

水工学シリーズ 04-B-4

「エコポートモデル事業」
釧路港島防波堤の計画から施工まで

独立行政法人北海道開発土木研究所港湾研究室
副室長

山 本 泰 司

国土交通省北海道開発局釧路港湾建設事務所
第1工事課長

金 田 充

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会
2004年7月

「エコポートモデル事業」 釧路港島防波堤の計画から施工まで

Eco-port model project; planning, design and construction of an eco-friendly breakwater at Kushiro Port

山 本 泰 司

Yasuji YAMAMOTO

金 田 充

Mitsuru KANEDA

1. はじめに

近年、地球環境の良好な保全が求められる中、港湾・漁港構造物などの沿岸構造物においてもその取り組みが進められている。2003年1月1日より施行された「自然再生推進法」の第3条基本理念においては、「自然再生は、健全で恵み豊かな自然が将来の世代にわたって維持されるとともに、生物の多様性の確保を通じて自然と共生する社会の実現を図り、あわせて地球環境の保全に寄与することを旨として適切に行われなければならない。」としている。また、国土交通省港湾局が2001年3月に策定した「暮らしを海と世界に結ぶみなとビジョン」においては、良好な沿岸域環境の継承をひとつのテーマとして、港湾施設の設置に際しても、生態系に配慮した構造形式の採用に努めるとしている。北海道における港湾・漁港においても、周辺の豊かな海域環境の保全に努めるべく技術開発を推進し、防波堤などの構造物に様々な工夫を行ってきている。

釧路港島防波堤は、1998年6月にエコポートモデル事業に認定され、水生生物との協調型防波堤として整備されることとなった。図-1のイメージに示すように、ケーソン式混成堤の背後に大規模な盛土を付加した形式であり、計画策定にあたっては浚渫土砂のリサイクルを促進し、土砂処分費低減や背後盛土の滑動抵抗により堤体幅の縮小を図るなど建設コスト縮減に努め、さらに大規模背後盛土を藻場の形成に適した環境に近づけることにより、多様な生態系創出の場を提供することを目指している。

本稿では、北海道の港湾・漁港においてこれまでに整備されている環境配慮型構造物の事例を紹介するとともに、現在整備が進められている釧路港島防波堤の計画策定経緯、設計上および施工上の問題とその解決経緯を取りまとめたものである。

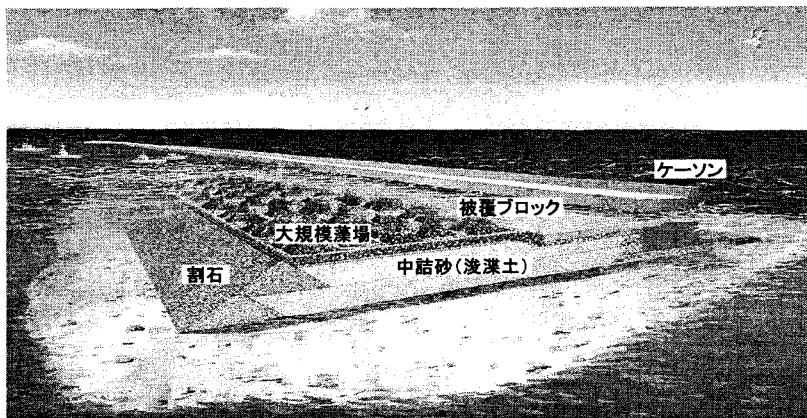


図-1 釧路港島防波堤のイメージ

2. 北海道における環境配慮型港湾・漁港構造物

北海道の港湾・漁港において，“環境”に対して積極的に配慮して整備されている構造物は、大きく2種類に分類できる(図-2)。ひとつは、港内水質環境保全を目的にしたもので、有孔堤と呼ばれる通水口付きの防波堤や護岸である。水産物の出荷調整などのために、港内水域で生物を一時的に蓄養する施設などに適用されている。もうひとつは、防波堤や護岸に“藻場機能(岩礁機能)”を付加した施設である。ここでは、後者について、その考え方と整備事例を紹介する。

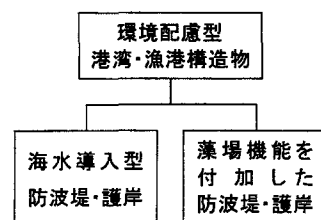


図-2 環境配慮型構造物の分類

2.1 構造物の岩礁機能

a) 沿岸構造物の擬似岩礁機能

現地のケーソン式混成堤などを観察すると、ケーソン側壁面の比較的浅い箇所にコンブなどの大型海藻が生息している様子が見られることがある。このことは、単純な直立型の防波堤であっても、砂浜海域に建設することにより、もとの自然状態にはない岩礁としての機能を創り出していることに他ならない。

直立型の堤体の前面に消波ブロックを大量に投入する形式の消波ブロック被覆堤では、ブロック内の多数の空隙が魚類の新たな生息場となる。さらに、海藻類の付着基質となるコンクリート面積が大幅に増加するとともに、消波工のり面が斜面となっているので、海藻の生長に欠かせない光環境が改善される。魚介類の産卵、育成、生息の場となる海藻群落が形成されれば、構造物の岩礁としての機能がより向上すると考えられる。

人為的に岩礁環境を作ることに対しては、是非の議論はあると考えられるが、比較的単調な砂浜域に岩礁機能を付加することは、生物の棲み場所を多様化することになる。このような考えに立ち、北海道の港湾・漁港では防波堤等の構造物に本来求められる水理的機能に加えて、構造物の擬似岩礁効果(谷野ら, 1993)を更に高めるための工夫が行われている。

具体的には、次節2.2に紹介するように、護岸や防波堤構造物の前面や背後に水深の比較的浅い“小段(盛土)”を設置して海藻群落が形成されやすい環境を作り出す工法が代表的である。

b) 海藻群落形成に必要な条件

海藻群落を形成する植物は海域により様々であるが、北海道周辺海域では、コンブ場、ガラモ場、アマモ場などが一般的にみられ、構造物周辺では流速場が早くなることからコンブ類が優先種となることが多い。

海藻類の生息環境因子は、物理的要因、化学的要因、動力学的要因、生物的要因に分類され、具体的には表-1の項目が挙げられる(北海道開発局監修, 1998)。これらのうち、光環境と流動環境については土木工学的に制御可能であると考えられる(佐々木ら, 1998)。

適度な流動環境は、植物への栄養塩の供給、胞子の付着基質上の浮泥の払拭、ウニによる摂餌圧の抑制に必要である。振動流水層を使った実験では、キタムラサキウニでは流速 25cm/s 以上で摂餌圧が激減する(川俣ら, 1994)ことや、エゾバフンウニの稚ウニが流速 20cm/s で退避行動を起こす(町口ら,

表-1 海藻類の生息環境因子

物理的 要因	光(光量, 光質, 周期性)
	附着基質(安定性, 組織, 表面形状, 位置等)
化学的 要因	温度(海水温)
	降雨
	塩分
	栄養塩類(窒素, リン等必須代謝物質)
動力学的 要因	光合成を行うための遊離二酸化炭素
	pH
	汚染(有機質, 無機質, 生物質)
生物学的 要因	海水の流動(海流, 波浪, 潮汐, 湧昇流)
	潮汐による干出
生物学的 要因	風
	藻食動物による被害
生物学的 要因	基質への競合
	繁茂による光の制限

1998) ことが報告されている。

光環境に対しては、海藻類の着生基質である小段天端水深を適切に設定することにより制御可能であるが、海域により透明度が異なったり、海藻類の種類により必要な照度（光量子量）が違うので、周辺の天然岩礁の海藻類分布状況を参考に小段水深を設定することが多い。表-2は北海道内の港湾・漁港で整備されている（あるいは整備が計画されている）小段構造物の天端水深の一覧である。L.W.L.以下-2.0～-5.0m程度に設定されている例が多いのは、周辺海域の海藻群落がこの水深帯で良好に形成されているためである。この程度の水深であれば、一般的に光環境は十分であり、波浪に起因する流れの影響も受けるため、藻場の形成に適した環境になっているものと考えられる。図-3に環境配慮型構造物の施工箇所を示しておく。

擬似岩礁機能を構造物に付加しようとするときには、対象地点周辺の水質、波浪、生物の分布状況などを把握し、その場所の特性に合った環境を整備する必要がある。周辺の天然岩礁や既設構造物において、対象とする海藻類の生育がみられないような場合は、生育の阻害要因を現地調査などによって見極め、その要因を人為的に制御可能かどうかという視点で検討することが重要である。前出表-1に挙げた要因の他に、海水の濁り（懸濁物質）や漂砂は光環境に影響するだけでなく、コンブ類の遊走子の基質への付着や、付着後の配偶体の生長に対して影響が大きいので（吉川ら、1972、荒川ら、1990、1991）、注意を払う必要がある。

2.2 岩礁機能を付加した構造物の整備事例

a) 消波ブロック被覆堤の前面小段

この構造形式は、消波ブロック被覆堤の擬似岩礁効果を更に高めるために、ブロックのり先に割石や消波ブロックの小段を設けたものである。浦河港（図-4）の護岸に採用された構造を図-5に示す。小段部分の天端水深は-3.0mと比較的浅く、光環境に配慮されている。

施工後に海藻類着生状況の調査を継続した結果、施工後1年半程度経過した後は、近隣の天然岩礁と同程度の海藻現存量となることが確認された。また、小段部分の材料は、20t型消波ブロック（延長20m）と割

表-2 小段構造の天端水深(計画中の施設を含む)

構造形式	施設名	天端水深(m)
消波工 前面小段	浦河港護岸(防波)	-3.0
	釧路港島防波堤	-1.0～-3.0
混成堤 背後盛土	雄冬漁港島防波堤	-1.5
	久遠漁港島防波堤	-2.8
	浦河港防波堤(西島)	-3.5
	様似漁港西護岸	-3.9
傾斜堤 背後小段	杓形港防波堤(島)	-5.0
	寿都漁港第2北外防波堤	-3.7
	元地漁港北島防波堤	-2.5～-3.5
	江良漁港西外防波堤	-3.7

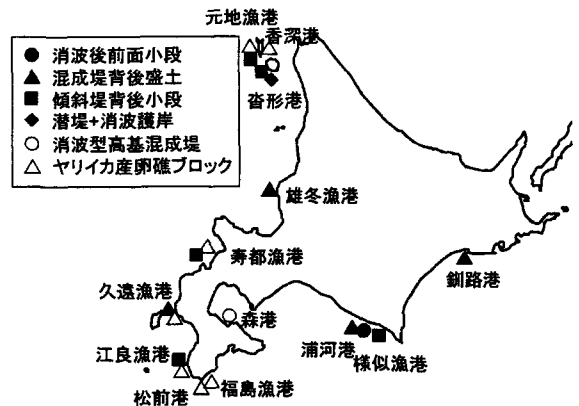


図-3 環境配慮型構造物設置箇所(計画含む)

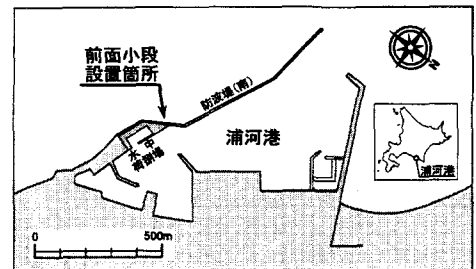


図-4 浦河港の港形

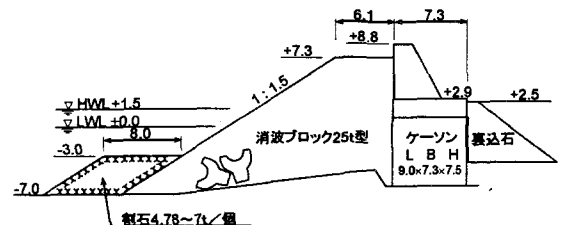


図-5 浦河港護岸(防波)標準断面
(前面小段付き防波護岸)

石（砂岩、延長 48.3m）を用いたが、材質の違いによる海藻類の着生状況に大きな差異は認められなかった（明田ら、1997）。

水理的には、前面小段の形状によっては、反射率の低減や越波量の低減効果も期待できる。これらについては文献に譲る（須藤ら、1994、平石ら、2001）。

b) 混成堤の背後盛土

ケーソン式混成堤などの不透過型の堤体の背後に、割石などを用いて盛土を付加する形式であり、本稿で取り上げている釧路港島防波堤もこの形式である。

図-6, 7 に現在建設が進められている雄冬漁港島防波堤の事例を示す。前出の前面小段と同様に、背後盛土の天端水深を比較的浅く設定し光環境に配慮している。盛土本体は他部門の事業で発生する残土（トンネル掘削岩）を中詰土として使用する予定である。また、防波堤直立部の耐波設計上は背後盛土の土圧抵抗を期待できるので、堤体幅の縮小が可能である。水理的には、背後盛土水深が浅いため、越波伝達波の形成が抑えられるので、伝達率の低減効果も期待できる（伊東ら、2002）。

流動環境の視点から見ると、背後盛土部分は防波堤直立部の陰にあるので、前出の「前面小段」に比べると波浪による流動が小さくなる。このため背後盛土形式は、流動環境が比較的よい島防波堤などの施設に採用されている。

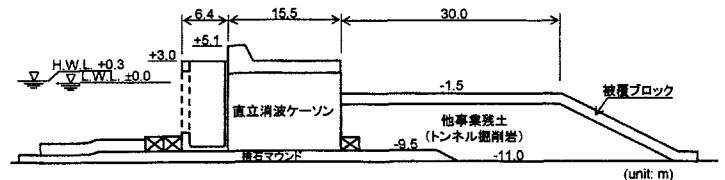


図-7 雄冬漁港島防波堤の標準断面
(背後盛土付混成堤)

c) 傾斜堤の背後小段

異型ブロック積み傾斜堤の背後に水深の浅い小段を設ける形式である。前出「背後盛土」と同様の機能を期待するものであるが、ブロック積み傾斜堤は透過性を有するので小段上の流動環境はより改善される。図-8, 9 は様似漁港で採用された事例である。本施設は西護岸の越波低減を目的とした施設であるが、護岸本体の前面海域は良質なミツイシコンブの群落が形成され、漁業者にとって格好の漁場となっていたため、既存コンブ群落の保全と新たなコンブ群落の創出を図る必要があり、護岸消波部を護岸本体から分離した傾斜堤背後小段構造が採用された。

小段上の海藻現存量は、施工後1年を経過した段階で、天然岩礁と同程度まで増加し、施工後3年以降は周辺の天然岩礁を上回っていたが、5年目には天然岩礁と同程度に減少した。また、小段上に出現した海藻の種類数は、小段設置当初は少ないものの、時間経過とともに天然岩礁と同程度になってきた（明田ら、1997）。

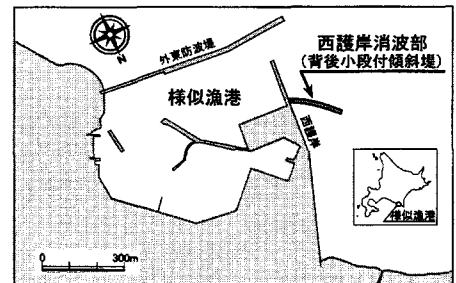


図-8 様似漁港の港形

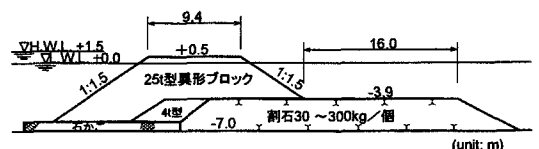


図-9 西護岸消波部の標準断面
(背後小段付傾斜堤)

水理的には、背後小段により伝達波の低減効果が期待できる。(木村ら, 2002)。

d) その他の形式

岩礁としての機能が期待できる他の構造形式として、消波ブロック式潜堤と消波型高基混成堤が挙げられる。

図-10 は利尻島の地方港湾である杵形港に採用された潜堤と消波護岸の組合せによる二重堤形式の護岸である。当港は利尻礼文サロベツ国立公園内にあり、防波護岸の天端高を高くすることができないため、この形式が採用されたものであるが、潜堤にはリシリコンブを主体とした良好な藻場が継続的に形成されている。

図-11 は内浦湾に面した地方港湾である森港に現在整備中の消波型高基混成堤である。この形式は高いマウンドにより碎波が促進されるため、波浪反射率が小さく、越波流量も消波ブロック被覆堤などに比べて小さいという特徴がある。比較的広いマウンド斜面が藻場の生育に適した環境になっていると考えられる。堤体の設置後1年目の調査ではマコンブを中心とした非常に良好な海藻群落が形成されていることが確認されている(二ノ宮ら, 2004)。

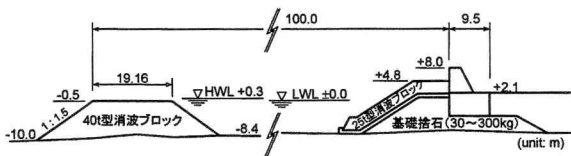


図-10 杵形港護岸(防波)標準断面
(潜堤+消波護岸)

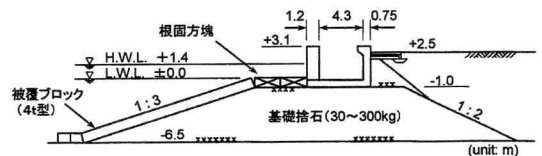


図-11 森港護岸(防波)標準断面
(消波型高基混成堤)

e) 表面形状の工夫

海藻の着生には基質表面の凹凸が重要である。写真-1は、コンクリートブロックに着生したコンブの様子である。このように、ブロックや自然石の縁辺部や平盤礁の溝の縁などの隅角部にコンブが集中的に着生している状況がみられる。これは、隅各部近傍の局所的な流れにより遊走子が付着しやすく、また、物理的に草食動物の食害を受けにくいと考えられる。このため、マウンド被覆ブロックや根固方塊に溝や凹凸を付ける工夫が行われ、一定の効果が確認されている。ただし、数 cm オーダーの凹凸ではその優位性が1年程度しか継続しないとの報告もある(浅井ら, 1997)。

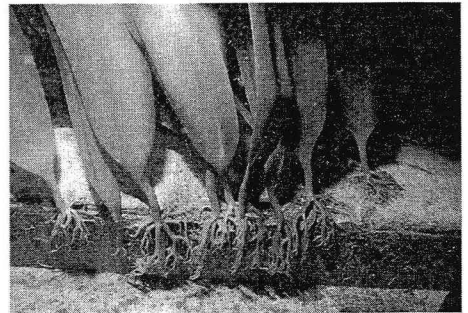


写真-1 ブロックの角部に着生したコンブ

f) 産卵礁機能の付加

北海道の日本海側や津軽海峡に面した沿岸域はヤリイカの産卵回遊ルートとなっており、天然岩礁や消波ブロックなどの空隙の天井部分に産卵が確認されている。現地産卵状況の調査から産卵に適した条件を推定して、写真-2に示すような形状のブロックを製作し、消波ブロック被覆堤のり先に設置したところ、周辺天然岩礁や消波ブロックと比較して非常に多くの産卵が確認された(谷野ら, 1998)。ヤリイカ産卵機能付きブロックは、日本海側の複数の港湾・漁港で使用



写真-2 ヤリイカ産卵礁機能付き
ブロックの例(松前港)

されている。

2.3 小段形式構造物の耐波設計法と課題

a) 消波工前面小段の耐波設計

防波堤の前面小段や背後小段は、その機能を維持するためには波浪作用に対して安定であることが求められる、通常、被覆石や被覆ブロックで保護する必要がある。

消波工前面小段形式の場合、小段被覆材の耐波設計法は確立していないので、基本的には模型実験により安定性の検討をする。消波工に用いられる消波ブロックで小段を形成するならば、耐波安定上は問題ない。小段被覆材として割石を用いる場合は、谷本ら（1982）による混成堤マウンド被覆材の所要質量算定法を適用することもできるが、質量を更に低減できる可能性もある（須藤ら，1994）。被覆材にブロックを使用する場合には、藤池ら（1999）が消波ブロック被覆堤の前面マウンド被覆材の所要質量算定法を提案しており参考になる。

b) 混成堤背後盛土の耐波設計

混成堤の天端高は、設計有義波高に対して $0.6 \sim 0.8H_{1/3}$ 程度に設定されるため、ある程度の越波を許容する。背後盛土の天端水深は、前述のように比較的浅く設定されるため、背後盛土の変形は主として越波水の打ち込み力によって生じる。

早川ら（2000）、森ら（2002b）は水理模型実験に基づき背後盛土被覆材の所要質量算定法を提案している。図

12 は、越波水の打ち込みモデルである。流速 U_2 で堤体上を越波した水塊が堤体からの距離 X の背後盛土上に打ち込むが、盛土天端近傍水平流速は、水中で減衰し U_b となる。

Hujii ら（1994）は親水性防波堤上の手すりの耐波安定性および利用者の安全性を検討するため、越波水の運動をモデル化した。越波水が天端上に打ち込み越流するという運動の中での水位および流速の算定が可能であり、堤体天端上港内側端での流速 U_2 は次の一連の式から求められる。

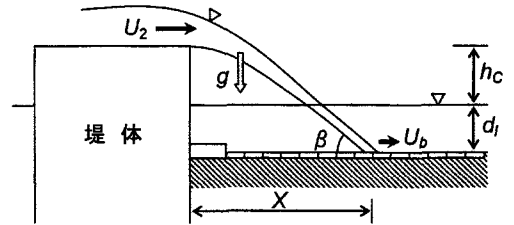


図-12 背後盛土への越波水の打ち込みモデル

$$U_2 = \begin{cases} (0.68 + 1.10H/h_m) \frac{C_1 \eta_1^{3/2}}{0.4 \eta_1} & (H/h_m < 0.4) \\ \left(0.8 + \frac{0.32}{(10H/h_m - 4)^2 + 1} \right) \frac{C_1 \eta_1^{3/2}}{0.4 \eta_1} & (H/h_m \geq 0.4) \end{cases} \quad (1)$$

$$h_m = \begin{cases} d & (B_M/L \geq 0.16) \\ d + (h - d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.05} & (0.11 < B_M/L \leq 0.16) \\ h & (B_M/L < 0.11) \end{cases} \quad (2)$$

$$\eta_1 = KH - h_c \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4h_c^*/h_m}}{2} \\ h_c^* &= h_c \frac{H/h_m}{2H/h_m - \frac{-1 + \sqrt{1 + 4h_c/h_m}}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 H ：波高， h_m ：マウンド部の影響を考慮した換算水深， η_1 ：堤体天端上の港外側最大水位， C_1 ：流量係数（ $=1.61\text{m}^{0.5}/\text{s}$ ）， B_M ：港外側マウンド肩幅， L ：波長， d ：前面マウンド天端水深， K ：越波が発生して

いるときの波頂高比, h_c : 静水面上の堤体天端高である。

図-13は, 水理模型実験により得られた盛土天端近傍流速の最大値 U_b について, U_2 , h_c 等を用いて無次元化して整理したものである。図中の計算値は近似曲線であり, 次式から U_b が求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_b}{U_2} &= a \left(\frac{U_2}{\sqrt{gh_c}} \right)^3 \\ a &= 0.0399 \left(\frac{h_c}{d_i} \right) + 0.00455 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに, g : 重力の加速度, d_i : 静水面を基準にした背後盛土水深である。

マウンド被覆材の所要質量は, 一般的に次式で示されるハドソン式により求められる。

$$M = \frac{\rho_r}{N_s^3 (S_r - 1)^3} H^3 \dots\dots\dots (6)$$

ここに, ρ_r : 被覆材の密度, N_s : 構造条件, 波浪条件, 被覆材形状などから決まる安定数, S_r : 被覆材と流体の密度比である。一方, 谷本ら(1982)は, 被覆材に作用する抗力, 揚力および底面との摩擦力の釣り合いから次式(7)のように安定限界質量 M が U_b の6乗に比例することの導いており, 両式から安定数 N_s の算定式(8)が得られる。

$$M = \frac{\rho_r U_b^6}{\{C_s g (S_r - 1)\}^3} \dots\dots\dots (7)$$

$$N_s = \frac{C_s}{(U_b / \sqrt{gH})^2} \dots\dots\dots (8)$$

ここに, C_s : 被覆材の形状, 抗力および揚力係数により決まる係数である。

図-14は, 実験により背後盛土天端水深 d_i を変化させて被覆ブロックの安定限界質量を求め, 式(6)から安定数 N_s を計算し整理したものである。計算曲線は, $C_s=0.06$ として式(8)から求めたもので, 実験結果とよく一致している。ただし, 波高としては最高波高 H_{MAX} を用いている。また, d_i/h が小さくなると N_s は一定になる傾向があるため, 藤池ら(1999)にならって式(8)を次式に改めている。

$$N_s = \max \left\{ N_{s0}, \frac{C_s}{(U_b / \sqrt{gH_{MAX}})^2} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで, N_{s0} はブロックの形状により決まる基準安定数であり, ここでは $N_{s0}=2.5$ としている。

前出図-12の打ち込みモデルでは, 堤体の天端上を流速 U_2 で水平に飛び出した越波水塊が自由落下しながら静水面にある角度をもって打ち込み, 港内側の被覆材に作用する。このときの堤体背後から作用位置までの水平距離 X は次式で

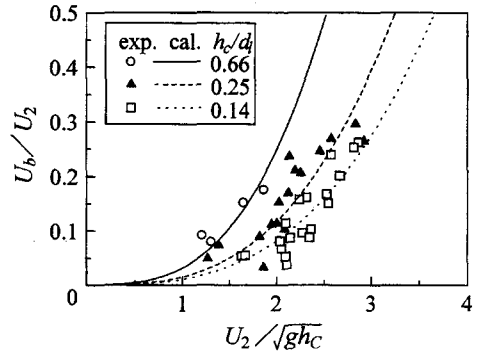


図-13 背後盛土天端近傍流速

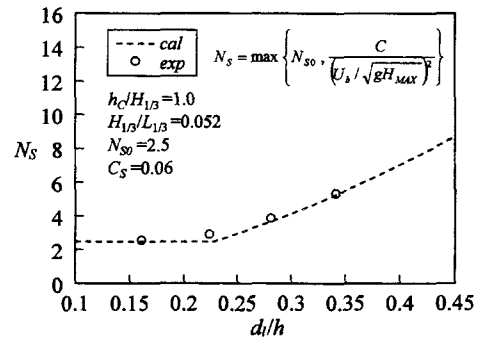


図-14 被覆ブロック安定数の実験値と計算値の比較

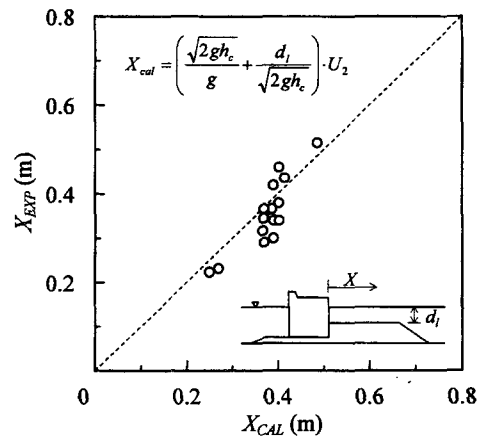


図-15 打ち込み位置の実験値と計算値の比較

求められる。

$$X = \left(\frac{\sqrt{2gh_c}}{g} + \frac{d_l}{\sqrt{2gh_c}} \right) \cdot U_2 \quad \text{..... (10)}$$

図-15 は、模型実験により被覆材に最も被害が生じた箇所と式(10)による計算値を比較したものであり、実験値と計算値はよく一致している。

式(9)の安定数算定式は、背後盛土肩幅が十分大きな条件の実験に基づき提案されたものであるから、盛土ののり肩が打ち込み箇所付近に位置する場合は、過小な結果を与える可能性がある、反対に、肩幅が打ち込み位置に比べて小さいときは、式(9)は過大な結果を与える。また、基準安定数 N_{s0} の値や、係数 C_s の値などは、限られた実験条件のもとに求めたものであるので、今後、更に検討を進める余地がある。

c) 傾斜堤背後小段の耐波設計

傾斜堤背後に設置される小段に作用する外力としては、堤体透過波と堤体を越波した水塊の打ち込み力が考えられるが、早川ら（2001）は後者の外力が支配的と考えて、越波水が水面に打ち込み小段天端に到達するという一連の運動を、Kudale ら（1996）を参考にして図-16 に示すようにモデル化している。越波水の打ち込み角、流速、打ち込み位置などは次の式(11)～(16)で表される。

$$V_j = C\sqrt{g\eta} \quad \text{..... (11)}$$

$$\eta = KH - h_c \quad \text{..... (12)}$$

$$V_{j2}^* (= V_{j2}/gH)^2 = C^2(K - h_c^*) + K + h_c^* \quad \text{..... (13)}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{C} \sqrt{\frac{K + h_c^*}{K - h_c^*}} \right) \quad \text{..... (14)}$$

$$V_b^{*2} (= V_b/gH)^2 = V_{j2}^{*2} \exp \left(-a \frac{d_l^*}{\sin \beta} \right) \quad \text{..... (15)}$$

$$X_b^* (= X_b/H) = C \left(\sqrt{K^2 - h_c^{*2}} + \frac{d_l^*}{\tan \beta} \right) \quad \text{..... (16)}$$

ここに、 V_j ：傾斜堤天端における流速、 C ：流量係数、 η ：天端上水位、 K ：波頂高比、 V_{j2} 、 β ：静水面への打ち込み速度および角度、 h_c^* ：無次元天端高 h_c/H 、 V_b ：小段天端上の流速、 a ：水中における減衰率の大きさを表すパラメータ、 d_l^* ：無次元小段天端水深 d_l/H 、 X_b ：小段天端における打ち込み位置である。

被覆材の安定数 N_s は、前出の式(7)と同様に次式で表すことができる。

$$N_s = \frac{C_s}{(V_b^* \cos \beta)^2} \quad \text{..... (17)}$$

ただし、式中の係数 C 、 K 、 a 、 C_s の値については明らかになっておらず、模型実験等により更に検討が必要である。

2.4 小段形式構造物の今後の課題

前節 2.3 で述べた耐波設計上の課題のほかに、環境的要素に関する課題が残されている。消波工前面小段

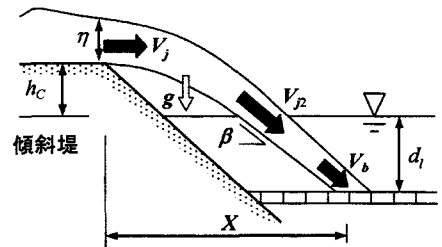


図-16 背後小段への越波水の打ち込みモデル

形式および傾斜堤背後小段形式の構造物については、整備後の生物調査が継続して実施されており、これまでの成果は森ら（2001）、佐藤ら（2004）などが報告している。これらの構造物は、概ね当初の期待通り岩礁として機能しており藻場の形成が確認されているが、海藻現存量などは年変動が激しく、必ずしも良好なデータばかりではない。これは、海藻群落形成の重要な要因である水温などの環境が影響していると考えられる。また、磯やけ地帯といわれる北海道日本海西南部では、ウニによる食害の影響が大きいといわれており、ウニの進入防止工（例えば桑原ら、2001）の併用や他の新技術の開発が待たれる。

また、公共事業としてこれらの施設を整備していく以上、社会に対してその効果を具体的に説明できることが重要である。このため、海域環境の保全、創造の効果を定量的に示すことが可能な手法の開発が求められる。

3. 釧路港島防波堤の施設計画

重要港湾釧路港は 1999 年に開港 100 年を迎え、年間 2,000 万トンを超える貨物量を取扱い、地元の製紙業や水産業、道東の酪農業といった産業を支える物流拠点港として、道東の海上貨物取扱いの約 9 割を担っている。1996 年 12 月には、輸送の高率化および物流コストの削減に資する、船舶の大型化や係留施設不足の解消に対応するため、西港区に水深 14m～12m の大型岸壁を有した釧路港港湾計画へと改訂されている（図-17 参照）。

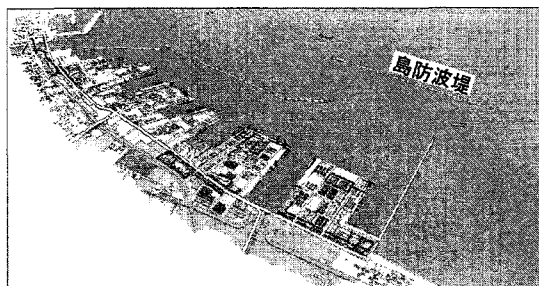


図-17 釧路港港湾計画完成予想図（西港）

1997 年度より本格的に西港拡張整備に事業着手し、2002 年 11 月 1 日に 14m 岸壁を有する第 4 埠頭を供用開始した。また、同年 8 月 31 日には道東で初めて釧路～韓国（釜山）間の外貿コンテナ定期航路が開設されたところである。釧路港島防波堤は、これら埠頭を有する新たな西港の港内静穏および船舶航行の安全を図るため、沖合約 3km に計画された全長 2,500m の防波堤である。

一方、釧路市は道東海域の豊富な水産資源を背景にした漁業基地として発展してきた港湾都市であり、物流機能と水産機能が共生する港湾整備の要請のもと、改訂港湾計画が策定されており、「港湾整備と将来の漁業の発展・安定の両立を実現」を目指している。具体的には、島防波堤の背後に形成される静穏域の有効利用を可能とし、「漁業の継続と経営の安定に資する」ことが強く求められた。

3.1 港湾環境政策（エコポート）

沿岸域の環境の保全が重要視される中、国の港湾環境政策は、①港湾を核とした総合的な静脈物流システムの構築、②自然と共生する社会の実現、③ダイオキシン類対策の推進、④放置艇対策の推進、の 4 つの柱建で推進中である。

現在に至るまでに、先導的に 1994 年 3 月より「環境と共生する港湾（エコポート）」として政策の推進を図ってきている。「環境と共生する港湾（エコポート）」は、①将来世代への豊かな港湾環境の継承、②自然環境との共生、③アメニティの創出の 3 つの基本理念のもと、表-3 のコンセプトで形成を図ることとしている。

エコポートモデル事業は、エコポートとして全国の模範となる整備事例を早期に形成するため、港湾環境インフラの総合的な整備を重点的、先行的に行っている事業で、釧路港改訂港湾計画の事業化において本構想を積極的に取り入れることとし、釧路港は 1998 年 6 月にエコポートモデル港指定を受け、同時に島防波堤の建設がエコポートモデル事業として認定されている。

表-3 環境と共生する港湾（エコポート）

① 循環型社会を構築する静脈物流システムの核となるみなど	既存ストックを最大限に活用し、物流コストの低減および環境負荷の軽減に主眼をおいた静脈物流システムを構築します。
② 自然にとけこみ、生物にやさしいみなど	港湾開発に際し、良好な自然環境を保全するとともに、生物を含む自然環境への影響をできる限り軽減します。
③ 積極的に良好な自然環境を創造するみなど	水質・底質の浄化など港湾環境の改善を図るとともに、緑地整備や海浜、干潟、浅場、磯場、藻場などの造成により生物の生息にも適した自然環境を積極的に創出します。
④ アメニティが高く、人々に潤いと安らぎを与えるみなど	良好な港湾環境の形成や親水性を生かした港湾緑地の整備などにより、人々が親しみやすい快適な水辺の整備を推進します。

3.2 釧路港エコポートモデル事業

釧路港島防波堤は、従来の防波堤構造に背後マウンドを築造することにより、水生生物の生息環境を新たに創出するとともに、マウンド設置による防波堤堤体のスリム化、浚渫土砂の処理費の低減などを図るものであり、建設コストの縮減と環境に配慮した「水生生物との協調型防波堤」として計画された。

全長 2,500m のうち 1,600m 区間の防波堤背後において幅 100m の盛土を施し、のべ 16ha に及ぶ巨大な人工藻場を創出させる計画である。

a) 島防波堤の特徴

本防波堤の特徴を要約すると、①浚渫土砂の有効利用により陸上処分にかかる費用を低減でき、環境負荷の低減が図られる、②設計に際し背後盛土による滑动抵抗力を期待できるため、堤体幅を縮小することができる、③背後盛土の天端を適切な水深に設定し、海藻類の育成に適した環境を創出することにより多様な生態系を生むことが期待できる。

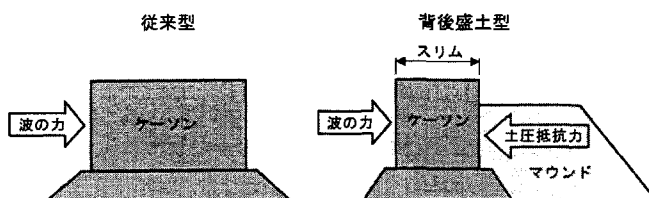


図-18 背後盛土による堤体の縮小イメージ

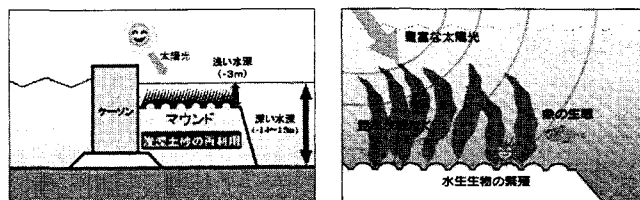


図-19 新たな環境の創造

b) 島防波堤の計画概要

島防波堤の配置計画は、拡張される西港内の静穏度の確保、入港船舶の安全確保、さらには潮流の変化による周辺漁場影響や漂砂による航路埋没に対する負荷を最も少なくするため、図-20 に示すように決定された。延長は 2,500m で、港湾計画目標年次は 2008 年である。

防波堤の基本的な構造は、一般的なケーソン式混成堤となっている。また、港外水域への反射波影響が許容されるので、消波工なしの構造により、ケーソン堤体の延伸工程に有利なように配

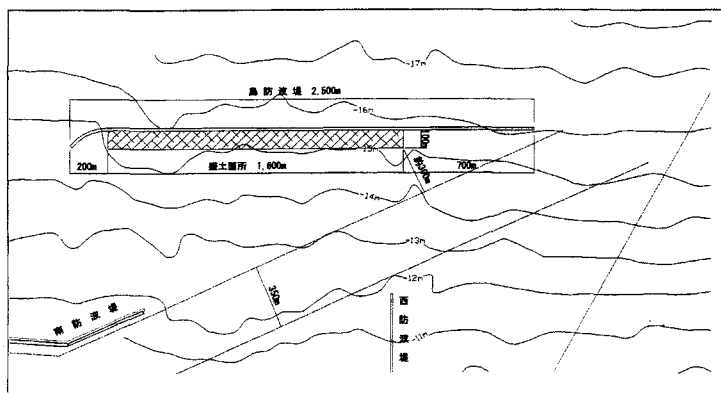


図-20 釧路港(西港)島防波堤配置図

慮している。このことにより工程促進の条件が整った場合、背後盛土の施工空間の早期確保や、港内への静穏効果の早期発現という課題に応えることができる。

背後盛土部の平面配置についても、周辺の潮流変化に大きな影響を与えないこと、大型船の入出港時の航行への配慮上、航路から 300m 程度離して、延長 1,600m、幅 100m の 16 ha の規模としている。

c) 島防波堤のスケジュール

島防波堤は 1998 年度に現地着工しているが、西港内で整備が進められた物流機能拡張のための第 4 埠頭の建設と並行して、本来機能の静穏度向上の目的に併せ、防波堤背後での盛土施工が可能となるために必要な防波堤延長確保のため、表-4 に示す実施工程で堤体本体部が急速施工されてきている。

背後盛土の本施工に向けては、試験フィールド事業として検証を行いながら、実証試験区間 1 ha (延長 100m × 幅 100m) の造成を 2001～2005 年度の予定で施工中である。

表-4 島防波堤の実施工程 (2004 年度まで)

年 度	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	備 考
本土工延長	80m	120m	120m	260m	120m	125m	195m	全体 2,500m のうち 1,020m
盛土工 (土留等を含む)				1 段目		2 段目	2 段目	全体 1,600m のうち 100m を 2005 年度に完成予定。

d) 事業の合意形成経過

釧路港の新しい港湾計画に水産協調型施設を導入する議論は、1996 年 5 月の釧路港水産協調型施設導入検討委員会で本格的に始まった。釧路市港湾部に事務局・座長を置き、地元 2 漁協 (利用者)、釧路市水産部 (港湾管理者)、釧路開発建設部 (事業主体) のメンバーで 1997 年 5 月までの 6 回開催されている。地元レベルの話し合いの場として、島防波堤の背後に形成される静穏域の有効利用について、利用する側から、および施設整備の制度等の側から、双方の意見が交わされ島防波堤の構想 (案) の輪郭が形作られた。次のレベルの専門機関として、学識経験者、行政 (市・道・国)、漁協で構成される釧路港水産協調型施設検討委員会を設置し、島防波堤の整備方針・構造断面の検討を行い、具体化している。

また、島防波堤を水産協調型で施設整備を行うにあたり、留意すべき付近海域の漁船と大型船舶航行の安全性について、船主協会、港湾協会、海上保安部、漁協、市、国のメンバーで 1997 年度に釧路港航路計画検討会として検討・評価が行われている。

また、1997 年度には釧路港環境調査委員会により、総合的な釧路港の環境に関する指針である釧路港環境計画 (案) が取りまとめられ、今後の釧路港海域での環境に対する総合的な評価の方法についても検討された。これら経過を踏まえ、釧路港のエコポートモデル事業計画書が 1998 年 6 月に策定され、指定されるに至っている。

4. 釧路港島防波堤の設計上の課題と対応

4.1 設計上の課題

前章で述べたように、釧路港島防波堤には一般的なケーソン式混成堤の背後に大規模な盛土を設置する形式が採用された。図-21 は防波堤設計の流れを示している。通常の混成堤を設計する場合に比べると、①藻

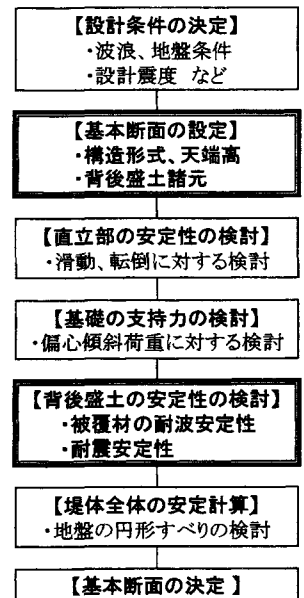


図-21 防波堤設計のフロー

場としての機能を発揮できる背後盛土の最適な形状を設定する必要がある、②盛土部の耐波安定性の検討が必要である、③釧路地方は地震の頻発地帯でもあり盛土部の耐震安定性が重要な課題として挙げられる。以下に、それらの検討結果を述べる。

4.2 藻場環境としての検討

a) 背後盛土天端水深の設定

既に述べたように、光環境および流動環境に対しては、藻場の天端水深が最も重要である。このため、1998～1999年度に現地周辺の天然藻場並びに既存防波堤の藻場調査を実施した。その結果、現地において海藻類の生息被度が向上するのは概ね-4.0m以浅であり、-2.0m付近の被度が最も大きいことが分かった。また、将来、盛土上をコンブやウニの漁場として利用する可能性も考慮すると、対象漁船を5t未満と想定すれば水深は2.5m程度必要である。更に、施工およびメンテナンス時の作業船等の作業限界水深などを考慮し、学識経験者の意見も参考に天端水深をL.W.L.以下-3.0mに設定することとし、流動環境をさらに向上させるために天端上に高さ2m程度の起伏を設ける方向で検討を進めることとなった。

ただし、越波水が打ち込む部分については、天端水深が小さいと打ち込み波力が大きくなり、質量の大きな被覆材が必要になるため、次節4.3に述べるように別途検討することとした。

b) 浮泥に対する検討

釧路港周辺の底質は砂質土であるが細粒分が多く含まれており、波浪による巻き上げや近隣の河川からの流出土砂などの浮遊砂が盛土天端上の付着基質へ堆積し、海藻類の遊走子の着生や生育を阻害することが懸念される。先に述べたように、盛土天端上に起伏工を設置するのは、遊走子の着生の障害となる基質上への浮泥等の堆積を極力防止することも目的としている。起伏工の形状は現在検討中であるが、例えば写真-22のように割石を積み上げたり、図-23のような溝付き傾斜ブロックなどが考えられている。

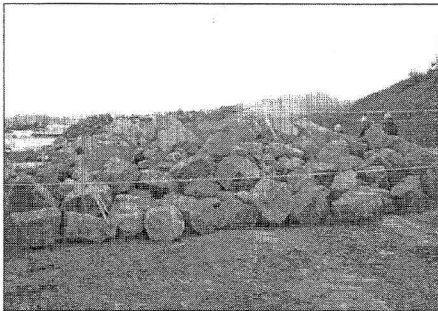


写真-22 陸上における、割石による起伏工の再現試験

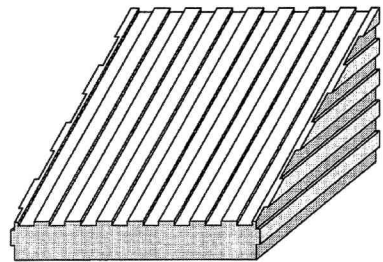


図-23 起伏工に用いるブロック形状の検討例

4.3 背後盛土の耐波設計

a) 打込部の被覆材所要質量

背後盛土天端には越波水が打ち込み、大きな波力が作用する。盛土中詰材の浚渫土砂は“ゆるい”状態と考えられるため、盛土天端は構造上十分な強度にする必要がある。ここでは、図-24に示すように越波水が直接打ち込む範囲を“打込部”として被覆材に異形ブロックを用いることを想定し、それ以外を“藻場部”として自然石（割石）による被覆を想定して耐波設計を行った。打込部の耐波安定性に関しては、2.3b)で既に述べたようにある程度の知見はあるものの、施設規模が大きく最適な被覆法を選定する必要があることから、現地条件に対応した縮尺1/50の二次元水理模型実験により基本的な被覆方法を決定した。

表-5 は、釧路港島防波堤の設計条件である。式(10)により打ち込み位置を求めると $X=16\text{m}$ となるが、藻場部に質量 500kg 程度の割石を用いることを想定しており、実験により打込部幅を 30m と設定した。実験の結果、被覆ブロックの所要質量 M は表-6 に示すように盛土天端水深により異なり、 -3.0m の場合は $M=26.4\text{t}$ 、 -4.0m では $M=19.9\text{t}$ となったが、両者の経済比較により打込部天端水深は -4.0m が採用された。同表には前出の式(1)～(9)により算出した計算質量も示してある。盛土天端水深が -4.0m の場合は実験値と計算値はほぼ等しいが、水深 -3.0m では、大きく異なっている。算定式は、被覆材近傍流速を推定し、その流速の 6 乗に所要質量が比例する形であるため、流速の推定精度により結果が大きく変わってくる。既に述べたが、係数 C_s の値を含めて更に検討が必要であると考えられる。

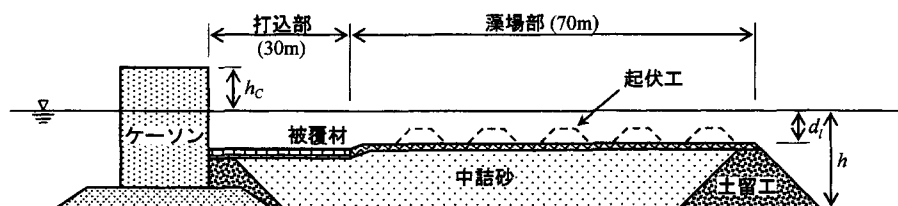


図-24 防波堤の断面模式図

表-5 設計条件

構 造	形 式	背後盛土付きケーソン式混成堤
	水 深	$h=15.8\text{m}$
	潮 位	$H.W.L.=+1.5\text{m}$
波 浪	天端高	$h_c=6.7\text{m}$
	波 高	$H_{1/3}=8.6\text{m}, H_{\text{MAX}}=12.6\text{m (H.W.L.)}$
波 浪	波 期	$T_{1/3}=12.9\text{s}$
	天端水深	打込部 -3.0m or -4.0m
背後盛土	藻場部	-3.0m

表-6 打込部被覆ブロック所要質量

天端水深	実験値	計算値
-3.0m	26.4t	66.2t
-4.0m	19.9t	22.4t

※ 実験では許容被害率を 1% (1200 波) とした。
 ※ 計算値は、 $C_s=0.06$ として算出した。

b) 藻場部の被覆材所要質量

藻場部被覆材の所要質量についても、上述と同様に水理模型実験により検討した。被覆材には割石を用いるものとし、設計波 1200 波作用後の被害率の許容値を 5% として安定質量を求めた。

盛土の天端水深は、打込部は -4.0m 、藻場部は -3.0m であり、水深が変化する箇所安定性が最も問題となる。このため、打込部と藻場部の接続方法を模型実験により種々検討した結果、勾配が $1:3$ より緩やかな割石斜面とする方法が採用された。最終的には次節の図-27 に示すように、藻場部は質量 500kg 程度の割石の 2 層被覆とし、接続部はやや被害を受けるため 3 層以上に被覆することとした。

4.4 背後盛土の耐震安定性の検討

釧路港は地震の頻発地帯にあり、 1993 年の釧路沖地震時には港湾施設も甚大な被害を受けた。背後盛土は規模が大きく、中詰砂としてゆるい浚渫土砂を使用することから、地震時の安定性を大型 3 次元水中振動台実験により検討した。

図-25 に示すように、土留工部分をモデル化した 4 ケースについて縮尺 $1/15$ の実験を行った。ケース③、④は、より経済的となるように、盛土中詰め材の 2 段階施工を想定したものである。地震波は八戸波 (S-252NS BASE) とし、最大加速度が 100gal と、レベル 1 地震動に相当する 350gal の 2 段階加振とした。加振後の残留変位量はスケールにより計測し、また、実験中の中詰砂内の間隙水圧を鉛直方向に 4 点で計測した。中詰

砂は相馬硅砂 5 号を使用し、水中落下させた状態で実験を行った。この硅砂は、通過百分率 50%に相当する粒径が $D_{50} = 0.32\text{mm}$ 、均等係数 $U_c = D_{60}/D_{10} = 1.4$ のよく粒径のそろった砂であり、現地の土砂に比べて液状化が発生しやすいと思われる。

100gal で加振したときには中詰砂に過剰間隙水圧はほとんど発生しなかったが、350gal では有効上載圧の 80～90%の過剰間隙水圧が発生しており、中詰砂が全層液状化に近い状態に達したと考えられる。図-26 は 350gal での加振後の各ケースにおける残留変位量を 3 倍に拡大して示している。盛土部においては各ケースとも現地スケールで 0.6～0.8m 程度の沈下が生じている。これは、盛土厚の 7%程度に相当する沈下量であり、中詰砂が液状化したために発生したものである。土留堤については全体として外側に向かって残留変位が生じている。ケース③で最大 0.8m 程度の水平変位が観測された点もあるが、全体的には 0.2～0.3m 程度となっている。

以上、各ケースとも、最大加速度 350gal での加振では盛土部においては液状化により沈下が生じるが、土留堤については、変位は生じるものの崩壊には至らず、土留工としての機能を保持できた。このため、各ケースのうち最も経済的なケース③の土留工形状が採用された。

以上の検討を経て決定された島防波堤の標準断面を図-27 に示す。

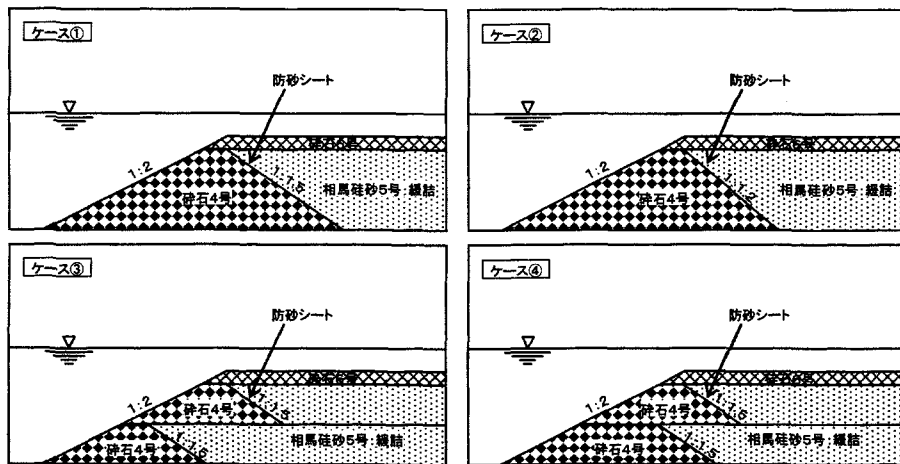


図-25 振動台実験の模型断面

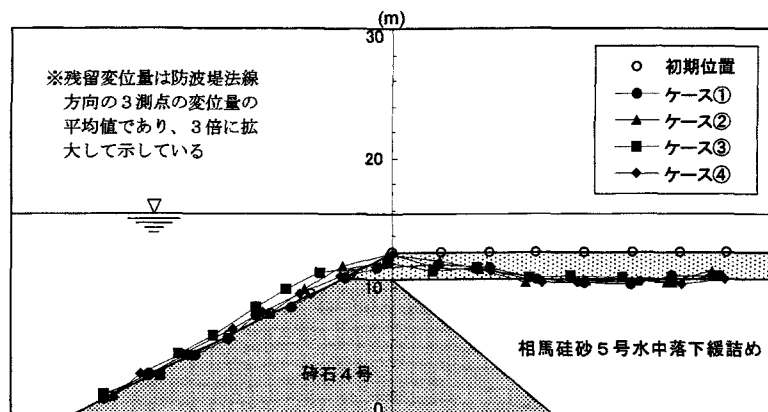


図-26 加震後の残留変位 (350gal)

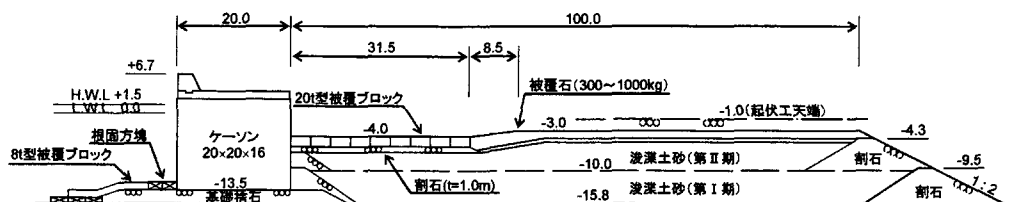


図-27 島防波堤の標準断面

5. 施工上の課題と対応

5.1 施設建設工事の経緯

島防波堤は3章に述べた実施工程で、図-27に示した構造断面のうち、ケーソン式混成堤部に1998年度より現地着工し、2003年度末までに防波堤延長825mのケーソン本体据付を完了させており、西港の静穏度対策施設として着実に機能を発揮させてきている。背後盛土の工程は、1,600mの延長の内100mを実証試験区間として着手し、2001年度から2003年度までに1段目の土留・背後盛土の施工段階を終え、引き続き2003年度から土留・背後盛土の2段目の施工段階を進めてきている。

2004年度には水深3mの被覆石の完成を図ることとしており、2005年度に起伏工の形成を計画している。背後盛土の整備に当たっては、最適な土砂の投入方法や均し方法、防砂シートの規格など大規模土工に対応した施工方法等について実証実験を行い検討してきているので、手法や確認できている事項について以下に概略を紹介する。

5.2 浚渫土砂の投入

島防波堤背後盛土（中詰）の1段目施工へ2001年度に使用した土砂は、第四埠頭-14m岸壁関連の-15m航路の浚渫土の一部の約6万 m^3 である。グラブ浚渫土砂を島防波堤背後へ運搬し、築造後の土留内に全開ページにて直接投入し盛土を行った。浚渫土砂は、細粒分が混じった細砂・レキ混じり砂が主体で、海上投入後、自由落下させることから、盛土の形成状況の把握には、マルチナロービーム測深システムによる高精度・高密度の海底面の測量を実施しており、また、土砂投入施工による周辺環境への影響を汚濁拡散状況のモニタリングを行い監視している。

a) マルチナロービームを利用した測深システムによる施工管理

マルチナロービーム測深システムは、

①動揺センサーにより測量船自体の変位を補正するため、より精度の高い測量が可能である、②通常のシングルビームの深浅測量では6~15°の指向角範囲の最浅値を測深値とするものだが、マルチナロービームでは0.5°の指向角で測深を行うため海底地盤の詳細な測深が可能である、③専用解析ソフトにより、測量データを深浅平面図・鳥瞰図・断面図等として簡単にアウトプットする事ができ、また

土量計算等も短時間で算出できる、などの利点から、水深変化が多くかつ複雑なダム湖の堆積状況調査、および埋立地の施工管理等(投入量、沈下量等)へ多く利用されてきている。

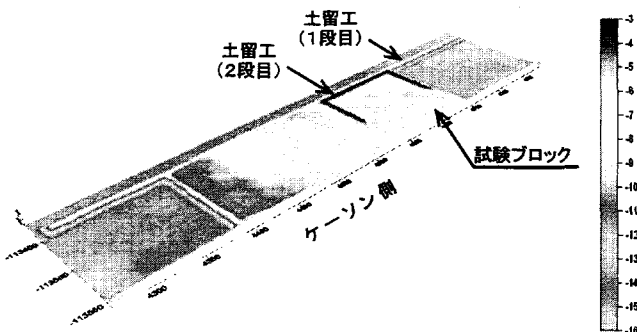


図-28 背後盛土測量図(2003年11月)

図-28 に示した 2003 年 11 月測量の画像のように、海中部の形状を立体的な視覚で把握出来ており、自由落下で形成される法面勾配の施工管理値を 1:10 と設定する根拠として、また、天端上の不陸処理や施工途上の変状把握などに有効に活用してきている。

b) 汚濁拡散状況のモニタリング

中詰として土留内に盛土される浚渫土砂の粒度組成は、細粒分の混入が相当量あり、海上投入時や自由落下時には濁りの発生が懸念されることから、汚濁拡散状況のモニタリングを流況観測（電磁流速計）、水質調査（SS 濃度）、濁度調査（自記記録式濁度計、拡散範囲は目視およびビデオ撮影）により行いながら、土砂投入の施工を行っている。土砂投入施工時の投入箇所周辺の流速は 0.3m/sec 以下の環境にあることが確認されており、SS 濃度は土砂投入 180 分後には検出されなくなることと、濁度の拡散についてはカーテン長 1m の汚濁防止膜の効果が十分であることが確認されている。

5.3 防砂シートに関する検証

一般的に埋立護岸工事においては、土砂の吸出しによる埋立地盤の陥没・沈下および護岸背面の空洞化を防止する為、埋立を行う前に防砂シートを敷設する。防砂シートはそれを敷設する場所の不陸の程度、埋立の方法等現場条件に合わせ選定されるが、そのシートの不陸追従性および物性の許容値を超える条件で使用すると損傷し、吸出し防止効果に影響を及ぼす。背後盛土部の築造にあたり、土留の斜面と中詰土砂との境界に吸出し防止工が必要となるが、防砂シートによる工法では、土留の石材の斜面均しが工程・コストの上で大きく影響することから、管理基準・シート規格の検証、他工法の適否を確認するため、陸上試験を行った。

a) 防砂シート下面の均しとシート規格

本工事における土留斜面の均し精度および防砂シートの規格を定める事を目的として、図-29 のイメージで、実際の現場を想定した模式土留（①均し面±20cm、②均し無し面±70cm）を陸上に構築し、防砂シート（織布 2 種類、不織布 5 種類）を使用し検証を行った。防砂シートを敷設後、土砂を水中での落下速度に見立てた空中落下高さ 2m で落下させ、厚さ 2m まで堆積させて、その後一昼夜放置の後に撤去し、防砂シートの物性変化を確認した。試験結果の概要と防砂シートの規格など仕様へ反映させた結果を図-30 に示す。

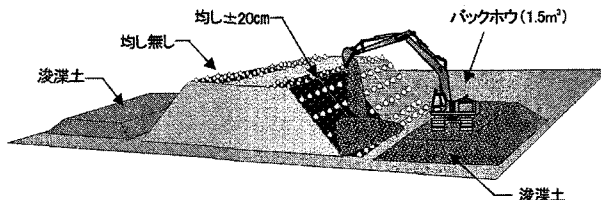


図-29 試験のイメージ

図-30 試験結果の概要と決定規格・仕様

試 験 結 果	決定した規格・仕様
均し面①は均し面②に対し、損傷率が 83.3% 減少した。	捨石式土留の防砂シート下面均しは精度±20cm で行う。
質量 700g/m ² シートは質量 500g/ m ² シートに対し、損傷率は 80% 減少した。	斜面部の防砂シート質量は 700g/ m ² 以上とする。
シートの圧縮率は土砂の衝撃力を緩和し、損傷率の低下に寄与する。	圧縮率を 5% 以上、15% 以下とする。

5.4 固化処理土の吸い出し防止材への活用検討

セメントを加えた固化処理土が防砂シートに代わり、吸出防止材として有効か否かを次のように検討した。

a) 試験方法

土留法面に固化処理土を利用した吸出防止層を設けることを目的として、実際の現場を想定した模式土留を陸上に構築し、固化処理土をバケット打設し、土留法面への堆積状況を目視確認すると共に、土留工法先への流出量を確認し、捨石内部への流入量を把握した。

b) 結果

- (1) 固化処理土を防砂シート代わりに吸出防止材とする場合、中割石空隙中への流入や堆積勾配の確保が課題となり、相当な数量の打設が必要となりコスト面で不利である。
- (2) 実験でのセメント添加量は最大で 220kg/m^3 であるが、添加量増加による上記課題の改善は土質やコストに課題を多く残し、固化処理土の吸い出し防止材への活用は困難である。

5.5 実証試験盛土地盤の評価

島防波堤背後盛土の実証試験区間 $L=100\text{m}$ は 2001 年度の土留造成工事の着工以来、2004 年度中の水深 3m のマウンド天端までの完成に向けて施工中であるが、今後の技術開発資料として活用するため、施工特性や地盤強度特性等を調査把握してきている。

実証試験区間に形成されるマウンドは、海底面下の極めて浅い深度まで浚渫土の自由落下により緩い盛土施工となることから、極軟弱な砂地盤の強度特性を評価し、波浪時・地震時における地盤の静的強度・液状化強度の確認が必要となるほか、①盛土の沈下・天端面の安定性、②盛土の段階施工の安定性に係る課題について確認が必要である。調査は表-7 に示す内容で、調査時期で「背後盛土の天端高を-10.0m まで施工した段階で実施する、第Ⅰ期」と「背後盛土を-5.0m まで施工した段階において実施する、第Ⅱ期」に分けて行う。

表-7 実証試験区間での調査項目

評価項目	検討目的	調査方法および検討内容	備考
盛土部の地盤強度特性	土砂投入のみで形成された極軟弱な砂地盤の強度特性	①原位置試験 ・標準貫入試験 ・オートマチックラムサウンディング (ARS) ・フラットディラトメータ試験 (DMT) ・コーン貫入試験・密度検層 ②土質試験 ・密度・含水比・粒度	2001 ~2004
盛土部の沈下および天端面の変状特性	盛土設置による沈下・天端面の安定性	①天端面の水深測量 ②沈下板による測定	2001 ~2004
試験構造物施工による盛土 2 段目の施工手法	2 目施工における諸問題の検討	①防砂シートの敷設 ②土留施工	2002 2003
試験構造物による盛土 2 段目構造の安定性	地盤強度からみた盛土 2 目構造の安定性	①土留 (2 段目) の安定性 ②被覆ブロック (20t 型) の安定性	2002 2003

a) 調査方法

2003 年度までに、実証試験区間では図-31 に示す地点の 1 段目盛土部において、表-7 に挙げた調査を実施している。

地盤強度を把握するための原位置試験としては、一般的な標準貫入試験や密度検層の外、ARS 試験 (オートマチックラムサウンディング) による N_d 値 (N 値と同等の値) の 20cm 毎の測定と、DMT (フラットディ

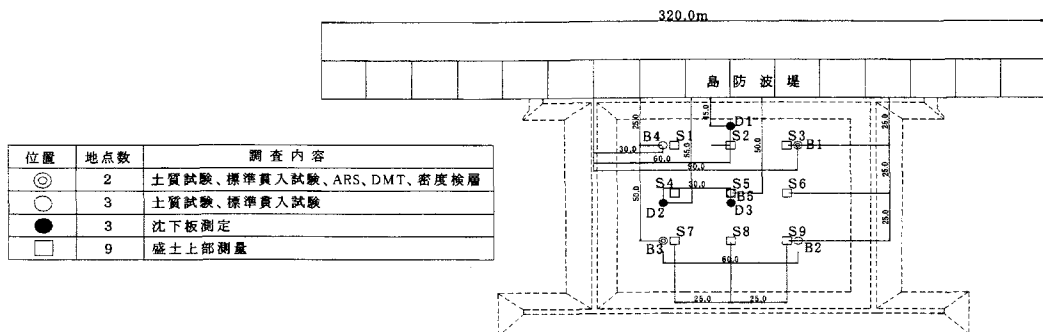


図-31 地盤調査位置全体図

ラトメータ試験)により水平方向の静止土圧を測定している。

b) 地盤強度の調査結果

実証試験区間では、これまでに4回の調査を行っており、各々盛土の1段目完了後、約2ヶ月、7ヶ月、12ヶ月、22ヶ月を経過した時期で、4回目は2003年十勝沖地震の後となる。

ARS試験やDMT試験等も併せて調査されている2地点(B1, B3)により経過の把握をしてきている。この2地点のボーリング結果を図-32に示す。今後、実証試験区間の完成後の荷重状態まで継続して調査を行い、評価・検証を行っていくこととなるが、現状把握として、他の調査結果も含めた概略は以下である。

①盛土箇所の土質構成は砂を主体としているが場所によっては礫やシルトが卓越し不均一な土質構成となっている。

②盛土層の N_d 値(N 値)は0~7と緩い状況にあり、その分布は、深度2m以浅では $N_d \approx 0$ 、2m以深では $N_d = 2 \sim 5$ となっている。また、旧海底面付近(-15m付近)では、 N_d 値が低くなる傾向がある。

③時間経過に伴う N 値および N_d 値の明確な増加は見られない。

④同一調査地点の標準貫入試験の N 値とARS試験の N_d 値については、比較的整合が良いといえる。

⑤密度検層結果についても時間経過に伴う明確な変化は見られない。

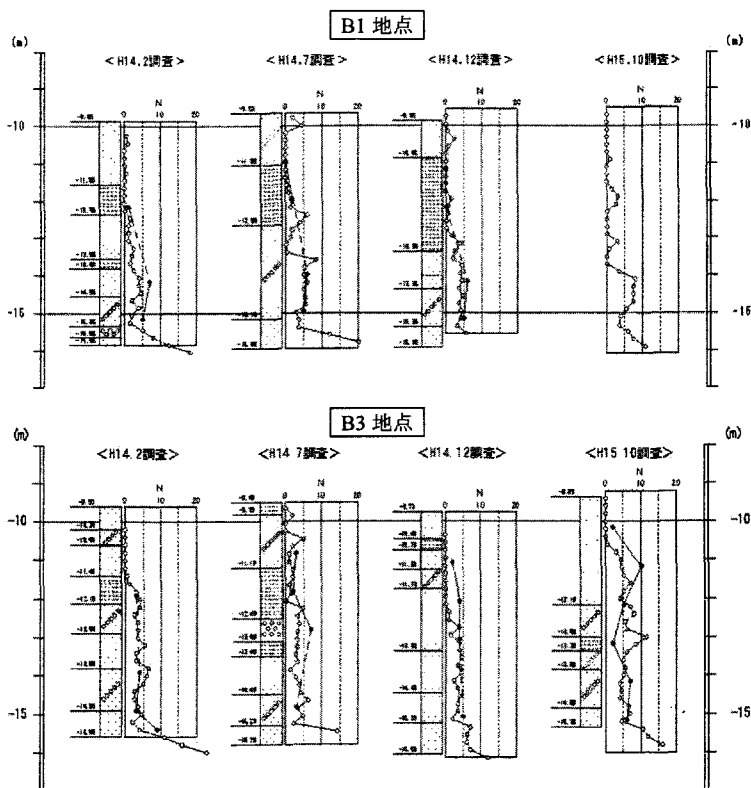


図-32 調査時期毎のボーリング結果

c) 盛土部の沈下および天端面の変状について

盛土部 1 段目の施工完了時からの沈下および天端面の変化を把握するために、水深測量および沈下板による測定を実施した。①観測は盛土施工完了時から約 3 ヶ月間実施した。②沈下板による観測では、各点ともわずかな沈下しかみられず、最も沈下量が大きい箇所でも盛土中央部で 0.09m であった。③水深測量による天端面の変化は、おおよそ 30cm の変動が見られたが、これは盛土の沈下というよりは、天端面が波浪によって場所ごとに移動（堆積あるいは浸食）しているものと考えている。

d) 試験構造物設置による沈下の検証

盛土 1 段目に実際に重量物（20t 被覆ブロック）を設置し沈下状況を把握することで、今後の構造物としての安定性を検証した。①盛土 1 段目に防砂シート・捨石マウンド（厚さ約 1.0m）を敷設し、20t 被覆ブロック 50 個を横断 5 列×延長 10 個の配列で 1 段設置した。②捨石マウンド天端および被覆ブロック天端の高さを測量して沈下状況を把握した。観測結果では、捨石マウンドが被覆ブロック載荷時に若干沈下するものの、その後ほとんど沈下は見られない。沈下量は 10cm 以下となり、施工上問題が無いことが確認された。

被覆ブロック天端も沈下量は微少で据付時に若干沈下した。また、防砂シートの潜水土による目視観察を行ったが異常は無い。

e) 土留工（2 段目）の施工に関して

盛土 1 段目と 2 段目の施工段階の境界について、土砂の投入のみで形成される面とした場合、土留（防砂シート敷設）施工箇所の盛土天端部分においては、均しの工程が必要と考えられた。しかし、実際の投入のみで形成された盛土表面では、限られた一部で 1.0m 超程度の高低差の起伏が生じたが、全般的にはシート敷設が困難な状況は生じていない。一部で生じた起伏についても、底面幅が 4.0m 四方のコンクリートブロックによる 1 回の載荷で、約 50cm の高低差を平滑化することが出来ており、シート敷設の施工上の課題は解決されている。

5.6 2003 年十勝沖地震による影響について

2003 年 9 月 26 日 4 時 50 分頃、十勝沖（北緯 41°46.7′，東経 144°4.7′，深さ 42km）を震源とする M 8.0 の地震が発生し、釧路市で震度 5 強を記録した。この地震による背後盛土への影響については以下のとおりであった。

a) 2002 年設置被覆ブロック状況（背後盛土 1 段目に設置）について

- ①捨石マウンドおよびその下面の防砂シートについては、崩れや陥没箇所はなかった。
- ②被覆ブロックおよび捨石マウンドについては、全体的な沈下が 30cm～45cm 程度発生した。

b) 土留の状況について

- ① 2 段目土留について、天端部の沈下が 20～30cm 生じ、法尻部および内側法面が若干変位した。

c) 背後盛土の状況について

- ①潜水調査を行ったが、噴砂現象の痕跡などは確認できなかった。
- ②盛土高さは、大きな変位は見られない。
- ③盛土天端面の凹凸が平滑化傾向となった。
- ④基礎地盤の沈下はない。

2003 年の十勝沖地震では、盛土上部への上載荷重となっている試験構造物（被覆ブロック、土留）の天端部に若干の沈下が生じたものの、大きな変形は確認されず、現施工段階での背後盛土としては安定していたと考えている。

6. おわりに

盛土中詰材として、建設残土である浚渫土砂を大量に使用する本プロジェクトは、設計、施工上非常に多くの課題を有していたが、これまでに多くの関係者の協力を得、問題を解決しながら慎重に事業が進められてきた。本稿はそれらの課題とこれまでの経緯について取りまとめたものである。2003年度までに、島防波堤計画延長2,500mのうちケーソン42函、825mの設置が完了し、2004年度には起伏工を除く背後盛土部の一部が完成する予定である。

本プロジェクト完了後、果たして盛土部分に期待通りに良好な藻場が形成され、持続されるか？これは、今後慎重にモニタリングを行い、海域利用者ととも協力しながら適切に対応していくことが求められる。

付記

本稿をまとめるにあたっては、(独法)北海道開発土木研究所水産土木研究室の多大な協力を得ている。また、釧路港エコポートモデル事業の実施に係る技術的課題については、1998年度から釧路港島防波堤施設検討委員会(委員長:北海道東海大学 竹田英章教授、主催:(独)寒地港湾技術研究センター)において検討されてきたものである。

参考文献

- 明田定満・山本泰司・小野寺利治・鳴海日出人・斉藤二郎・谷野賢二(1997):複断面構造を有する港湾構造物への海藻群落形成について,海工論文集,第44巻,pp.1131-1135.
- 浅井正・小笹博昭・村上和男(1997):ブロック式構造物への海洋生物着生実験とその着生条件について,港湾技研資料, No.881, 41p.
- 荒川久幸・松生治(1990):褐藻類カジメ・ワカメの遊走子の沈降速度および基質着生に及ぼす海中懸濁粒子の影響,日本水産学会誌, Vol.56, No.11, pp.1741-1748.
- 荒川久幸・松生治(1991):褐藻類ワカメ・カジメ遊走子の着生と成長,生残および成熟に及ぼす海底堆積粒子の影響,日本水産学会誌, Vol.58, No.4, pp.619-625.
- 伊東雅規・上久保勝美・山本泰司・梅沢信敏(2002):混成堤の背後マウンド形状が越波伝達波に及ぼす影響,土木学会北海道支部論文報告集,第58号, pp.482-483.
- 川俣 茂・足立久美子・山本正昭(1994):キタムラサキウニに及ぼす波浪の影響,平成6年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp.85-88.
- 木村克俊・清水雄平・田谷年樹・山本泰司・土井善和・半沢稔(2002):消波ブロック積み幅広潜堤の変形および伝達波特性に関する検討,海工論文集,第49巻, pp.816-820.
- 桑原久実・金田友紀・清川哲志・中山哲殿(2001):ウニの侵入を制御する空気ポケットフェンスの開発,海工論文集,第48巻, pp.1261-1265.
- 佐々木秀郎・竹田義則・北原繁志・鳴海日出人・袖野宏樹(1998):沿岸構造物における海藻群落形成に必要な光と流れに関する研究,海工論文集,第45巻, pp.1166-1170.
- 佐藤朱美・足立久美子・大澤義之・岡元節雄(2004):藻場造成機能を付加した沿岸構造物の藻場創出効果について,海洋開発論文集, Vol.20 (投稿中).
- 須藤賢哉・菊池聡一・山本泰司(1994):小段付き消波ブロック被覆堤の水理特性に関する研究,第37回北海道開発局技術研究発表会講演概要集.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永努・柴田鋼三・合田良実(1982):不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究,港研報告,第21巻,第3号, pp.3-42.
- 二ノ宮清志・須藤賢哉・北原繁志(2004):高基混成堤における環境調和機能について(第1報),第47回北

海道開発局技術研究発表会講演概要集.

- 早川哲也・山本泰司・梅沢信敏 (2000) : 越波による混成堤背後の流体運動とマウンド被覆材の安定性, 開発土木研究所月報, No.570, pp.12-18.
- 早川哲也・森昌也・梅沢信敏・土井善和・遠藤強 (2001) : 環境共生を目的とした傾斜堤背後小段の耐波安定性, 海洋開発論文集, Vol.17, pp. 417-421.
- 平石哲也・平山克也・丸山晴広・奥野光洋・富田孝史 (2001) : 小段を活用した越波低減型護岸の適用性に関する模型実験, 海工論文集, 第 48 巻, pp.726-730.
- 藤池貴史・木村克俊・林忠志・土井善和 (1999) : 消波ブロック被覆堤の前面マウンド被覆材の耐波安定性, 海工論文集, 第 46 巻, pp.881-885.
- 北海道開発局監修 (1998) : 寒冷地における自然環境調和型沿岸構造物の設計マニュアル—藻場・産卵機能編一, (社)寒地港湾技術研究センター, 120p.
- 町口裕二・山下卓也・伊東公人・谷野賢二 (1998) : 岩礫性底棲生物の波浪条件下における棲み場の評価, 海洋開発論文集, Vol.14, pp.35-40.
- 森信幸・坪田幸雄 (2001) : 北海道の自然調和型構造物の藻類着生状況と今後の課題, 第 46 回全国漁港建設技術研究発表会講演集, pp.30-41.
- 森信幸・橋詰知喜・丸山修治・坪田幸雄 (2002a) : 釧路港藻場創出機能付き防波堤の堆積砂制御について, 平成 14 年度日本水産工学会学術講演会論文集, pp.141-144.
- 森昌也・上久保勝美・梅沢信敏・山本泰司・橋詰知喜・伊東雅規 (2002b) : 海域環境に配慮した背後マウンド付き防波堤の設計法に関する研究, 海工論文集, 第 49 巻, pp.941-945.
- 谷野賢二・明田定満・佐藤仁・大森康弘・富士昭 (1993) : 防波堤の疑似岩礁効果について, 海工論文集, 第 40 巻, pp.1151-1155.
- 谷野賢二・鳴海日出人・佐々木秀郎・北原繁志・本間明宏・黄金崎清人 (1998) : 港湾域におけるヤリイカ産卵に関する研究, 海工論文集, 第 45 巻, pp.1156-1160.
- 吉川浩二・斉藤雄之助 (1972) : 泥の堆積および濁りがワカメの配偶体と芽胞体の生長に及ぼす影響, 本州四国連絡架橋漁業影響調査報告 (生理・生態班 試験研究結果集), 日本水産資源保護協会, pp.159-168.
- Hujii, A・S, Takahashi and K, Endoh (1994) : An Investigation of the Wave Forces Acting on Breakwater Handrails, Proc. 24th ICCE, pp. 1046-1060.
- Kudale, M.D. and N. Kobayashi (1996) : Hydraulic Stability Analysis of Leese Slopes of Overtopped Breakwaters, Proc. 25th ICCE, pp. 1721-1734.