

IV-3 構造物への新材料適用に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 14～平 15

担当チーム：橋梁構造チーム

研究担当者：村越 潤、新井 恵一、
長屋 優子

【要旨】

橋梁等の土木構造物に用いられる材料は鋼材及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：以下、FRP という。）等の軽量、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。

本研究では、アルミニウム合金及びFRPを取り上げ、橋梁への適用性を評価するために、これまでの適用事例の調査、試設計等を行い、新材料を橋梁上部工に適用した場合に必要な材料特性、製作・施工性、経済性について鋼材の場合と比較することにより検討した。その結果、各材料ともに軽量、高耐久性というメリットを活かしても鋼材を使用した方がコスト面で優位となる可能性が高いことや、各材料が有する技術的課題を把握した。

キーワード：新材料、アルミニウム合金、繊維強化プラスチック（FRP）

1. はじめに

橋梁等の土木構造物に用いられる材料は鋼材及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FRP等の軽量、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するためには、構造部材として有すべき性能や経済性の観点から適用性を明らかにする必要がある。

本研究では、軽量、高強度、高耐久性を有する新材料として海外や一部国内でも適用事例¹⁾²⁾のあるアルミニウム合金及びFRPを取り上げ、橋梁への適用性を評価するために、適用事例の調査、試設計等を行い、新材料を橋梁上部工に適用した場合に必要な材料特性、製作・施工性、経済性について、鋼材の場合と比較することにより検討した。

2. 研究方法

2.1 適用事例の調査

アルミニウム合金及びFRPは、橋梁の主部材としてこれまでも試験的に採用されている¹⁾²⁾。これらの事例を参考に、アルミニウム合金及びFRP部材について、鋼材を使用した場合との設計上の相違点及び使用上の問題点等を調査した。

2.2 材料特性、製作・施工性の比較

鋼材等の設計基準類に一般的に明示されている項

目について、アルミニウム合金及びFRPを対象に文献調査及びヒアリング調査を実施した。具体的には、各材料の材料特性や製作・施工上の主な特徴・留意点を整理した。

2.3 橋梁の試設計による経済性の検討

橋長180m（6@30m及び3@60m）の多径間連続橋を対象として、鋼材、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試設計を行い、建設コストを比較することにより、橋梁への適用性について経済性の観点から分析を行った。

3. 適用事例の調査結果

3.1 アルミニウム合金

アルミニウム合金を土木構造物に適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アルミニウム合金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の金慶橋¹⁾が製作されて以来、歩道橋を中心に10橋程度製作されている。表-1に示すとおり、適用実績では、強度、耐食性、溶接性の観点から、マグネシウムとの合金である5000系・6000系が多く使用されている。

表-2に金慶橋と鋼道路橋との物性比較を示す。鋼橋では鋼材の基本安全率を1.7として許容応力度

表-1 アルミ合金橋の事例

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
東京大学構内連絡踏橋 (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)	中階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)	中階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
陸橋 (東京都)	中階式単純プレートガーダー	1986	31.1 (橋長)	1.5	5083	歩道橋
石鐘神社 (愛知県)	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	歩道橋床版
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

を設定している⁵⁾が、アルミニウム合金の場合は、許容軸方向引張応力度については、 $\sigma_{tu}/2.2$ と $\sigma_{ty}/1.85$ のうち小さい方の値⁶⁾をとるように規定されている。また、金慶橋では主桁と床版コンクリート内部の鉄筋とが接触するため、電氣的に絶縁することから、主桁フランジ上面に歴青塗装を3mm程度塗布している。

3.2 FRP

土木・建築分野では、従来の材料に比較してコストが高いこと、使用実績が少なく構造材としての設計法、施工法、検査法に関する基準体系が整備されていないことなどから、構造材料として用いられた実績は少ない。最近になり、耐久性、軽量化などの観点から、鉄筋・緊張材の代替、コンクリート補強材、ドーム屋根の膜材として試験的に用いられ始めている。土木構造物の主材料としては炭素繊維強化プラスチック(以下、CFRPという。)の採用が多い。ガラス繊維強化プラスチック(以下、GFRPという。)はCFRPと比べ弾性率が低いという欠点があるが、市場性が良い。アラミド繊維強化プラスチック(以下、AFRPという。)は繊維の特性上(通常の有機繊維ではなく芳香族ポリアミド繊維である)、圧縮強度、曲げ強度とも劣っているため、他の繊維とのハイブリッド型FRPとする必要があるが、単独で引張り部材として使用する事例がみられる。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、構造材料として一般的に使用するのには現時点では困難であ

表-2 アルミ合金橋と鋼橋との比較

項目	適用事例	鋼材比
許容応力度	90MPa	+0.05~0.15
弾性係数	73GPa	×1/3
線膨張係数	2.4×10^{-5}	×2
単位体積重量	2.8 kN/m^3	×1/3

表-3 FRP歩道橋と鋼歩道橋の比較

項目	適用事例	鋼材比
許容応力度	部材たわみにて照査	
弾性係数	12GPa	×1/17.5
線膨張係数	2.0×10^{-5}	×1.7
単位体積重量	$1.5 \sim 2.0 \text{ kN/m}^3$	×1/4~1/5

ると考えられる。

橋梁分野での実績としては、塩害地域におけるプレストレストコンクリート部材の緊張材や補強筋への適用が挙げられる。1988年に新宮橋でCFRPより線が緊張材として初めて使用され、その後数橋に使用されている。また、CFRPシート(一部AFRP(シートや組紐状のもの))を使用した橋脚の耐震補強や床版下面の曲げ補強は、実績が比較的多くなっている事例である。特殊な例では、非磁性という特徴を活かしたリニアモーターカーの軌道への利用が挙げられる。主構として用いられた実績は、2000年に歩道橋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。)が建設されたのが最初となっている。表-3に、ロードパーク橋と鋼歩道橋との物性比較を示す。鋼橋の設計においては、許容応力度は降伏点を基準に設定しているが、FRPでは降伏点がないため、その基準は引張強度により設定されることとなった。しかし、ロードパーク橋では部材断面はたわみ(支間長の1/600)で決定されているため、この結果、引張強度に対する安全率は7以上となっている。この橋の床版はGFRP中空パネル(横500mm×高60mm(3室)の扁平四角形セル断面を橋軸方向=引き抜き方向に配したもの)を用い、横梁ピッチを1.5mとして床組トラスが配置されている。舗装はアスファルト舗装時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。FRPは紫外線で劣化するため、塗装にも工夫が見られ、ゲルコートの上にフッ素塗料を上塗りしている。なお、鋼橋では問題になる塩分による腐食はFRP橋では

表-4 鋼、アルミニウム合金及びFRPの材料特性

材料特性	鋼	アルミニウム合金	ガラス繊維強化プラスチック
変形性能	<ul style="list-style-type: none"> 弾性係数：$2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 応力-ひずみ曲線の例： 	<ul style="list-style-type: none"> 弾性係数：$7.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 応力-ひずみ曲線の例： 	<ul style="list-style-type: none"> 弾性係数：繊維構成、成形法などにより異なるが、概ね $1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 程度 応力-ひずみ曲線の例：
単位体積重量	単位体積重量： 77 kN/m^3	単位体積重量： 27 kN/m^3	単位体積重量： 19.0 kN/m^3 (引抜成形材)
線膨張係数	線膨張係数： $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	線膨張係数： $24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	線膨張係数： $20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
耐紫外線劣化	劣化なし	劣化なし	劣化あり (保護用塗装が必要)
耐水性・耐低温性	<ul style="list-style-type: none"> 乾湿繰返し：弱い 耐低温性：弱い 	<ul style="list-style-type: none"> 乾湿繰返し：比較的強い (海水中では腐食) 耐低温性：強い 	<ul style="list-style-type: none"> 乾湿繰返し：弱い 耐低温性：強い
耐火性・耐熱性	<ul style="list-style-type: none"> 感温性：大気温度では特に問題ない 耐熱性：比較的強い 	<ul style="list-style-type: none"> 感温性：大気温度では特に問題ない 耐熱性：弱い (100°C からクリープ変形が発生) 	<ul style="list-style-type: none"> 感温性：80°C 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)

生じないとされている。

4. 材料特性、製作・施工性の比較結果

表-4に鋼材、アルミニウム合金、FRP (GFRP) の材料特性の比較結果を示す。以下に各材料の材料特性、製作・施工性に関して、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。
- 単位体積重量について、鋼材と比較して小さい。
- 紫外線による劣化について、FRP では考慮する必要がある。
- 耐熱性について、アルミニウム合金とFRPでは低温でのクリープを考慮する必要がある。

また、アルミニウム合金では鋼材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いる。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つい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。

FRP部材の製作 (成形) 法については数種類あるが、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では、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、引抜装置の引抜き能力の制約により 200 cm^2 程度に限定されている現状にある。

現場施工について、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 10 kN 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、

表-5 試設計における検討ケース

径間数 /支間長	主構造の使用材料		床版の 使用材料
	主構造形式		
6@30 =180m	I桁	鋼材	RC FRP
		アルミニウム 合金	RC FRP
		FRP	RC FRP
3@60 =180m	箱桁	鋼材	RC FRP
		アルミニウム 合金	RC FRP
		FRP	RC FRP
	トラス	FRP	RC FRP
		アルミニウム 合金	RC FRP

※鋼トラスについては、適用範囲外
※RC:鉄筋コンクリート床版

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。

5. 橋梁の試設計による経済性の検討

試設計は、表-5に示す計16ケースについて実施した。以下に、試設計における設計及びコスト算出の条件及び試算結果を示す。

5.1 設計条件

(1) 構造条件及び設計方法

構造条件を以下に示す。

[上部構造]

形式: 6径間連続桁橋(支間割: 6@30=180m及び3@60=180m)

幅員: 有効幅員 9.50m(全幅員: 10m程度)

活荷重: B活荷重

支持条件: 弾性支持(反力分散支承)

[下部構造]

橋脚: 張出式橋脚

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、

表-6 設計に用いた材料特性の基準値

材料特性		アルミニウム 合金	FRP	
		5083-H112 5083-O	ハンドレイ アップ材	引抜成形材
設計基準強度 (N/mm ²)	引張	280	130	300
	曲げ	280	130	300
	圧縮	280	130	240
	せん断	160	50	50
弾性係数 (N/mm ²)	引張	7×10 ⁴	1.2×10 ⁴	2×10 ⁴
	曲げ	7×10 ⁴	1.2×10 ⁴	2×10 ⁴
	圧縮	7×10 ⁴	1.2×10 ⁴	2×10 ⁴
単位体積重量(kN/m ³)		27	19	19

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、各主桁を梁とした平面格子モデルを作成して死活荷重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。疲労設計は実施していない。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。

(2) 材料設計値

表-6に設計に用いた材料特性の基準値を示す。アルミニウム合金については、板厚40mmまで適用が可能な、5083-H112材及び5083-O材を使用した。アルミニウム合金の部材設計強度、安全率等については、文献6)を参考にした。

FRPについては、I桁・箱桁の主構には、製作寸法上の制限からハンドレイアップ材を使用した。トラスの主構についてはハンドレイアップ材よりも強度特性のよい引抜成形材とした。FRPの部材設計基準強度、安全率(3.2を目安)等については、ロードパーク橋の設計例²⁾を参考にした。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、既存の部材製作上の制約は考慮せず理想断面とした。

(3) コスト試算方法

建設コストについては既存資料、物価資料^{11),12),13)}、ヒアリング結果を基に設定した工事単価より算出した。施工に関する労務費等の算出に必要な歩掛は、基本的に国土交通省土木工事積算基準書¹⁴⁾を適用した。なお、維持管理コストについては、アルミニウム合金とFRPの耐腐食性及び耐疲労性が未知数であることから、比較対象としないこととした。

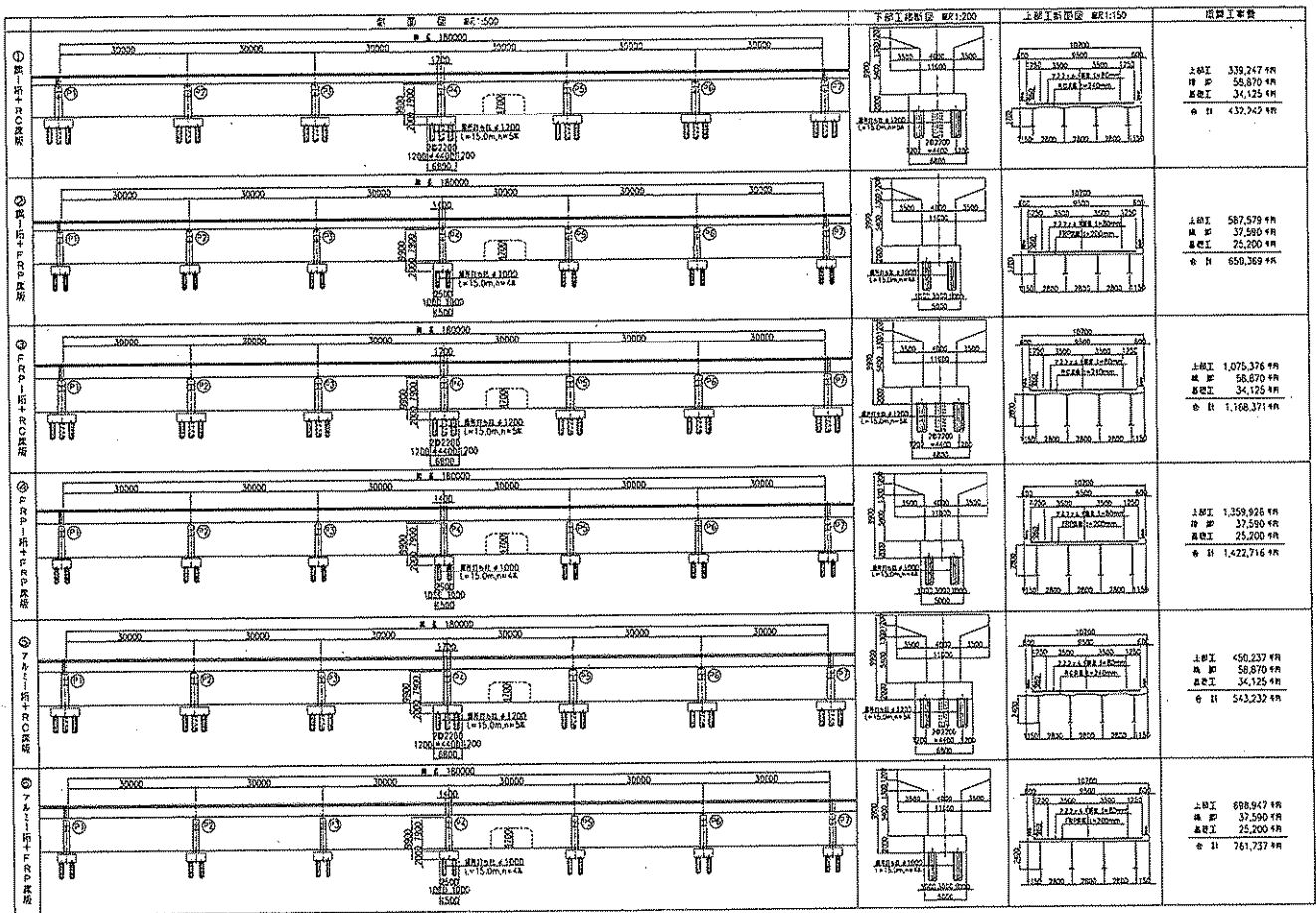


図-1 6径間連続鋼I桁の試設計結果

表-7 6径間連続I桁橋の初期建設コストの比較

(金額単位：千円、比率：FRP床版/RC床版)

算出項目	主構造・床版材料	鋼I桁			FRP I桁			アルミニウム合金I桁		
		金額		比率	金額		比率	金額		比率
		RC床版	FRP床版		RC床版	FRP床版		RC床版	FRP床版	
上部構造	工場製作	185,732	143,620	0.773	952,272	931,278	0.842	334,280	281,331	0.978
	架設工	77,767	60,282	0.775	47,356	44,971	0.844	40,209	33,939	0.950
	床版工	65,705	379,274	5.772	65,705	379,274	5.772	65,705	379,274	5.772
	舗装工	10,044	4,403	0.438	10,044	4,403	0.438	10,044	4,403	0.438
小計		339,247	587,579	1.732	1,075,376	1,359,926	1.265	450,237	698,947	1.552
橋脚		58,870	37,590	0.639	58,870	37,590	0.639	58,870	37,590	0.639
基礎工		34,125	25,200	0.738	34,125	25,200	0.738	34,125	25,200	0.738
合計		432,242	650,369	1.505	1,168,371	1,422,716	1.218	543,232	761,737	1.402

5.2 検討結果

試算結果(一部)として、図-1に6径間連続鋼I桁の試設計結果、表-7にその初期建設コストの内訳及びFRP床版とした場合の効果に着目した比率、表-8にその根拠となる主構造の断面決定要因、表-9にRC床版とした場合の主構造材料及び形式によるコスト比率を示す。

(1) 主構造材料の違いによる比較

図-1より初期建設コストの直接比較を行うと、鋼材を使用した場合が最もコストが低く、続いてア

ルミニウム、FRPの順となった。鋼材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。この理由は、表-7よりFRPを用いた場合の工場製作費が非常に高くなっていることであり、材料及び製作費の大幅な低減が必要であることが明らかとなった。今回、維持管理コストについては比較対象としていないが、両新材料がメンテナンスフリーであると想定すれば、鋼桁+FRP床版やアルミニウム合金桁+FRP床版とすることで従来材に競合できる可能性もあると考えられる。

表-8 6径間連続I桁橋の主構造の断面決定要因

照査項目 主構造材料	応力(N/mm ²)		たわみ(mm)		断面決定要因
	最大応力 (発生位置)	許容値	最大たわみ	許容値	
鋼材	134.5 (第1径間及び第6径間 支間中央下フランジ)	140.0	27.2	45.0	応力
アルミニウム合金	68.8 (第1径間支間中央 下フランジ)	70.0	27.2	45.0	応力
FRP	23.8 (第1径間支間中央 下フランジ)	40.6	44.4	45.0	たわみ

(2) 床版材料の違いによる比較

図-1及び表-7より、FRP床版を使用した場合はRC床版を使用した場合に比べ死荷重が大幅に低減されるため、鋼材、FRP、アルミニウム合金ともに床版以外の上部構造及び下部構造のコスト縮減効果が期待できる。ただし、FRP桁と組合せた場合には、活荷重に対するたわみ許容値により断面が決定されるため(表-8)、その効果は小さい。FRP床版はRC床版に比べ床版工事費が約5.8倍となっており(表-7)、上・下部構造を含めた建設コストはこの影響によりいずれの桁でもFRP床版を用いた場合の方が高くなる。また、主構造材料の違いによる下部構造への影響については、今回の試算では鋼材の重量が小さく、下部構造の断面を変えるまでには至らなかった。

(3) 主構造形式・材料の違いによる比較

表-9より、I桁、箱桁ともに鋼材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、コスト比率が優位となっている。

6. まとめ

本研究では、アルミニウム合金およびFRPの橋梁への適用性を評価するために、適用事例の調査、試設計等を行い、新材料を橋梁上部工に適用した場合に必要な材料特性、製作・施工性、経済性について、鋼材の場合と比較することにより検討した。試設計に基づく初期建設コストの試算結果によれば、各材料ともに軽量性というメリットを活かしても鋼橋の方がコスト面で優位となる可能性が高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

表-9 主構造形式・材料の違いによる比較
(RC床版の場合、新材料/鋼材)

主構造材料 主構造形式	鋼材	アルミニウム合金	FRP
I桁形式	1.00	1.26	2.70
箱桁形式	1.00 (1.58)	1.43 (1.79)	3.99 (2.33)

※()は、同材料におけるI桁を元とした割合

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。

【参考文献】

- 1) 川本・村松・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、No.5、Vol.16、1961
- 2) 伊計平良線ロードパーク連絡歩道橋設計業務報告書、沖縄県・(財)土木研究センター、2000.3
- 3) アルミハンドブック、(社)軽金属協会、1994.7
- 4) 森本尚夫：プラスチック系先端複合材料、高分子刊行会、1998.10
- 5) 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
- 6) 道路橋示方書・同解説、(社)日本道路協会、2002.3
- 7) 繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル、(社)強化プラスチック協会、1996.2
- 8) FRP構造設計便覧、(社)強化プラスチック協会、1995.9
- 9) コンクリート標準示方書(構造性能照査編)、(社)土木学会、2002.3
- 10) 設計施工マニュアル(橋梁編)、建設省東北地方建設局、2000.3
- 11) 建設物価、(財)建設物価調査会、2003
- 12) 土木コスト情報、(財)建設物価調査会、2003
- 13) 積算資料、(財)経済調査会、2003
- 14) 国土交通省土木工事積算基準書、(財)建設物価調査会、2002.7