

第3章 形鋼などを使用した3E配慮型の橋梁デザイン

第3章 形鋼などを使用した3E配慮型の橋梁のデザイン

目次

3.1 研究の背景	108
3.1.1 歴史的背景	
3.1.2 既存橋の“3E”の面から見た考察	
3.2 研究の目的	110
3.3 研究の概要	111
3.4 新型形鋼を用いた新しい橋梁デザイン	112
3.4.1 はじめに	
3.4.2 形鋼を利用した橋梁デザインの現状	
3.4.3 提案構造と今後の課題	
3.5 格点構造の工夫による新しい橋梁デザイン	116
3.5.1 はじめに	
3.5.2 溶接構造	
3.5.3 ボルト構造	
3.5.4 ピン構造	
3.6 コンクリートを併用した新しい橋梁デザイン	135
3.6.1 はじめに	
3.6.2 鋼・コンクリート複合構造	
3.6.3 トラス橋・アーチ橋の現状	
3.6.4 提案構造ならびに今後の課題	
3.7 まとめ	142
参考文献	143

3.1 研究の背景

3.1.1 歴史的背景

歴史的に見ると橋梁は、石材や木材により製作されていたが、18世紀に初めての鉄の橋「アイアンブリッジ」が誕生した。(図 3.1.1) 鉄は高強度で優れた材料であるが、橋梁などの構造物で使用するには当時高価であったため、建設にあたり材料の節約することが重要視された。そのため当初建設された鉄橋は、材料ミニマムの観点で建設されている。今見ても当時の技術者の努力の跡が読み取れる。(図 3.1.2)



図 3.1.1 Iron Bridge¹⁾



図 3.1.2 Chepstow Bridge¹⁾

20世紀になり、鋼、コンクリートの使用が一般化し、材料が比較的安く入手可能となった。その結果、工業製品の大量生産、大量消費、標準化などにより、街中に工業製品があふれた。

国内でも、二度の大戦を経て戦後すぐの戦災復興期、東京オリンピック～大阪万博をはじめとする高度経済成長期～安定成長期を通じ、当時の土木における最優先事項は、社会・経済の必要に応じて、とにかく社会資本を充実させることであった。つまり、大量の土木構造物を急速かつ安価につくることが要請されたのである。(図 3.1.3)

その結果、わが国の土木工学、設計・施工技術は、この背景に則する面において最も発展を遂げ、対照的に、本来土木分野にもあるべき景観性といったデザインを踏まえた技術の発展は軽視されてしまった。こうして、明治・大正期に多く存在した趣のある土木構造物をつくり出すことが妨げられてきたのである。(図 3.1.4)

こうして戦後の橋梁は、基準類の整備などにより、プレートガーダーを基本とする標準設計で建設され、地域性、固有性は薄くなり、趣のある橋梁構造物は少なくなっていた。



図 3.1.3 都市の風景 (左戦後、右現状)²⁾



図 3.1.4 永代橋 (大正時代)³⁾

3.1.2 既存橋の“3E”の面から見た考察

研究に先立ち、異なるタイプのアーチ橋3橋(メリダ橋、豊田大橋、カエル橋)を“3E (Efficiency, Economy, Elegance)”という新たな切り口で考察、ディスカッションを行い、各々の橋の印象などから「橋」として必要なものは何が、どうあるべきかなどの議論を実施した。主な意見を示す。



図 3.1.5 メリダ橋 ⁴⁾



図 3.1.6 豊田大橋 ⁵⁾

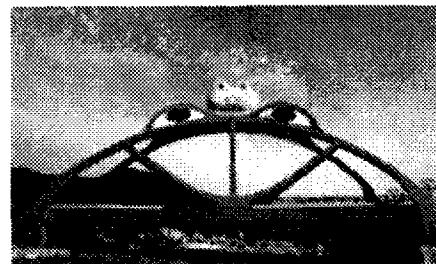


図 3.1.7 カエル橋 ⁶⁾

●主な意見

- ・ メリダ橋：力学的秩序表現が明確、水平方向への力の流れを感じる、素直な視点移動が可能、落ち着いた優美さ、無駄な装飾がない。
- ・ 豊田大橋：親水型階段など先進性・機能性は斬新、力学的な明快さに欠ける、重たく感じる、視点移動しづらい。
- ・ かえる橋：固有性・集客性がある、経済性・構造合理性に劣る、演出が過多。
等々

●見えてきたこと

- ・ 3橋共通でデザインに並々ならぬ意欲があり、その努力は評価されるべき。
- ・ バブル崩壊に前後して、特に地方で短縮的に経済効果を出そうと、地域の要望が直接構造物の形として現れたような、チープなデザインの公共物が増えた。
- ・ 構造物の計画・設計する基本となる“設計思想：コンセプト”を決定する技術と、具体的な形にする技術を向上すれば、ニーズを短縮的にデザイン化されることはないのでは。
等々

橋梁に求められる“3E”を「塔と橋/D・P・ピリントン」⁷⁾などの文献を参考に、“鋼橋らしさ”を出すという視点で考えた場合、以下の点などが見えてきた。

- ・ “最小の材料”という概念は、経済的なものを造るために必要なだけでなく、美しい橋を生むために必要な要素。 → Efficiency
- ・ 構造芸術は公共のものであり、費用とは切り離されない。 → Economy
- ・ 細さと薄さと安全性の微妙なつり合い=力学的に無駄のない部材構成が構造芸術を生む。
→ Elegance

3.2 研究の目的

鋼橋の初期に建造された、形鋼を多用した橋梁—特にトラス橋、アーチ橋が主流の時期があったが、高度成長を期に標準設計によるプレートガーダーが現状多くしめており、構造デザインとして魅力を感じる橋は少数となっている。パイプトラスなど新しい提案がされつつあるが、さまざまな理由より一般化されていない。

そこで、multi piece の美しさ・軽快感などの鋼構造の魅力を活かしつつ、施工性・経済性を満足する方向を模索し、“3E (Efficiency, Economy, Elegance)”についてバランスのとれた、“鋼構造らしさ”が出せる橋梁デザイン、アイデアを、「形鋼」をキーワードに提案することを目的とする。

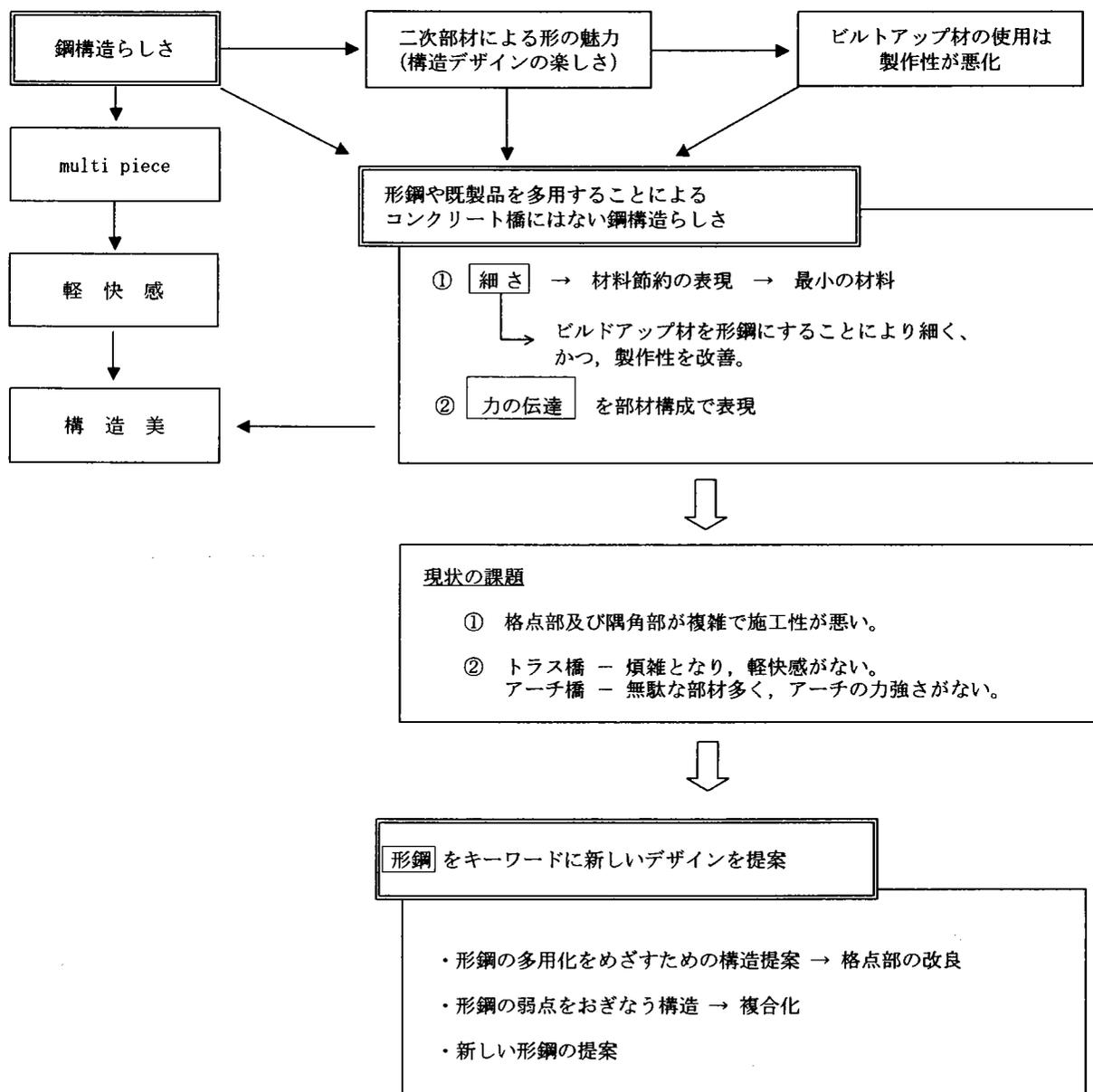


図 3.2.1 研究の目的

3.3 研究の概要

“3E (Efficiency, Economy, Elegance)”についてバランスのとれる鋼橋にするために、鋼構造らしさを、①新しい形鋼、②新しい格点、③材料の組み合わせの3点で研究を進め、“新しい橋梁デザイン”を提案する。

① 新しい形鋼 から新しい橋梁デザインを提案

- 従来は全体構造から使用する部材断面を決めていたが、逆に、新しい部材断面から、橋梁デザインを生み出す。



三角形鋼による

- Ⓐ 新型トラス
- Ⓑ 新型アーチ

② 新しい格点 から新しい橋梁デザインを提案

- 格点部ブロックの独立による新構造提案
・・・従来は格点部が煩雑だった。



- Ⓒ ボールジョイントの活用
- Ⓓ 引張ボルト継手による鋼管トラス

輸送限界から主構寸法を決めることからの脱却

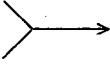
- 施工性のよい格点部に主眼をおいた新構造の提案



- Ⓔ パイプ接合の新しい格点構造提案

③ 材料の組み合わせによる新しい橋梁デザインを提案

- 複雑な板組の隅角部
- 大断面となる支点部



コンクリート化



- Ⓕ アーチリブ隅角部のコンクリート化
- Ⓖ トラス支点付近のコンクリート化

上記①～③に対し改良した案としてa～g案を提案した。

従来の鋼構造は、既存の型鋼を組み合わせにより部材構成する手法か、全体構造から必要な部材断面をビルトアップ材で構成する手法から構造化されていた。後者は、製作上から断面がある程度大きくなるため、全体として無骨になることが多かった。“新しい形鋼”を作り出すことにより、合理的でスレンダーな新しい構造を作り出すことができる。

従来トラス構造などでは、格点部が施工上、デザイン上のネックとなっていた。“新しい格点”の提案では格点部の施工が容易でデザイン上すっきりする構造に主眼をおいた。既製品の活用、外ダイヤフラムの活用、引張ボルト接合の活用などにより、施工性の改良とともに従来と異なる新しいデザインとすることができる。

従来煩雑な構造であった支点部や隅角部などで、コンクリートを活用することにより、施工の効率化とともに、構造全体としての安定感、新しいデザインとすることができる。

3.4 新型形鋼を用いた新しい橋梁デザイン

3.4.1 はじめに

これまで、2次部材に数多くの形鋼が使用されてきた。その理由は、既成品としての市場性があり安価で大量に製造できたためである。また、形鋼の種類は図-3.4.1のとおり多種にわたるので、多様な使用パターンが可能となり、あらゆる構造へも対応できるためである。従来橋は部材数、材片数が多くても、ビルドアップ材の代わりに形鋼を使用することにより、その製作工数も軽減し、最小材料の観点からもビルドアップによる大きな断面に対して、形鋼を利用した小さな断面で構成可能となった。しかし、最近の橋梁はこれまで以上に経済性と景観を重視し、部材数・材片数を少なくしたスレンダーなスペーストラス⁸⁾などに代表される構造が採用されることが多くなってきている。形鋼の新しい適材適所の使用方法が求められている。

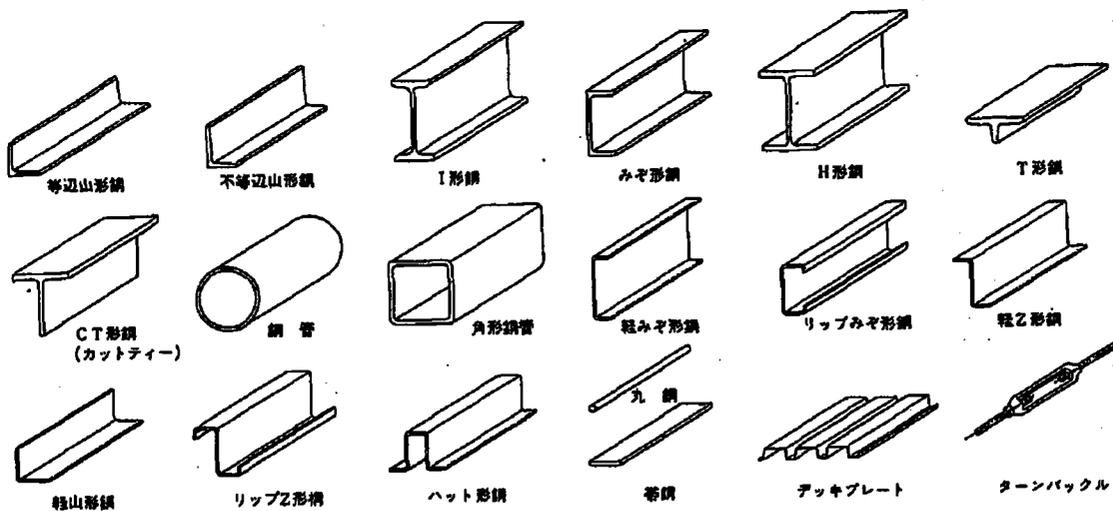


図 3.4.1 形鋼の種類⁹⁾

3.4.2 形鋼を利用した橋梁デザインの現状

ここでは最近の事例紹介などを含めて形鋼を利用した橋梁デザインの現状について述べる。

(1) デザイン上、形鋼を利用する利点

形鋼を景観という視点からみた場合、部材の組み合わせが複雑で規則性がない構造は美観上優れているとはいえない。これは使用する形鋼の種類が山形鋼、H型鋼、CT鋼に代表されるように、開断面形状となっており、コバ面が複数の線となり交差して見えるためである。また、形鋼を使用するとその格点部にガセットを利用する構造となることも、煩雑な印象を与えている。

では、美しい構造デザインを考慮した形鋼の利用方法とはどのようなものであろうか。それは同じ形鋼を使用し、パターンを繰り返すことで洗練されたリズムカルな印象を与えることができるのではないだろうか。また、閉断面を使用することにより、曲面や平面として見えるようになる。建築構造物に多く見られる大屋根部のトラス構造のように、空間をうまく利用することで、開放感がある軽快な印象を与えることが可能となる。さらに、形鋼の特徴、形状を生かすことにより、部材あるいは全体構造の力の伝達をその形鋼の形と部材構成で表現したストラクチャーデザインが可能となる。

(2) 新しい形鋼について

そこで、本項では景観にも配慮した構造的にも合理的な新しい形鋼として、三角形の形鋼を提案する。ここで、ピラミッドがなぜ三角形であるか考えてみると、三角形の形鋼の必然性が見えてくる。ピラミッドの三角形の角度は水晶の分子構造の角度と全く同じで、黄金率という自然の調和を保つ率（最も人間の感覚で美しいと見える比率）を保っている。また、三角形は形状として安定感があり、断面がつぶれにくく構造力学的にも安全である。



図 3.4.2 ピラミッドの形状¹⁰⁾

三角形鋼を有効利用すると、部材の組み合わせが自由に可能となり、格点部も自由に構成可能となる。三角形の角部は最小曲げ半径を確保する必要があるが、Rをつけて曲げ加工をする必要があるが、三角形により力の伝達が明確になり、デザインにシャープで力強い印象を与えることができる。デザイン面だけでなく、積雪地帯における落雪対策として利用することも可能となる。

(3) 最近の事例紹介

ここでは、閉断面の形鋼（鋼管、角鋼管）を利用した最近の事例を紹介する。

1) Lully 高架橋¹¹⁾

1998年にフランスで架設された Lully 高架橋は円形鋼管を使用した立体トラス構造（桁の上弦材と下弦材、斜材と支点上横桁が全てパイプで構成されている）を採用し、十分な剛性を持たせることで補剛材を省略するなど徹底的な合理化を可能としながら軽量化および透視性など美観上で優れた橋梁を実現している。

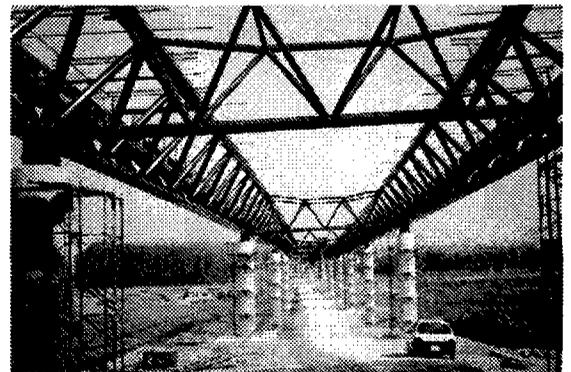


図 3.4.3 Lully 高架橋の架設時（床版施工前）¹¹⁾

2) 美保美術館橋梁の張り出しブラケット

支点上の横桁や張り出しブラケットに鋼管を使用した場合の構造



図 3.4.4 美保美術館橋梁の張り出しブラケット¹²⁾

3.4.3 提案構造と今後の課題

従来にない新しい橋梁デザインとして、従来の全体デザインから各部材をデザインする方法とは逆に新しい部材断面・形鋼から全体デザインを生み出す方法を提案する。全体デザインは力の伝達を明確にする必要があり、三角形鋼はエッジがシャープで直線的なデザインとなり、力強い印象を与える。今回提案したデザイン以外にも様々なデザインのバリエーションが可能となり、今後の利用が期待される形鋼である。しかし、新しい形鋼であるために、格点部の検討、需要の確保、新しい設備投資が必要となり、市場ニーズの動向を把握して、今後の橋梁デザインに盛り込んでいく必要がある。

ここでは、景観を考慮して三角形鋼を使用したデザイン案をパースにより紹介する。

①逆台形の平行弦トラス橋

→上弦材、下弦材、斜材の全てに三角形鋼を使用したデザイン

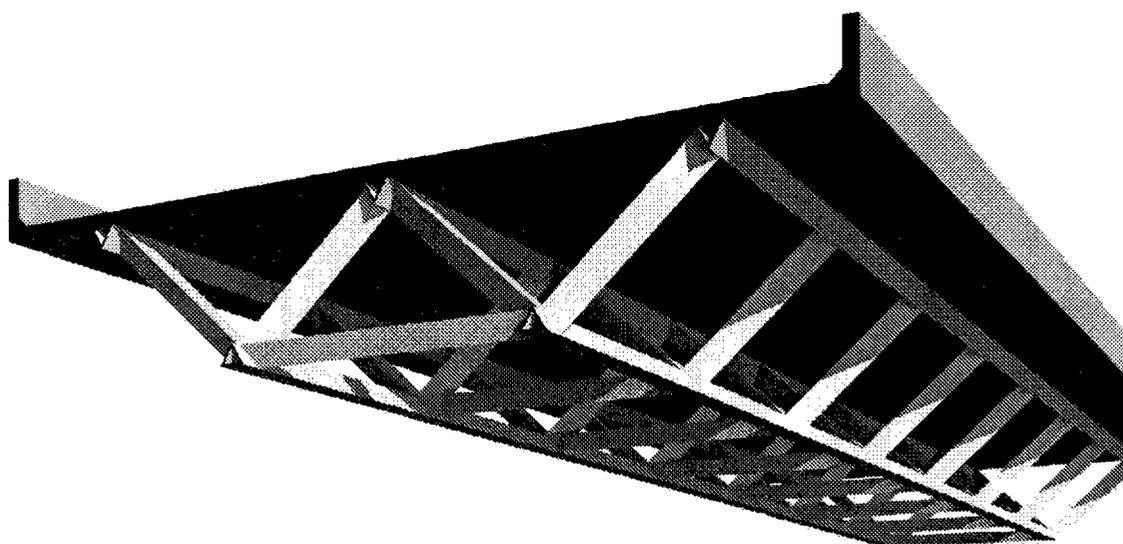


図 3.4.5 三角形鋼を使用したトラス橋

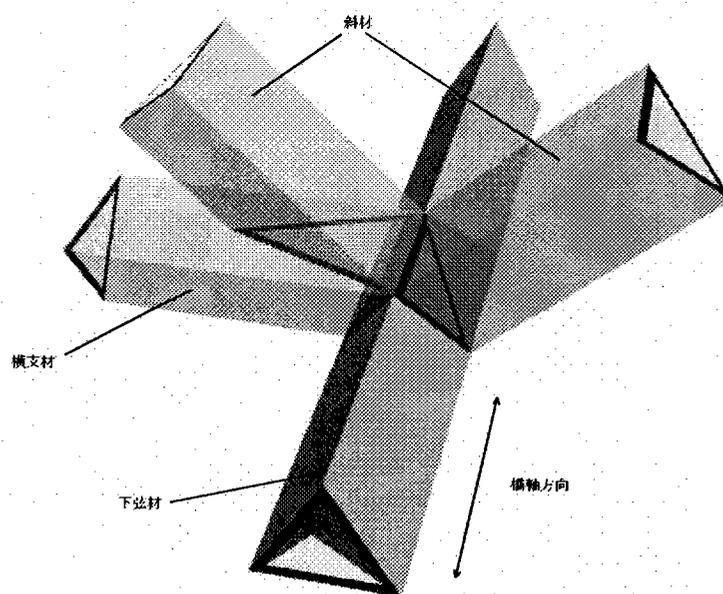


図 3.4.6 トラス橋の格点部

②アーチ橋

→アーチの弦材は三角形鋼3本で構成し、ケーブルの定着部を工夫しデザイン

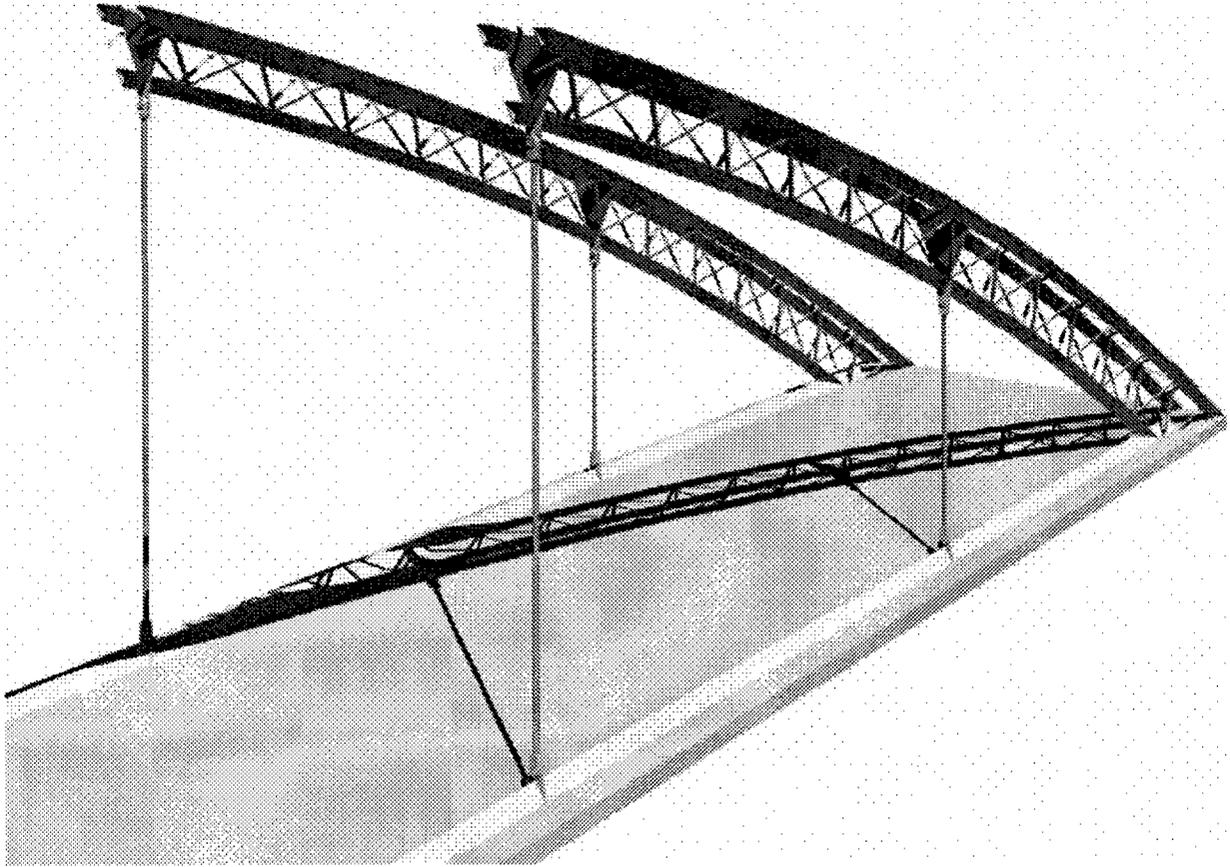


図 3.4.7 三角形鋼を使用したアーチ橋

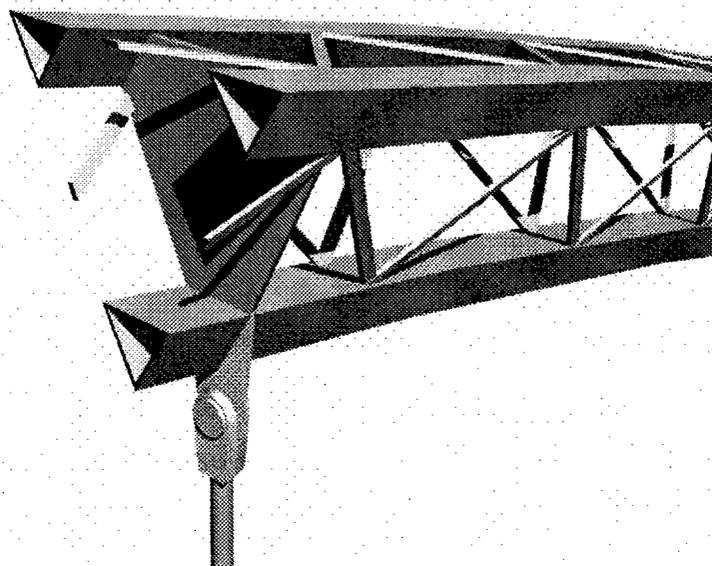


図 3.4.8 アーチリブ (ケーブル定着部)

3.5 格点構造の工夫による新しい橋梁デザイン

3.5.1 はじめに

鋼橋の魅力でもある「multi piece」の外観は、多数の部材を繊細に組み上げることによって得られる。特に鋼トラス橋や鋼アーチ橋は「multi piece」の代表的な橋梁形式であり、鋼橋らしさを感じさせる橋梁形式である。橋梁を構成する多数の部材を組み上げたときに、部材同士が交差するポイントは「格点」と呼ばれ、応力伝達上極めて重要な箇所であるが、美観的にも要所となる重要なポイントである。

ここでは、鋼トラス橋や鋼アーチ橋の「格点構造のデザイン」を取り上げ、鋼橋の魅力を伝える、新しい格点構造の提案を試みる。

提案にあたっては、格点を構成する部材の連結方法によって、次のように分類する。

- ・溶接構造
- ・ボルト構造
- ・ピン構造

3.5.2 溶接構造

最近では、景観上の配慮から橋梁にパイプ構造が採用される事例が増えてきているように思われる。また、合理化の観点から近年形鋼を利用したトラス橋が提案されるようになり、のちに示す滝下橋は角型鋼管を利用した代表的な例と言える。

このような形鋼の利用を前提とした橋梁を広めるためには、合理的でかつ景観性に優れた格点構造の検討が必要であり、近年このような形式の格点構造に関する検討結果が報告されるようになった。表 3.5.1 はそれら構造案を分類したものである。

表 3.5.1 形鋼を利用したトラスの格点構造の分類

	長所	短所	備考
鑄鋼品の利用	・景観性 ・製作性 →任意の形状、および板厚に加工できる。	・材料コスト ・疲労強度 →ディテールの検討が必要	海外では橋梁に適用された実績あり。建築では日本でも良く使われている。製作工数減による効果なども含め、コスト面での検討が不可欠となる。 参考文献 13)
鑄鋼品と溶接構造の併用	・景観性 ・製作性	・材料コスト	実績が少なく、使用には検討が必要。 参考文献 14)
溶接構造	・材料コスト	・製作性 →ダイアフラムの設置等が問題となる。 ・溶接部の応力集中・疲労強度の問題 →ディテールの工夫が必要 コンクリート充填等の検討	参考文献 15)
ガセット構造	・製作性・施工性	・景観性	参考文献 16)

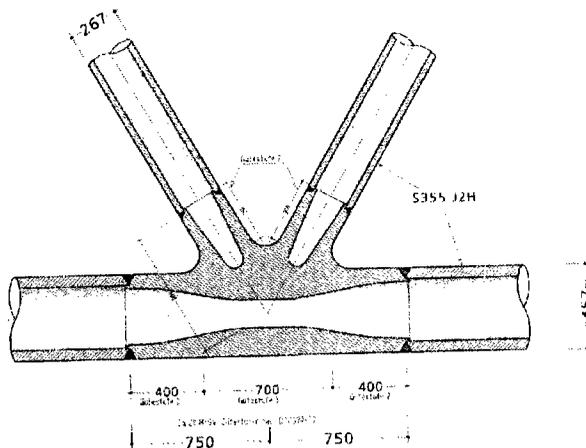


図 3.5.1 格点部を鋳鋼品にした例¹⁷⁾

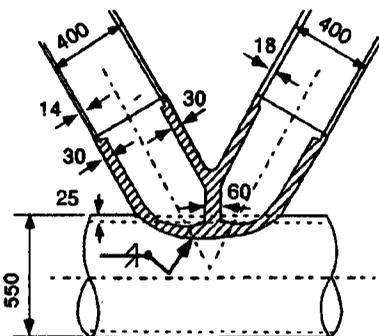


図 3.5.2 鋳鋼品と溶接の併用例¹⁴⁾



図 3.5.3 溶接構造の例¹⁸⁾

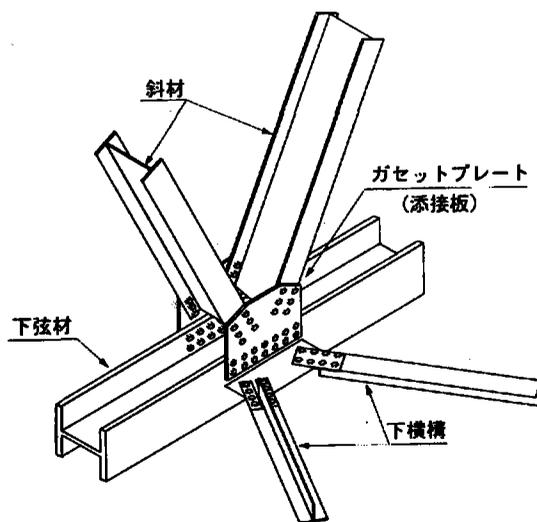


図 3.5.4 ガセット構造の例¹⁶⁾

最近の研究では合理化の観点から格点部に鋳鋼品を使用する試みも行われ、橋梁においては海外での実績が報告されている。¹⁷⁾ 日本国内においても同様な取り組み^{13),14)}がなされているが、実橋への使用は今後の課題である。

ここでは、溶接により構成される格点構造に着目し、最近の施工事例の紹介などを含めて現状を述べ、パースによる構造案の紹介を行う。

(1) 鋼管格点継手構造の現状

1) 鋼管の分岐継手¹⁹⁾

分岐継手とは鋼管相互を、ガセットプレートを介さずに直接溶接接合する継手である。これは鋼管構造の一大特色であり、他の構造体には見られない合理性と経済性をもたらすことができる。

分岐継手は、曲面と曲面が交差する形で直接分岐されるので主管管壁の局部変形と、その応力分布が複雑な相関関係となる。道路橋においては、道路橋示方書²⁰⁾ II 14.6.5 (3) に「集中荷重が作用する格点部や支承部は、環補剛材又はダイヤフラムで補強するのを原則とする」との記述があり、アーチ・補剛アーチの主構造部材やラーメン橋脚柱などの大口径鋼管を用いるような格点には無補剛の分岐継手が用いられた実績はほとんど無い。また、主管内部にダイヤフラムを取り付ける補強方法は一般に施工上の理由から嫌われることが多く、橋梁で鋼管構造をあまり用いられない要因の1つとなっている。

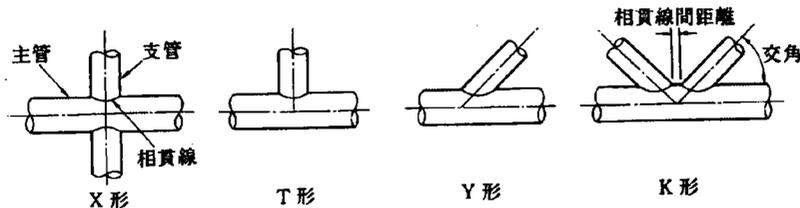


図 3.5.5 分岐継手の例¹⁹⁾

2) 鋼管のガセット継手^{19) 20)}

分岐継手は、あくまでも溶接接合を前提としたものである。実際の構造物では構造物の特性あるいは現場施工の都合から、ボルトによるガセット継手を用いたい場合が多い。

一般に橋梁では吊り材や横構に鋼管部材をつかう場合などガセット継手が多く用いられる。道路橋示方書²⁰⁾に示されているガセット継手を図 3.5.6 に示す。鋼管はねじり等に対し高い剛性を有しているが、図 3.5.6 のように管軸方向のガセットを介して集中荷重を受ける場合は局部変形を生じやすいので、通しガセットとするか、リップで補強する必要がある。また、ガセットプレートの溶接は疲労強度が低く疲労耐久性確保上の弱点となるので、施工上の注意が必要になる。

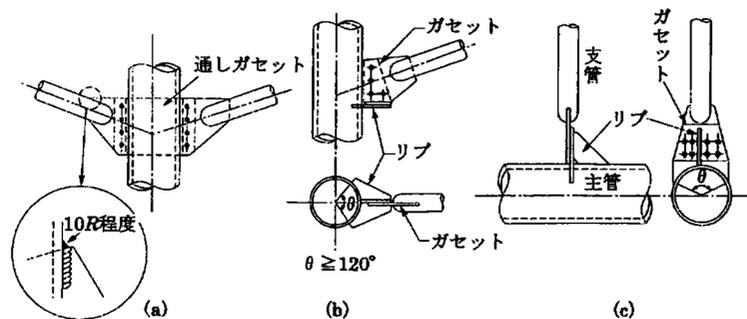


図 3.5.6 ガセット継手の例¹⁹⁾

3) 最近の事例

ここでは、型鋼を利用した橋梁のうち格点部の構造に工夫の見られる最近の事例を紹介する。

① Arc 川高架橋¹⁸⁾

上弦材と下弦材は製作部材であり格点部はダイアフラムによって補強されている。
 斜材が鋼管で構成され、格点部はガセットプレートで補強された構造である。
 応力集中を緩和させるためにガセット形状など格点部の構造が検討された。

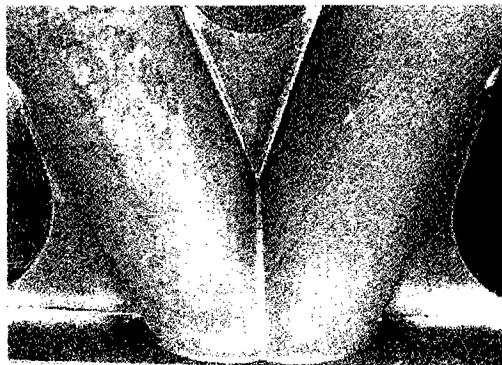
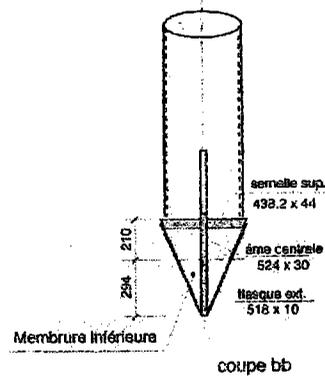
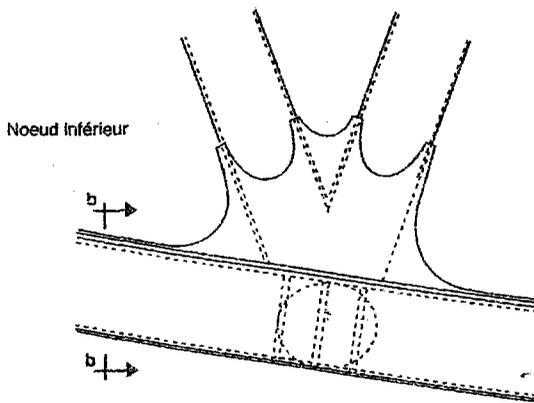
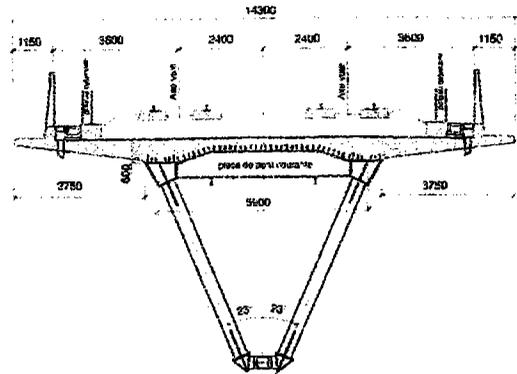
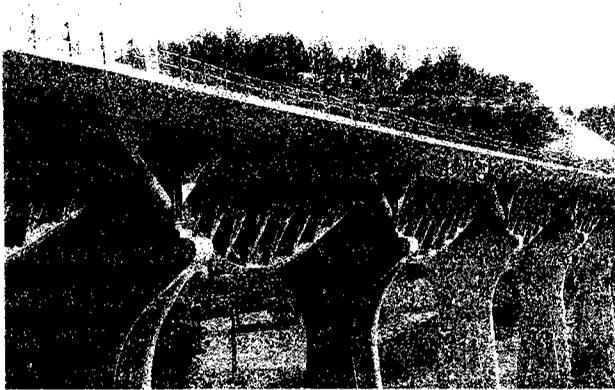


図 3.5.7 Arc 川高架橋の例¹⁸⁾

② 滝下橋^{21), 22)}

角形鋼管を使用した例。格点部の構造は分岐継手構造となっている。鋼管内はダイヤフラムで補強をしている。(補剛ではなく形状保持の理由で配置した箇所もあり)

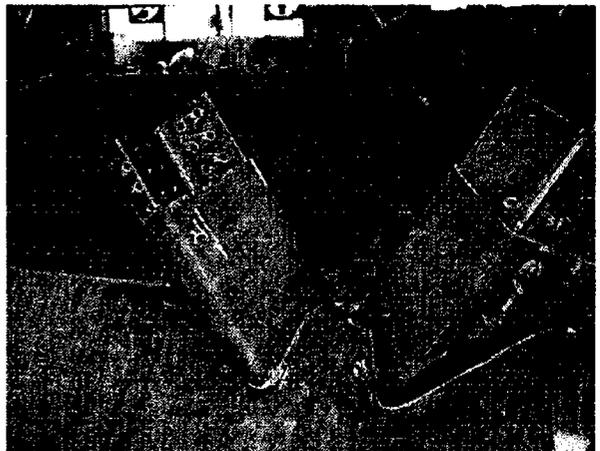
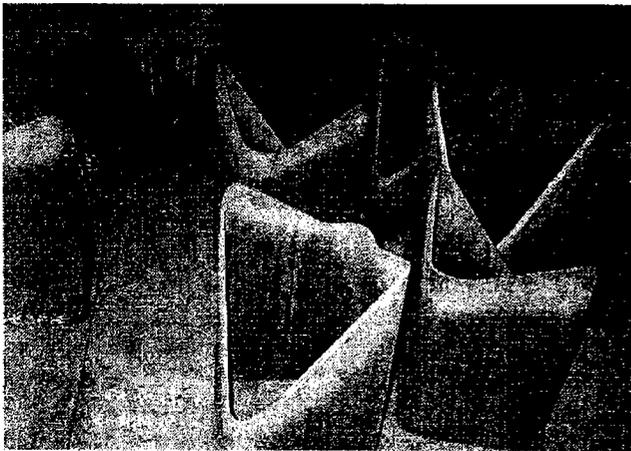
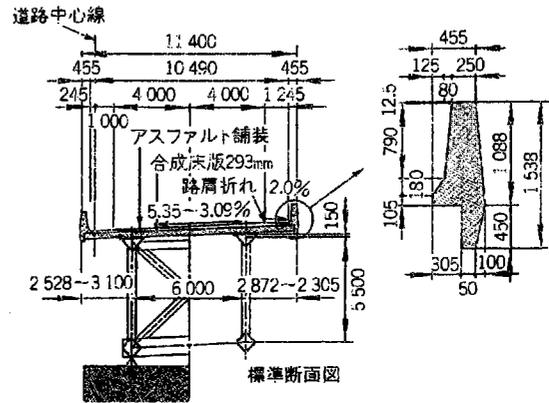
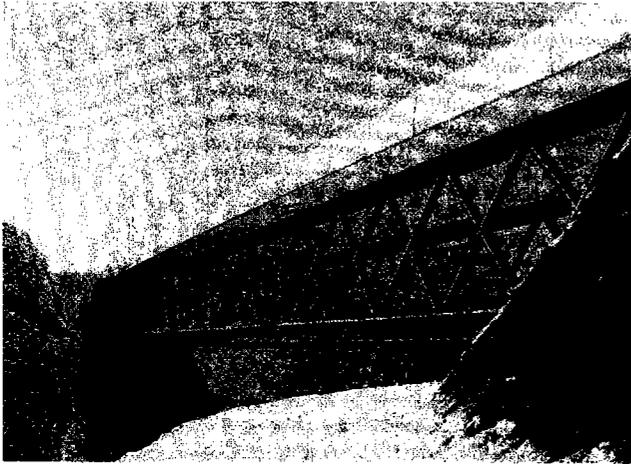


図 3.5.8 滝下橋の例^{20), 21)}

③ 渋谷歩道橋（仮称）²³⁾

国道246号・首都高を跨ぐ単径間フィーレンデル橋（歩道橋）である。

上・下弦材はH形鋼を使用し、斜材は鋼管で構成されている。

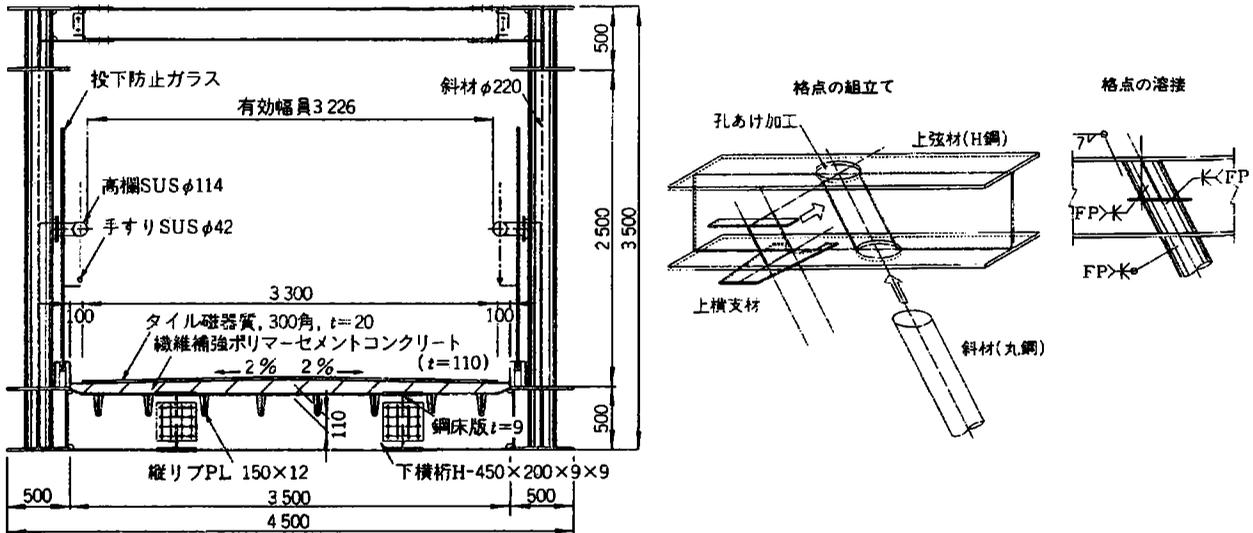
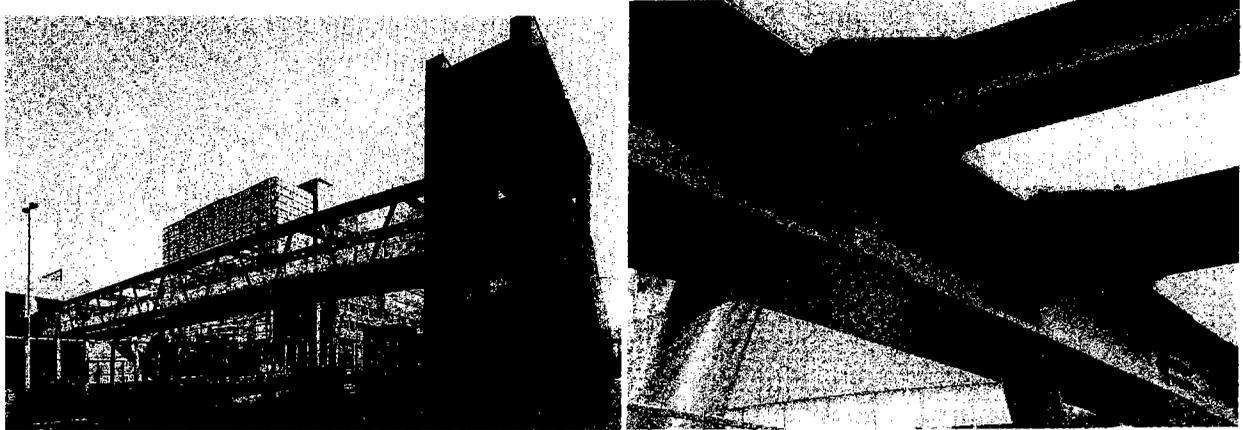


図 3.5.9 渋谷歩道橋（仮称）の例²³⁾

(3) パースによる構造案

最近の事例を見ると、景観を考慮して格点部を溶接により構成しているものが多いように思われる。確かに溶接による構造は形状をある程度自由に設定できるため設計者の考えを表現しやすい方法であるが、複雑な格点構造は工場製作工数がかかってしまう傾向にある。

そこで、景観を損なわずに工数を低減する方法として外ダイアフラムの構造に着目し、パースによる構造案を紹介する。

1) ダイアフラム兼用の上支材を配置したパイプ構造

- ・ 格点内のダイアフラムを省略するため、上支材を格点部の外ダイアフラムと兼用させる構造とし、格点補強の単純化ならびに工場での製作性に配慮した。
- ・ 上支材を床版張り出し部まで伸ばし、部材配置の規則性を強調するデザインにした。
- ・ 格点部の上支材の形状は垂直材からの力をせん断で上部に伝えるイメージを表現した。

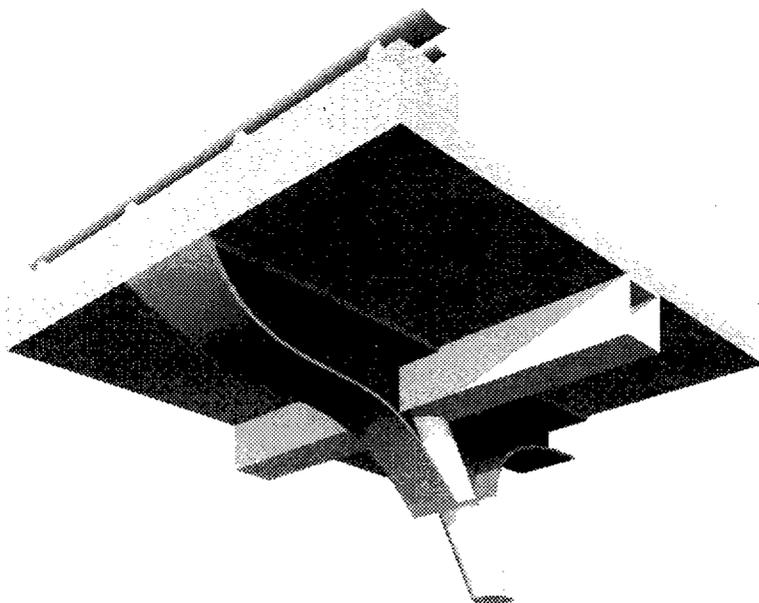
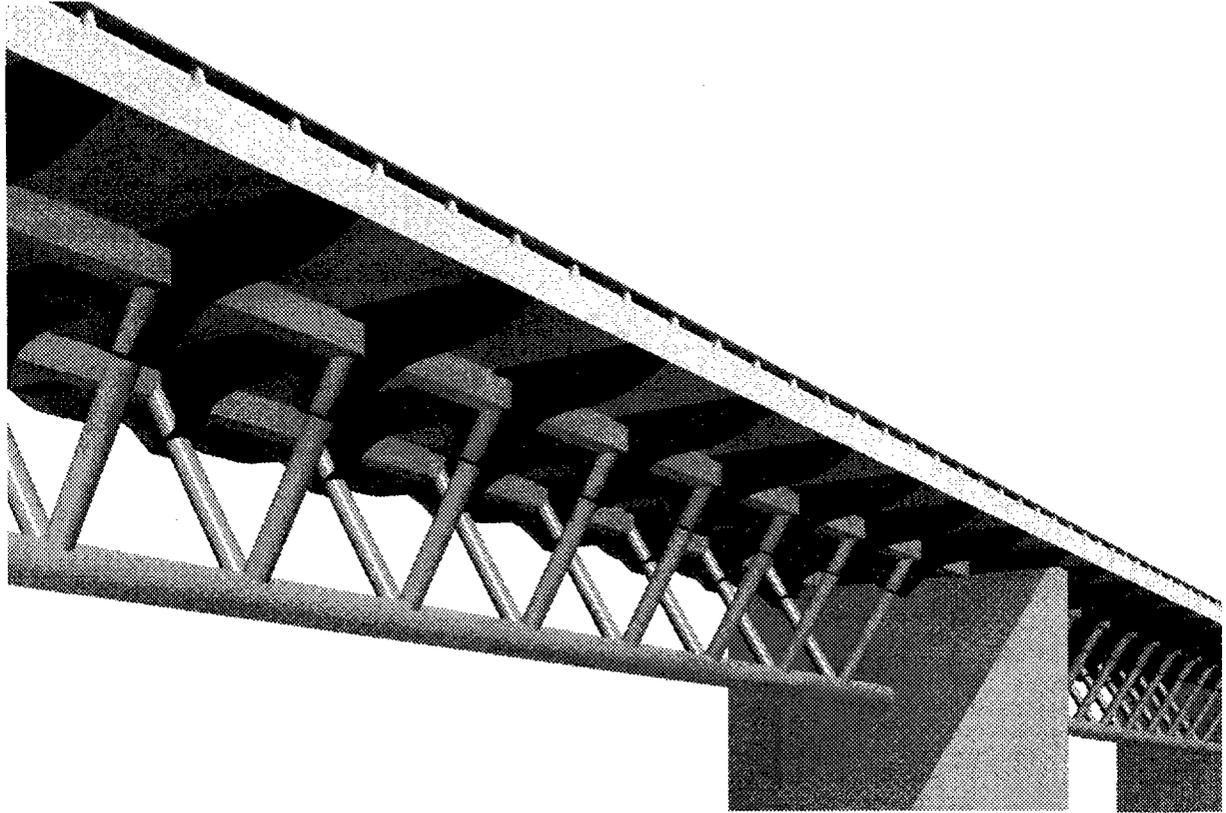


図 3.5.10 外ダイアフラム兼用の上支材を配置したパイプ構造

2) 上支材をA形に配置した3弦パイプトラス橋

- ・上支材を斜材の方向に合わせてA形に配置し、格点補強の合理化を図った。
- ・張り出し部の形状を低くし軽快感を表現した。

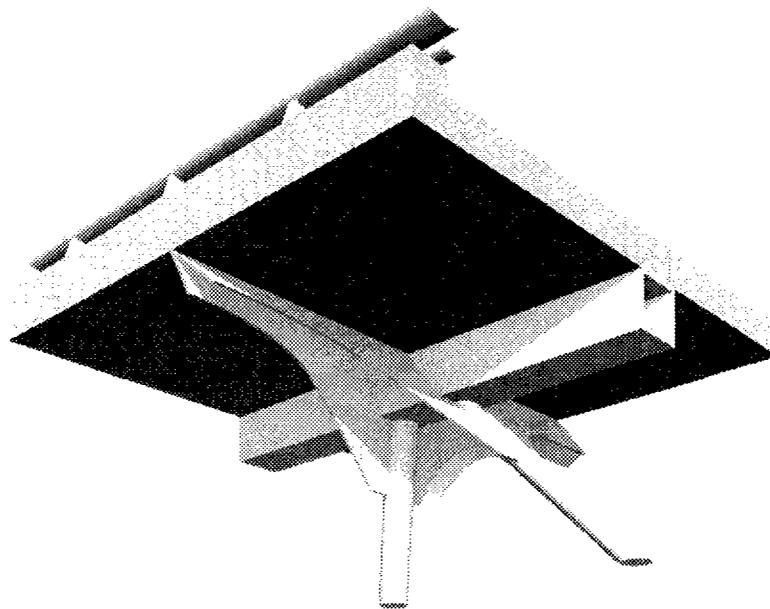
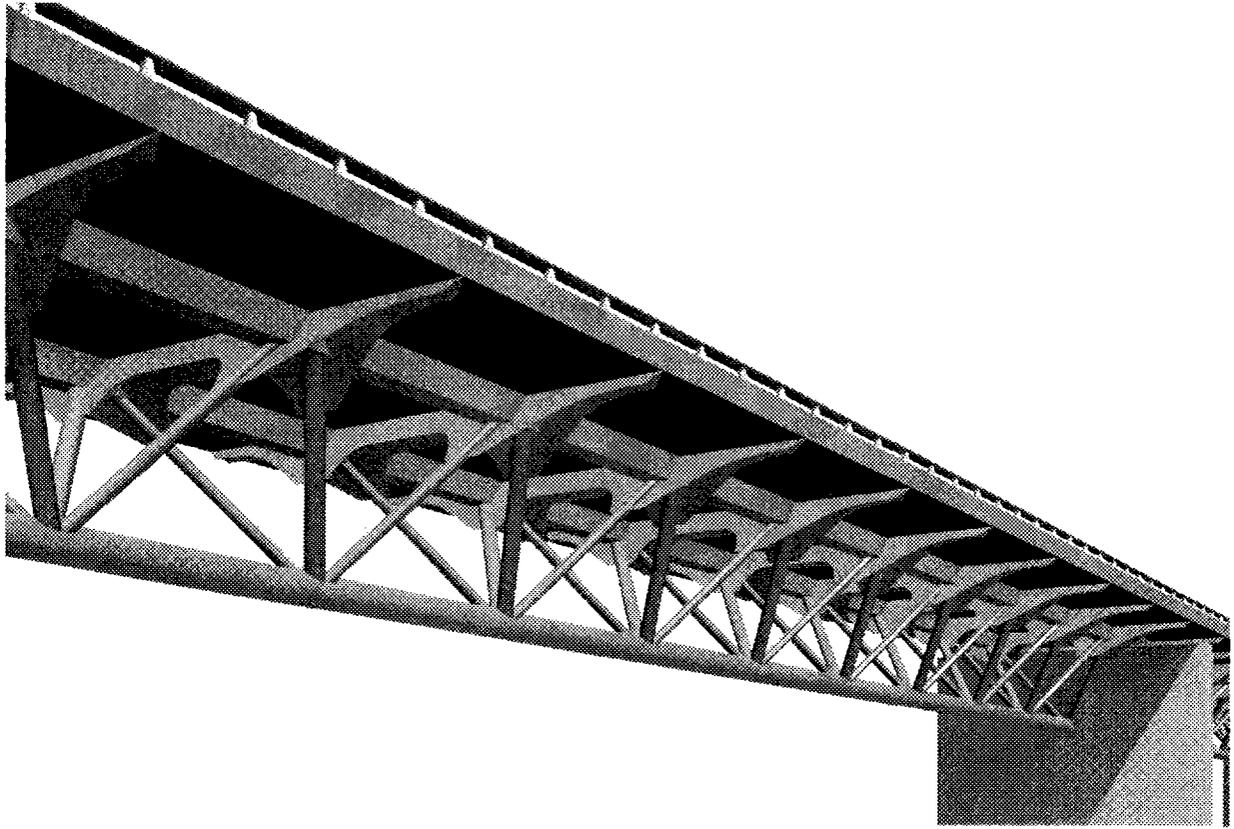


図 3.5.11 上支材をA形に配置した3弦パイプトラス橋

(4) 今後の課題

形鋼は経済性に有利であることに加え、鋼構造物のマルチピースの美しさを引き出すには格好の材料と考える。格点構造や添接構造の課題を克服し適切な使い方をすれば、将来最も3Eを満足しやすい材料になり得ると考える。

近年、鋼道路橋については疲労が注目されるようになり、格点部（格点溶接部）の要求性能は今まで以上に高まっている。これに対し、格点部の鋳鋼化や、コンクリート充填などの新しい取り組みが報告されるようになり、今後の研究成果が期待される場所である。

3.5.3 ボルト構造

ボルト接合は、溶接と並んで、鋼構造物の接合方法として一般的に用いられる。特に現場継手部においては、出来形確保と締付け管理の容易さから、ボルト接合とする場合が多い。そのことから、「工場内継手＝溶接」、「現場継手＝ボルト」、という使い分けがなされることが多い。

本節では、格点近傍の現場継手部にボルト接合を用いた場合の格点デザインを3E的観点から分析・考察し、新たな格点デザインの提案を行う。

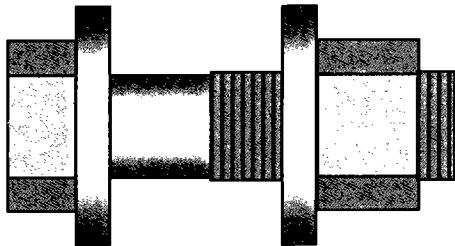
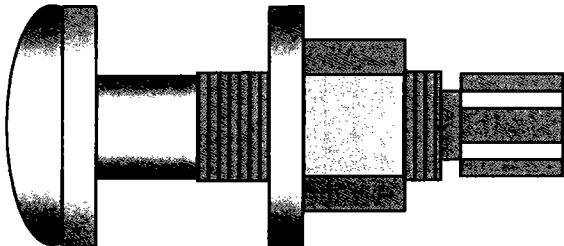
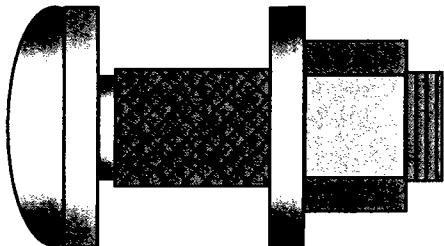
(1) 現状

1) ボルトの種類

高力ボルトが開発される以前には、現場継手にはリベットが多く用いられてきた。しかし、リベット焼きの設備が必要なことや、作業に高度の熟練を要すること、また、近隣への騒音問題などから、今日ではほとんど用いられることはない。現在は締付け力が強く、施工および品質管理の容易な「高力ボルト」が用いられる。

高力ボルトは下表に示すように、六角型、トルシア型、打込み式が代表的である。

表 3.5.2 ボルトの種類

ボルトの種類	接合方法	概形
六角型	摩擦接合 引張接合	
トルシア型	摩擦接合 引張接合	
打込み式	支圧接合	

2) 接合方法

高力ボルトの接合方法は、摩擦接合、引張接合、支圧接合の3種類の方法が一般的である。中でも、摩擦接合が最も一般的に用いられる。

① 摩擦接合

高力ボルトで継手材片（添接板）を締付け、その摩擦力によって応力を伝達。設計や施工が容易で信頼性が高い。部材力方向に対して直角にボルト軸を配置。

② 引張接合

部材力方向とボルト軸方向が一致する接合方式。継手面となる2枚の板を高力ボルトで締付けて接合する形式（短締め形式）と、継手面となる板を直接締付けずにリブプレートなどを介して高力ボルト、鋼ロッド、PC 鋼棒などで締付けて接合する形式（長締め形式）がある。

採用にあたっては、ボルトの材質、てこ作用などによる付加力、許容力、締付け力、疲労に対する応力範囲などを検討するとともに、継手接触面の平坦さ、被接合部の補強などについても十分な検討を行う必要がある。

③ 支圧接合

ボルト軸部のせん断抵抗および軸部とボルト孔壁との間の支圧力によって応力を伝達。ただし、継手性能を高めるため、摩擦接合と同等な軸力を与える。

摩擦接合に比べて許容応力度を 50% 高く設定可能であるが、ボルトの作業性（打ち込み難易度）や、ボルト打込み時の傷の程度などは、母材の厚さと打込み強さ、部材製作精度、ボルト径、きざみの形やボルトの強度などに関係するため、適用には十分な注意と検討が必要である。

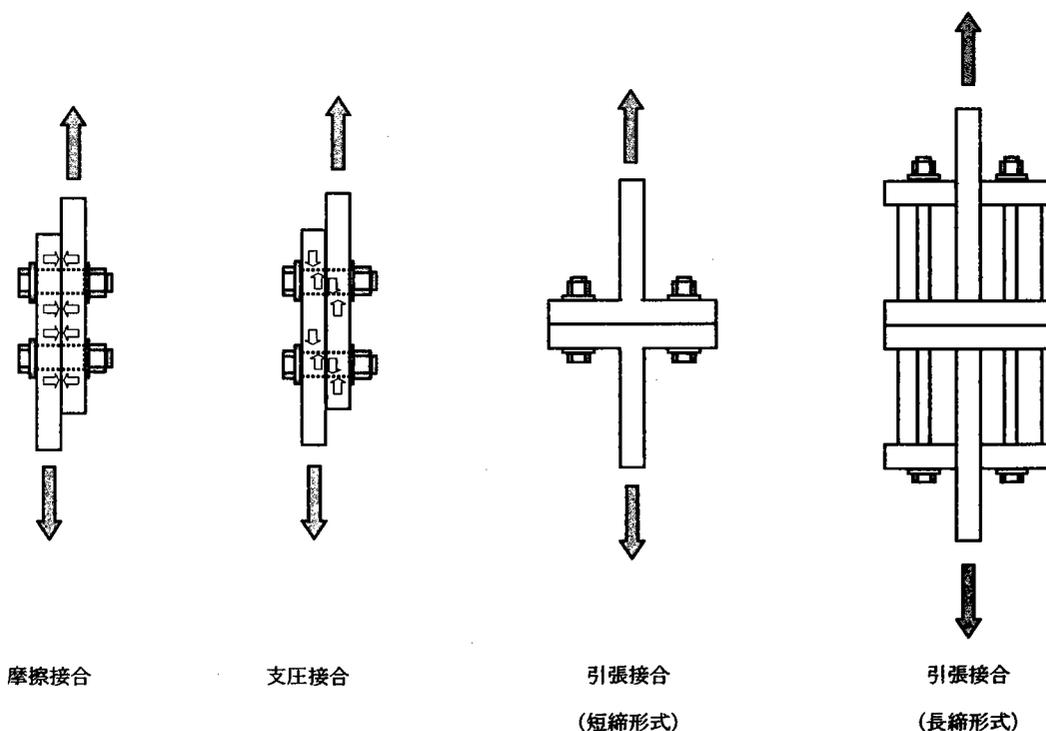


図 3.5.12 接合方法

3) ボルト接合の利点および問題点

ボルト接合の中でも、最も一般的に使用される摩擦接合について、その利点および問題点を3Eの観点から整理すると下表のようになる。

表 3.5.3 ボルト接合 3E比較表

	Efficiency (最小の材料)	Economy (経済性)	Elegance (優美)
利 点	・残留応力が生じない	・施工が容易で経済的 ・X線や超音波検査が不要	・鋼橋らしいディテール
問題点	・添接板の使用は最小の材料とは言い難い ・必要以上に大きなガセットプレートは部材端モーメントを増大させ、二次応力が生じる ・ガセット部の応力状態は一般的に複雑となる	—	・視点場が近い場合、煩雑な印象を与えてしまう ・主桁のように連続性が重要な箇所での継手は優美さを阻害する ・大きなガセットは本来のピン連結のイメージを阻害する ・溶接に比べて一般的に優美さに劣る。

上表によると、ボルト摩擦接合の問題点は、EfficiencyとEleganceに偏っている。つまり、ボルト摩擦接合のトータルデザインはEfficiencyとEleganceの改善に鍵があると考えられる。下表に、問題点と解決策を示す。

表 3.5.4 ボルト接合 3E比較表-2

	問題点	解決策
Efficiency (最小の材料)	添接板の使用は最小の材料とは言い難い	—
	必要以上に大きなガセットプレートは部材端モーメントを増大させ、二次応力が生じる	応力集中や疲労などに配慮した上で、できる限りガセットプレートは小さくした方がよい。
	ガセット部の応力状態は一般的に複雑となる	円滑な応力伝達を心掛ける。
Elegance (優美)	視点場が近い場合、煩雑な印象を与えてしまう	なるべく目立たないようにする。
	主桁のように連続性が重要な箇所での継手は優美さを阻害する	必要に応じて現場溶接を採用する。
	大きなガセットは本来のピン連結のイメージを阻害する	できる限りコンパクトに収める。
	溶接に比べて一般的に優美さに劣る	—

4) デザイン事例

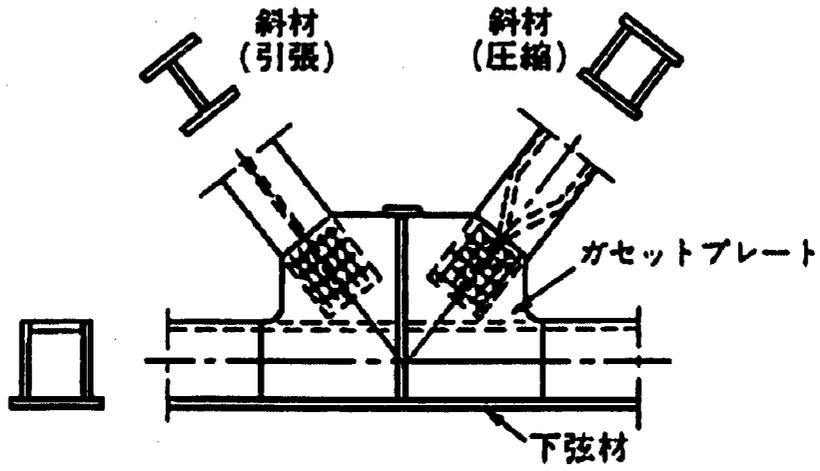


図 3.5.13 一般的なボルト格点構造 ²⁴⁾

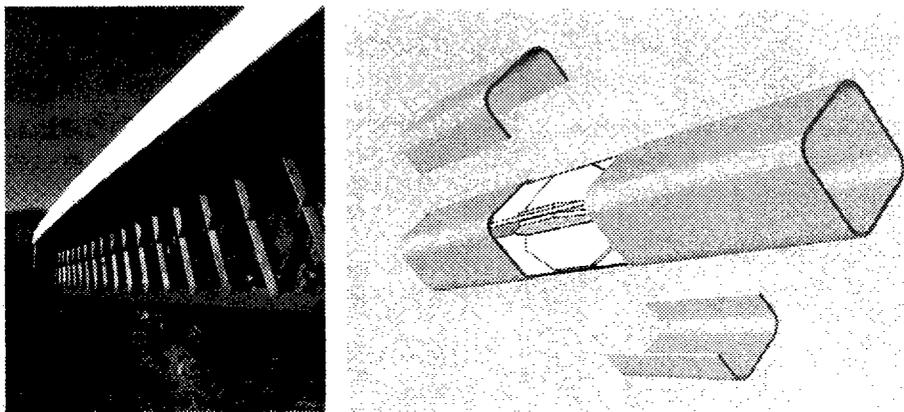


図 3.5.14 滝下橋の斜材部ボルト継手 ^{25) 26)}

(2) 提案 — 引張接合を用いた格点構造

1) Efficiency の改善

摩擦接合や支圧接合のように、添接板を介した応力伝達は、材料効率の面からは必ずしも優れたものではない。引張接合の場合は、添接板は不要であるが、代わりに支圧板やリブが必要となるため、これも Efficiency の改善になるとは言い難い。

つまり、摩擦接合に限らず、ボルト接合全般が本来的に Efficiency (最小の材料) に優れた継手方式と考えることもできる。

ボルト継手による格点構造を、可能な限り Efficiency に優れたものにするためには、格点に作用する応力をシンプルなものとし、ボルトに作用する力の種類を単純化することである。具体的には、格点をピン構造として、各部材に軸力のみが作用する状態にすれば、引張ボルトを用いることでシンプルな格点構造が得られるものと思われる。

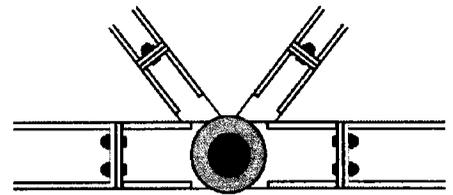


図 3.5.15 各部材に軸力のみが作用する
ピン格点とボルト継手

2) Elegance の改善

ボルトによる格点構造で、可能な限り Elegance を実現するためには、構造を極力シンプルに仕上げる必要がある。同時に、格点らしさを演出するために、格点そのものは溶接で仕上げ、現場継手部をボルト構造とする案も考えられる (図 3.5.16 参照)。

3) イメージ図

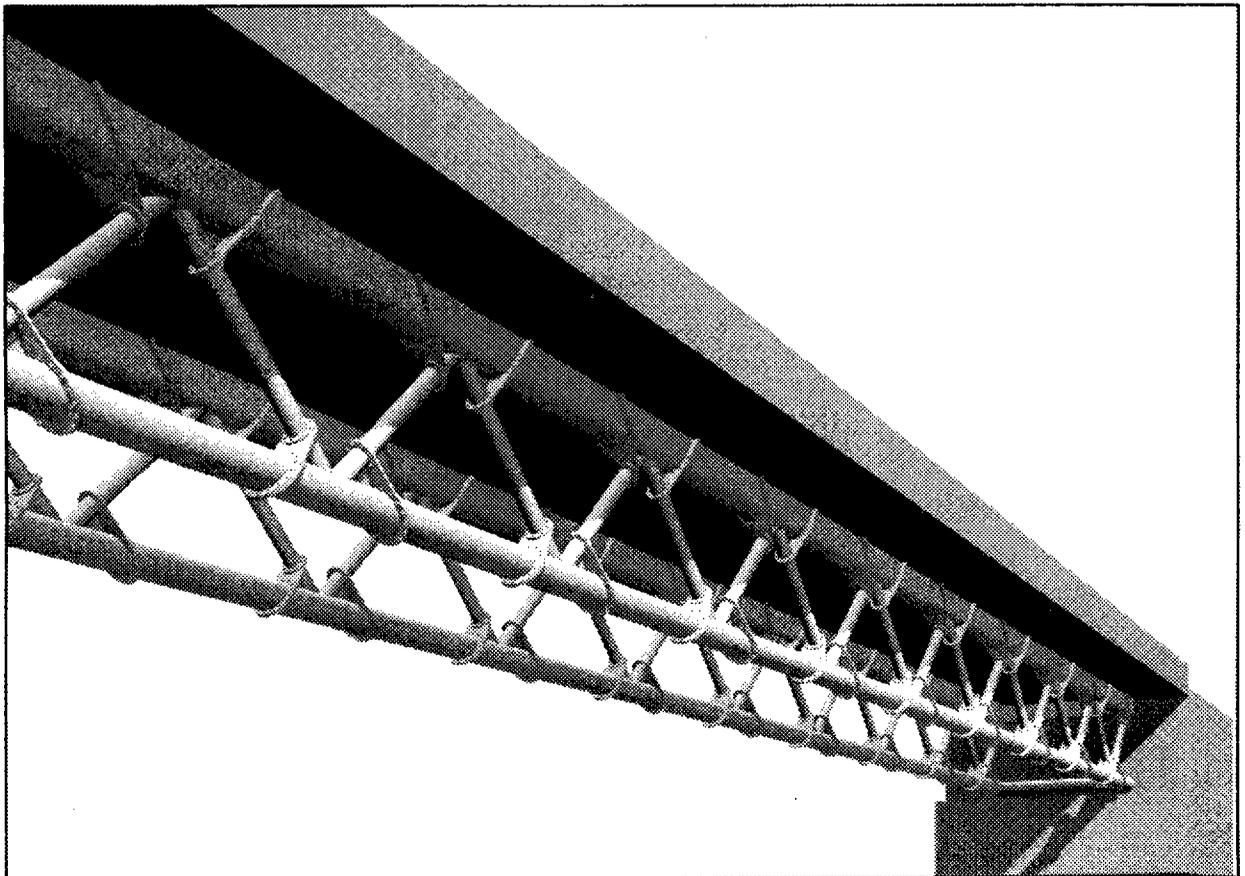


図 3.5.16 引張ボルト接合構造を用いた提案例



図 3.5.17 格点部拡大図

4) 今後の課題・考察

ボルト構造は鋼橋の魅力伝える有効な要素であるが、それを積極的にデザインに活かすことは容易でなく、多くの場合、煩雑感や異物感を与える結果となりやすい。ボルト継手を使用する場合には、見え方にも十分な配慮が必要である。

ここでは、ボルトによる格点構造として、**Efficiency** と **Elegance** の向上を目指して引張接合による方法を提案したが、技術的にはまだ十分な検討が必要である。今後の課題としたい。

近年、現場溶接の品質が向上し、以前に比べて現場溶接を採用することへの障壁がなくなってきた。工程や設備、コストなどを勘案しながら、可能であれば現場溶接を積極的に採用するののもひとつの方向であると考えられる。

3.5.4 ピン構造

もともとトラスの格点はモーメントを伝達しないピン構造とされており、解析上の仮定も実際の構造も、ピン構造で設計、施工がなされていた。しかし、製作性やメンテナンス、剛節としても2次応力がそれほど大きくなることなどから、近年ではほとんどの場合、格点は剛結されている。

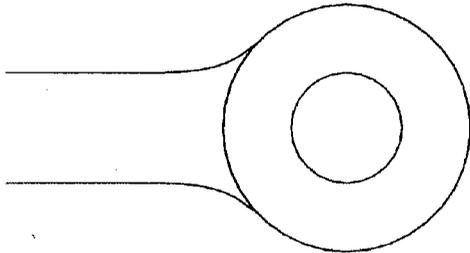
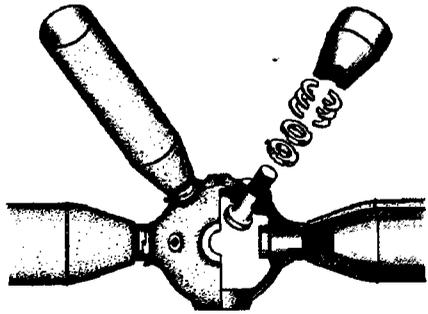
しかし、格点をピン構造とすることは、格点本来の魅力を表示し、鋼橋の魅力を引き出すことにもつながる。そこで、本節では、トラス橋やアーチ橋の格点をピン構造とした場合の格点デザインを3E的観点から分析・考察し、新たな格点デザインの提案を行う。

(1) 現状

1) ピン格点の種類

ピン格点は、アイバー型が一般的であるが、近年ではボールジョイントが採用される例もある。

表 3.5.5 ピン格点比較表

ピンの種類	概形	備考
アイバー		<ul style="list-style-type: none"> ・部材端部をめがね状に製作しピンで連結した構造。
ボールジョイント (システムトラス)		<ul style="list-style-type: none"> ・球体状の格点に部材をねじ込みなどで連結した構造。多方向からの3次元的な連結も可能。

2) ピン格点の利点および問題点

アイバーおよびボールジョイントについて、その利点および問題点を3Eの観点から整理すると下表のようになる。

表 3.5.6 ピン格点 3E 比較表

		Efficiency (最小の材料)	Economy (経済性)	Elegance (優美)
アイバー	利点	・2次応力が生じないため、剛結構造に比べて母材の断面を若干小さくできる。	—	・格点らしさを表現できる。 ・レトロなイメージを演出する場合には有効。
	問題点	・磨耗して孔が拡大することにより耐力が低下する場合がある。	・剛結構造に比べて維持管理費が高い。 ・格点部でのジョイントとなるため施工に留意。	・重たい印象がある。
ボールジョイント	利点	・部材に2次応力が発生しない。 ・3次元的な形状に対しても適用の自由度が高い。	—	・格点がコンパクトになる。
	問題点	・歩道橋には適用事例もあるが、基本的には建築物を前提とした構造であり、現状のままでは道路橋への適用は困難。	・初期建設費が高い。経済性以外の評価軸が必要。 ・維持管理が煩雑。	・適用の仕方によっては煩雑感を生じさせてしまう。

上表によると、アイバーとボールジョイントの問題点は、ともに、特に Efficiency と Economy にあることが分かる。つまり、アイバーおよびボールジョイントのトータルデザインは、特に Efficiency と Economy の改善に鍵があると考えられる。下表に、問題点と解決策を示す。

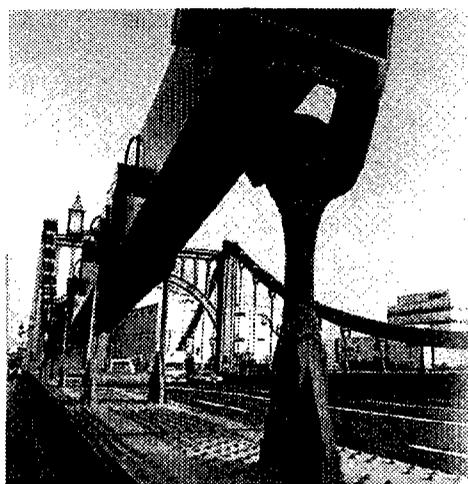
表 3.5.7 ピン格点 3E 比較表-2

		問題点	解決策
アイバー	Efficiency (最小の材料)	磨耗して孔が拡大することにより耐力が低下する場合がある。	接触面積を増大させることによる支圧応力の低減とそれによる摩擦応力の低減。
	Economy (経済性)	剛結構造に比べて維持管理費が高い。 格点部でのジョイントとなるため施工に留意。	— 仮固定方法の検討。
	Elegance (優美)	重たい印象がある。	当該橋梁に適したデザインとする。
ボールジョイント	Efficiency (最小の材料)	歩道橋には適用事例もあるが、基本的には建築物を前提とした構造であり、現状のままでは道路橋への適用は困難。	道路橋に適用する場合は、各種試験による安全性の検証が必要。
	Economy (経済性)	初期建設費が高い。経済性以外の評価軸が必要。 維持管理が煩雑。	コスト的に高くても、それに見合うだけの美しいデザインとすること。 —
	Elegance (優美)	適用の仕方によっては煩雑感を生じさせてしまう。	部材配置の仕方、見え方などについてチェック。

3) 好ましいデザイン事例



山形健康の森公園歩道橋



清洲橋

図 3.5.18 好ましいデザイン事例 (27) (28)

(2) 提案 — システムトラスを主構造に用いたペDESTリアンデッキ

1) Efficiency の改善

道路橋に適用するにはまだ課題が多いほか、そのメリットも十分に検討されなければならないが、歩道橋に採用する場合には既に実績もあり信頼性が高い。

特に、複雑な平面形状を有するペDESTリアンデッキなどには、従来では化粧板でしか桁下を美しく処理することができなかったが、本構造では主構造そのもので美しい桁下を演出可能である。

2) Economy の改善

機械加工を必要とする部材点数の多さから、コスト高はある程度避けられない。しかし、それに見合うだけの美しさを与えることができるならば、本構造を採用するメリットはある。しかも、従来の構造で化粧板を使用することを考えると、本構造のコストも相対的に緩和されるはずである。

また、部材寸法をできる限り統一またはグルーピングしてコストダウンに努めることも重要である。

3) Elegance の改善

繊細さが表現されていなければ、本構造はむしろ煩雑に見えてしまう。表現が大げさとならないように注意が必要である。

4) イメージ図

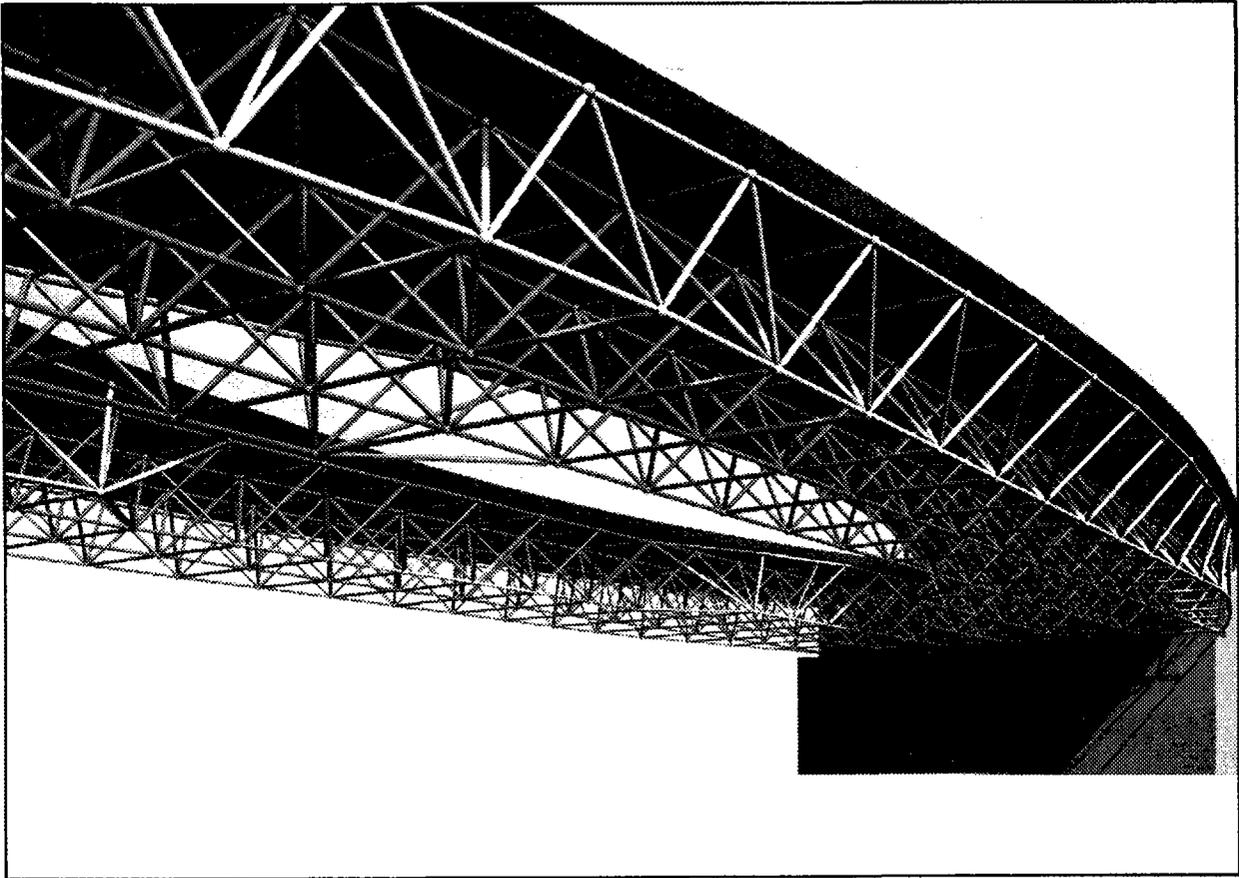


図 3.5.19 システムトラスを主構造に用いたペDESTリアンデッキ

(3) 今後の課題・考察

トラスやアーチの格点をピン構造とすることは、構造本来の機能を明確化し、分かりやすい実直なデザインとすることができる。また、それによって、鋼橋の魅力を引き出すこともできる。

しかし、経済性の面からは必ずしも有利ではなく、多くの場合、剛構造に比較して初期コストやメンテナンス費の点で劣る。

ここでは、複雑な平面形状を有するペDESTリアンデッキにボールジョイント・トラスを適用することを提案した。化粧板を用いることなく魅力的な桁下を表現することができるが、適用の仕方によっては煩雑な印象となるため、注意が必要である。

3.6 コンクリートを併用した新しい橋梁デザイン

3.6.1 はじめに

昨今、公共事業費のコスト縮減という社会的な要望が高く、橋梁の建設においても工費の削減・維持管理費の低減・省力化が強く求められている。このような背景により、鋼とコンクリートの長所を利用した新しい形式の複合橋梁（合成構造，SRC 構造，混合構造）が盛んに建設されている。これは鋼とコンクリート、その材料特性を生かして巧みに組み合わせることにより、1つの橋梁を合理的で施工性・経済性に優れる構造とすることが可能となるからである。

本項では形鋼を用いたトラス橋・アーチ橋に対して、材料の組合せ（鋼とコンクリート）をという観点により、3E配慮型の新しい橋梁デザインを提案することを目的とする。

3.6.2 鋼・コンクリート複合構造

近年多く採用されている橋梁における鋼・コンクリート複合構造の1例を表3.6.1に示す。

表 3.6.1 鋼・コンクリート複合構造の1例

種 別		適用橋梁, 箇所など
合成構造	桁の合成構造	波形鋼板（鋼トラス）ウェブPC橋, H鋼埋込橋
	床版・鋼桁の合成構造	合成桁・トラス・アーチ橋, スペーストラス橋
	床版の合成構造	鋼・コンクリート合成床版
	コンクリート充填（CFT）鋼管構造	合成桁橋・主塔・橋脚, トラス・アーチ橋圧縮材
混合構造	桁どうし（主塔と橋脚）の混合構造	混合桁・アーチ・斜張橋
	鋼桁と下部構造との混合構造	鋼桁とRC橋脚・橋台とのラーメン橋

上記のような鋼とコンクリートを併用した構造について、デザインも含めた3E的観点により、一般的な利点ならびに問題点を挙げると事項に示す表3.6.2が考えられる。

表3.6.2の考察として、構造として確立され採用事例も多い複合構造（波形鋼板ウェブ橋，合成桁橋，複合ラーメン橋等）の場合、3Eにおける経済性（Economy）、構造の合理化、製作・施工の効率（Efficiency）の2Eについては、十分満足している構造であるといえる。なお優美さ（Elegance）については、ケースバイケースであるため、必ずしも優れているとはいえない。

よって、優美さ（Elegance）の改善を行うことにより、3Eのバランスに配慮したトータルデザインが可能であると考えられる。

表 3.6.2 鋼・コンクリート併用構造の利点と問題点

	内 容	経済性	効率・合理性	優美さ
		Economy	Efficiency	elegance
利 点	・合成構造の場合、コンクリートを鋼板に付着させることにより、耐力・じん性・剛性が向上する。(材料・部材数の省力化)	○	◎	—
	・合成構造の場合、鋼板の弱点である座屈防止効果がある。(材料・部材数の省力化、構造の合理化)	○	◎	—
	・合成構造の場合、剛性向上により制振効果および防音効果がある。(機能の向上)	—	○	—
	・コンクリートにも力の一部を負担させ、応力の流れを円滑にすることにより、疲労軽減・隅角部せん断遅れ抑止効果がある。(材料・部材数の省力化、構造の合理化)	○	◎	—
	・合成構造の場合、腐食や火災から鋼材を保護する効果がある。またコンクリート接触面には塗装は不要となる。(機能・施工性の向上)	○	◎	—
	・鋼部材が型枠の代用となる場合、施工性が向上する。	○	◎	—
	・混合構造の場合、コンクリートの自重を利用して応力を減少させる力学的アンバランスの防止対策となる。(構造性の向上)	—	○	—
	・部材のスレンダー化により、美観が向上することもある。	—	—	○
	・異種材料の組合せにより、アクセントが付与され美観が向上することもある。	—	—	○
問題点	・設計基準が多種多様であり標準化されていない。	—	△	—
	・構造によっては、重量増加の影響が大きく、コスト縮減効果が少ない。	△	—	—
	・接合部の構造に検討が必要である。	—	△	—

3.6.3 トラス橋・アーチ橋の現状

現状のトラス橋・アーチ橋の格点部・支点部・隅角部は、部材数が多く板組が複雑である（図3.6.1、図3.6.2、図3.6.3）。また、支点上等の大きな圧縮力が作用する箇所においては、鋼構造の特性上断面が大きくなる。これらは工場製作工数の増加、施工性の悪化の原因となっており、また景観面でも煩雑となることから軽快感が損なわれる結果となっている。

そこで上記を踏まえ、格点部・支点部・隅角部等にコンクリートを活用した改善案について提案を行う。

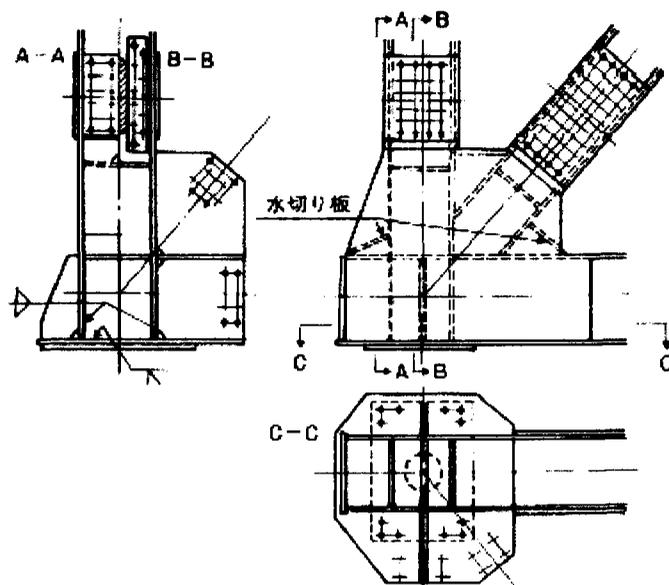


図3.6.1 トラス橋支点部の構造例 ²⁹⁾

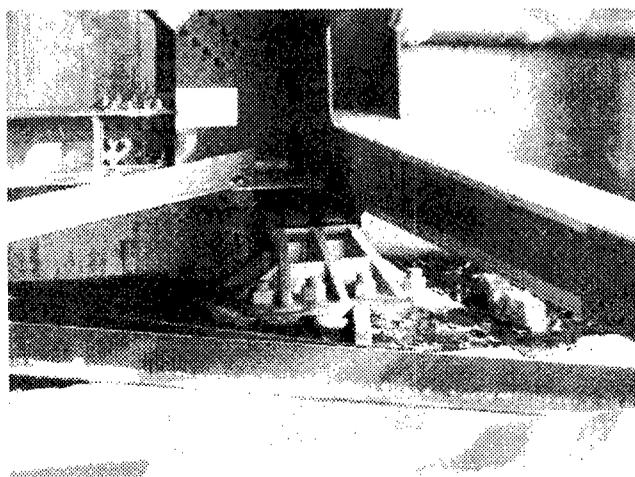


図3-6-2 トラス橋支点部の例



図3-6-3 トラス橋部材構成の例

3.6.4 提案構造ならびに今後の課題

(1) 提案構造

トラス・アーチ橋の支点部をコンクリートに置き換えた構造案について、次頁より CG パースにより紹介する。

なお、従来橋に対して改善した内容は以下の通りである。

- ・部材には鋼管パイプを用いた。これによりビルトアップ材と比べ工場製作工数の低減が可能であると考えられる。
- ・構造上複雑となる支点部はコンクリート構造とした。圧縮力を受ける部材をコンクリートに置き換えることは、鋼構造の弱点を補うことになり、工場製作工数・部材数の省力化が可能であると考えられる。またラーメン構造とすることにより、支承費の節減および維持管理性の向上、不静定次数の増加による耐震性の向上に努めた。
- ・トラス橋の上支材は、支点上をコンクリートとすることにより面外力に抵抗できると考えられるため省略した。これによりすっきりとした印象を表現した。
- ・圧縮部材にはCFT鋼管を用いることにより、部材をスレンダー化し軽快感を表現した。
- ・スレンダーなアーチリブ・トラス弦材から支点上のコンクリートに断面変化することにより、安定感のある釣り合いおよび力学的秩序表現の明確さを表現した。また構造寸法の対比効果により、支間部の鋼管の細さをより強調することが可能である。
- ・鋼部材からコンクリートへの断面変化は3次元的な変化としているため、鋼部材では出にくい柔らかさを表現した。

1) 支点上をコンクリートとした下路式パイプトラス (ラーメン構造)

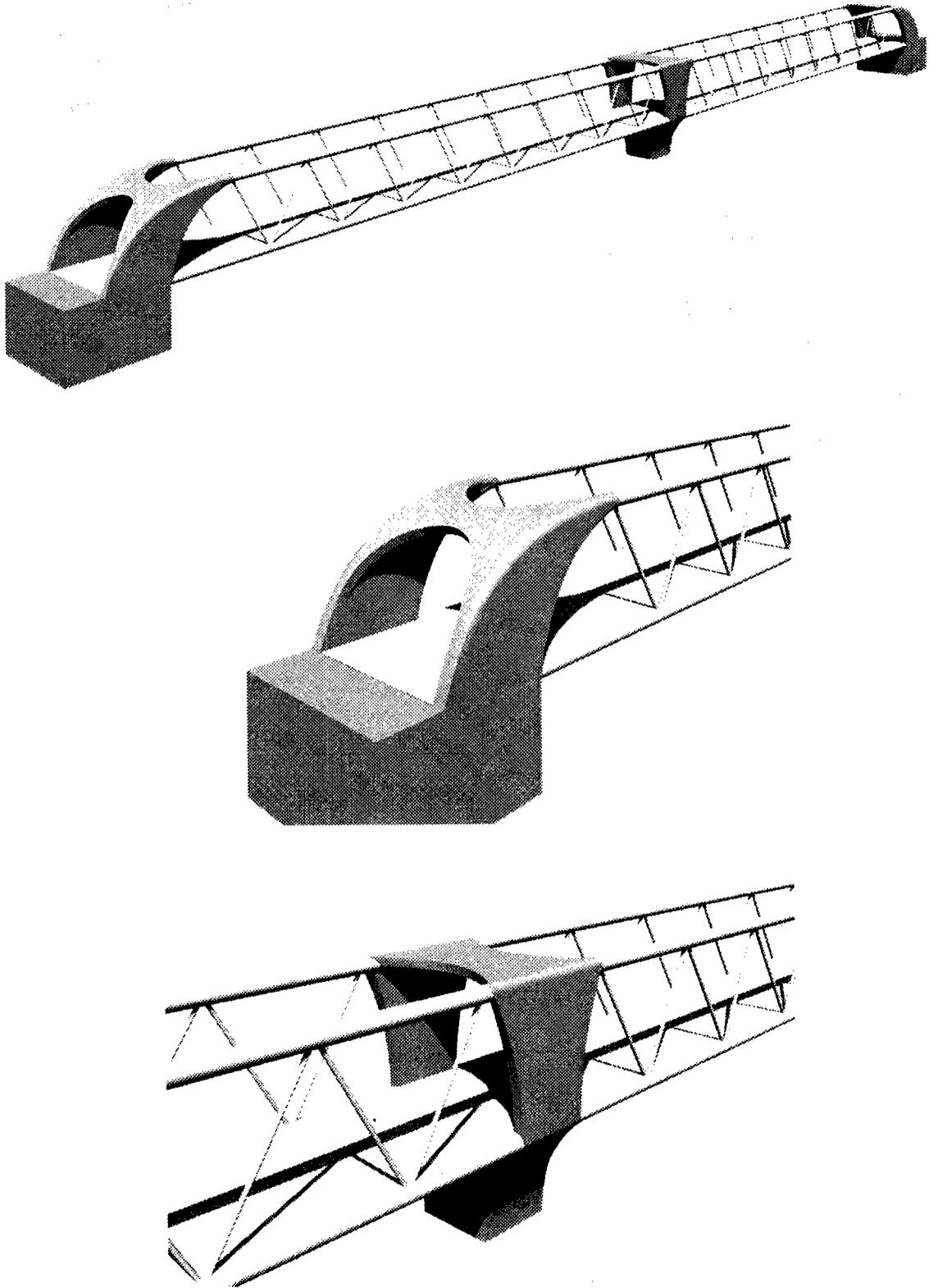


図 3.6.4 支点上をコンクリートとした下路式パイプトラス

※上部構造支点近傍の濃く見える部材および下部構造がコンクリート，その他は鋼管となっている。

2) 支点上をコンクリートとした下路式パイプアーチ (ラーメン構造)

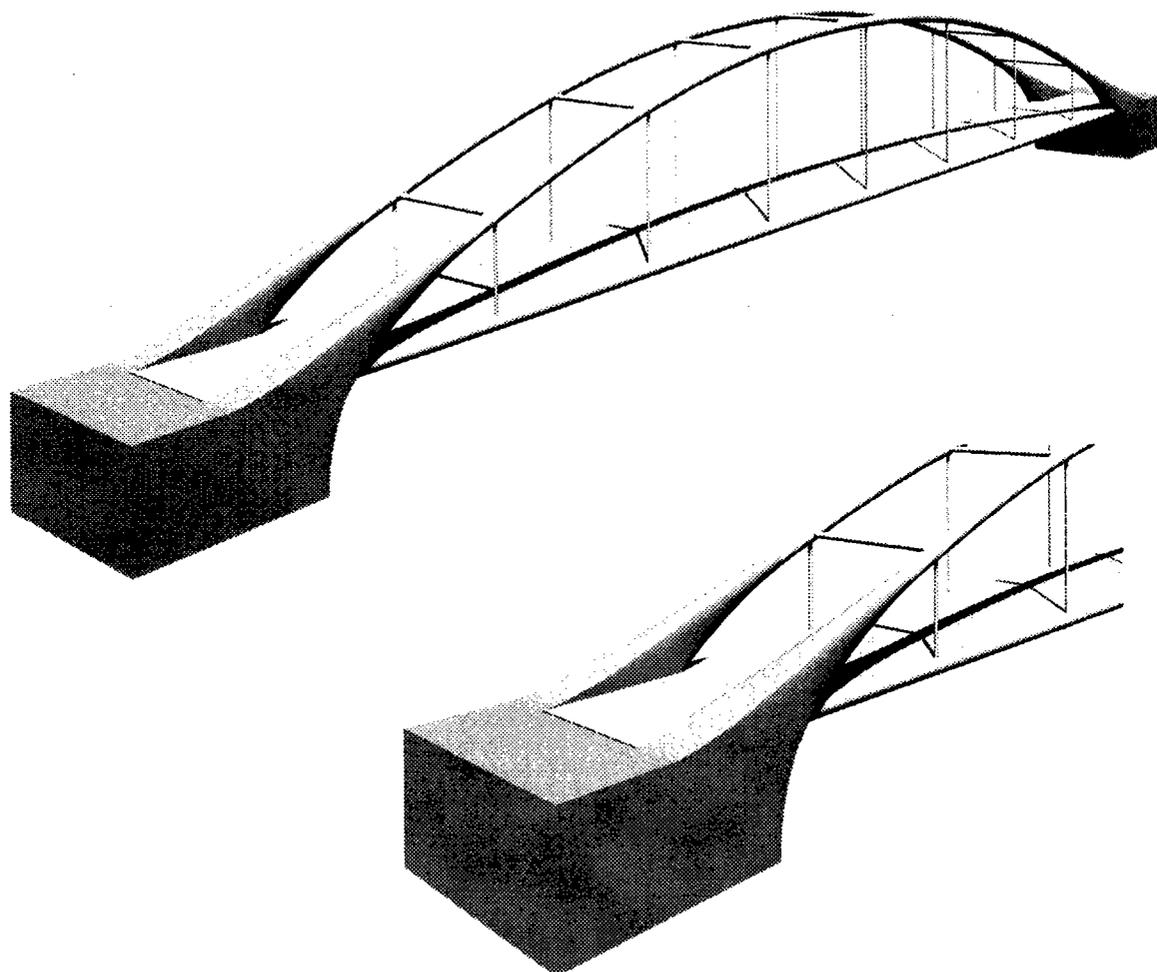


図 3.6.5 支点上をコンクリートとした下路式パイプアーチ

※上部構造支点近傍の濃く見える部材および下部構造がコンクリート，その他は鋼管となっている。

3) 鋼とコンクリートの接合部の例 (鉄筋定着方式)

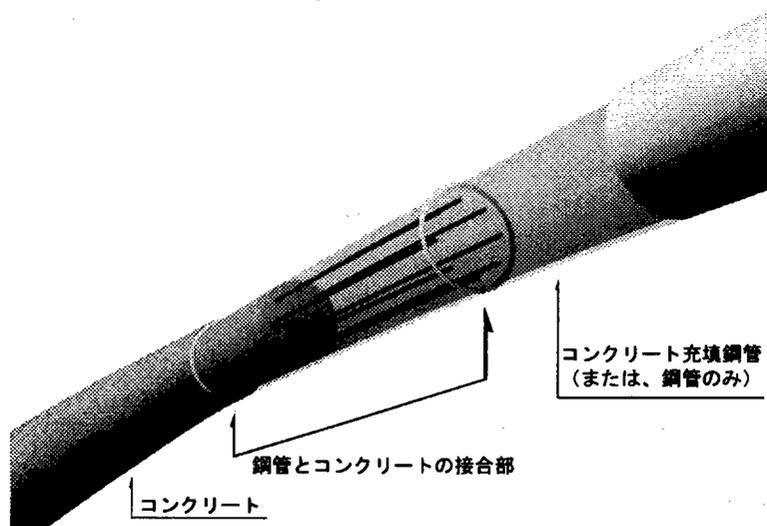


図 3.6.6 鋼とコンクリートの接合部の例

(2) 考察ならびに今後の課題

3.6 ではパイプトラス・アーチ橋の支点部にコンクリートを適用する構造について提案した。鋼構造の弱点である圧縮力を受ける部材をコンクリートに置き換えることは合理的な構造であり、また優美さ(Elegance)の改善を行うことにより、3Eのバランスに配慮された構造になっていると考えられる。これに対して、今後の課題となる点は、接合部の構造とコストの面である。

- 1) 本提案構造では鉄筋定着方式を1例として示したが、ずれ止め配置の方法については検討が必要である。小断面の場合には一般に付着力が卓越するため、ずれ止めを配置する必要はないと考えられるのに対し、大断面の場合には、鋼板と充填コンクリートの一体化および断面の補剛をより確実なものとするためにずれ止めが必要であると考えられる。また、接合部の構造として、補強リブや支圧板、PCケーブルを用いる構造もあるため、最適な構造の比較検討は、施工性を含め必要であると考えられる。
- 2) コストの面については、重量増の上下部工への影響度合いによるため、一概には言えないが、構造的に考えて、鋼構造のみと比べ同等以上程度と考えられる。今後の課題としては、常時に加え地震の影響も考慮した上での比較検討が必要であると考えられる。

3.7 まとめ

今回、「トラス橋」「アーチ橋」を multi piece の美しさ・軽快感などの鋼構造の魅力を活かしつつ、デザインのみ突出することなく、施工性、コストとバランスの取れた各種課題の解決案となりえる“3E配慮型橋梁デザイン”提案を行った。

“形鋼”をキーワードに、鋼構造らしい構造合理性、構造美を実現し、材料の節約、鋼構造らしい multi piece の美・軽快感を提案出来たと思う。

省資源、リサイクルが話題の昨今、経済性のみの追求ではなく、「最小の材料」という概念から、「景観配慮」を“装飾”ではなく“3Eのバランスのとれた橋”の提案がされたのではないか。現状の課題整理とアイデア提案、「3E」概念の周知や調査文献が、実務の助けとなれば幸いである。

参考文献

- 1) Iron Bridge, Chepstow Bridge :
東北大学工学部土木工学科 HP <http://www.civil.tohoku.ac.jp/~sugawara/phcd3.htm>
- 2) 御徒町の定点比較 : 林順信: 都電が走った街今昔 激動の東京定点对比 30年 JTB
- 3) 永代橋 : (社) 日本土木工業協会 HP
<http://www.dokokyo.or.jp/pavilion/isan/isanall/isan05/21.htm>
- 4) メリダ橋/カラトラバ設計 : 長崎大学工学部構造工学科 HP
<http://www.lw.st.nagasaki-u.ac.jp/~matsuda/home-page/2-chap.html>
- 5) 豊田大橋 : 神鋼鋼線工業 HP http://www.shinko-wire.co.jp/eng/br_toyota.html
- 6) かえる橋 : 印南町 HP <http://www.naxnet.or.jp/~gobokoui/inami/>
- 7) D. P. ビリントン (著), 伊藤 学, 杉山 和雄 (翻訳): 塔と橋—構造芸術の誕生 海洋架橋調査会
- 8) 坂井逸朗、春日昭夫: スペーストラス橋の新しいコンセプト 橋梁と基礎 2002.8
- 9) 日本建築学会、構造用教材、技報堂、1985
- 10) 「Akioの旅での発見」 : 個人のHP
<http://www.eva.hi-ho.ne.jp/akio-yakt/t79/j970810u.htm>
- 11) 川畑篤敬、伊藤久、中村哲也、植田俊司、猪村康弘、栗原康行: パイプトラス橋の新形式格点構造 土木学会 構造工学論文集 Vol.48A (2002.3)
- 12) 美保美術館橋梁 : 川崎重工 HP
<http://www.khi.co.jp/tekkou/monument/Miho/MihoJ.html>
- 13) 森啓之、香川恭徳、中村茂樹、古平准、堤一之: 建築・橋梁用部材への鋳鋼品の適用と製品最適化 追求への取り組み、神戸製鋼技法、2002.4
- 14) 栗原康行、加藤真志、伊藤久、中村哲也、川畑篤敬、猪村康弘: パイプトラス橋の新形式格点構造、NKK技報、NO.175(2001.12)
- 15) 保坂鐵矢、市川篤司、仁瓶寛太、磯江暁、橋本靖智: パイプトラス格点k継ぎ手溶接性能に関する実験的研究、土木学会構造工学論文集 Vol.48A、pp1079~1090、2002.3
- 16) 白水晃生、奥原秀敏、尾下里治: 形鋼を主体とした鋼合成ラチストラス橋の提案、横河ブリッジグループ技法 No28、pp.27~34、2000.
- 17) KlausBernhardt, BurkhardMohr, GerhardSeifried, VolkhardAngelmaier:
Talbrücke Korntal-Munchingen-innovativer Brückenentwurf als Rohrfachwerk-Verbundbrücke Teil1-Entwurf, Stahlbau, Ernst&Sohn, 2003. 2.
- 18) 社団法人日本橋梁建設協会: Bulletin 19 Ponts metalliques (フランスの鋼橋論文集)
- 19) 松下貞義、成瀬輝男: 土木学会編 新体系土木工学 38 鋼構造物の設計、技報堂出版、1986.11
- 20) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編.平成14年3月.
- 21) 川尻克利、梅津靖男、至田利夫: 滝下橋の計画・設計、橋梁と基礎、1998.3
- 22) 福岡一幸、川尻克利、香川紳一郎、近藤秀雄、杉村潤一: 滝下橋の工場製作・現地施工—角形鋼管によるデッキトラス橋—、橋梁と基礎、1998.6
- 23) 徳嵩公明、堀越英嗣ら: 渋谷歩道橋(仮称)の設計と施工、橋梁と基礎、2001.11
- 24) 中井博、北田俊行、鋼橋設計の基礎、共立出版、1992.5

- 25) 土木学会景観・デザイン委員会、DESIGN SELECTION 2001、2002.1
- 26) 景観デザイン研究会、景観デザインレポート、1999.11
- 27) 太陽工業(株)パンフレット、TM トラスの可能性
- 28) 白井裕、隅田川 橋の紳士録、東京堂出版、1993.9