

道路橋用アルミニウム床版の適用支間長

ALST 研究レポート 9

2009 年 5 月

大阪大学大学院工学研究科

大倉一郎，原田祐樹

日本軽金属(株)グループ技術センター

萩澤亘保，長尾隆史

概説

本研究は、これまで開発してきた道路橋用アルミニウム床版に対して、死荷重、活荷重、疲労荷重およびたわみ荷重を満たす、主桁間および張出し部の適用支間長の限界を明らかにする。

2 主桁橋の主桁間の適用支間長は 4000mm まで可能である。しかし多主桁橋の主桁間の適用支間長の限界は 3300mm である。

張出し部の適用張出し長の限界は 1350mm である。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究（B）（研究期間 2007 年度～2008 年度，課題番号 19360202，研究課題名：アルミニウム床版による軽量橋の実現）の研究費補助金を受けた。

目次

第1章	序論	1
第2章	アルミニウム床版の構造	3
第3章	荷重と許容応力	6
3.1	荷重	6
3.1.1	死荷重	6
3.1.2	活荷重	6
3.1.3	疲労荷重	7
3.1.4	たわみ荷重	8
3.2	許容応力と疲労限度	8
3.2.1	許容応力	8
3.2.2	疲労限度	9
3.2.3	モルタル充填開口の疲労限度	10
第4章	2主桁橋のアルミニウム床版の適用支間長	14
4.1	死荷重によって生じる応力	14
4.2	活荷重に対する照査	15
4.2.1	F E Mモデル	15
4.2.2	照査結果	18
4.3	疲労荷重に対する照査	18
4.4	たわみ荷重に対する照査	20
第5章	中主桁上の負曲げモーメントに対する照査	22
5.1	死荷重によって生じる応力	22
5.2	活荷重に対する照査	23
5.2.1	F E Mモデル	23
5.2.2	照査結果	25
5.3	疲労荷重に対する照査	27
5.3.1	モルタル充填開口	28
5.3.2	接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部	29
第6章	アルミニウム床版の適用張出し長	30

6.1	死荷重によって生じる応力	30
6.2	活荷重に対する照査	31
6.2.1	FEM モデル	31
6.2.2	照査結果	32
6.3	疲労荷重に対する照査	34
6.3.1	モルタル充填開口	34
6.3.2	接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部	35
6.3.3	接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部	35
6.4	たわみ荷重に対する照査	37
第7章	結論	38
	参考文献	39
付録 A	FEM 解析における中間支点上の応力の推定方法	41

第 1 章 序論

国土交通省の道路整備の中期ビジョン（案）¹⁾によれば，2006 年現在約 14 万橋あり，そのうち建設後 50 年以上経過した橋梁が 2006 年現在約 8,900 橋あり，2016 年および 2026 年にはそれぞれ約 28,400 橋，約 66,300 橋に達することが予想されている．これらの橋の中には補修が必要な橋梁が数多く出てくることが予想され，鉄筋コンクリート床版の取替えが必要なものも出てくる．

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い橋も出てくる．床版が厚くなれば自重が増加するため，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の約 1/5 のアルミニウム床版で取り替えることにより，これらの問題を解決できないかとの考えが出されている³⁾．新設の際にも，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，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挙げられる．

このような背景で道路橋用アルミニウム床版に関する研究がなされてきた．最初，押出型材を摩擦攪拌接合で接合することにより，図 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⁾．アルミニウム合金土木構造物の摩擦攪拌接合部の品質検査指針（案）⁵⁾では摩擦攪拌接合部を目視検査することが規定されている．しかし閉断面アルミニウム床版では，摩擦攪拌接合部の裏面を目視検査することができなかった．これを解決するために図 2 に示す開閉断面アルミニウム床版が開発された⁶⁾．その後，アルミニウム床版と鋼桁との連結構造⁷⁾，現場継手⁸⁾，地覆定着⁹⁾および摩擦攪拌接合部の疲労強度^{10),11)}に関する研究が行われてきた．そして 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 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¹²⁾．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．

しかし現在国内では，アルミニウム歩道橋^{3),13)}と歩道用アルミニウム床版^{14),15)}は実用に供されているが，道路橋にアルミニウム床版が使用された例はまだなく，道路橋用アルミニウム床版に関する設計基準もまだ制定されていない．

このような状況で，本研究は，アルミニウム床版の適用支間長を明らかにすることを研究目的とする．

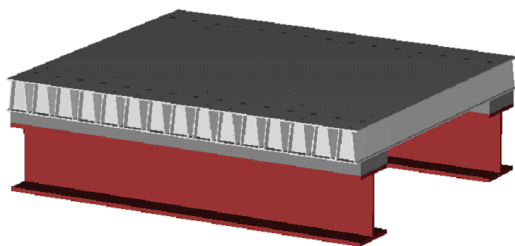


図 1 閉断面アルミニウム床版

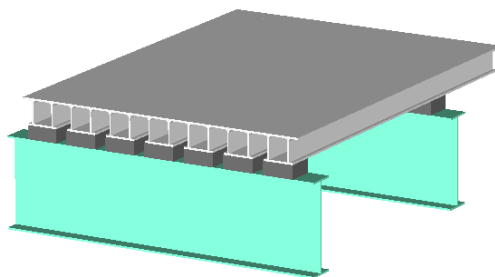


図 2 開閉断面アルミニウム床版

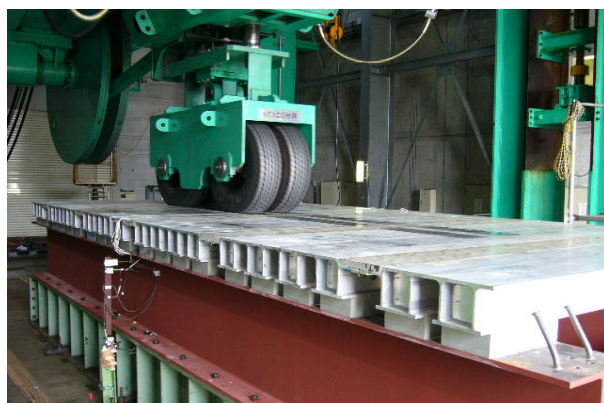


図 3 トラックタイヤ移動載荷疲労試験

第2章 アルミニウム床版の構造

アルミニウム床版を有する鋼桁橋のイメージを図4、アルミニウム床版の断面寸法を図5に示す。アルミニウム床版は複数の鋼主桁上に、開閉断面が橋軸直角方向に並ぶように設置される。床版の材質は A6061S-T6 であり、幅 320mm、高さ 200mm の押出型材を摩擦攪拌接合で接合することによって製作される。鋼床版の舗装には通常グースアスファルトが使用される。しかし、アルミニウム床版の舗装材料には施工温度を 160℃以下に抑え、突起物への充填性が良好なことが要求される。このために、アルミニウム床版には固形エポキシ樹脂を用いたアスファルト舗装が施される¹⁶⁾。床版の両端には鉄筋コンクリート製の地覆が設置される。

アルミニウム床版の断面形状は橋軸方向応力 σ_x に対して摩擦攪拌接合部に疲労亀裂が生じないように設計されている⁶⁾。これに対して、橋軸直角方向応力 σ_y は、活荷重、疲労荷重およびたわみ荷重（アルミニウム床版のたわみを照査する際に用いられる荷重）に対して安全でなければならない。 σ_y は、主桁間隔および張出し長が長くなるに従って大きくなるので、これらの荷重に対して安全な支間長、すなわち適用支間長に限界が存在する。さらに、張出し部の先端ではアルミニウム床版の開断面が開き、 σ_x が大きくなる可能性がある。したがって、張出し部では、 σ_x に対する摩擦攪拌接合部の疲労亀裂に対しても照査する必要がある。

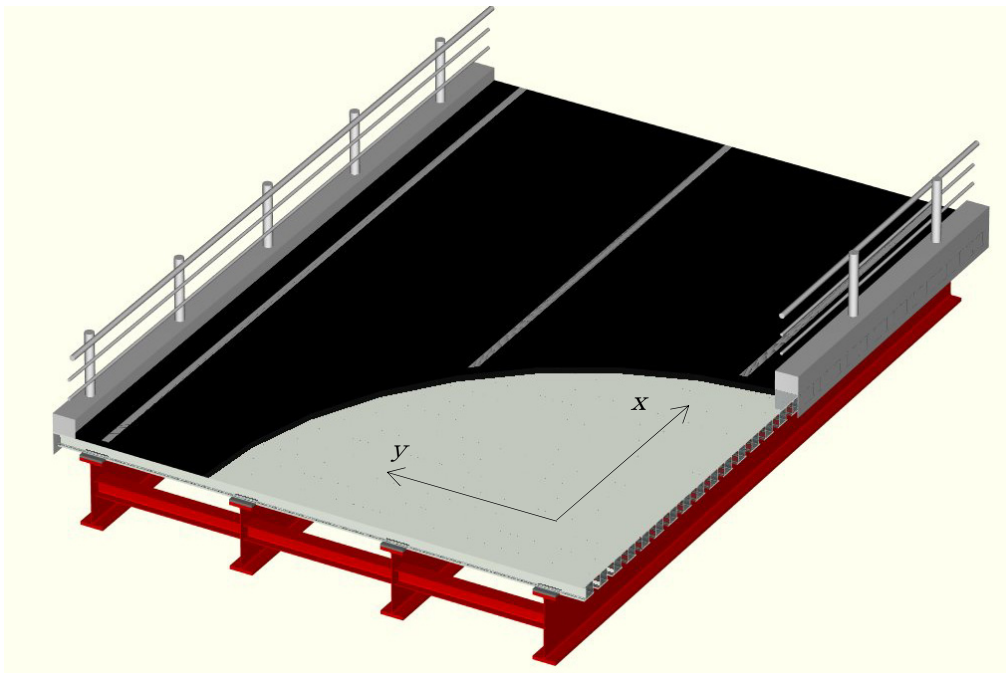


図4 アルミニウム床版を有する鋼桁橋

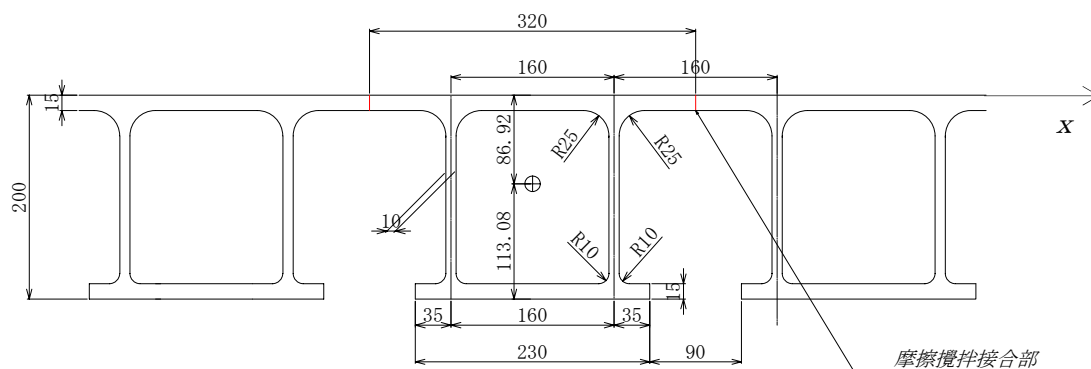


図5 アルミニウム床版の断面寸法

鉄筋コンクリート製地覆の取付け構造を図6に示す⁹⁾。地覆は、U字型鉄筋とナットによってアルミニウム床版の開断面部の上板に固定される。地覆に不慮に大きな衝突荷重が作用した際に、アルミニウム床版に残留変形を残さないようにするために、鋼製座金とアルミニウム床版の上板との間には80×80×20 mmのアルミニウム板が挿入される。

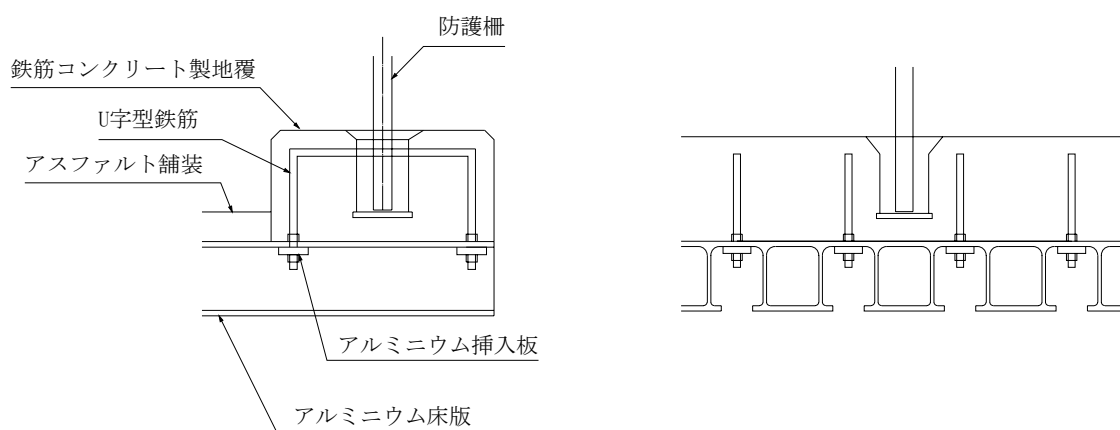


図6 鉄筋コンクリート製地覆のアルミニウム床版への取り付け構造

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図7に示す⁷⁾。鋼桁に溶植されたスタッドをアルミニウム床版の開断面内に挿入し、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は鋼桁に連結される。床版の上板にはモルタルを充填するために、直径50mmの円孔が開けられている。円孔の応力集中係数は3である。張出し部に荷重が載った場合および多主桁橋の場合、中主桁上にこのような円孔が存在すると、円孔から疲労亀裂が発生する可能性がある。したがって、本研究では、モルタル充填のための開口部の面積を小さくし、さらに応力集中を抑えるために、図8に示すような、応力集中係数が2.07になる、両端を丸めたみぞ形状の開口について考える。

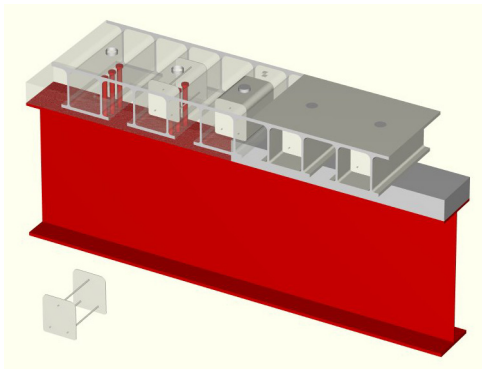


図7 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

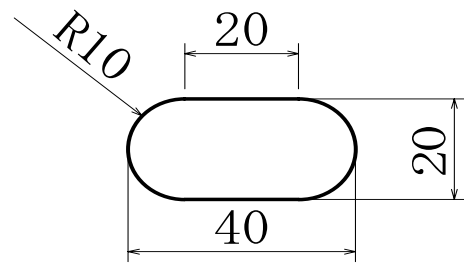


図8 モルタル充填開口

第 3 章 荷重と許容応力

3.1 荷重

3.1.1 死荷重

アルミニウム床版に作用する死荷重を表 1 に示す．アルミニウム床版の死荷重は，図 9 に示す押出型材 1 本の長さ 1m 当りの値，高欄の死荷重は橋軸方向 1m 当りの値，アスファルト舗装と地覆（鉄筋コンクリート）に関しては密度を示している．

表 1 死荷重

材料	重量
アルミニウム床版(断面積 12271mm^2)	325N/m
アスファルト舗装	22.5kN/m^3
地覆（鉄筋コンクリート）	24.5kN/m^3
高欄	500N/m

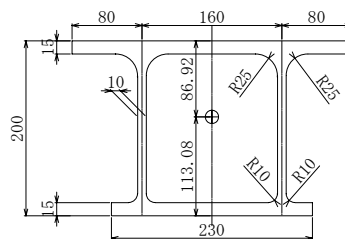


図 9 アルミニウム床版の断面図

3.1.2 活荷重

活荷重を図 10 に示す．活荷重は道路橋示方書²⁾に規定される T 荷重に従い，橋軸方向 200mm，橋軸直角方向 500mm の長方形の領域に載荷する．衝撃係数 0.4 を考慮して，1 つの長方形に 140kN ($=100\text{ kN} \times 1.4$) を載荷する．荷重の組み合わせは橋軸方向に 1 組，橋軸直角方向にできる限り多く載荷し，荷重と荷重との間隔を 500mm とする．

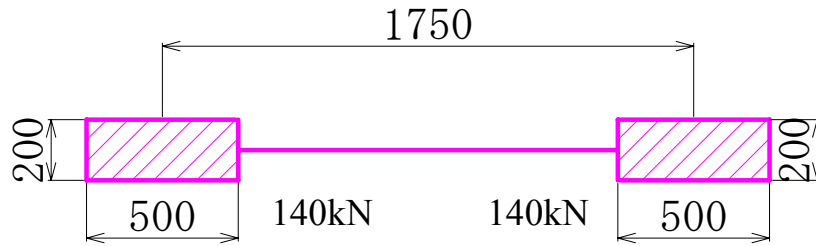


図 10 活荷重

3.1.3 疲労荷重

疲労荷重を図 11 に示す。これは、トラックの後輪 2 軸をモデル化している。後輪 2 軸のタイヤは複輪で、左右の複輪タイヤの中心間隔は 1750mm、前軸と後軸の間隔は 1300mm である。道路橋示方書²⁾の T 荷重の総計 100kN に対して、タイヤ 1 輪当たりの荷重は 25kN になる。さらに、鋼道路橋の疲労設計指針¹⁷⁾に従って、道路橋示方書²⁾で規定される衝撃係数 0.4 の半分の 0.2 を考慮して、タイヤ 1 輪の荷重を 30kN ($= 25 \times 1.2$) とする。荷重の組み合わせは橋軸方向に 1 組、橋軸直角方向にできる限り多く載荷し、荷重と荷重との間隔を 500mm とする。

図 11 のタイヤ 1 輪の形状を図 12 に示す。タイヤは樽型の形状を示し、その接地半径は荷重とタイヤの空気圧によって次式で与えられる¹⁸⁾。

$$r = \frac{1000P}{485.7(\alpha_1 P + \alpha_2)} + 33.7 \quad (1)$$

ここに、 r ：タイヤの接地半径（単位 mm）

P ：タイヤ 1 輪に作用する荷重（単位 kN）

α_1 と α_2 ：トラックタイヤの空気圧から決まる定数

トラックタイヤの空気圧に対して標準空気圧 700kPa を採用する。これに対して $\alpha_1 = 7.707 \times 10^{-3}$ 、 $\alpha_2 = 0.434$ であり¹⁸⁾、 $P = 30$ kN を式(1)に代入して、 $r = 126.5$ mm を得る。

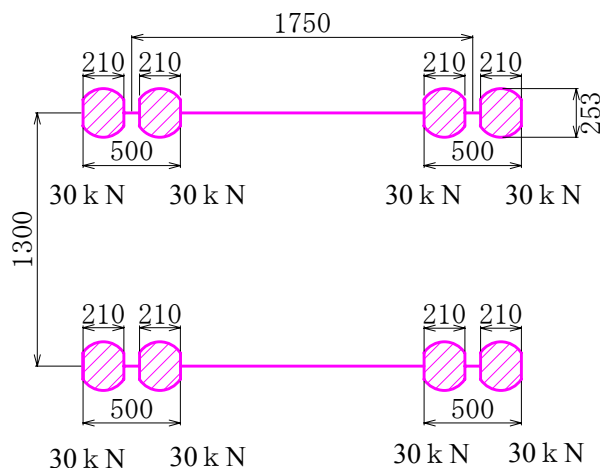


図 11 疲労荷重

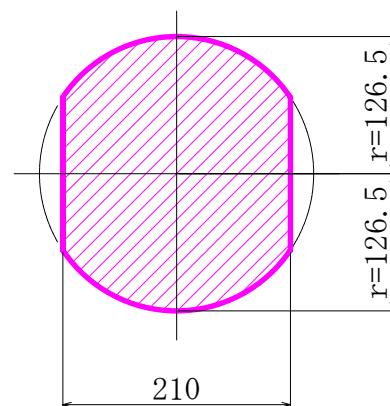


図 12 トラックタイヤの接地半径

3.1.4 たわみ荷重

道路橋示方書²⁾には、床版のたわみに関する規定はない。しかし床版がたわみ過ぎると、床版が振動を起こすことが懸念されるので、アルミニウム床版に対してたわみに関する規定を設ける。

アルミニウム床版に対するたわみの規定として、道路橋示方書²⁾で規定される鋼桁に対するたわみ規定を準用する。コンクリート床版以外の床版を有する鋼桁のたわみの許容値は、単純桁に対して $L/500$ (L は桁支間長)、ゲルバー桁の片持部に対して $L/300$ (L はゲルバー桁の片持長さ) である。したがって、アルミニウム床版のたわみの許容値は、主桁間に対して $L/500$ (L は主桁間隔)、張出し部に対して $L/300$ (L は張出し長) とする。

アルミニウム床版のたわみを照査する際に使用する荷重、すなわちたわみ荷重を図 13 に示す。疲労荷重と同様に、後輪 2 軸を前軸と後軸に分ける。そして活荷重と同様に、橋軸方向に 200mm、橋軸直角方向に 500mm の長方形の領域に輪荷重 50kN を載荷する。道路橋示方書²⁾に従って、たわみを照査する際には衝撃係数を考慮しない。荷重の組み合わせは橋軸方向に 1 組、橋軸直角方向にできる限り多く載荷し、荷重と荷重との間隔を 500mm とする。

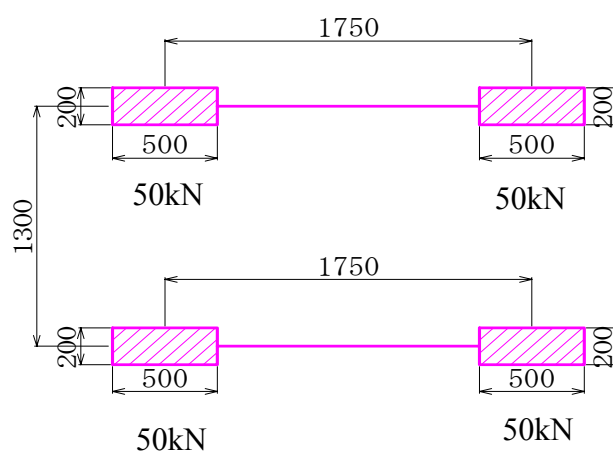


図 13 たわみ荷重

3.2 許容応力と疲労限度

3.2.1 許容応力

アルミニウム床版の母材は A6061S-T6 であり、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案 (JAA 指針)¹⁹⁾の規定に従って、その許容応力は 120MPa である。

アルミニウム床版の上板には摩擦攪拌接合部があり、その熱影響範囲の強度は低下する。

したがって、次式によってその強度低下を考慮する²⁰⁾。

$$\sigma_{pa} = \sigma_a - \frac{A_j}{A}(\sigma_a - \sigma_{ja}) \quad (2)$$

ここに、 σ_{pa} : 部材軸に平行な方向に摩擦撹拌接合されている部材の許容応力

σ_a : 母材の許容応力

σ_{ja} : 摩擦撹拌接合部の熱影響範囲の許容応力

A : 部材の全断面積

A_j : 摩擦撹拌接合部の熱影響範囲の断面積

図 9 に示すように、押出型材 1 本の上フランジの幅は 320mm であり、その両側が摩擦撹拌接合によって接合される。摩擦撹拌接合部の熱影響範囲が 1 インチルール²⁰⁾ (MIG 溶接による突合せ溶接部の熱影響範囲が溶接中心から左右各側 1 インチすなわち 25mm である。)に従うとすると、摩擦撹拌接合部の熱影響範囲は、押出型材 1 本の上フランジ幅 320mm に対して 50mm である。さらに摩擦撹拌接合部の熱影響範囲の許容応力に対して、JAA 指針¹⁹⁾で規定される MIG 溶接部の熱影響範囲に対する許容応力 59MPa を採用する。押出型材の板厚が 15mm であるので、 $A = 4800 \text{ mm}^2$ 、 $A_j = 750 \text{ mm}^2$ であり、さらに $\sigma_a = 120 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{ja} = 59 \text{ MPa}$ であるので、アルミニウム床版の上板の許容応力は式(2)より 110MPa である。

アルミニウム床版の上板にモルタル充填開口が設けられる場合、さらに許容応力が低下する。これに対して、モルタル充填開口の許容応力を 0 と考えれば、押出型材 1 本の上フランジ幅 320mm に対して、図 8 に示す 20mm の幅の開口を一つ設けるので、式(2)において、 $A = 4800 \text{ mm}^2$ 、 $A_j = 300 \text{ mm}^2$ 、 $\sigma_a = 120 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_{ja} = 0 \text{ MPa}$ として、摩擦撹拌接合部の熱影響範囲とモルタル充填開口の両者を考慮したアルミニウム床版の上板の許容応力は 103MPa になる。

3.2.2 疲労限度

アルミニウム床版の耐用年数を 100 年とした場合、床版を通過する車軸数は非常に多いので、アルミニウム床版の疲労設計は疲労限度に対して行う。

母材の疲労限度は次式で与えられる²¹⁾。

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{146(1-R)}{1.3244 - 0.6756R} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{caf}$: 疲労限度 (単位 MPa)

R : 応力比

α : 腐食影響係数 (腐食の影響を受けない場合 1, 腐食の影響を受ける場合 0.716)

摩擦撹拌接合部の疲労限度は応力を受ける方向によって異なる。接合線直角方向に応力を受ける場合に対して、疲労限度は次式で与えられる²¹⁾。

$-1 \leq R \leq 0.1$ に対して,

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{133(1-R)}{1.6786-0.3214R} \quad (4)$$

$0.1 < R \leq 1$ に対して,

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{99.0(1-R)}{1.2966-0.7034} \quad (5)$$

ここに, $\Delta\sigma_{caf}$: 疲労限度 (単位 MPa)

R : 応力比

α : 腐食影響係数 (腐食の影響を受けない場合 1, 腐食の影響を受ける場合 0.872)

接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労限度は, 接合による引張残留応力の影響を受けるために応力範囲だけで表され, その疲労限度は, 実物大の疲労試験の結果に基づいて決定される. 過去実施された, 実物大の疲労試験の結果を図 14 に示す⁴⁾. 試験体数が少ないので, 疲労限度を 60MPa とし, 腐食影響係数 α を考慮して, 接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部の疲労限度を次式で与える.

$$\Delta\sigma_{caf} = 60\alpha \quad (6)$$

ここに, $\Delta\sigma_{caf}$: 疲労限度 (単位 MPa)

α : 腐食影響係数 (腐食の影響を受けない場合 1, 腐食の影響を受ける場合 0.872)

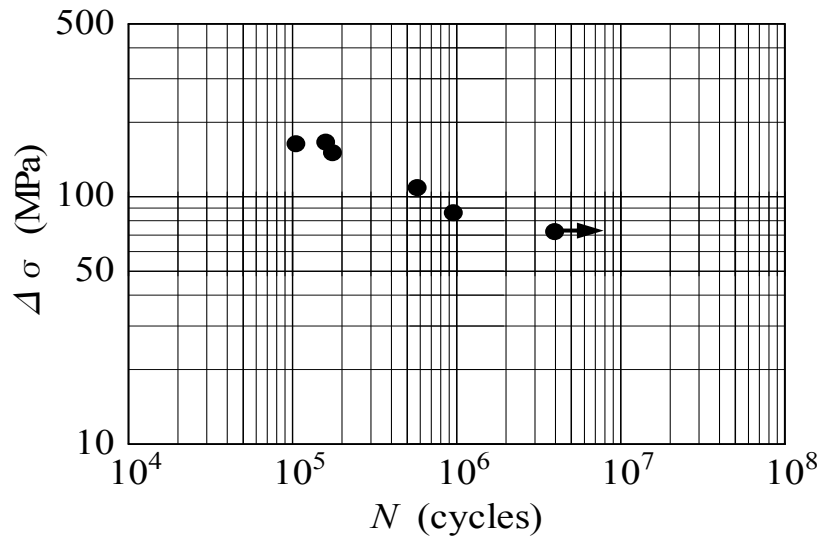


図 14 S-N 関係

3.2.3 モルタル充填開口の疲労限度

図 8 のモルタル充填開口の疲労限度を求めるために、モルタル充填開口を有するアルミニウム合金板の疲労試験を行った。試験片の材料は A6061P-T6 である。試験片の寸法を図 15 に示す。試験片の中央にモルタル充填開口が設けられている。開口の縁のバリは削除されているが、面取りは行なわれていない。試験片の数量は 8 体である。試験片のアルミニウム合金の化学成分を表 2、3 本の引張試験片 (JIS 14B 号) の引張試験による機械的特性を表 3 に示す。

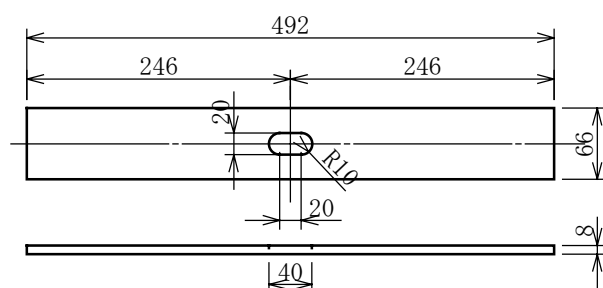


図 15 モルタル充填開口を有する試験片

表 2 試験片 (A6061P-T6) の化学成分

引用	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)
ミルシート値	0.61	0.42	0.28	0.03	1.01	0.12	0.01	0.03
JIS 規格値	0.4-0.8	0.7Max	0.15-0.40	0.15Max	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25Max	0.15Max

表 3 試験片の機械的特性(平均値)

引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
328.1	303.0	16.7	71.3	0.32

疲労試験は $R=0.1$ で行った。疲労試験の結果を表 4 に示す。 ΔP は荷重範囲、 A_{net} は試験片の純断面積、 $\Delta\sigma_{net}$ は荷重範囲を純断面積で除した応力範囲、 N は繰返し回数である。疲労試験後の試験片の様子を図 16 に示す。疲労亀裂は、円弧部と直線との交点より 0.1mm ほど円弧部に入った位置に発生している。円弧部と直線との交点近傍の応力集中係数が次式で与えられている²²⁾。

$$k = \left[2 + \left(1 - \frac{\rho}{B} \right)^3 \right] \left[0.6 + 0.4e^{-1.5 \left(\frac{a}{\rho} - 1 \right)} \right] \quad (7)$$

ここに、 k : 応力集中係数

ρ , a , B : 図 17 参照

表 4 疲労試験の結果

試験片	ΔP (kN)	A_{net} (mm ²)	$\Delta \sigma_{net}$ (MPa)	N (回)	破断
1	51.44	367.4	140.0	1.113×10^6	
2	66.38	368.8	180.0	6.87×10^4	
3	58.92	368.2	160.0	8.53×10^4	
4	44.54	371.1	120.0	1.108×10^7	無
5	55.08	367.2	150.0	4.29×10^5	
6	48.26	371.2	130.0	4.60×10^6	
7	49.83	369.1	135.0	2.37×10^6	
8	59.25	370.3	160.0	9.65×10^4	

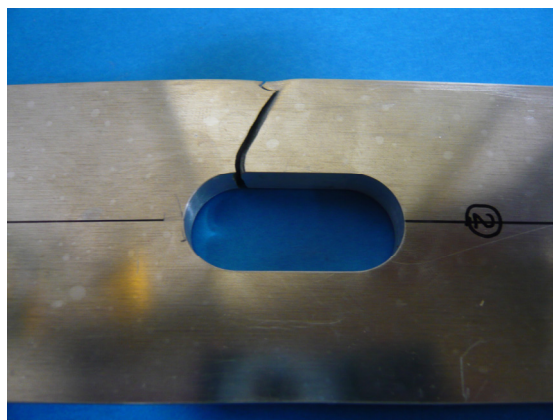


図 16 疲労試験後の試験片の様子

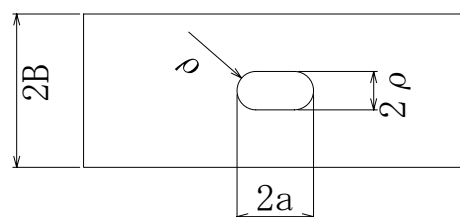


図 17 両端を丸めたみぞを長手方向に持つ帯板

$a=20\text{mm}$, $B=33\text{mm}$, $\rho=10\text{mm}$ の試験片に対して, 式(7)は $k=1.61$ を与える. したがって疲労亀裂が発生した位置には, $\Delta\sigma_{net}$ の 1.61 倍の応力範囲が作用している. $\Delta\sigma (=1.61\sigma_{net})$ と繰返し回数 N の関係を図 18 に示す. 同図には, $R=0.1$, $\alpha=1$ に対して, 次式で与えられる母材の S-N 曲線²¹⁾ と式(3)で与えられる疲労限度も描いてある.

$$\log N = 20.832 - 7.034 \log(\Delta\sigma) \quad (8)$$

図 18 において, 試験結果は母材の S-N 曲線および疲労限度よりかなり上に分布している. したがって, モルタル充填開口の疲労限度として式(3)を使用する. ただし, モルタル充填開口に作用する応力範囲に対して, 式(7)で与えられる応力集中係数を公称応力に乘じたものを使用する.

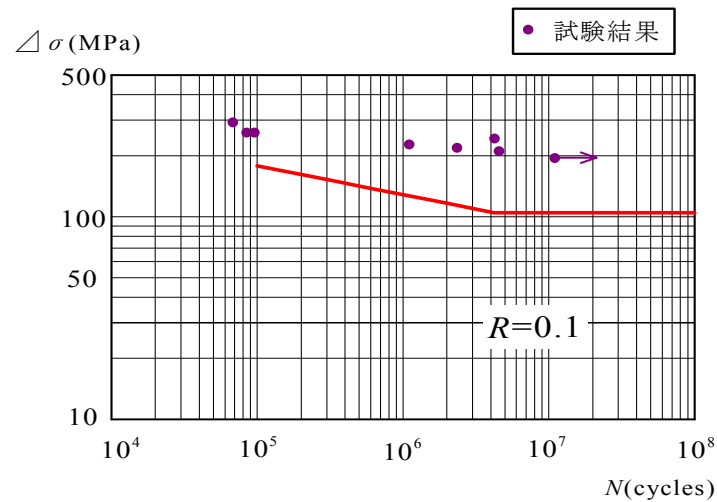


図 18 S-N 関係

第 4 章 2 主桁橋のアルミニウム床版の適用支間長

4.1 死荷重によって生じる応力

アルミニウム床版を有する 2 主桁橋の断面図を図 19 に示す．アルミニウム床版に作用する死荷重は，アルミニウム床版自身の重量とアスファルト舗装の重量である．アスファルト舗装の厚さは 80mm である．図 9 に示す押出型材 1 本の x 軸回りの断面 2 次モーメント I_x は $8.0809 \times 10^7 \text{ mm}^4$ である．

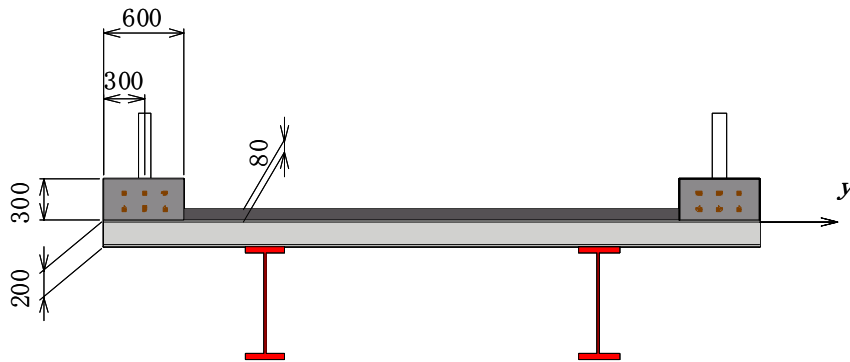


図 19 アルミニウム床版を有する 2 主桁橋の断面図

アルミニウム床版の橋軸方向の 320mm 幅に対して，橋軸直角方向の単位長さ当りの死荷重は，表 1 を参照して，次のように与えられる．

$$\text{アルミニウム床版に対して,} \quad p_1 = 325 \text{ N/m} \quad (9)$$

$$\text{アスファルト舗装に対して,} \quad p_2 = 22.5 \times 1000 \times 0.32 \times 0.08 = 576 \text{ N/m} \quad (10)$$

これらの死荷重によって発生する曲げモーメント M は支間中央で最大になり，その値は主桁間隔を $L \text{ mm}$ とすれば，

$$M = \frac{(p_1 + p_2)L^2}{8} = 1.126 \times 10^{-1} L^2 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (11)$$

したがって支間中央に生じる応力は，

$$\sigma_y = \frac{M}{I_x} z = 1.39 \times 10^{-9} L^2 z \text{ MPa} \quad (12)$$

ここに， z ：押出型材の中立軸からの距離（床版の上板上面で -86.92mm，下フランジ下面で 113.08mm）

各支間長に対する，死荷重によって生じる応力を表 5 に示す．

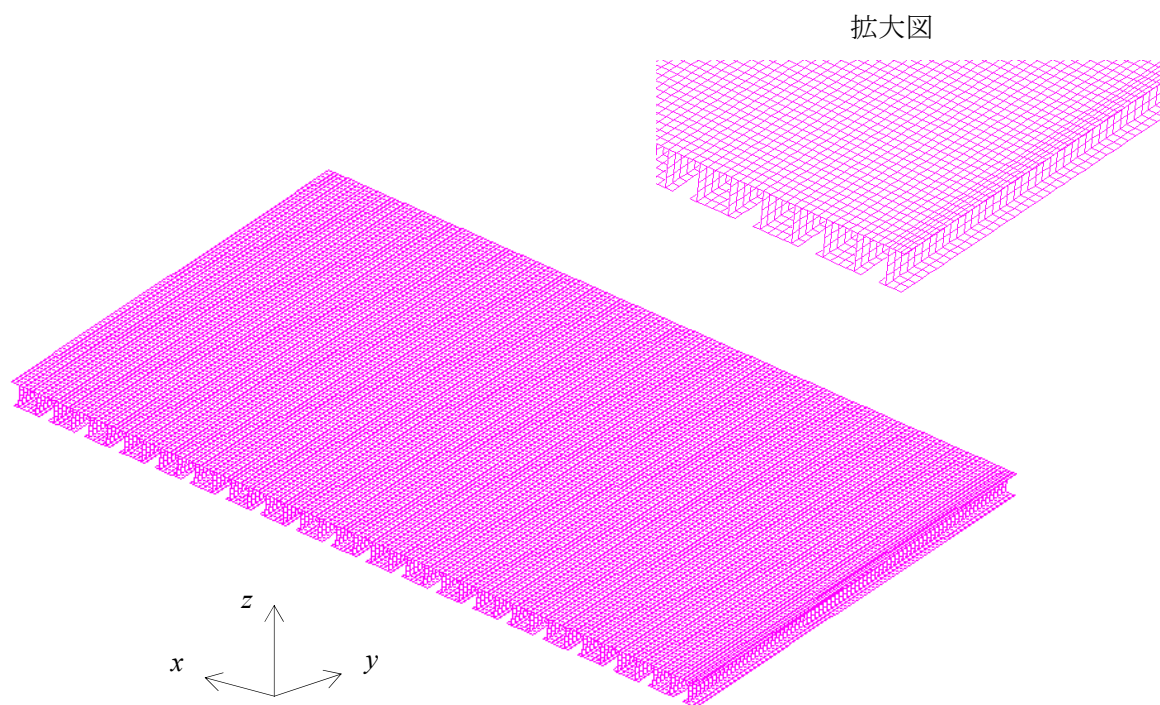
表 5 死荷重によって支間中央のアルミニウム床版に生じる応力

支間長 (mm)	上板上面 (MPa)	下フランジ下面 (MPa)
1500	-0.27	0.35
2000	-0.48	0.63
2500	-0.76	0.98
3000	-1.09	1.41
3500	-1.48	1.93
4000	-1.93	2.51

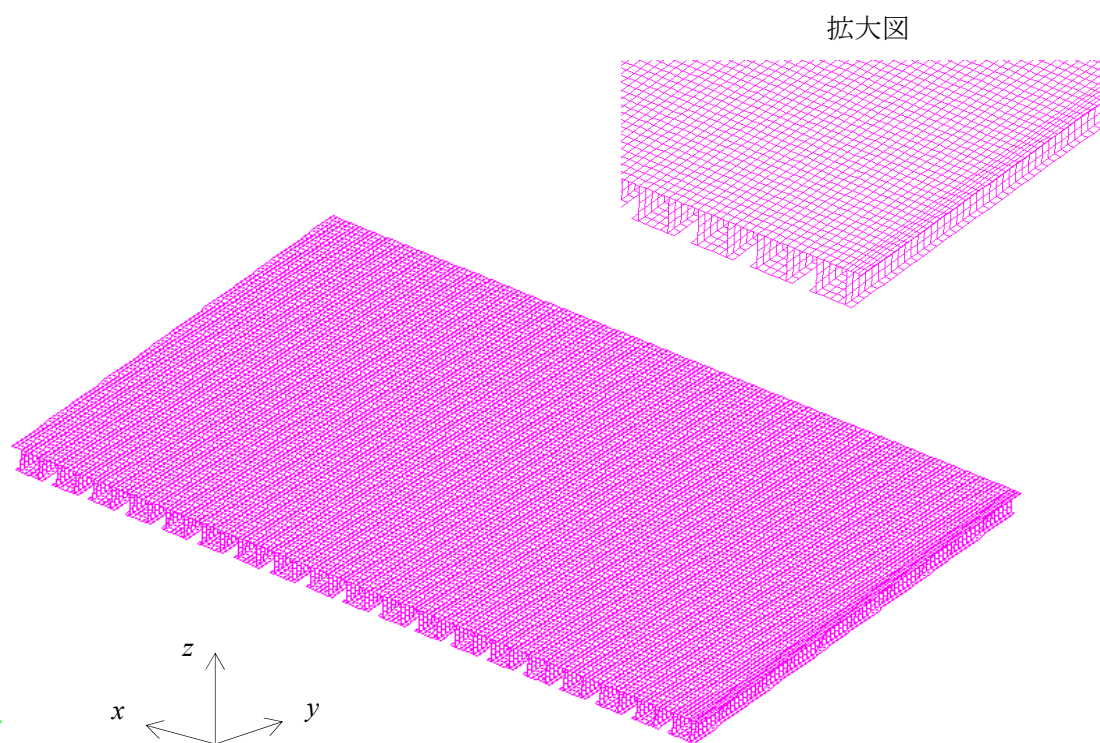
4.2 活荷重に対する照査

4.2.1 FEM モデル

活荷重によってアルミニウム床版に生じる応力を照査するために FEM 解析を行なった。FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA²³⁾ を用いた。支間長 4000mm に対する要素分割を図 20 に示す。使用した有限要素は 4 節点曲面シェル要素(Q20SH)である。有限要素の大きさは一辺の長さが 40mm～50mm である。アルミニウム床版のヤング係数とポアソン比をそれぞれ 70GPa, 0.3 とした。y 軸に関して対称となる境界条件を設け、鋼桁と連結する部分を単純支持した。FEM モデルの橋軸方向の長さは、床版支間の約 3 倍とした。実際のアルミニウム床版においては、図 7 に示すように、アルミニウム床版を鋼桁に連結するために、鋼桁上のアルミニウム床版の開断面内の一部がモルタルで充填されている。モルタルは開断面に生じる橋軸方向応力 σ_x および橋軸直角方向応力 σ_y の板曲げ応力成分を抑える効果がある²⁴⁾。しかし本解析では安全側に立ってモルタルを FEM モデルで考慮しない。



(a) 閉断面載荷



(b) 開断面載荷

図 20 要素分割

活荷重の橋軸方向の載荷位置として、図 21 に示すように、荷重中心が閉断面中心と開断面中心の 2 通りを考慮した。活荷重の橋軸直角方向の載荷位置は、床版支間の中央の曲げモーメントが最大となるように、各支間長に対して図 22 に示す位置に載荷した。

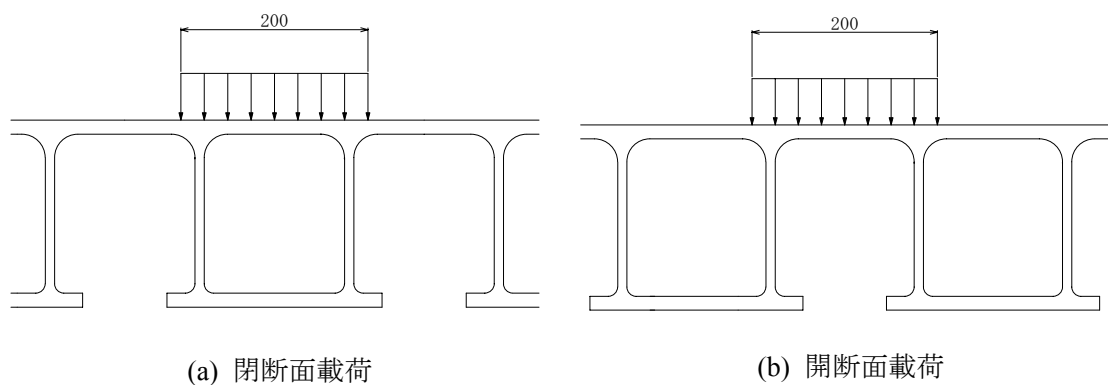


図 21 閉断面載荷と開断面載荷

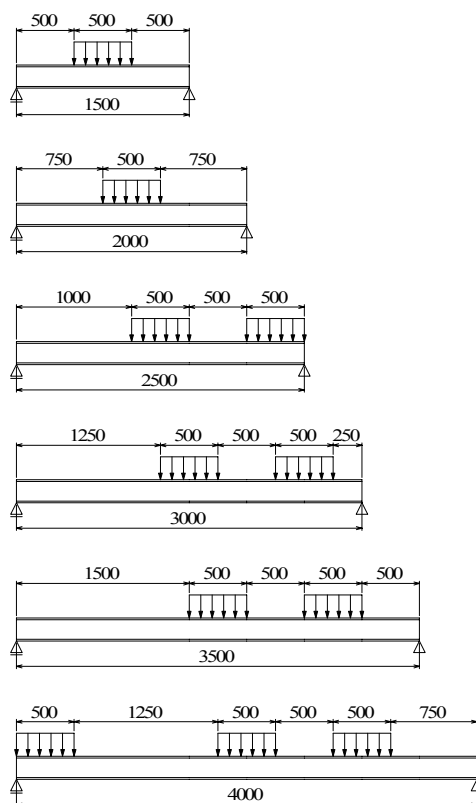


図 22 活荷重の橋軸直角方向の載荷位置

4.2.2 照査結果

支間中央のアルミニウム床板の上板上面に生じる応力 σ_y と支間長 L の関係、および下フランジ下面に生じる応力 σ_y と支間長 L の関係を図 23 に示す。応力には、表 5 の死荷重によって生じる応力も含まれている。

アルミニウム床版は中立軸が中央より上にあるため、下フランジ下面の応力が大きくなるはずであるが、上板上面の応力が大きくなっている。これは、上板上面にはアルミニウム床版全体の橋軸直角方向の曲げモーメントによって起こされる圧縮の膜応力のほかに、輪荷重が直接作用することによって圧縮の板曲げ応力が生じるからである。

上板上面および下フランジ下面ともに、開断面載荷より閉断面載荷の方が大きな応力が生じている。これは、閉断面載荷では、輪荷重直下の 1 つの開断面で荷重が受け持たれるのに対して、開断面載荷では、両隣の開断面で荷重が受け持たれるからである。

上板上面および下フランジ下面ともに、支間長 4000mm において応力は許容応力を下回っている。

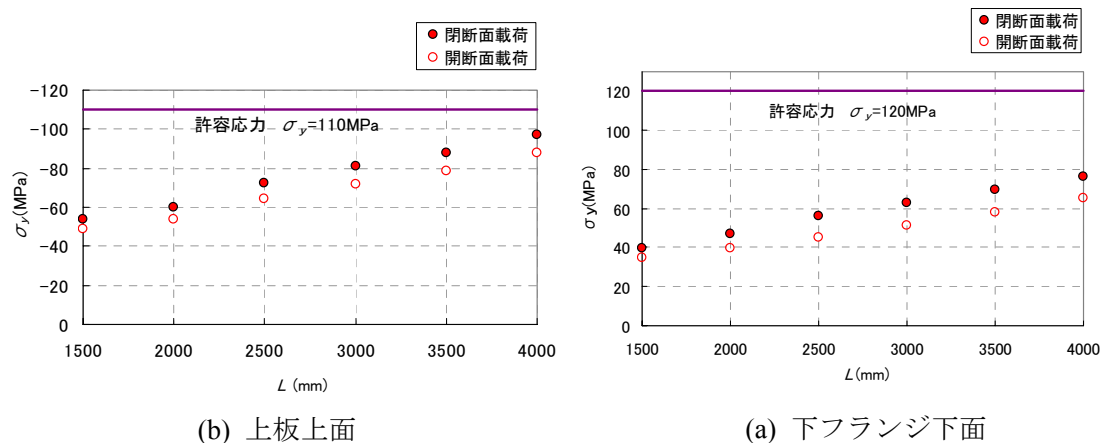


図 23 応力 σ_y と支間長 L の関係

4.3 疲労荷重に対する照査

図 24 に示すアルミニウム床版の下フランジ下面に発生する疲労亀裂に対して照査する。図 25 の要素分割に示す、支間長 2000mm で、橋軸方向の長さが 6080mm のアルミニウム床版の支間中央に 60kN の集中荷重を載荷し、これによって得られる、支間中央の床版の下フランジ下面の σ_y の影響線を図 26 に示す。荷重が 1280mm 離れると σ_y はほぼ 0 になる。後輪 2 軸の前軸と後軸との車軸間隔は 1300mm である。したがって、図 11 の疲労荷重を載荷した場合、前軸と後軸によって生じる応力は独立する。さらに、下フランジに生じる応力は、図 11 の複輪トラックタイヤ載荷と 200mm×500mm の長方形載荷とでほとんど変わら

ない²⁴⁾。したがって、アルミニウム床版の下フランジに生じる σ_y は、1軸の長方形の領域
 載荷で評価できる。活荷重の照査に使用した図20のFEMモデルにおいて、輪荷重を60kN
 に変更する。

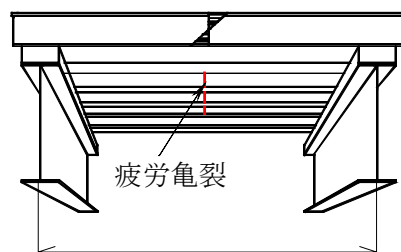


図24 アルミニウム床版の下フランジ下面に発生する疲労亀裂

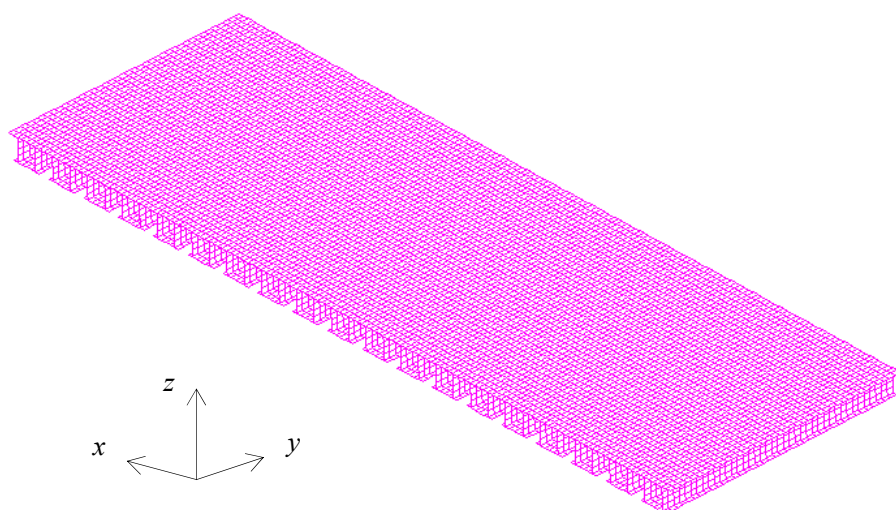


図25 要素分割

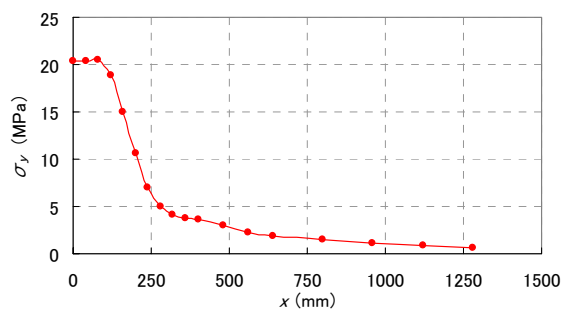


図26 下フランジ下面の σ_y の影響線

疲労荷重に対する応力範囲 $\Delta\sigma_y$ と支間長 L の関係を図 27 に示す．死荷重によって応力が生じているため， σ_y の応力比 R は 0 より大きくなる．支間長と応力比の関係を表 6 に示す． R は 0.020～0.085 である．これに対して，アルミニウム床版の下フランジ下面の疲労限度は，腐食の影響を受けるので，式(3)において $\alpha=0.716$ として，75.5MPa～78.1MPa である．図 27 の疲労限度(実線)は各支間長に対する疲労限度の最小値 75.5MPa を示している． $\Delta\sigma_y$ は疲労限度を大きく下回っているので，アルミニウム床版の下フランジに疲労亀裂は発生しない．

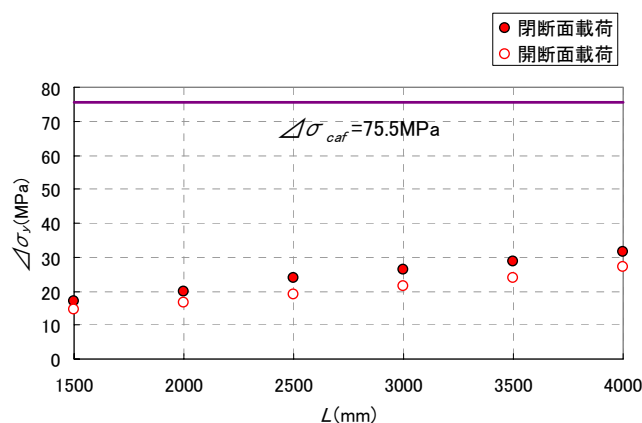


図 27 応力範囲 $\Delta\sigma_y$ と支間長 L の関係

表 6 支間長と応力比の関係

支間長 (mm)	応力比	
	閉断面載荷	開断面載荷
1500	0.020	0.023
2000	0.031	0.036
2500	0.040	0.049
3000	0.051	0.062
3500	0.063	0.075
4000	0.074	0.085

4.4 たわみ荷重に対する照査

4.3 節で述べたように，図 11 の疲労荷重を載荷した場合，前軸と後軸によって生じる応力は独立している．したがって，図 13 のたわみ荷重を載荷した場合も，前軸と後軸によって生じるたわみは独立しており，1 軸載荷で評価できる．そこで，活荷重に対する照査に使

用した図 20 の FEM モデルで，輪荷重を 50kN に変更して，アルミニウム床版のたわみを求める．

たわみ比 δ/L と支間長 L の関係を図 28 に示す．アルミニウム床版はヤング率が小さいため過度なたわみが心配されるが，支間長 4000mm の場合でも，たわみ比 δ/L は $L/1000$ 程度であり，許容値を大きく下回っている．

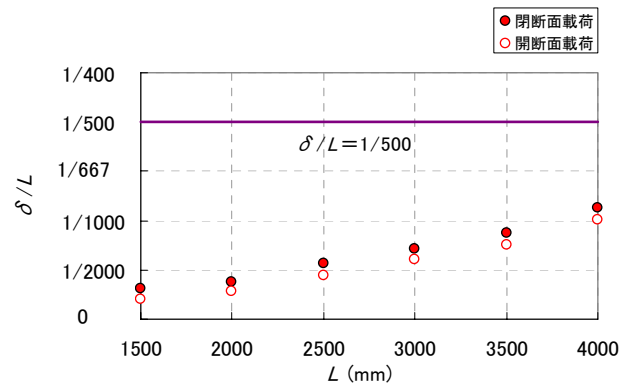


図 28 たわみ比 δ/L と支間長 L の関係

第5章 中主桁上の負曲げモーメントに対する照査

5.1 死荷重によって生じる応力

図 29 に示す，アルミニウム床版を有する 3 主桁橋に対して，死荷重によって中主桁上のアルミニウム床版に生じる応力を求める．考慮する死荷重は，主桁間のアルミニウム床版自身の重量とアスファルト舗装の重量である．アスファルト舗装の厚さは 80mm である．

主桁間隔を L mm とすると，アルミニウム床版の重量によって生じる中主桁上の曲げモーメント M は，

$$M = -\frac{(p_1 + p_2)L^2}{8} = -1.126 \times 10^{-1} L^2 \quad \text{N} \cdot \text{mm} \quad (13)$$

ここに， p_1 ：式(9)参照

p_2 ：式(10)参照

押出形材 1 本の x 軸回りの断面 2 次モーメント I_x は $8.0809 \times 10^7 \text{ mm}^4$ である．したがって，死荷重に対して，中主桁上のアルミニウム床版に生じる応力は，

$$\sigma_y = \frac{M}{I_x} z = -1.39 \times 10^{-9} L^2 z \quad \text{MPa} \quad (14)$$

ここで， z ：押出形材の中立軸からの距離（床版の上板上面で -86.92mm，下フランジ下面で 113.08mm）

各支間長に対して，死荷重によって中主桁上のアルミニウム床版に生じる応力を表 7 に示す．

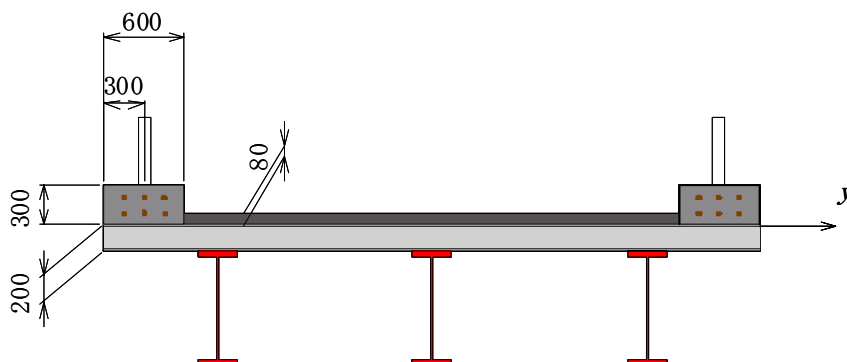


図 29 アルミニウム床版を有する 3 主桁橋の断面図

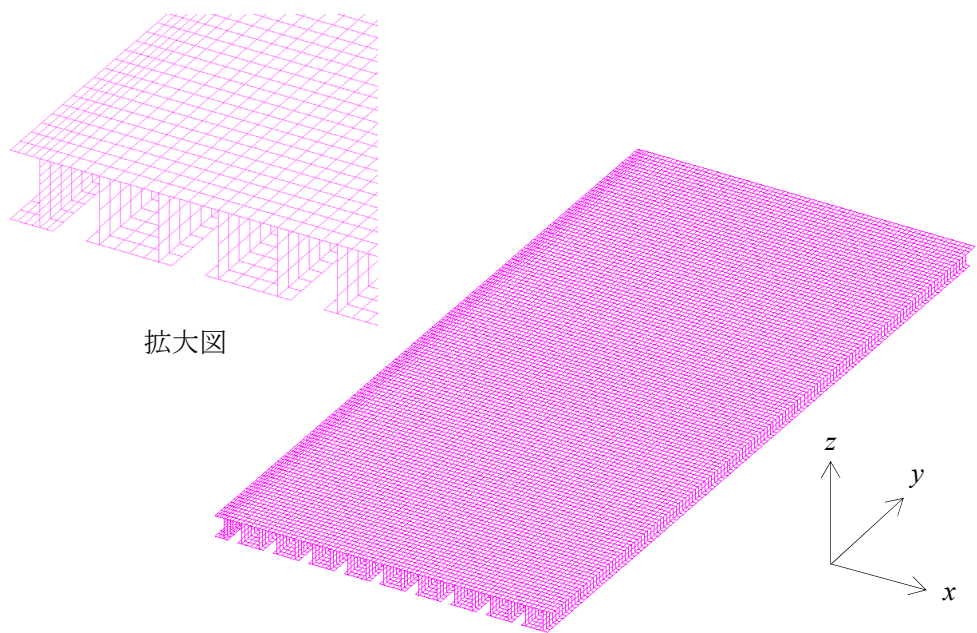
表 7 死荷重によって中主桁上のアルミニウム床版に生じる応力

支間長 (mm)	上板上面 (MPa)	下フランジ下面 (MPa)
3000	1.09	-1.41
3300	1.32	-1.71
3400	1.40	-1.82
3500	1.48	-1.93
3600	1.57	-2.04
3800	1.74	-2.27
4000	1.93	-2.51

5.2 活荷重に対する照査

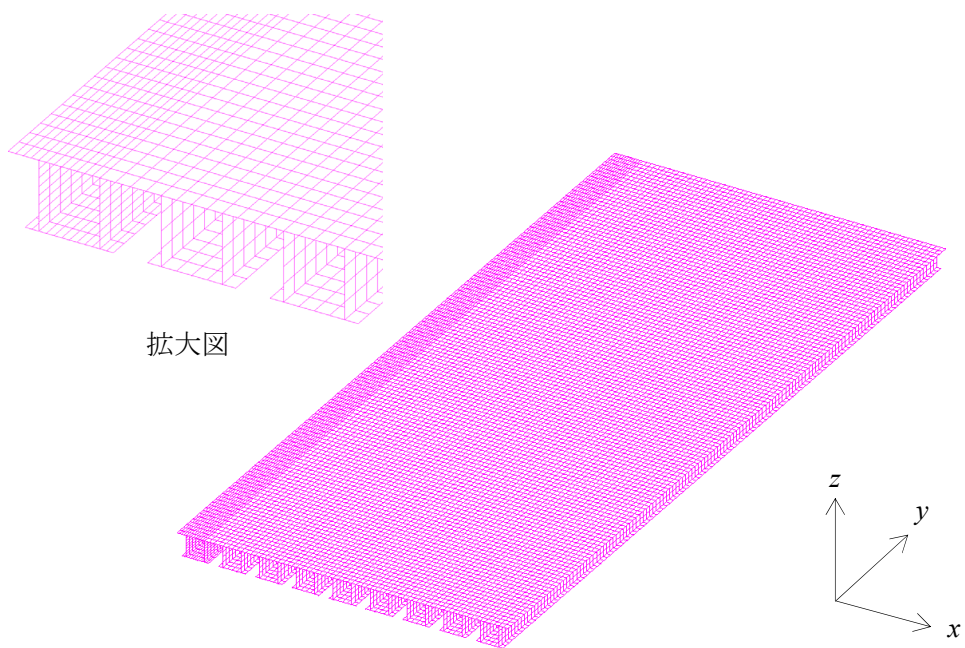
5.2.1 FEM モデル

FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム ANSYS²⁵⁾を用いた．一例として支間長 3300mm に対する要素分割を図 30 に示す．使用した有限要素は 8 節点構造シェル要素 (SHELL93)である．有限要素の大きさは一辺の長さが 40mm～50mm である． y 軸に関して対称となる境界条件を設け，鋼桁と連結する部分を単純支持した．FEM モデルの橋軸方向の長さは約 6000mm である．鋼桁上のアルミニウム床版の開断面内のモルタルを考慮していない．荷重の載荷中心として閉断面中心と開断面中心の 2 通りを考慮した．200mm×500mm の長方形の領域に対して 140kN の輪荷重を載荷し，橋軸直角方向の載荷位置は中主桁上の負曲げモーメントが最大となるように各支間長に対して図 31 に示す位置に載荷した．



拡大図

(a) 閉断面載荷



拡大図

(b) 開断面載荷

図 30 要素分割

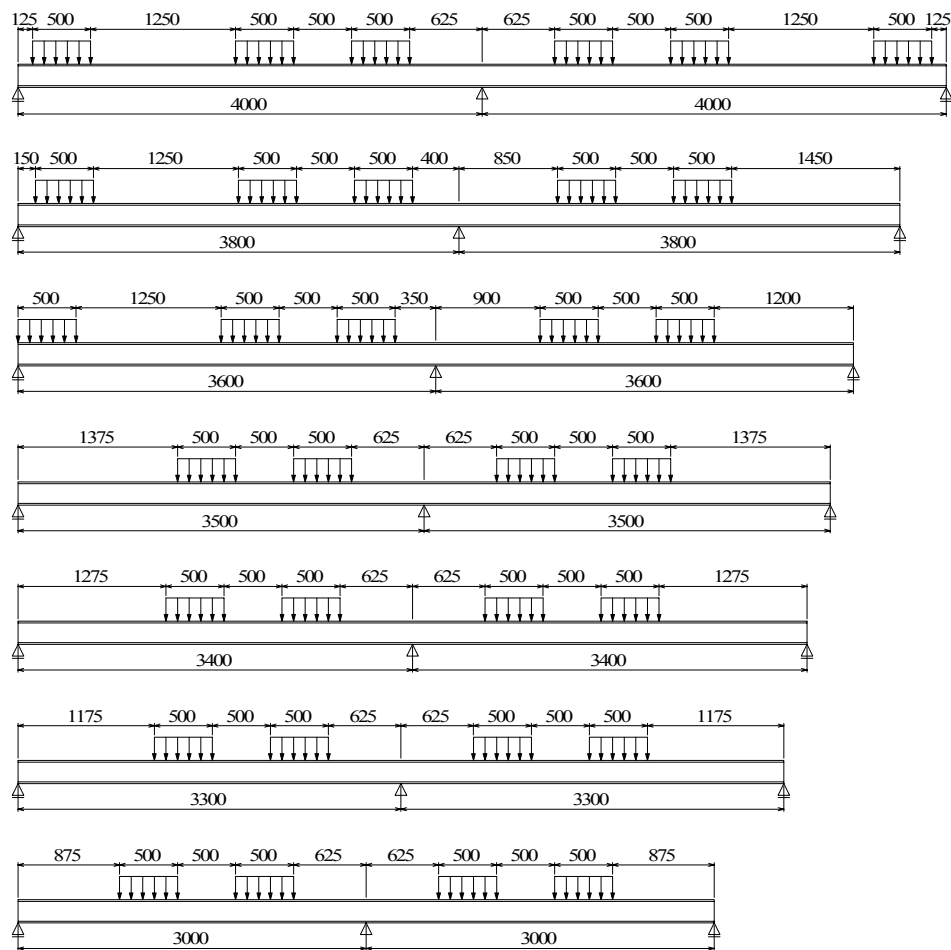


図 31 活荷重の橋軸直角方向の載荷位置

5.2.2 照査結果

中主桁上のアルミニウム床板の下フランジ下面に生じる応力 σ_y と支間長 L の関係を図 32 に示す。応力には、表 7 の死荷重によって生じる応力も含まれている。FEM 計算では、中主桁の付近で応力が乱れるので、中主桁上のアルミニウム床板の下フランジ下面に生じる応力 σ_y を付録 A に示す方法に従って推定した。

図 32 から分るように、閉断面載荷に対して $L = 3300\text{mm}$ 以下で応力が許容応力を下回り、開断面載荷に対して $L = 3500\text{mm}$ 以下で応力が許容応力を下回っている。したがって多主桁橋における主桁間の適用支間長の限界は 3300mm である。

支間長 3300mm に対して、閉断面載荷および表 7 の死荷重によって、中主桁上のアルミニウム床板の上板上面に生じる応力は 75MPa である。この値は、摩擦攪拌接合部の熱影響範囲とモルタル充填開口の両者を考慮したアルミニウム床版の上板の許容応力 103MPa より小さい。

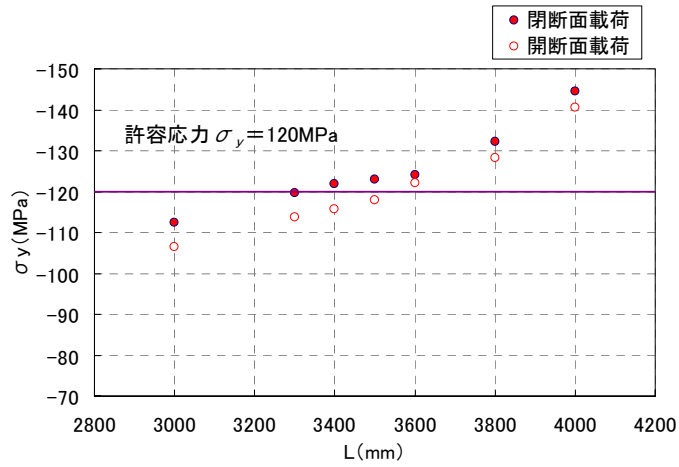


図 32 応力 σ_y と支間長 L の関係

中主桁上のウェブでは、曲げモーメントによる垂直応力とせん断力によるせん断応力が同時に作用する。この垂直応力とせん断応力が同時に作用する場合に対する照査は次式で行なわれる²⁶⁾。

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 \leq 1.2 \quad (15)$$

ここに、 σ : 曲げモーメントによる垂直応力（ただし、 $\sigma \leq \sigma_a$ ）

σ_a : 許容応力

τ : せん断力によるせん断応力（ただし、 $\tau \leq \tau_a$ ）

τ_a : 許容せん断応力

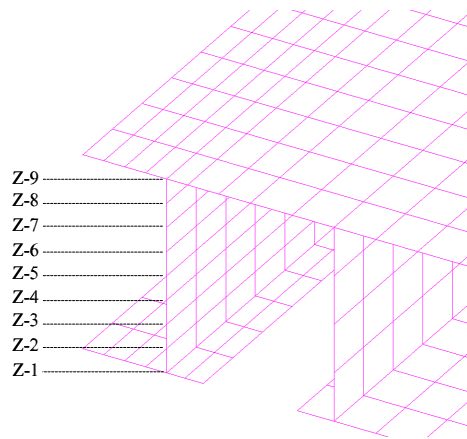
アルミニウム床版の母材の許容応力 σ_a が 120MPa であるので、許容せん断応力 τ_a は 69.3MPa ($=120/\sqrt{3}$) である。

支間長 3300mm に対して、中主桁上のアルミニウム床版のウェブに生じる垂直応力 σ_y とせん断応力 τ の値を表 8 に示す。これらの値に対して、式(15)が与える値は 1.2 未満である。したがって、支間長 3300mm に対して、中主桁上のアルミニウム床版のウェブは、垂直応力とせん断応力の同時作用に対して安全である。

表 8 σ_y と τ の値 ($L = 3300 \text{ mm}$)

ウェブの 位置*	閉断面載荷			開断面載荷		
	σ (MPa)	τ (MPa)	式(15)	σ (MPa)	τ (MPa)	式(15)
Z-9	60	35	0.51	59	38	0.54
Z-8	39	36	0.38	39	40	0.44
Z-7	17	37	0.31	20	41	0.38
Z-6	-3	37	0.29	1	41	0.35
Z-5	-25	37	0.33	-19	39	0.34
Z-4	-47	35	0.41	-38	38	0.40
Z-3	-69	32	0.54	-61	36	0.53
Z-2	-91	30	0.76	-78	33	0.65
Z-1	-112	26	1.01	-98	29	0.84

* : 図参照



5.3 疲労荷重に対する照査

中主桁上のアルミニウム床版の疲労荷重に対する照査では，図 33 に示す床板上板のモルタル充填開口と摩擦撹拌接合部について，橋軸直角方向応力 σ_y に対して照査する．

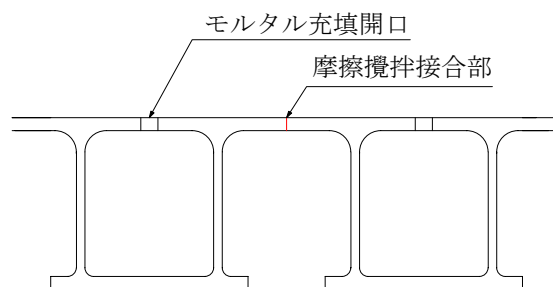


図 33 モルタル充填開口と摩擦撹拌接合部

5.3.1 モルタル充填開口

図 30 に示す主桁間隔 3300mm に対する FEM モデルに 200mm×500 mm の長方形の領域に対して 60kN を載荷した場合の、中主桁上のアルミニウム床版の上板上面に生じる応力 σ_y の橋軸方向の分布を図 34 に示す．閉断面載荷と開断面載荷の両者とも、荷重載荷位置から 1250mm 離れると σ_y はほぼ 0 になる．疲労荷重の後輪 2 軸の前軸と後軸の車軸間隔は 1300mm であり、前軸と後軸によって生じる応力は互いに独立しているため、1 軸載荷で評価できる．さらに、トラックタイヤの載荷位置はモルタル充填開口の位置から離れているため、図 11 の複輪トラックタイヤ載荷ではなく、長方形領域載荷に置き換えることができる．

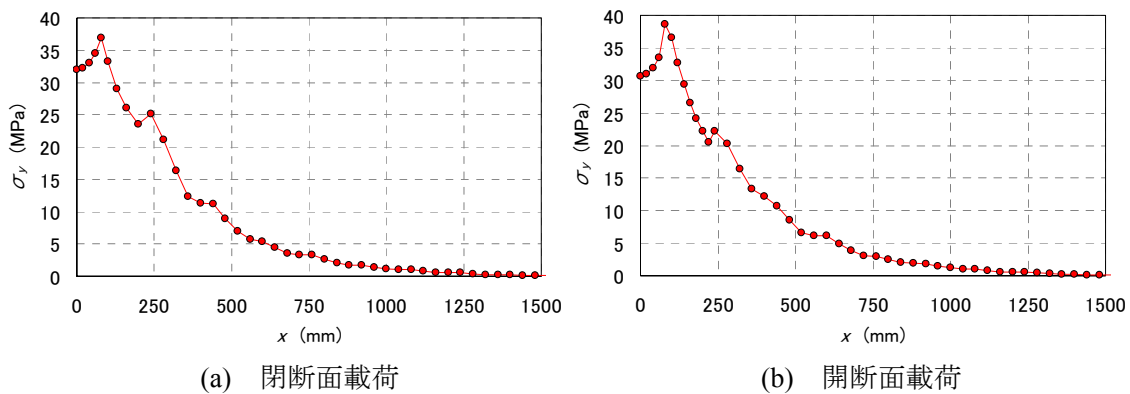


図 34 上板上面の σ_y の分布

図 34 から分かるように、中主桁上のアルミニウム床版の上板上面の応力は、押出型材 1 本の上フランジ幅 320mm の間で大きく変化している．安全側に立って、図 34 の最大の応力がモルタル充填開口に一樣に分布していると仮定する．さらに安全側に立って、 $a=20\text{mm}$ 、 $\rho=10\text{mm}$ のモルタル充填開口に対して、板幅 B を無限大として、式(7)が与える最大の応力集中係数 2.07 を採用する．

モルタル充填開口の応力範囲と応力比を表 9 に示す．同表には、腐食の影響を受けない場合、すなわち $\alpha=1$ に対して、式(3)で与えられる疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ も記載されている．応力集中係数が考慮されたモルタル充填開口の応力範囲は疲労限度を大きく下回っているため、主桁間隔が 3300mm 以下であれば、モルタル充填開口に疲労亀裂は発生しない．

表 9 モルタル充填開口の応力範囲と応力比および疲労限度 ($L=3300\text{mm}$)

載荷位置	$\Delta\sigma_y$ (MPa)	R	$2.07\Delta\sigma_y$ (MPa)	$\Delta\sigma_{caf}$ (MPa)
閉断面	36.9	0.035	76.4	108
開断面	38.7	0.033	80.1	108

5.3.2 接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部

摩擦攪拌接合部はアルミニウム床版の開断面に存在するため，橋軸直角方向応力 σ_y ，すなわち接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部に対して，開断面載荷について疲労照査を行う．

疲労荷重に対して摩擦攪拌接合部に生じる応力範囲 $\Delta\sigma_y$ は 38.7MPa である．疲労限度は，腐食の影響を受ける場合，すなわち $\alpha = 0.872$ に対して式(6)は 52MPa を与える．応力範囲は疲労限度を大きく下回っているので，支間長が 3300mm 以下であれば，摩擦攪拌接合部に疲労亀裂は発生しない．

第 6 章 アルミニウム床板の適用張出し長

6.1 死荷重によって生じる応力

図 19 と 29 に示す，アルミニウム床版を有する道路橋の張出し部に対して，死荷重によって外主桁上のアルミニウム床版に生じる応力を求める．アスファルト舗装の厚さは 80mm であり，地覆は鉄筋コンクリート製で，幅 600mm，高さ 300mm である．

張出し長を L mm（図 19 と 29 において，外主桁ウェブから張出し部先端までの距離）とすると，アルミニウム床板の重量によって生じる外主桁上の曲げモーメントは，

$$M_1 = -\frac{p_1 L^2}{2} = -1.625 \times 10^{-1} L^2 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (16)$$

ここに， p_1 ：式(9)参照

アスファルト舗装の重量によって生じる外主桁上の曲げモーメントは，

$$M_2 = -\frac{p_2 L^2}{2} = -2.88(L - 600)^2 \times 10^{-1} L^2 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (17)$$

ここに， p_2 ：式(10)参照

地覆の重量によって生じる外主桁上の曲げモーメントは，

$$M_3 = -24.5 \times 10^{-6} \times 600 \times 300 \times 320 \times (L - \frac{600}{2}) = -1411(L - 300) \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (18)$$

高欄の重量によって生じる外主桁上の曲げモーメントは，

$$M_4 = -500 \times 10^{-3} \times 320 \times (L - 300) = -160(L - 300) \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (19)$$

押出型材 1 本の x 軸回りの断面 2 次モーメント I_x は，主桁間と同じで $8.0809 \times 10^7 \text{ mm}^4$ である．したがって，上記の死荷重によって，外主桁上のアルミニウム床版に生じる応力は，

$$\sigma_y = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4}{I_x} z = -(5.575 \times 10^{-9} L^2 + 1.516 \times 10^{-5} L - 4.549 \times 10^{-3}) z \text{ MPa} \quad (20)$$

ここに， z ：押出型材の中立軸からの距離（床版の上板上面で -86.92mm，下フランジ下面で 113.08mm）

各張出し長に対する，死荷重によって外主桁上のアルミニウム床版に生じる応力を表 10 に示す．張出し部では，地覆幅が 600mm，活荷重の長方形載荷領域の長辺が 500mm であるので，張出し長の最小は 1100mm である．

表 10 死荷重によって外主桁上のアルミニウム床版に生じる応力

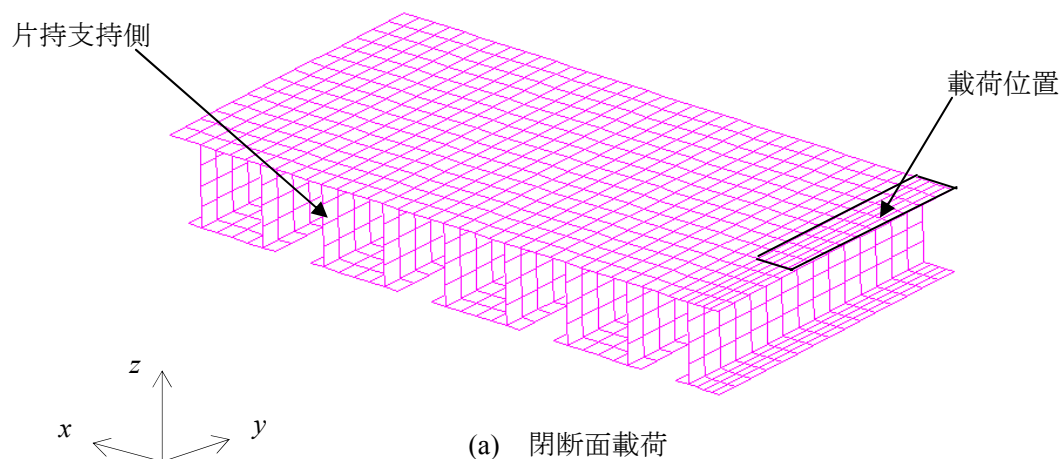
張出し長 (mm)	上板上面 (MPa)	下フランジ下面 (MPa)
1100	1.64	-2.13
1350	2.27	-2.95
1400	2.40	-3.12
1600	2.95	-3.84
1850	3.70	-4.81

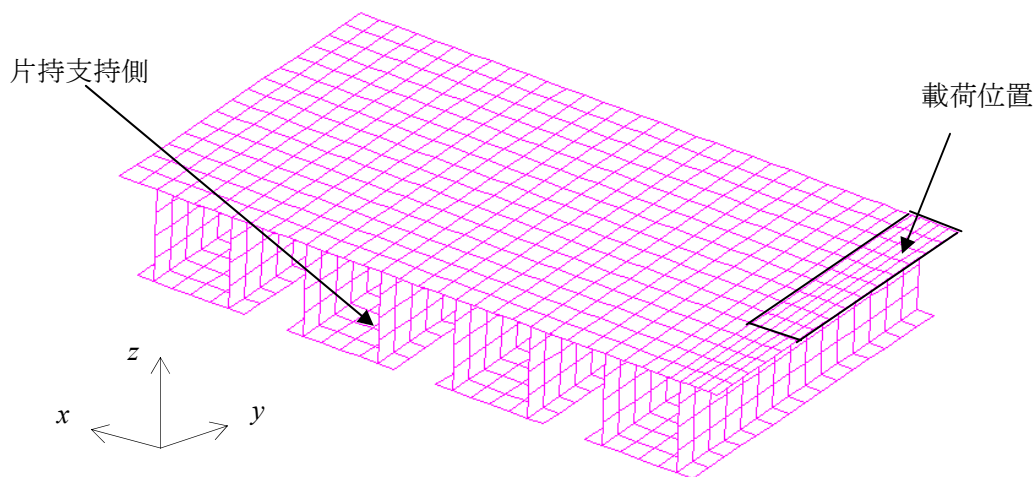
6.2 活荷重に対する照査

6.2.1 FEM モデル

活荷重に対する照査を行なう FEM モデルを図 35 に示す。これは、張出し長が 1350mm に対するものである。y 軸に関して対称となる境界条件を設け、主桁ウェブの直上のアルミニウム床版の断面に片持支持（x 軸，y 軸，z 軸方向の変位およびこれらの軸回りの回転を拘束）の境界条件を与えた。地覆および地覆直下のアルミニウム床版は活荷重を支持しないので、これらを FEM モデルで考慮していない。FEM モデルの橋軸方向長さは、張出し長から地覆幅 600mm を除いた長さの約 3 倍とした。主桁上のアルミニウム床版の開断面内のモルタルを考慮していない。荷重の荷重中心として閉断面中心と開断面中心の 2 通りを考慮した。

片持支持部の曲げモーメントが最大となるように、200 mm×500 mm の長方形の端が FEM モデルの端に位置するようにし、この長方形の領域に 140kN の輪荷重を載荷した。





(b) 開断面載荷

図 35 要素分割

6.2.2 照査結果

片持支持部のアルミニウム床板の上板上面に生じる応力 σ_y と張出し長 L の関係、および下フランジ下面に生じる応力 σ_y と張出し長 L の関係を図 36 に示す。図 36(a)に示すように、上板上面の開断面載荷では、 $L=1100\text{ mm}$ に対する応力が、これより長い $L=1350\text{ mm}$, 1400 mm , 1600 mm に対する応力より大きくなっている。これは、片持支持部には、アルミニウム床版全体の橋軸直角方向の曲げモーメントによって起こされる引張りの膜応力のほかに、輪荷重が直接乗ることによって引張りの板曲げ応力（片持支持部ではアルミニウム床版の上板が固定支持されているため、長方形の輪荷重載荷に対して、床版の上面に生じる板曲げ応力は引張りになる）が生じるためである。しかし実際には片持支持部の開断面内にはモルタルが充填されているために板曲げ応力は生じない。 $L=1100\text{ mm}$ の開断面載荷に対して、片持支持部の床版の上板に生じる膜応力は 18.6 MPa である。

図 36(b)に示すように、下フランジ下面では張出し長が 1350 mm を超えると、発生応力が母材の許容応力 120 MPa を超える。したがって活荷重に対して許容応力を満足する最大の張出し長は 1350 mm である。

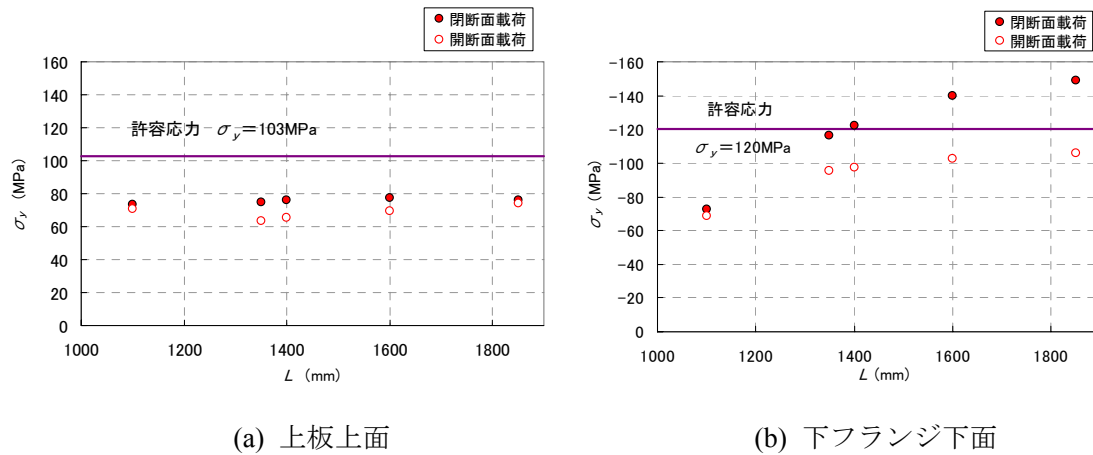


図 36 応力 σ_y と張出し長 L の関係

張出し部では図 37 に示すように、片持支持部のアルミニウム床版の下フランジとウェブの交差部のウェブ側に、曲げモーメントによる垂直応力とせん断力によるせん断応力が同時に作用する。この垂直応力とせん断応力が同時に作用する場合に対する照査は式(15)で行なわれる²⁶⁾。

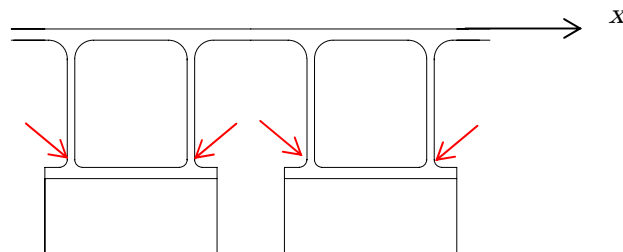


図 37 照査位置

アルミニウム床版の下フランジとウェブの交差部のウェブ側に生じる垂直応力 σ_y とせん断応力 τ の値を表 11 に示す。これらの値に対して、式(15)が与える値は 1.2 未満である。したがって、張出し長 1350mm に対して、アルミニウム床版の下フランジとウェブの交差部のウェブ側は、垂直応力とせん断応力の同時作用に対して安全である。

表 11 σ_y と τ の値 ($L=1350\text{mm}$)

载荷位置	σ_y (MPa)	τ (MPa)	式(15)
閉断面	-78.05	38.51	0.732
開断面	-60.87	35.40	0.518

6.3 疲労荷重に対する照査

張出し部の疲労荷重に対する照査では，図 33 に示す床版の上板のモルタル充填開口と摩擦撓拌接合部について，橋軸直角方向応力 σ_y に対して照査する．さらに張出し部では橋軸方向応力 σ_x に対しても疲労荷重に対する照査を行う．

6.3.1 モルタル充填開口

図 35 に示す張出し長 1350mm に対する FEM モデルの長方形領域に 60kN を載荷した場合の，片持支持部のアルミニウム床版の上板上面に生じる応力 σ_y の橋軸方向の分布を図 38 に示す．閉断面載荷と開断面載荷の両者とも，荷重載荷位置から 1000mm 離れると σ_y はほぼ 0 になる．疲労荷重の後輪 2 軸の前軸と後軸の車軸間隔は 1300mm であり，前軸と後軸によって生じる応力は互いに独立しているので，1 軸載荷で評価できる．さらに，トラックタイヤの載荷位置はモルタル充填開口の位置から離れているため，図 11 の複輪トラックタイヤ載荷ではなく，長方形領域載荷に置き換えることができる．

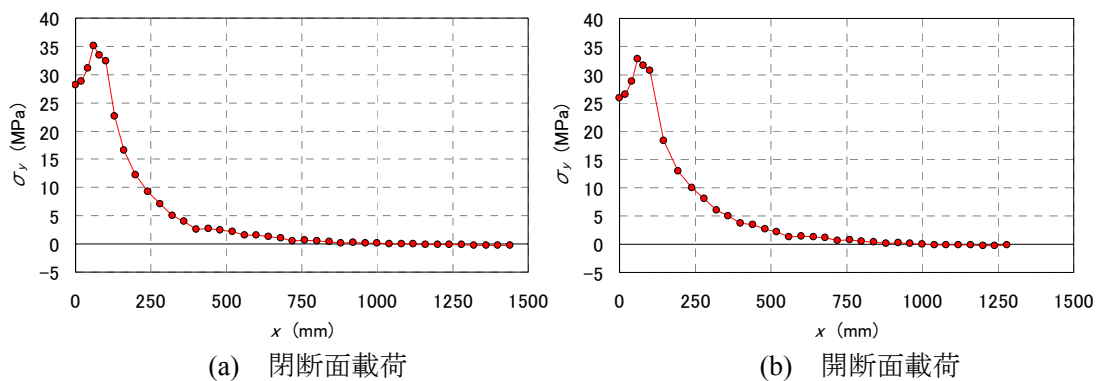


図 38 上板上面の σ_y の分布

図 38 から分かるように，片持支持部のアルミニウム床版の上板上面の応力は，押出型材 1 本の上フランジ幅 320mm の間で大きく変化している．安全側に立って，図 38 の最大の応力がモルタル充填開口に一樣に分布していると仮定する．さらに安全側に立って， $a=20\text{mm}$ ， $\rho=10\text{mm}$ のモルタル充填開口に対して，板幅 B を無限大として，式(7)が与える最大の応力集中係数 2.07 を採用する．

モルタル充填開口の応力範囲と応力比を表 12 に示す．同表には，腐食の影響を受けない場合，すなわち $\alpha=1$ に対して，式(3)が与える疲労限度 $\Delta\sigma_{caf}$ も記載されている．応力集中係数が考慮されたモルタル充填開口の応力範囲は疲労限度を大きく下回っているため，張出し長が 1350mm 以下であれば，モルタル充填開口に疲労亀裂は発生しない．

表 12 モルタル充填開口の応力範囲と応力比および疲労限度（ $L=1350\text{mm}$ ）

载荷位置	$\Delta\sigma_y$ (MPa)	R	$2.07\Delta\sigma_y$ (MPa)	$\Delta\sigma_{caf}$ (MPa)
閉断面	35.1	0.061	72.7	107
開断面	32.8	0.065	67.9	107

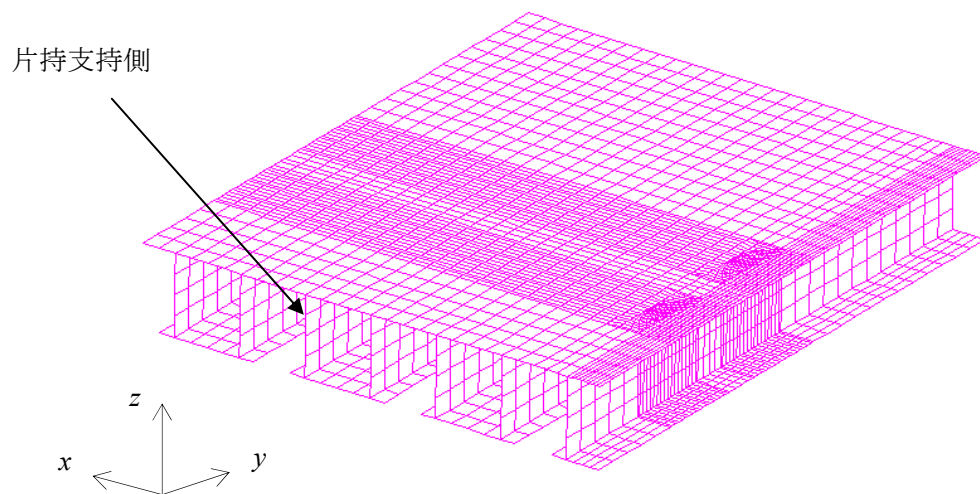
6.3.2 接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部

摩擦攪拌接合部はアルミニウム床版の開断面に存在するため、橋軸直角方向応力 σ_y ，すなわち接合線方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部に対して、開断面载荷について疲労照査を行う。

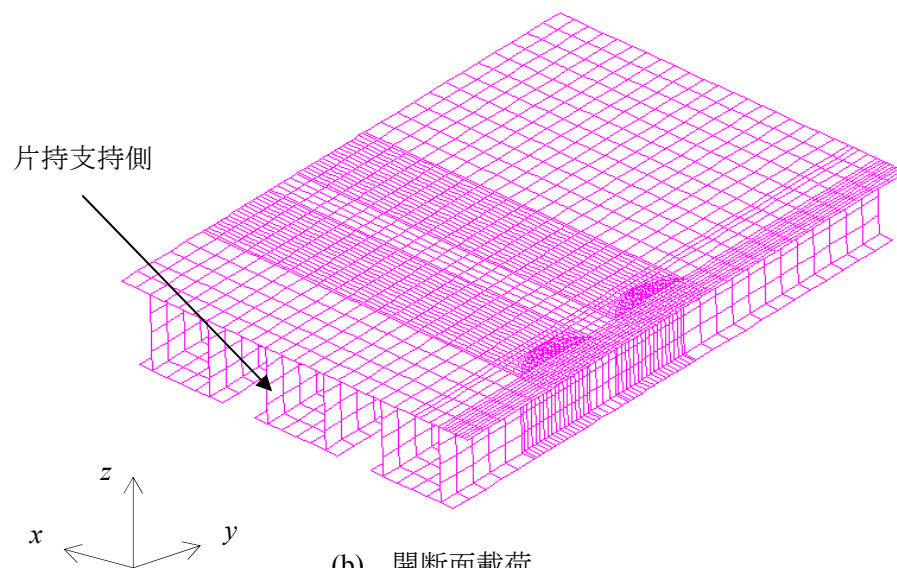
疲労荷重に対して摩擦攪拌接合部に生じる応力範囲 $\Delta\sigma_y$ は 32.8MPa である。疲労限度は、腐食の影響を受ける場合、すなわち $\alpha=0.872$ に対して、式(6)は 52MPa を与える。応力範囲は疲労限度を大きく下回っているので、張出し長が 1350mm 以下であれば、摩擦攪拌接合部に疲労亀裂は発生しない。

6.3.3 接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部

橋軸方向応力 σ_x はトラックタイヤの载荷形状の影響を受けるので、図 12 のトラックタイヤの接地形状を有する複輪トラックタイヤ载荷に対して、図 39 に示す FEM モデルを作成した。有限要素は、DIANA²³⁾の 4 節点曲面シェル要素(Q20SH)と 3 節点曲面シェル要素(T15SH)である。y 軸に関して対称となる境界条件を設け、片持支持した。地覆直下のアルミニウム床版を FEM モデルに含めた。複輪トラックタイヤの中心が閉断面中心と開断面中心に位置する場合を考慮した。



(a) 閉断面載荷



(b) 開断面載荷

図 39 要素分割

アルミニウム床板の上板下面に生じる応力範囲 $\Delta\sigma_x$ の値を表 13 に示す．同表には，閉断面と開断面に対する疲労限度も記載されている．閉断面の疲労限度は，腐食の影響を受けない母材の疲労限度であり， $\alpha=1$ ， $R=0$ を式(3)に代入して得られる値である．他方，開断面の疲労限度は，接合線直角方向に応力を受ける摩擦攪拌接合部が腐食の影響を受ける場合であり， $\alpha=0.872$ ， $R=0$ を式(4)に代入して得られる値である．応力範囲は疲労限度を大きく下回っており，張出し部に橋軸方向応力 σ_x によって疲労亀裂は発生しない．

表 13 上板下面に生じる応力範囲と疲労限度（ $L=1350\text{mm}$ ）

載荷位置	$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\sigma_{caf}$ (MPa)
閉断面	35.5	110.2
開断面	32.0	69.1

6.4 たわみ荷重に対する照査

活荷重に対する照査で使用した図 35 の FEM モデルで，輪荷重を 50kN に変更して，アルミニウム床版のたわみを求めた．支間長 1350mm に対するたわみ比 δ/L の値を表 14 に示す．図 35 の FEM モデルでは地覆直下のアルミニウム床版が考慮されていないので，FEM モデル先端のたわみを，FEM モデル先端のたわみ角を保って，幅 600mm の地覆の先端まで直線外挿することによって得られた値である．張出し長 1350mm 未満であれば，許容たわみ $L/300$ （ $L=1350\text{mm}$ ）を超えない．

表 14 たわみ照査（ $L=1350\text{mm}$ ）

載荷位置	δ/L
閉断面載荷	1/996
開断面載荷	1/1575

第 7 章 結論

本研究では、これまで開発してきた道路橋用アルミニウム床版⁶⁾に対して、死荷重、活荷重、疲労荷重およびたわみ荷重を満たす、主桁間および張出し部の適用支間長の限界を FEM 解析によって明らかにした。

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- 1) 2 主桁橋の主桁間の適用支間長は 4000mm まで可能である。
- 2) 多主桁橋の主桁間の適用支間長の限界は 3300mm である。3300mm を超えると、活荷重に対して、中主桁上のアルミニウム床版の下フランジに生じる応力が許容応力を超える。
- 3) 張出し部の適用張出し長の限界は 1350mm である。1350mm を超えると、活荷重に対して、外主桁上のアルミニウム床版の下フランジに発生する応力が許容応力を超える。
- 4) モルタル充填孔に生じる応力集中を抑えるため、断面積を小さくし、さらに形状を円形から両端を丸めたみぞ形状のモルタル充填開口を考案した。支間長が 3300mm 以下の中主桁上および張出し長が 1350mm 以下の外主桁上で、このモルタル充填開口に疲労亀裂は発生しない。
- 5) 張出し長が 1350mm 以下の張出し部において、橋軸方向応力による疲労亀裂は生じない。したがって開閉断面のアルミニウム床版の口開きを防止する部材を張出し部の先端に設ける必要はない。

参考文献

- 1) http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/06/060601_2/14.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，2002.
- 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) 日本アルミニウム協会，土木構造物委員会：アルミニウム合金土木構造物の摩擦撹拌接合部の品質検査指針（案），2008.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 筒井将仁，萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム床版の摩擦接合継手の開発，土木学会，第 61 回年次学術講演会，No.Ⅰ-365，pp.727-728，2006.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦撹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.
- 12) 日本建設機械化協会，施工技術総合研究所：道路橋用アルミニウム床版の移動載荷疲労試験報告書，2008.
- 13) 塚本健三，末廣本治，中林章，大隅心平：アルミニウム合金製橋梁－JR 川棚駅前広場自由通路橋，橋梁&都市 PROJECT，第 38 巻，第 6 号，pp.4-8，2002.
- 14) 島貫繁吉，山口進吾：資源循環型床版の施工ーリサイクル材を利用したアルミニウム合金製床版，橋梁&都市 PROJECT，第 37 巻，第 11 号，pp.5-11，2001.
- 15) 山田雅義，武本頼和：アルミ床版による新加古川大橋拡幅について，大阪大学，阪大フロンティア研究機構，第 1 回アルミニウム合金構造物実現のためのシンポジウム，pp.26-27，2004.
- 16) 近藤俊行，北山暢彦，大隈心平，岡本信人，大倉一郎：アルミニウム床版に適用する舗装材料の性能確認実験，アルミニウム橋研究会，2006 年度講演概要集，2006.
- 17) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.

- 18) 大倉一郎, 石川敏之, 筒井将仁, 大澤章吾:トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.655-666, 2007.
- 19) 日本アルミニウム協会:アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案(第1次改定試案), 1998.
- 20) 大倉一郎, 萩澤亘保, 花崎昌幸:アルミニウム構造学入門, 東洋書店, 2006.
- 21) 大倉一郎, 牧山大祐, 萩澤亘保:アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の設計 S-N 曲線, ALST 研究レポート, No.6, 2009.
- 22) 西田正孝:応力集中, 森北出版株式会社, 1967.
- 23) 日本電子計算株式会社, 科学技術事業部:DIANA9.3
- 24) 石川敏之, 筒井将仁, 大倉一郎:複輪トラックタイヤ載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.87-92, 2008.
- 25) サイバネットシステム株式会社:ANSYS 11.0
- 26) 大倉一郎:鋼構造設計学の基礎, 東洋書店, 2004.

付録 A FEM 解析における中間支点上の応力の推定方法

板要素を用いたアルミニウム床版の FEM 解析においては，線支持された中主桁の位置で応力が乱れる．構造設計では構造力学によって算出される応力が用いられる．したがって，本研究では，3 点支持された一本の押出型材に対して，構造力学が与える中間支点上の応力を正解値として，これを FEM 解析の結果から推定する方法について述べる．

図 A. 1 に示すように，等間隔 4000mm で，3 点支持された一本の押出型材が右支間中央に 140kN の集中荷重を受けている．これに対する構造力学が与える曲げモーメント分布およびせん断力分布を図 A. 2 に示す．さらに押出型材の断面に生じる垂直応力とせん断応力はそれぞれ次式で与えられる．

$$\sigma_y = \frac{M}{I_x}(z_0 - z) \quad (A1)$$

$$\tau = \frac{\int_z^H t(z - z_0) dz}{t I_x} Q \quad (A2)$$

ここに， σ_y ： z の位置の垂直応力

τ ： z の位置のせん断応力

M ：曲げモーメント

Q ：せん断力

I_x ：押出型材の x 軸回りの断面二次モーメント ($= 7.9992 \times 10^7 \text{ mm}^4$)

t ：押出型材の z の位置の厚さ (上下フランジの場合，板幅であり，ウェブの場合，左右のウェブの板厚の合計)

z_0 ：押出型材の中立軸の位置 ($= 110.45 \text{ mm}$)

H ：押出型材の高さ ($= 200 \text{ mm}$)

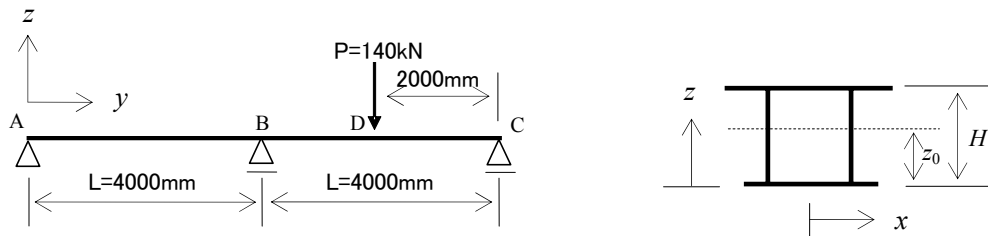


図 A. 1 3 点支持された一本の押出型材

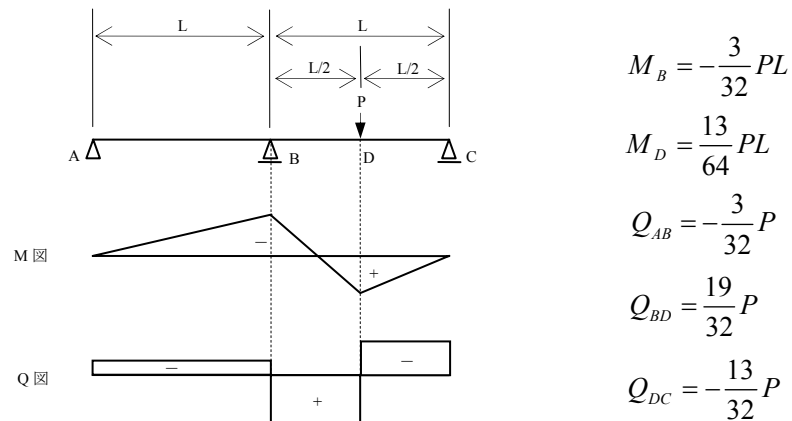


図 A.2 曲げモーメント図およびせん断力図

FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム ANSYS²⁵⁾ を用いた。図 A.1 に示す 3 点支持された一本の押出型材に対する要素分割を図 A.3 に示す。使用した有限要素は 8 節点構造シェル要素(SHELL93)である。押出型材の両端と中央の 3 箇所の下フランジを線支持し、上フランジの板幅中央に集中荷重を載荷する。

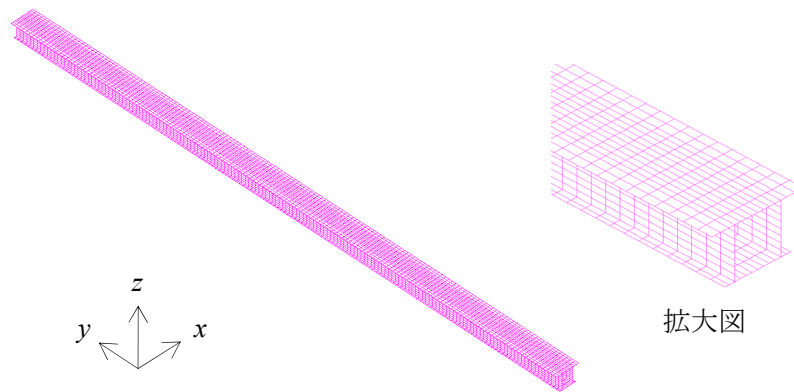
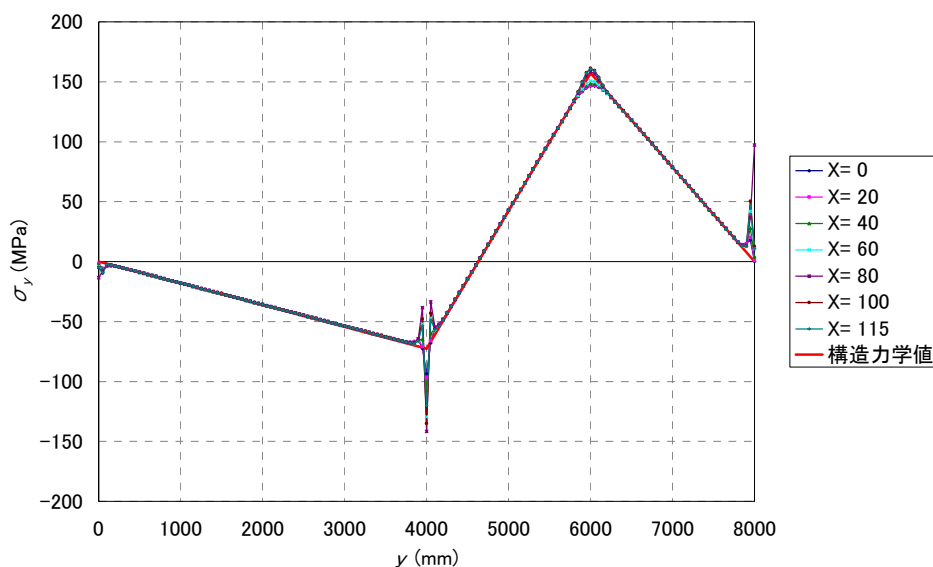
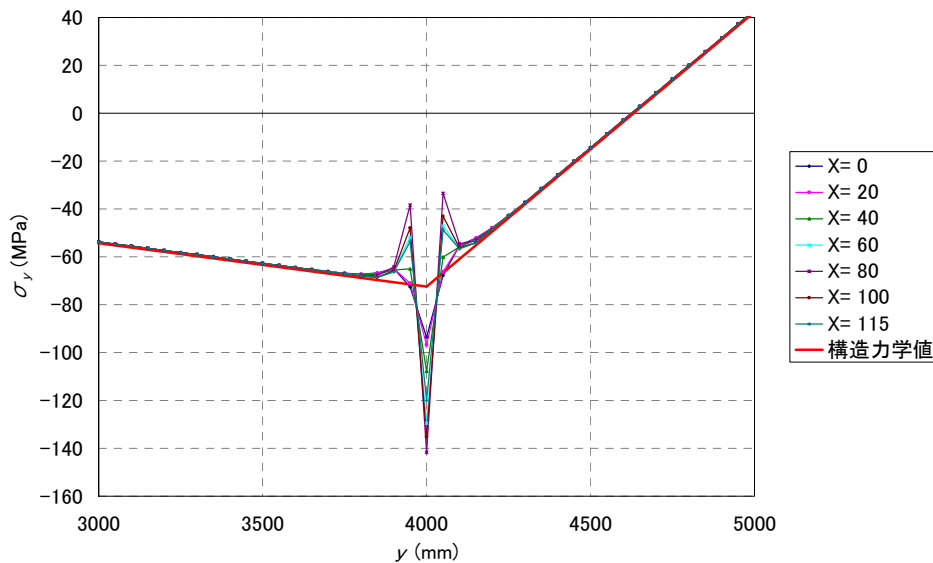


図 A.3 要素分割

下フランジ下面の σ_y に対して FEM 解析値と構造力学値の比較を図 A. 4 に示す。図 A. 4(a)より、支点および荷点付近を除き、FEM 解析値は構造力学値に合っている。中間支点付近の σ_y の分布を拡大した図 A. 4(b)から分るように、中間支点付近で FEM 解析値は乱れている。中間支点の左右各側で応力が直線的に変化している部分を中間支点に向かって直線外挿し、左右の直線が交差する点の値は 72MPa であり、構造力学値 72.5MPa にほぼ等しい。したがって、アルミニウム床版の FEM 解析において、中主桁の左右各側で応力が直線的に変化している部分を中主桁に向かって直線外挿し、左右の直線が交差する点の値を、中主桁位置の下フランジに生じる橋軸直角方向応力とする。



(a) 全体図



(b) 中間支点付近の拡大図

図 A. 4 下フランジ下面の σ_y に対して FEM 解析値と構造力学値の比較

ウェブの板厚中央の σ_y と τ に対する FEM 解析の結果をそれぞれ図 A. 5, A. 6 に示す. σ_y と τ の両者とも, 中間支点付近で応力が乱れている. 中間支点上のウェブの σ_y に対して, 前述の下フランジの場合と同様にして直線外挿から得られる推定値と構造力学値の比較を図 A. 7(a)に示す. 中間支点上のウェブの τ に対して, 中間支点の右側の直線部分を中間支点に向かって直線外挿した推定値と構造力学値の比較を図 A. 7(b)に示す. σ_y と τ の両者とも, FEM 外挿値は構造力学値にほぼ等しい.

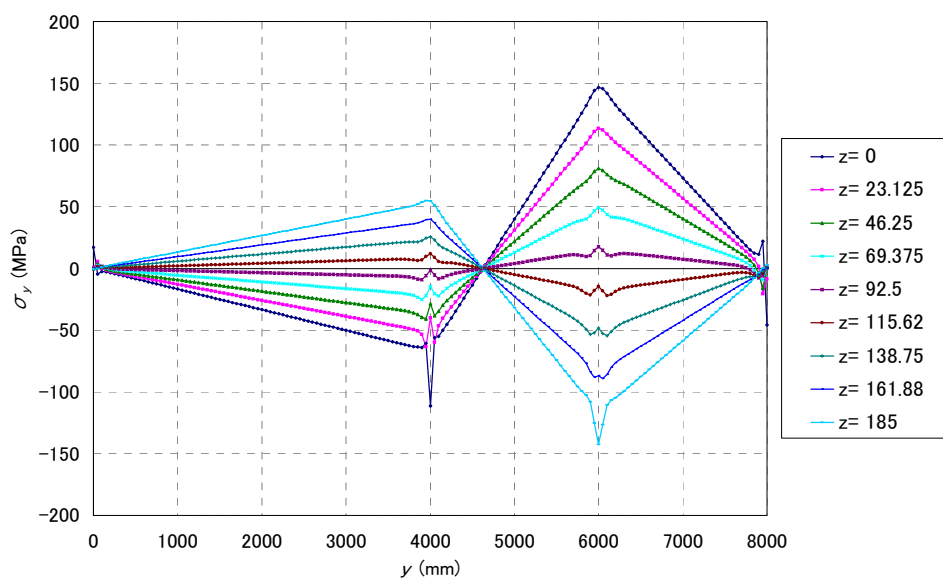


図 A. 5 ウェブの σ_y の分布

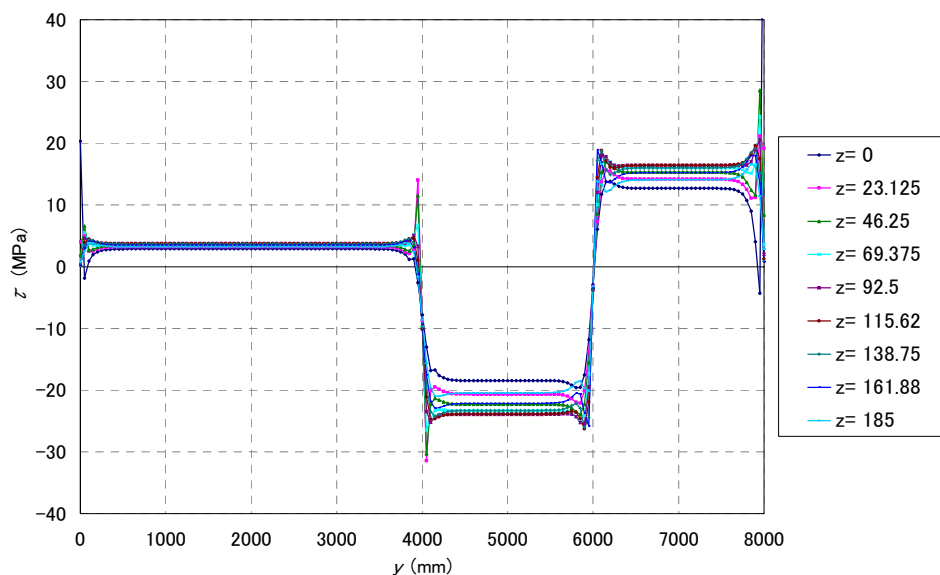


図 A. 6 ウェブの τ の分布

以上より，垂直直応力 σ_y に対して，FEM 解析値の中間支点の左右各側で応力が直線的に変化している部分を中間支点に向かって直線外挿し，左右の直線が交差する値を，FEM 解析値として採用する．せん断応力 τ に対して，FEM 解析値の中間支点の左右の各側において，直線的に変化している部分を中間支点に向かって直線外挿した値を，FEM 解析値として採用する．

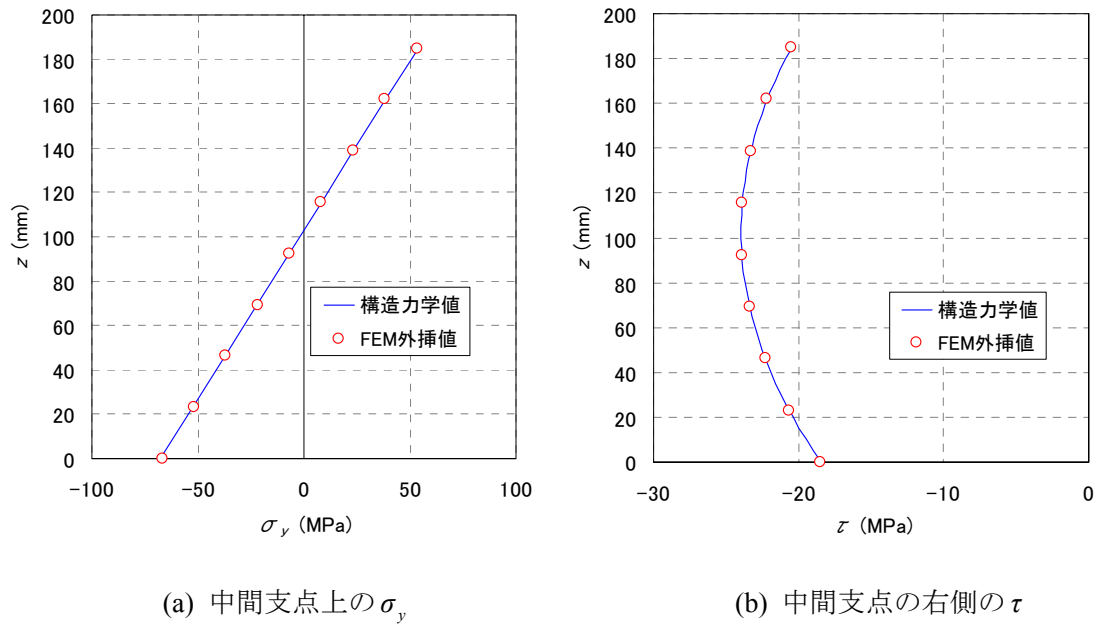


図 A.7 FEM 外挿値と構造力学値の比較