

港湾・漁港における津波漂流物対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 27

担当チーム：寒冷沿岸域チーム

研究担当者：中嶋雄一、井元忠博、上久保勝美、
本間大輔、酒井和彦

【要旨】

東北地方太平洋沖地震津波においては、津波そのものによる被害とともに、船舶や車両などの津波漂流物による被害が大きな問題となった。北海道内の一部の港においては津波漂流物の捕捉を目的とした津波漂流物対策施設が整備されており、今後も整備が進むものと考えられるが、対策施設の施工事例は極めて少なく、設計上の課題が残されている。本研究では、まず、今次津波における大型漂流物の発生状況および既存対策施設の設計条件について整理して設計上の課題を抽出するとともに、今次津波の再現数値シミュレーションを実施して既存の対策施設の効果について検証した。また、津波漂流物の捕捉特性に関する基礎的な水理模型実験を実施して、対象漂流物に応じた適切な施設形状の設定法を提案した。さらに、ラグランジュ型数値解析を用いて対策施設への漂流物の衝突運動を再現し、設計に用いる衝突エネルギーを精度よく推定する手法について検討した。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、津波漂流物対策施設、津波防災

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、今次津波）による津波は東日本の広範囲に甚大な被害をもたらした。今次地震では津波そのものによる被害とともに、船舶や車両などといった津波漂流物の衝突による構造物への被害や、津波漂流物の港内漂流や道路の遮断による物流機能の低下が大きな問題となった。例えば、相馬港では津波によって漂流したコンテナが岸壁上の上屋に衝突するといった津波漂流物による直接的な被害¹⁾が生じており、仙台塩釜港では津波によって港内に多数漂流したコンテナによって岸壁が使用不能となり物流機能が大きく低下するといった漂流物による間接的な被害¹⁾が報告されている。北海道内においても当チームが実施した現地調査において、多数の津波漂流物を確認しており、津波漂流物対策の重要性が今次津波によって改めて明らかになった。

このような津波漂流物に対する対策として、図-1 に示すような津波漂流物対策施設（以下、対策施設）が注目されている。この施設は防潮堤のように陸域への津波の侵入を阻止することが目的ではなく、津波によって生じる漂流物を捕捉することにより、漂流物によって生じる直接・間接的な被害を防ぐことを目的としている。津波の押し波時には船舶など海側の漂流物を

捕捉して、陸域の重要施設への衝突被害を防ぐとともに、引き波時には車両等の陸側の漂流物の港内流出による港湾機能低下を防ぐことができる。対策施設の基本的な構造は図-1 に示すような捕捉ワイヤーおよび支柱から構成された単純な構造形式であり、低コストで整備することができるのが特徴である。

対策施設の施工事例については全国的には非常に少ないのが現状であるが、北海道内においては、今次津波が発生する以前から全国に先駆けて対策施設の整備が進められてきた。さらに、これらの北海道内の対策施設については菅原ら²⁾が報告しているように、今次津波においても漂流物を捕捉する効果が確認されて



図-1 津波漂流物対策施設(釧路港)

おり、対策施設の効果は現地においても実証されている。このような津波漂流物対策に対する要望は今次津波を受けて高くなっており、今後も対策施設の整備が進むものと考えられるが、施工事例、研究事例ともに非常に少なく、設計上の課題が多く残されているのが現状である。

本研究では、既存施設の設計条件の整理や今次津波における効果を検証することによって設計上の課題を抽出するとともに、対策施設を対象とした水理模型実験および数値シミュレーションにより、これらの設計上の課題を解決することを目的とするものである



図-2 津波漂流物の発生状況(3月13日撮影)

2. 今次津波における大型漂流物の発生状況

今次津波においては北海道太平洋沿岸の港湾・漁港においても多くの津波漂流物の発生が報告されている。当チームが震災直後に実施した現地調査においても、**図-2**に示すような漁船などの津波漂流物を多数確認している。ここでは、まず、対策施設設計の基礎となる津波漂流物に関し、今次津波において北海道内で発生した大型津波漂流物の状況について取りまとめた。

船舶は港湾・漁港における代表的な移動浮体であり、津波漂流物として最も重要である。船舶の種類は港の利用形態等によって様々であるが、船体に大きな破損が無ければ漂流し続けることおよび質量が大きいことから重要な津波漂流物の一つである。コンテナ船や台船などの大型船舶については大規模な津波が発生しなければ漂流しないことから、今回の津波においては北海道内での大型船舶の漂流被害は報告されていない。これに対して、漁船に代表される小型船舶は比較的小さな津波であっても漂流しやすいことから、今次津波においても多数の漂流被害が報告されている。

図-3は北海道庁の報告³⁾による北海道太平洋沿岸の漁船被害の分布を示している。漁船の被害は日高地方から十勝地方に集中しており、これらの地域で北海道

全体の7割程度を占める結果となった。図中には来襲した津波の参考値として後述する津波計算手法による津波高の計算値および東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる現地調査結果(浸水高)も併せてプロットしている。今回、漁船被害の多かった日高、十勝地方に来襲する津波の特徴として、舌状に突き出したえりも岬の先端に津波のエネルギーが集中することにより津波高が増大することが指摘されている⁴⁾。今次津波においても上記の理由により、えりも岬周辺における津波高が高い値を示しており、これらの地域において漁船被害が増大した要因の一つであると考えられる。

車両も津波来襲時に制御する必要がある重要な漂流物の一つである。港湾・漁港域においては利用者や来訪者の車両が多数駐車されているとともに、その種類も普通自動車から大型トラックまで様々なものがある。前述の漁船については漁業協同組合により、詳細な被災隻数の取りまとめが行われているが、車両については被災実態についての資料が極めて少ないことから、詳細な台数を把握するのは困難である。北海道庁の報告によると、実際に漂流した台数は不明であるが1286台の車両被害が報告³⁾されており、考慮すべき重

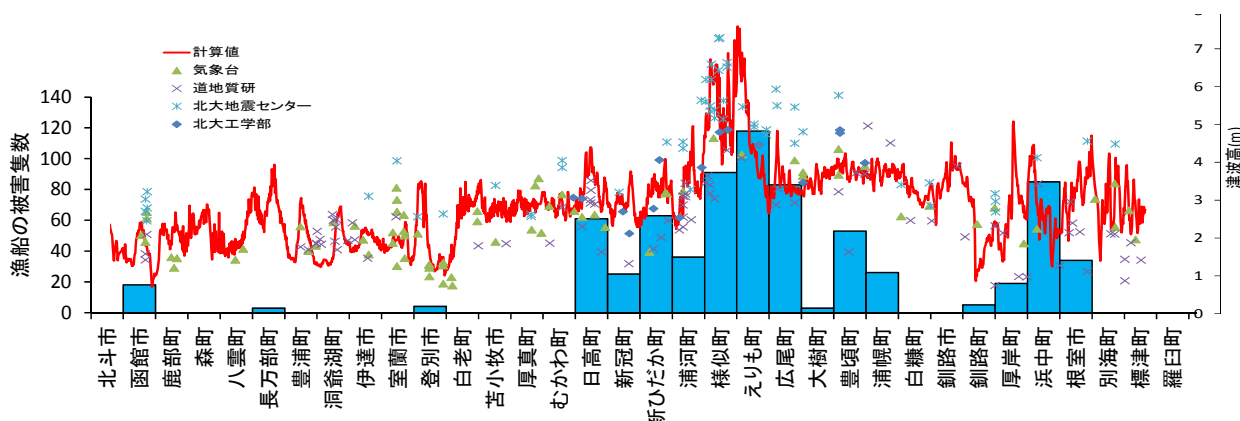


図-3 北海道太平洋沿岸域における漁船の被害隻数

要な津波漂流物の一つであることが再確認された。

漁船、車両以外にもコンテナ、木材、プレハブ、漁具などの多くの種類の津波漂流物の発生が報告されている。また、木岡ら³⁾は今次津波によって海氷が陸域に遡上した痕跡を確認しており、冬季に発生する津波においては、津波漂流物として考慮する必要があることを指摘している。このように、津波漂流物は港の利用形態等によって様々であることから、設計上考慮する必要のある津波漂流物については、漂流物実態調査を実施して漂流する可能性のある物体の位置とその個数を把握しておくことが重要であると考えられる。

3. 既存対策施設の設計条件の整理

3.1 既存の対策施設について

平成 19 年に全国初となる対策施設が釧路港において整備されて以降、北海道内の港湾・漁港では全国に先駆けて対策施設の整備が進められてきた。ここでは、今次津波においても漂流物を捕捉する効果が確認されているえりも港の対策施設に着目して、その設計条件について整理することにより、設計上の課題を抽出した。さらに、今次津波における津波漂流物の捕捉状況について取りまとめた。

3.2 えりも港の設計条件

えりも港においては、図-4 に示す本港地区の物揚場背後において平成 21 年度に対策施設を整備している。

物揚場の背後は図-5 に示すように臨港道路が位置していることから、押し波時には係留・上架している漁船が道路へ流出した場合の交通機能の障害を防ぐとともに、引き波には車両等が泊地へ流出した際の港湾機能の低下を防ぐことを目的として整備された。設置箇所が物揚場の背後用地であることから、配置にあたっては平常時の港湾活動を阻害しないよう、可能な限り道路側の用地に配置している。詳細な設計条件を表-1 に示す。えりも港では対策施設の構造形式について、経済比較の結果、図-6 の正面図に示すようなワイヤータイプを採用している。設計対象想定地震は十勝沖・釧路沖地震としており、この波源による津波の数値計算から対策施設位置の浸水深および流速を算出して設計に用いている。設計対象漂流物については漂流物の実態調査の結果から漁船(5,10,20GT)および普通自動車としている。

本施設の目的である津波漂流物を捕捉するという効果を発揮するためには支柱間隔、支柱高さ、ワイヤー高さの設定が重要であり、設計津波に対して適切な条件に設定しなければ漂流物を捕捉することができない。支柱高さについては、設計漂流物の内、最大である漁船 20GT が漂流した場合の甲板高さと同じ高さに設定しており、支柱間隔については同じく漁船 20GT の船長の半分の延長としている。また、捕捉ワイヤーは 3 本設置しており、設置高さは、津波計算による最



図-5 えりも港における対策施設の設置状況



図-4 えりも港における対策施設の平面配置

表-1 対策施設の設計条件(えりも港)

条件	内容
対象地震	(想定)十勝沖・釧路沖地震
対象漂流物	漁船(5, 10, 20GT), 普通自動車
構造形式	ワイヤータイプ
施設延長	50.0m
支柱間隔	10.0m
ワイヤー高さ	G. L. +2.7m, +2.0m, +1.3m
支柱高さ	G. L. +3.3m
衝突速度	0.8m/s(津波流速を採用)

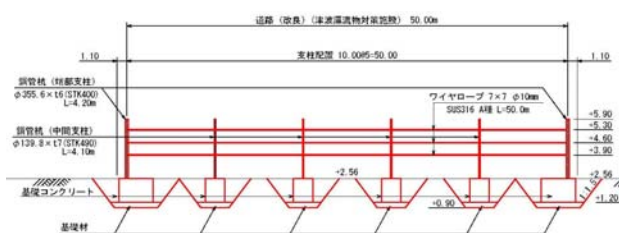


図-6 対策施設の正面図

大浸水深と最低浸水深の高さに設置するとともに、車両および漁船 5.0GT のすり抜け防止を目的として、両者の中間にも設置している。これらの支柱およびワイヤーの設定にあたっては、模型実験などによって捕捉特性の検証が行われておらず、根拠が不十分な点が残されており、設計上の課題となっている。また、支柱の設計にあたっては、塑性変形を考慮した設計が行われているため、衝突エネルギーを算出するための漂流物の衝突速度を精度良く算出することが重要となる。えりも港においては漂流物の衝突速度を津波計算から得られる対策施設位置の最大流速と同じとして支柱の設計が行われているが、衝突エネルギーを過大評価している可能性があり、漂流物の衝突速度の推定法が設計上の課題と考えられる。

本研究では、これらの設計上の課題を解決するため、基礎的な水理模型実験を実施して対策施設の形状が捕捉特性に与える影響について 5 章において示す。さらに、支柱の設計に必要な漂流物の衝突運動についてラグランジュ型数値シミュレーションにより衝突運動を高精度に再現する方法を 6 章において示す。

3. 3 今次津波における漂流物捕捉状況

えりも港において整備されている対策施設は、今次津波において津波漂流物を捕捉する効果が確認されている。まず、船舶について、物揚場に接岸していた漁



図-7 漁船の捕捉状況(えりも港)



図-8 車両の捕捉状況(えりも港)

船が津波により陸上へ漂流したものの、図-7 に示すように対策施設で捕捉しており、背後の家屋などへの衝突被害や道路への流出による交通障害を未然に防ぐことができた。さらに、車両についても道路に駐車されていた軽トラックが引き波によって、漂流したが図-8 に示すように対策施設によって捕捉することができた。対策施設が無かった場合は次章の数値シミュレーションで示すように港内に流出していた可能性が高く、漂流物の流出による港湾機能の低下を未然に防ぐ効果が確認された。次章ではえりも港を対象として今次津波の再現数値シミュレーションを実施して対策施設の詳細な効果の検証を行う。

4 今次津波の再現計算による効果検証

4. 1 検討概要

前節において示したとおり、えりも港において整備されている対策施設については、津波漂流物を捕捉する効果が確認されており、対策施設の効果は現地においても実証されている。しかしながら、数値計算等を用いた詳細な効果の検証は行われておらず、対策施設の有無による漂流挙動の違いなどについては明らかになっていない。ここでは、えりも港を対象とした今次津波の再現数値計算を実施して、対策施設への入射津波特性について明らかにするとともに簡易なモデルを用いた津波漂流物の漂流計算により、対策施設の効果について検証した。

4. 2 津波計算の支配方程式

今次津波の再現計算の支配方程式には式(1)に示す非線形長波理論に基づく連続式および式(2)、(3)に示す運動方程式を用いた。ここでは、近地津波であることを考慮して支配方程式にコリオリ力は考慮していない。計算では後藤ら⁶⁾の提案している手法と同様に空間的な計算点の配置にはスタッガード格子、時間差分には leap-frog 法を採用しており、移流項には一次精度の風上差分を用いた。計算条件の詳細を表-2 に示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

ここで、 η は水位、 h は水深、 D は全水深、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向のフラックス、 g は重力加速度、 n はマニング粗度係数を示す。なお、海域の粗度係数は $n=0.025$ で一定としており、陸域の粗度係数については土地利用条件に従って小谷ら⁷⁾の提案値を用いて設定した。

4. 3 計算条件

港に来襲する津波を精度良く計算するには入射波の遡上や反射などの挙動を再現できるように 10m 程度の空間格子が必要とされている⁸⁾。しかしながら、波源域を含んだ東日本全域を 10m 程度の格子幅で計算することは計算コストの面で困難であることから、波源域については格子幅を粗くし、検討対象領域に向けて徐々に格子幅を小さくする方法が一般的に用いられている。本検討においても波源域をカバーする領域から検討対象としたえりも港周辺の領域まで 6 段階 (2700m、900m、300m、100m、50m、12.5m) で格子幅を変化させて計算を実施した。各領域間における水位・流速の接続にあたっては、大領域の流量を小領域

へ接続し、小領域の水位を大領域へ接続する two-way ネスティングを採用した。再現時間は地震発生から 6 時間とし、時間刻みは C.F.L.条件を満足するように各領域で設定した。陸域への津波の遡上については、えりも港周辺の領域VIについてのみ小谷ら⁷⁾の方法を用いて遡上計算を行っており、上記以外の領域では陸域境界において全反射させた。

4. 4 漂流物の移動モデル

前章において示したとおり、えりも港において整備している対策施設については実際に漂流した車両を捕捉する効果が確認されている。ここでは、前述の津波計算に後藤ら⁹⁾の提案している圧力勾配、付加質量、流水抗力を考慮した漂流物の水平運動モデルを組み込むことにより、車両の漂流計算を行った。

$$\rho_t V \frac{du_t}{dt} = \rho V \frac{du}{dt} + \rho(C_M - 1)V \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_t}{dt} \right) - \frac{1}{2} \rho C_D A (u_t - u) |u_t - u| \quad (4)$$

ここで、 u_t は漂流物の速度、 u は漂流物位置の流速、 ρ_t は漂流物の密度、 ρ は水の密度、 V は漂流物の体積、 A は漂流物の接水投影面積、 C_M は付加質量係数、 C_D は抗力係数を示す。

漂流物位置の流速については前述の津波計算から得られる流速を空間補間して求めるとともに、付加質量係数と抗力係数については後藤ら⁹⁾の提案している方法で与えた。ここでは漂流物として車両を想定していることから、須賀ら¹⁰⁾の成果を参考にして浸水深が 0.5m 以上で漂流計算を開始し、0.5m 以下になると停止するように設定した。

4. 5 今次津波の波源モデル

今次津波の波源については、いくつかのモデルが提案されている。川崎ら¹¹⁾はこれらの提案モデルに対して再現計算を行って藤井・佐竹モデル¹²⁾の再現性が最も高いことを示している。本報告においてもこのモデルを採用することとし、提案されている断層パラメータから *Mansinha and Smylie* の方法¹³⁾を用いて計算した海底地盤変動量の鉛直成分を海面の初期水位分布として与えた。

表-2 計算条件

項目	内容
支配方程式	非線形長波方程式
計算領域	領域Ⅰ:2700m 領域Ⅱ:900m 領域Ⅲ:300m 領域Ⅳ:100m 領域Ⅴ50m 領域Ⅵ:12.5m
沖側境界	領域Ⅰ:沖合への自由透過 領域Ⅱ~Ⅵ:two-way ネスティング
陸域境界	領域Ⅰ~Ⅴ:遡上なし(全反射) 領域Ⅵ:遡上計算(小谷らの方法)
粗度係数	海域:n=0.025 陸域:領域Ⅵのみ土地利用条件に従って設定
再現時間	地震発生から6時間
漂流物計算	後藤らの水平運動モデル
付加質量、抗力係数	$C_0=[0.91+32.5Re^{-1/2}]^2+0.1Fr^{0.25}$ $C_M=1.78$
想定地震	東北地方太平洋沖地震津波(2011/3/11)
断層モデル	藤井・佐竹モデル Ver4.2
初期水位	Mansinha & Smylie の式

採用している波源モデルの妥当性を確認するため観測水位と計算水位の比較を実施した。図-9は代表的な例として苫小牧沖および釧路沖の海象計の設置地点における地震発生から6時間までの水位の時系列変化を示している。図中の青線は観測値、赤線は900m格子の領域Ⅱの計算結果を示す。計算結果は第一波の来襲を含め、観測値の傾向を概ね再現しており、本数値計算の妥当性が確認できる。

4.6 対策施設への入射津波特性

図-10は今次津波の再現数値計算における対策施設への第一波の作用状況の1分間隔のスナップショットを示している。地震発生から58分には港の開口部の流速が大きくなり始め、港内の水位も上昇し始めている。59分には港の開口部の流速がさらに増大し、港内へ津波が侵入するとともに、港の南側の防波護岸において水位が上昇し、そこから侵入した津波が対策施設に作用している。その後、60分には防波堤の開口部から侵入した津波と南側の防波護岸から侵入した津波が合流して対策施設位置の水位が上昇している状況が確認できる。津波の来襲状況を撮影した映像においても南側

の防波護岸から侵入した津波が対策施設に作用する状況が確認されており、概ね現地の津波来襲状況を再現できているものと考えられる。このような作用形態は第二波についても同様の傾向を示していた。

図-11は対策施設位置のGLを基準とした浸水深および流速の地震発生時刻を基準とした時系列変化を示している。地震発生から59分頃から第一波が対策施設に作用しており、118分後に第二波、166分には規模は小さいが第三波が作用している。菅原ら²⁾の報告によると対策施設にはGL+1.0mの高さに津波の痕跡が残されていたことが報告されている。本計算における最大浸水深は0.94mであることから、痕跡値と計算値は概ね一致しており、本数値計算の妥当性が確認できる。本施設的设计浸水深は図中に青破線で示した1.7mであることから、今次津波においては設計条件を上回るような津波は来襲しておらず、設計条件の6割程度の浸水深であったことが明らかとなった。流速についても同様に設計条件の0.8m/sに対して0.45m/sとなっており、浸水深と同様に設計条件以下の値を示している。

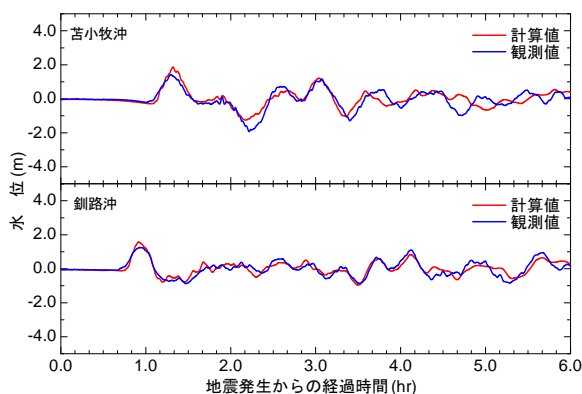


図-9 時系列の水位変化

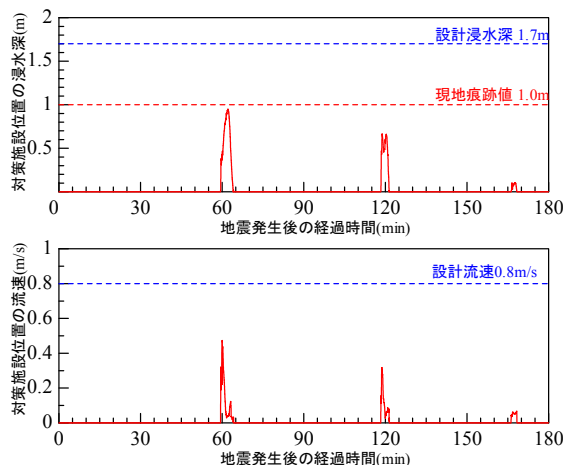


図-11 浸水深(上図)および流速(下図)の時系列変化

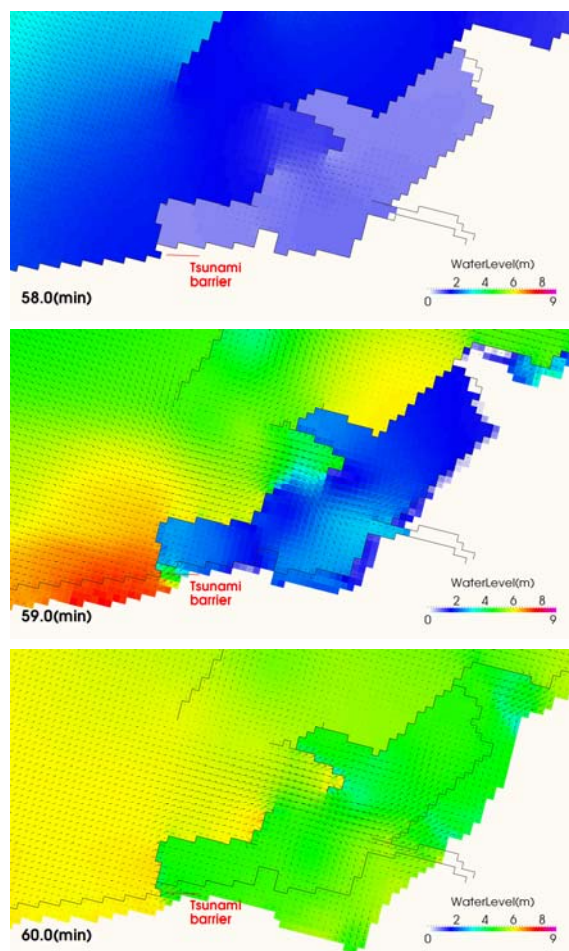


図-10 津波の来襲状況のスナップショット

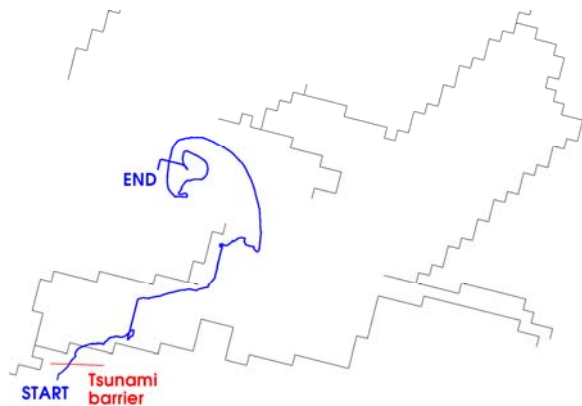


図-12 対策施設が無い場合の漂流軌跡（計算値）

4. 7 漂流物の捕捉特性と漂流軌跡

図-12 は対策施設によって捕捉することのできた車両について、対策施設が無かった場合の漂流開始後 1 時間の漂流軌跡の計算値を示している。前述の対策施設への入射津波特性において示したように南側の防波護岸から侵入した津波によって港内に流出した後、防波堤の開口部から侵入した津波の影響を受けながら港内を漂流する結果となった。実際には対策施設によって捕捉することができたが、対策施設が無かった場合は港内に流出していた可能性が高く、対策施設によって港湾機能の低下を未然に防ぐことができたと考えられる。

5 水理実験による対策施設の最適形状の検討

5. 1 実験の概要

対策施設に設計にあたっては、対象漂流物に応じて

適切な施設形状(間隔、高さ)を設定しなければ漂流物を捕捉することができない。前述の既存施設の設計条件の整理において示したとおり、対策施設形状の設定方法については水理模型実験などによる検討が行われておらず、支柱高さや間隔が漂流物の捕捉特性に与える影響については明らかになっていない。ここでは、対策施設による漂流物の捕捉特性に関する基礎的な水理実験を実施して対策施設の最適な形状について検討した。

5. 2 水理実験の方法

津波漂流物対策施設による漂流物の捕捉特性に関する基礎的な模型実験をフルードの相似測に従って 1/30 の実験縮尺で実施した。実験には図-13 に示す長さ 27.0m、幅 0.6m、高さ 1.2m の開水路を用い、水路に装備している回流装置を用いて水路内に定常流を発生させ、津波による準定常的な流れを模擬した。水路内には図-13 に示すようにモルタル地形を設けており、水平な地形上に対策施設模型を設置した。対策施設の構造形式についてはいくつかの形状が提案されているが、本検討では最も基本的な構造形式として杭タイプを対象とした。対策施設模型の詳細を図-14 に示す。ここでは、杭の直径を 1.0cm に固定し、杭高さ h_p を 3.0 ~ 9.0cm、杭間隔 L_p を 4.0 ~ 22.0cm に変化させてその影響を確認した。本検討では、杭間隔を十分小さくした条件で杭高さが捕捉特性に与える影響を確認する実験および杭高さを高くして杭間隔の影響を確認する実験の 2 系統の実験を実施した。漂流物模型には図-15 に示すような船舶を想定した塩化ビニル製の中空の箱

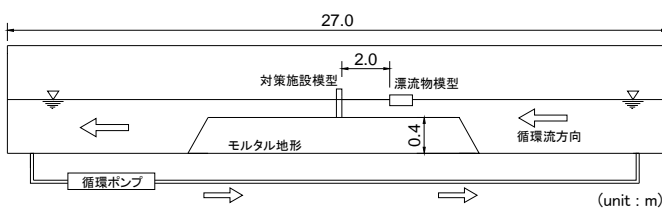


図-13 実験水路

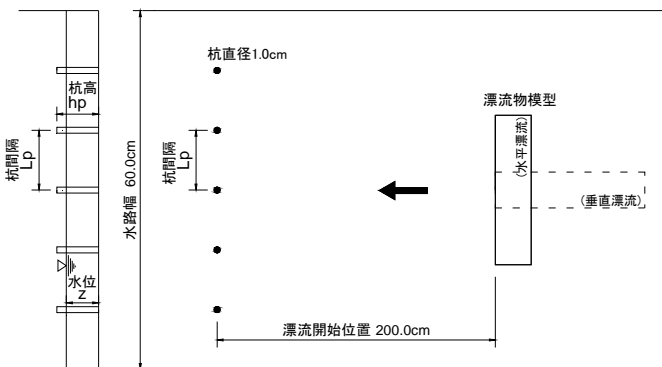


図-14 実験詳細図

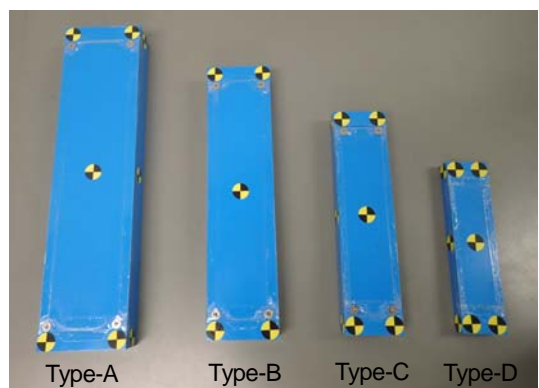


図-15 漂流物模型

表-3 流物模型の諸元

	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D
長さ (cm)	30.0	25.0	20.0	15.0
幅 (cm)	7.3	6.0	4.8	3.6
高さ (cm)	3.3	2.7	2.2	1.6
喫水 (cm)	2.2, 1.1	1.8, 0.9	1.4, 0.8	1.0, 0.6

型模型を用いた。対象船舶としては漁船を想定しており、形状の設定にあたっては、設計要領等を参考にし、表-3 のように Type-A~D の4種類に設定した。また、それぞれの形状について喫水を2種類変化させてその影響を確認している。

実験に先立って対策施設の無い状態において、水位および流速の検定を行っている。ここでは、水位 Z を5~12cm に変化させており、フルード数は0.44~0.55 の条件で実施した。測定では、水路内に所定の定常流を発生させた後、図-14 に示すように対策施設から200cm 上流位置から手動により漂流物模型を漂流させ、対策施設による捕捉状況を確認した。漂流状況については対策施設の上部および側面からビデオカメラにより撮影しており、図-15 に示すように漂流物模型に設置しているマーカーを画像解析により追跡することで漂流運動を把握した。

漂流物模型の漂流挙動については、水路内の流れ場の変動、漂流物の初期条件による変動、漂流物と水の相互作用による変動が要因により、実験毎に漂流挙動に違いが生じることが藤井ら¹⁴⁾により指摘されている。本検討においても、同一条件で実験を実施した場合においても、上記の理由により捕捉特性に変動が生じる条件が存在したことから、繰り返し回数を10回として実験を実施した。

5.3 対策施設の高さの影響

対策施設の杭高さの設定にあたっては、設置個所の津波の浸水深に対して適切な高さの設定しなければ漂

流物を捕捉することができない。ここでは、杭の間を漂流物のすり抜けが生じないような杭間隔($L_p=6.0\text{cm}$)に固定して、杭高さ h_p および水位 Z を系統的に変化させた実験から杭高さの設定法について検討した。図-16 は漂流物 Type-A、杭高さ $h_p=7.0\text{cm}$ 、水位 $Z=9.0\text{cm}$ の条件において漂流物の喫水 d が2.2cm および1.1cm における0.2s 間隔の漂流状況のスナップショットを示している。喫水1.1cm の条件については漂流物が対策施設に接触することなく、上部を乗り越えており、漂流物を捕捉することができていない。これに対して喫水2.2cm の条件では杭の上部に漂流物が衝突した後、水面下に潜り込んで漂流物を捕捉している。このように同じ津波水位および杭高さの条件であっても漂流物の喫水によって捕捉の可否が分かれる場合があることが確認された。図-16 の実験条件について漂流物の杭への接触の有無を判断する指標として無次元杭高さ $h_p/(Z-d)$ を算出すると、喫水 $d=2.2\text{cm}$ の条件は1.03、捕喫水 $d=1.1\text{cm}$ の条件は0.88 となり、このパラメータにより捕捉の可否を説明することができる。

図-17 は無次元杭高さとして池野ら¹⁵⁾が提案している無次元漂流速度の関係で実験結果を整理したものである。ここで V_H は漂流物の衝突速度、 g は重力加速度、 D は漂流物の代表高さ、 L は漂流物の代表長さを示している。図中の白抜き印は漂流物を捕捉できた条件、黒抜き印は捕捉できなかった条件を示している。捕捉の可否は漂流物の形状によらず、概ね無次元杭高さ1.0 付近で分かれており、本パラメータから捕捉を判断する

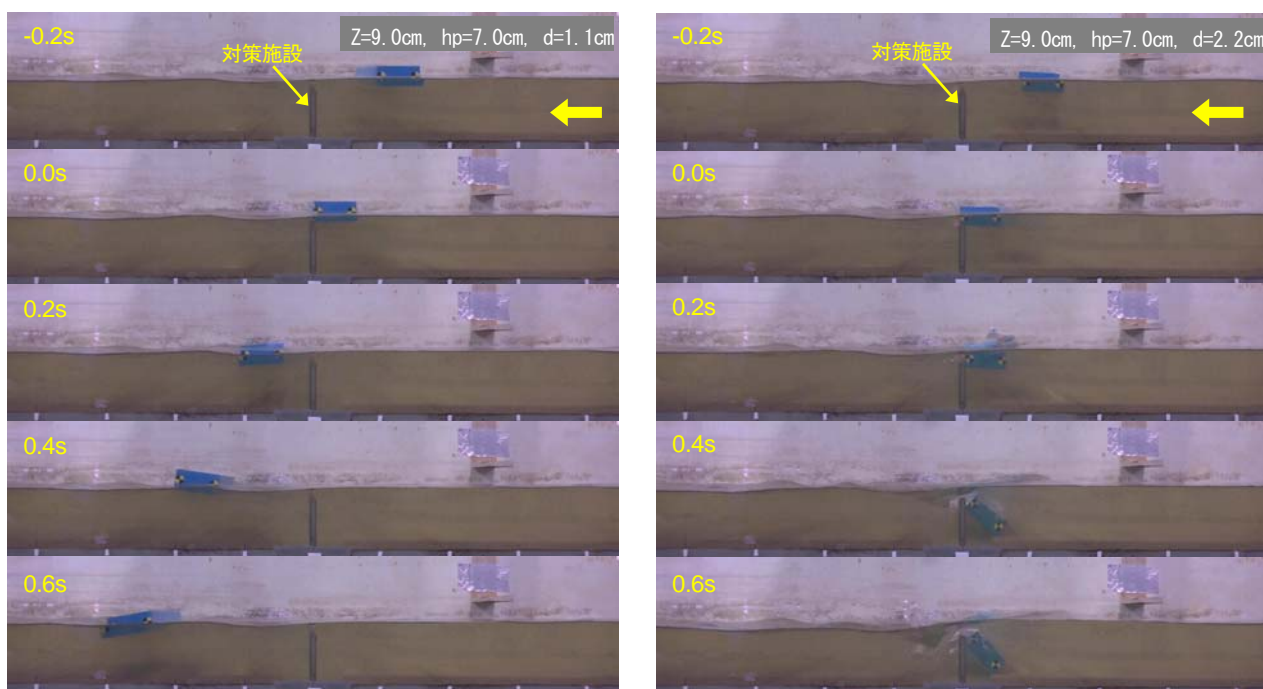


図-16 漂流状況のサンプル(左図:喫水 $d=1.1\text{cm}$ 、右図:喫水 $d=2.2\text{cm}$)

ことができる。今回の実験範囲においては無次元漂流速度が捕捉特性に与える影響は確認できなかった。

5. 4 対策施設の杭間隔の影響

対策施設の杭間隔の設定にあたっては、対象漂流物のすり抜けが生じないような間隔にする必要がある。ここでは杭間隔の影響を確認するために、杭高さを十分高い条件($h_p=9\text{cm}$)に固定して、杭間隔を系統的に変化させた実験から捕捉特性について検討した。前述の杭高さの検討においては10回の繰り返し実験によるばらつきは、ほとんど生じていないが、杭間隔に関する実験においては、実験方法において示したような変動によって、対策施設への衝突位置が微妙に変化することによって捕捉の可否が分かれるため、実験条件によるばらつきが生じた。そのため、杭間隔の検討においては、実験の繰り返し回数に対する対策施設により捕捉できた回数で定義する捕捉率 P_c を用いて実験結果の整理を行った。

図-18は漂流物 Type-A($l=30\text{cm}$)について杭間隔 L_p を段階的に変化させた場合の捕捉率 P_c の変化を示している。 L_p/l が0.5以下の条件においては捕捉率100%となっているが、0.5を上回ると徐々に捕捉率は低下し、0.7で捕捉率は0%を示しており、杭間隔と漂流物の代表長の関係が捕捉率を推定するうえで重要と考えられる。

津波漂流物対策施設に類似した施設として豪雨時の流木の流出被害を防止することを目的とした流木捕捉工を河道内に整備している事例がある。このような捕捉工による流木の捕捉特性について水山ら¹⁶⁾は基礎的な水理模型実験から流木捕捉率の推定式を下式のように提案している。

$$P_c = \begin{cases} 1.0 & (I_i < 0.8) \\ \log(8/I_i) & (0.8 \leq I_i \leq 8.0) \\ 0.0 & (8.0 < I_i) \end{cases} \quad (5)$$

$$I_i = F_r \frac{hW^2}{sL^2} \quad (6)$$

ここで、 I_i は流木の捕捉率に影響を与える捕捉率支配指標、 F_r はフルード数、 h は水位、 W は杭間隔、 L は流木長さ、 s は流木直径を示す。本検討では、 L を漂流物の長さ、 s を漂流物の喫水に置き換えて、今回実施した実験結果との比較を試みた。

図-19は捕捉率支配指標 I_i と捕捉率 P_c の関係で実験結果を整理したものである。捕捉率支配指標が1付近から捕捉率が低下し、8付近で捕捉率が0%となってい

る。図中には水山らの提案式を破線で示しているが、概ね実験値の傾向と一致しており、本算定式の妥当性が確認できる。杭間隔の設定にあたっては、この提案式を用いて捕捉率が100%となるような杭間隔に設定する必要がある。

6 津波漂流物の衝突運動の検討

6. 1 支柱設計の考え方

前述の設計条件の整理において示したとおり、漂流物対策施設の支柱の設計においては、塑性変形を考慮

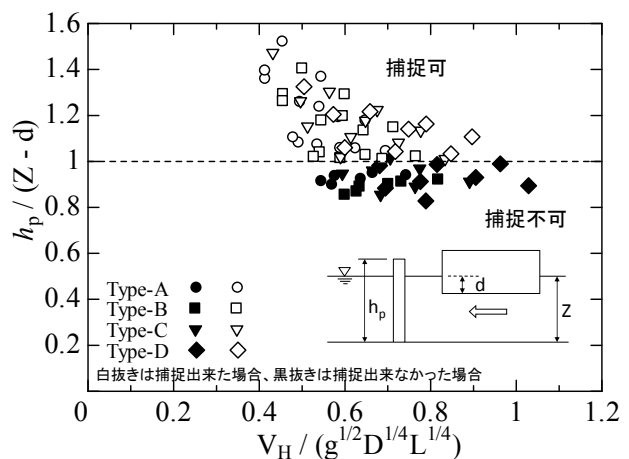


図-17 無次元杭高さが捕捉特性に与える影響

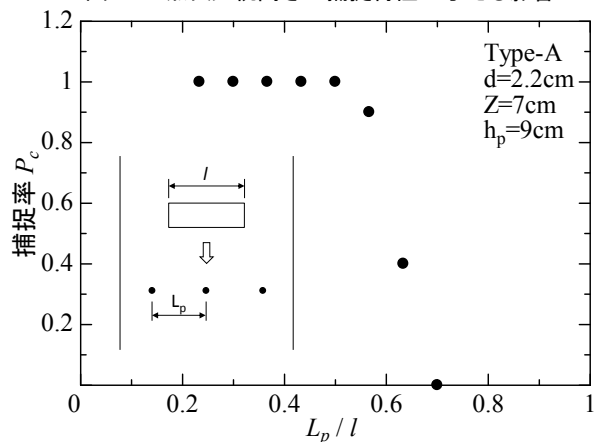


図-18 杭間隔と捕捉率の関係

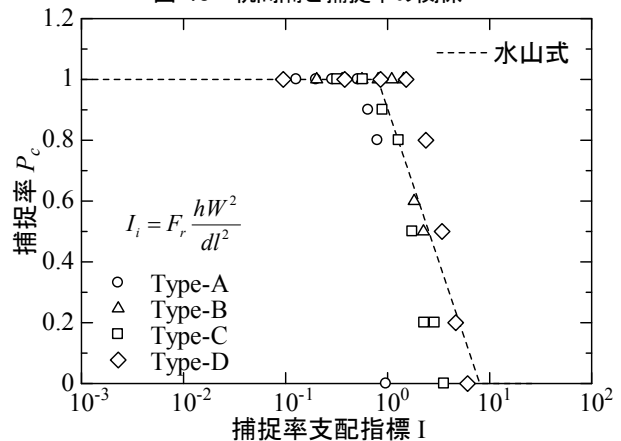


図-19 捕捉率支配指標と捕捉率の関係

した設計が行われている。すなわち、支柱への漂流物の作用（衝突エネルギー）が支柱の耐力（吸収エネルギー）に対して小さくなるような設計が行われている。吸収エネルギーについては支柱の局部変形（凹み）および梁変形による吸収を考慮すると支柱断面は下式を満足するように設定する必要がある。

$$E_r + E_p \geq E_0 \quad (7)$$

ここで、 E_r は支柱の局所変形による吸収エネルギー、 E_p は梁変形による吸収エネルギー、 E_0 は漂流物の衝突エネルギーを示す。

吸収エネルギー（ $E_r + E_p$ ）については支柱の断面性能によって決定することが出来るのに対して、衝突エネルギーについては漂流物の衝突速度に大きく依存することから、衝突速度を精度良く推定できなければ適切な支柱断面を決定することができない。現状では前述のえりも港の設計条件において示したように津波の浸水計算により得られた対策施設位置の最大流速を衝突速度と仮定して漂流物の衝突エネルギーを算出する手法が一般的に用いられている。しかしながら、条件によっては衝突エネルギーを過大評価している可能性が高く、漂流物の衝突運動を精度よく推定する手法が求められている。ここでは、対策施設への漂流物の衝突運動を高精度に推定する手法として、ラグランジュ型数値解析モデル(SPH法)を採用し、水理実験の再現計算からその適用性について検討を行った。

6. 2 計算の方法

SPH法を用いた流体と漂流物の連成シミュレーションにより模型実験の再現計算を実施した。SPH法は宇宙物理学の分野において用いられてきたシミュレーション手法であるが、近年、流体力学への応用も活発に

行われており、海岸工学の分野においても適用事例が増えている。SPH法ではオイラー型の数値解析とは異なり、連続体を離散的に分布した粒子(物理量の評価点)の集合として近似している。そのため、ある粒子の物理量 ϕ の定義には式(8)のように空間分布を定義するカーネル関数 W を用いて、近傍粒子が保持する物理量の重ね合わせとして求められる。

$$\phi(r) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} \phi(r_j) W(r - r_j, h) \quad (8)$$

ここで、 m は粒子の質量、 ρ は密度、 N は近傍粒子の総数、 W はカーネル関数、 h はカーネル関数の影響半径を示す。

カーネル関数を用いて近似した流体粒子の運動方程式を式(9)に示す。

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} - \frac{P_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla W_{ij} + g \quad (9)$$

ここで、 i, j は粒子番号、 P は圧力、 ρ は密度、 Π は人工粘性項、 g は重力加速度を示す。SPH法ではラグランジュ型数値解析であるため、移流項を計算する必要が無いのが特徴である。本検討では、SPH法のオープンソースソフトウェアであるDualSPHysics¹⁷⁾を用いて計算を実施した。計算条件の詳細を表-4に示す。

再現計算では、実験水路全体の再現は行わず、図-20のように対策施設を含んだ4.0m範囲を再現している。ここでは、実験と同じ定常流を計算領域内に発生させるため、流入境界の流体粒子に一定流速を与え続ける方法を採用するとともに、流出境界から計算領域外に出た粒子については、再び流入境界に与えることで、水路内の流体粒子の総数が変化しないように設定した。

表-4 計算条件

条件	内容
カーネル関数	Cubic spline関数
状態方程式	Tait's式
時間積分	Verlet法
粒子径(mm)	8.0
粒子総数	309776個
水位(cm)	7.0
杭高さ(cm)	9.0
杭間隔(cm)	18.0, 22.0
漂流物形状	Type-A

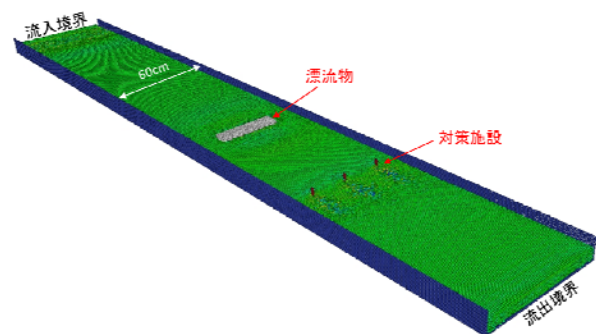


図-20 計算の概観図

漂流物および対策施設についても複数の粒子によって構成しており、形状は水理実験と同じとした。漂流物については構成している粒子の密度を変化させることによって水理実験と同じ喫水条件を再現している。ここでは、漂流物を剛体として扱っており、流体粒子が漂流物粒子に与える力から漂流物の重心位置の並進および回転運動を計算する方法¹⁸⁾により漂流物を運動させている。計算においても水理実験と同様に水路内が定常状態となってから対策施設の上流 2.0m から漂流を開始させた。

6. 3 漂流挙動の比較

図-21は漂流物 Type-A、喫水 $d=2.2\text{cm}$ 、杭高さ $h_p=9\text{cm}$ 、杭間隔 $L_p=18\text{cm}$ 、水位 $Z=7\text{cm}$ の条件について、0.5s 間隔のスナップショットを数値計算と模型実験で比較したものである。模型実験の漂流状況を見ると真ん中の支柱に漂流物が衝突した後、時計回りに回転して、上部の支柱との間で漂流物を捕捉している。数値計算結果は漂流物の捕捉の可否を含めた模型実験の漂流状況を精度良く再現しており、本数値計算の妥当性が確認できる。

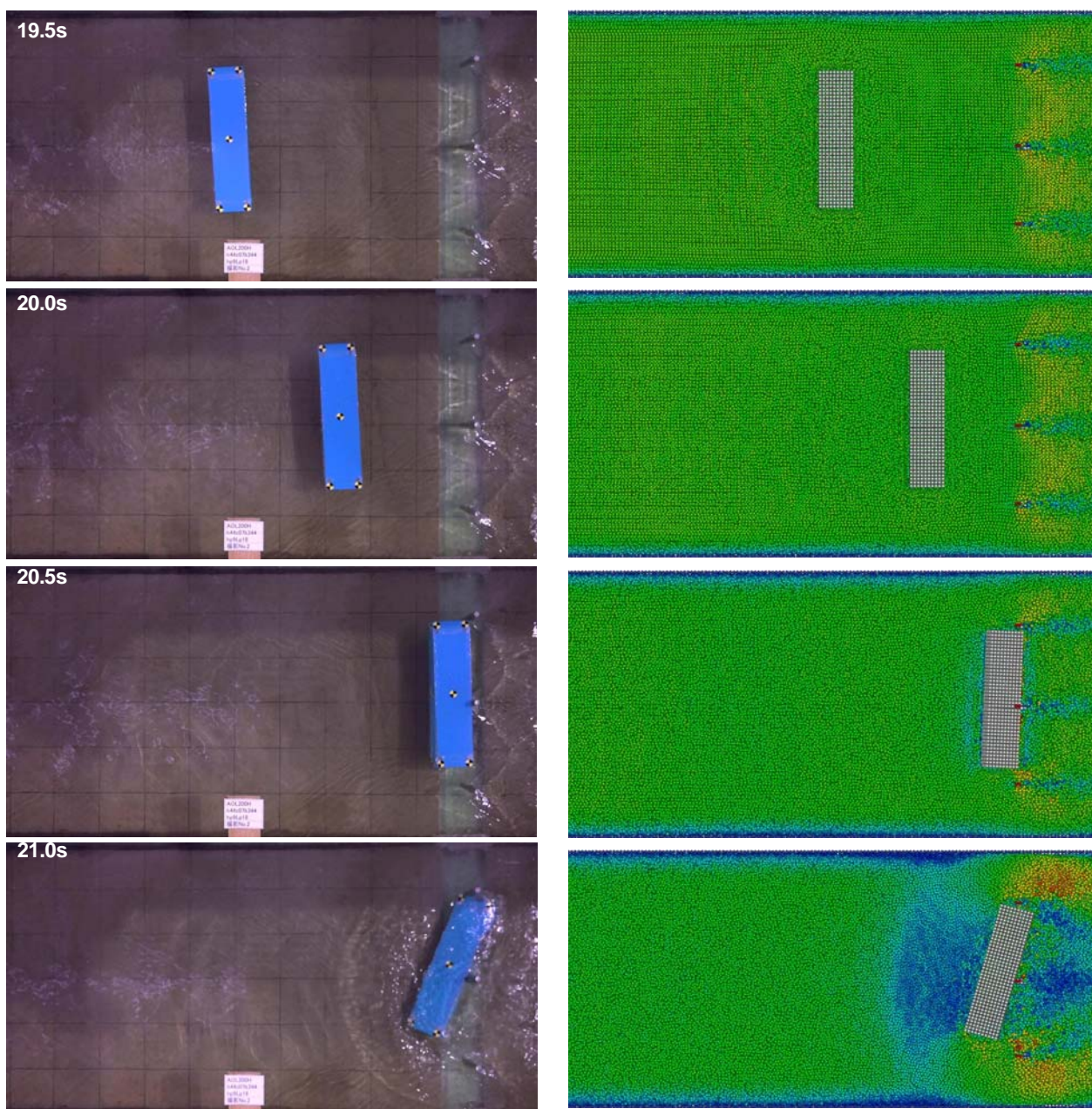


図-21 対策施設への漂流物の作用状況のスナップショット (Type-A, $h_p=9\text{cm}$, $L_p=18\text{cm}$, $Z=7\text{cm}$)

図-22(a), (b), (c)は漂流物 Type-A、喫水 2.2cm、杭高さ $h_p=9\text{cm}$ 、杭間隔 $L_p=22\text{cm}$ 、水位 $Z=7\text{cm}$ の条件について、漂流物の重心位置の X 方向、Y 方向の変位および回転角度の時系列変化を実験値と計算値で比較したものである。この条件では、4.4s において漂流物が対策施設に衝突した後、漂流物を捕捉することが出来ずに支柱を支点として回転運動をしながら対策施設を通過している。図中の実線は SPH 法による計算結果、○印は実験映像から画像解析により読み取った値を示している。X、Y 方向の変位を見ると Y 方向の変位において衝突後の運動にややずれが見られるが、おおむね実験の傾向を再現できている。回転運動についても支柱に衝突した後、緩やかに 90 度回転している運動を精度良く再現できている、本数値計算の妥当性が確認できる。さらに、漂流物の捕捉の可否についても本モデルによって判定可能であることから、支柱の設計のみならず、杭間隔や支柱高さの設計においても適用することができると考えられる。

7. 対策施設の平面配置の留意事項

前章までは、対策施設形状が捕捉特性に与える影響や対策施設への漂流物の衝突運動について述べてきたが、対策施設の現地への適用にあたっては、平面的な

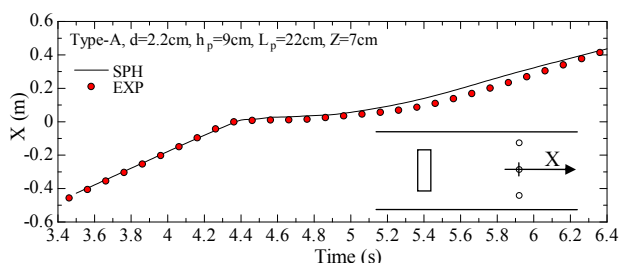


図-22(a) 実験値と計算値の比較(X方向変位)

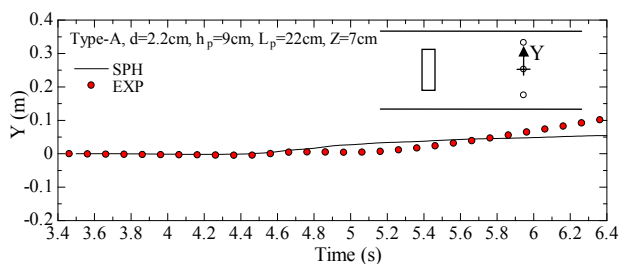


図-22(b) 実験値と計算値の比較(Y方向変位)

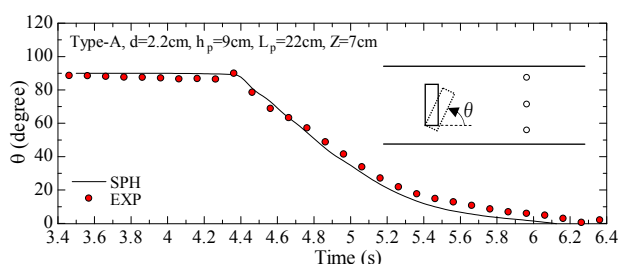


図-22(c) 実験値と計算値の比較(角度)

配置計画が重要であり、減災効果が最も発揮される箇所に配置する必要がある。基本的には水際線に沿った配置や重要構造物を取り囲むような配置とすれば、漂流物を捕捉することが可能であると考えられる。また、前述したえりも港の再現計算のような簡易な漂流物モデルを用いれば設計津波に対して効果的な配置を設定することが可能である。しかしながら、効果的な配置であったとしても、平常時の港湾活動等の支障になる位置であれば、整備することは困難であることから、津波来襲時の減災効果と平常時の利便性の両者を兼ね備えた配置が必要となる。このような平面配置の検討として厚岸漁港では臨港道路の中央分離帯に対策施設を設置することで、平常時の港利用に支障が生じないような配置としている。また、図-5 に示したえりも港のように可能な限り臨港道路に近い箇所に設置することで、物揚場の利用の障害とならない位置に整備している事例もある。また、十勝港においては構造形式に捕捉ワイヤーを用いない杭タイプを採用することによって、車両の横断は出来ないが、利用者の横断は可能な構造形式とすることで、港湾活動の平常時の利用に配慮した設計を行っている。釧路港の事例では支柱の上部にテントを設けてイベントスペースとして利用可能な構造とすることによって、平常時には別の目的を持たせるといった複合的な機能を持たせる配置も行われている。対策施設は数百年に一回程度の頻度の津波を想定していることから、その配置にあたっては、上記のような平面配置の工夫を行うとともに、津波漂流物によって生じると考えられるリスクを利用者と共有しながら平面配置を検討することが重要であると考えられる。

8. まとめ

本研究の主要な結論は下記のとおりである。

- 1) 今次津波において生じた大型漂流物の実態について取りまとめるとともに、既存の対策施設の設計条件を整理することによって設計上の課題を抽出した。
- 2) 今次津波を対象としたえりも港の再現数値シミュレーションから対策施設に作用した津波特性について示すとともに、対策施設が無かった場合の漂流挙動を明らかにすることで既存施設の効果を検証した。
- 3) 基礎的な水理実験を実施して杭高さおよび杭間隔が漂流物の捕捉特性に与える影響を明らかにし、対象漂流物に応じた適切な施設形状の考え方を提案した。

4) 対策施設の支柱設計の基礎となる漂流物の衝突運動について、ラグランジュ型数値解析モデルによる模型実験の再現計算を実施して、衝突運動を精度良く推定可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 高橋重雄、戸田和彦、菊池喜昭、菅野高弘、栗山善昭、山崎浩之ほか：「2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報」、港湾空港技術研究所資料、No.1231、2011.
- 2) 菅原健司、鈴木孝信、佐藤朱美：「津波漂流物対策施設の効果について—東日本大震災を経験して—」、北海道開発局技術研究発表会（安全3）、2011
- 3) 北海道総務部危機対策局危機対策課 HP「東日本大震災による北海道内の被害状況（最終）について」
- 4) 首藤伸夫：津波の事典、朝倉書店
- 5) 木岡信治、森昌也：「氷海域における津波防災の研究の取り組みについて」、寒地土木研究所月報、第720号
- 6) 後藤智明、小川由信：「Leap-frog法を用いた津波の数値計算法」、東北大学工学部土木工学科資料、1982
- 7) 小谷美佐、今村文彦、首藤伸夫：「GISを利用した津波遡上計算と被害推定法」、海岸工学論文集、Vol.45、pp.356-360、1998
- 8) 国土交通省：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き、平成23年7月
- 9) 後藤智明：「津波による木材の流出に関する計算」、海岸工学論文集、Vol.30、pp.594-597、1983
- 10) 須賀撓三：利根川の洪水、山海堂、1995
- 11) 川崎浩司、鈴木一輝、高杉有輝、李光浩、中村友昭、鈴木進吾：「東北地方太平洋沖地震による三陸海岸南部の津波被害と浸水計算」、土木学会論文集 B2（海岸工学）、Vol.68、No.1、pp.381-385、2012
- 12) Fujii,Y., Satake,K., Sakai,S., Shinohara,M. and Kanazawa,T. : “Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”,Earth Planets Space,Vol.63(No7),pp.815-820,2011
- 13) Mansinha, L. and Smylie, D. E. : “The displacement fields of inclined faults”, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440,1971
- 14) 藤井直樹、福山貴子、稲垣聡、池谷毅、稲沢賢、大森政則：「津波による漂流物挙動の変動性に関する実験と評価方法の提案」、海岸工学論文集、Vol.54、pp.241-245、2007
- 15) 池野正明、森信人、田中寛好：「砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究」、海岸工学論文集、Vol.48、pp.846-850、2001
- 16) 水山高久、石川芳治、矢島重美：「透過型砂防ダムによる流木捕捉効果」、土木技術資料、Vol.30、No.11、pp.47-52、1998
- 17) Crespo AJC, Domínguez JM, Rogers BD, Gómez-Gesteira M, Longshaw S, Canelas R, Vacondio R, Barreiro A, García-Feal O. 2015. DualSPHysics : open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Computer Physics Communications 187, 204-216
- 18) J.J. Monaghan, A. Kos and N. Issa : “Fluid motion generated by impact. Journal of Waterway”, Port, Coastal and Ocean Engineering 129, 250-259, 2003

A STUDY ON THE PREVENTION OF THE TSUNAMI DEBRIS IN PORTS

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2013-2015

Research Team : Cold-Region Hydraulic and Aquatic
Environment Engineering Research
Group (Port and Coast)

Author : NAKAJIMA Yuichi
IMOTO Tadahiro
KAMIKUBO Katsumi
HONMA Daisuke
SAKAI Kazuhiko

Abstract : Tsunami debris such as ships and cars has become serious problems as well as disasters caused by tsunami itself during the 2011 Great Tohoku Tsunami. In some ports of Hokkaido, the disaster prevention facilities to trap such tsunami debris have been constructed, and then such constructions are expected to continue to be developed in the future. However, some design problems have remained since there have been few construction results of the facilities so far. This study investigated the design conditions for the existing facilities as well as the occurrences of large floating bodies caused by its tsunami, and then verified the effects of the existing facilities by numerical simulations of the 2011 Great Tohoku Tsunami. Hydraulic model experiments for tsunami debris trapping were also made to propose a method to determine proper configurations of the facility depending on the target debris. Also, the collision processes of tsunami debris against a facility were simulated by a Lagrangian numerical calculation to develop a precise method of estimating the collision energy used for the design of the facility.

Key words : 2011 Great Tohoku Tsunami, trapping facilities for tsunami debris, tsunami prevention