

櫃石島高架橋トラスの設計

梶山 昭克¹⁾ 林 勝樹²⁾
鮫島 能章³⁾ 亀尾順一郎⁴⁾

はじめに

本州四国連絡橋のDルート（児島・坂出）は、本州より鷲羽山をくぐって下津井瀬戸を渡ると最初の島櫃石島になる。本橋は櫃石島の南端に位置し、櫃石島橋（支間420mの斜張橋）に接続する支間100.9mの鋼単純ワーレントラス橋（併用橋）である。

同ルート内では比較的小規模ではあるが、海峡連絡橋の道路鉄道併用橋として、他の長大橋群と同じ位置づけされた橋梁である。

1. 経緯の概略

本橋は昭和58年12月19日、まず製作工事として発注され、当社を代表会社とする日本橋梁(株)との2社の共同企業体でこれを受注した。

製作工事の工事範囲は、詳細設計（架設計画を含む）、工場製作、同塗装、および岸壁における立体地組立であった。工期は昭和60年12月15日までの約2ヶ月であったが、橋体大ブロックの架設時期として、昭和60年6月～8月を指定され、実質的にはこの時期にあわせてため、かなり圧縮された工程となった。図-2に製作工事の組織図を、図-3に工程表を示す。

ついで昭和59年12月に輸送架設工事が発注され、ここに設計から製作・架設までの一貫工事として施工することになった。架設工事工期は昭和61年2月で、本橋は同ルート内では橋梁上部工工事として最初に完成する橋梁である。

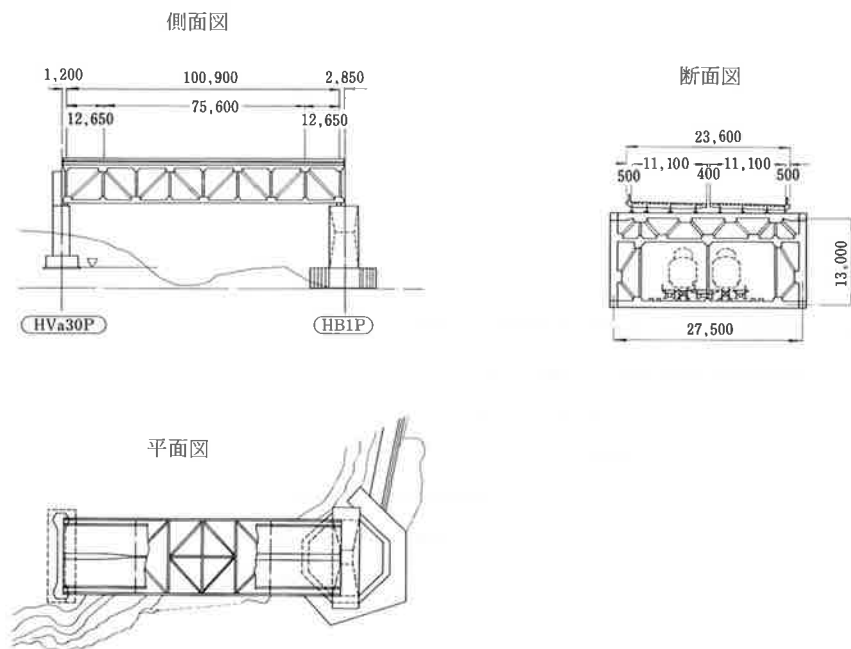


図-1 一般図

- 1) 設計部次長 2) 工事計画部架設計画課副課長
3) 設計部大阪設計課係長 4) 設計部東京設計課

3. 設計

(1) 概要

設計を開始したときには、Dルートの上部工では岩黒島橋が設計をほぼ完了していた。したがって、本橋の主構造部については岩黒島橋のものを適用根拠を明確にした後準用した。ただし次の点については、本橋以降に発注されたDルート内のトラス橋および吊橋の重要な参考資料となるため慎重に対応した。

- 1) 上路床組
- 2) 沓
- 3) 付属物全般
- 4) 大ブロック吊金具

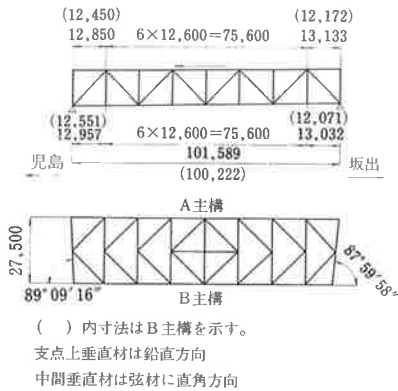


図-4 主構骨組寸法

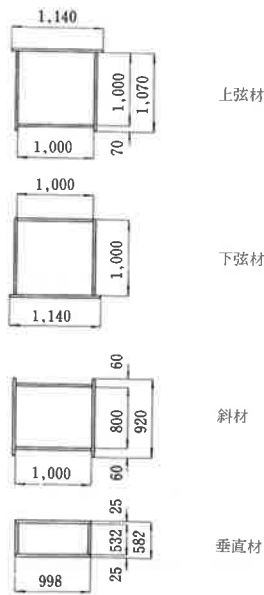


図-5 主構部材寸法

表-2 主構の主要諸元

項目		備考
最大活荷重たわみ	$\delta_t = 97\text{mm}$	(許容たわみ)202mm
最大軸力(上弦材)	$N = 3,479\text{ t}$	$t = 40\text{mm}$ (S M58)
◇ (下弦材)	$N = 3,276\text{ t}$	$t = 34\text{mm}$ (◇)
◇ (斜材)	$N = 2,207\text{ t}$	$t = 34\text{mm}$ (◇)
◇ (垂直材)	$N = 284\text{ t}$	$t = 25\text{mm}$ (S S41)
支点反力(Hva30P)	$R = 1,845\text{ t}$	Fix
◇ (Hø1P)	$R = 1,852\text{ t}$	Mov

上路床組は検討の結果、実施設計でRC床版のものを鋼床版に変更した。このことにより上路床組分の鋼重が増加したにもかかわらず全鋼重が減少し、このクラスの橋梁では全死荷重の軽減が鋼重の軽減に非常に大きくかわることをうかがわせた。

付属物については、本橋がPC高架橋と斜張橋の間にあり、この径間内で付属物の配置をすりつけねばならず、トラス内部の空間を全て使用する程に複雑な配置となった。

架設工法との関連については、架設の簡便さを考慮して「沓の完全先据固定による大ブロック一括架設」を採用し、吊金具の構造、沓の構造を工夫した。

(2) 主構

垂直材を有するワーレントラスであり、その骨組寸法、連結位置を図-4に示す。また部材断面寸法は試算の結果、隣接橋梁と同一でかつ経済性が損なわれないことから図-5に示す大きさとした。格点構造を図-6に示す。

また主構は併用部材であるから疲労に対する配慮をする必要がある。応力振幅の計算結果を図-7に示す。これにより、応力振幅は最低ランクであるDランク($\delta + a = 800\text{kg/cm}^2$)内にとどまっており、特に注意を要する部材はなかった。

主構の主要諸元を表-2に示す。

(3) 主横トラス

荷重載荷点の変化、荷重強度の変化に合わせて、全ての格点(9格点)で骨組解析を行い、部材断面については3グループに統一した。鉄道部材の疲労等級については、下弦材でランクC、腹材でランクDで設計した。部材寸法および溶接形状を図-8に示す。

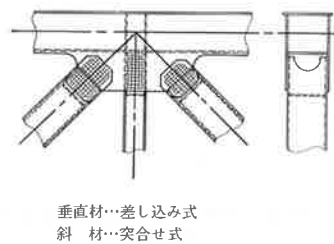


図-6 格点構造

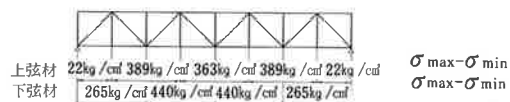


図-7 応力振幅(疲労応力度)

主横トラスのせん断剛性は $\gamma=3.9\sim 4.3\times 10^5 > 1.5\times 10^5$ であり、トラス全体に対して十分なねじり剛性を有している。

トラス部材の有効座屈長については、断面力の分布等を考慮して表-3のように定めた。

その他、弦材に作用する付加応力として表-4に示すものを考慮した。

(4) 上路床組

上路床組は当初RC床版であったが、経済性、現場施工工程の短縮をはかるため鋼床版に変更した。また中央分離帯の形状、主構との連合作用等を考慮して上下線分離構造とした。縦桁配置はアスファルト舗装のひずみ硬化を考慮して、輪荷重の載らない場所、つまりレーンマーク直下に配置した。(図-9)

また連続径間数は、吊橋等では最大6径間であり、本橋の8径間連続桁構造はDルート内では最も径間数の多い形式であり、主構の横方向の変形に伴う影響が大きい。上路床組支承はこの影響を考慮し、横方向水平反力を負担できる構造とした。

支承と主横トラス上弦材との取り合いは、溶接構造とボルト構造が考えられるが、上弦材の密閉性を重視して溶接構造とした。

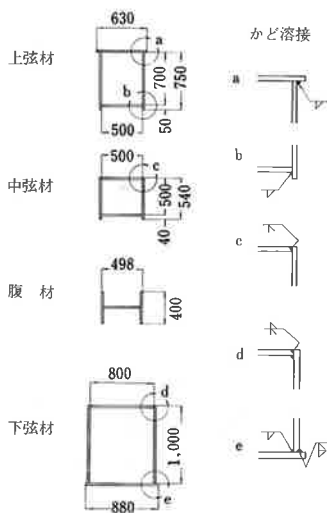


図-8 主横トラス部材寸法およびかど溶接形状

表-3 主横トラス有効座屈長

部材座屈長	面内	トラスの骨組長 ただし、ガセットで接合された場合にはボルト群の中心間又は骨組長の90%	
		上弦材	上横構取付点間隔
	中弦材	部材骨組長の2倍(圧縮領域)	
	下弦材	下横構取付点間隔	
	面外	腹材	面内の部材骨組長
		主構垂直材	主構高の90%

中央分離帯幅は高架部と斜張橋で異なるため、本橋にてすりつけを行った。また径間中央部には緊急時に自動車等をUターンさせるための上下線開口部がある。(図-10)

(5) 下路床組

下路床組は暫定2線時(在来線)のものを設計した。構造形式は鋼桁直結軌道を有する钣桁であり、桁配置は曲線軌道に沿った格点での折れ桁とした。軌道締結装置は中央部では鋼直II型を使用し、隣接

表-4 主横トラス弦材に作用する付加応力

弦材に作用する付加応力	暴風時および地震時横荷重に対する照査 活荷重の偏載による主構の振りに対する照査	
	ロングレール縦荷重による下弦材の面外曲げおよび振りに対する照査	
	主構下弦材の軸変形に伴う主横トラス弦材の面外曲げに対する照査	

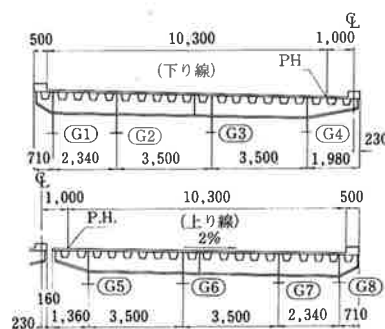


図-9 上路床組縦桁配置



図-10 中央分離帯開口部

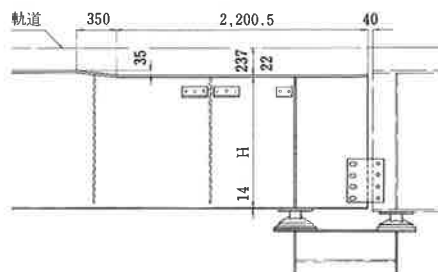


図-11 鋼直II型とIII型使用位置での縦桁腹板高の変化

工区との取合部では鉛直角折れが大きくなるため鋼直Ⅲ型を使用した。このため軌道締結装置の変化箇所では高さの差を吸収するため腹板高さを変化させ図-11のような方法で対処した。

(6) 付属物

付属物の種類は非常に多く、これらをすりつけ区間としての本橋内で縦横に配置した。概要を図-15に示す。

(7) 大ブロック吊金具

架設は3,000t吊クレーン船1隻にて吊天秤なしで吊上げる方法としたので、吊金具は内側の吊角度の方向へ傾けて設置した。(図-16)

吊金具は主構上弦材ウェブを立ち上げ、曲げ加工を行った。なお、かど溶接はこの箇所では遷移するが、圧縮材であるために疲労強度による問題はないものとした。(図-17)

(8) 沓

大ブロック一括架設における沓の構造は、一般的に次のような方式が考えられる。

- 1) ペDESTALフレーム方式
- 2) 仮受方式

3) 沓の先据固定方式
従来、最も多く用いられているのは1)の方法であるが、この方法によると、

- 1) 沓を溶接する時の熱影響でコンクリート脚にひび割れが発生する。
- 2) HB1Pでは斜張橋エンドリンクの大きな穴があって、大きなペDESTALフレームは設置できない。

等の問題がある。また2)の方法では面倒な後作業が残る。そこで、高度な精度管理さえ行えば最も簡便に架設できると判断し、3)の方法を採用した。このため上沓の突起部を円錐形に高くし、架設時の桁の

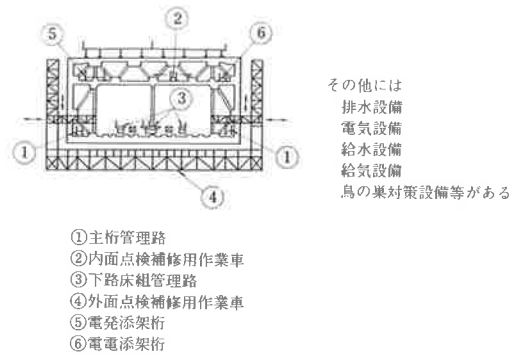


図-15 付属物

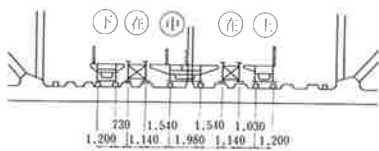


図-12 下路床組横断面図

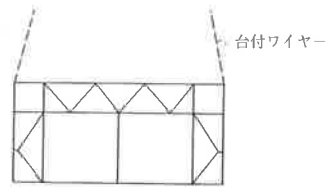


図-16 吊金具の配置

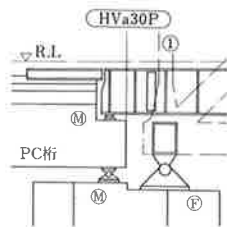


図-13 PC高架橋との取合部

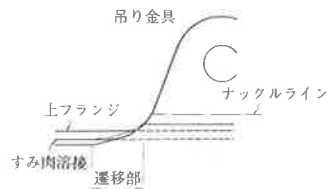


図-17 吊金具のかど溶接、遷移部

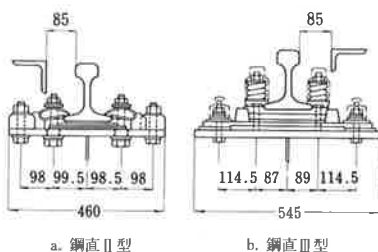


図-14 軌道締結装置

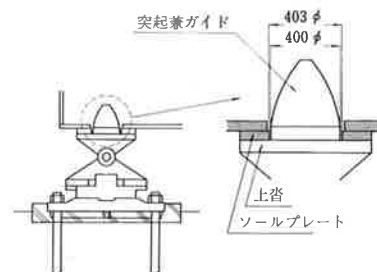



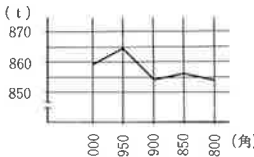
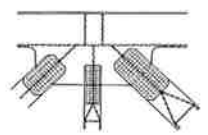


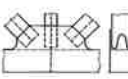
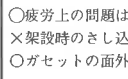
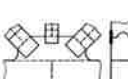
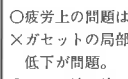


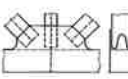
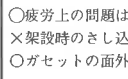
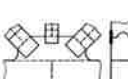
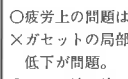
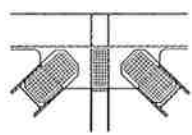


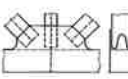
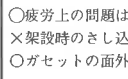
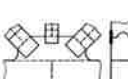
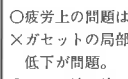



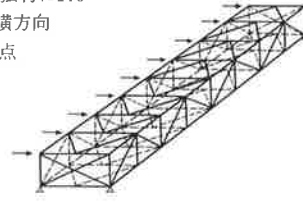
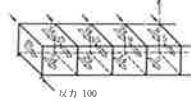
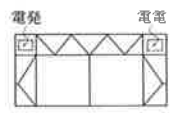

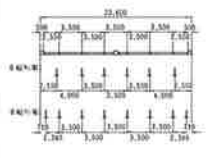
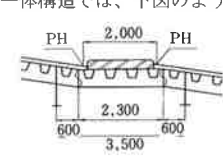
図-18 沓の構造

ガイドとした。また下沓のアンカーボルトは地組立のデータをもとに位置決めを行うなど、沓の設置誤差を極力少なくした。沓の構造を図-18に示す。精度管理の詳細については架設の項で述べる。

(9) 検討事項
種々の検討を行った中から主なものを抜粋して表-5に示す。

表-5 各種検討事項

検討項目	検討方針	検討内容	検討結果																												
主構解析の節点条件の検討	節点をピンとするか、剛結とするかの検討を行う。	<p>A  全節点剛結</p> <p>B  弦材剛結 腹材ピン</p> <p>C  全節点ピン</p> <p>上記のA、B、Cの3タイプを考える。 まず、Aタイプについては腹材の連結構造がピンに近いので除外する。次にBとCの2タイプについて、骨組解析を行い応力度を計算する。Bタイプでは、剛結による2次応力については、許容応力度を10%割増すものとする。その結果Bタイプで設計した方が安全側の設計となった。</p>	弦材剛結、腹材ピンのBタイプで弦材の2次応力を考慮した設計とする。																												
主構弦材の断面形状の検討	箱断面の大きさを決定する要因を示す。 (1) 経済性 (2) 主横トラス下弦材の大きさに対する取合部の (3) 隣接する樞石島橋の弦材との整合性	弦材の大きさによる主構重量の変化 	弦材の大きさは、1.000m角とする。要因としては、 (1) 樞石島橋の下弦材が1.000m角であるので景観面の整合性をとる。 (2) 主横トラスの下弦材の高さが1.000mであるのでこれに合わせる。 (3) 鋼重の変化は少なく、最大板厚 t=40mmで無理のない範囲である。																												
主構継手の高力ボルトM30とM24の比較検討	M24で可能であればM24を使用する方針で比較する。 (1) ボルト配列 (2) 経済性 (3) 現場施工性	主構弦材で継手の設計計算を行い、ボルトの配列、連結板厚を算出した。 ボルトの最大列数(下弦材)はM30で10列、M24で11列となっている。鋼重差はほとんどない。(M24が+0.2 ton)	主構の継手には全てM24を使用する。 (1) M24でも最大11列であり問題はない。 (2) 鋼重差がない。 (3) M24の方が締付機械の取扱いが容易である。																												
主構格点構造の検討	実施設計の格点構造は下図のようにになっている。  実施設計における格点構造の問題点 (1) ガセット内に腹材ウェブの控え板を溶接する事になり疲労上問題がある。 (2) 箱断面の端部をH形断面にすりつける区間に疲労上問題がある。 格点構造の検討方針 (1) 疲労上問題のない構造とする。 (2) 施工上問題のない構造とする。 (3) 適当な面外剛性を確保できる構造とする。	箱断面腹材の材端形状 <table border="1" data-bbox="678 1400 1204 1702"> <tr> <th>形式</th> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>疲労</th> <td>応力集中箇所があり疲労に対してやや問題がある。</td> <td>構造が単純で疲労上問題はない。</td> </tr> <tr> <th>製作</th> <td>曲げ加工溶接があり製作が困難</td> <td>製作が簡単。</td> </tr> <tr> <th>剛性</th> <td>フランジに局部座屈が生じやすい。</td> <td>剛性が高く局部座屈に対して強い。</td> </tr> <tr> <th>メンテナンス</th> <td>メンテナンスは簡単。</td> <td>水、ゴミがたまりやすい。</td> </tr> </table> 腹材とガセットとの連結方式 <table border="1" data-bbox="678 1747 1204 2116"> <tr> <th>形式</th> <th>形状</th> <th>得失</th> </tr> <tr> <td rowspan="2">さし込み式</td> <td></td> <td>○疲労上問題はない。 ×架設時のさし込みが困難。 ○ガセットの面外剛性は確保。</td> </tr> <tr> <td></td> <td>○疲労上問題はない。 ×ガセットの局部座屈及び剛性の低下が問題。 ○ボルト締め等の施工性が良い。</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">突合せ</td> <td></td> <td>○疲労上問題はない。 ×ガセット間のウェブの控え板の溶接に疲労上問題がある。 ○ガセットの面外剛性に優れる。</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </table>	形式			疲労	応力集中箇所があり疲労に対してやや問題がある。	構造が単純で疲労上問題はない。	製作	曲げ加工溶接があり製作が困難	製作が簡単。	剛性	フランジに局部座屈が生じやすい。	剛性が高く局部座屈に対して強い。	メンテナンス	メンテナンスは簡単。	水、ゴミがたまりやすい。	形式	形状	得失	さし込み式		○疲労上問題はない。 ×架設時のさし込みが困難。 ○ガセットの面外剛性は確保。		○疲労上問題はない。 ×ガセットの局部座屈及び剛性の低下が問題。 ○ボルト締め等の施工性が良い。	突合せ		○疲労上問題はない。 ×ガセット間のウェブの控え板の溶接に疲労上問題がある。 ○ガセットの面外剛性に優れる。			下図のような格点構造を採用する。  (1) 垂直材はさし込み式でガセットの面外剛性を確保する。 (2) 疲労上問題を解消するため斜材は箱断面のまま、フランジのみガセットに突合せ連結を行なう。この場合ガセットの局部座屈が問題となるが、ガセット厚は他の要因で決定し局部座屈のために増厚される事はない。
形式																															
疲労	応力集中箇所があり疲労に対してやや問題がある。	構造が単純で疲労上問題はない。																													
製作	曲げ加工溶接があり製作が困難	製作が簡単。																													
剛性	フランジに局部座屈が生じやすい。	剛性が高く局部座屈に対して強い。																													
メンテナンス	メンテナンスは簡単。	水、ゴミがたまりやすい。																													
形式	形状	得失																													
さし込み式		○疲労上問題はない。 ×架設時のさし込みが困難。 ○ガセットの面外剛性は確保。																													
		○疲労上問題はない。 ×ガセットの局部座屈及び剛性の低下が問題。 ○ボルト締め等の施工性が良い。																													
突合せ		○疲労上問題はない。 ×ガセット間のウェブの控え板の溶接に疲労上問題がある。 ○ガセットの面外剛性に優れる。																													
																															

検討項目	検討方針	検討内容	検討結果
立体解析による横荷重の流れの検討	風荷重、地震荷重の横荷重が支点付近で上横構から下横構へどの程度の割合で伝達されるかを調べるのを目的とする。 	右図のような主構、主横トラス、上横構、下横構で構成される立体トラスの上弦材に1.0 t/mに相当する横方向単位荷重を、格点荷重として載荷する。 	下横構については上弦材載荷の横荷重に対して、下図の割合で主横トラス、下横構が負担するので設計作用力として考慮する 
主横トラス上下弦材の連結部の検討	連結部に母材全強の75%強度を確保すべきかどうかについて検討する。	計算結果によると全強の75%を確保しようとすると複せん断継手となる。 上下弦材は断面変化させずに一定断面にて構成されている。もし仮に適当な断面変化をさせて、連結部を設計すると75%強度は確保していることになる。 連結部を含む骨組部材を連結部の剛度に置きかえて部材力を算出する。と以前のものとほとんど差がない。(断面力で1~2%)	連結部は実応力度にて設計する。その理由としては、 (1) 連結部は主横トラスの骨組として他にあまり影響を与えない部材である (2) 断面力の非常に小さな位置に連結部があるので75%強度の確保は構造的に煩雑となる。
格点⑨主横トラス骨組の検討	電電  上図の上斜材両端部は、櫃石島橋との渡り桁、角折れ装置の設置のため斜材の取付けられない構造となっている。 2点を剛結とした場合とピンとした場合の骨組解析を行い、全体構造の安定性を検討する。  剛結モデル ピンモデル	解析の結果、上垂直材を除く部材はどちらの場合も同一断面で構成できるが、上垂直材についてはピンの場合は他の主横トラスと同様、H形断面で構成できる、しかし剛結の場合H形断面で構成できないで箱形となる。 また、連結についても剛結の場合は、つき合せ継手でフランジ、ウェブ共に連結する必要がある。	安全側のモデルである剛結節点条件で解析し設計するしたがって上垂直材は箱断面で、突合せ継手とする。
上路床組、縦桁本数の検討	レーンマーク直下に縦桁を配置するのを原則として下記の2案について比較検討する。 	鋼重の比較 6 縦桁案 557 ton 8 縦桁案 568 ton 最大下フランジ断面の比較 6 縦桁 300×42 (S S41) 8 縦桁 300×30 (S S41)	8 縦桁案を採用する。 (1) 鋼重は大差がない。 (2) 断面構成は大差がない (3) レーンマーク直下に縦桁を配置できる。
上路床組、上下線一体構造、分離構造の比較検討	各構造に対して下記の項目について比較する。 (1) 中央分離帯幅のすりつけ。 (2) 中央分離帯付近の横断勾配の処理。 (3) 溶接ひずみ。	・中央分離帯幅のすりつけについて 分離帯幅を本橋内で、2.000mから0.400mにすりつけるため、一体構造ではすりつけが簡単で、分離構造では多少困難である。 ・中央分離帯付近の横断勾配の処理について 分離構造では問題ないが、一体構造では、下図のように継手が必要となる。  ・溶接ひずみについて ひずみ量は、溶接線の数と比例すると考えられるので、分離構造の方が溶接線は少なく、ひずみ量も少なくなる。	上下線分離構造を採用する (1) 溶接ひずみが少なく、分離帯付近の横断勾配の問題もない。 (2) 中央分離帯幅のすりつけは、多少困難ではあるが充分可能である。

おわりに

本橋は設計に着手してから約2ヵ年の短期間の工事で、昭和61年1月には完成する予定である。設計作業もかなり圧縮された工程で処理せざるを得なかったが、全員の力で無事、役目を終えることができた。

設計の基本的な問題は、先の岩黒島橋の設計で検討され、解決されていたが、Dルート内の他のトラス橋の参考資料となる問題も残されていて、短時間ながら慎重に検討を行い、解決に当たった。

最後に、本橋の設計を進めるうえで、本四公団児島工事事務所の第8工事の皆様方をはじめ、駒井・日橋共同企業体の技術委員会の方々に、多大の御指導をうけました。ここに改めて謝意をあらわします。