

新川橋(鋼・PC複合上部工)工事の設計・施工

～ 四国横断自動車道～

Design and Construction of SHINKAWA Bridge (Steel/PC Mixed Superstructure)

縄田 俊文
Toshifumi NAWATA

川田工業(株)工事本部大阪工事事務次長

高田 嘉秀
Yoshihide TAKADA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計二課課長

木本 輝幸
Teruyuki KIMOTO

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計一課課長

宮地 真一
Shin-ichi MIYACHI

川田工業(株)技術開発本部技術研究室主幹

柳澤 則文
Norifumi YANAGISAWA

川田工業(株)技術開発本部技術研究室

岩田 幸三
Kozo IWATA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
技術課

This project involves construction of the Shinkawa Bridge (length 278m) and the Yoshidagawa Bridge (length 156m), situated on a portion of Route 11 between Takamatsu West Interchange and the Takamatsu East Interchange on Transverse Shikoku Highway.

The bridges constructed in the "mixed bridge" method, a relatively new structural method unique even in Japan, involve bridges in which steel and concrete structures are continuously joined. The soundness of the joint structure was confirmed through partial actual size model load testing, FEM analysis, etc.

This report describes the design and construction of the Shinkawa Bridge

Key words: Shinkawa Bridge, mixed bridge, joint, PBL, high fluidity concrete

1. はじめに

本工事は、四国横断自動車道高松西IC～高松東IC区間の国道11号線上に位置する一連の都市内高架橋の一部である新川橋（橋長278m）および吉田川橋（橋長156m）の施工を行うもので、当社は日本高圧コンクリート(株)との共同企業体として平成10年6月日本道路公団四国支社より受注し、平成12年12月の竣工に向けて現在施工中である。

本橋の橋梁形式は、河川、交差道路、ボックスカルバートなどをまたぐ必要がある中央径間部に比較的軽くて架設時の施工性がよい鋼桁を、また橋梁全体のバランスをとるため側径間部にコンクリート桁（PRC桁）を用いて、隣接するコンクリート橋との景観バランス、経済性および構造特性に優れた5径間および3径間の連続混合橋を採用している。

本文は、主に5径間連続（鋼床版箱桁＋PRC箱桁）混合橋である新川橋の設計・架設の概要および接合部の設計・実験について報告するものである。

2. 詳細設計

新川橋の橋梁一般図を図1、橋梁諸元を表1に示す。

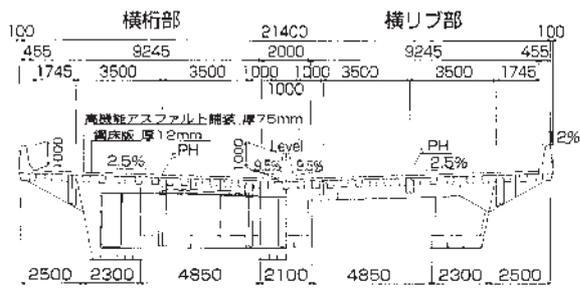
(1) 詳細設計の概要

断面形状は、景観を考慮して外側腹板の傾きやブラ

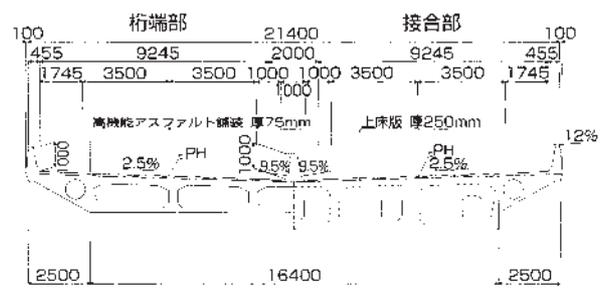
ケットの形状を隣接橋梁と合わせた。また、排水管を目立たなくさせるため路面の横断勾配を中分側に付け、排水ます・排水管を中分側に配置した。

表1 橋梁諸元

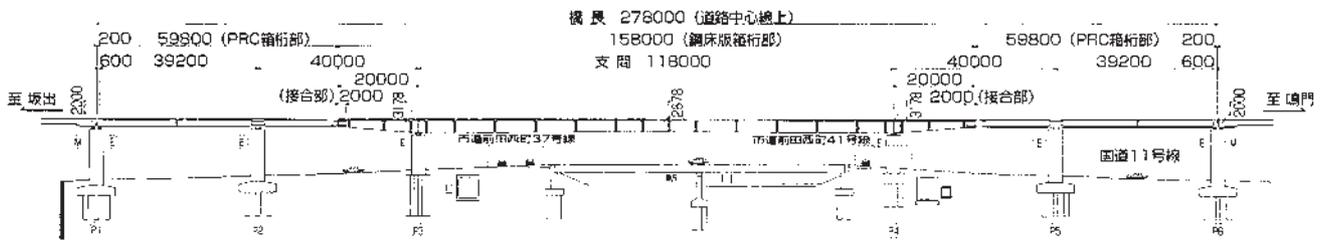
道 路 規 格	第1種3級A規格	
設 計 速 度	V=80km/hr	
活 荷 重	B活荷重	
型 式	鋼床版箱桁＋PRC箱桁	
橋 長	278.000m	
桁 長	277.600m	
支 間 長	39.2＋40.0＋118.0＋40.0＋39.2m	
有 効 幅 員	19.760m	
舗 装	高性能アスファルト舗装 75mm	
設 計 震 度	$K_h = 0.21$	
接 合 方 法	中詰めコンクリート後面支圧板方式 (孔あき鋼板ジベル使用:PBL)	
鋼 桁 部	使 用 鋼 材	SM570, SM490Y, SM400 約1600t
	床 版	鋼床版(現場溶接)
	鉄 筋	SD345(壁高欄)
	架 設 工 法	トラッククレーンベント工法 ワイヤークランプ吊り上げ工法
P R C 箱 部	コンクリート	$\sigma_k = 36\text{N/mm}^2$
	鉄 筋	SD345
	P C 鋼より線	SWPR7B12T15.2
	定 着 工 法	アンダーソン工法
架 設 工 法	固定支保工場所打ち工法	



a) 鋼桁部標準断面図



b) PRC桁部標準断面図



c) 側面図

図1 橋梁一般図

鋼桁部は支間長が118mと大きく、また縦断線形を抑えられることから鋼床版箱桁を採用した。なお、鋼床版は舗装割れおよび疲労に配慮した構造とし、デッキプレートは現場溶接とした。

PRC桁部は、鋼桁部との取合いや経済性を考慮し、PRCポストテンション5室箱桁とした。

接合部の位置は断面力が小さくかつ交番しない位置とし、経済性・施工性を考慮して決定した。なお、中央径間部に接合部を設けるのは地形条件より施工が困難であるため、側径間中央とした。

構造解析は、鋼桁部を主桁3本と荷重分配横桁、PRC桁部を腹板6本と横桁からなる格子骨組みとし、架設ステップに対応した格子計算を行った。

支承は地震時水平力分散支承とした。

(2) 接合部の設計

a) 接合部の構造

接合部は剛性の異なる鋼桁とPRC桁の接合面に作用する断面力に対して滑らかな応力伝達が行えるような構造とする必要がある。検討の結果、採用実績¹⁾が多く、また中詰めコンクリートとPRC桁が連続しているため応力の伝達がスムーズである「中詰めコンクリート後面支圧板ずれ止め併用方式」を採用した。接合部の構造図を図2に示す。

本橋は連続桁構造のため支配的な断面力は曲げモーメントとせん断力であり、接合位置をせん断力の小さい位置とすることにより、曲げモーメントを圧縮と引張の軸力成分とみなすことができる。軸力の圧縮成分は鋼殻セル内に配置したずれ止め(孔あき鋼板ジベル、以下PBL)と後面支圧板によって伝達し、引張成分はPC鋼材によるプレストレスを導入することにより圧縮力を確保し引

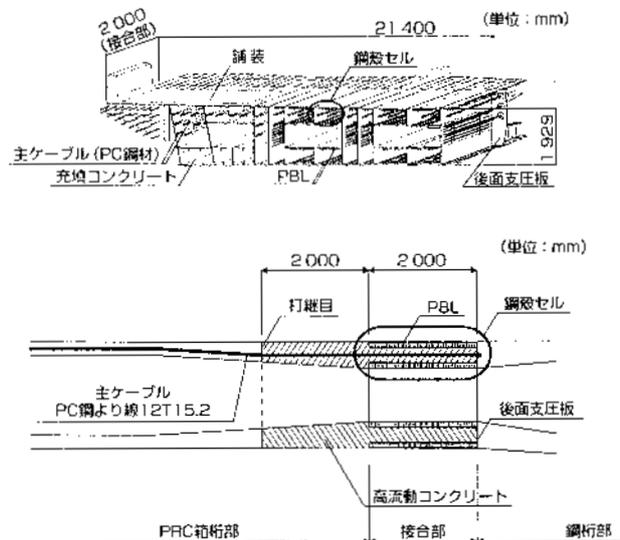


図2 接合部の構造

張力の生じない構造とした。

b) 接合部の設計方針

接合部は、主桁一般部に比較して十分な耐力を有するよう、作用断面力に対して鋼断面およびコンクリート断面がそれぞれ独立して負担できる断面とした。

ずれ止めは、そのずれ止め効果が頭付きスタッドより大きく、また施工性の良いPBLとした。

ずれ止めと後面支圧板の荷重分担率については、鋼殻セル単体モデルによるFEM解析（図3参照）の結果から以下の値とした。

- ・圧縮側：ずれ止め（35%）、支圧板（65%）
- ・引張側：ずれ止め（60%）、支圧板（40%）

なお、ポアソン効果による鋼殻セルとコンクリートの付着および摩擦による力の伝達は無視した。また、ずれ止めの軸方向ずれ力は三角形分布と考えた。

PBLの強度算定式は、レオンハルトの提案式²⁾とPBLの耐荷力に関する実験結果³⁾を参考として、下式を使用した。

$$P_a = \dots \cdot 1.4 d^2 \cdot w / F$$

ここに、 \dots : PBLの形状係数 (=0.7)

d : PBLの孔径 (cm)

w : コンクリートの設計基準強度 (kN/cm²)

F : 安全率 (=2.1, 脆性的な破壊に対して)

PBLの孔貫通鉄筋は、後述する実験結果および施工性を検討した結果、終局時での安全性を考えて設けるものとした。

3. 接合部のFEM解析

(1) 解析の目的

鋼桁とPRC桁の接合部は複合斜張橋で実績のある「中詰めコンクリート後面支圧板ずれ止め併用方式」を採用している。この方式は、ずれ止めと後面支圧板によって応力伝達する機構であるが、複合斜張橋での実施例と比較すると以下の点で異なっている。

実施例の多くは軸圧縮力が卓越しているが、本橋は連続桁形式のため曲げモーメントにより引張力が作用する。

鋼とコンクリートのずれ止めとしてスタッドよりずれ止め効果の大きいPBLを採用している。

以上より、接合部およびその近傍の鋼桁・PRC桁の応力伝達の状況の確認を目的として立体FEM解析を実施した。

(2) 解析モデル

解析モデルは図4に示すように、接合部およびその近傍のPRC桁・鋼桁を含んだ長さ14mを立体モデルとし、その他は棒モデルとした。鋼部材は4節点シェル要素、コンクリート部材は8節点ソリッド要素、PC鋼材は棒要素としてモデル化した。

PBLについては線形バネ要素とし、1孔当たり196kN/mmとした。また、鋼部材とコンクリート部材の結合条件は、圧縮力は伝達するが、引張力は伝達しないモデルとした。なお、鋼部材とコンクリート部材の付着力および摩擦力は無視した。

解析は、架設ステップを考慮した死荷重4ケースと活

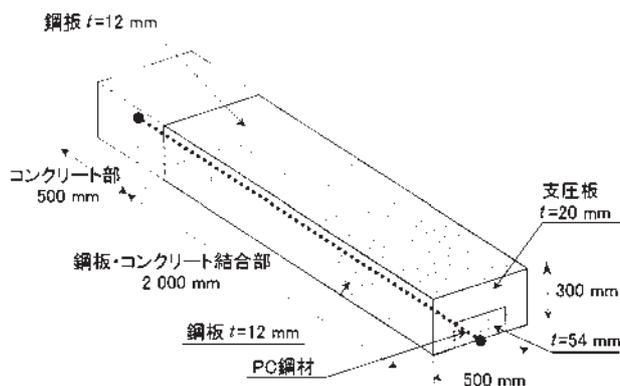


図3 鋼殻セル単体モデル

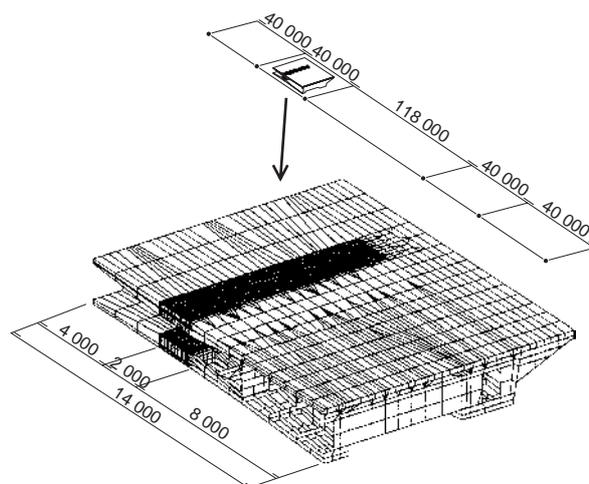


図4 接合部全体モデル

荷重2ケースを行った。また、PC鋼材のプレストレスは温度荷重にて考慮した。

なお、解析プログラムはMSC-NASTRANを使用した。

(3) 解析結果

a) ずれ止め (PBL) の分担率

接合部はずれ止めと後面支圧板によって応力伝達する方式であり、設計においてそれらの分担率が重要となる。解析結果でのずれ止めの分担率は、圧縮側で30%、引張側で48%となり、詳細設計で使用した分担率と比べて低くなっている。これは、後面支圧板の剛性を高めるために設けたダブリング補強および補強リブがずれ止めの分担率低下に大きく寄与したものと考えられる。

b) ずれ力の分布

図5にずれ力断面内分布、図6にずれ力軸方向分布を示す。

断面内分布は主桁腹板上（特にW3）においてずれ力が大きくなっている。これはPC鋼材の配置により鋼殻セルの内側フランジが設けられず、外側フランジの分担が増えたためである。

ずれ力の軸方向分布は、引張側である上側鋼殻セルは支圧板側が大きく、圧縮側である下側鋼殻セルは接合面側が大きくなっている。両者とも三角形分布に近い形状

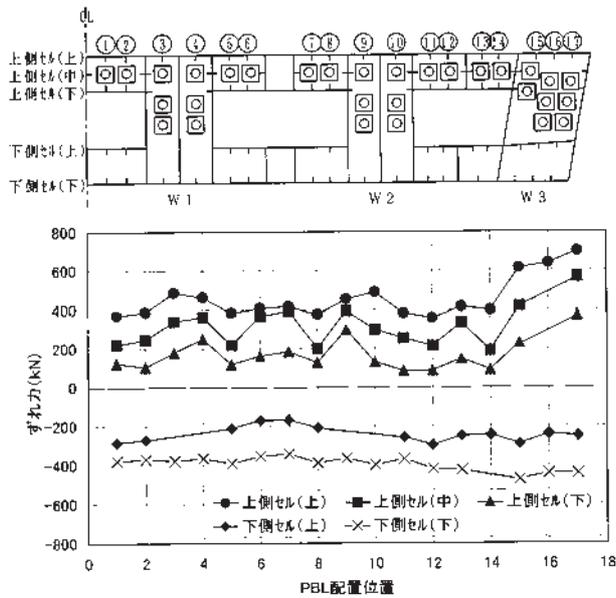


図5 PBLのずれ力断面内分布

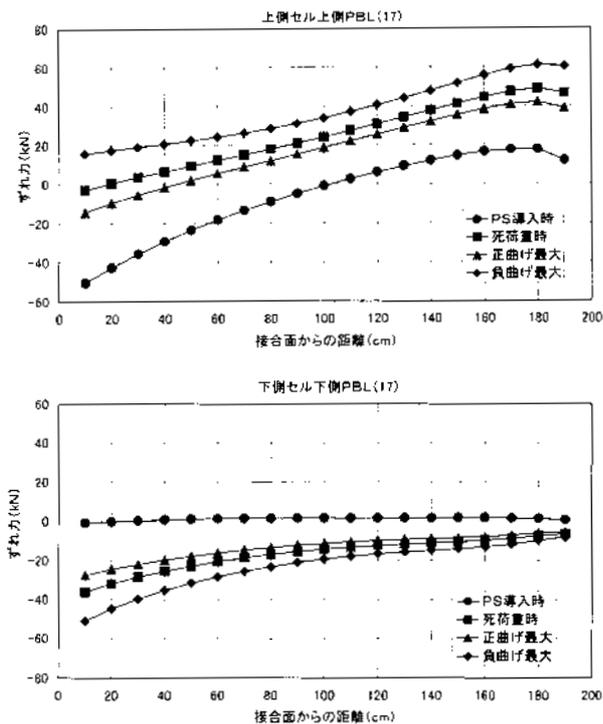
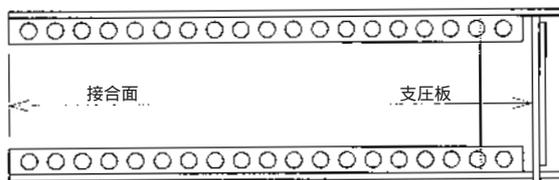


図6 PBLのずれ力軸方向分布

となっている。

ずれ力は橋軸直角方向および鋼殻セル内の上下で不均等となっているが、ずれ止めの分担率が詳細設計に用いた値より小さいため、ずれ止め1孔当たりのずれ力の解析結果は最大61.4kNとなった。このずれ力は詳細設計で用いた下記の強度計算値とほぼ同程度の値であり、接合部全体のずれ止め耐力は十分安全と考えられる。



図7 コンクリート部材の軸方向応力度

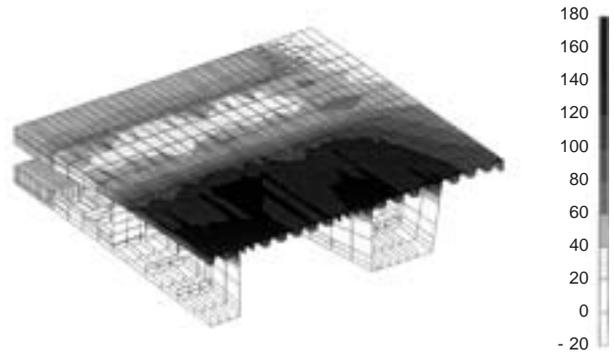


図8 鋼部材の主応力度

$$P_a = \cdot 1.4 d^2 \cdot w / F$$

$$= 0.7 \times 1.4 \times 6.0^2 \times 3.53 / 2.1 = 59.3 \text{ kN}$$

c) 接合部およびその近傍の応力性状

図7にコンクリート部材の軸方向応力度、図8に鋼部材の主応力図を示す。PC鋼材定着部など局部的に応力が集中している箇所もあるが、概ね詳細設計値と同程度の応力度となっている。

4. 接合部の実験

(1) 実験の目的

本橋では、鋼桁部とPC桁部の接合方式として「中詰めコンクリート後面支圧板方式」が、さらに、接合部鋼殻セル内のずれ止め構造としては「孔あき鋼板ジベル(PBL)」が新たに採用されている。そこで、主に次のようなことがらに着目し、設計法の妥当性を確認するため、静的荷重試験を実施した。

鋼殻セルの拘束効果を含んだPBL接合部の耐荷性能
PBL孔貫通鉄筋の補強効果

(2) 供試体と実験方法

本試験で対象としたのは、

<新川橋接合部>

- ・上フランジ部分(引張側) Type-T
- ・下フランジ部分(圧縮側) Type-C
- [後面支圧板<無>] Type-P

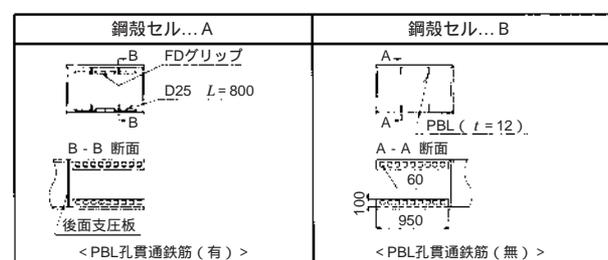
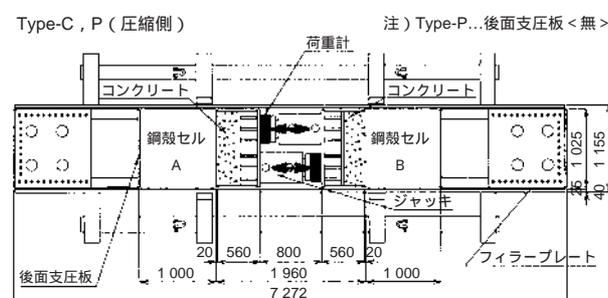
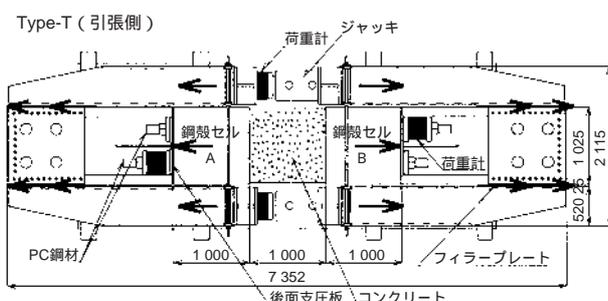


図9 実験供試体

の3種類であり、それぞれ2体ずつ供試体を製作した。

試験は、図9に示すようにType-Tは、PBL孔貫通鉄筋が有るモデルと無いモデルを合体してコンクリートに圧縮プレストレスを導入し、その両脇に設けた反力架台と油圧ジャッキによって、両側の接合部へ同時に引張力を作用させる構造としている。一方、Type-C, Pについては、PBL孔貫通鉄筋が有る側と無い側を反力板で連結し、中央部に設けたジャッキで両側へ同時に圧縮力を作用させるようにした。また、20mm以上の相対ずれを許さないストッパー機構を設けており、一方に大きなずれが生じても他方の試験を連続して行えるようになっている。

なお実験は、Type-P（押し抜き試験により、実橋と同じ状態での鋼殻セルの拘束効果などを確認）Type-C（Type-Pとの比較により、後面支圧板の効果を確認）Type-T（プレストレス導入時と引張力作用時の接合部の挙動や応力性状などを確認）の順に実施した。

(3) 実験結果の概要

a) 押し抜き耐力（後面支圧板の無いType-P）

PBLの孔貫通鉄筋の有無にかかわらず、PBLへの作用力を矩形分布とし安全率を考慮しない強度推定値^{< * 1 >}と比べ2～3割程度上回るものであった（表2）。

b) 圧縮側（後面支圧板を有するType-C）

強度推定値^{< * 1 >}より算出した値の約1.7倍（8 330kN）ま

表2 押し抜き試験によるPBLのずれ耐力

	実験値		計算値
	孔貫通鉄筋 <有>	孔貫通鉄筋 <無>	強度推定値 ^{< * 1 >}
Type-P : 1体目	6 820 kN	6 110 kN	4 948 kN
Type-P : 2体目	6 800 kN	5 700 kN	

< * 1 >強度推定値

$$0.74^{\text{文献(3)}} \times 1.4 \times 6.0^2 \times (3.177 \times 1.16^{\text{文献(4)}}) \times 9 \text{孔/枚} \times 4 \text{枚/セル} = 4 948 \text{kN}$$

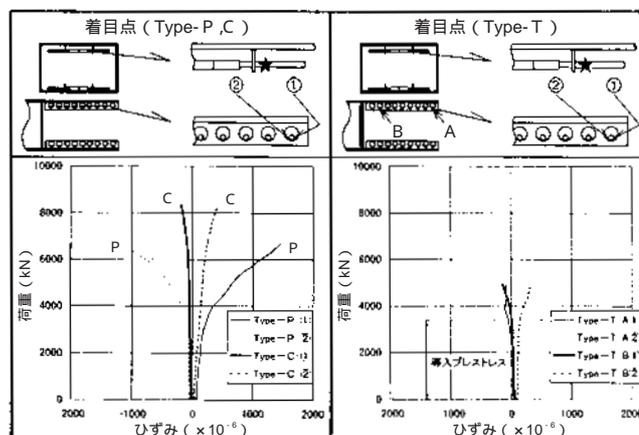


図10 PBL孔貫通鉄筋のひずみ性状

で載荷したが、PBL孔貫通鉄筋の曲げひずみは微小（図10）であり、また、除荷時の鋼殻セルと充填コンクリートの残留相対変位もほとんど生じていないことが確認された。

c) 引張側（Type-T）

PC鋼材の緊張力（3 380kN）と同程度の引張荷重で、PBL孔貫通鉄筋の曲げひずみは微小であり、導入プレストレスの範囲内で相対ずれがほとんど生じていないことが確認された。

5. 架設要領

(1) 架設の概要

架設ステップを図11に示す。架設工法は以下の条件より、中央径間は地組立後ワイヤークランプによる吊上げ架設、中間支点部はベント架設、PRC桁部は固定支保工架設とした。

中央径間部の下は河川、既設橋梁、交差道路などがあり、ベントやクレーンを設置することが困難である。

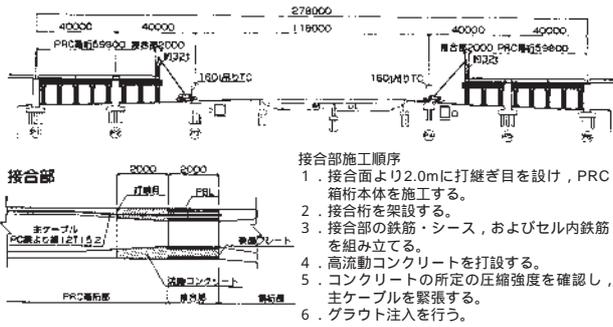
国道11号線や交差道路を全面交通止めとできないため、交通切り回しを行いながら架設する必要がある。

鋼床版の継手が現場溶接である。

(2) 接合部の充填コンクリート

鋼殻セル内は、高さ600mm、幅900mm、長さ2 000 mmと狭いうえ、PBL、PC鋼材、鉄筋が錯綜しているため、普通コンクリートでの充填は不可能である。したがって、本橋では自己充填性の優れた高流動コンクリートを使用した。高流動コンクリートの使用にあたっては、最適配合の検討に加え、施工性の確保が重要であるため、実物

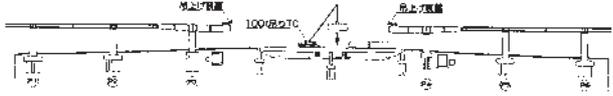
STEP1 PRC箱桁と接合部の施工



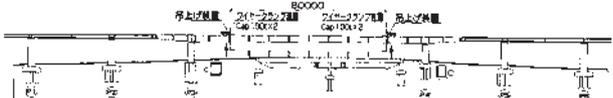
STEP2 中間支点部鋼床版箱桁の架設



STEP3 中央径間部鋼床版箱桁の地組立



STEP4 ワイヤークランプによる吊り上げ架設



STEP5 残りの鋼床版架設



図11 架設ステップ

大のアクリル製模型を製作し、高流動コンクリートの打設施工試験⁵⁾を行った。高流動コンクリートの基本特性を表3、試験状況を写真1に示す。

施工試験の結果、部分的に生じた空隙の量は微小であり、構造上の問題はなく、セル内コンクリートの充填性が確認できた。

6. おわりに

近年、コスト縮減、構造の合理化などを目的として複合構造が注目され、様々な新構造形式が検討され、適用例が増加している。本橋においても同様の目的で採用されたものであるが、この種の橋梁規模での鋼桁とコンクリート桁の混合橋としては実績の少ない構造型式である。したがって、様々な課題、問題点が考えられ、これらについての実験を含めた検討結果を基に、設計、施工を実施している。

本文はこれら一連の検討結果を述べたものであるが、限られた期間で安全な構造決定をすることが第一条件でもあり、特にずれ止めにPBLを用いた混合橋において、実用上十分なずれ耐荷性能が確認されたことは、今後のさらなる設計法の合理化や標準化に向けて有用なものと思われる。

表3 高流動コンクリートの基本特性

高流動コンクリートの配合			試験結果	
W/P	水粉体容積比	45.2%	スランプフロー	63.0 × 65.5cm
s/a	細骨材率	55.2%	停止時間	47.0sec
EX	膨張剤	30.0kg/m ³	空気量 (%)	4.7%
高性能減水剤		15.8kg/m ³	間隙通過性試験	32.7cm
液体型分離抵抗材		2.0kg/m ³	28日強度	57.6N/mm ²



写真1 試験状況

最後に、本工事にあたり「高松自動車道 鋼・コンクリート混合橋の設計施工に関する技術検討委員会（委員長：大阪大学西村宣男教授）」、日本道路公団四国支社の関係各位には適切なご指導をいただきました。また、JV構成員である日本高圧コンクリート㈱の関係各位にご協力をいただきました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山岸一彦・西本聡・矢野保広：生口橋主桁接合部の設計・施工，本四技報，Vol.15, No.58, pp.14-22, 1991.
- 2) Fritz Leonhardt, Wolfhart Andra, Hans-Peter Andra und Wolfgang Harre：Neues, vorteilhaftes Verbund -mittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauer -festigkeit, BETON-UND STAHLBETONBAU, pp.325- 331, 1987.
- 3) 平陽兵・古市耕輔・山村正人・西海健二：孔あき鋼板ジベルの耐荷力に関する研究，土木学会第53回年次学術講演会概要集，pp.648-649, 1998.
- 4) 西村昭・藤井学：最新土木材料，森北出版，1975.
- 5) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998.