

第3節 港湾・漁港・空港事業の技術

1 港湾・漁港事業の技術

(1) 港湾・漁港の技術変遷の概要

我が国の近代港湾漁港技術の確立は、明治時代以降、海外からの技術導入や港湾建設の現場における我が国独自の技術開発の努力によってなされてきた。

特に、北海道の沿岸は単調な海岸線が多く、函館港・室蘭港・厚岸漁港・寿都漁港などの地形の利を得た数港を除けば、いずれも直接海に面している。つまり、日本海側は秋期の日本海を北上する低気圧による南西よりの波及び冬期季節風による西よりの高波が多く、一方太平洋岸では、秋期の台風時に南東よりの周期の比較的長い波が来襲する。オホーツク海は秋期から冬期にかけて北よりの波が強くなるが、2～3月は流氷が接岸し海は大氷原となる。

北海道においては、このように波浪条件の厳しい外海に画した地域において安全な泊地と係留施設を確保するため、防波堤建設技術を中心に発展してきたといえる。

昭和26年の北海道開発局の設置と同時に、我が国初の掘込式港湾苫小牧（西）港の建設を開始している。苫小牧港の建設に当たっては、世界で始めてアイソトープを利用した漂砂調査を実施した。この成果は、世界の注目を浴びることになり、その後の本州の新潟港、鹿島港建設にも役立つこととなった。



写真-1 日本海の大波浪



写真-2 流氷の押し寄せるオホーツク海（紋別港）

昭和30年代に入ると、我が国の経済は戦後の経済復興期を脱し、世界的な好況を背景に輸出が大きく伸長し、大幅な景気上昇を示した。それに伴って、北海道の港湾取扱貨物量も著しく増加した。この時期、北海道の防波堤において初めて8t~25t消波ブロックが用いられたり、プレパックドコンクリートが堤体として採用され、全道に普及した。現在、道内では最大80tクラスの消波ブロックが設置されている。また、鋼材の腐食研究も進み、初めて二重矢板式防波堤も建設された。

係留施設を見ると、昭和30年頃から構造様式は極めて多様化し、ケーソン式、セルラーブロック式、L型ブロック式、コンクリート方塊式、プレパックドコンクリート式、鋼矢板式、鋼矢板セル式、鋼管横さん橋式、鋼管棚式、井筒基礎ゲタッチドピア式、重力式ドルフィンなど、現在施工されている構造様式の本格的なものはほとんど施行されている。

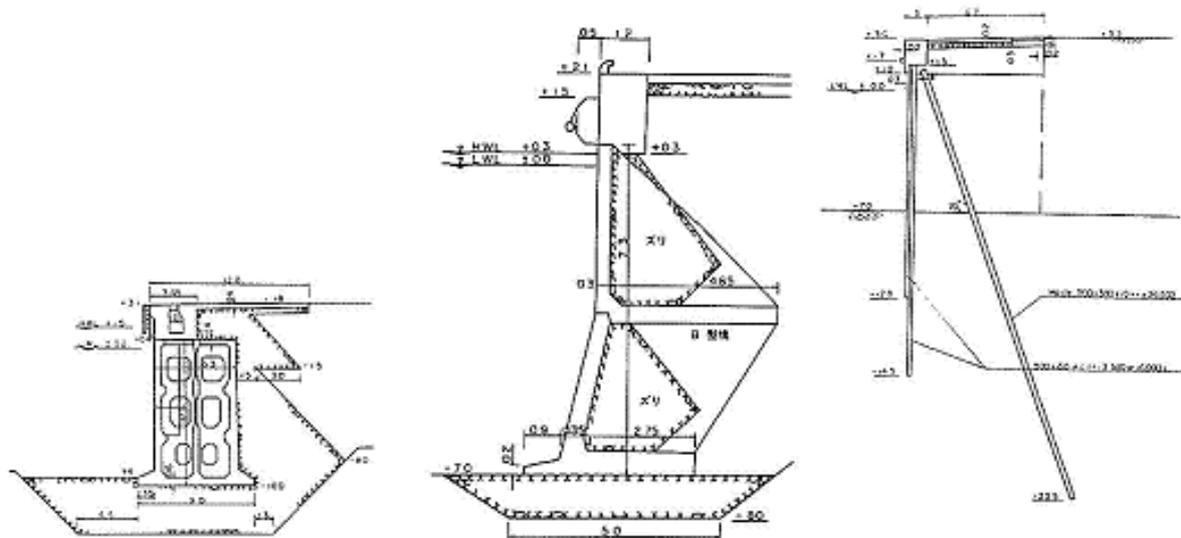


図-1 室蘭港中央埠頭標準断面図 図-2 留萌港-7m岸壁標準断面図 図-3 函館港-5.5m岸壁標準断面図

昭和40年代に入っても我が国の経済は成長を持続したが、昭和48年の石油危機を契機として安定成長期へと移行した。こうした情勢の下で、道内の港湾整備も昭和49年からスローダウンすることとなった。

一方、この時期は輸送革新が著しく進展し、コンテナ船やカーフェリーの就航及び船舶の大型化も進んだ。昭和40年代になってからは、岸壁工事においてサンドドレーン工法等種々の軟弱地盤対策が実施された。昭和42年には、ケーソンの進水方法として初めて起重機船による吊上げ進水方式が採用され、「たいせつ号(500t吊)」が建設された。また、フローティングドックが北海道で使用されたのも、この時期である。昭和40年代に入ると、民間の施工技術は大幅にアップし、北海道の港湾・漁港工事においても民間保有の大型グラブ船が各地で活躍するようになった。大型ドラグサクシオン船や大船ポンプ浚渫船の導入も進み、浚渫及び埋立ての施工能力が大幅にアップすることとなった。



写真-3 たいせつ号 (500t 吊) によるケーソン据付

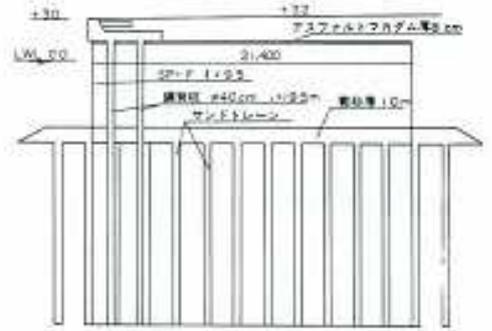


図-4 函館港北浜埠頭標準断面図

昭和 50 年代は、港湾に対する輸送需要が着実に増大し、一層の多様化を図るとともに、環境保全、安全防災対策をより一層推進し、快適な港湾及び海洋環境を実現していくこととなった。昭和 50 年代には、軟弱地盤の土質を改良するための大口径サンドパイル打設工法や石灰の水和熟・硬質化作用・圧入による締固め作用を利用した深層混合処理工法が開発された。

北海道において初めてケーソン（コンクリート製の函）を用いたのは、大正元年の小樽港南防波堤である。その後、ケーソンの大型化及び大水深域での防波堤建設が増大し、昭和 50 年代には、苫小牧東港で幅 24.5m の大型ケーソン、石狩湾新港では水深 -19.0m で防波堤建設を実施している。

昭和 60 年代から平成の初めにかけては、新たな需要に対応した港づくりや不利な条件下での港湾施設建設、高質な施設の整備など、ますます港湾・漁港に対する要請が多様化した時代となっている。

昭和 58 年の日本海中部地震で港湾施設の液状化被害が判明したことから、運輸省では全国の重要な既存施設について、液状化の危険性を総点検した。道内では釧路港・十勝港・石狩湾新港でグラベルドレーン又はサンドコンパクションパイル工法を実施している。また、道内初の耐震構造岸壁が十勝港に建設され、その後、効率的な液状化対策として事前混合処理工法等が開発された。さらに、利用及び施工条件が制約されている釧路港、小樽港では新たな構造形式により岸壁工事を実施している。狭陰な現場条件下にある釧路港の岸壁工事において、日本で初めて水中ストラット工法を採用した。小樽港勝納地区では岸壁の増深改良のため、内面リブ付鋼管杭を用いたコンクリート充填管杭工法による栈橋を施工した。一方、苫小牧港においては、大水深域における経済的な防波堤建設を目指した砂マウンド式混成堤の設置及び調査を実施した。

そのほか、市民に親しまれる港湾漁港施設として、紋別港・網走港・稚内港・瀬棚港・白老港・岩内港・宇登呂漁港において親水性防波堤又は親水性護岸の建設を行っている。

漁港技術の面でも活魚の安定的な供給を図るための蓄養水面を確保するため、抜海漁港では海水交換型二重防波堤を建設し、雄冬漁港等においても蓄養水面施設が建設されている。

オホーツク海の流水制御技術としてサロマ湖漁港において「アイスブーム工法」が採用され、この後に能取漁港においても採用されている。



写真-4 流氷の流入を防止するアイスブーム（サロマ湖漁港）

平成10年代は、港湾環境インフラの整備を総合的・先行的に行うエコポートモデル港に指定された釧路港等において、環境と調和した自然環境共生型の施設整備が進められた。また、漁港の冬季の過酷な荷捌き、網外し等の作業の就労環境改善を目的とした屋根付き岸壁が古平漁港を始め、全道各漁港で整備された。さらに、衛生管理の高度化を図る技術として、屋根付き岸壁に加えて清浄海水取水施設の整備が進められ、久遠漁港を始め、全道各漁港で整備された。

防災・減災に対する技術として、耐震強化岸壁の整備が進められ、液状化対策や土圧軽減、支持力増加に関する地盤改良技術がより一層進展し、全道各港湾・漁港で積極的に展開されている。また、大規模地震による津波の減災対策として、津波漂流物対策施設が釧路港、十勝港、えりも港で先駆的に施工されている。漁港においては、漁港用地確保



写真-5 釧路港津波漂流物対策施設

に加え防災安全機能を兼ね備えた高架構造物として、青苗漁港で人工地盤及び人工地盤へのアクセス高架橋の整備がされている。

一方、歴史的港湾・漁港構造物の保存・延命を図るため、稚内港北防波堤ドーム、小樽港北防波堤、函館漁港石積防波堤等の改良等が実施・計画され、北海道開拓の軌跡も残す貴重な選奨土木遺産及び北海道遺産として認められた、これら歴史的港湾・漁港構造物を後世に適切に保全するため、建設時の設計・施工思想を十分理解した上で関係者との合意形成を図りつつ、改良方法及び管理方法に配慮しながら事業を進めている。

平成20年代以降は、調査・解析技術や数値シミュレーション技術が高度化したことにより、様々な現象が解明された。比較的静穏な港内での船体動揺の要因が長周期波であると判明し、長周期波エネルギーの低減を目的とした対策工が苫小牧港や熊石漁港などで整備された。また、予算規模に応じて柔軟な防波堤の整備を可能とする連結セルラーブロック工法とともに、サロマ湖漁港の複雑な漂砂メ

カニズムの解明や対策工法について、有識者を中心とする技術検討委員会により検討が進められている。

一方、維持管理を含めたライフサイクルコストの概念が導入され、国際バルク戦略港湾に指定された釧路港では、炭素繊維筋を導入した。さらに、整備効果の早期発現に対するニーズの高まりを受け、釧路港や函館港では急速施工に対応したジャケット式構造やプレキャスト工法の積極的な活用により工期の短縮を図った。

また、令和に入り、建設業における時間外労働規制の導入等、「働き方改革」が進められ、建設現場の生産性を向上させる「i-Construction」の取組が加速し、省力化に向けた ICT 施工や BIM/CIM 等の新たな技術の導入が進められている。



写真-6 釧路港 国際バルク戦略港湾 国際物流ターミナル (完成)

(2) 港湾における主要技術

ア 苫小牧港における漂砂調査

(ア) 技術概要

昭和 20 年に終戦を迎えた我が国は、戦後の経済復興の一環として北海道開発に焦点をあて、その一つとして後背地等の諸条件の利点から苫小牧に大規模な掘込式の港湾を築造しようとした。しかし、世界的に見ても砂浜に大規模に港を造った例はなく、卓越する漂砂から航路の機能を保持することが困難であり、当時の築港技術としては避けるべきものとされ、漂砂現象の把握とその対策に対する科学的根拠が得られていない状況下において、中央の反応は非常に厳しかった。

昭和 25 年に至り、地元の築設運動が実り、わずかの予算がつき、東防波堤の試験工事が開始された。しかし、漂砂に関する内外の資料の蓄積はゼロに等しく、いかにして埋まらない港を造るかが最大の課題であった。

そのため、苫小牧海岸の漂砂現象の解明と港内埋没対策を講ずるための基礎資料を得ることを目的として、様々な調査機器・手法の開発、現地調査、水理模型実験による検討を行った。

《調査技術の変遷》

昭和 25 年、苫小牧市の依頼を受けて、苫小牧港の建設と海岸工学の研究のために『北大グループによる漂砂調査』が開始された。

その一方、当時室蘭開発建設部長であった猪瀬寧雄氏は、本格的な工事を進めるため、中央を説得する方法として新技術である『ラジオアイソトープを利用した漂砂調査』に着目した。そして、当時ラジオアイソトープの研究に携わっていた東京大学の加藤教授の協力の下、調査方法を開発し、港湾分野では世界で初めての調査を実施することとした。調査は昭和 29 年から昭和 37 年まで続けられたが、当初は調査費が少なく、苫小牧市から資金援助を受けての調査であった。そうした努力の結果、『水深 9m 以深では砂は動かない』という調査結果が得られ、その後の漂砂対策に有力な手掛かりを与えることとなった。この調査方法は、昭和 30 年にジュネーブで開催された『第 1 回原子力の平和利用に関する国際会議』で発表され、ラジオアイソトープの新しい平和利用として絶賛を浴びることとなった。

また、猪瀬氏はラジオアイソトープ調査のほか、砂浜に港を建設できることを証明するため、昭和 31 年、建設省土木研究所で漂砂実験を行ってもらった。さらに、北海道開発局土木試験所では防波堤配置等に関する模型実験が行われた。その結果、『防波堤によって向岸流が発生し、航路が確保できる。また、防波堤は最初の計画である水深 9m までの延長を、将来を考えて水深 12m までとした方がよい。』ことが明らかとなった。こうした一連の調査成果が防波堤配置等の決定のための根拠となり、苫小牧港建設の大きな推進力となった。

その後、漂砂調査はラジオアイソトープ調査に代わり、コンクリート盤や蛍光砂等を用いて行われた。

(イ) 北大グループによる漂砂調査

北大グループによる調査は、苫小牧市の依頼を受けて昭和 25 年から開始された。

調査内容は、漂砂現象の総合的把握を目指した以下のような広範囲にわたるものであった。

1. 捕砂器の開発と漂砂の水平、鉛直分布および方向性の把握 (図-1 参照)
2. 底質の粒度分析と漂砂経路の推定
3. 沿岸流観測装置の開発と沿岸流観測、沿岸流と海象との関係の把握
4. 波浪観測、汀線・深浅測量の実施

主な調査結果は、以下のとおりである。

1. 昭和 27 年調査では、岸沖方向測線における捕砂量の鉛直分布は、底面付近のみ砂の移動が大きく、特に岸から 300m 付近で激しい。また、岸から 900m (水深 8 m) を越えると底面でも砂の移動が少ないことがわかった。
2. 東防波堤が 500m 延伸され、船溜りが完成した昭和 32 年の調査では、漂砂量の鉛直分布を 4 つの分布型 (くの字型、L 字型、一様分布、逆 S 字型) に分けることができた。
3. 昭和 32 年~33 年に行われた底質の粒度分析の結果から砂移動状態図が得られた。(図-2 参照)

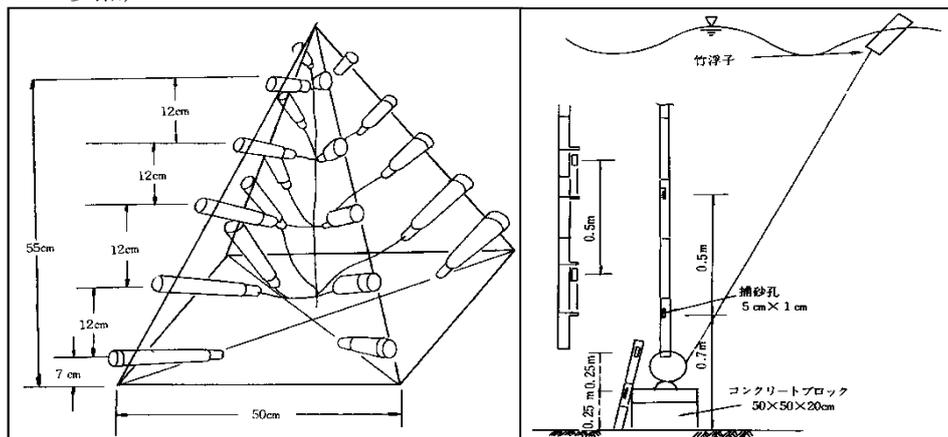


図-1 考案された捕砂器

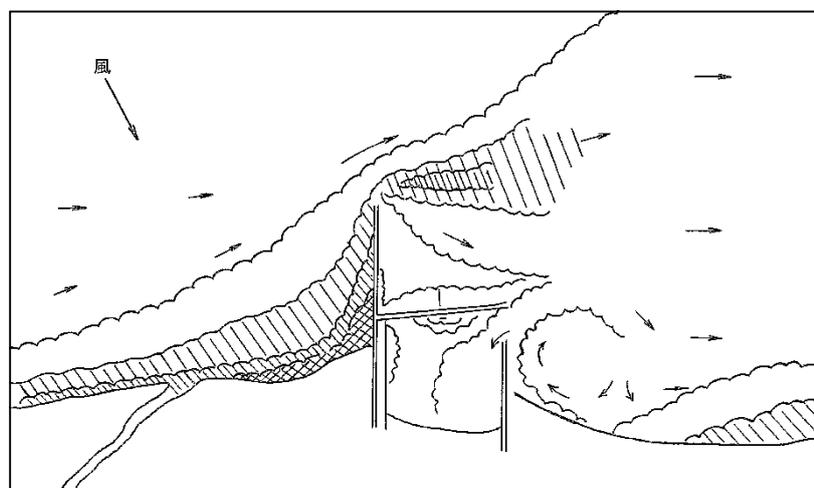


図-2 砂移動状況図

(ウ) ラジオアイソトープを用いた漂砂調査

ラジオアイソトープ（以下「R. I」という。）を用いた調査は、昭和 29 年から昭和 37 年まで実施された。この方法は、当時室蘭開発建設部長であった猪瀬寧雄氏の考案によるもので、現地砂の比重に合わせたガラスに R. I を溶かし込み、このガラス塊を砕いて現地のある水深の海底における砂の平均粒径と同一の直径を有するガラス粒を作り、これを所定箇所に投入するものである。

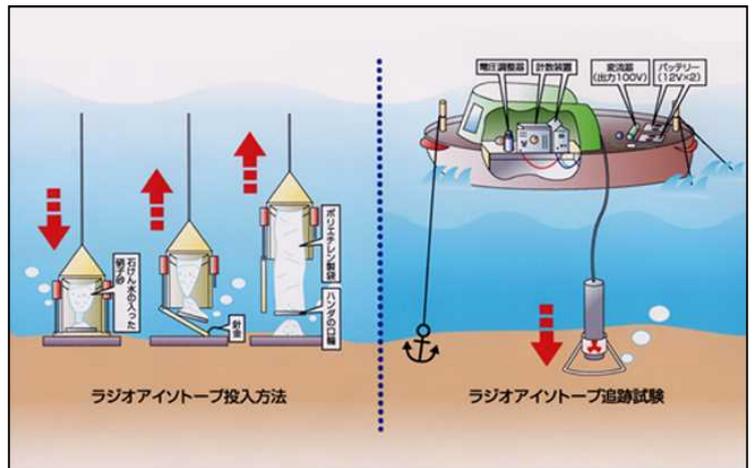


図-3 調査方法

このガラス粒は放射線を出すため、放射線を計器で捉えつつガラス粒の軌跡を追跡すれば、ガラス粒は砂とほぼ同一の運動をすることから、砂の移動状況が分かるというものであった。さらに、ガラス粒拡散後の各場所における放射エネルギーを測定すれば、その拡散状況も知ることができるものである。調査方法を図-3に示す。

主な調査結果は、以下のとおりである。

1. 漂砂は海岸近くが最も著しく、この部分の水深 3m では波高 1m の波で底質は完全に移動する。
2. 水深 6m 程度では波高 2.5m の波で完全に移動する（図-4 参照）。
3. 水深 9m では波高 2.5m の波に対しほとんど移動しない。
4. 砂の移動方向は、水深 3m～6m では波の方向と一致するが、水深 9m では潮流方向に移動し、波の影響は少ない。
5. 波高 2m 程度の一度の時化で砂の乱れる深さは、水深 9m では 10cm まで、水深 3m では 30cm くらいである。

水深 9m 以深では砂は動かないという調査結果は、その後の漂砂対策に有力な手掛かりを与えてくれた。なお、R. I を利用した調査方法は、昭和 30 年にジュネーブで開かれた「第 1 回原子力の平和利用に関する国際会議」で発表され、ラジオアイソトープの新しい平和利用の方法として絶賛を浴びた。

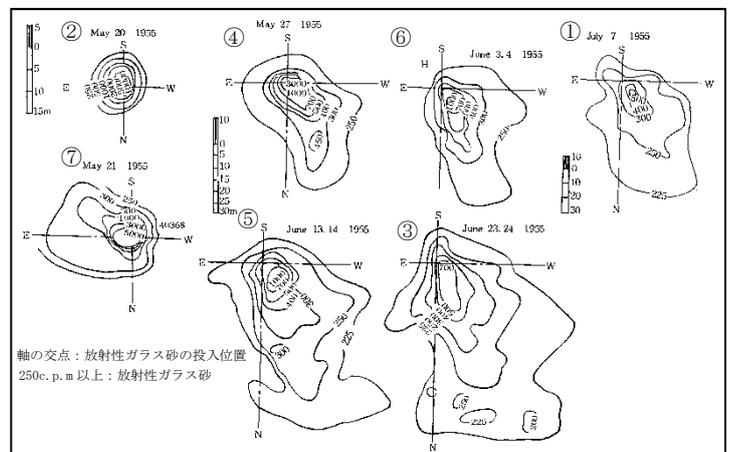


図-4 放射性ガラス砂の移動分布図（水深 6m、波高 2.5m 以上）

(エ) 土管屑を用いた調査

土管屑を用いた調査は昭和 35 年に実施された。土管屑は R. I を帯びたガラスと同様、一種のトレーサーであり、しかも安全でかつ安価であるため大量に投入できるという利点を持っていた。

調査地点は、図-5に示す東防波堤の東側2か所、西防波堤1か所であり、土管屑の移動を捕砂器等で追跡した。

主な調査結果は、以下のとおりである。

1. 東防波堤東側では、相当部分が東防波堤に沿って南西に流れ、一部は汀線側に送られる。
2. 西防波堤西側では、一部が西防波堤の内側に回り込み、その他は西 4,000m の範囲に流れついた。移動速度は非常に大きい。
3. 東 2,000m では、主に水深 7m より浅い部分を通って西へ動き、東 200m 付近から沖へ向かった。

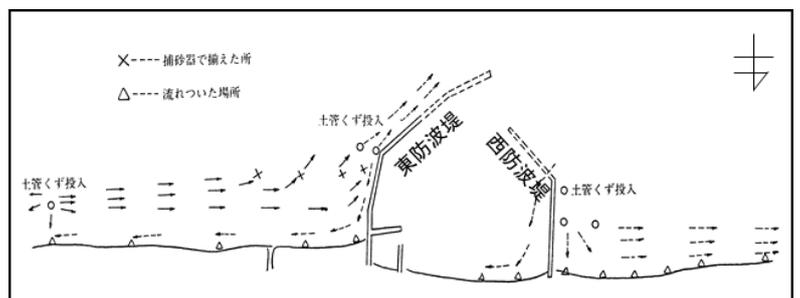


図-5 調査位置

(オ) 捕砂器を用いた調査

苫小牧港では、数種類もの捕砂器を考案し、漂砂の限界水深等について更に詳細な調査が行われた。調査地点を図-6に示す。

代表的な捕砂器の一つである円筒型捕砂器を用いた昭和 35 年の調査結果は、以下のとおりである (図-7 参照)。

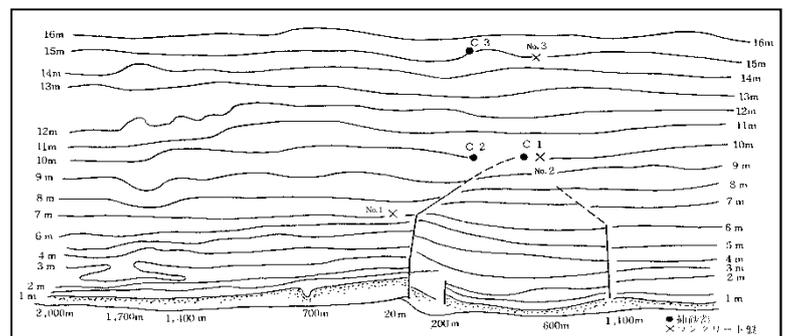


図-6 調査位置

1. 東防波堤の西側 300m 及び 600m で水深 10m 地点に設置した捕砂器には、孔の高さ 85cm の部屋にも一杯土砂が詰まっており、相当動きの激しいことが分かる。
2. 東側 300m の水深 15m 地点でも漂砂の移動がある。

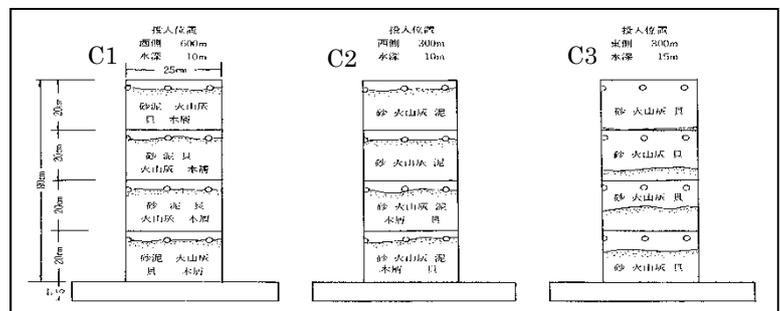


図-7 円筒型捕砂器

(カ) コンクリート盤を用いた調査

苫小牧港では、コンクリート盤を利用した漂砂の限界水深に関する調査も行っている。この方法は、1.5m×1.5m×0.1mのコンクリート盤を海底に沈め、一定期間後に盤周辺における砂の堆積状況を調べて砂の移動を把握するものである。調査地点を図-6に示す。

昭和36年10月から11月に行った調査結果は、次のとおりである。

1. No. 1（水深7m）は盤上18cm、No. 2（水深10m）は盤上29cmの堆積があったが、No. 3はコンクリート盤が露出していた。この期間に波高3.7mの波がSSWより来襲している。

2. その後の調査では、No. 1が29cm、No. 2が25cm堆積しており、No. 3は前回と同様に露出している。この期間に波高2.8mの波がSE方向より来襲している。

ラジオアイソトープを用いた調査では、水深9mでは砂がほとんど動かないと報告されていたが、「捕砂器による調査」及び「コンクリート盤による調査」から水深10mでも相当の漂砂があり、砂の移動する限界水深は15mくらいということが判明した。この成果は、昭和39年の港湾審議会第20回計画部会に提出された防波堤計画決定の根拠の一つとなった。

(キ) 蛍光砂を用いた調査

蛍光砂による調査は、他港においても行われており、苫小牧港では昭和41年度から調査を実施した。調査は、現地の砂を用いて蛍光砂を製作・投入し、数日を経て海底砂を採取してその中に含まれている蛍光砂数をカウントした。

主として防波堤周囲、先端付近に着目した調査を行った結果、水深12m以深まで防波堤がのびたことにより、先端をまわって移動する漂砂はほとんどみられなくなった。

(ク) 水理模型実験

a 建設省土木研究所による実験

昭和31年3月、建設省土木研究所赤羽分室に苫小牧港の1/50の縮尺の模型が製作された。これは苫小牧港建設の最大の問題である漂砂について模型を使って精密な実験を行い、埋没防止に対する科学的裏付けを得ようとするものであった（図-8参照）。

模型の規模は縦27m×横20mで、水深も実際の1/50である。造波装置は、水槽の片方に取り付けた造波板をピストン式の動力で動かし、波高3.5mの波まで再現することが可能であった。

主な実験結果は、以下のとおりである。

1. 波向S20°Wの場合には離岸流を打ち消す流れは発生しない。



図-8 建設省土木研究所での模型実験

2. 波向 $S35^{\circ} W$ の場合にも防波堤延長 200m では向岸流の発生には至らないが、延長 300m、400m の場合にはいずれの波に対しても離岸流は完全に打ち消されて明瞭な向岸流が形成される。

3. 向岸流の流速は、現地換算で $0.3\sim 0.5\text{m/s}$ 程度である。

こうした実験結果は、その都度苫小牧港に報告され、アイソトープなどの資料と共に防波堤工事の決定に使われ、最初の計画である水深 9m までの延長を、将来を考えて水深 12m まで変更する資料となった。

b 北海道開発局土木試験所による実験

(a) 防波堤配置に関する実験

昭和 32 年、苫小牧港の当面の目標が石炭の積み出し及び製鉄基地の誘致に置かれ、航路水深を 12m とすることが決定された。これに伴い、防波堤配置に関する実験が昭和 33 年に北海道開発局土木試験所で行われた。

主な実験結果は、以下のとおりである。

1. 東防波堤の法線は、内港港口から $S17^{\circ} W$ 方向に沖側へ引いた線と水深 12m の等深線の交点まで先端を延長する。

2. 西防波堤法線は、航路両側線上で水深 10.5m ないし 9m まで東防波堤基部に平行に配置すれば、SE 波に対して約 30%、SW 波に対して約 50% の静穏度を期待できる。

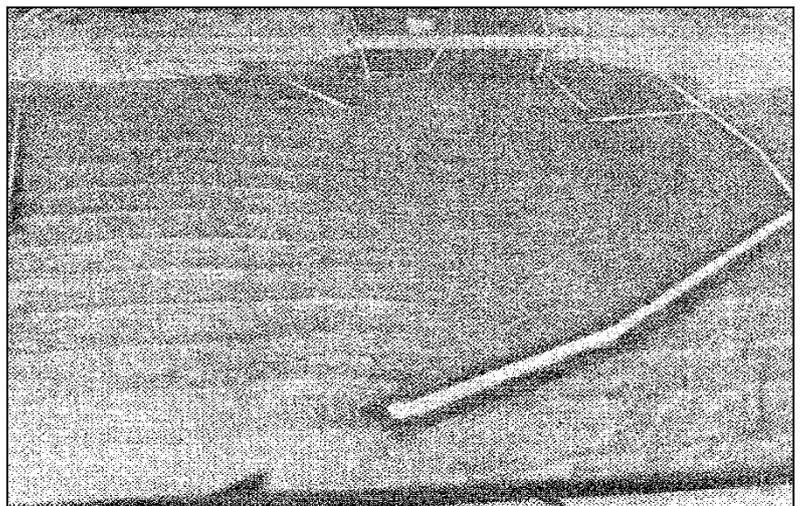
これらの実験結果を基に、運輸省と北海道開発庁の間で法線に関する協議会が持たれ、昭和 33 年 11 月、当面水深 9m 航路を早急に整備することを目的に防波堤計画が変更された。

(b) 構造物による反射波防止に関する実験

昭和 33 年 11 月に変更された防波堤計画に対し、浚渫の進捗に伴い、岸壁からの反射波が内港泊地の静穏度にどのような影響をもたらすかを検討する実験が昭和 34 年に北海道開発局土木試験所で行われた（図－9 参照）。

実験は模型縮尺 1/200、実験波は S 波と SW 波の 2 種類で、5 種類の浚渫区域を設定して行われた。

主な実験結果は、いずれの波向、いずれの浚渫区域に対しても、内港における静穏度は岸壁構造にあまり左右されず荷役可能な範囲にあることが確認された。



図－9 北海道開発局土木試験所での模型実験

c 苫小牧港湾建設事務所による実験

苫小牧港湾建設事務所では、長年にわたり漂砂に関する現地調査を実施していたが、全体的な漂砂の傾向を把握するため、事務所構内に模型水槽を製作し、昭和 35 年～36 年にかけて実験が行われた（図-10 参照）。

模型縮尺は水平 1/120、垂直 1/100 の歪模型で、実験波は SSE 波、S 波、SSW 波の 3 種類で行われた。また、流れの追跡には過マンガン酸カリウム、ノコ屑等を使用した。

主な実験結果は、以下のとおりである。

1. 波向 SSE で西向きの流れを与えた場合、沖波が港内に充分入り、港内に時計廻りの強い流れを発生させる。この流れは、沖の漂砂を持ち込み、また、港内西側の汀線付近を浸食させる。
2. 波向 S で西向きの流れを与えた場合、防波堤東側 500～600m 付近に沖側の流れを生じ、東方より運ばれた漂砂は沖に押し出される。
3. 波向 SSE の波による港内の流れは、計画どおり防波堤が完成すれば港内波高が小さくなり、早い流れも見られなくなる。

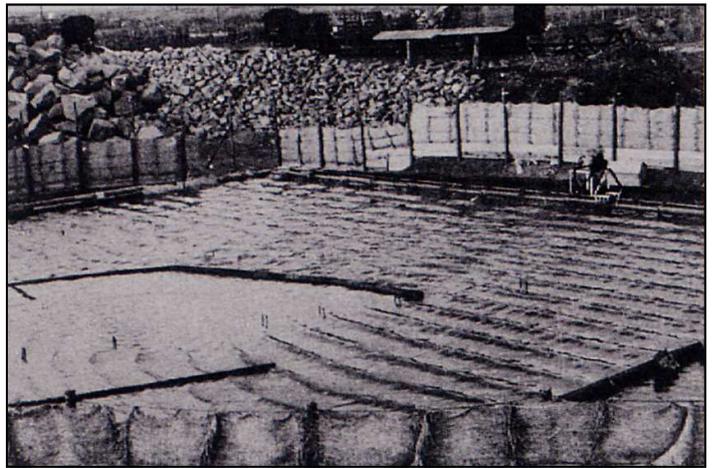


図-10 苫小牧港湾建設事務所での模型実験

この苫小牧で掘込式港湾を整備した際の漂砂調査の知見と経験は、その後に開発された掘込式港湾の鹿島港や新潟東港の整備に大きく貢献することとなった。

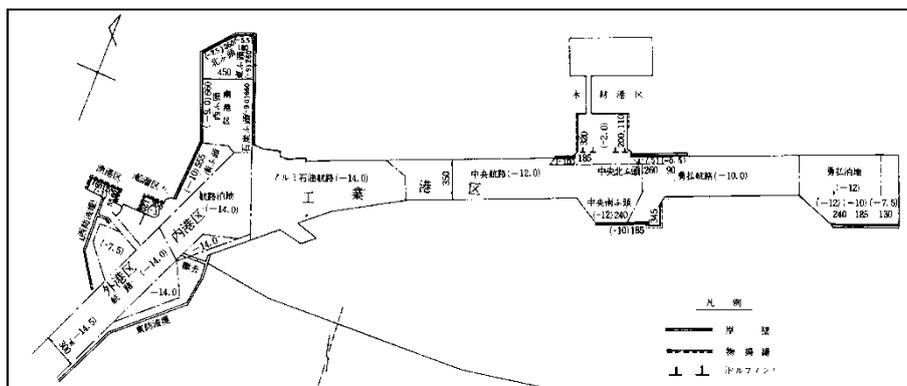
イ 苫小牧港西港区掘込み工事

(ア) 技術概要

苫小牧港の建設は、大正 13 年に林千秋氏が勇払に内陸掘込型の石炭積出港を建設すべしという「勇払築港論」を提唱したのが端緒とされている。以来、これを道標に幾多の構想と曲折を経た後、昭和 26 年に『世界で初めての大規模な掘込式港湾』として着工された。

掘込工事は、昭和 31 年度に国の直営事業で開始された。その後、昭和 35 年度から本格的な内港掘込みに入り、浚渫土砂量も大量となり、直営工事のほか、請負工事による浚渫が実施されるようになった。請負工事では、陸上機械で掘削する方法と水面下を浚渫船で揚土する方法が採用され、合計で約 7,200 万 m³もの膨大な土量が掘削（浚渫）された。

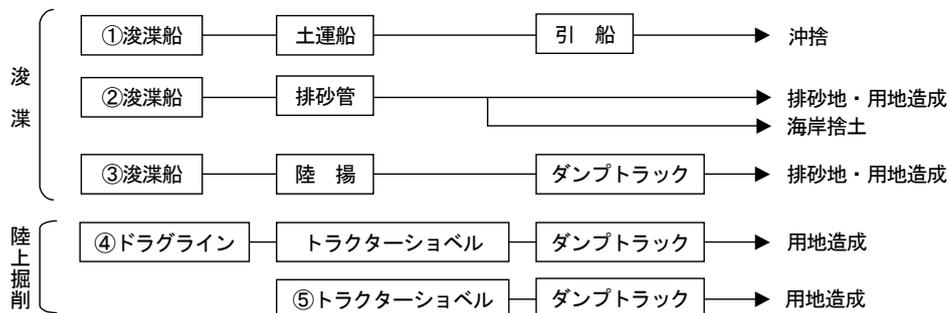
図－1 に西港区の水域施設平面図を示す。



図－1 西港区の水域施設平面図

(イ) 掘込工事の施工方法

掘込工事は、土質、地盤及び土砂処理方法の条件等により、図－2 に示す 5 種類の方法で行われた。その方法は、内陸部の表面から水深 2m～4m までを陸上機械で掘削する方法と水面下を浚渫船で揚土する方式に大別される。



図－2 施工方法

(ウ) 陸上機械による掘削

内港掘込みが開始された昭和 35 年度は、ポンプ浚渫船のみによる工事が行われた。しかし、周辺の地盤は標高+4m~+8mであり、土質は上層 1~2m が火山灰、その下層は泥炭層、粗砂、砂礫、火山灰の互層をなし、N 値は 30~60 と硬いため、ポンプ浚渫船による工事では以下のような障害が発生した。

1. 砂礫層の部分で浚渫船の能力が著しく低下し、排砂管内で沈降現象を起した。
2. 標高が高いため、浚渫作業中に前面の法勾配が急峻となり、土塊がカッター上に崩れ落ちて吸入管が一時的に閉塞状態となり、浚渫が不可能となった。

このため、翌 36 年度以降は、砂礫層より上部は作業効率が良く、経済性も高い陸上機械による掘削方式を採用した。掘込み定規図を図-3 に示す。

施工方法は、以下のとおりである。

1. 高潮位+1.5m を考慮し、標高+2m 以上の上層部は、パワーショベルまたはトラクターショベルで掘削してトラック運搬した。
2. 標高+2m~-3m 間の中層は、試験掘りの結果からドラグラインにて掘削し、トラクターショベル積込みをしてトラック運搬した。
3. 標高-3m 以下は、従来のポンプ浚渫船で行った。

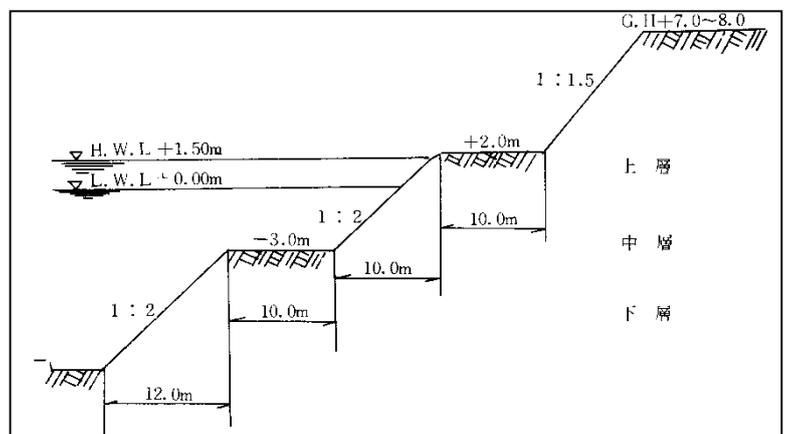


図-3 掘込み定規図

(エ) 中継ポンプによる浚渫工事

昭和 35 年の使用作業船は、排水トン数 885 トン、ポンプ馬力 1,800ps の電動式の浚渫船であった。

初年度の工事実施の結果、①土質・地盤条件による能力の低下、②浚渫船のポンプの問題による能力の低下が露呈した。

①の現場条件に対しては、前述の陸上掘削工法を用いた。②のポンプの問題に対しては、北海道の 50 サイクル電力に対応したモーターに取り替えるとともに、今後の排送距離の延伸を考慮して中継ポンプを設置し、加圧、継送する工法が採用された (図-4、5 参照)。

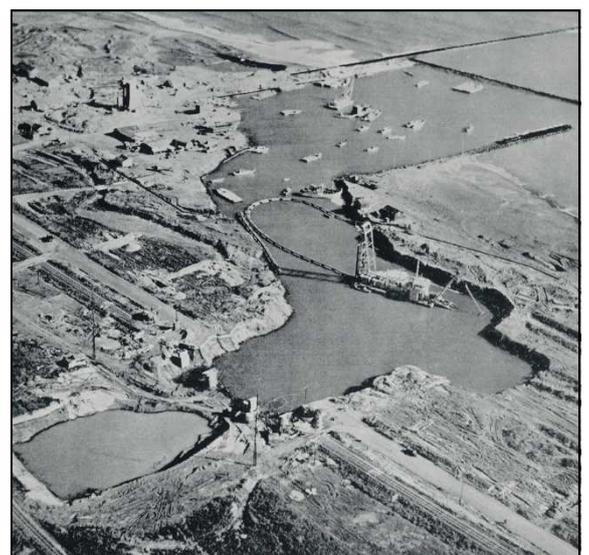


図-4 浚渫作業状況 (昭和 36 年)

中継ポンプ施設は、昭和 36 年 6 月に建設に着手し、7 か月後の 12 月より試運転を開始した。中継ポンプを用いた浚渫工事は、その後、昭和 39 年まで続けられ、その土量は 237 万 m³に及んだ。

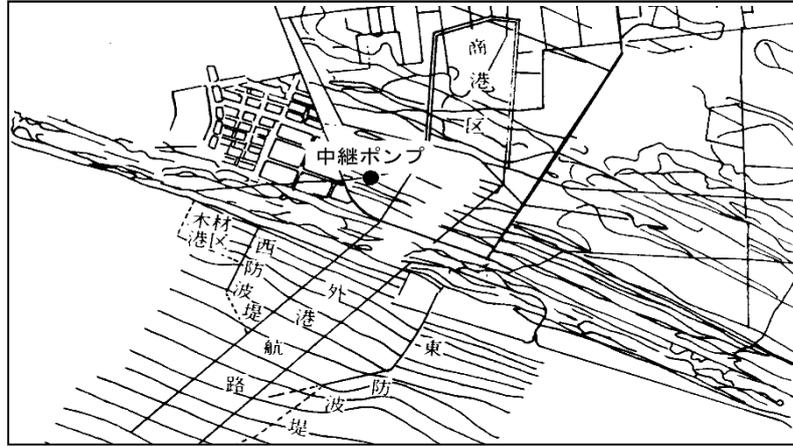


図-5 中継ポンプ位置図

(オ) 低揚程ポンプ浚渫船と自航土運船による浚渫工事

昭和 40 年度から工業港区の掘削に着手したことに伴い、航路水深の増加、年間事業量の増加により、浚渫土量も大量となった。このため、昭和 36 年度以降実施してきた中継ポンプ式の施工方法では対処しきれなくなり、大量の沖合投棄を行うこととなった。

施工方法は、図-6 及び図-7 に示すポンプ浚渫船、積込み台船及び土運船の組合せ方式である。積込み台船は、土運船の係留とポンプ浚渫船から送られた土砂を土運船に積込む吐出口を設置するための台船であり、自航土運船は浚渫土砂を沖合投棄場所まで運搬するものである。

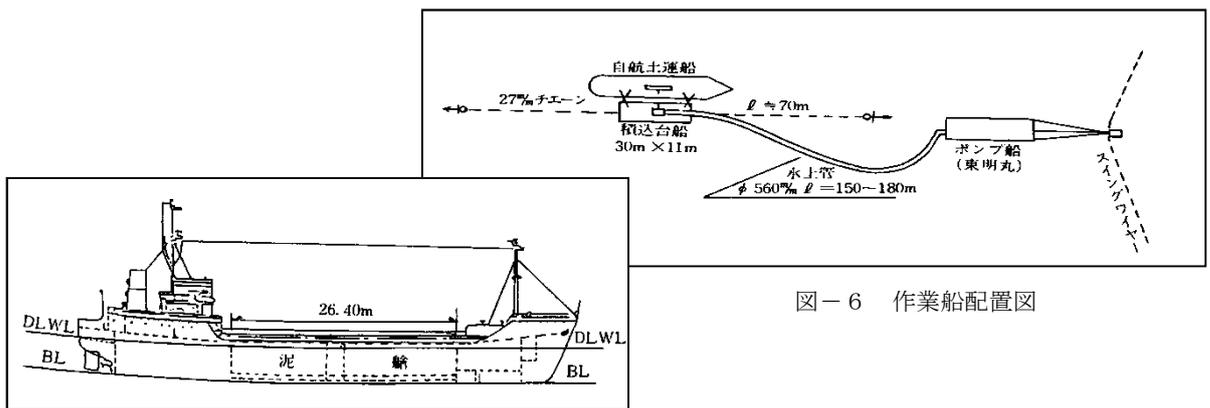


図-6 作業船配置図

図-7 自航土運船構造図

(カ) 土砂処理について

掘込工事に伴う浚渫及び掘削土砂量は、表－1に示すとおり、全体で約7,200万m³に及んだ。

表－1 年度別陸上掘削・浚渫土量

単位：千m³

年 度	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	合 計
陸上掘削土量	78	1,421	1,306	1,775	1,468	1,976	2,199	3,545	3,148	3,412	
浚渫土量	572	901	1,580	1,294	1,424	1,241	1,085	1,795	2,381	3,582	
計	650	2,322	2,886	3,069	2,892	3,217	3,284	5,340	5,529	6,994	
年 度	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
陸上掘削土量	2,933	5,366	4,859	3,490	739	1,080	561	205	123		39,684
浚渫土量	3,592	4,503	3,965	2,118	795	473	202	123	181	85	31,892
計	6,525	9,869	8,824	5,608	1,534	1,553	763	328	304	85	71,576

この膨大な土砂の処理方法として、表－2に示す四つの方法が行われた。

表－2 土砂処理方法

処理方式別の土量は、用地造成と沖合投棄で全体の86%に達する。以下に、それぞれの土砂処理方法の概要を述べる。

a 海岸養浜

西防波堤西側海岸の海岸侵食防止対策として、掘削土砂及び浚渫土砂による補給を行った。なお、この方法は、沖合投棄に伴う漁業調整と絡み、昭和46年以降中止された。

b 用地造成への流用

掘削土砂及び浚渫土砂は、西港臨海工業用地内の低湿部の埋立て及び工業用地の嵩上げで処理するものと、明野地区の準工業用地造成及びウトナイ地区の工場要員住宅用地造成に流用された。なお、土砂運搬に対し、道路の損傷、交通事故の危険性等による社会不安の増大や交通密度の増大が懸念されたため、専用運搬路（立体橋）を架設して対処した。

c 沖合投棄

昭和35年から実施された海中投棄は、昭和41年に沿岸漁業への影響が問題視され、漁業関係者との折衝が開始された。その結果、沖合投棄は漁業権の制限に係る補償金2億7,300万円を支払うことを条件に、昭和49年度末まで続けられた。その後は、漁業者側の同意が得られず中止された。

沖捨てによって形成されたマウンドは、その後、漁業者への聞き取り調査によれば、カレイなどの良好な漁場となっているとのことである。

処理方法		処理量(千m ³)
①	養 浜	7,733
②	海上投棄	24,785
③	用地造成	37,176
④	そ の 他	1,994
合 計		71,688

ウ 海洋性水中コンクリートの施工技術

港湾・漁港構造物の築造に係る水中部のコンクリートの施工方法は、大別するとプレパックドコンクリートと水中コンクリートとに分けられる。当局管内においては従来、プレパックドコンクリートによる施工がほとんどであったが、平成になってからは、熟練労働者や経験豊富な潜水士の不足、施工期間の制約等の理由から、水中コンクリートによる施工の提案が増加してきており、実際に施工された例も見受けられるようになった。この当時は水中コンクリートの当局管内における施工実績が少なく、標準とされる施工技術の近代化が遅れており、施工の良否によって品質が大きく左右されることから、より確実な品質管理を行うため、統計的に把握されたデータを基にした、新たな施工技術の開発が望まれていた。

以上のような背景から、平成元年度～２年度において、技術活用パイロット事業「海洋性水中コンクリート技術開発試験」として位置付け、実構造物での施工を基に配合や施工方法、品質等に関する各種技術データを収集・解析し、施工技術向上の検討を以下のとおり実施している。

(ア) 水中コンクリートの概要及び特徴

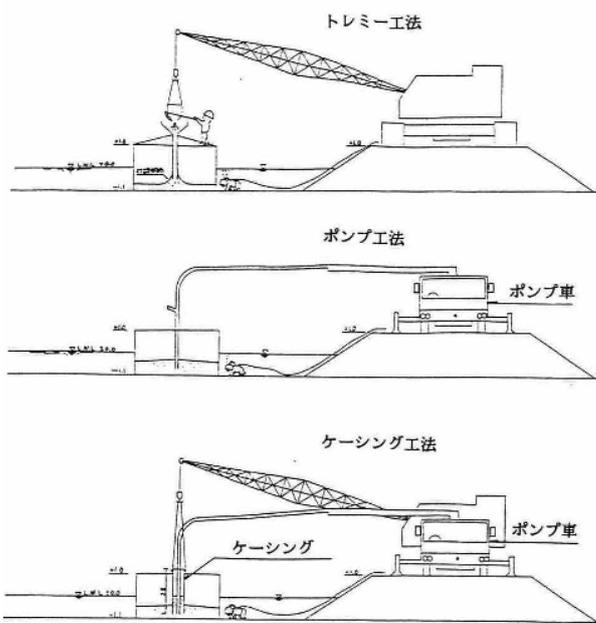
水中コンクリートは、陸上管理の普通コンクリートを直接水中に打設する工法であり、打設方法としては、トレミー工法とコンクリートポンプ工法とがある(図－１参照)。この検討では、現場での施工実態等を踏まえて後者に重点を置く。また、コンクリートの水中落下防止効果を期待して、吐出管の数倍の直径を持つ鋼製のケーシングを用いたポンプ工法(以下「ケーシング工法」という。)についても採用している。

本工法の長所としては、

1. コンクリートポンプ車又はミキサ船のコンクリートポンプによる機械施工が主となるので、施工能率が高く、大量施工が可能となる。
2. プレパックドコンクリートに較べて、施工工程が少なく、工期短縮が可能となる。
3. プレパックドコンクリートの場合、モルタル漏えい時の処置が困難であったが、この工法ではコンクリートの漏出はほとんどない。

といったことが挙げられるが、一方で以下のような不明な点があることから、平成元年から２年までの２か年のパイロット事業では、これらの解明に主眼を置いて各種データの収集を行った。

- ① 今までコンクリート品質に関する統計的な把握がなされていなかった。
- ② コンクリートの粘性・打設方法の良否がレイタンスの発生量に影響し、構造物の上面管理が問題となる。



図－１ 水中コンクリートの打設工法

- ③ コンクリート打設開始時あるいは打設途中でのトラブル発生における材料分離が懸念される。

(イ) 現地構造物調査の概要

(ア) で示した①～③の事項を解明するため、平成元年度から2年度のパイロット事業では次のような試験を実施するとともに、各種施工データの収集を行った。

1. 圧縮強度試験

コンクリートの品質を評価する一つの指標として強度を調べることとし、構造物から平面方向及び鉛直方向に複数のコアを抜き取り、圧縮強度試験を実施した。

2. 凍結融解試験及び空気量測定

コンクリートの品質を耐久性の面から評価するために、とりわけ北海道の場合は耐凍害性が問題となることから、構造物の部位のなかでも影響を受けやすい上面付近からコアを抜き取り、凍結融解試験を実施した。また、耐凍害性と空気量とは密接な関係にあることから、コアの一部を用いて空気量測定を行った。

3. 構造物内温度測定

本工法による構造物はマスコンクリートであることが多いことから、水和熱の発生が問題となる。そこで、コンクリートの表面及び内部の温度測定を実施した。

4. 打設状況及び汚濁拡散状況

より良い品質のコンクリートを確実に打設する方策を検討する基礎資料とするため、実施工の打設状況を調査した。また、周辺環境への影響を把握するため、コンクリート打設時の汚濁拡散状況を調査した。

以下に、各年度におけるパイロット事業及び実施した試験の概要を示す。

a 平成元年度の調査

平成元年度は特に数多くの圧縮強度を調べることに力点を置き、パイロット事業として4港5工事20スパン（各工事4スパン）の本体コンクリートの施工を行うとともに、そのほかに15港において水中コンクリートによる61個の根固方塊の製作を行った。各種配合及び打設工法について、従来の規定に較べて、とりわけ単位セメント量を低減させた条件を設定している。パイロット事業ではトレミー、ポンプ工法のほかに、1港2工事のみケーシング工法を用い、2種の単位セメント量と組合せて20スパンの施工を行っている。また、試験等は次の要領で行った。

1. 圧縮強度試験

現場で打設された本体コンクリート及び根固方塊より、コアボーリングを行い、材齢28日で圧縮強度試験を行った。ただし、根固方塊は上下2か所のみを行った。

2. 打設状況及び汚濁拡散状況

現場担当者を対象として実施したアンケート調査により、これらの把握を行った。

b 平成2年度の調査

平成2年度は元年度にも実施した圧縮強度に加えて、凍結融解試験や構造物温度測定も実施す

ることとし、パイロット事業としては4港5工事36スパン（6スパン×2工事+8スパン×3工事）を施工した。試験等の概要を以下に示す。

1. 圧縮強度試験

平成元年度と同様、本体コンクリートより、コアボーリングを行い、材齢28日で圧縮強度試験を実施した。

2. 凍結融解試験及び空気量測定

2スパンにおいてコアボーリングを行い、材齢28日で凍結融解試験及び空気量測定を実施した。

3. 構造物内温度測定

1港において、打設したコンクリート内に温度センサーを取り付けて、打設直後から35日間にわたってコンクリートの温度測定を行った。

4. 打設状況及び汚濁拡散状況

平成元年度と同様に、打設状況及び汚濁拡散状況の把握を行った。

(ウ) 調査結果及び考察

各項目の調査結果及び考察は、以下に示すとおりである。

a 圧縮強度

(a) 標準供試体とコア供試体との強度比特性

単位セメント量と、標準供試体とコア供試体の圧縮強度の比（以下「強度比」という。）との関係を表したのが図-2である。データは平成元年度の試験により得られたものであり、コア供試体強度は一つの構造物から得られた圧縮強度の平均値が用いられている。図-2によると、セメント量と強度比との間には強い相関関係は見られず、単位セメント量270~370kg/m³の範囲の中では、気中から水中への打設後の圧縮強度の変化の度合いは、セメント量には依存しないものと思われる。

(b) 単位セメント量と圧縮強度の関係

図-3は、平成元年度の試験結果を用いて、単位セメント量と構造物の圧

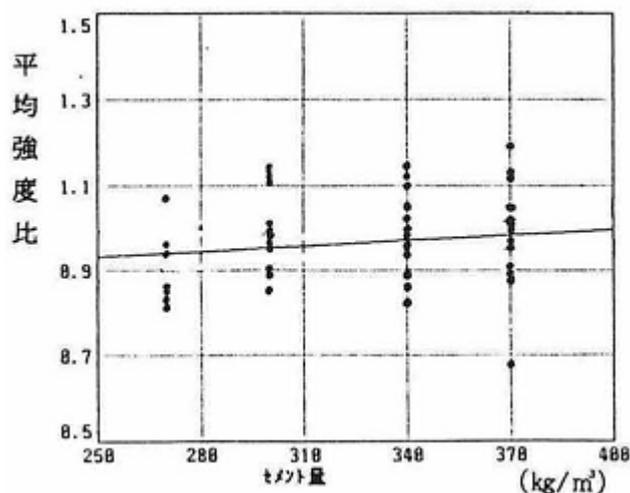


図-2 単位セメント量と強度比の関係

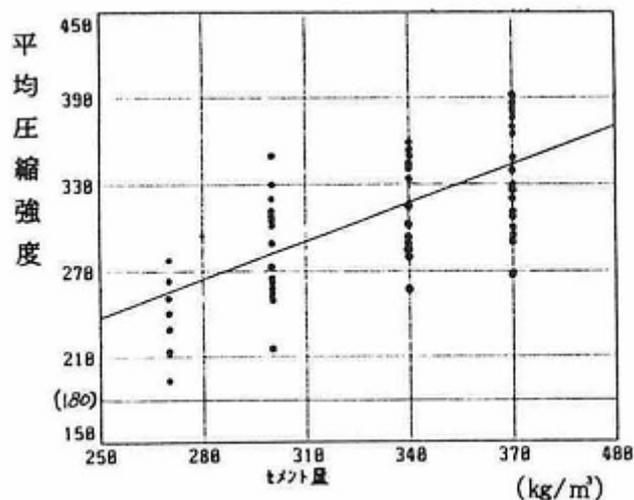


図-3 単位セメント量と圧縮強度の関係

縮強度の平均値との関係を表したものである。単位セメント量とコア供試体との間には強い相関関係があり、この図によると、セメント量を $10\text{kg}/\text{m}^3$ 減じると、圧縮強度は約 $9\text{kg}/\text{cm}^2$ 落ちることになる。

一方、水中コンクリートを用いて築造する通常の港湾・漁港の構造物は現在主にプレパッキングドコンクリートで施工されている防波堤や係船岸の本体であり、これらは設計基準強度として $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ という値が用いられてきた。そこで、本工法で施工する構造物に求められる圧縮強度の目安を $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ として現地構造物の強度がこの値に対してどの程度の強度を有しているか、図-3 で見てみる。図-3 で用いた圧縮強度は構造物の平均値であるが、平均値では単位セメント量 $270\text{kg}/\text{m}^3$ の場合であっても圧縮強度は $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ を上回っている。ただし、各個のコアでみると、 $270\text{kg}/\text{m}^3$ の場合では $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ を下回るものがあった。なお、2年度においても $300\text{kg}/\text{m}^3$ の施工を行っているが、各個のコアでみても、 $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上の強度は得られていた。

(c) 打設工法間の圧縮強度の比較

トレミー、ポンプ、ケーシングの3工法をパイロット事業の中で実施した平成元年度の試験結果を用いて打設工法間の圧縮強度の比較を行う。

図-4 は、パイロット港全4港において、3個のコア供試体の圧縮強度平均値をトレミー、ポンプの2工法間で比較したものである。全体的にポンプ工法の圧縮強度の方が大きくなっている。

次に、トレミー、ポンプ、ケーシングの3工法間の圧縮強度で比較したのが図-5 である。図をみると、トレミー→ポンプ→ケーシングの順に強度が大きくなっている傾向が伺える。ただし、ケーシング打設は1港のみでしか実施していないため、データ数は少なく、また、現場での施工特性が強く反映されている可能性があることを考慮しなければならない。

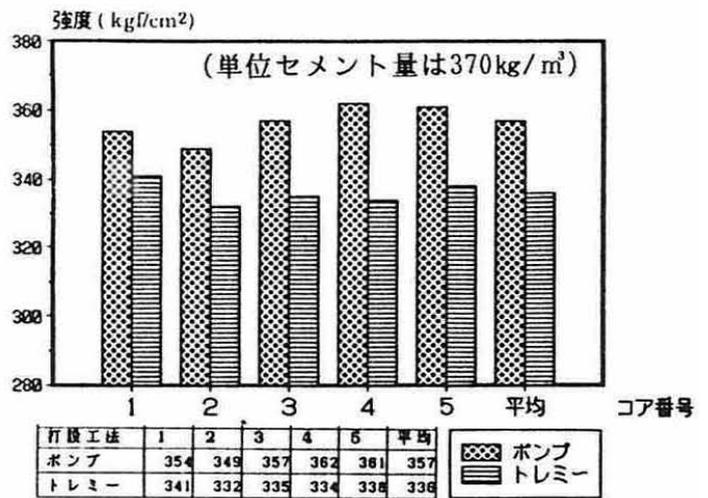


図-4 トレミーとポンプ工法の圧縮強度の比較

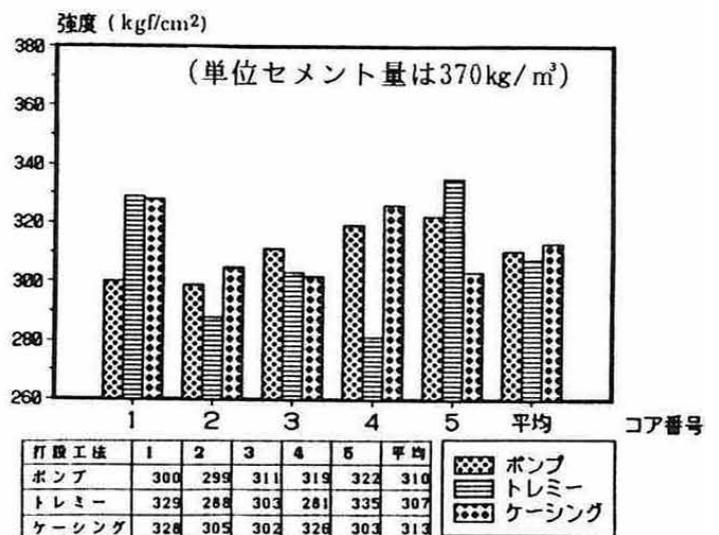


図-5 打設工法の違いによる圧縮強度の比較

(d) 構造物内各部における強度比較

構造物より採取された複数個のコア供試体の圧縮強度を、鉛直方向及び水平方向で比較し、構造物内の強度分布では、鉛直方向での強度分布に際立った特徴は見られなかった。

また、水平方向の圧縮強度を比較すると、距離が大きくなるにしたがい強度比は低下する傾向にあり、打ち込まれたコンクリートが流動する間に品質が低下していく様子が伺えた。

b 耐凍害性及び空気量

(a) 圧縮強度と耐久性指数の関係

圧縮強度と凍結融解試験により得られた耐久性指数との関係を図-6に示す。耐久性指数の分布に着目すると、耐久性指数の低い耐凍害性の劣る結果もある。また、圧縮強度と耐久性指数の相関はほとんどなく、また、港により耐久性指数が偏っていたり、ばらついていたりすることから、耐凍害性は、単位セメント量や水セメント比以外の配合条件や、施工の方法などに大きく左右されている可能性がある。

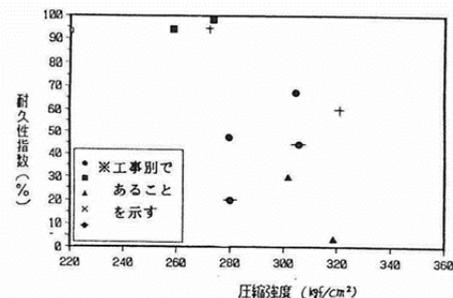


図-6 圧縮強度と耐久性指数の関係

(b) 細骨材率と耐久性指数との関係

一般に、細骨材率を大きくすると材料分離抵抗性が増加することから、細骨材率と耐久性指数の関係(図-7)についてみると、細骨材率が43%程度を超えた辺りから耐久性指数が大きな値を示し、細骨材率を大きく設定することは、コンクリートの耐凍害性の増加に寄与している可能性があると考えられる。

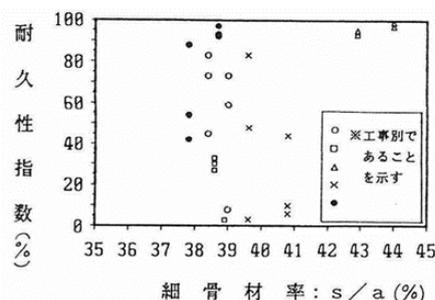


図-7 細骨材率と耐久性指数の関係

(c) 空気量と耐久性指数の関係

空気泡が適切に連行されたコンクリートは、凍結融解作用に対して有利であるといわれていることから、空気量と耐久性指数の関係についてみると、空気量が多い場合では耐久性指数の大きいものが多いという傾向が伺え、一般的にいわれていることと合致している。

c 構造物内温度

コンクリート打設後の温度変化では、温度ピーク期間は材齢3～7日で、温度は約60～80℃であるなど、傾向はほぼ同じであり、セメント量の違いによる差は見られなかった。

d 打設状況及び汚濁拡散状況

打設状況については、現場担当者を対象とした施工に関するアンケート調査を行った。その結果、今回の検討で採用したケーシング工法の長所を示す意見が多かった。それらをまとめると次の2点になる。

意見① ポンプ輸送管はケーシング内にあるため、輸送管の動揺による打ち込まれたコンクリ

ートのかき乱しが防止できた。

意見② ポンプ吐出口より出たコンクリートは、一度ケーシング内に貯留され、その後連続的に打ち込まれるが、ケーシング内はドライ状態であることから、コンクリートの水中落下が防止できた。

そのほかには、単位セメント量と施工性に関するものとして、単位セメント量が $300\text{kg}/\text{m}^3$ 以下においては管内が閉塞する場合がある、という意見が出されていた。汚濁拡散状況についても調査を行ったが、特に施工上問題となることを示す意見はなかった。

現地構造物から得られたコアを用いて実施した試験結果をまとめると、次のようになる。

1. 水中へ打設されたコンクリートの圧縮強度は、水の洗い出し作用を受けやすく、陸上のそれに較べて低下する傾向がある。しかし、その強度は、 $180\text{kgf}/\text{cm}^2$ （想定される構造物の設計基準強度）を目安とすると、単位セメント量を従来から用いられてきた値を減じ $340\text{kg}/\text{m}^3$ としても、さらに、特に流動性に留意するならば $300\text{kg}/\text{m}^3$ の場合であっても、確保されるものと思われる。
2. 水中コンクリートの施工に当たっては、とりわけコンクリートの水中落下防止措置が重要である。この点においてケーシング工法は、従来のトレミー、ポンプ工法に較べて優れている。ケーシング工法は、また、打ち込まれたコンクリートのかき乱し防止に対しても有効であることから、本工法を用いることにより意見①の品質の確保がより確実になるものと思われる。
3. 凍結融解試験を実施した結果、耐凍害性に劣るものがあった。その原因は明らかではないが、細骨材率や空気量の増大等が良い影響を及ぼす可能性がある。

海洋性水中コンクリートは、これらの調査による知見及び東京大学の岡村甫教授を委員長とする委員会より御助言を頂戴し検討を進め、「海洋性水中コンクリートの手引」として取りまとめられている。

その打設方法は、品質確保が確実なケーシング工法を基本的な工法とし、多くの港湾・漁港構造物として施工され、海洋性水中コンクリートの普及と品質向上に寄与している。

エ 釧路港島防波堤エコポートモデル事業

(ア) 釧路港におけるエコポートモデル構想

旧運輸省港湾局は平成6年8月に、近年の水質環境の悪化や地球環境への認識の高まりなどを背景に、新たな港湾環境政策「環境と共生する港湾<エコポート>」を策定した。この政策を早期に実現する観点から、全国の規範となる港湾において、港湾環境インフラの整備を総合的・先行的に行うエコポートモデル事業が創設された。

このような背景の下、釧路港では港湾計画の改定(平成8年12月)に際し、課題となっていた西港区の拡張と水産業の発展・安定の両立を図るため、本構想を港湾整備に積極的に取り入れることとした。平成10年6月に、釧路港西港区がエコポートモデル港に指定されるとともに、島防波堤がコスト縮減と環境に配慮した「水生生物との協調型防波堤」としてエコポートモデル事業に認定され、全国初の防波堤構造として整備を進めることとなった(図-1)。



図-1 釧路港全体平面図

(イ) 島防波堤の概要

a 港湾計画における防波堤の配置

西港区の防波堤配置計画は当初、経済性の観点から既存の南防波堤を航路と平行に延伸する案が検討された。しかし、潮流が変化し航路及び漁業への影響が懸念されることから、航行船舶の安全確保、更には、周辺漁場や漂砂などに最も影響が少ないと考えられる島防波堤案が「環境に変化のない港づくり」として採択されることになった(図-2)。



図-2 防波堤の配置案

島防波堤の計画延長は2,500mで、背後マウンドは防波堤の施工による航行船舶への影響を考慮し、航路から300m程度離して、延長1,600m、幅100mとした(図-3)。

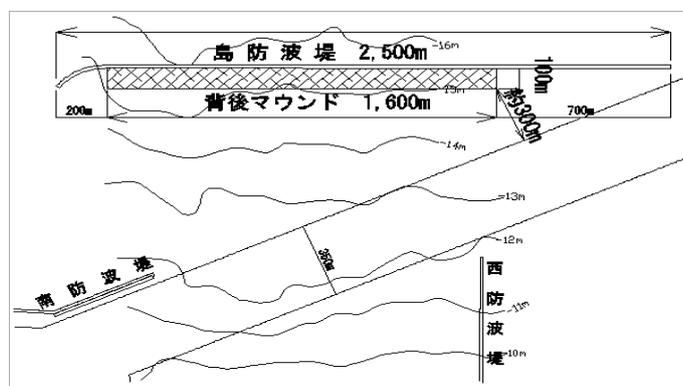


図-3 島防波堤の配置図

b 技術概要

図-4に、背後マウンドを有する島防波堤の標準断面図を示す。背後マウンドは、越波した波の影響を減じる打込対策部 40m、伝達波低減と海藻を繁茂させる藻場部 60m に大別される。背後マウンドは、港内側に土留堤を設置した後、水深約-15mの砂地盤から浚渫土砂を投入して築造する。その内、藻場部は水深-5mまで浚渫土砂を投入し、その上を雑割石及び大割石で水深-3mまで被覆し、最上部に越波の伝達波低減及び海藻繁茂機能を併せ持つ起伏ブロックを設置（最浅水深-1m）する構造としている。これにより、海藻類の光合成に必要な光量子の確保を図った。なお、島防波堤の構造は、産官学の有識者で構成した「釧路港島防波堤施設検討委員会」で検討を行い施工に反映した。

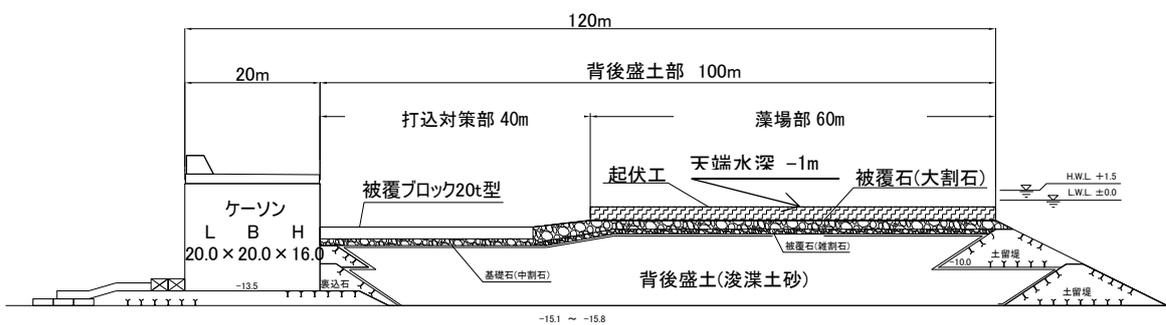


図-4 島防波堤標準断面図(実証試験区間)

c 島防波堤の建設効果

「水生生物との協調型防波堤」としての島防波堤は、本来の防波堤機能のほか、次のような「エコノミー（経済性）」と「エコロジー（環境）」の効果が期待できる（図-5）。

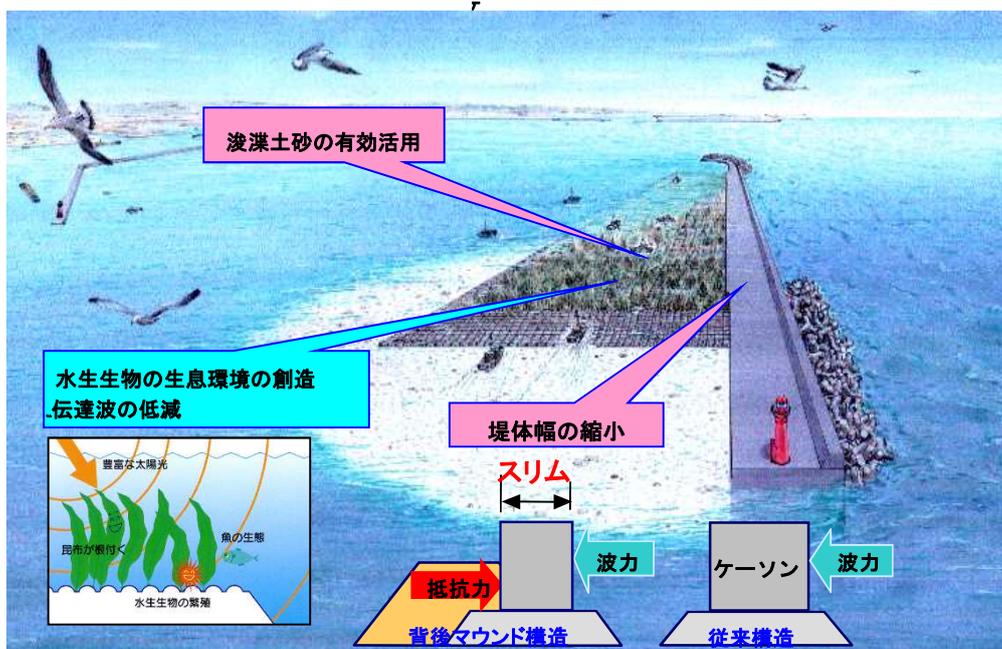


図-5 島防波堤のイメージパース

1. 浚渫土の有効活用

当初、釧路港の整備に伴って大量に発生する余剰浚渫土砂は陸上に処分する予定で、陸上処分費に多大な投資をする必要があった。しかし、水産協調型施設として整備することにより、約 100 万 m³の浚渫土砂を背後マウンドの盛土材として有効活用できるとともに、陸上処分による環境負荷回避（エコロジー）及び処分費用削減が図られる（エコノミー）。

2. 防波堤の堤体幅の縮小化

防波堤背後にマウンドを築造することにより、背後マウンドが波力に対する滑動抵抗力となることから、防波堤の堤体幅（ケーソン）は通常の防波堤に比べ2割程度スリムになり、建設コストの縮減が図られる（エコノミー）。

3. 新たな水生生物の生息環境の創出

背後マウンドの整備により水深-15mの砂地盤の海域に浅場ができ、そこに、海藻繁茂機能を持つ起伏ブロックを設置することにより、コンブなどの海藻類の定着が期待できる。また、防波堤背後及び起伏ブロックや被覆ブロックが水生生物の隠れ場所、産卵場、稚仔魚の保育場及び摂餌場となり、水生生物の生息環境の創出が期待できる（エコロジー）。

(ウ) 水生生物の生息環境の創造

釧路港島防波堤は、平成 10 年に直轄事業として我が国初のエコポートモデル事業（『環境と共生する港湾』）に認定され鋭意整備を進めてきた。令和 3 年 3 月現在、計画延長 2,500m のうち暫定的に 1,700m を施工し、そのうち背後盛土部は計画延長 1,600m のうち 100m が完成断面となっており、試験施工を行っている。

平成 18 年度以降、この試験箇所で生息環境調査を継続して実施しており、天然の藻場に比べてコンブ等の海生植物が豊富に生息し、また、アイナメやウニ等の海域生物の生息も多数確認され、海域生物等にとって良好な生育環境となっていることが確認されている（写真－1、2）。近年は、地球温暖化の緩和策として、光合成により二酸化炭素を吸収した海藻類が炭素の貯蔵庫として機能を発揮するブルーカーボンが注目されている。今後も背後盛土工事を継続して進め、釧路港島防波堤をフィールドとして、藻場における炭素固定量の算定や、UAV 等を活用した効率的な藻場分布調査手法などの技術開発も進めていく。



写真－1 海藻類の着生状況

写真－2 背後マウンドに生息する水生生物

オ 稚内港北防波堤ドームの補修

(ア) 稚内港北防波堤ドームの概要

稚内港北防波堤ドームは、稚内・大泊間の稚泊（ちはく）航路を利用する乗客を激しい越波から完全に守るため、昭和6年に着工し、昭和11年に完成した施設である。当該施設は、稚内市民の熱意により、昭和53年から3年間で基礎構造を残した形で再建され、さらに、平成11～14年に耐震補強工事を実施している。また、本施設は、平成13年に北海道遺産と平成15年に土木学会の選奨土木遺産に登録されており、歴史的にも価値の高い港湾施設として評価されている。

(イ) 技術概要

a 耐震補強工事

平成7年の阪神・淡路大震災を契機に耐震設計法が見直されたこと、また、多くの観光客が集まることから、安全性の照査により必要な耐震補強を行うこととし、平成9年の「稚内港護岸(防波) (北)耐震補強検討業務」委員会の設置により、保有すべき耐震性能の検討を行った。その結果、直下型地震のような極めて強い地震動に対しても、地震終了後には短時間で復旧できる耐震性能を保持する対策を講じることとなった。

耐震補強の課題として、支柱部の補強方法を選択する際に稚内港のシンボルであるドームの原形を守ることが重要な条件であった。そのため、外観と質感を従来と違和感のないものにするため、スパイラル巻き立て補強工法を採用した。また、既設支柱部の塩分量が多い表面から60mm以下の浅い部分をウォータージェットではつり、円柱状で直径が上下で異なる柱にPC鋼線をスパイラル上に巻き付けるため、自動巻き付け機を工事のために製作し、施工の効率化を図った。



写真－1 稚内港北防波堤ドーム



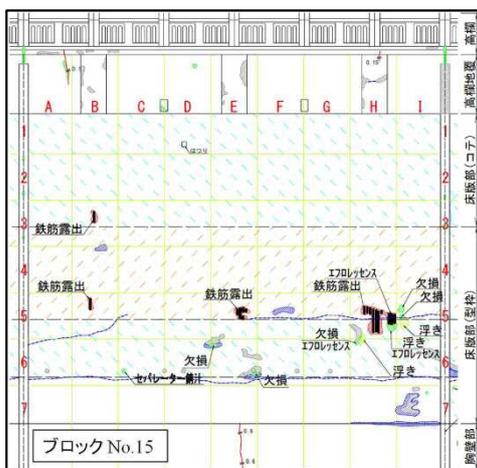
写真－2 PC鋼線自動巻き付け機

b 老朽化に対する補修工事

平成11年～14年に大部分のドーム内部の補修及び柱部の耐震補強を実施したが、昭和53年の全面改修からは約40年が経過し、ドームの港外側の劣化が進行し、また、コンクリートのひび割れにより美観も悪化していたことから、「稚内港北防波堤ドーム技術検討委員会」を設置し、調査及び補修方法に関する技術的検討を行った。

ドームの補修計画を立案するためには、維持管理に関するガイドライン等に示される一般的な劣化判定基準ではなく、構造物の特徴や環境条件を十分に考慮した判断基準が必要である。このため、安全性、使用性、美観・景観に配慮した劣化度判定と対策の検討手法として、施設を格子状（2m×2m）に区切り、ブロック単位で詳細な現況調査を行う劣化度マップによる手法が新たに提案された（図－1、2）。また、景観に配慮するため、ブロック単位の評価に基づき補修した場合の景観についてもCGにより確認した。

劣化度マップを用いることで、エリアごとによる補修工法の選択が可能となり、景観を踏まえた補修費用を最適化できる合理的な評価手法が整理された。



図－1 ブロック単位の劣化度調査結果

劣化度		A	B	C	D	E	F	G	H	I
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3	1	5	1	1	1	1	1	1	1
2	4	1	2	1	1	1	1	1	1	1
1	5	1	5	1	1	5	2	1	5	4
	6	1	1	2	3	3	3	1	4	2
	7	1	1	1	1	1	1	1	2	2

図－2 劣化度マップを用いたブロック単位の補修劣化度の評価イメージ

カ 津波漂流物対策施設

(ア) 津波漂流物対策の必要性

2004年12月、インドネシアのスマトラ島沖を震源とするマグニチュード9.0の大地震が発生し、死者・行方不明者を合わせて30万人以上という大きな被害をもたらした。地震により発生した津波は、停泊していた船舶を呑み込み、構造物を破壊し、更に危険な濁流となって市民や建物を襲った。その様子は各種メディアでも取り上げられ、全世界を震撼させた。

日本においても、いくつもの大規模地震の発生が危惧されており、これらの地震による津波発生の危険性が指摘されている。2005年6月当時、内閣府中央防災会議の専門調査会は、500年間隔で発生する地震津波が釧路地方に來襲する場合、最大10m以上もの高さになるとの試算を示した。また、前回の500年間隔地震から既に約400年が経過しており、北海道道東地方における津波対策は喫緊の課題となった。

これまでの津波防災対策としては、防潮堤や水門により、津波そのものを防ぐ手法が一般的に採られているが、前述のスマトラ島沖地震津波での被害の教訓より、津波によって運ばれる漂流物による被害を防ぐことが防災上、極めて重要であることが分かってきた。このため、津波來襲の危険が高い道東地域の3港湾（釧路港、十勝港、えりも港）において、平成19年から津波漂流物対策施設の整備を行った。

(イ) 技術概要

津波漂流物対策施設とは、防潮堤のように津波そのものを防御するのではなく、簡易な構造で水塊は透過させるが、漂流物を捕捉し、漂流物の衝突・散乱による被害の拡大を防ぐ新しい発想の減災技術である（図-1）。また、施設の基本構造は、支柱、捕捉スクリーン及び基礎から構成する単支柱構造で、車両や漁船などの漂流物の衝突エネルギーを各部材の変形により吸収するものである（図-2）。剛構造であるコンクリート製の防潮堤と異なり、漂流物の衝突エネルギーを鋼管支柱などの部材の変形によって吸収させる柔構造とすることで部材の縮小化及びプレキャスト化を図り、従来の津波対策の課題であったコスト縮減と整備期間の短縮化を可能とした。

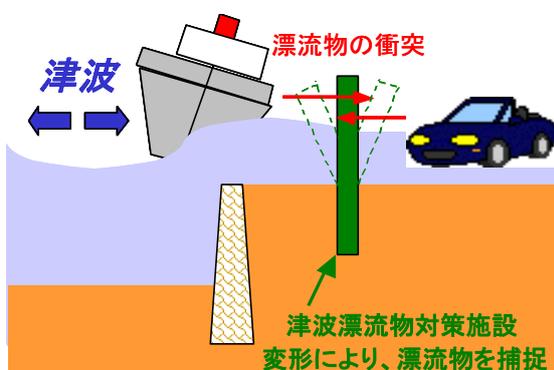


図-1 新たな津波漂流物対策施設のイメージ

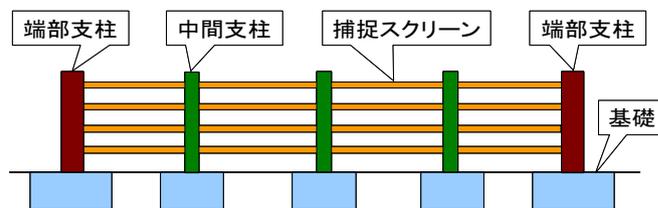


図-2 津波漂流物対策施設の基本構造

(ウ) 津波漂流物対策施設整備の効果

a 景観に配慮した構造

釧路港南地区に整備した津波漂流物対策施設（写真－１）は、幣舞橋やフィッシャーマンズウォーク（MOO）など釧路市の代表的な観光施設に近接していることから、基本構造の支柱と緩衝工の支柱を活用した天幕構造として整備し、市民、観光客及び漁船員の休息、イベント開催時などの常時利用、周辺景観にも配慮した構造とした。写真－２のように、天幕部を２頭のクジラが寄り添う形状とし、単支柱部の支柱に高低差をつけてクジラが波間を遊泳するデザイン（愛称：クーたん）とし、「減災とコスト縮減に着目した新たな津波漂流物対策施設」として、平成 20 年に全建賞（日本建設技術協会）を受賞した。



写真－１ 商業施設前に整備された対策施設



写真－２ 夜間のライトアップ状況

b 東日本大震災時の効果

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波において、3 港に整備した津波漂流対策施設の効果が確認された。えりも港と十勝港では、係留中の漁船が津波により陸上へ移動したが、津波漂流物対策施設により捕捉され、市街地側への漁船の流失を防いだ。また、釧路港では駐車している自動車も津波により移動、散乱したが、対策施設が捕捉し、海への流出を防ぐ効果を発揮した（写真－３）。



写真－３ 東日本大震災での捕捉効果(左からえりも港、十勝港、釧路港)

キ 小樽港北防波堤改良工事

(ア) 小樽港北防波堤の概要

小樽港北防波堤は、港湾工学の世界的権威である廣井勇博士の指揮・監督により、明治30年(1897)に第1期工事として着工し、明治41年に1,289mが完成した。

北防波堤は、調査・計画・設計・施工に至る全てが日本人の手によって実施された我が国初の本格的な外洋防波堤である。工学的に極めて価値の高い構造物であり、平成12年には土木学会推奨土木遺産に指定され、翌、平成13年には北海道遺産に選定された。北防波堤は建設から100年の歳月を経た現在でも、廣井博士が当時期待した機能を発揮し続けているが、平成15年度のマルチビームによる現況調査によって港外基礎部の階段形状を形成する捨塊(ブロック)の一部散乱とともに、基礎捨石や被覆石の洗掘も確認されたことから、補修することとした(図-1)。

(イ) 技術概要

本工事で取り扱う捨塊は、海中で100年間破壊せずに形状を保った貴重なコンクリートであるため、最新の注意をもって施工することとし、本工事の記録を後生に残すべく、施工区域内の全ての捨塊の位置情報を克明に記録した。

また、飛散した捨塊の撤去に先立ち、斜面部、階段部の全ての捨塊の現位置の測定、写真撮影、管理コード番号を付し現況図(図-2)を作成した上で撤去にかかり、陸揚げ後は所定の管理コード番号の取付け、長さ、幅、高さの測定とその状況写真の撮影(写真-2)と、これら全ての情報を「捨塊管理簿」として取りまとめている。また、斜面部の捨塊の撤去方法は大回しを使用するが、階段部は当時と同じ罫(かんぬき)という吊り金具を使用して効率的に施工している(写真-3)。

令和3年3月現在、北防波堤(斜塊部)860mのうち約7割の根固工の復旧が完了しており、引き続き、歴史的価値の高い北防波堤保全のため、継続的に整備を進めている。



写真-1 小樽港全景

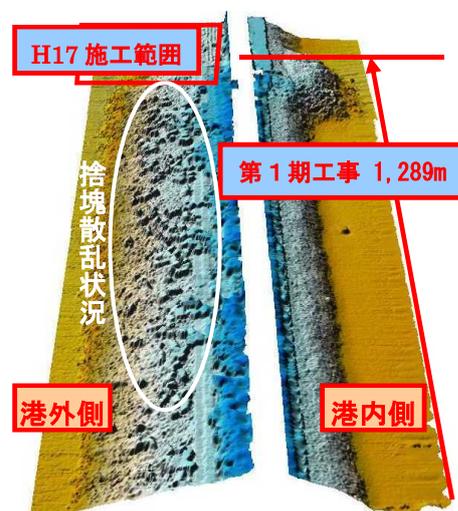


図-1 水中部の捨塊ブロック散乱



図-2 捨塊現況図



写真-2 捨塊仮置状況



写真-3 捨塊撤去状況 (門)

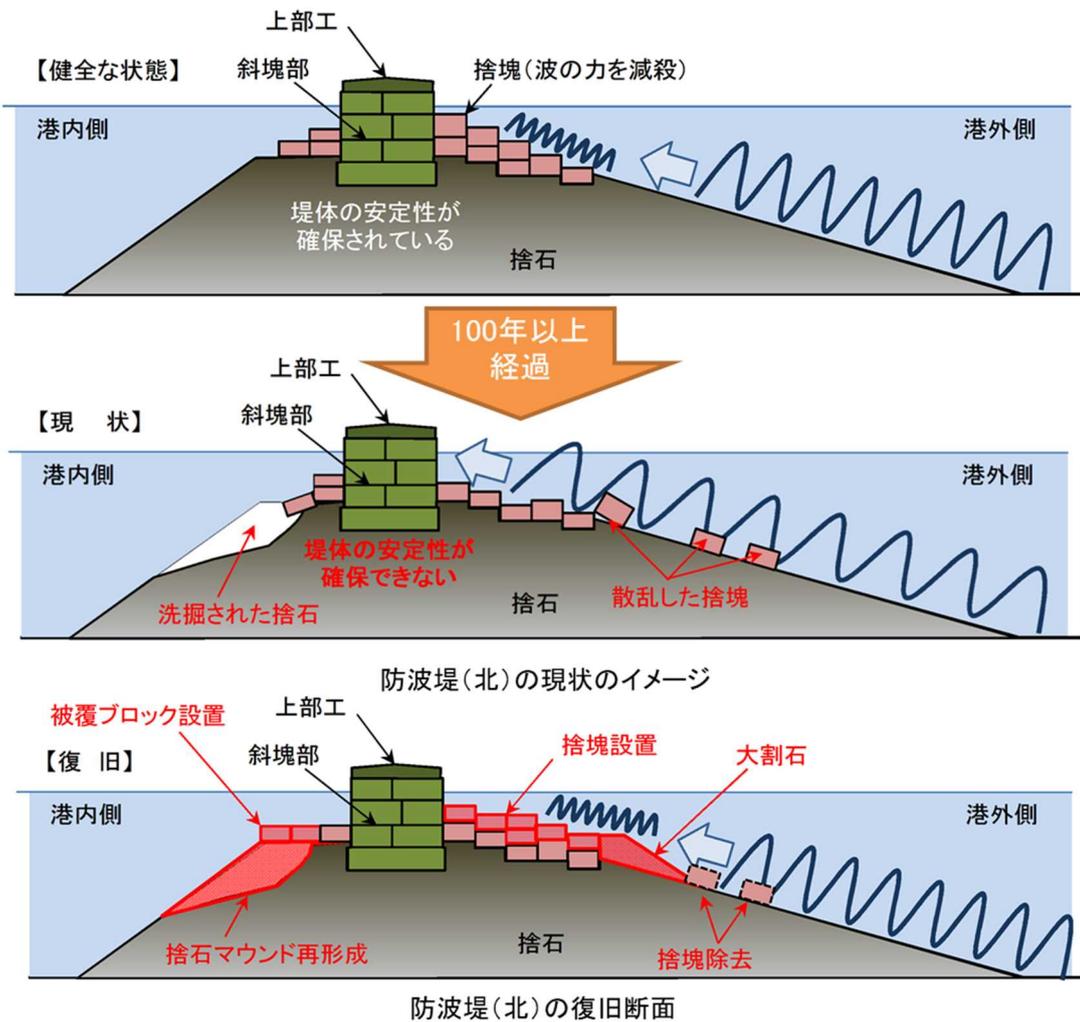


図-3 北防波堤の補修イメージ

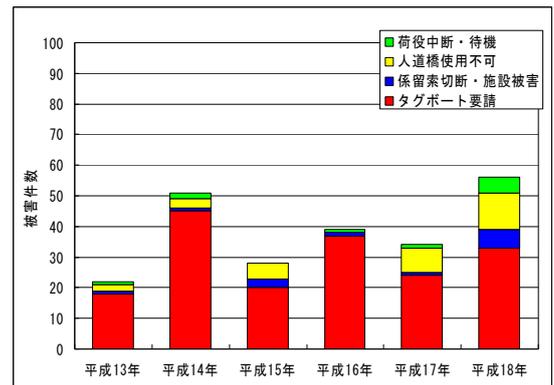
ク 苫小牧港における長周期波対策工

(ア) 長周期波対策工の概要

苫小牧港西港区では、特に入船ふ頭及びフェリーふ頭で船体動揺による被害が発生していた。主な被害の内容は、荷役作業の中断、他バースへの避難、人導橋の使用不可、係留索の切断、動揺抑止のためのタグボート要請であった（図－1）。フェリーの定時制確保及び被害時対応における利用者の費用負担発生が問題となっており、利用者からは早急な対策が要請され、港内静穏度を改善するために平成20年度から長周期波対策工の整備に着手した（写真－1）。



写真－1 長周期波対策工施工箇所と各施設の位置

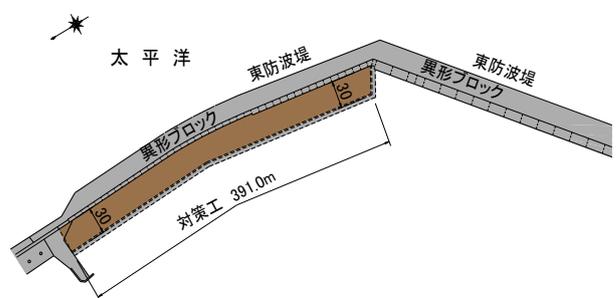


図－1 入船フェリーふ頭船体動揺被害状況

(イ) 技術概要

a 船体動揺要因と検討経緯

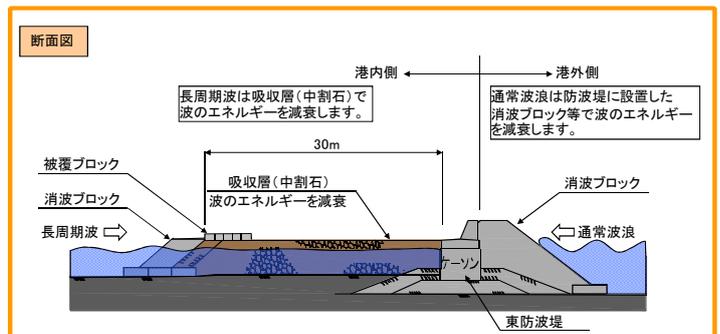
港内の波浪とフェリーの動揺を観測した結果、船体動揺の主な要因が長周期波であることを明らかにした。一方で、静穏度対策の基本となる沖合防波堤の延伸は多大な費用と期間を要することから、平成15年度に有識者による検討委員会を立ち上げ、北海道の港湾として初となる港内背後水域を活用した長周期波対策工の検討を進めた。



図－2 長周期波対策工設置箇所拡大図

b 長周期波対策工の構造

長周期波対策は、経済性や施工環境、周辺施設への影響を踏まえ、図－2に示す東防波堤港内側の未利用水面に中割石による吸収層を設置し、波長の長い長周期波のエネルギーを減衰させ、港内での多重反射による増幅を防止する構造とした。次に、吸収層



の幅は、長周期波の卓越周期90sにおける波長を考慮した。また、既往の知見は防波堤に対して直角入射条件によるものであったことから、現地観測で卓越傾向にあった波向SWを主波向とし、多方向からの入射を考慮して吸水層の幅を30mと設定した。なお、港内側からの越波等から吸収層を保護するための被覆ブロックと、法面保護として港内側に消波ブロックを設置する構造とした。

c 長周期波対策工の整備効果の検証

長周期波対策工は、平成20年度に現地着手し、段階的に整備を進め、平成24年度に全延長391mが完成した。施設の整備効果を検証するため、整備期間中も波浪観測を実施した（図-3）。

図-4は、現地調査の結果により、沖合の平均波高と長周期波対策工港内側の平均波高比を示したものである。長周期波対策工の延伸に伴って港内の波高比が低減していることを確認した。また、波浪変形計算において長周期波対策工の反射率を変化させた港内長周期波高と現地観測結果を比較した結果、反射率0.7で観測値と計算値の誤差割合が小さくなり（図-5）、設計目標の反射率0.7が妥当であることを確認した。

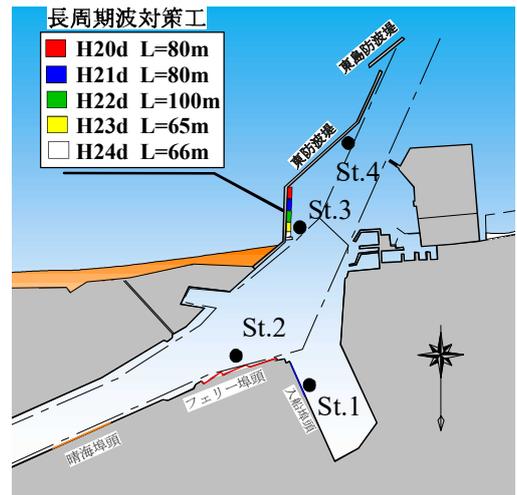


図-3 波浪観測地点

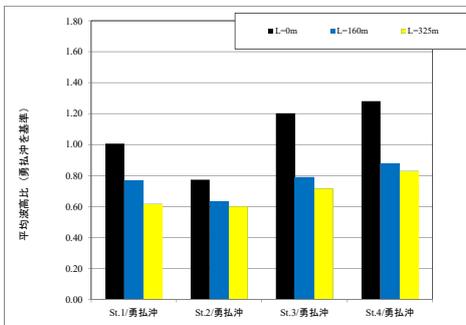


図-4 長周期波対策工の延長別平均波高比

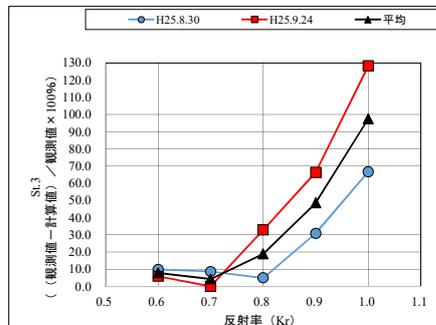


図-5 長周期波対策工の反射率



写真-2 長周期波対策工の完成写真



写真-3 長周期波対策工の航空写真

ケ 段階施工を可能とする防波堤整備工法の開発

(ア) 開発の背景

我が国の防波堤の構造形式はケーソン式防波堤が一般的であり、フローティングドック (FD) により複数のケーソンを同時に製作することで、大規模施工による効率化の利点がある。しかし、単年度に1函のケーソン製作等、施工規模が小さい場合は、FDの回航費や損料等が割高となる。さらに、ケーソン製作のため、ある程度まとまった予算が必要となり、特に地方港湾では予算規模に応じた柔軟な防波堤整備ができないという課題を有していた。このため、施工規模が小さい場合のコスト削減と予算に応じた段階整備を可能とする新たな整備工法の検討に着手した。

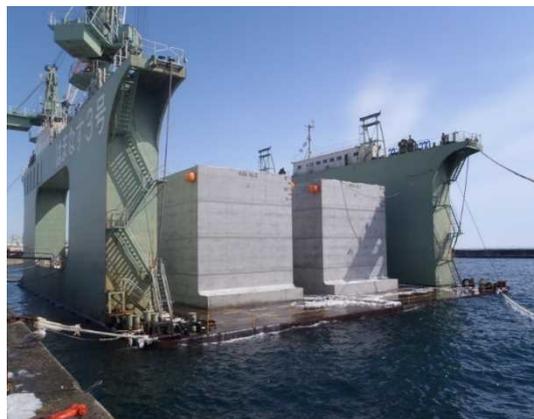


写真-1 FDによるケーソン製作(同時製作4函)

(イ) 技術概要

a 連結セルラーブロック工法

新たな工法開発に当たり、「北海道の港湾における防波堤整備技術検討委員会」を平成24年に設置し、プレキャスト型枠の一種であるセルラーブロックの連結による新たな防波堤整備工法を検討した。セルラーブロックは写真-2のように陸上製作し、起重機船により海中据付後、図-1のように、セルラーブロック内に水中コンクリートを打設し鉛直・水平方向に連結する工法である。この連結方法については、廣井勇博士が100年以上前に構築し、現在でも健全に機能している小樽港北防波堤の設計を参考にしており、例えば、北防波堤の本体をなす斜塊ブロックを楔型の部材により連結する工法をヒントに、水平方向の連結のためのブロックの形状の工夫や鉛直の連結のための水中コンの打設高の工夫を行っている。100年以上前の技術の継承によってセルラーブロックの一体化を強化し、耐波安定性を向上させた。



写真-2 セルラーブロックの製作状況

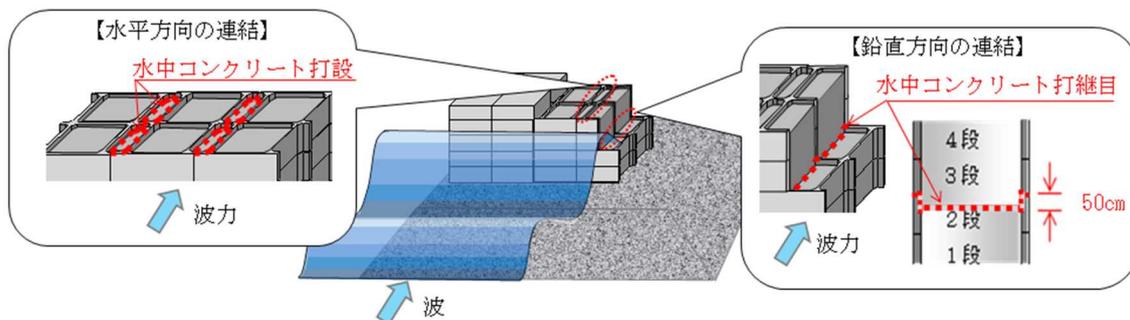


図-1 連結セルラーブロック工法の概要

b 整備途上段階における波浪に対する安定性の検討

鉛直方向のセルラーブロックの連結個数によっては、整備途上の暫定形状（堤体が没水した状態）が発生することが想定された。直立部の天端が没水した条件における波力算定法は明らかにされていないため、数値シミュレーション（CADMAS-SURF）による解析と不規則波を用いた水理模型実験を行った。その結果、完成時の防波堤に作用する波圧に対して、没水した状態の堤体に作用する波圧は約9割に低減することを明らかにした。この波圧に抵抗できる堤体の形状（所要重量）とすることで、整備途上の安定性を確保し、さらに、堤体が没水した状態でも、防波堤の機能として、波高が2割程度低減することを確認し、整備による段階的な効果発現についても確認した。

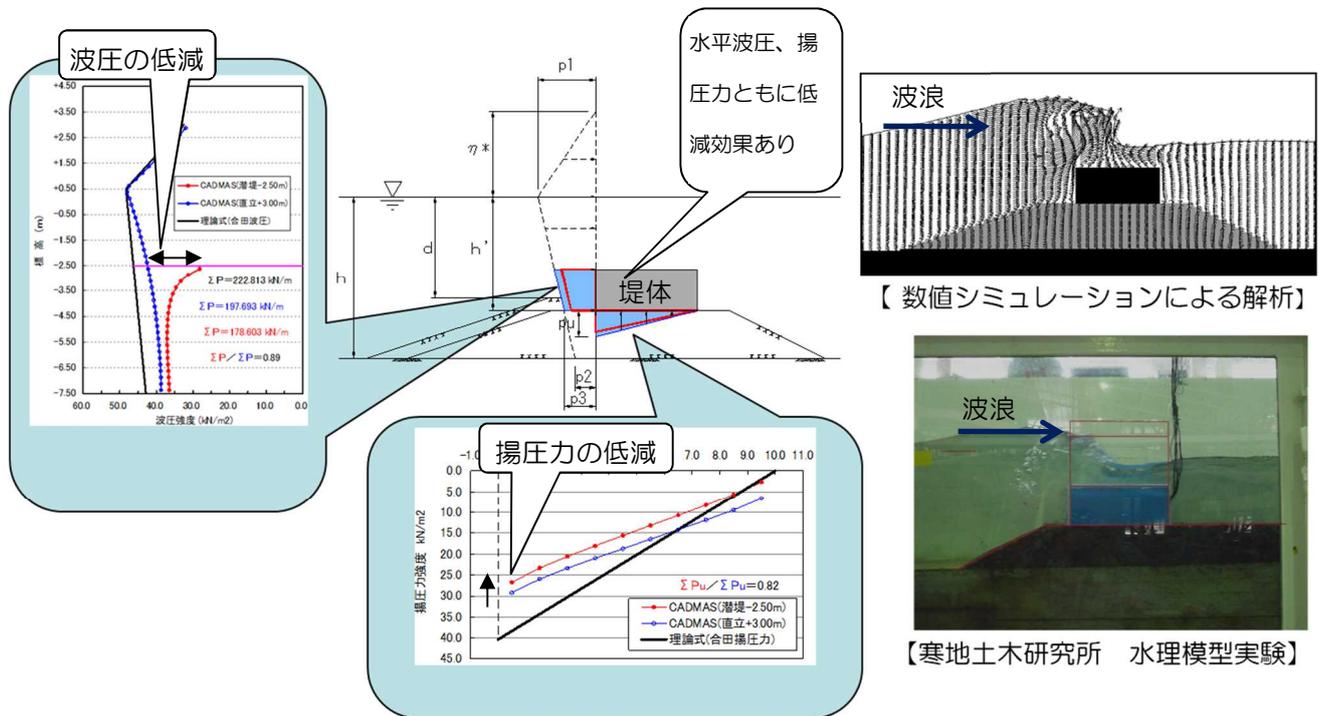


図-2 整備途上段階における波浪に対する安定性検討

連結セルラーブロック工法は、港内の静穏度や港内埋没対策を目的とする瀬棚港の防波堤（東外）で初めて採用され、平成25年から防波堤整備に着手し、着実に整備を進めている。



写真-3 瀬棚東外防波堤検討箇所



写真-4 セルラーブロック据付状況

コ 釧路港 国際バルク戦略港湾の整備

(ア) 釧路港国際物流ターミナル整備事業の概要

我が国は、飼料用穀物（トウモロコシ）のほぼ全てを海外に依存しており、安定的かつ安価な輸入穀物の確保が酪農・畜産業の国際競争力の強化に極めて重要である。しかしながら、大型船に対応できる港湾は限定的であり、その他の港湾では中型船等による非効率な穀物輸入が行われてきた。このため、複数港分の穀物を満載した大型船が荷役できる港湾施設を拠点的に整備し、当該港分の穀物を卸して喫水を上げた後に、次港への寄港を可能とすることで効率的な海上輸送網を形成する、国際バルク戦略港湾（穀物）施策に取り組むことになった。

釧路港国際物流ターミナル整備事業は、全国約5割の乳牛を飼養する生乳、乳製品の一大産地である東北海道地域を背後圏とする釧路港において、国際バルク戦略港湾（穀物）として穀物を満載したパナマックス船の荷役が可能な水深14m岸壁や航路・泊地を整備するものである（写真－1）。本施設は、全国10港で指定された国際バルク戦略港湾において初めて完成した（平成30年11月）（写真－2）。



写真－1 釧路港国際物流ターミナル事業（構成施設）

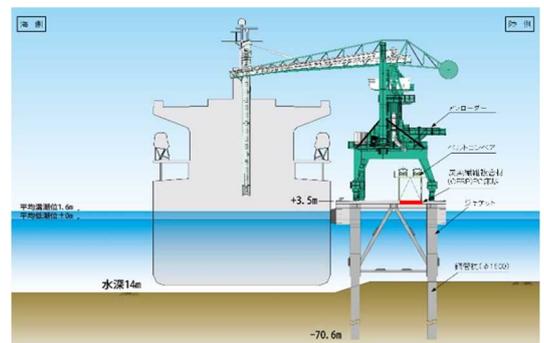


写真－2 水深14m岸壁の利用状況

(イ) 技術概要

a ジャケット式栈橋工法の採用

効率的な海上輸送網の早期形成を実現するため、水深14m岸壁は短期間での整備が求められた。このため、北海道港湾の大規模水深岸壁では初めてジャケット式栈橋構造を採用した（図－1）。本工法は、鋼管で組み立てた立体トラス構造物（ジャケット）の脚（レグ）を、杭で固定し、杭とレグを溶接又はグラウトで一体化させた工法である（写真－3）。ジャケットは、水平剛性が大きく、杭間隔を広げられるため、急速施工が可能となる。また、上部工のコンクリート床板等にプレキャスト部材を採用する等、工事期間の短縮を図り、当初計画から遅れることなく平成26年の工事着手から4か年で岸壁の完成を実現した。



図－1 水深14m岸壁（ジャケット式栈橋構造）

b 長期耐久性に考慮した工夫

水深 14m 岸壁の荷役機能が途絶えると、我が国の酪農・畜産業に多大な影響が発生する。このため、釧路港が地震多発地帯に位置することに鑑み、岸壁（ジャケット式栈橋構造）の耐震強化とともに、民間企業が設置する荷役機械（アンローダ）に免震構造を採用し、耐久性を向上した（写真－4）。

また、本施設は、輸送ネットワークの拠点として機能するために供用期間中の頻繁な補修や大規模な改修を避ける必要があった。そのため、施設の維持管理レベルは、最も高いレベル1（事前対策型）とし、岸壁の上部工に設置する PC 床版には、コンクリート版内部に塩化物が進入した場合の鋼材腐食を回避するため、我が国で初めて炭素繊維複合材（CFRP）を本格的に採用した（写真－5）。これにより、供用期間中に PC 床版を交換する場合に生じるベルトコンベア停止を回避することができる。さらに、ジャケット部の H 鋼桁には超厚膜形塗装を施し、ジャケット鋼管杭の飛沫帯にはステンレスによる金属被覆（写真－6）、PC 床版やプレキャスト部材の一部に防錆効果の高いエポキシ樹脂鉄筋を採用した。これにより、本施設の長期耐久性は向上し、飼料供給の拠点機能の継続性を確保した。



写真－3 ジャケットの据付工法



写真－4 免震装置を備えるアンローダー



写真－5 炭素繊維複合材（CFRP）を用いた PC 床版



写真－6 金属腐食を防ぐジャケットの長寿命化短縮

サ 函館港 新技術を活用した大型旅客船対応施設の整備

(ア) 事業の目的

我が国では、「観光立国の実現」を重要施策として位置付け、「訪日クルーズ旅客を2020年に500万人」とする目標の実現に向け、大型クルーズ船の受入環境整備が進められるようになった。クルーズ船寄港数が全道1位である函館港では、市街地から遠く、交通の便が悪い港町埠頭で大型クルーズ船を受け入れざるを得ない状況であった。このため、観光名所である函館朝一の目の前に位置し、公共交通機関が集まる函館駅に隣接する若松地区（図－1）において、11万GT級の大型クルーズ船が利用可能な水深10m岸壁及び水深10m泊地の整備に着手した。



図－1 函館港整備箇所位置図



写真－1 若松地区-10m岸壁暫定供用時の利用状況

(イ) 技術概要

a 早期供用に向けた構造の工夫

クルーズ船の寄港は地域への経済波及効果が大きく、函館市を含む周辺地域からも施設の早期利用開始に大きな期待が寄せられた。このため、床版にプレストレストコンクリート桁を用いたPC 栈橋構造を採用した。さらに、従来海上作業となる受梁コンクリートのプレキャスト化を図り、一括据付による大幅な工期の短縮を図った（写真－2）。また、岸壁全延長360mのうち、小型クルーズ船を対象に、泊地の整備途中であっても利用することができる構造を検討した。これらの取組により、平成29年11月の着工式から約1年後の平成30年10月に暫定供用を開始した（写真－3）。



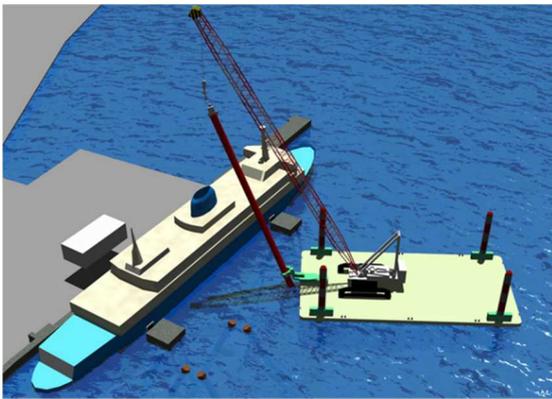
写真－2 大型起重機船によるプレキャスト受梁の据付状況



写真－3 暫定供用部完成状況

b 3次元データ技術の導入

国土交通省ではICTの全面的な活用により、生産性向上を図るi-Constructionの推進を進めている。港湾分野においても、ICT技術を活用した施工の省力化や計画・調査・設計段階からBIM/CIMによる3次元モデルを導入し、その後の施工・維持管理の各段階において、一連の建設システムの効率化を図る取組を進めている。本施設においても、これら技術を先進的に導入し、施工の効率化を図った。例えば、設計段階から栈橋鋼管杭の打設時の状況をBIM/CIMモデルを用いて3次元的に確認することで、既存構造物等との干渉リスクを事前に把握し、構造設計や施工方法の見直しを行った（図－2）。また、複数の技術員が必要な鋼管杭打設の誘導作業も、自動追尾式トータルステーションを用いることで、現場作業の省力化を図った（写真－4）。



図－2 BIM/CIMを活用した施工段階の施工検討例

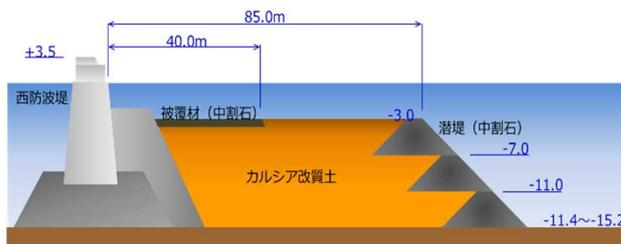


写真－4 自動追尾式トータルステーションを使用した鋼管杭打設状況

c カルシア改質土による防波堤背後盛土の整備

水深 10m泊地の整備においては、発生する浚渫土の処分用地がなかったため、カルシア改質材を粘性土と混合することで強度の促進と海中投入時の濁りの抑制を行い、そのカルシア改質土を西防波堤背後盛土として活用することとした（図－3、写真－5）。

背後盛土を整備することにより、①背後盛土による耐波安定性の向上、②越波による伝達波の低減、③浅場の造成による水産生物環境の改善効果を期待できる。また、カルシア改質土の寒冷地への適用性を確認したことで、今後の全国的な整備が期待される。



図－3 西防波堤背後盛土の概要



写真－5 バックホウによる浚渫土とカルシア改質材の混合状況