

道路橋用アルミニウム床版の終局挙動

ALST 研究レポート 43

2016年3月

大阪大学大学院工学研究科

重久純平，大倉一郎

概要

本研究では、FEM による弾塑性有限変位解析により、アルミニウム床版の終局挙動を明らかにする。

目次

| | |
|------------------------------|------|
| 第1章 序論 | ……1 |
| 第2章 アルミニウム床版 | ……3 |
| 第3章 試験体の弾塑性有限変位解析 | ……5 |
| 3.1 FEMによる弾塑性有限変位解析の概要 | ……5 |
| 3.2 試験体の有限要素モデル | ……5 |
| 3.3 解析値と試験値の比較 | ……10 |
| 3.4 支間長 4000mm の試験体モデルの解析 | ……14 |
| 第4章 アルミニウム床版の弾塑性有限変位解析 | ……19 |
| 4.1 解析モデル | ……19 |
| 4.2 解析結果 | ……25 |
| 4.2.1 アルミニウム床版のたわみ | ……25 |
| 4.2.2 アルミニウム床版の変形 | ……26 |
| 4.2.3 アルミニウム床版下フランジの橋軸直角方向応力 | ……26 |
| 4.2.4 アルミニウム床版上板の局部変形 | ……31 |
| 4.2.5 アルミニウム床版上板の橋軸方向応力 | ……32 |
| 4.2.6 アルミニウム床版の終局荷重 | ……35 |
| 第5章 結論 | ……38 |
| 参考文献 | ……39 |

第1章 序論

国土交通省によって取りまとめられた道路の老朽化対策の本格実施に関する提言¹⁾によれば、2013年現在、我が国には、橋長2m以上の橋梁が約70万橋あり、このうち建設後50年以上経過した橋梁が占める割合は約18%に達し、2023年には約43%に達することが予測されている。これらの中には補修が必要とされる橋が数多く出てくることが予想される。他方、1993年に設計自動車荷重が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替える場合、現行の道路橋示方書²⁾を適用すると床版厚を厚くしなければならなくなる橋梁も出てくる。床版が厚くなると自重が増えるため、鋼桁および下部工を補強しなければならなくなる場合が生じる。これに対して、重量が鉄筋コンクリート床版の約1/5倍のアルミニウム床版を導入することにより解決できないかと考えられた³⁾。橋を新設する際にも、建設重機の小型化による工期の短縮、下部工の小型化、および耐食性の良さからライフサイクルコストの削減にもつながるといった利点がある。

このような背景で、2000年頃から道路橋用アルミニウム床版の研究が開始された。最初、押出型材が摩擦撚拌接合によって連結された、図1.1に示すような閉断面アルミニウム床版が開発された⁴⁾。しかし、閉断面アルミニウム床版では、摩擦撚拌接合部の裏面を目視検査することができなかつたので、図1.2に示すような開閉断面アルミニウム床版⁵⁾が開発された。その後、アルミニウム床版と鋼桁の連結構造⁶⁾、現場継手⁷⁾、地覆定着⁸⁾、摩擦撚拌接合部の疲労強度⁹⁾、¹⁰⁾に関する研究が行われ、2008年には、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に示すような道路橋用アルミニウム床版に対して移動トラックタイヤ載荷疲労試験の公開実験が実施され、開発された開閉断面アルミニウム床版が高い疲労耐久性を有していることが示された¹¹⁾。2011年3月には、日本アルミニウム協会から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⁾が発刊され、同年4月には図1.4に示すような道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の試験施工が開始された¹³⁾。

しかし、前述の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⁾においては、次の事項に関して規定が設けられていない。

- (1) 斜角を有するアルミニウム床版の設計法
- (2) アルミニウム床版の終局強度
- (3) 鋼桁とアルミニウム床版を連結する頭付きスタッドの設計法

これらのうち、(1)に関連して、斜角を有するアルミニウム床版に生じる局部応力がALST研究レポート No.41¹⁴⁾で調べられた。本論文では、(2)に関連して、アルミニウム床版の終局挙動をFEMによる弾塑性有限変位解析によって明らかにする。

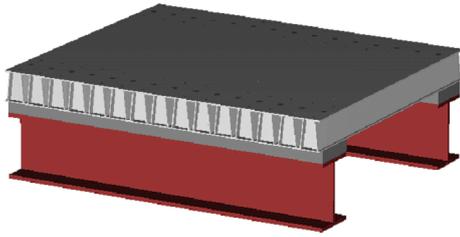


図1.1 閉断面アルミニウム床版

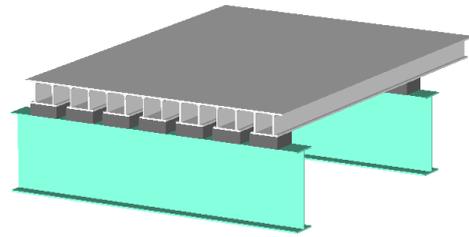


図1.2 開閉断面アルミニウム床版

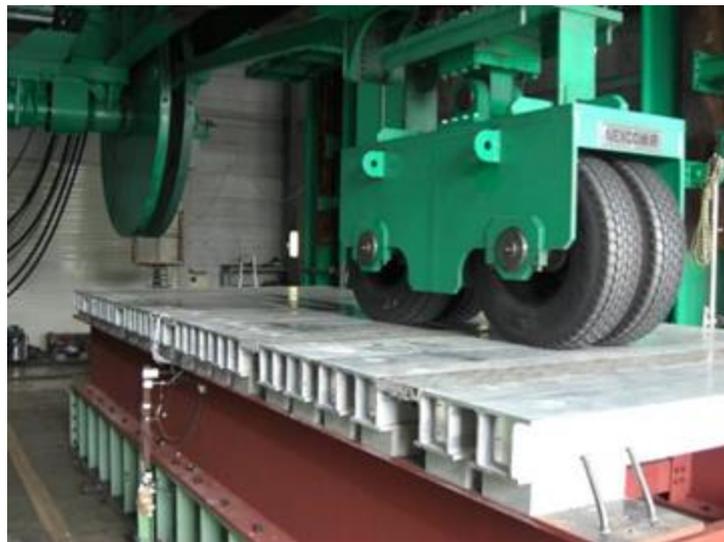


図1.3 道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験



図1.4 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋

第2章 アルミニウム床版

アルミニウム床版に使用される押出型材の断面寸法を図2.1に示す。材料は A6061S-T6である。図2.2に示すように、この押出型材の上フランジを摩擦攪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る⁵⁾。

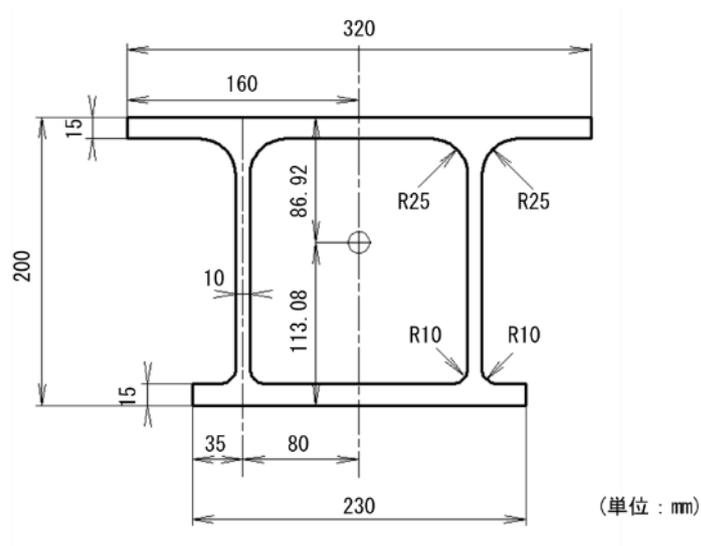


図2.1 押出型材の断面寸法

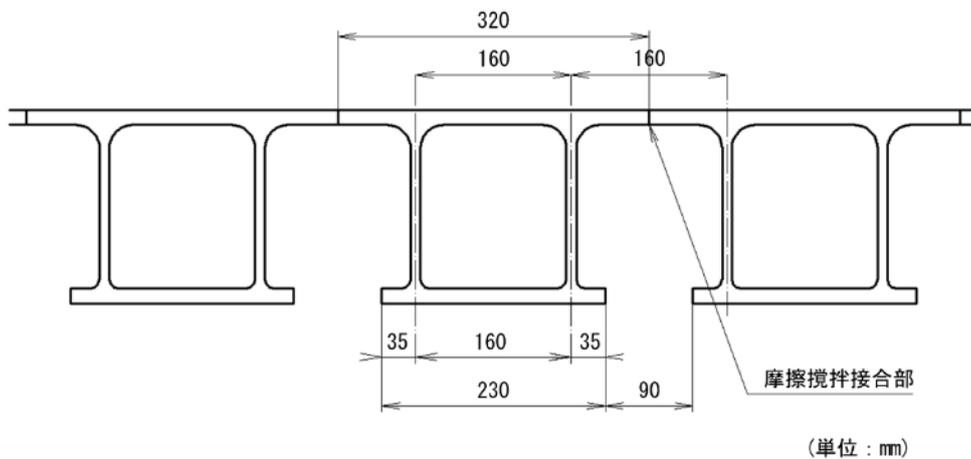


図2.2 アルミニウム床版

アルミニウム床版と鋼桁の連結構造を図2.3に示す。アルミニウム床版が鋼桁に接触することによって生じる異種金属接触腐食を防ぐために、鋼桁上フランジとアルミニウム床版

下フランジの間には ECC（高靱性セメント複合材料）の台座が設けられる。鋼桁上フランジに溶接された頭付きスタッドが、アルミニウム床版の閉断面内に挿入され、対向するアルミニウム仕切り板の間を無収縮モルタルで充填することにより、アルミニウム床版と鋼桁が連結される。

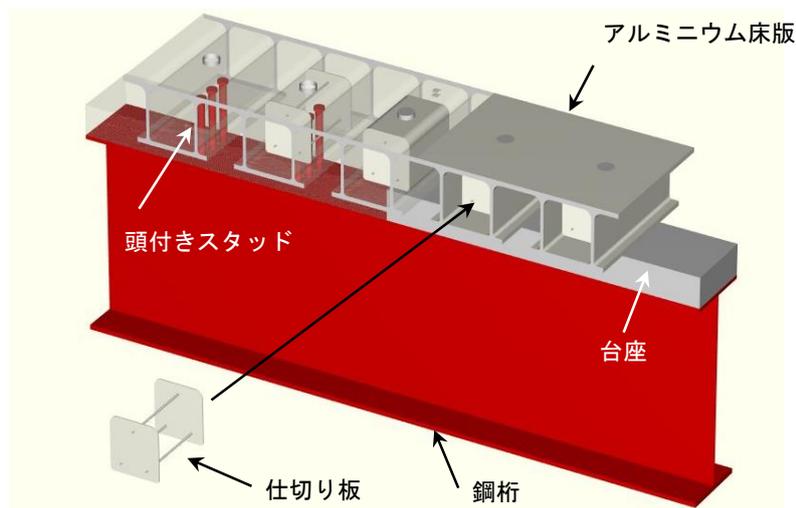


図2.3 アルミニウム床版と鋼桁の連結構造

第3章 試験体の弾塑性有限変位解析

3.1 FEMによる弾塑性有限変位解析の概要

汎用有限要素解析プログラム DIANA¹⁵⁾を用いてアルミニウム床版の弾塑性有限変位解析を行う。荷重を荷重制御で与え、弧長法によって非線形の剛性マトリックスを解く。アルミニウム床版の母材および摩擦撹拌接合部の応力-ひずみ関係に対して、次式で与えられる Ramberg - Osgood 式で与えられる関係を使用する¹⁶⁾。

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma > \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (3.1)$$

ここに、

- ε と σ : それぞれ、ひずみと応力
- E : ヤング率
- $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
- n : ひずみ硬化パラメータ

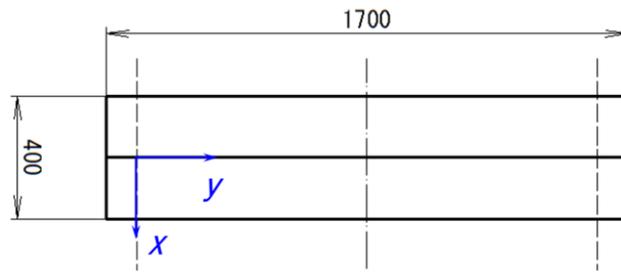
ひずみ硬化パラメータ n の値に対して、母材に対して29.1、摩擦撹拌接合部に対して10を使用する¹⁶⁾。ヤング率 E の値および0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の値は後に示す。

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)¹⁷⁾では、摩擦撹拌接合部の熱影響範囲が接合中心から最大で各側25mmと規定されている。したがって、摩擦撹拌接合の接合中心から各側25mmの範囲、すなわち50mmの範囲の0.2%耐力を母材のそれより低下させる。

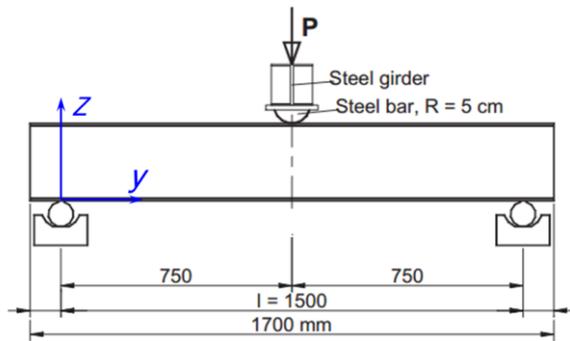
過去実施された静的載荷試験で使用されたアルミニウム試験体¹⁸⁾を FEM による弾塑性有限変位解析で解くことにより、アルミニウム床版を解析する際の留意点を明らかにする。

3.2 試験体の有限要素モデル

静的載荷試験が実施された試験体を図3.1に示す。図3.2に示すように、試験体は2本の押出型材の上下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。押出型材に使用されたアルミニウム合金は A6005C-T5 であり、その材料特性を表3.1に示す¹⁸⁾。試験体は鋼製のローラーによって支持され、荷重は鋼製の丸鋼によって支間中央に載荷された。



平面図



側面図

図3.1 試験体

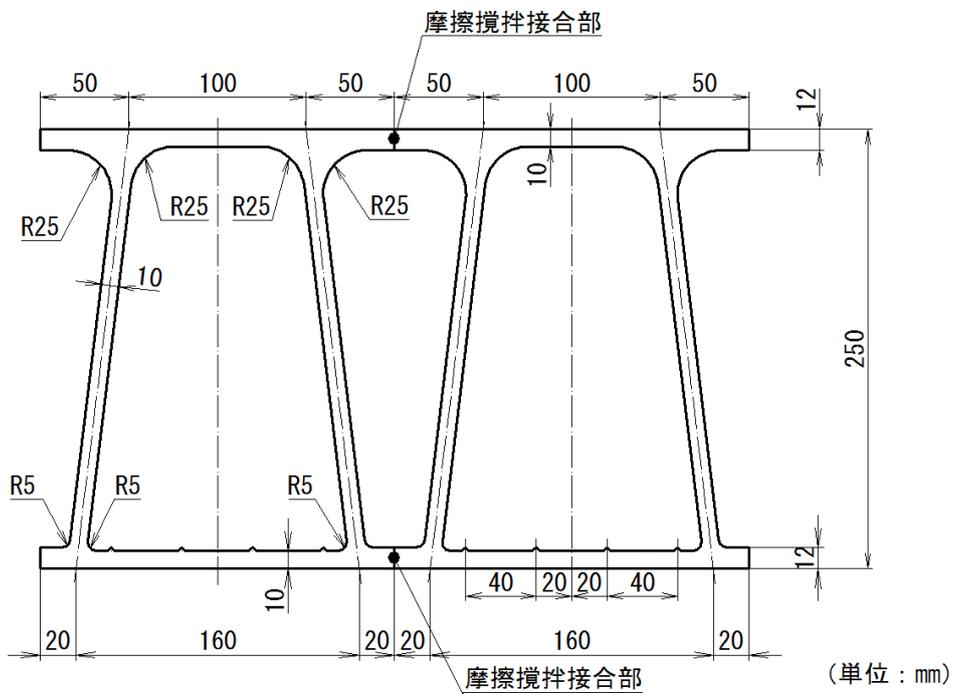


図3.2 試験体の断面

表3.1 試験体の材料特性

| | E [GPa] | μ | $\sigma_{0.2}$ [MPa] | 伸び [%] |
|----------------------|-----------|-------|----------------------|--------|
| 母材 | 70.290 | 0.31 | 245.1 | 7.95 |
| 摩擦撹拌接合部 (接合線直交方向) | 69.042 | 0.32 | 112.4 | - |
| 摩擦撹拌接合部 (接合線方向) | 67.297 | 0.33 | 127.0 | 30.50 |

試験体の要素分割を図3.3に示す。対称性から、試験体の1/4を、8節点アイソパラメトリック曲面シェル要素(DIANAにおけるCQ40S)を用いて要素分割する。試験体の長さ方向に25mm、幅方向に10mmから40mmの長方形の有限要素で試験体を分割する。FEM解析においては、試験体が線支持される位置に応力がスムーズに流れるようにするために、試験体の端部に200mm×200mm×25mmの厚板を設ける。20節点アイソパラメトリックブロック要素(DIANAにおけるCHX60)で厚板を要素分割する。図中の赤線で示された有限要素は摩擦撹拌接合部に相当し、表3.1に示す摩擦撹拌接合部の接合線方向の材料特性をこれに与える。黒線で示された有限要素に対しては、表3.1に示す母材の材料特性を与える。黄緑で表された厚板は、ヤング率 E が70GPa、ポアソン比 μ が0.3の弾性材料として扱う。

線支持される厚板の x 軸上の節点に対して、 z 軸方向の変位を拘束する。対称条件が課せられる、上下フランジおよび厚板の左側の節点に対して、 x 軸方向の変位、 y 軸回りの回転と z 軸回りの回転を拘束する。同様に、支間中央の上下フランジとウェブの節点に対して、 x 軸回りの回転、 y 軸方向の変位と z 軸回りの回転を拘束する。図3.3の青色の矢で示された要素に荷重を面圧として与える。図3.4に示すように、荷重の増加に伴い、試験体の上フランジと丸鋼の接触面は拡大する。したがって、丸鋼の半径が50mmであることを考慮して、荷重の載荷幅 d に対して50mmと100mmを考慮する。 $d = 50\text{mm}$ の場合、上フランジの支間中央の1列の要素に荷重を与え、 $d = 100\text{mm}$ の場合、2列幅の要素に荷重を与える。図3.3は、 $d = 50\text{mm}$ の場合を示している。

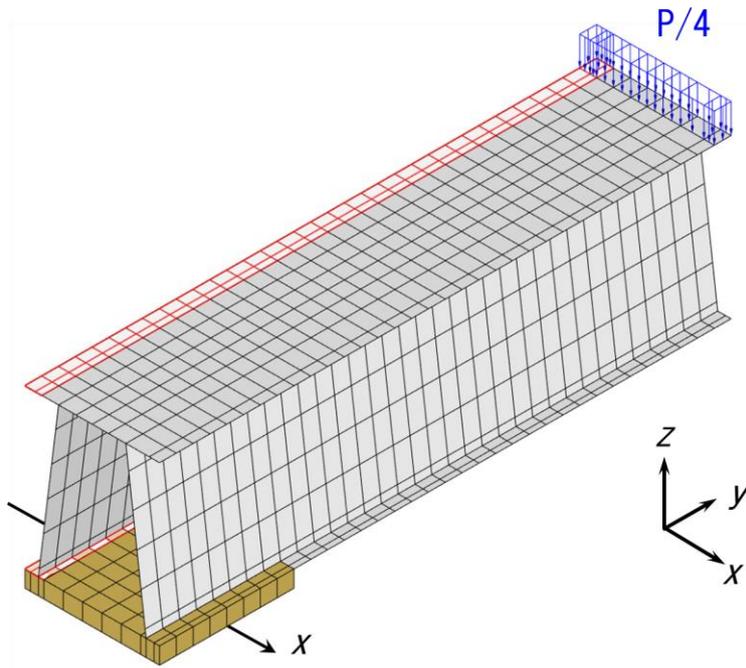
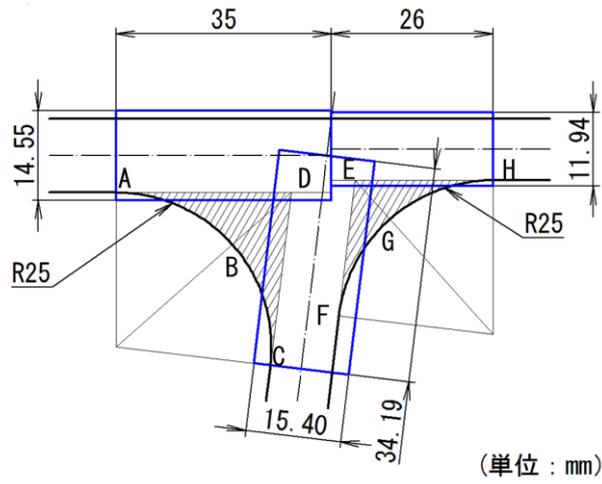


図3.3 試験体の要素分割

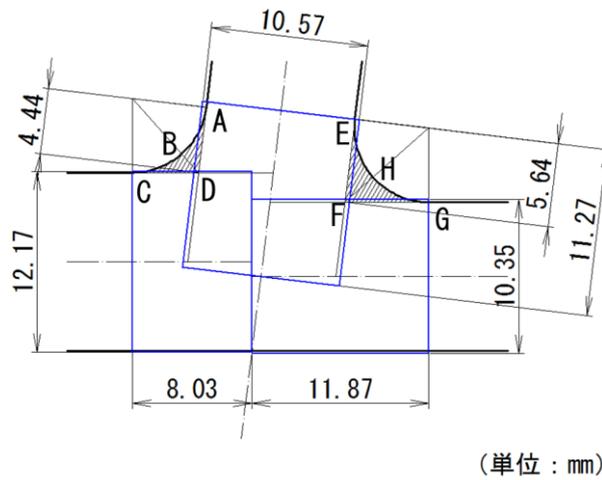


図3.4 丸鋼による試験体の変形

試験体の上フランジ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にはフィレットが設けられている。試験体のフィレットのモデル化を図3.5に示す。各フィレットの面積の半分の面積を各側の板要素に与え、要素の辺長で除した値を板厚に付加し、板厚を厚くする。上フランジとウェブが交差する部分のフィレットに対して、ABDとEGHの面積を上フランジに、BCDとEFGの面積をウェブに配分する。ウェブと下フランジが交差する部分のフィレットに対して、ABDとEFHの面積をウェブに、BCDとFGHの面積を下フランジに配分する。



(a) 上フランジとウェブが交差する部分のフィレット



(b) ウェブと下フランジが交差する部分のフィレット

図3.5 フィレットのモデル化

3.3 解析値と試験値の比較

荷重 P と支間中央のたわみ w の関係を図3.6に示す。 w は、右側の閉断面のウェブ間中央の下フランジの位置のたわみである。最大荷重を表3.2に示す。ここで、ケース1は、前述のフィレットの存在を考慮しない FEM モデルであり、ケース2は考慮する FEM モデルである。最大荷重は、試験値と解析値の間で大きく異なっている。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) の最大荷重時の試験体の変形を図3.7に示す。これは、プリ・ポストプロセッサ MIDAS+ for DIANA¹⁹⁾ のミラーモード機能を使用して、試験体の全体に対して表示されている。荷重直下で、試験体の上フランジが大きく変形し、ウェブが座屈している。図3.8に示すように、実際の試験体のウェブにも座屈が生じた。上フランジおよびウェブの変形には、上フランジとウェブが交差する部分のフィレットおよび荷重の載荷幅が大きく影響する。これが、試験値と解析値の間で最大荷重が大きく異なった原因である。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) に対する P と支間中央の下フランジ下面に生じる応力 σ_x および σ_y の関係を図3.9に示す。 σ_x と σ_y は、右側の閉断面のウェブ間中央の下フランジの位置の応力である。 P が 900kN を超えると、 σ_y は 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2} = 245.1\text{MPa}$ を超える。これは、平面応力状態に対する von Mises の降伏条件が FEM 解析で使用されているためである。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) の最大荷重時の支間中央のウェブ中立面の σ_y の分布を図3.10に示す。対象ウェブを矢印で示す。試験体は全断面でほぼ塑性している。

以上より、試験体は、荷重直下の局部変形と曲げモーメントによる全体変形によって最大荷重に達したと推定される。

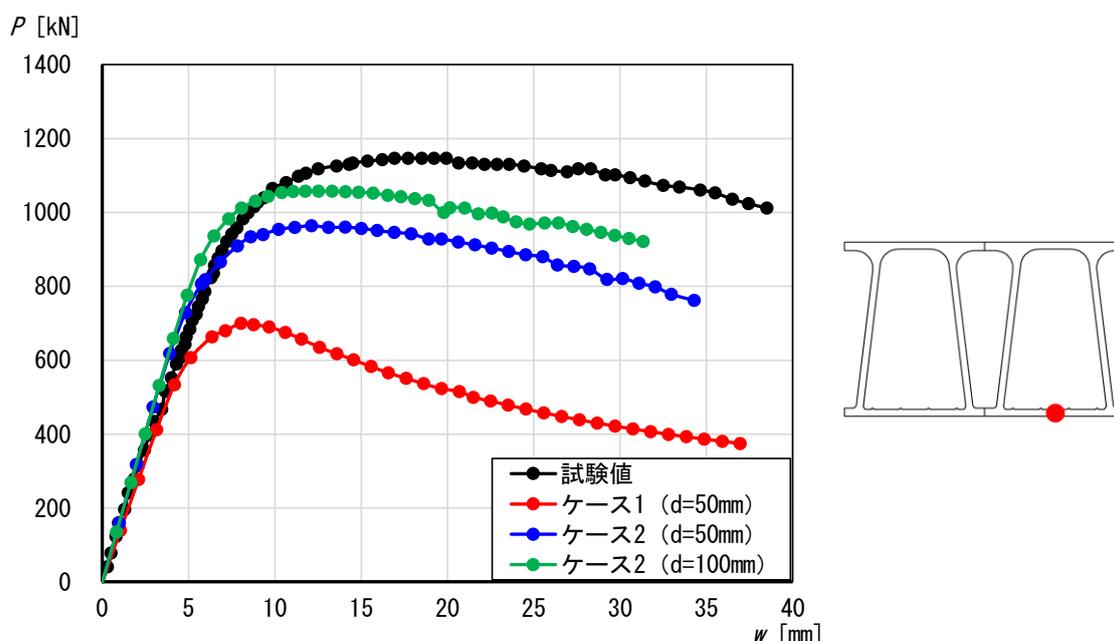
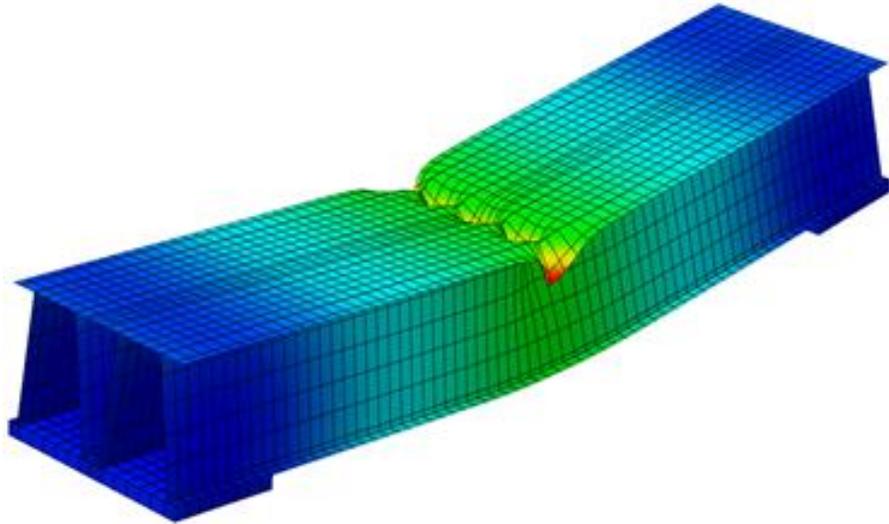


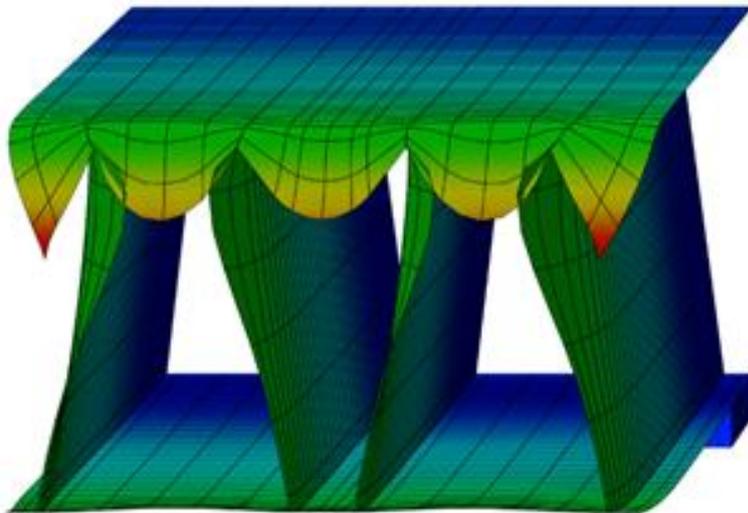
図3.6 荷重 P とたわみ w の関係

表3.2 最大荷重

| 試験値 | ケース1 | ケース2 | |
|--------|-------------------|-------------------|--------------------|
| | $d = 50\text{mm}$ | $d = 50\text{mm}$ | $d = 100\text{mm}$ |
| 1152kN | 700kN | 964kN | 1057kN |



(a) 俯瞰図



(b) 断面図

図3.7 試験体の変形 [ケース2 ($d = 50\text{mm}$)] (変形倍率2倍)

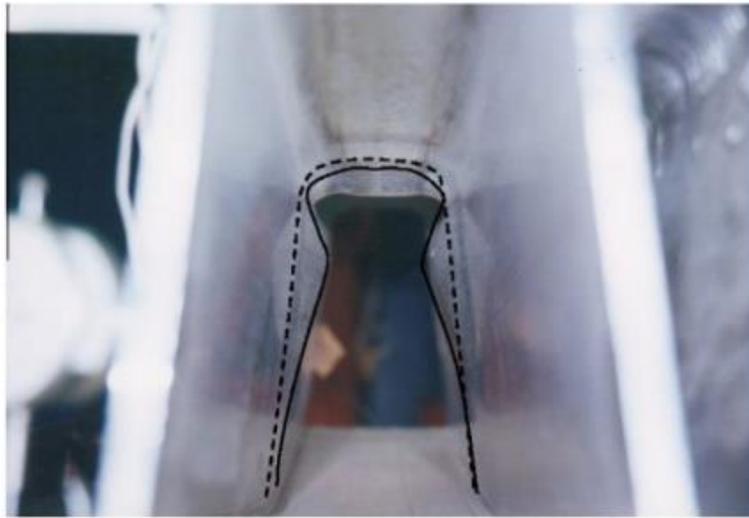


図3.8 試験体の変形

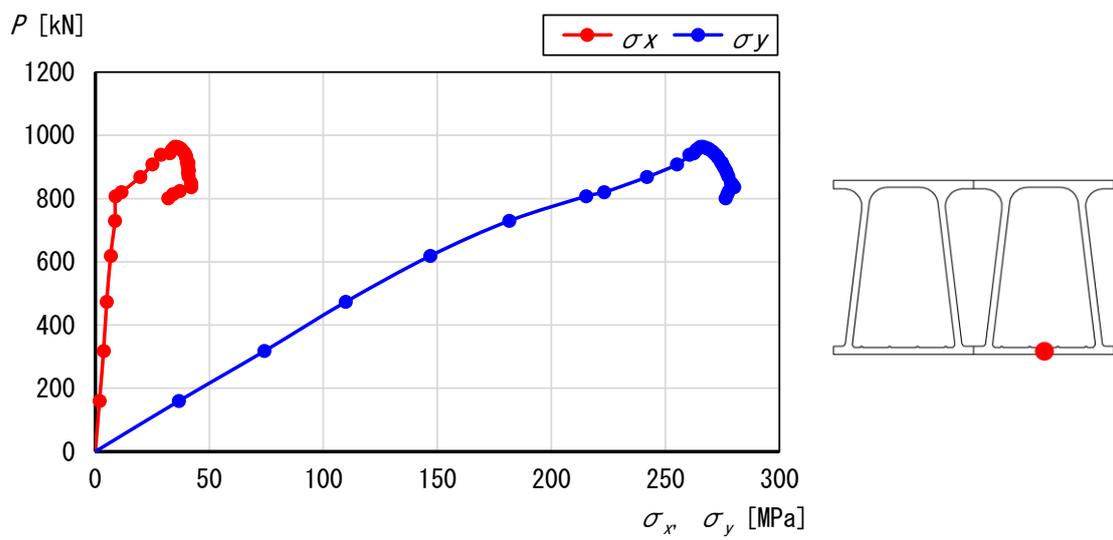


図 3.9 荷重 P と下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係 [ケース 2 ($d = 50\text{mm}$)]

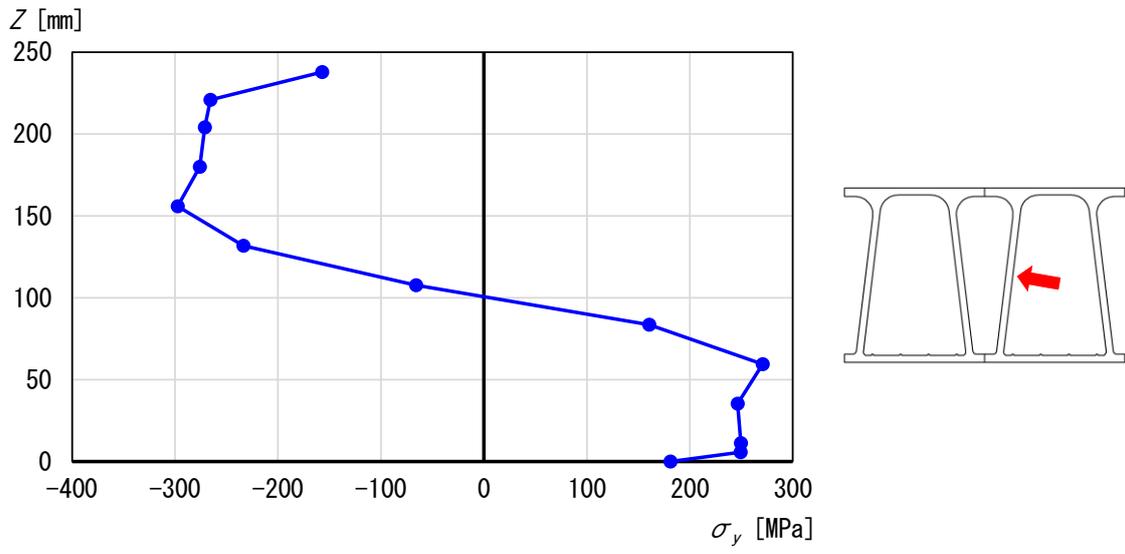


図3.10 ウェブ中立面の σ_y の分布 [ケース2 ($d = 50\text{mm}$)]

3.4 支間長4000mmの試験体モデルの解析

第2章で示した道路橋用アルミニウム床版の適用限界は4000mmである。したがって、図3.2に示す断面形状と同じ断面形状を有する支間長 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルの終局挙動を調べる。 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルの要素分割を図3.11に示す。

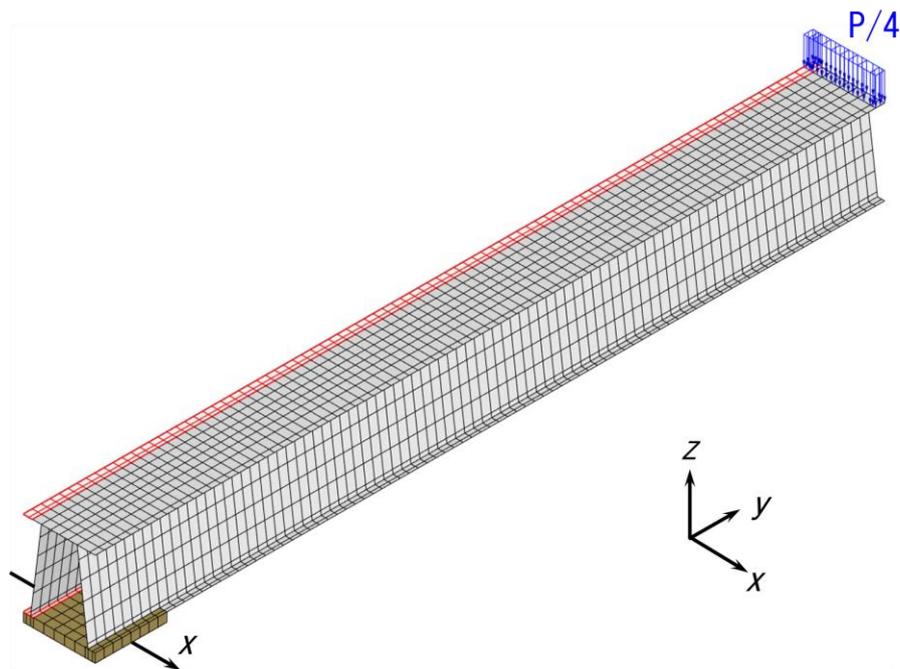


図3.11 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルの要素分割

P と支間中央のたわみ w の関係を図3.12, 最大荷重を表3.3に示す。 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルのケース1 ($d = 50\text{mm}$) とケース2 ($d = 100\text{mm}$) の最大荷重は近い。荷重の載荷幅に対して、ケース2 ($d = 50\text{mm}$) とケース2 ($d = 100\text{mm}$) の最大荷重はほぼ等しい。したがって、 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルでは、フィレットのモデル化や荷重の載荷幅が最大荷重に与える影響は小さくなる。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) の最大荷重時の試験体の変形を図3.13に示す。試験体は、上フランジは変形するが、ウェブは座屈しない。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) の P と支間中央の上フランジの局部変形 δ の関係を図3.14に示す。図3.15を参照して、 δ は次式によって与えられる。

$$\delta = \delta_m - \frac{1}{2}(\delta_{w1} + \delta_{w2}) \quad (3.2)$$

ここに、

δ : 上フランジの局部変形

δ_m : 上フランジのウェブ間中央の鉛直変位

δ_{w1}, δ_{w2} : ウェブの位置の鉛直変位

図3.14から分かるように、最大荷重に達した時の $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルの $\delta = 5\text{mm}$ は、 $L = 1500\text{mm}$ の試験体の $\delta = 16\text{mm}$ よりかなり小さい。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) の P と支間中央の下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係を図3.16に示す。 σ_y は0.2%耐力 $\sigma_{0.2} = 245.1\text{MPa}$ を超える。

ケース2 ($d = 50\text{mm}$) の最大荷重時の支間中央のウェブ中立面の σ_y の分布を図3.17に示す。試験体は全断面で塑性している。

以上より、試験体は、曲げモーメントによる全体変形によって最大荷重に達したと推定される。

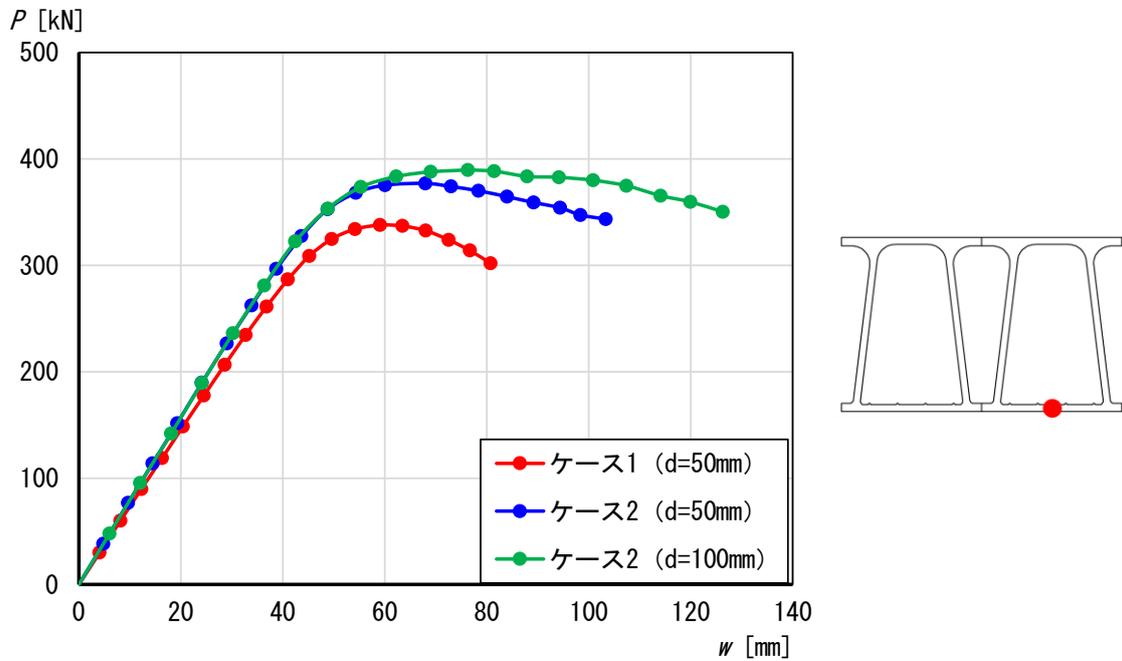
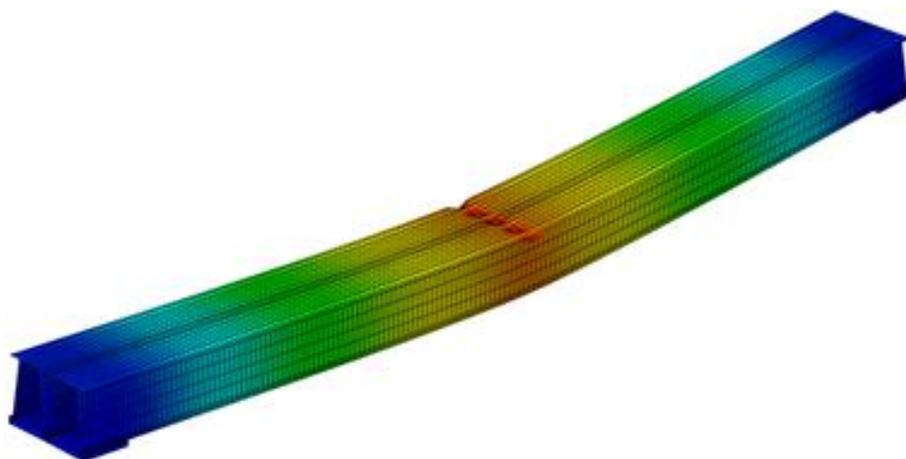


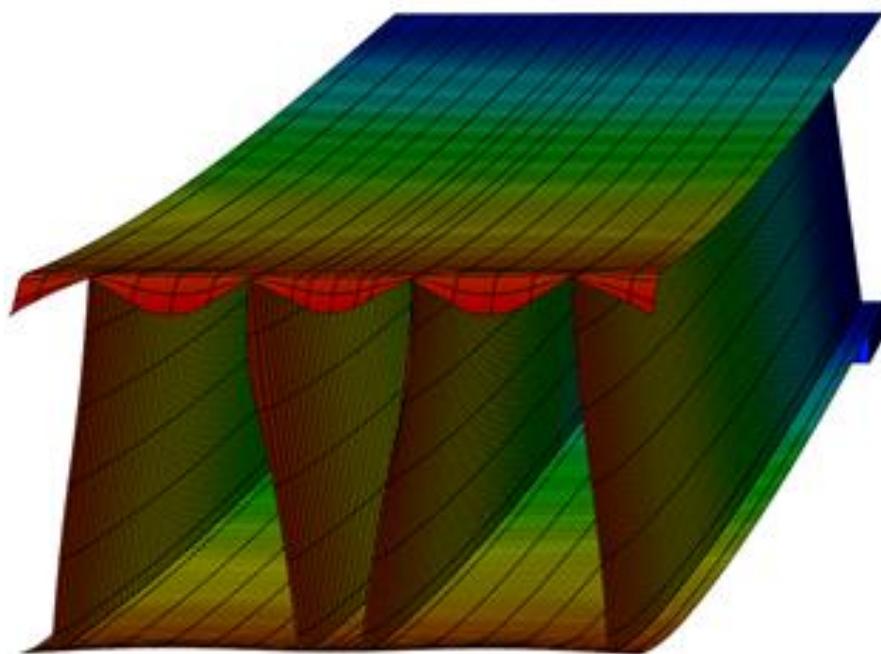
図3.12 荷重 P とたわみ w の関係 [$L = 4000\text{mm}$]

表3.3 最大荷重 [$L = 4000\text{mm}$]

| ケース1 | ケース2 | |
|-------------------|-------------------|--------------------|
| $d = 50\text{mm}$ | $d = 50\text{mm}$ | $d = 100\text{mm}$ |
| 338kN | 377kN | 389kN |



(a) 俯瞰図



(b) 断面図

図3.13 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルの変形 [ケース2 ($d = 50\text{mm}$)] (変形倍率2倍)

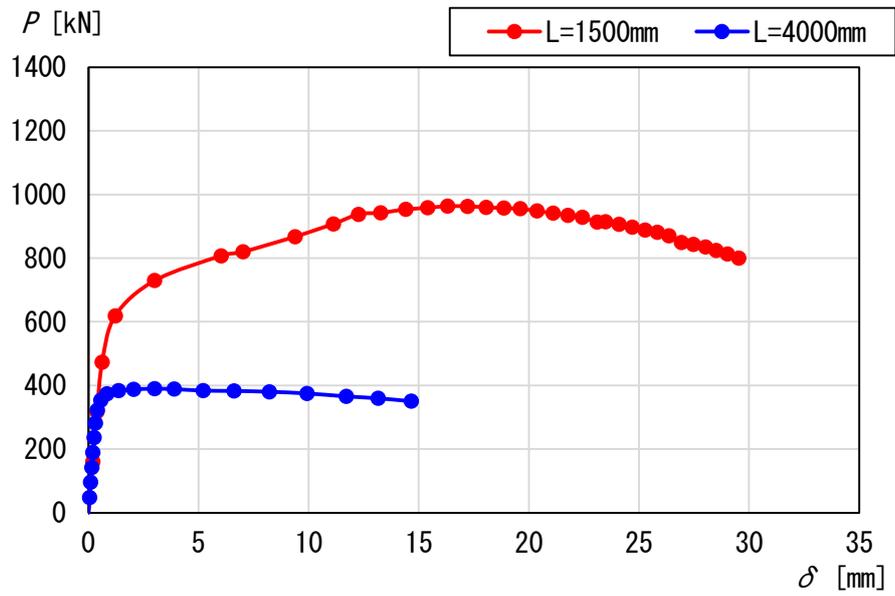


図3.14 荷重 P と上フランジの局部変形 δ の関係 [ケース2 ($d = 50\text{mm}$)]

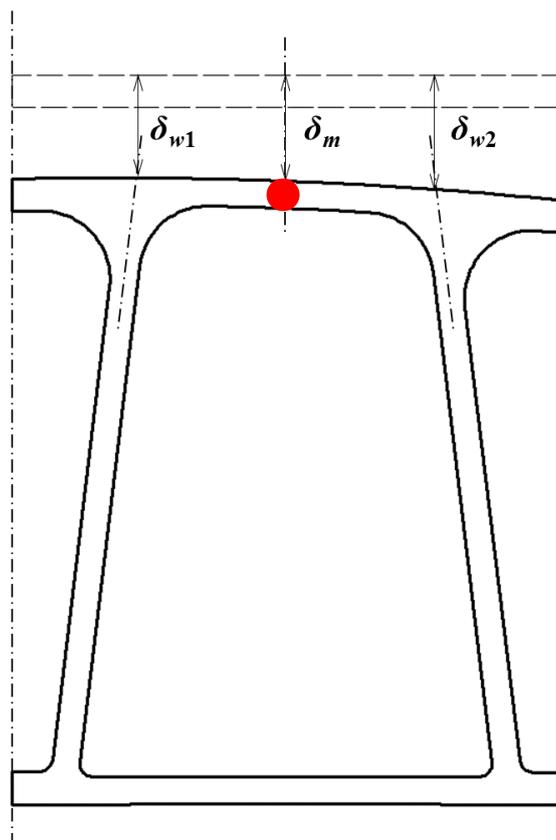


図3.15 上フランジの鉛直変位

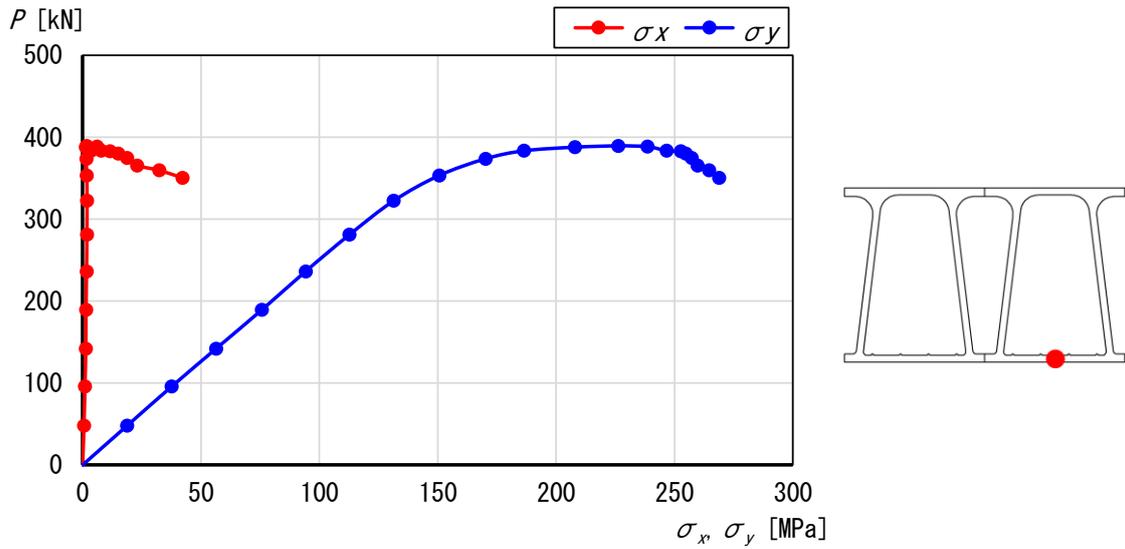


図3.16 荷重 P と下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係 [ケース2 ($d = 50\text{mm}$)]

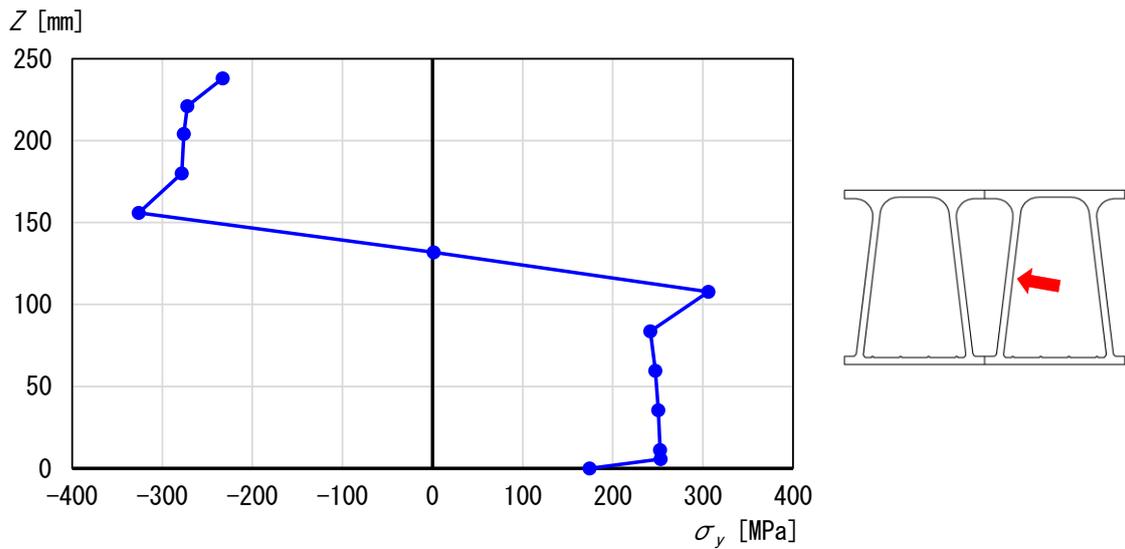


図3.17 ウェブの中立面の σ_y の分布 [ケース2 ($d = 50\text{mm}$)]

第4章では、 $L = 4000\text{mm}$ のアルミニウム床版の終局挙動を調べる。 $L = 4000\text{mm}$ の試験体モデルでは、フィレットのモデル化や荷重の載荷幅が最大荷重に与える影響は小さくなる。したがって、本章で述べた FEM による弾塑性有限変位解析によって、アルミニウム床版の終局挙動を把握することができると思う。

第4章 アルミニウム床版の弾塑性有限変位解析

4.1 解析モデル

図2.2に示す断面形状を有するアルミニウム床版の終局挙動を明らかにするために、FEMによる弾塑性有限変位解析を行う。解析対象を図4.1に示す。支持間隔は、アルミニウム床版の主桁間隔の適用限界すなわち4000mmである¹²⁾。ALST研究レポート No.41¹⁴⁾の図2.7と2.8に示すように、荷重直下から1600mm離れると、アルミニウム床版の鉛直変位および応力がほぼゼロになるので、橋軸方向の長さは、図2.1に示す断面形状を有する押出型材を10本並べる長さとして3200mmとする。

道路橋示方書²⁾に規定される橋軸方向200mm×橋軸直角方向500mmの輪荷重の載荷位置を図4.2に示す。載荷ケースAは、輪荷重がアルミニウム床版の閉断面上に載る場合であり、載荷ケースBは、輪荷重がアルミニウム床版の開断面上に載る場合である。

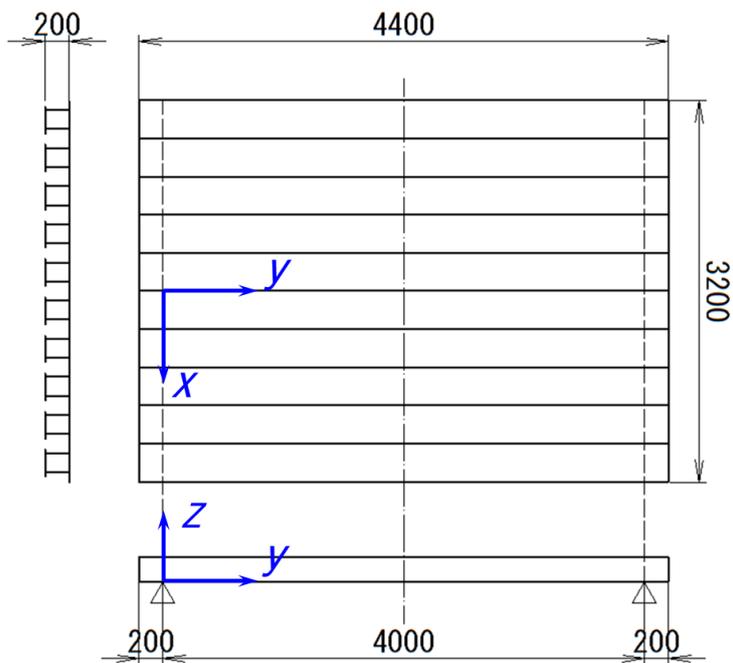
解析対象の要素分割を図4.3に示す。対称性から、解析対象の1/4を要素分割する。FEM解析において、アルミニウム床版が支持される付近で応力をスムーズに流すために、下フランジの下に、幅200mm、厚さ25mmのアルミニウム合金の厚板を挿入する。アルミニウム床版に対する有限要素の形状は、第3章で述べた有限要素の形状と同様であり、1辺の長さが橋軸方向に対して10mmから40mm、橋軸直角方向に対して25mmの長方形である。図中の青色の矢によって示される要素に荷重を面圧として与える。

アルミニウム床版の境界条件を表4.1に示す。アルミニウム床版は主桁によって鉛直支持され、さらに頭付きスタッドによってx軸方向の変位が拘束されると仮定する。したがって、x軸上の厚板の節点に対して、x軸方向の変位とz軸方向の変位を拘束する。アルミニウム床版に対して、図4.4を参照して、対称条件が課せられる、面AB上のアルミニウム床版と厚板の節点に対して、x軸方向の変位、y軸回りの回転とz軸回りの回転を拘束する。同様に、面AD上のアルミニウム床版の節点に対して、x軸回りの回転、y軸方向の変位とz軸回りの回転を拘束する。面CDの境界条件は自由とする。

アルミニウム床版の材料特性を表4.2に示す。ヤング率 E 、ポアソン比 μ および0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)¹⁷⁾に規定される値である。図4.3の赤線の要素に対して摩擦攪拌接合部の材料特性を与え、黒線の要素に対して母材の材料特性を与える。黄緑で表される厚板は、ヤング率 $E=70\text{GPa}$ とポアソン比 $\mu=0.3$ の弾性材料として扱う。

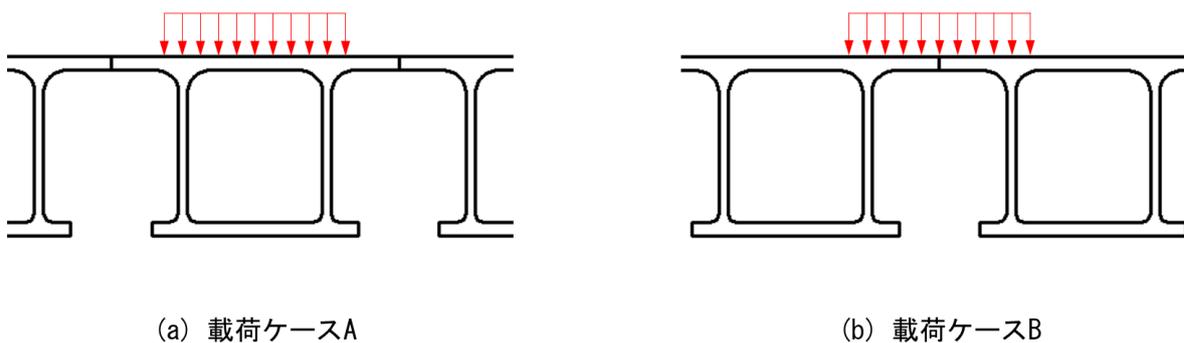
後述するように、1500kNを超える荷重に対しても、図4.3に示すアルミニウム床版は終局状態に至らなかった。そこで、その原因を明らかにするために、図4.5に示すように、押出型材が1本、2本、4本、5本の場合に対しても解析を行う。押出型材の本数と輪荷重の載荷

ケースを表4.3に示す。対称性を考慮して、押出形材が1本と5本の場合に対して載荷ケースA，押出形材が2本と4本の場合に対して載荷ケースBを考慮する。



(単位 : mm)

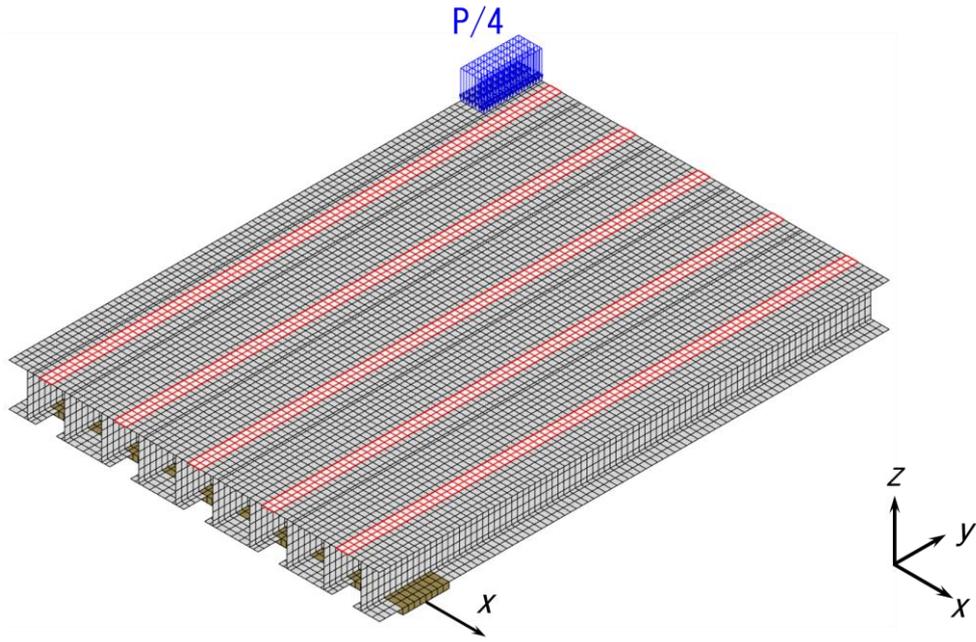
図4.1 解析対象



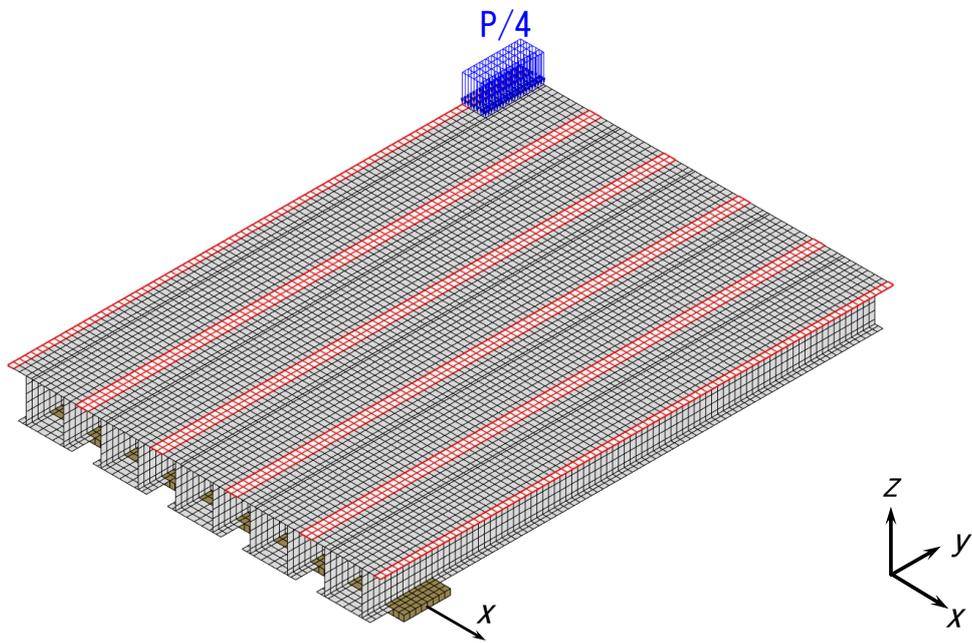
(a) 載荷ケースA

(b) 載荷ケースB

図4.2 輪荷重の載荷位置



(a) 载荷ケース A



(b) 载荷ケース B

図4.3 要素分割 [10本]

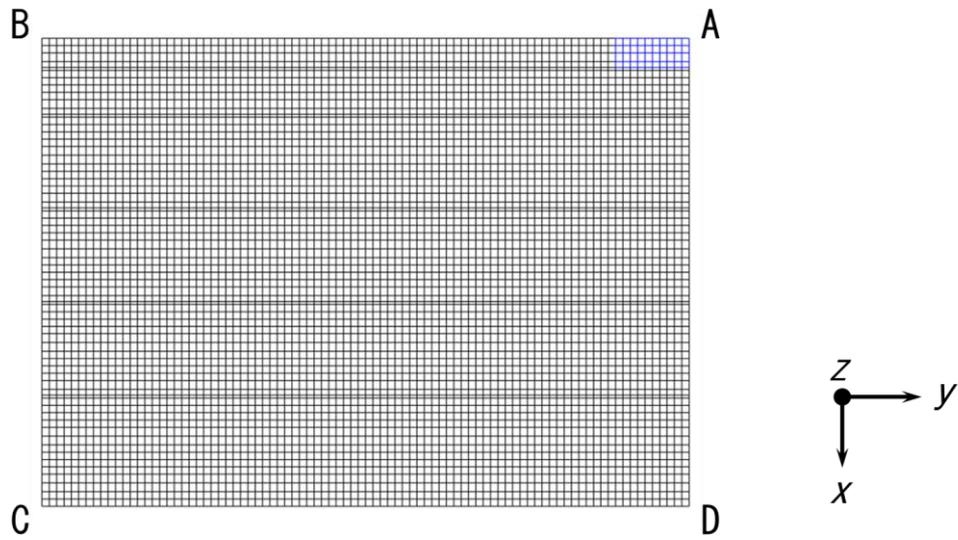


図4.4 対称条件

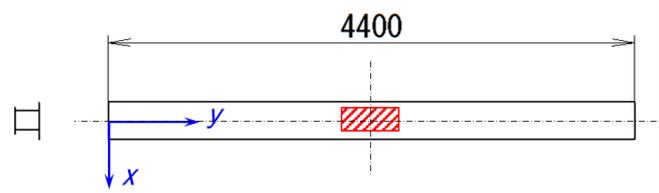
表4.1 アルミニウム床版の境界条件

| | u | v | w | θ_x | θ_y | θ_z |
|--------------|-----|-----|-----|------------|------------|------------|
| 厚板 ($x=0$) | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 面 AB | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 面 AD | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 面 CD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

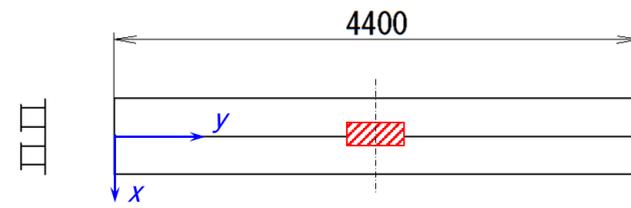
(0 : 自由, 1 : 拘束)

表4.2 アルミニウム床版の材料特性

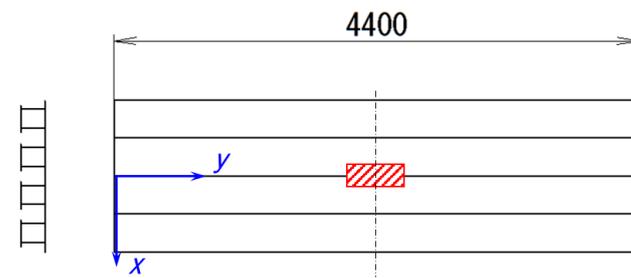
| | E [GPa] | μ | $\sigma_{0.2}$ [MPa] |
|---------|-----------|-------|----------------------|
| 母材 | 70 | 0.3 | 245 |
| 摩擦攪拌接合部 | | | 105 |
| 厚板 | | | - |



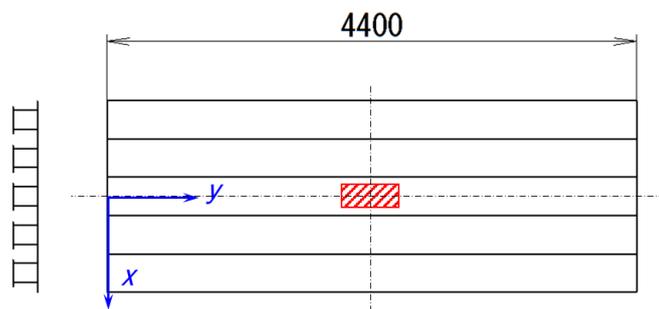
(a) 1本



(b) 2本



(c) 4本



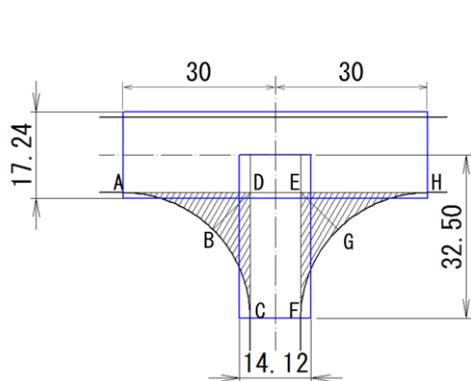
(d) 5本

图4.5 解析对象

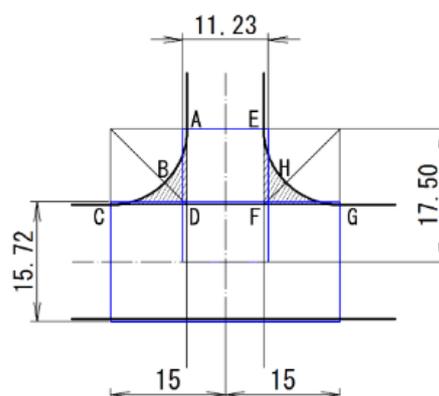
アルミニウム床版の上フランジとウェブが交差する部分、ウェブと下フランジが交差する部分のフィレットに対して、**図4.6**に示すように、各フィレットの面積の半分の面積を各板要素に与え、要素の辺長で除した値を付加して板厚を厚くする。すなわち、上板とウェブが交差する部分のフィレットに対して、**ABD** と **EGH** の面積を上フランジに、**BCD** と **EFG** の面積をウェブに配分する。ウェブと下フランジが交差する部分のフィレットに対して、**ABD** と **EFH** の面積をウェブに、**BCD** と **FGH** の面積を下フランジに配分する。

表4.3 押出型材の本数と輪荷重の荷重ケース

| 押出型材の本数 | 荷重ケース A | 荷重ケース B |
|---------|---------|---------|
| 10本 | ○ | ○ |
| 1本 | ○ | |
| 2本 | | ○ |
| 4本 | | ○ |
| 5本 | ○ | |



(単位 : mm)



(単位 : mm)

(a) 上フランジとウェブが交差する部分
のフィレット

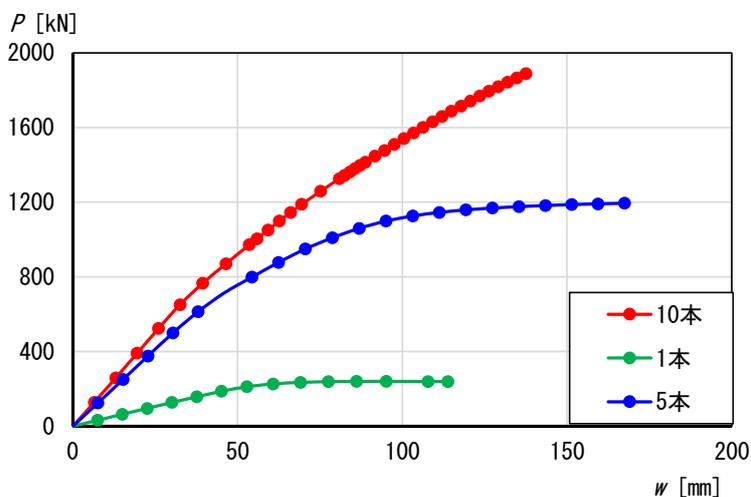
(b) 下フランジとウェブが交差する部分
のフィレット

図4.6 フィレットのモデル化

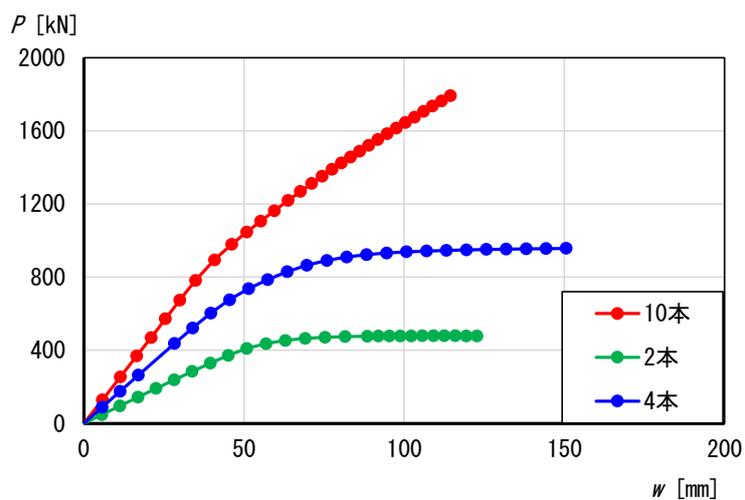
4.2 解析結果

4.2.1 アルミニウム床版のたわみ

荷重 P と支間中央のたわみ w の関係を図4.7に示す。 w は、赤丸で示される下フランジ中央のたわみである。 荷重ケース A では、 押出形材が10本の場合、 $P = 1889\text{kN}$ で解析を強制的に終了させた。 押出形材が5本の場合 $P = 1191\text{kN}$ ， 押出形材が1本の場合 $P = 241\text{kN}$ に達すると、 荷重はそれ以上増えなくなる。 同様に、 荷重ケース B では、 押出形材が10本の場合、 $P = 1791\text{kN}$ で解析を強制的に終了させた。 押出形材が4本の場合 $P = 957\text{ kN}$ ， 押出形材が2本の場合、 $P = 478\text{kN}$ に達すると、 荷重はそれ以上増えなくなる。



(a) 荷重ケース A

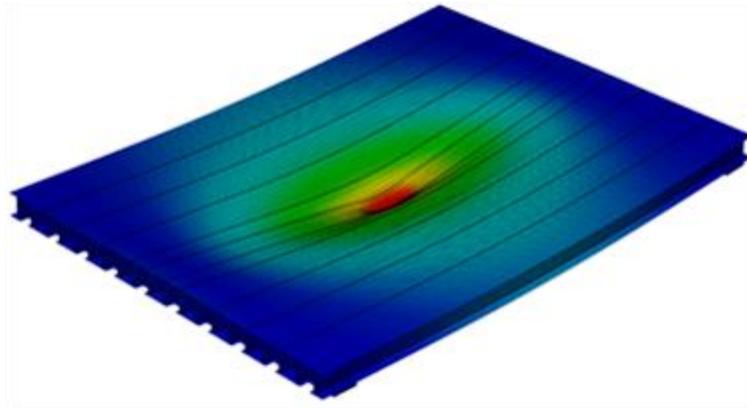


(b) 荷重ケース B

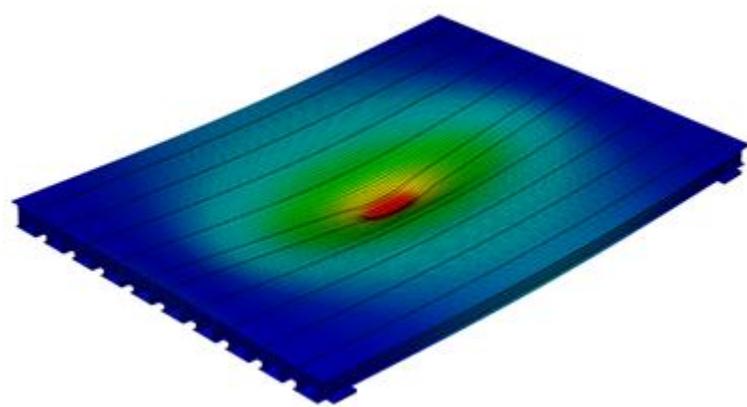
図4.7 荷重 P とたわみ w の関係

4.2.2 アルミニウム床版の変形

最大荷重時のアルミニウム床版の変形を図4.8に示す。荷重ケース A と B ともに、輪荷重直下でアルミニウム床版は大きく局部変形する。



(a) 荷重ケース A



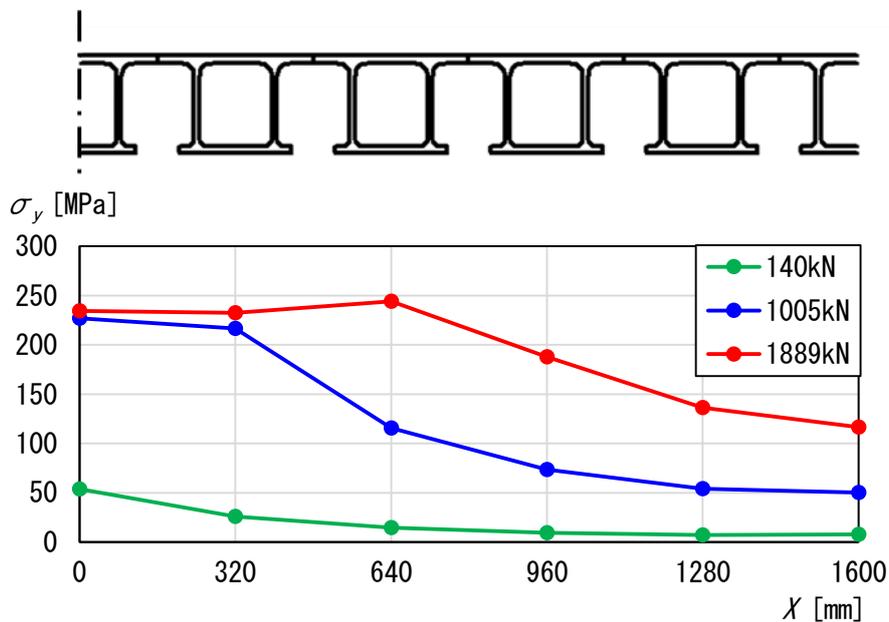
(b) 荷重ケース B

図4.8 アルミニウム床版の変形 [変形倍率2倍]

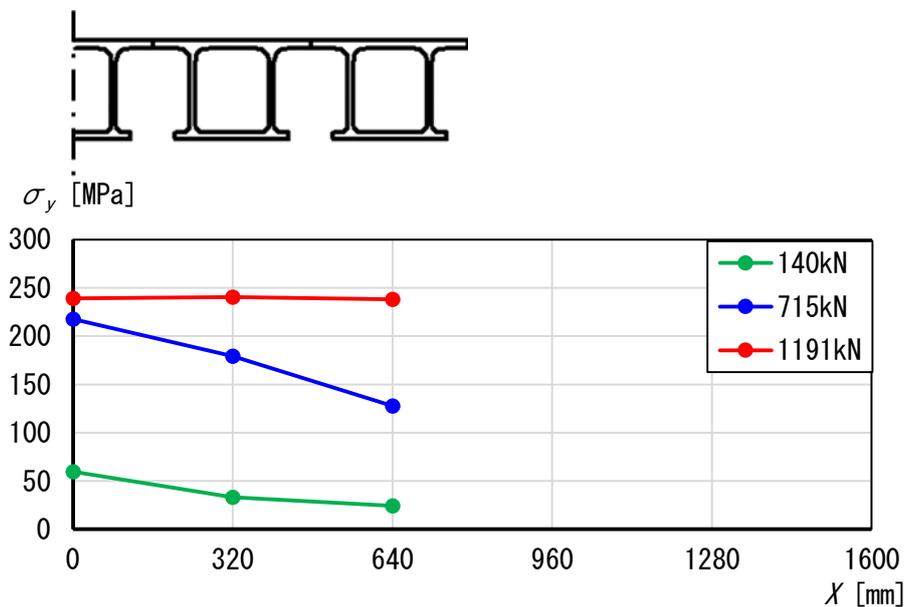
4.2.3 アルミニウム床版下フランジの橋軸直角方向応力

荷重ケース A に対する支間中央のアルミニウム床版の下フランジの橋軸直角方向応力 σ_y の x 軸方向の分布を図4.9に示す。押出形材が10本の場合、 P が増加するに従って、輪荷重に近い押出形材から塑性化する。押出形材が5本の場合、全ての押出形材が塑性化すると、 P の増加は止まる。押出形材が10本の場合も、全ての押出形材が塑性化すると、 P の増加は止まるであろう。荷重 P と支間中央のアルミニウム床版の下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係を図4.10に示す。 σ_x と σ_y は、赤丸で示される下フランジ下面の中央に発生する応力である。

載荷ケース B に対する支間中央のアルミニウム床版の下フランジ下面の σ_y の分布を図 4.11 に示す。荷重 P と支間中央のアルミニウム床版の下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係を図 4.12 に示す。載荷ケース B の結果は、載荷ケース A の結果と同様な傾向を示す。

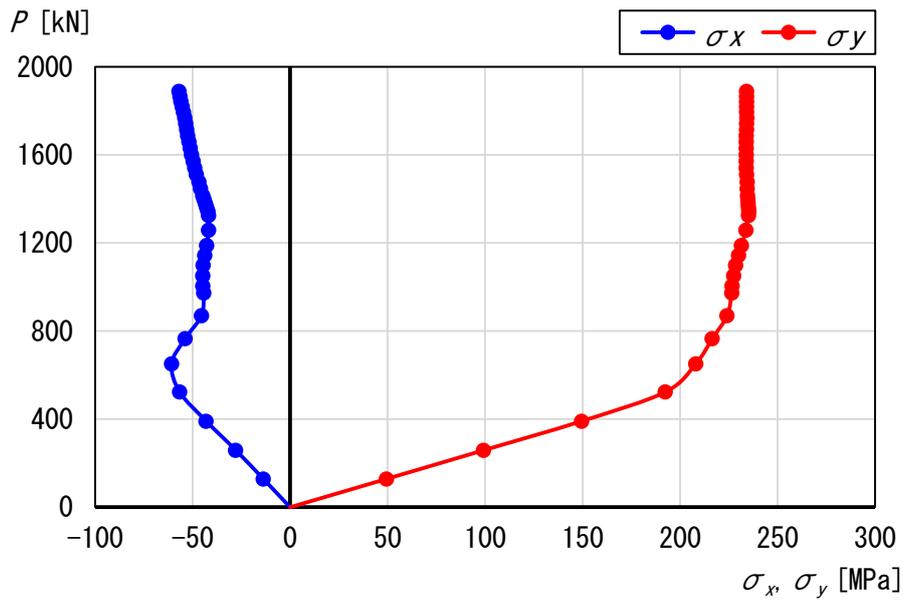
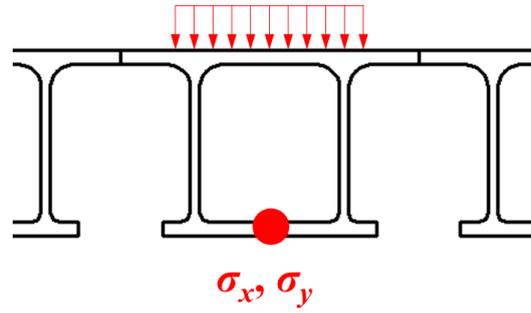


(a) 10本

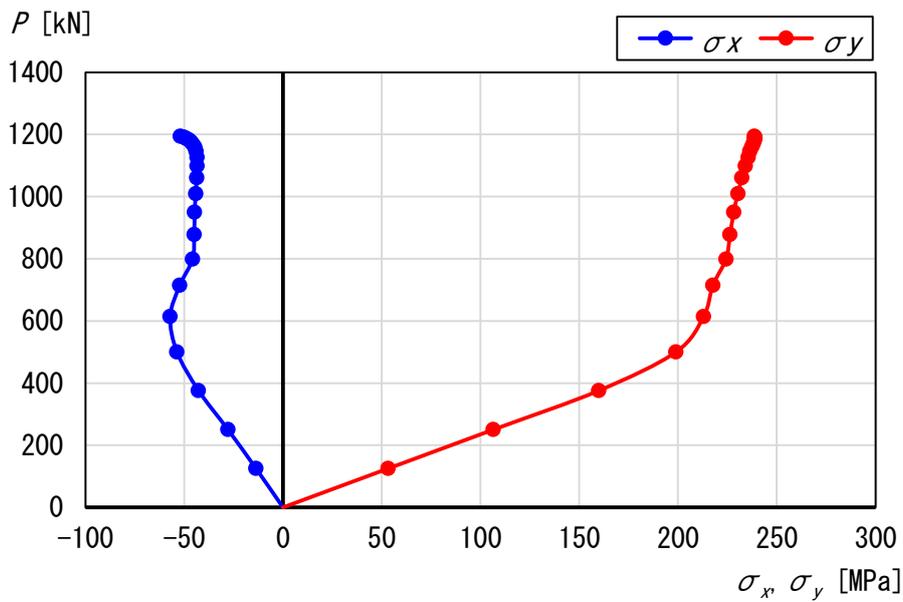


(b) 5本

図4.9 アルミニウム床版の下フランジ下面の σ_y の分布 [載荷ケース A]

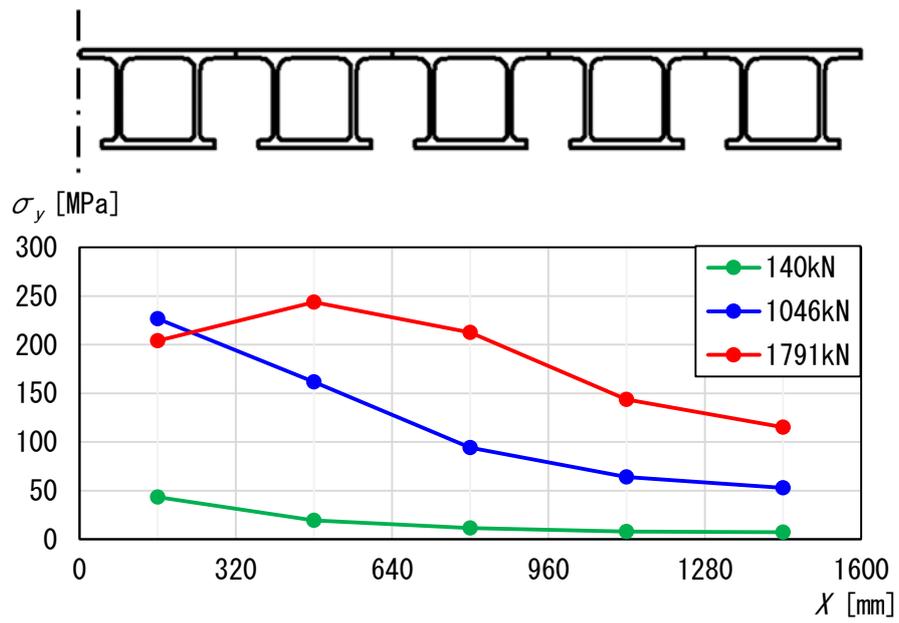


(a) 10本

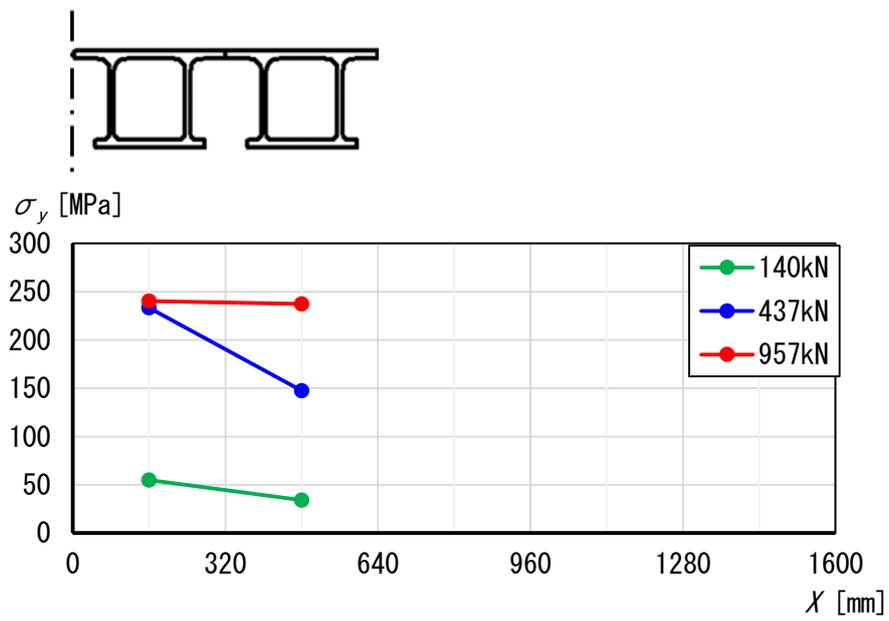


(b) 5本

図4.10 荷重 P と下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係 [载荷ケース A]

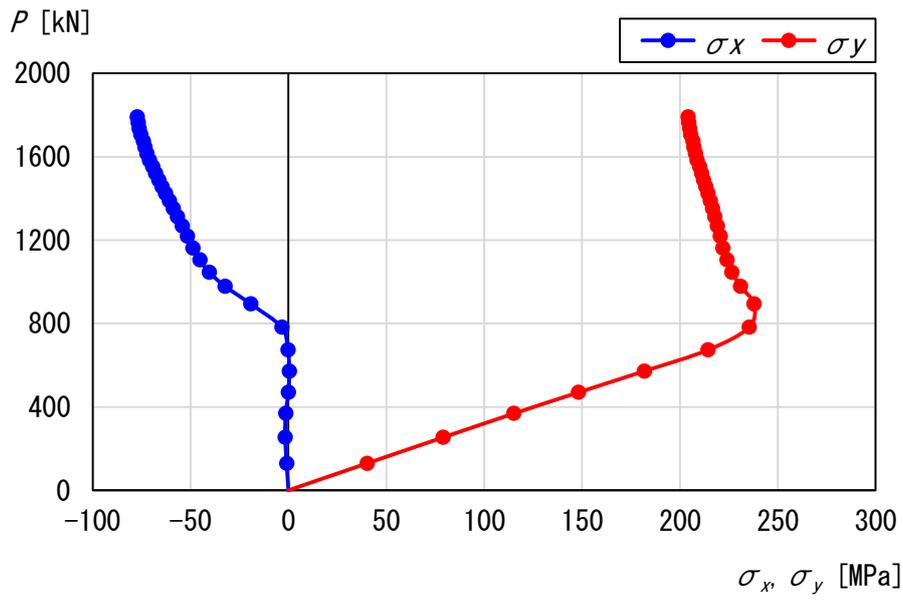
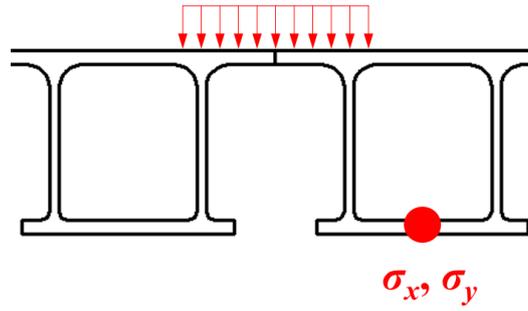


(a) 10本

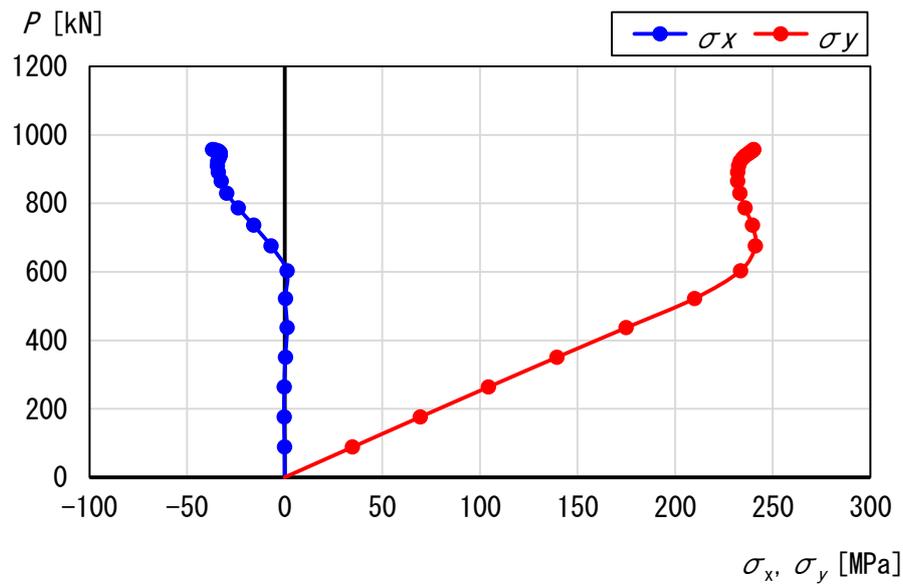


(b) 4本

図4.11 アルミニウム床版の下フランジ下面の σ_y の分布 [載荷ケース B]



(a) 10本

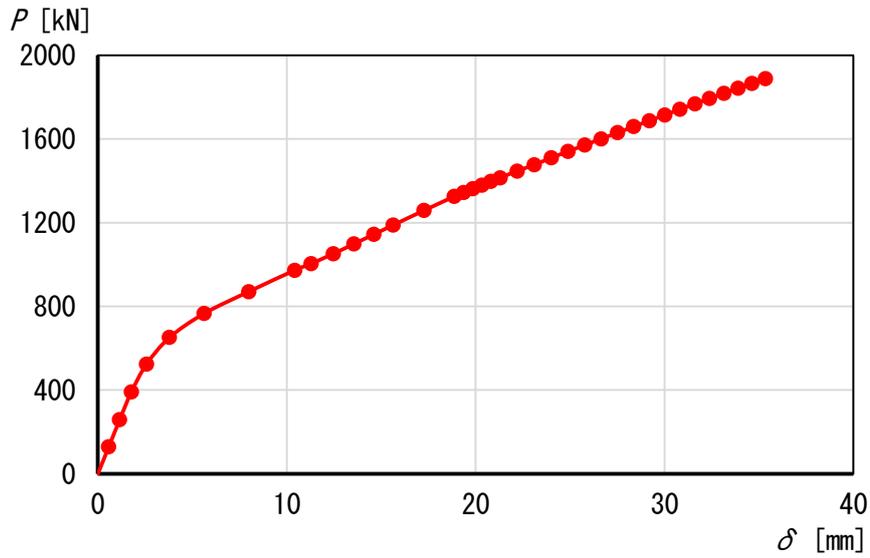


(b) 4本

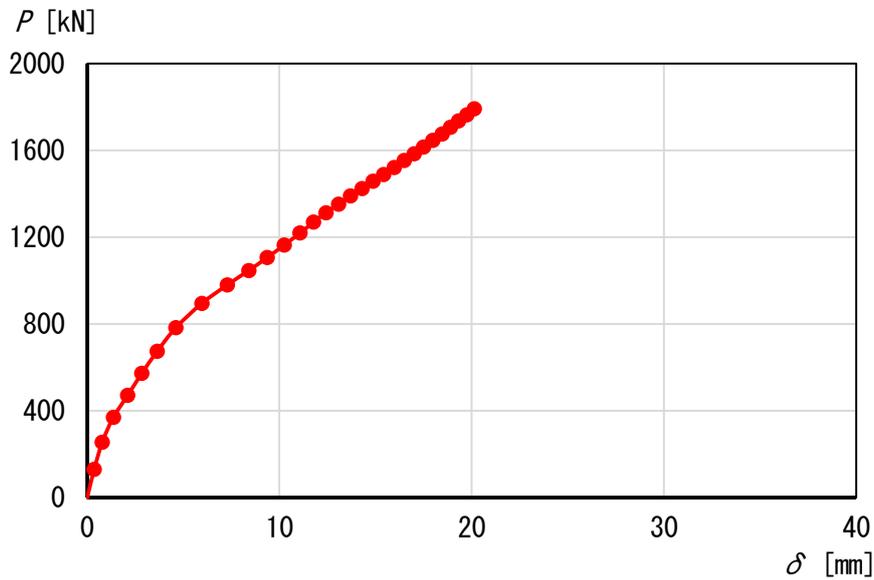
図4.12 荷重 P と下フランジ下面の σ_x および σ_y の関係 [载荷ケース B]

4.2.4 アルミニウム床版上板の局部変形

荷重 P とアルミニウム床版上板の局部変形 δ の関係を図4.13に示す。 δ は、 $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ の輪荷重の中心の位置の上板の局部変形であり、図4.14を参照して、式(3.2)によって与えられる。荷重ケース A の δ が荷重ケース B のそれより大きい。

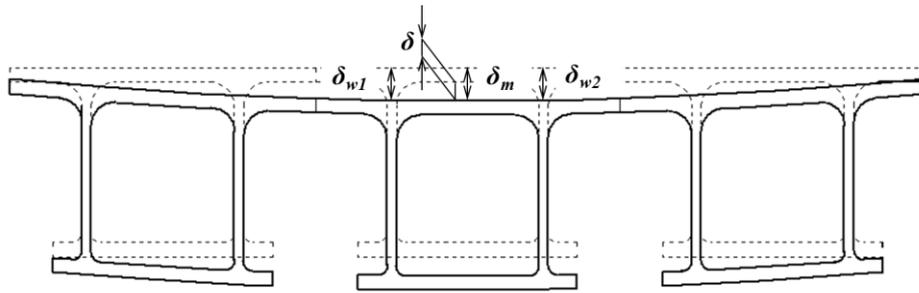


(a) 荷重ケース A

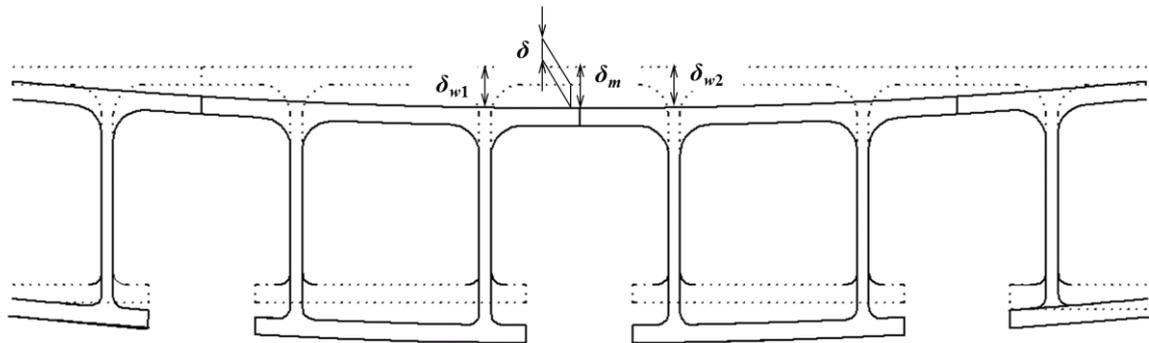


(b) 荷重ケース B

図4.13 荷重 P と局部変形 δ の関係



(a) 荷重ケース A

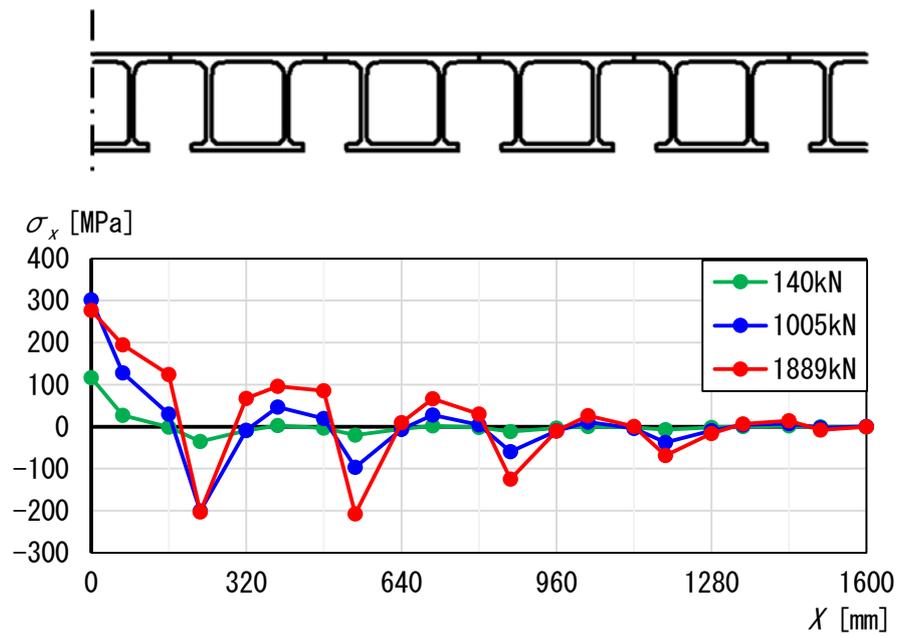


(b) 荷重ケース B

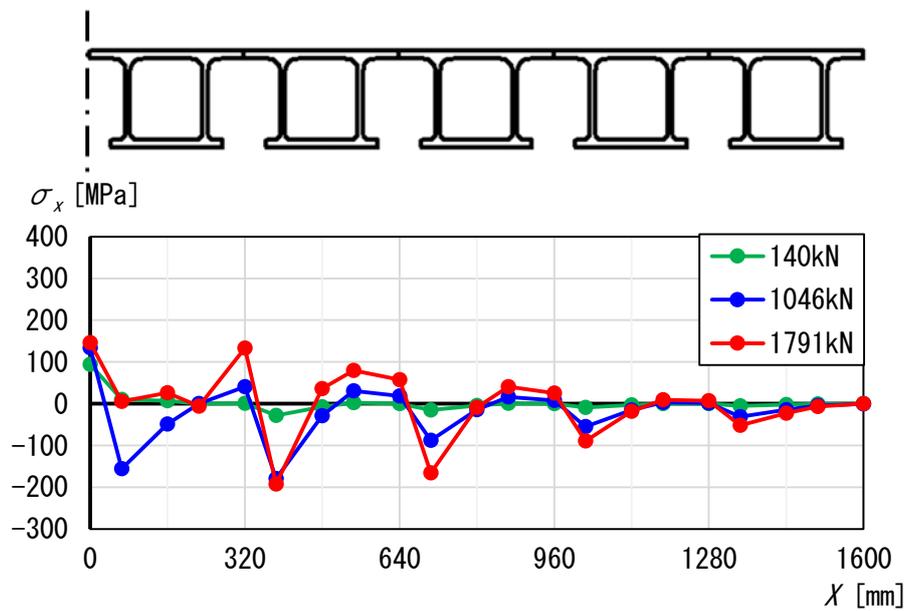
図4.14 局所変形 δ の定義

4.2.5 アルミニウム床版上板の橋軸方向応力

支間中央のアルミニウム床版の上板の橋軸方向応力 σ_x の x 軸方向の分布を図4.15に示す。 σ_x は、アルミニウム床版の上板下面に生じる応力である。荷重 P と輪荷重直下の中心位置の σ_x の関係を図4.16に示す。荷重ケース B に対して、輪荷重直下の σ_x は荷重ケース A のそれより小さい。これは、荷重ケース B の直下には摩擦撈拌接合部が存在し、表4.2に示すように、摩擦撈拌接合部の0.2%耐力は母材のその半分以下であるからである。

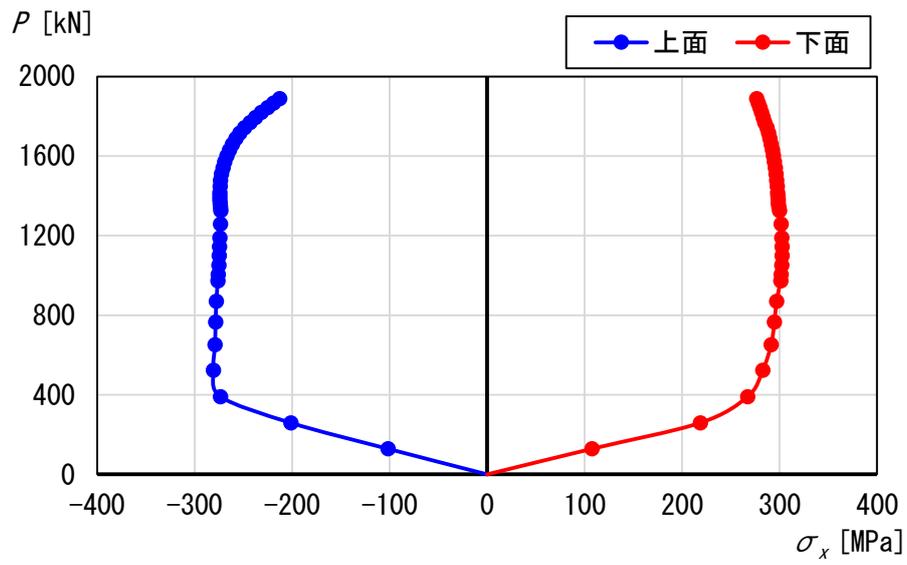


(a) 荷重ケース A

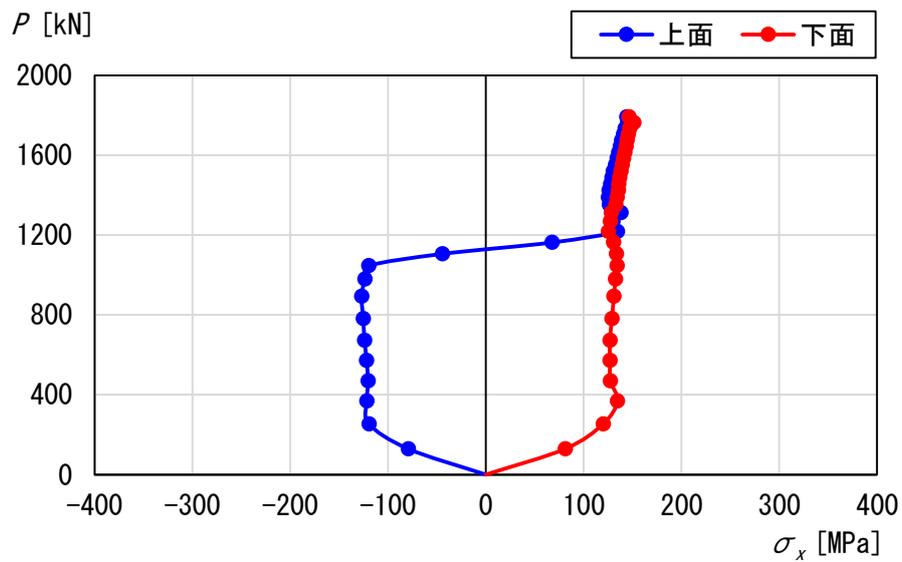


(b) 荷重ケース B

図4.15 アルミニウム床版の上板下面の σ_x の分布



(a) 荷重ケース A



(b) 荷重ケース B

図4.16 荷重 P とアルミニウム床版の上板の σ_x の関係

4.2.6 アルミニウム床版の終局荷重

本解析では有限要素に、平面応力状態に基づいたシェル要素を使用しているため、一様伸び以降を扱うことができない。したがって、ひずみが一様伸びに達した時の荷重を終局荷重と定義する。アルミニウム床版に使用される A6061S-T6の破断伸びは JIS H 4100²⁰⁾で10%以上と規定されている。そこで、10%の破断伸びに対して7%の一様伸びを仮定する。

真ひずみは公称ひずみと次の関係を有する。

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.1)$$

ここに、 ε_t ：真ひずみ、 ε ：公称ひずみ

公称ひずみで表される一様伸び0.07を式(4.1)に代入して、真ひずみ0.068を得る。表3.1に示すように、摩擦撚拌接合部の破断伸びは一般に増加するが、摩擦撚拌接合部に対しても母材と同じ破断伸びを仮定し、真ひずみで表された一様伸びを0.068とする。

アルミニウム床版に大きなひずみが生じる箇所を図4.17に示す。荷重ケース A では、支間中央の開断面の下フランジの下面中央に生じる橋軸直角方向ひずみ ε_y と開断面の上板の下面中央に生じる橋軸方向ひずみ ε_x である。他方、荷重ケース B では、支間中央の開断面の下フランジの下面中央に生じる橋軸直角方向ひずみ ε_y と開断面の上板の下面中央に生じる橋軸方向ひずみ ε_x である。

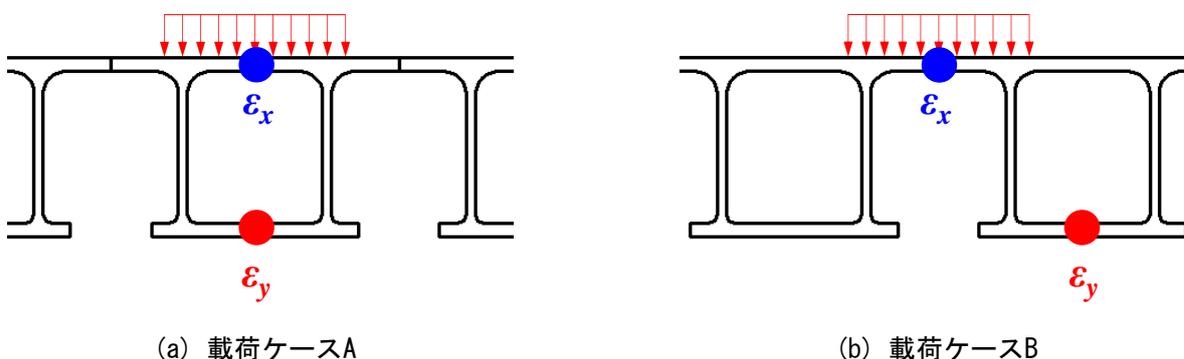
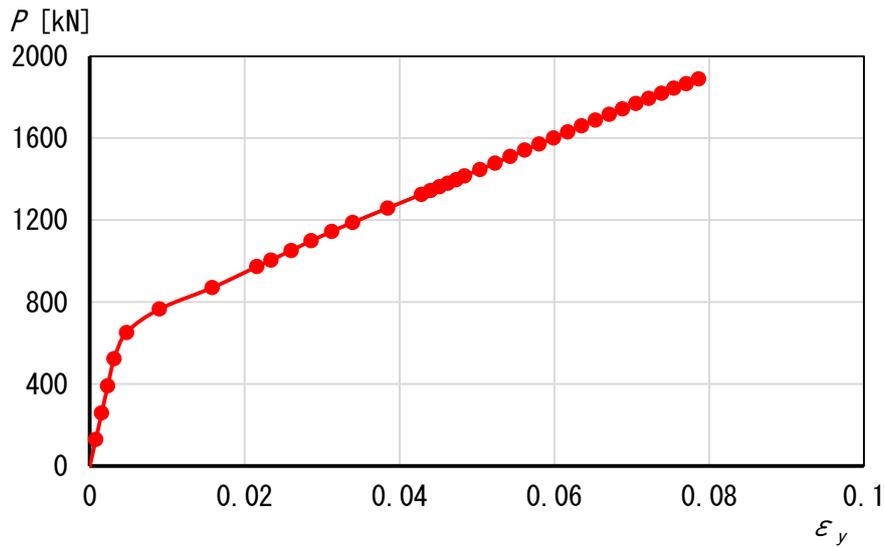


図4.17 大きなひずみが生じる箇所

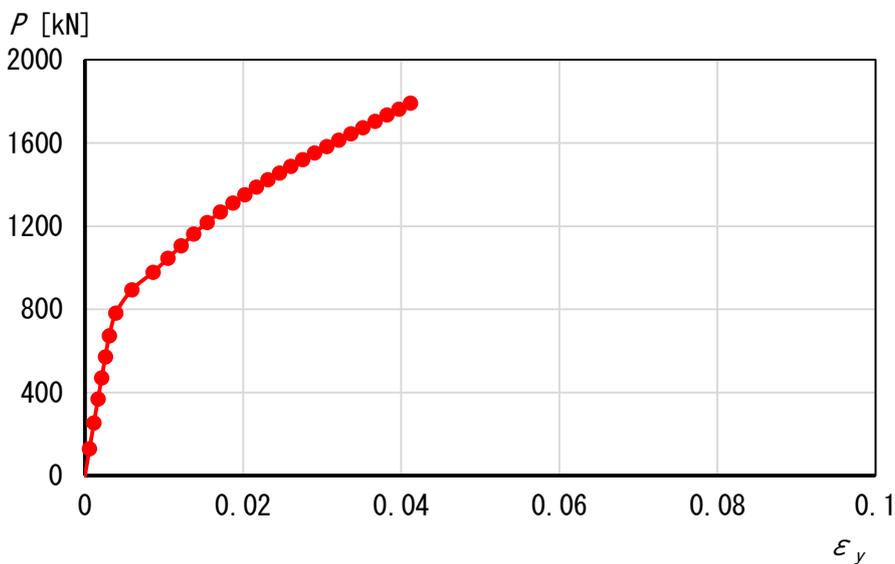
荷重 P と上記の各ひずみの関係を図4.18と4.19に示す。各ひずみが0.068に達した時の荷重を表4.4に示す。図4.18(b)に示すように、荷重ケース B では開断面の下フランジ下面に生じる ε_y は $P = 1743\text{kN}$ で0.068に達しないので、表4.4で“1743kN より大きい”と記している。同表から分かるように、荷重ケース B で開断面の上板下面に生じるひずみ ε_x に対する荷重が最も低い。したがって、アルミニウム床版の終局荷重は865kN である。

ALST 研究レポート No.41¹⁴⁾で示されたように、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⁾で規定される活荷重載荷に対して、アルミニウム床版の上板の橋軸方向に膜応力は生じなかったが、板曲げ応力が生じ、この板曲げ応力は、荷重ケース A に対して許容応力120MPaの1.29倍、荷重ケース B に対して許容応力57MPaの2.14

倍に達した [ALST 研究レポート No.41¹⁴⁾の図3.8(b)と図3.11(b)参照]. 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⁾で規定される輪荷重の大きさは140kNである. アルミニウム床版の終局荷重865kNは輪荷重140kNより6.17倍大きい. したがって, 活荷重載荷による板曲げ応力は, アルミニウム床版の安全性に関して問題とはならない.

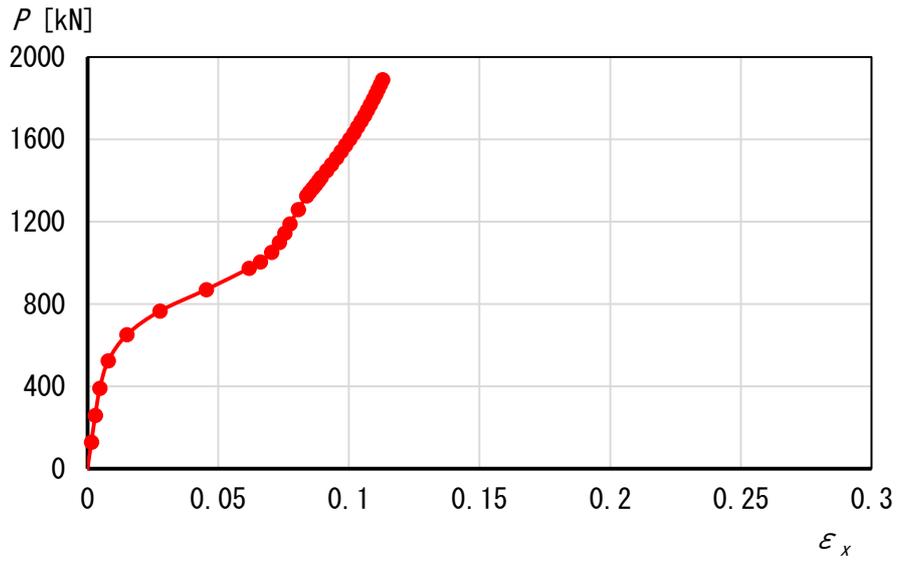


(a) 荷重ケース A

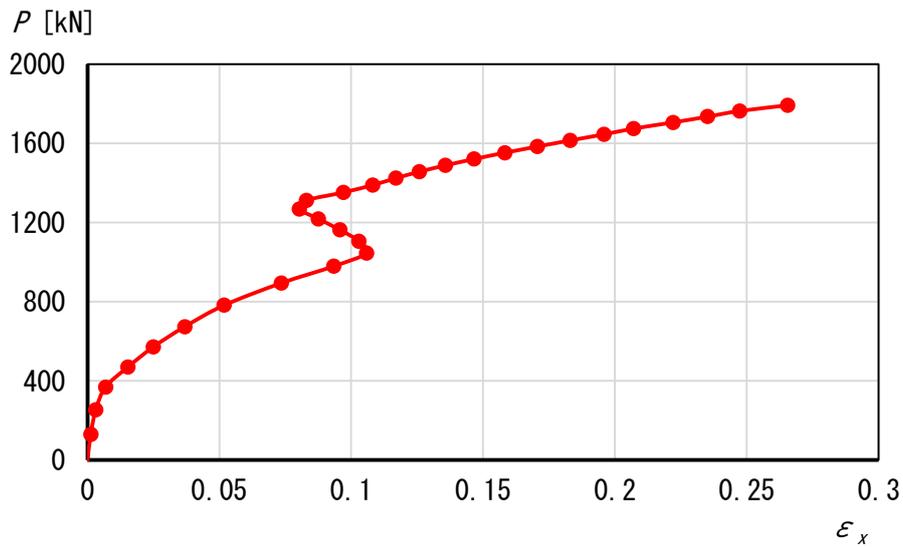


(b) 荷重ケース B

図4.18 荷重 P とアルミニウム床版の下フランジのひずみ ϵ_y の関係



(a) 荷重ケース A



(b) 荷重ケース B

図4.19 荷重 P とアルミニウム床版上板のひずみ ε_x の関係

表4.4 ひずみが0.068に達した時の荷重

| | 荷重ケース A | 荷重ケース B |
|-------|---------|--------------|
| 下フランジ | 1743kN | 1743kN より大きい |
| 上板 | 1025kN | 865kN |

第5章 結論

支間長がアルミニウム床版の主桁間隔の適用限界4000mm で、**図2. 2**に示す断面形状を有するアルミニウム床版の終局挙動を FEM による弾塑性有限変位解析によって調べた。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) アルミニウム床版に使用されるアルミニウム合金 A6061S-T6の一樣伸びを7%と仮定し、ひずみがこれに達した時の荷重を終局荷重と定義した場合、輪荷重直下の開断面の上板下面に生じる橋軸方向ひずみ [**図4. 17 (b)**参照] が最も早く一樣ひずみに達し、その時の荷重は865kN である。したがって、本研究で扱っているアルミニウム床版の終局荷重は865kN である。
- (2) 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⁾で規定される活荷重載荷に対して、アルミニウム床版の上板の橋軸方向に膜応力は発生しなかったが、許容応力を超える板曲げ応力が生じることが ALST 研究レポート No.41¹⁴⁾で示された。しかし、アルミニウム床版の終局荷重865kN は輪荷重140kN より6.17倍大きいので、活荷重載荷による板曲げ応力は、アルミニウム床版の安全性に関して問題とはならない。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会，道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
<http://www.mlit.go.jp/common/001036085.pdf>
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編 Ⅱ解説編，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：摩擦攪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.
- 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.
- 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攪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) 大倉一郎，長尾隆史，豊田英治：道路橋用アルミニウム床版の開発，*橋梁と基礎*，*建設図書*，第50巻，第3号，pp.26-30，2016.
- 14) 重久純平，大倉一郎：斜角が道路橋用アルミニウム床版の発生応力に与える影響，*ALST 研究レポート*，No.41，2015.
- 15) TNO Building and Construction Research: DIANA, Release 9.6, Delft, Netherland, 2015.
- 16) 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.
- 17) 土木学会 鋼構造委員会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案），2015年.

- 18) Vigh, L.G. and Okura, I.: Fatigue behavior of friction stir welded aluminum bridge deck segment, *Materials and Design*, Vol.44, pp.119-127, 2013.
- 19) MIDAS Information Technology Co. Ltd: midas FX+Version 3.3.0, 2014.
- 20) JIS H 4100 : アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材, 2006.