

気候変動に伴う海象変化による 防波護岸への影響とその対応について

港湾空港部港湾建設課 ○川口 拓也
船橋 雄大
北日本港湾コンサルタント(株) 奈良 俊介

気候変動に伴う海象変化により、波力等の外力が継続的に増大することが予測される。このため、将来の波高増大や潮位上昇に対して被災リスクが高い施設を把握し、優先度を付けた対応を行うことが重要となる。本稿は、防波護岸を対象に海象変化に伴う必要天端高の感度分析により被災リスクが高い諸条件を整理し、北海道内の港湾・漁港における防波護岸での対応について検討するものである。

キーワード：防波護岸、海象変化、気候変動、感度分析

1. はじめに

近年、気候変動に伴う海象変化の影響について種々の検討が進められている。例えば、北海道沿岸の波高の将来変化比を推定した研究¹⁾では、現在の気候状態に比べ、将来気候では波高が約2～9%増加する結果となっている。また、日本の気候変動2020²⁾によると、1980年代以降、日本沿岸の海面水位は上昇傾向にあり、21世紀末に4℃上昇シナリオでは0.71 m、2m℃上昇シナリオでは0.39 m上昇するとされている。

このような背景から、今後、海象変化による外力増加が予想されるため、被災リスクが高い施設を把握し、優先度を付けた対応を行うことが重要となる。特に、防波護岸などの外郭施設では海象変化により越波流量の増加が見込まれており、背後施設の利用に支障を来すことが想定されることから、早急な対応が求められている。

一方、気候変動による潮位上昇の影響のみを考慮した防波護岸の越波流量の増加量を算定した研究³⁾は行われているが、気候変動による波高増大と潮位上昇の影響を考慮した防波護岸の越波流量や必要天端高の変化量を調べた検討例はこれまで見当たらなかった。

そこで、本稿では防波護岸を対象に水深・海底勾配・許容越波流量・波形勾配をパラメータとして、波高増大と潮位上昇による必要天端高(越波流量)の感度分析を行い、被災リスクが高くなると考えられる諸条件を整理することで北海道内の港湾・漁港における防波護岸での対応を検討する。

2. 検討方法

(1) 検討条件

防波護岸の必要天端高の感度分析は、表-1に示すa)～e)の5ケースで検討した。着色部分は標準ケースから値を変更した箇所を示している。また、各検討ケースにおいて消波護岸と直立護岸の2つの構造形式で必要天端高を算定する。なお、必要天端高は、これまで実務で多く用いられてきた合田(1975)⁴⁾の越波流量推定図を用いて算出する。

(2) 検討手順

(1) のa)～e)の5ケースにおいて、それぞれ換算沖波波高と設計潮位を増加させた場合の必要天端高の増加率を整理する。その後、各検討ケースの整理結果を比較することで波高増大と潮位上昇の影響を検討する。

表-1 検討ケース一覧

ケース名	設置水深 h(m)	換算 沖波波高 H ₀ '(m)	設計 潮位 H.W.L.(m)	海底 勾配 i	波の 入射角 θ(°)	屈折 回折 係数	許容越波 流量 q(m ³ /m・s)	波形 勾配 H ₀ '/L ₀
a) 標準ケース	5.0	3.0	+1.7	1/30	0	1.0	2.0×10 ⁻²	0.036
b) 設置水深 変更ケース	1.0	3.0	+1.7	1/30	0	1.0	2.0×10 ⁻²	0.036
c) 海底勾配 変更ケース	5.0	3.0	+1.7	1/10	0	1.0	2.0×10 ⁻²	0.036
d) 許容越波流量 変更ケース	5.0	3.0	+1.7	1/30	0	1.0	2.0×10 ⁻⁴	0.036
e) 波形勾配 変更ケース	5.0	2.0	+1.7	1/30	0	1.0	2.0×10 ⁻²	0.012

3. 検討結果

(1) 検討結果の整理

各検討ケースについて、換算沖波波高 H_0' と必要天端高増加率 $1+\Delta hc/hc$ （元の波高と潮位での必要天端高 hc を1.0とした場合の増加率）の関係を、潮位上昇量別（0～1.0m）に感度分析した。

a) 標準ケース

標準ケースとして設定した条件のうち、**図-1**は消波護岸、**図-2**は直立護岸における必要天端高の増加率を整理したものである。

グラフの特徴として、線と線の間隔が広いほど潮位上昇による必要天端高の増加率が高いことを示しており、線の傾きが大きいほど波高増大による必要天端高の増加率が高いことを示している。

図-1と**図-2**を比較すると、潮位上昇による必要天端高の増加率は消波護岸の方が直立護岸よりも大きくなっている。この結果は既往の研究結果³⁾とも同様の傾向となっており、消波構造によって越波流量が抑制されている防波護岸では、潮位上昇があると砕波による波高減衰が起りにくくなるほか、消波ブロックの静水位での幅が小さくなるなどして越波流量が増加する傾向にあるものと推察されている。

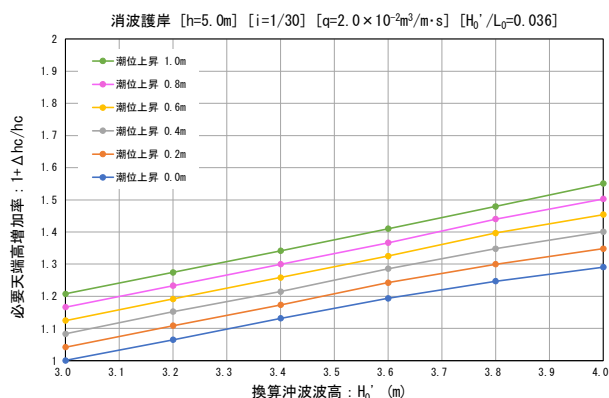


図-1 標準ケースにおける消波護岸の必要天端高増加率

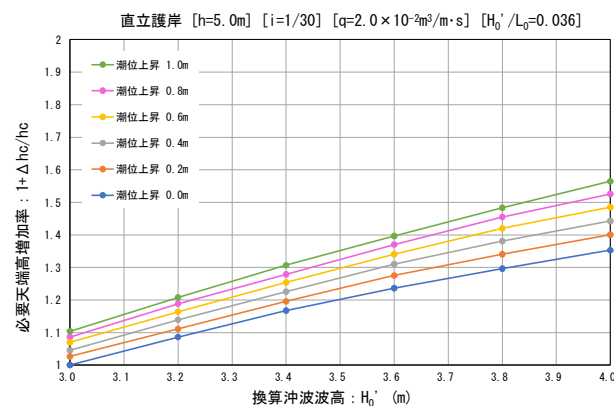


図-2 標準ケースにおける直立護岸の必要天端高増加率

一方、波高増大による必要天端高の増加率は消波護岸よりも直立護岸の方が大きくなっており、波高が1m増大すると必要天端高の増加率は最大で約1.4倍となっている。

b) 設置水深変更ケース

本ケースでは標準ケース（設置水深 $h=5.0$ m）に対して設置水深が浅い条件（設置水深 $h=1.0$ m）を設定した。**図-3**は消波護岸、**図-4**は直立護岸における必要天端高の増加率を整理したものである。

消波護岸である**図-1**と**図-3**を比較すると、潮位上昇による必要天端高の増加率は設計水深が浅い方が深い場合に比べて大きくなっている。設計水深が $h=1.0$ mの場合は、潮位が1m上昇すると必要天端高の増加率は最大で約1.5倍となっている。一方、波高増大による必要天端高の増加率は設計水深が深い方が浅い場合によりも大きくなっている。設計水深が $h=5.0$ mの場合においては、波高が1m増大すると必要天端高の増加率は最大で約1.3倍となっている。なお、直立護岸である**図-2**と**図-4**を比較した場合でも消波護岸と同様の傾向が確認できる。

c) 海底勾配変更ケース

本ケースでは標準ケース（海底勾配 $i=1/30$ ）に対して海底勾配が急な条件（海底勾配 $i=1/10$ ）を設定した。**図-5**は消波護岸、**図-6**は直立護岸における必要天端高の増加率を整理したものである。

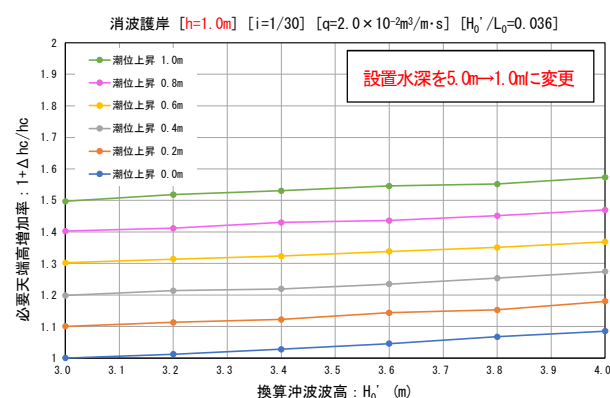


図-3 設置水深変更ケースにおける消波護岸の必要天端高増加率

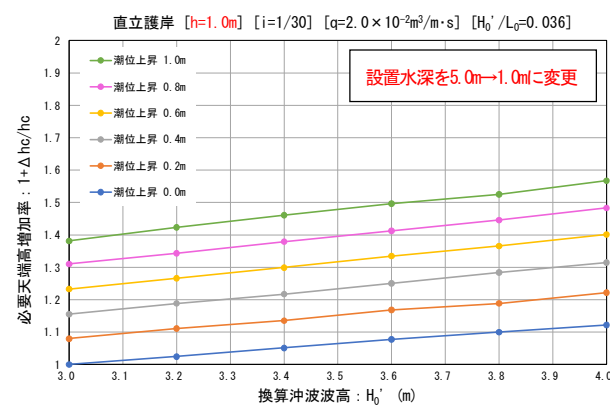


図-4 設置水深変更ケースにおける直立護岸の必要天端高増加率

消波護岸である図-1と図-5を比較すると、潮位上昇による必要天端高の増加率は海底勾配が緩い方が急な場合よりも大きくなる傾向であるが、大きな差は確認できない。一方、波高増大による必要天端高の増加率は海底勾配が急な方が緩い場合よりも大きくなる傾向であり、波高が1m増大すると必要天端高の増加率は最大で約1.4倍となっている。なお、直立護岸である図-2と図-6を比較した場合も消波護岸と同様の傾向が確認でき、直立護岸の方が波高増大による必要天端高の増加率は大きい傾向が確認できる。

d) 許容越波流量変更ケース

本ケースでは標準ケース（許容越波流量 $q=2.0 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ ）に対して許容越波流量が厳しい条件（許容越波流量 $q=2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ ）を設定した。図-7は消波護岸、図-8は直立護岸における必要天端高の増加率を整理したものである。

消波護岸である図-1と図-7を比較すると、潮位上昇と波高増大による必要天端高の増加率は許容越波流量が緩く設定されている方が厳しく設定されている場合に比べて大きくなっている。許容越波流量が $q=2.0 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ の場合においては、潮位が1m上昇すると必要天端高の増加率は最大で約1.2倍、波高が1m増大すると必要天端高

の増加率は最大で約1.3倍となっている。なお、直立護岸である図-2と図-8を比較した場合でも消波護岸と同様の傾向が確認できる。

e) 波形勾配変更ケース

波形勾配の変化による影響を検討するに際しては、必要天端高の増加について特徴的な結果が確認された換算沖波波高を $H_0'=2.0\text{m}$ から $H_0'=3.0\text{m}$ に変化させた場合について整理した。

図-9は標準ケース（波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ ）の消波護岸、図-10は波形勾配を標準ケースに対して小さく設定したケース（波形勾配 $H_0/L_0=0.012$ ）の消波護岸における必要天端高の増加率を整理したものである。

図-9と図-10を比較すると、波形勾配が大きい（周期が短い）方が潮位上昇による必要天端高の増加率が大きくなっている。波形勾配 $H_0'/L_0=0.036$ の場合においては、潮位が1m上昇すると必要天端高の増加率は最大で約1.3倍となっている。一方、波形勾配が小さい（周期が長い）方は波高増大による必要天端高の増加率が大きくなっている。波高が1m増大すると必要天端高の増加率は最大で約1.7倍となっている。

また、図-11は標準ケース（波形勾配 $H_0/L_0=0.036$ ）の直立護岸、図-12は波形勾配を標準ケースに対して小さく

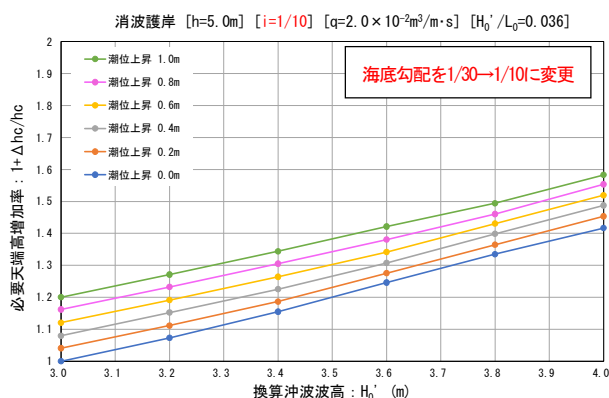


図-5 海底勾配変更ケースにおける消波護岸の必要天端高増加率

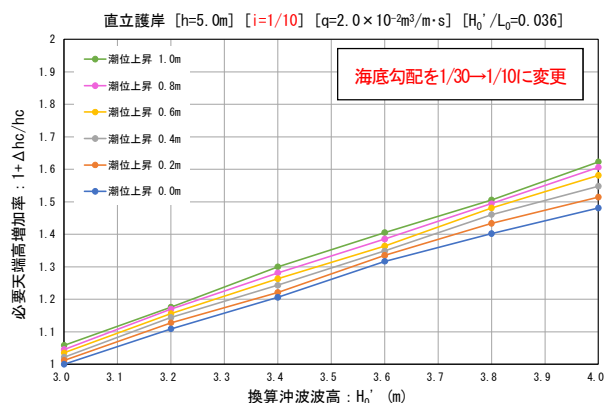


図-6 海底勾配変更ケースにおける直立護岸の必要天端高増加率

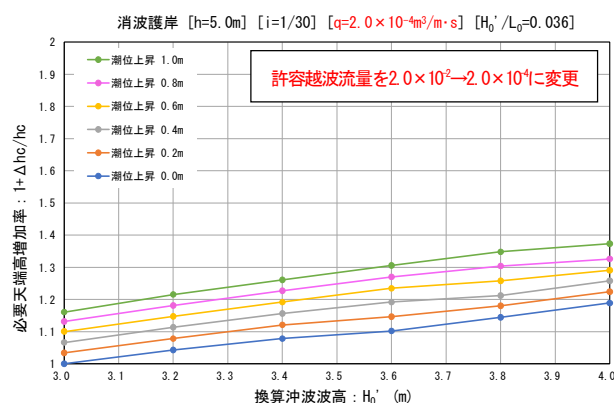


図-7 許容越波流量変更ケースにおける消波護岸の必要天端高増加率

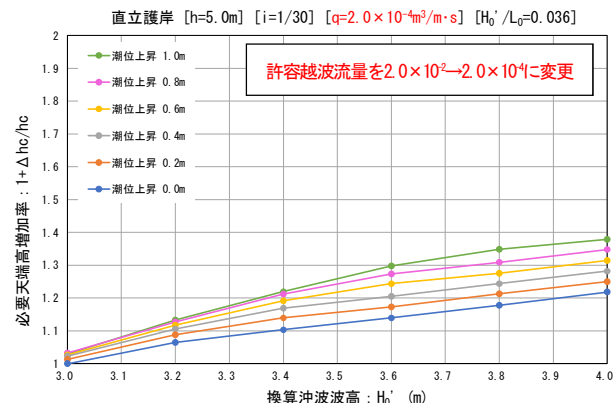


図-8 許容越波流量変更ケースにおける直立護岸の必要天端高増加率

く設定したケース（波形勾配 $H_0/L_0=0.012$ ）の直立護岸における必要天端高の増加率を整理したものである。

図-11と図-12を比較すると、消波護岸と同様、波形勾配が大きい（周期が短い）方が潮位上昇による必要天端高の増加率が大きく、波形勾配が小さい（周期が長い）方は波高増大による必要天端高の増加率が大きい傾向が確認できる。一方、図-12に注目すると水深波高比 $h/H_0=2.0$ 付近では潮位上昇の影響は小さく、波高増大による影響が顕著になっている。さらに、波高が1m増大すると必要天端高の増加率は最大で約2.2倍となっていることから、直立護岸において水深が浅く波形勾配が小さな護岸施設については、波高増大による影響に注意が必要である。

表-2(a)～e)の5ケースにおける検討結果一覧を示す。

(2) 被災リスクが高い一般条件の整理

(1) の感度分析の結果から、海象変化による防波護岸の被災リスクが高い一般条件については以下の通り整理する。

- a) 構造形式の違いでは、消波護岸の方が潮位上昇による必要天端高の増加率が大きく、直立護岸の方が波高増大による必要天端高の増加率が大きくなる傾向である。
- b) 水深が浅く、海底勾配が1/10程度の急勾配の防波護

岸では、海象変化に伴う波高増大と潮位上昇により越波量が急激に増加し、必要天端高は元の高さの1.5倍程度になる場合もある。特に、消波護岸については、潮位上昇による越波量の増大に注意が必要である。

c) 水深が浅く、波形勾配が0.012程度となる周期が長い直立護岸では、海象変化に伴う波高増大により越波量が急激に増加し、必要天端高は元の高さの2.2倍程度になる場合もある。

d) 許容越波流量を緩和設定している防波護岸（元の天端高が低い護岸）の方が波高増大と潮位上昇により元の天端高に対する増加率が大きくなる。

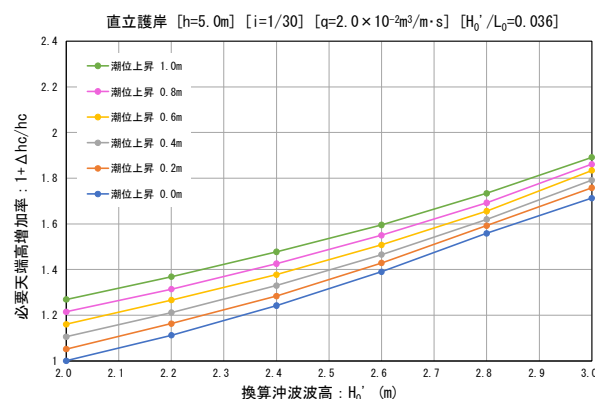


図-11 標準ケースにおける直立護岸の必要天端高増加率

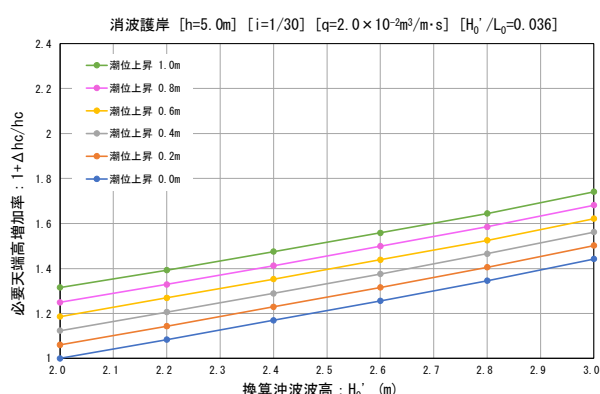


図-9 標準ケースにおける消波護岸の必要天端高増加率

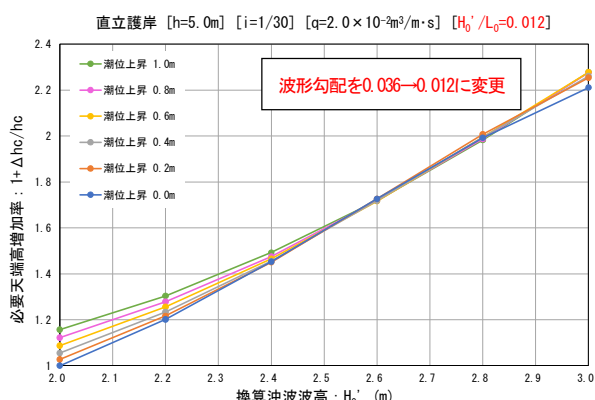


図-12 波形勾配変更ケースにおける直立護岸の必要天端高増加率

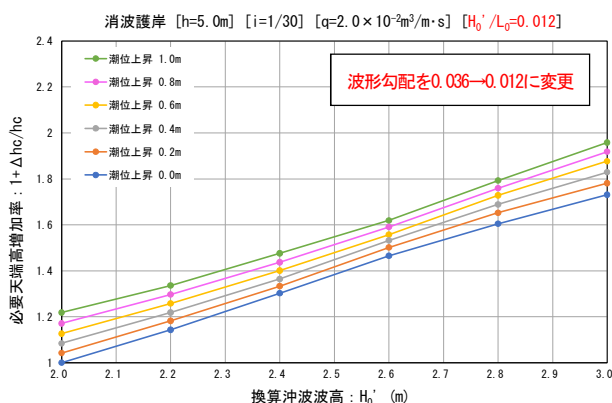


図-10 波形勾配変更ケースにおける消波護岸の必要天端高増加率

表-2 検討結果一覧

設定条件	構造形式	潮位上昇の影響	波高増大の影響
a) 標準ケース ($h=5.0\text{m}$, $i=1/30$, $q=2.0 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$, $H'_0/L_0=0.036$)	消波護岸	大	小
	直立護岸	小	大
b) 設置水深が浅い場合 ($h=5.0\text{m} \rightarrow 3.0\text{m}$)	消波護岸	大	小
	直立護岸	大	小
c) 海底勾配が急な場合 ($i=1/30 \rightarrow 1/10$)	消波護岸	中	大
	直立護岸	中	大
d) 許容越波流量が厳しい場合 ($q=2.0 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s} \rightarrow 2.0 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$)	消波護岸	小	小
	直立護岸	小	小
e) 波形勾配が小さい場合 ($H'_0/L_0=0.036 \rightarrow 0.012$)	消波護岸	小	大
	直立護岸	小	大

4. 対応方針の検討

(1) 道内防波護岸の被災リスク分析

表-3は直近15年間に北海道開発局が整備した主な防波護岸を整理したものである。表内の着色は3. の検討結果から被災のリスクが高くなると考えられる条件に当てはまる箇所を示している。

道内の防波護岸整備の特徴として、消波護岸が多いことが示されている。このため、多くの防波護岸で潮位上昇による越波量の増大に注意する必要があると考えられる。

また、道内の防波護岸の多くは設置水深が比較的浅く設定されており、特に離島の施設では、海底勾配も1/20以上の急勾配となる条件が多いことから波高増大や潮位上昇による越波量の急激な増加に注意が必要である。

以上の分析から、道内の防波護岸においては、特に潮位上昇による越波量の増大に細心の注意が必要である。実際に、No. 3のC港防波護岸北改良においては、平成16年に越波による被災を受けている事例もある。

このため、今後、北海道内の防波護岸を整備するにあたって、特に消波護岸において水深が浅い場合には、海底勾配と波形勾配に注目して適切に護岸天端高を設定することが必要である。

(2) 改良手法の検討

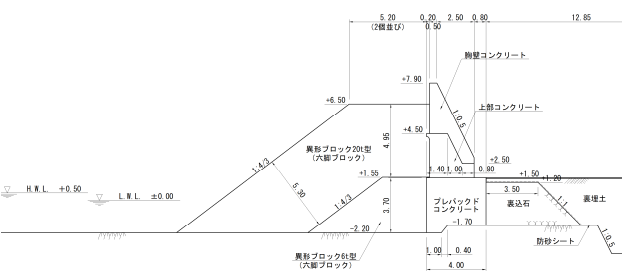
海象変化に伴う潮位上昇と波高増大に対して既設防波護岸の改良を行う場合、従来は、消波ブロックや防波護岸の天端高を嵩上げすることで越波流量を許容値内に抑えるように対応している。しかしながら、消波ブロックの嵩上げ時におけるブロックの噛み合わせを考慮するための既設ブロックの撤去等によるコスト増や、胸壁工天端高の嵩上げにより背後道路や用地に影響を与えるなどの課題がある。

そこで、本検討では、表-3に示す道内の防波護岸のうち、消波護岸構造で設置水深が浅く海底勾配が急であるB港の断面（図-13）をモデルケースとして、海象変化に対し、胸壁及び消波ブロックの天端を嵩上げする従来の改良手法による断面と、消波ブロックの天端幅のみを拡幅する新たな改良手法による断面で数値解析（CADMAS-SURF）を行い越波流量および改良手法の効果を確認した。

解析条件としては、気候変動の上位シナリオで想定されている換算沖波波高が設計時の波高の1.08倍、潮位は設計時の潮位+60cmの上昇を考慮し、必要天端高は合田（1975）⁴⁾の越波流量推定図を用いて算出した。図-14に換算沖波波高の増加率と必要天端高の増加率の関係を示す。換算沖波波高5.59mは1.08倍の6.04mとなる。護岸天端高は潮位が60cm上昇することで、既設天端高（+7.9m）の1.16倍である+9.3m必要となる。

表-3 直近15年間に北海道開発局が整備した主な防波護岸

No	港湾名 漁港名	施設名	構造形式	天端高 hc(m)	設置 水深 h(m)	沖波 波高 H ₀ (m)	沖波 周期 T ₀ (s)	換算 沖波 波高 H ₀ '(m)	波形 勾配 H ₀ '/L ₀	水深 波高比 h/H ₀ '	海底 勾配	潮位 H.W.L. (m)	許容 越波量 (m ³ /m・s)
1	A港	護岸防波東改良	消波護岸	+4.7	4.6	7.2	11.5	2.25	0.011	2.27	1/50	+0.5	2.0×10 ⁻³
2	B港	東防波護岸改良	消波護岸	+7.9	2.6	7.5	11.7	5.59	0.026	0.55	1/10	+0.5	2.0×10 ⁻³
3	C港	護岸防波北改良	消波護岸	+7.2	2.4	8.5	11.3	2.72	0.014	1.07	1/10	+0.5	2.0×10 ⁻⁴
4	D港	護岸防波改良	消波護岸	+8.2	5.9	9.8	12.8	7.55	0.030	0.85	1/50	+0.5	2.0×10 ⁻³
5	E港	護岸防波新川東	直立護岸	+5.0	1.8	3.1	7.0	2.77	0.036	1.30	1/10	+1.8	2.0×10 ⁻²
6	F港	護岸防波東改良	消波護岸	+8.0	5.6	5.8	8.8	4.81	0.040	1.50	1/30	+1.6	2.0×10 ⁻³
7	G港	護岸消波	直立護岸	+1.5	1.2	5.4	9.1	0.48	0.004	3.54	1/100	+0.5	2.0×10 ⁻⁴
8	H港	護岸防波南外改良	消波護岸	+8.8	0.0	3.3	7.1	3.30	0.042	0.55	1/10	+1.8	2.0×10 ⁻⁴
9	I港	護岸防波中改良	直立護岸	+6.2	5.4	7.2	11.2	2.13	0.011	3.33	1/100	+1.7	2.0×10 ⁻³
10	J港	護岸防波南外改良	直立護岸	+5.9	0.1	9.6	15.0	10.63	0.030	0.16	1/30	+1.6	2.0×10 ⁻²
11	K漁港	北護岸改良	消波護岸	+5.4	1.9	8.3	12.5	3.20	0.013	0.75	1/20	+0.5	2.0×10 ⁻³
12	L漁港	西護岸改良	消波護岸	+6.2	0.6	10.3	14.8	8.13	0.024	0.14	1/20	+0.5	2.0×10 ⁻²
13	M漁港	北護岸改良	直立護岸	+12.8	2.5	9.0	13.2	5.85	0.022	0.51	1/10	+0.5	2.0×10 ⁻³
14	N漁港	西護岸改良	消波護岸	+6.6	1.8	9.9	13.4	10.94	0.039	0.31	1/30	+1.6	2.0×10 ⁻²



潮位 (m)		水深 (m)		海底 勾配	換算沖波 H ₀ '(m)	波形勾配 H ₀ '/L ₀	既設天端高 (m)		許容越波量 (m ³ /m・s)
H.W.L.	L.W.L.	最深部	最浅部				胸壁工	消波工	
+0.50	±0.00	-2.6	-1.4	1/10	5.59	0.026	+7.90	+6.50	2.0×10 ⁻³

図-13 モデルケース断面

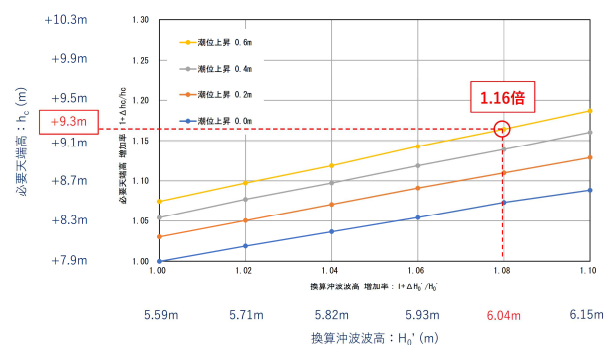
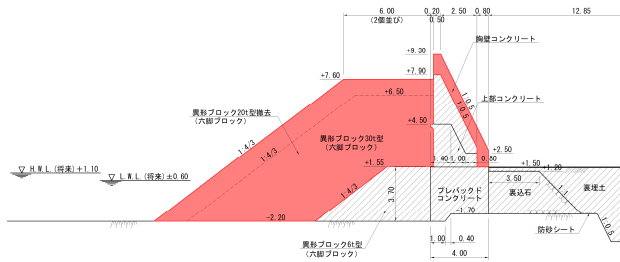
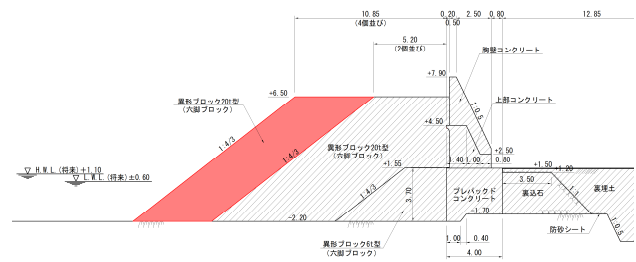


図-14 換算沖波波高と必要天端高の増加率の関係



潮位 (m)		水深 (m)		海底 勾配	換算沖波 H_0 (m)	天端高 (m)		越波流量 ($m^3/m \cdot s$)
H.W.L.	L.W.L.	最深部	最浅部			胸壁工	消波工	
+1.10	+0.60	-2.6	-1.4	1/10	6.04	+9.30	+7.60	2.6×10^{-3}

図-15 従来の改良手法による断面



潮位 (m)		水深 (m)		海底 勾配	換算沖波 H_0 (m)	天端高 (m)		越波流量 ($m^3/m \cdot s$)
H.W.L.	L.W.L.	最深部	最浅部			胸壁工	消波工	
+1.10	+0.60	-2.6	-1.4	1/10	6.04	+7.90	+6.50	1.4×10^{-3}

図-16 新たな改良手法による断面

図-15に従来の改良手法による断面、図-16に消波ブロックの天端幅のみを拡幅する新たな改良手法による断面を示す。

解析の結果から、嵩上げをせずに消波ブロック天端幅を通常の2個並び幅から4個並び幅（元の天端幅の2倍程度）に拡げることで、天端嵩上げ改良と同程度の越波流量に抑えられることが確認された。

このため、今後消波護岸を改良する際には消波ブロックの天端幅のみを拡幅する方法も選択肢のひとつとすることが可能と考える。また、この改良手法により、従来の改良手法で課題となる消波ブロックの嵩上げによるコスト増や胸壁工嵩上げによる背後道路や用地への影響を低減できる可能性もある。

5. まとめ

本稿の主要な検討結果を以下に示す。

- (1) 潮位上昇による必要天端高の増加率は消波護岸の方が大きく、波高増大による必要天端高の増加率は直立護岸の方が大きい。
- (2) 設置水深が浅い防波護岸ほど潮位上昇による天端高の増加率が大きく、設置水深が深い防波護岸ほど波高増大による必要天端高の増加率が大きい。
- (3) 海底勾配が急な防波護岸ほど波高増大による必要天端高の増加率は大きくなる傾向にある。
- (4) 許容越波量が緩く設定されている防波護岸（元の天端高が低い護岸）ほど波高増大と潮位上昇による必要天端高の増加率は大きくなる。
- (5) 波形勾配が大きい（周期が短い）防波護岸ほど潮位上昇による天端高の増加率が大きく、波形勾配が小さい（周期が長い）防波護岸ほど波高増大による必要天端高の増加率が大きい。

- (6) 道内の防波護岸としては消波護岸が多いため、潮位上昇の影響を受けやすい。また、設置水深が浅く海底勾配が急な既設の防波護岸では、海象変化による被災リスクが高い。
- (7) 消波護岸における従来の改良手法では、海象変化に伴う天端高の嵩上げにより、消波ブロックの噛み合わせを考慮した場合のコスト増や背後道路等への影響が課題となることがあるが、嵩上げをせずに消波ブロックの天端幅のみを2倍程度に拡幅することで、従来の改良手法と同程度の越波流量に抑えることが可能であることが確認できた。

6. おわりに

本稿の検討結果により、気候変動に伴う海象変化による防波護岸の必要天端高への影響を明らかにすることができた。ただし、気候変動に対応するための具体的な防波護岸の改良方法や、改良に伴うコストの増加率等については、今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 野村明弘, 佐藤典之, 石川浩希, 早川哲也, 岩崎慎介, 大塚淳一, 森信人, 渡部靖憲: d4PDFを用いた設計波高の将来変化の効率的な推定手法, 土木学会論文集, 78 巻 2 号, 2022.
- 2) 文部科学省, 気象庁: 日本の気候変動 2020, 2020.
- 3) 小林千紘, 鈴木高二朗: 海面上昇による護岸の越波流量の増加について, 土木学会論文集, 80 巻 18 号, 2024.
- 4) 合田良美, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾空港技術研究所報告, 第 14 巻第 4 号, 1975.