

**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年3月版

**社団法人 日本アルミニウム協会
土木構造物委員会**

まえがき

アルミニウム合金はこれまで橋の高欄や道路の防護柵など付属品的な用途以外に土木構造物の主要部材として用いられることはほとんどなかった。しかし耐食性に優れ、軽量であることから、土木構造物にアルミニウム合金の適用が期待されるようになってきた。

この様な状況で、当協会では、道路橋用アルミニウム床版の開発を 1997 年頃始めた。当初考案された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つたので、これを解決するアルミニウム床版として開閉断面のものが提案された。これに対して構造解析、載荷試験、疲労試験が実施され、アルミニウム床版の基本データが収集された。さらに、実物大のアルミニウム床版が試作され、これに対してトラックタイヤ移動載荷疲労試験が実施され、同床版には疲労亀裂が発生しないことが実証された。

アルミニウム床版を用いた鋼桁橋では、アルミニウム合金の線膨張係数が鋼の線膨張係数に対して約 2 倍あるため、温度変化により、アルミニウム床版と鋼桁のそれぞれに内部応力が発生する。この温度変化による内部応力の算定方法が確立され、これと前述の知見との統合により、本ガイドラインの完成を見た。

道路橋用アルミニウム床版は、劣化した鉄筋コンクリート床版を有する既設橋の取替床版としてのみならず、建設重機の小型化による工期短縮、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つながるなどの利点が挙げられ、新設橋にも適用することが期待される。

本ガイドラインが、橋梁技術者の実用書としてのみならず、アルミニウム床版を用いた土木構造物の設計に興味を抱く土木技術者・研究者に活用されることを期待する。

最後に、本ガイドラインの作成に多大な努力を払われた大倉一郎分科会委員長をはじめとする委員各位に心からの感謝の意を表する次第である。

2011 年 3 月

社団法人日本アルミニウム協会
土木構造物委員会
委員長 依田 照彦

土木構造物委員会

顧問 藤原 稔 元 海峡横断道路調査会
委員長 依田 照彦 早稲田大学 理工学術院
委員 大倉 一郎 大阪大学 大学院工学研究科
大隅 心平 (株)住軽日軽エンジニアリング 設計技術部
春日 昭 (株)IHI インフラシステム 技術本部
櫻井 勝好 日立造船(株) 機械・インフラ本部
萩澤 亘保 日本軽金属(株) グループ技術センター
福田 敏彦 住友軽金属工業(株) 研究開発センター

事務局 上田 健次 (社)日本アルミニウム協会

道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋 設計・製作・施工ガイドライン作成分科会

委員長	大倉 一郎	大阪大学	大学院工学研究科
委員	有住 康則	琉球大学	工学部
	石川 敏之	京都大学	大学院工学研究科
	大隅 心平	㈱住軽日軽エンジニアリング	設計技術部
	貝沼 重信	九州大学	大学院工学研究院
	久下 晴巳	日本道路㈱	技術営業部
	黒山 昭治	㈱竹中製作所	表面処理事業部
	近藤 俊行	㈱IHIインフラシステム	技術本部
	櫻井 勝好	日立造船㈱	機械・インフラ本部
	萩澤 亘保	日本軽金属㈱	グループ技術センター
	林 大介	鹿島建設㈱	技術研究所
	福田 敏彦	住友軽金属工業㈱	研究開発センター
	山田 靖則	㈱東光コンサルタンツ	大阪支店
	協力者	豊田 英治	日軽金アクト㈱
長尾 隆史		日本軽金属㈱	グループ技術センター
事務局	上田 健次	(社)日本アルミニウム協会	

目次

第1章	序論	1
第2章	道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋の構造	3
第3章	アルミニウム床版の設計	6
3.1	荷重	6
3.1.1	死荷重	6
3.1.2	活荷重	6
3.1.3	疲労設計荷重	7
3.1.4	たわみ照査荷重	8
3.2	許容応力，疲労限度，許容たわみ	9
3.2.1	許容応力	9
3.2.2	疲労限度	10
3.2.3	許容たわみ	11
3.3	アルミニウム床版の断面形状	11
3.4	アルミニウム床版の適用支間長	12
3.5	ボルト接合継手	13
3.6	モルタル注入開口	14
第4章	鋼桁の設計	15
4.1	一般事項	15
4.2	アルミニウム床版と鋼桁との連結構造およびモルタル台座	15
4.2.1	アルミニウム床版と鋼桁との連結構造	15
4.2.2	モルタル台座	16
4.3	アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に関する理論	17
4.4	鋼桁のたわみ	22
4.5	活荷重による桁端の変位	25
4.6	温度変化の影響	26
4.6.1	温度変化と線膨張係数	26
4.6.2	温度変化によって生じる応力	27
4.6.3	温度変化に対する鋼桁の応力照査	28
4.6.4	温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査	28
4.6.5	温度変化による鋼桁の反り	29

4.6.6	温度変化による桁端の移動量	30
4.7	アルミニウム床版の有効幅	32
4.8	端横桁と端ブラケット	33
4.9	端横桁と端ブラケットへのアルミニウム床版の定着構造	34
第5章	アルミニウム床版の製作	37
5.1	アルミニウム床版形材	37
5.2	摩擦攪拌接合	38
5.3	ボルト接合継手に使用される添接板	38
5.4	フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト	39
5.5	仮組立	40
第6章	鋼桁の製作	41
第7章	舗装	42
7.1	舗装材料	42
7.2	防水層	42
第8章	付属物	43
8.1	地覆	43
8.2	排水装置	44
8.3	伸縮装置	45
8.4	アルミニウム床版端部の処理	46
第9章	アルミニウム床版の施工	47
9.1	アルミニウム床版の施工フロー	47
9.2	台座の施工	47
9.3	アルミニウム床版の据付と調整	47
9.3.1	モルタルおよびコンクリート製地覆と接触する面の処理	47
9.3.2	アルミニウム床版ユニットの位置決め	48
9.4	ボルト締結	48
9.5	無収縮モルタルの施工	48
第10章	道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋の設計例	49
10.1	設計条件	49
10.2	アルミニウム床版の設計	51
10.2.1	床版支間	51

10.2.2	ボルト接合継手	51
10.3	鋼桁の設計	52
10.3.1	荷重	52
10.3.2	荷重強度	54
10.3.3	断面力	55
10.3.4	断面の決定	56
10.3.5	垂直補剛材	66
10.3.6	温度変化による桁端の移動量	68
10.3.7	頭付きスタッドの配置	70
10.4	端横桁および端ブラケット	70
10.5	地覆鉄筋の照査	71
参考文献		73
付録 A	水平せん断バネの算定方法	76
付録 B	アルミニウム床版の製作	78
付録 C	摩擦攪拌接合の特徴	80
付録 D1	フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの締結要領	81
付録 D2	フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの補修要領	83
付録 E	舗装の施工	84

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、橋長15m以上の橋梁が約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8900橋、2016年および2026年にはそれぞれ約28400橋、約66300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の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ことが予想される。

他方、1993年の道路構造令の改正により、設計自動車荷重が196kNから245kNに変更されたことにより、鉄筋コンクリート床版を取り替える場合、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することができないかと考えられた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、耐食性の良さからライフサイクルコストの削減にもつながるなどの利点が挙げられる。

このような背景で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 1.1**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 1.2**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 1.3**に示す道路橋用アルミニウム床版のトラックタイヤ移動載荷疲労試験の公開実験が行われ、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¹²⁾。

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、アルミニウム床版を用いた鋼橋の設計・製作・施工指針もまだ制定されていない。このような状況で、本書は、道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋（以下、道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋と呼ぶ）の設計・製作・施工に関するガイドラインを示す。

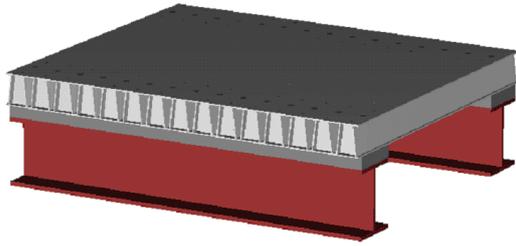


図 1.1 閉断面アルミニウム床版

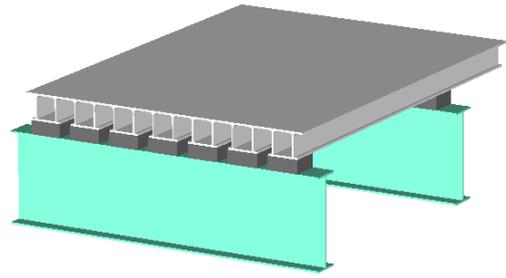


図 1.2 開閉断面アルミニウム床版



図 1.3 トラックタイヤ移動載荷疲労試験

第2章 道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋の構造

道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋のイメージを図 2.1，アルミニウム床版の断面形状を図 2.2 に示す。図 2.2 の中空の部材が橋軸直角方向に並ぶような形式で，複数の鋼主桁上にアルミニウム床版が設置される。材料は A6061S-T6 であり，幅 320mm，高さ 200mm の中空押出型材を摩擦攪拌接合で接合することによってアルミニウム床版が製作される⁶⁾。

鋼製高力ボルトを用いた，アルミニウム床版のボルト接合継手¹²⁾の断面形状を図 2.3 に示す。ボルト接合継手に使用される押出型材の片方の上フランジは，高力ボルトの頭が上面から突出しないように下方に下げられている。これは，アスファルト舗装厚を確保するとともに，基層まで打ち換えする際のはつり作業の施工性を良くするためである。

我国では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エポキシ樹脂を用いたアスファルト舗装が施される¹⁶⁾。

アルミニウム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。鉄筋コンクリート製地覆の取付け構造を図 2.4 に示す⁹⁾。地覆は，U字型鉄筋と鋼製ナットと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。

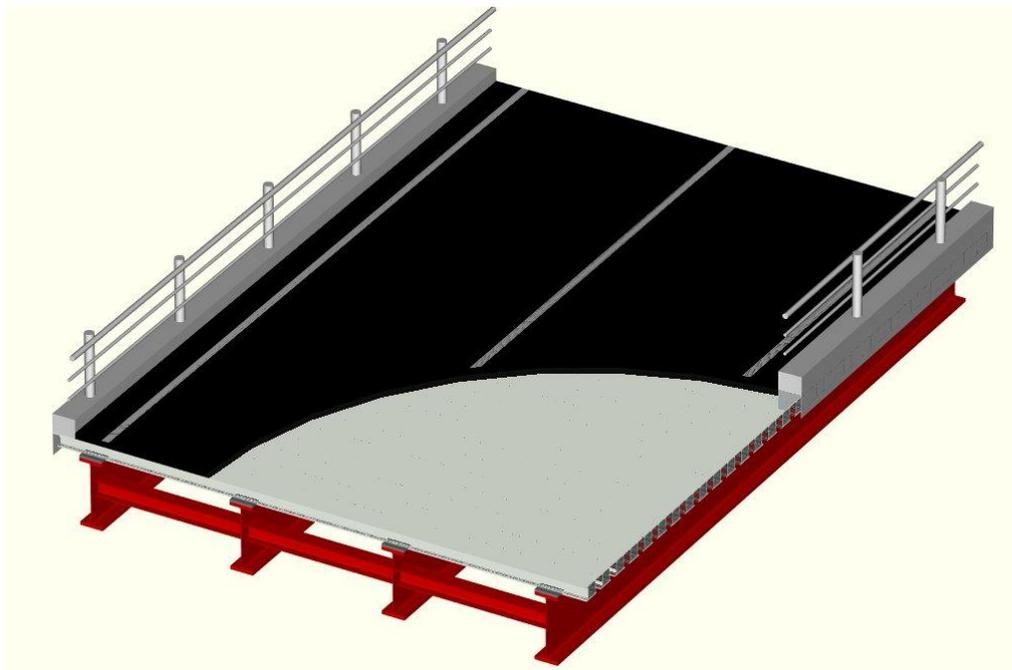


図 2.1 道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋

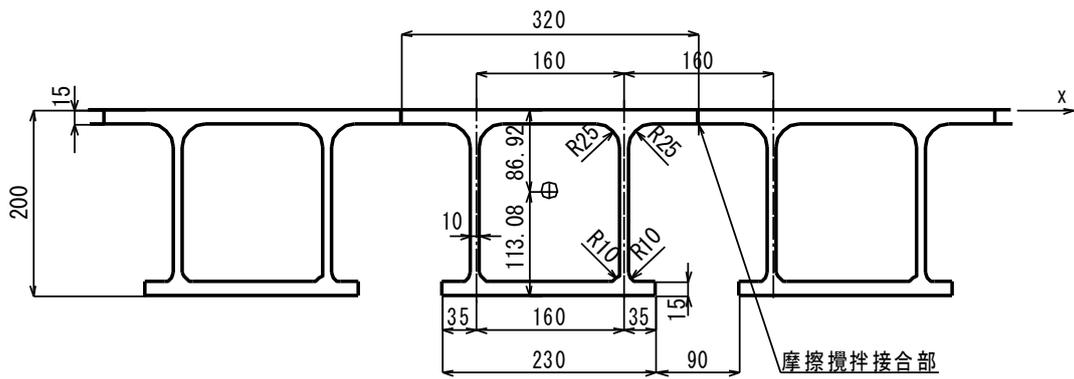


図 2.2 アルミニウム床版の断面形状

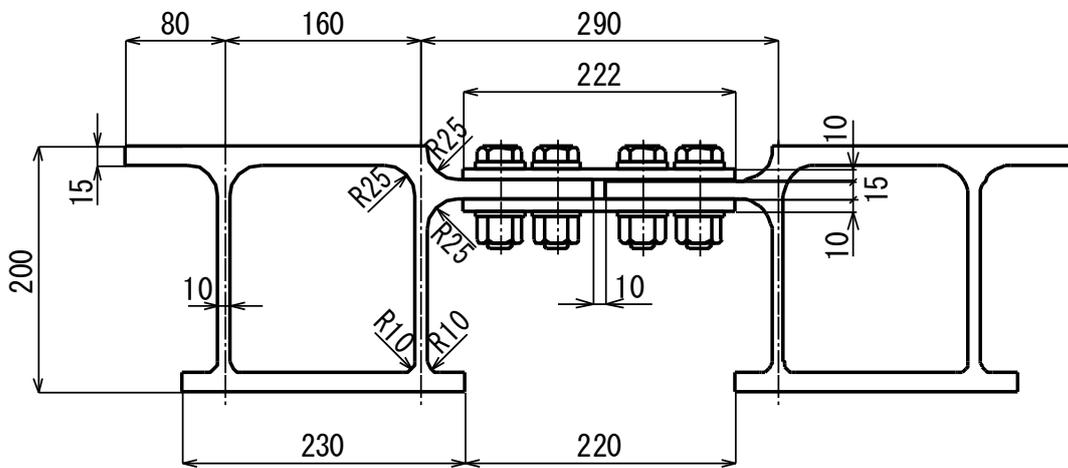


図 2.3 ボルト接合継手の断面形状

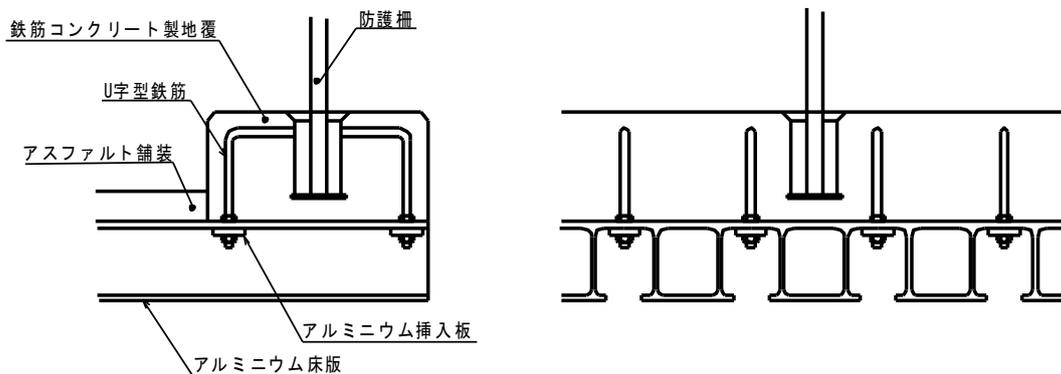


図 2.4 鉄筋コンクリート製地覆のアルミニウム床版への取り付け構造

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図 2.5 に示す⁷⁾。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閉断面内へ挿入され、対向するアルミニウム仕切り板の間をモルタルで充填することにより、アルミニウム床版と鋼桁とが連結される。したがって、アルミニウム床版と鋼桁との間には桁軸方向に合成作用が生じる。

アルミニウム合金の線膨張係数 ($23 \times 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$) は鋼の線膨張係数 ($12 \times 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$) に対して約 2 倍あるため、アルミニウム床版と鋼桁とが合成作用を有すると、温度変化によりアルミニウム床版と鋼桁に内部応力、すなわち温度変化応力が生じる。アルミニウム床版－鋼桁橋においては、この温度変化応力を設計で考慮しなければならない。

アルミニウム床版は鉄筋コンクリート床版と比べて軽量であるため、新設橋としてアルミニウム床版－鋼桁橋を設計する場合、アルミニウム床版－鋼桁橋の鋼桁断面は鉄筋コンクリート床版－鋼桁橋の鋼桁断面より小さくなる。したがって鋼桁断面の断面二次モーメントが小さくなることにより、活荷重に対する鋼桁のたわみが増加する。そこで活荷重に対する鋼桁のたわみを照査する際には、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮する。

しかし、死荷重、活荷重、衝撃荷重などの主荷重に対して鋼桁を設計する際には、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は考慮しない。すなわち、鋼桁は、アルミニウム床版に対して非合成桁として設計する。

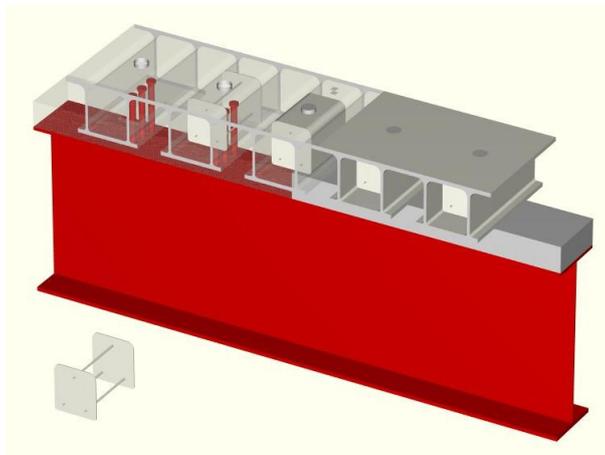


図 2.5 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

第 1 章で述べたように、アルミニウム床版は、元々、劣化した鉄筋コンクリート床版を有する既設橋の取替床版として提案された。しかし、アルミニウム床版－鋼桁橋によって、建設重機の小型化による工期短縮、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つながるなどの利点が挙げられ、今後、アルミニウム床版－鋼桁橋の新設が見込まれる。したがって本書では、単純支持された道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋が新設される場合を想定して、設計・製作・施工に関するガイドラインを示す。

第3章 アルミニウム床版の設計

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 3.1 に示す。アルミニウム床版の死荷重は、図 3.1 に示す押出型材 1 本の単位長さ当りの値、高欄の死荷重は橋軸方向の単位長さ当りの値、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 3.1 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

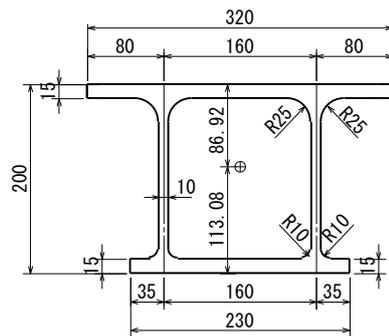


図 3.1 押出型材の断面図

3.1.2 活荷重

活荷重を図 3.2 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。活荷重の載荷は、橋軸方向に 1 組、橋軸直角方向には組数に制限がないものとし、着目する位置に最も不利な応力が生じるように載荷する。

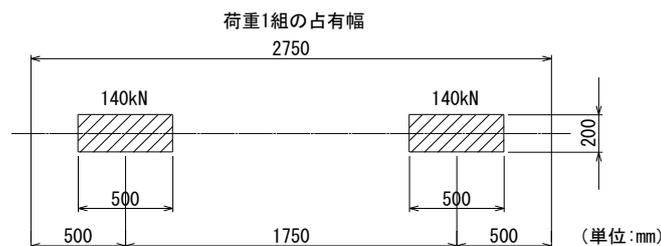


図 3.2 活荷重

3.1.3 疲労設計荷重

トラックタイヤを直接支持するアルミニウム床版の上板は面外変形を起こす。この面外変形に起因して、アルミニウム床版の上板に生じる応力は、タイヤの接地形状の影響を受ける¹⁷⁾。これに対する疲労設計荷重を図 3.3 に示す。疲労設計荷重は、トラックの後輪 2 軸をモデル化し、道路運送車両法に従う道路運送車両の保安基準（国土交通省令第 67 号）に従って前軸と後軸の間隔を 1300mm としている。各軸のタイヤは複輪で、左右の複輪タイヤの中心間隔は 1750mm 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¹⁸⁾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 (=25kN×1.2) とする。疲労設計荷重の載荷は、橋軸方向に 1 組、橋軸直角方向には組数に制限がないものとし、着目する位置に最も不利な応力が生じるように載荷する。

図 3.3 のタイヤ 1 輪の形状を図 3.4 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¹⁷⁾。

$$r = \frac{100QP}{485.7(\alpha_1 P + \alpha_2)} + 33.7 \quad (3.1)$$

ここに、 r : タイヤの接地半径 (mm)

P : タイヤ 1 輪に作用する荷重 (kN)

α_1, 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¹⁷⁾, $P = 30\text{kN}$ を式(3.1)に代入して、 $r = 126.5\text{mm}$ を得る。

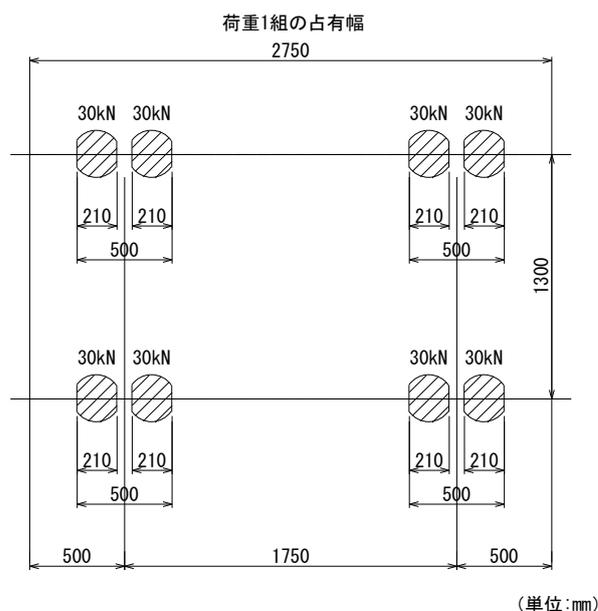


図 3.3 疲労設計荷重

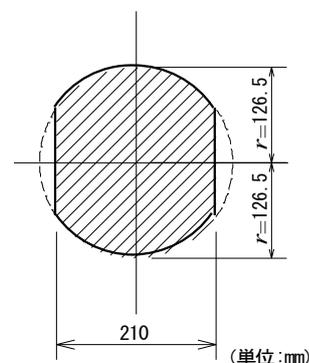


図 3.4 トラックタイヤの接地半径

トラックタイヤを直接支持するアルミニウム床版の上板以外に生じる応力はタイヤの接地形状の影響を受けない¹⁹⁾。したがって図 3.5 に示す疲労設計荷重を載荷してもよい。

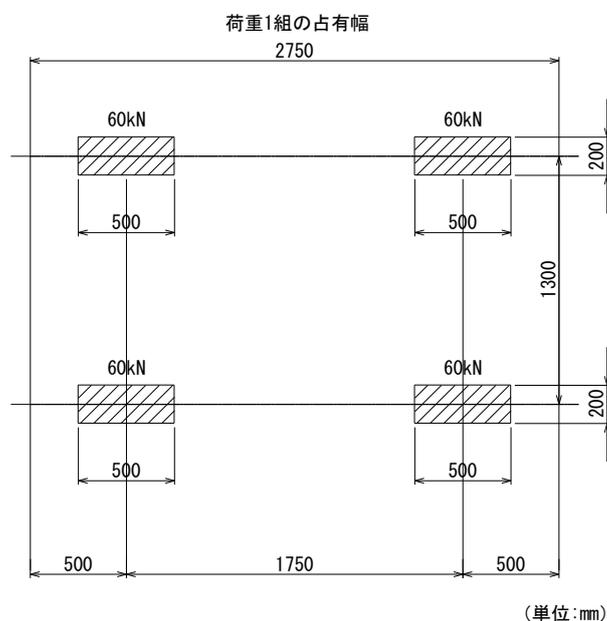


図 3.5 疲労設計荷重

3.1.4 たわみ照査荷重

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ため、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。

アルミニウム床版のたわみを照査する際に使用する荷重、すなわちたわみ照査荷重を図 3.6 に示す。疲労設計荷重と同様に、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。ここで道路橋示方書²⁾に従って、たわみを照査する際には衝撃荷重を考慮しない。たわみ照査荷重の載荷は、橋軸方向に 1 組、橋軸直角方向には組数に制限がないものとし、着目する位置に最も不利なたわみが生じるように載荷する。

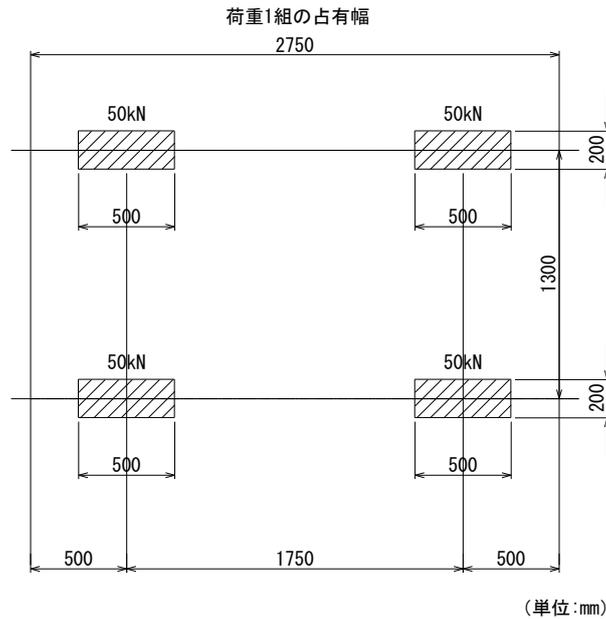


図 3.6 たわみ照査荷重

3.2 許容応力, 疲労限度, 許容たわみ

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)²⁰⁾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²¹⁾.

$$\sigma_{pa} = \sigma_a - \frac{A_j}{A} (\sigma_a - \sigma_{ja}) \quad (3.2)$$

ここに, σ_{pa} : 部材軸方向に摩擦攪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} : 摩擦攪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 : 摩擦攪拌接合部の熱影響範囲の断面積

図 3.1 に示すように, 押出形材 1 本の上フランジの幅は 320mm であり, その両側が摩擦攪拌接合によって接合される. 摩擦攪拌接合部の熱影響範囲が 1 インチルール²¹⁾ (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, 摩擦攪拌接合部の熱影響範囲は, 押出形材 1 本の上フランジ幅 320mm に対して 50mm である. さらに摩擦攪拌接合部の熱影響範囲の許容応力に対して, JAA 指針²⁰⁾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. 押出形材の板厚が 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(3.2)より 110MPa である。

アルミニウム床版の上板にモルタル注入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、モルタル注入開口の許容応力を 0 と考えて、押出型材 1 本の上フランジ幅 320mm に対して、図 3.7 に示す 20mm の幅の開口を一つ設ける場合、式(3.2)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、摩擦攪拌接合部の熱影響範囲とモルタル注入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 [= $110 - (300/4800)(120 - 0)$] になる。

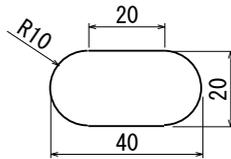


図 3.7 モルタル注入開口

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。

6000 系アルミニウム合金の母材の疲労限度は次式で与えられる²²⁾。

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{146(1-R)}{1.3244 - 0.6756R} \quad (3.3)$$

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)

6000 系アルミニウム合金の摩擦攪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²²⁾。

$-1 \leq R \leq 0.1$ に対して、

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{133(1-R)}{1.6786 - 0.3214R} \quad (3.4)$$

$0.1 < R \leq 1$ に対して、

$$\Delta\sigma_{caf} = \alpha \frac{99.0(1-R)}{1.2966 - 0.7034R} \quad (3.5)$$

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)

6000 系アルミニウム合金の， 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， 過去に実施された実物大の疲労試験の結果より， $-1 \leq R \leq 0.1$ に対して次式で与えられる²³⁾。

$$\Delta\sigma_{caf} = 60\alpha \quad (3.6)$$

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)

3.2.3 許容たわみ

たわみ照査荷重に対するアルミニウム床版の許容たわみとして， 道路橋示方書²⁾で規定される鋼桁に対する許容たわみを準用する。 道路橋示方書²⁾では， 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許容たわみは， 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。

3.3 アルミニウム床版の断面形状

図 2.2 に示すアルミニウム床版の断面形状 (材料 A6061S-T6) は， 図 3.3 に示す疲労設計荷重に対して生じる橋軸方向応力 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⁶⁾， 移動トラックタイヤ載荷試験によって疲労亀裂が発生しないことが実証されている¹²⁾。

張出し部の先端ではアルミニウム床版の開断面が開き， 橋軸方向応力 σ_x が大きくなる可能性がある。 しかし， 図 2.2 に示す断面形状 (材料 A6061S-T6) を有するアルミニウム床版の， 張出し長が 1350mm 以下の場合， σ_x によって摩擦攪拌接合部に疲労亀裂は発生しないことが照査されている²³⁾。

アスファルト舗装に悪影響を及ぼさないようにするために， アルミニウム床版のウェブとウェブとの間の上板の面外変形を抑制する必要がある。 図 2.2 に示すアルミニウム床版の断面形状 (材料 A6061S-T6) は， 道路橋示方書²⁾の鋼床版のデッキプレートの最小板厚の規定に付随する解説に従い， 衝撃荷重を考慮して， 図 3.8 に示す橋軸方向に 200mm， 橋軸直角方向に 500mm の長方形の領域に輪荷重 70kN を載荷し， アルミニウム床版の上板の面外変形が $B/300$ 以下となるように設計されている⁶⁾。 ここで， B はアルミニウム床版のウェブとウェブとの間の間隔である。

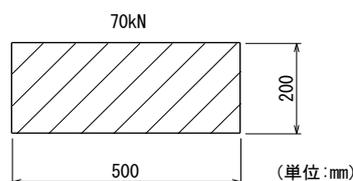


図 3.8 アルミニウム床版上板の面外変形を照査する荷重

5.2節で述べるように、摩擦攪拌接合においては、接合部の板厚が減少する。図2.2に示すアルミニウム床版の摩擦攪拌接合部の板厚15mmは、設計荷重に対して決定された板厚である。したがって、アルミニウム床版を製作する際には、使用する摩擦攪拌接合装置に応じて、摩擦攪拌接合部の板厚を15mmより厚くしなければならない。

3.4 アルミニウム床版の適用支間長

橋軸直角方向応力 σ_y は、死荷重、活荷重、疲労設計荷重、たわみ照査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。図2.2に示す断面形状(材料A6061S-T6)を有するアルミニウム床版に対するFEM解析の結果、図3.9に示すように、主桁間の適用支間長は、2主桁橋で4000mm以下、多主桁橋で3300mm以下、張出し部の適用張出し長は、地覆幅600mmを含めた長さで1350mm以下である²³⁾。

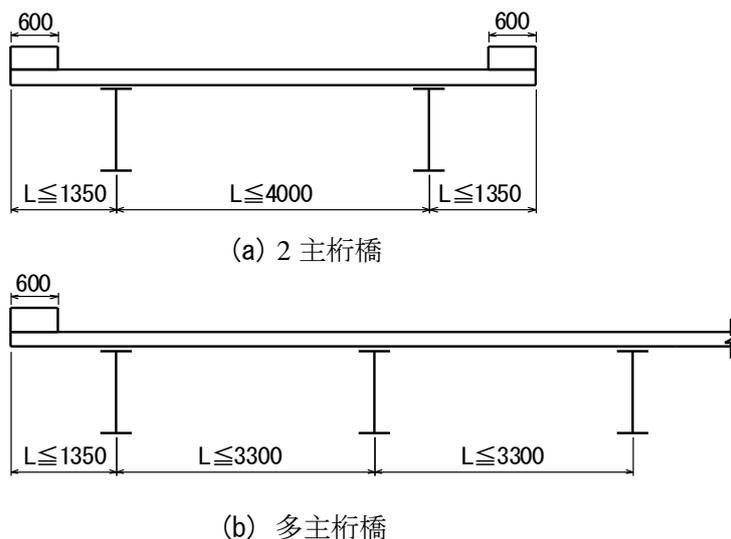


図3.9 適用支間長と適用張出し長

外主桁上および多主桁橋の中主桁上の、アルミニウム床版のウェブには、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を次式で行なう。

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 \leq 1.2 \quad (3.7)$$

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 ($= \sigma_a / \sqrt{3}$)

図2.2に示す断面形状(材料A6061S-T6)を有するアルミニウム床版は式(3.7)を満たす²³⁾。

3.5 ボルト接合継手

アルミニウム床版のボルト接合継手には鋼製高力ボルトによる摩擦接合継手を使用される。鋼製高力ボルトには、アルミニウム合金と鋼との異種金属接触腐食を防止するためにフッ素樹脂でコーティングされたものが使用される。フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト 1 本 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力は次式で与えられる。

$$\rho_a = \frac{1}{\nu} \mu N \quad (3.8)$$

$$N = 0.75 \sigma_{s,0.2} A_e \quad (3.9)$$

ここに、 ρ_a : フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト 1 本 1 摩擦面当りの許容荷重伝達力

ν : 安全率

μ : 摩擦面のすべり係数

N : 設計ボルト軸力

$\sigma_{s,0.2}$: 鋼製高力ボルトの 0.2% 耐力

A_e : 鋼製高力ボルトの有効断面積

鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手においては、フレットイング（こすれ）疲労亀裂が発生する⁸⁾。高力ボルトへの F8T および F10T の初期導入軸力の違いによって、このフレットイング疲労亀裂に対する疲労強度は変わらないことが明らかにされている⁸⁾。F8T の鋼製高力ボルトの使用本数は F10T のそれより増えるので、F8T の鋼製高力ボルトの使用は現実的でない。したがって本ガイドラインでは F10T の鋼製高力ボルトに対してのみ規定する。

摩擦面のすべり係数 μ は 0.45 とする。アルミニウム建築構造製作要領²⁴⁾においては、摩擦接合継手において、一つのせん断面の相対する両方の摩擦面、または一方の摩擦面をブラスト処理により表面粗さ Rz 20 μ m 以上の粗面とすることによって、すべり係数 0.45 が確保されると記述されている。これに対する追認試験が実施された結果、これが正しいことが明らかにされている²⁵⁾。

アルミニウム合金のクリープによる鋼製高力ボルトの軸力低下と経過時間の関係、鋼製高力ボルトの軸力変化と温度変化の関係および鋼製高力ボルトの初期導入軸力とアルミニウム合金板の表面の変形特性の関係が明らかにされている²⁶⁾。しかし、フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトのフッ素樹脂皮膜のクリープが明らかにされていないこと、フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの施工実績が少ないこと、および実際のボルト接合継手においては、舗装を介してボルトの直上をトラックタイヤが通過することなどを考慮して、フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト継手の許容荷重伝達力に対する安全率を、JAA 指針²⁰⁾で規定される 1.85 の基本安全率の 1.5 倍の 2.78 とする。

設計ボルト軸力およびフッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの許容荷重伝達力に対して式(3.8)と(3.9)が与える値を表 3.2 に示す。

表 3.2 設計ボルト軸力およびフッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの許容荷重伝達力 (1 ボルト 1 摩擦面当り)

等級	ねじの呼び	$\sigma_{s0.2}$ (MPa)	A_e (mm ²)	N (kN)	ν	μ	ρ_a (kN)
F10T	M12	900	84.3	56.9	2.78	0.45	9.2
	M16		157	106			17.2
	M20		245	165			26.7
	M22		303	205			33.2

アルミニウム床版のボルト接合継手に使用されるフッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの必要本数は、アルミニウム床版上板の全強を伝達することができる本数とする。ここで、全強を計算する際に使用する許容応力は摩擦攪拌接合部の許容応力であり、A6061S-T6 の場合 59MPa である。

ボルトの中心間隔および縁端距離は JAA 指針²⁰⁾の規定に従うことを原則とする。しかし図 2.3 に示すように、ボルト接合継手の橋軸方向の長さは設計上の制約を受けるため、材端距離 (ボルト孔の中心から材端までの距離) が、JAA 指針²⁰⁾で規定される値を満たさない場合が生じる。このようなボルト接合継手に対しては、その安全性を解析または実験によって明らかにしなければならない。

図 2.3 において、添接板の端部がボルト接合継手型材の円弧部に接触するのを避けるために、添接板の端部とボルト接合継手型材の円弧部開始点との間に 4mm の間隔を設け、アルミニウム床版ユニット間の隙間を 10mm としている。この場合、ボルト接合継手の材端距離は 30mm となり、JAA 指針²⁰⁾で規定される材端距離 40mm (ボルトの呼び径 20mm の 2 倍) を満足しない。しかし、図 2.3 に示すボルト接合継手には疲労亀裂が発生しないことが、移動トラックタイヤ載荷疲労試験によって確認されている¹²⁾。

3.6 モルタル注入開口

モルタル注入開口は、図 3.7 に示す長孔形状とする。モルタル注入開口の細長い方向が橋軸直角方向である。橋軸直角方向応力 σ_y に対して、床版支間長が 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、このモルタル注入開口に疲労亀裂が発生しないことが照査されている²³⁾。

図 4.1 に示すように、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下フランジに開けられた開口から中空断面内へ挿入される。アルミニウム床版の上板に開けられた開口から無収縮モルタルが注入され、3本のロッド（材料 A5056BE-H112, A5056BD-H12 など）で連結された対向する仕切り板（材料 A5052P-H32, H34 など）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とが連結される。

無収縮モルタルは、東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社および西日本高速道路株式会社の試験方法「無収縮モルタル品質管理試験方法」²⁸⁾に従って、その性能が表 4.1 に示す管理値を満たすものでなければならない。無収縮モルタルは注入後膨張するので、3本のロッドで連結された対向する仕切り板はこの膨張に抵抗できるものでなければならない。3本のロッドはスタッドに接触しない位置に設ける。

表 4.1 無収縮モルタルの管理値

項目	管理値
コンシステンシー	8±2 秒
ブリーディング	練上り 2 時間後において 2%以下
凝結時間	凝結開始時間 1 時間以上 終結時間 10 時間以内
膨張収縮	材齢 7 日で収縮を示さないこと
圧縮強度	材齢 3 日において 25MPa 以上 材齢 28 日において 45MPa 以上
付着強度	材齢 28 日において 3MPa 以上

4.2.2 モルタル台座

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止するために、アルミニウム床版と鋼桁との間にモルタル台座を設ける。モルタル台座は、アルミニウム床版からの繰返しの支圧力に耐えることが求められる。

モルタル台座には高靱性セメント複合材料 ECC (Engineered Cementitious Composite) を使用する。ECC は表 4.2 に示す管理値を満たすものでなければならない。同表の引張降伏ひずみは、ECC 台座に生じるひび割れを抑制するために、ECC 台座の引張降伏ひずみが鋼桁の降伏ひずみと同じになるように、ECC の材齢 28 日の引張降伏ひずみに対して要求される値である²⁷⁾。ECC には、混和材料および繊維などの多種類の材料が使用されるので、実施工において安定した品質を確保するために、プレミックスされた製品を用いることが望ましい。

表 4.2 ECC の管理値

項目	管理値	
コンシステンシー（スランプフロー）	550±100mm の範囲内	
圧縮強度	材齢 28 日において 24MPa 以上	
引張降伏ひずみ	鋼桁の鋼種	材齢 28 日において
	SS400 SM400 SMA400W	0.189%以上
	SM490	0.254%以上
	SM490Y SM520 SMA490W	0.286%以上
	SM570 SMA570W	0.362%以上
	引張終局ひずみ	材齢 28 日において 2.0%以上

ECC が台座に使用された試験体の，アルミニウム床版から支圧力を受ける疲労試験により，ECC にはひび割れが発生しないことが報告されている²⁷⁾。

モルタル台座の厚みは，一般部で 30mm 以上を標準とする．鋼桁の上フランジにボルト接合継手が存在する場合，モルタル台座の厚みは，ボルト頂部から 12mm 以上のかぶりを確保できる厚さとする．

4.3 アルミニウム床版と鋼桁との合成作用に関する理論

鉄筋コンクリート床版を有する鋼桁の合成作用に関する理論では，鉄筋コンクリート床版が変形後も平面を保持すると仮定されている．これに基づいて，初期の研究^{29),30)}においては，図 4.2 に示すように，アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分が変形後も平面を保持すると仮定して，鋼桁上フランジの上面の位置で，鋼桁上フランジの上面の水平変位とアルミニウム床版の水平変位との差と，水平せん断力との間に次式が仮定された．

$$H = k^*(u_f - u_a^*) \quad (4.1)$$

ここに， H : アルミニウム床版上板の下面および鋼桁上フランジの上面に生じる水平せん断力

k^* : 水平せん断バネ

u_f, u_a^* : それぞれ，鋼桁上フランジの上面の変位およびアルミニウム床版上板の鋼桁上フランジの上面の位置での変位

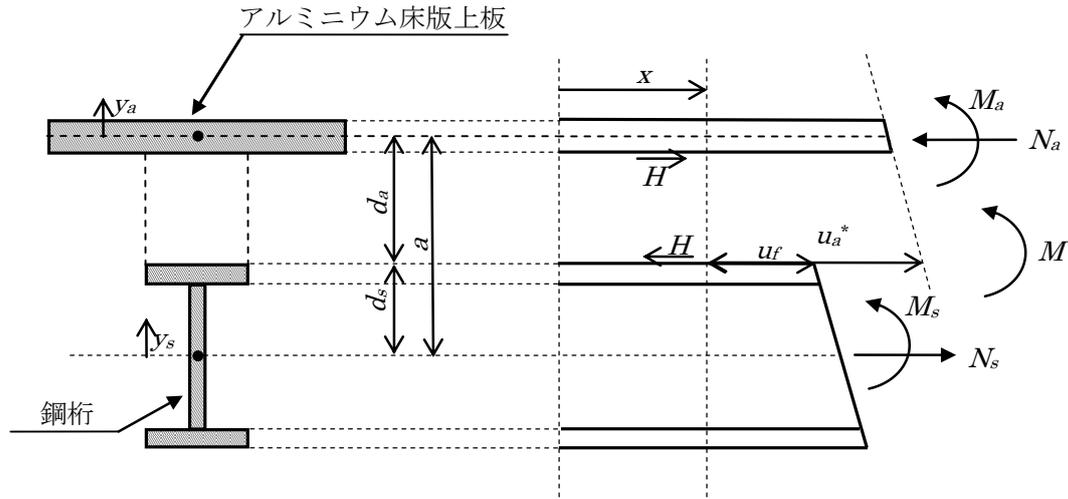


図 4.2 初期の研究におけるアルミニウム床版上板と鋼桁の変形

そして鋼桁上フランジの上面の、応力によるひずみ ε_{ss} およびアルミニウム床版上板の、鋼桁上フランジの上面の位置での、応力によるひずみ ε_{as} がそれぞれ次式で与えられた。

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} d_s \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} + \frac{M_a}{E_a I_a} d_a \quad (4.3)$$

- ここに、 E_s, E_a : それぞれ、鋼およびアルミニウム合金のヤング係数
 A_s, A_a : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板の断面積
 I_s, I_a : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板の断面二次モーメント
 N_s, N_a : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる軸力
 M_s, M_a : それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる曲げモーメント
 d_s : 鋼桁の中立軸から鋼桁上フランジ上面までの距離
 d_a : アルミニウム床版上板の中立軸から鋼桁上フランジの上面までの距離

式(4.2)は、鋼桁の断面が変形後も平面を保つという構造力学の基本仮定に基づいている。式(4.3)の右辺第2項では、アルミニウム床版上板の曲率 $M_a/(E_a I_a)$ にアルミニウム床版上板の中立軸から鋼桁上フランジの上面までの距離 d_a が乗じられている。したがって鋼桁上フランジの上面とアルミニウム床版上板との間に、変形後も平面が保持されていることが仮定されている。

前述の仮定に基づいて、アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる軸力 N に対して次式が導出された。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^{*2} N = -c^* \lambda^{*2} M + k^* \Delta \varepsilon_T \quad (4.4)$$

ここに、

$$\lambda^* = \sqrt{k^* \frac{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right)\left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} a^2}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n}\right)}} \quad (4.5)$$

$$c^* = \frac{A_s \frac{A_a}{n} a}{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right)\left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} a^2} \quad (4.6)$$

$$n = \frac{E_s}{E_a} \quad (4.7)$$

a : アルミニウム床版上板の中立面と鋼桁の中立軸との間の距離

$\Delta\varepsilon_T$: アルミニウム床版と鋼桁の温度変化によるひずみ差 [後出の式(4.25)]

開閉断面アルミニウム床版においては、モルタルが充填されていない開断面が存在する。そこで、開閉断面アルミニウム床版を有する鋼桁に対して FEM 解析を実施した結果、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に変形後、平面を保持していないことが明らかにされた³¹⁾。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分が変形後、平面が保持されない理論³¹⁾について次に述べる。

図 4.3 を参照して、鋼桁上フランジの上面の位置の鋼桁の水平変位とアルミニウム床版上板の中立面の位置のアルミニウム床版上板の水平変位との差と、水平せん断力との間に次式が成立すると仮定する。

$$H = k(u_f - u_a) \quad (4.8)$$

ここに、 H : アルミニウム床版上板の下面および鋼桁上フランジの上面に生じる水平せん断力

k : 水平せん断バネ

u_f, u_a : それぞれ、鋼桁上フランジの上面の水平変位およびアルミニウム床版上板の中立面の位置の水平変位

式(4.8)の u_a はアルミニウム床版上板の中立面の位置の水平変位である。初期の研究^{29),30)}の式(4.1)の u_a^* は、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分が変形後も平面を保持すると仮定して、鋼桁上フランジの上面の位置でのアルミニウム床版上板の水平変位であり、 u_a と u_a^* は異なる。式(4.8)では、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の部分に対して平面保持の仮定が設けられていない。

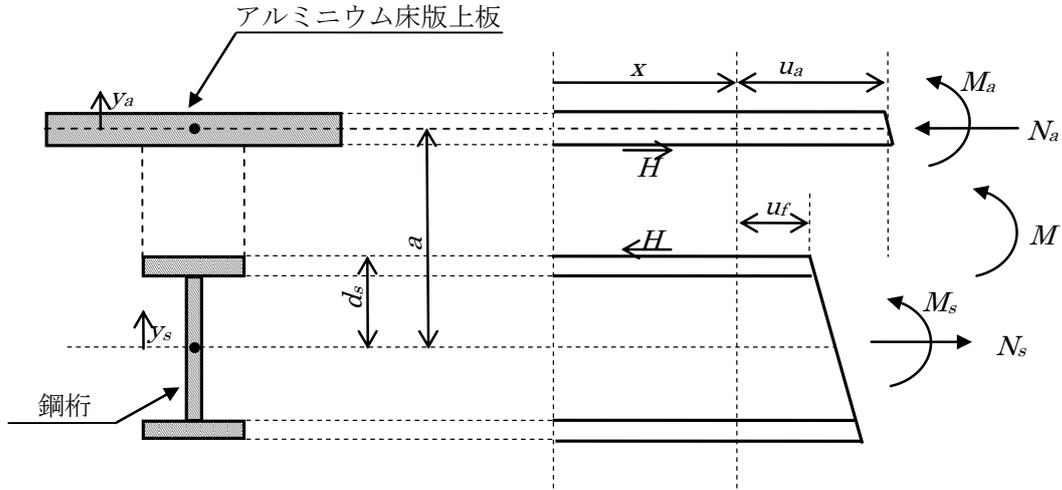


図 4.3 アルミニウム床版上板と鋼桁の変形

鋼桁とアルミニウム床版上板に生じるひずみをそれぞれ ε_s と ε_a で表すと、これらのひずみは、応力によるひずみと温度変化によるひずみの和として次式で与えられる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{ss} + \varepsilon_{st} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{at} \quad (4.10)$$

ここに、

$\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{as}$: それぞれ、鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる、応力によるひずみ

$\varepsilon_{st}, \varepsilon_{at}$: それぞれ、鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる、温度変化によるひずみ
 ε_{st} と ε_{at} はそれぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_{st} = \alpha_s \Delta T_s \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{at} = \alpha_a \Delta T_a \quad (4.12)$$

ここに、 α_s, α_a : それぞれ、鋼およびアルミニウム合金の線膨張係数

$\Delta T_s, \Delta T_a$: それぞれ、鋼桁およびアルミニウム床版上板の温度変化

(温度上昇を正、温度下降を負とする)

鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる、応力によるひずみ ε_{ss} と ε_{as} はそれぞれ次式で与えられる。

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} y_s \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} - \frac{M_a}{E_a I_a} y_a \quad (4.14)$$

ここに、 y_s, y_a : それぞれ、鋼桁の中立軸およびアルミニウム床版上板の中立面からの位置 (上方向を正)

アルミニウム床版上板の曲率と鋼桁の曲率は等しいので次式が成立する。

$$\frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{M_a}{E_a I_a} \quad (4.15)$$

他方，全モーメントは次式で与えられる．

$$M = Na + M_s + M_a \quad (4.16)$$

ここに，

$$N = N_s = N_a \quad (4.17)$$

式(4.15)と(4.16)より次式を得る．

$$M_s = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (4.18)$$

$$M_a = \frac{E_a I_a}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (4.19)$$

式(4.17)～(4.19)を式(4.13)と(4.14)に代入して，鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる，応力によるひずみがそれぞれ次式で与えられる．

$$\varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{ay_s}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{y_s}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{as} = \left(-\frac{1}{E_a A_a} + \frac{ay_a}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{y_a}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (4.21)$$

式(4.20)と(4.21)から鋼桁上フランジ上面とアルミニウム床版上板の中立面の，応力によるひずみがそれぞれ次式で与えられる．

$$\varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{ad_s}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N - \frac{d_s}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (4.22)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N}{E_a A_a} \quad (4.23)$$

$\varepsilon_s = du_s/dx$ および $\varepsilon_a = du_a/dx$ を考慮して，式(4.8)を微分したものに式(4.9)と(4.10)を代入して次式を得る．

$$\frac{1}{k} \frac{dH}{dx} = \varepsilon_{ss} - \varepsilon_{as} + \Delta\varepsilon_T \quad (4.24)$$

ここに，

$$\Delta\varepsilon_T = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{at} = \alpha_s \Delta T_s - \alpha_a \Delta T_a = (12\Delta T_s - 23\Delta T_a) \times 10^{-6} \quad (4.25)$$

$\Delta T_s, \Delta T_a$: それぞれ，鋼桁およびアルミニウム床版上板の温度変化

(温度上昇を正，温度下降を負とし，単位は℃)

$\Delta\varepsilon_T$ は温度変化によるひずみである．

図 4.4 に示すように，アルミニウム床版上板の微小区間 dx における力の釣り合いより，水平せん断力 H と軸力 N の関係が次式で与えられる．

$$H = \frac{dN}{dx} \quad (4.26)$$

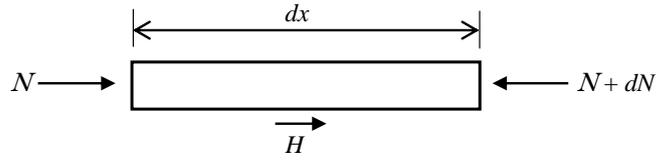


図 4.4 アルミニウム床版上板に生じる水平せん断力と軸力

式(4.22), (4.23), (4.26)を式(4.24)に代入して, 軸力に関する微分方程式が次のように導出される.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -c\lambda^2 M + k\Delta\varepsilon_T \quad (4.27)$$

ここに,

$$\lambda = \sqrt{k \frac{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s}{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}} \quad (4.28)$$

$$c = \frac{A_s \frac{A_a}{n} d_s}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \quad (4.29)$$

式(4.27)は, 初期の研究^{29),30)}の軸力に関する式(4.4)と同形である. しかし, 式(4.28)と(4.29)がそれぞれ与える λ と c は, 初期の理論の式(4.5)と(4.6)がそれぞれ与える λ^* と c^* と部分的に異なる.

開閉断面アルミニウム床版においては, アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの連結構造が同一であっても, 水平せん断バネ k の値は, アルミニウム床版と鋼桁の断面寸法および鋼桁の支間長によって変化することが明らかにされている³¹⁾. 水平せん断バネ k の算定方法を付録 A に示す.

4.4 鋼桁のたわみ

道路橋示方書²⁾においては, 鉄筋コンクリート床版を有する鋼桁に対して次の許容たわみが規定されている.

$$\delta_a = \begin{cases} \frac{L}{2000} & L \leq 10\text{m} \\ \frac{L^2}{20000} & 10\text{m} < L \leq 40\text{m} \\ \frac{L}{500} & 40\text{m} < L \end{cases} \quad (4.30)$$

ここに, δ_a : 鋼桁に対する許容たわみ (単位: m)

L : 鋼桁の支間長 (単位: m)

道路橋示方書²⁾で規定される鉄筋コンクリート床版に対する設計曲げモーメント式は、鉄筋コンクリート床版が鋼桁の位置で単純支持されている、すなわち、鋼桁の位置で鉄筋コンクリート床版に沈下が起こらないという仮定の基に、板に関する4階の偏微分方程式を解くことによって得られたものである。したがって、鋼桁の不等沈下に起因する付加曲げモーメントが鉄筋コンクリート床版に発生するのを防ぐために、道路橋示方書²⁾においては、鋼桁に対して式(4.30)の許容たわみが規定されている。

3.4節で述べたように、多主桁橋のアルミニウム床版の適用支間長は、中主桁でアルミニウム床版が単純支持された境界条件に対してFEM解析によって算出された²³⁾。したがって多主桁橋の鋼桁の許容たわみとして式(4.30)を採用する。2主桁橋の場合、鋼桁が不等沈下を起こしても付加曲げモーメントがアルミニウム床版に生じないが、アルミニウム床版－鋼桁橋は過去にまだ実施例のない構造であるので、2主桁橋の鋼桁の許容たわみに対しても式(4.30)を採用する。

道路橋示方書²⁾においては、鋼桁のたわみ照査は、衝撃荷重を含まない活荷重に対して行われる。すなわち鋼桁のたわみ照査は使用限界に対するものである。したがって鋼桁のたわみを算出する際には、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮する。

アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮した鋼桁のたわみの求め方を次に述べる。

アルミニウム床版と鋼桁との合成度が次の ϕ_v で評価される^{30),31)}。

$$\phi_v = \frac{v_0 - v}{v_0 - v_\infty} \quad (0 \leq \phi_v \leq 1) \quad (4.31)$$

ここに、 v_∞ ：完全合成の場合に対する鋼桁のたわみ

v_0 ：非合成の場合に対する鋼桁のたわみ

v ：不完全合成の場合に対する鋼桁のたわみ

ϕ_v が0に近いとき、アルミニウム床版と鋼桁の関係は非合成に近く、 ϕ_v が1に近いとき、両者の関係は完全合成に近い。

支間中央に集中荷重が載荷された単純支持桁の支間中央のたわみがそれぞれ次式で与えられる³¹⁾。

$$v = \frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ \frac{1 - ca}{24} L^3 + \frac{caL}{2\lambda^2} - \frac{ca}{\lambda^3} \tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \right\} \quad (4.32)$$

$$v_\infty = \frac{PL^3}{48E_s I_v} \quad (4.33)$$

$$v_0 = \frac{PL^3}{48(E_s I_s + E_a I_a)} \quad (4.34)$$

ここに、

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a d_s}{n A_s + A_a} \quad (4.35)$$

P ：集中荷重の大きさ

式(4.32), (4.33), (4.34)を式(4.31)に代入して ϕ_v は次式になる³¹⁾.

$$\phi_v = 1 - \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} \quad (4.36)$$

式(4.36)が与える ϕ_v と λL の関係を実線で図4.5に示す. λL が10以上のとき, ϕ_v は0.9より大きくなり, アルミニウム床版と鋼桁との合成作用は完全合成に近い.

式(4.31)を v/v_0 について解いて次式を得る.

$$\frac{v}{v_0} = 1 - \left(1 - \frac{v_\infty}{v_0} \right) \phi_v \quad (4.37)$$

式(4.33)と(4.34)を式(4.37)に代入して次式を得る.

$$v = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{I_s + \frac{I_a}{n}}{I_v} \right) \phi_v \right\} v_0 \quad (4.38)$$

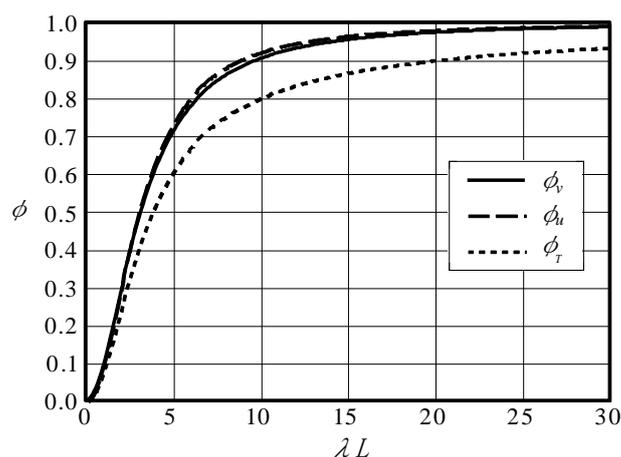


図 4.5 ϕ と λL の関係

付録 A に示す方法で算出された水平せん断バネ k の値を式(4.28)に用いて算出された λ の値を式(4.36)に代入して ϕ_v の値が得られる. アルミニウム床版と鋼桁が非合成として算出された鋼桁のたわみを v_0 に使用する. ここで衝撃荷重を含まない活荷重に対して v_0 を算出する.

4.6.5項で述べるように, 温度変化によって鋼桁は反る. 鋼桁の断面二次モーメントまたはアルミニウム床版の有効幅が異なる場合, 各鋼桁に生じる反りの大きさは異なる. この場合, 鋼桁は不等沈下を起こす. したがって隣接する鋼桁の反りの差を, 活荷重によって生じるたわみに加え, それが式(4.30)の許容たわみ以下であることを照査する.

4.5 活荷重による桁端の変位

支間中央に集中荷重が載荷された単純支持桁の鋼桁とアルミニウム床版上板に生じるひずみが次式で与えられる³¹⁾.

$$\varepsilon_s = \frac{P}{2E_s} \left[\left\{ \frac{c}{A_s} - \frac{(1-ca)y_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right\} x - \left(\frac{c}{A_s} + \frac{cay_s}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.39)$$

$$\varepsilon_a = \frac{P}{2E_a} \left[- \left\{ \frac{c}{A_a} + \frac{(1-ca)y_a}{nI_s + I_a} \right\} x - \left(-\frac{c}{A_a} + \frac{cay_a}{nI_s + I_a} \right) \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.40)$$

ここで、式(4.39)と(4.40)は $0 \leq x \leq L/2$ で成立する。

式(4.39)の y_s に $-y_l$ を代入して、鋼桁下フランジの下面に生じるひずみが与えられる。ここで y_l は、鋼桁の中立軸の位置から鋼桁下フランジの下面までの距離である。他方、 $\varepsilon_s = du_s/dx$ であるので次式を得る。

$$\frac{du_s}{dx} = \frac{P}{2E_s} \left[\left\{ \frac{c}{A_s} + \frac{(1-ca)y_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right\} x - \left(\frac{c}{A_s} - \frac{cay_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.41)$$

ここに、 u_s ：鋼桁下フランジの水平変位

$x=L/2$ で $u_s=0$ の境界条件に対して式(4.41)を解いて次式を得る。

$$u_s = \frac{P}{2E_s} \left[\left\{ \frac{c}{A_s} + \frac{(1-ca)y_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right\} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{L^2}{8} \right) + \left(\frac{c}{A_s} - \frac{cay_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \frac{1}{\lambda^2} \left[1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \right] \quad (4.42)$$

式(4.42)において $x=0$ と置いて、桁端の鋼桁下フランジの、活荷重による水平変位 u_{sL} が次式で与えられる。

$$u_{sL} = \frac{-PL^2}{16E_s} \left\{ \frac{y_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} + \left(\frac{c}{A_s} - \frac{cay_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \phi_u \right\} \quad (4.43)$$

ここに、

$$\phi_u = 1 - \frac{2}{\left(\frac{\lambda L}{2}\right)^2} \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.44)$$

式(4.44)が与える ϕ_u と λL の関係を破線で図 4.5 に示す。

式(4.34)を P について解いて、これを式(4.43)に代入して次式を得る。

$$u_{sL} = \frac{-3v_0}{L} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) \left\{ \frac{y_i}{I_s + \frac{I_a}{n}} + \left(\frac{c}{A_s} - \frac{cay_i}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \phi_u \right\} \quad (4.45)$$

式(4.45)において、アルミニウム床版と鋼桁が非合成として算出された鋼桁のたわみを v_0 に使用することにより、活荷重に対する、桁端の鋼桁下フランジの水平変位が算出される。ここで、 v_0 は衝撃荷重を含まない活荷重に対して算出する。

式(4.40)の y_a に 0 を代入し、アルミニウム床版上板の中立面に生じるひずみが与えられる。他方、 $\varepsilon_a = du_a/dx$ であるので次式を得る。

$$\frac{du_a}{dx} = \frac{Pc}{2E_a A_a} \left\{ -x + \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (4.46)$$

ここに、 u_a : アルミニウム床版上板の水平変位

$x=L/2$ で $u_a = 0$ の境界条件に対して式(4.46)を解いて次式を得る。

$$u_a = \frac{Pc}{2E_a A_a} \left[\frac{L^2}{8} - \frac{x^2}{2} - \frac{1}{\lambda^2} \left\{ 1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \right] \quad (4.47)$$

式(4.47)において $x=0$ と置いて、桁端のアルミニウム床版上板の、活荷重による水平変位 u_{aL} が次式で与えられる。

$$u_{aL} = \frac{PcL^2}{16E_a A_a} \phi_u \quad (4.48)$$

式(4.34)を P について解いて、これを式(4.48)に代入して次式を得る。

$$u_{aL} = \frac{3v_0 c (nI_s + I_a)}{LA_a} \phi_u \quad (4.49)$$

式(4.49)において、アルミニウム床版と鋼桁が非合成として算出された鋼桁のたわみを v_0 に使用することにより、活荷重に対する、桁端のアルミニウム床版上板の水平変位が算出される。ここで、 v_0 は、衝撃荷重を含まない活荷重に対して算出する。

4.6 温度変化の影響

4.6.1 温度変化と線膨張係数

温度変化は、道路橋示方書²⁾の規定に従って次の通りとする。

橋全体の設計に用いる基準温度は 20°C を標準とする。ただし寒冷な地域においては 10°C

を標準とする。橋全体に対して一様な温度変化を考慮する場合、温度変化の範囲は -10°C から 50°C までとする。ただし、寒冷な地方においては -30°C から 50°C までとする。

アルミニウム床版と鋼桁との温度差による影響を考慮する必要がある場合には、その温度差を 10°C とし、温度分布はアルミニウム床版および鋼桁のそれぞれにおいて一様とする。

支承の移動量ならびに伸縮装置の伸縮量の算定に用いる温度変化の範囲は -10°C から 50°C までとする。ただし、寒冷な地方においては -20°C から 40°C とする。

アルミニウム合金と鋼の線膨張係数は、それぞれ $23 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ 、 $12 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ とする。

4.6.2 温度変化によって生じる応力

アルミニウム合金と鋼の線膨張係数は異なるので、温度変化があると、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用によって、アルミニウム床版と鋼桁に応力が生じる。

$M=0$ を式(4.27)に代入して、アルミニウム床版と鋼桁との温度変化によって生じる軸力 N に関する微分方程式が次式で与えられる。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = k \Delta \varepsilon_T \quad (4.50)$$

$x=0$ で $N=0$ および $x=L/2$ で $dN/dx=0$ の境界条件に対して、式(4.50)の解が次式で与えられる。

$$N = N_T \Delta \varepsilon_T \left[1 - \frac{\cosh \left\{ \lambda \left(\frac{L}{2} - x \right) \right\}}{\cosh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)} \right] \quad (4.51)$$

ここに、

$$N_T = - \frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \quad (4.52)$$

$N_T \Delta \varepsilon_T$ は、アルミニウム床版と鋼桁とが完全合成の場合に対する、温度変化によって生じる軸力である。

温度変化応力は鋼桁の支間中央で最大になるので、 $x=L/2$ を式(4.51)に代入して、鋼桁の支間中央に生じる軸力が次式で与えられる。

$$N = N_T \Delta \varepsilon_T \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)} \right\} \quad (4.53)$$

式(4.53)の右辺の $\{\dots\}$ は1以下になるので、不完全合成の場合に対しても、完全合成の場合に対する $N_T \Delta \varepsilon_T$ が最も大きな軸力を与える。したがって、温度変化によって生じる軸力

として $N_T \Delta \varepsilon_T$ を採用する. 式(4.20)と(4.21)の N に $N_T \Delta \varepsilon_T$ を代入し, さらに $M = 0$ と置いて, 温度変化によって, 鋼桁とアルミニウム床版上板に生じる応力がそれぞれ次式で与えられる.

$$\sigma_{sT} = E_s \varepsilon_{ss} = \left(\frac{1}{A_s} + \frac{E_s a}{E_s I_s + E_a I_a} y_s \right) N_T \Delta \varepsilon_T \quad (4.54)$$

$$\sigma_{aT} = E_a \varepsilon_{as} = \left(-\frac{1}{A_a} + \frac{E_a a}{E_s I_s + E_a I_a} y_a \right) N_T \Delta \varepsilon_T \quad (4.55)$$

4.6.3 温度変化に対する鋼桁の応力照査

温度変化に対する鋼桁の応力照査は次式によって行う.

$$\sigma_{sd} + \sigma_{sl} + \sigma_{sT} \leq \sigma_{sa} \quad (4.56)$$

ここに, σ_{sd} : 死荷重によって鋼桁に生じる応力

σ_{sl} : 活荷重によって鋼桁に生じる応力

σ_{sT} : 温度変化によって鋼桁に生じる応力

σ_{sa} : 鋼桁の許容応力

死荷重によって鋼桁に生じる応力 σ_{sd} は, アルミニウム床版と鋼桁が非合成として算出される値である. 活荷重によって鋼桁に生じる応力 σ_{sl} は, アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮して算出される値である. しかし非合成として算出される値は, 合成作用を考慮して算出される値より大きくなるので, 非合成として算出される値を用いる. 温度変化によって鋼桁に生じる応力 σ_{sT} は, 式(4.54)によって算出される.

死荷重, 活荷重, 衝撃荷重などの主荷重に対して, アルミニウム床版と鋼桁は非合成として設計される. したがって, アルミニウム床版-鋼桁橋が崩壊するとき, アルミニウム床版と鋼桁は非合成となるので, 温度変化の影響は消滅する. 式(4.56)は実働荷重に対する照査式であり, 鋼桁の許容応力 σ_{sa} を割増すことによってこれを考慮する. 許容応力の割増しを幾らにするか種々の考えがあるが, 道路橋示方書²⁾の鉄筋コンクリート床版に対する合成桁における, 床版と鋼桁との温度差に対する鋼桁の許容応力の割増し係数と同じにして, 鋼桁の上フランジに対して 30%, 下フランジに対して 15%の許容応力の割増しを適用する.

4.6.4 温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査

温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査は次式によって行う.

$$\sigma_{AD} + \sigma_{AL} + \sigma_{AT} \leq \sigma_{Aa} \quad (4.57)$$

ここに, σ_{AD} : 舗装, 地覆, 高欄の死荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力

σ_{AL} : 活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力

σ_{AT} : 温度変化によってアルミニウム床版上板に生じる応力

σ_{Aa} : アルミニウム床版上板の許容応力 (摩擦攪拌接合部の許容応力)

舗装, 地覆, 高欄の死荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力 σ_{AD} および活荷重

によってアルミニウム床版上板に生じる応力 σ_{AL} は、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮して算出される値である。温度変化によってアルミニウム床版上板に生じる応力 σ_{AT} は、式(4.55)によって算出される。4.6.3項と同様な考察により、アルミニウム床版上板の許容応力 σ_{Aa} に割増しを考慮する。道路橋示方書²⁾の鉄筋コンクリート床版に対する合成桁における、床版と鋼桁との温度差に対するコンクリートの許容応力の割増し係数と同じにして、15%の許容応力の割増しを適用する。

舗装、地覆、高欄の死荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力 σ_{AD} および活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力 σ_{AL} は、アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考慮して算出される値であるが、次に示す方法によって算出される値は、合成作用を考慮して算出される値より大きくなる。

アルミニウム床版と鋼桁とが完全合成の場合、式(4.22)の ε_{ss} と式(4.23)の ε_{as} が等しいので次式を得る。

$$M = \frac{E_s I_s + E_a I_a}{d_s} \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_a A_a} + \frac{a d_s}{E_s I_s + E_a I_a} \right) N \quad (4.58)$$

式(4.58)を式(4.20)と(4.21)に代入して、鋼桁下フランジの下面に生じるひずみに対するアルミニウム床版上板の上面に生じるひずみの比が次式で与えられる。

$$\frac{\varepsilon_{as}}{\varepsilon_{ss}} = - \frac{\frac{t_a}{2d_s E_s A_s} + \left(1 + \frac{t_a}{2d_s}\right) \frac{1}{E_a A_a}}{\left(1 + \frac{y_l}{d_s}\right) \frac{1}{E_s A_s} + \frac{y_l}{d_s E_a A_a}} \quad (4.59)$$

ここに、 t_a : アルミニウム床版上板の板厚

y_l : 鋼桁の中立軸の位置から鋼桁下フランジの下面までの距離

舗装、地覆、高欄の死荷重および活荷重に対して、アルミニウム床版と鋼桁とが非合成として算出された鋼桁下フランジの下面に生じる応力 $\sigma_{sd} + \sigma_{sl}$ によって生じるひずみ $(\sigma_{sd} + \sigma_{sl})/E_s$ を式(4.59)の ε_{ss} に用いて、舗装、地覆、高欄の死荷重および活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力 $\sigma_{AD} + \sigma_{AL}$ が次式で与えられる。

$$\sigma_{AD} + \sigma_{AL} = - \frac{\frac{t_a}{2d_s E_s A_s} + \left(1 + \frac{t_a}{2d_s}\right) \frac{1}{E_a A_a}}{\left(1 + \frac{y_l}{d_s}\right) \frac{1}{E_s A_s} + \frac{y_l}{d_s E_a A_a}} \frac{\sigma_{sd} + \sigma_{sl}}{n} \quad (4.60)$$

4.6.5 温度変化による鋼桁の反り

鋼桁のたわみに関する微分方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = - \frac{M_s}{E_s I_s} = - \frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} \quad (4.61)$$

式(4.51)を式(4.61)に代入し、 $M = 0$ とにおいて、温度変化による鋼桁の反りに関する微分方

程式が次式で与えられる.

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{aN_T\Delta\varepsilon_T}{E_sI_s + E_aI_a} \left[1 - \frac{\cosh\left\{\lambda\left(\frac{L}{2} - x\right)\right\}}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.62)$$

$x=0$ で $v=0$ および $x=L/2$ で $dv/dx=0$ の境界条件に対して式(4.62)を解き, 次式を得る.

$$v = \frac{aN_T\Delta\varepsilon_T}{E_sI_s + E_aI_a} \left[\frac{x^2}{2} - \frac{Lx}{2} + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{\cosh\left\{\lambda\left(\frac{L}{2} - x\right)\right\}}{\lambda^2 \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right] \quad (4.63)$$

$x=L/2$ を式(4.63)に代入して, 支間中央の反りが次式で与えられる.

$$v = v_{\infty T} \left[1 - \frac{2}{\left(\frac{\lambda L}{2}\right)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \right] \quad (4.64)$$

ここに,

$$v_{\infty T} = -\frac{aL^2}{8(E_sI_s + E_aI_a)} N_T \Delta\varepsilon_T \quad (4.65)$$

式(4.64)の右辺の $[\dots]$ は 1 以下となるので, 不完全合成の場合に対しても, 完全合成の場合に対する $v_{\infty T}$ が最も大きな, 温度変化による鋼桁の反りを与える. したがって, アルミニウム床版-鋼桁橋の設計において, 温度変化によって生じる鋼桁の反りは, 式(4.65)で与えられる $v_{\infty T}$ により計算する.

鋼桁の断面二次モーメントまたはアルミニウム床版の有効幅が異なる場合, 各鋼桁に生じる反りの大きさは異なる. この場合, 鋼桁は不等沈下を起こすので, 4.4節で述べたように, 隣接する鋼桁の反りの差を, 活荷重によって生じるたわみに加える.

4.6.6 温度変化による桁端の移動量

式(4.9)の鋼桁に生じるひずみ ε_s は du_s/dx で与えられるので, 次式が成立する.

$$\frac{du_s}{dx} = \varepsilon_{ss} + \varepsilon_{st} \quad (4.66)$$

ここに, u_s : 鋼桁の水平変位

$\varepsilon_{ss}, \varepsilon_{st}$: それぞれ, 鋼桁に生じる, 応力によるひずみと温度変化によるひずみ

鋼桁下フランジの下面に発生する, 応力によるひずみ ε_{ss} は, 式(4.20)の y_s に $-y_l$ を代入し, N に式(4.51)を代入し, $M=0$ として与えられる. ここで, y_l は, 鋼桁の中立軸の位置から鋼桁下フランジの下面までの距離である. 温度変化によるひずみ ε_{st} は式(4.11)で与えられる. これらのひずみを式(4.66)に代入して次式を得る.

$$\frac{du_s}{dx} = N_T \Delta \varepsilon_T \left(\frac{1}{E_s A_s} - \frac{ay_l}{E_s I_s + E_a I_a} \right) \left[1 - \frac{\cosh \left\{ \lambda \left(\frac{L}{2} - x \right) \right\}}{\cosh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)} \right] + \alpha_s \Delta T_s \quad (4.67)$$

$x=0$ で $u_s=0$ の境界条件に対して式(4.67)を解いて次式を得る.

$$u_s = N_T \Delta \varepsilon_T \left(\frac{1}{E_s A_s} - \frac{ay_l}{E_s I_s + E_a I_a} \right) \left[x + \frac{\sinh \left\{ \lambda \left(\frac{L}{2} - x \right) \right\}}{\lambda \cosh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)} - \frac{\tanh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)}{\lambda} \right] + \alpha_s \Delta T_s x \quad (4.68)$$

式(4.68)において $x=L$ と置いて, 桁端の鋼桁下フランジの, 温度変化による水平変位 u_{sT} が次式で与えられる.

$$u_{sT} = \left\{ N_T \Delta \varepsilon_T \left(\frac{1}{E_s A_s} - \frac{ay_l}{E_s I_s + E_a I_a} \right) \phi_T + \alpha_s \Delta T_s \right\} L \quad (4.69)$$

ここに,

$$\phi_T = 1 - \frac{\tanh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)}{\frac{\lambda L}{2}} \quad (4.70)$$

式(4.70)が与える ϕ_T と λL の関係を点線で図 4.5 に示す. さらに, 式(4.25)を式(4.69)に代入し, $\Delta T = \Delta T_a = \Delta T_s$, $\alpha_s = 12 \times 10^{-6}$, $\alpha_a = 23 \times 10^{-6}$ として次式を得る.

$$u_{sT} = 10^{-6} \Delta T \left\{ -11 N_T \left(\frac{1}{E_s A_s} - \frac{ay_l}{E_s I_s + E_a I_a} \right) \phi_T + 12 \right\} L \quad (4.71)$$

他方, 式(4.10)のアルミニウム床版上板に生じるひずみ ε_a は du_a/dx で与えられるので, 次式が成立する.

$$\frac{du_a}{dx} = \varepsilon_{as} + \varepsilon_{at} \quad (4.72)$$

ここに, u_a : アルミニウム床版の水平変位

$\varepsilon_{as}, \varepsilon_{at}$: それぞれ, アルミニウム床版上板に生じる, 応力によるひずみと温度変化によるひずみ

応力によるひずみ ε_{as} は, 式(4.23)の N に式(4.51)を代入して与えられる. 温度変化によるひずみ ε_{at} は式(4.12)で与えられる. これらのひずみを式(4.72)に代入して次式を得る.

$$\frac{du_a}{dx} = -\frac{N_T \Delta \varepsilon_T}{E_a A_a} \left[1 - \frac{\cosh \left\{ \lambda \left(\frac{L}{2} - x \right) \right\}}{\cosh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)} \right] + \alpha_a \Delta T_a \quad (4.73)$$

$x=0$ で $u_a=0$ の境界条件に対して式(4.73)を解いて次式を得る.

$$u_a = -\frac{N_T \Delta \varepsilon_T}{E_a A_a} \left[x + \frac{\sinh\left\{\lambda\left(\frac{L}{2} - x\right)\right\}}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} - \frac{\tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)}{\lambda} \right] + \alpha_a \Delta T_a x \quad (4.74)$$

式(4.74)において $x=L$ と置いて、桁端のアルミニウム床版上板の、温度変化による水平変位 u_{aT} が次式で与えられる。

$$u_{aT} = \left\{ -\frac{N_T \Delta \varepsilon_T}{E_a A_a} \phi_T + \alpha_a \Delta T_a \right\} L \quad (4.75)$$

さらに、式(4.25)を式(4.75)に代入し、 $\Delta T = \Delta T_a = \Delta T_s$ 、 $\alpha_s = 12 \times 10^{-6}$ 、 $\alpha_a = 23 \times 10^{-6}$ として次式を得る。

$$u_{aT} = 10^{-6} \Delta T \left\{ \frac{11N_T}{E_a A_a} \phi_T + 23 \right\} L \quad (4.76)$$

支承の移動量を設計する際に必要となる、桁端の鋼桁下フランジの、温度変化および活荷重による移動量 ΔL_s が次式で与えられる。

$$\Delta L_s = u_{sT} - 2u_{sL} \quad (4.77)$$

ここで、 u_{sL} は式(4.45)で与えられる。

伸縮装置の伸縮量を設計する際に必要となる、桁端のアルミニウム床版の、温度変化および活荷重による伸縮量 ΔL_a が次式で与えられる。

$$\Delta L_a = u_{aT} - 2u_{aL} \quad (4.78)$$

ここで、 u_{aL} は式(4.49)で与えられる。

4.7 アルミニウム床版の有効幅

アルミニウム床版と鋼桁との合成作用を考える際に用いるアルミニウム床版の有効幅として、道路橋示方書²⁾で規定される有効幅が使用できることが明らかにされている³²⁾。アルミニウム床版の全有効幅は次式で与えられる。

$$B_e = \begin{cases} b_0 + b_{e1} + b_{e2} & \text{外桁} \\ b_0 + 2b_{e2} & \text{中桁} \end{cases} \quad (4.79)$$

ここに、 B_e : アルミニウム床版の全有効幅

b_0 : アルミニウム床版と鋼桁との連結部の仕切り板の間隔

b_{e1}, b_{e2} : 片側有効幅

図 4.6 を参照して、片側有効幅 b_{e1} と b_{e2} は次式で算出される。

$$b_e = \begin{cases} b & \frac{b}{L} \leq 0.05 \\ \left(1.1 - 2\frac{b}{L}\right)b & 0.05 < \frac{b}{L} < 0.30 \\ 0.15L & 0.30 \leq \frac{b}{L} \end{cases} \quad (4.80)$$

ここに、 b_e : b_{e1} または b_{e2}
 b : b_1 または b_2
 L : 単純支持桁の支間長

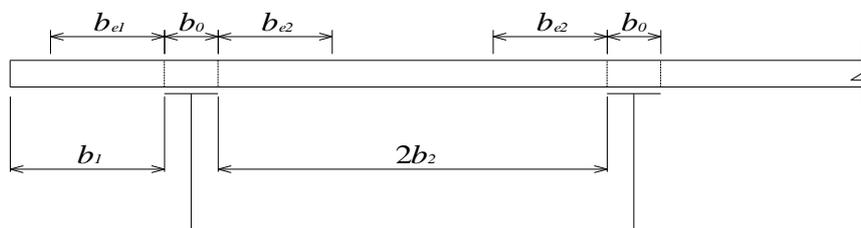


図 4.6 アルミニウム床版の有効幅

4.8 端横桁と端ブラケット

橋軸方向の両端には端横桁と端ブラケットを設ける。端横桁と端ブラケットの上フランジ幅は、アルミニウム床版と伸縮装置が定着できる幅でなければならない。端横桁と端ブラケットのウェブには、上フランジの鉛直変形を抑制するために鉛直リブを 0.5～1m の間隔で設ける。

端横桁および端ブラケットは、単独で輪荷重に抵抗でき、十分な剛性を確保するように設計しなければならない。端横桁と端ブラケットの曲げ剛性 EI は、次式で与えられる値以上でなければならない。

$$(a) \text{ 端横桁} \quad EI = 3759L^{1.8906} \quad (4.81)$$

$$(b) \text{ 端ブラケット} \quad EI = 10626L^{1.5397} \quad (4.82)$$

ここに、 E : 鋼材のヤング係数 (kN/m^2)

I : 端横桁または端ブラケットの断面二次モーメント (m^4)

L : 床版支間 (m)

図 4.7 に示すように、式(4.81)と(4.82)は、道路橋示方書²⁾の「8.2.11 けた端部の床版」に付随する解説中の図で与えられた点に最小自乗法による曲線当てはめにより与えられたものである。

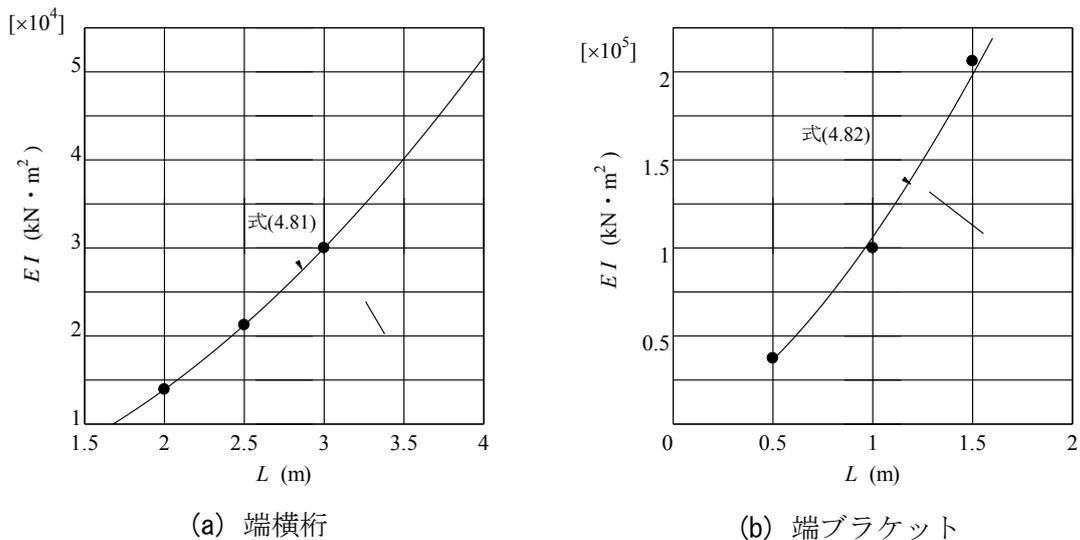


図 4.7 端横桁および端ブラケットの剛性

4.9 端横桁と端ブラケットへのアルミニウム床版の定着構造

端横桁と端ブラケットへのアルミニウム床版の定着構造を図 4.8 に示す。定着構造には、不陸のある ECC との間でガタが生じないようにし、伸縮装置の橋軸方向の変形を抑制する役割を果たすことが求められる。

図 4.9 に示すように、端横桁と端ブラケットの上フランジには、アルミニウム床版の定着に使用される頭付きスタッドを一箇所当り橋軸方向に 2 本溶接する。2 本の頭付きスタッドの橋軸方向の間隔は 60mm であり、橋軸直角方向に 250mm の間隔で配置する。端横桁と端ブラケットの上フランジには、アルミニウム床版の下フランジの端まで ECC を打設する。

アルミニウム床版の定着に使用される頭付きスタッドと伸縮装置の定着に使用される異形棒鋼スタッド (8.3 節参照) の橋軸直角方向の配置位置は同じにする。しかし、伸縮装置とアルミニウム床版の締結に使用する 2 本の異形鉄筋 (8.3 節参照) をアルミニウム床版の中空部の奥まで入れるために、アルミニウム床版の定着に使用される頭付きスタッドがこれを阻害する場合には、両者の配置位置を少しずらしてもよい。

端横桁および端ブラケット上のアルミニウム床版の中空部に頭付きスタッドを挿入するために設けるアルミニウム床版の下フランジの開口の形状を図 4.10 に示す。

図 4.9 に示すように、アルミニウム床版の下フランジに設けられた開口の直上の上フランジに直径 30mm のモルタル注入孔を設ける。アルミニウム床版は、端横桁および端ブラケット上に載っているため、主桁上に設けられる、図 3.7 に示す長孔より少し小さい円形の孔としている。

端横桁および端ブラケット上のアルミニウム床版の中空部の両端には、仕切り板を設置し、中空部全長にわたって無収縮モルタルを充填する。アルミニウム床版の中空部に一度に無収縮モルタルを充填することができない場合には、中空部の途中に仕切り板を設置し

てもよい。

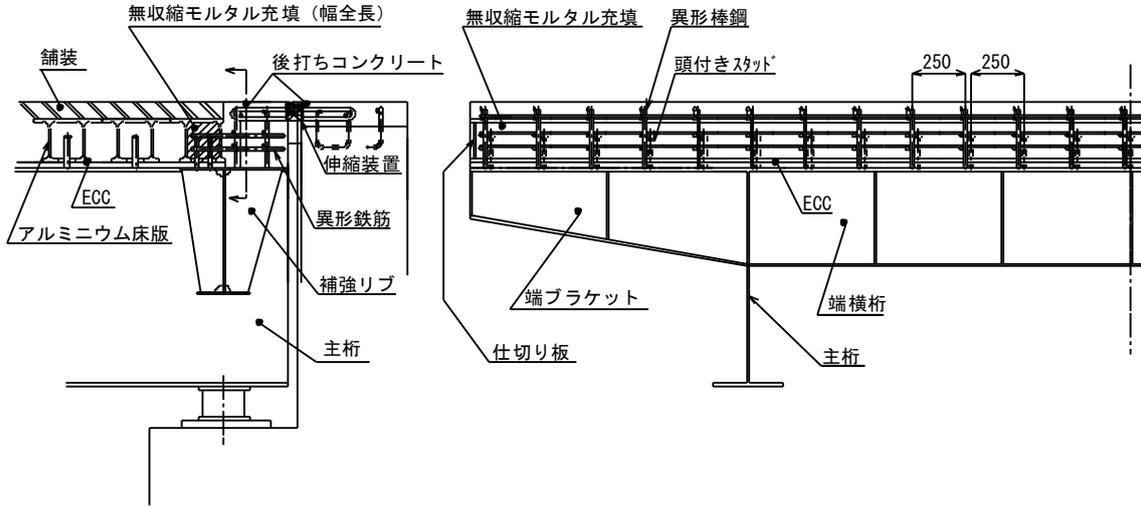


図 4.8 端横桁と端ブラケットへのアルミニウム床版の定着構造

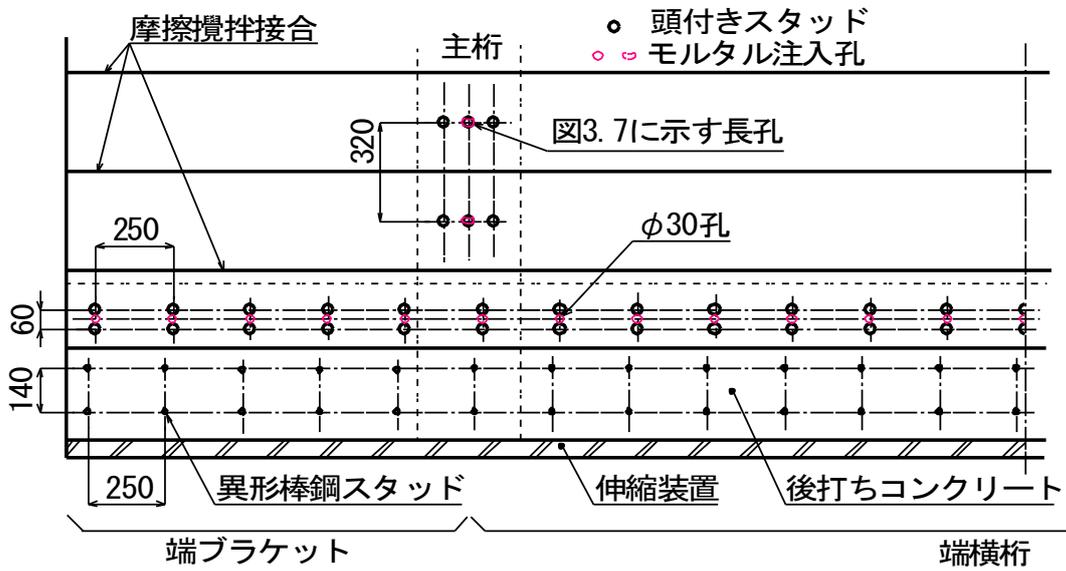


図 4.9 頭付きスタッドの配置位置

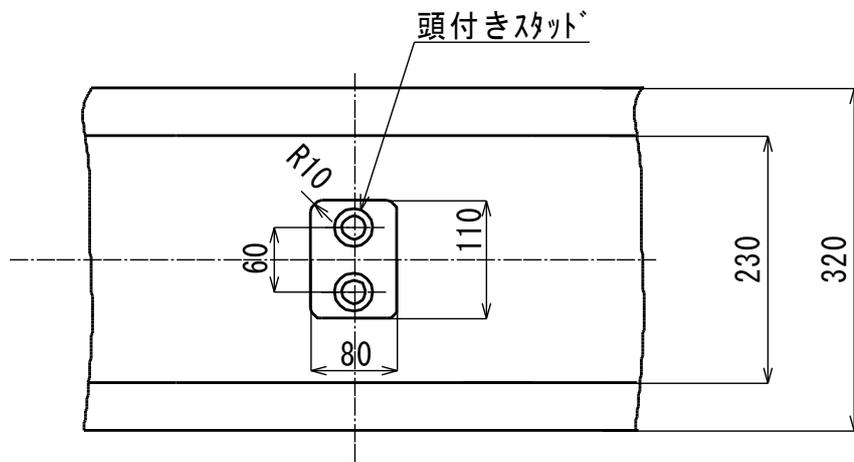


図 4.10 端横桁および端ブラケット上のアルミニウム床版の下フランジに設けられる開口の形状

第5章 アルミニウム床版の製作

アルミニウム床版の製作の具体例を付録Bに示す。

5.1 アルミニウム床版形材

アルミニウム床版形材としては、図5.1(a)，(b)に示す2種類がある。これらを摩擦攪拌接合することにより、図5.2に示すアルミニウム床版ユニットが製作される。アルミニウム床版ユニットの両端には図5.1(b)に示すボルト接合継手形材が用いられる。ボルト接合継手形材の片方の上フランジは下方に下げられている。これは、他のアルミニウム床版ユニットと現場でボルト接合する際、ボルトの頭がアルミニウム床版の上面から上に突出しないようにするためである。

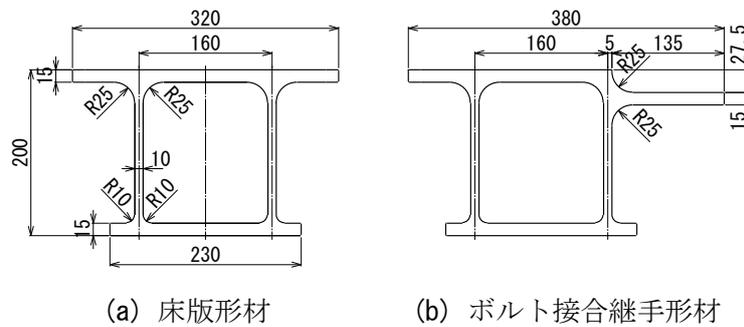


図5.1 アルミニウム床版形材の断面形状

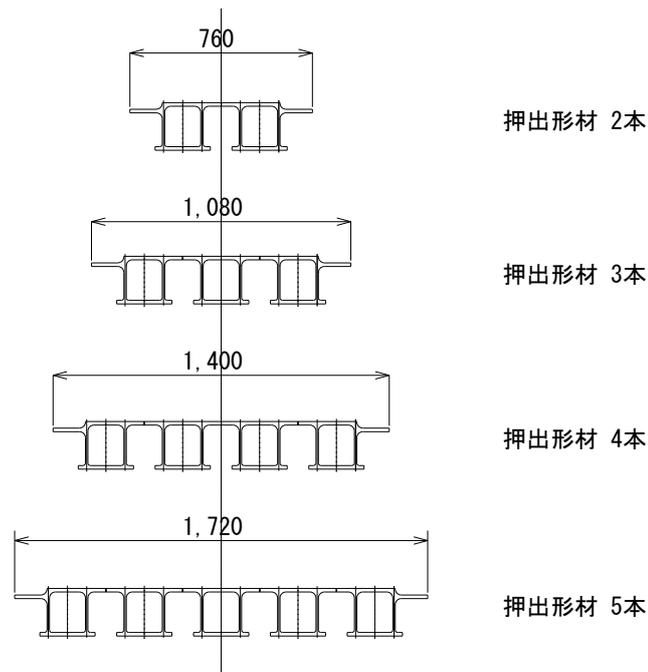


図5.2 アルミニウム床版ユニットの断面形状

5.2 摩擦攪拌接合

摩擦攪拌接合は、図 5.3 に示すように、互いに突合せされた一对の母材の突合せ面に鋼製のツールを挿入し、ツールの回転によって発生した摩擦熱によって軟化した母材を塑性流動させ、ツールを突合せ面に沿って移動させることによって継手が得られる最新の接合技術である²¹⁾。その特徴を付録 C に示す。

接合時に攪拌が不足すると、図 5.3 に示すプローブの先端付近には、キッシングボンドと呼ばれる接合不全部が生じる。キッシングボンドは疲労強度低下の原因となるため、これの発生を防止するために、アルミニウム床版の製作に用いる摩擦攪拌接合には、両面摩擦攪拌接合が使用されなければならない。両面摩擦攪拌接合は、図 5.4 に示すように、一回目の摩擦攪拌接合を行った後、裏返して反対側の面から二回目の摩擦攪拌接合を行うことによって継手が得られる方法である。

摩擦攪拌接合においては、ツールが母材の突合せ面に垂直に加圧されるので、ツールのショルダーと接触する板厚が減少する。しかし、アルミニウム床版の摩擦攪拌接合部の板厚は、第 3 章で決定された設計板厚より小さくなってはならない。その対策として、摩擦攪拌接合部の板厚を、第 3 章で決定された設計板厚より厚くしなければならない。

アルミニウム床版ユニットの摩擦攪拌接合部は、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ガイドライン³³⁾に規定される各種品質検査に合格しなければならない。付録 B に示すアルミニウム床版ユニットに対して、旧品質検査指針⁵⁾に従って実施された品質検査の結果が文献 34) に記載されている。

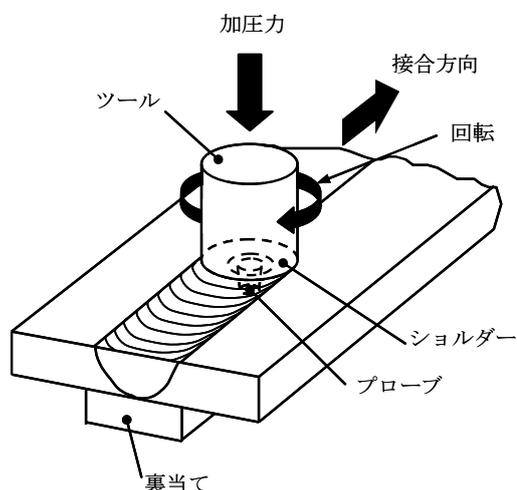


図 5.3 摩擦攪拌接合

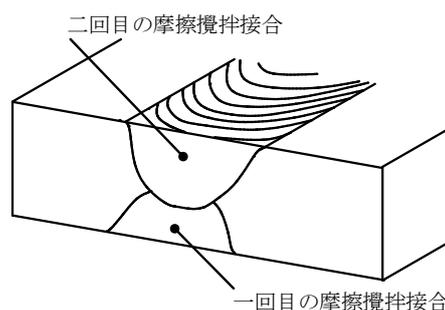


図 5.4 両面摩擦攪拌接合

5.3 ボルト接合継手に使用される添接板

ボルト接合継手に使用される添接板は、幅 222mm、厚さ 10mm の A6061S-T6 の平板の押出形材である。摩擦面のすべり係数 0.45 を確保するために、母材と接触する添接板の面に、表面粗さ Rz20 μ m 以上のブラスト処理を行う²⁴⁾。母材に対してブラスト処理を施す必要は

ない²⁴⁾。添接板の材縁までブラスト処理を施すと疲労強度が低下するので、ブラスト処理は添接板の材縁から5mmより内側の領域に行い⁸⁾、添接板の材縁の角に1mm程度の面取りを施す。

5.4 フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルト

ボルト接合継手には、アルミニウム合金と鋼との異種金属接触腐食を防止するために、フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトを使用する。ボルト接合継手は摩擦接合として使用するので、フッ素樹脂被膜は、JIS K 5600-5-5³⁵⁾に規定される鉛筆硬度5H以上の高硬度で、トルク係数値を満足するものでなければならない。

フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトとして、JIS B 1186³⁶⁾で規格化された高力六角ボルトが使用できる。ボルト軸力はトルク法で導入することができる。

フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの被膜断面構造を図5.5に示す。ボルト素材表面を清浄し、衝撃法により金属系材料下地皮膜を素材表面に約1~2 μm 形成した後、亜鉛系下地被膜を加熱硬化により2~5 μm 形成する。その後、加熱硬化型フッ素樹脂塗料を全表面に30 μm 以上の膜厚となるようにスプレー塗装する。フッ素樹脂塗料には紫外線劣化が生じないような耐候性に優れる可溶性フッ素樹脂がブレンドされたものを用いる。このような処理が施された鋼製高力ボルトに対して、フッ素樹脂被膜は、JIS Z 2371³⁷⁾に規定される塩水噴霧試験およびJIS K 5600-7-7³⁸⁾に規定される耐候性試験で10000時間の耐久性を有するものでなければならない。

フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの締め付けには、通常の現場施工で用いられる一次締めおよび本締め用電動工具が使用できる。電動インパクトレンチは被膜を破壊する恐れがあるので使用してはならない。締結の施工フローを付録D1に示す。締結の際、座金が共廻りした場合、座金の外縁の被膜が破壊され、ボルトとアルミニウム合金が異種金属接触腐食を起こす可能性があるため、座金が共廻りしたボルトセットは取り替えなければならない。締結後直ちに、付録D1に示す要領で、露出面を上塗塗装しなければならない。

ボルトの経年変化によって発生した被膜損傷および腐食箇所に対する補修は、付録D2の施工要領に従う。

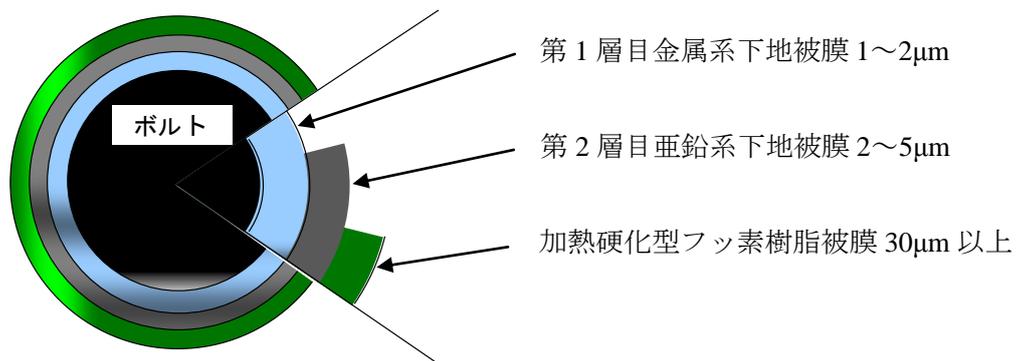


図 5.5 フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの被膜断面構造

5.5 仮組立

輸送の前に、アルミニウム床版を仮組立し、所定の形状が得られていることを確認する。仮組立の際、ボルト接合継手部をドリフトピンなどで位置決めし、ボルト孔にずれがないことを確認する。各部材要素に組立記号を記入する。

第6章 鋼桁の製作

鋼桁上フランジの上面に軸径 22mm の頭付きスタッドを溶接する。頭付きスタッドは、橋軸方向に対して、アルミニウム床版の全ての閉断面の中央の位置に設ける。頭付きスタッドの長さは、次式を満たすように決める。

$$l \geq h + \frac{H}{2} \quad (6.1)$$

ここに、 l : 頭付きスタッドの長さ

h : モルタル台座の厚さ

H : 床版の高さ

道路橋示方書²⁾に従って、頭付きスタッドの橋軸直角方向の最小中心間隔は 52mm とし、頭付きスタッドの幹と鋼桁上フランジ縁との最小純間隔は 25mm とする。

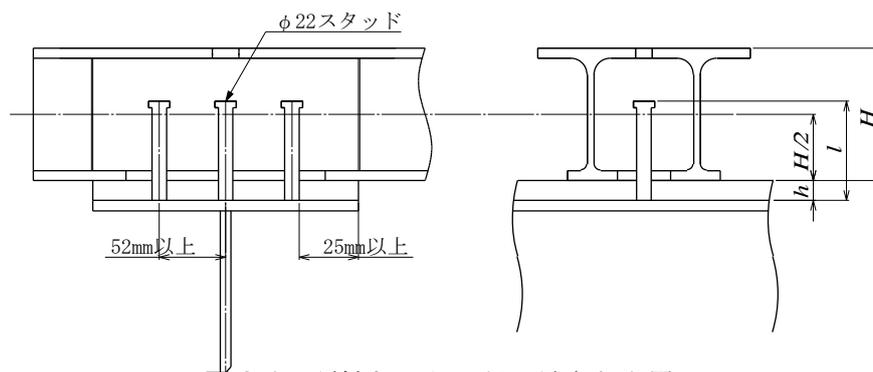


図 6.1 頭付きスタッドの長さや配置

図 5.1 に示すアルミニウム床版形材を使用する場合に対して、頭付きスタッドの橋軸方向の配置間隔を図 6.2 に示す。ボルト接合継手を挟まない頭付きスタッドの配置間隔は 320mm、ボルト接合継手を挟む頭付きスタッドの配置間隔は 450mm である。

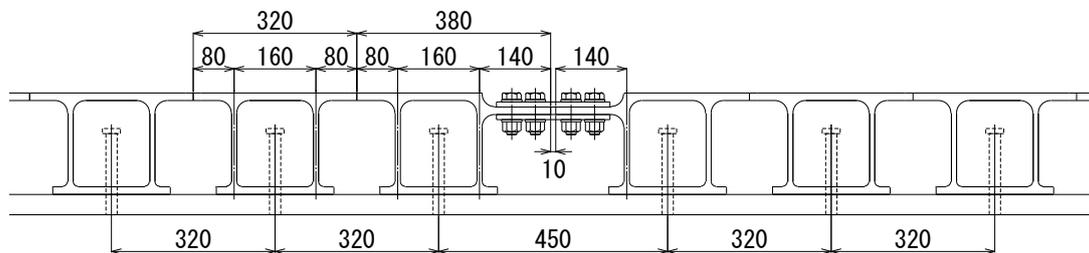


図 6.2 頭付きスタッドの橋軸方向の配置間隔

第7章 舗装

アルミニウム床版の舗装の施工例を付録 E に示す。

7.1 舗装材料

アルミニウム床版の舗装構成を図 7.1 に示す。アルミニウム床版の舗装は、基層および表層の 2 層構成とする。我国の鋼床版の舗装の基層には通常グースアスファルトが使用されるが、施工時の温度が 240℃程度あるため、180℃付近から軟化し始めるアルミニウム床版に使用することはできない。過去に、アルミニウム床版に適用する舗装材料として、施工時温度が 160℃程度のエポキシアスファルト混合物が選定されており¹⁶⁾、アルミニウム床版の舗装の基層にはエポキシアスファルト混合物の使用を標準とする。エポキシアスファルト混合物は、表 7.1 に示す基準値³⁹⁾を満たすものでなければならない。基層に関するその他の事項および表層に関する事項は、舗装設計便覧⁴⁰⁾の「7-3-1 橋面舗装」に準ずる。

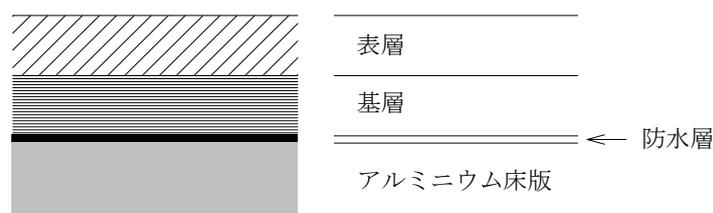


図 7.1 アルミニウム床版の舗装構成

表 7.1 エポキシアスファルト混合物の基準値

項目		基準値
マーシャル試験	空隙率 (%)	2～5
	飽和度 (%)	75～90
	安定度 (kN)	19.6 以上
	フロー値 (1/10mm)	80 以下
ホイールトラッキング試験	動的安定度 (回/mm)	5000 以上
曲げ試験 破断ひずみ		5.0×10^{-3} 以上

7.2 防水層

アルミニウム床版にはプライマーを塗布した後、防水層を施工する。加熱型アスファルト系防水材は、施工時の材料温度が高く、アルミニウム床版に悪影響を与える恐れがあるので使用してはならない。アルミニウム床版の表面の処理として塵埃と油脂の除去を行い、防水層とアルミニウム床版との接着強度が十分に得られるようにする。

第 8 章 付属物

8.1 地覆

地覆は鉄筋コンクリート構造とし、その幅は 600mm とする。地覆は、先端が M20 にねじ切りされた U 字型鉄筋を、M20 の摩擦接合用鋼製高力六角ナットと鋼製座金を用いて、アルミニウム床版の開断面部の上板に締結する。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、下側の鋼製ナットとアルミニウム床版の上板との間には 80×80×20mm のアルミニウム板 (A6061-T6 材) を挿入する⁹⁾。

支柱式の車両用防護柵を地覆に設ける場合には、支柱の抵抗モーメントを柱間隔で除した値が、地覆に均等に働くものとして地覆鉄筋の照査を行う。地覆の主鉄筋はアルミニウム床版上板にボルト接合された D22 の U 字型鉄筋であり、その間隔は 320mm を標準とする。さらに、その間隔の 1/2 に D13 の帯筋を配置する。ボルト接合継手付近は主鉄筋間隔が 450mm になるので、この箇所には帯筋を 3 本配置する。配力筋はボルト接合継手付近の主鉄筋間隔を考慮して D16 とし、上下 2 本配置するのを標準とする。鉄筋の配置と詳細を図 8.1 に示す。

図 8.1 において、防護柵に車両が衝突し、防護柵の支柱に水平力が作用すると、地覆の右端を支点として回転モーメントが生じ、U 字型鉄筋の左側の鉄筋に引抜力が発生する。この引抜力に対する、U 字型鉄筋の先端の、アルミニウム床版上板の締結部の抵抗強度、すなわち引抜強度は 244kN である⁹⁾。

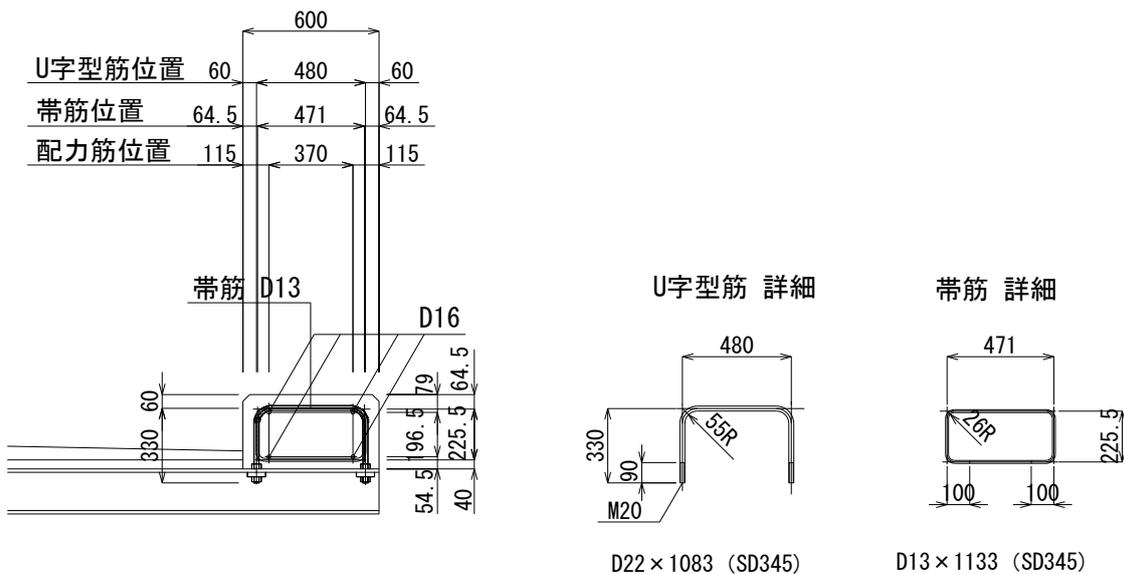


図 8.1 地覆の構造と鉄筋詳細

橋梁用防護柵の支柱の間隔は一般に 2000mm である。しかし、アルミニウム床版の場合、支柱が取付く地覆の主鉄筋間隔は 320mm であり、ボルト接合継手部にはこの鉄筋が配置できない。したがって支柱の両側に主鉄筋が配置されるように、アルミニウム床版ユニットの配置を考慮して支柱の間隔を決定する。支柱箇所には補強筋を一般に施工されているように配置する。

U 字型鉄筋とアルミニウム床版の異種金属接触腐食を防止するために、U 字型鉄筋の締結部のナットにはフッ素樹脂でコーティングが施されたものを使用し、さらに U 字型鉄筋のねじ部にもフッ素樹脂でコーティングを施す。締結後、両者には、付録 D1 に従って上塗塗装を行う。地覆の施工の際に、アルミニウム床版のアルカリ腐食を防止するために、地覆コンクリートに接触するアルミニウム床版の面に塗装を施す。

アルミニウム床版はその線膨張率が鋼材およびコンクリートと異なるので温度変化によって地覆にひび割れが発生する可能性が高い。そのため、コンクリート床版上の地覆以上に目地を多く設ける必要がある。目地は切断目地とし、その間隔は通常の 1/2 程度（約 4m 程度）とする。目地の配置はアルミニウム床版ユニットの配置や、橋梁用防護柵の支柱間隔を考慮して決定する。

8.2 排水装置

排水装置の標準図を図 8.2 に示す。排水装置は、地覆に排水管を貫通させて排水する構造とし、アルミニウム床版には排水のための孔を開けないものとする。

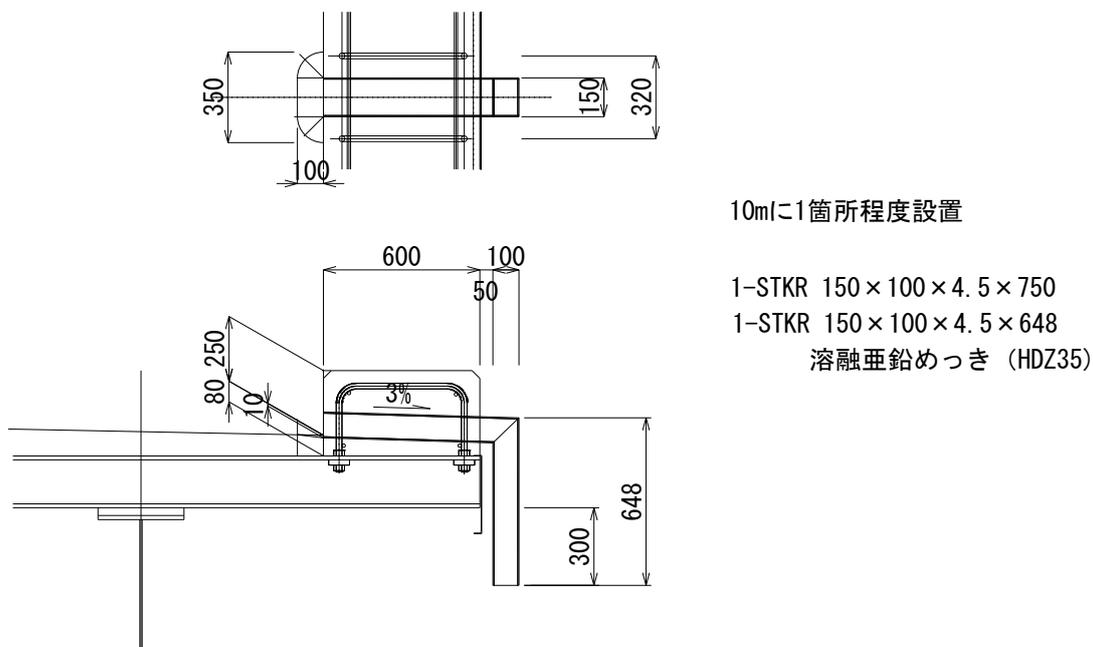


図 8.2 排水装置

8.3 伸縮装置

アルミニウム床版に使用できる伸縮装置として、東京ファブリック工業(株)製のプロフジョイント NII 型が挙げられる。図 8.3 に示すように、同伸縮装置は伸縮部と、それから突き出された直径 13mm の U 字型鉄筋から構成され、伸縮量に応じて 20, 25, 35, 50 および 60mm に対応できるものが用意されている。



図 8.3 伸縮装置

図 8.4 に示すように、この製品の定着には、一箇所当り 2 本の異形棒鋼スタッド (D16, 長さ 280mm) が用いられる。2 本の異形棒鋼スタッドの橋軸方向の間隔は 140mm であり、これらが橋軸直角方向に 250mm の間隔で配置される。舗装と後打ちコンクリートとの合わせ目が開かないようにするために、長さ 440mm の 2 本の異形鉄筋 (D16) を横からアルミニウム床版の中空部に 145mm 挿入する。アルミニウム床版のウェブに開ける、異形鉄筋を挿入する孔の直径は 30mm とする。異形鉄筋がこの孔に接触しないようにする。

アルミニウム床版の中空部に挿入する異形鉄筋を異形棒鋼スタッドに溶接した後、アルミニウム床版の中空部に無収縮モルタルを充填する。伸縮装置から橋軸方向に突き出された U 字型鉄筋および通し筋 (D13) を異形棒鋼スタッドに溶接して伸縮装置を固定する。その後、コンクリートを打ち、伸縮装置を固定する。

伸縮装置はパッキンの幅を季節に応じて治具で固定して工場から出荷され、伸縮装置が異形棒鋼スタッドに固定された後に固定治具を外す。

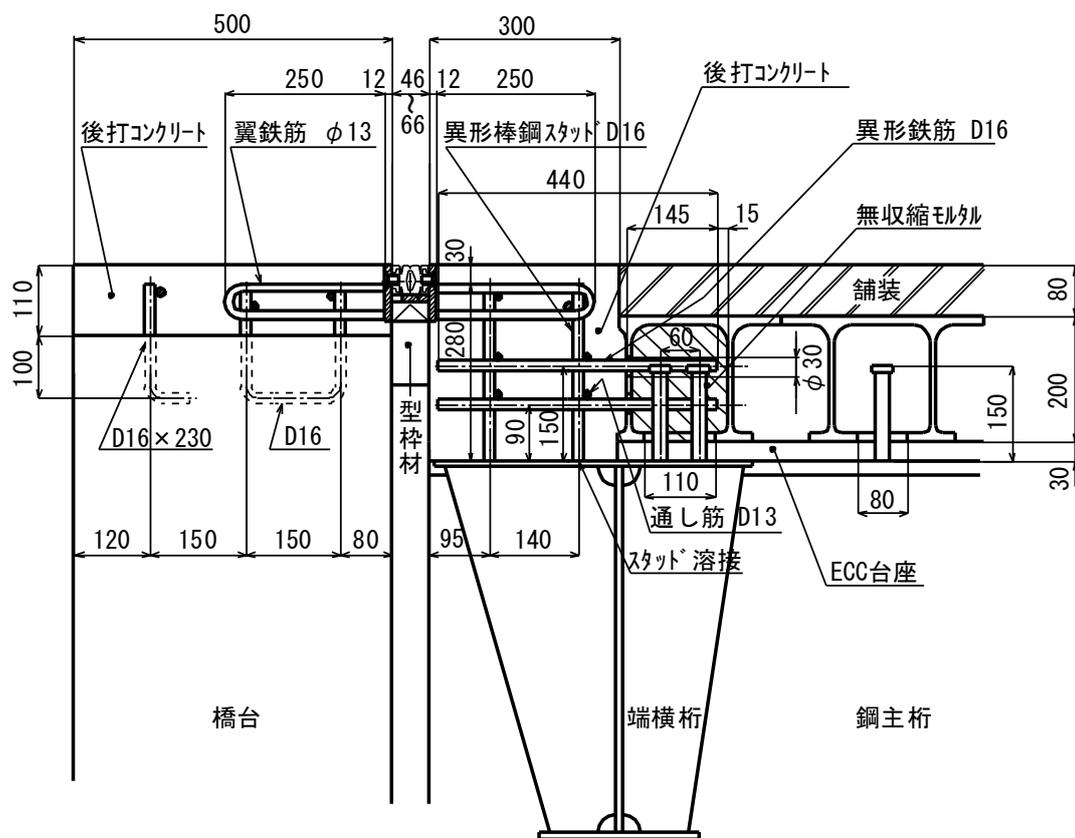


図 8.4 伸縮装置の設置

8.4 アルミニウム床版端部の処理

鳥による害を防ぐために、橋軸直角方向のアルミニウム床版の両端部の開閉断面を塞がなければならない。開閉断面を塞ぐ例を図 8.5 に示す。

アルミニウム床版端部の塞ぎ板としては、板厚が 2~5mm の A5052P-H32 あるいは H34 が適当である。塞ぎ板とアルミニウム床版端部との接合には、M3~M5 程度のステンレス製の小ねじを用いる。

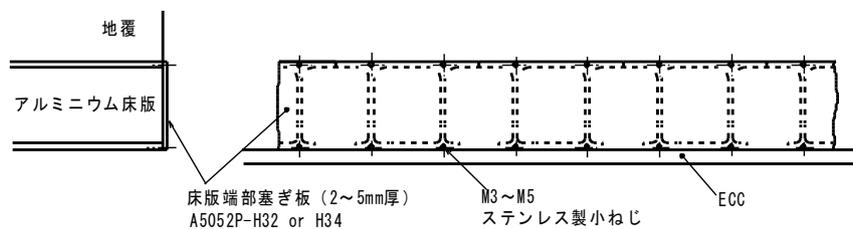


図 8.5 アルミニウム床版端部の処理

第9章 アルミニウム床版の施工

9.1 アルミニウム床版の施工フロー

アルミニウム床版の施工フローを図9.1に示す。

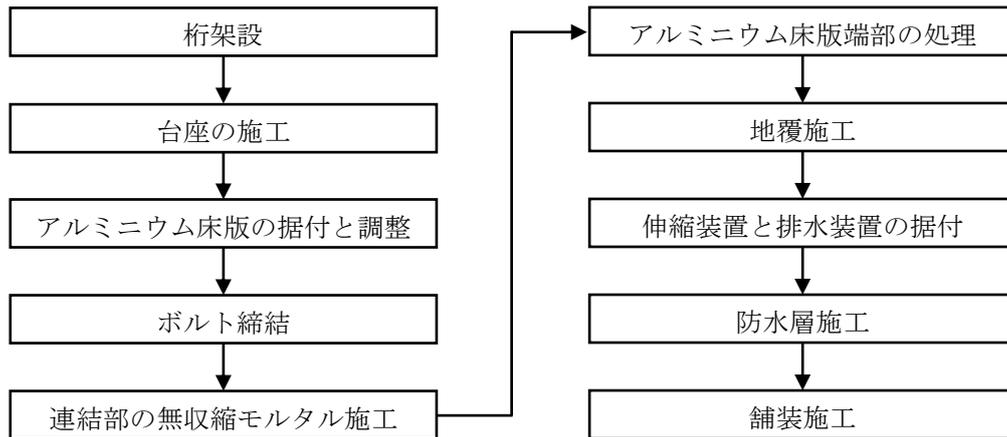


図9.1 アルミニウム床版の施工フロー

9.2 台座の施工

台座に使用される ECC の施工については、製造・販売メーカーの指示書に従う。型枠は打ち込み後24時間で脱型してよいが、湿潤養生をしなければならない。ECCの養生期間は、混合セメントとして養生することを標準とする⁴⁾。例えば、気温が15℃以上の場合には7日間以上の湿潤養生を必要とする。圧縮強度が、表4.2に示す値に達した時点で、ECCは実用に供することができる。

9.3 アルミニウム床版の据付と調整

9.3.1 モルタルおよびコンクリート製地覆と接触する面の処理

モルタルと接触するアルミニウム合金面は、モルタルが乾燥し、以後湿潤状態が続かない限りアルカリ腐食を起こすことはない。しかし、モルタルが乾燥するまではアルカリ腐食を起こすので、これを防止するために、モルタルと接触するアルミニウム合金面、すなわちアルミニウム床版の中空部内面の仕切り板間、アルミニウム床版下フランジのモルタル台座と接触する部分、およびアルミニウム床版上板のコンクリート製地覆と接触する部分に、エポキシ樹脂塗料などで塗装を施す。

9.3.2 アルミニウム床版ユニットの位置決め

図 4.1 に示すように、アルミニウム床版下フランジに設けられた四角の開口部を跨いで、仕切り板をアルミニウム床版の中空部に設置する。仕切り板の縁部は、充填する無収縮モルタルが漏れないように止水を施す。

アルミニウム床版ユニットをクレーンなどで吊る場合には、ナイロンスリングを用いる。アルミニウム床版ユニットの長手方向を橋軸直角方向に向け、モルタル台座の上に置く。その際、頭付きスタッドの位置をアルミニウム床版下フランジの開口部の中央に合わせる。アルミニウム床版の位置決めにドリフトピンを用いる。ドリフトピンは、位置決めをするために必要な本数を用いる。ボルトによる仮締めは行わない。

アルミニウム床版ユニットの下フランジとモルタル台座に生じる隙間から、注入時の無収縮モルタルの漏れを防ぐために、モルタル台座の上面に接着剤あるいはコンクリート補修材などを塗布した後、アルミニウム床版ユニットをモルタル台座の上に置く。

9.4 ボルト締結

アルミニウム床版ユニットのボルト接合継手を図 9.2 に示す。アルミニウム床版ユニット間の隙間は、許容誤差を 3mm として、 10 ± 3 mm とする。ボルトの締付けは頭締めで行う。

トルク法によって締結する場合の締付けボルト軸力は、設計ボルト軸力の 10%増しを標準とする²⁶⁾。

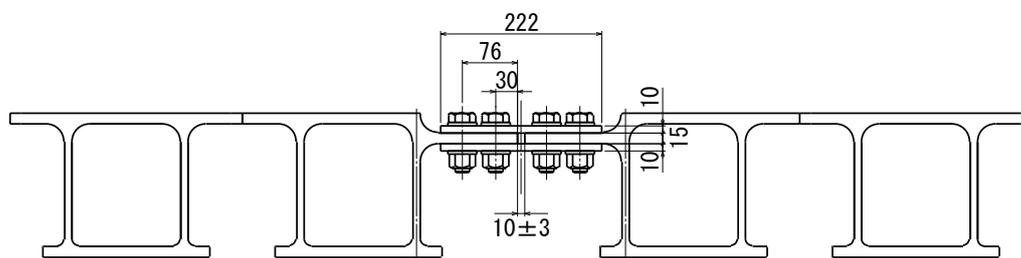


図 9.2 アルミニウム床版ユニットのボルト接合継手

9.5 無収縮モルタルの施工

アルミニウム床版ユニットのボルト締結終了後、アルミニウム床版の閉断面内部の、対向するアルミニウム仕切り板間の空間に無収縮モルタルを注入し、鋼桁とアルミニウム床版を連結する。無収縮モルタルは、アルミニウム床版の上板に開けられた注入孔から注入する。注入時、空気の巻き込みと無収縮モルタルの継ぎ足しに注意する。空気を巻き込むと空洞が生じ、無収縮モルタルを継ぎ足すと、その境に面状の分離が生じるので、アルミニウム床版の中空断面部の仕切り板間の空間の容積に相当する量のモルタルを一度に、連続的に注入しなければならない。

注入後数分経過して、無収縮モルタルが膨張して、注入孔から押出されるので、溢れた無収縮モルタルを拭き取って、注入孔を一時的に塞ぐ。

第 10 章 道路橋用アルミニウム床版－鋼桁橋の設計例

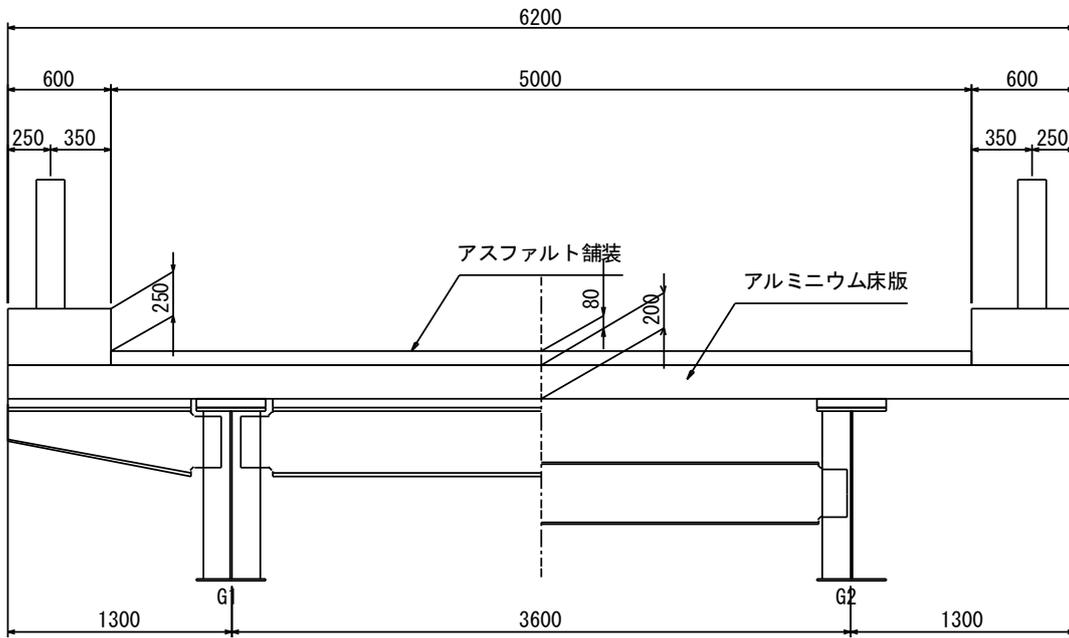
10.1 設計条件

◇形式	単純アルミニウム床版-鋼桁橋
◇荷重	活荷重：A 活荷重
◇橋長	14.100 m
◇桁長	13.980 m
◇支間長	13.380 m
◇有効幅員	5.000 m
◇平面線形	R=∞
◇斜角	A1：90° A2：90°
◇縦断勾配	2.96 %
◇横断勾配	—
◇舗装	アスファルト舗装
◇床版	アルミニウム床版
◇支承条件	A1：固定支承 A2：可動支承
◇主桁本数	2 本
◇主桁間隔	3.600 m
◇地覆幅	600 mm
◇地覆高	250 mm
◇舗装厚	80 mm
◇横桁本数	5 本

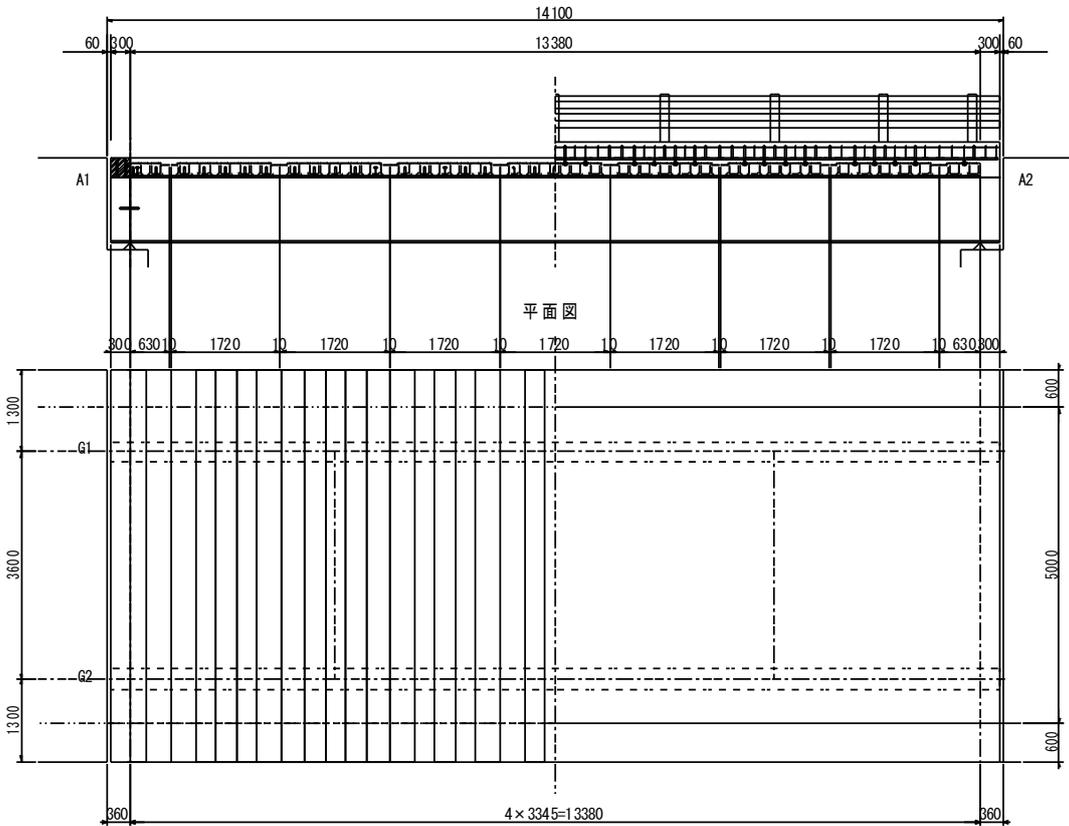
A 活荷重の T 荷重と L 荷重に対する曲げモーメントとせん断力の比較を下表に示す。曲げモーメントとせん断力は、いずれも T 荷重の場合が大きい。したがって、T 荷重に対して設計を行なう。

計算項目	位置	T 荷重	L 荷重
曲げモーメント (kN・m)	桁橋軸中央	935	790
せん断力 (kN)	支点	280	268

断面図



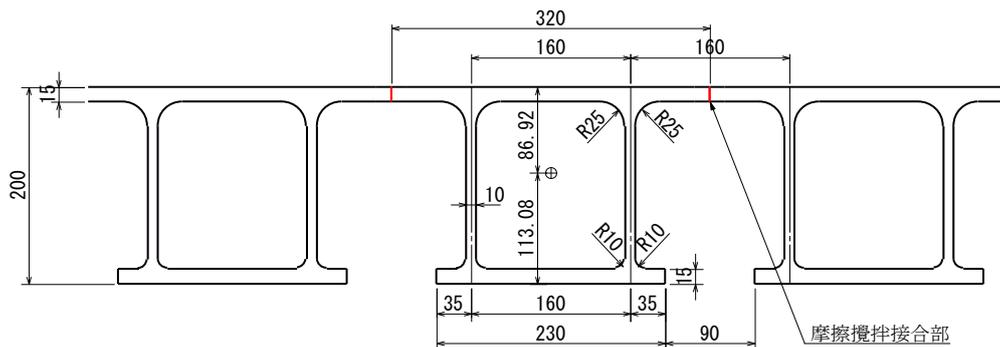
側面図



10.2 アルミニウム床版の設計

10.2.1 床版支間

3.4 節より，下図に示すアルミニウム床版の適用支間長は，2 主桁橋で 4000mm 以下，張出し部では地覆幅 600mm を含めた長さで 1350mm である．本橋は床版支間が 3600mm，張出し長が 1300mm であり，上記を満たす．



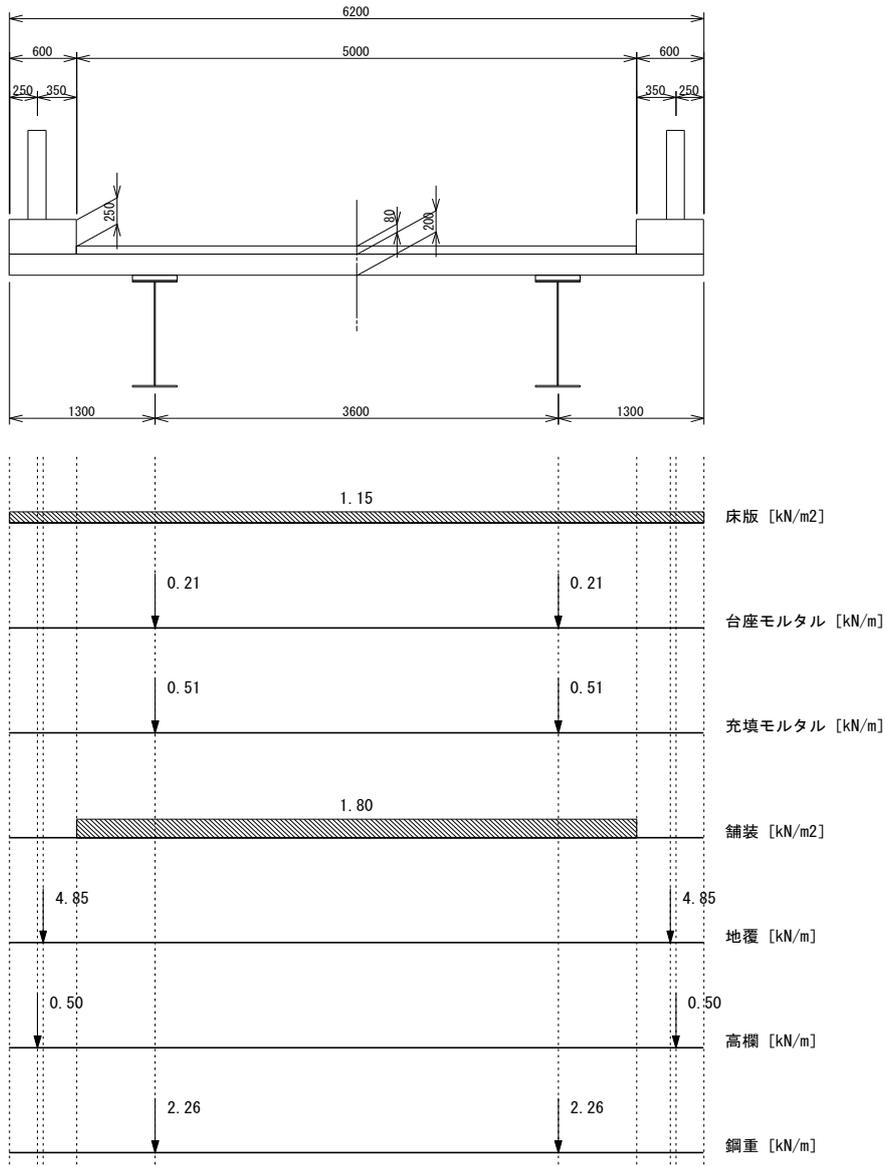
10.2.2 ボルト接合継手

(1) ボルト本数

使用ボルト	M20, F10T
ボルトの許容荷重伝達力	$\rho_a = 26.7 \text{ kN}$ (表 3.2)
母材断面積	$A = 6200 \times 15 = 9300 \text{ (mm}^2\text{)}$
摩擦攪拌接合部の許容応力	$\sigma_{ja} = 59 \text{ MPa}$
ボルト本数	$n = \frac{59 \times 93000}{2 \times 26700} = 1028 \rightarrow 123 \text{ 本}$

(2) ボルト配置

M20 のボルトの場合，JAA 指針²⁰⁾の規定では，ボルトの中心間隔およびボルト孔中心から材縁までの距離は，それぞれ 50～174mm および 34～55mm である．これに対して，下図に示すボルト接合継手では，それらが，それぞれ 68mm および 50mm であるので JAA 指針の規定を満足している．下図に示すボルト接合継手の材端距離は 30mm であり，JAA 指針で規定される材端距離 40mm (ボルトの呼び径 20mm の 2 倍) を満足していないが，3.5 節で述べられているように，このボルト接合継手には疲労亀裂が発生しないことが確認されている．



(2) 活荷重

A 活荷重-T

T 荷重載荷組数 2組

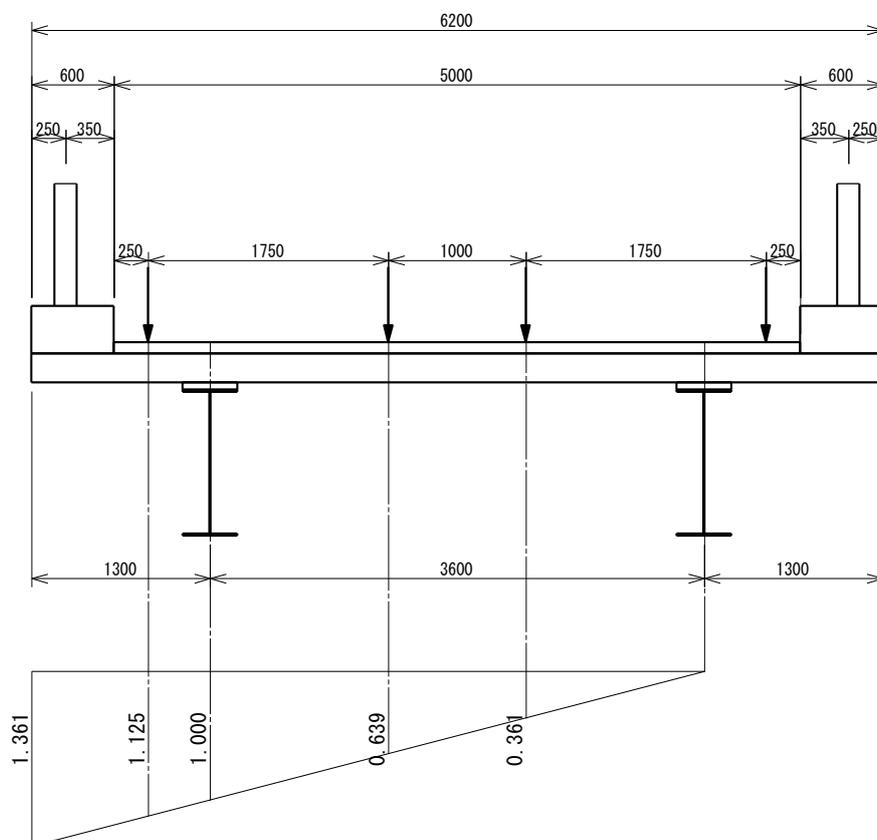
支間長 $L = 13.380\text{m}$

衝撃係数 $i = 20 / (50 + L) = 0.316$

T 荷重係数 なし

10.3.2 荷重強度

影響線



(1) 施工時荷重強度

床版	$1.145 \text{ kN/m}^2 \times 6.200 \text{ m} \div 2$	$= 3.550 \text{ kN/m}$
台座モルタル		$= 0.208 \text{ kN/m}$
充填モルタル		$= 0.505 \text{ kN/m}$
鋼重		$= 2.260 \text{ kN/m}$
		<hr/>
		$w_D' = 6.523 \text{ kN/m}$

(2) 荷重強度

死荷重

床版	$1.102 \text{ kN/m}^2 \times 6.200 \text{ m} \ / \ 2$	$= 3.550 \text{ kN/m}$
台座モルタル		$= 0.208 \text{ kN/m}$
充填モルタル		$= 0.505 \text{ kN/m}$
舗装	$1.800 \text{ kN/m}^2 \times 5.000 \text{ m} \ / \ 2$	$= 4.500 \text{ kN/m}$
地覆		$= 4.851 \text{ kN/m}$
高欄		$= 0.500 \text{ kN/m}$
鋼重		$= 2.260 \text{ kN/m}$

$$w_D = 16.374 \text{ kN/m}$$

活荷重

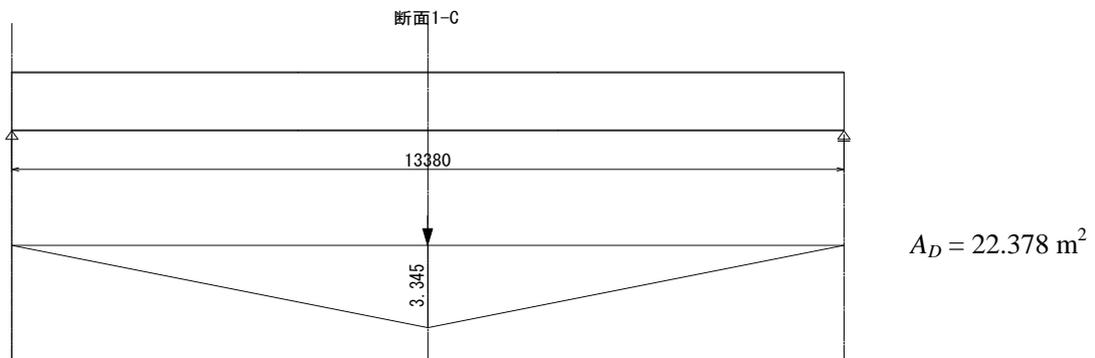
A 活荷重-T

$$w_L = 100 \times (1.125 + 0.639 + 0.361) \times (1 + 0.316) = 279.556 \text{ kN}$$

10.3.3 断面力

(1) 曲げモーメント

影響線

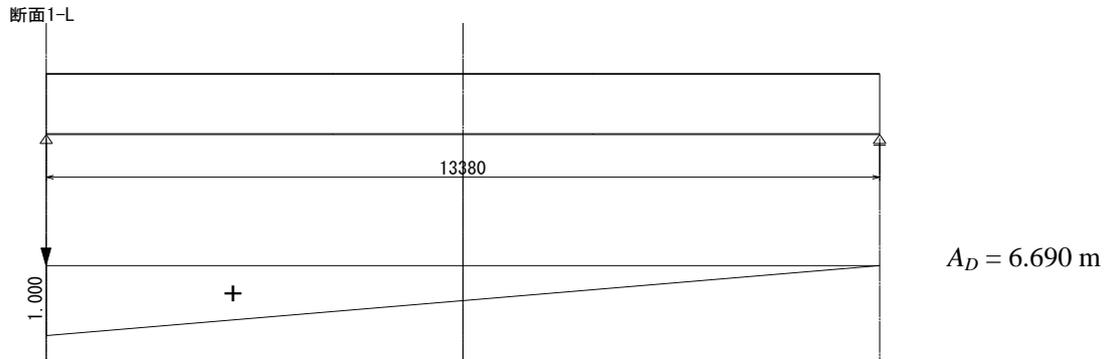


断面 1-C

施工時曲げモーメント	$M_D' = A_D \times w_D'$	$= 22.378 \times 6.523$	$= 1460 \text{ kN} \cdot \text{m}$
死荷重曲げモーメント	$M_D = A_D \times w_D$	$= 22.378 \times 16.374$	$= 3664 \text{ kN} \cdot \text{m}$
活荷重曲げモーメント	M_L	$= 3.345 \times 279.556$	$= 935.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$
全曲げモーメント	$M = M_D + M_L$	$= 3664 + 935.1$	$= 13015 \text{ kN} \cdot \text{m}$

(2) せん断力

影響線



断面 1-L

施工時せん断力	S_D'	$= A_D \times w_D'$	$= 6.690 \times 6.523$	$= 43.6$	kN
死荷重せん断力	S_D	$= A_D \times w_D$	$= 6.690 \times 16.374$	$= 109.5$	kN
活荷重せん断力	S_L		$= 1.000 \times 279.556$	$= 279.6$	kN
全せん断力	S	$= S_D + S_L$	$= 109.5 + 279.6$	$= 389.1$	kN

10.3.4 断面の決定

(I) 施工時の照査

(1) 応力計算

部材	断面 mm×mm	A cm ²	y cm	Ay cm ³	Ay ² cm ⁴	I ₀ cm ⁴
UF	330×16	52.8	-50.8	-26282	13.626×10 ⁴	
Web	1000×9	90.0	0.0	0.0	0.0	7.500×10 ⁴
LF	330×16	52.8	50.8	2628.2	13.626×10 ⁴	
合計		$A_s = 195.6$		$\Sigma Ay = 0.0$		$\Sigma(Ay^2 + I_0) = 34.75 \times 10^4$

ウェブ中央から中立軸位置までの距離 $\delta_s = \Sigma(Ay)/A_s = 0.0$ cm

鋼桁の断面二次モーメント $I_s = 34.75 \times 10^4 - A_s \delta_s^2 = 34.75 \times 10^4$ cm⁴

中立軸から上フランジ上縁までの距離 $y_{su} = -51.6 - \delta_s = -51.6$ cm

中立軸から下フランジ下縁までの距離 $y_{sl} = 51.6 - \delta_s = 51.6$ cm

鋼桁上縁の応力 $\sigma_{su,D'} = \frac{M_{D'}}{I_s} y_{su} = \frac{1460 \times 10^6}{34.75 \times 10^8} \times (-516) = -21.7$ MPa

鋼桁下縁の応力 $\sigma_{sl,D'} = \frac{M_{D'}}{I_s} y_{sl} = \frac{1460 \times 10^6}{34.75 \times 10^8} \times 516 = 21.7$ MPa

(2) 許容応力度の算出

使用鋼材 SM490Y

上フランジに対する許容曲げ圧縮応力度

$$\frac{A_w}{A_c} = \frac{9000}{5280} = 1.7 < 2$$

$$3.5 < \frac{l}{b} = \frac{3345}{330} = 10.1 < 27$$

A_w : ウェブの総断面積 (mm²)

A_c : 圧縮フランジの総断面積 (mm²)

l : 圧縮フランジの固定間距離 (mm)

b : 圧縮フランジ幅 (mm)

施工時の許容曲げ圧縮応力度は、道示Ⅱ3.1 から割り増し係数 1.25 を考慮して以下となる.

$$\sigma_{ca} = 1.25 \times \left\{ 210 - 4.6 \left(\frac{l}{b} - 3.5 \right) \right\} = 224.3 \text{ MPa}$$

局部座屈に対する許容応力度

$$b = (330 - 9) / 2 = 160.5 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{10.5} = 15.3 < t = 16 \text{ mm}$$

b : 自由突出幅 (mm)

t : 圧縮フランジの板厚 (mm)

施工時の許容応力度は、道示Ⅱ3.1 から割り増し係数 1.25 を考慮して以下となる.

$$\sigma_{ca} = 1.25 \times 210 = 262.5 \text{ MPa}$$

下フランジに対する許容曲げ引張応力度

施工時の許容曲げ引張応力度は、道示Ⅱ3.1 から割り増し係数 1.25 を考慮して以下となる.

$$\sigma_{ta} = 1.25 \times 210 = 262.5 \text{ MPa}$$

(3) 応力照査

応力状態	断面 1-C	
	鋼桁上縁	鋼桁下縁
施工時	-21.7	21.7
許容応力	-224.3	262.5

(単位 : MPa)

(Ⅱ) 主荷重に対する照査

(1) 応力計算

部材	断面 mm×mm	A cm ²	y cm	Ay cm ³	Ay ² cm ⁴	I ₀ cm ⁴
UF	330×16	52.8	-50.8	-2628.2	13.63×10 ⁴	
Web	1000×9	90.0	0.0	0.0	0.0	7.500×10 ⁴
LF	330×16	52.8	50.8	2628.2	13.63×10 ⁴	
合計		A _s = 195.6		ΣAy = 0.0	Σ(Ay ² + I ₀) = 34.75×10 ⁴	

$$\text{ウェブ中央から中立軸位置までの距離 } \delta_s = \Sigma(Ay)/A_s = 0.0 \text{ cm}$$

$$\text{鋼桁の断面二次モーメント } I_s = 34.75 \times 10^4 - A_s \delta_s^2 = 34.75 \times 10^4 \text{ cm}^4$$

$$\text{中立軸から上フランジ上縁までの距離 } y_{su} = -51.6 - \delta_s = -51.6 \text{ cm}$$

$$\text{中立軸から下フランジ下縁までの距離 } y_{sl} = 51.6 - \delta_s = 51.6 \text{ cm}$$

① 死荷重によって生じる応力

$$\text{鋼桁上縁の応力 } \sigma_{su,D} = \frac{M_D}{I_s} y_{su} = \frac{3664 \times 10^6}{34.75 \times 10^8} \times (-516) = -54.4 \text{ MPa}$$

$$\text{鋼桁下縁の応力 } \sigma_{sl,D} = \frac{M_D}{I_s} y_{sl} = \frac{3664 \times 10^6}{34.75 \times 10^8} \times 516 = 54.4 \text{ MPa}$$

② 活荷重によって生じる応力

$$\text{鋼桁上縁の応力 } \sigma_{su,L} = \frac{M_L}{I_s} y_{su} = \frac{935.1 \times 10^6}{34.75 \times 10^8} \times (-516) = -138.8 \text{ MPa}$$

$$\text{鋼桁下縁の応力 } \sigma_{sl,L} = \frac{M_L}{I_s} y_{sl} = \frac{935.1 \times 10^6}{34.75 \times 10^8} \times 516 = 138.8 \text{ MPa}$$

(2) 許容応力度の算出

使用鋼材 SM490Y

上フランジに対する許容曲げ圧縮応力度

上フランジが床版に固定されているので, $\sigma_{ca} = 210 \text{ MPa}$

局部座屈に対する許容応力度

$$b = (330 - 9) / 2 = 160.5 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{10.5} = 15.3 < t = 16 \text{ mm}$$

b : 自由突出幅 (mm)

t : 圧縮フランジの板厚 (mm²)

許容応力度は, $\sigma_{ca} = 210 \text{ MPa}$

下フランジに対する許容曲げ引張応力度

$$\sigma_{ta} = 210 \text{ MPa}$$

(3) 応力照査

応力状態	断面 1-C	
	鋼桁上縁	鋼桁下縁
①死荷重	-54.4	54.4
②活荷重	-138.8	138.8
①+②	-193.2	193.2
許容応力	-210.0	210.0

(単位: MPa)

(4) せん断応力の照査

鋼桁ウェブのみでせん断力を担うとする.

断面 1-L 全せん断力 $S = 389.1 \text{ kN}$

ウェブの断面積 $A_w = 90.0 \text{ cm}^2$

$$\text{せん断応力 } \tau = \frac{S}{A_w} = \frac{389.1 \times 10^3}{90.0 \times 10^2} = 43.2 \text{ MPa} < \tau_a = 120 \text{ MPa}$$

$\tau < 0.45\tau_a = 0.45 \times 120 = 54 \text{ MPa}$ であるので, 合成応力度の照査は省略する.

(Ⅲ) 温度変化に対する鋼桁の応力照査

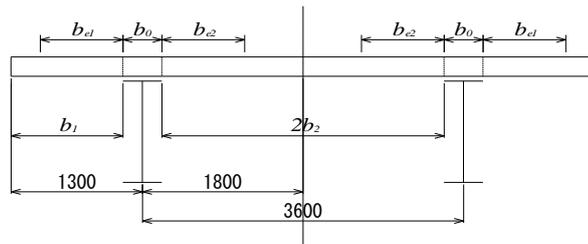
(1) 有効幅の算出

等価支間長 $L = 13380 \text{ mm}$

$$b_0 = 330 \text{ mm}$$

$$b_1 = 1135 \text{ mm}$$

$$b_2 = 1635 \text{ mm}$$



$$\text{片側有効幅 } b_{e1} = \left\{ 1.1 - 2 \frac{b_1}{L} \right\} b_1 = \left\{ 1.1 - 2 \times \frac{1135}{13380} \right\} \times 1135 = 1056 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = \left\{ 1.1 - 2 \frac{b_2}{L} \right\} b_2 = \left\{ 1.1 - 2 \times \frac{1635}{13380} \right\} \times 1635 = 1399 \text{ mm}$$

全有効幅 $B_e = b_0 + b_{e1} + b_{e2} = 2785 \text{ mm}$

(2) 応力計算

③温度変化によって鋼桁に生じる応力

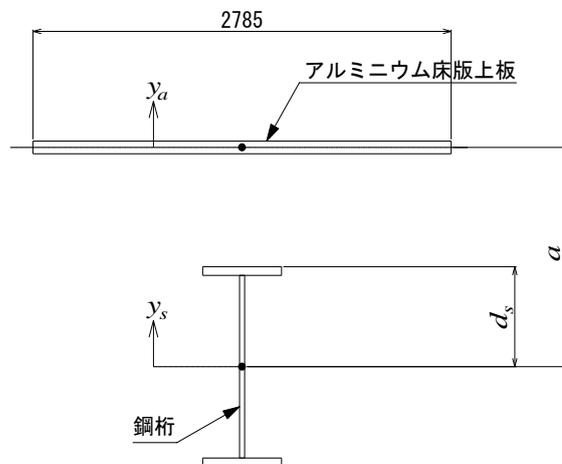
鋼のヤング係数 E_s		$= 200 \times 10^3$ MPa
アルミニウム合金のヤング係数 E_a		$= 70 \times 10^3$ MPa
$n = E_s / E_a$		$= 2.86$
鋼桁の断面積 A_s		$= 195.6$ cm ²
アルミニウム床版上板の断面積 A_a	$= 2785 \times 1.5$	$= 4177$ cm ²
鋼桁の断面二次モーメント I_s		$= 34.75 \times 10^3$ cm ⁴
アルミニウム床版上板の断面二次モーメント I_a	$= 2785 \times 1.5^3 / 12$	$= 78.3$ cm ⁴
鋼の線膨張係数 α_s		$= 12 \times 10^{-6}$ 1/°C
アルミニウム合金の線膨張係数 α_a		$= 23 \times 10^{-6}$ 1/°C
鋼桁の中立軸から鋼桁上フランジ上縁までの距離 d_s		$= 516$ mm
アルミニウム床版の中立軸から鋼桁中立軸までの距離 a		$= 7385$ mm
台座モルタルの高さ h		$= 30$ mm

式(4.52)より,

$$N_T = - \frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s}$$

$$= - \frac{200 \times 10^3 \times 195.6 \times 10^2 \times \frac{4177 \times 10^2}{2.86} \times \left(34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86} \right)}{\left(195.6 \times 10^2 + \frac{4177 \times 10^2}{2.86} \right) \times \left(34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86} \right) + 195.6 \times 10^2 \times \frac{4177 \times 10^2}{2.86} \times 7385 \times 516}$$

$$= -8.727 \times 10^8 \text{ N}$$



温度変化によって鋼桁に生じる応力は、鋼桁とアルミニウム床版の温度差を 10°C として、基準温度 (20°C) から (a), (b) に示す温度変化が生じた場合について計算する。

(a) $\Delta T_s = +20^\circ\text{C}$, $\Delta T_a = +30^\circ\text{C}$ の場合

$$\text{式(4.25)より, } \Delta \varepsilon_T = (12 \times 20 - 23 \times 30) \times 10^{-6} = -450 \times 10^{-6}$$

鋼桁上縁 $y_s = 51.6 \text{ cm}$

式(4.54)より,

$$\begin{aligned} \sigma_{st} &= \left(\frac{1}{195.6 \times 10^2} + \frac{200 \times 10^3 \times 7385}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \times 516 \right) \\ &\quad \times (-8.727 \times 10^8) \times (-450 \times 10^{-6}) \\ &= 63.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

鋼桁下縁 $y_s = -516 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \sigma_{st} &= \left(\frac{1}{195.6 \times 10^2} + \frac{200 \times 10^3 \times 7385}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \times (-516) \right) \\ &\quad \times (-8.727 \times 10^8) \times (-450 \times 10^{-6}) \\ &= -23.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(b) $\Delta T_s = -20^\circ\text{C}$, $\Delta T_a = -30^\circ\text{C}$ の場合

$$\Delta \varepsilon_T = \{12 \times (-20) - 23 \times (-30)\} \times 10^{-6} = 450 \times 10^{-6}$$

鋼桁上縁 $y_s = 516 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \sigma_{st} &= \left(\frac{1}{195.6 \times 10^2} + \frac{200 \times 10^3 \times 7385}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \times 516 \right) \\ &\quad \times (-8.727 \times 10^8) \times (450 \times 10^{-6}) \\ &= -63.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

鋼桁下縁 $y_s = -516 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \sigma_{st} &= \left(\frac{1}{195.6 \times 10^2} + \frac{200 \times 10^3 \times 7385}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \times (-516) \right) \\ &\quad \times (-8.727 \times 10^8) \times (450 \times 10^{-6}) \\ &= 23.0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(3) 応力照査

温度変化に対する鋼桁の応力照査は、式(4.56)によって行う。許容応力度は、上フランジに対して 30%、下フランジに対して 15%の割り増しを行う。

$$\text{上フランジに対する許容応力度 } \sigma_{sa} = 1.30 \times 210 = 273.0 \text{ MPa}$$

$$\text{下フランジに対する許容応力度 } \sigma_{sa} = 1.15 \times 210 = 241.5 \text{ MPa}$$

応力状態	断面 1-C	
	鋼桁上縁	鋼桁下縁
①死荷重	-54.4	54.4
②活荷重	-1388	1388
③温度変化(a)	63.1	-23.0
③温度変化(b)	-63.1	23.0
①+②+③(b)	-2563	2162
許容応力	-2730	241.5

(単位 : MPa)

(IV) 温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査

(1) 応力計算

④舗装，地覆，高欄の死荷重および活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力

アルミニウム床版上板の板厚

$$t_a = 15 \text{ mm}$$

鋼桁の中立軸の位置から鋼桁下フランジの下面までの距離

$$y_t = 516 \text{ mm}$$

舗装，地覆，高欄の死荷重および活荷重に対して，アルミニウム床版と鋼桁とが非合成として算出された鋼桁下フランジの下面に生じる応力（断面 1-C）

$$\sigma_{sd} + \sigma_{sl} = 32.7 + 1388 = 171.5 \text{ MPa}$$

舗装，地覆，高欄の死荷重および活荷重によってアルミニウム床版上板に生じる応力は，式(4.60)より，

$$\begin{aligned} \sigma_{AD} + \sigma_{AL} &= -\frac{15}{2 \times 516 \times 200 \times 10^3 \times 195.6 \times 10^2} + \left(1 + \frac{15}{2 \times 516}\right) \times \frac{1}{70 \times 10^3 \times 417.7 \times 10^2} \times \frac{171.5}{2.86} \\ &\quad - \frac{\left(1 + \frac{516}{516}\right) \times \frac{1}{200 \times 10^3 \times 195.6 \times 10^2} + \frac{516}{516 \times 70 \times 10^3 \times 417.7 \times 10^2}}{1} \\ &= -24.7 \text{ MPa} \end{aligned}$$

⑤温度変化によってアルミニウム床版上板に生じる応力

温度変化によってアルミニウム床版上板に生じる応力は，鋼桁とアルミニウム床版の温度差を 10°C として，基準温度から(a)，(b)に示す温度変化が生じた場合について計算する。

(a) $\Delta T_s = +20^\circ\text{C}$ ， $\Delta T_a = +30^\circ\text{C}$ の場合

$$\text{式(4.25)より， } \Delta \varepsilon_T = (12 \times 20 - 23 \times 30) \times 10^{-6} = -450 \times 10^{-6}$$

アルミニウム床版上板上面 $y_a = 7.5 \text{ mm}$

式(4.55)より，

$$\sigma_{AT} = \left(-\frac{1}{417.7 \times 10^2} + \frac{70 \times 10^3 \times 7385}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \times 7.5 \right) \times (-8.727 \times 10^8) \times (-450 \times 10^{-6})$$

$$= -9.2 \text{ MPa}$$

(b) $\Delta T_s = -20^\circ\text{C}$, $\Delta T_a = -30^\circ\text{C}$ の場合

$$\Delta \varepsilon_T = \{12 \times (-20) - 23 \times (-30)\} \times 10^{-6} = 450 \times 10^{-6}$$

アルミニウム床版上板上面 $y_a = 7.5 \text{ mm}$

$$\sigma_{AT} = \left(-\frac{1}{417.7 \times 10^2} + \frac{70 \times 10^3 \times 7385}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \times 7.5 \right) \times (-8.727 \times 10^8) \times (450 \times 10^{-6})$$

$$= 9.2 \text{ MPa}$$

(2) 応力照査

温度変化に対するアルミニウム床版上板の応力照査は、式(4.57)によって行う。許容応力度は、15%の割り増しを行う。

$$\text{アルミニウム床版上板の許容応力度 } \sigma_{Aa} = 1.15 \times 59 = 67.9 \text{ MPa}$$

応力状態	断面 1-C
	上板上面
④死荷重+活荷重	-24.7
⑤温度変化(a)	-9.2
⑤温度変化(b)	9.2
④+⑤(a)	-33.9
許容応力	-67.9

(単位: MPa)

(VI) 鋼桁のたわみの照査

(1) 弾性ばねの算出

本橋の弾性ばねを算出するために、付録 A に従って FEM 解析を行った。

使用ソフト 汎用有限要素解析プログラム ANSYS

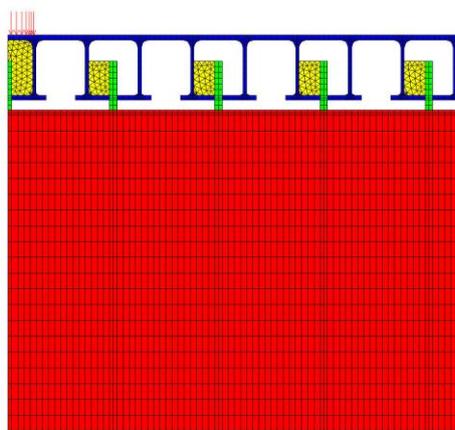
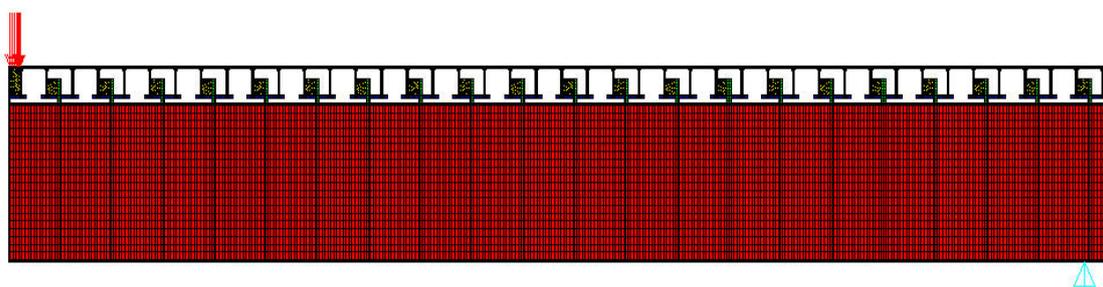
支間長 L 13.380m

載荷荷重 P 100kN

支間中央での鋼桁の中立軸位置のたわみ 3.80mm

	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	奥行き長さ (mm)
アルミニウム床版	70×10^3	0.3	2785
鋼桁上下フランジ	200×10^3	0.3	330
鋼桁ウェブ	200×10^3	0.3	9
スタッド	200×10^3	0.3	51.83
スタッドとアルミニウム 床版の交差部	200×10^3	0.3	967
充填モルタル	26.8×10^3	0.222	330

要素分割図



完全合成の場合に対する支間中央でのたわみ v_∞ は次式で表される.

$$v_\infty = \frac{PL^3}{48E_s I_v} + \frac{PI_s L}{4G_s A_{sw} I_v}$$

ここに,

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n} + \frac{A_s A_a a d_s}{n A_s + A_a}$$

$$= 34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86} + \frac{195.6 \times 10^2 \times 417.7 \times 10^2 \times 7385 \times 516}{2.86 \times 195.6 \times 10^2 + 417.7 \times 10^2} = 6.664 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)}$$

$$= \frac{200 \times 10^3}{2(1 + 0.3)} = 76.92 \times 10^3 \text{ MPa}$$

μ_s : 鋼のポアソン比

A_{sw} : 鋼桁ウェブの断面積

したがって,

$$v_\infty = \frac{100 \times 10^3 \times 13380}{48 \times 200 \times 10^3 \times 6.664 \times 10^9} + \frac{100 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 \times 13380}{4 \times 76.92 \times 10^3 \times 90.0 \times 10^2 \times 6.664 \times 10^9} = 4.00 \text{ mm}$$

FEM によって計算された鋼桁のたわみは、完全合成の場合に対する鋼桁のたわみ (3.80mm) よりも小さい。したがって、本橋は完全合成 ($\lambda = \infty$) である。

式(A.6)より,

$$k = \frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \lambda^2 = \infty$$

式(4.36)より,

$$\phi_v = 1 - \frac{3}{(\lambda L/2)^2} \left\{ 1 - \frac{\tanh(\lambda L/2)}{(\lambda L/2)} \right\} = 1.00$$

(2) たわみの計算

衝撃を含まない活荷重

$$P = 100 \times (1.125 + 0.639 + 0.361) = 2125 \text{ kN}$$

非合成の場合に対する鋼桁のたわみ

$$v_0 = \frac{PL^3}{48(E_s I_s + E_a I_a)} = \frac{2125 \times 10^3 \times 13380}{48(200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4)} = 15.26 \text{ mm}$$

式(4.38)より,

$$v = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{I_s + \frac{I_a}{n}}{I_v} \right) \phi_v \right\} v_0$$

$$= \left\{ 1 - \left(1 - \frac{34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86}}{6.664 \times 10^9} \right) \times 1.00 \right\} \times 15.26 = 7.96 \text{ mm}$$

(3) たわみの照査

$$10\text{m} < L < 40\text{m} \text{ より, 許容たわみ } v_a = \frac{L^2}{20000} = \frac{13.38^2}{20000} = 0.00895\text{m} \rightarrow 8.95 \text{ mm}$$

$$v = 7.96\text{mm} < v_a = 8.95\text{mm}$$

(VII) 温度変化による鋼桁の反りに対する照査

温度変化による鋼桁の反りは、式(4.65)より、

$$\begin{aligned} v_{\infty T} &= -\frac{aL^2}{8(E_s I_s + E_a I_a)} N_T \Delta \varepsilon_T \\ &= -\frac{738.5 \times 13380}{8 \times (200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4)} \times (-8.727 \times 10^{-8}) \times (\pm 450 \times 10^{-6}) \\ &= \pm 9.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

2本の主桁の断面二次モーメントおよびアルミニウム床版の有効幅が等しいので、温度変化による各主桁に生じる反りの大きさも等しい。したがって、温度変化によって不等沈下は生じない。

10.3.5 垂直補剛材

使用鋼材は SM400 とする。

(1) 端補剛材

補剛材の板幅 b

$$b \geq \frac{\text{ウェブ高}}{30} + 50 = \frac{1000}{30} + 50 = 83\text{mm} \rightarrow \text{使用板幅を } 100\text{mm} \text{ とする。}$$

補剛材の板厚 t

$$t \geq \frac{\text{使用板幅}}{13} = \frac{100}{13} = 7.7 \text{ mm} \rightarrow \text{使用板厚を } 9\text{mm} \text{ とする。}$$

有効断面積 A_g

$$A_g = 2 \times 9 \times 100 + 2 \times 9 \times 108 = 3744\text{mm}^2$$

$A' = 1800 \times 1.7 = 3060\text{mm}^2 \leq A_g$ より、柱として働く有効断面積 A_v は、 3060mm^2 となる。

断面二次モーメント I

$$I = \frac{9 \times (2 \times 100 + 9)^3}{12} = 6847 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

有効座屈長 l

$$l = \frac{\text{ウェブ高}}{2} = \frac{1000}{2} = 500\text{mm}$$

断面二次半径 r

$$r = \sqrt{\frac{I}{A_v}} = \sqrt{\frac{6846997}{3060}} = 47.3 \text{ mm}$$

許容軸方向許容圧縮応力度 σ_{ca}

局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度の上限値 $\sigma_{cao} = 140 \text{ MPa}$

局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度

$$\frac{l}{r} = \frac{500}{47.3} = 10.6 \text{ より, } \sigma_{cag} = 140 \text{ MPa}$$

局部座屈に対する許容応力度

$$\frac{b}{t} = 11.1 \text{ より, } \sigma_{cal} = 140 \text{ MPa}$$

許容軸方向許容圧縮応力度

$$\sigma_{ca} = \sigma_{cag} \times \sigma_{cal} / \sigma_{cao} = 140 \text{ MPa}$$

軸方向圧縮応力度 σ_c

$$\sigma_c = \frac{S}{A_v} = \frac{3882 \times 10^3}{3060} = 1269 \text{ MPa} < \sigma_{ca} = 140 \text{ MPa}$$

(2) 中間補剛材

垂直補剛材の間隔 a

垂直補剛材の間隔を, $13380/12=1115 \text{ mm}$ とする.

補剛材の板幅 b

$$b \geq \frac{\text{ウェブ高}}{30} + 50 = \frac{1000}{30} + 50 = 83 \text{ mm}$$

→ 使用板幅を 100mm とする.

補剛材の板厚 t

$$t \geq \frac{\text{使用板幅}}{13} = \frac{100}{13} = 7.7 \text{ mm} \rightarrow \text{使用板厚を 9mm とする.}$$

必要剛度 $I_{v,req}$

$$I_{v,req} = \frac{b_w t_w^3}{11} \gamma_{v,req} = \frac{1000 \times 9^3}{11} \times 8.0 \times \left(\frac{1000}{1115}\right)^2 = 42.65 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

垂直補剛材の剛度 I_v

$$I_v = \frac{tb^3}{3} = \frac{9 \times 100^3}{3} = 3000 \times 10^4 \text{ mm}^4 \geq I_{v,req}$$

有効座屈長 l

$$l = \frac{\text{ウェブ高}}{2} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ mm}$$

b_w : ウェブの板幅(mm)

t_w : ウェブの板厚(mm)

a : 垂直補剛材の間隔(mm)

$\gamma_{v,req}$: 垂直補剛材の必要剛比 $= 8.0 \left(\frac{b}{a}\right)^2$

垂直補剛材の間隔照査

$$\frac{a}{b_w} = \frac{1115}{1000} = 1.115$$

水平補剛材を用いない場合、次式で照査する.

$$\left(\frac{b_w}{100t_w}\right)^4 \left[\left(\frac{\sigma}{345}\right)^2 + \left\{ \frac{\tau}{77+58(b_w/a)^2} \right\}^2 \right] \leq 1$$

σ : ウェブの縁圧縮応力度(MPa)
 τ : ウェブのせん断応力度(MPa)

距離 (m)	b_w (mm)	t_w (mm)	a (mm)	σ (MPa)	τ (MPa)	照査式
0.000	1000	9	1115	0.0	43.2	$0.19 \leq 1$
1.115	1000	9	1115	-57.2	38.6	$0.19 \leq 1$
2.230	1000	9	1115	-1040	34.0	$0.25 \leq 1$
3.345	1000	9	1115	-1404	29.4	$0.34 \leq 1$
4.460	1000	9	1115	-1665	24.8	$0.42 \leq 1$
5.575	1000	9	1115	-1821	20.1	$0.46 \leq 1$
6.690	1000	9	1115	-1873	15.5	$0.47 \leq 1$

10.3.6 温度変化による桁端の移動量

(1) 温度変化による桁端の鋼桁下フランジの水平変位 u_{st}

支間長 $L = 13380\text{mm}$, $\lambda = \infty$, 温度変化は $-10 \sim 50^\circ\text{C}$ (普通の地方), 温度差 $\Delta T = 60^\circ\text{C}$,

$N_T = -8.727 \times 10^8 \text{ N}$, $y_i = 516\text{mm}$

式(4.70)より,

$$\text{合成度 } \phi_T = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)}{\frac{\lambda L}{2}} = 1.00$$

式(4.71)より,

$$\begin{aligned}
 u_{st} &= 10^{-6} \Delta T \left\{ -11 N_T \left(\frac{1}{E_s A_s} - \frac{a y_i}{E_s I_s + E_a I_a} \right) \phi_T + 12 \right\} L \\
 &= 10^{-6} \times 60 \times \left\{ -11 \times (-8.727 \times 10^8) \right. \\
 &\quad \left. \times \left(\frac{1}{200 \times 10^3 \times 195.6 \times 10^2} - \frac{783.5 \times 516}{200 \times 10^3 \times 34.75 \times 10^8 + 70 \times 10^3 \times 78.30 \times 10^4} \right) \times 1.00 + 12 \right\} \times 13380 \\
 &= 7.4 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

(2) 温度変化による桁端のアルミニウム床版上板の水平変位 u_{aT}

式(4.76)より,

$$\begin{aligned} u_{aT} &= 10^{-6} \Delta T \left\{ \frac{11N_T}{E_a A_a} \phi_T + 23 \right\} L \\ &= 10^{-6} \times 60 \times \left\{ \frac{11 \times (-8.727 \times 10^8)}{70 \times 10^3 \times 417.7 \times 10^2} \times 1.00 + 23 \right\} \times 13380 = 15.8 \text{ mm} \end{aligned}$$

(3) 活荷重による桁端の鋼桁下フランジの水平変位 u_{sL}

式(4.44)より,

$$\phi_u = 1 - \frac{2}{\left(\frac{\lambda L}{2}\right)^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} = 1.00$$

式(4.29)より,

$$\begin{aligned} c &= \frac{A_s \frac{A_a}{n} d_s}{\left(A_s + \frac{A_a}{n}\right) \left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \\ &= \frac{1956 \times 10^2 \times \frac{417.7 \times 10^2}{2.86} \times 516}{\left(1956 \times 10^2 + \frac{417.7 \times 10^2}{2.86}\right) \left(34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86}\right) + 1956 \times 10^2 \times \frac{417.7 \times 10^2}{2.86} \times 7385 \times 516} \\ &= 6.48 \times 10^{-4} \text{ 1/mm} \end{aligned}$$

$$v_0 = 15.26 \text{ mm}$$

式(4.45)より,

$$\begin{aligned} u_{sL} &= \frac{-3v_0}{L} \left(I_s + \frac{I_a}{n}\right) \left\{ \frac{y_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} + \left(\frac{c}{A_s} - \frac{cay_l}{I_s + \frac{I_a}{n}} \right) \phi_u \right\} \\ &= \frac{-3 \times 15.26}{13380} \times \left(34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86}\right) \\ &\quad \times \left\{ \frac{516}{34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86}} + \left(\frac{6.48 \times 10^{-4}}{1956 \times 10^2} - \frac{6.48 \times 10^{-4} \times 7385 \times 516}{34.75 \times 10^8 + \frac{78.30 \times 10^4}{2.86}} \right) \times 1.00 \right\} \\ &= -1.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

(4) 活荷重による桁端のアルミニウム床版上板の水平変位 u_{aL}

式(4.49)より,

$$u_{aL} = \frac{3v_0c(nI_s + I_a)}{LA_a} \phi_u$$

$$= \frac{3 \times 15.26 \times 6.48 \times 10^{-4} \times (2.86 \times 34.75 \times 10^8 + 78.30 \times 10^4)}{13380 \times 417.7 \times 10^2} \times 1.00 = 0.5 \text{ mm}$$

(5) 温度変化および活荷重による桁端の下フランジの移動量 ΔL_s

$$\Delta L_s = 7.4 + 2 \times 1.3 = 10.0 \text{ mm}$$

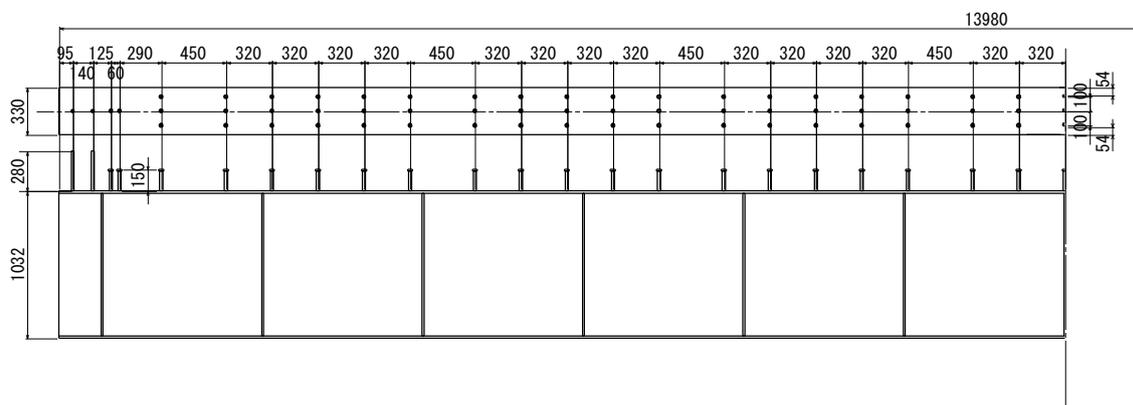
(6) 温度変化および活荷重による桁端のアルミニウム床版上板の移動量 ΔL_a

$$\Delta L_a = 15.8 + 2 \times 0.5 = 16.8 \text{ mm}$$

10.3.7 頭付きスタッドの配置

主桁上のスタッドの配置を下図に示す. スタッドの橋軸直角方向の中心間隔は 100mm (>52mm), スタッドの幹と鋼桁上フランジ縁との純間隔は 54mm (>25mm) である. 式(6.1)よりスタッドの長さは,

$$l \geq h + \frac{H}{2} = 30 + \frac{200}{2} = 130 \text{ mm} \rightarrow \text{スタッドの長さは 150mm とする.}$$



10.4 端横桁および端ブラケット

端横桁を充腹式として, その剛度を本文の式(4.81), 端ブラケットの剛度を式(4.82)によって決める.

端横桁に必要な剛度と断面二次モーメントは,

$$E \cdot I = 3759 \times 3.6^{1.8906} = 42.3 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$I = \frac{42.3 \times 10^3}{2 \times 10^8} = 2.12 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

端ブラケットに必要な剛度と断面二次モーメントは,

$$E \cdot I = 10626 \times (1.3 - 0.6 - 0.25)^{1.5397} = 31.1 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

$$I = \frac{31.1 \times 10^3}{2 \times 10^8} = 1.555 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

端横桁の断面寸法

部材	断面 mm×mm	A cm ²	y cm	Ay cm ³	Ay ² cm ⁴	I ₀ cm ⁴
UF	520×10	52.0	-24.5	-1274	3.12×10 ⁴	
Web	480×9	43.2	0.0	0.0	0.0	8294
LF	260×10	26.0	24.5	637	1.561×10 ⁴	
合計		A _s = 121.2		Σ Ay = -637		Σ(Ay ² + I ₀) = 5.51×10 ⁴

ウェブ中央から中立軸位置までの距離 $\delta_s = \Sigma(Ay)/A_s = -5.26 \text{ cm}$

端横桁の断面二次モーメント

$$I = 5.51 \times 10^4 - A_s \delta_s^2 = 5.17 \times 10^4 \text{ cm}^4 = 5.17 \times 10^{-4} \text{ m}^4 > 2.12 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

10.5 地覆鉄筋の照査

設計荷重

支柱断面 139.8 φ × 4.5 (STK400)

断面係数 6.269 × 10⁴ mm²

支柱の抵抗モーメント $M_r = 1.7 \times 140 \times 6.269 \times 10^4 / 10^6 = 14.92 \text{ kN} \cdot \text{m}$

柱間隔 B = 1.730 m

作用モーメント $M_r = 14.92 / 1.730 = 8.624 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$

断面照査

地覆幅 600 mm

鉄筋かぶり 60 mm

支柱間隔あたりの U 字鉄筋の本数 4 本

単位長(1m)あたりの U 字鉄筋の本数 $n = 4 / 1.730 = 2.312$ 本

鉄筋断面積 $A_s = A_s' = 387.1 \times 2.312 = 895.0 \text{ mm}^2$

U 字型鉄筋 D22 取付部のねじを M20 とすると, ねじ部有効断面積 $A_n = 245 \text{ mm}^2$

鉄筋応力計算

地覆厚	H	mm	600		
地覆単位長さ	B	mm	1,000		
鉄筋断面積	A_{s1}	mm ²	895.0		D22@320
	A_{s2}	mm ²	895.0		D22@320
圧縮縁からの距離	d_{s1}	mm	60.0		
	d_{s2}	mm	540.0		
弾性係数比	n		15		
鉄筋の総断面積	ΣA_{si}	mm ²	17.901×10^2		
鉄筋の一次モーメント	$\Sigma A_{si} \times d_{si}$	mm ³	537.02×10^3		
中立軸	x	mm	102.9		
断面二次モーメント C	I_c	mm ⁴	3.6303×10^8		
断面二次モーメント A_{s1}	I_{As1}	mm ⁴	0.2469×10^8		
断面二次モーメント A_{s2}	I_{As2}	mm ⁴	25.652×10^8		
総断面二次モーメント	ΣI	mm ⁴	29.529×10^8		
断面係数 (コンクリート)	K_c	mm ³	28.701×10^6		
断面係数 (圧縮鉄筋)	K_{s1}	mm ³	4.5904×10^6		
断面係数 (引張鉄筋)	K_{s2}	mm ³	0.4504×10^6		
作用曲げモーメント	M	kN·m	8.624		
コンクリート応力	σ_c	N/mm ²	-0.3	< -12.0	$\sigma_{ck}=24$
鉄筋応力 1	σ_{s1}	N/mm ²	-1.9	< 300	SD345
鉄筋応力 2	σ_{s2}	N/mm ²	19.1	< 270	SD345
ねじ部応力	σ_{s2}'	N/mm ²	30.3	< 270	SD345

許容値は衝突荷重による割増し 1.5 を考慮

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) 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攪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) 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.
- 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.
- 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.
- 12) 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.
- 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) 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.

- 18) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.
- 19) 石川敏之，筒井将仁，大倉一郎：複輪トラックタイヤ载荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力，第6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.
- 20) 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設計・製作指針案（第1次改定試案），1998.
- 21) 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.
- 22) 日本アルミニウム協会，土木構造物委員会：6000系アルミニウム合金土木構造物の母材および摩擦攪拌接合部の疲労設計ガイドライン，2010年9月版.
- 23) 大倉一郎，原田祐樹，萩澤亘保，長尾隆史：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，No.9，2009.
- 24) アルミニウム建築構造協議会：アルミニウム建築構造製作要領 アルミニウム建築構造物製作工場認定規定および基準・同解説，pp.39-50，2003.
- 25) 萩澤亘保，大倉一郎：鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手のすべり係数と鋼製高力ボルトの軸力低下，ALST 研究レポート，No.7，2009.
- 26) 大倉一郎，萩澤亘保，長尾隆史：アルミニウム合金板摩擦接合継手における鋼製高力ボルトの軸力低下，構造工学論文集，Vol.56A，pp.827-837，2010.
- 27) 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.
- 28) JHS 312：無収縮モルタル品質管理試験方法，1999.
- 29) 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.
- 30) 石川敏之，高木眞広，大倉一郎，武野正和：アルミニウム床版－鋼桁橋の合成挙動および温度変化応力，第7回複合構造の活用に関するシンポジウム，土木学会，複合構造委員会，CD，No.63，2007.
- 31) 大倉一郎，稲見豪：開閉断面アルミニウム床版と鋼桁との合成作用，ALST 研究レポート，No.13，2010.
- 32) 大倉一郎，高木眞広，石川敏之：アルミニウム床版－鋼桁橋の合成作用および温度変化により応力と反り，ALST 研究レポート，No.5，2008.
- 33) 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攪拌接合部の品質検査ガイドライン，2010年9月版.
- 34) 萩澤亘保，長尾隆史，大倉一郎：移動トラックタイヤ载荷試験による道路橋用アルミニウム床版の疲労耐久性評価，ALST 研究レポート，No.18，2010.
- 35) JIS K 5600-5-5:塗料一般試験方法－第5部 塗膜の機械的性質－第5節 引っかかり硬度(荷重針)，1999.
- 36) JIS B 1186：摩擦接合用高力ボルト・六角ナット・平座金のセット，2007.

- 37) JIS Z 2371 : 塩水噴霧試験方法, 2000.
- 38) JIS K 5600-7-7: 塗料一般試験方法—第7部 塗膜の長期耐久性—第7節 促進耐候性及び促進耐光性 (キセノンランプ法), 2008.
- 39) 本州四国連絡橋公団 : 橋面舗装基準(案), 1983.
- 40) 日本道路協会 : 舗装設計便覧, 2006.
- 41) 土木学会 : コンクリート標準示方書 施工編, 2007.

付録 A 水平せん断バネの算定方法

ここで述べる水平せん断バネの算定方法は文献 31) で示されたものである。詳細は同文献を参照されたい。

アルミニウム床版を有する鋼桁が単純支持され、支間中央に集中荷重を受ける場合に対する鋼桁のたわみを平面応力状態の弾性平面問題として FEM 解析によって解く。有限要素分割の例を図 A.1 に示す。アルミニウム床版の奥行き長さは全有効幅である。水平せん断バネを小さく評価するためにモルタル台座を考慮しない。アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に生じる水平せん断力は、頭付きスタッド（緑色の部分）の右側とアルミニウム床版のウェブ（水色の部分）との間に挟まれた充填モルタル（黄色の部分）に生じる圧縮力によって伝達される。支間中央における対称性より、支間の左側半分が要素分割されている。鋼桁の垂直補剛材と支点上のソールプレートは考慮しなくてもよい。

アルミニウム床版、頭付きスタッド、充填モルタル、モルタル台座、鋼桁の異種材料間の界面の節点を全て共有させる。頭付きスタッドの桁長手方向の長さは頭付きスタッドの直径と同じで、頭付きスタッドの奥行き長さは、頭付きスタッドの総本数の断面積に等しい長さとする。頭付きスタッドとアルミニウム床版が交差する部分の奥行き長さは次の計算によって、アルミニウム床版の下フランジの奥行き長さを等価な頭付きスタッドの奥行き長さに置き換え、これを頭付きスタッドの奥行き長さに加えたものとする。

$$b_s + \frac{E_a}{E_s}(B_e - b_o) \quad (\text{A.1})$$

ここに、 b_s : 頭付きスタッドの奥行き長さ
 B_e : アルミニウム床版の全有効幅
 b_o : 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奥行き長さ
 E_a, E_s : それぞれ、アルミニウム床版と頭付きスタッドのヤング係数

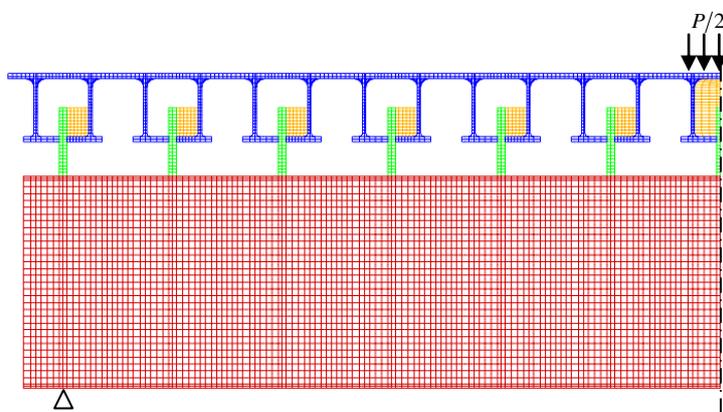


図 A.1 アルミニウム床版を有する鋼桁の有限要素分割

図 A.1 に示すように、集中荷重を受けるアルミニウム床版の中空部の充填モルタルを全て考慮し、この中空部の幅に、 $P/2$ の荷重を等分布載荷で与える。ここで、 P は荷重の大きさである。

鋼桁の中立軸上の節点が与えるたわみを次式の $v(x)$ に代入し、このたわみを満たす λ の値を数値計算によって求める。

$$v(x) = v_m(x) + v_q(x) \quad (\text{A.2})$$

ここに、

$$v_m(x) = \frac{P}{2(E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ -\frac{1-ca}{6} x^3 + \left(\frac{1-ca}{8} L^2 + \frac{ca}{\lambda^2} \right) x - ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda^3 \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (\text{A.3})$$

$$v_q(x) = \frac{PE_s I_s}{2G_s A_{sw} (E_s I_s + E_a I_a)} \left\{ (1-ca)x + ca \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right)} \right\} \quad (\text{A.4})$$

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)} : \text{鋼のせん断弾性係数} \quad (\text{A.5})$$

μ_s : 鋼のポアソン比

A_{sw} : 鋼桁ウェブの断面積

FEM 解析においては中立軸が支点上でわずかなたわみを生じるので、このたわみを除去したものを $v(x)$ に用いる。

得られた λ の値を次式に代入して水平せん断バネ k の値を求める。

$$k = \frac{E_s A_s \frac{A_a}{n} \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right)}{\left(A_s + \frac{A_a}{n} \right) \left(I_s + \frac{I_a}{n} \right) + A_s \frac{A_a}{n} a d_s} \lambda^2 \quad (\text{A.6})$$

水平せん断バネ k の桁長手方向の分布を描き、直線性を示す部分を支間中央に向かって直線外挿し、支間中央の位置の値を水平せん断バネとして採用する。

付録 B アルミニウム床版の製作

アルミニウム床版ユニットおよび添接板の製作フローを図 B.1 に示す。

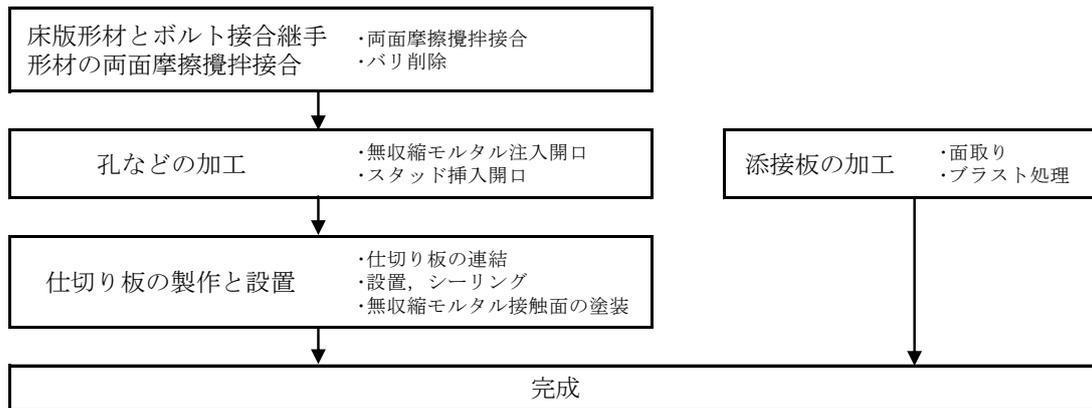


図 B.1 アルミニウム床版ユニットおよび添接板の製作フロー

(1) 床版型材とボルト接合継手型材の両面摩擦攪拌接合

ここでは、例として、図 5.2 に示す 4 本の押出型材で構成されるアルミニウム床版ユニットの両面摩擦攪拌接合について述べる。その他の本数からなるアルミニウム床版ユニットの場合も、以下に述べる方法に準じる。

床版型材とボルト接合継手型材を裏返しにして上フランジ端同士を突き合わせて固定し、最初に裏面から摩擦攪拌接合を行う。裏面の摩擦攪拌接合後のアルミニウム床版ユニットの半分を図 B.2、摩擦攪拌接合の状況を図 B.3 に示す。摩擦攪拌接合後、回転ツールをエンドミルと差し替えて、摩擦攪拌接合で生じたバリを削除する。裏面の摩擦攪拌接合終了後、上下を逆にして表面の摩擦攪拌接合を行う。同様に、摩擦攪拌接合後、回転ツールをエンドミルに差し替えて、摩擦攪拌接合で生じたバリを削除する。両面摩擦攪拌接合終了後のアルミニウム床版ユニットの半分を図 B.4 に示す。半分のアルミニウム床版ユニットの床版型材の上フランジ端同士を突き合わせ、両面摩擦攪拌接合することによりアルミニウム床版ユニットを製作する。

(2) 孔などの加工

無収縮モルタル注入開口、スタッドを挿入する四角形の開口およびボルト接合継手型材のボルト孔の加工を行う。

(3) 仕切り板の製作と設置

板厚 2mm の A5052P-H32 または H34 の 2 枚の板を、直径が 6mm の 3 本の A5056-H112

の棒で連結する。アルミニウム床版ユニットの完成後、頭付きスタッドが挿入される部分に仕切り板を設置する。床版型材の内面と接する仕切り板の周囲には、無収縮モルタルが漏れないようにシールを施す。アルミニウム床版の中空部内面の仕切り板間、アルミニウム床版の下フランジが台座モルタルと接触する部分、およびアルミニウム床版上板がコンクリート製地覆と接触する部分に、アルカリ腐食を防止するために塗装を施す。裏返しにされたアルミニウム床版ユニットの完成品を図 B. 5 に示す。

(4) 添接板の加工

厚さ 10mm の A6061-T6 の平板型材のすべての辺に対して 1mm 程度の面取りを行った後、ボルト孔を開け、片面にブラスト処理を行う。マスキングなどにより、辺から 5mm の範囲にはブラスト処理は行わず、その内部寄りに施す。ブラスト処理により、表面の粗さを Rz20 μ m 以上にする。加工後の添接板を図 B. 6 に示す。

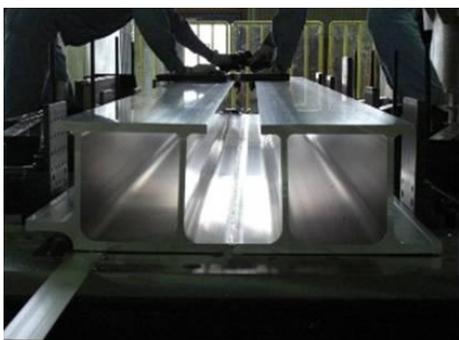


図 B. 2 裏面摩擦攪拌接合



図 B. 3 摩擦攪拌接合状況



図 B. 4 両面摩擦攪拌接合



図 B. 5 アルミニウム床版ユニット



図 B. 6 添接板

付録 C 摩擦攪拌接合の特徴

摩擦攪拌接合は 1991 年に英国の溶接研究所(TWI)で考案された新しい接合法である。ミグ溶接のような溶融凝固を伴わないので、摩擦攪拌接合は固相接合方法に属する。摩擦攪拌接合には、以下に示す長所がある。

- (1) 入熱量が少ないため、残留変形が小さい。
- (2) 溶融凝固を伴わないため、接合部の結晶粒が粗大化しにくい。
- (3) 機械制御で接合されるため、接合部の品質が安定している。
- (4) 接合する母材同士の材質と調質の組合せに制限がない。
- (5) 溶加材が不要である。
- (6) 騒音、スパーク、ヒュームなどの環境影響要因がほとんどない。

摩擦攪拌接合を行う際には、以下に示す注意が必要である。

- (1) 突合せ部の両母材の板厚を等しくしなければならない。突合せ部の両母材の板厚が異なる場合には、厚い方の母材の板厚を切削するなどして、薄い方の母材の板厚と等しくする必要がある。
- (2) 摩擦攪拌接合部の板厚は、元厚より減少する。
- (3) 接合の際、母材の接合部周辺の油、汚れなどを除去しなければならない。

付録 D1 フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの締結要領

フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトは、不適切な取り扱いおよび締結により被膜に損傷が生じると、耐久性が低下するので、取り扱いおよび締結の際には、以下の要領に従わなければならない。

(1) 締結工具

- ① フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトを締結する際には、インパクトレンチを使用してはならない。パイプレンチなどの鋭利な工具も使用してはならない。
- ② トルクレンチおよびトルクメーターの付いた油圧式レンチ（ナットランナー）など、トルク管理のできる工具を使用する。
- ③ ソケットは六角ソケットを使用することを推奨する。
- ④ 平面がナットの平面と一致しないソケットおよびレンチは使用してはならない。

(2) 締結および施工方法

被締結材を締結する前に、必ず現場でキャリブレーションを行ない、その時決定された締付トルク値を本締めの際のトルク値とする。施工フローを図 D1.1 に示す。

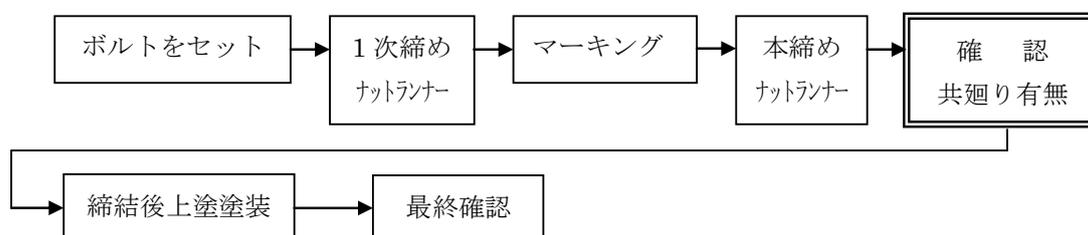


図 D1.1 施工フロー

次の注意事項を遵守しなければならない。

- ① 締結個所においてボルトとナットをセッティングする前に、添接板表面を十分に清掃する。
- ② ボルト孔にボルトを通す時、ボルトに傷や窪みができないように注意する。ハンマーで叩き入れたり、強い衝撃を与えてボルト孔に通してはいけない。
- ③ 座金には、両面がローレット加工されたものと、ローレット加工されていないものがある。ナット締めの場合にはボルト頭部側に、ボルト頭部締めの場合にはナット側にローレット加工された座金を使用しなければならない。

(3) 締結後の上塗塗装

締結後の上塗塗装に使用する材料の例を図 D1.2 に示す。



(a) 下地用塗料

(b) フッ素樹脂皮膜用
専用塗料液

(c) 清浄化用備品と刷毛

図 D1.2 締結後の上塗塗装に使用する材料

締結後の上塗塗装の施工要領を以下に示す。

① 表面の清浄化 (図 D1.3)

ボルト、ナットおよび座金の表面を、ウエスや布ブラシでごみなどを完全に除去して清浄にする。その後、布地で表面を拭き取り乾燥させ、油脂分・埃などが無いようにする。

② 下地塗装 (図 D1.4)

高濃度亜鉛末塗料を使用前に充分攪拌したのち、刷毛塗りにより被膜露出部全域を塗装する。塗料の調整は、塗料メーカーの要領に従わなければならない。

③ フッ素樹脂皮膜用専用塗料液 (図 D1.5)

専用塗料液は 2 液混合型塗料を用いる。下地塗料液を塗装後約 2 時間乾燥させる。フッ素樹脂皮膜用専用塗料液の 2 液を原液：硬化剤＝8：1 の比率で使用直前に必要量のみ混合し、充分に攪拌した後、被膜露出部全域を塗装する。専用塗料液の 2 液混合後、約 8 時間で液は硬化する。

フッ素樹脂皮膜用専用塗料液は、塗布から 2 時間経つと被膜はへこみや跡がつかない程度に硬化し、指で触ることができる。24 時間後には、被膜は完全に硬化する。その間は湿気やオイルなどから離して保管する。



図 D1.3 上塗塗装前の状態



図 D1.4 下地塗料の塗装



図 D1.5 専用塗料液による
上塗り

付録 D2 フッ素樹脂でコーティングされた鋼製高力ボルトの補修要領

経年変化後にボルト表面に錆が発生した場合に対する補修要領を次に述べる。

(1) 使用材料

付録 D1 に示す締結後の上塗塗装と同じ材料である (図 D1.2 参照)。

(2) 補修要領

損傷個所から既に錆びが発生している場合、真鍮ブラシで錆層を除去した後、ウエスなどで清浄する。表面が乾燥していることを確認した後、直ちに付録 D1 の(3)の締結後の上塗塗装と同じ施工を施す。施工フローを図 D2.1 に示す。



(a) 錆発生状態



(b) 真鍮ブラシによる錆層の除去



(c) 錆を除去した後の表面状態



(d) 補修後の状態

図 D2.1 施工フロー

付録 E 舗装の施工

アルミニウム床版の舗装の施工例について述べる。

(1) 舗装材料

舗装構成を図 E.1 に示す。基層に 5mmTop のエポキシアスファルト混合物、表層に 13mmTop の排水性アスファルト混合物を使用し、基層厚 40mm, 表層厚 35mm としている。

(2) アルミニウム床版の表面の処理

アルミニウム床版上面に塵埃、油脂などが付着しているとアルミニウム床版と防水層との接着性に悪影響を及ぼすので、高水圧洗浄機でアルミニウム床版上面の塵埃を除去する。次に、アセトン系脱脂洗浄剤により汚れを除去する。その後、アルミニウム床版上面が乾燥するまで放置する。

(3) 防水工

防水層にはゴム溶剤型塗膜系防水層を使用する。防水層の施工の様子を図 E.2 に示す。

(4) 基層工

基層材料にはエポキシアスファルト混合物を使用する。舗装の敷き均しおよび転圧の状況を図 E.3 と E.4 に示す。

(5) タックコート工

基層仕上り後、表面温度が下がるまで放置し、タックコートを施す。施工時の様子を図 E.5 に示す。

(6) 表層工

表層材料に排水性アスファルト混合物を使用する。舗装の敷き均しおよび転圧の状況を図 E.6 と E.7 に示す。

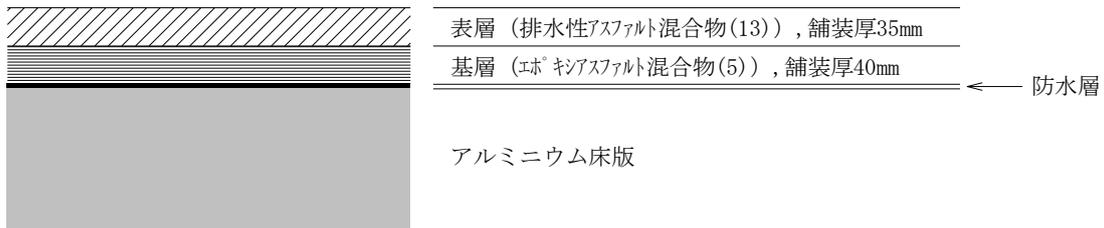


図 E.1 舗装構成



図 E.2 防水工



図 E.3 基層の敷き均し



図 E.4 基層の転圧



図 E.5 タックコート工



図 E.6 表層の敷き均し



図 E.7 表層の転圧