

# 海洋構造物における PC の歴史

横田 弘\*1・岩波 光保\*2

## 1. はじめに

港湾、海上空港等の海洋構造物は、衝撃的なものも含めて強大な波力、潮流力等が作用すること、大水深下では大きな水圧が作用することなど、陸上構造物に比べて厳しい荷重作用条件下に置かれる。また、海水中の塩化物イオンや乾湿の繰返しなどにさらされ、構成材料の劣化が急速に生じやすい。このような物理・化学的に厳しい環境は、一般に高品質のコンクリートを使用し、ひび割れの発生を抑制したプレストレストコンクリート（以下、PC と略す）構造が適しているといえる。これまでの海洋港湾構造物を概観しても、PC 構造のこのような特性を期待した適用事例は随所に見ることができる。これに加えて、施工の効率化のために、プレキャスト部材の接合や構造要素の一体化を目的として PC 構造が用いられる事例も多い。

このように、構造物の高性能化と施工の省力化や高精度化を実現できる PC 構造は、海洋構造物にとって不可欠な構造様式である。

本稿では、本誌特集号の趣旨に基づき、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 構造の変遷を簡単に紹介する。なお、最近では特筆的な PC 構造の採用事例が少なくなってきた。したがって、本誌等<sup>1~3)</sup>ですでに紹介されている記事と同様の内容になっていることをご容赦願いたい。

## 2. 港湾における PC 構造の変遷

### 2.1 港湾構造物への本格的採用

わが国の港湾において、PC 構造が本格的に採用されたのは、約 50 年前にさかのぼり、1960 年代に整備された神戸港第 5 防波堤である。これは、外径 15.5 m、高さ 11.5 m、厚さ 0.15 m の PC 円筒セルを基礎とし、その上にセルを積み重ねて防波堤の堤体としたものである。延長 800 m の部

分が完成した直後、1964 年 9 月に来襲した台風 20 号により、本防波堤は倒壊した。この倒壊の原因は部材の耐力不足等 PC 構造に直接起因するものではなく、セルと中詰め物の一体性が十分でなかったことなどによるものであるとされている。しかしながら、この被災以降しばらくの間、PC 構造の採用が敬遠されることとなり、PC 構造の実績に関して歴史的に空白の期間が生じることとなった。

### 2.2 栈橋上部工

神戸港防波堤の被災から 10 年ほど経過した 1975 年頃から、PC 港湾構造物の研究・技術開発が再開され、これに合わせて PC 構造の建設実績が増えることとなった。その代表は栈橋上部工への適用である。これは、工場で製作されたプレキャスト PC 桁（ホロー桁の場合もある）を敷き並べた後にこれらを横締めし、上部工（床版）を構築する手法である。PC 栈橋の標準断面の一例を図-1 に示す。

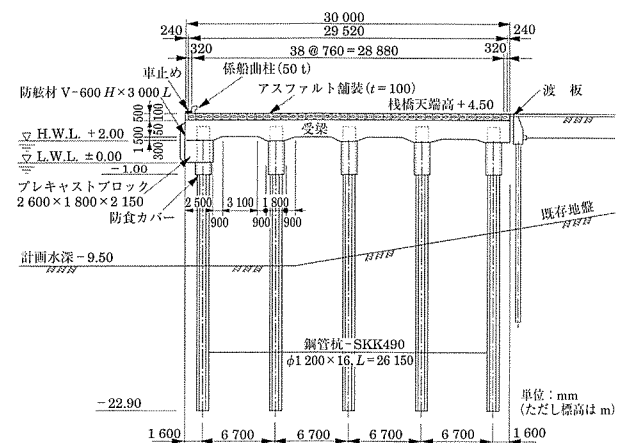


図-1 PC 栈橋標準断面の一例

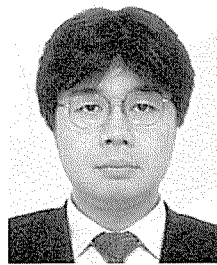
栈橋は、杭基礎でコンクリート上部構造を支持する形式であり、大水深の岸壁で用いられることが多い。これは、構造自体が軽量であり、軟弱地盤上での沈下の低減、地震時慣性力の低減などが期待できるためである。また、海水の流れを阻害しない利点もある。PC 栈橋は、軽量という栈橋の特徴に大きく寄与する構造である。PC 上部工の採用により、鉄筋コンクリート（以下、RC と略す）上部工の場合と比較して下部構造の杭配置間隔を長くすることができ、より経済的な施設の建設に寄与する。また、プレキャスト部材の活用により、海上施工時間の短縮も図られる。このようなことから、近年採用実績が増えている。

PC 栈橋においては、PC 桁と受梁および杭との接合部の力学性状が重要となる。一般に、上部工を支える杭の断面



\*1 Hiroshi YOKOTA

(株) 港湾空港技術研究所



\*2 Mitsuyasu IWANAMI

(株) 港湾空港技術研究所

諸元が水平荷重によって決定されるため、水平荷重を各下部工に合理的に分配できる剛結接合構造とすることが多い。2007年4月の港湾の施設の技術上の基準<sup>4)</sup>の改訂では、信頼性設計の枠組を基本原則として、係留施設の耐震性能の照査を行うこととされている。それ以前の1999年4月改訂の港湾の施設の技術上の基準<sup>5)</sup>において、すでに保有耐力による照査法が導入され、それが現在の耐震性能照査のベースとして引き継がれている。そこでは、鋼管杭の許容曲げモーメントを超える大きな断面力を考慮することが一般的になり、地震時には鋼管杭とPC上部工の接合部には大きな曲げモーメントやせん断力が発生することとなる。このようなことから、地震時に生じる断面力が作用した場合の接合部の性状について載荷試験により確認されている。これらの知見を取りまとめたPC栈橋技術マニュアル<sup>6)</sup>が2003年10月に発刊されている。

高品質のコンクリートを使用するPC栈橋は、RC栈橋よりも耐久性の向上が期待される。PC栈橋とRC栈橋の劣化程度を比較すると、RC栈橋では劣化が顕在化して激しい変状が見られるのに対し、PC栈橋ではこのような変状の発生は認められない事例も多い。この理由については詳細な分析が必要であるが、一般に入念に施工されたPC栈橋では、耐久性の向上が期待できると考えている。

### 2.3 浮 体

1980年頃から、浮体構造物（以下、ポンツーンという）にPC構造を採用する事例が多く見られるようになった。ポンツーンは、主に小型船舶の乗降用施設や消波堤として利用されている。とくに、瀬戸内海沿岸のように、波浪条件が厳しくなく、潮位差の大きい海域で用いられている。

ポンツーンでは漏水につながるひび割れの発生を抑制する必要がある、まさにPC構造の利点を生かした構造物である。近年ではさらなる合理化を図り、鋼殻構造の外側にPC壁あるいは床版を設けるPCハイブリッド構造も多用されている。

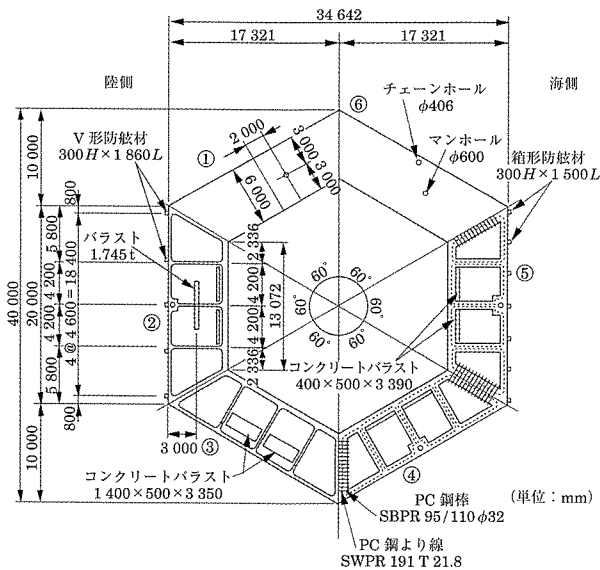


図 - 2 HMS 構造一般図

広島港宇品地区の浮体式係船岸は、5個の函体を洋上でPC鋼棒により結合し、延長150m、幅30mのフェリー・旅客船ターミナル施設としたものである。また、6函の台形ポンツーンを平面的に六角形になるようにPC鋼棒にて接合したHMS浮体構造物<sup>7)</sup>が新しい形式の構造物として、1989年の横浜博覧会の開催に合わせて開発された(図-2)。

### 2.4 曲面形状のケーソン

防波堤や護岸のケーソン（箱形の構造物）は直立壁で構成されるのが一般的である。しかし、波浪が直接作用する壁に曲率を設けて曲面壁にすると、堤体の安定性が高まる効果や、反射波が低減するなど水理特性の向上が期待できる。このように開発されたものが、曲面スリットケーソン、二重円筒ケーソン、半円形ケーソンである。しかし、曲面壁（部材）の内側から波浪が作用すると、部材に引張軸力が生じ、コンクリート部材にとって厳しい応力状態となる。そのため、PC構造の採用が有利となる。また、曲面部材の施工の合理化からプレキャスト部材とすることが多く、部材の接合・一体化にもPC構造が活用されている。

#### (1) 曲面スリットケーソン

曲面スリットケーソンは、ケーソン本体に、消波ブロックと同等の消波機能をもたせるもので、曲面スリットの設置により、消波ブロックを省略できる。曲面スリットケーソンは、水理模型実験や部材載荷実験などによる検討を経て、1979～1980年度に、秋田港に1函試験堤が設置され、各種の計測により設計法の検証が行われた。

その結果を受けて、船川港（秋田県）南防波堤において、1984年に実構造物として建造された(写真-1)。本防波堤の総延長は1270mで、そのうちの108m区間に曲面スリットケーソンが6函設置された。曲面スリットケーソンの堤体幅は18.0m、函長は18.0m、高さは15.5mで、曲面スリットの半径は7.0mである。構造は、曲面スリット部がPCで、ケーソン本体はRCである。このPC曲面部材はプレキャスト構造であり、PC鋼材によって函本体に取り付けられている。1年確率波（最高波 $H_{max} = 5.4$ m）による波力に対して引張応力が発生しないようにプレストレス量が決定されている。

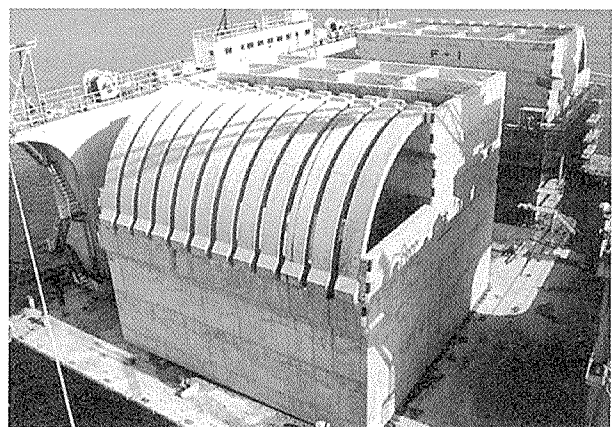


写真 - 1 曲面スリットケーソン

(2) 二重円筒ケーソン

二重円筒ケーソン式防波堤<sup>8)</sup>は、二重の円筒壁、底板、中間床版、隔壁などで構成された消波ケーソンである。曲面スリットケーソンと異なり、曲面部材が平面的に設けられている。曲面外壁に設けられた開口部から波浪の一部を透過させて、内壁との間の空間で消波を図る構造である。その結果、優れた水理特性と安定性を維持し、合わせて海水交換機能をもつ構造にもなっている。この防波堤は、1990年に境港(鳥取県)で最初に建設され、その後、柴山港(兵庫県)、紀伊長島港(三重県)に建設されている(図-3)。

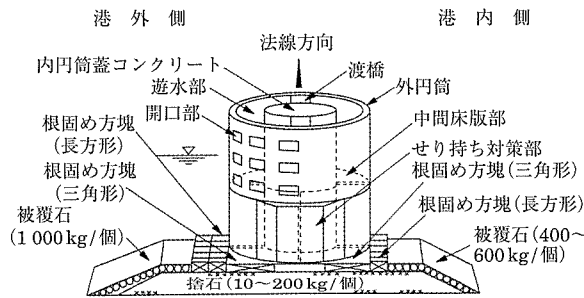


図-3 二重円筒ケーソン堤概念図<sup>8)</sup>

柴山港における二重円筒ケーソンの直径は16.2m、高さは10.4mである。厚さ400mmの円筒壁には、鉛直方向に直径26mmのPC鋼棒が、円周方向には直径21.8mmのPC鋼より線が配置されている。1年確率波( $H_{max} = 3.8$ m)に対して円筒壁に引張応力が生じないように、1~2MPaのプレストレスが与えられている。

(3) 半円形ケーソン

半円形ケーソン<sup>9)</sup>は、蒲鉾を伏せたような形状をもつ構造物で、中空構造をしている。宮崎港で1991年から建設が開始された防波堤(図-4)は、後壁のみが透過性を有する構造となっており、防波堤を越えて浸入した波(越波)が後壁によって消波されるため、伝達率が減少する利点を有する。また、半円形とすることで、壁面に作用する波力の水平成分が従来の直立壁よりも小さく、かつ鉛直成分が下向きに作用し堤体の安定性を増している。

半円形壁の部分にPC構造が採用されているが、1年確率

波( $H_{max} = 5.5$ m)に対して、許容ひび割れ幅を超えない程度のひび割れの発生を許容している。また、実際の建設においては、1/4円プレキャスト部材を現地にて組み立てて一体化させる方式を採用した。そのため、底板と半円形部を一体化するために円周方向にPC鋼線が、また、水平方向に4つの1/4円プレキャスト部材を一体化するためにPC鋼線が配置されている。

2.5 沈埋トンネル

沈埋トンネルは、あらかじめ製作されたトンネル構造体(以下、沈埋函という)を敷設現場まで曳航し、沈設して沈埋函どうしを接合した後、埋め戻してトンネルを完成させる工法である。沈埋函の製作方法には、鋼殻構造、コンクリート構造(RC方式およびPC方式)、鋼コンクリート合成構造、およびプレキャストセグメント構造がある。最近の沈埋トンネルは、構造の合理化を期待した合成構造で建設されることが多い。PC方式の沈埋トンネルとしては、2002年に完成した新潟みなとトンネル(信濃川河口)がある。

PC方式は、基本的にはRC方式と同様であるが、コンクリートのひび割れ防止や強度および変形性能の増加のためにプレストレスが導入される。その結果、水密性が高まることとなり、地震などの作用により、万一、コンクリートにひび割れが生じても、プレストレスによりひび割れが閉じることが期待される。PC鋼材は、沈埋函の軸方向に配置され、1~2MPa程度のプレストレスが導入されることが一般的である。

プレキャストセグメント構造沈埋トンネルは、長さ5m程度のRCセグメントを、工場または陸上のヤードで必要個数製作して、これをPC鋼材で緊張・連結することにより沈埋函を構成し、その後は従来の沈埋函と同様に施工してトンネルを構築するものである(図-5)。プレキャストセグメント構造沈埋トンネルは、諸外国で建設実績があるものの、わが国では適用されていない。この構造は、狭い製作ヤードでも沈埋函の製作ができるほか、セグメント相互の継手を工夫することで、柔構造とすることができ、地震および地盤沈下に対して有利となることが期待される<sup>10)</sup>。

最近建設された、あるいは建設が進められている港湾の沈埋トンネルでは、鋼コンクリート・サンドイッチ構造が用いられている。いずれも外側の鋼板に、構造部材として

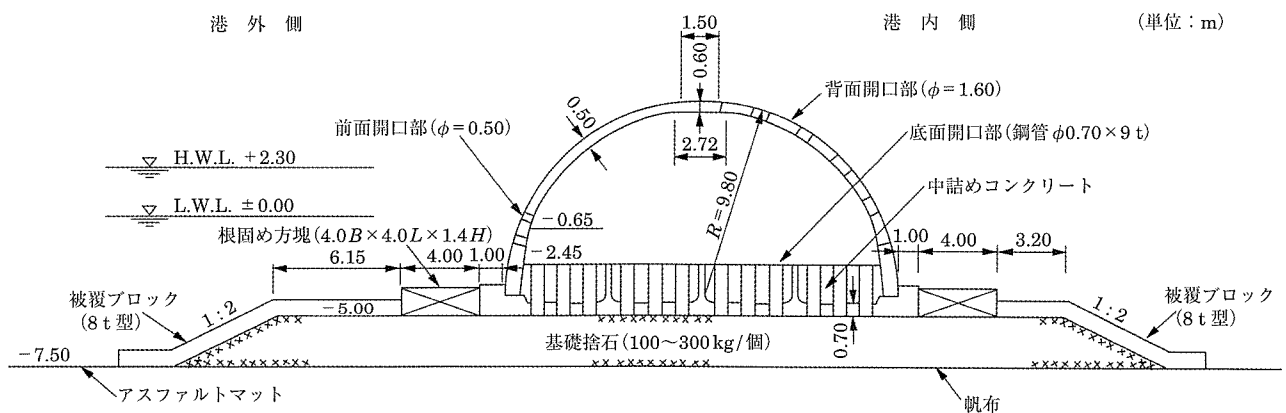


図-4 半円形防波堤標準断面図

の役割と止水版としての役割をもたせたものである。今後はPCと鋼材による複合構造の採用も期待されるところである。

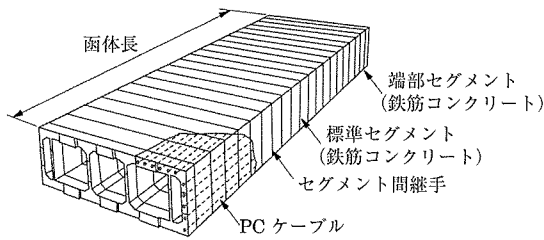


図-5 プレキャストセグメント構造沈埋面

### 2.6 PC 矢板岸壁・護岸

港湾構造物において、矢板は土留め壁としての機能を有する永久構造物として、岸壁や護岸に用いられることが多い。鋼矢板が使用されることが一般的であるが、これは、矢板の断面諸元や長さ、岸壁などに必要とされる性能を十分に満足していること、取扱いが容易であることなどによる。反面、海洋環境下では鋼材の腐食が懸念され、確実な防食対策や維持管理が必要となる。

プレストレストコンクリート矢板 (PC 矢板) は、1965 年に JIS 化されて以来、陸域の水路や河川の護岸において使用されてきたが、海洋環境下における使用実績はほとんどない。これは、鋼材のかぶり厚さが 20 mm 程度と小さく、耐久性に懸念があったことなどがその理由として考えられる。この問題を解決するために、PC 矢板の耐久性に関する検討を行い、港湾用 PC 矢板の開発が進められた。その結果、2002 年に設計・施工マニュアル<sup>11)</sup>が整備され、刊行されている。

港湾用 PC 矢板の耐久性試験結果<sup>12)</sup>の一例を、図-6 に示す。鉄筋あるいは鋼材位置での限界塩分量到達年数を指標とすれば、通常の港湾 RC 構造物に用いられる圧縮強度 24 MPa のコンクリートでかぶり 70 mm の場合と、圧縮強度 70 MPa のコンクリートでかぶり 50 mm の場合が、ほぼ同等の耐用年数を与えるという結論が得られた。この結果に基づき、港湾用 PC 矢板のかぶりは 50 mm を標準とした。港湾用 PC 矢板は、幅が 1 246 mm、厚さが 130 mm と一定で、高さは 350 ~ 1 200 mm の範囲で 50 mm ごとに設定されている。PC 矢板を用いた場合には、鋼矢板で必要であった防食工を省略できることとなり、ライフサイクルコストの観点から有利となる場合も十分生じ得る。

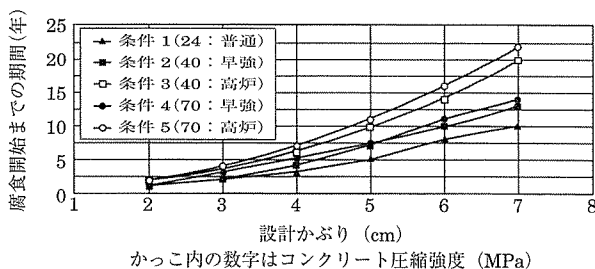


図-6 港湾用 PC 矢板の耐久性試験結果

## 3. 海上空港における PC 構造

### 3.1 空港における PC 構造

空港土木施設への PC 構造の適用は、エプロン等の舗装版、共同溝等の地下埋設構造物などに代表される。そのうち、ここでは最新の事例として、現在施工が進められている東京国際空港の D 滑走路への適用について紹介する。

### 3.2 栈橋式空港施設

東京国際空港 (羽田空港) は、年間の乗降客数が約 6 500 万人、離発着回数は約 29 万回を超えており、空港処理能力がすでに限界に達している。そこで離発着能力の向上を目的として、現在再拡張事業が急ピッチで進められている。この再拡張事業では、現空港の沖側の多摩川の河口部に新たに 4 本目の滑走路である D 滑走路 (2 500 m) を新設するとともに、旧空港地区で国際線地区整備事業が進められている (図-7)。この D 滑走路は、埋立・栈橋工法のハイブリッド構造であり、空港島 3 120 m のうち 1 100 m が栈橋 (ジャケット) 式構造となっている。この位置で栈橋式の構造が採用された理由としては、多摩川の通水性を確保することなどがあげられる。この栈橋部および現空港との連絡誘導路部の上部工において、耐久性に配慮された PC 構造が採用されている<sup>13)</sup>。

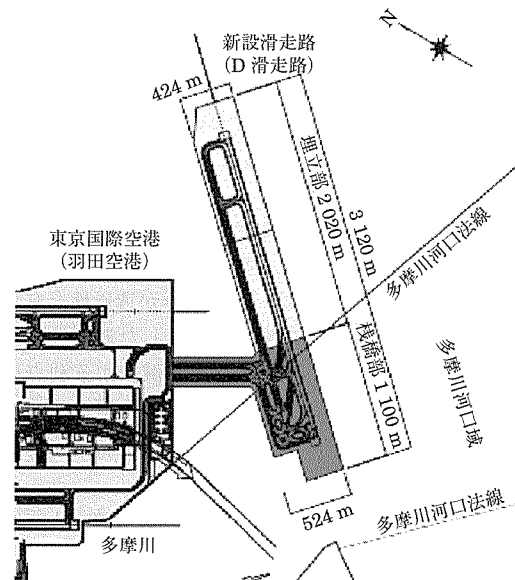


図-7 東京国際空港の再拡張事業の概要

栈橋部は、標準型の寸法で幅 63 m、長さ 45 m、高さ 32 m のジャケット (写真-2) 198 基を、先行打設した 1 165 本の鋼管杭 ( $\phi$  1 600 mm) 上に設置し、その上に PC 床版 (約 51 万  $m^2$ ) を配置することで構築されている。このうち、滑走路や誘導路などが配置される栈橋中央部 (約 31 万  $m^2$ ) は、約 10 700 枚のプレキャスト PC 床版 (標準寸法: 6.6 m  $\times$  3.3 m) と間詰めコンクリートを一体化した連続構造となっている。一方、栈橋の外周部 (着陸帯, 約 20 万  $m^2$ ) には、約 7 000 枚の超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC と略す) 床版 (標準寸法: 7.8 m  $\times$  3.6 m) が採用されてい

る(写真-3)。その理由は、UFCの強度が高いため床版を薄く軽量化でき、下部工の鋼材量を減らせることに加えて、UFCの優れた耐久性により供用中の維持管理を合理化できることである。実験結果<sup>14)</sup>によると、コンクリート内部への塩分の浸透はほとんどなく、きわめて長い期間、所要の性能が十分に確保できるとされている。

また、既述のように、栈橋上部工では塩害の発生が懸念されるが、D滑走路のPC床版では、海からの塩分の供給を遮断するため、床版下にチタン製のカバープレートを設置するとともに、その内部の湿度管理を行っている。



写真-2 据付け前のジャケッ ト

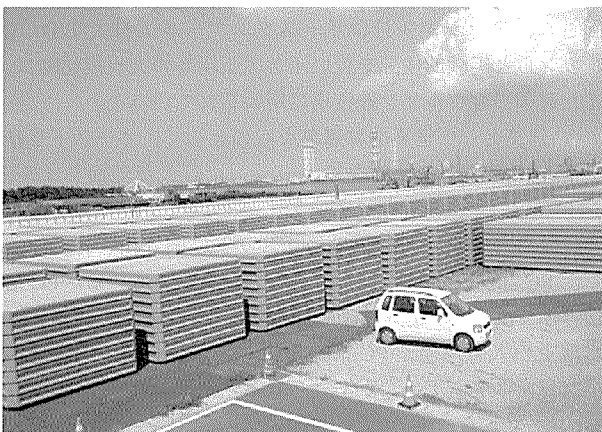


写真-3 製作された UFC 床版

#### 4. あとがき

本稿においては、海洋構造物におけるPC構造の開発・適用の変遷を簡単に紹介した。PC構造の特長を最大限に発揮した多種多様な港湾構造物や海上空港での構造物が数多く建設されていることを認識していただけたのではないかと。

港湾構造物の設計基準である、港湾の施設の技術上の基準<sup>4)</sup>においては、2007年の改訂版から性能設計の考え方を本格的に導入している。性能設計においては、要求性能を達成する方法およびそれを保証する方法(構造形式、使用材料および照査手法)は問わない。PC構造はそれ自体の構造性能が高く、使用限界に対して終局限界に余裕があるこ

とが多い。このような構造の特質を生かして、性能設計体系の中でより多くの適用事例が生まれるものと考えている。

また、海洋構造物において、PC構造とRC構造の比較設計の際に初期建設費が割高となる傾向にあるPC構造が採用されないことが多々あった。しかし、これからの構造物の建造において、初期建設費のみならず供用中の維持補修費用等も含めたライフサイクルコスト(LCC)の大小が工法採用の指標となりつつある。PC構造は、海洋環境において、RC構造に比較して耐久性に優れた構造であることを示す多くの客観的事例がある<sup>15)</sup>。そのために、初期建設費は高くても最終的なLCCが安価になることは十分考えられる。

このように、港湾および空港において、今後もPC構造の重要性は変わらないことと確信している。港湾や空港にかぎらず社会基盤施設の整備は厳しい時代を迎えているが、安全・安心な生活の実現のために必要な施設はまだ多い。そのために、PC構造の優れた特質が今後ますます役立っていくことを期待している。

本稿3.2の執筆にあたっては、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所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) 秦隆司：PC海洋構造物の歴史，プレストレストコンクリート，Vol.35，No.6，pp.13-14，1993
- 2) 加島總，福手動，横田弘，近藤真一，境恭宏：PC技術の幅広い適用事例，プレストレストコンクリート技術の適用拡大と世界の動向，第31回PC技術講習会，pp.109-134，2003
- 3) 横田弘：港湾構造物におけるPC技術の発展と展望，プレストレストコンクリート，Vol.46，No.6，pp.16-20，2004
- 4) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2007
- 5) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999
- 6) 沿岸開発技術研究センター：PC栈橋技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.19，2003
- 7) 横田弘，戀塚貴：PCポンツーンを用いた六角形浮体構造物の開発，プレストレストコンクリート，Vol.33，No.3，pp.38-46，1991
- 8) 鹿籠雅純ほか：二重円筒ケーソン堤の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.33，No.3，pp.18-30，1991
- 9) 山下廣行ほか：半円形ケーソン式防波堤の現地実証試験，コンクリート工学，Vol.33，No.10，pp.22-29，1995
- 10) 大野晋也ほか：プレキャストセグメント工法による沈埋トンネルの地震時断面力の低減効果，第2回免震・制振コロキウム論文集，土木学会，2000
- 11) 沿岸開発技術研究センター：港湾用PC矢板技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.9，2000
- 12) 浜田秀則，横田弘，菊池喜昭：促進試験によるプレストレストコンクリート製矢板の海洋環境下における耐久性評価，港湾空港技術研究所資料，No.1097，2005
- 13) 野口孝俊，加藤浩司：羽田空港再拡張事業における超高強度繊維補強コンクリートの活用，セメント・コンクリート，No.741，pp.34-38，2008
- 14) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.113，2004
- 15) Otsuki, N. et al.: Lifecycle Design for Durability of Offshore Concrete Structures, The First fib Congress, Osaka, Session 4, pp.65-84, 2002

【2008年12月22日受付】