

一般的な適用支間長を超える PC 単純箱桁橋における施工・品質管理について —函館新外環状道路 笹流橋（仮称）での事例—

函館開発建設部 函館道路事務所 第2工務課
ドーピー建設工業株式会社

○坂ノ上有紀
渋谷 誠一
棚田 尚宏

笹流橋（仮称）は、地域高規格道路函館新外環状道路の赤川IC～日吉IC間に位置し、二級河川亀田川水系亀田川を渡河する単純PC一室箱桁橋である。本橋梁は上下分離構造であり、上り線のR橋は支間長65mで国内最大級となる。

大断面箱桁におけるマスコンクリートの施工検討、標準適用支間長を超える固定支保工における主桁のたわみ管理、PC鋼材の緊張・グラウト管理手法について報告する。

キーワード：設計・施工、PC道路橋、マスコンクリート、緊張グラウト

1. はじめに

函館新外環状道路は、函館市内の交通混雑の緩和、交通事故の低減や道南エリアの物流・観光・産業への貢献が期待される函館 IC から函館空港 IC へ至る延長 10km の地域高規格道路である。

笹流橋（仮称：以下笹流橋）は、上下分離構造で L 橋と R 橋の2本の橋梁で構成されている。

本報告は、現在建設中である笹流橋の R 橋（上り線）を例に標準適用支間長を超えた場合のマスコンクリートの施工検討や固定支保工の施工時における主桁のたわみ管理をはじめとした各種の施工管理に関わる取り組みについて報告する。

2. 橋梁概要

本橋梁は、軽量化によるコスト縮減と箱桁内の点検効率を向上させるため、一室箱桁が採用されており、また、斜ウェブを採用することで更なる軽量化を図っている。また、美観性についても陰影等の視覚効果により橋梁の圧迫感の低減を図っている。（図-1・2）

○R橋(上り線)橋梁諸元

橋 長：67.200m
支 間 長：65.000m
有効幅員：12.888m～9.943m
桁 高：3.500m
縦断勾配：2.14737% 横断勾配：3.000%
架設工法：固定式支保工

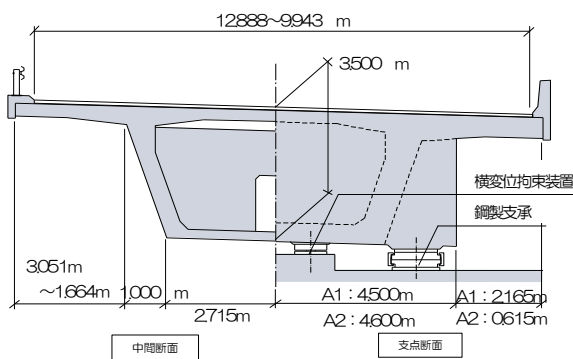


図-1 R橋（上り線）断面図

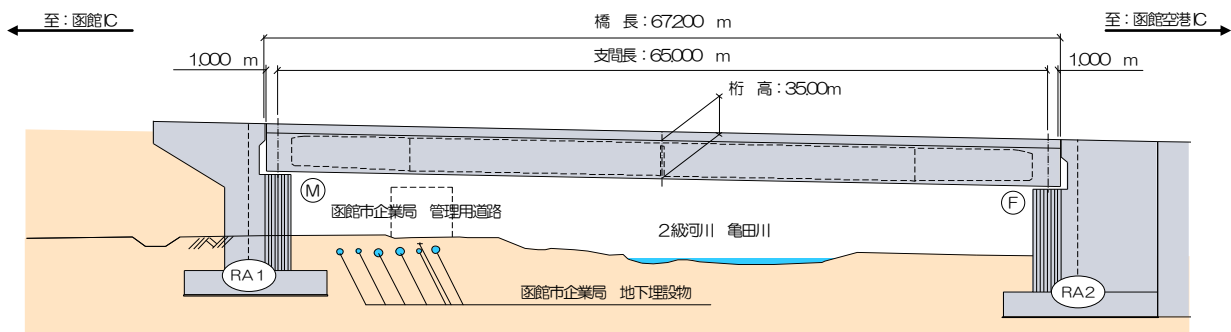


図-2 R橋（上り線）側面図

3. マスコンクリートの検討

本橋の支点横桁部分は、主桁を外側に拡幅し支承装置を配置しており、最大で高さ3.5m、幅9.5m、厚さ2.4mと非常にマッシブな構造となっている。(図-3) そのため、コンクリートの水和熱による温度ひび割れ(内部拘束ひびわれ)の発生が懸念された。

また本橋は、架設支保工を用いての箱桁の施工となるため、主桁ウェブと下床版を含めたU型断面部分と上床版部分を分割し施工を行う。そのため支点横桁および主桁ウェブ部に水平方向に打継ぎ面が発生し、上床版施工時において、既設コンクリートに収縮を拘束されることによる温度ひび割れ(外部拘束ひび割れ)の発生が懸念された。

よって、本工事では、支点部分をモデル化し、一般的な分割位置となる主桁ウェブ部と上床版接合付近で分割した場合を標準案として、三次元温度応力解析を行い、ひび割れ発生確率が高い部位の推定と対策方法について検討および実施した。

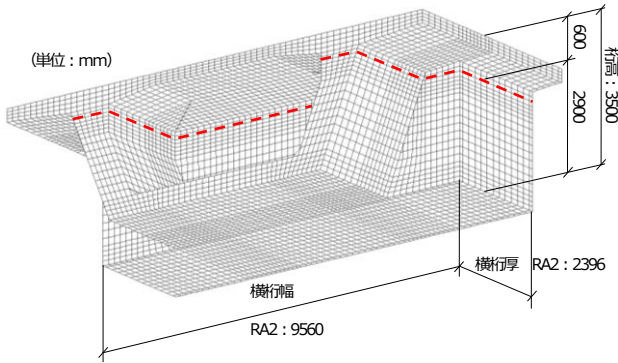


図-3 支点横桁モデル(標準案)

(1) 温度応力解析(標準案)の実施

標準案の場合における温度解析の結果、支点横桁の内部温度は最大87°C(図-4)まで上昇し、解析期間最終時(1次コンクリート打設からから160日間経過時点)において、主桁端部および水平打継ぎ部近傍においてひび割れ指数は、 $I_{cr}=0.81$ (ひび割れ発生確率82%)(図-5)となり温度ひび割れの発生が推定された。

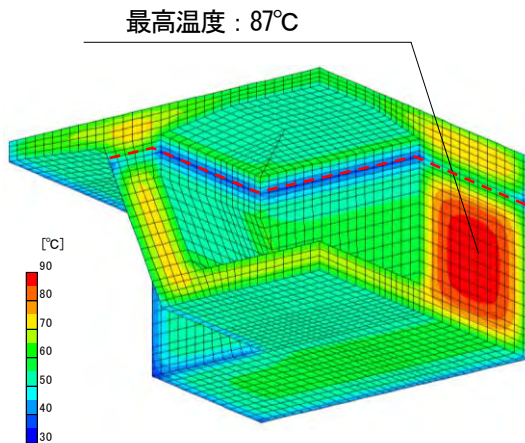


図-4 温度分布(標準案)

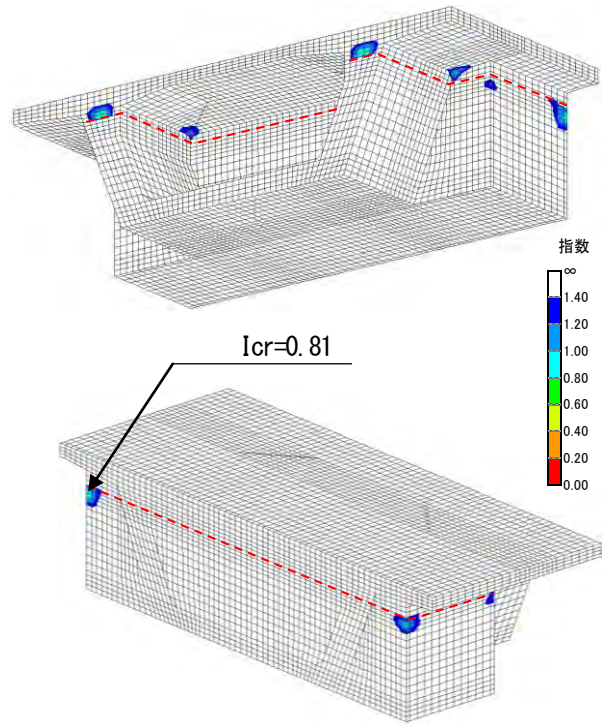


図-5 最小ひび割れ指数の分布(標準案)

(2) ひび割れ対策とその効果の検証

標準案で推定されるひび割れに対して抑制効果のある方法を検討した。

ひび割れ対策方法としては、温度応力増加に繋がるコンクリートの温度上昇を低減することを目的として、1次施工の打設高さを極力小さく($H=1.8m$)(図-6)すると共に、セメント種別を普通ポルトランドセメントに変更することでコンクリートの発熱を抑制した。また、2次施工は、水和熱抑制型の膨張材を使用し、その発熱抑制と膨張効果により打継部に発生する既設コンクリートによる拘束力を低減する方法を採用した。その結果、箱桁内部の断面変化付近にひび割れ指数 $I_{cr}=0.96$ (ひび割れ発生確率 58%)が発生するが、コンクリートの最高温度が低減され、主桁端部のひび割れ指数 $I_{cr}=0.81$ から $I_{cr}=\infty$ (ひび割れ発生確率 0%)に改善される結果となった。(図-7・8)

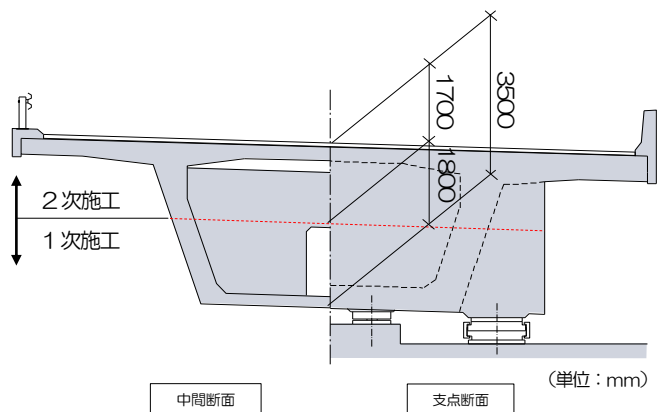


図-6 分割位置図(対策後)

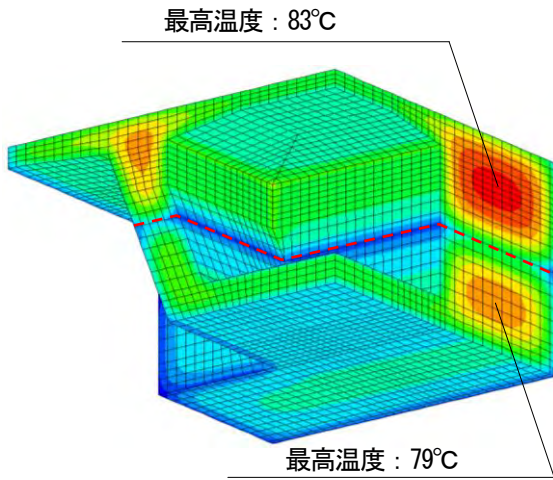


図-7 温度分布（対策後）

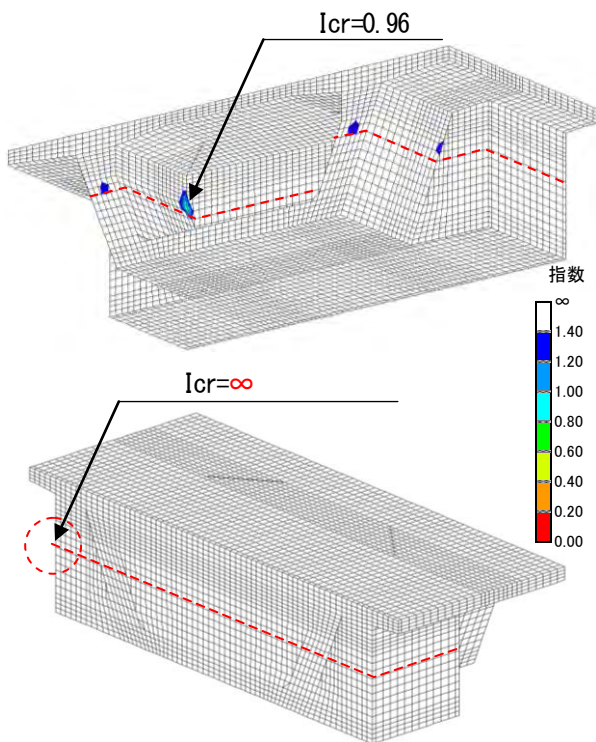


図-8 最小ひび割れ指数の分布（対策後）

(3) 温度測定結果と対策効果

コンクリート打設後においては、解析結果より求められた温度履歴との変動が発生した場合に対応できるようにコンクリート内に温度測定のため、温度感知センサーを使用し支点横桁部の温度履歴を確認しながら施工を行った。

測定したコンクリートの温度履歴と解析値を比較したところ、1次施工時（図-9）はほぼ解析通りの温度履歴となり、2次施工時（図-10）においては、解析値より最高温度が6°C程度低い結果となった。

型枠取り外し後、目視によりコンクリート表面のひび割れ調査を実施した結果、主桁端部および水平打継ぎ部近傍部、および床版表面にひび割れの発生は確認されなかった。また、1次コンクリート打設後 150 日経過段階

においてもコンクリートの表面にひび割れの発生は無く対策による効果があったと考えられる。

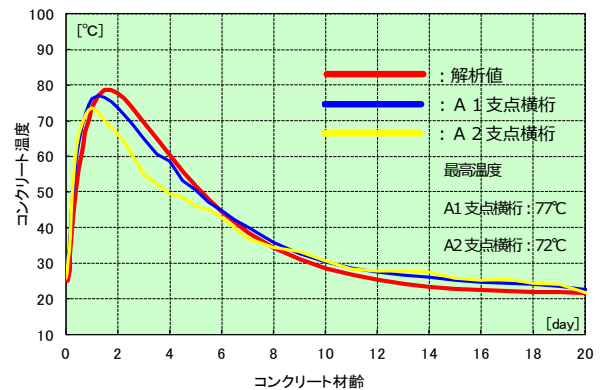


図-9 温度測定結果（1次施工）

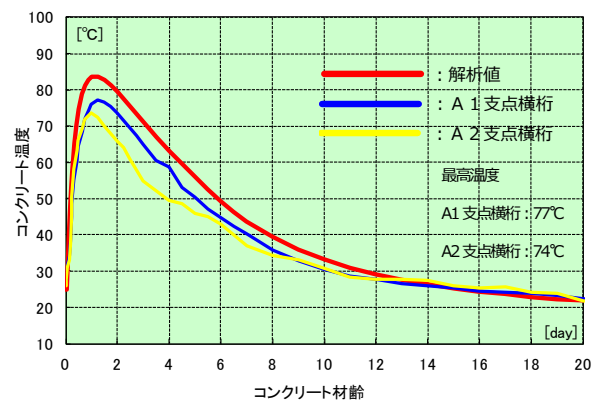


図-10 温度測定結果（2次施工）

4. 固定支保工における主桁のたわみ管理

本橋は、橋梁交差物として河川および函館市企業局管理用道路がある。また、管理用道路地中部には、送水管、導水管、配水本管およびダム管理用光ファイバーケーブルが埋設されている。

現地条件を踏まえ、河川部分は特殊トラス支保工を使用し、管理用道路部分は、橋梁施工中における埋設管の緊急時を想定し、支保工下の桁下空間の確保が可能な H 鋼を使用した開口部支保工を採用している。（図-11）

本橋のような固定支保工により PC 橋を施工する際は 1 回のコンクリート打設により大きな荷重が作用するため施工しながらの高さ調整が困難となる。そのため、施工時に発生する主桁の変位量および支保工の変位量について事前に把握し、必要な上げ越し量を設定し施工を行うことが重要となる。

(1) 主桁に発生する変位量

PC 橋はその製作過程において、コンクリートの自重、プレストレスの影響、橋面荷重およびクリープの影響により変位が生じる。基本的に、支間長が大きいほど主桁の変位量は大きくなる。

本橋における主桁自重等による変位量は、プレストレス導入時には上向きに 40.05mm となり、橋面荷重やク

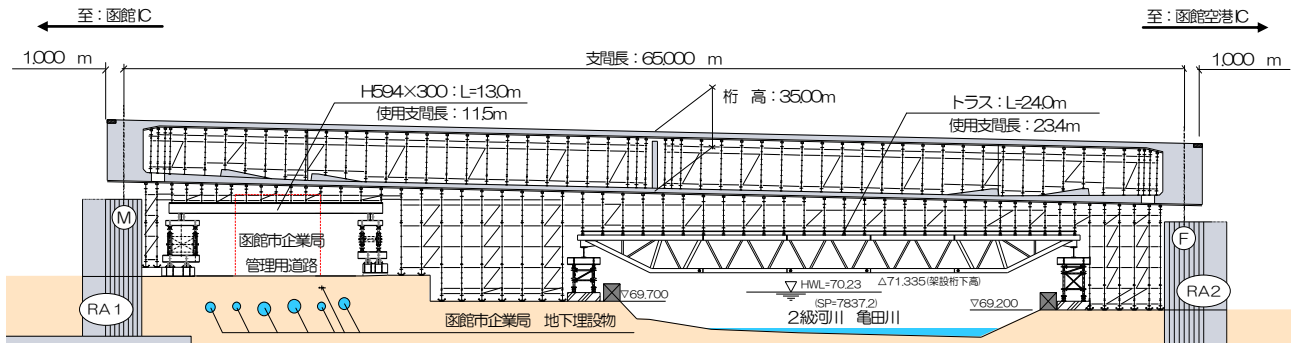


図-11 R橋(上り線)支保工側面図

リーブの影響を含めると最終的には 42.65mm 上向きの変位量の発生が想定された。

よって、クリープの影響と最終的な美観性に配慮し支間中央部において+10mm なるように主桁の上げ越し量を-33mm に設定し施工を行った。

(2) 支保工に発生する変位量

支保工部分においては、トラス、H 鋼およびクサビ式支保工部における下向きの変位量を考慮する。

トラスおよび H 鋼部分の変位量は、検討の結果トラス部分で下向きに 38.1mm、H 鋼部分においては、下向きに 27.1mm 発生する結果となった。特に H 鋼部分は、断面性能特性を最大限に活用した配置支間長 11.5m としているため、変位量は許容値内最大の数値となった。

クサビ式支保工部分については、作用荷重によるなじみ量として一律下向きに 5mm の変位量を想定した。

(3) 上げ越し量の設定と主桁の変位の測定結果

主桁および支保工の変位を考慮した型枠上げ越し量とプレストレス導入後 1 カ月経過段階での主桁の変位量の計画値と測定結果を以下に示す。(図-12)

測定時点においては、箱桁内部に支保工が存置された状態で計画値に対して 11mm 程度低い結果となった。

箱桁内部支保工の荷重を考慮するとほぼ計画通りの結果が得られたと考える。

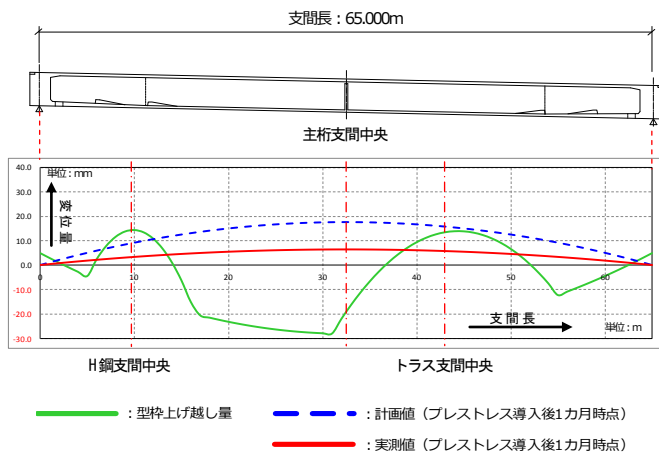


図-12 主桁変位量・上げ越し量

5. PC 鋼材の緊張管理手法について

PC 橋では、設計で定められたプレストレスを PC 部材に導入することで、目標とする設計耐力を保有することが可能となる。そのためプレストレスは最も重要な施工プロセスであり確実な管理が求められる。

本橋においては、一般的な緊張管理図による緊張管理と合わせ以下の方法により管理を実施した。

(1) 磁歪式張力センサーによる緊張の確認

磁歪式張力センサー(図-13)は、円筒形の専用測定器から与えられる強制磁界による磁気的変化を測定することで PC 鋼材に発生している張力を直接計測することが可能で、測定位置を任意で設定することができる。

本橋は、単純構造の橋梁であるため、支間中央部付近に引張応力が発生し、応力的に不利な断面となる。

そのため、支間中央部にセンサーを設置し、設計位置での緊張力を直接計測した。(図-14)

計測の結果(表-1)、設計位置において必要な緊張力の導入が確認でき、従来の緊張管理の妥当性についても確認できた。

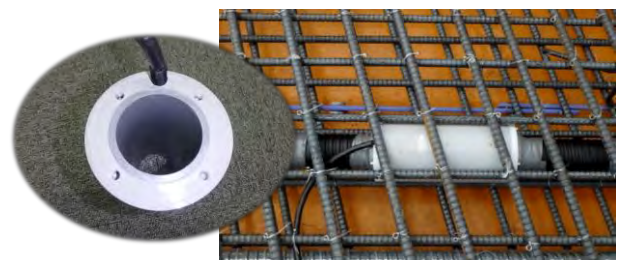


図-13 磁歪式張力センサー



図-14 緊張力測定状況

表-1 支間中央部緊張力測定結果

設置箇所	ケーブル種類	センサー番号	測定日	ジャッキ位置		EMセンサー緊張力 (N/mm ²)	セットロス (%)	設計値 (N/mm ²)	設計値との比較 (%)
				ジャッキ生張力 (MPa)	緊張力 (N/mm ²)				
C1左 (上流)	12S15.2	No.349	2016/9/28	0.0	0	0	-	-	-
				5.0	128	163	-	-	-
				10.0	256	290	-	-	-
				15.0	384	393	-	-	-
				20.0	512	501	-	-	-
				25.0	640	622	-	-	-
				30.0	768	741	-	-	-
				35.0	896	860	-	-	-
				40.0	1024	973	-	-	-
				45.0	1152	1096	-	-	-
				48.5	1241	1178	-	1129.5	104.3%
				定着後	-	1152	2.2%	-	-

(2) 緊張管理システムの活用

緊張端部での緊張管理は、人為的な測定誤差やミスは排除するため、PC 鋼材の伸び量の自動測定器とパソコンを使用したプログラムによる緊張管理システムを使用しながらプレストレス中の緊張管理を実施した。

(図-15)

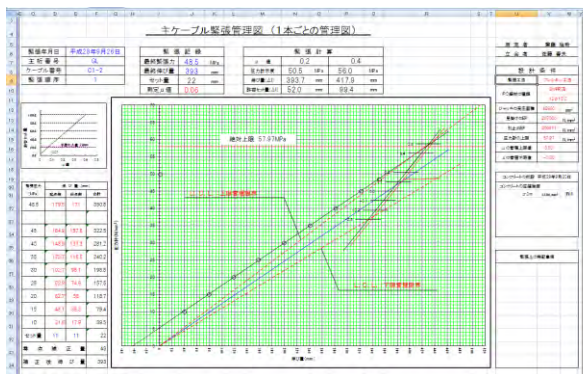


図-15 緊張管理画面

6. PC グラウトの管理手法について

PC グラウトは、その品質や施工の良否により PC 橋の耐久性に大きな影響を与える施工プロセスの一つでありその要求性能としては、PC 鋼材を腐食から保護すること、PC 鋼材と部材コンクリート間の一体性を確保することが規定されている。

本橋においては、PC グラウトに求められる要求性能をより確実なものとするため、以下の施工方法および管理方法により施工を実施した。

(1) プレミックス型グラウト材料の使用

PC グラウトに使用するグラウト材は、シース内の充填性の向上および品質の安定化を目的としており、プレミックス型の超低粘性タイプを使用した。使用したグラウト材は、低水材料結合比においても、高い流動性および優れた充填性能を有しており、単位水量が小さいためグラウト材の緻密化が図れる。また、あらかじめ生産工場ではセメントと混和剤を配合しているため、練混ぜ時に、自動計量給水器を使用し練混ぜ水の計量を行うことで、水結合材比の変動を抑制でき、安定したグラウトの品質が得られた。

(2) 真空グラウト工法によるグラウト注入

真空グラウト工法は、グラウト注入前のダクト内の気

圧を-0.09MPa 以下（真空度 90%以上）に減圧し、注入中もダクト内の未充填部分の減圧状態を保持した状態で施工を行う。ダクト内の空気圧を低くすることにより残留空気の体積が縮小し、グラウトの進行に伴うグラウト圧の上昇および注入完了後の加圧により空隙が減少し、充填度が高くなる。

また、注入位置は先流れが起きないように主桁縦断勾配と PC 鋼材の配置を考慮し、PC 鋼材が最も低い位置から主桁端部に向けてグラウト作業を実施した。

(3) グラウト注入管理システムによる注入管理

PC グラウトの注入管理は、計測ボックスを配置し注入速度、注入量、注入圧力、PC グラウト温度を連続的に計測する。リアルタイムでグラフ化された PC グラウトの注入状況をモニタリングすることで注入作業の進行状況と注入量の確認が可能となった。

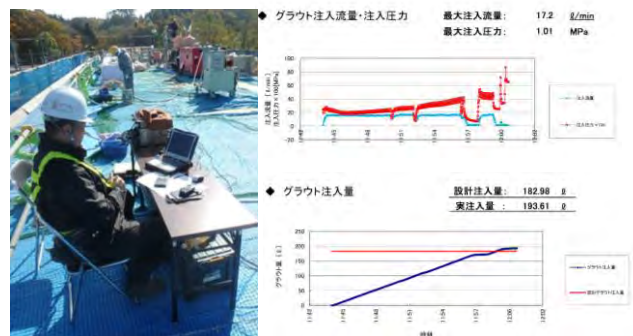


図-16 注入管理システムによる注入管理

(4) グラウト充填感知センサーによる充填確認

グラウトの充填管理は、グラウトホースからの排出状況の目視確認に加え、全ケーブルのダクト内に充填感知センサーを配置し充填確認を行った。

充填感知センサーは、内部に熱電対とヒーターが組み込まれており、温度差に応じた電圧値を出力するものでシース内部で空気と触れた状態とグラウトが接触した状態で出力電圧値が変化することで充填確認が可能となる。出力電圧値は充填前の空気に触れた状態で 7.0mV 以上、PC グラウトと接触した状態で 3.0mV 以下まで変化し、ダクト内部の充填状況についても数値的に確認可能となった。



図-17 グラウト充填確認

7. その他の施工管理

本橋梁の施工にあたっては、構造物の規模が大きく支保工形状も複雑なため、確実な施工を行うため以下の対策を実施している。

(1) コンクリート充填検知センサーによる確認

本橋は、桁高も高く、主桁ウェブも傾斜しているためコンクリート打設時において、下床版隅部の締固め不足による充填不良の発生が懸念された。そのため、締固め検知機能が付加された充填検知センサーを1m間隔で配置し目視管理に加えセンサーによる締固め状況を確認しながらコンクリートの打設を行った。

(図-18・19)

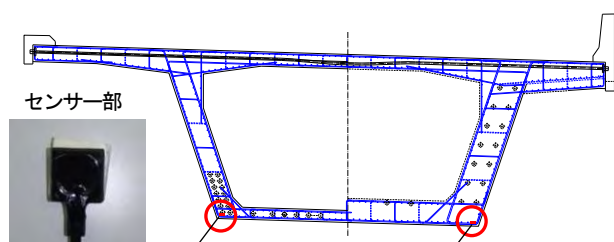


図-18 充填検知センサー配置図

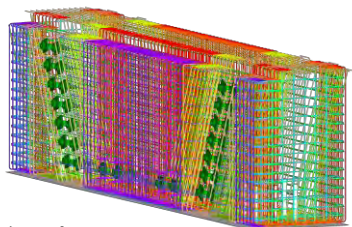


図-19 充填確認

(2) CIMの活用

施工前に支点横桁部および主桁配筋部分をモデル化し、鉄筋およびPCケーブル錯綜部における干渉確認を実施している。また、支保工に使用する特殊トラス部分についてもモデル化を行い作業開始前に予測される危険個所の抽出や注意点、作業手順の確認を実施し、施工時にお

○ 支点横桁部



○ トラス支保工部

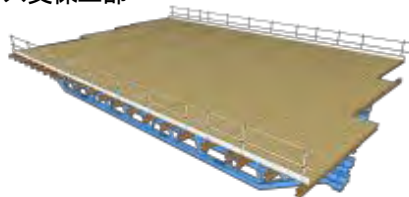


図-20 3Dモデル

ける安全性および施工性の向上を図った。(図-20)

8. まとめ

施工前に懸念された各種事項に関して、施工中測定や計測を行い対策効果や検討結果の有効性について検証を行いながら施工を進めた。

検証を行い以下の項目について確認ができた。

マスコンクリートに対してひび割れ対策を反映した温度解析を行なうことで、事前に最高温度および温度履歴が確認でき、ひび割れ発生確率の高い部位において対策を講じることでひび割れの発生が抑制できた。また、本橋において使用した水和熱抑制型膨張材による温度低減効果および外部拘束に対するひび割れ抑制効果が確認できた。

主桁のたわみ管理については、十分な検討により算出した上げ越し量をもとに施工することで計画通りの変位が発生することが確認できた。

緊張およびPCグラウトの施工管理については、従来の施工管理方法に加え、不可視部分を数値的に確認できる計測機器を使用しての管理を行った。目視で確認することができない部分について数値的に確認できることから従来の施工管理方法の妥当性や重要部における品質の確認ができた。

上記より施工前の懸念事項に対する各種取り組みに対して十分な効果が得られたと考える。

9. おわりに

社会インフラの劣化が生じる原因のその多くが初期の施工不良に起因する場合が多い。そのため、新設構造物の建設に当たっては、施工前の十分な検討と最初に丁寧に工事を行うことが重要になる。

現在R橋の施工が完了し(図-21)、下り線であるL橋の工事を進めているところである。橋梁規模的には、若干小さくなるが、R橋施工で得られた経験を生かしさらに品質の良い橋梁を、安全に対する配慮も行いながら無事故で建設したいと考えている。



図-21 R橋(上り線)全景