

特別講演

港湾構造物における合成構造の最近の適用例

RECENT APPLICATION OF COMPOSITE STRUCTURE TO MARINE FACILITIES

清宮 理

By Osamu KIYOMIYA

In marine facilities, composite members combined steel and reinforced concrete have been applied since the early 1980s. Composite members have such superior merits as high strength, watertightness, large rigidity and rapid construction in marine areas. This paper presents the outline of some marine facilities made of composite structures. The facilities described herein are gravity type caissons, a floating type breakwater and immersed tunnels.

1. まえがき

港湾構造物には各種の種類があるが、このなかで防波堤、護岸、岸壁、沈埋トンネルなどが代表的な施設である。これらの施設の多くは、鉄筋コンクリートで製作されている。鋼板と鉄筋コンクリートを力学的に合成した合成構造を港湾構造物に適用され始めてきている。合成構造を採用することにより以下の長所が考えられたからである。

- ①力学特性の向上：鉄筋コンクリート部材と比較して合成版は、部材が薄くても所定の耐荷力や変形性能（じん性）が得られる。このことはフーチング構造の長大化など構造物の設計上の自由度が広がる。またケーソンの重量を軽量化でき軟弱な海底地盤での使用が有利となる。
- ②省力化：鉄筋コンクリートの施工に伴う配筋、支保工、型枠工などを大幅に低減できる。工場製作が可能でプレハブ化が容易となる。
- ③低価格：鋼材の使用量が多いことから材料費の割高感があるが、軟弱地盤の改良費の低減や工期の短縮などにより全体工費を減らせる場合が多い。
- ④防食対策：電気防食など鋼材の海洋環境下での錆の対策が可能である。
- ⑤水密性：鋼板により水密性が高い。

現在防波堤や護岸用の重力式ケーソン、浮き防波堤、ポンツーン、沈埋トンネルなど広範囲の港湾構造物に合成構造が採用されてきており、ここではこれらの適用例について概説する。

2. 採用されている構造形式

港湾構造物に採用されている合成構造の形式は、オープンサンドイッチ構造、サンドイッチ構造および混合構造である。

2. 1 オープンサンドイッチ構造¹⁾

図-1にオープンサンドイッチ構造の概要を示す。片側が鋼板で他方が鉄筋コンクリート部材である。両部材は、ずれ止めにより力学的に結合されている。ずれ止めの種類として、スタッドと形鋼があるが、スタッドが広く使用されている。ずれ止めの役割は、鋼板とコンクリートの境界面に作用するせん断力を伝達することと、鋼板のコンクリートからの剥離を防止することである。この部材は、港湾用ケーソンに広く用いられている。鉄筋コンクリート側が海側に面し、鋼板側が海水に接しない内側に位置するのが普通である。

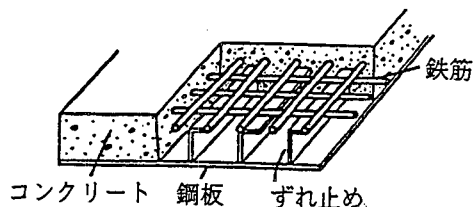


図-1 オープンサンドイッチ部材

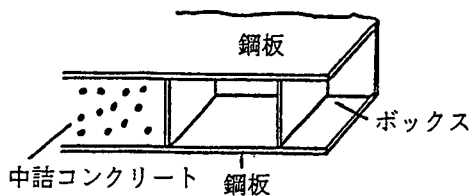


図-2 サンドイッチ部材

2. 2 サンドイッチ構造²⁾

図-2にサンドイッチ構造の概要を示す。部材の両側が鋼板でせん断補強鋼材により両鋼板が連結されている。内部が充填コンクリートとなっている。充填コンクリートとして高流動コンクリートが使用される。鋼板とコンクリートのずれせん断力は、形鋼とせん断補強鋼材の両者で取られる。この部材は腐食環境下での使用に注意が必要となる。この構造形式は、海底内に設置される沈埋トンネルに採用される予定である。

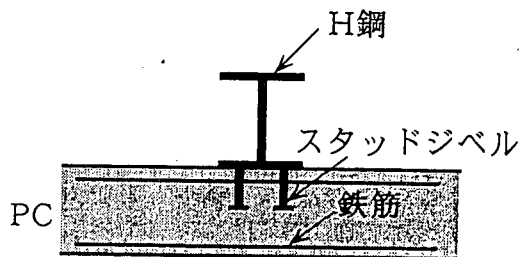


図-3 混合構造

2. 3 混合構造³⁾

図-3に混合構造の概要を示す。H鋼で内部骨格を製作し外側にプレストレストコンクリート版を取り付ける構造である。プレストレストコンクリートと鋼材とはスタッドジベルやアンカープレートで連結する。ケーソンの隔壁は鋼板で製作される。ポンツーン、浮き防波堤、長大ケーソンに使用されている。

3. 港湾用ケーソンの実施例

3. 1 今までの実績

昭和63年に横浜大黒埠頭の護岸ケーソン⁴⁾に合成版式ケーソンが採用されて以来、横浜MM21地区護岸、福井港防波堤堤頭面、横浜本牧埠頭護岸などで採用されている。今後釜石湾口防波堤の潜堤、下田湾口防波堤などで建設が予定されている。表-1に代表的なケーソンの諸元を示す。ただし表中の値は、同じ施設内でも場所毎に少しずつ異なっている。ここ10年ほどで護岸で総延長約1100m、防波堤で総延長約300mが建設あるいは建設中である。これらの防波堤の構造設計は、合成版式ケーソン設計マニュアル¹⁾に従って行われている。次ぎに代表的な事例を紹介する。

表-1 港湾ケーソンの建設実績

建設場所	用途	ケーソン寸法(m)				設置水深(m)	ケーソン重量(tf/面)
		長さ	高さ	上幅	フーチング		
大黒埠頭	護岸	20.0	15.3	4.0	1.0	-13.1	738
MM21地区	護岸	15.5	4.0	8.2	-	-4.0	293
南本牧埠頭	護岸	30.0	14.0	12.0	4.0	-12.0	2110
福井港	防波堤	24.25	19.5	33.5	-	-13.0	4885
釜石港	潜堤	20.0	13.0	13.0	-	-30.0	764
深浦港	防波堤	40.0	16.5	5.0	4.0	-15.0	2350
深江港	防波堤	23.8	13.0	3.5	2.0	-15.0	700

3. 2 南本牧の護岸ケーソン⁵⁾

オープンサンドイッチ部材によるケーソンの建設事例として南本牧の護岸ケーソンを紹介する。横浜市南本牧では、廃棄物の最終処分場と外資コンテナ輸送の拠点として大規模な埋め立てによる人工島建設が行われている。水深-15mの大水深コンテナバースを4箇所建設し、約650万 m^3 の廃棄物を受け入れる予定である。この外周護岸に合成版式ケーソンが用いられている。図-4に護岸断面図を示す。総延長8182mの内約1300mが合成版式ケーソンである。ケーソンの長さは30m、幅が12m、高さが14mである。鋼部材の厚さは、外壁と底版で6mm、鋼隔壁で8mmである。コンクリート版の厚さは、外壁で30cm、底版で40cm、フーチング部付け根で130cmである。コンクリート打設中の状況を図-5に示す。このケーソンは、岸壁上で組み立てられフローティングクレーンで海面に引き出され施工現場への曳航され沈設される。

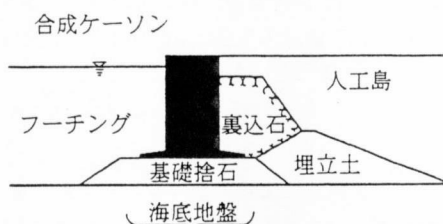


図-4 護岸断面

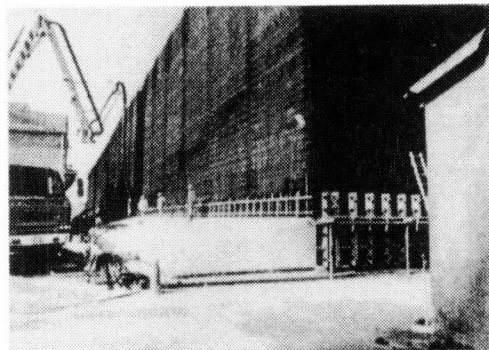


図-5 フーチング部コンクリート打設

3. 3 パネルシステムケーソン⁶⁾

パネルシステムとは、分割したオープンサンドイッチ構造による合成版パネルを工場等で事前に製作してヤードで組み立てる工法である。現場での省力化を目指した工法である。図-6にパネルシステムケーソンの概要を示す。組み立てられた鋼骨組みに溶接やボルトにより合成版パネルを取り付ける。パネル同志は、鋼板溶接と鉄筋の機械継ぎ手により接合する。ここでは、建築の壁の接合によく用いられているスリーブタイプの機械継ぎ手を使用している。接合部の一断面で、鉄筋や鋼板を接合するので耐荷力やじん性の低下、ひび割れの進展が懸念されるので、載荷試験や接合部コンクリート充填試験により確認を行っている。接合部の構造を図-7に示す。パネルの大きさは、組立ヤードでのクレーンの大きさや運搬方法で決まる。パネル製作、接合法の技術開発はほぼ終了し、現在横須賀港で実物実証試験が行われている。このケーソンの全長は、25m、幅が7.5m、高さが9.1mである。またプレストレストコンクリートパネルを鋼骨組みに取り付けて製作する工法も開発されている。

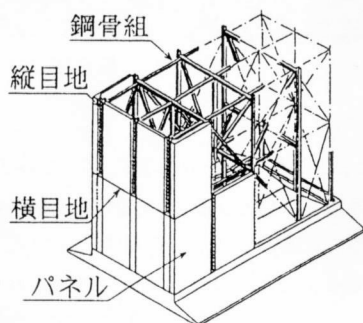


図-6 パネルシステムケーソンの概要

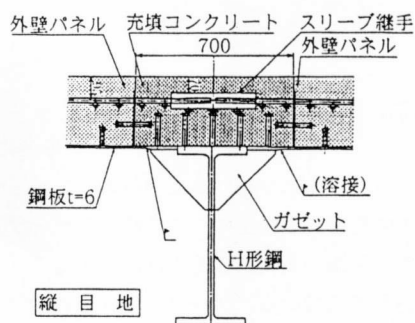


図-7 接合部の構造

3. 4 二重円筒ケーソン⁷⁾

図-8に二重円筒ケーソンの概要を示す。このケーソンは、半円の外壁、内壁と底版とで構成されている。外壁には多数の開孔部が設けられており、波浪が開孔よりケーソン内部に進入し外壁と内壁に囲まれた遊水部でエネルギーを消費する機構となっている。この種のケーソンは、既に紀伊長島港、境港、柴山港で建設されているが、福井港では合成構造を採用してケーソンの先端にこの二重円筒ケーソンを設置する。外壁は鉄骨鉄筋コンクリート構造、内壁と底版がオープンサンドイッチ構造である。ケーソンの幅は33.5m、高さが19.5mである。鋼殻は分割して造船所内のヤードで製作されその後現地のヤードに輸送して組立とコンクリート打設を行った。鋼殻の重量は、943tfでコンクリート打設後の総重量は、4885tfである。

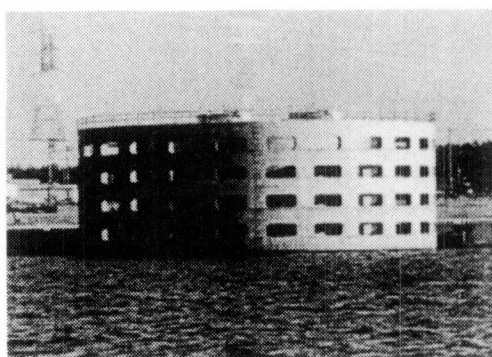


図-8 二重円筒ケーソン

3. 5 広島港の浮き防波堤⁵⁾

広島港の観音マリーナ整備事業の一環としてオープンサンドイッチ構造による大型浮き防波堤が平成4年に竣工した。マリーナ内外の海水交換性、隣接河川の水位上昇の影響低減等を考慮して浮き防波堤構造が採用された。浮き防波堤の全長は97.8m（あるいは70.75m）、幅が21m、高さが3.5m、喫水が2.5mである。総重量は3159tfである。底版のコンクリート厚さは16cm、鋼板の厚さは9mmで、側壁は、それぞれ20cmと8mmである。コンクリートには乾燥収縮によるひび割れ低減のため膨張材と高性能AE材を使用した。合計5函製作された。浮き防波堤の係留は図-9に示すようにドルフィンとセル式防舷材で行っている。鋼殻製作とコンクリート打設は陸上ヤードで行い、図-10に示すように3600tfフローティングクレーンにて吊り上げ進水されドルフィンに固定された。

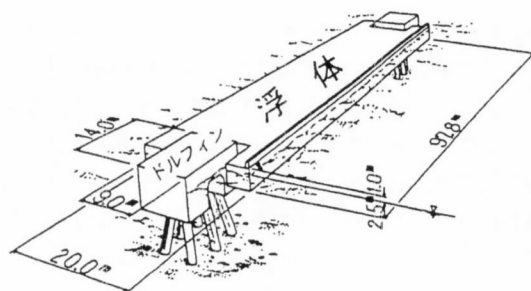


図-9 浮き防波堤の係留方法

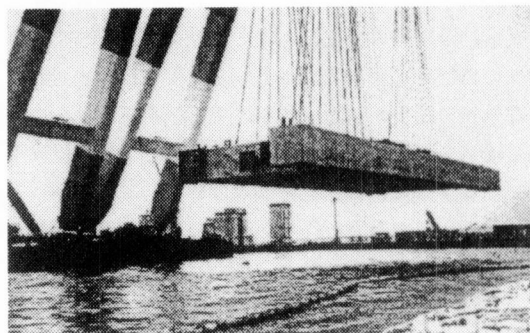


図-10 浮き防波堤の吊り下げ時

3. 6 高知港の長大ケーソン⁸⁾

通常のケーソンは長さ20m位のブロックを線条に連続して配置する。これはケーソン製作ヤードの広さの制約、施工機械の性能の制約、海底地盤の不等沈下の対策などから分割している。しかし大型施工機械の整備、海洋ドックの整備等の社会条件の変化からケーソンを一括して製作できるようになってきた。また大型計算機を用いて容易かつ正確に構造設計が出来ることも大きな要因である。高知港の港湾整備には、この長大ケーソンが使用されている。ケーソンの長さは100m、幅19.7m、高さ13.5mである。図-11に示すようにプレストレストコンクリート（PC）と鉄骨組との混合構造となっている。PC版と骨組とは、スタッドや定着アンカーによって合成されている。PCを用いることによりひびわれの発生を抑止でき水密性を確保すると

共に軽量化を図ることができる。長大ケーソンの製作は造船ドックで行なわれた。骨組と鉄筋とを組み立て、コンクリート打設を行った。その後ケーソン縦方向にコンクリート応力にして $15\text{--}34\text{kgf/cm}^2$ のP C量を導入した。長大ケーソンは、瀬戸内海の造船所で製作され高知港に回航後沈設据え付けが行われている。図-12に造船所ドックから引出したときの状況を示す。

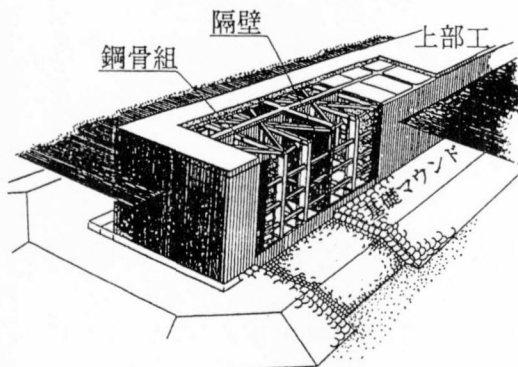


図-11 長大ケーソンの構造

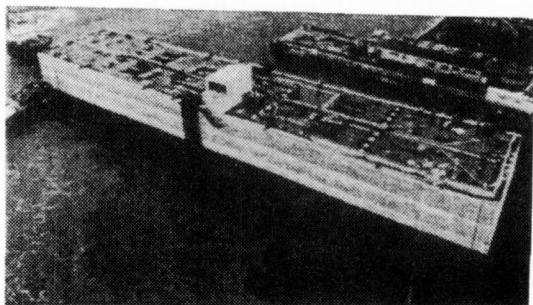


図-12 進水した長大ケーソン

4. 沈埋トンネル

4.1 沈埋トンネルの概要

図-13に示す沈埋トンネルは、港湾地区では埋立地への連絡通路として建設される。トンネルの本体は従来鉄筋コンクリート或いは鋼殻で製作される。第三港湾建設局では、現在合成部構造による沈埋トンネルを大阪湾と神戸港に建設中である。

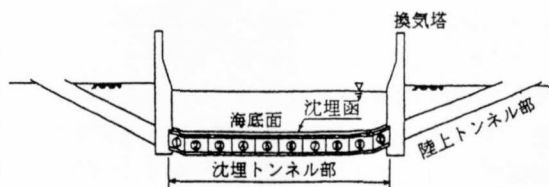


図-13 沈埋トンネルの概要

4.2 大阪港南港トンネル^{9) 10)}

大阪港南港トンネルは、全長約2700mの内1018mを沈埋函10函で建造する予定となっている。沈埋函は現在製作中であり、骨組みと配筋作業中の状況を図-14に示す。沈埋函を構成する部材にオープンサンドイッチ部材を用いている。従来防水のみしか考えていない外側の鋼板を強度部材に使用し、全鋼材の使用量を低減しようとするものである。外側鋼板と鉄筋コンクリートとはスタッドジベルで合成されかつせん断補強筋を配置してある。せん断補強筋及び施工時の鋼板の変形を押さえる形鋼にもずれ止めとしての機能をもたせている。スタッドジベルとせん断補強筋は自動溶接機で大量かつ迅速に鋼板に定着している。この部材では、鋼板が海水に直接面しているが、電防などの防食対策を施し腐食環境に耐えるようにする。

4.3 神戸港港島トンネル

港島トンネルは、神戸市沖合いのポートアイランドと神戸市街を連結するトンネルである。沈埋部の全長は520mで6函の沈埋函で構成され、各沈埋函は全長が約88m、幅が約35m、高さが約9mである。現在陸上トンネル部の掘削と沈埋函の製作が行われている。ここでは、図-15に示すサンドイッチ構造が採用されている。この構造を採用することにより鉄筋コンクリート打設時に必要なトラベラーが不必要なこと、ずれ止めの大幅な削減、ケーソンヤードでの工期短縮が図れる。ただし内部鋼材の耐火被覆や防食対策が必要になる。サンドイッチ部材の鋼殻内にコンクリートを打設するが、ここでは高流動化コンクリート¹¹⁾が採用されている。サンドイッチ構造ではコンクリートが十分に充填されている必要がある。このため高流動コンクリートの配合の適切な設定と施工管理が重要となる。各種の配合、充填方法、充填の検査方法、未充填部の強度に及ぼす影響などを検討し、高流動コンクリートの設計管理マニュアルを策定している。

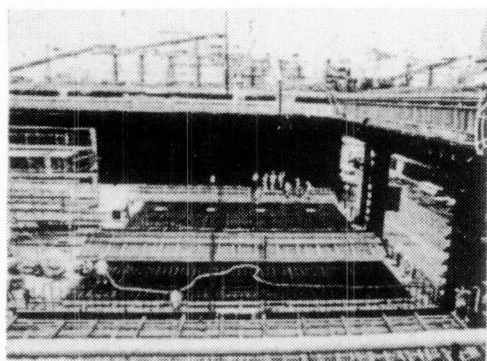


図-14 沈埋函の製作状況

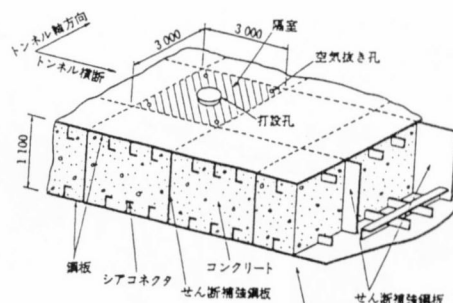


図-15 サンドイッチ部材による沈埋函の構造

5. 将来の展望

合成構造が、港湾施設に導入された歴史は新しい。この構造が力学的かつ経済的に有利であることが、次第に港湾技術者の間に広まりつつある。合成構造は、双胴型ケーソン¹²⁾やパネルシステムケーソンなど今後の新しい港湾施設にも採用の検討がされている。合成構造の基本的な力学性状に関しては説明はほぼなされ、設計施工法もかなり整備されたと考える。しかしながら合成部材のずれ耐荷力、せん断機構などの力学特性のさらなる解明、限界状態設計法による設計体系の整備、充填コンクリート打設に伴う管理体制の整備、より容易な施工法の提案などが必要と考える。今後の港湾工事に合成構造をさらに利用していくためには、各種合成部材を対象とした設計施工法の整備、鋼構造関係技術者と鉄筋コンクリート構造関係技術者の情報交換、発注受注体制の整理、一般技術者への合成部材の啓蒙なども必要と考える。また現状では合成部材は、鉄筋コンクリート部材や鋼構造と比較して一般的に高価となる。低価格な構造部材の提案と施工法の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 沿岸技術開発研究センター：合成版式ケーソン設計マニュアル、平成3年3月
- 2) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案）、平成4年7月
- 3) 清宮理、山田昌郎、吉村正：P C長大ケーソンのねじりの検討、JCIシンポジウム、プレストレストの原理技術の有効利用、pp.31-36, 1991, 7
- 4) 田中征登他5名：ハイブリッドケーソンの設計施工、日本鋼管技報、No. 122, pp. 119-128, 1988
- 5) 山本政彦他3名：R Cハイブリッド大型浮防波堤—広島港観音マリーナ浮防波堤の建設、土木学会代49回年次学術講演会、VI部門、pp. 648-649, 1994, 9
- 6) 清宮 理他3名：合成版パネルを用いた港湾用ケーソンの接合部載荷試験、構造工学論文集、pp. 1389-1400, 1994
- 7) 運輸省福井港工事事務所パンフレットより
- 8) Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA: New Development of PC for Marine Structures in Japan, FIP Symposium'93 Kyoto, pp. 401-408, Oct., 1993
- 9) 中島由貴：沈埋トンネル、コンクリート工学、Vol. 33, No. 1, pp. 65-69, 1995, 1
- 10) 第三港湾建設局：合成構造沈埋函設計指針、1991（内部資料）
- 11) 小門 武他3名：沈埋トンネルフルサンドイッチ構造部材への充填を対象とした粉体系高流動コンクリートの諸特性について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 1, pp. 191-196, 1995
- 12) 馬場孝博：下田港における消波ブロック内蔵双胴型ケーソン堤の開発、日本海上起重技術協会、会報第24号、pp. 11-16, 平成4年7月