

消波構造物の開発

Development of New Type Breakwater

大久保 寛^{*⁽¹⁾} 高橋 陽一^{*⁽¹⁾} 小島 一雄^{*⁽²⁾} 盛高 裕生^{*⁽²⁾}
Hiroshi OKUBO Yoichi TAKAHASHI Ichio KOJIMA Hiro MORITAKA

抄 録

ウォーターフロントの開発の進展に伴って、消波構造物に対して従来より自然条件の厳しい海域での設置が求められると共に、親水性、環境との調和など新たな技術要請がなされている。新日本製鐵はここ数年、新形式の消波構造物の開発に取り組んできた。その成果として建設省土木研究所らと共同で開発したH型スリット板ジャケット式構造物 CALMOS が建設省直轄の蒲原海岸に離岸堤として設置されることになった。又、傾斜板式消波構造物 PSR が新日本製鐵君津製鐵所西岸壁に設置された。更に外洋性の高波浪に対応しうる本格的防波堤の開発を目指し、運輸省港湾技術研究所との共同研究に着手したことについて述べた。

Abstract

With the progress of waterfront development, the environment in which breakwaters are installed has become increasingly severe. Moreover, new technical requirements, such as affinity for water and harmony with environment, have developed. To meet these requirements, Nippon Steel Corporation has continued effort for the development of a new type of breakwater. As a result, a H-shaped slit plate jacket type breakwater, called "CALMOS", has been developed jointly with the Public Works Research Institute of the Ministry of Construction. This breakwater will be installed as an off-shore breakwater at the Kanbara Coast under the direct control of the Ministry of Construction. Furthermore, a sloped breakwater, called "PSR", has been installed at the west quay of Nippon Steel's Kimitsu Works. Nippon Steel has started a joint research in the development of a breakwater for protection from oceanic waves with the Port and Harbor Research Institute of the Ministry of Transport.

1. 緒 論

近年、沿岸域の有効利用を図るため、ウォーターフロント開発、海洋開発の気運が高まっており、建設省による MMZ (Marine Multi Zone) 計画、運輸省による沖合人工島計画、水産庁によるマリノベーション構想等、各省庁により様々な海域利用構想が策定されている。これらの構想の中では港湾施設、漁港施設、海岸保全施設に対して厳しい海象条件に対応する防災面での強化と共に、潤い、景観、親水性の面での質的向上という新しい技術要請がなされており、これらの要請に対応する新しい形式の各種消波構造物の開発研究が各方面で活発に進められている。

新日本製鐵は、このような状況を踏まえてここ数年来、大水深、高波浪、軟弱地盤などの厳しい自然条件を克服できると共に景観や周囲との調和や環境面に配慮をした新しい消波構造物の開発を進めてきた。それは杭支持構造に防波板を取り付けることによって消波機能を付加したものである。又、杭だけでは耐えられないほど波力が大きい場合には鋼管構造で杭を補剛するジャケット構造を用いる。杭はジャケットをテンプレートとして打設するため、施工性に優れ、又、プレファブ化が図られているため急速施工が可能である。海洋

石油掘削プラットフォームとして世界各地で多数建設されているジャケット式構造物は、十分な施工実績を有し、信頼性も高く、新日本製鐵でも海洋石油掘削プラットフォームを中心として多数の施工を手掛け、最近では東京湾横断道路の川崎人工島にジャケット式護岸として施工した。

杭支持及びジャケット構造の活用は消波構造物の建設に際し、以下のような長所を生み出す。

- (1) 大水深・高波浪域、軟弱地盤域、急勾配海岸等、従来の重力式構造物では建設が困難とされている地点で、比較的容易かつ経済的に建設が可能である。
- (2) プレファブ化により現地海上工期の短縮が可能である。

新日本製鐵では、利用目的、自然条件に合わせて、1) CALMOS (Calm Offshore Structure)、2) PSR (Pile Supported Reef)、3) 上部斜面型杭式防波堤の3種類の消波構造物の開発を進めてきた。各々について開発の経緯、構造形式の概要及び現地への適用事例を紹介する。

*⁽¹⁾ 鉄構海洋事業部 土木事業開発部 掛長

*⁽²⁾ 鉄構海洋事業部 土木事業開発部 部長代理

2. CALMOS の開発

2.1 MMZ 構想と海域制御構造物

外洋に面した沿岸域では、一般に波浪などの海象条件が厳しく、海岸は侵食されやすいことなどから、その利用はこれまでかなり限定されたものとなっていた。しかし、近年海洋性レクリエーション需要の増大に伴う親水空間やレクリエーション施設の建設用地の不足などにより、沿岸域に新たな空間を創出する必要性が高まっている。

MMZ はこのような背景の下に、建設省によって提唱された構想であり、従来のブロック式離岸堤に代わる海域制御構造物を沖合いに建設することで広範な静穏海域を創出すると共に、養浜などによってウォーターフロント空間を形成し、沿岸域を総合的に開発、利用する一連の計画である。この MMZ 構想を推進するために、1986年度より建設省土木研究所と民間15社により各種海域制御構造物が開発されている。CALMOS はそのなかの一形式であり、新日本製鐵と戸田建設㈱及び建設省土木研究所との共同開発成果である。

2.2 CALMOS の概要

CALMOS は図1に示すように、H型に組み合わされた透過性の鉛直・水平消波板を有し、これらを鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造の上部工及び鋼製ジャケットと一体化させた構造物であり、先に出上げた構造・施工上の特徴に加え、以下のような水理上の特徴を有する。

- (1) ブロック式離岸堤と同程度の消波性能と、堤背後の海浜の堆砂機能を有する。
- (2) 鉛直消波板下部に開口部を設けた構造のため、堤内外の海水交換性に優れる。
- (3) 透過性消波板に作用する波力が小さいため、高波浪、大水深など厳しい建設条件での経済性に優れる。
- (4) 長期にわたる耐用年数の間、保守が必要ない。

CALMOS は鉛直・水平消波板による反射、消波板スリット部を通過する際に生じる乱れによるエネルギー損失によって消波効果を得ている。CALMOS の構造諸元を図2に示す。これら構造諸元、波浪

条件と透過率 (K_T) と反射率 (K_R) によって示される消波特性の関係は土木研究所で行った各種の水理実験によって確認されている。

図3は最も消波特性に影響が大きい堤体幅 (B) と波長 (L) の比 B/L と K_T の関係を示している。このグラフから分かるように堤体幅が大きいほど透過率は低くなり、つまり消波機能が高くなることを示す。又、CALMOS は衝撃的な波力が作用する砕波帯内に建設されることも想定し、重複波領域から砕波領域にいたる波力測定実験を実施している。写真1に1/10海底勾配での砕波波力の測定実験の様相を示す。

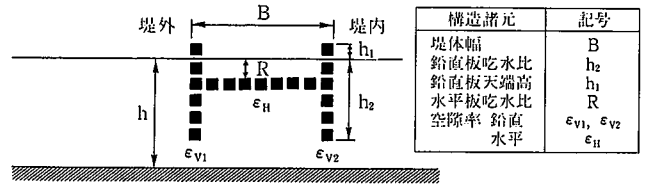


図2 スリット式CALMOS (H型スリット板ジャケット型)の構造諸元

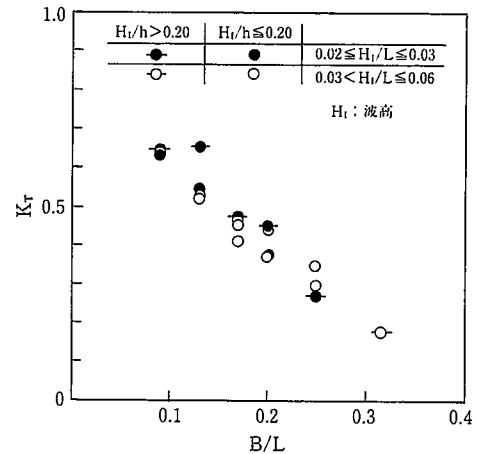


図3 堤体幅(B/L)と波の透過率(K_T)の関係

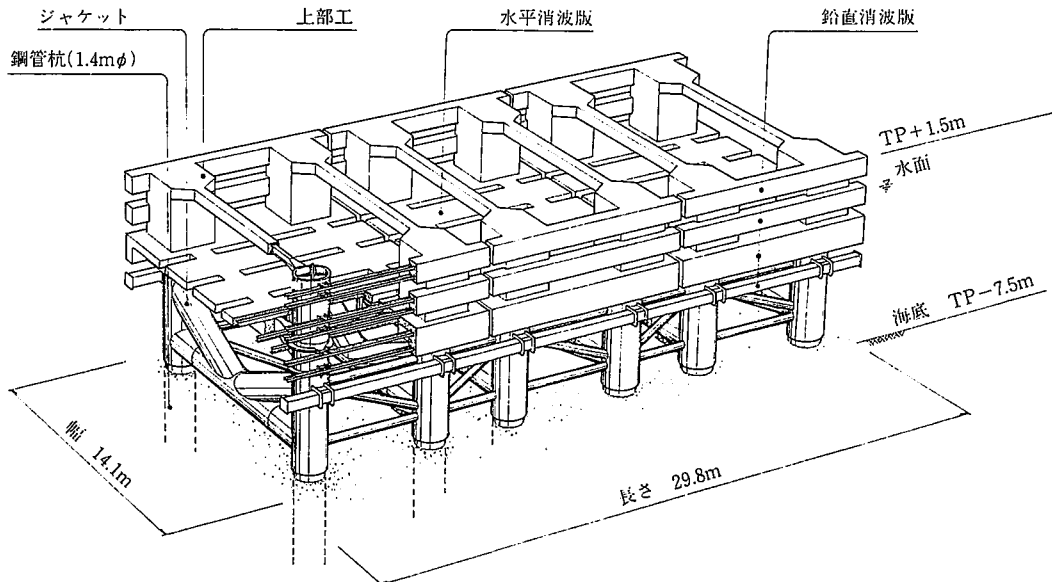


図1 CALMOS構造概念図

2.3 静岡県蒲原海岸における実施例

2.3.1 蒲原海岸の概要

蒲原海岸は富士川河口の西側に位置する蒲原町一帯の海岸で、さくらえびの産地として知られている。市街地は駿河湾に面する帯状の狭い平地に密集し、更に東海道線、国道1号線バイパスなど日本の交通の大動脈が海岸堤防の近傍を平行に走っている。この海岸は海底勾配が急なことが特徴で、波高の高い波が来襲し、度々災害を起こしている。このため、1967年度より建設省直轄により海岸堤防などの整備が行われており、この一環として1992年度に汀線から150mの位置に建設される長さ100mの離岸堤としてCALMOSが採用さ



写真1 CALMOSの砕波波力実験

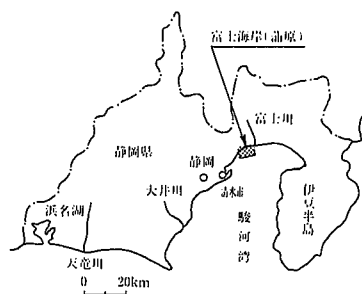


図4 CALMOS建設地点

れた。建設地点を図4に示す。

2.3.2 設計条件と設計手法

図5に設計条件及び構造諸元を示す。消波構造の諸元は1年間に来襲する上位5波浪の平均値と想定される周期10秒、有義波高3.5mの消波対象波に対し、 $K_T \leq 0.6$ 、 $K_R \leq 0.5$ の消波性能を実現するように既往の研究成果から決定した。設計では地盤の非線形性を考慮した二次元及び三次元骨組モデルによる暴風時、地震時の外力に対する構造計算によりジャケット、SRC上部工の断面を決定し、更にジャケット格点部は耐用年数50年に繰り返し作用する波浪に対して十分な疲労強度があることを確認している。

2.3.3 製作・施工概要

ジャケットは新日本製鐵若松鉄構海洋センターで、又、SRC上部工は清水港に隣接するヤードで製作され、共にバargeで現地に輸送された。現地での施工は海上作業の稼働率を勘案し、1993年2月～3月の冬季に実施した。図6に示すように、1) 仮受け杭の打設、2) ジャケットの据付け、3) 鋼管杭の打設、4) SRC上部工の据付け、5) グラウト注入の手順で施工が行われた。写真2は若松鉄構海洋センターにおけるジャケットの製作状況、写真3は現地におけるジャケットの吊り架設状況である。

3. PSRの開発

3.1 開発経緯

近年、大水深域、軟弱地盤域での漁港の建設や漁場の拡大が図られており、水質を確保しながら厳しい自然条件下で建設できる消波構造物が必要とされている。更に景観面、海洋レクリエーションなど周辺環境との調和など新たな要請もなされており、これらの要請に応えるべく、各種の新形式消波構造物が多方面で開発されている。

新日本製鐵は、新形式消波構造物として、通水性、低反射特性を有すると共に、大水深、軟弱地盤域においても経済的に建設できる傾斜板式消波構造物PSR(杭で支持された人工リーフ)の開発に取

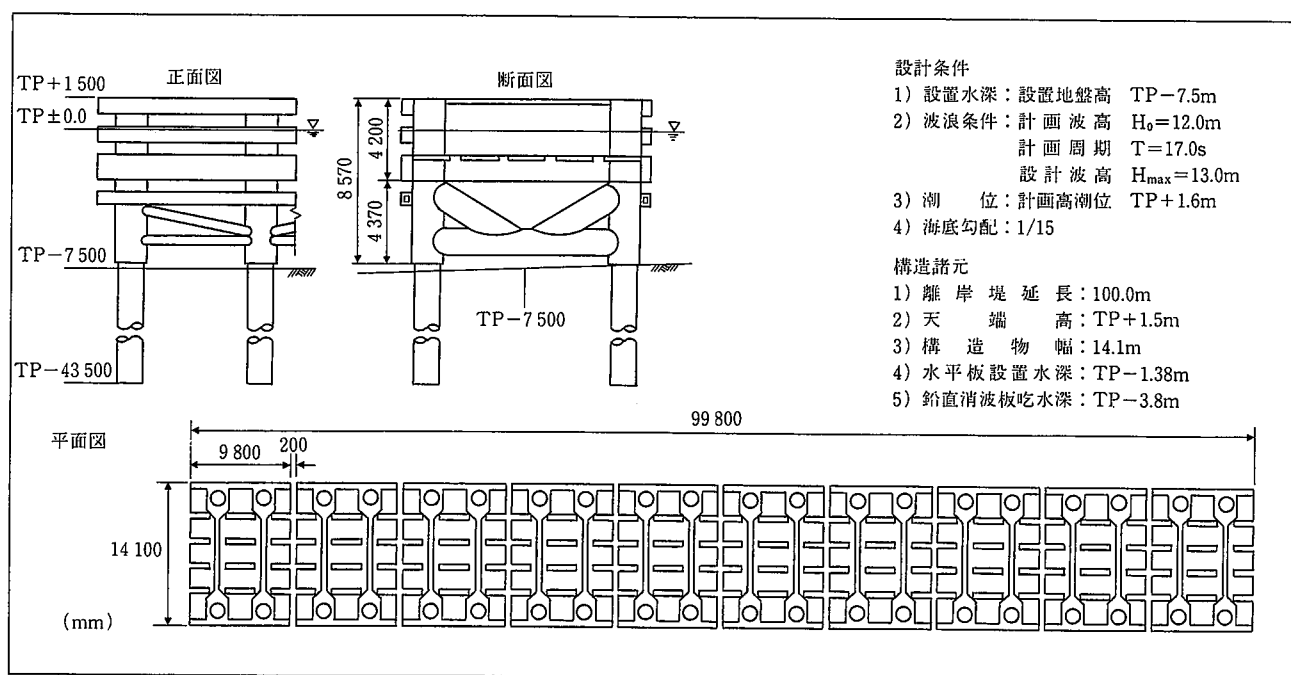


図5 CALMOS設計条件及び構造諸元

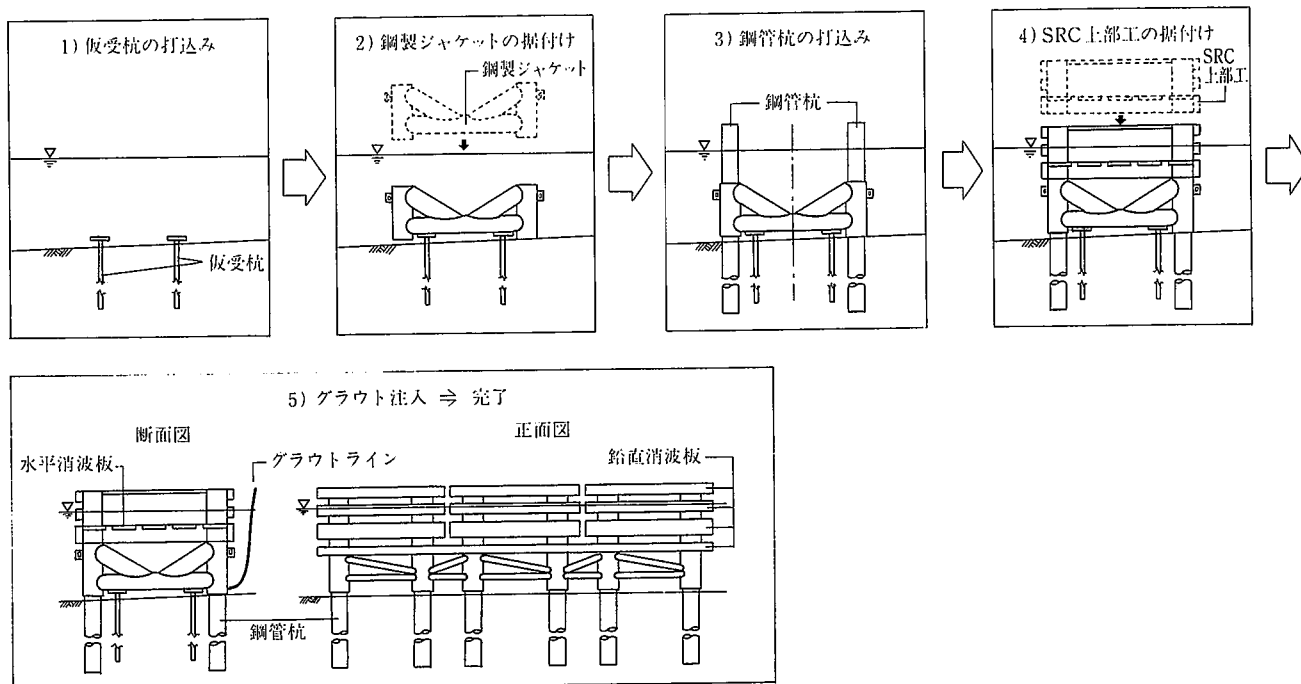


図 6 CALMOS施工フロー図

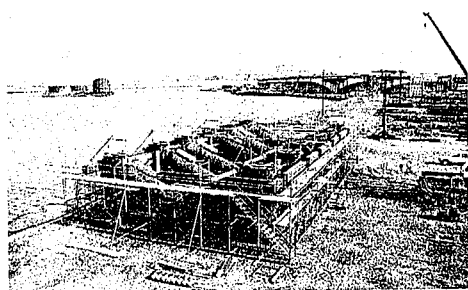


写真 2 CALMOSジャケット製作状況

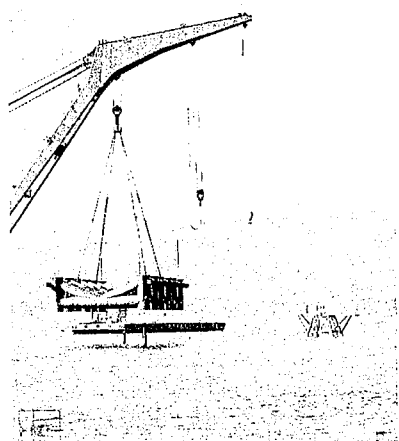


写真 3 CALMOSジャケットの架設状況

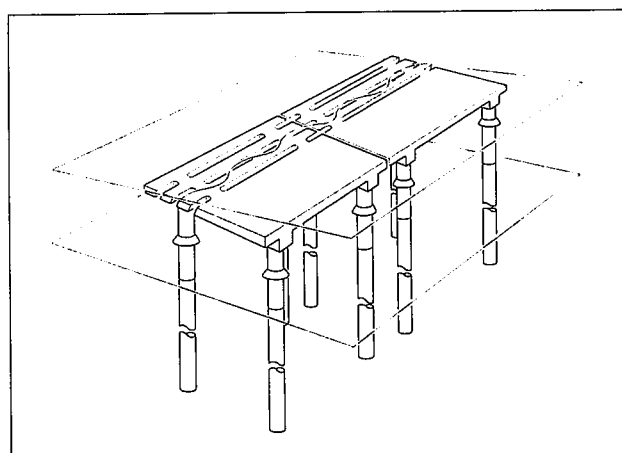


図 7 PSRの構造概念図

ものである。自然の海岸では沖合いから岸に向かってきた波は水深が浅くなるにつれて波の形状を保てなくなり、砕波に至り、この砕波によって波のエネルギーは消費され、波高は著しく減衰する。PSRはこの砕波の現象を利用したもので、擬似的な海底の役割を果たす傾斜板上で入射してきた波を反射、砕波することによって効果的に消波を行うものである。

PSRの主な特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) 砕波によるエネルギー散逸により、従来の防波堤に比べて非常に低い反射率を実現できることから、小型船舶などへの影響を最小限におさえることができる。
- (2) 傾斜板に作用する水平波力が小さいため、施工条件の厳しい大水深、軟弱地盤域において従来工法に比べ経済性を発揮する。
- (3) 海水の交換を妨げないため、水質保全に有効である。
- (4) 歩廊の設置等の工夫が容易で多目的な利用が図れる。
- (5) 傾斜板の傾斜角、吃水、天端高さを組み合わせることによって、必要な透過率、反射率を得ることができる。

用途として、防波堤、離岸堤、波除堤あるいは護岸前面の消波工

り組んできた。開発にあたって水理特性上の課題解明について東京大学土木工学科港湾・海岸研究室に指導を仰いだ。

PSRの構造は、図7に示すように平板を水面付近に緩い角度(水平面とのなす角度 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$)で鋼管杭又はジャケット構造に固定する

があげられる。特に水深波長比の大きい波浪に対して効果的な消波が行えることから、湾内の水深が深い海域で、通水性、低反射特性を有する経済的な消波構造物として威力を発揮できる。その一つとして北海道網走市の呼人漁港で防波堤として採用される予定である。

以下では、その低反射特性を活かした適用事例として、新日本製鐵君津製鐵所西岸壁でのPSR設置工事の概要を示す。

3.2 君津製鐵所西岸壁でのPSR設置工事

1990年12月、千葉県君津市にある小糸川漁港の航路への反射波低減対策を目的に、隣接する君津製鐵所西護岸の消波施設として、初めてのPSRが建設された。又、現地波浪観測を行い、実海域における反射波低減効果を検証した。

3.2.1 建設の経緯と設置地点

図8に示すように、君津航路は君津製鐵所西護岸と対岸の富津側埋立地に挟まれ、季節によっては両岸からの反射波によって波高が増大しやすく、西護岸前面は航路奥に位置する小糸川漁港の漁船の航行に支障をきたす海域となっていた。このため、新日本製鐵は千葉県と協議のうえ、航路の安全確保を目的とした西護岸前面の消波工として、1基あたりの長さ約12mのPSR31基を延長362mの区間に設置することになった。

3.2.2 波浪条件と構造諸元

船舶の安全航行を確保するため、波周期3秒、波高1m程度の波に対して反射率が0.3以下の消波性能が必要とされ、既往の研究成果や現地条件に合わせた水理実験結果等から表1に示す構造諸元を選択した。

3.2.3 製作、現地工事

本工事では現地の波浪や水深を考慮し、あらかじめ打設した鋼管杭のうえに傾斜板を設置する構造とし、傾斜板は飛沫帯部に設置されることからH型鋼に鉄筋コンクリートを被覆した鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)構造とした。1基あたり幅10.2m、長さ11.6m、厚さ0.35m、重量130tのSRC製傾斜板は、波力低減を目的とした幅20cmのスリットを持ち、4本の鋼管杭によって支持されている。このSRC製傾斜板の鉄骨加工、配筋、コンクリート打設は若松鉄構海洋センターで行った。製作状況を写真4に示す。

SRC製傾斜板は現地まで曳航し、あらかじめ打設した直径700mmの鋼管杭の上にクレーン船により吊り込み設置した。施工状況を写真5に示す。

表1 君津製鐵所西護岸設置工事

諸元	記号	設定値
水深	h	AP-5.0~-2.0m
潮位	満潮位	H.W.L.
	干潮位	L.W.L.
背面護岸との距離	B'	4.0m
傾斜板角度	θ	20°
傾斜板下端	d	AP-1.5m
傾斜板上端	hr	AP+2.0m
傾斜板幅	B	10.2m

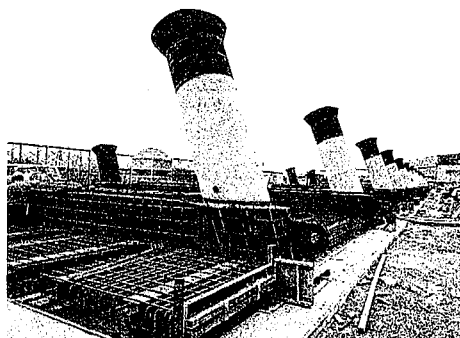
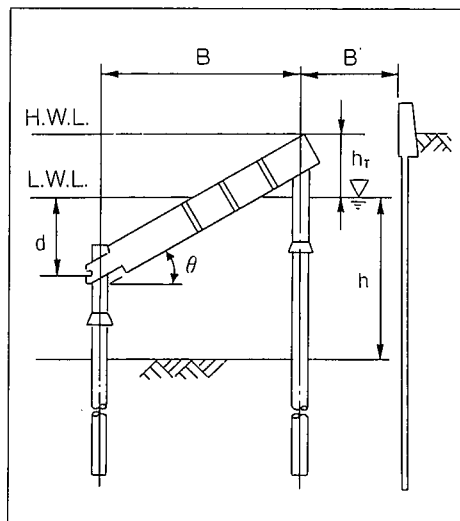


写真4 PSR製作状況

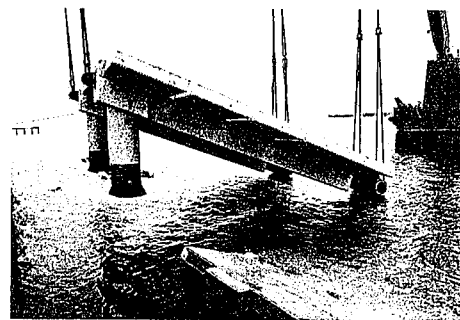


写真5 PSR施工状況

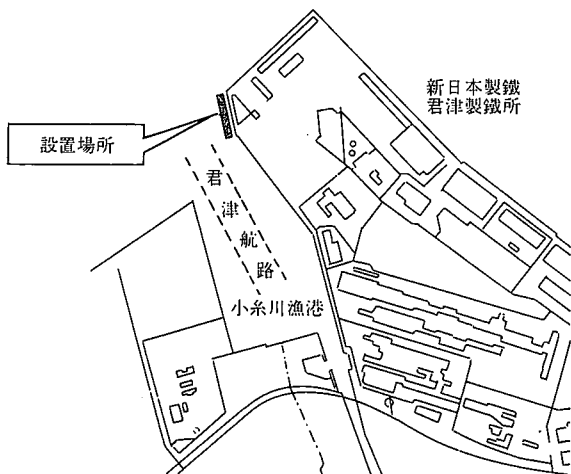


図8 PSR設置位置図

写真5に示す。傾斜板と杭との接合は、設置後レグと鋼管杭の間にグラウトを注入、固化して一体化を図った。又、防食対策として飛沫帯部の杭は重防食塗装を施し、それ以外の海中部、海底部の杭に

についてはアノードによる電気防食を施した。

大幅にプレファブ化された本工事は、延長360mの護岸建設を現地工期、僅か3か月の短期間で完工した。

3.2.4 現地波浪観測

実海域における反射波低減効果を実証するために現地波浪観測を行った。PSR 設置前後のそれぞれ約1か月にわたって、PSR 設置延長の中央地点で3台の波高計アレイを配置して観測した。観測データを磯部ら(1983年)による修正最尤法(MMLM法)により解析し、

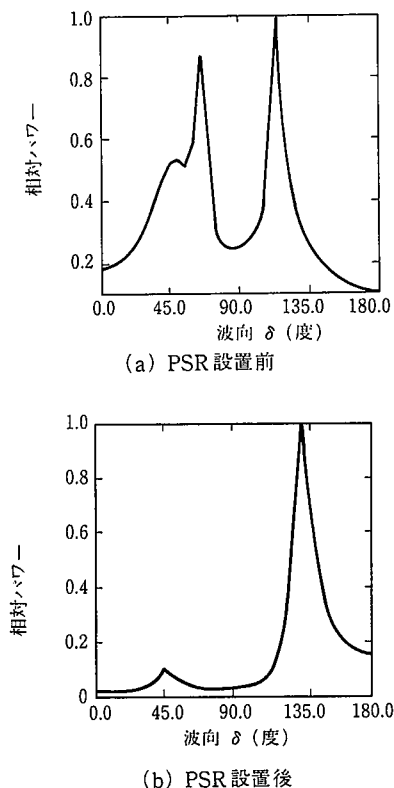


図9 PSR 設置前後の波浪方向スペクトル

方向スペクトルを算定した。PSR の設置前後の方向スペクトルを比較することによって反射波の低減効果を検証した。

図9は据付け前後の荒天時に計測された波浪観測データより得られた方向スペクトルであり、入射波のパワーで正規化した相対パワーを示している。護岸法線の走行を考慮すると波向90~180度が入射波の領域であり、0~90度には反射波が存在しているものと考えられる。設置前の方向スペクトル図9(a)からわかるように、波向き115度に入射波のエネルギーのピークがあって、これに対応する反射波成分が波向き65度に存在し、反射波のエネルギーは入射波の88%に達しており、全反射に近い。一方、設置後の方向スペクトル図9(b)では入射波のエネルギーのピークは波向き135度であり、対応する反射波のエネルギーは入射波の9.7%に過ぎない。反射率に換算すると0.27となり、実海域において効果的な消波が行われたことを確認できた。

4. 上部斜面型杭式防波堤の開発

4.1 開発の経緯

近年、港湾の外港展開が進められつつあり、港湾の建設地点が湾内から湾外へと移動するにつれて波浪条件の厳しい外海域あるいは軟弱地盤域など、より自然条件の厳しい海域における防波堤の建設が必要とされている。従来は捨石マウンドの上にケーソンや方塊を積んだ混成堤が防波堤の主流であるが、広範囲の地盤改良が必要となり、経済的でないことがある。更に、ウォーターフロント開発の進展に伴い、港内環境保全、航路河口部埋設対策、小型船舶の航行安全への配慮、港湾の緊急整備などの社会的要請がなされており、防波堤施設に対して基本的機能に加え、通水性、低反射特性、大量急速施工性のような新たな技術要請が高まっている。

これらの状況を踏まえ、新日本製鐵では大水深、高波浪、軟弱地盤域で経済的に建設できると共に、通水性、急速施工性を有する本格的な防波堤の開発に向け、1992年度より運輸省港湾技術研究所との2か年にわたる共同研究に着手した。

本防波堤の構造は図10に示すように、ジャケットにコンクリート

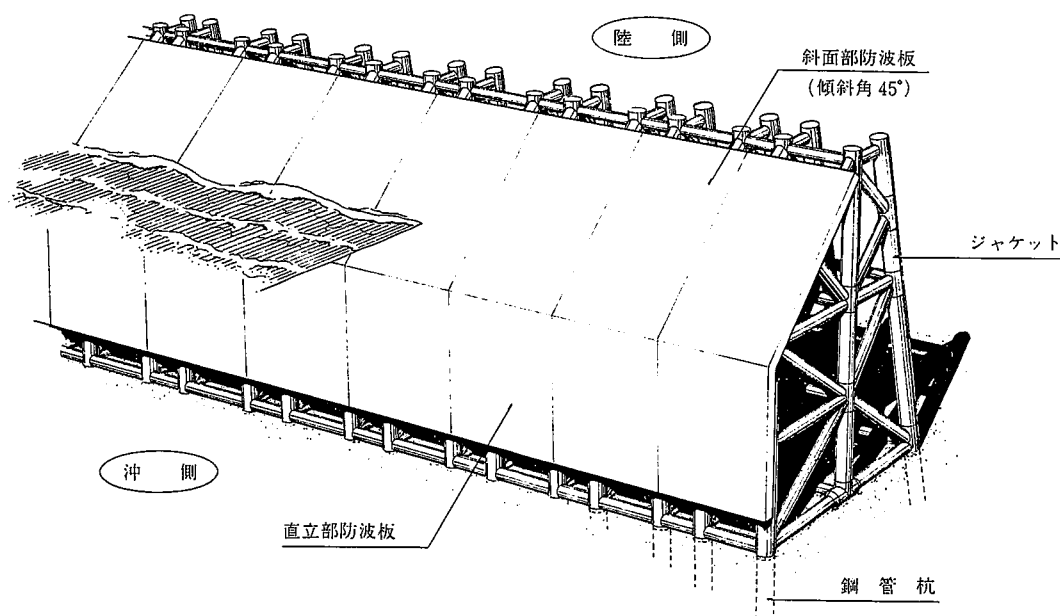


図10 上部斜面型杭式防波堤の構造概念図

版を前面に取り付けるものである。類似の防波堤として鋼管杭によってコンクリート版をカーテン状に配置したカーテン式防波堤があり、軟弱地盤域において大きな地盤改良をしなくて済むことや、材料が少量であることから工費を節減できる工法として、湾や入江等の波高の小さい静穏な海域を中心に利用されてきた。しかしながら、カーテン式防波堤を外洋性のうねりを含んだ高波浪域で設置しようとする、杭のみを主体とした構造であることや、杭と防波板との接合部の構造が高波浪に対応したものではないことから、耐荷力が十分でないこと、更に、長周期の高波浪に対して静穏度を確保するには天端が高く、カーテン壁が深くなり、大きな波力を受けるため経済的でないこと等、解決すべき課題がある。

そこで、杭を補剛したジャケット構造とすると共に、高波浪に対応する防波板とジャケットとの接合部の構造を開発することによって耐荷力を確保し、更に、うねりを含んだ外洋からの波浪に対して透過波高を小さく（透過率 $K_T < 0.2 \sim 0.6$ ）抑え、防災施設としての機能を確保することを前提として、通水性、経済性を向上させるために以下の工夫を加えた。

(1) 経済性の確保

水面付近に斜面部を設けて水平波力を低減し、経済性を高める。又、さほど高い静穏度が要求されない波浪制御構造物に対しては、低天端にすることによって波力を低減し、経済性をより重視することもできるようにする。

(2) 通水性の確保

港内水質浄化など、環境面への配慮ができるように海底部付近に開口部を設ける。

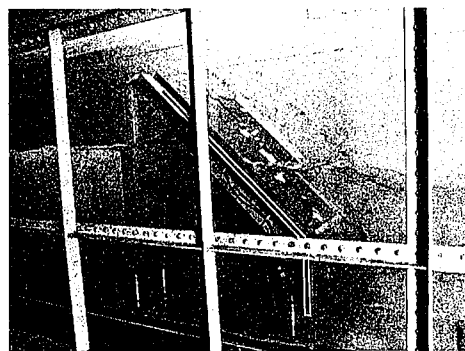


写真 6 上部斜面型杭式防波堤の水理実験

この防波堤実現に向けて防波板の構造諸元が消波特性、波力特性に及ぼす影響を把握するため、港湾技術研究所耐波研究室の大型造波水路で水理実験を実施した。写真 6 は水理実験の概況である。更に今後、水理特性を解明すると共に、防波板とジャケット構造との接合部強度を検討していく予定である。

5. 結 言

新日本製鐵は、海洋構造物に関する保有技術を活用し、軟弱地盤域、大水深・高波浪域、急深勾配の海岸等の苛酷な施工条件に対する経済性と急速施工性や通水性を特色とした消波構造物の実現に向けて着実に成果を挙げてきた。今後、更に開発を進め、沿岸域の有効利用の可能性を拡大することの一助となるよう取り組んでいきたいと考えている。