

# アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の 水平せん断バネの特性と合成作用

ALST 研究レポート 29

2013 年 3 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、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、アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用を明らかにする。

本レポートは、「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, No.24, 2012 年 7 月を修正・発展させたものである。

## 目次

第 1 章	序論	…1
第 2 章	三次元 FEM 解析	…6
	2.1 解析モデル	…6
	2.2 解析値と試験値の比較	…8
第 3 章	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	…12
第 4 章	水平せん断バネの特性	…16
	4.1 水平せん断バネの算出方法	…16
	4.2 台座の高さの影響	…17
	4.3 アルミニウム床版の幅の影響	…22
	4.4 頭付きスタッドの本数の影響	…23
第 5 章	アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の FEM 解析	…25
	5.1 三次元 FEM 解析	…25
	5.2 二次元 FEM 解析	…28
第 6 章	アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用と平面保持度	…31
	6.1 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用	…31
	6.2 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度	…36
第 7 章	アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の設計への提案	…43
第 8 章	結論	…44
	参考文献	…45
付録 A	三次元 FEM 解析における充填モルタルの取扱い	…47

## 第 1 章 序論

平成 22 年度道路施設現況調査<sup>1)</sup>によれば、2011 年現在、橋長 15m 以上の橋が約 16 万橋あり、そのうち建設後 50 年以上経過した橋が 20011 年現在約 15000 橋、2021 年および 2031 年にはそれぞれ約 44000 橋、84000 橋に達することが予想されている。これらの橋の中には補修の必要な橋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<sup>2)</sup>」を適用すると床版厚を厚くしなければならない橋も出てくる。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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。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。同図の断面形状を有するアルミニウム床版ユニットが橋軸直角方向に並ぶような形式で、複数の鋼主桁上に設置される。材料は A6061-T6 であり、幅 320mm、高さ 200mm の中空押出形材を摩擦攪拌接合で接合することによってアルミニウム床版ユニットが製作される<sup>5)</sup>。

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造<sup>6)</sup>、現場継手<sup>7)</sup>、地覆定着<sup>8)</sup>、摩擦攪拌接合部の疲労強度<sup>9),10)</sup>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<sup>11)</sup>。

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<sup>12)</sup>」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<sup>13)</sup>。

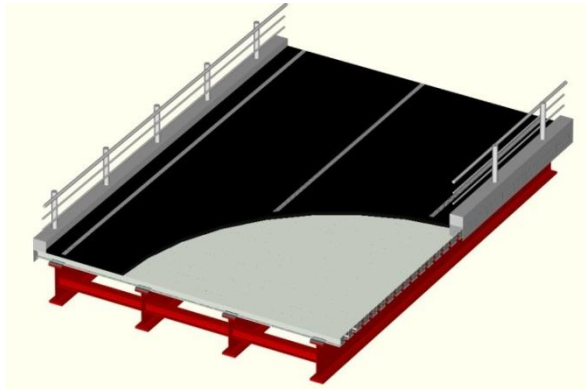


図-1.1 道路橋用アルミニウム床版を用いた  
鋼桁橋のイメージ

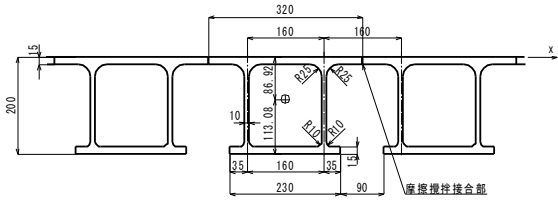


図-1.2 アルミニウム床版の断面形状



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れの約 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。

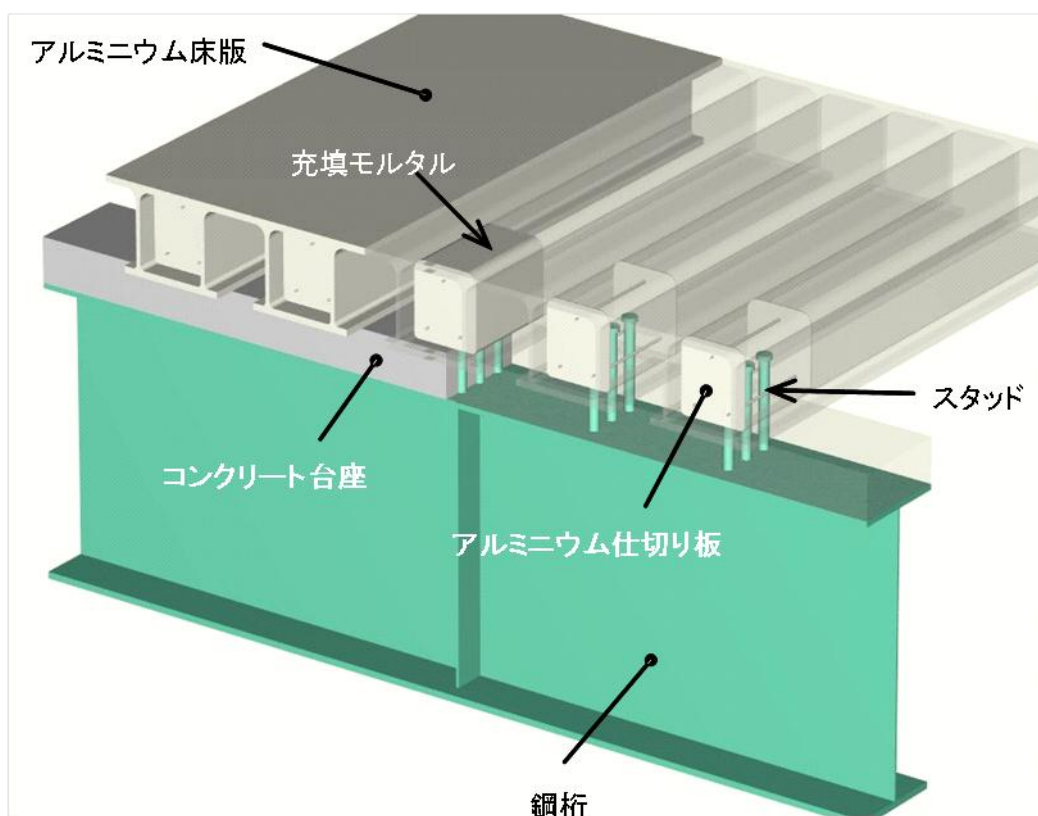


図-1.5 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

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<sup>14)</sup>。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。

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

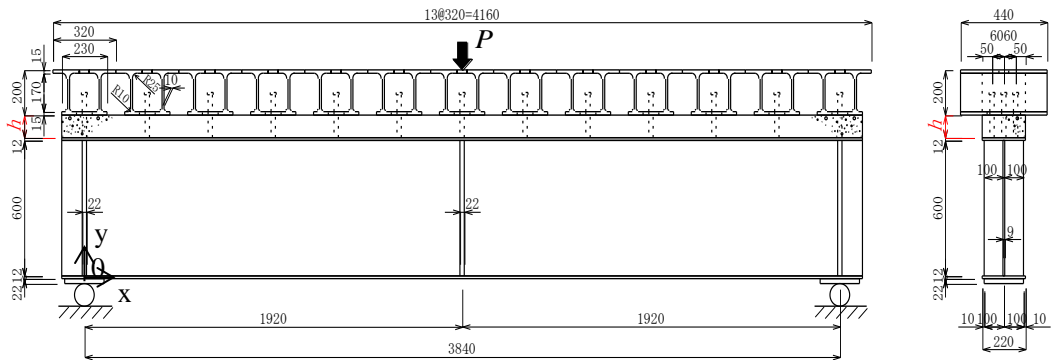
ここに、図-1.7 を参照して、

$H$  : 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, 台座の高さ (図-1.6 の  $h$ ) と規則的な関係を示さなかった<sup>14)</sup>.



試験体	$h$ (mm)
II	30
III	60
IV	100

図-1.6 試験体

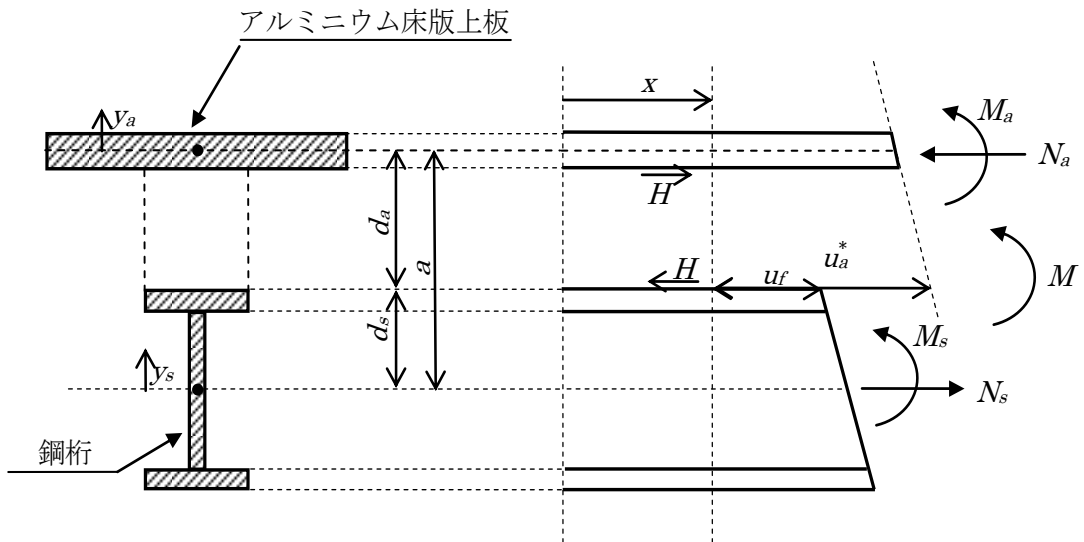


図-1.7 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる水平せん断力と水平変位

試験体に対して得られた水平せん断バネの値が, 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<sup>15)</sup>。

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

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

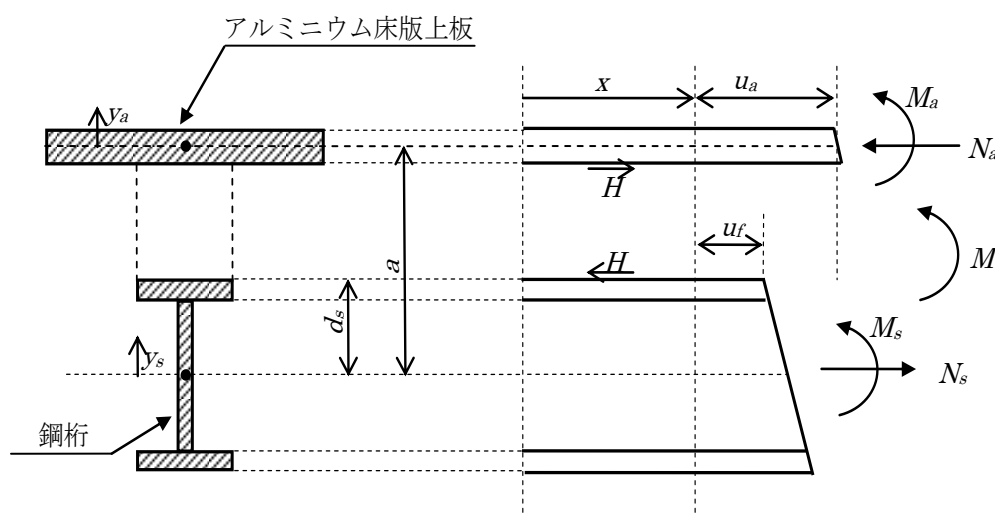


図-1.8 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる水平せん断力と水平変位

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、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<sup>15)</sup>。

以上述べたように、既往の研究において、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とそれに対する理論解析によって、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が明らかにされた。本研究は、FEM 解析によって水平せん断バネの特性を調べ、さらに、アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用を明らかにする。



## 第 2 章 三次元 FEM 解析

### 2.1 解析モデル

図-1.6 の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の結果と同試験体に対する三次元 FEM 解析の結果とを比較することより、アルミニウム床版と鋼桁との連結構造に対する、三次元 FEM 解析におけるモデリングについて検討する。三次元 FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA<sup>16)</sup>を使用する。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 の部分を要素分割する。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)、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)を使用する。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、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<sup>14)</sup>。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。

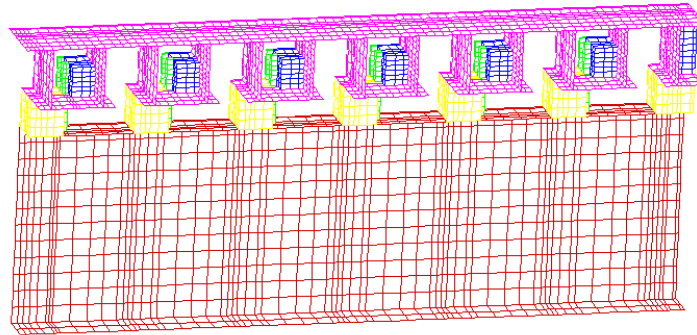
図-1.6 に示す試験体においては、頭付きスタッドが溶接されている位置のコンクリート製の台座に発生した乾燥収縮ひび割れにより、台座が伝達する桁長手方向の圧縮力が小さかったことが報告されている<sup>14)</sup>。そして、頭付きスタッドの右側のアルミニウム床版下フランジは台座から離れるので<sup>15)</sup>、頭付きスタッドの右側の台座を無視する。

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と考え、頭付きスタッドの左側の充填モルタルを無視する（この充填モルタルの取り扱いの妥当性は付録 A で述べる）。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。

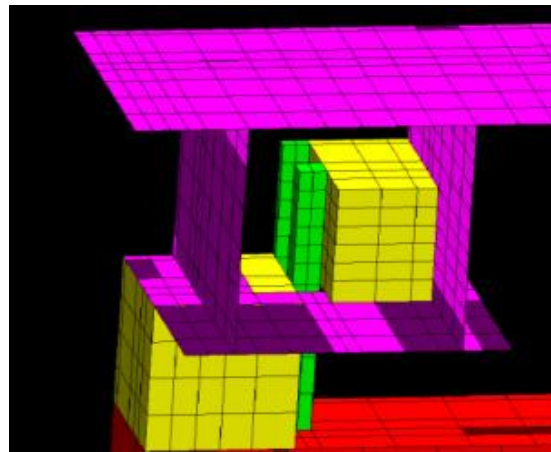
アルミニウム床版と鋼桁との連結部の要素分割を図-2.1 (b) に示す。頭付きスタッドは、アルミニウム床版下フランジの開口に挿入され、両者は連結されていない。

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中点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、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台座の界面および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。この影響については第 3 章で明らかにする。



(a) 全体

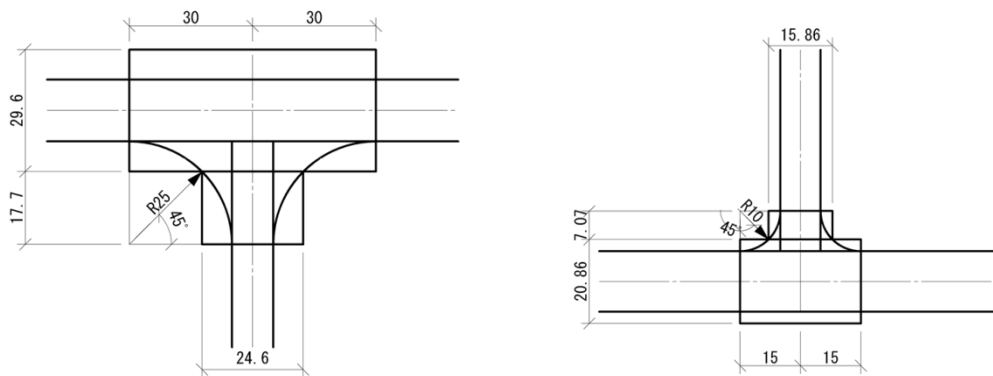


(b) 連結部

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
台座(コンクリート)	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

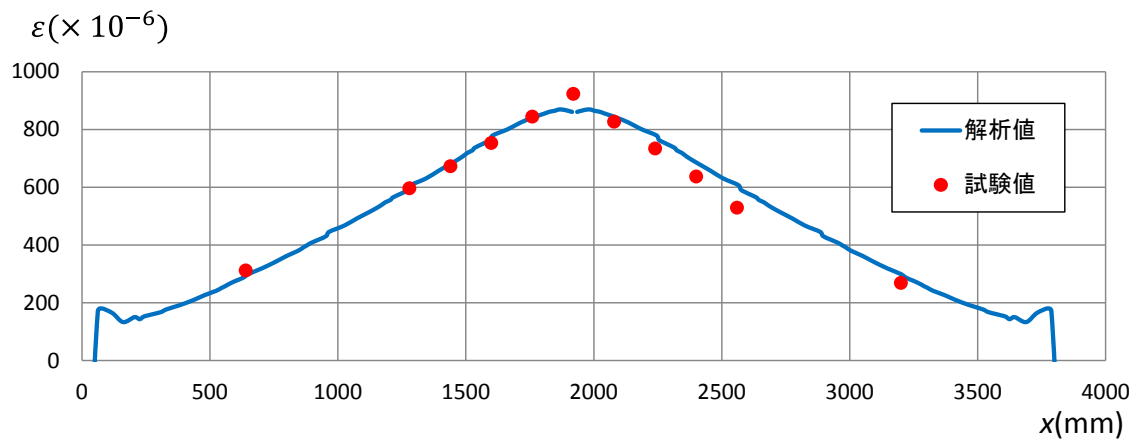
## 2.2 解析値と試験値の比較

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、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ていない解析値も示す。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。

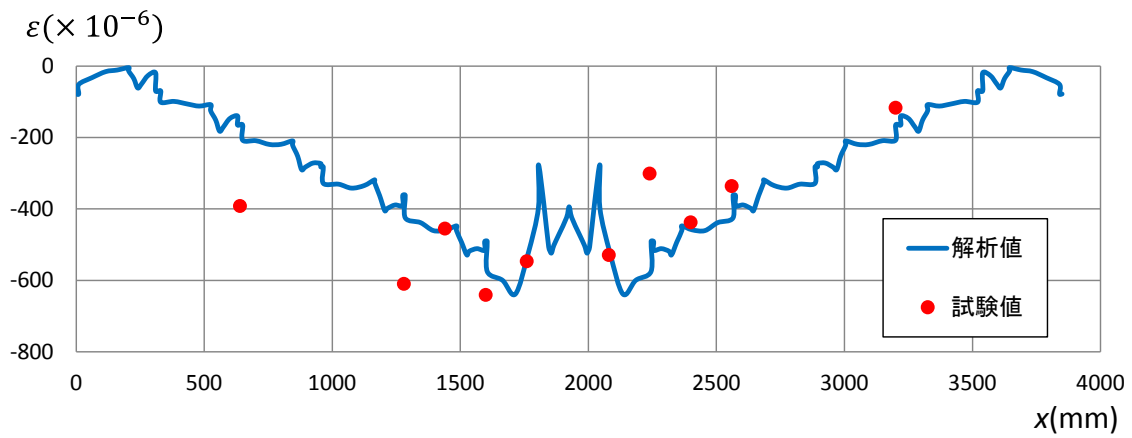
表-2.2 試験体の支間中央のたわみ

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

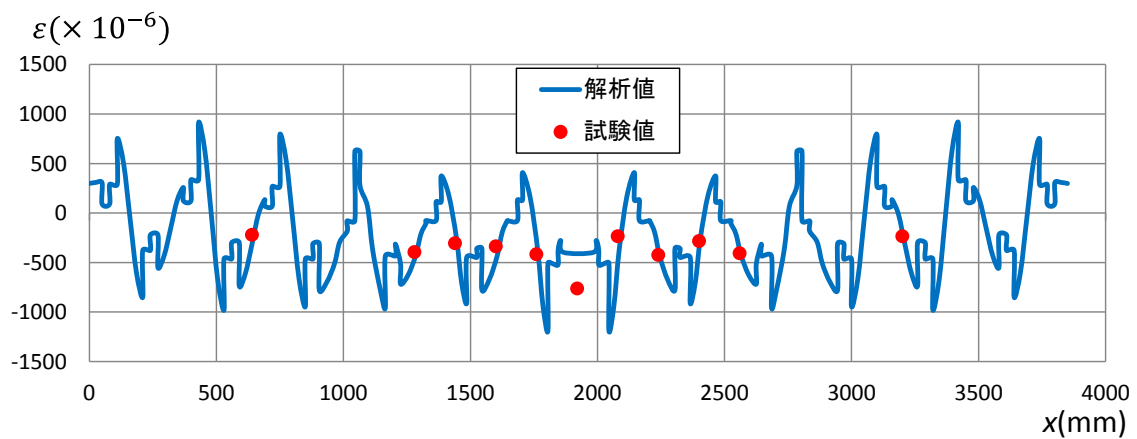
試験体の鋼桁下フランジの下面，鋼桁上フランジの下面，アルミニウム床版上板の上面に生じるひずみに関して、解析値と試験値の比較を、試験体Ⅱ，Ⅲ，Ⅳに対してそれぞれ図-2.3，2.4，2.5に示す。各図の横軸は、支点からの水平距離である。各試験体において、解析値は試験値に近い値を示している。



(a) 鋼桁下フランジの下面

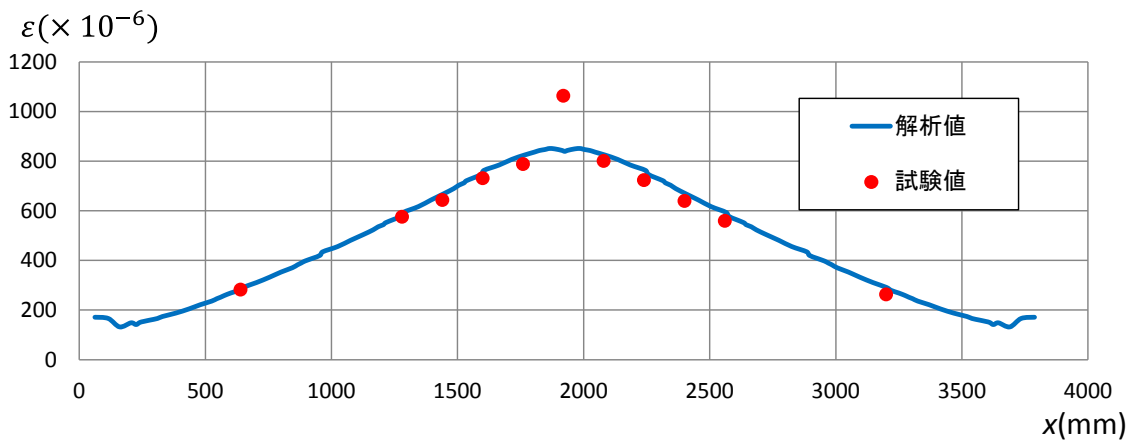


(b) 鋼桁上フランジの下面

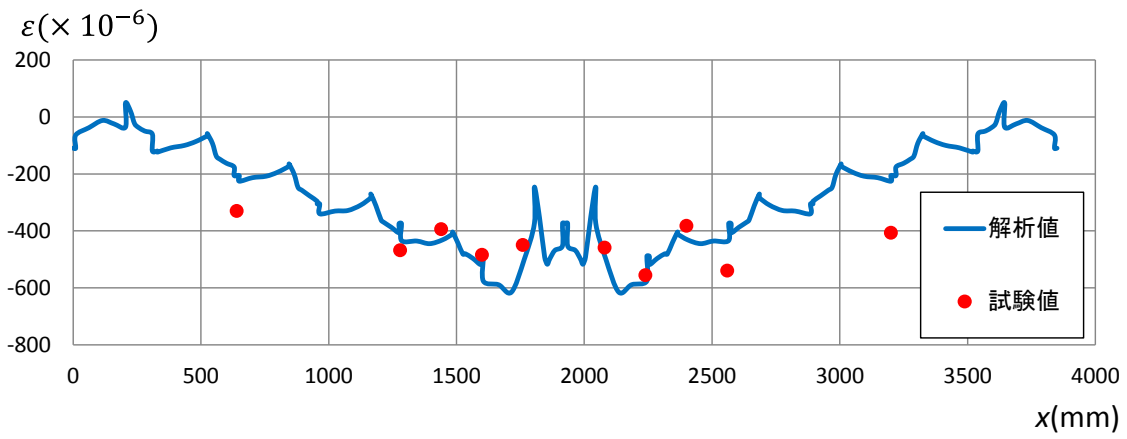


(c) アルミニウム床版上板の上面

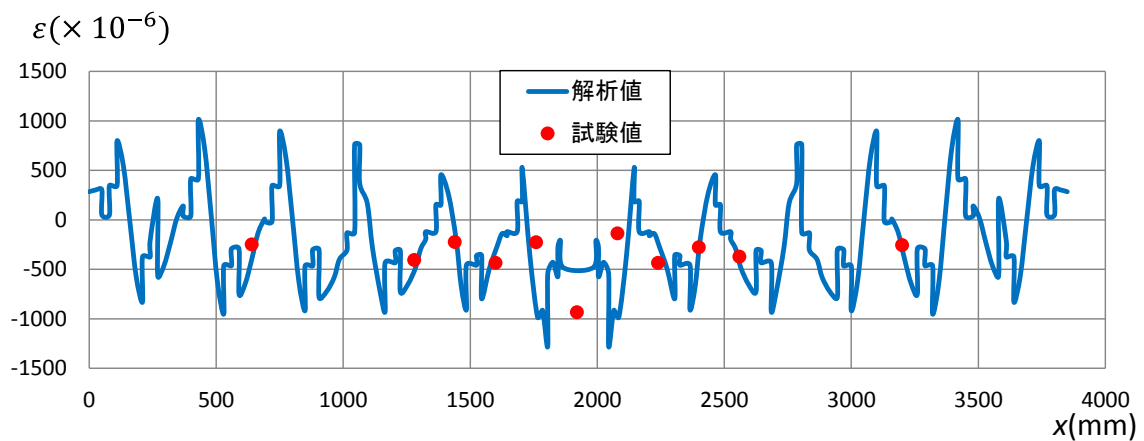
図-2.3 試験体Ⅱに生じるひずみ



(a) 鋼桁下フランジの下面

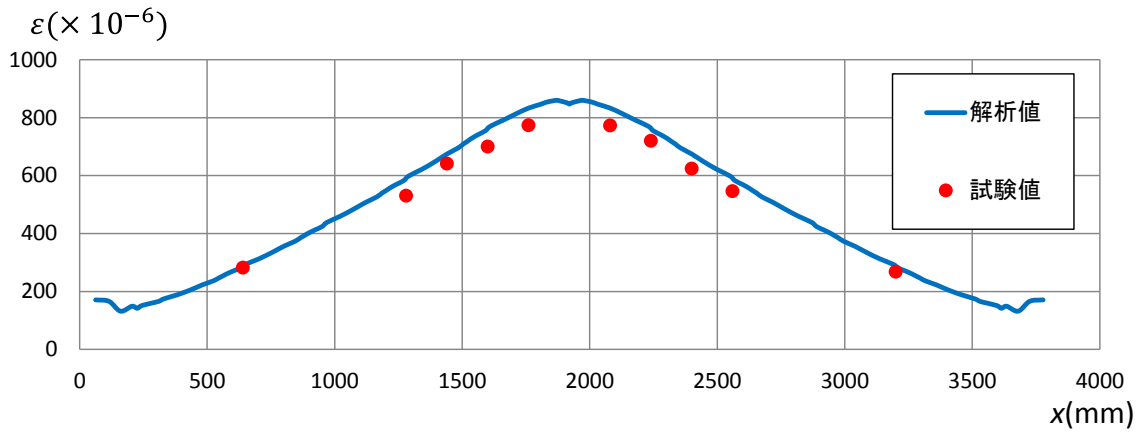


(b) 鋼桁上フランジの下面

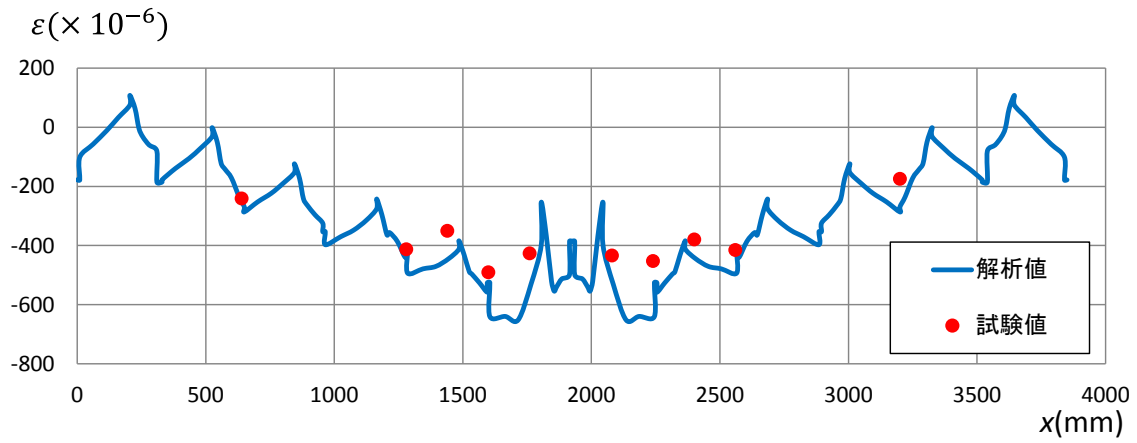


(c) アルミニウム床版上板の上面

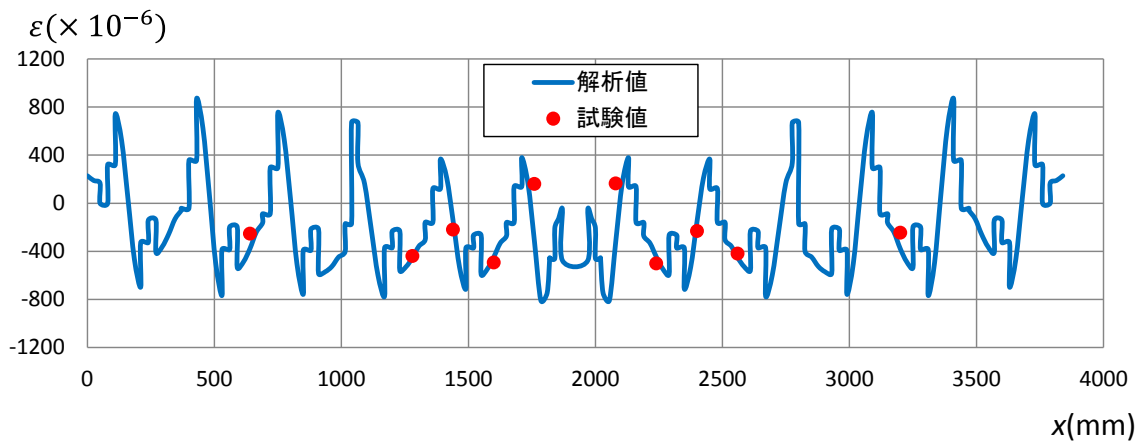
図-2.4 試験体Ⅲに生じるひずみ



(a) 鋼桁下フランジの下面



(b) 鋼桁上フランジの下面



(c) アルミニウム床版上板の上面

図-2.5 試験体IVに生じるひずみ

## 第3章

### 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

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台座から離れる<sup>15)</sup>。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台座を押し、支圧力を台座に生じさせる。この支圧力は、アルミニウム床版下フランジと台座の界面および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台座の間の水平方向ずれ、および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、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か不明である。

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台座の界面および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台座の界面および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。

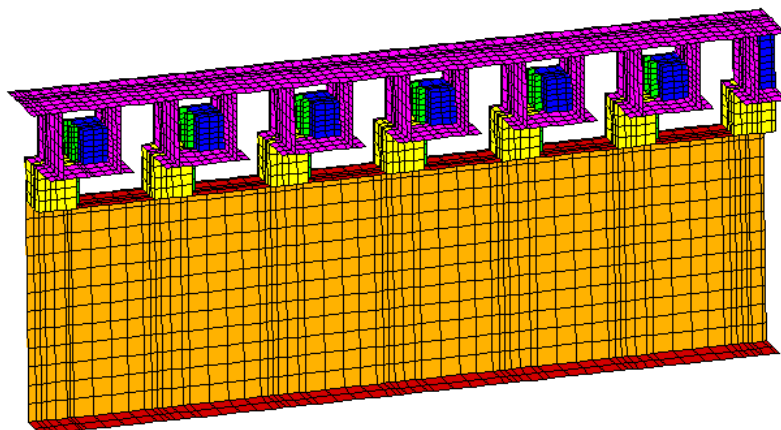
解析モデル C は、台座を考慮しないモデルである。これは、アルミニウム床版下フランジの変形に対して台座の支圧抵抗を考慮しないモデルである。

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台座の界面および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。

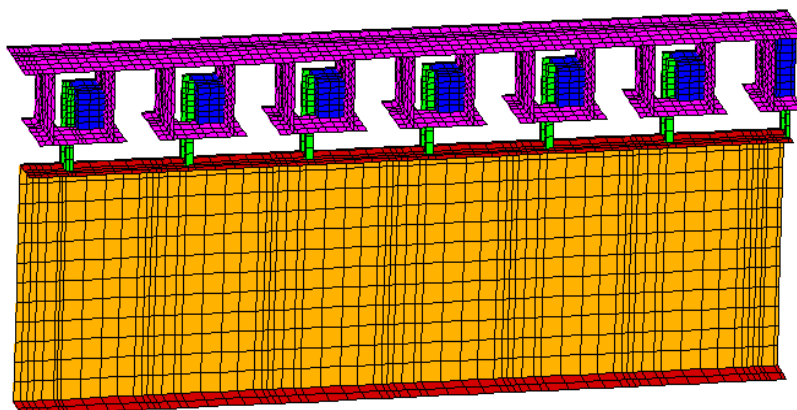
支間中央のアルミニウム床版上板に、荷重  $P/4=122.5\text{kN}$  を集中荷重として与える。解析モデル A, B, C が与える鋼桁下フランジのたわみ分布を図-3.2 に示す。解析モデル A と B が与えるたわみの差は小さい。したがって、アルミニウム床版下フランジと台座の界面および台座と鋼桁上フランジの界面に作用する摩擦力と付着力の大きさが、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に与える影響は小さい。しかし、解析モデル C が与えるたわみは、解析モデル A と B が与えるたわみよりかなり大きい。したがって、アルミニウム床版下フランジの変形に対する台座の支圧抵抗は、アルミニウム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，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



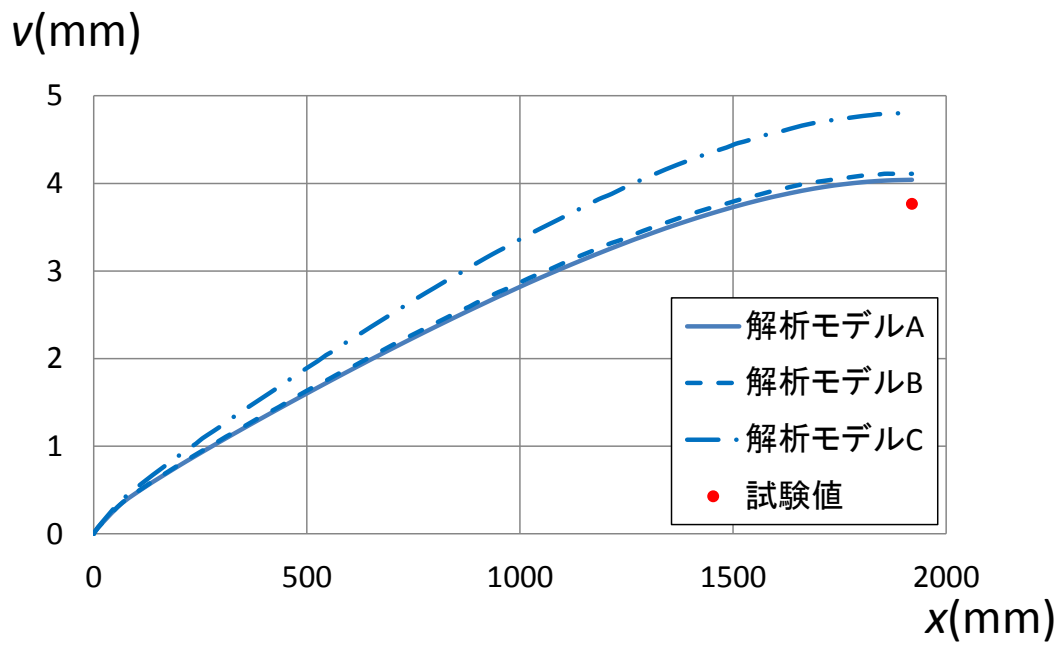
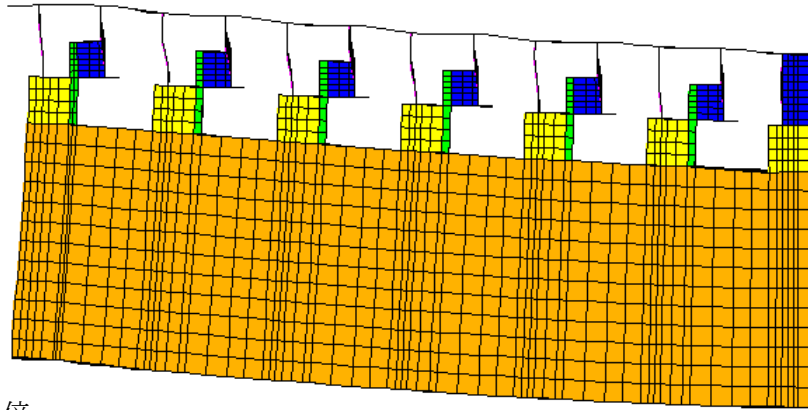
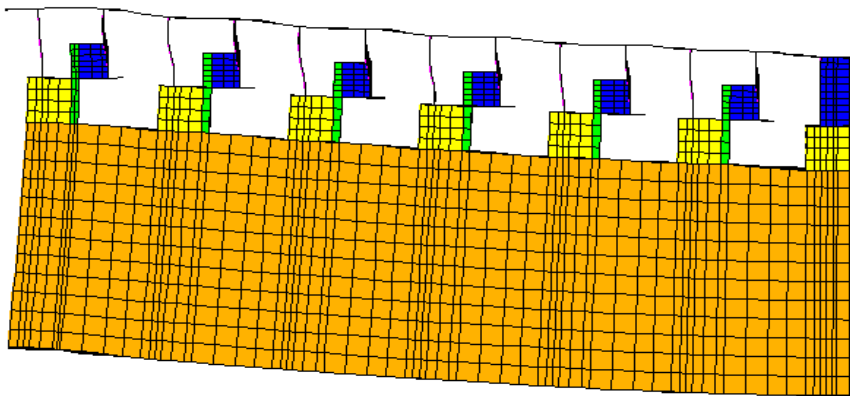


図-3.2 鋼桁下フランジのたわみ分布



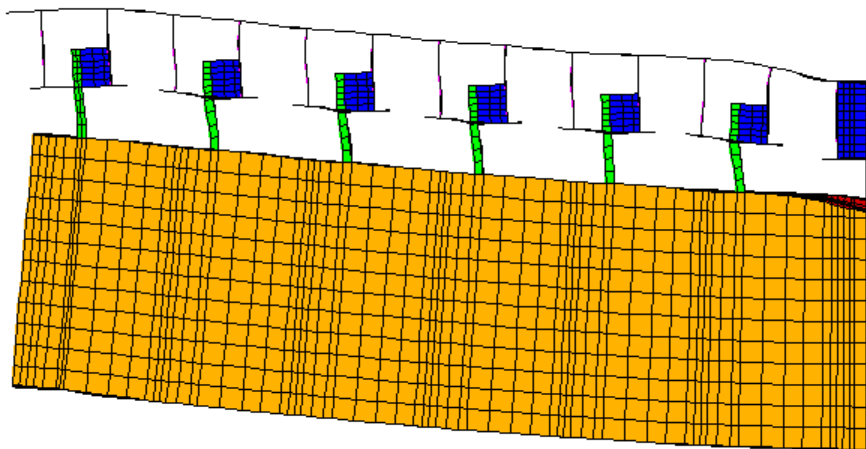
変形倍率 30 倍

(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用いた鋼桁のたわみは次式で与えられる<sup>15)</sup>．

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

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

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

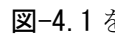
$$\lambda = \sqrt{k \frac{\left( A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left( I_s + \frac{I_a}{n} \right)}} \quad (4.4)$$

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

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

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，-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

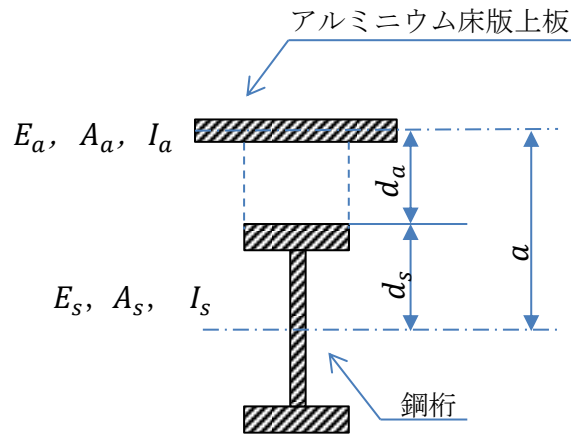


図-4.1 断面諸量

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<sup>15)</sup>. 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 $\lambda$ の値を数値計算により求める. 得られた $\lambda$ 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 台座の高さの影響

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. 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, 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.

表-4.1 の水平せん断バネの値を式(4.4)の $k$ に用いて得られる $\lambda$ を式(4.1)~(4.3)に代入して算出されるたわみの理論値と三次元 FEM 解析値との比較を, 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,  $\lambda$  を次式<sup>15)</sup>に代入して算出される鋼桁下フランジの下面に生じるひずみの理論値と三次元 FEM 解析値との比較を, 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.

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

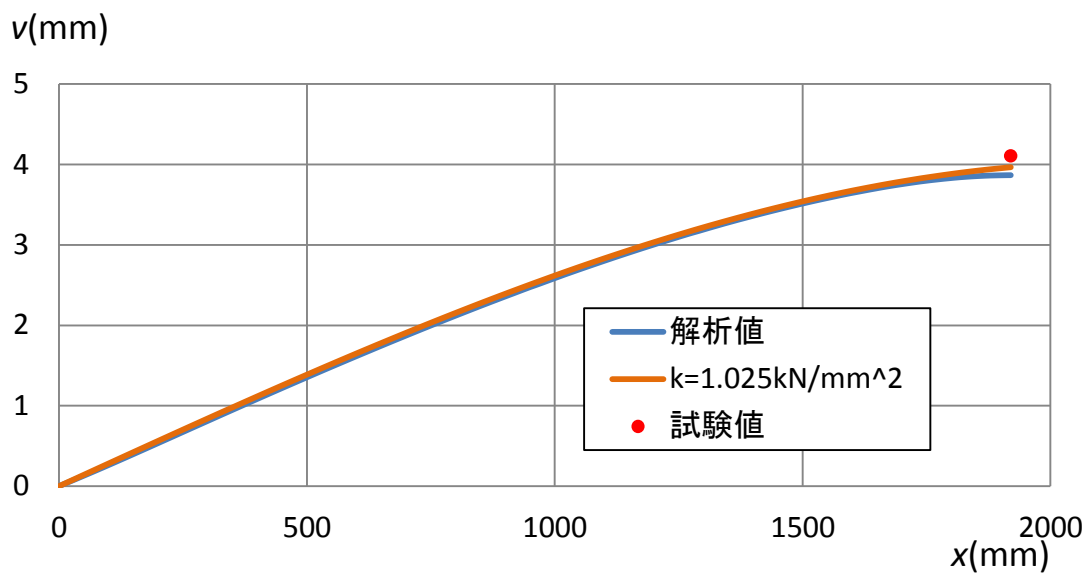
ここに,

$y_s$ : 鋼桁の中立軸を原点とする座標 (図-1.8 参照)

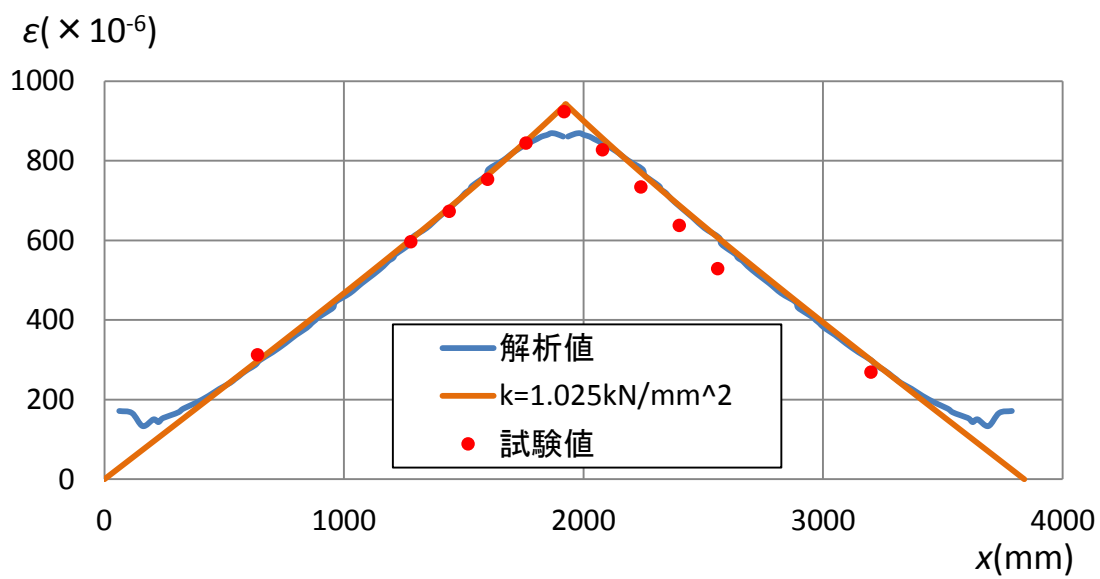
図-4.2, 4.3, 4.4 は, 荷重 490kN に対する結果である. これらの図から分かるように, 表-4.1 の水平せん断バネの値を用いて算出される理論値は, 解析値ならびに試験値の近傍を通過する.

表-4.1 台座の高さと水平せん断バネの値

試験体	台座の高さ $h$ (mm)	水平せん断バネ $k$ (kN/mm <sup>2</sup> )
II	30	1.025
III	60	0.998
IV	100	0.648

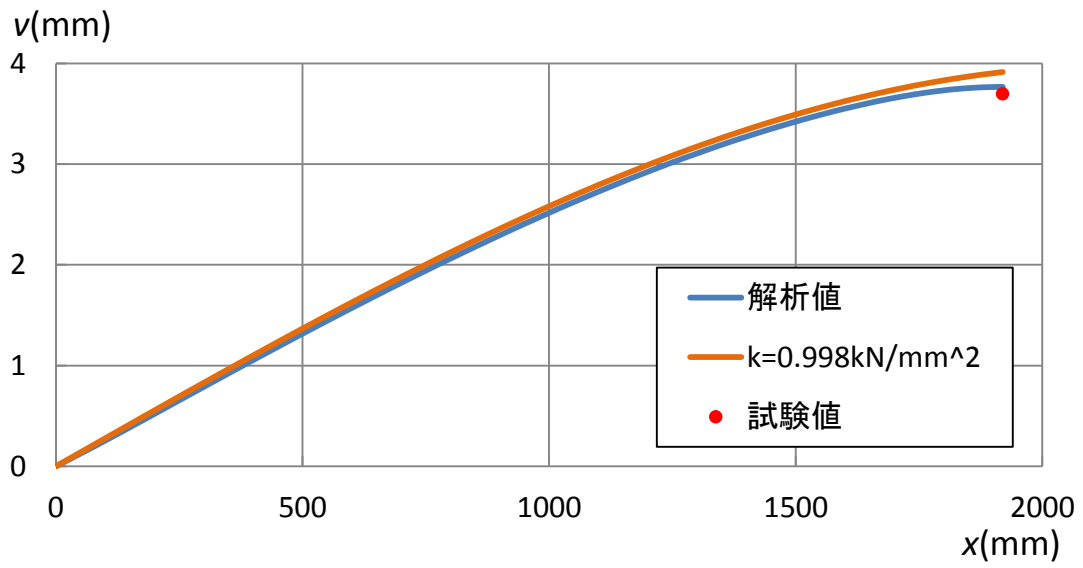


(a) 鋼桁の中立軸の位置のたわみ

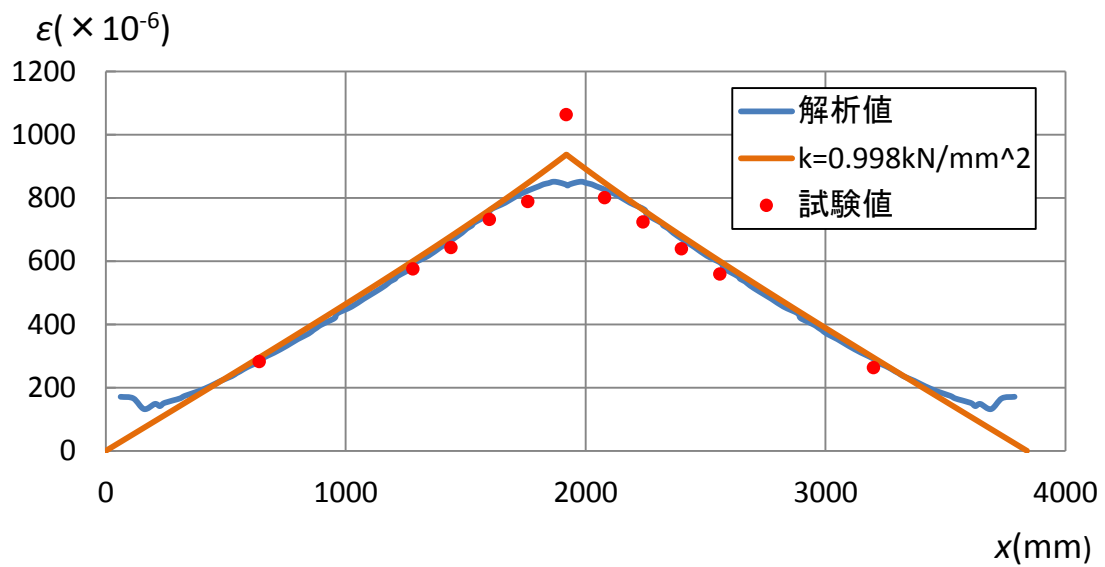


(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

図-4.2 試験体 II

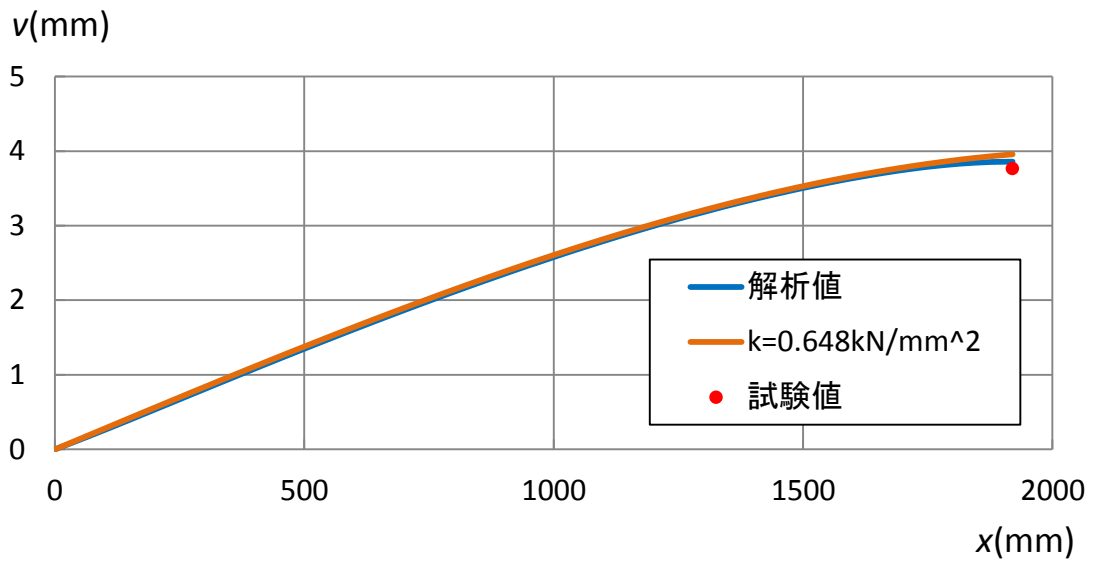


(a) 鋼桁の中立軸の位置のたわみ

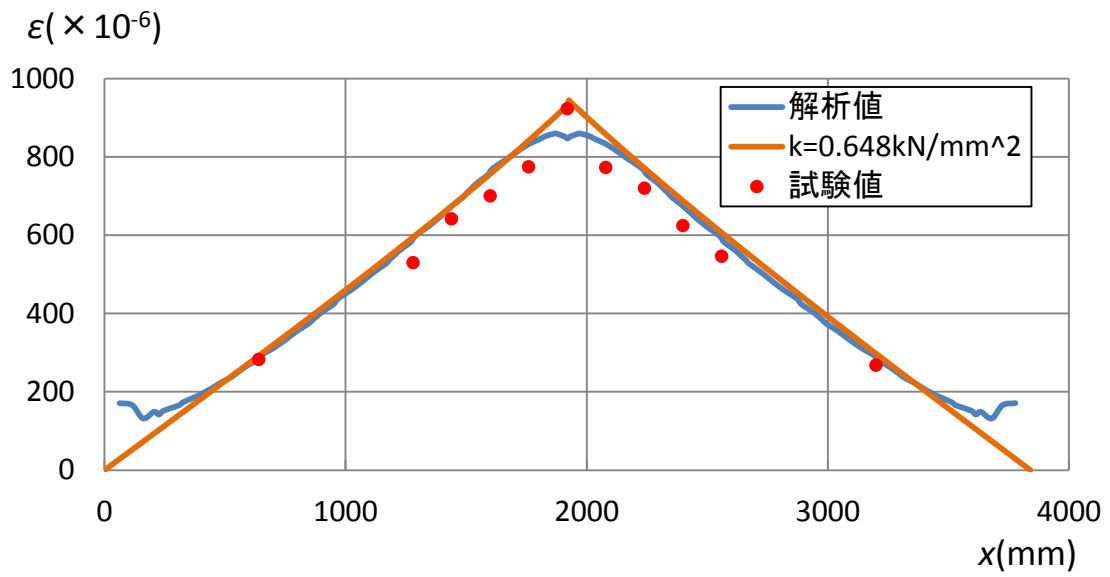


(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

図-4.3 試験体Ⅲ



(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-4.4 試験体IV



### 4.3 アルミニウム床版の幅の影響

図-1.6 に示す試験体IVにおいて、アルミニウム床版の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、アルミニウム床版の幅  $B$  に対して、試験体 IV のアルミニウム床版の幅 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の値を表-4.2 に示す。アルミニウム床版の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。

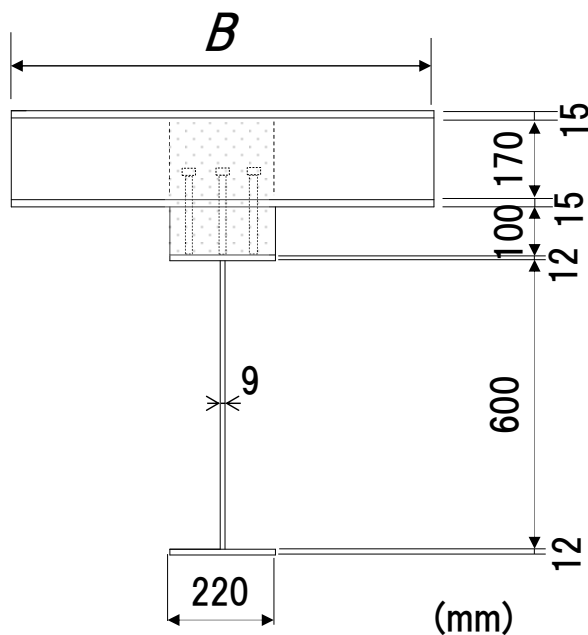


図-4.5 桁の断面寸法

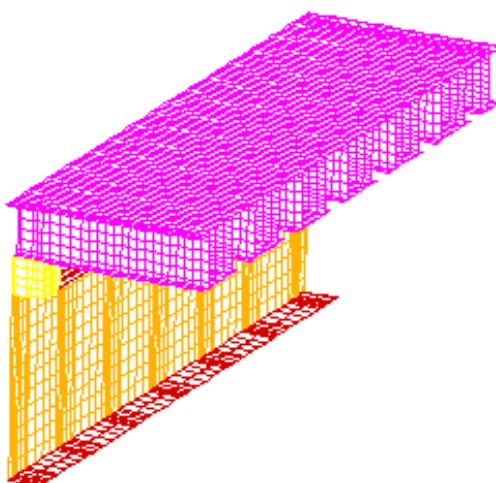


図-4.6 要素分割 ( $B=1320\text{mm}$ )

表-4.2 アルミニウム床版の幅と水平せん断バネの値

アルミニウム床版の幅 $B$ (mm)	水平せん断バネ $k$ (kN/mm <sup>2</sup> )
440	0.648
880	0.680
1320	0.698

#### 4.4 頭付きスタッドの本数の影響

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。頭付きスタッドの配置を図-4.7 に示す。得られた水平せん断バネの値を表-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。

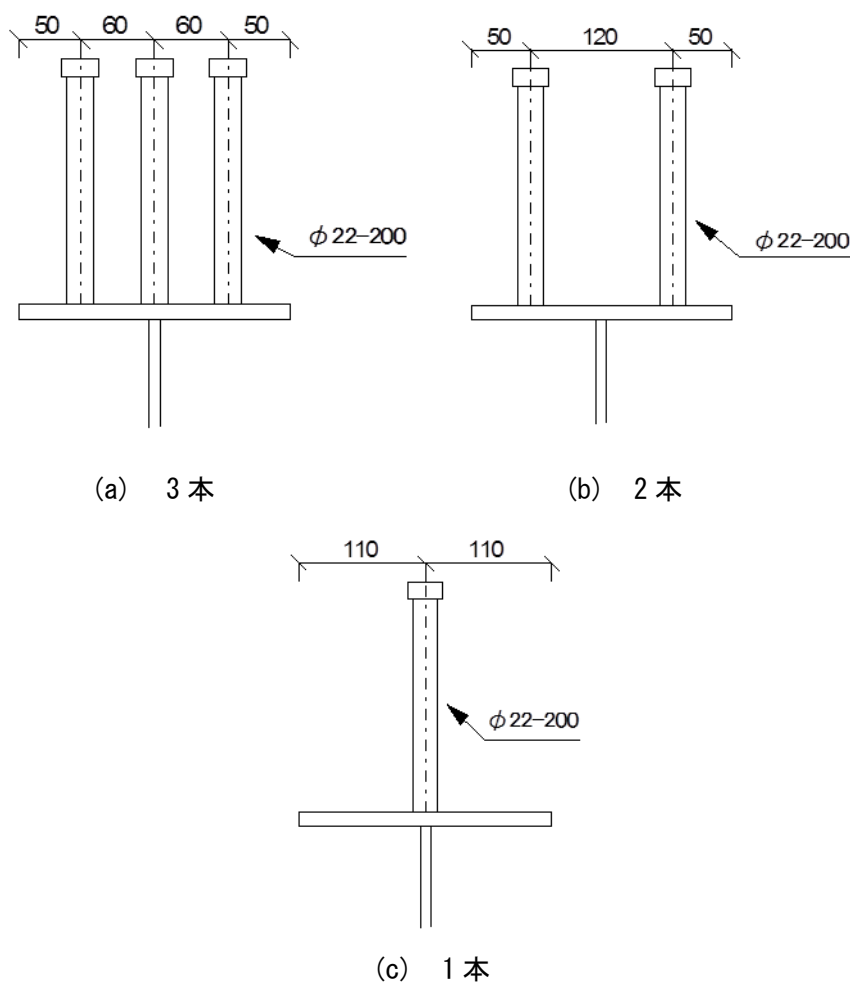


図-4.7 頭付きスタッドの配置

表-4.3 頭付きスタッドの本数と水平せん断バネの値

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

## 第5章 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋のFEM解析

### 5.1 三次元 FEM 解析

三次元 FEM 解析で対象とする、アルミニウム床版を用いた鋼桁橋は、6.1 節で述べる、支間長が 15m の橋である (図-6.1 と表-6.1 参照)。アルミニウム床版の断面形状を図-5.1 に示す。これは、「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>12)</sup>」の規定を満たす断面形状である。アルミニウム床版を有する鋼桁の断面形状を図-5.2 に示す。アルミニウム床版の幅は有効幅である。頭付きスタッドの本数は 3 本で、台座の高さは 30mm である。

三次元 FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA<sup>16)</sup>を使用する。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、解析対象の 1/4 の部分を要素分割する。要素分割を図-5.3 に示す。「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>12)</sup>」において、乾燥収縮ひび割れに優れる高靱性繊維補強セメント複合材料 ECC (Engineered Cementitious Composite) を台座に使用することが規定されている。しかし、ECC に対して、同ガイドラインで規定される管理値を満たすためには非常に高い技術が求められるために、ECC に代わる材料が求められている。第 3 章で述べたように、台座による鉛直方向の支圧抵抗が、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に影響する。したがって、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は、台座のヤング係数の値を変えることによって調べることができる。表-2.1 に示す、試験体のコンクリート台座のヤング係数に等しい 21.5GPa に加えて、これの約 10 倍の 200GPa、および約 1/10 の 2GPa を台座のヤング係数に考慮する。台座のポアソン比に対して、いずれも表-2.1 に示す値を用いる。充填モルタルのヤング係数とポアソン比に対して表-2.1 に示す値を用いる。アルミニウム床版のヤング係数とポアソン比に対して、それぞれ 70GPa, 0.3 を用いる。鋼桁と頭付きスタッドのヤング係数とポアソン比に対して、それぞれ 200GPa, 0.3 を用いる。支間中央に  $P/4=122.5\text{kN}$  の集中荷重を与える。

鋼桁の中立軸のたわみ分布の比較を図-5.4 に示す。たわみ分布はお互いに近い。したがって、台座のヤング係数の大きさが 2GPa から 200GPa の間で、台座がアルミニウム床版と鋼桁との合成作用に与える効果はほぼ同じである。

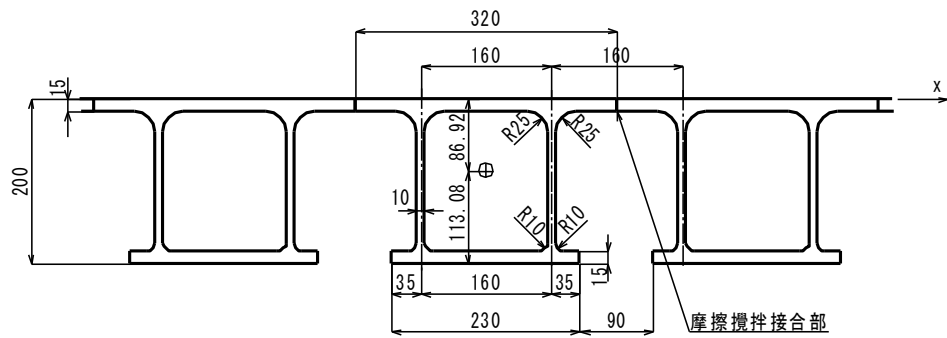


図-5.1 アルミニウム床版の断面形状

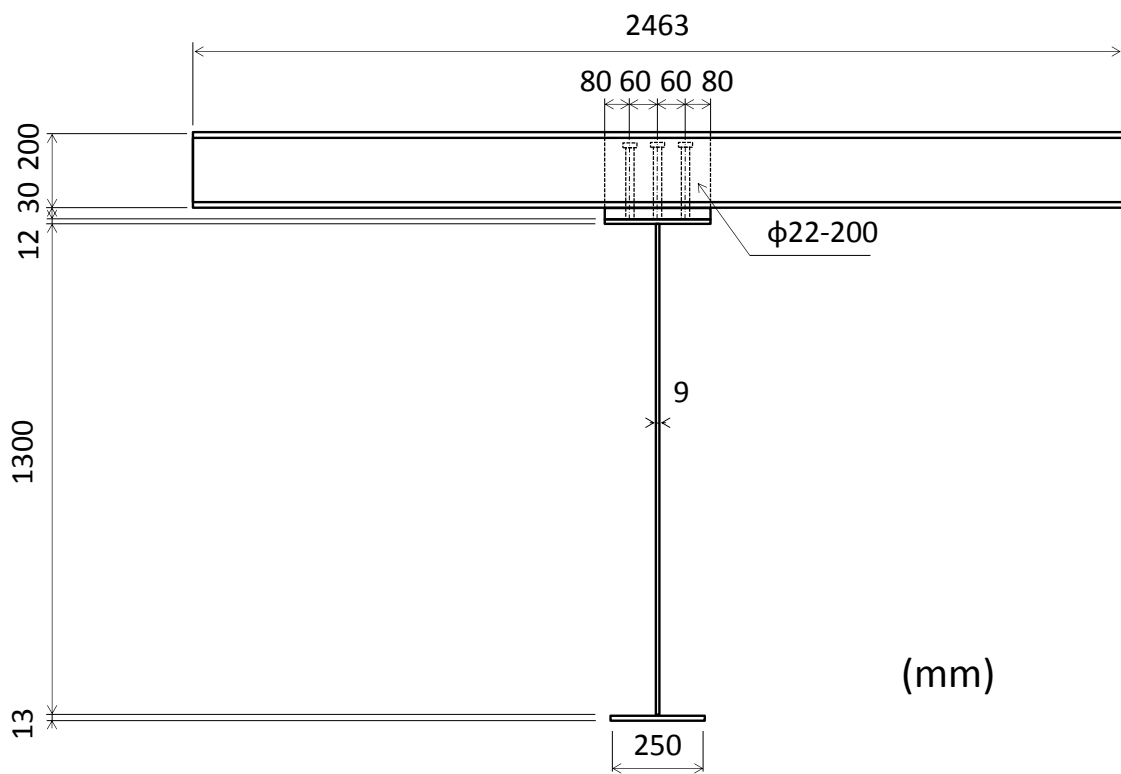
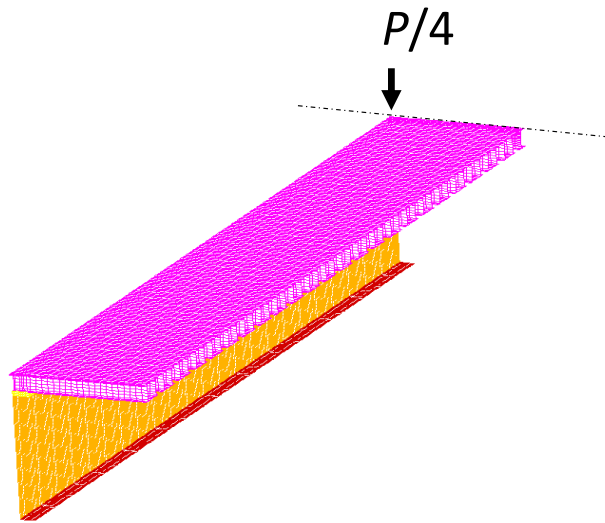
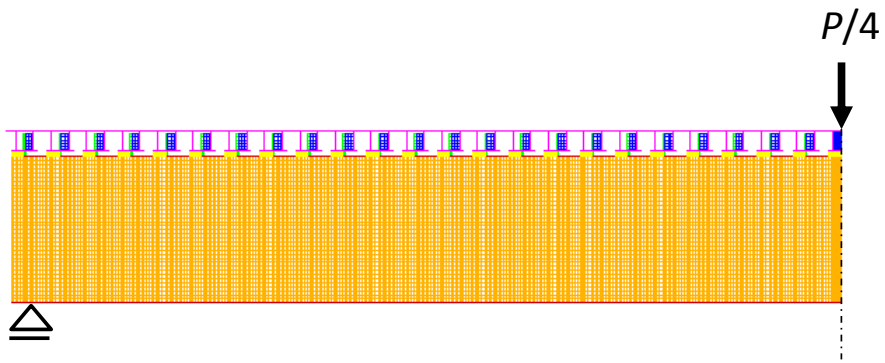
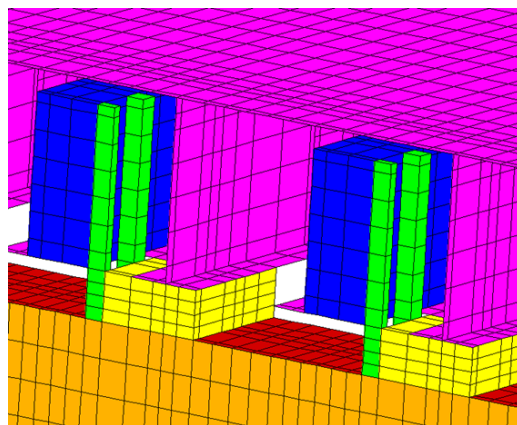


図-5.2 アルミニウム床版を有する鋼桁の断面形状



(a) 全体



(b) 連結部

図-5.3 要素分割

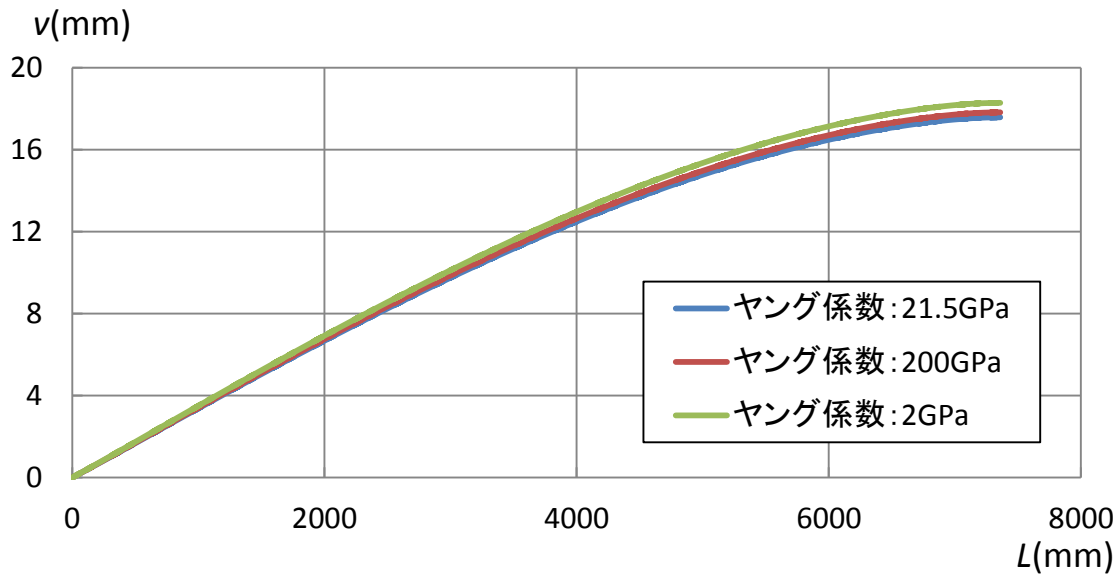


図-5.4 鋼桁の中立軸のたわみ分布の比較

## 5.2 二次元 FEM 解析

三次元 FEM 解析においては，アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の支間長が長くなるに従って有限要素の数も比例して増え，データの作成が困難になる．そこで，アルミニウム床版を用いた鋼桁橋を平面問題として，二次元 FEM 解析<sup>15)</sup>によって計算できる可能性について調べる．

三次元 FEM 解析で用いた，図-5.2 に示す，アルミニウム床版を有する支間長 15m の鋼桁を二次元 FEM 解析によって解く．二次元 FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA<sup>16)</sup>を用いる．要素分割図を図-5.5 に示す．支間中央における対称性より，支間の左側半分を要素分割する．アルミニウム床版上板の隅角部に対して 6 節点三角形アイソパラメトリック平面応力要素 (CT12M)，その他の部材に対して 8 節点四辺形アイソパラメトリック平面応力要素 (CQ16M) を使用する．アルミニウム床版，頭付きスタッド，充填モルタル，台座，鋼桁の異種材料間の界面の節点を全て共有させる．頭付きスタッドの桁長手方向の長さは， $\phi 22\text{mm}$  の頭付きスタッドの直径と同じで 22mm，頭付きスタッドの奥行きは，3本の  $\phi 22\text{mm}$  の頭付きスタッドの断面積の総計に等しくなるように 51.83mm とする．頭付きスタッドとアルミニウム床版が交差する部分の奥行き長さは次の計算によって，アルミニウム床版の下フランジの奥行き長さを等価な頭付きスタッドの奥行き長さに置き換え，これを頭付きスタッドの奥行き長さに加える．

$$51.83 + \frac{E_a}{E_s} (2463 - 170) = 51.83 + \frac{70}{200} (2463 - 170) = 8544 \text{ mm} \quad (5.1)$$

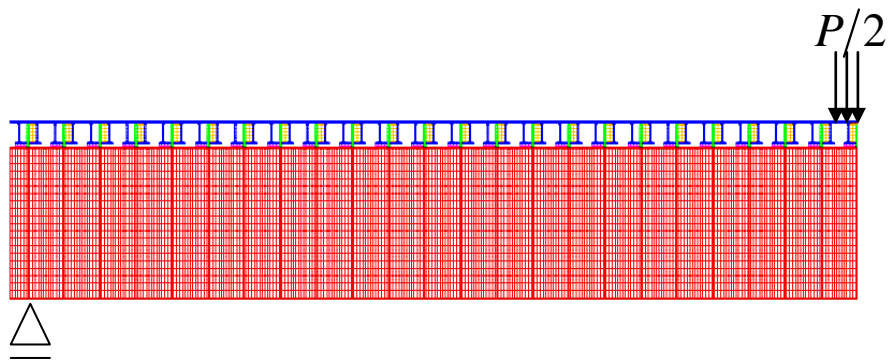
ここで， $E_a$  と  $E_s$  は，それぞれ，アルミニウム床版と頭付きスタッドのヤング係数であり，

2463mm はアルミニウム床版の下フランジの奥行き長さ、170mm は、スタッドを挿入するためにアルミニウム床版の下フランジに設けられた開口の奥行き長さである。

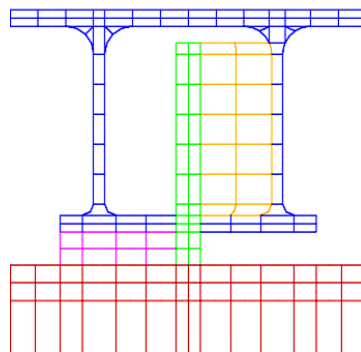
アルミニウム床版のヤング係数とポアソン比は、それぞれ 70GPa, 0.3 とする。充填モルタルと台座のヤング係数とポアソン比は表-2.1 に示す値とする。鋼桁と頭付きスタッドのヤング係数とポアソン比は、それぞれ 200GPa, 0.3 とする。

荷重は、支間中央から 100mm の幅に、荷重  $P/2=225\text{kN}$  を等分布载荷で与える。

鋼桁の中立軸のたわみ分布の比較を図-5.6 に示す。二次元 FEM 解析と三次元 FEM 解析による鋼桁の中立軸のたわみはほぼ等しい。したがって、二次元 FEM 解析によってアルミニウム床版を用いた鋼桁橋を解くことができる。

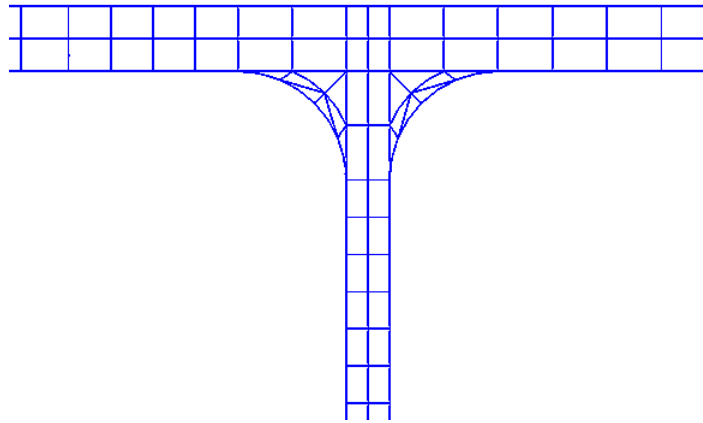


(a) 全体



(b) 連結部





(b) アルミニウム床版上板の隅角部

図-5.5 要素分割

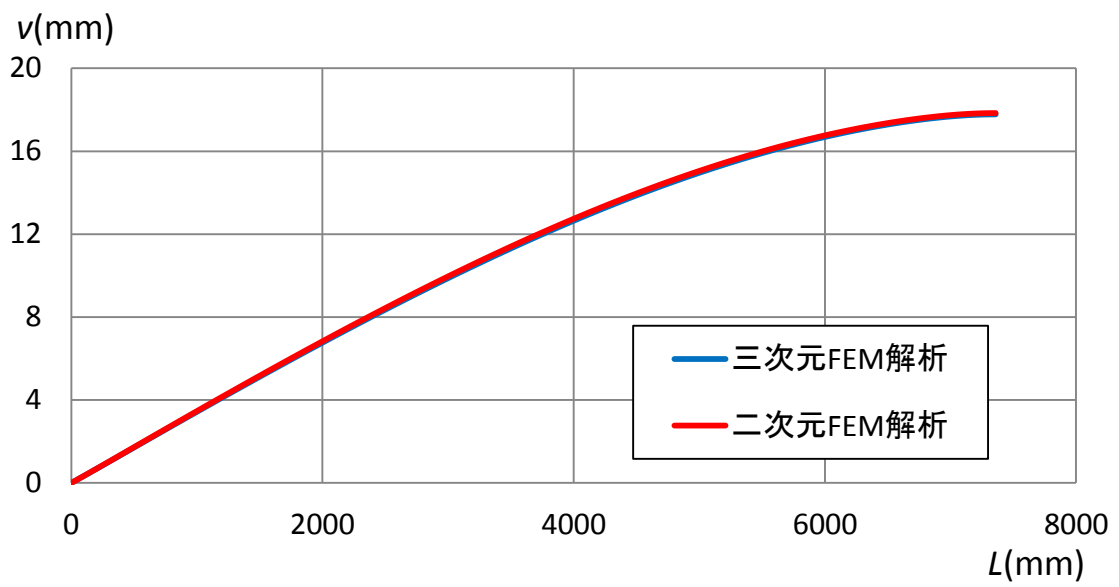


図-5.6 鋼桁の中立軸のたわみ分布の比較

## 第6章 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用と平面保持度

### 6.1 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用

図-6.1 と表-6.1 に示す，アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用を調べる．橋は単純支持され，橋の支間長に対して 15m, 20m, 30m, 40m を考慮する．橋の設計条件は次の通りである<sup>17)</sup>．

- 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．「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>12)</sup>」に規定されるアルミニウム床版を用いる (図-5.1 参照)．台座の高さは 30mm とする．
- iii) 高欄，舗装，地覆，アルミニウム床版の死荷重を表-6.2 に示す．
- 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対する許容たわみの値として，支間中央の許容たわみを  $L/500$  とする．ここで， $L$  は支間長である．
- v) 鋼材は SM490Y 材とする．
- 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) アルミニウム床版の有効幅に対して，道路橋示方書<sup>2)</sup>の完全合成桁に対する床版の有効幅の規定を適用する<sup>12)</sup>．

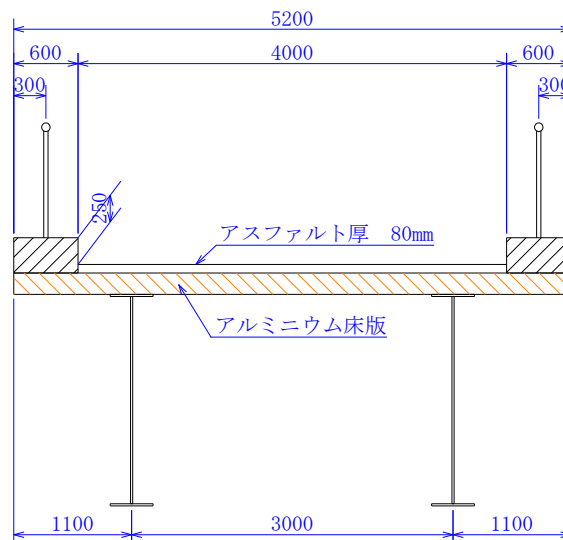


図-6.1 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋

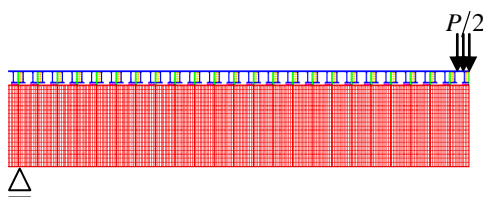
表-6.1 鋼桁の断面寸法とアルミニウム床版の有効幅

支間長 (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
台座の高さ (mm)		30			

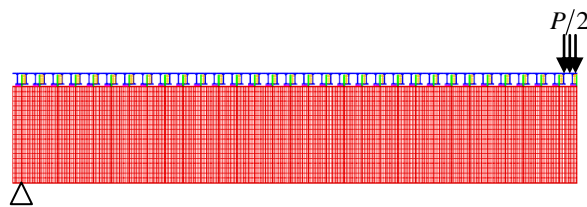
表-6.2 死荷重

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

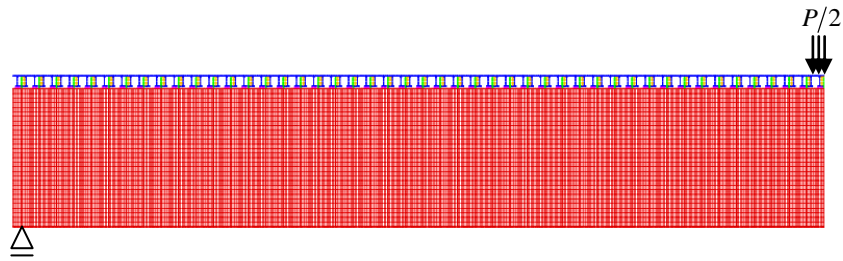
表-6.1 に示す支間長 15m, 20m, 30m, 40m のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋を二次元 FEM 解析によって解く. 要素分割を図-6.2 に示す. 荷重は, 支間中央から 100mm の幅に荷重  $P/2=245\text{kN}$  を等分布载荷として与える.



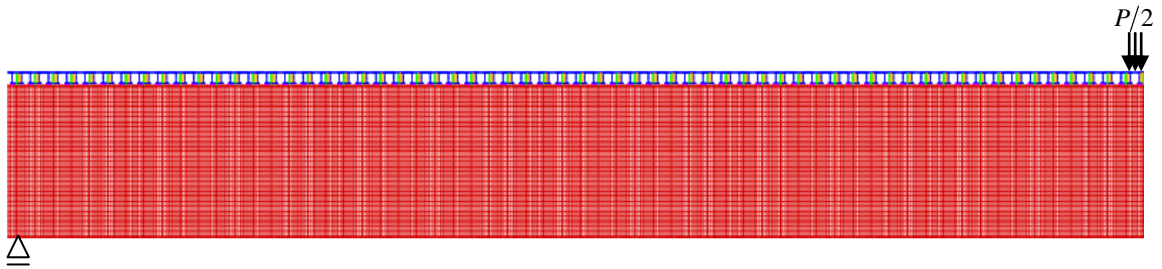
(a)  $L=15\text{m}$



(b)  $L=20\text{m}$



(c)  $L=30\text{m}$



(d)  $L=40\text{m}$

図-6.2 要素分割

二次元FEM解析によって算出された鋼桁下フランジの下面のひずみ分布を図-6.3に示す. 同図には, 次式で与えられる, アルミニウム床板と鋼桁とが完全合成の場合に対する, 鋼桁下フランジのひずみ分布も赤線で描いてある<sup>15),18)</sup>.

$$\varepsilon_s = -\frac{M}{E_s I_{v0}} y \quad (6.1)$$

ここに,

$$I_{v0} = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a d_s}{n A_s + A_a} \quad (6.2)$$

$M$  : 合成桁に作用する曲げモーメント

$I_{v0}$  : 鋼換算断面二次モーメント

$y$  : 合成桁の中立軸を原点とする座標 (上方を正)

鋼桁上フランジの上面から合成桁の中立軸までの距離  $e_0$  は次式で与えられる<sup>18)</sup>.

$$e_0 = \frac{E_s A_s d_s}{E_s A_s + E_a A_a} \quad (6.3)$$

FEM解析値は式(6.1)が与えるひずみより小さい. これは, 無収縮モルタルが充填された閉断面が, 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發揮させているためと考えられる. 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ひずみ分布を青線で図-6.3に示す. 式(6.1)の鋼換算断面二次モーメント  $I_{v0}$  を, 次式で与えられる鋼換算断

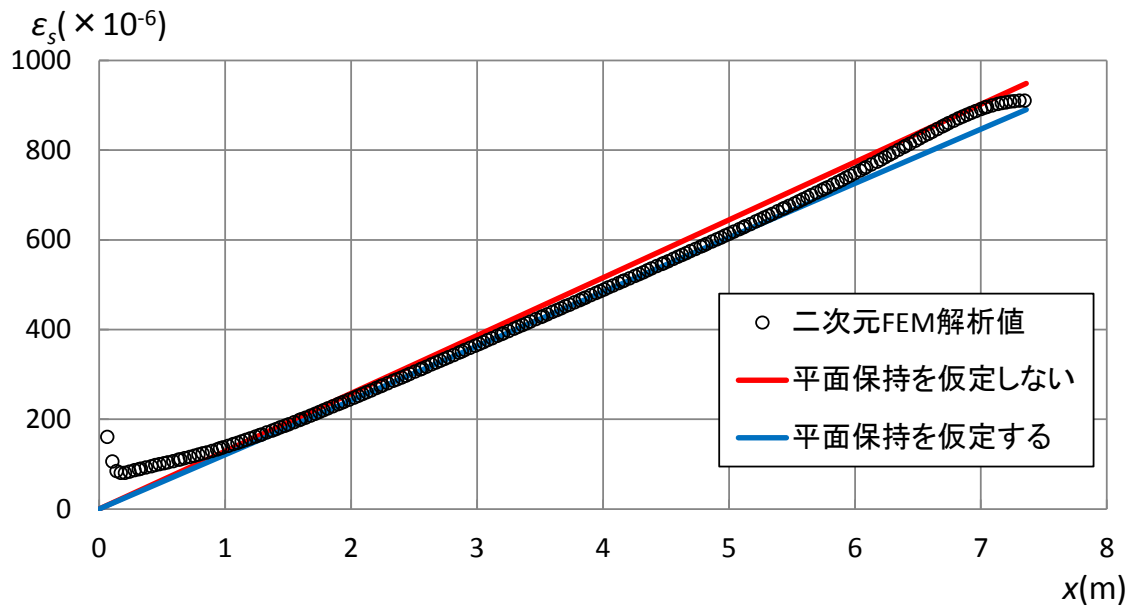
面二次モーメント  $I_{v1}$  に置き換えることによって、青線は与えられる<sup>15),18)</sup>。

$$I_{v1} = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a d^2}{n A_s + A_a} \quad (6.4)$$

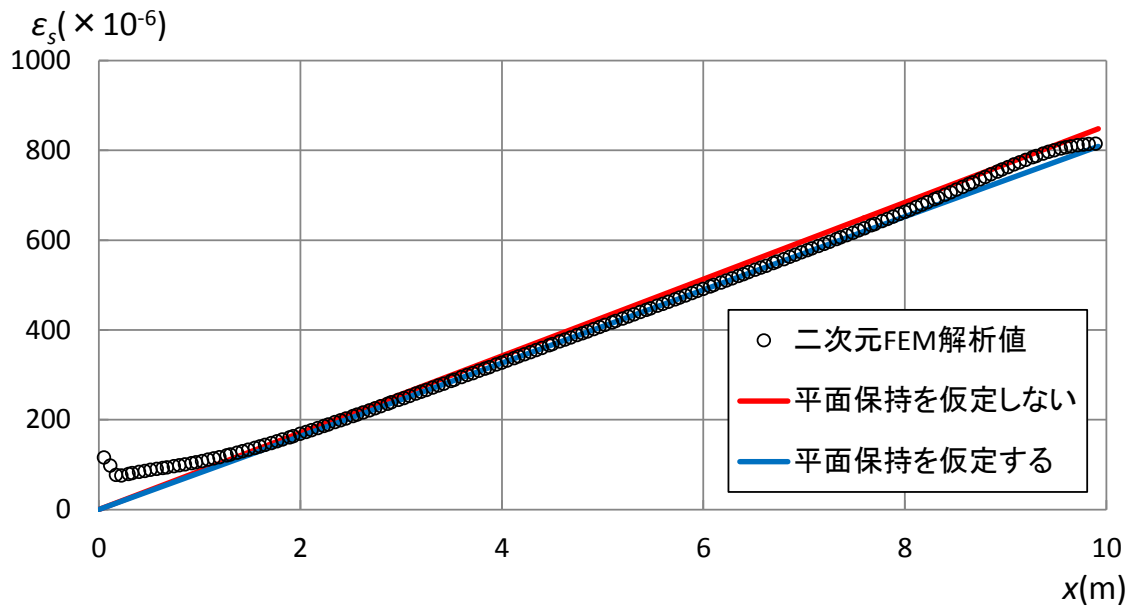
この場合の鋼桁上フランジの上面から合成桁の中立軸までの距離  $e_1$  は次式で与えられる<sup>18)</sup>。

$$e_1 = \frac{E_s A_s d_s - E_a A_a d_a}{E_s A_s + E_a A_a} \quad (6.5)$$

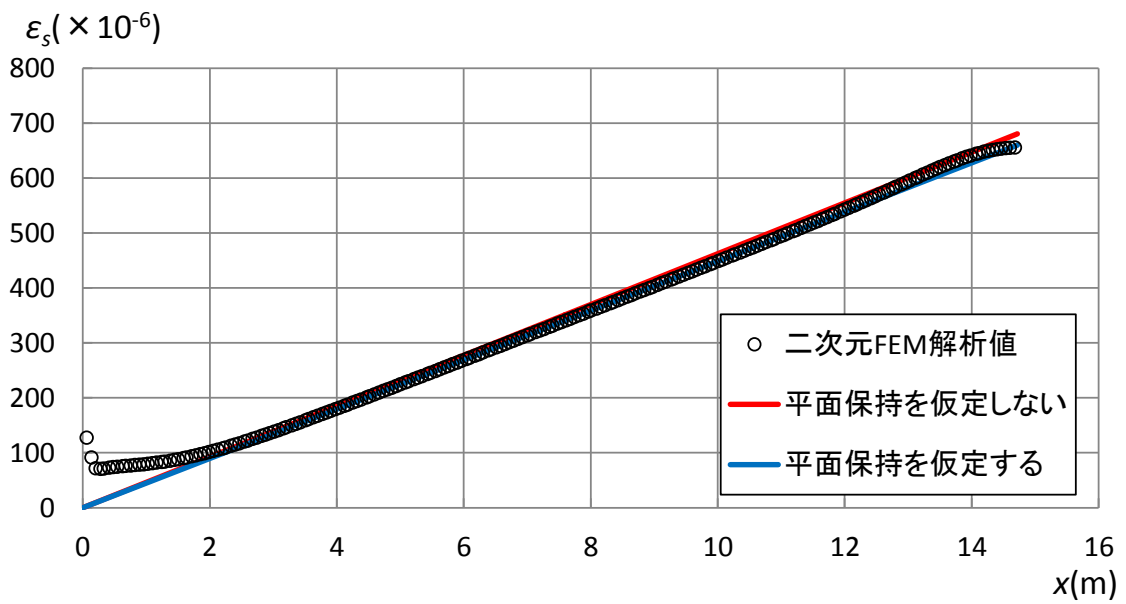
FEM 解析値は全ての支間長に対して赤線と青線の間分布している。アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が不完全合成の場合、鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは曲線分布を示し、完全合成の場合は直線分布を示す<sup>15)</sup>。図-6.3 の各図のひずみ分布は直線分布を示す。したがって、支間長 15m 以上のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋においては、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は完全合成であると言える。



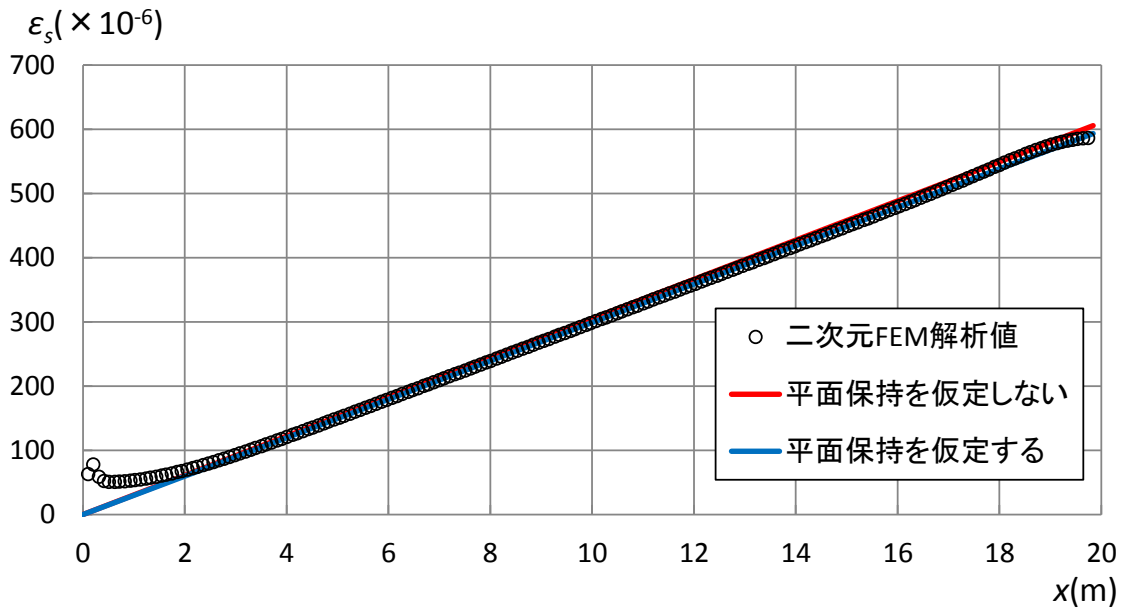
(a)  $L=15m$



(b)  $L=20\text{m}$



(c)  $L=30\text{m}$



(d)  $L=40\text{m}$

図-6.3 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

## 6.2 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度

二次元 FEM 解析による鋼桁の中立軸のたわみ分布を図-6.4 に示す. 同図には, 次式で与えられる, アルミニウム床板と鋼桁とが完全合成の場合に対するたわみ分布も描いてある(15),18).

$$v = \frac{P}{2E_s I_v} \left( -\frac{x^3}{6} + \frac{L^2 x}{8} \right) + \frac{P I_s}{2G_s A_{sw} I_v} x \quad (6.6)$$

ここで, 赤線は, 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を仮定しない場合のたわみ分布であり, 式(6.6)の $I_v$ に $I_{v0}$ を用いることにより与えられる. 青線は, 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を仮定した場合のたわみ分布であり, 式(6.6)の $I_v$ に $I_{v1}$ を用いることにより与えられる. 式(6.6)の適用範囲は $0 \leq x \leq L/2$ である. 試験体中央のたわみは次式で与えられる.

$$v = \frac{PL^3}{48E_s I_v} + \frac{P L I_s}{4G_s A_{sw} I_v} \quad (6.7)$$

図-6.4 から分かるように, FEM 解析値は各支間長において赤線と青線の間分布している.

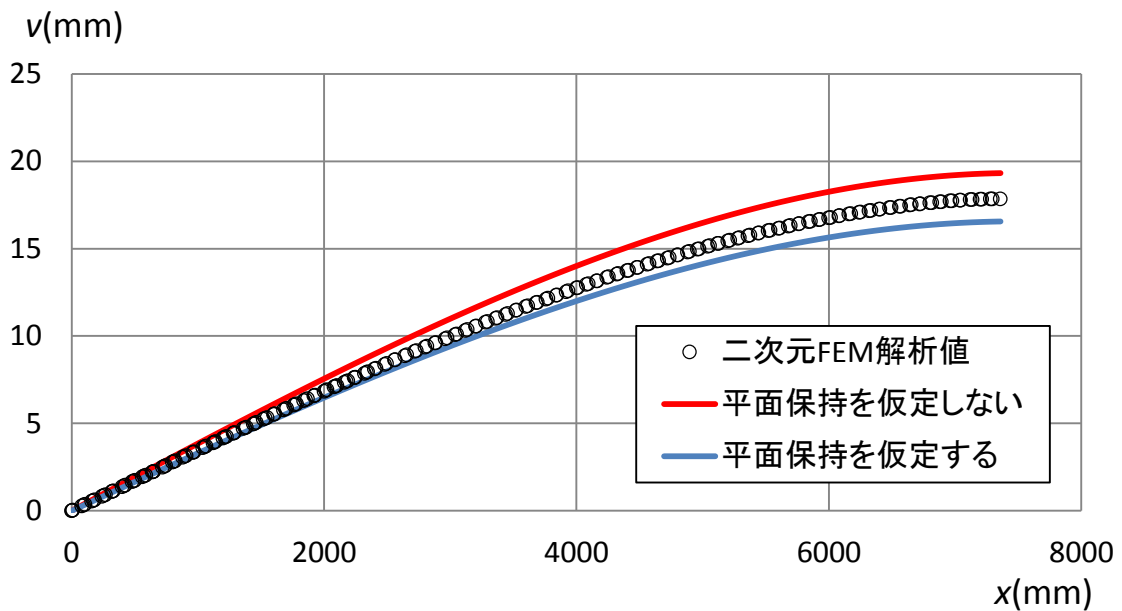
式(6.2)と(6.4)から分かるように,  $I_{v0}$ と $I_{v1}$ の相違は, 右辺第3項の分子が, 前者は $ad_s$ , 後者は $a^2$ であることである. したがって, アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の平面保持の作用を考慮した鋼換算断面二次モーメント $I_v$ は次式で表される.

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a \{d_s + \eta(a - d_s)\}}{n A_s + A_a} \quad (6.8)$$

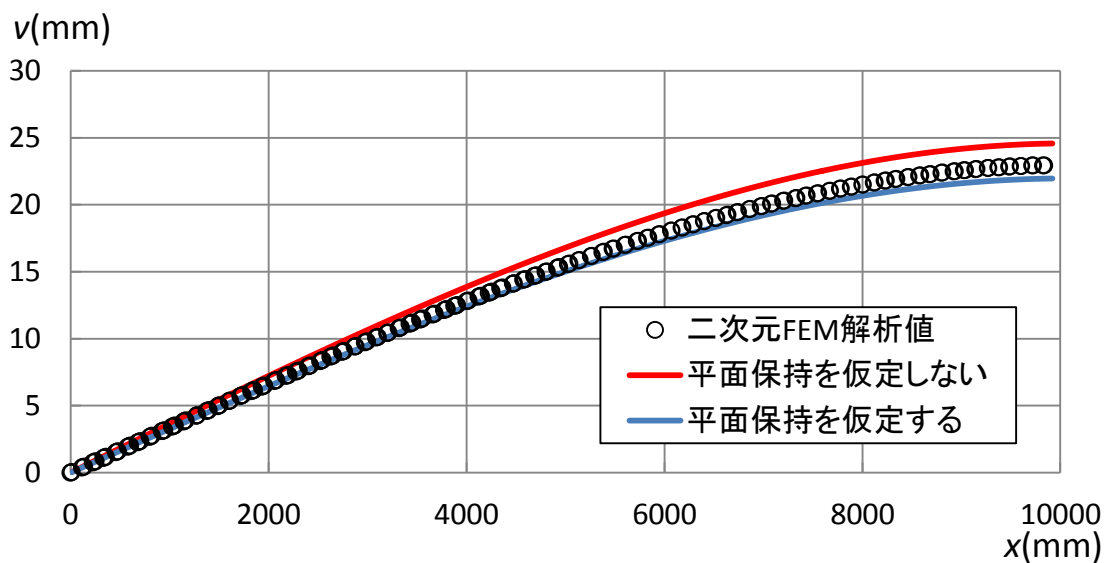
ここに,

$$0 \leq \eta \leq 1$$

式(6.8)は,  $\eta=0$  に対して  $I_v = I_{v0}$ ,  $\eta=1$  に対して  $I_v = I_{v1}$  である. 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程度は,  $\eta$  が 0 に近づくに従って小さくなり,  $\eta$  が 1 に近づくに従って大きくなる.  $\eta$  を平面保持度と呼ぶ.

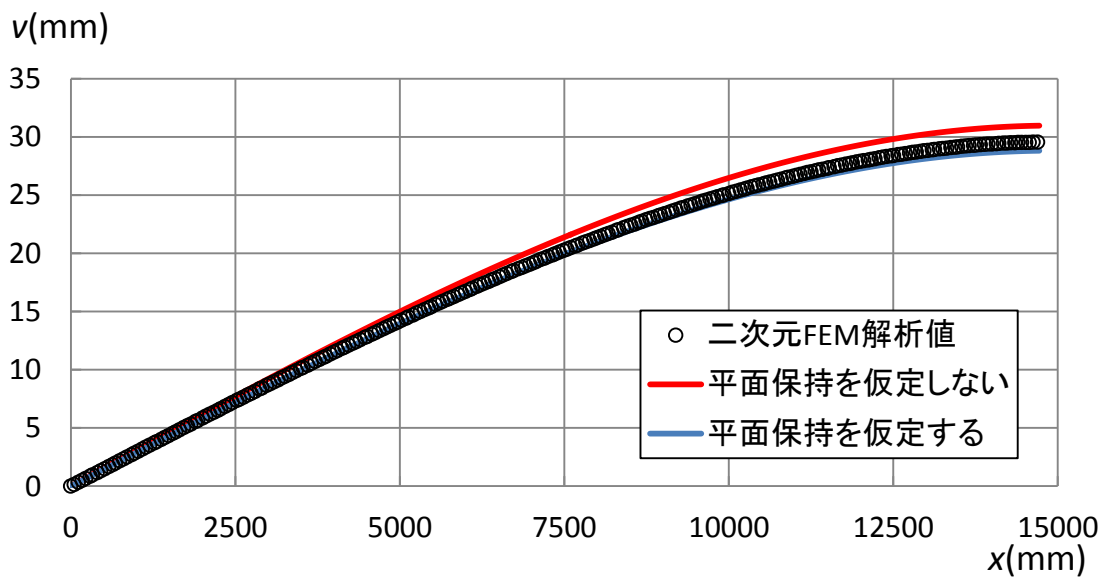


(a)  $L=15\text{m}$

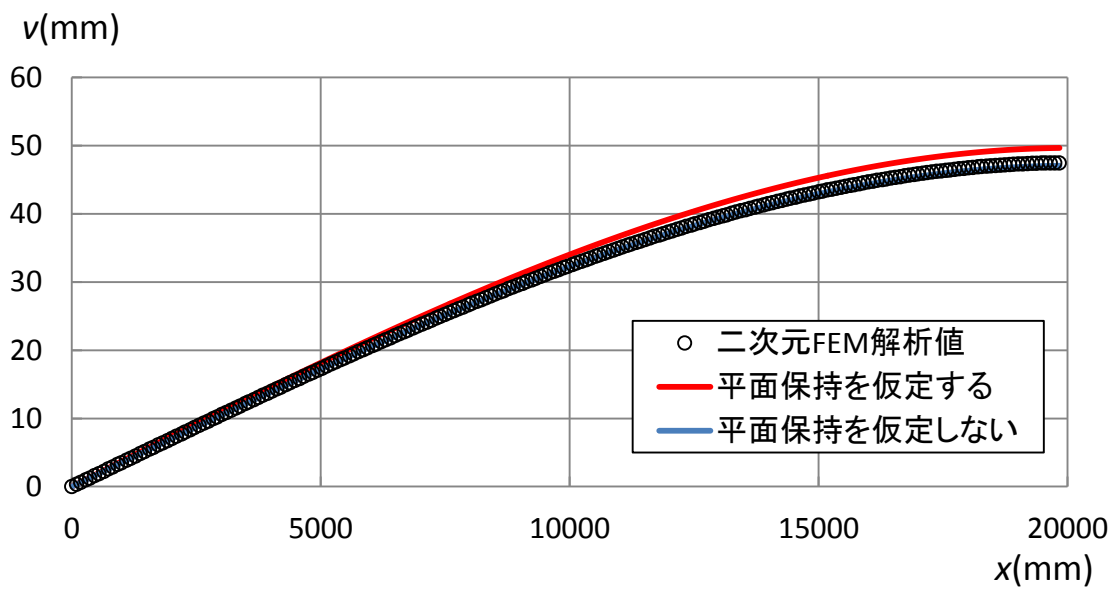


(b)  $L=20\text{m}$





(c)  $L=30\text{m}$



(d)  $L=40\text{m}$

図-6.4 鋼桁のたわみ分布

式(6.8)を式(6.7)に代入して、 $\eta$  について解いて次式を得る.

$$\eta = \frac{\left\{ \left( \frac{PL^3}{48E_s} + \frac{PLI_s}{4G_s A_{sw}} \right) \frac{1}{v} - I_s - \frac{I_a}{n} \right\} \left( A_s + \frac{A_a}{n} \right)}{a(a-d_s)A_s \frac{A_a}{n}} - \frac{d_s}{a-d_s} \quad (6.9)$$

各支間長に対して、FEM 解析によって算出された支間中央の、鋼桁の中立軸の位置のたわみを式(6.9)の  $v$  に用いて  $\eta$  の値が与えられる. 平面保度  $\eta$  と支間長との関係を図-6.5 に示す. 支間長が長くなるに従って、 $\eta$  は大きくなる. 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の平面保持の程度は大きくなる.

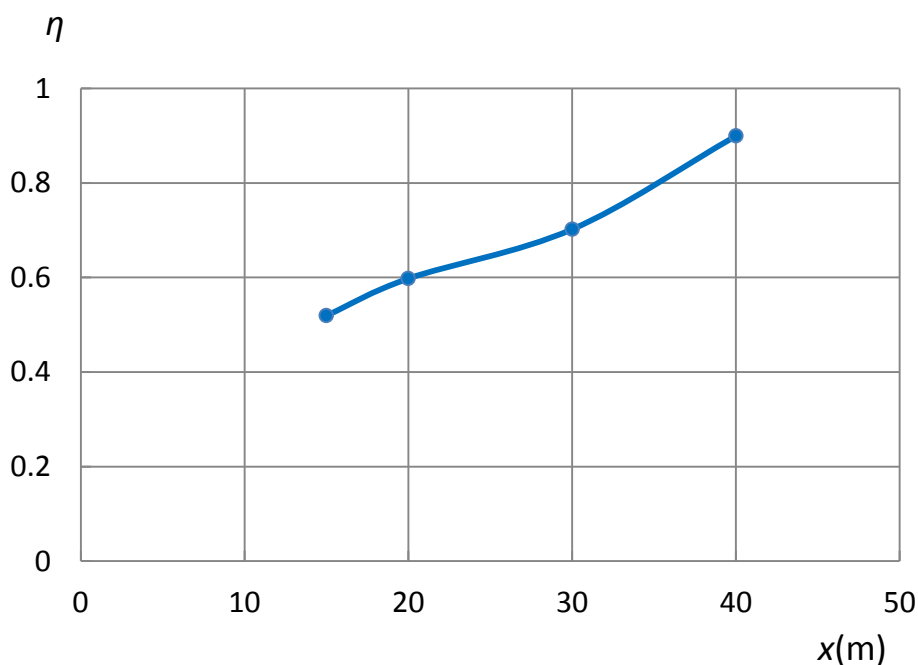
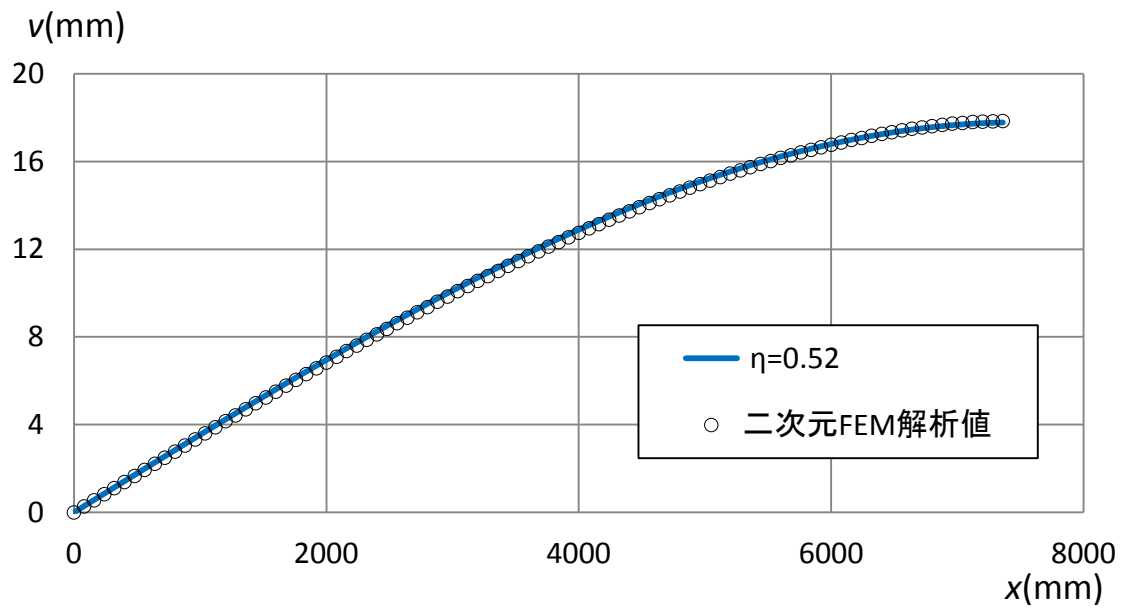
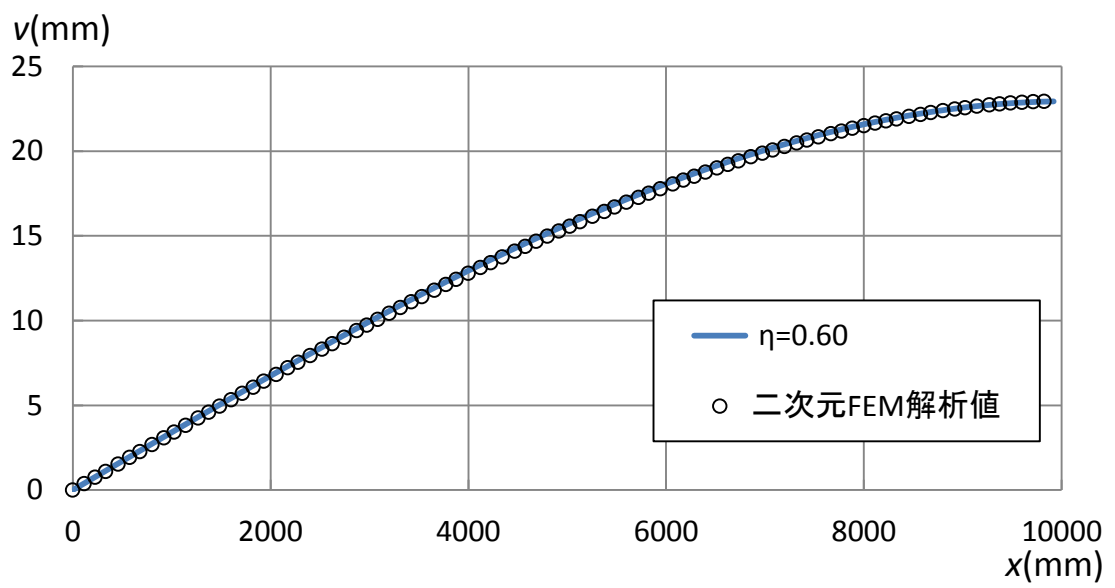


図-6.5 平面保持度と支間長の関係

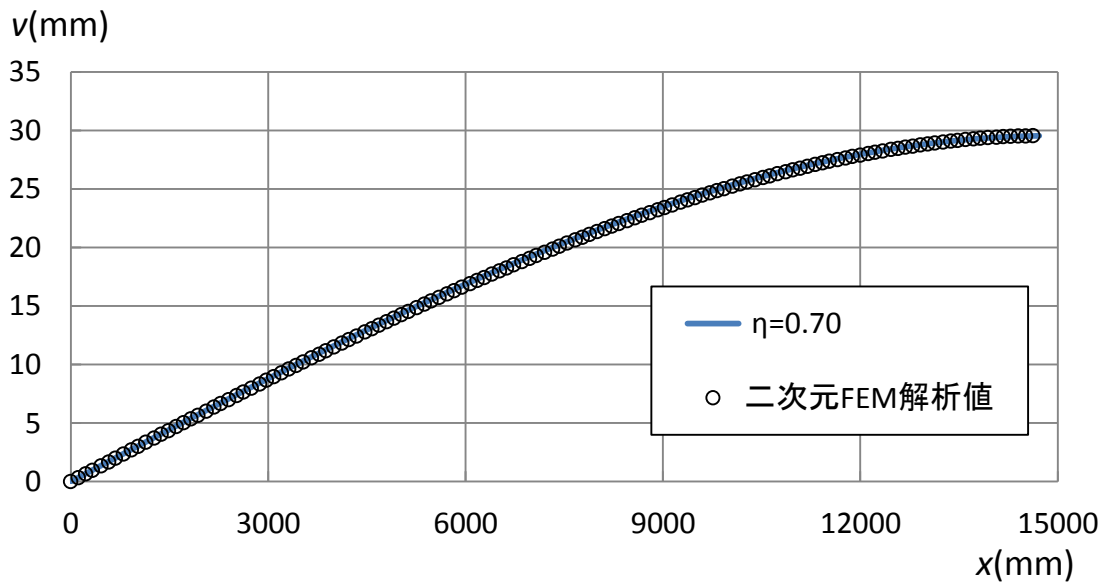
図-6.5の  $\eta$  の値を式(6.8)に代入して得られた鋼換算断面二次モーメント  $I_p$  を式(6.6)に代入して得られる鋼桁のたわみ分布と、FEM 解析によって算出された鋼桁の中立軸の位置のたわみ分布の比較を図-6.6 に示す. 式(6.6)が与える鋼桁のたわみは、FEM 解析が与えるたわみにほぼ等しい.



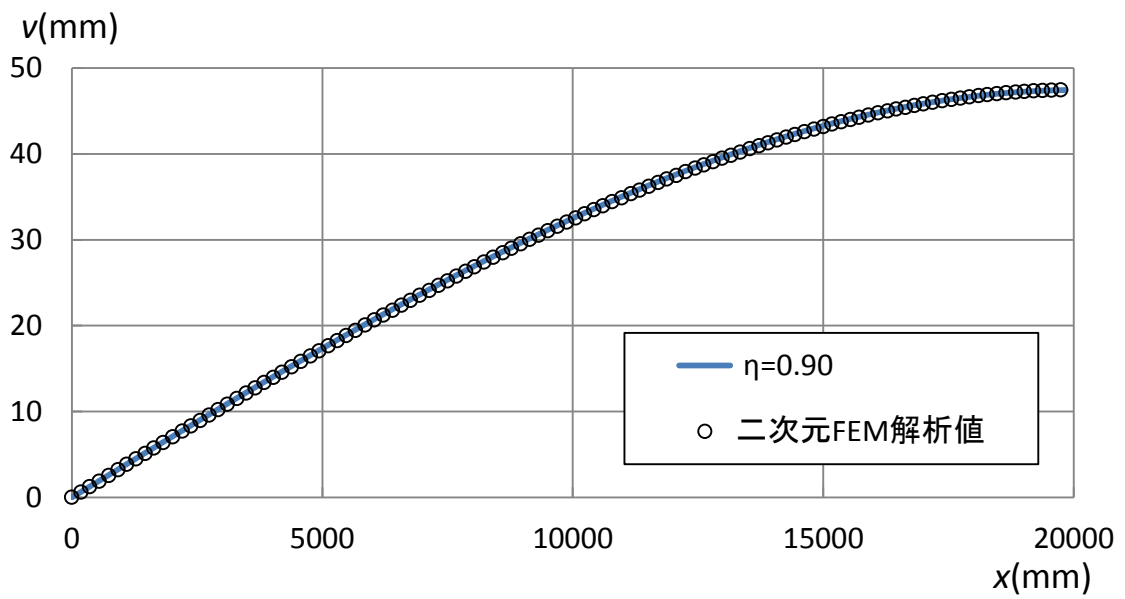
(a)  $L=15\text{m}$



(b)  $L=20\text{m}$



(c)  $L=30\text{m}$



(d)  $L=40\text{m}$

図-6.6 鋼桁のたわみ分布の比較

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の鋼桁のたわみ $v_0$ に対する、両者の間に平面保持を仮定する場合の鋼桁のたわみ $v_1$ の比、すなわち $v_1/v_0$ が次式で与えられる。

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{I_{v0}}{I_{v1}} \quad (6.10)$$

$I_{v0}/I_{v1}$ と支間長を関係を図-6.7に示す。これは、表-6.1の断面諸量を式(6.2)と(6.4)に用いることにより与えられる。支間長が長くなるに従って、 $I_{v0}/I_{v1}$ は1に近づく。これは、支間長が長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化しないので、支間長が長くなるに従って、 $d_s$ が $a$ に近づくために、 $I_{v0}$ と $I_{v1}$ の差が小さくなるからである。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、鋼桁のたわみに与える影響は小さくなる。

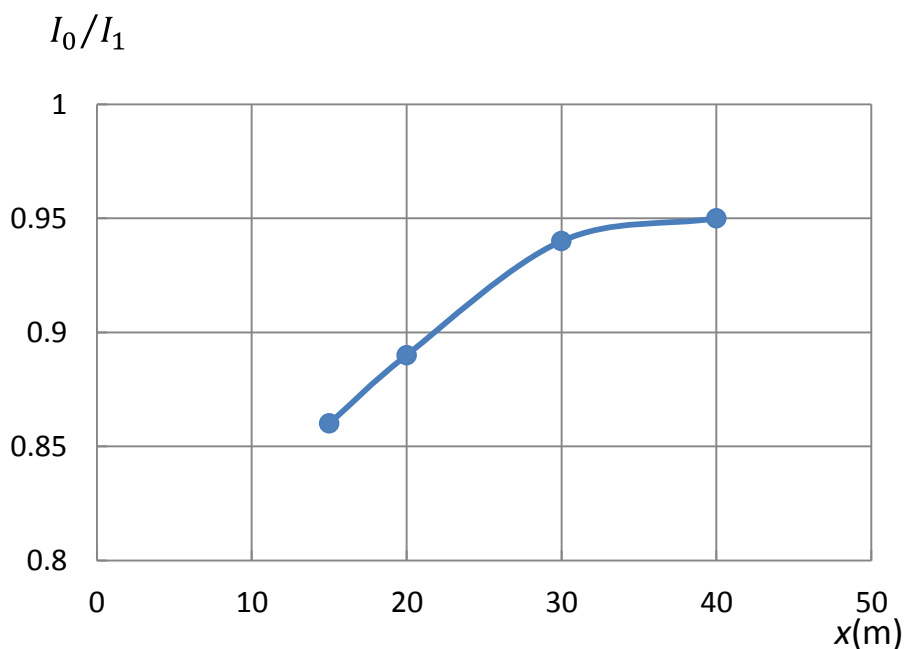


図-6.7  $I_{v0}/I_{v1}$ と支間長の関係

## 第7章 アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の設計への提案

支間長が 15m 以上のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋に対しては，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なくて，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．支間長が 15m 未満のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋に対しては，水平せん断バネに $0.648\text{kN/mm}^2$ （表-4.1～4.3 参照）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なくて，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．

## 第 8 章 結論

本研究では、FEM 解析によって、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特性を調べた。さらに、アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用を明らかにした。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台座の界面および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、台座による鉛直方向の支圧抵抗は、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。台座のヤング係数の大きさが 2GPa から 200GPa の間で、台座がアルミニウム床版と鋼桁との合成作用に与える効果はほぼ同じである。
- (2) アルミニウム床版と鋼桁とが完全合成でない場合には、台座が高くなると水平せん断バネの値は低下する。しかし、アルミニウム床版の幅および頭付きスタッドの本数が水平せん断バネの値に及ぼす影響は小さい。
- (3) 支間長が 15m 以上のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋においては、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は完全合成である。
- (4) 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の平面保持の程度は大きくなる。
- (5) 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、支間長が長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ため、平面保持を仮定する場合とそうでない場合の鋼換算断面二次モーメントの差が小さくなるからである。
- (6) 本研究の成果に基づいて次を提案した。支間長が 15m 以上のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋に対しては、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なくて、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。支間長が 15m 未満のアルミニウム床版を用いた鋼桁橋に対しては、水平せん断バネに  $0.648\text{kN/mm}^2$  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なくて、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。

## 参考文献

- 1) [http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1\\_1.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.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](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](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—設計・製作・施工ガイドライン，2011.  
[http://www.aluminum.or.jp/doboku/files/guideline110303\\_03.pdf](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) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎 : 頭付きスタッドの本数がアルミニウム床版と鋼桁との合成作用に及ぼす影響, ALST 研究レポート, No.25, 2012.  
[http://alst.jp/pdf/ALST\\_report25.pdf](http://alst.jp/pdf/ALST_report25.pdf)

## 付録 A 三次元 FEM 解析における充填モルタルの取り扱い

第 2 章では、頭付きスタッドの右側の充填モルタルのみを考慮した三次元 FEM 解析の結果が試験結果に近いことを示した。しかし、この FEM 解析における充填モルタルの取り扱いが適切か否かは不明であり、FEM 解析の結果が試験結果に偶然近くなった可能性がある。そこで、第 2 章で採り上げた試験体と異なる試験体に対して、頭付きスタッドの右側の充填モルタルのみを考慮した三次元 FEM 解析を実施し、頭付きスタッドの右側の充填モルタルのみを考慮する妥当性について調べる。

図-A.1 に示す、第 2 章で採り上げた試験体とは異なる試験体<sup>18)</sup>を三次元 FEM 解析によって解く。一個所当たりの頭付きスタッドの本数が 1 本、2 本、3 本設けられた試験体が各 1 体製作されたが、ここでは、一個所当たりの頭付きスタッドの本数が 3 本の試験体を計算対象とする。支間中央に荷重が集中荷重として載荷される。

頭付きスタッドの右側の充填モルタルのみを考慮したモデルに対する要素分割を図-A.2 に示す。これに対する比較モデルとして、充填モルタルを全て考慮したモデルに対する要素分割を図-A.3 に示す。前者を中空モデル、後者を中実モデルと呼ぶ。中実モデルでは、閉断面内の充填モルタルがアルミニウム床版および頭付きスタッドと接触する節点は全て共有させる。

試験体の台座には ECC が使用されているので、三次元 FEM 解析では台座を連続させている。頭付きスタッドの各位置から支間中央に向かって、アルミニウム床版下フランジと台座が接する節点は二重節点とし、頭付きスタッドの各位置から桁端に向かって、アルミニウム床版下フランジと台座が接する節点は共有させる。支間中央のアルミニウム床版上板に、荷重  $P/4=75\text{kN}$  を等分布荷重として、支間中央から試験体の長手方向に 100mm、奥行き 150mm の範囲に与える。アルミニウム床版、鋼桁、充填モルタル、台座のヤング率とポアソン比に対して表-A.1 に示す材料試験値を使用する。直径 22mm で高さ 150mm 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。

鋼桁下フランジのたわみに関して、三次元 FEM 解析の結果と試験結果の比較を図-A.4 に示す。中空モデルの解析値は、中実モデルの解析値より試験値に格段に近い。

以上より、第 2 章で採り上げた試験体と異なる試験体に対しても、中空モデルに対する FEM 解析値が試験値に近い値を示す。したがって、アルミニウム床版と鋼桁の連結部の充填モルタルに対して中空モデルが妥当であると言える。

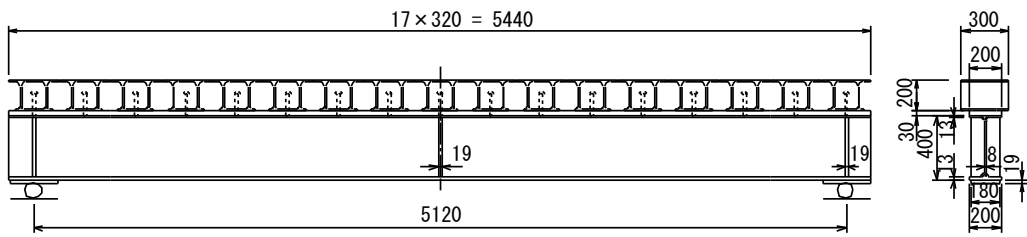
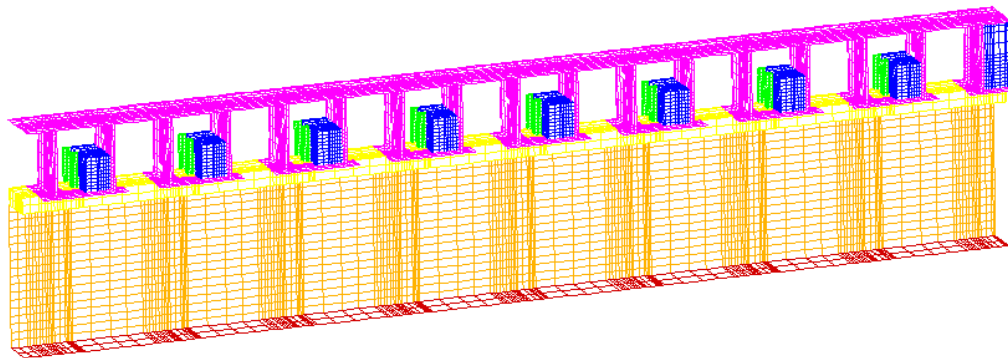
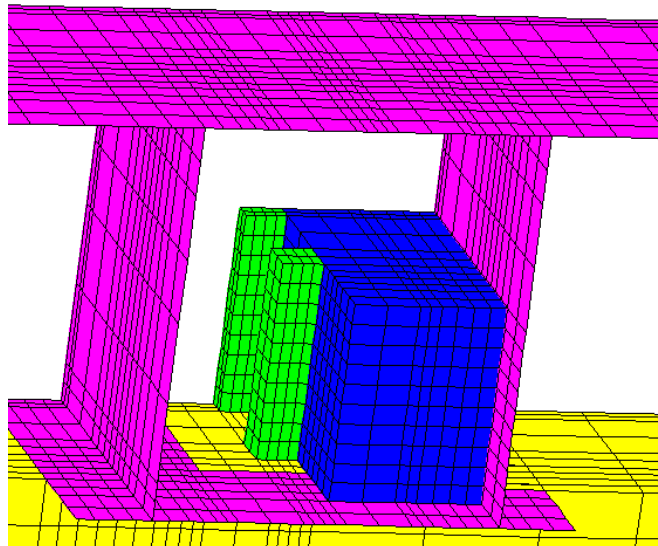


図-A.1 試験体

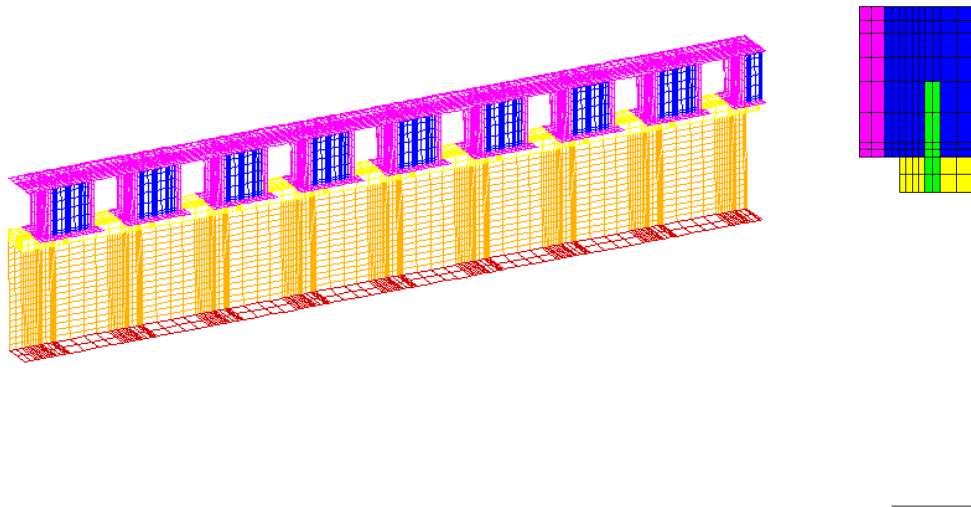


(a) 全体

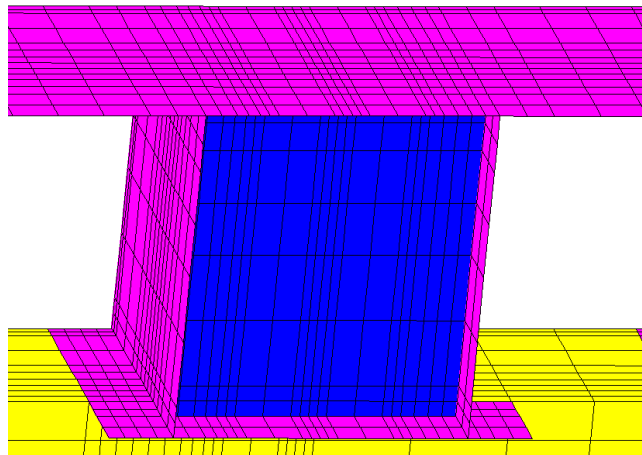


(b) 連結部

図-A.2 要素分割(中空モデル)



(a) 全体



(b) 連結部

図-A.3 要素分割(中実モデル)

表-A.1 試験体の材料特性

	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
アルミニウム合金材	71.4	0.312
鋼材	200	0.285
台座(ECC)	15.39	0.200
充填モルタル	26.8	0.200

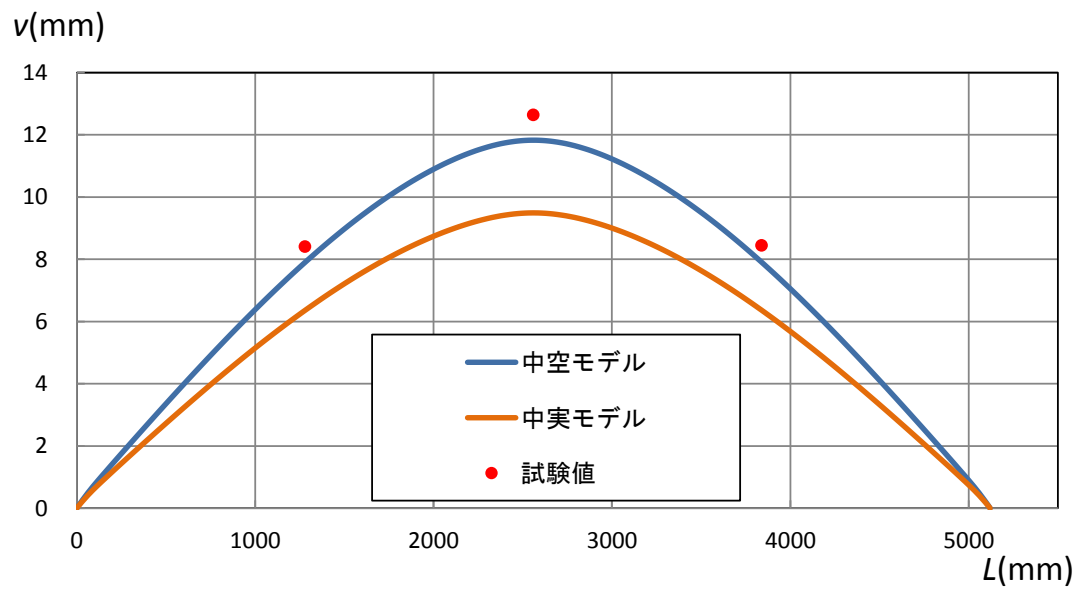


図-A.4 鋼桁下フランジのたわみの比較