

海上に架橋される PCT 桁橋の塩害対策

— 土屋大橋 —

東北支店	土木統括部技術部	古村 豊
東北支店	土木統括部技術部	三浦一浩
東北支店	土木統括部工事部	渡辺幹雄
東北支店	土木統括部技術部	西垣義彦

概要：土屋大橋は、青森県陸奥湾に面した国道4号線の建設工事の一環として建設される橋長410mの海上橋である。本橋の構造形式は、3径間連結ポストテンション方式PCT桁橋を3連で構成する計9径間のPC橋梁である。本橋は海上に架橋されることから、塩害の影響を激しく受けるコンクリート橋梁であるため、設計、施工においては十分な塩害対策が必要であった。本橋では、その塩害対策として、①VE提案により主桁をセグメント化して品質向上と現場作業の省力化を図る、②PC鋼材の防錆対策の検討、③セグメントカップラーの使用、④透水性型枠の使用と、透水シートの選定試験の実施、⑤樹脂被覆PC鋼材定着体の定着性能確認試験の実施、など様々な対策を講じた。本報告では、本橋の設計、施工における塩害対策について報告する。

Key Words：塩害対策, VE提案, セグメント, マルチレイヤープロテクション

1. はじめに

1.1 バイパス工事計画

国道4号土屋バイパス建設工事は、青森市浅虫から平内町中野までの総延長4.2kmの付替え建設工事である。本バイパス工事は、国土交通省東北地方整備局より発注され、平成9年度より工事を着手している。この区間の国道4号線は、青森市方面と平内町および下北南方面をつなぐ幹線道路である。しかし、現在の国道4号線は、海と山、JR東北本線に挟まれ、道幅が狭いうえに危険なカーブが連続しているために渋滞や交通事故が頻発している。このため、これを回避してより安全な交通機能を確認するために本バイパス工事が計画された。現在、バイパス工事の進捗は、平成16年11月に浅虫地区延長400m区間が開通している。

土屋大橋は、バイパス計画区間に存在する7カ所ある急カーブのうちの1つを回避するために海上に架橋される道路橋である。本橋を含む新しい路線は、浅虫から接続して土屋大橋を渡り、ほたて広場(平内町)の約400m先で現在の国道4号と合流する路線計画である(図-1参照)。平成19年度には、本橋を含む900m区間が開通する予定である。

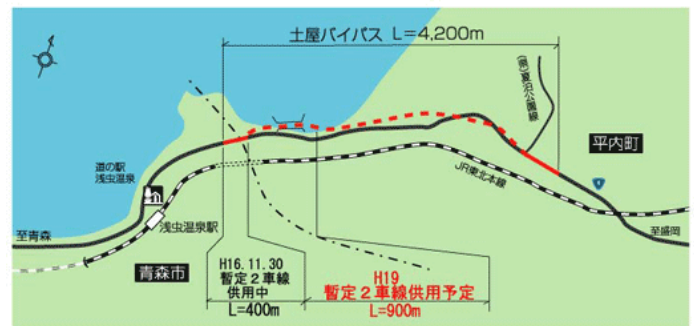
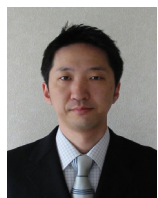


図-1 土屋バイパス工事
(資料提供：国土交通省青森河川国道事務所)



古村 豊



三浦一浩



渡辺幹雄



西垣義彦



図-2 完成予想図

1.2 本橋の当初計画と実施施工

本橋の架橋位置は、道路橋示方書による塩害の影響地域で対策区分 S に区分され、塩害の影響を激しく受ける環境にある。当初設計では、表-1のように本橋の構造形式の選定を、①塩害に対する抵抗性、②S字曲線平面線形(横断勾配)への適応性、③施工性、④経済性などについて評価した結果、多径間連結構造 PCT 桁橋を採用している。

表-1 構造形式の選定

	第1案 ポステン連結PCT桁	第2案 ポステン連結PCホロー桁	第3案 ポステン連続PC箱桁
塩害に対する抵抗性	暴露形状が単純であり、塩害対策を行えば適用可能	暴露形状が単純であり、塩害橋梁に適している	暴露形状が単純であり、塩害橋梁に適している
平面線形への適応性	横断勾配の変化への適用性に乏しく、調整モルタル厚が増加し、死荷重増となる	横断勾配の変化への適用性に乏しく、調整モルタル厚が増加し、死荷重増となる	横断勾配の変化への適用性は優れている
施工性	架設桁架設となる。2案に比べて、架設桁本数が少ない	架設桁架設となる。比較案中で、主桁本数が最も多く桁製作、架設とも大規模	S字平面線形に対応するためスパンバイスパン架設となり、大規模な架設となる。
経済性比較	1.00	1.10	1.31
評価	◎	△	○

また本橋では、橋梁区間の地盤種別が2種類(始点側3径間：Ⅱ種地盤、終点側6径間：Ⅰ種地盤)で構成されていることから、地盤種別が明確となるような支間割りとする事で耐震設計上の合理化を図った。さらに本橋の平面線形が、S字曲線形状であるため横断勾配の変化が比較的大きく、9径間を1連構造とした橋梁として計画した場合、勾配調整コンクリートが厚くなり、死荷重の増加につながり、経済的に不利な設計となる。これ

らのことから本橋では、合理的な設計とするため410mの橋梁区間を3連に分割して、その構造形式を3径間連結ポストテンション方式PCT桁橋(×3連)とした。

表-2 当初設計での主桁の製作方法の比較

		場所打ち製作桁	プレキャストセグメント桁
桁高(m)		2.8m	3.0m
主桁の設計基準強度		40N/mm ²	40N/mm ²
主桁応力照査(N/mm ²)	上縁	10.8 < σ_a = 14	10.6 < σ_a = 14
	下縁	-0.7 > σ_a = -1.5	0.1 > σ_a = 0.0
反力(全橋当り)		156000kN	162000kN
工事費比率		1.00	1.16

ポストテンション方式 PCT 桁の製作方法には、場所打ち製作桁とプレキャストセグメント桁がある。当初設計では、表-2のように主桁の製作方法について構造的、経済性などに着目して比較検討している。その結果、当初設計では、場所打ち製作桁としたほうが桁高を低減することができ、経済性に優れるとして場所打ち製作方法を採用している。

表-3 プレストレス導入の効率化に伴う変更事項

		当初設計 (場所打ち製作)	実施施工 (セグメント桁)
主桁の設計基準強度		40N/mm ²	50N/mm ²
P C 鋼材	リラクゼーション率	5.0%	1.5%
	定着具のセット量	9mm	8mm
	1m当たりの摩擦係数	0.004 ⁷⁾	0.001 ⁷⁾
	1rad当たりの摩擦係数	0.3	0.14

本橋の実施施工では、総合評価方式の VE 提案において上部構造の設計、材料および施工面からの品質確保と耐久性向上を目的とした技術提案を行った。技術提案内容の詳細については後述するが、主に主桁の製作方法について当初案の場所打ち製作桁をあらため、工場製作によるセグメント桁の採用を提案した。VE 提案時に試設計を行った結果、表-3の通り、当初設計の材料選定を変更して、プレストレスをより効率的に導入することにより、セグメント桁としても場所打ち製作桁と同等の桁高 2.8m とすることができることを確認した。このことから経済性については当初案と同程度を確保したうえで、工場製作のメリットである部材品質の向上と現場作業の省力化が可能となるプレキャストセグメント工法を提案した。

2. 橋梁概要

2.1 工事概要

本橋の工事概要は以下の通りである。また、上部工工事着工前の状況を写真-1、2に示す。

- 工事名 : 一般国道4号 土屋大橋上部工工事
- 発注者 : 国土交通省 東北地方整備局 青森河川国道事務所
- 施工者 : ピーエス三菱・日本鋼弦コンクリート特定建設工事共同企業体
- 工事場所 : 青森県東津軽郡平内町大字土屋地内
- 工期 : 平成17年7月8日～平成19年6月25日
- 構造形式 : 3径間連結ポストテンション方式 PCT 桁橋(×3連)
- 主桁製作 : プレキャストセグメント工法
- 架設方法 : 2組桁による架設桁架設工法



写真-1 施工前写真
(橋梁側面より撮影)



写真-2 施工前写真
(A2橋台背面より撮影)

2.3 塩害環境

塩害環境下のコンクリート橋の耐久性の指標は、橋梁の架橋される環境、飛来塩分量、塩分の浸透度合い、コンクリートの品質や部材形状などを考慮して、設計上の目標期間内における鋼材位置での塩化物イオン濃度が鋼材腐食限界濃度以下であることを確認することで、耐久性性能を評価することが可能である。そのためには、架橋地点の飛来塩分量およびコンクリートの塩分浸透係数を把握する必要がある。

道路橋示方書¹⁾では、これまでの塩害損傷の実態および飛来塩分量全国調査の結果、コンクリートの塩分浸透試験に基づき、表-6、表-7、表-8および図-4のように設計上の目標年数を100年と想定した場合の塩害の影響による最小かぶり、塩害の影響地域区分を定めている。本橋が架橋される塩害環境は、塩害対策区分S、地域区分Cであり塩害の影響度合いが激しい環境下であるといえる。

表-6 塩害の影響による最小かぶり

塩害の影響の度合い		構造対策区分	(1) 工場で製作されるプレストレストコンクリート構造	(2) (1)以外のプレストレストコンクリート構造	(3) 鉄筋コンクリート構造
			影響が激しい	S	70(塗装鉄筋かコンクリート塗装を併用)
影響を受ける	I		50	70	
	II		35	50	70
	III				50
影響を受けない			通常のかぶり		

表-7 塩害の影響地域

地域区分	地域	海岸線からの距離	塩害の影響度合いと対策区分	
			対策区分	影響度合い
A	沖縄県	海上部及び海岸線から100mまで	S	影響が激しい
		100mを越えて300mまで	I	影響を受ける
		上記以外の範囲	II	
B	図-4および表-8に示す地域	海上部及び海岸線から100mまで	S	影響が激しい
		100mを越えて300mまで	I	影響を受ける
		300mを越えて500mまで	II	
		500mを越えて700mまで	III	
C	上記以外の地域	海上部及び海岸線から20mまで	S	影響が激しい
		20mを越えて50mまで	I	影響を受ける
		50mを越えて100mまで	II	
		100を越えて200mまで	III	

注) 朱書きは、本橋の塩害環境区分を示す。

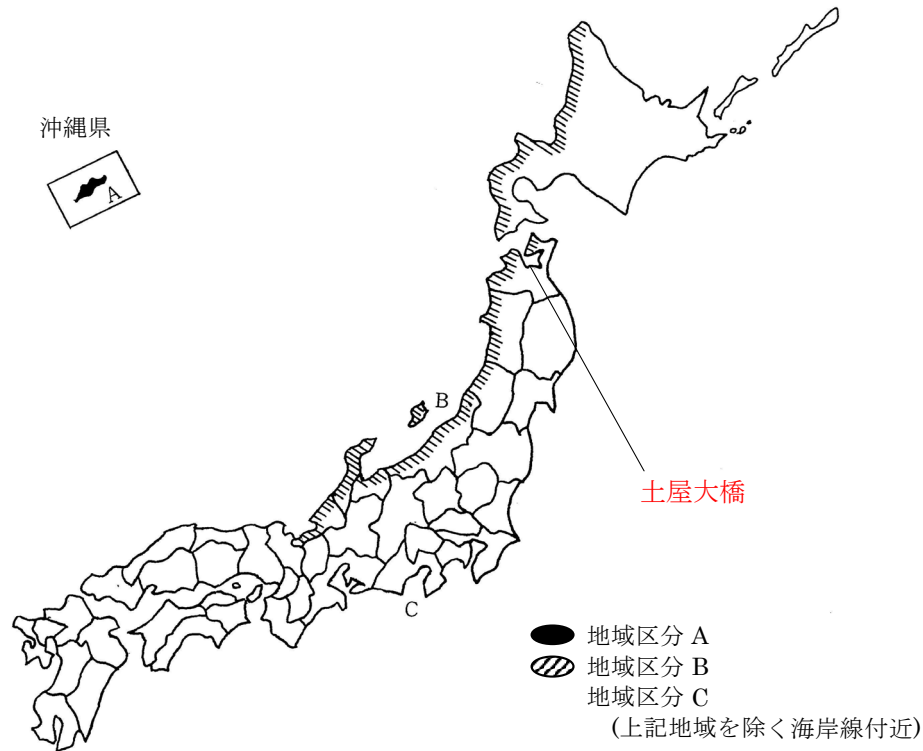


図-4 塩害の影響の度合いの地域区分

表-8 地域区分Bとする地域

北海道のうち、宗谷支庁の礼文町、利尻富士町、利尻町、稚内市、猿払村、豊富町、留萌支庁、石狩支庁、後志支庁、檜山支庁、渡島支庁の松前町

青森県のうち、蟹田町、今別町、平舘村、三厩村(東津軽郡)、北津軽郡、西津軽郡、大間町、佐井村、脇野沢村(下北郡)

秋田県、山形県、新潟県、富山県、石川県、福井県

3. 施工方法

架設要領図および施工工程表をそれぞれ図-5、表-9に示す。冬期間におけるコンクリート打設作業は、品質向上のため一般に避けることが望ましい⁵⁾。そのため、本橋の主桁セグメントの製作は、塩害や冬期施工の影響を受けない全天候設備を有するピーエス三菱北上工場屋内ヤードにおいて、冬期間を通して連続的に製作する。製作した主桁セグメントは、架橋場所までトレーラーにて運搬して、現地に仮置き養生を行う。主桁組立は、A1橋台背面に造成した主桁組立ヤードにて行う。主桁架設は、組み立てた主桁を自走台車にて架設位置まで引き出し、2組桁による下吊り式架設桁架設工法によって、A1~P1径間から順次架設する。本架設工法は、2組の架設桁を用いて、後方は橋台あるいは既設桁上に軌道梁を載せ、前方には橋脚上に軌道付きのバンドを配置して、下から桁を吊り上げて横取り架設する工法である。本橋の主桁重量は、約200tと国内最大クラスの規模であり、1組桁の最大適用範囲(国土交通省基準)である155tを大きく超えている。このため、1組桁で架設しようとした場合には転用の見込めない新たな架設機材が必要となり不経済な施工となる。このことから2組桁による架設桁架設を採用している。

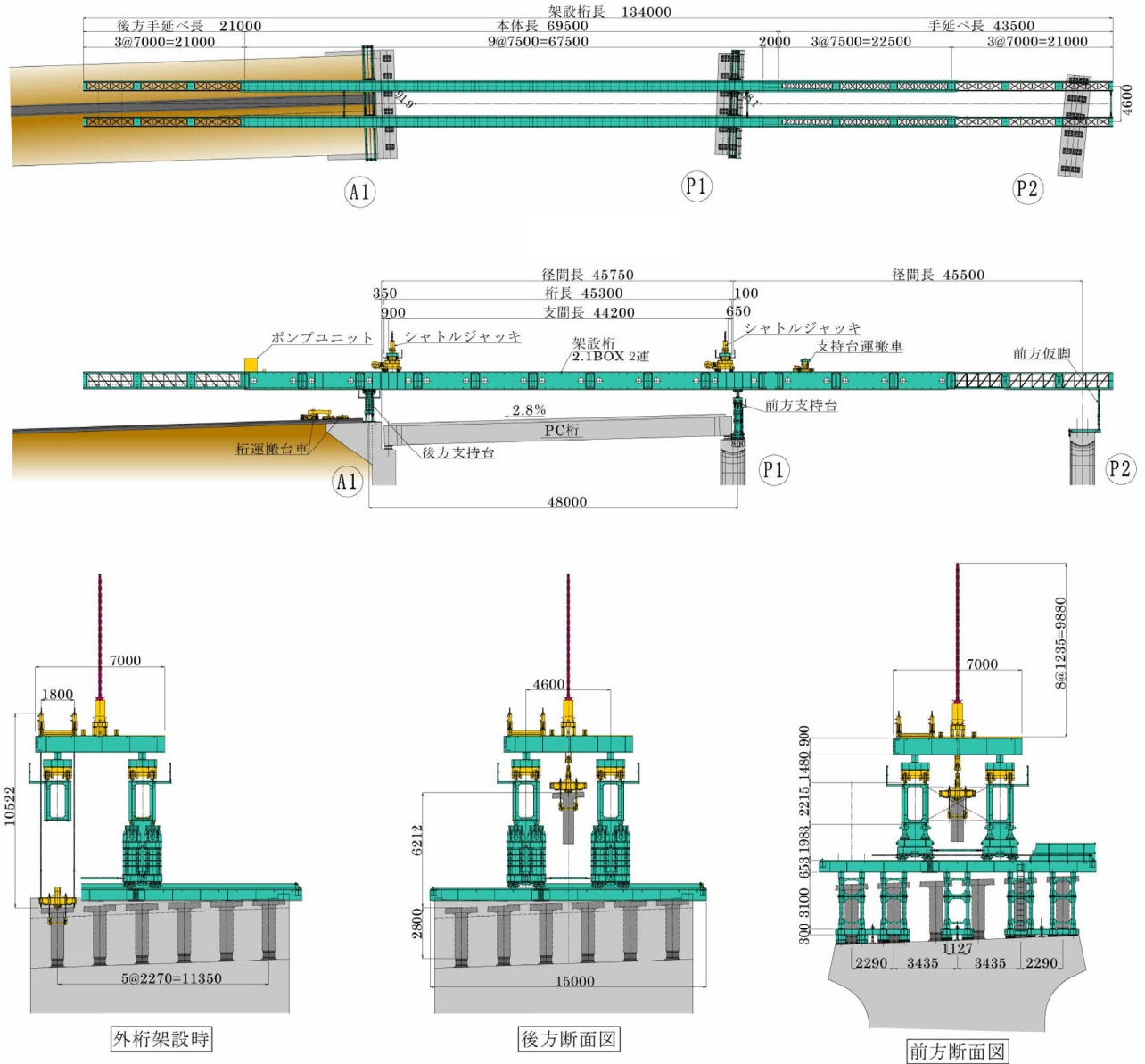


図-5 架設要領図

表-9 施工工程表

	H17		H18										H19									
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6		
準備工	■																					
主桁製作工		■																				
支承工	■		■																			
主桁組立工							■															
主桁架設工							■															
床版横組工															■							
張出床版工															■							
地覆工															■							
橋面工															■							
後片け工																					■	

4. 塩害対策方法

コンクリート構造物の塩害は、コンクリート中の鉄筋および PC 鋼材が塩化物イオンにより腐食することで、鋼材の体積変化が起こり、コンクリートのひび割れや剥離などを引き起こす現象である。塩化物イオンは、コンクリートの製造過程において材料から供給される場合と、構造物の供用後に飛来塩分や凍結防止剤などによって外部環境から供給される場合が考えられる。コンクリート内部に浸入した塩化物イオンが鋼材付近まで達し、鋼材付近の塩化物イオン濃度が腐食限界値に達すると鋼材表面の不動態皮膜が破壊され、鋼材が腐食する。また、塩化物イオンの移動速度の指標である拡散係数は、コンクリートの緻密性に関係があるため、セメントの種類や水セメント比に大きく影響を受ける。本橋の塩害対策は、その設計耐用年数を 100 年として、①緻密なコンクリートとすることで外部環境から浸入する塩化物イオンの拡散速度を低減、②施工過程に浸入する塩化物を抑制、③PC 鋼材および鉄筋の防錆、④多重防錆仕様とすることで塩害に対するリスクを低減する、など様々な対策を施している。さらに、耐久性に対するリスクをより低減するためマルチレイヤープロテクションの概念を取り入れた。本節では、本橋の塩害対策方法の詳細について述べる。

4.1 塩害対策一覧

本橋の塩害対策を、表-10 に示す。

表-10 塩害対策一覧

項 目		仕 様	
コンクリートの品質と施工	主桁製作方法	プレキャストセグメント化	
	水セメント比	36%以下	
	単位セメント量	330kg/m ³ 以上	
	単位水量	160kg/m ³ 以下	
	空気量	6.0%(凍結融解抵抗性)	
	型 枠	透水性型枠	
	打設時期(場所打ち)	冬期間の打設を回避	
	間詰めコンクリート	ひび割れ防止対策として膨張材を使用	
鉄 筋	鉄筋防錆	エポキシ樹脂塗装鉄筋(220±40μm)	
	加工・組立	樹脂被覆結束線の使用	
PC鋼材	PC鋼材防錆		ポリエチレン樹脂被覆PC鋼材
	シース	標準部	ポリエチレン製シース
		セグメント目地部	セグメントカップラーシース
定着具防錆		エポキシ樹脂塗装仕様(220±40μm)	
鋼材のかぶり	標準部(床版上面)		70mm(35mm) 飛来塩分量から必要かぶりを算出
	スペーサ		モルタルスペーサ
	インサート		セラミック製

4.2 VE 提案による主桁のセグメント化

4.2.1 プレキャスト化による効果

当初設計での主桁の製作方法は、場所打ち製作桁として計画していた。実施施工では、前項 1.2 に前述したように総合評価方式の VE 提案において、主桁の製作方法をプレキャストセグメント工法とすることを提案した。主桁の製作方法をプレキャストセグメント工法とすることによるメリットは、主に、①設備が整備された工場で作成、管理を行うため、部材品質が向上する、②沿岸部でのコンクリート打設作業を省略できるため、部材品質が向上する、③現場作業が省力化できるため、工期の短縮が図れる、④現場作業の省力化

により、海洋への環境保全に貢献できる、などが挙げられる。このようにプレキャストセグメント工法の採用は、塩害対策として重要な部材の耐久性を向上させることができるほか、工期の短縮および環境保全に大きく貢献できるため、非常に有益な提案であるといえる。

工場製作とすることで部材品質が向上する具体的要因は、①優れた設備環境であるため高い品質管理が可能、②熟練した工員による高い製造管理が可能、③屋内での製作であるため、自然環境に影響されず安定した品質管理が可能、などが挙げられる。さらに、水セメント比を当初設計の43%から、実施施工では35.9%に低減することで、より耐久性の向上を図った。図-6は、コンクリート内での塩化物イオンの浸透速度を指標する塩化物イオンの拡散係数と水セメント比の関係を示したものである⁴⁾。簡便に評価した場合、水セメント比を低減したことで塩化物イオンの拡散係数を、約50%低減することが可能となった。

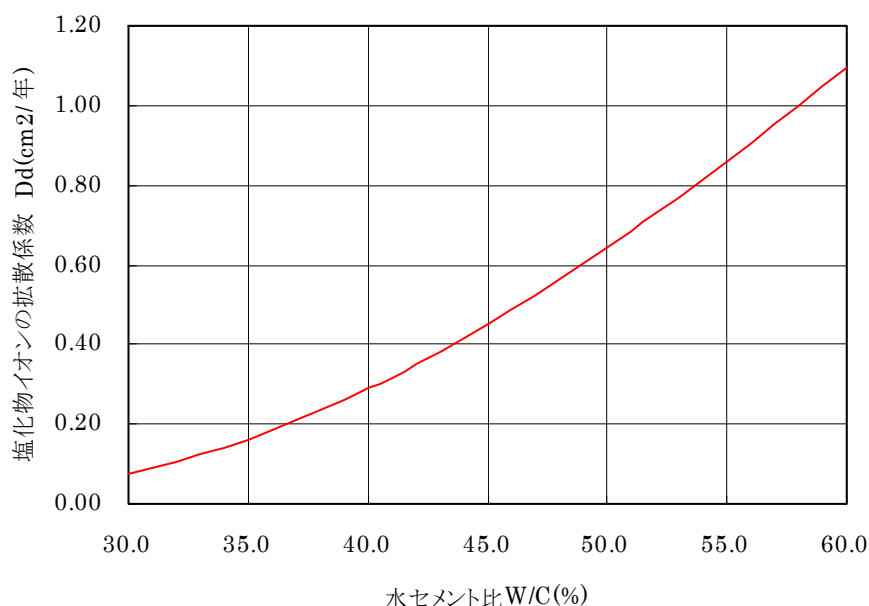


図-6 塩化物イオンの拡散係数と水セメント比の関係

4.2.2 構造計算への配慮

当初設計では、前項 1.2 で前述したように主桁の製作方法について比較検討を行った結果、場所打ち製作方法としている。これは、当初設計の試設計において場所打ち製作桁としたほうが、プレキャストセグメント桁に比べて桁高を 0.2m 低減可能であることに起因する。

表-11 使用材料の変更と材料特性の改善

		発注時 (場所打ち製作)	実施施工 (セグメント桁)	改善効果	
コンクリート	設計基準強度	40N/mm ²	50N/mm ²	弾性変形とクリープおよび乾燥収縮によるプレストレス減少量を低減	
	プレ ストレス 導入時	強度	30N/mm ²		50N/mm ²
		クリープ	2.6		2.0
		乾燥収縮	20×10 ⁻⁵		18×10 ⁻⁵
PC鋼材	リラクセーション	ノーマル	低リラク	鋼材のリラクセーション、くさび定着によるセット量およびシースの摩擦などによるプレストレス減少量を低減	
	セット量	9mm	8mm		
	1m当たりの摩擦係数	0.004	0.001 ⁷⁾		
	1rad当たりの摩擦係数	0.3	0.14 ⁷⁾		

実施施工では、表-11に示す通り、使用材料の選択を変更して材料特性を改善し、プレストレスを効率的

に導入することで、プレキャストセグメント桁の桁高の低減を試みた。主な改善点は、①セグメント化により、プレストレス導入時の圧縮強度を増加させたことから主桁弾性変形が減少、②セグメント化により主桁のクリープ乾燥収縮によるプレストレスの減少量が低減、③低リラクセーション品のPC鋼材の採用、④定着具の変更により、くさび定着時のセット量を低減、⑤ポリエチレンシースの採用により、摩擦係数を低減、などが挙げられる。その結果、表-12に示す通り、プレキャストセグメント桁としても、場所打ち製作桁の桁高2.8mと同一の桁高とすることが可能となった。

表-12 主桁の応力照査結果

		発注時 (場所打ち製作)	実施施工 (セグメント桁)	
桁高		2.8m		
設計基準強度		40N/mm ²	50N/mm ²	
P C 鋼材	鋼材種別(本数)	SWPR7B 12S15.2(6本)		
	初期緊張応力度	1360N/mm ²	1240N/mm ²	
	有効緊張応力度	839N/mm ²	962N/mm ²	
(主 支 桁 間 応 力 照 査)	上縁	合成応力	9.7N/mm ²	10.0N/mm ²
		許容値	$\sigma < 14.0$	$\sigma < 16.0$
	下縁	合成応力	-0.6N/mm ²	0.6N/mm ²
		許容値	$\sigma > -1.5$	$\sigma > -1.8$

4.3 必要かぶりの検討とPC鋼材、鉄筋の防錆仕様

4.3.1 概要

鋼材の防食においては、設計耐用年数の間における鋼材位置での塩化物イオン量が、使用する鋼材の腐食発生限界塩化物イオン量を超えないように、所要のかぶりを確保することが必要である。そのためには、架橋地点の飛来塩分量、コンクリートの種類、配合、品質、かぶりの施工精度などに配慮する必要がある。そこで本橋では、鉄筋およびPC鋼材に対する必要な純かぶりを、独立行政法人土木研究所研究報告によるミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅱ)³⁾、(Ⅲ)⁴⁾に準じて評価した。

4.3.2 必要かぶりの算定方法

必要かぶりの算定は、表-13に示す4ケースについて行った。必要かぶりの算定は、本橋の架橋地点の飛来塩分量が不明であったため、本橋本来の地域区分Cのほかに、安全側に評価するために地域区分Bに定める飛来塩分量でも評価を行った。また、飛来塩分量の標準値を逸脱するケースである非透過確率97.7%や、波しぶきが直接かかる場合についても評価を行った。評価パラメータであるW/Cと初期塩化物イオン量は、本橋の主桁製作での実際の値を用いた。

表-13 必要かぶりの検討ケース

		W/C, 初期塩分量	C1	
ケース1	地域区分B	飛来塩分量を平均値とした場合	本橋の値	0.92
ケース2		非透過確率97.7%の飛来塩分量とした場合	本橋の値	0.92
ケース3	波しぶきが直接かかるものと仮定した場合(区分なし)		本橋の値	注
ケース4	地域区分C	飛来塩分量を平均値とした場合	本橋の値	0.34

注) ケース3では地域区分の別に関わらず、 $Co=13.0\text{kg/m}^3$ となる。

表-14 水セメント比および初期塩化物イオン量

	本橋の値
水セメント比 W/C(%)	35.9%
初期塩化物イオン量	0.07kg/m ³

表-15 1km 換算飛来塩分量 C1³⁾

地域区分	C1
A	0.62(1.0)
B	0.92
C	0.34

ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(II)³⁾, (III)⁴⁾に基づいた必要かぶりの算定方法を、以下に示す。

拡散係数 Dd および Dc を以下に示す。

$$Dd = 31536000 Dc$$

$$Dc = (5 \times 10^{-7}) e^{-1.6(C/W)}$$

ここに、 Dd : 塩化物イオンに対する設計拡散係数(cm²/年)

Dc : 塩化物イオンに対する設計拡散係数(cm²/sec)

C : 単位セメント量(kg/m³)

W : 単位水量(kg/m³)

必要かぶりの算定は、以下のように算出する。

$$Cd = \gamma d \cdot Co \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{Dd \cdot t}} \right) < C_{corr} - C_{init}$$

ここに、 Cd : 鋼材位置における塩化物イオン量の期待値(kg/m³)

γd : 鋼材位置における塩化物イオン濃度 Cd の設計値のばらつきを考慮した安全係数

Co : コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m³)

c : かぶり(mm)

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数(年)

C_{corr} : 鋼材腐食発生限界量(1.2kg/m³)

C_{init} : 初期塩化物イオン量(kg/m³)

erf : 誤差関数

コンクリート表面における塩化物イオン量 Co は、次式による。

$$Co = 1.2 \cdot Cair^{0.4}$$

ここに、 $Cair$: 架橋地点における飛来塩分量(mdd · NaCl) mdd=mg/dm²/day

$$Cair = C_1 \cdot d^{-0.6}$$

ここに、 C_1 : 1 km 換算飛来塩分量(mdd · NaCl)

ただし、非透過確率 97% は、報告書(II)³⁾の飛来塩分量と海岸線からの距離との関係グラフより引用する。

d : 海岸線からの距離(km)

ただし、海上や海岸線上で 0km の場合は、0.001km とする。従って、本橋では 0.001km となる。

ここで、検討ケース1についての算定を以下に示す。

塩化物イオンに対する設計拡散係数 Dd は以下の通りである。なお、単位セメント量 $C=432\text{kg/m}^3$ 、単位水量 $W=155\text{kg/m}^3$ とする。

$$Dc = (5 \times 10^{-7}) \cdot e^{-1.6(C/W)} = (5 \times 10^{-7}) \cdot e^{-1.6(432/155)} = 5.8 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$$

$$Dd = 3153600Dc = 3153600 \times 5.8 \times 10^{-9} = 0.1824 \text{cm}^2/\text{年}$$

架橋地点における飛来塩分量 C_{air} 、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 C_o は以下の通りである。

$$C_{air} = C_1 \cdot d^{-0.6} = 0.92 \times 0.001^{-0.6} = 58.05 \text{mdd} \cdot \text{NaCl}$$

$$C_o = 1.2 \cdot C_{air}^{0.4} = 1.2 \times 58.05^{0.4} = 6.09 \text{kg/m}^3$$

鋼材位置における塩化物イオン量の期待値 C_d および誤差関数 $1-erfk$ は以下の通りである。なお、安全係数 $rd=1.0$ 、鋼材腐食発生限界値 $C_{corr}=1.2\text{kg/m}^3$ 、初期塩化物イオン量 $C_{init}=0.07\text{kg/m}^3$ (北上工場試験結果) とする。

$$C_d = 1.2 - 0.07 = 1.13 \text{kg/m}^3$$

$$1-erfk = C_d / C_o = 1.13 / 6.09 = 0.186$$

表-16より、 k 値を算定すると $k=0.792$ が得られる。

このため、 $Dd=0.1824\text{cm}^2/\text{年}$ より、設計耐用年数を100年における必要かぶり厚 c は以下の通りである。

$$c = k \cdot 2(Dd \cdot t)^{1/2} = 0.792 \times 2 \times (0.1824 \times 100)^{1/2} = 6.77 \text{cm} = 67.7 \text{mm}$$

以上より、検討ケース1における必要かぶり厚 $c=66.7\text{mm}$ となる。

表-16 $1-erfk$ 数値表⁴⁾

k の値	10 ⁻² 位の値										
	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	
10 ⁻¹ 位の値以上	0.0	1.000	0.989	0.977	0.966	0.955	0.944	0.932	0.921	0.910	0.899
	0.1	0.888	0.876	0.865	0.854	0.843	0.832	0.821	0.810	0.799	0.788
	0.2	0.777	0.766	0.756	0.745	0.734	0.724	0.713	0.703	0.692	0.682
	0.3	0.671	0.661	0.651	0.641	0.631	0.621	0.611	0.601	0.591	0.581
	0.4	0.572	0.562	0.553	0.543	0.534	0.525	0.515	0.506	0.497	0.488
	0.5	0.480	0.471	0.462	0.454	0.445	0.437	0.428	0.420	0.412	0.404
	0.6	0.396	0.388	0.381	0.373	0.365	0.358	0.351	0.343	0.336	0.329
	0.7	0.322	0.315	0.309	0.302	0.295	0.289	0.282	0.276	0.270	0.264
	0.8	0.258	0.252	0.246	0.240	0.235	0.229	0.224	0.219	0.213	0.208
	0.9	0.203	0.198	0.193	0.188	0.184	0.179	0.175	0.170	0.166	0.161
	1.0	0.157	0.153	0.149	0.145	0.141	0.138	0.134	0.130	0.127	0.123
	1.1	0.120	0.116	0.113	0.110	0.107	0.104	0.101	0.0980	0.0952	0.0924
	1.2	0.0897	0.0870	0.0845	0.0819	0.0795	0.0771	0.0748	0.0725	0.0703	0.0681
	1.3	0.0660	0.0639	0.0619	0.0600	0.0581	0.0562	0.0544	0.0527	0.0510	0.0493
	1.4	0.0477	0.0461	0.0446	0.0431	0.0417	0.0403	0.0389	0.0376	0.0363	0.0351
	1.5	0.0339	0.0327	0.0316	0.0305	0.0294	0.0284	0.0274	0.0264	0.0255	0.0245
	1.6	0.0237	0.0228	0.0220	0.0212	0.0204	0.0196	0.0189	0.0182	0.0175	0.0168
	1.7	0.0162	0.0156	0.0150	0.0144	0.0139	0.0133	0.0128	0.0123	0.0118	0.0114
	1.8	0.0109	0.0105	0.0101	0.0097	0.0093	0.0089	0.0085	0.0082	0.0078	0.0075
	1.9	0.0072	0.0069	0.0066	0.0063	0.0061	0.0058	0.0056	0.0053	0.0051	0.0049
2.0	$k=2$ 以上は便宜的に $(1-Erfk) = 0$ として計算してよい。										

4.3.3 算定結果

耐久性確保の目標年数を100年として上記の4ケースに対して必要かぶりを検討した結果を表-17に示す。検討の結果、地域区分Cとして検討した場合での必要かぶりは、59.5mmとなる。また、本橋の飛来塩分量を最も厳しい地域である日本海沿岸の非透過確率97.7%の飛来塩分量と仮定した場合での必要かぶりは、77.6mmとなった。

表-17 必要かぶりの算定結果

			必要かぶり (mm)
ケース1	地域区分B	飛来塩分量を平均値とした場合	67.7
ケース2		非透過確率97.7%の飛来塩分量とした場合	77.6
ケース3	波しぶきが直接かかるものと仮定した場合（区分なし）		77.1
ケース4	地域区分C	飛来塩分量を平均値とした場合	59.5

4.3.4 防錆仕様のまとめ

鉄筋の必要かぶりの検討結果、ケース2,3のような場合では、設計耐用年数の間における鉄筋位置での塩化物イオン量が、鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン量を超えることとなる。このことから、鉄筋は防錆処理を施すことが必要となる。一方、PC鋼材の必要かぶりの検討結果は、日本海沿岸地域の非透過確率97.7%の飛来塩分量を考慮して検討した場合においても、その必要かぶりは77.6mmであり、本主桁のシースまでの純かぶり91.0mmよりも小さい値となる。このことから、PC鋼材の防錆仕様は、「かぶり+鋼製シース+裸鋼材」で耐久性上の要求性能を満足することとなる。

しかし、どのような防錆システムでも完全なものはないという考え方、いわゆる「マルチレイヤープロテクション」の観点から評価した場合では、耐久性に対するリスクをより低減するため、多重防食とする必要がある。特にPC鋼材は、PC部材にとって最も重要な構造材料であり、その防錆仕様の選定には、この概念を十分に配慮する必要がある。本橋のPC鋼材の防錆仕様は、発注者との協議の結果、発注者の主体的な要請によりマルチレイヤープロテクションの概念を取り入れた多重防錆仕様とした。

樹脂被覆鋼材の種別は、本橋で使用する12S15.2の場合、エポキシ樹脂被覆鋼材とポリエチレン樹脂被覆鋼材が挙げられる。PC鋼材の機械的特性は、前項4.2.2で述べたように構造計算の結果から低リラクセーション品が条件となる。エポキシ樹脂被覆鋼材は、被覆処理過程に熱処理を施すため、見掛けのリラクセーション率が、ノーマル品と同等となることから、低リラクセーション品とすることができない。一方、ポリエチレン樹脂被覆鋼材は、製造過程に熱処理を行う必要がなく、被覆前の鋼材の機械的特性を損なわないため、低リラクセーション品と同様に取り扱うことができる。このことから、本橋ではポリエチレン樹脂被覆鋼材を選定した。なお、ポリエチレン樹脂被覆鋼材には、スープロストランドを採用した。

表-18 鉄筋とPC鋼材の防錆仕様

	塩害対策
かぶり	70mm
鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋
PC鋼材	ポリエチレン製シース +グラウト +ポリエチレン樹脂被覆鋼材

4.4 セグメント目地部の塩害対策

セグメント工法では、セグメントの目地部の耐久性の確保が重要となる。セグメント目地部は、活荷重載荷時においても目地部に引張応力が生じないように設計されている。しかし、設計上予想していない外力によって、万一、セグメント目地部にひび割れが発生した場合、そこから直ちにPC鋼材が腐食するようなことは好ましくない。本橋のPC鋼材の防錆仕様は「マルチレイヤープロテクション」の観点から多重防錆仕様としており、そのひとつとしてポリエチレン製シースを使用している。しかし、セグメント目地部におけるシース配置は通常、不連続となっているため、目地部のみに着目した場合には、多重防錆となっていないことになる。そこで本橋では、セグメント目地部のシースとして、ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅲ)⁴⁾において推奨しているセグメントカップラーシースを採用した。このセグメントカップラーシースは、セグメント目地部において2重管構造となっているため、上記のように万一、セグメント目地部にひび割れが発生した場合においても、シース内への塩化物イオンの浸入を遮断することが可能となる。

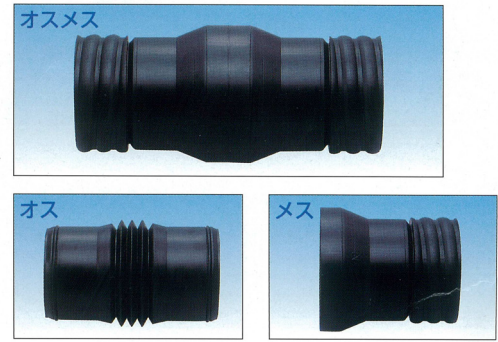


図-7 セグメントカップラーシース

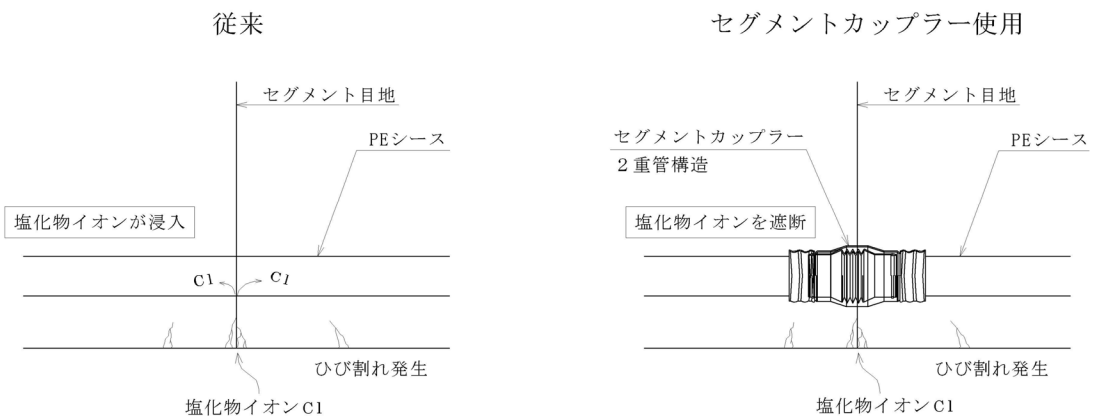


図-8 模式図



写真-3 セグメントカップラーシース設置状況

4.5 間詰めコンクリート

間詰め部の床版、横桁コンクリートは、主桁架設後に施工される2次施工のコンクリートである。この間詰め部の床版および横桁部材は、主桁と同様、重要な構造部材である。特に床版は、輪荷重を直接支持する部材であることから、特に重要な構造部材といえる。しかし、このような間詰めコンクリートを施工する場

合、間詰めコンクリートの収縮変形が主桁コンクリートに拘束されることで、収縮ひび割れが発生することが懸念される。

そこで本工事では、間詰め部の床版および横桁コンクリートに膨張コンクリートを使用することで、収縮ひび割れの発生を抑制することを試みた。膨張材の使用量は、収縮補償として一般的な 30kg/m^3 とした。図-9、図-10は、間詰め床版コンクリートの施工における膨張材使用の効果について、立体 FEM を用いた温度応力解析によって評価した結果である。図は、解析モデルの各要素が経験した最低のひび割れ指数を表示した結果である。解析の結果、膨張材を使用した場合、間詰め床版部に発生するひび割れ指数が 1.4 となり、膨張材なしと比較してひび割れの発生確率を低減することができた。このことから膨張コンクリートの使用は、床版や横桁部材に耐久性上の初期欠陥となり得るようなひび割れの発生を抑制できるものと考えられる。

以上の解析結果から本橋では、間詰め床版、横桁コンクリートの施工時ひび割れを抑制し、耐久性上の初期品質を確保する目的で、間詰めコンクリートに膨張コンクリートを使用する。

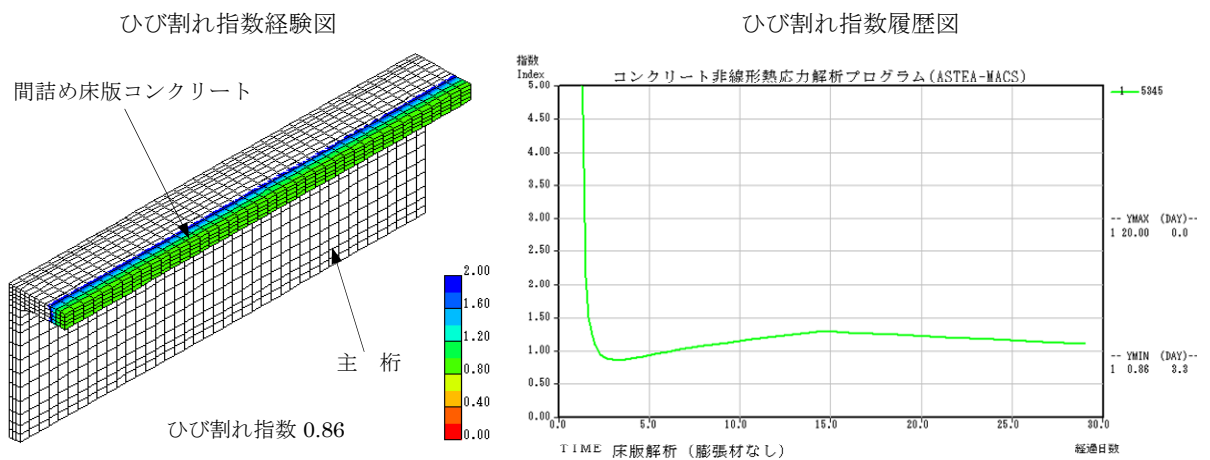


図-9 ひび割れ指数(膨張材なし)

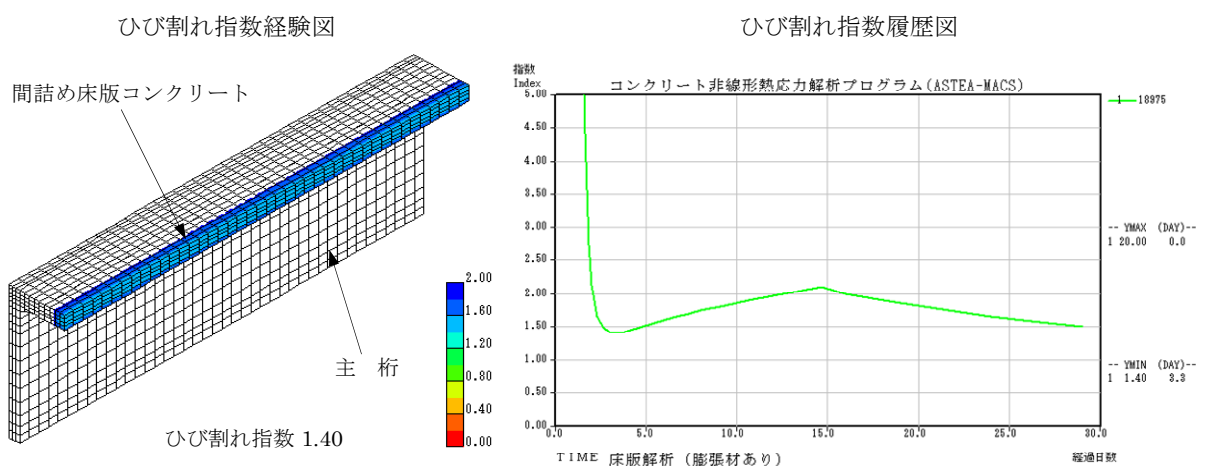


図-10 ひび割れ指数(膨張材あり)

さらに、間詰め部の打ち継ぎ面は、粗面仕上げとし打設前に十分な吸水を行い、打設後は湿潤養生を行う。粗面仕上げと膨張コンクリートの併用は、打ち継ぎ部の耐久性向上に寄与するものと考えられる。道路橋示方書¹⁾では、収縮補償コンクリートの使用と粗面仕上げが、床版の耐久性を向上させるとしている。



写真-4 粗面仕上げ状況(1)



写真-5 粗面仕上げ状況(2)

4.6 透水性型枠の採用

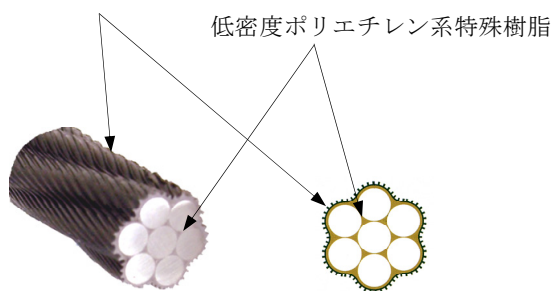
コンクリート施工においてコンクリート表層部に気泡やブリージング水が残ると、表層部の水セメント比が大きくなる、あるいは表層部がポーラスな状態となり、耐久性が低下する。従って、コンクリート表層部を密実に仕上げることは、耐久性を確保するうえで非常に重要である。コンクリート表層部に気泡が残らないようにするためには、打ち込み速度の管理や締め管理を行うほかに、透水性型枠を使用する方法がある。透水性型枠は、コンクリート表層部の余剰水や気泡を排出する効果があり、これによりコンクリート表層部の組織を緻密化する。本橋では、主桁、横桁および地覆に透水性型枠を使用することで、耐久性の向上を図った。

4.7 被覆 PC 鋼材定着具の定着性能確認試験

4.7.1 概要

前項 4.3.4 では、塩害対策の一つとして縦締め PC 鋼材にスープロストランドを採用することを述べた。スープロストランドは、横締め鋼材や外ケーブル構造として採用された事例は多いが、本橋のように内ケーブル構造の縦締め鋼材として採用した事例は少ない。スープロストランドをくさび定着する場合は、従来の裸仕様の PC 鋼材を定着するための定着具では定着することができない。このため本工事では、スープロストランドを定着できる定着具として、FKK フレシネー工法被覆鋼より線定着具 12TC15 を採用した。12TC15 は、樹脂被覆を施した塩害対策定着具である。しかし、12TC15 は、新開発された定着装置であり採用事例がないことから、定着装置としての要求性能を確認する必要がある。そこで本工事では、土木学会コンクリート標準示方書[規準編]²⁾に定められる試験に基づいて定着具の定着性能を確認した。本項では、その試験方法および試験結果について報告する。

高耐久ポリエステル系硬質樹脂



PC鋼より線(7本より ϕ 15.2mm)

写真-6 スープロストランド

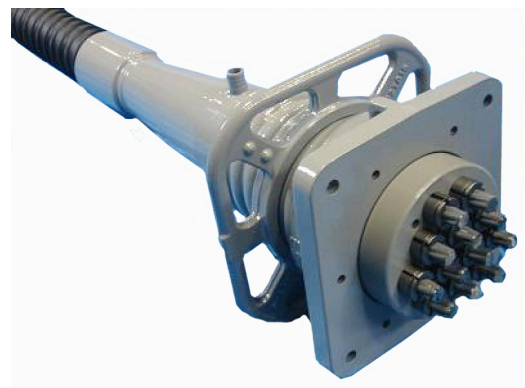


写真-7 12TC15

4.7.2 試験方法

定着具の定着性能確認試験は、土木学会コンクリート標準示方書[規準編]に定められる「PC工法の定着具および接続具の性能試験方法(JSCE-E 503-1999)」のうち、「2.2 定着具および接続具の緊張材と組み合わせた性能試験」に準じて実施した。試験は、図-11に示す 10000kN 引張試験装置を用いて行った。試験方法は、スープロストランド(12S15.2mm)を、規格破断荷重の 95%(0.95Pu)まで片引きにより緊張し、定着効率が 95%以上であることを確認する(表-19参照)。なお、定着効率とは、規格引張荷重に対する最大引張荷重の比を百分率で示したものである。

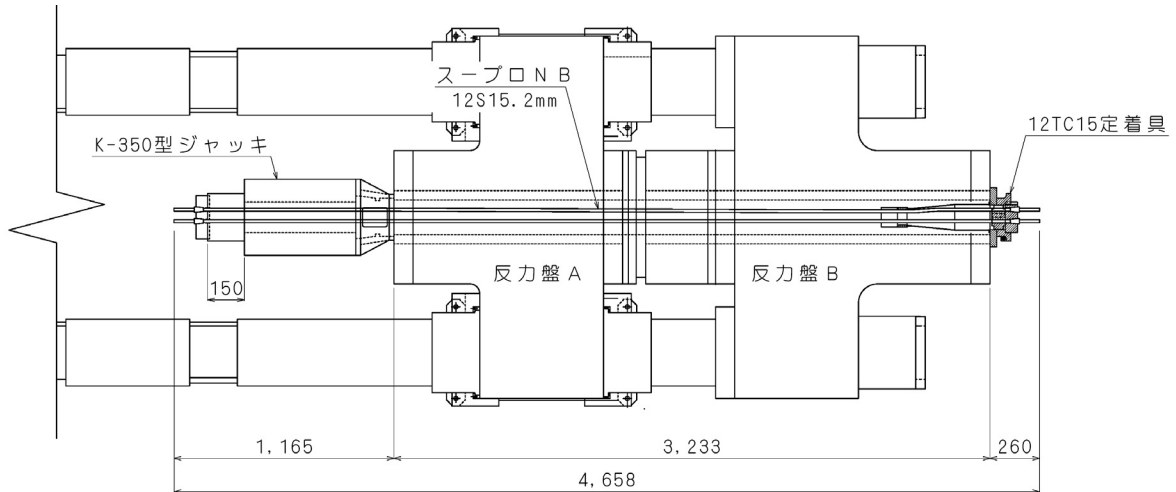


図-11 10000kN 引張試験装置



写真-8 10000kN 引張試験装置
(極東鋼弦コンクリート技術研究所試験装置)

表-19 試験時最大荷重および圧力

緊張材	規格引張荷重 Pu	試験時最大荷重 0.95Pu	ジャッキ受圧面積	試験時最大圧力
SWPR7BL 12S15.2	3132kN	2975.4kN	541.1cm ²	55.0MPa

4.7.3 試験結果

本定着具は、PC 鋼材の規格破断荷重の 95%(0.95Pu) 載荷時においても、めり込みおよびズレなどの異常がなく、土木学会規準である定着効率 95%以上を満足する結果が得られた。

写真-9, 10に固定定着縁の拡大写真を示す。

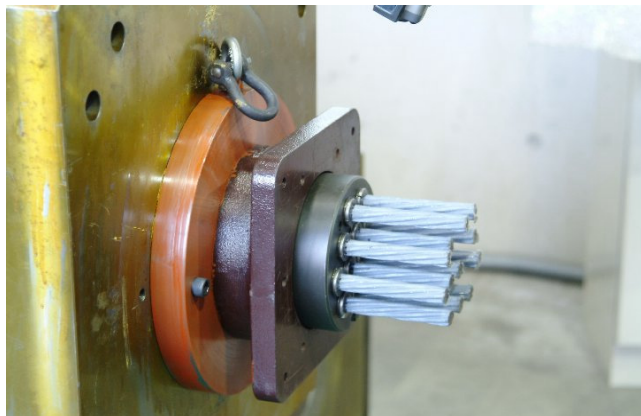


写真-9 試験後の定着部

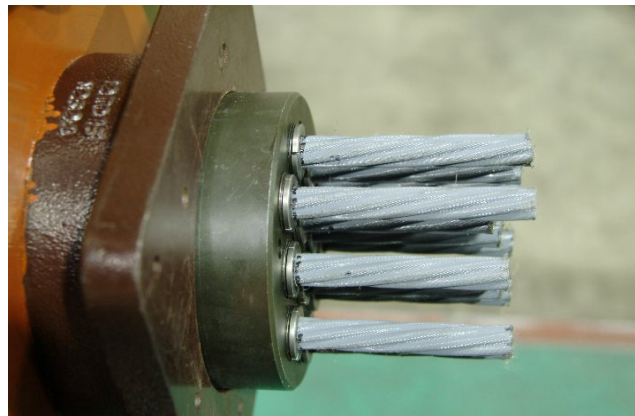


写真-10 定着部(拡大)

表-20 試験結果

定着具	緊張材	試験方法	試験結果	判定
12TC15	SWPR7BL 12S15.2	JSCE-E 503-1999	定着効率95% を満足した	異常なし

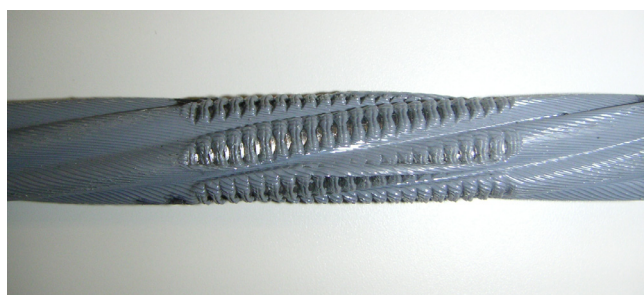


写真-11 試験後のスープロストランド

4.8 主桁型枠の透水シートの選定試験

4.8.1 概要

前項 4.6 では、塩害対策の一つとして主桁セグメント製作に透水性型枠を使用することを述べた。本橋の主桁の型枠は鋼製型枠を使用しているが、これまでに鋼製型枠に透水シートを採用して施工した事例が少ない。このためセグメント製作を行ううえで、①透水シートの貼り付け、コンクリート打設および脱枠などの施工性、②外観性、③透水シートの転用性、などについて懸念された。そこで、ピーエス三菱北上工場において、実施施工の条件で部分的なセグメント桁の試験製作を行い、透水シートの選定試験を行った。

4.8.2 試験方法

試験用セグメントは、桁高 2.8m(実桁高)、セグメント長 3.05m とする試験桁とした。試験条件は、配合、締固め方法、配筋および主 PC 鋼材配置などについて実桁とほぼ同等とし、実桁の製作を再現できる条件とした。透水シートの選定は、鋼製型枠に使用可能な市販製品として表-21 に示す 2 社の製品を試験対象とした。

表-21 透水シート

A社製	クラザップシート
B社製	エアレックス



写真-12 透水シート貼り付け



写真-13 型枠組立完了

4.8.3 試験結果

試験結果の一覧を表-22 に示す。それぞれの透水シートを、①透水シートの貼り付け、コンクリート打設および脱枠などの施工性、②外観性、③透水シートの転用性、などについて比較した結果、A社製のクラザップシートが本橋の施工に適していると判断し、実施施工で採用した。

表-22 試験結果一覧

	クラザップシート	エアレックス	比較評価
透水シート 貼り付け	△ 施工性に難あり 貼り付け作業に4名必要	△ 施工性に難あり 貼り付け作業に4名必要	両者とも施工性に難あり
打設作業	○ 異常を認めず	○ 異常を認めず	両者とも問題なし
脱 枠	△ 施工性に難あり 脱枠時にシートが桁に残る 除去可能	× 施工性に難あり 脱枠時にシートが桁に残る 桁に食込み除去不可能	両者とも施工性に難あり エアレックスはシートの 除去が出来ない場合あり
外 観	○ 肌はツヤがあり綺麗 わずかなシワはあるが気にな らない	△ 肌はツヤがなく色むらあり シワ、めり込みがあり	外観はツヤ、色むらおよび シートのめり込みなど 比較すればクラザップシ ートが優れている
転 用	× 転用不可	× 転用不可	両者とも転用不可



写真-14 シート貼り付け
(クラザップシート)



写真-15 シート貼り付け
(エアエックス)



写真-16 脱枠完了
(クラザップシート)



写真-17 脱枠完了
(エアエックス)



写真-18 外観
(クラザップシート)



写真-19 外観
(エアエックス)

5. 施工

5.1 セグメント桁製作

主桁セグメントは、ピーエス三菱北上工場で作成した。以下に、セグメント桁の製作状況を示す。



写真-20 鉄筋組組立



写真-21 型枠組立



写真-22 コンクリート打設



写真-23 蒸気養生



写真-24 脱枠



写真-25 仮置

5.2 主桁組立, 架設

架設桁の組立および主桁架設状況を, 以下に示す.



写真-26 架設桁組立



写真-27 架設桁据付完了



写真-28 主桁組立



写真-29 主桁引き出し



写真-30 主桁吊り上げ



写真-31 主桁架設

6. まとめ

平成18年6月現在、本橋の施工はA1～P1径間の主桁架設を無事に終えて、2径間目の主桁架設に着手している。また、北上工場での主桁製作作業は、平成18年8月中に終える予定である。

本橋の塩害対策は、設計耐用年数を100年として、①主桁のセグメント化による製品品質の向上と塩害環境下である現場作業の省力化、②必要かぶりの検討および確保、③PC鋼材の多重防錆仕様、④セグメント目地部の遮塩性の向上、⑤透水性型枠の使用、⑥間詰め部コンクリートの耐久性の向上、⑦樹脂被覆PC鋼材定着体の定着性能確認試験の実施、⑧透水シート試験などといった様々な対策を講じた。本橋の塩害対策の概念では、どのような防錆システムでも完全なものはないという考え方、いわゆる「マルチレイヤープロテクション」の観点として、耐久性に対するリスクをより低減するために、あらゆる塩害対策を併用した。

特に主要構造である主桁コンクリート、床版目地部、主要材料のPC鋼材については、W/Cの低減、透水型枠の使用、鋼材の多重防錆、膨張コンクリートの使用など塩害対策を強化することで、耐久性の向上を図っている。このため、現在の塩害対策における技術水準と本橋の架橋地点の塩害環境などを考慮すれば、本橋で行った塩害対策は十分であったものと評価している。

今後、コンクリート橋の塩害対策の展望としては、LCC評価の標準化、非金属緊張材や高耐久性コンクリートなど新材料の採用など、技術水準の向上が望まれる。最後に本報告が少しでも今後の同種工事の参考となれば幸いである。



写真-32 施工進捗状況

謝辞

本橋の施工は、国土交通省東北地方整備局ならびに同局青森河川国道事務所の方々の多大なご支援、ご指導をいただいている。また、本橋の計画では、株式会社長大ならびに極東鋼弦コンクリート株式会社の方々のご協力をいただいている。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅲ），2002.3
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]，2005
- 3) ミニмумメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅱ) —コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討—，国土交通省土木研究所ほか，2000.12
- 4) ミニмумメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅲ) —PC橋の塩害対策に関する検討—，国土交通省土木研究所ほか，2001.3
- 5) 設計施工マニュアル[橋梁編]，国土交通省東北地方整備局，2005.5
- 6) 塩害に対するプレキャストPCげたの設計・施工資料，(社)プレストレストコンクリート建設業協会，2005.3
- 7) 細木・渡辺：ポリエチレン製シース実用化に向けての研究，(社)プレストレストコンクリート技術協会，第8回シンポジウム論文集，1998.10
- 8) FKKフレシネー工法施工基準，極東鋼弦コンクリート振興(株)，2004.6