

流水勢力変動に伴う沿岸防災の対策手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 28

担当チーム：寒冷沿岸域チーム

研究担当者：中嶋雄一、増田亨、本間大輔、
酒井和彦

【要旨】

近年、地球温暖化の影響によるオホーツク海の海水面積減少が懸念されており、その場合、海面を覆う海氷は波浪を減衰させる機能を有していることから、沿岸に来襲する波浪が激化する恐れがある。既に、氷海域の海岸道路では、来襲する高波により後浜盛土が崩壊する被害が発生しており、将来的な波浪増大に備えて、沿岸施設の防災機能を高めることが重要となっている。このように、盛土が崩壊し、被災に至る以前に対策を講じることが有効となるが、波浪により小規模な盛土被害を発生させる初期条件やその対策手法に関する研究は少ない。また、沖に海氷が少なく沿岸部に海氷が卓越した状況で高波が作用した場合には、波そのものの遡上のみならず、海氷の遡上による被害も想定されるが、沿岸部での海氷のパイルアップ現象やこれに伴う波浪低減特性についての研究はほとんどない。

本研究では、ブロック等で被覆されていない自然海岸となっている道路盛土を対象に、今後の維持管理に資するため、水理模型実験および数値解析により過去の被災事例における波の遡上特性を明らかとする。併せて、高波による地盤性状変化を考慮した後浜盛土の破壊メカニズムを解明し、波の遡上対策法を提案することを目的とする。また、海氷による波浪低減効果および波の遡上特性について、高波浪作用時における海氷による波浪低減の要因を明らかにし、海氷による波浪低減効果や海氷遡上特性についての対策手法について検討した。

キーワード：流水勢力、波浪低減、波の遡上、CADMAS-SURF、後浜盛土、相対密度、飽和度、破壊メカニズム、海氷、高波、パイルアップ、対策手法

1. 研究の目的

近年、地球温暖化の影響により、オホーツク海の海水面積が減少すると懸念されている。海面を覆う海氷は波浪の勢力を減衰させる機能を有しているため、海水面積が減少した場合、現在よりも強い勢力の波浪が沿岸域に来襲する恐れがあり、地球温暖化の影響による氷海域での将来的な波浪増大に備えて、沿岸施設の防災機能を高めることが重要である。我が国においては、地域の主要な交通路が海岸線の直近に位置している場合も多く、そのような箇所では高波により交通障害が発生することがある。さらに、海岸道路の後浜盛土被害の事例として、北海道のオホーツク海沿岸に位置する自然海岸の後浜道路盛土が高波時に侵食される被害が報告されている。海岸道路は、背後圏の物流や地域住民の生活において重要な役割を果たしている場合が多いため、大きな被災に至る以前に対策を講じることが有効となるが、波浪により小規模な盛土被害を発生させる初期条件およびその対策手法に関する検討の研究は限られている。また、海岸道路での後浜盛土の被災は前述の

ように主に波浪が直接作用することにより進行するが、これとともに後浜盛土斜面の地盤性状は不飽和から飽和状態に変化し、相対密度が低下し飽和度が增加する。後浜盛土斜面が飽和状態になると土粒子間に作用しているサクシオンによる粒子間付着力が消失し、骨格剛性が低下することによる体積圧縮現象が発生し、地盤強度の低下による破壊が進行する。Sassa ら¹⁾は、地盤の飽和～不飽和の推移に対する地盤内に作用するサクシオンとの関係を明らかにしているが、積雪寒冷地においては、降雨のみならず、融雪の影響もあり、後浜盛土斜面の地盤性状は四季を通じて様々に変化する。そのため、季節によっては、相対密度が低下し、飽和度が増加するなど、より後浜盛土斜面を破壊させやすい状況となる。

他方、冬期におけるオホーツク海は、流水に覆われることにより、海上風による波浪の発達を抑制する効果により、波浪が低く抑えられているが、今後、北海道北東部における海水面積が著しく減少する可能性が高いことが報告されている²⁾。特に、沖合に海氷がほとんど存在せず、沿岸

部に海水が卓越した状況で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る被害のみならず、海水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。海水による波の減衰効果については、Wadhamsら³⁾Squireら⁴⁾が海水距離の増加に伴って指数関数的に減少することを検証し、塚ら⁵⁾片山ら⁶⁾は、海水が沖にシート状に卓越した状態を想定した場合の波浪低減特性や海水の挙動について明らかとしている。また、Frankensteinら⁷⁾は、高波浪の条件下では、海水は小さく破壊され、surge、sway、pitch、roll、yawなどの複雑な動きとなることを指摘しており、Shen・Squireら⁸⁾は、海水域における波の減衰に影響を及ぼす要因として、氷盤間の衝突や相互作用による吸収、砕波による散逸、波の伝搬による氷の変形などの様々な要因があることを指摘している。しかしながら、被害が甚大となる可能性の大きい沖に海水が少なく、沿岸部に海水が卓越した状況で高波浪が作用した場合の沿岸部における海水のパイルアップ現象やこれに伴う波浪低減特性についての研究はほとんどされていないのが現状である。

本研究では、近年におけるオホーツク海域における海象状況を整理し(第2章)、ブロック等により被覆されていない海岸道路盛土を対象に、今後の維持管理に資するため、水理模型実験および数値解析によって過去の被災事例における海水がない状態での波の遡上特性を明らかにする(第3章)。また、盛土被害の発生条件とその対策工法について検討し(第4章)、後浜盛土の破壊メカニズムについて解明する(第5章)ものである。併せて、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代表的な地形を基に、海水が沖側にほとんどなく、沿岸部に卓越した状態(写真-1参照)を設定し、実海域に卓越する流水盤の大きさや厚さ⁹⁾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水による波浪低

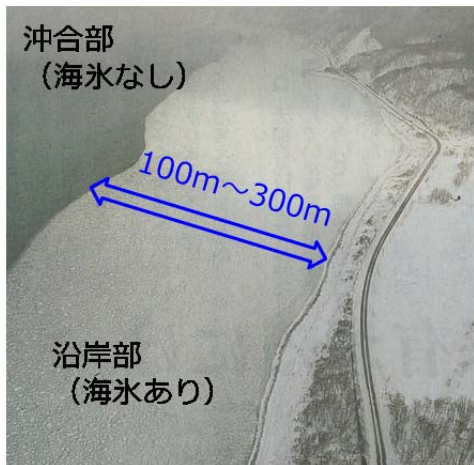


写真-1 本研究で対象とした海水状況

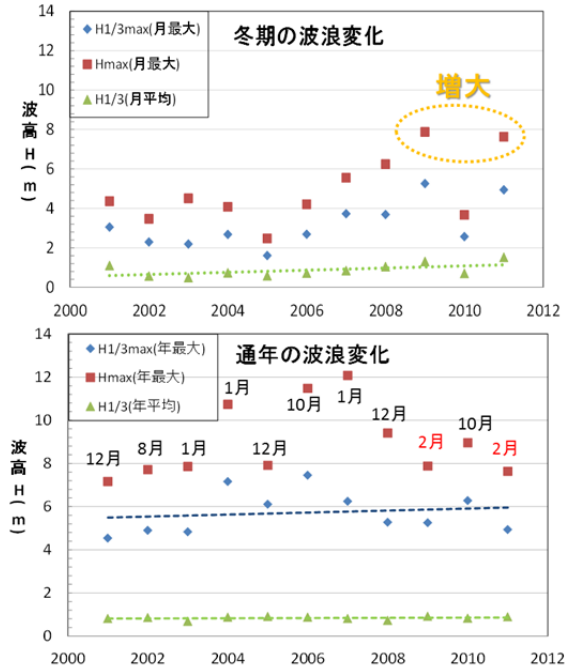


図-1 波浪変化(2001~2011)

上図: 冬期、下図: 通年

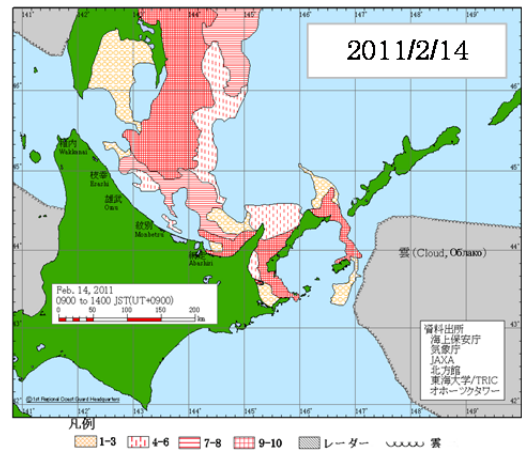


図-2 2月期の流水分布

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、その対策手法について検討する(第6章)ものである。

2. オホーツク海沿岸域における近年の波浪状況

一般的に冬期におけるオホーツク海沿岸域は、流水に覆われ波高が小さくなる特徴がある。図-1(上図)は、オホーツク海沿岸の紋別沖で観測された最近(2001~2011年)の2月における波浪データを示したものである。月平均有義波高 $H_{1/3}$ は全体的に微増傾向となっており、特に月最大波高 H_{max} および月最大有義波高 $H_{1/3}$ については、ここ数年で著しく増大している。なお、2010年に波高が小さかった理由は、流水勢力が強かったことが考えられる。図-1(下図)は、同期間における年間の波浪変化を示したものである。

通常、年間における最大波高 H_{max} は、低気圧が発達する台風時期もしくは流氷の発達しない秋期から冬期初期にピーク値となるが、2009年および2011年の年間最大波高 H_{max} および最大有義波高 $H_{1/3}$ は通常波高の小さい2月期に発生している。図-2は2011年の年間最大波高が発生した2月14日の流水分布であるが、オホーツク沿岸部周辺には流氷は存在しておらず、また過去全体的に密接度についても波高の小さかった過年度と比較し低く、同様の現象は2009年の2月期においても見られた。

以上のことから、オホーツク海沿岸の流氷勢力が減少すると、波高が増大する要因と推測され、今後、冬期においても高波が発生する可能性がある。

また、通年の平均有義波高 $H_{1/3}$ については大きな変化はないが、災害をもたらす可能性がある年最大波高および年最大有義波高については、年変動が大きいものの増大傾向であり、冬期のみならず通年の波浪に対する備えが重要であると考えられる。

3. 海水がない状態での波の遡上特性

3.1 被災事例の概要

近年、オホーツク海沿岸の国道において、波の遡上により、道路盛土が欠損する被害が発生している。本研究では、過去に同じ路線で発生した3つの被災事例を対象として、当時の海浜形状、汀線と道路の位置関係および盛土被害の状況について整理した。

被災事例1(写真-2(a))は、国道238号線のA地区における被害である。被害は2004年1月14日に発生し、同日の22時に近隣のナウファス波浪観測点の紋別(南)では、有義波高 $H_{1/3}=7.16\text{m}$ 、最大波高 $H_{max}=10.73\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=10.5\text{s}$ 、潮位 $D.L+1.05\text{m}$ を記録した。被害箇所(図-3(a))はオホーツク海沿岸において特徴的な自然海浜からなる複合緩勾配海岸であり、汀線付近から道路盛土までの海底勾配は1:10程度で、距離は60m程度であった。道路面の標高は $D.L+7.9\text{m}$ であり、波は路面まで遡上し、盛土に軽微な被害があった事例である。

被災事例2(写真-2(b))は同じ路線のB地区における被害である。被害は2006年10月8日に発生し、同日の14時に紋別(南)における観測データは、有義波高 $H_{1/3}=7.45\text{m}$ 、最大波高 $H_{max}=11.47\text{m}$ 、有義周期 $T_{1/3}=12.6\text{s}$ 、潮位 $D.L+1.66\text{m}$ であった。被災範囲は延長約100m、高さ約3m、幅約7.5mとなっており、路肩舗装部分が欠落するまで侵食、崩壊が進行した。被災事例2は汀線付近から道路盛土までの海底勾配は1:8程度で被災事例1とほぼ同様だが、距離は25m程度しかなかった(図



(a) 被災事例1 (A地区)

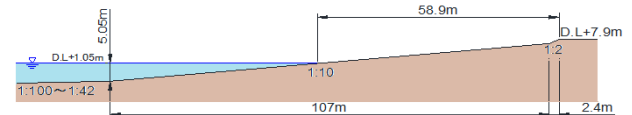


(b) 被災事例2 (B地区)

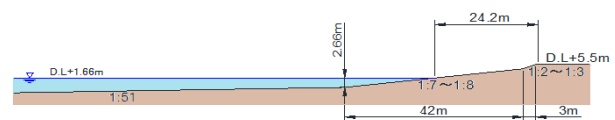


(c) 被災事例3 (C地区)

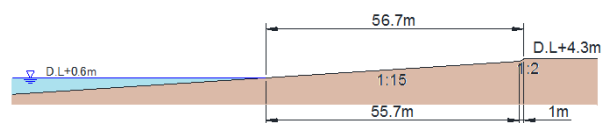
写真-2 オホーツク海沿岸の被災状況



(a) 被災事例1 (A地区)の断面地形



(b) 被災事例2 (B地区)の断面地形



(c) 被災事例3 (C地区)の断面地形

図-3 被災事例の断面地形

-3(b))。波の遡上は、被害状況から道路面のレベル(D.L+5.5m)まで達していたと推定される。

被災事例3(写真-2(c))は、同じ路線のC地区における被害である。被害は被災事例1と同じ日時に発生し、盛土の法先に軽微な侵食が確認された事例である。被災事例3は汀線付近から道路盛土までの海底勾配が1:15程度で、距離は60m程度であった(図-3(c))。

表-1は、軽微な盛土被害があった被災事例1の発生箇所を含む4.2km区間(KP.225.1~229.3)のうち、代表6地点(調査地点①~⑥)における海浜形状や汀線と道路の位置関係について測量データを整理したものである。その結果、汀線から道路盛土までの勾配はおおよそ1:10で、距離は62mであり、図-3(a)の断面地形とほぼ同様であることがわかった。

比較的軽微な被害が生じた被災事例1および3における来襲波浪は、沖波波高 $H_0=7.5m$ 程度で10年確率波相当であったが、1:30および1:10程度の複合勾配を持つ当該海岸において、後浜盛土の被災限界の目安は汀線から盛土までの距離が50~60m程度と推定される。また、大規模な被害が生じた被災事例2における来襲波浪は、沖波波高 $H_0=8.0m$ 程度で20~30年確率波相当であったが、被災事例1および3の地区で当該波浪が作用した場合、盛土の被害規模はより大きくなっていったと想定される。

表-1 被災事例1付近の調査結果

調査箇所	① 汀線から道路 までの距離(m)	② 汀線から目標 物までの距離 (m)	③ 道路の高さ (D.L標記m)	④ 汀線から目標 物までの高低 差(m)	⑤ 海浜勾配 (④/②)	
						調査地点①
調査地点①	KP225.3	52.4	28.4	6.4	3.0	0.106
調査地点②	KP255.39	59.0	37.0	6.4	3.0	0.081
調査地点③	KP227.33	76.2	47.2	6.5	4.0	0.085
調査地点④	KP227.42	63.7	35.7	6.7	3.0	0.084
調査地点⑤	KP227.57	51.1	23.1	7.0	2.4	0.104
調査地点⑥	KP228.62	70.9	42.9	7.7	3.7	0.086
	平均	62.2			平均	0.091

3.2 被災波浪の再現実験

3.2.1 実験地形

実験の地形条件を設定するにあたり、オホーツク海沿岸の国道において、冬期間に波の遡上により道路盛土に軽微な欠損が生じた数件の事例のうち安全側を考慮した代表的な地形である1:30および1:10の複合勾配を対象とした。

3.2.2 実験条件

盛土被害の発生条件を明らかにするため、後浜盛土に初期被害の発生していた被災事例1における波の遡上高を水理模型実験により再現した。図-4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24m,幅0.8m,深さ1.0m)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、対策手法としては消波堤の2種類を、汀線から33.3cm~100.0cm(St.1~St.3)の範囲に配置した。なお、消波堤は消波ブロック(現地換算10t型)を用い、天端2個並び2層厚とした。実験にはすべて不規則波(修正Bretschneider・光易型を有するスペクトル)を用い、1波群を200波とした。波浪条件は、被災相当波浪である $H_0=7.5m$, $T=10.5s$ (水位D.L+1.05m)を含めて、周期2種類、波高5種類に変化させた。以上の実験条件をまとめて表-2に示す。

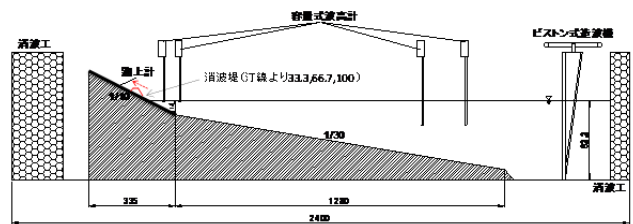


図-4 実験水路(単位:cm)

表-2 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), D.L.3.4(+1.55m)
海底勾配 i	1:30と1:10の複合勾配
消波堤設置箇所(cm)	汀線より33.3(15m:St.1)~100.0(45m:St.3)

3.2.3 計測方法

波の遡上高は、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計測した。遡上高 R は静水面を基準とし、上方を正と定義した。サンプリングタイムは0.03s程度とし、同一の計測を3回行って、その平均値を採用した。

遡上計の精度の検証を行うため、デジタルビデオカメラにより撮影した遡上高と、遡上計により計測した遡上高を比較した。対象とした波は規則波とし、波高の安定する5波目以降21波目までの17波とした(図-5)。図中の上段および下段は、それぞれデジタルビデオによる映像解析による遡上高と遡上計による遡上高である。遡上計の高さと映

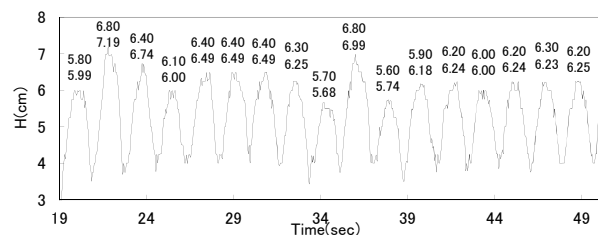


図-5 映像解析と遡上計による遡上高の比較

像解析の差の平均は、+0.099 cmであり、遡上計による平均計測値に対し誤差も 1.58 %と小さく、十分使用可能と考えられるため、以後の実験は遡上計のみで計測した。また、波の先端遡上水脈厚 η （水底からの波頂高）をデジタルビデオカメラにより計測し、先端遡上流速 u を遡上計により計測された遡上波先端水位の流速を単位面積あたりの流束として取り扱い、遡上波1周期あたりのエネルギー方程式によって求めた宮武ら¹⁰を準用して算出した。

3.3 波の遡上特性

3.3.1 改良仮想勾配法による検討

複合勾配条件の波の打上げ高の推定には、中村ら¹¹の改良仮想勾配法を適用するのが一般的である。図-6は、被災事例1 (A地区)を対象に、前出の表-2に示す実験条件に対して碎波水深 h_b を算出したものである。碎波水深 h_b は、合田¹²および Mase・Kirby¹³ を踏襲した。本実験の条件は、海底勾配 i が 1:10~1:30 でかつ波形勾配 $H_0/L_0 = 0.02 \sim 0.05$ の範囲となっており、合田¹²の碎波水深とほぼ一致する値となった。なお、図中の $H_0=20\text{cm}$ 、 $T=1.34\text{s}$ に対応するプロットがないのは、碎波水深を求める算定図において適用外の条件であったためである。

図-7は上記で求めた h_b から、改良仮想勾配法を用いて遡上高さ R を算出したものである。現地の被害領域は海水面 (WL) から道路盛土下端12.6cm (D.L.+14.9cm) ~ 道路面高さ15.2cm (D.L.+17.6cm) の間で発生し、道路面の高さまで波の遡上痕が残っていた。改良仮想勾配法で求まる R は 9.3cm 程度となり、現地の遡上高を過小評価した結果となった。

3.3.2 波高と代表遡上高さの関係

実験による遡上高さを整理するにあたり、最大遡上高で評価した場合、バラツキが大きい。このため、玉田ら¹⁴により提案されている2% 超過確率遡上高さ $R_{2\%}$ と1/10 最大遡上高さ $R_{1/10}$ を代表値とし、式 (1) および (2) に示す算定式により遡上高さを求めた。

$$R_{2\%}/H_0 = 2.99 - 2.73 \exp \left[-0.57 * \left\{ \tan\beta / \left(H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\} \right] \quad (1)$$

$$R_{1/10}/H_0 = 2.72 - 2.56 \exp \left[-0.58 * \left\{ \tan\beta / \left(H_0/L_0 \right)^{0.5} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\tan\beta$: 仮想勾配の傾斜角、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長

図-8は、表-2に示した実験条件での沖波波高 H_0 と遡上高さ 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

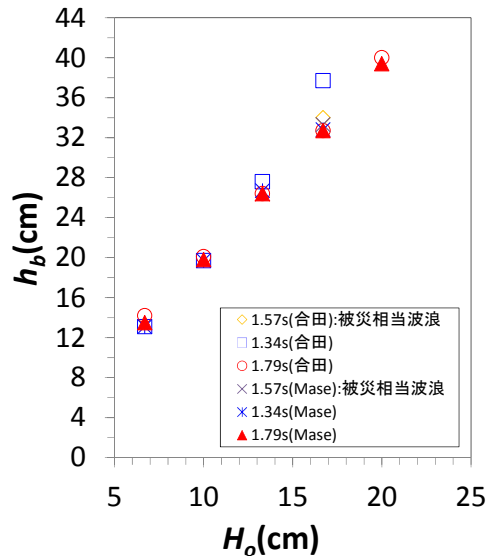


図-6 沖波波高 H_0 に対する碎波水深 h_b

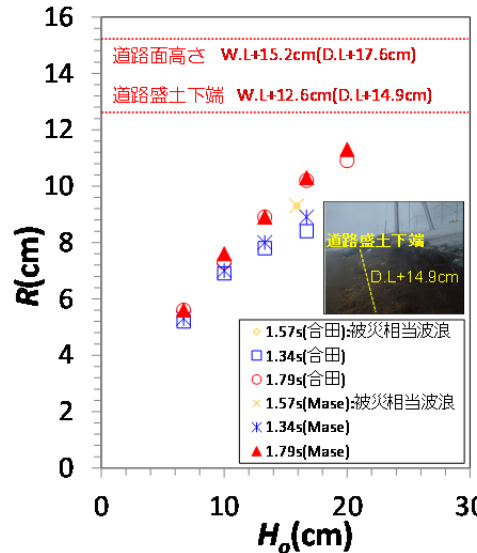


図-7 沖波波高 H_0 に対する波の遡上高 R

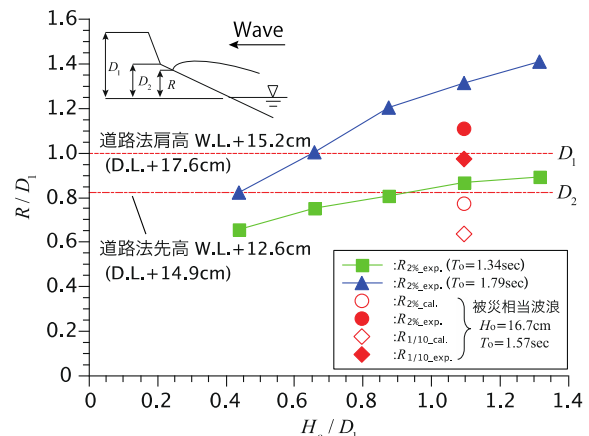


図-8 波の遡上高

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 まで波が到達する場合がある。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。

3.3.3 オホーツク沿岸域における波の遡上高さ

図-9は遡上高さの実測値 R_{exp} と計算値 R_{cal} を沖波波高 H_o で除して無次元化したものである。実験値は周期に関わらず計算値に対して、波高が小さい場合に計算値との隔たりが大きくなる傾向がある。玉田ら¹⁴⁾にもあるように式(1)の検証として実施されている本実験と同じ複合勾配条件の実験において、実験値は、計算値よりも大きくなるが、上記式の適用の妥当性を概ね確認している。そのため、本実験における実験結果についても $\tan\beta$ を含む項 (surf similarity parameter) で整理することを試みた。図-10は、surf similarity parameter と $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ を沖波波高 H_o で無次元化したものとの関係である。波浪条件や、潮位条件が異なる結果を含んでいるにも係わらず、surf similarity parameter により整理することができる。以上から、オホーツク海沿岸域における波の遡上高さの関係は以下のように推定する。

$$R_{2\%}/H_o = 2.11 * \left\{ \frac{\tan\beta}{(H_o/L_o)^{0.5}} \right\}^{0.682} \quad (3)$$

$$R_{1/10}/H_o = 1.89 * \left\{ \frac{\tan\beta}{(H_o/L_o)^{0.5}} \right\}^{0.674} \quad (4)$$

ただし、適用範囲は海底および海浜地形が1:30と1:10の複合勾配で

$$\left. \begin{array}{l} 5.05 < h < 5.55 \quad (h \text{は勾配変化点の水深m}) \\ 0.007 < H_o/L_o < 0.07 \\ 0 < \tan\beta / (H_o/L_o)^{0.5} < 0.86 \end{array} \right\} \quad (5)$$

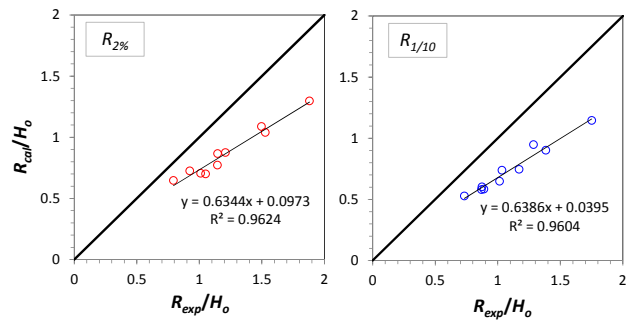


図-9 実験による遡上高 R_{exp} と計算値 R_{cal}

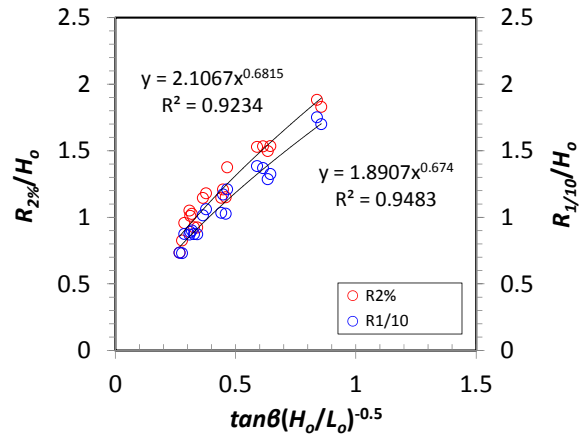


図-10 $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ 遡上高

の場合とする。

3.3.4 後浜盛土被害と波の遡上高さとの関係

近年の海水面積減少を考慮した波浪推算手法について、第3世代波浪モデルSWANを用いた菅原ら¹⁵⁾の手法により山之内ら¹⁶⁾がオホーツク海沿岸の50年確率波高を算出した結果、海水の減少などの気象変動の影響により、オホーツク沿岸域においては1m以上増大している可能性があることを報告している。また、気象庁によると将来的な水位上昇量は、0.5mと予測している。そのため、本検討で対象としている後浜盛土被害を発生させた被災相当波浪 ($H_o=16.7\text{cm}$, $T=1.57\text{s}$) に上記増加予想分の波高と水位上昇を見込んだ条件も追加し、被災のあった後浜道路盛土 (A地区) の先端高さ D_1 と波の遡上高さ R との関係を検討した。図-11は、遡上高 R と R/D_1 の関係である。図に示すとおり、被災相当波浪において、今回の被災のあった $D_1 \sim D_2$ の範囲にある遡上高は、入射波数の1/5に対応する遡上高さ $R_{1/5} \sim R_{1/10}$ に相当する。なお、図中の $R_{1/3}$ は入射波数の1/3に対応する遡上高さ、 $R_{平均}$ はすべての入射波数に対応する平均遡上高である。実際に現地の後浜盛土を欠損させた遡上高は $R_{2\%}$ と想定されるが、この遡上高は、将来的に予想される $R_{1/10}$ 遡上高とほぼ同値となっており、今後は後

浜盛土に作用する波浪の頻度が増加することとなり、波の遡上に対する対策が必要であると考えられる。

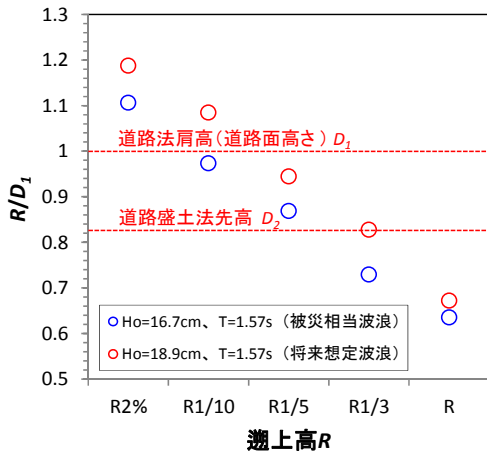


図-11 遡上高 R と R/D_1 との関係

4. 盛土被害の発生条件とその対策工法

4.1 後浜盛土被害の発生条件と対策

4.1.1 後浜盛土被害の発生条件

波浪の作用による盛土の被害程度は、波の遡上高とともに遡上流速および水脈厚の影響を考慮する必要がある。遡上流速は、遡上波先端水位の流速を単位面積当たりの流束として取り扱い、遡上波 1 周期あたりのエネルギー方程式によって求めた宮武ら¹⁰⁾を準用して算出した。この方法によって遡上計で観測されたすべて波の遡上高を算出した後、 $R_{2\%}$ に該当する遡上波先端水位の流速を遡上

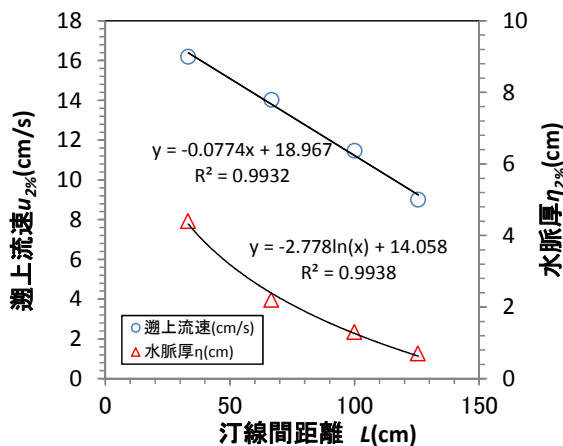


図-12 遡上流速および水脈厚

流速 $u_{2\%}$ とした。また、水脈厚 η (水底からの波頂高) は、デジタルビデオ解析による値とし、遡上流速と同様に $R_{2\%}$ に該当する波の遡上波の水脈厚を $\eta_{2\%}$ とした。

図-12 は被災相当波 ($H_0=7.5\text{m}$, $T=10.5\text{s}$) を作用させたときの汀線からの距離と遡上流速 $u_{2\%}$ および水脈厚 $\eta_{2\%}$ の関係である。汀線から離れるにした

がって $u_{2\%}$ および $\eta_{2\%}$ は直線的に減少し、後浜盛土先端位置では、 $u_{2\%}=9.0\text{cm/s}$ 程度 (現地スケール: 0.6m/s)、 $\eta_{2\%}=0.7\text{cm}$ (現地スケール: 0.3m) 程度となった。これらの値は波浪による盛土の初期被害の 1 つの目安と考えられる。

4.1.2 後浜盛土被害の対策

海岸道路における盛土被害の対策としては、応急対策と恒久対策に分けて考える必要がある。ここでは図-13 に示すように、応急対策としては、大型土嚢を石かごまたは方塊ブロックにより安定化させることを検討した。また、恒久対策としては天端 2 個並び 2 層厚の消波堤を検討対象とした。

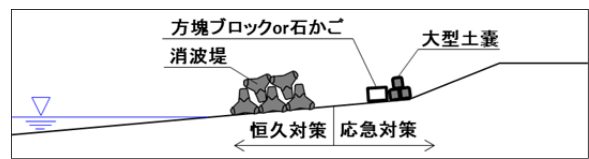


図-13 応急対策と恒久対策

4.1.3 後浜盛土被害の応急対策

応急対策としては、 $\eta_{2\%}=0.3\text{m}$ 程度の流れを抑制させることで対応可能と想定される。越智ら¹⁷⁾は大型土嚢の安定実験を行っており、沖波波高 $H_0=4.0\text{m}$ 程度まではその安定性を確認している。この波高は、被害事例 1 が発生した A 地区では 1 年確率波相当であり、緊急的な措置としては十分有効であると考えられる。一般的な大型土嚢の外径は 1.1m 、高さは 1.1m で重量は 1t 程度である。比較的大きな波浪に対し大型土嚢を安定化させるには、対象とする波浪の程度により前面に方塊ブロックまたは石かごで保護することが必要になると考えられる。

ここでは、 $\eta_{2\%}=0.3\text{m}$ 程度の流れを発生させる被災波浪 ($H_0=7.5\text{m}$, $T=10.5\text{s}$) において、大型土嚢の前面に設置する方塊ブロックの安定性の確認を模型実験により検証した。安定性の確認方法としては、大型土嚢模型の前面に方塊ブロック ($3\text{cm} \times 5\text{cm} \times 2\text{cm}$: 現地換算 6t 程度) を設置し、被災波浪を 1000 波 (不規則波: 修正 Bretschneider・光易型を有するスペクトル) 作用させたときの方塊ブロックの被害を確認した。方塊ブロックおよび大型土嚢模型の設置位置は汀線から近い順に CASE 1 ~ CASE 3 ($L=33.3\text{cm} \sim 100.0\text{cm}$) とした。その結果、写真-3 および表-3 に示す通り CASE 3 では、方塊ブロックに被害はなく、10 年確率波相当である $H_0=7.5\text{m}$ までの安定性を確認した。

4.1.4 後浜盛土被害の恒久対策

恒久対策としては、実績の多い汀線の陸側に消波堤を設置することを想定し、図-4 に示した3箇所に消波堤を設置し、表-2 の条件の波を作用させ、遡上低減効果を模型実験により検証した。

図-14 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_0/L_0 の違いによる消波堤の波の低減効果は、多少バラツキのある結果となったが、CASE1 である汀線から $L=15\text{m}$ の位置に設置した場合に一番効果が高く、概ね $R_{2\%}$ を4割程度低減することが可能となる。

図-15 は被災相当波を対象に、消波堤を設置した場合の遡上流速 $u_{2\%}^*$ を無堤時の遡上流速 $u_{2\%}$ で除して遡上流速の低減効果を確認したものである。汀線近くに設置したCASE1 で最も効果が高く、盛土法先位置においては、遡上流速が 0cm/s となり、波自体の遡上がなくなることを確認した。

4.2 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-16 に示す計算領域を設定し、表-4 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¹⁸⁾ に準じ、それぞれ1.2、1.0とした。

図-17 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-18 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 $H_0=4.5\text{m}$ 、 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 $2.7 \times 10^3 (\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec})$ となり、道路天端面 (T.P+7.9m) における許容越波量は福田ら¹⁹⁾ 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



写真-3 方塊ブロックの状況

表-3 方塊ブロックの被害

実験ケース	汀線からの距離	被害個数	被害率(%)	方塊重量(模型)	方塊重量(現地換算)
CASE1	L=33.3cm	17	100.0	68g	6.2t
CASE2	L=66.7cm	9	52.9		
CASE3	L=100.0cm	0	0.0		

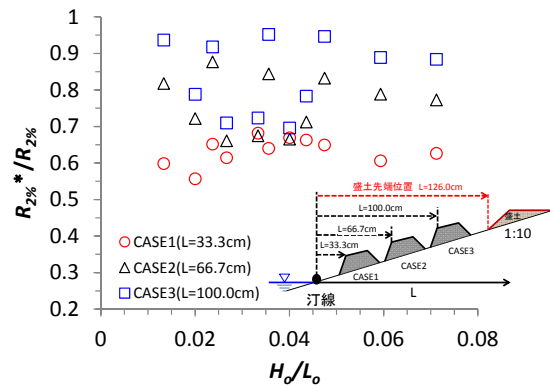


図-14 消波堤による遡上高 $R_{2\%}$ の低減効果

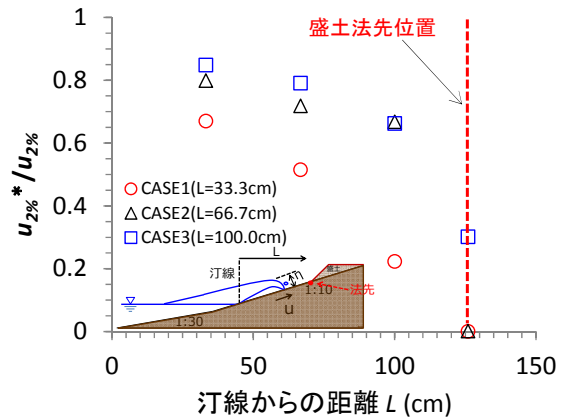


図-15 消波堤による遡上流速 $u_{2\%}$ の低減効果

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証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

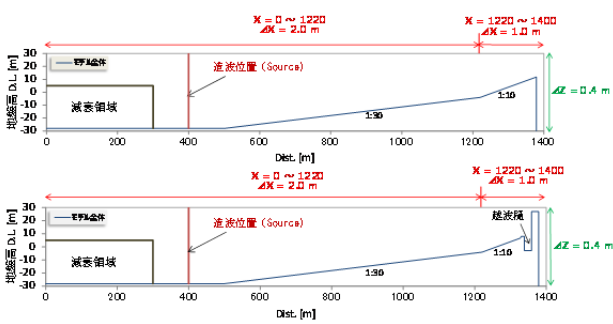


図-16 数値波動水路の概要
(上図：遡上時、下図：越波時)

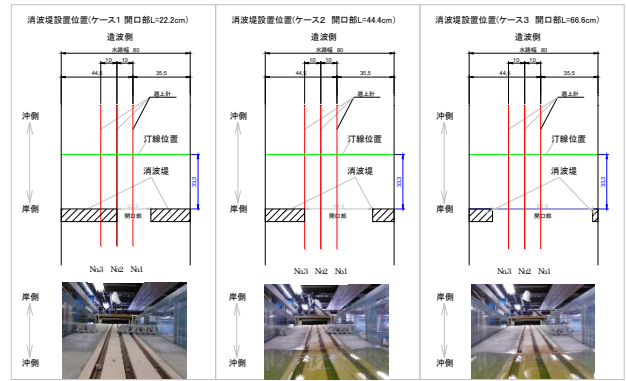


図-19 実験の概要 (単位：cm)

表-4 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
消波工	空隙率	0.5
	慣性力係数 C_m	1.2
	抗力係数 C_D	1.0

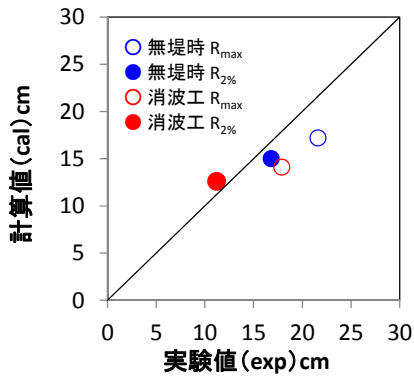


図-17 被災相当波を作用させたときの波の遡上高

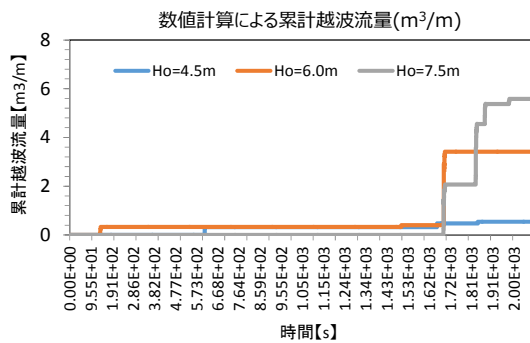


図-18 累計越波流量

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。

4.3 消波堤による平面的な波の遡上特性

前節までの模型実験結果より、汀線より33.3cm (現地スケール15m) 離れた箇所に消波堤を設置することにより、

効果的に波の遡上を低減することが可能となる。しかしながら、経済的にも効果的な配置を検討するため、準平面実験を行い、開口部の広さの影響による波の低減効果を調べた。実験条件は、図-4の実験水路に、表-2に示した実験条件および消波堤設置箇所と同じ条件で実施した。消波堤開口部は図-19のように22.2cm、44.4cm、66.6cm (CASE1～3：現地スケール10m、20m、30m) とし、遡上計を造波側に向かって消波堤開口部中心から左に3本の遡上計 (No.1、No.2、No.3) を設置して、開口部付近の波の遡上を計測した。図-20は、上記条件での開口部付近の波の遡上高の結果である。図中の $R_{2\%}^*$ は消波堤設定時の遡上高であり、消波堤のない無堤時の状態遡上高 $R_{2\%}$ で除することにより、遡上高の低減割合を示している。消波堤の設置位置が汀線より近いほど、各遡上計における波の遡上低減効果が大きくなる傾向が見られるが、開口部が大きくなるほど、どの箇所での遡上計においても波形勾配 H_o/L_o が0.02以下の小さい条件においては、1.1～1.2倍の遡上増大が見られた。特に、開口部を狭めるほど、波形勾配が0.04付近において、最も弱点となるNo.1地点の遡上高の低減効果が大きくなる結果となった。

以上のことから、全体のコストを考慮し、弱点となる開口部は極力小さくする必要がある。

5. 後浜盛土の破壊メカニズム

5.1 オホーツク沿岸域における後浜斜面の現地調査

前述3.1でオホーツク海沿岸域における波浪による後浜盛土の被災事例を提示したが、このうち後浜斜面の地盤性状の継続調査が可能な盛土被害の小さい被害事例1のA地区を対象に現地調査を行った。

図-21は調査の対象としたA地区の代表断面地形である。後浜斜面は汀線から約60mの位置にあり、主に砂粒子で構成され、0.2mm～2.0mmの比較的狭い範囲に集中し、中央粒径 d_{50} が1.0～1.2mm付近の粗砂が8割に及ぶ (図-22)。調

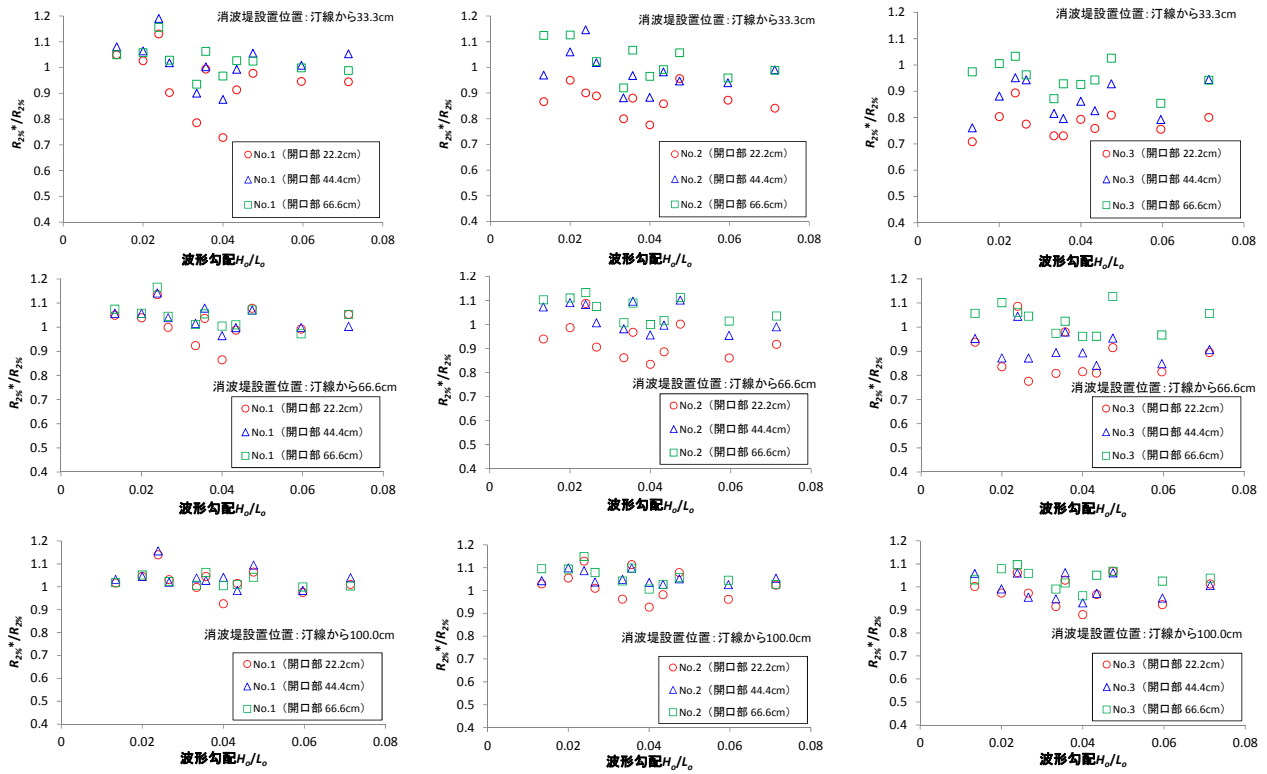


図-20 開口部付近における波の遡上高の影響

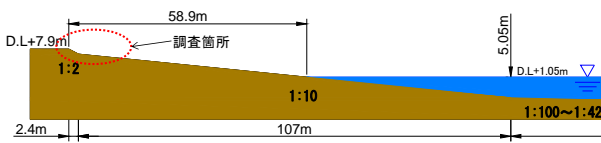


図-21 調査対象箇所

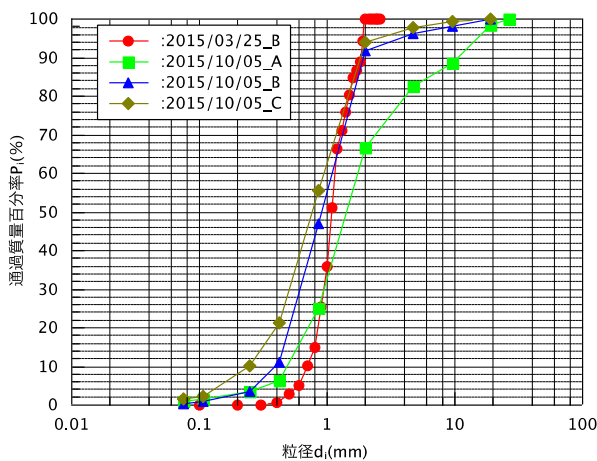


図-22 粒度分布の例

表-5 現地調査概要

調査項目	調査月日
底質粒度試験	2015/3/25, 10/6
相対密度試験	2015/3/25, 10/6
せん断強度試験	2015/3/25, 10/6, 2016/3/29, 10/12, 12/19

査概要を表-5に示す。図-23は、2015年3月25日、10月6日に実施した相対密度試験結果である。測定地点A～Cは、後浜斜面中腹部、測定地点Dは砂浜で計測した結果である。両日も調査期間前後において晴天であり、降雨の影響は小さい条件であったが、3月期の相対密度は10月期と比較

して大きく異なり30～50%程度低下している。図-24は、地盤表層のベーンせん断試験によるせん断強度の変化である。測定点、No.1～No.2は後浜斜面、No.3は後浜斜面法先、No.4～7は砂浜で測定した結果であり、3月、10月ともに前浜から後浜斜面に向かってせん断強度は増加するが、融雪期となる3月では、10月と比較して全体的に5割の強度の低下がみられる。また、図示はしていないが、12月期における後浜斜面は、積雪および凍結の影響を受けている状態であったが、積雪が大きい場合には断熱効果もあり、凍結しておらず、せん断強度としては、概ね3月期と10月期の中間程度の強度を有していた。後浜盛土の状況としては、表層が湿った状態となっていた。観測したデータは少なく、潮位や気象などの日変動の影響までは明確ではないが、相対密度試験およびせん断強度試験の結果から、積雪が融解する3月期では、地盤内の飽和度が増加することにより、地盤が緩詰めとなったことが起因し、後浜斜面全域の相対密度が低下したと考えられる。このように寒冷地の海岸道路では、季節変動による地盤性状変化が大きいことが確認された。

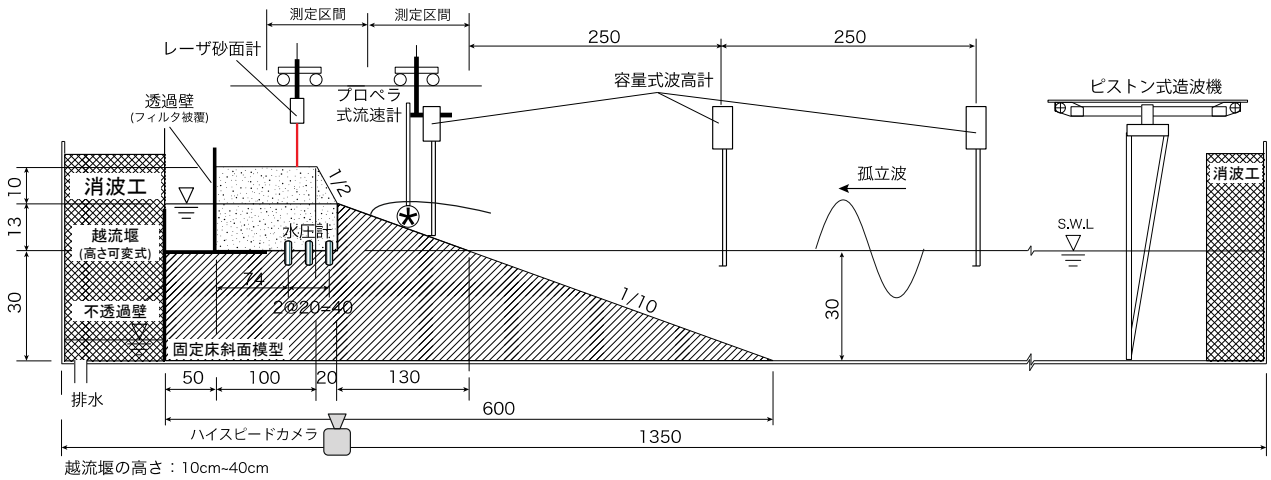


図-25 実験装置の概要図 (単位: cm)

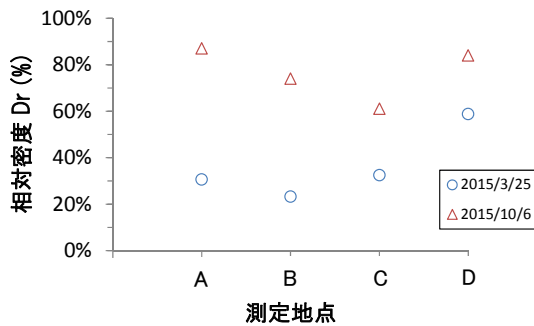


図-23 相対密度の変化

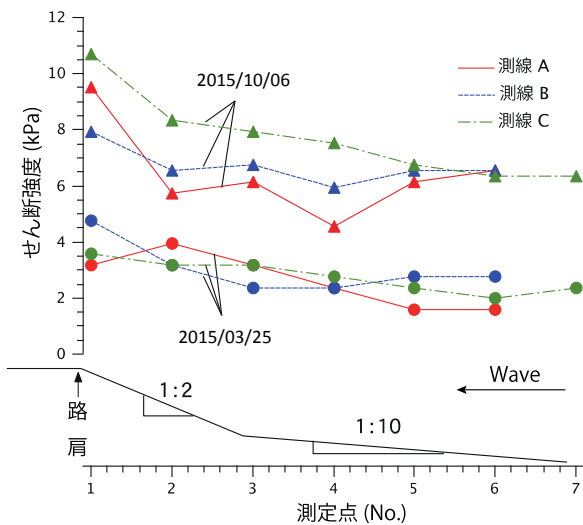


図-24 せん断強度の変化

5.2 孤立波による後浜盛土斜面の破壊実験

後浜盛土斜面の破壊メカニズムを解明するため、孤立波による後浜盛土斜面の破壊実験を行った。実験は、2次元造波水路内 (長さ23.5m, 幅0.5m, 深さ1.0m) に代表粒径0.28mmの珪砂を用い道路盛土斜面を成形した (図-25)。盛土は、製作過程や後浜から与える水位によって、表-6のように地盤の性状を変化させた。Run1~Run6に対応した間隙比はそれぞれ、0.74, 0.70, 0.66, 0.65, 0.50, 0.59

である。なお、相似率はFroude相似率を採用し、後浜粒径は以下に示すKozeny-Donatの式を用い、透水係数の相似則から規定した。

$$k = \frac{C_k \lambda^3}{\mu (1-\lambda)^2} D_w^2 \quad (6)$$

ここに、 C_k :砂粒子の形状による定数、 μ :水の粘性係数、 λ :砂粒子の空隙率、 D_w :代表粒径である。

現地において、後浜斜面の被災を発生させた遡上波は、

表-6 後浜盛土の性状条件

ケース	相対密度 D_r (%)	飽和度 S_r (%)	せん断強度 τ (kPa)
Run1	43.0 (中密)	81.0 (不飽和)	0.669
Run2	52.0 (中密)	100.0 (飽和)	0.725
Run3	67.0 (密)	83.0 (不飽和)	1.81
Run4	75.0 (密)	100.0 (飽和)	0.770
Run5	88.0 (高密)	87.0 (不飽和)	2.06
Run6	84.0 (高密)	100.0 (飽和)	0.948

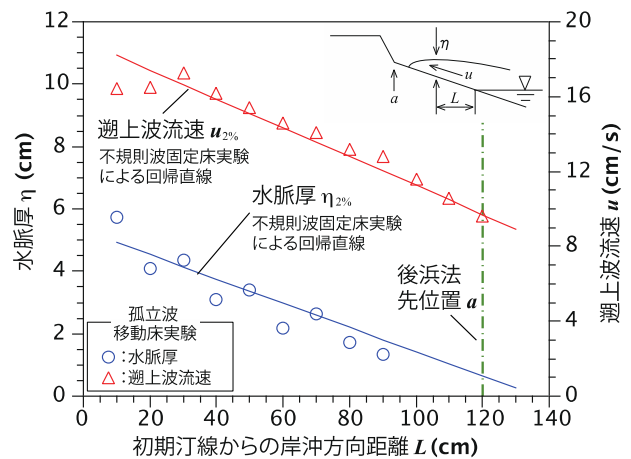


図-26 遡上流速および水脈厚

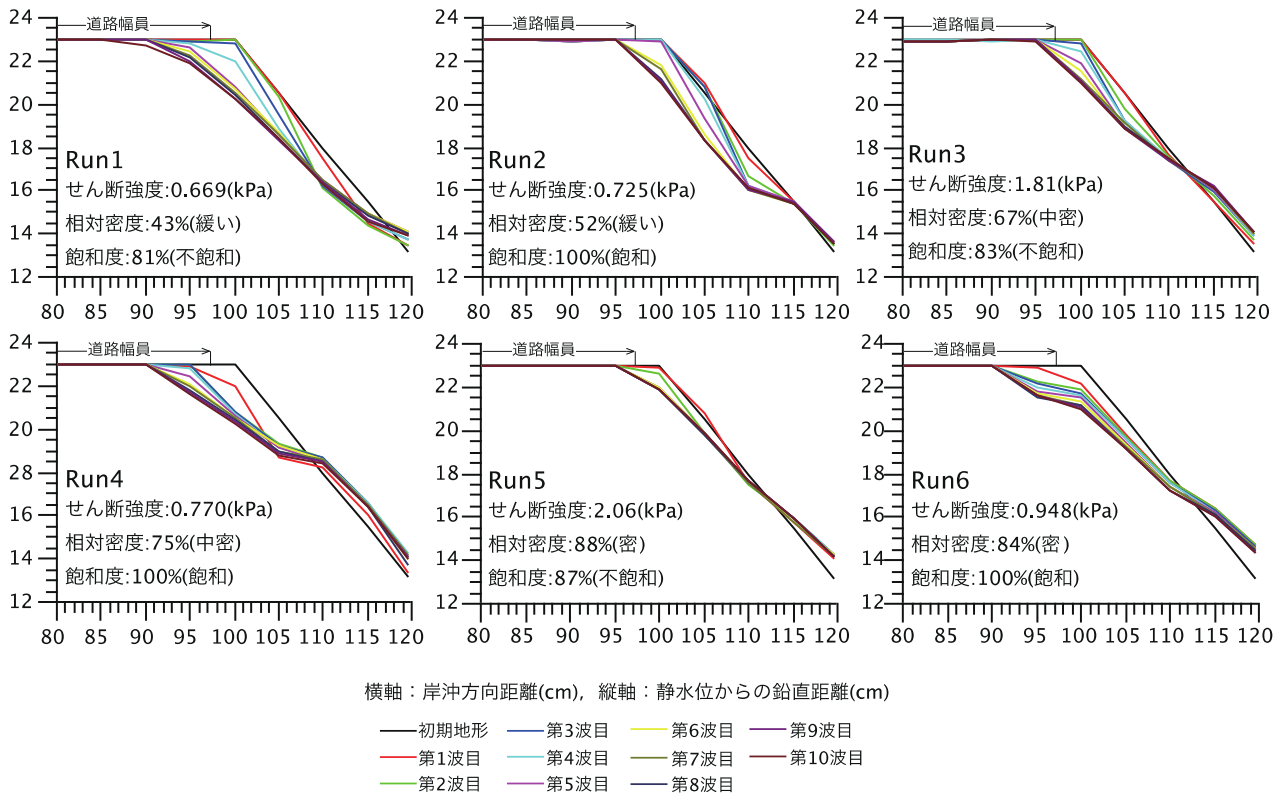


図-27 地盤性状の違いによる被害状況

碎波に伴う乱れや先行波による戻り流れとの干渉など複雑な水理現象を呈していると考えられる。本実験では、前述のように地盤性状による後浜盛土斜面の崩壊メカニズムの解明を主眼としているため、現象を単純化し、入射波には孤立波を用いた。入射させる孤立波は、前述した不規則波固定実験において被災相当波浪を与え、現地の遡上痕と同等となった $R_{2\%}$ 遡上高に相当する水脈厚 $\eta_{2\%}$ および遡上波流速 $u_{2\%}$ を抽出して線形回帰で得た直線に一致するよう検定し(図-26)、被災時の遡上波を再現させた。この結果、孤立波の諸元は、 $H=8.1\text{cm}$ 、 $T=11.0\text{s}$ である。この孤立波を4分間隔で10波作用させ、1/10勾配の前浜斜面上の波浪変形、遡上波変形および遡上流速、地下水位、縦断地形変化の計測をそれぞれ波高計、ハイスピードカメラ、プロペラ流速計、水圧計、レーザー砂面計により計測した。

5.3 地盤性状の違いによる後浜盛土斜面の破壊特性

5.3.1 後浜盛土斜面の破壊パターン

図-27は後浜盛土性状による被害状況である。後浜盛土斜面の破壊パターンは、飽和度に関わらず、図-28に示すように、盛土斜面が緩い状態の場合(Run1,2)、法先付近の侵食が進行し、その後、これより上部にある法肩付近が大きく崩壊するパターン1、後浜盛土斜面が中密な

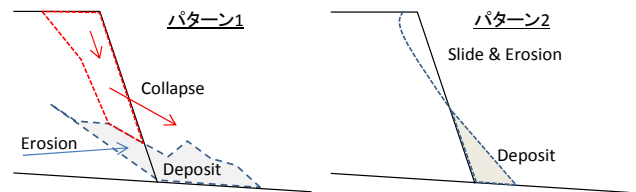


図-28 道路幅員の欠損パターン

状態の場合(Run3,4)では、法肩付近の斜面の洗掘が先行し、法先付近にその土砂が堆積するパターン2に大きく分類される。後浜盛土斜面を更に密にした状態(Run5,6)では基本的に中密な状態のパターン2に準じて破壊が進行する。パターン2で破壊するRun3とほぼ同じ飽和度(不飽和斜面)となる破壊パターン1のRun1では、道路法肩部の侵食がRun3と比較して、より道路幅員側に及び、道路の一部を欠損させるまでに至る。一方、Run3と同じ中密な状態の盛土を飽和にしたRun4は、同じ飽和斜面およびせん断強度を有する中密状態のRun2の破壊パターンとは明らかに異なっている。後浜盛土斜面の破壊は、Run1と同様に法肩部の侵食が進行し、道路幅員の一部を欠損させる。この両ケースはそれぞれ、相対密度の低下および飽和度の増加に伴い、盛土自身のせん断強度が低下したことで、道路幅員の大規模な欠損を発生させてい

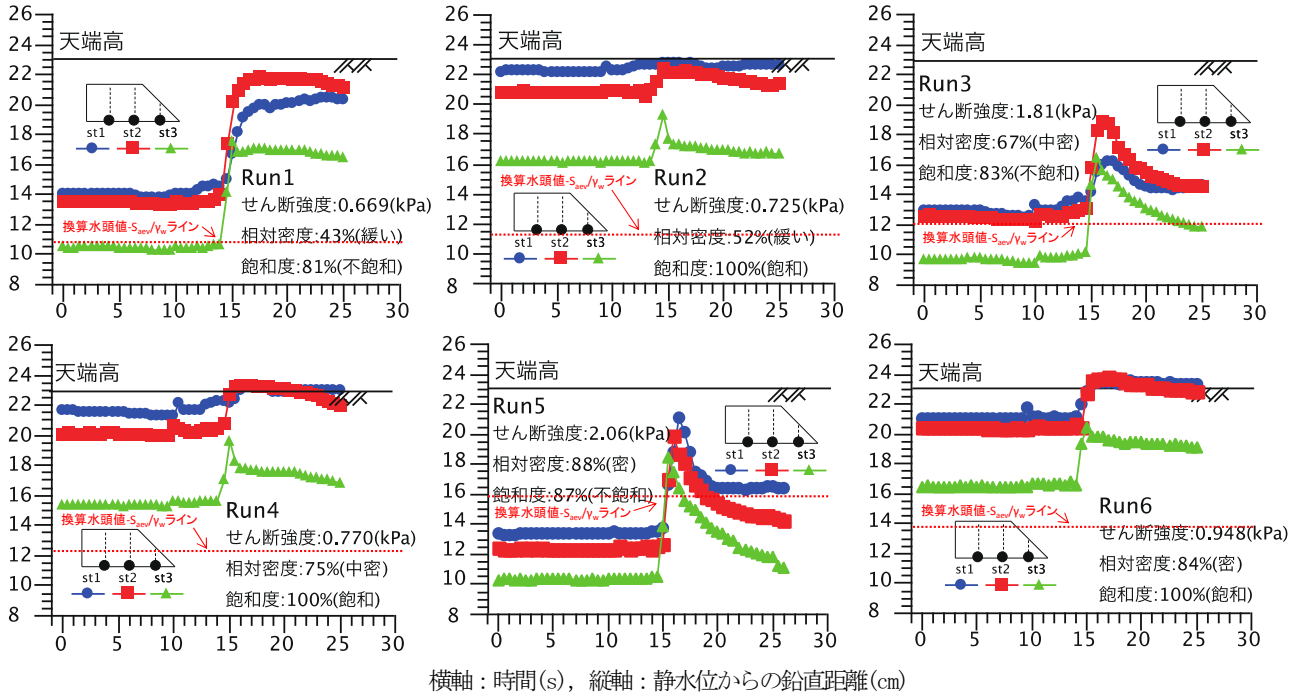


図-29 後浜盛土と地下水位の時系列変化

る。Run5では、Run3と同様の破壊形態となるが、初期のせん断強度および相対密度が大きいため、盛土自身の強度が大きく、道路幅員の欠損が最も小さい結果となった。

5.3.2 地下水位の時系列変化

図-29は、後浜盛土と地下水位の時系列変化であり、図中の破線ラインは、佐々ら²⁰⁾により提案された次式から求まる、土中水分が保持される換算水頭値 $-s_{aeV}/\gamma_w$ を示している。

$$S_{aeV} = \frac{\psi}{e \cdot D_{10}} \gamma_w \quad (7)$$

ここに、 S_{aeV} は空気混入サクシオン値、 ψ は係数で本研究では 20mm^2 を適用している。全てのケースにおいて最も沖側の地下水位が14~15s付近で急激に上昇し、それにやや遅れ岸側の地下水位が上昇している。側面から撮影した動画解析から、地下水位が上昇する時間帯は、遡上波が測定点に到達した時間とほぼ一致し、地下水位は波の遡上に対して俊敏に応答する。一方、地下水位が低下する引き波時では、盛土性状や飽和度に応じ、低下速度が大きく異なり、この違いが盛土斜面の崩壊に大きく影響を与えていると考えられる。

Run1,3,5の結果から、地下水位は不飽和斜面の空隙が大きくなると上昇量および砂層内の貯留される浸透水量が増加し、相対密度の低下に伴う盛土自身のせん断強度の低

下を助長させ、道路法肩部の洗掘を加速させているものと考えられる。特に不飽和斜面のRun1においては、高波によるサクシオン低下に伴うコラプス現象がみられた。一方、Run2,4,6から、地下水位はほぼ天端高に達し、より法肩部の洗掘を生じやすい環境下にあったと考えられ、特に密な状態になる程、遡上波による変動水圧の影響を受けやすくなり、法肩の洗掘が進行するものと考えられる。

5.3.3 崩壊土砂量

図-30は後浜盛土斜面の崩壊がほぼ収束する10波の孤立波を作用させた後の相対密度と崩壊土砂量およびせん断強度の関係である。飽和斜面の場合 (Run2,4,6) では、崩壊量の変化が小さい。相対密度が増加しても土粒子間のサクシオンが消失した状況にあり、せん断強度はほぼ一定に

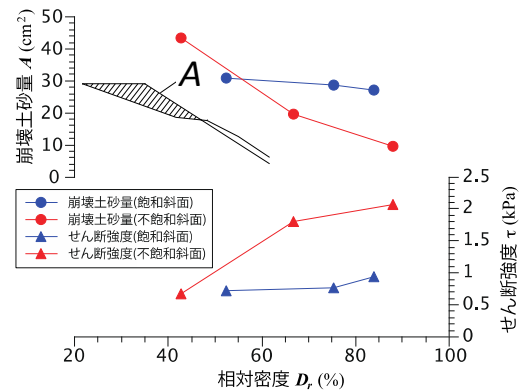


図-30 相対密度と崩壊土砂量およびせん断強度の関係

推移しているためと考えられる。不飽和斜面の場合 (Run1,3,5) では、盛土が高密度化する程、せん断強度が大きくなるだけでなく土粒子間のサクシオンも大きくなるため崩壊量が減少しているが、特に相対密度が低下する程、崩壊量は飽和斜面より大きくなる傾向となる。

現地における汀線背後の海浜および後浜盛土斜面は、年を通して相対密度と飽和度が変化し、後浜盛土斜面の崩壊状況が変化することから、被覆工などにより、保護することが重要と考えられる。

6. 海水による高波時の波の遡上特性

6.1 実験条件

海水による波の波浪低減効果を明らかにするため、水理模型実験を実施した。図-31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 24.0m, 幅 0.8m, 深さ 1.0m)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海水の遡上特性、簡易的に設定した防水柵前面における模擬氷の堆積(以下、パイルアップと称す。)厚さ、防水柵背後における波の低減率、反射特性、波の遡上特性を調べた。波浪条件は、被災事例において道路盛土に軽微な被災が生じた $H_0=7.5\text{m}$, $T=10.5\text{s}$ (水位 $DL+1.05\text{m}$) を含めて、周期3種類、波高6種類に変化させた。海水の模型には、ポリプロピレンを用いた模擬氷(比重0.91)を用いた。また、國松ら⁹⁾によりオホーツク沿岸域で観測された海水氷の大きさおよび厚さの実測データを参考に、 $6.0\text{cm} \times 6.0\text{cm}$ と $10.0\text{cm} \times 10.0\text{cm}$ 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。模擬氷の設定範囲は500cmおよび800cm区間とし、海水の対策工としては、写真-4に示す防水柵をイメージした鉄網を設置したケースと消波堤を設置したケースを実施した。以上の実験条件をまとめて表-7に示す。



写真-4 防水柵による海水の制御状況

表-7 実験条件

(括弧内は現地量)	
模型縮尺	1/45
入射波高 $H_0(\text{cm})$	6.7(3m)~20(9m):5波高
入射周期 $T(\text{s})$	1.34(9s), 1.57(10.5s), 1.79(12s)
実験水位 $h(\text{cm})$	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 $t_i(\text{mm})$	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)

6.2 計測の方法

模擬氷の遡上高および防水柵全面のパイルアップ厚さ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_t は、岸側2本で計測された波高の平均値を沖側2本の入射分離した波高で除した値とし、波高の反射率 K_r は沖側2本の波高計により計測した。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、容量線をもつ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回行いその平均値とした。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。

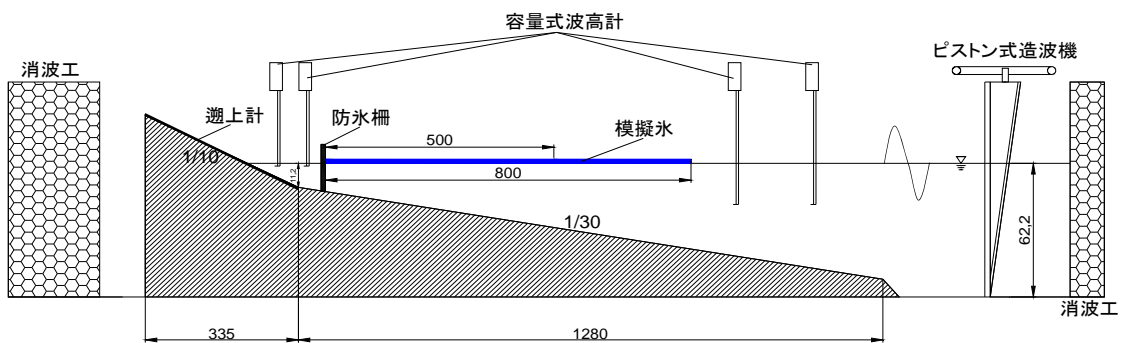


図-31 実験装置の概要図(単位: cm)

6.3 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 ($H_0=16.7\text{cm}$ 、 $T=1.57\text{s}$) 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。

6.3.1 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-32 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²¹⁾、Takeuchi ら²²⁾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。

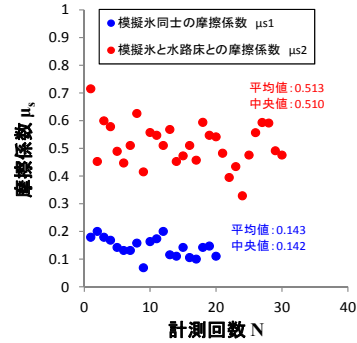
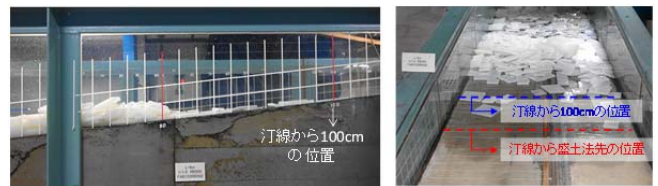


図-32 摩擦係数



6.3.2 海水の遡上特性

図-33 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。模擬氷のパイルアップ傾向は、波高および周期の増加により、到達距離およびパイルアップ高が増加する。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、釘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、 $110\text{cm} \sim 140\text{cm}$ 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。

3.1 に前述しているが、概ね 10 年確率波程度以上の波浪が作用した場合、釘線から 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、釘線より 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。

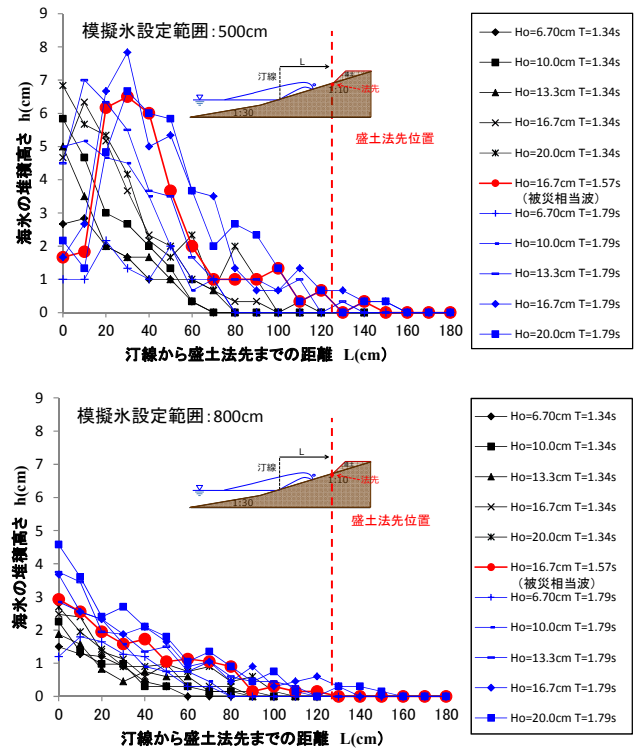


図-33 模擬氷の遡上状況

6.4 対策工による波の遡上特性

海水による波高低減の要因としては、著者ら²³⁾も指摘している、①海水の相互作用 (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 (海水厚さに依存) 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。

6.4.1 防氷柵による対策

図-34は模擬氷の遡上を防氷柵で対策（開口率0%）を施した表-7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 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 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パイルアップすることにより②と③の現象が強く出ていた。 $ICR50\%$ 、 $t_i=5\text{mm}$ では、 X/L_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、 X/L_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。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% の場合の海水の遡上低減効果の目安値はそれぞれ次式(8)(9)のようになる。

$$\frac{K_t}{K_t^*} = e^{(-0.0039t_i - 0.022)\left(\frac{X}{L_0}\right)} \quad (8)$$

$$\frac{K_t}{K_t^*} = e^{(-0.0073t_i - 0.0235)\left(\frac{X}{L_0}\right)} \quad (9)$$

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

$$5\text{mm} < t_i < 20\text{mm}, 1 < X/L_0 < 2.85$$

図-35は、一例として模擬氷の設定範囲が500cm、沖波波高 $H_0=16.7\text{cm}$ 、周期 $T=1.57\text{s}$ のときの模擬氷通過後の波高であり、0.032s間隔、8192データにおけるスペクトル密度を示したものである。スペクトル密度は ICR が高く氷厚が大きいほど低減効果が高い。また、 ICR や氷厚の違いに関わらず全周波帯でスペクトル密度が減衰する傾向が見られた。つぎに海水による反射率特性(③)を確認するため、模擬氷の有無による反射率 K_r を調べた(図-36)。模擬氷設定範囲が5mの場合(上図)では、海水存在時の反射率 K_r は、模擬氷の無い場合の反射率 K_r と比較してほとんど差のない結果となったが、模擬氷設定範囲が8mの場合(下図)ではその差が明確にでている。反射率 K_r は最大で0.35程度となり、模擬氷がな

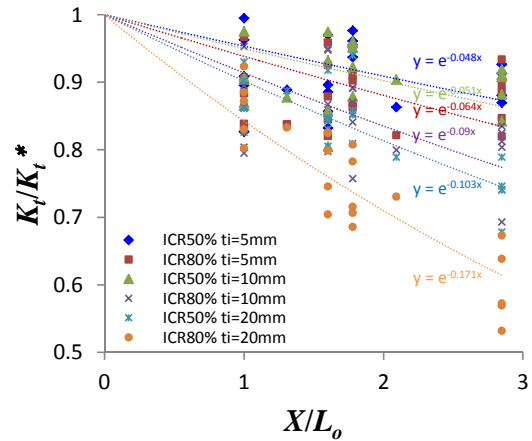


図-34 波浪低減効果

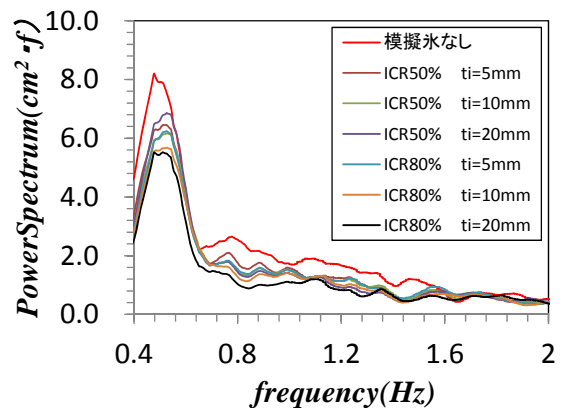


図-35 周波数とスペクトル密度の関係

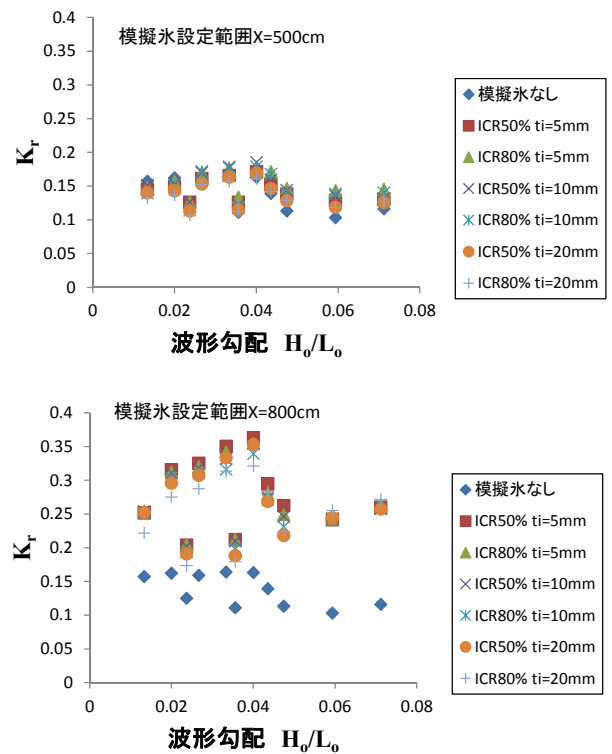


図-36 波形勾配 H_0/L_0 と反射率 K_r の関係

い場合の2倍～3倍程度となった。この要因としては、*ICR*が高く、氷厚 t_i が大きいほど、模擬氷が防氷柵前面付近にパイルアップし、反射波が大きくなったことが考えられる。

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-37は、表-7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 $R_{2\%}^*/R_{2\%}^{**}$ 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、*ICR*80%、 $t_i=20\text{mm}$ 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_o/L_o 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_o/L_o 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-38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。開口率が50%の場合では、遡上域にランダムに海氷がパイルアップするため、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。

図-39は、開口率が0%の場合の沖波波高 H_o と防氷柵前面の模擬氷のパイルアップ厚 $T_{2\%}$ の関係の結果である。図中の $T_{2\%}$ は、模擬氷のない状態で、波の代表遡上高 $R_{2\%}^*$ が発生する波浪が作用したときの防氷柵前面のパイルアップ厚さを示している。 $T_{2\%}$ は *ICR* および氷厚 t_i に依存しない結果となったが、沖波波高 H_o との強い関連性があり、 H_o の増加にともない \log 関数的に増加する傾向がみられた。実験状況を写真-5に示す。

6.4.2 消波堤による対策

実用的な海氷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氷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4型、6型、10型) とし、設置位置は前節4.1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-40は、模擬氷設置範囲 $X=800\text{cm}$ 、*ICR*=80%の条件で被災相当波 ($H_o=16.7\text{cm}$ 、 $T=1.57\text{s}$) 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

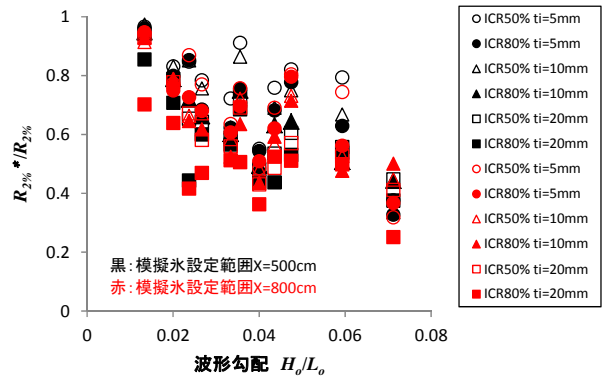


図-37 波形勾配 H_o/L_o と波の遡上低減効果の関係

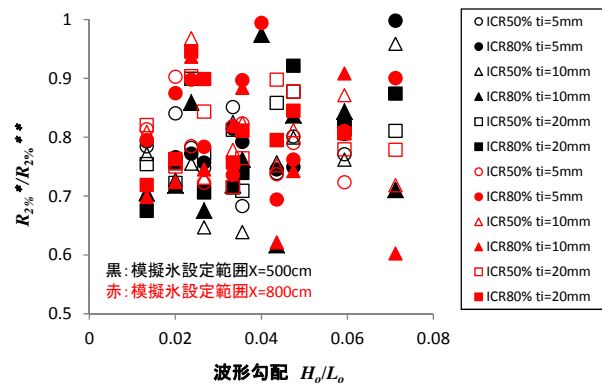


図-38 防氷柵による遡上低減効果

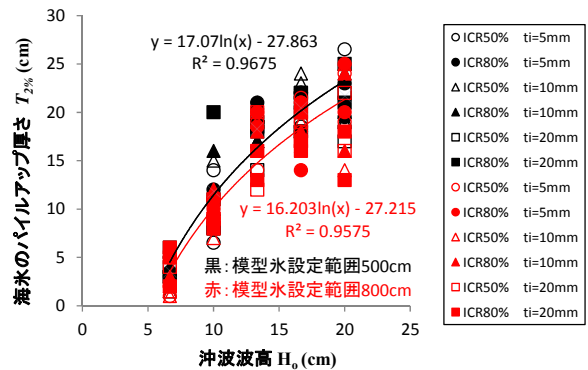


図-39 沖波波高 H_o とパイルアップ厚さ T の関係

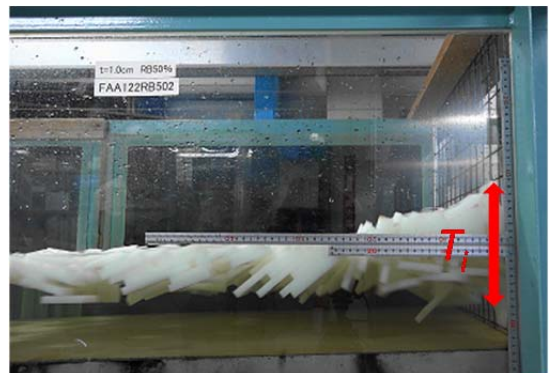


写真-5 実験状況

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-8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-6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。

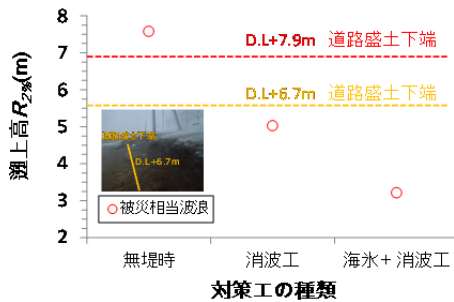


図-40 消波堤による遡上低減効果

表-8 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



写真-6 被災相当波浪作用後の状況

7. 主要な結論

●オホーツク海沿岸域における近年の波浪状況（第2章）より

①過去10年間の通年の平均有義波高にほとんど変化はないが、年変動はあるものの、流氷の卓越する特に2月期における月最大波高および月最大有義波高は増大傾向がみられた。

②年変動が大きいものの、流氷の勢力が減少した年が散見され、年間最大波高が発生した流氷分布は、沿岸部周辺には流氷は存在しておらず、また密接度についても低かった現象がみられた。

●海氷がない状態での波の遡上特性（第3章）より

③北海道オホーツク海沿岸における1:30および1:10程度の複合勾配をもつ自然海岸においては、10年確率波相当波浪に対する後浜斜面盛土の被災限界の目安は、現地の被災事例を勘案すると汀線から60m程度となる。

④オホーツク海沿岸域における波の遡上高さについてsurf similarity parameterを用いて推定した。

●後浜盛土被害の発生条件と対策（第4章）より

⑤対象海岸において、10年確率波相当波浪に対する後浜盛土斜面の被害の発生条件の1つの目安として、波の遡上流速 $u_{2\%}$ は0.6m/s程度、水脈厚 $\eta_{2\%}$ は0.3m程度と推定した。

⑥対象海岸の後浜盛土被害の応急対策としては、水脈厚0.3m程度の流れを抑制させる大型土嚢と方塊を併用することが有効であり、恒久対策としては消波堤を汀線の陸側15m程度の位置に設置することにより、波の遡上を4割程度低減でき効果的であることを示した。

⑦数値解析（CADMAS-SURF）により、波の遡上および越波流量解析を行った。その結果、波の遡上高および越波流量を比較的精度よく再現することが可能であることを検証した。

⑧消波堤による平面的な波の遡上特性について水理模型実験を実施した結果、弱点となる開口部は狭めるほどまた、波形勾配が0.04程度の条件で遡上低減効果が高くなる。開口部はコスト面に留意し、極力小さくする必要がある。

●後浜盛土の破壊メカニズム（第5章）より

⑨オホーツク海沿岸域における汀線背後の海浜および後浜斜面において季節変動による地盤性状変化が大きいことを現地調査により確認した。

⑩緩い不飽和斜面では高波によるサクシオン低下に伴うコラプス現象、中～密な不飽和斜面では高波による洗掘が確認され、相対密度および飽和度の変化に伴う海岸道路幅員の欠損パターンを明らかにし、地盤性状変化を考慮した海岸道路の後浜斜面の高波による破壊メカニズムを解明した。

⑪後浜斜面の崩壊量は、相対密度と飽和度によって異なることを明らかにした。

本研究で得られた知見は、現場で起こりうるほぼ全ての物理状態（相対密度30%～90%程度）を網羅していることから、様々な地盤性状の後浜斜面の高波リスク評価に資するものと考えられる。

また、4章⑤⑥⑧の結果を踏まえ、現地においては後浜斜面の防護手法として、法面被覆を施すなどの対策が重要である。

●海氷による高波時の波の遡上特性（第6章）より

- ⑫10年確率波相当波浪に対する1:30および1:10の勾配をもつ対象海岸における海水の遡上影響範囲は、汀線から概ね60m程度と想定される。
- ⑬防水柵による対策を行った場合の模擬氷による波の低減効果は、模擬氷設定範囲が大きいほど効果が高く、 $ICR80\%$ かつ氷厚 $t_i=20\text{mm}$ の場合では $30\% \sim 50\%$ 程度となり、どの条件においてもスペクトル密度は全周波帯で低減している。
- ⑭限られた条件ではあるが、 $ICR50\%$ 、 80% のときの海水による波の遡上低減効果の目安値を算出した。
- ⑮模擬氷による波の反射率特性は、模擬氷設定範囲が増加するほど高くなり、最大で模擬氷がない場合の2~3倍程度となる。
- ⑯模擬氷による波の遡上低減効果は、模擬氷設定範囲および ICR 、氷厚 t_i が大きいほど高く、 $ICR80\%$ 、 $t_i=20\text{mm}$ の場合、最大8割程度の効果がある。
- ⑰模擬的に設置した防水柵前面での波浪による海水のハイムアップ厚さ T の値は、模擬氷設定範囲が増加するほど小さくなり、 ICR と t_i の違いにあまり依存せず、波高による影響が大きい。
- ⑱オホーツク沿岸域における高波作用時の沿岸部における海水による波浪低減の要因は、海水の ICR と t_i および波高に依存し、1)海水の相互作用(衝突や摩擦)、2)海面上での波の砕波、3)海水に作用する波の反射(海水厚・海水延長に依存)による影響があることを確認した。
- ⑲海水の遡上対策として消波堤が有効であることを確認した。海水の厚さが現地でも卓越する $t_i=10\text{mm}$ (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。

参考文献

- Sassa, S., Yang, S., Watabe, Y., Kajihara, N., and Y.Tanaka: Role of suction in sandy beach habitats and the distributions of three amphipod and isopod species, *Journal of Sea Research.*, Vol.85, pp.336-342, 2014.
- 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)
- Wadhams,P.,V.A.Squire,D.J.Goodman,A.M.Cowan,and S.C.Moore : The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone (1998),*J.Geo-phys.Res.*, pp.6799-6818.
- Squire,V.A.,J.P.Dugan,P.Wadhams,P.J.Rottier,andA.K.Liu : Of ocean waves and sea ice (1995), *Annu.Rev.Fluid Mech.*,27, pp.115-168.
- 堺茂樹, 笹本誠, 片山潤之助, 劉曉東, 平山健一, 泉山耕, 金田成雄(1996): 氷板による不規則波の変形に関する実験, 海岸工学講演会論文集, 第43巻, pp.426-430.
- 片山潤之助, 劉曉東, 笹本誠, 金田成雄, 泉山耕, 堺茂樹 (1997): 氷盤群下の波浪変形特性に関する実験, 海岸工学講演会論文集, 第44巻, pp.146-150.
- Frankenstein,S.,S.Loset,and H.H.Shen (2001) : Wave-ice interactions in Barents Sea marginal ice zone, *Journal of Cold Region Engineering*,15, pp.91-102.
- Shen,H.H.and V.A.Squire (1998) : Wave damping in compact pancake ice fields due to interactions between pancakes,In jeffris, M.O.,ed.Antrctic sea ice , physical processes,interations and variability.Washington, DC,American, Geophysical Union, pp.325-341.
- 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.
- 宮武誠, 藤間聡 (2004) : 波打ち帯の浸食・堆積過程に及ぼす前浜地下水の流動特性, 土木学会論文集, No.754, pp.51-61.
- 中村充, 佐々木康雄, 山田穰二 (1972) : 複断面における波の打ち上げ高に関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp.309-312.
- 合田良實 (1975b) : 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, pp.59-106.
- Mase,H. Kirby,J.T.(1993):Hybrid frequency-domain KdVequation for random wave transformation,Proc.23rd Int.Conf.Coastal Eng.,ASCE,pp.474-487.
- 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏 (2009) : 複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.936-940.
- 菅原吉浩, 山之内順, 山本泰司 (2012) : 海水減少を考慮したオホーツク海における波浪の将来変化, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68,pp.1221-1225.
- 山之内順, 菅原吉浩, 関口浩二 (2011) : オホーツク海沿岸における流氷勢力の変動と確率波高の変化について, 北海道開発技術研究発表会論文, 第55回.
- 越智聖志, 木村克俊, 宮武誠, 上久保勝美 : 国道238号猿払海岸道路における路肩部の高波被害とその復旧, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.68, pp.876-881, 2012.
- 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.
- 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.
- 佐々真志, 渡部要一, 石井嘉一 : 干潟と砂浜の保水動態機構と許容地下水位の解明, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1151-1155, 2007.
- 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.
- Takahiro,T.,Mikio,S.,Kazuo,M.,Hirokazu,S. and Atushi T.atakeuch : Coefficients of Friction of Sea Ice on Sand : Proceeding of The Thiteenth International Offshore and Polar Conference, pp.461-464.
- 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

COASTAL DISASTER PREVENTION METHODS THAT RESPOND TO CHANGING SEA ICE CONDITIONS.

Budgeted : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2014-2016

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

Author : NAKAJIMA Yuichi, MASUDA Tohru,
HONMA Daisuke, SAKAI Kazuhiko,

Abstract : In recent years, because of global warming and the resulting reductions in sea ice, the occurrence frequency of high waves run-up onto coastal roads has been increasing. Backshore embankments on coastal roads have suffered damage from these high waves. It is important to take measures against such high waves before such embankments have collapsed and large-scale damage has occurred. However, very few studies have addressed the initial conditions under which small-scale embankment damage of waves occurs and few have addressed countermeasures. It is assumed that when high waves act on sea ice at the seashore but there is little offshore sea ice, damage is caused not only from wave run-up but also from sea ice run-up. Few studies have addressed the piling up of sea ice on the beach and the wave damping effect of such pile-up ice that may occur when high waves act on sea ice.

To contribute to the future maintenance and management of coastal road embankments, this study addressed a road embankment along a natural coast without artificial revetments such as concrete blocks and clarified the characteristics of wave run-up in past cases of embankment damage through a hydraulic model experiment and numerical analysis. This study also aims at proposing a measure for mitigating wave run-up by clarifying the failure mechanism of backshore embankments. The examination considered changes in the ground properties caused by high waves. The characteristics of wave run-up with sea ice were examined, and the factors that contribute to the wave damping effect of sea ice against high waves were clarified. Based on the findings, measures against sea ice run-up were examined.

Key words : sea ice condition, wave damping, wave run-up, CADMAS-SURF, backshore embankment, relative density, degree of saturation, failure mechanism, sea ice, high waves, piling up, countermeasures