ISSN 0386-5878
土木研究所資料　第3888号

土　木　研　究　所　資　料

新材料の土木構造物への適用に関する研究

－アルミニウム合金と繊維強化プラスチックの
道路橋への適用に関する調査・分析－

平成１６年３月

独立行政法人　土木研究所
構造物研究グループ橋梁構造チーム

Copyright © (2004) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土木研究所資料
第3888号　2004年3月

新材料の土木構造物への適用に関する研究
－アルミニウム合金と繊維強化プラスチックの道路橋への適用に関する調査・分析－

構造物研究グループ
橋梁構造チーム　上席研究員　村越　潤
同　主任研究員　新井　恵一
同　研究員　長屋　優子
同　研究員　高橋　実

要　旨

橋梁等の土木構造物に用いられる材料は、主に鋼およびコンクリートが一般的であるが、近年、アルミニウム合金や繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics：FRP）などの軽量、高強度、高耐久性を有する新材料の適用が提案されている。また、これらの新材料は材料コストは高価であるが、維持管理を含めたライフサイクルコストの評価ではコスト縮減の可能性が考えられる。

このような背景を踏まえ、本研究では新材料のうちアルミニウム合金及びFRPを取り上げ、道路橋の上部構造に採用した場合における課題を整理するとともに、道路橋床版を対象として、数値解析により構造断面の試設計を行い、アルミニウム合金及びFRPの道路橋への適用可能性について検討を行った。本報告書はこれらの検討結果についてとりまとめたものである。

キーワード：土木構造物、橋梁、床版、新材料、アルミニウム合金、繊維強化プラスチック

本研究は平成11年度から開始されたものであり、過年度における研究者は下記のとおりである。

構造橋梁部構造研究室	室　　長	佐藤　弘史*
同	主任研究員	平原　伸幸**
同	研　究　員	大儀　健一***
同		佐藤　政文****
構造物研究グループ		
橋梁構造チーム	上席研究員	平原　伸幸**
同	主任研究員	森山　　彰*****
同	交流研究員	徳橋　亮治******

＊現在：独立行政法人土木研究所構造物研究グループ長
＊＊現在：本州四国連絡橋公団保全部保全企画課
＊＊＊現在：国土交通省北陸地方整備局阿賀川河川工事事務所
＊＊＊＊現在：文化庁文化財部美術学芸課美術館・歴史博物館室
＊＊＊＊＊現在：本州四国連絡橋公団保全部橋梁保全課
＊＊＊＊＊＊交流研究員在職期間：平成13年4月～平成15年3月

目　　次

1. はじめに 1

2. 本資料の構成 2

3. 材料特性の調査 3
3.1 アルミニウム合金の種類と特性 3
3.2 FRP の種類と特性 17

4. 土木構造物としての設計基準類の調査 23
4.1 アルミニウム合金土木構造物の設計基準類に関する調査 23
4.2 FRP 土木構造物の設計基準類に関する調査 26

5. 新材料の土木構造物への適用事例の調査 27
5.1 アルミニウム合金の土木構造物への適用 27
5.2 FRP の土木構造物への適用 31

6. 新材料の橋梁上部構造への適用性に関する検討 34
6.1 鋼との比較 34
6.2 試設計によるコスト比較 36

7. 新材料を用いた橋梁床版に関する構造性能の検討 49
7.1 断面基本形状の検討 49
7.2 断面形状の検討 60
7.3 新材料の接合方法の調査 92

8. まとめ 102

参考文献 103

巻末資料-1 アルミニウム設計基準対比表 105
巻末資料-2 FRP 設計基準 EUROCOMP 条文と概要 113
巻末資料-3 金慶橋設計対比表 119
巻末資料-4 伊計平良線ロードパーク連絡歩道橋設計対比表 135

1．はじめに

橋梁等の土木構造物に用いられる材料は、主に鋼やコンクリートが一般的であるが、近年鋼やコンクリートに比較して、アルミニウム合金や繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics：FRP　以下、FRPという。）などの軽量、高強度、高耐久性を有する新材料の適用が提案されている。これらの新材料を土木構造物に適用した場合、材料単価ならびに製作費用が比較的高価な分、初期建設コストが高くなると予想されるが、維持管理を含めたライフサイクルコストを縮減させる可能性が期待されている。

一方で、高度経済成長期を中心に建設されてきた橋梁は既に数十年を経ており、今後膨大な数の道路橋が維持管理の時代を迎えることになる。さらに、交通量の増大や設計活荷重の変更に伴い、橋梁の部位の中でもとりわけ過酷な条件下にある床版は、これまでにも多くの損傷事例が報告されている。

このような背景のもと、本研究ではアルミニウム合金と FRP の土木構造物への適用性について、材料特性、製作性、施工性及び経済性の観点から検討した上で、耐塩害性の観点から最も実現性の高いと考えられる道路橋床版を対象に、アルミニウム合金と FRP の適用性について、構造形式の提案、断面の試設計とその経済性の評価を目的とした。

本資料は平成 11～13 年度の 3 年間で実施した「新材料の土木構造物への適用に関する研究」の成果及び平成 14～15 年度の 2 年間で実施した「構造物への新材料適用に関する研究」についてとりまとめたものである。

2．本資料の構成

以下に、本資料の構成を記す。

第 3 章

橋梁などの社会資産は、長年月に亘って性能および機能が著しく低下することがないように高耐久性であることが必要である。そこで、他分野で使用されている耐久性（耐腐食性）の高い材料のうち、建設分野への適用性が期待されるアルミニウム合金と FRP を取り上げ、各々の特性などを調査した。

第 4、5 章

アルミニウム合金および FRP は、土木・建築分野における従来の材料と比較して材料費が高いこと、構造材として設計法に関する基準体系が整備されていないこと等から、構造部材として用いられた実績は非常に少ない。しかしこれらの材料は、最近、耐久性、軽量化、ライフサイクルコスト等の観点から見直され、数は少ないものの試験的に用いられる事例が増えている[1), 3)]。第 4 章では、アルミニウム合金および FRP を用いた土木構造物の国内外の設計基準類を調査し、アルミニウム合金および FRP が土木構造物の要求性能を満足しているかどうかを調査した。また、これらの事例を参考に、鋼材を用いた土木構造物との設計上の相違点および使用上の問題点等を調査した。

第 6 章

第 3 章～第 5 章までのまとめとして、鋼及び鉄筋コンクリートとアルミニウム合金及び FRP を材料特性、構造性、製作性及び施工性の観点から比較した。さらに、試設計を行うことにより、主構造部材へ適用した場合の経済性及び問題点について検討し、橋梁への適用に際して解決すべき課題の整理とその方法の提案を行った。

第 7 章

第 3 章～第 6 章の調査を踏まえ、アルミニウム合金及び FRP の道路橋床版への適用検討を行う。本研究では中空セル構造を有する断面形状を対象とし、立体 FEM 解析により構造の最適化を行い、従来床版との比較を行った。

第 8 章

アルミニウム合金及び FRP の実用化に向けた課題を整理した。

3．材料特性の調査

3.1　アルミニウム合金の種類と特性

3.1.1　アルミニウム合金の種類

（1）アルミニウム合金の分類[4)]

JIS（日本工業規格）[5)~15)]では、個々のアルミニウム合金材料を**図-3.1.1** に示す合金系に分類している。

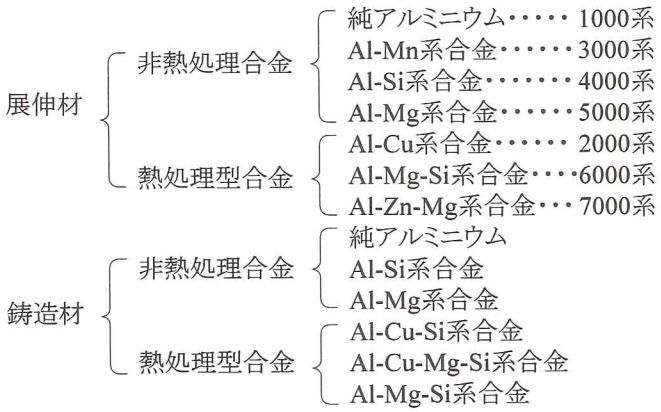


図-3.1.1　アルミニウム合金の分類[4)]

1）展伸材の呼称

JIS による展伸材の呼称例を以下に示す。

A5052P-H34（非熱処理型 Al-Mg 系合金（5000 系）の例）

A6063TE-T5（熱処理型 Al-Mg-Si 系合金（6000 系）の例）

最初の A はアルミニウム合金を表し（通例省略されることが多く、本資料においても割愛するものとした）、続く 4 桁の数字（具体的な 4 桁の数字については**表-3.1.3** を参照）は国際アルミニウム合金名にならって表示され、第 1 桁の数字は合金系を第 3，4 桁の数字は個々の合金の識別を表すが、合金系表示の第 1 桁が 1 の場合、すなわち純アルミニウム系材料では純度を示す。第 2 桁の数字は第 3，4 桁で識別された合金の改良または派生合金であることを表す。ただし、我が国で開発され、国際アルミニウム合金に相当する合金を見いだせない場合は第 2 桁目の数字に代えて N を記す。なお、この 4 桁の数字は記号を含むため、本資料においては総称して“合金記号”と統一し、本節以降に記述のある 4 桁は合金記号を指すものとする。

合金記号に続く記号は、**表-3.1.1** に示す材料の形状および製造条件を表す。

表-3.1.1　製品形状及び製造条件を示す主な記号 [4)]

記号	意味	記号	意味
P	板、条、円板	TW	溶接管
PC	合せ板	TWA	アーク溶接管
H	箔	S	押出形材
BE	押出棒	FD	型打鍛造品
BD	引抜棒	FH	自由鍛造品
W	引抜線	PB	圧延板導体
TE	押出継目無管	SB	押出板導体
TD	引抜継目無管	TB	管導体

アルミニウム合金は冷間加工、溶体化処理、時効硬化処理、焼なまし等によって、強度や性質を調整することができる。このような操作によって所定の性質を得ることを調質といい、調質の種類を質別という。製造過程における加工・熱処理条件の違いは、合金記号の後にハイフン（記号“－”）とともに付ける表-3.1.2 に示される質別記号（調質記号）により区別される。製造そのままのものを F 材と呼び、このうち機械的性質が保証されたものを H112 材と呼ぶ。塑性加工や鍛造したアルミニウム及びアルミニウム合金を 300～400℃に加熱すると加工や鍛造による結晶のひずみが除去される。このように転位をなくし、再結晶させて完全に軟化させた状態の焼きなまし材を O 材と呼ぶ。強度が低いアルミニウムの焼きなまし材を加工すると、加工率の増加とともに転位密度が上昇して引張強度と耐力は上昇する。一方、伸びは逆に加工硬化するとともに減少する。加工硬化したアルミニウムを加熱して温度を上昇させると、転位が減少し、200℃を超えると転位のない新たな再結晶粒が形成するため、じん性を調整して目的に応じた材料を製造することができる。加工によって強度を調整した材料を H1n と呼ぶ。加工硬化後適度に軟化熱処理したものを H2n と呼び、加工硬化後に安定化処理したものを H3n と呼ぶ。熱処理により F・O・H 材以外の安定な質別に調整したものには記号 Tn をつける。ここで、n は強度の度合いを表し、引張強度の値を完全焼きなまし状態の O 材を含めて 10 段階に分け、n=1～9 をつけている。

表-3.1.2　JIS 規格で用いられている基本的な質別記号（調質記号）（JIS H 0001） [5)]

質別記号(調質記号)		定　義	意　味
F		製造のままのもの	加工硬化または熱処理について特別の調整をしない製造工程から得られるもの。(特に調質の指定なく製造された状態を示す。押出のまま、鋳放しのままで調質をうけない材料がこれにあたる。)
H112		展伸材においては積極的な加工硬化を加えずに、製造されたままの状態で機械的性質の保証されたものを示す。	
O		焼なましにより最も軟らかい状態となったもの	焼なましにより完全に再結晶した状態を示す。熱処理合金の場合は、焼なまし温度より緩やかな冷却を行い、焼入れの効果を完全に防止することが必要である。鋳物では、伸びの増加又は寸法安定化のために施される。
H	H1n	冷間加工を行ない加工硬化したもの	nは1～9の数字で示され、加工硬化の程度を示す。すなわち8は硬質材、4はOと硬質材の中間(1/2硬質)の加工硬化状態であることを示す。2,6はそれぞれOと1/2硬質、1/2硬質と硬質の中間の加工硬化状態であることを示す。
	H2n	加工硬化させたものに適度に軟化熱処理したもの	
	H3n	冷間加工を行ないさらに安定化したもの	
Tn		熱処理によってF・O・H以外の安定な質別にしたもの	安定の質別にするため、追加加工硬化の有無にかかわらず、熱処理したもの。

2）鋳造材の呼称

JISによる鋳造材の呼称例を以下に示す。

AC3A-F（非熱処理型 Al-Si 系合金の例）

AC4C-T6（熱処理型 Al-Mg-Si 系合金の例）

最初の A は展伸材と同様であり、A に続く C, DC, J の記号は製品記号でそれぞれ、鋳物、ダイカスト、軸受鋳物であることを示している。製品記号に続く数字は添加元素による種別を表し、1，2，3‥‥の数字は 1 種、2 種、3 種‥‥であることを示す。ハイフン（記号“－”）の前の A，B，C 等の記号は同一合金系の中で添加量が異なることを示す。質別記号は展伸材と同じ要領で使用される。

（2）展伸材の合金系の種類[4)]

表-3.1.3 にアルミニウム合金の特性と用途例を合金系別に示し、各々について以下に述べる。

1）純アルミニウム（1000 系）

工業用純アルミニウムは純度 99.00%以上の純アルミニウムをいい、不純物としては鉄 Fe とけい素 Si が主となり、その他に微量の銅 Cu、亜鉛 Zn を含有する。鉄 Fe とけい素 Si の含有量や量比によってアルミニウムの強度、加工性、成形性が異なるので、それらの不純物を合金元素と同様に調節し、制御している。代表的なものには、純度 99.00%以上の 1100，1200、99.50%以上の 1050、99.70%以上の 1080 等がある。1000 系の材料は加工性、耐食性、溶接性に優れており、電気および熱の伝導率が優秀で伝導体、熱交換器に利用されている。純度が高いほど耐食性が向上する。強度を上昇させるには加工硬化を行う。一般的に、純アルミニウムは強度が低く、構造材には適さないが、家庭用品、日用品、電気器具、各種容器、建築物の内外装板等に多く用いられる。

2）アルミニウム－銅系合金（2000 系）

アルミニウム－銅（Al-Cu）系の合金は、析出による時効硬化（金属材料を低温中に放置しておくと硬くなる現象）が生じることが初めて見出された合金系で、2014（Al-4.4%Cu-0.8%Si-0.8%Mn(マンガン)：ここに、元素記号の直前の百分率はその元素の含有率を表し、各元素同士をハイフン（記号“－”）で結んで表した。また、先頭の元素記号“Al”は、母材のためその含有率は省略した。以下同様に記す。）、Al-Cu-Mg(マグネシウム)系のジュラルミン 2017（Al-4.0%Cu-0.6%Mg-0.7%Mn）、超ジュラルミン 2024（Al-4.4%Cu-1.6%Mg-0.6%Mn）等があり、時効硬化処理により鋼に匹敵する強度をもち、切削性もよい。しかし、銅 Cu は耐孔食性を著しく劣化させるとともに表面酸化被膜の防食力を低下させる合金元素なので、他のアルミニウム合金と比べるとこの系の合金の耐食性は悪く、腐食性の小さい大気中を除いては、防食対策をせずに使用することは望ましくない。一般に、高強度の合金ほど腐食環境下で低い応力のもとで割れる応力腐食割れを生じ易くなる。航空機用材料には、防食を目的として Al-Cu 系合金の表面に耐食性が良い純アルミニウムを重ねて圧延したクラッド材（合せ板）として用いられている。析出硬化材であるため、材料を溶解して接合する溶接が適用できないので、接合はリベット、ボルト接合、抵抗スポット溶接により行われる。ただし、銅 Cu の含有率が多い 2219（Al-6.3%Cu）は溶接性が良好である。航空機

の胴体や翼、ギヤ、油圧部品、光学部品、ネジ、リベット、シリンダヘッド、ピストン等の航空機、輸送機器、機械部品の材料として多く使われている。

3）アルミニウムーマンガン系合金（3000 系）

アルミニウムーマンガン（Al-Mn）系の合金は、3003（Al-1.3%Mn）、Al-Mn-Mg 系の 3004（Al-1.3%Mn-1.0%Mg）、3105（Al-0.6%Mn-0.5%Mg）が代表的であり、純アルミニウムと同等の加工性と耐食性をもち、固溶硬化により強度を少し上昇させた合金である。加工硬化による強度上昇は可能であるが、熱処理硬化性はない。成形加工性がよい合金で、器物、フィン、建築用材、車両用材、船舶用材、カラーアルミ、各種容器、キャップ、電球口金、飲料水アルミ缶に用いられている。

4）アルミニウム合金ーけい素系合金（4000 系）

けい素 Si の含有量が多い 4032（Al-12%Si-0.9%Cu-1.1%Mg-0.9%Ni）は熱膨張率が小さく、耐摩耗性が優れており、銅 Cu およびマグネシウム Mg の析出硬化元素を加えて、耐熱性の高い鍛造用合金となり、ピストン、VTR ヘッド等に用いられる。けい素 Si の含有量が少ない 4043（Al-5%Si）は、溶解状態で湯流れがよいので、溶接ワイヤ、接合用ろう材として用いられ、またビル外装用パネル材として利用されている。けい素 Si は孔食発生を多少促進する効果があるので、この系の合金は純アルミニウム系より耐食性がやや劣る。

5）アルミニウムーマグネシウム系合金（5000 系）

マグネシウム Mg は耐食性を向上させる効果と酸化被膜の成長を促進する効果を持つため、この系の合金の耐食性は優れ、とくに海水や工業汚染雰囲気に耐えるもっとも耐食性の高い合金である。表面処理性も優れており、外観が問題になる装飾用や建築用材には表面処理を施して使用する。析出硬化性（析出物が材料中に析出して硬化する現象（硬化処理方法の詳細は（3.1.2（5）を参照のこと））はないが、固溶硬化性（固溶体が形成されることによる合金化現象）の高い合金で、さらに加工硬化（冷間加工により強度が高くなり、展延性が減少する現象）によって強度上昇が図れる上、溶接が可能である。マグネシウム Mg の含有量が少ない 5N01（Al-0.4%Mg）は、高級な装飾や器物用材料ならびに建築や反射板、5005（Al-0.8%Mg）は車両、建築用内装、一般器物なので用いられている。マグネシウム Mg の含有量が多く、中程度の強度をもつ 5052（Al-2.5%Mg）や強度の高い 5082（Al-4.5%Mg）は缶の蓋材、車両や建築用材として使用されている。5083（Al-4.5%Mg-0.7%Mn-0.15%Cr(クロム)）は、比熱処理合金では最も強度をもつ合金で、船舶、車両、圧力容器用の溶接構造用材料として用いられている。

6）アルミニウムーマグネシウムーけい素系合金（6000 系）

アルミニウムーマグネシウムーけい素（Al-Mg-Si）系の合金は、少量の Mg と Si を含有した析出硬化型合金で、中程度の強度と優れた耐食性を兼ね備えた合金であり、構造用鋼材として用いられている。この系の合金の耐食性は 5000 系、3000 系に次ぎ、熱処理型合金の中ではもっともよい。6061（Al-1.0%Mg-0.6%Si-0.25%Cu）は強度が高く、また 6N01（Al-0.6%Mg-0.6%Si）は加工性に優れ、船舶、

車両、陸上構造物や光学機器に使用されている。溶接すると強度が下がり、継手効率が悪く、ビス、ボルト、リベット等による接合が行われている。

7）アルミニウムー亜鉛ーマグネシウム系合金（7000 系）

アルミニウムー亜鉛ーマグネシウム（Al-Zn-Mg）系の合金には、析出硬化により、アルミニウム合金中で最高の強度をもつ 7075（Al-5.6%Zn-2.5%Mg-1.5%Cu）と銅 Cu を含有しない溶接構造用の 7N01 がある。7075 は超々ジュラルミンと呼ばれ、航空機の構造材、スポーツ用品、金型に用いられている。7N01 は、溶接後の自然放置で時効し、溶接により熱影響を受けた部分も母材に近い強度まで上昇するので、溶接可能な時効硬化型合金である。亜鉛は酸化被膜の保護力を弱める作用があるので、この系の合金の耐食性はあまり良好ではない。7000 系の合金は強度が最高値を示す時効熱処理状態では応力腐食割れが生じやすく、使用環境によっては強度を少し犠牲にして過時効状態（時効化を過度に生じた状態）にすることにより、応力腐食割れを防止した上で使用できる。

表-3.1.3　アルミニウム合金の種類別の特性と用途例 [4)]

合金系統	合金記号	材料特性の概要	用途例
純アルミニウム 1000系	1100 1200	強度は比較的低いが、成形性、溶接性、耐食性がよい。	一般器物、各種容器、電気器具、建築用材
	1050 1070 1080	純アルミニウムのため強度は低いが、成形性、溶接性、耐食性がよい。	反射板、照明器具、装飾品、伝導材
Al-Cu 2000系	2011	切削加工性の優れた合金で、強度も高い。	切削部品
	2014	強度が高い熱処理合金である。	トラック、フレーム、航空機構造用
	2017	熱処理合金で強度が高く、切削加工性もよい。	切削部品、フィッティング
	2117	液体化処理後かしめを行うリベット用材として常温時効速度を遅くした合金である。	リベット、引抜き棒
	2018 2218	鍛造性に優れ、高温強度が高いので、耐熱性が要求される鍛造品に使用される。	シリンダーヘッド、ピストン、ジェットエンジン、翼、リング
	2219	強度が高く、耐熱性、溶接性もよい。	高温使用構造体(320℃まで)、溶接構造物
	2024	2017より強度が高く、成形性、溶接性、耐食性もよい。	切削部品、航空機構造材
	2025	鍛造性良好で強度は高いが、耐食性は劣る。	航空機用プロペラ、磁気ドラム
Al-Mn 3000系	3003 3203	1100より若干強度が高く、成形性、溶接性、耐食性もよい。	化学装置、圧力槽、板金工作物、建材
	3004	3003より強度が高く、成形性に優れ、耐食性もよい。	板金工作物、タンク
Al-Si 4000系	4032	耐熱性、耐摩耗性に優れ、熱膨張係数が小さい。	ピストン、シリンダーヘッド
	4043	湯流れがよく、凝固収縮が少ない。硫酸陽極酸化処理により灰色に自然発色をする。	溶接棒、建築外装
Al-Mg 5000系	5005	3003と同程度の強度があり、耐食性、溶接性、加工性がよい。	器物、建材、伝導材
	5052	中程度の強度をもった代表的な合金で、耐食性、成形性、溶接性がよい。	板金工作物、水圧管、器物
	5652	5052の不純物元素を規制して過酸化水素の分解を抑制した合金で、その他の特性は5052と同等。	溶接構造物、圧力槽、過酸化水素容器
	5154	5052と5083の中程度の強度をもった合金で、耐食性、成形性、溶接性がよい。	溶接構造物、圧力槽、タンク、塩水供給装置
	5454	5052より強度が高く、耐食性、成形性、溶接性がよい。	溶接構造物、圧力容器、船舶部品
	5056	耐食性、切削加工物、陽極酸化処理性がよい。	ケーブル皮膜、マグネシウム材のリベット
	5083	非熱処理合金中で最高の強度があり、耐食性、溶接性がよい。	船、自動車、航空機用品、配管材
	5086	5154より強度が高く、耐食性の優れた溶接構造用合金である。	テレビ塔、ミサイル部品、低温装置
Al-Mg-Si 6000系	6101	高強度導電用材。55%IACS※1保証。	ブスバー、電線
	6151	特に鍛造加工性が優れ、耐食性、表面処理性もよく複雑な鍛造品に適する。	機械、自動車部品
	6061	耐食性が良好で、主にボルト・リベット接合の構造用材として用いられる。	耐食性構造物、トラック、船、車両、家具
	6262	耐食性、切削加工性に優れる合金。2011に比し耐食性、及び表面処理が一段と優れ、6061と同等の強度を	カメラ鏡胴、気化器部品、ブレーキ部品、ガス器具部品
	6063	6061より強度は低いが、耐食性、表面処理性もよい。	家具、サッシなど建材用押出形材
Al-Zn-Mg 7000系	7072	電極電位が低く防食的クラッド皮材として主用されるが、犠牲陽極作用を利用して熱交換フィンにも適用される。	クラッド材の皮材、熱交換フィン
	7075	アルミニウム合金中最高の強度をもつ合金のひとつである。	航空機その他の構造物、スキー

※1：国際船級規格協会(IACS：International Association of Classification Societies)

3.1.2　アルミニウム合金の特性

（1）アルミニウムの特徴[16)]

アルミニウムは、工業材料として金属のうちで最も多く用いられており、家庭用の日用品から高層ビル建材、宇宙・航空機、陸上運輸車両、船舶、電気通信機器、金属機械、産業機械まで、非常に広い分野で利用されている。アルミニウムの特徴としては次のことが挙げられる。

① 軽い

アルミニウムの比重は2.7で、鉄Feの7.7、銅Cuの8.9と比べて約1/3である。従って、アルミニウムは軽量化に適した材料であるため、自動車、航空機、船舶等の輸送分野や、ホイル、ピストンのような高速回転部品において運動性能、作業効率を高めている。

② 強い

純アルミニウムは軟らかく、強度は高くはないが、銅Cuや亜鉛Zn、マグネシウムMg、けい素Si、マンガンMn、リチウムLi等の元素を加えて合金にすることにより、また冷間加工や時効硬化熱処理を施すことによって、強度を高くすることができる。高張力アルミニウム合金といわれるAl-Cu-Mg系超ジュラルミン2024系合金（引張強さ490MPa）、Al-Zn-Mg-Cu系超々ジュラルミン7075合金（引張強さ585MPa）は普通鋼（引張強さ380～470MPa）に十分匹敵する強さを持っている。さらに比重が小さいことから比強度（＝引張強さ／比重）が大きいため、鉄Feや銅Cuに比べて肉厚を厚くして強さを増しても軽いという特徴をもち、輸送機器や建造物、機械構造物の材料として多く使われている。

③ 耐食性がよい

アルミニウムは空気中で表面に薄くて緻密な酸化被膜を生成する。この酸化被膜（アルミナ）が腐食性雰囲気や腐食性溶液からアルミニウムを保護するため、耐食性に優れている。この酸化被膜を人工的により厚くかつ緻密に形成する陽極酸化処理（アルマイト処理）等の表面処理を行うことにより、さらに飛躍的に耐食性を高めることができる。またマグネシウムMgを加えて合金化することにより、耐食性が一段と高まる。耐食性のよさを利用して、建築・土木、海洋開発、自動車等の分野で多く用いられている。

④ 加工性がよい

アルミニウムは圧延、押出、鍛造、成形等の塑性加工が容易で、さまざまな複雑な形状の素材を製造することができる。またアルミニウムにけい素Siが含有すると鍛造が大変容易になる。

⑤ 電気伝導率が高い

純アルミニウムの電気伝導率は銅Cuの約2/3で、銅Cuに次いで高い電気伝導率を有している。銅Cuに比べると比重が約1/3であるため、同じ重さでも断面積が大きくなるアルミニウムは銅の約2倍の電流を流すことができる。このような観点から、重量の軽減が望まれる中・高圧送電線に使われている。

⑥ 熱伝導性がよい

アルミニウムの熱伝導率は銅の約64%で、鉄の約3倍である。この特徴を活かして、冷暖房装置、エンジン部品、熱交換器、放熱フィン、ヒートシンク等に利用されている。

⑦ 磁性を帯びない

アルミニウムは電磁気の磁場にほとんど影響されず、磁気を帯びることがない。この特性を利用して、パラボラアンテナ、リニアモーターカー、超伝導関連機器等に利用されている。

⑧ 反射性がよい

アルミニウムは光、熱、電波をよく反射する。このため、暖房の反射板、宇宙服、ポリゴンミラー等に用いられている。

⑨ 低温に強い

アルミニウムは液体窒素（-196℃）、液体酸素（-183℃）といった低温下でも鉄鋼のような脆性破壊は起こさず、じん性が大きいという特性を持っている。高強度及び高じん性ならびに軽量であるという特性を組み合わせて、低温プラント、LNG タンク、超伝導、宇宙開発に活用されている。

⑩ 鍛造しやすい

アルミニウムは融点（660.4℃）が低く、溶解が容易である。アルミニウムにけい素 Si を加えた合金は鋳型の中で流動性がよく、充填しやすいので、肉厚の薄い複雑な形状の鋳物をつくることができる。

⑪ 接合性がよい

溶接、ろう付け、はんだ付け、リベット接合、接着等種々の接合方法で容易に接合できる。したがって、広い分野でアルミニウムの広範な設計・施工を可能にしている。

⑫ 美しい

アルミニウムは銀白色の美しい金属であり、陽極酸化皮膜処理等の表面処理で自然発色させたり電解着色することができ、装飾品、建築内外装、包装材として利用されている。

⑬ 毒性がない

アルミニウムは無臭、無害で、重金属のように人体を害したり、土壌を害したりすることはほとんどないとされている。そのため、食器、食品包装、飲食缶、医療機器等に広く利用されている。

⑭ リサイクルしやすい

アルミニウムの材料は鉄鋼等の金属材料と違って、全体が酸化物になってしまうことはない。そのため使用後のアルミニウム製品を再度溶解してアルミニウム地金として再生することができる。

一方、欠点としては鉄鋼と比べ疲労強度が低いこと、明確な降伏点が無いこと、耐力以下の応力であっても元の形状に戻らない可能性がある（ヒステリシス性が悪い）等が挙げられる。

（２）物理的性質 [4)]

アルミニウム合金の物理的性質は通常の場合、合金の種類や質別にかかわらず、下記の値が用いられる。

単位体積重量（密度）	27.5 kN/m^3
縦弾性（ヤング）係数	70 GPa
横（せん断）弾性係数	26 GPa
ポアソン比	0.33
線膨張係数	24×10^{-6}/℃

（３）機械的性質 [4)]

アルミニウム合金の機械的性質は、化学成分及び調質により大きく変化する。わずかな差が問題となる場合や、詳しい値が必要な場合等、詳細はアルミハンドブック [4)] が参考となる。**表-3.1.4** に他の代表的な工業用材料との比較を示す。

表-3.1.4　アルミニウムと他の工業用材料との比較例 [4)]

材　料		引張強さ (MPa)	降伏点又は耐力(MPa)	伸び (%)	せん断強さ (MPa)	縦弾性係数 (GPa)	比重	線膨張係数 (10^{-6}/℃)
アルミニウム合金	1200-H18	166	152	5	89	68.0	2.71	23.6
	7075-T6	566	496	11	338	70.7	2.80	23.6
ベークライト板		65	–	2	69	6.9	1.33	25.2
ポリエチレン		12～31	–	20～100	11.6	0.55～1.03	0.92～0.96	10～18
ポリ塩化ビニル		35～62	–	2～4	–	2.11～4.12	1.38～1.45	50～185
木材(硬質)		69	–	1.5	9.8	11.0	0.67	6.3
マグネシウム	鍛造品	302	220	14	140	44.6	1.80	25.9
	鋳造品	268	96	10	137	44.6	1.82	26.7
亜鉛	ダイカスト	275	178	5	213	–	6.64	27.4
銅	硬質	343	309	6	192	117	8.90	16.8
	熱間圧延材	233	69	45	158	117	8.90	16.8
黄銅 (Cu-35%Zn)	硬質	522	309	7	295	103	8.46	18.4
	軟質	309	86	50	227	103	8.46	18.4
青銅 (Cu-5%Sn)	硬質	556	515	10	–	110	8.86	17.8
	軟質	323	515	64	–	110	8.86	17.8
モネル (Ni-30%Cu)	硬質	755	686	8	597	178	8.80	14.0
	軟質	549	240	40	316	178	8.80	14.0
鉄	鋳鉄	206	172	0.5	302	96	7.10	10.1
	板	350	213	21	288	192	7.65	11.7
鋼	鋳物	515	288	24	412	206	7.86	11.7
	熱間圧延材	412	261	30	309	192	7.85	11.7
ステンレス鋼	軟質	618	275	55	460	199	7.90	17.3
	硬質	1059	858	15	769	199	7.90	17.3
工業用純チタニウム	軟質	392	275	42	245	106.4	4.5	8.9

（４）化学的性質 [4)]

アルミニウムの表面には必ず酸化皮膜が存在する。この皮膜は外側の比較的緻密度の低い層と、アルミニウム自体に隣接した緻密度の高い層からなっている。内部保護に寄与しているのは主として後者で、バリヤー層とも呼ばれている。

空気中で新しく作られたアルミニウムの表面はただちに酸化被膜が形成され、室温ではその厚さは約1nm（$=10^{-9}$m）程度といわれている。初めのうちは被膜はバリヤー層のみでできているが、環境の作用によって最外部はしだいに低緻密層に変質し、その分だけ酸化は内部へ進行してバリヤー層の厚さは一定に保たれる。バリヤー層厚さを決定する因子は温度であり、温度が高くなるほど厚くなる。表面酸化被膜の成分はアルミナ（Al_2O_3）である。この酸化被膜の存在によりアルミニウムは防食効果をもつが、酸化被

膜を侵すような環境では独自の挙動を示す。

アルミニウムは両性金属といわれており、水素を発生させて酸にもアルカリにも溶解する。これは表面酸化被膜の溶解速度が著しく大きいためである。中性水溶液においては、溶液の種類や濃度により挙動が異なる。すなわち塩素イオン Cl^-を含まない低濃度液ではアルミナ水和物の被膜が成長し、Cl^-を含む溶液では孔食（後述する）が生ずる。

① 孔食（塩素イオン Cl^-による腐食）

孔食は、酸化被膜の溶解度が比較的小さい場合に、被膜が局部的破壊を受けて生ずる腐食である。アルミニウムは塩素イオン Cl^-が存在しなければ孔食をおこさないとされているが、Cl^-が数 ppm でも存在すると孔食を生じる。したがって地球上のほとんどの環境においてアルミニウムに孔食は発生するものと考えるべきである。ただし孔食を発生させる環境がそのまま孔食を成長させる環境ではない。また、たとえ孔食を成長させる環境にあっても、発生した孔食すべてが成長するわけではない。

孔食の発生および成長の機構は次のように考えられている。すなわち、表面酸化被膜の欠陥部分に塩素イオン Cl^-が吸着し、皮膜を局部的に可溶化して孔食を生じる。孔食内でアルミニウムが溶解すると、生じたアルミニウムイオン Al^{3+}にみあう Cl^-が沖合いから拡散してきて孔食内の酸性度は高まり、溶解は加速される。孔食の外に出た Al^{3+}は $Al(OH)_3$となって沈殿し、かさぶた状となって孔食内の液が混ざるのを防ぐ。この状態が継続される限り孔食は成長するが、孔食内の液が中和されると成長は停止する。

② 異種金属と接触する場合の腐食

多くの金属はアルミニウムの孔食電位より高い電位を示すので、それらに接触した状態で水溶液に浸っているアルミニウムの孔食は多かれ少なかれ促進される。ただし促進度合いは電位の差だけでは決まらない。金属類の促進効果を大小別に分類した例を以下に示す。

促進せず：亜鉛 Zn（むしろ抑制効果あり）、カドミウム Cd

促進度小：ステンレス鋼、マグネシウム Mg、クロム Cr、チタン Ti、鉄鋼（Cl^-の少ない場合）

促進度中：ニッケル Ni、すず Sn、炭素 C

促進度大：水銀 Ag、銅 Cu、鉄鋼（Cl^-の多い場合）

促進度は環境の強弱で変わる。接触腐食電流は、アルミニウム→水溶液（イオン伝導）→異種金属→接点（電子伝導）→アルミニウムのように流れる。この電流が多いほどアルミニウムの腐食量は多くなるわけであるが、逆に接点の抵抗や溶液の抵抗を大きくすることにより促進効果を低減させることもできる。またアルミニウムに対して異種金属の表面積を小さくすれば、アルミニウムの腐食を減らすことができる。

③ アルミニウムと他の金属材料との耐食性の比較

表-3.1.5 に、異種金属と接触する場合の自然環境下における、アルミニウムと接触金属の腐食度の例を示す。大気に曝露されたアルミニウムは表面に浅く腐食が生じ、凹凸のある表面となる。しかし厚さの減少はきわめて少なく、平均腐食速度が年間 1 μm を超えることはほとんどない。天然海水は弱アルカリ性であるため、孔食発生と皮膜成長の両方がおこる。真水（水道水、地下水、河川水、湖沼水等）でのアル

ミニウムの腐食形態は孔食である。真水中の耐食性は組成によって決まるが、きわめて他成分の希薄混合溶液であるため、分析値から耐食性を予想することは困難である。相対的にみてアルミニウムの耐食性は、全面的に腐食が生じる大気中ではステンレス鋼に次ぎ良好の部類に入るが、孔食の成長する真水中ではかなり劣ると判断される。土壌における耐食性を比較できるデータ（特に孔食のデータ）は見当たらないが、評価はおそらく真水と同様であろう。

表-3.1.5　アルミニウムと異種金属との腐食度 [4)]

異種金属の種類	腐食度（$\times 10^{-8}$mm）		
	異種金属と接触した場合		接触しない場合（単独）
	アルミニウム	異種金属	
アルミニウム	-	-	1.28
銅	400	0	10
13Crステンレス鋼	375	0	8
黄銅	350	0	14
鉄	200	406	506
18Cr-8Niステンレス鋼	150	7	2
鉛	130	5	12
ニッケル	120	0	4
カドミウム	25	2	120
マグネシウム	12	1615	1064
亜鉛	1.07	775	284

（５）アルミニウムの引張強度を向上させる方法 [4)]

アルミニウムの結晶は正立方体の 8 つの角と 6 つの面の中心に、Al 原子が位置した面心立方格子と呼ばれる構造が密に積み重なってできている。結晶面に転位があると原子の移動によって塑性変形が容易に起こる（格子配列の転位と呼ぶ）ので、材料の変形と転位のしやすさには関連がある。したがって、アルミニウム合金の強度を上げるには転位をしにくくすればよい。そのためには次のような方法がある。

① 加工する（加工硬化）

② 合金元素を加えて固溶させる（固溶硬化）

③ 合金のマトリクスに格子の大きさが異なる超微粒子相を析出させる（析出硬化）

これらの硬化処理方法について、以下に説明する。

① 加工硬化

普通の結晶は完全な結晶ではなく、結晶内には多くの転位が存在するので、一般的には加工しやすい。しかし、加工によって変形すると結晶格子の乱れが激しくなり、転位密度が増大する。転位が多くなりすぎると転位同士が絡み合って動けず、材料は変形出来なくなる。したがって、アルミニウム合金を圧延や押抜き、引抜き、鍛造等の加工をおこなうと、加工の度合いが大きくなるにつれて固くなり強度が上昇する。この現象を加工硬化という。

② 固溶硬化

アルミニウム合金の固体の中に他の金属が固体状態で溶け込んでいる状態を固溶体という。マグネシウム Mg やマンガン Mn、銅 Cu、亜鉛 Zn 等の元素は比較的固溶量が多い元素で、これらの元素は添加されると、アルミニウム合金の結晶格子内のアルミニウム Al 原子の位置に入れ替わって入り、無秩序に分布する。Al 原子と置換する原子の半径が異なると格子の原子配列にひずみを生じ、転位の移動に対して大きな抵抗となる。このようにして、固溶体を作る合金化によって材料は著しく硬化する。これを固溶硬化という。

③ 析出硬化

固溶体をつくる合金において、合金元素がアルミニウムに溶け込む量には一定の限度がある（これを固溶限という）。固溶限は温度が高いほど増加し、温度の低下とともに減少する。アルミニウム合金を高温（450～550℃）の固溶体領域に保持するとほとんどの元素は固溶し、それを室温の水の中に瞬時に入れると、途中で析出することはなく室温では固溶しきれないほどの合金元素を強制的に固溶した過飽和固溶体ができる。この状態は安定ではないので、室温に長時間保持しておくと、次第に過剰な合金元素が分離して析出してくる。このようにして生成した析出相は非常に微細で、結晶格子のアルミニウムの原子配列と整合性を持ち、大きな格子ひずみを生じて転位の運動に対する抵抗が大きくなるため合金は硬化する。析出硬化を得るための熱処理は、高温に加熱して固溶体を形成させる溶体化処理、それを水中で急速冷却する焼き入れ処理、続いて室温に保持あるいは 100～250℃に加熱して析出させる時効硬化処理（低温焼きもどし処理）で構成されている。

析出硬化は、アルミニウム合金において硬化率の最も高いもので、これにより Al-Cu-Mg-Mn 系のジュラルミン、超ジュラルミン、Al-Zn-Mg-Cu 系の超々ジュラルミンが作られている。

3.1.3　材料の選定[4)]

用途に応じて材料を選定するときには、強度、耐食性、装飾性、加工性の諸特性を総合して検討する必要がある。しかし、これらの項目のすべてを満足させることは難しい。ここでは各項目を重視したときの選定の基本的な考え方を述べる。

（１）強度を重視した場合

一般的に、純アルミニウムから Al-Mg 系、Al-Mg-Si 系、Al-Cu 系、Al-Zn-Mg 系の順に強度は高くなる。これら各合金系の代表的なものは Al-Mg 系では 5052，5083、Al-Mg-Si 系では 6063，6061、Al-Cu 系では 2014，2017、Al-Zn-Mg 系では 7003，7N01，7075，7050 がある。調質を含めて考えると強度的には 1080-O 材の引張強さ約 60MPa から 7075-T6 の約 590MPa までがあり、かなり広い範囲の選択が可能である。

鉄道車両、船舶、土木構造物で溶接を主体とするときには 5000 系、6000 系を検討する。例えば、5083-H112 の溶接継手の引張強さは 275MPa であり、耐食性がよいため無塗装で使用できる場合が多い。また、低温での用途においても脆性を示さず安全であるため、極低温構造物にも使用される。さらに高い溶接強度を必要とする場合には 7N01-T4，同 T5，同 T6 や 7003-T5 材を考えるのがよい。また、リベット・ボルト組立構造では 6061-T6 や 6063-T6 材、同 T5 材を使用するのがよい。

（２）耐食性を重視した場合

耐食性はその使用環境により大きく異なり、また腐食促進試験の結果と一致しないことも多いので一概に適性を評価することは難しいが、薬品、食品の容器やプラントの場合にはまず、純アルミニウムを検討する。真水中では一般に純アルミニウムよりもむしろ 3003 の方が良い結果が得られることが多い。海水中では一般的に純アルミニウムより Al-Mg 系合金のほうが耐食性に優れているとされており、海洋構造物や船舶等には、5052 や 5083 が使用されている。

（３）加工性を重視した場合

家庭用器物やビールの缶等の絞り物用として 1100，3003，3004 系合金が一般的に使用されている。切削加工用の材料には 2011 が特によく、6262 がこれに次ぐ。一方、耐食性等については 5056 がすぐれ、6262 がこれに次ぎ 2011 はかなり劣る。したがって用途に応じて適宜選択する必要がある。

（４）溶接性を重視した場合

溶接性は、純アルミニウム系、Al-Mn 系、Al-Mg 系および銅 Cu を含まない Al-Zn-Mg 系合金が優れている。溶接強度を重視する場合、7N01，7003 は溶接後、強度はいったん低下するものの、その後の室温時効により回復するので使用されているが、耐食性を重視する場合には 5083 が用いられる。Al-Mg-Si 系合金は溶接により熱影響部は O 材と同等の強度になるため、構造設計上特に配慮される場合以外は、機械式接合が用いられる。

（５）その他

上記以外に伝導性、耐摩耗性、耐熱性等を考慮して材料選定を行う場合がある。耐摩耗性は一般的に強度に依存しており Al-Si 系の合金や高強度の Al-Cu-Mg 系および Al-Zn-Mg-Cu 系が優れている。耐熱合金としては Al-Cu-Mg-Ni 系の 2018 が使用されている。**表-3.1.6** に材料選定のための比較表を示す。

表-3.1.6　アルミニウム合金系統毎の各特性の比較表 [4)]

合金系統	合金番号	強度	耐食性	溶接性	切削性
1000系	1100-O	D	A	A	E
	1100-HX2～HX8	C	A	A	D
	1050-O～HX2	D	A	A	E
	1050-HX4～HX8	C	A	A	D
	1070-O～HX2	D	A	A	E
	1070-HX4～HX8	C	A	A	D
	1080-O～HX2	D	A	A	E
	1080-HX4～HX8	C	A	A	D
	1085-O～HX2	D	A	A	E
	1085-HX4～HX8	C	A	A	D
2000系	2011-T3,T8	A	D	C	A
	2014-T4,T6	A	D	B	B
	2017-T3,T4	A	D	C	B
	2219-T3,T8	A	D	B	B
	2024-T3,T4,T6	A	D	C	B
3000系	3003-O～HX2	C	A	A	E
	3003-HX4～HX8	C	A	A	D
5000系	5005-O～HX2	C	A	A	E
	5005-HX4～HX8	C	A	A	D
	5052-O～HX2	C	A	A	D
	5052-HX4～HX8	B	A	A	C
	5154-O～HX2	B	A	A	D
	5154-HX4～HX8	A	A	A	C
	5154-HX4～HX8	A	A	A	C
	5056-H32	A	A	A	D
	5083-O	B	A	A	D
	5083-H112	A	A	A	D
	5083-H32	A	A	A	D
6000系	6061-T4	B	B	A	C
	6061-T6	A	B	A	C
	6262-T6,T9	B	B	A	A
	6063-T1	C	A	A	D
	6063-T5	C	A	A	C
	6063-T6	B	A	A	C
	6N01-T5,T6	B	A	A	C
7000系	7N01-T4	A	B	A	C
	7N01-T5,T6	A	B	A	B

※質別記号“HX”における“X”は、**表-3.1.2** における 1～3 を示す。

	A	B	C	D	E
引張強さ (MPa)	295以上	195～295	100～195	100以下	－
耐食性	問題なし	屋外無処理使用可	屋外では防食処理必要	完全な防食処理必要	－
溶接性	問題なし	特別な配慮は要るが溶接可能	実用的ではない	－	－
切削性	優れる	問題なし	若干の配慮が必要	特別の配慮が必要	実用的でない

3.2 FRP の種類と特性

3.2.1 FRP の種類

FRP はプラスチックである樹脂を母体（マトリクス）とし、繊維により補強した複合材料である。FRP には、①ガラス繊維を用いて補強した GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）、②炭素繊維を用いて補強した CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）、③アラミド繊維を用いて補強した AFRP（Aramid Fiber Reinforced Plastics）、④ボロン繊維を用いて補強した BFRP（Boron Fiber Reinforced Plastics）、⑤炭素繊維とアラミド繊維等のハイブリッド繊維を用いて補強した HFRP（Hybrid Fiber Reinforced Plastics）等がある。FRP の物性値は、樹脂と繊維の物性値から「複合則の理論」により概ね決定される。繊維の強度がプラスチックより圧倒的に強い（例えば GFRP では 40 倍程度）ので、繊維が強度、樹脂は構造体の形状保持媒体とみなすことができる。鉄筋コンクリートにおける鉄筋に相当するのが強化繊維であり、鉄筋をとりまくコンクリートに相当するのが樹脂であると考えることもできる。繊維の長さ、繊維と樹脂の接着状態、成形条件等加工条件が物性に与える影響は大きい（以上、参考文献 17）より）。

（1）繊　維 [17)]

表-3.2.1 に代表的な繊維の種類と特性値を示す。

表-3.2.1　代表的な繊維の種類と特性値 [17)]

繊維	種類		繊維径（μm）	比重	引張強度（GPa）	比強度（×10⁴m）	弾性率（GPa）	比剛性率（×10⁶m）
ガラス	E ガラス		10	2.51	2.5	10	76	3
	S ガラス		9	2.49	3.6	15	71	4
炭素	レーヨン系	GP	8～10	1.45～1.50	0.7～1.2	5～8	34～55	2～4
	PAN 系	HP	6～7	1.75～1.80	4.2～5.1	24～30	290	16～17
	ピッチ系	GP	10	1.61	1.0	6	40	25
		HP		2.0～2.15	1.9～2.2	9～11	380～725	18～37
アラミド	ケブラー29	GP	12	1.44	2.7	19	60	4
	ケブラー49	HP	12	1.45	3.5	25	130	9
ポリエチレン	ゲル紡糸法			0.95	3.0	32	70	9
炭化けい素	か焼法		10～12	2.55	2.5～3.0	10～12	170～200	6～8
	蒸着法		100	3.3～3.4	3.3	10	135	13
ボロン	蒸着法		50～100	2.5～3.0	3.5～3.7	12～15	400	14～16
アルミナ	DuPont 法		20	3.9	1.1	4	380	10
	住化法		9	3.2	2.6	8	250	8
ウィスカー	SiC 原料		-	3.2	3～14	-	測定困難	-
（金属）	（鋼）		-	(7.7)	(0.345)	(0.448)	(210)	(27)

※GP（General Purpose）とは汎用型を示す。
※HP（High Performance）とは高性能型を示す。
※（　）内は参考名または参考値。

① ガラス繊維（GFRP に用いられる強化繊維） [17)]

ガラス繊維には、**表-3.2.2** に示すように、いくつかの種類が商品化されている。その中で、GFRP に使

用されている種類としてはEガラスが一般的である。Eガラスは本来電気絶縁用であったが、GFRPの主要な補強材になっている。高強度タイプとしてはSガラスがあり、Eガラスに比較して約30%引張強度が高い。また、最近では組成面に改良を加えた高強度ガラスが開発されつつある。

表-3.2.2　ガラス繊維の化学成分[18)]

ガラス繊維の種類	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	B_2O_3	Na_2O	その他
E(電気絶縁ガラス)	54.0	15.0	—	17.0	5.0	8.0	0.6	—
C(化学用ガラス)	65.0	4.0	—	14.0	3.0	5.0	8.0	1.0
A(一般用ガラス)	72.0	0.6	—	10.0	2.5	—	14.7	—
S(高強度ガラス)	64.3	24.8	0.2	＜0.01	10.3	＜0.01	0.27	—
YM-31-A(高弾性ガラス)	53.7	—	0.5	12.9	9.0	—	—	24.0

(組成比：重量%)

② 炭素繊維（CFRPに用いられる補強材）[17)]

炭素繊維は開発されてから30年以上を経過し、多くの品種が開発されてきた。炭素繊維は補強材として使用する場合、強度と弾性率の高低により汎用型、高強度型、高弾性型、高性能型等に分類分けされている。また、原料によりレーヨン系、PAN系、ピッチ系に分類される。PAN系はポリアクリロニトリル（Poly Acrylo Nitrile）を原料として得られ、ピッチ系、レーヨン系に比べ高強度品が得られやすい。ピッチ系は石油化学や炭素化学の廃材であるピッチを原料として得られ、等方性ピッチ系と異方性ピッチ系がある。等方性ピッチは低強度、低弾性率の汎用型となり、比較的安価である。異方性ピッチは結晶構造が発達して、高弾性型（縦弾性係数：350GPa以上）である点が特徴である。レーヨン系はレーヨンを原料とする種類であり、高強度や高弾性が得られるが、強度がPAN系に、弾性率がピッチ系に劣るので生産量は少ない。

③ アラミド繊維（AFRPに用いられる補強材）[17)]

アラミド繊維とは、分子的にはアラミド結合と芳香族骨格からなる芳香族ポリアミドを原料とする繊維である。アラミド繊維の大きな特徴は軽量性にあり、その比重は約1.4であり炭素繊維（比重：約1.7）やガラス繊維（比重：約2.5）よりも低い。また弾性率は炭素繊維に及ばないがガラス繊維より優れ、強度は炭素繊維とガラス繊維とほぼ同等である。しかし、AFRPの圧縮強さは引張強さに比較すると低く、GFRPの1/2～1/3、CFRPの1/6程度である。この原因は、圧縮荷重により繊維内の結晶が局所的に座屈することにある。この現象は曲げ変形で発生する圧縮応力によっても発生し、引張強さに比較して曲げ強さの補強される程度が低い原因となっている。

また、アラミド繊維は強化繊維として上記機械的性質の他に次の点に特徴がある。

・耐衝撃性、強靭性：衝撃エネルギーの吸収量が大きいため、衝撃後の物性値低下が小さく、また曲げ荷重に対して破断までに大きな変形を示す。

・耐疲労性：GFRPや金属よりも優れている。

・振動減衰性：CFRP や GFRP より 3～4 倍優れている。

④ ボロン繊維（BFRP に用いられる補強材）[17)]

ボロン繊維は、米国の航空・宇宙分野向けの補強材として最初に開発されたものであり、炭素繊維やアラミド繊維のようにまだ一般的に使用されている補強材ではない。高性能ではあるが高価なこともあり、一部のスポーツ用品に使用されている程度である。ガラス繊維は**表-3. 2. 1** に示すように強度が優れているが縦弾性係数が他の繊維より低く、これを解消するため、ボロン繊維は特に大きな弾性を得ることを目的に製品化された。また、ボロン繊維は優れた機械的特性を有しており、ガラス繊維や炭素繊維に比べ繊維径が 10 倍程度太いため座屈に対する性能が優れる上、縦弾性係数は高弾性である炭素繊維と同等の約 400GPa である。成形に対しては、繊維径が太いため小曲率半径の形状や板厚の薄い部分への応用が不可能という欠点がある。

⑤ その他の強化繊維 [17)]

今後実用化の有望な繊維としてポリエチレン（Poly Ethylene。以下、PE という。）繊維、アルミナ繊維、炭化けい素繊維等がある。応用面では炭素繊維やガラス繊維とのハイブリッド化が活発に行われており、さらに PE 繊維と炭素繊維とのハイブリッド化によって、PE 繊維の軽量性、耐衝撃性、高振動減衰特性と炭素繊維の高弾性を兼ね備えたより性能の高い材料が得られる。アルミナ繊維、炭化けい素繊維等のセラミック繊維は 400℃以上の高温の大気中においても耐酸化性を有しているという特性を持つ。

（２）樹脂（成形材）[17)]

樹脂は繊維同士を結合させ、繊維に加わる力を分散させる役割を果たしている。しかし、一方では樹脂の優れた耐食性と耐熱性の付与により、力学的特性ばかりでなく、化学的特性の向上に寄与するところも大きい。FRP 用の樹脂としては熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂があるが、通常使用されているもののほとんどは熱硬化性樹脂であり、中でもエポキシ樹脂がその大半を占めるため、本研究ではこれを対象とした。

3.2.2 FRP の特性

FRP の機械的性質においては、同じ素材や構成でも成形法によってその値は異なり、また、試験片の形や試験方法によっても異なることがある。このため既往データは参考値、または概略性能を知るためのものと考えることが適当であると言われている[17]。**表-3.2.3** に代表的な FRP の物性を示す。

表-3.2.3 代表的な FRP の物性[18]

FRPの種類	樹脂の種類	繊維の種類	部材軸からの角度	物理的性質					機械的性質		
				比重	熱伝導率 (W/m・K)	線膨張係数 (10^{-5}/℃)	縦弾性係数(GPa)	横弾性係数(GPa)	圧縮強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	せん断強さ (MPa)
GFRP	エポキシ樹脂	Eガラス	0°	1.99	—	1～1.2	45	1.9	765	1137	42
	エポキシ樹脂	S－2ガラス	0°	1.97	—	1～1.2	53	1.9	889	1344	42
CFRP	エポキシ樹脂	汎用型炭素繊維 (35～40%含有)	0°	1.58	4.2	0.02	147	6.2	1516	1654	76.6
			90°		0.7	3.5	10			61	
			±45°		—	—	21			156	
		高強度型炭素繊維 (35～40%含有)	0°	1.61	—	—	152	4.1	1654	2819	68.9
			90°		—	—	0.01			54	
			±45°		—	—	—			248	
		高弾性型炭素繊維 (35～40%含有)	0°	1.59	55	-0.08	205	3.86	924	1510	60
			90°		1.3	3.5	6.69			34.5	
			±45°		—	—	—			119	
		超高弾性型炭素繊維 (35～40%含有)	0°	1.83	—	—	310	4.8	662	786	3.78
			90°		—	—	7			24	
			±45°		—	—	—			—	
AFRP	エポキシ樹脂	アラミド繊維 (60%含有)	0°	1.38	—	—	76	2.07	276	1382	41～83
			90°		—	—	5.52		138	29.6	
			±45°		—	—	6.6		126	97	
BFRP	エポキシ樹脂	ボロン繊維30%充填	0°	1.99	—	—	206	—	2480	1588	—
鋼 (参考)				7.85	60	1.17	192	81	—	412	309
コンクリート (参考)				2.35	2.3～3.0	0.7～1.4	23	10	5.5	—	0.4

（1）GFRP[18]

GFRP は、FRP の中の主流を占めており、軽量・高強度であり、最も経済的な材料といわれ、船体のような巨大構造物から数ミリの微小部材に至る多方面の用途に利用されている。**表-3.2.3** に示すように GFRP は繊維含有率を主な基準として分類されており、規格値を満足するために適切な材料設計と適切な成形法を選択しなければならない。

GFRP の劣化に大きな影響を及ぼす因子としては、温湿度、NOx、SOx、オゾン等もあるが、最大の要因は紫外線による劣化あるいは砂塵等による摩耗である。GFRP の劣化は、まず外観上の変化（光沢の低下、黄変、ガラス繊維の露出等）が発現し、続いて性能の低下へと進行する。劣化を防ぐためには、表面に樹脂リッチ層をつくる、塗装する、耐候性フィルムを複層する等の方法がとられている。材料強度と曝露時間の関係をみると、引張強さについては 5 年間の天然曝露によっても大きな変化はみられない。

（2）CFRP[18)]

CFRP は、先端複合材料の中核に位置し、軽量、高強度、高弾性材料として、航空・宇宙分野に欠くことのできない構造材料である。CFRP に補強材として使用される炭素繊維には、PAN 系とピッチ系の 2 種類がある。また、強度と弾性率により分類された多くの種類がある。

CFRP には**表-3. 2. 4** に示す特徴がある。耐候性について、屋外曝露試験結果によれば 5 年間の屋外曝露によっても大きな性能低下はなかった。

表-3.2.4　CFRP の特徴 [18)]

長・短	分類	内　容
長所	力学的	・強度、弾性率が高い
		・比強度、比弾性率がきわめて高い
		・疲労特性が優れる
		・クリープ特性に優れる
		・金属に比べ振動減衰特性がよい
	潤滑性	・耐摩耗性がよく、摩擦係数が小さい
	熱的	（設計によっては、ゼロ熱膨張材料が得られる）
		・耐熱性、極低温性に優れる
	化学的	・耐薬品性に優れる（強酸、橋アルカリに強い）
		・耐海水性に優れる
	電磁気的	・電気伝導性がある
		・非磁性である（電磁遮蔽に利用できる）
		・X線の透過性が大きい
短所	全体	・異方性がある
	力学的	・破断伸びが小さく耐衝撃性が低い
		・応力集中しやすい
	電気的	・金属と接合して使用するとき電気腐食を起こしやすい
		・浮遊炭素繊維による電気短絡

（3）AFRP[18)]

AFRP の特性について、CFRP、GFRP と比較して特徴的な点を**表-3. 2. 5** に示す。アラミド繊維は比重（1.38～1.45）が小さいいため、成型品の比重も小さく軽量化の必要な製品に適している。引張強さは炭素繊維やガラス繊維より大きく、比強度に関しては他の FRP に比べ最も大きい。しかし、アラミド繊維の特性上、圧縮強さが小さく、このため曲げ強さも劣っているという欠点がある。曲げ強さや圧縮強さの必要な構造部材に関しては、炭素繊維等とハイブリッド構成にするのが適切である。AFRP の耐衝撃性は、CFRP や GFRP にはない最も特徴的な性質である。それは、衝撃後の物性低下が小さく、繰返し衝撃に対して耐久性があり、ぜい性破壊をする点である。アラミド繊維の線膨張係数はマイナスであるため、マトリクス樹脂とともに成形した積層品は低膨張で寸法安定性の良いものになる。

表-3.2.5　AFRP の特徴 [18)]

長・短	分類	内　容
長所	全体	・軽量である
	力学的	・引張強度が高く比重が小さいので比強度も高い
		・耐衝撃性、靭性に優れる
		・疲労特性、振動減衰性に優れる
	熱的	・低膨張であり、寸法安定性に優れる
	化学的 電磁気的	・耐薬品性に優れる（強酸、橋アルカリに強い）
		・電気絶縁性に優れる
短所	力学的	・圧縮強度が低く、それに伴い曲げ強度も低くなる
		・脆性破壊を起こす

（4）HFRP[18)]

HFRP（Hybrid Fiber Reinforced Plastics）はGFRP、CFRP、AFRPのそれぞれの物性面の短所を補うために開発されたもので、炭素繊維＋ガラス繊維を用いたHFRP（CF/GF HFRP）と炭素繊維＋アラミド繊維を用いたHFRP（CF/AF HFRP）等の種類がある。CF/GF HFRPはGFRPの弱点とされる剛性の低さを改善し、等方性材料として改良されている。CF/AF HFRPでは耐衝撃性の向上があり、AFRPの圧縮強さが改善されている。補強材はそのほかにボロン繊維、炭化けい素繊維、アルミナ繊維、超高分子ポリエチレン繊維等が用いられている。組み合わせる補強材、配置する位置、使用割合によって強度等が異なってくるため、用途に対応したハイブリッド構成とすることが重要である。

4．土木構造物としての設計基準類の調査

4.1　アルミニウム合金土木構造物の設計基準類に関する調査

4.1.1　調査概要

調査対象とする(社)軽金属協会のアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）（第１次改訂試案）[19]（以下、アルミ設計指針という。）及びEurocodeアルミニウム構造の設計「第１編1-1一般基準及び建物のための基準」[20]（以下、Eurocode9 という。）の目次構成と基本的な設計方針を 4.1.2 に要約した。次に4.1.3にて、具体的な項目について両基準を比較した（**巻末資料-1** に対比表を掲載）。

両基準は互いに引用規格として用いられている項目はなく、独立のものである。前者の場合、日本におけるアルミニウム合金構造物の設計施工実績が少ないこと等から米国の指針による部分が多い（安全率、耐荷力曲線、疲労照査法等）。また、照査式の誘導にあたっては道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編（以下、道示鋼橋編という。）[21]に定められる式を調整したものが多く見られる。

4.1.2　対象基準類の概要

（１）アルミ設計指針[19]

以下にアルミ設計指針の目次構成と基本的な設計方針を示す。

１章　総則	５章　床構造
２章　許容応力度	６章　桁構造
３章　部材に関する一般事項	７章　施工
４章　連結	

- 多種類のアルミニウム合金の中から使用材質を４種類（5083、6061、6063、6N01）に指定している。
- 許容応力度設計法であり、所要の安全率を確保することを要求し、材料強度に対して許容応力度を規定している。安全率の設定は米国のアルミ製構造物仕様書[22]による。
- 部材強度の照査方法は道示鋼橋編の考え方を基にアルミニウム合金の材質により調整されている。
- 溶接、アルミニウム合金リベット、鋼製高力ボルト及びアルミニウム合金ボルトによる連結を規定している。
- 工作・加工、溶接施工、仮組み立て精度等に関する規定の他、防食処理のため、鋼、コンクリート、木材および土壌との接触試験結果を例示している。
- 解析法、荷重に関しては特に規定はない。

巻末資料-1 に、アルミ設計指針の条項及びその概要を示す。

（２）Eurocode9[20)]

以下に Eurocode9 の目次構成と基本的な設計方針を示す。

1 章　共通	5 章　終局限界状態
2 章　設計の基本	6 章　添接
3 章　材料	7 章　製作・施工
4 章　使用限界状態	8 章　試験による設計

- 構造物の強度、使用性および耐久性に関する要求性能と検証方法を規定している。
- 構造材料は 11 種類の材質が適用される（アルミ設計指針の 3 材種がこれに含まれる）。
- 要求性能（安全性および使用性）は部分安全係数を用いた限界状態設計法の照査式で検証する。
- アルミニウム部材の圧縮耐荷力曲線は独自の定式化を行っている。
- 熱処理材の熱影響部の強度低下に対して、HAZ 軟化係数 ρ haz を与えている。
- 疲労限界の照査は Eurocode2 による。

4.1.3　基準類の対比

アルミ設計指針では、設計荷重（限界状態設計の作用特性値に相当するもの）に対する所要の安全率確保を規定した許容応力度設計法を採用しているため、限界状態設計法の Eurocode9 と個々の定量的規定を対比するのは難しいが、可能な範囲で以下に具体的な項目について両基準を比較した結果を示す。

（１）使用材料[19), 20)]

Eurocode9 では 11 種類の構造用アルミニウム合金を適用しており、アルミ設計指針のうち 6N01（日本独自の材種）を除く 3 種類がこれに含まれる。Eurocode9 では、7000 系（Al-Zn-Mg 系）の高強度合金について耐久性が劣るとしながらも、選択基準を示した上で板用として適用している。

（２）物理定数[19), 20)]

縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比、単位体積重量は両基準ともに同じである。

線膨張係数 α は、若干 Eurocode9 の方が小さい。

（３）安全性照査の基本[19), 20)]

アルミ設計指針における照査は安全率の確保による方法であるが、Eurocode9 では、諸式、抵抗に対する部分安全係数とも Eurocode2 同様の限界状態設計法を適用している。

（4）溶接部近傍の HAZ 軟化に対する扱い方 [19), 20)]

アルミ設計指針では 6000 系の材種に対して許容応力度の低減を図っている。Eurocode9 では 6000 系ならびに 7000 系の材種のほか、硬化条件により 5000 系の材種に対して、MIG（Metal Inert Gas Arc）溶接と TIG（Tungsten Inert Gas Arc）溶接に分類し、HAZ 軟化による強度の低減係数 ρ haz を数値で与えている。0.50～0.86 と範囲が広い。また、HAZ の影響範囲 b haz を突き合わせ溶接、すみ肉溶接及び板厚、溶接方法、熱処理等を条件に数値で与えている。概ね 30mm～40mm にある。

（5）座屈関連規定について [19), 20)]

座屈関連規定については、多岐仔細にわたり相異がある。Eurocode9 では断面を 1～4 にクラス分けし、それぞれ異なった細長比パラメータを用いる。またクラス 4 断面の局部座屈については熱処理の有無、溶接の有無によって局部座屈係数 ρ_c を使い分ける事としている。

（6）疲労の照査について [19), 20)]

アルミ設計指針では米国の指針の照査方法を参考としてあげている。Eurocode9 では対象部位を溶接、非溶接等 5 つの基礎グループに分類して、それぞれに疲労強度の詳細カテゴリー表、$\Delta\sigma - N$ 図を与えている。

（7）たわみ制限について [19), 20)]

使用性を考慮したたわみ制限規定が双方にあるが、アルミ設計指針は道示鋼橋編と同じであるのに対し、Eurocode9 では建物を対象とした規定となっている。

4.2 FRP 土木構造物の設計基準類に関する調査

4.2.1 調査概要

ここで対象とする FRP は GFRP とする。これは、現状における海外実績で GFRP の強度特性が CFRP や AFRP よりも比較的規格化されているため、より情報が得やすいことによる。しかし、FRP は基本的に異方性の複合材料を基本として組成されているため、強度特性や弾性係数を自由に変えられる材料であることから、構造設計上最初に必要とされる機械的性質の標準化が行われにくかったようである。従って、設計施工の実績が少なく設計データが少ないこともあり、構造設計のための一般的な国内設計基準に相当するものはまだできていない。海外の基準としては EUROCOMP Design Code and Handbook の「Structural Design of Polymer Composites」[23]（以下、EUROCOMP という） を調査対象とした。なお、材料の規格としては、(社)強化プラスチック協会による繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル [24] や JIS（日本工業規格）等が参考にできる。

4.2.2 対象基準類の概要

以下に EUROCOMP の目次構成と基本的な設計方針を示す。

1 章　序論	5 章　接合設計
2 章　設計の基本	6 章　建設と作業要領
3 章　材料	7 章　試験
4 章　断面または部材設計	8 章　品質管理

- この指針では、設計の基本方針を限界状態設計とする一方、材料の特性にもとづく設計上の留意事項や警告事項が述べられている。
- 材料強度については規格ではなく設計データ（参考）として数値をあげており、試験の必要性を基本としている。

巻末資料-2 に EUROCOMP の条項およびその概要を示す。

5．新材料の土木構造物への適用事例の調査

5.1　アルミニウム合金の土木構造物への適用

5.1.1　適用実績の調査

アルミニウム合金を土木構造物に使用した実績としては、1946 年に米国の Alcoa 社が自社内の鉄道橋に 2014-T6 を用いたものが最も古いものであり、欧州では 1948 年にイギリスで鉄道・道路併用橋が製作されている。一方、日本では 1961 年に兵庫県芦屋市に道路橋として金慶橋が製作されて以来、歩道橋等に適用されている。**表-5.1.1** に国内における橋梁本体への主な適用実績を示す。

表-5.1.1　国内の主なアルミニウム合金橋 [25)]

名　　称	形　　式	完成年	支間(m)	幅員(m)	使用材料	用途
金慶橋（兵庫県）	全溶接活荷重合成プレートガーダー	1961	20.0	8.2 ～7.12	5083	道路橋
東京大学構内連絡跨線橋（東京都）	2ヒンジラーメン桁	1963	21.3	3.5	5083	歩道橋
神宮前三丁目歩道橋（東京都）	中路式単純プレートガーダー	1967	18.6	1.5	5083	歩道橋
初台下歩道橋（東京都）	中路式単純プレートガーダー	1967	18.0	1.5	5083	歩道橋
大月線歩道部（山梨県）	添加方式	1967	202.2 (橋長)	1.5	7N01	歩道橋
今町大橋歩道部（新潟県）	添加方式	1972	69.4	1.1	7N01	歩道橋
有明橋（山梨県）	単径間無補剛吊り橋	1984	50.0 (橋長)	1.0	6061	歩道橋
天鼓林橋（山梨県）	単径間無補剛吊り橋	1986	24.5 (橋長)	1.0	6061	歩道橋
睦橋（東京都）	中路式単純プレートガーダー	1986	31.1 (橋長)	1.5	5083	歩道橋
石鎚神社（愛媛県）	単純桁プレートガーダー	1994	8.0	3.0	5083	歩道橋
女鹿酒田工事事務所（山形県）	アルミ床版(組立歩道)	2001	87.0 (延長)	2.0	6N01	歩道部床版
十番港橋（熊本県）	ポニートラス	2002	30.9	2.0	6061	歩道橋
新加古川大橋拡幅(上り)（兵庫県）	添加方式	2003	420.0	4.0	6N01	歩道橋

この他、軽量性を活かした死荷重軽減や施工性（ハンドリングの容易さ、工期短縮等）の観点から、床版にも適用された事例がある。米国では、既設橋の補修・補強時に、鉄筋コンクリート床版を軽量のアルミニウム合金に置換した事例がある。国内では、国道２号新加古川大橋の副道部の拡幅時に床組と床版にアルミニウム合金が採用されている。

使用されているアルミニウム合金は、強度、耐食性、溶接性の観点から、金慶橋では耐食アルミニウム合金 7 種（現在の 5083 合金相当品）が、東京大学構内連絡跨道橋では 5083-H113，F 材、東京都歩道

橋では耐食アルミニウム合金7種（現在の5083合金相当品）、山梨県有明橋では6061-T6材，6063-T5材、山梨県天鼓林橋では6061-T6材，6063-T5材，5052材、八王子市むつみ橋では主構造部材には5083-O，H112材、高欄には6063-T5材がそれぞれ選定されている。

アルミ設計指針[19]では、強度、耐食性、溶接性の点からJISの5083-T112，5083-O，6061-T6，6063-T5，6N01-T5が使用材料として指定されているので、これらの合金の中から選定して使用することが望ましい。平成10年の改訂以前の指針では、使用材料として5083，6061，7N01を規定していたが、7N01は母材の熱処理が適切でない場合に応力腐食の可能性があるため、現指針ではこれを削除し、押出形材として使用頻度の高い6063と6N01を新たに加えている（同指針の作成にはSpecification for Aluminium for Aluminium Structures 5th ed.[22]等も参考として検討されている）。土木構造物として使用される場合におけるこれらの合金の強度、耐食性、溶接性の面からの選定に関する考え方を以下に整理する。また、ここで示した以外の材料については、使用目的を十分満足することを確認した上で使用することができる。

（1）強　度[4]

一般にAl-Mg系合金（5083）よりAl-Mg-Si系合金（6061，6063，6N01）の方が強度が大きい。調質を含めて考えると、強度的には6063-T5材の引張り強さ160MPaから6061-T6材の300MPaまであり、加工および使用条件による制限はあるが、広い範囲の選択が可能である。

土木構造物で溶接構造を主体とするときは5083合金を検討する。板および形材の5083合金のO材とH112材の溶接継手の引張り強さは280MPaと高く、耐食性がよいため無塗装で使用できる場合が多い。

また、低温でもぜい性を示さず安全であるため低温構造物にも使用される。リベット・ボルトによる組立構造には6061-T6材が有利である。

（2）耐食性[4]

耐食性はその使用環境により大きく異なり、また腐食促進試験の結果と一致しないことも多い。海水中ではAl-Mg系合金（5083）が耐食性に優れているため、海洋構造物に多く使用されている。

（3）溶接性[4]

アルミニウム合金における溶接の代表的なものとしては、不活性ガスを用いたTIG（Tungsten Inert Gas Arc）溶接およびMIG（Metal Inert Gas Arc）溶接が最も広く利用されている。これらの溶接を行う場合にはAl-Mg系合金（5083）が優れている。Al-Mg-Si系合金（6061，6063，6N01）は溶接の熱影響部の強度が低下するため、リベットやボルト等の機械的接合が望ましい。

また、防護柵の設置基準が平成10年11月5日の建設省通達により改訂されており、そこでは防護柵の使用材料としてアルミニウム合金が明確化されている。橋梁用ビーム型車両防護柵のうち、アルミニウム合金製防護柵は建設省土木研究所（当時）と(社)軽金属協会の共同研究に基づき標準タイプの図集が発行されている。使用材料は6061-T6合金である。

5.1.2　アルミニウム合金の適用事例

アルミニウム合金を用いた土木構造物の設計事例としては、金慶橋が挙げられる。

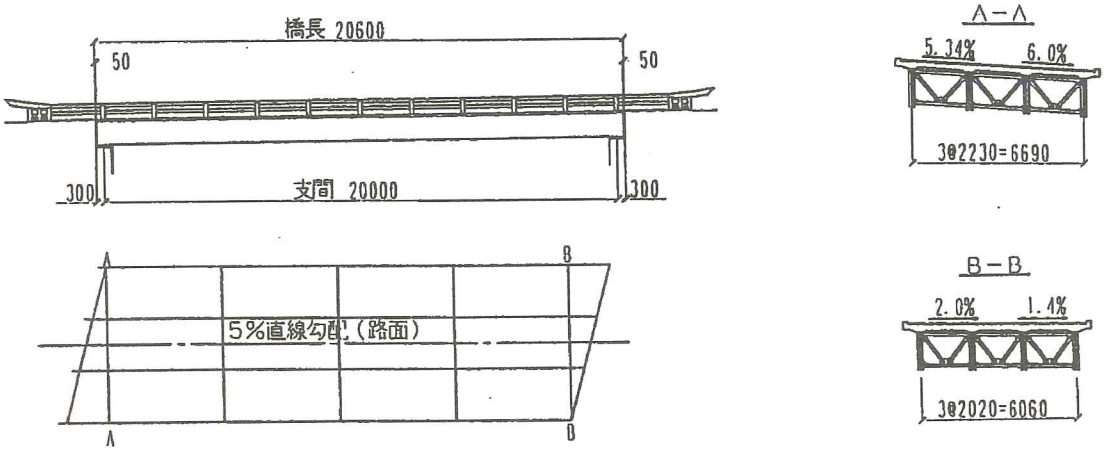


図-5.1.1　金慶橋一般図 [26)]

表-5.1.2　設計条件 [1), 26)]

項　目	設計条件
橋　長	20.600m
支　間	20.000m
幅　員	8.160～7.120m
橋　種	1等橋
形　式	活荷重合成桁
縦断勾配	5%直線勾配
横断勾配	1.4%～6.0%
斜　角	左　75°
主材料	耐食アルミ合金７種（現在のJIS A 5083合金相当）
許容応力度	引張91.8MPa
	圧縮86.7MPa
床　版	鉄筋ｺﾝｸﾘｰﾄ厚17cm
舗　装	ｱｽﾌｧﾙﾄｺﾝｸﾘｰﾄ厚5cm
	（防水層5mm）
高　欄	アルミ合金製

金慶橋における主な設計諸量について以下にまとめる。

・安全率　　：アルミニウムの場合、許容軸方向引張応力度については引張強度 σ_{tu}／2.2 と降状強度 σ_{ty}／1.85 のうち小さい方の値としている。

・縦弾性係数　：鋼の約 1/3（金慶橋では 7.4×10^{4} MPa、鋼：2.0×10^{5} MPa）

・合成桁としての鉄筋コンクリート床版との弾性係数比
　　：金慶橋の場合、各弾性係数から求めた値を丸めて、n=3（鋼橋：n=7）

・線膨張係数　：鋼の約 2 倍（金慶橋では 23.8×10^{-6}/℃、鋼：12×10^{-6}/℃）

・単位体積重量：鋼の約 1/3（金慶橋では 27 kN/m^3、鋼：77 kN/m^3）

・コンクリート床版との接触面の処理
　　：金慶橋では、主桁フランジ上面に歴青塗装を 3 ㎜程度塗布している（アルミニウム橋では、主桁と床版コンクリートとの接触面を防食処理することがある。）。

巻末資料-3 に本橋の設計資料と道示鋼橋編の対比表を示す。

5.2 FRP の土木構造物への適用

5.2.1 適用実績の調査

1988 年にわが国で初めて CFRP が橋梁（石川県新宮橋）の緊張材に使われて以来、CFRP や AFRP を緊張材として用いた PC 橋梁が試験的に建設された。1997 年には世界で初めて CFRP 製の立体トラス屋根を採用した建築物（東レ愛媛工場 食堂屋根）が建設された。この屋根は、縦 13m×横 27m、面積 351m^2 の大きさで、鋼製立体トラス屋根に比べ重量が約 1/3 と軽量で、耐食性に優れ、強度は同等以上という特徴を備えている [27]。1998 年には CFRP を補強筋として用いた大型薄肉軽量 PC 板が、日本で初めて品川インターシティのスカイウェイ（全長：277m）の屋根パネルに採用された。

FRP を一般構造材料に使用するときの問題点としてイニシャルコストが高いことが挙げられる。FRP の材料費が、従来のコンクリートや鋼よりも安価もしくは同等になる可能性は極めて低い。したがって、FRP を一般構造材料として適用していくためには、軽量であり耐久性に優れることから施工やメンテナンスの費用を削減できるといった付加価値を考慮し、構造物のライフサイクルコストという総合的な評価を行う必要がある。

土木構造物に用いる場合の FRP の主部材としては、大型構造物として採用されはじめた高強度・高弾性である CFRP の適用可能性が高い。GFRP は環境によって強度が大きく低下するという欠点があるが、コスト的には有利である。AFRP は繊維の特性上圧縮強さ，曲げ強さとも劣っているため、引張り部材として使用する場合には単独で採用可能であるが、その他の用途では他の繊維とのハイブリッド型として所定の強さを確保する必要がある。ボロン繊維、ポリエチレン繊維を使用した FRP はすぐれた特性をもつが、まだ実績が少なく高価であるため一般的に構造材料として使用するのは現時点では困難であると考えられる。

5.2.2　FRP の適用事例 [3)]

FRP を用いた土木構造物の設計事例として、伊計平良線ロードパーク連絡歩道橋（以下、ロードパーク橋という）[3)] が挙げられる。本橋は、国内で初めて上部構造に一次部材として GFRP が採用された、2 径間連続 GFRP プレートガーダー歩道橋である。

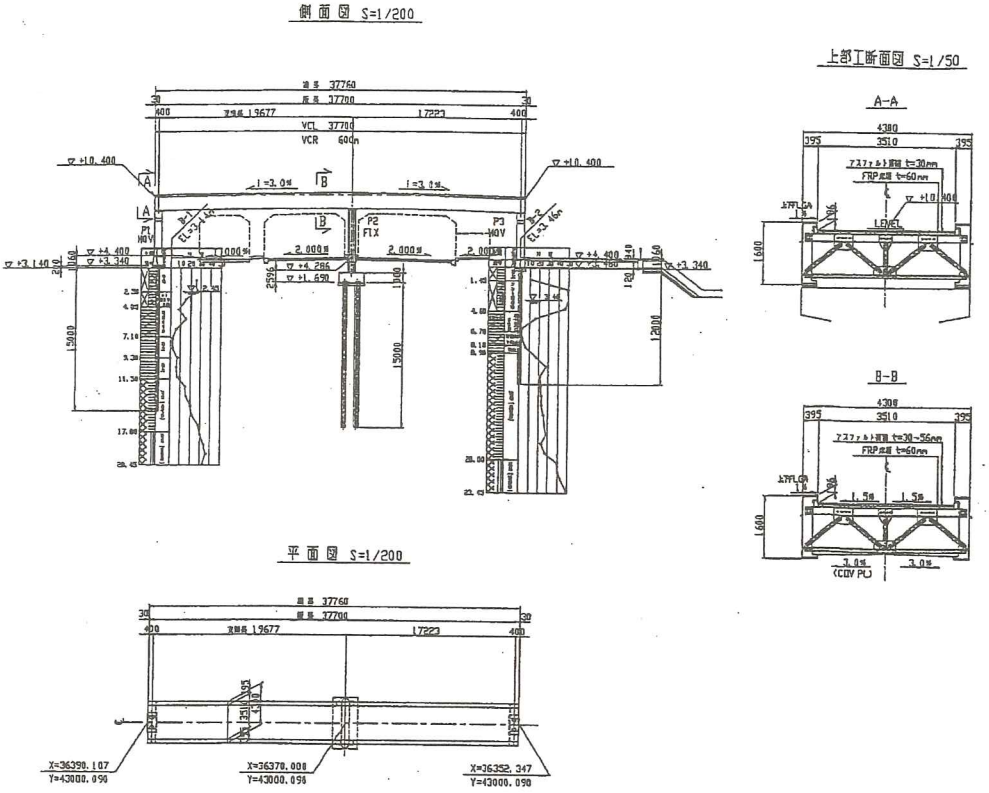


図-5.2.2　ロードパーク橋一般図 [3)]

表-5.2.2　橋梁諸元 [3)]

項　目	諸　元
橋　長	37.760m
支　間	19.677m＋17.223m
有効幅員	3.5m
橋　種	歩道橋
形　式	2径間連続GFRP桁
縦断勾配	R= 600（円弧）
	V.C.L. 37.700m、V.C.R.600m
横断勾配	1.5%（山形勾配）
斜　角	90°
主桁諸元	桁高1600mm，厚さ35mm（最大）
使用材料	橋梁部材：GFRP
	主桁部材：ハンドレイアップ材
	その他　：引抜成形材
	ボルト類：ステンレス
	高　　欄：GFRP
	舗　　装：タイル
引張強さ	200MPa
床　版	引抜成形材の中空パネル（幅500mm、高さ60mm）
	その上面にGFRP板（厚さ4mm、上面砂敷き加工）
舗　装	タイル張り舗装
高　欄	GFRPの引抜成型材

ロードパーク橋における設計諸量等について以下にまとめる。

・安全率　　：部材の破壊荷重に対して安全率を確保している。部材断面は道示鋼橋編のたわみ規定（支間長の 1/600）で決定されており、その結果、破壊時の応力度に対する安全率は 7 以上となっている。

・縦弾性係数　：鋼の約 1/17.5（FRP：1.14×10^4 MPa、鋼：2.0×10^5 MPa）

・せん断たわみ：せん断たわみが鋼に比べて大きいため、ウェブに斜め方向に繊維を並べることにより、せん断剛性が得られる積層構成としている。材料試験結果より、せん断強さの基準値は 50MPa となっている。

・線膨張係数　：鋼の約 1.7 倍
（ロードパーク橋に用いるハンドレイアップ材では 20×10^{-6}/℃程度、鋼：12×10^{-6}/℃）

・単位体積重量：鋼の約 1/4～1/5（ロードパーク橋：15～20 kN/m^3、鋼：77 kN/m^3）

・床版　　：GFRP 中空パネルを用い、横梁ピッチを 1.5m として床組トラスを配置している。床版取り付けは、床組トラス上弦材へのリベット接合としている。

・舗装　　：アスファルト舗装を行う際の熱と転圧の影響を避けるため、タイル張り舗装としている。

・塗装　　：FRP は紫外線で劣化するため、ゲルコートの上にフッ素塗料を上塗りしている。

巻末資料-4 に本橋の設計資料と道示鋼橋編の対比表を示す。

6．新材料の橋梁上部構造への適用性に関する検討

6.1　鋼との比較

ここでは、材料特性、製作性及び施工性に関して、従来から土木構造物（主に橋梁を対象）に用いられている鋼に対してアルミニウム合金及びFRPについて比較する。

表-6.1.1 に、材料特性について概略比較・整理した結果を示す。第３章と重複するが、以下に鋼に対するアルミニウム合金及びFRPの主な特徴・留意点をまとめる。

・強度特性（応力-ひずみ関係）が異なること
・安全率について、FRPのみが相対的に大きい値がとられていること
・単位体積重量について、鋼と比較して小さいこと
・疲労強度特性について、鋼と比較して強度データが不足していること
・紫外線による劣化について、FRPでは考慮する必要があること
・耐熱性について、アルミニウム合金とFRPでは低温度でのクリープを考慮する必要があること

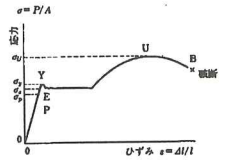
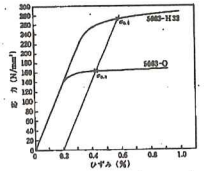
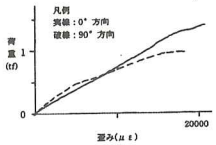
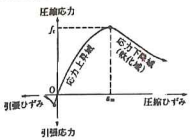
また、アルミニウム合金では鋼と比較して溶接継手としての疲労強度が相対的に低くなること、FRPではじん性が劣ること、同じ成形法であっても強度や弾性係数のばらつきが大きくなる等の特徴があり、製作・加工などの条件により、材料特性が大きく変化することに留意する必要がある。

アルミニウム合金部材の製作については、板材切断時に加えられる熱により板が反り返ったり、ひずみが生じるなどの影響があるとされており[4)]、それらが発生すると材片の密着度や耐荷力の低下に繋がるので、橋梁部材への適用にあたっては特に留意する必要がある。また、溶接部のひずみについては、鋼材の場合よりも発生しやすく、発生したひずみは取りにくいと言われている[4)]。

FRP 部材の成形法としては数種類あるが、ハンドレイアップ法と引抜成形法が一般に用いられている。ハンドレイアップ法については、第５章に示した伊計平良橋の主桁の製作にも採用されているが、成形の自由度が大きい反面、製作品質の信頼性や経済性の面では引抜成形法よりも劣る。引抜成形法は最も一般的であり比較的均質なものが得られるが、国内における製造可能な部材の断面積は金型と引抜装置の制約により200cm^{2}程度に、寸法は切断装置の刃の移動距離により幅600 ㎜×高300 ㎜程度に限定されている現状にある。

現場施工に関して、アルミニウム合金及び FRP は材料自体が軽量であることから、架設に用いる重機を小さくすることができる。ただし、アルミニウム合金については、溶接時の強度特性の点で現場溶接に注意を払う必要がある。摩擦攪拌接合という疲労強度の低下しにくい接合法も開発されているが、接合時に数10kN程度の圧力を加える必要があり、現状では工場内での適用に留まっている。溶接以外の継手構造に関しても、橋梁のような大型部材を対象とした場合のクリープや長期の安定性については、実験により十分に確認されているわけではない。また、FRP についてもアルミニウム合金と同様に、継手構造に課題がある。

表-6.1.1　材料特性の比較

項目		鋼	アルミニウム合金	ガラス繊維強化プラスチック	［参考］　鉄筋コンクリート
材料特性	変形性能	・弾性係数：2.0×10^5N/mm^2 [10] ・応力－ひずみ曲線[8]　：  ・延　性：17%以上（SS400A）、24%以上（SS400C）[10] ・じん性：あり（原材料により異なる）	・弾性係数：7.0×10^4N/mm^2（鋼材の1/3）[8] ・応力－ひずみ曲線[3]　：  ・延　性：12%以上（5083-H112）、16%以上（5083-0）[8] ・じん性：あり（原材料により異なる）	・弾性係数：繊維構成、成形法などにより異なる ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ材：1.2×10^4N/mm^2（鋼材の1/17）[2] 引抜成形材　：2.0×10^4N/mm^2（鋼材の1/10）[2] ・応力－ひずみ曲線：  ・延　性：あり ・じん性：劣る（層間破壊で低下、樹脂材料により異なる）	・弾性係数：配合設計により異なる 2.50×10^4N/mm^2（σck=24N/mm^2）[10] 3.30×10^4N/mm^2（σck=50N/mm^2）[10] ・応力－ひずみ曲線（鉄筋）：完全弾塑性 ・応力－ひずみ曲線（Ｃｏ）[19]　：  ・延　性：ほとんどない ・じん性：あり（コンクリート拘束効果により異なる）
	強度（引張、圧縮）	・降 伏 点：235N/mm^{2}以上（SM400、40mm以下）[10] 420N/mm^{2}以上（SM570、40mm以下）[10] ・引張強さ：400～510N/mm^2（SM400、40mm以下）[10] 570～720N/mm^2（SM570、40mm以下）[10] ・圧縮強さ：引張に準じる（座屈非考慮）[10] ・許容支圧：210N/mm^2（SM400、40mm以下）[10] 380N/mm^2（SM570、40mm以下）[10] ・破壊時のひずみ：0.15～0.20程度[10]	※材料、製造方法によって異なる ・降伏点　：130N/mm^2（5083-O、5083-H112）[8] ・引張強さ：275N/mm^2（5083-O、5083-H112）[8] ・圧縮強さ：130N/mm^2（5083-O、5083-H112）[8] ・支圧強さ：520N/mm^2（5083-O、5083-H112）[8] ・破壊時のひずみ：0.10～0.20程度[8]	成形法、使用材料、材料構成によって異なる ・降伏点：なし（＝破断） ・引張強さ：130N/mm^2（ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ）、300N/mm^2（引抜成形材）[2] ・圧縮強さ：130N/mm^2（ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ）、240N/mm^2（引抜成形材）[2] ・支圧強さ：195N/mm^2（ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ）、450N/mm^2（引抜成形材）[2] ・破壊時のひずみ：0.025～0.17[13]	・降伏点(鉄筋)：295N/mm^2（SD295）、345N/mm^2（SD345）[10] ・引張強さ　：440～600N/mm^2（SD295）[10] 490以上 N/mm^2（SD345）[10] ・圧縮強さ　：24.0N/mm^2（σck=24N/mm^2）[20] 50.0N/mm^2（σck=50N/mm^2）[20] ・支圧強さ　：(A/Aa)$^{(1/2)}\times$f'ck（A：コンクリート面の支圧分布面積、Aa：支圧を受ける面積）[20] ・破壊時のひずみ：0.0025～0.0035[20]
	安全率	・基準降伏点：1.5～2.0（道示：1.7）	＜土木構造物指針案（米国土木学会ＡＳＣＥに準拠）＞ ・降伏点基準　：1.85　《5083-H112:700kgf/cm^2》 ・引張強度基準：2.20 ＜日本建築学会ＡＩＪ＞ ・基準応力値Ｆ/1.5　《5083-H112板:866kgf/cm^2》	・静的な長期荷重（固定力、積載荷重、積雪荷重等）：3～6[12] ・繰り返し荷重　：6～12[12]	・材料係数（Ｃｏ）：1.3（終局限界）、1.3（疲労限界）[20] ・材料係数（鉄筋）：1.05（終局限界）、1.05（疲労限界）[20] ・部材係数　：1.1～1.3（終局限界）、1.0～1.1（疲労限界）[20] ・構造解析係数：1.0（終局限界、疲労限界）[20] ・荷重係数　：1.0～1.2（終局限界）、1.0（疲労限界）[20] ・構造物係数　：1.0～1.2（終局限界）、1.0～1.1（疲労限界）[20] ・許容曲げ圧縮応力度：設計基準強度の1/3
	単位重量	・単位重量：77kN/m^3 [10] ・比強度(引張)：5.19（SM400、40mm以下） 7.40（SM570、40mm以下）	・単位重量：27kN/m^3（鋼材の1/3）[8] ・比強度(引張)：10.2（5083-O、5083-H112）	・単位重量：16.5kN/m^3（ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ材）[2] 19.0kN/m^3（引抜成形材、鋼材の1/4）[2] ・比強度(引張)：7.88（ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ材） 15.8（引抜成形材）	・単位重量：24.5kN/m^3 [10] ・比強度(圧縮)：0.98（σck=24N/mm^2） 2.04（σck=50N/mm^2）
	品質等	※道路橋示方書に規定がある。 ・鋼材の板厚：JIS G 3193の許容差かつ公称板厚の-5%以内 ・表面状態：有害なきずがあってはならない （補修はJIS G 3193に準じる） ・平坦度：JIS規格（JIS G 3193）の2/3程度 ・溶接部の内部欠陥：非破壊検査実施（JIS Z 3060）	・板厚：JIS H 4000の許容差かつ公称板厚の-5%以内[8] ・表面状態：保管期間中に著しい腐食を生じさせり傷をつけたりしないよう配慮[8] ・平坦度：板取り、けがき、接合に支障のない平坦度を確保[8] ・溶接部の内部欠陥：放射線透過試験（JIS Z 3105）[8] ・公差(JIS H 4000)：幅、長さ、曲がり、そり、etc	・JISによる試験を実施 ・強度、弾性率ともにバラツキは大きい[13] 《例(変動係数):圧縮強度=30%前後、圧縮弾性率=20%前後》 ・材料特性によるバラツキは安全率により補正する[13] 《機械成形:1.0、ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ法:1.15、etc》	※道路橋示方書に規定がある。 ・コンクリートの配合強度：３回の平均値 （全て設計基準強度の85%以上） ・コンクリートの品質試験及び検査：JIS A 5308 ・かぶり：所要のかぶりを確保する
	疲労強度特性	・10^7回疲労限度比(S-N曲線)：0.45～0.55 ・基準疲れ限度：200万回強度	・10^7回疲労限度比(S-N曲線)：0.41（5803-H112）[3] ・基準疲れ限度は不明。 ・疲労限：1000万回程度[3] ・海水中の疲れ強さは大気中の1/4[3]	・10^7回疲れ限度比(S-N曲線)：母材強度の0.22～0.41[13] ・基準疲れ限度は不明 ・疲労限は不明	・水中での疲労強度は著しく低い ・鉄筋を溶接した場合の疲労強度　：母材強度の30%[20] ・鉄筋をガス圧接した場合の疲労強度：母材強度の70%[20]
	耐紫外線劣化	・劣化なし	・劣化なし	・劣化あり（表面樹脂の劣化(保護用塗装が必要)）	・劣化なし
	腐食要因	・要因：酸素及び水素との結合、応力腐食、電食 ・防食方法：塗装、耐侯性鋼材、亜鉛メッキ、 金属溶射等	・要因：異種金属との接触、アルカリ性材料との接触、海水中 ・対策：合金タイプ(海水中はAl-Mg系合金5083が優れる)、塗装、メッキ	・耐アルカリ性(コンクリートとの接触) ：弱い（樹脂の種類による） ・凍結融解：強い	・要因：飛来塩分、海水中、酸性土壌、凍結融解、凍結防止剤散布 ・対策：かぶりコンクリート、塗装、樹脂鉄筋
	耐水性・耐低温性	・乾湿繰返し：弱い（防食処理） ・耐低温性　：弱い	・乾湿繰返し：比較的強い(海水中では腐食) ・耐低温性　：強い	・乾湿繰返し：弱い ・耐低温性　：強いと言われている。	・乾湿繰返し：弱い（防止層による対策など） ・耐低温性　：強い
	耐火性・耐熱性	・線膨張係数：12×10^{-6}／℃[10] ・感温性：大気温度では特に問題ない ・耐熱性：比較的強い（溶接ひずみは生じる）	・線膨張係数：24×10^{-6}／℃[8] ・感温性：大気温度では特に問題ない ・耐熱性：弱い（100℃からクリープ変形が発生）	・線膨張係数：20×10-6／℃[2] ・感温性：一般的に80℃程度までは問題ない ・耐熱性：弱い（不燃材ではない） ・クリープ破壊強度は温度上昇と共に低下	・線膨張係数：10×10^{-6}／℃[10] ・感温性：大気温度では特に問題ない ・耐熱性：強い

※国内実績の使用材料→車道橋(金慶橋)：耐食アルミ合金７種

6.2 試設計によるコスト比較

鋼、アルミニウム合金及びFRPを上部構造部材に適用した場合について、橋長180m（6@30m及び3@60m）の多径間連続橋を対象とした試設計を行い、その構造寸法を基に建設コストを算出し、橋梁への適用性について経済性の観点から比較分析を行った。

検討したケースは、主構造について鋼、アルミニウム合金、FRPを使用した鈑桁、箱桁、トラスとし、床版についてはRC、FRPとして組み合わせた、表-6.2.1に示す16ケースである。

表-6.2.1　検討した橋梁形式

支間長 / 主構造の材料	支間長30m（6径間連続）		支間長60m（3径間連続）	
鋼材	鈑桁形式	RC床版	箱桁形式	RC床版
		FRP床版		FRP床版
アルミニウム合金	鈑桁形式	RC床版	箱桁形式	RC床版
				FRP床版
		FRP床版	トラス形式	RC床版
				FRP床版
FRP	鈑桁形式	RC床版	箱桁形式	RC床版
				FRP床版
		FRP床版	トラス形式	RC床版
				FRP床版

6.2.1 試設計及び建設コスト算出方法

（1）設計条件及び設計方法

設計条件を以下に示す。

・上部構造　形　　式：6径間連続鈑桁橋（支間割：6@30＝180m）及び
　　3径間連続箱桁及びトラス橋（支間割：3@60＝180m）
　幅　　員：有効幅 9.50m（全幅員：10m 程度）道路構造令の一般道路3種1級を採用（補足表-6.1及び補足図-6.1）
　活 荷 重：B活荷重
　支持条件：反力分散ゴム支承による弾性支持

・下部構造　橋　　脚：張出式橋脚（橋脚高：9900㎜（鈑桁）、9200㎜（箱桁及びトラス））
　　建築限界 4.7m に保守余裕等を考慮して鋼鈑桁(RC 床版)橋にて設定し、材料によらず同値とした
　基　　礎：杭基礎（場所打ち杭：φ1200）
　地盤種別：Ⅱ種地盤

本検討では、主として死荷重軽減による断面縮小が建設コストに与える影響を概略確認するために、上部構造については死活荷重に対する設計を行った。上部構造の断面決定にあたっては、平面格子モデ

ルを作成して死活荷重（疲労設計は未実施）に対して断面力を求め、応力及びたわみを照査した上で必要な断面を確保した。下部構造については、橋脚では地震時保有水平耐力法による断面照査を行い、杭基礎については地震時及び常時における照査により断面を決定した。

主桁たわみの許容値としては、使用材料によらず道示鋼橋編[21] 2.3 の規定を適用した。なお、RC 床版は道示鋼橋編[21] 8.2.5 により算定しているが、FRP 床版については活荷重たわみに対して許容値 1/600 として照査した（**表-6.2.2**）。

表-6.2.2　活荷重たわみに対する許容値

主構造	床版	材料		
		鋼材	アルミニウム合金	FRP
6径間連続鈑桁橋（支間長:30m）	RC	1/(20000/L)＝45㎜		
	FRP			
3径間連続箱桁橋（支間長:60m）	RC	1/500＝120㎜		
	FRP			
3径間連続トラス橋（支間長:60m）	RC	1/600＝100㎜		
	FRP			

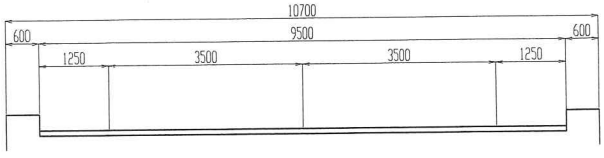
【補足】

＜有効幅員＞

有効幅員については、下表に示す高速道路および都市部の一般国道のほぼ平均的な幅員としている。

補足表-6.1　有効幅員

規格		1方向車線数	路肩の縮小	有効幅員(m)	
高速道路	1種2級	1	無	2.5+2*3.5+2.5=	12.00
		1	有	1.75+2*3.5+1.75=	10.50
		2	無	2.5+2*3.5+1.25=	10.75
		2	有	1.75+2*3.5+1.25=	10.00
一般道路	3種1級	1	無	1.25+2*3.5+1.25=	9.50
		1	有	0.75+2*3.5+0.75=	8.50
		2	無	1.25+2*3.5+0.5=	8.75
		2	有	0.75+2*3.5+0.5=	8.25
				平均	9.78



補足図-6.1　幅員条件（単位：m）

＜主構造・床版以外の死荷重＞

舗　　装：アスファルト舗装（ｔ＝80㎜）を考慮する。（東北地方建設局（当時）における「設計施工マニュアル[橋梁編][28]（以下、東北地建マニュアル）第２編 6-2」より）

床　　版：ＲＣ床版とＦＲＰ床版の両方のケースを比較する（床版厚等は道示鋼橋編[21]による）。

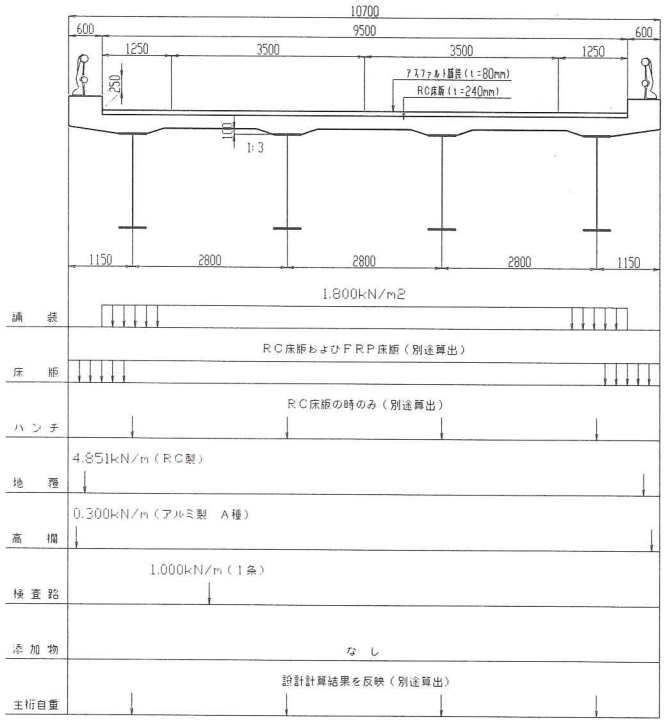
ハ ン チ：ＲＣ床版を使用した場合のみ考慮する。

地　　覆：一般的なＲＣ製を考慮する。地覆幅は、既製高欄を取り付けられる幅を考慮し、一般的である 600mm とする（東北地建マニュアル[28] 第２編 5-1 より）。

高　　欄：Ａ種（高速道路・自動車専用道の一般区間、一般国道の道路・鉄道交差部）のアルミ製高欄とし、その荷重（建設物価記載の製品単質の最大値程度：0.300kN/m）を考慮する。

検 査 路：一般的な設計と同様に、１.000kN の荷重を外側に１条分考慮する。

添 加 物：考慮しない。



補足図-6.2　考慮した死荷重（鈑桁の場合）

（２）アルミニウム合金と FRP における材料設計値と部材設計の仮定

アルミニウム合金については、板厚 40mm までの適用が可能な、5083-H112 材及び 5083-O 材を使用した。**表-6.2.3** に設計に用いた材料特性の基準値を示す。アルミニウム合金部材の設計基準強度、安全率(降伏強度 σ_{ty} に対して 1.85)については、アルミ設計指針[19]に従った。

FRP については、鈑桁及び箱桁橋主桁には、製作寸法上の制限からハンドレイアップ材を使用した。トラス主構については寸法制限内であるため、ハンドレイアップ材よりも強度特性がよく経済的な引抜成形材とした。床版については、引抜成形材（現在、国内で生産可能な最大の正方形セル：250×250㎜）の引き抜き方向を橋軸直角方向に配し橋軸方向に連続的に並べた形状のものを採用し、断面に発生する応力とたわみを満足するように必要な板厚を確保した。**表-6.2.4** に設計に用いた材料特性の基準値を示す。FRP 部材の設計基準強度、安全率(設計基準強度に対して 3.2)については、ロードパーク橋の設計値[3]を使用した（本橋はたわみにより断面が決定されており、設計上の発生応力に対して安全率は 4.3

～9.8 となった)。FRP 部材の座屈照査式はオイラー曲線によった[24]。

表-6.2.3　設計に用いた材料特性の基準値（アルミニウム合金）[19]

材料特性		単位	5083-H112 5083-O	備考
設計基準強度	引張	N/mm^2	280	降伏強度は130
	曲げ		280	引張に準じる
	圧縮		280	
	せん断		160	引張の$1/\sqrt{3}$
弾性係数	引張		7.00×10^4	
	曲げ		7.00×10^4	引張に準じる
	圧縮		7.00×10^4	
単位体積重量		kN/m^3	27	

表-6.2.4　設計に用いた材料特性の基準値（ＦＲＰ）[3) 24)]

材料特性		単位	ハンドレイアップ材	引抜成形材	備考
設計基準強度	引張	N/mm^2	130	300	
	曲げ		130	300	引張強度に準じる
	圧縮		130	240	
	せん断		50	50	部材軸直角方向の値 ハンドレイアップ材、引抜成形材で同等とした
弾性係数	引張		1.20×10^4	2.00×10^4	
	曲げ		1.20×10^4	2.00×10^4	
	圧縮		1.20×10^4	2.00×10^4	
単位体積重量		kN/m^3	19	19	安全側の値とした

鈑桁及び箱桁の場合、桁高決定のもう一つの要因として桁運搬及び架設重機の制約が考えられる。運搬時における主桁の分割は、トレーラ車による運搬が可能なものとし、桁高から決まる輸送車両の最大積載長とモーメントバランスによる分割位置から決定した。架設については、桁下にベントが施工可能であり、架設地点までトラッククレーンが進入できるものとし、トラッククレーンベント工法を採用することとした。桁種ごとの最大積込長、積込高及び分割数を**表-6.2.5** にまとめる。

なお、アルミニウム合金、FRP を用いた場合の部材断面については、FRP 床版を除き、既存の部材製作上の制約は考慮していない。また、部材接合方法については本質的な課題ではあるが、ここでは特殊な継手を採用せずに一般的なボルトによる継手を採用した場合を想定し、その数量を積み上げた。

表-6.2.5　桁分割数、運搬車両及び桁高の関係

主構造の材料と形式	総桁高 (m)	分割数	最大積込長と積込高※(m)		運搬車両
			積込長	積込高	
鋼鈑桁	1.8程度	13	16.0	2.55	トラクタポール(25t積) 車両重量13.5t, 車両総重量38.5t
アルミニウム合金鈑桁	2.48	13	16.0	2.55	トラクタポール(25t積) 車両重量13.5t, 車両総重量38.5t
FRP鈑桁	2.97	23	9.80	3.05	低床式セミトレーラ(20t積) 車両重量19.52t, 車両総重量39.52t
鋼箱桁	2.77	19	10.1	2.95	中低床式セミトレーラ(20t積) 車両重量17.72t, 車両総重量37.72t
アルミニウム合金箱桁	3.00	19	9.80	3.05	低床式セミトレーラ(20t積) 車両重量19.52t, 車両総重量39.52t
FRP箱桁	3.43	31	6.00	3.45	低床式セミトレーラ(20t積) 車両重量19.52t, 車両総重量39.52t

※車両制限令による最大の積込高から台木等の高さとして 0.1m を考慮したものを最大積込高とした。

表-6.2.6 に各橋梁の断面決定要因を示す。

表-6.2.6　断面決定要因

材料			応力(N/mm²)		たわみ(mm)		断面決定要因
材料	主構造	床版	許容値	最大応力（発生位置）	許容値	最大たわみ	
鋼材	鈑桁	RC床版	140	134.5 (G1G4桁,第1第6径間支間中央下フランジ)	45	27.2	応力
		FRP床版		134.1 (G2G3桁,第1第6径間支間中央下フランジ)		35.7	
	箱桁	RC床版		133.0 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下フランジ)	120	45.6	
		FRP床版		131.2 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下フランジ)		64.3	
アルミニウム合金	鈑桁	RC床版	70	64.2 (G1G4桁,第1第6径間支間中央下フランジ)	45	27.2	応力
		FRP床版		61.3 (G1G4桁,第1第6径間支間中央下フランジ)		37.7	
	箱桁	RC床版		68.5 (G1G4桁,第1第3径間支間中央下フランジ)	120	65.2	
		FRP床版		63.0 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下フランジ)		88.7	
	トラス	RC床版		67.4 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下弦材)	100	65.4	
		FRP床版		64.2 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下弦材)		89.6	
FRP	鈑桁	RC床版	40.6 ※ハンドレイアップ材	23.8 (G1G4桁,第1第6径間支間中央下フランジ)	45	44.4	たわみ
		FRP床版		17.9 (G1G4桁,第1第6径間支間中央下フランジ)		45	
	箱桁	RC床版		30.4 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下フランジ)	120	115.9	
		FRP床版		22.2 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下フランジ)		118.2	
	トラス	RC床版	93.7 ※引抜成形材	46.1 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下弦材)	100	98.8	
		FRP床版		30.7 (G1G2桁,第1第3径間支間中央下弦材)		98.8	

（3）コスト試算の前提条件

コストについては、建設時の初期建設コストと維持管理コストを考慮した。

1）初期建設コスト

初期建設コストについては、建設物価資料、ヒアリング結果等を参考として設定した工事単価により算出した。単価設定の参考資料等を表-6.2.7 に示す。施工に関する労務費等の算出に必要な歩掛は、国土交通省土木工事積算基準書 [23] を基本とした。建設コストの算出根拠として、アルミニウム合金６径間鈑桁＋FRP 床版のケースを例に表-6.2.8 に示す。

表-6.2.7　参考とした積算資料等

資料等	項　　目
国土交通省土木工事積算基準書 [29] 2002（国土交通省大臣官房技術調査課監修）	一般管理費、共通仮設費、イメージアップ経費、現場管理費、鋼桁工場製作費、架設費等の歩掛・損料等の算出
建設物価 [30] 2003（(財)建設物価調査会）	鋼材・鉄筋・コンクリート・アスファルト舗装・高欄・支承等の材料単価、塗装関係費用
土木コスト情報 [31] 2003（(財)建設物価調査会）	塗装関係費用
積算資料 [32] 2003（(財)経済調査会）	排水管材料単価
メーカー等ヒアリング	アルミニウム合金桁材料費・工場製作費、ステンレスボルト材料費、GFRP 材料費・工場製作費

表-6.2.8　アルミニウム合金６径間鈑桁＋FRP 床版の算出根拠

工種		細目		数量		工場製作工 直接費 材料費	工場製作工 直接費 製作費(労務)	工場製作工 間接費	架設工 直接費 輸送費	架設工 直接費 架設費	架設工 間接費
				鋼橋の設計値を参考に決定							
上部工	主桁部材	アルミニウム合金	板材	162.405t	計185.6t	¥709,000-/t (メ)	¥27,000-/t (建) 橋梁特殊工	間接労務費:35.2% 工場管理費:28.1% 一般管理費:9.05%	¥6,200-/t 距離100kmと仮定 (鋼)	¥87,000-/t ベント高7mと仮定 (鋼)	共通仮設費:17.38% イメージアップ経費:2.50% 現場管理費:23.55% 一般管理費:11.73%
			押出成形材	8.424t		¥601,000-/t (メ)					
		ステンレス鋼板		9.516t		¥290,000-/t (建)					
		ステンレス高力ボルト	M20	10,416組→	5.21t	¥3,000-/組 (メ)					
		副資材	板材合計	180.35t		¥25,000-/t (メ)					
	床版部材	GFRP	ホットプレス材	12.654t	計168.7	¥2,000-/kg (メ)	¥29,997-/t FRP重量の10%と仮定				
			引抜成形材	152.589t		¥1,800-/kg (メ)					
		ステンレスボルト	M16	11,520組→	3.46t	¥139-/組 (建)					
	付属物	伸縮継手工		21.4m→	0.225t/m	¥144,800-/m (鋼)		一般管理費:9.05%	¥6,200-/t (鋼)	¥87,000-/t (鋼)	
		支承工	750kN用	8個→	2.88t	¥423,783-/個 (建)			－		
			1250kN用	20個→	12.76t	¥658,481-/個 (建)					
		排水工	排水桝	0.05個/m→	0.0039t/m	¥113,800-/個 (メ)					
			排水管	180m→	0.01013t/m	¥9,170-/4m (積)					
		高欄工	アルミニウム製	360m→	0.028t/m	¥50,800-/m (建)			床版の単価/m2に地覆幅0.6mを掛けた	¥14,580-/m (鋼)	
	地覆工	コンクリート工		360m		施工に含む		－			
	舗装工	密粒度アスファルト		1710m²		施工に含む	－	共通仮設費:全体の35.2% 現場管理費:全体の28.1% ※全体で考慮するため本項では差し引いた		¥682-/m² (建)	共通仮設費:23.64% イメージアップ経費:2.95% 現場管理費:27.63% 一般管理費:14.67%
		細粒度アスファルト								¥706-/m² (建)	
下部工	橋脚 フーチング含	コンクリート工		7基	107.4m³	¥11,475-/m3 (建)			－	¥13,330-/m³ (積)	共通仮設費:20.15% イメージアップ経費:1.36% 現場管理費:25.17% 一般管理費:14.23%
		鉄筋工			97.7t	¥36,479-/t (土)				¥4,830-/t (建)	
		ガス圧接	D32		－					¥810-/個 (土)	
	基礎	オールケーシング工	φ1000		12.5m 28本	施工に含む			鉄筋径毎の単価の平均値	¥21,800-/m (積)	
		コンクリート工			475.0m³					¥10,100-/m (建)	
		鉄筋工			71.3t	¥35,921-/t (土)			－	¥1,840-/t (建)	
		残土処理			－					¥502-/m³ (積)	

※( )は数値の根拠であり、メ:メーカー見積、建:建設物価、鋼:鋼橋上部工基本計画資料、積:積算資料、土:土木コスト情報

２）　維持管理コスト

維持管理コストについては 100 年間を想定し、材料間の比較に直接的に関係する主構造の塗装塗り替え、床版の補修・取り替えに係る費用を算出した。ただし、アルミニウム合金と FRP については、現時点で腐食や疲労等に対する耐久性が不明であることから、あくまでも参考値として鋼材の塗装塗替え、RC 床版の補修・取り替え費用のみを以下の仮定により算出した。

①塗装塗替え費用

鋼橋における塗装系はライフサイクルコストを考慮し、C-1 系（重防食塗装）とした。**表-6.2.9** に塗装に関して 100 年間に必要な費用をA-1 系及びC-1 系として算出したものを示す[33)]。

表-6.2.9　市街地を想定した場合の 100 年間の塗装工事費

	A-1（一般塗装）	C-1（重防食塗装）
新設時	3,000円/m²　（12年）	6,000円/m²　（45年）
塗替時	6,000×7=42,000円/m²（12年）	8,000×2=16,000円/m²（35年）
合計	45,000円/m²	22,000円/m²

※（　）内は塗替えまでの年数

②RC 床版補修・取替え費用

床版補修・取替えについては、文献 34）を参考に 50 年を目安とした。よって本試算では、“床版打ち換え１回（1 回/50 年)”を想定する。ＲＣ床版の取替え工事費は、ジェットコンクリートを使用した場合の見積より 10.45 万円/m²（直接工事費）とした。

6.2.2　コスト試算結果

試算結果を**図-6.2.1** 及び**表-6.2.10～14** に示す。

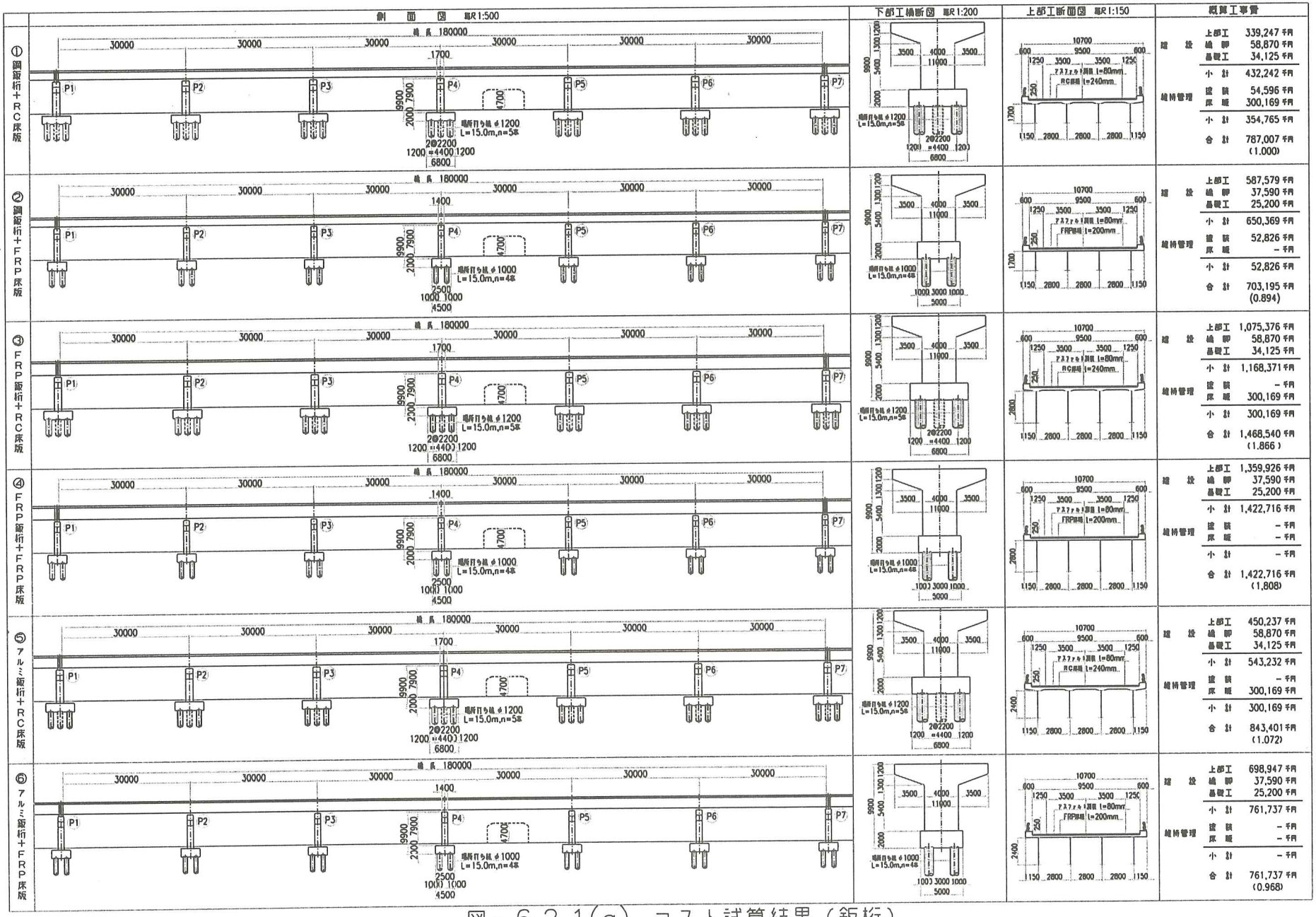
表-6.2.11 より、同じ床版種類での比較では、６径間、３径間ともに建設コストは鋼が最も小さく、続いてアルミニウム合金、FRP の順となった。鋼及びアルミニウム合金に比べ、FRP については倍程度の値となった。この理由としては FRP を用いた場合の工場製作費が非常に高く、また**表-6.2.6** に示したように、断面が活荷重に対するたわみ許容値により決定されていることが影響しており、材料費の低減や製作上の省力化が大幅に行われることが、従来材料と競合するための前提であると考えられる。

表-6.2.12 に、主構造を鋼、FRP、アルミニウム合金とした６径間連続鈑桁橋について、FRP 床版を適用した場合の効果に着目し、初期建設コストを比較した結果を示す。FRP 床版の場合、RC 床版に比べ死荷重が大幅に低減されるため、上部・下部構造のコスト縮減効果が期待でき、実際床版工以外では割合が１以下となっている。しかし、FRP 床版は床版工事費が RC 床版の約６倍近い値となっており、初期建設コスト全体ではこの影響によりいずれの材料でも FRP 床版を用いた場合の方が高くなる。また、主桁材料の違いによる下部構造への影響については、今回の試算では上部構造の重量が小さく、通常 10 cm 間隔程度で構造寸法を決定する下部構造の断面を変えるまでには至らなかった。

表-6.2.13 に６径間連続鋼鈑桁橋について、床版構造別の初期建設コストと維持管理コストを示す。FRP 床版の床版取り替え工事を必要としないとすると、維持管理コストを含めたコストではどうにか優位となる。ただし、FRP 床版の腐食や疲労等に対する耐久性が未知数であること、RC 床版については 50 年を更新期間と仮定してコストを計上していること等から、あくまでも将来の可能性を探る上での参考値としてとらえるべきものである。また、仮に耐久性の高い PC 床版を採用した場合には、FRP 床版よりも優位になるという試算結果も容易に想像される。

表-6.2.14 に、RC 床版を用いた場合において鋼に対する各材料のコスト比率（鋼桁橋を１とした場合の比率）を示す。初期建設コスト及び初期建設＋維持管理コストともに鋼桁の方がアルミニウム合金及び FRP を用いた場合と比較して優位となっている。支間長 60m の箱桁形式とトラス桁形式を比較した場合には、アルミニウム合金及び FRP ともに、トラス桁の方がコスト比率は小さく、この構造が重量あたりの材料の軸方向圧縮強度並びに引張強度が大きいことを活かせるような構造となっていることがわかる。また、特に FRP の場合において顕著な差が見られているのは、箱桁ではハンドレイアップ材を使用しているが、トラス桁の場合には主構造に引抜成形材を使用していることも要因であると考えられる。

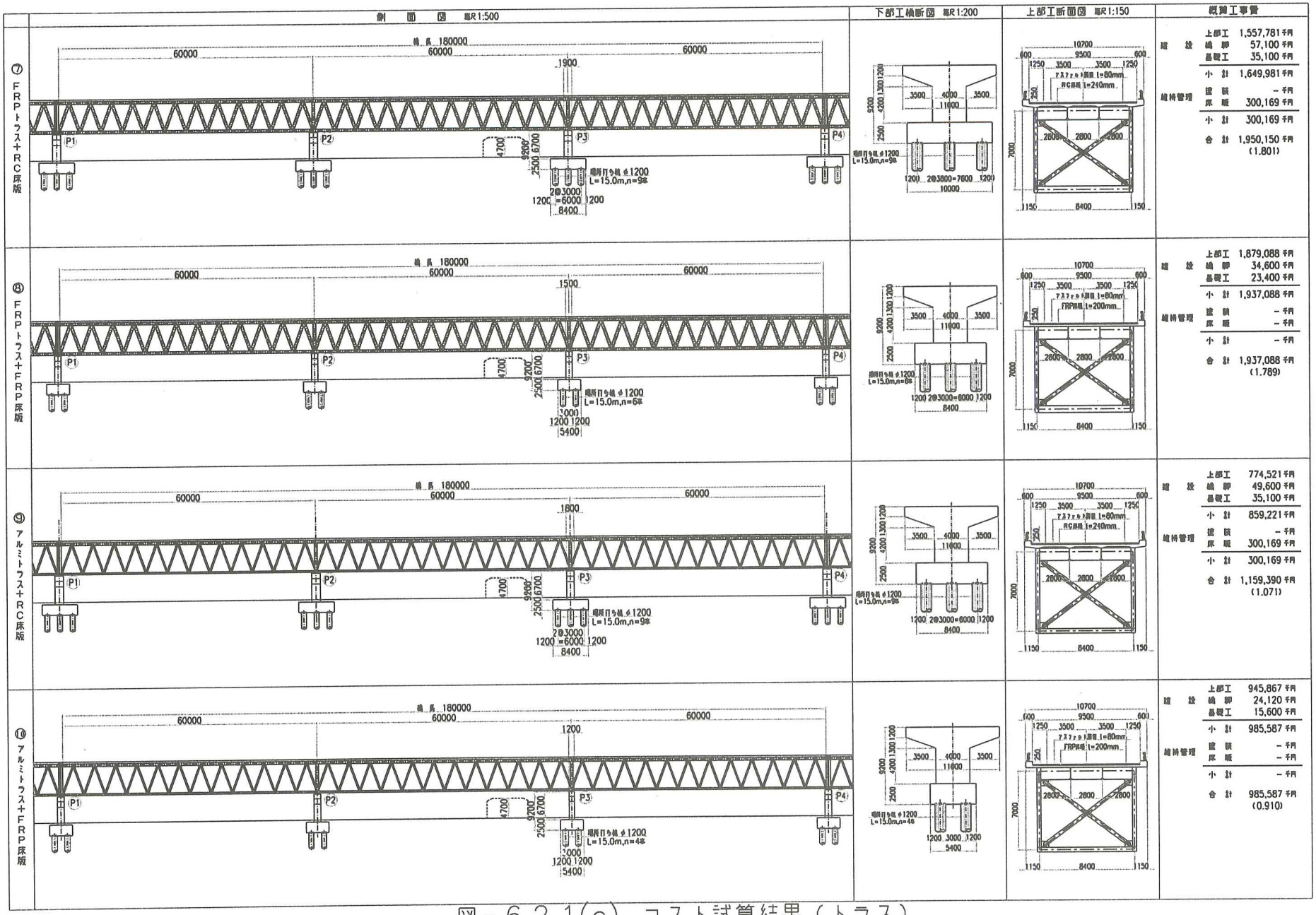
以上のように、各材料ともに軽量性というメリットを活かしても鋼に対してコスト面で優位となる可能性が低いことが確認された。また、アルミニウム合金については溶接継手の疲労耐久性やそれに代わる継手構造の確立、FRP については低弾性率や品質のばらつき、疲労耐久性等材料特性への対処や継手構造の確立等技術的課題が多岐にわたることが確認された。



図－6.2.1(a) コスト試算結果（鈑桁）



図－6.2.1(b) コスト試算結果（箱桁）



図－6.2.1(c) コスト試算結果（トラス）

表-6.2.10　数量表

（a）６径間連続鈑桁橋（6@30m=180m）

工種			単位	鋼鈑桁		FRP鈑桁		アルミニウム合金鈑桁		摘要
				RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	
上部工	工場製作		t	359.2	269.7	271.6	260.4	221.9	185.6	製作重量
	架設工		t	359.2	269.7	271.6	260.4	221.9	185.6	架設重量
	床版工	コンクリート	m^3	504.5	—	552.6	—	540.2	—	
		FRP	t	—	168.2	—	168.2	—	168.2	
		全体重量	kN	12361.2	1649.5	13538.7	1649.5	13234.4	1649.5	
	舗装工	表層+レベリング	m^2	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	
		床版防水層	m^2	1710.0	—	1710.0	—	1710.0	—	
下部工	本体工	鉄筋	t	153.1	97.7	153.1	97.7	153.1	97.7	0.13 t /m^3
		コンクリート	m^3	1177.4	751.8	1177.4	751.8	1177.4	751.8	
基礎工	場所打ち杭	φ1200×L=15.0m	本	35	—	35	—	35	—	
		φ1000×L=15.0m	本	—	28	—	28	—	28	
		鉄筋	t	89.1	71.3	89.1	71.3	89.1	71.3	0.15 t /m^3
		コンクリート	m^3	593.8	475.0	593.8	475.0	593.8	475.0	

（b）３径間連続箱桁橋（3@60m=180m）

（c）３径間連続トラス橋（3@60m=180m）

工種			単位	鋼箱桁		FRP箱桁		アルミニウム合金箱桁		ＦＲＰトラス		アルミニウム合金トラス		摘要
				RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	
上部工	工場製作		t	766	590.2	710.5	675.8	519.5	423.6	520.2	514.9	314.3	223.3	製作重量
	架設工		t	766	590.2	710.5	675.8	519.5	423.6	520.2	514.9	314.3	223.3	架設重量
	床版工	コンクリート	m^3	516.8	—	517.5	—	517.0	—	516.6	—	516.6	—	
		FRP	t	—	168.7	—	168.7	—	168.7	—	168.7	—	168.7	
		全体重量	kN	12661.1	1654.4	12678.8	1654.4	12665.5	1654.4	12656.7	1654.4	12656.7	1654.4	
	舗装工	表層+レベリング	t	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	1710.0	
		床版防水層	t	1710.0	—	1710.0	—	1710.0	—	1710.0	—	1710.0	—	
下部工	本体工	鉄筋	t	144.8	87.4	148.2	87.4	125.5	85.0	148.5	90.0	129.0	62.7	0.13 t /m^3
		コンクリート	t	1113.6	672.4	1140	672.4	965.6	654	1142	692	992	482.4	
基礎工	場所打ち杭	φ1200×L=15.0m	本	36	24	44	24	36	24	36	24	36	16	
		鉄筋	t	91.6	61.1	112.0	61.1	91.6	61.1	91.6	61.1	91.6	40.7	0.15 t /m^3
		コンクリート	m^3	610.7	407.2	746.5	407.2	610.7	407.2	610.7	407.2	610.7	271.4	

表-6.2.11　コスト試算結果

（a）６径間連続鈑桁橋（6@30m=180m）　　（千円）

桁形式			鋼鈑桁		FRP鈑桁		アルミニウム合金鈑桁		
床版形式			RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	備考
初期建設コスト	上部工	工場製作	185,732	143,620	952,272	931,278	334,280	281,331	製作,工場塗装,付属工
		架設工	77,767	60,282	47,356	44,971	40,209	33,939	輸送,架設,現場塗装,付属工
		床版工	65,705	379,274	65,705	379,274	65,705	379,274	
		舗装工	10,044	4,403	10,044	4,403	10,044	4,403	As舗装、（防水工）
		小　計	339,247 (1.00)	587,579 (1.73)	1,075,376 (3.17)	1,359,926 (4.01)	450,237 (1.33)	698,947 (2.06)	
	t当り単価(工場製作＋架設工)		[733.6]	[756.0]	[3680.5]	[3749.0]	[1687.6]	[1698.7]	
	m^2当り単価(工場製作＋架設工)		[154.1]	[119.2]	[584.6]	[570.9]	[219.0]	[184.4]	
	下部工	橋脚	58,870	37,590	58,870	37,590	58,870	37,590	
	基礎工	場所打ち杭	34,125	25,200	34,125	25,200	34,125	25,200	
	合計		**432,242** **(1.00)**	**650,369** **(1.50)**	**1,168,371** **(2.70)**	**1,422,716** **(3.29)**	**543,232** **(1.26)**	**761,737** **(1.76)**	
維持管理コスト	床版打換工（RC床版）		300,169	—	300,169	—	300,169	—	1回/50年=計1回
	塗装塗換工（C-1系）		54,596	52,826	—	—	—	—	1回/35年=計2回
	合計		354,765	52,826	300,169	—	300,169	—	
初期建設コスト＋維持管理コスト			787,007 (1.00)	703,195 (0.89)	1,468,540 (1.87)	1,422,716 (1.81)	843,401 (1.07)	761,737 (0.97)	

（b）３径間連続箱桁橋（3@60m=180m）

桁形式			鋼箱桁		FRP箱桁		アルミニウム合金箱桁		FRPトラス		アルミニウム合金トラス		
床版形式			RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	RC床版	FRP床版	備考
初期建設コスト	上部工	工場製作	380,823	303,474	2,454,279	2,374,002	744,303	596,452	1,367,960	1,373,178	625,551	499,070	製作,工場塗装,付属工
		架設工	134,897	106,513	90,474	86,655	68,409	56,811	115,114	128,303	74,263	69,190	輸送,架設,現場塗装,付属工
		床版工	64,663	373,204	64,663	373,204	64,663	373,204	64,663	373,204	64,663	373,204	
		舗装工	10,044	4,403	10,044	4,403	10,044	4,403	10,044	4,403	10,044	4,403	As舗装、（防水工）
		小　計	590,427 (1.00)	787,594 (1.33)	2,619,460 (4.44)	2,838,264 (4.81)	887,419 (1.50)	1,030,870 (1.75)	1,557,781 (2.64)	1,879,088 (3.18)	774,521 (0.30)	945,867 (0.36)	
	t当り単価(工場製作＋架設工)		[673.3]	[694.7]	[3581.6]	[3641.1]	[1564.4]	[1542.2]	[2851.0]	[2916.1]	[2226.6]	[2544.8]	
	m^2当り単価(工場製作＋架設工		[301.6]	[239.8]	[1488.2]	[1439.0]	[475.3]	[382.0]	[867.3]	[878.1]	[409.2]	[332.3]	
	下部工	橋脚	55,680	33,620	57,000	33,620	48,280	32,700	57,100	34,600	49,600	24,120	
	基礎工	場所打ち杭	35,100	23,400	42,900	23,400	35,100	19,500	35,100	23,400	35,100	15,600	
	合計		**681,207** **(1.00)**	**844,614** **(1.24)**	**2,719,360** **(3.99)**	**2,895,284** **(4.25)**	**970,799** **(1.43)**	**1,083,070** **(1.59)**	**1,649,981** **(2.42)**	**1,937,088** **(2.84)**	**859,221** **(1.26)**	**985,587** **(1.45)**	
維持管理コスト	床版打換工（RC床版）		300,169	—	300,169	—	300,169	—	300,169	—	300,169	—	1回/50年=計1回
	塗装塗換工（C-1系）		101,655	81,384	—	—	—	—	—	—	—	—	1回/35年=計2回
	合計		401,824	81,384	300,169	—	300,169	—	300,169	—	300,169	—	
初期建設コスト＋維持管理コスト			1,083,031 (1.00)	925,998 (0.86)	3,019,529 (2.79)	2,895,284 (2.67)	1,270,968 (1.17)	1,083,070 (1.00)	1,950,150 (1.80)	1,937,088 (1.79)	1,159,390 (1.07)	985,587 (0.91)	

（c）３径間連続トラス橋（3@60m=180m）　　（千円）

表-6.2.12　6径間連続鈑桁橋の建設コストの比較（比率：FRP 床版/RC 床版）

（比率:FRP床版/RC床版）

主構造・床版材料 / 算出項目		鋼鈑桁	アルミニウム合金鈑桁	FRP鈑桁
上部構造	工場製作	0.77	0.98	0.84
	架設工	0.78	0.95	0.84
	床版工	5.77	5.77	5.77
	舗装工	0.44	0.44	0.44
小　計		1.73	1.55	1.26
下部構造	橋　脚	0.64	0.64	0.64
	基 礎 工	0.74	0.74	0.74
小　計		0.68	0.68	0.68
合　計		1.51	1.40	1.22

表-6.2.13　6径間連続鋼鈑桁橋における床版構造別のコスト

算出項目	RC床版適用時	FRP床版適用時	比率 (FRP床版／RC床版)
初期建設コスト	432百万円	650百万円	1.505
維持管理コスト	355百万円	53百万円	0.149
合　計	787百万円	703百万円	0.894

表-6.2.14　鋼桁を1とした場合の各材料のコスト比率（いずれも RC 床版）

主構造形式	算出内容	鋼桁	アルミニウム合金桁	FRP桁
鈑桁形式	初期建設コスト	1.00	1.26	2.70
	初期建設＋維持管理コスト	1.00	1.07	1.87
箱桁形式	初期建設コスト	1.00	1.43	3.99
	初期建設＋維持管理コスト	1.00	1.17	2.79
トラス桁形式	初期建設コスト	-	1.26	2.42
	初期建設＋維持管理コスト	-	1.07	1.80

※トラス形式については鋼の箱桁形式と比較

［参考］PC 床版のコスト概算

（千円/1橋(180m)）

	RC床版	FRP床版	PC床版
建設コスト	65,705	379,274	253,200
維持管理コスト	300,169	0	55,200
合計	365,874	379,274	308,400

「ミニマムメンテナンス橋に関する検討(土木研究所資料,平成9年6月)」参照
資料はスパン30m橋梁における試算であり、比較のため6倍した
建設コスト:¥253,200千円←¥42,200千円)
維持管理コスト:部分補修50年　¥55,200千円←¥9,200千円
更新200年(対象外)

7．新材料を用いた橋梁床版に関する構造性能の検討

7.1　断面基本形状の検討

7.1.1　基本条件の整理

（1）検討条件

道路橋床版の検討に先立ち、床版寸法形状の検討条件を整理した。本研究では、新材料が軽量化に適した材料であるという点を最大限に活かすことを念頭に、中空セル構造を有する断面形状に対象を絞った。

その一方で、新材料の強度や弾性率は鋼に比べて低く、かつ現在のメーカーの製品能力には製造可能サイズに上限がある。そのため製品カタログ等を確認しても土木構造物に適合するようにはできていない。このような事情を考慮して、また床版としての機能に見合った断面の形状が必要であることから、既存の金型には拘束されないものとした。製造可能な最大寸法について、アルミニウム合金の場合、日本では 500×800 ㎜、海外では高さ 20cm と報告されていることから、高さでおおよそ 20cm を最大寸法と考えた。FRP の場合は、部材の形状が型材や板材であること、日本における実績は、最大寸法が 600×300 ㎜であることから、これを最大値の目安とした。引抜き（押出し）延長は主桁間隔とした。ここで、主桁間隔は通常 3m 程度であるが、新材料は剛性が低く、たわみやすいことから 2.5m を基本とし、またある程度の余裕を考えて 1.5m についても検討の対象とした。

床版の設計に当たって、アルミニウム合金については、アルミ設計指針 [19] を参考にした。ただし、これには床版についての具体的な記載がないため、適宜他の文献等を参照して考察を加えながら検討を進めた。

FRP については設計の参考となる基準類が存在しないことから、既往の施工試験データや研究報告に関する文献、並びに関連企業からの聞き取り調査を参考にした。実例としてはロードパーク橋 [3] がある。

なお、使用材料にかかわらず道示鋼橋編 [21] の活荷重規定とたわみ規定を適用した。

（2）使用材料の特性

1）アルミニウム合金 [4]

プレキャスト版には中空断面を押し抜き方式で製造するものと考え、それに適する材質としては 6N01-T5 が考えられる。また、中空押し抜きにやや困難さを伴うとされるが、厚板にできる 6061-T6 も候補として考えられる。

安全率は、アルミ設計指針 [19] により、降伏点に対して 1.85，破壊に対して 2.2、弾性係数ほかの物理定数は下記の値とした。

単位体積重量（密度）	27 kN/m^3
縦弾性（ヤング）係数	70 GPa
横（せん断）弾性係数	26 GPa
ポアソン比	0.33
線膨張係数	24×10^{-6}/℃

2）FRP[35)]

使用材種は文献 35）を参考にして GFRP を選定した。材料構成は、UD（一方向層）比率：80%、クロスマット（ランダム層）率：20%であり、積層構成は、「マット層／ロービング・クロス層／ロービング層／ロービング・クロス層／マット層」とした。表-7.1.1 に材料特性を示す。同表は文献 35）で実施された物性試験による結果と、積層構成から得られる物性計算値によるものである。

表-7.1.1　材料特性[35)]

方向	項目		単位	実測値（計算値）	安全率1.0の数値	安全率3.2の数値
0°	引張試験	引張強さ（計算値）	MPa	518(450)	450	141
		引張弾性率（計算値）	GPa	24.0(23.5)	23.5	23.5
	曲げ試験	曲げ強さ	MPa	413	413	129
		曲げ弾性率	GPa	11.9	11.9	11.9
	圧縮試験	圧縮強さ	MPa	430	430	134
		圧縮弾性率	GPa	30	30	30
	層間せん断試験	層間せん断強さ	MPa	38.4	38.4	12
	横せん断試験	横せん断強さ	MPa	183	183	57.2
	面内せん断試験	面内せん断強さ	MPa	106	106	33.1
90°	引張試験	引張強さ（計算値）	MPa	147(178)	147	46.3
		引張弾性率（計算値）	GPa	12.9(10.1)	10.1	10.1
	曲げ試験	曲げ強さ	MPa	281	281	87.8
		曲げ弾性率	GPa	11.4	11.4	11.4
	圧縮試験	圧縮強さ	MPa	182	182	56.9
		圧縮弾性率	GPa	16	16	16
	層間せん断試験	層間せん断強さ	MPa	24.6	24.6	7.7
	横せん断試験	横せん断強さ	MPa	90.2	90.2	28.2

※ポアソン比：0.24～0.25、せん断弾性係数：5.5～6.0GPa

安全率の設定については議論の余地があるが、ここでは文献 35）で検討された値、ν=3.2 を用いることとする。同文献によると、安全率は概ね以下に示す因子から導かれており、その算出根拠と併せて示す。

① 材料品質のばらつき
- 基本の安全係数（1.30）
- 試験条件と実際条件との差（1.10）
- 等方性として構造計算を行う場合の精度（1.20）
- 材料特性のばらつき係数（1.13）

② 環境劣化
- 屋外暴露無塗装 2 年で曲げ強さが 0.9
- 塗装すると 1.0：現段階では大気中で 1／0.9=1.10 とする（ただし、コンクリート中、水中では更に低下する）

③ 荷重作用
- 疲労：　静的強さに対する 10^7 回疲労限度は 0.22～0.41 であり、疲労破断に関する安全係数 2.5

～5 程度が見込まれる。

・クリープ破断：静的強さに対する 1000 時間破断強さは大気中で 0.64～0.70 に低下し、クリープ破断に関する安全係数は 1.6 程度となる。

以上①～③の数値を掛け合わせて、文献 35）では安全率 3.2 を得ている。

3）材料特性総合比較

以上より、本研究で決定した材料をアルミニウム合金及び鋼と比較したものを表-7.1.2 に示す。

表-7.1.2　材料特性の比較

特性＼材料名			鋼材		アルミ合金		GFRP	
			SS400	SM490Y	5083-H112 板材	6N01-T5 押出成形	引抜成形材	ハンドレイアップ
機械的特性	引張強度	MPa	400～510	490～610	280	230[170]	450<147>	130～200
	曲げ強度	MPa	引張に準じる		引張に準じる		413<281>	130～200
	圧縮強度	MPa					430<182>	130～200
	層間せん断強度	MPa	引張の1/√3		引張の1/√3		38.4<24.6>	－
	横せん断強度	MPa					183<90.2>	50
	面内せん断強度	MPa					106	－
	降伏点	MPa	235	355	130	180[100]	－	－
	疲労限度または強度		静強度の0.45～0.55		－	16～80MPa	－	0.22～0.48
物理定数	引張弾性係数	GPa	210		70		23.5<10.1>	12
	曲げ弾性係数	GPa	引張に準じる		引張に準じる		11.9<11.4>	12
	圧縮弾性係数	GPa	引張に準じる		引張に準じる		30<16>	－
	せん断弾性係数	GPa	81		27		5.5～6.0	－
	ポアソン比		0.3		0.3		0.24	－
	線膨張係数		0.000012		0.000024		0.000020	0.000020
	単位体積重量	kN/m^3	76.982		26.478		18.633	16.671
	融点	℃	1535（純鉄）		660（純アルミ）		－	
耐候・耐食性			水、酸素、塩分および高温環境で酸化		鋼の1/10～1/20の劣化速度		直射日光で表面の樹脂が劣化	
加工・成形性			冷間曲げ加工可		冷間曲げ加工可		成形後の曲げ加工は不可	
接合方式			溶接、摩擦、支圧		溶接、摩擦、支圧		支圧ボルト・接着	
設計安全率			1.7		1.85		3.2	

注）[ ]は熱影響部を示す、< >は90° 方向を示す。

7.1.2　架構方向の検討

引抜き加工によって製作したプレキャスト部材を、床版として桁上に配置する方向（以下、架構方向という）について検討する。ここでは、**図-7.1.1** に示すような 2 方向（ここに、成形時の引抜き方向を強軸方向、引抜く方向に直角な方向を弱軸方向という）について輪荷重を載せたときのたわみと応力を調べ、どの架構方向で用いるのが有利かを検討する。断面形状の検討は次節にて行うため、ここでは便宜上三角形セル型断面を取り上げた。この形状は方向による差異がその他の形状と比べて小さいと考えられ、この形をもって有利な方向を見いだせば、他の形状についても適用できると思われる。材料特性その他は、7.1.1 で選定したアルミニウム合金 6N01-T5 を使用した。

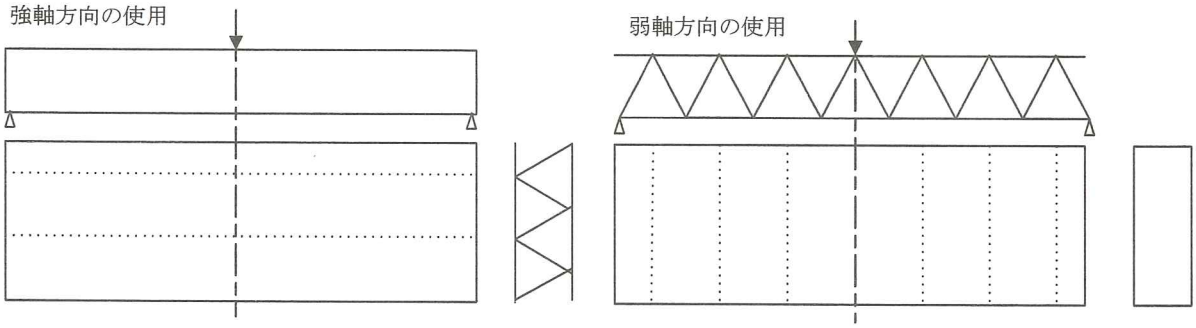


図-7.1.1　架構方向比較概念図

荷重は、支間中央に輪荷重を想定して 100kN の集中荷重とした。また、このような構造は通常、版としての性能を示すが、ここでは架構方向の荷重分配効果の比較が目的であるため、桁として取り扱うものとした。版を構成する部材のうち、上デッキは直接輪荷重を受け、鋼床版でいうデッキプレートに相当する部材である。道示鋼橋編 [21] ではデッキプレートのたわみスパン比を、舗装のひび割れを考慮して 1/300 に押さえていることから、板厚 $t>0.037b$（b は縦リブの間隔、すなわち板の支間長）としている。単純にヤング係数比を適用すると、例えばGFRP では鋼の場合に比べて十数倍の板厚を必要とし、実用的でない。そこで輪荷重一輪を複数の支間で分担する必要があると判断し、隔壁間隔を輪帯幅（20cm）よりも小さい支間長とすることとした。検討に用いる構造の寸法諸元を以下に示す。

- 支間長：150cm、幅：50cm（全幅有効）
- サンドイッチ版としての高さ（床版高）：20cm
- 三角形の底辺の長さ：18.75cm（支間長を 8 等分した値）
- 板厚は全て 3 mm

以上の条件にて計算した結果を**表-7.1.3** に示す。応力とたわみの関係から強軸方向の架構が有利であることがわかる。たわみについては倍半分程度の差異があり、断面がたわみによって決定される可能性が極めて高く、弱軸方向での使用は経済性を著しく損ねるおそれがある。従って今後の検討は強軸方向に架構するものとした。

表-7.1.3　計算結果比較

架構方向	最大応力度(MPa)	最大たわみ(mm)	対支間比
強軸方向	90	2.4	1/625
弱軸方向	125	4.4	1/341

7.1.3　断面形状の選定

（１）候補断面

アルムニウム合金やGFRPで版を構成する場合には接合部の構造が課題となる。アルミニウム合金の場合にはその溶接技術が進んではいるが、鋼に比べると未だ一般的ではない。GFRPの場合は溶接に準ずるような接合法が無く、もっぱら接着ないしボルト接合、およびその併用となっている。

このような事情から、断面と接合法との間には密接な関係があり、既往例を見てもこのような観点から決められているようである。アルミニウム合金よりも接合が難しいGFRPの場合について、その実例を調べてみると、断面形状は**図-7.1.2**に示すように、矩形と六角形（ハニカム構造）が多い。

今回検討をする断面形状としては、現状にあまりとらわれることなく、引き抜き成形の技術や接合技術の発展をある程度期待したものを考える。具体的には、継手の施工が比較的容易になるものと考え、現場の作業を出来るだけ少なくする観点から、単体の幅が広く取れる構造を取り上げることにした。

このような考察に基づき、候補の断面としては、三角形を基本とするもの、四角形のものを選定した。また、この両者に比べハニカム形は断面が複雑であり、幅の広い単体にはあまり適当ではないが、版厚が大きいときには斜材の座屈長を小さく出来るメリットがあるため候補の対象とした。

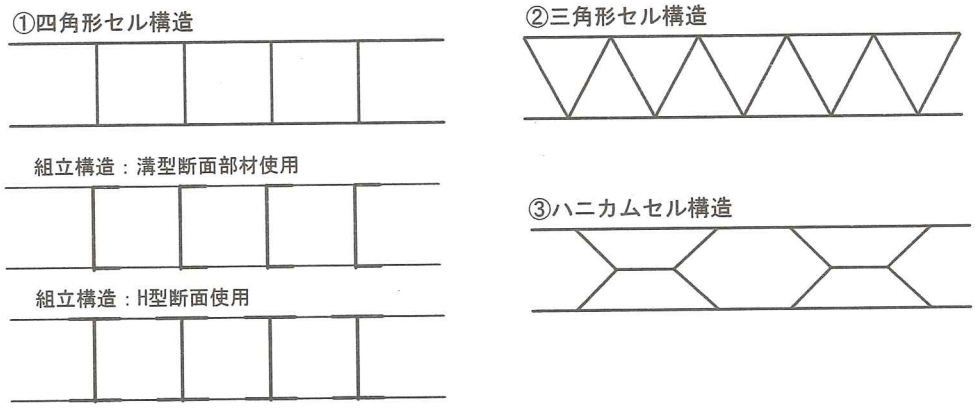


図-7.1.2　候補断面形状

① 四角形セル構造

形状が単純であるため、**図-7.1.2**に示したように幾つかの断面を繋げたような断面を一体として製作でき、継ぎ手の数が少なくて済む利点がある。単体同士の接合は、側面に設けたせん断キーを頼りに接着する方法、I形の部材を介して接着する方法等がある。

② 三角形セル構造

四角形セル断面と比べて断面内における部材の延長が長くなる傾向にあるが、各部材に生じる面外曲げを低減させることができると考えられる。また、制動荷重等の水平荷重に対する抵抗が大きく、構造的な安定性が高いと言える。

③ ハニカムセル構造

比較的接合しやすい断面で、底版にハンドホールを設けることによって、ボルトを併用することも可能であり、施工も比較的容易で大きな断面にも対応できる。

（２）断面の比較検討

１）検討方法

選定した候補断面に対して、たわみと応力を満たした上で、荷重分配性能が良い構造を選定する。ここで、“たわみ”と“応力”と“荷重分配性能”について以下に補足する。

① たわみ：たわみの量は鋼やコンクリートに比べて剛性が小さいため比較的大きい。

② 応力：鋼やコンクリートと比べて剛性が小さいため、応力の許容値を小さくしないと、たわみ量が大きくなる。

③ 荷重分配性能：集中荷重に近い輪荷重を荷重直下の部材だけでなく他の部材にも分担させることが出来る性能を指す。

本検討の目的は、詳細な性能を把握するために後に行う FEM 解析のための断面形状を決定することであり、ここでは簡易な方法によって断面形状の性能比較を行うこととした。したがって計算の簡便化を図るため、図-7.1.3 のような平面骨組モデルを作成し、輪荷重 1 輪に相当する 100kN を載荷した時の変形、断面力および支点反力の分布を算出し、たわみと応力を満たした上で相対的に荷重分配性能のよい形式を選択することとした。検討モデルはアルミニウム合金を対象として作成した。

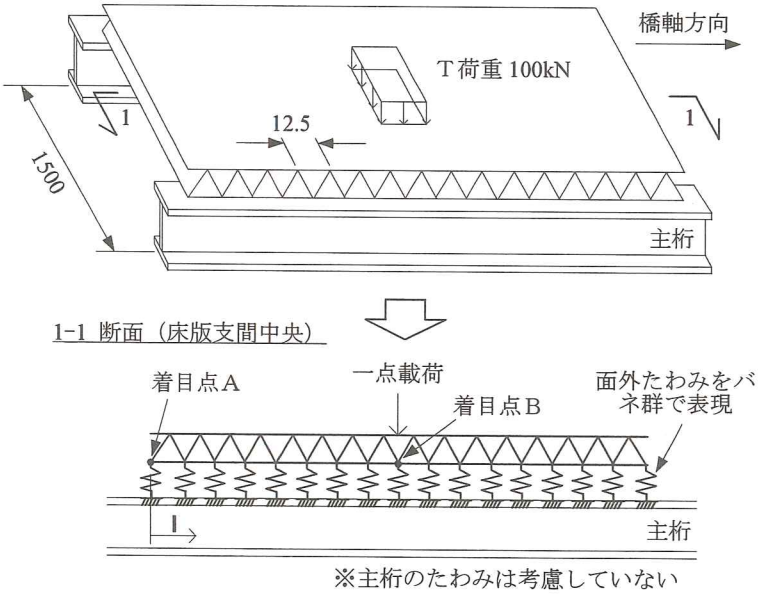


図-7.1.3　平面骨組モデルへの置換（アルミニウム合金を対象）

検討モデルは、主桁間隔 1.5m、橋軸方向幅 3.0m とし、床版支間中央を橋軸方向に切断して平面モデルに置き換えた。その際、橋軸直角方向の面外たわみは、上図のとおりバネに置き換えてモデル化した。橋軸直角方向の床版部材のたわみをバネとして、橋軸方向の床版部材としてそのバネにより支えられるトラスとしてモデル化した。床版支間中央のたわみを橋軸方向の床版部材のたわみと橋軸直角方向の床版部材のたわみの和と仮定する。橋軸方向の床版部材はトラス構造のままとし、橋軸直角方向の床版部材を三角形セル一辺の幅で切断された梁として考え、その梁の支間中央のたわみ量が同等となるバネによりその梁を置き換えた。

2）検討ケース

3つの異なる断面形状の板厚構成は、三角形セル断面の断面積を基準として、全てのケースの断面積を一致させている。三角形セル断面以外の断面は、上デッキとウェブと下デッキの構造部材の板厚比率を三角形セル断面と等しくしたケース（板厚相似）と、上デッキとウェブと下デッキの各部位の断面積を三角形セル断面の断面積と等しくしたケース（断面積一定）の2ケースについて比較を行った。**図-7.1.4**に断面構成、**表-7.1.4**に各検討ケースの構成部材と断面積を示す。

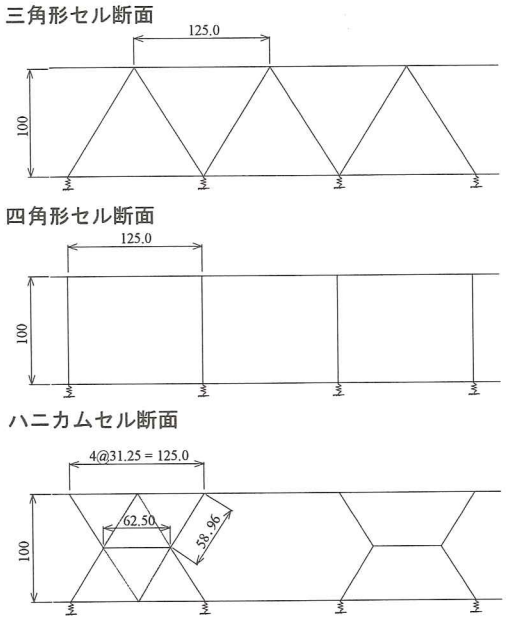


図-7.1.4　断面構成（アルミニウム合金）

表-7.1.4　床版の部材構成と1セルあたりの断面積（アルミニウム合金）

構成要素	三角形セル断面		四角形セル断面				ハニカムセル断面			
			板厚相似		断面積一定		板厚相似		断面積一定	
	板厚	断面積	板厚	断面積	板厚	断面積	板厚	断面積	板厚	断面積
上デッキ	14.0	17.5	18.8	23.5	14.0	17.5	16.7	20.9	14.0	17.5
ウェブ	10.0	23.6	13.4	13.4	23.6	23.6	11.9	14.1	15.8	18.6
水平版	——	——	——	——	——	——	11.9	3.7	15.8	5.0
下デッキ	10.0	12.5	13.4	16.7	10.0	12.5	11.9	14.9	10.0	12.5
合計		53.6		53.6		53.6		53.6		53.6

（単位：板厚（mm）、断面積（cm^2））

3）計算結果

図-7.1.5(a)～(c)に床版支間中央における変形、モーメント、軸力の発生概要と**表-7.1.5**に計算結果を示す。

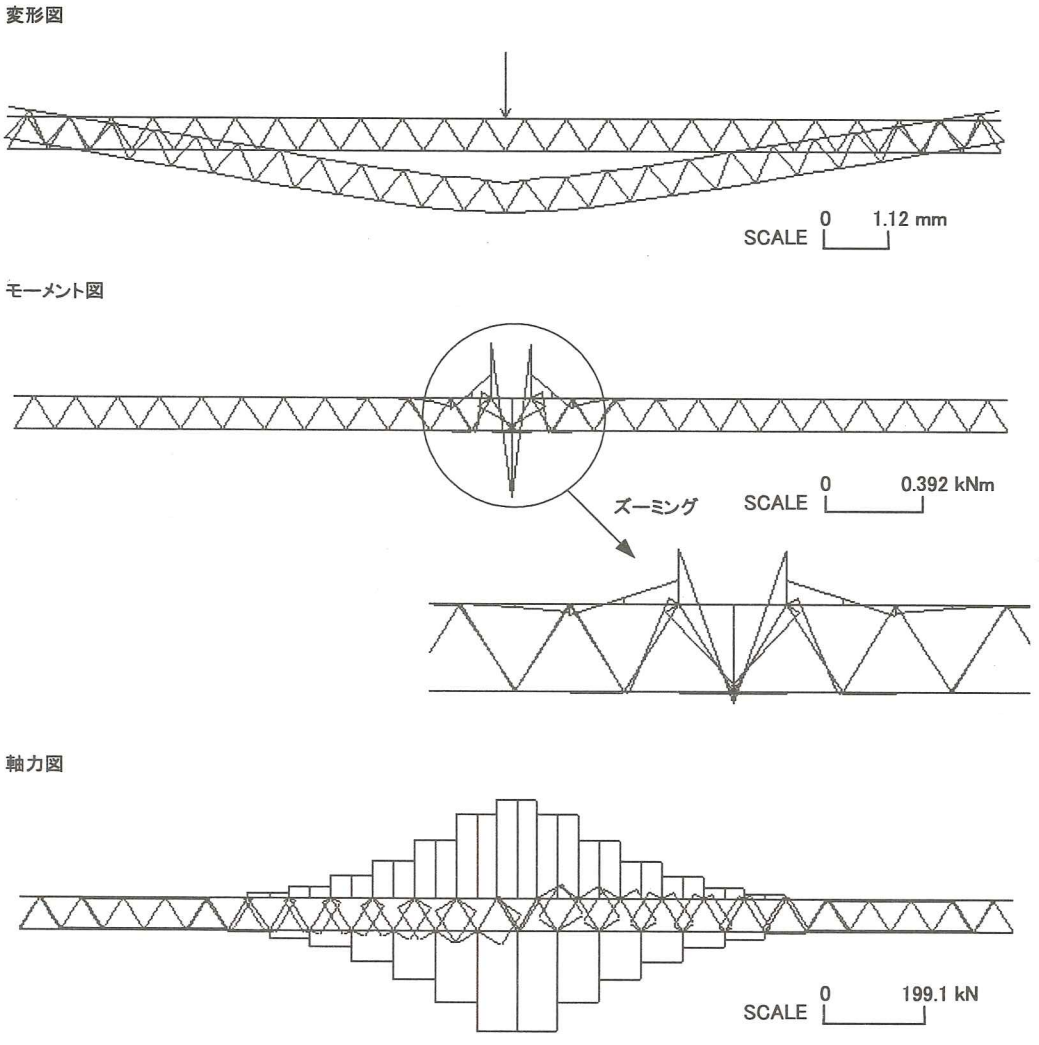


図-7.1.5(a)　三角形セル断面に発生する変形及び断面力の概要

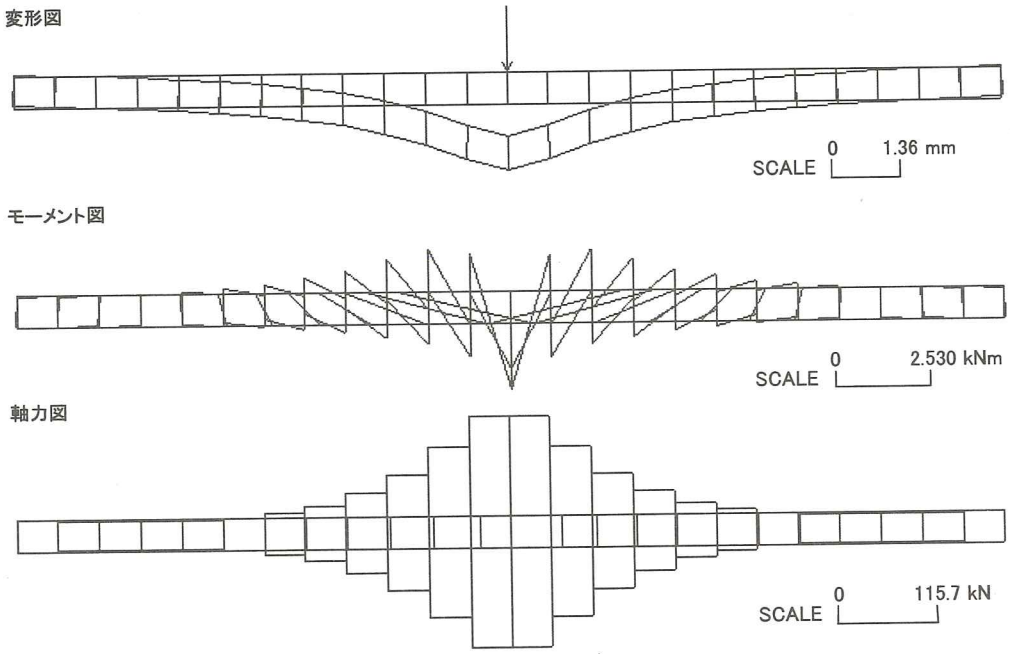


図-7.1.5(b)　四角形セル断面（板厚相似）に発生する変形及び断面力の概要

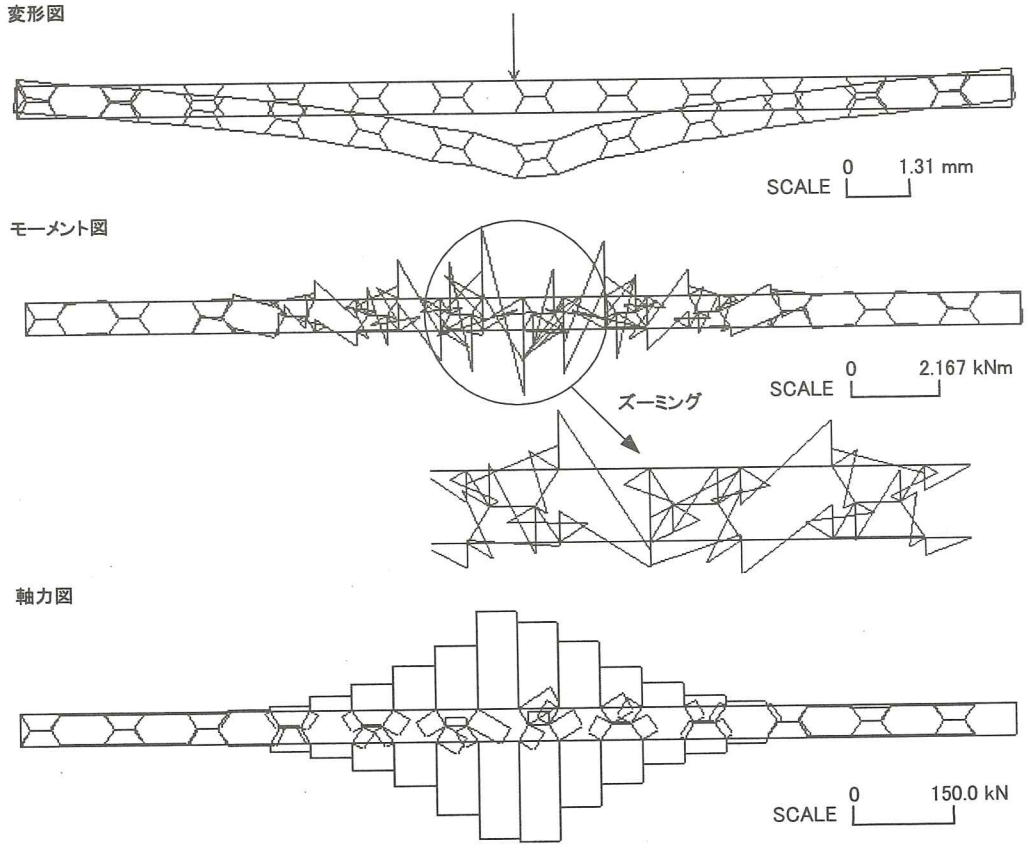


図-7.1.5(c)　ハニカムセル断面（板厚相似）に発生する変形及び断面力の概要

表-7.1.5　断面性能と計算結果（アルミニウム合金の場合）

〔断面性能：m^2, $\times 0.001m^4$〕

構成要素	三角形セル断面		四角形セル断面				ハニカムセル断面			
			板厚相似		断面積一定		板厚相似		断面積一定	
	断面積	断面二次	断面積	断面二次	断面積	断面二次	断面積	断面二次	断面積	断面二次
上デッキ	0.02100	0.00034	0.02810	0.00082	0.02100	0.00034	0.02510	0.00058	0.0210	0.00034
ウェブ	0.01500	0.00013	0.02010	0.00031	0.03540	0.00170	0.01780	0.00021	0.0237	0.00049
水平版	—	—	—	—	—	—	0.01780	0.00021	0.0237	0.00049
下デッキ	0.01500	0.00013	0.02010	0.00031	0.01500	0.00013	0.01780	0.00021	0.0150	0.00013

〔各梁のバネ定数:kN/m〕

構成要素	三角形セル断面	四角形セル断面		ハニカムセル断面	
		板厚相似	断面積一定	板厚相似	断面積一定
上デッキ	7,767	10,317	8,571	9,199	8,110
ウェブ	49.82	52.07	51.48	51.09	50.60
水平版	60.02	61.78	58.35	61.00	59.23
下デッキ	7,728	10,268	8,532	9,150	8,071

〔最大断面力：kN, kN・m〕

構成要素	三角形セル断面		四角形セル断面				ハニカムセル断面			
			板厚相似		断面積一定		板厚相似		断面積一定	
	軸力	曲げ	軸力	曲げ	軸力	曲げ	軸力	曲げ	軸力	曲げ
上デッキ	-199.1	0.392	-115.7	2.530	-133.4	2.050	-146.1	2.167	-150.0	1.981
ウェブ	-53.0	0.069	-43.1	1.844	-39.2	2.932	-58.8	0.941	-58.8	1.265
水平版	—	—	—	—	—	—	-21.4	1.285	-13.7	1.324
下デッキ	174.6	0.069	115.7	1.138	133.4	0.667	150.0	1.098	151.0	0.843

〔断面構成：mm〕

構成要素	三角形セル断面		四角形セル断面				ハニカムセル断面			
			板厚相似		断面積一定		板厚相似		断面積一定	
	板厚	断面積	板厚	断面積	板厚	断面積	板厚	断面積	板厚	断面積
上デッキ	14.0	17.5	18.8	23.5	14.0	17.5	16.7	20.9	14.0	17.5
ウェブ	10.0	23.6	13.4	13.4	23.6	23.6	11.9	14.1	15.8	18.6
水平版	—	—	—	—	—	—	11.9	3.7	15.8	5.0
下デッキ	10.0	12.5	13.4	16.7	10.0	12.5	11.9	14.9	10.0	12.5
合計		53.6		53.6		53.6		53.6		53.6

〔計算結果（応力）：MPa（許容値128MPa）〕

構成要素	三角形セル断面		四角形セル断面				ハニカムセル断面			
			板厚相似		断面積一定		板厚相似		断面積一定	
	直応力	曲げ応力	直応力	曲げ応力	直応力	曲げ応力	直応力	曲げ応力	直応力	曲げ応力
上デッキ	-95	81	-41	290	-64	422	-58	312	-71	408
ウェブ	-35	26	-21	398	-11	204	-33	267	-25	204
水平版	—	—	—	—	—	—	-12	364	-6	213
下デッキ	116	26	58	246	89	256	84	311	101	324

〔計算結果（たわみ）：mm（許容値 L/600=2.5mm）〕

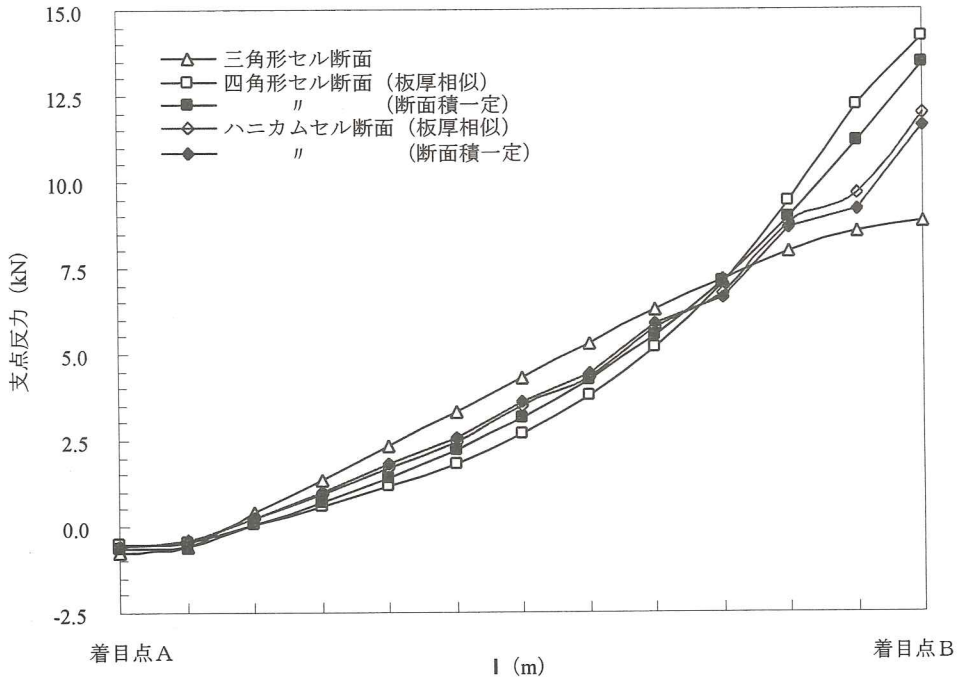
構成要素	三角形セル断面	四角形セル断面		ハニカムセル断面	
		板厚相似	断面積一定	板厚相似	断面積一定
最大たわみ	1.12	1.36	1.55	1.31	1.43

4）考察と断面形状の選定

図-7.1.6 に支点反力図を示す。同図より三角形セル断面の場合が最も荷重分配に優れていることが分かる。逆に、最も分配効率が悪いのは四角形セル断面であり、ハニカムセル断面はその中間的性質を示す。ただし、ハニカムセルでは上デッキを支えるウェブの傾斜が一つおきに異なることから、支点反力図は二つの点を一組と考えると、同図に見られる凹凸が均されるのがわかる。

また、三角形セル断面の場合は他の場合に比べて、直応力ではやや大きくなったものの曲げ応力については数分の一程度となったことから、使用材料からは三角形セル断面が圧倒的に有利であるといえる。

したがって、既往の例で四角形セル断面やハニカムセル断面が採用されているのは、製作・施工上の理由が大きいためと考えられるため、本研究においては、この問題点が将来的な技術開発により解決されると仮定し、構造的に最も優れる三角形セル断面を検討することとした。



※着目点は図-7.1.3 を参照

図-7.1.6　各梁要素の支点反力図（アルミニウム合金）

7.2 断面形状の検討

7.2.1 要素分割の検討

前節の平面モデルの検討で決定した三角形セル断面アルミニウム合金を対象とした立体モデルを作成し、立体 FEM 解析を行う。後に行う各材料による様々の検討に先立ち、ここでは要素分割の検討を行った。要素分割は、床版を構成する全ての部材を考えると膨大な要素数となるため、ここでは図-7.2.1に示す3つのケースを想定した。同図中の三角形セル断面の内、三角形1辺あたりを2分割したものをモデル①とし、①のモデルにおいて、輪荷重を集中的に受ける部分の上フランジだけを 10 分割したものをモデル②、輪荷重を受ける上フランジの中央部分を 10 分割したものをモデル③とした。使用する要素はシェル要素とし、アスペクト比が1となるように、橋軸直角方向の分割数を調整している（要素分割の詳細は図-7.2.2を参照されたい）。

対象とした解析ケースは、7.2.2 に示すモデル名：ALUM1 とし、以下に示す板厚にて検討を行った。その他の条件は後に行う断面形状の検討と同条件である。

- 上デッキ　15mm
- 下デッキ　10mm
- ウェブ　　7mm
- 床版厚　　100mm

なお、本検討のみ汎用コード：ANSYS56 を用いた。

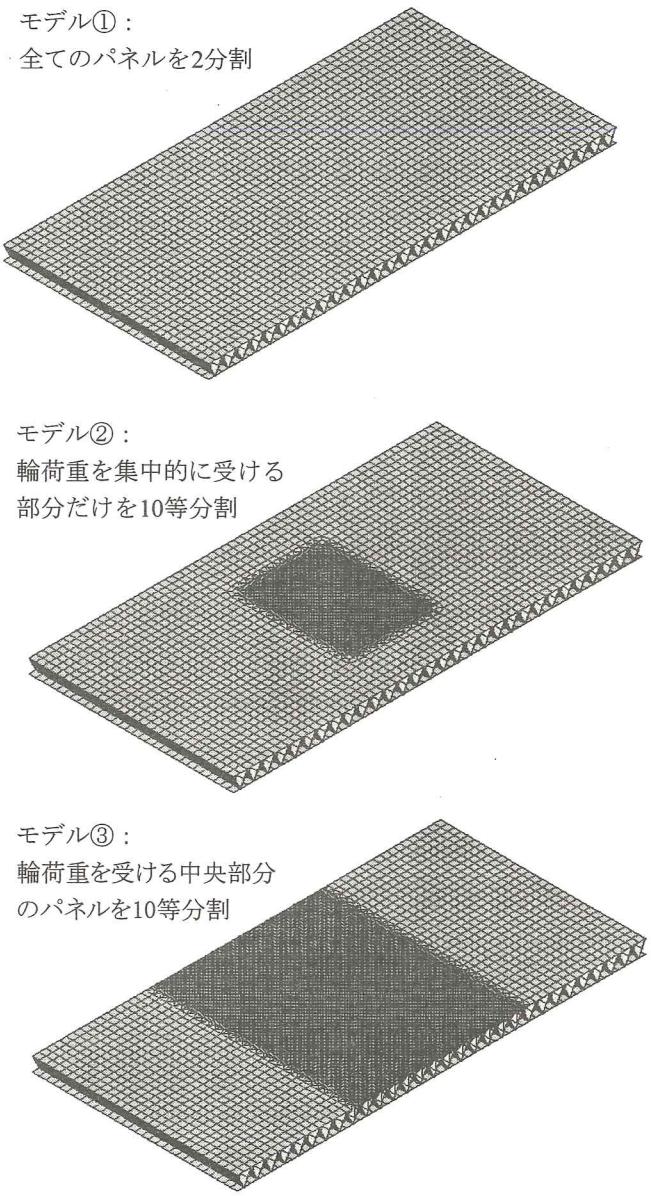


図-7.2.1　要素分割図

表-7.2.2 に解析結果を示す。分割状態によって影響されると思われる上デッキの面外せん断応力（xz, yz 成分）の最大値に着目すると、モデル②と③の比較においてはほぼ一致しているが、モデル①と②では、顕著な差異が見られたため、細かく分割した場合には板曲げが精度よく考慮されていることが分かった。下デッキの最大応力はほぼ一致しており、ウェブ応力も局部的な影響を受けるが、ほぼ一致していると考えられる。従って、輪荷重直下の上フランジに発生する局部的な応力やセル間の接合部に発生する応力等の検討以外では、粗いメッシュでも精度の良い解が得られることがわかったため、版の設計を対象とする本研究において、今後はモデル①を対象として検討を行うものとした。

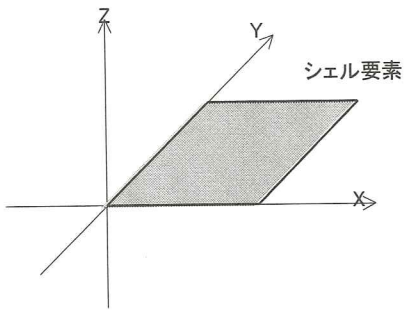
表-7.2.2　要素分割モデルと応力の最大値と最小値の関係　[N/mm^2]

上デッキ	正の応力の最大値			負の応力の最大値		
着目した断面力	モデル①	モデル②	モデル③	モデル①	モデル②	モデル③
σxx	3.62	2.79	3.07	-27.27	-27.65	-27.65
σyy	2.83	2.85	3.07	-22.73	-23.51	-23.49
σxy	3.33	4.98	4.45	-3.33	-4.98	-4.45
σxz	1.43	2.86	2.86	-1.43	-2.86	-2.86
σyz	0.44	2.23	2.05	-0.44	-2.23	-2.05

下デッキ	正の応力の最大値			負の応力の最大値		
着目した断面力	モデル①	モデル②	モデル③	モデル①	モデル②	モデル③
σxx	22.09	22.13	22.13	-2.07	-2.07	-2.07
σyy	25.6	25.34	25.31	-4.02	-4.02	-4.02
σxy	4.74	4.73	4.64	-4.74	-4.73	-4.64
σxz	0.19	0.19	0.19	-0.19	-0.19	-0.19
σyz	0.45	0.45	0.47	-0.45	-0.45	-0.47

ウェブ	正の応力の最大値			負の応力の最大値		
着目した断面力	モデル①	モデル②	モデル③	モデル①	モデル②	モデル③
σxx	21.56	21.29	21.27	-18.37	-19.217	-19.96
σyy	14.8	15.53	15.53	-23.44	-23.49	-27.7
σxy	7.19	8.74	8.75	-7.19	-8.74	-8.75
σxz	0.11	0.89	0.82	-0.11	-0.89	-0.82
σyz	0.08	0.12	0.11	-0.09	-0.12	-0.12

ここに、応力方向の記号は以下を意味するものとした。
- xx：橋軸方向の板面内直応力成分（部材x軸方向応力）を示す
- yy：橋軸直角方向の板面内直応力成分（部材y軸方向応力を示す
- xy：板面内のせん断応力を示す
- xz：xz面に平行なz方向（板面外）せん断応力を示す
- yz：yz面に平行なｚ方向（板面外）せん断応力を示す



7.2.2　解析モデル

検討の対象とした解析モデルは、前節での検討と同様に構造全体をシェル要素とし、床版支間長は 1.5, 2.5m を想定した。また、継手の選択により接合条件が異なることを鑑み、曲げモーメント伝達の有無を考慮した。

以上より、**表-7.2.3** に示す合計 8 モデルについて検討を行う。本解析に使用するモデル概要を**図-7.2.2(a)～(f)**に示す。なお、以降の解析は汎用コード：COSMOS／M Ver2.6 を用いて行った。

表-7.2.3　モデル形式の一覧表

モデル名	接合条件	材料	寸法(mm)
ALUM1	剛結	アルミニウム合金	1500×3000
ALUM2	せん断力伝達		
ALUM3	剛結		2500×3000
ALUM4	せん断力伝達		
FRP1	剛結	FRP	1500×3000
FRP2	せん断力伝達		
FRP3	剛結		2500×3000
FRP4	せん断力伝達		

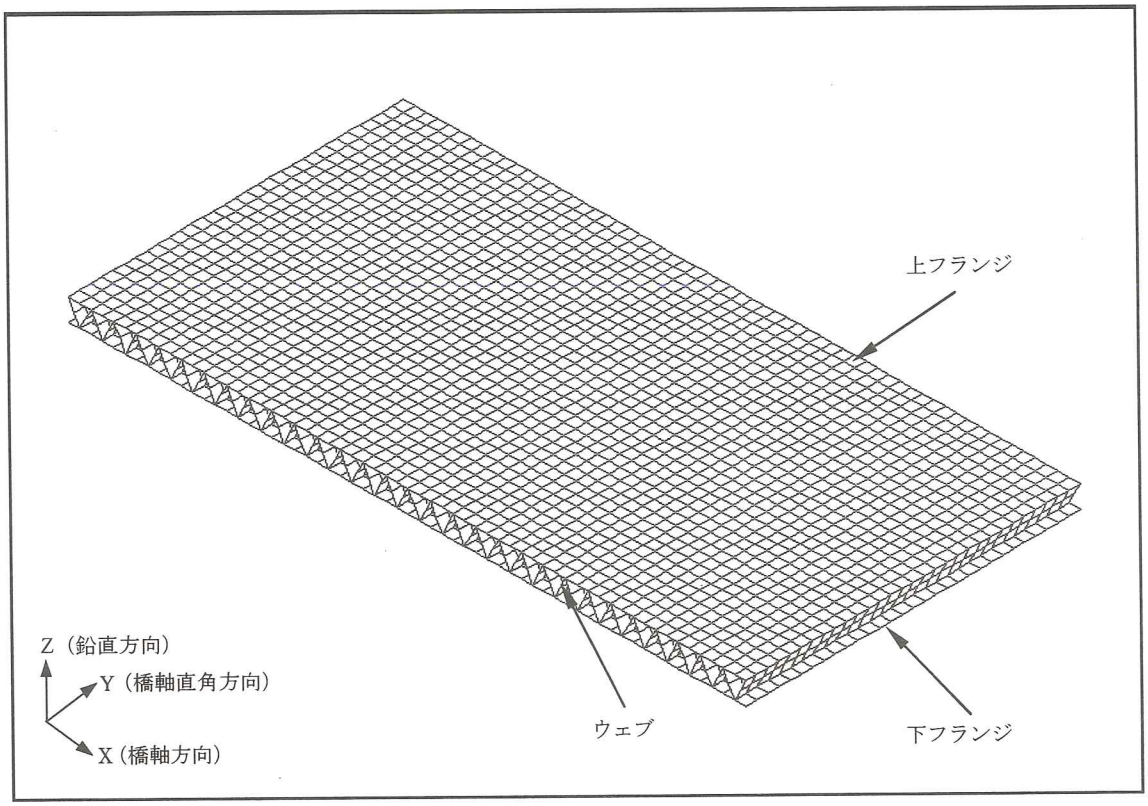


図-7.2.2(a)　1500×3000 モデル

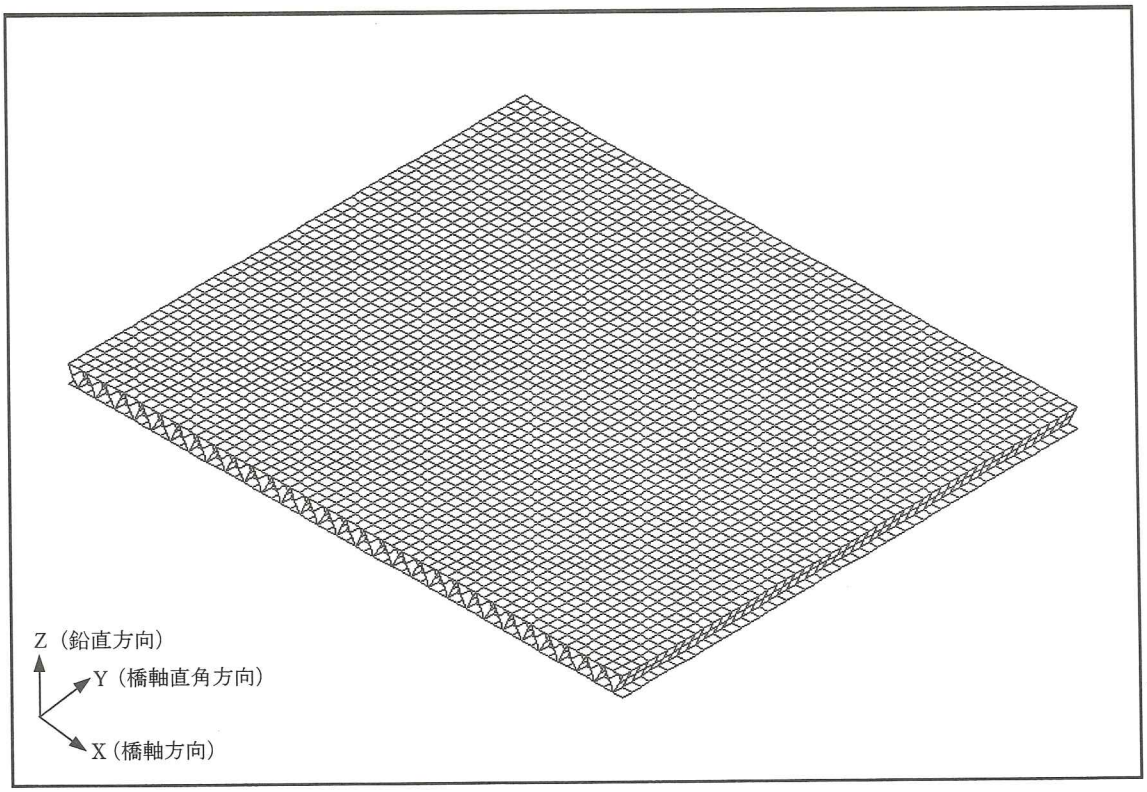


図-7.2.2(b)　2500×3000 モデル

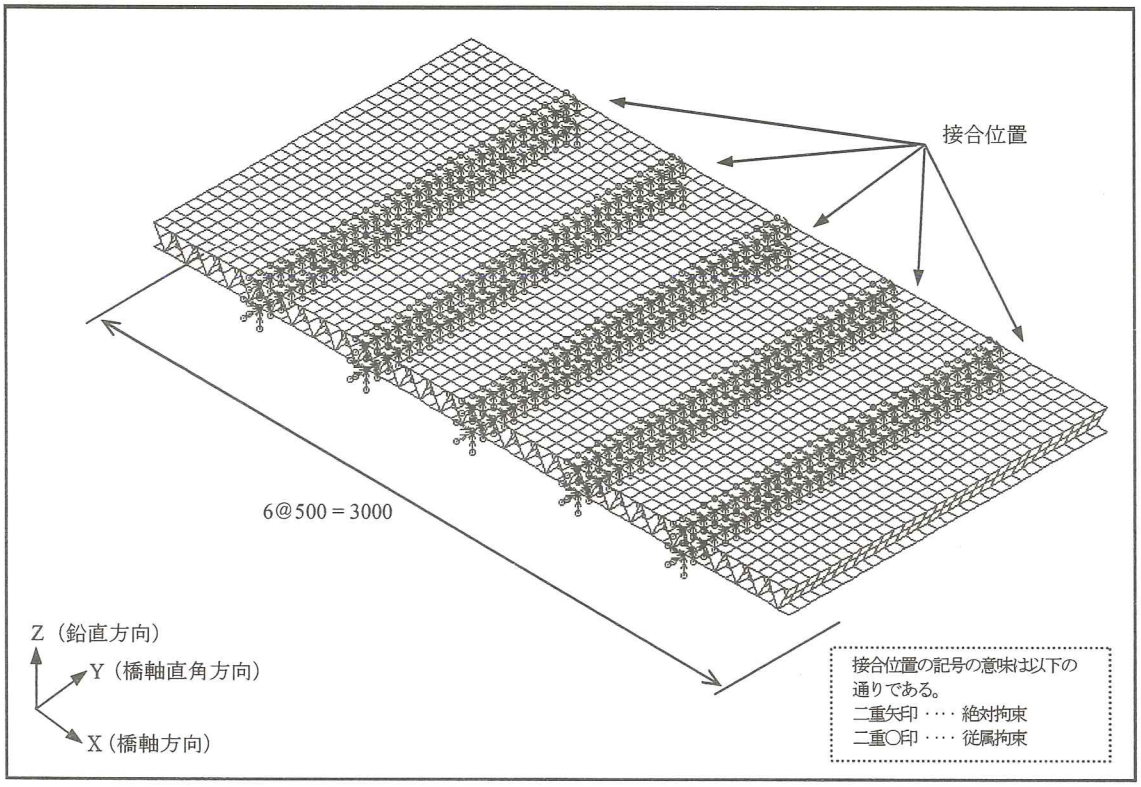


図-7.2.2(c)　接合位置図（1500×3000 モデル）

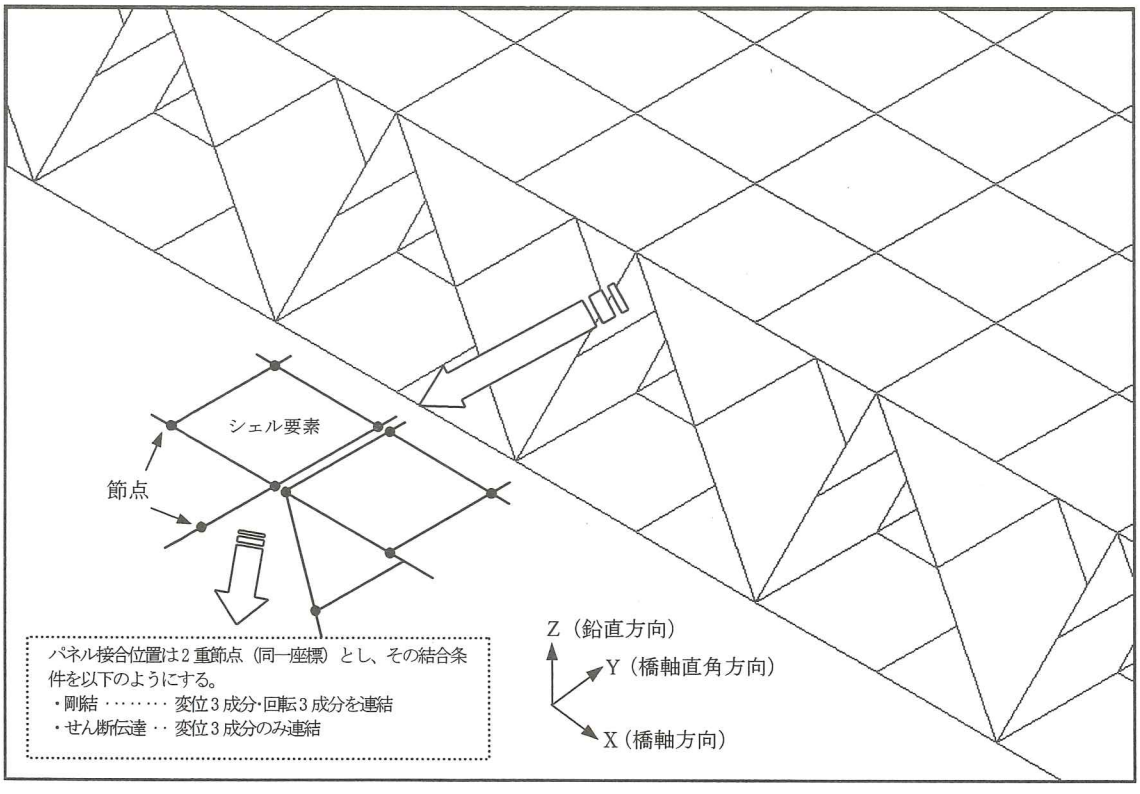


図-7.2.2(d)　接合条件（1500×3000 モデル）

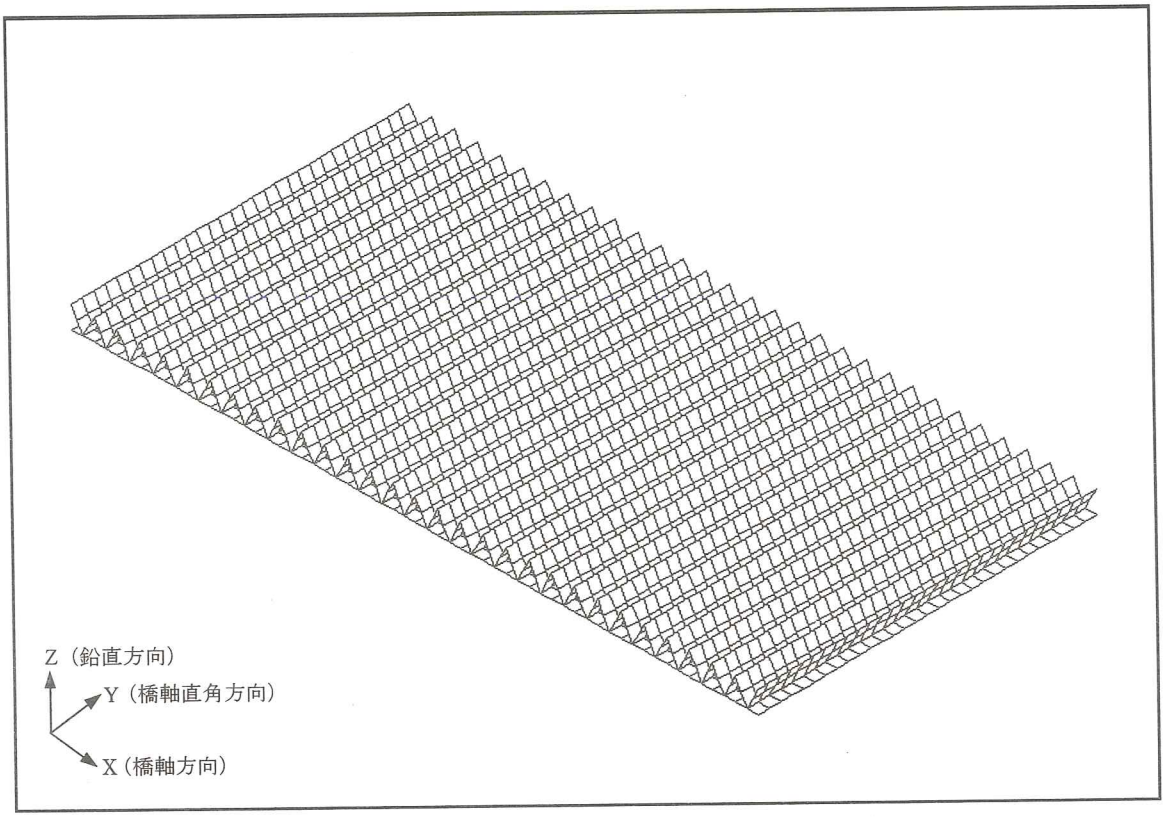


図-7.2.2(e)　上フランジなし（1500×3000 モデル）

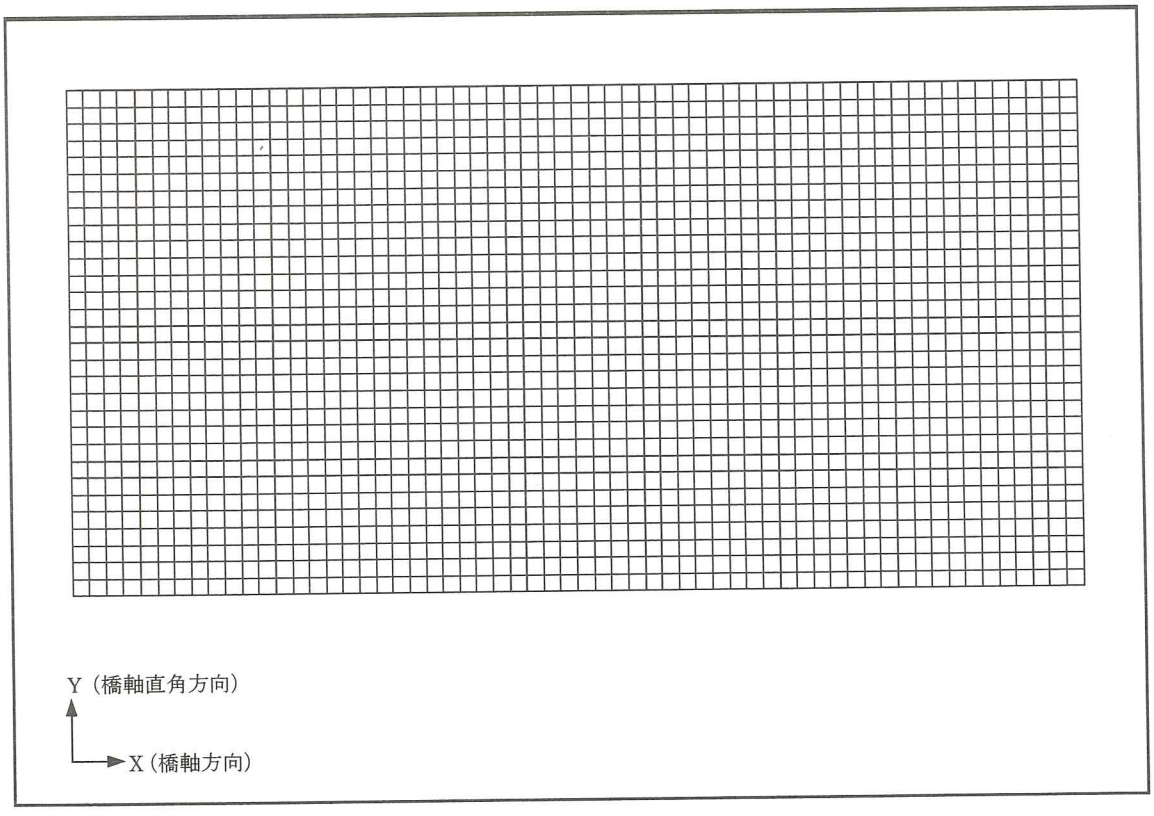


図-7.2.2(f)　平面図

7.2.2　解析条件

（１）　拘束条件

下デッキ両端（橋軸方向）の節点を鉛直方向変位に拘束する。水平方向は中央の節点で拘束する。拘束条件を図-7.2.3(a)に示す。

（２）　荷重条件

荷重条件を図-7.2.3(b)～(c)に示す。荷重は死荷重（舗装+自重）および、活荷重（T 荷重）を載荷する。

死荷重

舗装荷重 .....上デッキに面荷重として載荷（図-7.2.3(b)参照）、

舗装 .....80 mm×22.5×10^{-6} N/mm^3 = 0.00180 N/mm^2

アルミ自重 .....上下デッキおよびウェブに重量密度として載荷

活荷重

T 荷重 .....上フランジの中央に面荷重として載荷（図-7.2.3(c)参照）、

100 kN×1.400÷（200×500）= 1.4 N/mm^2

ただし、衝撃係数 i = 0.400 とする。

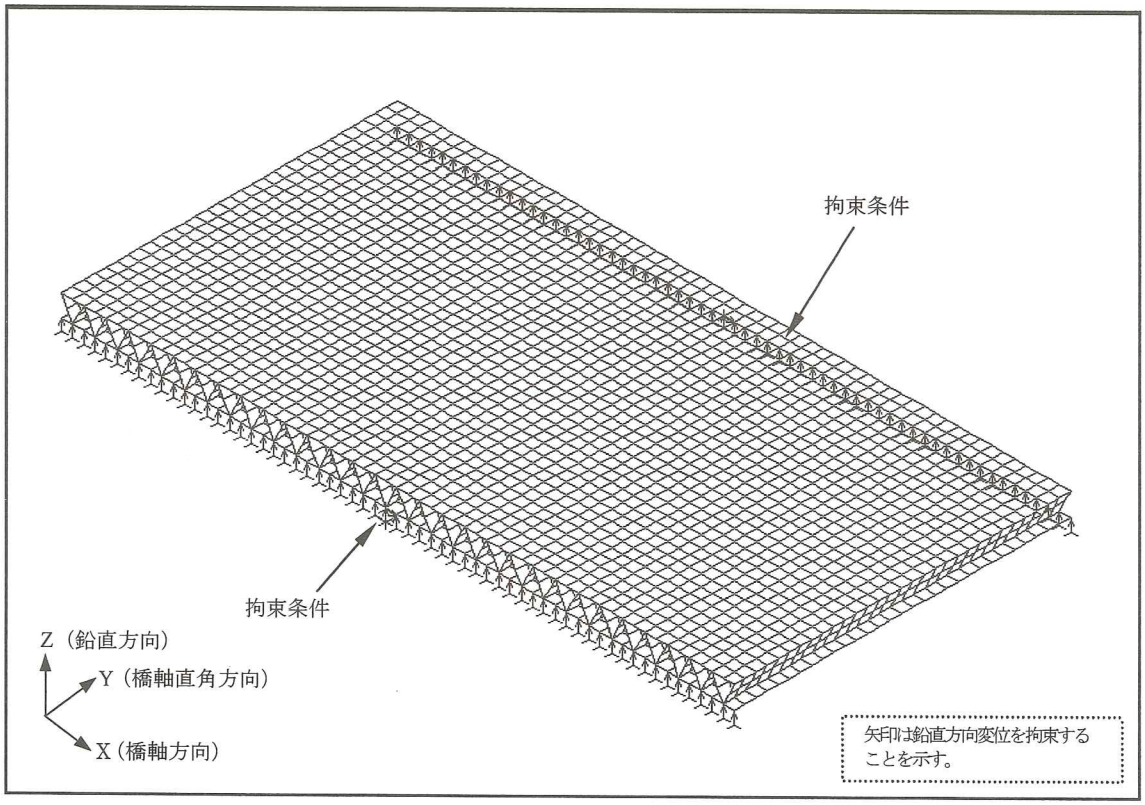


図-7.2.3(a)　拘束条件

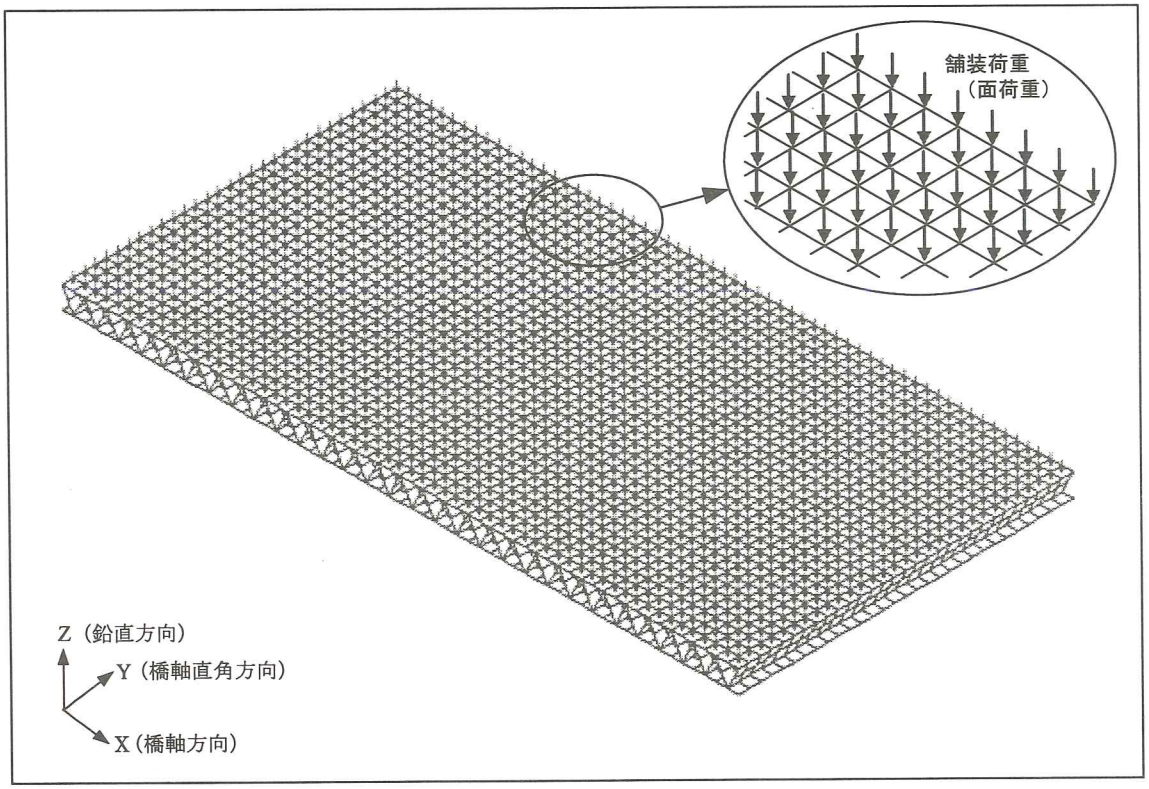


図-7.2.3(b)　荷重条件（ 舗装荷重 ）

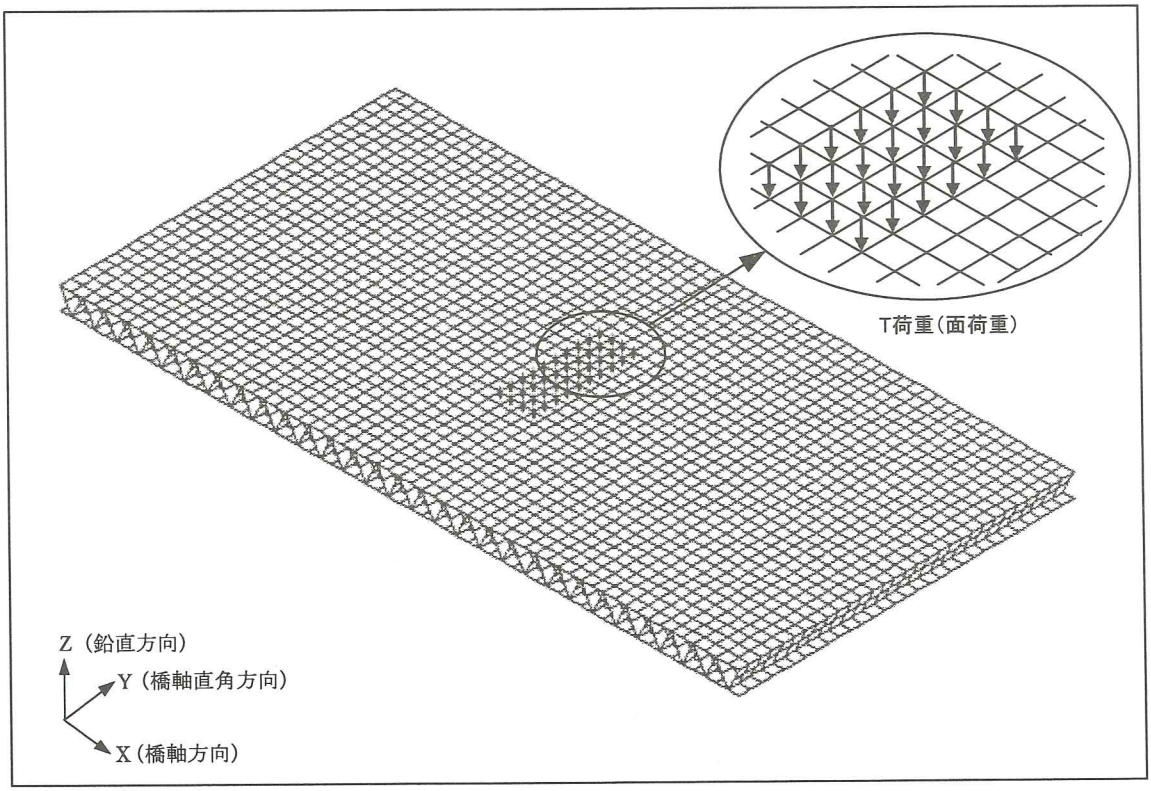


図-7.2.3(c)　荷重条件（T荷重 ）

（３）材料特性

アルミニウムの材料特性はアルミ設計指針[19]より、FRP の材料特性は FRP 構造設計便覧[36]の型材Ⅰ～Ⅲの曲げ弾性係数の平均値より算出する。本解析に使用した材料特性を**表-7.2.4** に示す。

表-7.2.4　材料特性

材料	ヤング係数（MPa）	せん断弾性係数（MPa）	ポアソン比	質量密度（N/mm^3）
アルミニウム合金（6N01-T5）	6.865×10^4	2.640×10^4	3.000×10^{-1}	2.750×10^{-5}
FRP	橋軸　7.600×10^3 橋直　1.270×10^4	4.100×10^3	2.500×10^{-1}	1.569×10^{-5}

（４）板厚の適用範囲

アルミニウム合金の板厚は、最小板厚規定[19]より 3mm 以上、かつ b／60（b＝ウェブ間隔）以上とする。また 6N01-T5 の適用板厚より最大板厚は 12mm 以下とする。

アルミニウム合金の板厚：　3mm ≦ t ≦ 12mm

FRP の板厚については明確な規定が無いため、アルミニウム合金と同様に最小板厚を 3mm 以上、かつ b／60（b＝ウェブ間隔）以上とする。

FRP の板厚：　3mm ≦ t

（５）許容値

１）許容応力度

アルミニウムの許容応力度はアルミ設計指針[19]より、FRP の許容応力度は FRP 構造設計便覧[36]の型材Ⅰ～Ⅲの曲げ強さおよびせん断強さの平均値を安全率で割って算出する。安全率については繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル[24]の安全率＝3～6 を参考に、本解析では安全率＝5 として算出した。また本解析に適用した許容応力度を**表-7.2.5**、**表-7.2.6** に示す。

表-7.2.5　アルミニウムの許容応力度

材料	引張曲げ応力度（MPa）		圧縮曲げ応力度（MPa）		せん断応力度（MPa）	
	t ≦6	6＜ t ≦12	t ≦6	6＜ t ≦12	t ≦6	6＜ t ≦12
アルミニウム合金（6N01-T5）	113	93	113	93	64	54

表-7.2.6　FRP の許容応力度

材料	曲げ応力度（MPa）		せん断応力度（MPa）
	橋軸	橋直	橋軸・橋直
FRP（CFRP）	22	76	10～30

2）許容たわみ

アルミニウム合金，FRP ともに、たわみの許容値の明確な規定が無いため、道示鋼橋編 [21] のたわみの許容値（許容たわみ＝L／600 ここで、L＝支間長）を準用する。

また、たわみは活荷重（衝撃を含まない）により算出する。また本解析に適用した許容たわみを表-7.2.7 に示す。

表-7.2.7　たわみの許容値　（ L/600 ）

タイプ	1500×3000 モデル (mm)	2500×3000 モデル (mm)
許容値	2.500×10^{3}	4.167×10^{1}

（6）解析モデルの規模

解析モデルの規模を下記に示す。

- 1500×3000 モデル
  - 節点数　約 6,000 節点
  - 要素数　約 7,200 要素
- 2500×3000 モデル
  - 節点数　約 10,000 節点
  - 要素数　約 12,000 要素

7.2.3　最適化解析

前節にて作成した解析モデルにて、許容応力度および許容たわみを満足しアルミニウム合金自重、または FRP 自重が最も小さくなる断面を求めるものとする。最適化パラメータとしては、各部の寸法・板厚等様々な要素が考えられるが、ここでは３つのパラメータ（床版厚、ウェブ間隔、上下フランジ及びウェブの板厚）に着目し、最適化を行った。各々の解析ケースの最適化結果を表-7.2.8(a)～(h)に示す。

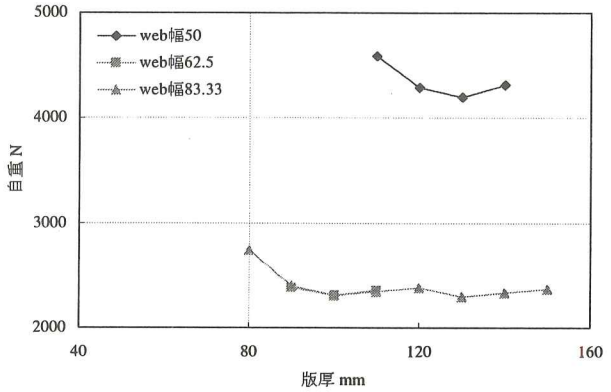
表-7.2.8（a）　形状最適化解析

ALUM1

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	von-Mises応力度(N/mm^2)				許容応力度照査				たわみ		せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	(mm)	照査	txy
	50	110	10	3	3	4176.53	84.7				○	○	○	○	4.91	×	
	50	110	10	4	3	4382.78	83.6				○	○	○	○	4.31	×	
	50	110	9	5	3	4382.78	96.0				×	○	○	○	4.05	○	
○	50	110	10	5	3	4589.03	82.8	66.2	53.2	52.6	○	○	○	○	3.89	○	17.5
	50	120	8	3	3	3877.50	111.6				×						
	50	120	9	3	3	4083.75	93.9				×						
○	50	120	10	3	3	4290.00	81.1	88.2	66.1	66.8	○	○	○	○	4.15	○	17.1
	50	130	10	3	3	4404.89	78.2	77.3	61.0	61.4	○	○	○	○	3.54	○	16.3
○	50	130	9	3	3	4198.64	90.8	77.9	61.4	61.8	○	○	○	○	3.66	○	16.3
	50	130	8	3	3	3992.39	108.4	78.5	62.0	62.2	×	○	○	○	3.83	○	16.2
	50	140	8	3	3	4108.43	105.6				×						
○	50	140	9	3	3	4314.68	88.3	74.4	57.0	57.3	○	○	○	○	3.18	○	15.6
	62.5	90	12	3	3	2507.11	71.4	92.8	67.2	68.9	○	○	○	○	2.48	○	23.6
○	62.5	90	10	4	3	2383.36	89.8	74.6	57.3	57.0	○	○	○	○	2.31	○	23
	62.5	90	11	3	3	2383.36	79.8	93.2	67.5	69.2	○	○	○	○	2.55	×	
	62.5	90	10	3	3	2259.61	90.9	93.6	67.9	69.6	○	○	○	○	2.64	×	23.7
	62.5	90	9	3	3	2135.86	105.8	94.0	68.3	70.0	×	○	○	○			
	62.5	100	9	3	3	2185.47	101.6	83.9	61.7	62.8	×	○	○	○			
○	62.5	100	10	3	3	2309.22	86.8	83.6	61.4	62.5	○	○	○	○	2.19	○	21.8
○	62.5	110	10	3	3	2360.25	86.8	75.4	56.1	56.8	○	○	○	○	1.95	○	20.2
	62.5	110	9	3	3	2236.50	98.3	75.7	56.4	57.1	×	○	○	○			
	83.33	80	11	3	3	2247.13	95.9				×						
	83.33	80	12	3	3	2370.88	85.5	108.1	79.4	82.5	○				3.38	×	33.1
	83.33	80	12	4	3	2494.63	83.9				○				2.94	×	
	83.33	80	12	5	3	2618.38					○				2.66	×	
○	83.33	80	12	6	3	2742.13	82.2	62.2	66.2		○	○	○	○	2.46	○	30.7
	83.33	90	11	3	3	2278.93	90.8				○				2.83	×	
○	83.33	90	11	4	3	2402.68	89.7	76.2	64.3	61.2	○	○	○	○	2.49	○	29
	83.33	100	10	3	3	2188.66	100.4	86.3	65.7	66.9	×	○	○	○	2.47	○	
○	83.33	100	11	3	3	2312.41	86.9	86.0	65.3	66.6	○	○	○	○	2.37	○	27.5
○	83.33	110	11	3	3	2347.30	83.9	77.7	59.9		○	○	○	○	2.02	○	25.4
	83.33	120	9	3	3	2135.86	112.9				×						
	83.33	120	10	3	3	2259.61	94.9				×						
○	83.33	120	11	3	3	2383.36	81.5	70.8	55.4	55.8	○	○	○	○	1.76	○	23.7
◎	83.33	130	10	3	3	2296.68	92.9	65.1	51.9	51.9	○	○	○	○	1.64	○	22.4
	83.33	130	9	3	3	2172.93	110.8				×					○	
	83.33	140	9	3	3	2210.83	109.1				×					○	
○	83.33	140	10	3	3	2334.58	91.2	60.1	52.0	51.4	○				1.48	○	21.2
	83.33	150	9	3	3	2249.45	107.7				×					○	
○	83.33	150	10	3	3	2373.20	89.8	55.7	52.0	51.4	○	○	○	○	1.34	○	20.2

web幅125mmについての検討は、web間隔が広いためT活荷重載荷点において上フランジに大きな応力が発生するため、上フランジを最大版厚12mmにしても許容応力に達しない。このことから、web間隔125mmはweb間隔83.33mmの最適自重を下回らないと考える。

版厚	web幅50	web幅62.5	web幅83.33
80			2742
90		2383	2403
100		2309	2312
110	4589	2360	2347
120	4290		2383
130	4199		2297
140	4315		2335
150			2373



web幅	自重
50	4199
62.5	2309
83.33	2297

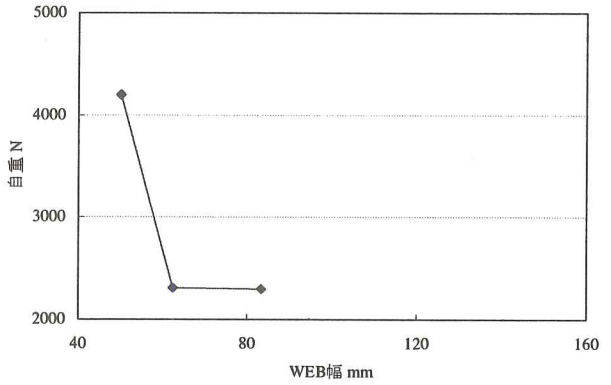


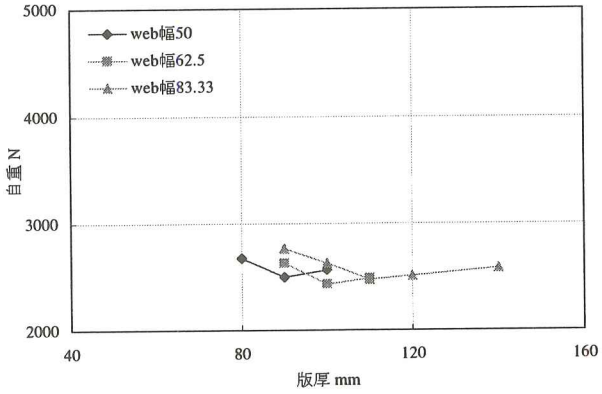
表-7.2.8（b）　形状最適化解析

ALUM2

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	von-Mises応力度(N/mm^2)				許容応力度照査				たわみ		せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	(mm)	照査	txy
	50	80	11	3	3	2432.973	90	104	74	76	○	○	○	○	3.04	×	
	50	80	10	3	3	2309.223	103	105	75	77	×	○	○	○			
○	50	80	11	5	3	2680.473	88.23	68.61	56.6	54.1	○	○	○	○	2.39	○	
○	50	90	11	3	3	2496.95	85	92	66	67	○	○	○	○	2.46	○	
	50	90	10	3	3	2373.20	98	92	67	68	×	○	○	○			
	50	100	9	3	3	2315.14	112	82	60	62	×	○	○	○			
	50	100	10	3	3	2438.89	95	82	60	61	×	○	○	○			
○	50	100	11	3	3	2562.64	82	82	59	61	○	○	○	○	2.04	○	
○	62.5	90	12	4	3	2630.86	82.2	70.7	57.0	55.9	○	○	○	○	2.21	○	22.6
	62.5	90	12	3	3	2507.11	82.9	89.4	66.2	68.4	○	○	○	○	2.53	×	
	62.5	90	11	3	3	2383.36	94.6	89.7	66.7	68.8	×	○	○	○			
◎	62.5	100	11	3	3	2432.97	91.4	80.2	60.1	61.7	○	○	○	○	2.18	○	21.45
	62.5	100	10	3	3	2309.22	106.6	80.5	60.6	62.2	×	○	○	○			
	62.5	110	10	3	3	2360.25	103.9	72.7	55.1	56.5	×	○	○	○			
○	62.5	110	11	3	3	2484.00	88.8	72.4	54.7	56.1	○	○	○	○	1.86	○	19.9
	62.5	110	12	3	3	2607.75	77.2	72.1	54.5	55.7	○	○	○	○			
	83.33	90	11	3	3	2278.93	111.1				×						
	83.33	90	12	3	4	2584.83	94.6				×				2.63	×	
	83.33	90	12	4	4	2708.58	94.0				×				2.33	○	
○	83.33	90	12	3	5	2766.97	92.4	84.6	61.1	63.1	○	○	○	○	2.47	○	19.2
	83.33	100	11	3	3	2312.41	108.1				×				2.52	×	
	83.33	100	12	3	3	2436.16	93.5				×						33.1
	83.33	100	12	4	3	2559.91	93.1				×						
○	83.33	100	12	3	4	2629.46	91.7	78.5	57.2	60.1	○	○	○	○	2.21	○	21.4
○	83.33	110	12	3	3	2471.05	91.2	74.1	57.8	59.5	○	○	○	○	2.06	○	25
	83.33	110	11	3	3	2347.30	105.8				×						
	83.33	120	11	3	3	2383.36	103.9				×				1.92	○	
○	83.33	120	12	3	3	2507.11	89.4	67.6	54.7	54.7	○	○	○	○	1.81	○	23.4
	83.33	140	11	3	3	2458.33	101.0				×					○	
○	83.33	140	12	3	3	2582.08	86.6	57.3	51.9	51.3	○	○	○	○	1.45	○	20.8

web幅125mmについての検討は、web間隔が広いためT活荷重載荷点において上フランジに大きな応力が発生するため、上フランジを最大版厚12mmにしても許容応力に達しない。このことから、web間隔125mmはweb間隔83.33mmの最適自重を下回らないと考える。

版厚	web幅50	web幅62.5	web幅83.33
80	2680		
90	2497	2631	2767
100	2563	2433	2629
110		2484	2471
120			2507
140			2582



web幅	自重
50	2497
62.5	2433
83.33	2471

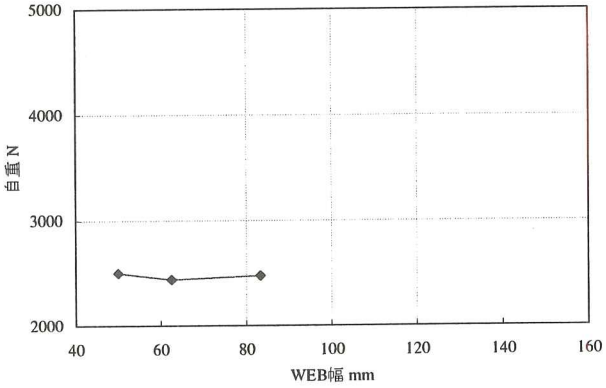


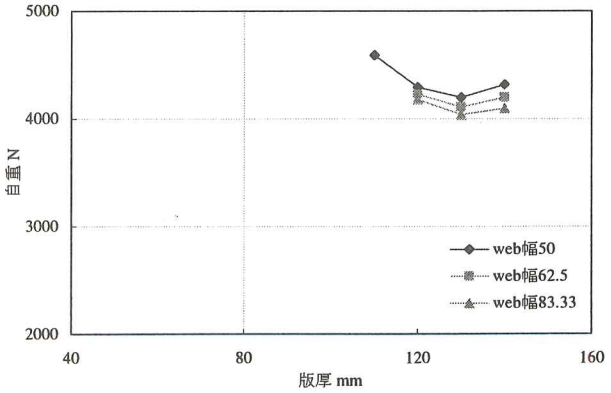
表-7.2.8（c）　形状最適化解析

ALUM3

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	von-Mises応力度(N/mm²)				許容応力度照査				たわみ		せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	(mm)	照査	txy
	50	110	10	3	3	4176.53	84.7				○				4.91	×	
	50	110	10	4	3	4382.78	83.6				○				4.31	×	
	50	110	9	5	3	4382.78	96.0				×				4.05	○	
○	50	110	10	5	3	4589.03	82.8	66.2	53.2	52.6	○	○	○	○	3.89	○	17.5
	50	120	8	3	3	3877.50	111.6				×						
	50	120	9	3	3	4083.75	93.9				×						
○	50	120	10	3	3	4290.00	81.1	88.2	66.1	66.8	○	○	○	○	4.15	○	17.1
	50	130	10	3	3	4404.89	78.2	77.3	61.0	61.4	○	○	○	○	3.54	○	16.3
○	50	130	9	3	3	4198.64	90.8	77.9	61.4	61.8	○	○	○	○	3.66	○	16.3
	50	130	8	3	3	3992.39	108.4	78.5	62.0	62.2	×	○	○	○	3.83	○	16.2
	50	140	8	3	3	4108.43	105.6				×						
○	50	140	9	3	3	4314.68	88.3	74.4	57.0	57.3	○	○	○	○	3.18	○	15.6
	62.5	120	9	3	3	3814.48	102.9	88.0	68.2	69.0	×	○	○	○			
	62.5	120	10	3	3	4020.73	88.0	87.7	67.8	68.6	○	○	○	○	4.33	×	
	62.5	120	11	3	3	4226.98	76.9	87.3	67.4	68.3	○	○	○	○	4.2	×	
○	62.5	120	10	4	3	4226.98	87.1	70.4	56.6	57.0	○	○	○	○	3.8	○	18.24
	62.5	120	12	3	3	4433.23	68.5	87.0	67.1	68.0	○	○	○	○	4.09	○	18.7
	62.5	130	9	3	3	3903.01	99.9	80.5	62.9	63.4	×	○	○	○			
○	62.5	130	10	3	3	4109.26	85.1	80.2	62.5	63.1	○	○	○	○	3.72	○	17.7
○	62.5	140	10	3	3	4199.09	82.8	73.8	57.9	58.3	○	○	○	○	3.23	○	16.8
	62.5	140	9	3	3	3992.84	97.4	74.0	58.3	58.7	×	○	○	○	3.36	○	16.8
	83.33	120	11	3	3	3972.27	88.0	90.0	71.9	73.0	○	○	○	○	4.53	×	
	83.33	120	12	3	3	4178.52									4.39	×	
○	83.33	120	11	4	3	4178.52	87.1	71.7	60.5	60.6	○	○	○	○	3.95	○	22.7
	83.33	120	10	4	3	3972.27	100.8	71.9	60.9	60.8	×	○	○	○	4.12	○	
	83.33	130	10	3	3	3827.79	98.9	82.7	66.8	67.4	×	○	○	○	4.05	○	22
◎	83.33	130	11	3	3	4034.04	85.4	82.5	66.4	67.1	○	○	○	○	3.9	○	22
	83.33	140	10	3	3	3890.97	96.7	76.2	62.1	62.4	×	○	○	○	3.54	○	
○	83.33	140	11	3	3	4097.22	83.2	76.0	61.7	62.2	○	○	○	○	3.4	○	20.9

web幅125mmについての検討は、web間隔が広いためT活荷重載荷点において上フランジに大きな応力が発生するため、上フランジを最大版厚12mmにしても許容応力に達しない。このことから、web間隔125mmはweb間隔83.33mmの最適自重を下回らないと考える。

版厚	web幅50	web幅62.5	web幅83.33
110	4589		
120	4290	4227	4179
130	4199	4109	4034
140	4315	4199	4097



web幅	自重
50	4199
62.5	4109
83.33	4034

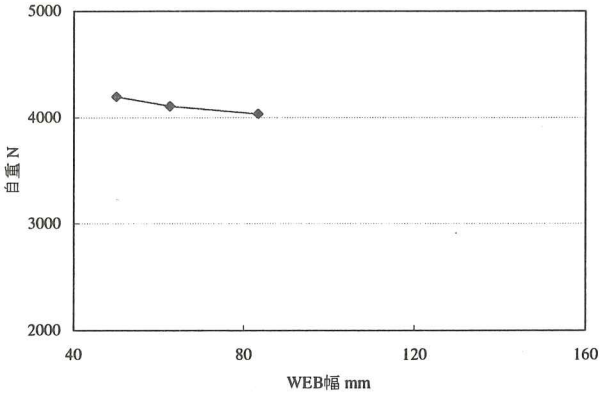


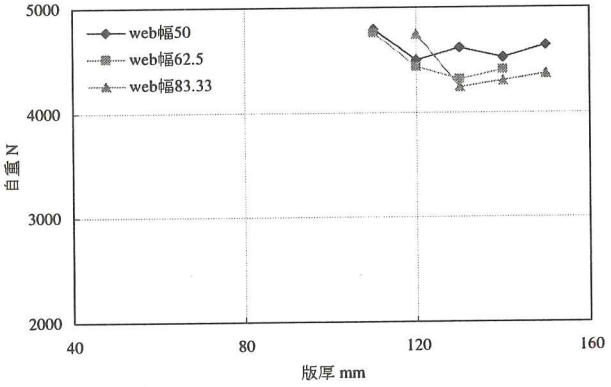
表-7.2.8（d）　形状最適化解析

ALUM4

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	von-Mises応力度(N/mm²)				許容応力度照査				たわみ		せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	ufg	lfg	web(top)	web(bot)	(mm)	照査	txy
	50	110	11	3	3	4382.78	85.8				○				4.79	×	
	50	110	11	4	3	4589.03									4.19	×	
○	50	110	11	5	3	4795.28	84.6	63.2	53.1	51.9	○	○	○	○	3.78	○	17.2
○	50	120	11	3	3	4496.25	82.8	85.5	65.2	66.1	○	○	○	○	4.04	○	16.8
	50	130	10	3	3	4404.89	93.2				×						
○	50	130	11	3	3	4611.14	80.3	78.1	60.1	60.7	○	○	○	○	3.46	○	16
○	50	140	10	3	3	4520.93	91.1	72.1	56.2	56.6	○	○	○	○	3.11	○	15.4
	50	140	9	3	3	4314.68	108.2				×						
	50	150	8	3	3	4225.41	129.8				×						
	50	150	9	3	3	4431.66	106.3				×						
○	50	150	10	3	3	4637.91	89.2	66.7	52.5	52.8	○	○	○	○	2.74	○	14.8
	62.5	110	11	3	3	4140.01	95.3	93.3	72.8	74.6	×	○	○	○			
	62.5	110	12	3	3	4346.26	83.6	93.0	72.5	74.2	○	○	○	○	4.88	×	19.7
	62.5	110	12	4	3	4552.51									4.24	×	
	62.5	110	12	3	4	4763.76	82.1	88.4	65.8	68.0	○	○	○	○	4.53	×	
	62.5	110	11	4	3	4346.26									4.38	×	
	62.5	110	11	5	3	4552.51	94.2	62.5	54.3	52.7	×	○	○	○	3.96	○	
○	62.5	110	12	5	3	4758.76	82.3	62.3	53.8	52.4	○	○	○	○	3.82	○	18.9
	62.5	120	11	3	3	4226.98	92.5	84.8	66.5	67.9	○	○	○	○	4.25	×	
○	62.5	120	12	3	3	4433.23	80.8	84.5	66.3	67.5	○	○	○	○	4.12	○	18.5
○	62.5	130	11	3	3	4315.51	90.2	77.6	61.3	62.3	○	○	○	○	3.65	○	17.6
	62.5	130	10	3	3	4109.26	105.4	77.9	61.6	62.8	×	○	○	○	3.8	○	
	62.5	140	10	3	3	4199.09	103.4	71.7	57.2	58.1	×	○	○	○	3.31	○	
○	62.5	140	11	3	3	4405.34	88.2	71.4	56.9	57.7	○	○	○	○	3.18	○	16.7
	83.33	120	11	3	3	3972.27	109.3	87.1	70.2	72.4	×	○	○	○			
	83.33	120	12	3	3	4178.52	94.7				×						
	83.33	120	12	6	3	4797.27	93.6				×						
	83.33	120	12	3	6	5263.30	88.9				○				3.74	○	
	83.33	120	12	3	4	4540.11	93.1				×				4.19	×	
○	83.33	120	12	4	4	4746.36	92.7	66.1	53.2	55.2	○	○	○	○	3.69	○	10.3
◎	83.33	130	12	3	3	4240.29	92.6	79.5		66.2	○	○		○	3.89	○	21.6
	83.33	140	11	3	3	4097.22	105.4	73.6	60.2	61.6	×	○	○	○			
○	83.33	140	12	3	3	4303.47	90.8	73.3	60.1	61.3	○	○	○	○	3.41	○	20.5
	83.33	150	11	3	3	4161.58	103.9				×						
○	83.33	150	12	3	3	4367.83	89.3	68.0	56.1	57.0	○	○	○	○	3.02	○	19.6

web幅125mmについての検討は、web間隔が広いためT活荷重載荷点において上フランジに大きな応力が発生するため、上フランジを最大版厚12mmにしても許容応力に達しない。このことから、web間隔125mmはweb間隔83.33mmの最適自重を下回らないと考える。

版厚	web幅50	web幅62.5	web幅83.33
110	4795	4759	
120	4496	4433	4746
130	4611	4316	4240
140	4521	4405	4303
150	4638		4368



web幅	自重
50	4496
62.5	4316
83.33	4240

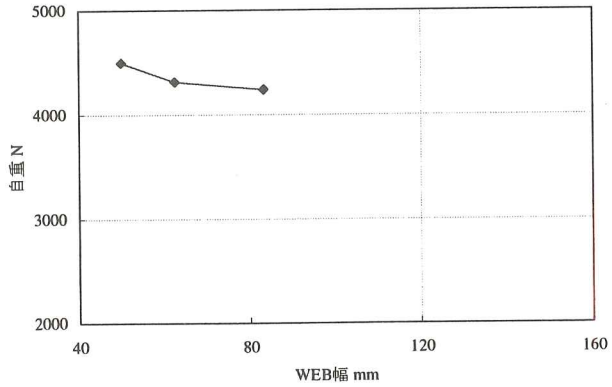


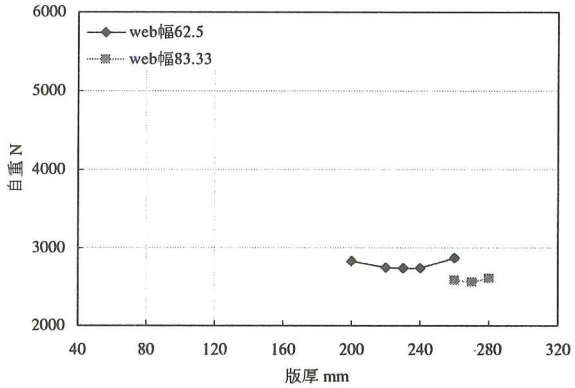
表-7.2.8（e）　形状最適化解析

FRP1

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	たわみ		SX応力度(N/mm²)			SY応力度(N/mm²)			SX許容応力度照査			SY許容応力度照査			せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	(mm)	照査	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	txy
	62.5	220	16	16	4	3292.82	2.29	○													
	62.5	220	9	9	6	2821.07	2.43	○													
	62.5	220	7	7	7	2797.02	2.62	×													
	62.5	220	8	8	6	2679.86	2.63	×													
○	62.5	220	9	8	6	2750.47	2.49	○	16.6	10.7	1.4	20.6	20.9	19.9	○	○	○	○	○	○	7.0
	62.5	230	8	8	6	2745.17	2.52	×													
	62.5	230	9	8	6	2815.78	2.38	○													
○	62.5	230	9	7	6	2745.17	2.44	○	16.2	11.1	1.3	20.2	21.6	19.7	○	○	○	○	○	○	6.9
	62.5	240	7	7	6	2669.46	2.67	×													
○	62.5	240	8	7	6	2740.07	2.49	○	17.7	10.6	1.2	21.2	21.1	20.1	○	○	○	○	○	○	6.8
	62.5	260	7	7	6	2800.97	2.51	×													
○	62.5	260	8	7	6	2871.58	2.32	○	16.9	9.3	1.0	20.2	19.6	19.2	○	○	○	○	○	○	6.6
	83.33	260	10	6	6	2517.64	2.52	×													
○	83.33	260	11	6	6	2588.24	2.38	○	13.8	11.1	2.02	15.8	20.6	18.49	○	○	○	○	○	○	8.2
	83.33	270	10	8	6	2707.34	2.33	○	14.2	8.3	1.8	17.8	17	18.4	○	○	○	○	○	○	8.0
	83.33	270	10	7	6	2636.73	2.39	○	15.0	9.3	1.8	17.9	18.4	18.6	○	○	○	○	○	○	8.0
◎	83.33	270	10	6	6	2566.13	2.45	○	15.0	10.5	1.9	18.1	20.0	18.8	○	○	○	○	○	○	8.1
	83.33	280	10	8	6	2755.99	2.28	○													
	83.33	280	9	6	6	2544.17	2.56	×													
○	83.33	280	10	6	6	2614.78	2.38	○	14.76	9.95	1.71	17.76	19.35	18.46	○	○	○	○	○	○	8.0

web幅125mmについての検討は、web間隔が広いためT活荷重載荷点において上フランジに大きな応力が発生するため、許容応力に達するために非常に大きな版厚を設定しなくてはならない。このことから、web間隔125mmはweb間隔83.33mmの最適自重を下回らないと考える。

版厚	web幅62.5	web幅83.33
200	2832	
220	2750	
230	2745	
240	2740	
260	2872	2588
270		2566
280		2615



web幅	自重
62.5	2740
83.33	2566

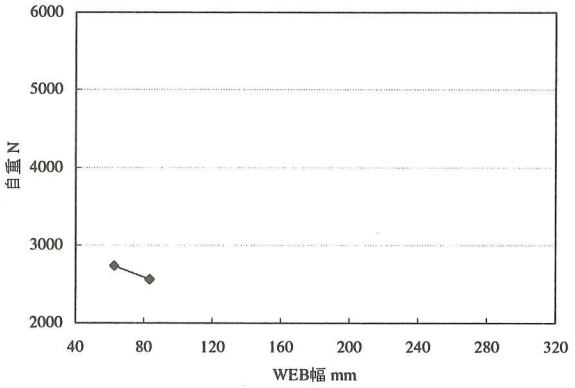


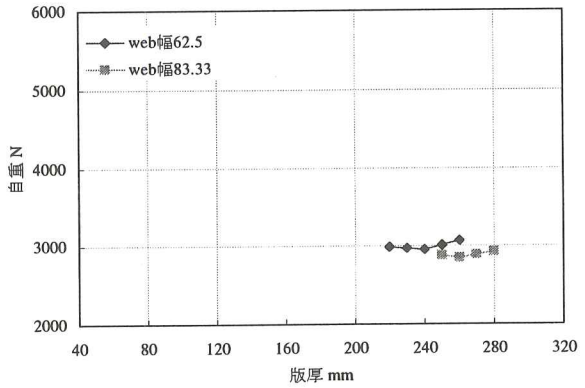
表-7.2.8（f）　形状最適化解析

FRP2

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	たわみ		SX応力度(N/mm²)			SY応力度(N/mm²)			SX許容応力度照査			SY許容応力度照査			せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	(mm)	照査	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	txy
	62.5	220	17	4	4	2516.16	3.12	×													
	62.5	220	17	5	4	2586.77	2.97	×													
	62.5	220	17	4	5	2774.53	2.76	×													
	62.5	220	17	5	5	2845.13	2.62	×													
	62.5	220	17	7	5	2986.34	2.43	○	22.0						×						
○	62.5	220	18	6	5	2986.34	2.46	○	20.1	11.7	1.8	19.8	24.0	18.9	○	○	○	○	○	○	8.4
	62.5	230	17	5	5	2899.55	2.51	×													
○	62.5	230	18	5	5	2970.16	2.46	○	19.8	12.9	1.6	19.6	25.6	20.1	○	○	○	○	○	○	8.3
○	62.5	240	17	5	5	2954.14	2.42	○	21.5	12.0	1.5	20.3	24.7	19.5	○	○	○	○	○	○	8.2
	62.5	240	16	5	5	2883.53	2.48	○	23.8						×						
○	62.5	250	17	5	5	3008.87	2.33	○	21.2	11.4	1.4	19.9	23.7	18.9	○	○	○	○	○	○	8.0
	62.5	250	16	5	5	2938.26	2.39	○	23.5						×						
○	62.5	260	17	5	5	3063.73	2.25	○	21.0	11.3	1.3	19.6	22.8	18.3	○	○	○	○	○	○	7.9
	62.5	260	16	5	5	2993.12	2.32	○	23.3						×						
	83.33	250	18	5	5	2740.28	2.61	×							○						
	83.33	250	19	5	5	2810.88	2.53	×							○						
○	83.33	250	20	5	5	2881.49	2.46	○	19.9	13.4	2.7	18.4	23.5	18.1	○	○	○	○	○	○	9.6
◎	83.33	260	19	5	5	2851.15	2.45	○	21.5	12.6	2.5	19.0	22.7	17.7	○	○	○	○	○	○	9.5
	83.33	260	18	5	5	2780.54	2.53	×							○						
○	83.33	270	19	5	5	2891.56	2.38	○	21.4	11.8	2.3	18.7	21.9	17.1	○	○	○	○	○	○	9.4
	83.33	270	18	5	5	2820.96	2.46	○	23.5						×						
	83.33	280	18	5	5	2861.50	2.40	○	22.0						×						
○	83.33	280	19	5	5	2932.10	2.31	○	21.2	11.1	2.1	18.4	21.1	16.6	○	○	○	○	○	○	9.3

web幅125mmについての検討は、web間隔が広いためT活荷重載荷点において上フランジに大きな応力が発生するため、許容応力に達するために非常に大きな版厚を設定しなくてはならない。このことから、web間隔125mmはweb間隔83.33mmの最適自重を下回らないと考える。

版厚	web幅62.5	web幅83.33
220	2986	
230	2970	
240	2954	
250	3009	2881
260	3064	2851
270		2892
280		2932



web幅	自重
62.5	2954
83.33	2851

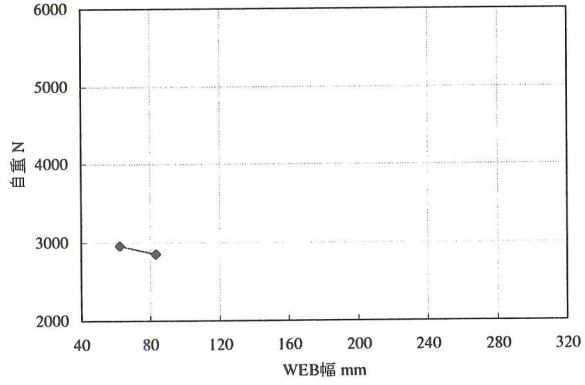
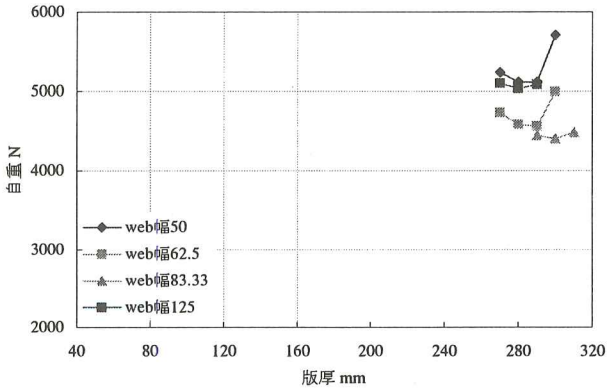


表-7.2.8（g）　形状最適化解析

FRP3

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	たわみ		SX応力度(N/mm²)			SY応力度(N/mm²)			SX許容応力度照査			SY許容応力度照査			せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	(mm)	照査	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	txy
	50	270	9	6	5	4996.37	4.34	×													
	50	270	10	6	5	5114.04	4.21	×													
○	50	270	10	7	5	5231.72	4.07	○	15.4	7.7	0.5	21.9	20.9	21.6	○	○	○	○	○	○	7.7
	50	280	9	7	5	5229.82	4.02	○													
	50	280	8	7	5	5112.15	4.18	×													
○	50	280	9	6	5	5112.15	4.16	○	16.5	9.3	0.5	23.0	22.5	22.7	○	○	○	○	○	○	7.6
○	50	290	8	6	5	5110.38	4.14	○	18.0	8.8	0.5	24.1	22.0	23.3	○	○	○	○	○	○	7.5
	50	290	7	6	5	4992.70	4.34	×													
	50	300	7	7	6	5942.18	3.36	○	18.9						○						
○	50	300	6	6	6	5706.83	3.96	○	21.9	10.2	0.4	25.9	21.1	22.8	○	○	○	○	○	○	6.0
	62.5	270	9	7	5	4491.79	4.33	×													
	62.5	270	10	7	5	4609.47	4.17	×													
○	62.5	270	10	8	5	4727.14	4.04	○	15.8	10.4	0.8	21.5	22.1	21.2	○	○	○	○	○	○	7.8
	62.5	280	7	5	6	4653.05	4.53	×													
○	62.5	280	9	7	5	4583.59	4.16	○	17.3	11.0	0.8	22.7	23.2	21.9	○	○	○	○	○	○	7.7
	62.5	280	11	8	4	4396.46	4.21	×													
	62.5	290	7	6	5	4322.52	4.63	×													
	62.5	290	8	7	5	4557.87	4.20	×													
	62.5	290	9	7	5	4675.54	3.99	○													
○	62.5	290	9	6	5	4557.87	4.13	○	16.9	11.8	0.7	22.5	24.4	21.7	○	○	○	○	○	○	7.6
	62.5	300	8	7	6	5226.93	3.66	○													
	62.5	300	6	6	6	4873.91	4.34	×													
○	62.5	300	7	6	6	4991.58	4.07	○	20.6	11.7	0.6	23.9	22.7	21.4	○	○	○	○	○	○	6.1
	83.33	290	9	6	6	4321.61	4.24	×													
○	83.33	290	10	6	6	4439.29	4.01	○	16.4	12.5	1.4	20.8	22.9	20.7	○	○	○	○	○	○	7.6
◎	83.33	300	9	6	6	4403.15	4.08	○	18.1	12.0	1.3	21.9	22.4	21.2	○	○	○	○	○	○	7.5
	83.33	300	8	6	6	4285.47	4.39	×													
○	83.33	310	9	6	6	4484.88	3.94	○	17.8	11.5	1.2	21.5	21.6	20.7	○	○	○	○	○	○	7.4
	83.33	310	8	6	6	4367.20	4.24	×													
	125	270	22	6	6	4975.48	4.17	×	22.1						×						
○	125	270	23	6	6	5093.15	4.07	○	20.7	16.3	5.8	18.5	23.0	17.3	○	○	○	○	○	○	8.8
○	125	280	22	6	6	5026.90	4.00	○	21.9	15.5	5.3	19.1	22.2	16.9	○	○	○	○	○	○	8.7
○	125	290	22	6	6	5078.62	3.84	○	21.7	14.8	4.9	18.8	21.5	16.6	○	○	○	○	○	○	8.6
○	125	300	22	6	6	5130.63	3.70	○	21.6	14.1	4.6	18.5	20.9	16.3	○	○	○	○	○	○	8.4
	125	310	21	6	6	5065.22	3.68	○	23.0						×						
○	125	310	22	6	6	5182.89	3.57	○	21.5	13.5	4.2	18.2	20.4	16.1	○	○	○	○	○	○	8.3

版厚	web幅50	web幅62.5	web幅83.33	web幅125
270	5232	4727		5093
280	5112	4584		5027
290	5110	4558	4439	5079
300	5707	4992	4403	
310			4485	



web幅	自重
50	5110
62.5	4558
83.33	4403
125	5131

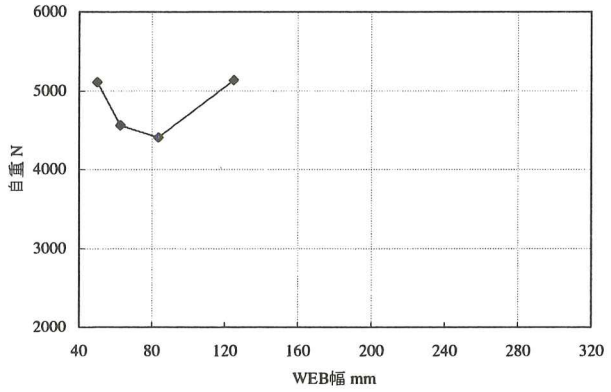
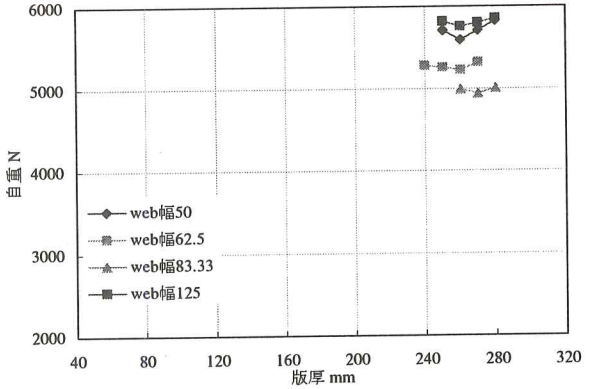


表-7.2.8（h）　形状最適化解析

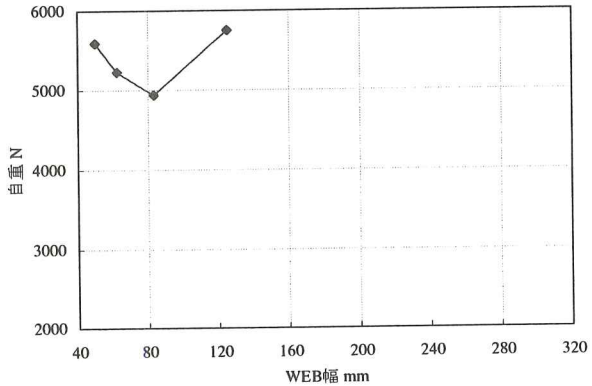
FRP4

照査	web幅	版厚	板厚（mm）			自重	たわみ		SX応力度(N/mm²)			SY応力度(N/mm²)			SX許容応力度照査			SY許容応力度照査			せん断
		(mm)	ufg	lfg	web	(N)	(mm)	照査	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	ufg	lfg	web	txy
	50	250	16	6	5	5588.99	4.17	×													
○	50	250	16	7	5	5706.66	4.01	○	21.3	10.4	0.6	22.6	22.4	19.5	○	○	○	○	○	○	7.6
	50	260	17	5	5	5704.46	4.08	○	19.0						○						
○	50	260	16	5	5	5586.79	4.15	○	21.0	13.6	0.6	22.6	26.3	22.2	○	○	○	○	○	○	7.4
	50	260	15	5	5	5469.11	4.24	×	23.3						×						
○	50	270	16	5	5	5702.42	3.96	○	20.7	12.7	0.5	22.1	25.4	21.5	○	○	○	○	○	○	7.4
	50	280	15	5	5	5700.52	3.88	○	22.7						×						
○	50	280	16	5	5	5818.20	3.80	○	20.4	11.8	0.5	21.7	24.5	20.9	○	○	○	○	○	○	7.3
	62.5	240	17	5	5	4923.56	4.67	×	22.9						×						
	62.5	240	18	5	5	5041.24	4.58	×	20.9						○						
	62.5	240	18	6	5	5158.91	4.34	×													
	62.5	240	18	8	5	5394.26	4.00	○	20.9	10.4	1.0	21.1	22.8	17.9	○	○	○	○	○	○	7.8
○	62.5	240	18	7	5	5276.59	4.16	○	20.9	11.9	1.0	21.3	24.7	19.3	○	○	○	○	○	○	7.8
	62.5	250	18	5	5	5132.46	4.33	×	20.6						○						
○	62.5	250	18	6	5	5250.13	4.12	○	20.6	12.9	0.9	21.1	26.0	20.3	○	○	○	○	○	○	7.7
	62.5	260	17	5	5	5106.22	4.20	×	22.3						×						
	62.5	260	17	6	5	5223.89	4.01	○	22.3						×						
○	62.5	260	18	5	5	5223.89	4.12	○	20.3	14.4	0.9	20.9	27.7	21.6	○	○	○	○	○	○	7.7
	62.5	270	17	5	5	5197.84	4.01	○	22.0						×						
○	62.5	270	18	5	5	5315.52	3.93	○	20.1	13.5	0.8	20.5	26.7	20.9	○	○	○	○	○	○	7.5
	83.33	260	20	5	5	4869.59	4.31	×	21.2						○						
	83.33	260	21	5	5	4987.27	4.24	×													
○	83.33	260	20	6	5	4987.27	4.09	○	21.2	13.9	1.9	20.3	24.5	19.3	○	○	○	○	○	○	9.2
◎	83.33	270	20	5	5	4936.94	4.11	○	20.9	15.6	1.7	20.2	26.3	20.7	○	○	○	○	○	○	9.1
	83.33	270	19	5	5	4819.27	4.20	×													
	83.33	280	20	6	5	5122.19	3.74	○	20.2	12.3	1.6	19.5	23.3	18.1	○	○	○	○	○	○	8.8
	83.33	280	19	6	5	5004.51	3.83	○	22.7						×						
○	83.33	280	20	5	5	5004.51	3.93	○	20.7	14.7	1.6	19.9	25.3	20.0	○	○	○	○	○	○	8.9
	125	250	29	6	6	5697.40	4.36	×	21.8						○						
○	125	250	29	7	6	5815.08	4.16	○	21.8	14.1	6.8	19.0	22.5	16.6	○	○	○	○	○	○	9.1
○	125	260	29	6	6	5748.12	4.15	○	21.7	18.1	6.5	19.2	25.8	19.6	○	○	○	○	○	○	9.1
	125	260	29	5	6	5630.44	4.36	×													
○	125	270	29	6	6	5799.20	3.97	○	21.5	14.6	5.8	18.6	22.8	17.0	○	○	○	○	○	○	8.8
	125	280	28	6	6	5732.95	3.88	○	22.8						×						
○	125	280	29	6	6	5850.62	3.80	○	21.4	13.9	5.4	18.3	22.2	16.4	○	○	○	○	○	○	8.6

版厚	web幅50	web幅62.5	web幅83.33	web幅125
240		5277		
250	5707	5250		5815
260	5587	5224	4987	5748
270	5702	5316	4937	5799
280	5818		5005	5851



web幅	自重
50	5587
62.5	5224
83.33	4937
125	5748



7.2.4 解析結果

各モデルの最適な断面構成、応力度およびたわみを**表-7.2.9**、**表-7.2.10** に示す。ここで、応力度はアルミニウム合金の場合 Von-Mises 相当応力を用い、FRP の場合はσ_xおよびσ_yのどちらか大きい方で判断する。また、たわみは鉛直たわみで判断した。

表-7.2.9 アルミニウムの断面構成と応力度

モデル	版厚 (mm)	WEB間隔 (mm) (角度)	板厚 (mm)			Von-Mises応力度 (MPa)			せん断応力 (MPa)	たわみ (mm)
			Uflg	Lflg	Web	Uflg	Lflg	Web	Web	
ALUM1	130	83.33 (57°)	10	3	3	92.9 ≦93	65.1 ≦113	51.9 ≦113	22.4 ≦64	1.64 ≦2.50
ALUM2	100	62.50 (58°)	11	3	3	91.4 ≦93	80.2 ≦113	61.7 ≦113	21.5 ≦64	2.18 ≦2.50
ALUM3	130	83.33 (57°)	11	3	3	85.4 ≦93	82.5 ≦113	67.1 ≦113	22.0 ≦64	3.90 ≦4.17
ALUM4	130	83.33 (57°)	12	3	3	92.6 ≦93	79.5 ≦113	66.2 ≦113	21.6 ≦64	3.89 ≦4.17

※ウェブ間隔の（角度）は、下デッキとウェブとの角度とする。
※ハッチ部はクリティカルであることを示す。

表-7.2.10 FRP の断面構成と応力度

モデル	版厚 (mm)	WEB間隔 (mm) (角度)	板厚 (mm)			σx (MPa)			σy (MPa)			せん断応力 (MPa)	たわみ (mm)
			Uflg	Lflg	Web	Uflg	Lflg	Web	Uflg	Lflg	Web	Web	
FRP1	270	83.33 (73°)	10	6	6	15.0 ≦22	10.5 ≦22	1.9 ≦22	18.1 ≦76	20.0 ≦76	18.8 ≦76	8.1 ≦10	2.45 ≦2.50
FRP2	260	83.33 (72°)	19	5	5	21.5 ≦22	12.6 ≦22	2.5 ≦22	19.0 ≦76	22.7 ≦76	17.7 ≦76	9.5 ≦10	2.45 ≦2.50
FRP3	300	83.33 (74°)	9	6	6	18.1 ≦22	12.0 ≦22	1.3 ≦22	21.9 ≦76	22.4 ≦76	21.2 ≦76	7.5 ≦10	4.08 ≦4.17
FRP4	270	83.33 (73°)	20	5	5	20.9 ≦22	15.6 ≦22	1.7 ≦22	20.2 ≦76	26.3 ≦76	20.7 ≦76	9.1 ≦10	4.11 ≦4.17

※ウェブ間隔の（角度）は、下デッキとウェブとの角度とする。
※ハッチ部はクリティカルであることを示す。

決定した断面での解析結果（応力図および変形図）を**図-7.2.4(a)～図-7.2.4(v)**に示す。

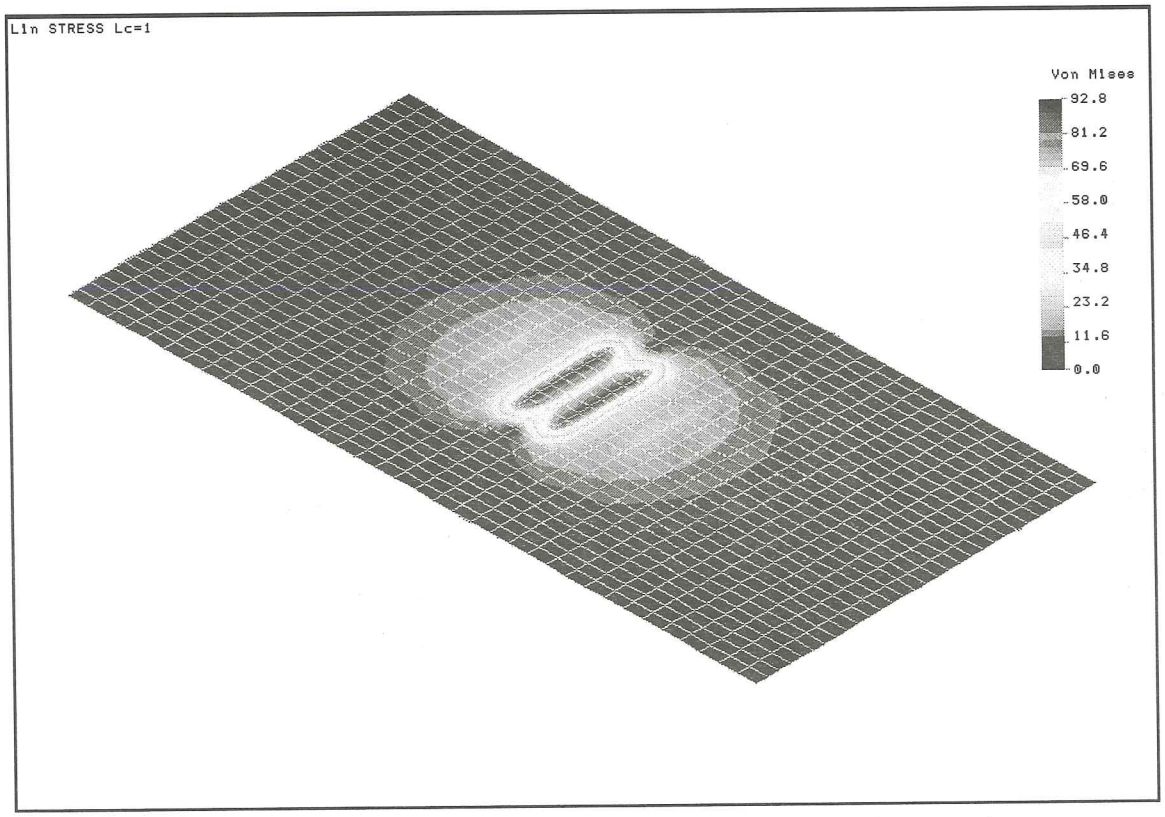


図-7.2.4(a)　ALUM1 上フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

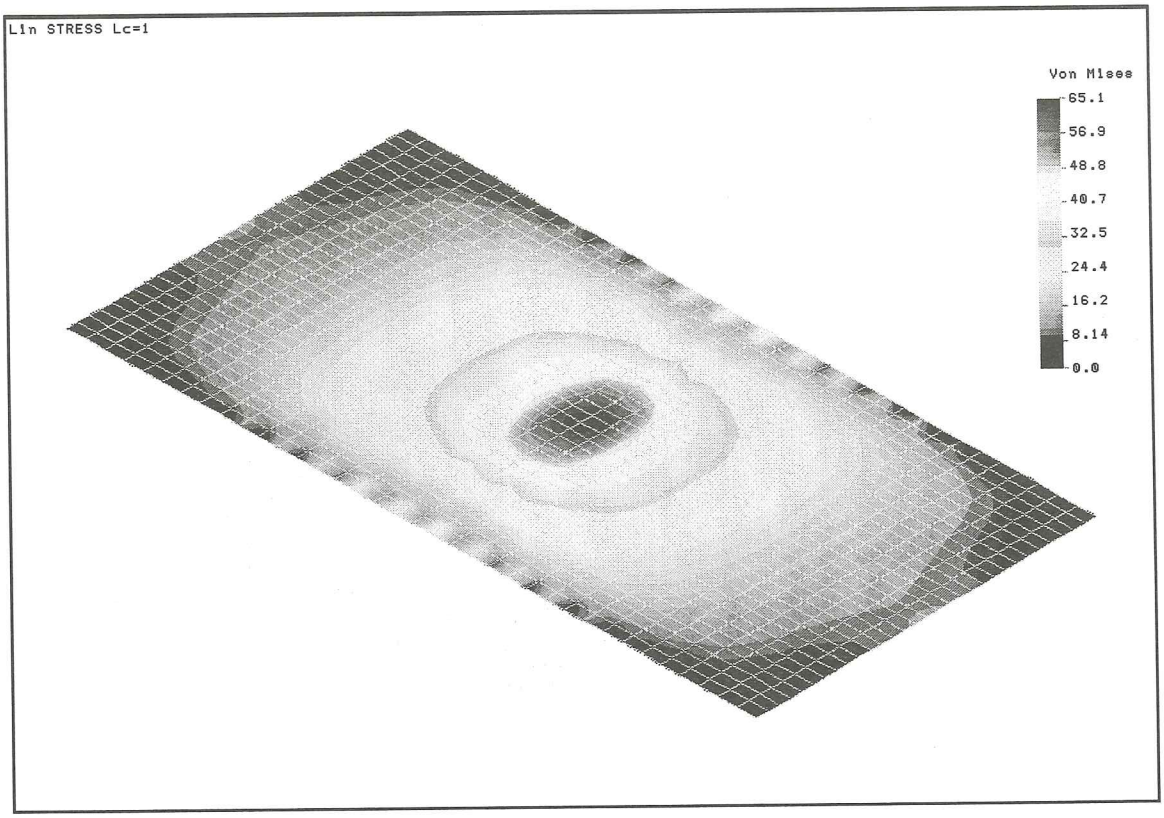


図-7.2.4(b)　ALUM1 下フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

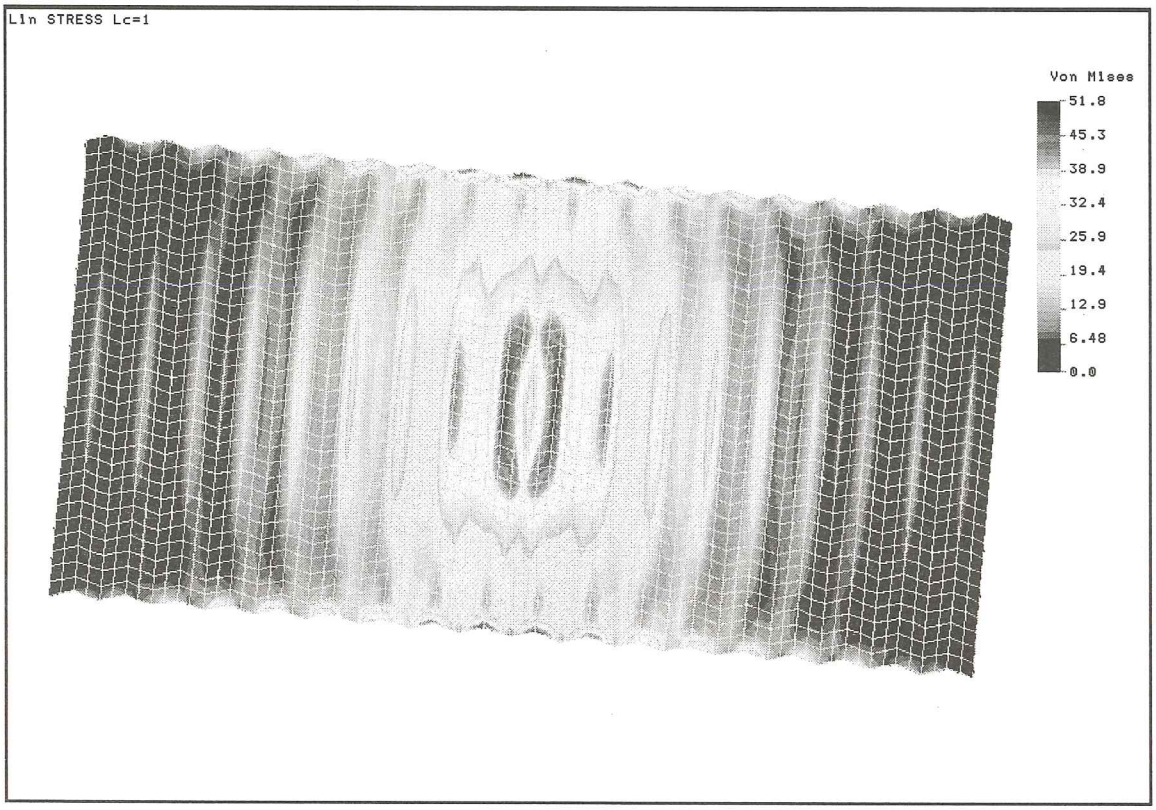


図-7.2.4(c)　ALUM1 ウェブ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

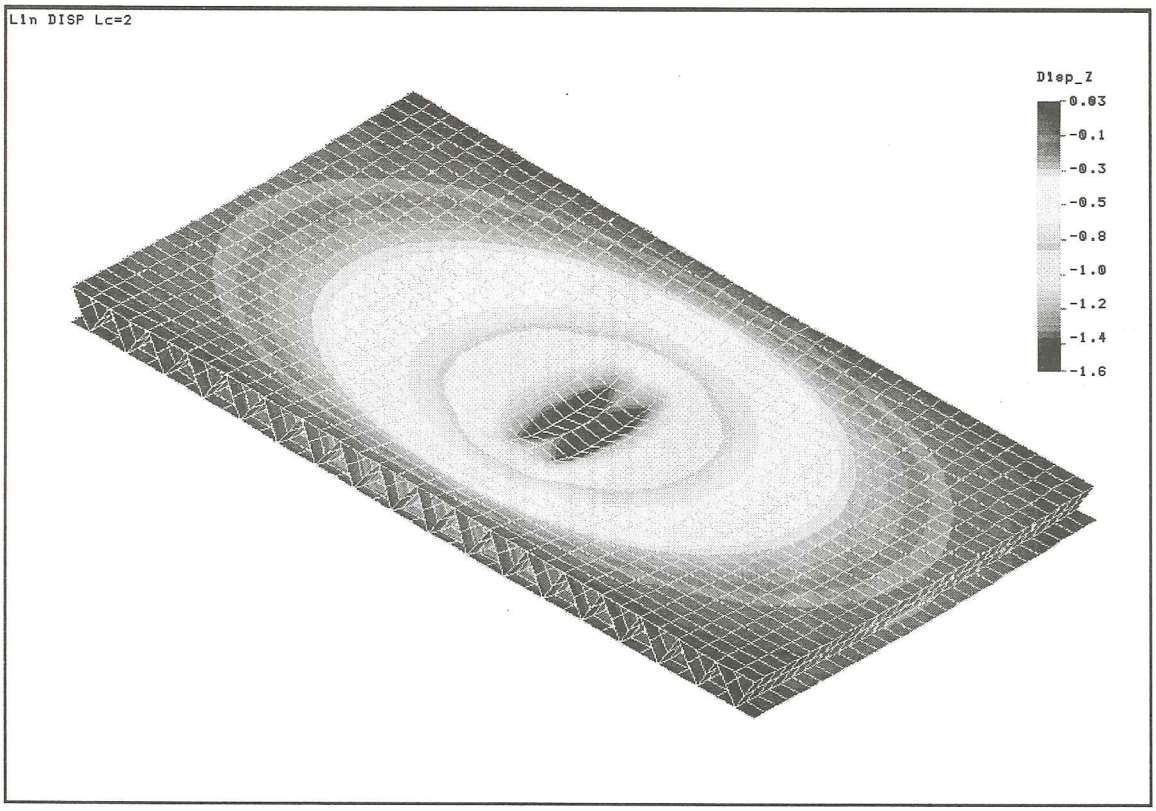


図-7.2.4(d)　ALUM1 変形図　（鉛直変位：mm）

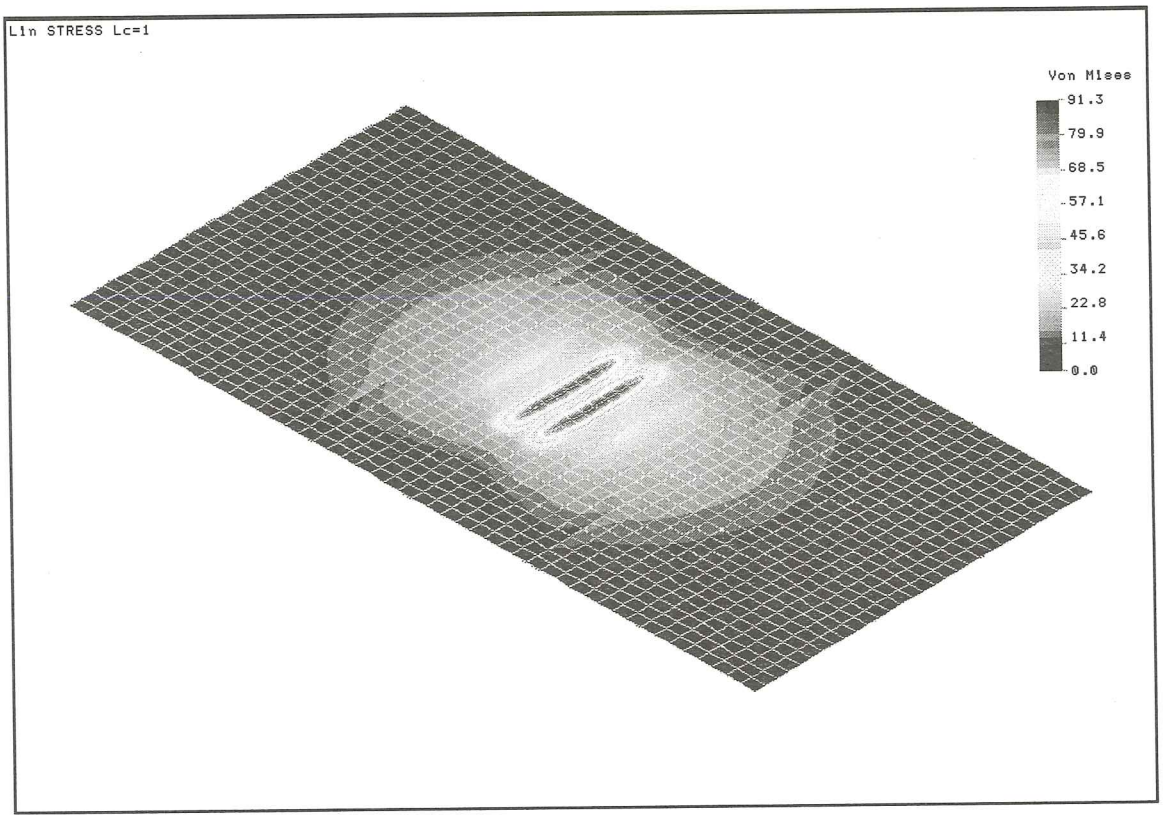


図-7.2.4(e)　ALUM2 上フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

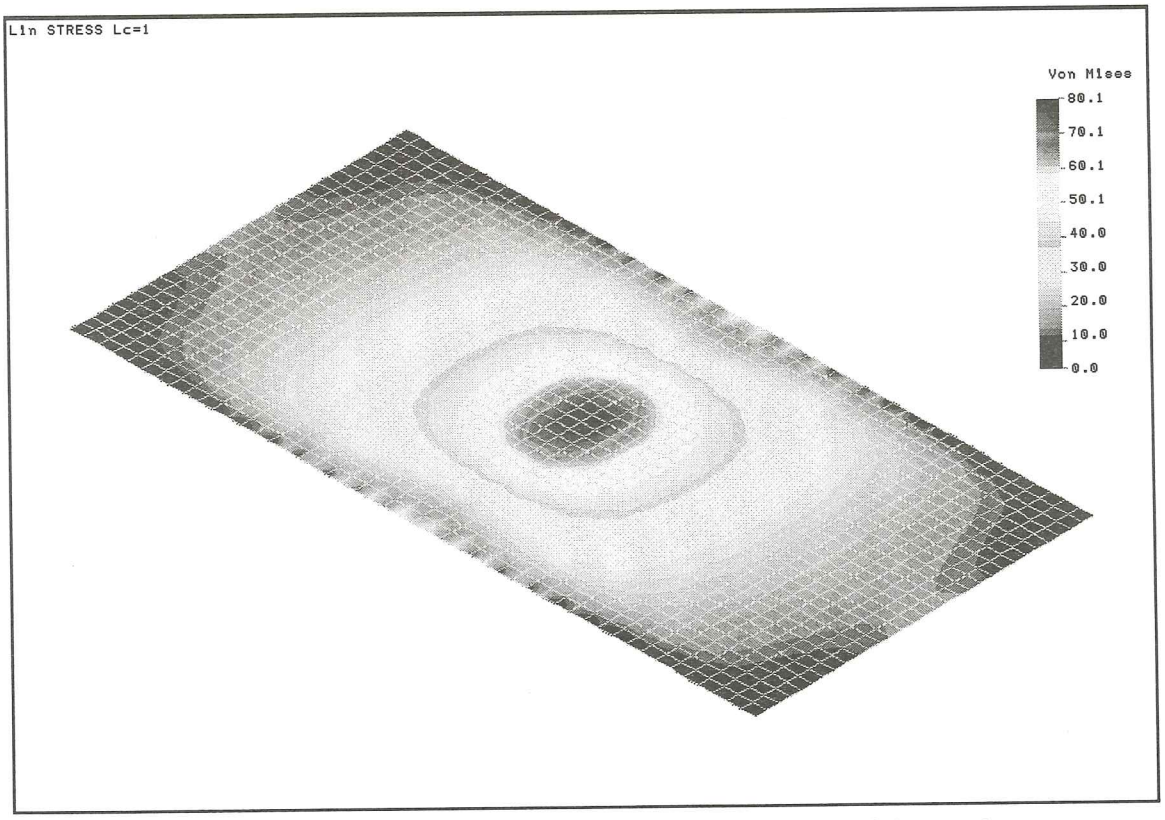


図-7.2.4(f)　ALUM2 下フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

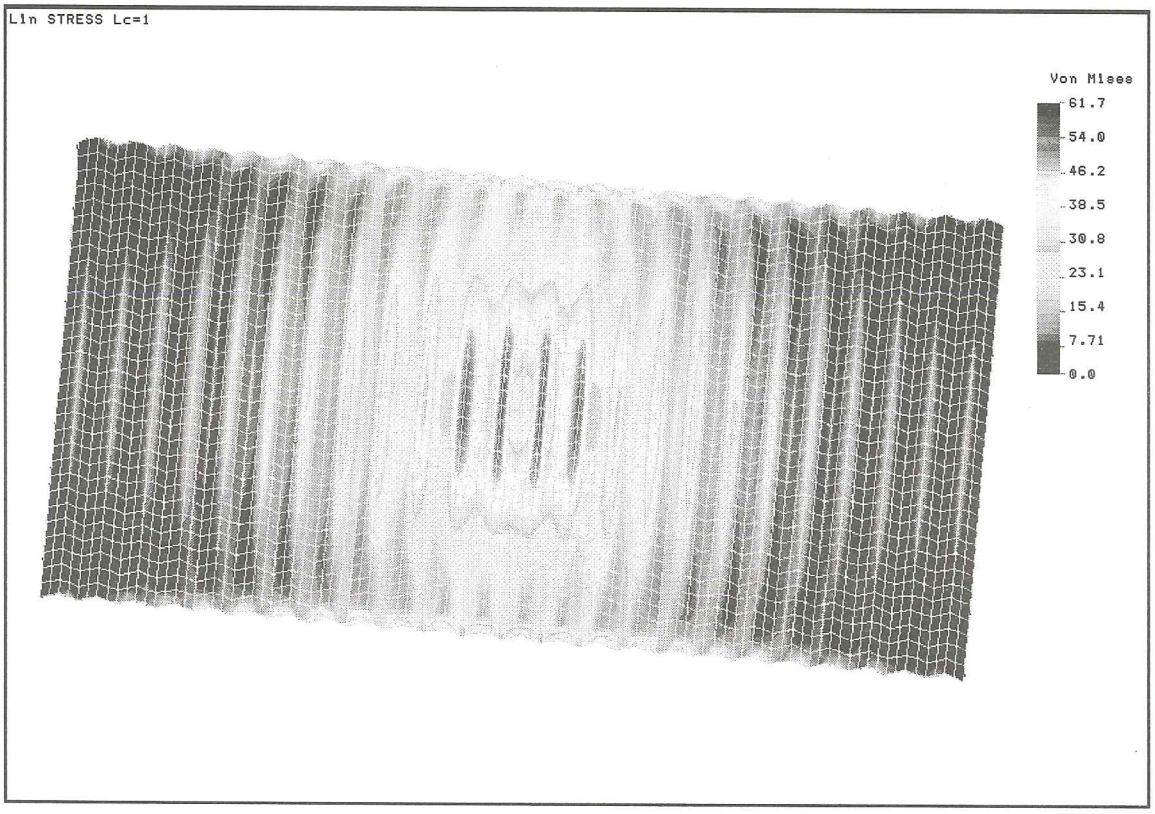


図-7.2.4(g)　ALUM2 ウェブ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

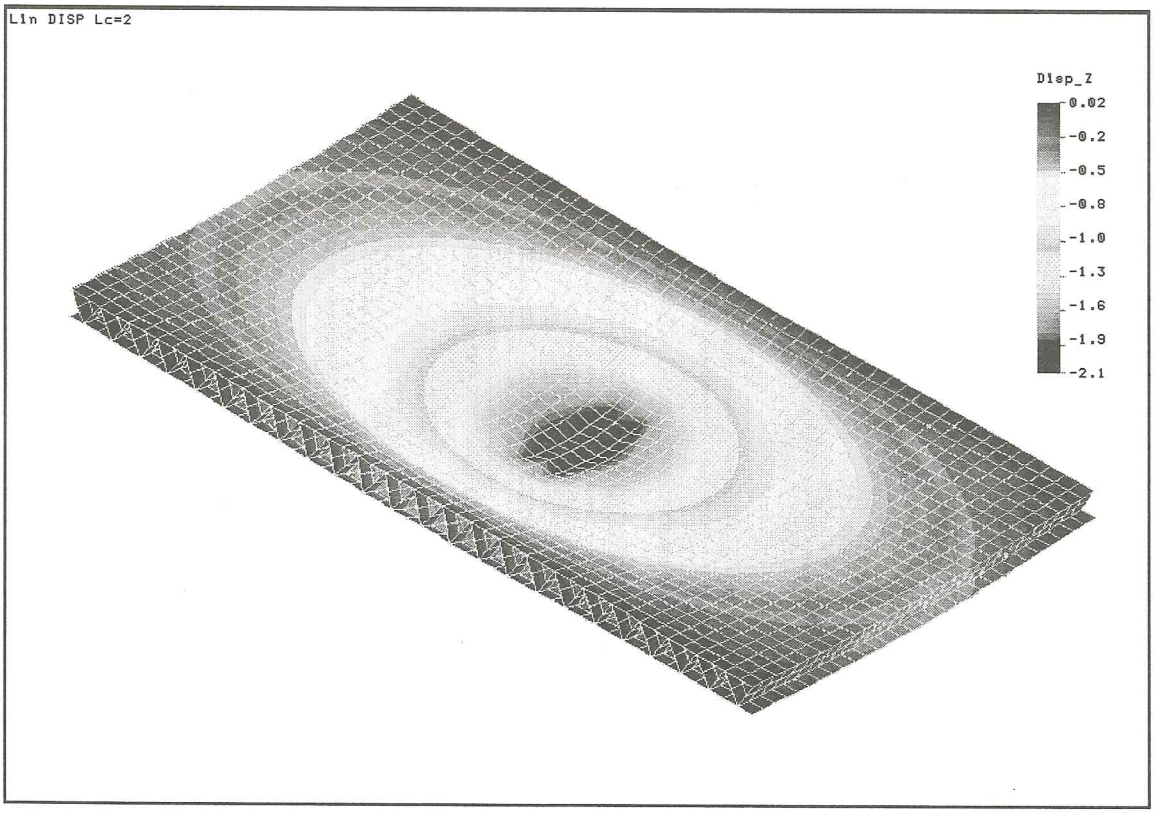


図-7.2.4(h)　ALUM2 変形図　（鉛直変位：mm）

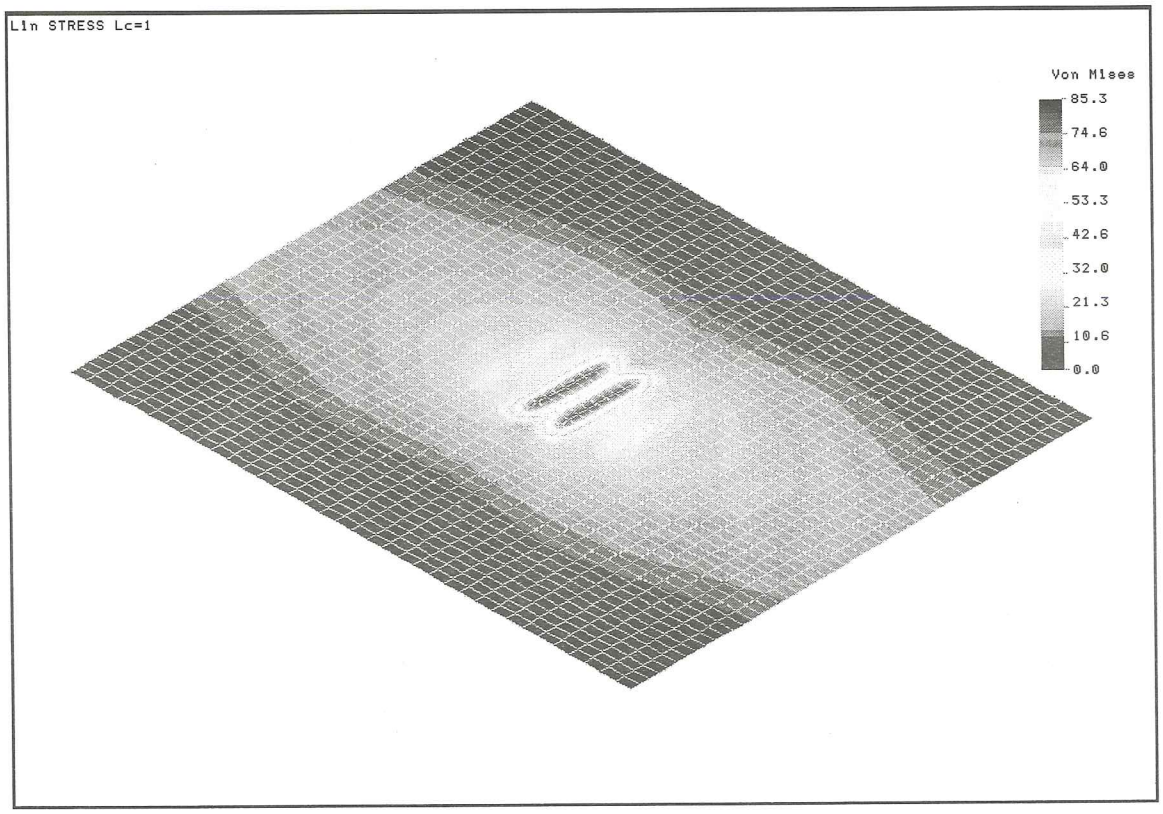


図-7.2.4(i)　ALUM3 上フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

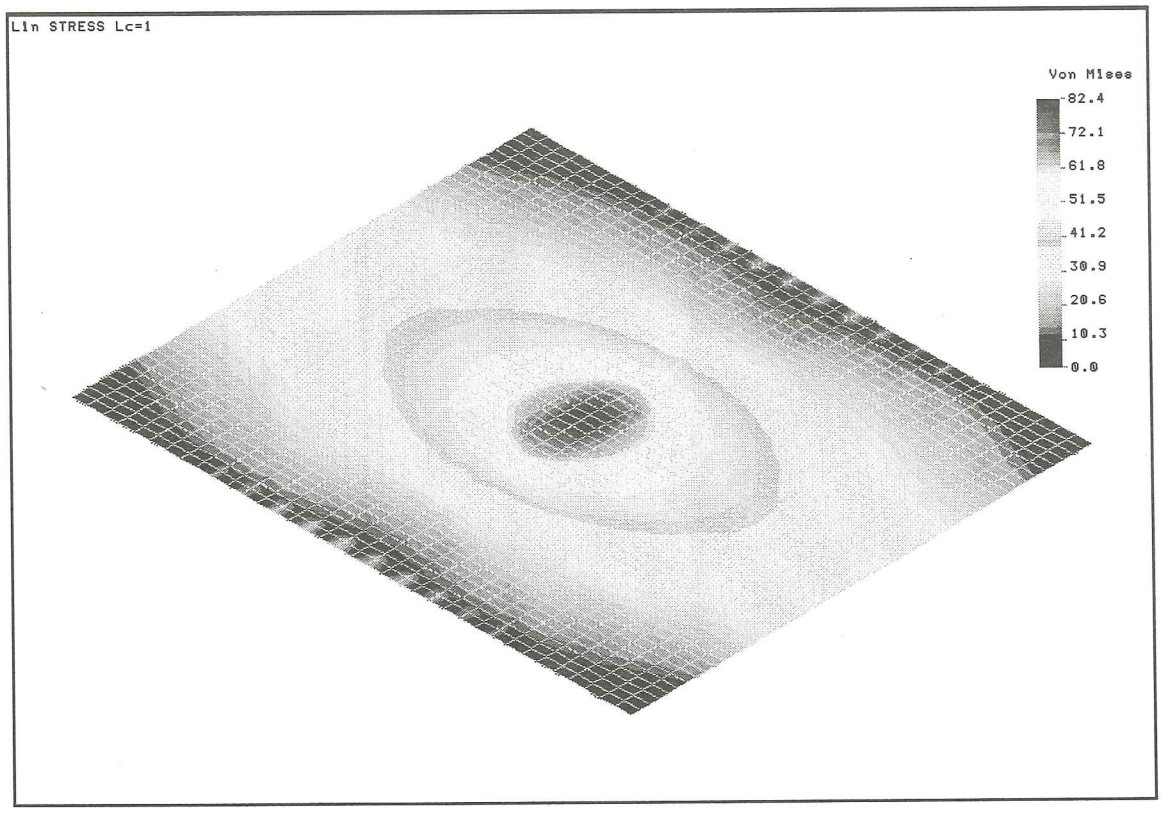


図-7.2.4(j)　ALUM3 下フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

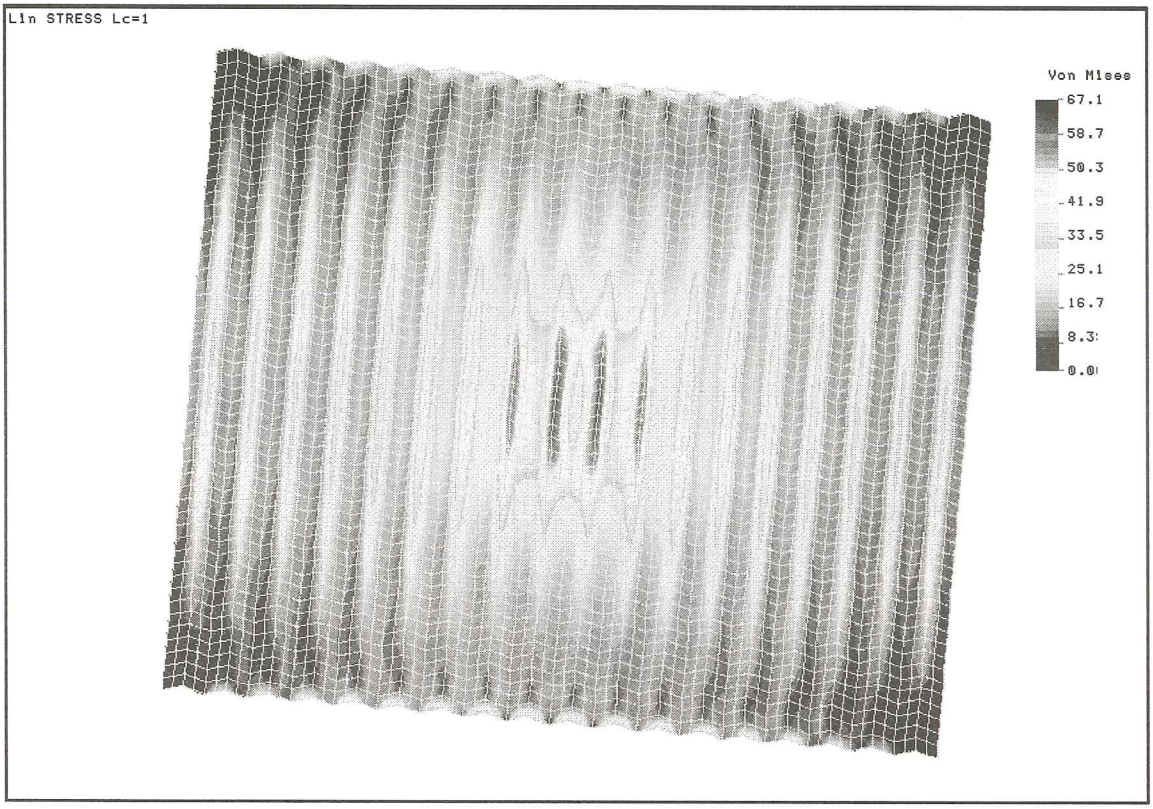


図-7.2.4(k)　ALUM3 ウェブ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

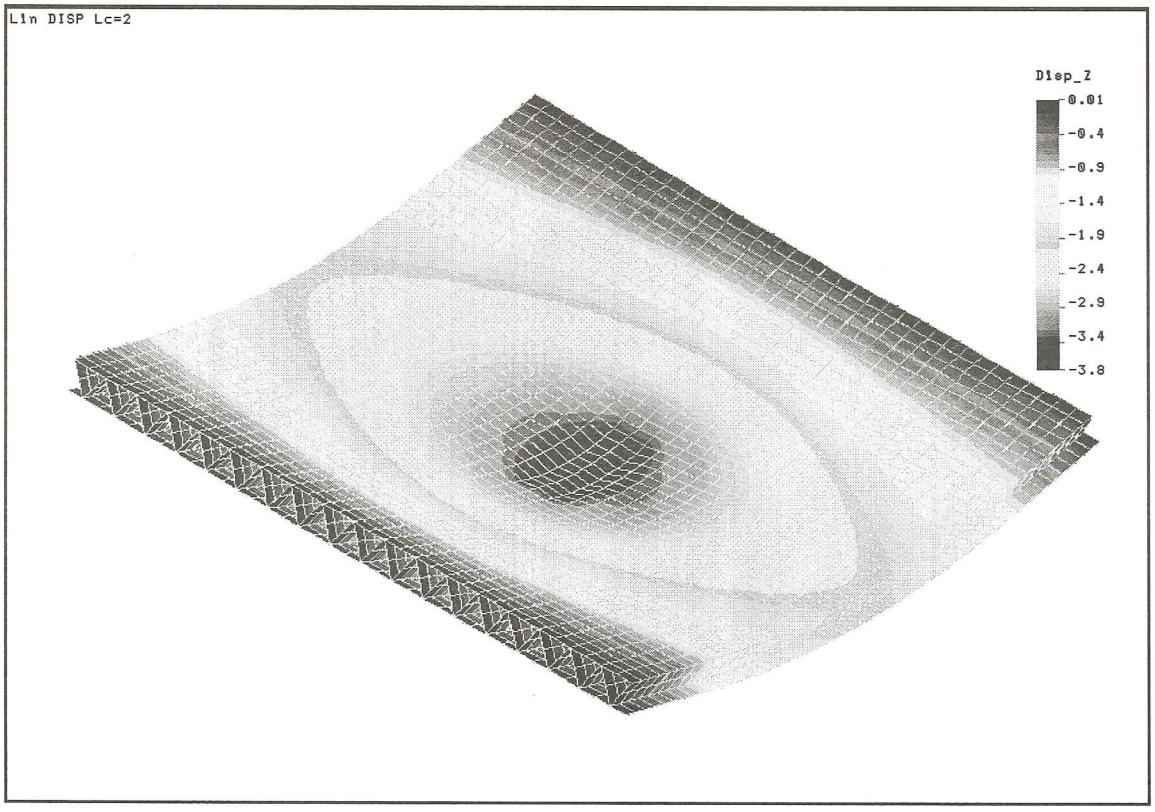


図-7.2.4(l)　ALUM3 変形図　（鉛直変位：mm）

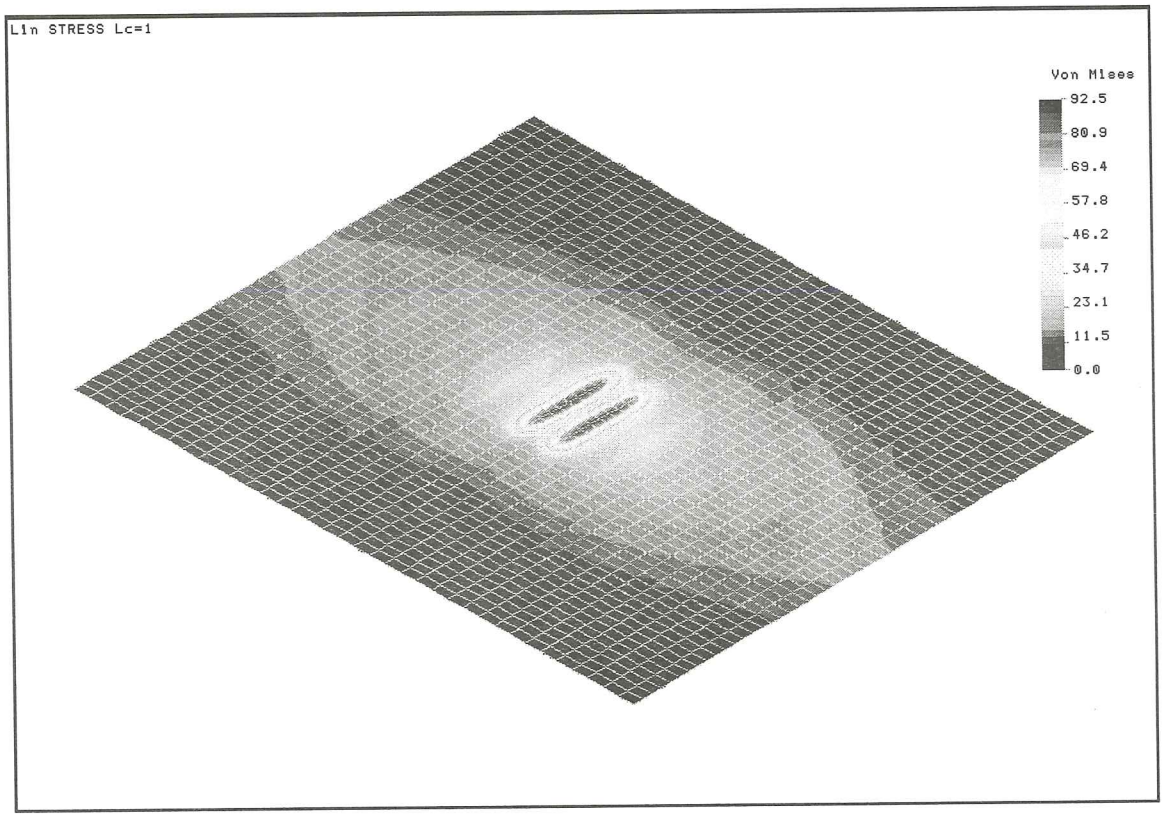


図-7.2.4(m)　ALUM4 上フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

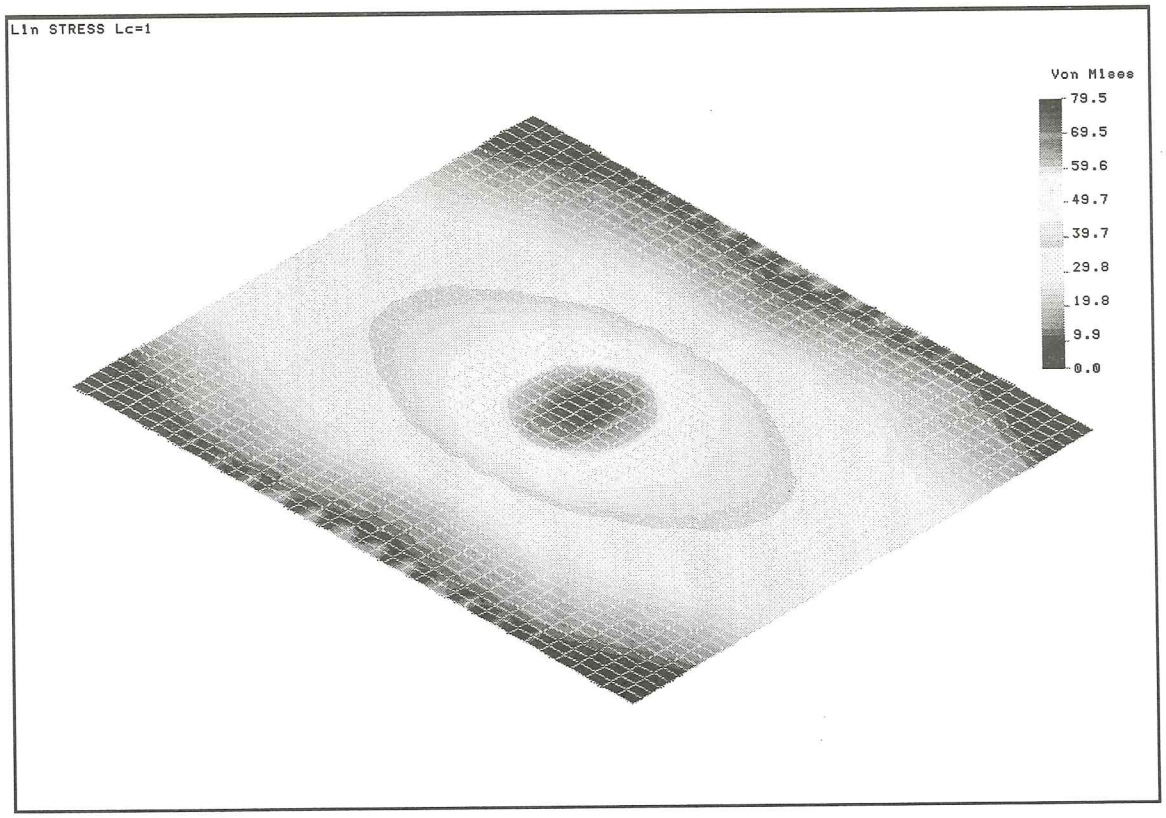


図-7.2.4(n)　ALUM4 下フランジ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

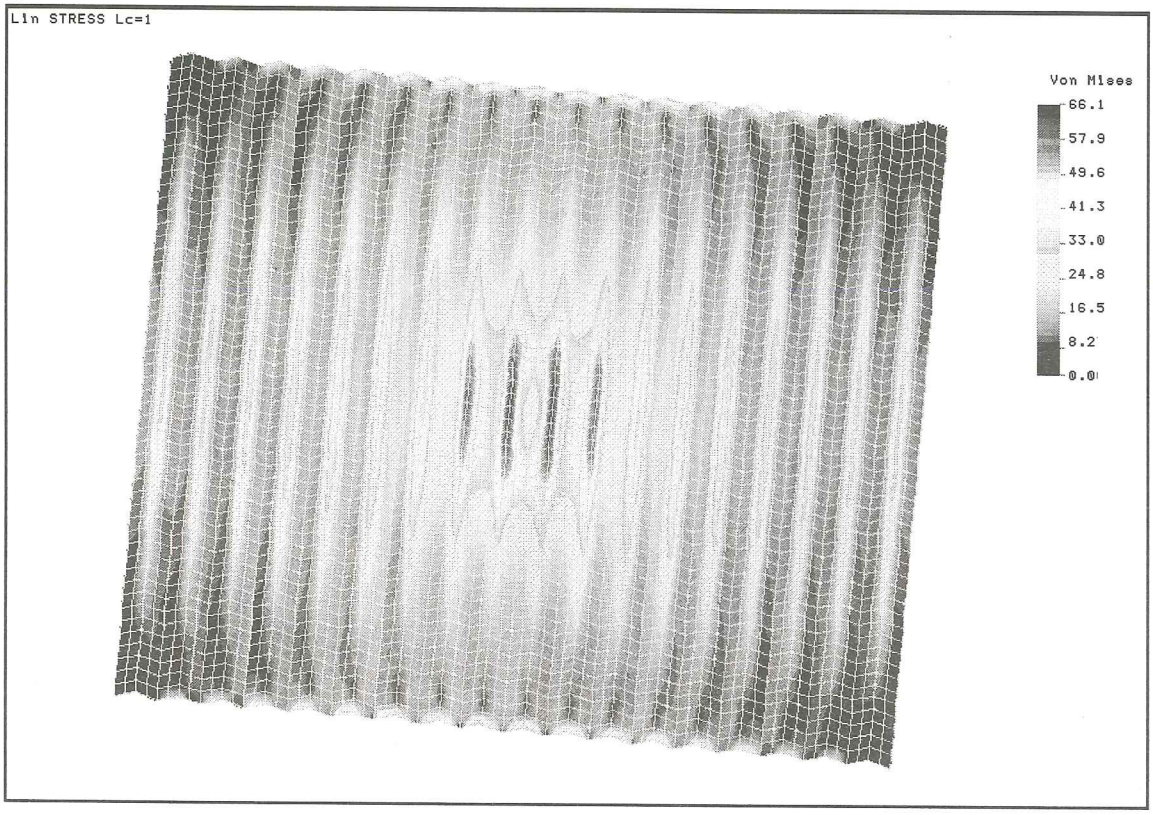


図-7.2.4(o)　ALUM4 ウェブ応力（Von-Mises 相当応力：MPa）

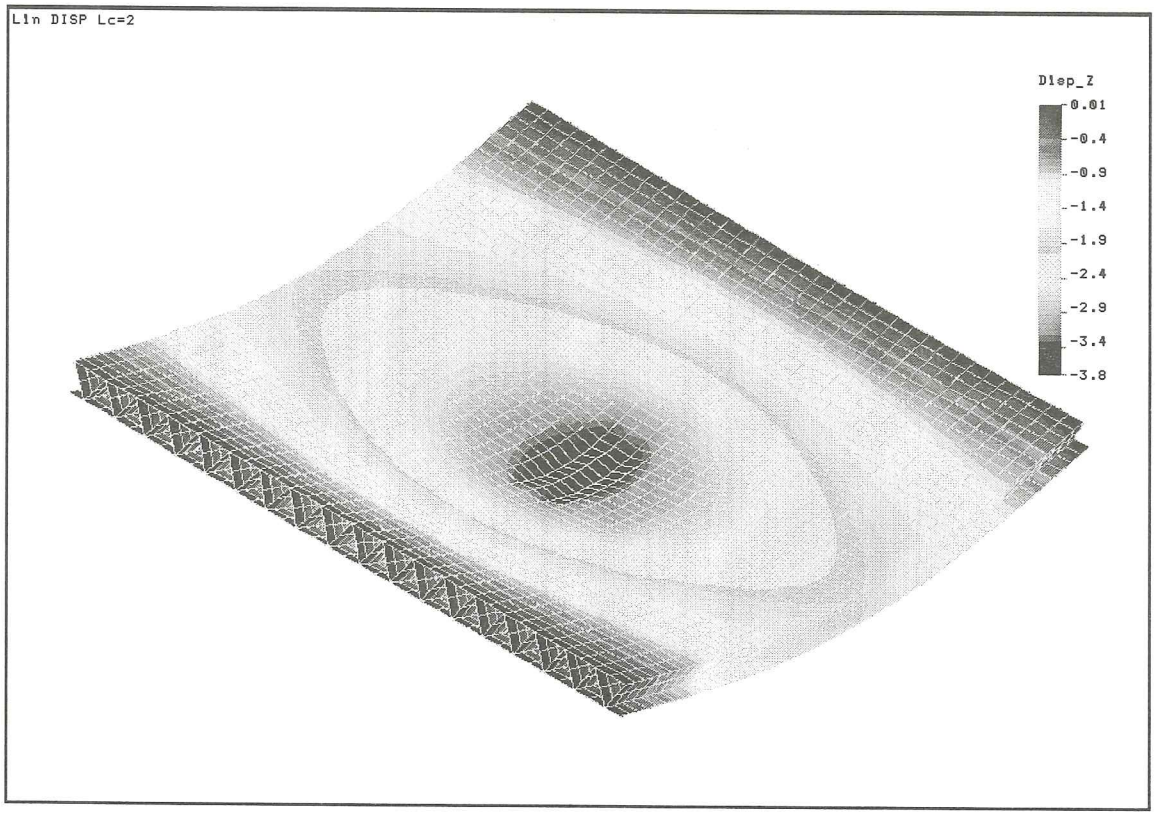


図-7.2.4(p)　ALUM4 変形図　（鉛直変位：mm）

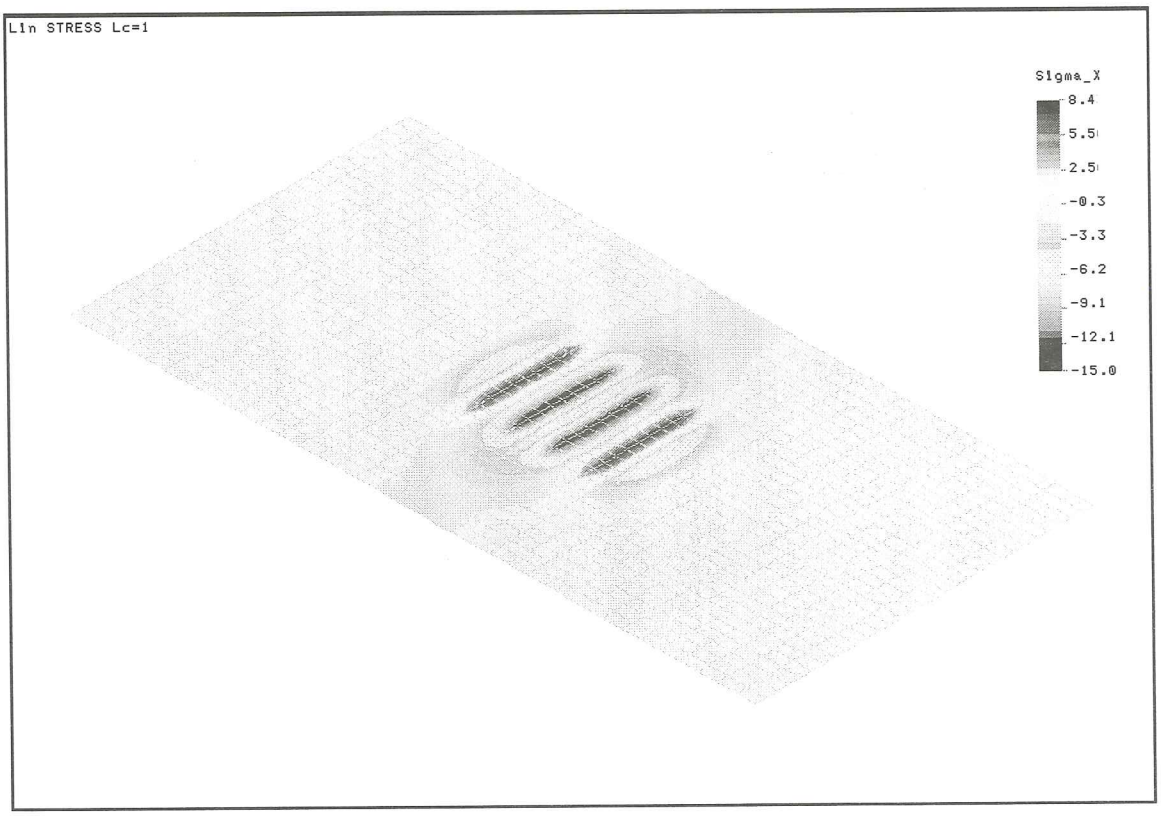


図-7.2.4(q)　FRP1 上フランジ応力（σx 応力：MPa）

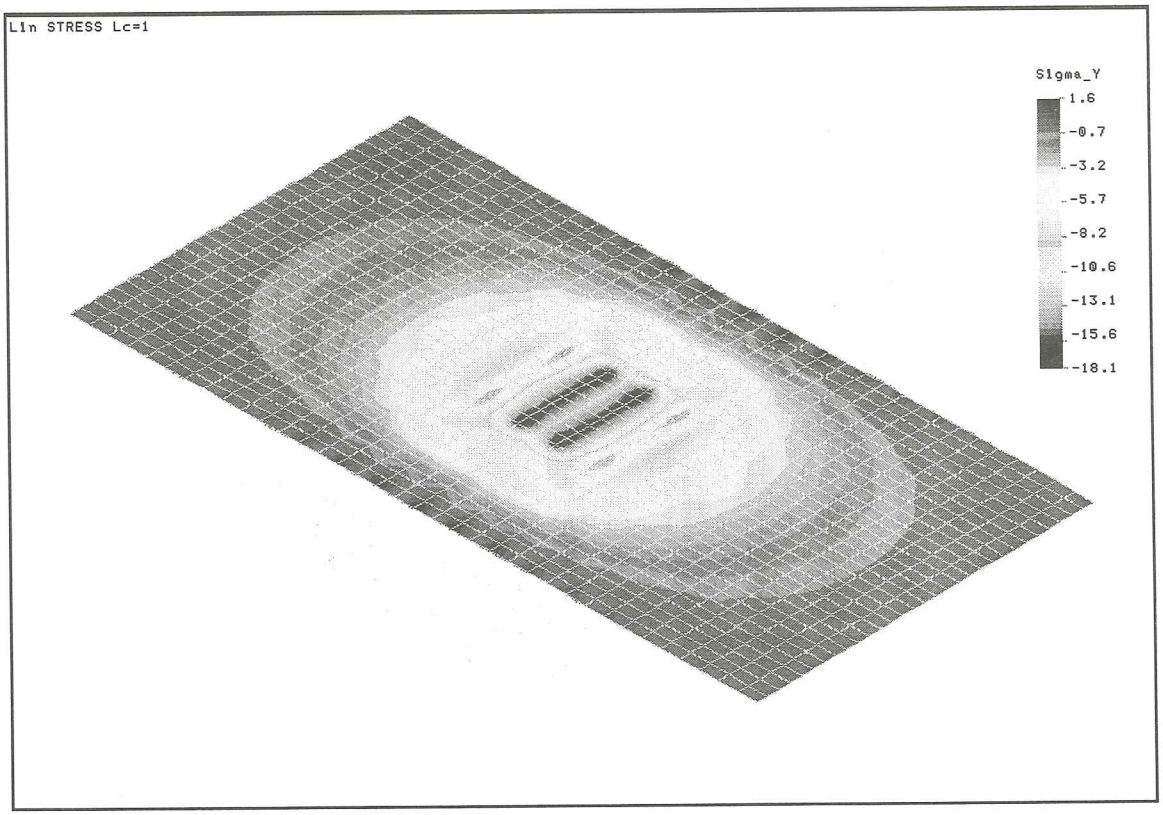


図-7.2.4(r)　FRP1 上フランジ応力（σy 応力：MPa）

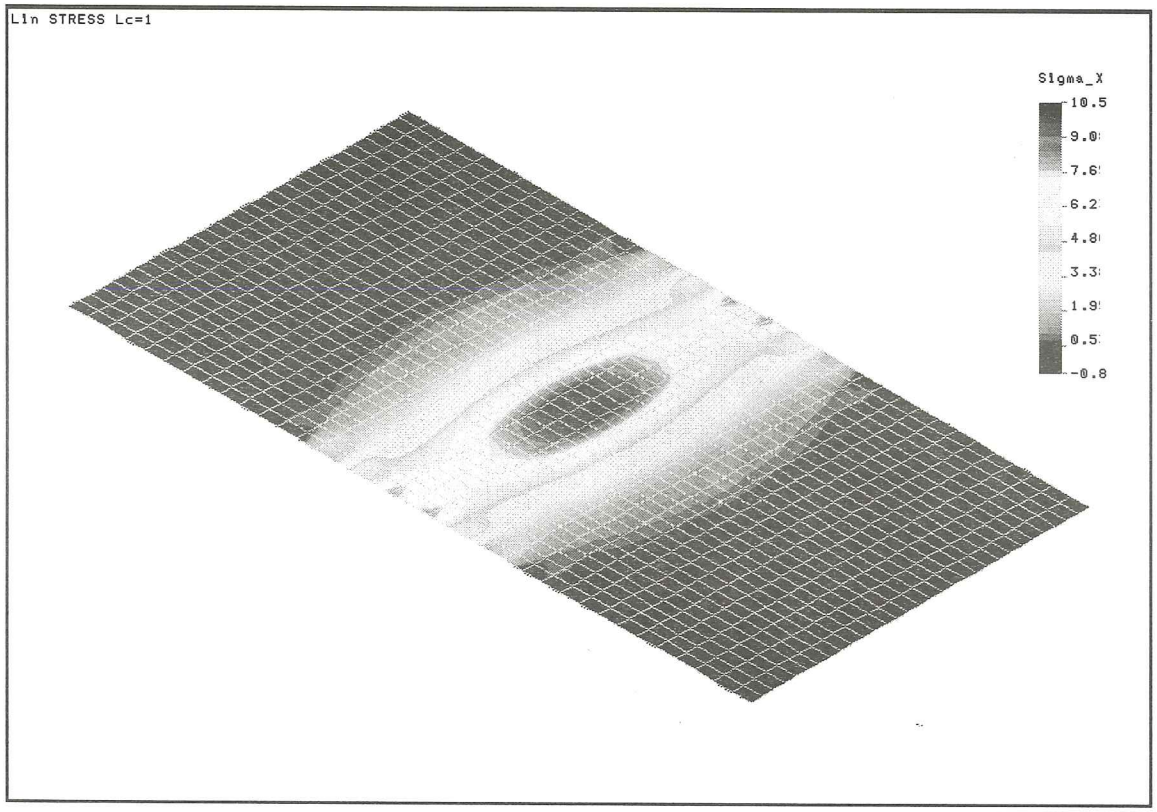


図-7.2.4(s)　FRP1 下フランジ応力（σx 応力：MPa）

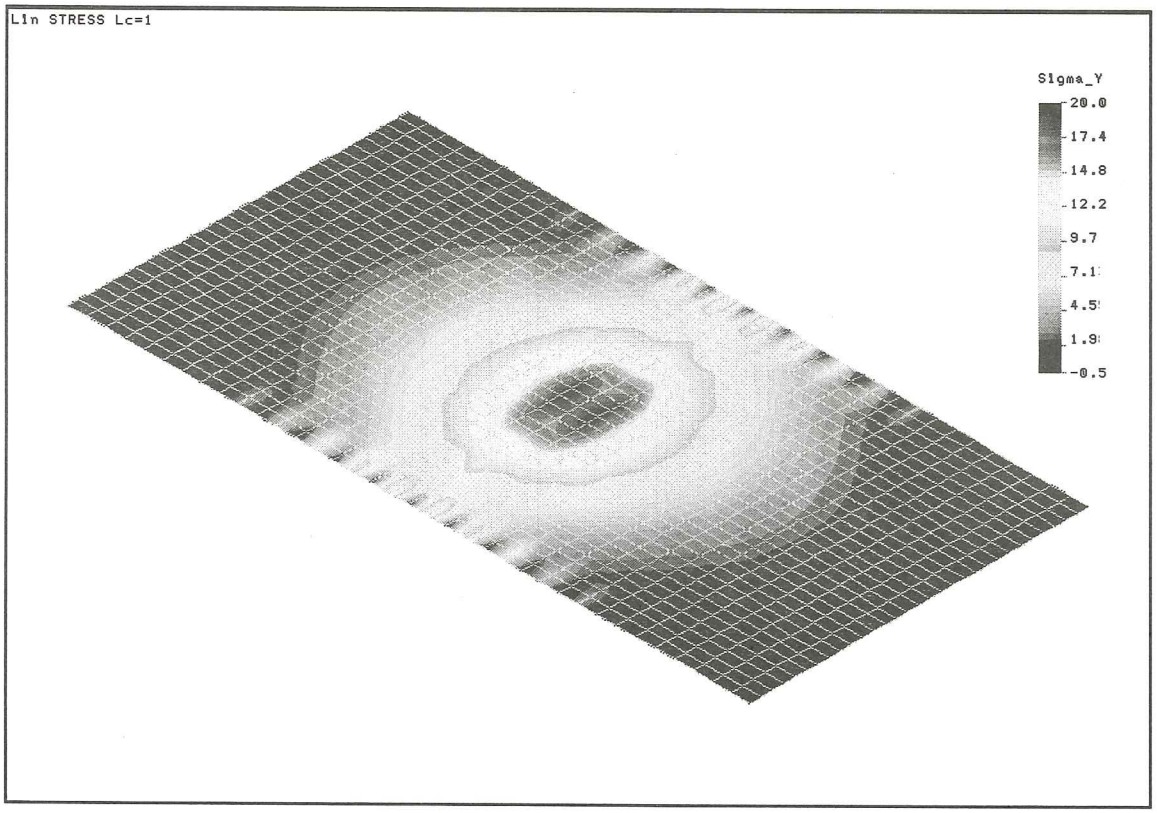


図-7.2.4(t)　FRP1 下フランジ応力（σy 応力：MPa）

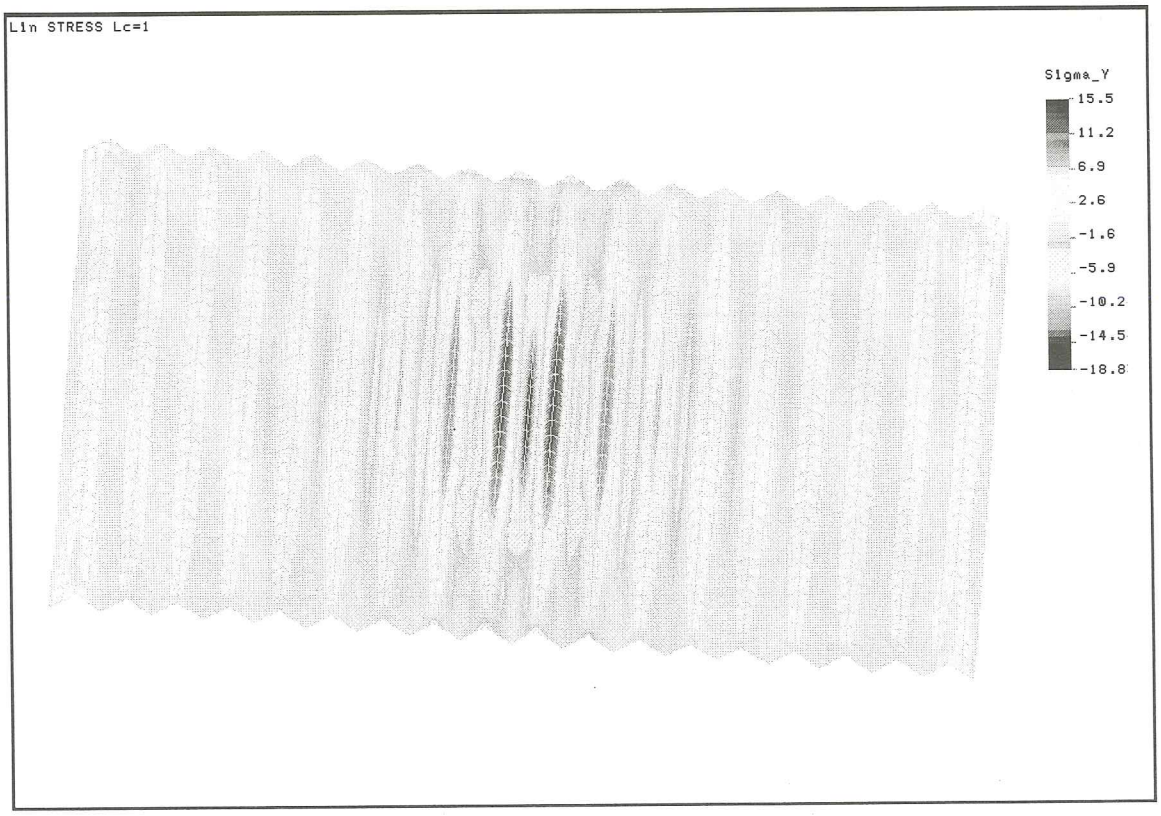


図-7.2.4(u)　FRP1 ウェブ応力（σy 応力：MPa）

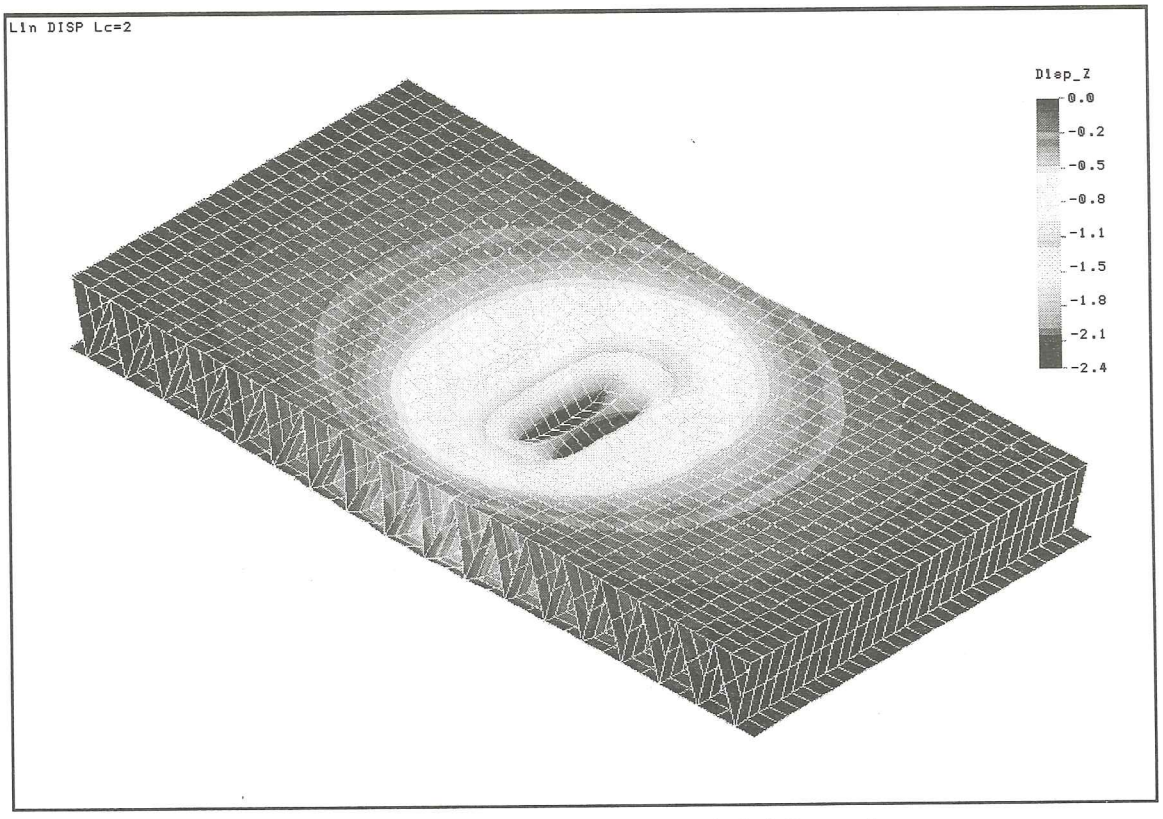


図-7.2.4(v)　FRP1 変形図　（鉛直変位：mm）

7.2.5 従来形式との比較

FEM 解析により算出した各モデルと RC 床版および鋼床版の構造比較を**表-7. 2. 11** に示す。

表-7.2.11 新素材モデルと従来の構造比較

モデル名	寸法 (mm)	版厚 (mm)	たわみ (mm)	重量 (N)	重量の比率
ALUM1	1500×3000	130	1.64	2.30×10^3	0.104
ALUM2	1500×3000	100	2.18	2.43×10^3	0.110
FRP1	1500×3000	270	2.45	2.57×10^3	0.116
FRP2	1500×3000	260	2.45	2.85×10^3	0.129
RC 床版	1500×3000	200	---	2.21×10^4	1.000
鋼床版	1500×3000	12	0.25	7.39×10^3	0.335

モデル名	寸法 (mm)	版厚 (mm)	たわみ (mm)	重量 (N)	重量の比率
ALUM3	2500×3000	130	3.90	4.03×10^3	0.088
ALUM4	2500×3000	130	3.89	4.24×10^3	0.092
FRP3	2500×3000	300	4.08	4.40×10^3	0.096
FRP4	2500×3000	270	4.11	4.94×10^3	0.107
RC 床版	2500×3000	250	---	4.59×10^4	1.000
鋼床版	2500×3000	12	0.62	1.25×10^4	0.272

※ 比率はＲＣ床版自重を 1.00 とする。
※ 鋼床版は等価格子法による解析モデルで算出した。
※ RC 床版は試設計を行い算出した。

また、コストに関しては、各材料の最適な床版支間長の違い、主桁の構造や本数による違い、また床版重量の増減による上部構造や下部構造のコストの増減も考慮する必要があるため、一概に床版重量から経済性を評価することは難しいが、概ね**表-7. 2. 12** のような傾向となる。

表-7.2.12 新素材モデルの構造比較

モデル名	材料費	製作費
アルミニウム合金	△	×*1
FRP	△	×*1
RC 床版	◎	○
鋼床版	○	△

◎：優れている、○：良い、△：やや悪い、×：悪い
*1：実績があまりなく、高度な技術を必要とする。

7.1 及び 7.2 では数値解析により構造性能を概略検討したが、荷重の伝達経路、有効幅、座屈性状、有効座屈長等に対する安全率や、輪荷重の繰り返し載荷に対する耐疲労性、耐衝撃性について、実験等による検証が必要と考えられる。特に材料異方性を考慮した解析手法や構造細目の妥当性、継手構造についても実験による検証が必要である。

7.3 新材料の接合方法の調査

7.3.1 FRP 継手の調査結果

（1）対象となる床版の構造

対象となる床版の構造は三角形セル中空断面構造とし、5 ボイド（セルの孔数のこと）を 1 ユニットとして引き抜き成形したものを、橋軸直角方向を部材軸方向として並べて接合し、床版を形成する形状を考える。

（2）接着接合 [42)]

接着接合は、連続的な接合であり、機械的接合に比べて応力集中をあまり伴わずに応力を伝達することができる。FRP 用の接着剤として、通常、ポリエステル系、エポキシ系、シアノアクリレート系、ポリウレタン系、ゴム系等の各種のものが用いられている。接着に際して、被着材の接着面を洗浄したり粗面形成したり、あるいは、薄い繊維シートのような基材を接着界面に挿入して大きな変形にも十分耐えられるようにする工夫がされている。

図-7.3.1 に FRP 構造物において通常用いられる接着接合について、その方法とそれぞれの接着効率とを示した。ここで接着効率は、母材の引張強さを 100%として各接合方式の破壊強さの比を示したものである。図表の白い部分は FRP 母材（板厚 12mm 程度）を示し、斜線部は 2 次接着によって接着したもの（板厚 7mm 程度）を示す。

同図から、継手形状により強度接着効率に大きな差があることがわかる。橋梁への適用にあたっては、継手形状を工夫して接着効率が落ちないようにする必要がある。また、現場施工をする際には、硬化に時間が必要であるため、その間の形状保持および養生について考慮する必要がある。

継手方式	接着効率(%)
シングルスカーフ接合	37
ベベルラップ接合	23
ベベルラップ接合	28
ダブルストラップ接合	55
ダブルストラップ接合	55
ステップドラップ接合	53
ステップドラップ接合	76

M：マット層，MR：マット，ロービングクロス層，
R：ロービング・クロス層

図-7.3.1 FRP の接着接合の種類と接着効率 [42)]

（3）機械式接合 [36)]

FRP に用いられる機械式接合を、**図-7.3.2** に示す。FRP は耐食性があるため、接合材料もアルミニウムやステンレスあるいは亜鉛メッキ材等の耐食性の高い材料を用いる。なお、ボルトによる接合は、孔廻り

の強度が重要になるため、大きさ・本数・位置等に注意する必要がある。

機械式接合の破壊様式は、図-7.3.3に示すようなものがある。鋼部材と同様の破壊様式の他に、FRPの特徴的なものとして、接合部の孔廻りの圧壊による様式がある。

機械式接合の破壊様式には多くの因子が影響している。特に、材料（強化材の種類、強化材の形態、繊維配向角度、積層方法等）と接合部の寸法、締め付け力が重要である。たとえば、繊維配向角度により、せん断破壊から引張破壊へと破壊様式が変化し、板厚と接合部の口径の比により圧壊強度が変化し、あるいは、締め付け力の大きさによっても圧壊強度が大きく変わる。

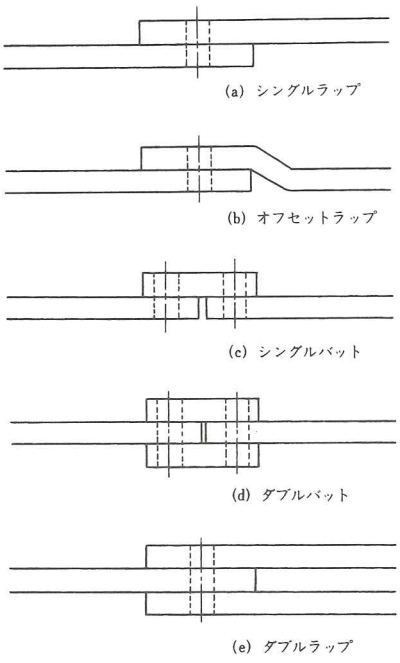


図-7.3.2　主要な機械式接合の種類[36)]

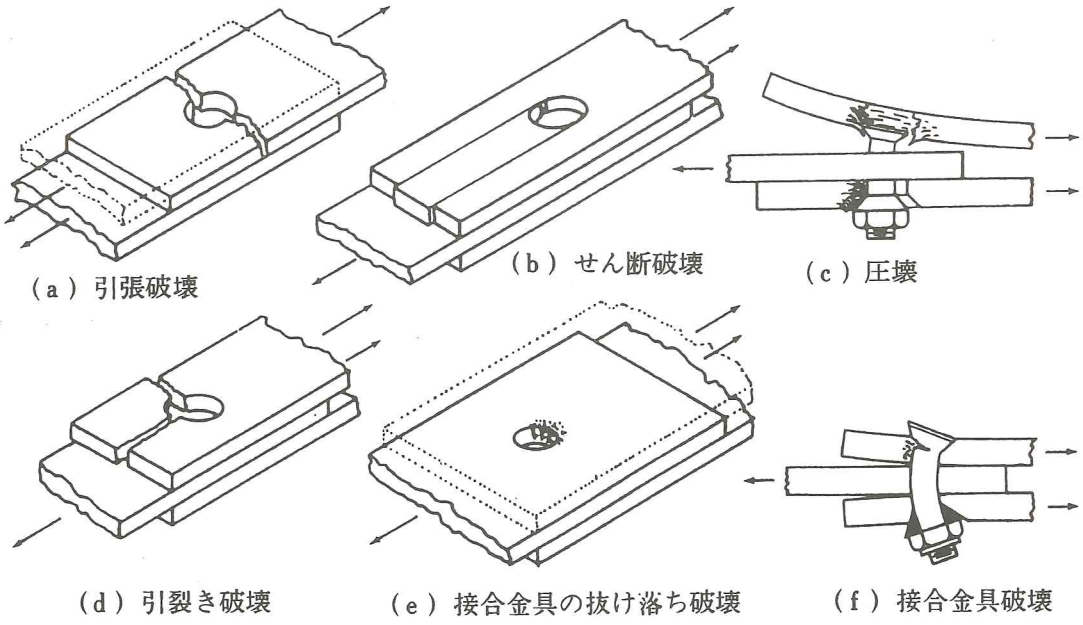


図-7.3.3　機械式接合の破壊様式[36)]

（4）接合事例

FRPの引抜成形材を用いる場合の接合部形状について、実際に適用された例を示す。

① 図-7.3.4に示した例は六角形断面を7ボイド1ユニットとして凸タイプと凹タイプのパネルを用意して、これらを接着接合して床版を形成した例である。現場での接着接合の場合、接着剤が硬化するまでパネルを固定する必要があるが、ここではそれを部材の組み合わせで解決している。

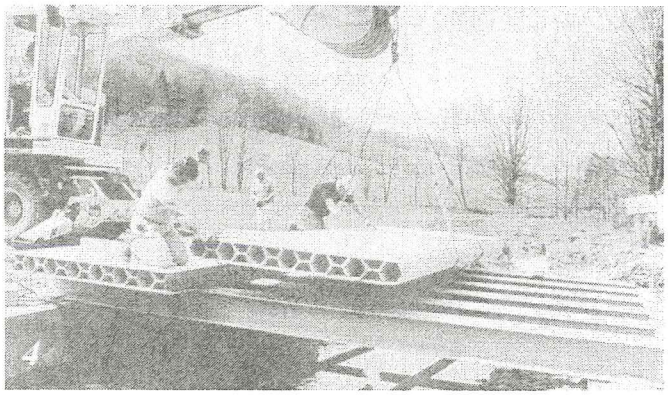
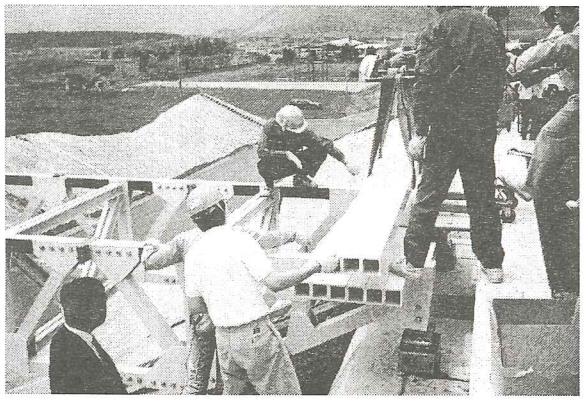


図-7.3.4　FRPの床版への適用例1[38)]



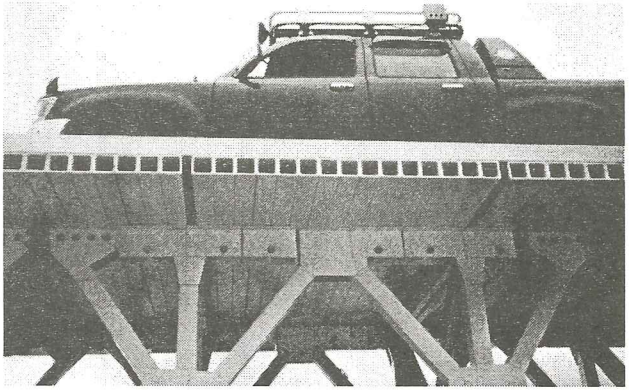


図-7.3.5　FRPの床版への適用例2[38)]

② 図-7.3.5に示した例は、3ボイド1ユニットとして作成したパネルを、床組材にボルトで固定した例である。応急橋として考案されたものであり、床版の架設は人力で行う。

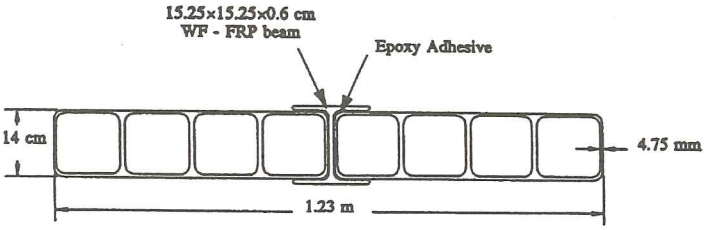


図-7.3.6(a)　FRPの床版への適用例3[38)]

③ 図-7.3.6(a)に示した例は、4ボイド1ユニットとして作成したパネルを、H形鋼を接続部材として接着接合した例である。接着剤はエポキシ樹脂を用いている。

④ 図-7.3.6(b)に示した例は、3ボイド1ユニットとして作成したパネルを、ボルトにて床組材に接合した例である。各パネルの両端には凸凹の溝が設けてあり、接合する際にこの部分を組み合わせる構造としている。

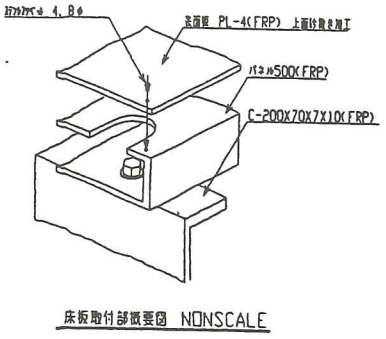


図-7.3.6(b)　FRPの床版への適用例4[38)]

（５）適用の是非

表-7.3.1 に示すとおり、接着接合、機械式接合ともに、継手形状が接合部の強度に大きく影響するため、橋梁への適用にあたり、設計段階で十分検討することが重要である。

表-7.3.1　FRP 継手における適用性

接合方法	パネルの形成（工場）	パネル固定（現場）	パネル相互接合（現場）
接着	○	△ *1	○
機械式接合（ボルト）	○	○	△ *2

◎：優れる，○：良好，△：やや困難，

*1：接着面積の確保が困難。
*2：接合部表面の突起が障害となる可能性がある。
※表-7.3.1 におけるパネル固定とは、床組材上へのパネルの取付を、パネル相互接合とはパネル間の橋軸直角方向の接合を示す。

7.3.2　アルミニウム合金継手の調査結果

（１）基本形状

アルミニウム合金では、押出材の軸方向を橋軸直角方向に並べて接合し、床版を形成する形状を考える。

（２）溶　接[19), 39), 40)]

不活性ガスを用いた TIG 溶接（Tungsten Inert Gas Arc 溶接），MIG 溶接（Metal Inert Gas Arc 溶接）が各構造物で広く用いられている。これらの溶接は、小回りがきくため補修溶接、小物の溶接、薄板の溶接等では高品質のものが得られる。シールドガスとしてはアルゴン、ヘリウムおよび両者の混合ガスが用いられる。このほか、スポット溶接やシーム溶接等の抵抗溶接も多く用いられる。

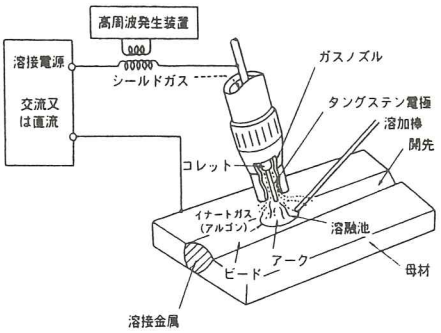


図-7.3.7　TIG 溶接概略

アルミニウム合金溶接部の性質は、溶接金属が母材と溶加材の混ざった鋳造組織であり、溶接熱影響部が元の母材とは組成が変化するため、母材単独とは機械的性質や耐食性が異なったものとなる。特に、6N01-T5 のように、時効硬化処理を行った材料では強度が低下するため、高い応力が作用する継手には向かない。

溶接部の疲労強度は溶接方法、継手形状、欠陥等のため母材部より変化が大きく、特に余盛りの形状が疲労強度に比較的大きな影響を与える。疲労強度の向上には、止端部を滑らかに仕上げること等が有効と考えられている。

（３）摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）[39)]

MIG、TIG 溶接では、母材の接合部が融点以上に加熱、溶融されるため、接合部の周辺の熱影響部が軟化し、強度が低下する。そこで、この問題点を解決する技術として開発されたのが、摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）である。これは、摩擦熱により母材の内部組織に塑性流動を起こし、攪拌することによって、母材同士の組織を一体化させるものである。**図-7.3.8** に概要を、**図-7.3.9** に施工部の外観を示す。FSW では、母材が融点以上の温度になることがなく、接合時の熱影響による強度の低下が非常に小さくなり、ひずみの発生も少ないため、特に薄肉の母材で接合がしやすくなり、製品の薄肉化に大きく貢献できる。また、接合部の疲労強度もかなり高くなる。

図-7.3.10 に FSW 継手の疲労強度を母材の強度と比較したものを示す。このときの試験片は、**図-7.3.11** に示す形状のものである。応力範囲により疲労強度が変化するが、概ね母材強度の 8 割程度は確保されていることがわかる。

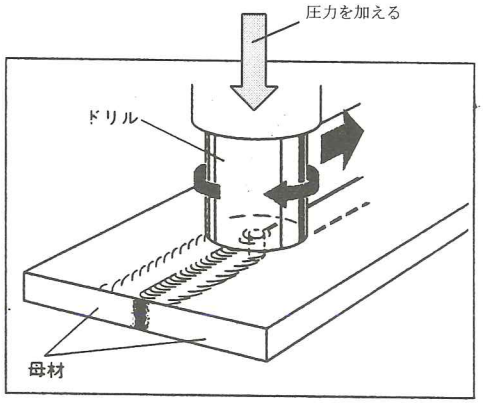


図-7.3.8　FSW 概要

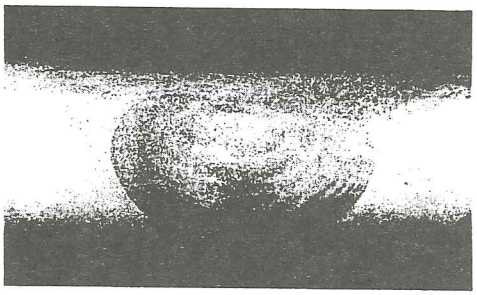
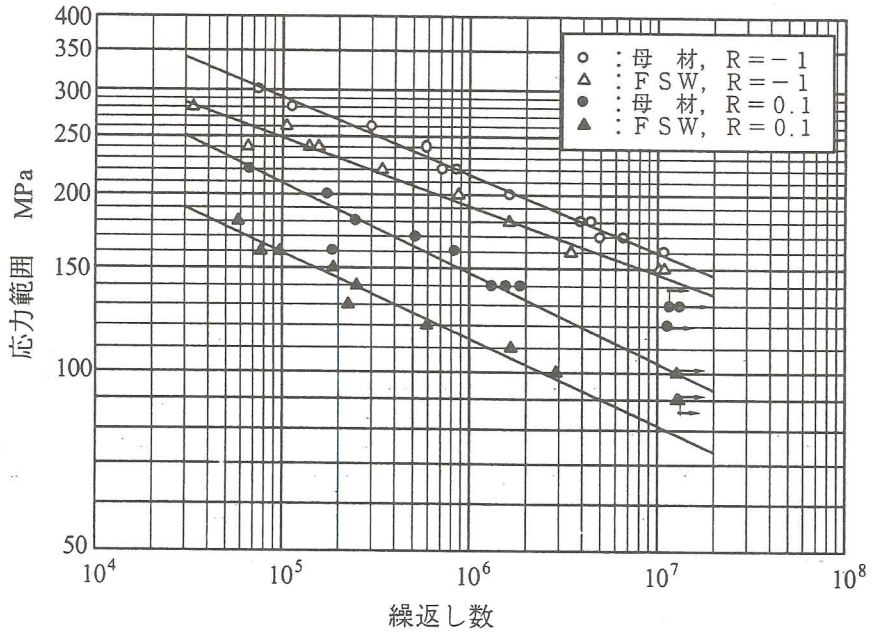


図-7.3.9　FSW 施工部外観



※R：応力比　$R=\dfrac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

図-7.3.10　FSW 疲労試験結果 [39)]

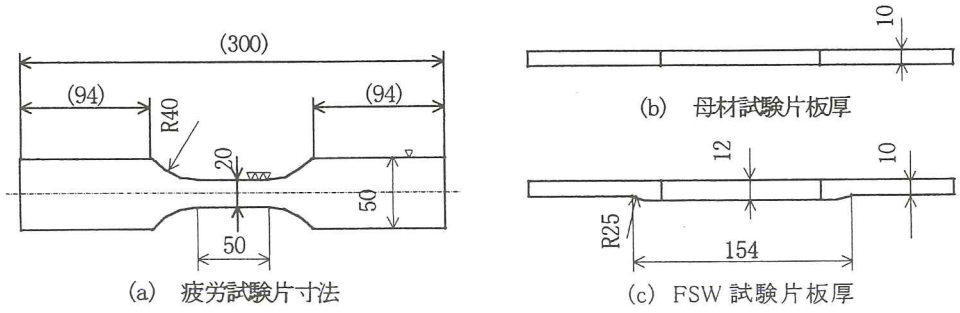


図-7.3.11 FSW 疲労試験片形状 [39)]

こうした特性のため、1991 年にイギリスで考案されて以降、航空機や鉄道車輌、圧力容器等に適用範囲を広げている。

摩擦攪拌接合そのものは、ごく単純な機構の装置で行うことが可能であるが、接合時に図-7.3.8 に示す方向に数 10kN 程度の圧力を加えることが必要であるため、現在のところ工場内での適用に留まっている。また、突合わせ継手にのみ可能な接合法である。

（4）機械式接合

1）アルミニウム合金製リベット継手 [19), 39)]

一般にリベットの材質は JISH4040 に規定があり、せん断力が高く、かしめの容易なものが要求される。非熱処理合金のリベットは、熱処理により強度を得ることができないので冷間打鋲をすることが普通である。

リベット継手は、一般的に軸方向の引張力を働かせることは望ましくなく、リベット軸と母材のせん断および支圧によって力を伝達させる方法で設計する方が良い。リベット径は、締め付ける部材の最も厚い板の厚さより太く、最も薄い部材厚さの 3 倍を越えると作業困難になるため、厚板の継手には実績が少ない。リベット接合の特徴を以下に列挙する。

- 均一な強度の継手が得られ、接合の良否は肉眼で容易に判別できる。
- 冷間でのリベット締めは、部材が熱影響を受けず、リベット締めによる熱ひずみや強度低下を生じさせることはない。
- 適切な工具を用いれば、継手の強度は作業者の熟練度に影響を受けることは少ない。

2）アルミニウム合金製ボルト継手 [19), 39)]

ボルト継手の力の伝達は、ボルトのせん断と支圧、および母材の支圧による方法が一般的である。ボルト、ナットは、引抜棒、あるいは線材から製造されているため、材質区分はそれぞれの引抜棒および線材の機械的性質に基づき規定される。耐食性および表面硬さの向上のため、原則として陽極酸化被膜を 6μm 以上施すことになっている。建築構造物では既に広く利用されている。ただし、継手強度があまり高くないため、作用応力が大きい場合、ボルト本数が多くなる可能性がある。また、ボルトの単価が高いため、不経済となりやすい。

3）溶融亜鉛めっき高力ボルト継手 [19), 39)]

アルミニウム合金との接触腐食を防止するため溶融亜鉛めっきを施した高力ボルトを用いる。ボルト継手の力の伝達は、摩擦力による。そのため、継手部には粗面処理が必要になる。

一般に使用する摩擦接合用高力ボルト，ナットは、F10T であり、熱処理（焼き入れ、焼き戻し）により、その強度を得ている。溶融亜鉛めっきは約 400～500℃で施工され、熱影響によりその強度を保証できない場合があるので、F8T として使用するのを標準としている。

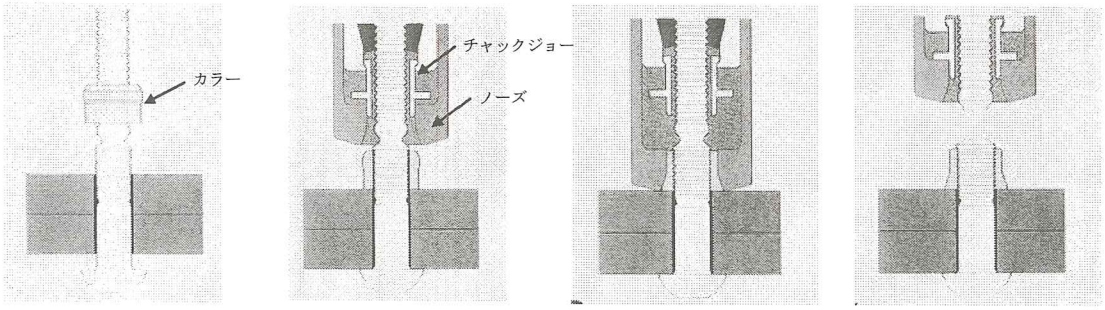
メッキがはく離すると、電位差腐食の原因になるため、取扱いを丁寧にする必要がある。

4）ステンレス高力ボルト継手 [19), 39)]

高力ボルト摩擦接合部に対して F10T 相当の構造用ステンレス鋼高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセットが製品化されている。素材は、析出硬化系のステンレス鋼（例えば JIS 規格の SUS630 等）である。安定した摩擦係数確保のため、摩擦面には粗面処理が必要となる。ボルトの単価が高いため、不経済となりやすい。

5）グリップ式高力ボルト [19), 39)]

ボルトに相当するピンに付けられた平行溝へ、ナットに相当するカラーの材料をかしめ込む方法により添接板同士を締結する接合方法である。高く安定した引張り・せん断強さを有している。接合部の疲労強度も特に問題ないと考えられる。専用のエアー工具、または油圧工具で簡単・迅速に施工可能である。ボルト材質には、炭素鋼、ステンレス、アルミニウムの３種類がある。グリップ式ボルトの接合状況を図-7.3.12 に示す。この場合も、ボルトの単価が高く、不経済となりやすい。



1. ファスナーを穴に差し込み、カラーをピンに通す。

2. ピンテールをノーズに差し込むと、ノーズ内部のチャックジョーがピンテールをつかむ。

3. ツールを作動させるとチャックジョーがピンテールを引張り、部材を呼び込むと共にカラーをピンのロック溝にかしめ込む。

4. ツールのチャックジョーがさらにピンテールを引くと、ピンテールが破断する。締結が完了すると、ノーズがカラーを押し離す。

図-7.3.12　グリップ式ボルトの接合状況

6）ろう付 [19), 39)]

アルミニウムの接合に使用されるろう材は硬ろうと軟ろうに大別される。一般に硬ろう付をろう付と呼び、軟ろう付をはんだ付と呼ぶ。接合部にフラックスを塗布するが、母材を腐食させるため、接合後に除去作業を完全に行う必要がある。

建設機械、輸送機器等の細部組立用に利用されているが、橋梁への適用は困難と考えられている。

7）接　着[19), 39)]

接着剤は、溶剤揮散タイプ、化学反応タイプ、および熱溶融タイプに分類できる。接着剤を使用する場合の長所、短所を列記する。

- 接合部における応力集中が小さくなる。
- 音および振動を抑止できる。
- 異種金属間で起きる接触腐食の心配が少ない。
- 接合部重量を軽減できる。
- 大きな部材の場合、各施工段階で移動を伴うため、特別な治工具が必要となりコスト増になることがある。
- 引き裂きおよび引き剥がし強度が弱い。
- 高温、極低温環境に弱い。
- 一般の建築構造物に使用されており、橋梁の伸縮装置の非排水部にも使用実績がある。しかし、橋梁へ適用する場合には、接着耐久性に課題がある。

（５）　アルミニウム合金の接合例

図-7.3.13 に示した例は、アルミニウム単板にπ形の押出形材を溶接し、異方性パネルとしたものを工場製作して、現場で床版同士および床版と横構を亜鉛メッキボルトにより接合した例である(米・ピッツバーグ・スミスフィールド橋)。図中のアルミニウム合金床版は約 30 年間再塗装なしで供用された後撤去されたものであるが、表面的な孔食が発生している程度で、床版の強度に影響を与えるような腐食は発生していなかった。

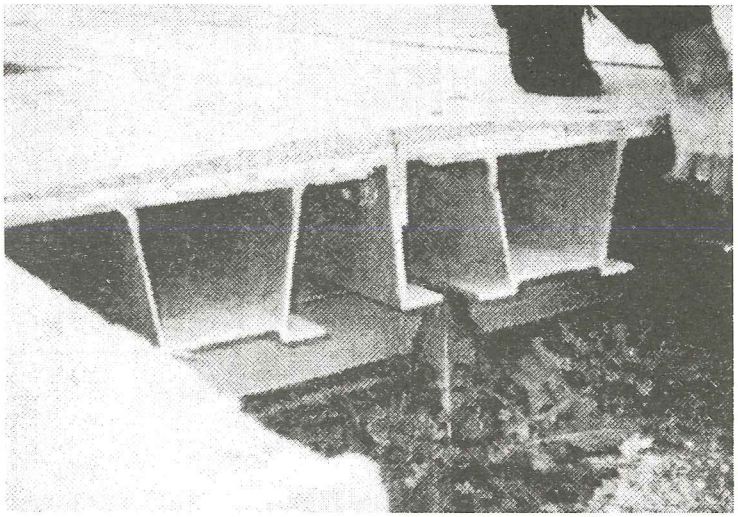


図-7.3.13　アルミ合金床版の施工例１[39)]

図-7.3.14 に示した例は、三角形閉断面の押出形材を工場で溶接接合して輸送可能なサイズのパネルにした後、樹脂系の薄層舗装を施して現場へ搬入した例である（米・コルビン橋)。鋼製横構の上にアルミニウム形鋼の縦桁を設置し、上記パネルを、形材の押出方向を橋軸直角方向にしてボルト接合されている。

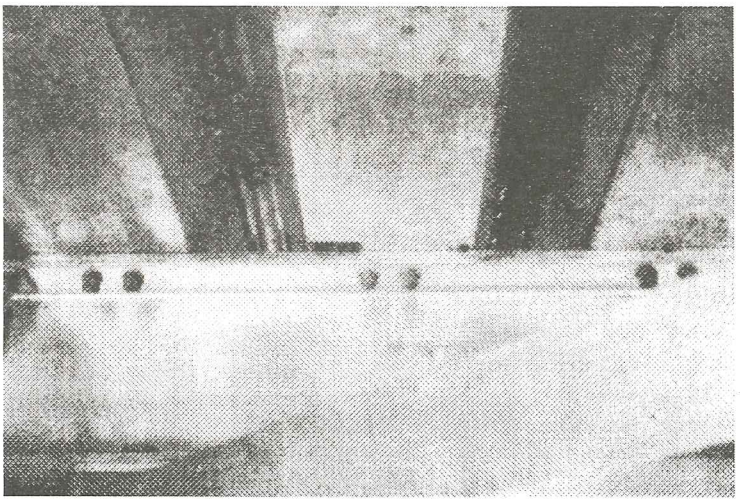


図-7.3.14　アルミ合金床版の施工例２[39)]

（6） 各種接合法の比較

表-7.3.2 に、各種接合法について床版の施工段階ごとに適用性を概略比較した結果を示す。

表-7.3.2 アルミニウム合金継手における適用性

		パネルの形成（工場）	パネル固定（現場）	パネル相互接合（現場）
溶接	溶接継手	○	△ *1	○
	摩擦攪拌接合	◎	×	×（◎）*2
機械式接合	アルミニウム合金製リベット	△ *3	△ *3	△ *3
	アルミニウム合金製ボルト	△ *4	○	△ *5
	溶融亜鉛メッキ高力ボルト	○	○	△ *6
	ステンレス高力ボルト	△ *4	○	△ *5
	グリップ式ボルト	△ *4	○	△ *5
その他	ろう付け	×	×	×
	接着	○	× *7	×

◎：優れる，○：良好，△：やや困難，×：困難

ここで、

*1：異種金属接合の場合には適用が難しい。

*2：現場用装置が開発されれば適用性が高くなる。

*3：作業性が悪い。

*4：コストが高くなる可能性がある。

*5：接合部表面の突起が障害となる可能性がある。接合強度および施工性には特に問題はない。また、コストが高くなる可能性がある。

*6：接合部表面の突起が障害となる可能性がある。接合強度および施工性には特に問題はない。

*7：接着面積の確保が困難。

※表-7.3.2 で、パネル固定とは床組材上へのパネルの取付を、パネル相互接合とはパネル間の橋軸直角方向の接合を示す。

８．まとめ

本研究では、アルミニウム合金およびFRPの道路橋部材への適用性を評価することを目的として、以下の項目について検討を行った。

①材料特性に関する調査

②土木構造物への適用実績に関する調査

③構造物設計のための技術資料の整備状況に関する調査

④試設計及びコスト試算による道路橋上部構造への適用性に関する検討

⑤FEM解析による道路橋床版に適用した場合の構造特性に関する検討

以上の結果、アルミニウム合金及びFRPの橋梁主構造への適用性については、軽量等のメリットを活かしても鋼に対してコスト面で優位となる可能性が低いことが確認された。また、海外では道路橋床版への試験的な適用実績はあるものの、現時点では材料特性についてデータの充実を図る必要があること、設計、製作、施工上の制約や技術的課題が残されていること等、検討すべき事項が多いことが確認された。

（参考文献）

1）川本・松村・石川・海老名：日本最初の溶接アルミニウム合金橋　金慶橋（１），土木技術，№5，Vol.16，1961

2）川本・松村・石川・海老名：日本最初の溶接アルミニウム合金橋　金慶橋（２），土木技術，№6，Vol.16，1961

3）伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋設計業務報告書，沖縄県・土木研究センター，2000.3

4）アルミハンドブック，(社)軽金属協会，1978.5

5）JIS H 0001 アルミニウム,マグネシウム及びそれらの合金－質別記号，日本工業規格，1998

6）JIS H 4000 アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条，日本工業規格，1999

7）JIS H 4040 アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線，日本工業規格，1999

8）JIS H 4080 アルミニウム及びアルミニウム合金の継目無管，日本工業規格，1999

9）JIS H 4100 アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材，日本工業規格，1999

10）JIS H 4140 アルミニウム及びアルミニウム合金鍛造品，日本工業規格，1988

11）JIS H 4160 アルミニウム及びアルミニウム合金はく，日本工業規格，1994

12）JIS H 4180 アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び管の導体，日本工業規格，1990

13）JIS Z 3262 銅及び銅合金ろう，日本工業規格，1998

14）JIS H 5202 アルミニウム合金鋳物，日本工業規格，1999

15）JIS H 5302 アルミニウム合金ダイカスト，日本工業規格，2000

16）アルミニウム新時代～軽量・高強度と新機能を追求～，工業調査会，1999.6

17）FRP 入門，強化プラスチック協会，1987.9

18）森本尚夫：プラスチック系先端複合材料，高分子刊行会，1998

19）アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案），(社)軽金属協会，1998.12

20）EUROCODE 9 -Berechnung von Konstruktionen aus Aluminum-，Japanisch-Deutsches Kolloquium 2nd Japanese-German Colloquium

21）道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，（社）日本道路協会，2002.3

22）Specification for Aluminum for Aluminum Structures 5th ed.., Aluminum Association, Inc

23）Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, The European Structural Polymeric Composites Group E&FN SPON, 1996

24）繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル，強化プラスチック協会，1996.2

25）欧州橋梁調査団報告書，（財）高速道路調査会，2001.3

26）公共土木資材のアルミニウム化による社会資本の長寿命化に関する調査研究報告書，日本アルミニウム連盟，1997

27）連続繊維補強材に関する資料集，橋梁と基礎，1997.8

28）設計施工マニュアル｛橋梁編｝，国土交通省東北地方整備局，2000.3

29）国土交通省土木工事積算基準書　平成 14 年度，（財）建設物価調査会，2002.7

30）建設物価，（財）建設物価調査会，2003.

31）土木コスト情報，（財）建設物価調査会，2003.

32）積算資料，（財）経済調査会，2003.

33）片脇清士：鋼橋防食のライフサイクルコスト，鋼橋塗装，Vol.28，2000.3

34）ミニマムメンテナンス橋に関する検討，建設省土木研究所，土木研究所資料第 3506 号，1997.6

35）第１回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集，土木学会構造工学委員会 FRP 橋梁研究小委員会，2001.1

36）FRP 構造設計便覧，強化プラスチック協会，1995.9
37）新版　接着と接着剤，日本規格協会，1989.3
38）繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書（Ⅰ），土木研究所資料，1998.10
39）即効的知的基板整備調査委託報告書「非鉄金属系材料の基礎物性等に係るデータベースの整備」「アルミニウム構造物に関する基礎的物性のデータベース化と重点課題データの整備」アルミニウム床版に関する基礎データベース，（社）日本アルミニウム協会，2000.3
40) 構造材料［Ⅰ］金属系，東京大学出版会，1985.3

巻末資料

巻末資料-1

アルミニウム設計基準対比表

1-1 外的作用に対する安全性	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会		Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)	
	条項（基準）	条項番号（page）	条項（基準）	条項番号(page)
1-1-1 破壊現象				
①要求レベル(1-1)	応力度の照査は、次式により行うものとする。 $\sum_{i=1}^{j}\sigma_i \le \gamma_c \cdot \sigma_a = \gamma_c \cdot \frac{\sigma_k}{\gamma}$ ……(1.4.1) ここに、σ_i ：設計荷重 i によって部材内に生じる応力度 σ_a ：許容応力度 σ_k ：設計基準応力度 γ ：安全率 γ_c ：許容応力度の割増係数 j ：作用する荷重の種類の数 たわみの照査は、構造物または部材のたわみ制限に対して静的解析により照査することを基本とし、次式により照査するものとする。 $\delta \le \delta a$ (1.4.2) ここに、δ ：構造物または部材のたわみ δa：構造物または部材のたわみの許容値	1.4（p5）	1）構造物の静的な釣合い、全体の変位または変形の限界状態を考えるときには次式を確認しなければならない $E_{d\_dst} \leqq E_{d\_stb}$ E_{d_dst} ； 不安定挙動の設計影響 E_{d_stb} ； 安定挙動の設計影響 2）破壊の限界状態や、断面、部材または添接の過度な変形の限界状態は、次式で確認する。 $E_d \leqq R_d$ E_d ； 内力またはモーメント R_d ； 対応する設計抵抗値	2.3.2.1（p 25）
②検証方法(2-1)		1.4(p5)	・ 組合せ荷重を考慮 ・ 挙動把握 ・ 断面力計算	2.2.2（p 23） 5.2（p 48）
③みなし仕様(3-1)		1.4(p5)	1）部材別（ストラット、梁、板、補剛板、プレートガーダー等）、また作用応力状態別に抵抗力を規定している。 1） 引張部材抵抗力照査 2） 曲げモーメント抵抗力の照査 3） 剪断抵抗力照査 4） 曲げ＋剪断の抵抗力照査 5） 曲げ＋軸力の抵抗力照査 6） プレートガーダー抵抗力の照査	5 章（p 46～107） 5.7 (p67) 5.6.2 (p61) 5.6.3 (p62) 5.6.4 (p63) 5.9.3 (p77) 5.12.7 (p102)
1-1-2 静的不安定現象				
①要求レベル(1-2)	部材の細長比は、表 3.1.1 に示す値をこえてはならない。 表 3.1.1 部材の細長比 部材 / 細長比(ℓ/r) 圧縮材 / 主要部材 / 100 圧縮材 / 二次部材 / 120 引張材 / 応力の反転の影響を受ける主要部材 / 120 引張材 / 主要部材 / 150 引張材 / 二次部材 / 200		1）構造物の静的な釣合い、全体の変位または変形の限界状態を考えるときには次式を確認しなければならない $E_{d\_dst} \leqq E_{d\_stb}$ E_{d_dst} ； 不安定挙動の設計影響 E_{d_stb} ； 安定挙動の設計影響 2）破壊の限界状態や、断面、部材または添接の過度な変形の限界状態は、次式で確認する。 $E_d \leqq R_d$ E_d ； 内力またはモーメント R_d ； 対応する設計抵抗値	2.3.2.1（p 25）
②検証方法(2-2)			・ 組合せ荷重を考慮 ・ 挙動把握 ・ 断面力計算	2.2.2 (p23) 5.2 (p48)
③みなし仕様(3-2)	1）板材の場合 局部座屈が生じない幅厚比を規定した。（表 3.2.1） 全体座屈強度から許容応力度を定めた。 表 3.2.1 圧縮力または圧縮力と曲げを受ける部材の幅厚 材質と調質 / 板厚範囲(mm) / 板厚 t(cm) 圧縮と曲げ 板材 5083-H112 / $t \le 40$ / $\frac{b}{30f}$ 板材 5083-O / $t \le 40$ / $\frac{b}{30f}$ 板材 6061-T6 / $t \le 6.5$ / $\frac{b}{23f}$ 押出材 5083-H112 / $t \le 40$ / $\frac{b}{32f}$ 押出材 5083-O / $t \le 40$ / $\frac{b}{32f}$ 押出材 6061-T6 / $t \le 25$ / $\frac{b}{22f}$ 押出材 6063-T5 / $t \le 25$ / $\frac{b}{23f}$ 押出材 6N01-T5 / $t \le 6$ / $\frac{b}{24f}$ 押出材 6N01-T5 / $6 < t \le 12$ / $\frac{b}{24f}$ 2）管材の場合 局部座屈と全体座屈の連成を考慮して許容応力度を定めた。 座屈強度についての取扱いは道路橋示方書および鋼構造物設計指針に準じる。	3.2(p27)	1） 限界強度の定義（降伏、0.2%公証強度） 2） 部材断面のクラス分け 3） 各種断面の細長比の採り方 4） 局部座屈を考慮する上での有効断面の採り方 5） 溶接部の熱影響による有効で断面の考え方 6） 横振り座屈の抵抗力 7） 全体座屈に対する抵抗力 8） 曲げ座屈の抵抗力 9） 捩り座屈の抵抗力(照査除外断面が明記されている) １０） 曲げ＋軸引張力の照査方法 １１） I－Beam の照査方法（式 5.40、式 5.41） １２） 曲げ＋軸力作用下の曲げ座屈照査式（式 5.44、式 5.45,式 5,46） １３） 曲げ＋軸力作用下の横振り座屈照査式（式 5.47、） １４） 座屈有効長の採り方。 １５） 無補剛板の座屈照査 １６） 補剛板の座屈照査 １７） プレートガーダーの座屈モードと設計方法	5.3.5(p50) 5.4.2(p51) 5.4.3(p52) 5.4.5(p56) 5.5(p57) 5.6.6(p64) 5.8.3(p68) 5.8.4(p68) 5.8.5(p70) 5.9.3.1(p77) 5.9.3.2(p78) 5.9.4.2(p79) 5.9.4.3(p81) 5.9.4.7(p82) 5.10(p84) 5.11(p88) 5.12(p95)

1．安全性

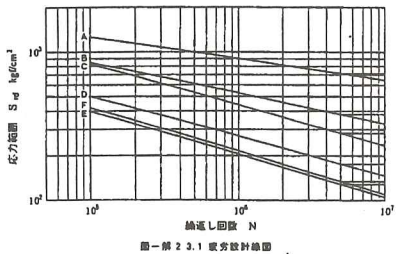
<table>
<tr><th>1-1 外的作用に対する安全性</th><th>ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会</th><th></th><th>Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)</th><th></th></tr>
<tr><td></td><td>条項（基準）</td><td>条項番号（page）</td><td>条項（基準）</td><td>条項番号(page)</td></tr>
<tr><td colspan="5">1-1-3　たわみ</td></tr>
<tr><td>①要求レベル(1-3)</td><td>構造物または部材の変位・変形・振動・騒音等が、構造物の機能、使用性、および、耐久性を損なわないように、たわみには制限を加えるものとする。
たわみの照査は、構造物または部材のたわみ制限に対して静的解析により照査することを基本とし、次式により照査するものとする。
$\delta \leqq \delta a$　(1.4.2)
ここに、δ：構造物または部材のたわみ
δa：構造物または部材のたわみの許容値</td><td>1.4(p5)</td><td>1）構造物の静的な釣合い、全体の変位または変形の限界状態を考えるときには次式を確認しなければならない
$E_{d,dst} \leqq E_{d,stb}$
$E_{d,dst}$ ；　不安定挙動の設計影響
$E_{d,stb}$ ；　安定挙動の設計影響</td><td>2.3.2.1(p25)</td></tr>
<tr><td>②検証方法(2-3)</td><td></td><td></td><td>1）　構造解析
弾性全体解析（線形、非線形）
塑性全体解析</td><td>5.2(p48)</td></tr>
<tr><td>③みなし仕様(3-3)</td><td>1）構造物または部材のたわみは、死荷重などの永久荷重を除いた変動荷重（衝撃を含まず）による荷重作用に対して、部材の総断面積を用いて算出することを原則とする。
2）たわみの許容値は、対象とする構造物の形式や規模、および、その使用条件に応じて定めるものとし、類似の構造物に設計基準等の定めがある場合にはそれを準用し、ない場合には類似の構造物における動的応答解析結果や測定結果なども参照して定める。
道路橋の場合は、道路橋示方書のたわみ許容値（表－解 1.4.2）を準用する。
表－解 1.4.2 たわみの許容値　(単位：m)　L：支間長(単位：m)
<table><tr><th>橋の形式</th><th>げたの形式</th><th>単純げたおよび連続げた</th><th>ゲルバーげたの片持ち部</th></tr><tr><td rowspan="4">プレートガーダー形式</td><td rowspan="3">鉄筋コンクリート床版をもつプレートガーダー</td><td>$L \leqq 10$</td><td>$L/2{,}000$</td><td>$L/1{,}200$</td></tr><tr><td>$10 < L \leqq 40$</td><td>$\frac{L}{20{,}000/L}$</td><td>$\frac{L}{12{,}000/L}$</td></tr><tr><td>$40 < L$</td><td>$L/500$</td><td>$L/300$</td></tr><tr><td>その他の床版をもつプレートガーダー</td><td colspan="2">$L/500$</td><td>$L/300$</td></tr><tr><td colspan="2">吊橋形式</td><td colspan="2">$L/350$</td></tr><tr><td colspan="2">斜張橋形式</td><td colspan="2">$L/400$</td></tr><tr><td colspan="2">その他の形式</td><td>$L/600$</td><td>$L/400$</td></tr></table>
歩道橋の場合は、立体横断施設技術基準（δa＝L/600（L：支間長））を準用する。ただし、振動が利用者に及ぼす影響について特に配慮した場合には、支間長Lの 1/400 までたわみの許容値を緩和しても良いことにしている。</td><td>1.4(p6)</td><td>1）Annex　C　断面力の計算　に従って計算する。
2）Annex　D　全体解析手法　に従って計算する。

＊　終局限界状態のたわみは幾らかの表現はない、要求レベルが上記のように明示されているだけである。</td><td>p165
p177</td></tr>
<tr><td colspan="5">1-1-4　振動</td></tr>
<tr><td>①要求レベル(1-4)</td><td>細長比限界が 120 を越える部材については、風による振動に対して検討しなければならない。</td><td>3.1.4(p27)</td><td>1）共振を避けるため構造の固有値は振（震）源のそれと十分ずらす。
2）風による疲労破壊の可能性を照査する。
3）ダンピング特性を把握する</td><td>4.3（p 45）</td></tr>
<tr><td>②検証方法(2-4)</td><td></td><td>1.4(p5)</td><td>1）ダンパーの要否は検討・調査し、必要ならば模型受験する。</td><td>4.3.2（p 45）</td></tr>
<tr><td>③みなし仕様(3-4)</td><td></td><td>1.4(p5)</td><td>1）振動に対する抵抗力は、疲労の照査によって、また構造または構造材のダンピング特性に基づく照査によって評価される。
2）Eurocode 1　Part2,3　Actions on structures wind actions による。</td><td>5.1. 10(p48)</td></tr>
</table>

2．利用性

2-1 利用者の体感的快適性の確保	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会		Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)	
	条項（基準）	条項番号（page）	条項（基準）	条項番号(page)
2-1-1 たわみ				
①要求レベル(1-5)	たわみを制限することにより、車両の走行安定性、利用者の乗り心地や歩行の快適さなどは通常確保される。	1.4(p6)	1）アルミニュウム構造の使用限界状態は、次の状態をたわみ限界とする ・ 構造の利用に悪影響する変形またはたわみ（機械や施設の適切に作動することを含め） ・ 完成状態や非構造要素に損傷を与える変形またはたわみ ・ 構造の外観に悪影響を与える変形またはたわみ	4.1(p43)
②検証方法(2-5)		1.4(p6)	1） 弾性たわみ計算	4.2.4(p44)
③みなし仕様(3-5)	橋梁を例にとると、道路橋示方書や立体横断施設技術基準に示される、たわみの許容値以下にすれば車両や通行者に与える不快感の排除が可能である。	1.4(p6)	1） たわみ制限の考え方 δmax ＝ δ1＋δ2－δ0 δmax ； 最終たわみ δ0 ； キャンバー（上げ越し量） δ1 ； 固定荷重(自重他)のたわみ δ2 ； 活荷重たわみ＋時間軸たわみ（クリープ他） 2） たわみ制限値は以下とする ・ 片持ち構造 ； L／180 ・ 石膏やその他壊れやすい構造を支える梁 ； L／360 ・ Purlins and sheeting rails（？and 鉄道軌条） a) 死荷重のみ ； L／200 b) 最も大きくなる組合せ荷重 ； L／100 ・ Curtain wall mullions and transoms a） single glazed ； L／175 b) double glazed ； L／250 ・ 柱のトップ（水平たわみ） ； L／300 L ： 支間長	4.2.3(p43)
2-1-2 振動				
①要求レベル(1-6)	細長比限界が 120 を越える部材については、風による振動に対して検討しなければならない。	3.1.4(p27)	1） 使用限界状態下で人々に不快を与える振動の制限	2.2.1（p21）
②検証方法(2-6)		1.4(p6)	記述なし	
③みなし仕様(3-6)	車両の走行や歩行者の歩行による振動の他に、風による振動も無視できない場合があるので、このようなときには道路橋耐風設計便覧を参考にする。	1.4(p6)	同上	
2-1-3 騒音				
①要求レベル(1-7)	記述なし		記述なし	
②検証方法(2-7)	同上		同上	
③みなし仕様(3-7)	同上		同上	
2-2-1 美観				
①要求レベル(1-8)	美観を維持するためには陽極酸化あるいは塗装などの表面処理を施す。	7.5（p121）	記述なし	
②検証方法(2-8)	長期間大気に曝されるとアルミニウム表面で水和物皮膜が成長し、灰褐色になったり汚れが付着したりして元の金属光沢が失われる。	7.5(p121)	同上	
③みなし仕様(3-8)			同上	
2-2-2 景観				
①要求レベル(1-9)	記述なし		記述なし	
②検証方法(2-9)	同上		同上	
③みなし仕様(3-9)	同上		同上	

3．耐久性

3-1 時間軸における各性能の確保	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会		Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)	
	条項（基準）	条項番号（page）	条項（基準）	条項番号(page)
3-1-2 疲労				
①要求レベル(1-11)	アルミニウム合金に対する統一された疲労設計法は無いので、Aluminum Association（以下 AA という）の疲労設計を示す。 (1)一定応力振幅の場合 Sra≦Srd　（解 2.3.3） ここに、Sra：部材に作用する応力範囲。部材に発生する応力は、その部材に規定される許容応力度以下でなければならな。 Srd：許容応力範囲 (2)変動応力振幅の場合 Sre≦Srd　（解 2.3.4） ここに、Sre：等価応力範囲 $Sre=\left[\sum \alpha_i S_{ri}^m\right]_m$　（解 2.3.5） αi：i 番目の応力範囲スペクトルの繰り返し回数を繰り返し総数で除した値 Sri：i 番目の応力範囲スペクトル。 Ns：応力範囲スペクトルの数 Srd：許容応力範囲	2.3（p25）	1） 2）要求品質レベルは次のように記されている ① 表 5.1.1 から表 5.1.5 の詳細カテゴリーは、Annex D の品質要求で製作されたとき、詳細構造に対して認められた建築（？）基準の最大疲労強度を示している、この値は試験によって実証されないならば超えてはならない。 ② より高いレベルの細部構造はしばしば追加検査を求められ、またより高い作業基準が要求される(see Annex D)、しかし製作の経済性には逆の影響をもたらす。検査と作業基準は適切な品質レベルによって決められる。 ③ 詳細構造の要求された品質レベルは、Miner's summation D_L が 1 を超えない場合に、最も低い疲労強度を求めることによって得られる。応力変動が細部構造で一方向より多く生じる場合には、異なったクラスの性能が各々の方向に対して定義される。 ④ 溶接された部分の品質レベルは表 6.1.1 から決定されなければならない。	6 章(p48) 5.1(p31)
②検証方法(2-11)	変動応力の繰返し回数が 10 万回以上で疲労設計を適用し、応力の変動を一定振幅と変動振幅の２つの場合に分けている。 疲労設計線図（図－解 2.3.1 参照） $Srd=A\times N^{-1/m}$ ここに、Srd：許容応力範囲　、　N：繰返し回数 クラスＡの疲労設計線：$Srd=6.79\times10^3N^{-1/6.85}$ クラスＢの疲労設計線：$Srd=9.18\times10^3N^{-1/4.84}$ クラスＣの疲労設計線：$Srd=19.59\times10^3N^{-1/3.64}$ クラスＤの疲労設計線：$Srd=11.02\times10^3N^{-1/3.73}$ クラスＥの疲労設計線：$Srd=11.22\times10^3N^{-1/3.45}$ クラスＦの疲労設計線：$Srd=12.24\times10^3N^{-1/3.42}$　(kgf/cm²)  図－解 2.3.1 疲労設計線図 注）繰返し回数が 5×10^6 以下の疲労設計線は一定振幅と変動振幅の両方の場合に用いる。繰り返し回数が 5×10^6 以上の水平な疲労設計線（一定振幅疲労限）は一定振幅の場合に、右下がりの疲労設計線は変動振幅の場合に用いる。	2.3(P24)	1） 疲労設計の基本を以下のように定義している ① Safe life design ： この方法は、下限境界の耐荷データと上限境界の疲労荷重の評価基準を用いる構造の使用期間中の損傷計算に基づいている。これは疲労寿命の保守的な評価に基づくものであり、供用中の検査は通常、本質的な安全には考慮されない。方法は 2.2 に与える。 ② Damage tolerant design ： この方法は、強制的な検査プログラムに従って、疲労クラックの成長を制限するものである。疲労クラックが一旦事前に決定した大きさに到達すると、その部分は補修されるか取り替えられる。方法は 2.3 に与える。 ③ Design by testing ： この方法は必要な荷重データ、応答、疲労強度データまたはクラック成長データが、対象部分において基準や他の原因から不明の場合に用いられる。 2） 疲労荷重と部分安全係数 3） 応力解析	2.1.6(p16) 3 章(p21) 4 章(p23)
③みなし仕様(3-11)	以下の場合、疲労を考慮する必要はない。 ・変動応力の繰返し回数が 10 万回以下の場合。 ・部材に作用する最大の応力範囲スペクトルが、一定振幅疲労限より低い場合。	2.3	1） 疲労強度がカテゴリー分けして定義されている	5 章(p31)
3-1-3 摩耗				
①要求レベル(1-12)	記述なし		記述なし	
②検証方法(2-12)	同上		同上	
③みなし仕様(3-12)	同上		同上	

4．施工性

4-1 施工時の安全確保	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会		Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)	
	条項（基準）	条項番号（page）	条項（基準）	条項番号(page)
①要求レベル(1-13)	1．架設時の応力と変形の照査 設計時に考慮した施工法、施工手順と異なる方法を用いる場合は、あらためて架設時の応力と変形を検討し、安全を確かめなければならない。 2．架設用機材の安全 架設に用いる仮設備および架設用機材については、工事中の安全を確保できるだけの規模と強度を有することを確かめなければならない。 3．組立 部材の組立てに使用する仮締めボルトとドリフトピンとの合計は、その箇所の連結ボルト数の 1/3 程度を用いるのを標準とし、そのうち 1/3 以上をドリフトピンとするのがよい。ただし、大きな架設応力が作用する場合は、その架設応力に十分耐えられるだけの仮締めボルトとドリフトピンを用いなければならない。 4．高力ボルト 摩擦接合用鋼製高力ボルト	7 章施工(p103)	1．架設期間中に、構造は堅固に締付けられなければならない。仮材は、もし全架設荷重または状態（架設機材も含め）において安全を確かにするため必要ならば用いなさい。	7.3.1(p141)
②検証方法(2-13)	・検査を実施する。 ・製品が所定の性能を有しているか否かを検査する。 ・施工が所定の方法によって進められているか否かを確認する。	7 章施工(p103)	1．設計者または独立した検査・試験を代行する代理人（指示されたように）は、現場でも工場内でも作業が行われている全ての場所に立会えなければならない。作業の検査や試験のための設備は、製作者と設計者の合意の下に、手順に従って用意されなければならない。	7.8(p153)
③みなし仕様(3-13)	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編「15 章施工」を参照する。 7 章施工(p103)			
4-2 施工精度の確保				
①要求レベル(1-14)	1．工場製作 工作 孔径の許容差は、アルミニウム合金製リベットは+0.5mm、-0.2mm とし、アルミニウム合金製ボルト、摩擦接合用鋼製高力ボルトは+0.5mm とする。ただし、1 ボルト群および 1 リベット群の 20%に対しては、径の誤差を+1.0mm まで認めて良いものとする。 溶接 1) 材片の組み合わせ精度は、溶接部の応力伝達が円滑で、かつ、溶接不良を起こさないものにしなければならない。 2) 材片の組み合わせ精度は下記の値を標準とする。ただし、施工試験によって誤差の許容量が確認された場合はこれによらなくてもよい。 i) グルーブ溶接 a) ルート間隔の誤差：規定値±1.0mm 以下 b) 板厚方向の材片の偏心：t≦50　薄い方の板厚の 10%以下 50＜t　5mm 以下 t：薄い方の板厚 c) 裏当金を用いる場合の密着度：0.5mm 以下 d) 開先角度：規定値±10° ii) すみ肉溶接 材片の密着度：0.5mm 以下 仮組立 部材および仮組立の精度は原則として表 7.3.11 によるものとする。 2．架設 記述なし	7 章施工(p103)	1．製作と組立作業は、軽量な構造または組立品、部材剛性の大きさ、温度による形状変化、アルミニュウムの機械加工の容易さなどを考慮しなければならない。 2．製作、架設、構造または部品の組立の誤差は設計者によって明示されなければならない。	7.3.1(p143) 7.3.3(p143)
②検証方法(2-14)	・検査を実施する。 溶接の検査 突合せ継手の内部欠陥に対する検査 放射線透過試験 ・製品が所定の性能を有しているか否かを検査する。 ・施工が所定の方法によって進められているか否かを確認する。	7 章施工(p103)	1．溶接品質と検査は溶接品質管理の主な要求事項、検査と実験、品質基準、検査範囲、検査基準、補修または交換についてに基準化されている。 2．設計者または独立した検査・試験を代行する代理人（指示されたように）は、現場でも工場内でも作業が行われている全ての場所に立会えなければならない。作業の検査や試験のための設備は、製作者と設計者の合意の下に、手順に従って用意されなければならない。	7.5.6(p147) 7.8(p153)
③みなし仕様(3-14)	道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編「15 章施工」を参照する。 溶接の検査 突合せ継手の内部欠陥に対する検査 十分な資料を有する場合は、放射線透過試験のかわりに超音波探傷試験を用いることができる。	7 章施工(p103)	1．溶接品質基準は EN30042 による。	7.5.6.3

5．維持管理

5-1 検査・清掃・補修	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会		Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)	
	条項（基準）	条項番号（page）	条項（基準）	条項番号(page)
①要求レベル(1-15)	記述なし	7 章施工(p103)	1） 工場の溶接補修の記述はあるが、維持管理についての記述なし	
②検証方法(2-15)	同上	7 章施工(p103)	記述なし	
③みなし仕様(3-15)	同上 安定的にアルミニウム材を防食する鋼材の表面処理は、SPCC（冷延鋼板）では合金化亜鉛めっき、SUS304 では亜鉛粉末系化成処理がある。 アルミニウムと吸湿木材が接触する場合には、アルミニウム側に陽極酸化＋電着塗装等の複合被膜処理や、エポキシ系塗装、歴青質塗装等の表面処理を施すことが望ましい。	7 章施工(p103)	同上	

6．経済性

6-1 コスト	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）平成 10 年 12 月（社）軽金属協会		Eurocode 9 1-1 prENV1999-1-1(1997)、 Eurocode 9-2 prENV1999-2(1997)	
	条項（基準）	条項番号（page）	条項（基準）	条項番号(page)
①要求レベル(1-16)	記述なし		1） コストに合った設計を要求している	2.1(p21)
②検証方法(2-16)	記述なし		記述なし	
③みなし仕様(3-16)	記述なし		同上	

巻末資料-2

FRP設計基準EUROCOMP
条文と概要

1．安全性

1-1 外的作用に対する安全性	Eurocomp Design Code、 Structural Design of Polymer Composites	
	条項（基準）	条項番号(page)
1-1-1 破壊現象		
①要求レベル(1-1)	1） 構造物の静的な釣合い、全体の変位または変形の限界状態を考えるときには次式を確認しなければならない。 $E_{d,dst} \leqq E_{d,stb}$ $E_{d,dst}$ ； 不安定挙動の設計影響 $E_{d,stb}$ ； 安定挙動の設計影響 2） 破壊の状態、断面、部材または連結部の極端な変形（疲労は除外）を考える時には次式によって照査しなさい。 $Sd \leqq Rd$ Sd ： 軸力、モーメント、歪または変形の設計値 Rd ： 設計抵抗力、歪限界値、変形の限界値(see 2.5.3) 3） クリープの結果として定数減少が生じると、強度減少が起こりうる。このことが終局的に破壊を導く可能性がある。	2.3.2.1(p33) 4.12.3(p128)
②検証方法(2-1)	・ 設計状態、作用荷重と設計値、荷重載荷と荷重ケース ・ 荷重の組合せ ・ 解析方法	2.2.(p27) 2.3.2.2(p35) 2.5(p43)
③みなし仕様(3-1)	1） 引張部材の抵抗力照査 2） 圧縮部材の抵抗力照査 3） 剪断抵抗力の照査 4） 部材断面力組合せの照査 5） クリープ破壊の照査	4.3(p43) 4.4(p78) 4.6(p84) 4.8(p92) 4.12.3(p128)
1-1-2 静的不安定現象		
①要求レベル(1-2)	（1）構造物の静的な釣合い、全体の変位または変形の限界状態を考えるときには次式を確認しなければならない。 $E_{d,dst} \leqq E_{d,stb}$ $E_{d,dst}$ ； 不安定挙動の設計影響 $E_{d,stb}$ ； 安定挙動の設計影響 （2）破壊の状態、断面、部材または連結部の極端な変形（疲労は除外）を考える時には次式によって照査しなさい。 $Sd \leqq Rd$ Sd ： 軸力、モーメント、歪または変形の設計値 Rd ： 設計抵抗力、歪限界値、変形の限界値(see 2.5.3)	2.3.2.1(p33)
②検証方法(2-2)	・ 設計状態、作用荷重と設計値、荷重載荷と荷重ケース ・ 荷重の組合せ ・ 解析方法	2.2.(p27) 2.3.2.2(p35) 2.5(p43)
③みなし仕様(3-2)	1) ウエブの曲げ限界照査 2) ウエブの剪断限界照査 3) ウエブの曲げ＋剪断の照査 4) 圧縮フランジの座屈照査 5) 横振り座屈照査	4.7.1(p86) 4.7.2(p87) 4.7.3(p87) 4.7.4.5(p90) 4.7.4.6(p91)
1-1-3 たわみ		
①要求レベル(1-3)	（1）構造物の静的な釣合い、全体の変位または変形の限界状態を考えるときには次式を確認しなければならない。 $E_{d,dst} \leqq E_{d,stb}$ $E_{d,dst}$ ； 不安定挙動の設計影響 $E_{d,stb}$ ； 安定挙動の設計影響	2.3.2.1(p33)
②検証方法(2-3)	・ 設計状態、作用荷重と設計値、荷重載荷と荷重ケース ・ 荷重の組合せ ・ 解析方法	2.2.(p27) 2.3.2.2(p35) 2.5(p43)
③みなし仕様(3-3)	終局状態のたわみ制限を幾らにするかの明記ない。	
1-1-4 振動		
①要求レベル(1-4)	記述なし	
②検証方法(2-4)	同上	
③みなし仕様(3-4)	同上	

2．利用性

2-1 利用者の体感的快適性の確保	Eurocomp Design Code、 Structural Design of Polymer Composites 条項（基準）	条項番号(page)
2-1-1 たわみ		
①要求レベル(1-5)	1） 2）使用限界状態でたわみによる構造物の機能性を損なわない ① 使用限界状態は以下とする。 ・ 構造の外観や機能の悪影響する変形またはたわみ ・ 使用者に不快をもたらすまたは内容物に損傷をもたらす振動、横揺れ ・ 完成系または非構造要素に損傷をもたらす変形、たわみ、振動、横揺れ ② これらの限界を超えることを避けるために、変形、たわみ、振動を制限する必要がある。 ③ 示された制限値がクライアント、設計者、所管の権威者間で一致している場合は除いて、この章にて与えられる制限値を適用しなければならない。	2.2.1 (p27) 4.2.1(p75)
②検証方法(2-5)	・ 解析	2.5(p43)
③みなし仕様(3-5)	1） たわみ制限は協議事項とし、明示されない場合は以下とする。 ・ たわみの考え方 δ max ＝ δ 1＋δ 2＋δ 3 δ max ； 最終たわみ δ 0 ； キャンバー（上げ越し量） δ 1 ； 固定荷重(自重他)のたわみ δ 2 ； 活荷重たわみ＋時間軸たわみ（クリープ他） ・ 推奨値 ティピカルな状態 δ max δ 2 公共性のない臨時に用いる歩道橋 L/150 L/175 一般に明示されていない状態への適用 L/175 L/200 一般に公衆が用いる床 L/250 L/300 石膏、他の壊れやすいもの、 非可撓性区域を支える床、屋根 L/250 L/350 柱を支えている床 L/400 L/500 δ max が構造の外観を損なう場合 L/250 —	4.2.2.2(p76) 4.5.2(p82)
2-1-2 振動		
①要求レベル(1-6)	1）使用限界状態下で人々に不快を与えるような振動	4.2.1 ((p75)
②検証方法(2-6)	記述なし	
③みなし仕様(3-6)	同上	
2-1-3 騒音		
①要求レベル(1-7)	記述なし	
②検証方法(2-7)	同上	
③みなし仕様(3-7)	同上	
2-1-4 美観		
①要求レベル(1-8)	記述なし	
②検証方法(2-8)	同上	
③みなし仕様(3-8)	1） 製作時不調和色が生じないように 2） 外面塗装は同色とする	6.2.1(p240) 6.2.4(p241)
2-1-4 景観		
①要求レベル(1-9)	記述なし	
②検証方法(2-9)	同上	
③みなし仕様(3-9)	同上	

3．耐久性

3-1 時間軸における各性能の確保	Eurocomp Design Code、 Strucuural Design of Polymer Composites	
	条項（基準）	条項番号(page)
3-1-1 腐食		
①要求レベル(1-10)	1）内的外的の環境条件が、耐久性に関する影響を評価する為または材料を保護するための適切な対策を講じる為、設計段階で評価される必要がある。	2.4(p42)
②検証方法(2-10)	計画された管理プログラムは、使用中に実施するための管理計測と検査を明示しなければならない。	8.9(p272)
③みなし仕様(3-10)		
3-1-2 疲労		
①要求レベル(1-11)	1） 適切な耐久構造を保証するための、係数の考え方。 2） 構造は、確率上の許容レベルを持って、疲労荷重の結果として破壊すること、また疲労によって生じる損傷の修復を要求することないように、設計、建設されなければならない。 3) 疲労荷重として以下が挙げられている ・ リフティング機械やローリング荷重を支える部材 ・ 振動する機器から繰返し応力サイクルを支える部材 ・ 風による振動や風荷重によって交番応力を支える部材 ・ 群集によって生じる振動を支える部材	2.4(p42) 4.13.1(p130)
②検証方法(2-11)	1) 疲労設計を行う上での要求内容が示されている ① 構成要素の疲労設計において考慮されなければならない。 ・ 疲労破壊基準 ・ 構造や部材の求められる疲労寿命 ・ ある応力サイクルにおける、変動直応力と剪断応力の最大、平均、最小値は応力集中または動的振幅を考慮する。 ② 次の制限条件の一つが考慮される。 ・ 使用限界状態； 繊維の分離または樹脂のクラック ・ 終局限界状態； 破壊または構成要素の局部変形の超過 ③ 疲労に対する設計が終局限界状態で照査法は、n応力サイクルに対して、次式の基準が疲労荷重下のFRP合成構成要素の全ての位置で適用される。 式(4.58)、式(4.59) ④ 可能な限り、疲労荷重を支えているFRP構成要素の破壊の理論上の点が添接、断面変化、応力集中範囲から離れさせるように詳細構造を作る。	4.13.2(p131)
③みなし仕様(3-11)	1） 疲労設計法を示している ① 疲労強度は、可能な限り、類似の樹脂と類似なタイプ・形状のガラス繊維補強を持って作られたFRP薄板のサンプルのテストに基づいて決定されなければならない。テスト条件は設計された構成要素の荷重条件と環境条件に適合させる。 ② 使用限界状態で疲労に対しての設計照査をするために、適切なテストデータがない場合には、表4.20は直角方向繊維分離がCSM,WRとUDガラス補強を持って作られた薄板内に生じない限界歪範囲を概算するために用いられる。 ③ 終局限界状態で疲労に対する設計照査を行うために、適切なテストデータがない場合には、直応力疲労強度と剪断疲労強度（CSM,WRとUDガラス補強を持って作られた薄板のそれぞれ、相当する特性直応力強度または相当する特性剪断強度の比率で）は次式のように計算される。 式(4.60)、(4.61) ④ 疲労に対して設計するときには、設計者は特に、応力集中が存在する区域に注意を払わなければならない。これらは添接位置、凹角コーナー、ホ以降を鋭角に変化させる点で生じる。	4.13.3(p133)
3-1-3 摩耗		
①要求レベル(1-12)	記述なし	
②検証方法(2-12)	同上	
③みなし仕様(3-12)	同上	

4．施工性

	Eurocomp Design Code、 Structural Design of Polymer Composites	
	条項（基準）	条項番号(page)
4-1 施工時の安全確保		
①要求レベル(1-13)	1） 施工時の安全確保の記述は特にないが、その基となる次の点が明記 ① FRP製作者は次のことを備えなさい。 ・ FRPユニットの輸送と架設に対する明確な、豊富な知識、またその知識が現場作業で理解されていることを確認する必要がある。 ・ 合成ユニットの架設を経験した適切な熟練工による適切な現場監督	6.2.7
②検証方法(2-13)	1） 管理は、クライアントまたは関連した監督庁によって、この仕事を任された独立機関によって行われる。管理内容は以下。 ・ 内部管理計測の検証 ・ 内部管理システムから独立した別の照査過程（要領）	8.2.3
③みなし仕様(3-13)		
4-2 施工精度の確保		
①要求レベル(1-14)	1）完成した製品は、満足な外観を持たなければならない、全ての接合部で満足な適合を持つようにsquare, regular, true to line, level and plane で在らねばならない、また設計者と合意した誤差内でなければならない。	6.3.4
②検証方法(2-14)	1） 管理は、クライアントまたは関連した監督庁によって、この仕事を任された独立機関によって行われる。管理内容は以下。 ・ 内部管理計測の検証 ・ 内部管理システムから独立した別の照査過程（要領）	8.2.3
③みなし仕様(3-14)		

5．維持管理

	Eurocomp Design Code、 Structural Design of Polymer Composites	
	条項（基準）	条項番号(page)
5-1 検査・清掃・補修		
①要求レベル(1-15)	1）管理プログラムは、使用中に実施するための管理計測と検査を明示しなければならない。	8.9
②検証方法(2-15)	1）　供用中の維持管理のあり方は上記の内容しかないが、架設中の維持管理について述べている。 ① 架設作業の完成した時点、または事前に決められたインターバルで、全ての FRP 構成要素は十分な外観検査が与えられなければならない。 ② 洗い ・要求された時、ところでは、FRP の表面は、洗剤と水を用いて、清浄水を噴出しながら剛毛ブラシ又はナイロンパッドを用いてクリーンにする。 ・ワイヤーウールまたは目立ての洗い研磨剤（軽石など）は用いてはならない。 ③ 塗装 ・ 色あせた、引っ掻かれたまたは軽い損傷表面は適切なブラシやスプレーを用いた塗料を用いて改善または補修される。 ・ FRP 表面に用いられる塗料や他のコーティングシステムは FRP 樹脂に適合しており、樹脂製造者によって承認されていなければならない。 ・ メチレン二塩化物を含む普通の塗料剥離材は用いてはならない、熱して抜き取ることはどのような環境下においても実施してはならない。 ・ 非構造構成要素においては；前記 6.7.2 のように洗った後に、約 0.5mm 幅以上の表面クラックはクラックの目視終点を少なくとも 50mm 超えて、承認されたブラシ使用の溶解自由なエポキシ溶液を用いて埋められる。これは、重ね塗りする前に wetーすりへらしされなければならない。 ・ 適切な塗料システムとは： 非黄色（脂肪族）two－part ポリウレタン塗料 シリコンアルキドエナメル 2）　局部損傷の補修 ① 補修は設計者と製作者によって一致した過程に従って行われなければならない（and in accordance with manufacturer's recommendations)。 ② 修は極端に損傷した構成要素を行ってはならない、補修された部分は外観、や耐久性を損なうでしょう。 ③ 観が問題とならない場合には、補修がテストによって正当化さえできれば、損傷したユニットを補修することが認められる。 ④ 補修が行われる場所は ・ 周囲の積層は適度にざらざら化しなければならない、もし必要ならば、研磨または適切な化学薬品（primer？）を用いて。 ・ FRP ユニットの製作に用いられた材料と互換性のある材料が、補修では用いられなければならない。 ・ 補修は十分に乾燥させなければならない、必要な場合には、現場乾燥のために適切なポータブルヒーターが用いられる。	6.7 6.6
③みなし仕様(3-15)		

6．経済性

6-1 コスト	Eurocomp Design Code、 Structural Design of Polymer Composites	
	条項（基準）	条項番号(page)
①要求レベル(1-16)	記述なし	
②検証方法(2-16)	同上	
③みなし仕様(3-16)	同上	

巻末資料-3

金慶橋設計対比表

比較表

項　目	金　慶　橋	文献金慶橋(1) (pp36-37)	アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）	道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）
(1)使用材料	本橋は活荷重合成桁でありガーダーに**耐蝕アルミ合金７種（B.S.NP5/6）**を使用している。 使用理由） １）高力アルミ合金（14Ｓ）は、信用できる溶接継手を得られず、また熱処理の関係上、大サイズの板も得られず、リベット継手箇所箇所が多くなり、美観上好ましくない。 ２）溶接構造用アルミ合金は強度は落ちるが、溶接性がよく、大サイズの板が得られ、単価も少し安くなる。 ３）非熱処理材は、直接に風雨を受けない部分には、塗装の必要がない。 ４）たわみについても熱処理材とＥが同じであるので不利とならない。 ５）他の分野でアルミ合金溶接の実績があった上、試験的にも溶接桁をという要望にこたえた。 以下に金慶橋の使用材料を示す。 **表―２　金慶橋使用材料** **橋桁工事（仕上り重量）** 主　桁　7,256kg（内アルミ合金6,253kg）　AzP7-F　6,220kg 伸縮継手　1,035　SS41　2,215 支承板　650　ANV　36 排水管　33　Zn　74 FC15　400 計　8,974（内アルミ合金 6,253）　SGR　29 計　8,974 **高欄工事（仕上り重量）** 手摺通貫　594kg　63S−T5　554kg 支柱　172　52S−O　122 床板　91　A2P7−F　36 アンカーボルト　93　Zn　16 SS41　184 950（内アルミ合金750）　61S−T4　38 計　950 **コンクリート工事** 舗装アスコン　7.77m³ 床版コンクリート　31.98 床版鉄筋　φ16　65／φ13　3,529／φ9　1,030　4,624kg 親柱コンクリート　1,291m³ 親柱鉄筋　φ16　280／φ9　56　336kg **溶接棒およびアルゴンの消費量** 溶接長　756.66m　溶接工数　612.0H 溶接棒　109.4kg（0.145kg/m）　（アルミ合金のみ） アルゴン　78000.0ℓ　（103ℓ/m）　1時間当溶接長 1.23m		1.2 (p.1) 主な強度部材に使用するアルミニウム合金は表 1.2.1 に示す日本工業規格(以下 JIS という)に適合するものを標準とする。ただし，表 1.2.2 に規定した以外の材料については，使用目的を十分満足することを確認した上で使用することができる。 表 1.2.1 アルミニウム合金材料規格 製品の種類 ／ 規格 アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条　JIS H 4000 アルミニウム及びアルミニウム合金の棒及び線　JIS H 4040 アルミニウム及びアルミニウム合金継目無管　JIS H 4080 アルミニウム及びアルミニウム合金押出形材　JIS H 4100 表 1.2.2 アルミニウム合金の材質と調質 板材　A5083-H112, A5083-O, A6061-T6 押出材　A5083-H112, A5083-O, A6061-T6, A6063-T5, A6N01-T5	鋼材　I_3.1 (pp.72-73) コンクリート　I_3.2 (p.81)

比較表

項　目	金　慶　橋	アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）	道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）
(2)使用材料の基準強度及び機械的性質	文献金慶橋(1) (pp.38-39)	1.2 (p.3-4)	鋼材　Ⅱ_1.6 (pp.106-113) コンクリート

表—4—1　使用アルミ合金材の化学成分および機械的性質

合金記号	化学成分 % Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	機械的性質 引張強さ kg/mm²	耐力 kg/mm	せん断強度 kg/mm²	伸%	備考
JISH 4104 A2P7—0	<0.1	<0.4	<0.4	0.3 ~1.0	3.8 ~4.8	<0.1	<0.5	<0.2	残	>27.0	>13.0	—	>15 >19	厚0.5~1.5mm 〃1.5以上
防衛庁 AND	<0.1	<0.4	<0.4	<1.0	3.0 ~4.0	<0.5	<0.1	<0.2	残	>23.0	—	—	>20	〃
以下個単成分を示す）														
Alcoa 61S—T4	0.25	0.6	—	—	1.0	0.25	—	—	残	24.6	14.8	16.9	22	伸は厚1/sein板の 2in でのもの
〃 63S—T5	—	0.4	—	—	0.65	—	—	—	残	19.0	14.8	12.0	12	〃
〃 52S—O	—	—	—	—	2.5	0.25		—	残	19.7	9.1	12.7	25	〃
参考（同　上）														
BS NP⁶/₀	—	—	—	0.6	4.3	—	—	—	残	26.8	12.0	16.2	22	機械的性質および伸は 5056—0 のもの

註　アルミ合金の応力ヒズミ曲線には鋼の様な降伏点が現れないので，0.2% の永久歪を生ずる時の応力を耐力と名づけている．
ただし英国（B.S.規格）では，これを0.1%としている。

表—4—2　アルミ合金Ａ２Ｐ７—Ｆの化学成分および機械的性質

使用個所 板厚 mm	化学成分 % Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	機械的性質 引張強さ kg/mm²	耐力 kg/mm²	せん断強度 kg/mm²	伸%	備考
アラソリ 25	0.02	0.07	0.16	0.52	4.3	0.20	0.01	—	残	31.4	—	—	30.0	Gauge Length 50
アラソリ 14	0.02	0.07	0.15	0.51	4.2	0.21	0.01	—	残	30.8	—	—	26.5	〃 〃
アラソリ 12	0.02	0.07	0.15	0.51	4.2	0.21	0.01	—	残	30.2	—	—	27.0	〃 〃
アラソリ 10	0.02	0.07	0.15	0.51	4.2	0.21	0.01	—	残	31.1	—	—	22.5	〃 〃
フジラ鋼ソ板 8	0.02	0.07	0.15	0.51	4.2	0.21	0.01	—	残	33.0	—	—	22.5	〃 〃

註　耐力は神戸製鋼兵庫工場の資料によれば　16.5~17.5kg/mm² であった．

表—解 1.2.1　使用材料の基準強度　（単位：kg/cm²）

材質と調質		厚さ (mm)	部位	引張 σ_u	引張 σ_{uy}	圧縮 σ_{cy}	せん断 τ_u	せん断 τ_y	支圧 σ_{bu}	支圧 σ_{by}
板材	5083-H112 5083-O	t≦40	母材	2800	1300	1300	1600	750	5300	2100
			溶接熱影響部	2800	1300	1300	1600	750	5300	2100
	6061-T6	t≦6.5	母材	3000	2500	2500	1750	1450	5700	4000
			溶接熱影響部	2100	1100	1100	1200	650	4000	1750
押出材	5083-H112 5083-O	t≦40	母材	2800	1200	1200	1600	700	5300	1900
			溶接熱影響部	2800	1200	1200	1600	700	5300	1900
	6061-T6	t≦25	母材	2700	2500	2500	1550	1450	5150	4000
			溶接熱影響部	1800	1100	1100	1050	650	3400	1750
	6063-T5	t≦25	母材	1600	1100	1100	900	650	3050	1750
			溶接熱影響部	1200	600	600	700	350	2300	950
	6N01-T5	t≦6	母材	2500	2100	2100	1450	1200	4750	3350
			溶接熱影響部	1800	1100	1100	1050	650	3400	1750
		6<t≦12	母材	2300	1800	1800	1350	1050	4350	2900
			溶接熱影響部	1700	1000	1000	1000	600	3250	1600

表—解 1.2.2　使用材料の JIS 機械的性質

材質と調質		厚さ (mm)	引張強さ (kgf/cm²)	0.2%耐力 (kgf/cm²)	伸び(%)
板材	5083-H112	4 以上　6.5 以下	2900 以上	1300 以上	11 以上
		6.5 を超え　40 以下	2800 以上	1300 以上	12 以上
	5083-O	0.5 以上　0.8 以下	2600 以上 3600 以下	——	16 以上
		0.8 を超え　40 以下	2800 以上 3600 以下	1300 以上 2000 以下	
	6061-T4	0.4 以上　0.5 以下	2100 以上	——	14 以上
		0.5 を超え　6.5 以下		1100 以上	16 以上
	6061-T6	0.4 以上　0.5 以下	3000 以上	——	8 以上
		0.5 を超え　6.5 以下		2500 以上	10 以上
押出材	5083-H112	130 以下	2800 以上	1100 以上	12 以上
	5083-O	38 以下	2800 以上 3600 以下	1200 以上	14 以上
	6061-T4	——	1800 以上	1100 以上	16 以上
	6061-T6	6 以下	2700 以上	2500 以上	8 以上
		6 を超えるもの			10 以上
	6063-T1	12 以下	1200 以上	600 以上	12 以上
		12 を超え　25 以下	1100 以上	550 以上	
	6063-T5	12 以下	1600 以上	1100 以上	8 以上
		12 を超え　25 以下	1500 以上		
	6N01-T5	6 以下	2500 以上	2100 以上	8 以上
		6 を超え　12 以下	2300 以上	1800 以上	

※　せん断強さとせん断降伏応力度は、アルミニウム合金の降伏条件が von Mises の条件式に従うものとして、それぞれ引張強さと引張降伏応力度の 1／√3 とした。
（鋼材と同じ考え方）

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度	許容引張応力度　900kgf/cm² 許容圧縮応力度　800kgf/cm²	設計計算書 (p.002) 文献金慶橋(1) (p.36) (p.38)	母材（その１）	2.1 (pp.8-11)	鋼材（その１）	Ⅱ_2.2.1 (pp.116-120)

表—3　設計許容応力度 (kg/cm²)

種別	A2 P7（生地）	A N V（リベット材）	52S−O（高張）	63S−T5（〃）	61S−T4（ボルト）
1. 軸方向引張応力度（純断面積につき）	900	−	630	600	750
2. 軸方向圧縮応力度（総断面積につき） l=部材長 r=部材総断面の回転半径	0<l/r≦80 850−0.08 ×(l/r)² l/r>80は使用しないこととする	−	0<l/r≦80 600−0.08 ×(l/r)² l/r>80は使用しないこととする	−	−
3. 曲げ応力度 けたの引張縁（純断面積につき） けたの圧縮縁（総断面積につき） l=フランジ固定点間距離 b=フランジ幅	900 850−0.9(l/b)²	− −	630 630−0.9(l/b)²	600 600−0.9(l/b)²	− −
4. せん断応力度 プレートガーダーの腹板 工場リベット 現場リベット 仕上ボルト	700 − − −	− 700 560 −	− − − −	− − − −	− − − 750
5. 支圧応力度 工場リベット 現場リベット 仕上ボルト	− − −	1,500 1,200 −	− − −	− − −	− − 1,600

註　材質符号中ヘイフォンにて示す文字および数字について
O：加工硬化したものを完全軟化した軟質材
T4：液体化処理後、常温時効を完了したもの
T5：加工後、そのまま高温時効（焼戻し）させたもの

※　突き合せ溶接部は溶接材の強度を考慮して低減

(25.9＋26.4)／(2×33)≒0.8

表—5　鋼およびアルミ合金の許容応力比較表

材　料	破壊引張強度 kg/mm²	降伏点または耐力 kg/mm²	許容引張応力度 kg/mm²	破壊引張強度／許容引張応力度	降伏点又は耐力／許容引張応力度
SS 41	41 (min)	23 (min)	13.0	3.15	1.77
14S−T6	47 〃	42 〃	15.5	3.03	2.71
A2P7−O	27 〃	13 〃	9.0	3.00	1.44
A2P7−F	33	17.0(平均)	9.0	3.67	1.89

(1)　構造用アルミニウム合金母材の許容軸方向引張応力度，許容曲げ応力度，許容せん断応力度および許容支圧応力度は，表 2.1.1 に示す値とする。

表 2.1.1 構造用アルミニウム合金板母材の許容応力度　(単位：kgf/cm²)

	板材		板材
材質と調質	5083-H112	5083-O	6061-T6
適用板厚　t (mm)	t≦40		t≦6.5
軸方向引張応力度（純断面積につき）	700		1350
軸方向圧縮応力度（総断面積につき） ℓ：有効座屈長　(cm) r：部材断面二次半径(cm)	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 9$　650 (b) $9<\frac{\ell}{r}\leqq 119$　$650-3.9\left(\frac{\ell}{r}-9\right)$ (c) $119<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$		(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 9$　1200 (b) $9<\frac{\ell}{r}\leqq 65$　$1200-8.2\left(\frac{\ell}{r}-9\right)$ (c) $65<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
曲げ応力度 (1)桁の引張縁(純断面につき) (2)桁の圧縮縁(総断面につき) (2.1)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが連続床版などで固定されている場合または箱桁 (2.2)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが連続床版などで固定されていない場合 $\frac{A_w}{A_c}\leqq 2$ $\frac{A_w}{A_c}>2$ ℓ：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの固定間距離(cm) b：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞ幅　(cm) A_c：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの総断面積(cm²) A_w：腹板の総断面積(cm²) $K=\sqrt{3+\frac{A_w}{2A_c}}$	700 700 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 7$　700 (b) $7<\frac{\ell}{b}\leqq 36$　$700-15\left(\frac{\ell}{b}-7\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{14}{K}$　700 (b) $\frac{14}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 36$　$700-7.5\left(K\frac{\ell}{b}-14\right)$	1350 1350 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 5$　1350 (b) $5<\frac{\ell}{b}\leqq 20$　$1350-34\left(\frac{\ell}{b}-5\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{10}{K}$　1350 (b) $\frac{10}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 20$　$1350-17\left(K\frac{\ell}{b}-10\right)$
せん断応力度（総断面積につき）	400		780
支圧応力度 (1)リベット，ボルト穴の支圧 (2)平面とピンの支圧 長穴内のボルトによる支圧	1150 750		2150 1450

比較表

項　目	金　慶　橋	アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）	道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）
(3)許容応力度 （続き）		母材（その２）　2.1 (pp.8-11)	鋼材（その２）　Ⅱ_2.2.1 (pp.116-120)

表 2.1.1 構造用アルミニウム合金押出母材の許容応力度(つづき)　(単位：kgf/cm²)

材質と調質	押出材 5083-H112	押出材 5083-O	押出材 6061-T6
適用板厚　t (mm)	t≦40		t≦25
軸方向引張応力度（純断面積につき）	650		1250
軸方向圧縮応力度（総断面積につき） ℓ：有効座屈長　(cm) r：部材断面二次半径(cm)	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 10$　600 (b) $10<\frac{\ell}{r}\leqq 125$　$600-3.5\left(\frac{\ell}{r}-10\right)$ (c) $125<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$		(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 9$　1200 (b) $9<\frac{\ell}{r}\leqq 65$　$1200-8.2\left(\frac{\ell}{r}-9\right)$ (c) $65<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
曲げ応力度 (1)桁の引張縁（純断面につき） (2)桁の圧縮縁（総断面につき） (2.1)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されている場合または箱桁 (2.2)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されていない場合 $\frac{A_w}{A_c}\leqq 2$ $\frac{A_w}{A_c}>2$ ℓ：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの固定間距離(cm) b：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞ幅　(cm) A_c：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの総断面積(cm²) A_w：腹板の総断面積(cm²) $K=\sqrt{3+\frac{A_w}{2A_c}}$	650 650 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 7$　650 (b) $7<\frac{\ell}{b}\leqq 38$　$650-13\left(\frac{\ell}{b}-7\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{14}{K}$　650 (b) $\frac{14}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 38$　$650-6.5\left(K\frac{\ell}{b}-14\right)$		1350 1350 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 5$　1350 (b) $5<\frac{\ell}{b}\leqq 20$　$1350-34\left(\frac{\ell}{b}-5\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{10}{K}$　1350 (b) $\frac{10}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 20$　$1350-17\left(K\frac{\ell}{b}-10\right)$
せん断応力度（総断面積につき）	400		700
支圧応力度 (1)リベット，ボルト穴の支圧 (2)平面とピンの支圧 長穴内のボルトによる支圧	1050 700		1950 1300

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度 （続き）			母材（その３）	2.1 (pp.8-11)	鋼材（その３）	Ⅱ_2.2.1 (pp.116-120)

表 2.1.1 構造用アルミニウム合金押出母材の許容応力度(つづき)　(単位：kgf/cm²)

	押出材		
材質と調質	6063-TS	6N01-TS	
適用板厚　t (mm)	t≦25	t≦6	6<t≦12
軸方向引張応力度 (純断面積につき)	600	1150	950
軸方向圧縮応力度 (総断面積につき) ℓ：有効座屈長 (cm) r：部材断面二次半径 (cm)	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 14$　550 (b) $14<\frac{\ell}{r}\leqq 97$ $550-2.6\left(\frac{\ell}{r}-14\right)$ (c) $97<\frac{\ell}{r}$ $\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 10$　1000 (b) $10<\frac{\ell}{r}\leqq 70$ $1000-6.0\left(\frac{\ell}{r}-10\right)$ (c) $70<\frac{\ell}{r}$ $\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 11$　850 (b) $11<\frac{\ell}{r}\leqq 76$ $850-4.7\left(\frac{\ell}{r}-11\right)$ (c) $76<\frac{\ell}{r}$ $\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
曲げ応力度 (1)桁の引張縁(断面積につき) (2)桁の圧縮縁(断面積につき) (2.1)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されている場合または箱桁 (2.2)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されていない場合 $\frac{A_w}{A_c}\leqq 2$ $\frac{A_w}{A_c}>2$ ℓ：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの固定間距離 (cm) b：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞ幅 (cm) A_c：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの総断面積 (cm^2) A_w：腹板の総断面積 (cm^2) $K=\sqrt{3+\frac{A_w}{2A_c}}$	600 600 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 8$　600 (b) $8<\frac{\ell}{b}\leqq 30$ $600-10\left(\frac{\ell}{b}-8\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{16}{K}$　600 (b) $\frac{16}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 30$ $600-5\left(K\frac{\ell}{b}-16\right)$	1150 1150 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 6$　1150 (b) $6<\frac{\ell}{b}\leqq 22$ $1150-28\left(\frac{\ell}{b}-6\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{12}{K}$　1150 (b) $\frac{12}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 22$ $1150-14\left(K\frac{\ell}{b}-12\right)$	950 950 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 6$　950 (b) $6<\frac{\ell}{b}\leqq 23$ $950-19\left(\frac{\ell}{b}-6\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{12}{K}$　950 (b) $\frac{12}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 23$ $950-9.5\left(K\frac{\ell}{b}-12\right)$
せん断応力度 (総断面積につき)	350	650	550	
支圧応力度 (1)リベット，ボルト穴の支圧 (2)平面とピンの支圧 長穴内のボルトによる支圧	950 650	1800 1200	1550 1050	

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度 （続き）			溶接熱影響部（その１）	2.2 (pp.19-23)	溶接部および接合用鋼材の許容応力度	Ⅱ_2.2.3 (pp.133-139)

(1) 構造用アルミニウム合金の溶接部の許容応力度は，次に示す２つの場合に分けて規定するものとする。

1) 軸方向に直角な溶接部の許容応力度

軸方向に直角な方向に溶接された部材の許容軸方向圧縮応力度は，溶接部が部材の両端から部材長さの 1/20 以内にある場合には表 2.1.1，それ以外にある場合には表 2.2.1 に示す値とする。

ただし，許容軸方向引張応力度，許容曲げ応力度の引張縁，許容せん断応力度および許容支圧応力度は，表 2.2.1 に示す値とする。

2) 軸方向に溶接された場合の溶接熱影響部を含む断面の許容応力度

軸方向に平行な溶接部の許容応力度は，材料の板厚に関係なく，溶接部(溶接中心線から両側にそれぞれ 25mm 以内の部分)の断面積が，引張部材では純断面積，圧縮部材では総断面積，曲げ部材では圧縮フランジ断面積の 15%以上の場合，次式から計算される値とする。

$$\sigma_{wa} = \sigma_a - \frac{A_w}{A}(\sigma_a - \sigma'_a) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.2.1)$$

ここに，　σ_{wa} ：断面の一部に溶接部のある断面の許容応力度

σ_a ：表 2.1.1 に示す母材の許容応力度

σ'_a ：表 2.2.1 に示す溶接熱影響部の許容応力度

A ：全断面積。引張部材では純断面積，圧縮部材では総断面積，曲げ部材の圧縮フランジではこれにつながるウェブの高さの 1/6 の断面もフランジ断面と見なす。

A_w ：断面積Ａの中の溶接熱影響部の断面積

(2) 溶接熱影響部の許容応力度

1) 構造用アルミニウム合金溶接熱影響部の許容軸方向引張応力度，許容曲げ応力度許容せん断応力度および許容支圧応力度は，表 2.2.1 に示す値とする。なお，強度の異なる合金を溶接する場合は，強度の低い合金に対する値をとるものとする。

2) 表 2.2.1 に規定された溶接熱影響部の許容応力度は，MIG 溶接と，一層の TIG 溶接に適用するものとする。

二層以上の TIG 溶接の場合には，試験により得られた強度を用いるものとする。O 材の強度を適用する場合にはこの試験を省くことができる。

3) 曲げ応力度を照査する断面を含む圧縮フランジの固定点間の部材において，部材両端の曲げモーメントが異なり，その間で曲げモーメントがほぼ直線的に変化する場合は，2.1(2)によるものとする。

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度 （続き）			溶接熱影響部（その２）	2.2 (pp.19-23)	鋼桁床版鉄筋	Ⅱ_6.1.7 (pp.222-223)
					合成桁（コンクリート）	Ⅱ_9.3.1 (pp.286-289)

表 2.2.1 構造用アルミニウム合金板溶接熱影響部の許容応力度　（単位：kgf/cm²）

材質と調質	板・材 5083-H112	板・材 5083-O	板・材 6061-T6
適用板厚　t（mm）	t≦40		t≦6.5
軸方向引張応力度 （純断面積につき）	700		600
軸方向圧縮応力度 （総断面積につき） ℓ：有効座屈長（cm） r：部材断面二次半径(cm)	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 9$　650 (b) $9<\frac{\ell}{r}\leqq 119$　$650-3.9\left(\frac{\ell}{r}-9\right)$ (c) $119<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$		(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 72$　600 (b) $72<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
曲げ応力度 (1)桁の引張縁（純断面積につき） (2)桁の圧縮縁（総断面積につき） (2.1)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されている場合または箱桁 (2.2)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されていない場合 $\frac{A_w}{A_c}\leqq 2$ $\frac{A_w}{A_c}>2$ ℓ：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの固定間距（cm） b：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞ幅　（cm） A_c：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの総断面積(cm²) A_w：腹板の総断面積（cm²） $K=\sqrt{3+\frac{A_w}{2A_c}}$	700 700 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 7$　700 (b) $7<\frac{\ell}{b}\leqq 36$　$700-15\left(\frac{\ell}{b}-7\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{14}{K}$　700 (b) $\frac{14}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 36$　$700-7.5\left(K\frac{\ell}{b}-14\right)$		600 600 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 24$　600
せん断応力度 （総断面積につき）	400		350
支圧応力度 (1)リベット，ボルト穴の支圧 (2)平面とピンの支圧 長穴内のボルトによる支圧	1150 750		950 650

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度 （続き）			溶接熱影響部（その３）	2.2 (pp.19-23)	ＲＣ部材（コンクリート）	Ⅲ_3.2.1 (pp.155-157)

表 2.2.1 構造用アルミニウム合金押出溶接熱影響部の許容応力度(つづき)(単位：kgf/cm²)

	押出材		
材質と調質	5083-H112	5083-O	6061-T6
適用板厚　t (mm)	t≦40		t≦25
軸方向引張応力度 (純断面積につき)	650		600
軸方向圧縮応力度 (総断面積につき) ℓ：有効座屈長　(cm) r：部材断面二次半径(cm)	(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 10$　600 (b) $10<\frac{\ell}{r}\leqq 125$　$600-3.5\left(\frac{\ell}{r}-10\right)$ (c) $125<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$		(a) $\frac{\ell}{r}\leqq 72$　600 (b) $72<\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
曲げ応力度 (1)断の引張応力 (純断面積につき) (2)断の圧縮応力 (総断面積につき) (2.1)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されている場合または箱桁 (2.2)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されていない場合 $\frac{A_w}{A_c}\leqq 2$ $\frac{A_w}{A_c}>2$ ℓ：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの固定間距 (cm) b：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞ幅　(cm) A_c：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの総断面積(cm²) A_w：腹板の総断面積　(cm²) $K=\sqrt{3+\frac{A_w}{2A_c}}$	650 650 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 7$　650 (b) $7<\frac{\ell}{b}\leqq 38$　$650-13\left(\frac{\ell}{b}-7\right)$ (a) $\frac{\ell}{b}\leqq\frac{14}{K}$　650 (b) $\frac{14}{K}<\frac{\ell}{b}\leqq 38$　$600-6.5\left(K\frac{\ell}{b}-14\right)$		600 600 (a) $\frac{\ell}{b}\leqq 24$　600		
せん断応力度 (総断面積につき)	400		350			
支圧応力度 (1)リベット，ボルト穴の支圧 (2)平面とピンの支圧 長穴内のボルトによる支圧	1050 700		950 650			
					ＲＣ部材（鉄筋）	Ⅱ_3.2.2 (pp.157-158)

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度 （続き）			溶接熱影響部（その４）	2.2 (pp.19-23)	ＰＣ部材（コンクリート）	Ⅲ_3.3.1 (pp.159-161)
					ＰＣ部材（鋼材）	Ⅲ_3.3.2 (pp.162-163)

表 2.2.1 構造用アルミニウム合金押出溶接熱影響部の許容応力度（つづき）（単位：kgf/cm²）

押出材			
材質と調質	6063-T5	6N01-T5	
適用板厚　t（mm）	t≦25	t≦6	6＜t≦12
軸方向引張応力度 （純断面積につき）	350	650	550
軸方向圧縮応力度 （総断面積につき） ℓ：有効座屈長　(cm) r：部材断面二次半径(cm)	(a) $\frac{\ell}{r}$≦95　350 (b) 95＜$\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$	(a) $\frac{\ell}{r}$≦72　600 (b) 72＜$\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$	(a) $\frac{\ell}{r}$≦76　550 (b) 76＜$\frac{\ell}{r}$　$\frac{3.14\times10^6}{\left(\frac{\ell}{r}\right)^2}$
曲げ応力度 (1)桁の引張縁（純断面積につき） (2)桁の圧縮縁（総断面積につき） (2.1)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されている場合または箱桁 (2.2)圧縮ﾌﾗﾝｼﾞが直接床版などで固定されていない場合 ℓ：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞの固定間距 (cm) b：圧縮ﾌﾗﾝｼﾞ幅　(cm)	350 350 (a) $\frac{\ell}{b}$≦31　350	600 600 (a) $\frac{\ell}{b}$≦24　600	550 550 (a) $\frac{\ell}{b}$≦25　550
せん断応力度 （総断面積につき）	200	350	300
支圧応力度 (1)リベット，ボルト穴の支圧 (2)平面とピンの支圧 長穴内のボルトによる支圧	500 350	950 650	850 600

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(4)許容応力度の割増し係数	対傾構の設計において、 地震　：1.8 風荷重：1.25 の割増しが考慮されている。	設計計算書 (p.35)	表－解 1.4.1 アルミニウム合金製橋梁を対象とした荷重の組合せによる許容応力度の割増し係数 荷　重　の　組　合　せ / 割増し係数 (1) 主荷重＋主荷重に相当する特殊荷重 / 1.00 (2) 主荷重＋主荷重に相当する特殊荷重＋温度変化の影響 / 1.20 (3) 主荷重＋主荷重に相当する特殊荷重＋風荷重 / 1.30 (4) 主荷重＋主荷重に相当する特殊荷重＋温度変化の影響＋風荷重 / 1.40 (5) 主荷重＋主荷重に相当する特殊荷重＋制動荷重 / 1.30 (6) 主荷重＋主荷重に相当する特殊荷重＋衝突荷重 / 1.65 (7) 風荷重のみ / 1.25 (8) 制動荷重のみ / 1.25 (9) 活荷重および雪害以外の主荷重＋地震の影響 / 1.55 (10) 架設時荷重 / 1.30 また，本割増率は許容応力度設計法によって設計計算が行われることを前提として構成されているため，荷重抵抗係数設計法などを用いる場合にはこのまま適用してはならない。	1.4.2 (p.5)	鋼橋	Ⅱ_2.1 (pp.114-116)
(5)物理定数の値	ヤング係数：E＝7.3×10⁵kgf/cm² 線膨張係数：α＝2.38×10⁻⁵(1/□)	設計計算書 (p.039) 設計計算書 (p.016)	設計計算に用いるアルミニウム合金の物理定数の値は表 1.3.1 による。 表 1.3.1 アルミニウム合金の物理定数の値 種　類 / 物理定数の値 単位体積重量 / 2700 (kgf/m³) ヤング係数 / 7.0×10⁵ (kgf/cm²) せん断弾性係数 / 2.7×10⁵ (kgf/cm²) ポアソン比 / 0.3 線膨張係数 / 24×10⁻⁶ (1/℃)	1.3 (p.4)	鋼桁（合成桁） コンクリート橋 鋼材、コンクリート	Ⅱ_9.3.1 (pp.288-229) Ⅲ_3.1 (pp.153-154) Ⅰ_3.3 (pp.84-86)

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(6)設計計算に関する一般事項 ①床版作用としての設計用ヤング係数比	n＝Es/Ec＝15	設計計算書 (p.015)			鋼橋の床版 n＝Es/Ec＝15	Ⅱ_6.2.1 (p.209)
②主桁作用としての設計用ヤング係数比	n＝Es/Ec＝3	設計計算書 (p.014)			合成桁 n＝Es/Ec＝7	Ⅱ_9.2.2 (p.279)
③版のコンクリートの乾燥収縮およびクリープ係数	最終収縮度　：$\varepsilon s=18\times10^{-5}$ クリープ係数：　$\varphi=2.5$ ヤング係数比：n＝Es/Ec＝3 の代わりに $n_\varphi=n\times(1+\varphi)=3\times(1+2.5)=10.5$	設計計算書 (p.015)			合成桁 ○クリープによる応力度を算出する場合 クリープ係数：　$\varphi_1=2.0$ ヤング係数比：n＝Es/Ec＝7 の代わりに $n_1=n\times(1+\varphi_1/2)=7\times(1+2.0/2)=14$ ○クリープによる応力度を算出する場合 最終収縮度　：$\varepsilon s=20\times10^{-5}$ クリープ係数：　$\varphi_2=2\varphi_1=4.0$ ヤング係数比：n＝Es/Ec＝7 の代わりに $n_1=n\times(1+\varphi_1/2)=7\times(1+4.0/2)=21$	Ⅱ_9.2.6 (pp.281-284) Ⅱ_9.2.6 (pp.285-286)
③版のコンクリートと主桁との温度差	温度差　　：10□ 線膨張係数：$\alpha=2.38\times10^{-5}$ (1/□) ※温度差は道示Ⅱに準拠している。	設計計算書 (p.015)	線膨張係数：$\alpha=2.4\times10^{-5}$ (1/℃) ※アルミニウム合金の線膨張係数は、鋼またはコンクリート構造物の約２倍である。	1.3 (p.4)	温度差　　：10℃ 線膨張係数：$\alpha=2.38\times10^{-5}$ (1/□)	Ⅱ_9.2.7 (pp.284-285)

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(7)荷重 ①単位体積重量	アルミニウム：2800 kgf/m³ ※金慶橋では道示□の単位重量を使用している。 （アルミニウムの単位重量は鋼の約 1/2.8）		アルミニウム合金：2700 kgf/m³	1.3 (p.4)		Ⅰ_2.1.2 (p.10)
②活荷重	鋼道路橋設計示方書（昭和 39 年８月）に準拠 $a=1-(w-5.5)/50$　$(1 \geqq a \geqq 0.75)$ w：Ｌ荷重の載荷幅(m) （道示Ⅱ　付録２　表-1：次頁参照）	設計計算書 (p.010)			道路橋設計活荷重の変遷（付録２　表-1）次頁参照	Ⅰ_2.1.3 (pp.10-26) Ⅱ_付録２ (pp.456-459)
③衝撃係数	鋼道路橋設計示方書（昭和 39 年８月）に準拠 $i=20/(50+L)$　（Ｔ荷重、Ｌ荷重ともに） （道示Ⅱ　付録２　表-1：次頁参照）	設計計算書 (p.003、010)				Ⅰ_2.1.4 (pp.26-31) Ⅱ_付録２ (pp.456-459)

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(8)たわみの許容値	活荷重（衝撃を含まない）による桁のたわみ 許容値：L/600 計算値：1.47mm（L/1360）	設計計算書 (p.039)	(1) 構造物または部材の変位・変形・振動・騒音等が，構造物の機能，使用性，および，耐久性を損なわないように，たわみには制限を加えるものとする。 (2) たわみの照査は，構造物または部材のたわみ制限に対して静的解析により照査することを基本とし，次式により照査するものとする。 $\delta \leq \delta_a$ ……(1.4.2) ここに，δ ：構造物または部材のたわみ δ_a ：構造物または部材のたわみの許容値 (3) 構造物または部材のたわみは，死荷重などの永久荷重を除いた変動荷重(衝撃は含まず)による荷重作用に対して，部材の総断面積を用いて算出することを原則とする。 (4) たわみの許容値は，対象とする構造物の形式や規模，および，その使用条件に応じて定めるものとし，類似の構造物に設計基準等の定めがある場合にはそれを準用し，ない場合には類似の構造物における動的応答解析結果や測定結果なども参照して定めるものとする。 ※道路橋の場合、道示□に準拠	1.4.3 (pp.5-6)		Ⅱ_1.4 (pp.104-106)
(9)そり	そりは死荷重のたわみの量だけ付ける。	設計計算書 (p.040)	(1) 支間 10m 以上のプレートガーダーには、そりを付けるのを原則とする。 (2) そりは死荷重に対して路面が所定の高さになるように付けるものとする。	6.8 (p.102)	合成桁 合成桁の鋼桁にはそりを付けるのを原則とする。	Ⅱ_9.7 (p.298)
(10)疲労の影響	引張強度または降伏強度に対する疲労限度の低下する割合が大きいので、突き合わせ溶接部は鉄道橋並みにグラインダー仕上げとしている。	設計図	構造物に疲労の恐れがあるような繰り返し荷重が作用する場合には、疲労の影響を考慮しなければならない。 ※アルミニウム合金に対する統一された疲労設計法がないので、AA（Aluminum Association）の疲労設計の概要が示されている。	2.3 (pp.23-25)	鋼橋 道路橋においては、鋼床版ならびに道路橋に軌道または鉄道を併用する場合などを除いて一般に疲労の影響を考慮しなくてもよい。	Ⅱ_3.1.5 (p.144)

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(11)主要部材の最小板厚	t＝8mm （理由）アルミ合金橋の主要部材に対する最小板厚は耐蝕性その他の点から鋼橋の場合より緩和してよいが、Ｅの値が小さいため 8mm とした。	文献金慶橋(1) (p.37)	主な強度部材の厚さは、3mm 以上としなければならない。	3.1.3 (p.26)		Ⅱ_3.1.6 (pp.144-145)
			プレートガーダーの場合 ○引張フランジの板厚 ・自由突出部：自由突出幅の 1/16 以上 ・箱桁の引張フランジ：腹板中心間隔の 1/80 以上 ただし、十分剛な補剛材がある場合には、補剛材間隔とする。 ※道示Ⅱに準拠	6.3.1 (p.90)		
			○腹板	6.5 (pp.91-96)	プレートガーダーの場合 ○引張フランジの板厚 ・自由突出部：自由突出幅の 1/16 以上 ・箱桁の引張フランジ：腹板中心間隔の 1/80 以上 ただし、十分剛な補剛材がある場合には、補剛材間隔とする。	Ⅱ_8.3.1 (p.250) Ⅱ_8.3.2 (pp.250-251)
			プレートガーダーの腹板厚は，表 6.5.1 の値以上でなければならない。 計算応力度が許容応力度に比べて小さい場合には，表の分母を $\sqrt{\text{許容曲げ圧縮応力度の上限値}/\text{計算曲げ圧縮応力度}}$ 倍することができる。 ただし 1.3 倍を超えてはならない。		○腹板	Ⅱ_8.4 (pp.257-261)

表 6.5.1 プレートガーダーの最小板厚

		板　材		押　出　材					
		5083-H112 5083-O	6061-T6	5083-H112	5083-O	6061-T6	6063-T5	6N01-T5	
								t≦6	6<t≦12
	補剛材不要	$\frac{b}{75}$	$\frac{b}{55}$	$\frac{b}{85}$	$\frac{b}{80}$	$\frac{b}{55}$	$\frac{b}{85}$	$\frac{b}{60}$	$\frac{b}{60}$
	垂直補剛材のみ	$\frac{b}{90}$	$\frac{b}{65}$	$\frac{b}{95}$	$\frac{b}{90}$	$\frac{b}{65}$	$\frac{b}{95}$	$\frac{b}{70}$	$\frac{b}{70}$
	垂直補剛材と水平補剛材	$\frac{b}{130}$	$\frac{b}{90}$	$\frac{b}{140}$	$\frac{b}{130}$	$\frac{b}{90}$	$\frac{b}{140}$	$\frac{b}{100}$	$\frac{b}{110}$

比較表

項　目	金　慶　橋		アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第１次改訂試案）（平成 10 年 12 月）		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(12)床版	ＲＣ床版を使用している。 ○主桁と床版コンクリートの絶縁 瀝青塗料を 3mm 程度種桁フランジ上面に塗布。		○床版 (1) アルミニウム合金製の主桁の床版として、アルミニウム以外の材料を使用する場合には、両者の接合部構造に十分な留意を払わなければならない。 (2) アルミニウム合金製床版を採用する場合は、デッキプレートに補剛リブを取り付けた補剛板構造として設計するものとする。ただし、車両の繰り返し載荷による疲労問題には十分な注意が必要である。 ○アルカリ性材料との接触 アルミニウム合金部材を、アルカリ性を示すコンクリートなどに埋設する場合には、必要に応じて防食処理を施すものとする。特に、鉄筋などの異種金属と接触する場合には、電気的に絶縁しなければならない。	5.2 (pp.87-88) 7.5.3 (pp.123-125)	鋼橋 コンクリート橋	Ⅱ_6 章参照 Ⅲ_5 章参照
(13)補剛材	○垂直補剛材 垂直補剛材の自由突出幅は、板厚に対し 支点上：1/7.14 中間　：1/11.2 となっている。 ○水平補剛材 水平補剛材は連続とし、断面定数に算入している。	文献金慶橋(1) (p.37) 設計計算書 (p.034) 設計計算書 (p.014) 設計図			○垂直補剛材 ・垂直補剛材の幅は腹板高の 1/30 に 50mm を加えた値以上としなければならない。 ・垂直補剛材の板厚は、その幅の 1/13 以上としなければならない。 ○水平補剛材 水平補剛材は、垂直補剛材間で切っている。	Ⅱ_8.5 (pp.261-267) Ⅱ_8.6 (pp.267-269)
(14)ずれ止め	底版を有する鋼ジベル（SS41）を使用。 ○ジベルと主桁との絶縁 主桁上フランジ面と底版との間に 1mm 厚の亜鉛板をはさみ、アルミ合金リベット締めとした。	文献金慶橋(1) (pp.39-40) 金慶橋材料表 (p.003)			合成桁 合成桁に用いるずれ止めはスタッドを標準とする。	Ⅱ_9.5 (pp.292-297)

巻末資料-4

伊計平良線ロードパーク連絡歩道橋
設計対比表

比較表

項　目	ロードパーク橋		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(1)使用材料	本橋は２径間連続 FRP 桁橋であり，主桁，対傾構，床版，高欄に GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastic，ガラス繊維強化プラスティック）を使用している。 １）FRP‥‥樹脂と強化材である繊維を組み合わせた複合材料。樹脂，強化材，副資材から成る。 ２）成型法による分類 ①ハンドレイアップ（HLU）：型枠の中に繊維を敷き，樹脂を塗りつけて無圧常温でそのまま硬化する方法。自由な形状のものが成形できる。 長所　１）多品種少量生産に適している。 ２）設備投資が少なくてすむ。 ３）大型製品が成形可能である。 ４）樹脂および強化材の組み合わせが自由である。 ５）着色が可能である。 短所　１）人手によるためコストに占める人件費の割合が大きい。 ２）品質が作業者の熟練度に左右される。 ３）無圧成形のためＧＦ含有量が少ない。 ②引抜法：樹脂をしみこませた長い繊維を多本数引き揃えて中空の金型の中に引き込み，型の熱で硬化させながら連続的に引抜く方法。断面形状が一定のものに限られる。 ３）材料の分類 (1)樹脂 ①不飽和ポリエステル FRP 用樹脂として最も一般的で多く使用される。硬化が早く多様な成形法が可能であり，耐薬品性に優れ，着色も自由で比較的安価である。 ②エポキシ樹脂 不飽和ポリエステルに比べ粘度が高く，比較的高温長時間の硬化条件を必要とするため作業性に劣るが，接着性・靭性に優れ機械的強度が大きく，成形収縮が小さく寸法安定性が良い。 ③ビニルエステル樹脂 エポキシアクリレート樹脂とも呼ばれる。耐熱性が高く，耐溶剤性も優れているため，高い耐熱性を必要とする構造部材や耐溶剤性を必要とする耐食 FRP に使用される。 ④フェノール樹脂 耐熱性に優れるが，硬くて脆い傾向があり，硬化も遅く成形条件や寸法変化に限定があり，自由な着色が難しいという欠点がある。 (2)強化材 FRP の強化材として用いられる繊維にはガラス繊維(GF)，炭素繊維(CF)，アラミド繊維(AF)があるが，土木構造物においては GF が最も一般的である。以下にその特徴を示す。 ＜長所＞ ①比強度が高い ②成形性が良く、デザインの自由度が高い ③耐食性がある ④電気絶縁性がある ⑤電波透過性がある ⑥透光性を付与できる ＜短所＞ ①耐熱性があまり高くない ②弾性率が低い ③疲労に弱い ④積層材の層間せん断強さが低い ⑤成形速度を速めると残留ひずみ応力を生じやすい		鋼材	Ⅰ_3.1 (pp.72-73)

比較表

<table>
<tr><th>項　目</th><th colspan="2">ロードパーク橋</th><th colspan="2">道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月）
道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）</th></tr>
<tr><td>(1)使用材料
（続き）</td><td>また，ハンドレイアップ成形品のガラス繊維の形態としては
①チョップドストランドマット
ストランドを約 50mm に切断し，無方向に均一な厚さに積み重ね，結合材を用いてマット状に成形したもの。
②ロービングクロス
縦糸および横糸にストランドまたはロービング（ストランドを数本から数十本，撚りを与えず引き揃えたもの）を用いて製織した織物。
があるが，本橋の主桁にはこの両者を併用したMR積層品を用いている。このMR積層品は他に比較して靭性が高いのが特徴で，形状が比較的単純で大型のものに適している。

本橋の主要使用材料を以下に示す。

橋梁部材　GFRP
ボルト類　ステンレス
高　欄　GFRP
舗　装　タイル</td><td>参考資料２
(p.88)</td><td>コンクリート</td><td>Ⅰ_3.2
(p.81)</td></tr>
<tr><td>(2)使用材料の基準強度及び機械的性質</td><td>1）FRP の一般的性質（他の材料との比較）
<table><tr><th></th><th>GFRP
ガラス繊維</th><th>CFRP
炭素繊維</th><th>AFRP
ｱﾗﾐﾄﾞ繊維</th><th>炭素鋼</th><th>Al
合金</th><th>Ti
合金</th></tr><tr><td>密度
(g/cm^3)</td><td>2.0</td><td>1.6</td><td>1.4</td><td>7.85</td><td>2.8</td><td>4.5</td></tr><tr><td>引張強さ
(Mpa)</td><td>1170</td><td>1760</td><td>1470</td><td>1370</td><td>470</td><td>960</td></tr><tr><td>比強度
(10^4m)</td><td>6.0</td><td>11.2</td><td>11.5</td><td>1.8</td><td>1.7</td><td>2.1</td></tr><tr><td>引張弾性率
(Gpa)</td><td>41</td><td>125</td><td>78</td><td>206</td><td>75</td><td>108</td></tr><tr><td>比弾性率
(10^6m)</td><td>2.1</td><td>8.0</td><td>5.7</td><td>2.7</td><td>2.7</td><td>2.5</td></tr><tr><td>線膨張率
(10^{-5}/℃)</td><td>0.8</td><td>-0.07</td><td>——</td><td>1.2</td><td>2.3</td><td>——</td></tr></table>
2）本橋に使用した FRP の機械的性質一覧
<table><tr><th></th><th>FRP
引抜成形</th><th>FRP
ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ</th><th>鋼材
SM400</th></tr><tr><td>ヤング係数
($10^3kgf/mm^2$)</td><td>1.5～3.0</td><td>1.0～1.5</td><td>21</td></tr><tr><td>引張強さ
(kgf/mm^2)</td><td>20～55</td><td>12～20</td><td>41</td></tr><tr><td>密度
(t/m^3)</td><td>1.7～2.0</td><td>1.5～1.6</td><td>7.85</td></tr><tr><td>線膨張係数
(10^{-5}/℃)</td><td>0.6～1.7</td><td>2.0～3.5</td><td>1.2</td></tr></table></td><td>参考資料２
(p.93)</td><td>鋼材

コンクリート</td><td>Ⅱ_1.6
(pp.106･113)</td></tr>
</table>

比較表

項　目	ロードパーク橋		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年12月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年12月）	
(2)使用材料の基準強度及び機械的性質（続き）	3）本橋に使用した材料強度の設計値			

	主桁ﾌﾗﾝｼﾞ	主桁ｳｪﾌﾞ	主桁リブ	ｶﾞｾｯﾄﾌﾟﾚｰﾄ
引張強さ (Mpa)	130	130	130	130
引張弾性率 (Gpa)	11.8	11.8	11.8	11.8
曲げ強さ (MPa)	130	130	130	130
曲げ弾性率 (GPa)	11.8	11.8	11.8	11.8
圧縮強さ (MPa)	130	130	130	130
せん断強さ (MPa)	50	50	50	50
せん断弾性率 (GPa)				
線膨張率 (10^{5}/℃)	1.0	1.0	1.0	1.0

4）FRP の特徴

参考資料２ (p.93)

a）機械的性質

①ヤング係数

鋼材に比較して FRP はヤング係数が小さい。設計では 1.2×10^{5}kgf/cm^{2} と仮定している。

②引張強さ

本橋の主桁に用いるハンドレイアップ部材では 1,200kgf/cm^{2} 程度である。FRP には塑性領域はほとんどなく，破断まで弾性であることが特徴である

③密度

鋼材の 7.85t/m^{3} に対し，FRP は 1.5～2.0t/m^{3} と軽い。

④膨張係数

本橋の主桁では 2.0×10^{-5} 程度である。

参考資料２ (p.94)

b）クリープ特性

FRP のクリープ変形は樹脂の粘弾性挙動により生じ、時間とともに変形が増加するクリープ変形と、時間とともに強度が低下するクリープ破壊がある。応力レベルが引張強さの約 30%より小さいときはクリープ効果は無視できるとされている（FRP 構造設計便覧より）。

参考資料２ (p.95)

c）温度特性

FRP 材料は常温より低温になると引張強さは上昇する。また、温度の上昇とともに引張強さは低下する。常時使用する場合の制限温度は 90℃程度とされる。温度に対する引張強さおよびヤング係数の低下率を以下に示す。

温度（℃）	20	40	60	80
引張強さ	0.0	0.04	0.10	0.20
ヤング係数	0.0	0.02	0.05	0.10

比較表

項　目	ロードパーク橋		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(2)使用材料の基準強度及び機械的性質（続き）	d) 疲労特性 FRP では、一般にＳ－Ｎ曲線の 10^7 回に対する応力を疲労限度としており、この疲労限度は引張強さのおよそ 0.22～0.41 の範囲にある。 孔等の切り欠きによる応力集中の疲労限度に対する影響は少ないと言われている。 本橋における活荷重応力の最大値は約 100kgf/cm² で、引張強さの 0.1 以下であり、かつ発生頻度は少ないために、疲労の影響を無視している。	参考資料２ (p.95)		
	e) 異方性 FRP は繊維方向および繊維直交方向に弾性主軸を持つ直交異方性板である。製作にあたっては部材の応力状態を考慮した繊維の配置が必要となる。	参考資料２ (p.96)		
	f) 応力集中 異方性板は等方性板に比較して応力集中の程度が大きいが、応力集中係数の大きさに比べ引張強さの低下は小さい。よって、本橋では上フランジに設ける高欄を固定するボルト孔については、照査の必要はあるものの本質的に問題ないとしている。	参考資料２ (p.96)		
	g) 耐候性 FRP は塩分による腐食がない。 紫外線によって外観上の変化（光沢の低下、黄変、ガラス繊維の露出など）が生じ、引張強さ等の機械的物性が低下する。また、飛砂による摩耗がある。 本橋では紫外線および飛砂対策として、樹脂リッチ層と厚さ約 0.3mm のゲルコート、さらにその表面に塗装を施している。 塗装を行った FRP 橋と鋼橋とを比較すると以下の通りとなる。	参考資料２ (p.97)		

	FRP 橋	鋼橋
耐用年数	塗装との密着性が良く、耐用年数が長い。	FRP に比べ短い。
表面処理	表面処理の影響については鈍感で、再塗装に際しケレンが楽である。	塗装の性能は表面処理に左右される。
塗装が劣化や剥離して簿材が露出した場合	塩分の影響が無く、腐食の観点の劣化はない。樹脂の劣化は起こるが、その劣化速度を考慮すると実務上強度的な問題はない。	鋼材の腐食が進行し、塩分がある場合はその進行は急速である。

	h) 耐熱性 FRP の温度に対する変化を以下に示す。 200～240℃　発煙が始まる 260～340℃　酸化のための黄変 300～380℃　発煙が顕著となる 340～400℃　炭化して黒く変色 380～420℃　引火 420℃以上　燃焼 本橋は車両火災などの特別な現象を除けば一般の FRP の耐熱性で十分と考えたため、耐熱性向上のための特別な配慮は行っていない。 なお、タバコのもみ消しによって焦げ跡が残るが、主桁上フランジについては特別な配慮を行っておらず、高欄については笠木上面に丸みを付け、タバコの放置を防ぐこととしている。	参考資料２ (p.98)		

比較表

項　目	ロードパーク橋		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年 12 月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年 12 月）	
(3)許容応力度	FRP には塑性領域がほとんどなく、破断まで弾性であるため、その基準を引張強さとすることになる。伊計平良橋においては許容応力度（安全率）を定めていないが、橋梁の剛性がたわみで決定されるため、設計応力レベルは低く押さえられている（下表参照）。 材料 / 降伏点 σy / 引張強さ σb / 許容応力度 σa / 安全率 (σy/σa) / 安全率 (σb/σa) FRP[1] / —— / 1,200 / 160[2] / —— / 7.50 SM400(鋼材) / 2,400 / 4,100 / 1,400 / 1.71 / (2.93)	参考資料２ (p.93)	鋼材（その１）	Ⅱ_2.2.1 (pp.116-120)
			鋼材（その２）	Ⅱ_2.2.1 (pp.116-120)
			鋼材（その３）	Ⅱ_2.2.1 (pp.116-120)
			溶接部および接合用鋼材の許容応力度	Ⅱ_2.2.3 (pp.133-139)
			鋼桁床版鉄筋	Ⅱ_6.1.7 (pp.222-223)
			合成桁（コンクリート）	Ⅱ_9.3.1 (pp.286-289)
			ＲＣ部材（コンクリート）	Ⅲ_3.2.1 (pp.155-157)
			ＲＣ部材（鉄筋）	Ⅱ_3.2.2 (pp.157-158)
			ＰＣ部材（コンクリート）	Ⅲ_3.3.1 (pp.159-161)
			ＰＣ部材（鋼材）	Ⅲ_3.3.2 (pp.162-163)
(4)許容応力度の割増し係数	前項に示したように、FRP には許容応力度の規定はなく、引張強さに対する安全率が 7.50 となっている。 なお、風荷重については、本橋の架設地点が強風地域であり、橋梁が軽量で風の影響を受けやすいことから、設計基準風速 U_d を 52.2m/s とし、風荷重は道路橋示方書の規定の 1.7 倍としている。	参考資料２ (p.93) 参考資料２ (p.90)	鋼橋	Ⅱ_2.1 (pp.114-116)
			鋼桁（合成桁）	Ⅱ_9.3.1 (pp.288-229)
			コンクリート橋	Ⅲ_3.1 (pp.153-154)

比較表

項　目	ロードパーク橋		道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編（平成８年12月） 道路橋示方書・同解説　Ⅲｺﾝｸﾘｰﾄ橋編（平成８年12月）	
(5)物理定数の値	ヤング係数および線膨張係数は以下のように比較される。 FRP 引抜成形：ヤング係数 1.5～3.0（10^3kgf/mm²）、線膨張係数 0.6～1.7（10^{-5}/℃） FRP ﾊﾝﾄﾞﾚｲｱｯﾌﾟ：ヤング係数 1.0～1.5、線膨張係数 2.0～3.5 鋼材 SM400：ヤング係数 21、線膨張係数 1.2 本橋ではハンドレイアップ材を用いる主桁においてE＝1.2×10^5kgf/cm²としている。 また、線膨張係数は2.0×10^{-5}としている。	参考資料２ (p.93)	鋼材、コンクリート コンクリートのクリープ及び乾燥収縮の影響	Ⅰ_3.3 (pp.84-86) Ⅰ_2.1.6 (pp.37-44)
(6)荷重 ①単位体積重量	FRP：1,500～2,000 kgf/m³ FRP 橋、鋼床版橋、ＰＣ橋（スラブ）の概算重量を示す。 FRP 橋：橋本体 122、舗装 99、総重量 29.2 tf ＰＣスラブ橋：橋本体 2,811、舗装 99、総重量 384.0 tf 鋼床版橋：橋本体 270、舗装 99、総重量 48.7 tf	参考資料２ (p.94)		Ⅰ_2.1.2 (p.10)
②活荷重	立体横断施設技術基準に準拠し、 常時：350kgf/m²（主桁の設計） 500kgf/m²（床組、床版の設計） 地震時：100kgf/m² を見込んでいる。 群集荷重については４通りの載荷ケースを検討している。	参考資料２ (p.85)	歩道等に載荷する等分布荷重は表-2.1.4 の通り。	Ⅰ_2.1.3 (pp.10-26)
(7)たわみの許容値	活荷重（衝撃を含まない）による桁のたわみ 許容値：L/600（δa＝19677/600＝32.795mm） 計算値：32.225mm たわみにより主桁の剛性が決定	参考資料２ (p.99)		Ⅱ_1.4 (pp.104-106)
(8)疲労の影響	FRP では、一般にＳ－Ｎ曲線の 10^7 回に対する応力を疲労限度としており、この疲労限度は引張強さのおよそ 0.22～0.41 の範囲にある。 孔等の切り欠きによる応力集中の疲労限度に対する影響は少ないと言われている。 本橋における活荷重応力の最大値は約 100kgf/cm² で、引張強さの 0.1 以下であり、かつ発生頻度は少ないために、疲労の影響を無視している。	参考資料２ (p.95)	鋼橋 道路橋においては、鋼床版ならびに道路橋に軌道または鉄道を併用する場合などを除いて一般に疲労の影響を考慮しなくてもよい。	Ⅱ_3.1.5 (p.144)
(9)床版	床版の構造部材には、引抜成型材の中空パネル（幅 500mm、高さ 60mm）を使用。 継ぎ目部からの漏水を防止するため、その上面に FRP 板（厚さ 4mm、上面砂敷き加工）を敷設。	参考資料２ (p.89)	鋼橋 コンクリート橋	Ⅱ_6 章参照 Ⅲ_5 章参照
(10)継手部の接合方法	主桁継手部はフランジ内にステンレス板（t=9）を埋め込み、これとステンレス板(t=16）で構成するフレームをボルト（M16）で連結する。主桁突き合わせの後、両フレームを PC 鋼棒（φ13）で締め付ける。フレームの内側はレジンモルタルを充填する。最後に継手構造部全ておよび主桁外側をオーバーレイする。	参考資料２ (p.102)	鋼橋の継手には溶接継手と高力ボルト継手、ピンによる連結がある。このうち、高力ボルト継手には摩擦接合、支圧接合、引張接合がある。	Ⅱ_4 章参照 (pp.170～205)