

PC フィンバック橋の施工

- 北陸新幹線 姫川橋りょう -

東京土木支店 土木工事統括部 PC 工事事務 武田哲郎
 東京土木支店 土木工事統括部 PC 工事事務 吉田 武
 東京土木支店 土木工事統括部技術部 林 康子
 東京土木支店 土木工事統括部技術部 宮前俊之

概要: 姫川橋りょうは、新潟県糸魚川市に位置し一級河川姫川を渡河する、新潟県内の北陸新幹線では最長の橋梁である。本橋梁は新幹線の橋梁形式として初めて採用される7径間連続 PC フィンバック橋で、橋梁支点部に魚の背びれ(フィン)のようにウェブを突出させた中路構造であり、鉄道橋としては JR 仙石線鳴瀬川橋りょう(6径間連続桁, 単線断面)に引き続き 2 番目、複線断面としては初の採用となる。また、架橋位置は海岸線に近いことから塩害対策を行っている。そこで、本稿では姫川橋りょうの特徴および施工について報告する。

Key Words: フィンバック橋, 鉄道橋, 温度解析, 真空ポンプ, 塩害対策

1. はじめに

フィンバック橋の構造的な特徴は、以下のようなことがあげられる。

- 1) ウェブ断面を橋面上に突出させたフィンバック部で、中間支点部の負の曲げモーメントとせん断力に対して抵抗させること。
- 2) フィンバック部に PC ケーブルを配置することにより偏心量を大きく取れ、桁高を変えることなく桁下空間を確保でき、堤防管理用道路の建築限界を確保すると共に線路縦断を低く抑えることが可能なこと。
- 3) フィンバックの断面に曲線形状を施すことにより、背景の山並みに調和すること。

2. 工事概要

姫川橋りょうの概要を以下に、位置図を図-1 に、完成予想図を図-2 に、構造図を図-3, 4 に示す。

工事名 : 北陸幹(上・糸), 姫川 B 上部工他工事
 工事箇所 : 新潟県糸魚川市寺島・須沢地内
 工期 : 平成 16 年 7 月 ~ 平成 19 年 7 月
 発注者 : (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構
 鉄道建設本部 北陸新幹線第二建設局
 施工者 : ピーエス三菱・興和・常磐 JV
 構造形式 : 7 径間連続 PC フィンバック橋
 橋長 : 462.0m
 支間 : 57.0+69.0+3@70.0+69.0 +57.0m
 総幅員 : 13.3m
 設計速度 : V=260km/h (新幹線)
 曲線半径 : 直線
 縦断勾配 : 6.0% ~ level
 架設方法 : 固定式支保工架設工法



図-1 施工位置図



武田哲郎



吉田武



林康子



宮前俊之



図-2 完成予想図

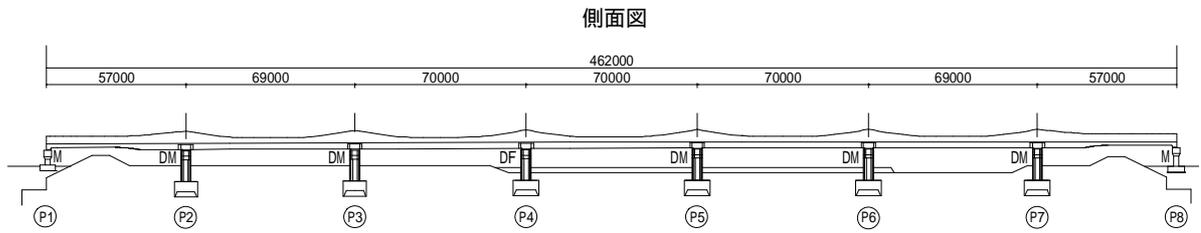


図-3 一般構造図

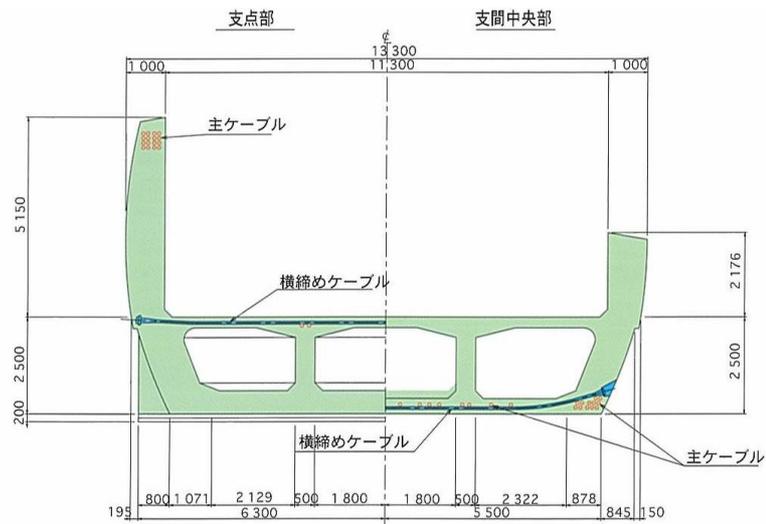


図-4 標準断面図

3. 分割打設の検討

(1) 概要

本橋梁における工程表を表-1に示す。姫川は急流河川であり洪水到達時間が短く増水するのが早いため、河川管理上の理由により施工は非出水期に限定された。施工方法は図-5に示すように固定式支保工架設による7施工区分の分割施工であり、7施工区分を3回の非出水期に分けて施工する。また耐久性の観点からは、一施工区分における主桁のコンクリート打設は1回により行うことが望ましいが、打設数量が約1,500m³と多くポンプ車の配置スペース、打設に要する時間、鉄筋およびケーブルの保持、型枠および支保工の設置がきわめて困難であることから1施工区分をさらに4ブロックに分割して打設した。図-6に分割図を示す。このため、打継ぎ部の拘束および温度勾配の影響を把握するために、立体FEMによる温度解析を行い、ひび割れ幅抑制用の鉄筋補強を行った。また打設から緊張までの期間が長くなる部位に対しては、コンクリート打設2日後に仮にプレストレスを与えることで施工段階での乾燥収縮によるひび割れの発生を抑制した。

表-1 工程表

	平成16年			平成17年					平成18年					平成19年														
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7			
	出水期			第1非出水期					出水期					第2非出水期					出水期									
準備工	■																											
瀬替え	■																											
PC桁製作架設工	■																											
第1施工区分				■										■														
第2施工区分				■										■														
第3施工区分				■										■														
第4施工区分				■										■														
第5施工区分				■										■														
第6施工区分				■										■														
第7施工区分				■										■														
橋面工																			■									
防水工																			■									

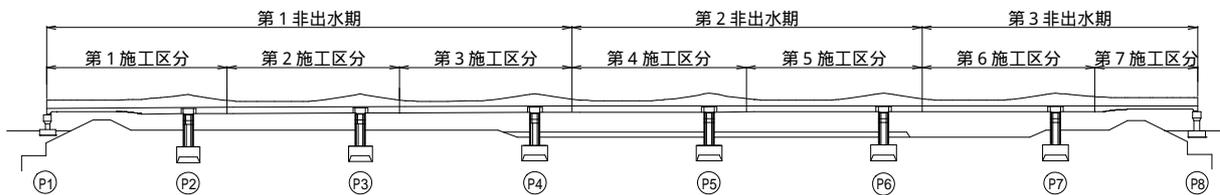


図-5 施工段階図

コンクリートの打設は、柱頭部は上床版に横締めケーブルが配置されているので箱桁部とフィン部で分割し、箱桁部は全断面一括で行った。また、側径間および中央径間部は、横締めケーブルと主ケーブルが下床版に配置されるので下床版とウェブと上床版とフィン部に分割して行った。

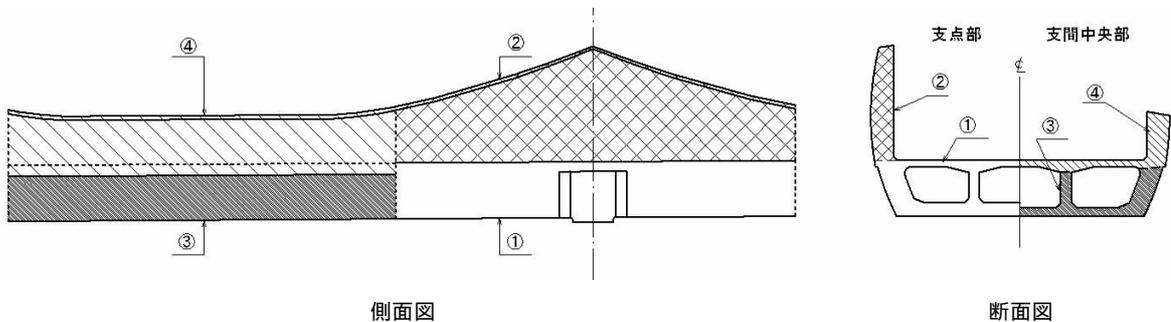


図-6 打設分割図

第1非出水期の施工ステップ図を図-7に示す。

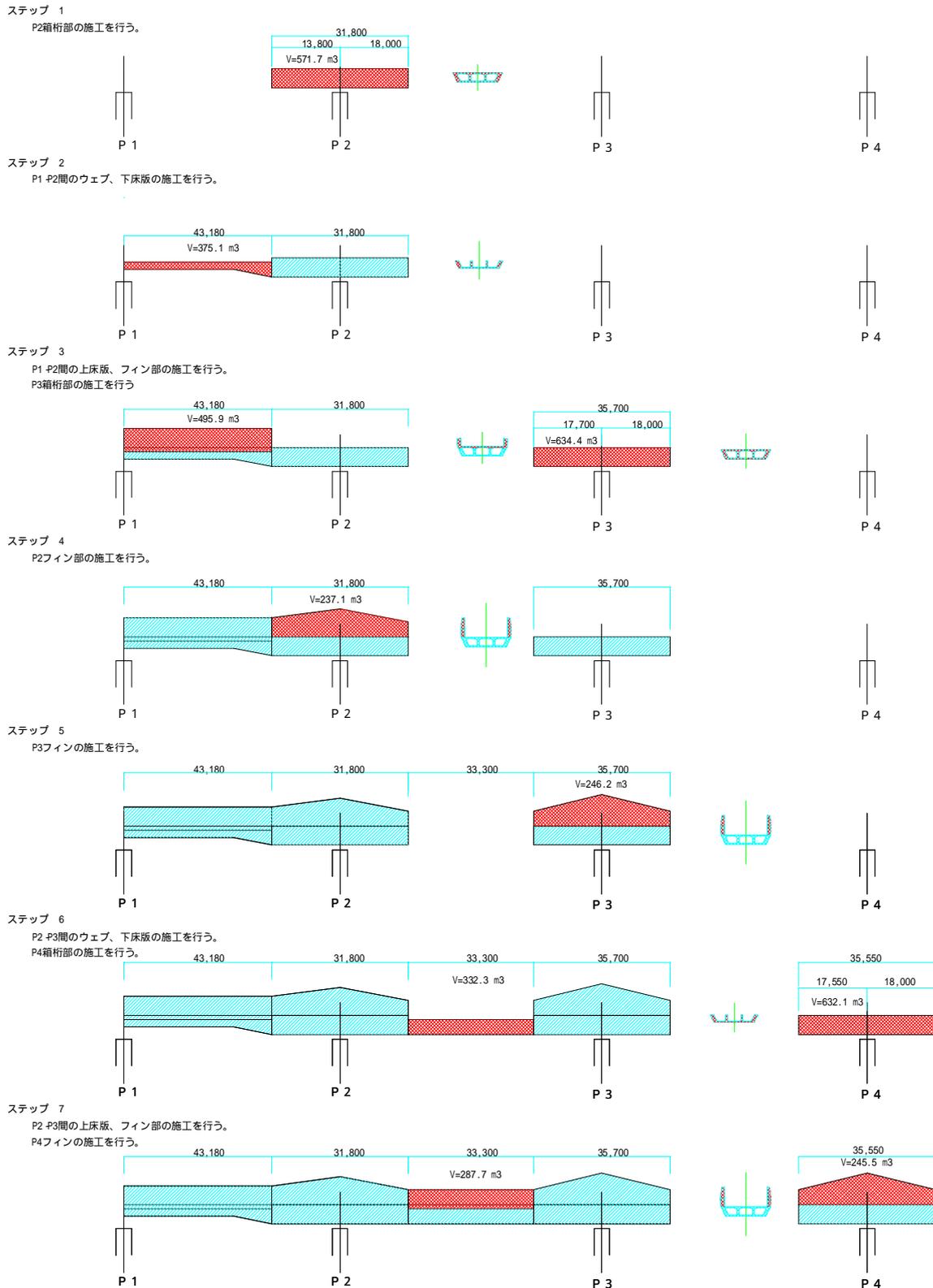


図-7 施工ステップ図

なお、第1施工区分については工程の都合上、他施工区分と打設順序が異なる。

(2) 温度解析

分割打設により生じる打継ぎ目には、新設コンクリートの水和熱による温度上昇、外気温の影響、既設コンクリートによる拘束などによりひび割れが発生する可能性がある。そこで、3次元FEM温度解析を行い、各施工目地における打継ぎ目でのひび割れ発生の可能性を検討し、ひび割れ発生の可能性が高い場合には鉄筋により補強することとした。

温度解析は、図-8に示す3カ所の打継ぎ目に対し検討を行った。着目点1では、柱頭部箱桁部とフィン部の打継ぎ目、着目点2では中央径間箱桁部とフィン部の打継ぎ目、着目点3では柱頭部と中央径間部との打継ぎ目についてそれぞれ検討を行った。

以下に、代表モデルとして着目点1の検討について示す。モデル図および拘束条件を図-9に示す。また、表-2に物性データ、図-10にリフト割りおよび熱伝達境界を示す。

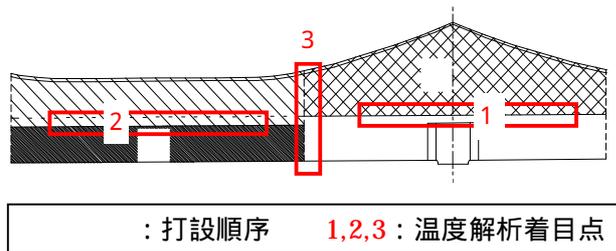


図-8 検討位置

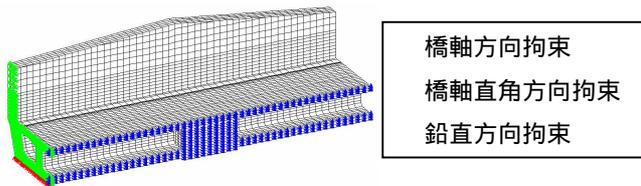
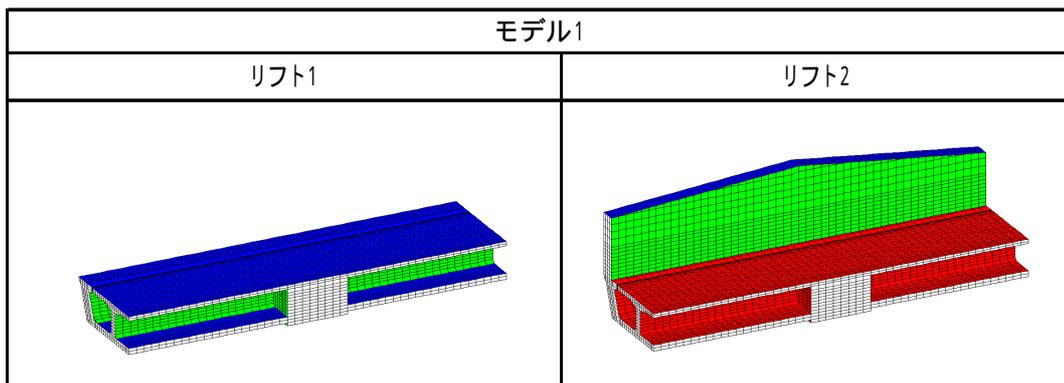


図-9 モデル図および拘束条件

表-2 物性データ

	単位		
熱伝導率	W/m	2.7	
密度	kg/m ³	2400	
比熱 C	kJ/kg	1.16	
断熱温度上昇率		JSCE実験式	
弾性係数	N/mm ²	$E_c = (t) \times 4.7 \times 10^3 \text{ f}'_c(t)$	
圧縮強度	N/mm ²	0.44 f'c	
ポアソン比		0.2	
線膨張係数		10×10^{-6}	
クリープ構成則		有効弾性係数法	
乾燥収縮ひずみ		JSCE実験式	
自己収縮ひずみ		考慮しない	
配合	水	kg/m ³	165
	セメント	kg/m ³	412



種類	色	熱伝達係数	
合板	緑	8 14	材齢2日まで合板型枠
マット	青	5 14	材齢2日までマット養生
外気	赤	14	

図-10 リフト割りおよび熱伝達境界条件

図-11 に最高温度経験値, 図-12 に最大主応力経験値および図-13 に経験最小ひび割れ指数を示す.

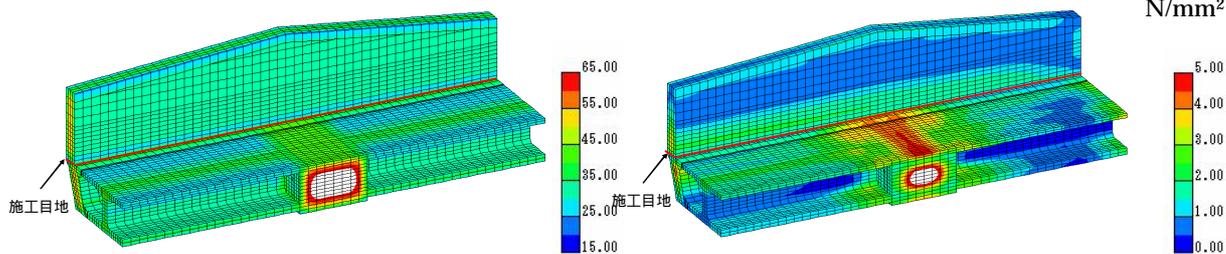


図-11 最高温度経験値

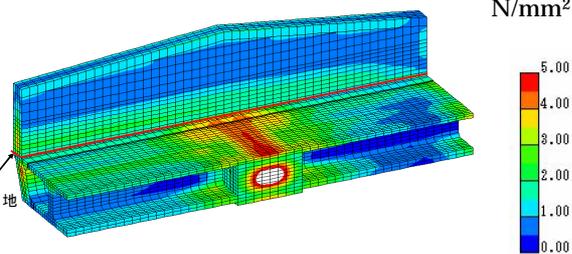


図-12 最大主応力経験値

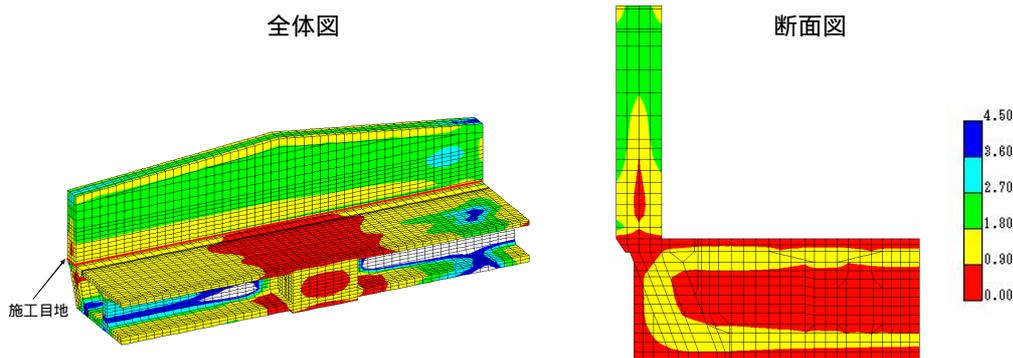


図-13 経験最小ひび割れ指数

温度によるひび割れの補強検討は, 最小ひび割れ指数が 1.8 以下の部分に対して行った. コンクリート標準示方書では, ひび割れの防止をしたい場合, ひび割れ指数 1.75 以上と規定されていることから, 本検討では, 1.8 以下の部分に対して検討を行うこととした. このときひび割れ幅の制限値は, 特に厳しい腐食性環境を考慮して 0.15mm 以下とした.

ひび割れ幅の照査については, コンクリート標準示方書に規定される曲げひび割れ算定式が一般的に適用されている. しかし, 本検討のように貫通ひび割れが発生する状態では, 純曲げ状態よりもむしろ純引張状態に近い状態のため, 適用が難しいと判断した. 一方海外の基準では, 鉄筋コンクリート部材の温度ひび割れ幅を簡易に算出できる方法として以下の方法が挙げられる. この算定方法は, 純引張部材に対しても適用されるため, 本検討においてもこの算定方法を適用した.

以下にひび割れ幅算定式を示す.

ひび割れ幅算定式 w

$$w = s \times \varepsilon$$

w: ひび割れ幅(mm)

s: ひび割れ間隔(mm)

ε : 拘束によるひずみ(温度ひずみ)

ひび割れ間隔 s

$$s = \frac{\phi}{2.5\rho}$$

ϕ : 鉄筋径(cm)

$$\rho = \frac{A_s}{A_{ct}}$$

A_s : 鉄筋量(cm²)

$A_{ct} = 3.0(t-d) \times$ 鉄筋間隔

t: 部材厚(cm)

d: 有効高(cm)

拘束によるひずみ

$$\varepsilon = \frac{R \times T1 \times \alpha}{2}$$

R:拘束度

T1:硬化温度上昇値()

 $\alpha: 10 \times 10^{-6}$

1/2:若材齢時におけるクリープの影響

補強鉄筋の配置方向は、図-14 に示すような主応力ベクトル図により決定した。

前述の計算式によるモデル1柱頭部フィン部のひび割れ幅検討結果を表-3 に示す。発注図書において、配置されているD19ctc125の配筋では、解析結果の温度勾配によるひび割れ幅は0.16mmとなり許容値を満足しない。よって、D13鉄筋をD19鉄筋の間に配置することとし、この結果、ひび割れ幅は0.11mmとなり許容値を満足する。

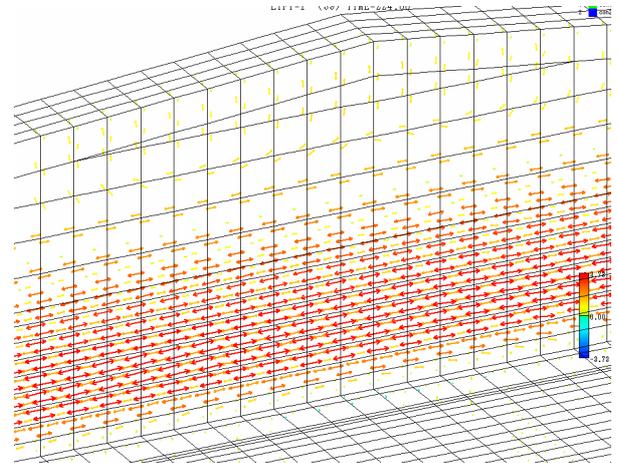
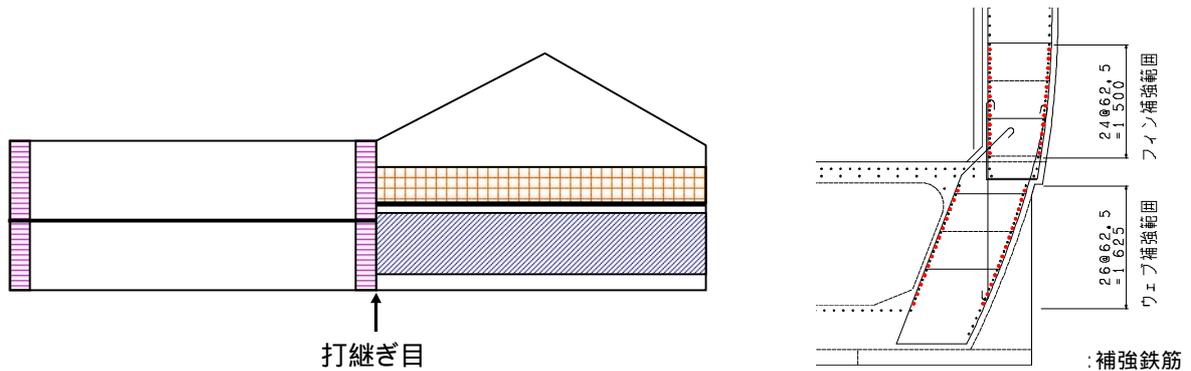


図-14 主応力ベクトル図(フィン部)

表-3 柱頭部フィンひび割れ幅検討結果

補強鉄筋	D19 ctc 125	D19 ctc 125 + D13 ctc 125
かぶりc(mm)	79.5	79.5
(=3.0 × c)(cm)	23.9	23.9
As(cm ²)	2.865	4.132
Act(cm ²)	298.1	298.1
(=As/Act)(%)	1.0	1.4
ひび割れ間隔s(mm)	0.79	0.55
(s= /2.5)		
硬化温度上昇値T1()	39.4	39.4
温度拘束ひずみ	1.97E-04	1.97E-04
(=1.0・T1・10 × 10 ⁻⁶ /2)		
ひび割れ幅W(mm)	0.16	0.11
(W=s・)		
判定 (W < 0.15mm)	NG	OK

同様に着目点2および着目点3についても解析を行い、ひび割れ幅の検討および補強鉄筋の検討を行った。補強鉄筋配置要領を図-15 に示す。



検討位置		補強方法
柱頭部フィン		橋軸方向鉄筋を柱頭部ブロック中のフィン部において、床版天端から1500mm範囲のD19鉄筋(ctc125)の間にD13鉄筋(ctc125)を配置する。補強鉄筋はフィン部内外側に配置する。
柱頭部箱桁外ウェブ		橋軸方向鉄筋を柱頭部ブロック中の箱桁において、D19鉄筋(ctc125)の間にD13鉄筋(ctc125)を配置する。補強鉄筋は外ウェブの内外側に配置する。
打継ぎ目(中央径間側)		打継ぎ目の新コンクリート側に用心鉄筋(ctc100)を配筋する。打継ぎ目用心鉄筋の配置は、鉄道構造物等設計基準・同解説 14章 14.16打ち継ぎ目 に従うものである。

図-15 補強鉄筋配置要領

(3) 乾燥収縮の検討

次に温度解析のモデルを用いて、乾燥収縮の影響に着目した解析を行った。乾燥収縮の検討は、コンクリートの温度上昇および外気温の影響を無視したものである。

図-16 に最大主応力経験値を示す。このとき、床版とウェブの接合部付近に応力集中していることが判る。最小ひびわれ指数は制限値の 1.8 を下回ってはいないが、ひび割れ発生抑制のため床版とウェブの接合部付近に補強鉄筋を配置することとした。図-17 に補強鉄筋配置図を示す。

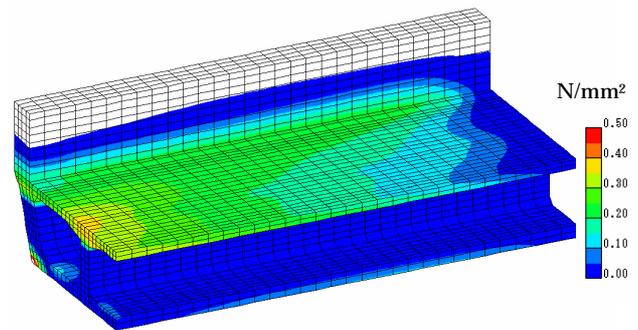


図-16 乾燥収縮による最大主応力経験値

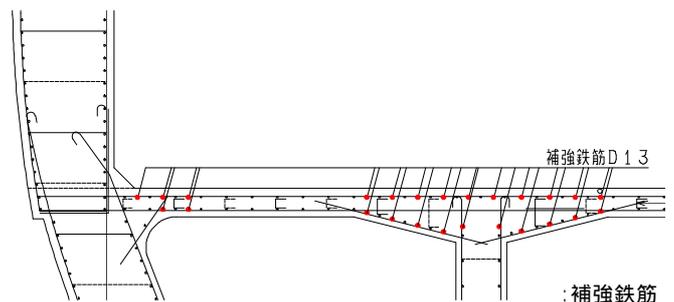
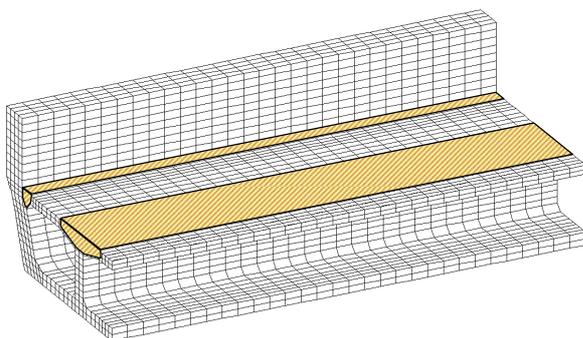


図-17 乾燥収縮に対する補強鉄筋配置図

(4) 仮締めケーブル

前述したように、本橋梁は各施工区分について4分割でのコンクリート打設を行うため、最初に施工する橋脚上の主桁部分のコンクリート打設から主ケーブルの緊張完了まで 60 日程度要する。このとき、乾燥収縮による変形を型枠で拘束する可能性があるため、主ケーブルの一部および仮設ケーブルにより主桁にプレストレスを与えることで、ひび割れの発生を抑制する。このことにより、設計計算と異なるプレストレスを導入することとなるので、応力照査も併せて行った。

施工手順を図-18に示す。

- STEP-1 柱頭部箱桁部のコンクリート打設後，上床版と下床版に設置したPCケーブルを緊張する。
- STEP-2 柱頭部フィン部のコンクリート打設後，フィン部仮締めPCケーブルを緊張する。
- STEP-3 側径間部または中央径間部箱桁部のコンクリート打設後，下床版ケーブルの一部を緊張する。
- STEP-4 側径間部または中央径間部フィン部のコンクリート打設後，本ケーブル緊張前に，柱頭部フィン部の仮締めケーブルの開放を行う。

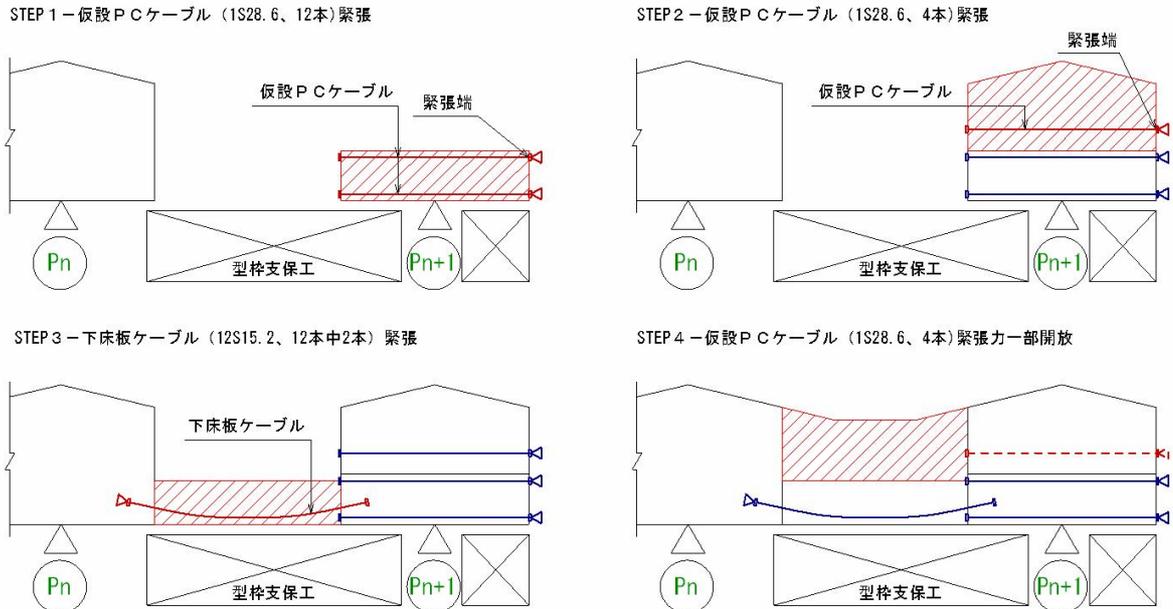


図-18 仮締めケーブル施工手順

4. 実物大模型によるコンクリート打設試験

本橋梁は，箱桁部とフィン部が一体になった構造になっており，上床版付近において，600mm 間隔に配置された横締めケーブル(12S12.7)と主ケーブル(12S15.2)が交差している。また，箱桁部上床版筋，ウェブスターラップ，フィン部スターラップ(D19～D25)が125mm 間隔でそれぞれが入り組んで配置されており，コンクリート打設の施工性が懸念された。さらに，糸魚川地区ではアルカリ骨材反応に対し無害の骨材を供給することが難しいため，この地区で採掘される石灰石を骨材に100%使用した配合の採用，フィン部の部材厚が1000mmと比較的大きく水和熱による温度ひび割れ・収縮ひび割れ対策についても施工性とあわせて事前に配合試験を行った。ここで，水セメント比を小さくするために高機能型 AE 減水剤を用い，かつ，コンクリートのフレッシュ性状としては，高い流動性・間隙通過性を有し，なおかつ，材料分離抵抗性を有することを目標とした。

現地での実物大模型を用いた打設試験では，実際に鉄筋・ケーブルの配置を行い，その配置状況を確認し，打設時に充填状況が目視確認出来るように半透明型枠を部分的に使用した。図-19に試験体として抽出した部位を，写真-1に試験体全景を，写真-2にコンクリート打設状況を，写真-3に半透明型枠を示す。試験の結果，鋼材配置の困難な箇所の鉄筋形状の変更，組立順序，コンクリート打設時の注意点等再検討を行い，本施工に反映させた。また，コンクリートのワーカビリティなどが良好であることが確認できた。

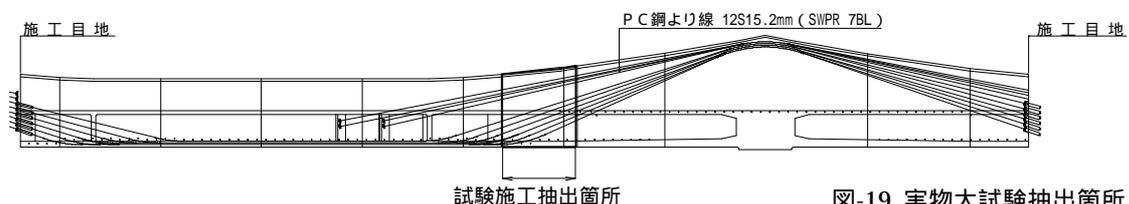


図-19 実物大試験抽出箇所



写真-1 試験体全景



写真-2 コンクリート打設状況



写真-3 半透明型枠

使用するコンクリートの配合は、耐久性を考慮し、単位水量の上限値 175kg/m³、最大水セメント比 43%、骨材の種類は無害と制限されており、条件を満たす表-4 の配合を採用した。無害の骨材として、石灰石を使用した。

表-4 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スラブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位重量(kg/m ³)				
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 フローリック SV10
40	12	40.0	50.0	412	165	878	878	4.12

養生期間を決定する目的で、試験体内に熱電対を設置し内部温度を測定した。図-20 に温度測定位置図を、表-5 に最高温度を、図-21 にコンクリート温度履歴グラフを示す。

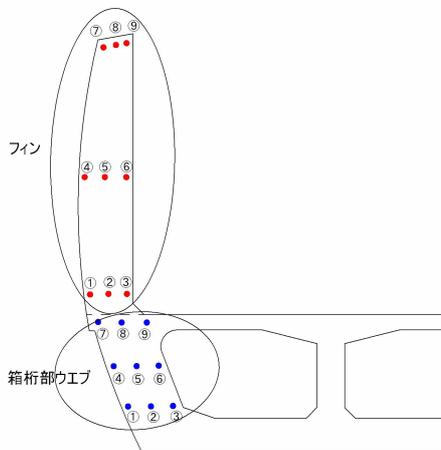


図-20 温度測定位置図

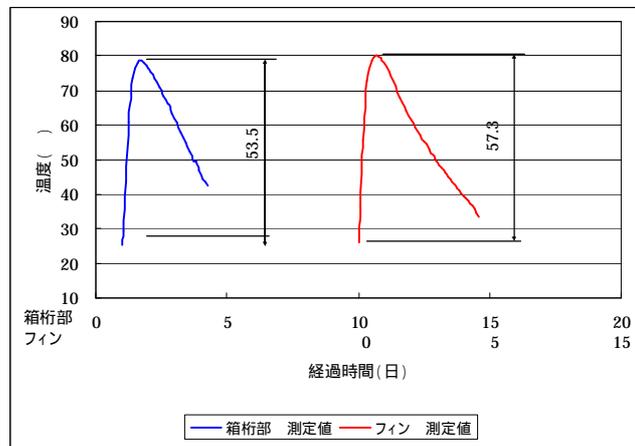


図-21 コンクリート温度履歴グラフ

表-5 試験打設時測定値最高温度

										(単位: °C)	
										打設時温度	
										コンクリート温度	外気温
箱桁部	47.7	57.9	51.5	70.4	78.5	69.7	66.4	74.5	64.6	25.0	23.0
ウェブ部	59.4	61.8	56.8	71.2	80.1	68.1	49.7	55.0	49.3	20.6	21.3

実施工でのコンクリート打設は、試験打設時よりも外気温の低い時期に行われる。打設時の温度設定を実施工時の条件に合わせて行った温度解析結果について、図-22 に FEM 解析温度図を、表-6 に最高温度を、図-23 にコンクリート温度履歴グラフを示す。



図-22 FEM 解析温度図

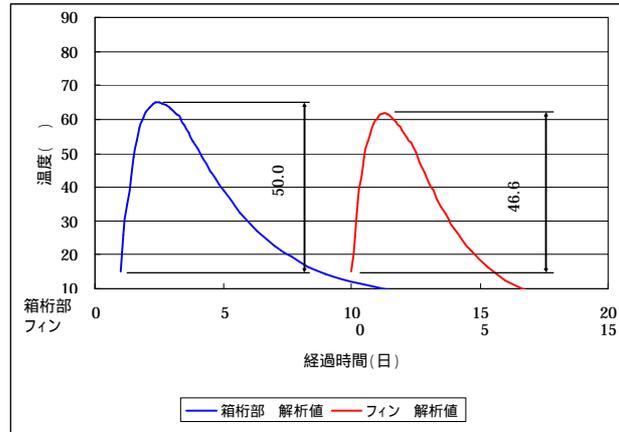


図-23 コンクリート温度履歴グラフ

表-6 FEM 解析最高温度

											(単位:)	
											打設時温度	
											コンクリート温度	外気温
箱桁部	36.2	53.4	39.1	36.6	55.4	36.8	33.3	46.7	47.2	15.0	12.0	
ウェブ部	27.5	42.3	27.2	33.3	54.1	33.3	24.8	37.4	24.8	15.0	12.0	

以上より、打設時温度の相違により最高温度は異なるものの、測定値と解析値はほぼ同様の挙動を示すことが確認できた。

5. 型枠工

本橋梁は、側面がR=13.0mの曲面になっており、また、フィン部の断面が大きいことから型枠の組立解体時の効率化および形状保持剛性を図るため、鋼製フレームによる大型パネルとした。また、冬期養生時の保温性を考慮し、表面はウレタック合板を使用した。図-24 に側枠組立図を、写真-4,5 に型枠の組立状況を示す。

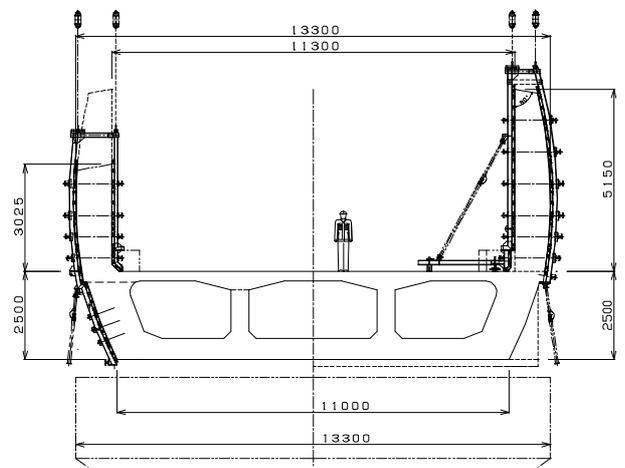


図-24 側枠組立図



写真-4 フィン部側枠組立状況

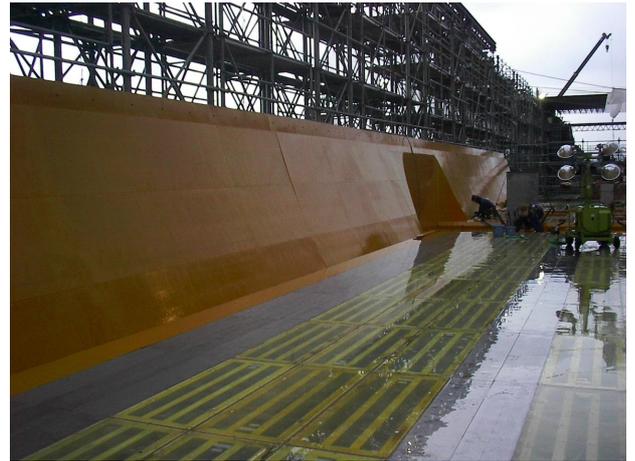


写真-5 箱桁部型枠組立状況

6. PC ケーブル工

主ケーブルは、12S15.2(マルチストランドシステム)、横締めケーブルは、12S12.7(SEE F-FUT)を使用した。写真-6,7 に配置状況を示す。



写真-6 フィン部主ケーブル配置状況



写真-7 横締めケーブル配置状況

横締めケーブルは 600mm 間隔で配置され、主ケーブルと複雑に交差し、狭い空間でのデッドアンカーの組立作業となる。くさび式定着具の場合確実にセットするのが非常に困難であるため、固定側にはスリーブを圧着してナット定着する SEE-F 型、緊張側には FUT 型の F-FUT 型定着具を採用した。写真-8,9,10 にケーブルの配置状況を、図-25 に定着具の詳細を示す。

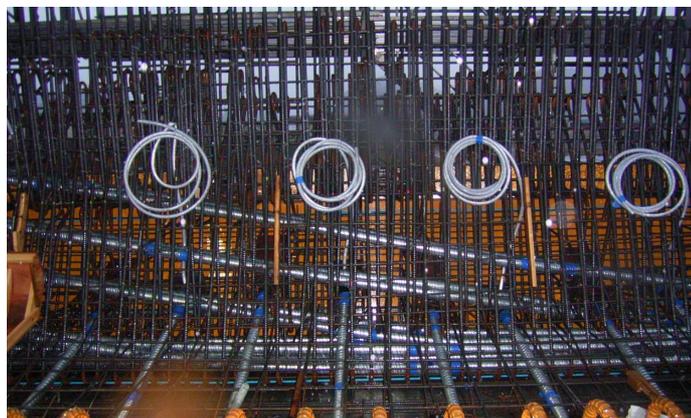


写真-8 主ケーブルおよび横締めケーブル配置状況



写真-9 横締めケーブル配置状況



写真-10 デッドアンカー配置状況

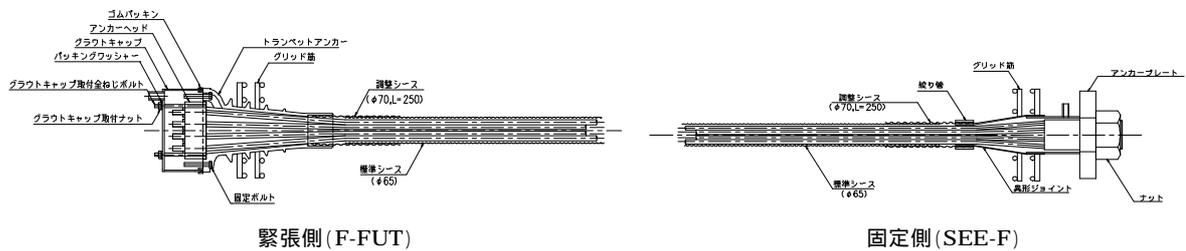


図-25 横締めケーブル定着具

7. コンクリート工

柱頭部の箱桁部は、約 640m³を全断面一括打設となるので、コンクリートポンプ車を 4 台配置し 4 パーティ - で入念に打設を行った。図-26 にコンクリート打設図を、写真-11,12 に箱桁部の打設状況を示す。

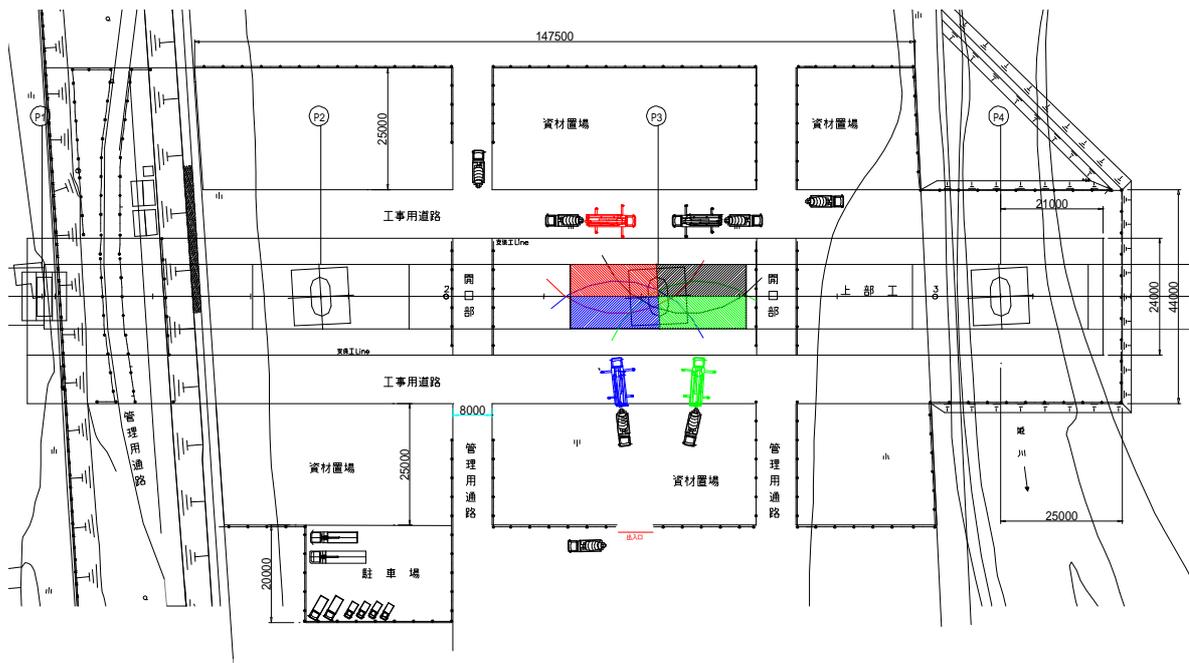


図-26 コンクリート打設図



写真-11 コンクリート打設状況



写真-12 箱桁部コンクリート打設状況

側径間および中央径間のフィン部は、浮き型枠にしてフィン部と上床版を一括で打設を行った。写真-13 にフィン部の打設状況を示す。



写真-13 フィン部コンクリート打設状況

8. 養生工および仮囲い

本橋梁は、日本海の海岸線から700m程度に位置し、施工する冬期は気温が低く防風雪の吹き荒れる日が多いため、飛来塩分からの防護、コンクリートの適切な温度での養生、また、良好な施工環境を確保する目的で写真-14に示す全体を覆う形式の大規模な上屋を設置した。



写真-14 養生上屋

養生は、主桁全体をコンクリートファーンを使用し保温した。一方、箱桁内部は送風機により外気を送り温度上昇を抑制した。写真-15,16,17に養生の状況を示す。



写真-15 コンクリートファーン



写真-16 温風ダクト



写真-17 箱桁内送風状況

図-27 に示すように熱電対をコンクリート内部に設置し、養生期間および脱型時期を決定した。打設後はコンクリートファーンを設置して、養生温度を5日間10 以上に保つようにした。また、脱型時の温度差によるひび割れを防止するためコンクリート外側温度 と養生温度 の差が15 以内になったのを確認後脱型した。図-28に養生温度グラフを示す。

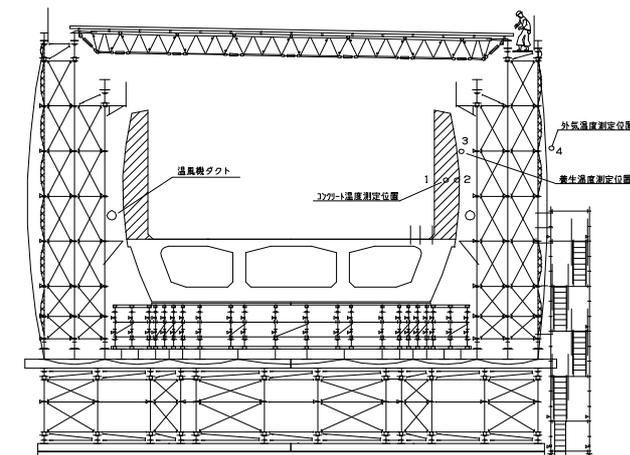


図-27 養生上屋および温度測定位置図

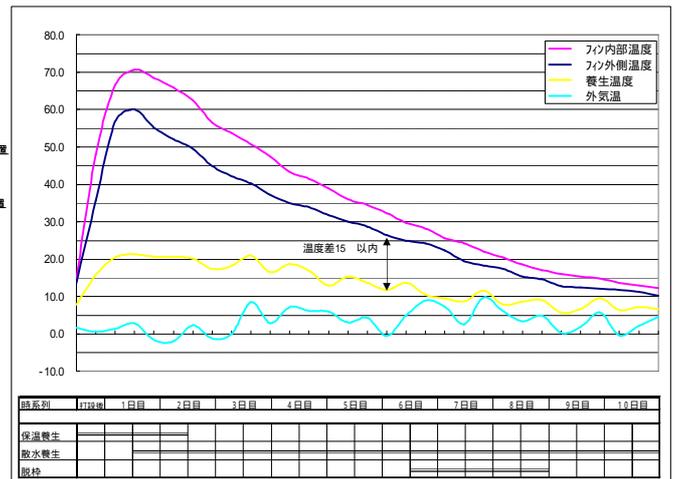


図-28 養生温度グラフ

9. PC グラウト工

(1) 概要

フィン部における PC 鋼材は、最大高低差 7.37m 最大傾斜角度 24°12'36"で配置されており、グラウトが確実に充填できるか懸念された。そこで本施工に先立ち、真空ポンプ併用グラウトシステムを採用し、半透明シーを使用し、実際のケーブル形状の試験体を製作し、グラウトの注入状況および充填状況の確認試験を行った。本施工のグラウト充填は、この確認試験の結果をふまえて行った。

(2) グラウト注入確認試験

1) 試験設備および使用機材

写真-18 にグラウト試験体, 図-29 に機材配置図, 写真-19,20 に使用機材を示す.



写真-18 グラウト試験体

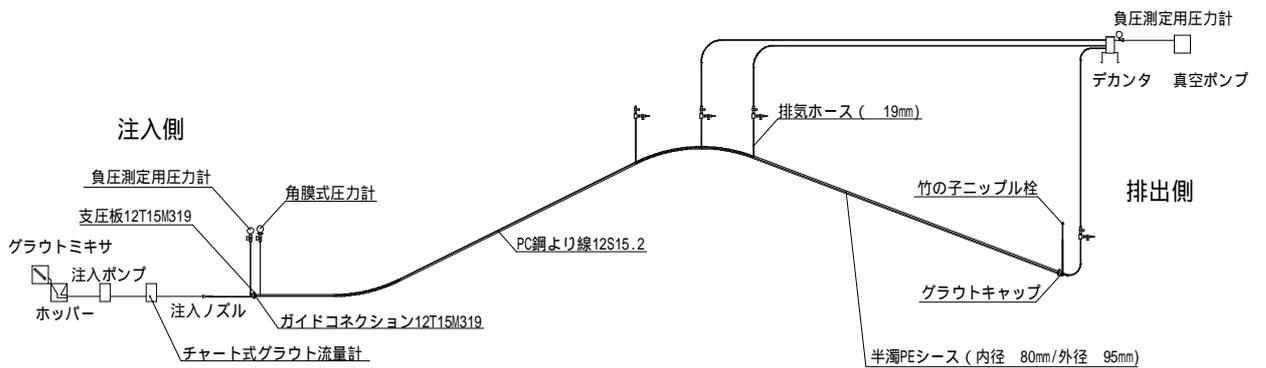


図-29 グラウト注入試験機材配置図



写真-19 練混ぜおよび注入設備



写真-20 真空ポンプおよびデカンタ

2) 配合

表-7 に示す W/C=43%と 44%の 2 種類の配合で、確認試験を行った。

表-7 グラウトの配合

水セメント比 (%)	単位重量(kg/m ³)		
	セメント(高炉 B 種)	水	混和剤(セベックス 208)
43	1,319.5	567.4	13.139
44	1,302.3	573.0	13.023

3)注入作業および充填状況

真空ポンプによるダクト内の減圧は、真空度-0.09MPa で行い、1 分程で注入側でもほぼ同等圧力を確認した。写真-21,22 に減圧状況を示す。



写真-21 デカンタの負圧測定圧力計



写真-22 注入側の負圧測定用圧力計

上り勾配では、全断面で注入される。下り勾配に入ると先流れ現象が起き途中エアだまりが発生するが、排出側に到達後徐々に最頂部に向かって充填される。このときエアだまりの真空度が低下するので最頂部に設置した真空ポンプにより真空度を保つ。写真-23,24,25 に充填状況を示す。



写真-23 最頂部付近注入状況



写真-24 下り勾配の先流れ状況

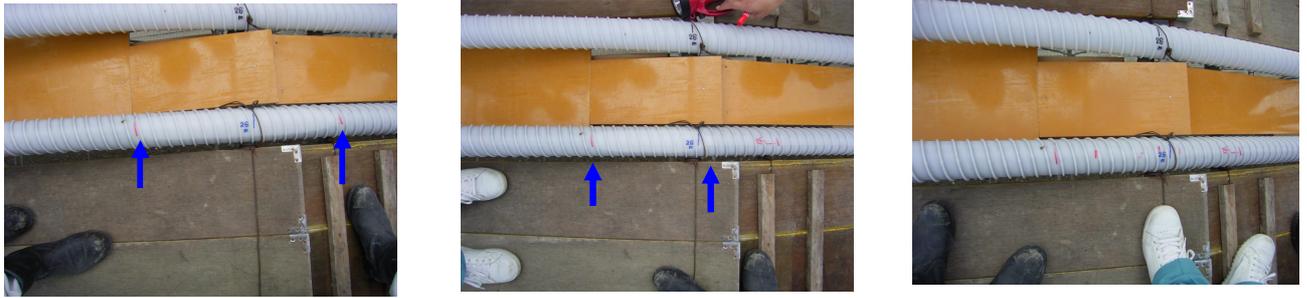


写真-25 エアだまりの充填状況

グラウト注入時の圧力を図-30 に示す . 注入完了後のダクト内の圧力は , 0.3MPa 程度であるので , 注入完了後 0.5MPa まで圧力を上げるにより完全に充填されたことが確認できる .

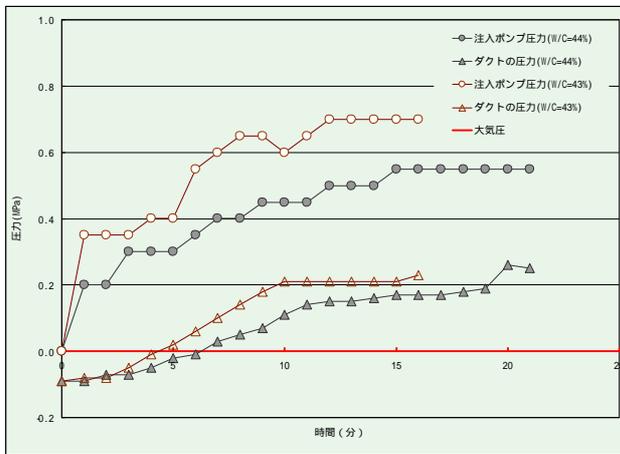


図-30 グラウト注入圧力図



写真-26 再頂部エアだまり

グラウト充填完了後 , 時間の経過と共に写真-26 に示すように最頂部に気泡が集まりだしエアだまりが発生するが , 約 1 時間程度で大きさは変わらなくなる . 最頂部の下り側ホースより注入速度の遅い手動ポンプを使用して再注入することで充填を行った .



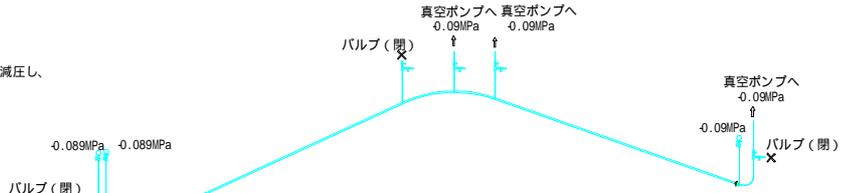
写真-27 手動ポンプ



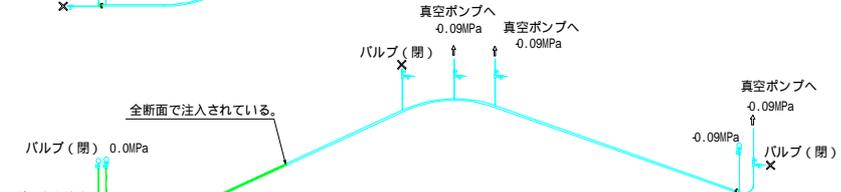
写真-28 排出状況

確認試験におけるグラウト注入の状況を図-31 に示す.

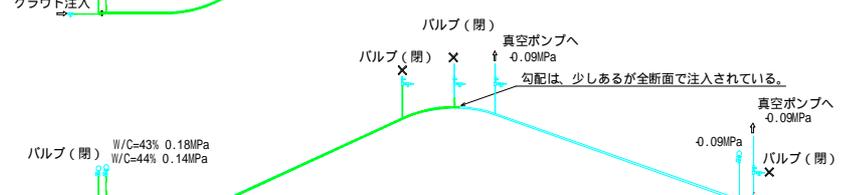
1. 真空ポンプによるシース内の減圧
排出側及び、最頂部より真空ポンプにより減圧し、シース内全体を減圧する。



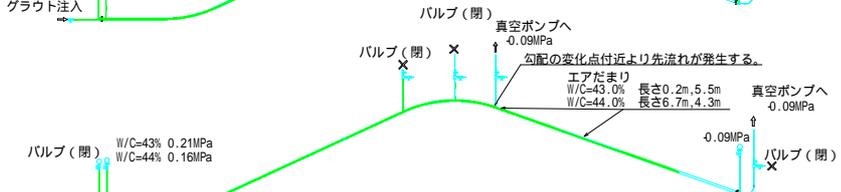
2. グラウト注入状況 (上り勾配)



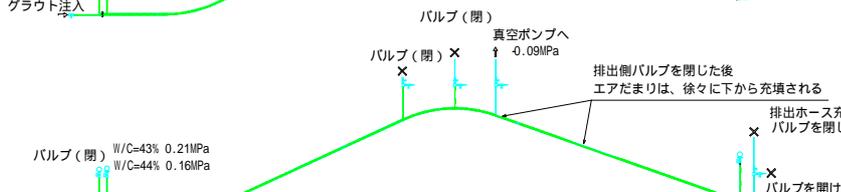
3. グラウト注入状況 (最頂部付近)



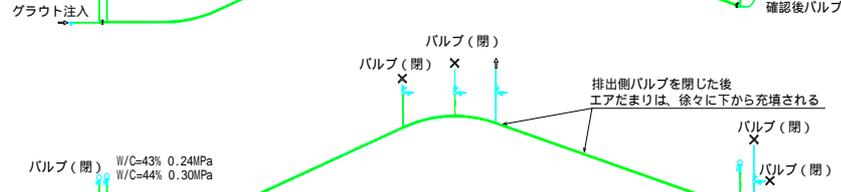
4. グラウト注入状況 (下り勾配)



5. グラウト注入状況 (下り勾配充填状況)

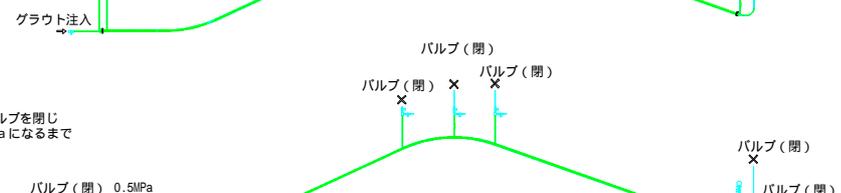


6. グラウト注入状況 (下り勾配充填状況)



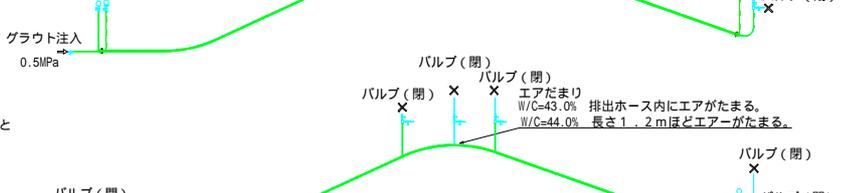
7. グラウト充填完了

グラウトが充填完了したら、最頂部のバルブを閉じ注入側のグラウトの圧力が、0.5MPaになるまで加圧し、バルブを閉じて終了する。」



8. 充填完了後約1時間

グラウト充填完了後、約1時間ほどすると最頂部にエアだまりが出来る。



9. 最頂部グラウト再注入

手動ポンプにより再注入する。

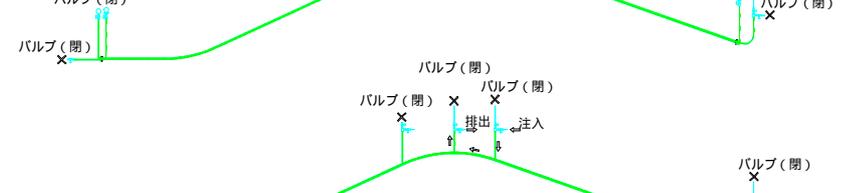


図-31 グラウト注入状況図

4) 充填状況確認

グラウトの硬化後、頂部付近のシーすをはがして充填状況を確認した。W/C=43%、44%共に頂部付近およびその前後において完全に充填されていることを確認した。写真-29～32に充填確認状況を示す。



写真-29 頂部付近充填状況(W/C=43%)



写真-30 頂部付近充填状況(W/C=44%)

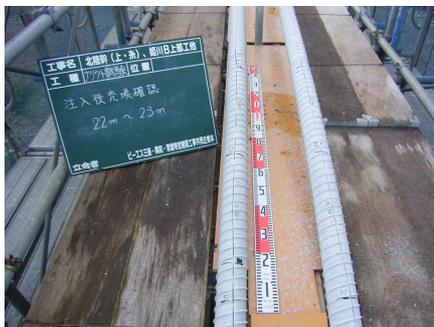


写真-31 上り勾配部充填状況

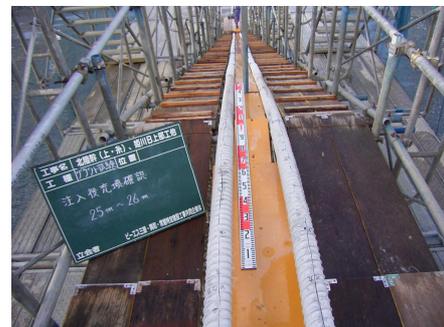


写真-32 下り勾配部充填状況

また、上り勾配部および下り勾配部において断面を切断し充填状況の確認をおこなったが、いずれの断面においてもPC鋼材間を含め充填状況は良好であった。写真-33,34に断面の充填状況を示す。



写真-33 断面充填状況(W/C=43%)



写真-34 断面充填状況(W/C=44%)

(3) 真空ポンプ併用グラウトシステムの利点と考察

今回の確認試験から、真空ポンプを併用することの利点として下記のことがあげられる。

- 通常のグラウトに比べ注入圧力が小さく、長いケーブルを注入する場合有利である。
- 本試験体のように配置角度がきつく長いケーブルにおいても、PC鋼材間の空隙にもグラウトが充填される。
- 勾配のきつい下り部分でグラウトの先流れ現象が起こるため、-0.09MPaの真空状態では残留空気による未充填部が発生するが、0.0MPaの大気圧下ではその体積は1/10になり、注入完了後0.5MPaまで加圧すること

によりほとんど消滅する。

また、注入完了後最頂部に集まる気泡はエントラップエアによるものと考えられるが、W/C=43%のグラウトではほとんど発生していないことより、粘性の高いグラウトの方がエントラップエアは集まらないという結果が得られた。

本施工では、W/C=43%のグラウトを使用し、確認試験と同じ手順でグラウトの注入を行った。

10. 防水工

本橋梁は、寒冷地かつ塩害環境下に架橋されるため以下の塩害対策を行っている。

- 1) 水セメント比の制限
- 2) かぶりの増厚(外側 70mm, 箱桁内部 50mm)
- 3) 施工が中断する施工目地におけるエポキシ鉄筋の使用
- 4) ひび割れ制限値を、特に厳しい腐食性環境を考慮して 0.15mm以下とし、補強鉄筋を配置

また、近隣の高架橋における塩分浸透状況を見ると、海岸線より 600m, 経過年数 12 年におけるコンクリート表面からの塩化物イオン浸透深さは概ね 5cm に達する。このことから、コンクリート打設時の発熱により発生する微細なひび割れを考慮すると先に述べた対策のみではなく、さらなる耐久性向上策として全周に塩害対策の防水塗装を行った。表-8 および図-32 に施工箇所と使用した防水の種類を示す。

表-8 防水工の種類

施工箇所	防水の種類	特徴
外側側面・底版	浸透性吸水防止材 シラン・シトキサン系 (マジカルリペラー)	塗布することにより、コンクリート面に浸透して無色透明の吸水防止層を形成する。吸水防止層は、水滴は通さずコンクリート内部の水蒸気は透過させる。
内側側面・橋面	浸透性無機系コンクリート改質材 (RC ガード)	塗布することにより、コンクリート内部に浸透して水酸化カルシウムと反応しプリン状ゲルを形成し空隙を塞ぎ水の浸入を防止する。無色透明であり、自己修復機能により長期間にわたり劣化抑制効果がある。
横締め跡埋め部	浸透性無機系コンクリート改質材 (RC ガード) + コンクリート防蝕塗装材 ハイパロン合成ゴム系4層 (タフコートB)	RC ガードは、上記による。 耐候性・耐薬品性に優れゴム被膜は継ぎ目のない弾性のある均一な防水塗膜を形成する。

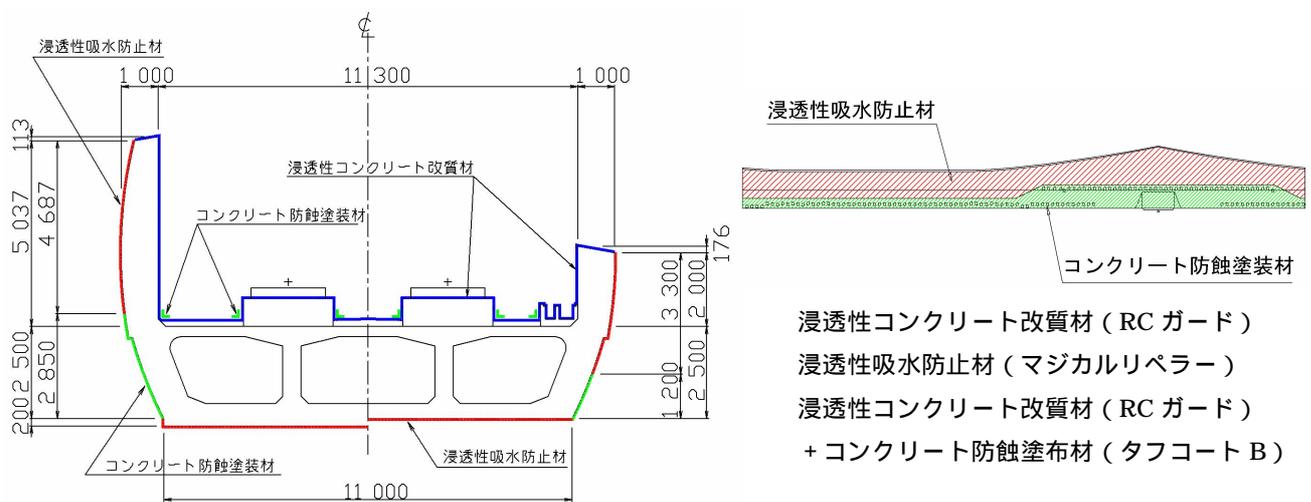


図-32 防水工施工箇所

8. その他の諸検討

(1) 概要

1 項で述べたように、本橋梁はウェブを箱桁断面から突出させた特異な主桁断面を有している。よって、プレストレスの応力分布、横締め鋼材の緊張時期などの照査・確認のため3次元FEM解析を行った。

また、たわみ管理計画においては、第1非出水期施工区間について、施工ステップを追ったモデルでFEM解析を行い、はり理論解析によるたわみ計算結果の妥当性を検証した。

(2) 解析モデル

1) 対象区間とモデル化

代表モデルとして、第1施工区分から第3施工区分(P1~P4先張出し部)までをモデル化した。主桁断面形状は、横断形状図(CADデータ)を使用しモデル化した。また、橋軸方向および橋軸直角方向に配置されるPCケーブルは、解析ソフトの埋込鉄筋要素を用いて、偏曲点を正確に考慮し1本ずつモデル化を行った。

図-33に、第1施工区分のモデル図を示す。

2) 横方向のモデル化

本橋梁は、横断方向に対し左右対称構造であるため、ハーフモデルで解析を行った。解析に際しては、常に横断中心線上の節点を拘束している。

3) 荷重

本解析では、以下の荷重を各施工段階において載荷し、検討を行う。

- ・ 主桁自重
- ・ 上床版および下床版横締めケーブルプレストレス荷重
- ・ フィンケーブルプレストレス荷重（フィンから外ウェブに渡って配置される鋼材）
- ・ ウェブケーブルプレストレス荷重（中ウェブに配置される鋼材）
- ・ 下床版ケーブルプレストレス荷重

4) 拘束条件

下床版下面の支承中心に設けた解析上の支点(節点)を、支承の大きさとモデル化した周辺節点と剛な要素で接続し、中心に設けた解析上の支点(節点)1点に対して、自由および拘束の条件を与え処理を行う。図-34に拘束条件モデル図を示す。

ただし、横締め鋼材の緊張時期検討においては、下床版下面全面を支保工で支持した状態であることから、モデルの全区間に渡って下床版下面を鉛直方向指示した。

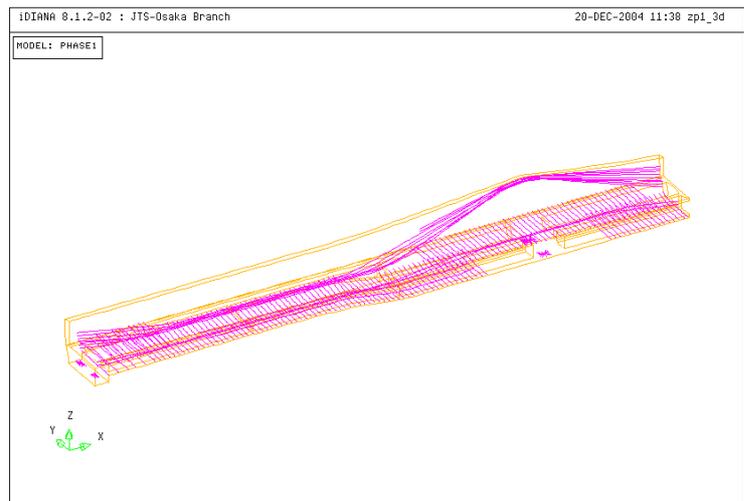
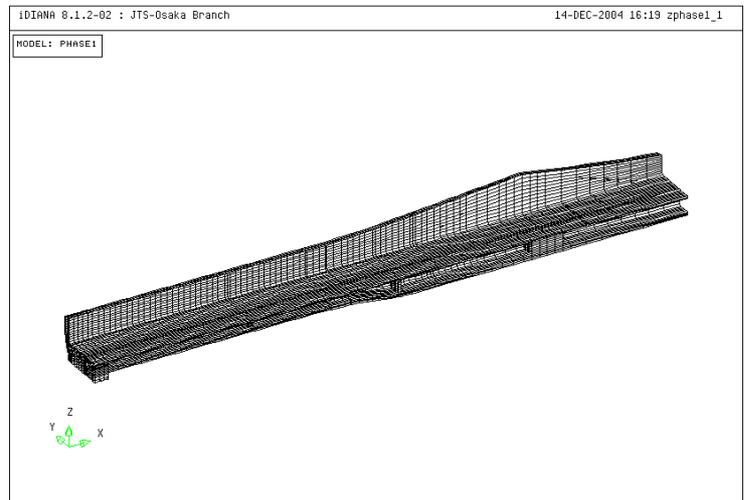


図-33 モデル図(第1施工区分)

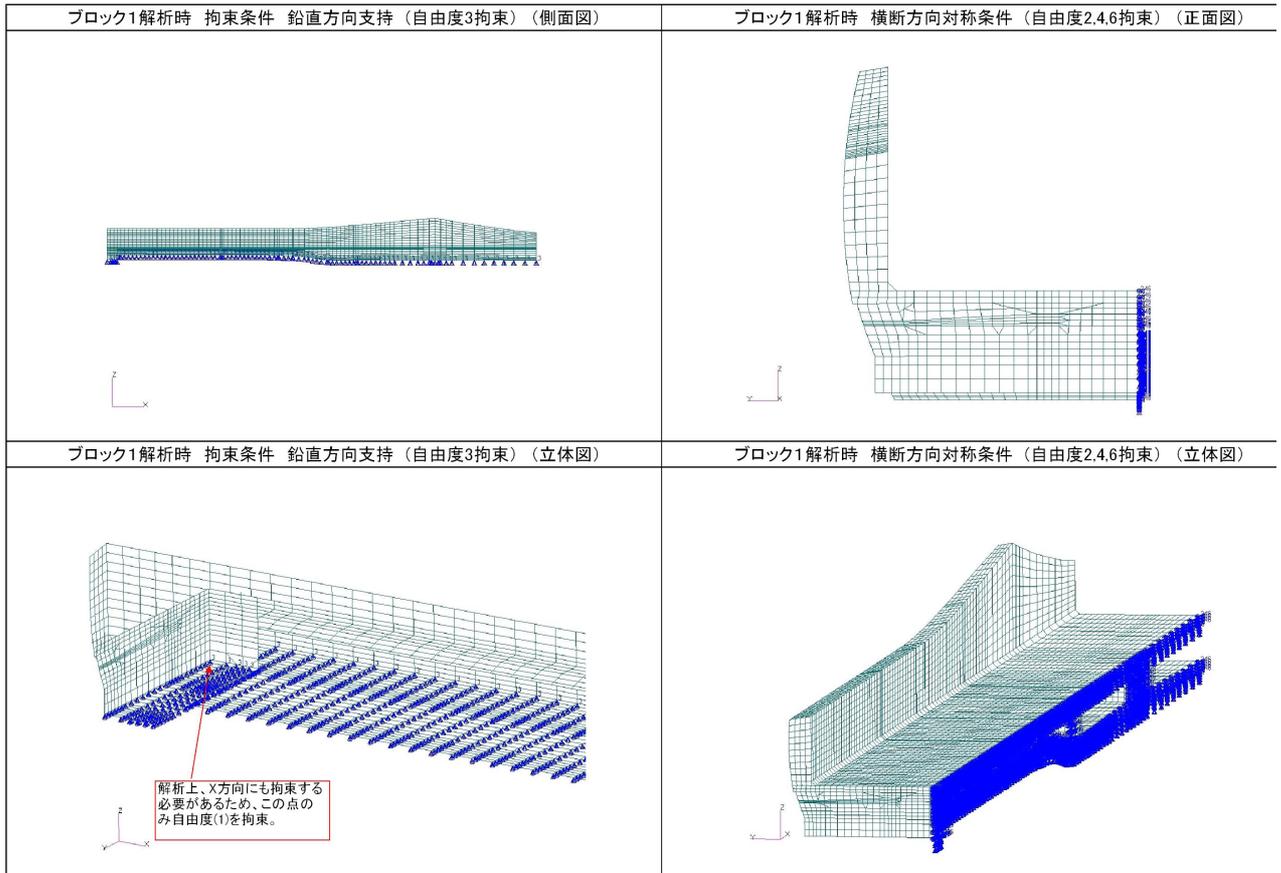


図-34 拘束条件モデル図(第一施工区分)

(3) 主ケーブルのプレストレスによる応力分布確認

本橋梁の中間支点上においては 図-35 に示すように、配置鋼材のほとんどがフィンの先端に集中している。

このような構造の解析において、

- ・ はり理論解析で算出したプレストレスによるコンクリート応力度との整合
- ・ 大偏心配置されているプレストレスが、断面にどの様に分布しているか

を確認するため、FEM 解析を行った。

配置鋼材のほとんどがフィンの先端部に集中して配置されている中間支点上断面の応力分布図を 図-36 に示す。() 内値がはり理論解析による応力度、赤線がその分布を示したものである。緑線は、FEM 解析結果より、高さの同じ要素の平均値をプロットしたものを結んだ線である。この図より、数値は異なるものの、ほぼ同一の応力分布を示すことが確認できる。

また、図-37 に橋軸方向応力度のコンター図を示す。この図からも、同一高さの要素内では、ほぼ同一の応力状態となっていることが確認できる。

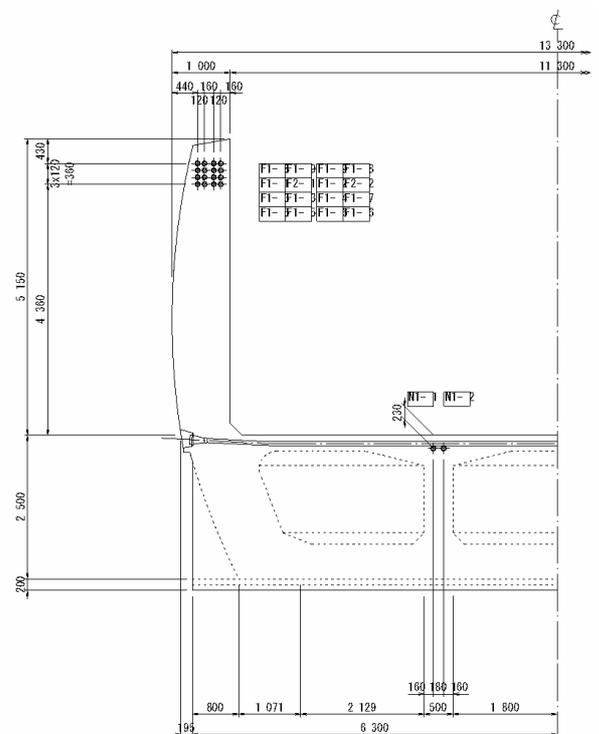


図-35 中間支点上の鋼材配置図

以上より、はり理論解析と FEM 解析の結果は解析上の諸条件の違いにより値は若干異なるものの、ほぼ同一の応力分布を示すことが確認できた。よって、プレストレスによるコンクリート応力度は、はり理論解析において、妥当な評価がされていると判断した。

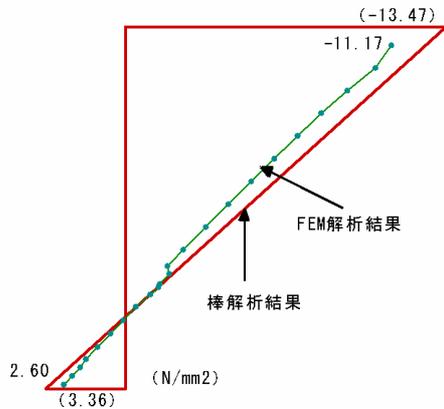


図-36 プレストレスによる応力度

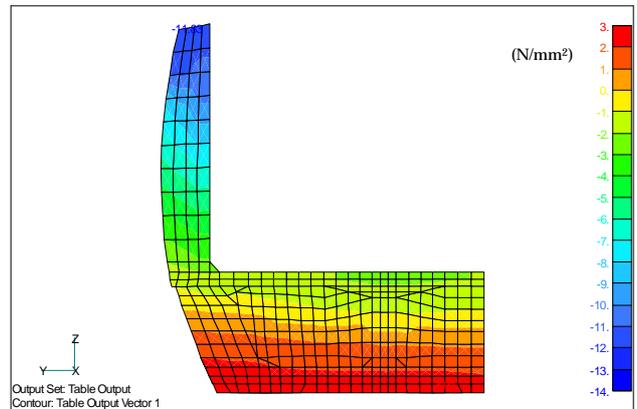


図-37 橋軸方向応力度コンター図

(4) 横締め鋼材の緊張時期

発注図書では、「フィンバック部の自重により上床版に軸引張力が生じるため、横締めケーブルは箱桁部打設後に緊張する必要がある。このため、横目地位置は上床版上縁とする。」とされていた。しかし上床版横締めケーブルの定着部は、分割打設により生じるフィンバック部と箱桁部の打継ぎ目にあるため、フィンバック部を打設せずに横締めケーブルを緊張することは構造上好ましくないとの判断より、上床版横締めケーブルの緊張は、「フィンバック部打設後かつ主ケーブル緊張前とする」とし、応力度の照査を行った。

図-38 にストレス導入前と全荷重(主桁自重、横締め鋼材および主ケーブルによるストレス)作用時の橋軸直角方向応力度のコンター図を示す。

ストレス導入前は上床版において引張応力度が生じるが許容値以下であり、また全荷重載荷時には圧縮状態となるので、問題ないと判断した。

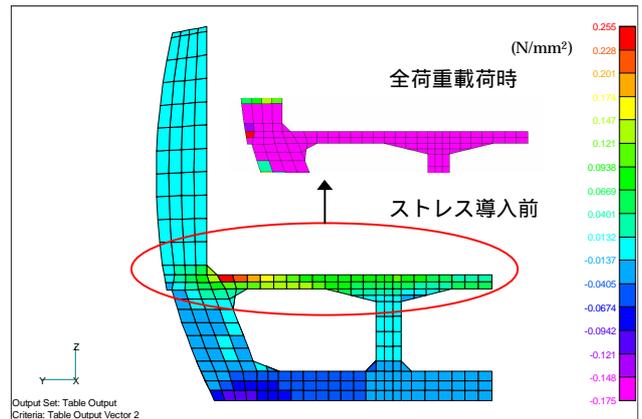


図-38 橋軸直角方向応力度コンター図

(5) たわみ管理計画

本橋梁でのたわみ管理は、実施工工程、支承条件に合わせて行ったはり理論解析によるたわみ計算結果を基本とし計画することとしたが、はり理論解析の妥当性を検証するために FEM 解析を行った。

図-39 に着目断面位置図を、表-9 に棒解析と FEM 解析によるたわみ量比較表を示す。

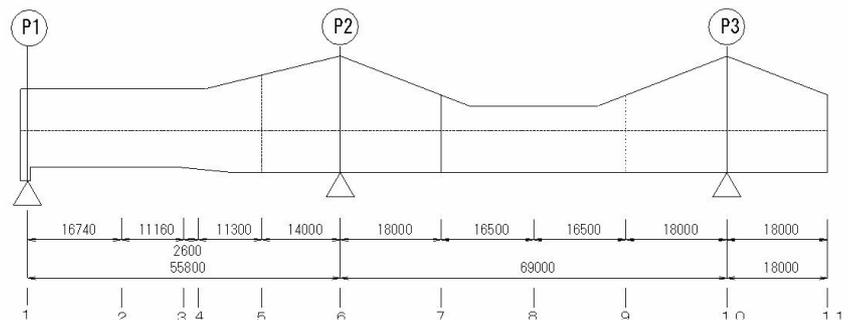


図-39 着目断面位置図

表-9 たわみ量比較表

	着目断面	2	3	5	7	8	9	11
はり理論 解析結果	自重	17.3	22.3	16.6	-32.5	-53.6	-39.9	37.5
	フィンケーブル	0.2	-0.3	-1.0	5.1	10.0	6.7	5.7
	ウェブケーブル	-0.7	-0.9	-0.7	1.5	2.7	2.0	-2.1
	下床版ケーブル	-3.3	-4.3	-3.2	6.7	10.7	8.3	-8.3
	合計	13.5	16.8	11.7	-19.2	-30.2	-22.9	32.8
FEM 解析結果	自重	17.9	22.5	16.0	-32.7	-53.2	-40.0	35.2
	フィンケーブル	0.4	-0.1	-0.8	5.1	9.9	7.1	5.0
	ウェブケーブル	-0.7	-0.9	-0.6	1.3	2.5	1.9	-1.4
	下床版ケーブル	-3.5	-4.4	-3.1	6.3	9.5	7.7	-8.2
	合計	14.1	17.1	11.5	-20.0	-31.3	-23.3	30.6
合計の差		0.6	0.3	-0.2	-0.8	-1.1	-0.4	-2.2

上方たわみ：+，下方たわみ：-（mm）

表-9 に示すとおり，はり理論解析と FEM の解析結果はほぼ一致しており，はり理論解析によるたわみ計算の妥当性が確認できた。

5.まとめ

本橋梁は，PC フィンバック橋本体の第 1～3 施工区分の施工を終え，平成 19 年 7 月の完成を目指し施工中である。その状況を写真-35 に示す。

新幹線の橋梁形式として初めてのフィンバック橋である本橋梁においては，耐久性向上の目的からいくつかの新しい試みもされている。本報告が今後 PC 橋の発展の一助になれば幸いである。

最後に，本橋梁の設計および施工に関し，ご指導，ご協力をいただきました関係者各位に深く感謝し，ここに記して謝意を表する次第です。



写真-35 施工状況(平成 17 年 5 月撮影)