アルミニウム床版を有する鋼桁の弾塑性有限 変位挙動に頭付きスタッドの本数が与える影響

ALST 研究レポート 40

2015年3月

大阪大学大学院工学研究科 藤本倫人, 大倉一郎

概要

本研究では、アルミニウム床版を有する鋼桁の弾塑性有限変位挙動に頭付きスタッドの 本数が与える影響を有限要素法解析によって明らかにする.

目次

第1章 序論	• • • 1
第2章 試験体	• • • 5
第3章 試験体の弾塑性有限変位解析	• • • 8
3.1 解析モデル	• • • 8
3.2 解析結果と試験結果の比較	• • • 11
3.2.1 たわみ	• • • 11
3.2.2 鋼桁下フランジに生じるひずみ	• • • 14
3.2.3 アルミニウム床版上板に生じるひずみ	• • • 18
3.2.4 アルミニウム床版と桁端部の変形	• • • 24
第4章 水平せん断力	• • • 27
4.1 頭付きスタッドに作用する力	• • • 27
4.2 水平せん断力の分布	• • • 34
第5章 結論	• • • 37
参考文献	• • • 38
付録	• • • 40

第1章 序論

国土交通省の道路の老朽化対策の取組み¹⁾によれば、2013 年現在、全国の橋長 2m以上の橋梁数は約70万橋あり、そのうち建設後50年以上経過した橋梁が約7.1万橋ある. その数は2023年には約17.1万橋に達することが予想されている. これらの橋梁の中には補修が必要とされる橋梁が数多く出てくることが予想され、その中には、鉄筋コンクリート床版の取り換えが必要な橋梁も出てくることが予想される. 他方、1993年の道路構造令の改正により、設計自動車荷重が196kNから245kNに変更されたことにより、鉄筋コンクリート床版を取り換える場合、現行の道路橋示方書²⁾を適用すると床版厚を厚くしなければならなくなる橋梁も出てくる. 床版が厚くなれば自重が増加するために、鋼桁や下部工への荷重が増加し、耐震性にも問題が出てくる. そこで、鉄筋コンクリート床版の重量に対して約1/5のアルミニウム床版で取り換えることにより、これらの問題を解決することができないかと考えられた³⁾. 新設の場合においても、鉄筋コンクリート床版に比べ、建設重機を小型化できることによる工期短縮、下部工の小型化、耐食性の良さからライフサイクルコストの削減にもつながるなどの利点が挙げられる.

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

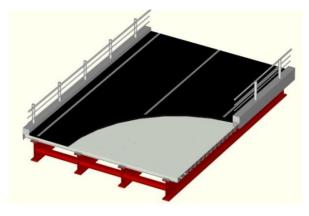


図-1.1 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋のイメージ

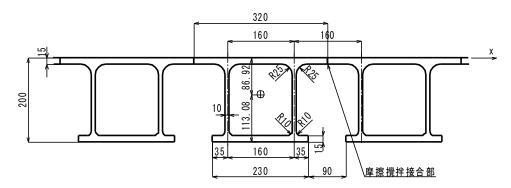


図-1.2 アルミニウム床版の断面形状



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

「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 2011年に日本アルミニウム協会から発刊され,同年 4 月には, \mathbf{Z} -1.4 に示す道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設された $^{13)}$.

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図-1.5 に示す. 鋼桁に一箇所あたり 3 本溶接された頭付きスタッドがアルミニウム床版の閉断面内へ挿入され、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とが連結される. したがって、鋼桁とアルミニウム床版との間には橋軸方向に合成作用が生じる.

前述の鋼桁に一箇所あたり頭付きスタッドを 3 本溶接することは,アルミニウム床版の橋軸直角方向の変形に対して,頭付きスタッドと台座が十分な静的強度と疲労強度を有していることが試験によって確認され,提案された 6 . その後,頭付きスタッドの本数を一箇所当たり 3 本として,30mm,60mm,100mm の高さの異なる台座を有する試験体の静的載荷試験が行われ,台座の高さが,アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に与える影響が調べられた 14 . さらに,台座の高さを 30mm として,一箇所あたり 1 本,2 本,3 本の頭付きスタッドが配置された試験体の静的載荷試験が行われ,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が調べられた 15 .

他方、アルミニウム床版と鋼桁の合成作用に関する理論についても研究がなされてきた ^{14),16)}. 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が、鋼桁上フランジとアルミニウム床版上板の水平変位差に比例すると仮定して、鋼桁とアルミニウム床版上板に対して軸力方程式が誘導された. しかし、一方の理論では、鋼桁上フランジとアルミニウム床版上板との間が、変形後も平面を保持すると仮定して軸力方程式が誘導された ¹⁶⁾. 図-1.5 に示すように、アルミニウム床版は開断面と閉断面が交互に並ぶ構造であるので、鋼桁上フランジとアルミニウム床版は開断面と閉断面が交互に並ぶ構造であるので、鋼桁上フランジとアルミニウム床版上板の間に対して、平面保持が成立するとは考え難いが、平面保持が成立しないとも考え難い. これに対して、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の平面保持の程度を表すパラメータとして平面保持度が定義され、過去の静的載

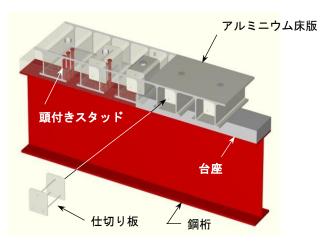


図-1.5 アルミニウム床版と鋼桁の連結構造

荷試験 $^{17)}$ で使用された試験体の平面保持度が推定され、頭付きスタッドの本数と平面保持度の関係が明らかにされた $^{18)}$.

本研究では、アルミニウム床版を有する鋼桁の弾塑性有限変位挙動に頭付きスタッドの 本数が与える影響を有限要素法解析によって明らかにする.

第2章 試験体

鋼桁とアルミニウム床版から成る試験体を図-2.1 に示す ¹⁷⁾. アルミニウム床版は, 図-2.2 に示す断面を有する 17 本の押出形材の上フランジを突合わせ, 摩擦撹拌接合で連結することによって製作された. 鋼桁は, 高さ 400mm, 幅 200mm の H 形鋼である. 台座には ECC(乾燥収縮ひび割れ抵抗性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. アルミニウム床版の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, 充填モルタルの挙動を観察するためにアクリル板が使用される.

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-2.3 に示す。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-2.4 に示す。アルミニウム合金材(A6061S-T6)、鋼材(SS400)、頭付きスタッド(CH16A)、台座(ECC)、充填モルタルの材料特性を表-2.1 に示す。表-2.1(b)に示す値は、H 形鋼および頭付きスタッドのミルシート記載値である。

試験体は両端がローラー支持され,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.

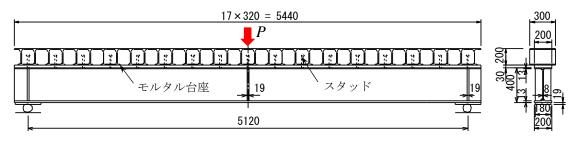


図-2.1 試験体

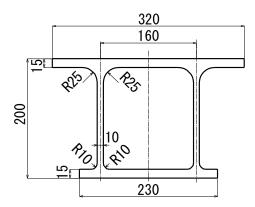


図-2.2 アルミニウム床版形材の断面

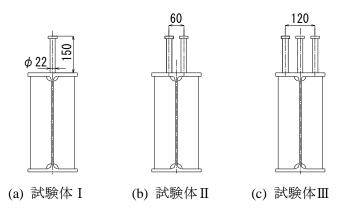


図-2.3 頭付きスタッドの配置位置

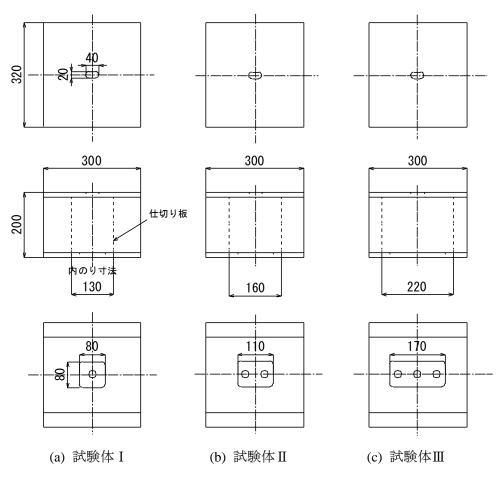


図-2.4 仕切り板の間隔と開口の寸法

表-2.1 材料特性

(a) アルミニウム合金材(A6061S-T6)

部位	母材	摩擦撹拌接合部
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

(b) 鋼材(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

(c) 台座(ECC)

材齢	(日)		91
	ヤング係数	(MPa)	15.39
圧縮試験	圧縮強度	(MPa)	34.2
	終局ひずみ	(%)	0.332
	ポアソン比		0.172
	ヤング係数	(MPa)	13.02
	降伏強度	(MPa)	3.86
一軸引張試験	降伏ひずみ	(%)	0.189
	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 試験体の弾塑性有限変位解析

3.1 解析モデル

図-2.1 に示す試験体の三次元弾塑性有限変位解析を汎用有限要素解析プログラム DIANA¹⁹⁾によって行う. 例として, 図-2.1 の試験体Ⅲの要素分割を図-3.1 に示す. 支間中 央および鋼桁ウェブの板厚中央に関する対称性より、試験体の 1/4 の部分を要素分割する. アルミニウム床版と鋼桁に対して、8節点四辺形アイソパラメトリック曲面シェル要素 (CQ40S), 台座, 充填モルタル, 頭付きスタッドに対して, 20 節点アイソパラメトリック ソリッドブロック要素(CHX60)を使用する.

アルミニウム床版と鋼桁との連結部の要素分割を図-3.2 に示す. 円柱の頭付きスタッド をブロック要素で分割するには多くの要素を必要とするので, 直径 22mm の頭付きスタッ ドを正四角柱に置き換える. 正四角柱の断面の一辺の長さは, 直径 22mm の頭付きスタッ ドの断面積と等しくなるように、19.50mmとする.

アルミニウム床版上板と鋼桁との間に生じる水平せん断力は, 頭付きスタッドと, 頭付 きスタッドの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

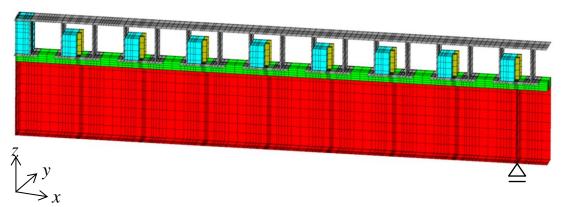
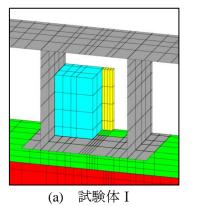
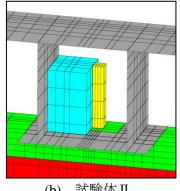
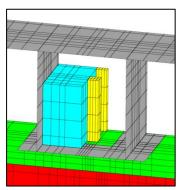


図-3.1 要素分割 [試験体Ⅲ]





(b) 試験体Ⅱ



(c) 試験体Ⅲ

図-3.2 連結部の要素分割

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. 充填 モルタルと頭付きスタッドの界面の節点、充填モルタルとアルミニウム床版ウェブの界面 の節点、充填モルタルとアルミニウム床版下フランジの界面の節点をいずれも共有させる. アルミニウム床版下フランジの開口部の充填モルタルと台座の界面の節点を重複させる.

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 16 、頭付きスタッドの左側のアルミニウム床版下フランジと台座の界面の節点を重複させる. これとは反対側の右側のアルミニウム床版下フランジは台座を押し、台座に支圧力を生じさせるので、頭付きスタッドの右側のアルミニウム床版下フランジと台座の界面の節点を重複させ、両者のz軸方向の変位は同じとし、水平方向の変位は自由とする. 頭付きスタッドに接する台座は局所的に圧壊することを想定して、頭付きスタッドと台座の界面の節点を重複させる. 他方、台座と鋼桁上フランジの界面の節点を共有させる.

アルミニウム床版に対してシェル要素を使用しているので、アルミニウム床版上板とウェブが交差する部分、およびウェブと下フランジが交差する部分のフィレットを、**図-3.3** に示すように、各板厚のフィレットの弧の中点まで厚くすることによって考慮する²⁰⁾.

荷重は,支間中央から長手方向 100mm, 奥行き方向 150mm のアルミニウム床版上板の節 点に強制変位によって与える.

鋼桁,頭付きスタッド,アルミニウム床版,台座,充填モルタルの材料特性に対して表 -2.1 に示す値を用いる. 鋼桁および頭付きスタッドのヤング係数とポアソン比は,それぞれ 200GPa, 0.3 とし,両者の応力-ひずみ関係は,2次勾配が $E_s/100$ のバイリニア型とする. E_s は鋼桁および頭付きスタッドのヤング係数である.

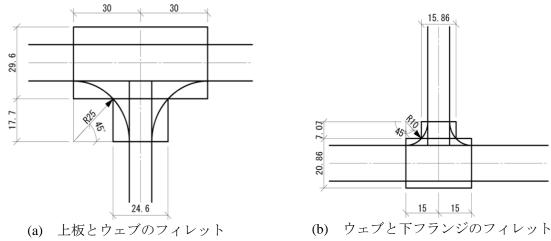


図-3.3 アルミニウム床版のフィレットのモデル化

アルミニウム合金材および摩擦撹拌接合部の応力-ひずみ関係に対して、次式によって与えられる Ramberg & Osgood 式を用いる.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_a} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}}\right)^n \qquad (\sigma \le \sigma_{0.2})$$
(3.1)

$$\sigma = \sigma_{0.2} \qquad (\sigma > \sigma_{0.2}) \tag{3.2}$$

ここに,

 ε と σ : それぞれ, ひずみと応力

 E_a : アルミニウム合金のヤング係数

 σ_{02} : アルミニウム合金の 0.2%耐力

n:アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金の母材と摩擦撹拌接合部のヤング係数,0.2%耐力,ひずみ硬化パラメータnの値を表-3.2に示す.同表の E_a と $\sigma_{0.2}$ の値は,表-2.1(a)に与えられる材料試験値である.ひずみ硬化パラメータnの値は,引張試験の結果に確率統計学的処理を施すことによって得られた,非超過確率 5%に対する値である 21).

弾塑性有限変位解析の約 700kN の最大荷重時で、試験体端部のアルミニウム床版の閉断面内の充填モルタルに約 60MPa の圧縮応力、試験体中央の台座に約 25MPa の圧縮応力が生じる.これらの値は、表-2.1 に示す、充填モルタル 79.6MPa と台座 34.2MPa の圧縮強度に対して、70~80%である.したがって、充填モルタルおよび台座は、弾性材料として扱う.

 母材
 摩擦撹拌接合部

 E_a (GPa)
 71.4
 71.8

 $\sigma_{0.2}$ (MPa)
 290
 167

 n 29.1
 10

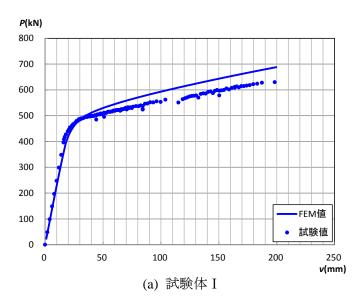
表-3.2 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータnの値

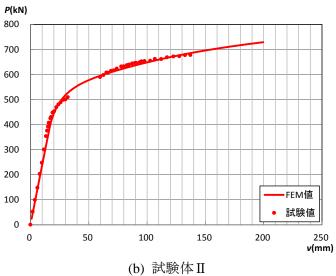
3.2 解析結果と試験結果の比較

3.2.1 たわみ

荷重と試験体中央のたわみの関係を図-3.4 に示す. 荷重が約 500kN を超えると, 試験体 I とIIIでは, FEM 値が試験値から少し離れるが, 試験体IIでは, FEM 値と試験値はほぼ一致している.

試験体のたわみ分布を図-3.5 に示す。横軸は試験体中央を原点とする座標であり、縦軸はたわみである。同図からわかるように、荷重が約 400kN までは、全試験体とも FEM 値と試験値はほぼ一致している。荷重が約 500kN を超えると、試験体 I とIIIでは、FEM 値が試験値から離れるが、試験体IIでは、FEM 値と試験値はほぼ一致している。





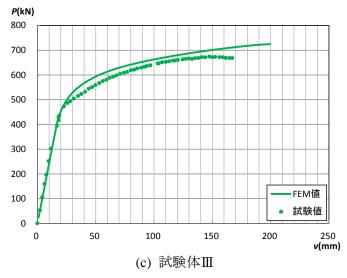
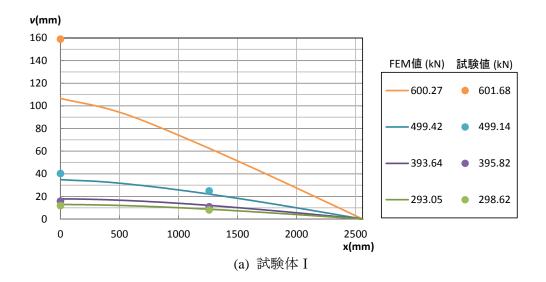
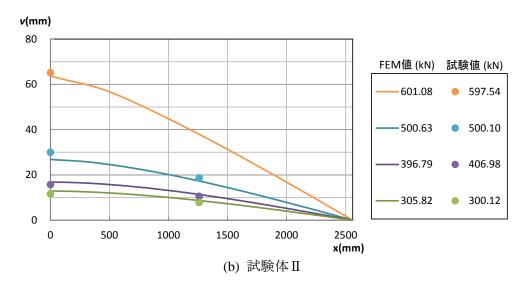


図-3.4 荷重と試験体中央のたわみの関係





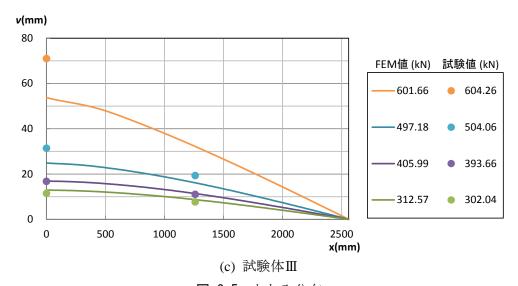
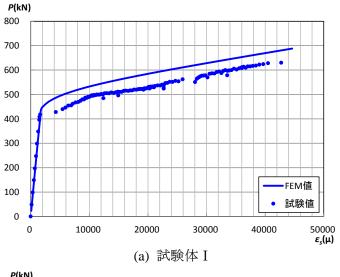


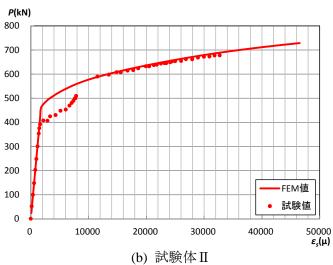
図-3.5 たわみ分布

3.2.2 鋼桁下フランジに生じるひずみ

荷重と鋼桁下フランジの下面のひずみ(試験体中央から 320mm の位置)の関係を図-3.6 に示す. 試験体 I では、荷重が約 400kN を超えると、FEM 値が試験値から離れ、試験体 II では、荷重が約 500kN を超えると、FEM 値が試験値から離れる. 試験体 II では、荷重が 400kN から 500kN の間で試験値が特異な値を示すが、これを除くと、FEM 値は試験値にほぼ一致している.

鋼桁下フランジの下面のひずみ分布を**図**-3.7 と 3.8 に示す. **図**-3.8 は,**図**-3.7 の 3000 μ 以下のひずみ分布の拡大図である. 横軸は試験体中央を原点とする座標であり,縦軸はひずみである. 荷重が約 400kN までは,FEM 値は試験値にほぼ一致しているが,荷重が約 500kN を超えると,FEM 値は試験値から離れる.





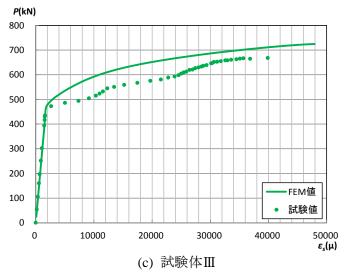
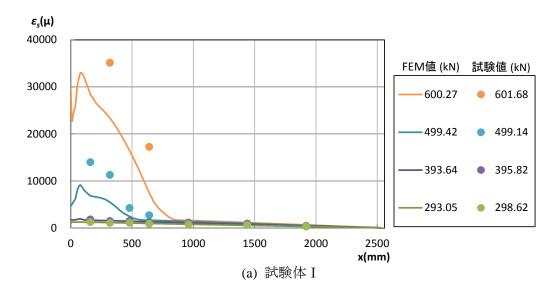
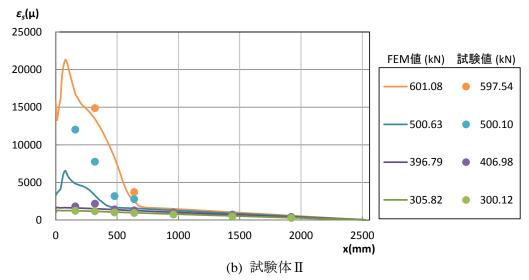


図-3.6 荷重と鋼桁下フランジの下面のひずみの関係 (x=320mm)





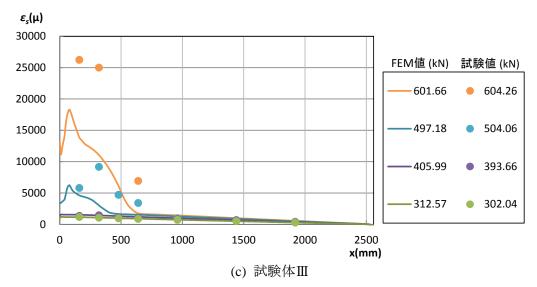
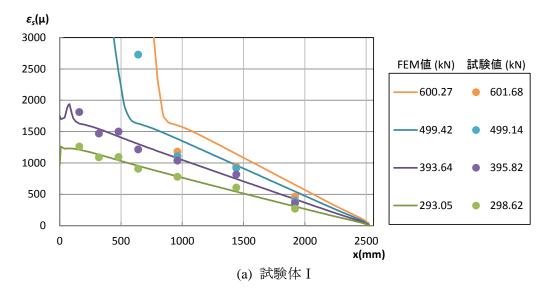
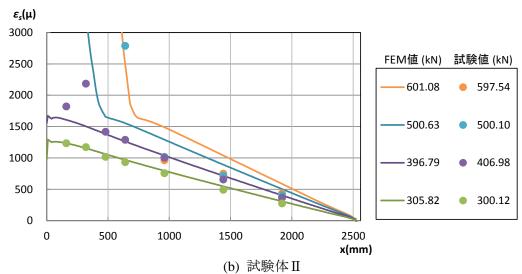


図-3.7 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布





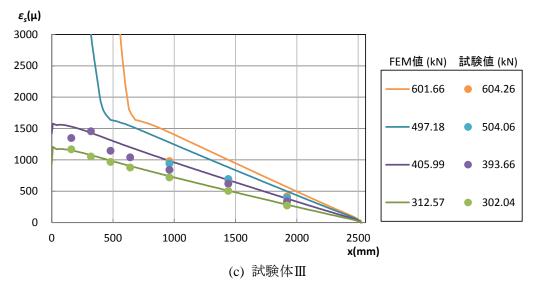


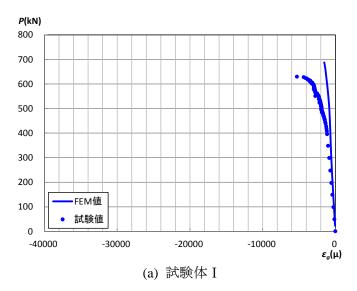
図-3.8 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布の拡大図

3.2.3 アルミニウム床版上板に生じるひずみ

試験体中央から 480mm の位置における,荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみおよび 板曲げひずみの関係をそれぞれ図-3.9,3.10 に示す.膜ひずみは,アルミニウム床版上板 の上面と下面に生じるひずみの平均値であり,板曲げひずみは,上下面のひずみ差を2 で除した値である.荷重が増加するに従って,FEM 値は試験値より小さくなる.

アルミニウム床版上板の膜ひずみの分布を図-3.11 と 3.12 に示す. 図-3.12 は、図-3.11 の-3000 μ 以上のひずみ分布の拡大図である. さらに、アルミニウム床版上板の板曲げひずみの分布を図-3.13 に示す. これらの図の横軸は、いずれも試験体中央を原点とする座標であり、縦軸はひずみである. どの図においても、FEM 値は試験値より小さい.

このように、アルミニウム床版上板に生じるひずみに関しては、有限要素法解析が試験 結果を再現できていない. これは、**付録 A** で示すように、アルミニウム床版の閉断面内の 充填モルタルを全て考慮していないことが原因である.



P(kN) 800 700 600 500 400 300 200 FEM値 100 試験値 0 $\varepsilon_a^0(\mu)$ -20000 -40000 -30000 (b) 試験体Ⅱ

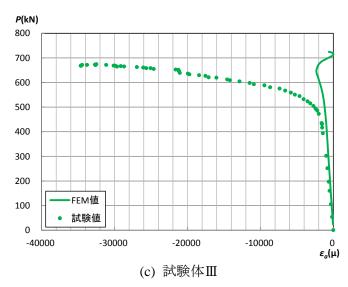
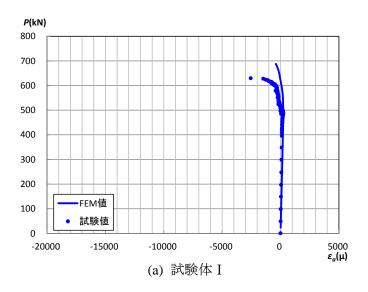
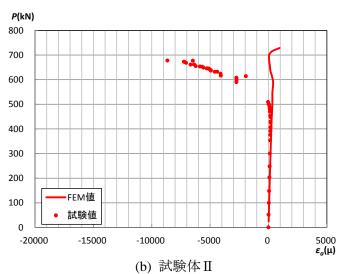


図-3.9 荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係 (x=480mm)





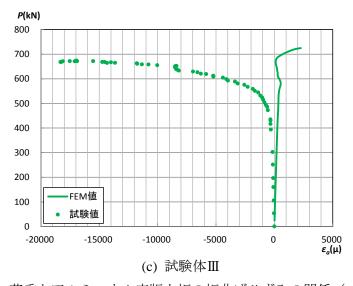
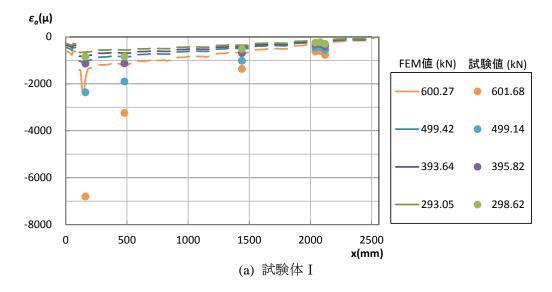
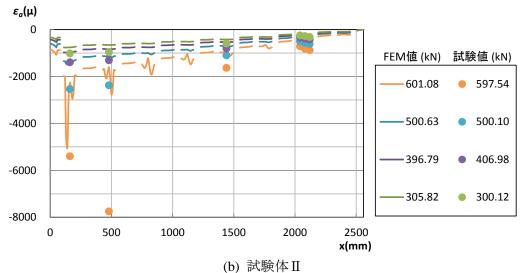


図-3.10 荷重とアルミニウム床版上板の板曲げひずみの関係 (x=480mm)





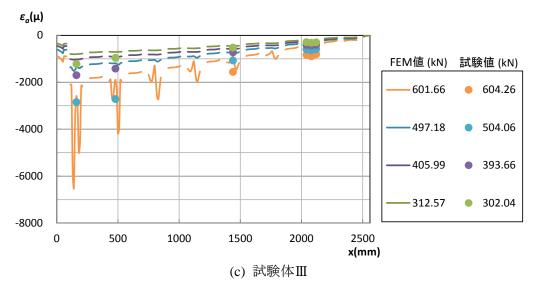
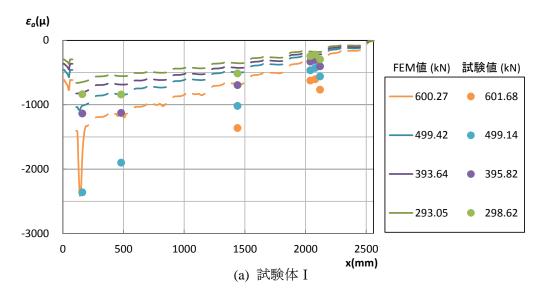
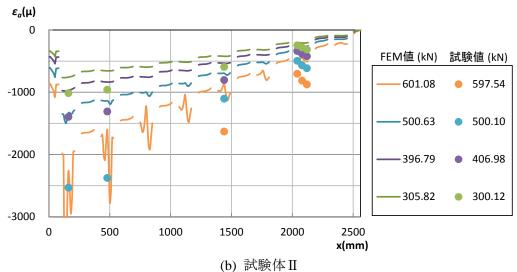


図-3.11 アルミニウム床版上板の膜ひずみの分布





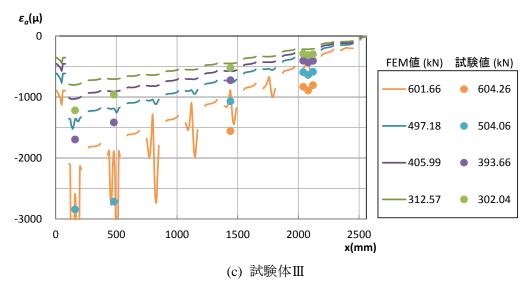
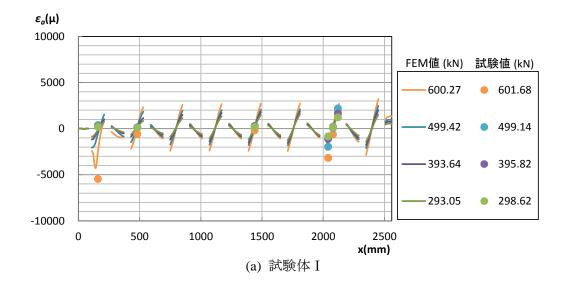
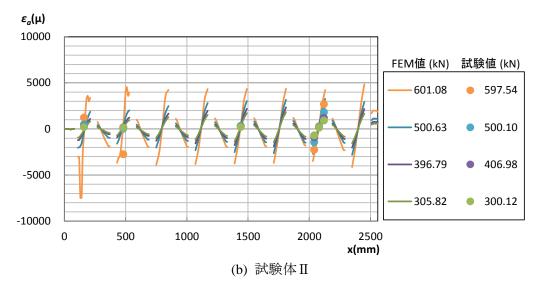


図-3.12 アルミニウム床版上板の膜ひずみの分布の拡大図





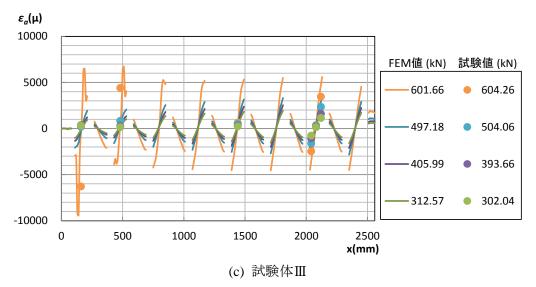


図-3.13 アルミニウム床版上板の板曲げひずみ分布

3.2.4 アルミニウム床版と桁端部の変形

試験終了後の試験体の中央部分と端部の変形をそれぞれ図-3.14,3.15に示す。これらは、荷重除荷後の変形である。図-3.14(a)に示すように、試験体 I では、アルミニウム床版上板に大きな変形は見られないが、図-3.14(b)と(c)に示すように、試験体 I とII では、開断面のアルミニウム床版に大きな塑性変形が生じている。一方、図-3.15(a)に示すように、試験体 I では、ECC 台座の端が鋼桁の端から外に突き出しているが、図-3.15(b)と(c)に示すように、試験体 I とII ではその様な現象は見られない。

有限要素法解析による試験体 I , II , III の変形をそれぞれ図-3.16, 3.17, 3.18 に示す. 変形倍率は 1 倍である. これらは,最大荷重時の変形である. 図-3.16(c), 3.17(c), 3.18 (c) では,台座を除いて,頭付きスタッドの変形が見えるようにしている.

図-3.16 からわかるように、試験体 I では、中央部分の開断面のアルミニウム床版上板が塑性変形していないが、端部の頭付きスタッドに大きな塑性変形が生じている. このように、端部の頭付きスタッドが大きく塑性変形することによって、試験体 I では、ECC 台座の端が鋼桁の端から外に突き出したと推察される.

図-3.17 と 3.18 に示すように、試験体ⅡとⅢでは、中央部分の開断面のアルミニウム床版上板が塑性変形し、頭付きスタッドも塑性変形している。しかし、頭付きスタッドの塑性変形の大きさは、試験体Ⅰのそれと比較すると小さい。

以上より、試験体 I は、端部の頭付きスタッドが塑性変形することによって終局強度を 迎え、試験体 II と III は、中央部分の開断面のアルミニウム床版上板が塑性変形することに よって終局強度を迎えたと推察される.



(a) 試験体 I



(b) 試験体Ⅱ



(c) 試験体Ⅲ

図-3.14 試験終了後の試験体の中央部分の変形



(a) 試験体 I

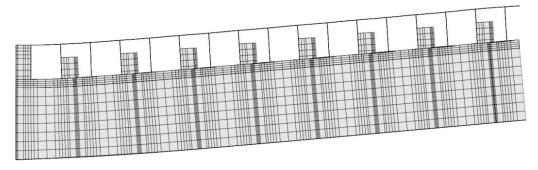


(b) 試験体Ⅱ



(c) 試験体Ⅲ

図-3.15 試験終了後の試験体の端部の変形



(a) 全体

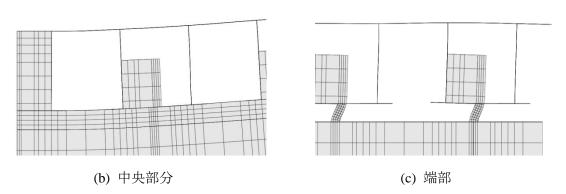
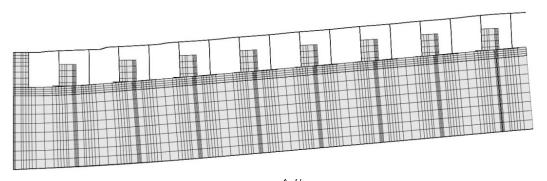


図-3.16 試験体 I の変形 (P=688kN)



(a) 全体

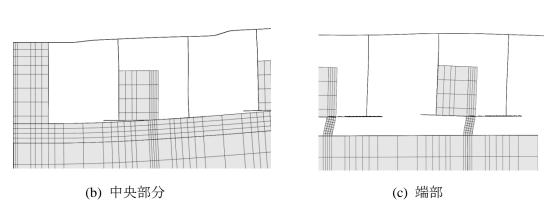


図-3.17 試験体Ⅱの変形(P=729kN)

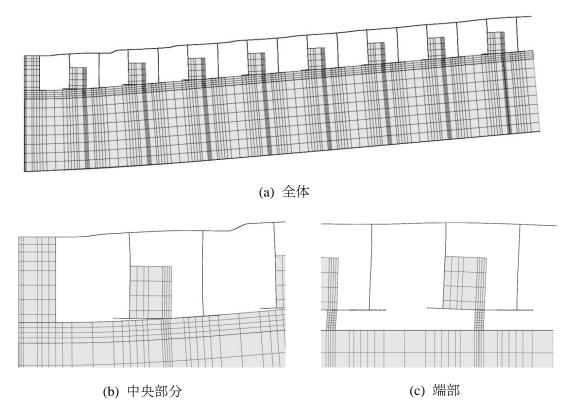


図-3.18 試験体Ⅲの変形(P=725kN)

第4章 水平せん断力

4.1 頭付きスタッドに作用する力

図-4.1 を参照して、鋼桁上フランジの中央面から 22mm の位置の、頭付きスタッドの横断面上の節点に生じるせん断応力に対して、シンプソン法による数値積分を適用することによって、1 本の頭付きスタッドに作用する力 P_{scl} が与えられる。他方、頭付きスタッドの変形 δ が、鋼桁上フランジの中央面の位置とアルミニウム床版下フランジの中央面の位置における頭付きスタッドの変位差によって与えられる。

荷重Pと頭付きスタッド 1 本に作用する力 P_{scl} の関係を図-4.2 に示す。頭付きスタッドの識別を図-4.3 に示す。試験体IIIでは、鋼桁ウェブの直上の頭付きスタッドに作用する力と、外側の頭付きスタッドに作用する力がほぼ一致するので、両者の平均値を与えている。図-4.2 からわかるように、頭付きスタッドの本数が増加するに従って、頭付きスタッド 1 本に作用する力は減少する。

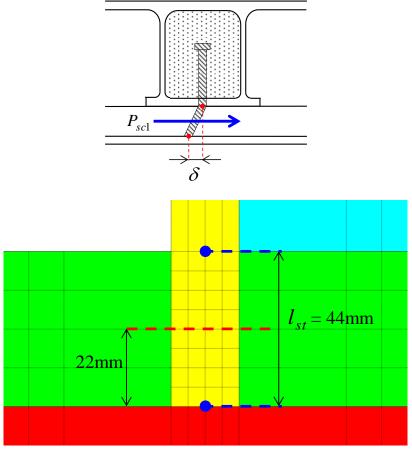
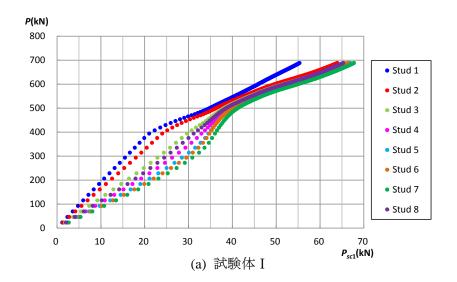
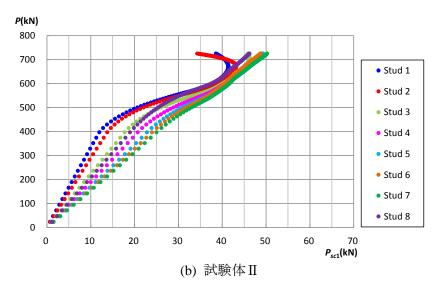


図-4.1 頭付きスタッドに作用する力と変形





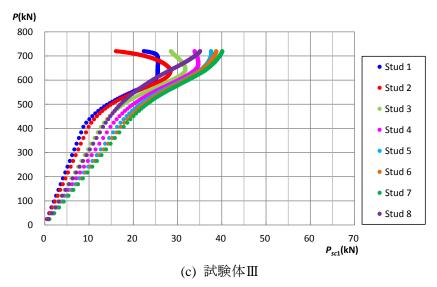


図-4.2 荷重と頭付きスタッド1本に作用する力の関係

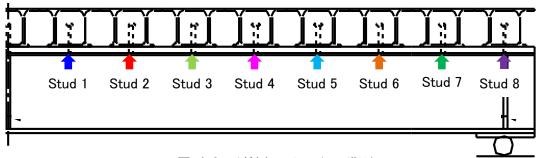


図-4.3 頭付きスタッドの識別

頭付きスタッド 1 本に作用する力 P_{sc1} と頭付きスタッドの変形 δ の関係を図-4.4 と 4.5 に示す。図-4.5 は,図-4.4 において δ が 1.0mm 以下の領域の拡大図である。試験体IIIに関しては,図-4.4 において δ が減少する部分を図-4.5 では削除している。図-4.4 からわかるように,頭付きスタッドの本数が増えるに従って,頭付きスタッド 1 本に作用する力が減少するため,変形量も減少する。図-4.5 からわかるように,Stud 8 の P_{sc1} と δ の関係を除いて,Stud 1~7 に対する P_{sc1} と δ の関係はほぼ一致している。Stud 8 の δ が Stud 1~7 のそれより大きいのは,Stud 8 が試験体の端部にあるためである。

 P_{scl} と δ/l_{st} の関係を図-4.6 と 4.7 に示す。 l_{st} は,図-4.1 に示す,鋼桁上フランジの中央面の位置とアルミニウム床版下フランジの中央面の位置の間の距離で 44mm である.図-4.6 は, $\delta/l_{st} \le 0.4\%$ に対して P_{scl} と δ/l_{st} の関係を示し,図-4.7 は, $\delta/l_{st} \le 1.0\%$ に対して P_{scl} と δ/l_{st} の関係を示している.両図では,Stud 8 の P_{scl} と δ/l_{st} の関係を除去している.

 P_{sc1} が約 10kN 以下で, P_{sc1} と δ/l_{st} の関係が直線性を示す部分の傾きを**表-4.1** に示す.図 **-4.6** の破線で示すように, δ/l_{st} =0.01%を通って,**表-4.1** に示す傾きを有する直線が, P_{sc1} と δ/l_{st} の関係に交差する点の P_{sc1} の値を,頭付きスタッド 1 本の比例限度とする.同様に,図 **-4.7** の破線で示すように, δ/l_{st} =0.2%を通って,**表-4.1** に示す傾きを有する直線が, P_{sc1} と δ/l_{st} の関係に交差する点の P_{sc1} の値を,頭付きスタッド 1 本の 0.2% 耐力とする.

Stud $1\sim7$ の各頭付きスタッドに対して得られた比例限度の平均値および0.2%耐力の平均値を表-4.2 に示す。さらに,頭付きスタッド 1 本の比例限度および0.2%耐力とその本数の関係を図-4.8 に示す。頭付きスタッドの本数が増えるに従って,比例限度と0.2%耐力は低下する。

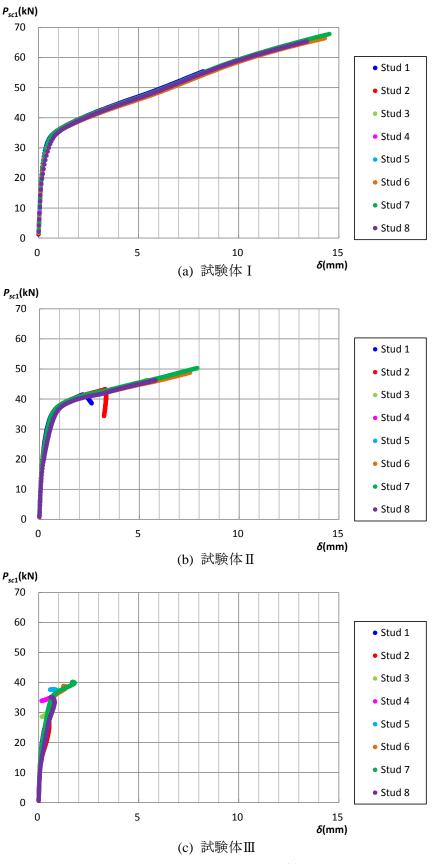
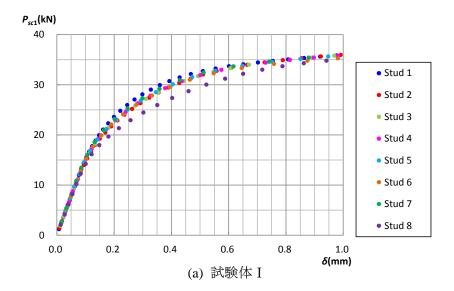
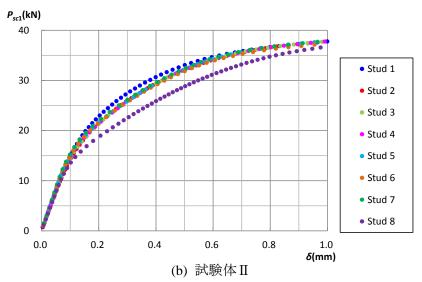


図-4.4 P_{scl} と δ の関係





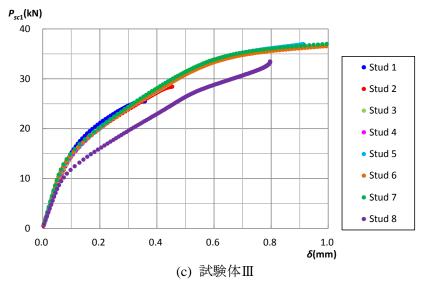
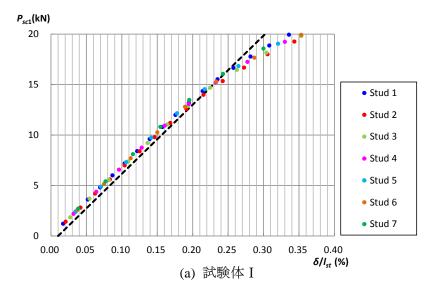
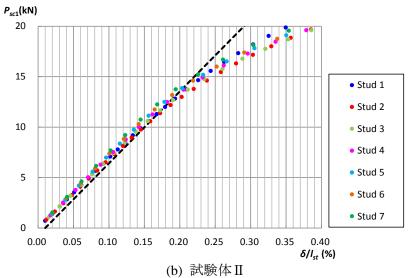


図-4.5 P_{scl} と δ の関係の拡大図





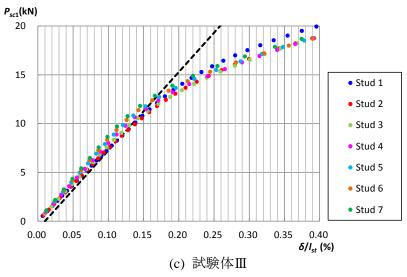
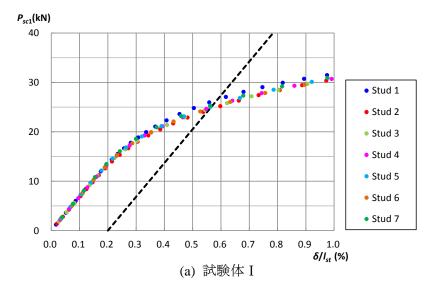
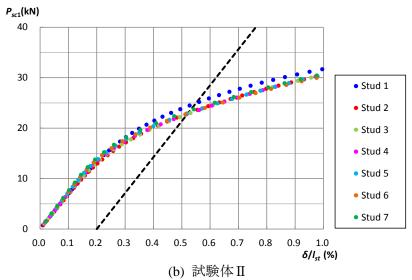


図-4.6 P_{sc1} と δ の関係 $(\delta/l_{st} \leq 0.4\%)$





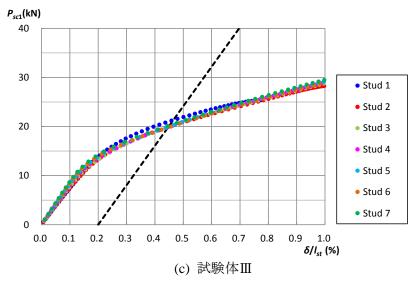


図-4.7 P_{sc1} と δ の関係 $(\delta/l_{st} \le 1.0\%)$

表-4.1 $P_{sc1} \geq \delta/l_{st}$ の関係の傾き

	試験体 I	試験体Ⅱ	試験体Ⅲ
P_{sc1} と δ/l_{st} の傾き(kN)	68.5	71.3	80.5

表-4.2 頭付きスタッド1本の比例限度と0.2%耐力

	試験体 I	試験体Ⅱ	試験体Ⅲ
比例限度(kN)	15.0	13.3	11.7
0.2%耐力(kN)	24.8	23.2	20.0

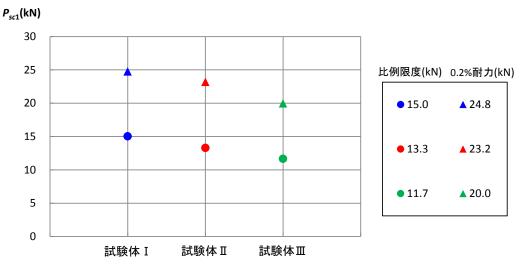


図-4.8 頭付きスタッドの比例限度および0.2%耐力とその本数の関係

4.2 水平せん断力の分布

図-4.9 を参照して、水平せん断力Hは次式で与えられる.

$$H = \frac{\Delta N_a}{\Delta x} \tag{4.1}$$

ここに,

 ΔN_a : アルミニウム床版の開断面中央の位置の上板に生じる軸力と、それに隣接する開断面中央の位置の上板に生じる軸力との差

Δx : 頭付きスタッドの配置間隔 (320mm)

一箇所に配置される頭付きスタッドの本数をn本とすれば、 ΔN_a は次式で与えられる.

$$\Delta N_a = nP_{sc1} \tag{4.2}$$

式(4.2)を式(4.1)に代入して、水平せん断力は次式で与えられる.

$$H = \frac{nP_{sc1}}{\Lambda x} \tag{4.3}$$

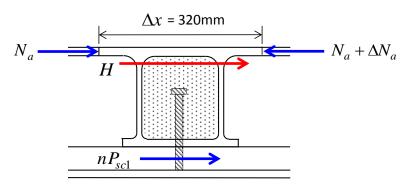


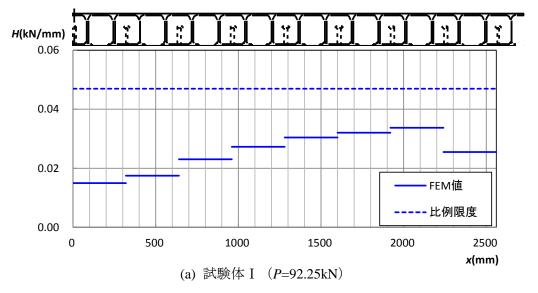
図-4.9 アルミニウム床版上板に生じる水平せん断力と軸力

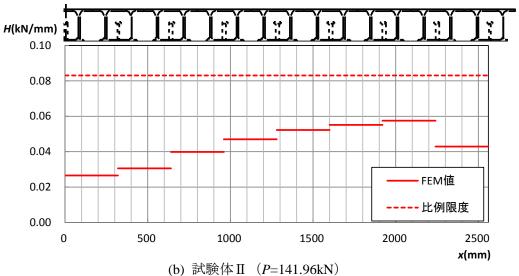
7.17 270 19170			
	試験体I	試験体Ⅱ	試験体Ⅲ
比例限度 (kN/mm)	0.047	0.083	0.109
0.2%耐力(kN/mm)	0.077	0.145	0.187

表-4.3 水平せん断力の比例限度と 0.2%耐力

表-4.2 に示す,頭付きスタッド 1 本の比例限度と 0.2%耐力を式(4.3)に代入して,水平せん断力の比例限度と 0.2%耐力が与えられる.各試験体の水平せん断力の比例限度と 0.2%耐力を表-4.3 に示す.

水平せん断力の分布を図-4.10に示す.荷重の大きさは、試験体 I、Ⅱ、Ⅲに対して、それぞれ 92.25kN、141.96kN、192.91kN である. 横軸は試験体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. 同図からわかるように、試験体中央から桁端に向かって水平せん断力は増加する. 鋼桁下フランジの下面に生じるひずみが直線分布を示すので、頭付きスタッドの本数が 1 本から 3 本の範囲で、鋼桁とアルミニウム床版は完全合成に近いことが示された ¹⁸⁾. 鋼桁とアルミニウム床版が完全合成の場合、支間中央に集中荷重を受ける桁の水平せん断力は一定値をとる ¹⁸⁾. しかし、図-4.10 からわかるように、FEM 値は一定値を示さない. したがって、水平せん断力については、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を完全合成とみなすことができない.





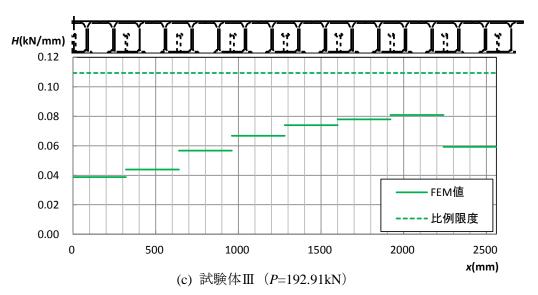


図-4.10 水平せん断力の分布

第5章 結論

本研究では、アルミニウム床版を有する鋼桁の弾塑性有限変位挙動に頭付きスタッドの 本数が与える影響を有限要素法解析によって明らかにした。主な結論は次の通りである。

- (1) 試験体 I (頭付きスタッド 1 本) は、端部の頭付きスタッドが塑性変形することによって終局強度を迎え、試験体 II (頭付きスタッド 2 本) と III (頭付きスタッド 3 本) は、中央部分の開断面のアルミニウム床版上板が塑性変形することによって終局強度を迎える.このように、頭付きスタッドの本数により、試験体の終局状態の迎え方が異なる.
- (2) 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については、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を完全合成とみなすことができない.
- (3) アルミニウム床版の閉断面内の充填モルタルに対する有限要素モデルが適切でないために、アルミニウム床版上板に生じるひずみが試験結果と合っていない. アルミニウム床版の閉断面内の充填モルタルに対する有限要素モデルを改善する必要がある.

参考文献

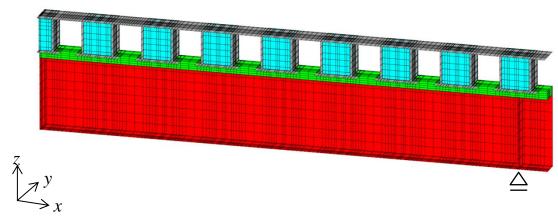
- 1) 国土交通省の道路の老朽化対策の取組み. http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書·同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 2012.
- 3) 大倉一郎, 萩澤亘保, 岩田節雄, 北村幸嗣: アルミニウム橋実現のための技術開発, 軽金属, 軽金属学会, 第54巻, 第9号, pp.380-387, 2004.
- 4) 大倉一郎, 萩澤亘保,鳴尾亮,戸田均:摩擦撹拌接合で製作されたアルミニウム床版 の疲労特性,土木学会論文集,No.703/I-59,pp.255-266,2002.
- 5) 大倉一郎, 岡田理, 萩澤亘保, 大澤章吾: 開閉断面のアルミニウム床版の開発, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1219-1227, 2005.
- 6) 大倉一郎, 萩澤亘保, 中原太樹, 岡田理, 山口進吾: アルミニウム床版と鋼主桁との 連結部の静的および疲労挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.199-206, 2003.
- 7) 大倉一郎, 西田貴裕: アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性, ALST 研究レポート, No.8, 2009. http://alst.jp/pdf/ALST_report8.pdf
- 8) 大倉一郎, 筒井将仁: 地覆定着のためのアルミニウム床版の引抜強度, ALST 研究レポート, No.4, 2008. http://alst.jp/pdf/ALST_report4.pdf
- 9) 萩澤亘保, 大倉一郎, 花崎昌幸, 大西弘志, 佐藤正典: アルミニウム合金材の母材と 摩擦撹拌接合部の疲労強度に腐食が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.478-488, 2006.
- 10) 萩澤亘保, 大倉一郎: アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪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) アルミニウム橋研究会:蒲原ケミカル橋. 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) 藤本倫人, 大倉一郎, 長尾隆史: 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, 鋼構造年次論文報告集, 第22巻, pp.152-159, 2014.
- 16) 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.
- 17) 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,No25,2012.

- http://alst.jp/pdf/ALST_report25.pdf
- 18) 藤本倫人, 大倉一郎: アルミニウム床版と鋼桁の連結に用いられる頭付きスタッドの本数と平面保持度の関係, ALST 研究レポート, No39, 2015. http://alst.jp/pdf/ALST_report39.pdf
- 19) TNO Building and Construction Research: DIANA, Release 9.4.4, Delft, Netherland, 2012.
- 20) 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, No29, 2013. http://alst.jp/pdf/ALST_report29.pdf
- 21) 大倉一郎,長尾隆史,石川敏之,萩澤亘保,大隅心平:構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化,土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008.

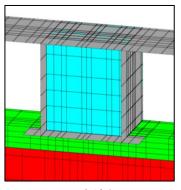
付録 A

アルミニウム床版上板に生じるひずみに関しては、有限要素法解析が試験結果を再現していないことを 3.2.3 で述べた. アルミニウム床版の閉断面部において、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がその原因と考え、アルミニウム床版の閉断面内に存在する全ての充填モルタルを考慮した有限要素モデルを作成し、アルミニウム床版上板に生じるひずみを調べる. ここで、頭付きスタッドの左側の充填モルタルのみを考慮した第 3 章のモデルを中空モデル、充填モルタルを全て考慮したモデルを中実モデルと呼ぶ. 中実モデルの要素分割を付図-A.1 に示す. このモデルでは、頭付きスタッドと充填モルタルの界面の節点およびアルミニウム床版と充填モルタルの界面の節点を全て共有させる.

荷重と試験体中央のたわみの関係,荷重と鋼桁下フランジの下面のひずみ(試験体中央から320mmの位置)の関係,荷重とアルミニウム床版上板のひずみ(試験体中央から480mmの位置)の関係について,中実モデルと中空モデルに対する解析結果の比較を,それぞれ付図-A.2, A.3, A.4に示す.付図-A.2とA.3からわかるように,試験体中央のたわみと鋼



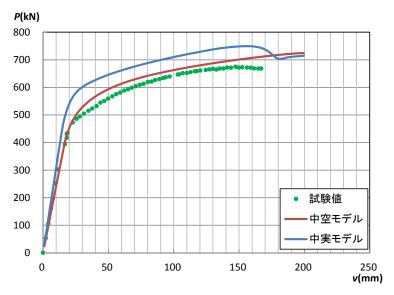
(a) 全体



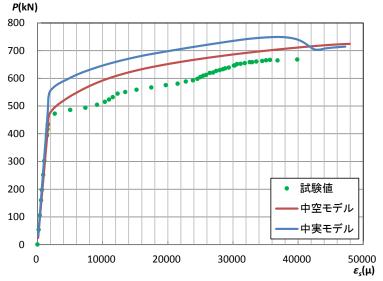
(b) 連結部

付図-A. 1 要素分割 [試験体Ⅲ]

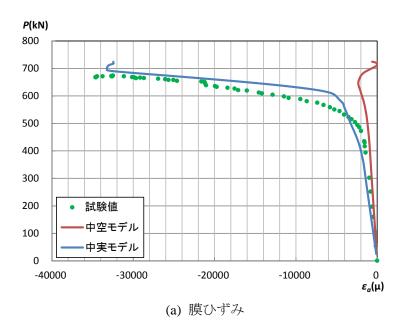
桁下フランジの下面のひずみに関しては、中空モデルの結果が中実モデルの結果より試験値に近い.他方、付図-A.4 からわかるように、アルミニウム床版上板の膜ひずみと板曲げひずみに関しては、中空モデルの結果は試験値と全く合っていないが、中実モデルの結果は試験値の特徴をとらえている.したがって、アルミニウム床版に生じるひずみに対しては、閉断面内の充填モルタルを全て考慮した有限要素モデルが妥当であるといえる.

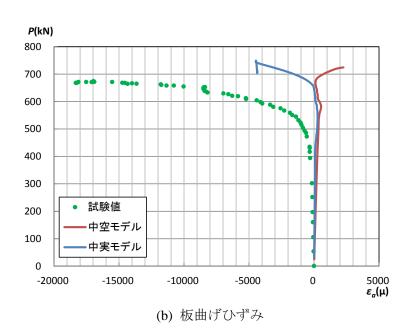


付図-A.2 荷重と試験体中央のたわみの関係



付図-A.3 荷重と鋼桁下フランジの下面のひずみの関係 (x=320mm)





付図-A.4 荷重とアルミニウム床版上板のひずみの関係 (x=480mm)