

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：寒地水圏研究グループ（寒冷沿岸域）

研究担当者：山本 泰司、本間 大輔、
上久保 勝美、酒井 和彦、
井元 忠博

【要旨】

近年、オホーツク海沿岸の氷海域において、地球温暖化に伴う氷海勢力の変動により海面上昇および流氷減少に起因する冬期間の波浪増大に伴う高波・越波や海岸浸食等の現象が発生しており、主要道路の通行止めなどの交通アクセスへの影響が懸念されている。しかしながら、比較的勾配の緩い複合勾配の海浜における波の遡上現象による海岸道路の盛土被害の発生条件は、解明されていない。そのため、本研究では、オホーツク海沿岸の氷海域における海岸道路の高波による被害を分析し、複合勾配海岸を想定した水理模型実験を実施することにより、オホーツク沿岸域の波の遡上特性および海岸道路盛土の被害条件について解明するものである。

キーワード：流水勢力、波浪増大、海岸道路、波の遡上、盛土被害

1. はじめに

気象庁¹⁾によると、地球温暖化の影響により、北海道北西部における海氷面積が将来的に著しく減少する可能性が高く、海面水位についても、日本近海において将来的に上昇する可能性が高いことが報告されている。冬期におけるオホーツク海は、流氷に覆われることにより、波浪が低く抑えられているが、流水勢力の減少や水位上昇に起因するオホーツク沿岸の冬期間における波高増大が懸念されている。菅原ら²⁾、山之内ら³⁾は、海氷面積の減少を含めた将来気候におけるオホーツク海沿岸の50年確率波高を算出した。その結果、海氷の減少などの気象変動の影響により、50年確率波高が1m以上増大することを報告している。

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、こ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。近年は海岸に襲撃する波高は増加傾向となっており、冬期において北海道オホーツク海沿岸に位置する道路盛土が高波時に侵食される被害が報告されている（写真-1）。被害の発生した海岸は、比較的緩い自然勾配からなる複合勾配地形となっている。海岸道路の盛土は波の作用によって侵食されるものと考えられるが、このような地形に対応した波の遡上特性や盛土の侵食発生限界などの研究は多くはない。越智ら⁴⁾は、海岸道路における路肩部が高波により大きく被災した場

合の崩壊プロセスの検討を行い、応急復旧に関する実験とその効果の検証を行っている。しかしながら、盛土が崩壊し、大規模な復旧が行われた場合、復旧が完了するまでの間、周辺住民への影響は甚大となる。そのため、大きな被災に至る以前に対策を講じることが有効であり、波の遡上により小規模な盛土被害を発生させる初期条件を明らかにする必要がある。

本研究は、オホーツク海沿岸域において近年の波浪状況を把握すると共に、複合緩勾配を有する海岸を対象に、今後の維持管理に資するため水理模型実験によって過去の被災事例における波の遡上特性を明らかにし、盛土被害の発生条件について検討するものである。



写真-1 国道への高波遡上事例（宗谷地方沿岸国道）

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、流氷に覆われ波高が小さくなる特徴がある。図-1は、オホーツク海沿岸の紋別沖で観測された最近(2001~2011)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加している。なお、2010年に波高が小さい理由は、流氷勢力が強かったことが考えられる。図-2は、図-1と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月期に観測されている。図-3は2011年の年間最大波高が観測された2月14日の流氷分布であるが、オホーツク沿岸部周辺には流氷は存在しておらず、また、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ても低かった。この現象は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が、波高増大の要因と推測され、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加傾向であり、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 海岸道路の盛土被害の事例

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。ここでは、過去に同じ路線(一般国道238号)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。写真-2および図-4は、それぞれの事例の被災状況の写真および海岸と道路盛土の断面地形である。

被災事例1(A地区)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、10年確率波相当の有義波高 $H_{1/3}=7.16\text{ m}$ 、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。断面地形(図-4(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

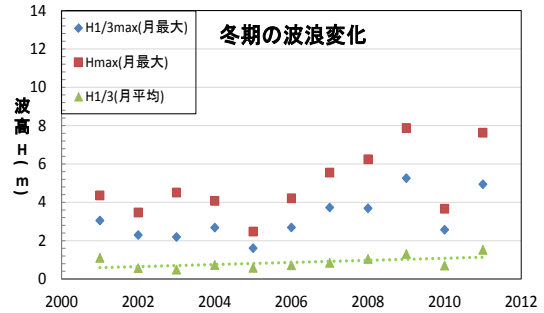


図-1 冬期における波浪変化(2001~2011)

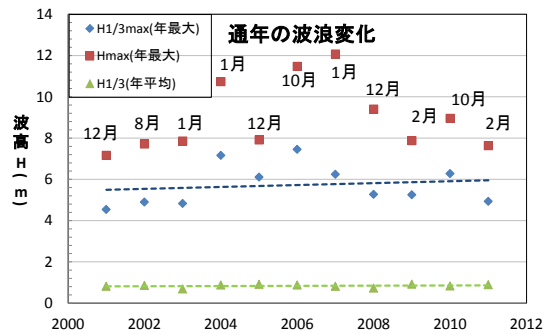


図-2 通年の波浪変化(2001~2011)

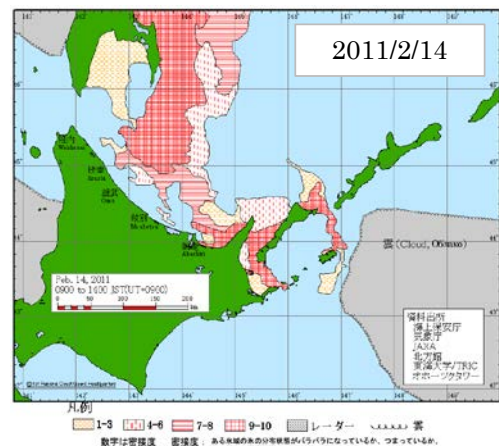


図-3 流氷分布

表-1 被災事例1付近の調査結果

調査箇所		①	②	③	④	⑤
		汀線から道路までの距離(m)	汀線から目標物までの距離(m)	道路の高さ(D.L.標記m)	汀線から目標物までの高低差(m)	海浜勾配(④/②)
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

った事例である。

被災事例2(B地区)は2006年10月8日に発生した。同日14時の紋別(南)における観測データは、20~30

年確率波相当の有義波高 $H_{1/3} = 7.45$ m、最大波高 $H_{max} = 11.47$ m、有義周期 $T_{1/3} = 12.6$ s、潮位 D.L.+1.66 m であった。被災範囲は延長約 100 m、高さ約 3 m、幅約 7.5 m 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。断面地形（図-4 (b)）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 25 m 程度しかなかった。波の遡上は、被害状況から道路面のレベル(D.L.+5.5 m) まで達していたと推定される⁵⁾。

被災事例 3 (C地区) 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。断面地形（図-4 (c)）は汀線付近から道路盛土までの海底勾配は 1:15 程度で、距離は 60 m 程度であった。

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 4.2 km 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 62 m であり、図-4 (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 10 年確率波相当の高波浪であったが、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は、盛土の被災条件は汀線から盛土までの距離が 60 m 程度が目安と推定される。

4 実験の方法

4.1 実験条件

盛土被害の発生条件を明らかにするため、被災事例 1 における波の遡上を水理模型実験により再現した。図-5 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 m、幅 0.8 m、深さ 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、盛土被害の発生条件を調べるための直立壁を、汀線から 33.3 cm ~ 126.0 cm の範囲に配置した。実験にはすべて不規則波を用い、1 波群を 200 波とした。波浪条件は、被災相当波浪である $H_0 = 7.5$ m、 $T = 10.5$ s (水位 D.L.+1.05 m) を含めて、周期 2 種類、波高 6 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。

4.2 波の遡上の計測方法

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、波の遡上を計測した。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 0.03 s 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



(a) 被災事例 1 (A 地区)

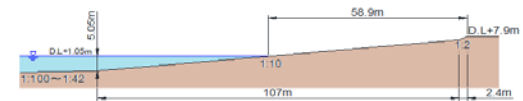


(b) 被災事例 2 (B 地区)

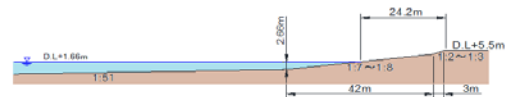


(c) 被災事例 3 (C 地区)

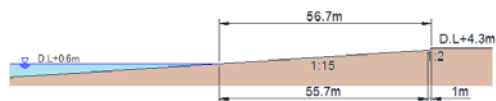
写真-2 オホーツク海沿岸の被災状況



(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-4 被災事例の断面地形

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。遡上計の高さとビデオ撮影の差の絶対値の平均は、0.099 cm であり、遡上計による平均計測値に対する差は 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。



図-5 実験水路 (単位: cm)

5 波の遡上特性

5.1 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さの推定には、中村ら⁹⁾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に示す波浪条件に対して砕波水深 h_b を合田⁷⁾および Mase・Kirby⁸⁾を踏襲し算出したものである。玉田ら⁹⁾にもあるように本実験の条件は、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⁷⁾の砕波水深とはほぼ一致する値となった。

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。現地の盛土被害は海水面 (W.L.) から道路盛土下端 5.65 m (D.L.+6.7 m) ~ 道路路面高さ 6.85 m (D.L.+7.9 m) の間で発生し、道路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 4.2 m 程度となり、現地の遡上高を過小評価した結果となった。

5.2 波高と代表高さの関係

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、ばらつきが大きい。このため、玉田ら⁹⁾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。

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

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

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および9は、沖波波高 H_0 と代表遡上高 $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ の関係を示したものである。実験値 (exp) は計算値 (cal) の 1.3~1.6 倍となった。実験値と計算値の値が異なる原因としては、式 (1) および (2) が、海底勾配 1:10, 1:20, 1:30 の一様の条件で行った実験結果をベースとしているものであり、本実験で用いた複合勾配 (1:30 と 1:10) とは異なる条件であったことが考えられる。ま

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) : 6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), D.L.+1.34(+1.55m)
海底勾配 i	1:30と1:10の複合勾配
直立壁設置箇所(cm)	汀線より33.3(15m)~126.0(56.7m)

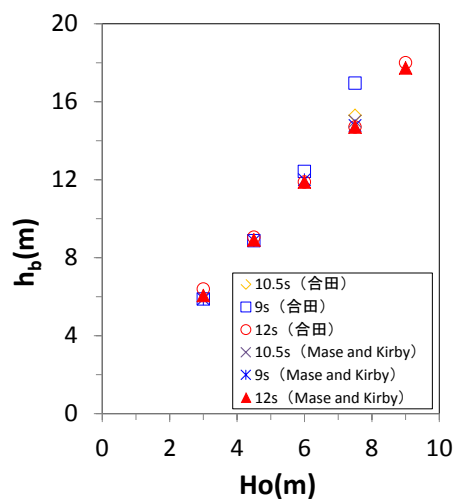


図-6 沖波波高 H_0 と砕波水深 h_b の関係

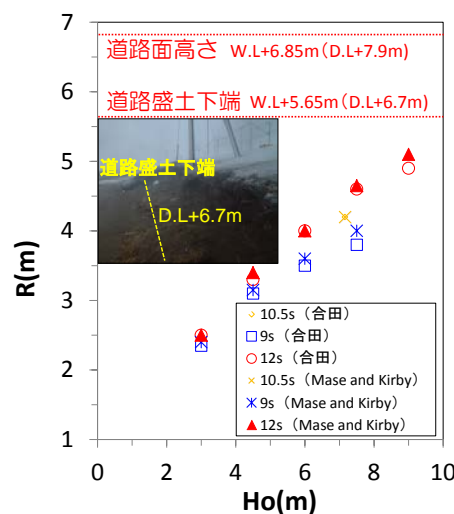


図-7 沖波波高 H_0 と波の遡上高さ R の関係

た、沖波波高が比較的小さい場合には、1:30の地形勾配では碎波せず、勾配変化点もしくは1:10の地形勾配で碎波する現象が見られたことも影響していると考えられる。被災相当波浪 ($H_0=7.5\text{m}$, $T=10.5\text{s}$) に対しては、 $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ のいずれにおいても、●印で示す計算値(cal)は道路盛土下端を下回るが、○印で示す実験値(exp)はこれを上回る結果となった。現地被災時は、道路面高さまで波が遡上していたことから、 $R_{2\%}$ 遡上高を代表遡上高さとするのが妥当と考えられる。

5. 3 波の遡上高

前述のとおり実験値(exp)は計算値(cal)よりも大きくなるが、玉田⁹⁾は式(1)および(2)の妥当性を検証するための実験を複合勾配 (1:30と1:10) で実施し、その妥当性を概ね確認している。そのため、本実験においてもsurf similarity parameter ($\tan \beta / (H_0/L_0)^{0.5}$) 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_0 で除して無次元化したものとの関係を示したものである。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。1:30および1:10程度の複合勾配をもつ自然海岸である北海道のオホーツク海沿岸域の波の遡上高さの関係は以下ようになる。

$$\frac{R_{2\%}}{H_0} = 2.09 * \left\{ \tan \beta / \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.5} \right\}^{0.667} \dots (3)$$

$$\frac{R_{1/10}}{H_0} = 1.89 * \left\{ \tan \beta / \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.5} \right\}^{0.674} \dots (4)$$

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、

$$\left. \begin{aligned} &0.56 < h/H_0 < 1.85 \quad (h \text{は勾配変化点の水深m}) \\ &0.007 < H_0/L_0 < 0.07 \\ &0 < \tan \beta / (H_0/L_0)^{0.5} < 0.86 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

の場合とする。

6 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、波の遡上高さとともに遡上流速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計測されたすべての遡上高に対して算出した後、 $R_{2\%}$ に該当する遡上波先端水位の流速を遡上流

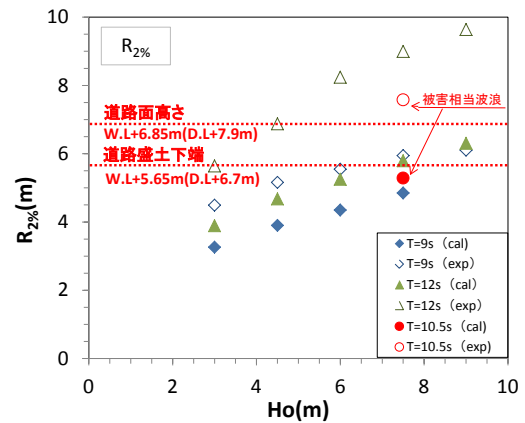


図-8 沖波波高 H_0 と遡上高さ $R_{2\%}$

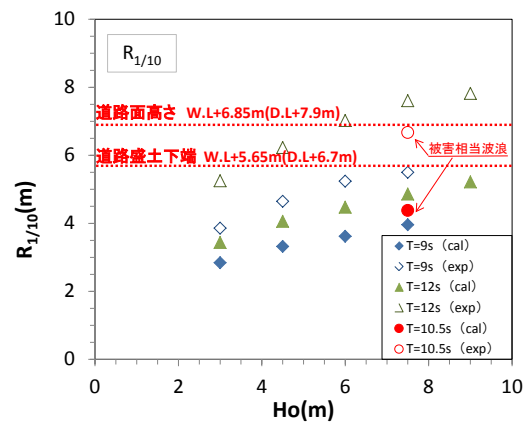


図-9 沖波波高 H_0 と遡上高さ $R_{1/10}$

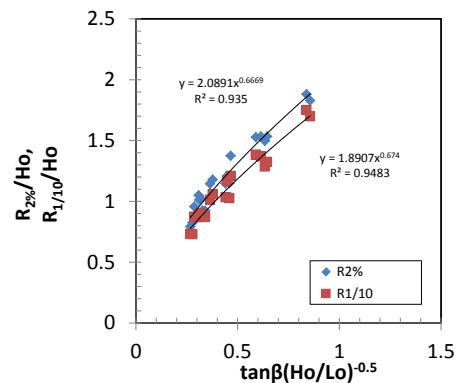


図-10 $R_{2\%}$ および $R_{1/10}$ 遡上高

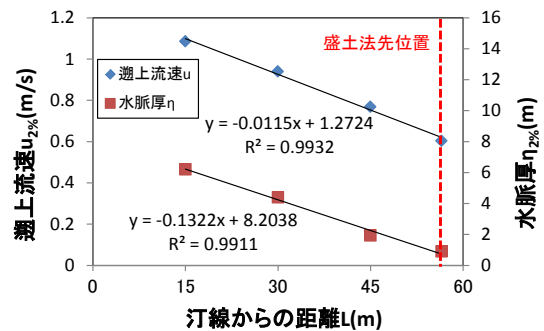


図-11 汀線距離と遡上流速、水脈厚

速 $u_{2\%}$ とした。また、水脈厚 η （水底からの波高頂）は、堤防を汀線より陸側に置いた場合の打上げ高さとの関係を明らかにしている富永・久津見¹¹⁾の実験データを準用して算出した。ここでは、図-5に示す位置に直立堤を設置したときの $R_{2\%}$ に該当する打ち上げ高さから $\eta_{2\%}$ を推定した。

図-11 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、盛土先端位置では、 $u_{2\%} = 0.6 \text{ m/s}$ 程度、 $\eta_{2\%} = 0.9 \text{ m}$ 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目安と考えられる。

7 まとめ

本研究で得られた結論を要約すると、以下に示すとおりである。

(1) オホーツク海沿岸の波浪状況は、年平均有義波高にほとんど変化はないが、道路盛土の被災原因となる最大波高および最大有義波高が高くなっている傾向があり、特に冬期において顕著にみられる。

(2) 北海道の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 (A,B,C 地区) においては、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 60 m 程度となる。

(3) オホーツク海に面した海岸道路における盛土被害の事例を整理 (A,B,C 地区) し、被災の要因となる波の遡上高を算定した。

(4) A 地区海岸における海岸盛土に被害を及ぼす発生条件の 1 つの目安として、遡上流速 $u_{2\%} = 0.6 \text{ m/s}$ 程度、水脈厚 $\eta_{2\%} = 0.9 \text{ m}$ 程度と推定した。

今後は、現地被災データを蓄積し、水理模型実験および数値解析を実施し、盛土被害に関する断面的・平面的な波遡上低減特性を解明する必要がある。また、波遡上対策案を抽出し、水海岸保全を考慮した沿岸施設整備手法を提案する予定である。

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), pp.23-24
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 武田光邦, 山本隆, 及川秀一: 一般国道238号猿払村における海岸侵食被害状況と復旧後の管理体制について, 北海道開発技術研究発表会, 第50回, 2006.
- 6) 中村充, 佐々木康雄, 山田穰二: 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, 1972.
- 7) 合田良實: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, pp.59-106, 1975.
- 8) Mase, H.・Kirby, J.T: Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation, Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng. ASCE, pp.474-487, 1993.
- 9) 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, 2009.
- 10) 宮武誠, 藤間聡: 波打ち帯の侵食・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.
- 11) 富永正照, 久津見生哲: 海岸堤防に作用する碎波後の波圧, 第18回海岸工学講演会論文集, pp.215-221, 1981.

COASTAL DISASTER PREVENTION METHODS RESPONDING TO CHANGES IN 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: YAMAMOTO Yasuji , HONMA Daisuke,
KAMIKUBO Katsumi, SAKAI Kazukiko,
IMOTO Tadahiro

Abstract: In recent years, high waves, overtopping waves, and coastal erosion in winter have been increasing in areas along the Okhotsk Coast of Hokkaido, where sea ice generally comes in winter. These phenomena are triggered by global warming, and by the resulting rise in seawater and reduction in the amount and period of floating sea ice that comes to the Okhotsk Coast. Damage to roads and disruption of roads, including closures of major ones, resulting from climate change and sea ice reduction have become concerns. The hydraulic characteristics of sea waves running up on beaches with comparatively moderate, complex gradients have not been clarified in detail. In this study, the characteristics of wave run-up in areas along the Okhotsk Coast and the conditions of damage to embankments on coastal roads will be clarified by analyzing road damage caused by high waves in the subject area and conducting a hydraulic model experiment that simulates a coast with a complex gradient.

Key words: floating ice conditions, increase in sea waves, coastal roads, wave run-up, embankment damage