

RC ラーメン式橋脚 (PC 梁) 施工報告

— 高速横浜環状南線 PUD24 橋脚 —

東京土木支店	土木工事部	太田有一
東京土木支店	土木工事部	桐谷充彦
東京土木支店	土木技術部	藤岡篤史
東京土木支店	土木工務部	若松賢司

概要：高速横浜環状南線は、横浜の都心部から 10～15km に位置する横浜環状道路の南側区間である。本工事においては、栄 JCT (仮称) にかかる B,C ランプおよび本線の分岐一体構造部分の橋脚を構築した。構造は、上下線一体のラーメン式橋脚で高速道路直下に新設される都市計画道路 戸塚大船線の建築限界を侵さないよう梁高の制約および張出し長が長い PC 梁が採用されている。本稿では、本工事の特色である PC 梁の施工において実施した事項について報告する。

Key Words：PC 梁, パイプクーリング, CIM, EM センサー

1. はじめに

横浜環状南線は、首都圏中央連絡自動車道の一部として横浜市金沢区の横浜横須賀道路 釜利谷 JCT から横浜市戸塚区の国道 1 号戸塚 IC (仮称) に接続する自動車専用道路である。地形は横浜市南部を流下する柏尾川が形成した沖積低地にあたる。地質は連続性の悪い基底砂礫層と陸成の粘土層を主体とし、部分的に砂層および腐植土層が堆積している軟弱な沖積層の下に第四紀前期更新世の上総層群大船層 (泥岩) を基盤としている。なお、上総層群大船層は非常に起伏が大きく、本橋脚の大口径深礎基礎において 10m 程度の標高差が確認されている。本稿では、本工事の特色である PC 梁の施工において実施した事項について報告する。

2. 工事概要

本工事の概要を以下に示し、概要図を図-1, 図-2, 図-3 に示す。

工事名：H30 横環南栄 IC・JCT 下部 (その 4) 工事

工事場所：神奈川県横浜市栄区田谷町地先

発注者：国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所

施工者：株式会社ピーエス三菱 東京土木支店

工期：2018 年 10 月 6 日～2021 年 3 月 31 日

工事内容：RC ラーメン式橋脚 (PC 梁) 1 基

橋脚 (柱) 2 本 □5.0m×4.5m h=9.0m 9.446m

PC 梁 延長 40.7m 梁幅 4.5m 梁高 1.5m～3.0m

PC ケーブル緊張・定着 (SWPR7BL 12S15.2) 28 本

大口径深礎基礎

杭径 8.5m 杭長 11.0m 1 本, 杭径 8.5m 杭長 18.0m 1 本



太田有一



桐谷充彦



藤岡篤史



若松賢司

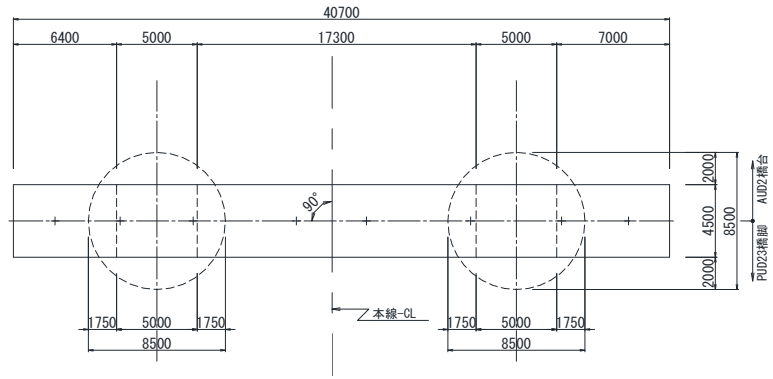


図-1 平面図

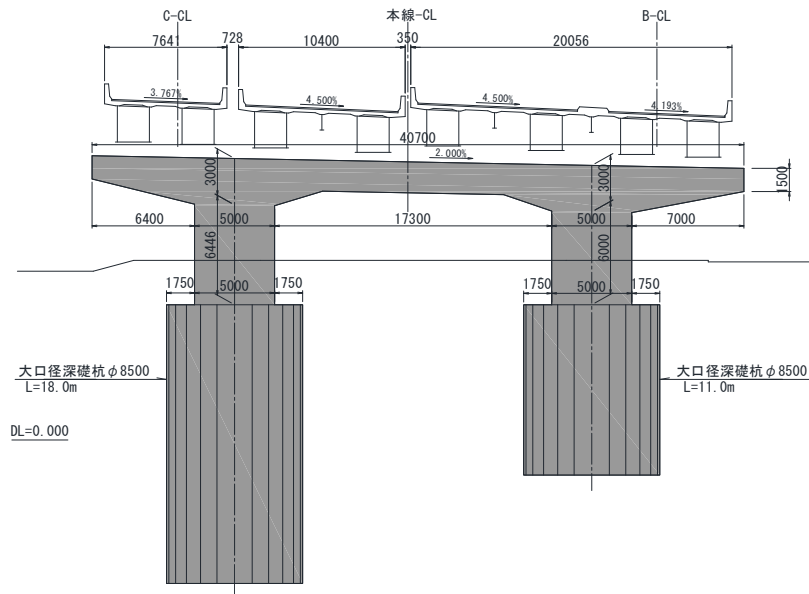


図-2 正面図



図-3 施工箇所

出典：関東地方整備局 横浜国道事務所ホームページ
 (https://www.ktr.mlit.go.jp/yokohama/yokokoku_index022.html)

3. 課題

3.1 課題

本工事では、目的物を構築する上で以下の 4 点を課題として対策を講じることとした。

1. コンクリートのひび割れ抑制。

梁部材断面が3.0m×4.5mのマスキングコンクリートのため、セメントの水和熱によるひび割れ対策およびコンクリート表層を緻密化し供用後のひび割れ抑制を図ることが課題とされた。

2. コンクリートの充填。

梁と橋脚接合部は太径鉄筋とPCケーブルが交錯し、梁内部はPCケーブルと主鉄筋が高密度で多段配置のため、コンクリートの充填・締固めが課題とされた。

3. PC鋼材の緊張管理

緊張端における緊張力管理で設計断面に緊張力不足が生じていないか緊張力の確認を行うことが課題とされた。

4. PC鋼材の緊張力導入精度確保

PC鋼材の緊張力は、シースとの摩擦の影響を受けるため、緊張力導入精度を確保するためにシースを正確な形状で配置し、コンクリート打設で移動することのないよう強固に固定することが課題とされた。

3.2 課題解決に向けての対策方法の決定

上記の課題に対しては以下の対策を取ることとした。

1. コンクリートのひび割れ抑制に関して、

- ・事前の温度解析による「空冷パイプクーリング」を行う。橋脚全体（深礎杭接合部、柱、梁）で実施しているがPC梁部における対応、改善施工の効果を報告する。
- ・PC梁上面の養生を設定水分量に応じて自動散水できる「湿潤養生管理システム」を使用する。

2. コンクリートの充填に関して、

- ・打設箇所に応じたバイブレータを使用。
- ・「充填検知センサー」により過密配筋箇所と緊張端付近シース管下端の充填及び締固度を確認する。
- ・梁部分の鉄筋量を照査し適切なスランプのコンクリートを決定する。

3. PC鋼材の緊張管理に関して

- ・設計断面で緊張力が確実に導入されているか「EMセンサー」を用いて、直接計測する。
- ・最終緊張力の決定は「自動緊張管理システム」を用いて、人為的誤差を排除する。

4. PC鋼材の緊張力導入精度確保に関して

- ・シース管の鉛直方向変化部に工場製作の堅固な固定治具を用いる。
- ・固定治具設置時に3Dスキャナーを用いて設計値の3Dモデルとの照合検査を行う。
- ・CIM (Construction Information Modeling/Management) を用いて、予めPCケーブルと橋脚・梁鉄筋との干渉を照査する。

4. 施工

4.1 コンクリートのひび割れ抑制対策

4.1.1 空冷パイプクーリング

コンクリートのひび割れ抑制に関して、コンクリート内部と外部の温度勾配が緩やかになるよう、梁断面内のPCケーブル挿入孔であるシース管を用いて、空冷パイプクーリングを行った。対策を実施するにあたり、3次元温度応力解析を事前に実施し、数パターンをシミュレートした結果から最適となったものを図-4

に示す。解析条件として、風速を図-5に示す「エアクーリングによる風速と熱伝導率の関係」の提案設計値である3m/秒以上とした結果、通気を5日間実施することでコンクリートの発熱量を低減させられることがわかった。

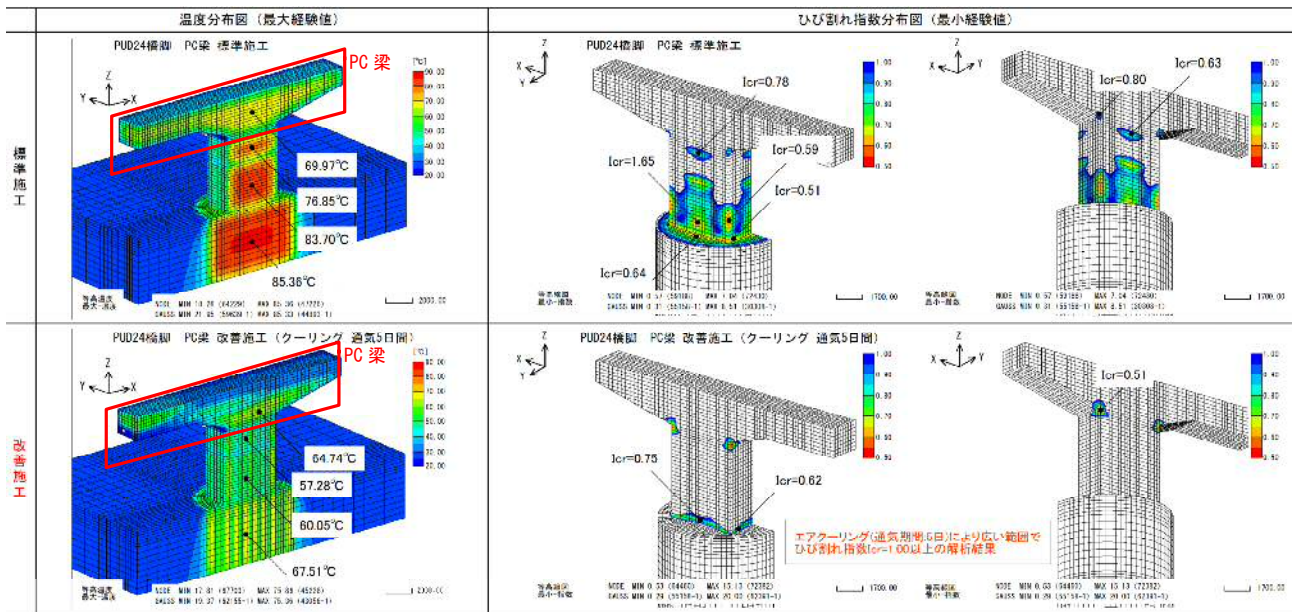


図-4 温度分布図・ひび割れ指数分布図

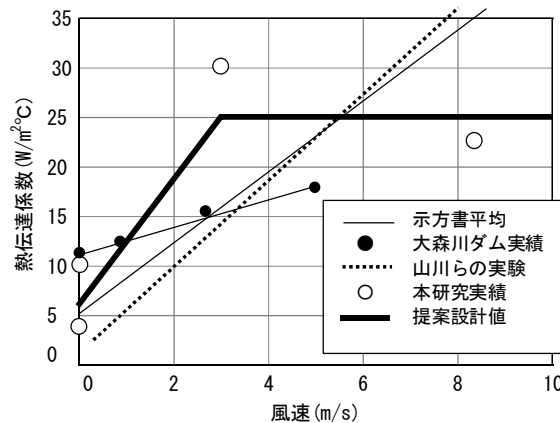


図-5 エアクーリングにおける風速と熱伝達率の関係

出典: 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008年 p.32

クーリングパイプとなるシース管の配置図を図-6に示す。送風機械は、クーリング長が40.3mと長いのでシース管内風速を確保するため、一般的な送風機ではなく、吐出圧力の高い空気圧縮機(5.0m³/秒 0.7MPa)を2台使用した。空冷方法は、空気圧縮機から延長したエアホースに分配器を取付け、φ15mmホースをシース管内に挿入し、連続して送風することにより、シース管内の温度を下げ、コンクリート温度の上昇を抑制するものとした。実施したエアクーリング状況を写真-1に示す。空気圧縮機を使用することで送風温度が外気温より高くなるため、水道水を循環させている水槽タンク内にエアホースを通過させることで温度上昇を抑制した。またシース管の送風口、排気口での風速については、写真-2、写真-3に示す風速計を用いて解析条件の3m/秒以上を満たしていることを確認した。さらに、クーリング時の外気温、送風温度、コンクリート温度については、各種温度の連続監視と異常時の自動アラート通知が可能な「モバイル式温度管理システム」を用いて管理した。これらの履歴グラフを図-7に示す。解析結果において、最大発生温度が標準施工は約70°C、改善施工では64.7°Cであったが、実施工での温度履歴は67.1°Cであった。これは、クーリ

ングパイプ長が長かったため、送風温度が排出口に向かって上昇していったことが原因と考えられる。そのため、今後は躯体規模に応じた管内風速や配管長を考慮する必要があると考えられる。

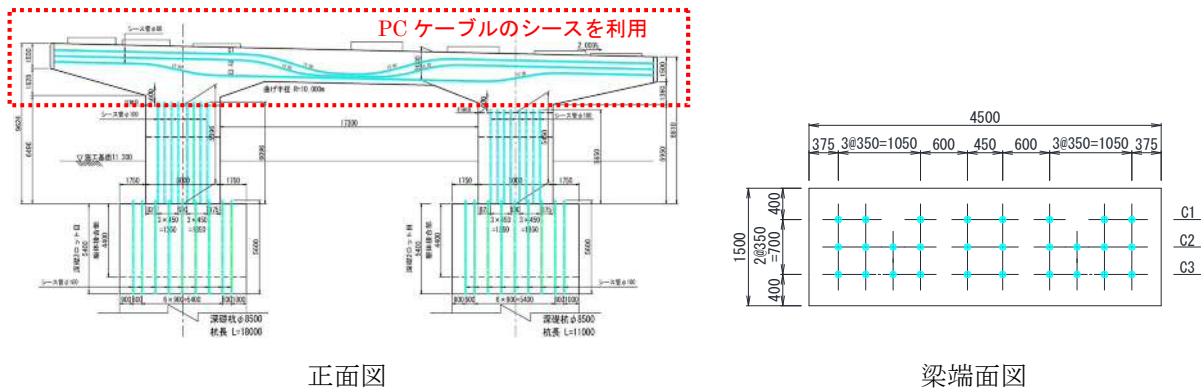


図-6 クーリングパイプ配置図



写真-1 空冷パイプクーリング状況



写真-2 送風速度測定



写真-3 排気速度測定

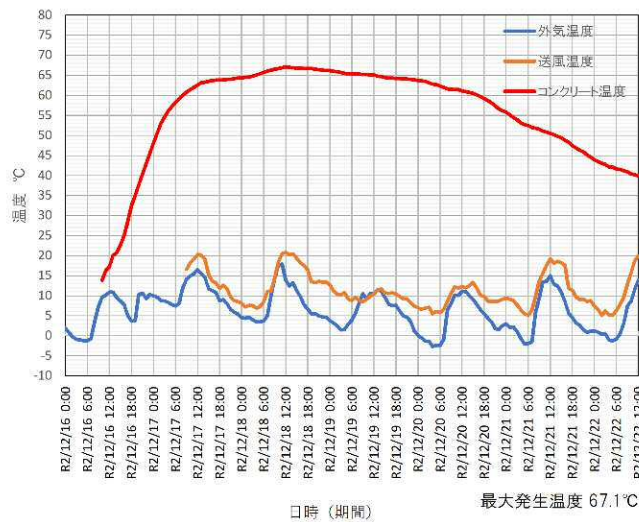


図-7 パイプクーリング温度履歴図

4.1.2 湿潤養生管理システム

PC 梁上面の養生マットが乾燥することのないよう、自動で散水を行える「湿潤養生管理システム」を用いて標準養生期間に 5 日追加した 14 日間養生を実施した。湿潤養生管理システムの概要図を図-8 に示す。散水設備については、工事用水を上水道φ40 から得ていたため、上水道と電磁弁を直結し散水箇所まではφ26 ホースを敷設し、孔空き塩ビ管と接続して散水する設備とした。水分計は、梁上面の上流、中央、下流の 3 箇所に設置し、足場上に設置したパソコン、データロガーと接続した。電磁弁との

無線接続に問題が生じないようにパソコンに付随する親機と電磁弁機の離隔は5m程度とした。散水条件として、梁上面に設置したセンサーの水分量が50%以下になった場合に散水する設定とした。図-9に養生時のセンサー水分量履歴を示す。梁上面には2%縦断勾配があるため均等に養生水が流下散布されており、保水力の高い養生マットを用いたこともあり、乾燥することなく養生を行えた。養生状況を写真-4に示す。水道直結のため通常のタンク方式の場合と比較して水量、水圧ともに安定した供給を行うことができ、また人為的な作業は少なく養生中の管理は容易であった。

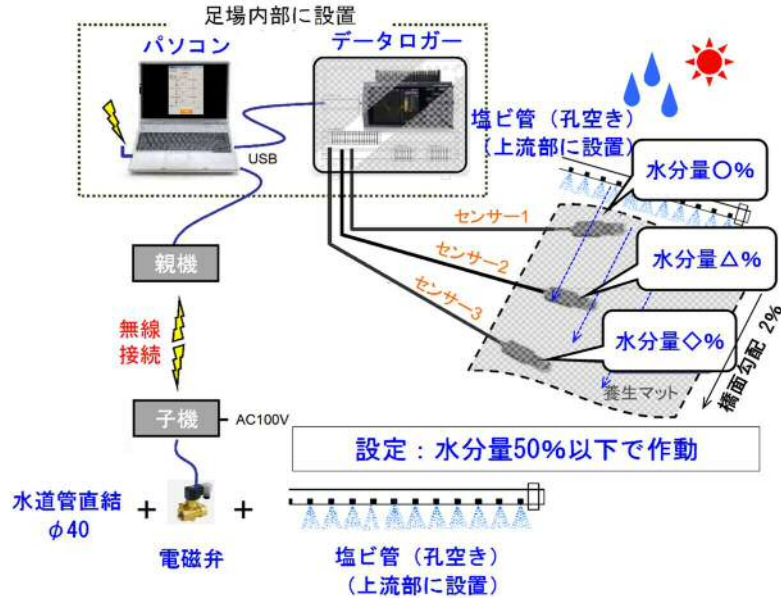


図-8 湿潤養生管理システム概要図

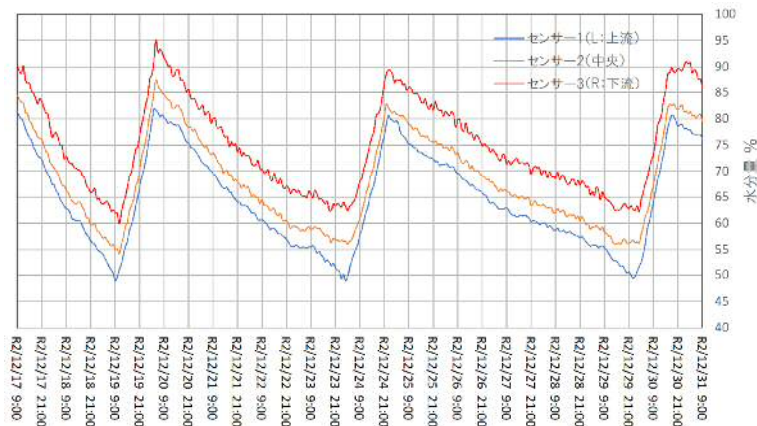


図-9 センサー水分量履歴

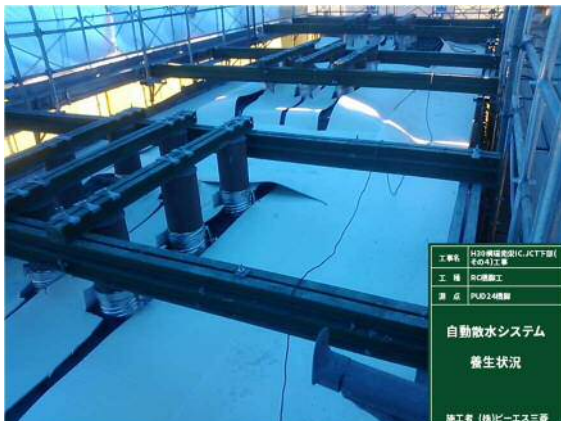


写真-4 養生状況

4.2 コンクリートの充填対策

4.2.1 打設箇所に応じたバイブレータの使用、充填・締固め検知センサーの活用

梁のコンクリート打設に有効なバイブレータを選定した結果を表-1に、外観写真を写真-5に示す。梁本体、PC鋼材配置部および柱接合部については、スパイラルインナーバイブレータと延長パイプ付きバイブレータを主に使い、PC定着部の鉄筋間隔狭隘部には小径強力バイブレータを用いた。また、充填不良や締固め不足が懸念される橋脚柱との接合部の過密配筋箇所とPC鋼材定着部シース管下端に振動検知式の充填検知センサーを設置して充填および締固めを確認した。充填・締固め検知センサー表示概要図を図-10に示す。センサーによる測定の結果、写真-6に示すように、確実に充填（緑色点灯）、締固め（青丸3列点灯）ができており、打設箇所に応じたバイブレータ使用の効果が確認された。今回の梁は、橋脚柱接合部が2箇所あるため、過密配筋箇所が多く、センサーを橋脚柱接合部とシース定着部下面に合計74箇所設置した。そのため、コンクリート打設中の管理確認作業が煩雑であったので、今後はより効果的な位置に配置する計画が必要である。

表-1 バイブレータ選定結果表

種類	使用箇所	性能	効果
スパイラルインナーバイブレータ	梁一般部	螺旋状の凹溝を有し、左右に回転振動を切替可能。右回転上向き推進力でコンクリート上面を締固める。 左回転下方向推進力で隅々までコンクリートを充填し、引上げ時に気泡を上方へ排出。	遠方まで振動が伝播し、鉄筋の周囲や型枠の隅々までコンクリートを充填できる。 打ち重ね箇所のコールドジョイント防止や充填不良、締固め不足の防止に有効。
延長パイプ付バイブレータ	梁と柱接合部、PC鋼材配置部	軽量鋼管パイプ付で斜方向に挿入可能。高所からピンポイントで締固めが可能。	鋼材交錯箇所、PC鋼材配置部、型枠隅角部等の充填・締固めに有効。
小径強力バイブレータ	鋼材間隔狭隘部、型枠隅角部	従来の小径バイブレータに比べ締固め能力が1.5倍。振動部径28mm	PC定着部等の鉄筋間隔狭隘部や型枠隅角部等の充填・締固めに有効。



写真-5 使用バイブレータ外観

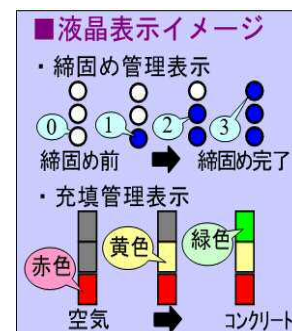


図-10 充填検知センサー表示概要図

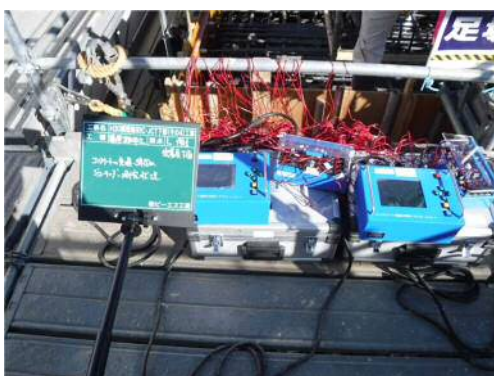


写真-6 充填検知センサー使用状況



4.2.2 適切なスランプの選定

梁部分の鉄筋量を照査した結果、PC梁部の鉄筋量が $212\text{kg}/\text{m}^3$ であった。また、梁上筋が2重で重量が大きくスターラップだけでは配筋形状を保持できないため、山形鋼 L50、L65 を用いて鉄筋架台を組立てて支持させている。(写真-7) そのため、鉄筋間隔狭隘下での定着部付近シース下端と橋脚との接合部のコンクリートの充填が懸念された。そのため、コンクリートのスランプについて、表-2 に示す「プレストレストコンクリート部材における打込み時の最小スランプの目安」を参考に、発注者と協議し、当初の12cm から18cm に変更した。実施工においては、打設時にトラブルの発生はなく、前述の充填検知センサーの結果からコンクリートの充填は問題なく行えた。



写真-7 配筋状況

表-2 プレストレストコンクリート部材における打込み時の最小スランプの目安

出典：土木学会：コンクリート標準示方書（施工編：特殊コンクリート）2017年制定 p.313

部材	平均鉄筋量 ¹⁾	呼び強度	打込みの 最小スランプ
内ケーブルを主体とした PC 上部工の主桁 ³⁾	120kg/m ³ 未満 (RC 換算 ²⁾ 250kg/m ³ 程度未満)	36 または 40	7
	120kg/m ³ 以上 140kg/m ³ 未満 (RC 換算 ²⁾ 250~300kg/m ³ 程度未満)		9
	140kg/m ³ 以上 170kg/m ³ 未満 (RC 換算 ²⁾ 300~350kg/m ³ 程度未満)		12
	170kg/m ³ 以上 200kg/m ³ 未満 (RC 換算 ²⁾ 350~400kg/m ³ 程度未満)		15
	200kg/m ³ 以上 (RC 換算 ²⁾ 400kg/m ³ 程度以上)		個別に検討 ⁴⁾
	170kg/m ³ 未満 (RC 換算 ²⁾ 350kg/m ³ 程度未満)	50	12
	170kg/m ³ 以上 200kg/m ³ 未満 (RC 換算 ²⁾ 350~400kg/m ³ 程度未満)		15
	200kg/m ³ 以上 (RC 換算 ²⁾ 400kg/m ³ 程度以上)		個別に検討 ⁵⁾
T 桁橋の横桁および間詰床版	—	30	7
上記以外の間詰床版	—	30	5
高密度配筋部を含む部材 ⁴⁾	300kg/m ³ 以上 (RC 換算 ²⁾ 500kg/m ³ 程度以上)	—	個別に検討 ⁵⁾

- 1) 平均鉄筋量は、1 回に連続してコンクリートを打ち込む区間の鉄筋量をコンクリートの体積で割った値である（PC 鋼材、シース、定着具を含まない）。
- 2) RC 換算鉄筋量は、鉄筋に加えシースの全断面も鉄筋断面として換算した場合の参考値。
- 3) 主桁には中空床版橋上部工を含む。また PRC 橋では PC 鋼材が減少し、鉄筋量が増加するため、鉄筋量から標準値を定めるのは適切でない場合が多く、本表の対象外とした。
- 4) 高密度配筋部とは、斜張橋や外ケーブル構造の定着部付近等、特に鉄筋量の多い部位をいう。
- 5) PC 橋上部工の平均鉄筋量が $200\text{kg}/\text{m}^3$ を超えることはまれであり、特殊な事例と考えられる。このような場合、施工上の特別工夫を行う、あるいは打込みの最小スランプ 15cm 以上のコンクリートやスランプフロー管理を行うような流動性を有するコンクリートを使用する等の事前検討が必要な場合が多い。

4.3 PC 鋼材の緊張管理対策

4.3.1 EM センサーを用いた緊張力の直接計測および自動緊張管理システムの併用

緊張力が設計断面で正しく導入されているか確認するために「EM センサー」を用いて、設計断面において3段あるケーブルの各段1本目の緊張力を直接計測した。なお、緊張力不足が確認された場合には、最終緊張力の補正を行うこととした。EM センサー測定フローを図-11に示す。EM センサーは、磁気特性と応力の関係から発生応力を直接測定するもので、センサー設置の前後1mについては、鋼製シースでは測定に影響があるためポリエチレンシースとし、図-12に示す設計断面位置に各段1台配置した。EM センサーの外観を写真-8、設置完了を写真-9に示す。施工時の最終緊張力は「自動緊張管理システム」を併用することで、人為的な行為を排除し、緊張管理の精度向上を図った。自動緊張管理システムの概要を図-13に、施工状況を写真-10に示す。EM センサーの測定は、図-14に示すようにジャッキ荷重とEM センサー緊張力の関係を確認し、適否について判断する。結果は、表-3に示すように、適切な緊張・定着の施工によって導入直後の設計断面緊張力が設計値の102.6%~106.5%であった。そのため、再緊張をすることなく、精度の高い緊張管理を行うことができた。必要箇所の応力をピンポイントで容易に計測できたことは、有効であった。また、この結果から、緊張計算値と、自動緊張管理システム+EM センサーの併用による測定結果において、齟齬のないことが確認できた。

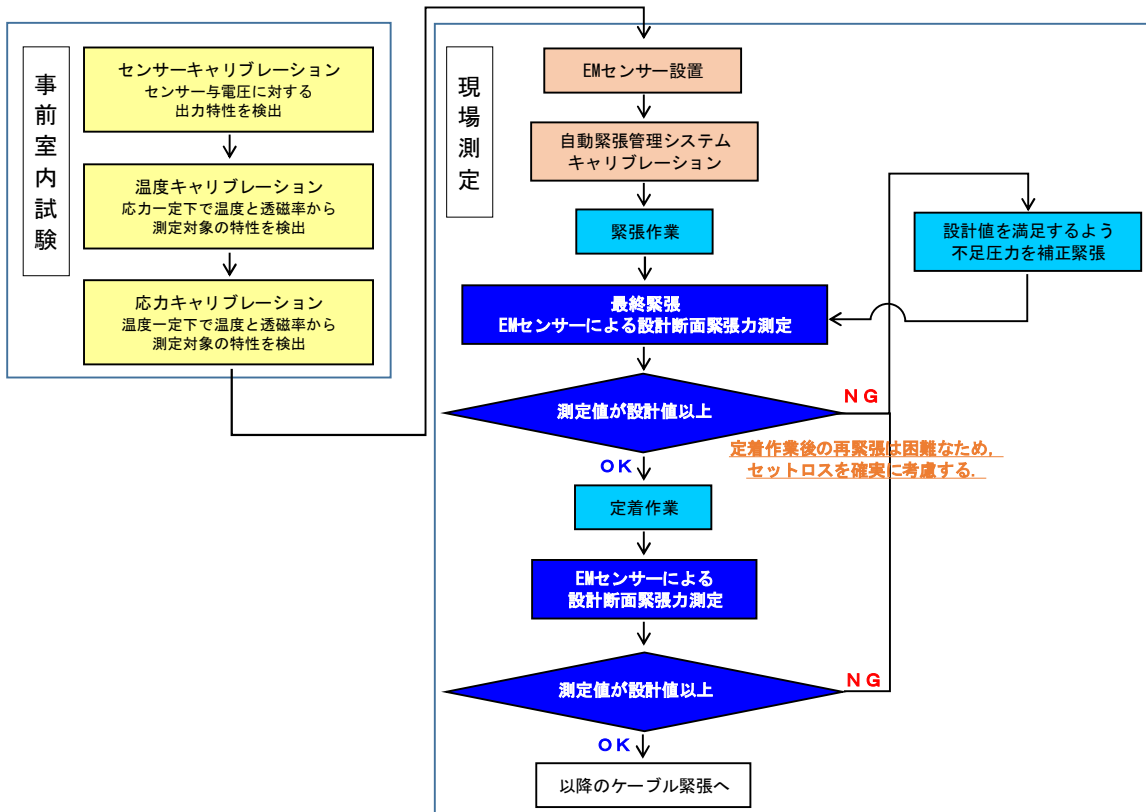


図-11 EM センサー測定フロー

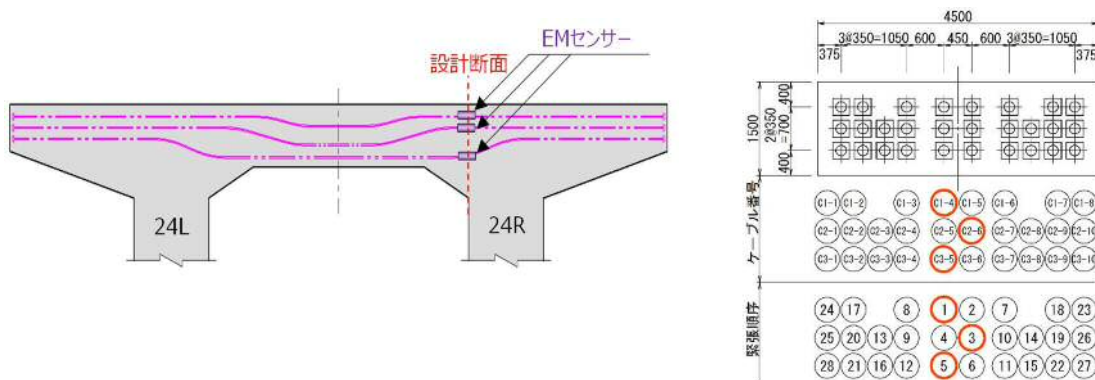


図-12 EM センサー配置計画図



写真-8 EM センサー外観



写真-9 EM センサー設置

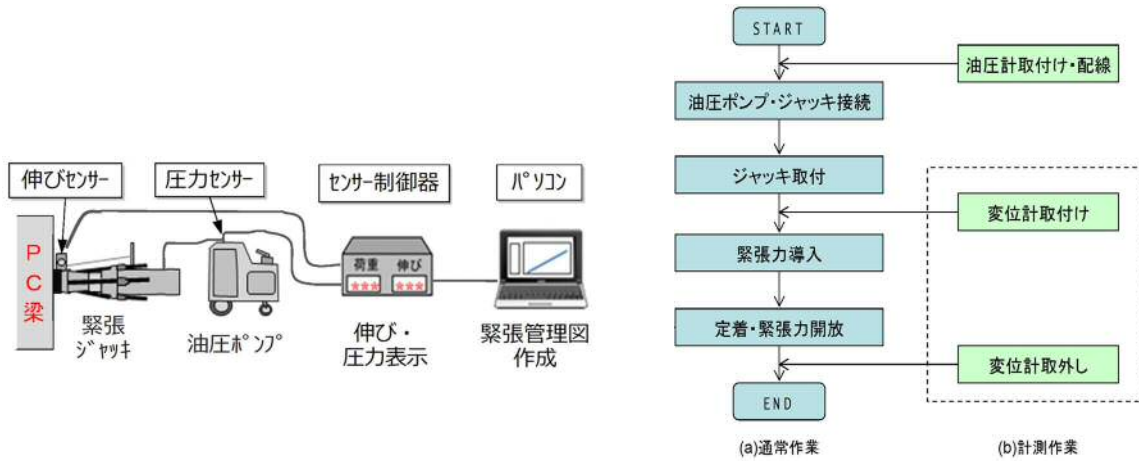


図-13 自動緊張管理システム概要・フロー



写真-10 緊張管理測定状況

ジャッキ位置 ジャッキ読み値 (MPa)	緊張力 (N/mm ²)	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 (%)
0.0	0	0	-	-	-
5.0	128	90	-	-	-
10.0	256	197	-	-	-
15.0	384	302	-	-	-
20.0	512	422	-	-	-
25.0	640	542	-	-	-
30.0	768	672	-	-	-
35.0	896	795	-	-	-
40.0	1024	927	-	-	-
45.0	1152	1056	-	-	-
50.0	1280	1184	-	-	-
55.0	1408	1301	-	1240.0	104.9%
導入直後	-	1205	7.4%	1131.6	106.5%

図-14 ジャッキ荷重と EM センサー 緊張力 (C1-4 ケーブル)

表-3 緊張結果一覧表

ケーブル 名称	ジャッキ位置	設計断面		セット ロス	設計値 との比較
	緊張力 (N/mm ²)	設計緊張力 (N/mm ²)	EM センサー緊 張力 (N/mm ²)		
C1-4	1,408	1,240.0	1,301	-	104.9%
		1,131.6	1,205	7.4%	106.5%
C2-6	1,382	1,240.0	1,251	-	100.9%
		1,128.6	1,158	7.4%	102.6%
C3-5	1,433	1,116.9	1,172	-	104.9%
		1,116.9	1,159	1.1%	103.8%

注) 設計断面の2段書き 上段は最終緊張時 下段は定着・緊張力開放後

4.4 PC 鋼材の緊張力導入精度確保対策

4.4.1 PC 鋼材鉛直方向変化部への固定治具設置

シース管の配置精度確保として、棚筋に加えて、**図-15**に示すように、PC 鋼材の鉛直方向曲げ変化点 24 箇所、シース管支持用異形棒鋼を溶接した工場製作の山形鋼固定治具を設置した。製作した固定治具の形状を**図-16**に示す。**写真-11**に固定治具設置完了、**写真-12**にシース管固定完了を示す。今回は、鉄筋組立に際して、山形鋼による架台を組立ており、固定治具鉛直支持材は架台に溶接固定を行った。施工時においては、縦断変化部が明確であることに加え、断面方向位置もガイドによって明確であったため、シース管作業の効率化が図れた。また、ガイドによって固縛後に移動することがないことも有効であった。

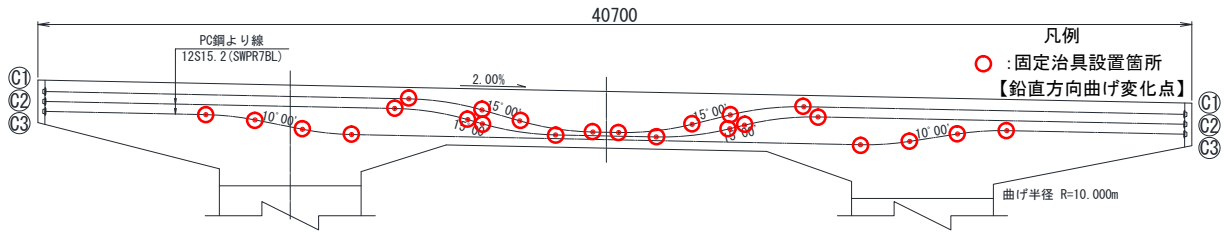


図-15 固定治具設置箇所

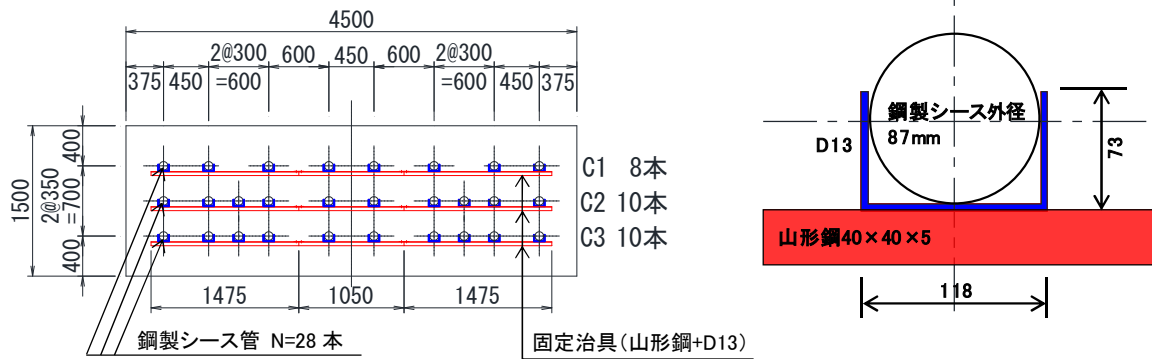


図-16 固定治具製作・設置図

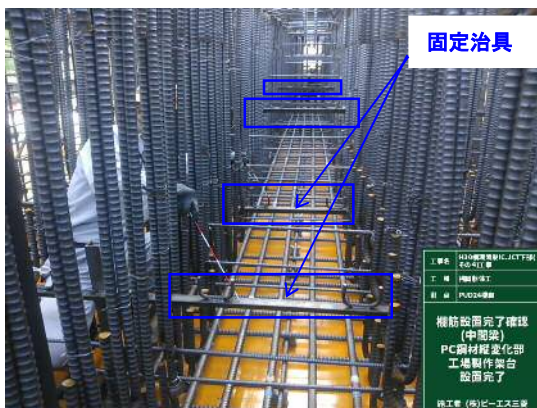


写真-11 固定治具配置完了

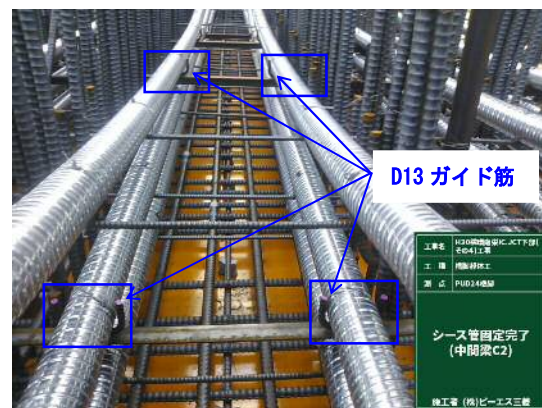


写真-12 シース管固定完了

4.4.2 3D スキャナーを用いた設計値の 3D モデルとの照合検査

PC 鋼材の鉛直方向曲げ変化点に山形鋼にて製作設置した固定治具の高さについて、3次元レーザー測定器 (**写真-13**) により得られる点群データを、設計の PC 鋼材 3D モデルに重ね合わせて照合し、その配置検査を行った。合成図を**図-17**に、配置検査図を**図-18**に示す。照合結果において、±5mm を超えるものが無いことを確認した。問題点としては、PC 梁の鉄筋量が多かったため、3D スキャナーの解析・照査に時間を要した。そのため、今後は、測定対象毎に適切な測定時期や施工手順について、事前に検討する必要がある。



写真-13 測定機械・計測状況

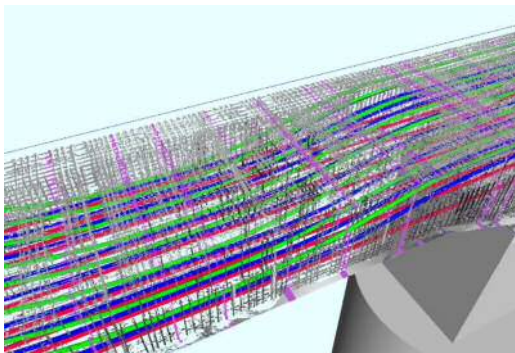


図-17 点群データ・設計 3D モデル合成

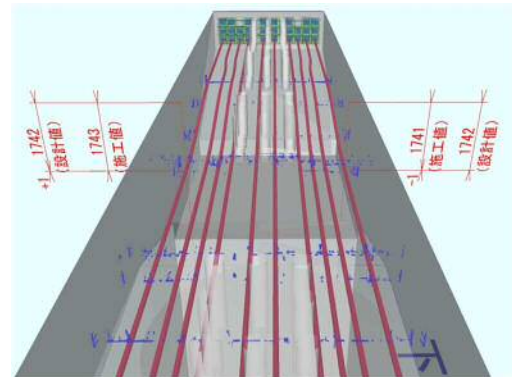


図-18 配置検査図

4.4.3 CIM による PC ケーブルと橋脚・梁鉄筋との干渉照査

本 PC 梁の特徴として、梁長が長く PC ケーブルの緊張力により梁高を小さくし、桁下の車道空間を確保する構造となっているので鉄筋量が多く、橋脚柱部との定着に主鉄筋 D51 を使用しているため PC ケーブル等との取合いが複雑である。そのため、CIM を用いて、シース管と橋脚・梁鉄筋との干渉を図-19 に示す BIM/CIM 活用ガイドライン（案）で定義されるモデル詳細度 400 にて照査し、事前に施工への影響の有無について確認を行った。照査に際して、干渉が確認された場合、鉄筋の移動により対応することとしたが大きな移動（ $\pm\phi$ 以上）を伴う場合、発注者と協議を実施することとした。照査の結果、図-20、図-21 に示すような干渉が橋脚全体で 43 箇所確認されたが、ほとんどが鉄筋径以下の移動であり、鉄筋長の変更が必要なものは、修正設計で鉄筋長と形状の変更を実施した。実施工では、橋脚柱構築時から留意して施工したため、シース組立時に鉄筋との干渉の問題は生じることはなく CIM による照査は有効な手段であった。本橋脚のように太径 D51 鉄筋と PC ケーブルに十分な空き間隔がない配筋において、シース管組立時に干渉が確認された場合、移動対応が非常に困難を極めるため、事前に照査を行うことが有用である。

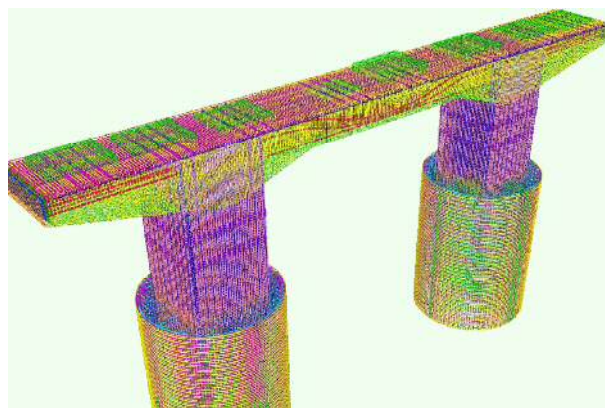


図-19 CIM 鉄筋モデル

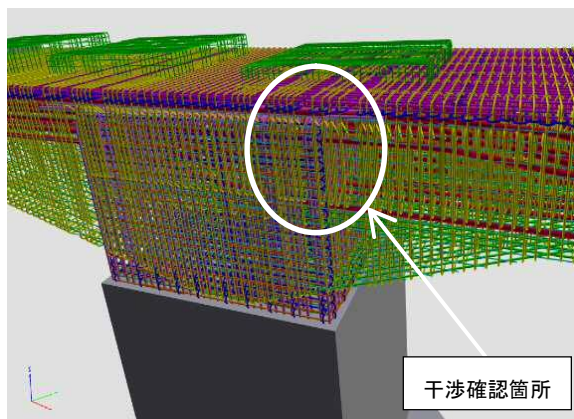


図-20 干渉箇所全体図

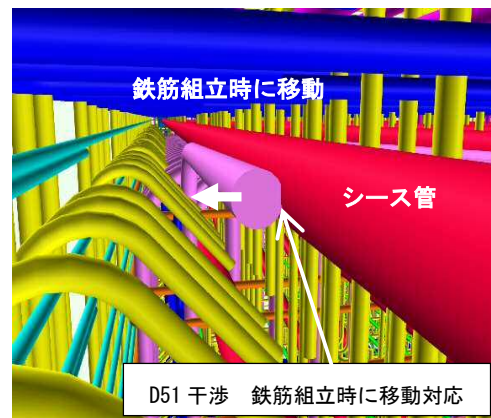


図-21 干渉箇所詳細図

5. まとめ

当社では実績の少ない橋梁下部工における、PC梁の施工上の課題への対策について報告した。ひび割れ対策については、空冷パイプクーリングの実施にあわせて行った温度計測により熱低減効果を確認することができ、施工後のひび割れ調査において、有害なひび割れの発生はなく対策が有効であった。また、PC鋼材の緊張管理については、設計断面での緊張力が担保されていることが確認され、対策は有効であった。今回の空冷パイプクーリングは、クーリングパイプ長が長いため、送風温度が排出口に向かって上昇し、グラウト排気口およびシース管排出口で測定した排気温度は、延長とともに温度が上昇する結果であった。躯体の温度を全体的に低下させるためには、美観上の問題はあるが橋軸方向へのパイプの設置も有効と考えられる。今後は、今回の実施事項を踏まえ、パイプクーリングを行う際のパイプの配置や送风量、設備などに改良を加えて、同種構造物への適用を図っていきたい。



写真-14 PUD24 橋脚全景

謝辞

本工事を施工するにあたり、ご協力を賜りました関係者各位に、この場をおかりして深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編）2017年制定
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）2017年制定
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016年
- 4) 国土交通省：BIM/CIM 活用ガイドライン（案）令和2年3月