ISSN 1346-7328
国総研資料 第1281号
令 和 6 年 3 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 1281 March 2024

気候変動適応策を踏まえた防波堤の設計手法に関する検討

小林怜夏・竹信正寛・本多和彦
蒔苗嘉人・村田誠

Study on a Methodology for Designing Breakwaters
Considering Climate Change Adaptation

KOBAYASHI Reina, TAKENOBU Masahiro, HONDA Kazuhiko
MAKINAE Yoshihito, MURATA Makoto

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No. 1281　　2024 年 3 月
(YSK-N-497)

気候変動適応策を踏まえた防波堤の設計手法に関する検討

小林怜夏*・竹信正寛**・本多和彦***・蒔苗嘉人****・村田誠*****

要　旨

港湾における気候変動適応策の実装方針（素案）が国土交通省港湾局から公表され，気候変動に対する各種適応策に関する考え方が示された．これにより，今後の施設設計や性能照査において設定する作用は，気候変動に伴う作用の時間変化を適切に考慮する必要がある．しかし，その具体的な設定手法はこれまで提案されていない．

また，将来の作用の変化に対して港湾の施設に対する要求性能を確保する方策として，事前適応策および順応的適応策という2つの適応策が提案されているものの，設計実務における両適応策の具体的な適用事例はこれまで報告されていない．

本資料は，当該適応策を適用する設計実務の一助とするため，気候変動による時間変化を考慮した作用（天文潮位，潮位偏差，沖波波高）の設定手法を提案するとともに，既設のモデル防波堤（消波ブロック被覆堤）に対する全体安定性を対象として，事前適応策および順応的適応策を適用した場合の設計手法を検討したものである．

キーワード：気候変動適応策，事前適応策，順応的適応策，防波堤

* 前 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 研究官
** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室長
*** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾・沿岸防災研究室長
**** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 交流研究員（株式会社日本港湾コンサルタント）
***** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室 交流研究員（三井共同建設コンサルタント株式会社）

〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019　Fax：046-842-9265　　e-mail：ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Technical Note of NILIM
No. 1281 March 2024
(YSK-N-497)

Study on a Methodology for Designing Breakwaters Considering Climate Change Adaptation

KOBAYASHI Reina*
TAKENOBU Masahiro**
HONDA Kazuhiko***
MAKINAE Yoshihito****
MURATA Makoto*****

Synopsis

An outline of the implementing measures to adapt to climate change at ports were announced by Ports and Harbours Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. The outline shows concepts of climate change adaptations for port facilities. Based on that, temporal change of actions should be anticipated on future facility design and performance verification, but the concrete ways of setting actions have not been proposed.

Furthermore, two measures of designing (proactive adaptation and flexible proactive adaptation) were also showed in the outline. Those measures are for satisfying performance requirements in designing port facilities against actions influenced by climate change. However, design examples of port facilities with those measures have never been reported yet.

This paper presents a methodology to set actions (astronomical tides, tidal levels, deepwater wave heights) with anticipation of temporal change a case study of setting cross sections to which two designing approaches applied. The object of the case study is an existing breakwater covered with wave-dissipating blocks.

Key Words: climate change adaptation, proactive adaptation, flexible proactive adaptation, breakwater

* Former Researcher of Port Facilities Division, Port, Coastal and Marine Department
** Head of Port Facilities Division, Port, Coastal and Marine Department
*** Head of Port and Coastal Disaster Prevention Division, Port, Coastal and Marine Department
**** Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM (Japan Port Consultants, Ltd.)
***** Exchanging Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM (Mitsui Consultants Co., Ltd.)

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目　次

1. はじめに …… 1

2. 気候変動適応策の基本的考え方および作用の時間変化のシナリオ設定…… 1
2.1 気候変動による作用の時間変化を踏まえた要求性能の確保の考え方 …… 1
2.2 気候変動適応策の基本的な考え方 …… 2
2.3 気候変動適応策の検討に利用する作用変化のシナリオ設定 …… 3

3. 将来気候における作用の設定 …… 4
3.1 日本の気候変動に関する知見 …… 4
3.2 天文潮位の考え方 …… 6
3.3 潮位偏差の考え方 …… 7
3.4 沖波波高の考え方 …… 8
3.5 作用の設定例 …… 9

4. 気候変動適応策を考慮した断面諸元の設定例 …… 11
4.1 検討対象とする断面の諸元 …… 11
4.2 上位シナリオに対するモデル断面の安定性照査 …… 12
4.3 上位シナリオ断面の検討 …… 13
4.4 順応的適応策における中位シナリオ断面の検討 …… 17
4.5 事前適応策と順応的適応策の比較 …… 20
4.6 モデル断面に対する断面変化の要因 …… 21

5. まとめ …… 22

謝辞 …… 23
参考文献 …… 23

1. はじめに

日本の気候変動2020[1)]によれば，気候変動の影響による平均海面水位の上昇などが顕在化していることや，今後さらなる平均海面水位の上昇や台風の強大化等が指摘されている．港湾は水際線に存在する特性上，気候変動に伴う平均海面水位，高潮および波浪の変化による影響が不可避であり，長期的な視点で対策を講じることが必要である．このことを踏まえ，国土交通省港湾局では，令和3年に「港湾における気候変動適応策の実装に向けた技術検討委員会」を立ち上げ，令和5年9月には「港湾における気候変動適応策の実装方針（素案）」[2)]（以下，「素案」という．）を公表した．

素案では，気候変動の影響を踏まえた港湾の施設（以下，単に「施設」という．）への設計の考え方が示されており，将来の作用の変化に対して施設の要求性能を確保する方策として，「事前適応策」と「順応的適応策」の2種類の適応策が提案されている．さらに，令和6年4月には「港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示」において，施設の性能確保にあたり，気象の状況及び将来の見通しを勘案した作用を設定する旨の改正が行われる予定である．

これにより，今後の施設設計や性能照査において設定する作用は，気候変動に伴う作用の時間変化を適切に考慮する必要がある．しかし，その具体的な設定手法はこれまで提案されていない．また，施設に対する要求性能を確保する手法として，上記2種類の適応策が提案されているものの，設計実務における両適応策の具体的な適用事例はこれまで報告されていない．

このような背景を踏まえ，本資料は，今後の施設設計や性能照査の設計実務上の参考となるよう，ある既設の防波堤（以下，「モデル防波堤」という．）を対象として，設計供用期間中の気候変動の影響を考慮した作用の設定を試行するとともに，当該作用を用いて事前適応策と順応的適応策を適用した断面諸元の設定を試行し，それらについてとりまとめたものである．

本資料の構成は以下のとおりである．

まず，2.において気候変動適応策の考え方を提示するとともに，当該検討に用いる作用の時間変化のシナリオ設定の考え方を示した．3.では特に気候変動による設計潮位や50年確率波としての設計波浪，潮位偏差の変化に着目した作用の設定の考え方，およびその設定事例を示した．4.ではモデル防波堤を対象として，3.で整理した作用を踏まえ，将来気候に対する防波堤堤体の安定性照査，および気候変動適応策を適用した断面諸元の設定に関する試行結果を整理した．また5.では，本検討を実施したことによって判明した，気候変動適応策を考慮した断面諸元の設定に関する課題や継続的な検討が必要な事項についてまとめた．

なお，本資料の検討は防波堤を対象としているものの，いわゆる外部安定に着目した検討結果のみを整理しており，堤体のひび割れや部材の終局限界状態等を検討する内部安定や，嵩上げ部に関する設計や性能照査手法に関する詳細は，別報としてとりまとめることを想定している．

2. 気候変動適応策の基本的考え方および作用の時間変化のシナリオ設定

2.1 気候変動による作用の時間変化を踏まえた要求性能の確保の考え方

施設の要求性能は設計供用期間中にわたって確保する必要がある[3)]．このため，当該期間中の対象施設の要求性能の確保に際し，気候変動の影響を考慮する場合は，気候変動に伴う作用の時間変化も踏まえる必要がある．この点は従来の考え方と大きく異なる点であり，素案においては，気候変動を考慮した施設の要求性能の考え方として「気候変動に伴う外力の変化を考慮して、将来の外力に対して施設に要求される性能が発揮されるよう設計を行う必要がある。」とされている．気候変動による作用（外力）の時間変化を踏まえた要求性能の確保の考え方を，概念図として**図-2.1**に示す．

作用の将来予測には，将来の温室効果ガスの排出量に応じた温暖化シナリオ，予測モデル毎に異なるバイアス等に起因する不確実性があり，この不確実性に伴う予測幅が潜在的に存在する．そのため，ある作用の予測結果を採用した場合，その採用した作用と比べて実際の将来の作用が上振れまたは下振れする可能性がある．この上振れリスクまたは下振れリスクに対応するためには，将来の作用の予測幅を踏まえて，作用の予測値の大小に応じた上位シナリオ，中位シナリオ等といった複数のシナリオを想定することが重要である．

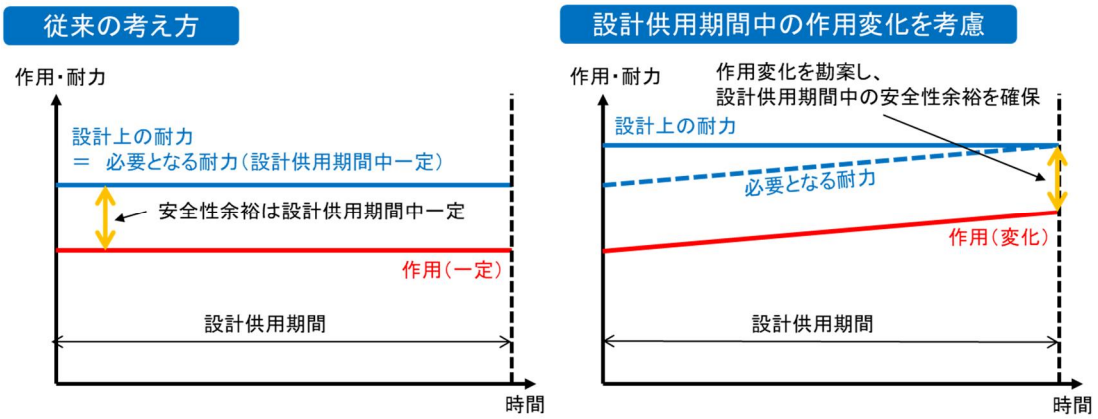

図-2.1　要求性能の確保の考え方 [2)]

2.2　気候変動適応策の基本的な考え方

素案においては，気候変動による作用の時間変化を踏まえた施設の要求性能を確保する方策として，事前適応策と順応的適応策の 2 種類の気候変動適応策が提示されている（**図-2.2**）．

事前適応策とは，設計供用期間中における気候変動による作用の時間変化を勘案した上で，設計供用期間の全ての時点において要求性能を確保可能な断面諸元として，当該期間の初期段階において対応する方策である．事前適応策は，対象とする将来の作用を上位シナリオのみに設定すると，将来の実際の作用が下振れした場合，断面諸元が過大となる可能性があり，また，中位シナリオ（上位シナリオと比べて予測される変化の値が小さいシナリオ）のみに設定すると，将来の実際の作用が上振れした場合，施設の耐力が不足して手戻りが生じる可能性がある．

順応的適応策とは，設計供用期間の全ての時点において要求性能を確保可能な断面諸元を設計時点で検討するものの，実際の整備は部材や構造的な特性に応じて，当該期間中の適切な時期に段階的に対応する方策である．これは，設計時に想定した作用に対して将来の実際の作用が上振れするリスクまたは下振れするリスクを踏まえ，設計供用期間中の実際の作用の時間変化を把握しつつ，実際の作用の時間変化に順応的に対応することを前提としたものである．

順応的適応策の考え方の一例として，特に上振れリスクに対応する次の考え方が挙げられる．

まず，施設の設計段階で想定した設計供用期間中における作用の時間変化と比較して，将来の実際の作用が上振れするリスクにも対応できるよう，作用の変化予測の上位シナリオに対して，設計供用期間中の全ての時点において要求性能を確保可能な断面（以下，「上位シナリオ断面」という．）を検討しておく．この検討は，事前適応策で検討する内容と同様である．一方で，作用の将来的な変化は必ずしも上位シナリオとならない可能性や，設計供用期間の初期段階で上位シナリオ断面として整備する場合の下振れリスクを踏まえると，設計供用期間の初期段階では，中位シナリオを想定して整備することが考えられる．そのため，中位シナリオに対して，設計供用期間中の全ての時点において要求性能を確保可能な断面（以下，「中位シナリオ断面」という．）を検討する．中位シナリオ断面の検討では，仮に設計供用期間中に作用が中位シナリオに対して（設計時に想定していた上位シナリオの範囲内で）上振れしたと判断した場合は，追加施工によって上位シナリオ断面に移行可能とする工夫が必要である．また，実際の断面の検討では，中位シナリオ断面から上位シナリオ断面に移行させるための追加施工の工種のうち，追加施工が困難な工種や工費が比較的高い工種は，設計供用期間の初期段階で上位シナリオ断面に対応する諸元として整備することで，追加施工の工費を低く抑えることが重要である．

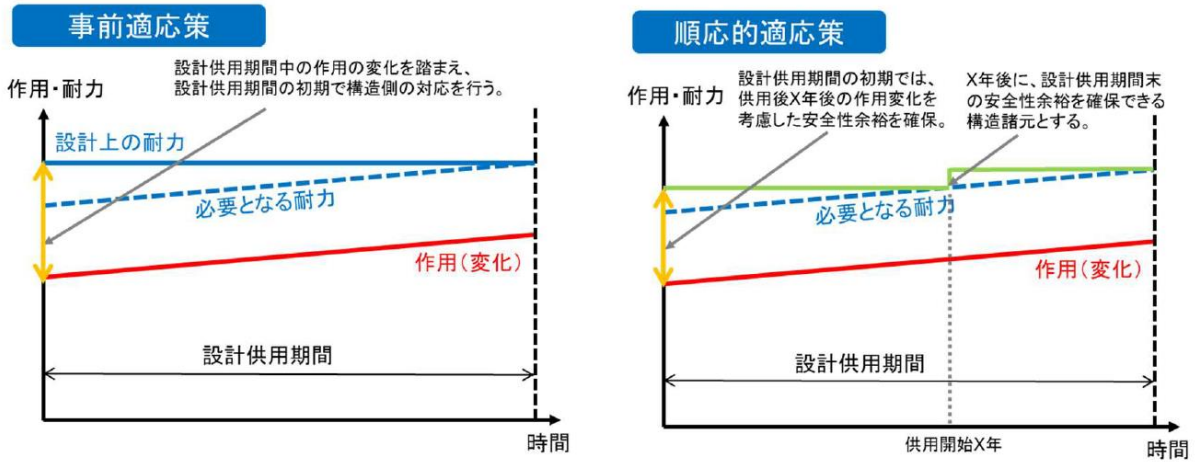

図-2.2　設計供用期間中における要求性能の確保方法のイメージ[2)]

2.3　気候変動適応策の検討に利用する作用変化のシナリオ設定

本資料では，港湾構造物の代表的な施設である防波堤（具体的にはモデル防波堤）を対象として，2.1，2.2に基づく気候変動適応策（事前適応策または順応的適応策）を適用した断面諸元の設定の試行例を示す．ただし，その適用にあたっては，設計供用期間中における作用変化のシナリオを設計段階で想定する必要があるものの，その明示的な設定ルールはない．そこで，以下の2つの仮定を設けることとした．

仮定①　両適応策の検討に際しての設計供用期間中の作用変化は，「変化する気候下での海洋・氷雪圏に関するIPCC特別報告書[4)]」における気候変動予測のうち，RCP2.6シナリオ（おおむねパリ協定の2℃目標が達成されるシナリオ．本資料では「2℃上昇シナリオ」という．）に基づく各種検討結果を用いて推定する．

仮定② 両適応策の検討に際しての設計供用期間中の作用変化は，2℃上昇シナリオに対する上振れの可能性を考慮して設定する．ただし，順応的適応策の検討に際し，設計供用期間の初期段階の断面は，2℃上昇シナリオの平均的な作用の推定結果に基づいて設定する．

仮定①については，気候変動に関する国際的枠組みであるパリ協定においては，「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2℃未満に抑え，1.5℃までに抑える努力をする」との目標を掲げ，日本を含めた世界各国で温室効果ガスの排出抑制が進められている．そのため，施設の設計に際して気候変動の影響を考慮する際には，2℃上昇シナリオに基づいた作用の時間変化を考慮することが妥当であると考える．仮定②については，仮定①で2℃上昇シナリオに基づいた検討を基本としながらも，2℃以上の世界の平均気温の上昇も否定できないことから，将来予測の上振れリスクを考慮することとしている．

2℃上昇シナリオの平均的な作用を「中位シナリオ」とし，2℃上昇シナリオの平均的な作用に対する上振れの可能性を考慮して設定した作用を「上位シナリオ」とした場合の，事前適応策および順応的適応策の要求性能の確保のイメージを**図-2.3**に整理した．仮定②から，事前適応策では，上位シナリオに対する要求性能を確保可能な断面を整備する．これらの作用の設定に関する具体例は，3．において詳述する．

なお，気候変動適応策の適用において，素案では「各適応策の適用にあたっては、どちらか一方に限定する必要はなく、各施設の利用状況や構造的な特性等に応じて適切に組み合わせて適用することができる。」[2)]と触れられており，実際には同一断面においても部材や工種ごとに，両適応策の組合せも考えられる．モデル防波堤を対象としたその組合せの例については4.にて触れる．

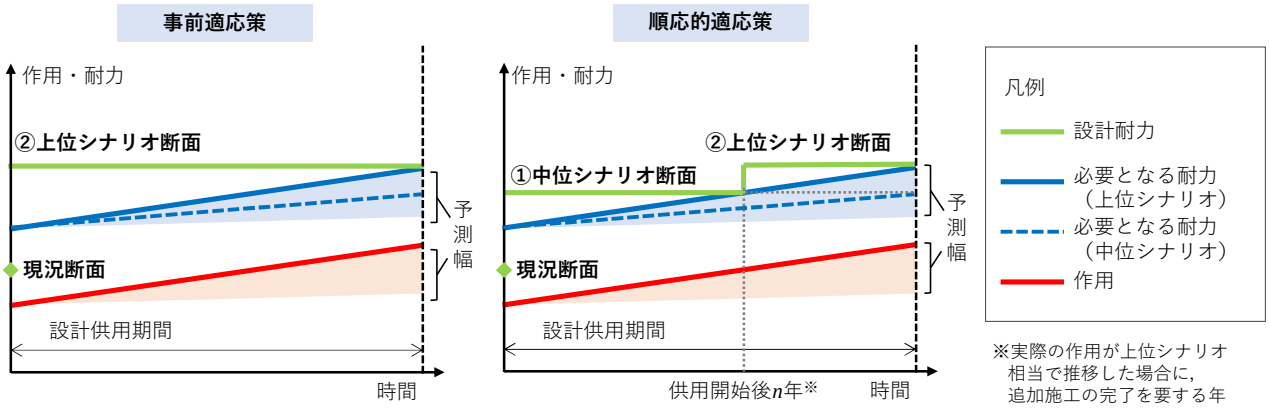

図-2.3　各適応策における要求性能の確保のイメージ

3. 将来気候における作用の設定

施設の設計に用いる作用は，施設の設計供用期間中の気候変動による作用の時間変化を勘案して設定する必要がある．そのため，作用の設定にあたっては，その設定時点における気候変動に伴う作用への影響に関する知見に基づいて，設計供用期間中の作用の時間変化を評価する必要がある．本資料では，防波堤の性能照査を対象として，天文潮位，潮位偏差，および沖波波高についてモデル化を行った．これらのモデル化について，3.2～3.4 に詳述する．

本資料では，対象とする施設に適用されている作用の現在の設計値に対して，気候変動による作用の時間変化を考慮して算出した将来の変化倍率を乗じる（または，将来の変化量を加える）ことで，将来の設計値を推定することとした．この現在の設計値は，すでに気候変動の影響を含んだ気候条件下における観測値または推算値から算出した場合も想定される．そのため，将来の変化倍率（または，変化量）を算出する際には，現在の設計値を算出した気候条件および将来の設計値を推定した気候条件を個別に推定することは重要であるが，この気候条件を直接推定することは解析コストが非常に高いことから困難である．

そこで，潮位偏差および沖波波高については，現在気候および将来気候の2時点の気候条件において算出された潮位偏差および沖波波高の将来変化の比を用いて，現在の設計値（または，最新の観測値または推算値から算出した値）から将来の設計値を推定するための変化倍率を推定する．天文潮位については，現在気候および将来気候の2時点の気候条件から算出された天文潮位の将来変化の差を用いて，現在の設計値（または，最新の観測値から算出した値）から将来の設計値を推定するための変化倍率を推定する．この将来の変化倍率（または，変化量）を推定する際には，前述の現在の設計値を算出した気候条件に相当する時点を x 年（以降，「基準年」という．）とし，将来の設計値を推定する気候条件に相当する時点を y 年（本資料では「設計供用期間末の年」とする．）とする．現在の設計値の算出には一定期間の観測値または推算値を用いているため，厳密には基準年はある一点の時点ではないことがあるが，本資料では当該期間内のある時点を基準年と仮定する．なお，以降において，添え字 x および y がつく変数は，それぞれ x 年および y 年の値を表す．

3.1　日本の気候変動に関する知見

(1) 日本の気候変動に関する知見の概要

日本における気候変動による変化については，観測事実，将来予測および予測の確信度が報告されている[1]．また，文部科学省・気象庁（2020）[1]の知見の多くは環境省（2019）[4]による世界の気候変動に関する知見を踏まえている．

(2) 気温

文部科学省・気象庁（2020）[1]によれば，日本の年平均気温に関する観測事実としては，様々な変動を繰り返しながら有意に上昇している．将来予測としては，2℃上昇シナリオにおいて，21世紀末（2076～2095 年平均）には20世紀末（1980～1999年平均）と比べて全国的に有意に上昇すると予測されている．

(3) 平均海面水位

文部科学省・気象庁（2020）[1]によれば，日本沿岸の年平均海面水位に関する観測事実としては，過去 100 年間に上昇傾

向は見られないものの，1980 年以降では上昇傾向が見られる．将来予測としては，21世紀中に上昇し，20世紀末（1986年～2005年平均）と比較して21世紀末（2081年～2100年平均）には2℃上昇シナリオで0.22～0.55 m（95%信頼区間）程度の上昇幅と推定されており，この確信度は高い．このことから，日本の港湾における天文潮位が21世紀末まで上昇傾向になることも確信度が高いといえる．**図-3. 1**は文部科学省・気象庁（2020）[1)]に示された領域ごとの海面水位の上昇幅である．

(4) 台風

日本における台風の強度については，森ら（2021）[5)]によると，気温の昇温パターンに応じて台風の強度が連続的に強化される傾向にあり，2℃上昇シナリオでは2015年から2040年頃まで単調に台風の強度が強化されるが，その後は横ばい傾向と予想されている．港湾で来襲する高潮や波浪の主要因の１つとして台風が挙げられる．そのため，台風の中心気圧の変化の傾向に応じて，港湾における高潮や波浪は変化する．

台風および温帯低気圧に伴う高潮・高波については，国土技術政策総合研究所・港湾空港技術研究所により，2℃上昇シナリオでの将来の潮位偏差および波高の変化について，将来の6つの海面水温（SST）パターンを踏まえて暫定値を算出している[2)]．この潮位偏差および波高の将来変化の暫定値は，海域区分毎の潮位偏差及び50年確率波高について，現在気候（20世紀末 : 1980年）における値に対する将来気候（21世紀末 : 2090年）における値の比（以下，「将来変化比」という．）で表され，**図-3. 2**のとおり素案に示されている．この将来変化比は2℃上昇シナリオの将来気候を対象としたものであり，前述の森ら[5)]のとおり2℃上昇シナリオにおける台風強度が2040年頃まで上昇し，その後はほぼ一定となることを踏まえると，将来変化比は2040年の将来気候に応じたものであると想定される．本資料では，この将来変化比の考え方と値に従って，潮位偏差および沖波波高の変化をモデル化することとする．なお，**図-3. 2**は6つのSSTモデルに基づく将来変化比の平均の暫定値を示しているが，平均値以外に10%tile～90%tileも含む確定値が追って公表される予定であり，先行的に３大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）については公表されている[6)]．

なお，いわゆる既往の災害をもたらした台風を参考に設定した「モデル台風」を使って現在の設計値を算出している場合は，気候変動に伴う中心気圧の低下量を評価し，その中心気圧の低下量を反映させた新たなモデル台風を想定することで，将来の設計値を算出するといった手法もある．

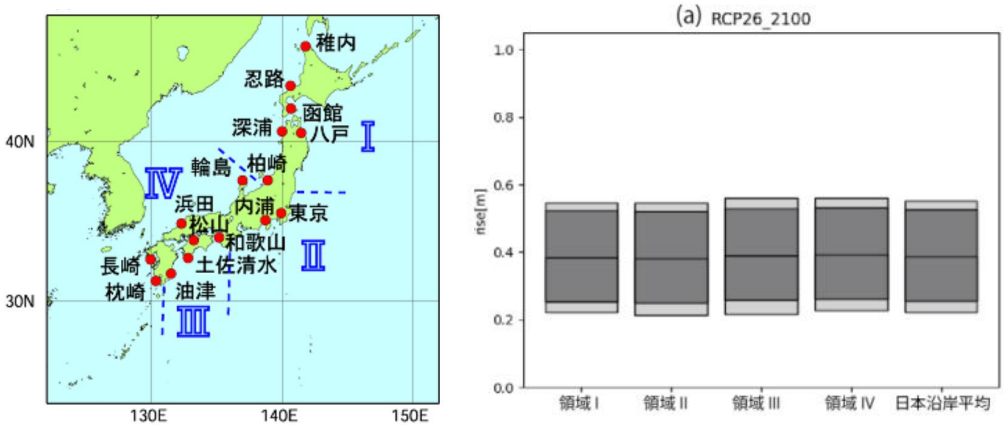

図-3. 1　SI-CAT 海洋モデルによる 21 世紀末における日本沿岸の領域 I～IV 及び日本沿岸平均の海面水位の 20 世紀末からの上昇幅 [m][1)]

海域	将来変化比		対象港湾（重要港湾以上）
	高潮偏差	波高	
北海道日本海側	1.01	1.01	稚内港・留萌港・石狩湾新港・小樽港・函館港
オホーツク海	1.00	1.03	紋別港・網走港・根室港（根室）
北海道太平洋側（東側）	1.01	1.02	根室港（花咲）・釧路港・十勝港
北海道太平洋側（西側）	1.01	1.02	苫小牧港・室蘭港
陸奥湾	1.02	1.04	青森港
東北太平洋側	1.04	1.04	むつ小川原港・八戸港・久慈港・宮古港・釜石港・大船渡港・仙台釜石港・相馬港・小名浜港
北関東	1.06	1.09	茨城港・鹿島港
東京湾	1.10	1.02	千葉港・木更津港・東京港・横浜港・川崎港・横須賀港
駿河湾	1.04	1.01	御前崎港・田子の浦港・清水港
伊勢湾	1.07	1.00	名古屋港・衣浦港・三河港・四日市港・津松坂港
紀伊半島	1.03	1.00	尾鷲港・日高港・和歌山下津港
大阪湾	1.06	1.04	大阪港・堺泉北港・阪南港・神戸港・尼崎西宮芦屋港
四国太平洋側	1.07	1.02	徳島小松島港・橘港・高知港・須崎港・宿毛湾港・宇和島港
瀬戸内海（東部：播磨灘・燧灘）	1.02	1.01	東播磨港・姫路港・岡山港・宇野港・水島港・福山港・尾道糸崎港・今治港・東予港・新居浜港・三島川之江港・坂出港・高松港
瀬戸内海（西部：伊予灘・周防灘）	1.05	1.01	呉港・広島港・岩国港・徳山下松港・三田尻中関港・宇部港・小野田港・下関港（周防灘）・北九州港（周防灘）・苅田港・中津港・別府港・大分港・松山港
九州南東側	1.04	0.99	細島港・宮崎港・油津港・志布志港・佐伯港・津久見港
薩南	1.07	1.02	鹿児島港・西之表港
琉球諸島	1.01	1.01	名瀬港・運天港・金武湾港・中城湾港・那覇港・平良港・石垣港
九州西側	1.06	1.01	川内港・八代港・三角港・熊本港・三池港・長崎港・佐世保港・福江港
九州北側	1.08	1.06	苅原港・郷ノ浦港・伊万里港・唐津港・博多港・北九州港（響灘）・下関港（響灘）
山陰地方	1.05	1.02	三隅港・浜田港・西郷港・境港・鳥取港
若狭湾	1.03	1.03	舞鶴港・敦賀港・金沢港
富山湾	1.03	1.02	七尾港・伏木富山港・直江津港・小木港・両津港・新潟港
東北日本海側	1.01	1.02	能代港・秋田港・船川港・酒田港

※潮位偏差の将来変化比は、標準的な値として、再現期間 50～100 年の範囲での最大値を示す。
※波高の将来変化比は、再現期間 50 年の場合（50 年確率波高）を示す。
※将来変化比が「1」未満の場合は、現況と同じ波高を用いるため「1」とする。
（注意）三大湾以外の海域における値は暫定値であり、今後数値が更新される可能性がある。

図-3.2　海域別の潮位偏差及び 50 年確率波高の将来変化比 [2)]

3.2　天文潮位の考え方

3.1(3)に示したとおり，日本周辺における平均海面水位上昇の将来予測では，20世紀末（1986年～2005年）の値と21世紀末（2081年～2100年）の値を比較して示している．ここでは，それらの期間の中間である1995年から2090年までに線形的にΔL [m]上昇するものと仮定する．天文潮位の設計値は，基準年の天文潮位（例えば朔望平均満潮位）に，設計供用期間末までの平均海面水位の上昇量を加えて，設計供用期間末の天文潮位を算出する．以上を図式で表すと，式-3.1，式-3.2

および**図-3.3**のようになる．

$$a = \frac{\Delta L}{2090-1995} = \frac{\Delta L}{95} \qquad \text{(式-3.1)}$$

$$L_{Hy} = L_{Hx} + a(y-x) \qquad (1986 \le x \le 2100, 1986 \le y \le 2100) \qquad \text{(式-3.2)}$$

ここで，aは１年あたりの海面水位上昇量，ΔLは1995年から2090年までの海面水位上昇量，L_{Hy}は設計供用期間末の天文潮位，L_{Hx}は基準年の天文潮位である．なお，基準年の天文潮位 L_{Hx} は，基本的には現在の設計値であるが，現在の天文潮位の設計値を算出したときに用いた観測値の期間が 1986年以前の場合には，直近の観測値を用いて新たに算出する必要があることに留意が必要である．

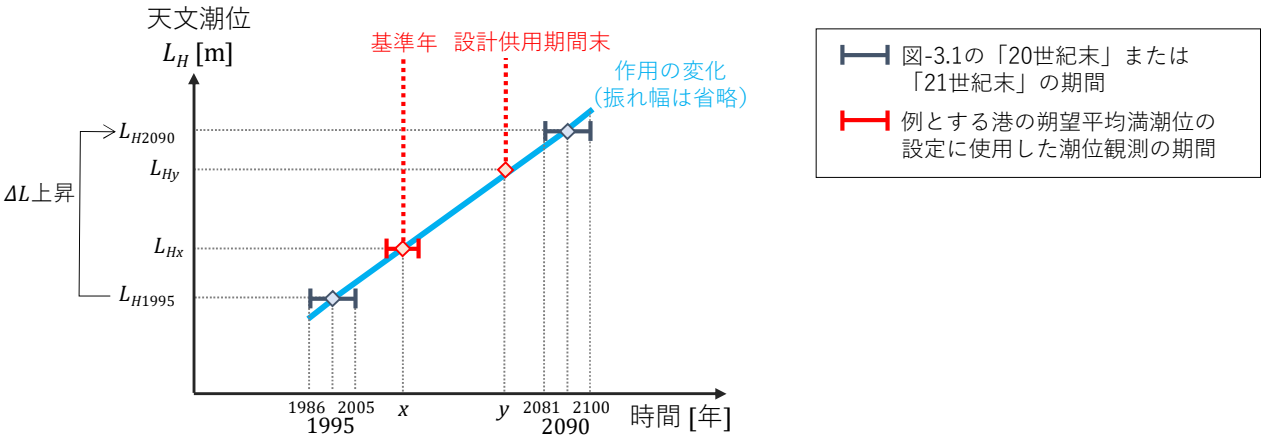

図-3.3　天文潮位の変化のモデル

3.3　潮位偏差の考え方

3.1(4)に示したとおり，日本周辺における潮位偏差は，現在気候の対象期間の中間である1980年から2℃上昇シナリオの将来気候条件の2040年までに線形的にr_V倍になるように線形に増加し，その後は変化しないものと仮定する．また，1980年以前においても変化しないものと仮定する．潮位偏差の設計値は，基準年の潮位偏差をもとに1980年時点の潮位偏差を推算し，**図-3.2**のように算出された将来変化比をかけて，設計供用期間末の潮位偏差を算出する．以上を図式で表すと，式-3.3～式-3.5および**図-3.4**のようになる．

$$c_V = \frac{r_V - 1}{2040-1980} = \frac{r_V - 1}{60} \qquad \text{(式-3.3)}$$

$$V_{1980} = \begin{cases} V_x & (x \le 1980) \\ \dfrac{V_x}{1+c_V(x-1980)} & (1980 < x \le 2040) \\ \dfrac{V_x}{r_V} & (2040 < x) \end{cases} \qquad \text{(式-3.4)}$$

$$V_y = \begin{cases} V_{1980} & (y \le 1980) \\ \{1 + c_V(y-1980)\}V_{1980} & (1980 < y \le 2040) \\ r_V V_{1980} & (2040 < y) \end{cases} \qquad \text{(式-3.5)}$$

ここで，c_Vは潮位偏差の年変化率，r_Vは潮位偏差の1980年から2040年までの将来変化比，V_{1980}は1980年の潮位偏差，V_xは基準年の潮位偏差，V_yは設計供用期間末の潮位偏差である．

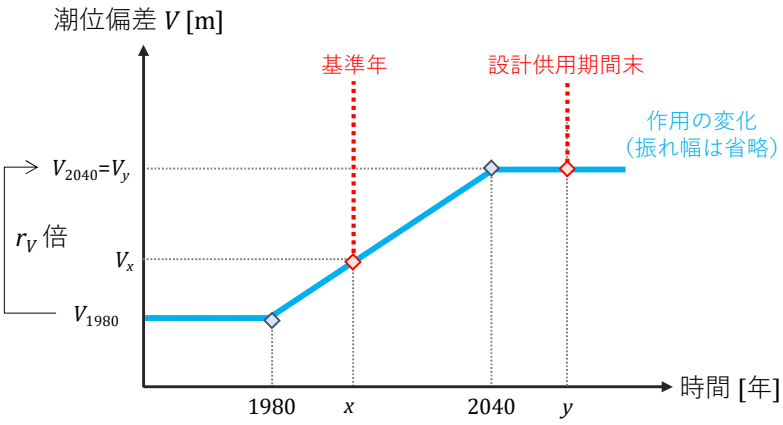

図-3.4　潮位偏差の変化のモデル

3.4　沖波波高の考え方

3.1(4)に示したとおり，日本周辺における波高は，3.3の潮位偏差と同様に，現在気候の対象期間の中間である1980年から2℃上昇シナリオの将来気候条件の2040年までにr_H倍になるように線形に増加し，その後は変化しないものと仮定するとともに，1980年以前においても変化しないものと仮定する．波高の設計値は，基準年の波高をもとに1980年時点の波高を推算し，図-3.2のように算出された将来変化比をかけて，設計供用期間末の波高を算出する．以上を図式で表すと，式-3.6～3.8および図-3.5のようになる．

$$c_H = \frac{r_H - 1}{2040 - 1980} = \frac{r_H - 1}{60} \qquad \text{(式-3.6)}$$

$$H_{1980} = \begin{cases} H_x & (x \leq 1980) \\ \dfrac{H_x}{1 + c_H(x - 1980)} & (1980 < x \leq 2040) \\ \dfrac{H_x}{r_H} & (2040 < x) \end{cases} \qquad \text{(式-3.7)}$$

$$H_y = \begin{cases} H_{1980} & (y \leq 1980) \\ \{1 + c_H(y - 1980)\}H_{1980} & (1980 < y \leq 2040) \\ r_H H_{1980} & (2040 < y) \end{cases} \qquad \text{(式-3.8)}$$

ここで，c_Hは沖波波高の年変化率，r_Hは沖波波高の1980年から2040年までの将来変化比，H_{1980}は1980年の沖波波高，H_xは基準年の沖波波高，H_yは設計供用期間末の沖波波高である．

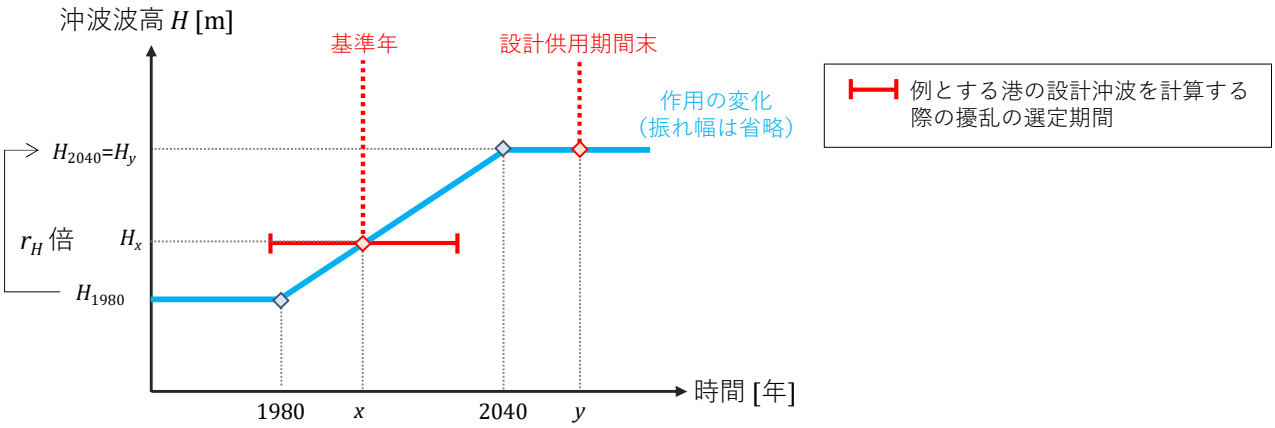

図-3.5　沖波波高の変化のモデル

3.5　作用の設定例

本節では，3.2～3.4で整理した作用の考え方により，モデル防波堤のある港をモデル港とした上で，2℃上昇シナリオの中位シナリオおよび上位シナリオに基づく作用を設定する．また，3.1(3)，(4)を踏まえ，**表-3.1**に示すとおり，各作用の将来変化は，作用毎の到達時期に各シナリオに応じた値に到達するものとする．天文潮位の中位シナリオについては，本資料では，他の作用と同様に，天文潮位の中位シナリオを設定する際の平均海面水位上昇量における平均値を採用した．しかし，気候変動に伴う気温上昇が止まっても平均海面水位は引き続き上昇し続けることから，他の作用と比較して平均海面水位上昇によるリスクは高いことを踏まえて，平均海面水位上昇量の将来予測の95%信頼区間の上限値を採用することも考えられる．

なお，4.においてモデル防波堤について断面諸元を設定するが，当該施設の設計供用期間は50年間（2023年～2073年）と仮定したため，本節では当該期間末である2073年時点の作用を設定するとする．

表-3.1　各シナリオにおいて21世紀末頃に作用が到達する値

作用	到達時期	中位シナリオ	上位シナリオ
天文潮位	2090年	現在の天文潮位の設計値に，**図-3.1**で示されている海面水位上昇量の95%信頼区間の平均値を加えた値	現在の天文潮位の設計値に，**図-3.1**で示されている海面水位上昇量の95%信頼区間の上側信頼限界を加えた値
潮位偏差	2040年 （2090年まで変動なし）	3.1(4)で述べた将来変化比の平均値	3.1(4)で述べた将来変化比の90%tile値
沖波波高	2040年 （2090年まで変動なし）	3.1(4)で述べた将来変化比の平均値	3.1(4)で述べた将来変化比の90%tile値

(1)天文潮位

設計供用期間末の天文潮位の例として，朔望平均満潮位を設定する．なお，本資料の手法により朔望平均満潮位以外の天文潮位に対しても，現在の天文潮位の設計値に設計供用期間末における平均海面水位上昇量を加算することで，設計供用期間末の天文潮位を設定することができる．

モデル港の1995年から2090年までの平均海面水位の上昇量は，中位シナリオで0.39 [m]，上位シナリオで0.49 [m]とする．また，モデル港の港湾計画図に記載の潮位表によると，朔望平均満潮位は1987年から1991年の観測記録に基づき，1.64 [m]と設定されている．よって，モデル港の基準年は1989年（1987年から1991年の中間）とし，基準年の朔望平均満潮位は1.64 [m]とする．式-3.1，式-3.2を用いて設定したパラメータおよび設計供用期間末の朔望平均満潮位は**表-3.2**のとおりである．なお，次項で詳述するが，ここでは，既往最高潮位を設計高潮位とした場合を想定し，朔望平均満潮位ではない天文潮位を設定するものとする．

表-3.2　モデル港の天文潮位に関するパラメータと設計供用期間末の朔望平均満潮位

	1995年から2090年の海面上昇量 ΔL [m]	1年あたりの海面上昇量 a [m]	基準年 西暦 x 年	基準年の朔望平均満潮位 L_{Hx} [m]	設計供用期間末の年 西暦 y 年	設計供用期間末の朔望平均満潮位 L_{Hy} [m]
上位シナリオ	0.49	0.005	1989	1.64	2073	2.07
中位シナリオ	0.39	0.004	1989	1.64	2073	1.98

※ここで，ΔLは本資料の検討経緯を踏まえた値に設定している．**表-3.1**のとおり**図-3.1**から設定する場合は，例えば領域Ⅰならば上位シナリオで0.55 [m]，中位シナリオで0.38 [m]となる．

(2)潮位偏差

設計供用期間末の潮位偏差を設定する．

モデル港の1995年から2040年までの潮位偏差の将来変化率は中位シナリオで1.05，上位シナリオで1.14とする．また，モデル防波堤の設計にあたって，設計高潮位として既往最高潮位を使用しているものとする．既往最高潮位$L_{\max}$（T.P. +1.70

[m]）は2019年に観測され（例えば，気象庁が公表する過去の災害をもたらした気象事例[7]で$L_{\max}$の値を確認する），そのときの天文潮位の予測値L_a（T.P. +0.76 [m]）とする（例えば，気象庁が公表する潮位表[8]でL_aの値を確認する）．このとき，モデル港の基準年を2019年（既往最高潮位を記録した年）とし，基準年の潮位偏差V_xは式-3.9により求めることができる．

$$V_x = L_{\max} - L_a \tag{式-3.9}$$

式-3.3～3.5を用いて設定したパラメータおよび設計供用期間末の潮位偏差は**表-3.3**のとおりである．

ここで，**表-3.3**で設定したモデル港の潮位偏差を用いて，モデル港の防波堤の設計高潮位を設定する．モデル港における基準年の設計高潮位L_{Dx}はモデル港の現在の既往最高潮位とし，式-3.9の関係を用いて式-3.10のとおりに整理した．設計供用期間末の設計高潮位L_{Dy}は式-3.11から求める．

$$L_{Dx} = L_{\max} = L_a + V_x \tag{式-3.10}$$

$$L_{Dy} = L_a + a(y - x) + V_y \tag{式-3.11}$$

以上より，算出した設計供用期間末の設計高潮位を**表-3.4**に示す．**表-3.4**はD.L.で表記しており，モデル港ではD.L.＝T.P. -0.78 [m]である．

本資料では，現在の設計値として既往最高潮位を用いて設計高潮位を設定している場合を対象とした．一方で，設計高潮位の主要な設定手法として，(A)朔望平均満潮位に既往の最大潮位偏差を加算した潮位を設定する手法，および，(B)朔望平均満潮位にモデル高潮により推算された潮位偏差を加算した潮位を設定する手法がある[9]．現在の設計値として，これら(A)または(B)の手法で設定している場合，いずれにおいても，設計供用期間末の朔望平均満潮位は本節(1)の手法で設定する．設計供用期間末における「既往の最大潮位偏差」は，現在気候での既往の最大潮位偏差が観測された年を基準年として，既往の最大潮位偏差が式-3.3～3.5に従って変化するとして算出する．

表-3.3　モデル港の潮位偏差に関するパラメータと設計供用期間末の潮位偏差

	1995年から2040年の将来変化率 r_V	年変化率 c_V [/年]	基準年 西暦 x 年	基準年の潮位偏差 V_x [m]	1980年の潮位偏差 V_{1980} [m]	設計供用期間末の年 西暦 y 年	設計供用期間末の潮位偏差 V_y [m]
上位シナリオ	1.14	$\frac{0.14}{60}$	2019	0.94	0.86	2073	0.98
中位シナリオ	1.04	$\frac{0.04}{60}$	2019	0.94	0.92	2073	0.95

表-3.4　モデル港の設計高潮位

	設計供用期間末の設計高潮位（D.L.） L_{Dy} [m]
上位シナリオ	2.80
中位シナリオ	2.71

(3)沖波波高

設計供用期間末の沖波波高を設定する．

モデル港の1995年から2040年までの沖波波高の将来変化率は中位シナリオで1.01，上位シナリオで1.05とする．モデル港では近年，設計沖波を再計算しており，再計算の際の擾乱の選定期間は1955年から2019年としていた．50年確率波でSSE方向の設計沖波の波高は13.53 [m]であった．よって，モデル港の基準年を1987年（1955年から2019年の中間）とし，基準

年の50年確率波でSSE方向の沖波波高は13.53 [m]とした．式-3.6～3.8を用いて設定したパラメータおよび設計供用期間末の沖波波高（50年確率波；SSE方向）は**表-3.5**のとおりである．また，同様の方法で全ての波向に対して設計供用期間末の波高を算出した結果が**表-3.6**である．なお，沖波周期は現在気候と波形勾配が同等になるように調整した．

表-3.5　モデル港の沖波波高に関するパラメータと設計供用期間末の沖波波高（50年確率波；SSE方向）

	1995年から2040年の将来変化率 r_H	年変化率 c_H [/年]	基準年 西暦 x 年	基準年の沖波波高 H_x [m]	1980年の沖波波高 H_{1980} [m]	設計供用期間末の年 西暦 y 年	設計供用期間末の沖波波高 H_y [m]
上位シナリオ	1.05	$\frac{0.05}{60}$	1987	13.53	13.45	2073	14.12
中位シナリオ	1.01	$\frac{0.01}{60}$	1987	13.53	13.51	2073	13.65

表-3.6　モデル港の設計供用期間末の沖波波高（50年確率波；全方向）

上位シナリオ

波向	50年確率波		
	波高 [m]	周期 [s]	波形勾配
N	0.79	4.80	0.0221
NNE	0.86	5.01	0.0219
NE	0.98	5.31	0.0223
ENE	1.63	7.05	0.0210
ENE	3.31	9.71	0.0225
ESE	3.88	10.32	0.0234
SE	9.19	13.69	0.0314
SSE	14.12	15.73	0.0366
S	14.12	15.73	0.0366
SSW	14.19	15.73	0.0367
SW	9.89	14.00	0.0323
WSW	2.14	7.97	0.0216
WSW	0.92	5.21	0.0217
WNW	0.52	3.78	0.0234
NW	0.51	3.68	0.0242
NNW	0.65	4.19	0.0236

中位シナリオ

波向	50年確率波		
	波高 [m]	周期 [s]	波形勾配
N	0.77	4.72	0.0221
NNE	0.83	4.92	0.0219
NE	0.95	5.22	0.0223
ENE	1.57	6.93	0.0210
ENE	3.20	9.54	0.0225
ESE	3.75	10.14	0.0234
SE	8.88	13.46	0.0314
SSE	13.65	15.47	0.0366
S	13.65	15.47	0.0366
SSW	13.71	15.47	0.0367
SW	9.55	13.76	0.0323
WSW	2.07	7.83	0.0216
WSW	0.89	5.12	0.0217
WNW	0.50	3.72	0.0234
NW	0.49	3.62	0.0242
NNW	0.63	4.12	0.0236

4. 気候変動適応策を考慮した断面諸元の設定例

本章ではモデル防波堤に対し，気候変動による作用の時間変化を踏まえて施設の要求性能を確保可能な，断面諸元の設定を試行する．以下では，2.2で示した2つの適応策を検討する． 2.3で整理した作用変化のシナリオの仮定①，②のとおり，事前適応策として上位シナリオ断面に関する検討が，順応的適応策として上位シナリオ断面に加えて中位シナリオ断面に関する検討が必要となる．検討に使用する作用や設計供用期間は3.5で整理したものである．

なお，本章における断面の考え方はあくまで一例であり，断面諸元に関する設計上の工夫の余地は多く残されていることに留意が必要である．

4.1　検討対象とする断面の諸元

本資料では，**図-4.1**に示すモデル防波堤のひとつの断面（以下，「モデル断面」という．）を検討対象とした．モデル断面の構造形式は消波ブロック被覆堤である．

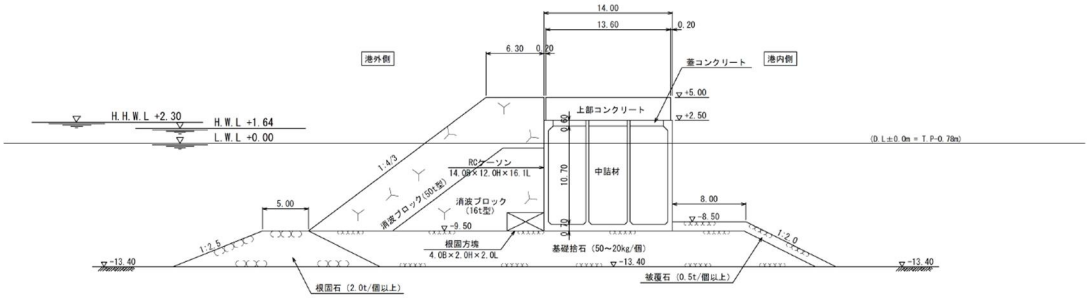

図-4.1　検討対象とするモデル防波堤の断面（モデル断面）

4.2　上位シナリオに対するモデル断面の安定性照査

気候変動による作用の時間変化が生じた場合のモデル断面に対する安定性を把握する目的で，上位シナリオに対する作用を用いて，現行港湾基準による照査手法に基づき全体安定性を照査する．2.3に示したとおり，気候変動適応策を検討する上では，事前適応策および順応的適応策のいずれも上位シナリオ断面の検討を要するため，上位シナリオに対する安定性照査は最低限必要となる．

ここで，照査に使用する作用は3.に示した考え方を用いて設定しており，設計供用期間末は2073年と仮定している．上位シナリオの潮位条件・波浪条件は**表-4.1**のとおりである．

モデル断面の上位シナリオに対する照査結果を**表-4.2**に示す．**表-4.2**(a)および**表-4.2**(c)に示す項目は，**表-4.1**の既往最高潮位（H.H.W.L.）および朔望平均満潮位（H.W.L.）の2つの潮位条件で照査したうえで，より安定性が不足した結果を適用することとした．**表-4.2**(b)に示す天端高は，次節の式-4.1のとおり，朔望平均満潮位を用いて照査した．

表-4.2(a)のとおり，防波堤本体の滑動および支持力に関する作用耐力比が1.0を上回ったことから，モデル断面は上位シナリオに対して設計供用期間末における全体安定性が不足する．また，沖波波高の変化に伴って波浪変形計算で得られる堤前の有義波高$H_{1/3}$も変化するため，**表-4.2**(b)および(c)のとおり，静穏度の確保に必要な防波堤の天端高ならびに，消波ブロックや被覆材の安定性も不足する結果となった．**表-4.2**(b)，(c)に示した必要な諸元の算定手法は次節に詳述する．

表-4.1　上位シナリオにおける潮位条件・波浪条件

シナリオ	将来気候（上位シナリオ）	
潮位	H.H.W.L.	H.W.L.
	D.L.+2.80m	D.L.+2.07m
波向	SSE	SSE
周期 T_0 [s]	15.73	15.73
有義波高 $H_{1/3}$ [m]	9.20	9.00
最高波高 $H_{\max}$ [m]	12.80	12.30
入射波向 β' [°]	0.00	0.00

表-4.2　上位シナリオに対するモデル断面の性能照査の結果

(a)堤体の全体安定性

検討項目		作用耐力比							
		H.H.W.L. +2.801m				H.W.L. +2.073m			
滑動		1.300	>	1.00	NG	1.180	>	1.00	NG
転倒		0.807	≦	1.00	OK	0.720	≦	1.00	OK
基礎地盤の支持力		1.353	>	1.00	NG	1.206	>	1.00	NG
円弧すべり	港内側	--			-	0.662	≦	1.00	OK
	港外側	--			-	0.399	≦	1.00	OK

(b)堤体の天端高

照査項目	現況断面の諸元	必要な諸元	判定
堤体の天端高	D.L. +5.00 [m]	D.L. +7.50 [m]	NG

(c)消波ブロックおよび被覆材の安定性

照査項目	現況断面の諸元	必要な諸元	判定
消波ブロックの質量	46.00 [t] （カタログ記載の実質量）	62.62 [t] （計算結果）	NG
被覆材の質量	被覆石　2.0 [t] （モデル断面の設計計算書より）	被覆石　68.5 [t] （計算結果）	NG
		被覆ブロック　13.87 [t] （計算結果）	

なお，1.で述べたとおり，本資料では全体安定性に関する照査結果のみを示しているが，実際には部材照査等が必要となる．また，モデル断面は比較的堅牢な砂地盤の上に防波堤が建設されていると仮定し，円弧滑りに関する照査等については，本資料では省略している．また，モデル断面に関する各種安定性に関する作用耐力比は，1.0を大幅に超過するものが存在するが，超過理由の全てが気候変動に起因するものではなく，設計時点から現在までに，設計沖波等の設計条件が大きく変わっていることに起因するものもある．これについては4.6で再度触れる．

4.3　上位シナリオ断面の検討

4.2の性能照査結果を踏まえて，上位シナリオ断面の諸元を検討する．当該断面は事前適応策に対応する断面である．また，順応的適応策を適用した場合でも，作用の時間変化の状況から，当該断面として整備する可能性があることを想定する必要がある．

性能照査結果から，**表-4.3**のとおり対策が必要な項目を整理し，上位シナリオに対して各項目の安定性能を確保するようにモデル断面の対策内容(a)～(f)を検討した．**図-4.2**には，対策内容(a)～(f)を反映して設定した上位シナリオ断面を示す．当該断面の検討はあくまで一例であり，実際には各現場の設計条件に照らして，適切な断面諸元の検討を行う必要がある．また，検討の結果得られた上位シナリオ断面および4.4で論じる中位シナリオ断面に対して，設計供用期間の全ての時点において要求性能が確保できていることを確認するため，現在気候での照査も必要である．なお，**図-4.2**の上位シナリオ断面については，現在気候での照査を行い，全体安定性が確保されていることを確認した．

表-4.3　上位シナリオに対応するためのモデル断面の対策内容

対策が必要な項目	対策内容
天端高	(a) 上部工の嵩上げ
消波ブロックおよび被覆材の安定性	(b) 消波ブロックの規格の変更（質量増加） (c) 被覆材の材料の変更（質量増加のため石からブロックへ変更） (d) 基礎マウンドの拡幅（被覆材を設置する幅の確保）
堤体の滑動および支持力安定性	(e) 腹付工の設置 (f) 上部工の拡幅（腹付工を無視した直立壁の滑動安定性の確保）

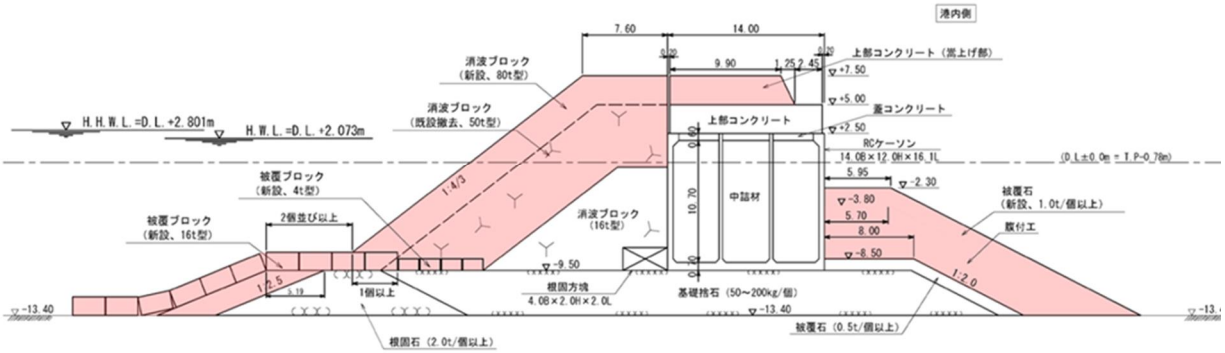

図-4.2　モデル断面における上位シナリオ断面
（着色箇所：現況断面に対して必要な対策工の範囲）

以下に，**表-4.3**で示した対策内容(a)～(f)の内容を詳述する．

対策内容(a)　上部工の嵩上げ

港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）[10]（以降，「基準・同解説」という．）に基づいて，上位シナリオに対して，静穏度の確保に必要となる防波堤の天端高を式-4.1から求めた．朔望平均満潮位（H.W.L.）の上昇と，防波堤の安定性の検討で用いる堤前の有義波高$H_{1/3}$の変化に伴い，必要天端高H_tはD.L.+7.50 [m]となり，現況天端高から2.50 [m]の嵩上げが必要となった．このため，上部工に**図-4.2**のような嵩上げ（パラペット）を設けることとした．

$$H_t = \mathrm{H.W.L.} + 0.6 \times H_{1/3} \tag{式-4.1}$$

対策内容(b) 消波ブロックの規格の変更

表-4.1のとおり堤前の有義波高が変化するため，既設の50t型消波ブロックの質量ではその安定性が不足する．モデル断面では既設消波ブロックと同じ製品を使用することとし，上位シナリオに対応する必要なブロック質量を式-4.2（ハドソン式）[11]，式-4.3（高橋らによる式）[11]より算出したところ，80t型消波ブロックが必要という結果になった．

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_S{}^3 \left(S_r - 1\right)^3} \tag{式-4.2}$$

$$N_S = C_H \left\{ a \left(N_0 / N^{0.5} \right)^{0.2} + b \right\} \tag{式-4.3}$$

ここに，Mは捨石またはコンクリートブロックの所要質量[t]，ρ_rは捨石またはコンクリートブロックの密度[t/m^3]，Hは安定計算に用いる波高[m]，N_sは安定数（主として被覆材の形状，勾配，被害率等によって決まる），S_rは捨石またはコンクリートブロックの水に対する比重，N_0は被災度（被害の程度を表す被害率の一種．防波堤法線方向の幅D_nの範囲に

おける移動したブロックの個数），D_nはブロックの代表径（$D_n = (M/\rho_r)^{1/3}$），C_Hは砕波の効果を表す係数（$C_H = 1.4/(H_{1/20}/H_{1/3})$，非砕波領域では1.0），$a, b$はブロックの形状や斜面勾配などによる係数である．

消波ブロックの規格の変更にあたっては，既設ブロックを全て置き換えるのではなく，表層部の既設ブロックを新設ブロック2層厚が確保できる程度に撤去し，新設ブロックに置き換えることとした．これは，基準・同解説[12]の「消波工の天端幅は十分な消波効果を得るためには，消波ブロック2個並び以上とすべきである」旨を参考としたものである．この際のブロックの積み上げ角度は既存の消波工の勾配と同じになるように設定した．

なお，今回は，防波堤直立部の天端高に対して，2個積み重ねた新設ブロックの高さが収まるように，既設ブロックを撤去することを想定したため，直立部と消波工の天端高は等しくなっている．実際の設計では，消波工の天端高が直立部の天端高に比べて低すぎると，直立部に衝撃砕波力が作用するおそれがあり，逆に直立部の天端高より高すぎると，天端のブロックが不安定になるため，直立部天端高の設定や施工時には注意が必要である．

また，消波ブロックの下には，過去の設計事例を参考に，基準・同解説[13]にある被覆材下の捨石等の質量の設定手法を準用して，消波ブロックの1/20以上の質量の被覆ブロックを設置した．

対策内容(c) 被覆材の材料の変更

港外側の基礎マウンドについて，対策内容(b)と同様に，既設の被覆石2.0 [t/個]の規格では質量不足であり，石材では対応できない質量が必要であることが判明した．このため，被覆ブロックを設置することとし，上位シナリオに対して必要質量を算定したところ，20t型の被覆ブロックが必要という結果となった．

なお，被覆材の必要質量の算出には式-4.2を用いた．式-4.2における安定数N_Sは，被覆石については式-4.4～式-4.7（拡張された谷本式）[11]を用い，被覆ブロックについてはブロックメーカーのカタログで示されている値を用いた．

$$N_S = \max\left\{1.8, 1.3\frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}}\frac{h'}{H_{1/3}} + 1.8\exp\left[-1.5\frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}}\frac{h'}{H_{1/3}}\right]\right\} \quad : B_M / L' < 0.25 \tag{式-4.4}$$

$$\kappa = \kappa_1 (\kappa_2)_B \tag{式-4.5}$$

$$\kappa_1 = \frac{4\pi h'/L'}{\sinh(4\pi h'/L')} \tag{式-4.6}$$

$$(\kappa_2)_B = \max\left\{\alpha_S \sin^2\beta\cos^2(2\pi l\cos\beta/L'), \cos^2\beta\sin^2(2\pi l\cos\beta/L')\right\} \tag{式-4.7}$$

ここに，h'は基礎捨石マウンド（被覆層を除く）の天端の水深[m]，λは直入射の場合は前肩幅B_M [m]で斜め入射の場合はB_M [m]またはB'_M [m]のうち$(\kappa_2)_B$が大きな方の値，L'は水深h'での設計有義波周期に対する波長[m]，α_Sは対象地点が水平な場合の補正係数（=0.45），bは波の入射角（法線直角方向となす角，15°の波向き補正は行わない），$H_{1/3}$は設計有義波高[m]である．

今回，必要な被覆材は既設の被覆石2.0 [t/個]と比べて質量が大幅に増大しているが，これは既往の設計において，現行の基準・同解説には無い「ブレブナー・ドネリーの図表[14]」を用いて「根固石」として所要質量の算定を行ったことが要因と考えられる．既往の設計では，安定数N_Sを求める際は式-4.4～式-4.7ではなく**図-4.3**を用いた．各種パラメータを**表-4.4**のように設定し，式-4.2から所要質量を算定したうえで，既往の施工で使用された2.0 [t]の石を被覆石として用いていた．

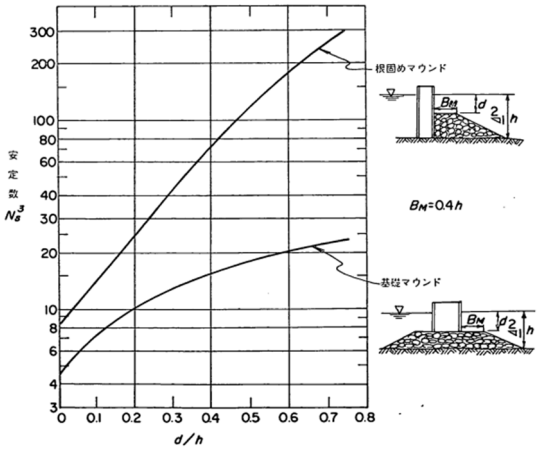

図-4.3　ブレブナー・ドネリーの図表[14)]

表-4.4　既往の設計で被覆石の所要質量の計算に用いたパラメータ

ρ_r [tf/m^2]	H [m]	$N_S{}^3$	S_r	M [tf]
2.5	7.5	270	2.43	1.344

対策内容(d)　基礎マウンドの拡幅

消波ブロックの置き換えに伴って，基礎マウンドの拡幅が必要となる．これは，波浪による基礎地盤の洗掘，吸出しによる消波工の沈下を防ぐためのものであり，堤体の安定性確保を目的としていない．基礎マウンドの拡幅の幅は，基礎マウンドの法先に設置する被覆材（今回は対策内容(c)により20t型被覆ブロックを使用）の設置数から決めた．具体的には，過去の設計事例を参考に，消波ブロックに覆われていない箇所で被覆ブロックを2個並び以上，消波ブロックに覆われている箇所で被覆ブロックを1個以上設置できる幅を確保した．

対策内容(e)　腹付工の設置

作用の変化による前面波高の増大および港外側の天端高の変更（対策内容(a)）に伴い，堤体に作用する波力が増大し，堤体の滑動および支持力安定性が不足する．両破壊モードの安定性を確保するため，港内側に腹付工を設置することとした．腹付工の高さおよび幅は，基準・同解説[15)]（**図-4.4**）を参考として，それぞれ防波堤の直立部（上部工を含む）の高さの1/3以上として設定した．腹付工の勾配は既存の基礎マウンドの勾配と同じになるように設定した．この際，腹付工による底面反力の低減を見込んでおり，上述の考え方で設定した諸元の腹付工で，底面反力が十分に低減されることを確認した．

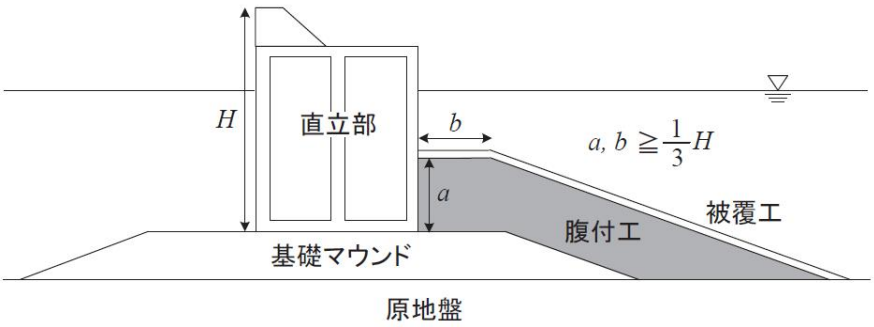

図-4.4　港内側を割石で補強した防波堤[15)]

対策内容(f)　上部工の拡幅

基準・同解説[15)]を踏まえ，堤体背後の腹付工を無視した直立部の波力に対する滑動の安定性照査において，部分係数を1.0とした場合の作用耐力比が1.0を下回るように，堤体の必要質量を確保する観点から上部工の幅を調整した．上部工の港内側の勾配は一般的な1:0.5で設定した．

4.4　順応的適応策における中位シナリオ断面の検討

次に，順応的適応策において設計供用期間の初期段階で整備する，中位シナリオ断面の諸元を検討する．検討の流れは以下のとおりである．まず，中位シナリオに対して最小限の対策で要求性能を確保可能な断面（以下，「中位シナリオに対する最小断面」という．）を検討する．この際，2.2で述べたとおり，追加施工によって上位シナリオ断面に移行可能な断面を検討する必要がある．次に，作用が上位シナリオに上振れした場合を想定し，中位シナリオに対する最小断面から上位シナリオ断面に対応させるための検討を行い，このうち，施工難易度などの観点から，上位シナリオに対応する断面（つまり，事前適応策で整備する断面）にしたほうがよい部材・工種を選定する．最後に，これらの検討を踏まえた中位シナリオ断面案を設定する．

(1)　中位シナリオに対する最小断面の検討

4.2で実施した上位シナリオに対するモデル断面の安定性照査と同じ手法で，中位シナリオに対する安定性照査を実施する．上位シナリオの潮位条件・波浪条件は**表-4.5**のとおりである．中位シナリオに対する照査結果は**表-4.6**のとおりで，**表-4.2**に示した上位シナリオに対する照査結果と同じ項目で安定性が不足した．よって，上位シナリオ断面と同様の考え方で，**表-4.3**に示した対策内容を用いて中位シナリオに対する最小断面を設定した．**図-4.5**に設定した中位シナリオに対する最小断面を示す．

表-4.5　中位シナリオにおける潮位条件・波浪条件※ページ下部に注あり

シナリオ	将来気候（中位シナリオ）	
潮位	H.H.W.L.	H.W.L.
	D.L.+2.632m	D.L.+1.903m
波向	SSE	SSE
周期 T_0 [s]	15.47	15.47
有義波高 $H_{1/3}$ [m]	9.00	8.80
最高波高 H_{max} [m]	12.60	12.20
入射波向 β' [°]	0.00	0.00

※　中位シナリオ断面の検討に用いる将来気候（中位シナリオ）のH.W.L.は，本資料の考え方に則せば，本来は3.5(1)において求めたとおり，中位シナリオにおける設計供用期間末（モデル断面では2073年）の値（D.L.+1.98 [m]）を使うべきである．しかし，4.4に示す中位シナリオ断面の検討では，供用から30年後（モデル断面では2053年）までの海面上昇量を考慮したH.W.L.の値(D.L.+1.903 [m])を用いている．同様に，中位シナリオ断面の検討に用いる将来気候（中位シナリオ）のH.H.W.L.は，本資料の考え方に則せば，3.5(2)において求めた中位シナリオにおける設計供用期間末（モデル断面では2073年）の値（D.L.+2.71 [m]）を使うべきところ，4.4では供用から30年後（モデル断面では2053年）までの海面上昇量を考慮したH.H.W.L.の値(D.L.+2.632 [m])を用いている．この理由は，本資料執筆中に中位シナリオ断面の検討に用いる将来気候の時期の考え方を変更したものの，時間的制約により中位シナリオ断面の再作成を実施できなかったためである．なお，沖波波高および潮位偏差については，2040年以降は変化しない想定であることから，将来気候（中位シナリオ）の時点を2053年から2073年に変更しても影響は生じなかった．

順応的適応策を適用した施設は，中位シナリオ断面での供用後，追加施工がなければ設計供用期間末まで中位シナリオ断面で供用することとなる．したがって，繰り返しになるが，中位シナリオ断面は将来気候（中位シナリオ）における設計供用期間末の作用を用いて検討する必要がある．

表-4.6　中位シナリオに対するモデル断面の性能照査の結果

(a) 堤体の全体安定性

検討項目		作用耐力比							
		H.H.W.L. +2.632m				H.W.L. +1.903m			
滑動		1.249	>	1.00	NG	1.146	>	1.00	NG
転倒		0.771	≦	1.00	OK	0.695	≦	1.00	OK
基礎地盤の支持力		1.286	>	1.00	NG	1.167	>	1.00	NG
円弧すべり	港内側	--			-	0.703	≦	1.00	OK
	港外側	--			-	0.412	≦	1.00	OK

(b) 堤体の天端高

照査項目	現況断面の諸元	必要な諸元	判定
堤体の天端高	D.L. +5.00 [m]	D.L. +7.20 [m]	NG

(c) 消波ブロックおよび被覆材の安定性

照査項目	現況断面の諸元	必要な諸元	判定
消波ブロックの質量	46.00 [t] （カタログ記載の実質量）	59.43 [t] （計算結果）	NG
被覆材の質量	被覆石　2.0 [t] （モデル断面の設計計算書より）	被覆石　63.9 [t] （計算結果）	NG
		被覆ブロック　13.08 [t] （計算結果）	

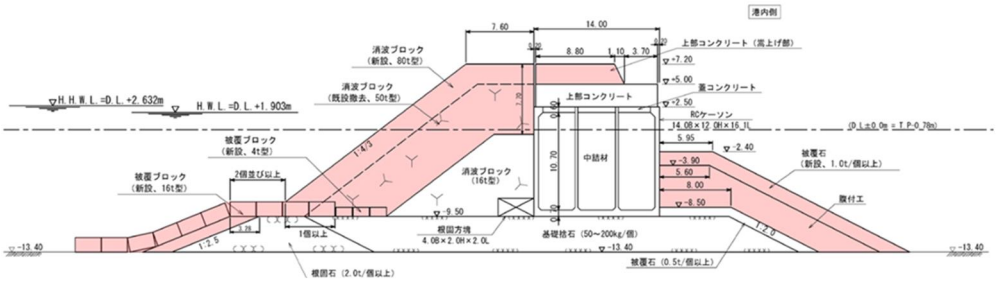

図-4.5　モデル断面における中位シナリオに対する最小断面

（着色箇所：現況断面に対して必要な対策工の範囲）

(2)　作用が上位シナリオに上振れする場合を想定した断面の検討

順応的適応策では，設計供用期間の初期段階においては中位シナリオ断面で整備し，施設の供用期間中に作用が上振れたと判断した場合は，上位シナリオ断面になるように追加施工を行うこととなる．よって，設計供用期間の初期段階で整備する中位シナリオ断面は，中位シナリオに対する最小断面を基本としつつ，追加の整備の施工性や効率性を考慮して，

一部の部材や工種等は初期段階から上位シナリオ相当の性能を確保する必要がある．

モデル断面を用いて具体的に説明する．作用が上位シナリオに上振れした場合を想定し，4.4(1)で検討した中位シナリオに対する必要諸元を，上位シナリオ断面に対応させるための検討を行う．すなわち，**図-4.5**の断面から**図-4.3**とするように追加施工する場合を考慮する．追加施工が必要となる項目は**表-4.7**のとおりであり，ここではそれぞれの項目に関する追加施工等の視点から検討を行う．

まず，上部工の嵩上げ（対策内容(g)）に関しては，中位シナリオに対する必要諸元から上位シナリオ断面への対応として，30 [cm]の嵩上げが必要となるという試算結果が得られた．しかし，標準的なコンクリートの最小打設厚さは一般的に50 [cm]程度であり，追加施工による対応は現実的ではない．このことから，上部工の嵩上げ高については，設計供用期間の初期段階で上位シナリオに対応する諸元とすることが合理的であると考えられる．

消波工（対策内容(h)）の天端高は，上述の嵩上げの対応に伴って必要となる対応である他，腹付工の断面諸元（対策内容(j)）については，現行基準の腹付工の設置における留意点に関する記載内容に従った場合に必要となる対応である．また，基礎マウンドの拡幅（対策内容(i)）は，堤体等の安定性確保の目的ではなく，消波工の天端高を30 [cm]上げた際に消波ブロック法尻部が変化することを踏まえ，被覆ブロックをマウンド部に2個以上設置するために必要となるものである．しかし，対策内容(h)（消波工の嵩上げ30 [cm]）を消波ブロックの追加施工で事後的に対応することは困難であるほか，対策内容(i)，(j)はいずれも水中施工を伴い，複数回の施工は非効率的であると考えられる．

したがって，モデル断面に対する順応的適応策に関する検討においては，対策内容（g)，(h)，(i)，(j)は，設計供用期間の初期段階で，上位シナリオに対する断面諸元として予め整備することが適切であると考えた．

一方で，上部工の拡幅（対策内容(k)）については，上位シナリオに対するケーソンの直立壁単体での滑動安定性に関する作用耐力比が1.0以下とするための対応である．この施工は比較的容易であると考えられるため，実際に中位シナリオから上振れたと判断した後に追加施工が可能と判断した．したがって，当該項目については，中位シナリオに対応する断面諸元として設定することとした．ここまで述べた，中位シナリオ断面から上位シナリオ断面に移行する際の，各対策内容(g)～(k)に関する対応の考え方を**図-4.6**に整理する．

表-4.7　中位シナリオに対する最小断面への追加施工

対策が必要な項目	改良内容	
天端高	(g) 上部工の嵩上げ0.3 [m]	
	(h) 消波工の嵩上げ0.3 [m]	※上部工の嵩上げに伴って必要
	(i) 基礎マウンドの拡幅	※消波工の嵩上げに伴って必要
	(j) 腹付工の嵩上げ0.1 [m]・拡幅0.1 [m]	※上部工の嵩上げに伴って必要
堤体の滑動および支持力安定性	(k) 上部工の拡幅（腹付工を無視した直立壁の滑動安定性の確保）	

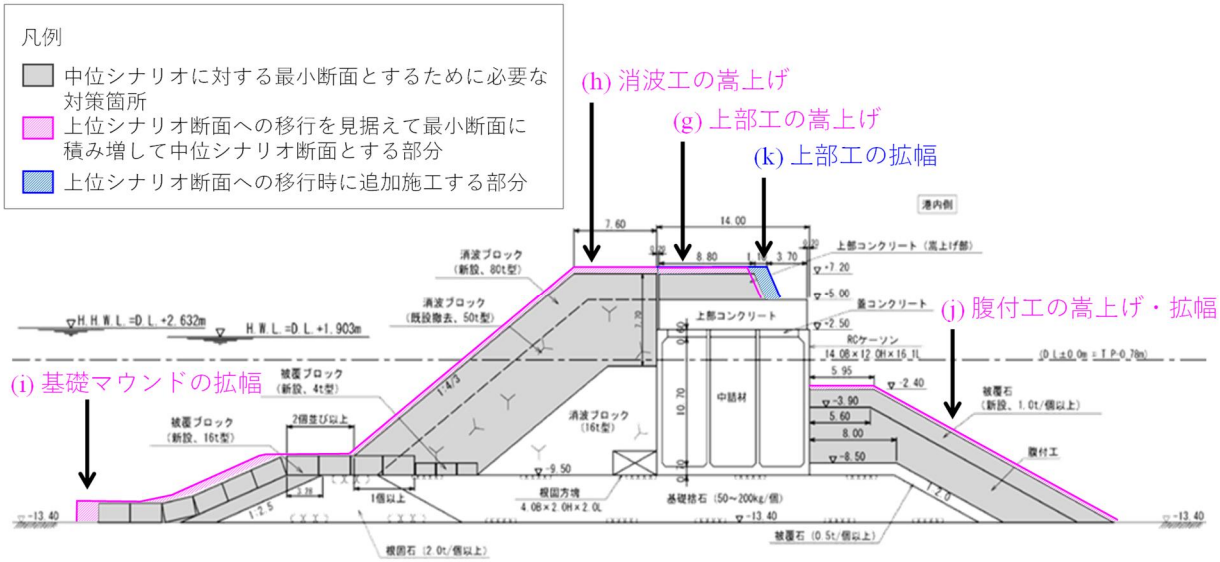

図-4.6　中位シナリオ断面から上位シナリオ断面への移行に必要な改良内容(g)～(k)の対応の考え方

(3)　中位シナリオ断面案の検討

4.4(1)，(2)の検討内容を踏まえ，順応的適応策を適用した際の設計供用期間の初期段階で整備する，モデル断面に対する中位シナリオ断面案は**図-4.7**のようになる．この断面は，施設供用開始直後において，設計供用期間中における中位シナリオに対する要求性能を確保できる断面である（全体安定性の観点のみ）．あわせて，当該断面について，現在気候での照査を行い，全体安定性が確保されていることを確認している．当該断面の決定においては，(2)で検討したように，中位シナリオに対する必要断面諸元を検討した上で，作用のシナリオが上振れた際に，上位シナリオに対応可能な追加施工の実現性を踏まえる必要がある．

なお，順応的適応策の検討にあたっては，中位シナリオ断面から上位シナリオ断面に移行する際に，部材や工種によっては，追加施工を実施すること自体が合理的ではない可能性があることを考慮する必要がある．そのような場合は，設計供用期間の初期段階で，断面諸元を上位シナリオ断面に対応させる（つまり，事前適応策で整備する断面諸元と同等とする）といった工夫も必要となる．

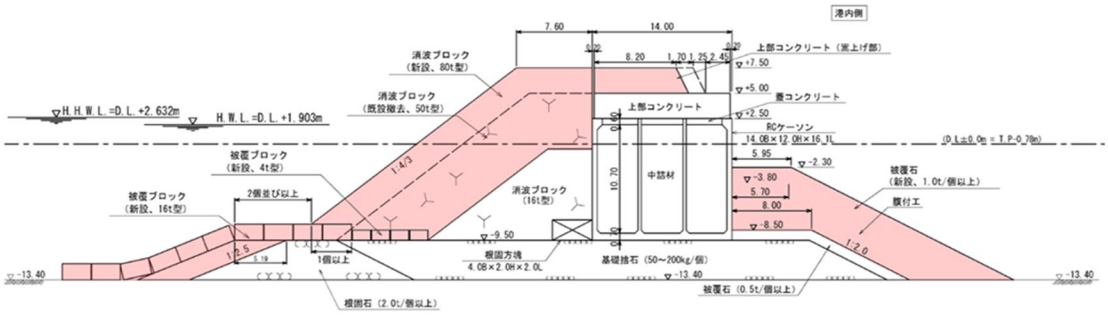

図-4.7　モデル断面における中位シナリオ断面
（着色箇所：現況断面に対して必要な対策工の範囲）

4.5　事前適応策と順応的適応策の比較

本資料では，モデル防波堤を対象として，設計供用期間の初期段階で上位シナリオに対する要求性能を確保可能な断面整備の手法を事前適応策として，また，設計供用期間の初期段階では中位シナリオに対応する要求性能を確保可能な断面

を整備し，当該期間中の作用変化を踏まえつつ，必要に応じて上位シナリオ断面とする断面整備の手法を順応的適応策として，それぞれの断面諸元の設定例を示した．実際の設計ではいずれかの適応策を選定する必要がある．

両者を比較するにあたり，本資料の執筆時点で相対的な優位性を示す定量的な指標はないものの，ひとつの参考として，モデル断面における設計供用期間末までの直接工事費を算定した．各適応策における直接工事費の算定結果は**表-4.8** のようになり，直接工事費の工種ごとの内訳を各適応策の総額に対する割合は**表-4.9** のとおりとなった．

表-4.8 について，設計供用期間の初期段階で必要となる直接工事費は，順応的適応策が安くなる．これは，順応的適応策では，設計供用期間の作用を中位シナリオで想定しているため，初期段階において上位シナリオで想定した事前適応策と比べ，断面の規模が小さくなるからである．さらに，順応的適応策において，設計供用期間中に，作用の時間変化が設計時点で想定したシナリオから上振れしなければ，上位シナリオ断面に対応するための追加施工が不要であるため，設計供用期間末までに必要となる直接工事費も安くなる．一方で，作用の時間変化が中位シナリオよりも上振れしていると判断した場合は，中位シナリオ断面に対して追加施工が必要となることから，結果的に事前適応策のほうが設計供用期間末までに必要となる直接工事費の合計額が安くなる可能性がある．なお，直接工事費を算定するにあたり，順応的適応策における追加施工の時期を設計段階で想定することが難しいと考えられることから，物価変動や金利の影響は一切考慮していない．

モデル断面においては，費用の観点から評価した両適応策は一長一短であり，適応策を選択する際は，対象施設の周辺状況等を踏まえて総合的に判断せざるを得ない．施工の容易性や，宮島ら（2023）[16]で触れられているような，作用増大に対する施設の脆弱性に関する感度分析等による判断も可能と考えられるものの，適応策の選択における具体的な判断基準は，今後に向けた検討課題である．

表-4.8　適応策ごとのモデル断面の直接工事費の概算（施設延長1 [m]あたり）

適応策	設計供用期間の初期段階 [千円/m]	追加施工 [千円/m]	合計 [千円/m]
順応的適応策	8,008	223	8,231
事前適応策	8,145		8,145

表-4.9　概算した直接工事費の工種ごとの内訳（各適応策の総額に対する割合）

		事前適応策	順応的適応策	
合計		100%	100%	
施工時期		設計供用期間の初期	設計供用期間の初期	追加施工
内訳	撤去工（消波ブロック）	7%	7%	
	基礎工	22%	22%	
	上部工	12%	10%	3%
	被覆工	17%	16%	
	消波工	43%	42%	

4.6　モデル断面に対する断面変化の要因

モデル断面を対象とした気候変動適応策に関する検討例は **4.1～4.5** のとおりである．現況断面であるモデル断面に対して，気候変動による作用の時間変化を考慮した，設計供用期間中の要求性能を確保可能な断面としての中位シナリオ断面および上位シナリオ断面は，いずれも大規模な改良となる結果となった．以下では，この要因について言及する．

一例として，**表-4.10** に，本資料で検討した設計条件としての沖波波高等を整理して示す．この例では，モデル断面の

設計時点の沖波波高に対し，気候変動による影響を踏まえた中位シナリオや上位シナリオを用いた沖波波高は，大きく変化しているように見える．しかし，実際には現在気候（気候変動による作用の時間変化を考慮していないが，最新の設計条件）と元々のモデル断面の設計条件としての沖波波高（50 年確率波）が大きく異なっていることがわかる．これは，各海域または港湾毎で沖波波高が一定の期間で見直されるためであり，気候変動の影響を考慮しない状態でも，設計条件の見直しによって，その条件が大きく変化する場合があることに注意が必要である．

仮に，モデル断面を現在気候による作用に対する要求性能を満足するように設定した断面（これを「現在気候断面」とする．）を**図-4.8** のとおり作成した．**図-4.8** と**図-4.2**（上位シナリオ断面），**図-4.5**（中位シナリオ断面）を比較すると，例えば現在気候断面での消波ブロックの規格は，中位シナリオや上位シナリオ断面よりは小さい規格となるものの，64t 型ブロックが必要となる試算となり，やはり大規模な改良が必要という試算結果となった．このように，大規模改良の要因が，気候変動に伴う作用変化のみに限定されるわけではない．その要因については個々の施設の設計条件によって大きく異なることから，特に既存施設の場合は元々の設計条件に対し，現在気候による作用と将来気候による作用の変化を整理した上で，気候変動適応策に関して検討することが重要であると考えられる．

表-4.10　断面諸元を設定する際に適用した作用の比較

本資料で検討している断面		現況断面	現在気候に対して要求性能を確保した断面	順応的適応策の初期段階の断面	事前適応策の断面（順応的適応策の追加施工後の断面）
作用		既往の設計時の値	最新の値（設計沖波更新後）	中位シナリオ	上位シナリオ
設計値の例	SSE方向の沖波波高 [m]	11.05	13.53	13.65	14.12
	堤前の有義波高 $H_{1/3}$ [m]（潮位H.H.W.L.）	8.10	8.90	9.00	9.20

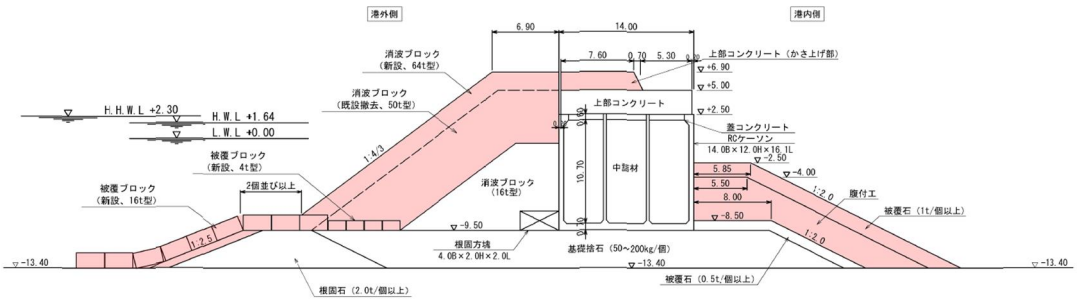

図-4.8　モデル断面における現在気候に適応する断面諸元

5. まとめ

本資料では，気候変動の影響を勘案した港湾の施設の設計にあたって参照できる例となることを目的として，気候変動適応策を考慮した設計手法を検討し，モデル防波堤に対して気候変動適応策を踏まえた断面諸元の設定を試行した．本資料の結論は以下のとおりである．

- 気候変動による作用の時間変化を踏まえた要求性能の確保の考え方として，気候変動に対する事前適応策では設計供用期間の初期段階から2℃上昇シナリオの上位シナリオを想定することとし，順応的適応策では設計供用期間の初期段

階では2℃上昇シナリオの中位シナリオへの対応としたうえで，作用の上振れに伴って上位シナリオに対応することを想定することとした．

- 気候変動に伴う時間変化を考慮した作用（天文潮位，沖波波高，潮位偏差）の設定手法を提案した．
- モデル港の防波堤の断面を用いて，気候変動に対する事前適応策および順応的適応策を適用した場合の断面諸元の設定を試行した．
- 順応的適応策を適用した断面諸元の設定では，作用が上振れした場合に追加施工が必要な対策内容を整理した．対策内容ごとに施工の効率性等を考慮し，一部の対策内容については設計供用期間の初期段階から上位シナリオへ対応させる判断も必要であることを示した．
- モデル断面において，2 つの適応策を適用した場合を比較するにあたり，ひとつの参考として，設計供用期間末までの直接工事費を算定した．費用の観点から評価した両適応策は一長一短であり，適応策の選択では対象施設の周辺状況等を踏まえて総合的に判断する必要がある．

さらに，気候変動の影響を考慮した設計では検討が必要と考えられるが本資料では検討していない事項のうち，主要なものを挙げる．

- 部材照査の実施

本資料では消波ブロック被覆堤について全体安定性の照査のみ行ったが，実際の設計・性能照査ではケーソンの配筋照査も必要である．気候変動の影響を考慮した作用を用いれば，ケーソンの底版や側壁において終局限界および使用限界に達する箇所が発生すると予想される．気候変動の影響を勘案した配筋照査の試行とその照査結果を踏まえた安定性の確保手法の検討については，別報で整理する予定である．

- 維持管理の観点

本資料では，気候変動の影響によって作用が時間的に変化することは考慮したが，施設の耐力が時間的に低下することは考慮できていない．しかし，本来の施設の要求性能を発揮するためには，作用が時間的に増大するなかで耐力が時間的に低下することを考慮した，継続的な施設の維持管理が必要となる．そのためには，施設の耐力の時間的変化の予測を可能とすることや，施設の維持管理の一環として作用の時間的変化も把握する仕組みを構築することが必要である．

- 作用変化の予測の見直し時期

今回の検討では他機関による気候変動の予測[1), 2)]を活用しているが，これらの予測は一定程度の期間で見直される．気候変動の影響を勘案して設計した港湾の施設について，他機関による気候変動予測が見直される度に施設の照査を実施するのか，順応的適応策の追加施工を実施する基準として見直された予測を用いるのか，等の論点を整理することが必要である．

今後，全国の港湾のあらゆる施設に対して気候変動の影響を考慮した設計が開始すると，本資料で実施した内容以外の検討課題が次々と明らかになるとおもわれる．上述した3つの観点や実例から明らかとなる課題については，本資料に続き，より具体的に検討していきたい．

（2024年2月14日受付）

謝辞

3. を検討するにあたり，国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所の平山克也氏および髙川智博氏にご意見を頂きました．ここに記して御礼申し上げます．

参考文献

1) 文部科学省, 気象庁（2020）: 日本の気候変動2020, https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/2020/pdf/cc2020_honpen.pdf（参照2024年1月25日）.

2) 港湾における気候変動適応策の実装に向けた技術検討委員会（2023）: 港湾における気候変動適応策の実装方針（素案）, https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001634406.pdf（参照2024年1月5日）.
3) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 14p.
4) 環境省（2019）: 変化する気候下での海洋・氷雪圏に関するIPCC特別報告書, https://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html（参照2024年1月5日）.
5) 森壮太郎, 森信人, 志村智也, 宮下卓也（2021）: 気候変動による日本主要湾における可能最大クラス高潮の長期変化, 土木学会論文集B2（海岸工学）, Vol.77, No.2, I_937-I_942.
6) 本多和彦・成田裕也・岡本侃大・百海郁弥・平山克也・髙川智博・森信人（2024）：３大湾内の港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価,国土技術政策総合研究所資料, No.1266,132p.
7) 気象庁: 災害をもたらした気象事例, https://www.data.jma.go.jp/stats/data/bosai/report/index_1989.html（参照2023年12月7日）.
8) 気象庁: 潮汐・海面水位のデータ 潮位表, https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/index.php （参照2023年12月7日）.
9) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 118p.
10) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 917-918pp.
11) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 238-248pp.
12) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 950p.
13) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 924p.
14) 谷本勝利・柳生忠彦・村永努・柴田鋼三・合田良実（1982）：不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.21, No.3, 35p.
15) 公益社団法人日本港湾協会（2018）: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年）, 933-934pp.
16) 宮島正悟・竹信正寛・三上康光・宮田正史（2023）: 気候変動に伴う作用条件の変化に対する既存防波堤の応答曲面法を用いた改良設計手法, 土木学会論文集特集号（海洋開発）, Vol.79, No.18.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1281 March 2024

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料　No.1281

気候変動適応策を踏まえた防波堤の設計手法に関する検討

March 2024