

港湾における津波漂流物対策の取り組み ～釧路港における整備事例～

THE ACTION OF TSUNAMI JETSAM COUNTERMEASURE IN PORT MAINTENANCE CASE IN KUSHIRO PORT

丸山修治¹・繁本護²・根本任宏³・佐々木洋介⁴・本間明宏⁵・松下圭吾⁵
Shuji MARUYAMA, Mamoru SHIGEMOTO, Takahiro NEMOTO,
Yousuke SASAKI, Akihiro HONMA, and Keigo MATSUSHITA

¹ 国土交通省北海道開発局釧路開発建設部釧路港湾事務所（〒084-0914 釧路市西港 1 丁目）

² 釧路市港湾空港部（〒084-0914 釧路市西港 1 丁目 100 番地 17）

³ 正会員 国土交通省北海道開発局釧路開発建設部築港課（〒085-8551 釧路市幸町 10 丁目 3 番地）

⁴ 国土交通省北海道開発局農業水産部水産課（〒060-8511 札幌市北区北 8 条西 2 丁目）

⁵ 社団法人寒地港湾技術研究センター（〒060-0807 札幌市北区北 7 条西 2 丁目 8 番地）

Countermeasures against Tsunami disaster are an urgent matter in Kushiro region, which is located at south east of Hokkaido, since the region has experienced large-scale earthquakes several times in the past. The key role of Kushiro Port as a principle center for shipping activities mainly between eastern Hokkaido and Tokyo Metropolitan Area must be secured from Tsunami disaster. However, conventional countermeasures such as development of breakwater often requires considerable time and investment. Focusing on reduction rather than prevention of damage, this paper introduces a new concept of Tsunami countermeasure and shows a case study to design and construct “Tsunami Screen” in time and cost effective manner in Kushiro Port.

Key Words : Kushiro Port, Tsunami Screen, Tsunami Jetsam Countermeasure

1. はじめに

日本政府は、「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る地震防災対策の推進に関する特別措置法」を施行し（平成 17 年 9 月）、防災対策上の対象とすべき海溝型地震・津波を公表するとともに（図-1）、北海道東部から東北に至る太平洋沿岸の 130 市町村を同法の防災対策推進地域に指定した。本海溝周辺はマグニチュード 8 クラスの大規模地震の常襲地帯で、地震とともに津波の被害も受けているのが特徴である。本推進地域に位置している釧路港は、北海道東部と主に首都圏を結ぶ物流の拠点であり、地震・津波によって被災し港湾機能が低下した場合、地域経済に与える影響が大きいことから、地震・津波対策が急務となっている。一方、港湾に津波が来襲し被災した近年における事例では、平成 5 年 7 月に発生した北海道南西沖地震(M7.8)がある。北海道奥尻港においては、車両などが津波漂流物（以下、漂流物）となって港内に流入し、港湾機能や災害復旧活動の大きな支障となったことから、港湾における津波漂流物対策が重要となっている。

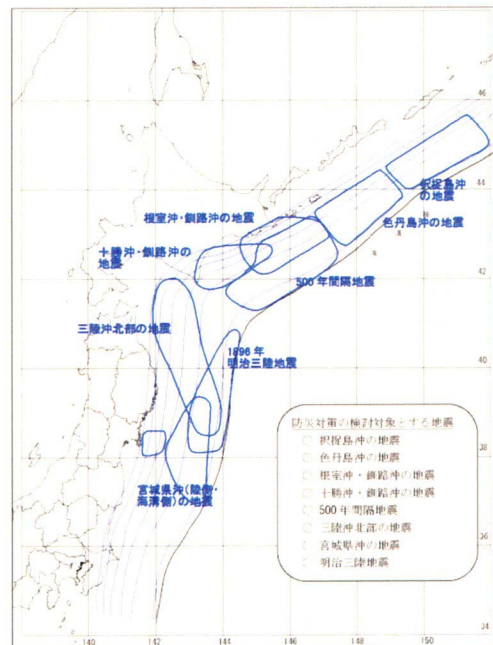


図-1 中央防災会議「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」が示した津波を発生させる断層領域

一方、従来の津波対策は海岸部における防潮堤などの整備が主体で、津波の陸域への流入を防ぐことが目的である。しかし、その整備に要する費用が大きく、かつ整備期間が長いことが課題となっている。また、港湾の過去における津波災害の経験から、津波対策の重要性が指摘されているが、船舶の接岸や荷役など港湾の有する利用特性から、防潮堤等による津波対策は難しいことが課題となっている。

国土交通省北海道開発局釧路開発建設部では、このような課題の解決を図るため、「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」の設計手法を確立し、釧路港において実用化を図った。

2. 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

(1) 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-2)。

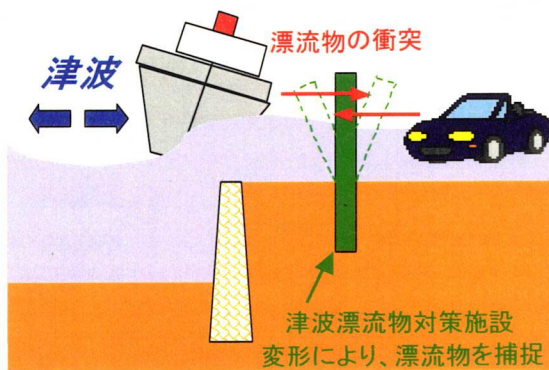


図-2 新たな津波漂流物対策のイメージ

また、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。

(2) 基本構造

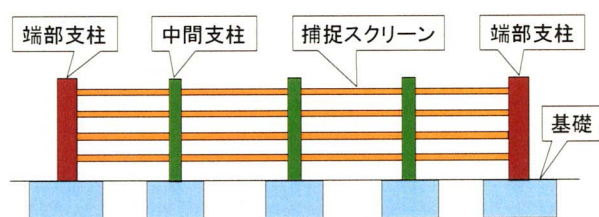


図-3 基本構造

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、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-3)。

a) 端部支柱

端部支柱は、捕捉スクリーンの端部を固定するための支柱で、漂流物が衝突した場合、変形しながらも完全には破壊せずに漂流物を捕捉するものである。また、捕捉スクリーンが目詰まりして流体力を受けた場合には、その荷重に抵抗する。

b) 中間支柱

中間支柱は、支柱位置での捕捉スクリーンの高さを保持するための支柱で、漂流物が衝突した場合、変形しながらも完全には破壊せずに漂流物を捕捉するものである。また、捕捉スクリーンが目詰まりして流体力を受けた場合には、その荷重に抵抗する。

c) 捕捉スクリーン

捕捉スクリーンは、漂流物の衝突時に破損せず漂流物を捕捉するための部材であり、支柱へは外力に耐えられるように固定されている。

d) 基礎

基礎は、地盤と一体化した構造で支柱を固定するものである。

e) 各部材の構造・材質

各部材の構造・材質は、端部・中間支柱は鋼材（鋼管）、鉄筋コンクリートなどが考えられ、捕捉スクリーンはロープ、ネット、ベルトなどが考えられる。なお、後述する釧路港の整備では、端部・中間支柱は鋼管とし、捕捉スクリーンはワイヤーロープ（以下、捕捉ロープ）とした。

(3) 緩衝工

緩衝工の構造は、緩衝工支柱、緩衝工ワイヤーロープ（以下、緩衝工捕捉ロープ）及び基礎から構成している。基本構造の前面に設置することで、基本構造に衝突する漂流物の衝突エネルギーの一部を、緩衝工捕捉ロープの伸びにより吸収することが可能である。このことから、漂流物の捕捉効果をより高める必要がある箇所に整備することが有効である（図-4）。

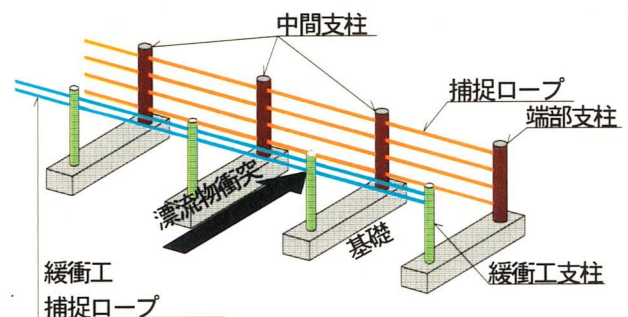


図-4 緩衝工構造

3. 設計手法

(1) 設計の基本概念

津波漂流物対策施設の設計の基本概念を以下に示す。

- ①支柱に漂流物が衝突して損傷を受けても、構造物全体としては破壊せず、捕捉施設としての機能を保持する。
- ②捕捉施設の同じ箇所には漂流物は2回以上衝突しないものとする。
- ③端部支柱及び中間支柱は、漂流物が衝突した箇所の支柱断面が局部的に変形し、さらに、支柱基部の変形により、衝突エネルギーを吸収する。
- ④端部支柱への漂流物の衝突には、支柱のみで抵抗して漂流物を捕捉する。漂流物の衝突エネルギーは、支柱の衝突断面及び支柱基部の変形で吸収する。
- ⑤捕捉施設全体の機能を損なわないために、端部支柱が漂流物の衝突により変形しても、施設両端で捕捉ロープの張力を保持させる。
- ⑥端部支柱の梁変形の許容変形量は、支柱基部に局部座屈が発生した時の支柱の傾斜角とする。
- ⑦中間支柱は、支柱への漂流物の衝突に対し、支柱と捕捉ロープの変形で抵抗し漂流物を捕捉する。漂流物の衝突エネルギーは支柱の変形と捕捉ロープの変形で吸収する。
- ⑧中間支柱の梁変形の許容変形量は、支柱の傾斜角 15° とする。
- ⑨捕捉ロープへの漂流物の衝突には、捕捉ロープと両端の支柱の変形により、衝突エネルギーを吸収して漂流物を捕捉する。
- ⑩漂流物による捕捉スクリーンの目詰まりが起これることを考え、目詰まりによる水の抗力（流体力）を考慮する。
- ⑪緩衝工構造を採用した場合、漂流物は初めに緩衝工に衝突する。この時、緩衝工支柱は崩壊するが、衝突エネルギーの一部は緩衝工捕捉ロープの伸びによって吸収され、その後、漂流物は端部支柱又は中間支柱に衝突する。

(2) 端部支柱

設計手法は、部材の変形により岩石などの衝突エネルギーを吸収する考え方である「鋼製砂防構造物¹⁾」を準用した。端部支柱は、漂流物の捕捉後においても捕捉ロープを保持する必要がある。このため、支柱の許容変形を降伏域に設定し、支柱1本の「梁変形(図-5)」と「局部変形(図-6)」により、漂流物の衝突エネルギーを吸収するものとして部材の諸元を設定する。

$$E \leq E_p + E_r \quad (kN \cdot m) \quad (1)$$

E : 漂流物の衝突エネルギー $(kN \cdot m)$

E_p : 梁変形による吸収エネルギー $(kN \cdot m)$

E_r : 局部変形による吸収エネルギー $(kN \cdot m)$

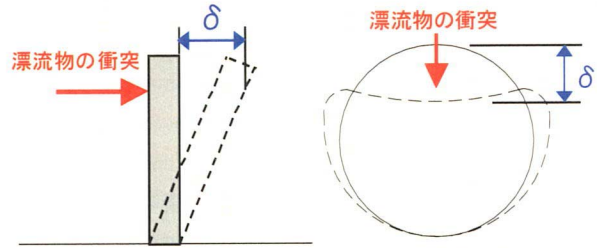


図-5 支柱の梁変形

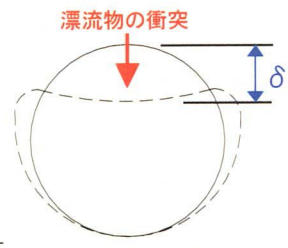


図-6 支柱の局部変形

a) 梁変形による吸収エネルギー (E_p)

梁変形による吸収エネルギー(E_p)は、降伏モーメントから求めた荷重(P_y)と降伏時梁変形量(δ_{py})を用いて次式で算定する。

$$E_p = (1/2)P_y \times \delta_{py} \quad (kN \cdot m) \quad (2)$$

P_y は次式で表される。

$$P_y = M_y / H = Z \cdot \sigma_{yd} / H \quad (kN) \quad (3)$$

M_y : 降伏モーメント $(kN \cdot m)$

H : 漂流物の衝突高さ (m)

Z : 断面係数 (m^3)

σ_{yd} : 動的降伏応力 $= 1.2\sigma_y \quad (kN/m^2)$

σ_y : 降伏応力 (kN/m^2)

δ_{py} は、塑性時梁変形量(δ_{pa})、 P_y 、塑性モーメントから求めた荷重(P_p)を用いて、次式で算定する。

$$\delta_{py} = \delta_{pa} \cdot (P_y / P_p) \quad (m) \quad (4)$$

δ_{pa} は、鋼管片持ち梁を対象とした静的及び高速載荷実験から、ひずみ速度効果や局部座屈の影響を考慮した動的塑性回転容量を次式で算定する²⁾。

$$\delta_{pa} = \theta_{pa} \cdot H \quad (m) \quad \theta_{pa} = 1.355 / (D / tp) \quad (5)$$

D : 鋼管径 (mm)

tp : 鋼管肉厚 (mm)

P_p は次式で表される。 (6)

$$P_p = M_p / H = Z_p \cdot \sigma_{yd} / H = 4R^2 \cdot tp \cdot \sigma_{yd} / H \quad (kN)$$

M_p : 塑性モーメント $(kN \cdot m)$

Z_p : 塑性時断面係数 (m^3)

R : $(D - tp) / 2$

b) 局部変形による吸収エネルギー (E_r)

局部変形による吸収エネルギー(E_r)は、局部変形を発生させる荷重(P)と局部変形量(δ_L)を用いて次式で算定する。

$$E_r = P(\delta_L / 1.8) \quad (kN \cdot m) \quad (7)$$

P は次式で表される。

$$P = M_y / H = Z \cdot \sigma_{yd} / H \quad (kN) \quad (8)$$

δ_L は、 P と次式から算定する。

$$P = (1/4)K \cdot \sigma_{yd} \cdot tp^2 \cdot (\delta_L / D)^{0.8} \quad (kN) \quad (9)$$

k : 実験定数 (=185)

c) 流体力に対する支柱の応力照査

流体力発生時に作用する捕捉ロープの張力に対して、支柱の応力照査を次式により行う。

$$Tw = (FD \cdot a^2) / (8f \cdot ns) + T \quad (kN) \quad (10)$$

Tw : 張力 (kN)

FD : 流体力 (kN/m)

a : 支間長 (m)

f : 支間中央での垂下長 (m)

ns : 捕捉ロープの本数 (本)

T : 中間支柱の変形(δ_{15})に伴う張力 (kN)

$$\sigma = (ns \cdot T \cdot Hr) / Z \quad (kN/m^2) \quad (11)$$

σ : 流体力に対する支柱の応力 (kN/m²)

Hr : 捕捉ロープの高さ (m)

(3) 中間支柱、捕捉ロープ

設計手法は、支柱とワイヤーロープなどの変形により、落石の衝突エネルギーを吸収する考え方である「落石防護工³⁾」を準用した。

中間支柱は、部材性能を最大限活用することとし、支柱の許容変形を塑性域に設定する(最大許容変形角度 15 度)。部材の諸元は、支柱の「梁変形(図-5)」と「捕捉ロープの伸び」により、漂流物の衝突エネルギーを吸収するものとして設定する。

捕捉ロープは、中間支柱変形時においても許容伸び率(3.0%)以下となるようロープ径を決定する。

$$E \leq Ep + ER \quad (kN \cdot m) \quad (12)$$

E : 漂流物の衝突エネルギー (kN・m)

Ep : 梁変形による吸収エネルギー (kN・m)

ER : 捕捉ロープの伸びによる吸収エネルギー (kN・m)

a) 梁変形による吸収エネルギー (Ep)

梁変形による吸収エネルギー(Ep)は、梁変形を発生させる荷重(Fy)と支柱の変形量(δ_{15})を用いて次式で算定する。

$$Ep = Fy \cdot \delta_{15} \quad (kN \cdot m) \quad (13)$$

Fy は次式で表される。

$$Fy = (\sigma_{yd} \cdot Zp) / H \quad (kN) \quad (14)$$

δ_{15} は次式で表される。

$$\delta_{15} = H \cdot \tan 15^\circ \quad (m) \quad (15)$$

b) 捕捉ロープの伸びによる吸収エネルギー (ER)

捕捉ロープの伸びによる吸収エネルギー(ER)

は、弾性域における吸収エネルギー(ER1)と塑性域における吸収エネルギー(ER2: 伸び率 1.5%以下, ER3: 伸び率 1.5%~3.0%)により算定する(図-7)。

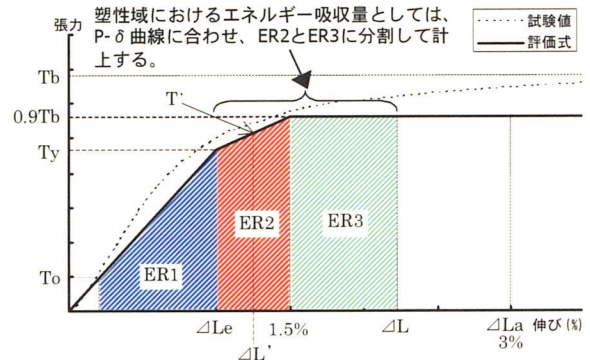


図-7 捕捉ロープの伸びと張力との関係

$$ER = ER1 + ER2 + ER3 \quad (kN \cdot m) \quad (16)$$

c) 流体力に対する支柱の応力照査

流体力発生時に作用する捕捉ロープの張力に対して、支柱の応力照査を次式により行う。

$$Tw = (FD \cdot a^2) / (8f \cdot ns) \quad (kN) \quad (17)$$

$$\sigma = (FD \cdot a \cdot b / 2) / Zp \quad (kN/m^2) \quad (18)$$

b : 流体力作用時の浸水深 (m)

(4) 緩衝工支柱、緩衝工捕捉ロープ

緩衝工は、緩衝工捕捉ロープの伸びにより漂流物の衝突エネルギーを吸収するものとして部材の諸元を設定する。

緩衝工捕捉ロープは、漂流物の衝突により緩衝工支柱が崩壊し、背後の基本構造に衝突するまで、その伸びにより衝突エネルギーを吸収することが可能である。このため、伸び率の高い材質を採用することが効果的である。

緩衝工支柱は、緩衝工捕捉ロープの破断荷重により設計する。

(5) 基礎

基礎は、設計外力作用時に支柱から基礎に伝わる荷重を用いて、滑動、転倒、支持力について検討する。その際の安全率は、想定地震津波の発生確率などを考慮し、滑動及び転倒の安全率を 1.0 に設定する。なお、後述する釧路港の整備では、コンクリート基礎とした。

4. 釧路港における整備事例

(1) 整備箇所

釧路港における津波漂流物対策は、東港区の入舟地区港湾施設用地において、津波漂流物対策施設の整備を実施することとした(写真-1)。

当該箇所には多数の駐車車両があり、前面の岸壁には 5～10GT の小型漁船等が係留しているとともに、整備中である耐震旅客船岸壁の対岸に位置している。また、市街地に隣接し周辺には道路や木造家屋などがある。

このことから、地震津波発生時には、車両の航路・泊地への流入、及び小型漁船等の市街地への流出が懸念されている箇所である。

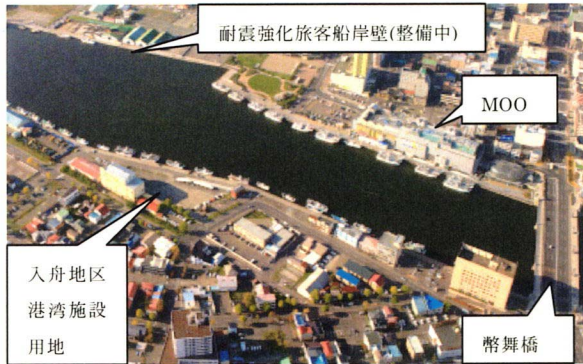


写真-1 津波漂流物対策施設整備箇所（釧路港東港区）

(2) 設計条件

設計条件を表-1 に示す。対象地震津波は、地震の規模及び切迫性の高さを勘案して、中央防災会議において設定している防災対策上の対象地震の中から、「根室沖・釧路沖の地震（M8.3、今後 30 年以内の発生確率 30～40%）」を設定した。

表-1 設計条件

項 目	設 定 値
地震津波	根室沖・釧路沖の地震(M8.3) (今後30年以内の発生確率30～40%)
最大浸水深	1.0m
津波漂流物 (吃水≦浸水深)	押し波時: 5GT未満漁船(吃水0.8m) 引き波時: 車両(吃水0.5m)
漂流物流速	5GT未満漁船: 4.5(m/s) 車両: 3.7(m/s)
衝突エネルギー	5GT未満漁船: 106.2(kN・m) 車両: 20.9(kN・m)
流体力(抗力)	5GT未満漁船: 16.8(kN・m) 車両: 7.1(kN・m)

来襲する津波は、この対象地震による津波シミュレーションの結果を基に、整備箇所における浸水深及び津波流速を津波来襲波ごとに押し波と引き波に分けて整理した。

設計漂流物は、整備箇所周辺の岸壁及び港湾施設用地の利用状況から想定される漂流物を整理し、浸水深が漂流物の吃水以上となる漂流物に設定した。その結果、押し波時の設計対象漂流物は、岸壁に係留している 5GT 未満漁船（吃水 0.8m）、引き波時の設計対象漂流物は、港湾施設用地に駐車している車両（吃水 0.5m）に設定した。

衝突エネルギーは、その算出に際して、設計漂

流物の漂流形態を、5GT 未満漁船は横付係船している利用状況から横漂流、車両は危険側の外力が作用する縦漂流と設定した。また、設計漂流物の衝突形態は、津波漂流物対策施設に対して直角衝突や斜め衝突が想定される。ここでは危険側の外力が作用する直角衝突に設定した。これら設計漂流物の漂流及び衝突形態を基に、設計漂流物の衝突エネルギーは、船舶の有効接岸エネルギー算定式⁴⁾を準用して算定した。

なお、衝突エネルギーの算出に際して、設計漂流物の速度は、下記に記載の方法により算定した。

①5GT 未満漁船（押し波時の設計漂流物）は、津波来襲時には津波漂流物対策施設前面の岸壁に係留状態であると想定し、速度を持たない状態から加速する形態に設定した（他の外力が作用しない理想的な漂流形態）。この形態を基に、5GT 未満漁船の津波漂流物対策施設への衝突速度は、津波流速（押し波）の最大値を、係留箇所から津波漂流物対策施設までの距離を勘案して算出した。

②車両（引き波時の設計漂流物）は、津波来襲時には常にフリーな状態にあり、その位置も特定できない。よって、車両の津波漂流物対策施設への衝突速度は、危険側の外力である津波流速（引き波）の最大値に設定した。

$$E_1 = W \cdot V^2 / 4g \quad (kN \cdot m) \quad (19)$$

E_1 : 漂流物(漁船)の衝突エネルギー $(kN \cdot m)$

W : 仮想重量 (kN)

V : 漂流物(漁船)の速度 (m/s)

$$E_2 = W \cdot V^2 / 2g \quad (kN \cdot m) \quad (20)$$

E_2 : 漂流物(車両)の衝突エネルギー $(kN \cdot m)$

W : 仮想重量 (kN)

V : 漂流物(車両)の速度 (m/s)

W は次式により算定する。

$$W = W_0 + W' = W_0 + (\pi/4) D^2 \cdot L \cdot rw \quad (kN) \quad (21)$$

W_0 : 排水トン数(車両の場合は重量) (kN)

W' : 付加重量 (kN)

D : 吃水 (m)

L : 漁船の長さ(横漂流)、車両の幅(縦漂流) (m)

rw : 海水の単位体積重量 (kN/m^3)

流体力は、抗力の算定式⁵⁾を用いて算定した。

$$FD = CD \cdot rw \cdot A \cdot U^2 / 2g \quad (kN) \quad (22)$$

FD : 流体力 (kN)

CD : 抗力係数(平板)

A : 物体の流れ方向の投影面積 (m^2/m)

U : 津波流速 (m/s)

(3) 構造検討結果

主要な構造部材の検討結果を表-2に、平面・縦断面図を図-8に、完成写真を写真-2に示す。

本施設の整備総延長は137mであることから、連続して基本構造を整備した場合、港湾施設用地と前面の岸壁との動線が確保できず、日常の港湾利用に支障をきたす。そこで、15～20mを1ブロックとしてブロック間に幅が1.4m(軽自動車が通過できない幅)の通路を設けることで、人の通行が可能となるよう整備した。この場合の各ブロック両端に配置する支柱(施設内端部支柱)の設計は、これらが隣接していることから、2本で漂流物の衝突エネルギーを吸収するものとした。

捕捉ロープは、設計漂流物(5GT未満漁船、車両)以外の小さな漂流物の捕捉なども考慮して、配置間隔を0.3m以下に設定した。また、設置高さは現地盤から中間支柱変形時に最大浸水深を確保できる高さまでとした。

本施設の整備箇所内、幣舞橋側の37m区間は、背後に道路や木造家屋などがある。このため漂流物の捕捉効果を高める必要があることから、基本構造の前面(海側)に緩衝工を整備した。

表-2 主要な構造部材の検討結果

部材	諸元	材質
端部支柱	$\phi 508.0 \times t6.4$	STK400
施設内端部支柱	$\phi 457.2 \times t6.4$	STK400
中間支柱	$\phi 318.5 \times t6.0$	STK400
捕捉ロープ	$\phi 11.2$ ST1670 7×19	SUS304

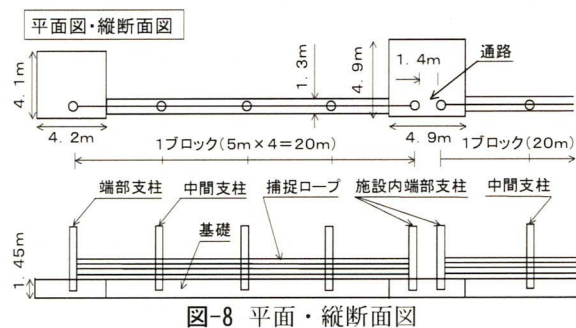


図-8 平面・縦断面図



写真-2 津波漂流物対策施設(基本構造)

(4) 景観への配慮

本整備箇所周辺は、幣舞橋、フィッシャーマンズワーフ(MOO)など釧路市の代表的な施設に近

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。なお、天幕部は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とした(写真-3)。



写真-3 津波漂流物対策施設(景観への配慮箇所)

(5) コスト縮減効果

本施設のコスト縮減効果は、同条件で構造検討した場合の防潮堤(コンクリート製、重力式)と比較して、約20%の縮減が図られた。

5. おわりに

当該地域は、津波来襲の危険性が高い地域であることから、本施設が津波対策のシンボルとして活用されることが期待されている。また、今後、津波漂流物対策を実施する港湾において参考になれば幸いである。

謝辞：本施設の設計に際しては、水野雄三北海道工業大学教授を座長とする「釧路港津波漂流物対策施設検討会」を開催し、多くの方々に設計手法などについてご指導をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，一般鋼製砂防構造物編，財団法人 砂防・地すべり技術センター，2001。
- 2) 星川辰雄，石川信隆，彦坂熙，阿部宗平：鋼管はり部材の動的終局限界に関する一考察，土木学会論文集，No.525/I-33，pp.139-152，1995。
- 3) 社団法人 日本道路協会：落石対策便覧，第5章落石防護工の設計，社団法人 日本道路協会，2000。
- 4) 漁港・漁場の施設の設計の手引検討委員会：漁港・漁場の施設の設計の手引(上)，第2編設計条件，社団法人 全国漁港漁場協会，2003。
- 5) 港湾の施設の技術上の基準・同解説検討委員会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，第2編設計条件第7章流れ及び流れの力，社団法人 日本港湾協会，1999。