

PC15 径間連続箱桁橋の設計・施工

― 東海環状自動車道 ^{し め} 七五三第二高架橋 ―

東京土木支店	土木技術部	下風笑美子
東京土木支店	土木技術部	笛木亮
東京土木支店	土木工事部（名古屋支店駐在）	大谷嘉生
大阪支店	土木工事部	中司和宏

概要：七五三（しめ）第二高架橋は、東海環状自動車道大野神戸（おおのこうど）IC～糸貫 IC（仮称）に位置する PC15 径間連続箱桁橋である。本工事は七五三第二高架橋（内回り線暫定 2 車線）を建設する詳細設計付き工事である。本工事では、隣接工事が同時期の施工であることや一部の下部工が未完了という条件の中で工程順守に課題があった。また、将来の 4 車線化（外回り線施工）を考慮して、本工事で施工する中央分離帯側の張出し床版拡幅部の将来撤去を想定した設計をする必要があった。施工に関しては、施工範囲には 5 本の市道が横断していることに加え、MP81R 橋脚上空近傍には送電線が横断しているため、安全に配慮した施工が求められた。本稿では、これらの課題に対して実施した設計および施工に関する取組みについて報告する。

Key Words：工程順守，2 径間施工，ひび割れ対策，横締め接続具

1. はじめに

七五三第二高架橋は、東海環状自動車道大野神戸 IC～糸貫 IC（仮称）に位置する PC15 径間連続箱桁橋である。この東海環状自動車道は、愛知・岐阜・三重を環状に連結する高規格道路であり、本事業は、中京圏の放射状ネットワークを環状道路で結ぶことで、環状道路内の渋滞緩和、災害に強い道路機能の確保に寄与する。本工事は七五三第二高架橋（内回り線暫定 2 車線）を建設する詳細設計付き工事である。本工事では、隣接工事である大野神戸 IC 側の真桑高架橋や、糸貫 IC 側の七五三第一高架橋が同時期の施工であることに加え、上部工施工開始時において一部下部工施工が完了していない条件の中で工程順守が求められた。このため、当初設計では糸貫 IC 側から 1 径間ごとの片押し施工であった計画を、大野神戸 IC 側から 2 径間ごとの片押し施工に変更して工程を順守した。また、中央分離帯側に拡幅した張出床版部に標識バルコニーや非常駐車帯が設置されるが、将来外回り線施工時に拡幅範囲の撤去を想定した設計をする必要があった。加えて施工範囲の一部には交通量の多い道路や送電線が横断しており、安全に配慮した施工が求められた。

本稿では、工程順守を目的とした設計・施工に対する取組み、将来外回り線施工を考慮した設計、交差施設を考慮した施工時の安全対策について報告する。



下風笑美子



笛木亮



大谷嘉生



中司和宏

2. 工事概要

本橋の工事概要を表-1に、主桁断面図を図-1に、橋梁一般図を図-2に示す。

表-1 橋梁諸元

工事名	東海環状自動車道 七五三第二高架橋 (PC上部工) 工事	
発注者	中日本高速道路株式会社 名古屋支社	
工事場所	岐阜県本巣市七五三～上真桑	
構造形式	PC15径間連続箱桁橋 (固定支保工)	
橋長	555.000m	
支間長	29.600m+7@37.000m+6@38.000m+35.800m	
有効幅員	10.750m (非常駐車帯部 14.000m)	
横断勾配	2.50%	
縦断勾配	0.30%	
PC鋼材	外ケーブル	SWPR7BN 19S15.2
	内ケーブル	SWPR19L 1S28.6
	床版横締め	SWPR19L 1S28.6

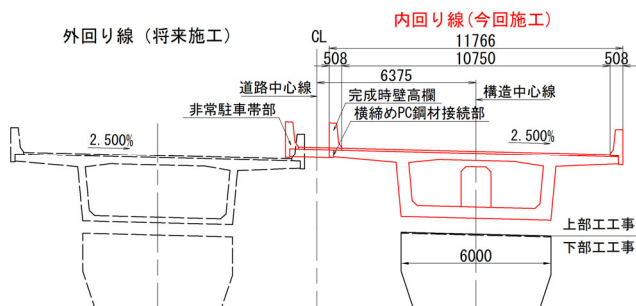


図-1 主桁断面図

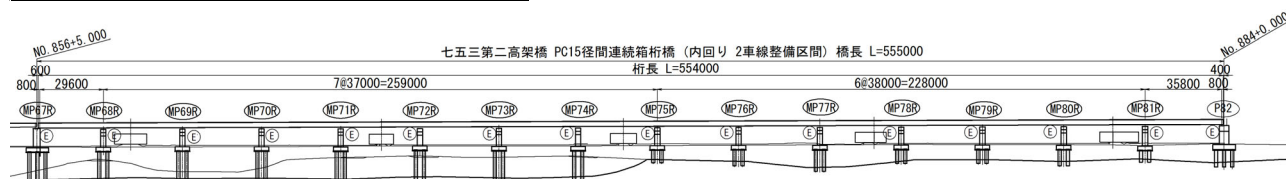


図-2 橋梁一般図

3. 工程順守への取組み

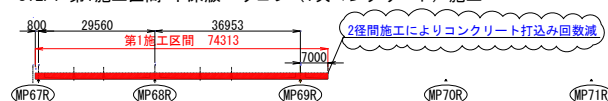
3.1 施工ステップの変更

当初設計では1径間ごとの片押し施工の計画であったが、詳細設計にて以下のとおり施工ステップを変更した。

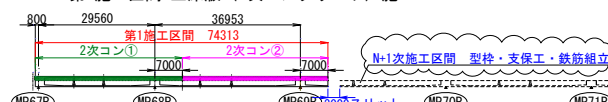
1) 2径間ごとの施工に変更し、コンクリートの打込み回数を減らすことで工程促進を図った。

2) 施工目地に3mのスリットを設ける構造に変更した。N次施工区間の上床版（2次コンクリート）施工時に、次施工区間（N+1次）の下床版・ウェブ（1次コンクリート）の型枠・支保工・鉄筋組立等のラップ施工を可能とし、更なる工程促進を図った。スリット部は2次コンクリートと同時に打込む計画とした。第1施工区間と第2施工区間の施工ステップの例を図-3に示す。

STEP1 第1施工区間 下床版・ウェブ（1次コンクリート）施工



STEP2 第1施工区間 上床版（2次コンクリート）施工



STEP3 第2施工区間 下床版・ウェブ（1次コンクリート）施工



STEP4 第2施工区間 上床版（2次コンクリート）施工



図-3 施工ステップ

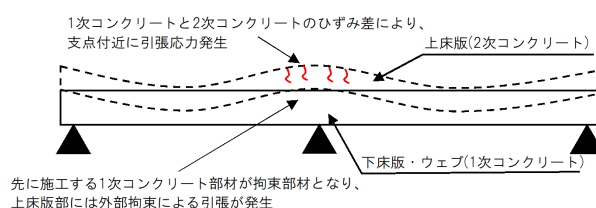


図-4 2径間施工挙動イメージ

PC箱桁橋を上下2分割した場所打ち施工をする場合、ウェブに水平打継目が発生する。このため、1次コンクリートと2次コンクリートの材齢差により、先行施工する下床版・ウェブが拘束部材となり、上床版に引張応力が発生する。加えて、本橋は2径間施工であり、前述の上下層のひずみ差に伴う曲げ変形を2径間中央の中間支点が拘束することにより引張応力が発生する。このことから、中間支点近傍の上床版コンクリートにひび割れが生じる懸念があるため、温度ひずみに着目した温度応力解析を行った（図-4）。

3.2.1 解析モデル

解析モデルは実施工ステップに合わせて橋軸方向に 2 径間以上のモデルを作成し、断面は上下 2 層打ちとした。左右対称断面のため橋軸直角方向は 1/2 モデルとした (図-5)。また、配合については使用プラントで事前に配合試験を行った結果を標準配合とした。本橋は通年施工であるため、夏季施工・冬季施工の 2 ケースを解析し、夏季施工の方が厳しい結果となった。本解析での着目箇所は 2 箇所であり、① 2 径間施工中央の中間支点横桁近傍の上床版、② 先行施工ブロックの拘束を受けるスリット部とした。なお、温度応力解析は 2017 年制定コンクリート標準示方書に準じて行った。

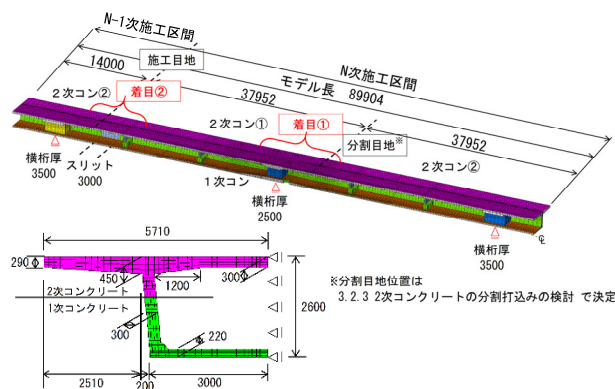


図-5 解析モデル

3.2.2 2 次コンクリート一括打込みの解析結果

事前解析にて 2 次コンクリート一括打込みの解析を行った結果、中間支点近傍の上床版に引張応力が発生した。目標としたひび割れ指数 1.4 以上に対して 1.0 以下になる範囲が橋軸方向に 24m 程度発生する結果になった (図-6)。

ひび割れ指数の算出方法を以下に示す。

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr}$$

ここに $I_{cr}(t)$: ひび割れ指数

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t) \cdots \cdots (1)$$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度

$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート最大主引張応力度

γ_{cr} : ひび割れ発生確率に関する安全係数

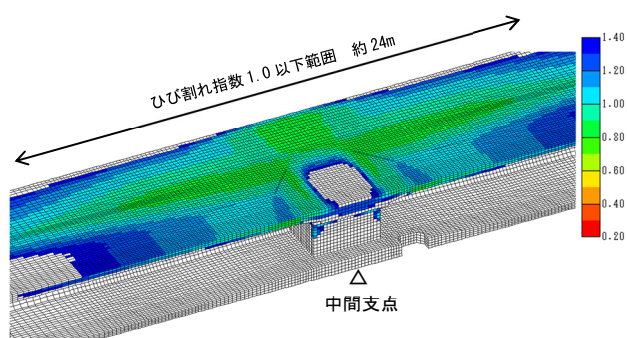


図-6 2 次コンクリート一括打込み (I_{cr} コンター図)

3.2.3 2 次コンクリートの分割打込みの検討

3.2.2 より中間支点近傍に発生する引張応力緩和のため、2 次コンクリート (施工延長約 74m) 施工を橋軸方向に 2 分割とした。橋軸方向に 2 分割するにあたり、分割目地位置を中間支点部の起点側にしたケース (以下、A 案) と終点側にしたケース (以下、B 案) の 2 ケースの解析を行った。どちらも中間支点から起終点側に 7m 位置を目地位置とした。

解析結果より、B 案の終点側目地ケースの方が、A 案に比べ発生する引張応力が小さく、ひび割れ指数も大きくなった (図-7)。A 案は、2 次コンクリートの後打ち部 (2 次コンクリート②) にマッシブな横桁上を含むため、この部位の膨張収縮は 2 次コンクリートの先打ち部 (2 次コンクリート①) に拘束されることになる。A 案の方が B 案に比べ 2 次コンクリート②の打込み延長も長いため、収縮量が大きく、拘束応力も大きくなる。B 案に比べ、中間支点近傍の拘束による引張応力発生速度も速くなるため、ひび割れ指数算出時の式 (1) におけるコンクリート引張強度との関係より、ひび割れ指数低下の要因になったと考える。一方で B 案は、2 次コンクリート①に横桁を含む範囲を施工する。2 次コンクリート①施工時には終点側には部材がないため、上層のみに着目すると自由な膨張収縮変形が可能である。そのため、初期材齢時の発生応力値や速度は A 案に比べて緩やかであり、ひび割れ指数は改善したと考える。よって、2 次コンクリートの目地位置は中間支点より終点側に設けることに決定した。

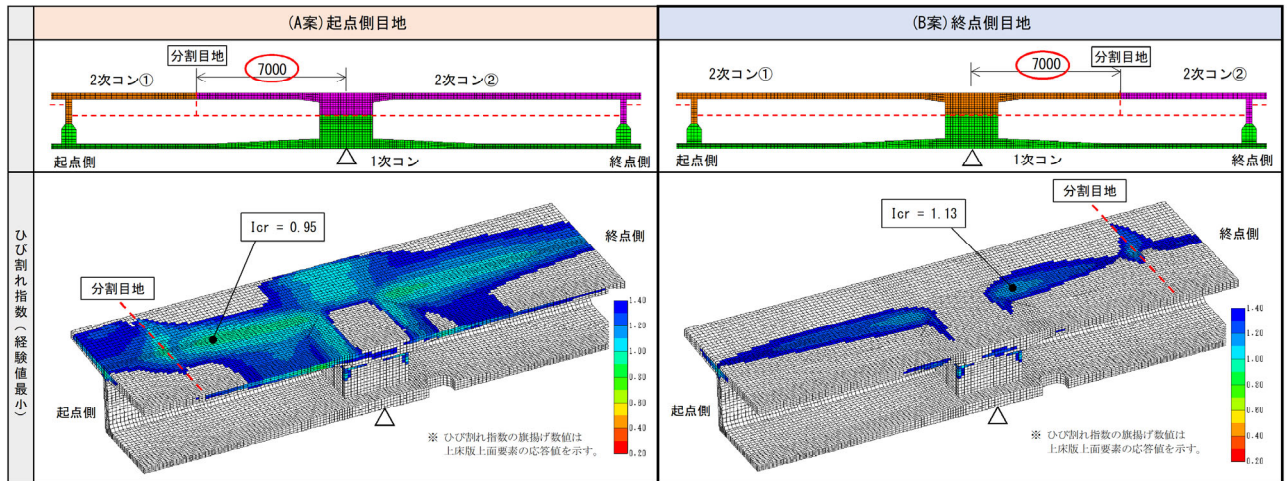


図-7 2次コンクリート目地位置検討結果

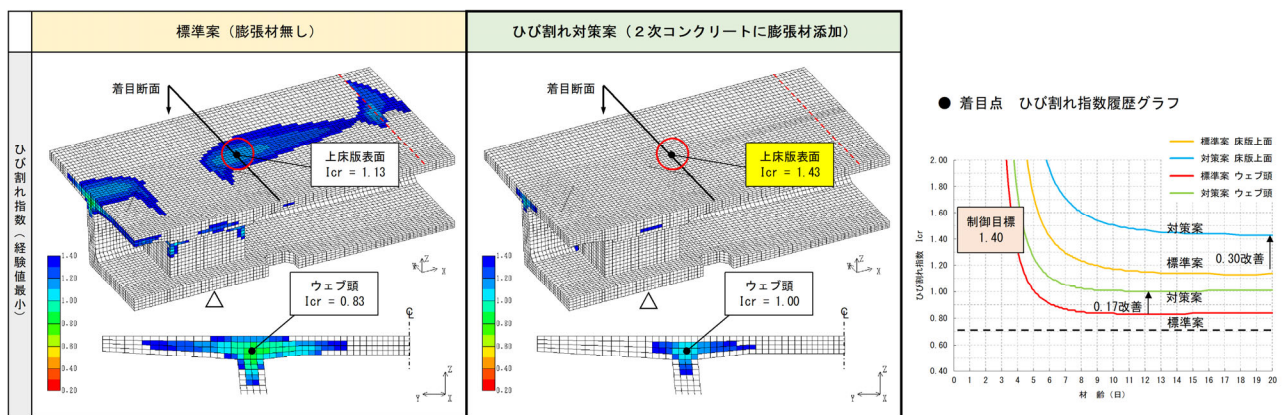


図-8 着目①：2 径間中央の中間支点横析解析結果（夏季）

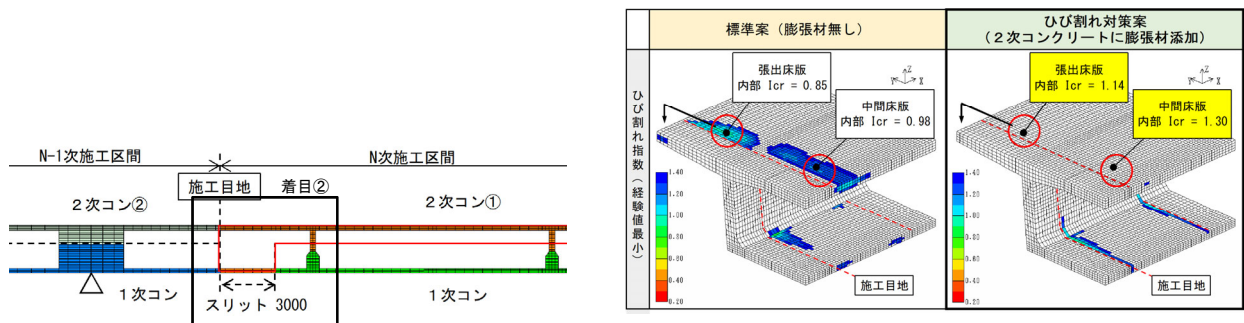


図-9 着目②：スリット部解析結果（夏季）

3.2.4 コンクリートの配合検討

3.2.3 の解析結果より、標準配合の場合は制御目標のひび割れ指数 1.4 を大きく下回るため、ひび割れ対策を行う必要があった。2 次コンクリートに膨張材を添加した再解析を行った結果、着目した 2 箇所においてひび割れ指数が大幅に改善したため、ひび割れ対策として膨張材を添加した配合を採用した（図-8、図-9）。その上で、引張応力発生箇所については必要となる補強鉄筋を配置した。

3.3 外ケーブル定着横桁の検討

当初設計では、全外ケーブル（SWPR7BN 19S15.2）配置であった。中間支点横桁近傍に別途外ケーブル定着用横桁を設置し、外ケーブル定着可能箇所を増やした上で、各径間ごとにたすき掛け配置する PC 鋼材配置計画であった（図-10）。上下床版とマッシブな中間支点横桁および外ケーブル定着用横桁により 4 辺固

定された状態で大容量外ケーブルを両横桁に定着すると、部材厚が薄い上下床版に引張応力が発生し、4辺固定に起因するひび割れの発生が懸念された。このため、外ケーブル定着用横桁を設置しない構造が求められた。

外ケーブル定着用横桁を設置しない計画の場合、定着スペースが中間支点横桁に限られるため、配置可能な外ケーブル本数が減少し、所定のプレストレスを導入することができない。このため、2径間連続外ケーブル配置を採用した(図-10)。しかしながら、外ケーブルの配置を当初計画の外ケーブル定着用横桁と中間支点横桁に分散して定着する配置から、中間支点横桁に集中して定着する配置に変更したため、中間横桁の定着部付近の断面に有効なプレストレスを導入することができず、プレストレスが不足する結果となった。このため、必要とされるプレストレスを確保するため、プレグラウト PC 鋼材(SWPR19L 1S28.6)を追加採用した(図-11、図-12)。

プレグラウト PC 鋼材は、図-11、図-12 に示す通り、1次コンクリートの打込み時点から緊張までの期間を緊張可能日数として管理する必要がある。また、打込み後のコンクリート温度から緊張可能日数が決まる(表-2)。本工事では、1次コンクリートの打込みから鋼材緊張まで約40日程度であった。このため、上述3.2で行った温度解析の温度履歴を使用し、プレグラウト PC 鋼材の配置から緊張までの工程を緊張可能日数以内で行うことができるか事前に検討を行った。なお、プレグラウト PC 鋼材は湿気硬化型を使用する。

夏季施工を想定した温度履歴を使用して検討した結果、解析上最高温度+10℃においても緊張可能日数に収まることが確認できた(表-3)。実施工でコンクリート温度を計測し、解析結果と乖離が無いことを確認した上でプレグラウト PC 鋼材の緊張を無事行うことができた。

表-2 湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材適用条件¹⁾

納入後の温度条件	納入から打設までの期間	打設後の最高温度	常温まで低下する日数	打設後の緊張可能日数	チェック欄
最高温度 26℃～40℃ (夏期)	1ヶ月以内	75℃を超え95℃以下	打設16日以内 ^{※1}	30日以内	
		45℃を超え75℃以下	打設16日以内 ^{※1}	45日以内	
		45℃以下	打設3日以内 ^{※1}	60日以内	
最高温度 16℃～25℃ (春秋期)	1ヶ月以内	75℃を超え95℃以下	打設16日以内 ^{※1}	45日以内	
		45℃を超え75℃以下	打設16日以内 ^{※1}	60日以内	
		45℃以下	打設3日以内 ^{※1}	90日以内	
最高温度 15℃以下 (冬期)	1ヶ月以内	75℃を超え95℃以下	打設16日以内 ^{※1}	60日以内	
		45℃を超え75℃以下	打設16日以内 ^{※1}	75日以内	
		45℃以下	打設3日以内 ^{※1}	110日以内	

※1) コンクリート打設後常温まで低下した後は30℃を一定とした。

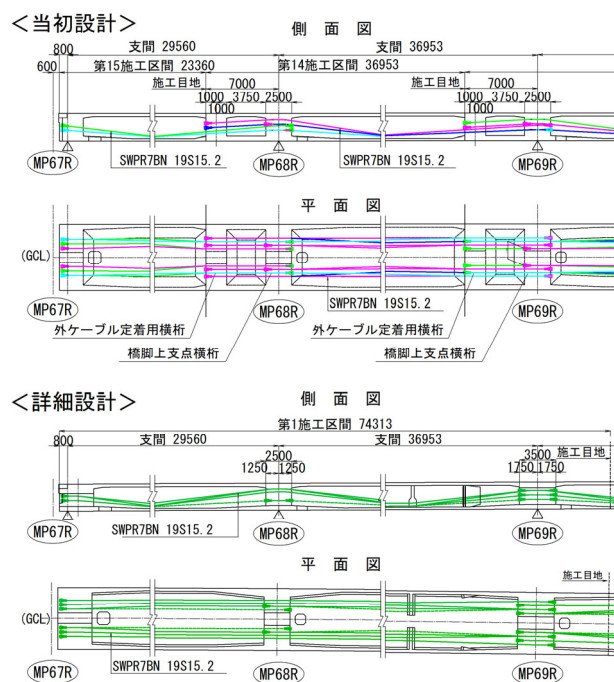


図-10 外ケーブル配置

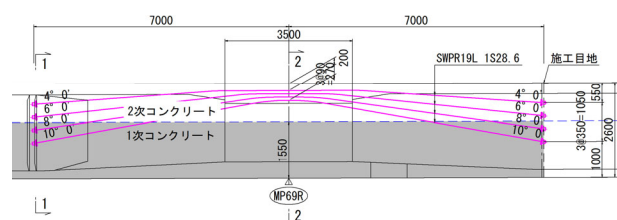


図-11 支点上プレグラウト PC 鋼材配置(側面図)

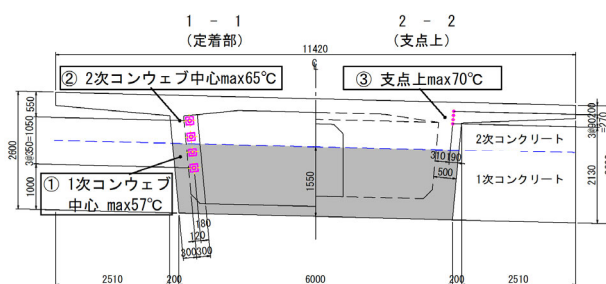


図-12 支点上プレグラウト PC 鋼材配置 (断面図)

表-3 プレグラウト PC 鋼材緊張可能日数検討結果

	プレグラウトPC鋼材緊張可能日数(打設日からの日数)		
	①1次コンウェブ中心 (定着突起側)	②2次コンウェブ中心 (施工目地側)	③2次コン支点上 ウェブ中心
温度解析の最高温度	57℃	65℃	70℃
温度履歴	50日以内	50日以内	50日以内
温度履歴+10℃	40日以内	30日以内	30日以内

3.4 コンクリートの打込み

本橋は全径間場所打ち施工である。近隣に生コンプラントは2工場存在するが、東海環状自動車道対象工事が同時期に多数行われることから、雨天等による打込み時期の調整が困難であることが予測された。このため、打込み箇所を対象にあらかじめ橋梁上部工側に大型屋根・シートを設置し、その中に配管を敷設してコンクリートの打込み箇所まで圧送する計画とした。この結果、雨天の場合でも予定通りにコンクリートの打込みができ、工程順守に繋げることができた（写真-1、写真-2）。



写真-1 屋根・シート設置

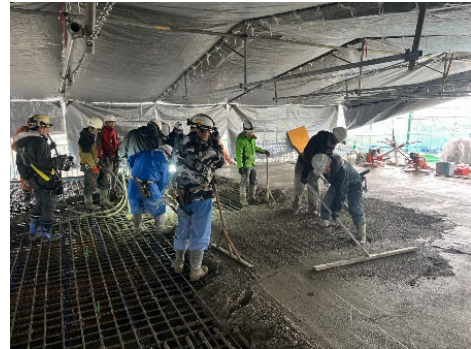


写真-2 コンクリート施工

4. 将来外回り線施工を考慮した設計

4.1 非常駐車帯部床版横締め構造

本工事は内回り線（暫定2車線）の施工であり、将来外回り線を施工する計画である。暫定2車線供用時は、非常駐車帯を中央分離帯側に拡幅して設置するが、将来外回り線を施工する際は拡幅させた非常駐車帯やバルコニーを撤去する必要がある。このため、非常駐車帯部の将来撤去に配慮し、床版横締めは非常駐車帯との目地部に接続具を配置してプレストレスを導入する計画とした（図-13、図-14）。

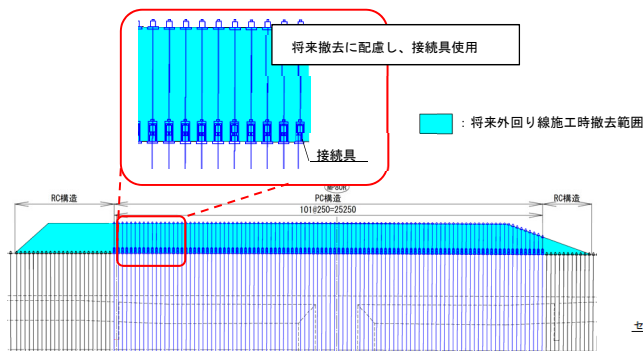


図-13 非常駐車帯将来撤去範囲(平面図)

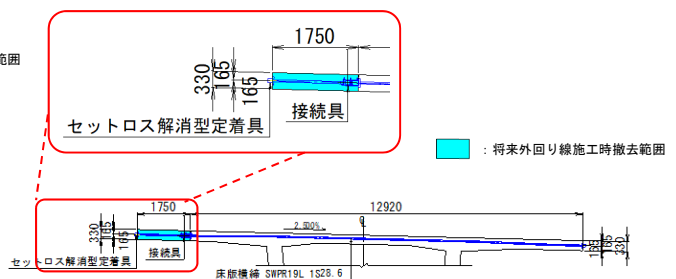


図-14 非常駐車帯将来撤去範囲(断面図)

4.2 接続具解体確認試験

4.2.1 試験概要

接続具カップラーを使用した非常駐車帯を将来撤去する際、接続具を正常に取り外すことが求められる。接続具カップラーは通常接続後、空隙部にプレグラウト樹脂を充填するため、カップラースリーブおよびねじ部にプレグラウト樹脂が付着して硬化した場合、解体が非常に困難になることが予測された。このため、将来の接続具解体が適切に行えるか事前に確認試験を行った。充填材の代替案として、解体可能型樹脂を用いた接続具についても解体確認試験を行った。解体可能型樹脂は常温硬化型の二液性ポリウレタン樹脂であり、塩水噴霧試験にて耐食性が確認された材料である。硬化後も柔らかさを保ち、充填性に加え、防水・防湿・防食効果があることが特徴である。

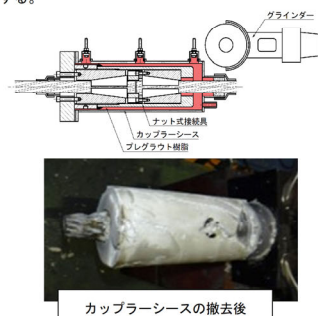
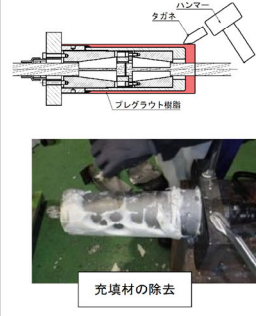
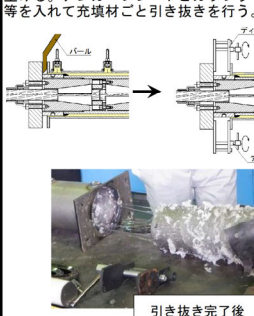
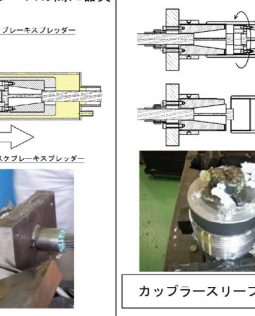
4.2.2 試験結果

試験の結果、充填材の除去と部品の解体確認試験においては、プレグラウト樹脂も解体可能型樹脂も判定基準(表-4)を満足したが、プレグラウト樹脂については解体作業に1体当たり約5時間を要した。硬化した樹脂によりカップラーシースの撤去およびカップラースリーブの解体に時間がかかり、作業性に劣る結果となった。一方で、解体可能型樹脂の解体時間は1体当たり約40分であった。解体可能型樹脂のカップラーシースは、支圧板から反力を取り、充填材ごと引抜くことで撤去が可能であり、これによりカップラースリーブも容易に取り外しができ、作業性に優れる結果になった。解体作業の優位性を考慮し、充填材は解体可能型樹脂が採用された(表-5)。

表-4 判定基準

試験項目	判定基準	参照規格
充填材の除去と部品の取り換え	充填材の除去が可能で一次施工側グリッパとナット以外の取り換えが可能なこと	—

表-5 接続具解体確認試験

CASE1充填材【プレグラウト樹脂】	CASE2充填材【解体可能型樹脂】
①カップラーシース撤去 グラインダーでカップラーシースに切り込みを入れた後、パールを使用してカップラーシースを撤去する。  カップラーシースの撤去後 ②充填材解体 タガネ等を用いて充填材の解体を行う。  充填材の除去 解体時間約5時間/体 作業性：△	①カップラーシース撤去 カップラーシースを固定するボルトを取り外し、アンカープレートとカップラーシースの間にパールを入れて隙間を空ける。アンカープレートとカップラーシースの間に器具等を入れて充填材ごと引き抜きを行う。  引き抜き完了後 ②充填材解体 大型のバイブレンチ等を用いてカップラースリーブを取り外す。  カップラースリーブの取り外し後 解体時間約40分/体 作業性：◎

4.3 ナット式グリッパの採用

床版横締め用の定着具には通常くさび型定着具が用いられ、セットによる影響により緊張力が減少する。上記 4.1 のとおり、非常駐車帯の床版横締めは本線部範囲を緊張した後、接続具を用いて中央分離帯側から片側緊張する。接続するケーブル長が 1750mm と短い非常駐車帯側では、セットによるプレストレス減少の影響が固定端までおよび、プレストレス導入効果が本線部と比較して大きく低減する(図-15)。一方、本線部においてはプレストレス導入効果を考え、交互片引きとした。その際、中央分離帯側張出床版付根部において、非常駐車帯設置時の上縁引張制限値を満足するように高いプレストレスが必要となる。加えて、将来非常駐車帯撤去後の設計においては、同じ張出床版付根部において下縁引張(オーバープレストレス)が発生しないようにも配慮して、ケーブル配置を行う必要がある(図-16)。

上記条件を考慮して検討を行った。くさび型定着具を使用した場合、張出床版付根および接続部の上縁引張に対して SWPR19L 1S28.6 を最小定着間隔 250mm で配置してもプレストレス力不足により制限値を満足できなかった。これ以上ケーブル配置本数を

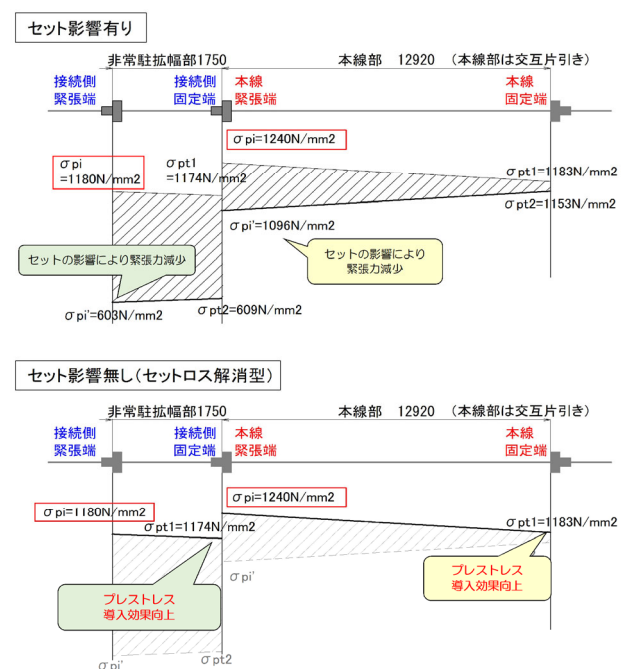


図-15 横方向のセットロスの影響

増やすことは困難であるため、セットロス補正が可能な専用のナット式グリップと専用接続具（セットロス解消型）を採用してプレストレス導入効果を高め、制限値を満足させた。加えて、ケーブル配置形状については将来非常駐車帯撤去後も制限値を満足できる形状に決定した。

ナット式グリップは、セット量による応力損失を補正するための定着具であり、一旦緊張・定着したケーブルをラムチェアを用いて再緊張し、ナットを締め込むことにより、セットロスを補正することができる（図-17）。これにより、床版横締め緊張力を低減することなくプレストレス導入効果を高めることができる。接続部においてナット式グリップを使用する場合、グリップ寸法がねじ切り設置分大きくする必要があるため、専用の接続カップラーを使用した。

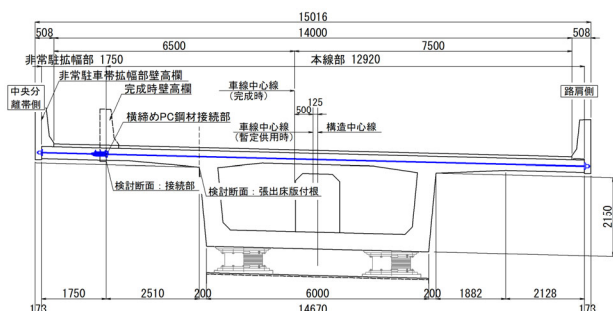


図-16 非常駐車帯部断面図

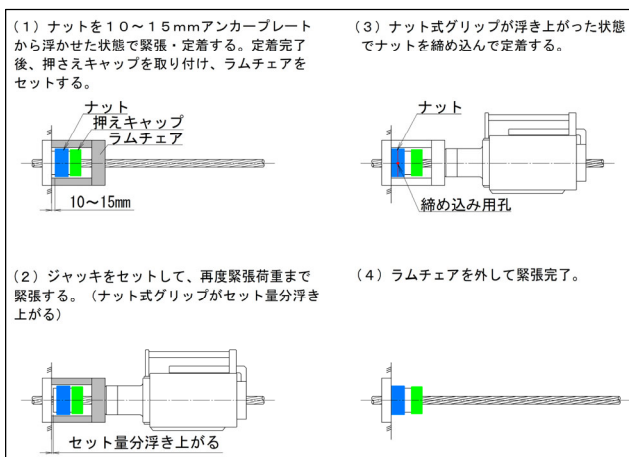


図-17 ナット式グリップセットロス解消方法

5. 施工時の安全対策

本工事の施工区間には5本の市道が横断している。その中でも特に交通量の多い交差点がある起点側MP68R-MP69R径間は、夜間通行止めを実施した。地域住民等の第三者被害を出さないよう、安全に配慮した支保工組立・解体作業計画が必要であった。また、終点側MP81R橋脚上空近傍には高圧線が横断しており、クレーン作業やコンクリート打込み作業時の安全対策を講じる必要があった。

5.1 支柱式支保工のユニット化

市道上に設置する支柱式支保工は、重量物の支柱と主梁を安全带を使用しながら高所作業にて組み立てるため、墜落災害が懸念される。支柱材をユニット化し、クレーンで一括設置することで高所作業を削減した（写真-3）。



写真-3 支柱のユニット化

5.2 3D シミュレーション

市道や高圧線に近接したクレーン荷役作業があるため、安全性を確保したクレーン計画が必要であった。そのため、市道近傍の地形や高圧線の位置等の現地状況を3Dスキャンで計測して3Dモデル化を行った。モデル空間上でクレーン作業のシミュレーションを行うことで、交差物からの安全な離隔を確保した作業範囲の決定を行った。また、感電防止対策として危険領域へクレーン等が侵入しないように位置を制御できる3Dバリアシステムを導入し、離隔距離の管理を行う計画とした。

施工手順や作業方法の3Dシミュレーション動画を用いて見える化を行い、地域住民に対して分かりやす

い説明に努め、コミュニケーションを充実させることでトラブルが発生しないように施工を行った（図-18、図-19）。

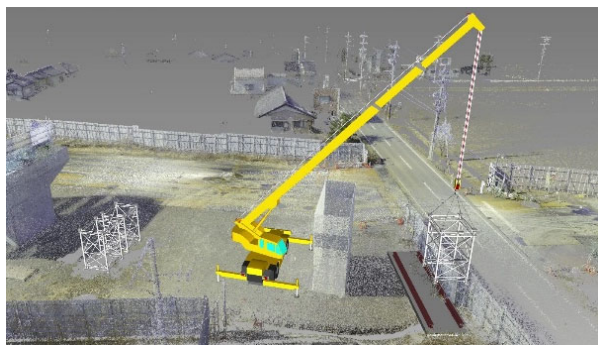


図-18 3D シミュレーション（ユニット支柱設置）

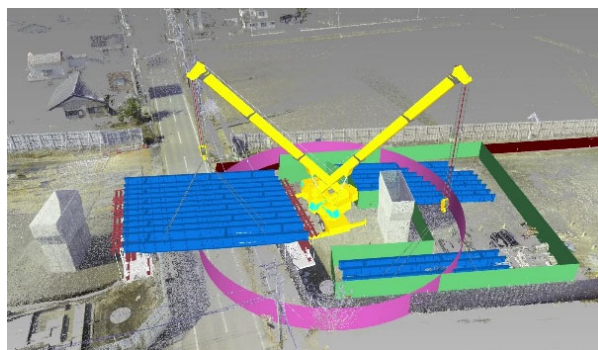


図-19 3D シミュレーション（クレーン作業半径）

6. まとめ

本工事は、工程順守を目的とした設計・施工に対する取り組み等、様々な設計および施工の課題に取り組みながら、現在鋭意施工を進めている（写真-4）。



写真-4 施工写真

謝辞

本橋の設計・施工では、発注者の構造技術部門および工事監理の方々の多大なご支援をいただいている。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) ディビダーク協会：ディビダーク工法設計・施工マニュアル，p.196，2022.9