

高波作用時の海氷および波の遡上特性と 対策の検討

国立研究開発法人 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○本間 大輔
中嶋 雄一

地球温暖化などの影響により、流水勢力の減少に起因する波高増大が懸念されている。しかしながら、沖に海氷が少なく沿岸部に海氷が卓越した状況での海氷の遡上特性やその対策についての研究はほとんどされていない。本報告では、実海域に多く見られる海氷の大きさや厚さを考慮した、海氷および波の遡上特性を明らかとし、これらの対策について水理模型実験により検討するものである。

キーワード：高波、海氷の遡上、波の遡上、波の低減特性、CADMAS-SURF

1. はじめに

近年、地球温暖化などの影響により北極圏内の海氷面積が将来的に著しく減少することが高いことが報告されている¹⁾。海氷は波浪の発達を抑制する効果を有しているが、特に沖合部に海氷がほとんど存在せず、沿岸部に海氷がある場合に発達した低気圧の影響を受けると、波そのものの遡上により海岸線の直近に位置している主要な交通路である道路盛土への被害のみならず、海氷を伴った波の遡上により打ち上げられる氷塊によって、施設や家屋への甚大な被害が想定される。近年においては最も海氷の卓越する2月期においても前述した海氷分布の状況（写真-1参照）が見られていることから、高波浪時において海氷を伴った場合の沿岸域への影響を解明することは、今後の沿岸域の防災の観点から重要な課題である。

本報告では、冬期において波の遡上により北海道オホーツク海沿岸域の道路盛土に被害のあった（図-1参照）代表的な地形を基に、海氷が沖側にほとんどなく、沿岸部に卓越した状態を設定し、実海域に卓越する流氷盤の大きさや厚さ²⁾を考慮した上で、高波浪が作用した場合の沿岸部における海氷の遡上現象を把握し、海氷による波浪低減および遡上特性について、水理模型実験により明らかにし、その対策について検討するものである。

2. 実験方法

(1)実験条件

海氷による波の波浪の遡上特性を明らかにするため、水理模型実験を実施した。図-2に示す反射吸収式造波装置を備えた2次元造波水路（長さ 24.0 m, 幅0.8 m, 深さ

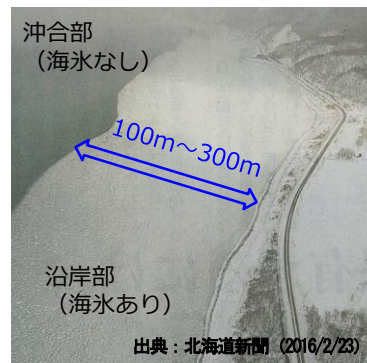


写真-1 本研究で対象とした海氷状況

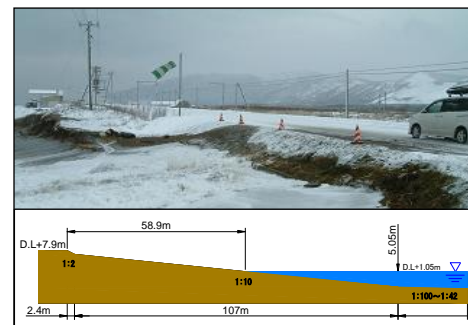


図-1 被災事例の断面地形

1.0 m) に、現地の地形条件に合わせて1:30および1:10 勾配のモルタル製固定床を設置した。模型縮尺は1/45とし、実験にはすべて不規則波を用い、1波群 200 波を作用させたときの波の遡上高 R 、遡上先端流速 u および水脈厚 η を計測した。波浪条件は、道路盛土に軽微な被災が生じた $H_0=7.5$ m、 $T=10.5$ s（水位 $D.L.+1.05$ m）を含め、周期3種類、波高5種類に変化させた。海氷の模型には、ポリプロピレン（比重0.91）を用いた。また、國松ら²⁾によりオホーツク沿岸域で観測された海氷盤の大きさおよび厚さの実測データを参考に、6.0cm×6.0cmと10.0cm×10.0cmの2種類の大きさを用い、厚さは0.5cm、1.0cm、2.0cmの3

種類とした。海水被覆率ICRは50%と80%とし、2種類の大きさの模擬氷を同じ面積になるように設定した。設置範囲は500cmおよび800cm区間とした。海水および波の遡上対策としては、写真-2に示す防水柵をイメージした鉄網および消波堤を設置した。防水柵の設置条件は、海水を通さない開口率の0%と50%、消波堤は、天端3個並び2層厚とした。以上実験条件をまとめて表-1に示す。

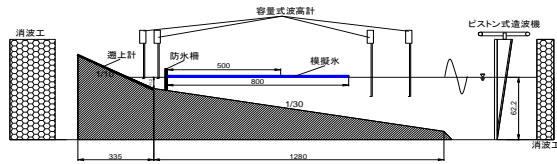


図-2 実験装置の概要図 (単位: cm)



写真-2 防水柵による海水の制御状況

表-1 実験条件

	(括弧内は現地量)
模型縮尺	1/45
入射波高 H_0 (cm)	6.7(3m)~20(9m):5波高
入射周期 T (s)	1.34(9s), 1.57(10.5s), 1.79(12s)
実験水位 h (cm)	D.L.+2.3(+1.05m)
海底勾配 i	1/30と1/10の複合勾配
模擬氷設置範囲(cm)	500(225m)、800(360m)
模擬氷の大きさ(cm)	6(2.7m)×6(2.7m)、10(4.5m)×10(4.5m)
模擬氷被覆率 ICR(%)	50, 80
模擬氷厚さ t (mm)	5(22.5cm)、10(45.0cm)、20(90.0cm)
防水柵の開口率(%)	0, 50
消波堤の設置位置(cm)	汀線から33.3(15m)、66.7(30m)、100(45m)

(2)計測方法

模擬氷の遡上高の計測にはデジタルビデオカメラを用いた。また、波高の伝達率 K は、岸側2本で計測された波高の平均値を沖側2本の入反射分離した波高で除した値とした。波の遡上高の計測は、水路床の1:10勾配部分に幅2cmの溝を設けて、容量線を斜面と同じ高さになるように設置して計測した。全ての計測は同一の条件で3回行ってその平均値とした。模擬氷同士および模擬氷と水路床の摩擦係数は、水路床1:10の勾配箇所において20回~30回の繰り返し試験を行い、平均値および中央値を採用した。

3. 被災波浪の再現

はじめに被災事例(図-1)を再現させた水理模型実験を実施し、波の遡上高さを調べた。図-3は表-1に示した波浪条件での沖波波高 H_0 と遡上高 R との関係であり、図中の D_1 と D_2 は後浜斜面の道路法肩高と道路法先高である。被災相当波浪を作用させたときの $R_{2\%}$ (入射波数の2%波数に対応する遡上高)/ D_1 および $R_{1/10}$ (入射波数の上位1/10に対応する平均遡上高)/ D_1 の値は、それぞれ1.11, 0.97となった。現地における後浜斜面の被災は、 $D_1 \sim D_2$ の範囲で発生しており、道路面まで波の遡上痕があったことから、道路法肩高 D_1 まで波が遡上していたことを表している。以上の結果から、 $R_{2\%}$ 超過波(exp)が現地の遡上高を再現できたと想定される。図中には参考として、既往の式による計算値(cal)も掲示しているが、実験値を過小評価しており、 D_2 を下回ることから被災時の遡上痕とも整合がとれていない。これは計算式が一樣勾配の条件で行った実験結果を基にしているためであり、本検討には適用できないことを確認した。

また、遡上高に及ぼす周期の依存性を調べるため、被災相当波浪の周期をベースに大小に振った2種類の周期に対し、波高5パターンで行った。その結果、入射波の波高が同じでも周期の増大に伴い遡上高が大きくなる傾向にあり、被災相当波浪以下でも D_1 まで波が到達する可能性がある。以上のことから、後浜斜面の被災が生じるリスクは、来襲する波の周期に依存していることがいえる。

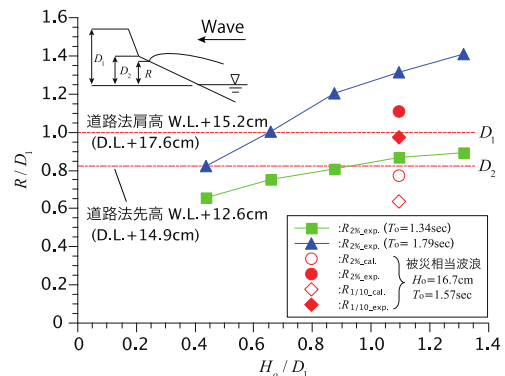


図-3 波の遡上高

4. 海水がない状態での対策工(消波堤)の効果

(1)水理模型実験

海水の影響による波の遡上特性を明らかにするため、海水のない状態での消波堤の効果について水理模型実験を実施した。表-1に示した3箇所(10型)を設置し、波の遡上低減効果を調べた。

図-4は、消波堤を設置した場合の遡上高 $R_{2\%}^*$ を無堤時の遡上高 $R_{2\%}$ で除したものである。消波堤の設置位置は汀線から近い順にcase1~case3($L=33.3\text{cm} \sim 100.0\text{cm}$)と

した。波形勾配 H_o/L_o の違いによる消波堤の遡上低減効果は、バラツキのある結果となったが、case1である汀線から $L=33.3\text{cm}$ （現地換算 $L=15\text{m}$ ）の位置に設置した場合が一番効果が高く、概ね4割程度低減できることが可能となる。

図-5は、被災相当波（ $H_o=16.7\text{cm}$ 、 $T=1.57\text{s}$ ）を対象に、消波堤を設置した場合の波の先端遡上波流速 $u_{2\%}^*$ を無堤時の遡上流速 $u_{2\%}$ で除した遡上流速の低減効果を示したものである。どのケースにおいても汀線から離れるに従い、 \log 関数に近い低減結果となるが、汀線に近いcase1が最も効果が高く、盛土先端位置での遡上流速は0となり、波そのものが遡上しない結果となった。

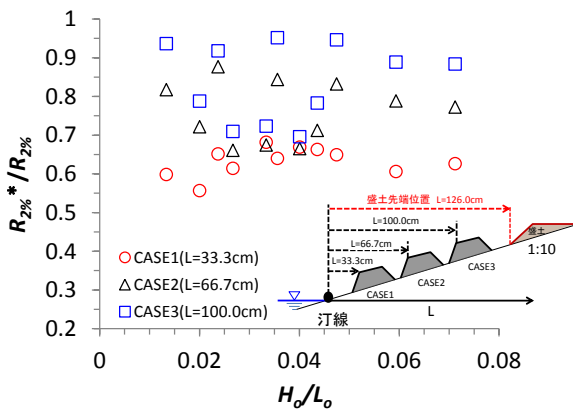


図-4 消波堤による遡上高 $R_{2\%}$ の低減効果

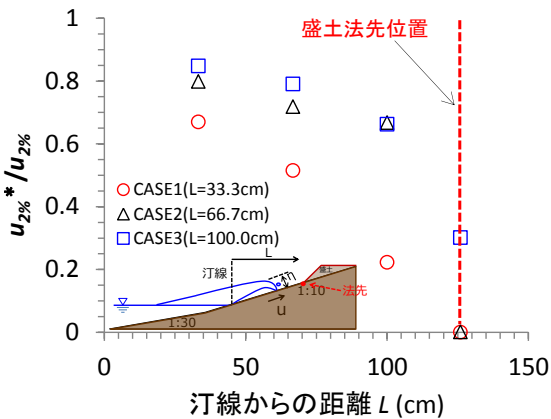


図-5 消波堤による遡上流速 $u_{2\%}$ の低減効果

(2) 数値解析 (CADMAS-SURF)

数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いて、波の遡上および越波流量解析を実施した。図-6に示す計算領域を設定し、表-2の条件で数値解析を実施した。差分スキームは、段階的に変化させ模型実験による遡上高 R との整合を図った結果、0.3に設定した。消波工の慣性力係数 C_M と抗力係数 C_D は川崎ら³⁾に準じ、それぞれ1.2、1.0とした。

図-7は被災相当波を作用させたときの最大遡上高 R_{max} と $R_{2\%}$ 遡上高について、実験による遡上高 (exp) と数値

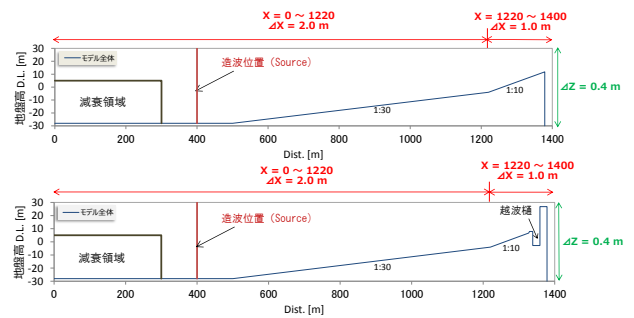


図-6 数値波動水路の概要

(上図：遡上時、下図：越波時)

表-2 計算条件

計算時間(s)	不規則波	2100(200波)
計算ステップ(s)	TIME CONST	0.01
計算メッシュ間隔(m)	X方向	2.0m、1.0m(遡上域:1:10勾配箇所)
	Z方向	0.4m
連立1次方程式の解法	M-ILUBCGSTAB	デフォルト
差分スキーム	VP-DONOR	0.3
	空隙率	0.5
消波工	慣性力係数 C_M	1.2
	抗力係数 C_D	1.0

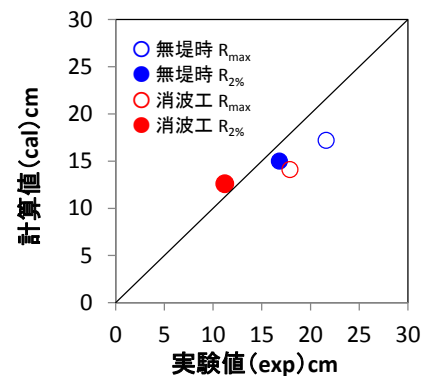


図-7 被災相当波を作用させたときの波の遡上高

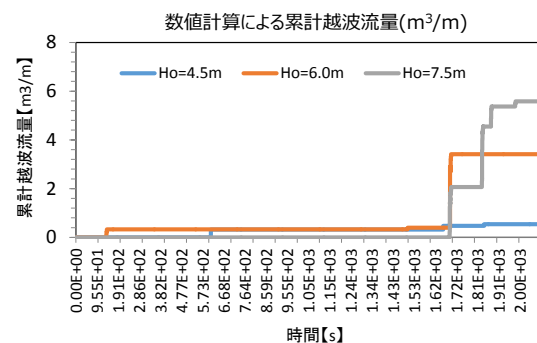


図-8 累計越波流量

解析による遡上高 (cal) のデータをプロットしたものである。消波堤は、前節で最も効果の高かった汀線より $L=33.3\text{cm}$ （現地換算 $L=15\text{m}$ ）離れた個所に設定した。計算結果は10%程度の差異はあったものの、概ね実験値を再現することができた。

図-8は、消波堤を設置していない無堤時のときの被災相当波浪を含む3波高（現地換算 $H_o=4.5\text{m}$ 、 6.0m 、 7.5m ）、周期 $T=1.57\text{s}$ （現地換算 10.5s ）での累計越波流量である。被災相当波浪を作用させた場合の200波での平均越波流

量は 2.7×10^3 ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$) となり、道路天端面 (TP+7.9m) における許容越波量は福田ら⁴⁾を準拠すると車が通行する場合および人が歩行する場合ともに10m程度離れる必要があり、越波量を減少させる対策が必要になると考えられる。

消波堤を汀線より33.3cmに設置した場合での計算越波流量は、どの波高においてもほぼ0となり、水理模型実験の結果とも整合がとれている。

以上のことから、消波堤を設置した場合の波の遡上高については、CADMAS-SURFを用いることでおよその目安値を算定することができることを検証した。ただし、差分スキーム設定のための検定が必要と考えられる。また、高波浪条件においては計算が途中で中断する状況が見られた。主なエラーとしては連立1次方程式の解法において、残差の2乗ノルムが一定値を超過することによるものであった。この対処法としては、格子間隔を均等にすの等の場の性質をよくする方向で入力データを再検討し、タイムステップおよび計算メッシュをより細かく設定するなどの対処を行うことで解決できる場合もあったが、計算時間が莫大に大きくなることに留意する必要がある。

5. 海水の遡上

海水の遡上状況を把握するため、水理模型実験を実施した。ここでは、被災時における波浪条件 ($H_o=7.5\text{m}$ 、 $T=10.5\text{s}$) をベースに海水が写真-1に示す状況で高波が作用した場合の模擬氷の遡上状況について整理した。

(1) 摩擦係数

本実験における模擬氷同士の静止摩擦係数 μ_{s1} および模擬氷と水路床の静止摩擦係数 μ_{s2} は、現地の状態を想定し、湿潤状態とした。それぞれの値は図-9に示すとおりであり、摩擦係数の結果はバラツキのある傾向が見られた。安留ら⁵⁾、Takeuchiら⁶⁾は氷と氷、海水と地盤との摩擦係数に与える因子の効果について、相対速度、砂の粒径、鉛直応力、氷の温度などに依存することを明らかにしている。本検討で対象とした海岸における海浜の砂の中央粒径 d_{50} は 1.2mm、2016年における2月期の最低外気温は概ね $3^\circ\text{C} \sim 14^\circ\text{C}$ となっており、文献におけるこれらの条件下でのそれぞれの摩擦係数の値は今回の繰り返し試験により得られた摩擦係数の平均的な値および中央値と近い結果となった。

(2) 海水の遡上特性

図-10は、模擬氷設定範囲が500cmおよび800cm (現地換算225m、360m)、模擬氷の厚さが1.0cm (現地換算45cm) のときの被災波浪を含む5波高、3周期の条件での模擬氷の遡上範囲の一例である。模擬氷の堆積傾向は、波高および周期の増加により、到達距離および

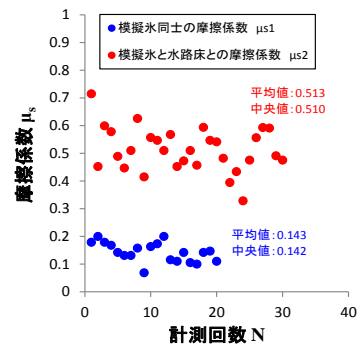


図-9 摩擦係数

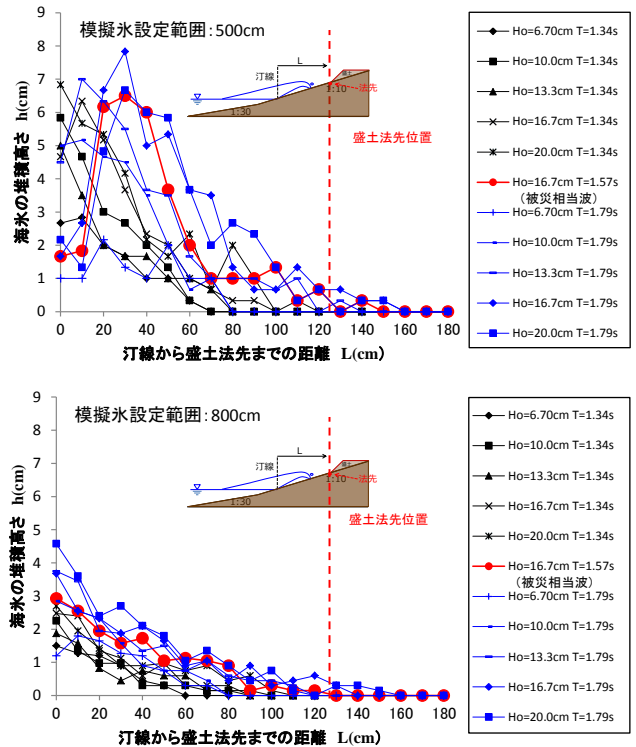
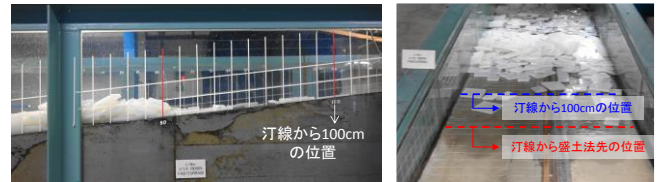


図-10 模擬氷の遡上状況

堆積高さが増加する。また、模擬氷の設定範囲および図示はしていないが、模擬氷の厚さ t_i が大きいほどその傾向は小さくなるが、この要因として考えられるのは、模擬氷の設定範囲が大きい場合、汀線付近から沖側にかけて多量の模擬氷が集積し、波浪のエネルギーが吸収・減衰され、模擬氷が遡上しづらくなる傾向があるためである。被災相当波 (10年確率波程度) では、模擬氷の厚さ t_i による差はあるが、110cm~140cmまで遡上し、概ね盛土法先位置である125cm (現地換算56m) 程度まで遡上する結果となった。

著者ら⁷⁾は、オホーツク沿岸域における自然海岸にお

ける盛土の被災事例を整理しており、概ね 10 年確率波程度以上の波浪が作用した場合、汀線から 60m 程度離れた盛土に被災が発生する可能性があることを報告している。このことから、1:10 および 1:30 の海底勾配を持つ未整備の当該自然海岸においては、汀線より 60m 程度の値を目安に、ハード面では、波浪および海水を直接的に抑制する対策あるいは路線の変更、ソフト面では、日々のパトロールの強化および通行止めの措置等を行うことが重要と考えられる。

6. 対策工による海氷による波の遡上特性

(1) 防水柵による対策

海氷による波高低減の要因としては、著者ら⁸⁾も指摘している、①海氷の相互作用（衝突や摩擦）、②海氷面上での波の碎波、③海氷の変形に伴う波の反射（海氷厚さに依存）などが考えられる。しかしながら、高波浪時にはこれらの要因が同時に発生し、非常に複雑な現象となる。ここでは、波浪低減に影響を及ぼす①～③について全体を考慮した検討とした。図-11は模擬氷の遡上を防水柵で対策（開口率0%）を施した表-1の条件での模擬氷による波浪低減効果の結果である。図中の K_t/K_t^* は模擬氷存在時の伝達率であり、模擬氷が無い場合の伝達率 K_t^* で除することにより波浪の低減割合を示している。模擬氷設定範囲 X が大きく波長 L_0 が小さいほど、また、 ICR が高く氷厚 t_i が厚いほど波浪低減効果が大きい。 $ICR80\%$ 、 $t_i=20\text{mm}$ の場合では、おおよそ30%~50%程度の低減効果があり、波浪低減の要因である①②③が複合的に発生していることが実験映像より確認できた。特に H_0/L_0 が大きくなるほど模擬氷が激しく衝突しながら、岸方向に移動し、大きな氷群となって堆積（パイルアップ）することにより②と③の現象が強くなっていった。 $ICR50\%$ 、 $t_i=5\text{mm}$ では、 XL_0 （模擬氷設置範囲と波長との比）が小さい場合ではほとんど低減効果が見られなかった。この要因としては、 XL_0 が1程度の条件では模擬氷がその場に留まった上下運動が主となり、前述した波浪低減の要因の②と③の影響はほとんどなく、①が主要な要因となるため低減効果が小さかったと考えられる。現象が非常に複雑なため、データのバラツキも大きいですが、遡上域において完全に海水をせき止める対策をとった場合では、限られた条件ではあるが $ICR=50\%$ 、 80% の場合の海氷の遡上低減効果の目安値はそれぞれ次式(1)(2)のようになる。

$$\frac{K_t}{K_t^*} = e^{(-0.0039t_i - 0.022)\left(\frac{X}{L_0}\right)} \quad \dots (1)$$

$$\frac{K_t}{K_t^*} = e^{(-0.0073t_i - 0.0235)\left(\frac{X}{L_0}\right)} \quad \dots (2)$$

ここで t_i : 氷厚(mm)、 X : 模擬氷設置範囲(cm)、 L_0 : 波長(cm) ただし、海底勾配1:30、1:10の複合勾配で $5\text{mm} < t_i < 20\text{mm}$ 、 $1 < XL_0 < 2.85$

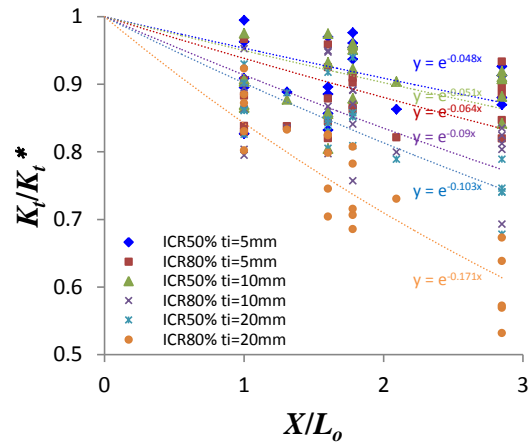


図-11 波浪低減効果

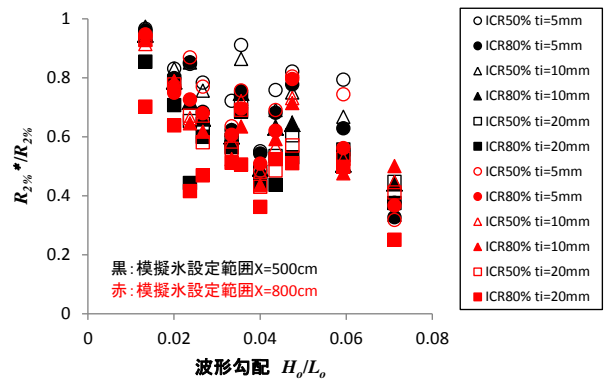


図-12 波形勾配 H_0/L_0 と波の遡上低減効果の関係

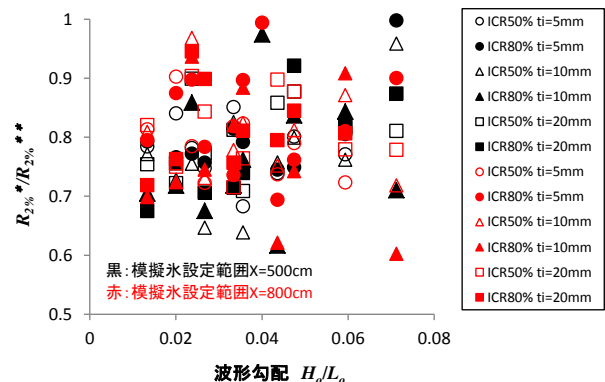


図-13 防水柵による遡上低減効果

海氷による波の遡上高の低減効果を明らかにするため、模擬氷のない状態での波の代表遡上高 $R_{2\%}$ （2%超過値）をベースとし、模擬氷を設定したときの遡上高の関係を調べた。図-12は、表-1の条件での海氷による波の遡上低減効果の結果である。図中の $R_{2\%}^*$ は、模擬氷設定時の遡上高であり、模擬氷がない場合の遡上高 $R_{2\%}$ で除することにより、波の遡上低減割合を示している。 ICR と氷厚 t_i が大きくなる程、低減効果が増し、 $ICR80\%$ 、 $t_i=20\text{mm}$ の場合では最大で8割程度の低減効果が見られ、波形勾配 H_0/L_0 が大きくなるほど、波の遡上低減効果が大きくなる傾向が見られた。また、 ICR と氷厚 t_i が小さく、 H_0/L_0 も小さい場合は、ほとんど波の遡上低減効果はなく、

この傾向は波浪低減特性と同様となった。

図-13は、模擬氷の遡上対策として、開口率が0%の場合（遡上域前で全ての模擬氷を防止）の遡上高 $R_{2\%}^*$ と50%の場合の遡上高 $R_{2\%}^{**}$ の波の遡上高の低減特性（ $R_{2\%}^*/R_{2\%}^{**}$ ）の結果である。開口率50%の場合では、遡上域にランダムに海水が堆積するため、波の遡上高の結果もバラツキが多く、波形勾配の違いによる低減効果に規則性は見られなかったが、開口率が0%の条件よりも低減効果が大きい結果が得られた。

(2)消波堤による対策

実用的な海水の遡上対策工として、波の遡上にも有効である消波堤を設置した場合での海水を伴う遡上高および消波堤の安定性について検討した。消波ブロックの重量は、35g, 59.7g, 100.0g（現地換算4t型, 6t型, 10t型）とし、設置位置は前節での検討の結果から、最も波の遡上低減効果の高い汀線より33.3cm（現地スケール15m）とした。図-14は、模擬氷設置範囲 $X=800\text{cm}$ 、 $ICR=80\%$ の条件で被災相当波（ $H_p=16.7\text{cm}$ 、 $T=1.57\text{s}$ ）を作用させた場合の対策工別の波の遡上高である。消波堤のみの場合と比較し模擬氷設置時には未対策時と比べ4割程度波の遡上高を低減させることが確認された。表-2は被災相当波浪を200波作用させた後の消波ブロックの被災率の結果である。6t型以上のブロックを設置（CASE2）することで耐波・耐氷双方の安定性の確保が可能となる。写真-3は、4t型を設置した場合の波浪作用後の状況である。消波ブロックの変形は見られるものの、模擬氷の遡上を完全に防止できることが確認された。

7. 結論

- 1) 海水がない状況において、波の遡上高を数値波動水路を用いた数値計算により消波堤の効果を検討した。その結果、概ね精度よく模型実験を再現することができることを検証した。
- 2) 対象海岸において、沖にほとんど海水がなく、岸に海水が卓越している状況下における海水の遡上は、10年確率波程度（被災相当波浪）において、汀線より60m程度まで達する可能性がある。
- 3) 防護柵により海水の遡上対策を施した場合の波浪低減について推定式を提案した。
- 4) 海水の遡上対策として消波堤は有効であることを確認した。海水の厚さが現地でも最も卓越する $t_f=10\text{mm}$ （現地換算50cm程度）の条件では、波の遡上対策として効果的となった汀線より15m程度の位置に設置した場合、10年確率波程度（被災相当波浪）においてブロック重量を6t程度以上とすることにより耐波・耐氷双方の安定性の確保が可能となる。



写真-3 被災相当波浪作用後の状況

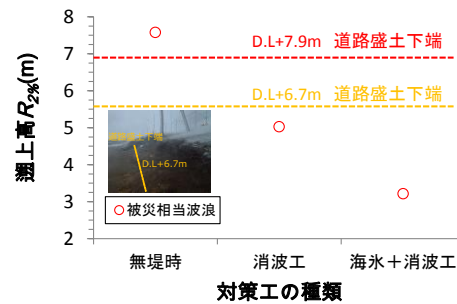


図-14 消波堤による遡上低減効果

表-3 消波ブロックの被害

実験ケース	消波堤の設置位置	ブロックの重量	被害率(%)
CASE1	汀線より33.3cm (現地換算:15m)	35g (現地換算:4t型)	100
CASE2		59.7g (現地換算:6t型)	0
CASE3		100g (現地換算:10t型)	0

参考文献

- 1) IPCC第5次評価報告書 第1作業部会報告書 政策決定者向け要約. 気象庁暫定訳 (2014年3月6日版) .
- 2) 国松靖, 秋原真哉, 榎国夫, 高木雄一郎, 原文宏, 佐伯浩 (1992): 氷盤の大きさに関する研究, 寒地技術シンポジウム論文・報告集, 第8回, pp.417-422.
- 3) 川崎浩司, 菊雅美, 眞栄里和也, 米須俊彦, 嶋田宏, 五味久昭, 柴多哲朗, 板橋直樹: 数値波動水路を用いた海岸護岸周辺の越波対策工法の検討(2007), 海岸工学論文集, 第54巻, pp.951-955.
- 4) 福田伸男, 宇野俊泰, 入江功: 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報)(1973), 海岸工学論文集, 第20回, pp.113-118.
- 5) 安留哲, 荒川政彦, 前野紀一(1999): 氷・氷摩擦係数の測定: 日本雪氷学会誌, 第61巻, 6号, pp.437-443.
- 6) Takahiro, T., Mikio, S., Kazuo, M., Hirokazu, S. and Atushi Tatakauch(2003): Coefficients of Friction of Sea Ice on Sand: Proceeding of The Thiteenth International Offshore and Polar Conference, pp.461-464.
- 7) 本間大輔, 山本泰司, 宮武誠, 木村克俊(2015): 高波による海岸道路の盛土被害の発生条件と対策の検討, 土木学会論文誌 B3 (海洋開発) Vol.71, No.2, pp.269-274.
- 8) Honma, D., Kioka, S. and Takeuchi, T.: Effect of Sea Ice on the Wave Damping and the Wave Run-up Characteristics under High Waves in the Sea of Okhotsk off Hokkaido (2016): Proceeding of the 23rd IAHR International Symposium on Ice. (Paper.No.4871913)