

続 東北発 PC 道路橋の長寿命化を目指して

岩城 一郎^{*1}・榊原 直樹^{*2}

本稿は2015年3月本誌に掲載された「東北発 PC 道路橋の長寿命化を目指して」の続編である。前編では東北地方におけるPC道路橋の耐久性に関する問題を指摘し、このうち道路橋コンクリート床版では凍結防止剤の大量散布により複合劣化が生じ、著しく耐久性が低下するおそれがあることを解説した。さらに、この問題を解決するため、大学のキャンパス内に実物大の鋼主桁付鉄筋コンクリート床版モデルを再現し、各種試験を行い、その施工性、表層品質、膨張収縮挙動、耐久性などを評価したうえで、高耐久コンクリート床版を現場実装させる構想を示した。本稿では、こうした考えにしたがい現場実装した向定内橋と大日川橋のコンクリート床版に関する設計・施工の要諦と、施工後の品質・性能評価結果について報告する。さらに、産業副産物の地産地消によりコンクリート床版を高耐久化させることの意義について、脱炭素社会の実現との関係性を含め論じる。

キーワード：道路橋、凍結防止剤、RC床版、PC床版、耐久性、フライアッシュ、脱炭素

1. はじめに

近年、高度経済成長期に集中整備された道路橋の一斉老朽化が社会問題になっている。このうち東北地方においては大部分が積雪寒冷地に属するため、ほぼ全域で冬期に凍結防止剤（NaCl）が大量散布されており、その影響による劣化が顕在化している。とくに道路橋コンクリート床版では、凍結防止剤の浸透による塩害、凍害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）の促進と、疲労との複合劣化により、架設後わずか数十年で架替えを余儀なくされるものが増加しており、その設計・施工・維持管理への対応が急務となっている。

このような背景の下、第一著者は既報¹⁾において、道路橋コンクリート床版を高耐久化するための研究構想を示した。すなわち、大学のキャンパス内に実物大の鋼主桁付鉄筋コンクリート床版モデル（ロハスの橋）を6種類再現し（写真-1）、コンクリートの材料、配合、施工方法を変化させて（表-1）、その施工性、表層品質、膨張収縮挙動、耐久性などを評価したうえで高耐久コンクリート床版を現場実装させる構想を提案した。その結果、表中の

No.4 最上級仕様とすることで厳しい凍結防止剤散布環境においても凍害、塩害、ASR および疲労という複合劣化に対する長期耐久性が確保されることを明らかにした。著者らはこれを複合防御網と呼び（図-1）、このコンセプト



写真-1 ロハスの橋

表-1 床版の主な仕様

	床版の種類	W/C (%)	空気量 (%)	養生方法
No.1	国交省標準仕様	55	4.5	湿布養生7日
No.2	低品質仕様	65	3.0	湿布養生7日
No.3	高耐久仕様（膨張材）	45	6.0	湿布養生7日
No.4	最上級仕様（膨張材+FA）	45	6.0	湿布養生7日+上面 湛水封鎖養生84日
No.5	標準仕様—封鎖養生案	55	4.5	湿布養生7日+上面 湛水封鎖養生84日
No.6	標準仕様—機械仕上げ案	55	4.5	湿布養生7日



*1 Ichiro IWAKI

日本大学
工学部 教授



*2 Naoki SAKAKIBARA

（株）大林組
道央道大谷地JV

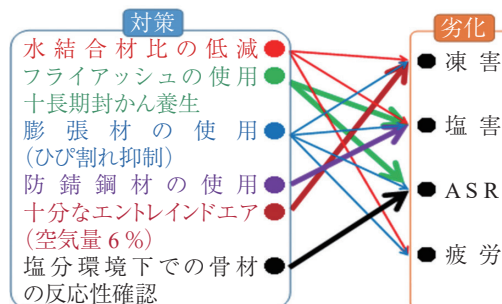


図-1 複合防御網のコンセプト

トを2章以降に示す向定内橋と大日川橋に適用し、実施工を行うとともに施工後の品質・性能評価を行った。

2. 向定内橋における高耐久 RC 床版を目指した取組

2.1 向定内橋の概要

岩手県の釜石市と花巻市を結ぶ復興支援道路の一つである国道 283 号釜石道路の釜石市の山間に位置する向定内橋は、橋長 44.5m の 5 主桁単純非合成鉄桁橋で、上下線一体全幅員 12.78 m の RC 床版を採用している（図 - 2）。架橋位置の冬期（12 月から 2 月）の月平均気温は、約 -3℃であり、凍害の影響を受けやすく、凍結防止剤の散布が行われる環境にあることから、塩害の影響も受けやすい。そのため、国土交通省東北地方整備局では、産学官の連携により、複合防御網の考え²⁾を導入し、フライアッシュ（以下、FA）を用いた床版の耐久性確保を目指した取組を進めた³⁾。

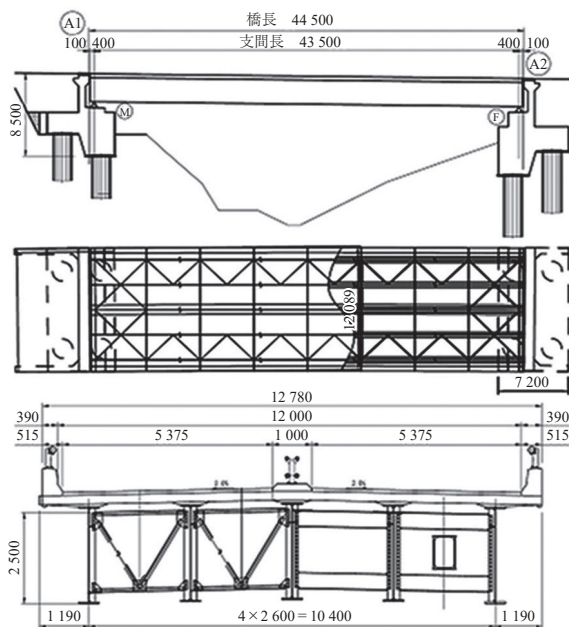


図 - 2 向定内橋の構造一般図

2.2 複合防御網を実践するための課題

(1) コンクリートの配合

FA コンクリートには、いくつかの課題がある。それは、① FA の品質のばらつき、② 空気量が安定しない、③ 強度発現性が遅く、とくに寒中施工で顕在化することなど⁴⁾である。①と②に対しては、再現性に問題がなく品質の安定した実績のある東北電力（株）能代火力発電所産の JIS A 6201 で規定されるⅡ種灰を用い、エントレインドエアを確保する締固め方法を検討することとした。③に対しては、給熱養生を前提に環境温度を管理することとした。

複合防護網の考えを導入した向定内橋の FA コンクリートの配合表（表 - 2）を示す。ロハスの橋における研究成果からセメント量の 20% 質量のⅡ種灰を外割置換し、収縮補償を目的に膨張材を添加した。また、FA の未燃カーボンが混和剤を吸着することで空気量が減少することから、生コン工場出荷時の上限空気量を 7% とし、現場受入れ時の空気量を 6% と高めに設定した。

なお、生コン工場に FA 用サイロが確保できないことから手投入としたため、出荷時の 2 m³ の練り混ぜで袋詰 FA（25 kg/袋）を 5 袋と袋数管理できる配合調整を行った。

(2) 施工方法の検討

施工面の課題として、エポキシ樹脂塗装鉄筋に対する打込み時のバイブレータとの接触による塗装被膜損傷防止、FA コンクリートの密実で均一な締固めとエントレインドエアを確保する打込み管理、ブリーディングが少ない特性に対する仕上げ作業があげられた。また、寒中施工での打込み環境温度や養生温度の管理も課題となった。

そこで、室内試験（事前試し練りを 2014 年 12 月下旬、翌年 2 月 5 日に実施）で決定した配合（表 - 2）で実機練り試験施工（2015 年 3 月 4 日に実施）を行い、FA コンクリートの性状を確認し、施工方法の確認と検証を行った。その試験施工と温度応力解析の結果に基づき、施工計画を立案し、2015 年 3 月 20 日に打込みを実施した。図 - 3 に実施工までのプロセス⁵⁾を示す。

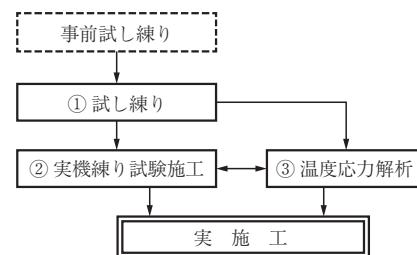


図 - 3 実施工までのプロセス⁵⁾

2.3 コンクリートの製造・施工管理結果

FA コンクリートの製造管理では、打込み当日早朝の外気温が 6℃と、想定する日平均 4℃より高かったため、コンクリートの練混ぜ水は、加温せずに 13 ± 3℃で管理した。

現場での受入れ検査では、全車のスランプ試験を行い、空気量試験を、最初の 4 台目までは全車で、5 台目以降は 50 m³ ごとに実施した。受入れ検査時の空気量は、6.0 ～ 6.7% とすべて 6% 以上で規格値を満足する安定した結果であった。また、ポンプ圧送時の空気量の減少量を 2 台目で測定した結果 0.6% であった。バイブレータによる空気量の低下が 0.5% と考えると、受入れ検査時の空気量を 5.0 ～ 6.9% に管理した場合、硬化後の空気量は 3.9 ～

表 - 2 向定内橋の FA コンクリート配合表⁵⁾

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	C	Ex	FA	S	G	AE 減水剤
25	12 ± 2.5	54.8	42.4	6.0 ± 0.9	43.3	155	283	20	62.5	752	1 010	3.03

5.8%と予想されるので、空気量の管理目標値は妥当であったと判断される。

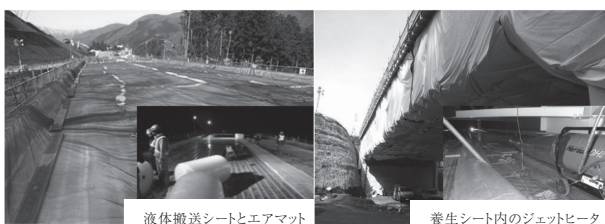
2.4 試験施工結果に基づく施工管理

締固めの管理として、試験施工でのバイブレータの最適締固め時間と空気量、気泡間隔係数の測定結果、さらにはポンプ圧送による空気量の減少を考慮し、締固め時間を8秒間として打込み管理を行った。具体的には、打込み中に事前に録音した8秒カウントのエンドレステープを流すことにより、確実に締固め時間を周知させ管理することとした。また、使用するバイブレータは、試験施工で確認した先端ゴム付きタイプで、筒先での締固めにφ50 mm、後追い締固めにφ40 mmを用い、50 cm 間隔でバイブレータを挿入するよう打込み作業員に周知指導した。

打重ねの管理として、試験施工での凝結試験と導入したN式貫入試験⁶⁾の結果に基づき計画した打重ね時間の管理時間を2.5時間とし管理旗に打込み時間を明示することで「見える化」し管理した。

仕上げについては、室内試験結果からブリーディングが通常のコンクリートの半分程度であることから、水性パラフィンワックスを主成分とする仕上げ養生剤を使用した。また、試験施工より左官工がコンクリート表面に上がり、機械仕上げを開始し、最終金コテ仕上げるタイミングは練上り完了から約7時間であったことから、左官工を増員した。最終金コテ仕上げ後の湿潤養生用の液体搬送シートと保温用のエアマット等の敷設は、打込み完了後6時間以上かかることが明らかであったため、養生シート敷設の作業員の集合時間を調整することで長時間労働を回避することとした。

当該床版は寒中施工であるため、上面はエアマットによる保温養生、下面は床版下面の足場全体をシートで覆い、ジェットヒータ6台により底型枠下面の養生環境温度を10～15℃で管理した。写真・2に打込み状況、床版上面と下面の養生状況を示す。



写真・2 打込み・養生状況⁵⁾

荷卸し時のコンクリート温度が13～15℃だったこと、寒中施工による床版上面のエアマット4枚相当での保温と床版下面の給熱保温したことに加え、コンクリートの水和熱の効果により、エアマット設置直後からコンクリート表面の温度は速やかに上昇し、翌朝まで15℃近くの温度を保ち、初期凍害を防ぐ状態であることを確認した。水和熱の発生が収まったあとも、保温養生の効果により、コンクリート温度はつねに10℃以上に保たれていた。また、この温度計測結果から、コンクリート打込み後の養生状況の管理を行い、天気予報の気温から給熱養生の終了およびシート養生の撤去時期を判断した。給熱養生は打込みから24日目で終了した。

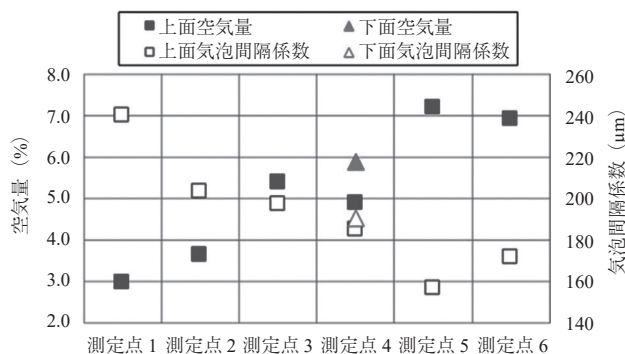
FAコンクリートに期待する塩分浸透抵抗性を十分に発揮させるため、長期養生によりポズラン反応を進める方針とした。そのため、給熱養生終了後も床版上面では、液体搬送シートとエアマットにより湿潤養生を継続した。また床版下面と側面は、底枠脱型後に養生テープを貼り付け、封かん養生を打込みから3箇月間継続した。

2.5 本施工の結果と評価

耐久性に関わる指標の評価と確認を目的として、3箇月間の養生終了後に圧縮強度に加え、表層の緻密性やエントレインドエアの分散状況の調査と載荷試験を実施⁷⁾した。

試し練り、試験施工および実施工の標準供試体の圧縮強度結果と試験施工の際に製作した版状の試験体を実橋床版と同様な状態で現場養生し、そこからコアを採取して圧縮強度を評価した結果、実橋床版は50 N/mm²程度の圧縮強度と推定される。当初の水セメント比を保持し、かつFAを外割添加したことによって、設計基準強度の24 N/mm²を大きく上回る結果となったが、この点は管理者の事前承諾を得ている。

耐凍害性を評価するため、現場気泡間隔係数測定装置⁵⁾により、硬化後の実床版の空気量と気泡間隔係数を測定(図・4)した。上面の空気量は3～7%と測定点により異なり、気泡間隔係数は約160～240 μmと空気量が多い箇所ほど気泡間隔係数は小さくなる傾向であった。しかし、測定点1のように表面の空気量が3%であってもエントレインドエアが表面に残存しているため気泡間隔係数は目安となる250 μm以下であり、耐凍害性を確保するのに十分な値であると考えられる。測定点4では、上下面で測定を行い、おのおの値に乖離がないことを確認した。これより、適



図・4 気泡間隔係数の測定結果⁵⁾

切な締固めで床版全体に所要のエントレインドエアが連行されていると考えられる。

そのほか、試験施工の試験体からコアを抜き実施したスケリング試験、塩水浸漬試験、Torrent 法⁸⁾による実床版の表層透気係数の測定の結果から、向定内橋の RC 床版は、目指すべき品質・性能を確保できたものと判断⁷⁾される。

3. 大日川橋における高耐久 PC 床版への展開

3.1 PC 床版への適用経緯

凍結防止剤散布下の塩害、凍害、ASR と疲労による複合劣化対策として、2 章で紹介したⅡ種灰を用いた向定内橋を先駆け^{5,7)}に、大沢第 3 橋⁹⁾や波板橋、高炉セメント B 種を用いた新気仙大橋¹⁰⁾や桑折高架橋¹¹⁾などの実績が上がった。これらは、国土交通省東北地方整備局での東日本大震災の復興事業から RC 床版の耐久性確保の取組として実施されたものである。

一方、高速道路会社（以下、NEXCO）では、鋼桁上のコンクリート床版は、一般に早強ポルトランドセメントを用いた場所打ちプレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版）を採用している。凍結防止剤散布下におけるこの種の床版の劣化事例として、八戸自動車道の橋山橋において ASR が発生¹²⁾し、一部取替えを余儀なくされた。このような背景から、常磐自動車道暫定 2 車線区間の機能強化事業（付加車線工事）として、南相馬市に位置する大日

川橋において地産地消を前提とした FA を用いた高耐久 PC 床版の適用に関する検討が実施されることとなった。

対象橋梁の大日川橋（上り線）は、橋長 58.5 m、全幅員 10.65 m の鋼単純合成細幅箱桁橋（図 - 5）である。PC 床版は、設計基準強度が 40 N/mm² で、橋軸直角方向に間隔 500 mm でプレグラウト PC 鋼材（1S21.8）が配置され、鋼細幅箱桁とは合成構造である。

3.2 実物大模擬床版での試験施工

大日川橋では、架橋地点より 10 km 離れた東北電力株式会社原町火力発電所産の JIS 規格Ⅳ種の FA を有効利用することとした。しかし、原町火力発電所産の FA は、コンクリート構造物への使用実績がほとんどないことから、FA の特性を把握するためのモルタルによる基本物性の評価からはじまり、コンクリートとしての性能評価、加えて場所打ち PC 床版用コンクリートの強度発現性、耐久性やクリープ・乾燥収縮の検討¹⁴⁾を日本大学工学部において実施した。その結果、室内試験でのコンクリートのフレッシュ性状と硬化性状から、PC 床版としての性能を満足する可能性のあることが確認された。

そこで、NEXCO 東日本東北支社と日本大学工学部の共同研究「高速道路橋における FA コンクリート適用の基礎研究」で、早強ポルトランドセメントと JIS 規格Ⅳ種 FA を混和材として利用したコンクリート（以下、早強 FA コンクリート）による高耐久場所打ち PC 床版の現場実装に

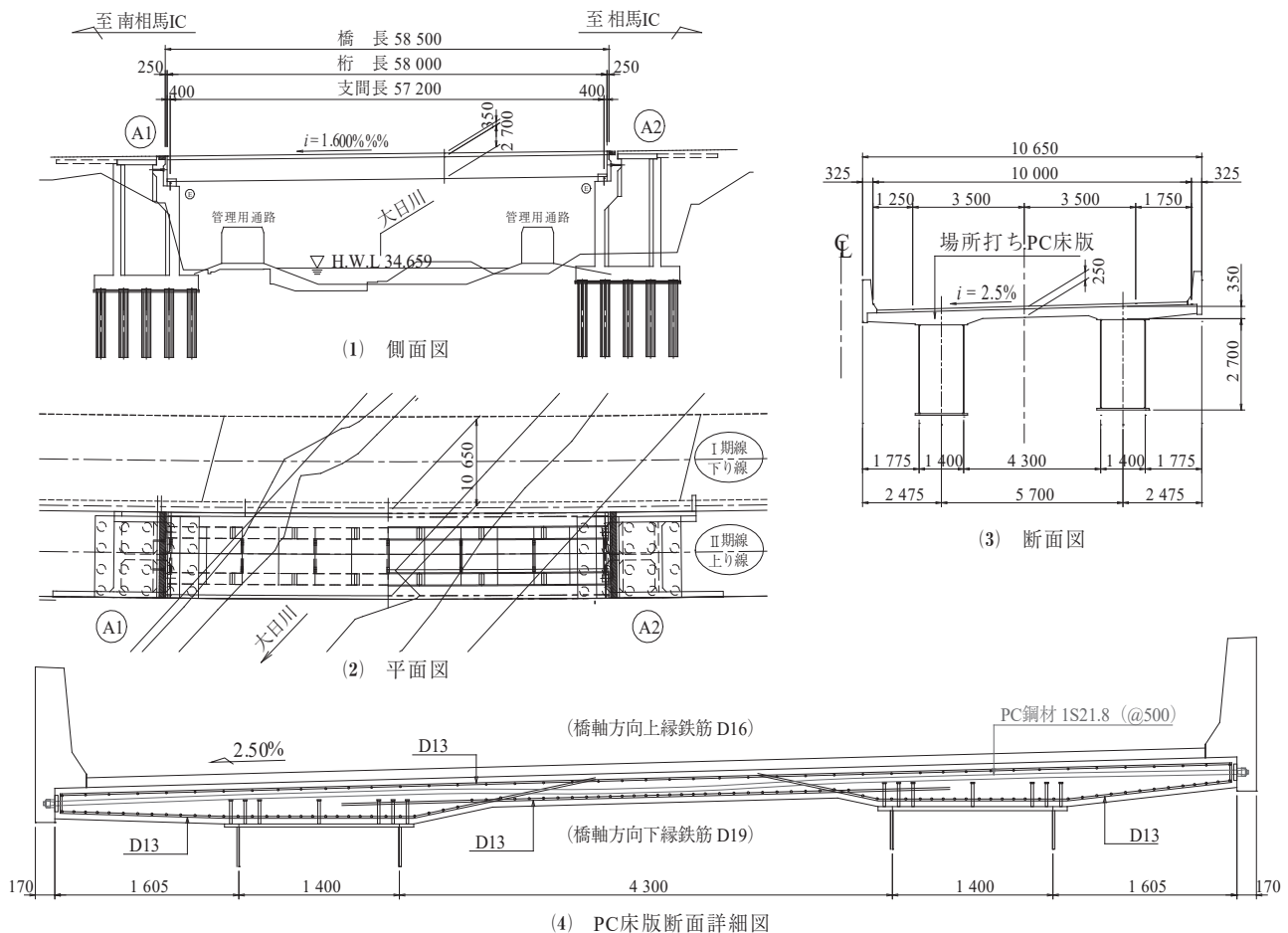


図 - 5 大日川橋 全体一般図および床版配筋図¹³⁾

向けた研究を進めることとした。具体的には、わが国で JIS 規格Ⅳ種の FA を用いたポンプ圧送による場所打ち PC 床版の施工実績がないため、施工上の課題を抽出する目的で、室内試験で検討した早強 FA コンクリートの配合¹⁴⁾に基づき、2019 年 11 月 28 日に前述のロハスの橋を用い施工性確認試験を行った。打込んだ実物大模擬床版の寸法は、橋軸方向が 3.5 m、橋軸直角方向が 3.0 m、床版厚が 0.24 m である。

試験は、実装の対象となる橋梁に出荷予定の生コン工場の骨材を用いた実機によるコンクリートの製造からポンプ車による圧送、打込み、専門業者による表面仕上げまでを対象とした。写真 - 3 に打込み状況写真、表 - 3 に施工性確認試験で用いた FA コンクリートの配合を示す。



写真 - 3 施工性確認試験の打込み状況¹³⁾

施工手順は、向定内橋の例を参考に、圧送ポンプの筒先で棒状パイププレートにより 8 秒間加振し打込み、レイキで均し、あと追いで 8 秒間加振し締固め、木コテで均した。その後、仕上げ補助剤を 150 ml/m² 散布し、機械仕上げを行った。最終仕上げとして再度仕上げ補助剤を 150 ml/m² 散布し、金コテで仕上げた。養生は保湿シートを用い 28 日間湿潤状態を保持した。

試験当日、生コン工場での練混ぜ時の外気温は 10℃、打込み現場の外気温は打込みから養生まで 6℃、天候は時折小雨であった。フレッシュ性状の経時変化として、練混ぜ後の生コン工場、現場受入れ時、ポンプ圧送した筒先で

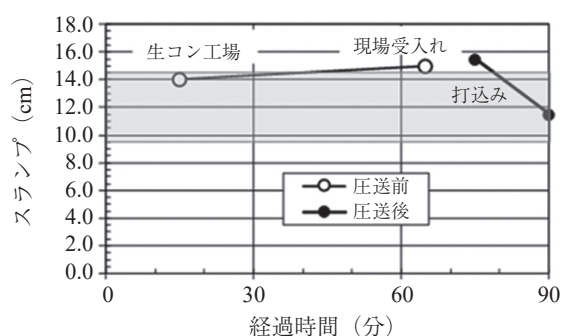


図 - 6 実物大模擬床版でのスランプの経時変化¹³⁾

のスランプ（図 - 6）と空気量（図 - 7）を示す。なお、図中の着色部は当初想定した管理規格値を示す。

図より、出荷時から現場受入れ検査までの経過時間は 65 分であり、スランプは増加するものの、空気量は大きく減少する結果となった。また、スランプは練上がり後 90 分でもポンプ圧送した筒先で受入時の規格値に収まるものの、空気量は規格値を大きく下回る結果となった。

打込みおよび均し作業では、圧送後の筒先のスランプは 11.5 cm を確保できているものの、作業員の足が自由に動かすことができないほど早強 FA コンクリートの粘性が高く、ワーカビリティに問題があることを確認した。

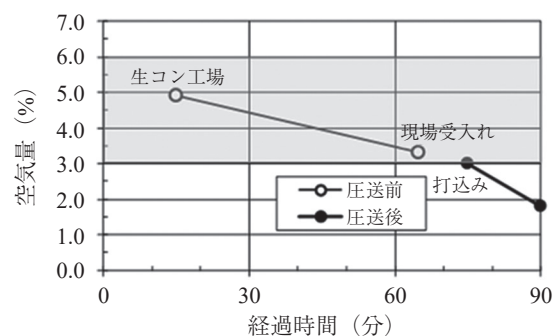


図 - 7 実物大模擬床版での空気量の経時変化¹³⁾

3.3 問題点の整理と改善検討

実物大模擬床版での施工性確認試験から、問題点として、フレッシュ性状における空気量の保持性と打込み荒均しの作業性（粘性抵抗の低減改善）があげられた。

表 - 4 に、施工性確認試験で浮き彫りとなった課題とその検討項目について配合修正の観点より整理して示す。検討項目について室内試験での配合検討の実施に立ち回り、実機試験練りで検証し、配合改善を行った。

表 - 4 施工性確認試験での課題一覧¹³⁾

配合面の課題	検討項目
空気量の保持性	AE 助剤の種類変更
	AE 助剤の添加量調整
	空気量の保持性向上の細骨材率調整
	練上がり時の空気量の上げ越し
打込み・荒均し作業性の向上	単位水量の増量
	細骨材率の低減
	スランプの増加
	FA 添加率の低減

3.4 配合修正検討と試験施工での確認

配合の修正項目として、室内試験において、単位水量の増加、細骨材率の低減、混和剤の種類の変更や FA 添加率の低減を検討した。また、実機試練りにおいて経時変化を確認することで、スランプや空気量の出荷時の目標値を

表 - 3 施工性確認の FA コンクリート配合表¹³⁾

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	水結合材比		細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (C × %)	
		W/B (%)	W/B' (%)		W	C	Ex	FA	S	G	高性能 AE 減水剤	AE 助剤
25	47.6	45.0	37.5	41.9	168	353	20	75	698	996	0.85	0.035

大きく上げ越す必要性を確認し、現場受入れ時の管理規格値の検証を行った。さらに、施工時期が5月下旬と決定されたことから、配合面の暑中コンクリート対策として、遅延型の混和剤の使用について高温室で検証確認も行った。配合の修正検討フローを図 - 8 に示す。

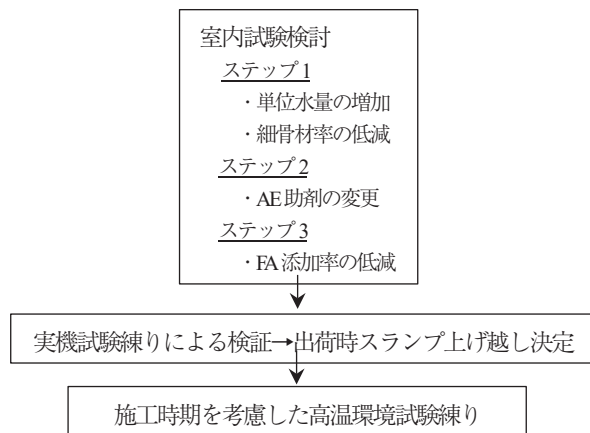


図 - 8 配合の修正検討フロー¹³⁾

検討の結果、単位水量の増加と細骨材率の低減がスランプの保持性に有効であり、FA添加率5%の低減は空気量の保持に大きく影響した。FA用AE助剤の変更は本配合には適さない結果となったが、暑中コンクリート対策としての遅延型混和剤は高温室での試験結果よりスランプの保持に有効で必要とする初期強度発現に問題がないことを確認できた。最終的に単位水量を増加しない表 - 5 に示す最終配合を決定した。

使用する配合が決定したのち、出荷から打込み場所までの運搬時間と打込み時間を考慮し設定した管理規格値の妥当性を検証するために、生コン工場から現場まで実際に運搬し、模擬床版（2.8 m × 3.0 m × 0.35 m）に打ち込むことで作業員にコンクリートの性状を把握してもらう目的も兼ねて2020年4月22日に試験施工（写真 - 4）を実施した。表 - 6 に試験施工におけるフレッシュ性状の確認結

果を示す。

その結果、生コン工場出荷時の目標値と現場受入時の管理値に大きな問題がないことを確認した。また、配合修正により、圧送、打込み、荒均し、締固め、均し、仕上げのいずれについても作業性に問題ないことを模擬床版での打込み試験施工で確認した。



写真 - 4 試験施工の打込み状況

3.5 本施工の結果

本施工は、2020年5月28日に実施された。打込み計画数量は178 m³で、時間あたりの打込み数量を44 m³で計画した。打込み方法は、最大吐出量125 m³/h、最大吐出量7 MPaの性能を有するポンプ車によるポンプ圧送とした。打込み区画を橋軸直角方向に3 mの幅で区分けし、橋軸直角方向に圧送ポンプの筒先を移動し打ち込んだ。プレグラウトPC鋼材が配置されていることから、締固めには先端ゴム付きの棒状バイブレータを用いた。打込み以降の手順は、実物大模擬床版での試験施工における施工手順と同様とした。

打込み当日の天候は晴れ、外気温は22～27℃であった。打込みはポンプ車の移動により計画より約1時間遅延したものの打重ね処理は良好なフレッシュ状態で実施できた。打込み状況を写真 - 5 に示す。

早強FAコンクリートの製造では、試験施工と同様に生コン工場で出荷前のフレッシュ性状と荷卸し時の受入れ検

表 - 5 配合修正のFAコンクリート配合表¹³⁾

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	水結合材比		細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤 (C × %)	
		W/B (%)	W/B' (%)		W	C	Ex	FA	S	G	高性能 AE 減水剤	AE 助剤
25	47.5	45.0	39.0	40.0	168	354	20	56	681	1042	0.70	0.025

*) W/B はセメントと膨張材 (Ex) による水結合材比、W/B' は FA を結合材とした場合の水結合材比を示す。

表 - 6 試験施工でのフレッシュ性状確認結果¹³⁾

	経過時間 (分)	生コン工場出荷時				現場受入時							
		スランプ (cm)		空気量 (%)		スランプ (cm)		空気量 (%)		塩化物量 (kg/m ³)		コンクリート温度 (℃)	気温 (℃)
		目標値 19.0 ± 2.5	判定	目標値 5.0 ~ 6.9	判定	管理値 13.5 ~ 19.0	判定	管理値 4.5 ± 1.5	判定	管理値 0.3 以下	判定		
1 台目	0	20.0	合格	6.6	合格							15	15
	30					18.5	合格	5.5	合格	0.04	合格	16	15
	55					18.0	--	6.5	--			17	15
2 台目	30					17.5	合格	5.8	合格			17	20
	60					16.5	--	3.9	--			17	20

*) 経過時間 55 分と 60 分の測定はポンプ圧送後の筒先で試料採取して実施した。



写真 - 5 本施工での打込み状況 13)

査の両者より品質管理された。コンクリート温度は、荷卸し時の受入れ検査で 23 ～ 25℃であり、前述の高温室試験で設定した想定温度と違いはなかった。

スランプは、生コン工場出荷から現場荷卸しまでの運搬ロスが試験施工時の経過時間 30 分で 1.5 ～ 2.5 cm（表 - 6）に対し、経過時間 20 分で 3 cm とやや大きい結果となった。これは外気温の差から生じたものと考えられるが、遅延型の混和剤を使用したことで、暑中環境においても良好なスランプを保持できていた。空気量も現場受入時の試験結果から 4.5 % 以上確保されており、圧送後にも大きな損失がないことを確認できた。

3.6 施工後の品質・性能評価

大日川橋の早強 FA コンクリートでは、スランプおよび空気量のロスが著しいため、通常の規定値で出荷するとポンプ圧送・打込み・締固め・仕上げに支障をきたしたり、所定の空気量を満足しないことで耐凍害性に劣るコンクリートとなる可能性がある。これらの問題を解決するために、施工裕度を優先し JIS 規格Ⅳ種の FA 添加率を下げ、工場出荷時のスランプの値を 19.0 ± 2.5 cm と大幅に上げ越しし、現場到着からポンプ圧送・打込み・締固め・均しに要する時間内に、13.5 ～ 19.0 cm の値に入るように制御することで、良好なフレッシュ性状に保つことが可能であることが明らかとなった。

実施工した床版の圧縮強度試験結果（図 - 9）を示す。結果より、早強 FA コンクリートの緊張作業に必要な 32.5 N/mm^2 は、材齢 3 日が休日であったことから材齢 4 日の確認で達していること、材齢 7 日には設計基準強度の 40 N/mm^2 に達しており、要求された強度特性を確認した。

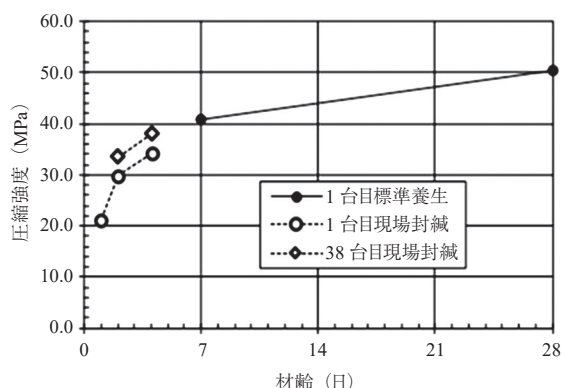


図 - 9 圧縮強度試験結果 13)

また、養生完了後に実施した現場試験の床版上面の Torrent 法⁹⁾ による透気係数と電気抵抗率の結果（図 - 10）を示す。橋軸方向 5 断面、おのおの構造中心（□）、壁高欄側（○、△）の合計 15 箇所を測定した。結果より、表層品質はグレード 2 の範囲に収まっており、ばらつきも小さいことから十分な物質移動抵抗性が期待できることを確認した。

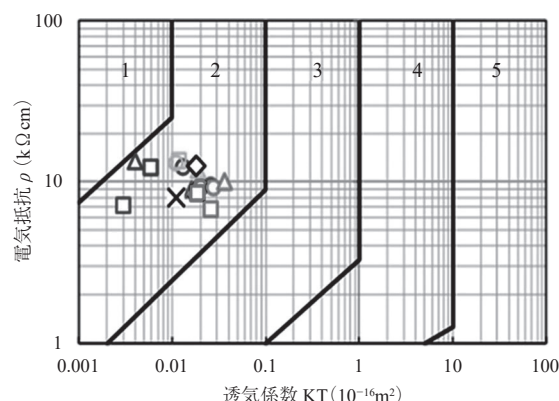


図 - 10 表層品質確認試験結果 13)

4. 向定内橋と大日川橋に関するまとめ

向定内橋での RC 床版と大日川橋での PC 床版の現場実装は、あくまで現場条件に適合させた単品施工を行った結果である。しかし、図 - 11 の模式図に示すように、RC 床版では普通ポルトランドセメントと混和材として実績のあるⅡ種灰を用いた普通コンクリートで強度発現の遅い寒中施工、PC 床版では凝結の速い早強ポルトランドセメントと未利用のⅣ種灰を用いた高強度コンクリートによる暑中施工であり、両極端な厳しい環境条件下で要求性能の異なる道路橋場所打ちコンクリート床版という重要構造物で現場実装を成功させたことになる。とくに、高強度コンクリートに塩害や ASR 抵抗性の向上を目的に混和材として地産地消のⅣ種灰を用い耐凍害性にも富む高耐久コンクリート床版の実装に成功したことは、今後あらゆる構造物への FA コンクリートの適用や標準化を推進させる大きなステップアップに繋がると思われる。

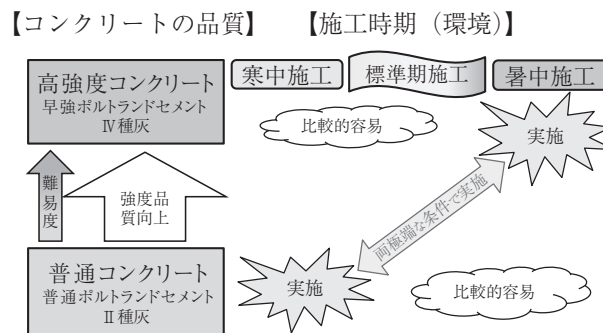


図 - 11 2つの現場実装例の模式図

5. おわりに

以上、2つの高耐久FAコンクリート床版の実例を示した。このような実装を可能とした要因に、室内試験—実物大模擬床版試験（ロハスの橋）—実機試験—現場施工試験を通した性能評価に基づき、適切な材料・配合・構造設計を行い、綿密な施工計画を立て、実施工に臨むシナリオを明確化したことがあげられる。また、施工後の床版に対し事後評価を行い、所定の性能が確保されていることを確認し、得られた情報（データ）を維持管理に引き継ぐことも意識した点で、コンクリート構造物のライフサイクルマネジメントを実践した取組といえる。今後このような考えが浸透し、品質・性能確保を目指したコンクリート構造物の建設が進むことを期待する。

最後に産業副産物を活用し、コンクリート構造物を高耐久化することの意義と今後の展望について記述する。まず、コンクリートの原則は地産地消である。またコンクリート構造物は長持ちさせなければならない。この両者を前提に、地域で排出されるFAなどの産業副産物を有効利用し、コンクリート構造物の高耐久化を図ることで、実は脱炭素社会の実現に貢献できると考えている。脱炭素社会の実現に向けては、セメントの製造過程でCO₂の排出を削減したり、コンクリート中にCO₂を吸収させる技術が脚光を浴びているが、現時点でマスマンズ、エネルギーバランス、コストという包括的視点で考えるとすぐに実用化が進み、大幅なCO₂削減に貢献できるものとはいえない。一方、地産地消材料を用いたコンクリート構造物の高耐久化は今すぐできることである。著者らの研究拠点である福島県内では原子力発電所の事故以降、浜通り地方において石炭火力発電所がフル稼働しており、大量のFAが排出される。また近年では、石炭ガス化複合発電所の建設が進み、ここからはスラグが排出される。これらをコンクリートの混和材や細骨材として用いることで、アルカリシリカ反応や塩分浸透に対する抵抗性を高めることが分かってきた。このことは、アルカリシリカ反応性の高い骨材であっても有効利用できる可能性を示唆している。このように耐久性を飛躍的に高めたコンクリートを用いた構造物を福島県内あるいは東北地方に建設することにより、地産地消なので材料の輸送コストは低く抑えられるし、構造物の寿命を2-3倍に延ばすことができれば、廃コンクリートの処分にかかるCO₂排出量、エネルギー消費量、コストを1/2-1/3に抑えることができる。こうした考えのもと福島県庁においても、地産地消のFAを用いた道路橋コンクリート床版の建設が今秋に予定されている。今後は道路橋下部工などの一般構造物やプレキャスト製品にもこうした考えを普及させる予定である。2050年脱炭素社会の実現に向けてブレークスルーをもたらす技術開発もさることながら、個々のコンクリート研究者・技術者が、今自分たちにでき

ることが何かを真剣に考え、実行に移すことが必要と思われる。そうした努力の積み重ねなくしては、2050年脱炭素社会の実現など到底及ばないように思われる。

【謝辞】本解説に記載した研究は、国土交通省東北地方整備局およびNEXCO 東日本東北支社との連携により行われたものである。また、施工にあたっては多くの関係企業の協力を得た。さらに実験にあたっては日本大学工学部土木工学科コンクリート工学研究室子田康弘教授および構造・道路工学研究室前島拓助教と両研究室の学生の助力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 岩城一郎：東北発 PC 道路橋の長寿命化を目指して、プレストレストコンクリート, Vol.57, No.2, pp.37-44, 2015.3-4
- 2) 岩城一郎, 江頭慶三, 岸良 竜, 渡邊法久, 樋口正典, 阿合延明：「ロハスの橋」プロジェクトの紹介, 橋梁と基礎, Vol.50, No.2, pp.26-31, 2016.2
- 3) 榑原直樹, 田中泰司, 佐藤和徳, 岩城一郎：高耐久道路橋 RC 床版の施工段階における各種性能評価に関する実証研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, No.1, pp.277-284, 2019.3
- 4) 榑原直樹：フライアッシュを用いた道路橋場所打ちコンクリート床版の現場実装に関する研究, 日本大学学位論文, 2021.3
- 5) 榑原直樹, 工藤和信, 田中泰司, 子田康弘, 石田哲也, 岩城一郎：フライアッシュコンクリートを用いた高耐久床版の施工, 橋梁と基礎, Vol.49, No.9, pp.25-30, 2015.9
- 6) 土木学会：コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策, コンクリートライブラリー 103, pp.141-156, 2000.7
- 7) 榑原直樹, 岩城孝之, 田中泰司, 子田康弘, 石田哲也, 岩城一郎：フライアッシュコンクリート床版の各種耐久性評価, 橋梁と基礎, Vol.50, No.4, pp.13-18, 2016.4
- 8) Torrent, R.J. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”, Materials and Structures, 25 (6), pp.358-365, 1992.7
- 9) 田中 実, 鈴木辰幸, 橋爪博文, 漆原新一, 中村定明, 岩城一郎：高耐久仕様を適用した PC コンボ桁橋の施工, 橋梁と基礎, Vol.51, No.2, pp.28-33, 2017.2
- 10) 石井博典, 石田哲也, 細田 暁, 田中泰司, 佐藤和徳：高炉セメントを用いた高耐久 RC 床版の開発, 性能検証および現場実装, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.800-812, 2020.4
- 11) 国土交通省東北地方整備局道路部：東北地方における RC 床版の耐久性確保の手引き（案）巻末資料, 2019.6
- 12) 高久英彰, 吉田 敦, 館山和浩, 湯町浩司, 植村典生：PC 連続合成桁の床版更新工事, 橋梁と基礎, Vol.53, No.9, pp.5-10, 2019.9
- 13) 榑原直樹, 富塚翔太, 吉田 敦, 前島 拓, 子田康弘, 岩城一郎：早強ポルトランドセメントとフライアッシュを併用した道路橋場所打ち PC 床版の現場実装, 土木学会論文集 E2, Vol.77, No.2, pp.65-77, 2021.6
- 14) 榑原直樹, 富塚翔太, 子田康弘, 岩城一郎：フライアッシュ IV 種で管理される石炭灰を用いたコンクリートの品質と性能評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.73, pp.176-183, 2020.3

【2021 年 9 月 2 日受付】