

寒冷海域における沿岸道路の盛土斜面崩壊 に関する研究

共同研究報告書

令和5年1月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
独立行政法人国立高等専門学校機構
函館工業高等専門学校

Copyright © (2023) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て発行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

寒冷海域における沿岸道路の盛土斜面崩壊 に関する研究

共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地水圏研究グループ 寒冷沿岸域チーム

元 上席研究員 中嶋 雄一^{※1}
元 総括主任研究員 井元 忠博^{※2}
元 研究員 本間 大輔^{※3}

独立行政法人国立高等専門学校機構
函館工業高等専門学校 社会基盤工学科

元 准教授 宮武 誠^{※4}

- ※1：現 (一社) 寒地港湾空港技術研究センター 審議役
※2：現 北海道開発局 網走開発建設部 紋別港湾事務所 所長
※3：現 北海道開発局 函館開発建設部 築港課 上席築港専門官
※4：現 函館工業高等専門学校 社会基盤工学科 教授

要旨

オホーツク海沿岸域の海岸道路における後浜盛土斜面の被災状況を把握し、現地走査により得られた後浜盛土斜面の調査結果を踏まえ、相対密度やサクシオン動態、ベーンせん断強度を様々に変化させた盛土の高波による破壊実験を行った。その結果、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ープス現象、中～密な不飽和斜面では高波による洗掘が確認され、相対密度及び飽和度の変化に伴う海岸道路幅員の崩壊パターンを明らかにし、高波による地盤性状変化に応じた海岸道路の崩壊メカニズムを解明した。また、後浜盛土斜面の崩壊量は、相対密度と飽和度によって異なることを明らかにした。そして、その対策工として消波堤に着目し、波の遡上低減効果を定量的に示した。加えて、オホーツク海沿岸域は氷海を伴う波の遡上が想定されるため、海氷を捕捉した防氷柵による波の遡上低減効果についても、その効果を定量的に示した。

キーワード：高波、飽和度、サクシオン、相対密度、海岸道路、崩壊パターン、海氷の遡上、波の遡上、波の低減特性

1. 研究目的

近年、日本を含む北東アジア地域において、特に大きな発達速度を有する爆弾低気圧の発生頻度が増加しており、冬期における低気圧強度も増大傾向にあるとの報告がある。北海道オホーツク海沿岸域においても、特に冬期の短時間で急激な波高増大が全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）で確認されており、今後海岸道路の後浜盛土斜面に來襲する高波の頻度の増加が懸念される。

後浜盛土斜面の破壊は、高波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（以後、コラップスと呼ぶ）が発生し、地盤強度の低下による崩壊が進行すると考えられる。既往研究には、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としているものもあるが、積雪寒冷地においては、降雨など地盤内の飽和度を増加させる短期的な要因の他に、春季における融雪のような長期的な要因もあり、四季を通じて後浜盛土斜面が崩壊しやすい環境にある。

後浜盛土斜面の崩壊対策としては直接作用する遡上波の抑制が必要であるが、景観や予算等の制約上、護岸構造物等で波浪対策のとられていない自然海浜が多くある。これらの自然海浜にある後浜盛土斜面の崩壊は高波によって急速に進行する可能性があり、走行車両の転落など、重大事故につながる恐れがある。そのため、後浜盛土斜面崩壊の予測手法の開発や交通規制などの明確な判断基準の確立が、沿岸道路を管理・運営する上で重要な課題となっている。また、遡上波を抑制する目的で整備する護岸構造物等の検討にあたっては、その有効性の評価が必要となる。

本研究は、高波により後浜盛土斜面が崩壊したオホーツク海沿岸域の海岸道路の被災状況調査、相対密度やサクシオン動態そしてベーンせん断強度を様々に変化させた後浜盛土斜面の高波による崩壊実験を行い、高波作用下における後浜盛土斜面の崩壊メカニズムの解明を目的としている。さらに、後浜盛土斜面の崩壊を抑制する護岸構造物の有効性について、オホーツク海沿岸域の特徴である海氷の効果を含めて評価することを目的としている。

2. 研究内容

2. 1 研究項目

- 1) 現地試験による盛土性状の把握
- 2) 実験による盛土汀線間距離に応じた盛土崩壊現象の再現
- 3) 波浪による盛土崩壊のメカニズムの解明
- 4) 実験による盛土崩壊規模に及ぼす盛土性状の影響評価
- 5) 実験による護岸構造物の遡上波抑制効果の評価

2. 2 研究概要

平成 28 年度

＜オホーツク海沿岸における高波による後浜盛土斜面の被災概要と現地走査＞

近年、オホーツク海沿岸域において高波による後浜盛土斜面の被災が発生しており、被災発生地区における現地走査を実施した。これにより、オホーツク海沿岸域における後浜盛土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明らかにした。

平成 29 年度

＜波浪による盛土崩壊のメカニズムの解明と地盤性状が崩壊規模に及ぼす影響の解明＞

オホーツク海沿岸域における後浜盛土斜面の現地走査結果を踏まえ、相対密度やサクシオン動態、ベーンせん断強度を様々に変化させた盛土の高波による崩壊実験を行った。その結果、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が、中～密な不飽和斜面では高波による洗掘が確認され、相対密度及び飽和度の変化に伴う海岸道路幅員の崩壊パターンを明らかにし、高波による地盤性状変化に応じた海岸道路の崩壊メカニズムを解明した。また、後浜盛土斜面の崩壊量は、相対密度と飽和度によって異なることを明らかにした。

平成 30 年度

＜盛土斜面崩壊の対策工の評価＞

後浜盛土斜面崩壊の対策工として消波堤に着目し、波の遡上低減効果を定量的に示した。特に、オホーツク海は海氷が来襲する環境であるため、防氷柵による海氷の捕捉が波の遡上を低減する効果についても定量的に示した。

3. 研究の実施期間と検討フロー

3. 1 研究の実施期間

自 平成 28 年 3 月 25 日 至 平成 30 年 3 月 31 日 (3 年間)

3. 2 実施体制と分担

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と独立行政法人国立高等専門学校機構函館工業高等専門学校による共同研究体制をとっている。その分担は下表に示すとおりである。

研究項目	研究分担	
	寒地土木研究所	函館工業 高等専門学校
①現地試験による盛土性状の把握	◎	○
②実験による盛土汀線間距離に応じた盛土崩壊現象の再現	◎	◎
③波浪による盛土崩壊のメカニズムの解明	○	◎
④実験による盛土崩壊規模に及ぼす盛土性状の影響評価	○	◎
⑤実験による護岸構造物の遡上波抑制効果の評価	◎	○
⑥とりまとめ	◎	◎

◎：主として分担

○：従として分担

共同研究に参加した研究員

機関名	所属名	氏名	役職名
寒地土木研究所	寒地水圏研究グループ 寒冷沿岸域チーム	中嶋 雄一	上席研究員
		井元 忠博	総括主任研究員
		本間 大輔	研究員
函館工業高等専門学校	社会基盤工学科	宮武 誠	准教授

目次

1. はじめに.....	1
2. オホーツク海沿岸道路における後浜盛土斜面の被災.....	1
2.1 後浜盛土斜面の被災事例.....	1
2.2 被災発生地区の地盤性状と季節変動	2
3. 高波作用時における後浜盛土斜面の崩壊メカニズム.....	3
3.1 後浜盛土斜面の崩壊実験方法	3
3.1.1 後浜盛土斜面における被災時の遡上波再現.....	3
3.1.2 孤立波による後浜盛土斜面の崩壊実験.....	4
3.2 高波作用時における後浜盛土斜面の崩壊メカニズム	5
3.2.1 後浜盛土斜面の崩壊パターン	5
3.2.2 地下水位の時系列変化	6
3.2.3 後浜盛土斜面の崩壊土砂量.....	7
4. 消波堤および防氷柵による後浜盛土斜面の崩壊抑制効果.....	8
4.1 後浜盛土斜面に作用する遡上波の抑制効果検証実験方法.....	8
4.2 消波堤による遡上波抑制効果	9
4.3 海氷がある場合の消波堤および防氷柵による遡上波抑制効果	10
4.3.1 防氷柵による遡上波抑制効果	10
4.3.2 消波堤による遡上波抑制効果	11
5. まとめ	12
6. 今後の課題	12
<参考文献>	13
<主な発表論文>	14

1. はじめに

近年、日本を含む北東アジア地域において、特に大きな発達速度を有する爆弾低気圧の発生頻度が増加しており、冬期における低気圧強度も増大傾向にあるとの報告がある¹⁾。北海道オホーツク海沿岸域においても、特に冬期の短時間で急激な波高増大が全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）で確認されており、今後海岸道路の後浜盛土斜面に來襲する高波の頻度の増加が懸念される。

後浜盛土斜面の破壊は、高波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（以後、コラプスと呼ぶ）が発生し、地盤強度の低下による崩壊が進行すると考えられる。佐々ら²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾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としているが、積雪寒冷地においては、降雨など地盤内の飽和度を増加させる短期的な要因の他に、春季における融雪のような長期的な要因もあり、四季を通じて後浜盛土斜面が崩壊しやすい環境にある。

後浜盛土斜面の崩壊対策としては直接作用する遡上波の抑制が必要であるが、景観や予算等の制約上、護岸構造物等で波浪対策のとられていない自然海浜が多くある。これらの自然海浜にある後浜盛土斜面の崩壊は高波によって急速に進行する可能性があり、走行車両の転落など、重大事故につながる恐れがある。そのため、後浜盛土斜面崩壊の予測手法の開発や交通規制などの明確な判断基準の確立が、沿岸道路の管理・運営する上で重要な課題となっている。また、遡上波を抑制する目的で整備する護岸構造物等の検討にあたっては、その有効性の評価が必要となる。

本研究は、高波により後浜盛土斜面が崩壊したオホーツク海沿岸域の海岸道路の被災状況調査、相対密度やサクシオン動態そしてベーンせん断強度を様々に変化させた後浜盛土斜面の高波による崩壊実験を行い、高波作用下における後浜盛土斜面の崩壊メカニズムの解明を目的としている。さらに、後浜盛土斜面の崩壊を抑制する護岸構造物の有効性について、オホーツク海沿岸域の特徴である海氷の効果を含めて評価することを目的としている。

2. オホーツク海沿岸道路における後浜盛土斜面の被災

2. 1 後浜盛土斜面の被災事例

近年、オホーツク海沿岸域において高波による海岸道路の後浜盛土斜面の被害が発生している。写真-1(a)に示す被災事例1は、国道238号線のA地区において、10年確率波相当の高波（沖波波高 $H_0=7.5$ m、有義周期 $T=10.5$ s）が作用した時の後浜盛土斜面の被災状況である。汀線から後浜盛土斜面までの海底勾配は1:10、距離は60 m程度であった。被災当時、道路面の $D.L.+7.9$ mまで波が遡上し、後浜盛土斜面が部分的に被災していた。写真-1(b)に示す被災事例2は、同じ路線のB地区において、30年確率波相当の波浪（沖波波高 $H_0=8.0$ m）が作用した時の後浜盛土斜面の被災状況である。汀線から後浜盛土斜面までの勾配は1:8、距離は



(a) 被災事例 1 (A 地区)



(b) 被災事例 2 (B 地区)

写真-1 オホーツク海沿岸の後浜盛土斜面の被災状況

25m 程度であった。被災範囲は 100m の広範囲に及び、後浜盛土斜面が全て消失し、路肩舗装部分が欠落するまで崩壊が進行した。

2. 2 被災発生地区の地盤性状と季節変動

2.1 に示した被災状況のうち、後浜盛土斜面の地盤性状の調査が可能な被災事例 1 の A 地区を対象に現地走査を行った。図-1 は調査の対象とした A 地区の代表断面地形である。後浜盛土斜面は汀線から約 60m の位置にあり、主に砂粒子で構成され、粒径は 0.2 ~ 2.0mm の比較的狭い範囲に集中し、中央粒径 $d_{50}=1.2$ mm 付近の粗砂が 8 割に及ぶ。調査概要を表-1 に示す。図-2 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、後浜盛土斜面中腹部、測定地点 D は砂浜で計測した結果である。両日と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-3 は、地盤表層のベーンせん断試験によるせん断強度試験結果である。測定点 No.1~No.2 は後浜盛土斜面、No.3 は後浜盛土斜面法先、No.4~7 は砂浜

表-1 後浜盛土斜面の調査概要

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

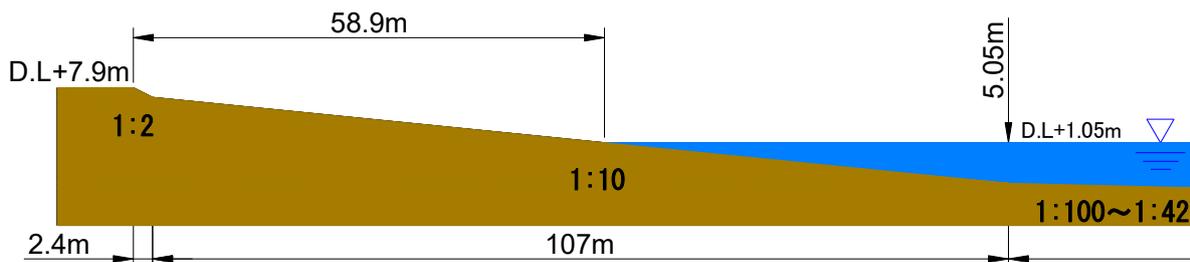


図-1 A 地区の代表断面地形

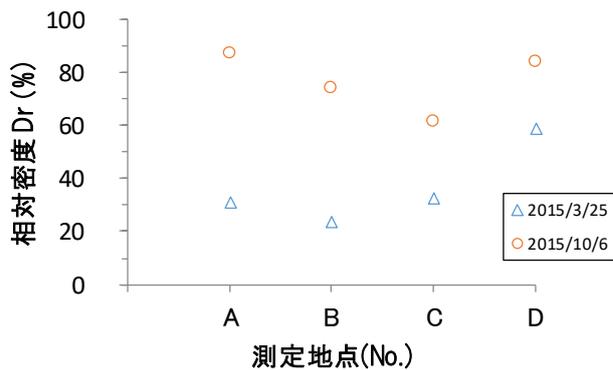


図-2 相対密度試験結果

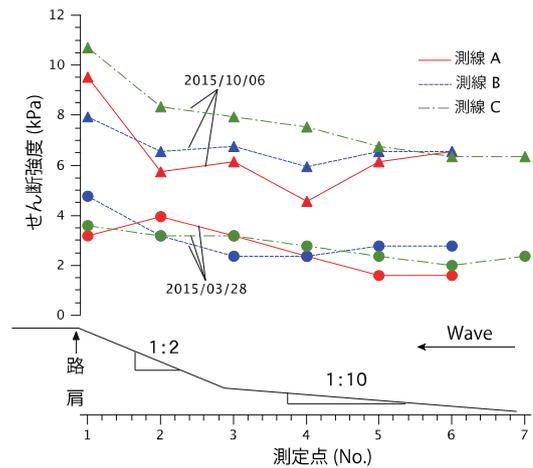


図-3 せん断強度試験結果

で測定した結果であり、3月、10月ともに前浜から後浜盛土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。

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に起因し、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傾向にある。

3. 高波作用時における後浜盛土斜面の崩壊メカニズム

3. 1 後浜盛土斜面の崩壊実験方法

3. 1. 1 後浜盛土斜面における被災時の遡上波再現

後浜盛土斜面に被害をもたらした被災事例1の遡上波を再現するため、固定床による水理模型実験を行った。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、現地の地形に合わせて沖岸方向に1:30から1:10勾配のモルタル製固定床を設置し、模型縮尺は1/45とした。実験には不規則波を用い、1波群を200波とし、被災相当波浪である $H_o=7.5$ m、 $T=10.5$ s、潮位 $D.L.+1.05$ mをベースに2周期、5波高に変化させた。遡上波の計測には、1:10勾配部分に溝を設け、容量線を水路床と同じ高さに設置し、遡上高 R を計測した。また、併せて遡上流速 u を遡上波1周期あたりのエネルギー方程式により求めた宮武ら⁹⁾の方法を準用し、観測された遡上高 R に対応する遡上波先端流速を遡上流速 u として算出した。併せて、デジタルビデオカメラによる水脈厚 η を計測した。

図-4は、沖波波高 H_o と遡上高 R 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 $R_{2\%}/D_1$ および $R_{1/10}/D_1$ 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、 $R_{2\%}$ (exp) が現地の遡上高を再現して

いると想定される。なお、図中には既往の玉田ら⁷⁾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。

参考として、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 まで波が到達することが示された。このことから、後浜盛土斜面で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わかる。

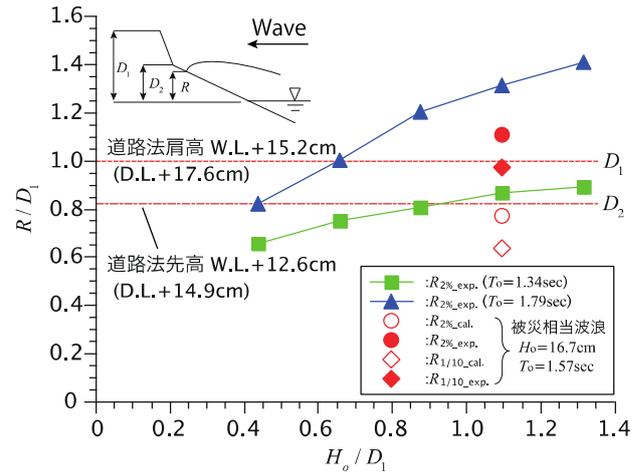


図-4 後浜盛土斜面における波の遡上高

3. 1. 2 孤立波による後浜盛土斜面の崩壊実験

後浜盛土斜面の崩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崩壊実験を行った。実験は、2次元造波水路内（長さ 23.5 m、幅 0.5 m、深さ 1.0 m）に代表粒径 0.28 mm の珪砂を用い後浜盛土斜面を成形した（図-5）。盛土は、製作過程や後浜から与える水位によって、表-2 のように地盤の性状を変化させた。Run 1~Run 6 に対応した間隙比 e 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。

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

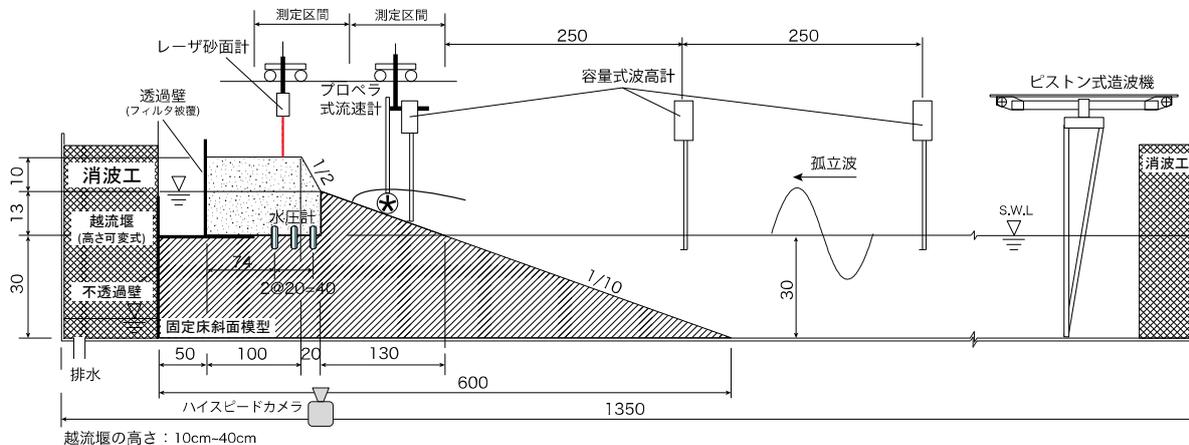


図-5 実験装置の概略図（単位：cm）

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。

現地において後浜盛土斜面を崩壊させた遡上波は、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、現象を単純化するため、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⁸⁾における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-6)、被災時の遡上波を再現した。この結果、孤立波の諸元は、 $H=8.1\text{ cm}$ 、 $T=11.0\text{ s}$ となった。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。

表-2 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 $\tau(\text{kPa})$
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

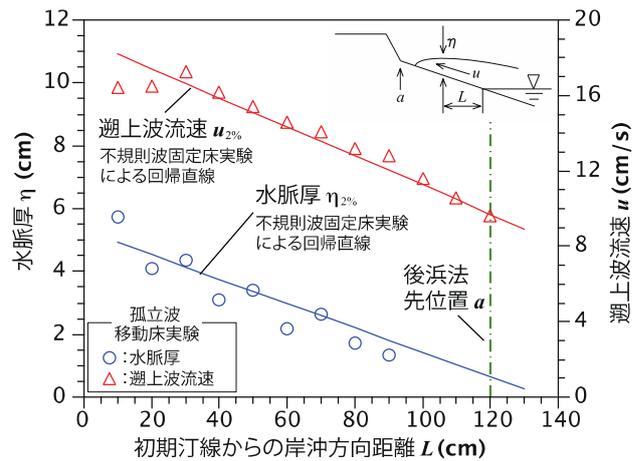


図-6 遡上流速および水脈厚

3. 2 高波作用時における後浜盛土斜面の崩壊メカニズム

3. 2. 1 後浜盛土斜面の崩壊パターン

図-7 は後浜盛土斜面の地盤性状毎の崩壊状況である。図-8 に示すように、後浜盛土斜面の崩壊パターンは、飽和度に関わらず、後浜盛土斜面が緩い状態の場合 (Run 1, 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状態の場合 (Run 3, 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 (Run 5, 6) では基本的に中密な状態のパターン 2 に準じて崩壊が進行する。パターン 2 で崩壊する Run 3 とほぼ同じ飽和度 (不飽和斜面) となる崩壊パターン 1 の Run 1 では、道路法肩部の侵食が Run 3 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、Run 3 と同じ中密な状態の盛土を飽和にした Run 4 は、同じ飽和斜面およびせん断強度を有する中密状態の Run 2 の崩壊パターンとは明らかに異なっている。後浜盛土斜面の崩壊は、Run 1 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、相対密度の低下及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る。Run 5 では、Run 3 と同様の崩壊形態となるが、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。

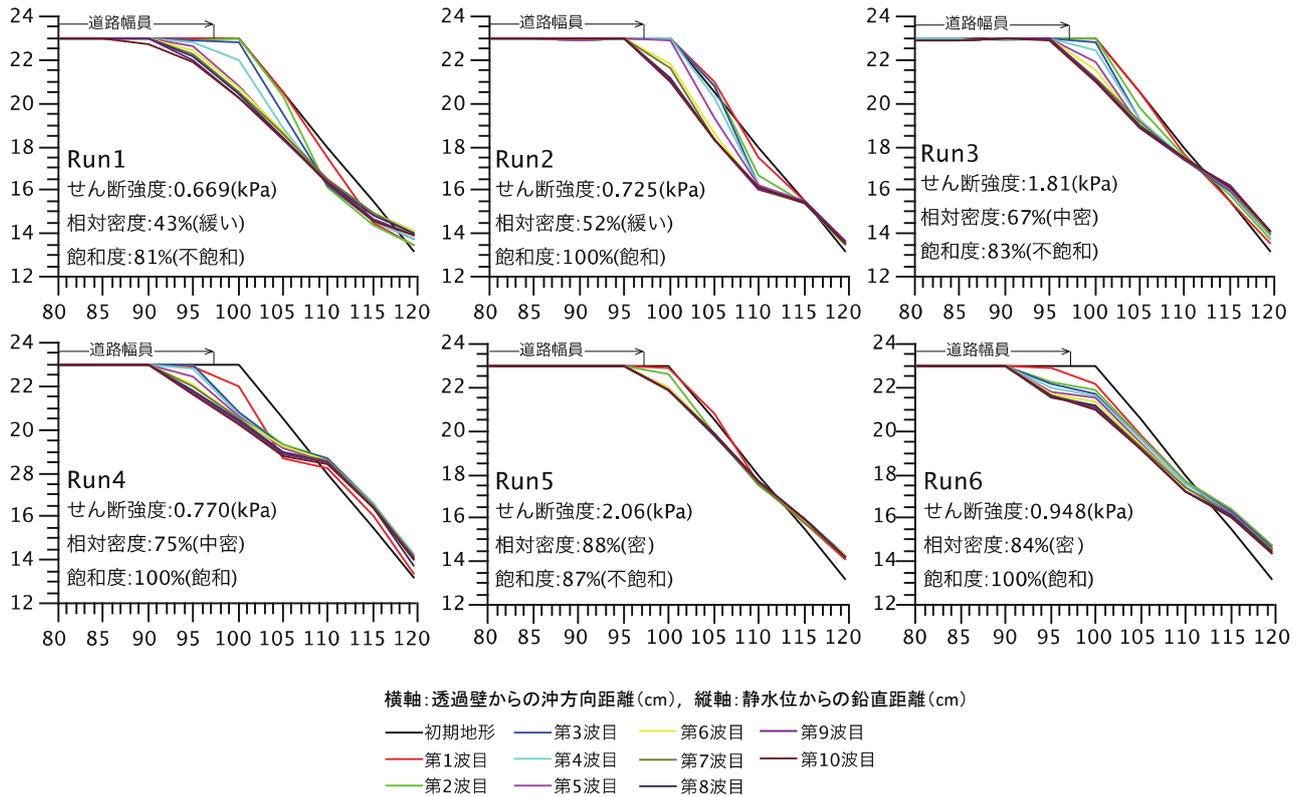


図-7 後浜盛土斜面の地盤性状毎の崩壊状況

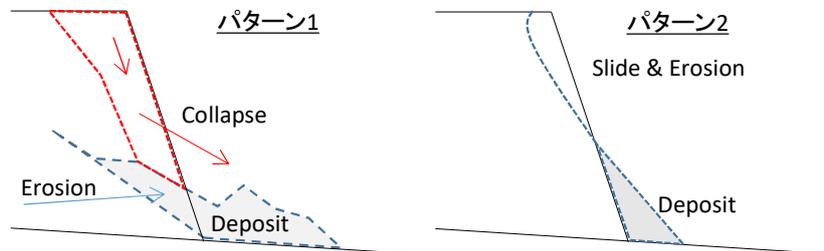


図-8 後浜盛土斜面の崩壊パターン

3. 2. 2 地下水位の時系列変化

図-9は、後浜盛土斜面の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²⁾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。

$$s_{aev} = \frac{\psi}{e \cdot D_{10}} \gamma_w \quad (2)$$

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 20 mm^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 14~15 s 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

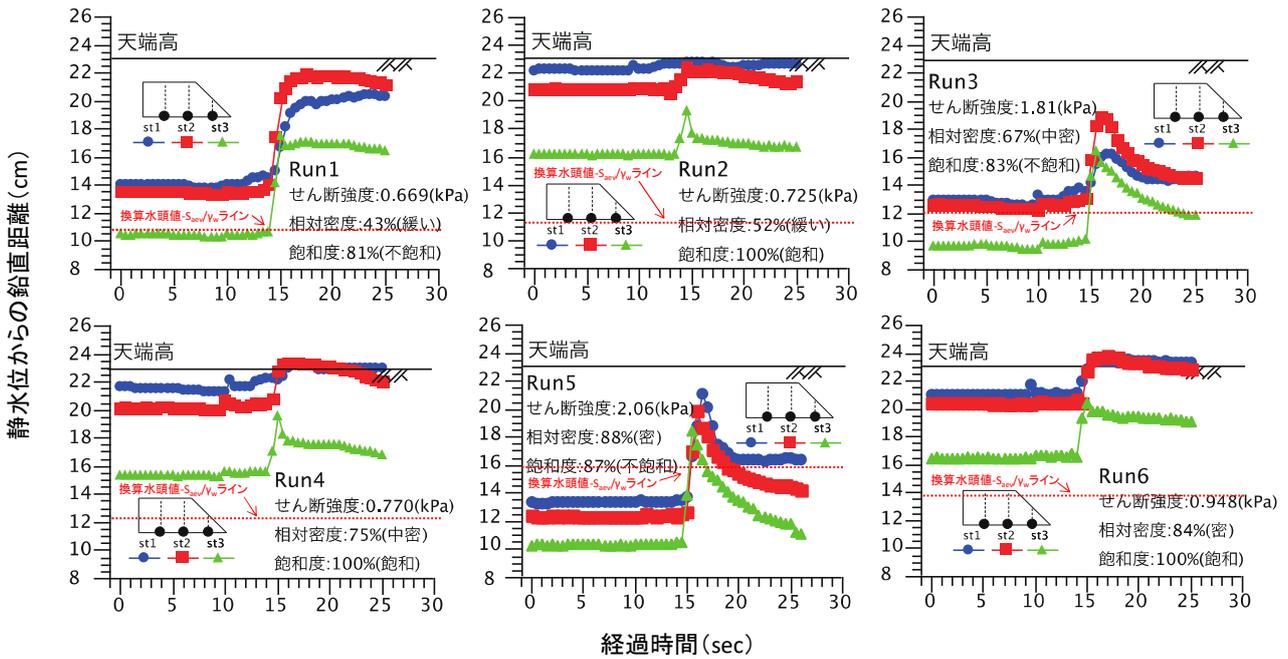


図-9 後浜盛土斜面の地下水位の時系列変化

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及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ップスがみられた。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。

3. 2. 3 後浜盛土斜面の崩壊土砂量

図-10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及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ほ

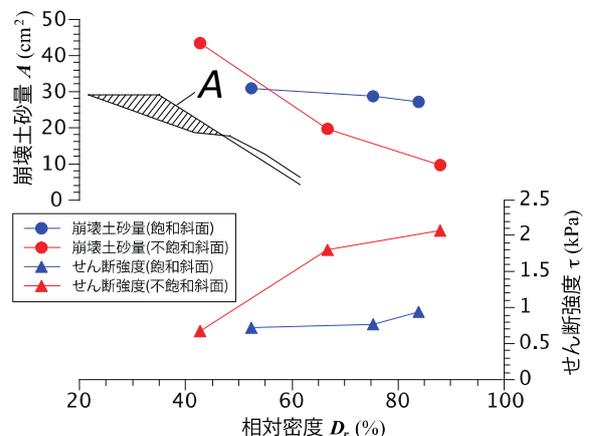


図-10 相対密度と崩壊土砂量
およびせん断強度の関係

ど、崩壊量は飽和斜面より大きくなる傾向となる。

4. 消波堤および防水柵による後浜盛土斜面の崩壊抑制効果

4. 1 後浜盛土斜面に作用する遡上波の抑制効果検証実験方法

後浜盛土斜面を崩壊させる遡上波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-11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 $H_0=7.5\text{ m}$ 、 $T=10.5\text{ s}$ (水位 $D.L.+1.05\text{ m}$)を含め、周期2種類、波高6種類に変化させた。さらに、オホーツク海特有の海氷がある場合における遡上波の遡上特性を明らかにするため、模擬氷を使用した実験も実施した。模擬氷には、ポリプロピレン(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氷盤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5mm、10mm、20mmの3種類とした。海氷被覆率 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。設置範囲は写真-2に示す海氷の分布状況を参考に

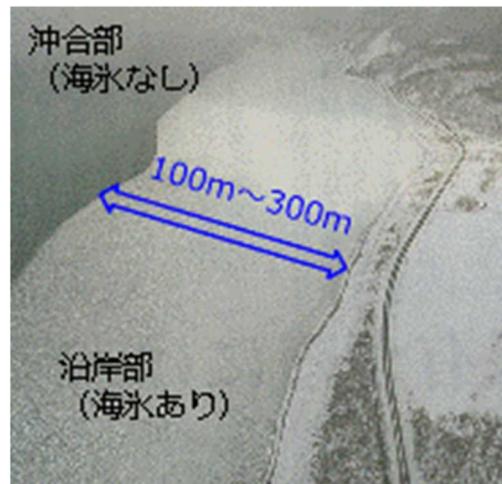


写真-2 実験のモデルとした海氷の分布状況



写真-3 防水柵による海氷の制御状況

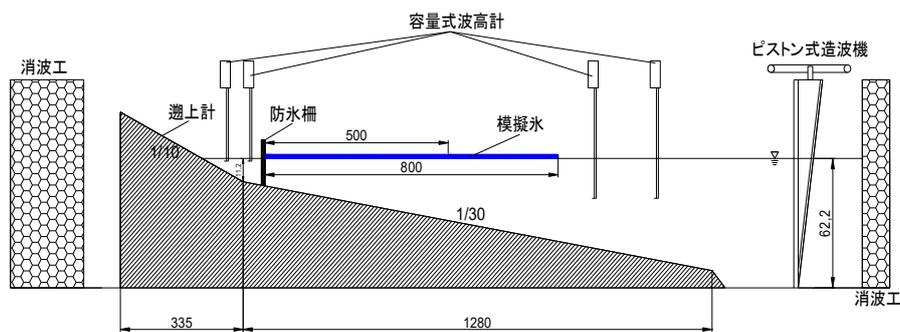


図-11 実験装置の概略図(単位: cm)

500 cm および 800 cm 区間とした。

遡上波の抑制効果を検証する対象としては、海浜斜面に設置する消波堤と海水の接岸を抑制する防氷柵（写真-3）とした。消波堤の設置条件としては、天端 3 個並び 2 層厚とした。設置位置は、水路床の 1:10 の斜面上とした。防氷柵の設置条件としては、海水を通さない開口率の 0 % と、ある程度海水を通過させる開口率 50 % とした。以上の実験条件をまとめて表-3 に示す。

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_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た。波の遡上高の計測は、水路床の 1:10 勾配部分に幅 2 cm 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。

表-3 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.+0.23(+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 (mm)	5(22.5cm)、10(45.0cm)、20(90.0cm)
防氷柵の開口率(%)	0、50
消波堤の設置位置(cm)	汀線から33.3(15m)、66.7(30m)、100(45m)

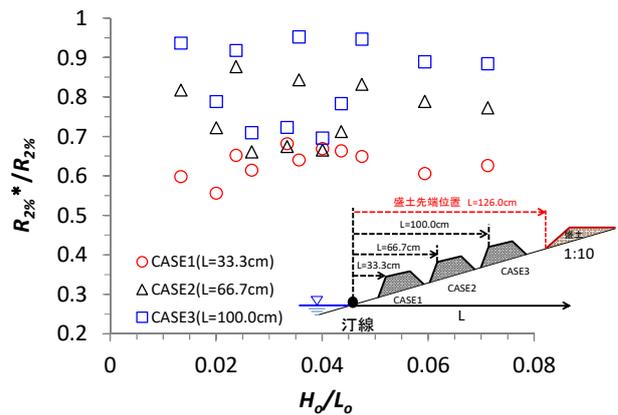


図-12 消波堤による遡上高 $R_{2\%}^*$ の低減効果

4. 2 消波堤による遡上波抑制効果

消波堤による遡上波の抑制効果を検証するため、水理模型実験を実施した。表-3 に示した 3 箇所に消波堤 (10 t 型) を設置し、遡上高の低減効果を調べた。

図-12 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 CASE 1~CASE 3 ($L=33.3\sim 100.0$ cm) とした。波形勾配 H_0/L_0 の違いによる消波堤の遡上高低減効果は、バラツキのある結果となったが、CASE 1 である汀線から $L=33.3$ cm (現地換算 $L=15$ m) の位置に設置した場合が一番効果が高く、概ね 4 割程度低減することが可能である。

図-13 は、被災相当波 ($H_0=16.7$ cm、 $T=1.57$ s) を対象に、消波堤を設置した場合の波の先端の遡上流速 $u_{2\%}^*$ 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 CASE 1 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。

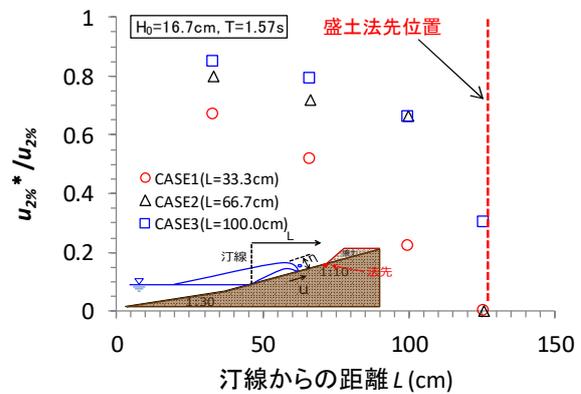


図-13 消波堤による遡上流速 $u_{2\%}^*$ の低減効果

4. 3 海水がある場合の消波堤および防水柵による遡上波抑制効果

4. 3. 1 防水柵による遡上波抑制効果

海水による波高低減の要因としては、著者ら¹⁰⁾も指摘している①海水の相互作用（衝突や摩擦）、②海水面上での波の碎波、③海水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。図-14 は模擬氷の遡上を防水柵で対策（開口率 0 %）した場合における表-3 の条件での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_o が小さいほど、また、海水被覆率 ICR が高く氷厚 t_i が厚いほど、波浪低減効果が大きい。 $ICR=80\%$ 、 $t_i=20\text{ mm}$ の場合では、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_o 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の現象が強く出ていた。 $ICR=50\%$ 、 $t_i=5\text{ mm}$ では、 X/L_o （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_o が一定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% の場合の海水による波浪の低減割合の目安値はそれぞれ次式(3)、(4)のようになる。

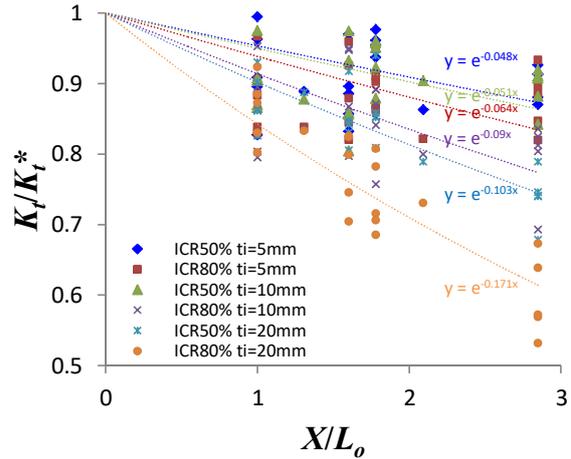


図-14 海水による波浪の低減割合

$$\frac{K_t}{K_t^*} = e^{(-0.0039t_i - 0.0220)\left(\frac{X}{L_o}\right)} \quad (3)$$

$$\frac{K_t}{K_t^*} = e^{(-0.0073t_i - 0.0235)\left(\frac{X}{L_o}\right)} \quad (4)$$

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

海水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 $R_{2\%}$ 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-15 は、表-3 の条件での海水による波の遡上低減効果の結果である。図中の $R_{2\%}^*$ は、模擬氷設置時の遡上高であり、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 が大きくなるほど、低減効果が増し、 $ICR=80\%$ 、

$t_i=20$ 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-16 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、波の遡上高の結果にバラツキが多く、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。

4. 3. 2 消波堤による遡上波抑制効果

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、35 g、59.7 g、100.0 g（現地換算 4 t 型、6 t 型、10 t 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 33.3 cm（現地スケール 15 m）とした。図-17 は、模擬氷設置範囲 $X=800$ cm、 $ICR=80\%$ の条件で消波堤に被災相当波（ $H_o=16.7$ cm、 $T=1.57$ s）を作用させた場合の波の遡上高である。消波堤のみの場合と比較すると、模擬氷設置時にはさらに 4 割程度遡上高を低減していることが確認された。

表-4 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。6 t 型以上のブロックを設置（case 2,3）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-4 は、4 t 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

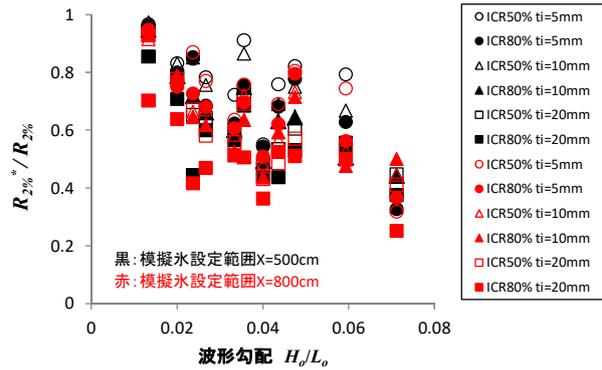


図-15 波形勾配 H_o/L_o と波の遡上低減効果の関係

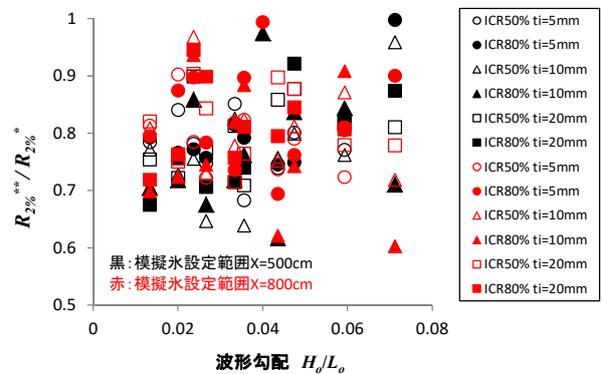


図-16 防氷柵による遡上低減効果

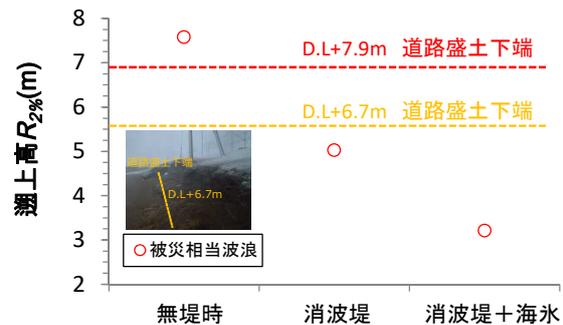


図-17 消波堤と海水による遡上高 $R_{2\%}$ の低減効果

表-4 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

全に防止できることが確認された。

5. まとめ

本研究により得られた結果は以下の通りである。

- 1) オホーツク海沿岸域における後浜盛土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確認した。
- 2) 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が、中～密な不飽和斜面では高波による洗掘が確認され、相対密度及び飽和度の変化に伴う後浜盛土斜面の崩壊パターンを明らかにし、地盤性状変化を考慮した、後浜盛土斜面の高波による崩壊メカニズムを解明した。
- 3) 後浜盛土斜面の崩壊量は、相対密度と飽和度によって異なることを明らかにした。
- 4) 消波堤による遡上波の抑制効果を示した。汀線より 15m 程度の位置に消波堤を設置した場合、遡上高を 4 割程度低減することが可能である。
- 5) 防氷柵により海氷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するとともに、海氷を捕捉した防氷柵による遡上波の抑制効果を示した。
- 6) 海氷の遡上対策としても消波堤は有効であるが、波の遡上対策として効果的となった汀線より 15 m 程度の位置に設置した場合、海氷の厚さが現地でも最も卓越する $t_i=10\text{ mm}$ (現地換算 50 cm 程度) の条件では、10 年確率波程度 (被災相当波浪) においてブロック重量を 6 t 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-4 被災相当波浪作用後の状況

6. 今後の課題

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盛土斜面の高波リスク評価に資するものと考えられる。残された課題として、安全性評価のための指標の構築が必要であると考えられる。具体的には、実験と数値解析により盛土崩壊規模に及ぼす土質性状の影響を定量的に評価可能とする計算図表を作成することが今後の課題である。

<参考文献>

- 1) 猿渡亜由未, 渡部靖憲: 日本海上の爆弾低気圧に起因する高波の発達機構, 海岸工学論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.537-542, 2015.
- 2) 佐々真志, 渡部要一: 砂質干潟の土砂環境場におけるサクシオン動態とその果たす役割, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.981-985, 2005.
- 3) 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.
- 4) Sassa, S. , and watabe, Y. : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, Journal of Geophysical Research. , Vol.112, F01003, 2007.
- 5) 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.
- 6) 宮武誠, 藤間聡: 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, 2004.
- 7) 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏: 複合断面に対する波の不規則性を考慮した打ち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.65, No.1, pp.936-940, 2009.
- 8) 本間大輔, 山本泰司, 宮武誠, 木村克俊: 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, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I_269-I_274, 2015.
- 9) 国松靖, 秋原真哉, 榎国夫, 高木雄一郎, 原文宏, 佐伯浩: 氷盤の大きさに関する研究, 第 8 回寒地技術シンポジウム論文・報告集, pp.417-422, 1992.
- 10) 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: Proceeding of the 23rd IAHR International Symposium on Ice. (Paper. No. 4871913), 2016.

<主な発表論文>

- 論文 1 本間大輔, 宮武誠, 佐々真志, 木村克俊, 白水元, 蛭子翼 : 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の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_1189-I_1194, 2016.
- 論文 2 本間大輔, 中嶋雄一 : 高波作用時の海氷および波の遡上特性と対策の検討, 第 60 回北海道開発技術研究発表会, 2017.
- 論文 3 Honma,D. , Sirozu,H. , Miyatake,M. , and Sassa,S. : Study on the Risk of Wave-Driven Damage to Backshore Slopes of Coastal Roads Due to Changes in Ground Properties, 9th International Conference on Asian and Pacific Coasts, 2017.

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.578 January 2023

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046