

海洋構造物における PC 技術の進展

岩波 光保*

港湾や海上空港などに建設される海洋構造物には、巨大な波力や流体力が供用中だけでなく、施工時にもつねに作用するなど、陸上構造物と比較してきわめて過酷な外力条件に曝される。また、海水中の塩化物イオンや乾湿繰返しの影響などにより、構成材料の劣化が著しく速く進行することも特徴である。このような厳しい海洋環境においても、高品質のコンクリートが使用され、ひび割れの発生が制御されたプレストレストコンクリート（PC）は優れた構造形式として古くから用いられてきた。本稿では、この10年間にPC技術を活用して建設された海洋構造物のうち、高耐久化を目指した事例や生産性向上を目指した事例などについて概説した。また、今後の海洋構造物におけるPC技術のあり方について、高耐久化、生産性向上、国土強靱化の観点から筆者の私見を述べた。

キーワード：海洋構造物、高耐久化、生産性向上、防災・減災

1. はじめに

港湾や海上空港などに建設される海洋構造物には、暴風時や津波時に巨大な波力や流体力が衝撃的に作用するだけでなく、大水深海域では巨大な水圧が作用するなど、陸上構造物と比較してきわめて過酷な外力条件に曝される。また、海水中の塩化物イオンや乾湿繰返しの影響などにより、構成材料の劣化が著しく速く進行することが特徴である。

このように外力も環境作用も厳しい海洋環境では、高品質のコンクリートが使用され、ひび割れの発生が制御されたプレストレストコンクリート（PC）が適した構造形式の1つとして考えられる。

また、海洋環境下における工事では、波浪や潮流が常時作用しているなかで、ときには海中作業を強いられることもあることから、施工の合理化や工期の短縮のために、プレキャスト部材の有効活用が古くから進められてきた。たとえば、防波堤や岸壁の建設に用いられるコンクリートケーソンは大きなプレキャスト部材である。この際、プレキャストPC部材の活用は1つの選択肢となることから、部材接合の省力化などの技術開発が海洋構造物でも進められてきた。

このように、構造物の高耐久化と施工の合理化を実現できるPC構造は、海洋構造物にとって有効な構造形式である。2009年の本誌特集号では、海洋構造物の代表である

港湾および海上空港における代表的なPC構造物の変遷が紹介されている¹⁾。港湾構造物への適用としては、棧橋上部工、浮体、曲面形状を有するケーソン、沈埋トンネル、矢板岸壁・護岸の事例が、海上空港への適用としては、羽田空港D滑走路への事例が詳述されている。

それから10年が経過し、海洋構造物におけるPC技術は適用実績を積み重ねることでさらに洗練されてきた。また、社会からの多様な要請に応えるべく、今までにないPC構造物も提案され、実現されてきている。本稿では、この10年間に建設されたPC技術を活用した海洋構造物のうち、代表的なものについて、その特徴を述べるとともに、今後の海洋構造物におけるPC技術のあり方について論じる。海洋構造物におけるPC構造物の適用実績については、港湾PC構造物研究会のホームページ²⁾に詳細に紹介されているので、是非参照されたい。

2. 最近のPC構造物の建設事例

ここでは、最近の海洋構造物におけるPC構造物の適用事例のなかから、特徴的なものを4件紹介する。1件目は、棧橋の高耐久化のため、PC鋼材の代わりに、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を緊張材・補強材として採用した事例、2件目は、厳しい海洋環境下で供用されるPC橋梁の維持管理の合理化を図った事例、3件目は、工期短縮のためにPC棧橋の受梁をプレキャスト化した事例、4件目は、曲率半径が小さい線形を有する低橋脚のPC橋梁において後ラーメン工法を採用した事例である。

2.1 釧路港西港地区—14m岸壁

釧路港は、北海道の太平洋側東部に位置し、わが国有数の食料供給基地を背後に抱えており、東北道の物流拠点として、地域経済の発展のために大きな役割を担っている。背後圏である東北道は、酪農や畑作を中心とした農業と、恵まれた水産資源を活かした漁業が基幹産業であり、これに加えて、農水産物を原材料とした加工品製造、木材加工、紙・パルプ製造などの2次産業も盛んである。



* Mitsuyasu IWANAMI

東京工業大学
環境・社会理工学院 教授



写真 - 1 釧路港の全景
(国土交通省北海道開発局釧路開発建設部提供)

釧路港では、現在、西港区において第1埠頭から第4埠頭が供用され、物流機能の中心となっている一方で、東港区は旅客船岸壁などの交流拠点としての機能や漁業基地としての機能を主に担っている(写真 - 1)。このうち、西港区の第2埠頭では、2011年に釧路港が穀物の国際バルク戦略港湾に選定されたことを受け、安定的で安価な穀物輸送を実現することを目的に、大型船舶による穀物の大量一括輸送を可能とする国際物流ターミナルの整備が進められている(写真 - 2)³⁾。



写真 - 2 国際物流ターミナル
(国土交通省北海道開発局釧路開発建設部提供)

2014年度に、国際物流ターミナルの整備事業が着手され、水深-14mの岸壁を整備する工事が行われた。岸壁にはジャケット式栈橋構造が採用されている(写真 - 3)。上部に施工される床版のうち、一般部にはRC床版が使用



写真 - 3 ジャケット製作状況
(国土交通省北海道開発局釧路開発建設部 HP より)

されているが、ベルトコンベアや建屋の下などに位置する床版(41枚)は、補修や交換が困難なことから、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を緊張材・補強筋として用いたPC床版が採用された。CFRPを用いることで、PC鋼材や鉄筋の腐食の懸念がなくなり、北海道の厳しい自然環境下であっても、岸壁の高耐久化と長寿命化を図ることができる。

このPC床版は、工場で製作されたプレテンション床版3枚が、ポストテンション方式により現場近傍のヤードで一体化されている(写真 - 4)。その後、台船で運搬されて、起重機船によりジャケット上に架設された。



写真 - 4 CFRPを用いたPC床版(一体化後)
(国土交通省北海道開発局釧路開発建設部提供)

なお、福島県の小名浜港東港地区岸壁(-18m)の整備においても、栈橋と背後を結ぶ渡橋のPCホロー桁の一部にCFRPが使用されている。本工事は、国土交通省港湾局の港湾技術パイロット事業として行われており、渡橋完成後も、各種のモニタリングを実施することで、通常のPCホロー桁との比較を行い、耐久性の確認などを通じて、CFRPの有効性が検証される予定となっている。

2.2 小名浜マリブリッジ

小名浜港は、東京と仙台のほぼ中間、福島県沿岸南東部のいわき市に位置し、背後に数多くの工場や発電所が立地する東北地方有数の国際貿易港である。2011年には、石炭の国際バルク戦略港湾の指定を受け、国際物流ターミナルの整備が進められている。

この国際物流ターミナル整備事業では、小名浜港の東港地区において、岸壁(-18m)(耐震)、臨港道路、航路・泊地(-18m)などの整備が進められている(図 - 1)。中でも、臨港道路の橋梁部である小名浜マリブリッジは、人工島である東港地区の国際物流ターミナルから背後地域へ石炭などの港湾貨物を陸上輸送するための重要な構造物である(写真 - 5)。

小名浜マリブリッジの構造諸元は次のとおりである。

- ・橋梁延長：927m(道路延長：1805m)
- ・道路規格：第4種第2級
- ・設計速度：40km/h
- ・幅員構成：車道部 7.0m(2車線)
歩道部 3.0m～4.5m(片側)
- ・縦断勾配：最大5%

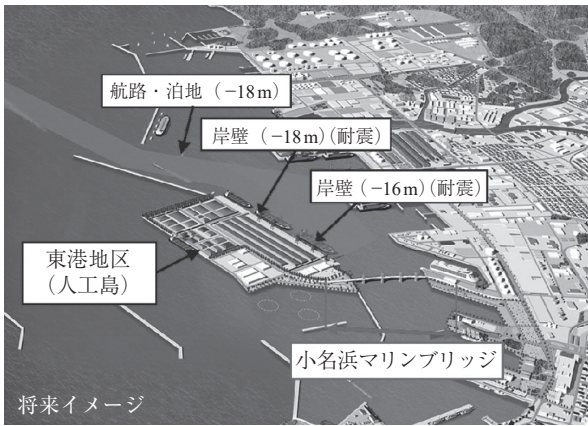


図 - 1 東港地区国際物流ターミナル整備事業
(国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所提供)



写真 - 5 小名浜マリナブリッジ
(国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所 HP より)

橋梁構造としては、3号ふ頭部が4径間連続PC箱桁橋(220m)、航路部が5径間連続PCエクストラロード橋(510m)、東港部が4径間連続PC箱桁橋(197m)であり、国内の臨港道路の橋梁では初めて、PCエクストラロード橋形式が採用され、2017年3月に完成した。本形式の採用により、PCケーブルで桁が支えられることで桁高が抑えられ、航行船舶のための桁下クリアランスの確保や道路勾配の抑制に寄与している。

この橋梁は航路部に架かっており、厳しい塩害環境に晒されているが、設計供用期間の100年間にわたって、その機能を維持し続けなければならない。そのために、設計上の配慮として、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用やPCケーブル定着部の桁内収容などが図られている(写真-6)。また、設計・施工の段階から維持管理を陽な形で考慮するため、供用後に使用する「点検マニュアル」をあらかじめ検討して完成させたことも特徴の1つである⁴⁾。さらに、「人の目を使い、実感をともなった点検」を行いやすくするための工夫(マーキングなど)を随所で施している(写真-7)。そして、これらの維持管理のための配慮を実行可能なものとするために、地域の技術者との連携体制を構築して、点検技術の継承・向上に地域ぐるみで取り組んでいることも特筆に値する。

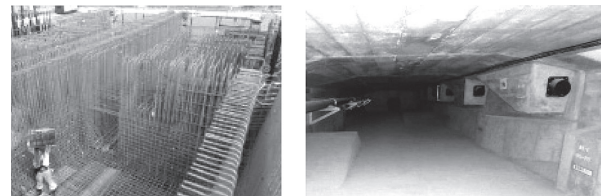


写真 - 6 高耐久化のための設計上の配慮
(国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所 HP より)

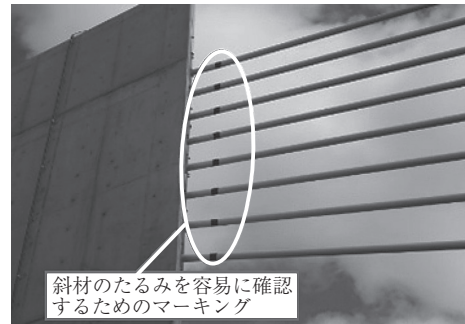


写真 - 7 マーキングの例
(国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所提供)

これらの取組みは、下に示す「日常点検十箇条」に集約されている。この十箇条の最初の文字をつなげると、この取組みに関わった担当者からのメッセージが浮かび上がってくる。

- 一. 安全を確保する点検装備品と点検マニュアル携帯版の所持を確認すること。
- 一. 強い斜材張力を支える主塔は、基部を重点的に確認すること。
- 一. マーキングをもとに、桁側面・桁下のひび割れ等を確認すること。
- 一. 劣化を進行させる雨水を制御する排水装置・水切りを確認すること。
- 一. 技能を要する遠望目視での浮き・交差ひび割れ・錆汁の判断能力の向上に努めること。
- 一. 地震時には、まず擁壁・支承・落橋防止装置を確認すること。
- 一. 遊間四箇所に設置された伸縮装置は、構造の変わり目であるという視点で確認すること。
- 一. 強い張力で桁を支える斜材は、コーキング・水抜き孔を確認すること。
- 一. 主桁内部の点検箇所は、マーキングの助けを借りて確認すること。
- 一. やりにくさ、使いにくさは適宜意見を出し合い、点検マニュアルの改善に努めること。

このような維持管理への取組みが評価され、2018年には、国土交通省などが主催するインフラメンテナンス大賞（メンテナンス実施現場における工夫部門）の優秀賞が贈られている。

2.3 函館港若松地区岸壁

函館港は、北海道西南部渡島半島の南部に位置し、1859年の修好条約締結により、横浜、長崎とともに、わが国最初の貿易港として開港された。その後は、本州と北海道を結ぶ要衝として、また外国貿易港として、発展を遂げてきた。

現在は、2005年改正の函館港港湾計画に基づき、流通拠点としての公共ふ頭の整備、幹線臨港道路の整備、ウォーターフロントの整備などの事業が進められている（写真-8）。

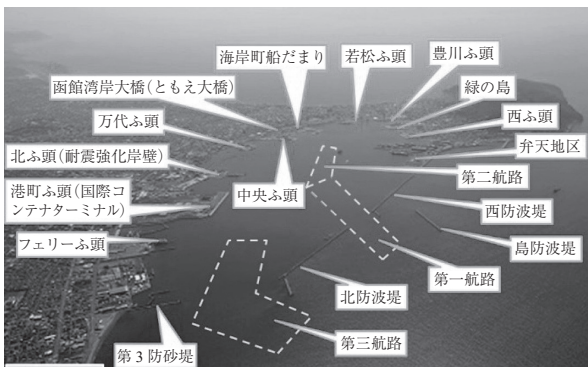


写真-8 函館港の全景
(国土交通省北海道開発局函館開発建設部 HP より)

函館は、函館山、五稜郭公園、赤レンガ倉庫街などの観光資源が豊富な観光都市であり、クルーズ船寄港数は全国15位、北海道内では1位となっている（2016年）。このような旺盛なクルーズ船需要に対応するため、若松ふ頭地区に大型のクルーズ船が着岸可能な岸壁（-10m）の整備が進められている⁵⁾。若松ふ頭地区は、JR函館駅や函館朝市などの近くに位置しており、「街なか」にあるクルーズ船岸壁として期待が寄せられている（図-2）。

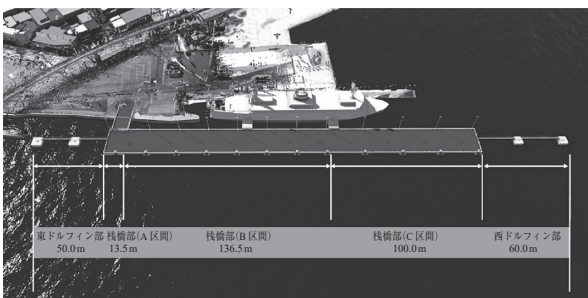


図-2 クルーズ船岸壁の整備イメージ
(国土交通省北海道開発局函館開発建設部提供)

設計上の対象船舶は、完成時と暫定供用時でそれぞれ定められており、完成時は函館港に寄港実績がある4000～120000GTクラスのうち、最大級であるダイヤモンド・プリンセス、暫定時は40000GT級クルーズ船とされてい

る。

函館港は、軟弱地盤層が厚く堆積しており、また支持層がうねって存在していること、青函連絡船記念館として隣接して保存されている摩周丸との離隔を確保する必要があることなどを考慮して、工期、施工性、経済性の観点から、PC栈橋式とジャケット式が選定されたが、最終的には、柔軟な施工手順を取り入れることが可能なPC栈橋式が採用された。

東ドホルフィン部は、直杭式のドルフィン2基からなっており、栈橋部（A区間）はRC栈橋形式で約1000トンの受梁1基と上部工からなっている。栈橋部（B区間）と栈橋部（C区間）はPC栈橋形式で、それぞれ約500トンの受梁7基、4基の上に、それぞれ7スパン、4スパンにPCホロー桁が架設されている。B区間の7スパンのうち、1スパンは長さ13.7mの桁が25本、残る6スパンは長さ17.2mの桁が25本/スパンで計150本が用いられている。C区間の4スパンは、長さ22.4mの桁が25本/スパンで計100本が用いられている。



写真-9 プレキャスト受梁の架設
(国土交通省北海道開発局函館開発建設部提供)



写真-10 暫定供用が開始されたクルーズ船岸壁
(国土交通省北海道開発局函館開発建設部 HP より)

本工事では、供用までの工期が短かったため、大幅な工期短縮が必要であったことから、PC栈橋の受梁がプレキャスト化された。受梁を場所打ちで施工した場合、冬季の厳しい気象・海象条件などによりコンクリート工が困難となるが、プレキャスト受梁は屋根囲いの設備を作って冬場にも製作することができる。これにより、プレキャスト受梁の架設を、鋼管杭の打設完了直後に、起重機船により行

うことができ、大幅な工期短縮が可能となった(写真 - 9)。2018年9月に一部施工が完了して、10月に暫定供用が開始された(写真 - 10)。

2.4 四日市・いなばポートラインのPC橋梁

四日市港は、主に羊毛、綿花の輸入港として栄え、1952年には、外国貿易上、とくに重要な港として特定重要港湾に指定されるなど、中部圏を代表する貿易港として国際経済や地域産業に大きく貢献している(写真 - 11)。

2004年には、名古屋港とともに「伊勢湾におけるスーパー中核港湾」に、2005年には、指定特定重要港湾に指定されるなど、伊勢湾全体の連携による国際物流機能の強化が求められている。2006年には、霞ヶ浦地区において、水深-14mの国際海上コンテナターミナルの供用が開始され、コンテナ貨物も飛躍的に増加している。2011年には、港格が特定重要港湾から国際拠点港湾に改められた。



写真 - 11 四日市港の概要
(国土交通省中部地方整備局四日市港湾事務所提供)

四日市港において増大する港湾貨物を円滑に背後の高速道路網に輸送するため、霞ヶ浦ふ頭地区から伊勢湾岸自動車道みえ川越インターチェンジ付近に至る臨港道路(四日市・いなばポートライン)が整備された。この道路は、暫定2車線で、全長約4.1kmであり、このうち延長3.3kmは連続高架橋となっていて、6径間連続鋼床版箱桁橋をはじめ、8径間連続PC中空床板橋、4径間連続PCラーメン箱桁橋、3径間少数鈹桁橋などの11の橋梁で構成されている。ルート選定にあたっては、地元住民の生活と自然環境への影響を最小化することに配慮したため、曲率半径が小さく、横断勾配の変化が大きいS字が続く線形となっている(図 - 3)。



図 - 3 四日市・いなばポートラインのルート

この道路のうち、6工区の橋梁では、経済性や施工性、水路への影響などを考慮して、4径間連続PCラーメン箱桁橋が採用された。この工区は、軟弱地盤のため大規模地震時の応答が長周期となり、免震支承や分散支承の適用が

難しく、供用後の維持管理の面からも、ラーメン構造とすることが合理的であると判断された。しかし、P50の橋脚高は、固定支間長に対してきわめて低くなっているため、ラーメン構造とすると主桁のクリープや乾燥収縮によって橋脚に大きな曲げモーメントが発生することが懸念された。そこで、この発生断面力を改善するため、張出し架設期間中は、上部工と下部工との間にすべり板を設置し、主桁のクリープや乾燥収縮による変形を拘束しないように配慮し、変形が収束したあとに上下部工を剛結構造とする後ラーメン工法が採用された(図 - 4)⁶⁾。曲率半径が180mという特殊な線形の低橋脚を有する橋梁では、橋軸方向と橋軸直角方向にも収縮変形が生じ、水平変位量の管理が難しくなることが想定された。このような事例に後ラーメン工法が適用されたのは、国内で初めてである。

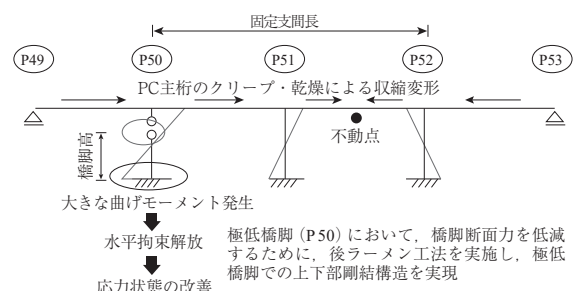


図 - 4 応力改善を目的とした後ラーメン工法の採用

地元の多様な要望を可能なかぎり事業計画に取り入れてステークホルダー間の合意形成を図り、設計および施工上の技術的な課題を克服して、2018年4月に供用が開始され、四日市港の物流の円滑化に大きく貢献している(写真 - 12)。



写真 - 12 後ラーメン工が採用されたPCラーメン箱桁橋
(国土交通省中部地方整備局四日市港湾事務所提供)

3. 今後の海洋構造物におけるPC技術のあり方

3.1 高耐久化に向けて

海洋構造物は厳しい自然環境で供用されることから、塩害などの劣化が発生しやすい。PC構造は、RC構造と比較して耐久性に優れていることから、今後も適材適所でPC構造の採用を積極的に検討していくことが望ましい。

2007年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準・同解説(港湾基準)」では、施設の設置者が維持管理計画等

を定め、これに基づいて適切な維持管理がなされるよう規定された。2018年に改訂された港湾基準でも基本的な考え方は踏襲されたが、コンクリートの塩害に対する照査の方法が見直されるとともに、高耐久材料の積極的活用の推進や維持管理用設備の設置の奨励など、設計時における維持管理への配慮に関する記載が新たに追加された。

今後は、新設構造物に対する維持管理を考慮した設計の具現化のための検討をさらに進めるとともに、既設構造物に対する点検診断技術と性能評価技術、さらには、既設構造物の補修・補強に留まらず、機能向上のための改良技術について、引き続き研究開発を推進していく必要がある。既設構造物の補強や改良にあたっては、PC技術の活用による新形式構造の開発が期待される。

3.2 生産性向上に向けて

国土交通省では、2016年を「生産性革命元年」と位置付けて以降、全省的に生産性向上に向けた数々の取組みが「i-Construction」の旗印のもとで進められている。なかでも、トップランナー施策として、①ICT技術の全面的な活用、②コンクリート工の規格の標準化などの全体最適の導入（プレキャスト化）、③施工時期の平準化に関する取組みがこれまで広く展開されている。

港湾工事は、海中や海上での作業を強いられることから、陸上工事と比較して古くからICTを含む先端技術が積極的に活用されてきた。たとえば、浚渫工や床掘工などの海中作業の可視化や施工管理、海中へのブロックや捨石などの投入管理、ケーソンの自動据付けなどであり、作業の安全性向上や工事の品質向上に大きく貢献してきた。

このような生産性向上の取組みを加速させるため、2017年度にICT浚渫工の試行工事が行われ、2018年度からはICT導入工種をマウンド基礎工やブロック据付工にも拡大するためのモデル工事が始まっている。また、CIM（Construction Information Modeling）の導入についても検討が進められ、2018年度には「CIM導入ガイドライン（港湾編）」が作成される予定である。

PC構造においても、ICT技術の活用、CIMの導入およびプレキャスト部材の活用により、生産性向上を図るとともに、そのための技術開発にも注力していく必要がある。たとえば、PC構造の優位な特徴ではあるが、塩害による劣化の弱点にもなりやすい、張出し架設工法などの分割施工による目地部やプレキャスト部材の接合部の構造性能評価や耐久性確保の方策などがあげられる。

3.3 国土強靱化に向けて

2011年の東日本大震災では、橋梁の流出などの陸上構造物の被害だけでなく、防波堤などの港湾構造物でも大きな被害が生じた。これを受けて、津波波力の算定方法の見直しや防波堤などへの粘り強さの付与など、レジリエンスの向上のための取組みが各方面で進められている。

しかし、港湾分野におけるPC構造の被害は限定的であり、その優位性が確認されている⁷⁾。たとえば、大きな地震力や津波による揚圧力を受けたにもかかわらず、PC栈橋の被害は認められなかった。また、PC浮栈橋についても、係留系の不具合により流出したのもあったが、PC構造としての浮体が損傷した事例はなかった。

自然災害の激甚化が叫ばれるなか、PC構造の優れた防災・減災機能に着目した検討が進められている。PC工学会でも、2017年に、PC複合津波防災構造委員会が設置され、PC技術の適用による沿岸域の防災・減災機能の強化のための検討が開始された。この委員会は、津波から背後地を守るための堤防や防潮堤を、PC複合構造を活用して効率的、効果的に整備するための考え方を整理し、想定する津波、背後地の状況、建設地点の地盤条件などに応じて、最適な構造を選択できる方法を提案しようとしている。PC複合構造とすることで、従来型の構造よりも高コストとなるが、粘り強さが付与されるとともに高耐久化が図られることから、この効果を定量的に評価できるような手法や指標についても検討が行われている。

4. おわりに

本稿では、この10年間に建設されたPC技術を活用した海洋構造物のうち、高耐久化を目指した事例、生産性向上を目指した事例などについて紹介した。また、今後の海洋構造物におけるPC技術のあり方について、高耐久化、生産性向上、国土強靱化の観点から筆者の私見を述べた。本稿が読者の皆様の業務などに少しでも役立てば幸いである。

本稿の執筆にあたっては、国土交通省および港湾PC構造物研究会の関係各位にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 横田 弘、岩波光保：海洋構造物におけるPCの歴史、プレストレストコンクリート、Vol.51, No.1, pp.41-45, 2009.1.
- 2) <http://www.kopi-ken.com/04.html>
- 3) 飯田 誠：軟弱地盤に対応した大口径長尺杭の施工精度向上等に向けた取り組み、港湾、Vol.95, No.8, pp.20-21, 2018.8.
- 4) 佐々木 均、齋藤良章：小名浜港東港地区臨港道路点検マニュアル（案）の策定、プレストレストコンクリート、Vol.58, No.5, pp.26-32, 2016.9.
- 5) 中嶋道雄：函館港若松地区クルーズ船栈橋におけるCIMの活用、土木学会土木建設技術発表会、1-04, 2018.11.
- 6) 岡村和明：後ラーメン工法とその施工上の工夫、土木施工、Vol.60, No.1, pp.109-112, 2019.1.
- 7) プレストレストコンクリート技術協会：東日本大震災PC構造物災害調査報告書、2011.12.

【2019年1月14日受付】