

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
—FEM 解析による検討—

ALST 研究レポート 30

2013 年 4 月

大阪大学大学院工学研究科

藤本倫人，大倉一郎

概要

本研究は、「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与える影響」ALST 研究レポート, No.25, 2012 年 7 月に対して, FEM 解析による検討を追加したものである. 同研究レポートでは触れられなかった水平せん断力の特性についても記述している.

目次

第1章	序論	・・・1	
第2章	試験体	・・・6	
第3章	試験体の特性値	・・・8	
	3.1	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	・・・8
	3.2	中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力，降伏荷重	・・・8
第4章	FEM 解析モデル	・・・12	
第5章	試験結果と FEM 解析結果の比較	・・・14	
	5.1	たわみ	・・・14
	5.2	鋼桁に生じるひずみ	・・・15
	5.3	アルミニウム床版に生じるひずみ	・・・21
第6章	水平せん断力の特性	・・・29	
	6.1	水平せん断力の理論値	・・・29
	6.2	試験体に生じる水平せん断力	・・・29
	6.3	試験値と FEM 値の比較	・・・31
第7章	結論	・・・33	
	参考文献	・・・34	
付録 A	荷重とたわみの関係	・・・36	
付録 B	鋼桁下フランジの下面のひずみ分布	・・・37	
付録 C	鋼桁上フランジの下面のひずみ分布	・・・38	
付録 D	鋼桁断面のひずみ分布	・・・39	
付録 E	合成桁の中立軸の分布	・・・43	
付録 F	アルミニウム床版ウェブの表面のひずみ分布	・・・44	
付録 G	荷重と水平せん断力の関係	・・・45	
付録 H	各試験体の水平せん断力の弾性限界	・・・46	
付録 I	既往の試験体の荷重と水平せん断力の関係	・・・47	

第1章 序論

平成22年道路施設現況調査¹⁾によれば、2011年現在、橋長15m以上の橋が約157000橋あり、そのうち建設後50年以上経過した橋が2011年現在約15000橋、2021年および2031年にはそれぞれ約44000橋、約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を必要とする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替えが必要な橋も出てくることが予想される。他方、1993年に道路構造令が改正され、設計自動車荷重が196kNから245kNに変更されたことにより、既存のコンクリート床版と桁の補強が急がれている。鉄筋コンクリート床版を取り替える場合、現行の道路橋示方書²⁾を適用すると床版厚を厚くせねばならず、自重が増加するために鋼桁と下部工への荷重が増加し、耐震性にも問題が出てくる。この対策として、鉄筋コンクリート床版に対して重量が約1/5のアルミニウム床版で取り替えることにより、これらの問題を解決することができないかと考えられた³⁾。新設の場合、建設重機の小型化および下部工の小型化による建設費の削減と工期短縮、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といった利点が挙げられる。

このような背景で、2000年頃、道路橋用アルミニウム床版に関する研究が開始された⁴⁾。道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋のイメージを図-1.1、アルミニウム床版の断面形状を図-1.2に示す。図-1.2に示す、中空の部材が橋軸直角方向に並ぶような形式で、複数の鋼主桁上にアルミニウム床版が設置される。アルミニウム合金材料はA6061-T6であり、幅320mm、高さ200mmの中空の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が製作される⁵⁾。アルミニウム床版と鋼桁との連結構造⁶⁾、現場継手⁷⁾、地覆定着⁸⁾、摩擦攪拌接合部の疲労強度⁹⁾、¹⁰⁾に関する研究が行われ、2008年、静岡県富士市にある施工技術総合研究所において、図-1.3に示す道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験の公開実験が行われ、同床版には疲労亀裂が発生せず、開発されたアルミニウム床版は疲労耐久性が高いことが実証された¹¹⁾。

その後、「道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋—設計・製作・施工ガイドライン¹²⁾」が日本アルミニウム協会から2011年3月に発刊された。さらに、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2011年4月に建設された¹³⁾。

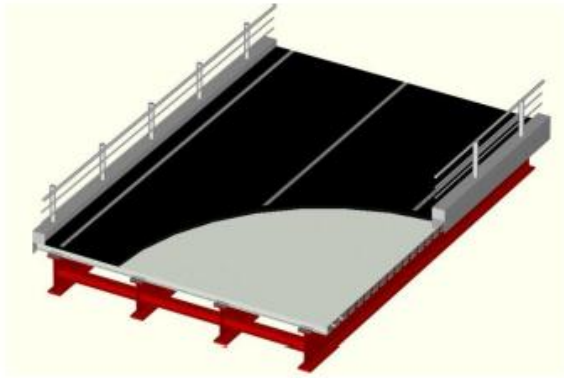


図-1.1 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋のイメージ

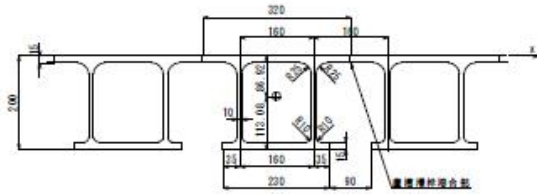


図-1.2 アルミニウム床版の断面形状

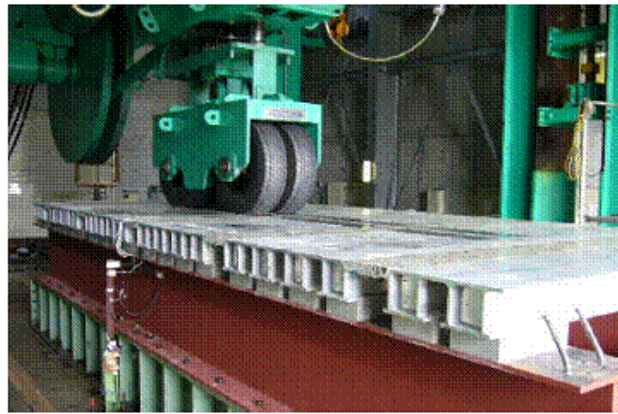


図-1.3 道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験



図-1.4 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図-1.5に示す。鋼桁上フランジに溶接された頭付きスタッドが、アルミニウム床版の下フランジに設けられた開口から閉断面内に挿入され、対向するアルミニウム製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、両者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。

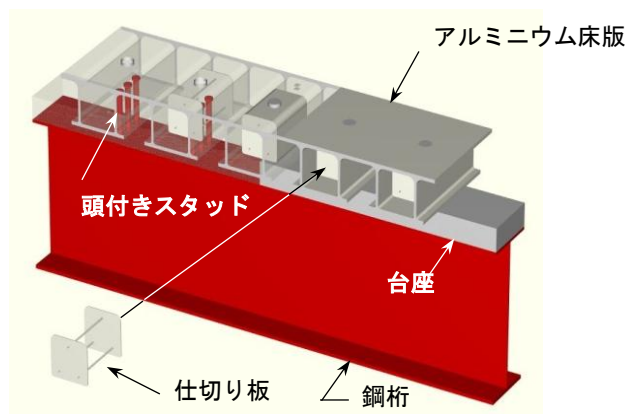


図-1.5 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

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、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行われた¹⁴⁾。頭付きスタッドの本数は1個所当たり3本で、コンクリート製の台座に対して30mm, 60mm, 100mmの高さの試験体が製作された。試験体の合成作用を評価するために、次式に示すように、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に生じる水平せん断力と両者の水平変位差との間に比例関係が仮定された。

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

ここに、図-1.6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水平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水平変位

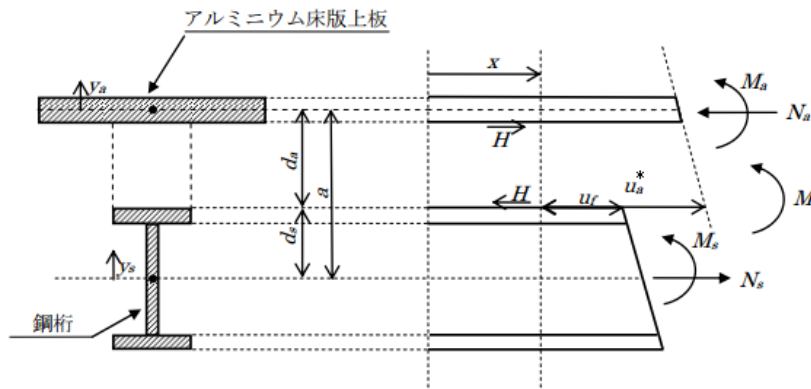


図-1.6 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる水平せん断力と水平変位

式(1.1)を用いて，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，荷重とたわみの関係が与えられた．この関係を用いて，試験体の載荷試験の結果から水平せん断バネの値が推定された．しかし，得られた水平せん断バネの値は，台座の高さと規則的な関係を示さなかった¹⁴⁾．その原因として，図-1.5 に示すように，アルミニウム床版において，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)で採用された，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の仮定を設けることの妥当性が疑われた．そこで，式(1.1)が次式に修正された¹⁵⁾．

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

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水平変位およびアルミニウム上板の中立面の水平変位

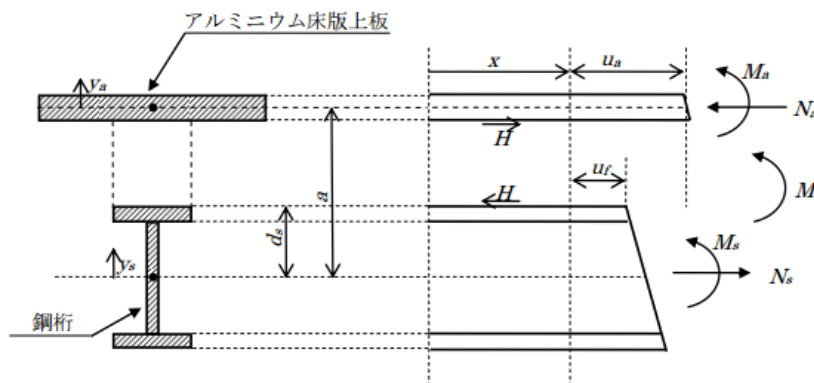


図-1.7 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる水平せん断力と水平変位

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が設けられていない。式(1.2)を用いて、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、これから得られた荷重とたわみの関係を用いて推定された水平せん断バネの値は、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¹⁵⁾。

その後、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が調べられ、アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の合成作用が明らかにされた^{16),17)}。

他方、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与える影響を明らかにするために、頭付きスタッドが1箇所当たり1本、2本、3本配置された、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行われた¹⁸⁾。本研究は、この試験体をFEM解析によって解き、試験結果と解析結果とを比較することにより、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与える影響を明らかにする。

第2章 試験体

既往の静的載荷試験で使用されたアルミニウム床版と鋼桁から成る試験体を図-2.1 に示す¹⁸⁾。鋼桁は、高さ 400mm、幅 200mm の H 形鋼である。台座には ECC（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）を使用し、高さは 30mm である。閉断面内に設置された対向するアクリル仕切り板の間に無収縮モルタルが充填されている。通常、仕切り板にはアルミニウム板が使用されるが、充填モルタルのひび割れを観察するためにアクリル板が使用されている。

試験体は、頭付きスタッドの本数が 1 箇所当たり 1 本、2 本、3 本の 3 体である。これらの試験体を、それぞれ試験体 I、II、III と呼ぶ。各試験体の頭付きスタッドの配置位置を図-2.2 に示す。使用された頭付きスタッドの寸法は、直径 22mm、長さ 150mm である。頭付きスタッドの配置間隔は全試験体とも 320mm である。アクリル仕切り板の間隔および頭付き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寸法を図-2.3 に示す。アルミニウム合金材(A6061S-T6)、鋼材(SS400)、台座 (ECC)、充填モルタルの材料特性を表-2.1 に示す。支間中央の、桁長手方向 200mm、奥行方向 300mm の領域に荷重が載荷された。

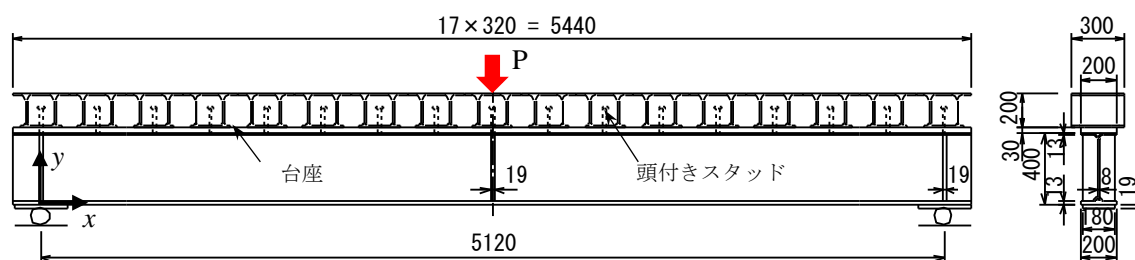


図-2.1 試験体

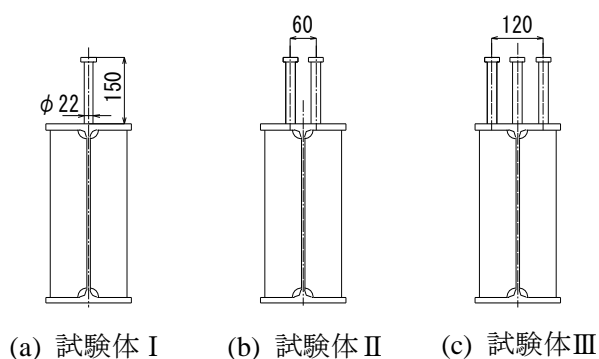


図-2.2 頭付きスタッドの配置位置

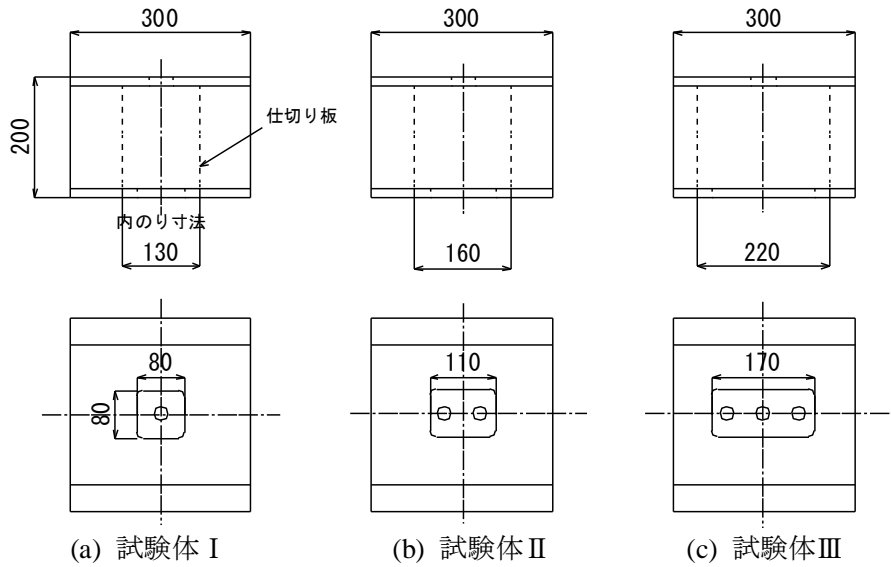


図-2.3 仕切り板の間隔と開口の寸法

表-2.1 材料特性

(a) アルミニウム合金材(A6061S-T6)

部位	母材	摩擦攪拌接合部
引張強さ (MPa)	316	259
0.2%耐力 (MPa)	290	167
伸び (%)	15	-
ヤング係数 (GPa)	71.4	71.8
ポアソン比	0.312	0.312

(b) H形鋼(SS400)と頭付きスタッド(CH16A)

部材	H形鋼	頭付きスタッド
引張強さ (MPa)	446	461
降伏応力 (MPa)	323	324
伸び (%)	32	36
ポアソン比	0.300	0.300

(c) 台座 (ECC)

材齢 (日)		91
圧縮試験	ヤング係数(GPa)	15.39
	圧縮強度(MPa)	34.2
	終局ひずみ (%)	0.332
	ポアソン比	0.172
一軸引張試験	ヤング係数(GPa)	13.02
	降伏強度 (MPa)	3.86
	引張強度 (MPa)	4.78
	終局ひずみ (%)	1.75

(d) 充填モルタル

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

第3章 試験体の特性値

3.1 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

第1章で述べたように、頭付きスタッドを用いて連結されたアルミニウム床版と鋼桁との合成作用は、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に設けられた水平せん断バネによって表され、両者の間に平面保持の仮定を設ける場合より、設けない場合の方が試験結果を適切に評価できることが示された¹⁵⁾。水平せん断バネが無限大の場合、すなわちアルミニウム床版と鋼桁とが完全合成の場合、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場合「仮定 A」および設けない場合「仮定 B」に対するひずみ分布をそれぞれ図-3.1(a), (b)に示す。仮定 A に対するひずみ分布は、アルミニウム床版上板の上面から鋼桁下フランジの下面まで直線である。他方、仮定 B に対するひずみ分布は、台座の上面から鋼桁下フランジの下面まで直線で、アルミニウム床版上板の中立軸の位置のひずみが鋼桁上フランジの上面の位置のひずみに等しい。

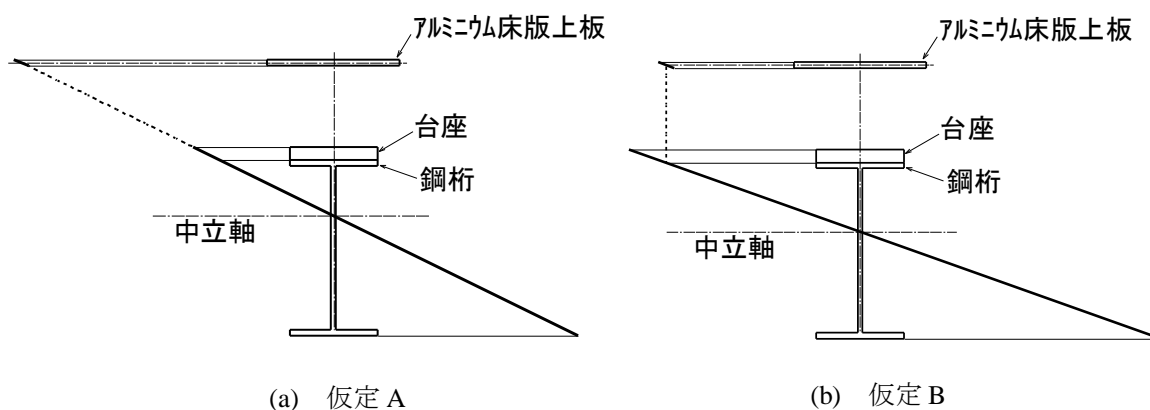


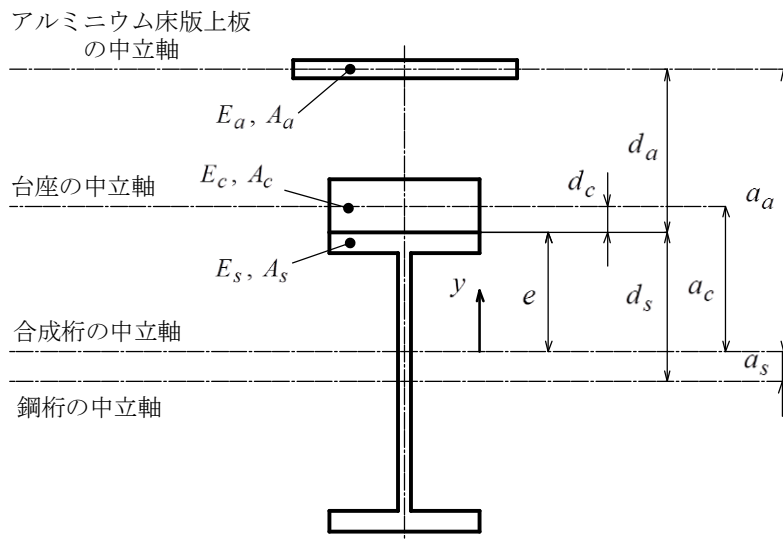
図-3.1 完全合成の場合のひずみ分布

3.2 中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力，降伏荷重

アルミニウム床版と鋼桁とが完全合成の場合，仮定 A と B に対する，合成桁の中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力の算定式を表-3.1 に示す。

表-3.1 合成桁の中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力の算定式

	仮定 A	仮定 B
中立軸	$e = \frac{E_s A_s d_s - E_c A_c d_c - E_a A_a d_a}{E_s A_s + E_c A_c + E_a A_a} \quad (3.1)$	$e = \frac{E_s A_s d_s - E_c A_c d_c}{E_s A_s + E_c A_c + E_a A_a} \quad (3.6)$
鋼換算断面二次モーメント	$I_v = I_s + \frac{I_c}{n_c} + \frac{I_a}{n_a} + A_s a_s^2 + \frac{A_c}{n_c} a_c^2 + \frac{A_a}{n_a} a_a^2 \quad (3.2)$	$I_v = I_s + \frac{I_c}{n_c} + \frac{I_a}{n_a} + A_s a_s^2 + \frac{A_c}{n_c} a_c^2 + \frac{A_a}{n_a} e a_a \quad (3.7)$
応力	$\sigma_s = -\frac{M}{I_v} y \quad (3.3)$	$\sigma_s = -\frac{M}{I_v} y \quad (3.8)$
	$\sigma_c = -\frac{M}{n_c I_v} y \quad (3.4)$	$\sigma_c = -\frac{M}{n_c I_v} y \quad (3.9)$
	$\sigma_a = -\frac{M}{n_a I_v} y \quad (3.5)$	$\sigma_a = -\frac{M}{n_a I_v} (y - d_a) \quad (3.10)$



e	: 鋼桁上フランジの上面から合成桁の中立軸までの距離
d_s, d_c, d_a	: 鋼桁上フランジの上面から, それぞれ, 鋼桁, 台座, アルミニウム床版上板の中立軸までの距離
a_s, a_c, a_a	: 合成桁の中立軸から, それぞれ, 鋼桁, 台座, アルミニウム床版上板の中立軸までの距離
E_s, E_c, E_a	: それぞれ, 鋼, 台座, アルミニウム床版のヤング係数
A_s, A_c, A_a	: それぞれ, 鋼桁, 台座, アルミニウム床版上板の断面積
I_v	: 鋼換算断面二次モーメント
I_s, I_c, I_a	: それぞれ, 鋼桁, 台座, アルミニウム床版上板の各中立軸に関する断面二次モーメント
n_c, n_a	: それぞれ, E_s/E_c と E_s/E_a
$\sigma_s, \sigma_c, \sigma_a$: それぞれ, 鋼桁, 台座, アルミニウム床版上板に生じる応力
M	: 合成桁に作用する曲げモーメント
y	: 合成桁の中立軸を原点とする座標 (上方を正)

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試験体のたわみ v が次式で与えられる¹⁵⁾.

$$v = \frac{P}{2E_s I_v} \left(-\frac{x^3}{6} + \frac{L^2 x}{8} \right) + \frac{P I_s}{2G_s A_{sw} I_v} x \quad (3.11)$$

ここに,

P	: 試験体中央に作用する荷重
L	: 試験体の支間長
G_s	: 鋼桁のせん断弾性係数 [$= E_s / \{2(1 + \mu_s)\}$]
μ_s	: 鋼のポアソン比
A_{sw}	: 鋼桁ウェブの断面積
x	: 支点を原点とする座標 $0 \leq x \leq L/2$

試験体中央のたわみは次式で与えられる.

$$v = \frac{P L^3}{48 E_s I_v} + \frac{P L I_s}{4 G_s A_{sw} I_v} \quad (3.12)$$

アルミニウム床版と鋼桁とが完全合成の場合, 鋼桁が降伏するときの荷重, すなわち降伏荷重が次式で与えられる.

$$P_Y = \frac{4I_v}{L y_f} \sigma_{sY} \quad (3.13)$$

ここに,

- P_Y : 降伏荷重
- y_f : 合成桁の中立軸から鋼桁下フランジの下面までの距離
- σ_{sY} : 鋼桁の降伏応力

試験体のアルミニウム床版と鋼桁との合成作用が完全合成の場合に対する、中立軸の位置、鋼換算断面二次モーメント、試験体の降伏荷重を算出するために必要な諸量の値を表-3.2に示す。合成桁の中立軸の位置 e 、合成桁の中立軸から鋼桁下フランジの下面までの距離 y_f 、鋼換算断面二次モーメント I_v 、降伏荷重 P_Y の値を表-3.3に示す。

表-3.2 諸量の値

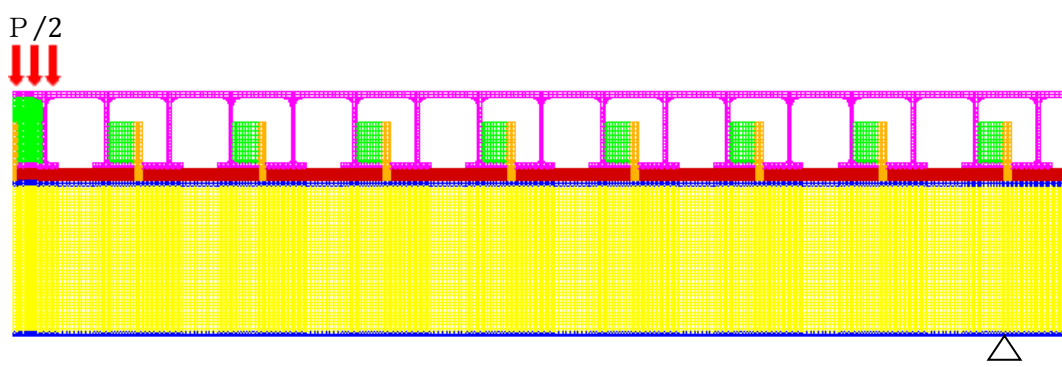
E_s (MPa)	E_c (MPa)	E_a (MPa)	I_s (mm ⁴)	I_c (mm ⁴)	I_a (mm ⁴)	A_s (mm ²)	A_c (mm ²)	A_a (mm ²)
200×10^3	15.4×10^3	71.4×10^3	2.30×10^8	4.50×10^5	8.44×10^4	8192	6000	4500
d_s (mm)	d_c (mm)	d_a (mm)	n_c	n_a	G_s (MPa)	L (mm)	A_{sw} (mm ²)	σ_{sY} (MPa)
200	15	222.5	12.99	2.86	76.9×10^3	5120	2992	323

表-3.3 e , y_f , I_v , P_Y

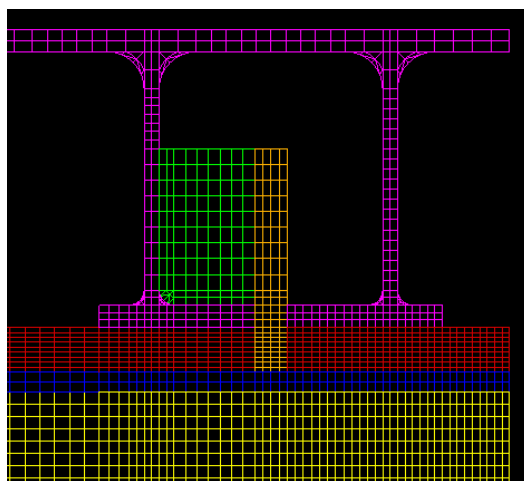
	仮定 A	仮定 B
e (mm)	124.2	159.0
y_f (mm)	275.8	241.0
I_v (mm ⁴)	4.79×10^8	3.55×10^8
P_Y (kN)	438	372

第4章 FEM解析モデル

アルミニウム床版を有する鋼桁を平面問題として、二次元 FEM 解析によって計算できることが示されているので¹⁷⁾、**図-2.1**に示す試験体を二次元 FEM 解析によって計算する。二次元 FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA¹⁹⁾を用いる。試験体の要素分割を**図-4.1**に示す。支間中央における対称性より、支間の右側半分が要素分割されている。使用した有限要素はアルミニウム床版の隅角部に対して 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。



(a) 全体図



(b) 連結部

図-4.1 要素分割

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、頭付きスタッドの左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、頭付きスタッドの右側の充填モルタルを考慮しない。この

様な充填モルタルの取り扱いに対する妥当性が文献 17)で示されている。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とき、頭付きスタッドの左側の、アルミニウム床版の下フランジが台座から離れるので^{15),17)}、アルミニウム床版下フランジと台座の界面に重複接点が設けられている。その他の異種材料間の界面の節点は共有させる。

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 である。頭付きスタッドの奥行きは、試験体の頭付きスタッドの断面積の総計に等しくなるように、試験体 I (1本の頭付きスタッド)、試験体 II (2本の頭付きスタッド)、試験体 III (3本の頭付きスタッド) に対して、それぞれ 17.28mm 、 34.55mm 、 51.83mm である。

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式によって、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。

$$b_{st} + \frac{E_a}{E_s}(b_a - b_h) \quad (4.1)$$

ここに、

- b_{st} : 頭付きスタッドの奥行き長さ
- b_a : アルミニウム床版の下フランジの奥行き長さ (=300mm)
- b_h : 頭付き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 (=71.4GPa)
- E_s : 頭付きスタッドのヤング係数 (=200GPa)

頭付きスタッドの奥行き長さ b_{st} は、試験体 I, II, III に対して、それぞれ 17.28mm 、 34.55mm 、 51.83mm である。頭付き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 b_h は、試験体 I, II, III に対して、それぞれ 80mm 、 110mm 、 170mm である。アルミニウム床版のヤング係数 71.4GPa は、表-2.1(a)に与えられる材料試験値である。以上より、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、式(4.1)より、試験体 I, II, III に対して、それぞれ 95.82mm 、 102.38mm 、 98.24mm である。

荷重は、支間中央から 100mm の幅に、荷重 $P/2 = 150\text{kN}$ を等分布荷重として与える。

第5章 試験結果と FEM 解析結果の比較

5.1 たわみ

荷重と試験体中央のたわみの関係を図-5.1 に示す（たわみが 40mm 以下の領域の各試験体の荷重とたわみの関係を付録 A に示す）．同図には，仮定 A と B に対する式(3.12)による理論値も示してある．荷重が約 350kN 以下の直線性を示す部分では，FEM 値は試験値にほぼ一致し，試験体 I，II，III の間で違いはほとんど見られない．試験値と FEM 値は仮定 B に対する理論値に近い．

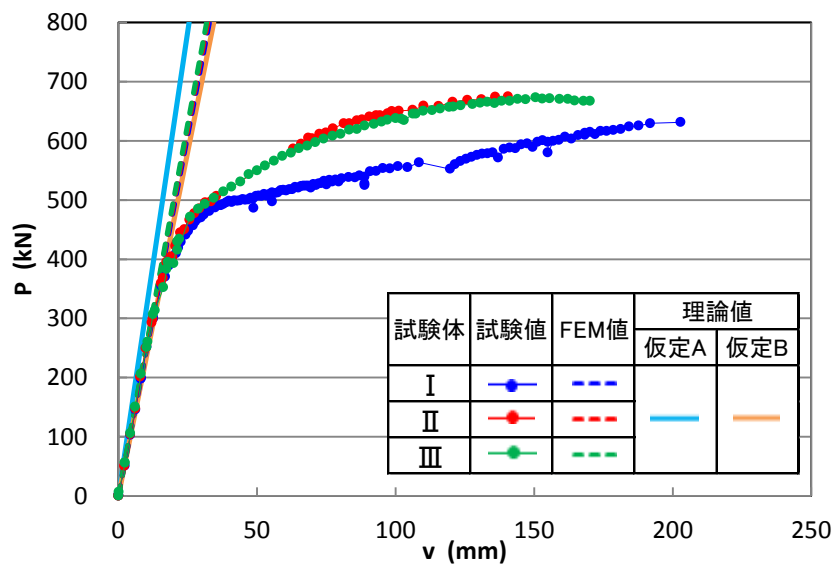


図-5.1 荷重とたわみの関係

試験体の鋼桁下フランジの下面のたわみに関して，荷重 $P=300\text{kN}$ に対する試験値と FEM 値の比較を図-5.2 に示す．さらに，試験体中央の試験値と FEM 値を表-5.1 に示す．図-5.2 には，仮定 A と B に対する，式 (3.11) によって計算されるたわみ分布も描いてある．試験値と FEM 値は，試験体 I，II，III の間で違いはほとんど見られず，仮定 B に対するたわみ分布に近い．表-5.1 に示すように，FEM 値は試験値に対して 4% 程度の誤差である．

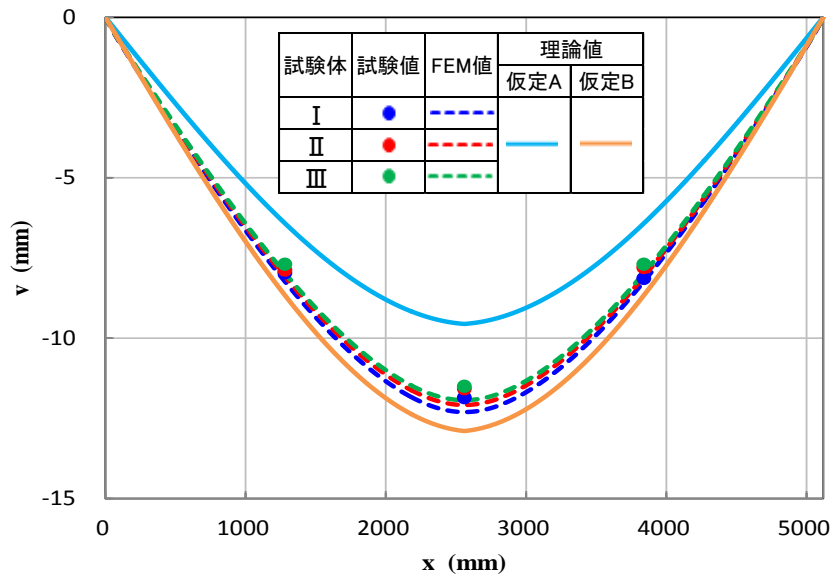


図-5.2 300kNの荷重に対するたわみ分布

表-5.1 300kNの荷重に対する試験体中央のたわみ

試験体	試験値(mm)	FEM値(mm)	FEM値／試験値
I	11.86	12.30	1.037
II	11.58	12.08	1.043
III	11.50	11.93	1.037

5.2 鋼桁に生じるひずみ

鋼桁下フランジの下面に生じるひずみに関して、試験値と FEM 値の比較を図-5.3 に示す（各試験体に対する試験値と FEM 値の比較を付録 B に示す）。荷重の大きさは $P=300\text{kN}$ である。同図の横軸は試験体の中央を原点とする座標であり、縦軸はひずみである。さらに、仮定 A と B に対する、それぞれ式(3.3)と(3.8)によって計算されるひずみ分布も描いてある。図-5.3 から分かるように、FEM 値は試験値に近い値を示しており、試験体 I、II、III の間で違いはほとんど見られない。試験値と FEM 値は仮定 B に対するひずみ分布にはほぼ一致している。

鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは、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、曲線分布を示し、両者が完全合成の場合、直線分布を示す¹⁵⁾。図-5.3 のひずみ分布は直線分布を示しているため、試験体の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。

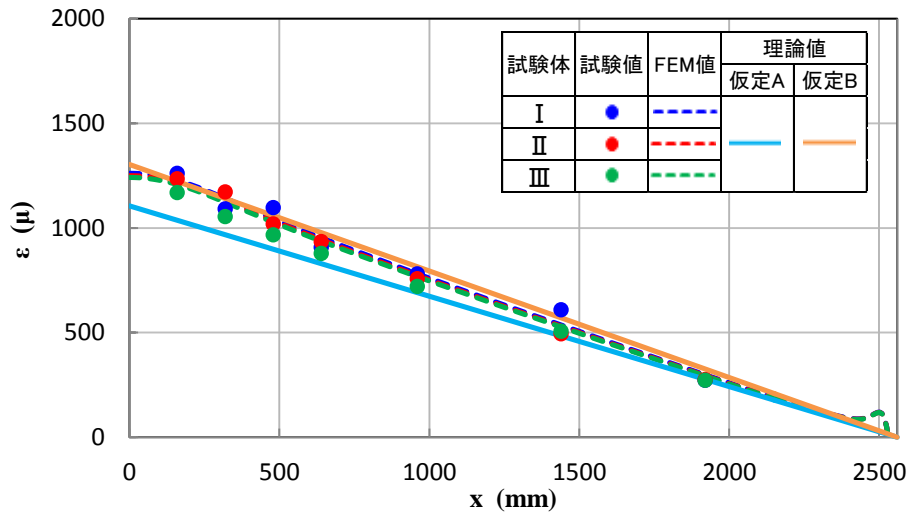


図-5.3 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみの関係を図-5.4 に示す. 同図には, 仮定 A と B に対する, それぞれ式(3.3)と(3.8)による理論値も示してある. 試験体Ⅲの一点を除いて, 各試験体の FEM 値は試験値に近い値を示し, 試験体 I, II, III の間で違いはほとんど見られない. 試験値と FEM 値は仮定 B に対する理論値に近い.

各試験体の荷重とひずみの関係に最小二乗法を適用して (試験体Ⅲにおいては P が約 400kN に対応する一点を除く) 得られる直線に対して, 鋼桁の降伏ひずみ 1615μ (鋼桁の降伏応力 323MPa) に対応する荷重すなわち降伏荷重は, 試験体 I, II, III に対して, それぞれ 361kN, 364kN, 401kN である. これらの値は, 表-3.3 に示す, 仮定 B に対する降伏荷重 372kN に近い.

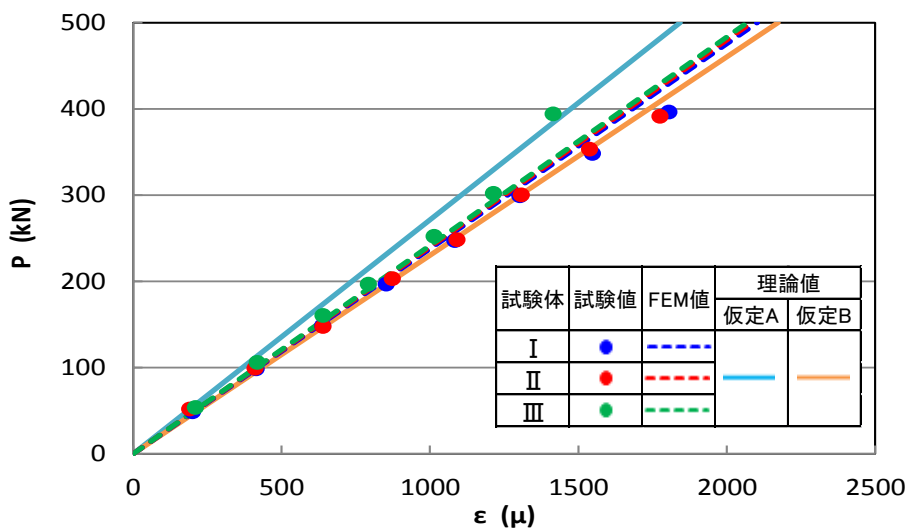
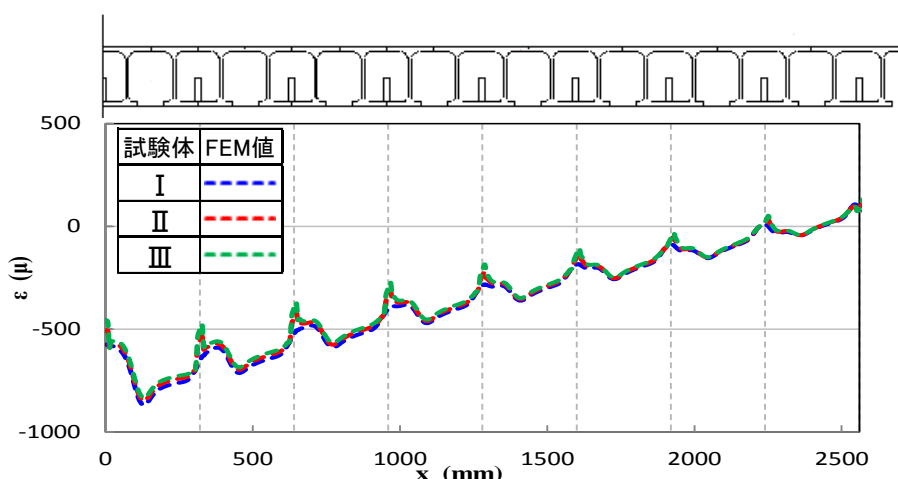
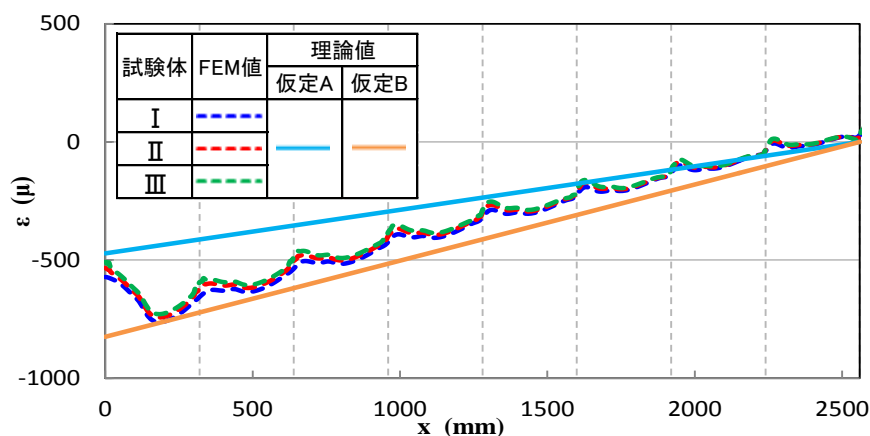


図-5.4 荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみの関係

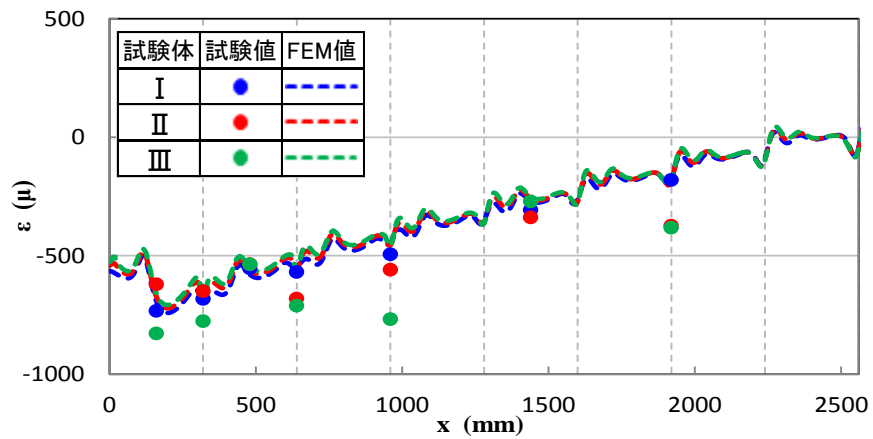
鋼桁上フランジの上面，中央面，下面に生じるひずみに関して，試験値と FEM 値の比較を図-5.5 に示す（各試験体に対する，鋼桁上フランジの下面に生じるひずみに関する試験値と FEM 値の比較を付録 C に示す）．荷重の大きさは $P=300\text{kN}$ である．試験値は，鋼桁上フランジの下面に対してのみ測定されている．各図の縦の破線は頭付きスタッドが存在する位置を示す．さらに，図-5.5(b)には，仮定 A と B に対する，それぞれ式(3.3)と(3.8)によって計算されるひずみ分布も描いてある．図-5.5(a)に示すように，試験体 I，II，III の FEM 値に違いがみられない．FEM 値は頭付きスタッドが存在する位置で大きくなっている．これは，水平せん断力を受ける頭付きスタッドが鋼桁上フランジを局所的に曲げるためと考えられる．図-5.5(b)に示すように，FEM 値は仮定 B に対する理論値に近い．図-5.5(c)に示すように，試験体 I と II では，試験値は FEM 値に近い値を示している．他方，試験体 III では，開断面中央の位置では，試験値が FEM 値に近い値を示しているが，頭付きスタッドが存在する位置では，試験値が FEM 値より大きい．これは，図-5.6 に示すように，ひずみゲージが外側の頭付きスタッドの真下に貼付されているために，水平せん断力を受ける頭付きスタッドによって鋼桁上フランジが曲げ変形を受けるためと考えられる．



(a) 鋼桁上フランジの上面



(b) 鋼桁上フランジの中央面



(c) 鋼桁上フランジの下面

図-5.5 鋼桁上フランジのひずみ分布

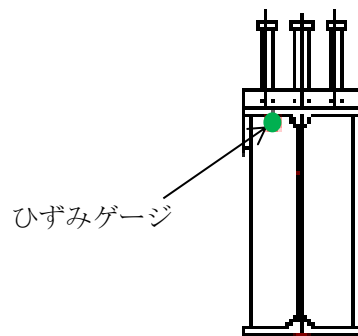
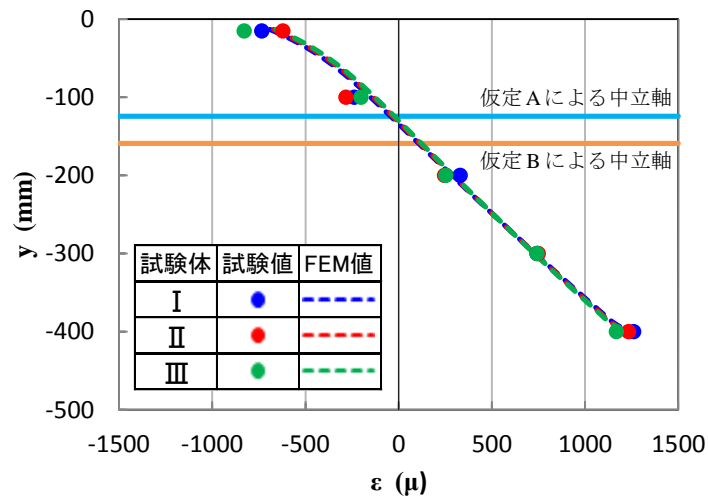
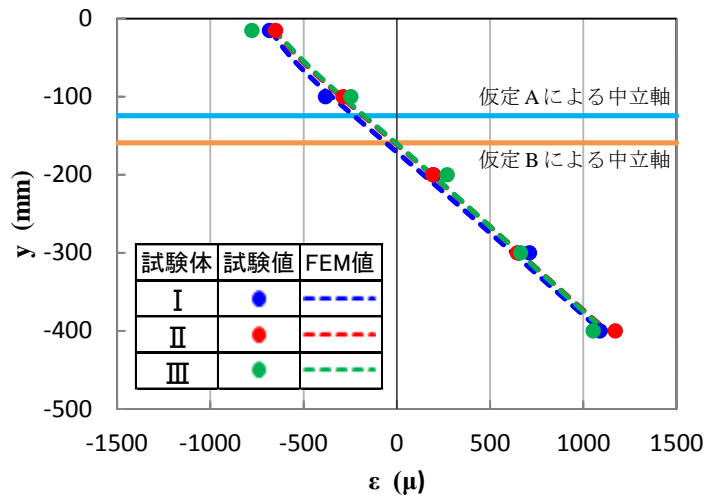


図-5.6 試験体Ⅲのひずみゲージの貼付位置

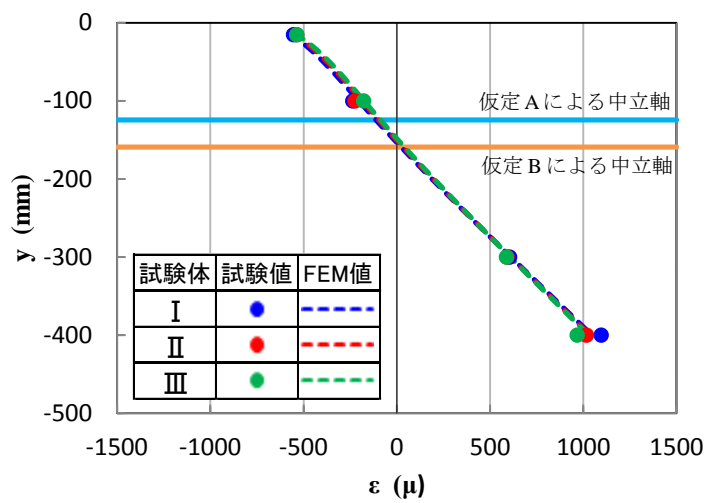
試験体中央から 160mm, 320mm, 480mm, 640mm の位置の鋼桁断面に生じるひずみに関して、試験値と FEM 値の比較を図-5.7 に示す（各試験体に対する試験値と FEM 値の比較を付録 D に示す）。試験体中央から 160mm, 480mm の位置は開断面中央であり、試験体中央から 320mm, 640mm の位置は頭付きスタッドが存在する位置である。縦軸は鋼桁上フランジの上面を原点とし、上方向を正とする座標であり、横軸はひずみである。さらに、仮定 A と B に対する、それぞれ式(3.1)と(3.6)による合成桁の中立軸の位置も描いてある。図-5.7 から分かるように、試験値は FEM 値に近い値を示しており、試験体 I, II, III の間で違いはほとんど見られない。合成桁の中立軸が、試験体中央から 160mm の位置では仮定 A に対する中立軸にほぼ一致し、試験体中央から 320mm, 480mm, 640mm の位置では仮定 B に対する中立軸にほぼ一致している。試験体中央から 160mm の位置の中立軸が仮定 A に対する中立軸に近いのは、後の図-5.8 に示すように、合成桁の中立軸が波形分布を示すからである。



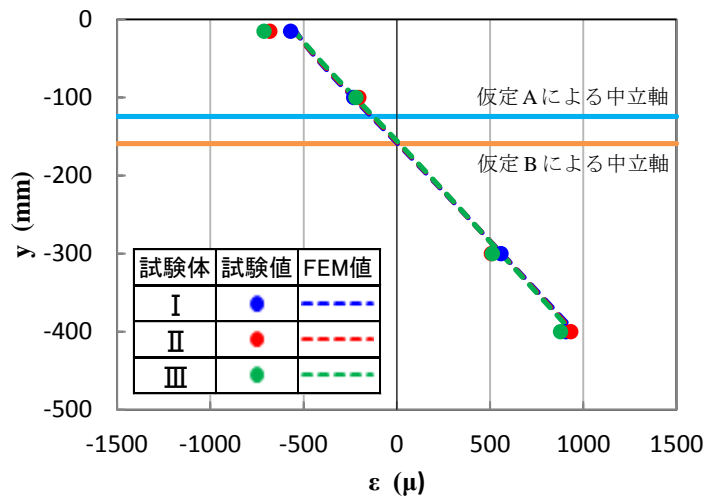
(a) $x=160\text{mm}$ (開断面中央)



(b) $x=320\text{mm}$ (頭付きスタッドの位置)



(c) $x=480\text{mm}$ (開断面中央)



(d) $x=640\text{mm}$ (頭付きスタッドの位置)

図-5.7 鋼桁断面のひずみ分布

合成桁の中立軸の分布に関して、試験値と FEM 値の比較を図-5.8 に示す（各試験体に対する試験値と FEM 値の比較を付録 E に示す）。試験値は、鋼桁断面のひずみ分布に最小二乗法を適用して得られる直線が 0 のひずみを示す位置である。さらに、仮定 A と B に対する中立軸も描いてある。図-5.8 から分かるように、FEM 解析が与える中立軸は波形分布を示し、試験体 I、II、III の間で違いがあまり見られない。FEM 解析が与える中立軸の波形分布は、試験体中央で仮定 A に対する中立軸に近く、試験体中央から離れると仮定 B に対する中立軸に近くなり、試験体の端部に近づくに従って、波形の振幅が大きくなり、仮定 A に対する中立軸に近づく。

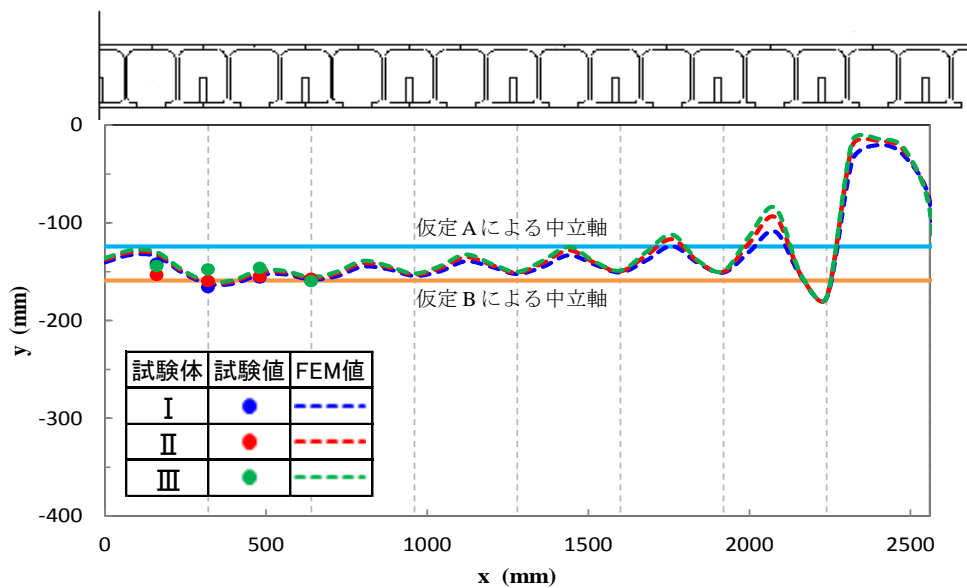


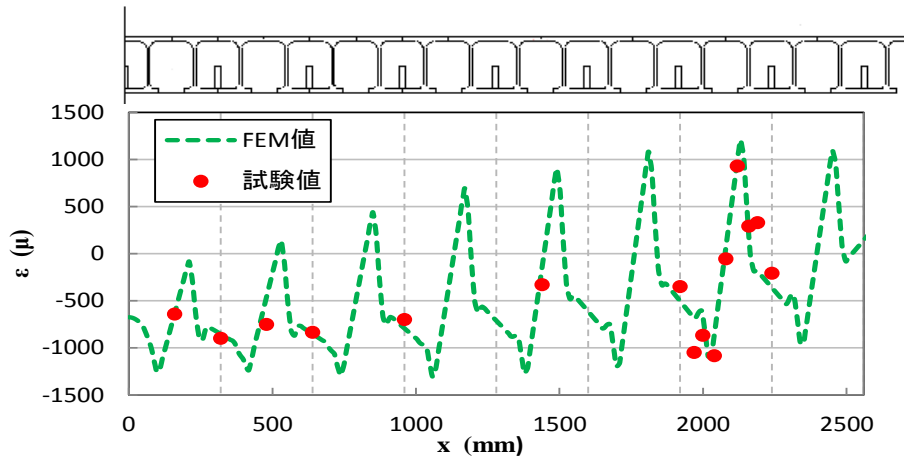
図-5.8 合成桁の中立軸の分布

5.3 アルミニウム床版に生じるひずみ

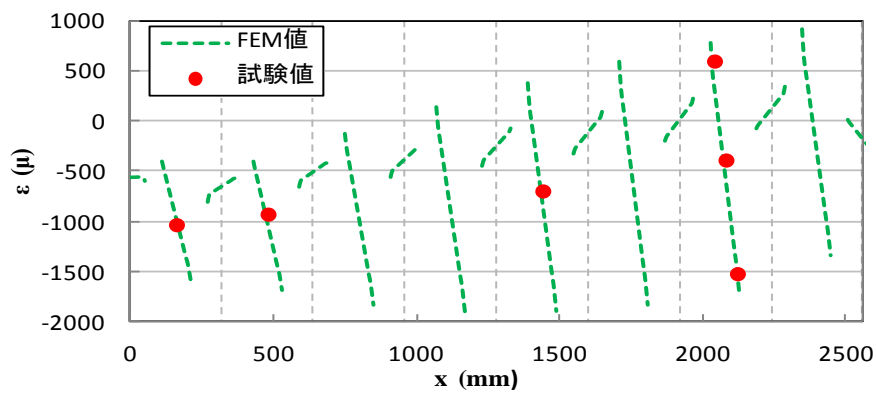
アルミニウム床版上板の上面のひずみ，下面のひずみ，膜ひずみ（上面のひずみと下面のひずみの平均値），板曲げひずみ（上面のひずみから下面のひずみを引いて，2 で除した値）に関して，各試験体の試験値と FEM 値の比較を，試験体 I，II，III に対して，それぞれ図-5.9，5.10，5.11 に示す．荷重の大きさは $P=300\text{kN}$ である．各図の横軸は試験体の中央を原点とする座標であり，縦軸はひずみである．各図の縦の破線は頭付きスタッドが存在する位置を示す．図-5.9(c)，5.10(c)，5.11(c)には，仮定 A と B に対して，それぞれ式(3.5)と(3.10)によって計算されるひずみ分布も描いてある．

図-5.9，5.10，5.11 から分かるように，アルミニウム床版上板の上面と下面のひずみ，板曲げひずみに関して，試験値は FEM 値にほぼ一致している．図-5.9(d)，5.10(d)，5.11(d)に示すように，板曲げひずみは急激な変化を示すが，開断面中央の摩擦撚拌接合部に生じる板曲げひずみは小さい．

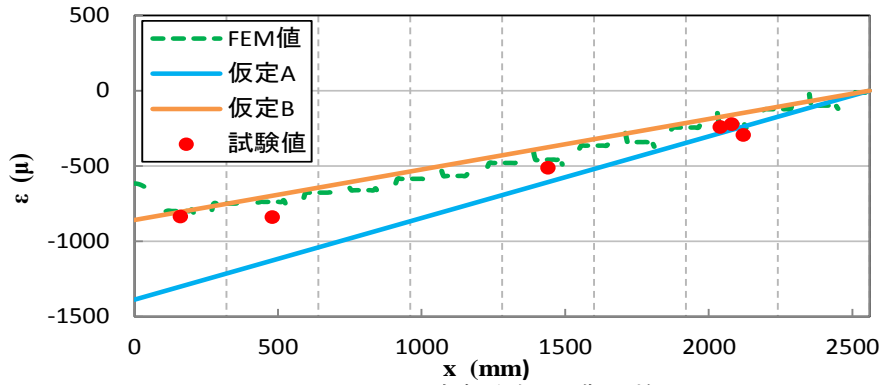
図-5.9(c)，5.10(c)，5.11(c)に示すように，アルミニウム床版上板の膜ひずみに関して，試験体 I の試験値は FEM 値にほぼ一致し，両者は仮定 B に対するひずみ分布に近い．しかし，試験体 II と III の試験値は仮定 A に対するひずみ分布に近いが，試験体 II と III の FEM 値は仮定 B に対するひずみ分布に近い．膜ひずみの FEM 値が階段状に分布しているのは，図-5.12 に示すように，320mm の間隔で配置された頭付きスタッドの位置のみで，アルミニウム床版上板から鋼桁上フランジに水平せん断力が伝達されるからである．



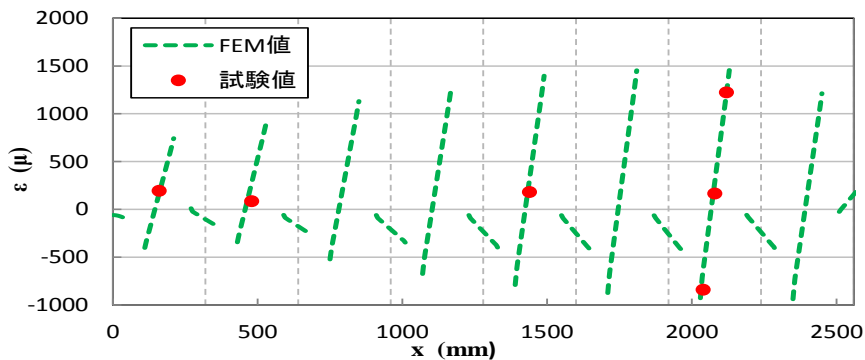
(a) アルミニウム床版上板の上面のひずみ



(b) アルミニウム床版上板の下面のひずみ



(c) アルミニウム床版上板の膜ひずみ



(d) アルミニウム床版上板の板曲げひずみ

図-5.9 試験体 I のアルミニウム床版上板のひずみ分布

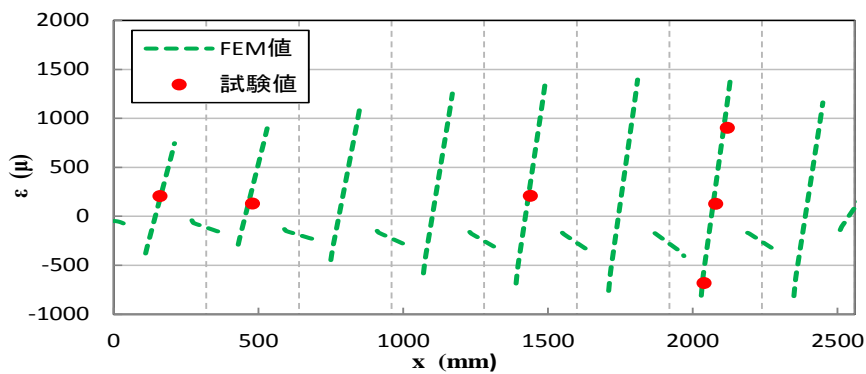
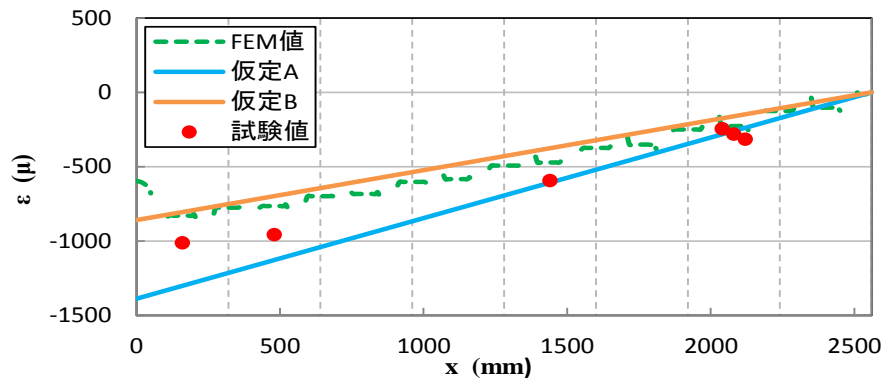
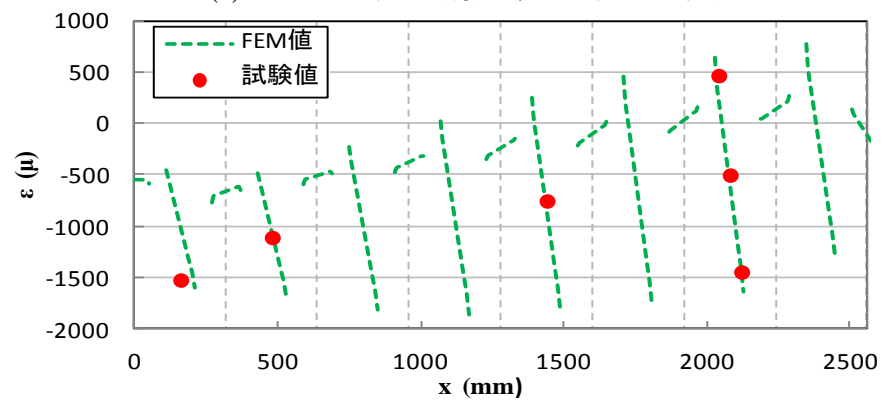
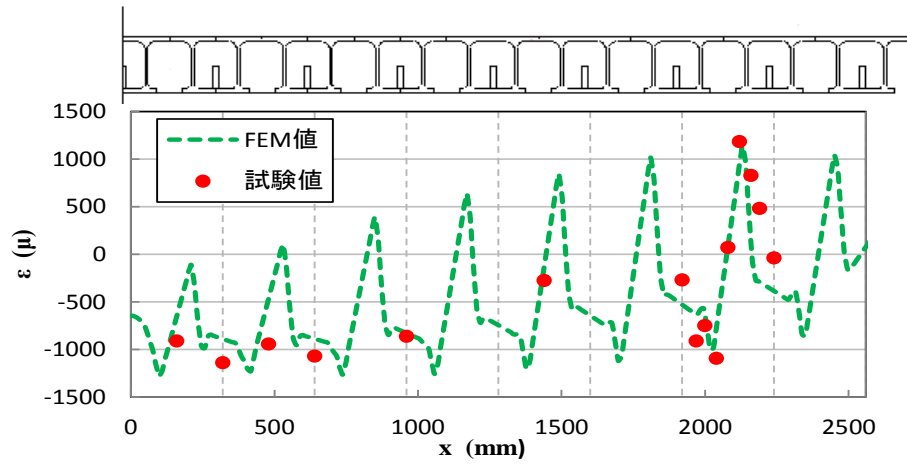
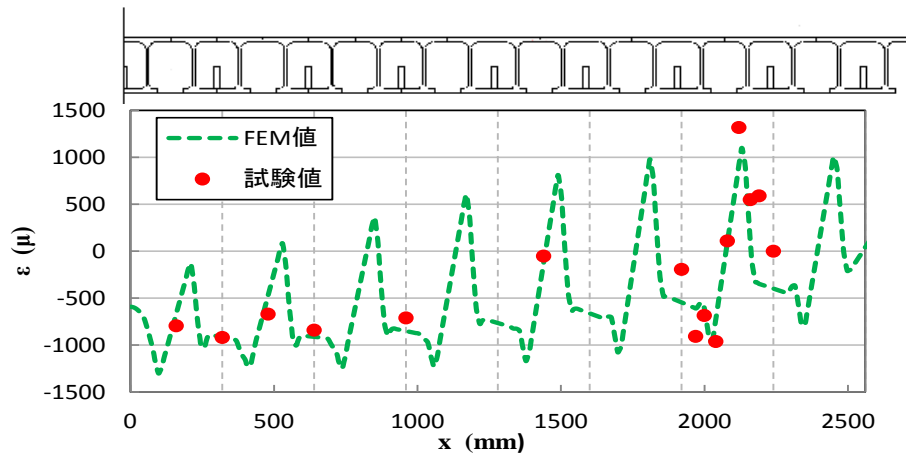
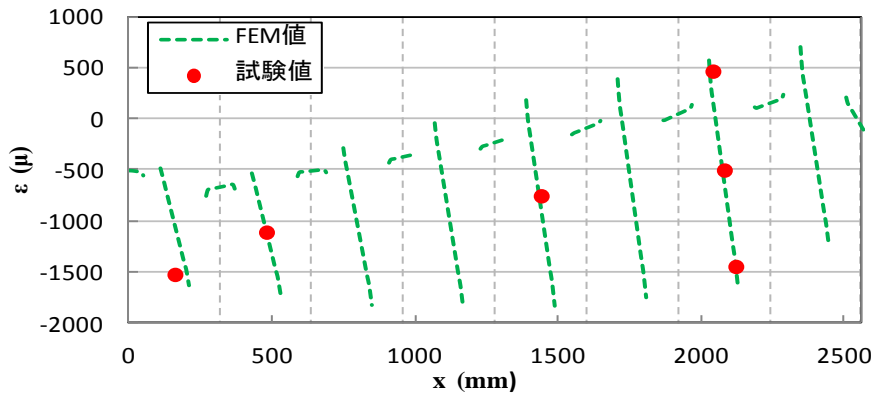


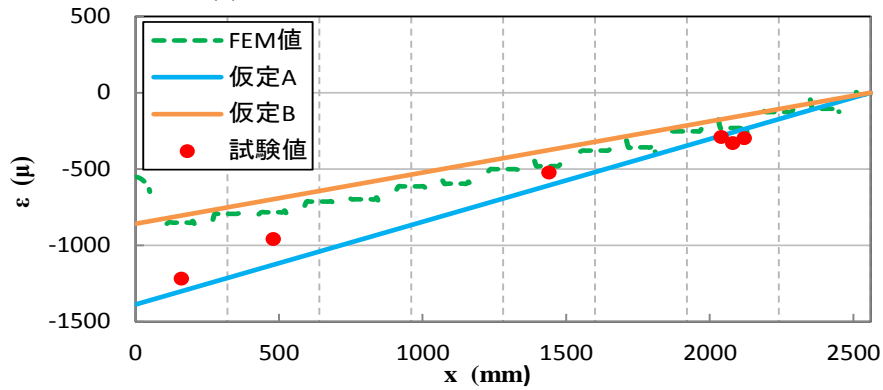
図-5.10 試験体Ⅱのアルミニウム床版上板のひずみ分布



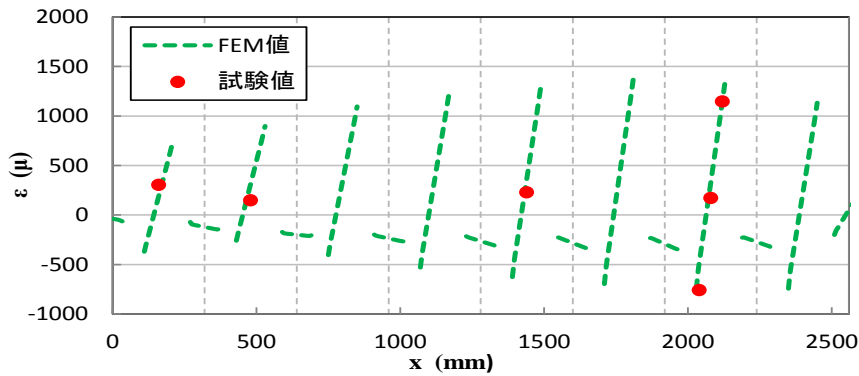
(a) アルミニウム床版上板の上面のひずみ



(b) アルミニウム床版上板の下面のひずみ



(c) アルミニウム床版上板の膜ひずみ



(d) アルミニウム床版上板の板曲げひずみ

図-5.11 試験体Ⅲのアルミニウム床版上板のひずみ分布

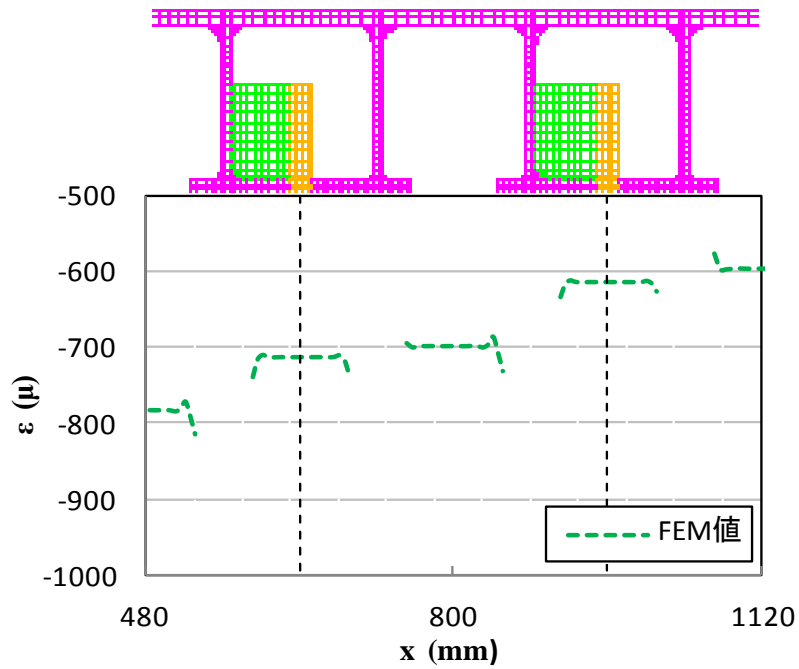
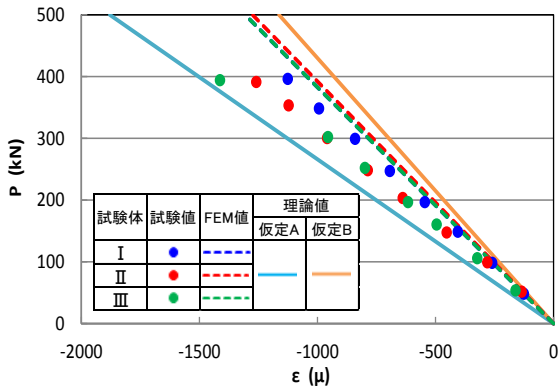
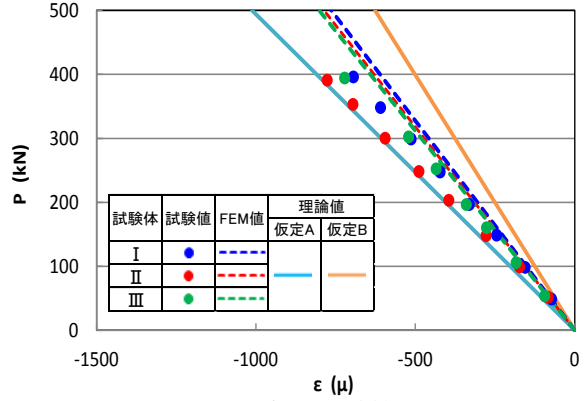


図-5.12 アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布の拡大図（試験体Ⅲ）

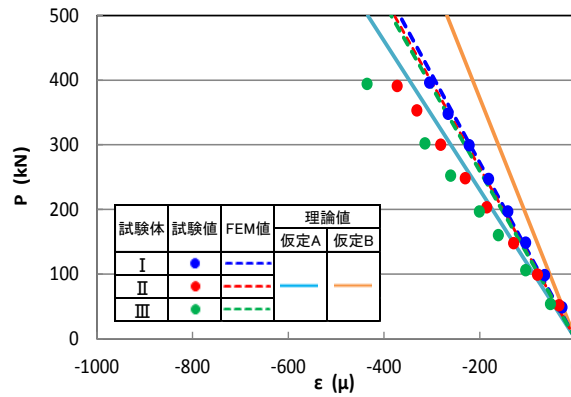
$x=480\text{mm}$, 1440mm , 2080mm の位置（開断面中央）における，荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係を図-5.13，荷重とアルミニウム床版上板の板曲げひずみの関係を図-5.14 に示す．図-5.13 に示すように，膜ひずみに関して，試験体Ⅰの試験値は FEM 値に近いが，試験体ⅡとⅢの試験値は FEM 値にあまり一致していない．図-5.9(d), 5.10(d), 5.11(d) に示すように，試験値は FEM 値に一致しているように見える．しかし，図-5.14 に示すように，試験値は FEM 値にあまり一致していない．これは，図-5.9(d), 5.10(d), 5.11(d)の縦軸のひずみのスケールに対して，図-5.14 の横軸のひずみのスケールが大きいからである．



(a) $x=480\text{mm}$

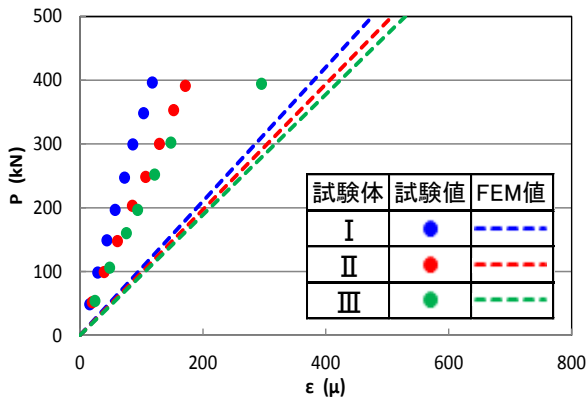


(b) $x=1440\text{mm}$

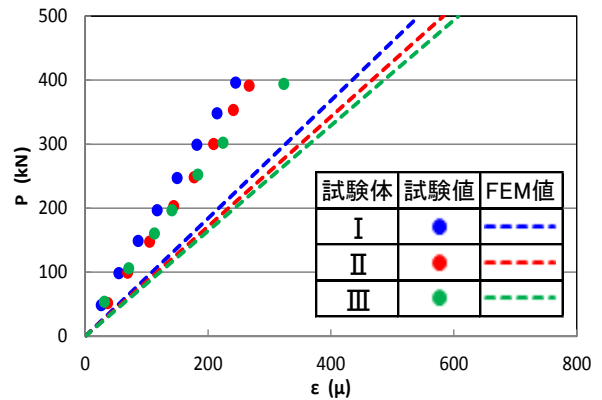


(c) $x=2080\text{mm}$

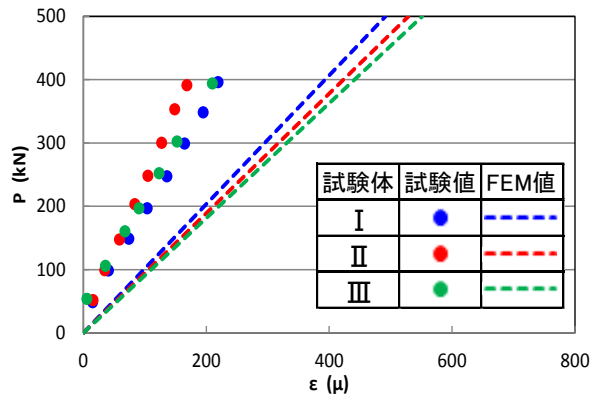
図-5.13 荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係



(a) $x=480\text{mm}$



(b) $x=1440\text{mm}$



(c) $x=2080\text{mm}$

図-5.14 荷重とアルミニウム床版上板の板曲げひずみの関係

図-5.15 に示す，アルミニウム床版ウェブの表面に生じるひずみ（試験体中央から $x=2005\text{mm}$ と $x=2155\text{mm}$ の位置）に関して，試験値と FEM 値の比較を図-5.16 に示す（各試験体の試験値と FEM 値の比較を付録 F に示す）．縦軸はアルミニウム床版下フランジの下面を原点とし，上方向を正とする座標である．横軸はひずみである．図-5.16 から分かるように，試験体 I，II，III の間でひずみに違いはほとんど見られない．図-5.16(a) に示すように， $x=2005\text{mm}$ の位置で，FEM 値が試験値より大きくなっているのは，図-5.15 に示すように，FEM 解析モデルでは，頭付きスタッドの右側の充填モルタルが考慮されていないことによると考えられる．図-5.16(b) に示すように， $x=2155\text{mm}$ の位置で， $y=120\text{mm}$ 付近で FEM 値が急変するのは，FEM 解析モデルでは， $y=120\text{mm}$ から上の充填モルタルが考慮されていないために，アルミニウム床版ウェブが曲げ変形を受けるためと考えられる．

アルミニウム床版ウェブの膜ひずみ分布と板曲げひずみ分布をそれぞれ図-5.17，5.18 に示す．図-5.17 から分かるように，膜ひずみはほぼ 0 に近い．図-5.18 の板曲げひずみ分布は，図-5.16 の分布とほぼ同じである．したがって，アルミニウム床版ウェブに生じるひずみは板曲げひずみである．

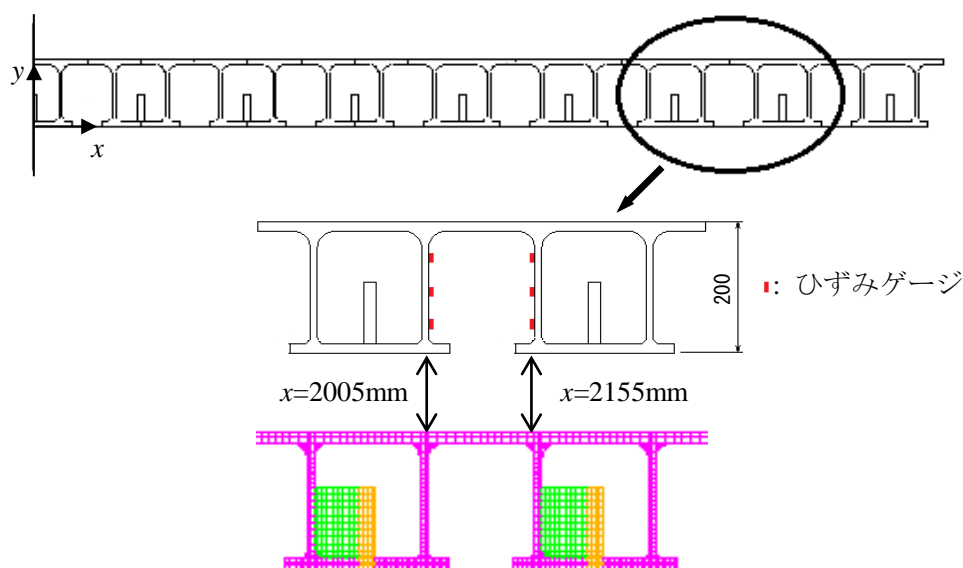
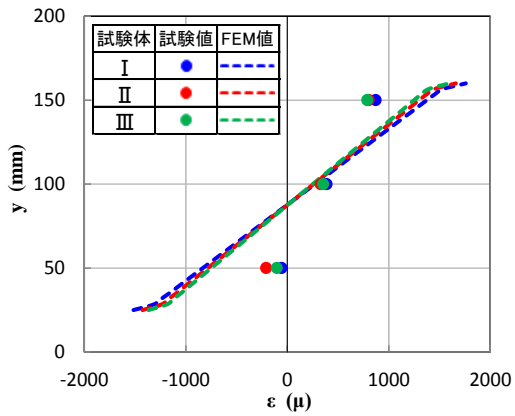
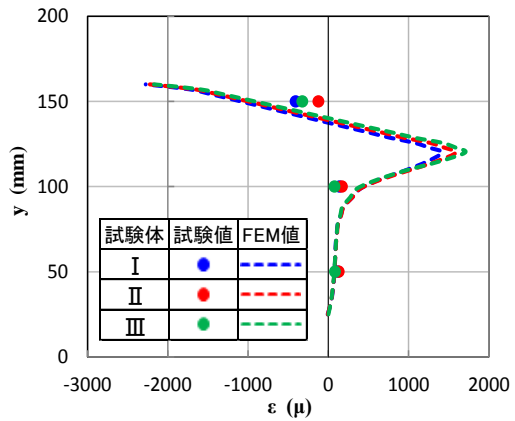


図-5.15 アルミニウム床版ウェブの表面のひずみの測定位置

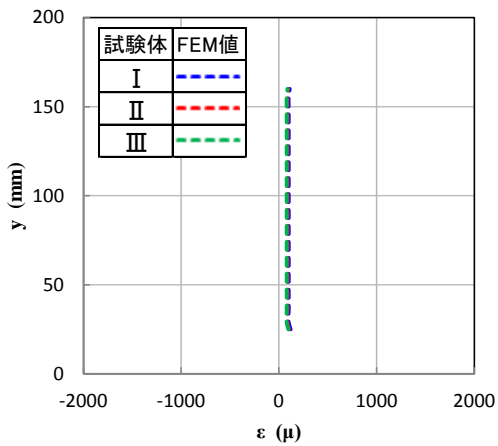


(a) $x=2005\text{mm}$

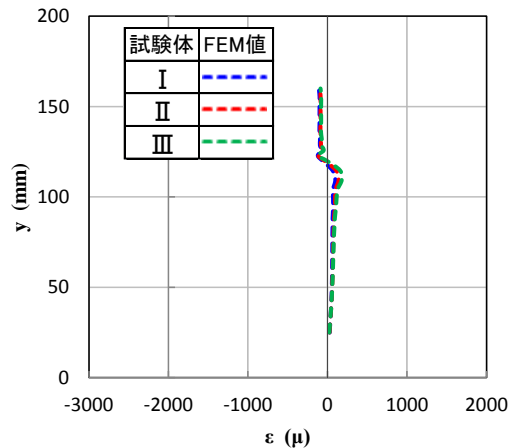


(b) $x=2155\text{mm}$

図-5.16 アルミニウム床版ウェブの表面のひずみ分布

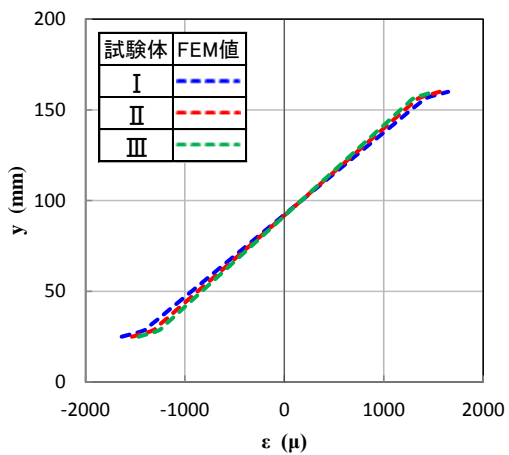


(a) $x=2005\text{mm}$

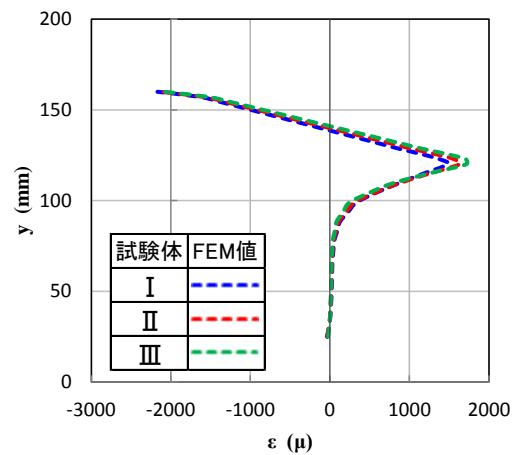


(b) $x=2155\text{mm}$

図-5.17 アルミニウム床版ウェブの膜ひずみ分布



(a) $x=2005\text{mm}$



(b) $x=2155\text{mm}$

図-5.18 アルミニウム床版ウェブの板曲げひずみ分布

6章 水平せん断力の特性

6.1 水平せん断力の理論値

アルミニウム床版上板に生じる水平せん断力 H と軸力 N の関係が次式で与えられる.

$$H = \frac{dN}{dx} \quad (6.1)$$

ここに,

H : アルミニウム床版上板に生じる水平せん断力

N : アルミニウム床版上板に生じる軸力

アルミニウム床版上板に生じる軸力 N は次式で与えられる.

$$N = \sigma_a A_a \quad (6.2)$$

式(6.2)を式(6.1)に代入して次式を得る.

$$H = A_a \frac{d\sigma_a}{dx} \quad (6.3)$$

式(3.5)と(3.10)を式(6.3)に代入して, $M = Px/2$ および $y = e + d_a$ と置いて, 仮定 A と B に対する水平せん断力と荷重の関係が次の様に与えられる.

$$\text{仮定 A} : \quad H = \frac{PA_a}{2n_a I_v} (e + d_a) \quad (6.4)$$

$$\text{仮定 B} : \quad H = \frac{PA_a}{2n_a I_v} e \quad (6.5)$$

図-5.12 に示すように, FEM 解析が与えるアルミニウム床版上板の膜ひずみは階段状に分布する. したがって, 水平せん断力 H は次式で与えられる.

$$H = E_a A_a \frac{\Delta \varepsilon_a}{\Delta x} \quad (6.6)$$

ここに,

$\Delta \varepsilon_a$: 頭付きスタッドの位置のアルミニウム床版上板に生じる膜ひずみと, それに隣接する頭付きスタッドの位置のアルミニウム床版上板に生じる膜ひずみとの差

Δx : 頭付きスタッドの配置間隔 (320mm)

6.2 試験体に生じる水平せん断力

試験体に生じる水平せん断力は, 図-6.1 に示すように, ひずみゲージが貼付されている, 支点から $l=480\text{mm}$ の区間で水平せん断力が一定であると仮定して, 水平せん断力 H と軸力 N の関係が次式で与えられる.

$$H = -\frac{N}{l} \quad (6.7)$$

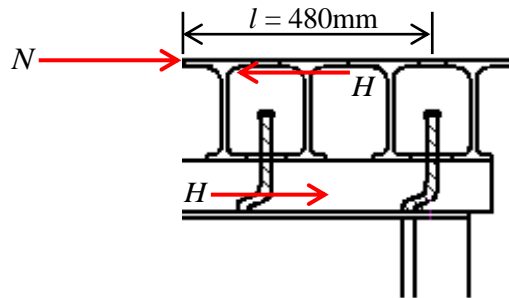


図-6.1 試験体に生じる水平せん断力

支点から 480mm 離れた位置のアルミニウム床版上板に生じる軸力 N は次式で与えられる.

$$N = A_a \sigma_{a480} \quad (6.8)$$

ここに,

σ_{a480} : ひずみゲージが貼付されている, 支点から 480mm 離れた位置のアルミニウム床版上板に生じる膜応力

アルミニウム床版上板の, 支点から 480mm 離れた位置の摩擦撹拌接合部で測定された荷重と膜ひずみの関係を図-6.2 に示す. 摩擦撹拌接合部の比例限度ひずみは 0.173% である¹⁸⁾.

図-6.2 から分かるように, 各試験体の膜ひずみは比例限度より小さい. したがって, N は次式で与えられる.

$$N = E_a A_a \varepsilon_{a480} \quad (6.9)$$

ここに,

ε_{a480} : 支点から 480mm 離れた位置のアルミニウム床版上板に生じる膜ひずみ

さらに, 式(6.9)を式(6.7)に代入して, 試験体に生じる水平せん断力 H が次式により算出される.

$$H = -E_a A_a \frac{\varepsilon_{a480}}{l} \quad (6.10)$$

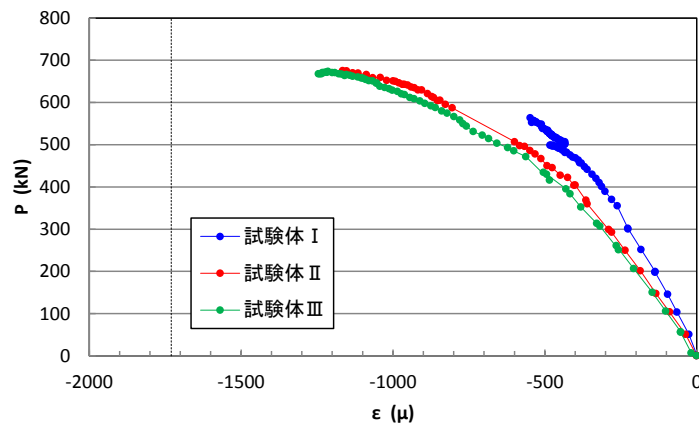


図-6.2 荷重と膜ひずみの関係

6.3 試験値と FEM 値の比較

水平せん断力に関して、試験値と FEM 値の比較を図-6.3 に示す。試験値は式(6.10)によって計算され、FEM 値は式(6.6)によって計算される。荷重の大きさは $P=300\text{kN}$ である。横軸は試験体の中央を原点とする座標であり、縦軸は水平せん断力である。縦の破線は頭付きスタッドが存在する位置を示す。さらに、仮定 A と B に対する、それぞれ式(6.4)と(6.5)によって計算される値も描いてある。図-6.3 から分かるように、FEM 値は、試験体中央付近で小さく、支点に向かって増加し、ほぼ一定になる。試験体 I の試験値は FEM 値に近く、仮定 B に対する理論値に近い。試験体 II と III の試験値は FEM 値より大きく、仮定 A と B に対する理論値の中間に分布している。

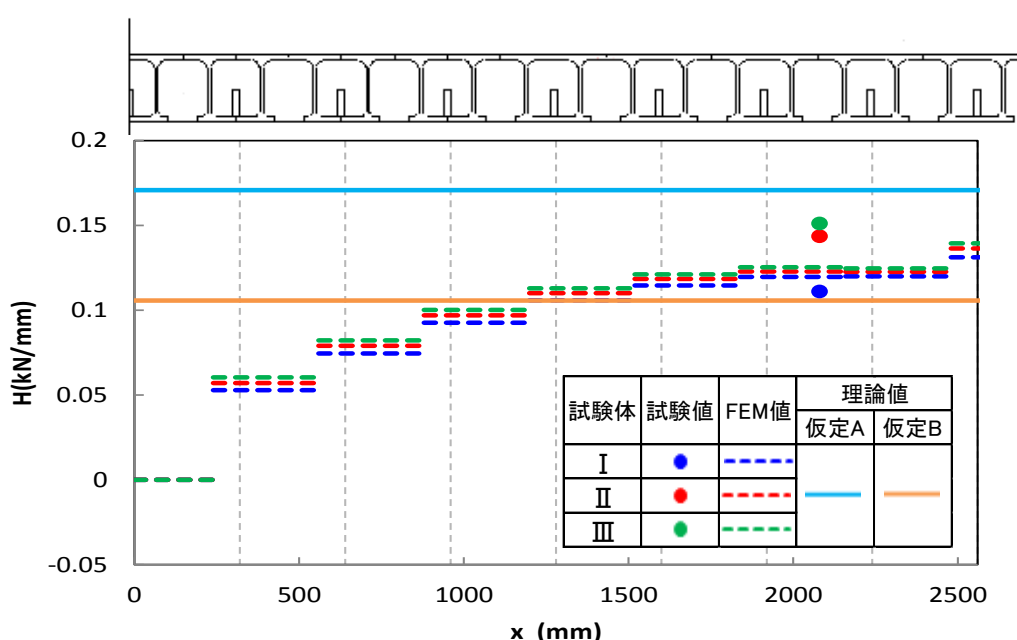


図-6.3 水平せん断力

支点から 480mm 離れた位置における、荷重と水平せん断力の関係を図-6.4 に示す（各試験体に対する試験値と FEM 値の比較を付録 G に示す）。仮定 A と B に対する、それぞれ式(6.4)と(6.5)による理論値も示してある。同図から分かるように、試験値は、試験体 I, II, III の順番、すなわち頭付きスタッドの本数が増えるに従って増加するが、FEM 値は試験体間で違いがほとんど見られない。

アルミニウム床版と鋼桁から成る試験体は、鋼桁、アルミニウム床版、鋼桁とアルミニウム床版との連結部から構成される。したがって、図-6.4 の荷重と水平せん断力の関係の非線形性がどの構成要素によってもたらされているか不明である。しかし、荷重と水平せん断力の関係が直線性を示す領域では、少なくとも水平せん断力は弾性限界以下にあると言える。各試験体の水平せん断力の弾性限界を表-6.1 に示す（各試験体の水平せん断力の弾性限界を付録 H に示す）。表-6.1 から分かるように、水平せん断力の弾性限界は、試験体 I に

対して試験体ⅡとⅢの値は大きく、試験体ⅡとⅢの値は近い。

既往の研究¹⁴⁾で、頭付きスタッドが1箇所当たり3本で、台座の高さが異なる試験体に対して、荷重と水平せん断力の関係が求められている。既往の試験体の水平せん断力の弾性限界を表-6.2に示す(既往の試験体の水平せん断力の弾性限界の求め方を付録Iに示す)。台座の高さが変化しても、水平せん断力の弾性限界はほとんど変化しない。頭付きスタッドが1箇所当たり3本の場合の水平せん断力の弾性限界は0.362kN/mmである。

以上より、水平せん断力の弾性限界は、1箇所当たりの頭付きスタッドの本数が1本、2本、3本に対し、小さくても、それぞれ0.129kN/mm、0.197kN/mm、0.362kN/mmである。

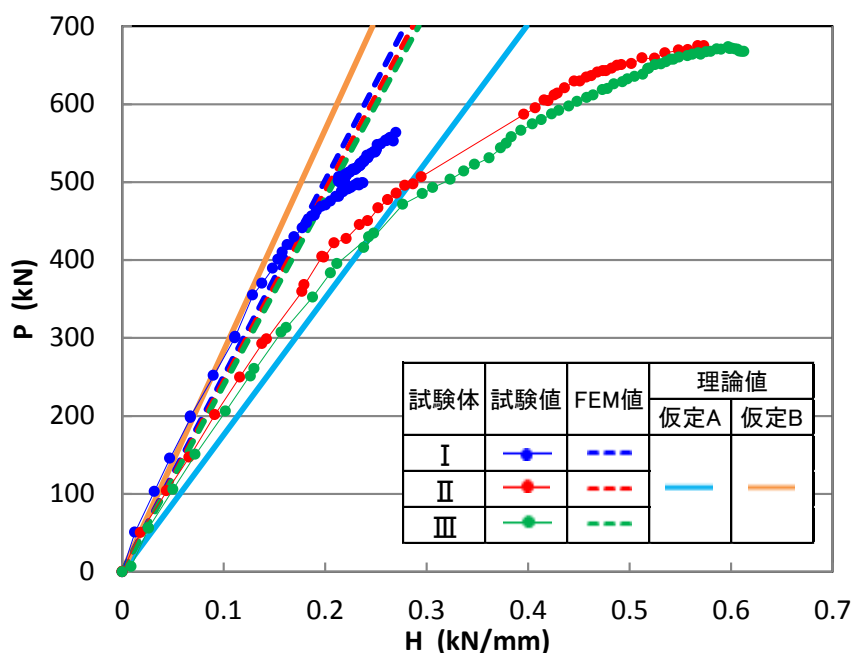


図-6.4 支点から480mm離れた位置の荷重と水平せん断力の関係

表-6.1 各試験体の水平せん断力の弾性限界

試験体	頭付きスタッドの本数	台座の高さ	H (kN/mm)
I	1本	30mm	0.129
II	2本	30mm	0.197
III	3本	30mm	0.212

表-6.2 既往の試験体の水平せん断力の弾性限界

試験体	頭付きスタッドの本数	台座の高さ	H (kN/mm)
II	3本	30mm	0.362
III	3本	60mm	0.358
IV	3本	100mm	0.360

第7章 結論

本研究では、既往の静的載荷試験¹⁸⁾で製作されたアルミニウム床版と鋼桁から成る試験体を FEM 解析によって解き、試験結果と解析結果とを比較することにより、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与える影響を明らかにした。本研究で得られた主な結論を次に示す。

- (1) 荷重と試験体中央のたわみの関係において、荷重が約 350kN 以下の直線性を示す部分に対して、1 箇所当たり 1 本、2 本、3 本の頭付きスタッドの本数による違いはほとんど見られない。試験値と FEM 値は、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い場合に対する理論値に近い。
- (2) 鋼桁に生じるひずみに対しても、1 箇所当たり 1 本、2 本、3 本の頭付きスタッドの本数による違いはほとんど見られず、試験値と FEM 値は、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い場合に対する理論値に近い。
- (3) アルミニウム床版上板に生じる膜ひずみは、1 箇所当たり 1 本、2 本、3 本の頭付きスタッドの本数による違いが試験値には生じるが、FEM 値には生じない。1 箇所当たり 1 本の頭付きスタッドの場合、試験値は、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い場合に対する理論値に近いが、1 箇所当たり 2 本と 3 本の頭付きスタッドの場合、試験値は、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る場合に対する理論値に近い。
- (4) アルミニウム床版上板に生じる板曲げひずみは、急激な変化を示すが、開断面中央の摩擦撹拌接合部に生じる板曲げひずみは小さい。板曲げひずみは、1 箇所当たり 1 本、2 本、3 本の頭付きスタッドの本数による違いはほとんど見られない。
- (5) アルミニウム床版ウェブに生じるひずみは、板曲げひずみであり、1 箇所当たり 1 本、2 本、3 本の頭付きスタッドの本数による違いはほとんど見られない。
- (6) 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の弾性限界は、1 箇所当たりの頭付きスタッドの本数が 1 本、2 本、3 本に対し、小さくても、それぞれ 0.129kN/mm, 0.197kN/mm, 0.362kN/mm である。

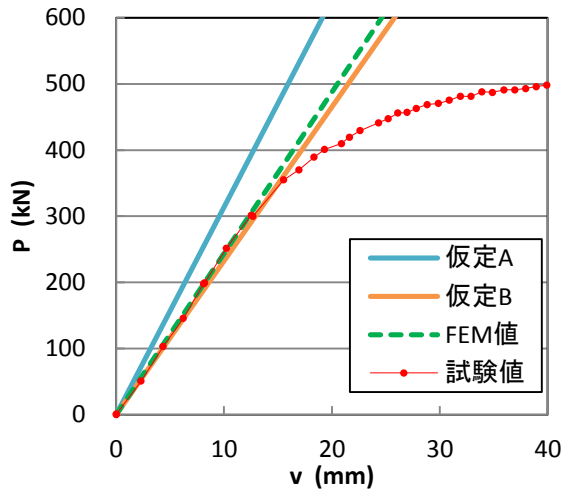
参考文献

- 1) 平成22年道路施設現況調査, 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：摩擦撈拌接合で製作されたアルミニウム床版の疲労特性, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.255-266, 2002.
- 5) 大倉一郎, 岡田理, 萩澤亘保, 大澤章吾：開閉断面のアルミニウム床版の開発, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1219-1227, 2005.
- 6) 大倉一郎, 萩澤亘保, 中原太樹, 岡田理, 山口進吾：アルミニウム床版と鋼主桁との連結部の静的および疲労挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.199-206, 2003.
- 7) 大倉一郎, 西田貴裕：アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性, ALST研究レポート, No.8, 2009. http://alst.jp/pdf/ALST_report8.pdf
- 8) 大倉一郎, 筒井将仁：地覆定着のためのアルミニウム床版の引抜強度, ALST研究レポート, No.4, 2008. http://alst.jp/pdf/ALST_report4.pdf
- 9) 萩澤亘保, 大倉一郎, 花崎昌幸, 大西弘志, 佐藤正典：アルミニウム合金材の母材と摩擦撈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の母材と摩擦撈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
- 13) 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋, 2011.
<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) 北里龍馬, 大倉一郎：アルミニウム床版—鋼桁橋の合成度, 鋼構造年次論文報告集,

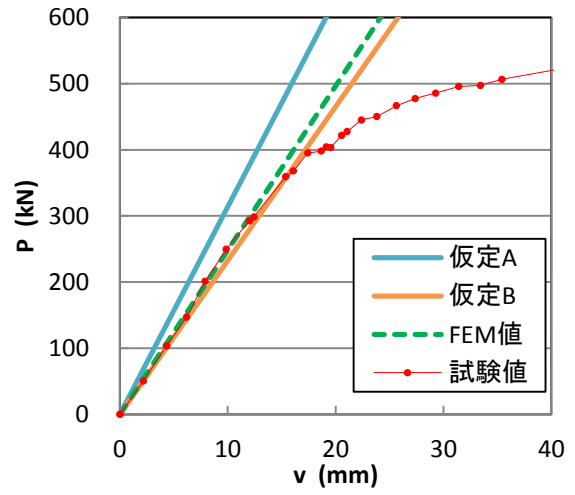
第 20 卷, pp.491-498, 2012.

- 17) 北里龍馬, 大倉一郎: 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, No.29, 2013. http://alst.jp/pdf/ALST_report29.pdf
- 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
- 19) TNO Building and Construction Research: DIANA, Release 9.4.4, Delft, Netherland, 2012.

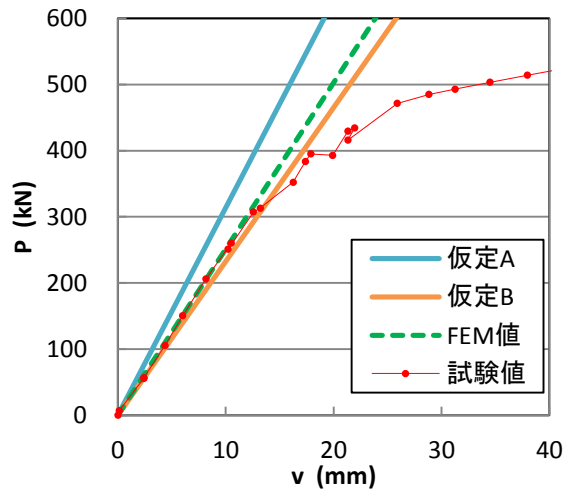
付録 A 荷重とたわみの関係



(a) 試験体 I



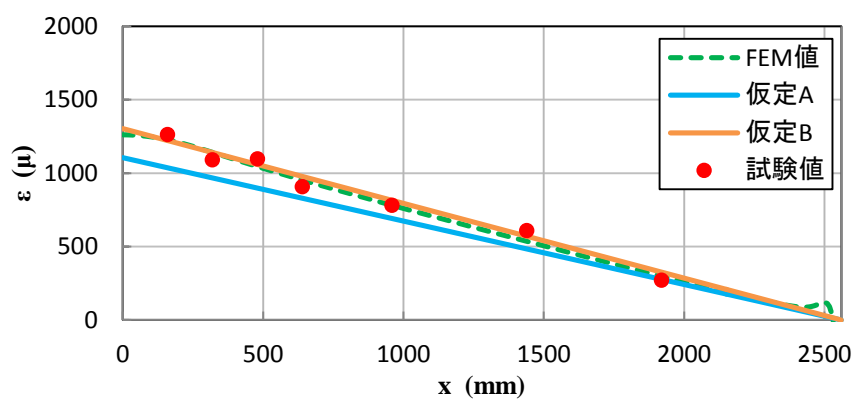
(b) 試験体 II



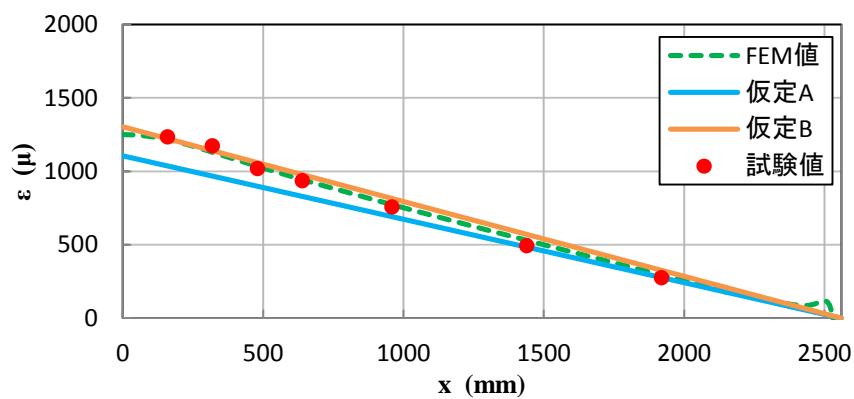
(c) 試験体 III

付図 A.1 荷重とたわみの関係

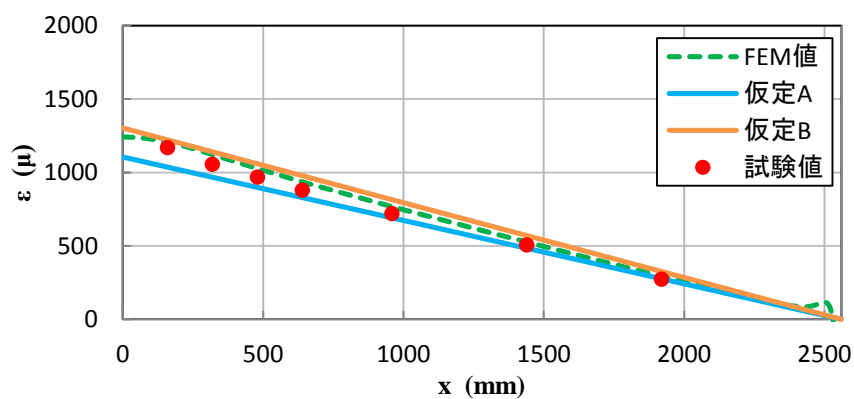
付録B 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布



(a) 試験体 I



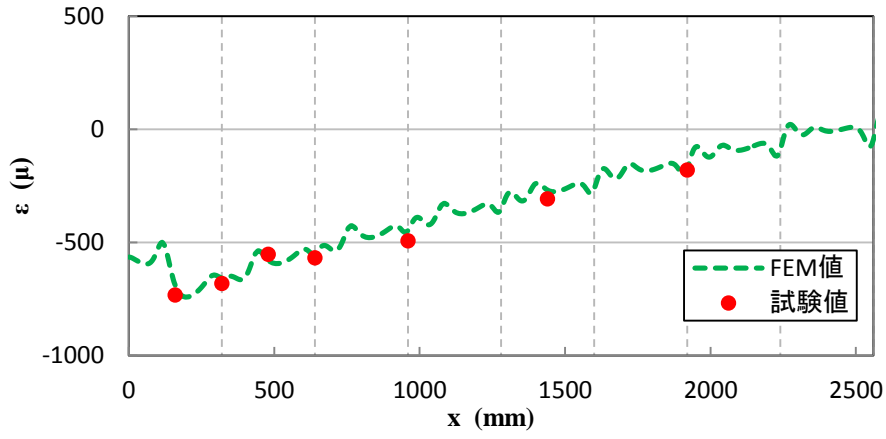
(b) 試験体 II



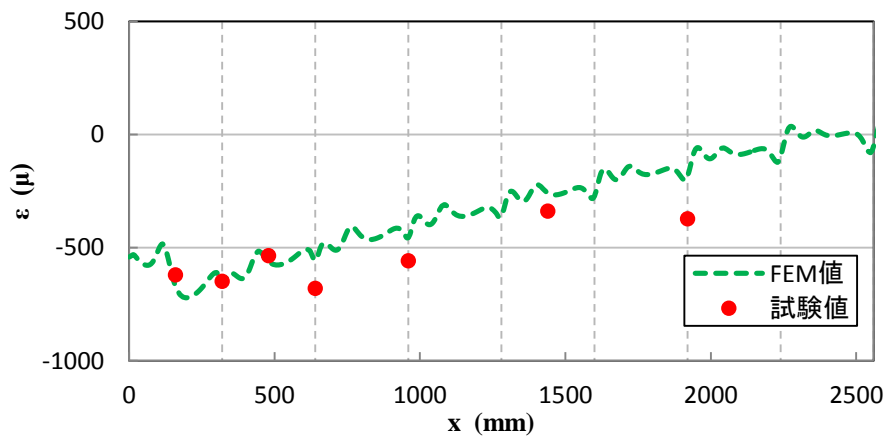
(c) 試験体 III

付図 B.1 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

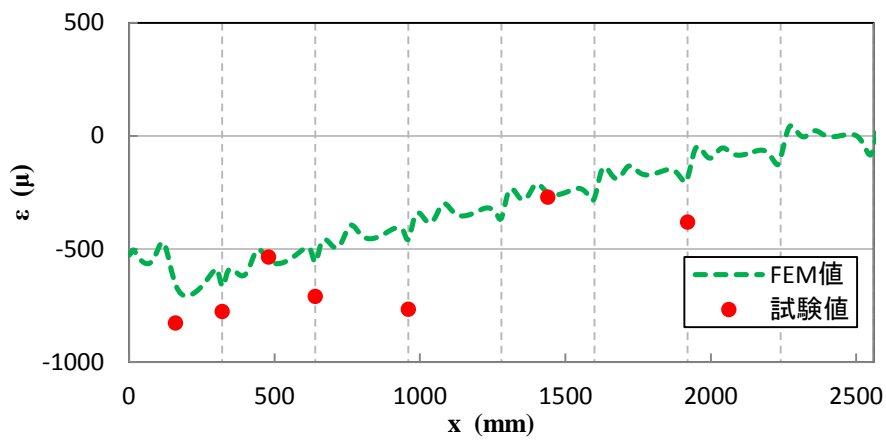
付録C 鋼桁上フランジの下面のひずみ分布



(a) 試験体 I



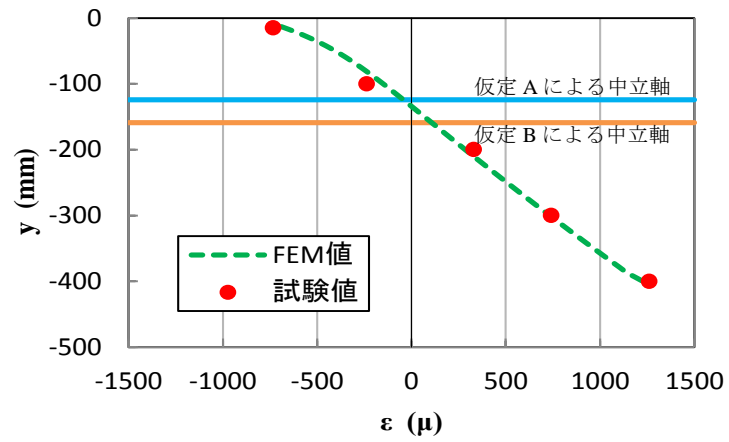
(b) 試験体 II



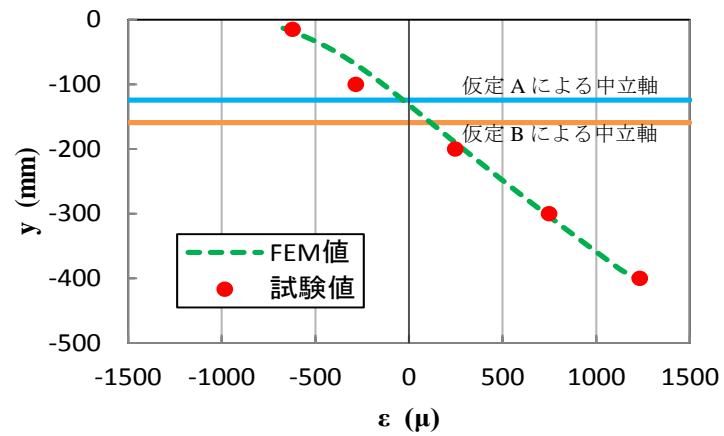
(c) 試験体 III

付図 C.1 鋼桁上フランジの下面のひずみ分布

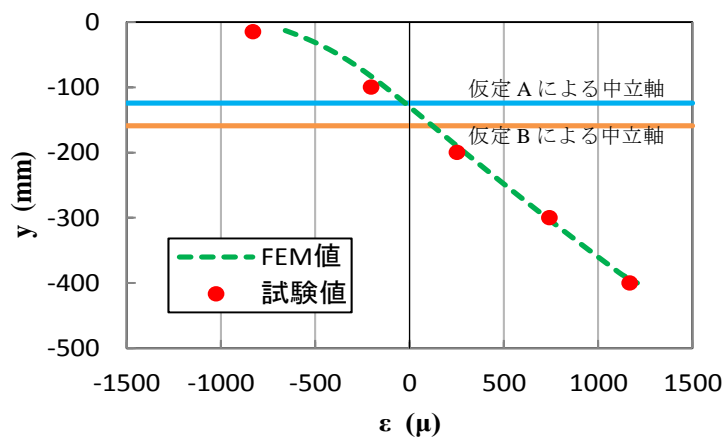
付録 D 鋼桁断面のひずみ分布



(a) 試験体 I

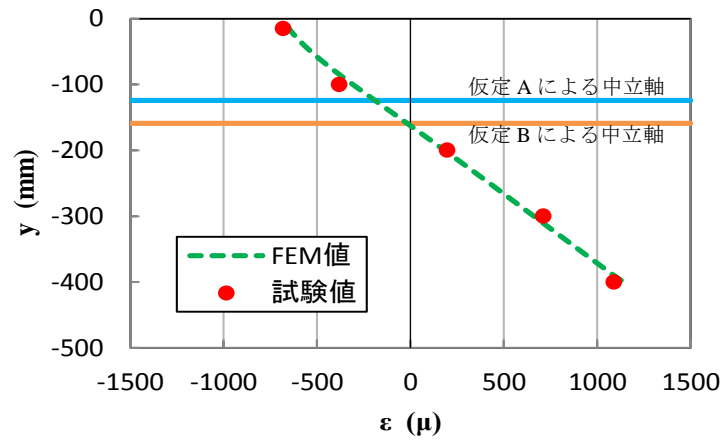


(b) 試験体 II

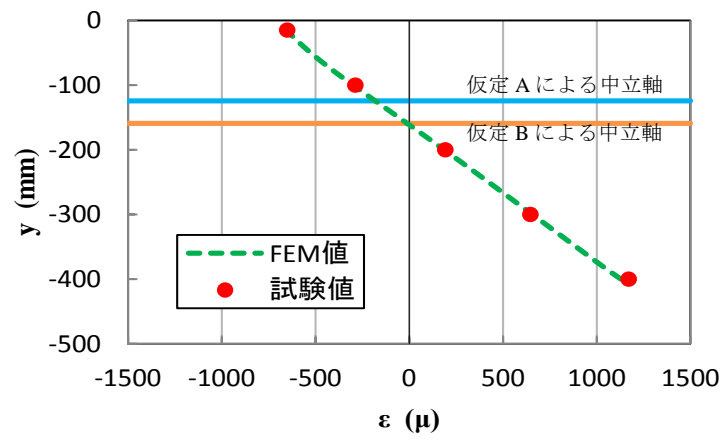


(c) 試験体 III

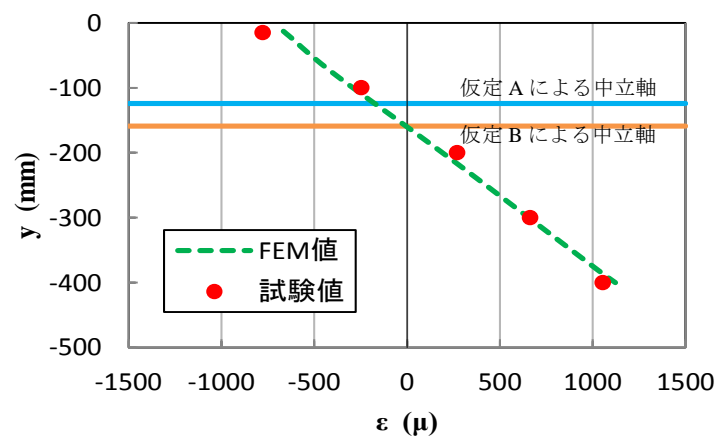
付図 D.1 $x=160$ mm (開断面中央)



(a) 試験体 I

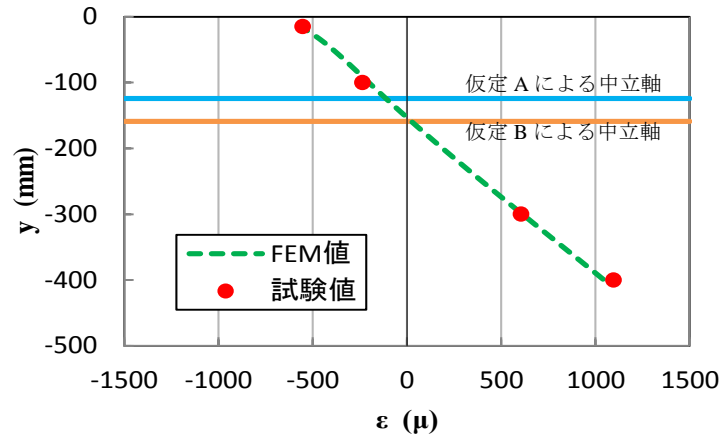


(b) 試験体 II

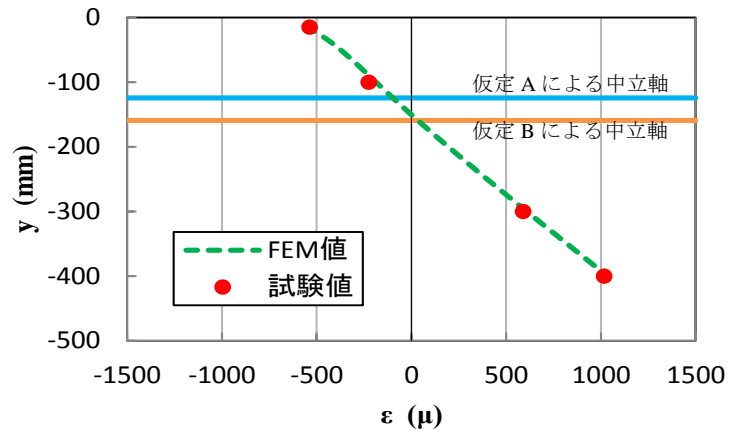


(c) 試験体 III

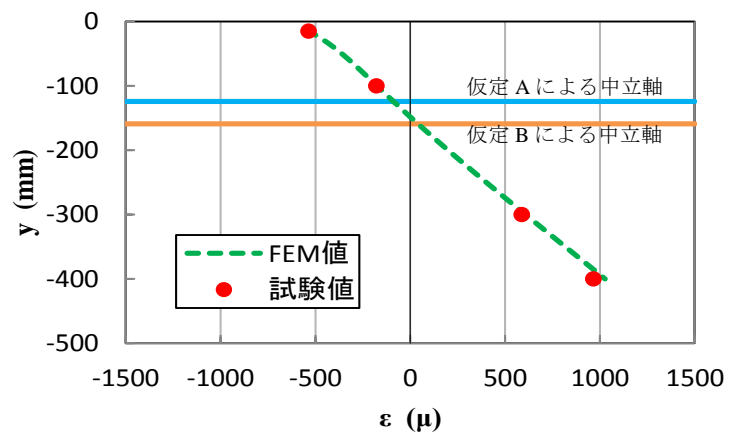
付図 D.2 $x=320$ mm (頭付きスタッドの位置)



(a) 試験体 I

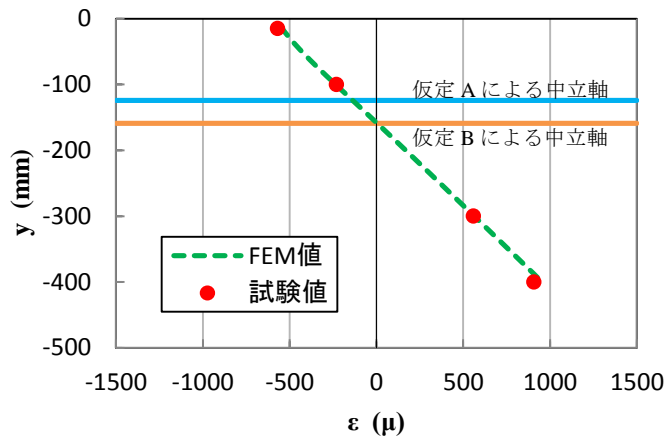


(b) 試験体 II

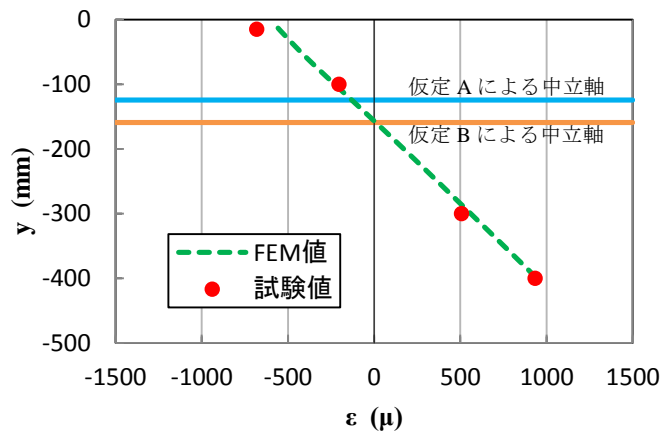


(c) 試験体 III

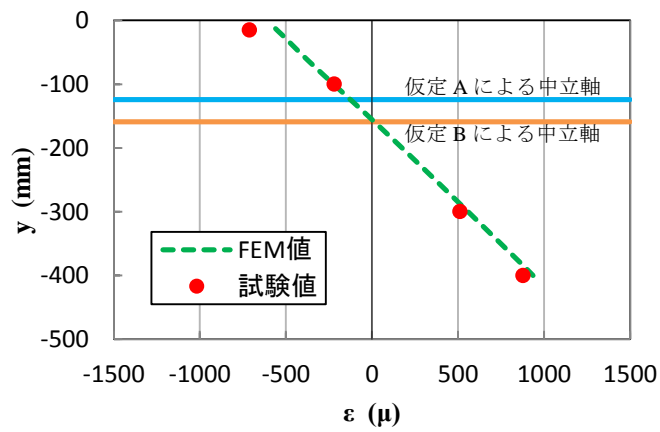
付図 D.3 $x=480\text{mm}$ (開断面中央)



(a) 試験体 I



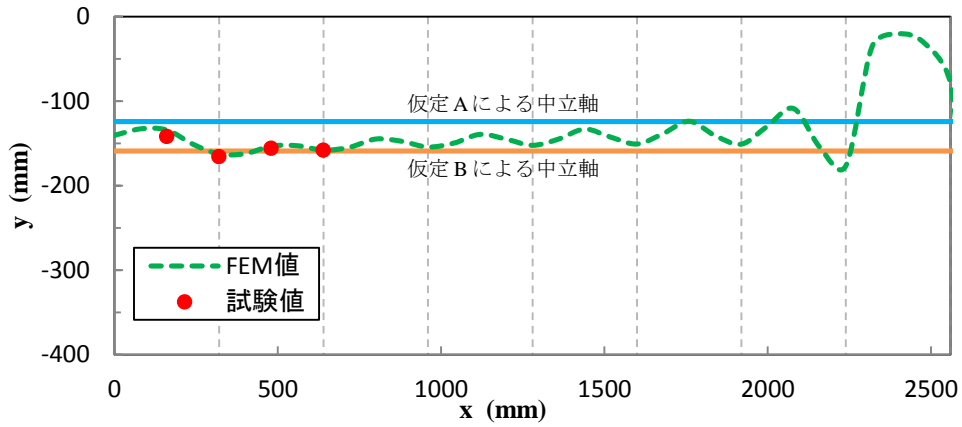
(b) 試験体 II



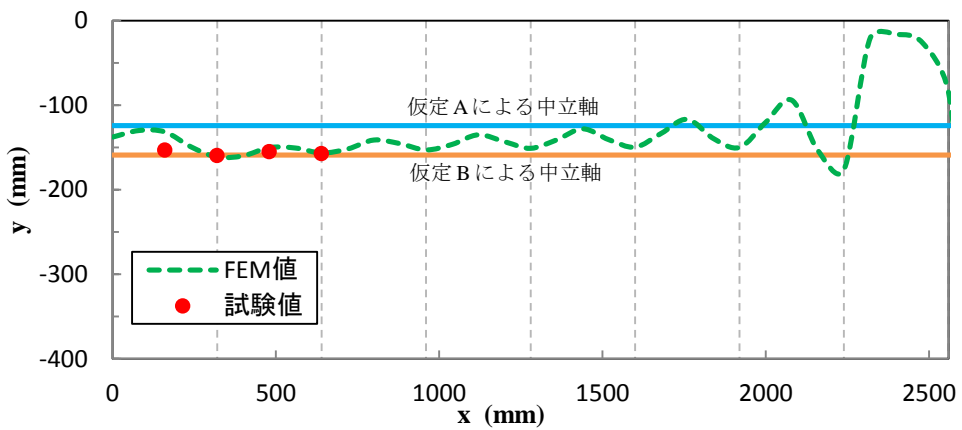
(c) 試験体 III

付図 D.4 $x=640$ mm (頭付きスタッドの位置)

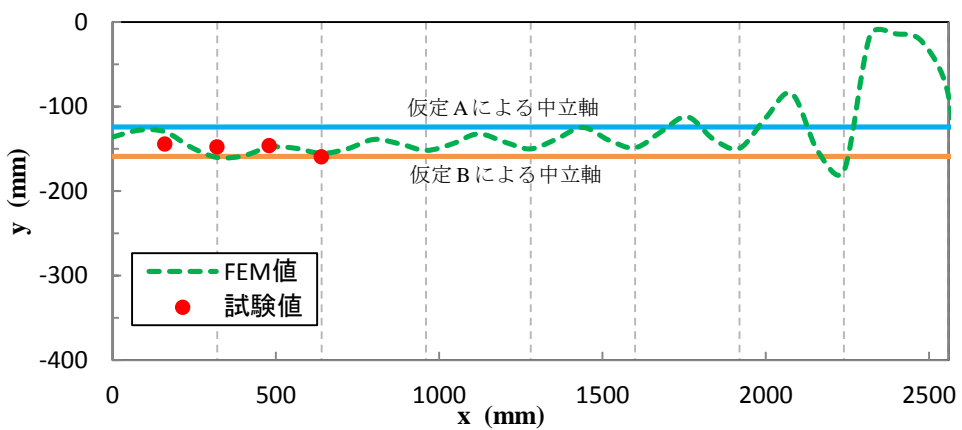
付録 E 合成桁の中立軸の分布



(a) 試験体 I



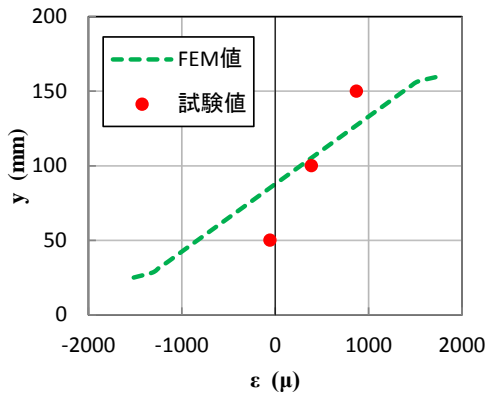
(b) 試験体 II



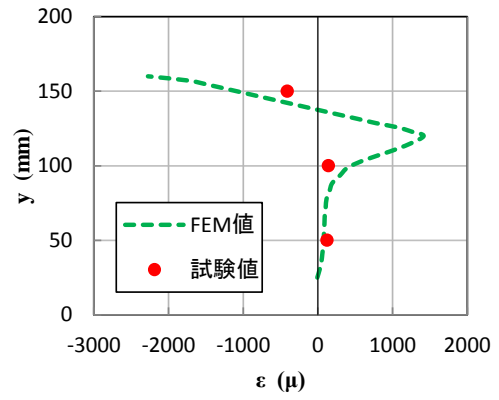
(c) 試験体 III

付図 E.1 合成桁の中立軸の分布

付録F アルミニウム床版ウェブの表面のひずみ分布

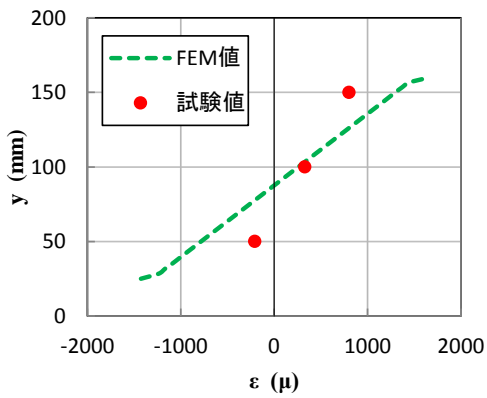


(a) x=2005mm

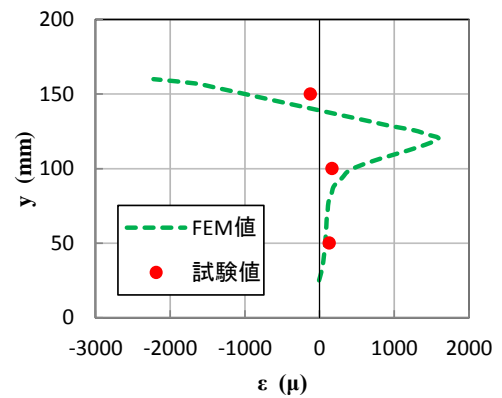


(b) x=2155mm

(1) 試験体 I

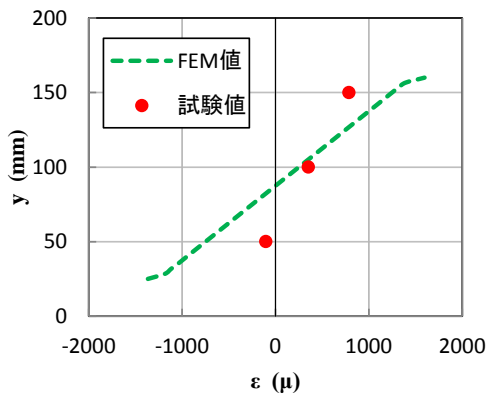


(a) x=2005mm

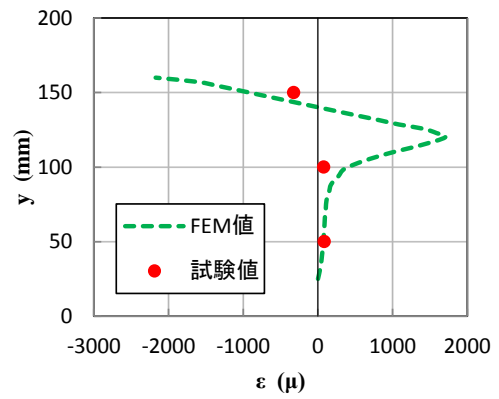


(b) x=2155mm

(2) 試験体 II



(a) x=2005mm

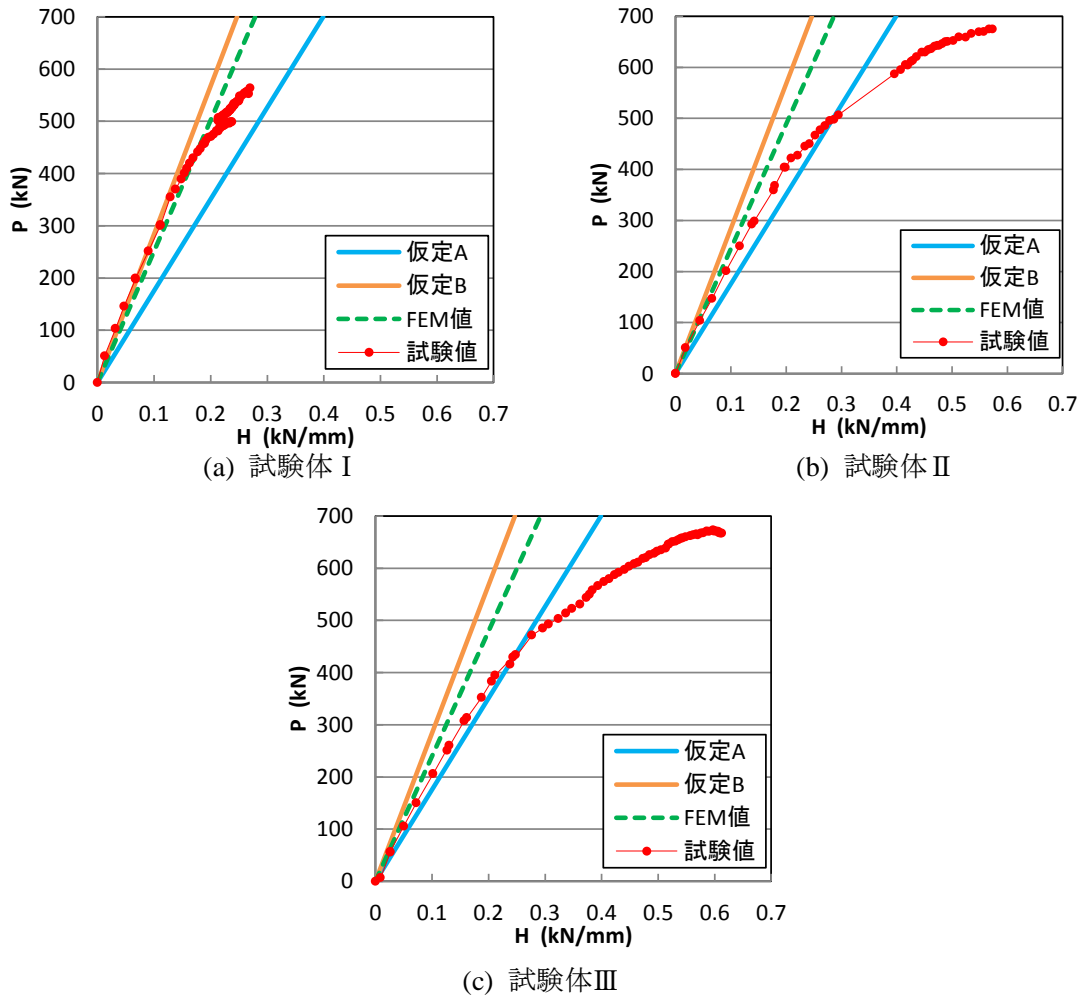


(b) x=2155mm

(3) 試験体 III

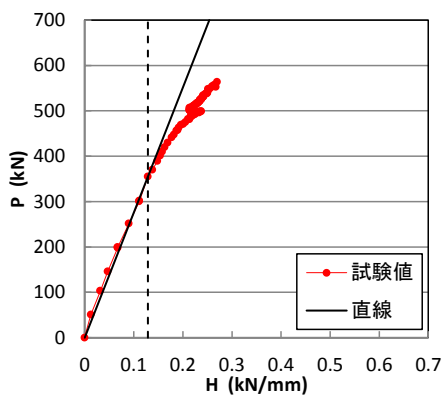
付図 F.1 アルミニウム床版ウェブの表面のひずみ分布

付録 G 荷重と水平せん断力の関係

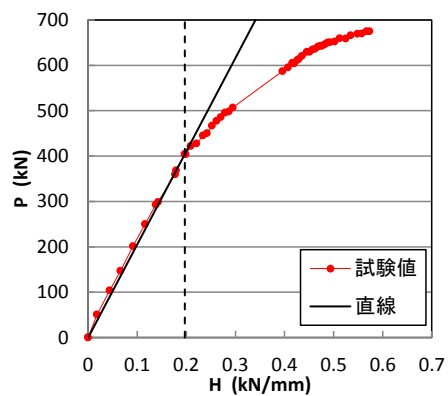


付図 G.1 荷重と水平せん断力の関係

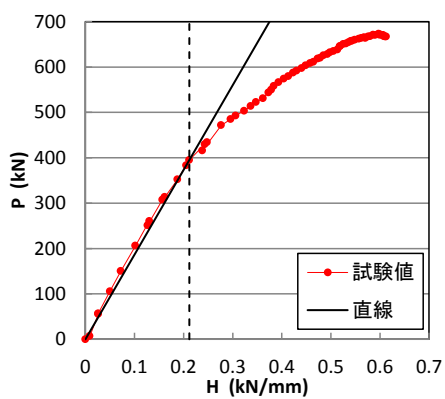
付録 H 各試験体の水平せん断力の弾性限界



(a) 試験体 I



(b) 試験体 II

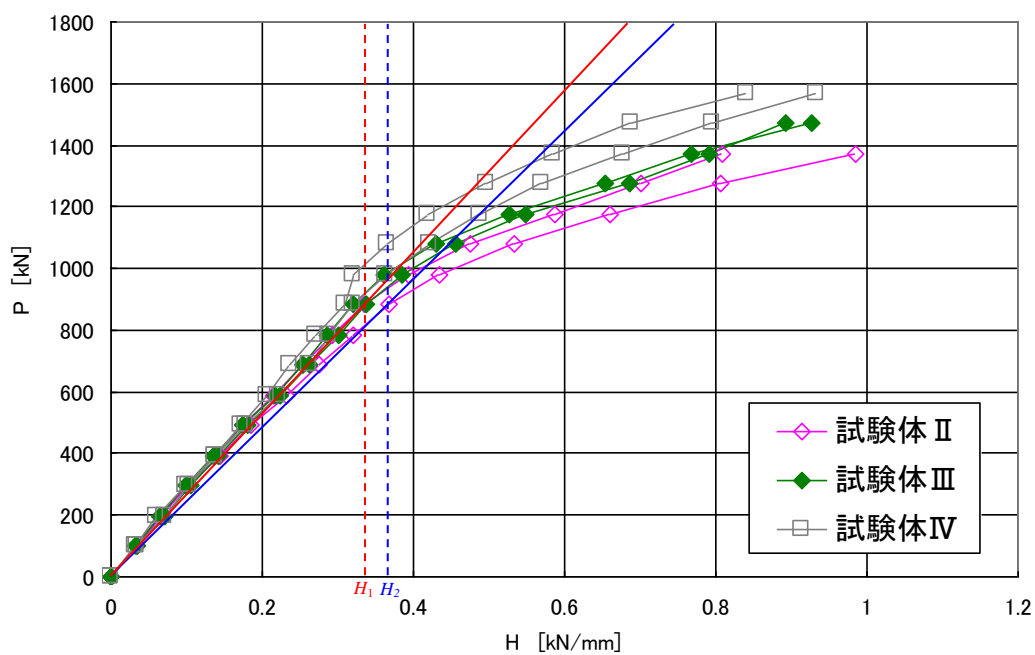


(c) 試験体 III

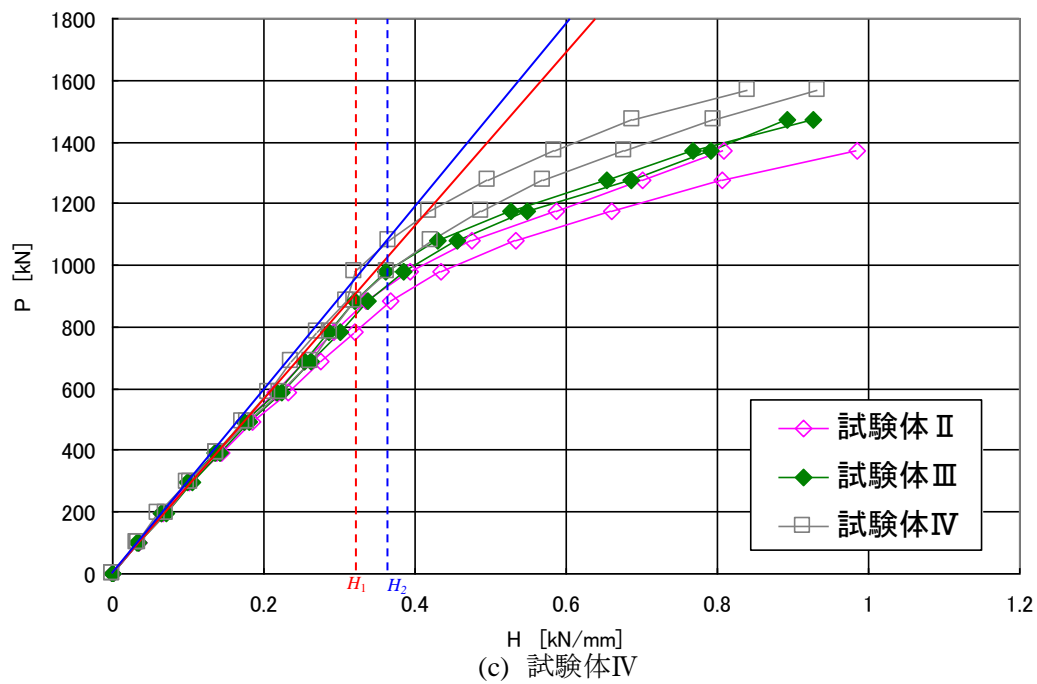
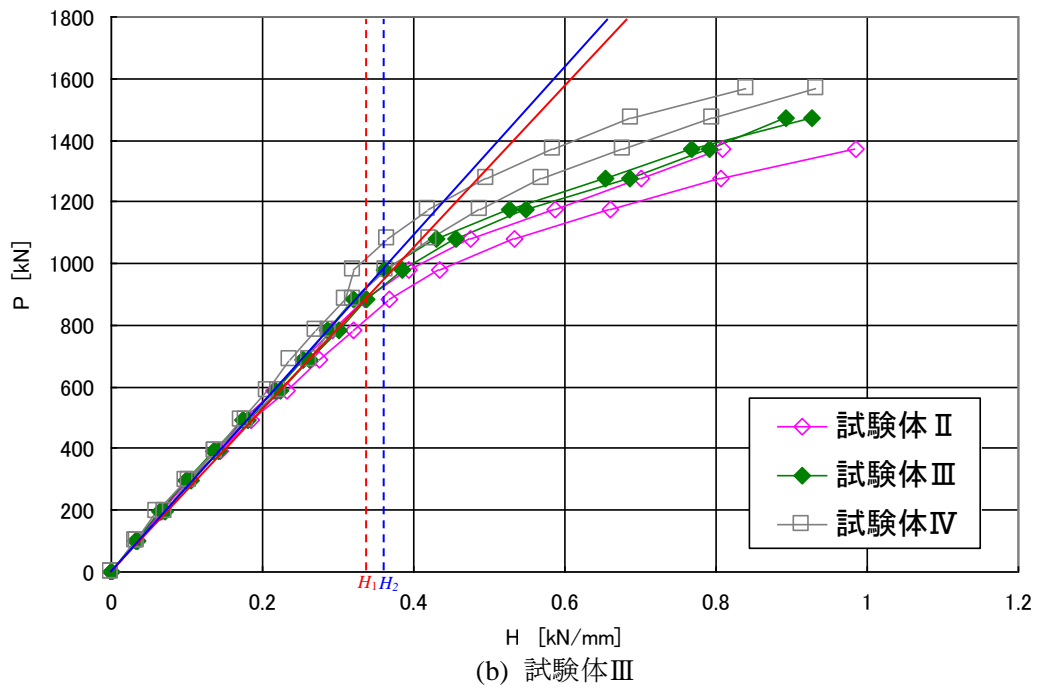
付図 H.1 各試験体の水平せん断力の弾性限界

付録 I 既往の試験体の荷重と水平せん断力の関係

頭付きスタッドの本数が1箇所当たり3本で、台座の高さが30mm(試験体II)、60mm(試験体III)、100mm(試験体IV)に対する、荷重と水平せん断力の関係を付図I.1に示す¹⁴⁾。各試験体について、桁端の荷重と水平せん断力の関係が示されている。したがって、各試験体に二つの荷重と水平せん断力の関係が与えられている。 H_1 と H_2 は、荷重と水平せん断力の関係が直線性を示す限界、すなわち水平せん断力の弾性限界を示す。各試験体の H_1 と H_2 の値を付表I.1に示す。



(a) 試験体 II



付図 I.1 既往の試験体の荷重と水平せん断力の関係

付表 I.1 各試験体の水平せん断力の弾性限界

試験体	台座の高さ	H_1 (kN/mm)	H_2 (kN/mm)
II	30mm	0.330	0.362
III	60mm	0.332	0.358
IV	100mm	0.320	0.360