

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 25

2012年7月

日本軽金属(株)グループ技術センター
萩澤亘保，長尾隆史

大阪大学大学院工学研究科
大倉一郎

概要

本研究は、頭付きスタッドが一個所当たり 1 本、2 本、3 本配置された、アルミニウム床版と鋼桁とから成る試験体の静的載荷試験を実施し、得られた試験結果より、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及ぼす影響を明らかにする。

謝辞

本研究は、日本科学技術振興機構の独創的シーズ展開事業 平成 19 年度第二回委託開発のもとで行われた。

試験体の製作においては、鹿島建設株式会社 技術研究所の林大介，橋本学，内田雄士の各氏に，試験体の静的載荷試験においては，日本建設機械化協会 施工技術総合研究所の小野秀一氏と大城剛氏にご協力を賜るとともに有益な助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

目次

第1章	序論	1
第2章	試験体	2
第3章	試験体の特性値	6
3.1	合成理論	6
3.2	中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力分布，たわみ	6
3.3	降伏荷重	9
3.4	全塑性荷重	9
3.5	特性値	11
第4章	試験方法	13
第5章	試験結果	18
5.1	試験体の挙動	18
5.1.1	荷重とたわみの関係	18
5.1.2	たわみ分布	19
5.1.3	試験終了後の試験体の様子	20
5.1.4	無収縮モルタルとECC台座の挙動	22
5.2	鋼桁に生じるひずみ	24
5.3	アルミニウム床版に生じるひずみ	28
5.4	ECC台座に生じるひずみ	40
第6章	結論	43
	参考文献	44
付録A	試験体 ， ， の荷重とたわみの関係	45
付録B	試験体の鋼桁下フランジの下面のひずみ分布	46
付録C	試験体の鋼桁断面のひずみ分布	48
付録D	試験体のアルミニウム床版上板とウェブのひずみ	51
付録E	試験体のアルミニウム床版上板の荷重とひずみの関係	55

第1章 序論

図 1.1 に示すように，鋼桁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中空部に挿入され，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ので，両者は合成作用を発揮する．既往の研究¹⁾では，アルミニウム床版下フランジと鋼桁上フランジの間に設けられる台座にコンクリートを用い，頭付きスタッドの本数を一個所当たり 3 本として，30mm，60mm，100mm の異なる高さの台座に対して，アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が調べられた．

台座にコンクリートや無収縮モルタルを使用すると，ひび割れが発生するので^{1),2)}，実橋では，乾燥収縮ひび割れに優れる高靱性繊維補強セメント複合材料 ECC (Engineered Cementitious Composite) が台座に使用される³⁾．

ところで，頭付きスタッドを一個所当たり 3 本配置することは，アルミニウム床版の橋軸直角方向の変形に対して，頭付きスタッドとモルタル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，提案された構造である⁴⁾．したがって頭付きスタッドの本数と配置間隔は，元々，アルミニウム床版と鋼桁との橋軸方向の合成作用の観点から決められたものではない．

しかし，一個所当たり頭付きスタッドが 3 本配置された，アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は，3 本と異なる本数の頭付きスタッドが配置された場合の合成作用との比較によって明らかにされる．

本研究は，頭付きスタッドが一個所当たり 1 本，2 本，3 本配置された，アルミニウム床版と鋼桁とから成る試験体の静的載荷試験を実施し，得られた試験結果より，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及ぼす影響を明らかにする．

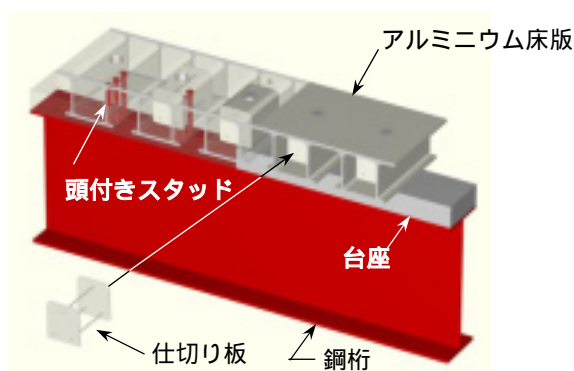


図 1.1 アルミニウム床版と鋼桁の連結構造

第2章 試験体

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。アルミニウム床版は、図 2.2 に示す断面を有する 17 本の押出型材の上フランジを突合わせ、摩擦撈拌接合によって製作された。鋼桁は、高さ 400mm、幅 200mm の H 形鋼である。鋼桁の上フランジに頭付きスタッドを溶接した後、高さ 30mm の ECC 台座を施工した。その後、アルミニウム床版の下フランジに設けられた開口に頭付きスタッドを挿入し、アルミニウム床版を ECC 台座の上に載せた。最後に、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を充填することによって、アルミニウム床版と鋼桁を連結した。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た。仕切り板と連結ロッドの寸法を図 2.3 に示す。仕切り板は図 2.3 に示す 3 本のアルミニウムロッドで連結される。

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 A、B、C と呼ぶ。各試験体の頭付きスタッドの配置位置を図 2.4 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。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とアクリル仕切り板の間隔を図 2.5 に示す。無収縮モルタルを注入するために、アルミニウム床版の上フランジに設けられる開口の寸法は全試験体とも同じである。

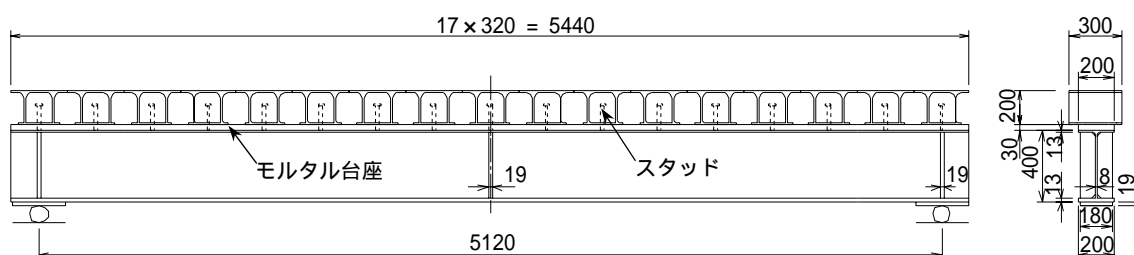


図 2.1 試験体

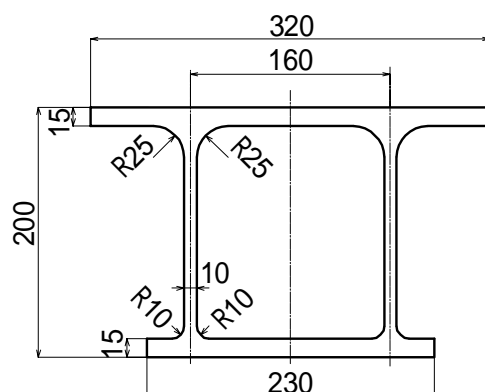


図 2.2 アルミニウム床版型材の断面

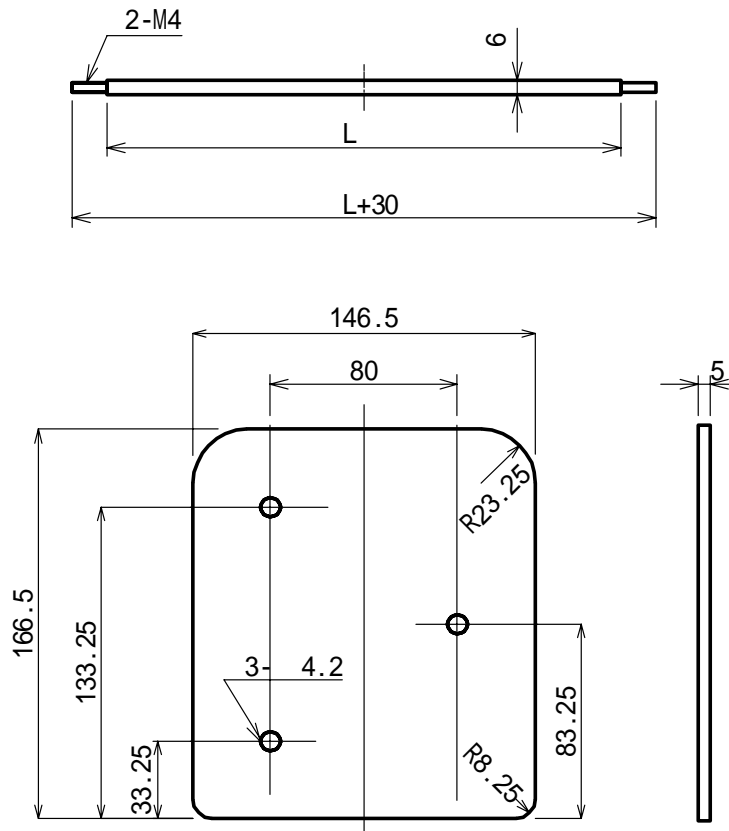


図 2.3 仕切り板と連結ロッド

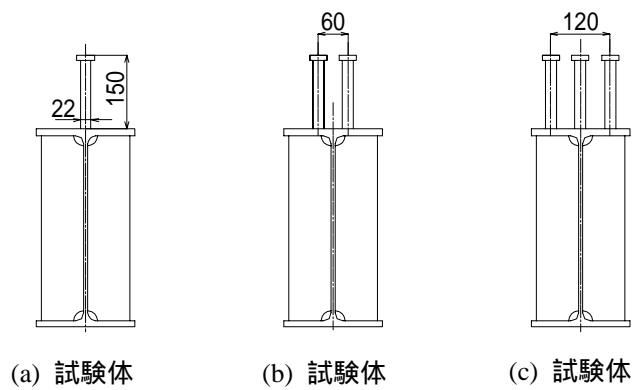


図 2.4 頭付きスタッドの配置位置

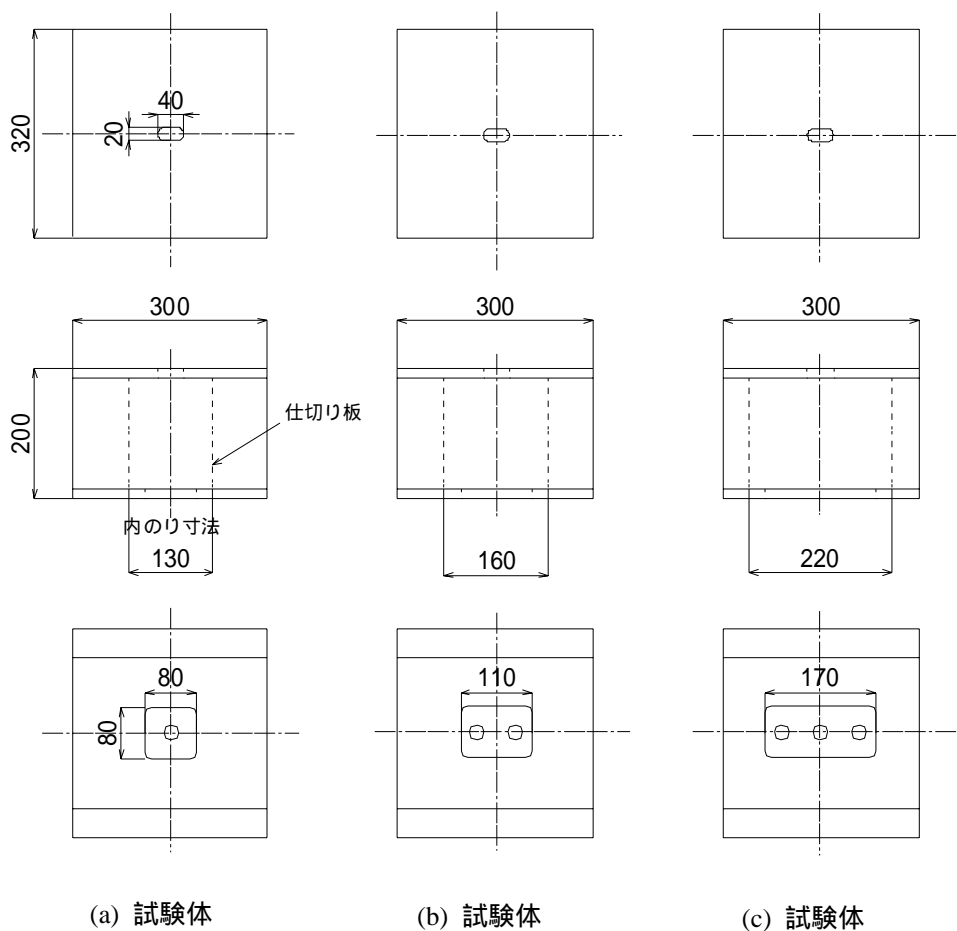


図 2.5 アルミニウム床版の上下フランジの開口と仕切り板の間隔

試験体に使用されたアルミニウム床版型材の材料は A6061-T6 であり，H 形鋼は SS400 である．引張試験による，アルミニウム床版の母材および摩擦撈拌接合部の機械的特性を表 2.1 に示す．引張試験片の形状は JIS 14B 号である．アルミニウム床版型材の上フランジの押出方向から母材の引張試験片を採取し，接合線が引張試験片の平行部の中央に位置するように，接合線直角方向に摩擦撈拌接合部の引張試験片を採取した．

H 形鋼および頭付きスタッドのミルシート記載値を表 2.2 に示す．

ECC の材齢 28 日と 91 日における圧縮試験結果および一軸直接引張試験結果を表 2.3 に示す⁵⁾．圧縮試験で得られるヤング係数は，応力-ひずみ曲線における圧縮強度の 1/3 の応力の点と原点とが結ばれた直線の勾配で与えられる割線静弾性係数，終局ひずみは圧縮強度に対応するひずみである．一軸直接引張試験におけるヤング係数は，応力 - ひずみ関係の原点における接線係数，降伏強度は，応力 - ひずみ関係において最初に現れる応力のピーク値，降伏ひずみは降伏強度に対応するひずみ，引張強度は最大の引張応力，終局ひずみは引張強度に対応するひずみである．

表 2.1 アルミニウム床版(A6061S-T6)の母材と摩擦撈拌接合部の機械的特性 (引張試験)

部位	母材	摩擦撈拌接合部
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

表 2.2 H形鋼(SS400)と頭付きスタッド(CH16A)の機械的特性 (ミルシート記載値)

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

表 2.3 ECC の圧縮試験および一軸直接引張試験の測定結果

材齢 (日)		28	91
圧縮試験	ヤング係数 (GPa)	13.67	15.39
	圧縮強度 (MPa)	26.8	34.2
	終局ひずみ (%)	0.340	0.332
一軸引張試験	ヤング係数 (GPa)	12.10	13.02
	降伏強度 (MPa)	3.69	3.86
	降伏ひずみ (%)	0.340	0.189
	引張強度 (MPa)	5.12	4.78
	終局ひずみ (%)	2.87	1.75

第3章 試験体の特性値

3.1 合成理論

頭付きスタッドによって締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定された水平せん断バネによって表される^{1),6)}．この水平せん断バネを用いて，アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を議論する際に，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と設けない場合とで，アルミニウム床版と鋼桁から成る合成桁の中立軸の位置および鋼換算断面二次モーメントに違いが生じる⁶⁾．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に平面保持の仮定を設ける場合を「A法」，設けない場合を「B法」と呼ぶ．

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，合成桁断面に生じるひずみ分布をA法とB法に対して，それぞれ図3.1(a)，(b)に示す．A法によるひずみ分布は，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，B法によるひずみ分布は，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は鋼桁上フランジの上面の位置のひずみに等しい．

アルミニウム床版と鋼桁との合成作用はB法がA法より適切であることが理論研究によって示されている⁶⁾．本研究は，これを試験によって確認する．

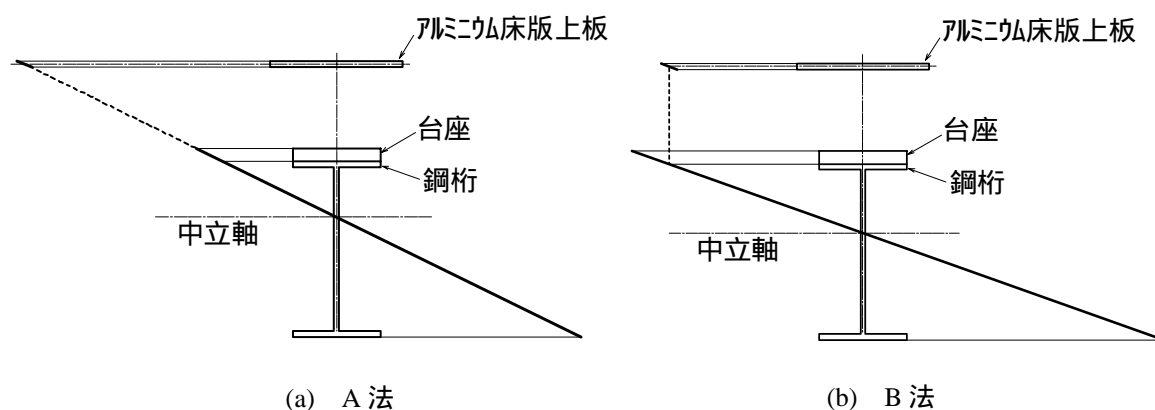


図3.1 完全合成の場合のひずみ分布

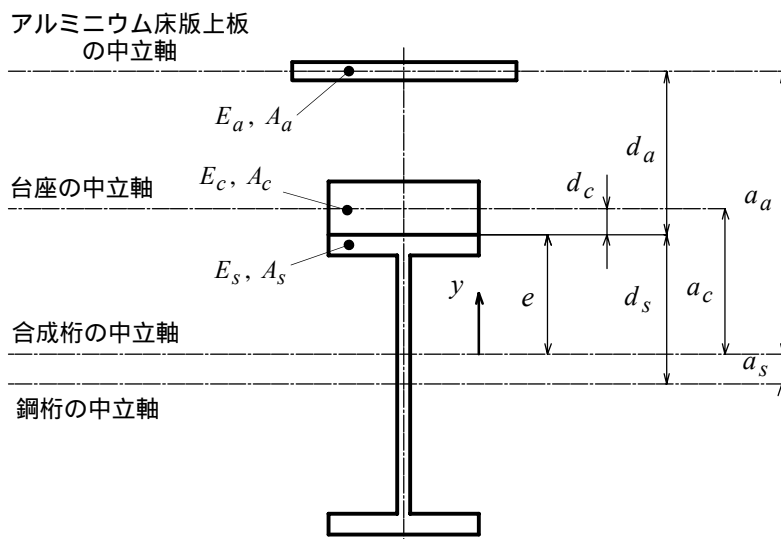
3.2 中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力分布，たわみ

A法とB法に対する，合成桁の中立軸，鋼換算断面二次モーメント，応力分布を表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，応力分布

	A 法	B 法
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	$I_v = I_s + \frac{I_c}{n_c} + \frac{I_a}{n_a} + A_s a_s^2 + \frac{A_c}{n_c} a_c^2 + \frac{A_a}{n_a} a_a^2 \quad (3.2)$	$I_v = I_s + \frac{I_c}{n_c} + \frac{I_a}{n_a} + A_s a_s^2 + \frac{A_c}{n_c} a_c^2 + \frac{A_a}{n_a} e a_a \quad (3.7)$
応力分布	$\sigma_s = -\frac{M}{I_v} y \quad (3.3)$	$\sigma_s = -\frac{M}{I_v} y \quad (3.8)$
	$\sigma_c = -\frac{M}{n_c I_v} y \quad (3.4)$	$\sigma_c = -\frac{M}{n_c I_v} y \quad (3.9)$
	$\sigma_a = -\frac{M}{n_a I_v} y \quad (3.5)$	$\sigma_a = -\frac{M}{n_a I_v} (y - d_a) \quad (3.10)$

台座を考慮しない場合， $A_c = 0$ ， $I_c = 0$



- 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_y : 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⁶⁾.

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

ここに,

- P : 試験体中央に作用する荷重
 L : 試験体の支間長 (5120mm)
 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.

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

3.3 降伏荷重

図 2.1 に示す試験体において，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

3.4 全塑性荷重

合成桁の全塑性状態において，圧縮の合力と引張の合力が等しくなる位置が塑性中立軸の位置である．鋼桁上フランジの上面から塑性中立軸までの距離 e_z が次のように与えられる．

(a) 塑性中立軸が鋼桁ウェブにある場合，

$$e_z = \frac{\sigma_{sY} H t_w - \sigma_{aY} A_a - \sigma_{cB} A_c}{2 t_w \sigma_{sY}} \quad (3.14)$$

(b) 塑性中立軸が鋼桁上フランジにある場合，

$$e_z = \frac{\sigma_{sY} A_s - \sigma_{aY} A_a - \sigma_{cB} A_c}{2 B \sigma_{sY}} \quad (3.15)$$

ここに，

- H, B : それぞれ，鋼桁の全高と鋼桁上フランジの幅（図 3.2 参照）
- t_w : 鋼桁ウェブの厚さ
- σ_{cB} : 台座の圧縮強度
- σ_{aY} : 合成桁の全塑性モーメントを算出する際，アルミニウム床版上板に使用される強度

図 3.2 を参照して，合成桁の全塑性モーメント M_p が次のように与えられる．

(a) 塑性中立軸が鋼桁ウェブにある場合，

$$M_p = A_a \sigma_{aY} a_a + A_c \sigma_{cB} a_c + \sigma_{sY} (A_{sf} a_{sfu} + A_{swu} a_{swu} + A_{swl} a_{swl} + A_{sfl} a_{sfl}) \quad (3.16)$$

(b) 塑性中立軸が鋼桁上フランジにある場合，

$$M_p = A_a \sigma_{aY} a_a + A_c \sigma_{cB} a_c + \sigma_{sY} (A_{sfu} a_{sfu} + A_{sfl} a_{sfl} + A_{sw} a_{sw} + A_{sf} a_{sf}) \quad (3.17)$$

ここに，

- A_{sf}, A_{sw} : それぞれ，鋼桁上フランジとウェブの断面積
- a_a, a_c : それぞれ，塑性中立軸から，アルミニウム床版上板の中立軸と台座

の中立軸までの距離

A_{swu}, A_{swl} : 塑性中立軸が鋼桁ウェブにある場合、それぞれ、塑性中立軸より上方と下方の鋼桁ウェブの断面積

a_{sfu}, a_{sfl} : 塑性中立軸が鋼桁ウェブにある場合、それぞれ、塑性中立軸から、鋼桁上フランジの中立軸と鋼桁下フランジの中立軸までの距離

a_{swu}, a_{swl} : 塑性中立軸が鋼桁ウェブにある場合、それぞれ、塑性中立軸から、それより上方の鋼桁ウェブの図心とそれより下方のウェブの図心までの距離

A_{sfu}, A_{sfl} : 塑性中立軸が鋼桁上フランジにある場合、それぞれ、塑性中立軸より上方と下方の鋼桁上フランジの断面積

a_{sf}, s_{sw} : 塑性中立軸が鋼桁上フランジにある場合、塑性中立軸から鋼桁下フランジの中立軸と鋼桁ウェブの中立軸までの距離

a_{sfu}, a_{sfl} : 塑性中立軸が鋼桁上フランジにある場合、それぞれ、塑性中立軸から、それより上方の鋼桁上フランジの図心とそれより下方の鋼桁上フランジの図心までの距離

合成桁が全塑性モーメント M_p に達するときの荷重、すなわち全塑性荷重 P_p が次式により計算される。

$$P_p = \frac{4M_p}{L} \quad (3.18)$$

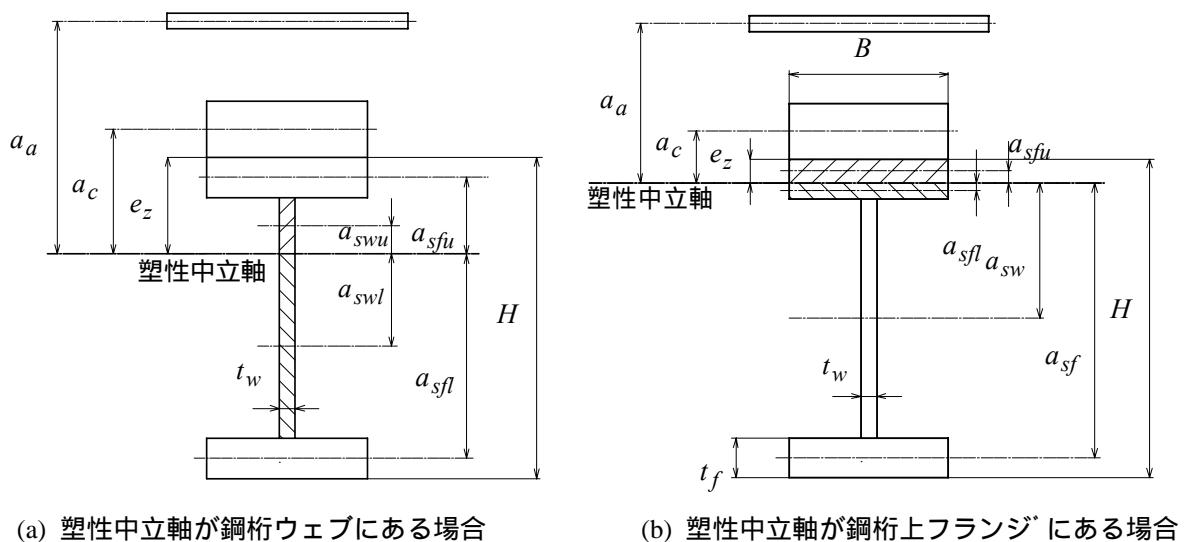


図 3.2 塑性中立軸から各要素の中立軸または図心までの距離

3.5 特性値

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，塑性中立軸の位置，試験体の全塑性荷重を算出するために必要な諸量の値を表 3.2 に示す．ECC 台座が施工されてから 76 日経って試験体の載荷試験が実施されたので，76 日に近い材齢 91 日の ECC の圧縮強度を，ECC 台座の圧縮強度 σ_{cB} に採用している．アルミニウム床版上板には，試験体長手方向に 320mm 間隔で摩擦撈拌接合部が存在する．したがって，全塑性モーメントを算出する際，アルミニウム床版上板の強度 σ_{aY} に対して，摩擦撈拌接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{aF0.2}$ ，またはその引張強さ σ_{aFB} ，あるいはアルミニウム床板上板の母材の 0.2% 耐力 $\sigma_{a0.2}$ を考慮する．

合成桁の中立軸の位置 e ，鋼換算断面二次モーメント I_y および降伏荷重 P_y の値を表 3.3，塑性中立軸の位置 e_z ，全塑性モーメント M_p ，全塑性荷重 P_p の値を表 3.4 に示す．

表 3.3 の A 法と B 法ともに，鋼換算断面二次モーメントは台座を考慮した場合の値が考慮しない場合の値より大きい，降伏荷重は，A 法では台座を考慮した場合の値が考慮しない場合の値より小さく，B 法では台座を考慮した場合の値と考慮しない場合の値が等しい．これは，台座を考慮することにより鋼換算断面二次モーメントは大きくなるが，合成桁の中立軸が上昇し，合成桁の中立軸から鋼桁下フランジの下面までの距離が大きくなるためである．降伏荷重に対する台座の影響は小さい．降伏荷重は，A 法に対して B 法は約 15% 低下する．

表 3.4 から分かるように，全塑性荷重に対する台座の影響は小さい．アルミニウム床版上板の強度 σ_{aY} に対して，摩擦撈拌接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{aF0.2}$ ，摩擦撈拌接合部の引張強さ σ_{aFB} ，アルミニウム床板上板の母材の 0.2% 耐力 $\sigma_{a0.2}$ のどれを採用するかによって，全塑性荷重は大きく異なる．

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	70×10^3	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)	-
200	15	222.5	12.99	2.86	76.9×10^3	5120	2992	-
σ_{sY} (MPa)	σ_{cB} (MPa)	σ_{aY}			頭付きスタッド			
		$\sigma_{aF0.2}$ (MPa)	σ_{aFB} (MPa)	$\sigma_{a0.2}$ (MPa)	σ_{sdY} (MPa)	h_{sd} (mm)	d_{sd} (mm)	
323	34.2	167	259	290	324	150	22	

表 3.3 e, I_v, P_Y

台座の考慮	A 法		B 法	
	無	有	無	有
e (mm)	130.7	124.2	167.2	159.0
I_v (mm ⁴)	4.69×10^8	4.79×10^8	3.43×10^8	3.55×10^8
P_Y (kN)	440	438	372	372

表 3.4 e_z, M_p, P_p

台座の考慮	無			有		
	$\sigma_{aF0.2}$	σ_{aFB}	$\sigma_{a0.2}$	$\sigma_{aF0.2}$	σ_{aFB}	$\sigma_{a0.2}$
e_z (mm)	54.6	11.5	10.4	14.9	9.9	8.8
M_p (kN・m)	678	780	813	688	785	818
P_p (kN)	530	609	635	538	614	639

第4章 試験方法

表 4.1 に示す仕様を有する大型疲労試験機を用いて静的载荷試験を実施した。試験状況を図 4.1 に示す。図 4.2 に示すように、試験体の中央のアルミニウム床版上板に置かれた厚さ 12mm の硬質ウレタンと、厚さ 35mm の鋼板を介して荷重を载荷した。硬質ウレタンと鋼板の平面寸法は同じで、試験体の長手方向の寸法が 200mm、奥行き方向の寸法が 300mm である。

荷重が 400kN 以下のとき、100kN、300kN、400kN の各値で荷重を除荷し、その後再载荷した。50kN ごとにひずみと変位を測定した。400kN 以降の荷重载荷に対して、試験体の中央の変位が 2～3mm 増加することにひずみと変位を測定した。

試験体の全载荷および試験体の荷重 507kN までは大型疲労試験によって実施したが、507kN の荷重载荷直後から、大型疲労試験の油圧システムが不調となったので、試験体のこの荷重以降の荷重载荷と試験体の全载荷は、図 4.3 に示すように、大型疲労試験機の载荷装置と試験体の荷重载荷点の間に挿入された、容量 2000kN の油圧ジャッキによって実施された。荷重の検出は、大型疲労試験機のロードセルにより行われた。

表 4.1 試験機の仕様

項目	仕様
種類	大型疲労試験機
形式	4 柱縦型油圧サーボコントロール方式
最大荷重	静的 6000 kN (圧縮・引張共) 動的 4000 kN (圧縮・引張共)
ラムストローク	150 mm
動的変位振幅	200cpm で 5mm 以上
繰返し速度	0～500cpm
繰返し変動波形	正弦波
荷重精度	静的 ±1.5% 以内 動的 ±3.0% 以内



図 4.1 試験状況



図 4.2 载荷部

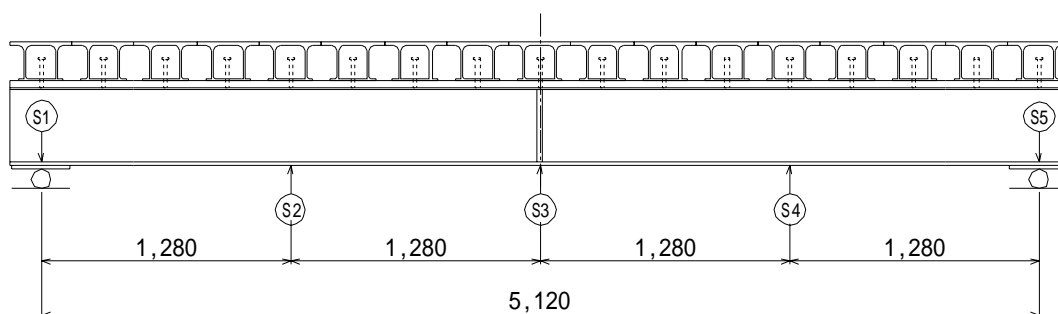


図 4.3 油圧ジャッキによる荷重载荷

測定項目と測定内容を表 4.2 に示す。表 4.2 に記載される図 4.4~4.8 は、試験体のたわみとひずみの測定位置を示す。図 4.6 は、アルミニウム床版の局部ひずみを測定するために設けられたひずみゲージの貼付位置である。さらに、充填モルタルと ECC 台座のひび割れの観察も行った。

表 4.2 測定項目と測定内容

測定項目	測定位置	測定点の合計
変位	図 4.4	両支点の変位および支間の 4 等分点の 3 点のたわみ 合計 5 点
アルミニウム床版の ひずみ	図 4.5 図 4.6	試験体長手方向上板のひずみ(ゲージ長 2mm) 上板上面 20 点, 上板下面 6 点, ウェブ 6 点, 合計 32 点
鋼桁のひずみ	図 4.7	試験体長手方向のひずみ(ゲージ長 2mm) 上下フランジの下面 14 点, ウェブ 10 点, 合計 24 点
ECC 台座のひずみ	図 4.8	試験体長手方向のひずみ(ゲージ長 30mm) 上面 3 点, 側面 4 点, 合計 7 点



○ : 変位計

図 4.4 変位の測定位置

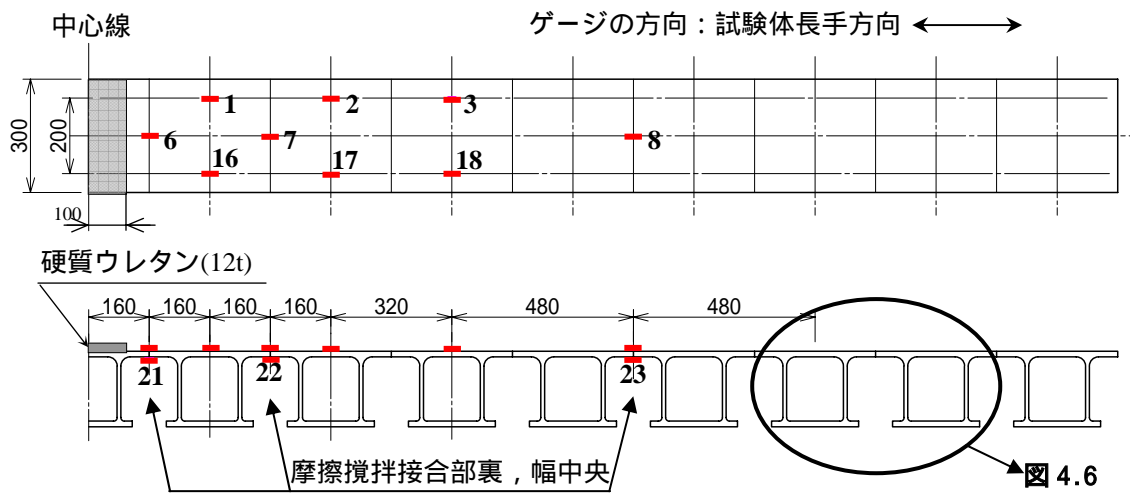


図 4.5 アルミニウム床版のひずみの測定位置

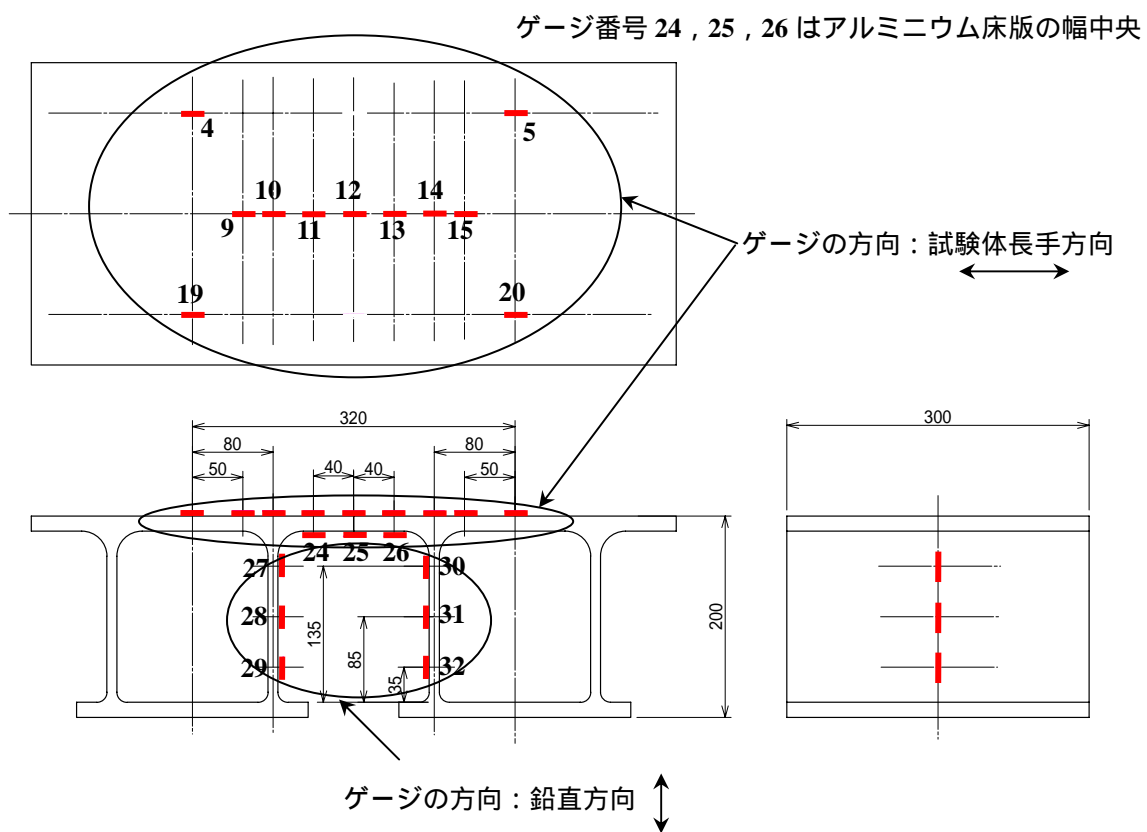


図 4.6 アルミニウム床版の局部ひずみの測定位置

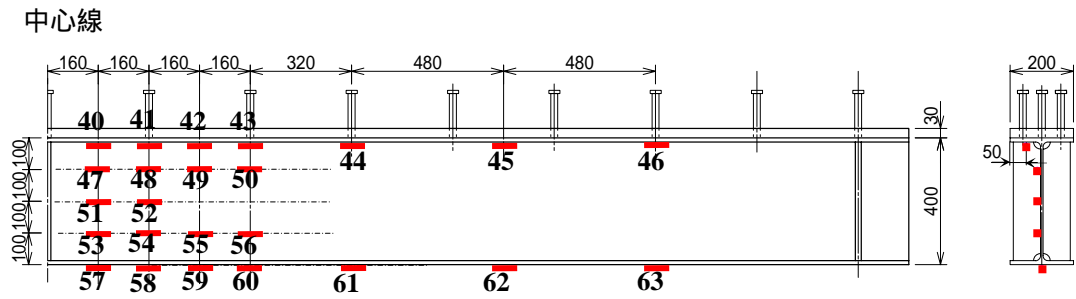


図 4.7 鋼桁のひずみの測定位置

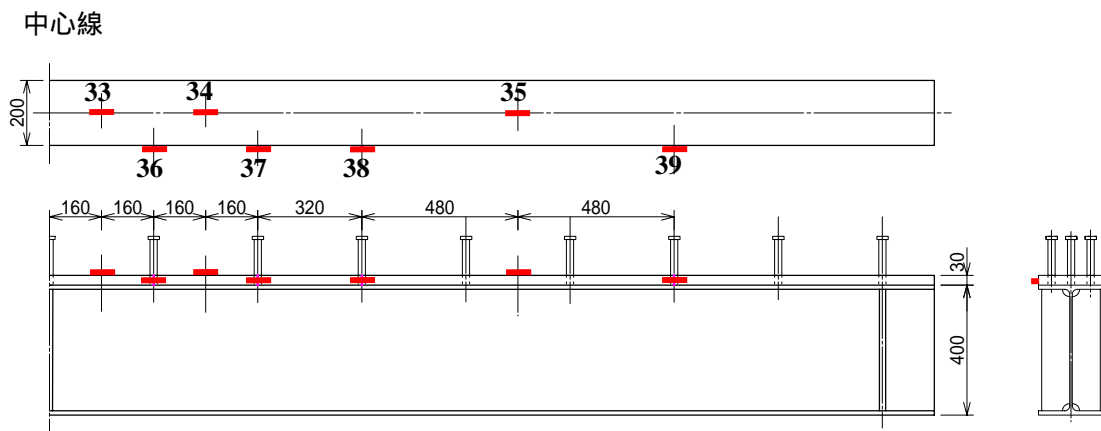


図 4.8 ECC 台座のひずみの測定位置

第5章 試験結果

5.1 試験体の挙動

5.1.1 荷重とたわみの関係

荷重と試験体中央のたわみの関係を図5.1に示す。たわみは変位計S3(図4.4参照)の測定値である。図を見やすくするために、除荷と再載荷に対する結果を削除している(除荷と再載荷に対する結果を含む、荷重と試験体中央のたわみの関係を付録Aに示す)。

図5.1から分かるように、荷重が約450kNを超えると、試験体の荷重は試験体とのそれより低くなる。試験体と の荷重とたわみの関係は最大荷重までほぼ同じ曲線を示す。最大荷重は、試験体が631kN、試験体が675kN、試験体が673kNである。これらの荷重は、表3.4に示す、台座を考慮した場合の、 σ_{aFB} (アルミニウム床版上板の摩擦撈拌接合部の引張強さ)に対する全塑性荷重614kNを上回り、さらに試験体との最大荷重は、 $\sigma_{a0.2}$ (アルミニウム床版上板の母材の0.2%耐力)に対する全塑性荷重639kNを上回る。

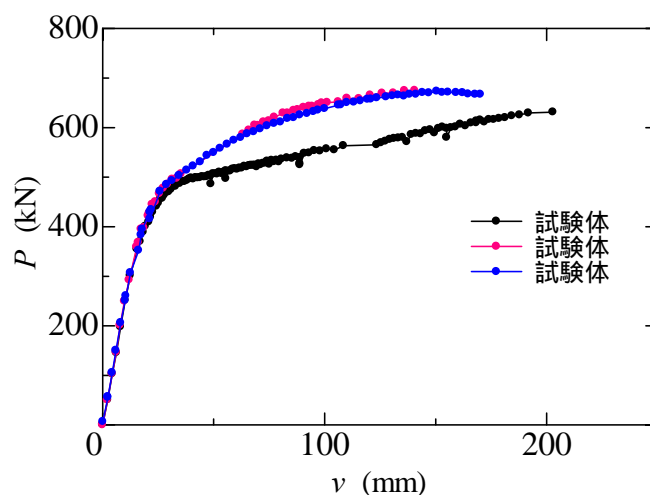


図5.1 荷重とたわみの関係

図5.1において、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図5.2に示す。同図には、台座を考慮した場合のA法とB法に対する、式(3.12)による計算値も示してある。測定結果が約350kN以下の直線性を示す部分に対して、B法による計算結果がこれにほぼ一致する。図5.2(b)と(c)において、荷重が300kNから400kNの範囲で、荷重とたわみの関係が滑らかでない理由は、5.1.4項で述べるように、アルミニウム床版の閉断面部の無収縮モルタルに発生したひび割れがこれに影響していると推察されるが、これの究明は今後の課題である。

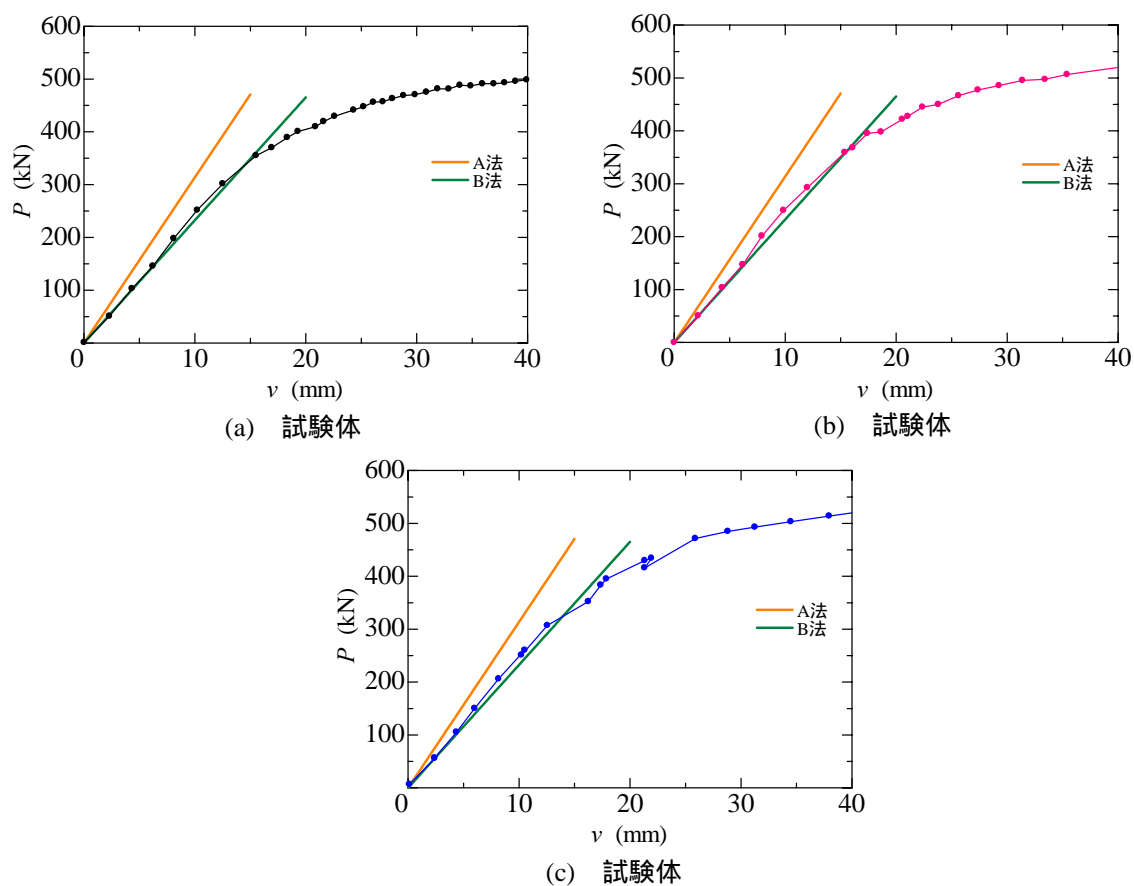


図 5.2 荷重とたわみの関係の理論値との比較

5.1.2 たわみ分布

300kN の荷重に対する試験体のたわみ分布を図 5.3 に示す。たわみは変位計 S2, S3, S4 (図 4.4 参照) の測定値である。同図には、A 法と B 法に対する、式(3.11)によって計算されるたわみ分布も描いてある。試験体 , , の測定値はお互いに近く、これらは、B 法に対するたわみ分布に近い。

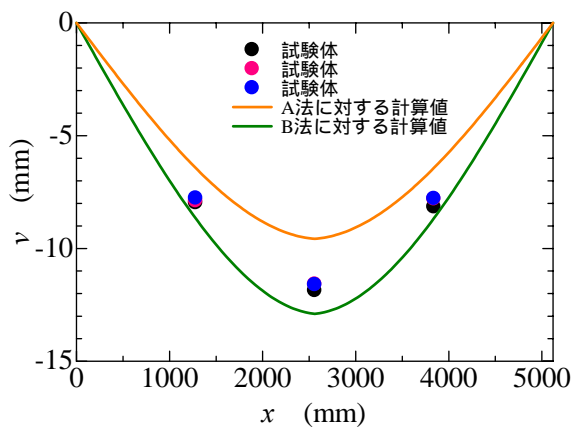


図 5.3 300kN の荷重に対するたわみ分布

5.1.3 試験終了後の試験体の様子

試験終了後の試験体の様子を図 5.4 に示す。図 5.4(a)に示すように、試験体 には、アルミニウム床版上板に大きな変形が見られないが、図 5.4(b)と(c)に示すように、試験体 と には、開断面部に大きな塑性曲げ変形が生じている。一個所当たり 3 本の頭付きスタッドが配置された、過去の試験体の開断面部のアルミニウム床版上板にも大きな塑性曲げ変形が生じた¹⁾。

試験終了後の試験体の端部の様子を図 5.5 に示す。図 5.5(a)に示すように、試験体 では、ECC 台座の端が鋼桁の端から突き出ているが、図 5.5(b)と(c)に示すように、試験体 と ではその様な現象は生じていない。図 5.5(a)の詳細を図 5.6 に示す。同図において、点線は試験前のアルミニウム床版の位置を示し、実線は試験終了後のアルミニウム床版の位置を示す。試験終了後、ECC 台座の左右端は、ともに鋼桁上フランジの端から 6mm 外側に突き出ている。さらに、アルミニウム床版の左端の下フランジは、元の位置から外側に 2mm、右端の下フランジは元の位置から外側に 5mm 移動している。



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.4 試験終了後の試験体の様子



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.5 試験終了後の試験体の端部の様子

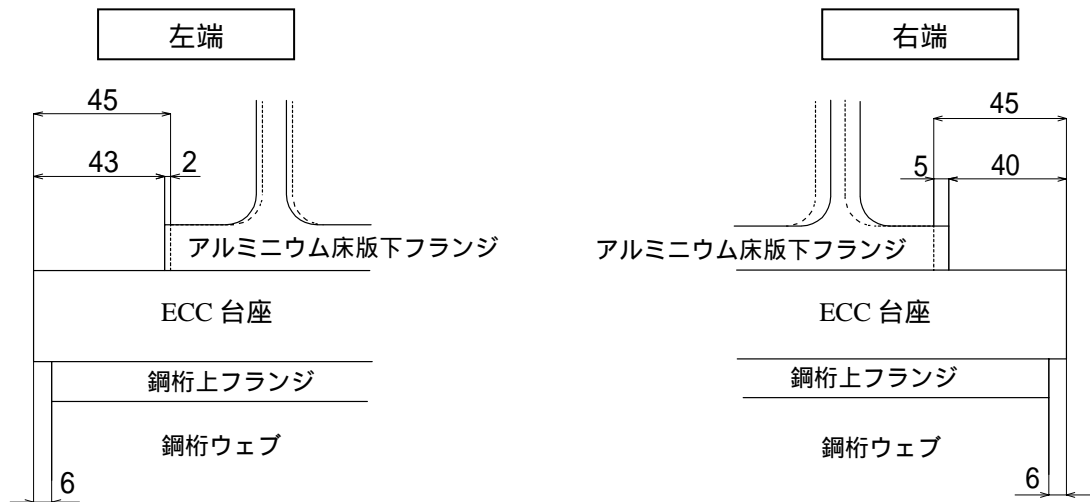


図 5.6 試験終了後の試験体 の端部の詳細

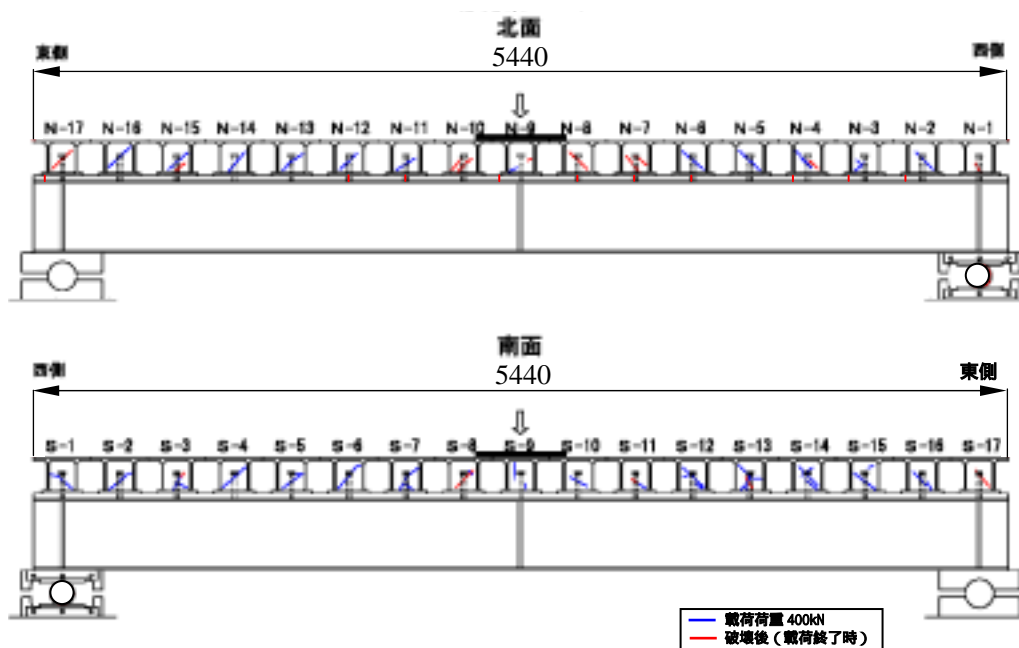
この様な試験体の変形と図 5.1 の荷重と試験体中央のたわみの関係から次が言える．頭付きスタッドが 1 本の場合には，荷重が約 450kN を超えると，水平せん断力に対して頭付きスタッドが塑性変形を起こし，アルミニウム床版が鋼桁上フランジから水平方向にずれ

るために、荷重は、頭付きスタッドが2本以上の場合に対する荷重より低くなる。頭付きスタッドが1本の場合、アルミニウム床版上板に大きな塑性曲げ変形は生じない。頭付きスタッドが2本以上になると、頭付きスタッドは塑性変形せず、アルミニウム床版は鋼桁上フランジから水平方向にずれなくなるが、開断面部のアルミニウム床版上フランジに大きな塑性曲げ変形が生じる。この大きな塑性曲げ変形によって荷重の増加は止まる。

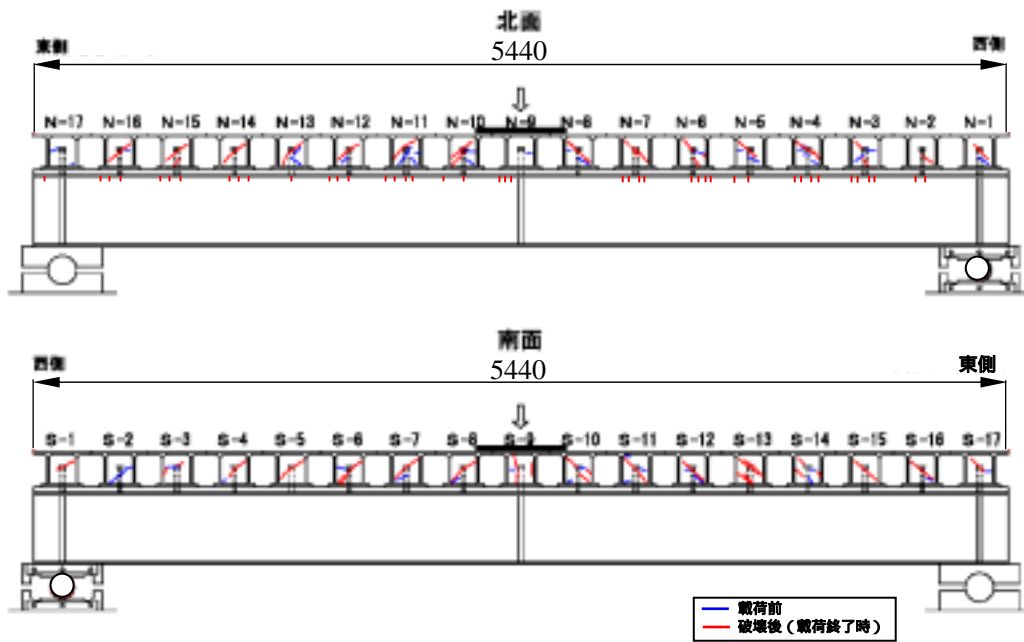
以上より、アルミニウム床版と鋼桁上フランジとの連結部の水平せん断力に対する抵抗強度は、頭付きスタッドが1本の場合には、頭付きスタッド1本を有する閉断面部の強度で決まり、頭付きスタッドが2本以上になると、開断面部のアルミニウム床版上板の板曲げ強度で決まる。

5.1.4 無収縮モルタルとECC台座の挙動

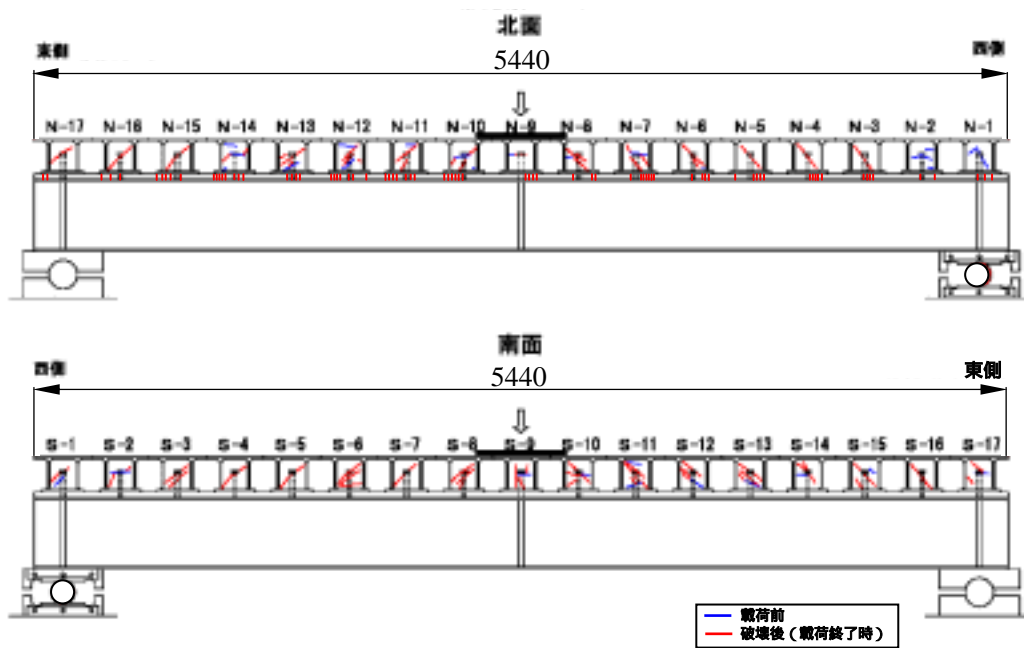
アルミニウム床版の開断面部の無収縮モルタルと、ECC台座に発生したひび割れを図5.7に示す。青色の線は、試験体では載荷荷重が400kNで観察されたひび割れ、試験体とでは無載荷のときに観察されたひび割れである。いずれの試験体においても、アルミニウム床版の開断面部の無収縮モルタルには、斜めのひび割れが1本発生し、荷重の増加とともに、ひび割れ幅が大きくなった。



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.7 無収縮モルタルと ECC 台座に発生したひび割れ

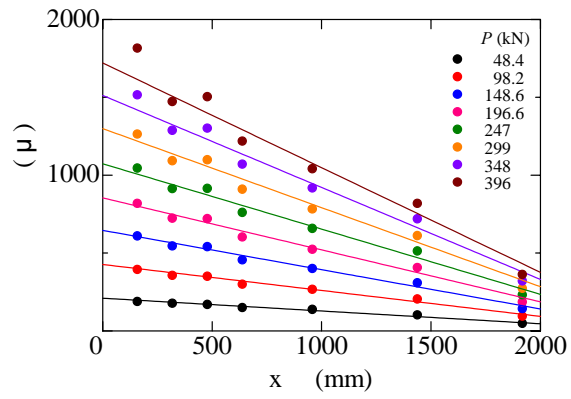
ECC 台座においては、乾燥収縮によるひび割れが、試験体 1、2、3 の北面で、それぞれ 10 本、10 本、4 本あった。これらのひび割れの幅はいずれも 0.04mm 以下であった。荷重載荷中、ECC 台座には圧縮応力が作用するために、乾燥収縮によるひび割れが閉じたので、ひび割れは観察されなくなった。試験終了後、ECC 台座には鉛直方向にひび割れが残された。本数は、試験体 1、2、3 の北面で、それぞれ 10 本、45 本、79 本であった。ひび割れの幅は、試験体 1 において最大で 0.8mm、試験体 2 と 3 において最大で 0.2mm であった。

5.2 鋼桁に生じるひずみ

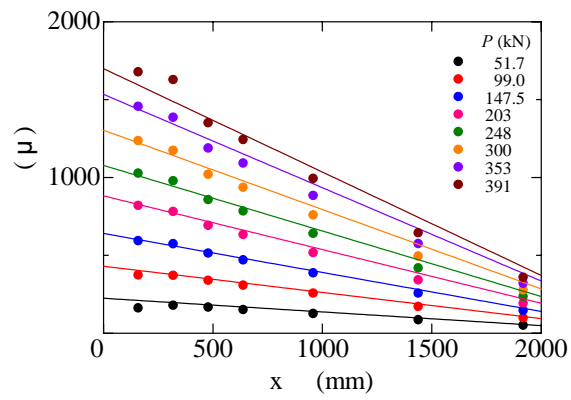
荷重を 400kN まで載荷した後に除荷した状態を初期として、再度 400kN まで載荷した場合に対する鋼桁下フランジの下面のひずみ分布を図 5.8 に示す。同図の横軸は、試験体の中央を原点とする座標であり、縦軸はひずみである。さらに、同図には、B 法で、台座を考慮した場合に対する式(3.8)より計算されるひずみ分布も示してある。試験値は、試験体 1 では 196.6kN 以下、試験体 2 では 300kN 以下、試験体 3 では 302kN 以下でほぼ直線分布を示している。アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が不完全合成の場合、鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは曲線分布を示し、両者が完全合成の場合、鋼桁下フランジの下面に生じるひずみは直線分布を示す⁶⁾。したがって、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いえる。

他方、試験体 1 では 247kN 以上、試験体 2 では 353kN 以上、試験体 3 では 394kN 以上でひずみ分布が乱れている。5.1.4 項で述べた、アルミニウム床版の閉断面部の無収縮モルタルに発生したひび割れがこれに影響していると推察されるが、これの究明は今後の課題である。

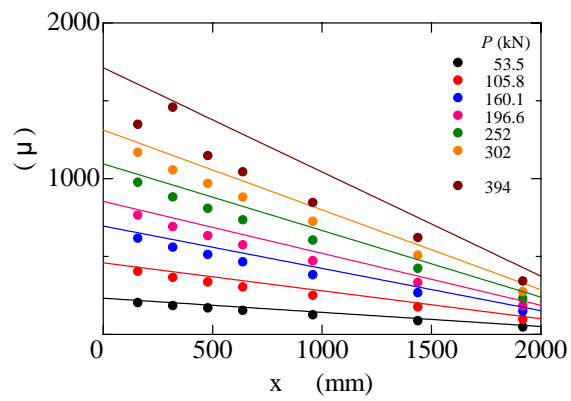
図 5.8 から分かるように、試験体 2 と 3 では、B 法に対して式(3.8)が与える直線の近傍に試験値が分布している。しかし、試験体 1 では、荷重が低いときは、B 法に対する式(3.8)が与える直線の近傍に試験値が分布しているが、荷重が高くなると、この直線の下に試験値が分布している。図 5.3 に示したように、試験体 1、2、3 のたわみがほぼ同じであったので、このような現象が、頭付きスタッドの本数の影響によるものであるかどうかは不明である。



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.8 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 5.9 に示す。図 5.8 の試験値に最小二乗法を適用して得られる直線の $x=0$ の位置のひずみ値(付録 B 参照)を図 5.9 の試験値としている。さらに図 5.9 には、台座を考慮した場合の A 法と B 法に対するそれぞれ式(3.3)と(3.8)による計算結果も示してある。試験体 と の荷重とひずみの関係は、B 法に対する計算結果と一致する。したがって試験体 と の降伏荷重は、表 3.3 に示す、B 法に対する降伏荷重 372kN である。

他方、試験体 の荷重とひずみの関係は、一点を除いて、A 法と B 法に対する計算結果のほぼ中央に位置している。この一点を除いて、試験体 の荷重とひずみの関係に最小二乗法を適用して得られる直線の、鋼桁の降伏ひずみ 1615 μ (鋼桁の降伏応力 323MPa) に対応する荷重は 401kN である。この値は、表 3.3 に示す、B 法に対する降伏荷重 372kN より大きい。図 5.3 に示したように、試験体 ， ， のたわみがほぼ同じであったので、試験体 の降伏荷重の試験値が試験体 と のそれより大きくなった原因の解明は今後の課題である。

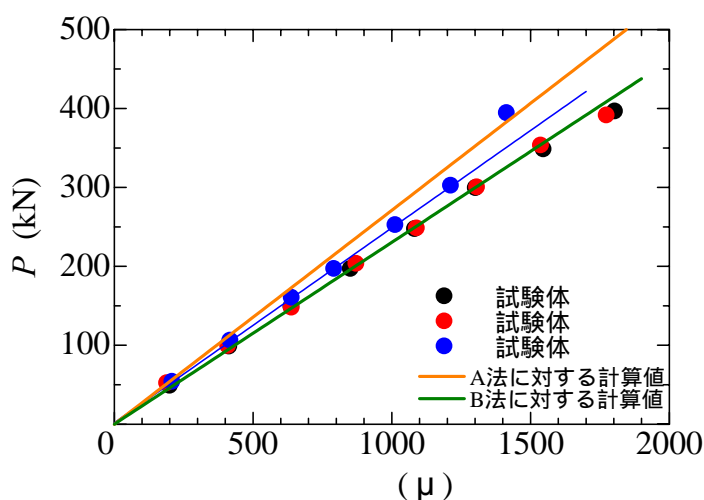
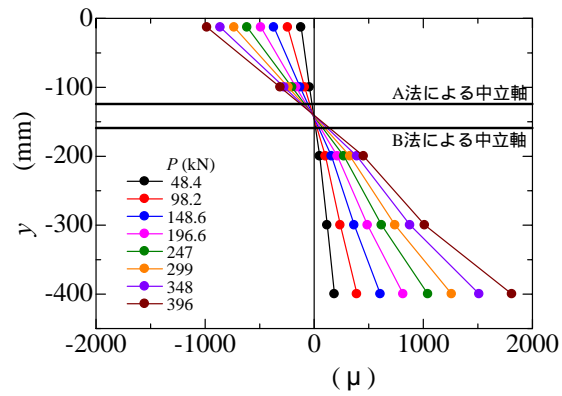
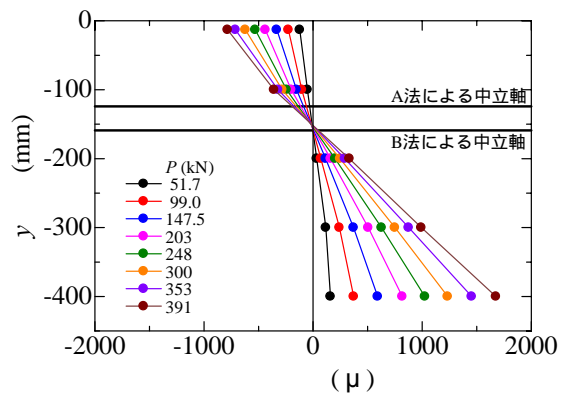


図 5.9 荷重と試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみの関係

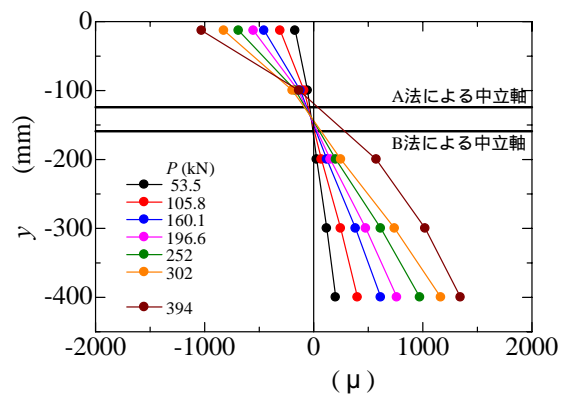
荷重を 400kN まで載荷した後に除荷した状態を初期として、再度 400kN まで載荷した場合に対する、試験体中央から 160mm 離れた鋼桁断面(図 4.7 のひずみゲージ 40 の鉛直列)ひずみ分布を図 5.10 に示す。縦軸は、鋼桁上フランジの上面を原点とし、上方向を正とする座標であり、横軸はひずみである。さらに、同図には、台座を考慮した場合に対して、A 法と B 法による合成桁の中立軸の位置(表 3.3 参照)も描いてある。試験体中央から 320mm, 480mm, 640mm 離れた鋼桁断面(図 4.7 のひずみゲージ 41, 42, 43 の各鉛直列)のひずみ分布を付録 C に示す。図 5.10 および付録 C から分かるように、合成桁の中立軸は、B 法による位置にほぼ一致している。



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.10 試験体中央から 160mm 離れた鋼桁断面のひずみ分布

5.3 アルミニウム床版に生じるひずみ

アルミニウム床版に生じるひずみについて考察する前に，アルミニウム合金の応力 - ひずみ関係の比例限度ならびにそれに対応する比例限度ひずみについて述べる．欧州では，アルミニウム合金は明瞭な比例限度を示さないため，比例限度として 0.01%耐力が用いられている⁷⁾．一般に，アルミニウム合金材の応力 - ひずみ関係は，次の Ramberg & Osgood 式によって与えられる．

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (5.1)$$

ここに， ε ：ひずみ， σ ：応力， E ：ヤング係数， n ：ひずみ硬化パラメータ
式(5.1)より，0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ と0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は次の関係を有する．

$$0.0001 = 0.002 \left(\frac{\sigma_{0.01}}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (5.2)$$

これより， $\sigma_{0.01}$ は次式で与えられる．

$$\sigma_{0.01} = \sqrt[n]{0.05} \sigma_{0.2} \quad (5.3)$$

ひずみ硬化パラメータ n の値は，6000系アルミニウム合金の母材に対して29.1，摩擦撈拌接合部に対して10であることが示されている⁸⁾．

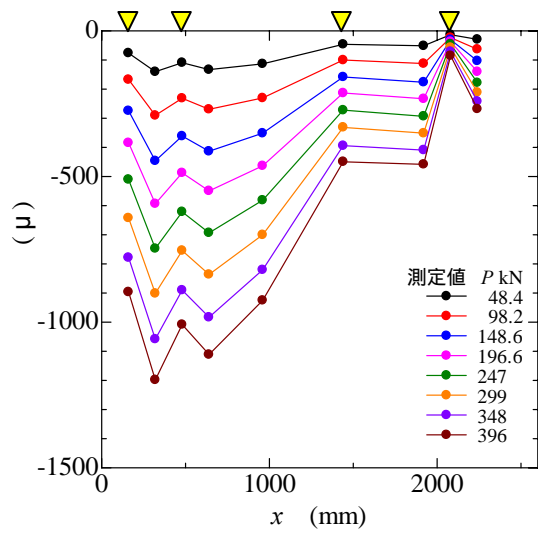
表2.1に示す0.2%耐力を式(5.3)に代入して得られる0.01%耐力を同表のヤング係数で除して得られる比例限度ひずみを表5.1に示す．

表5.1 アルミニウム床版の母材と摩擦撈拌接合部の比例限度と比例限度ひずみ

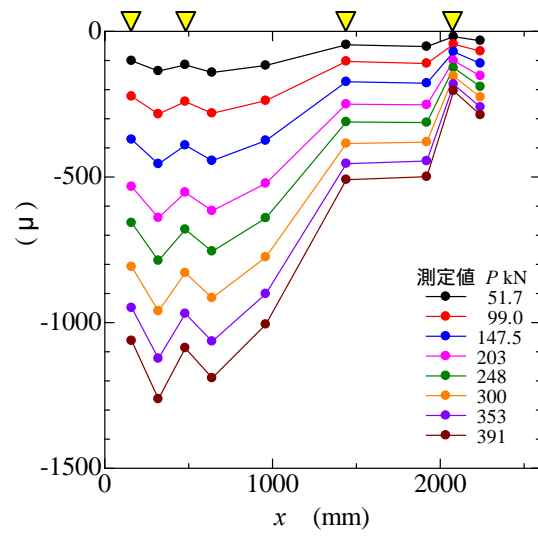
部位	母材	摩擦撈拌接合部
比例限度 (0.01%耐力) (MPa)	262	124
比例限度ひずみ (%)	0.367	0.173

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まで載荷した場合のアルミニウム床版上板の上面のひずみ分布を図5.11に示す（ひずみの値は付録D参照）． x 軸の原点は試験体中央であり，黄色の三角形は，アルミニウム床版の開断面中央の位置を示す．各試験体とも，開断面上の圧縮ひずみが開断面上のそれより大きい．

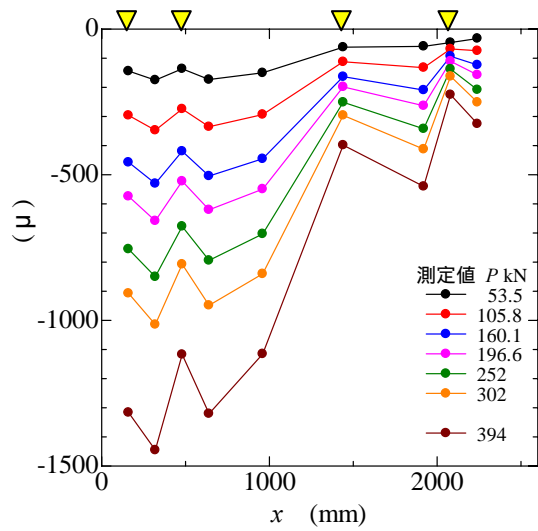
荷重と $x=480\text{mm}$ の位置（開断面中央）のひずみの関係を図5.12に示す．同図の縦の破線は，摩擦撈拌接合部の比例限度ひずみ0.173%を示している．荷重とひずみの関係は，B法に対する計算値に近い．さらに，400kNの荷重に対して，ひずみは摩擦撈拌接合部の比例限度ひずみ未満である．



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

▼ : 開断面中央の位置

図 5.11 アルミニウム床版上板の上面のひずみ分布

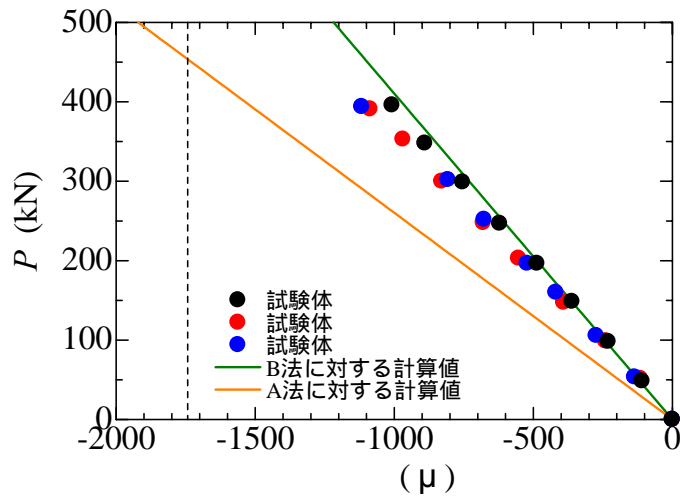
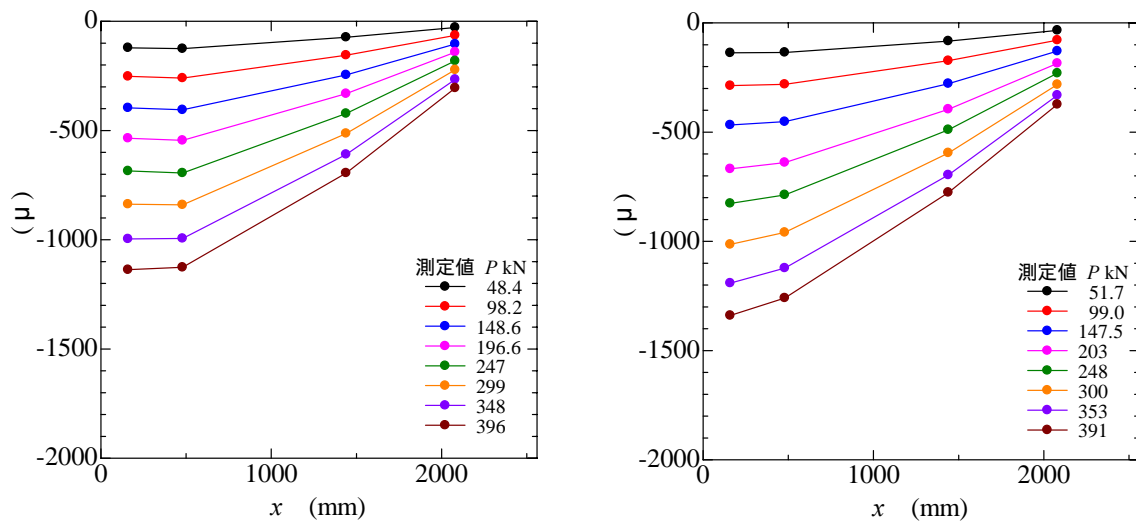


図 5.12 荷重とアルミニウム床版上板の上面のひずみの関係 ($x=480\text{mm}$)

アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布を図 5.13 に示す。膜ひずみは、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。各試験体とも、膜ひずみは直線分布を示している。 $x=0$ の近傍の膜ひずみが直線上にないのは、図 4.5 に示すように、荷重載荷で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と考えられる。

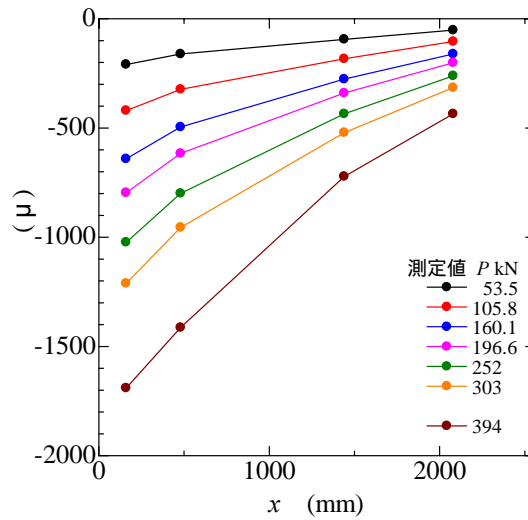
荷重と $x=480\text{mm}$ の位置（開断面中央）の膜ひずみの関係を図 5.14 に示す。同図の縦の破線は、摩擦攪拌接合部の比例限度ひずみ 0.173% を示している。荷重と膜ひずみの関係は、A 法に対する計算値と B 法に対する計算値の中間にある。これは、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に、平面保持の仮定を設ける場合と設けない場合の間にあることを意味している。

荷重と $x=480\text{mm}$ の位置（開断面中央）の、アルミニウム床版上板の板曲げひずみの関係を図 5.15 に示す。板曲げひずみは、アルミニウム床版上板の上面のひずみから下面のひずみを引いて 2 で除した値である。A 法と B 法に対する計算値は圧縮の板曲げひずみであるが、計測された板曲げひずみは引張りである。図 5.12 のアルミニウム床版上板の上面のひずみが B 法に対する計算値に近かったのは、図 5.14 に示すように、B 法に対する計算値より大きな圧縮ひずみが、図 5.15 に示す引張りの板曲げひずみで相殺されたことによるものであり、アルミニウム床版上板のひずみが B 法で精度よく推定されることを意味するものではないことに注意されたい。



(a) 試験体

(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.13 アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布

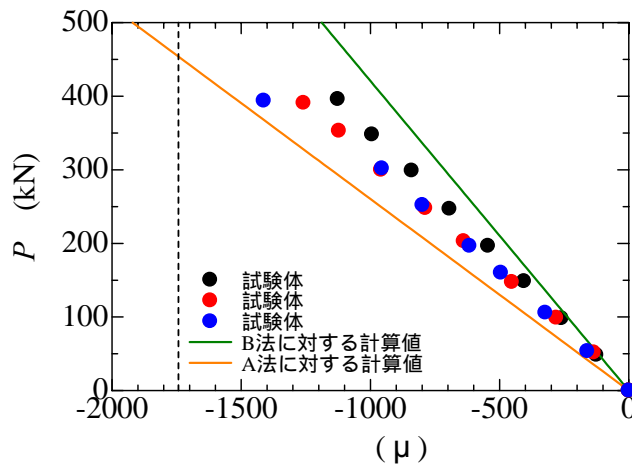


図 5.14 荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係 ($x=480\text{mm}$)

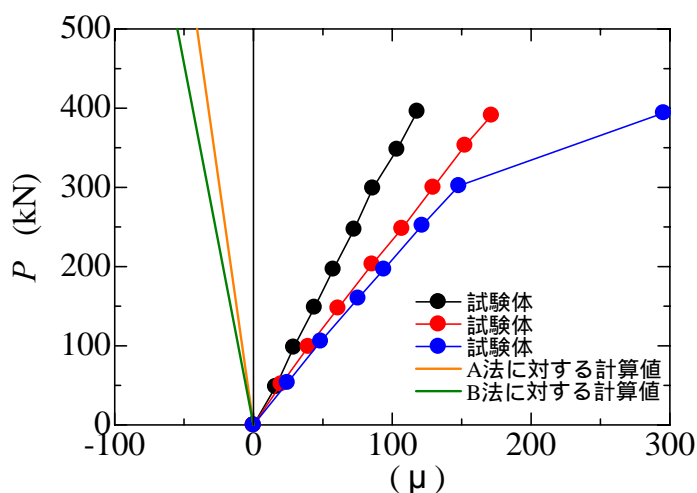
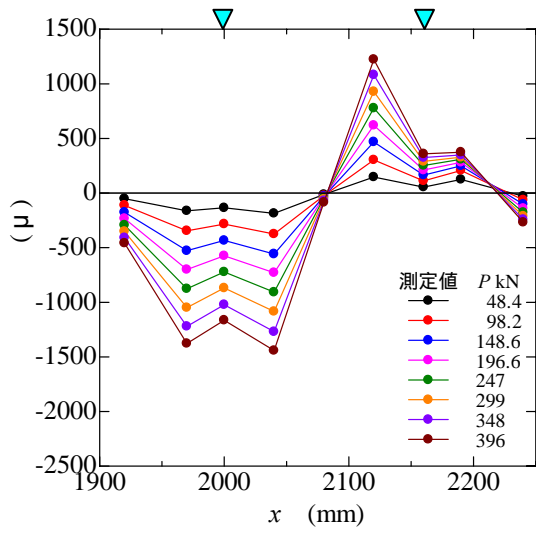


図 5.15 荷重とアルミニウム床版上板の板曲げひずみの関係 ($x=480\text{mm}$)

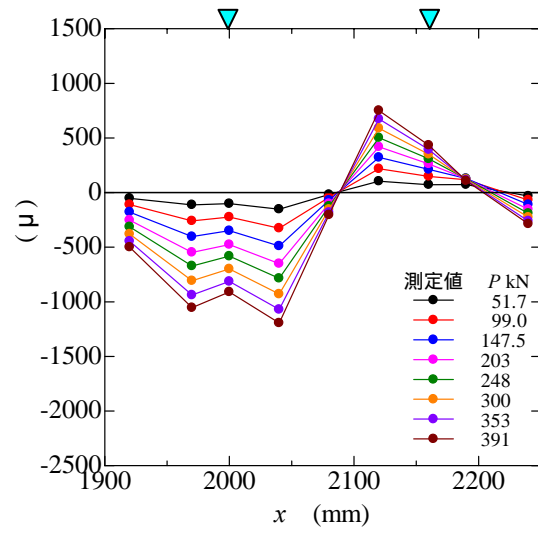
図 4.6 に示す範囲の、アルミニウム床版上板の上面と下面のひずみ分布をそれぞれ図 5.16, 5.17 に示す。さらに、同範囲のアルミニウム床版上板の膜ひずみ分布と板曲げひずみ分布をそれぞれ図 5.18, 5.19 に示す。これらの図の水色の三角形は、アルミニウム床版ウェブの板厚中央の位置を示す。図 5.16 から分かるように、アルミニウム床版上板の上面のひずみ分布は複雑な形状を示す。図 5.16 と 5.17 から分かるように、開断面中央の両側のひずみが大きい。図 5.18 から分かるように、アルミニウム床版上板の膜応力分布の変化は穏やかであるが、図 5.19 から分かるように、板曲げひずみ分布の変化は急である。アルミニウム床版上板の板曲げひずみは、アルミニウム床版上板、ウェブ、下フランジで構成される骨組みとしての独自の曲げ変形に起因するものである。荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係を図 5.20 に示す。同図の縦の破線は、摩擦撹拌接合部の比例限度ひずみ 0.173% を示している。荷重と膜ひずみの関係は、A 法に対する計算値に近いことが分かる。

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 5.21 に示す。同図の縦の破線は、摩擦撹拌接合部の比例限度ひずみ 0.173% を示している。開断面中央 ($x=2080\text{mm}$) の板曲げひずみは小さいが、開断面中央の両側 ($x=2040\text{mm}$ と 2120mm) の板曲げひずみは非常に大きい。これらの板曲げひずみは、アルミニウム床版上板、ウェブ、下フランジで構成される骨組みとしての独自の曲げ変形に起因するものあり、他の開断面および閉断面にも生じているはずであり、これらの板曲げひずみの評価の仕方は今後の検討課題である。

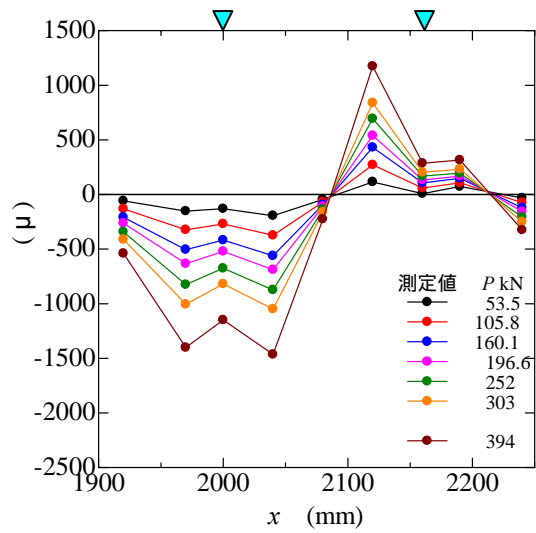
図 4.6 に示すアルミニウム床版ウェブのひずみ分布を図 5.22 に示す。各試験体において、開断面の左右のウェブのひずみ分布が異なっている。しかし、ウェブに生じるひずみは、荷重が 400kN であっても、母材の比例限度ひずみ 0.367% に対して、左右のウェブで、それぞれ 3 分の 1, 7 分の 1 程度である。



(a) 試験体



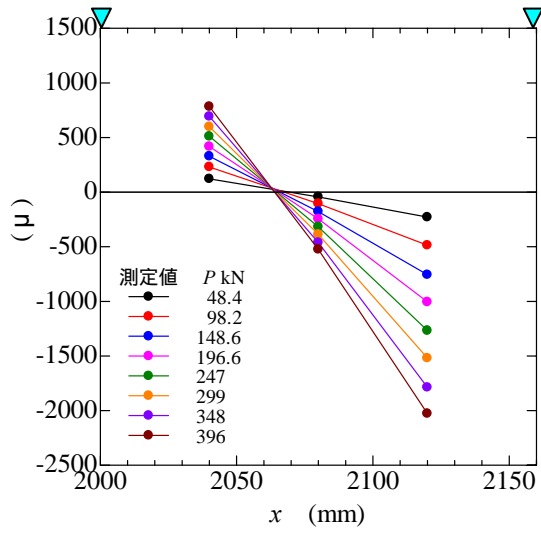
(b) 試験体



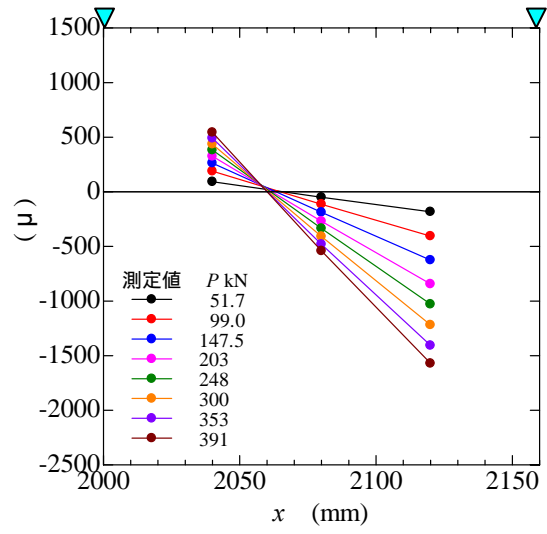
(c) 試験体

▼ : ウェブの板厚中央の位置

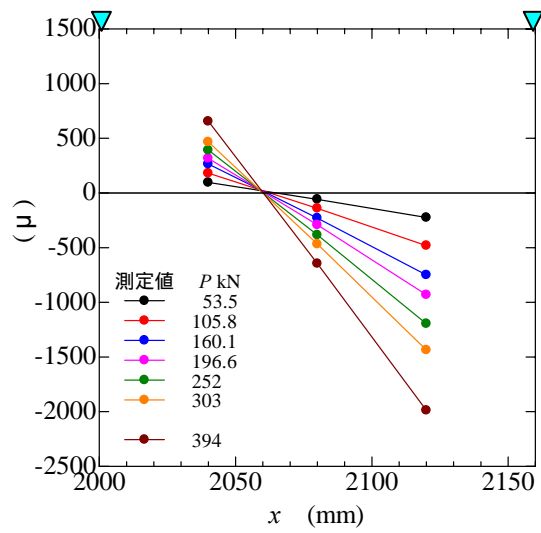
図 5.16 アルミニウム床版上板の上面のひずみ分布



(a) 試験体



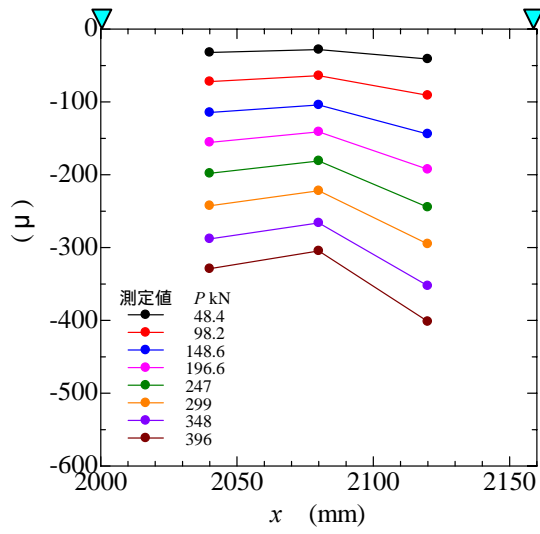
(b) 試験体



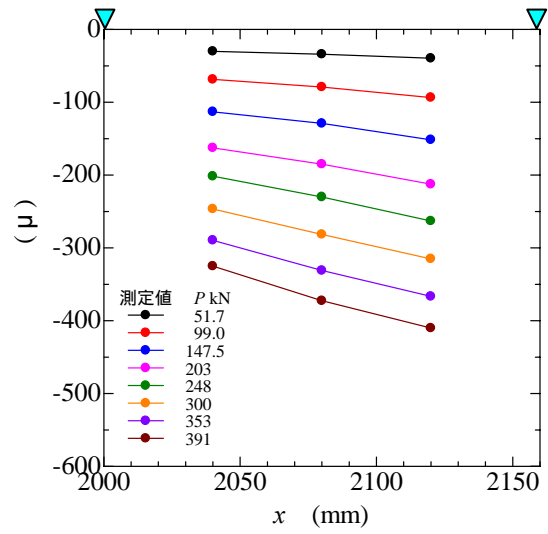
(c) 試験体

▼ : ウェブの板厚中央の位置

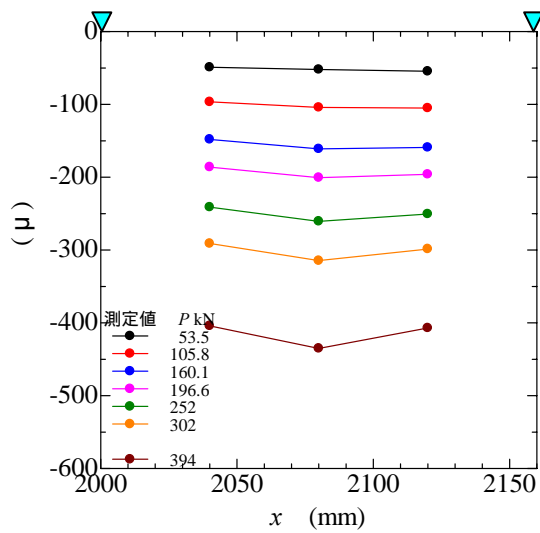
図 5.17 アルミニウム床版上板の下面のひずみ分布



(a) 試験体



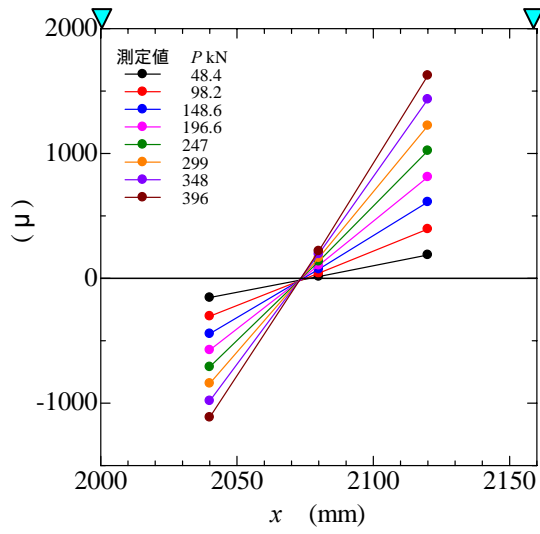
(b) 試験体



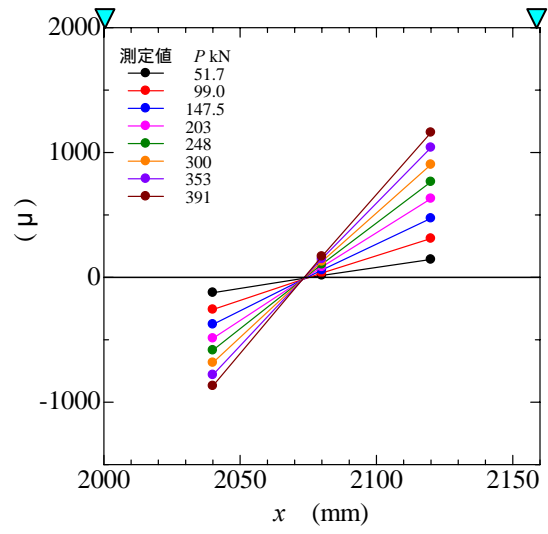
(c) 試験体

▼ : ウェブの板厚中央の位置

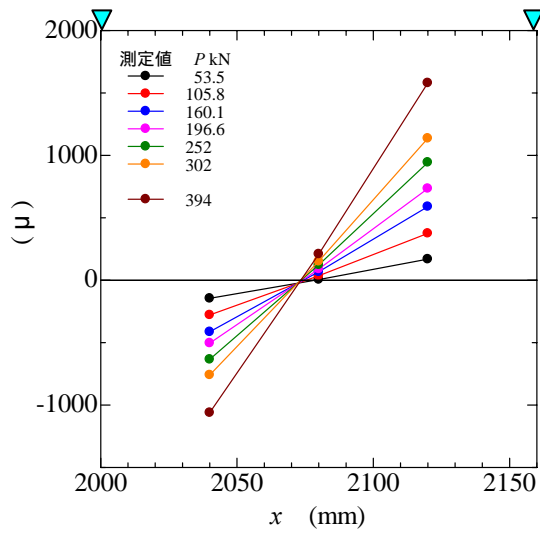
図 5.18 アルミニウム床版上板の膜ひずみ分布



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

▼ : ウェブの板厚中央の位置

図 5.19 アルミニウム床版上板の板曲げひずみ分布

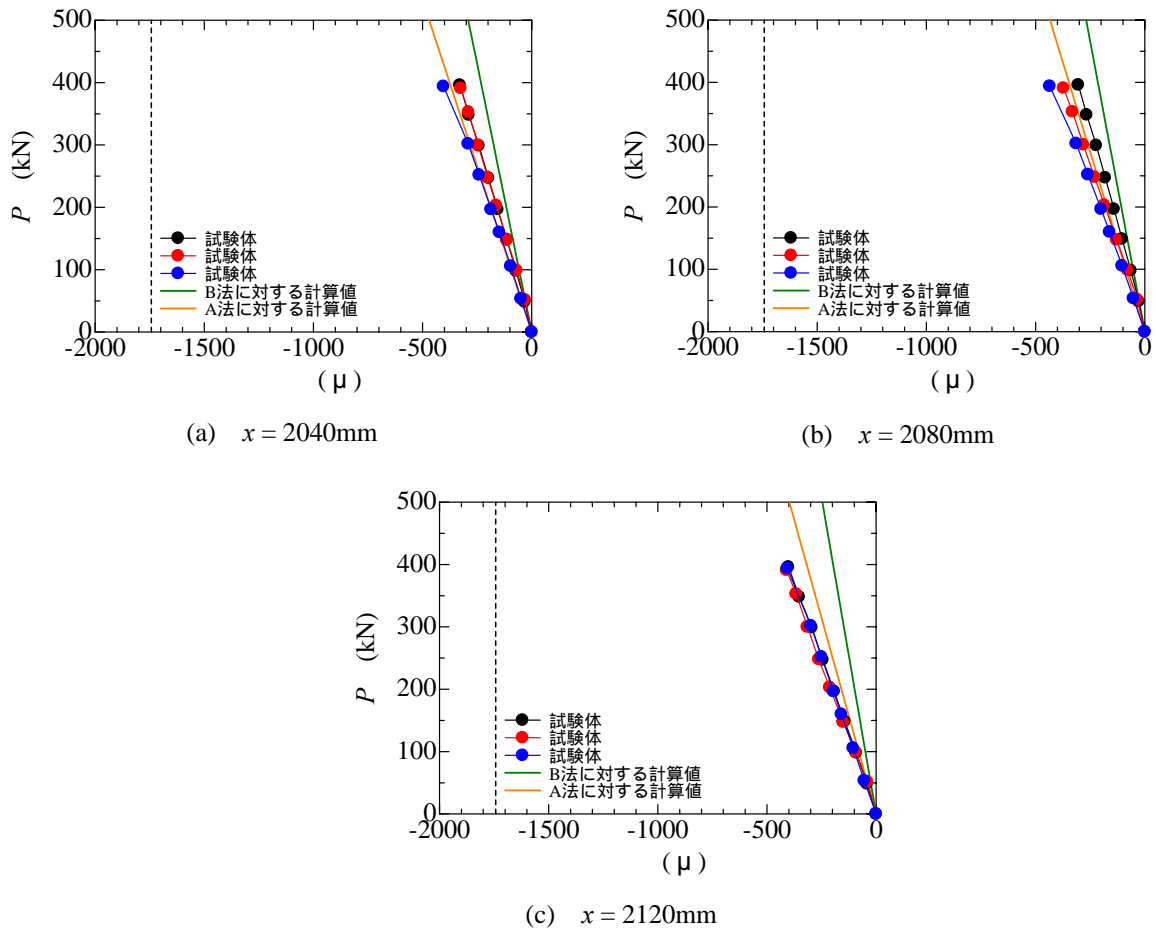


図 5.20 荷重とアルミニウム床版上板の膜ひずみの関係

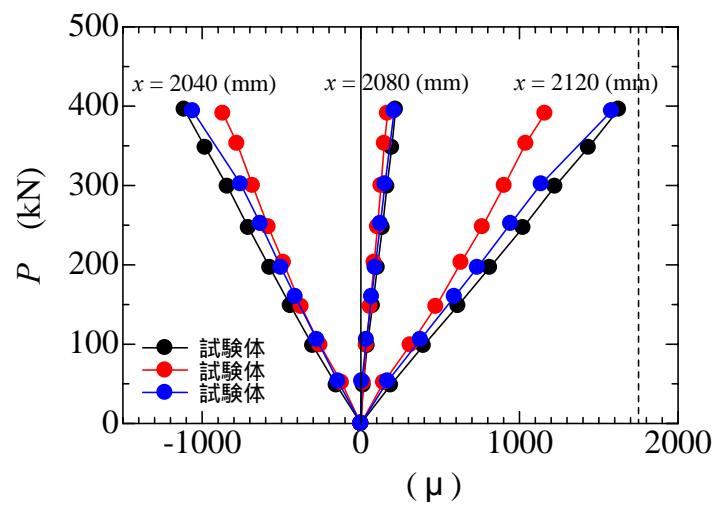
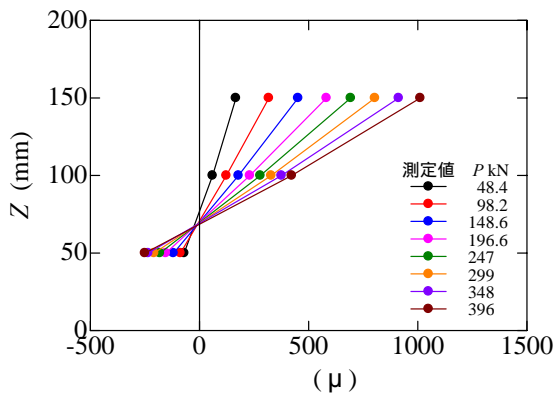
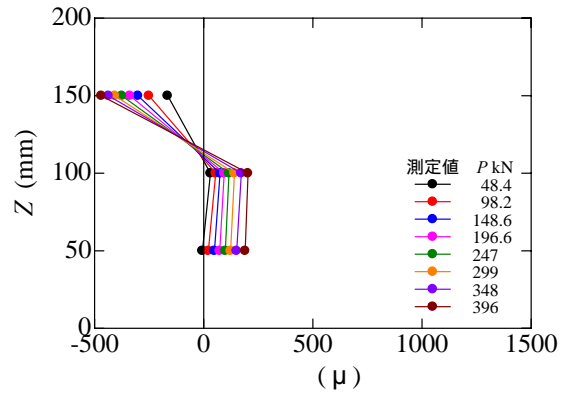


図 5.21 荷重とアルミニウム床版上板の板曲げひずみの関係

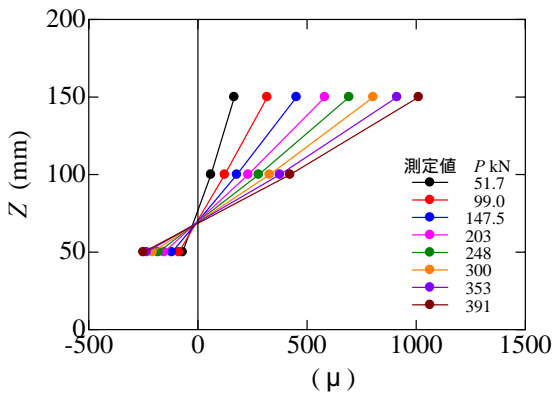


(a) $x = 2005$ mm

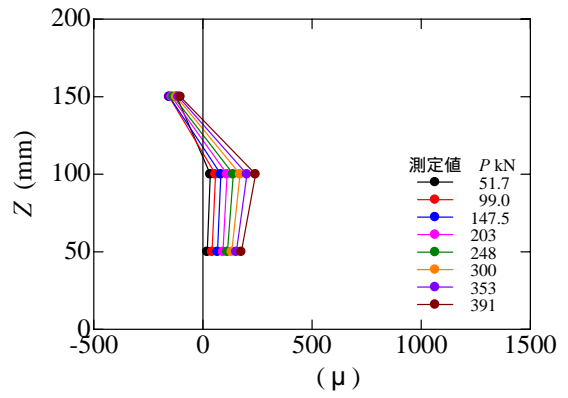


(b) $x = 2155$ mm

(1) 試験体

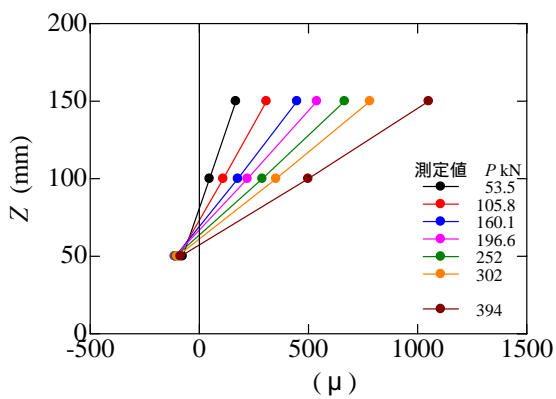


(a) $x = 2005$ mm

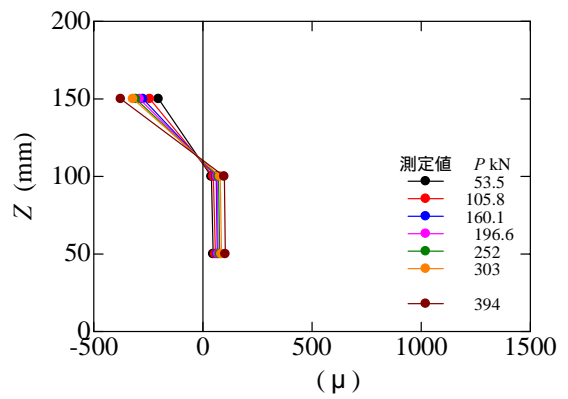


(b) $x = 2155$ mm

(2) 試験体



(a) $x = 2005$ mm



(b) $x = 2155$ mm

(3) 試験体

図 5.22 アルミニウム床版ウェブのひずみ分布

無載荷時を初期状態とする，アルミニウム床版上板の荷重とひずみの関係を付録Eに示す．比例限度ひずみ（母材 0.367%，摩擦撈拌接合部 0.173%）に対応する荷重を表5.2に示す．ひずみゲージ6と21に対する，比例限度ひずみに対応する荷重は，荷重載荷で使用された硬質ウレタンの影響を受けている可能性があるため，これらのひずみゲージが与える比例限度ひずみに対応する荷重を除いて，比例限度ひずみに対応する荷重の中で最も低い値は，試験体 ， ， に対して，それぞれ 457kN，420kN，405kN である．頭付きスタッドの本数が増えるに従って，アルミニウム床版と鋼桁との合成作用が大きくなり，アルミニウム床版が分担する荷重が増加するために，比例限度ひずみに対応する荷重が低下する．5.2節で述べたように，試験体 と の降伏荷重は 372kN，試験体 の降伏荷重は 401kN であった．したがって，鋼桁下フランジの下面が降伏応力に達したとき，アルミニウム床版に生じるひずみは，いずれの試験体においても比例限度ひずみ未満である．

図 5.11 に示すように，アルミニウム床版上板の上面の圧縮ひずみは，開断面より閉断面の方が大きい．しかし，表 5.2 から分かるように，比例限度ひずみに対応する荷重は，開断面より閉断面の方が高い．これは，開断面に摩擦撈拌接合部が存在し，摩擦撈拌接合部の比例限度ひずみ 0.173%が，閉断面の母材の比例限度ひずみ 0.367%の半分以下であるからである．

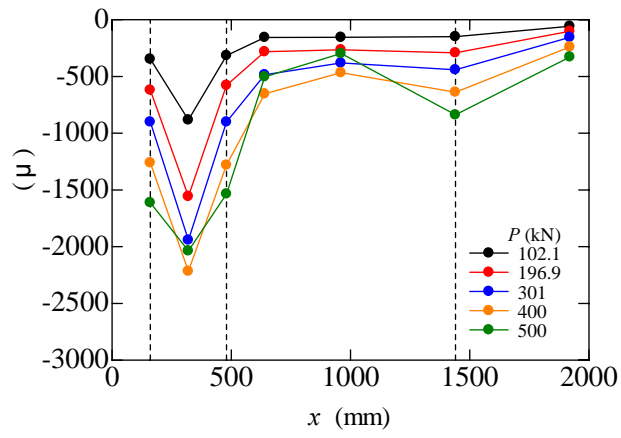
表 5.2 比例限度ひずみに対応する荷重

x (mm)	断面	ゲージ番号	試験体 (kN)	試験体 (kN)	試験体 (kN)
160	開	6	489	471	443
		21	432	388	327
320	閉	1, 16	-	659	668
480	開	7	491	461	486
		22	457	420	405
1440	開	8	-	629	-
		23	-	557	528
1970	閉	9	-	-	672
2000	閉	10	-	-	667
2040	開	11	574	643	619
		24	-	-	-
2120	開	13	-	-	666
		26	-	603	554

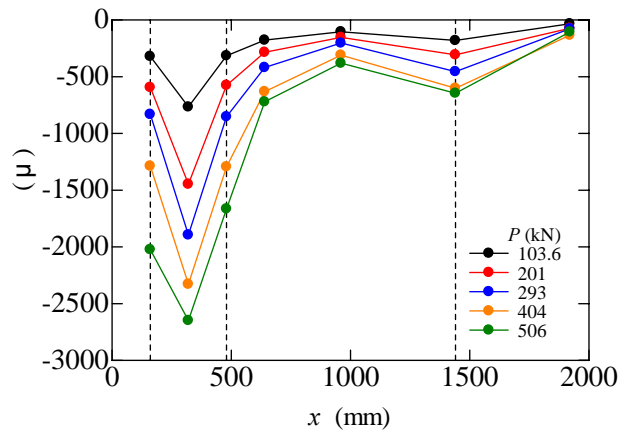
5.4 ECC 台座に生じるひずみ

無載荷時を初期状態とする，ECC 台座に生じるひずみを図 5.23 に示す．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．縦の破線は，開断面中央の ECC 台座の上面に生じるひずみを示し，その他は，頭付きスタッドの位置の ECC 台座の側面に生じるひずみである(図 4.8 参照)．図 5.23 から分かるように，試験体 と では，左から 2 番目の圧縮ひずみが 1 番目のそれより大きい，試験体 では，左から 2 番目の圧縮ひずみが 1 番目のそれより小さい．

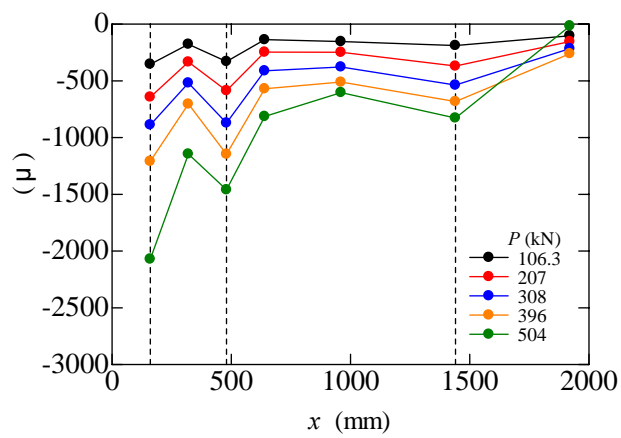
無載荷時を初期状態とする，ECC 台座の荷重とひずみの関係を，試験体 ， ， に対してそれぞれ図 5.24 ， 5.25 ， 5.26 に示す．各図の図(a)は，頭付きスタッド間の中央における ECC 台座上面のひずみ，図(b)は，頭付きスタッドの位置の ECC 台座側面のひずみである(図 4.8 参照)．図 5.24(b)と 5.25(b)に示すように，試験体 と のゲージ No.36 ($x=320\text{mm}$) の ECC 台座のひずみは荷重載荷直後から大きい．これらのひずみは，前述の図 5.23(a)と(b)の左から 2 番目のひずみに対応する．図 5.24～5.26 のから分かるように，いずれの試験体においても，荷重が約 400kN を超えると，荷重とひずみの関係は複雑な様相を示す．



(a) 試験体



(b) 試験体



(c) 試験体

図 5.23 ECC 台座に生じるひずみ

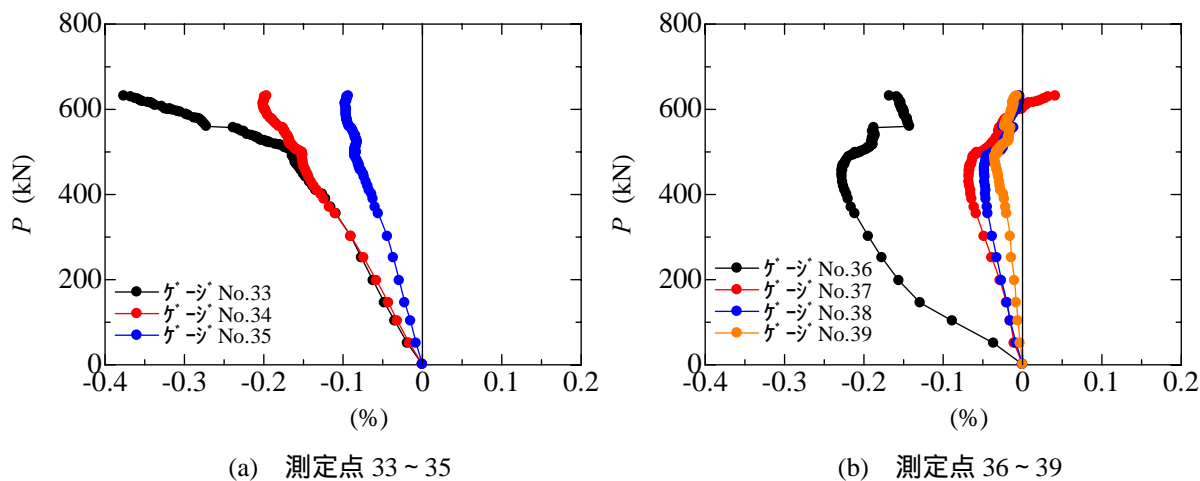


図 5.24 試験体 の ECC 台座の荷重とひずみの関係

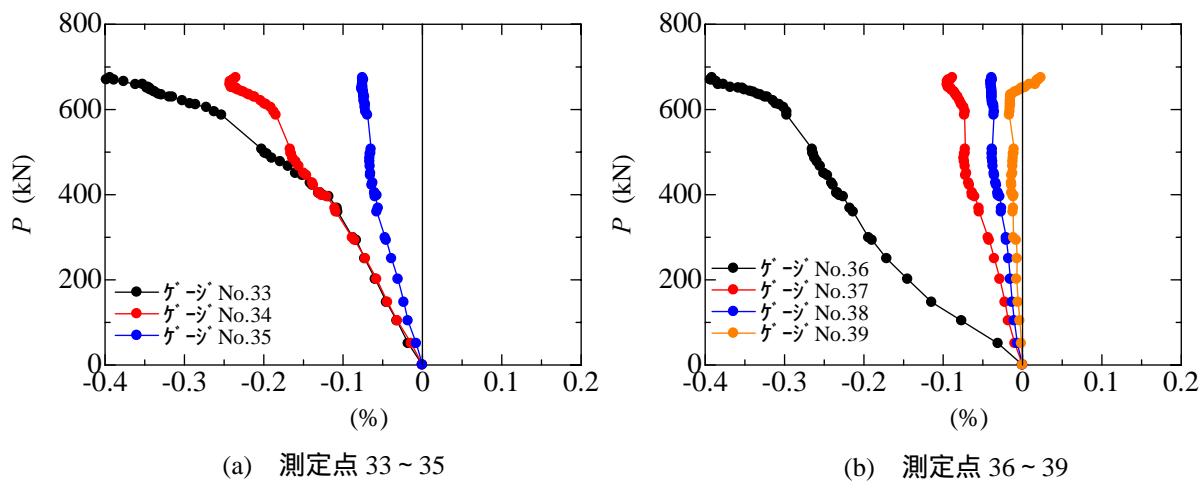


図 5.25 試験体 の ECC 台座の荷重とひずみの関係

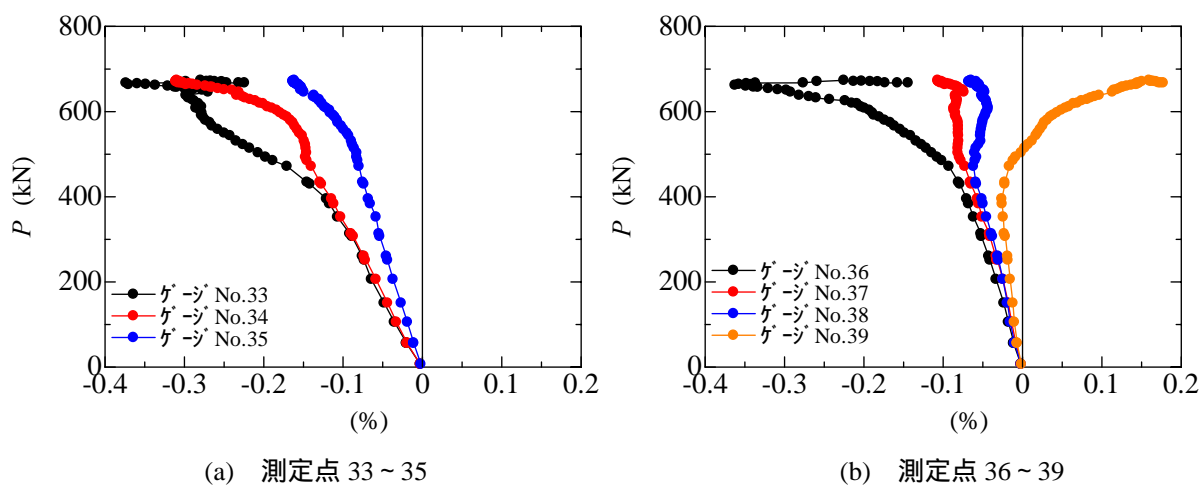


図 5.26 試験体 の ECC 台座の荷重とひずみの関係

第6章 結論

本研究は、頭付きスタッドが一個所当たり1本、2本、3本配置された、アルミニウム床版と鋼桁とから成る試験体の静的載荷試験を実施し、得られた試験結果より、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及ぼす影響を明らかにした。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

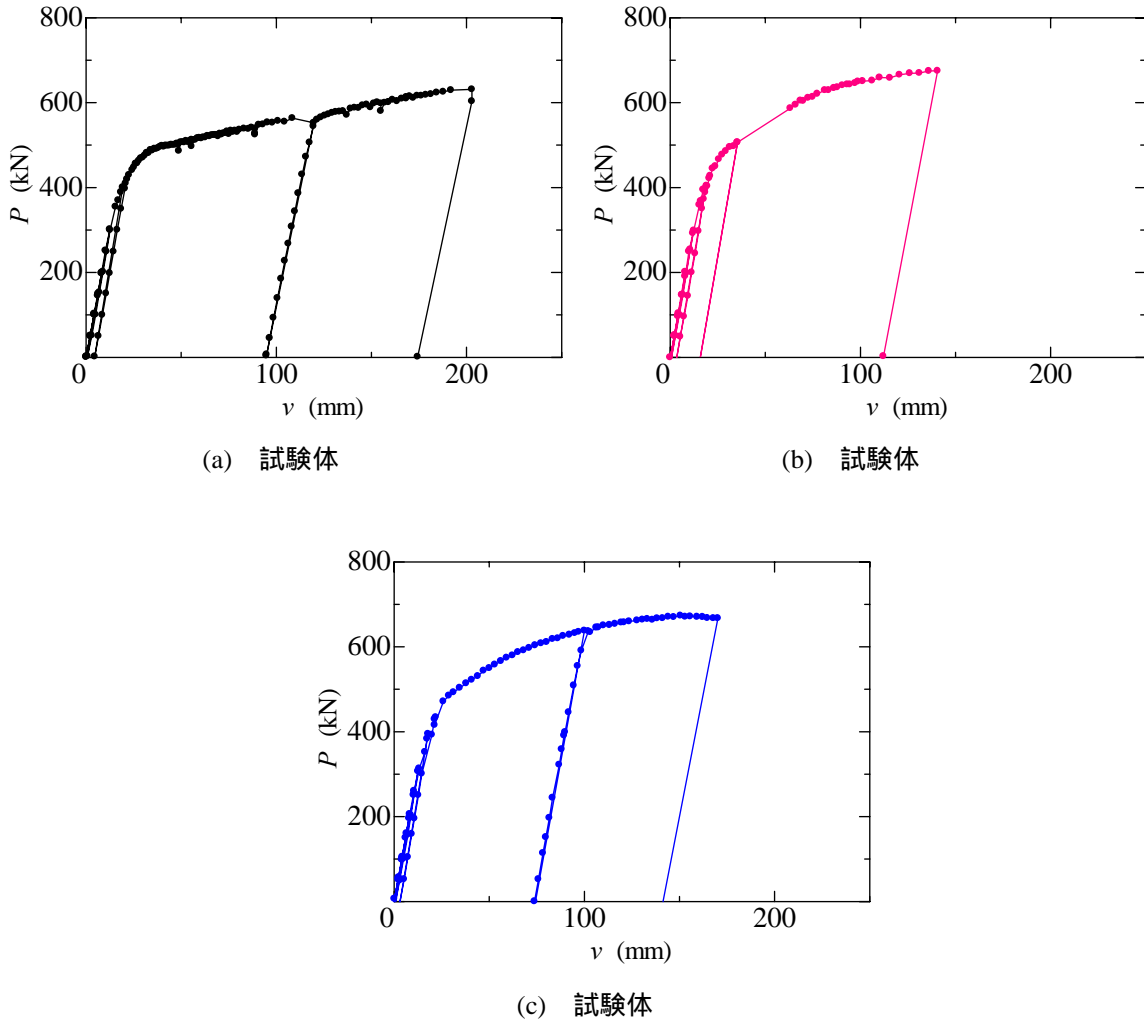
- (1) 荷重が約350kN以下のとき、試験体（頭付きスタッドが一個所当たり1本）、試験体（頭付きスタッドが一個所当たり2本）、試験体（頭付きスタッドが一個所当たり3本）の荷重とたわみの関係は、いずれも直線性を示し、試験体間で、相違しない。たわみの測定結果は、B法（アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に平面保持の仮定を設けない）によって算出されるたわみにほぼ一致する。
- (2) 荷重が約450kNを超えると、試験体の荷重は、試験体と の荷重より低くなる。試験体と の荷重とたわみの関係は最大荷重までほぼ同じ曲線を示す。最大荷重は、試験体が631kN、試験体が675kN、試験体が673kNであった。これらの荷重は、アルミニウム床版上板の摩擦撈拌接合部の引張強さに対する全塑性荷重614kNを上回り、さらに試験体と の最大荷重は、アルミニウム床版上板の母材の0.2%耐力に対する全塑性荷重639kNを上回る。
- (3) 試験終了後、試験体のアルミニウム床版上板には大きな変形が見られなかったが、試験体と には、開断面部に大きな塑性曲げ変形が生じた。アルミニウム床版と鋼桁上フランジとの連結部の水平せん断力に対する抵抗強度は、頭付きスタッドが1本の場合には、頭付きスタッド1本を有する開断面部の強度で決まり、頭付きスタッドが2本以上になると、開断面部のアルミニウム床版上板の板曲げ強度で決まる。
- (4) 試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみは、試験体と に対してはB法で推定され、試験体 に対してはA法とB法によって算出される値の間にある。アルミニウム床版上板と鋼桁から成る合成桁の中立軸の位置は、B法で推定される位置にほぼ一致する。
- (5) アルミニウム床版上板の開断面部の膜ひずみは、A法とB法に基づいて算出される値の間にある。板曲げひずみは、アルミニウム床版上板、ウェブ、下フランジで構成される骨組みとしての独自の曲げ変形に起因する。
- (6) アルミニウム床版の開断面部の無収縮モルタルには、試験体、 、 のいずれの試験体においても、斜めのひび割れが1本発生し、荷重の増加とともに、ひび割れ幅が大きくなる。ECC台座においては、乾燥収縮による、ひび割れ幅0.04mm以下のひび割れが、試験体、 、 において、それぞれ10本、10本、4本発生した。しかし、荷重載荷によって、ECC台座には圧縮応力が作用するために、これらのひび割れは閉じる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 萩澤亘保, 長尾隆史, 大倉一郎: 道路橋用アルミニウム床版の ECC 台座のひび割れ抵抗試験および疲労試験, ALST 研究レポート, No.20, 2010.
- 6) 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.
- 7) Federico M. Mazzolani: Aluminium Alloy Structures Second edition, E & FN SPON, 1995.
- 8) 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 試験体 , , の荷重とたわみの関係

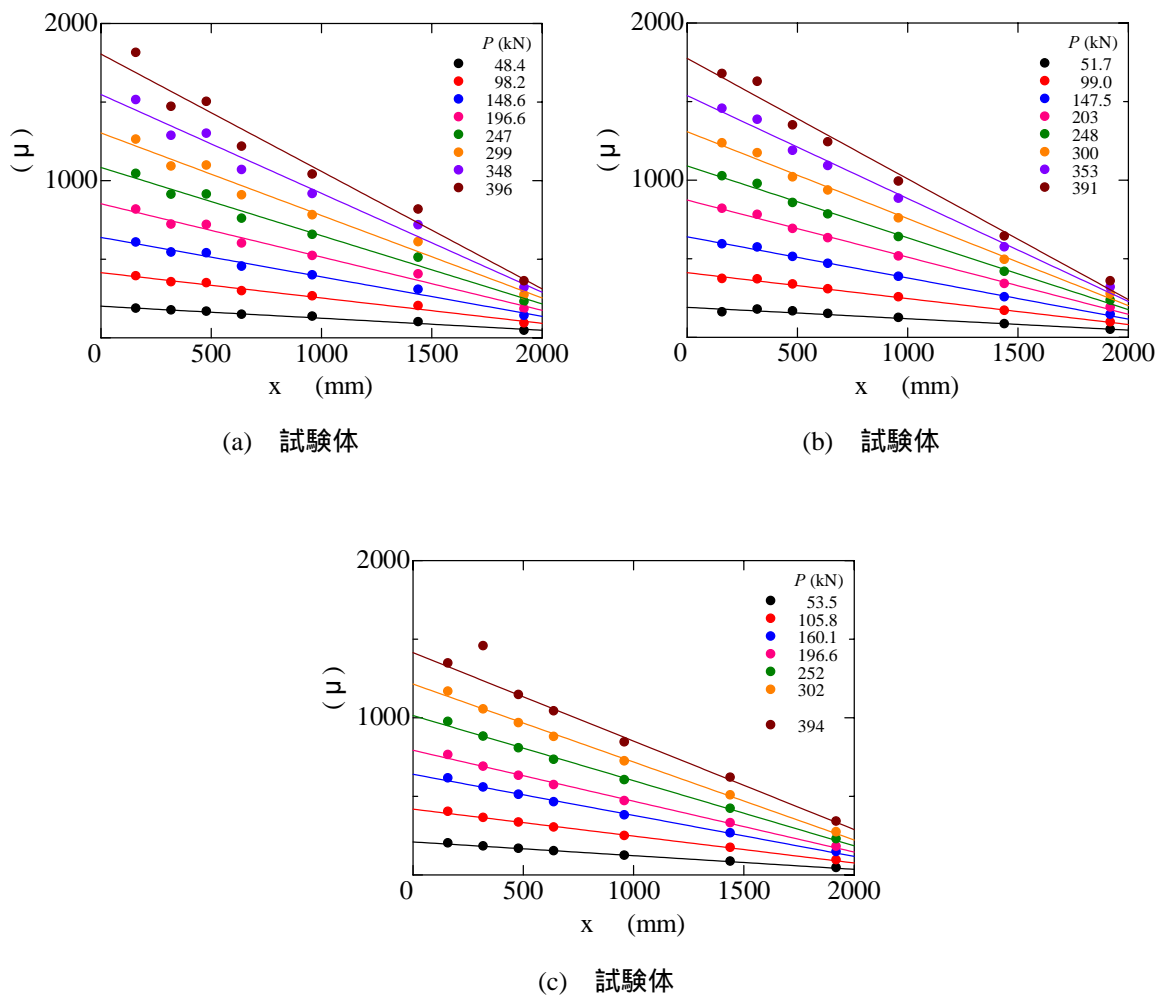
試験体 , , の荷重と試験体中央のたわみの関係を付図 A.1 に示す .



付図 A.1 荷重と試験体中央のたわみの関係

付録 B 試験体の鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

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付図 B.1 に示す. 同図には, ひずみの測定値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.



付図 B.1 鋼桁下フランジの下面のひずみ分布

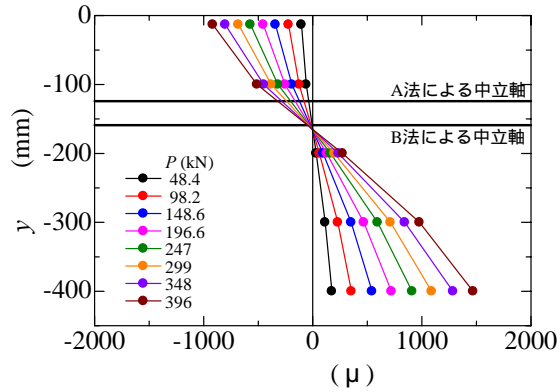
付図 B.1 に示す直線の $x=0$ におけるひずみ，すなわち試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみを付表 B.1 に示す．

付表 B.1 試験体中央の鋼桁下フランジの下面のひずみ

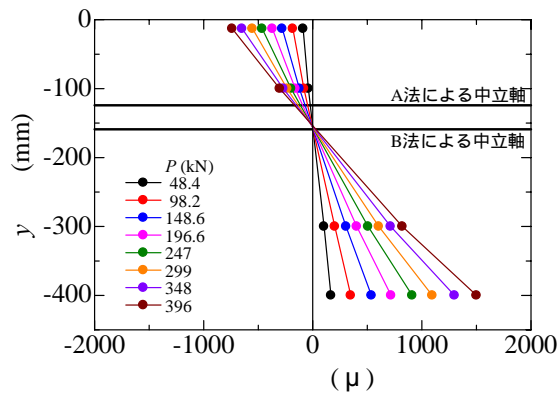
試験体	荷重 (kN)	ひずみ (μ)
	48.4	201
	98.2	415
	148.6	639
	196.6	853
	247	1084
	299	1303
	348	1548
	396	1805
	51.7	191
	99.0	411
	147.5	640
	203	873
	248	1091
	300	1308
	353	1538
	391	1775
	53.5	210
	105.8	419
	160.1	640
	196.6	793
	252	1014
	302	1214
	394	1415

付録 C 試験体の鋼桁断面のひずみ分布

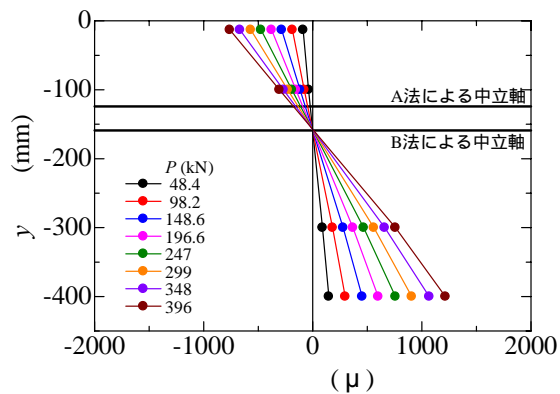
荷重を 400kN まで載荷した後に除荷した状態を初期として、再度 400kN まで載荷した場合に対して、試験体中央から 320mm, 480mm, 640mm 離れた鋼桁断面（図 4.7 のひずみゲージ 41, 42, 43 の各鉛直列）のひずみ分布を、試験体 , , に対して、それぞれ付図 C.1, C.2, C.3 に示す。



(a) $x=320$ mm

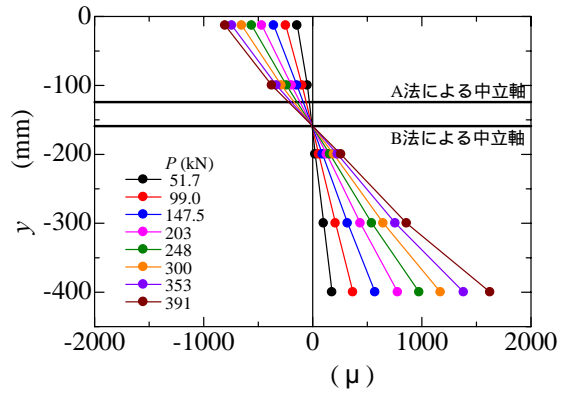


(b) $x=480$ mm

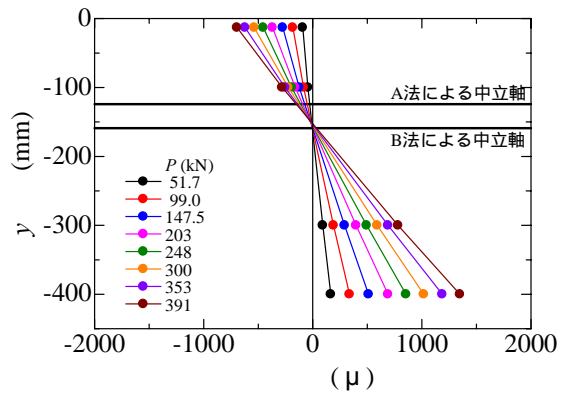


(c) $x=640$ mm

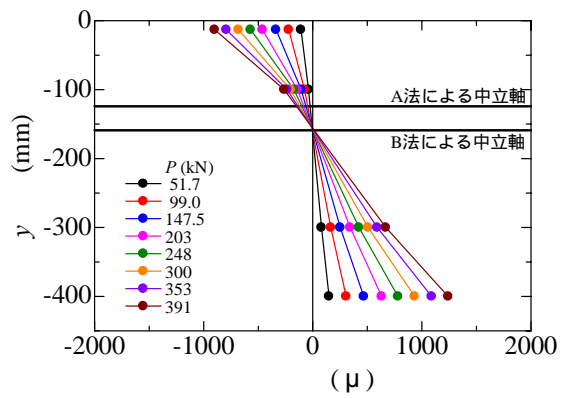
付図 C.1 試験体



(a) $x=320$ mm

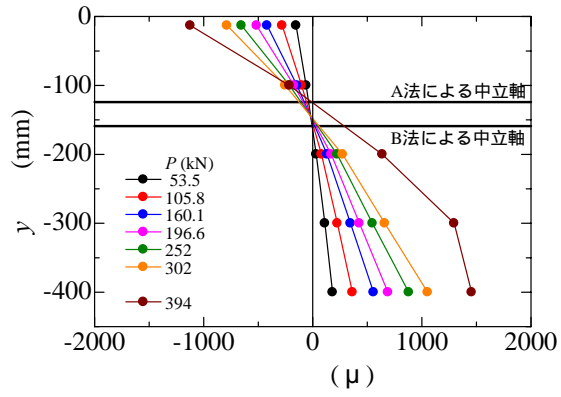


(b) $x=480$ mm

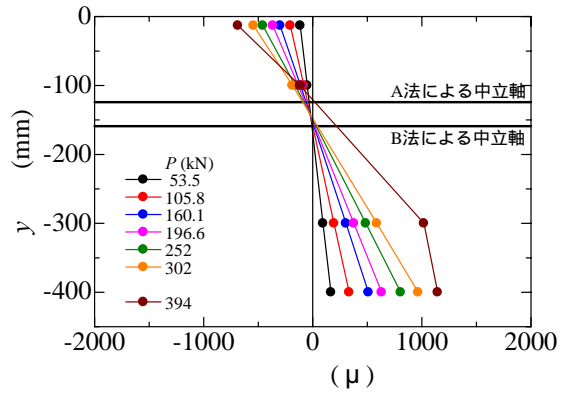


(c) $x=640$ mm

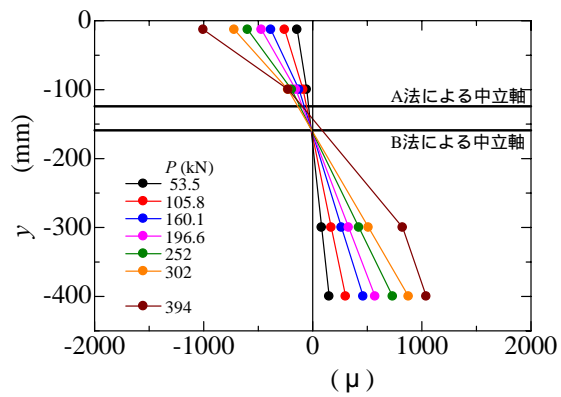
付図 C.2 試験体



(a) $x=320$ mm



(b) $x=480$ mm



(c) $x=640$ mm

付図 C.3 試験体

付録 D 試験体のアルミニウム床版上板とウェブのひずみ

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,試験体のアルミニウム床版上板の測定ひずみを,試験体 , , に対して,それぞれ付表 D.1, D.2, D.3 に示す. x は試験体中央からの距離, P は荷重である.

図 4.5 と 4.6 の各図において,アルミニウム床版上板の上面の,幅方向に 2 点貼付されたひずみゲージに対しては,両者の測定値の平均値を示している.灰色の網かけが施してある行は摩擦撈拌接合部,網かけが施されていない行は母材を示す.

付表 D.1 試験体 のアルミニウム床版上板の測定ひずみ

x (mm)	P (kN) 位置	48.4	98.2	148.6	196.6	247	299	348	396
	160	上面	-76	-167	-274	-384	-510	-642	-778
下面		-166	-336	-517	-685	-860	-1031	-1214	-1377
320	上面	-140	-290	-446	-593	-747	-901	-1058	-1198
480	上面	-109	-231	-361	-487	-621	-754	-890	-1008
	下面	-141	-289	-449	-602	-766	-926	-1097	-1244
640	上面	-133	-269	-413	-549	-693	-836	-983	-1111
960	上面	-113	-230	-351	-463	-581	-700	-820	-925
1440	上面	-46	-100	-158	-213	-272	-331	-394	-449
	下面	-99	-210	-331	-448	-572	-695	-824	-939
1920	上面	-51	-112	-176	-233	-293	-351	-409	-458
1970	上面	-162	-345	-528	-700	-876	-1049	-1220	-1377
2000	上面	-135	-284	-434	-574	-722	-869	-1022	-1164
2040	上面	-186	-375	-558	-729	-907	-1084	-1269	-1442
	下面	122	231	329	418	511	599	693	784
2080	上面	-13	-23	-30	-37	-45	-57	-71	-85
	下面	-43	-105	-178	-245	-317	-387	-461	-524
2120	上面	147	304	468	620	778	929	1082	1224
	下面	-229	-486	-756	-1005	-1267	-1519	-1787	-2027
2160	上面	55	112	165	211	253	290	325	359
2190	上面	125	207	249	282	309	328	349	374
2240	上面	-29	-63	-103	-140	-178	-211	-242	-268

付表 D.2 試験体 のアルミニウム床版上板の測定ひずみ

x (mm)	P (kN)	51.7	99.0	147.5	203	248	300	353	391
	位置								
160	上面	-101	-223	-371	-533	-657	-808	-949	-1062
	下面	-173	-350	-563	-802	-995	-1219	-1432	-1615
320	上面	-136	-284	-455	-640	-787	-960	-1123	-1262
480	上面	-115	-241	-391	-553	-680	-829	-969	-1087
	下面	-155	-320	-513	-724	-894	-1088	-1274	-1430
640	上面	-141	-281	-444	-616	-755	-915	-1064	-1190
960	上面	-117	-238	-375	-522	-641	-775	-901	-1006
1440	上面	-46	-103	-173	-250	-311	-385	-454	-509
	下面	-120	-242	-383	-539	-666	-804	-937	-1043
1920	上面	-52	-110	-178	-252	-313	-380	-445	-499
1970	上面	-112	-259	-403	-547	-672	-807	-938	-1054
2000	上面	-101	-224	-349	-476	-582	-699	-813	-910
2040	上面	-152	-326	-489	-650	-785	-929	-1070	-1194
	下面	92	189	263	325	382	436	491	544
2080	上面	-18	-44	-70	-101	-125	-154	-182	-204
	下面	-50	-114	-188	-269	-335	-409	-480	-541
2120	上面	104	218	322	419	503	589	674	751
	下面	-183	-405	-625	-844	-1029	-1219	-1407	-1571
2160	上面	72	149	212	263	309	351	394	434
2190	上面	73	117	129	127	127	121	115	109
2240	上面	-32	-68	-110	-153	-190	-226	-260	-287

付表 D.3 試験体 のアルミニウム床版上板の測定ひずみ

x (mm)	P (kN)	53.5	105.8	160.1	196.6	252	302	394
	位置							
160	上面	-144	-296	-457	-574	-755	-907	-1316
	下面	-273	-543	-825	-1017	-1291	-1514	-2063
320	上面	-175	-347	-530	-658	-850	-1014	-1445
480	上面	-136	-274	-419	-522	-677	-807	-1117
	下面	-185	-371	-570	-710	-920	-1103	-1708
640	上面	-173	-335	-504	-620	-794	-948	-1320
960	上面	-150	-293	-445	-549	-703	-840	-1115
1440	上面	-62	-112	-163	-198	-251	-296	-398
	下面	-125	-254	-389	-481	-618	-745	-1045
1920	上面	-59	-132	-209	-263	-342	-412	-540
1970	上面	-152	-323	-505	-633	-825	-1005	-1401
2000	上面	-130	-269	-418	-521	-676	-819	-1149
2040	上面	-194	-374	-561	-689	-874	-1049	-1464
	下面	96	181	265	317	392	467	656
2080	上面	-46	-68	-93	-110	-137	-162	-225
	下面	-58	-140	-229	-291	-384	-467	-645
2120	上面	115	271	431	539	694	839	1174
	下面	-224	-481	-749	-931	-1195	-1436	-1988
2160	上面	8	59	106	132	168	203	286
2190	上面	73	107	148	168	195	232	315
2240	上面	-32	-74	-123	-157	-208	-251	-325

アルミニウム床版ウェブの測定ひずみを 試験体 , , に対して ,それぞれ付表 D.4 , D.5 , D.6 に示す .

付表 D.4 試験体 のアルミニウム床版ウェブの測定ひずみ

P (kN) ゲージ番号 (図 4.6)	48.4	98.2	148.6	196.6	247	299	348	396
27	166	321	470	603	742	871	1010	1135
28	40	111	183	251	322	388	461	531
29	-13	-17	-29	-41	-50	-56	-60	-57
30	-165	-251	-301	-338	-375	-407	-436	-469
31	31	55	75	94	116	141	172	203
32	-6	21	49	73	99	123	151	190

付表 D.5 試験体 のアルミニウム床版ウェブの測定ひずみ

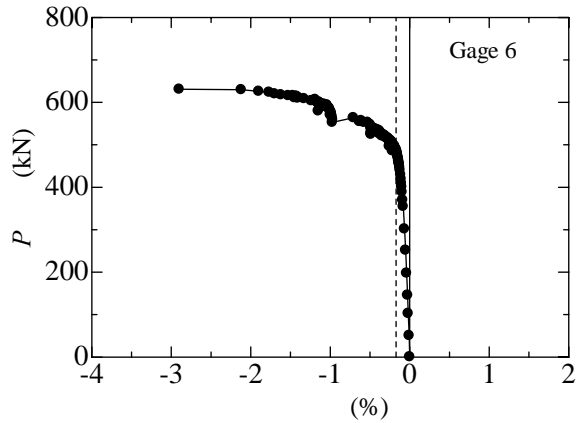
P (kN) ゲージ番号 (図 4.6)	51.7	99.0	147.5	203	248	300	353	391
27	167	318	452	582	693	804	913	1012
28	60	123	179	231	279	329	376	423
29	-70	-87	-119	-154	-181	-208	-235	-250
30	-120	-155	-153	-143	-135	-122	-112	-103
31	34	58	82	111	139	170	202	241
32	20	42	67	92	112	132	153	176

付表 D.6 試験体 のアルミニウム床版ウェブの測定ひずみ

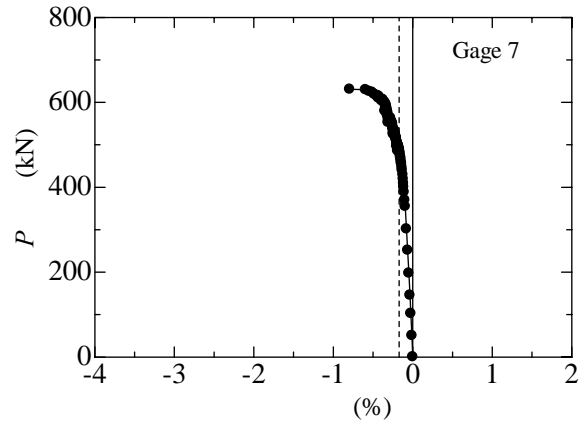
P (kN) ゲージ番号 (図 4.6)	53.5	105.8	160.1	196.6	252	302	394
27	168	308	448	539	666	782	1051
28	47	110	177	221	289	352	499
29	-76	-95	-110	-113	-109	-101	-86
30	-203	-243	-274	-290	-307	-320	-376
31	39	48	61	65	71	79	98
32	47	57	66	70	77	85	103

付録 E 試験体のアルミニウム床版上板の荷重とひずみの関係

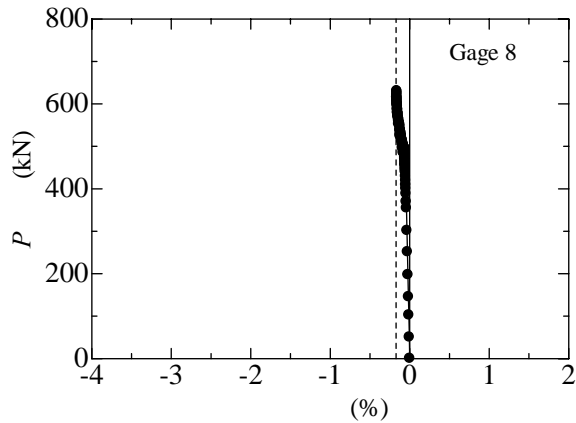
無載荷時を初期状態とする, アルミニウム床版上板の荷重とひずみの関係を, 試験体 , , に対して, それぞれ付図 E1.1 と E1.2, 付図 E2.1 と E2.2, 付図 E3.1 と E3.2 に示す.



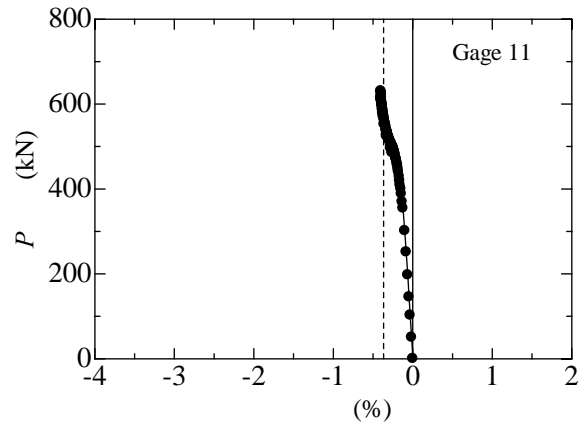
(a) ゲージ No.6



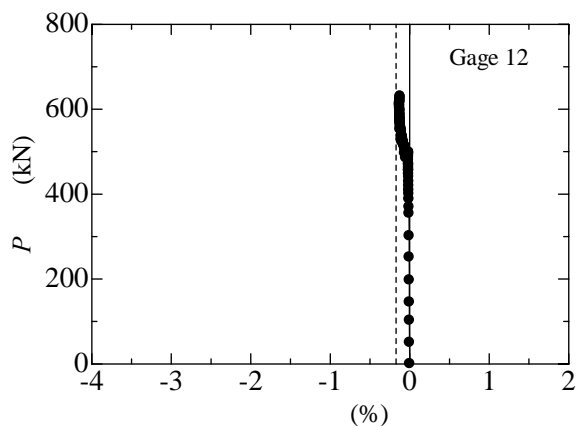
(b) ゲージ No.7



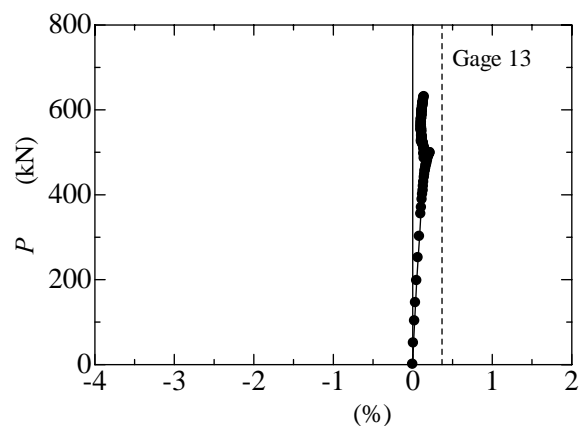
(c) ゲージ No.8



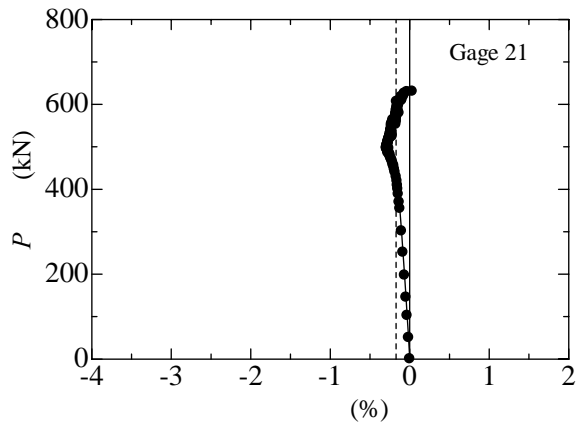
(d) ゲージ No.11



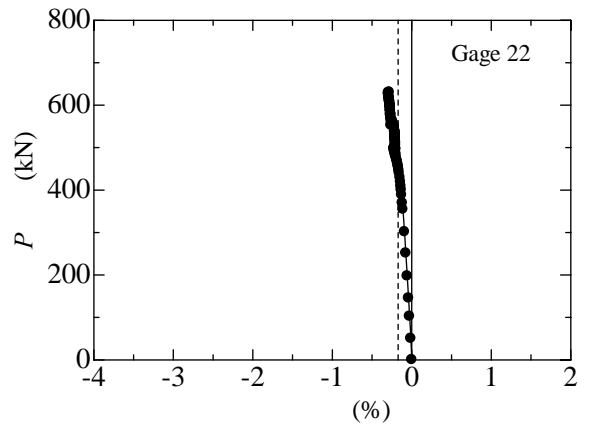
(e) ゲージ No.12



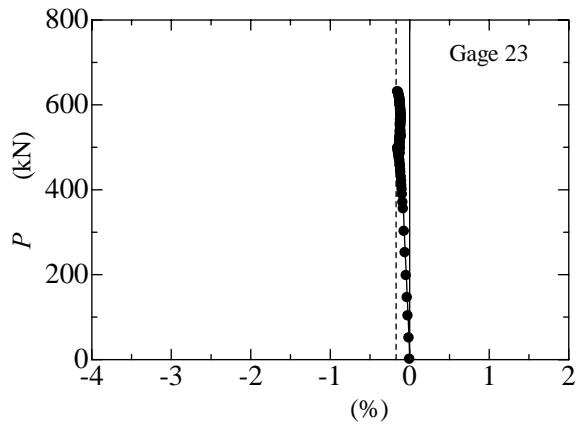
(f) ゲージ No.13



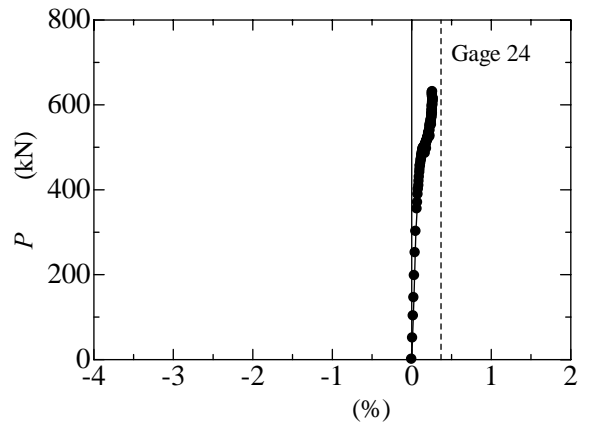
(g) ゲージ No.21



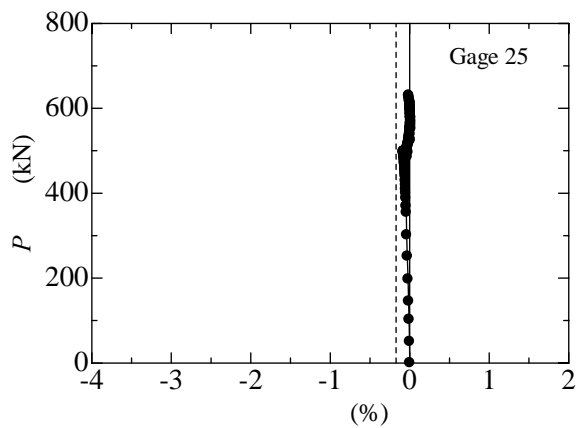
(h) ゲージ No.22



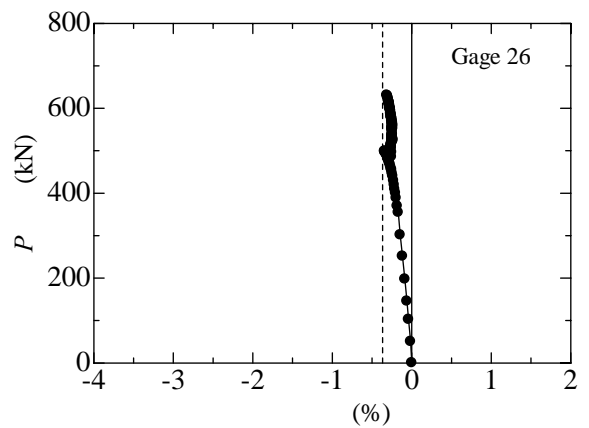
(i) ゲージ No.23



(j) ゲージ No.24

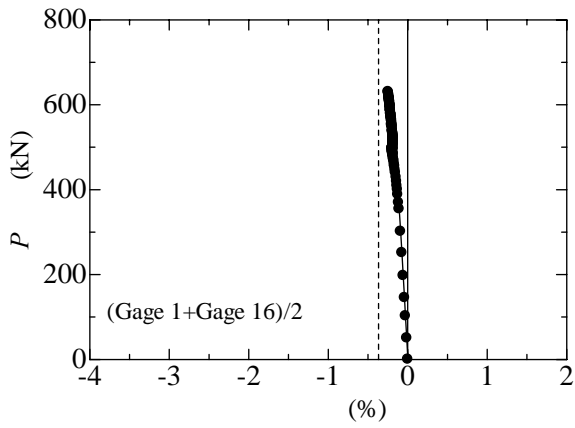


(k) ゲージ No.25

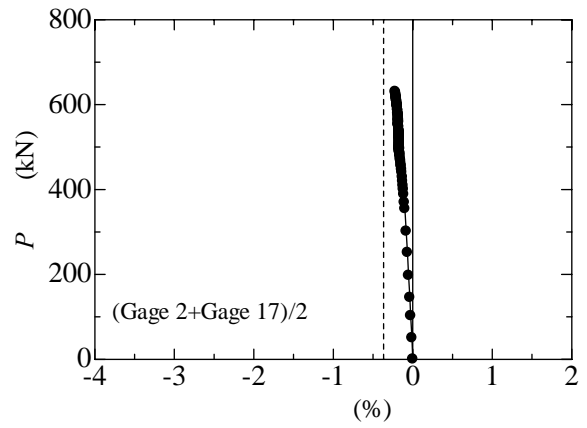


(l) ゲージ No.26

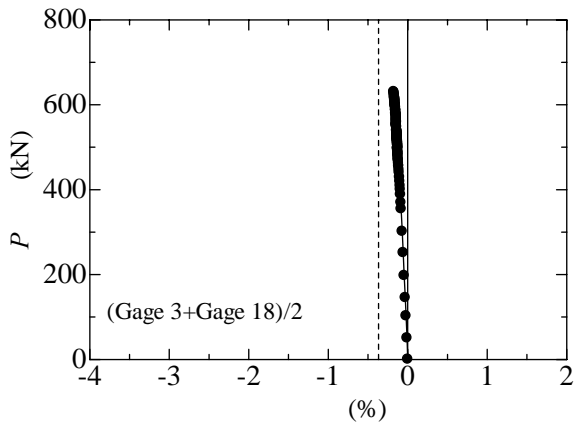
付図 E1.1 試験体 の開断面部の荷重とひずみの関係



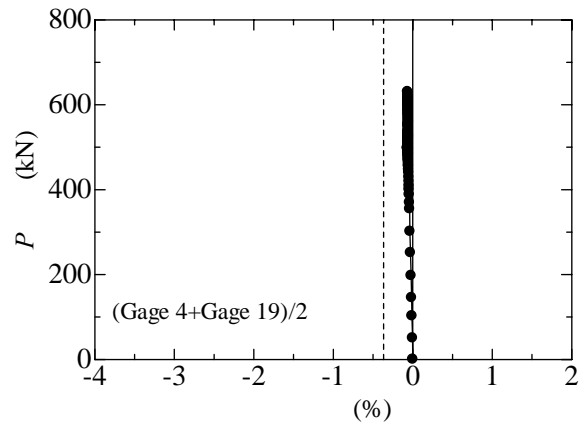
(a) ゲージ No.1 と No.16 の平均



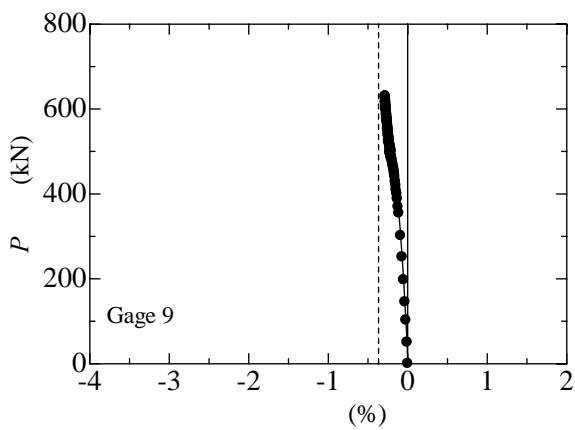
(b) ゲージ No.2 と No.17 の平均



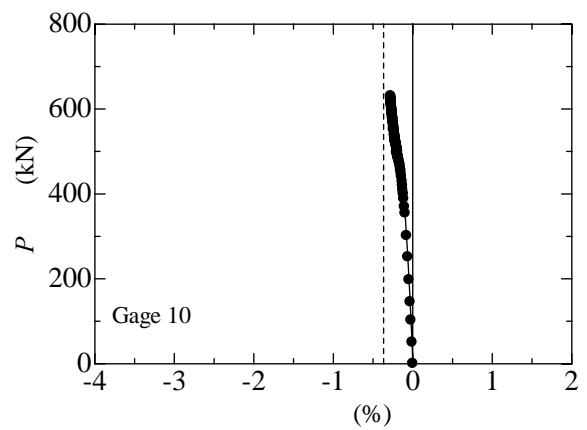
(c) ゲージ No.3 と No.18 の平均



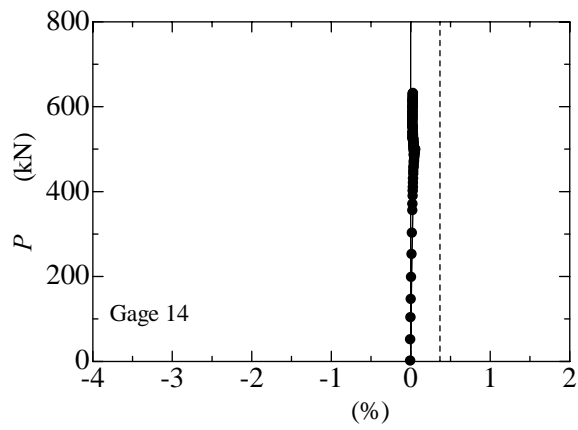
(d) ゲージ No.4 と No.19 の平均



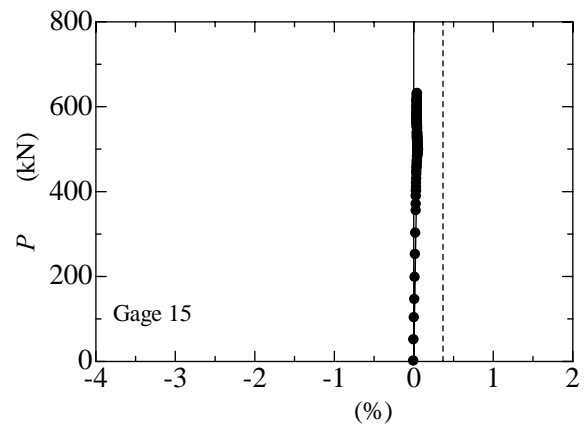
(f) ゲージ No.9



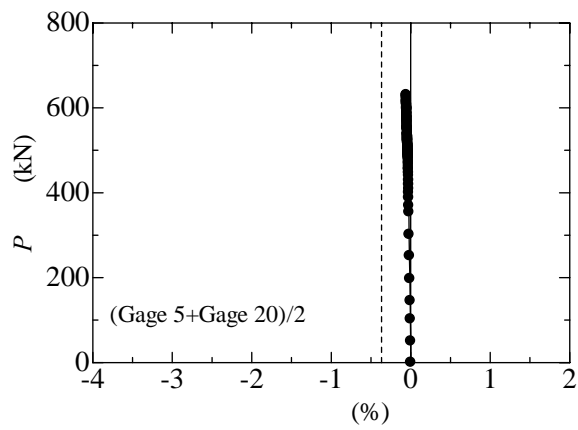
(g) ゲージ No.10



(h) ゲージ No.14

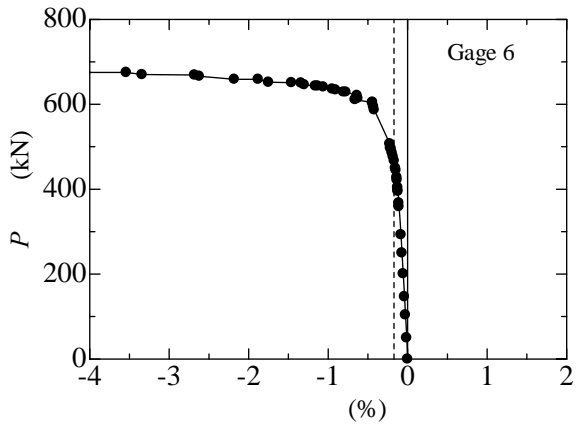


(i) ゲージ No.15

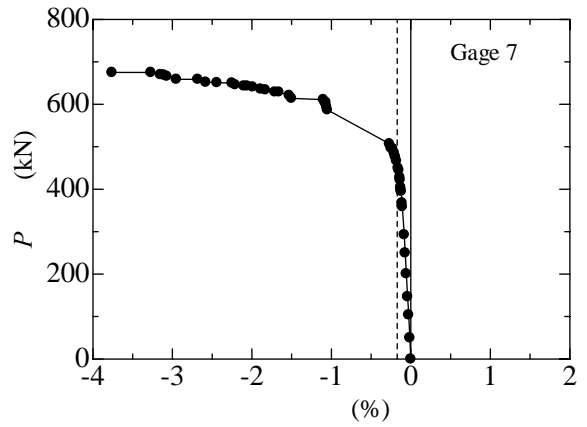


(j) ゲージ No.5 と No.20 の平均

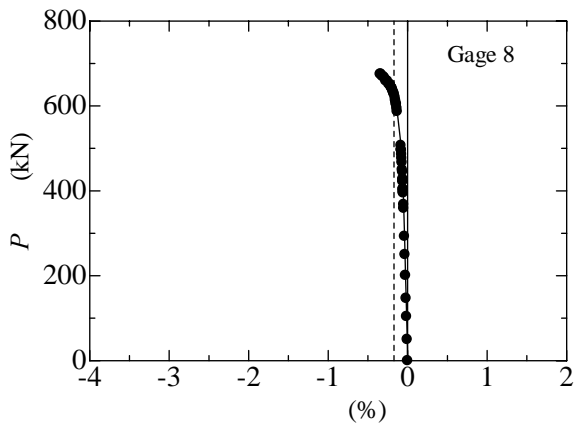
付図 E1.2 試験体 の閉断面部の荷重とひずみの関係



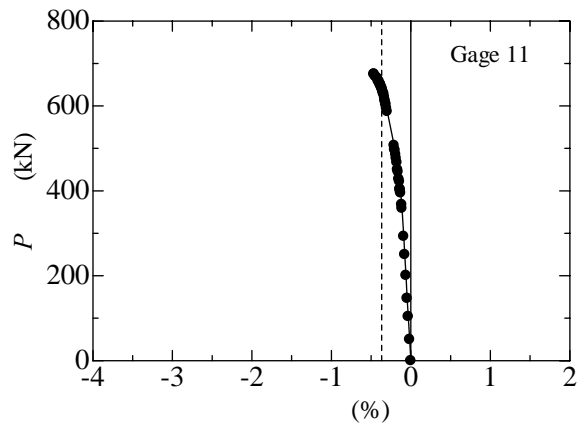
(a) ゲージ No.6



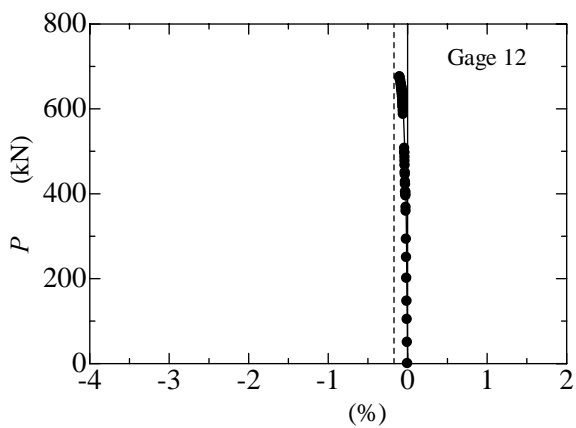
(b) ゲージ No.7



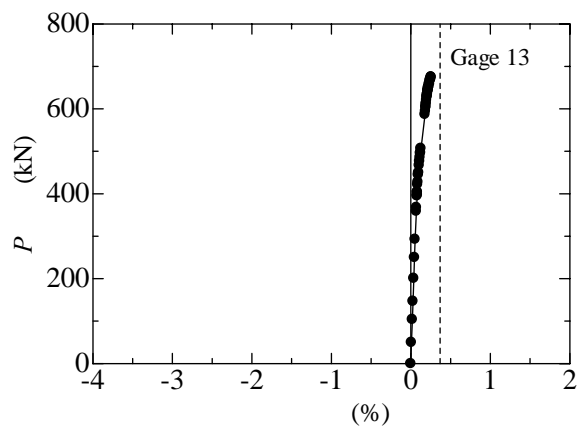
(c) ゲージ No.8



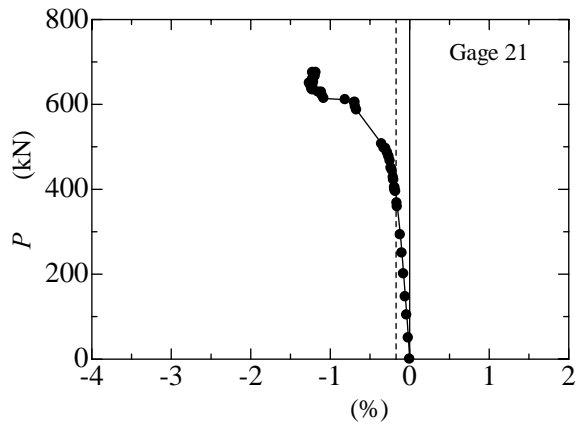
(d) ゲージ No.11



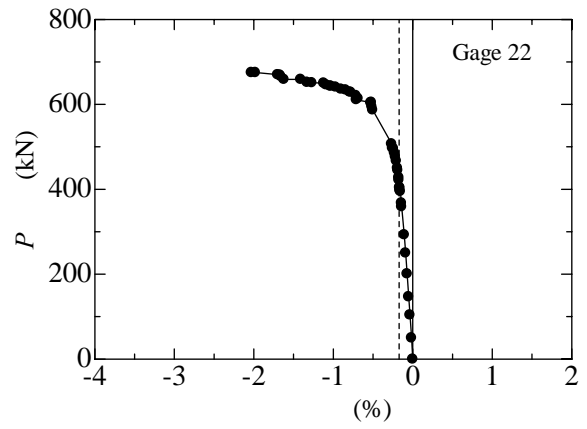
(e) ゲージ No.12



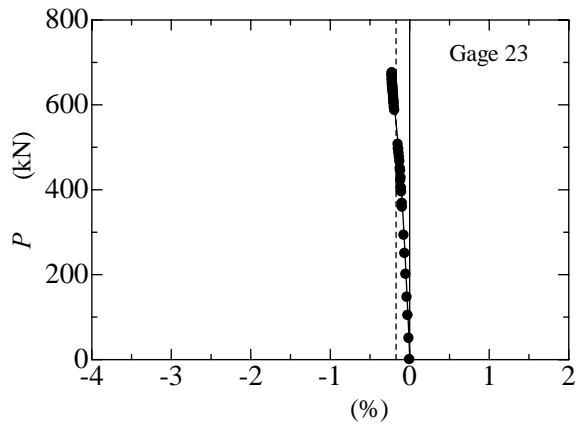
(f) ゲージ No.13



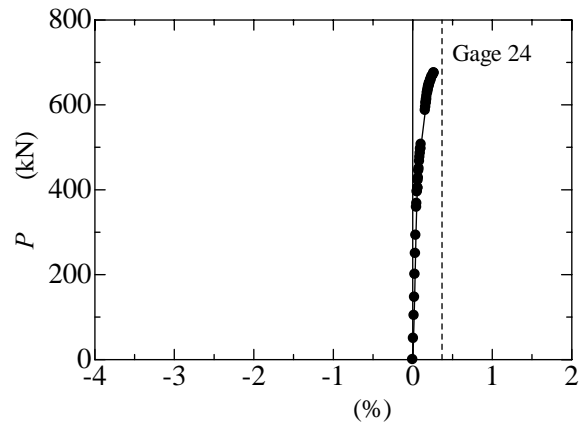
(g) ゲージ No.21



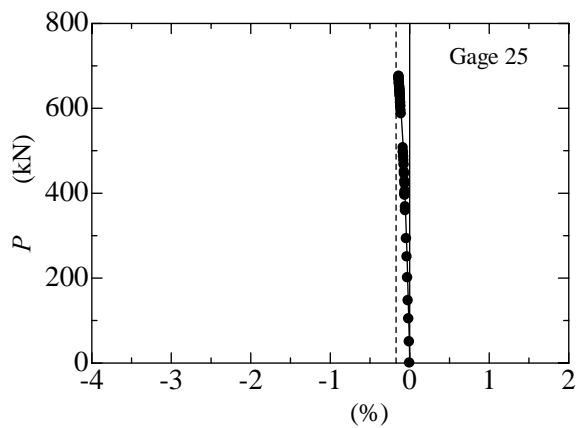
(h) ゲージ No.22



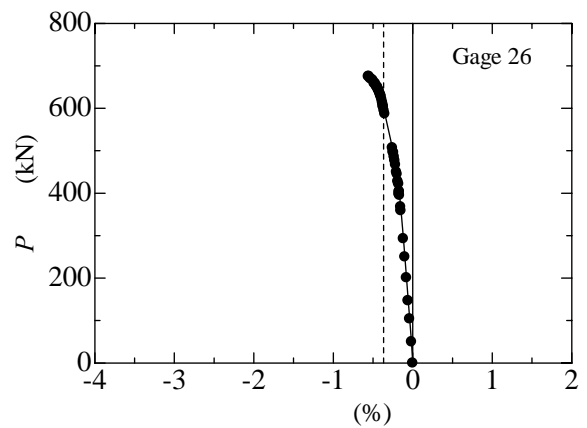
(i) ゲージ No.23



(j) ゲージ No.24

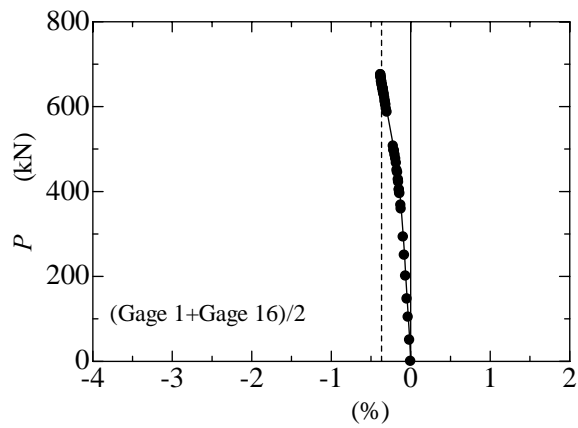


(k) ゲージ No.25

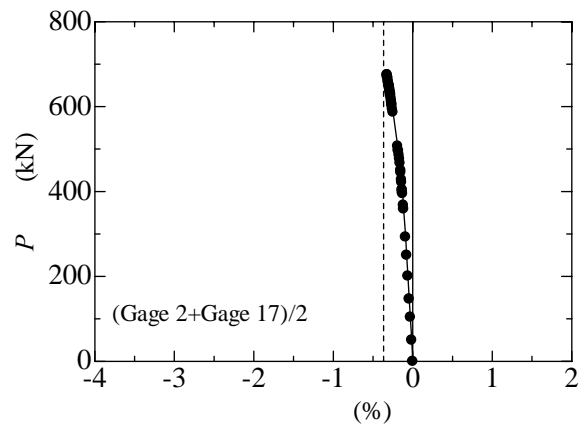


(l) ゲージ No.26

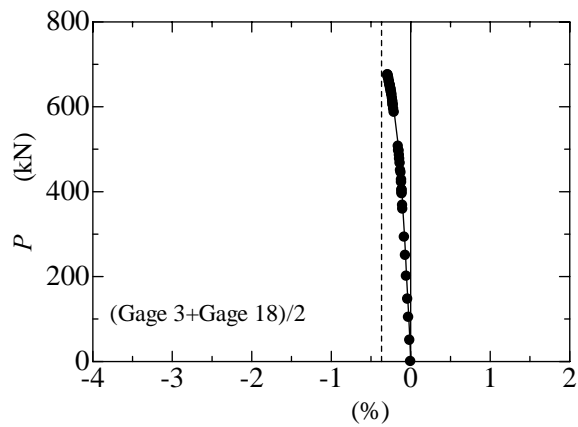
付図 E2.1 試験体 の開断面部の荷重とひずみの関係



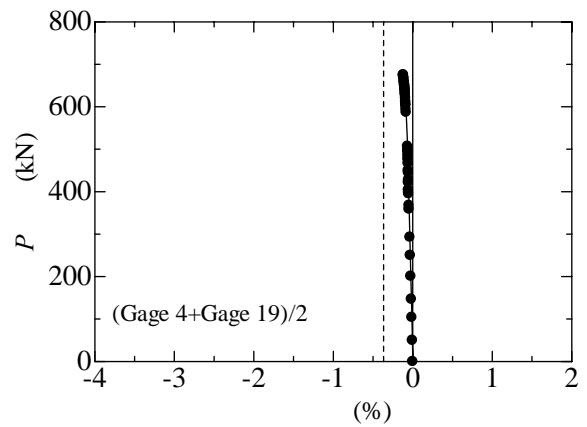
(a) ゲージ No.1 と No.16 の平均



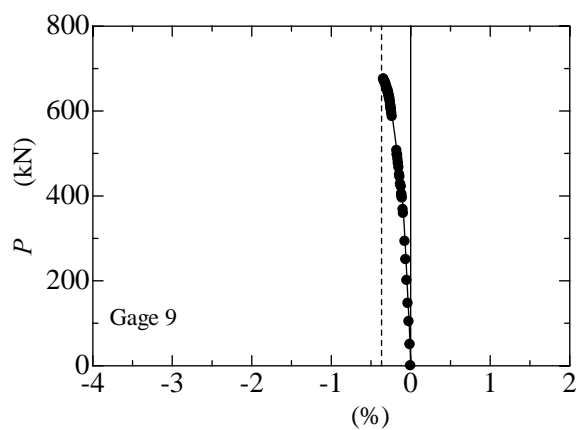
(b) ゲージ No.2 と No.17 の平均



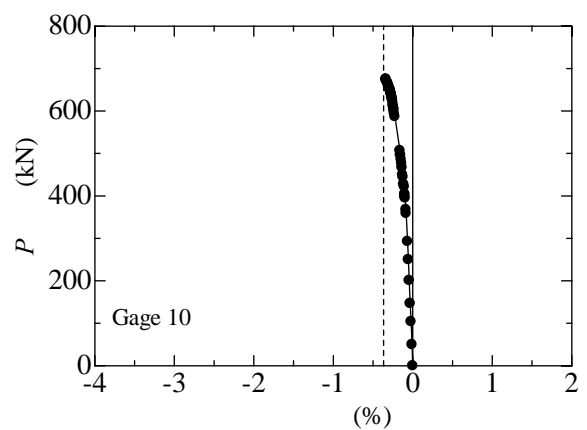
(c) ゲージ No.3 と No.18 の平均



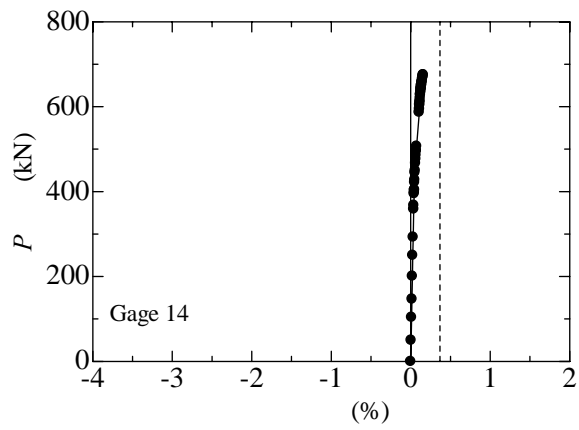
(d) ゲージ No.4 と No.19 の平均



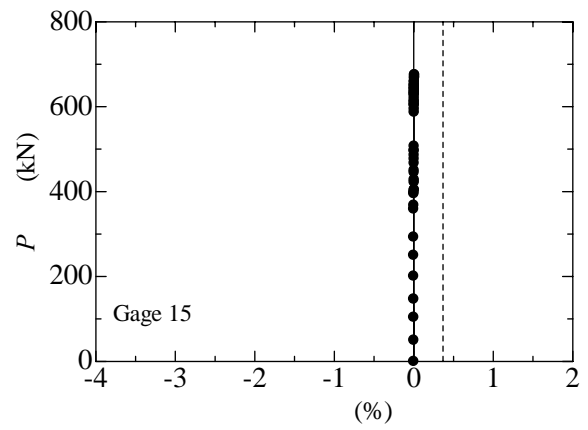
(f) ゲージ No.9



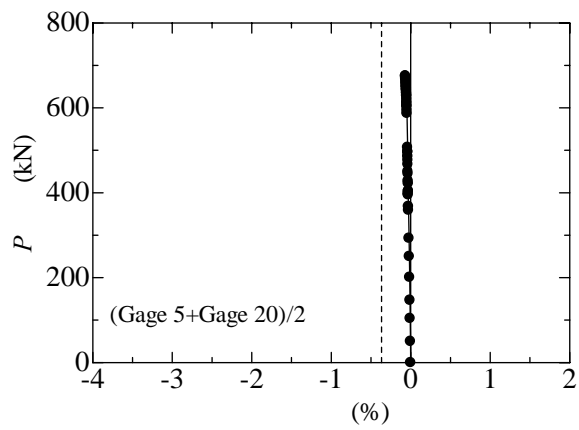
(g) ゲージ No.10



(h) ゲージ No.14

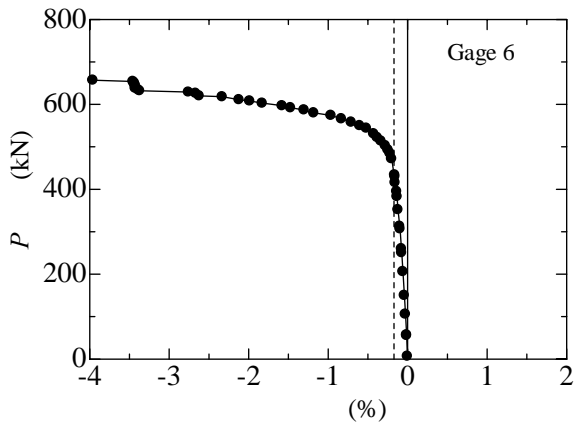


(i) ゲージ No.15

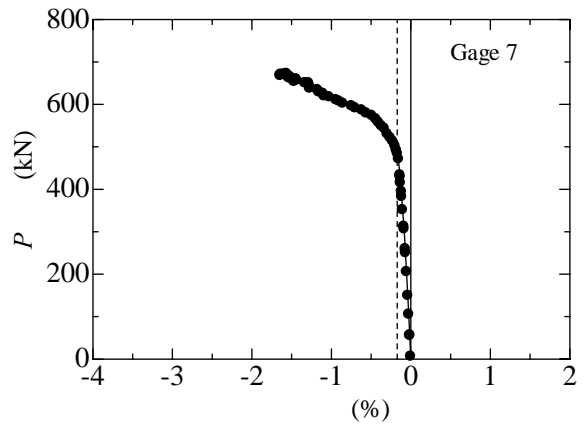


(j) ゲージ No.5 と No.20 の平均

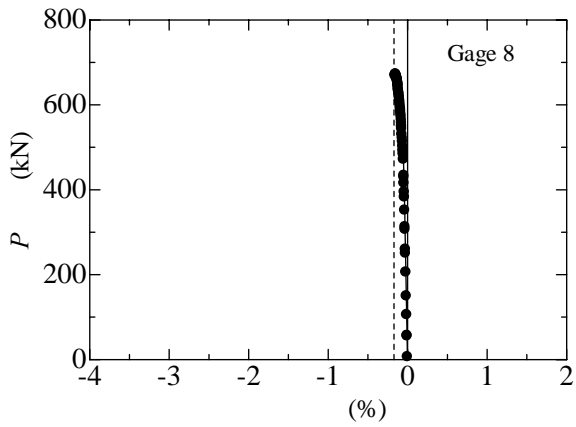
付図 E2.2 試験体 の閉断面部の荷重とひずみの関係



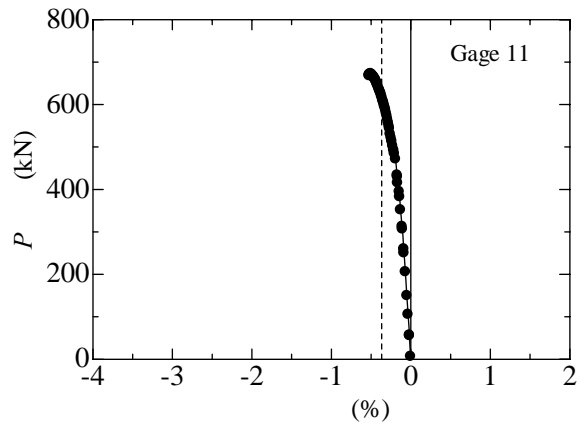
(a) ゲージ No.6



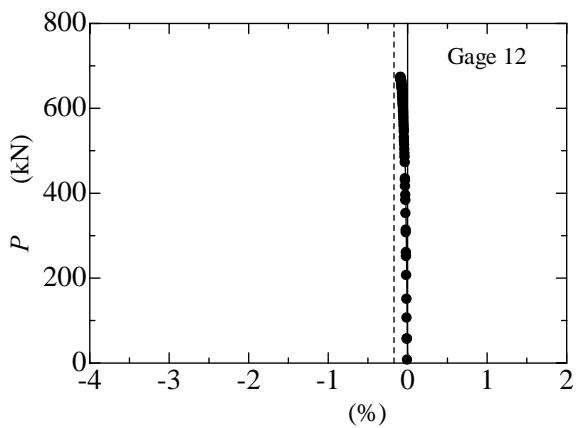
(b) ゲージ No.7



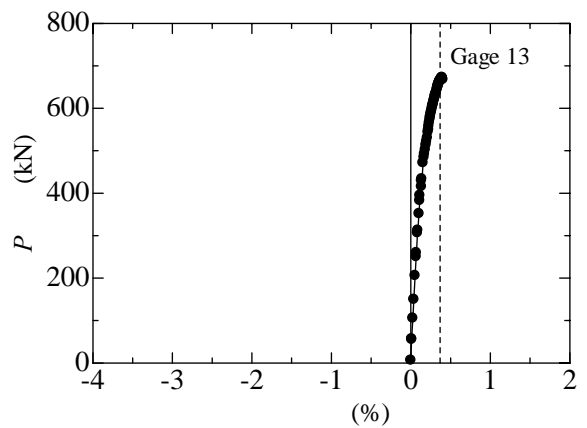
(c) ゲージ No.8



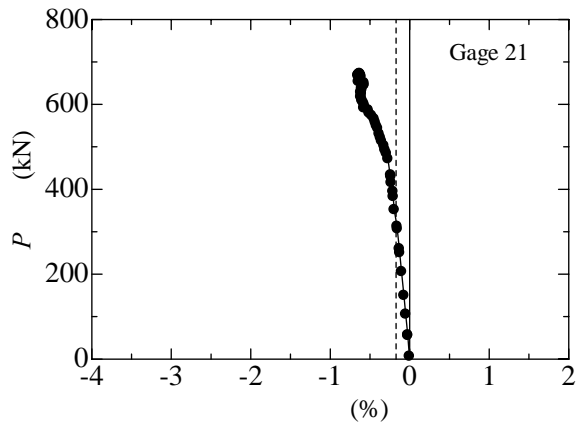
(d) ゲージ No.11



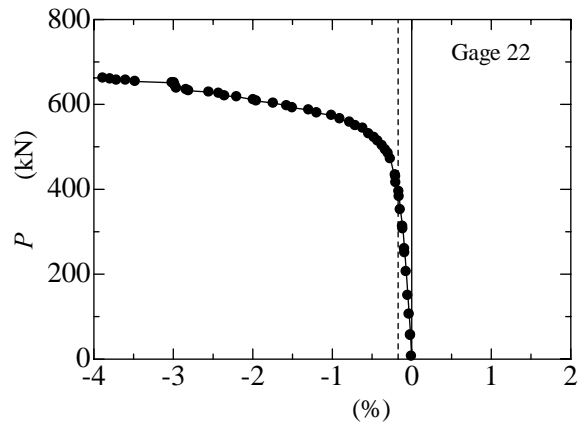
(e) ゲージ No.12



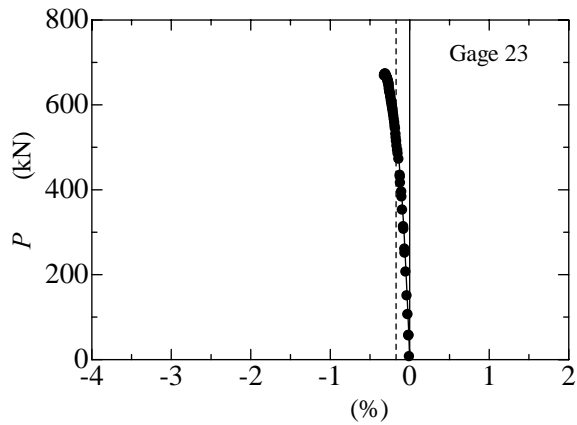
(f) ゲージ No.13



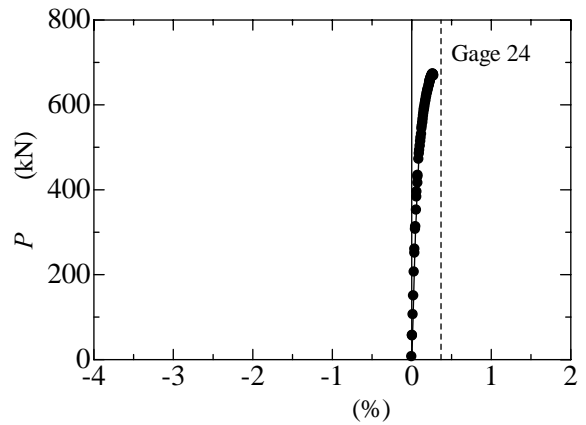
(g) ゲージ No.21



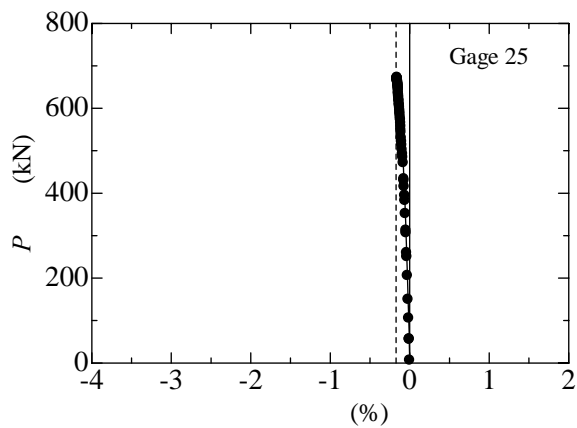
(h) ゲージ No.22



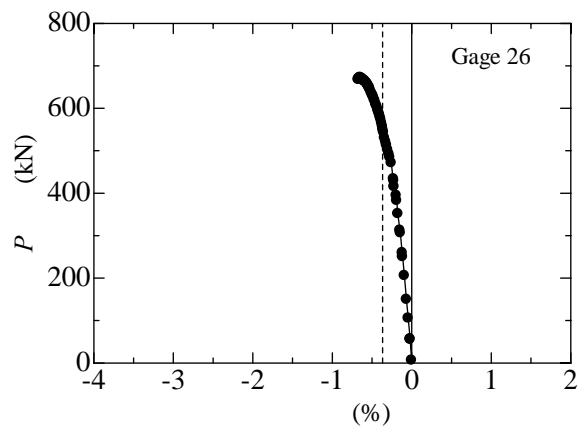
(i) ゲージ No.23



(j) ゲージ No.24

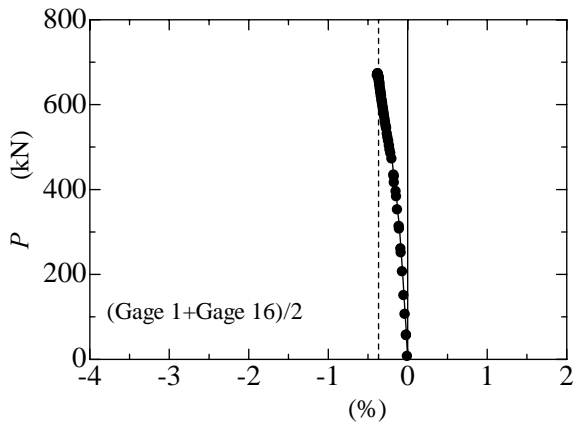


(k) ゲージ No.25

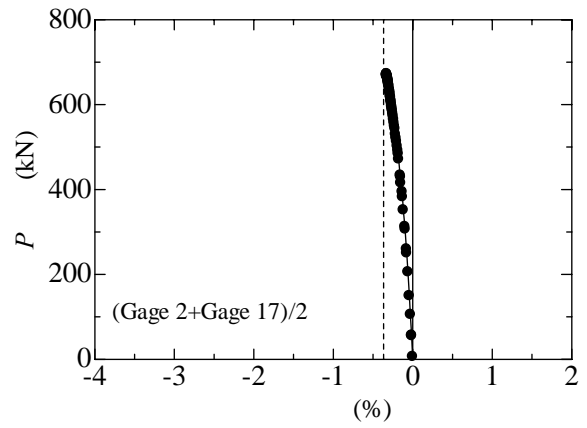


(l) ゲージ No.26

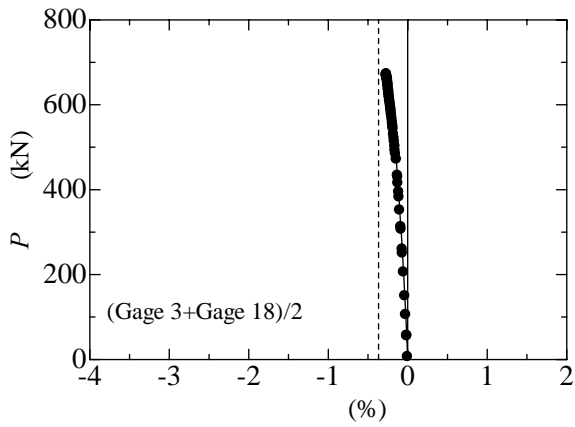
付図 E3.1 試験体 の開断面部の荷重とひずみの関係



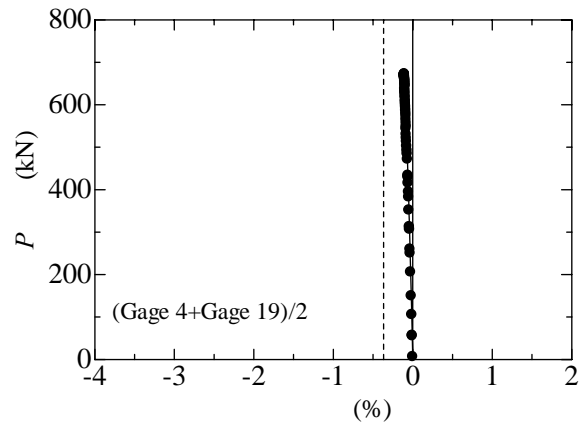
(a) ゲージ No.1 と No.16 の平均



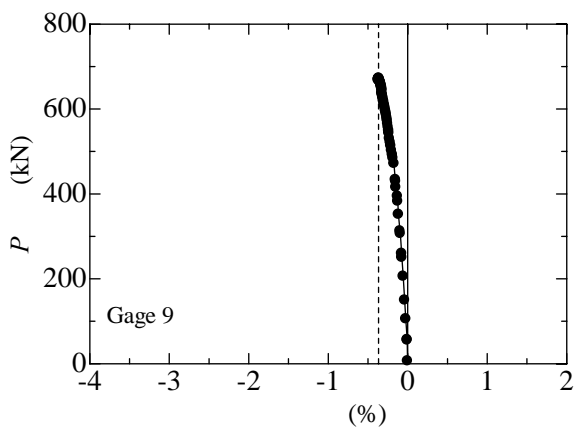
(b) ゲージ No.2 と No.17 の平均



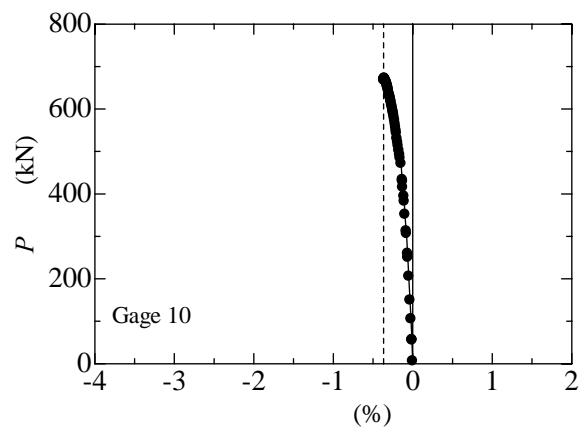
(c) ゲージ No.3 と No.18 の平均



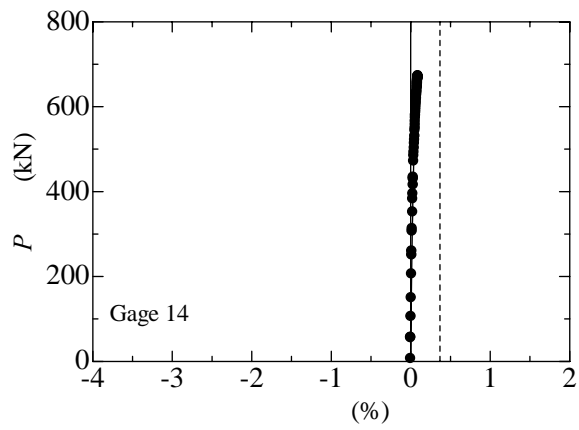
(d) ゲージ No.4 と No.19 の平均



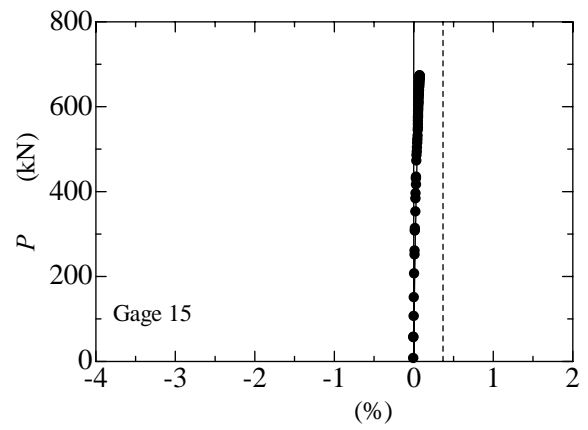
(f) ゲージ No.9



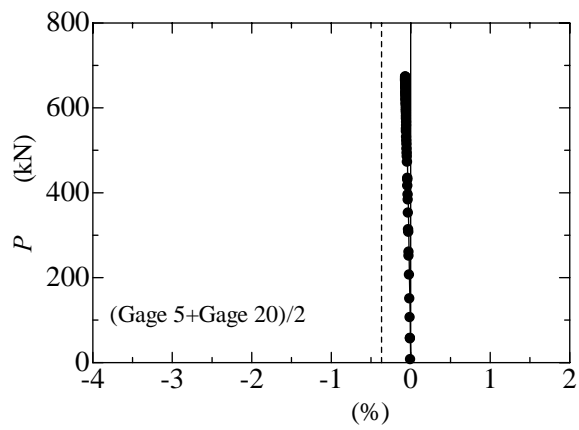
(g) ゲージ No.10



(h) ゲージ No.14



(i) ゲージ No.15



(j) ゲージ No.5 と No.20 の平均

付図 E3.2 試験体 の閉断面部の荷重とひずみの関係