

CADMAS-SURF を用いた消波ブロック被覆堤拡幅断面の越波伝達特性の把握について

若林 信孝*・服部 俊朗**・峯村 浩治***・西ノ園 憲人****・安武 輝征*****

* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 九州支部 支部長

*** 株式会社エコー 防災系事業部 構造解析部 部長

**** 前 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 前任建設管理官

***** 前 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 建設管理官

沖波の見直し等により堤前波が増大した場合、消波ブロック被覆堤では、防波堤の要求性能を満足させるために上部工天端の嵩上げが行われるが、その代替として消波ブロックを拡幅する方法により、要求性能（反射波、越波伝達特性）を満足する断面について、CADMAS-SURF を用いて検討を行った。併せて、施工条件による性能の余裕代を将来の気候変動による海面上昇への対応として評価することにより、施設更新時の優先順位への適用について検討を行った。

キーワード：CADMAS-SURF, 消波ブロック被覆堤, 消波工拡幅, 反射波, 越波伝達特性, 気候変動

1. はじめに

近年、神戸に再上陸した台風1821号や、関東に上陸した台風1915号のように、大規模な台風被害が頻発している。そのため、下関港湾空港技術調査事務所では、最新の気象擾乱を考慮して波浪推算を実施し、九州地方整備局管内の設計沖波の見直しを実施している¹⁾。

沖波の見直し等により堤前波が増大した場合、防波堤の要求性能を満足させるため、通常はパラペット天端の嵩上げで対処する。また、消波ブロック被覆堤の場合、消波工天端と上部工天端は同じにすることが望ましいため、ブロックの積み増しが必要となる。このとき、消波ブロックの大型化が必要となった場合、消波ブロック同士の噛み合わせ確保のため、新たに設置する消波ブロックは、最低でも2層分の厚さが必要なことから、既設の消波ブロックの一部を撤去するという工程が生じる(図-1)。

一方、図-2に示すように消波ブロックの天端幅を広げることで、越波越流の抑制効果が得られることが知られている²⁾。また、既存ブロックの前面に新ブロックを増設する方法であれば、既存ブロックの撤去といった工程も不要となるメリットが発生する。

本稿は、消波工断面の違いによる越波伝達特性を定量的に把握することを目的として、数値波動水路CADMAS-SURF³⁾を用いて、反射波および越波伝達波の低減効果を検討するとともに、工事におけるパラペット嵩上げの最小単位が50cmであることから、施工条件による性能の余裕代を気候変動の適応策として評価し、性能不足となるまでの経過年数を評価することでの効果の検証の試検討を行ったものである。

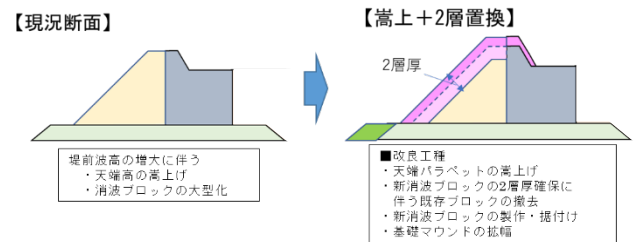


図-1 消波ブロック被覆堤の嵩上げ断面のイメージ図

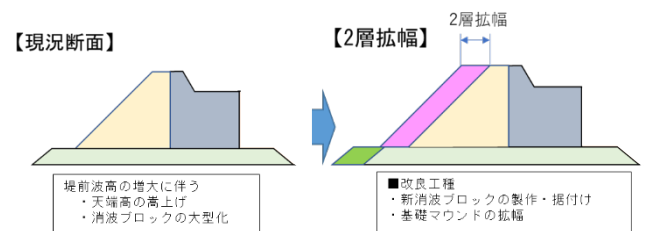


図-2 消波ブロック被覆堤の拡幅断面のイメージ図

2. 検討対象断面

本検討において対象とした防波堤は、既存の消波ブロック被覆防波堤において、設計波の見直しにより消波ブロックの質量増、上部工嵩上げ対策が必要とされている志布志港若浜地区防波堤(沖)(Ⅲ-1工区)(以下、志布志港防波堤(沖))および荻田港南港地区第2南防波堤(Ⅱ-3工区)(以下、荻田港第2南防波堤)とした。

2.1 志布志港若浜地区防波堤(沖)(Ⅲ-1工区)

志布志港防波堤(沖)における、新・旧外力による防波堤の必要天端および消波ブロック所要質量を表-1、新外力時の改良断面を図-3に示す。図中の赤枠は、新外力時の改良断面を示す。

表-1 新・旧外力による防波堤の諸元 (志布志港)

外力条件	旧外力	沖波見直しによる新外力
設計潮位	H.W.L.: +2.40m L.W.L.: ±0.00m	H.W.L.: +2.40m L.W.L.: ±0.00m
設計波	有義波高: $H_{1/3} = 6.7\text{m}$ 最高波高: $H_D = 11.6\text{m}$ 周期: $T_{1/3} = 14.0\text{s}$ 波向: SE $\beta = -1.0^\circ$	有義波高: $H_{1/3} = 7.9\text{m(HWL)}$ 最高波高: $H_D = 11.2\text{m(HWL)}$ 周期: $T_{1/3} = 16.3\text{s}$ 波向: SSE $\beta = 0^\circ$
必要天端高 要嵩上げ	必要天端: 6.5m 現況天端: 7.0m	必要天端: 7.2m ※必要嵩上厚さは、0.2mであるが、施工性より0.5mの嵩上厚とする。(天端+7.5m)
消波B質量	33.4t⇒テトラポッド50t型	54.7t⇒テトラポッド64t型

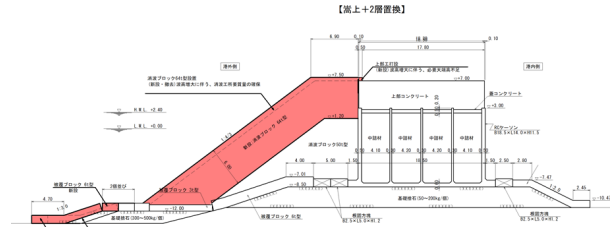


図-3 対象防波堤の断面図 (志布志港)

2.2 苅田港南港地区第2南防波堤 (Ⅱ-3工区)

苅田港第2南防波堤における、新・旧外力による防波堤の必要天端および消波ブロック所要質量を表-2, 新外力時の改良断面を図-4 に示す。図中の赤枠は、新外力時の改良断面を示す。

表-2 新・旧外力による防波堤の諸元 (苅田港)

外力条件	旧外力	沖波見直しによる新外力
設計潮位	H.W.L.: +4.04m L.W.L.: ±0.08m	H.W.L.: +3.83m L.W.L.: ±0.14m
設計波	有義波高: $H_{1/3} = 3.0\text{m}$ 最高波高: $H_D = 5.4\text{m}$ 周期: $T_{1/3} = 6.4\text{s}$ 波向: E $\beta = 0^\circ$	有義波高: $H_{1/3} = 3.8\text{m(HWL)}$ 最高波高: $H_D = 5.4\text{m(HWL)}$ 周期: $T_{1/3} = 6.7\text{s}$ 波向: E $\beta = 0^\circ$
必要天端高 要嵩上げ	必要天端: 5.9m 現況天端: 6.0m	必要天端: 6.2m ※必要嵩上厚さは、0.2mであるが、施工性より0.5mの嵩上厚とする。(天端+6.5m)
消波B質量	3.0t⇒テトラポッド4t型	6.1t⇒テトラポッド8t型

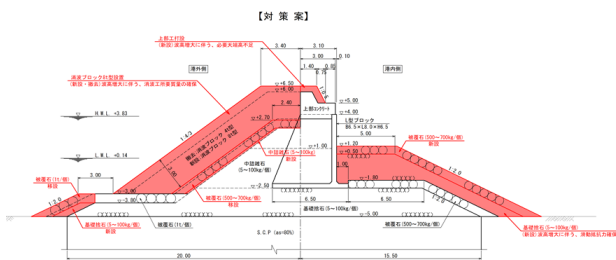


図-4 対象防波堤の断面図 (苅田港)

3. CADMAS-SURF による解析条件

3.1 CADMAS-SURF による解析条件の設定

CADMAS-SURF における計算領域および構造物モデルの設定について、志布志港防波堤 (沖) を図-5, 苅田港第2南防波堤を図-6 に示す。

解析では通過波検定により堤前波高が設計における堤前波高 (有義波高) を満足していることを確認したうえで、構造物モデルを配置した解析地形により反射波および越波伝達波の計測を実施した。また、越波伝達計算

に使用した計算パラメータを表 3-3 に示す。

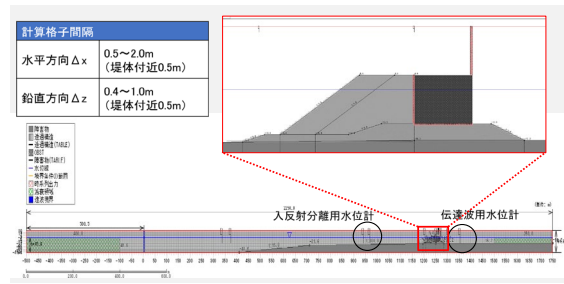


図-5 計算領域図 (志布志港)

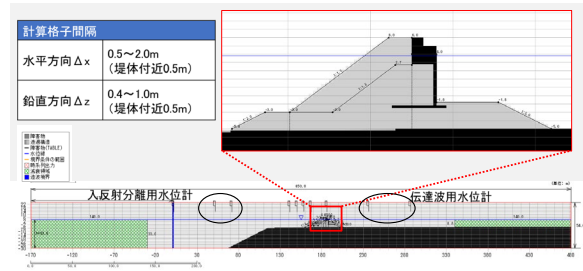


図-6 計算領域図 (苅田港)

表-3 CADMAS-SURF の計算パラメータ設定

項目	値	備考
計算時間	2000s	
時刻間隔	自動	安全率0.2かつ $\Delta t \leq 0.05\text{s}$
VP-DONOR	0.2	一次風上差分:二次中心差分=2:8
SOLV M-ILUBCGSTAB	0.95	連立一次方程式の解法(デフォルト設定)
OPTION DUB-LOOP	2	サブループ回数:2回
OPTION WL-AUTO-ADJUST	100.0	総水量を100sごとに補正
OPTION S-CELL-UW	DU=0	表面セルの流速を勾配ゼロで算出
OPTION T-DOOR BUB	0.2	気泡上昇速度:0.2m/s
OPTION T-DOOR DROP	FREE-RUNDOWN	水滴落下速度:自由落下+斜面処理

3.2 解析ケースの設定

解析ケースは、各施設に対して「嵩上+2層置換断面」を1ケース、「現況断面」および「現況断面+拡幅断面」を5ケースの計6ケースを実施した。解析ケース一覧を表-4, 志布志港防波堤 (沖) の構造物モデルを図-7, 苅田港第2南防波堤のケースを表-5, 構造物モデルを図-8 にそれぞれ示す。

表-4 解析ケース一覧

解析ケース	構造物断面
Case1	嵩上+2層置換
Case2-1	現況
Case2-2	現況+2層拡幅
Case2-3	現況+3層拡幅
Case2-4	現況+4層拡幅
Case2-5	現況+6層拡幅

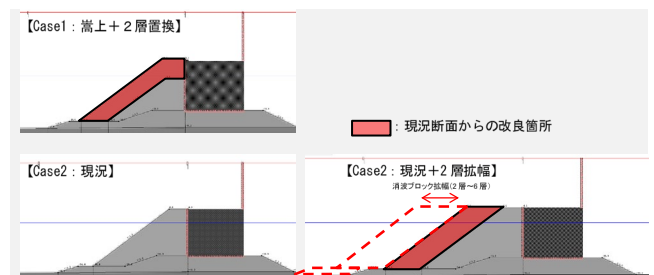


図-7 構造物モデル (志布志港)

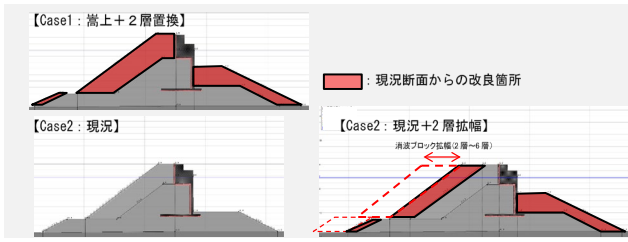


図-8 構造物モデル (荇田港)

4. CADMAS-SURF による解析結果

4.1 CADMAS-SURF による反射波特性の解析結果

志布志港防波堤 (沖) の反射率の解析結果を図-9、荇田港第2南防波堤の反射率の解析結果を図-10に示す。

反射率は消波ブロックの拡幅幅の増加に対して顕著に低下することはない結果となった。

本来は周期と消波層幅の関係で波エネルギーの逸散量が変化するため、反射率は拡幅とともに低下すると思われるが、CADMAS-SURF 解析における消波層に用いたD-F 則のポーラスモデルでは、周期の違いによる変化がモデルとして表現できていない可能性が考えられる。したがって、防波堤前面での反射率の低減を強く要求される施設においては、消波層厚に応じた反射率の変化については、水理模型実験により確認する必要がある。

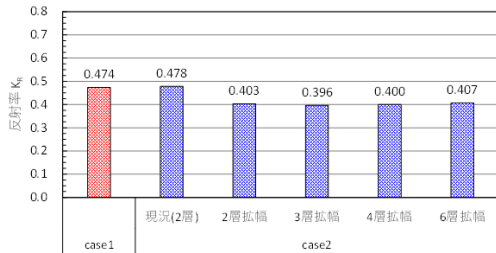


図-9 消波ブロック拡幅時の反射率の変化 (志布志港)

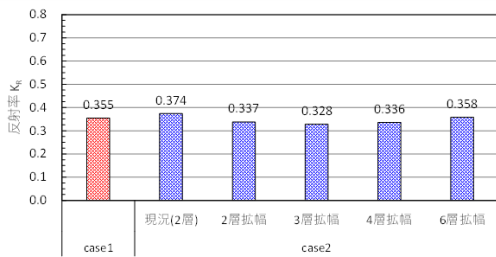


図-10 消波ブロック拡幅時の反射率の変化 (荇田港)

4.2 CADMAS-SURF による伝達波特性の解析結果

防波堤の越波伝達波は、防波堤天端を越波する水塊が港内水面に打ち込むために発生する越波成分と基礎マウンドにおける石材の空隙を透過して伝わる透過波成分とが合成された波形として、図-11に示すような波形が計測される。この波形に対して以下の処理を施して伝達率を解析した。

- ① ケーソン背後に2カ所、伝達波計測用の水位計を設定する(堤体前面から50mおよび100m離れた地点)。

- ② 既往文献⁴⁾を基に、有義波周期の2倍程度に相当する周波数 (0.033Hz 以下) のハイパスフィルターにより長周期波成分を除去する。
- ③ ゼロアップクロス法により有義波高を算出し、港内側2カ所の平均値を伝達波高とする。
- ④ (伝達波高)/(入射波高)から伝達率を算定する。

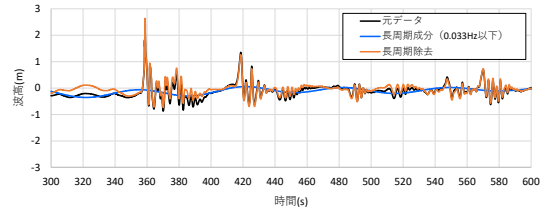


図-11 伝達波形の時系列

志布志港防波堤 (沖) の伝達率の解析結果を図-12、荇田港第2南防波堤の伝達率の解析結果を図-13に示す。

志布志港の伝達率は、消波ブロック幅を拡幅することで徐々に減少しており、Case1 (嵩上+2層置換) と同等以上の伝達率であったのは2層拡幅時であった。

荇田港の伝達率は、Case1 (嵩上+2層置換) の伝達率 0.149 に対して同等の伝達率を満足するのは Case2 (現況+3層拡幅) と志布志港より1層多くなった。これは図-14に示すように消波ブロック拡幅により越波の形態が変化して、腹付マウンドへの打ち込み方が異なるため、伝達波を抑える効果が変化していると思われる。

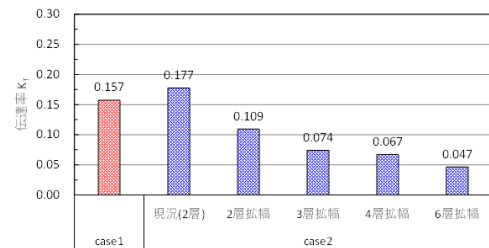


図-12 消波ブロック拡幅時の伝達率の変化 (志布志港)

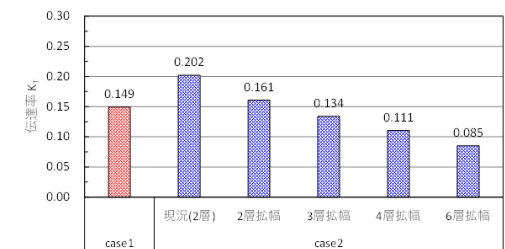


図-13 消波ブロック拡幅時の伝達率の変化 (荇田港)

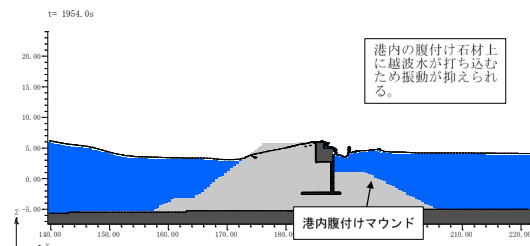


図-14 Case2-3 (3層拡幅) のスナップショット (荇田港)

4.3 水理模型実験と解析結果の比較

CADMAS-SURF による解析結果の検証として、志布志港防波堤（沖）における水理模型実験を用いて反射率および伝達率の比較・検証を行った。

Case 1（嵩上+2層置換）と Case 2（現況+2層拡幅）の反射率を図-11、伝達率を図-12 に示す。反射率については、実験結果よりはやや低いものの、Case 1（嵩上+2層置換）に対して Case 2（現況+2層拡幅）の反射率が2割程度低減する傾向は一致している。また、波高伝達率については、解析結果と実験値がよく一致している。

以上より、CADMAS-SURF による解析結果は水理模型実験を良く再現しているものと判断できる。

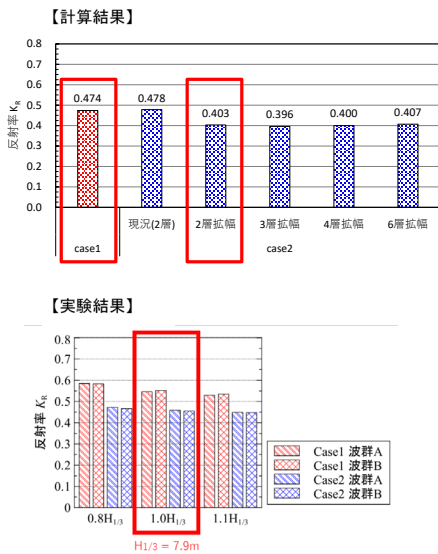


図-11 反射率の検証（志布志港）

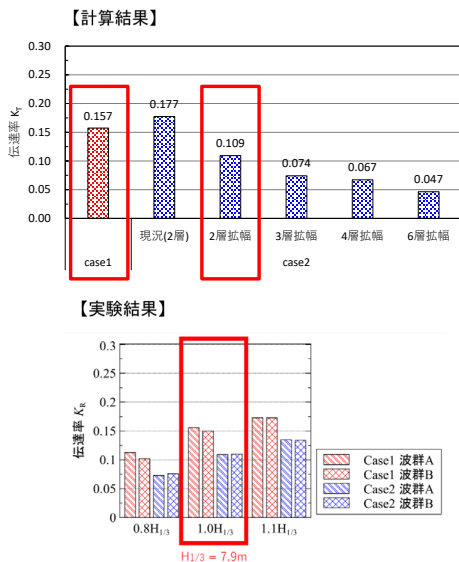


図-12 波高伝達率の検証（志布志港）

5. 気候変動への適応のための試検討

気候変動の影響により経年的に増大する海洋外力（潮位、波浪）の変化への適応策に資する検討として、工事における天端幅拡幅の最小単位が、消波ブロック同士の噛み合わせのため2層厚以上確保、パラペット嵩上げ厚は、コンクリートの剥離やひび割れ回避のために打設厚を最低でも50cm確保する必要があることを踏まえ、これらの施工条件による性能の余裕度を算出し、海面上昇により防波堤としての性能を満足しなくなるまでの経過年数を評価することで気候変動の適応策としての効果を確認した。

5.1 検討概要

本検討では、志布志港防波堤（沖）、荇田港第2南防波堤の2施設を対象として、通常改良（嵩上+2層置換）での越波伝達率を防波堤としての必要性能と考えた。それぞれの防波堤において、その性能に余裕がある現況+消波ブロック拡幅断面（志布志港：2層拡幅、荇田港：3層拡幅）を対象として、必要性能を満足する海面上昇量を検討した。ここでは、将来の気候の変化としては海面上昇のみとし、波浪は変化しないものとして入射波条件を設定した。

5.2 海面上昇に伴う伝達波の検討結果

潮位上昇量を段階的に変化させた場合の越波伝達率を図-13、図-14 に示す。潮位上昇に伴う伝達波の変化は、志布志港及び荇田港とも海面の上昇に伴い伝達率は増加する。これは防波堤の天端高と水面の差（hc）が減少するために越波水塊が増加するためであると考えられる。

志布志港においては、海面上昇量+0.6mでも通常改良である Case 1 の伝達率を下回っており、防波堤の必要性能を満足する結果となった。外挿して考えると海面上昇+0.7m 以上で必要性能を満足しなくなると見込まれる。

荇田港は、海面上昇量+0.2m では防波堤性能を満足するが、海面上昇量+0.4m になると伝達率が Case 1 を超え、防波堤の必要性能を満足しない結果となった。

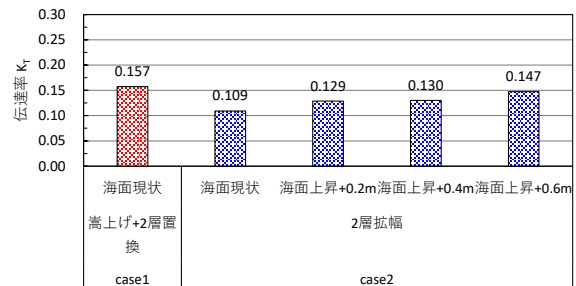


図-13 潮位上昇を考慮した伝達率の変化（志布志港）

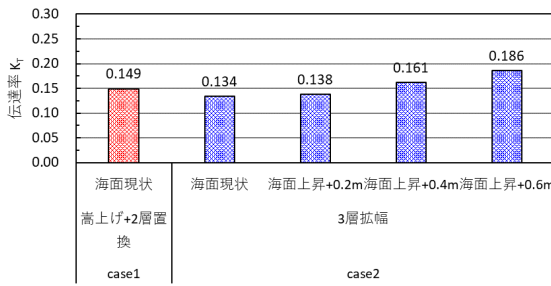


図-14 潮位上昇を考慮した伝達率の変化 (荇田港)

5.3 気候変動の適応策としての評価

表-5 に示すように 21 世紀末には日本沿岸の海面は平均気温の上昇に伴い海面も上昇する予測が公表されている。これにより、越波伝達機能が満足しなくなる海面上昇量が何年後に発生するかを逆算することで、気候変動適応策の実施の緊急性が明確になる。

志布志港における海面上昇の余裕代 0.7m は、表-5 に示す 4℃上昇シナリオであっても 21 世紀末 0.71m に相当する。このため、志布志港防波堤 (沖) における気候変動の影響は当面の間無視できることとなる。

一方、荇田港第 2 南防波堤の場合は、図-14 の結果により、海面上昇+0.2m~0.4m の中間に当たる 0.3m 程度で越波伝達性能を満足しなくなる。2℃上昇シナリオでは、設計供用期間の 50 年で 0.18m の海面上昇が見込まれるため、設計供用に対応策が必要となることはないが、2℃上昇シナリオにおける 21 世紀末には防波堤機能の不足が現れるため、50 年後の施設更新時には機能増強の適応策を施す必要があるものと評価される。

なお、以上の検討では、波浪の強大化や潮位偏差の増大は見込んでいないため、これらの条件変化を考慮した場合には、適応策の実施時期が早まる可能性があることに留意する必要がある。

表-5 気候変動にともなう平均海面水位予測⁵⁾

	2℃上昇シナリオ による予測 パリ協定の2℃目標が 達成された世界	4℃上昇シナリオ による予測 現時点を超える追加的な緩和策 を取らなかった世界
日本沿岸の 平均海面水位	約0.39 m上昇	約0.71 m上昇
【参考】世界の 平均海面水位	(約0.39 m上昇)	(約0.71 m上昇)

※海面水位上昇量は 20 世紀末と 21 世紀末の平均海面水位を比較した偏差である。

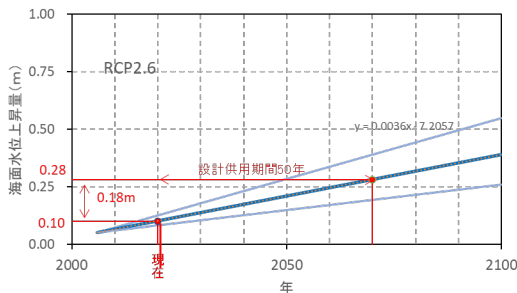


図-15 気候変動 2℃上昇シナリオの海面水位予測

6. おわりに

今回の検討において、志布志港防波堤では消波ブロック 2 層拡幅断面が、一般的な改良 (高上+2 層置換) と同等以上の性能となる場合があることを確認した。併せて、気候変動への適応のための検討を実施し、施工条件による性能の余裕代を評価することにより、将来の海面上昇に対する影響を把握し、施設更新時の優先順位への適用の可能性について検討を行った。

なお、消波ブロック 2 層拡幅断面の場合、一般的な防波堤としての必要天端高 (朔望平均満潮位上に 0.6H_{L3} 以上とする) を満足しないことになるため、改良断面の候補として検討する際には、防波堤としての要求性能を整理しておく必要がある。

また、消波ブロックの拡幅に伴う反射率および波力の低減効果については、水理模型実験により確認する必要がある。特に、波力については、衝撃波力の発生が懸念される場合は、消波層の拡幅に応じて波力低減が得られない可能性もあるため検証を行うことが望ましい。さらに、今回は限られた施設のみの検討に留まっているため、他の事例 (衝撃波圧, 上部斜面堤) による検証を蓄積することが望ましい。

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所発注の「令和 4 年度防波堤・護岸の改良工法検討業務」の成果の一部をまとめたものである。

検討にあたっては、(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 鈴木領域長、平山グループ長から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 峯村ら: 仮想台風による高波災害リスクの基礎的検討について, 沿岸技術研究センター論文集 No. 21, pp. 35-38, 2021.
- 2) 合田良実, 岸良安治: 不規則波による低天端護岸の越波特性実験, 港湾技研資料, No. 242, 1976.
- 3) 財団法人 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の面波設計への適用に関する研究報告書, 沿岸開発技術ライブラリーNo. 12, 2001.
- 4) 谷本勝利, 大里睦男: 消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について, 海岸工学講演会論文集, Vol. 26, pp. 309-313, 1979.
- 5) 文部科学省, 気象庁: 日本の気候変動 2020 -大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書- 概要版, pp. 10, 2020.

