

釧路港岸壁(-14m)における 耐久性を考慮した設計について

釧路開発建設部 釧路港湾事務所 第一工務課 ○森谷 佳太
第一工務課 鈴木 孝信
計画・保全課 山口 圭太

本施設は栈橋構造を採用しており、大水深に適応可能な構造としている。一方で腐食の激しい干満帯等に鉄筋コンクリート部材や鋼材が必要となることから、その腐食対策が重要となってくる。このため各部材の耐久性の向上を意図し、鉄筋の代わりに炭素繊維複合材を用いるなど耐候性に優れた資材や防食塗装を採用するなど対策を講じている。本報告では、採用した耐久性向策についてとりまとめ、報告するものである。

キーワード：耐候性、炭素繊維複合材

1. はじめに

釧路港は我が国の食料供給基地である東北北海道を背後圏として地域の暮らしと産業を支える東北北海道の物流拠点港である。釧路港は新釧路川を中心に東西に分かれており、東港区は日本有数の水揚げを誇る漁業基地として、また防災や賑わいの拠点として利用されており、一方で西港区は、後背地に製紙工場や飼料工場を有しており港湾物流の中心として活用されている。飼料工場では主に畜産のためのトウモロコシを扱っており、その大半を米国から輸入している状況である。

輸入元の米国では航路の増深(-16.8m)、またパナマ運河の増深(-15.2m)が進められており、今後船舶の大型化が進むことが想定され、現在穀物バースとして使用している岸壁(-12.0m)ではその対応が困難となる。また現行の輸送経路では、国内で最も米国と近いとされる本港には直接入港せず、内地の港湾や苫小牧港を経由し入港する状況にあり輸送効率が悪い状況にある。

このような背景の中、船舶の大型化に伴う岸壁の増深

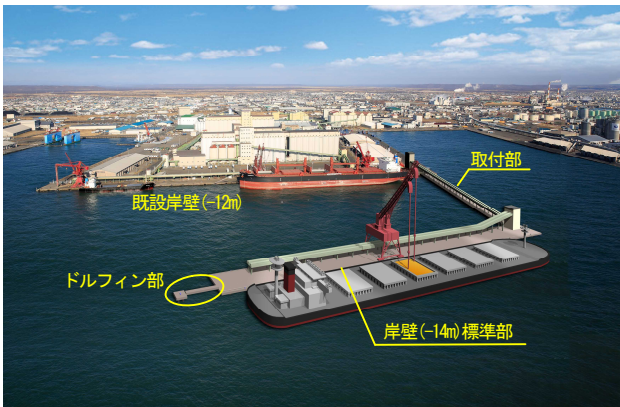


図-1 完成イメージ図

を図るとともに、釧路港を拠点とした苫小牧港、八戸港・石巻港・新潟港の4港湾との輸送ネットワークを形成し効率的な輸送を実現すべく、釧路港は「国際バルク戦略港湾」として平成23年に指定され、平成26年度から整備を開始し、平成30年度供用に向け鋭意整備が進められている。

2. バルク岸壁の構造的な特徴

(1) バルク岸壁の構造形式

バルク岸壁の完成イメージ図および構造図を図-1および2に示す。バルク岸壁は、標準A~C部、ドルフィン部および取付部で構成され、その構造形式は、標準部はジャケット式栈橋構造、ドルフィン部は斜杭ドルフィン構造、取付部はPC栈橋構造としており、いずれも栈橋構造という共通点がある。栈橋構造とは、鋼管杭を基礎として土中に打ち込み、その鋼管杭上にRC部材や鋼

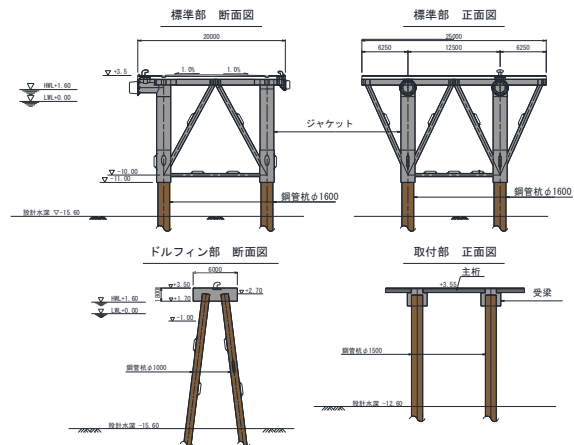


図-2 構造図

管トラスを設置した構造であり、大水深化においてもコストを抑えられることや急速施工が可能な特徴を有する。

(2) 栈橋構造の塩害特性

港湾鋼構造物の腐食環境¹⁾を図-3に示す。このうち最も腐食環境が厳しいのは飛沫帯である。栈橋構造の場合その上部構造がこの飛沫帯に位置しており、塩害による腐食が最も懸念される場所のひとつである。写真-1に栈橋上部工における劣化状況を示す。どちらも耐用年数期間内であるが、鉄筋が腐食し床版に欠損が見られる。また上部構造を支持する鋼管杭についても干満帯、主にMLWL付近での集中腐食が懸念される場所である。このため、栈橋構造を検討する際には、飛沫帯～干満帯にかけて耐塩害について十分検討する必要がある。

3. バルク岸壁の塩害対策

(1) バルク岸壁の耐塩害に対する考え方

港湾施設の維持管理レベルは、事前対策型のレベルⅠ、予防保全型のレベルⅡおよび事後保全型のレベルⅢの3種類に分類される。各レベルの概要²⁾について表-1に示す。栈橋構造はその重要度に応じて、レベルⅠ又はレベルⅡを目標として設計が行われる。レベルⅠの場合では、50年の供用期間中に部材の性能に影響を及ぼす変状が十分に軽微であることとされており、一方レベルⅡの場合では、供用期間中に部材の性能に影響を及ぼす変状が生じることが予測され、維持管理の段階で予防保全対策を実施することとしている。本施設が輸送ネットワークの拠点施設として機能するためには、供用期間中の頻繁な補修や大規模な補修は避けるべきと考えられ、維持管理レベルⅠを目標としての設計を行うこととした。

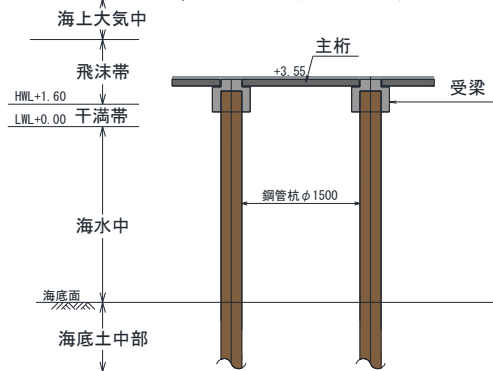


図-3 栈橋の腐食環境



写真-1 栈橋の劣化状況

(2) バルク岸壁の塩害対策

バルク岸壁で採用した塩害対策について図-4、表-2に示す。本構造の塩害対策は材質やその腐食環境により大きく4つに大別される。鋼管杭およびジャケットの鋼構造物はその腐食環境により、水中部と干満帯、さらに腐食の激しい飛沫帯に区分でき、上部構造であるコンクリート部材に分類できる。

鋼構造物の塩害対策としては、L.W.L. -1.0mを境に、下方を電気防食、それより上方を被覆防食とするのが一般的であり、本施設でも同様の考え方をしている。被覆防食については、その部位に応じて超厚膜形被覆、金属被覆、ペトロラタム+耐食性金属カバーを採用している。また栈橋とドルフィン部の連結する連絡橋にはシリコン系樹脂防錆塗料を採用している。

一方、上部構造であるコンクリート部材は、現場施工を避けプレキャスト化を図るとともに、工場製品を採用、異形鉄筋の代わりにエポキシ鉄筋を採用している。さらにコンクリート部材の交換が困難と想定される床版には高耐久性が期待できる炭素繊維複合材を採用している。

表-1 維持管理レベルの概要

維持管理レベルⅠ 予防保全(事前対策)型	高い水準の損傷劣化対策を行うことにより、供用期間中に要求性能が満たされなくなる状態に至らない範囲に損傷劣化に留める。 【代表的な部材の例】 ・耐用年数が供用期間よりも長い材料を用いた部材 ・耐食性の高い鋼材(ステンレス鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋等)を用いたコンクリート部材 ・耐用年数が供用期間を超えるような電気防食を施した鋼管杭・鋼管矢板 ・一般に劣化の進展が軽微であると考えられているコンクリートケーソン
維持管理レベルⅠ 予防保全(事前対策)型	損傷劣化が軽微な段階で、小規模な対策を頻繁に行うことにより、供用期間中に要求性能が満たされなくなる状態に至らないように性能の低下を予防する。 【代表的な部材の例】 ・耐用年数が供用期間よりも短い材料を用いた部材 ・表面被覆等の補修を計画的に施すコンクリート部材 ・供用期間中に隣接の交換が必要な電気防食を施した鋼管杭・鋼管矢板
維持管理レベルⅠ 予防保全(事前対策)型	要求性能が満たされる範囲内で、損傷劣化に起因する性能低下をある程度許容し、供用期間中に1~2回程度の大規模な対策を行うことにより、損傷劣化を事後的に対処する。 【代表的な部材の例】 ・耐用年数が供用期間よりも短い材料を用いた部材 ・使用性が損なわれた際に打替えを実施するエプロン積装 ・劣化・変状が顕著となった際に取替えを実施する付帯設備(防舷材、車止め等)

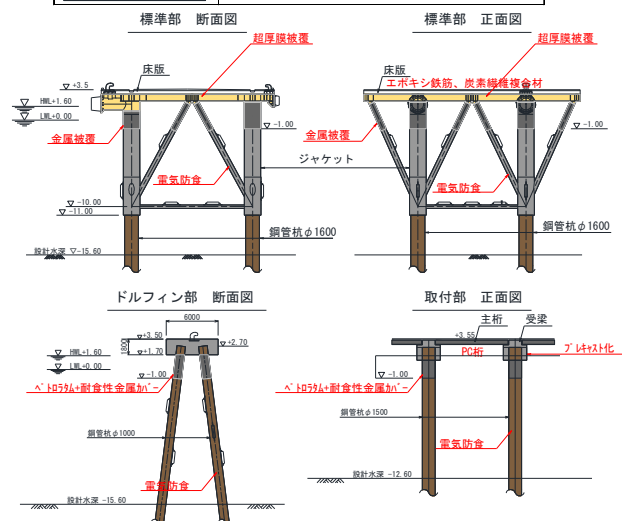


図-4 バルク岸壁の塩害対策

(3) 鋼構造物に対する塩害対策の検討

鋼構造物の塩害対策は前述のとおり、電気防食と被覆防食を採用している。電気防食による鋼管杭の耐用年数は陽極質量により左右されることとなるため、防食電流密度を考慮の上、耐用年数50年として必要な質量を確保している。一方、被覆防食はその種類が多岐に渡る。表-3に被覆防食の暴露試験状況²⁾を示す。現状暴露試験が20年を超えている被覆防食は、ウレタンエラストマー被覆、超厚膜形被覆、耐海水性ステンレス鋼被覆の3種類である。またその他にも暴露試験が継続して実施されているものとして、ペトロラタム+耐食性金属カバー等がある。この中でも最も耐用年数が期待できる被覆防食は耐食性ステンレス鋼被覆（以下金属ライニング）である。

被覆防食を施す箇所はL.W.L.-1.0mよりも上方で集中腐食の発生しやすい干満帯や腐食の激しい飛沫帯に位置しており最も腐食が懸念される箇所である。このため長期耐久性に期待できる金属ライニングを採用することが最も望ましいものと考えられる。しかしながら基礎杭といった長尺部材に金属ライニングを施すための工場設備が整っておらず、ライニングを施すことが出来ない。このため基礎杭についてはペトロラタム+耐食性金属カバーを採用するものとした。なお、採用したペトロラタム+耐食性金属カバーは、30年以上の耐久性が期待できるものである。一方でジャケットの当該箇所はレグやトラス斜材であり、部材長が短いため金属ライニングを採用した。またジャケットのうち桁部材についても金属ライニングによる対応も可能であったが、桁、格点部等複雑な形状をしており、金属ライニングを施すとすると施工が困難なことが考えられた。このため桁部材等については暴露試験でも30年程度の耐久性が確認され、港湾鋼構造物で広く使用されている超厚膜形被覆を採用している。但し金属ライニングと比較し耐久性が劣ることが想定されるため、定期的な点検や補修を行うことで要求性能を維持する必要がある。

表-2 塩害対策一覧

コンクリート部材	取付部		標準部		ドルフィン部	
	受梁	主桁	床版	上部工	基礎杭	上部工
コンクリート部材	・断面を2段階施工とし、下側を2レキスト化を施す。	・PCホロー桁(工場製作)を採用	・荷役下床版の主筋、補強筋にGFRPを採用	・他の床版の主筋にエポキシ樹脂塗料を採用	・LWL-1.00mを境に、上方に金属被覆、下方に塩害防食を採用	・LWL-1.00mを境に、上方にペトロラタム+耐食性金属被覆、下方に塩害防食を採用
鋼構造部材	・LWL-1.00mを境に、上方にペトロラタム+耐食性金属被覆、下方に塩害防食を採用	・LWL-1.00mを境に、上方にペトロラタム+耐食性金属被覆、下方に塩害防食を採用	・LWL-1.00mを境に、上方に金属被覆、下方に塩害防食を採用	・LWL-1.00mを境に、上方にペトロラタム+耐食性金属被覆、下方に塩害防食を採用	・LWL-1.00mを境に、上方にペトロラタム+耐食性金属被覆、下方に塩害防食を採用	・LWL-1.00mを境に、上方にペトロラタム+耐食性金属被覆、下方に塩害防食を採用

表-3 被覆防食の暴露試験状況

防食系	防食法	鋼管杭の実海域暴露試験により防食効果が確認された年数			
		0年	10年	20年	30年
塗装	エポキシ+ガラスフレーク塗料				
有機被覆	ポリエチレン被覆				
	ウレタンエラストマー被覆				
超厚膜形被覆					
ペトロラタム+耐食性金属カバー	ペトロラタム+耐食性金属カバー				
	ペトロラタム+耐食性金属カバー				
金属被覆	耐海水性ステンレス鋼被覆				

標準部とドルフィン部を連結する連絡橋はH形鋼を組合せた単純鋼合成H桁であり、+3.0mよりも上方に設置されるため飛沫帯に位置する構造物である。本構造に対する耐塩害対策としてシリコン系樹脂防錆塗料を採用している。シリコン系樹脂防錆塗料は、近年海洋構造物に対する適用例が増えており、栈橋手摺、洋上構造物、受衝板等の付属物における実績を有している。表-4にシリコン系樹脂塗料とジャケットで採用している超厚膜形被覆との比較を示す。シリコン系樹脂塗料は、複合サイクル試験結果に基づく耐用年数50年が期待でき供用期間中のメンテナンスフリーが期待できる。一方で超厚膜形被覆の耐用年数30年程度と云われており供用期間中に一度はメンテナンスを要することとなる。このためイニシャルコストは超厚膜形被覆と同程度であるものの、ランニングコストを踏まえると50%程度のコストダウンが図れる。なお、シリコン系樹脂防錆塗料は常時没水するような箇所や超厚膜形被覆と比べ塗膜が薄いため、流木等の漂流物の接触が想定される箇所での使用は出来ないものと考えており、そのような恐れがない連絡橋についてのみ採用している。

(4) 上部構造に対する塩害対策の検討

上部構造は各構造形式により、主桁、受梁、渡版、床版、ドルフィン部上部工に分類される。栈橋上部工に対する検討は、維持管理レベルIの場合、塩化物イオンの侵入による鋼材腐食が生じないことを確認すれば良いとされている³⁾。表-5に性能の経時変化に対する照査結果について示す。主桁については標準的な仕様で問題なく、鉄筋腐食発生限界濃度を2.0kg/m³とすれば、期待耐用年数は80年、100年以上である。一方で受梁、渡版、床版、上部工については標準的な仕様である普通鉄筋では供用期間中に腐食限界に達することとなりNGとなる。このためエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用を検討している。

表-4 連絡橋の塗装比較

耐久性	シリコン塗装		超厚膜エポキシ樹脂塗装	
	・期待耐用年数:50年 (複合サイクル試験より)	・期待耐用年数:30年程度 (港湾構造物 防食・補修マニュアルより)		
適用	・飛沫帯~海上大気中 ・海中は適用不可		・海中~海上大気中	
施工性	・工場、作業ヤード等で施工可 ・現場での補修可 ・熟練度を要しない。		・工場、作業ヤード等で施工可 ・現場での補修可 ・熟練度を要しない。	
実績	・近年鋼橋から海上構造物まで実績を有しているが、海上での施工事例としては、栈橋の手摺、受衝板の取付金具、洋上浮体天蓋部等の使用実績がある。		・港湾構造物で一般的に使用されており、実績は十分有している。	
コスト	イニシャルコスト(円/m ²)	14130	イニシャルコスト(円/m ²)	15100
	ランニングコスト(円/m ²)	-	ランニングコスト(円/m ²)	17214
	ライフサイクルコスト	14.130	ライフサイクルコスト	32.314

表-5 性能の経時変化に対する照査結果

位置	部材	取付部				標準部	ドルフィン部
		主桁(鉄筋)	主桁(PC)	受梁等	RC床版		
照査	部材下面の高さ	+2.90m	+2.90m		+3.00m	+1.70m	
	鉄筋位置	下面	下面	下面	下面	下面	
照査	セメント種別	普通ボルト	普通ボルト	高炉セメント	高炉セメント	高炉セメント	
	鉄筋のふぶり(mm)	70mm	80mm	70mm	70mm	89mm	
照査	普通鉄筋	γiCd/Clm	0.60	0.41	2.27	1.54	2.44
	耐用年数	80年	100年以上	20年	32年	20年	
照査	エポキシ鉄筋	γiCd/Clm		0.13	0.09	0.11	
	耐用年数			100年以上	100年以上	100年以上	

土木学会「エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針〔改訂版〕」を用いて照査を実施したところ、受梁、床版、ドルフィン部上部工全てにおいて期待耐用年数は100年以上となり、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いることとした。

また鉄筋腐食を遅延させる方法としてコンクリートの品質向上も手段の一つである。受梁や床版については急速施工に対応すべくコンクリート部材のプレキャスト化を図っており、プレキャスト化により海上施工が避けられ、コンクリート打設時における飛沫等の鉄筋の腐食要因が低減できることから、耐塩害性能の向上も期待できる。主桁はPC桁としており工場製品となるため高品質なコンクリートとなり耐塩害性の向上も期待できる。ドルフィン部上部工は、基礎杭が斜杭のためプレキャスト化は困難であるが、コンクリートの品質向上のため、腐食要因の侵入抵抗性向上を目的にコンクリートの密実性や乾燥収縮によるひび割れ抵抗性の向上に期待できる混和剤や添加材をコンクリートに追加することで品質向上を図ることを考えている。

(5) 床版における炭素繊維複合材の検討

a) 検討経緯

前述のとおり、床版はプレキャスト化を図るとともに、エポキシ樹脂塗装鉄筋による塩害対策を採用している。しかしながら図-5に示すように岸壁上には、ベルトコンベアを始め荷役機械が設置される予定がある。またエポキシ樹脂塗装鉄筋は、擦れにより塗装が剥がれ耐用年数を待たずに腐食した事例もあり、腐食するリスクが少なからずある。このためエポキシ樹脂塗装鉄筋の腐食による床版の劣化が生じることを前提に、荷役機械直下の床版に発錆のリスクを回避できる炭素繊維複合材の採用について検討を行った。

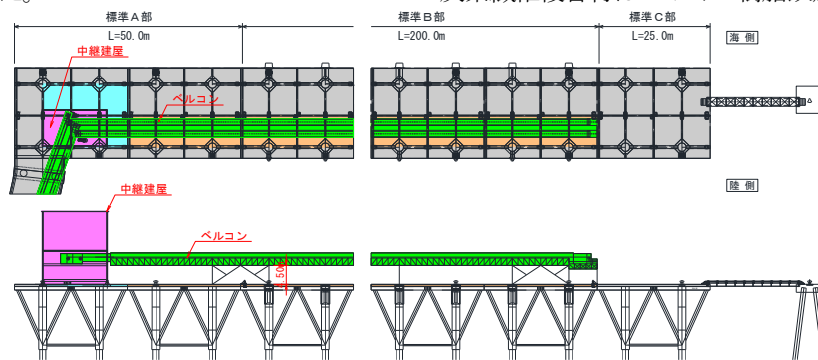


図-5 荷役機械設置状況

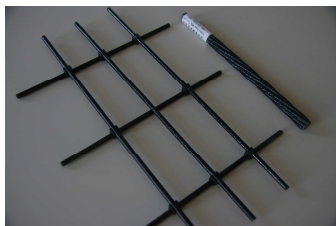


写真-2 炭素繊維複合材

b) 炭素繊維複合材とは

写真-2に炭素繊維複合材の一例を示す。炭素繊維複合材とは炭素繊維と樹脂との複合材料で、鋼材と比べ比重が軽く、高い耐食性およびPC鋼より線と同等以上の強度を有している材料であり、沿岸部のPC橋や栈橋床版における使用実績がある。また炭素繊維複合材を用いた構造物の設計手法については、土木学会より設計・施工指針(案)が提示されている。

c) 検討箇所の選定

炭素繊維複合材は鉄筋比べ高価であることから必要最低限とする必要がある。図-5で示した様に岸壁上には、荷役機械としてアンローダー、ベルトコンベア、中継建屋が整備される予定である。このうちベルトコンベア下の床版交換は、限られた空間において施工を行う必要があり施工が困難となることが想定される。またベルトコンベアは振動、衝撃に弱く、ベルトの芯ズレが生じる恐れがあり点検後の再稼働となる。このため床版交換時はベルトコンベアを停止せざるを得ない状況となる。また中継建屋についても床版上に構築される構造物であるため、床版交換時には中継建屋を撤去・再設置する必要がある。このためベルトコンベアの再稼働まで約3ヶ月、岸壁供用を停止せざるを得ない。以上より炭素繊維複合材を用いた床版(以下CFRP床版)の検討箇所は、ベルトコンベア下および中継建屋下の2箇所とした。なお、アンローダーレールに近接する床版については、アンローダーの稼働位置を調整することにより、岸壁供用を停止せず床版交換が可能と考えている。

d) 経済性

表-6にエポキシ樹脂鉄筋、炭素繊維複合材の材料単価および床版製作費を示す。材料単価の比較は引張強度が同程度のもので比較している。材料単価を比較すると炭素繊維複合材はエポキシ樹脂鉄筋と3倍以上高価であ

表-6 単価比較

		エポキシ樹脂塗装鉄筋		炭素繊維複合材	
材料単価		D22(SD345)	435円/m	12.5φ	1490円/m
床版	断面図				
	製作費	1,695千円/版(6.9×5.9×0.4)		5,204千円/版(6.9×5.9×0.3)	

り、床版製作費（6.9m×5.9m）で比較しても3倍程度高価となる試算結果となった。また、CFRP床版をPC床版としているのは、炭素繊維複合材が引張力に強いものの付着力が鉄筋と比べ弱いといった特徴があり、ひび割れ防止の観点から、炭素繊維複合材を用いたコンクリート部材では炭素繊維複合材を緊張材として用いることが効果的であると考えられるためである。

次に炭素繊維複合材を用いた場合のライフサイクルコストについて試算した。その結果を表-7に示す。なお、工事費は岸壁標準部全体における工事費であり、補修費用は供用50年でRC床版は1回、CFRP床版はメンテナンスフリーとして試算しており、ジャケット等の補修費用は計上していない。その結果、CFRP床版を建屋下およびベルトコンベア下に採用した場合には、初期投資としては154百万円の増となるものの、RC床版の補修費用が低減され総額としては46百万円の減となりライフサイクルコストの低減が期待できる。

また岸壁(-14m)は輸送ネットワークの拠点施設として位置付けされており、供用停止とした場合、多大な影響を与えるものと考えられる。このため港湾投資の評価に関する解説書2011に基づき、岸壁供用停止に伴う経済的損失の算出を試みた。経済的損失は、岸壁(-14m)が使用出来ず既設岸壁(-12m)による荷役となり、大型船による荷役係留不可を前提とし少量多頻度輸送および荷役作業能力の減少を想定し試算した。その結果、全てRC床版の場合は供用50年で、RC床版の交換、中継建屋の撤去・再設置で21ヶ月の供用停止が見込まれ、この間の経済的損失は1,218百万円が見込まれる。

以上より、中継建屋下およびベルトコンベア下の床版交換時には荷役に必要となるベルトコンベアを停止させる必要

表-7 ライフサイクルコスト試算結果

施設費用		
ケース	全てRC床版	建屋下ベルトコンベア下にCFRP床版
工事費	3,451百万円	3,605百万円
	(203百万円)	(330百万円)
補修費	432百万円	233百万円
総額	3,883百万円	3,838百万円

があり、その不稼働期間の影響により最大12億円の経済的損失が見込まれるため、高耐久性に期待できるCFRP床版を採用することとした。

4. まとめ

岸壁(-14m)は国際バルク戦略港の主要施設であり、供用期間中に不稼働期間が発生しないよう最大限配慮した設計を行った。またその中でも補修が困難と想定される荷役機械直下の床版についてはライフサイクルコストの低減および経済的損失発生を回避するため、炭素繊維複合材を用いたCFRP床版を採用した。また今後工事においてCFRP床版の製作を行っていくが施工における留意点等についてはおって報告する方針である。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル。
- 2) 港湾空港建設技術サービスセンター：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版）。
- 3) 港湾施設戦略的維持管理水深技術 WG：維持管理を考慮した栈橋の設計マニュアル。