

都市内高速道路における合理化橋梁

LIFE-CYCLE COST EFFECTIVE BRIDGES IN URBAN EXPRESSWAY

吉崎信之*, 常松修一**, 石毛立也***, 小川克美****

Nobuyuki YOSHIZAKI, Shuichi TSUNEMATSU, Tatsuya ISHIGE, Katsumi OGAWA

ABSTRACT: This paper presents outstanding matters regarding steel life-cycle cost effective bridges in the Fukuoka express way No.5. Steel tub-like shape girder bridges with steel-concrete composite slab are adopted in the expressway for construction and maintenance cost reduction and landscape. Many steel tub girder bridges are constructed in Europe, but few in Japan. The structural study committee for steel tub girder bridges is organized for solving some issues to execute construction. This paper focuses on durability, economy for life-cycle cost and aesthetic of whole bridges.

KEYWORDS: 開断面箱桁, 合成床版, ライフサイクルコスト、金属溶射
Tub girder, composite slab, life-cycle cost, metal spray

1. はじめに

福岡北九州高速道路公社では、コスト意識の徹底と事業運営の効率化を進めることを目的として、事業費のうち大きなウエイトを占める建設費や管理費等について縮減の行動計画を策定し推進している。

この具体的施策の一環として、図-1に示す福岡高速5号線（月隈JCT～福重JCT間 18.1km）の鋼桁部に（社）日本橋梁建設協会から提案されている合理化桁の採用を検討した。福岡高速5号線の沿線は、住居系地域が大部分となっているため、事業推進に際しては環境対策や道路景観に配慮する必要がある。

福岡高速5号線で採用した“鋼開断面箱桁”は海外での実績はあるものの、日本国内での施工例が僅かである。採用にあたっては、構造検討は勿論のこと、現地における製作・架設を含めた技術検討を十分に行う必要があり、西川和廣建設省土木研究所橋梁研究室長（当時）を座長とする官学産界関係者による「構造技術検討会（鋼橋部会）」（以下「構造検討会」と称す）が設置された。

本報告は、「構造検討会」で検討された、橋梁全体の耐久性、ライフサイクルコストおよび景観についての検討結果¹⁾を中心に述べる。なお、福岡高速5号線の第1工区（板付～

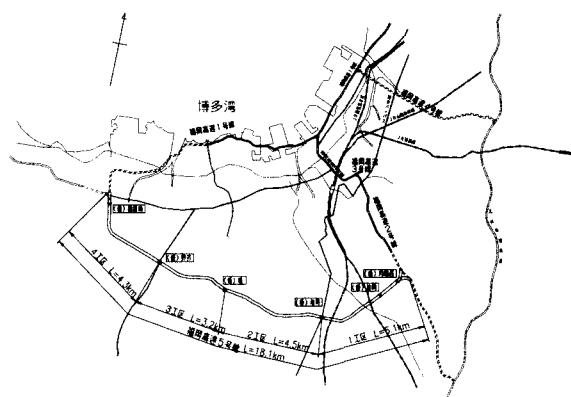


図-1 福岡高速5号線

* 福岡北九州高速道路公社 福岡事務所 設計課長 (〒812-0055 福岡市東浜2-7-53)

** 福岡北九州高速道路公社 福岡事務所 設計課 (同上)

*** 工修 福岡北九州高速道路公社 福岡事務所 設計課 (同上)

**** (株) 横河ブリッジ 橋梁本部技術部 部長 (〒592-8331 大阪府堺市築港新町2-3)

向新町間)と第2工区の一部(向新町～野多目間)で施工中の実施設計結果(鋼桁の数量)も併せて報告する。

2. 構造概要

福岡高速5号線の上下線全幅での標準幅員は20.35mであり、鋼桁部の支間長は50～80mの範囲である。鋼桁部で検討した橋梁形式は、従来型のRC床版閉断面箱桁、PC床版少數鉄桁、および鋼・コンクリート合成床版閉断面箱桁で、経済性、景観および現場施工条件から鋼・コンクリート合成床版閉断面箱桁を採用した。橋梁横断面は、合成床版および閉断面箱桁の構造特性や施工性から上下線分離型とした。経済性については後述する。

2.1 床版

(1) 鋼・コンクリート合成床版の採用

床版形式選定に当たって、鉄筋コンクリート(RC)床版と長支間対応型床版(PC床版および合成床版)を比較する場合、鋼桁を含む建設コストと耐久性の総合的観点から判断する必要がある。福岡高速5号線では設計供用年数を100年として長支間対応型床版を採用した。また、縦桁やブレケットなどの部材数を削減するという観点から、閉断面箱桁橋には長支間対応の床版が有効である。長支間対応の床版としては、鋼・コンクリート合成床版、PC床版および大型I断面グレーチング床版がある。

閉断面箱桁橋は、架設時には上フランジがオープンであるため、ねじり剛性が小さく、不安定な状態となる。また本橋のように主桁が逆台形断面である場合は、鉛直荷重による水平分力²⁾に対しても対策を必要とする。これらの構造特性をカバーでき、かつ吊り上げ重量を軽くするという施工性から鋼・コンクリート合成床版を採用した。その理由は、鋼・コンクリート合成床版の鋼パネルはせん断剛性を有し、鉛直荷重による水平分力にも抵抗でき、かつ比較的自重が軽いためである。

(2) 鋼・コンクリート合成床版の採用条件

開発されている鋼・コンクリート合成床版は十数種類ある。これらの中から下記の条件を満足する5タイプを選定した。なお床版厚は文献3)の計算式を基に余裕代を考慮して決定した。

- ①公的機関による輪荷重移動載荷試験を実施し、床版の耐久性が確認されていること
- ②床版の活荷重たわみがL/2000を満足できること
- ③床版張り出し長が2.3m程度で、ハンチ厚が極端に厚くならないこと
- ④工事費がほぼ同程度で施工できること

2.2 主桁

(1) 主桁断面形状

閉断面箱桁の断面形状は、矩形断面と逆台形断面があるが、長支間対応床版の採用や下フランジの輸送幅を考慮すると逆台形断面とすることが一般的である。主桁ウェブ上端でのウェブ間隔(床版支間長)は、張出し長とのプロポーションを考慮して5.8mとし、主桁ウェブ下端でのウェブ間隔は、下フランジ幅の輸送幅から3.0mとした。

(2) 主桁横断面分割

本橋の架橋地点は都市内であるため、部材はトラックによる陸上輸送が基本となる。そこで主桁を橋軸方向に分割する必要があるが、分割方法としては、①下フランジ中央にだけシーム連結を設けるL字分割工法(図-2a)と②上フランジ付きウェブ2枚と下フランジに分割するパネル工法(図-2b)の2種類を選択した。L字分割工法の場合のシーム連結は、施工性を考慮して高力ボルト接合を採用した。なお下フランジの縦リブは、L字分割工法とパネル工法では、シーム連結の有無により、その配置を変えた。L字分割工法とパネル工法の採用箇所の区別は後述する。

(3) 主桁ブロック割

主桁のブロック割は、輸送条件や架設条件に配慮して決定した。主桁部材はトラック輸送となるため、主桁横断面方向で分割し、その最大部材長をL字分割工法の場合は10m程度、パネル工法の場合は12m程度とした。この程度の部材長であれば架設工法に影響を与える、また経済的であると考えられる。

支点上主桁ブロックは、製作方法によらず、長さ3.5m程度の橋軸方向に分割しない一体型短ブロックとした。その理由は、施工性と経済性を考え、主桁と支点上ダイヤフラムの現場溶接をなくすこと、L字分割工法の場合のシーム連結と支承の干渉をなくすためである。

主桁ブロック間の現場継手形式は、上フランジを溶接接合、ウェブと下フランジは高力ボルト接合あるいは溶接接合とした。上フランジを現場溶接とした理由は、フランジ幅が狭いため、板厚が非常に厚くなり、高力ボルト接合では列数が多くなること、鋼・コンクリート合成床版との取合い構造が複雑になることを避けるためである。

(4) 支承数

一般的に1箱桁の主桁の場合は2支承となる。1箱桁2支承とすると、横荷重や活荷重偏載によるアップリフト対策から、その支承設置間隔を5m程度に広くする必要があり、景観上好ましくない。そこで支間長60mの開断面箱桁橋を高架橋下からの視点での鳥瞰図(パース)を作成して検討し、後述する横桁との関係から、1箱桁1支承を採用した。このことにより支承補修用のジャッキアップ装置をウェブ直下に設置できた。またこのジャッキアップ装置は段差防止装置としての機能を併用している。

(5) 支点上ダイヤフラム

支点上ダイヤフラムは過去の例に倣って充腹構造を採用した。充腹構造とすることにより、ダイヤフラムの剛性が高くなり、架設時の仮受け反力によって発生する水平圧縮分力に対する座屈耐荷力が向上する。中間支点上ダイヤフラムは、支承平面寸法が大きくなること、後述する横桁の関係から、間隔を約1mのダブル配置とした。また、端支点上ダイヤフラムには騒音防止や端部補強の目的でコンクリートを巻き立てた。

(6) 中間ダイヤフラム

中間ダイヤフラムも過去の例に倣って逆V型の対傾構方式を採用した。形鋼を使用した対傾構方式のダイヤフラムは、材料費、製作費のコストを縮減することができ、対傾構の下弦材(横リブ)と主桁下フランジの交差を避けることにより、主桁の組立を容易にすることができる。詳細は後述するが、対傾構方式のダイヤフラムが主桁二次応力へ与える影響を立体FEM解析で検証し、問題がないことを確認している。

2.3 横桁

(1) 概要

福岡高速5号線の標準幅員の鋼桁部は、上下線分離構造で1箱桁1支承を採用したが、すべての支点で1箱桁1支承とすると、転倒に対して不安定な構造となる。そこで、中間横桁は設けず、各支点のみを横桁で連結する構造を採用した。

(2) 横桁の構造

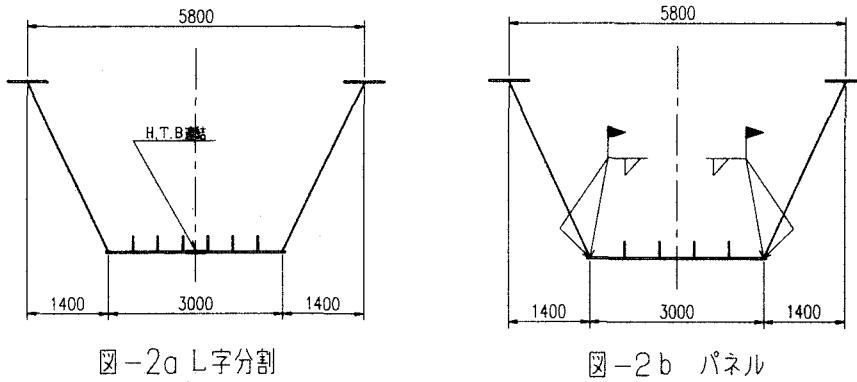


図-2a L字分割

図-2b パネル

横桁の構造を、景観、経済性、付属物との取合いの観点から検討し、①パイプトラス構造、②フルウェブ構造の2種類を併用することとした。

①パイプトラス構造

福岡高速5号線は市街地の高架橋であるため、高架橋下を往来する歩行者や運転者の視線に配慮する必要がある。そこで、スイスのルーリー高架橋⁴⁾などで採用されている開放感のあるパイプトラス構造を採用した。パイプトラス横桁の構造概要図を図-3に示すが、開放感を追求して、斜材をV型配置とし、パイプ断面（直径）を最大400φ程度に抑えることとした。

パイプトラス構造は、すべての中間支点上横桁にダブル（間隔1m程度）で配置しているが、端支点上横桁は開断面箱桁橋が連続する部分のみパイプトラス構造とし、その他は②のフルウェブ構造とした。

②フルウェブ構造

PRC中空床版橋および従来型の鋼橋に隣接する端支点横桁は、主桁断面が不連続となり景観を重視する必要性が無いことと、電纜ケーブルの設置など付属物との取合いからフルウェブ構造を採用了。

2.4 非常駐車帯

非常駐車帯は約300m間隔で設置されるが、そのプラケットも景観に配慮してパイプトラス構造を採用了。また、非常駐車帯拡幅部は台形状であるが、プラケット長さは、トラスの構造特性や景観に配慮して一定とした。なお、側縦桁は施工性に配慮してビルトアップI断面とした（図-4参照）。

2.5 支承

前述したように、本橋は1箱桁1支承を採用了ため、支承の形状寸法が大きくなる。そこで常時機能と地震時機能を分離した機能分離支承の採用了を検討した。検討の結果、経済性と地震時の複雑な挙動に対する検証が現段階では不十分であることから、従来から公社で採用している免震支承を採用了。

免震支承を採用了が、橋台や橋脚の設計では水平反力分散支承とした。その理由は免震支承としての物性が明確でないこと、橋脚にRC構造や鋼構造が混在していることによる。

ただし、動的解析で橋脚の耐荷力や桁遊間の照査を行う場合は、実挙動を再現させるため免震支承としている。

3. 設計

3.1 方針

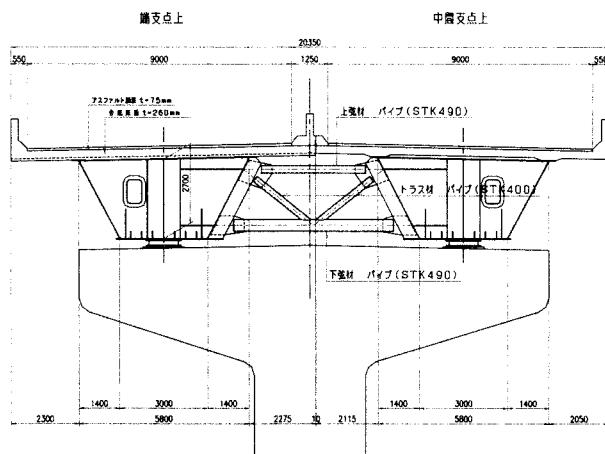


図-3 支点上横桁

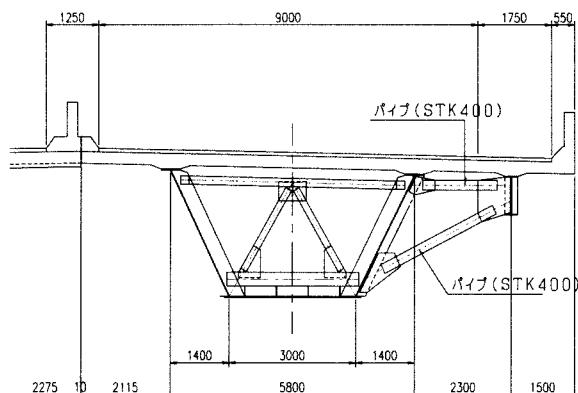


図-4 非常駐車帯プラケット

1) 主桁

主桁の設計は、床版コンクリートのひび割れ幅を制御する“プレストレスしない連続合成桁”⁵⁾として行った。計算モデルは、支点上横桁で上下線が連結されることによる影響に配慮できるものとした。

試設計の結果、床版の乾燥収縮が主桁断面に与える影響は大きいことが判明したが、鋼・コンクリート合成床版には膨張コンクリートの使用を義務付けたことにより、最終乾燥収縮度を道路橋示方書⁶⁾に規定されている数値（200 μ）よりも小さな値（50 μ）を採用した。

開断面箱桁橋も一種の省力化桁であるため、リダンダンシーが小さい。したがって、主桁ウェブのスカラップ部や補剛材取り付け部などの部位に対し疲労照査を行うことを義務付けたが、総じて問題となる部位は無かった。なお疲労照査は、日本道路協会鋼橋小委員会疲労設計WGで検討中の要領を参考に、設計寿命を100年として行った。

都市内の高架橋は地震に対して十分耐力を有することが重要である。先ず保有水平耐力法による耐震設計を行い、動的解析により照査を行った。動的解析による照査項目は、桁遊間量と橋脚のひずみ照査による構造安全性と地震後の残留変位および支承のせん断ひずみとした。

2) ダイヤフラム

「構造検討会」では、今回採用した簡易な中間ダイヤフラムが反り応力や断面変形に伴う曲げ応力に及ぼす程度を把握するため、直線橋と曲線橋（R = 600 m）をモデル化した立体FEM解析を実施した。

BEFアナロジー⁷⁾とFEM解析の結果を比較すると大差がなく（BEFアナロジーの方が安全側）、BEFアナロジーにより設計しても支障のないことを確認した。

3) 横桁・プラケット

横桁および非常駐車帯プラケットに採用したパイプトラスの設計は、道示規定のほか局部応力の照査に「鋼管構造設計施工指針・同解説」⁸⁾の規定を準用した。

ただし、プラケットのたわみ照査は行わないこととした。その理由は、道示に規定されているたわみ照査の規定が、過度の振動を抑制するためのものであり、非常駐車帯はこれに該当しないと判断したことによる。

3. 2 結果

福岡高速5号線第1工区および第2工区（一部）の従来桁を含む実施設計結果（数量）を下記に示す。なお、各図に併記したガイドライン設計および鋼重最小設計の各数値は、「平成10年度版 工数要素実績データ」⁹⁾および「デザインデータブック」¹⁰⁾の値を用いた。

(1) 鋼重

橋梁形式ごとの橋面積当たり上部工の鋼重を、平均支間長で整理した結果を図-5aに示す。また、開断面箱桁橋（合成桁）と閉断面箱桁橋（非合成桁）の鋼重を比較したグラフを図-5bに示す。

図-5bから分るように、開断面箱桁橋（合成桁）の鋼重は、閉断面箱桁橋（非合成桁）よりも小さく、平均支間長が60mの場合、ガイドライン設計の75%、鋼重最小設計の83%となっている。

(2) 材片数

図-6aに、橋梁形式ごとの大型材片数を橋面積で整理したグラフを示し、図-6bに、橋梁形式ごとの小型材片数を橋面積で整理したグラフを示す。開断面箱桁橋（合成桁）の大型および小型材片数は、閉断面箱桁橋（非合成桁）の30%程度である。

(3) 溶接延長

図-7に、橋梁形式ごとの鋼重当たりのT継手溶接延長を平均支間長で整理したグラフを示す。開断面箱桁橋（合成桁）のT継手溶接延長は、閉断面箱桁橋（非合成桁）の40%程度である。

(4) 塗装面積

図-8に、橋梁形式ごとの鋼重当たりの塗装（外面は溶射）面積を平均支間長で整理したグラフを

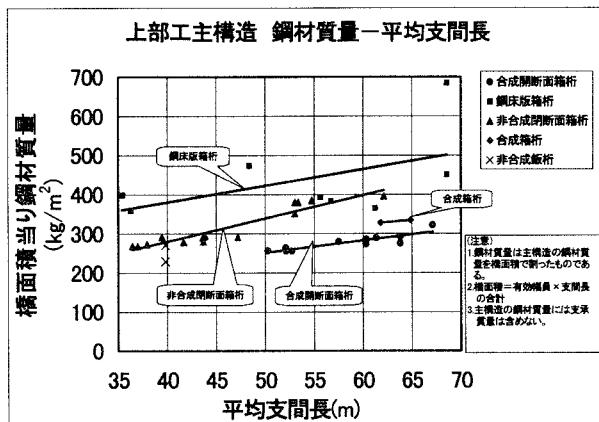


図-5a 鋼重比較(1)

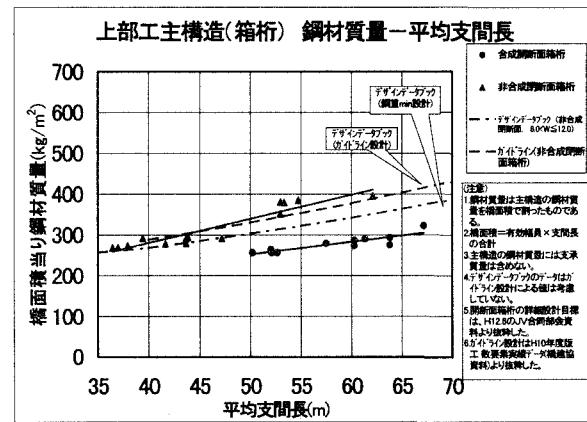


図-5b 鋼重比較(2)

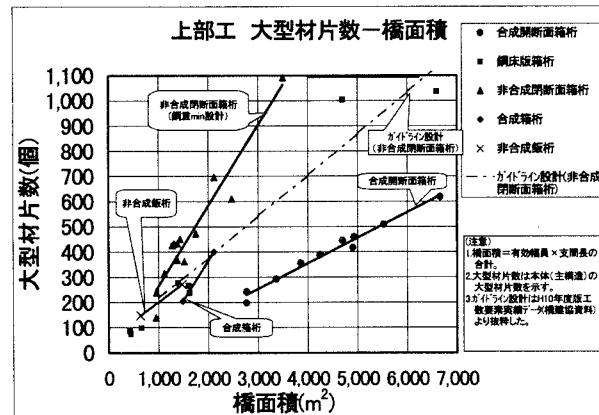


図-6a 大型材片数比較

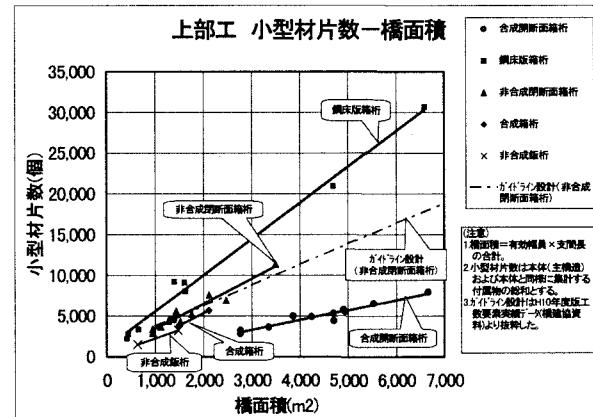


図-6b 小型材片数比較

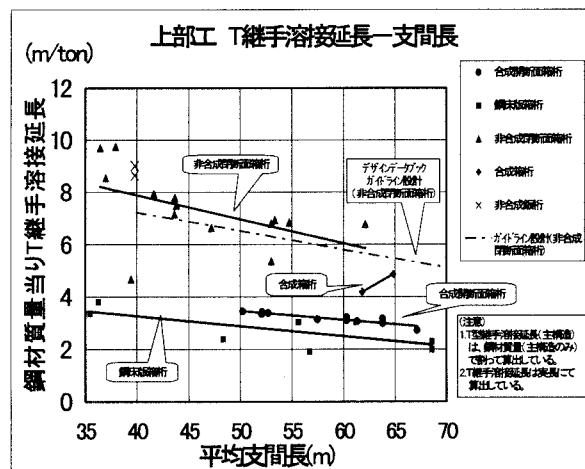


図-7 T継手溶接延長比較

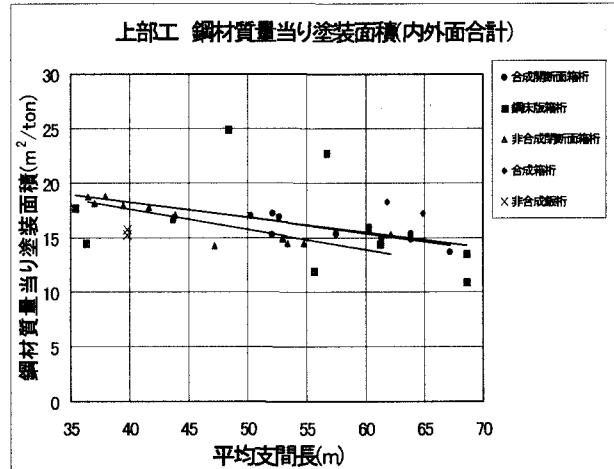


図-8 塗装面積比較

示す。開断面箱桁橋の塗装面積は、閉断面箱桁橋よりも若干大きい値となっているが、これは鋼重差の影響によるものであり、塗装面積そのものが大きいわけではない。なお、開断面箱桁橋の内面と外面の面積比率は、閉断面箱桁橋と同じ60:40となっている。

(5) 工費

開断面箱桁橋(合成桁)の上部工工費は、閉断面箱桁橋(非合成桁)の10%縮減となった。これは、「構造検討会」で当初想定した“約10%コスト縮減”を満足するものである。開断面箱桁橋(合成桁)の架設費と床版の工費は、閉断面箱桁橋(非合成桁)に比べて高くなるものの、工場製作費が安くなるため、トータルのコストは縮減できた。

開断面箱桁橋が閉断面箱桁橋(非合成桁)に比べて、架設費が高くなるのは、現地組立工事が発生するためであり、床版費が高くなるのは、RC床版に比べて耐久性のある鋼・コンクリート合成床版を採用したことによる。

4. 施工

4. 1 製作

(1) 製作方法

前述したように、製作方法は主桁断面の分割方法により区分し、L字分割工法とパネル工法の2種類を採用した。「構造検討会」では、主桁ブロックの継手形式(溶接、高力ボルト)、現場桁組立工法(L字分割、パネル)および架設工法(トラッククレーン+ベント、送り出し)の組合せにより12通りのパターンを考え、架設工期、経済性等を焦点として検討した。その結果、表

ー1の5つの組合せを推奨し、現場施工条件等に考慮して適切なケースを選択するようにした。

(2) 実施状況

福岡高速5号線の第1工区では、全12JVの内、2JVがケース2を採用し、残りがケース1を採用している。ただし、全JVとも支点上主桁ブロックは、前述したように短ブロックとして、工場でU形の完成主桁断面としている。

4. 2 架設

(1) 架設の現況

福岡高速5号線の第1工区では充分な作業ヤードが確保できるため、架設工法はトラッククレーン+ベント工法を基本としている。

(2) 精度管理規定

従来桁の場合は、管理基準に従い製作して工場で仮組立を行い、組立精度を保証していた。しかし、開断面箱桁は現地にて組立が行われ、現地での組立精度が出来上がり精度となるため、別途その精度基準を設定した。精度基準は、道路橋としての機能(走行性、排水性、景観)を満足させることを主眼に作成している。

その内容は、現場での組立となることから、従来の基準を若干緩和した規定となっている。

5. 排水と防錆

5. 1 橋面排水

(1) 鋼製排水溝

表-1 製作方法と架設工法

| 制作方法 | 主桁現場継手 | 架設工法 |
|--------------|--------|-------|
| ケース1 L字分割 | 高力ボルト | T.C.B |
| ケース2 パネル | | |
| ケース3 L字分割 | | |
| ケース4 パネル | | 送出し |
| ケース5 パネル | 溶接 | |

注) 1. L字分割の下フランジシーム継手は高力ボルト接合。
2. 主桁現場継手の高力ボルト接合は、上フランジのみ溶接。
3. T.C.Bはトラッククレーン+ベント工法を示す。

景観に配慮して横引き配水管を極力設けないこととした。路面線形と降雨強度から排水処理能力を計算した結果、ほとんどの箇所で橋面排水（排水性舗装の浸透水含む）は鋼製排水溝を設置することで対処できることが判明した。なお、鋼製排水溝だけで処理ができない場合は一般的な排水枠を併用している。

鋼製排水溝は、内部の防錆や掃除などのメンテナンスが容易となる構造であることも重要である。

（2）防水工

鋼・コンクリート合成床版の長期耐久性は、輪荷重移動載荷試験などで確認しているが、これは雨水の浸透がないことを前提としている。雨水の浸透を防ぐ適切な防水工の施工が肝要である。

防水工の良否は、材料の選定（従来のシート系や塗布系、ポリウレタン、砕石マスチックなど）、施工時期（コンクリート打設直後か舗装施工前など）および端部処理などに大きく影響される。防水工の材料として何が適切かを調査するために、16種類の材料を選定し、福岡高速1号線の実橋（百道近傍の高架橋）で確認試験を行っている。

また、防水工の設置とは別に不測の事態に備え、鋼・コンクリート合成床版の鋼パネルにある間隔でモニタリングホールを設置し、浸透水のチェックを行えるようにした。

5. 2 防錆処理

（1）防錆方法

「構造検討会」では、ミニマムメンテナンスを目標として防錆方法を検討した。防錆方法は、①重防食塗装②溶融亜鉛めっき③金属溶射④耐候性鋼材の4種類を対象とし、設計供用年数を100年として補修、塗り替えなどのライフサイクルコストを計算し、さらに施工性や景観の要素も加味して検討した結果、金属溶射が最良であると判断した。

金属溶射として、亜鉛アルミ擬合金溶射、亜鉛アルミ合金溶射、亜鉛溶射、アルミ溶射などが過去の実績としてあるが、施工箇所の地理的条件を考慮して、亜鉛アルミ擬合金溶射および亜鉛アルミ合金溶射を選定した。

（2）金属溶射

過去の実績での亜鉛アルミ（擬）合金溶射は、（溶射+封孔処理+塗装）という仕様であったが、塗装を行うことによってライフサイクルコストが高くなるため、塗装を省略することとした。「景観検討委員会」は、鋼桁の外面色を、側面と下面で変えることを提案しているが、これは封孔処理で対処することとした。

金属溶射の施工部位は、鋼製橋脚、上部工（従来桁含む）の外面および合成床版の外面・裏面とした。また、跨線部などの維持管理が容易でない個所の開断面箱桁には、内面も同様の金属溶射を施工した。

6. あとがき

本報告は、鋼・コンクリート合成床版を有する鋼開断面箱桁橋を都市内高速道路に適用した事例である。本橋梁形式を本格的に採用したのは、福岡高速5号線が初めてである。本格的な採用ということから、官学産界の有識者による「構造検討会」を組織し、様々な検討を行った。本検討結果を受けて、実施設計・製作が完了し、現在架設工事中である。

未だ検討すべき課題も若干残されているが、本報告がこれから工事に生かされれば幸いである。

最後に「構造検討会」の委員のメンバーの方々、実工事に携わっている方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡北九州高速道路公社；平成11年度 構造技術検討書、平成12年3月
- 2) 日本道路協会；鋼道路橋設計便覧、昭和55年8月
- 3) 土木学会；鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物、1995年5月

- 4) (訳) 橋、長井；スイスにおける合成桁橋、橋梁と基礎、2000年3月
- 5) (社) 日本橋梁建設協会；P C床版を有すプレストレスしない連続合成桁、平成8年3月
- 6) 日本道路協会；道路橋示方書・同解説 I 共通編、II 鋼橋編、平成8年12月
- 7) 小松、長井；中間ダイヤフラムの新しい設計法に関する研究、土木学会論文報告集、第326号、
1982年10月
- 8) 日本建築学会；鋼管構造設計施工指針・同解説、1990改訂
- 9) (社) 日本橋梁建設協会；平成10年度版 工数要素実績データ、平成11年12月
- 10) (社) 日本橋梁建設協会；'01 Design Data Book デザインデータブック