

# 港湾構造物における PC 技術の発展と展望

横田 弘\*

## 1. 概 要

港湾構造物は、陸上構造物に比べて相当大きな波力、潮流力等が作用すること、大水深下では強大な水圧が作用することなど、厳しい荷重作用条件下に置かれる。また、海水中の塩化物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(PC)構造の適用に非常に適しているといえる。事実 PC 構造のこのような特性を期待した適用事例を港湾において随所に見ることができる。これに加えて、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増えつつある。

このように、施工の省力化と高精度化および構造物の高性能化を実現できる PC 構造は、港湾構造物にとって不可欠な構造様式である。本誌においても過去に定期的に PC 海洋・港湾構造物の特集号が企画されていることから、その重要性を認識することは容易である。

本稿では、港湾における代表的な PC 構造の変遷を簡単に紹介し、昨今の港湾整備の状況を踏まえて PC 構造の今後の展望について私見を述べる。なお、近年公共事業の見直しにより、新形式構造物開発の動きは以前に比べて沈静化している。そのため、最近では特筆的な PC 構造の採用事例がほとんど見当たらず、本誌等<sup>1)2)</sup>ですでに紹介されている構造物のレビューが多くなってしまった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 初めての本格的採用

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、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15.5m、高さ11.5m、厚さ0.15m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800m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、本防波堤は残念ながら倒

壊した。現在も神戸港で被災した状態の構造物を見ることが可能である。この倒壊の原因はPC構造に直接起因するものではなく、セルと中詰砂の一体性が十分でなかったことなどによる。しかし、この被災以降しばらくの期間PC構造の採用が敬遠されることとなった。

なお、この防波堤基礎を構築する際に用いた工法は、負圧を利用するもので、当時画期的な工法であった。それから約40年弱経過した現在、サクシオン基礎等の名称でこの工法の再評価がなされ、設計・施工のためのマニュアル<sup>3)</sup>が新たに発刊されるに至っている。

### 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PC栈橋への適用である。これは、工場で製作されたプレキャストPCホロー桁を敷き並べた後にさらに横締めし、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。

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、大水探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をさらに高めた構造であり、その結果、RC栈橋と比較して下部構造の杭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、海上施工の短縮化も図られる。このようなことから、近年採用実績が増えており、1989年以降、約50件の施工実績がある。

PC栈橋においては、PC桁と受け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。1999年4月の「港湾の施設の技術上の基準」の改訂により、保有耐力法をベースとする手法が栈橋の耐震性能照査の標準的手法になった。このため、従来の許容応力度レベルを超えた大きな曲げモーメントおよびせん断力が地震時に接合部に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(写真-1)により確認した。これらの知見を取りまとめたPC栈橋技術マニュアル<sup>4)</sup>が2003年に発刊されている。

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。一例として、写真-2に



\* Hiroshi YOKOTA

独立行政法人 港湾空港技術研究所  
構造強度研究室長

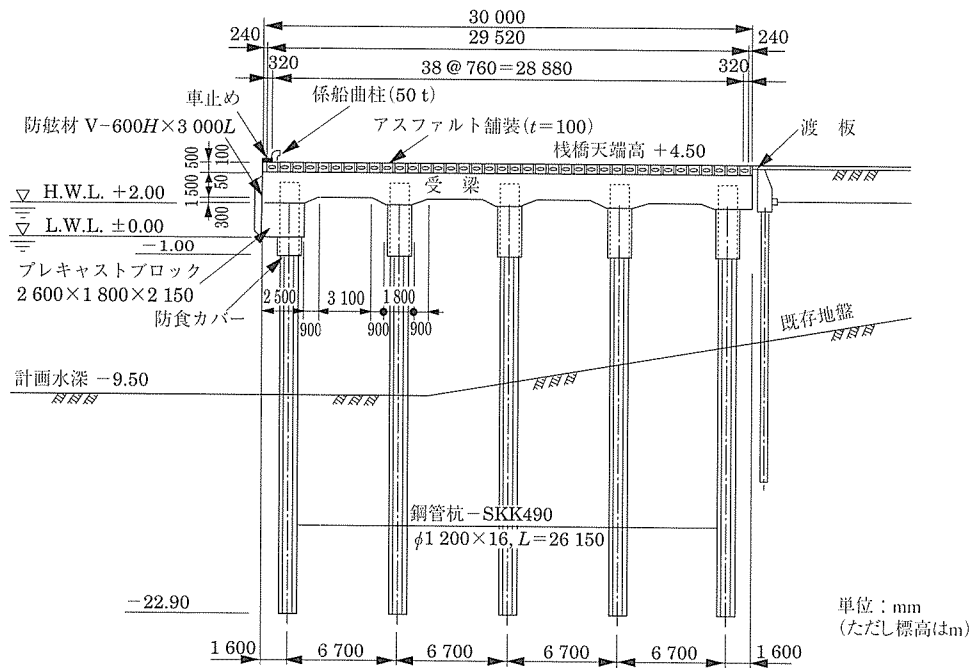


図 - 1 PC 栈橋標準断面の一例

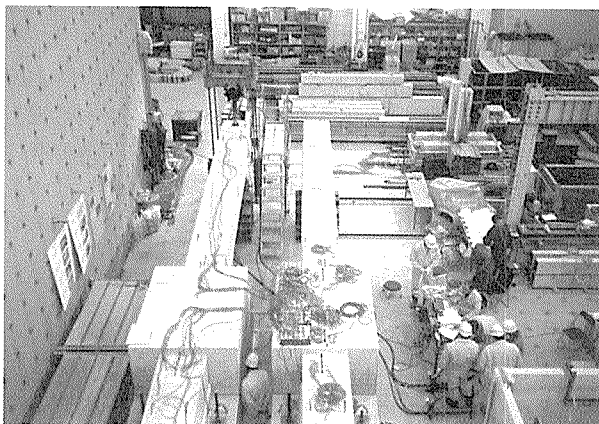


写真 - 1 PC 栈橋の接合部載荷試験

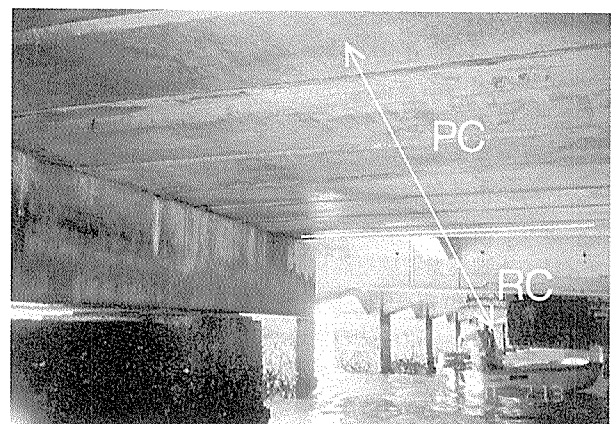


写真 - 2 耐久性に優れる PC 栈橋

PC 栈橋と RC 栈橋が隣接して建造されている事例を示す。同図奥の RC 栈橋の上部工梁では劣化が顕在化し、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。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ことをこの事例は示している。

### 2.3 浮 体

1980 年頃から、浮体構造物（ポンツーン）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、瀬戸内地方のように、波浪条件が厳しくなく、潮位差の大きい港湾で用いられている。

浮体構造物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 / 版を設ける PC ハイブリッド構造も多用されている。

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 150 m、幅 30 m 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 鋼棒にて結合した HMS 浮体構造物<sup>5)</sup> が新しい形式の構造物として、1989 年の横浜博覧会に合わせて開発された (図 - 2)。現在、十和田湖や猪苗代湖など供用されている。

### 2.4 曲面形状のケーソン

防波堤や護岸のケーソン（函型の構造物）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荷重作用となる。そのため、PC 構造の採用が有利となることが多い。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

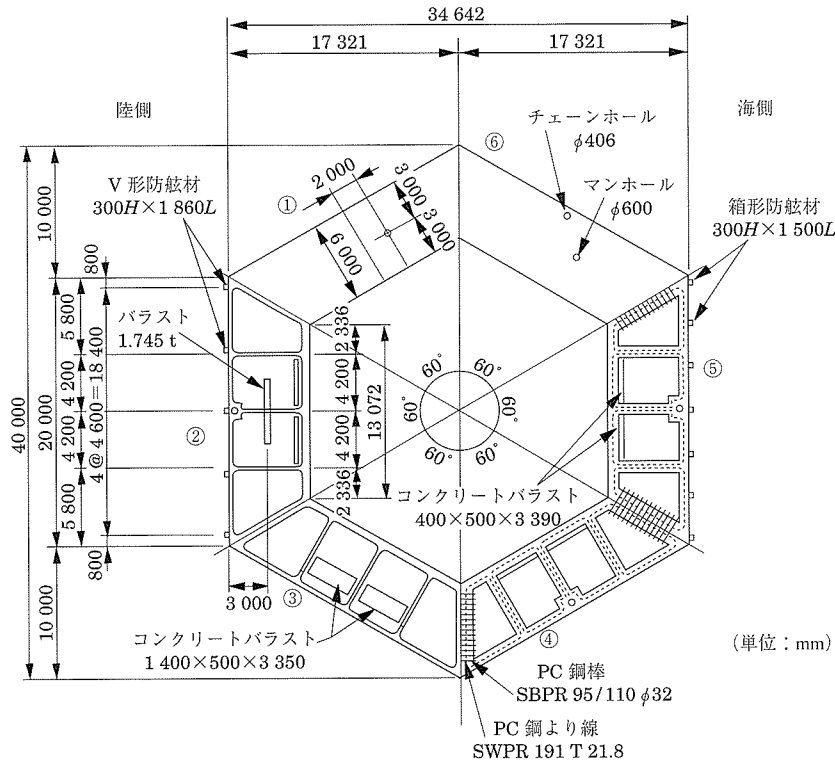


図-2 HMS 構造一般図

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。筆者が就職をして初めての研究課題がこの曲面部材の力学性能の評価であり、大変思い出深い構造物である。

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 - 3）。本防波堤の総延長は 1 270 m で、そのうちの 108 m 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 18.0 m、函長は 18.0 m、高さは 15.5 m で、曲面ス

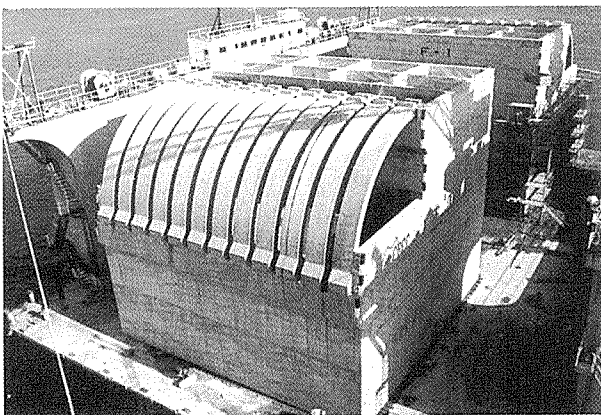


写真-3 曲面スリットケーソン

リットの半径は 7.0 m である。構造は、曲面スリット部が PC 構造で、ケーソン本体は RC 構造である。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 ( $H_{max} = 5.4$  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。

(2) 二重円筒ケーソン

二重円筒ケーソン式防波堤<sup>6)</sup>は、二重の円筒壁、底版、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）。柴山港における二重円筒ケーソンの直径は 16.2 m、高さは 10.4 m である。厚さ 400 mm の円筒壁には、鉛直方向に

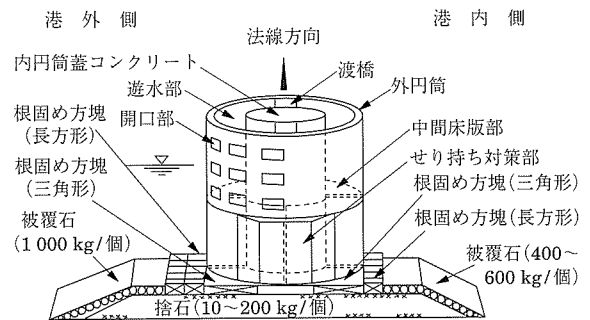


図-3 二重円筒ケーソン堤概念図<sup>6)</sup>

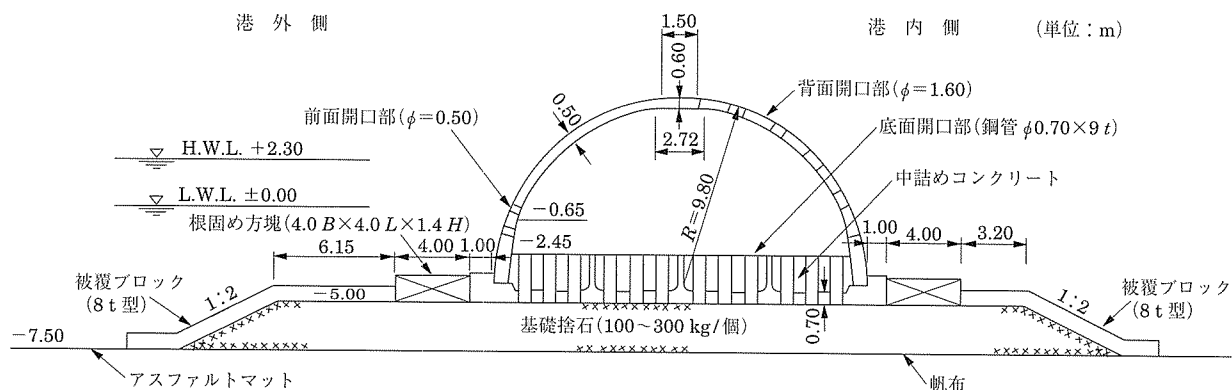


図-4 半円形防波堤標準断面図

直径 26 mm の PC 鋼棒が、円周方向には直径 21.8 mm 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、1~2 MPa 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>7)</sup>は、蒲葺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、港内側壁のみが透過性を有する構造となっており、防波堤を越えて侵入した波 (越波) が港内側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、底版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 (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、1~2 MPa 程度のプレストレスが導入されることが一般的である。

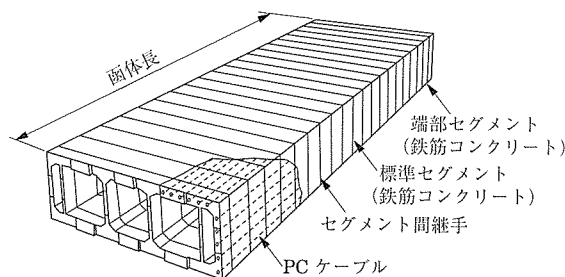


図-5 プレキャストセグメント構造沈埋函

プレキャストセグメント構造沈埋トンネルは、長さ 5 m 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>8)</sup>。

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が、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 矢板の開発を進めた。その結果、2002 年に設計・施工マニュアル<sup>9)</sup>が整備された。

港湾用 PC 矢板の耐久性試験結果の一例を、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 70MPa 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、鋼矢板が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に生じ得る。

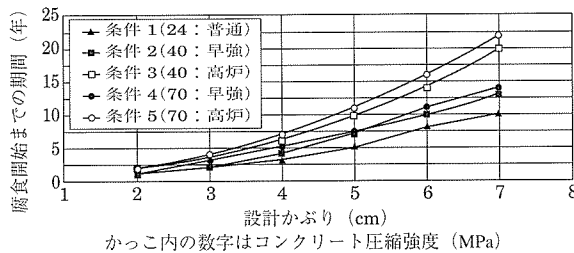


図-6 港湾用 PC 矢板の耐久試験結果

### 3. 今後の展望

ここまで、港湾における 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港湾構造物が数多く建設されていることを認識していただいたと思う。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が、以下のような展望をもっている。

#### (1) 性能設計

構造物の設計が従来の仕様設計から性能設計へと移行しつつある。コンクリート構造物の設計においても、国際標準である ISO 19338<sup>10)</sup> が最近制定され、各国の設計基準においてもこれに従って構造物の性能を規定し、それを照査することが求められている。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」においても、次期改訂版において性能設計の考え方を導入するための作業を行っている。

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（構造形式の採用および照査技術）は問わない。また、要求性能を満たすことを直接照査することになるため、一つの破壊が構造全体の破壊につながる（進行性破壊）や、個別の性能に対してぎりぎりの設計をして総合的な性能に対する余裕が少ないこと（いわゆる冗長性の欠如）などが照査の段階で否となる。

PC 構造はそれ自体の性能が高く、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。

#### (2) 耐久性と LCC

港湾構造物において、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、一般に RC 構造に比較して耐久性に優れた構造である<sup>11)</sup>。そのために、初期建設費は高くとも最終的な LCC が安価になることは十分考えられる。近年グラウト不良等で PC 構造の耐久性が問題となったが、施工の際にこのような初期欠陥を防ぎ、名実ともに耐久性の優れた構造を実現できれば、LCC の低下につながる事となる。

#### (3) 新材料・新工法による高性能化

超高強度繊維補強コンクリートのように新しい材料を効率的に用いて高強度あるいは高耐久を実現する構造が開発されている<sup>12)</sup>。超高強度繊維補強コンクリートは圧縮強度が 200 MPa にもなり、鉄筋を用いずに構造部材が構成される。また、PC 鋼材との併用により、プレキャスト構造としての適用も可能になる。もちろん、耐久性にも優れ、塩分の浸透はほとんど問題ないそうである。これは一つの事例であり、このような新しい素材を積極的に活用することにより、今後新しい領域での PC 構造の活用もますます広がっていくことが期待される。

### 4. あとがき

本稿においては、港湾構造物における PC 構造の活用と展望について私見を述べさせていただいた。港湾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・安心な生活のために必要な施設はまだ整備の必要がある。そのために、PC 構造の優れた特質がますます役立つことを期待している。

#### 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) 加島聡ほか：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.116-122, 2003
- 3) 沿岸開発技術研究センター：サクシオン基礎技術マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.17, 2003
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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 震災・制振コロキウム論文集，土木学会，2000
- 9) 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
- 10) ISO: Performance and Assessment Requirements for Design Standards on Structural Concrete (ISO 19338) , 2004
- 11) Otsuki, N. et al.: Lifecycle Design for Durability of Offshore Concrete Structures, The first fib Congress, Osaka, Session 4, pp.65-84, 2002
- 12) 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

【2004 年 9 月 24 日受付】