

中部管内初！ 考慮した四日市港 構造検討について

西崎 菜月美

中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課

(〒457-0833 愛知県名古屋市中区東又兵衛町1丁目57-3).

四日市港直轄海岸保全施設整備事業は、地震に伴う津波などの自然災害から、地域住民の生命・財産を防護するとともに企業活動の維持を目的として令和6年度に事業採択された。施設の整備水準として、L2地震に対する耐震性を確保するとともに、必要な嵩上げを行う。その際、気候変動による気温2℃上昇シナリオを前提条件とし、平均海面水位の上昇、潮位偏差の増加、波高の増加を外力として考慮した。気候変動を考慮した海象条件は海岸管理者（三重県）が海岸保全基本計画の見直しにおいて策定したシナリオを採用したが、設計供用期間中に上振れするリスクにも留意した設計の考え方について紹介する。

キーワード 気候変動，四日市港海岸，護岸設計

1. はじめに

はじめに、本論文の題名にある四日市港海岸について説明する。四日市港海岸における既設護岸は、昭和34年の伊勢湾台風による被災後、昭和41年までに整備された。そのため、築造から古いもので約60年が経過し、老朽化が顕著であり、かつ液状化の概念が導入される以前の古い設計となっている。また、四日市市は「南海トラフ地震防災対策推進地域」及び「南海トラフ地震津波避難対策特別強化区域」に指定され、南海トラフ巨大地震が発生した場合、最大震度6強の揺れが想定されている。さらには、背後には石油コンビナートや半導体関連企業が多数立地するとともに、住宅地が密集しており、浸水被害軽減のため、護岸の耐久性を早急に確保するための耐高潮、耐津波及び耐震対策といった護岸の抜本的な改良が必要となる。

そのため、四日市港海岸保全施設は、地震に伴う津波などの自然災害時から、地域住民の生命・財産を防護するとともに企業活動の維持を目的として令和6年度より四日市港海岸石原地区・塩浜地区の直轄海岸保全施設の事業が採択された。

また、近年、気候変動により、地球全体で温暖化が進行している。この影響により、設定する外力は図-1.1 に示す通り、平均海面水位、潮位偏差、波高が2040年頃まで増加し、2040年頃からは、平均海面水位のみ増加する。

この影響を考慮するため、公益社団法人日本港湾協会は、令和6年4月に「港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾」（以下、港湾基準）を気候変動を考慮した港湾の施設の建設・改良・維持を行えるよう改訂した。

この改定に伴い、令和6年度に採択された四日市港海岸について気候変動も考慮し設計を行うこととなった。

本論文では、港湾において中部管内初となる気候変動を考慮した設計として、令和6年度に行った四日市港海岸護岸の石原地区V工区の設計を紹介する。

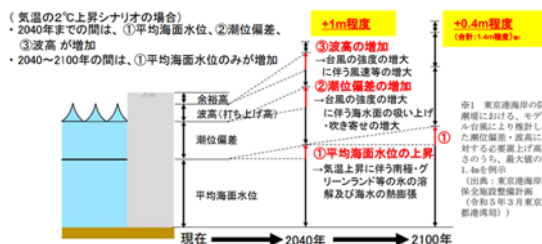


図-1.1 気候変動による外力変化のイメージ

2. 設計対象の施設について

(1) 四日市港海岸の背後圏について

四日市港海岸石原・塩浜地区の背後には、昭和30年代に形成された石油化学コンビナートが立地し、輸入原油

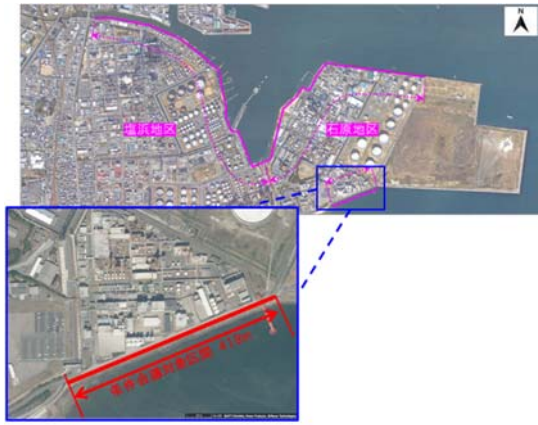


図-2.1 石原地区V工区

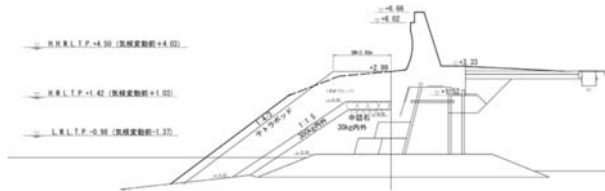


図-2.2 対象施設断面

を精製し、石油製品を製造する能力（原油処理能力）が伊勢湾内において5割を占めるなど、中部圏のエネルギー供給基地として重要な役割を担っている。また、国道1号、23号、JR関西本線、近鉄名古屋線など、愛知県と関西方面をつなぐ重要な交通網が当該区域を横断しているとともに、コンビナートの直背後には住宅地が密集している。

(2) 石原地区V工区について

設計対象区間の延長は図-2.1 に示す通り419mであり、既存断面は図-2.2 に示す通り混成堤（消波工付）で整備されている。護岸背後道路は石油関連の事業者が常時利用している。また、整備当時の護岸天端高はT.P.+6.75mであるが、事前の施設点検によると、現況天端高はT.P.+6.66mであり、これは圧密沈下の影響によるものであるが、整備時の天端高からさほど下がっていないことが判っている。

また、該当区間で液状化の判定を行った結果、液状化はしないとなったため、液状化の対策は必要ない。

3. 設計条件

(1) 気候変動のシナリオ

気候変動の影響により設定する将来の外力の変化量は、気温の上昇量により決まる。そのため、「港湾における気候変動適応策の実装方針²⁾」では、将来の外力を推定するための前提条件となる気温上昇を、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）による第5次評価報告書³⁾に用

表-3.1 設計潮位

	現在気候	海岸管理者シナリオ	上位シナリオ
H.W.L	T.P.+1.03m	T.P.+1.42m(+39cm)	T.P.+1.58m(+55cm)
L.W.L	T.P.-1.37m	T.P.-0.98m(+39cm)	T.P.-0.82m(+55cm)
潮位偏差	3.00m	3.08m	3.30m[3.00×1.10]
設計高潮位 (H.W.L+潮位偏差)	T.P.+4.03m	T.P.+4.50m	T.P.+4.88m

いられたRCP2.6シナリオ（2℃上昇相当）を前提とすることが定められた。

また、設計時点において設定した作用が当該施設の設計供用期間中に上振れまたは下振れするリスクがあることに留意し、その際に生じる当該施設の構造的な応答や、供用及び利便性への影響を踏まえた上で、対象施設の構造計画や構造設計を行うことも考えられる。

今回の設計対象である四日市港海岸の海岸管理者（三重県）は、令和7年に「三重県海岸保全基本計画」を改訂するため、令和5年より検討会を行っている。

本設計で利用した気候変動による外力変化は、令和6年9月18日に行われた「第3回三重県 海岸保全基本計画検討委員会技術部会」にて提示された暫定シナリオ（以下、海岸管理者シナリオ）を利用する。

また、本設計を行うにあたり、海岸管理者シナリオと併せて、設計供用期間中の上振れリスクを考慮する必要がある。しかし、海岸管理者シナリオに上振れを考慮したシナリオがないことから国土技術政策総合研究所の資料等を参考に上位シナリオを設定した。

(2) 検討の前提条件

石原地区V工区における現在気候の潮位は表-3.1 に示す通り、H.W.L=T.P.+1.03m、L.W.L=T.P.-1.37m、潮位偏差を3.00mと設定している。

(3) 気候変動に伴う外力条件と将来変化比

海岸管理者シナリオは、平均海面上昇量を0.39m、潮位偏差を3.08m、波高の将来変化比を1.01と設定している。

上位シナリオの平均海面上昇量は、「日本の気候変動2020⁴⁾」により、日本沿岸の平均海面上昇量が0.22m～0.55mとなることが示されているため、この予測変動幅の最大値である0.55mとしている。また、上位シナリオの潮位偏差の将来変化比の予測変動幅は、伊勢湾では1.03～1.10となっているため、この予測変動幅の最大値である1.10とする。また、上位シナリオの波高の将来変化比の予測変動幅は、伊勢湾では0.98～1.03となっているため、この予測変動幅の最大値である1.03とする。設定した値をまとめたものを表-3.1 に示す。

(4) 気候変動を考慮した波浪変形計算

設計波浪は、「平成30年度 伊勢湾波浪推算業務 国土交通省 中部地方整備局」により設定された沖波諸元を

基に波浪変形計算を実施し設定した。波浪変形計算は、エネルギー平衡方程式を用い、表-3.2 の沖波条件により各シナリオと各波向について50年確率波と10年確率波について実施した。その結果、波向SSEが卓越していることがわかる。図-3.1 及び図-3.2 に波向SSEの換算沖波波高分析図を示す。図中の黄色ハッチングは検討対象前面の換算沖波波高を読み取る範囲を示し、赤丸に囲まれる数値は採用値を示す。波浪変形計算により算出した換算沖波波高を表-3.3 に示す。

気候変動による平均海面水位の上昇により波向が変化する可能性があったが、設計対象区間の波向は、変化しないことが分かった。

(5) 設計天端高の算出

a) 設計天端高の算出方法

設計天端高を設定するにあたり、換算沖波波高に基づき算定した設計天端高と津波外力に基づき算定された設計天端高を比較し、大きい値を設計天端とする。

b) 換算沖波波高に基づき算定した設計天端高

換算沖波波高に基づく護岸の設計天端高は、許容越波流量によって決まる。その許容越波流量は港湾基準に基づき、構造物や背後地の状況によって様々な値が設定

表-3.2 沖波波浪条件

	確率年	ESE	SE	SSE	S
現在気候	50年	2.42m(4.5s)	3.35m(6.3s)	3.81m(7.0s)	2.52m(5.7s)
	10年	1.41m(4.0s)	2.61m(5.7s)	3.16m(6.5s)	1.81m(5.0s)
海岸管理者シナリオ	50年	2.44m(4.5s)	3.38m(6.3s)	3.85m(7.0s)	2.55m(5.7s)
	10年	1.42m(4.0s)	2.64m(5.7s)	3.19m(6.5s)	1.83m(5.0s)
上位シナリオ	50年	2.49m(4.6s)	3.45m(6.4s)	3.92m(7.1s)	2.60m(5.8s)
	10年	1.45m(4.1s)	2.69m(5.8s)	3.25m(6.6s)	1.86m(5.1s)

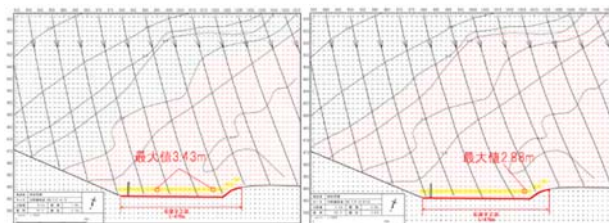


図-3.1 海岸管理者シナリオ換算沖波波高分布図
(波向 SSE, 左 50年確率波, 右 10年確率波)

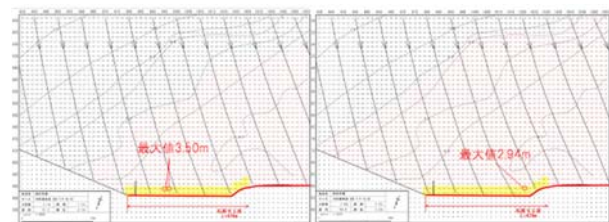


図-3.2 上位シナリオ換算沖波波高分布図
(波向 SSE, 左 50年確率波, 右 10年確率波)

表-3.3 換算沖波波高

	確率年	波向	波高(Ho')	周期(To)
海岸管理者シナリオ	10年	SSE	2.88m	6.5s
	50年	SSE	3.43m	7.0s
上位シナリオ	10年	SSE	2.94m	6.6s
	50年	SSE	3.5m	7.1s

されている(表-3.4)。表-3.4 に記載されている条件の内、四日市港海岸の背後地は、中部圏のエネルギー供給基地として重要な役割を担っている区域であることを考慮し、「その他の重要な地区」の0.02m³/m/sを採用する。

換算沖波波高に基づく護岸の越波流量の算定について、港湾基準では、単純な形状の直立または消波護岸に対しては、合田の越波流量算定図(以下、合田式)を用いて越波流量を算定してもよいとされている。しかし、消波護岸に対する合田式は、消波天端高と護岸天端高が同じである完全消波被覆による形状を想定したものである。そのため、消波工天端高が護岸天端高より低い不完全消波被覆である当該構造物については、合田式を使用することができない。よって、数値変動水路CADMAS-SURFを利用し、設計天端高を算出する。

CADMAS-SURFは、流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を数値的に解くものであり、VOF法と呼ばれる自由表面の処理法に基づく計算方法である。そのため、波、流れ、地盤の相互作用を伴う複雑な現象の数値シミュレーションを迅速かつ容易に行うことが可能である(図-3.3)。

CADMAS-SURFを用い、護岸天端高と越波流量を繰り返し計算した結果を図-3.4 に示した。海岸管理者シナリ

表-3.4 港湾基準による許容越波流量の評価

被災限界の越波流量		
種別	被覆工	越波流量 (m ³ /m/s)
堤防	天端・裏法面とも被覆工なし	0.005 以下
	天端被覆工あり、裏法面被覆工なし	0.02
	三面被覆工あり	0.05
護岸	天端被覆工なし	0.05
	天端被覆工あり	0.2
背後地の重要度から見た許容越波流量		
背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の侵入により重大な被害が予想される地区		0.01程度
その他の重要な地区		0.02程度
その他の地区		0.02~0.05

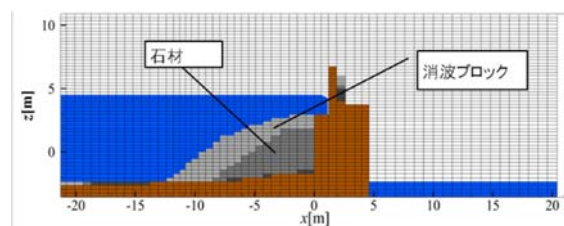


図-3.3 CADMAS-SURF

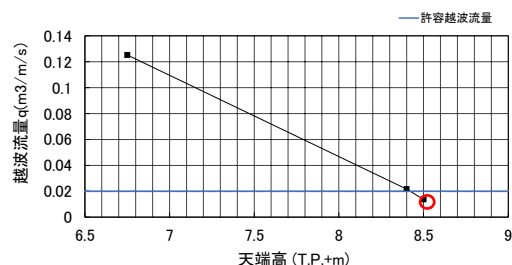


図-3.4 越波流量の算定結果(海岸管理者シナリオ)

表-3.5 換算沖波波高に基づき算定した設計天端高

	海岸管理者シナリオ	上位シナリオ
所要天端高	T.P.+8.50m	T.P.+9.00m

オの結果は、護岸の天端高T.P.+8.50mにて許容越波流量（0.02m³/s/m）を満足することが確認された。

上位シナリオについては、不確実性を考慮して海岸管理者シナリオから定まる天端高に+50cmとしているため、今回はT.P.+9.00mと設定した。換算沖波波高に基づき算定した設計天端高をまとめたものを表-3.5 に示す。

現況天端高が6.66mであるため、将来気候における高潮が発生した場合、現況天端高では1.84m足りないことがわかった。

c) 津波外力に基づき算定された設計天端高

三重県では津波シミュレーションを踏まえた三重県沿岸の海岸保全施設の設計津波高が設定されている（表-3.6）。本業務における津波条件は、設計津波水位T.P.+3.1m、広域地盤沈下量を0.6mとし、さらに気候変動による将来の潮位上昇も加味する。また、「設計津波を発生させる地震による護岸の沈下量」は安定性照査によって算出される沈下量であり、断面形状によって沈下量が変わることに留意する。

上記の条件を考慮し、表-3.7 の通り護岸天端高を算出し、算定値に余裕高（10cm単位切り上げ）を加えて設計天端高とした。

現在の天端高が6.66mであるため、将来気候におけるレベル1津波が発生しても、現況天端高で足りることがわかった。気候変動を考慮した設計天端高さを算出する際に、嵩上げを必要としない断面がある可能性がある。

d) 設計天端高の採用値

換算沖波波高により算出した設計天端高（表-3.5）と津波外力に基づき算定された設計天端高（表-3.7）を比較した結果、換算沖波波高により算出した設計天端高が3m高いため、本設計では、換算沖波波高に基づき算定した設計天端高を採用する。そのため、設計天端高は、海岸管理者シナリオでT.P.+8.50m、上位シナリオでT.P.+9.00mとした。

表-3.6 津波外力

	現在気候	海岸管理者シナリオ	上位シナリオ
L1津波水位	T.P.+3.1m	T.P.+3.49m	T.P.+3.65m
L1津波水位 (地盤沈降考慮)	T.P.+3.7m	T.P.+4.09m	T.P.+4.25m

表-3.7 津波外力に基づき算定した設計天端高

	海岸管理者シナリオ	上位シナリオ
護岸 天端高	T.P.+4.95m (L1津波水位： T.P.+3.10m +気候変動による潮 位上昇:0.39m +広域地盤沈下量： 0.60m +レベル1津波を引 き起こす地震による 沈下量:0.86m)	T.P.+5.36m (L1津波水位： T.P.+3.10m +気候変動による潮 位上昇:0.55m +広域地盤沈下量： 0.60m +レベル1津波を引 き起こす地震によ る沈下量： 1.11m)
設計天端高	T.P.+5.00m	T.P.+5.40m

4. 性能規定の設定

港湾基準では、構造物に求められる要求性能のみを規定し、設計結果に至るプロセスを規定しない性能規定型の設計を行っている。

(1) 要求性能

要求性能とは、目的を達成するために施設が保有しなければならない性能を説明責任の観点から平易に表現したものである。当該区域の要求性能を高潮・波浪、地震動、沖波の作用毎に表-4.1 に示す通り設定した。

(2) 性能規定値

性能規定とは、要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定を技術的観点で表現したものであり、表-4.2 に示す通り設定した。

表-4.1 要求性能

作用	作用条件	要求性能・照査項目など
高潮・波浪	【50年確率波】 H ₁₀ WL.T.P.+4.50m, 換算沖波波高H ₀ *=3.43m, 周期T ₀ =7.0s	【照査項目】 -越波流量(50年確率波) -構造的安定性 【要求性能の考え方】 作用による損傷等により護岸としての機能を損なわず、継続して使用することに影響を及ぼさないこと。 「使用性」を照査する
L1地震動	供用期間中に1〜2度発生する確率を有する地震動 基礎の最大加速度:108.05gal (国総研I+P)	【照査項目】 -液状化判定 -越波流量(50年確率波) ※1 -目地開きに伴う堤体盛土の流出防止 ※1 -構造的安定性 【要求性能の考え方】 作用による損傷等により護岸としての機能を損なわず、継続して使用することに影響を及ぼさないこと。 「使用性」を照査する
L2地震動	M6.5直下型:586.44gal 震央-桑名-四日市断層帯地震:516.69gal 東海・東南海地震:151.75gal 5地震重ね合わせ地震:827.74gal	【照査項目】 -越波流量(10年確率波) -目地開きに伴う堤体盛土の流出防止 -目地開きに伴う津波・高潮の流入防止 -構造的安定性 【要求性能の考え方】 地震後の速やかな機能の回復が可能なこと。 作用による護岸の変形が、背後の企業活動に支障を及ぼさないこと。 「修復性」「安全性」を照査する
設計津波	設計津波の水位:T.P.+4.1m (地盤沈降考慮)	【照査項目】 -設計津波水位 -構造的安定性 【要求性能の考え方】 先行地震動による被害を許容するが、津波作用に対し、所要の構造の安全を確保し、機能を損なわないこと。 「使用性」※2を照査する
(参考) L2津波	南海トラフ巨大地震:690gal	性能規定値は設けず、地震による堤防の変形量及び津波による越流有無を確認する。

※1:レベル1地震動による地盤の液状化が発生しない場合には規定しない。
※2:先行地震動による被害を許容するが、修復することなく、津波作用に対する機能を損なわないことから「使用性」と表現する。

表-4.2 性能規定値

レベル1地震動 (使用性)	鉛直方向※1	H.W.L.+50年確率波
	水平方向※1	目地開きに伴う堤体盛土の流出防止 (壁厚の1/2程度※2)
レベル2地震 (修復性・安全性)	鉛直方向	H.W.L.+10年確率波
	水平方向	目地開きに伴う堤体盛土の流出防止 目地開きに伴う津波・高潮の流入防止 (壁厚の2倍程度※3)
	傾斜角	5度※4
設計津波 (使用性)	鉛直方向	設計津波水位
	水平方向	静的照査による構造的安定性

※1:レベル1地震動による地盤の液状化が発生しない判定された場合には規定しない。
※2:隣り合うスパンが逆向きで変位する場合。
※3:隣り合うスパンの両方が一体的に変形するものとする場合。
※4:港湾空港技術研究所資料No1145許容被害程度基準より被害程度Ⅱ(補修可能)な残留傾斜角

5. 検討断面

(1) 断面決定

3. 設計条件を基に要求性能を満足するように性能照査を実施し、気候変動を考慮した海岸管理者シナリオ及び上位シナリオの設計断面を決定した。

海岸管理者シナリオの断面を表-5.1 に、上位シナリオの断面を表-5.2 に示す。

構造検討の結果、決定断面は既設護岸の天端高の嵩上げ、滑動・転倒に対する抵抗力として背後に鋼管杭を配置し、円弧滑り対策として背後を軽量盛土で置換した。両者を比較すると分かる通り、上位シナリオで設計すると天端高のほか、鋼管杭の肉厚、軽量盛土の深さが増加する結果となる。また、整備コストについても1m当たり約1.2倍のコスト増になることが分かった。

今回の対象施設は、「三重県海岸保全基本計画」に定める条件により断面決定するものであるため、今回の決定断面は、海岸管理者シナリオの断面となる。ただし、港湾における気候変動適応策の実装方針に記載があるとおり、上振れとされる上位シナリオへの改良対応もできる断面であることを確認する必要がある。

(2) 順応的適応策の考え方

設計供用期間内に想定される作用の時間変化に対し、施設の要求性能を確保する方策として、設計供用期間の初期段階で対応する「事前適応策」と、設計供用期間中に段階的に対応する「順応的適応策」がある(図-5.1)。

今回、表-5.2 に示す上位シナリオの断面を見た場合に、仮に順応的適応策で段階整備する場合には、将来的に上部工を改良することは可能だが、地中の鋼管杭の肉厚増や軽量盛土の改良深度への対応が不可能となる。そこで、海岸管理者シナリオの断面を基本とし、上振れを考慮した順応的適応策へも対応が可能な断面について検討を行った。その断面が表-5.3 である。この断面であれば、上部工の1.0mの増し打ちと海側へのカウンター材の対応で上位シナリオへの改良が可能となる。

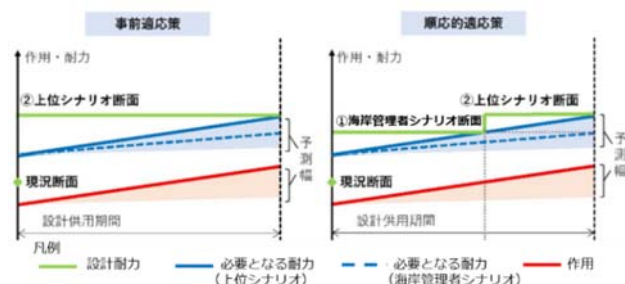


図-5.1 事前適応策と順応的適応策

表-5.1 管理者シナリオ断面

海岸管理者シナリオ	
標準断面図	
概要	・既設護岸の嵩上げ: 天端高T.P.+8.6m(圧密沈下0.1m含む) ・滑動・転倒に対する抵抗力: 背後鋼管杭(t=14mm) ・円弧滑り対策: 背後を軽量盛土材で置き換え(深さ3m)
コスト	護岸腹付・拡幅: 301千円/m 鋼管杭打設: 1,695千円/m 上部工: 195千円/m 背後置換: 680千円/m 合計: 2,870千円/m

表-5.2 上位シナリオ断面（事前適応策）

上位シナリオ【事前適応策】	
標準断面図	
特徴	・既設護岸の嵩上げ: 天端高T.P.+9.1m(圧密沈下0.1m含む) ・滑動・転倒に対する抵抗力: 背後鋼管杭(t=18mm) ・円弧滑り対策: 背後を軽量盛土材で置き換え(深さ3.3m)
コスト	護岸腹付・拡幅: 327千円/m 鋼管杭打設: 2,214千円/m 上部工: 195千円/m 背後置換: 733千円/m 合計: 3,470千円/m

表-5.3 上位シナリオ（順応的適応策）

上位シナリオ【順応的適応策】	
標準断面図	
特徴	・海岸管理者シナリオからの追加対策 ・既設護岸の嵩上げ・腹付け: 天端高T.P.+8.6m(圧密沈下0.1m含む)、壁厚1.0m ・消波ブロックの設置による嵩上げ天端高の抑制と波力の低減 ・円弧滑り対策: 海側にカウンター材
コスト	護岸腹付・拡幅: 315千円/m 消波工: 1,130千円/m 鋼管杭打設: 1,695千円/m 上部工: 195千円/m 背後置換: 680千円/m 合計: 4,015千円/m

6. まとめ

港湾において中部管内で初めて気候変動の影響を考慮した海岸保全施設の設計を行った。気候変動による外力作用の変化を検討する中で、海岸管理者シナリオと事前適応策の上位シナリオを比較した際に、上部工の嵩上げや鋼管杭の肉厚、軽量盛土の置換深さが増大した。

さらに、海岸管理者シナリオにおいて整備後、将来気候が上振れした際にも、更なる嵩上げ等の対策が可能であることも確認できた。

今回、気候変動による外力の増大により構造物の滑動・転倒対策が必要になることや、上部工の巨大化に伴い自重が増大し、円弧滑り対策も必要になる可能性があることが分かった。

事業採択された塩浜地区、石原地区は大きく10工区に

分類することができ、既設構造物の形状は様々である。その中には、背後に石油化学コンビナートがあり、既設護岸を跨ぐ架空管や埋設管が多く設置される箇所があり、上部工の嵩上げや地盤改良を容易に施工できないことが想定される。今後は新たな設計手法や新技術の活用について有識者による委員会に諮ると共に、様々な護岸形状や背後利用を鑑みた最適な対策を都度検討して参りたい。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p. 21，2024.
- 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：港湾における気候変動適応策の実装方針，p. 24.
- 3) 気象庁：IPCC 第5次評価報告書，2025-06-17，<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>.
- 4) 国土交通省気象庁：日本の気候変動2020，p. 31，2020.