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　39

2015 年 1 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を定義する．過去の静的載荷試験で使用された，アルミニウム床版を有する鋼桁の試験体の平面保持度を推定し，両者の連結に用いられた頭付きスタッドの本数と平面保持度の関係を明らかにする．

目次

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 万橋あり，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い橋梁も出てくる．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攪拌接合で連結することによって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)]．

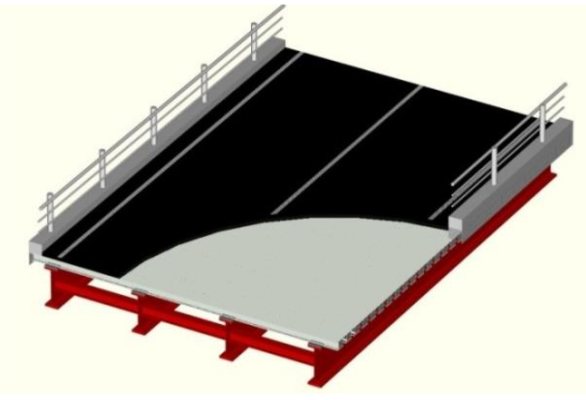


図-1.1　道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋のイメージ

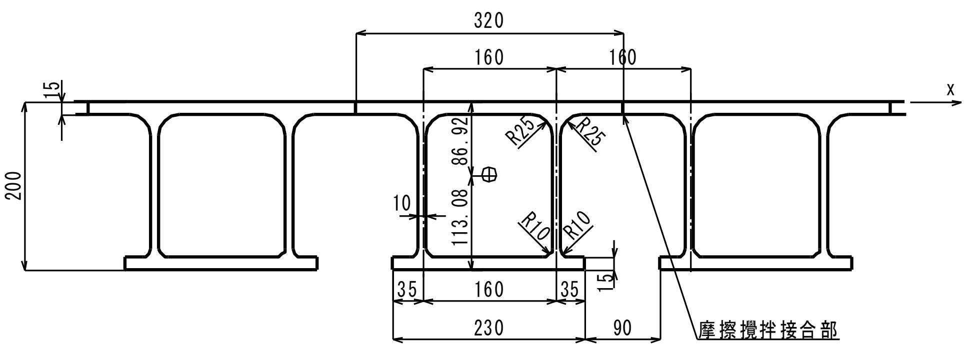


図-1.2　アルミニウム床版の断面形状

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，**図-1.4**に示す道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設された[13)]．

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．

アルミニウム合金の線膨張係数（24×10^{-6} 1/℃）は鋼の線膨張係数（12×10^{-6} 1/℃）に対して2倍あるため，鋼桁とアルミニウム床版とが合成作用を発揮すると，温度変化により鋼桁とアルミニウム床版に内部応力，すなわち温度変化応力が生じる．アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の設計では，温度変化応力に対して照査する必要がある[12)]．

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，鋼桁とアルミニウム床版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)]．両者の理論では，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

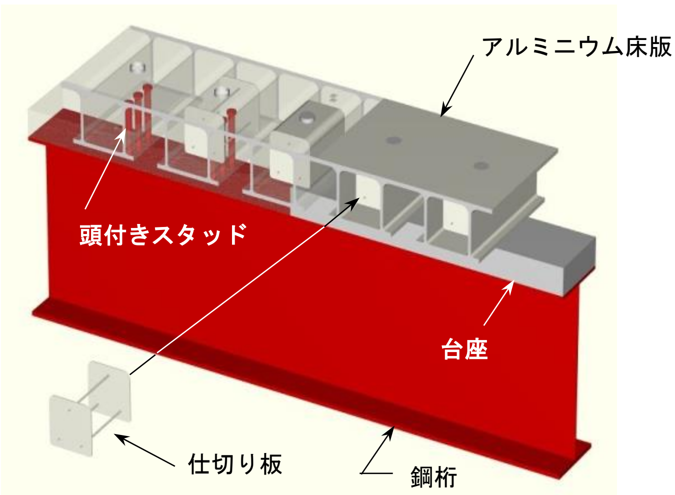


図-1.5　アルミニウム床版と鋼桁の連結構造

が誘導され，他方の理論では，平面保持しないと仮定して軸力方程式が誘導された．

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．すなわち，鋼桁上フランジとアルミニウム床版上板の間には，ある程度の平面保持が存在していると考えられる．

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平面保持の程度を表すパラメータとして平面保持度を定義する．過去の静的載荷試験[15)]で使用された，アルミニウム床版を有する鋼桁の試験体の平面保持度を推定し，両者の連結に用いられた頭付きスタッドの本数と平面保持度の関係を明らかにする．

第 2 章　基礎式

2.1　平面保持度を考慮した軸力方程式

鋼桁に生じるひずみをε_s，アルミニウム床版上板に生じるひずみを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．

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{ss} + \varepsilon_{st} \tag{2.1}$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{at} \tag{2.2}$$

ここに，

ε_{ss}，ε_{as}　：それぞれ，応力によって鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じるひずみ

ε_{st}，ε_{at}　：それぞれ，温度変化によって鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じるひずみ

ε_{st}とε_{at}は，それぞれ次式で与えられる．

$$\varepsilon_{st} = \alpha_s \Delta T_s \tag{2.3}$$

$$\varepsilon_{at} = \alpha_a \Delta T_a \tag{2.4}$$

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（温度上昇を正，温度降下を負とする）

図-2.1 を参照して，応力によって，鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じるひずみε_{ss}とε_{as}はそれぞれ次式で与えられる．

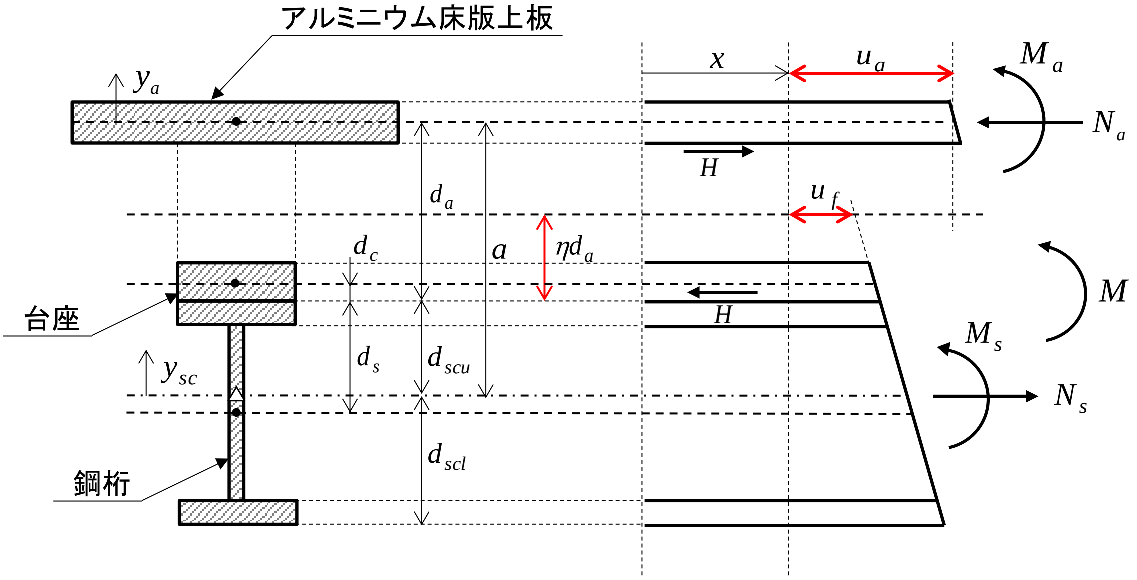


図-2.1　アルミニウム床版上板および鋼桁上フランジに生じる水平せん断力と水平変位

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_{sc}} - \frac{M_s}{E_s I_{sc}} y_{sc} \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} - \frac{M_a}{E_a I_a} y_a \tag{2.6}$$

ここに,

$$A_{sc} = A_s + \frac{A_c}{n_c} \tag{2.7}$$

$$I_{sc} = I_s + \frac{I_c}{n_c} + A_s \left(d_s - d_{scu}\right)^2 + \frac{A_c}{n_c}\left(d_{scu} + d_c\right)^2 \tag{2.8}$$

$$d_{scu} = \frac{E_s A_s d_s - E_c A_c d_c}{E_s A_s + E_c A_c} \tag{2.9}$$

$$n_c = \frac{E_s}{E_c} \tag{2.10}$$

E_s, E_c, E_a : それぞれ，鋼，台座，アルミニウム合金のヤング係数

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

A_{sc} : 鋼桁と台座の合成断面に対する鋼換算された断面積

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

I_{sc} : 鋼桁と台座の合成断面に対する鋼換算された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, d_c : 鋼桁上フランジの上面から，それぞれ，鋼桁，台座の中立軸までの距離

d_{scu} : 鋼桁と台座の合成断面に対する中立軸から鋼桁上フランジの上面までの距離

y_a, y_{sc} : それぞれ，アルミニウム床版上板の中立面および鋼桁と台座の合成断面に対する中立軸からの位置（上方向を正）

鋼桁の曲率とアルミニウム床版上板の曲率は等しいので次式が成立する．

$$\frac{M_s}{E_s I_{sc}} = \frac{M_a}{E_a I_a} \tag{2.11}$$

他方，鋼桁とアルミニウム床版から成る合成桁に作用する曲げモーメントは次式で与えられる．

$$M = Na + M_s + M_a \tag{2.12}$$

ここに,

$$N = N_s = N_a \tag{2.13}$$

M : 鋼桁とアルミニウム床版から成る合成桁に作用する曲げモーメント

N : 鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる軸力

a　：アルミニウム床版上板の中立面と，鋼桁と台座の合成断面に対する中立軸との間の距離

式(2.11)と式(2.12)より次式を得る．

$$M_s = \frac{E_s I_{sc}}{E_s I_{sc} + E_a I_a}(M - Na) \tag{2.14}$$

$$M_a = \frac{E_a I_a}{E_s I_{sc} + E_a I_a}(M - Na) \tag{2.15}$$

式(2.13)～(2.15)を式(2.5)と(2.6)に代入して，応力によって，鋼桁および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．

$$\varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{E_s A_{sc}} + \frac{a y_{sc}}{E_s I_{sc} + E_a I_a} \right) N - \frac{y_{sc}}{E_s I_{sc} + E_a I_a} M \tag{2.16}$$

$$\varepsilon_{as} = \left(-\frac{1}{E_a A_a} + \frac{a y_a}{E_s I_{sc} + E_a I_a} \right) N - \frac{y_a}{E_s I_{sc} + E_a I_a} M \tag{2.17}$$

前章で述べたように，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，アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間にはある程度の平面保持が存在していると考えられる．この平面保持の程度は，**図-2.1** を参照して，鋼桁の平面保持が鋼桁上フランジの上方 ηd_a まで存在していると仮定する．ここで，η は $0 \le \eta \le 1$ であり，d_a は，鋼桁上フランジの上面からアルミニウム床版上板の中立面までの距離である．$\eta = 0$ のとき，アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間には平面保持が存在せず，$\eta = 1$ のとき，鋼桁の平面保持がアルミニウム床版上板まで拡大する．η を平面保持度と呼ぶ．

さらに，**図-2.1** を参照して，アルミニウム床板上板および鋼桁上フランジに生じる水平せん断力と両者の水平変位差との間に次式が成立すると仮定する．

$$H = k\left(u_f - u_a\right) \tag{2.18}$$

ここに，

H　：アルミニウム床版上板および鋼桁上フランジに生じる水平せん断力

u_f，u_a　：それぞれ，鋼桁上フランジの上方 ηd_a の位置における鋼桁の水平変位およびアルミニウム床版上板の中立面の位置におけるアルミニウム床版上板の水平変位

k　：水平せん断バネ

図-2.2 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，水平せん断力 H と軸力 N の関係が次式で与えられる．

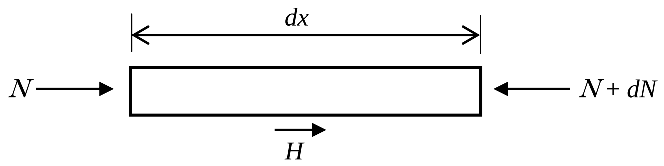


図-2.2　アルミニウム床版上板に生じる水平せん断力と軸力

$$H = \frac{dN}{dx} \tag{2.19}$$

式(2.19)を式(2.18)に代入することにより，次式を得る．

$$\frac{dN}{dx} = k\left(u_f - u_a\right) \tag{2.20}$$

式(2.20)を微分して， $\varepsilon_s = du_f/dx$および$\varepsilon_a = du_a/dx$を考慮して，式(2.1)と(2.2)を代入して次式を得る．

$$\frac{d^2N}{dx^2} = k\left(\frac{du_f}{dx} - \frac{du_a}{dx}\right) = k\left(\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{as} + \Delta\varepsilon_T\right) \tag{2.21}$$

ここに，

$\Delta\varepsilon_T$ ： アルミニウム床版と鋼桁の温度変化によるひずみの差$(\Delta\varepsilon_T = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{at})$

式(2.16)と(2.17)から，鋼桁上フランジの上方ηd_aの位置における，応力によるひずみε_{ss}，およびアルミニウム床版上板の中立面の位置における，応力によるひずみε_{as}がそれぞれ次式で与えられる．

$$\varepsilon_{ss} = \left\{\frac{1}{E_s A_{sc}} + \frac{a\left(d_{scu} + \eta d_a\right)}{E_s I_{sc} + E_a I_a}\right\} N - \frac{d_{scu} + \eta d_a}{E_s I_{sc} + E_a I_a} M \tag{2.22}$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N}{E_a A_a} \tag{2.23}$$

式(2.22)と(2.23)を式(2.21)に代入して，軸力に関する微分方程式が次のように導出される．

$$\frac{d^2N}{dx^2} - \lambda^2 N = -c\lambda^2 M + k\Delta\varepsilon_T \tag{2.24}$$

ここに，

$$\lambda = \sqrt{k\frac{\left(A_{sc} + \frac{A_a}{n_a}\right)\left(I_{sc} + \frac{I_a}{n_a}\right) + A_{sc}\frac{A_a}{n_a} a\left(d_{scu} + \eta d_a\right)}{E_s A_{sc}\frac{A_a}{n_a}\left(I_{sc} + \frac{I_a}{n_a}\right)}} \tag{2.25}$$

$$c = \frac{A_{sc}\frac{A_a}{n_a}\left(d_{scu} + \eta d_a\right)}{\left(A_{sc} + \frac{A_a}{n_a}\right)\left(I_{sc} + \frac{I_a}{n_a}\right) + A_{sc}\frac{A_a}{n_a} a\left(d_{scu} + \eta d_a\right)} \tag{2.26}$$

$$n_a = \frac{E_s}{E_a} \tag{2.27}$$

2.2　完全合成の場合に対する応力分布

鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合，すなわち**図-2.3** に示すように，ひずみが鋼桁下フランジの下面から，鋼桁上フランジの上方ηd_aの位置まで直線分布し，その位置のひずみとアルミニウム床版上板の中立面の位置のひずみが等しくなる．この場合，**図-2.4** を参照して，鋼桁とアルミニウム床版の合成断面の中立軸を原点とする応力分布が次式で与えられる．

$$\sigma_s = -\frac{M}{I_v} y \tag{2.28}$$

$$\sigma_c = -\frac{M}{n_c I_v} y \tag{2.29}$$

$$\sigma_a = -\frac{M}{n_a I_v} \{y-(1-\eta)d_a\} \tag{2.30}$$

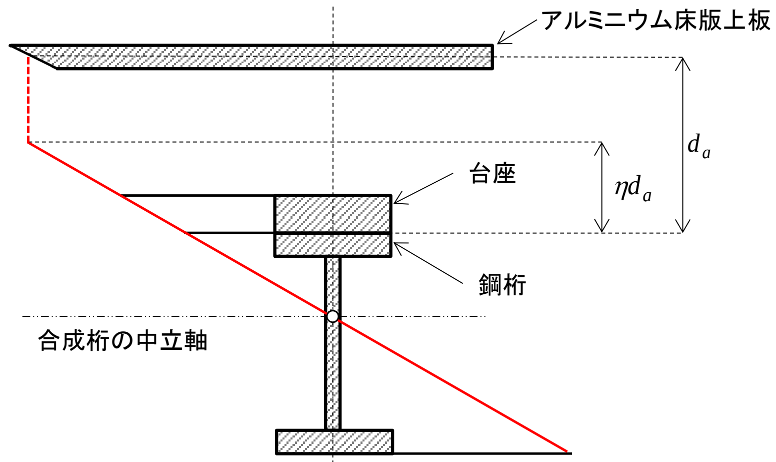


図-2.3　完全合成の場合に対するひずみ分布

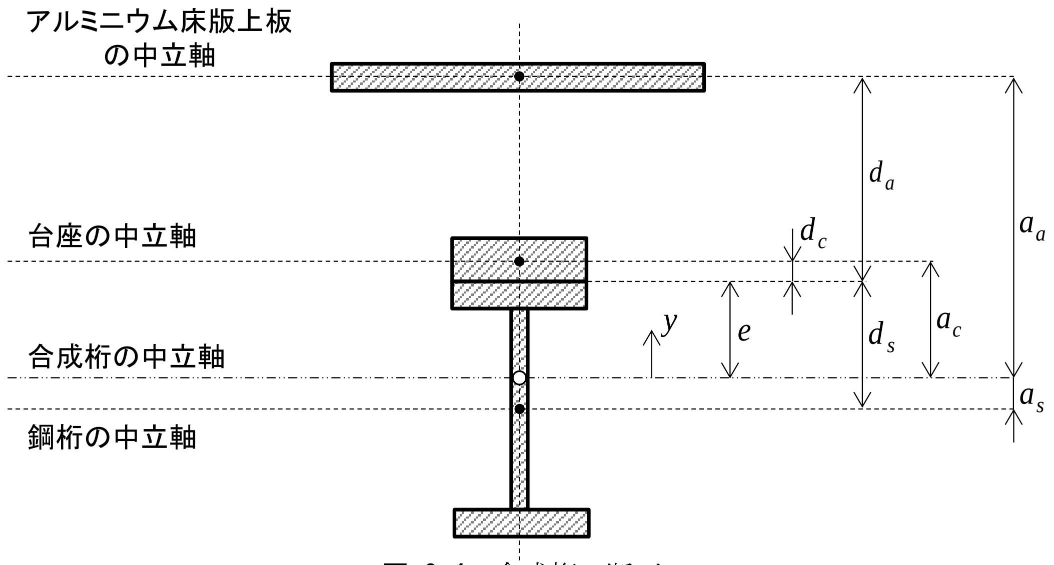


図-2.4　合成桁の断面

ここに，

σ_s，σ_c，σ_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

y　：鋼桁とアルミニウム床版の合成断面の中立軸を原点とする座標（上方を正）

a_s，a_c，a_a　：鋼桁とアルミニウム床版の合成断面の中立軸から，それぞれ，鋼桁，台座，アルミニウム床版の中立軸までの距離

I_vは，アルミニウム床版上板と台座が鋼換算された断面二次モーメントであり，次式で与えられる．

$$I_v = I_s + \frac{I_c}{n_c} + \frac{I_a}{n_a} + A_s a_s{}^2 + \frac{A_c}{n_c} a_c{}^2 + \frac{A_a}{n_a} a_a (e + \eta d_a) \tag{2.31}$$

$$= I_s + \frac{I_c}{n_c} + \frac{I_a}{n_a} + A_s d_s{}^2 + \frac{A_c}{n_c} d_c{}^2 + \eta \frac{A_a}{n_a} d_a{}^2 - e\left(A_s d_s - \frac{A_c}{n_c} d_c - \frac{A_a}{n_a} d_a \right) \tag{2.32}$$

eは，鋼桁上フランジの上面から，鋼桁とアルミニウム床版の合成断面の中立軸までの距離であり，次式で与えられる．

$$e = \frac{E_s A_s d_s - E_c A_c d_c - \eta E_a A_a d_a}{E_s A_s + E_c A_c + E_a A_a} \tag{2.33}$$

鋼換算断面二次モーメントI_vは式(2.26)のcと次の関係を有する．

$$I_v = \frac{I_{sc} + \dfrac{I_a}{n_a}}{1 - ca} \tag{2.34}$$

2.3　支間中央に集中荷重を受ける単純支持桁

次章で述べる，鋼桁とアルミニウム床版から成る試験桁の平面保持度を推定する基礎式を得るために，**図-2.5** に示すように，支間中央に集中荷重Pを受ける，支間長Lの単純支持桁を考える．

$0 \le x \le L/2$で，桁は次式で与えられる曲げモーメントを受ける．

$$M = \frac{P}{2} x \tag{2.35}$$

ここに，

x　：支点からの距離（$0 \le x \le L/2$）

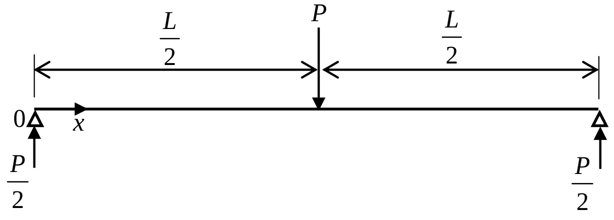


図-2.5　集中荷重を受ける単純支持桁

温度変化がないので温度ひずみ差$\Delta\varepsilon_T$は0である．式(2.35)および$\Delta\varepsilon_T=0$を式(2.24)に代入して次式を得る．

$$\frac{d^2N}{dx^2}-\lambda^2N=-c\lambda^2\frac{P}{2}x \tag{2.36}$$

x=0でN=0，$x=L/2$でdN/dx=0の境界条件に対して，式(2.36)を解いて次式を得る．

$$N=\frac{cP}{2}\left\{x-\frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)}\right\} \tag{2.37}$$

式(3.37)においてλを無限にして，鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合に対する軸力が次式で与えられる．

$$N=\frac{cP}{2}x \tag{2.38}$$

式(2.35)と(2.37)を式(2.16)と(2.17)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．

$$\varepsilon_s=\frac{P}{2E_s}\left[\left\{\frac{c}{A_{sc}}-\frac{(1-ca)y_{sc}}{I_{sc}+\frac{I_a}{n_a}}\right\}x-\left(\frac{c}{A_{sc}}+\frac{cay_{sc}}{I_{sc}+\frac{I_a}{n_a}}\right)\frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)}\right] \tag{2.39}$$

$$\varepsilon_a=\frac{P}{2E_a}\left[-\left\{\frac{c}{A_a}+\frac{(1-ca)y_a}{n_aI_{sc}+I_a}\right\}x-\left(-\frac{c}{A_a}+\frac{cay_a}{n_aI_{sc}+I_a}\right)\frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)}\right] \tag{2.40}$$

ここで，温度変化がないので，$\varepsilon_{st}=0$，$\varepsilon_{at}=0$であり，式(2.39)と式(2.40)において，$\varepsilon_s=\varepsilon_{ss}$，$\varepsilon_a=\varepsilon_{as}$としている．

式(2.39)と(2.40)においてλを無限にして，鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合に対する鋼桁とアルミニウム床版のひずみがそれぞれ次式で与えられる．

$$\varepsilon_s=\frac{P}{2E_s}\left\{\frac{c}{A_{sc}}-\frac{(1-ca)y_{sc}}{I_{sc}+\frac{I_a}{n_a}}\right\}x \tag{2.41}$$

$$\varepsilon_a=-\frac{P}{2E_a}\left\{\frac{c}{A_a}+\frac{(1-ca)y_a}{n_aI_{sc}+I_a}\right\}x \tag{2.42}$$

式(2.34)の関係を用いると，式(2.41)と(2.42)はそれぞれ次式になる．

$$\varepsilon_s = -\frac{Px}{2E_s I_v} y \tag{2.43}$$

$$\varepsilon_a = -\frac{Px}{2E_s I_v} \{y - (1-\eta) d_a\} \tag{2.44}$$

ここに,

$$y = y_{sc} + e - d_{scu} \tag{2.45}$$

$$y = y_a + e + d_a \tag{2.46}$$

アルミニウム床版を有する鋼桁のたわみが次式で与えられる[14),16)].

$$v = v_m + v_q \tag{2.47}$$

$$v_m = \frac{P}{2(E_s I_{sc} + E_a I_a)} \left\{ -\frac{1-ca}{6} x^3 + \left(\frac{1-ca}{8} L^2 + \frac{ca}{\lambda^2} \right) x - ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda^3 \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \tag{2.48}$$

$$v_q = \frac{P E_s I_{sc}}{2 G_s A_{sw} (E_s I_{sc} + E_a I_a)} \left\{ (1-ca) x + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \tag{2.49}$$

ここに,

v ： 鋼桁のたわみ

v_m ： 曲げモーメントによる鋼桁のたわみ

v_q ： せん断力による鋼桁のたわみ

G_s ： 鋼のせん断弾性係数

A_{sw} ： 鋼桁ウェブの断面積

式(2.48)と(2.49)において λ を無限にして, 鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合に対するたわみが次式で与えられる.

$$v = \frac{P(1-ca)}{2(E_s I_{sc} + E_a I_a)} \left(-\frac{x^3}{6} + \frac{L^2 x}{8} \right) + \frac{P E_s I_{sc} (1-ca) x}{2 G_s A_{sw} (E_s I_{sc} + E_a I_a)} \tag{2.50}$$

式(2.34)の関係を用いると，式(2.50)は次式になる.

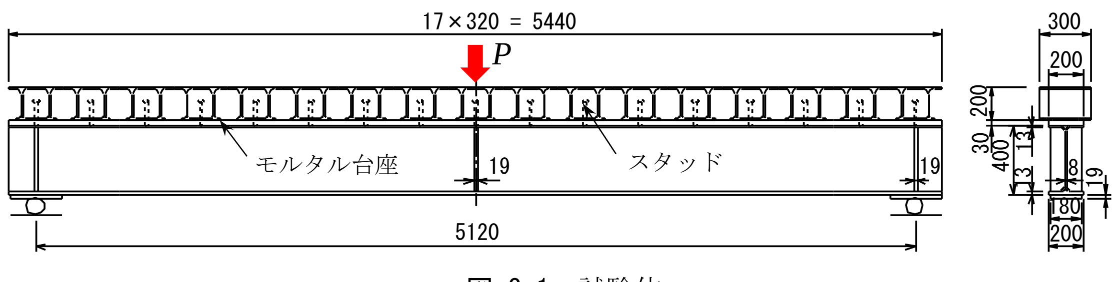
$$v = \frac{P}{2E_s I_v} \left(-\frac{x^3}{6} + \frac{L^2 x}{8} \right) + \frac{P I_{sc}}{2 G_s A_{sw} I_v} x \tag{2.51}$$

第 3 章　試験体

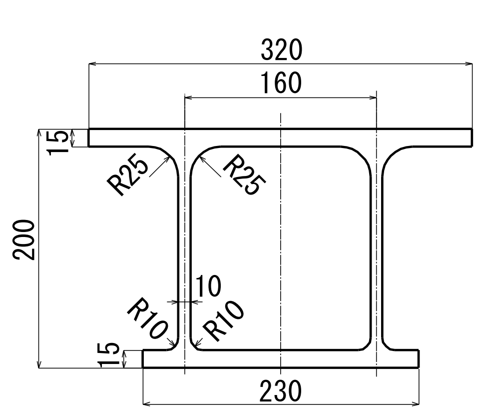
鋼桁とアルミニウム床版から成る試験体を図−3. 1 に示す [15]. アルミニウム床版は, 図−3. 2 に示す断面を有する 17 本の押出形材の上フランジを突合わせ，摩擦攪拌接合で連結することによって製作された．鋼桁は，高さ 400mm，幅 200mm の H 形鋼である．台座には ECC（乾燥収縮ひび割れに優れる高靭性繊維補強セメント複合材料）を使用し，高さは 30mm である．アルミニウム床版の閉断面内に設置された，対向するアクリル仕切り板の間に無収縮モルタルが充填される．通常，仕切り板にはアルミニウム板が使用されるが，充填モルタルの挙動を観察するためにアクリル板が使用される．

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−3. 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−3. 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−3. 1 に示す．表−3. 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．

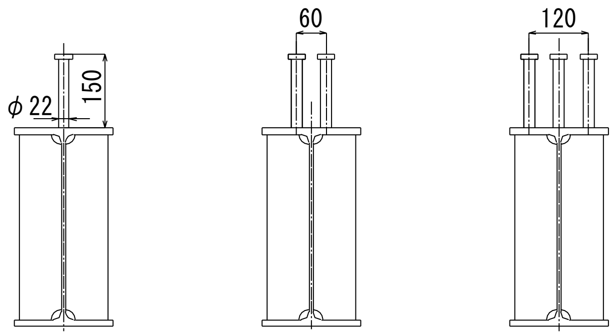
試験体は両端がローラー支持され，支間中央の桁長手方向 200mm，奥行方向 300mm の領域に荷重が載荷された．



図−3. 1　試験体

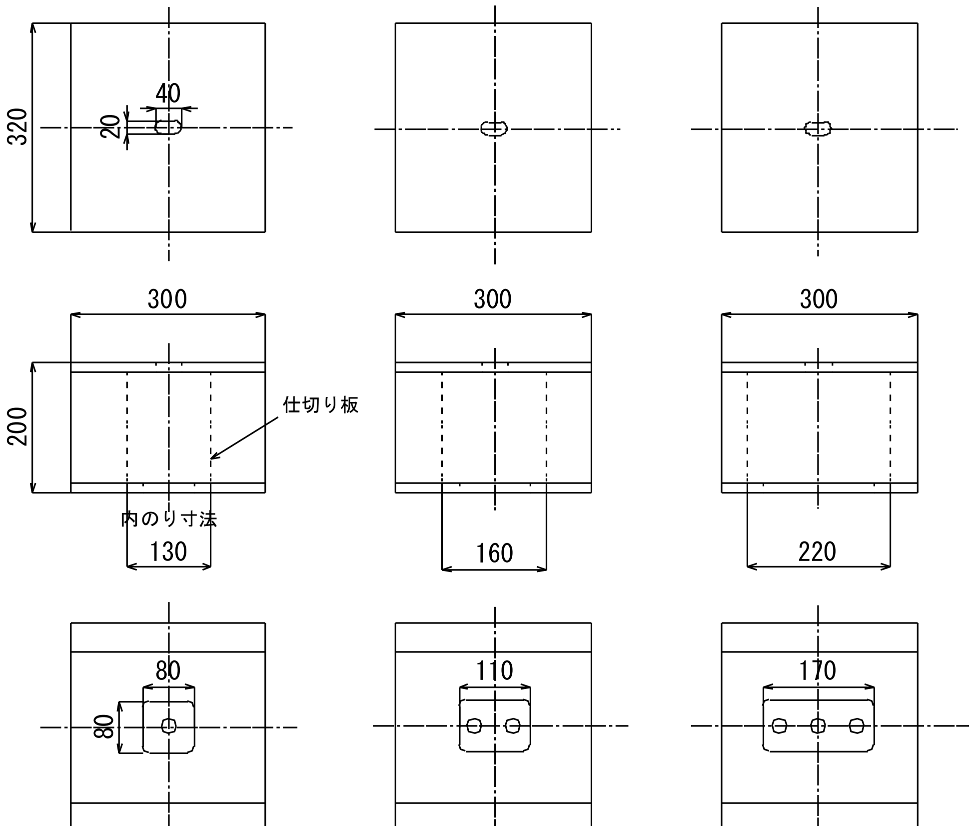


図−3. 2　アルミニウム床版形材の断面



(a) 試験体Ⅰ　(b) 試験体Ⅱ　(c) 試験体Ⅲ

図-3.3　頭付きスタッドの配置位置



(a) 試験体Ⅰ　(b) 試験体Ⅱ　(c) 試験体Ⅲ

図-3.4　仕切り板の間隔と開口の寸法

表-3.1　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

(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
圧縮試験	ヤング係数　(MPa)	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　(MPa)	13.02
	降伏強度　(MPa)	3.86
	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

次章で述べる平面保持度の推定に使用される諸量の値を**表-3.2** に示す．同表で，e_0 と e_1 は，式(2.33)において，それぞれ η =0 と 1 に対する値であり，次式で与えられる．

$$e_0 = \frac{E_s A_s d_s - E_c A_c d_c}{E_s A_s + E_c A_c + E_a A_a} \tag{3.1}$$

$$e_1 = \frac{E_s A_s d_s - E_c A_c d_c - E_a A_a d_a}{E_s A_s + E_c A_c + E_a A_a} \tag{3.2}$$

e_0 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が存在しない場合に対する，鋼桁上フランジの上面から，鋼桁とアルミニウム床版の合成断面の中立軸までの距離であり，e_1 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が存在する場合に対するそれである．e_0 と e_1 を用いると，e は次式で与えられる．

$$e = e_0 - \eta(e_0 - e_1) \tag{3.3}$$

表-3.2　諸量の値

E_s (MPa)	E_c (MPa)	E_a (MPa)	A_s (mm^2)	A_c (mm^2)	A_a (mm^2)
200×10^3	15.4×10^3	71.4×10^3	8192	6000	4500
A_{sc} (mm^2)	A_{sw} (mm^2)	I_s (mm^4)	I_c (mm^4)	I_a (mm^4)	I_{sc} (mm^4)
8654	2992	2.30×10^8	4.50×10^5	8.44×10^4	2.50×10^8
d_s (mm)	d_c (mm)	d_a (mm)	G_s (MPa)	n_c	n_a
200	15	222.5	76.9×10^3	12.99	2.80
L (mm)	e_0 (mm)	e_1 (mm)			
5120	159.0	124.2			

第 4 章　平面保持度の推定

4.1　試験体のたわみによる推定

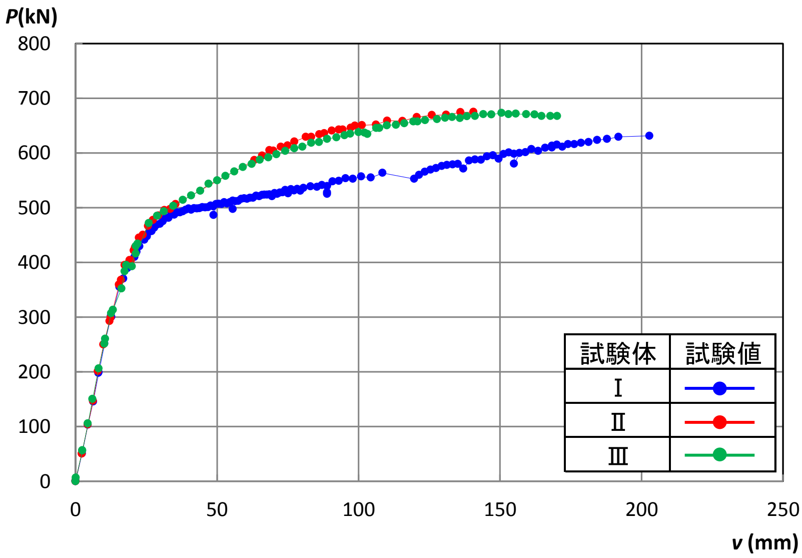
荷重と試験体中央のたわみの関係を**図−4.1** に示す．同図において，荷重が 300kN 以下の直線性を示す部分に対し，平面保持度 η を推定する．鋼桁とアルミニウム床版は完全合成に近いことが次節で示される．したがって，$x = L/2$ を式(2.51)に代入して，鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合に対する試験体中央のたわみが次式で与えられる．

$$v = \frac{PL^3}{48E_s I_v} + \frac{PLI_s}{4G_s A_{sw} I_v} \tag{4.1}$$

式(4.1)を I_v について解いた式を式(2.32)の左辺の I_v に用い，さらに η について解いて次式を得る．

$$\eta = \frac{\dfrac{P}{v}\left(\dfrac{L^3}{48E_s} + \dfrac{LI_s}{4G_s A_{sw}}\right) - I_s - \dfrac{I_c}{n_c} - \dfrac{I_a}{n_a} - A_s d_s(d_s - e_0) - \dfrac{A_c}{n_c} d_c(d_c - e_0) - \dfrac{A_a}{n_a} d_a e_0}{\dfrac{A_a}{n_a} d_a(d_a - e_1)} \tag{4.2}$$

図−4.1 で，荷重が 300kN 以下の直線性を示す部分を**図−4.2** に示す．各試験体の P と v の関係に最小二乗法を適用することによって得られる P と v の傾き，すなわち P/v の値を式(4.2)に代入して得られる平面保持度 η の値は，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ 0.20，0.29，0.34 である．これらの値を式(2.32)に代入して得られる I_v の値を式(2.51)に用いて算出される試験体のたわみ分布と試験値の比較を**図−4.3** に示す．荷重の大きさは，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ 298.62kN，300.12kN，302.04kN である．横軸は試験体中央を原点とする座標であり，縦軸はたわみである．同図には，η =0 と 1 に対するたわみ分布も描いてある．計算値は試験値にほぼ一致している．



図−4.1　荷重と試験体中央のたわみの関係

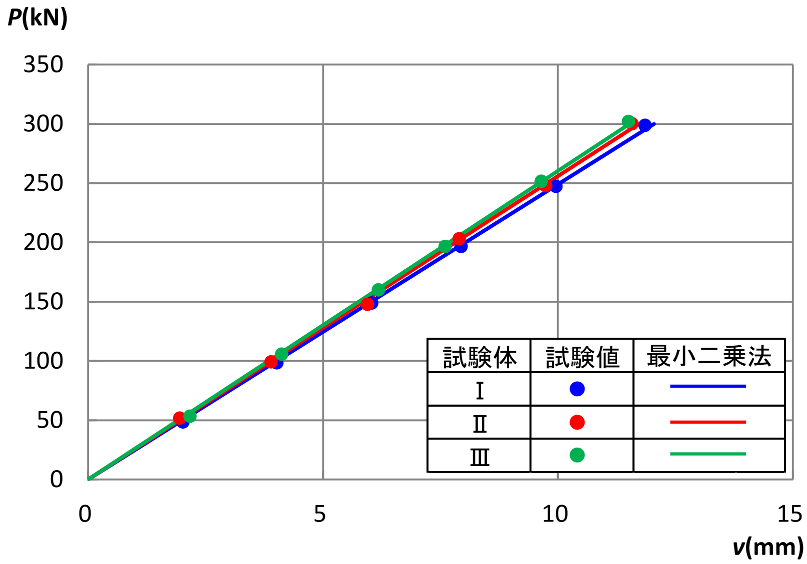


図-4. 2　荷重と試験体中央のたわみの関係（$P \leq 300$kN）

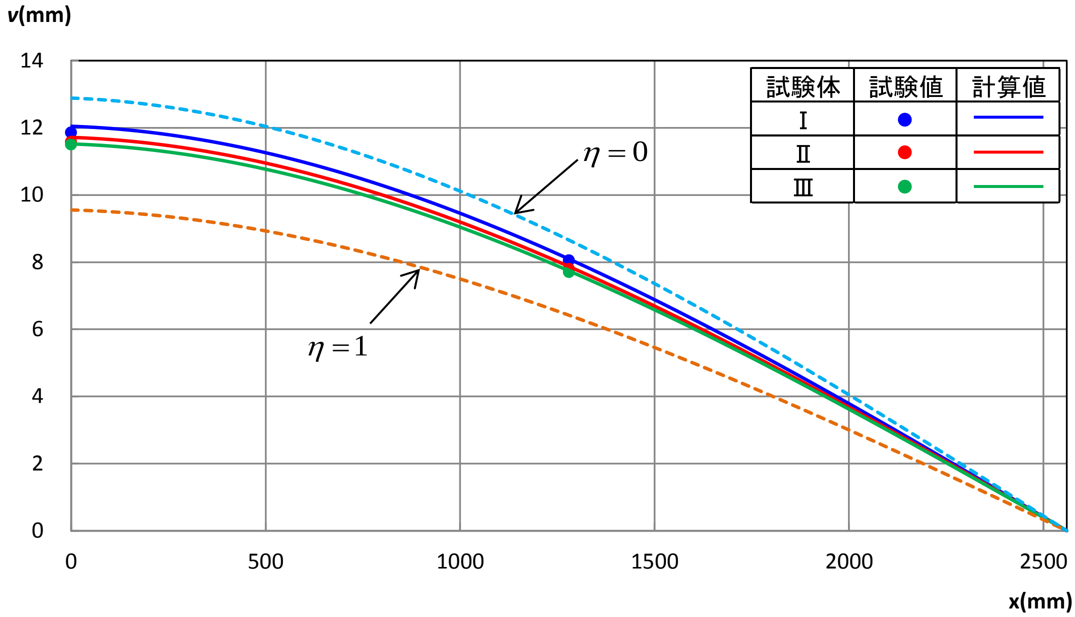
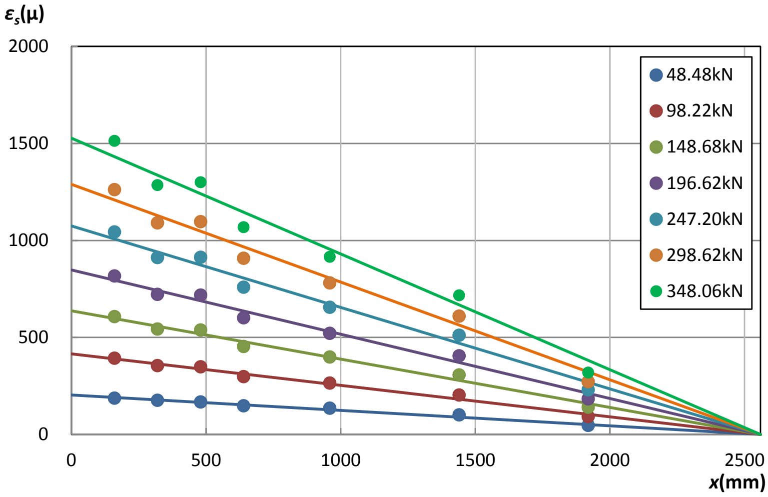


図-4. 3　試験体のたわみ分布

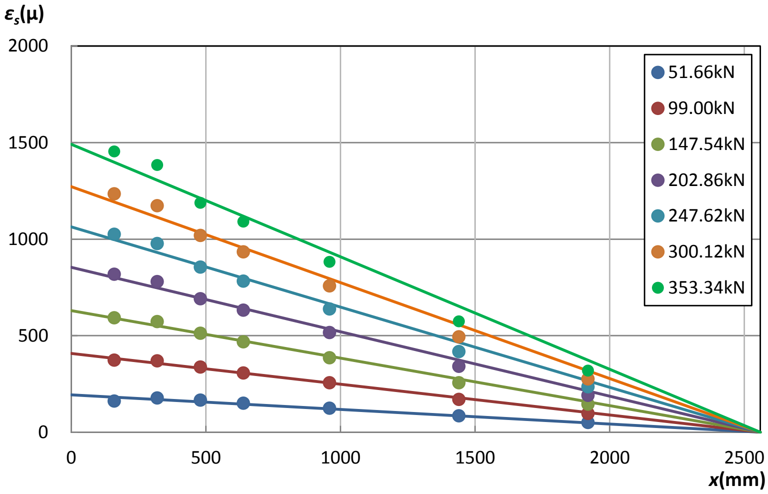
4. 2　鋼桁下フランジに生じるひずみによる推定

荷重を 400kN まで載荷した後に除荷した状態を初期として，再度 400kN まで載荷した場合に対する鋼桁下フランジの下面のひずみ分布を**図-4. 4** に示す．横軸は試験体中央を原点とする座標であり，縦軸はひずみである．各荷重に対応する直線は，最小二乗法を試験値に適用することによって得られた直線である．

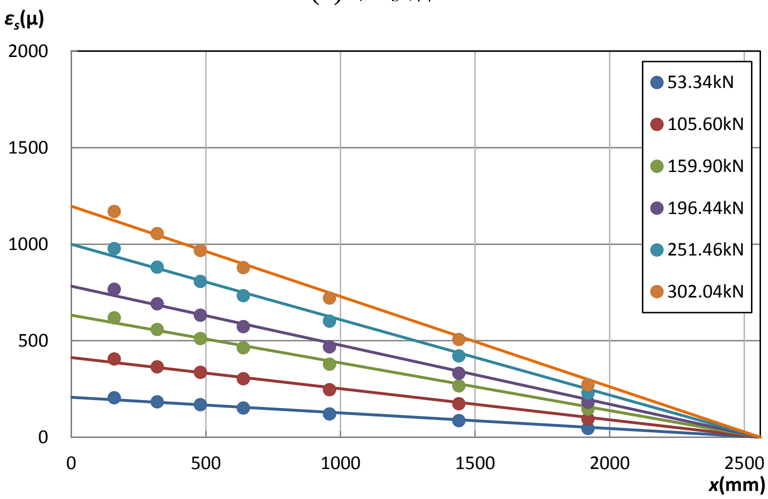
鋼桁とアルミニウム床版が不完全合成の場合，式(2.39)が示すように，鋼桁下フランジの



(a) 試験体Ⅰ



(b) 試験体Ⅱ



(c) 試験体Ⅲ

図-4.4 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

下面に生じるひずみは曲線分布となるが，両者が完全合成の場合，式(2.41)が示すように，鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは直線分布となる．**図−4.4** からわかるように，試験値はほぼ直線分布を示しているので，鋼桁とアルミニウム床版は完全合成に近いといえる．

$y=-(h-e)$ を式(2.43)に代入して，鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合に対する，鋼桁下フランジの下面に生じるひずみが次式で与えられる．

$$\varepsilon_s=\frac{Px}{2E_sI_v}(h-e) \tag{4.3}$$

ここに，

h ：鋼桁の高さ

$x=L/2$ を式(4.3)に代入して，試験体中央の鋼桁下フランジ下面のひずみが次式で与えられる．

$$\varepsilon_s=\frac{PL}{4E_sI_v}(h-e) \tag{4.4}$$

式(4.4)を I_v について解いた式を式(2.32)の左辺の I_v に用い，さらに η について解いて次式を得る．

$$\eta=\frac{-\dfrac{PL}{4E_s\varepsilon_s}(e_0-h)-I_s-\dfrac{I_c}{n_c}-\dfrac{I_a}{n_a}-A_sd_s(d_s-e_0)-\dfrac{A_c}{n_c}d_c(d_c-e_0)-\dfrac{A_a}{n_a}d_ae_0}{\dfrac{A_a}{n_a}d_a(d_a-e_1)-\dfrac{PL}{4E_s\varepsilon_s}(e_0-e_1)} \tag{4.5}$$

荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面に生じるひずみの関係を**図−4.5** に示す．**図−4.4** の各荷重に対する直線の x =0 に対するひずみ値を**図−4.5** の ε_s に採っている．各試験体の P と ε_s の関係に最小二乗法を適用することによって得られる P と ε_s の傾き，すなわち P/ε_s の値を式(4.5)に代入して得られる平面保持度 η の値は，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ 0.03，0.12，0.50 である．これらの値を式(2.32)に代入して得られる I_v の値を式(4.3)に用いて算出された試験体の鋼桁下フランジの下面のひずみ分布と試験値の比較を**図−4.6** に示す．荷重の大きさは，それぞれ 298.62kN，300.12kN，302.04kN 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．同図には，η =0 と 1 に対するひずみ分布も描いてある．計算値は試験値にほぼ一致している．試験体ⅠとⅡのひずみ分布は，η = 0 に対するひずみ分布に近く，試験体Ⅲのひずみ分布は，η =0 と 1 に対するひずみ分布の中間に分布する．

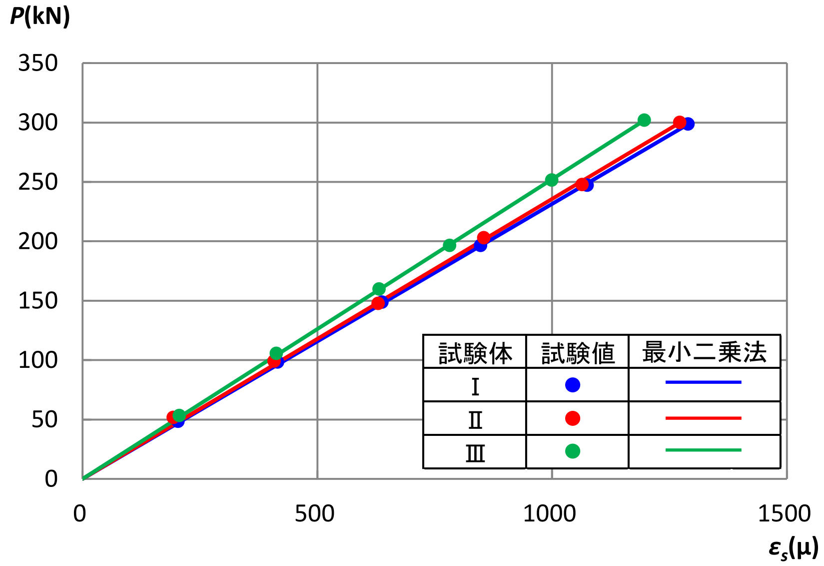


図-4.5　荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面に生じるひずみの関係（$P \leq 300$kN）

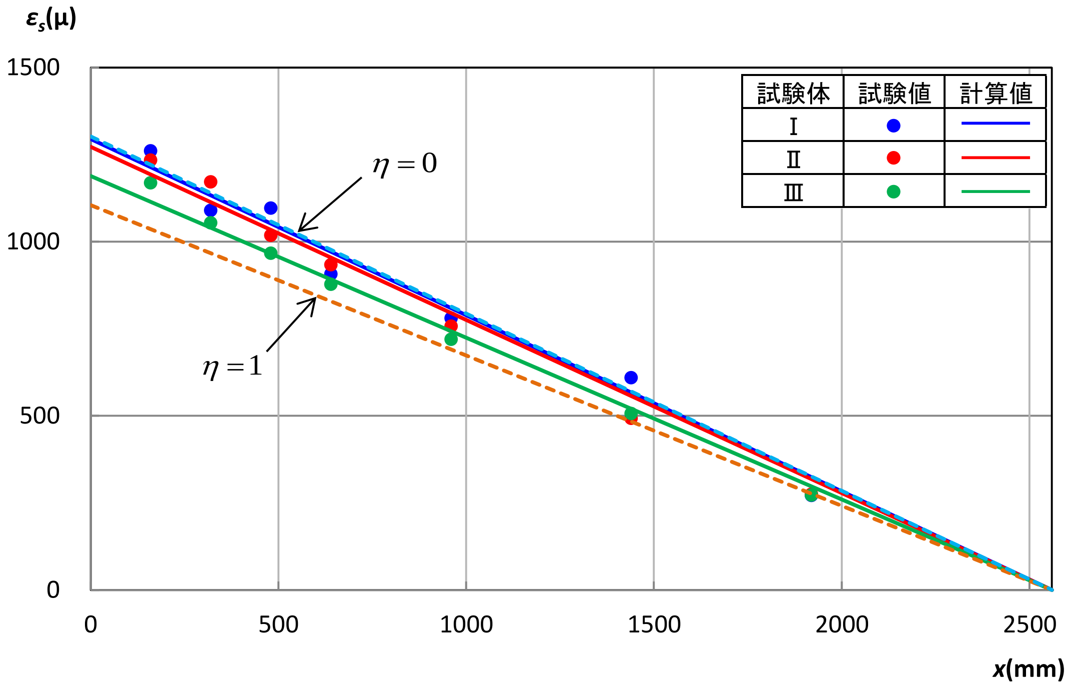
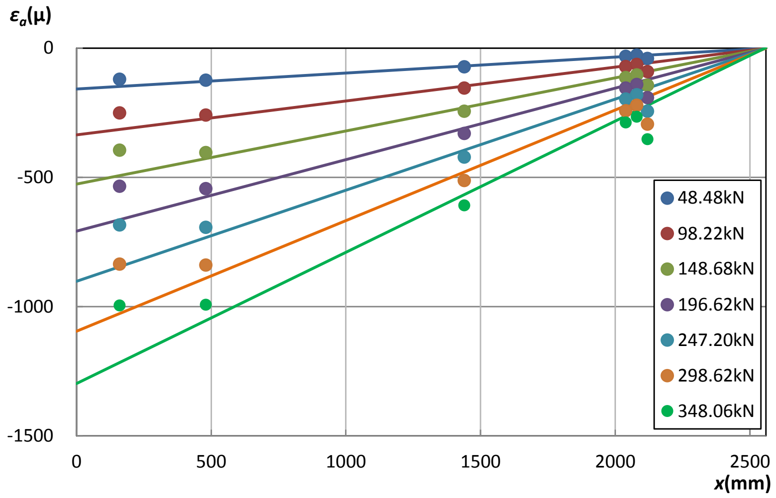


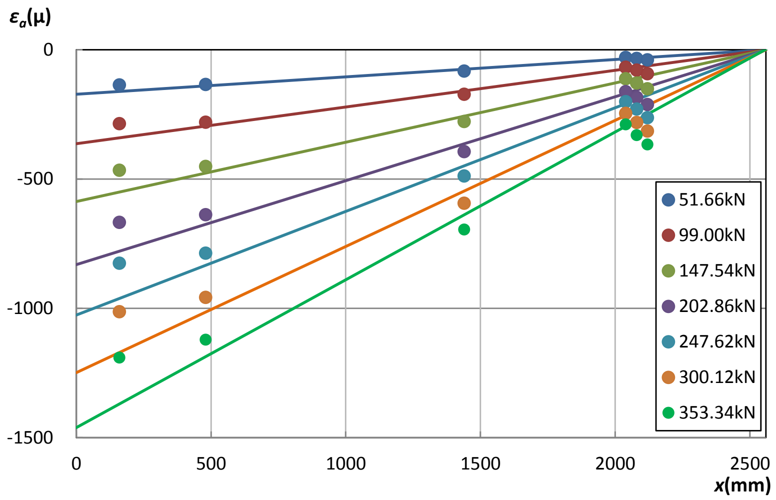
図-4.6　鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

4.3　アルミニウム床版上板に生じるひずみによる推定

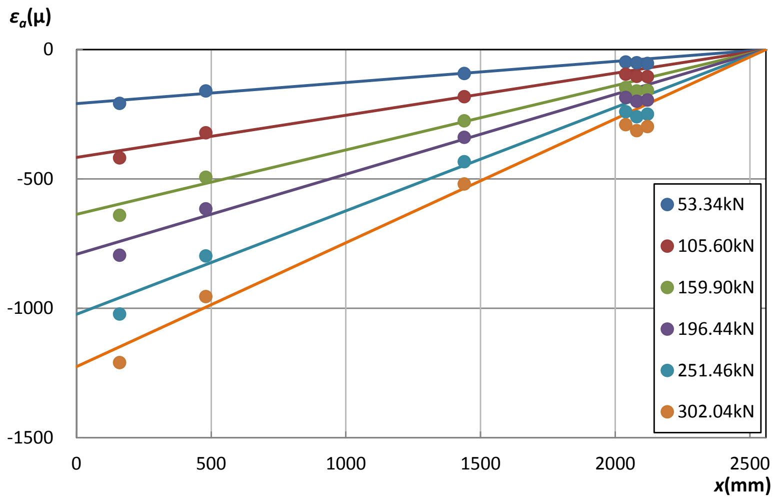
荷重を 400kN まで載荷した後に除荷した状態を初期として，再度 400kN まで載荷した場合に対するアルミニウム床版上板の膜ひずみ分布を**図-4.7** に示す．膜ひずみとは，アルミニウム床版上板の上面のひずみと下面のひずみの平均値である．横軸は試験体中央を原点とする座標であり，縦軸はひずみである．同図には，x =160mm の位置を除いた試験値（x



(a) 試験体 I



(b) 試験体 II



(c) 試験体 III

図-4. 7 アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布

=160mm の位置のひずみは, 荷重載荷のために使用された硬質ウレタンがひずみゲージの近傍に位置しているために局所的なひずみを含んでいる可能性があるので排除）に最小二乗法を適用することによって得られる直線も示してある．

$y = a_a$ を式(2.44)に代入することにより，鋼桁とアルミニウム床版とが完全合成の場合に対する，アルミニウム床版上板の膜ひずみが次式で与えられる．

$$\varepsilon_a = -\frac{Px}{2E_s I_v}\left(a_a - d_a + \eta d_a\right) = -\frac{Px}{2E_s I_v}\left(e + \eta d_a\right) \tag{4.6}$$

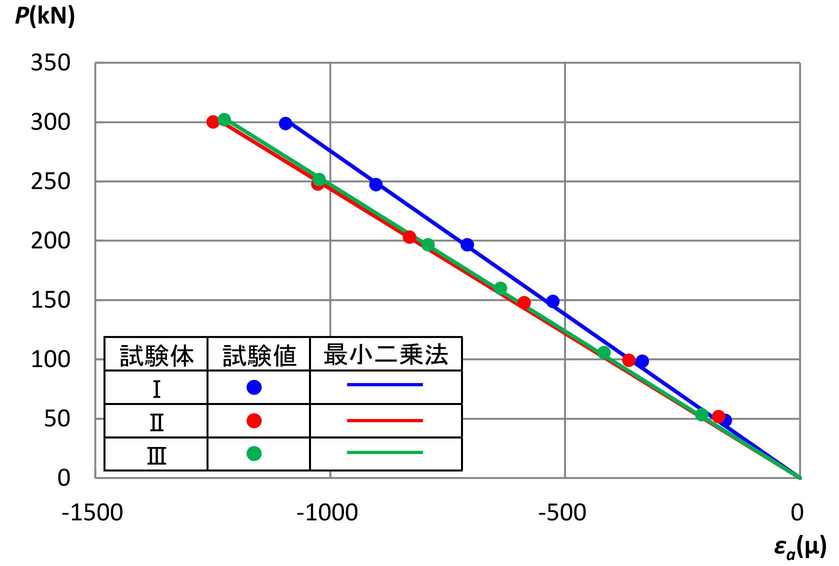
$x = L/2$ を式(4.6)に代入して，試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみが次式で与えられる．

$$\varepsilon_a = -\frac{PL}{4E_s I_v}\left(e + \eta d_a\right) \tag{4.7}$$

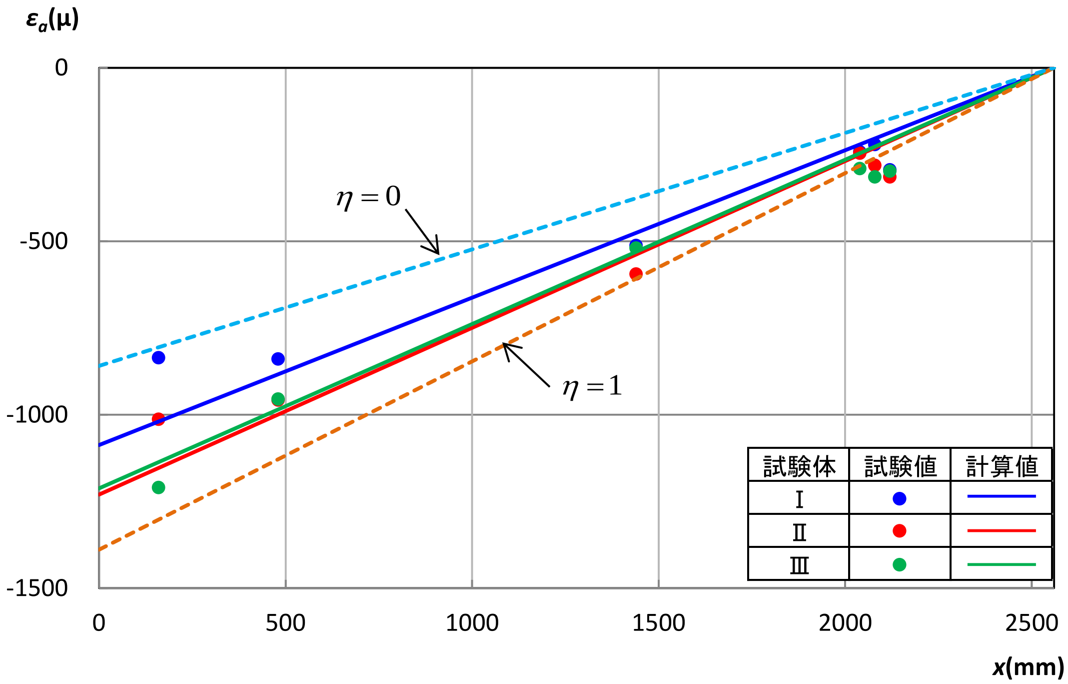
式(4.7)を I_v について解いた式を式(2.32)の左辺の I_v に用い，さらに η について解いて次式を得る．

$$\eta = \frac{-\dfrac{PL}{4E_s\varepsilon_a} - I_s - \dfrac{I_c}{n_c} - \dfrac{I_a}{n_a} - A_s d_s\left(d_s - e_0\right) - \dfrac{A_c}{n_c} d_c\left(d_c - e_0\right) - \dfrac{A_a}{n_a} d_a e_0}{\dfrac{A_a}{n_a} d_a\left(d_a - e_1\right) - \dfrac{PL}{4E_s\varepsilon_a}\left(e_0 - e_1 - d_a\right)} \tag{4.8}$$

荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係を**図-4.8** に示す．**図-4.7** の試験値に対して最小二乗法を適用することによって与えられた直線の x=0 の位置のひずみの値を**図-4.8** の ε_a に採っている．各試験体の P と ε_a の関係に最小二乗法を適用することによって得られる P と ε_a の傾き，すなわち P/ε_a の値を式(4.8)に代入して得られる平面保持度 η の値は，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ 0.36，0.63，0.60 である．これらの値を式(2.32)に代入して得られた I_v の値を式(4.6)に用いて算出された試験体のアルミニウム床版上板の膜ひずみと試験値の比較を**図-4.9** に示す．荷重の大きさは，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ 298.62kN，300.12kN，302.04kN である．横軸は試験体中央を原点とする座標であり，縦軸は膜ひずみである．同図には，η =0 と 1 に対する膜ひずみ分布も描いてある．計算値は試験値にほぼ一致している．試験体ⅡとⅢのひずみ分布は，η = 1 に対するひずみ分布に近く，試験体Ⅰのひずみ分布は，η = 0 と 1 に対するひずみ分布のほぼ中間に分布する．



図−4.8　荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係（$P \leq 300$kN）



図−4.9　アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布

4.4　頭付きスタッドの本数と平面保持度の関係

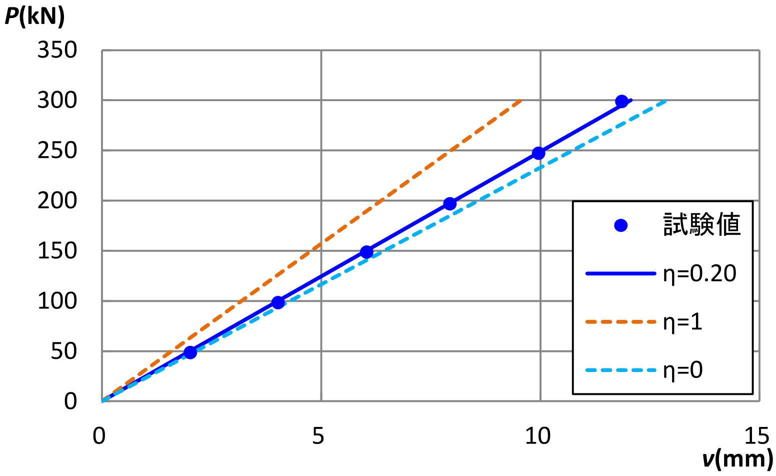
試験体のたわみ，鋼桁下フランジの下面のひずみ，アルミニウム床版上板の膜ひずみによって推定された平面保持度を**表−4.1** にまとめる．同表には，各試験体の平面保持度の平均値も示してある．平面保持度の平均値は，頭付きスタッドの本数が増えるに従って増加する．

表-4.1　平面保持度の値

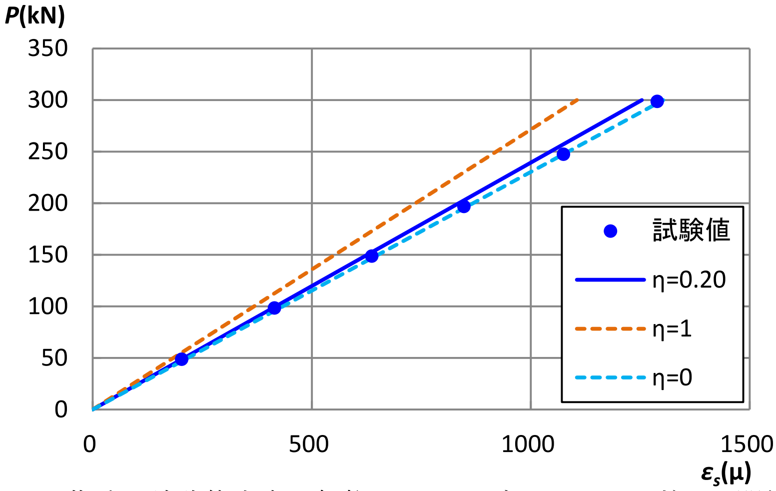
	試験体Ⅰ	試験体Ⅱ	試験体Ⅲ
試験体のたわみ	0.20	0.29	0.34
鋼桁下フランジの下面のひずみ	0.03	0.12	0.50
アルミニウム床版上板の膜ひずみ	0.36	0.63	0.60
平均値	0.20	0.35	0.48

表-4.1 に示す平面保持度の平均値を用いて算出された，荷重と試験体中央のたわみの関係，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，荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係を，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ図-4.10，4.11，4.12 に示す．さらに，試験体のたわみ分布，鋼桁下フランジの下面のひずみ分布，アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布を，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ図-4.13，4.14，4.15 に示す．荷重の大きさは，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに対して，それぞれ 298.62kN，300.12kN，302.04kN である．

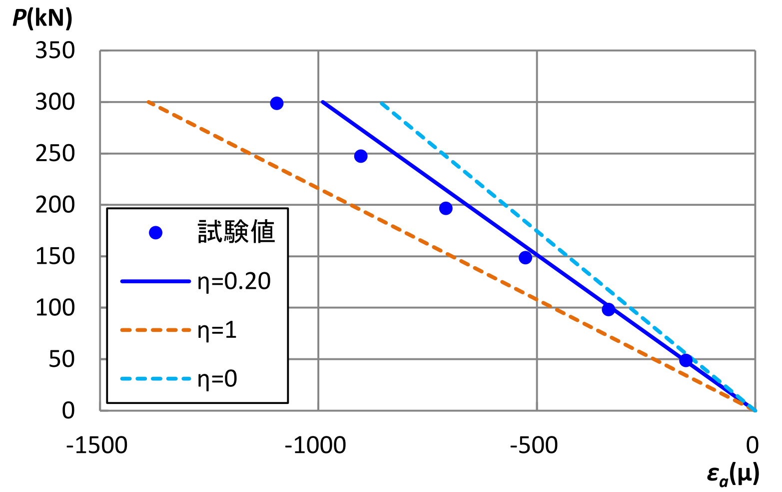
図-4.10(c)と 4.11(c)からわかるように，試験体ⅠとⅡの，荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係に関しては，推定値が試験値から少し離れているが，これらを除けば，図-4.10，4.11，4.12 の各図の推定値は試験値にほぼ一致している．他方，図-4.14(c)からわかるように，試験体Ⅱのアルミニウム床版上板の膜ひずみ分布の関係に関しては，推定値が試験値から少し離れているが，これを除けば，図-4.13，4.14，4.15 の各図の推定値は試験値にほぼ一致している．したがって，試験体Ⅰ，Ⅱ，Ⅲの平面保持度は，表-4.1 に示す平均値としてよいであろう．



(a) 荷重と試験体中央のたわみの関係

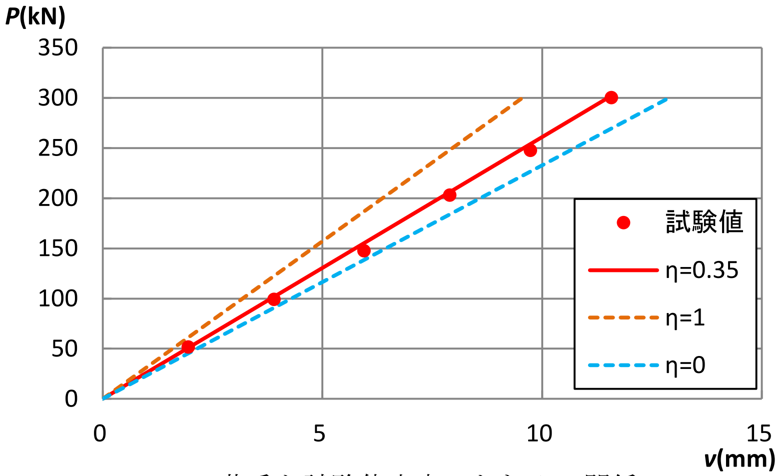


(b) 荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみの関係

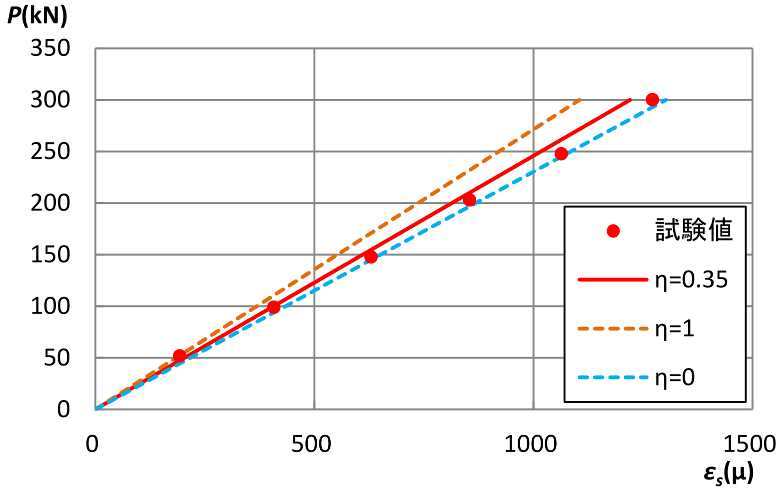


(c) 荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係

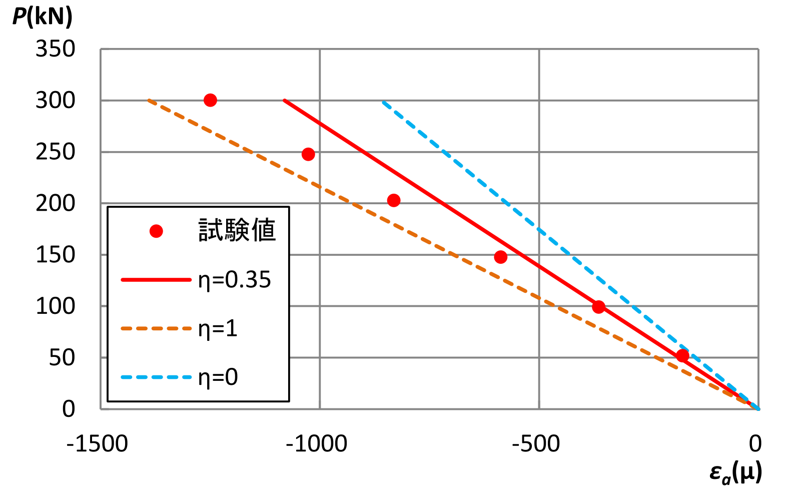
図−4. 10　試験体 I



(a) 荷重と試験体中央のたわみの関係

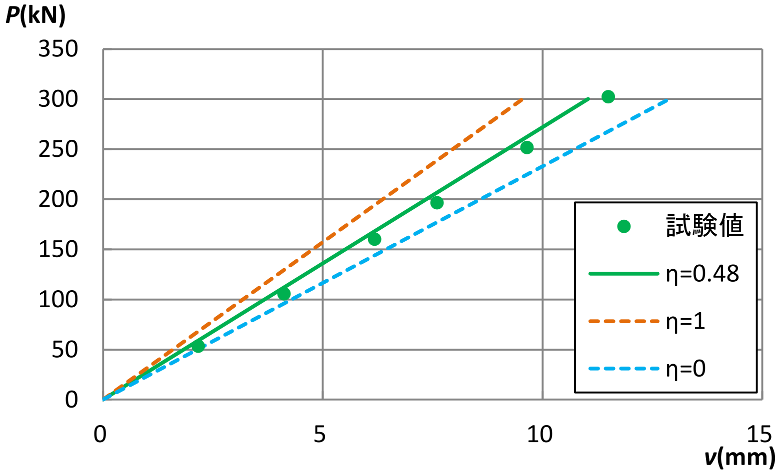


(b) 荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみの関係

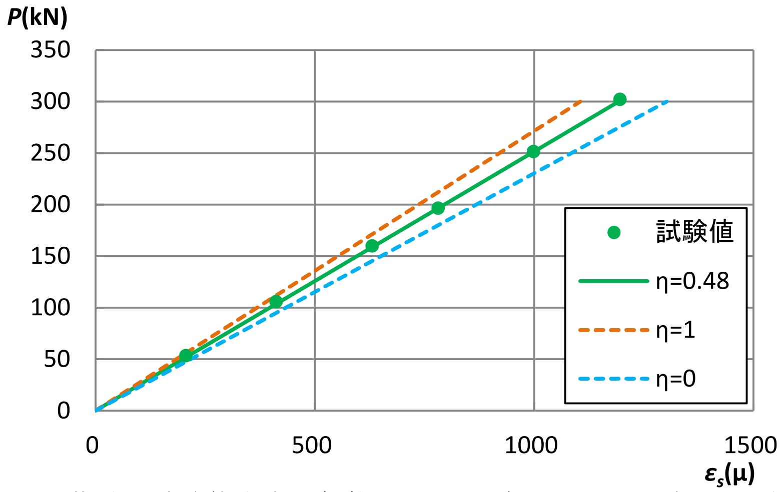


(c) 荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係

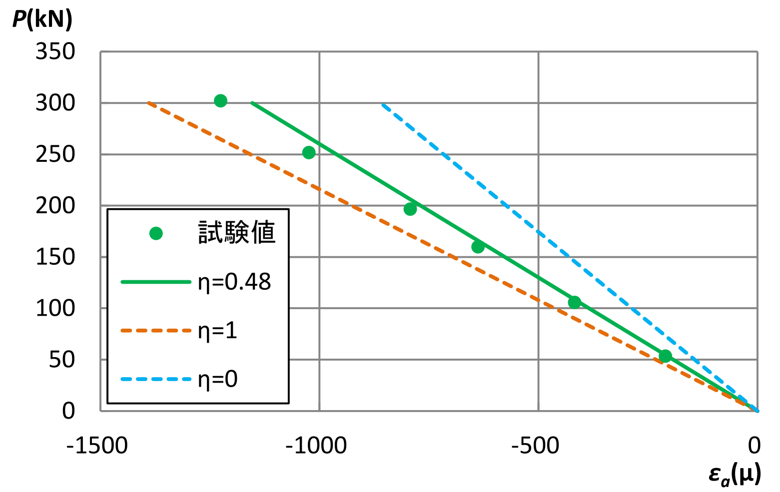
図−4. 11　試験体 II



(a) 荷重と試験体中央のたわみの関係

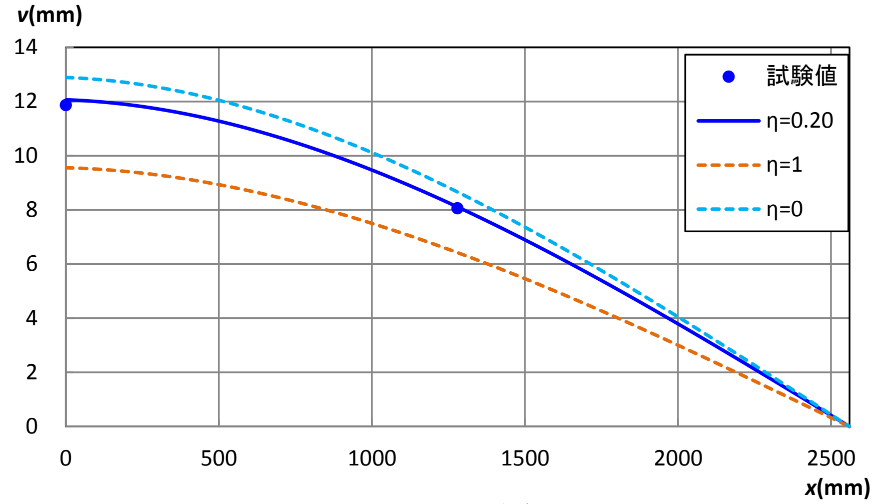


(b) 荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみの関係

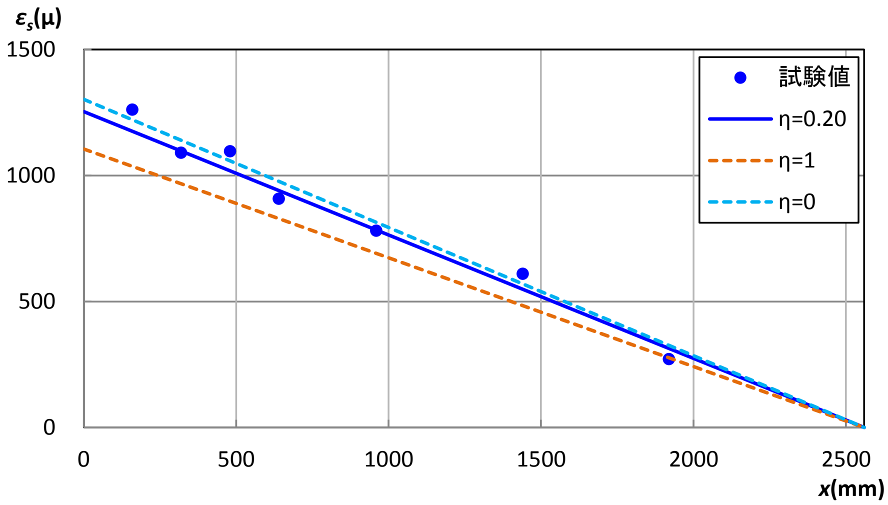


(c) 荷重と試験体中央のアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係

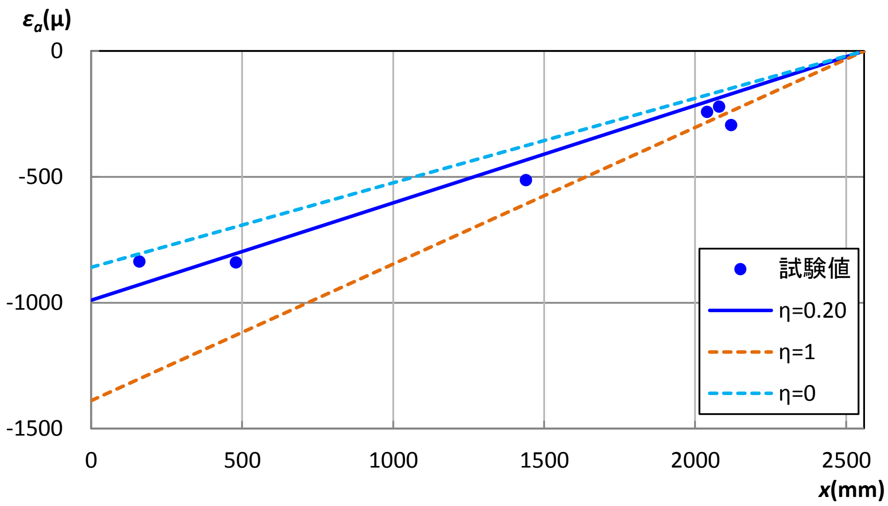
図-4. 12　試験体Ⅲ



(a) たわみ分布

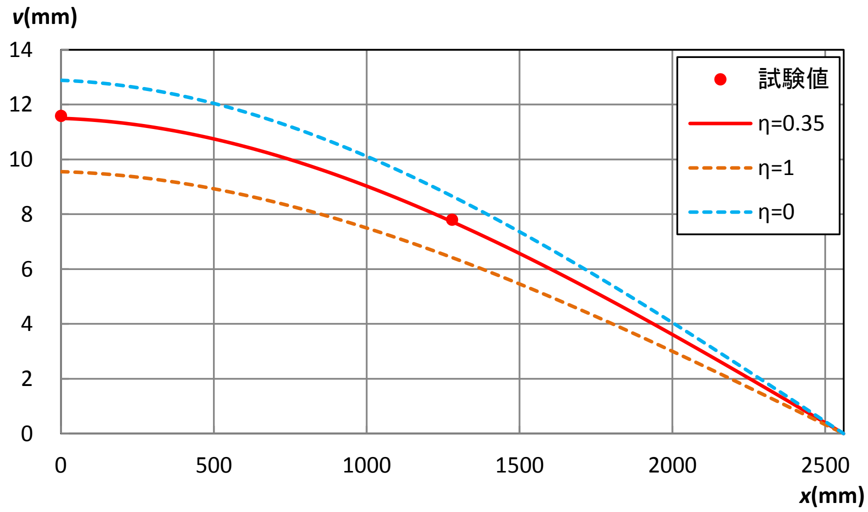


(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

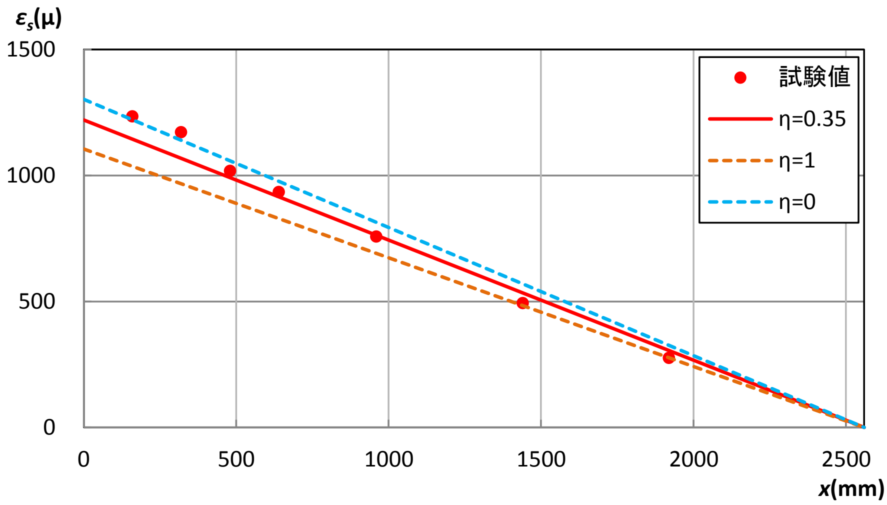


(c) アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布

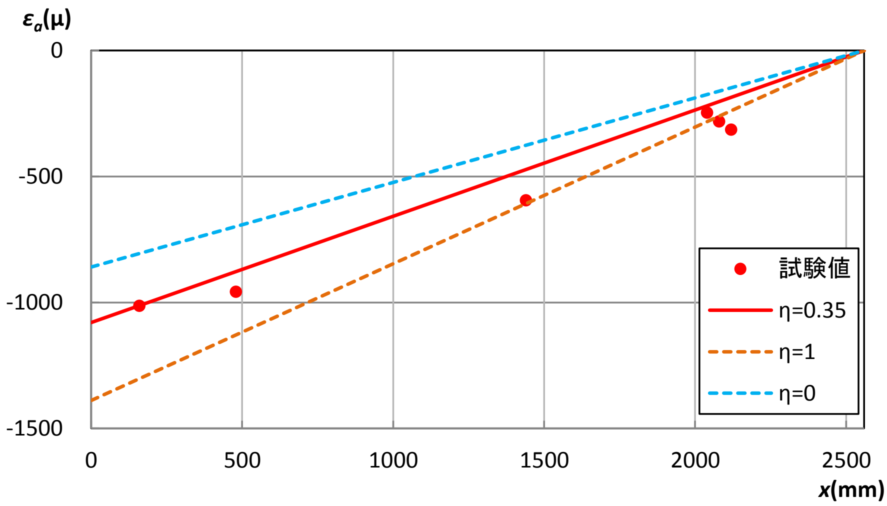
図-4. 13　試験体 I



(a) たわみ分布

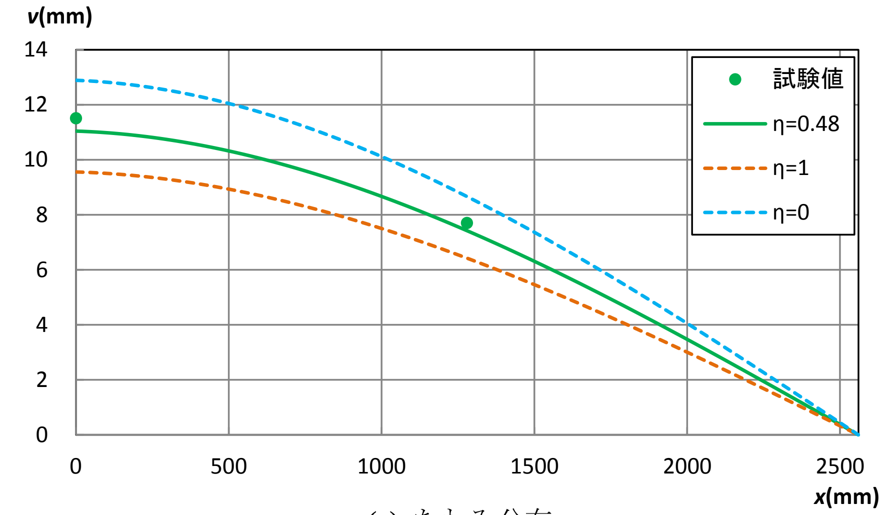


(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

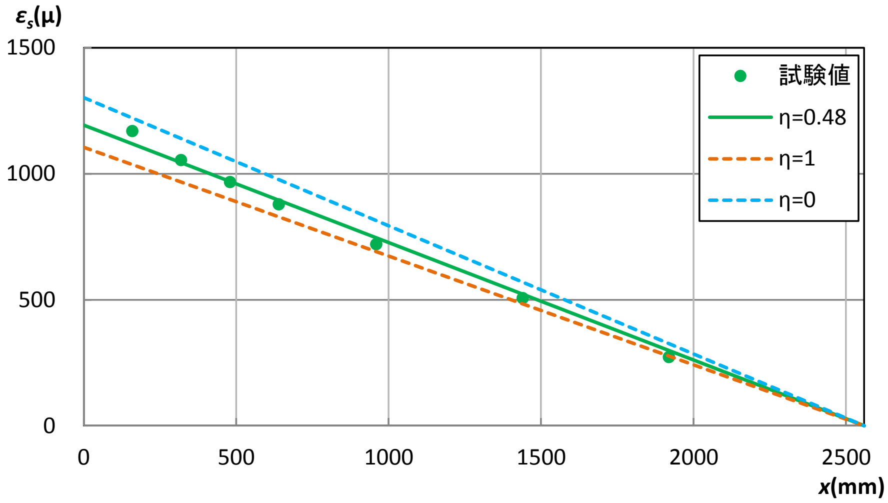


(c) アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布

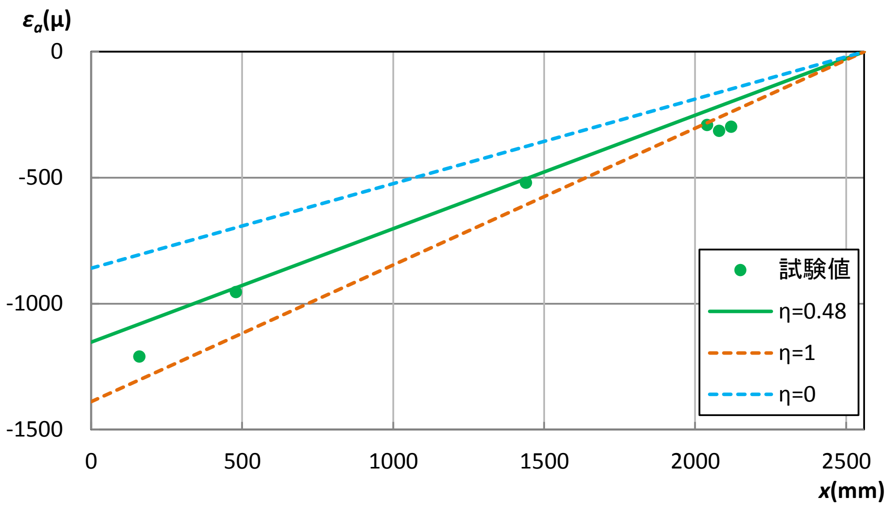
図-4. 14　試験体 II



(a) たわみ分布



(b) 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布



(c) アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布

図-4.15　試験体Ⅲ

第 5 章　結論

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平面保持の程度を表すパラメータとして平面保持度を定義し，過去の静的載荷試験[15)]で使用された，アルミニウム床版を有する鋼桁の試験体の平面保持度を推定し，両者の連結に用いられた頭付きスタッドの本数と平面保持度の関係を明らかにした．主な結論は次の通りである．

(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の程度は，鋼桁の平面保持が鋼桁上フランジの上方 ηd_a まで存在していると仮定することにより考慮することができる．η は $0 \le \eta \le 1$ であり，平面保持度である．d_a は鋼桁上フランジの上面からアルミニウム床版上板の中立面までの距離である．$\eta = 0$ のとき，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は存在せず，$\eta = 1$ のとき，鋼桁の平面保持がアルミニウム床版上板まで拡大する．

(2) 平面保持度 η を考慮した，アルミニウム床版と鋼桁に対する軸力方程式が式(2.24)～(2.27)で与えられた．

(3) 鋼桁とアルミニウム床版が不完全合成の場合，鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは曲線分布となるが，両者が完全合成の場合，鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは直線分布となる．頭付きスタッドの本数が 1 本，2 本，3 本の各試験体の，鋼桁下フランジの下面のひずみ分布は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といえる．

(4) 頭付きスタッドの本数が 1 本, 2 本, 3 本に対して, 平面保持度 η はそれぞれ 0.20, 0.35, 0.48 と推定され，頭付きスタッドの本数が増えるに従って平面保持度は増加する．

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.