

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 13

2010年2月

大阪大学大学院工学研究科
大倉一郎，稲見豪

概要

開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との連結構造に対して、既往の研究においては、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジに生じる水平せん断力と両者の水平ずれとの間に比例関係を仮定して、アルミニウム床版と鋼桁に生じる軸力に関する微分方程式を誘導している。このとき、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間のアルミニウム床版の部分が変形後も平面を保持すると仮定している。しかし、アルミニウム床版は開閉断面であり、この仮定が適切であるかどうか疑問が残る。

本研究は、この疑問に答えるとともに、開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を解明することを研究目的としている。

最初に、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の変形を FEM 解析で調べ、両者の間に平面保持の仮定が成立していないことを示す。この場合に対する、アルミニウム床版と鋼桁に生じる軸力に関する微分方程式を誘導する。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとを連結する連結材が同じであっても、バネ定数は、アルミニウム床版と鋼桁の断面寸法および桁の支間長によって変化することを示す。既往の研究で製作された試験体のバネ定数と合成度を明らかにする。既往の研究で開発されたアルミニウム床版と鋼桁との連結構造が実橋に使用された場合、アルミニウム床版と鋼桁との合成度は完全合成であることを示す。

目次

第1章	序論	・・・1
第2章	開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に関する既往の理論	・・・4
第3章	開閉断面アルミニウム床版を有する鋼桁の FEM 解析	・・・7
3.1	有限要素	・・・7
3.2	解析モデル	・・・10
3.3	変形	・・・11
3.4	曲率	・・・13
3.5	断面力	・・・15
3.6	応力と断面力の関係	・・・17
第4章	開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に関する理論の修正	・・・19
4.1	軸力方程式	・・・19
4.2	集中荷重を受ける単純支持桁	・・・22
4.2.1	鋼桁とアルミニウム床版上板に生じるひずみ	・・・23
4.2.2	アルミニウム床版を有する鋼桁のたわみ	・・・24
4.2.3	合成度	・・・26
第5章	バネ定数の特性	・・・28
5.1	支間長の影響	・・・28
5.2	断面寸法の影響	・・・37
5.3	連結材の寸法の影響	・・・38
第6章	試験体のバネ定数と合成度	・・・39
6.1	試験体	・・・39
6.2	解析モデル	・・・40
6.3	FEM 値と試験値の比較	・・・42
6.3.1	変形	・・・42
6.3.2	ひずみ	・・・44
6.3.3	たわみ	・・・48
6.4	バネ定数	・・・49
第7章	実橋のバネ定数と合成度	・・・53
7.1	対象とする実橋	・・・53
7.2	FEM 解析	・・・55
7.3	バネ定数と合成度	・・・58
第8章	結論	・・・64
	参考文献	・・・65

付録 A	要素分割	・・・66
付録 B	解析モデルの変形	・・・68
付録 C	ひずみ分布 (試験体)	・・・70
付録 D	ひずみ分布 (試験体)	・・・72
付録 E	ひずみ分布 (試験体)	・・・74

第 1 章 序論

わが国では 1950 年代に建設された多くの道路橋が高齢化、老朽化し、損傷した鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)の補修・補強ならびに取り替えが行われ始めている。さらに 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、RC 床版を取り替える場合、現行の道路橋示方書¹⁾を適用すると床版厚が厚くなるため、主桁の補強が必要になる場合がある。これに対して、RC 床版をアルミニウム床版に取替えることにより、床版そのものの重量を減らす方法が考えられている²⁾。アルミニウム床版は RC 床版に比べて、約 1/5 の重量であるため、地震による上部工の慣性力の低減、および小型重機の使用による工期の短縮が見込まれる。さらに、アルミニウム合金の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。

このような状況で、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),4)}。図-1.1 に示すように、道路橋用の開閉断面アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験が行われ、載荷荷重 138kN、往復の繰返し回数 121.7 万回に対して、疲労亀裂が発生せず、開閉断面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⁵⁾。

開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図-1.2 に示す。鋼桁に溶植された頭付きスタッド(以後スタッドと呼ぶ)がアルミニウム床版の開断面内へ挿入され、対向するアルミニウム仕切り板の間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が結合される⁶⁾。したがって、アルミニウム床版と鋼桁とは桁軸方向に合成作用を示す⁷⁾。

アルミニウム合金の線膨張係数は鋼の線膨張係数の 2 倍あるため、アルミニウム床版と鋼桁とが合成作用を有すると、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⁸⁾。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-鋼桁橋の実用化を考える際には、この温度変化応力が設計の際に考慮されなければならない。

前述したように、RC 床版と比べてアルミニウム床版は軽量であるため、新橋として、アルミニウム床版-鋼桁橋が設計される場合、アルミニウム床版-鋼桁橋の鋼桁断面は RC 床版-鋼桁橋の鋼桁断面より小さくなる。したがって鋼桁断面の断面二次モーメントが小さくなることにより、活荷重に対する鋼桁のたわみが増加することが予想される。そこで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活用することが考えられる。

第 2 章で述べるように、既往の研究^{7),8)}においては、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジに生じる水平せん断力と両者の水平ずれとの間に比例関係を仮定して、アルミニウム床版と鋼桁に生じる軸力に関する微分方程式が誘導されている。このとき、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間のアルミニウム床版の部分が変形後も平面を保持すると

仮定されている。しかし、これまで開発されてきたアルミニウム床版は開閉断面であり、既往の研究で採用されたこの仮定が適切であるかどうか疑問が残る。

本研究では、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の変形を FEM 解析で調べ、両者の間に変形後平面が保持されていないことを示す。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に変形後平面が保持されていない場合のアルミニウム床版と鋼桁に生じる軸力に関する微分方程式を誘導する。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとを連結する連結材が同じであっても、両者を連結するバネ定数は、アルミニウム床版と鋼桁の断面寸法および桁の支間長によって変化することを示す。過去静的載荷試験が実施された、-1.2 に示す連結構造を有する試験体のバネ定数と合成度を明らかにする。さらに-1.2 に示す連結構造を有する実橋のバネ定数と合成度を明らかにする。



図-1.1 トラックタイヤ移動載荷疲労試験

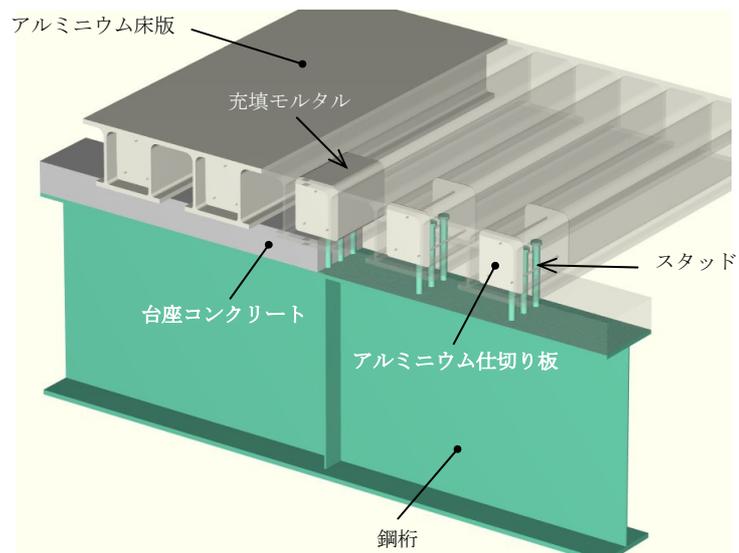


図-1.2 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

第2章 開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との

合成作用に関する既往の理論

既往の研究^{7),8)}においては、図-2.1に示すように、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分が変形後も平面を保持すると仮定して、鋼桁上フランジの上面の位置で、鋼桁上フランジの上面の水平変位とアルミニウム床版の水平変位の差と水平せん断力との間に次式を仮定している。

$$H = k(u_f - u_a) \quad (2.1)$$

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 : 弾性ばね

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

水平せん断力 H は、鋼桁上フランジの上面のひずみ、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ひずみと次の関係を持っている (4.1 節参照)。

$$\frac{1}{k} \frac{dH}{dx} = \varepsilon_{ss} - \varepsilon_{as} + \Delta\varepsilon_T \quad (2.2)$$

ここに、

$\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{as}$: それぞれ、鋼桁上フランジの上面の応力によるひずみ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応力によるひずみ

$\Delta\varepsilon_T$: 温度変化による鋼桁のひずみとアルミニウム床版のひずみの差

ε_{ss} と ε_{as} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} d_s \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} + \frac{M_a}{E_a I_a} d_a \quad (2.4)$$

ここに、

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

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 : 鋼桁の中立軸から鋼桁上フランジ上面までの距離

d_a : アルミニウム床版上板の中立軸から鋼桁上フランジの上面までの距離
 式(2.3)は、鋼桁の断面が変形後も平面を保つという構造力学の基本仮定に基づいている。
 式(2.4)の右辺第 2 項では、アルミニウム床版上板の曲率 $M_a/(E_a I_a)$ にアルミニウム床版上板の中立軸から鋼桁上フランジの上面までの距離 d_a が乗じられている。したがって鋼桁上フランジの上面とアルミニウム床版上板との間に、変形後も平面が保持されていることが仮定されている。

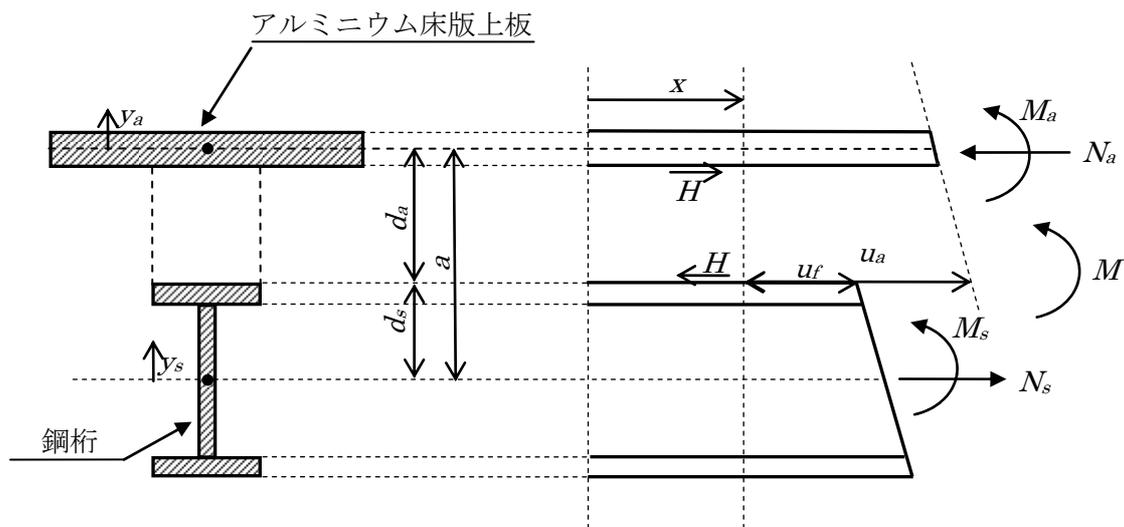


図-2.1 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる断面力

図-2.1 を参照して、次式が成立する。

$$N_s = N_a = N \quad (2.5)$$

$$\frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{M_a}{E_a I_a} \quad (2.6)$$

$$M = Na + M_s + M_a \quad (2.7)$$

ここに、

N : アルミニウム床版上板と鋼桁に生じる軸力

M : 全モーメント

a : アルミニウム床版上板の中立軸と鋼桁の中立軸との間の距離

水平方向の力の釣り合いから、水平せん断力 H は軸力 N と次の関係を有する (4.1 節参照)。

$$H = \frac{dN}{dx} \quad (2.8)$$

式(2.2)~(2.8)から軸力 N に関する微分方程式が次のように導出される。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -c\lambda^2 M + k\Delta\epsilon_T \quad (2.9)$$

ここに,

$$\lambda = \sqrt{k \frac{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right)\left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} a^2}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n}\right)}} \quad (2.10)$$

$$c = \frac{A_s \frac{A_a}{n} a}{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right)\left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} a^2} \quad (2.11)$$

$$n = \frac{E_s}{E_a} \quad (2.12)$$

前述したように、既往の研究^{7),8)}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間の部分が変形後も平面が保持されていると仮定しているが、開閉断面アルミニウム床版においては、モルタルが充填されていない開断面が存在する。このようなアルミニウム床版に対して、平面が保持されていると仮定するのは適切でないと考える。

第3章 開閉断面アルミニウム床版を有する鋼桁の FEM 解析

3.1 有限要素

開閉断面アルミニウム床版を有する鋼桁を弾性平面問題として解く場合，鋼桁ウェブが平面応力状態，鋼桁フランジとアルミニウム床版上板が平面ひずみ状態になる．そこで，弾性平面問題に平面応力状態の有限要素と平面ひずみ状態の有限要素を混在させても問題が生じないか，**図-3.1** に示す鋼桁を FEM 解析で解き，解析結果と構造力学による理論値とを比較することによって明らかにする．この場合，鋼桁ウェブが平面応力状態で鋼桁上下フランジが平面ひずみ状態となる．FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA⁹⁾を用いる．使用する要素は，8 節点四辺形アイソパラメトリック平面応力要素 (DIANA の要素タイプ CQ16M) である．鋼桁は，支間長 $L=3840\text{mm}$ ，鋼桁の上下フランジは $220\text{mm}\times 12\text{mm}$ ，ウェブは $600\text{mm}\times 9\text{mm}$ である．支間中央に集中荷重 490kN を載荷する．支間中央における対称性より，支間の左側半分を解析対象とし，その要素分割を**図-3.2** に示す．鋼材のヤング係数とポアソン比をそれぞれ 200GPa ， 0.3 とする．

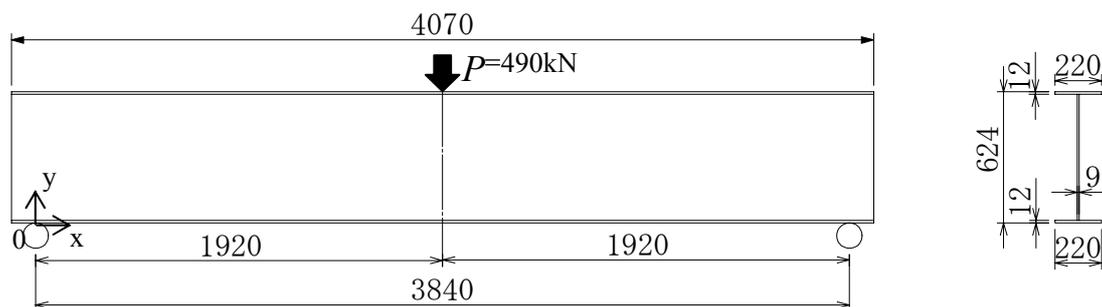


図-3.1 鋼桁

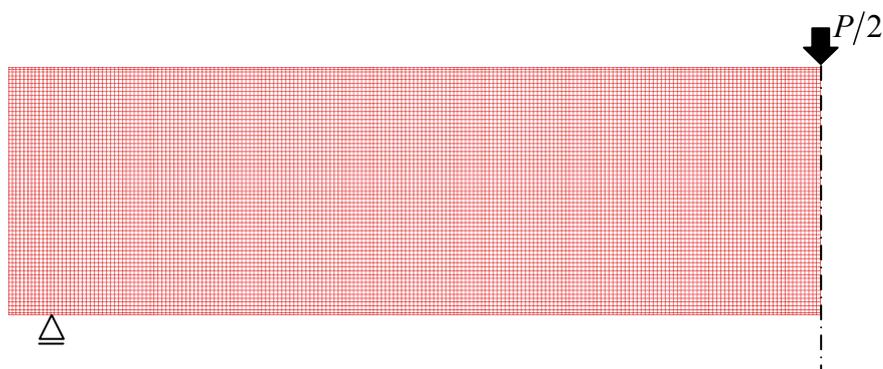


図-3.2 要素分割

DIANA では，平面ひずみ要素に対して厚さを入力できない．したがって平面応力要素に，

次式で与えられる換算ヤング係数 E'_s と換算ポアソン比 μ'_s を用いることによって、平面ひずみ状態を実現する。

$$E'_s = \frac{E_s}{(1 - \mu_s^2)} \quad (3.1)$$

$$\mu'_s = \frac{\mu_s}{(1 - \mu_s)} \quad (3.2)$$

ここに、

E'_s, μ'_s : それぞれ鋼材の換算ヤング係数と換算ポアソン比

E_s, μ_s : それぞれ鋼材のヤング係数とポアソン比

鋼桁ウェブと鋼桁上下フランジのヤング係数とポアソン比の値を表-3.1 に示す。鋼桁上下フランジのヤング係数とポアソン比の値は、式(3.1)と(3.2)を用いて計算されている。

表-3.1 鋼桁ウェブと鋼桁上下フランジのヤング係数とポアソン比の値

	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
鋼桁ウェブ	200.0	0.300
鋼桁上下フランジ	219.8	0.429

他方、構造力学で与えられる鋼桁に生じる応力および支間中央のたわみは次式で与えられる。

$$\sigma_s = \frac{M_s}{I_s} y_s \quad (3.3)$$

$$v_s = \frac{PL^3}{48E_s I_s} + \frac{PL}{4A_{sw} G_s} \quad (3.4)$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)} \quad (3.5)$$

ここに、

σ_s : 鋼桁に生じる応力

v_s : 鋼桁の支間中央のたわみ

M_s : 鋼桁に生じる曲げモーメント

I_s : 鋼桁の断面二次モーメント

y_s : 鋼桁の中立軸からの位置(上方向を正)

A_{sw} : 鋼桁ウェブの断面積

G_s : 鋼のせん断弾性係数

$x=900$ の断面の応力分布に関して、FEM 値と構造力学値の比較を図-3.3 に示す。FEM 値は上下フランジの近傍で構造力学値と異なる。支間中央のたわみに関して、FEM 値が 5.23mm、構造力学値が 5.54mm であり、両者は異なる。

上下フランジに対しても平面応力状態を仮定して得られる FEM 値と構造力学値の比較を 図-3.4 に示す. 応力分布に関して両者は一致している. 支間中央のたわみについても, FEM 値は 5.54mm であり, 構造力学値に一致する. したがって, アルミニウム床版上板, 鋼桁上下フランジおよび鋼桁ウェブに対して, 全て平面応力状態を仮定して FEM 解析を行う.

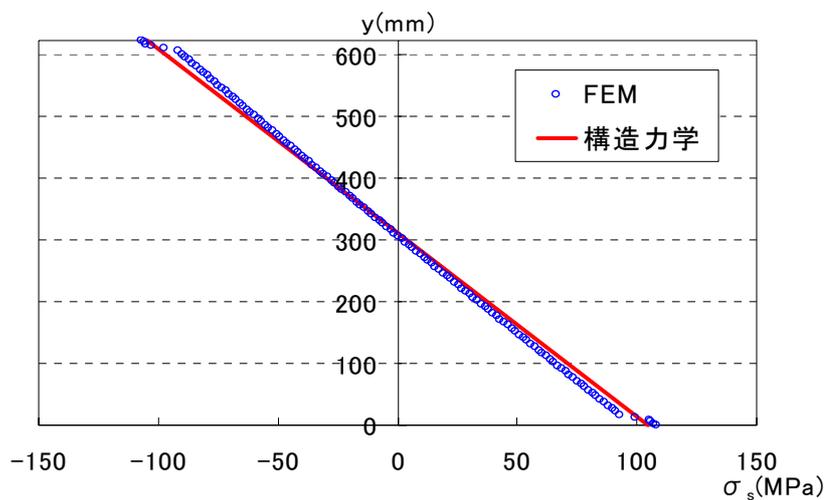


図-3.3 鋼桁上下フランジに平面ひずみ状態を仮定した場合の応力分布

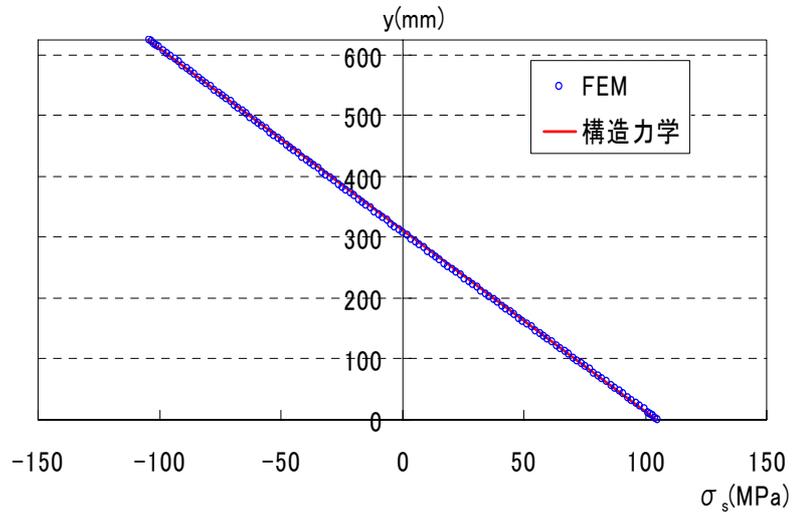


図-3.4 鋼桁上下フランジに平面応力状態を仮定した場合の応力分布

3.2 解析モデル

開閉断面アルミニウム床版を有する鋼桁の変形，断面力，応力と断面力の関係を明らかにするために，**図-3.5**に示すモデルに対してFEM解析を行なう．このモデルの断面寸法は，既往の研究で静的載荷試験が行われたアルミニウム床版を有する鋼桁の試験体⁷⁾に基づいている．アルミニウム床版を有する鋼桁の挙動に関して基本的な情報を得るために，閉断面内のモルタルおよび台座コンクリートを考慮せず，桁長手方向に連続している，アルミニウム床版上板のみを考慮し，アルミニウム床版上板と鋼桁を鋼棒の連結材で連結する．連結材の桁長手方向の長さは，アルミニウム床版を有する鋼桁の試験体で用いられた $\phi 22\text{mm}$ のスタッドの直径と同じで 22mm であり，連結材の幅は，3本の $\phi 22\text{mm}$ の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．連結材の桁長手方向の配置間隔は 320mm である．

FEM解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA⁹⁾を用い，支間中央における対称性より，支間の左側半分を解析対象とする．要素分割を**図-3.6**に示す．使用した要素は，8節点四辺形アイソパラメトリック平面応力要素(DIANAの要素タイプ CQ16M)である．荷重は支間中央の連結材の長さ 11mm の範囲のアルミニウム床版上板に，荷重 $P/2=245\text{kN}$ を等分布載荷で与える．アルミニウム床版上板と鋼桁の材料定数を**表-3.2**に示す．

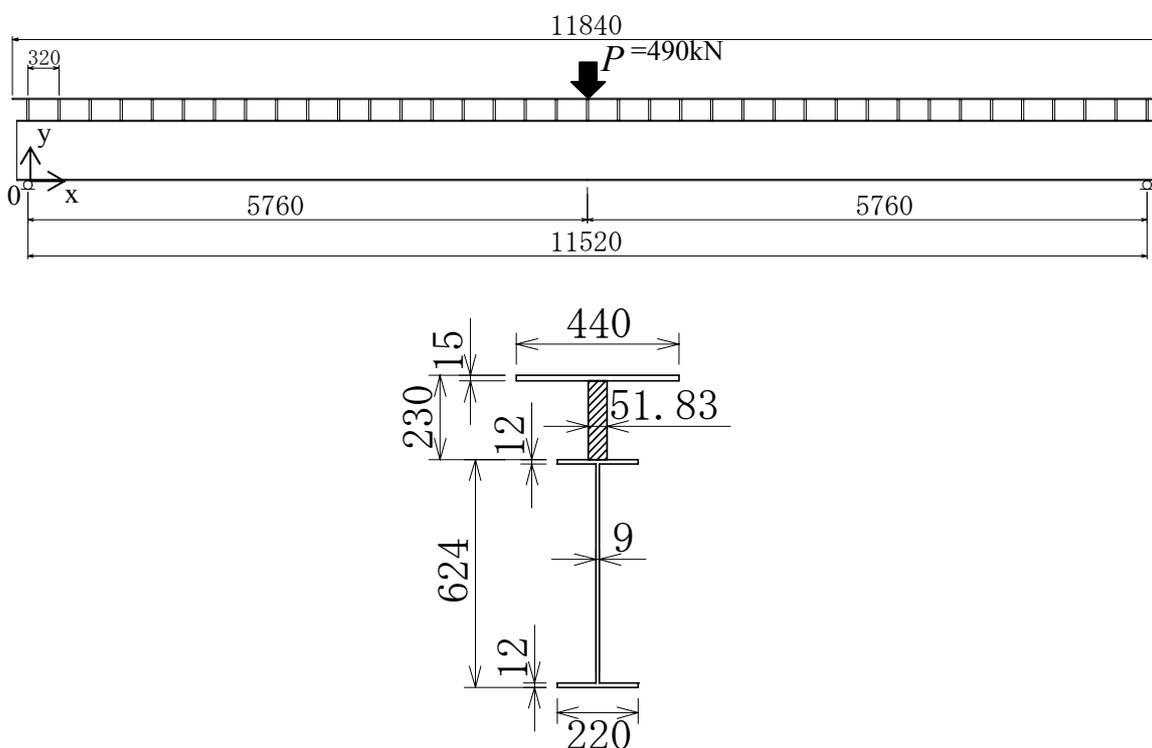


図-3.5 解析モデル

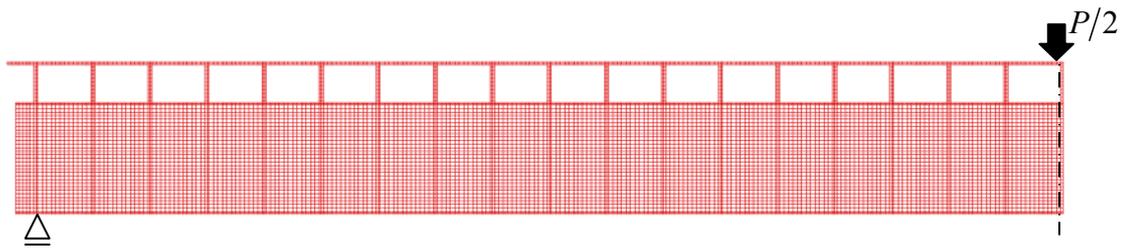


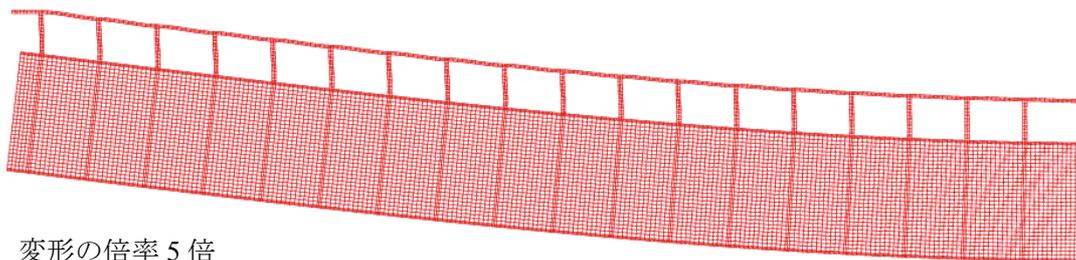
図-3.6 要素分割

表-3.2 材料定数

	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
鋼桁	200	0.3
連結材	200	0.3
アルミニウム床版上板	70	0.3

3.3 変形

解析モデルの変形を図-3.7 に示す。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の変形は平面を保持していない。



変形の倍率 5 倍

図-3.7 解析モデルの変形

アルミニウム床版上板の中立軸と鋼桁の中立軸のたわみを図-3.8 に示す。図-3.8(a) は全体図を表し、図-3.8(b) は $x=2500\sim 3000\text{mm}$ の拡大図を表す。図-3.8(a) から分るように、アルミニウム床版上板のたわみと鋼桁のたわみはほぼ等しい。すなわち、

$$v_s = v_a \quad (3.6)$$

ここに、

v_s : 鋼桁の中立軸のたわみ

v_a : アルミニウム床板上板の中立面のたわみ

図-3.8(b) から分るように、鋼桁のたわみの周りにアルミニウム床版上板のたわみが、蕩が絡まるようにまとわり付いている。そして、アルミニウム床版上板のたわみは、アルミニウム床版の開断面中央および連結材が存在する位置で鋼桁のたわみに交差する。アルミニウム床版上板の変形は、鋼桁の変形と同じ変形の上に、アルミニウム床版上板と連結材とが形成する独自の曲げ変形が重ね合わされた変形を示す。しかし、アルミニウム床版上

板と連結材とが形成する，この独自の曲げ変形は，鋼桁の変形と比較して非常に小さいので，式(3.6)が成立する．

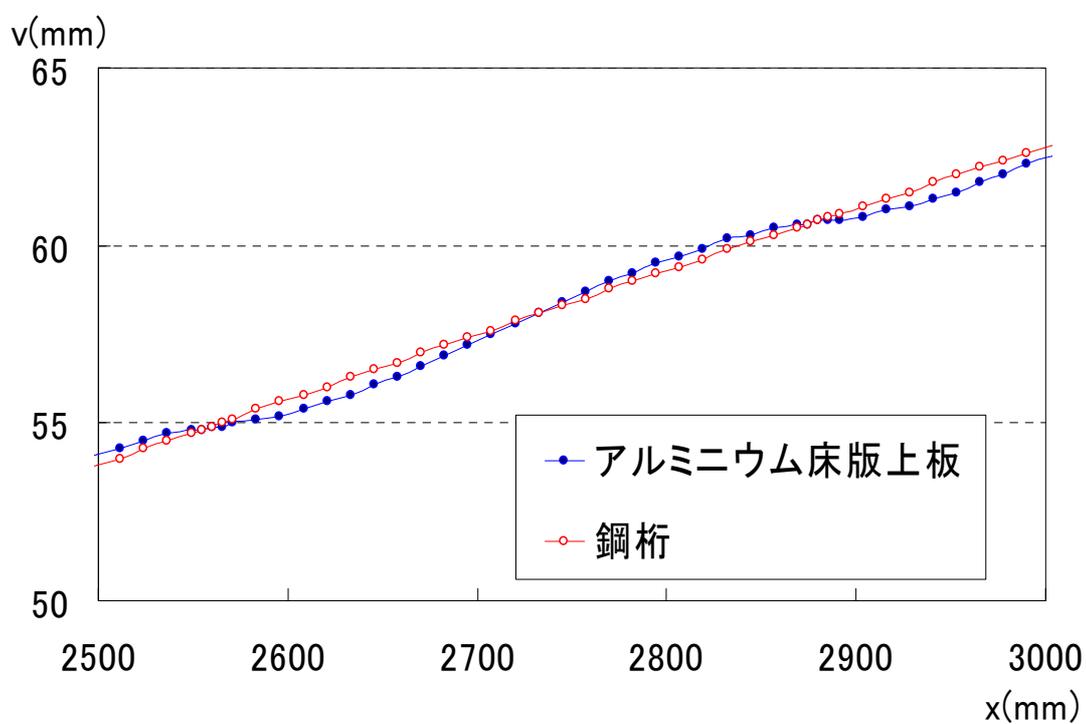
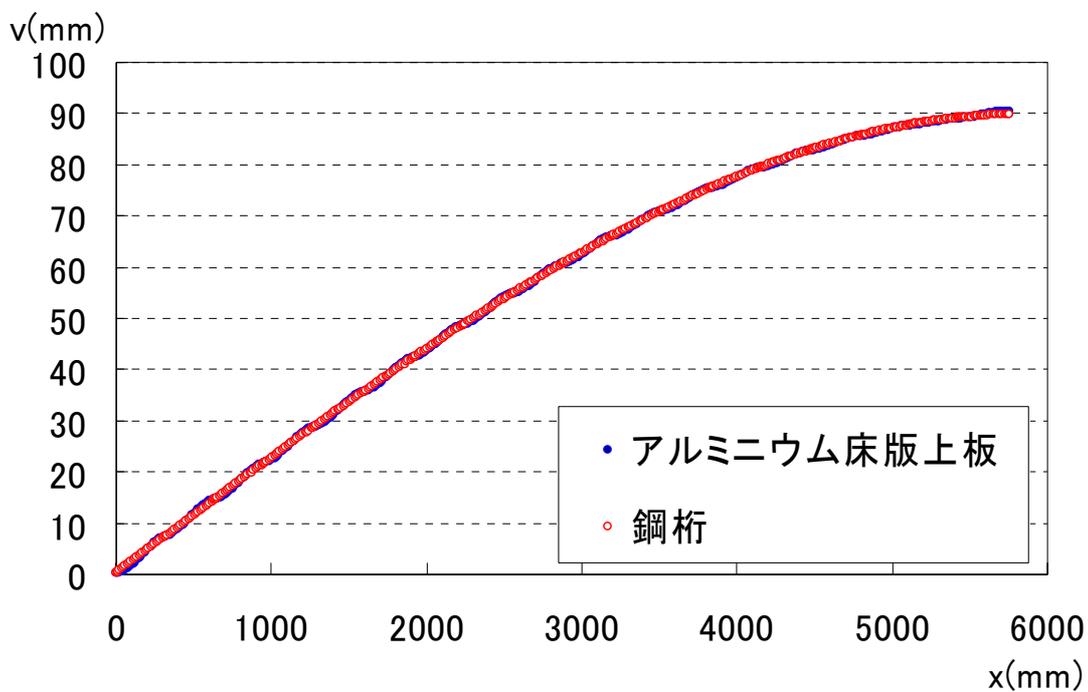
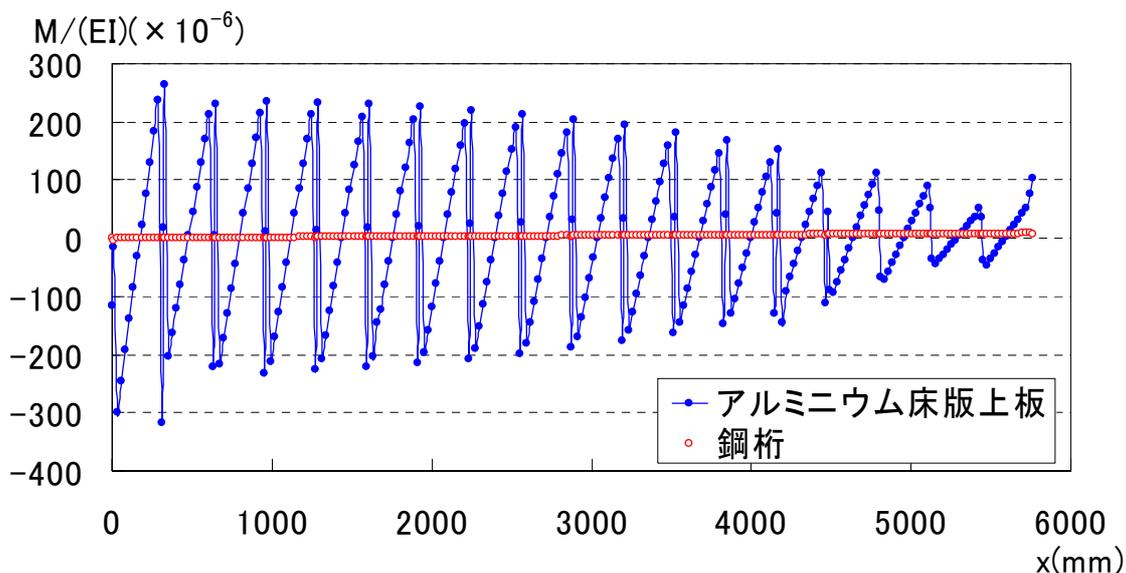


図-3.8 アルミニウム床版上板と鋼桁のたわみ

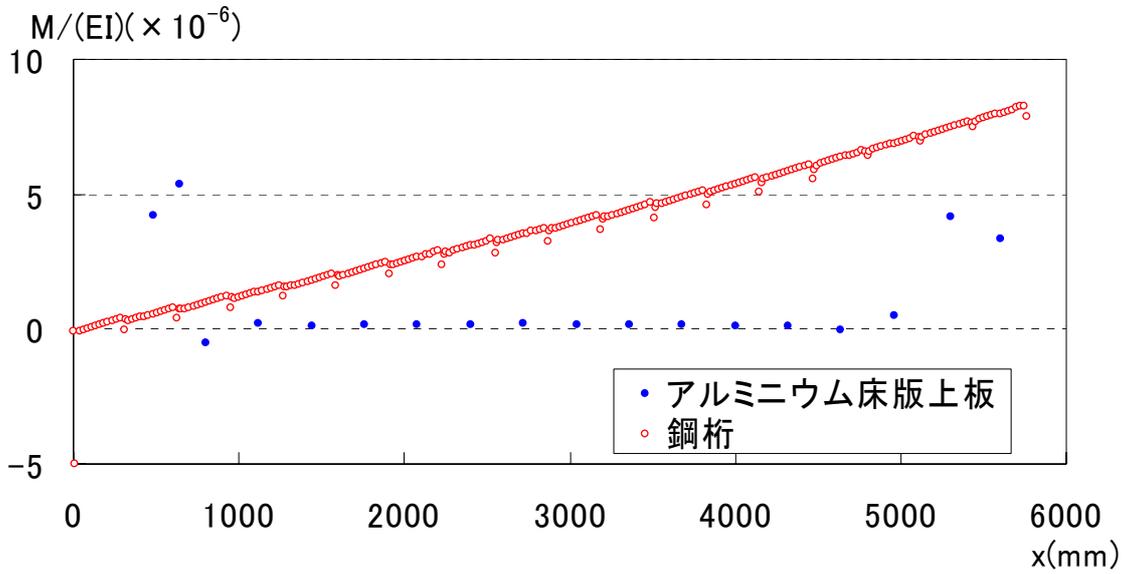
3.4 曲率

アルミニウム床版上板と鋼桁の曲率の比較を図-3.9 に示す。アルミニウム床版上板と鋼桁の曲率は、それぞれ $M_a/(E_a I_a)$ 、 $M_s/(E_s I_s)$ で計算される。ここで、 M_a と M_s は、それぞれアルミニウム床版上板および鋼桁に生じる曲げモーメント、 E_a と E_s は、それぞれアルミニウム合金および鋼の弾性係数、 I_a と I_s は、それぞれアルミニウム床版上板および鋼桁の断面二次モーメントである。 M_a と M_s は、それぞれ 3.5 節の図-3.10 (b), (c) で与えられる。

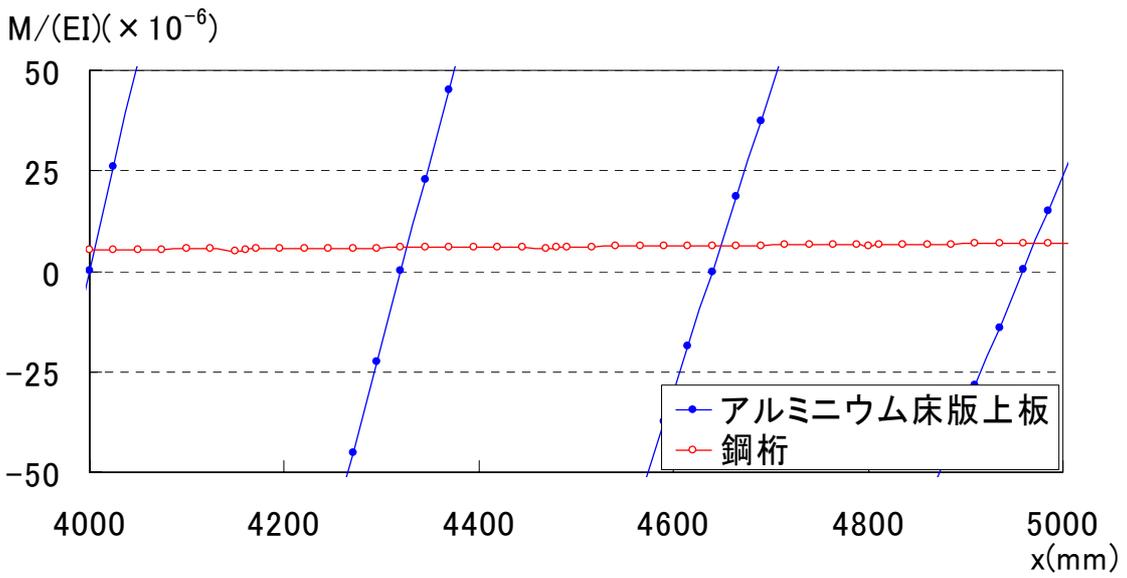
アルミニウム床版上板が連結材間で独自の曲げ変形を生じるため、アルミニウム床版上板の曲率は図-3.9 (a) に示すように、上下に大きく変動する。鋼桁の曲率の最大値はアルミニウム床版上板の曲率の最大値に対して 2 桁程度小さい。図-3.9 (b) は鋼桁の曲率を基準とした、アルミニウム床版上板と鋼桁の曲率の比較である。アルミニウム床版上板の曲率はアルミニウム床版の開断面の中央の値のみ図に現れる。鋼桁の曲率は支間中央に向かって、下に湾曲して増加する。図-3.9 (c) は $x=4000\sim 5000\text{mm}$ の範囲のアルミニウム床版上板と鋼桁の曲率の比較である。鋼桁の曲率の変化に対して、アルミニウム床版上板の曲率の変化が非常に大きいことが分る。



(a) 全体図



(b) 部分図



(c) 拡大図

図-3.9 アルミニウム床版上板と鋼桁の曲率の比較

3.5 断面力

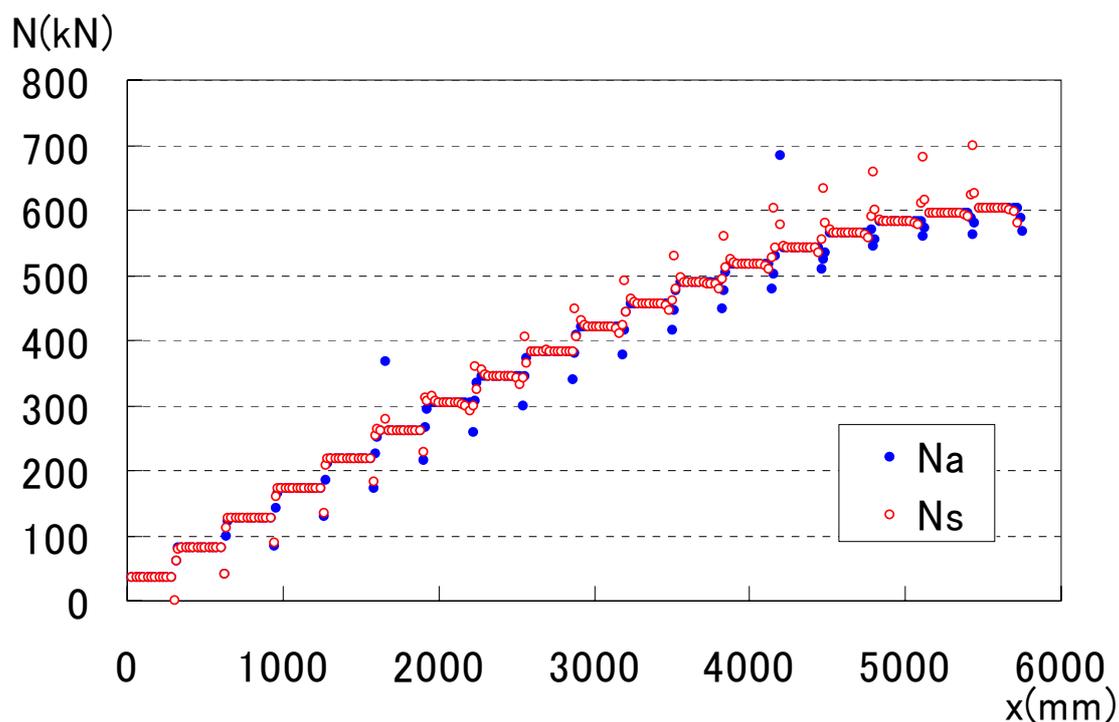
隣接する節点間の応力を直線で近似し、数値積分することによって軸力が得られる。隣接する節点間の応力を台形で近似し、台形の重心とアルミニウム床版上板の中立面との距離、および鋼桁の中立軸との距離を乗じて数値積分することによって曲げモーメントが得られる。これらの結果を図-3.10に示す。

図-3.10(a)において、 N_a と N_s はそれぞれアルミニウム床版上板と鋼桁に生じる軸力である。両者は、連結材が存在する位置を除いて一致している。すなわち、

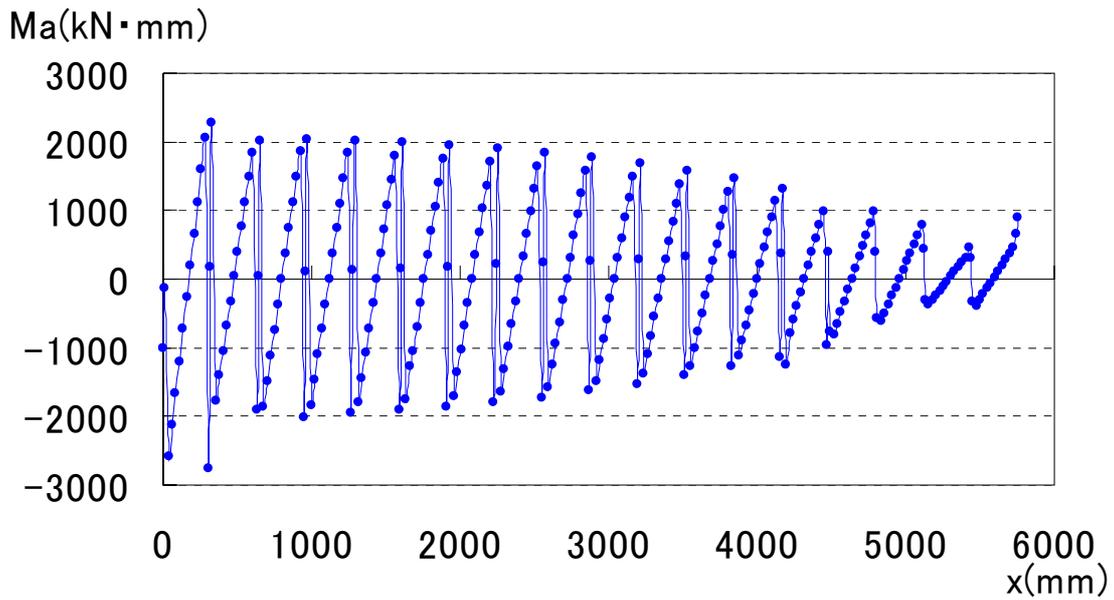
$$N_s = N_a \quad (3.7)$$

図-3.10(b)から分るように、アルミニウム床版上板に生じる曲げモーメント M_a は正負に変動する。これは、3.3節で述べたように、アルミニウム床版上板と連結材とが形成する独自の曲げ変形に起因する。しかし、その大きさは、次に述べる図-3.10(c)に示す鋼桁の曲げモーメントと比較すると2桁程度小さい。

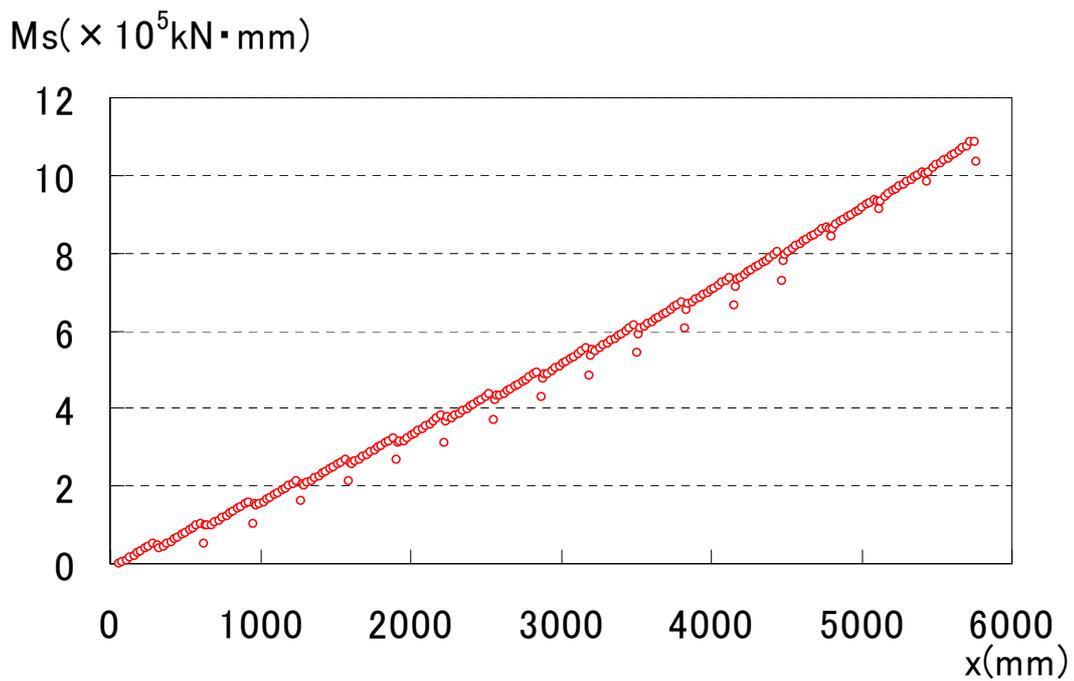
図-3.10(c)から分るように、鋼桁に生じる曲げモーメント M_s は、支間中央に向かって、下に湾曲して増加する。連結材の位置で、 M_s に小さな段差が生じる。これは、一部の曲げモーメントが連結材に流れるからである。



(a) アルミニウム床版上板と鋼桁に生じる軸力



(b) アルミニウム床版上板に生じる曲げモーメント



(c) 鋼桁に生じる曲げモーメント

図-3.10 断面力

次式で与えられる全モーメント M の分布を図-3.11 に示す.

$$M = Na + M_s + M_a \quad (3.8)$$

ここに,

$$N = N_a = N_s$$

a : アルミニウム床版の中立面と鋼桁の中立軸との間の距離

図-3.11 から分るように、全モーメント M は直線分布を示し、分布は $Px/2$ である。

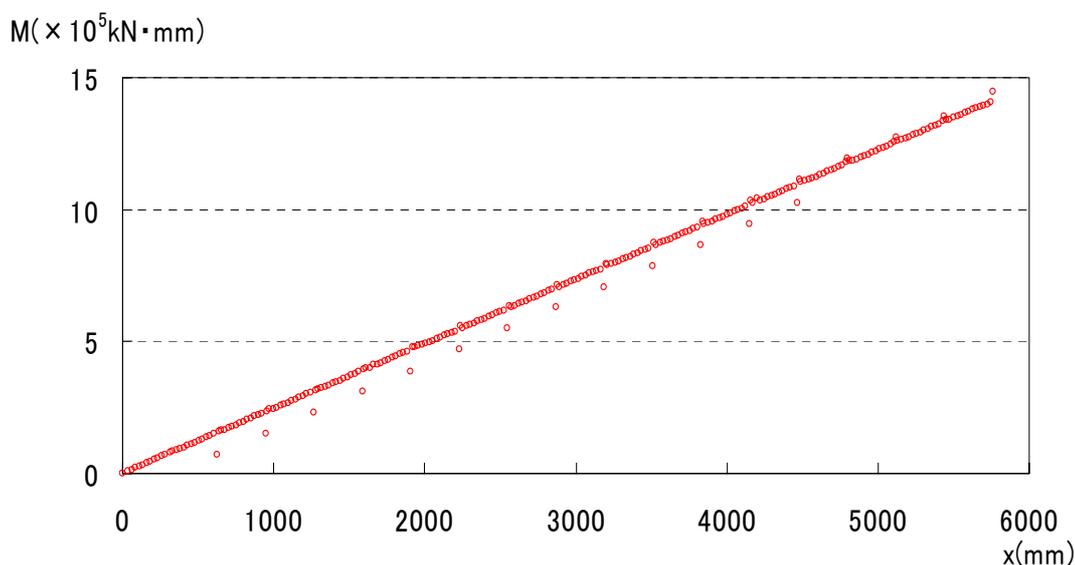


図-3.11 全モーメント

3.6 応力と断面力の関係

構造力学においては、応力と断面力の関係が次式で与えられる。

$$\sigma_s = \frac{N_s}{A_s} - \frac{M_s}{I_s} y_s \quad (3.9)$$

$$\sigma_a = -\frac{N_a}{A_a} - \frac{M_a}{I_a} y_a \quad (3.10)$$

ここに、

σ_s : 鋼桁に生じる応力

σ_a : アルミニウム床版上板に生じる応力

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

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

y_s, y_a : それぞれ鋼桁の中立軸およびアルミニウム床版上板の中立面からの位置 (上方向を正)

3.5 節で求められた鋼桁の軸力 N_s と曲げモーメント M_s を式(3.9)に代入して得られる鋼桁の応力分布と FEM 解析の結果との比較を図-3.12 に示す。式(3.9)が与える鋼桁の分布は、アルミニウム床版の開断面中央の位置で FEM 解析の結果にほぼ等しい。他方、連結材の位置では、 y_s が約 200mm から下では、式(3.9)が与える値は FEM 解析の結果に一致しているが、 y_s が約 200mm より大きい位置では、式(3.9)が与える値は FEM 解析の結果より幾分小さくなる。

3.5 節で求められたアルミニウム床版上板の軸力 N_a と曲げモーメント M_a を式(3.10)に代

入して得られるアルミニウム床版上板の応力分布と FEM 解析の結果との比較を図-3.13 に示す. 式(3.10)が与えるアルミニウム床版上板の応力分布は, アルミニウム床版の開断面中央の位置および連結材の位置で, FEM 解析の結果にほぼ等しい.

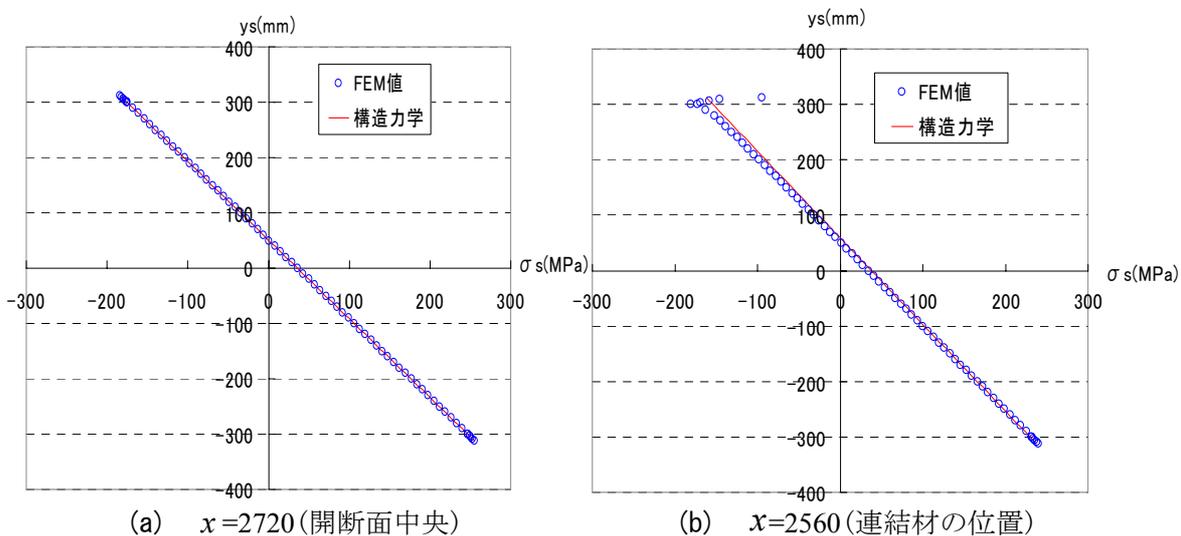


図-3.12 鋼桁断面の応力分布

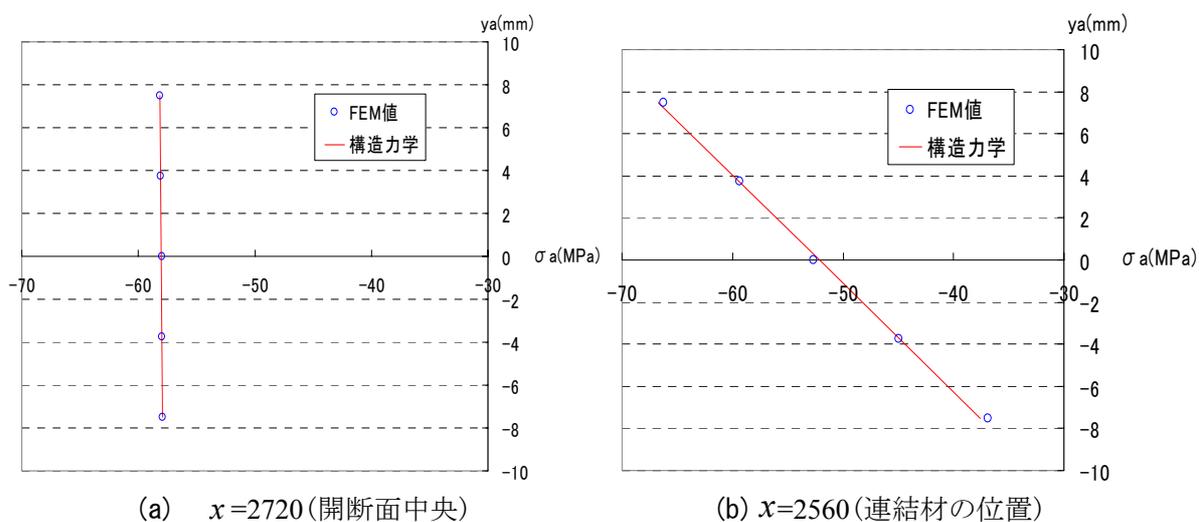


図-3.13 アルミニウム床版上板断面の応力分布

第4章 開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との

合成作用に関する理論の修正

4.1 軸力方程式

図-3.7 から分かるように、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間で水平方向にせん断変形が生じている。したがって図-4.1 を参照して、鋼桁上フランジの上面の位置の鋼桁の変位と、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変位との差と水平せん断力との間に次式が成立すると仮定する。

$$H = k(u_f - u_a) \quad (4.1)$$

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 : 弾性ばね

u_f, u_a : それぞれ、鋼桁上フランジの上面の位置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

式(4.1)の u_a はアルミニウム床版上板の中立面の位置の水平変位である。既存の理論^{7),8)}の式(2.1)の u_a は、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分が変形後も平面を保持すると仮定して、鋼桁上フランジの上面の位置でのアルミニウム床版上板の水平変位であり、両者は異なる。式(4.1)では、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分に対して平面保持の仮定が設けられていない。

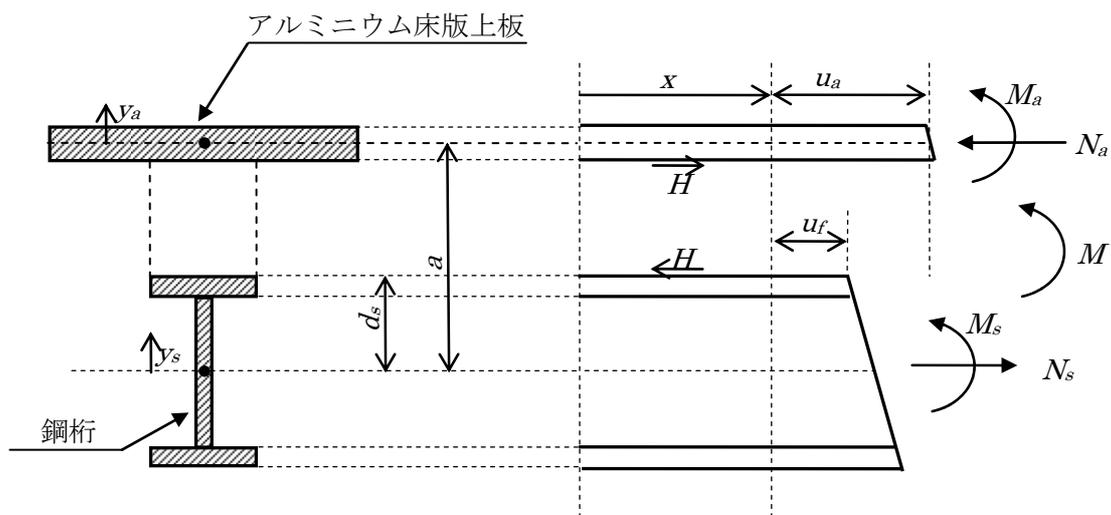


図-4.1 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる断面力

鋼桁とアルミニウム床版上板に生じるひずみをそれぞれ ε_s と ε_a で表すと、これらのひずみは、応力によるひずみと温度変化によるひずみの和として次式で与えられる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{ss} + \varepsilon_{st} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{at} \quad (4.3)$$

ここに、

ε_{ss} , ε_{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

ε_{st} , ε_{at} : それぞれ鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる温度変化によるひずみ

ε_{st} と ε_{at} はそれぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_{st} = \alpha_s \Delta T_s \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{at} = \alpha_a \Delta T_a \quad (4.5)$$

ここに、

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_s , ΔT_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

式(4.1)を微分し、 $\varepsilon_s = du_s/dx$ および $\varepsilon_a = du_a/dx$ を考慮して、式(4.2)と(4.3)を代入して、次式を得る。

$$\frac{1}{k} \frac{dH}{dx} = \varepsilon_{ss} - \varepsilon_{as} + \Delta \varepsilon_T \quad (4.6)$$

ここに、

$$\Delta \varepsilon_T = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{at} \quad (4.7)$$

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 ε_{ss} と ε_{as} はそれぞれ次式で表される。

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} y_s \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} - \frac{M_a}{E_a I_a} y_a \quad (4.9)$$

ここに、

y_s , y_a : それぞれ鋼桁の中立軸およびアルミニウム床版上板の中立面からの位置 (上方向を正)

3.4節で述べたように、アルミニウム床版上板は連結材間で独自の曲げ変形を生じるため、アルミニウム床版上板の曲率は鋼桁の曲率と異なる。しかし、3.3節で述べたように、アルミニウム床版上板の連結材間の独自の曲げ変形を除いたアルミニウム床版上板のたわみは鋼桁のたわみと同じである。したがって、アルミニウム床版上板の連結材間の独自の曲げ変形を除いたアルミニウム床版上板の曲率と鋼桁の曲率は等しく、次式が成立する。

$$\frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{M_a}{E_a I_a} \quad (4.10)$$

式(3.8)と(4.10)より次式を得る。

$$M_s = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (4.11)$$

$$M_a = \frac{E_a I_a}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (4.12)$$

式(3.7), (4.11), (4.12)を式(4.8)と(4.9)に代入して, 鋼桁とアルミニウム床版上板に生じるひずみがそれぞれ次式で与えられる.

$$\varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{ay_s}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{y_s}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{as} = \left(-\frac{1}{E_a A_a} + \frac{ay_a}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{y_a}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (4.14)$$

ここに,

$$N = N_a = N_s$$

式(4.13)と(4.14)から鋼桁上フランジ上面とアルミニウム床版上板の中立面の, 応力によるひずみがそれぞれ次式で与えられる.

$$\varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{ad_s}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{d_s}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N}{E_a A_a} \quad (4.16)$$

ここに,

d_s : 鋼桁の中立軸から鋼桁上フランジの上面までの距離

図-4.2 に示すように, アルミニウム床版上板の微小区間 dx における力の釣り合いより, 水平力 H と軸力 N の関係が次式で与えられる.

$$H = \frac{dN}{dx} \quad (4.17)$$

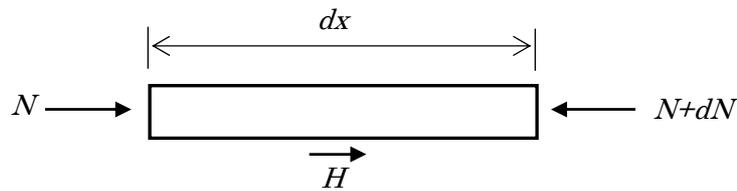


図-4.2 アルミニウム床版上板に生じる水平せん断力と軸力

式(4.15), (4.16), (4.17)を式(4.6)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.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -c\lambda^2 M + k\Delta\varepsilon_T \quad (4.18)$$

ここに,

$$\lambda = \sqrt{k \frac{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right)\left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} ad_s}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n}\right)}} \quad (4.19)$$

$$c = \frac{A_s \frac{A_a}{n} d_s}{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right)\left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} ad_s} \quad (4.20)$$

$$n = \frac{E_s}{E_a} \quad (4.21)$$

本章で得られた軸力に関する方程式(4.18)は、既存の理論^{7),8)}の軸力に関する式(2.9)と同形である。しかし、式(4.19)と(4.20)がそれぞれ与える λ と c は、既存の理論の式(2.10)と(2.11)と異なる。

4.2 集中荷重を受ける単純支持桁

図-4.3 に示すように、アルミニウム床版を有する支間長 L の鋼桁が中央に集中荷重 P を受ける場合を考える。ここで温度変化はないとする。

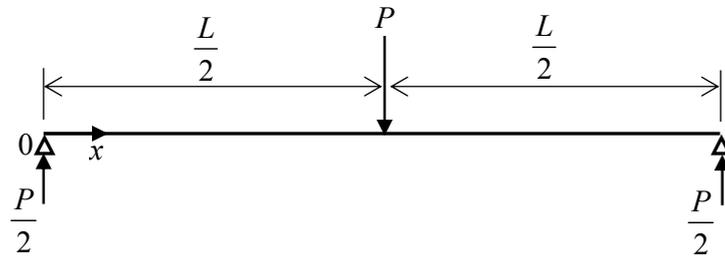


図-4.3 集中荷重を受ける単純支持桁

$0 \leq x \leq L/2$ の範囲で曲げモーメントは次式で与えられ、温度変化がないので温度ひずみ差 $\Delta\varepsilon_T$ は0である。

$$M = \frac{P}{2} x \quad (4.22)$$

ここに、

x : 支点からの距離

式(4.22)および $\Delta\varepsilon_T = 0$ を式(4.18)に代入して次式を得る。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -c \lambda^2 \frac{P}{2} x \quad (4.23)$$

式(4.23)を解き、次の一般解を得る。

$$N = A \cosh(\lambda x) + B \sinh(\lambda x) + \frac{cP}{2} x \quad (4.24)$$

ここに,

A, B : 未定係数

$x=0$ で $N=0$, $x=L/2$ で $dN/dx=0$ の境界条件に対して, 式(4.24)を解き, 次式を得る.

$$N = \frac{cP}{2} \left\{ x - \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.25)$$

アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成の場合, λ が無限になるので, 式(4.25)は次式になる.

$$N = \frac{cP}{2} x \quad (4.26)$$

4.2.1 鋼桁とアルミニウム床版上板に生じるひずみ

式(4.22)と(4.25)を式(4.13)と(4.14)に代入して, 鋼桁とアルミニウム床版に生じるひずみがそれぞれ次式で与えられる.

$$\varepsilon_s = \frac{P}{2E_s} \left[\left\{ \frac{c}{A_s} - \frac{(1-ca)y_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right\} x - \left(\frac{c}{A_s} + \frac{cay_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.27)$$

$$\varepsilon_a = \frac{P}{2E_a} \left[- \left\{ \frac{c}{A_a} + \frac{(1-ca)y_a}{nI_s + I_a} \right\} x - \left(- \frac{c}{A_a} + \frac{cay_a}{nI_s + I_a} \right) \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.28)$$

ここで温度変化がないので $\varepsilon_{st} = 0$, $\varepsilon_{at} = 0$ であり, 式(4.27)と(4.28)において $\varepsilon_s = \varepsilon_{ss}$, $\varepsilon_a = \varepsilon_{as}$ としている.

式(4.27)と(4.28)において λ を無限にして, アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成の場合に対する鋼桁とアルミニウム床版の集中荷重によるひずみがそれぞれ次式で与えられる.

$$\varepsilon_s = \frac{P}{2E_s} \left\{ \frac{c}{A_s} - \frac{(1-ca)y_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right\} x \quad (4.29)$$

$$\varepsilon_a = - \frac{P}{2E_a} \left\{ \frac{c}{A_a} + \frac{(1-ca)y_a}{nI_s + I_a} \right\} x \quad (4.30)$$

4.2.2 アルミニウム床版を有する鋼桁のたわみ

曲げモーメントによる鋼桁のたわみに関する微分方程式が次式で与えられる.

$$\frac{d^2 v_m}{dx^2} = -\frac{M_s}{E_s I_s} \quad (4.31)$$

ここに,

v_m : 曲げモーメントによる鋼桁のたわみ

式(4.11)を式(4.31)に代入して次式を得る.

$$\frac{d^2 v_m}{dx^2} = -\frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} \quad (4.32)$$

式(4.22)と(4.25)を式(4.32)に代入して, 次式を得る.

$$\frac{d^2 v_m}{dx^2} = -\frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ (1-ca)x + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.33)$$

式(4.33)を解き, 次の一般解を得る.

$$v_m = -\frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ \frac{1-ca}{6} x^3 + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda^3 \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} + A_1 x + B_1 \quad (4.34)$$

ここに,

A_1, B_1 : 未定係数

$x=0$ で $v_m=0$, $x=L/2$ で $dv_m/dx=0$ の境界条件に対して式(4.34)を解き, 次式を得る.

$$v_m(x) = \frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ -\frac{1-ca}{6} x^3 + \left(\frac{1-ca}{8} L^2 + \frac{ca}{\lambda^2} \right) x - ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda^3 \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.35)$$

$x=L/2$ を式(4.35)に代入して支間中央の, 曲げモーメントによる鋼桁のたわみが次式で与えられる.

$$v_m\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ \frac{1-ca}{24} L^3 + \frac{caL}{2\lambda^2} - \frac{ca}{\lambda^3} \tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \right\} \quad (4.36)$$

他方, せん断力による鋼桁のたわみに関する微分方程式が次式で与えられる.

$$\frac{dv_q}{dx} = \frac{Q_s}{G_s A_{sw}} \quad (4.37)$$

ここに,

Q_s : 鋼桁に作用するせん断力

G_s : 鋼のせん断弾性係数

A_{sw} : 鋼桁ウェブの断面積

せん断力と曲げモーメントに関して次式が成立する.

$$Q_s = \frac{dM_s}{dx} \quad (4.38)$$

式(4.11)を式(4.38)に代入して, 次式を得る.

$$Q_s = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_a I_a} \left(\frac{dM}{dx} - \frac{dN}{dx} a \right) \quad (4.39)$$

式(4.39)を式(4.37)に代入して次式を得る.

$$\frac{dv_q}{dx} = \frac{E_s I_s}{G_s A_{sw} (E_s I_s + E_a I_a)} \left(\frac{dM}{dx} - \frac{dN}{dx} a \right) \quad (4.40)$$

式(4.22)と(4.25)を式(4.40)に代入して得られる微分方程式を解いて, 次の一般解を得る.

$$v_q = \frac{PE_s I_s}{2G_s A_{sw} (E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ (1-ca)x + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} + A_2 \quad (4.41)$$

ここに,

A_2 : 未定係数

$x=0$ で $v_q=0$ の境界条件に対して, 式(4.41)を解いて次式を得る.

$$v_q(x) = \frac{PE_s I_s}{2G_s A_{sw} (E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ (1-ca)x + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.42)$$

$x=L/2$ を式(4.42)に代入して, せん断力による支間中央の鋼桁のたわみが次式で与えられる.

$$v_q\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{PE_s I_s}{2G_s A_{sw} (E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ \frac{1-ca}{2} L + \frac{ca}{\lambda} \tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \right\} \quad (4.43)$$

鋼桁に生じるたわみは, 式(4.35)に式(4.42)を加えて次式で表される.

$$v(x) = v_m(x) + v_q(x) \quad (4.44)$$

鋼桁の支間中央に生じるたわみは, 式(4.36)に式(4.43)を加えて次式で表される.

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = v_m\left(\frac{L}{2}\right) + v_q\left(\frac{L}{2}\right) \quad (4.45)$$

式(4.35)と(4.42)において λ を無限にして, アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成の場合に対するたわみが次式で与えられる.

$$v_\infty(x) = \frac{P}{2E_s I_v} \left(-\frac{x^3}{6} + \frac{L^2 x}{8} \right) + \frac{P I_s}{2G_s A_{sw} I_v} x \quad (4.46)$$

ここに,

$$I_v = \frac{I_s + \frac{I_a}{n}}{1 - ca} = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a d_s}{n A_s + A_a} \quad (4.47)$$

I_v は, アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成を示すとき, 鋼桁に換算された断面全体の断面二次モーメントである.

式(4.46)において $x=L/2$ を代入して, アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成の場合に対する支間中央のたわみが次式で与えられる.

$$v_\infty \left(\frac{L}{2} \right) = \frac{PL^3}{48E_s I_v} + \frac{PLI_s}{4G_s A_{sw} I_v} = \frac{PL^3}{48E_s I_v} \left\{ 1 + \frac{24(1 + \mu_s) I_s}{A_{sw} L^2} \right\} \quad (4.48)$$

4.2.3 合成度

アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の程度を次式で定義される ϕ で評価する.

$$\phi = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_\infty} \quad (0 \leq \phi \leq 1) \quad (4.49)$$

ここに,

- ϕ : アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の評価指標
- v_∞ : 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

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. 4.2.2 項で得られた, 曲げモーメントによる鋼桁の支間中央のたわみを v , v_∞ および v_0 に使用する. 式(4.36)において, λ を無限にして v_∞ が与えられ, λ を 0 に近づけて v_0 が与えられる. すなわち,

$$v_\infty = \frac{PL^3}{48E_s I_v} \quad (4.50)$$

$$v_0 = \frac{PL^3}{48(E_s I_s + E_a I_a)} \quad (4.51)$$

式(4.36), (4.50), (4.51)を式(4.49)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 ϕ が次式で与えられる.

$$\phi = 1 - \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} \quad (4.52)$$

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 λL に支配される. 式(4.52)は, 既往の理論⁸⁾で定義された評価指標と同形である. 式(4.52)が与える ϕ と λL の関係を図-4.4 に示す. λL が 10 以上のとき, ϕ 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。

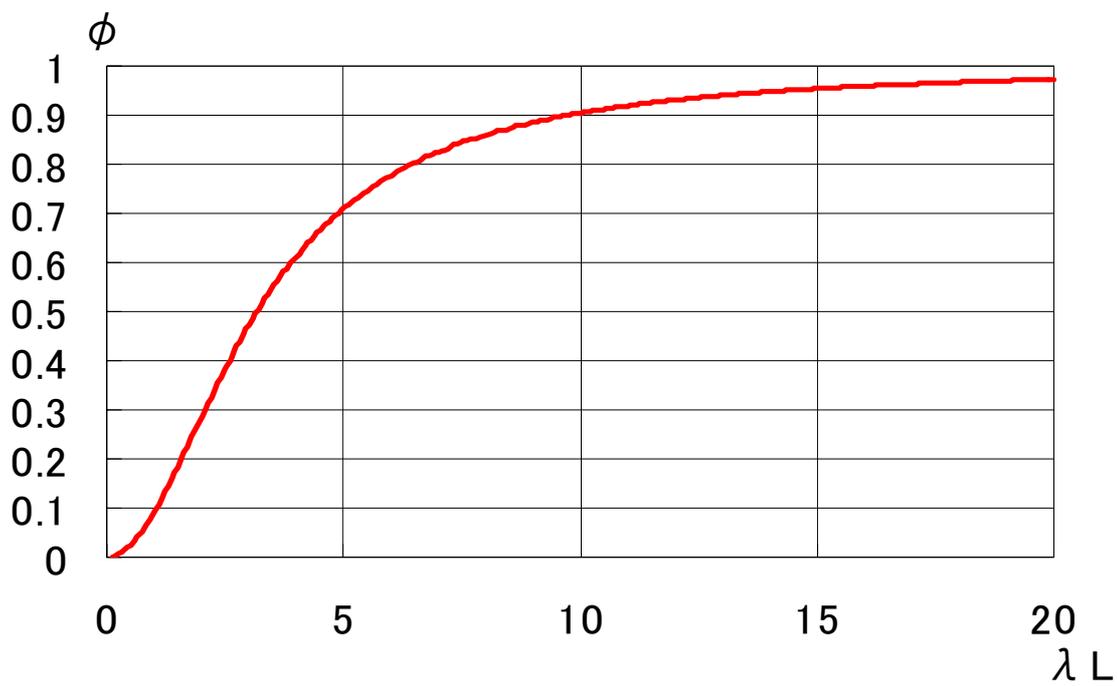


図-4.4 ϕ と λL の関係

第5章 バネ定数の特性

5.1 支間長の影響

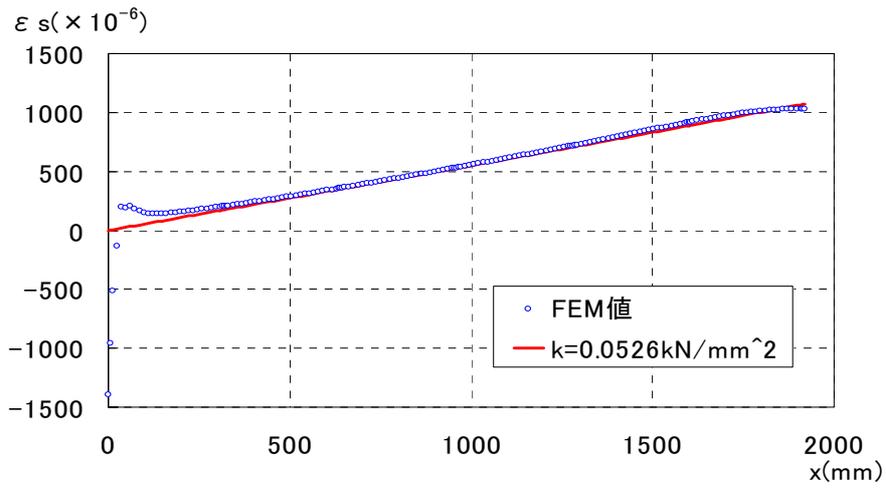
鋼桁とアルミニウム床版に生じるひずみがそれぞれ式(4.27)と(4.28)で与えられた。したがって、アルミニウム床版を有する鋼桁で得られるひずみを両式に代入し、このひずみを満たす λ の値を数値計算によって求める。同様に、鋼桁のたわみを式(4.44)に代入し、このたわみを満たす λ の値を数値計算によって求める。得られた λ の値を次式に代入してバネ定数 k が求められる。

$$k = \frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \lambda^2 \quad (5.1)$$

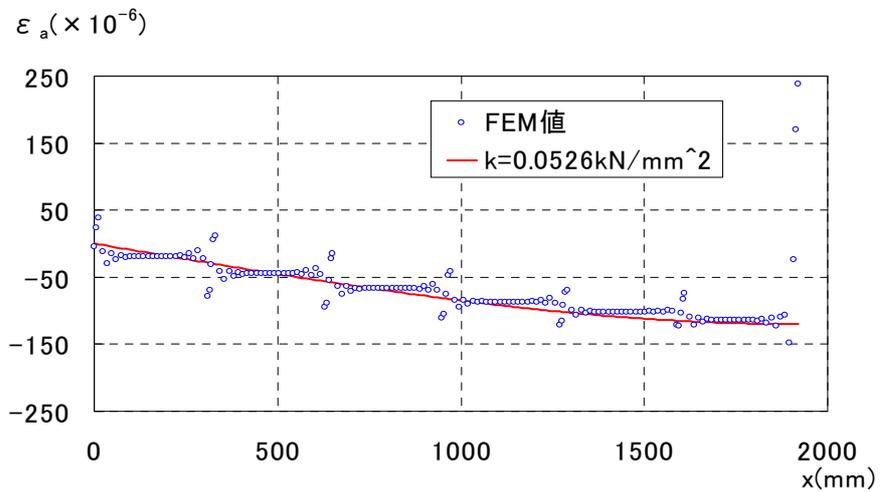
ここで、式(5.1)は、式(4.19)を k について解くことにより与えられる。

3.2節の図-3.5で示した断面構成と同じで、支間長 L が3.84mと19.2mに対してアルミニウム床版を有する鋼桁のFEM解析を行なう。これは、支間長が変化した場合、バネ定数がどのような値をとるか調べるためである。

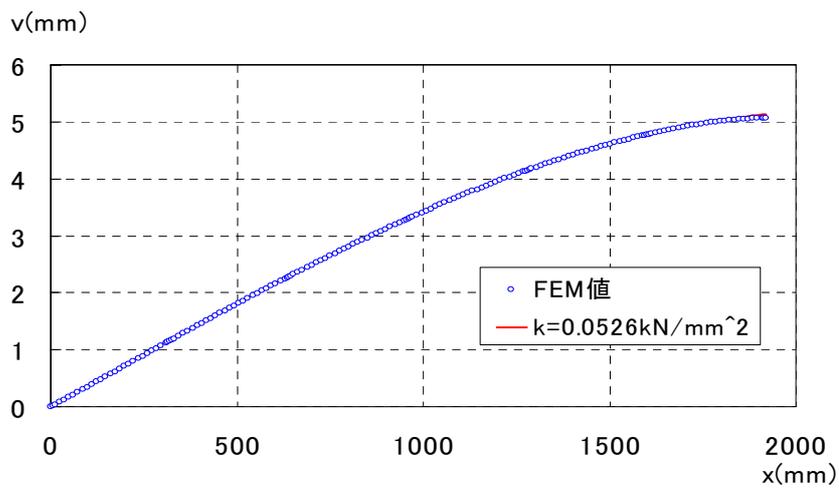
$L=3.84\text{m}$, 11.52m , 19.2m に対するFEM解析の結果をそれぞれ図-5.1, 5.2, 5.3に示す。図-5.1(a), 5.2(a), 5.3(a)は鋼桁下フランジの下面のひずみ分布, 図-5.1(b), 5.2(b), 5.3(b)はアルミニウム床版上板の中立面のひずみ分布, 図-5.1(c), 5.2(c), 5.3(c)は鋼桁の中立軸のたわみ分布を示す。荷重の大きさは $P=490\text{kN}$ である。FEM解析においては中立軸が支点上でわずかなたわみを生じるので、このたわみを除去した結果が図-5.1(c), 5.2(c), 5.3(c)に示してある。



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

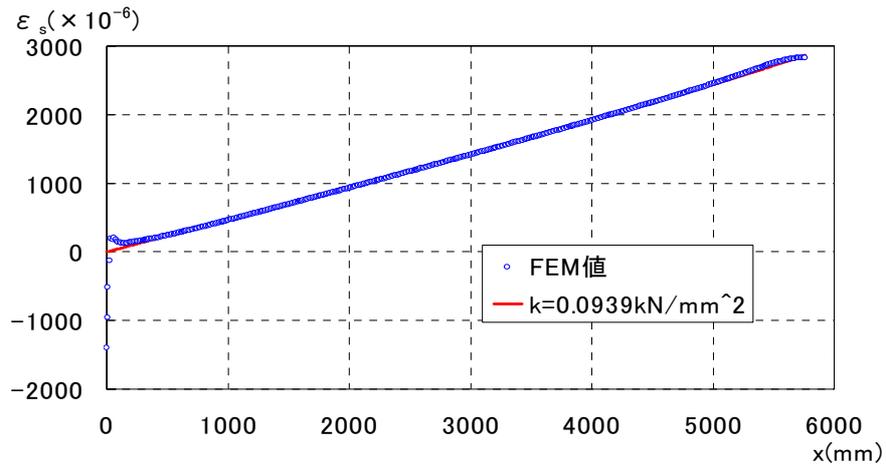


(b) アルミニウム床版上板の中立面のひずみ

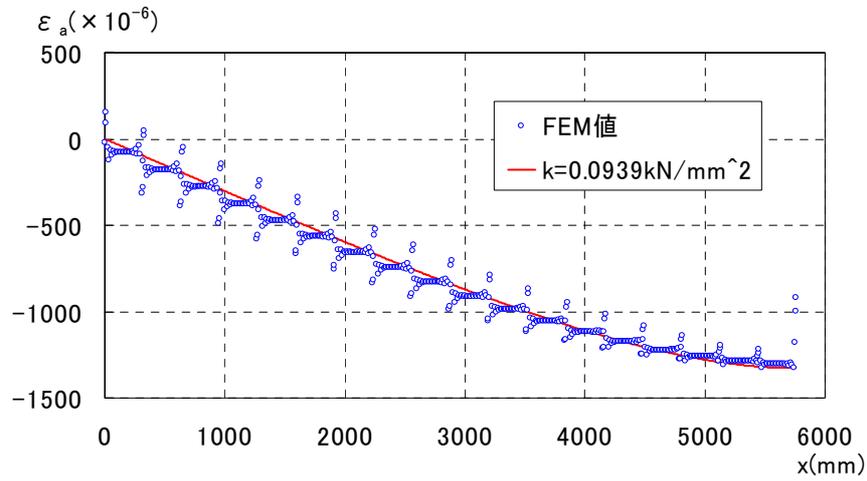


(c) 鋼桁の中立軸のたわみ

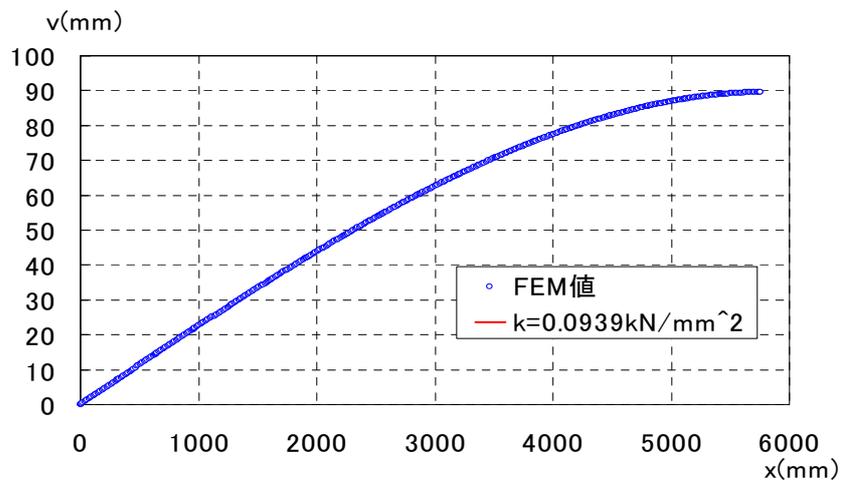
図-5.1 支間長 3.84m の桁



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

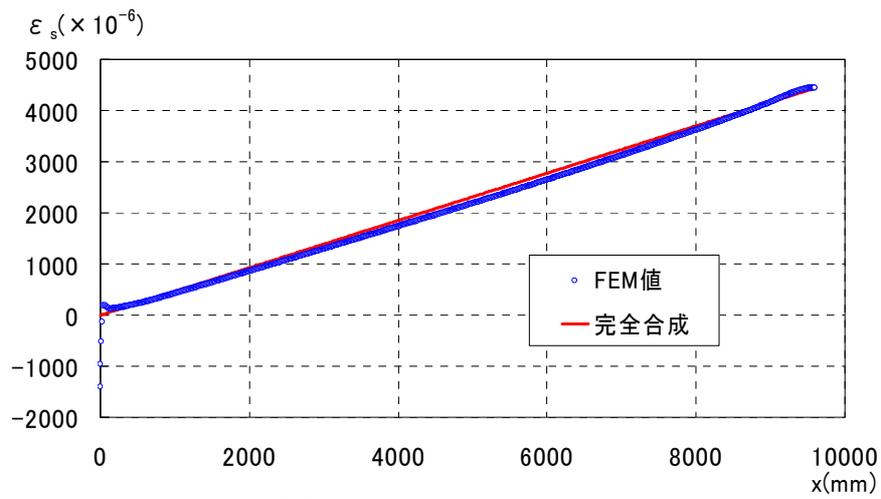


(b) アルミニウム床版上板の中立面のひずみ

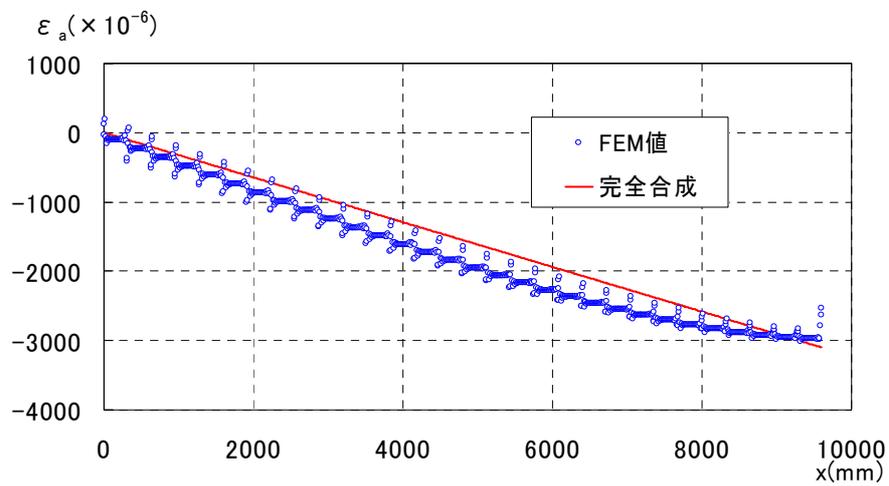


(c) 鋼桁の中立軸のたわみ

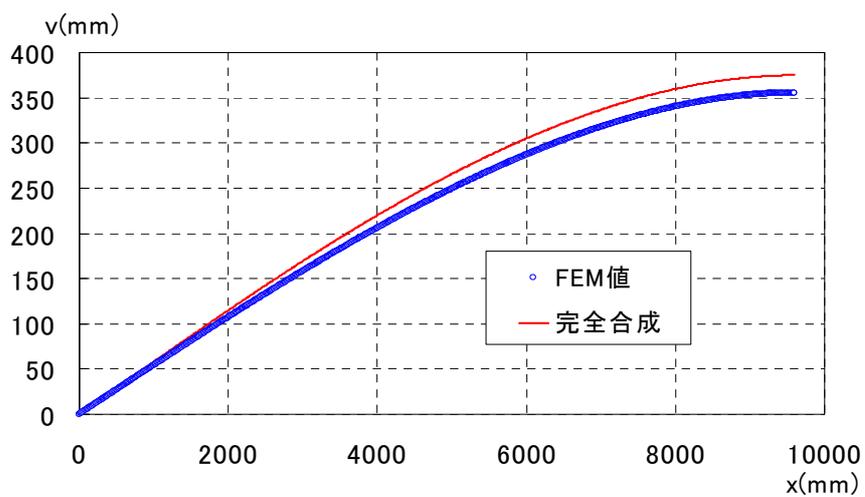
図-5.2 支間長 11.52mの桁



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ



(b) アルミニウム床版上板の中立面のひずみ



(c) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-5.3 支間長 19.2mの桁

図-5.1(a) と 5.2(a) の鋼桁下フランジの下面のひずみを式(4.27)に代入して得られるバネ定数の分布をそれぞれ図-5.4(a) と 5.5(a)に示す. 図-5.1(b) と 5.2(b) のアルミニウム床版上板の中立面のひずみを式(4.28)に代入して得られるバネ定数の分布をそれぞれ図-5.4(b) と 5.5(b) に示す. 図-5.1(c) と 5.2(c) の鋼桁の中立軸のたわみを式(4.44)に代入して得られるバネ定数の分布をそれぞれ図-5.4(c) と 5.5(c)に示す. 図-5.4 と 5.5 は, それぞれ支間長 3.84m, 11.52m の桁に対する結果である.

支間長 3.84m の桁の場合, 図-5.4(a) から分るように, 鋼桁下フランジの下面のひずみに対して決定されたバネ定数は大きく変動する. x が 0 から 500mm の範囲でバネ定数が 0 の値を示しているのは, $k=0$ すなわち非合成を仮定した場合のひずみより FEM 値が大きくなるからである. 同様に, 図-5.5(a) から分るように, 支間長 11.52m の桁の場合, 鋼桁下フランジの下面のひずみに対して求められたバネ定数は大きく変動する. x が 600 から 1700mm の範囲で k が発散しているのは, 完全合成を仮定した式(4.29)が与えるひずみより FEM 値が小さくなるからである. 載荷点と支点との中間点 $x=960$ の位置のバネ定数の値を代表値として採用する.

図-5.4(b) と 5.5(b) から分るように, アルミニウム床版上板の中立面のひずみに対して決定されたバネ定数は連結材の位置で段差が生じるが, アルミニウム床版の開断面の値は, 支間中央に向かうに従って安定した値を示す. 載荷点に最も近い開断面のバネ定数の平均値をバネ定数の代表値として採用する.

図-5.4(c) と 5.5(c) から分るように, 鋼桁の中立軸のたわみに対して決定されたバネ定数は支点近傍および載荷点近傍を除いて安定した値を示し, 中央に向かって, 徐々に低下する. したがって, 直線性を示す部分を直線外挿し, 支間中央の位置の値をバネ定数の代表値として採用する.

支間長 3.84m と 11.52m の桁に対して, 上記 3 つのバネ定数の代表値を表-5.1 に示す. 各支間長において, アルミニウム床版上板の中立面のひずみによって決定されたバネ定数の値と鋼桁の中立軸のたわみによって決定されたバネ定数の値は近い. そこで鋼桁の中立軸のたわみによって決定されたバネ定数を式(4.27), (4.28), (4.44)に用いて得られる結果を図-5.1 と 5.2 に示す. 式(4.27), (4.28), (4.44)が与える結果は FEM 値にほぼ合っている. したがって, バネ定数は次の方法で決定する.

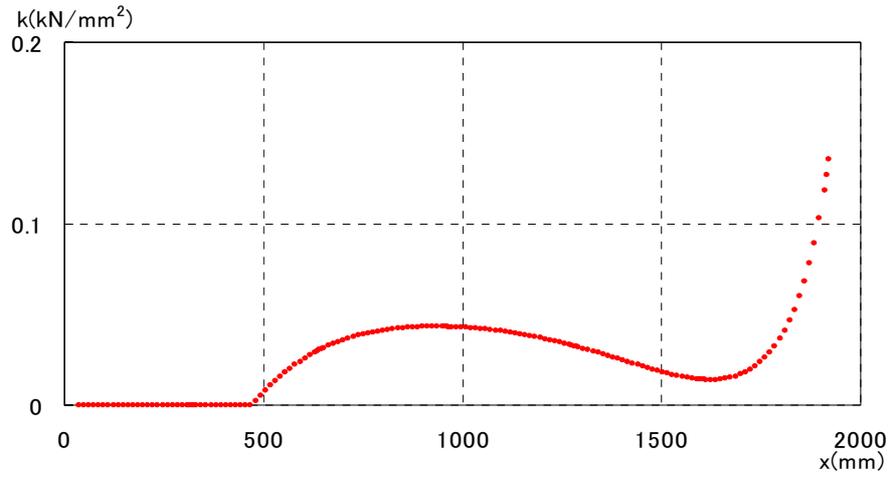
鋼桁の中立軸のたわみを式(4.44)に代入し, このたわみを満たす λ の値を数値計算によって求め, 得られた λ の値を式(5.1)に代入してバネ定数 k の値を決定する. そして, 得られたバネ定数 k の値の桁長手方向の分布で直線性を示す部分を支間中央に向かって直線外挿し, 支間中央の位置の値をバネ定数として採用する.

支間長 19.2m の桁の場合, 図-5.3(a) に示すように, FEM 解析が与える, 鋼桁下フランジの下面のひずみは, 式(4.29)が与える完全合成を仮定した場合より小さくなる. 図-5.3(b) に示すように, FEM 解析が与える, アルミニウム床版上板の中立面のひずみは, 式(4.30)が与える完全合成を仮定した場合より大きくなる. さらに図-5.3(c) に示すように, FEM 解

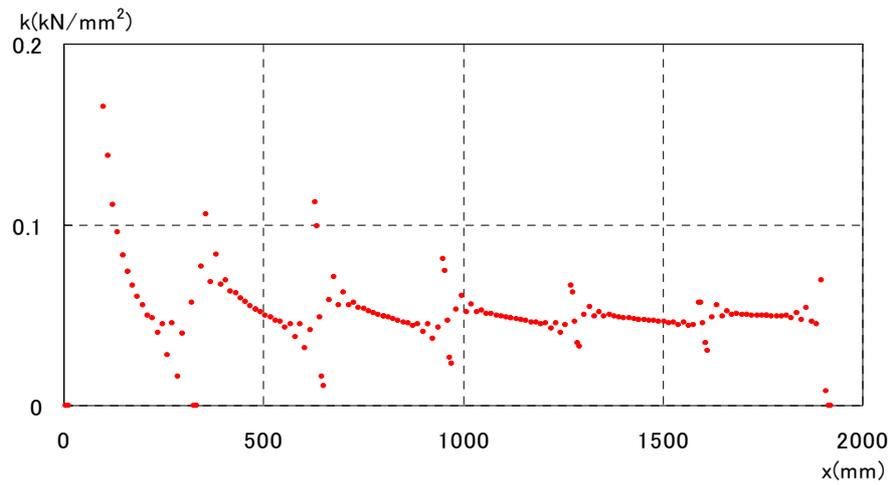
析が与える，鋼桁の中立軸のたわみは，式(4.46)が与える完全合成を仮定した場合より小さくなる．したがって表-5.1において，支間長 19.2 の桁に対するバネ定数の値を ∞ で表示している．

支間長 3.84m, 11.52m, 19.2m の各桁の変形を図-5.6 に示す．支間長 19.2 の桁の場合，FEM 解析が与える，鋼桁の中立軸のたわみは，式(4.46)が与える完全合成を仮定した場合より小さくなるので，アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の変形が平面を保持していると予想されるが，図-5.6(c)から分るように，アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の変形は平面を保持していない．

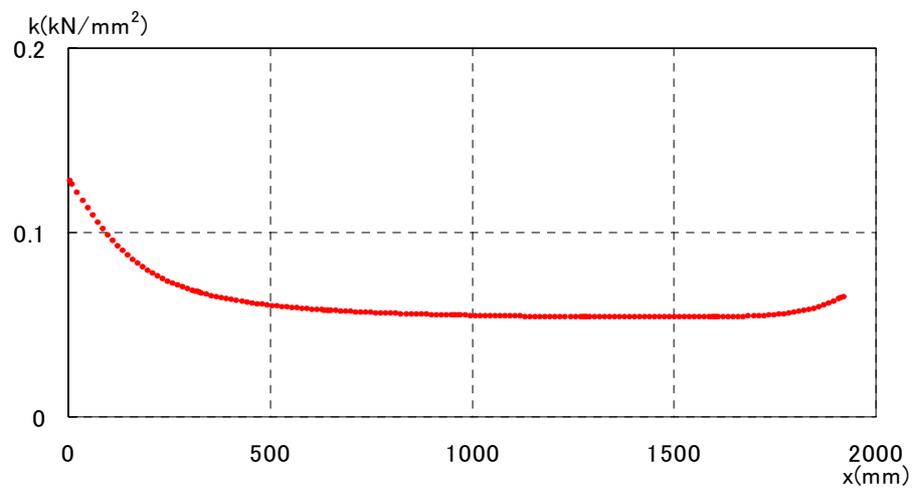
鋼桁の中立軸のたわみによって決定されたバネ定数を用いて計算された λL の値，および式(4.52)で計算される合成度 ϕ の値を表-5.1 に示す．支間長が長くなると，合成度 ϕ が1に近づく．開閉断面アルミニウム床版においては，断面寸法と連結材が同じであっても，支間長が長くなると，バネ定数が大きくなり，アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は完全合成に近づく．



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

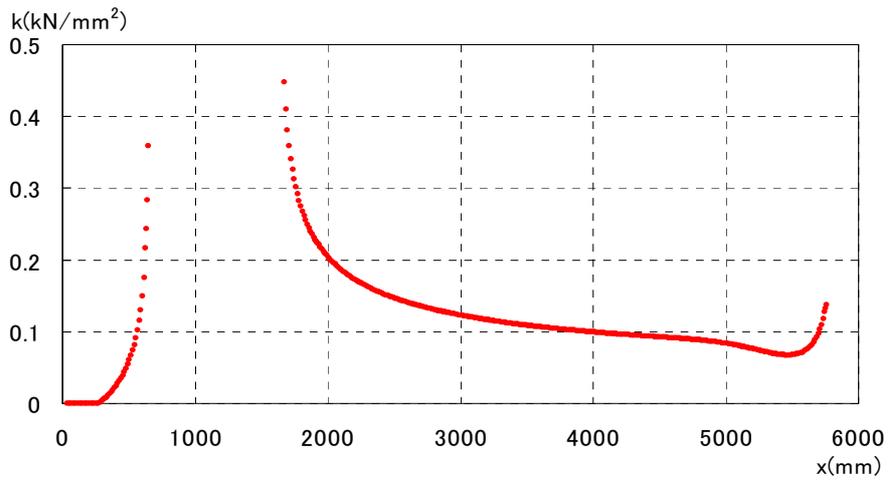


(b) アルミニウム床版上板の中立面のひずみ

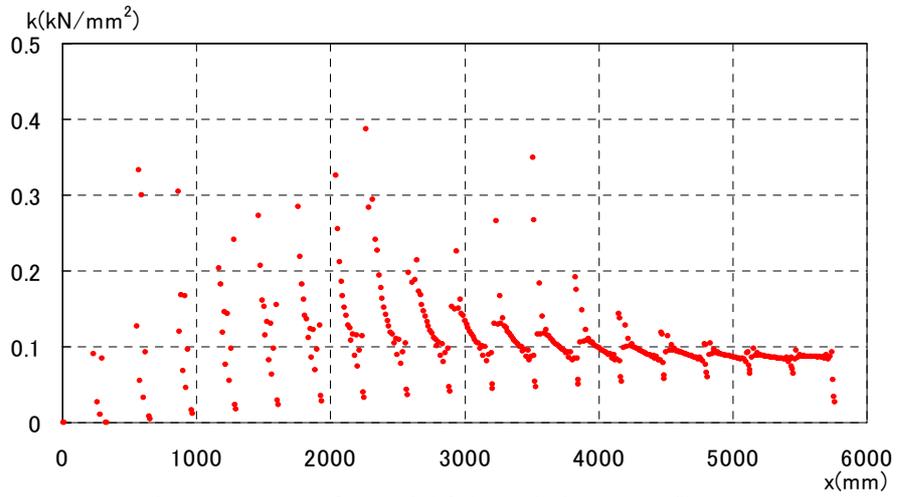


(c) 鋼桁の中立軸のたわみ

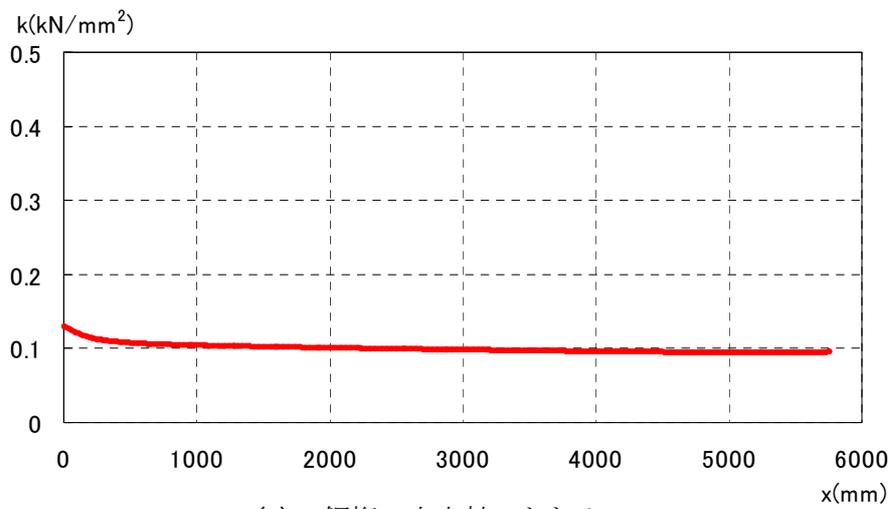
図-5.4 支間長 3.84mの桁のバネ定数の分布



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ



(b) アルミニウム床版上板の中立面のひずみ



(c) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-5.5 支間長 11.52mの桁のバネ定数の分布

表-5.1 バネ定数と合成度

L (m)	k (kN/mm ²)			λL	ϕ
	鋼桁下フランジの下面のひずみ	アルミニウム床版上板の中立面のひずみ	鋼桁の中立軸のたわみ		
3.84	0.0432	0.0508	0.0526	1.74	0.23
11.52	0.128	0.0874	0.0939	6.97	0.82
19.20	∞	∞	∞	∞	1

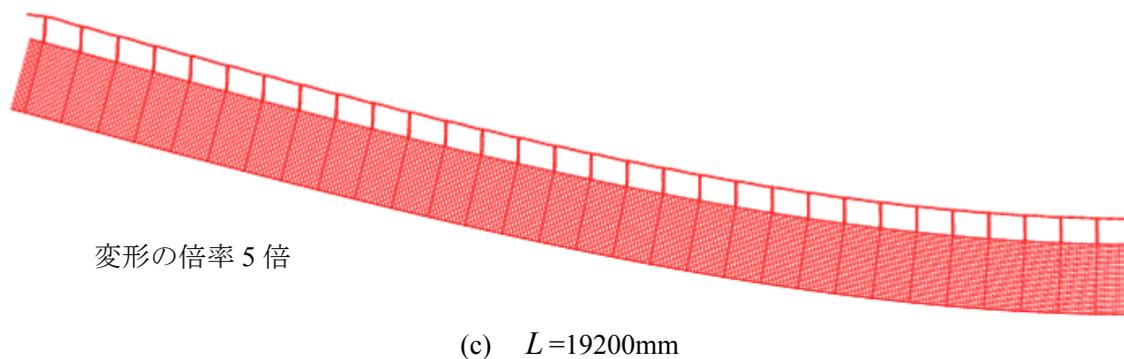
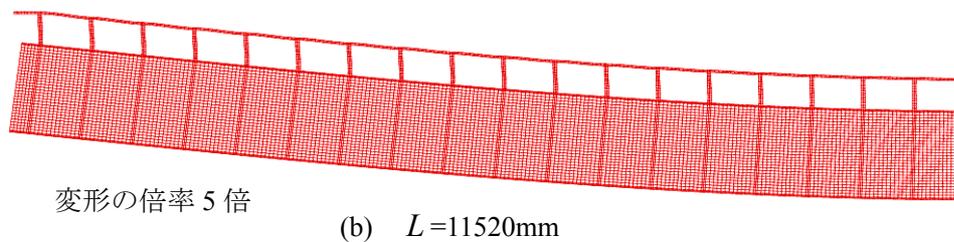
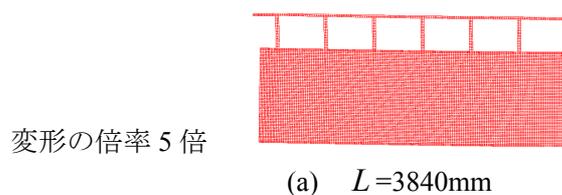


図-5.6 桁の変形

5.2 断面寸法の影響

3.2節で示した解析モデルと同じ支間長 $L=11.52\text{m}$ の桁において、断面寸法を変化させてアルミニウム床版を有する鋼桁のFEM解析を行なう。これは、断面寸法が変化した場合、バネ定数がどのような値をとるか調べるためである。

図-5.7を参照して、各解析モデルの断面寸法を表-5.2に示す。解析モデルNo.1は3.2節の図-3.5の断面寸法と同じである。解析モデルNo.1に対して、解析モデルNo.2のアルミニウム床版上板の幅 b_a は小さく、解析モデルNo.3のそれは大きい。解析モデルNo.1に対して、解析モデルNo.4の鋼桁の上下フランジの幅 b_f は小さく、解析モデルNo.5のそれは大きい。解析モデルNo.1に対して、解析モデルNo.6の鋼桁のウェブの高さ h_w は低く、解析モデルNo.7のそれは大きい。解析モデルNo.2, No.4, No.6の断面寸法は解析モデルNo.1の断面寸法より小さい。これに対して、解析モデルNo.3, No.5, No.7の断面寸法は解析モデルNo.1の断面寸法より大きい。

5.1節で示された方法に従って、鋼桁の中立軸のたわみに対して決定されたバネ定数 k の値、 λL の値、合成度 ϕ の値を表-5.2に示す。解析モデルNo.1と比較して断面寸法が小さい解析モデルNo.2, No.4, No.6のバネ定数の値は、解析モデルNo.1のバネ定数の値より大きい。これに対して、解析モデルNo.1と比較して断面寸法が大きい解析モデルNo.3, No.5, No.7のバネ定数の値は、解析モデルNo.1のバネ定数の値より小さくなる。このように、連結材が同一であってもバネ定数は断面寸法によって変化する。

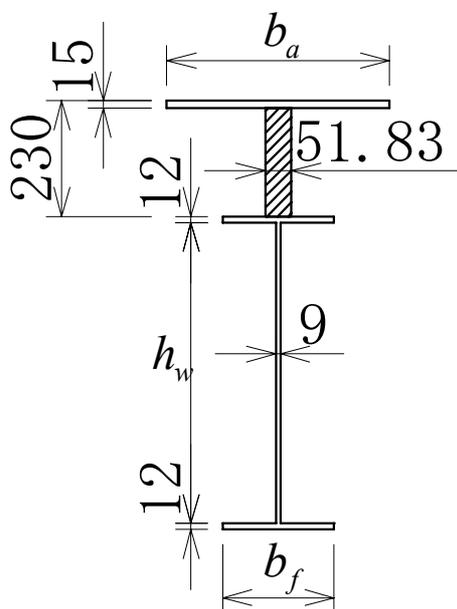


図-5.7 断面寸法

表-5.2 バネ定数と合成度

No.	b_a (mm)	b_f (mm)	h_w (mm)	d_s (mm)	a (mm)	A_a (mm ²)	A_s (mm ²)	$I_a(\times 10^5 \text{mm}^4)$	$I_s(\times 10^8 \text{mm}^4)$	k (kN/mm ²)	λL	ϕ
1	440	220	600	312	534.5	6600	10680	1.24	6.56	0.0939	6.97	0.82
2	220	220	600	312	534.5	3300	10680	0.619	6.56	0.234	13.7	0.95
3	880	220	600	312	534.5	13200	10680	2.48	6.56	0.0734	5.24	0.73
4	440	150	600	312	534.5	6600	9000	1.24	4.99	0.0944	7.19	0.83
5	440	330	600	312	534.5	6600	13320	1.24	9.04	0.0933	6.55	0.81
6	440	220	400	212	434.5	6600	8880	1.24	2.72	0.326	3751	1.00
7	440	220	900	462	684.5	6600	13380	1.24	16.4	0.0583	5.20	0.73

5.3 連結材の寸法の影響

3.2節の図-3.5の支間長 $L=11.52\text{m}$ の解析モデルにおいて、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジの連結材の幅と高さを変化させてFEM解析を行なう。これは、連結材の寸法が変化した場合、バネ定数がどのような値をとるか調べるためである。

34.55mmと17.28mmの幅の連結材を有する解析モデルに対してFEM解析を行なう。34.55mmと17.28mmは、3.2節の解析モデルの連結材の幅51.83mmに対してそれぞれ2/3倍、1/3倍である。バネ定数 k の値、 λL の値、合成度 ϕ の値を表-5.3に示す。連結材の幅が減少すると、バネ定数の値が減少し、合成度も低下する。バネ定数は連結材の幅に比例しない。

245mmと285mmの高さの連結材を有する解析モデルに対してFEM解析を行なう。バネ定数 k の値、 λL の値、合成度 ϕ の値を表-5.4に示す。215mmは、3.2節の図-3.5の解析モデルの連結材の高さである。連結材の高さが増加すると、バネ定数の値が減少し、合成度も低下する。

表-5.3 バネ定数と合成度

連結材の幅(mm)	k (kN/mm ²)	λL	ϕ
51.83	0.0939	6.97	0.82
34.55	0.0520	5.19	0.72
17.28	0.0228	3.44	0.54

表-5.4 バネ定数と合成度

連結材の高さ(mm)	k (kN/mm ²)	λL	ϕ
215	0.0939	6.97	0.82
245	0.0558	5.42	0.74
285	0.0334	4.25	0.64

第6章 試験体のバネ定数と合成度

6.1 試験体

既往の研究⁷⁾で使用された開閉断面アルミニウム床版を有する鋼桁の静的載荷試験体を図-6.1に示す。 $\phi 22\text{mm} \times 200\text{mm}$ のスタッドが320mm間隔で一列に3本ずつ上フランジに溶植されている。台座コンクリート厚 h が30mm, 60mm, 100mmの3体の試験体が製作された。アルミニウム合金材 (A6061S-T6), 鋼材 (SS400), 台座コンクリート, 充填モルタルの機械的特性を表-6.1に示す。

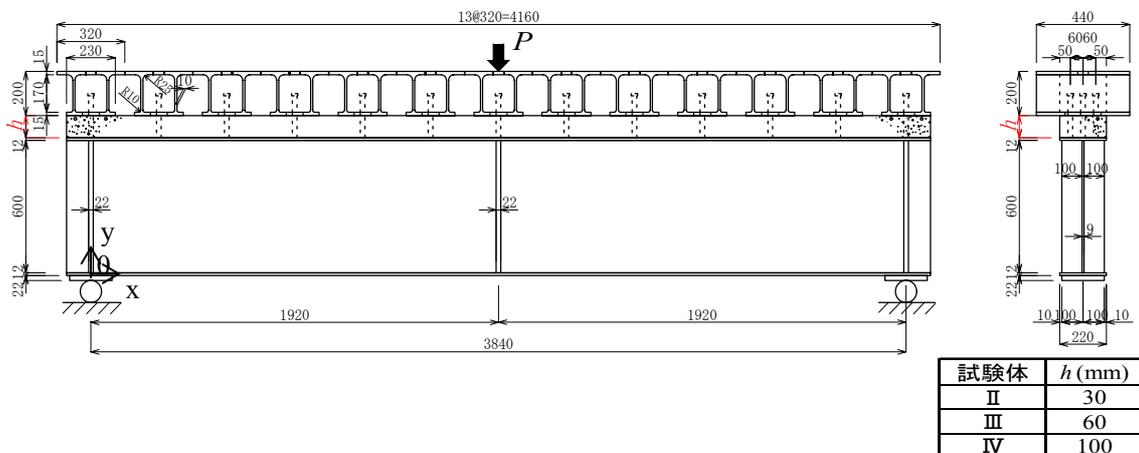


図-6.1 試験体 II, III, IV

表-6.1 機械的特性

(a) アルミニウム合金材

0.2%耐力 (MPa)	328
引張強さ (MPa)	346
ヤング係数 (GPa)	70.6
ポアソン比	0.312
伸び (%)	11.6

(b) 鋼材

	ウェブ	フランジ
降伏応力 (MPa)	291	290
引張強さ (MPa)	426	450
ヤング係数 (GPa)	210	202
ポアソン比	0.285	0.283
伸び (%)	27.2	29.4

(c) 台座コンクリート

材齢 (日)	150
圧縮強度 (MPa)	22.5
ヤング係数 (GPa)	21.5
ポアソン比	0.172

(d) 充填モルタル

材齢 (日)	60
圧縮強度 (MPa)	79.6
ヤング係数 (GPa)	26.8
ポアソン比	0.222

桁の両支点がローラー支持され、支間中央の桁長手方向 200mm, 奥行方向 440mm の領域に荷重が載荷された。桁の両支点と支間中央の鉛直変位が変位計により計測された。鋼桁上フランジの下面, 鋼桁下フランジの下面, ウェブ, 台座コンクリート, アルミニウム床版上板の上面のひずみが一方方向ひずみゲージで計測された。

6.2 解析モデル

図-6.1 に示す試験体を弾性平面問題として FEM 解析によって解く。FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA⁹⁾を用いる。例として試験体IVの要素分割を図-6.2 に示す。他の試験体の要素分割は付録 A に示す。支間中央における対称性より、支間の左側半分が要素分割されている。鋼桁の垂直補剛材と支点上のソールプレートは考慮されていない。使用した有限要素は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(DIANA の要素タイプ 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(DIANA の要素タイプ CQ16M)である。アルミニウム床版上板の隅角部の要素分割の様子を図-6.3 に示す。

製作された試験体においては、スタッドが溶殖されている位置の台座コンクリートに発生した乾燥収縮ひび割れにより、台座コンクリート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⁷⁾。したがって図-6.2(a) (解析モデル A) では台座コンクリートが考慮されていない。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は、図-6.2(a)に示すように、スタッド(緑色の部分)の右側とアルミニウム床版のウェブ(水色の部分)との間に挟まれた充填モルタル(黄色の部分)に生じる圧縮力によって伝達される。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間でせん断変形が生じる場合、アルミニウム床版の下フランジは上下に変位することが予想される。そこで図-6.2(b) (解析モデル B) は、アルミニウム床版の下フランジの直下の台座コンクリート(紫色の部分)が、アルミニウム床版の下フランジの上下の変位を抑制することを想定したモデルである。そして図-6.2(c) (解析モデル C) は、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間でせん断変形が生じるとき、スタッドの右側の、アルミニウム床版の下フランジが台座コンクリートから離れることを想定して、スタッドの右側の台座コンクリートを無視したモデルである。

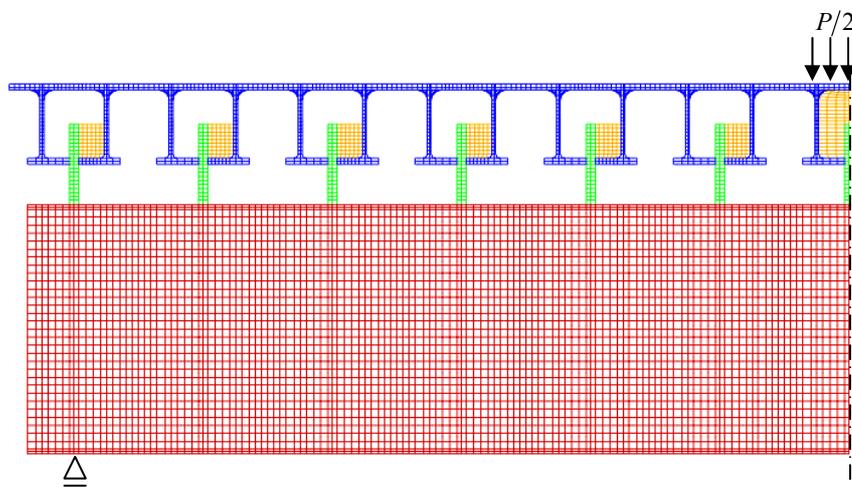
アルミニウム床版、スタッド、充填モルタル、台座コンクリート、鋼桁の異種材料間の界面の節点を全て共有させる。スタッドの桁長手方向の長さは、 $\phi 22\text{mm}$ のスタッドの直径と同じで 22mm 、スタッドの奥行きは、3本の $\phi 22\text{mm}$ のスタッドの断面積の総計に等しくなるように 51.83mm とする。スタッドとアルミニウム床版が交差する部分の奥行き長さは次の計算によって、アルミニウム床版の下フランジの奥行き長さを等価なスタッドの奥行き長さに置き換え、これをスタッドの奥行き長さに加えたものとする。

$$51.83 + \frac{E_a}{E_s}(440 - 170) = 51.83 + \frac{70.6}{200}(440 - 170) = 147.14 \text{ mm} \quad (6.1)$$

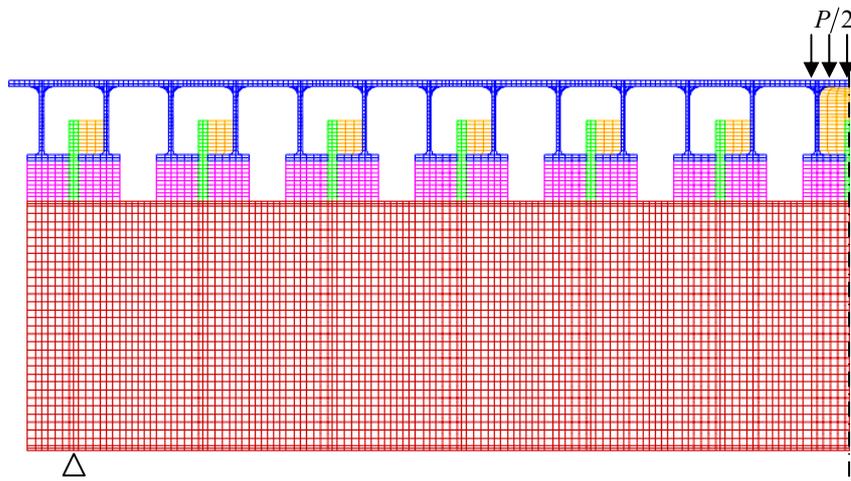
ここで、 E_a と E_s は、それぞれ、アルミニウム床版とスタッドのヤング係数であり、440はアルミニウム床版の下フランジの奥行き長さ、170mmは、スタッドを挿入するためにアルミニウム床版の下フランジに設けられた開口の奥行き長さである。

荷重は、支間中央から 100mm の幅に、荷重 $P/2=245\text{kN}$ を等分布載荷で与える。アルミニウム床版、鋼桁、充填モルタルおよび台座コンクリートのヤング係数とポアソン比に対

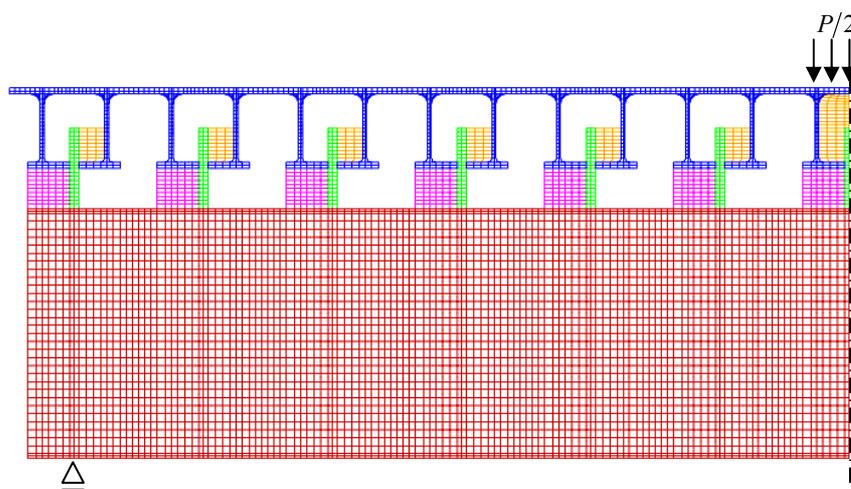
して表-6.1 の値を用いる. スタッドのヤング係数とポアソン比をそれぞれ 200GPa, 0.3 とする.



(a) 解析モデル A



(b) 解析モデル B



(c) 解析モデル C

図-6.2 要素分割(試験体IV)

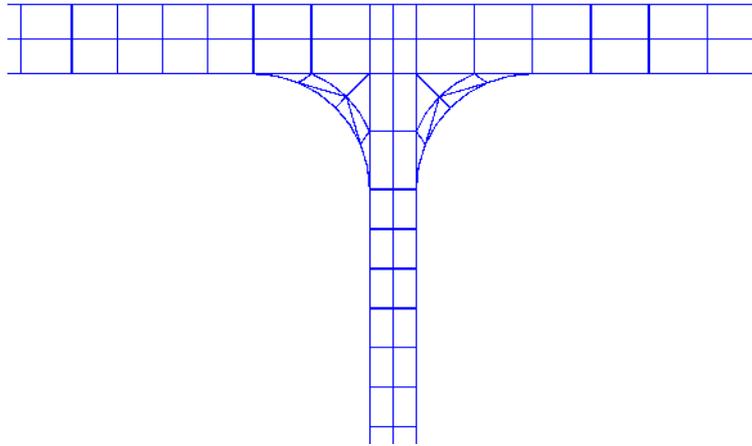
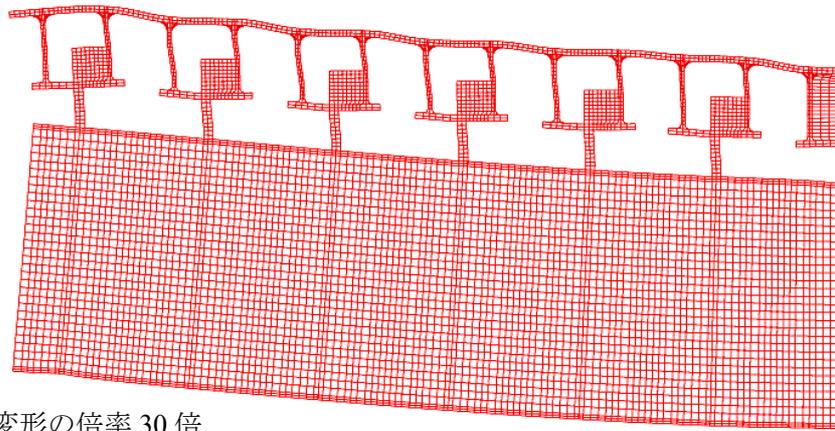


図-6.3 アルミニウム床版上板の隅角部の拡大図

6.3 FEM 値と試験値の比較

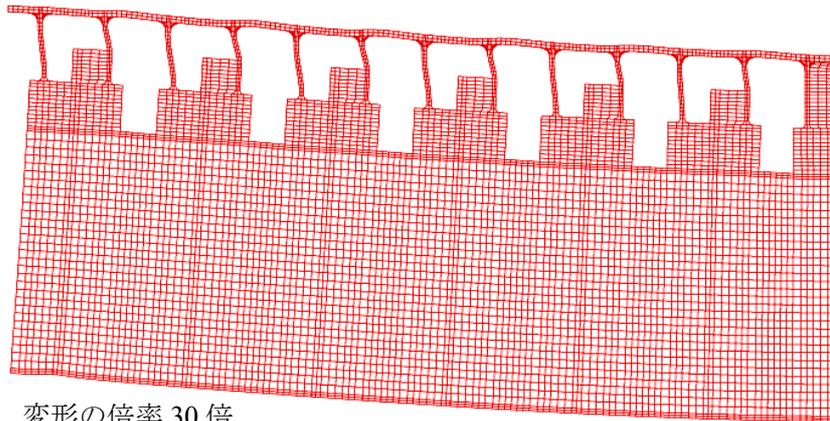
6.3.1 変形

試験体IVの変形を図-6.4に示す。他の試験体の変形を付録Bに示す。図-6.4の各図から分るように、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間で、水平方向にせん断変形が生じている。図-6.4(a)から分るように、アルミニウム床版下フランジと鋼桁上フランジとの間の間隔は、スタッドの右側で大きくなり、左側で小さくなる。したがって、アルミニウム床版下フランジは、スタッドの右側で台座コンクリートから離れることが予想され、変形の観点から、三つの解析モデルのうち解析モデルCが最も適切であると言える。



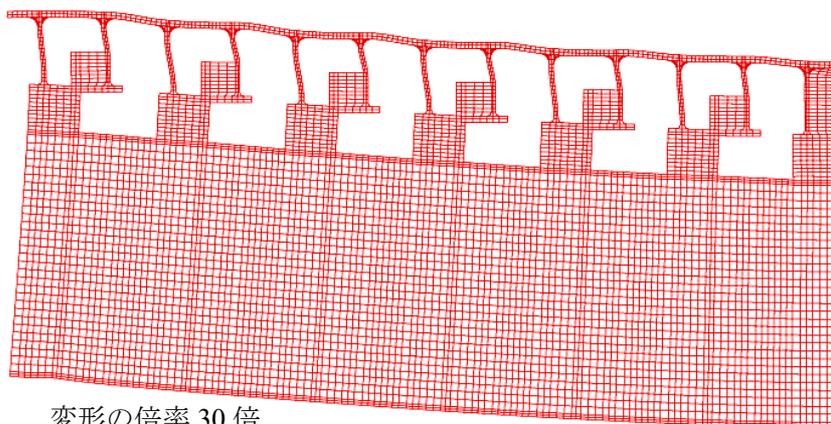
変形の倍率 30 倍

(a) 解析モデル A



変形の倍率 30 倍

(b) 解析モデル B



変形の倍率 30 倍

(c) 解析モデル C

図-6.4 解析モデルの変形(試験体IV)

6.3.2 ひずみ

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のひずみ分布に関して，FEM 値と試験値の比較を図-6.5，6.6，6.7に示す．図-6.5，6.6，6.7は，それぞれ試験体Ⅱ，Ⅲ，Ⅳに対応する．荷重の大きさは $P=490\text{kN}$ である．鋼桁上フランジの下面のひずみ分布およびアルミニウム床版上板の上面のひずみ分布に対して，各解析モデルに対する FEM 値と試験値の比較を付録 C，D，E に示す．付録 C，D，E は，それぞれ試験体Ⅱ，Ⅲ，Ⅳに対応する．図-6.5，6.6，6.7 および付録 C，D，E を参照して，解析モデルの優劣を表 6.2 に示す．各試験体において，試験値に対して解析モデル C の結果が最もよくあっている．

表 6.2 解析モデルの優劣

(a) 試験体Ⅱ

項目	解析モデル A	解析モデル B	解析モデル C
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	△	×	○

○：一番合っている △：次に合っている ×：一番合っていない

(b) 試験体Ⅲ

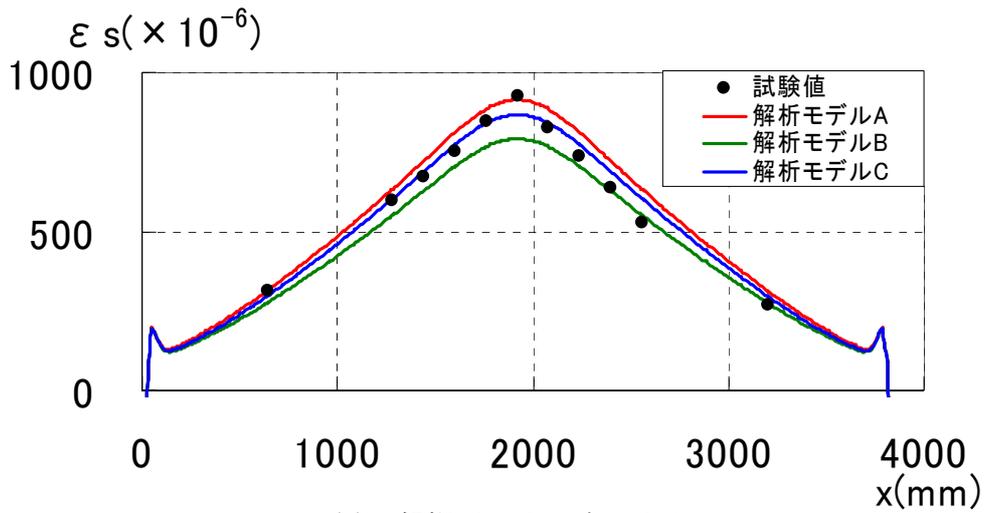
項目	解析モデル A	解析モデル B	解析モデル C
鋼桁下フランジの下面	×	○	△
鋼桁上フランジの下面	△	×	○
アルミニウム床版上板の上面	△	×	○

○：一番合っている △：次に合っている ×：一番合っていない

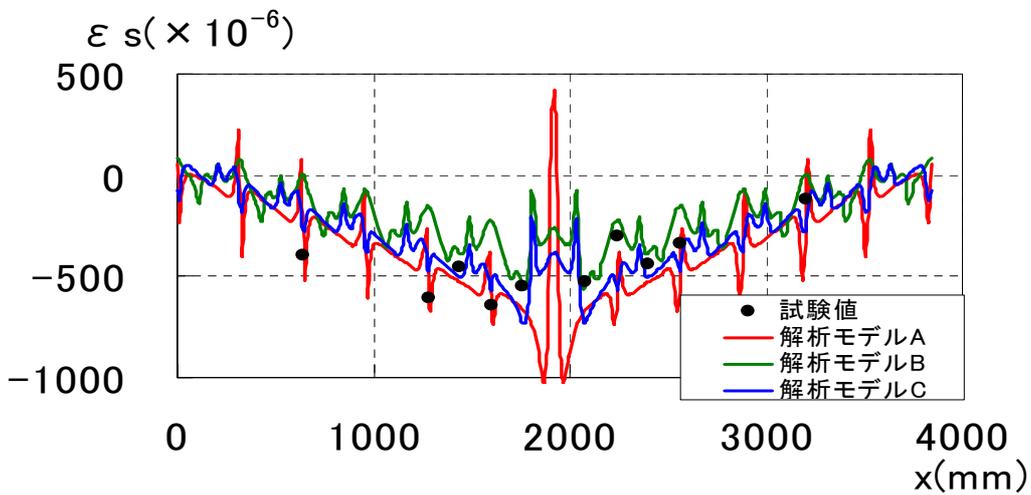
(c) 試験体Ⅳ

項目	解析モデル A	解析モデル B	解析モデル C
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	×	△	○

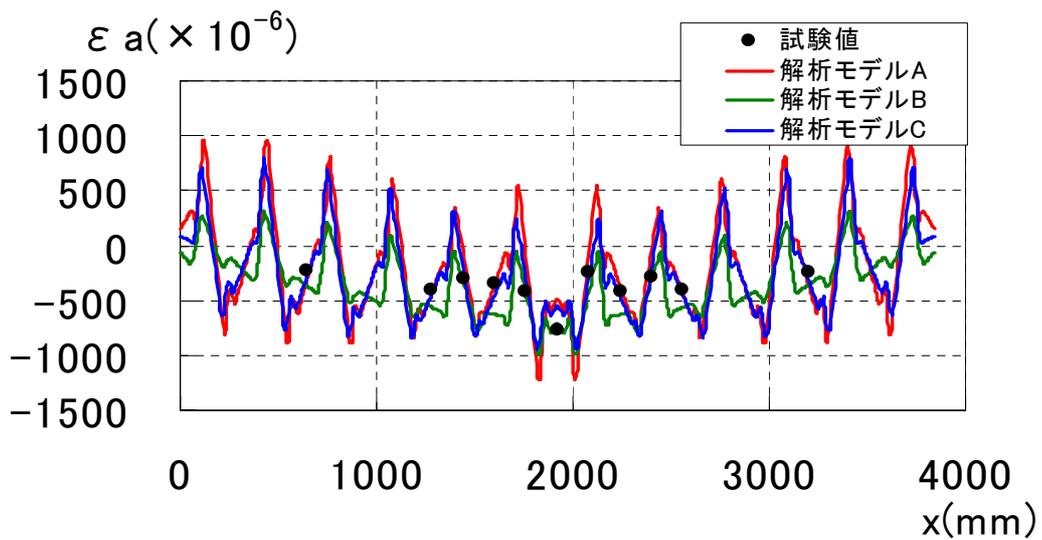
○：一番合っている △：次に合っている ×：一番合っていない



(a) 鋼桁下フランジの下面

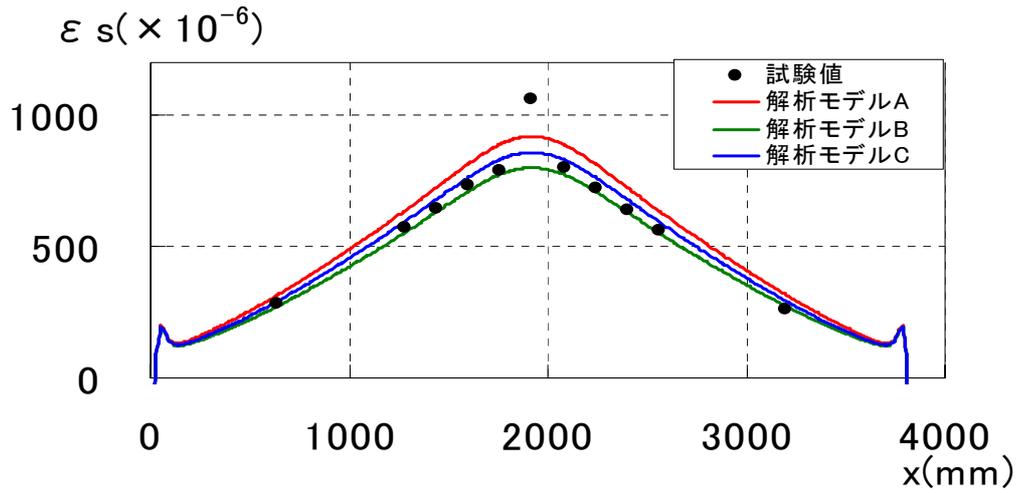


(b) 鋼桁上フランジの下面

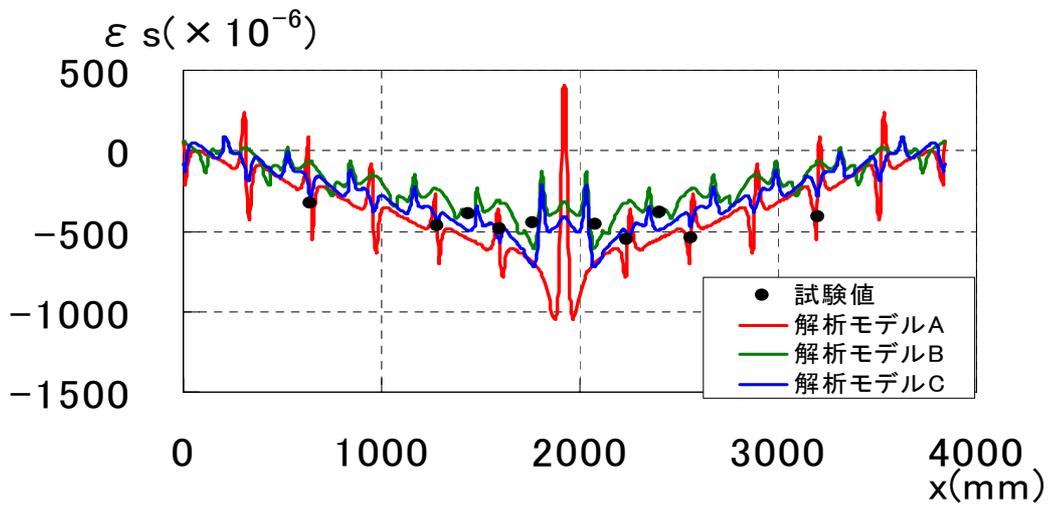


(c) アルミニウム床版上板の上面

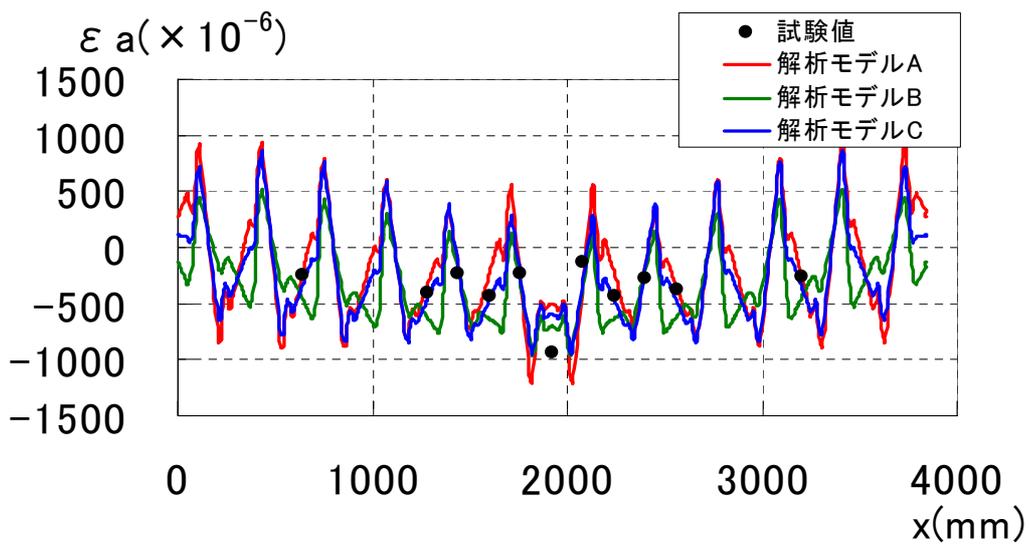
図-6.5 ひずみ分布(試験体II)



(a) 鋼桁下フランジの下面

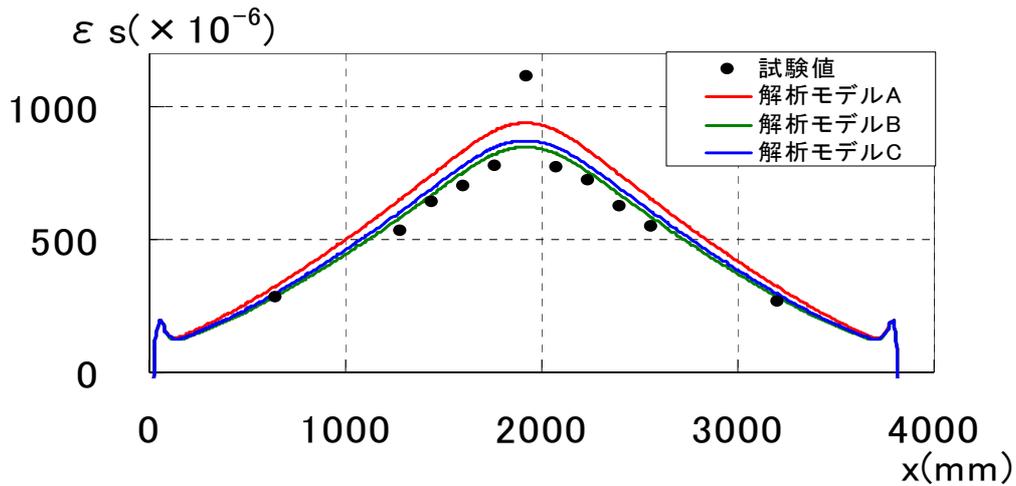


(b) 鋼桁上フランジの下面

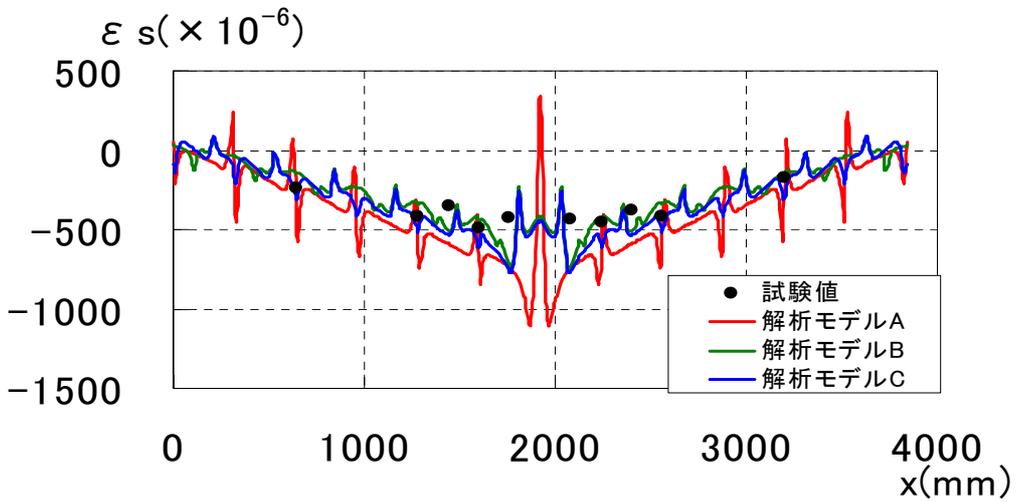


(c) アルミニウム床版上板の上面

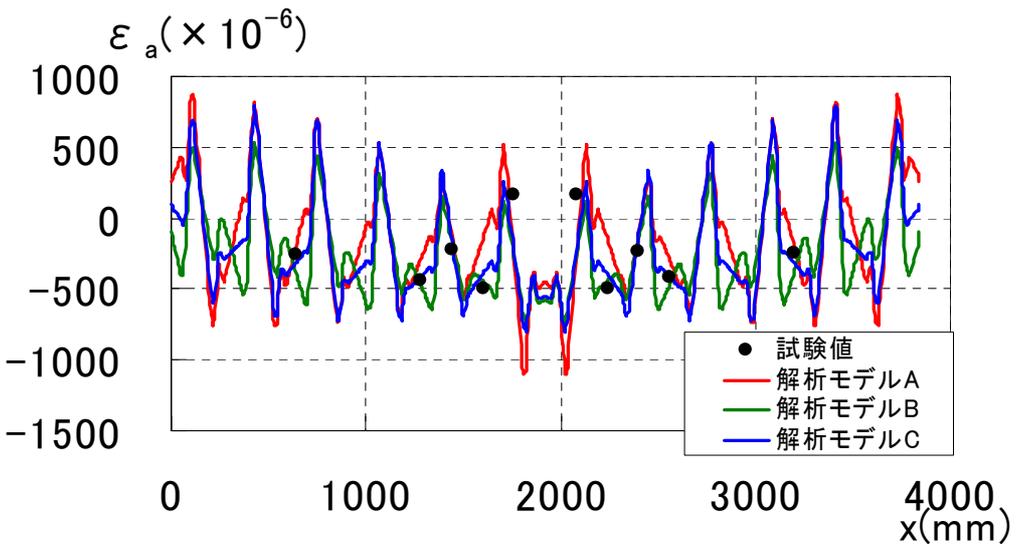
図-6.6 ひずみ分布(試験体Ⅲ)



(a) 鋼桁下フランジの下面



(b) 鋼桁上フランジの下面

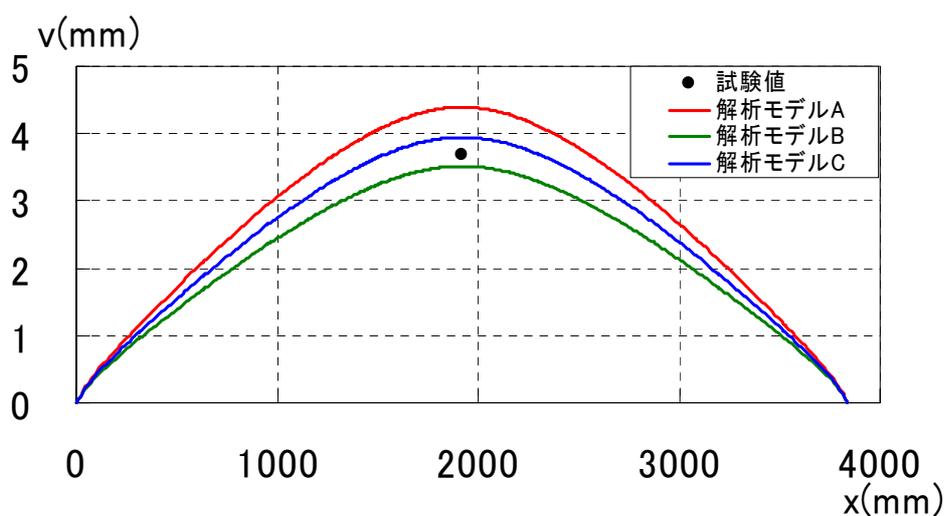
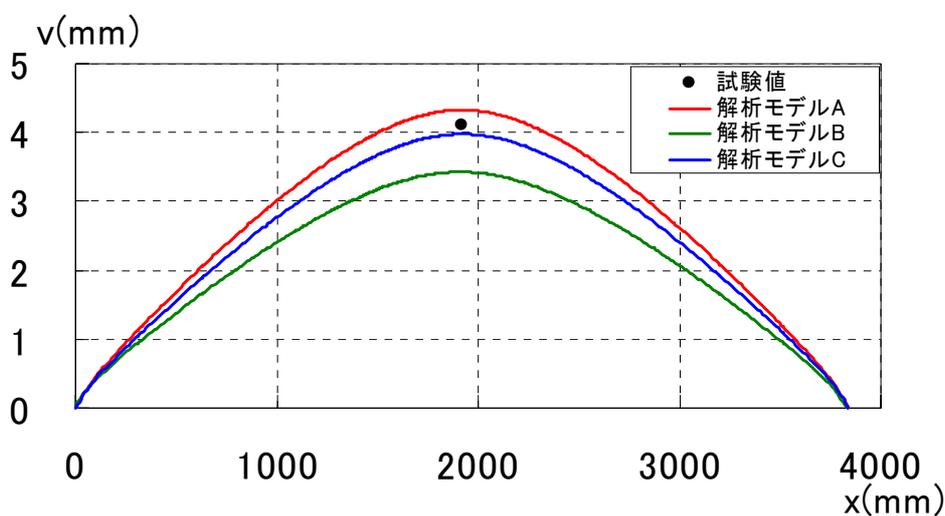


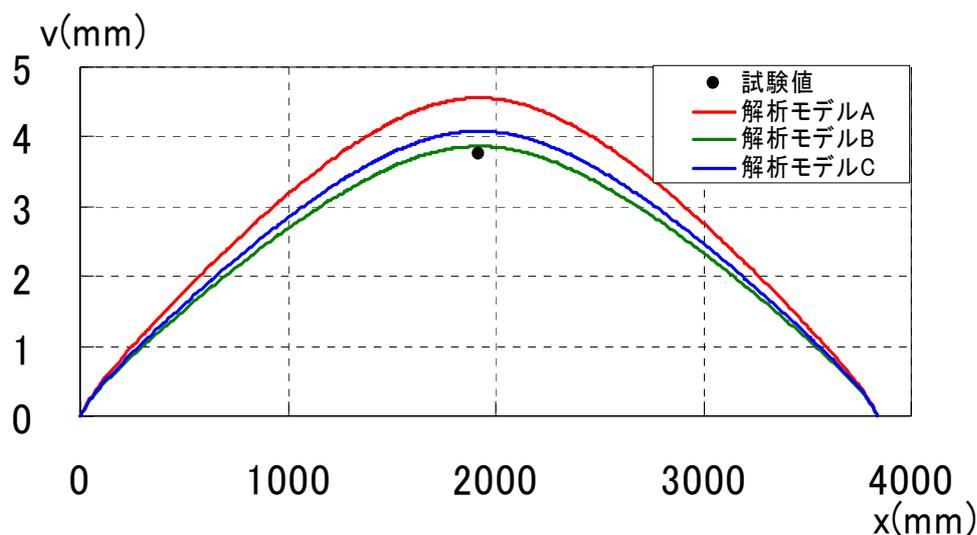
(c) アルミニウム床版上板の上面

図-6.7 ひずみ分布(試験体IV)

6.3.3 たわみ

鋼桁下フランジの下面のたわみに関して、FEM 値と試験値の比較を図-6.8 に示す。これは、荷重 $P=490\text{kN}$ に対する結果である。支間中央における鋼桁下フランジの下面の試験値と FEM 値、および FEM 値を試験値で除した値を表-6.3 に示す。図-6.8 から分るように、FEM 値は、解析モデル A, C, B の順番でたわみが大きくなる。試験体 IV, III, II の順番、すなわち台座コンクリートが高くなるに従って、解析モデル B と解析モデル C のたわみの差は小さくなる。表-6.3 から分るように、試験値に対する FEM 値の比は、全試験体を通して、解析モデル A が 1.05~1.21, 解析モデル B が 0.84~1.03, 解析モデル C が 0.97~1.08 である。1 前後で、解析モデル C のバラツキの範囲が最も小さいので、試験値に対して解析モデル C の結果が最もよくあっているといえる。





(c) 試験体IV

図-6.8 たわみ分布

表-6.3 支間中央のたわみ

試験体	試験値	解析モデルA	解析モデルB	解析モデルC
II	4.104	4.327 (1.05)	3.426 (0.84)	3.976 (0.97)
III	3.696	4.393 (1.19)	3.514 (0.95)	3.946 (1.07)
IV	3.765	4.559 (1.21)	3.865 (1.03)	4.081 (1.08)

単位：(mm)

()：FEM 値/試験値

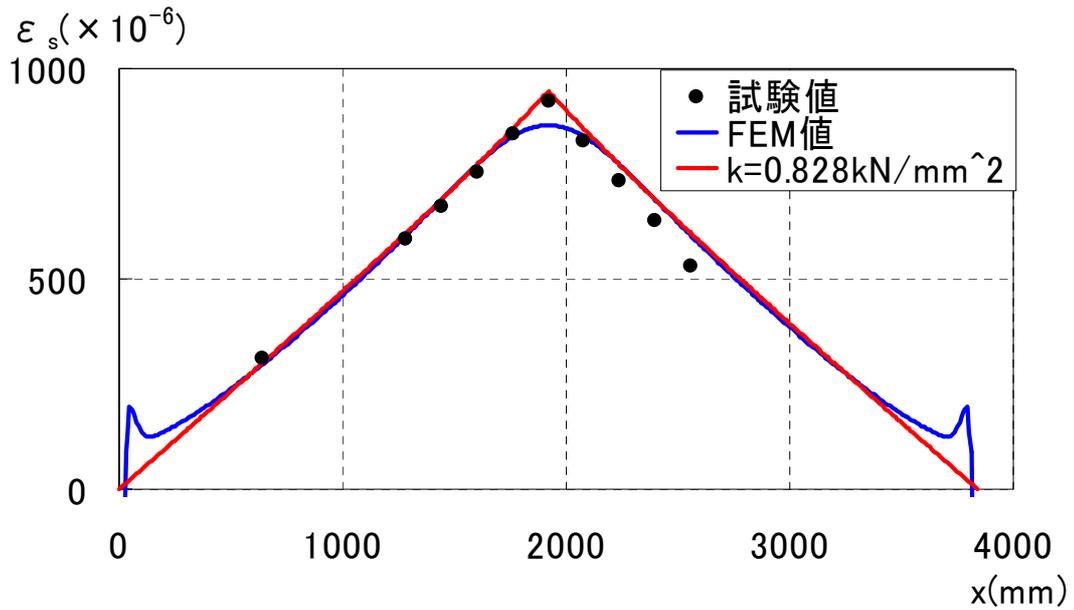
6.4 バネ定数

6.3 節の FEM 値と試験値の比較から、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの連結構造に対して解析モデル C が最も適切である。したがって解析モデル C が与える鋼桁の中立軸のたわみ（支点のたわみを除いたもの）に対して、5.1 節で述べた手法に従ってバネ定数を求める。各試験体に対して求められたバネ定数の値および合成度を表-6.4 に示す。表-6.4 のバネ定数を式(4.27)に用いて得られる鋼桁下フランジ下面のひずみ分布および式(4.44)に用いて得られる鋼桁の中立軸のたわみ分布を、試験体 II, III, IV に対して、それぞれ図-6.9, 6.10, 6.11 に示す。式(4.27)と(4.44)が与える値は FEM 値にほぼあっている。さらに試験値は、式(4.27)と(4.44)が与える値に近い。

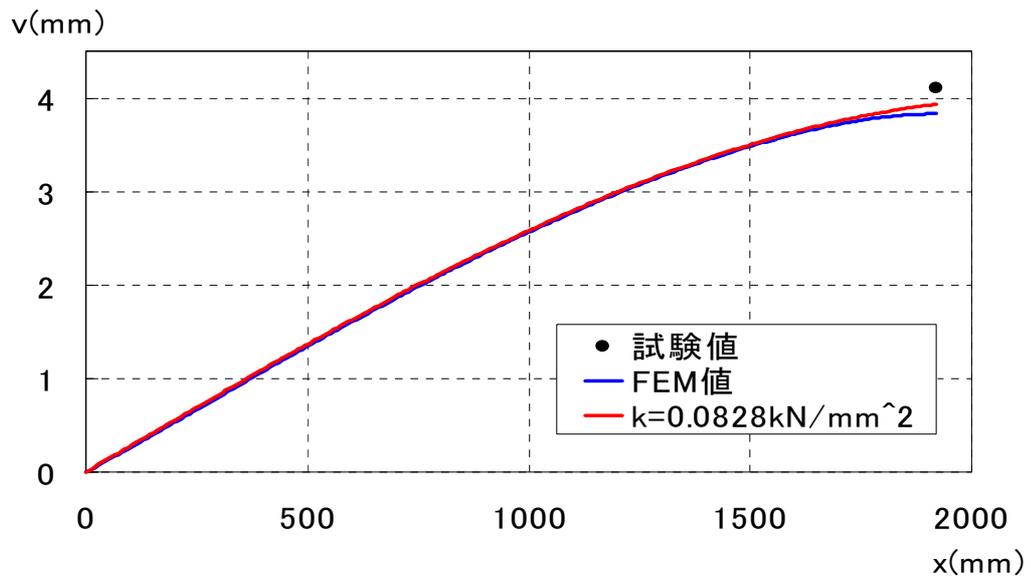
表-6.4 から分るように、試験体 IV, III, II の順番、すなわち台座コンクリートの高さが高くなるに従って、バネ定数の値が小さくなり、合成度も低下する。これは、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジを連結する連結材の高さを高くするとバネ定数の値が小さくなり、合成度も低下した 5.3 節の解析結果に呼応している。

表-6.4 バネ定数と合成度

試験体	バネ定数(kN/mm ²)	λL	ϕ
II	0.828	6.81	0.82
III	0.769	6.62	0.81
IV	0.458	5.17	0.72

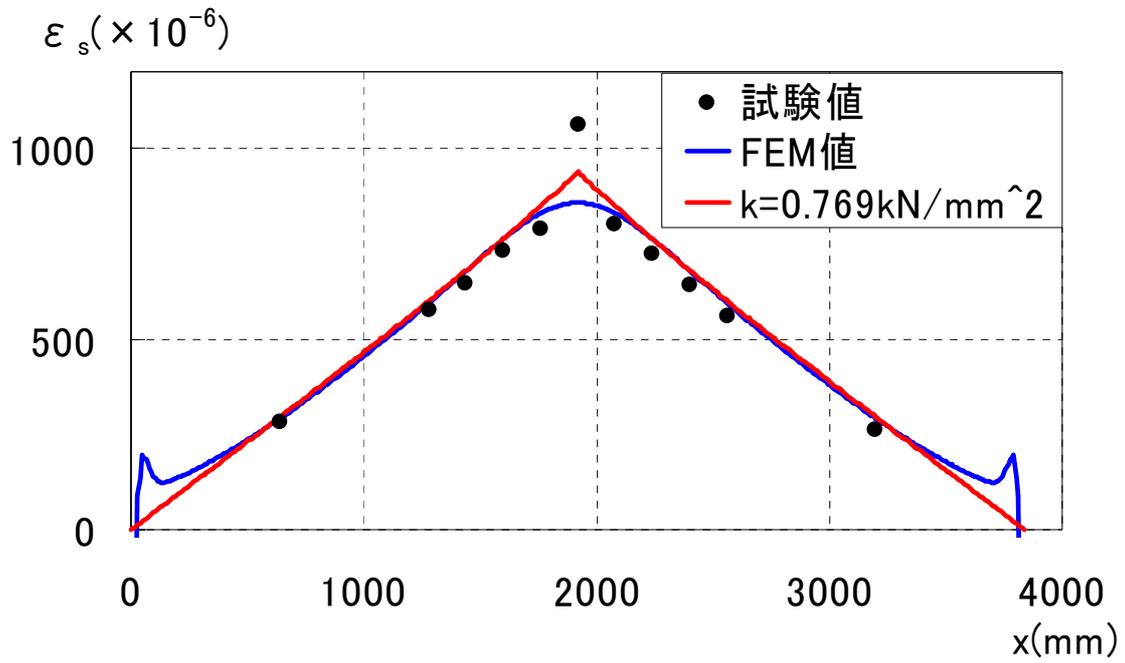


(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

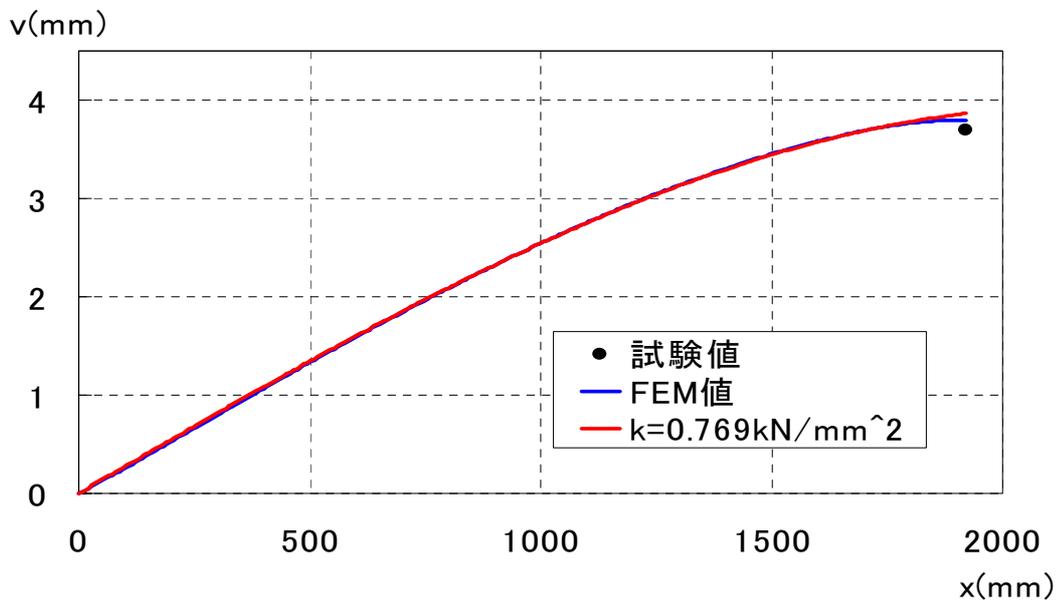


(b) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-6.9 試験体II

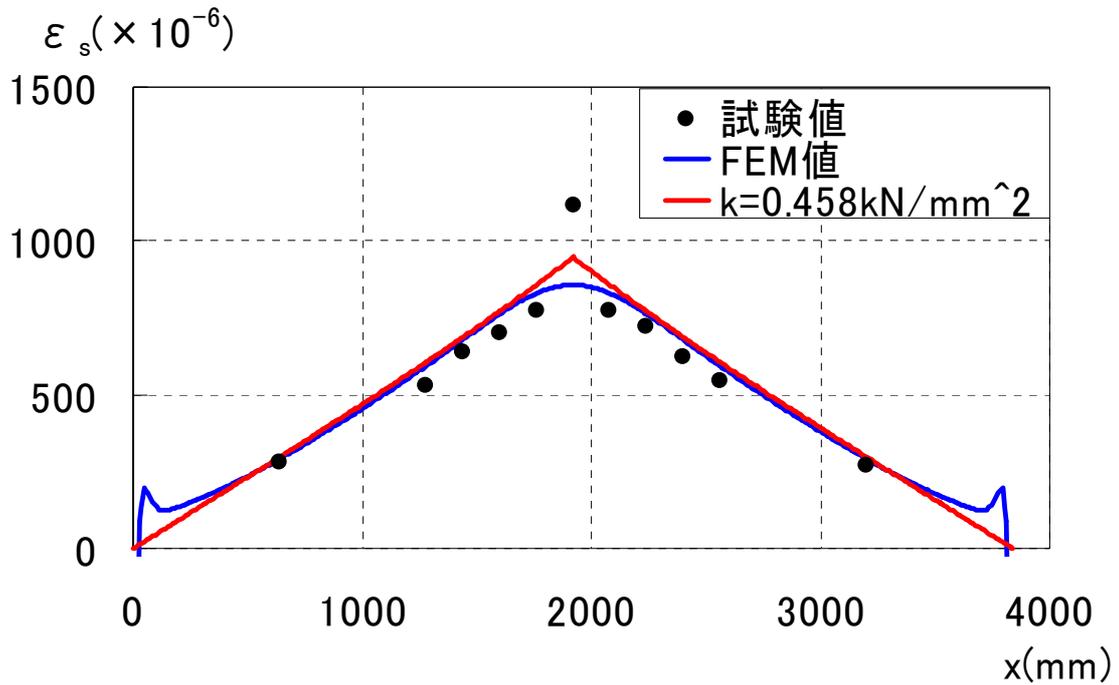


(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

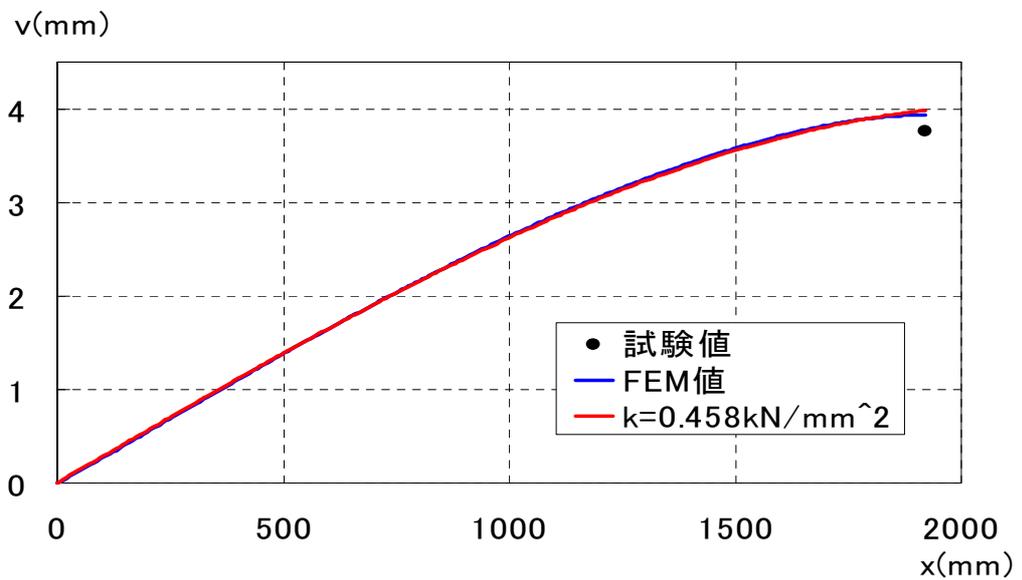


(b) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-6.10 試験体Ⅲ



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ



(b) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-6.11 試験体IV

第7章 実橋のバネ定数と合成度

7.1 対象とする実橋

5章で、開閉断面アルミニウム床版においては、同床版と鋼桁上フランジとを連結する連結材が同じであっても、バネ定数と合成度は、鋼桁の断面寸法と支間長によって変化することを明らかにした。したがって6章で示した試験体のアルミニウム床版と鋼桁上フランジとの連結構造を実橋に適用した場合、同章で算出したバネ定数と合成度は変化することが考えられる。そこで支間長が15m, 20m, 30m, 40mのアルミニウム床版－鋼桁橋を設計し、これらの橋に6章で示した試験体の連結構造が使用された場合、どのようなバネ定数と合成度を示すか調べる。

既往の研究¹⁰⁾で設計されたアルミニウム床版－鋼桁橋の断面を図-7.1に示す。設計条件を次に示す。

- 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-7.1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-7.2に示すアルミニウム床版の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対するたわみの許容値として、支間中央のたわみを $L/500$ 以下とする。ここで、 L は支間長である。
- v) 鋼材はSM490Y材を使用する。
- vi) 鋼桁断面は橋軸方向に対して一定とする。
- vii) フランジ幅はウェブ高の $1/3$ 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。

上記の設計条件に対して、支間長が15m, 20m, 30m, 40mの各場合に対して得られる断面寸法を表-7.2に示す。アルミニウム床版の有効幅については、既往の研究¹⁰⁾より、道路橋示方書¹⁾の完全合成桁に対する床版の有効幅の規定を適用している。

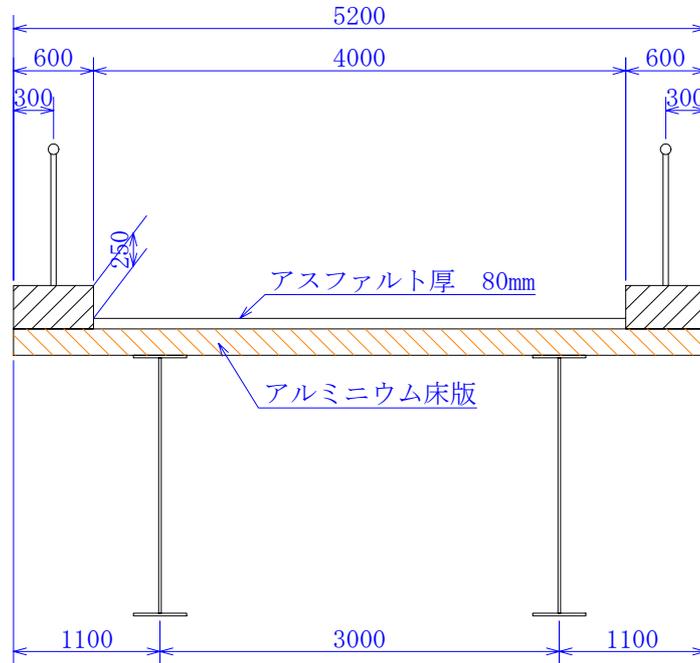


図-7.1 アルミニウム床版－鋼桁橋の断面

表-7.1 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

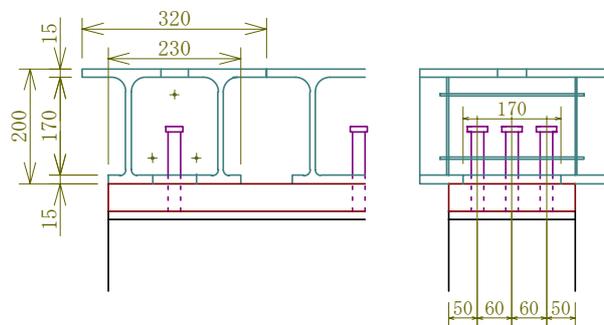


図-7.2 アルミニウム床版の断面

表-7.2 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 [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

7.2 FEM 解析

表-7.2に与えられるアルミニウム床版を有する鋼桁を弾性平面問題としてFEM解析によって解く。台座コンクリートの厚さは30mmとする。スタッドの本数は1本、2本、3本の場合を考え、1本、2本、3本に対して、スタッドの幅をそれぞれ17.28mm、34.55mm、51.83mmとし、充填モルタルの奥行きをそれぞれ130mm、160mm、220mmとする。FEM解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA⁹⁾を用いる。アルミニウム床版と鋼桁上フランジとの連結構造の要素分割は、6章で台座コンクリートを考慮しない解析モデルAおよび試験値に最も近い値を示す解析モデルCを採用する。台座コンクリートを考慮しない解析モデルAは、アルミニウム床版と鋼桁上フランジとの連結の程度を低めに評価する。したがって解析モデルAの解析結果は、解析モデルCの比較値となる。

例として解析モデルCのアルミニウム床版を有する鋼桁の各支間長に対する要素分割を図-7.3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している。使用した有限要素は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(DIANAの要素タイプ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(DIANAの要素タイプCQ16M)である。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式で算出し、その結果を表-7.3に示す。

$$b_{st} + \frac{E_a}{E_s}(b_a - b_h) \quad (7.1)$$

ここに、

b_{st} : スタッドの幅

b_a : アルミニウム床版の下フランジの奥行き長さ(アルミニウム床版の有効幅)

b_h : 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

E_a : アルミニウム床版のヤング係数

E_s : スタッドのヤング係数

荷重は、支間中央から 100mm の幅に、荷重 $P/2=245\text{kN}$ を等分布载荷で与える。鋼桁とスタッドのヤング係数とポアソン比をそれぞれ 200GPa, 0.3 とし、アルミニウム床版のヤング係数とポアソン比を 70GPa, 0.3 とする。充填モルタルおよび台座コンクリートのヤング係数とポアソン比に対して表-6.1 の値を用いる。

解析モデル C のアルミニウム床版を有する鋼桁の変形を図-7.4 に示す。支間長が 40m の桁の桁端部を拡大した変形を図-7.5 に示す。図-7.5 から分るように、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間で、水平方向にせん断変形が生じている。

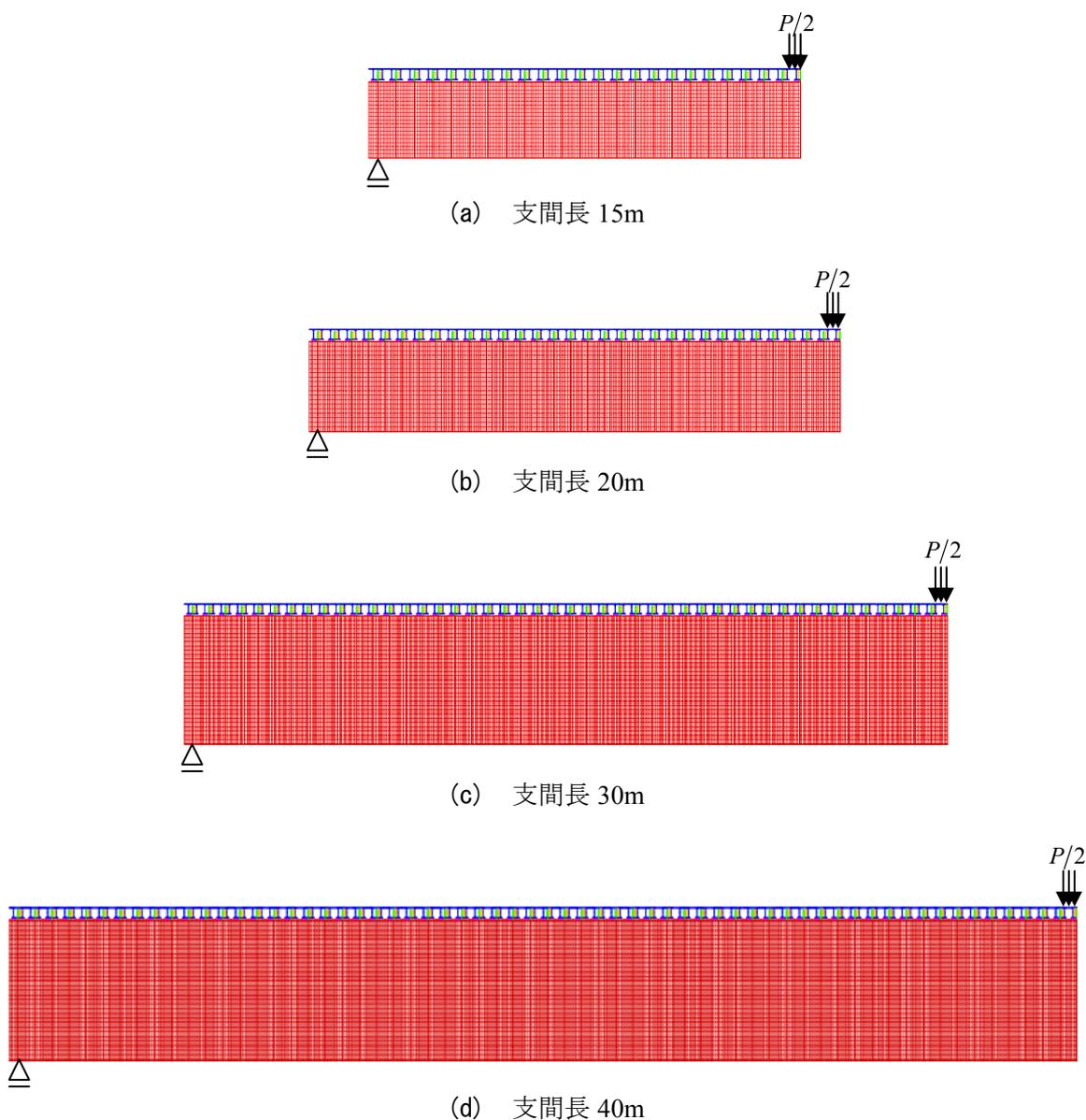


図-7.3 要素分割 (解析モデル C)

表-7.3 アルミニウム床版の下フランジとスタッドとの交差部の奥行き長さ

スタッドの幅 b_{st} (mm)	開口 b_h (mm)	支間長(m)			
		15	20	30	40
17.28	80	851.3	882.1	899.3	899.3
34.55	110	858.1	888.9	906.1	906.1
51.83	170	854.4	885.2	902.3	902.3

単位 : (mm)

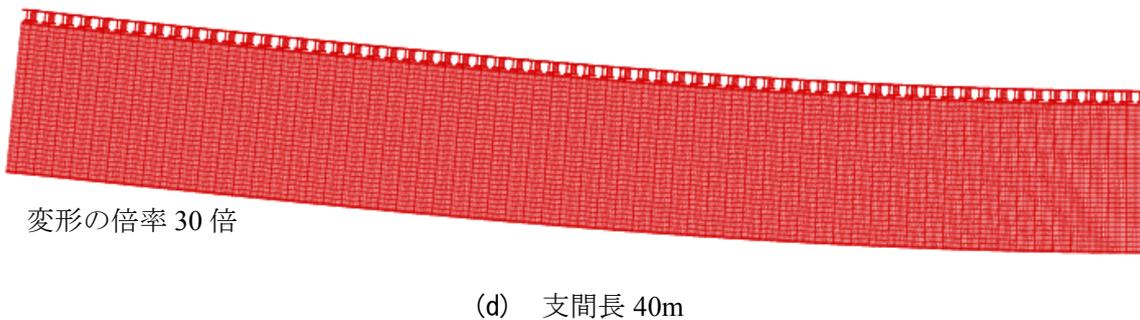
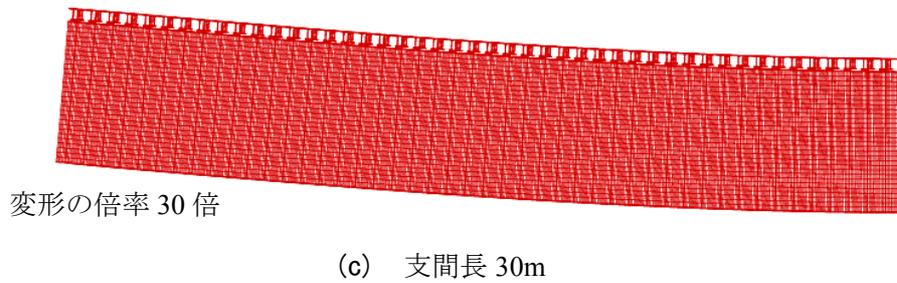
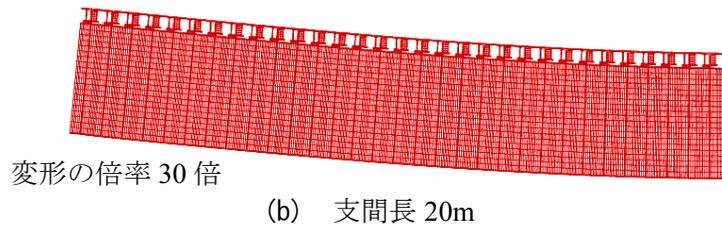
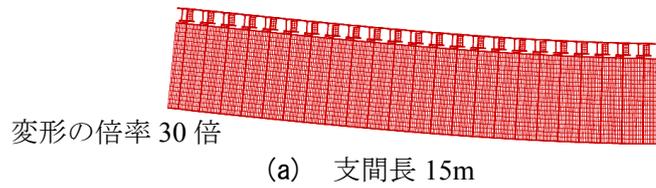


図-7.4 解析モデルの変形 (解析モデル C)

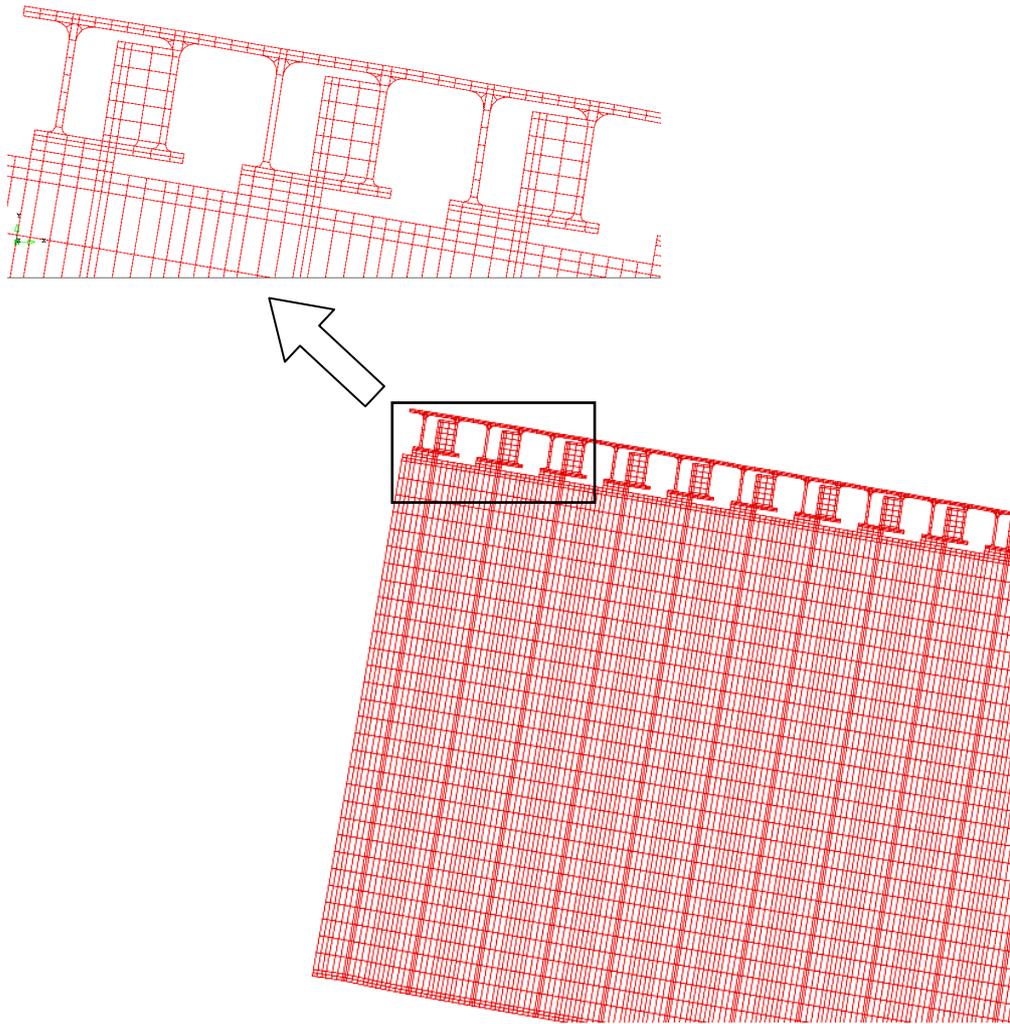


図-7.5 桁端の変形（解析モデルC）

7.3 バネ定数と合成度

FEM 解析が与える支間中央の鋼桁の中立軸のたわみ（支点のたわみを除いたもの）および式(4.48)が与える支間中央のたわみ（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）を表-7.4 に示す。FEM 解析が与えるたわみは、解析モデル A と C およびスタッドの幅に関わらず、式(4.48)が与える値より小さい。したがって、バネ定数の値は ∞ 、合成度は1となる。スタッドの本数が3本の場合に対して、完全合成に対する式(4.29)が与える鋼桁下フランジの下面のひずみ分布および完全合成に対する式(4.46)が与える鋼桁の中立軸のたわみ分布と解析モデルCに対するFEM値を図-7.6~7.9に示す。図-7.6, 7.7, 7.8, 7.9は、それぞれ支間長15m, 20m, 30m, 40mに対応する。各支間長において、式(4.29)が与える鋼桁下フランジの下面のひずみ値はFEM値にほぼあっており、式(4.46)が与える鋼桁の中立軸のたわみ分布はFEM値より若干大きなたわみとなっている。

2章の既往の理論^{7),8)}で得られた、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て、アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成を示す場合の、鋼桁換算の断面二次モーメント I_v' が次式で与えられる。

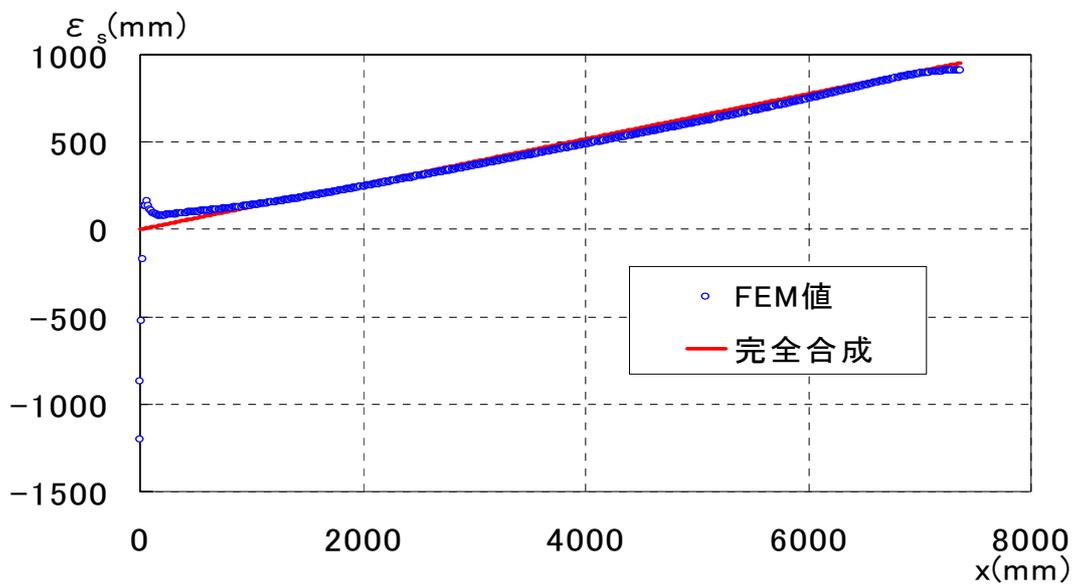
$$I_v' = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a^2}{n A_s + A_a} \quad (7.2)$$

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て、アルミニウム床版上板と鋼桁が完全合成を示す場合の支間中央のたわみが、 I_v' を式(4.48)の I_v に用いて求まる。このたわみを表-7.4 に示す。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は、FEM 値よりも小さな値となっている。

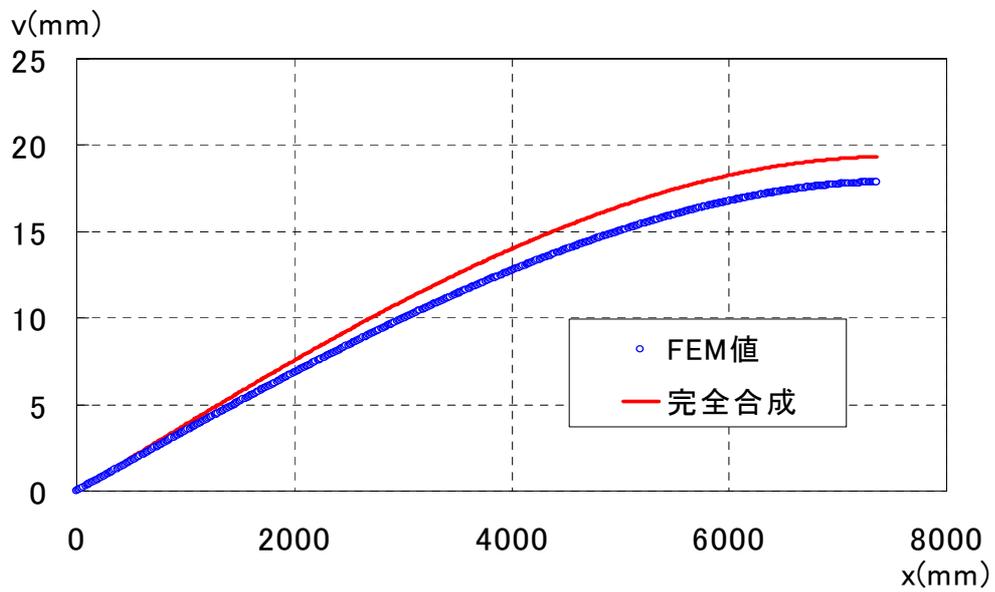
表-7.4 支間中央のたわみ

支間長 L (m)	理論値 (平面保持を仮定しない)	理論値 (平面保持を仮定)	解析モデルA			解析モデルC		
			スタッドの幅(mm)			スタッドの幅(mm)		
			17.28	34.55	51.83	17.28	34.55	51.83
15	19.3	16.6	18.6	18.4	18.3	18.0	17.9	17.8
20	24.6	22.0	23.6	23.4	23.3	23.1	23.0	22.9
30	31.0	29.0	30.0	29.9	29.8	29.7	29.6	29.5
40	49.6	47.1	48.0	47.9	47.8	47.6	47.5	47.4

単位 : (mm)

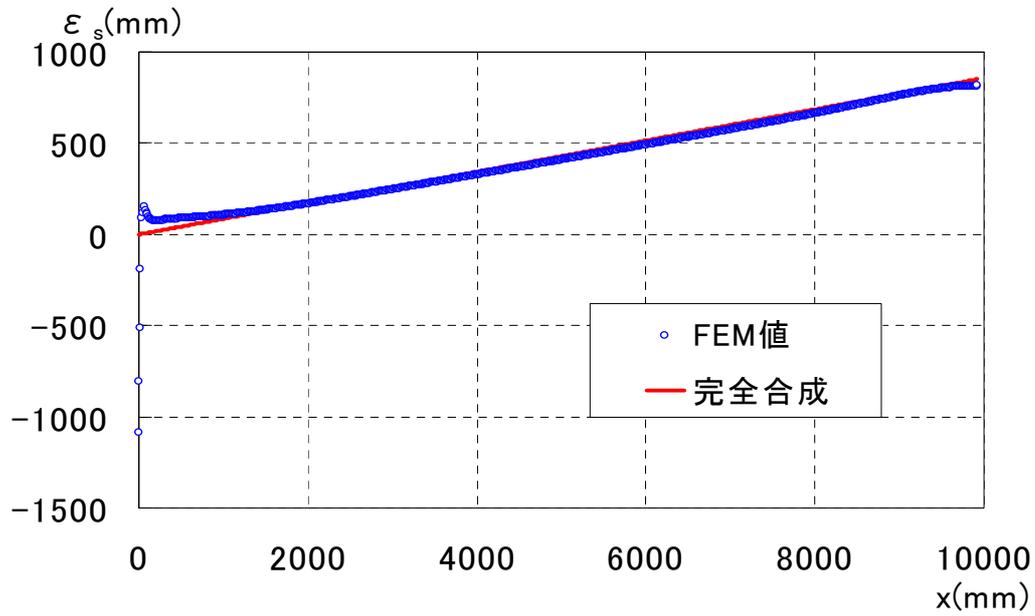


(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ

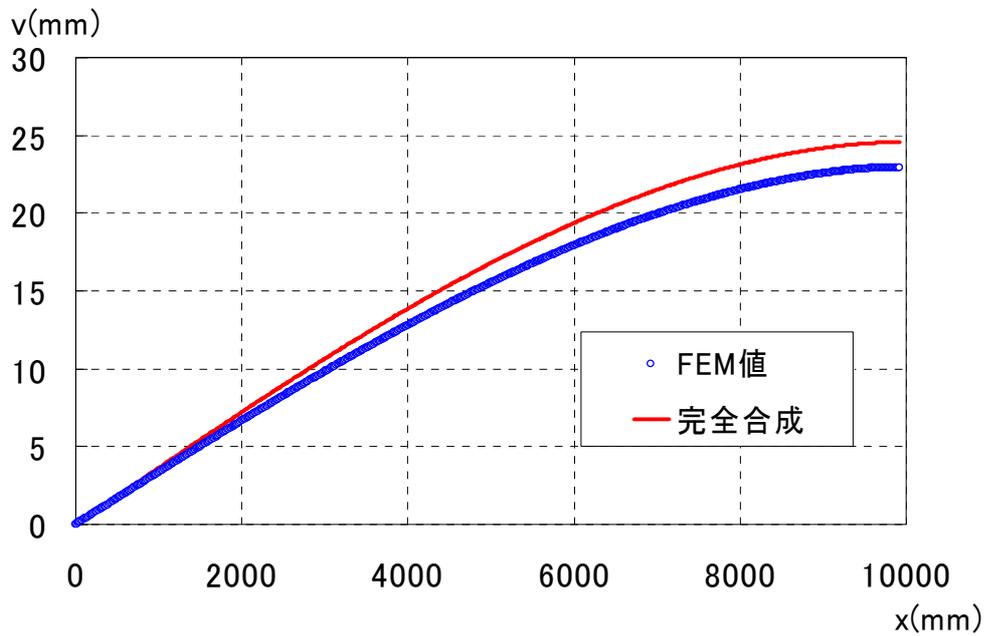


(b) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-7.6 支間長 15m の桁 (解析モデル C)



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ



(b) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-7.7 支間長 20m の桁 (解析モデル C)

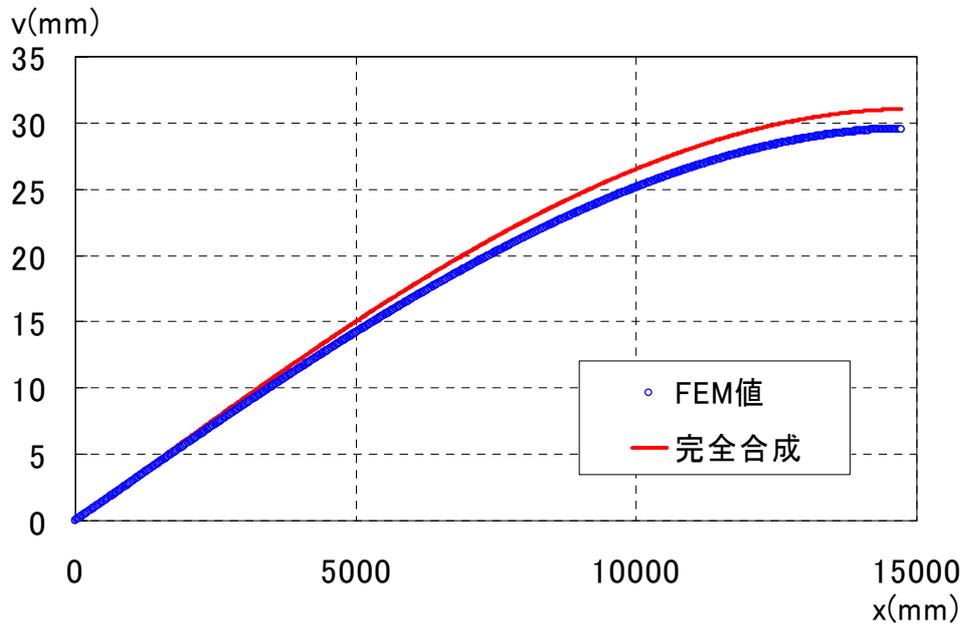
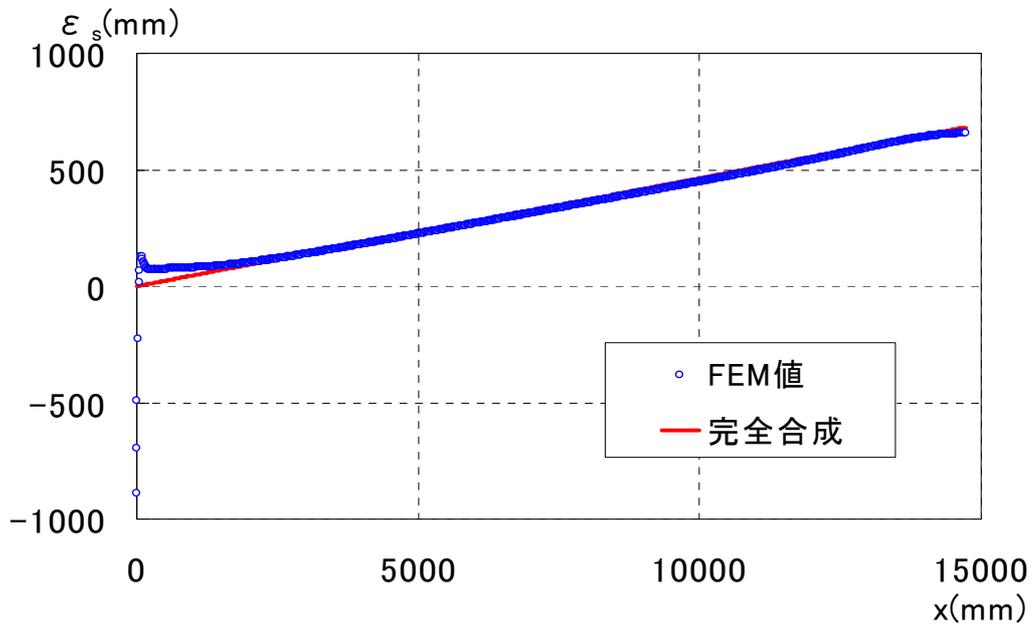
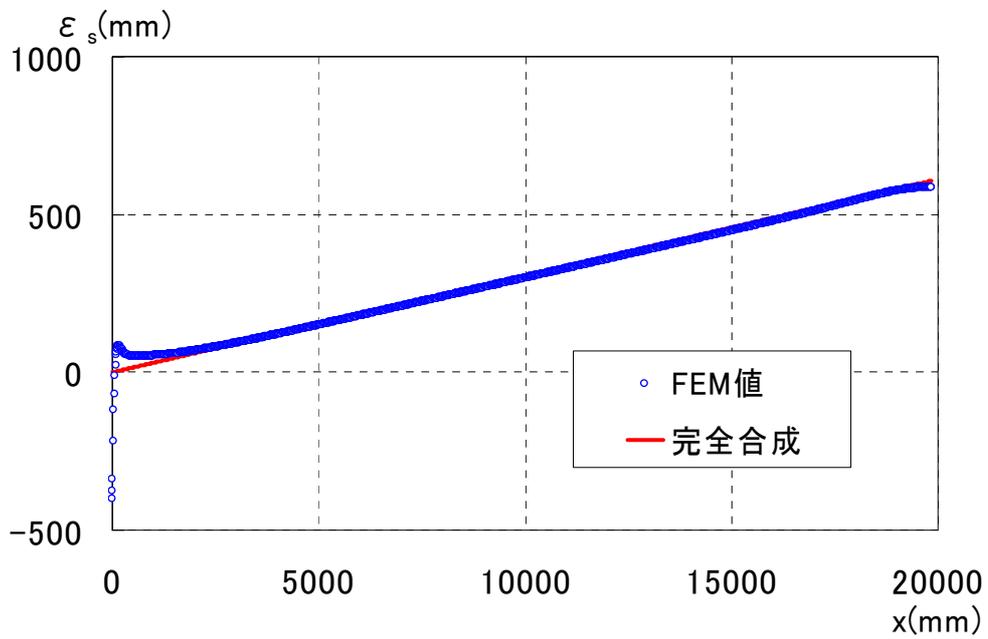
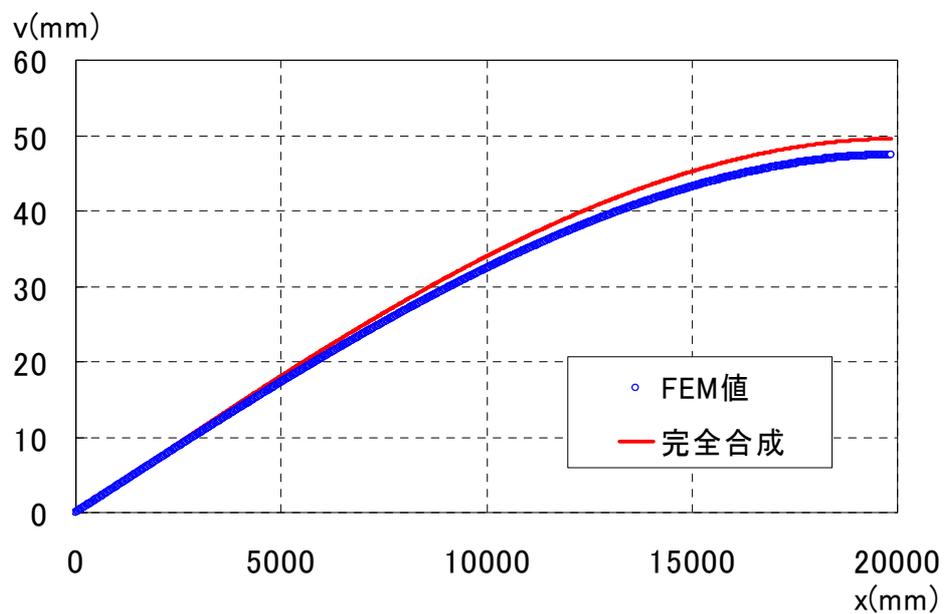


図-7.8 支間長 30m の桁 (解析モデル C)



(a) 鋼桁下フランジの下面のひずみ



(b) 鋼桁の中立軸のたわみ

図-7.9 支間長 40m の桁 (解析モデル C)

第8章 結論

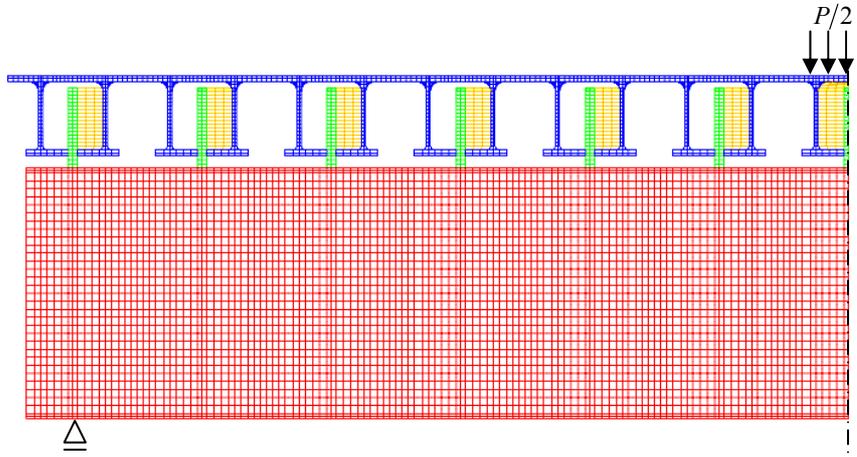
本研究では、開閉断面アルミニウム床版と鋼桁の合成作用を、FEM 解析による理論解析によって明らかにした。本研究で得られた主な結論を次に示す。

- (1) 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は成立していない。
- (2) 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成立していない場合に対する、アルミニウム床版と鋼桁に生じる軸力に関する微分方程式を誘導した [式 (4.18)参照]。この式は、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て誘導された既存の式と同形であるが、係数の内容が既存のものと異なる。
- (3) アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとを連結する連結材が同じであっても、バネ定数は、アルミニウム床版と鋼桁の断面寸法および桁の支間長によって変化する。
- (4) 既往の研究で製作された試験体のバネ定数と合成度を明らかにした。
- (5) 既往の研究で開発されたアルミニウム床版と鋼桁との連結構造が実橋に使用された場合、アルミニウム床版と鋼桁との合成度は完全合成であることを示した。

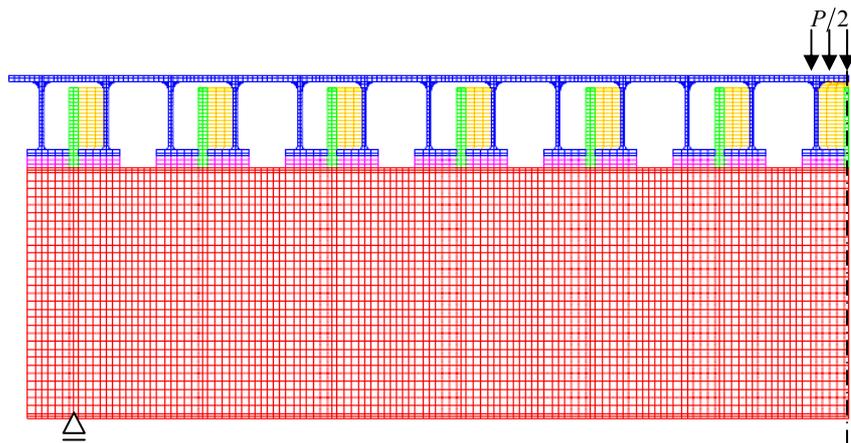
参考文献

- 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，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，第54巻，第9号，pp.380-387，2004.
- 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，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，No.4，pp.655-666，2007.
- 5) 大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版のトラックタイヤ載荷試験による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.56A，2010.（印刷中）
- 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，pp.199-206，2003.
- 7) 大倉一郎，石川敏之，高木真広，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.
- 8) 石川敏之，高木真広，大倉一郎，武野正和：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，第7回複合構造の活用に関するシンポジウム，土木学会，複合構造委員会，CD，No.63，2007.
- 9) TNO Building and Construction Research：DIANA Release 9.3，Delft，Netherland，2008.
- 10) 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る応力と反り，ALST 研究レポート5，2008.

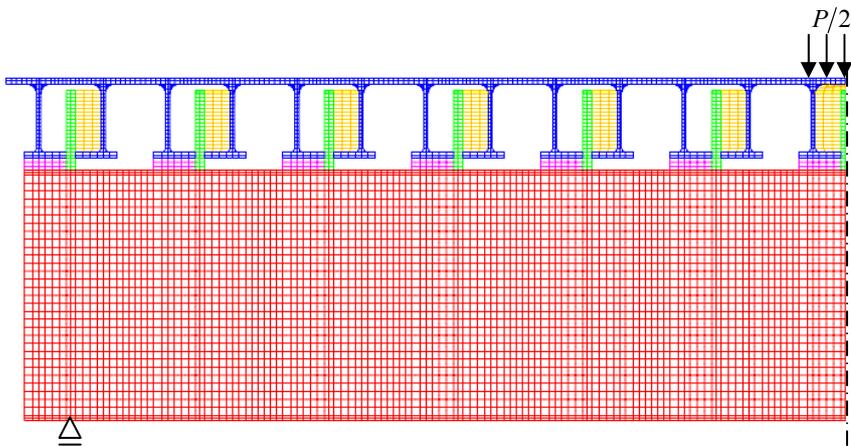
付録 A 要素分割



(a) 解析モデル A

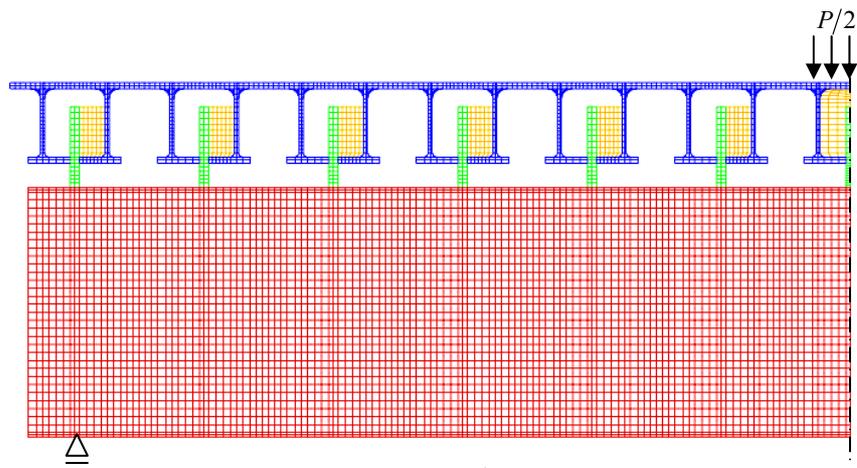


(b) 解析モデル B

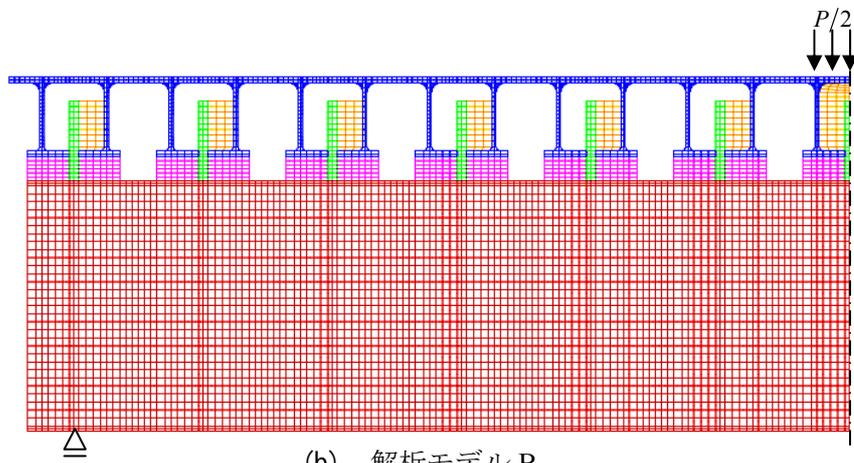


(c) 解析モデル C

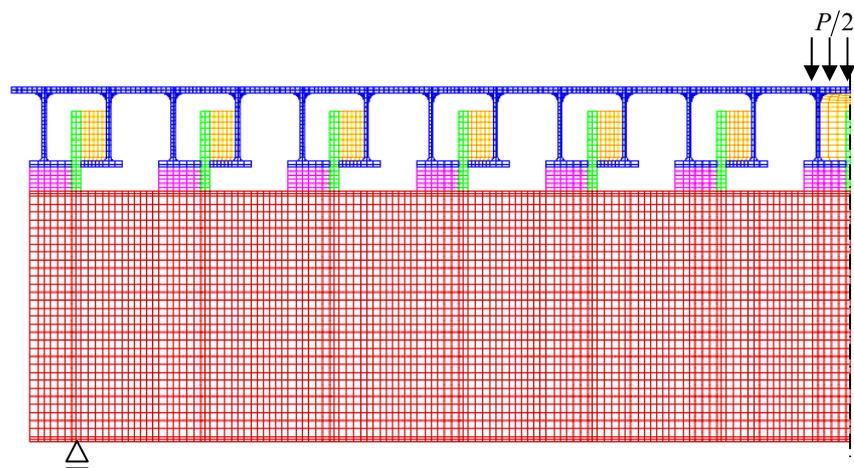
図-A.1 試験体 II



(a) 解析モデル A



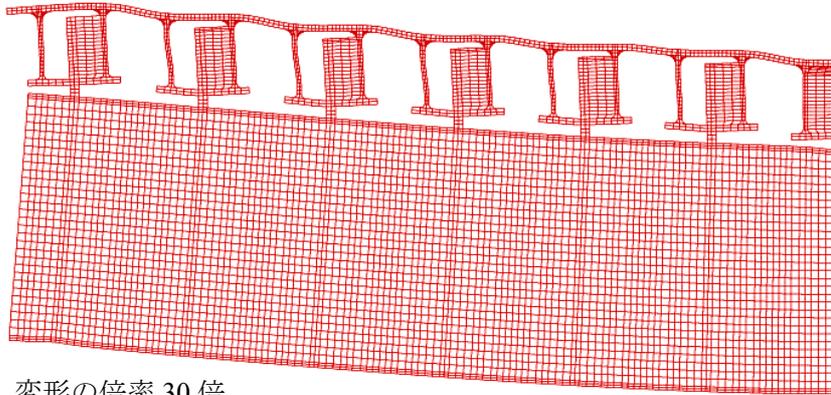
(b) 解析モデル B



(c) 解析モデル C

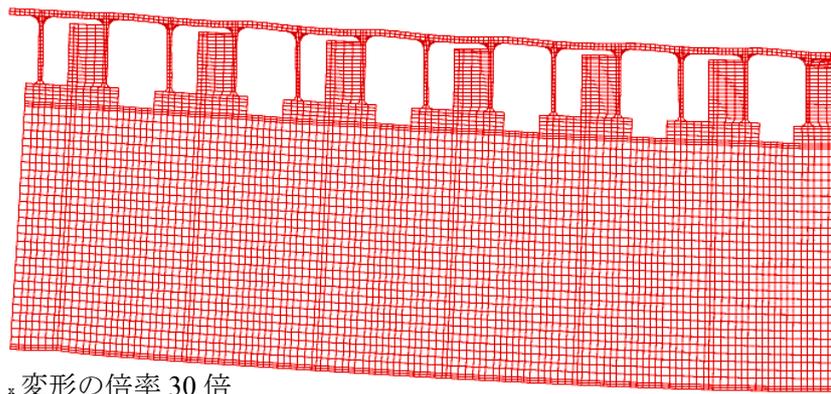
図-A.2 試験体Ⅲ

付録 B 解析モデルの変形



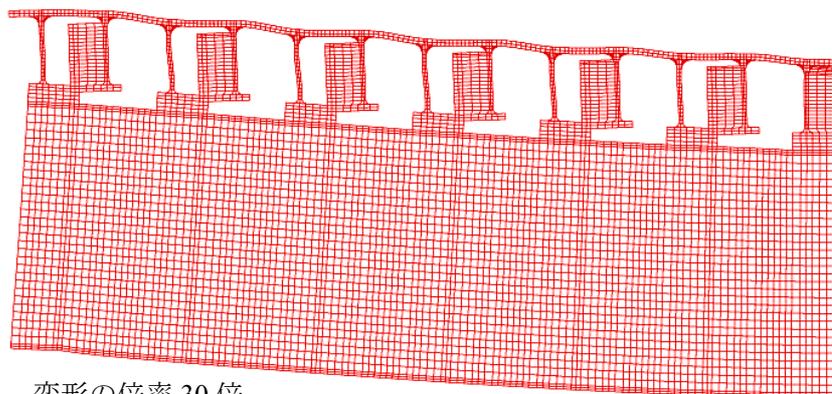
変形の倍率 30 倍

(a) 解析モデル A



変形の倍率 30 倍

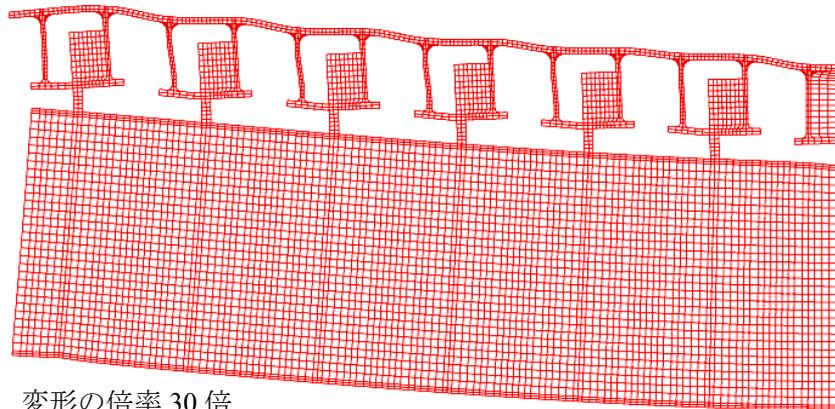
(b) 解析モデル B



変形の倍率 30 倍

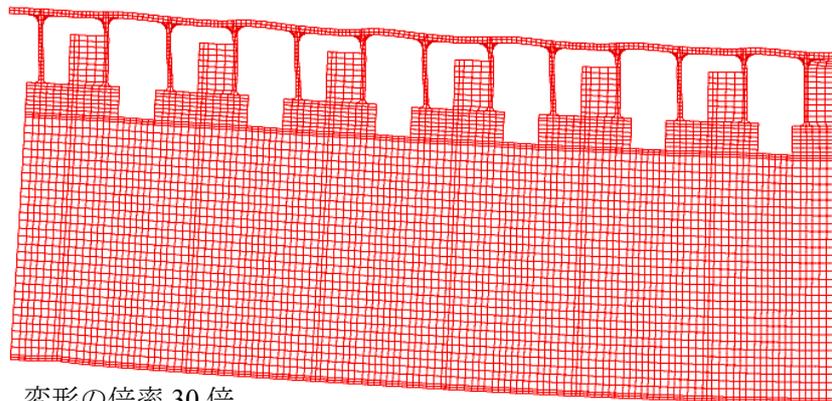
(c) 解析モデル C

図-B.1 試験体 II



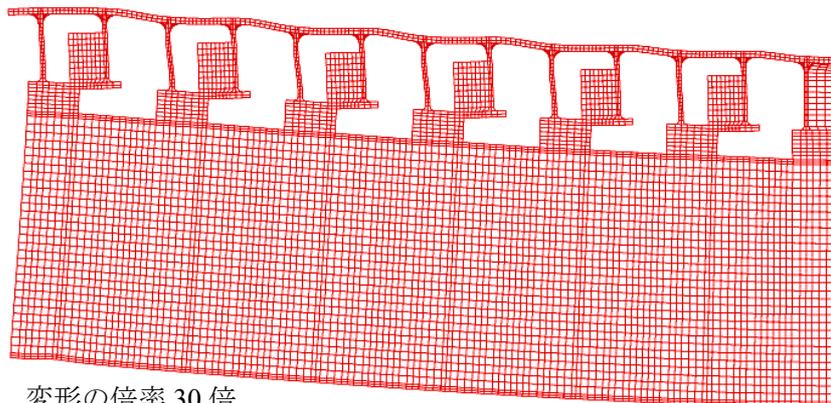
変形の倍率 30 倍

(a) 解析モデル A



変形の倍率 30 倍

(b) 解析モデル B



変形の倍率 30 倍

(c) 解析モデル C

図-B.2 試験体Ⅲ

付録C ひずみ分布（試験体Ⅱ）

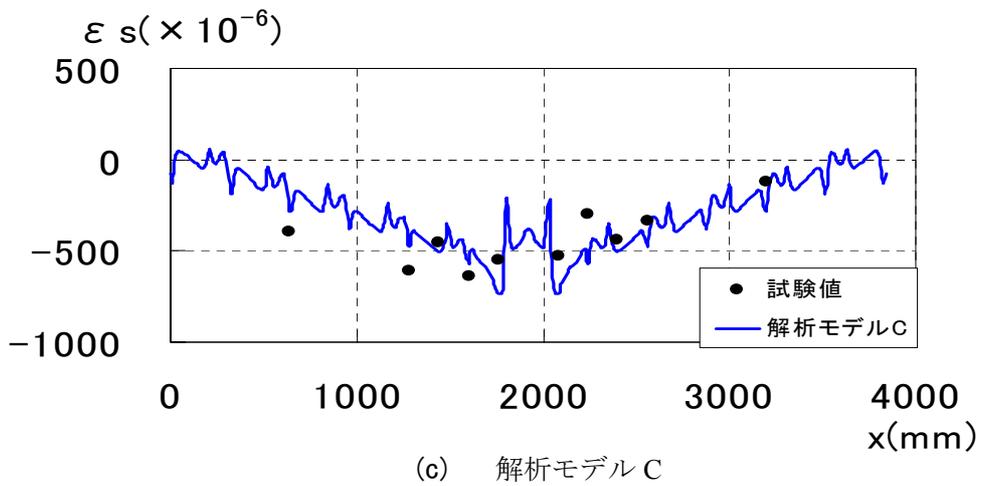
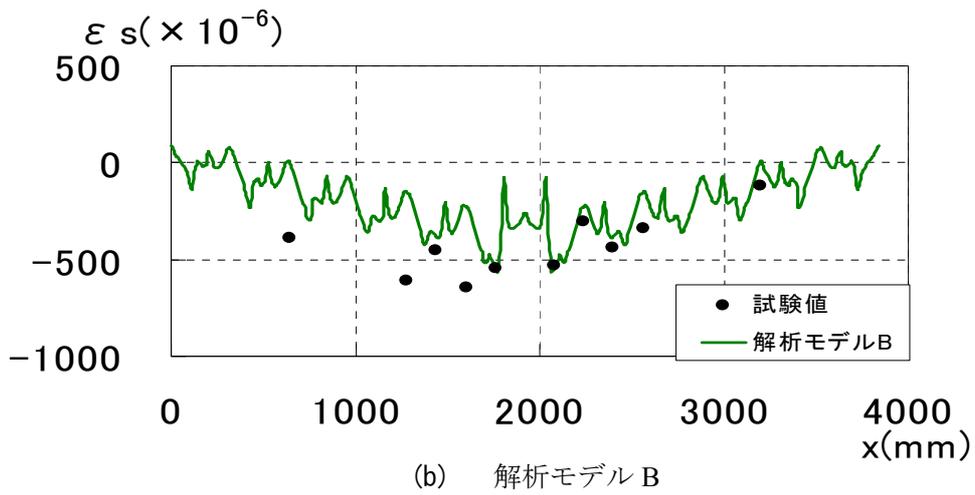
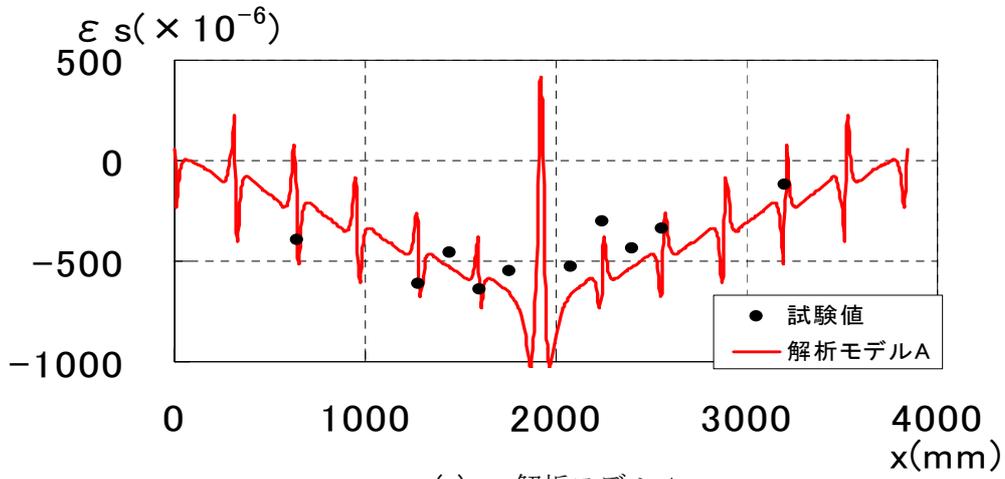


図-C.1 鋼桁上フランジの下面

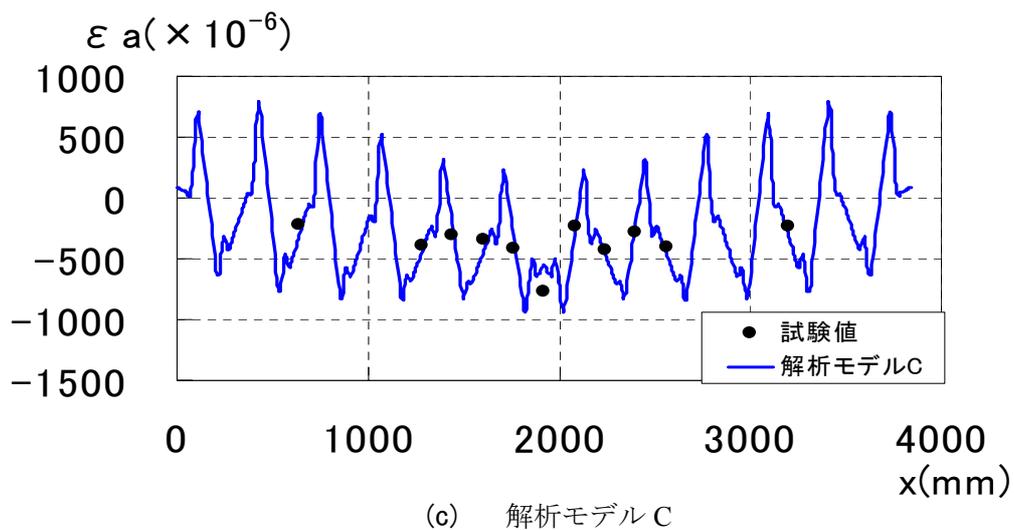
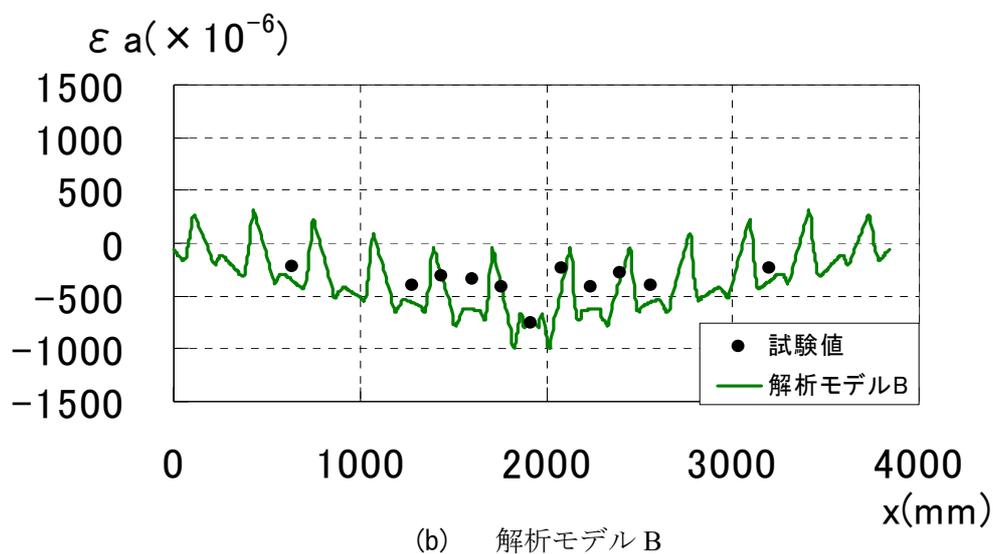
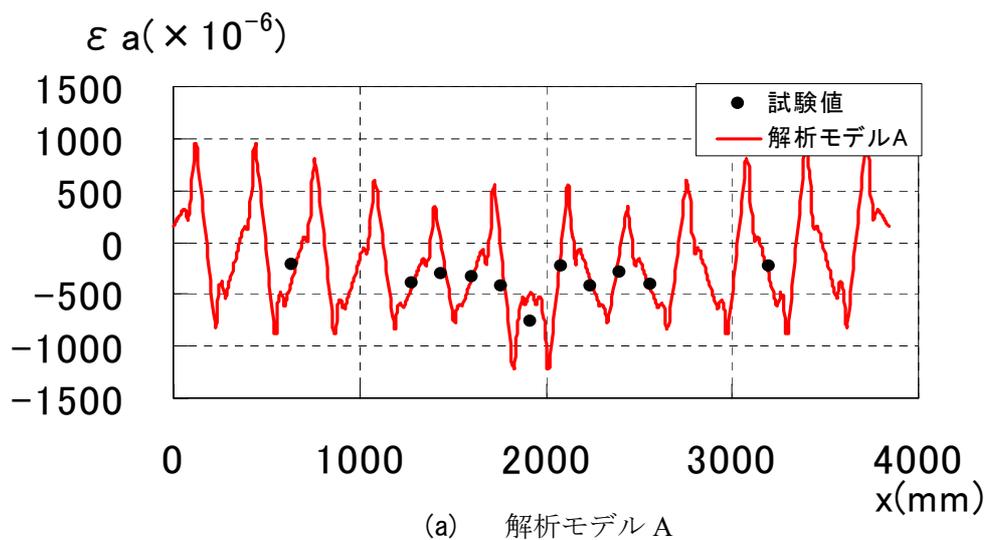


図-C.2 アルミニウム床版上板の上面

付録D ひずみ分布（試験体Ⅲ）

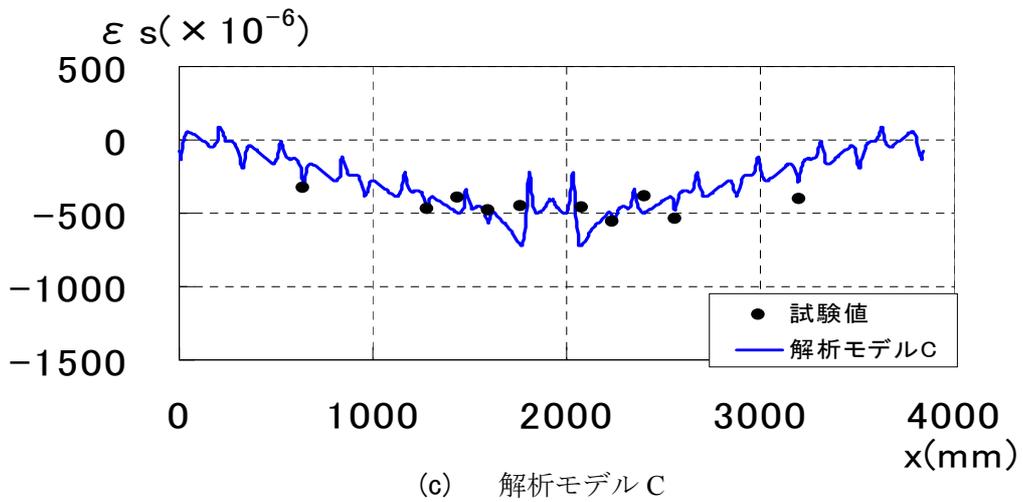
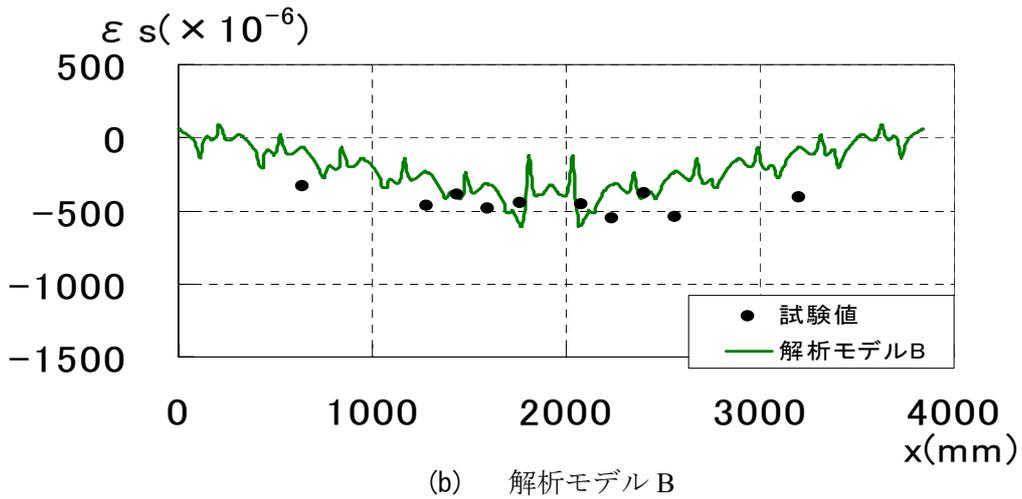
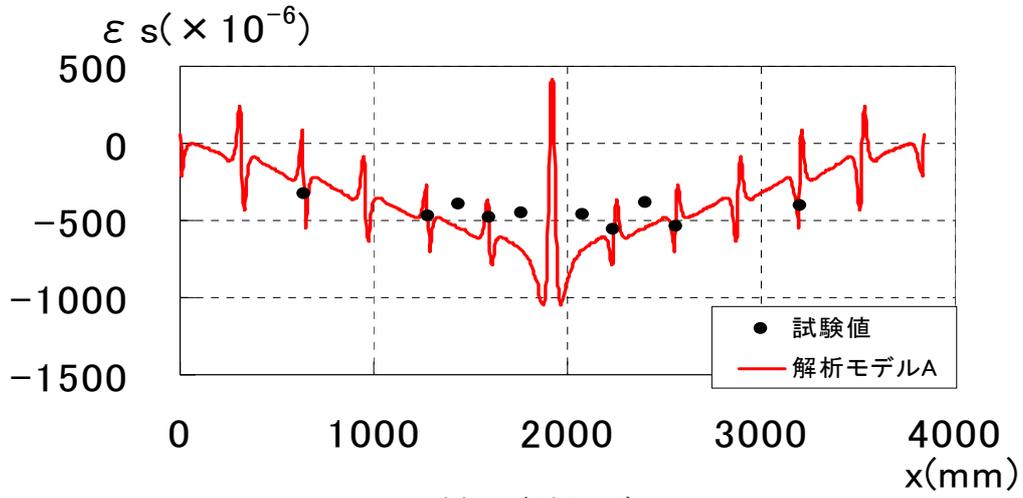


図-D.1 鋼桁上フランジの下面

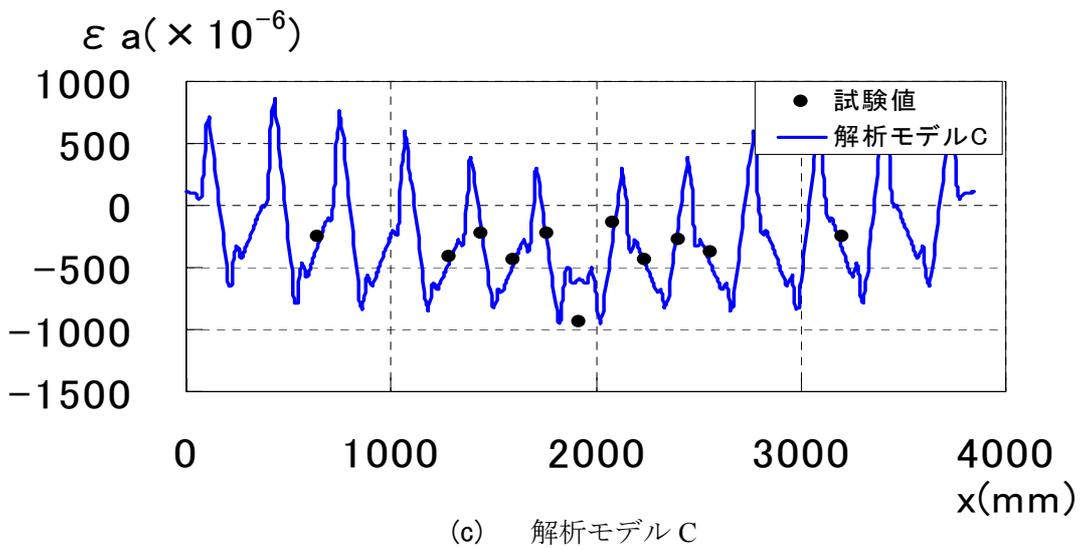
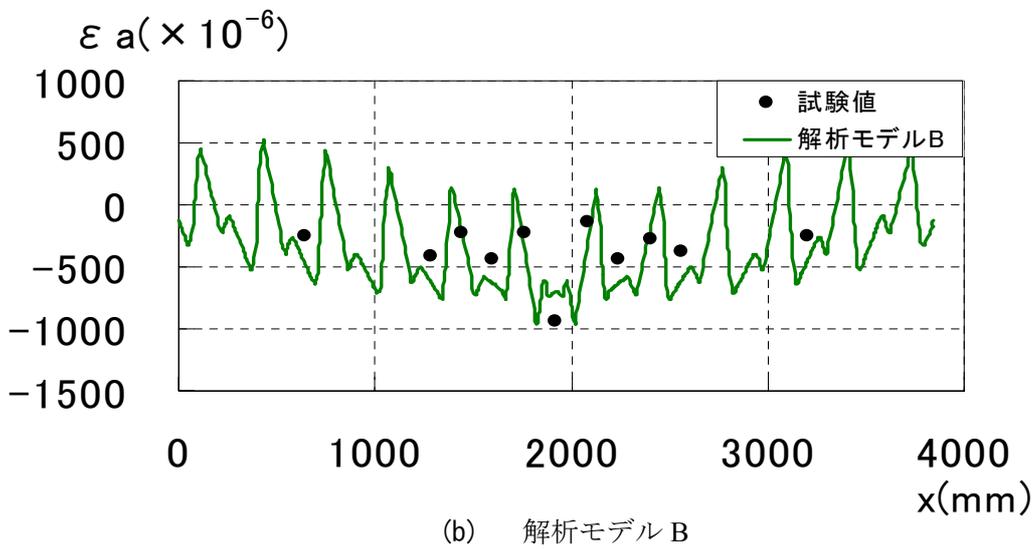
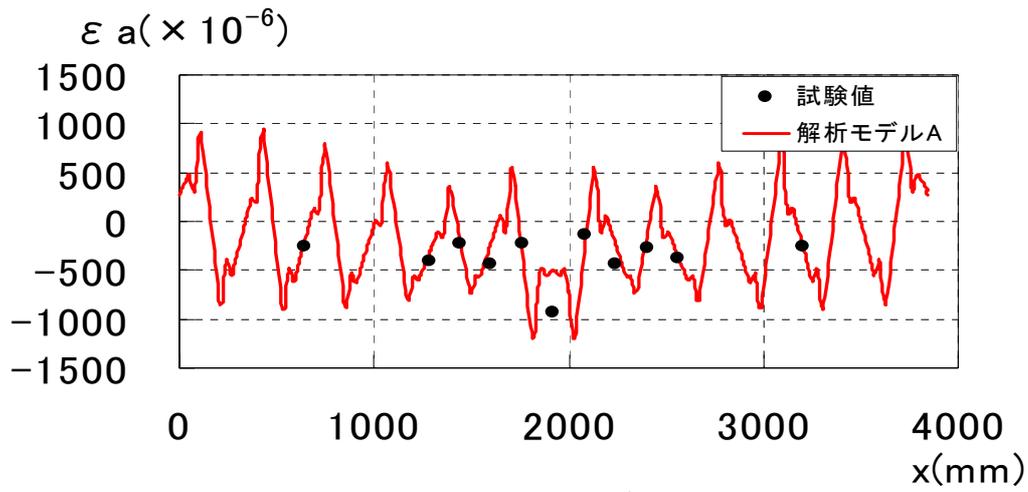
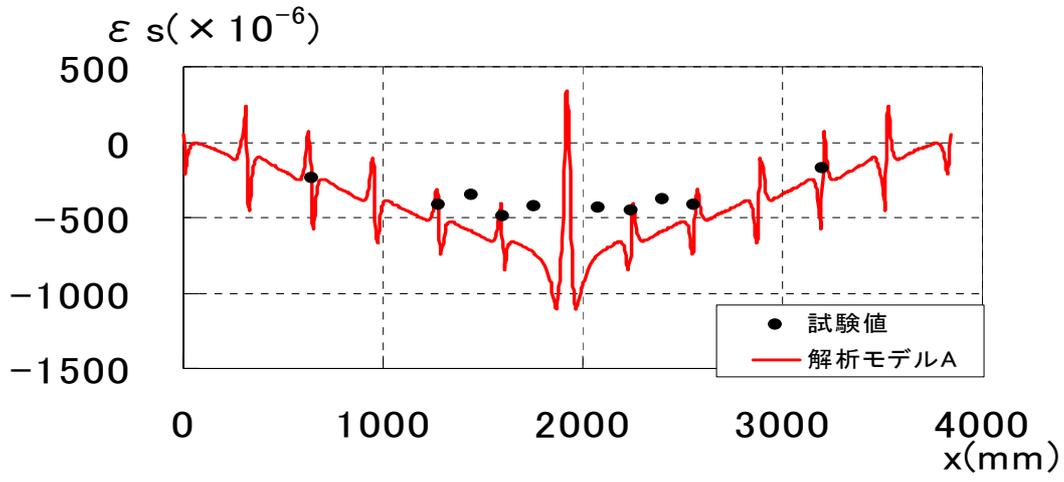
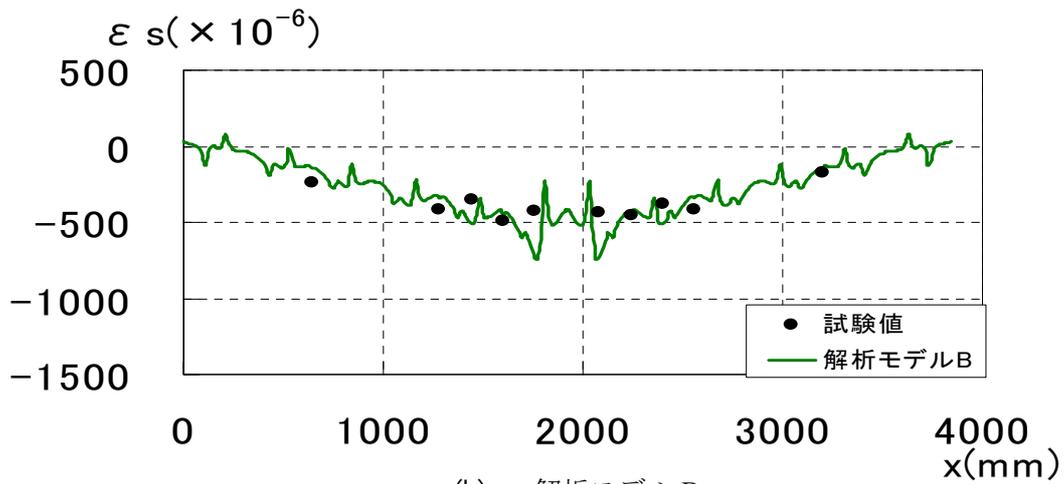


図-D.2 アルミニウム床版上板の上面

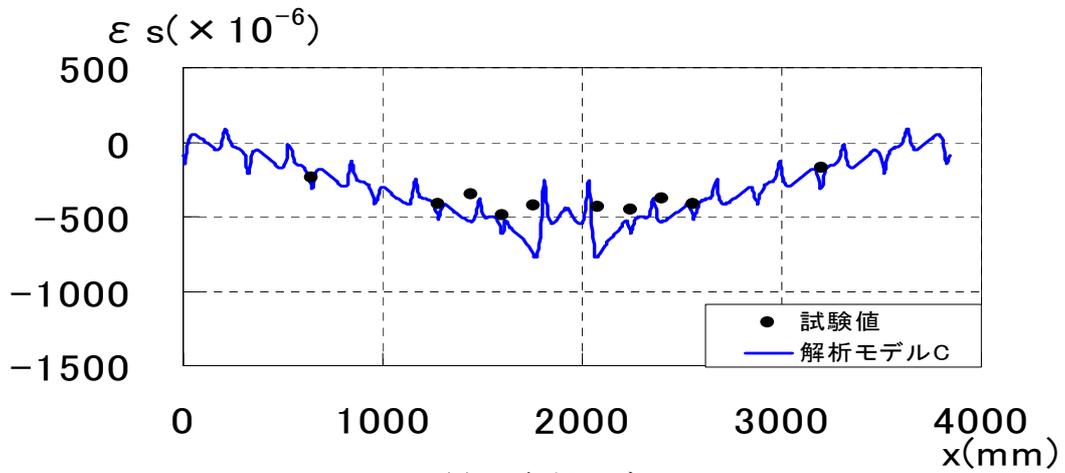
付録E ひずみ分布（試験体IV）



(a) 解析モデル A



(b) 解析モデル B



(c) 解析モデル C

図-E.1 鋼桁上フランジの下面

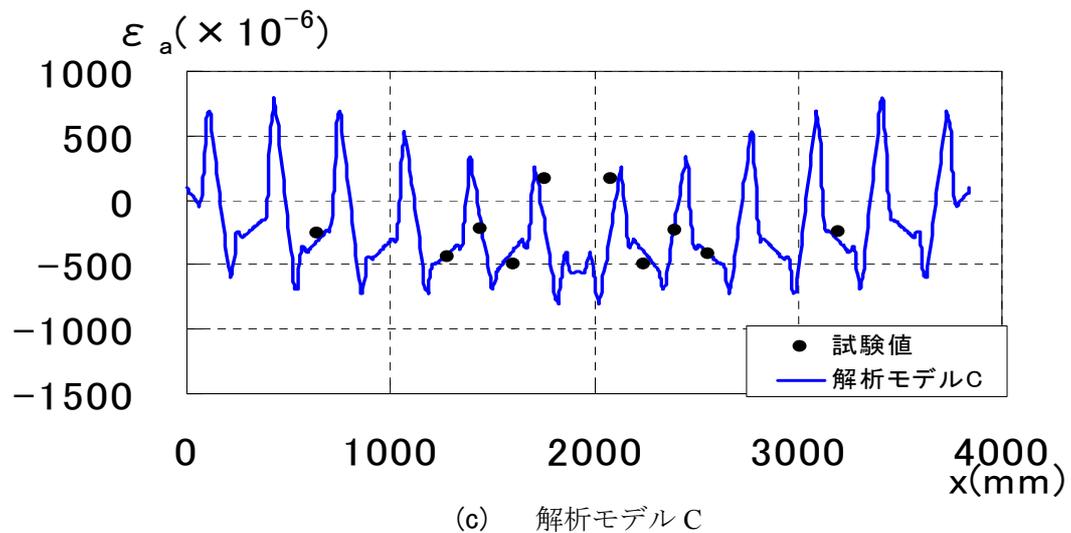
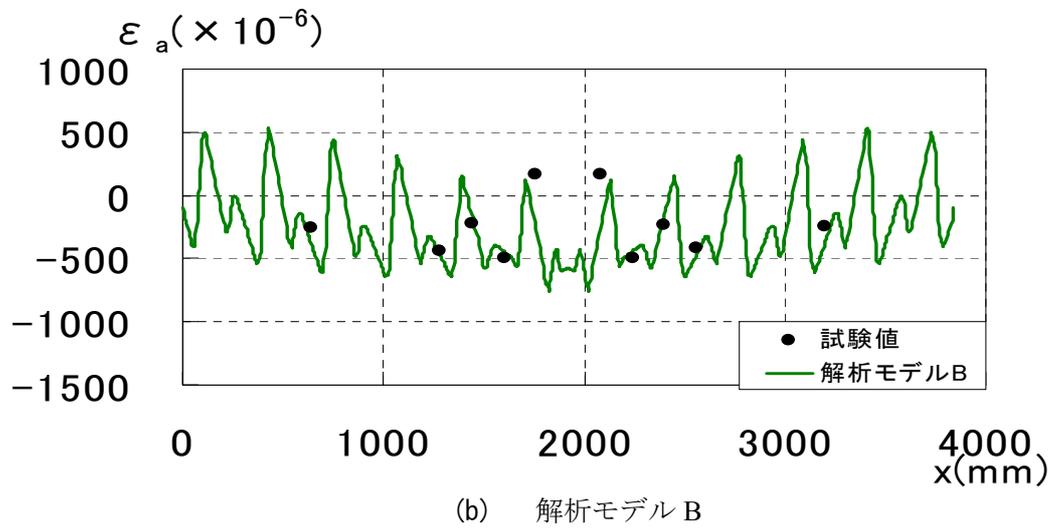
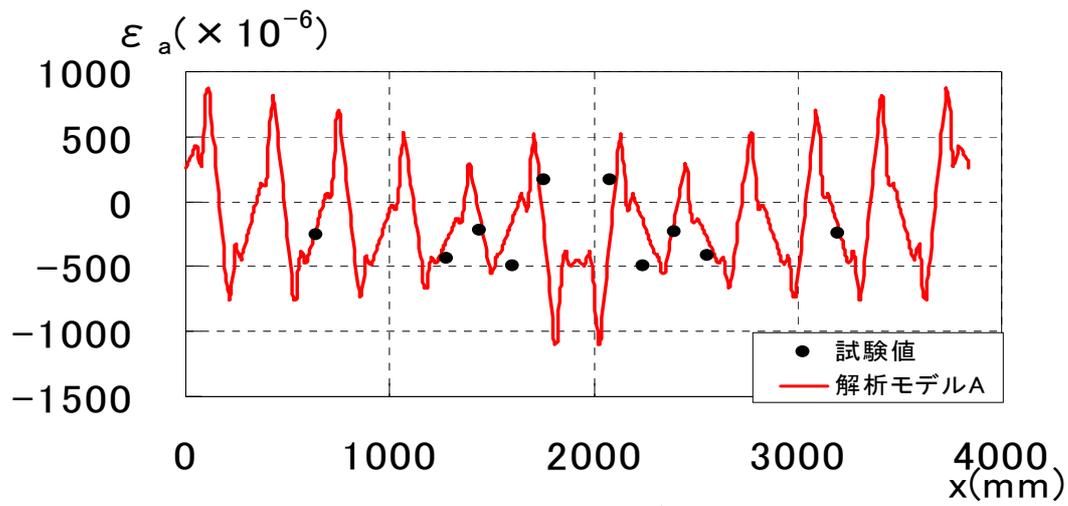


図-E.2 アルミニウム床版上板の上面