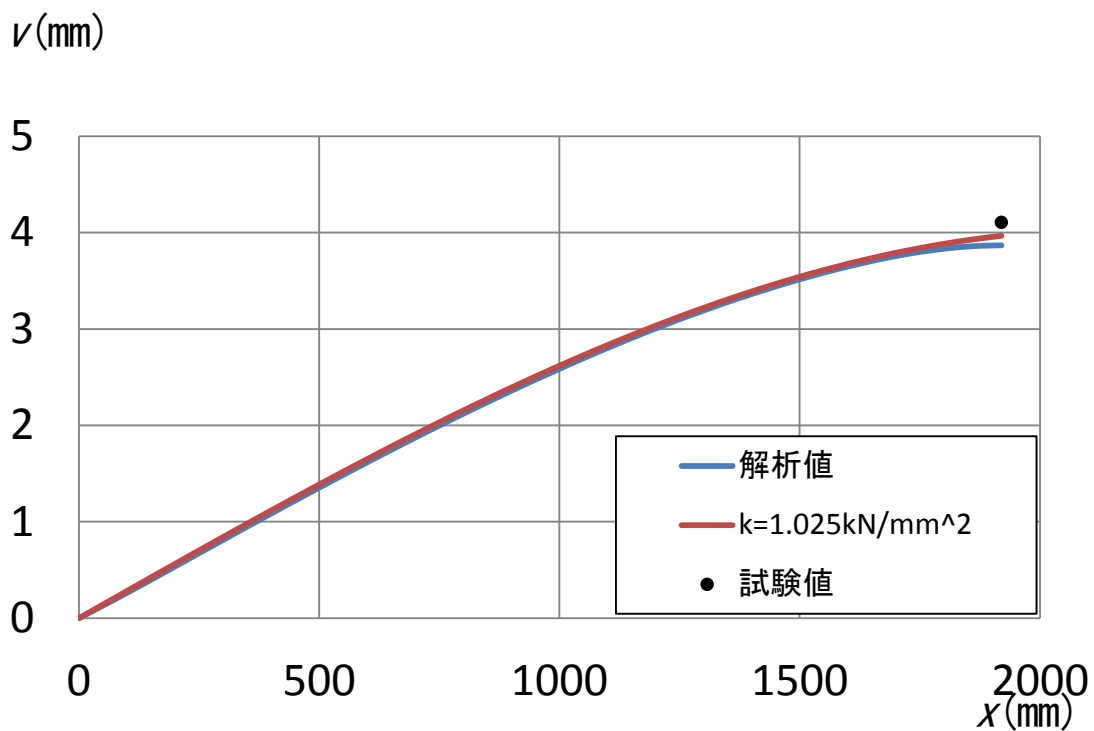
す。さらに、表-4.1の水平せん断バネ k の値を次式¹⁵⁾に用いて算出される鋼桁下フランジの下面に生じるひずみを、試験体Ⅱ、Ⅲ、Ⅳに対して、それぞれ図-4.2(b)、4.3(b)、4.4(b)に示す。

$$\varepsilon = \frac{P}{2E_s} \left[\left\{ \frac{c}{A_s} - \frac{(1-ca)y_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right\} x - \left(\frac{c}{A_s} + \frac{cay_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.8)$$

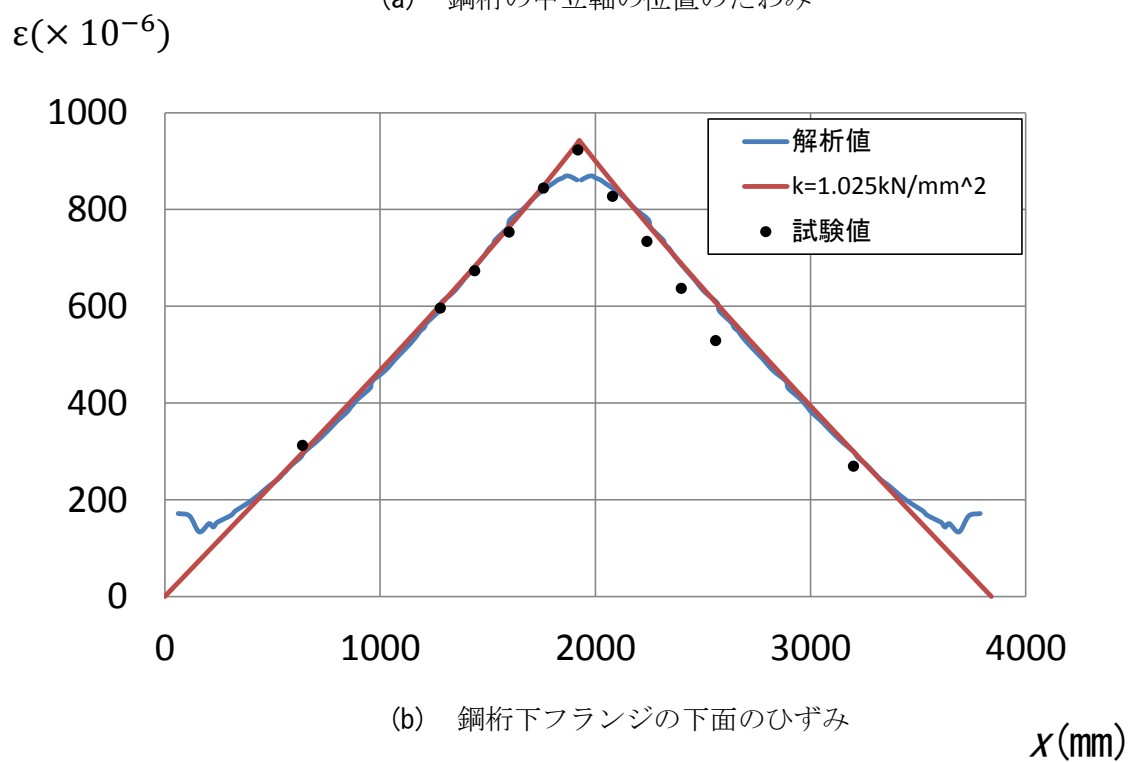
図-4.2, 4.3, 4.4は、荷重490kNに対する結果である。図-4.2, 4.3, 4.4から分かるように、表-4.1の水平せん断バネ k の値を用いて算出される理論値は、解析値ならびに試験値の近傍を通過する。

表-4.1 コンクリート台座の高さと水平せん断バネ

試験体	コンクリート台座高さ h (mm)	水平せん断バネ k (kN/mm ²)
Ⅱ	30	1.025
Ⅲ	60	0.998
Ⅳ	100	0.648



(a) 鋼桁の中立軸の位置のたわみ



(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

図-4.2 試験体 II

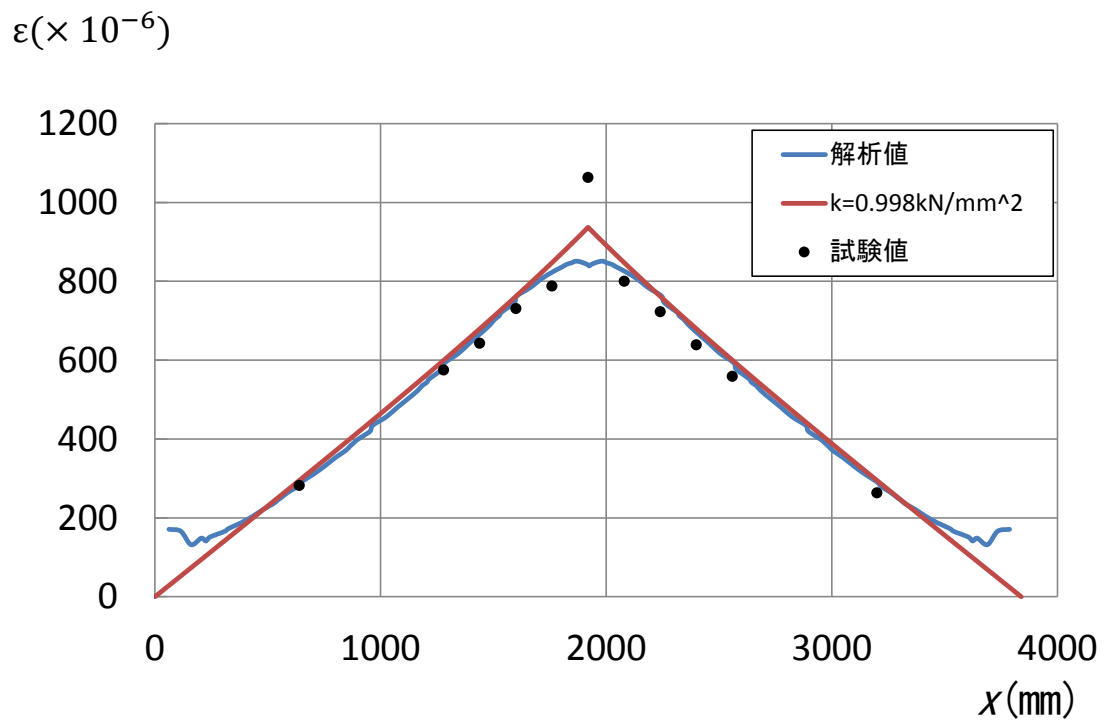
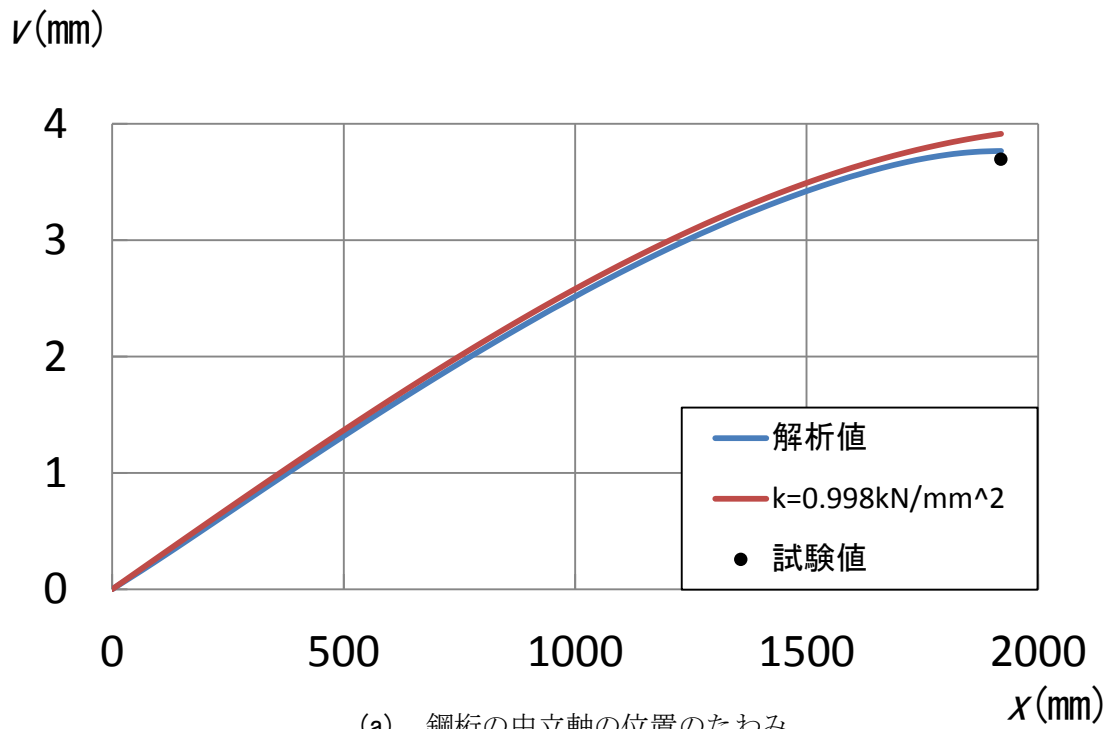
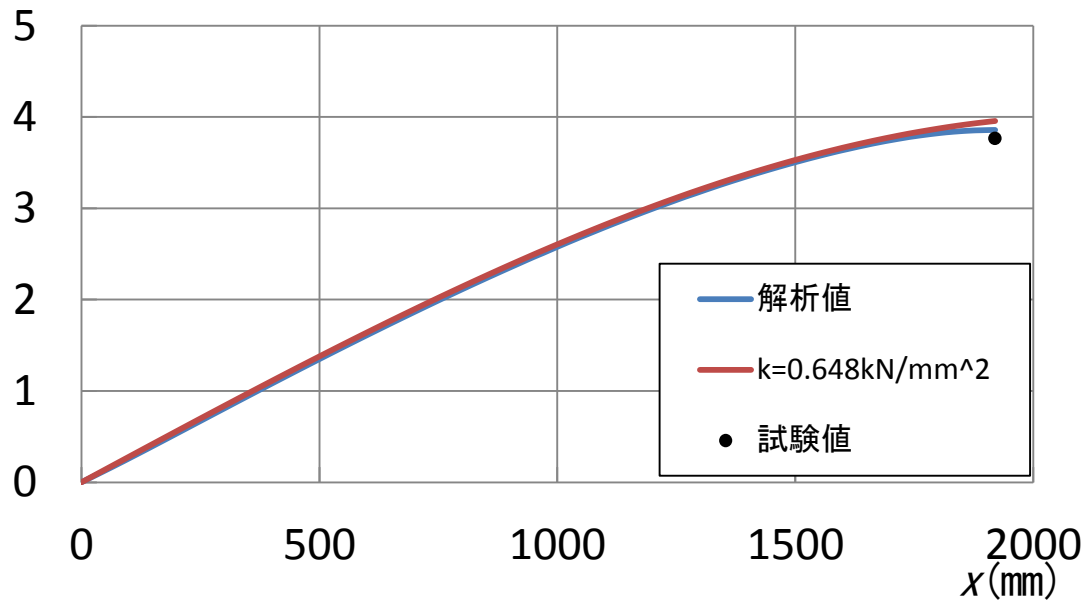


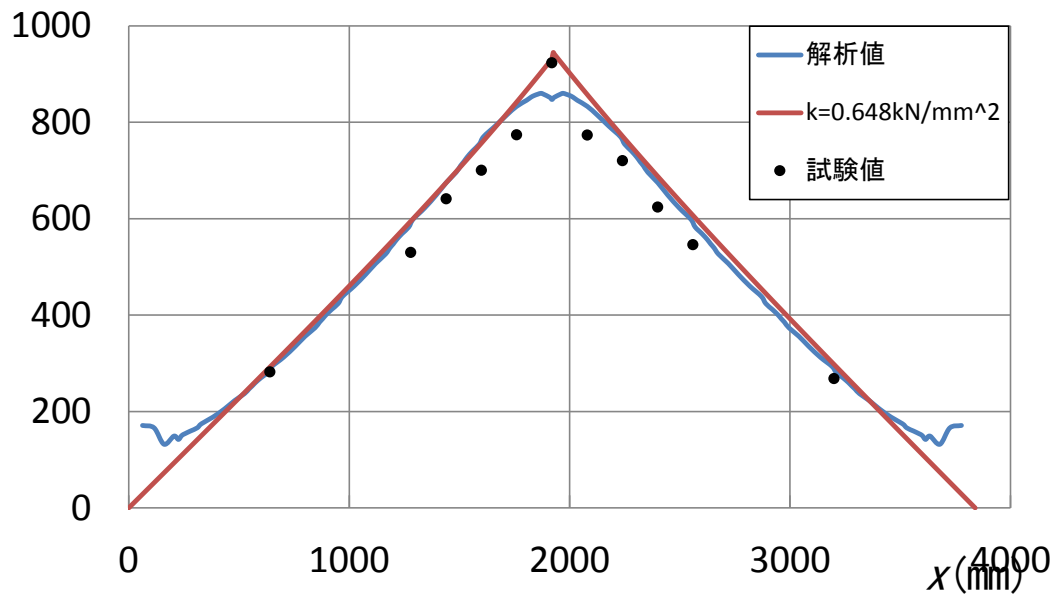
図-4.3 試験体Ⅲ

$v(\text{mm})$



(a) 鋼桁の中立軸の位置のたわみ

$\varepsilon(\times 10^{-6})$



(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

図-4.4 試験体IV

4.3 アルミニウム床版の幅が水平せん断バネに与える影響

図-1.6 に示す試験体IVにおいて、アルミニウム床版幅を増加させたモデルを三次元 FEM 解析によって解く。図-4.5 に示すように、アルミニウム床版幅 B に対して、試験体IVのアルミニウム床版幅 440mm の他に 880mm, 1320mm を考慮する。 $B=1320\text{mm}$ に対する要素分割を図-4.6 に示す。得られた水平せん断バネ k の値を表-4.2 に示す。アルミニウム床版幅が大きくなるに従って、水平せん断バネの値は増加するが、増加の程度は小さい。

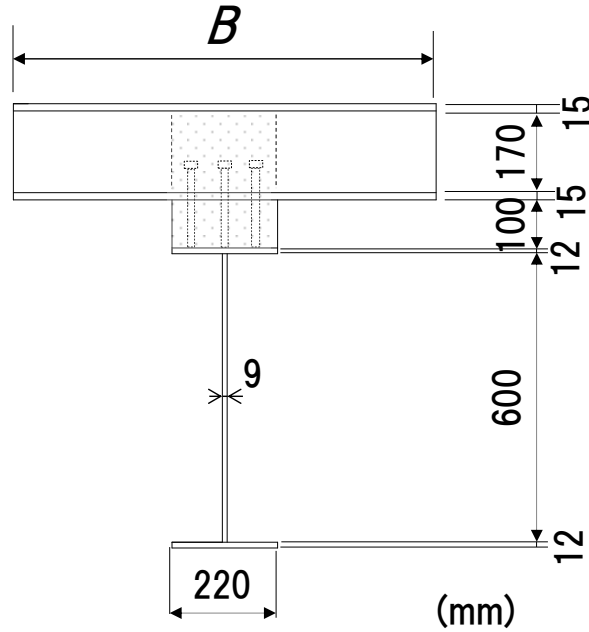


図-4.5 桁の断面寸法

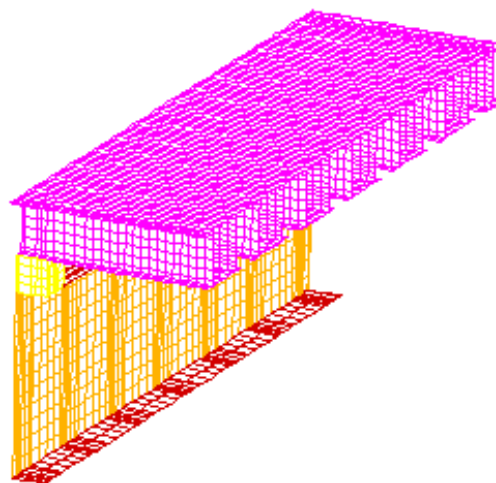


図-4.6 要素分割 ($B=1320\text{mm}$)

表-4.2 アルミニウム床版の幅と水平せん断バネ

アルミニウム床版幅 B (mm)	水平せん断バネ k (kN/mm ²)
440	0.648
880	0.680
1320	0.698

4.4 頭付きスタッドの本数が水平せん断バネに与える影響

図-1.6 に示す試験体IVにおいて、頭付きスタッドの本数を少なくしたモデルを三次元 FEM 解析によって解く。図-1.6 に示す試験体IVの頭付きスタッドの本数 3 本の他に 2 本、1 本を考慮する。頭付きスタッド本数の配置を図-4.7 に示す。得られた水平せん断バネ k の値を表-4.3 に示す。頭付きスタッドの本数が 3 本から少なくなるに従って、水平せん断バネの値は減少するが、減少の程度は小さい。

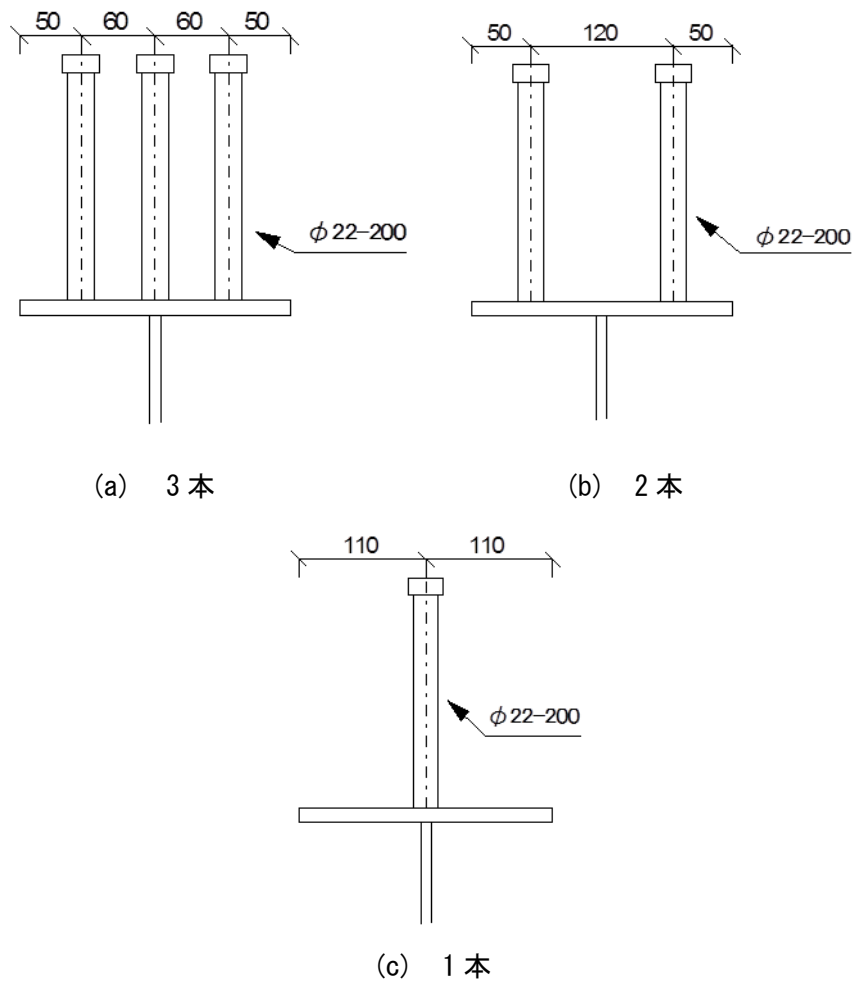


図-4.7 頭付きスタッドの配置

表-4.3 頭付きスタッドの本数と水平せん断バネ

頭付きスタッドの本数	水平せん断バネ k (kN/mm ²)
3	0.648
2	0.622
1	0.593

第5章 実橋の合成度

5.1 合成度

アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を評価する指標として、次式で定義される合成度が提案されている¹⁵⁾。

$$\phi = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_\infty} = 1 - \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} \quad (5.1)$$

ここに、

ϕ : アルミニウム床版と鋼桁との合成度

v_∞ : 完全合成時の鋼桁のたわみ

v_0 : 非合成時の鋼桁のたわみ

v : 不完全合成時の鋼桁のたわみ

v , v_∞ , v_0 には、せん断変形による鋼桁のたわみは考慮されていない。

$\phi = 0$ のとき非合成、 $\phi = 1$ のとき完全合成であり、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が大きくなるに従って、 ϕ は0から1に近づく。

5.2 実橋の合成度

アルミニウム床版が用いられた実橋の設計例を図-5.1と表-5.1に示す¹⁷⁾。橋の支間長として15m, 20m, 30m, 40mが考慮され、橋は単純支持されている。橋の設計条件は次の通りである。

- i) 設計活荷重はB活荷重とする。
- ii) アルミニウム床版と鋼桁とは非合成として設計する。
- iii) 図-1.2に示す断面形状を有するアルミニウム床版¹²⁾を用いる。
- iv) 高欄、舗装、地覆、アルミニウム床版の死荷重を表-5.2に示す。
- v) 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対するたわみの許容値として、支間中央のたわみを $L/500$ とする。ここで、 L は支間長である。
- vi) 鋼材はSM490Y材を使用する。
- vii) 鋼桁断面は橋軸方向に対して一定とする。
- viii) フランジ幅をウェブ高の1/3以下とする。
- ix) フランジおよびウェブの板厚を9mm以上40mm以下とする。
- x) コンクリート台座を考慮しない。
- xi) アルミニウム床版の有効幅については、既往の研究¹⁸⁾より、道路橋示方書²⁾の完全合成桁に対する床版の有効幅の規定を適用する。

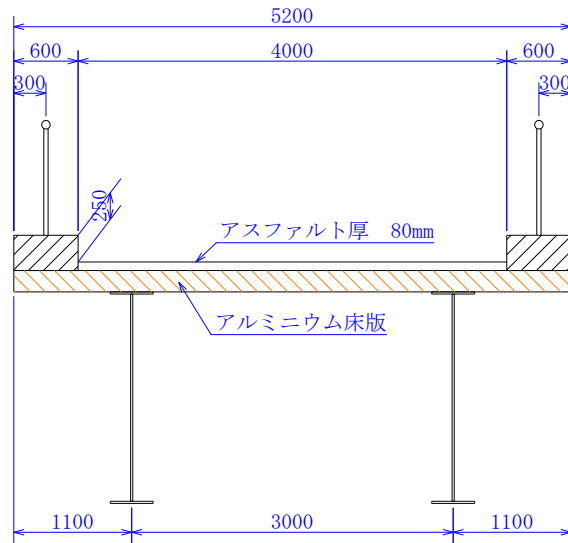


図-5.1 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の断面

表-5.1 鋼桁の断面寸法およびアルミニウム床版の有効幅

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)		2463	2551	2600	2600

表-5.2 死荷重

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

表-4.3 に示す水平せん断バネの値および表-5.1 に示す断面諸量を式(4.4)に代入して、 λ の値を算出する。この値を式(5.1)に代入して得られる合成度 ϕ と λL の関係を図-5.2に示す。各支間長において、頭付きスタッドの本数が少なくなるに従って、合成度はわずかに減少する。支間長が長くなるに従って、 ϕ の値は上昇し、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は完全合成に近づく。

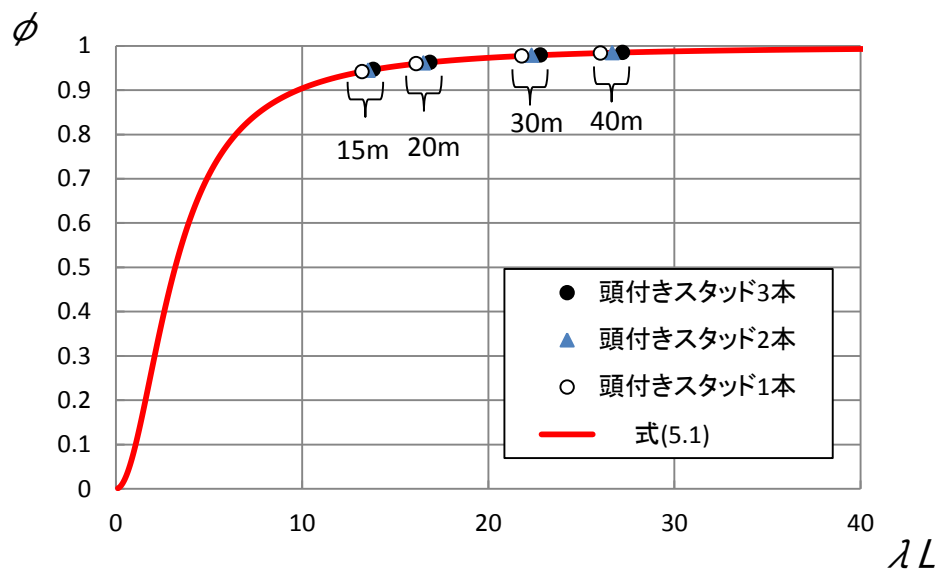


図-5.2 ϕ と λL の関係

5.3 アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の平面保持の影響

表-5.1 に示す、支間長 15m の実橋を三次元 FEM 解析によって解く。頭付きスタッドの本数は 3 本とする。この解析では、30mm の高さのコンクリート台座を考慮する。要素分割を図-5.3 に示す。支間中央のアルミニウム床版上板に $P/4=122.5\text{kN}$ の集中荷重を与える。

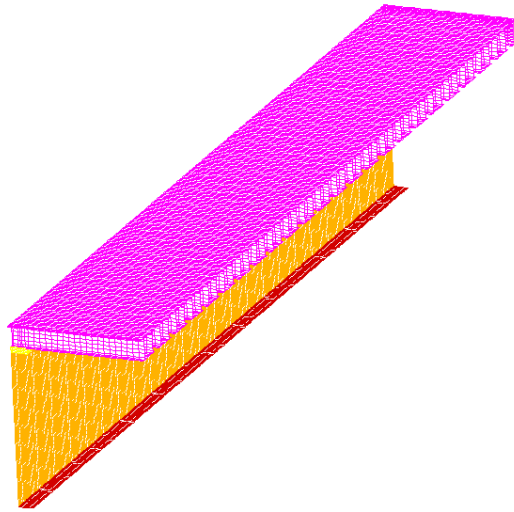


図-5.3 要素分割

三次元 FEM 解析が与える鋼桁の中立軸の位置のたわみを図-5.4 に示す。同図には、次式によって与えられる、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が完全合成の場合に対するたわみが赤線で描いてある。

$$v(x) = \frac{P}{2E_s I_v} \left(-\frac{x^3}{6} + \frac{L^2 x}{8} \right) + \frac{P I_s}{2G_s A_{sw} I_v} x \quad (5.2)$$

ここに、

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a d_s}{n A_s + A_a} \quad (5.3)$$

式(5.2)は、式(4.1)～(4.3)において、 λ を無限にすることによって与えられ、 $0 \leq x \leq L/2$ の範囲で成立する。

図-5.4 から分かるように、解析値は式(5.2)が与える鋼桁のたわみより小さい。式(5.2)は、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が完全合成の場合に対するたわみである。式(5.2)は、第 1 章で述べたように、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定が設けられないで与えられた式である。アルミニウム床版には無収縮モルタルが充填された閉断面が存在するので、これが、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間にある程度の平面保持を起こさせていると考えられる。そこで、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持が成立すると仮定して、両者の合成作用が完全合成の場合に対するたわみが青線で図-5.4 に描いてある。この線は、式(5.2)の鋼換算断面二次モーメント I_v を、次式で与えられる I_v^* に置き換えることによって与えられる¹⁵⁾。

$$I_v^* = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a^2}{n A_s + A_a} \quad (5.4)$$

解析値は、赤線と青線のほぼ中央に分布している。したがって、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間には、ある程度の平面保持作用が働き、この作用は、支間長が長くなるに従って大きくなることが予想される。

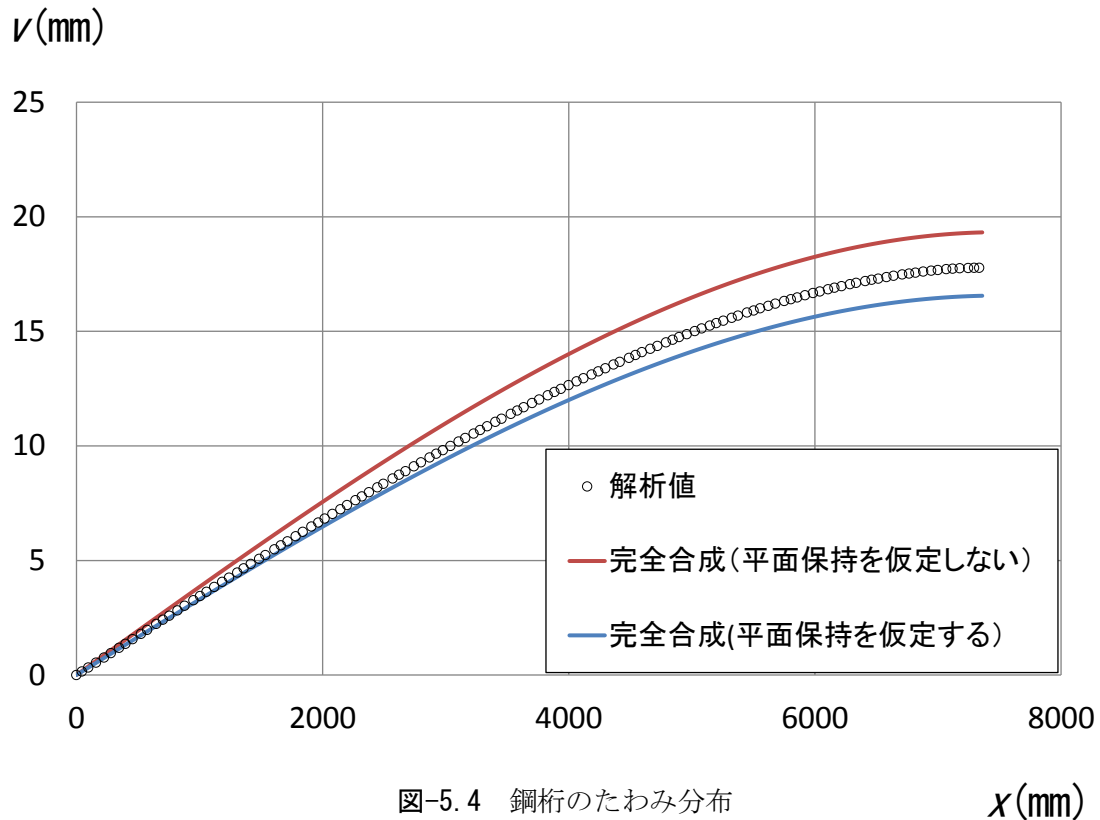


図-5.4 鋼桁のたわみ分布

アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持を仮定しない場合に対する鋼桁のたわみを v 、両者の間に平面保持を仮定する場合に対する鋼桁のたわみを v^* とすると、比 v^*/v が次式で与えられる。

$$\frac{v^*}{v} = \frac{I}{I^*} \quad (5.5)$$

表-5.1 に示す、15m、20m、30m、40m の各支間長に対する v^*/v の値を表-5.3 に示す。これは、表-5.1 に示す断面諸量に対して式(5.3)と(5.4)を計算することによって与えられる。支間長が長くなるに従って、 v^*/v は 1 に近づく。すなわち、支間長が長くなるに従って、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けるか否かが、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に及ぼす影響は小さくなる。これは、支間長が大きくなるに従って鋼桁は高くなるが、アルミニウム床版の高さは変わらないので、式(5.3)の d_s の値が a の値に近づくため、 I_v と I_v^* の差が小さくなるためである。

表-5.3 支間長と v^*/v

支間長 $L(m)$	v^*/v
15	0.86
20	0.89
30	0.94
40	0.95

5.4 アルミニウム床版を有する鋼桁橋の設計法への提案

本研究の成果に基づいて、アルミニウム床版を有する鋼桁橋の設計法に関して次を提案する。

支間長が 15m 未満の橋に対しては、表-4.3 に示す水平せん断バネの値を用い、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けず、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を不完全合成として設計する。

支間長が 15m 以上の橋に対しては、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けず、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を完全合成として設計する。

第 6 章 結論

本研究では、三次元 FEM 解析によって、アルミニウム床版上板と鋼桁下フランジとの連結部の水平せん断バネの特性を調べた。さらに、三次元 FEM 解析によって得られた水平せん断バネの値を用いて、実橋のアルミニウム床版と鋼桁との合成度を明らかにした。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) アルミニウム床版と鋼桁の連結部では、アルミニウム床版下フランジとコンクリート台座の界面およびコンクリート台座と鋼桁上フランジの界面に作用する摩擦力と付着力が、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に与える影響は小さい。しかし、アルミニウム床版下フランジの変形に対するコンクリート台座の支圧抵抗は、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に大きく影響する。
- (2) コンクリート台座の高さが 30mm と 60mm の場合、水平せん断バネの値はほぼ等しいが、コンクリート台座の高さが 100mm になると、水平せん断バネの値は大きく低下する。
- (3) アルミニウム床版幅が大きくなるに従って、水平せん断バネの値は増加するが、増加の程度は小さい。
- (4) 頭付きスタッドの本数が 3 本から少なくなるに従って、水平せん断バネの値は減少するが、減少の程度は小さい。
- (5) 支間長が 15m 以上の、アルミニウム床版を有する鋼桁橋においては、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は完全合成に近い。
- (6) 支間長が長くなるに従って、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けるか否かが、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に及ぼす影響は小さくなる。これは、支間長が大きくなるに従って鋼桁は高くなるが、アルミニウム床版の高さは変わらないからである。
- (7) 本研究の成果に基づいて、アルミニウム床版を有する鋼桁橋の設計法に関して次を提案した。支間長が 15m 未満の橋に対しては、表-4.3 に示す水平せん断バネの値を用い、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けず、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を不完全合成として設計する。支間長が 15m 以上の橋に対しては、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けず、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を完全合成として設計する。

参考文献

- 1) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/06/060601_2/14.pdf
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 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：摩擦撹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) 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.
- 6) 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.
- 7) 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. http://alst.jp/pdf/ALST_report8.pdf
- 8) 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. http://alst.jp/pdf/ALST_report4.pdf
- 9) 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撹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.
- 10) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦撹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.
- 11) 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疲労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.
- 12) 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一設計・製作・施工ガイドライン，2011.
http://www.aluminum.or.jp/doboku/files/guideline110303_03.pdf
- 13) <http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 14) 大倉一郎，石川敏之，高木眞広，武野正和：アルミニウム床版と鋼桁の合成作用，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1172-1181，2009.
- 15) 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.870-880，2011.
- 16) TNO Building and Construction Research: DIANA, Release 9.4.2, Delft, Netherland, 2008.
- 17) 石川敏之，高木眞広，大倉一郎，武野正和：アルミニウム床版-鋼桁橋の合成作用および温度変化応力，第 7 回複合構造の活用に関するシンポジウム，論文番号 63，pp.1-6，2007.

- 18) 大倉一郎，高木眞広，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る応力と反り，ALST 研究レポート，No.5，2008.