

海洋構造物における複合構造

横田 弘*

1. はじめに

海洋空間は、宇宙空間、地下空間などともにかつては人知の及ばない自然領域であったが、近年の科学・工学における技術の急速な発展に伴い、有効利用構想が各方面で検討されている。とくに海洋は、生命の母であるとともに、私たちの日常生活に密接に関係しているため、今後も環境に調和しつつ適切な開発が望まれているところである。

海洋空間には、岸壁、防波堤などの港湾施設、海岸保全施設、石油掘削施設、さらには人工島など大小さまざまな構造物が多数構築されている。また、これらの構造物のほとんどが海岸線付近に建造され、生活・産業空間の確保、海からの自然災害の防衛などの役割を担っている。

しかし、機能だけを満足すればよい時代はすでに過ぎ去った。今や、海洋構造物には、周辺環境と調和し、景観性が高く、付加価値の高い高品質であることが求められている。加えて、今後の海洋開発の場が水深の大きな沖合い海域に求められるにつれて、構造物は大型化するとともに、より厳しい外力・環境条件にさらされることになる。すなわち、海洋構造物の使命は今後ますます重要に、かつ厳しくなってくるわけである。

海洋構造物は、これまで鋼材あるいはコンクリートを主要な材料として建造されてきた。これらは、それぞれが単独で用いられるとともに、両者を適切に組み合わせ

た形態でも利用されている。これらの内の1つである、鋼材とコンクリートを適切に合成した複合構造は、両者のそれぞれの長所を生かしつつ短所を補い合う理想的な構造様式である。そのため、海洋環境下において種々の利点が期待でき、海洋構造物に求められている要請に十分応えることが可能であると考えられる。

本稿では、複合構造を用いた海洋構造物の特徴、利点、これまでの建造事例、および設計上の課題などについて概説を行う。

2. 海洋構造物の特徴と複合構造

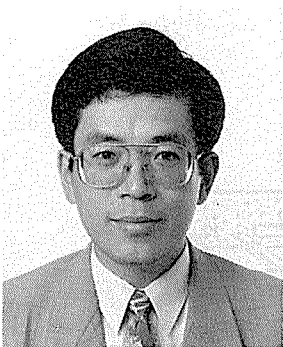
2.1 海洋構造物に要求される性能

海洋構造物に作用する主たる外力は波浪によるものである。防波堤の設計波力は、設計波高に比例して計算されるが、波浪条件の厳しい日本海沿岸の港湾などでは20 tf/m²程度の値になる。また、波浪は、言うまでもないが、繰り返し構造物に作用する。わが国沿岸では大小合わせて年間約500万波もの波浪が来襲している。加えて、北極海などの寒冷地では氷荷重が作用することもある。氷荷重は設計値として数100 tf/m²もの値が提案されている¹⁾。このように、波浪や氷による外力は、陸上構造物に作用する外力に比べても、かなり厳しい値が設定されている。

海洋構造物は海洋の厳しい気象・海象環境のもとで長期間使用される。構造物の大半の部分は、海水中に没していることや、厳しい条件下での作業となることなどから、損傷の発見や日常の維持・管理、破損した場合の補修などが非常に困難である。

また、構造物自体が現地で製作されることは少なく、通常は陸上あるいは湾内や港内の静穏な場所で建造された後に、最終設置位置まで曳航して設置される。そのため、製作時、曳航時、設置時、および設置後の施工段階で所定の安全性が必要となる。さらに、製作時には喫水の確保などの観点から軽量であることが求められるとともに、設置後には所定の重量が必要になるという、相反する性能が同時に求められる。

このように、海洋構造物は特有の設計条件や使用条件を満足する性能を十分に有するものでなければなら



* Hiroshi YOKOTA
運輸省港湾技術研究所
計画設計基準部設計技術研究室 室長

い。すでに述べたように、今後はますます厳しい条件下での構造物の建造が求められるようになり、これを満足する構造様式の開発が必要となる。

2.2 複合構造の海洋構造物への適用

海洋構造物という言葉が対象とするものはいへん広く、いわゆるウォーターフロントと呼ばれる海岸線の構造物からはるか沖合い大洋上の施設まで含まれる。私たちの目にとまりやすい海岸線近くの構造物、代表的なものとして港湾構造物や海岸構造物を見回してみると、古くから複合構造が使われていることがわかる。たとえば、港湾において船舶が着岸し、船客の乗降や貨物の荷役が行われる棧橋には古くから鋼材とコンクリートが複合されて用いられている。棧橋の断面の一例を図-1に示す。船舶が接岸し、荷役作業などの場となる床版部分には鉄筋コンクリート (RC) あるいはプレストレストコンクリート (PC) が使われている。さらに、これを海底地盤中に打設された複数の鋼管杭が支える構造になっている。諸外国ではコンクリート杭が使われている例も多いが、わが国では主に地震によるせん断力に耐えるため、あるいは施工の簡便性などの理由で鋼管杭が多く用いられている。このような棧橋の構造形態は複合構造のうちでもとくに「混合構造」と呼ばれている。混合構造とは、複数の材料が構造部材レベルで適材適所に組み合わせられて用いられているものである。

複合構造のもう一方の形態として、「合成構造」と言われるものがある。これは、部材断面が常に複数の異種材料から構成されるものであり、合成柱、合成桁、合成床版などいくつかの構造様式がある。海洋構造物では、合成構造のなかでも、図-2に示すようなオープンサンドイッチ構造あるいはサンドイッチ構造と呼ばれる構造様式が使われ始めている。この構造は、鋼板とコンクリート (RC もしくは PC) が断面内でずれ止めなどを用いて合成されている。この種の構造は、とくに強大な水荷重に耐え得る必要性のある北極海向けの石油掘削用プラットフォームへの適用を通して実用化が図られたものである。後ほど述べるように、鋼板とコンクリートとの合成構造は海洋構造物にはきわめてポテンシャルの高い有用なものである。本稿では、この種の複合構造を中心にこれから話を進めていく。

3. 海洋構造物での複合構造の利点

図-2で示した様式の複合構造には、海洋構造物に適用した場合にいくつかの利点が考えられる。

まず、従来の棒鋼にかわって鋼板が2次元に配置され、その鋼板がコンクリートを拘束する効果を有するために、耐力の上昇やじん性 (変形能力) の改善などの力学性状の向上が期待できる²⁾。そのため、従来は製作が難しかった大きな外力下での構造物や、複雑な形状を必

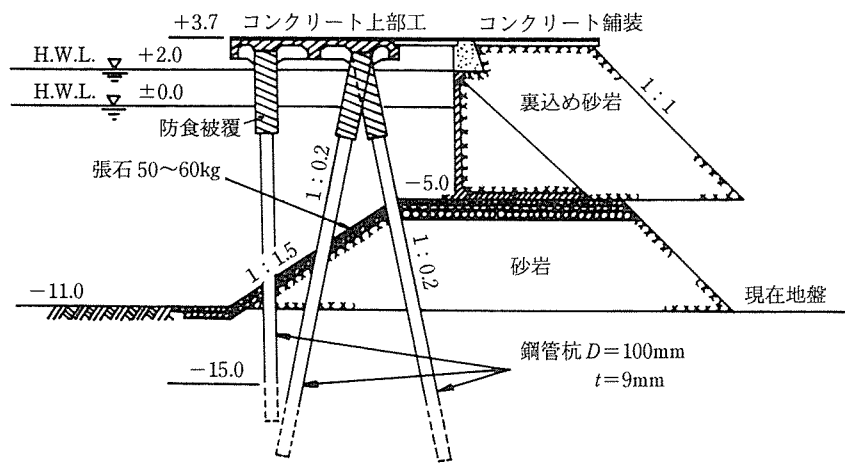


図-1 棧橋構造の一例

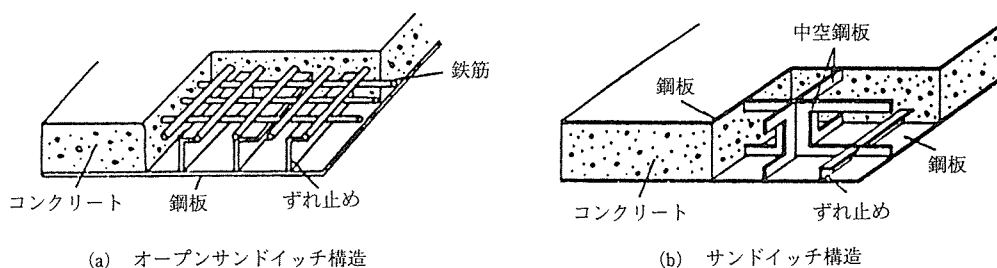


図-2 海洋構造物における合成構造断面

要とする構造物にも適用が可能となり、構造物に大きな自由度をもたせることができる。さらに、このような優れた力学特性のために、同じ断面力であるならば逆に部材寸法を小さくすることができる。また、鋼板にかぶりコンクリートを使用していないこともあって、部材の重量が軽減できる。

コンクリートにひびわれが発生しても、鋼板の存在によって水密性や気密性が確保できる。また、コンクリート部分にプレストレスを導入することによって、さらに厳しい耐久性の管理が可能となる。

施工の際に、鋼板を型枠のせき板としても活用できることで、型枠・支保工の削減が可能となる。また、工場製作化に適しており、現場施工と効率良く組み合わせることで、構造物のプレハブ化が容易となり、施工の省力化に寄与できる。

4. 複合構造の適用事例

わが国において、大規模な海洋構造物に複合構造を本格的に採用した最初の例は、1984年に完成した北極海向けの石油掘削プラットフォーム Glomar Beaufort Sea I (Super CIDS)³⁾ である。この施設は、図-3に示すように、着底部と空中部が鋼構造、両者の中間部がプレストレスコンクリート構造という混合構造になっている。石油掘削施設ではその後も複合構造による耐水壁を主体とした構造様式が多く提案されている。

平成5年度時点でのわが国の港湾構造物への複合構造の適用事例を表-1⁴⁾に取りまとめる。これまでの事例では、浮桟橋や浮防波堤といった浮体構造物への適用事例がかなりの数にのぼっている。さらに、最近では防波

堤や護岸のケーソン、および沈埋トンネルの沈埋函に採用されている。以下にこれらの施設での複合構造の概要や採用理由などを簡単に紹介する。

4.1 浮体構造物

浮体構造物はポンツーンと呼ばれる箱形の浮体を単独にあるいは複数個連結し、海上に係留したものである。この構造物は水深が浅く波浪条件の厳しくない箇所、あるいは潮位差の大きな箇所でも有利となる構造で、小型船舶の係留などの目的で瀬戸内海沿岸や九州地方の内湾で多く採用されている。浮体構造物としては、PCハイブリッド構造とRCハイブリッド構造がある。前者はプレストレスコンクリート版と鋼殻を合成したもので、後者はプレストレスコンクリートの代わりに鉄筋コンクリートが用いられている。鋼殻としては、鋼板と形鋼を用いて桁を構成し、桁と鋼管でフレームを築き、さらに形鋼で補剛した鋼板の水密隔壁を設けている例が多い。

複合構造を採用する理由としては、浮体で最も重要である軽量性および水密性、加えて施工性があげられる。これまでの事例ではRCハイブリッド構造が基本であるが、耐荷力が不足する場合や、コンクリートのひびわれの発生を防止することで鋼板の腐食に配慮し、維持補修の軽減を図る場合などでは、PCハイブリッド構造を採用した事例も多く見られる。

PCハイブリッド構造を用いた浮体構造物の代表例として福山港の浮消波堤⁵⁾を取り上げる。当地は潮位差が大きいことに加えて非常に軟弱地盤であるために重力式構造物は非常に高価となること、および瀬戸内の風光明媚な箇所でも景観に配慮したことから、わが国で初めて浮

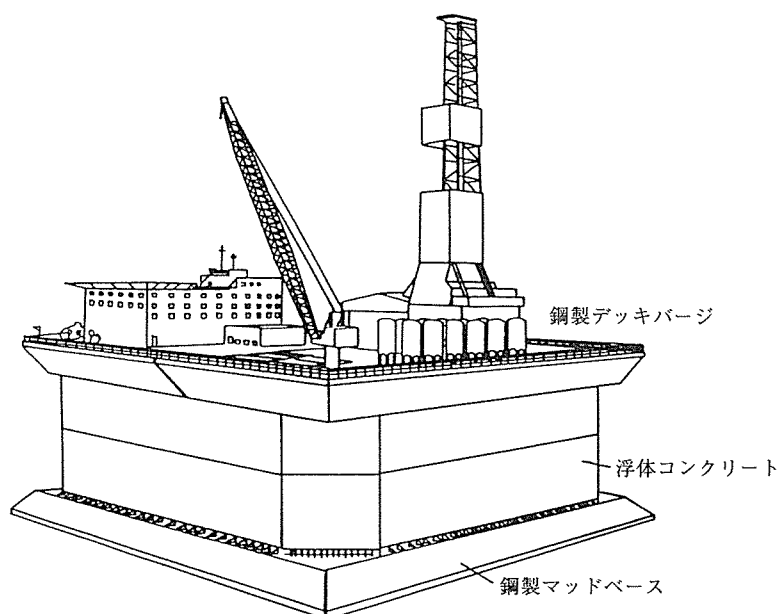


図-3 Glomar Beaufort Sea I の概要

表-1 港湾構造物への複合構造の適用事例

港名	施設種類	延長(m)	数量	高さ×幅×長さ(m)	構造形式	整備時期	採用理由
福井港	防波堤堤頭部	24.25	1	19.5×33.5×24.25	半円形二重円筒ケーソン	1992～	力学特性
釜石港	開口部潜堤	20	1	13×13×20		1991～92	軽量
東京港	浮棧橋	40	1	3×10×40	PCハイブリッド	1992～	軽量, 力学特性, 施工性
横浜港	護岸	365	6	4×6.5×15		1988～	
横浜港	護岸		3	4×8.2×15.5		1991	
横浜港	護岸		2	15.3×6×20		1987	
横浜港	護岸		1	8.1×6×26		1987	
横浜港	護岸		1	15.3×6×15.75		1988	
横浜港	護岸		1	7.2×4×26		1988	
横浜港	護岸		7	14×20×30		1991～	
横浜港	浮棧橋		1	3.2×24×24	RCハイブリッド	1991	
横須賀港	防波堤	30	1	8.5×7×30	鋼トラスとコンクリート	1984～85	軽量
横須賀港	防波堤			9.1×7.5×25	パネルシステムケーソン	計画中	施工性
大阪港	沈埋トンネル	1 025	10	8.5×35.2×103.3	沈埋函(RC)	1989～	鋼板の有効利用
神戸港	浮棧橋	40	1	2.25×20×40	PCハイブリッド	1991～92	軽量, 水密性
芦屋港	浮棧橋	250	5	2.4×9×50		1990～	維持補修
津名本港	浮棧橋	45	1	3×15×45	PCハイブリッド	1990～	維持補修
洲本港	浮棧橋	45	1	3×15×45	PCハイブリッド	1992～93	維持補修
福良港	浮棧橋	40	1	2.5×10×40	PCハイブリッド	1989～	維持補修
高知港	波浪制御構造物	100	1	13.5×19.7×100	長大ケーソン	1990～91	施工性
高松港	浮棧橋	110	1	3×15	PCハイブリッド	1991	安全性, 施工性
高松港	浮棧橋	100	1	3×15	PCハイブリッド	計画	安全性, 施工性
多度津港	浮棧橋	50		2.5×10		1991	維持管理
仁尾港	浮棧橋	30		2.4×6		計画	維持管理
丸亀港	浮棧橋	35		2.6×10		1991	維持管理
土庄港	浮棧橋	69		2.1×3		計画	
小松島港	浮棧橋	50	1	3.2×20×50	PCハイブリッド	1992～93	施工性, 耐久性
岡山港	浮棧橋	25	1	2.3×8×25	PCハイブリッド	1987～89	軽量, 耐久性
宇野港	浮棧橋	20	1	2.16×8×20		1984～88	軽量, 耐久性
水島港	浮棧橋	20	1	2×8×20	PCハイブリッド	1988～89	軽量, 耐久性
水島港	浮棧橋	30	1	2.3×15×30	PCハイブリッド	1991～92	軽量, 耐久性
牛窓港	浮棧橋	20	1	2.5×8×20	PCハイブリッド	1990～91	軽量, 耐久性
児島港	浮棧橋	50	2	2.18×14×25	PCハイブリッド	1985～87	軽量, 耐久性
笠岡港	浮棧橋	20	1	2.7×8×20	PCハイブリッド	1991	軽量, 耐久性
笠岡港	護岸	1 166		10×11	PCハイブリッド	計画	施工性
笠岡港	護岸	520		11×12.2	PCハイブリッド	計画	施工性
鴻島港	浮棧橋	20	1	2.2×6×20		1991	軽量, 耐久性
石島港	浮防波堤	50	1	2.4×8×50		1990～92	品質, 耐久性
渋川港	浮棧橋	25	1	2.2×12×25		1987～88	軽量, 耐久性
小飛鳥港	浮棧橋	20	1	2.5×8×20		計画	軽量, 耐久性
土生港	物揚場	150	6	2.1×3×27		計画	軽量
中田港	物揚場	80	3	2.1×2.6×24	RCハイブリッド	計画	軽量
尾道糸崎港	浮棧橋	94	3	2.6×10×38	RCハイブリッド	1993	軽量
安芸津港	浮棧橋	98	3	2.1×3×30	RCハイブリッド	計画	軽量
千年港	物揚場	97				計画	軽量
蒲刈港	物揚場	132	4	2.1×3×30	PCハイブリッド	計画	軽量
鹿川港	物揚場	60	2	2.1×3×28	PCハイブリッド	計画	軽量
鯨崎港	物揚場	40				計画	軽量
須波港	物揚場	240	8	2.1×3×30		1993～94	軽量
竹原港	物揚場	90	3	2.1×3×27		計画	軽量
大柿港	物揚場	84				計画	軽量
広島港	浮棧橋	70		2.1×10×35	RCハイブリッド	計画	施工性
広島港	浮防波堤	475	3	3.5×20×97.8		1991～93	軽量
広島港	浮棧橋	140	1	3.5×30×140		計画	軽量, 力学特性
広島港	浮棧橋	275	8	2.1×3×15	RCハイブリッド	1990～92	施工性
室津港	浮防波堤	30	1	2.15×10×30		1983	
室津港	浮防波堤	60	2	2.15×10×30		1983～85	
大分港	浮棧橋		5	2.1×3×38.2	PCハイブリッド	1992	耐久性, 施工性
中津港	浮棧橋	30	1	2.1×10×30		1992～93	耐久性, 施工性
佐賀関港	浮棧橋	30	1	2.1×10×30	PCハイブリッド	1990～91	耐久性
佐世保港	浮棧橋		2	2.3×10×30	RCハイブリッド	1993～	力学特性, 維持管理
杵島港	浮棧橋			2.05×10×25	RCハイブリッド	1992	維持管理, 水密性
長崎港	浮棧橋	126	3	3×15×40	RCハイブリッド	1989	軽量
竹敷港	浮防波堤		2	2.7×5×50	RCハイブリッド	1991～92	施工性
時津港	浮棧橋			2.6×15×40	RCハイブリッド	1992～93	施工性
堂崎港	浮棧橋	20	1	2×10×20	RCハイブリッド	1993	維持管理
小長井港	物揚場	99	2	1.65×10×45	RCハイブリッド	計画	軽量, 維持管理
大島港	浮棧橋	26	1	1.95×12×26	RCハイブリッド	1989	
下田港	防波堤	200		23.5×33.5×22	双鋼型ケーソン	1994～	力学特性, 施工性

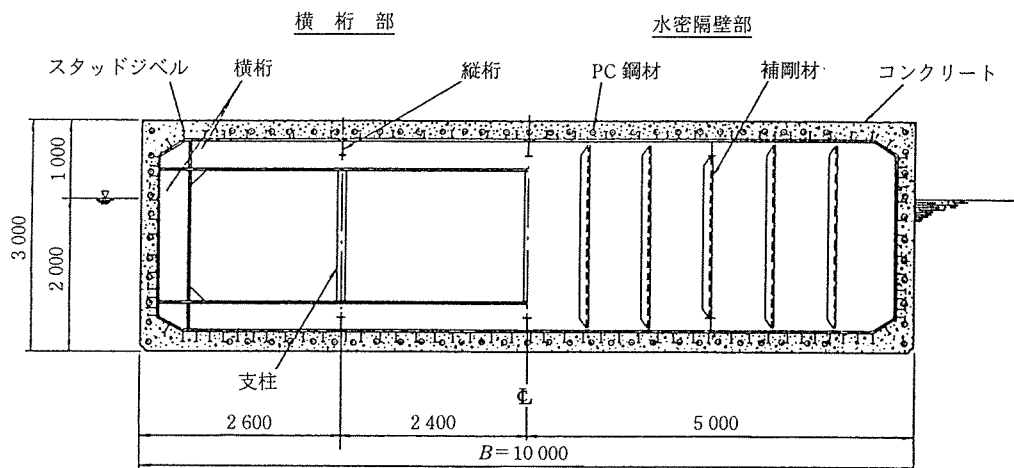


図-4 浮消波堤の横断面図

(単位：mm)



写真-1 横浜港海上旅客ターミナル

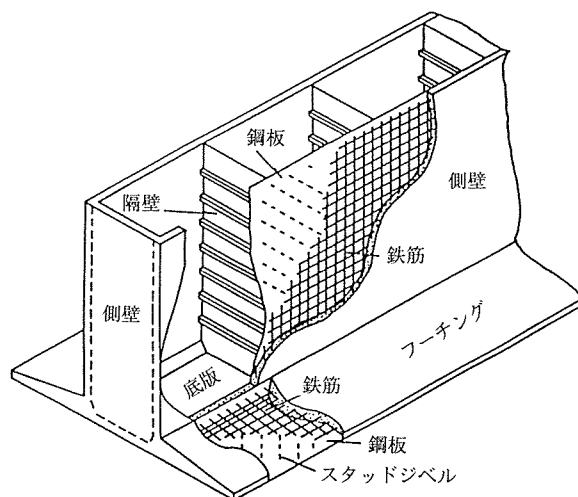


図-5 護岸用ケーソンの構造（横浜港）

消波堤が海岸保全施設として採用された。自然条件，信頼性，経済性などの種々の項目を検討した結果，図-4に示すようにPCの外殻構造と鋼の内部材からなる構造が採用された。この浮消波堤は長さ70 m (60 m)，幅10 m，高さ3 mの浮体を4基連結した総延長が275 mの施設である。プレストレスは浮体の長さ方向に導入されており，供用時の縦曲げによるモーメントでコンクリートにひびわれが発生しないように設計されている。

また，最近の浮体構造物の一例として，横浜港 MM 21 地区海上旅客ターミナルの概要を写真-1に示す。本施設は，横浜港内の海上バスの旅客ターミナルで，上部に船客待合室とレストランが設けられており，構造物の高性能化の一例でもある。浮体部分本体はRCハイブリッド構造を用いて建造されている。

4.2 防波堤・護岸ケーソン

防波堤は，わが国では一般的に，捨石マウンドの上にケーソンと呼ばれるコンクリート製の函体を設け，内部に中詰めを投入して完成する重力式の構造物である。また，同種の構造を埋立て地などの護岸に用いることもある。この函体に複合構造を採用する事例が最近増加しは

じている。

複合構造による護岸ケーソン⁶⁾の概要を図-5に示す。この例では，ケーソンの底版および外壁がオープンサンドイッチ構造で，隔壁には補剛材を付加した鋼板がそのまま用いられている。このように，オープンサンドイッチ構造の鋼板を構造物の内側に位置させれば，浮体構造物と同様に，鋼板の腐食に対して有利となる。このケーソンは，通常のRCケーソンと比較すると，フーチングを長く伸ばしているのが特徴で，ケーソンが受ける地盤反力を低減し，軟弱地盤上の建設に有利な構造となっている。このように，複合構造の有する優れた力学特性と軽量性および施工性のために独特の構造が取り得たのである。

防波堤ケーソンへの適用例として，釜石港湾口防波堤開口部における潜堤⁷⁾があげられる。潜堤は常時水面下にある波浪制御構造物で，海岸保全施設などでよく用いられる。釜石港では津波防波堤の開口部300 mの区間に潜堤が整備される計画であるが，そのうち第1号函が

複合構造により製作された。本潜堤では、据付け機材の制約から自重が小さくなる複合構造が選択されている。図-6に示すように、外壁がオープンサンドイッチ構造で隔壁が鋼板、さらには、底版が鉄筋コンクリート構造と一種の混合構造にもなっている。

複合構造の強度的なメリットが発揮された防波堤ケーソンとして高知港の長大型波浪制御構造物⁸⁾がある。長大型波浪制御構造物は、堤体が長大であるため斜め入射

波に対して波浪の位相差により波力の低減が期待できること、現場での設置作業などの施工が低減できることなどの特長を有している。しかし、幅 22.5、高さ 13.5、長さ 100 m と、通常のケーソンよりも長大（大型）であることから、耐力の増大を図る必要があり、鋼材および PC 構造からなる複合構造が採用された。

構造の基本は図-7に示すように、PC 鉄骨構造であり、長さ方向 20 m 間隔にコンクリート隔壁、その間 5

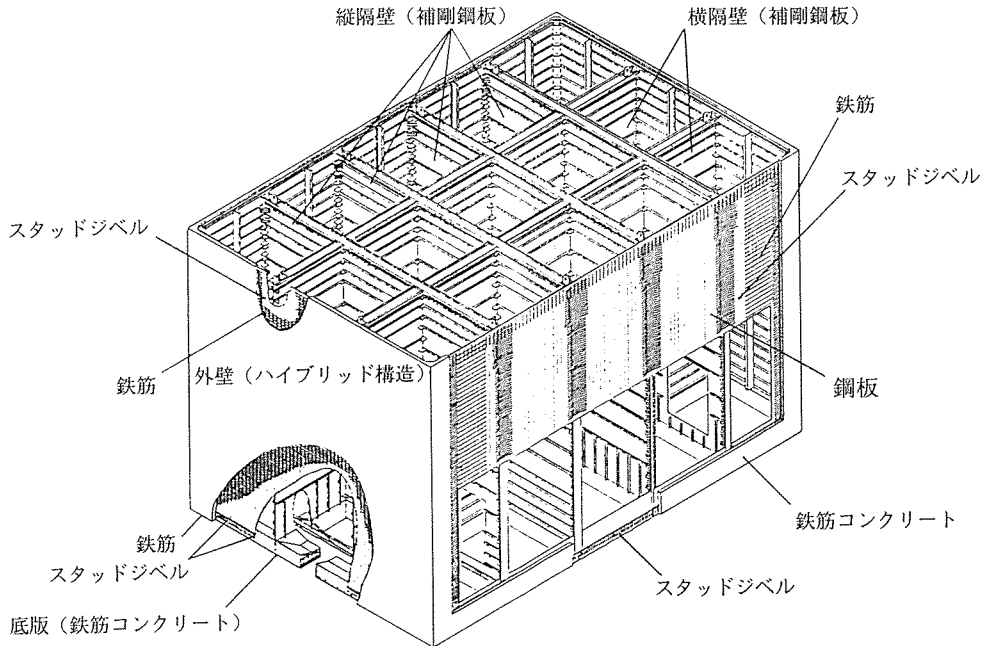


図-6 潜堤ケーソンの構造 (釜石港)

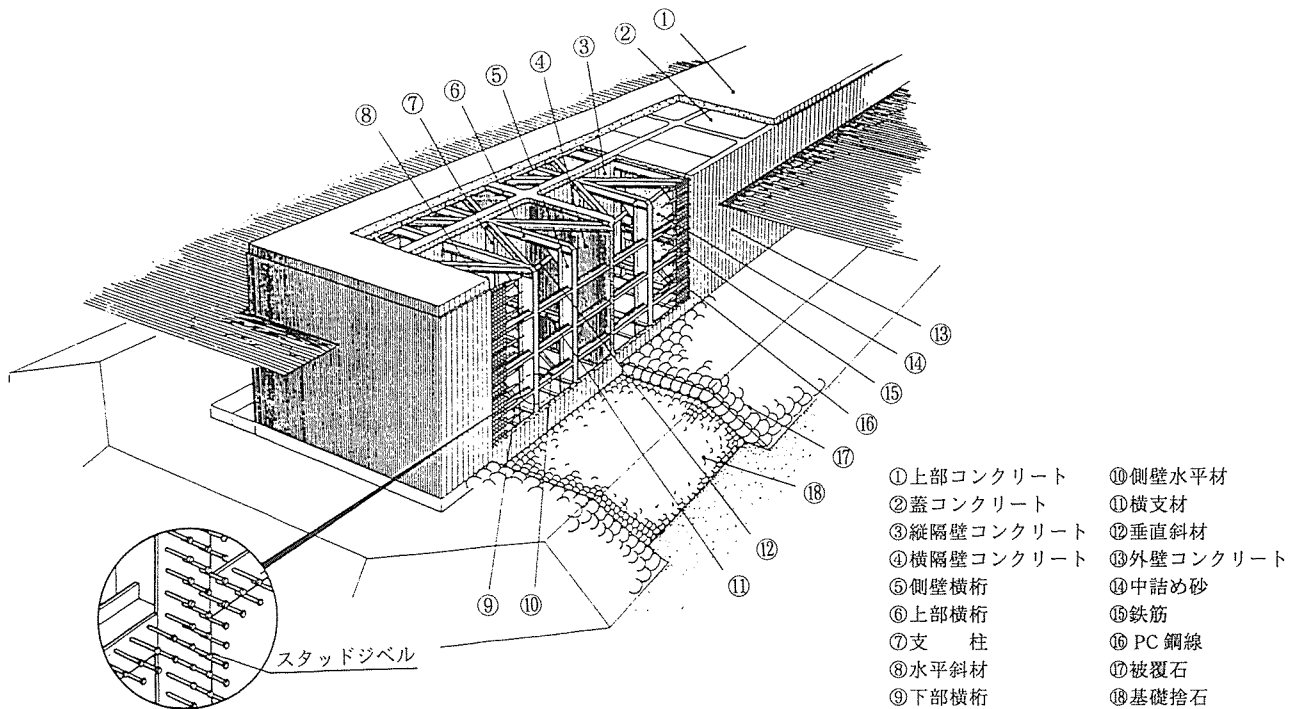


図-7 長大型波浪制御構造物 (高知港)

m 間隔に鋼殻を設けている。また、側壁には鋼殻に直交する横鋼桁を配置している。長大ケーソンでは、曳航時などにおけるねじりに対する検討が必要であり、本ケーソンの場合には、上面に曳航用のブレース材を配置している。ケーソン長さ方向の側壁、底版、および隔壁は PC で製作されており、PC 鋼材量は底版、側壁部で約 130 tf、隔壁部で約 40 tf である。コンクリートと鋼殻との接合はスタッドジベルにより行われている。

その他にも、福井港や下田港の防波堤ケーソンにも優れた力学特性および軽量化の点から複合構造が採用されている。両者のケーソンは、それぞれ半円形二重円筒ケーソン（図-8）⁹⁾ および双胴型ケーソンという新形式の構造になっており、複合構造の有する優れた力学特性がこれらの構造物の開発には不可欠であったものと思われる。

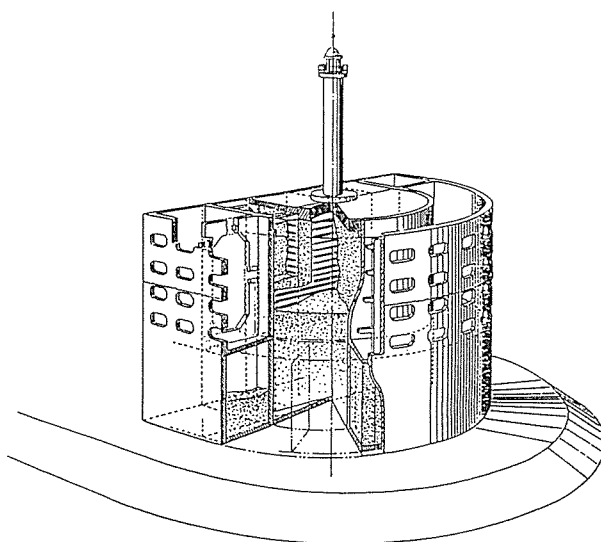


図-8 半円形二重円筒ケーソン（福井港）

4.3 沈埋トンネル

沈埋トンネルは、陸上で製作した沈埋函と呼ばれる函体を複数個水中で連結した後、土砂などで埋め戻して建造されるトンネルで、運河や河川あるいは臨港地区内の連絡路として用いられている。沈埋函は、これまで RC を主体とする RC 方式、もしくは鋼殻内にコンクリートを充填する鋼殻方式で製作されてきた。RC 方式では防水用の鋼板を沈埋函の周囲に配置してきたが、いずれの方式でも外周鋼板は強度部材として考えていなかった。

しかし、この防水用の外周鋼板にも耐荷力を期待することで新たな構造形式の沈埋函が生まれている。それらは、大阪南港トンネルおよび神戸港港島トンネルで採用されている。

大阪南港トンネル¹⁰⁾の沈埋函の概要は図-9 に示すように、断面幅 35.2 m、高さ 8.5 m、長さ 100 m 程度の寸法を有している。沈埋函は、外周鋼板（板厚 10~12 mm）を RC に合成させたオープンサンドイッチ構造を採用しているが、鋼板が海水の作用を直接受ける構造物の外側に位置している。そのため、電気防食により鋼板の腐食防止を行っている。設計は、基本的に現行の RC 構造のものと同じ方法で行っているが、事前に載荷試験などを行って、設計法の適用の妥当性を確認している。また、スタッドベジルの設計にあたっては、押抜き試験結果から独自の安全率を設定している。

神戸港港島トンネル（図-10）は、大阪南港トンネルとほぼ同様の形状・寸法であるが、オープンサンドイッチ構造に加えて、側壁部分がサンドイッチ構造で製作される。そのため、サンドイッチ部分へのコンクリートの充填方法、充填状況のモニタリングなどの技術開発が行われている。

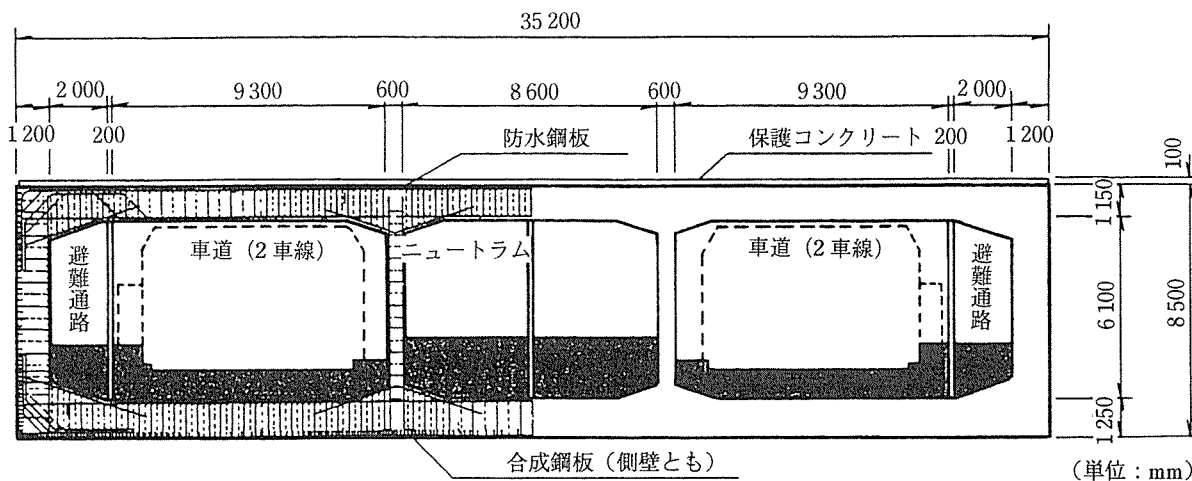


図-9 大阪南港トンネル断面図

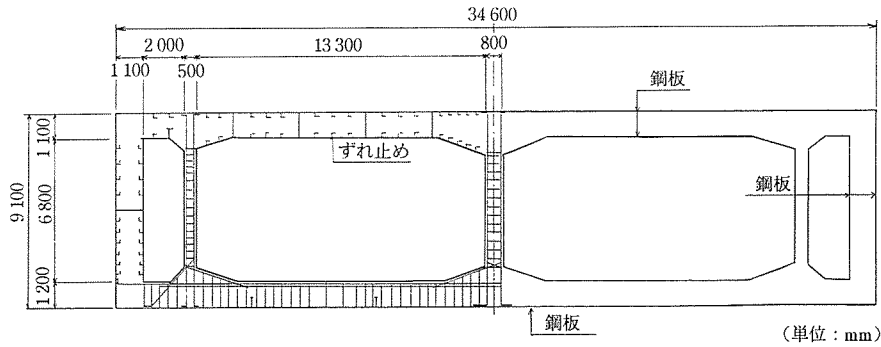


図-10 神戸港港島トンネル断面図

5. 複合構造による海洋構造物の構造設計

5.1 構造設計における検討事項

複合構造においては、断面に生じる引張力に対しては鋼板で、圧縮力に対してはコンクリートあるいは鋼板でそれぞれ抵抗する。力学的には、引張力には棒鋼で、圧縮力には主にコンクリートで抵抗する RC や PC と同じである。しかし、鋼板とコンクリート間に発生するせん断力により鋼板とコンクリートとが剥がれる現象が生じ易いので、この抵抗メカニズムを十分に発揮させるために鋼板とコンクリートとを一体化させる必要がある。

構造設計において複合構造が通常の RC や PC と異なる点の 1 つに、ずれ止めの性状、鋼材およびコンクリートのせん断剛性とせん断耐力などに応じてさまざまな耐荷機構が存在することがある。言い換えれば、鋼板とコンクリートとが一体となって平面保持の仮定が成立するような完全合成機構を形成する場合がある一方で、両者が単に重ね合わされただけでそれぞれ独自の中立軸を持つ重ねばり的な機構を形成する場合もある。また、これら両者の中間の状態も考えられる。このように、複合構造では、合成の程度によって設計手法を変える必要があり、種々の設計概念が存在する。さらに、この合成

の程度は検討する限界状態の概念に応じて変化する。また、構造部材に発生する応力やひずみが増加するにつれて、合成の度合いの変化など、構造メカニズムの破壊が徐々に変化しつつ進行することになる。したがって、進行性破壊についての考慮も必要であろう。

このようなことから、複合構造の構造設計は限界状態設計法によって行うことが適切であると考えている。現状では、わが国において海洋構造物全般に適用される設計基準類はない。港湾構造物では、「港湾の施設の技術基準・同解説¹¹⁾」が用いられているが、平成 11 年に予定されている改訂の際に限界状態設計法を導入するための作業が進められている。また、複合構造を防波堤ケーソンに適用する場合の設計の考え方は既に取りまとめられており、「合成版式ケーソン設計マニュアル¹²⁾」として発刊されている。その中では、許容応力度設計法に基づいた合成版式ケーソンの構造設計の考え方や手法が示されている。

5.2 構造設計における検討項目

複合構造を用いた海洋構造物の構造設計を検討するにあたり、主要な構造物の 1 つであるケーソン式防波堤を代表例として取り上げて考える。防波堤ケーソンの構造ならびに設計時の検討項目は図-11 に示すようなもので

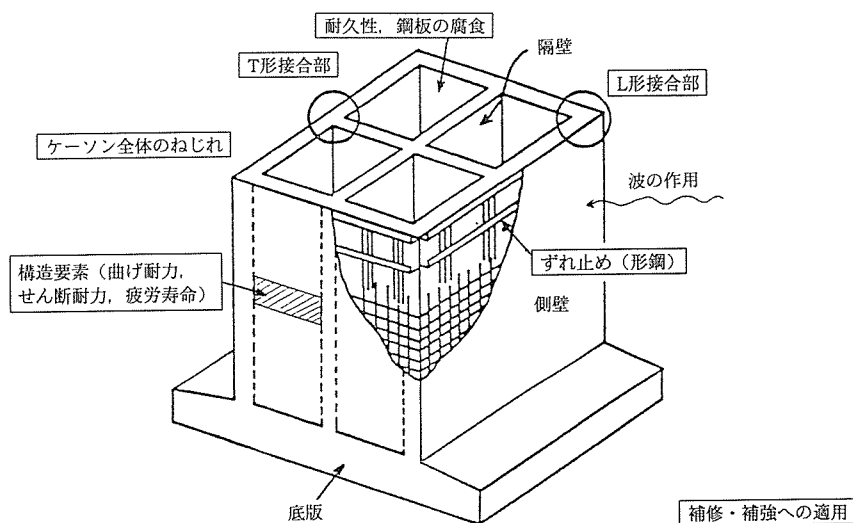


図-11 防波堤ケーソンの構造と設計時の検討項目

ある。これらの各項目について、通常の RC ケーソンの構造設計の手順に関連付けて考えてみる。

RC ケーソンの設計は、「港湾の施設の技術上の基準」に基づいて行われている。基本設計においては、外力の設定、堤体のすべり出しおよび転倒の検討、基礎の支持力の検討、曳航時の安定性の検討が行われ、形状寸法が決定される。言い換えれば、堤体の基本的な機能が十分に発揮できるような基本的な設計がなされることになる。これらの設計においては、複合構造に特有の検討項目はほとんどなく、既往の設計の考え方および手法が十分適用できるものと思われる。

しかし、細部設計においては、複合構造ケーソンに特有の検討項目がいくつかある。「合成版式ケーソン設計マニュアル」では、図-12 に示すような細部設計の手順が示されている。複合構造ケーソンの細部設計では、RC ケーソンでも行われている構造要素の曲げおよびせん断に対する検討に加えて、圧縮鋼板の座屈および鋼板とコンクリートとの一体化に関する照査が必要である。構造要素の設計では、部材を梁に置換し、曲げおよびせん断耐力の検討および構造細目を決定する。

複合構造では優れた力学性能が期待できるため、部材厚さの低減が可能となる。しかし、版厚が極端に薄くなる場合の曲げモーメントの算定の際に、剛比の観点から RC ケーソンで想定している版の固定条件が満たされない場合が考えられる。さらに、版の変形に伴ってとくに法線方向の曲げに対して付加曲げが生じることが指摘されている¹³⁾ので注意する必要がある。

海洋環境下では主たる外力は波浪によって与えられることを考慮すると、複合構造では繰返し荷重に対する疲労破壊に対する安全性の評価がより重要となる。複合構造では、鋼板間の接合やずれ止め、せん断補強鋼材などの取付けに溶接接合を多用している。溶接を行った鋼材では、形状の不連続性、溶接止め端部の切欠き、溶接部の材質急変や残留応力などの原因で、疲労強度が低下し、疲労破壊が急速に進展する危険性がある。また、これらずれ止めにせん断補強の役割を付与した場合には、図-13¹⁴⁾ に示すように、疲労強度がかなり低下するおそれもあり注意が必要である。

また、複合構造に特有の検討項目として、ずれ止めの設計がある。複合構造の利点を最大限に発揮させるに

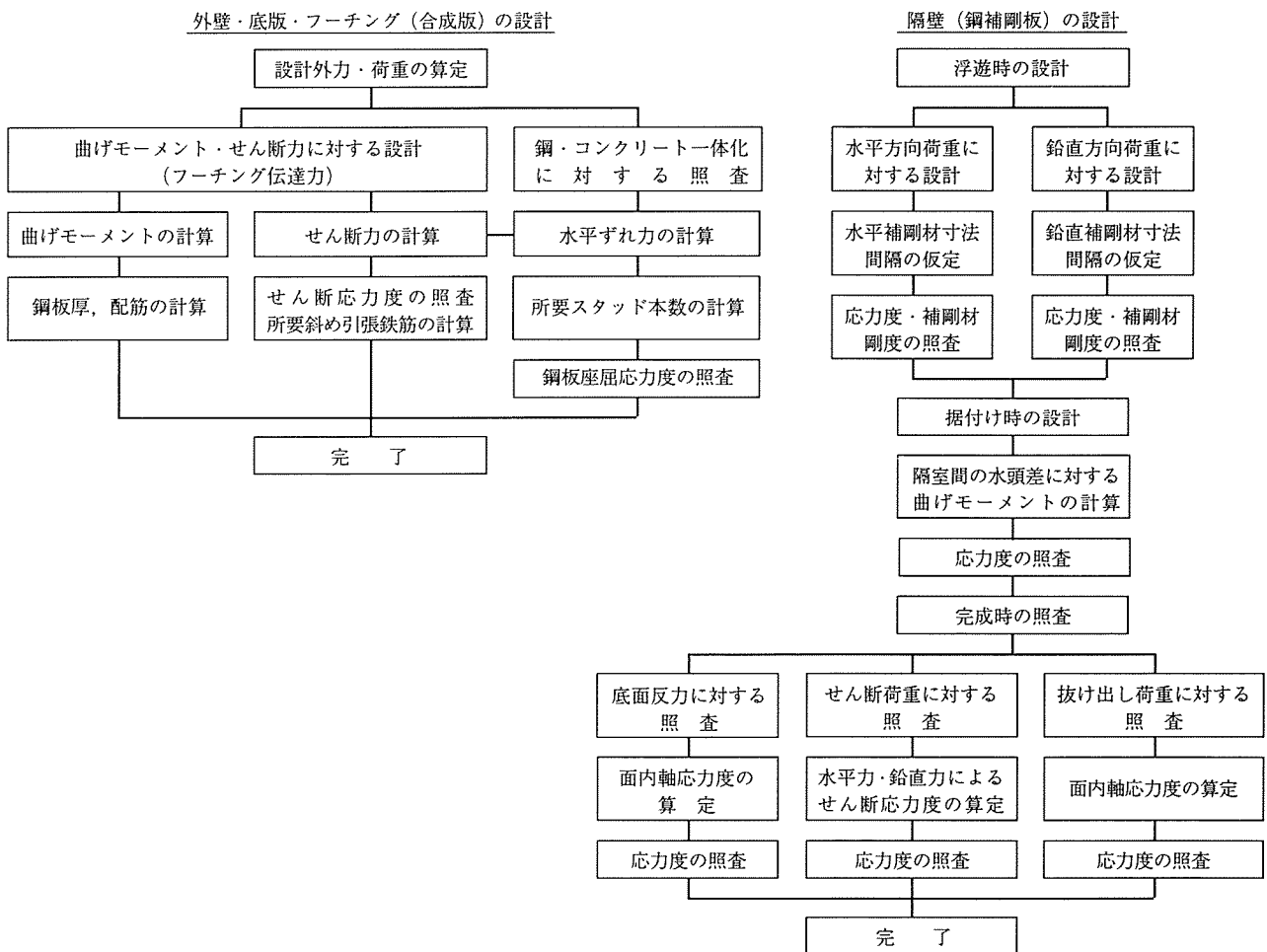


図-12 合成版式ケーソンの細部設計の手順¹²⁾

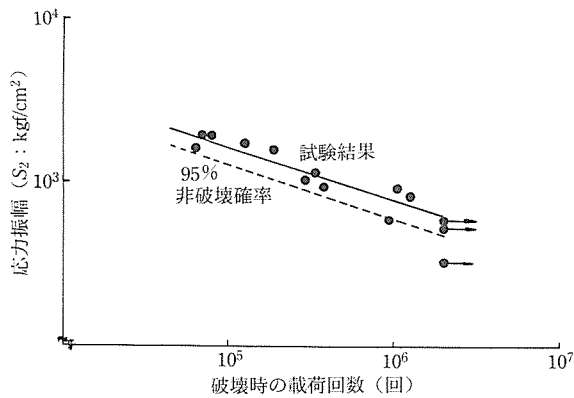


図-13 複合構造に用いた鋼板の疲労寿命線¹⁴⁾

は、鋼板とコンクリートとが確実に合成されている必要があり、このために発生する水平ずれ力に対して必要なずれ止めの量を設計する。

構造要素の検討の後、ぐう角部などの部材間の接合部の設計を行う。複合構造の接合部の強度については未解決の問題も多いため、現状では接合部を剛域と見なせるような補強方法を確保する手法を考えている。さらに、大型ケーソンの曳航時や浮体構造物などでは、波浪による動揺の際にねじりモーメントが生じるおそれがあるので、ねじり耐力の照査を十分に行う必要がある¹⁵⁾。

5.3 複合構造の基本的劣化性状

複合構造が海洋環境下に置かれる場合には、鋼構造物と同様に鋼板の腐食が当然予想される。しかし、複合構造要素を構成する鋼板と鋼構造物との相違点の一つに、鋼板の一面が腐食環境である海洋環境にさらされると同時に、もう一方の面が非腐食環境であるコンクリートに接するという点がある。その結果、鋼板の両面間に電位差が生じ、海洋環境に接する表面がアノード、コンクリートに接する表面がカソードとなる腐食電池が形成され、腐食が促進されることが考えられる。

複合構造要素を対象とし、鋼板を海洋環境に直接暴露した試験の結果¹⁶⁾によると、劣化の主要な原因は鋼板の腐食である。鋼板のコンクリートに接触していた面での腐食の状況をスケッチした結果を図-14に示す。黒く塗りつぶした部分が発錆の確認された場所である。鋼板の端部から徐々に内部へと腐食が進行している様子が観察できる。この腐食部分の面積や腐食侵入深さなどの鋼

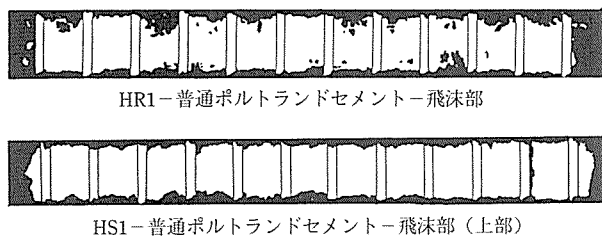


図-14 コンクリート面に接した鋼板面の腐食状況

板の腐食特性は鋼板の板厚減少量と強い相関性がある。つまり、劣化の程度は鋼板の腐食による板厚の減少量で考えてよい。また、この鋼板の腐食は、構造様式や材料の相違よりもむしろ暴露環境の影響を大きく受ける。

複合構造では荷重が作用した場合にずれ止めからひびわれが誘発される傾向にある。これに加えて、鋼板やずれ止めが腐食した場合には、体積膨張を起こし周辺のコンクリートは押し拡げるために、さらにこのひびわれ幅が増大するおそれもあるので注意が必要である。

暴露試験中の鋼板表裏間（暴露試験は2枚の鋼板を接着剤で貼り合わせて鋼板の表裏をモデル化している）の発生電流量を図-15に示す。この図から、電流は潮位変動に対応して増減していることがわかる。つまり、複合構造の構造の特異性によって形成されるマクロセルの規模は極めて小さく、むしろ潮位変動によるマクロセルによる腐食電流によって腐食が生じると考えられる。

複合構造では、浮体構造物やケーソンで見られたように、鋼板が直接海洋環境にさらされるよりもむしろコンクリートが鋼板のかぶりとして働くような状態である場合がきわめて多い。このような場合、当然のことではあるが、鋼板の腐食量は鋼板が直接海水の作用を受ける場合の結果に比較してかなり小さい値（表-2）となり、

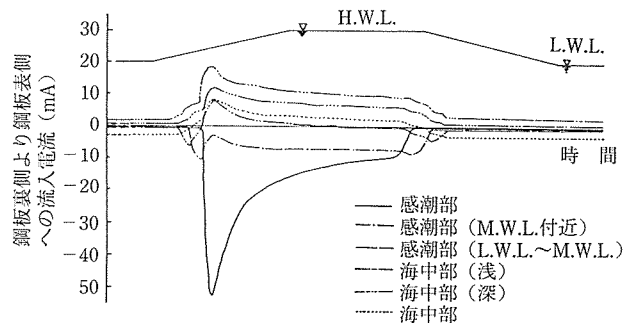


図-15 鋼板に生じる電位変動の実験結果

表-2 鋼板の腐食速度の実験結果

腐食環境		腐食速度 (mm/年)
鋼標準値物における	1) H.W.L以上	0.3
	2) H.W.Lから(L.W.L-1.0 m)まで	0.1~0.3
	3) 海水中	0.1~0.2
	4) 海底土中部	0.03
	5) 背面土中部	
	a. 残留水位より上	0.03
	b. 残留水位より下	0.02
暴露試験結果	飛沫環境* (シミュレーション装置) (1年)	0.60
	海中部* (1年)	0.27
	海水接触** (酸素の供給少の場合) (2年)	0.03
	海水砂との接触** (酸素の供給少の場合) (2年)	0.04

* 海水の作用に直接接

** コンクリートを介して海水に接

(ただし、ケーソンの内部の状態を再現した環境)

コンクリートによる防食効果が期待できる。つまり、外側のコンクリートを通すことにより鋼板へ酸素が到達しにくくなったため、鋼板の腐食もそれだけ抑制される。

暴露試験より得られた複合構造部材の平均腐食量の一覧を表-2に示す。暴露試験がかなり厳しい海洋環境を再現した状態で実施されたこと、および試験期間が2年程度と短かったことを考慮すると、暴露試験の結果と腐食速度の標準値¹⁷⁾はおおむね一致していると考えている。これらのことから、複合構造の鋼板の腐食特性は鋼材単独の場合の腐食特性とは大きく異なるものではないことが推察される。また、電気防食は海中部の複合構造においてもその効果があることが暴露試験から確認されている。

鋼板の腐食に対してはコンクリートの効果が高いことが分かったが、その効果を高めるにはもちろんコンクリート自身の耐ひびわれ性や耐久性の向上が必要である。コンクリートのひびわれの制御にはプレストレスの導入が効果的である。また最近では、鋼板自身に2方向のプレストレスを付与して通常のPCと同様の効果を得るための研究¹⁸⁾も行われている。

6. おわりに

複合構造は、その優れた力学特性などのために海洋構造物に適した構造素材であり、今後もPCやRCとの役割分担のなかで高品質な海洋施設の整備に寄与することを期待している。しかし、現状では、複合構造部材の面内せん断耐力、押抜きせん断耐力、接合部の耐力評価など未解決の課題も多く残されており、現在も多くの研究が進められている。最近では、限界状態設計手法をベースとする設計指針類¹⁹⁾が徐々に整備され始めているが、これらの研究成果を基に、統一的な設計指針類の早期の整備が待たれるところである。

最後に適用事例をとりまとめるにあたり、多くの方々の貴重な資料を参考とさせていただきますことをここに記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、構造工学シリーズ、No. 3, 1989年3月
- 2) 横田 弘：鋼・コンクリートハイブリッド構造の力学特性ならびに海洋構造物への適用性に関する研究、港湾技研資料、No. 750, 1993年6月

- 3) 大野義郎・鈴木智郎・丹羽元和・井畔瑞人：北極海向け移動式石油掘削人工島の建設—コンクリート構造部に関して—、土木学会論文集、第354号/V-2, pp. 43~52, 1985年2月
- 4) 横田 弘：ハイブリッド構造の力学特性と構造設計法、平成5年度港湾技術研究所講演会講演集、pp. 95~128, 1993年
- 5) 清水春生・菅原忠夫・太田誠二：広島県福山港みゆき地区浮消波堤建設工事、土木施工、第24巻、第11号、pp. 11~24, 1983年10月
- 6) 田中征登・植村俊郎・若菜弘之・綿引 透：ハイブリッド構造のケーソン等港湾構造物への適用、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp. 385~390, 土木学会, 1989年9月
- 7) 渡部 勝・中道正人・角 隆嗣・米澤秋則：鋼コンクリートハイブリッド潜堤ケーソンの設計と施工、コンクリート工学、Vol. 30, No. 8, pp. 48~58, 1992年8月
- 8) 片岡真二・高橋浩二：長大防波堤の開発、'90日本沿岸域会議研究討論会講演概要集、No. 3, pp. 71~72, 1990年5月
- 9) 船越晴世・島田 敬・大野正人・津田修一：ハイブリッド構造による二重半円筒ケーソン防波堤の開発、コンクリート工学、Vol. 31, No. 11, pp. 33~37, 1993年11月
- 10) 小泉哲也・安井征人・渡辺英夫・田中樹由：日本初の道路・鉄道併用沈埋トンネル—臨港交通施設大阪南港沈埋トンネルの設計・施工—、コンクリート工学、Vol. 31, No. 6, pp. 22~32, 1993年6月
- 11) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、改訂版、1989年
- 12) 沿岸開発技術研究センター：合成版式ケーソン設計マニュアル、1991年
- 13) 沿岸開発技術研究センター：合成版式ケーソン調査研究報告書、pp. 56~71, 1990年9月
- 14) 横田 弘・清宮 理：鋼・コンクリートハイブリッドはりの力学特性に関する研究、土木学会論文集、第451号/V-17, pp. 149~158, 1992年8月
- 15) 清宮 理・山田昌郎：上部開放断面を有する長大ケーソンのねじれ特性、土木学会論文集、No. 466/V-19, pp. 41~50, 1993年5月
- 16) 福手 勤・横田 弘・濱田秀則：鋼・コンクリートハイブリッド構造の海洋環境下における劣化性状、コンクリート工学論文集、Vol. 4, No. 2, pp. 89~99, 1993年7月
- 17) 沿岸開発技術研究センター：港湾鋼構造物防食マニュアル、1986年
- 18) 新西成男・太田俊昭・日野伸一・河野伸征：プレストレス鋼板・コンクリート合成版の2方向クリープ挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 1159~1164, 1994年
- 19) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)、コンクリートライブラリー、第73号、1992年

【1994年12月20日受付】