

平成24年度

オホーツク海沿岸における将来的な海象変化を 考慮した防波堤の安定性評価と対策工選定手法に 関する検討

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○山之内 順
上久保 勝美
山本 泰司

本研究では、オホーツク海を対象として将来的な海象変化を考慮した確率波高分布を、MRI-AGCM3.2S の気象データを用いて仮定し、将来の海氷面積減少に伴う波浪増大の影響を考慮した堤体滑動量をモンテカルロ法にて検討することで、将来的な波浪増大および海面水位の上昇が防波堤に与える影響を検討した。また、将来波浪に対する防波堤の維持対策の検討について、モンテカルロ法を用いた場合の一例を示した。

キーワード：信頼性設計法、モンテカルロ法、堤体滑動量、MRI-AGCM3.2S

1. はじめに

地球温暖化の影響により、オホーツク海沿岸の海氷面積が近年減少傾向にある¹⁾とともに、将来的にも著しく減少する可能性が高いことが気象庁²⁾により報告されている。さらに、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同じく気象庁²⁾により報告されている。

海氷面積減少を考慮した波浪推算手法については、菅原ら³⁾が検討しており、海氷密接度に応じて風速を変化させ、日々の海水の移動を考慮することで、従来実施されていた海水域を陸域として扱う手法に比べて、再現性が向上することがわかった。

さらに、この手法を基に山之内ら⁴⁾がオホーツク海沿岸の50年確率波高（以下 H_{50} ）を算出した結果、風速の増大および海氷の減少などの気象変動の影響により、近年では H_{50} が 1m 以上増大していることが明らかとなった。

このようなことから、今後、港湾施設の健全性の維持および沿岸防災対策を検討していく上で、将来的な海象変化を考慮した施設健全性の評価を行うことが重要と考える。

このため本研究では、海象変化の影響を最も受けやすい防波堤を対象に、将来的な海氷面積減少による波浪増大および海面水位の上昇に対する影響をレベル3信頼性設計法のモンテカルロシミュレーション（以下、モンテカルロ法）を用いて検討を行うこととした。

2. 検討方法

(1) 現況および将来シナリオにおける確率波高の検討

構造物の将来的な変形量を検討するためには、将来的な気象変動（以下、将来シナリオ）を推定する必要がある。このため、将来シナリオについては、気象庁・気象研究所の超高解像度全球気候モデル（以下、MRI-AGCM3.2S）による温暖化予測実験結果（Mizuta ら⁵⁾）の気象データを用いるとともに、波浪推算手法については菅原ら⁶⁾が用いた手法と同様とした。

A1B シナリオ条件下における MRI-AGCM3.2S の対象期間は、現在気候（1979～2003 年の 25 年間）、近未来気候（2015～2039 年の 25 年間）および将来気候（2075～2099 年の 25 年間）とあるが、今回は近い将来の予測を行うことから、対象期間を近未来気候とした。

現況の波浪推算手法については、1979～2008 年の 30 年間における水深 50m 地点のナウファス紋別の現地波浪データを基に、欠測期間については菅原ら³⁾の手法により補間した。

確率波高を求める際の統計手法については、極値統計解析（合田⁷⁾）を用いた。極値資料に当てはめる確率波高分布は、極値 I 型分布、極値 II 型分布（形状母数 $k=2.5, 3.33, 5.0, 10.0$ ）および Weibull 分布（形状母数 $k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$ ）の中から、最適な確率波高分布を相関係数および MIR 基準に従って選択した。なお、閾

値については、閾値以上の極大値の割合が3~5%となるように格子毎に設定した。

ただし、MRI-AGCM3.2Sの現在気候は、過去の実際の気象状況を考慮していないことから、より再現性を向上させるため、MRI-AGCM3.2S 近未来気候の H_{50} と現在気候の H_{50} の差を、現況の H_{50} に加えたものを将来シナリオの H_{50} とした。このため、将来シナリオの確率波高分布については、上記手法で算定した H_{50} と一致するように、MRI-AGCM3.2S 近未来気候の確率波高分布を一部修正したものを仮定した。

図-1は、紋別港の H_{50} が最大となる波向NEの現況（極値I型分布、尺度母数 $A=0.858$ 、位置母数 $B=3.443$ ）および将来シナリオ（極値II型分布、形状母数 $k=5.0$ 、尺度母数 $A=0.624$ 、位置母数 $B=5.624$ ）における沖波波高と再現期間の関係を示した。なお、 H_{50} は現況では8.17m、将来シナリオでは9.66mである。

また、高波の出現特性について、合田⁸⁾⁹⁾は、極値分布関数の裾の広がり具合を表すパラメータとして、50年確率波高と10年確率波高の比で定義される、裾長さパラメータ γ_{50} を提案している。現況と将来シナリオの γ_{50} は、1.20および1.26となる。

さらに、下迫・多田¹⁰⁾が、50年間の防波堤の総滑動量と γ_{50} の関係を示しており、 γ_{50} が大きくなるほど、総滑動量1.0m以上となる確率が大きくなることが示されている。

以上から、将来シナリオの方が再現期間に対する波高および γ_{50} が高いことから、大きな滑動が発生しやすい状況になると考える。

(2) 将来シナリオにおける防波堤の性能評価

防波堤の信頼性設計法に関する既往の研究事例としてはさまざま行われているが、本研究では、高山ら¹¹⁾の手法に従い、消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した堤体滑動量の算出を行う。図-2に期待滑動量の計算フローを示す。沖波は2(I)で設定した確率分布に従うが、再現期間中の高波を再現させるため、下迫ら¹²⁾を参考に下限値を5年確率波高、上限値を200年確率波高とした。また、1年間(1波群)の有義波高 $H_{1/3}$ の継続時間は2hrとした。

防波堤の供用期間は50年と仮定し、50年間の総滑動量の計算を乱数を変化させて繰り返し計算を行い、累積堤体滑動量、累積消波ブロック沈下量および累積消波ブロック被災度を試行回数で平均したものを期待滑動量（以下、 S_E ）、期待ブロック沈下量（以下、 D_E ）および期待ブロック被災度（以下、 C_E ）とした。

モンテカルロ法は、乱数の発生方法や試行回数によって結果が異なってくる可能性があるため、これらの設定については慎重に行う必要がある。

乱数の発生方法については、長尾ら¹³⁾の検討を基に一様乱数の発生にメルセンヌ・ツイスタ(Mersenne Twister)

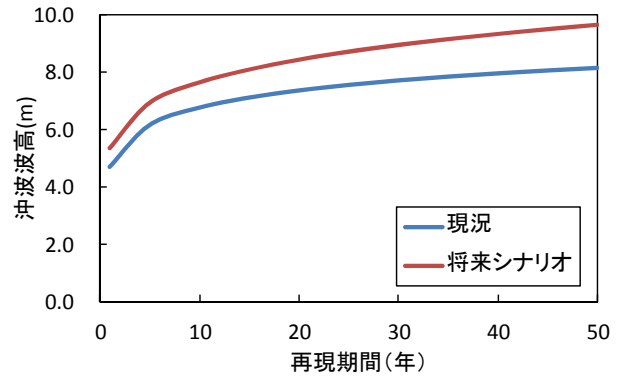


図-1 沖波波高と再現期間との関係

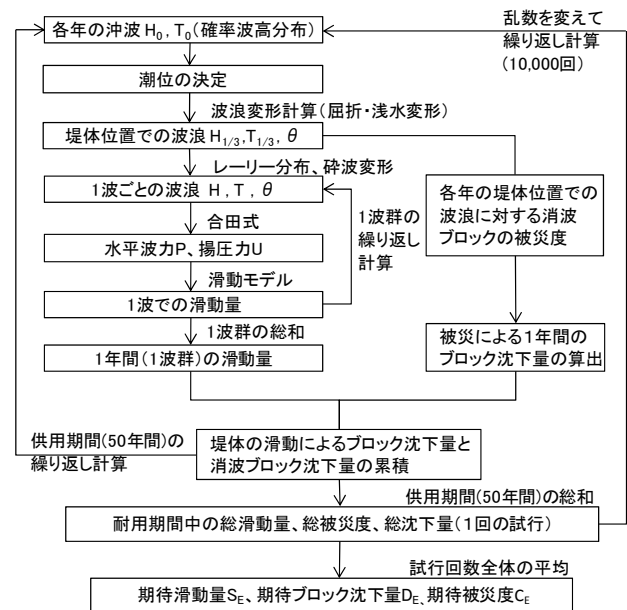


図-2 期待滑動量の計算フロー

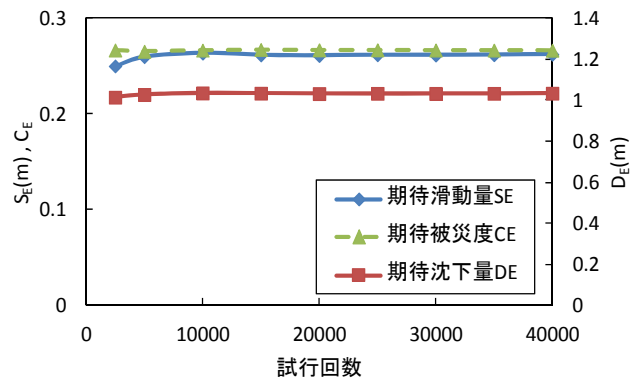


図-3 試行回数における50年目の変動量

を用い、正規乱数への変換にボックス・ミュラー法(Box-Muller transform)を用いた。

図-3に試行回数における50年目の S_E 、 D_E および C_E の変化を示す。いずれにおいても10000回で変動量がほぼ頭打ちとなり、その後は安定した結果が得られていることから、試行回数を10000回と設定した。

表-1に、信頼性設計における各要因の正規分布の変動条件を示す。平均値の偏り α や変動係数 γ の意味は、

真値と誤差のばらつきを正規分布として考慮したもので、限られた波浪データから確率分布を推定するための統計的不確実性、波浪変形および波力などの算定精度のばらつき等である。値については長尾¹⁴⁾と同様としている。堤体への入射角については、下迫ら¹⁵⁾を参考に、主波向と隣り合う波向の角度を考慮して決定した。例えば主波向が40°で隣り合う波向の入射角がそれぞれ27°および45°の場合、 $40 \pm \{(45-27) \div 4\} = 40 \pm 4.5^\circ$ を主波向のばらつきとした。

沖波から堤体位置までの屈折係数は、1試行回数毎に計算を行わず、現行設計法における屈折係数を一定値として与えた。ただし、正規分布のばらつきを考慮するため表-1の波浪変形における平均値の偏り α および変動係数 γ を用いた。

検討対象施設は、紋別港の沖合の第1線防波堤を対象とし、この防波堤の設計沖波に、2.(1)で設定した確率分布を適用させた。

検討対象断面を図-4に示す。構造形式は消波ブロック被覆堤であり、設計当時の滑動安全率は、設計沖波波高(=H₅₀)6.8mに対して1.21である。

表-2に検討ケースを示す。シナリオIを現況、シナリオIIを将来シナリオとし、シナリオIIIおよびIVで海面上昇による影響の検討を行う。なお、海面上昇量については、IPCCがA1Bシナリオにおける100年後の平均水位上昇量を21~48cmと予測していることから、本研究においては、海面上昇量を100年間で48cm上昇すると仮定し、供用期間の間では経過年数に対して線形的に増加させた。

3. 検討結果

(1) 将来シナリオにおける防波堤性能の変化

図-5は、シナリオIVにおける10000回の繰り返し計算の中から、50年間の総滑動量が期待滑動量30cmに近いある1回の試行を選び出し、沖波波高H₀、堤体位置の有義波高H_{1/3}、沖波周期T₀および堤体変動量について示したものである。H₀およびT₀が大きい26年目に堤体滑動量およびブロックの沈下量が増加している。

43年目についても、26年目と同様に堤体滑動量およびブロックの沈下量が増加している。しかし、H_{1/3}については9年目および34年目等よりも小さい。この理由としては、過年度の消波ブロックの沈下により堤体に作用する波力が増加したことが考えられる。さらに、波力および摩擦係数等のばらつきによって、滑動限界を上回る外力が発生した可能性もある。

図-6に、シナリオ別の各年の期待滑動量を示す。シナリオIとIIを比較すると、50年目の期待滑動量は約23cm(約7.5倍)となった。また、期待滑動量の許容値

表-1 各要因の正規分布の変動条件

不確定要因	平均値の偏り α	変動係数 γ	備考
沖波	1.00	0.10	
潮位	1.00	0.20	
波浪変形	0.97	0.04	
摩擦係数	1.06	0.15	$\mu=0.6$
碎波変形	0.87	0.10	
波力	0.84	0.12	消波ブロック被覆堤
単位体積重量			
鉄筋コンクリート	0.98	0.02	
無筋コンクリート	1.02	0.02	
中詰砂	1.02	0.04	

※ α = 平均値/特性値

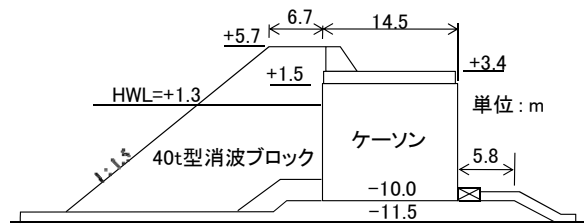


図-4 検討対象断面

表-2 期待滑動量の検討ケース

シナリオ	海面上昇	備考
I	無	現況
II	無	将来シナリオ
III	有	シナリオI + 海面上昇
IV	有	シナリオII + 海面上昇

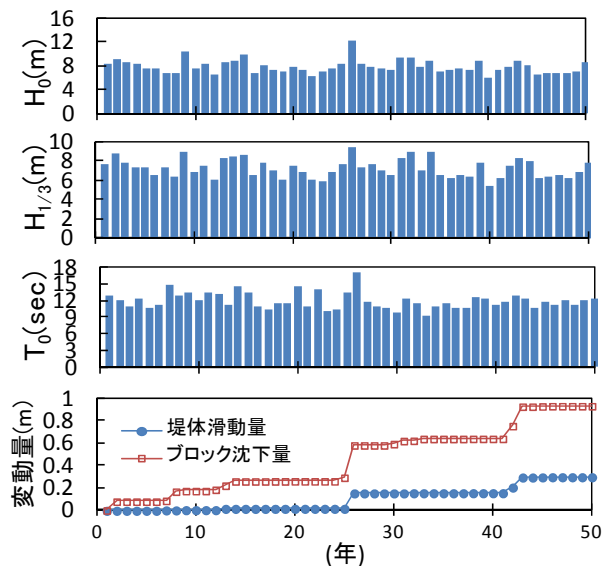


図-5 波高と被害の経年変化 (シナリオIV)

については下迫ら¹⁵⁾によりケーソン側壁の破壊を防ぐ目的および一般的な被災基準から30cm程度が目安として示されており、シナリオIVの45年目で30cmを超える結

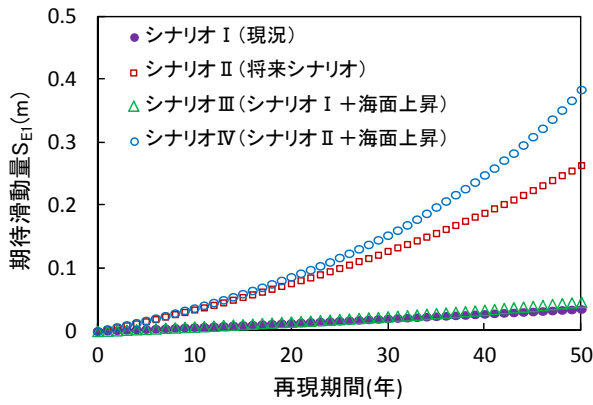


図-6 シナリオ別の期待堤体滑動量の経年変化

表-3 50年間総滑動量の超過確率の許容値

		施設の重要度		
		高い	普通	低い
滑動量	0.1m	0.15	0.3	0.5
	0.3m	0.05	0.1	0.2
	1.0m	0.025	0.05	0.1

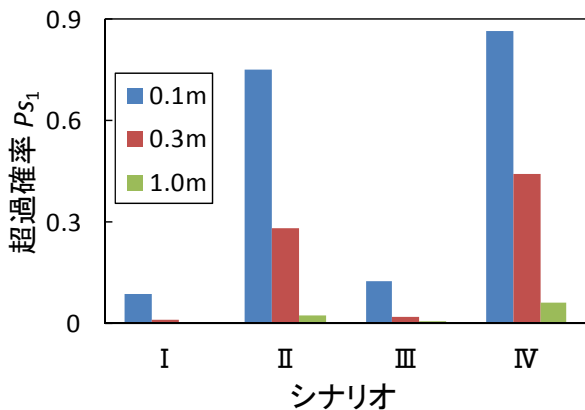
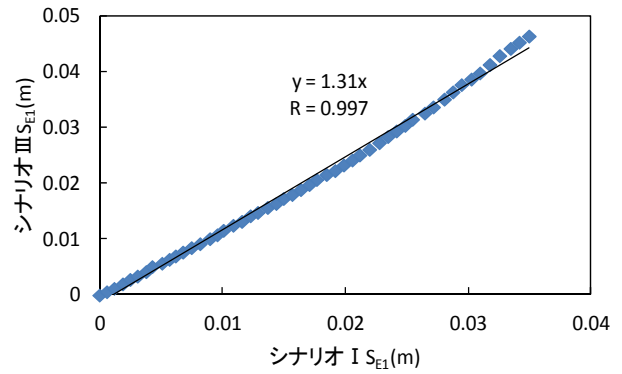


図-7 シナリオ別の50年間総滑動量の超過確率

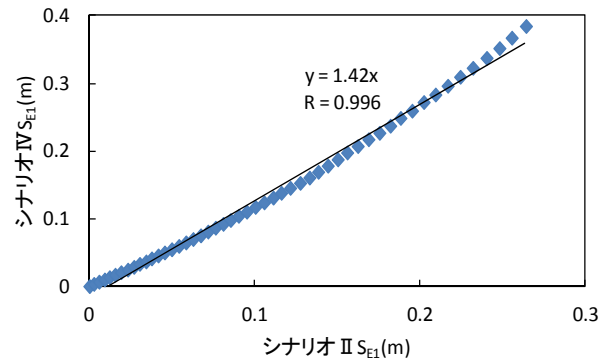
果となった。

さらに、堤体滑動量の超過確率の許容値としては、下迫・多田¹⁰⁾が表-3を提案している。この表は港湾の施設の技術上の基準・同解説にも記載されている指標である。図-7に、シナリオ別の50年間総滑動量の超過確率を示す。なお、表-3と比較するため、滑動量0.1m、0.3mおよび1.0mに対する超過確率を抽出して棒グラフで表した。その結果、シナリオIVについては、滑動量0.1mの超過確率が約80%、0.3mでは約40%、1.0mでは約5%となっており、表-3の許容値を満足できていないことが明らかとなった。

なお、シナリオIについては、設計当時の H_{50} を1.37mも上回っているにもかかわらず、50年目の期待滑動量は約4cmであった。これは、当時の設計法での滑動安全率が1.19程度となることから、堤体の滑動が抑えられたと考える。なお、 H_{50} が大きくなっているにもかかわらず、安全率の減少量が小さいのは、碎波変形に



(a) 現況



(b) 将来シナリオ

図-8 海面上昇が期待滑動量に与える影響

より最高波高があまり大きくなっていないためと考える。

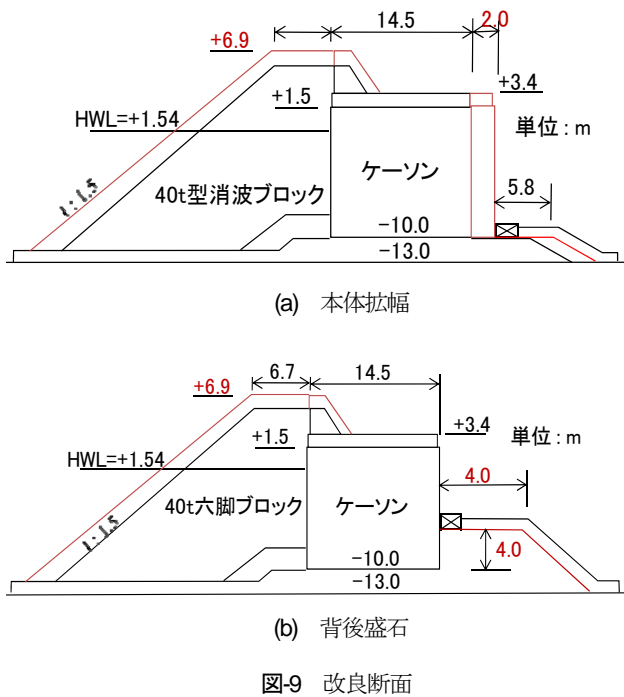
同様にシナリオIIにおける安全率は1.05程度であった。シナリオIに比べて期待滑動量および超過確率の数値が大きくなったのは、安全率が1.0付近であることから、表-1の平均値の偏り α および変動係数 γ によって、滑動限界を上回る外力が作用したからと考える。

一方、海面水位の上昇が堤体滑動量に与える影響について、図-8(a)(b)に示す。海面水位の上昇を考慮したシナリオIIIおよびIVの期待滑動量は、海面上昇を考慮していないシナリオIおよびIIの1.3~1.4倍程度となったことから、海面水位が上昇すると堤体滑動量に多大な影響を与えることが明らかとなった。

(2) 将来シナリオに対する維持対策の検討の一例

1960年代の高度経済成長期に建設された施設の多くは、建設されてから50年程度が経過し更新時期を順次迎えている。しかし、近年では、既存構造物を極力維持していくことが求められていることから、一般的な供用期間である50年にとらわれず、耐久性が確保できれば、既存構造物を活かした改良方策を行っていくことと思われる。

改良断面の検討は、一般的には、レベル1信頼性設計法(以下、部分係数法)を用いているが、この方法では、施設の安定性を滑動、転倒および支持力の各被災モードに対する力の釣り合いで評価するため、具体的な被災の



程度が把握できない。

それに対してモンテカルロ法では、具体的な被災の程度を定量的に示すことができることから、将来における改良等の対策を講じた場合の効果に対する評価が容易になると考える。ここで、防波堤の維持対策の検討にモンテカルロ法を用いた一例を示す。

図-9(a) (b)は、改良断面の一例を示したものである。図-9(a)は、図-4 の天端高を 12m 嵩上げし、堤体幅をコンクリートで 2.0m 拡幅した断面であり、図-9(b)は、嵩上げは前述と同様として、背後盛石を整備した断面である。なお、図-9(a) (b)の断面は、いずれも将来シナリオ H_{30} (9.66m) の条件における滑動、転倒および基礎の支持力に対する安定性能を部分係数法による性能照査で確認している。

図-10 は、波浪条件をシナリオIVとし、図-9 に改良した場合の期待滑動量の経年変化を示す。なお、比較のため、未対策（改良もブロック復旧もしない）のケース、並びに、5年目から10年毎に5回、消波ブロックを原形復旧するケース（以下、ブロック復旧）についても示す。その他の条件については、前述 2.(2)と同様としている。

改良を行った2ケース（堤体拡幅および背後盛石）の50年目の期待滑動量は数 cm であったが、両者の値に若干の差があるのは、改良断面を部分係数法で検討した際の滑動抵抗力と外力との比が、堤体拡幅では 1.02 であるのに対し、背後盛石では 1.12 となることが要因と考える。

図-11 は、図-7 と同様に、上記検討ケースの50年間の総滑動量における超過確率を示す。

改良を行った2ケースについては、表-3 の許容値を満足していたが、ブロック復旧および未対策のケースでは

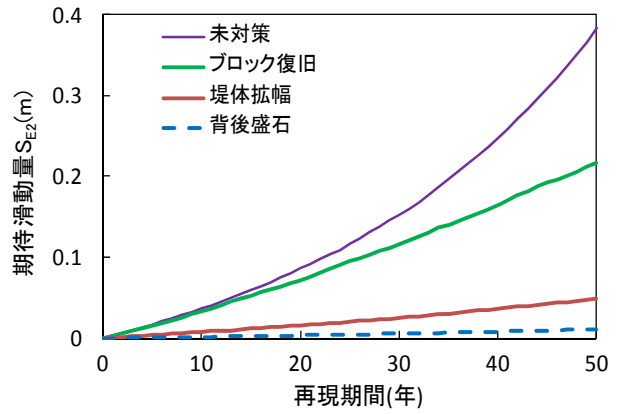


図-10 ケース別の期待堤体滑動量 S_{E2} の経年変化

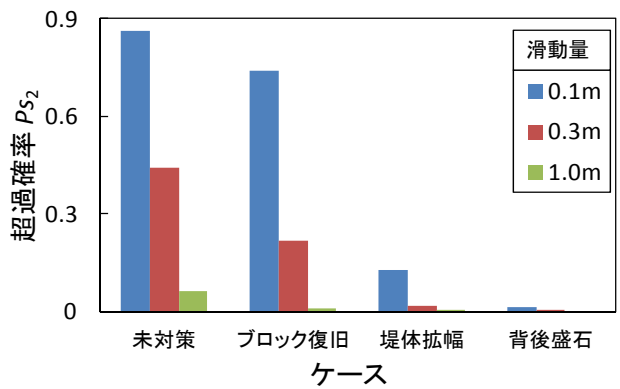


図-11 ケース別の50年間総滑動量の超過確率

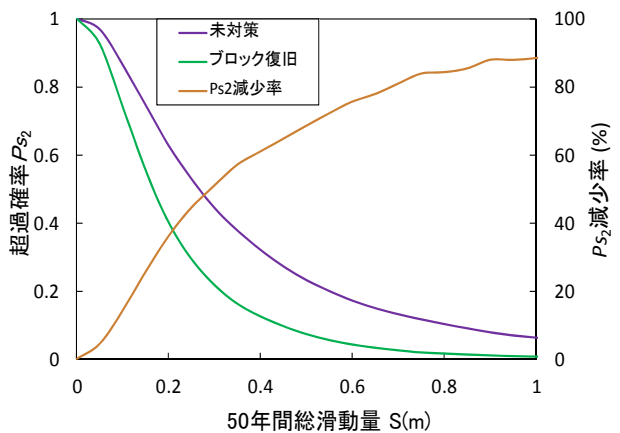


図-12 ブロック復旧の効果

満足していなかったことから、図-9(a) (b)のような改良を行う必要があると考える。

ただ、ブロック復旧では、未対策のケースよりも期待滑動量および超過確率を抑えることができていた。超過確率について、未対策のケースと比較するため、図-12 に50年間総滑動量に対する超過確率を示す。ここで、 P_{S2} 減少率とは、ブロック復旧での超過確率と未対策での超過確率の商を1.0から差し引いた値の百分率であり、ブロック復旧することで、未対策のケースからどの程度超過確率が減少したのかを示す指標とした。

これを見ると、50年間の総滑動量が大きくなるにつれて、 P_{S_2} 減少率が大きくなっていることから、消波ブロックを原形復旧することで比較的大きな滑動量を抑制する効果が期待できると考える。

4. まとめ

本研究の主要な結論を以下に示す。

- 1) シナリオⅡおよびシナリオⅣについては、50年間の総滑動量の超過確率が許容値を満足していなかったことから、将来的な防波堤の維持については、留意する必要がある。
- 2) 海面水位の上昇が堤体滑動量に与える影響について検討した結果、海面水位の上昇を考慮しない場合と比較し、期待滑動量が3~4割程度増加したことから、海面水位の上昇が堤体滑動量に多大な影響を与えることが予想される。
- 3) 将来シナリオにおける防波堤の維持対策の検討を行った結果、部分係数法にて設計した堤体拡幅および背後盛石で改良した断面では50年間の総滑動量の超過確率が許容値を満足することが確認できた。
- 4) 消波ブロックを原形復旧することで、比較的大きな滑動量を抑制する効果が期待できることから、堤体拡幅等の恒久的な対策を行うまでの応急的な措置として有効な方法であると考ええる。
- 5) モンテカルロ法を用いることで、防波堤における維持対策の効果を定量的に示すことができたことから、本法を用いることで各対策工に対する評価が容易になると考える。

謝辞： 気象研究所から MRI-AGCM3.2S のデータを御提供いただいた。また、北海道開発局紋別港湾事務所から、紋別港に関する資料をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 菅原吉浩, 大塚淳一, 山本泰司, 山下俊彦: オホーツク海の流氷減少が波浪に与える影響, 海洋開発論文集, 第27巻, 2011.
- 2) 地球温暖化予測情報: 気象庁, 第7巻, 2008.

- 3) 菅原吉浩, 上久保勝美, 山本泰司: 海氷存在海域における波浪推算手法および予報精度の検討, 北海道開発技術研究発表会論文集, 第55回, 2012.
- 4) 山之内順, 菅原吉浩, 関口浩二: 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集, 第55回, 2012.
- 5) Mizuta, R. et al. : Climate Simulations Using MRI-AGCM3.2 with 20-km Grid, J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 90A, pp. 233-258, 2012.
- 6) 菅原吉浩, 山之内順, 山本泰司: 海氷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, No.2, pp. I_1221-I_1225, 2012.
- 7) 合田良実: 耐波工学—港湾・海岸構造物の耐波設計—, 鹿島出版会, pp. 327-379, 2008.
- 8) 合田良実: 防波堤の信頼性設計における極値分布の選択とその影響, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 1-6, 2001.
- 9) 合田良実: 設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 171-175, 2002.
- 10) 下迫健一郎, 多田清富: 混成堤の性能照査型設計法における滑動量の許容値設定に関する検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 766-770, 2003.
- 11) 高山知司, 辻尾大樹, 安田誠宏: 消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した期待滑動量算定法の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 906-910, 2007.
- 12) 下迫健一郎, 大寄菜々子, 中野史丈: 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第45巻第3号, pp. 1-23, 2006.9.
- 13) 長尾毅, 吉岡健, 尾崎竜三: モンテカルロシミュレーションを用いた防波堤の滑動量に関する破壊確率の算定精度向上に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究資料, No.465, pp. 1-20, 2008.6.
- 14) 長尾毅: ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の提案, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.4, pp. 1-26, 2002.3.
- 15) 下迫健一郎, 高橋重雄: 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第37巻第3号, pp. 1-30, 1998.9.