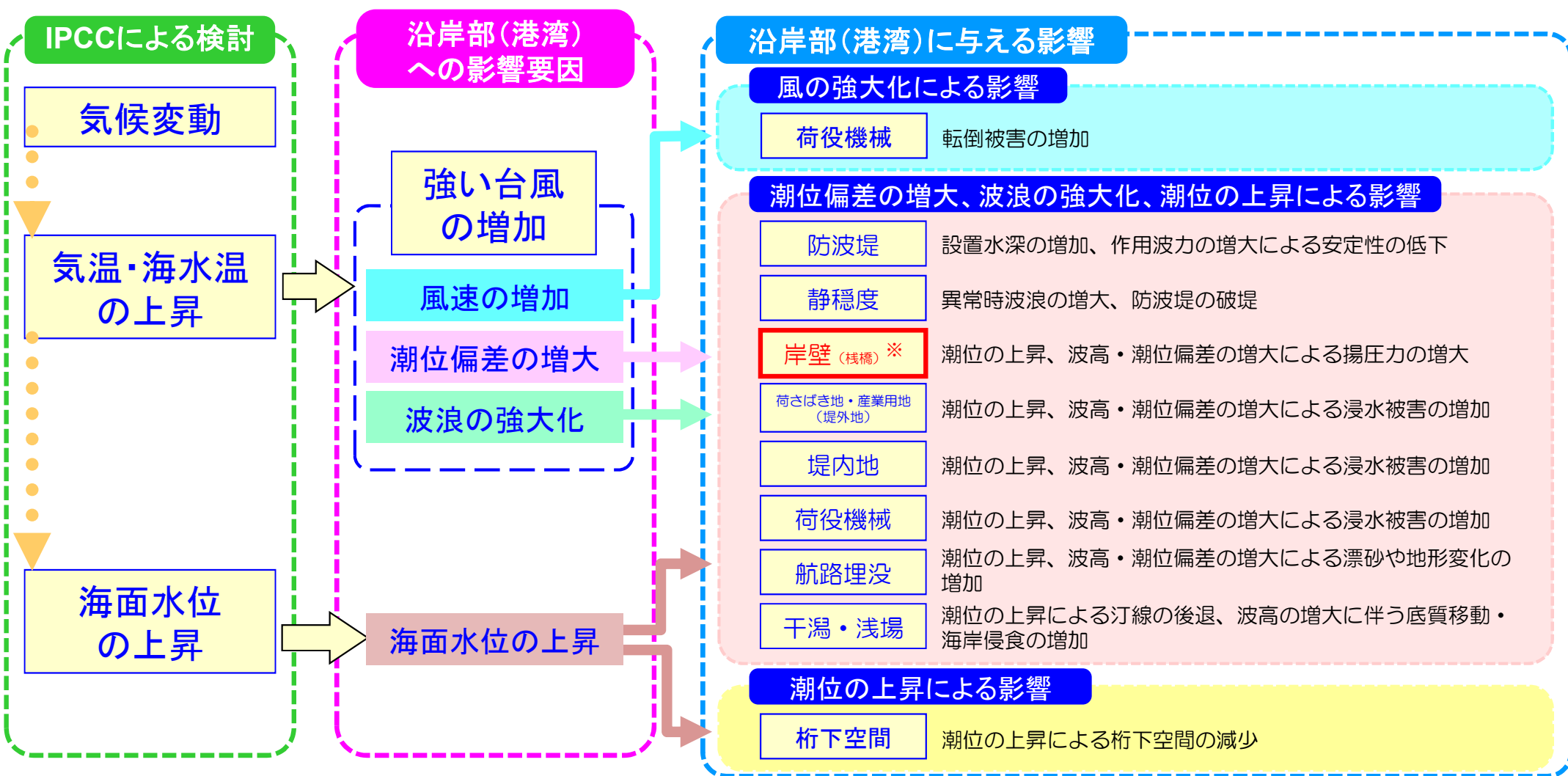


気候変動適応策の実装に向けた論点 (参考資料)

気候変動が港湾に与える影響

沿岸部(港湾)における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会報告書(平成27年6月)より

※令和元年東日本台風の教訓を踏まえ追加



沿岸部(港湾)における気候変動の影響及び適応の方向性検討委員会報告書(平成27年6月)に一部加筆

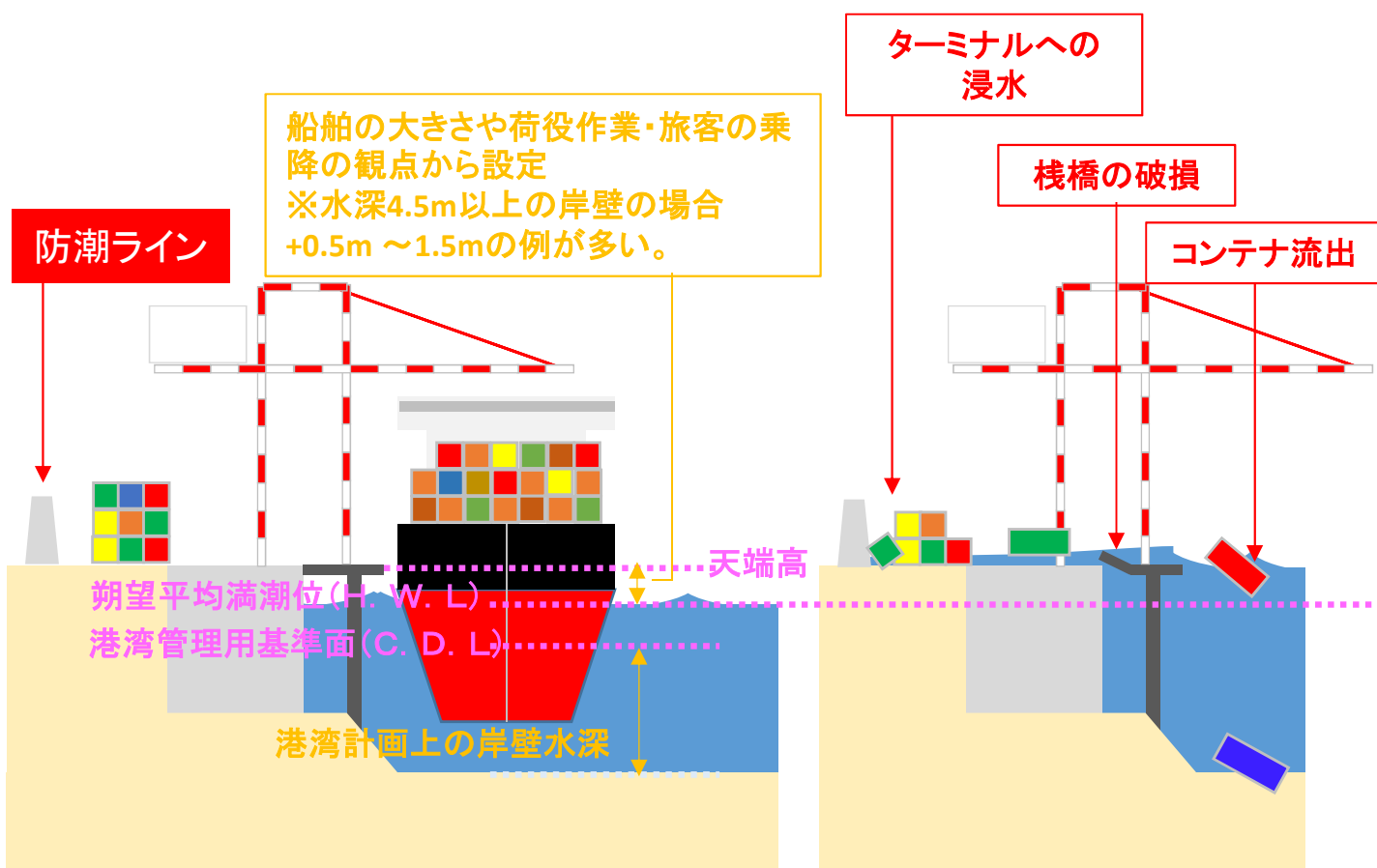
○気候変動の沿岸部(港湾)に与える影響に対して取り得る適応策を例示。個々の場所の特性や気候変動の影響の発現動向に応じ適切な施策を適切なタイミングで講じていくことが肝要。

主な項目	影 響	適応策(△:ソフト対策、□:ハード対策)
防波堤等外郭施設及び港湾機能への影響	○海面水位及び波浪条件、高潮偏差の変化に伴う防波堤被災 ○防波堤被災に伴う静穏性の低下 ○海上輸送に係る物流機能の低下	△海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 □係留施設や防波堤の機能維持(外力及び防波堤断面等の見直し) △□粘り強い構造の防波堤、防潮堤等の技術開発・整備 □防砂堤等による航路・泊地の埋没防止・軽減対策 △港湾BCPの作成
堤外地(埠頭・荷さばき地、産業用地等)	○浸水による港湾・産業施設の被害 ○浸水によるコンテナ等の流出被害の拡大 ○強風による荷役機械の倒壊	△気象・海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 △災害リスクの評価及びハザードマップ等による周知 △避難判断に資する情報の分析・提供(リアルタイム情報を含む) □気候変動の影響を考慮した埋立地の地盤高の設定 △□強風によるクレーン逸走対策 □コンテナ等の流出対策の推進 □関係機関と連携した排水機能の確保 □高潮位時の逆流防止対策 △港湾・企業BCPの作成 △自衛防災の促進 △避難計画策定・訓練実施の促進(操作規則との整合確保を含む) △協議会等の組織による地域の防災力の向上
背後地(堤内地)への影響	○浸水による人的被害、建物被害、経済損失の発生 ○長期湛水等による都市機能の麻痺	△海岸保全施設等の防護機能の把握 △防護能力確保等の低コスト化 △ライフサイクルコストを考慮した最適な更新等の考え方の検討 □被災リスクの高い箇所及び更新時期を踏まえた海岸保全施設等の戦略的な整備 □民有施設(胸壁、上屋、倉庫、緑地帯等)の活用 △□粘り強い構造の防波堤、防潮堤等の技術開発・整備 △災害リスクの評価及びハザードマップ等による周知 △避難計画策定・訓練実施の促進 △協議会等の組織による地域の防災力の向上 △災害リスクを踏まえた土地利用の見直し △沿岸域における生態系による減災機能の定量評価手法開発
桁下空間への影響	○桁下空間の減少による船舶通行不可	△海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 △通行禁止区間・時間の明示 □港湾機能の再配置
浅場・干潟への影響	○海面水位及び波浪条件の変化に伴う浅場・干潟面積の減少 ○生態系への影響	△海象のモニタリング、高潮・高波による影響の予測・情報提供 △沿岸域における生態系による減災機能の定量評価手法開発

港湾における堤外地の特徴

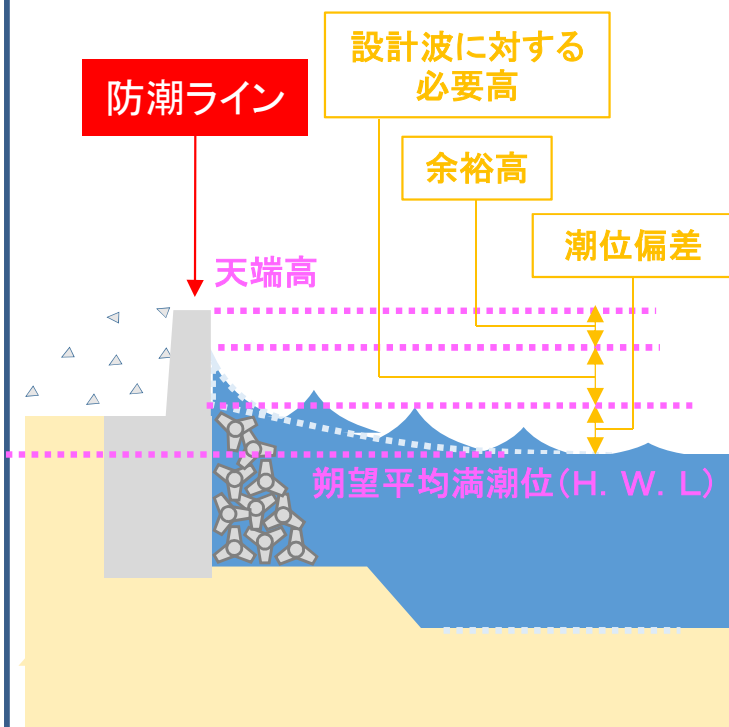
- 港湾においては、防潮ラインの外側（堤外地）に物流機能が集中するとともに多数の従業員が就労。
- 岸壁周辺は荷役作業等の観点から天端高が設定されているため、防潮ラインがターミナルの背後に設定されていることが一般的であり、高潮・高波の影響を受けやすい。
- 海に面しているため、暴風が直接作用する。

岸壁周辺



台風来襲時

護岸



気候変動が港湾施設に与える影響(想定)

施設の耐力(安定性)

防波堤	重力式	・堤体に作用する波力・浮力の増大により安定性が低下する。 ・波高増大による消波ブロック、被覆ブロックの重量が不足する。
岸壁	重力式	・堤体に作用する浮力の増大により安定性が低下する。 ・残留水圧の増大により安定性が低下する。 ・地震時動水圧の増大により安定性が低下する。 ・水位上昇により堤体に作用する土圧が低下する。
	矢板式	・残留水圧の増大により安定性が低下する。 ・地震時動水圧の増大により安定性が低下する。 ・水位上昇により堤体に作用する土圧が低下する。
	栈橋式	・上部工に作用する揚圧力の増大により安定性が低下する。
護岸・堤防	重力式	・岸壁と同様 ・波高増大による消波ブロック、被覆ブロックの重量が不足する。 ・マウンド透過波による背後地盤の吸出しリスクの増大 ・波力増大によるパラペットの倒壊
	矢板式	

天端高(越波・浸水)

防波堤	重力式	・天端高の不足により防波堤背後への越波量が増加する。 ・消波構造の反射率が増大する。
岸壁	重力式	・天端高不足によりエプロンや荷さばき施設への越波量が増加する。 ・雨水・排水の水面勾配の低下により流下能力が低下する。
	矢板式	
	栈橋式	
護岸・堤防	重力式	・天端高不足により荷さばき施設や工場等の背後施設への越波量が増加する。 ・マウンドを透過した水塊による浸水 ・パラペット倒壊に伴う浸水の増大
	矢板式	

利用性

岸壁	重力式	・海面が上昇することにより、船体と岸壁天端高の高さ関係が変化する。
	矢板式	
	栈橋式	

高潮対策施設の設計潮位(港湾の施設の技術上の基準・同解説)

高潮対策施設に対しては、高潮の発生も考慮した設計高潮位を定める。
その決め方には次の4つの方法がある。

- ①既往最高潮面、あるいはこれに若干の余裕を見込んだ潮位を用いる。
- ②朔望平均満潮面に既往の最大潮位偏差、あるいは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用いる。
- ③既往の異常高潮位の生起確率曲線を求め、ある再現期間の間にそれより高い潮位の発生回数が1 以下であるような潮位を用いる。
- ④異常高潮位の生起確率と各潮位に対する背後地の被害額及び高潮対策施設の建設費を勘案して経済的に決定する。

・・・(中略)・・・現在広く採用されている方法は、①及び②である。・・・(後略)

◎現在の基準は実績値に基づく前提 ⇒ 将来の気候変動に伴う影響を考慮した体系に改めることが必要

日本沿岸の平均海面水位の上昇量(将来予測)

『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 —』より

時期	2081～2100年平均(21世紀末)					2100年	
シナリオ	日本沿岸の平均海面水位の上昇量				検潮所 16 地点の 平均値	世界の平均海面 水位の上昇量	世界の平均海面 水位の上昇量 (SROCC※)
	領域 I	領域 II	領域 III	領域 IV			
2℃上昇 シナリオ (RCP2.6)	0.38 m (0.22～0.55 m)	0.38 m (0.21～0.55 m)	0.39 m (0.22～0.56 m)	0.39 m (0.23-0.55m)	0.39 m (0.22～0.55 m)	0.39 m (0.26～0.53 m)	0.43 m (0.29～0.59 m)
4℃上昇 シナリオ (RCP8.5)	0.70 m (0.45～0.95 m)	0.70 m (0.45～0.95 m)	0.74 m (0.47～1.00 m)	0.73 m (0.47～0.98 m)	0.71 m (0.46～0.97 m)	0.71 m (0.51～0.92 m)	0.84 m (0.61～1.10 m)

※気候変動に関する政府間パネル(IPCC)「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関するIPCC特別報告書」

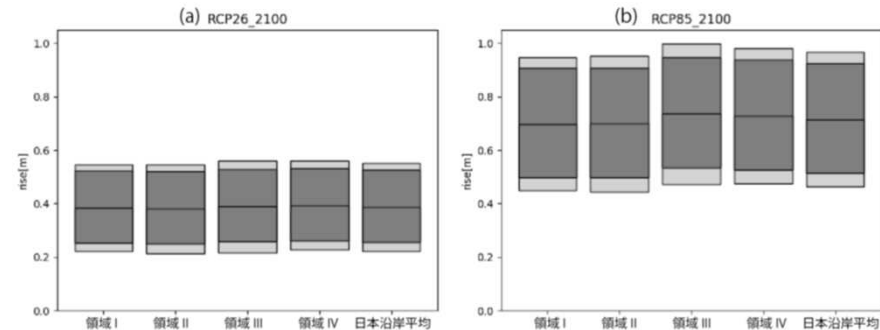
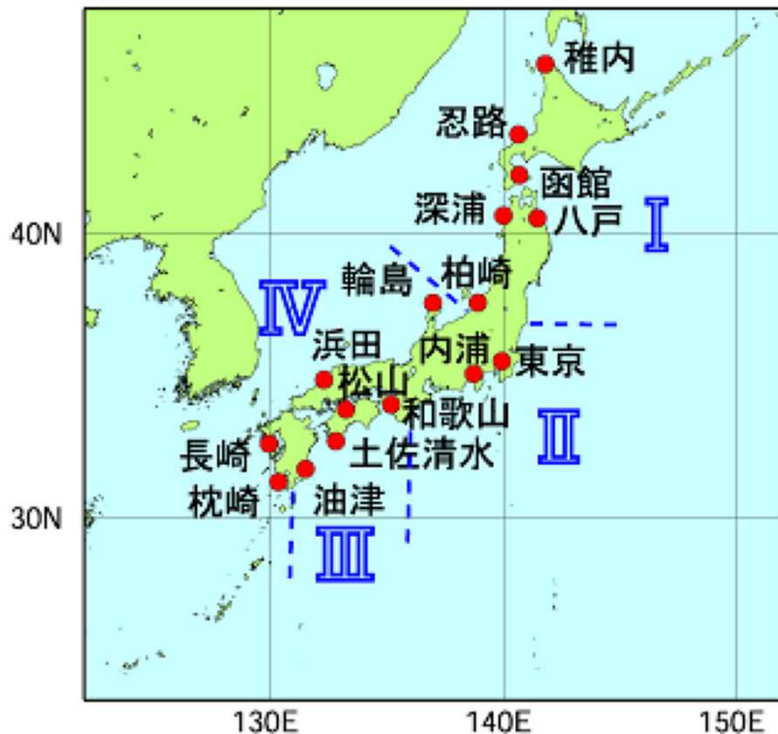


図10.2.4 SI-CAT海洋モデルによる

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)

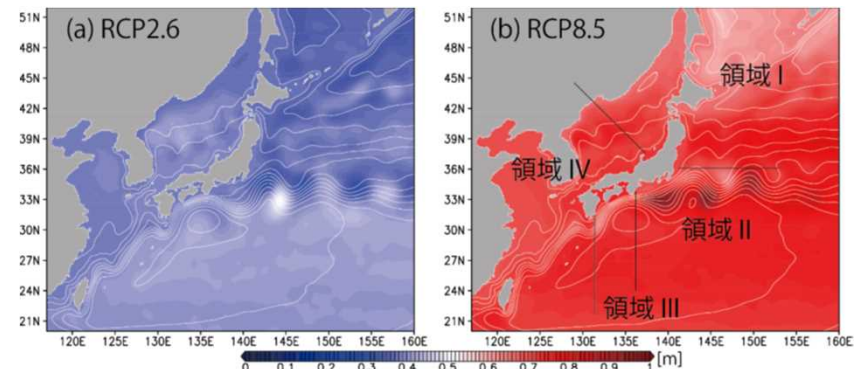


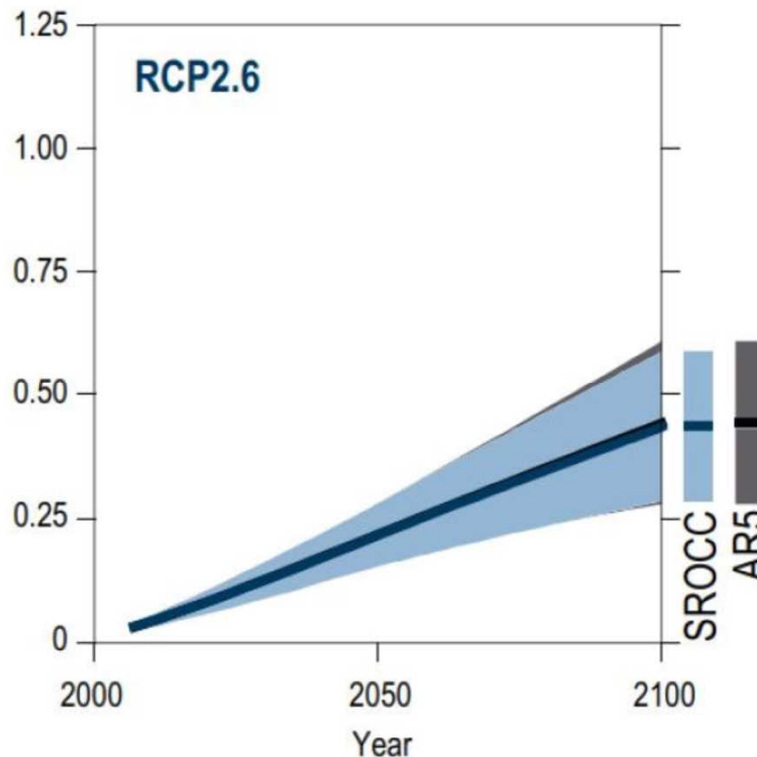
図 10.2.3 SI-CAT海洋モデルによる

21 世紀末における日本近海の海面水位(年平均)の 20 世紀末からの上昇幅(m)

平均海面水位の上昇量の具体的な設定

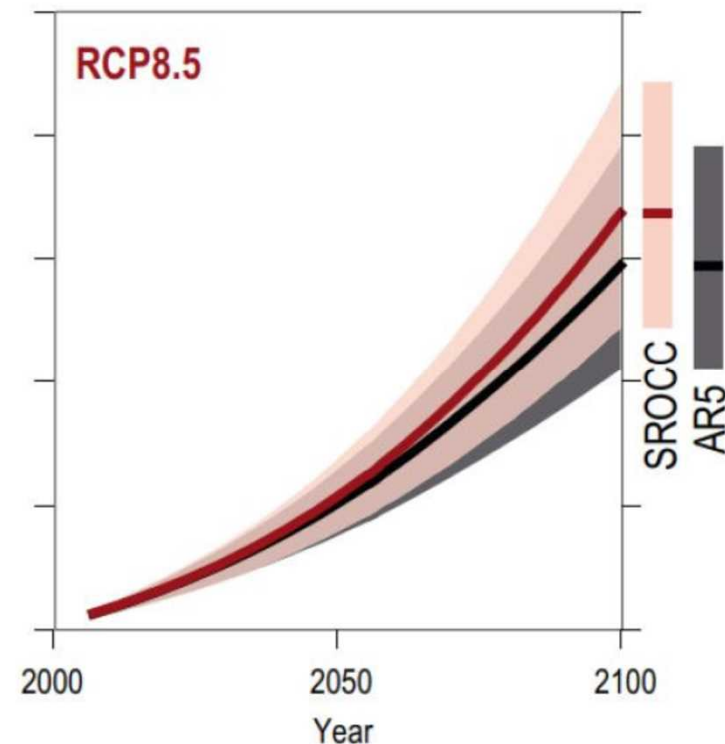
○将来の平均海面水位の上昇量については予測に幅があることから、具体的な設定方法をあらかじめ定める必要がある。

世界平均海面水位の予測



2℃上昇シナリオ(RCP2.6)は、21世紀末※の世界平均気温が、工業化以前と比べて0.9～2.3℃(20世紀末※と比べて0.3～1.7℃)上昇する可能性の高いシナリオ。

➤ パリ協定の2℃目標が達成された世界であり得る気候の状態に相当。



4℃上昇シナリオ(RCP8.5)は、21世紀末※の世界平均気温が、工業化以前と比べて3.2～5.4℃(20世紀末※と比べて2.6～4.8℃)上昇する可能性の高いシナリオ。

➤ 現時点を超える追加的な緩和策を取らなかった世界であり得る気候の状態に相当。

※ 20世紀末: 1986～2005年の平均、21世紀末: 2081～2100年の平均

出典: 日本の気候変動2020

①通常波浪(風波・うねり)に対する荷役稼働率の計算(港湾の施設の技術上の基準・同解説)

(a) 港外の波向別風波(波高・周期)頻度表を作成する。

(b) 計算対象とする港外の代表波浪を複数設定する。
港湾の地勢や港外地点の波向別風波・うねり頻度表から、
計算対象とする港外の代表波浪(波高と周期の組み合わせ及び波向)を複数設定する。
(略)

気候変動の影響を
受けるおそれ

(c) 港内地点の波高を算定し、港内波高出現頻度表を作成する。
(略)

(d) 通常波浪(風波・うねり)成分に対する荷役稼働率を計算する。
荷役稼働率は、下記の手順により計算することができる。

- 1) 荷役限界波高を設定する。
- 2) 対象施設前面波高が荷役限界波高を超える場合の頻度を累積する。
- 3) 2)の累積頻度を全データ数で除して荷役不稼働率(%)を求め、全周期・全波向について集計する。100%からこれを差し引いて荷役稼働率を求める。

波浪及び潮位偏差の将来予測

- 波浪や潮位偏差の将来予測にはd4PDFが用いる手法が提案されている。
- d4PDFを用いる場合、ダウンスケーリングやバイアス補正が必要となるが、手法が統一されていない、また、設計波を算出する場合、従前より用いているデータと比較して空間解像度が低いなどの課題がある。

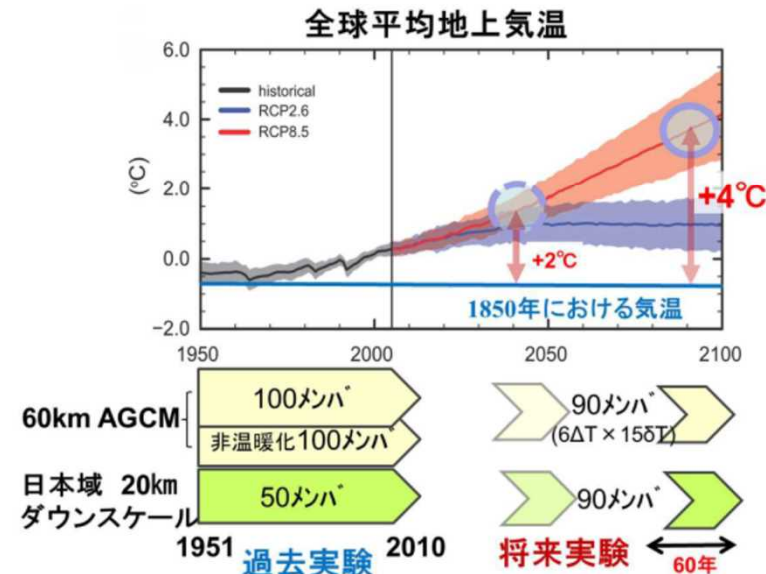
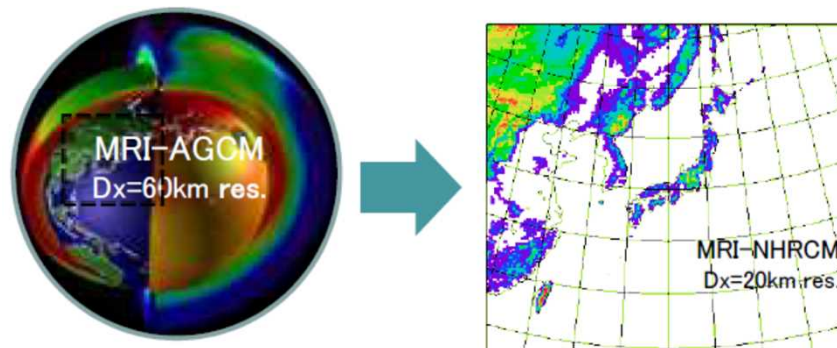
地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)

- d4PDFとは、分野間で整合した地球温暖化緩和・適応策の検討に利用できるように整備されたアンサンブル気候予測計算結果のデータベース(database for Policy Decision making for Future climate change)
- 高解像度の気候モデルによる多数のアンサンブル計算を行った結果を整理したもので、その活用により、顕著な気候現象について統計的に信頼性の高い将来予測情報が得られることが期待される。

特徴

- 世界に類例の無い大規模アンサンブル・高解像度気候シミュレーションプロダクト。
総実験データ量は約 2ペタバイト(文科省DIAS サーバーで配信)。
- 過去気候変化の再現性が高い。気象庁現業モデルを基にした気候モデル採用。
- 異常高温、集中豪雨、台風等の顕著現象の発現頻度や強度の将来変化を抽出。

- ・過去実験(6000年) = 温暖化トレンドを入れた過去60年の時間変動 × 観測不確実性を表す100摂動
- ・将来実験(5400年) = 温暖化トレンドを除いた過去60年の時間変動 × 6種のCMIP5 温暖化パターン × 観測不確実性を表す15摂動



- 港湾計画においては、各港湾管理者が10～15年後を目標年次として定めているが、気候変動への対応については、50～100年など長期的かつ持続的に対応を行わなければならない。
- このような観点から、港湾の骨格となる施設の配置や能力の決定要素となる橋梁の高さについては、港湾計画において定めるべきではないか。

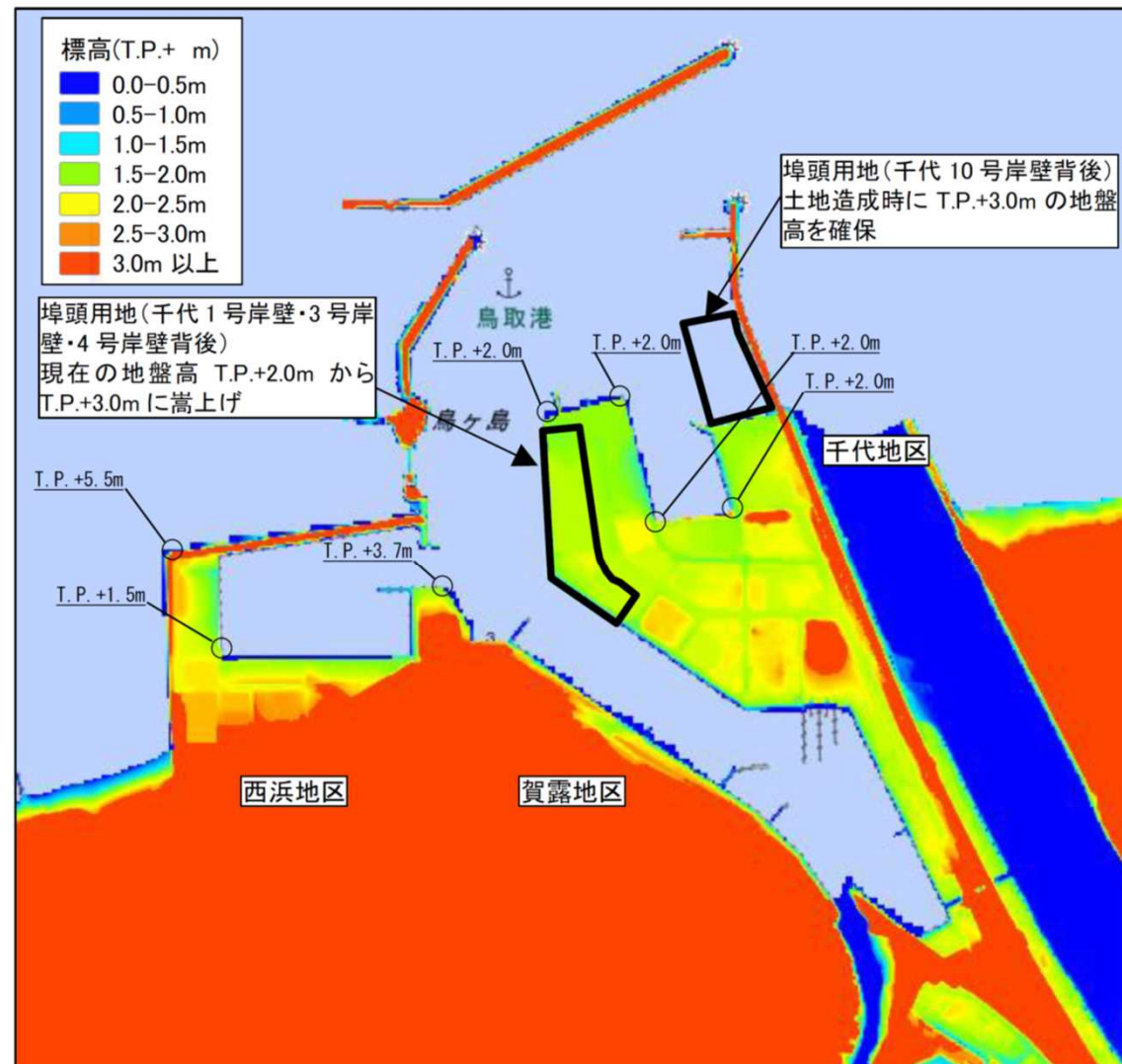
○港湾法施行令

(港湾計画)

第1条の4 法第3条の3第1項の政令で定める事項は、次のとおりとする。

- 一 港湾の開発、利用及び保全並びに港湾に隣接する地域の保全の方針
- 二 港湾の取扱貨物量、船舶乗降旅客数その他の能力に関する事項
- 三 港湾の能力に応ずる水域施設、係留施設その他の港湾施設の規模及び配置に関する事項
- 四 港湾の環境の整備及び保全に関する事項
- 五 港湾の効率的な運営に関する事項
- 六 その他港湾の開発、利用及び保全並びに港湾に隣接する地域の保全に関する重要事項

○鳥取港では、波浪や高潮による浸水への対策の強化のため、港湾計画書の参考資料に地盤高を表記し、浸水リスクを示している。

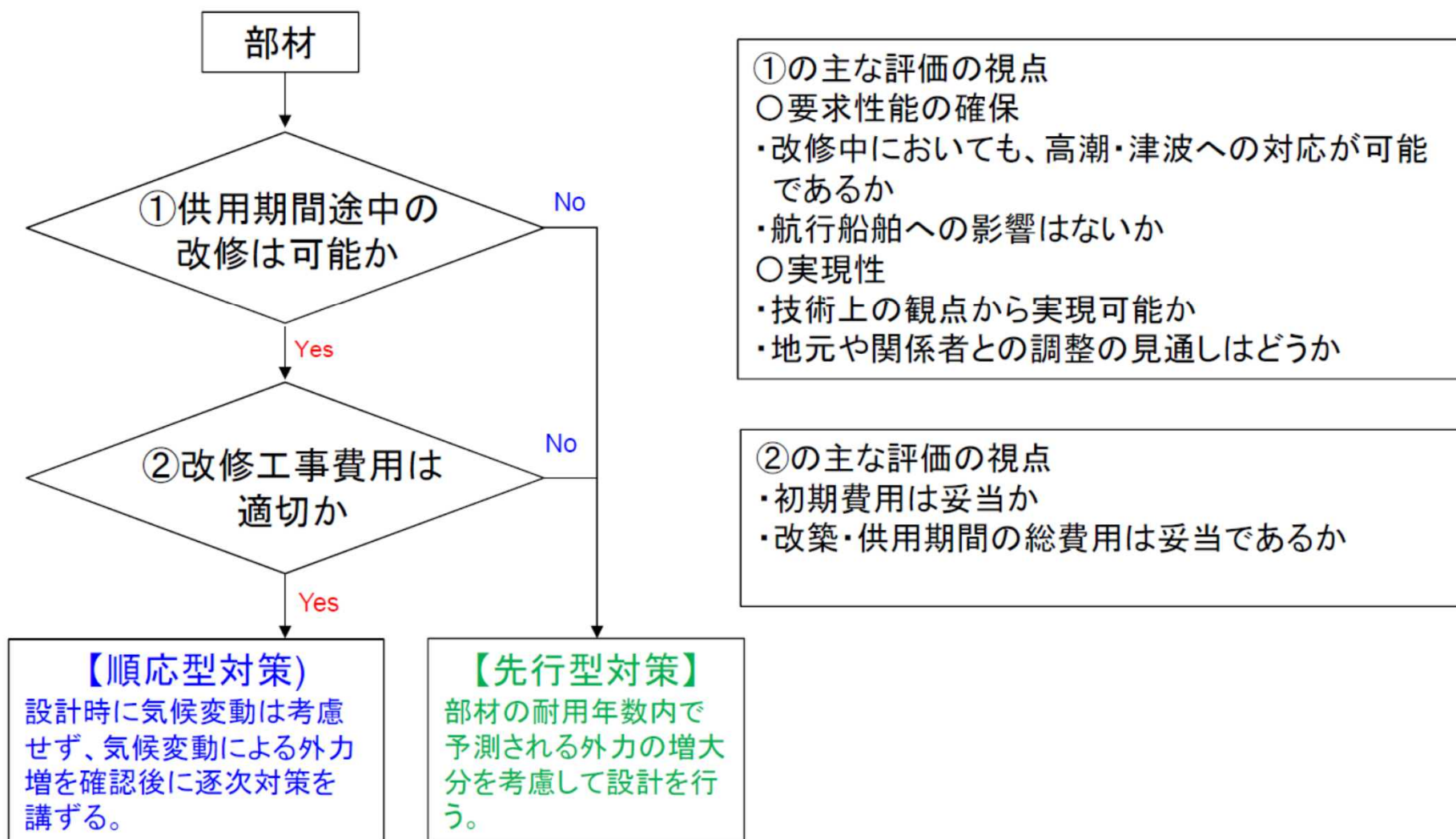


資料：地理院地図

港湾計画への地盤高の表記(鳥取港の事例)

気候変動の影響を考慮した設計(考え方)

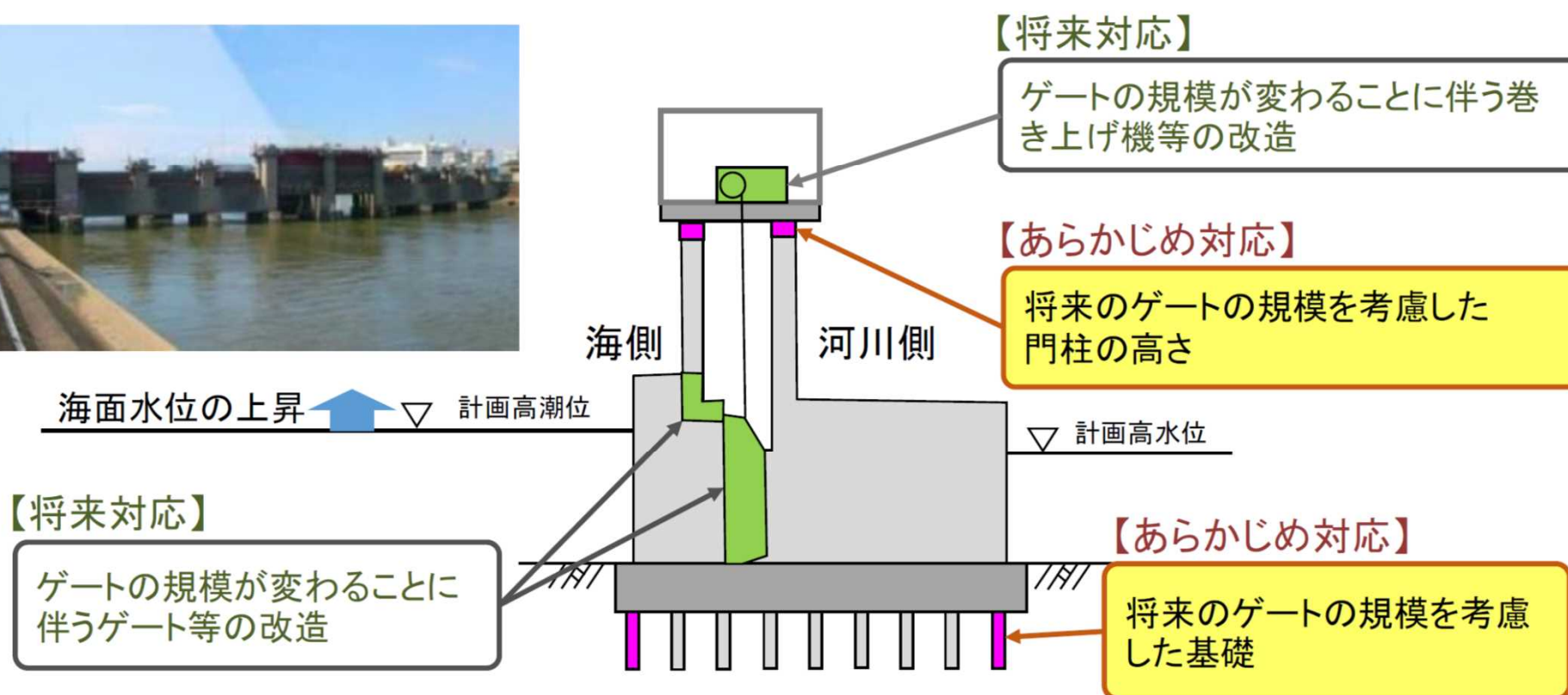
- ・気候変動予測を基に設定した外力には、様々な不確実性が潜在するため、手戻りなく設計すること、また過剰な投資にならないように設計することの両面を考えることが重要である。
- ・そのため、各部材の設計に際しては、あらかじめ対策を講じておく「先行型対策」と将来における気候変化を確認後に対策を講じる「順応型対策」のどちらか適切な対策方法を選択する。



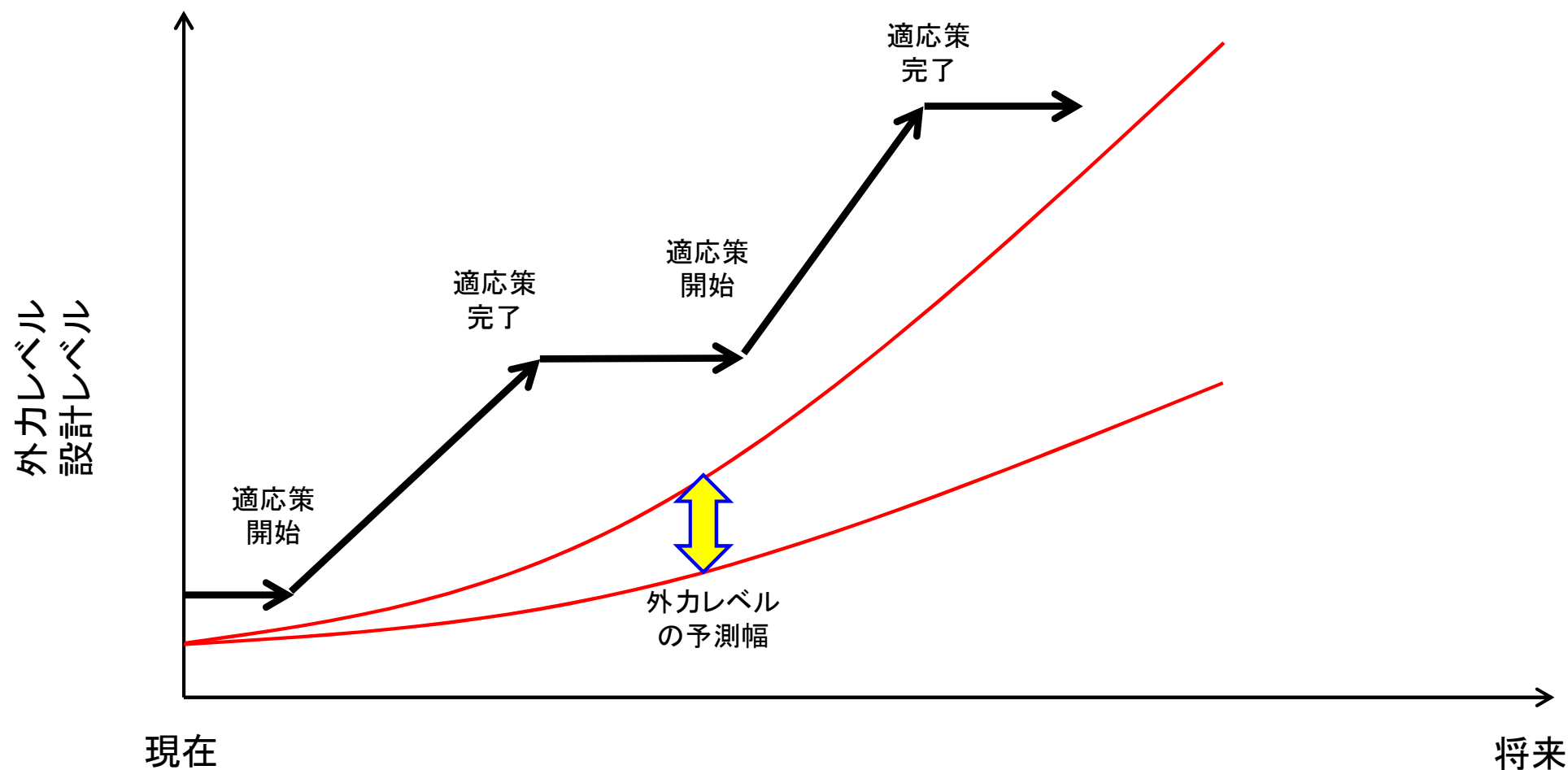
できるだけ手戻りのない施設の設計

- 将来の海面水位の増加等に対してできるだけ容易に改造ができるよう設計
- 将来の改造が難しい門柱や基礎はあらかじめ対応し、将来交換が必要なゲート等や機械類等については更新時に対応

(例) 海面水位上昇に対する水門設計での対応イメージ



○気候変動の将来予測については、不確実性が存在することから、途中で追加対策を講じる構造を想定した準備工事を可能とすべきではないか。

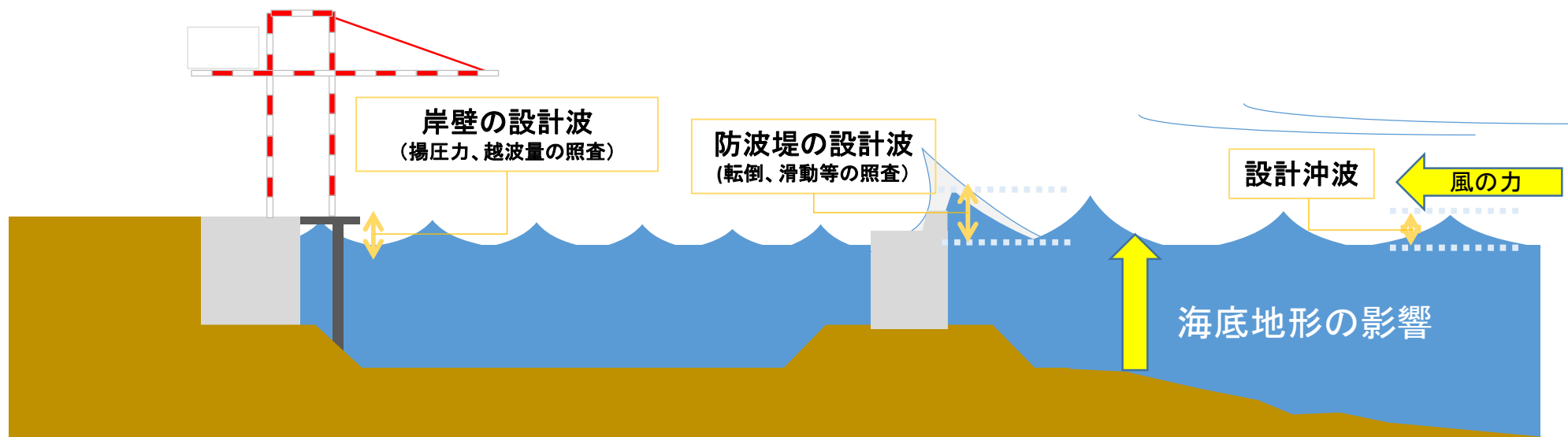


	東京湾	伊勢湾	大阪湾
計画外力	伊勢湾台風(S34.9)	伊勢湾台風(S34.9)	伊勢湾台風(S34.9)
計画高潮位	T.P.+ 4.0 m	T.P.+ 4.5 m	T.P.+ 3.9 m
高潮偏差	3.0 m	3.5 m	3.0 m
朔望平均満潮位	T.P.+ 1.0 m	T.P.+ 1.0 m	T.P.+ 0.9 m
台風経路	伊勢湾台風、キティ台風 他の平行経路を比較し、 最悪のコースを設定	伊勢湾台風実績コース	室戸台風、ジェーン台風 を比較し、被害が大きくなる 室戸台風コースを設定

防波堤岸壁等の照査

波浪変形計算 エネ法、高山法、ブシネスク法等

波浪推算 スペクトル法等



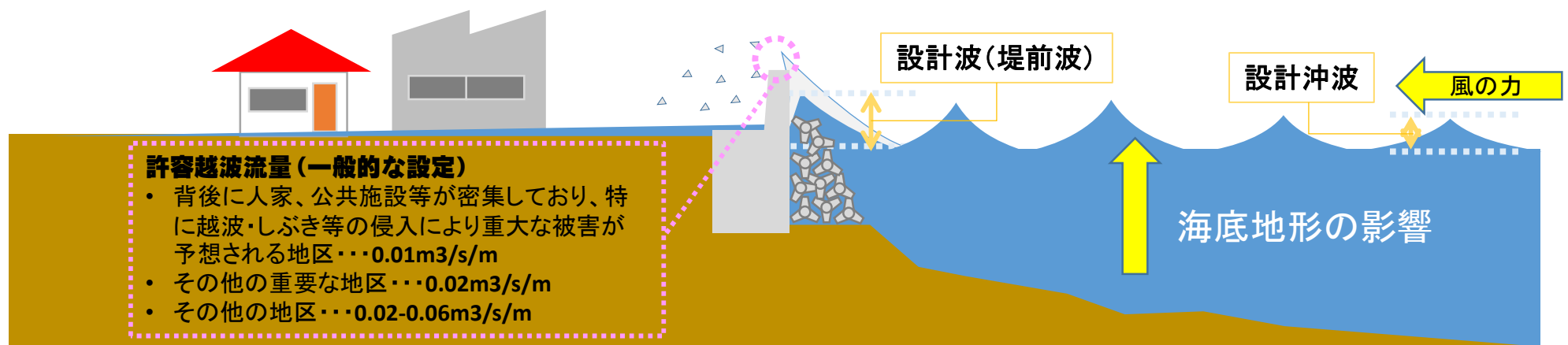
護岸等の照査

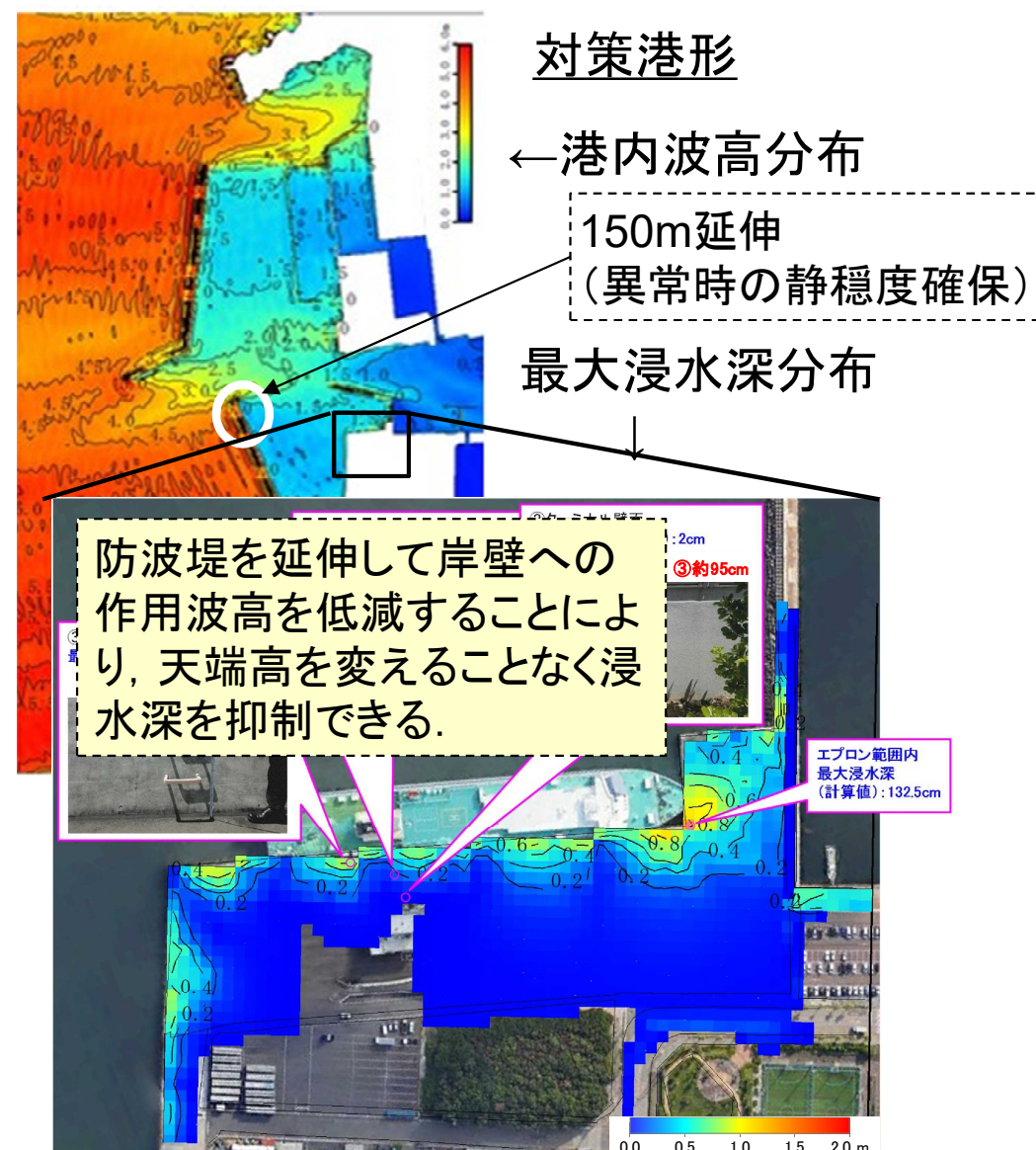
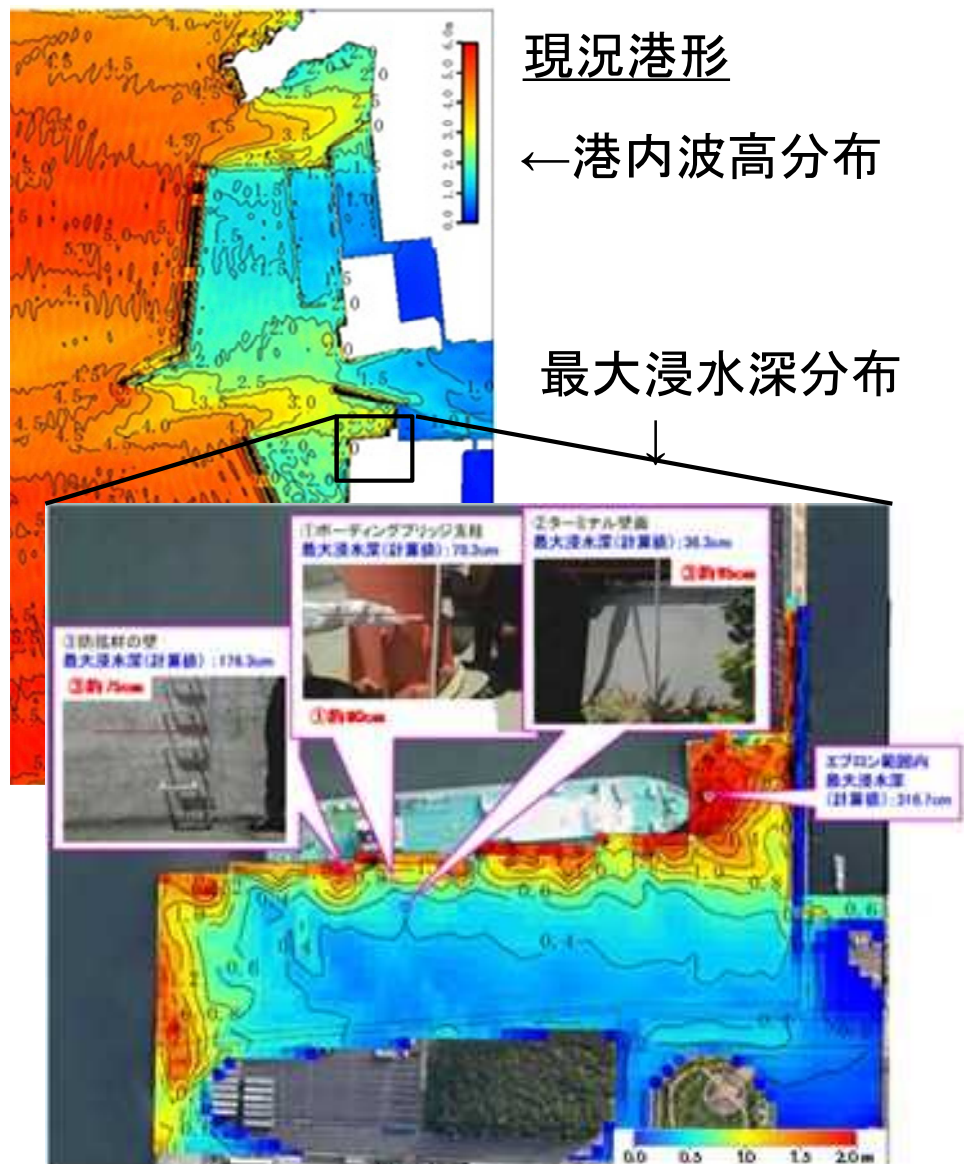
浸水計算

越波量計算
CADMAS-SURF等

波浪変形計算
エネ法、高山法、ブシネスク法等

波浪推算
スペクトル法等

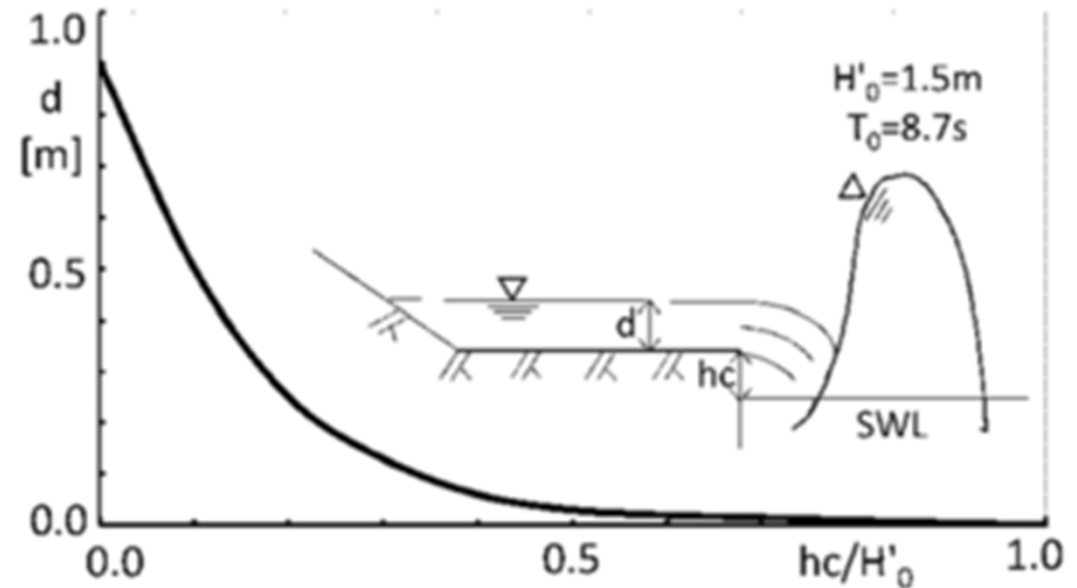




ターミナルへの 浸水

渡板の破損

コンテナ流出



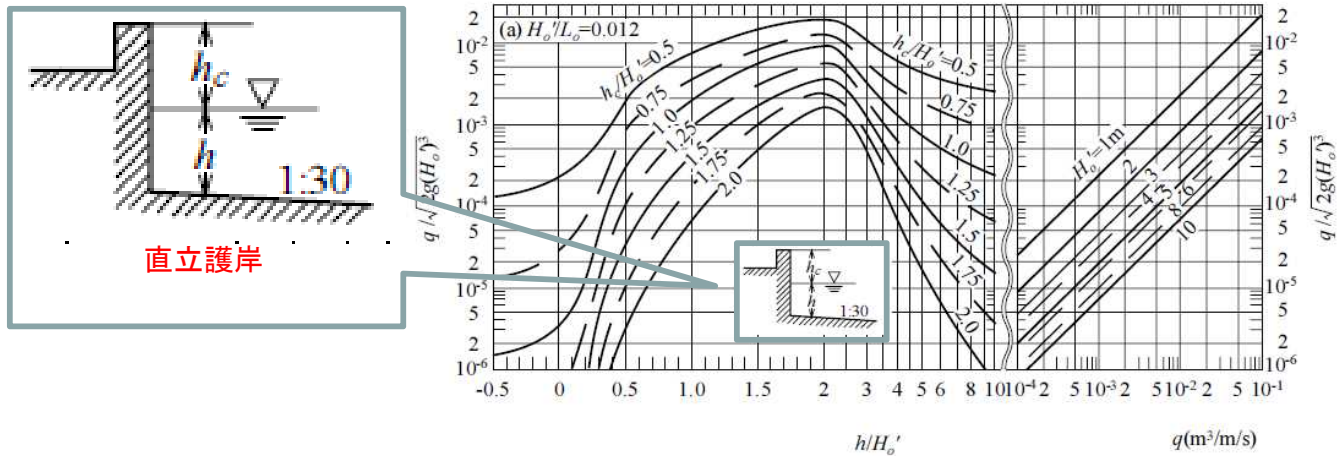
岸壁の相対天端高に対するコンテナヤード内の浸水深

一般的な海岸堤防とは異なり、越波水塊の一部は引き波時に海へと戻るため、想定される護岸越波量と関連づけて浸水域や浸水深を推定することは容易ではない

簡易にリスク評価を行うための手法の検討

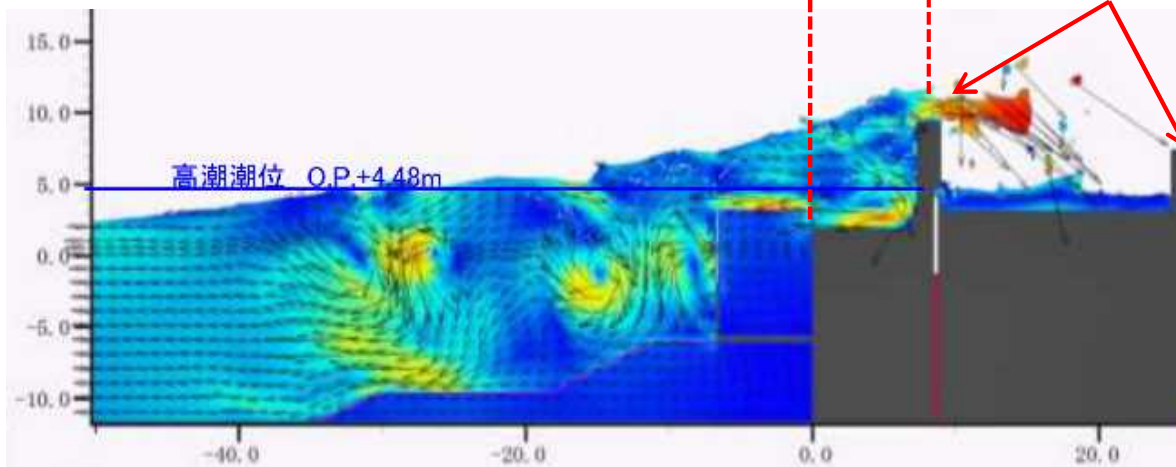
- 複雑な断面を持つ構造物(2重パラペット護岸等)については、簡易に越波量を計算する手法がない。
- 数値シミュレーションは複雑な断面にも適用できるが、時間とコストがかかるとともに、特に碎波を伴う場合には精度が低下し、波力や越波を過小評価する傾向にある。

【現行】算定図を用いた手法



直立護岸等の単純な断面については、波高、護岸前面水深等から算定図を用いて越波流量を算定可能。

【現行】シミュレーション



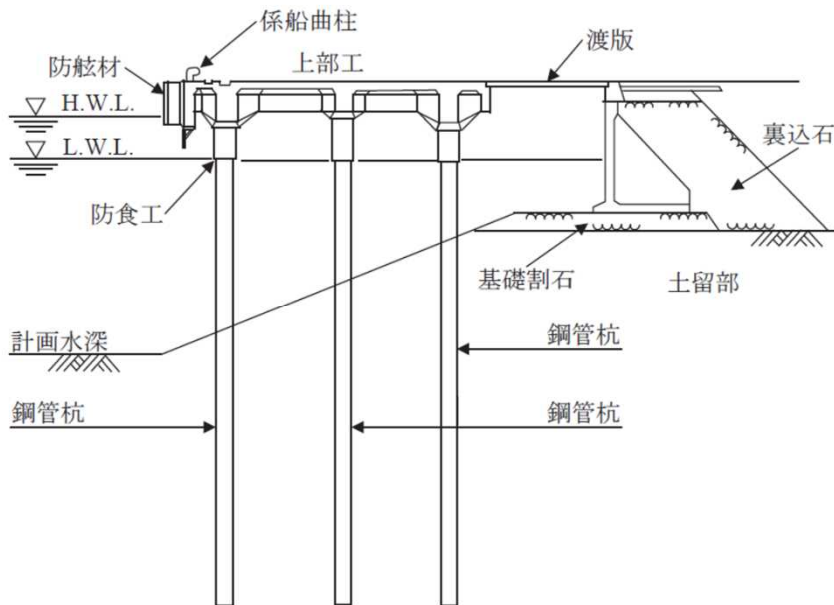
数値シミュレーションは複雑な断面にも適用できるが、時間とコストがかかる。

栈橋に働く揚圧力の検討

○栈橋に働く揚圧力については、下記の検討を行う必要があるのではないかな。

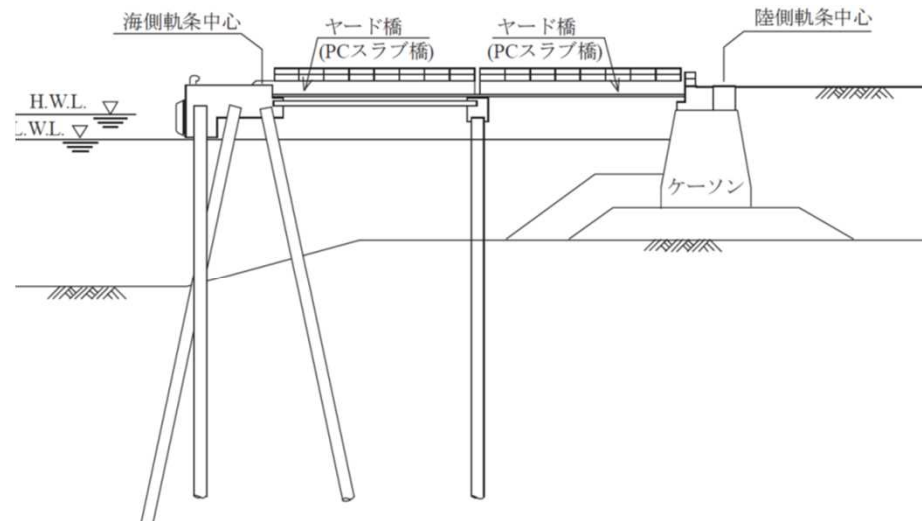
1. 栈橋の床板と静水面のクリアランスが小さくなると波力が大きくなるため、海面上昇によるクリアランスの減少で、揚圧力が設計を超える可能性がある
2. 周期や波向きによる波力の算定法が不十分
⇒ 重複波の節と腹の位置の違いによる波力算定等、詳細な検討ができない
3. 空気を介在した波力が重要になるため、現状の数値計算では算定が難しい

直杭式横栈橋の断面



$$p = 4\rho_0 gH$$

デタッチドピアの断面



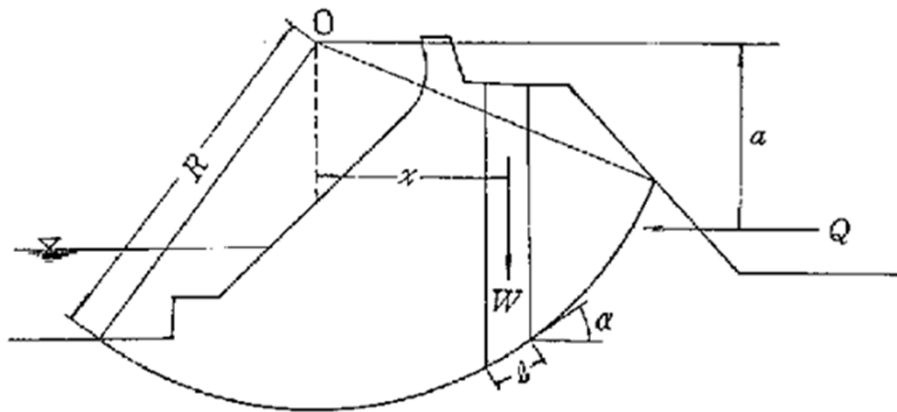
$$p = 2\rho_0 gH$$

p : 揚圧力のピーク値の平均値 (kN/m²)
 $\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)
 H : 入射波高 (m) (最高波高)

護岸の地盤安定性の検討

- 高波によって被覆工内部の地盤を含む護岸崩壊が発生しているが、その安定性照査方法が十分に検討されていない。
- 海面上昇によって地下水位が上昇し、地盤の安定性は低下すると考えられ、その効果を取り入れた安定性照査方法を検討する必要がある。

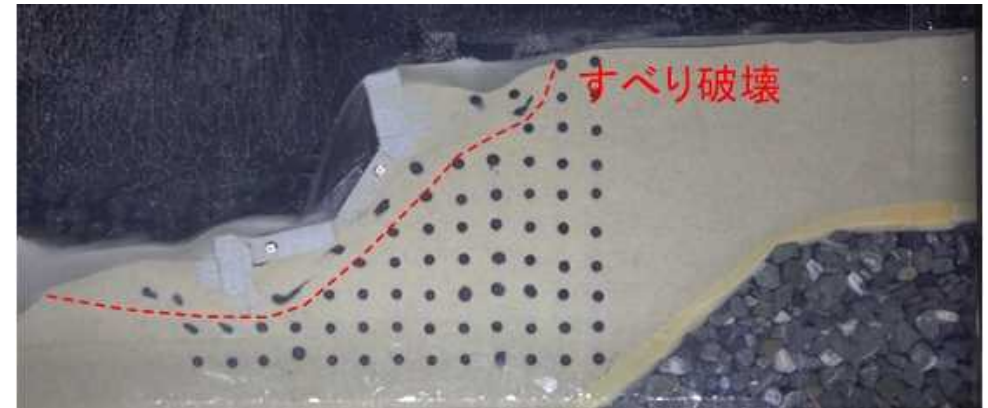
現行の安定性照査手法



※海岸基準より

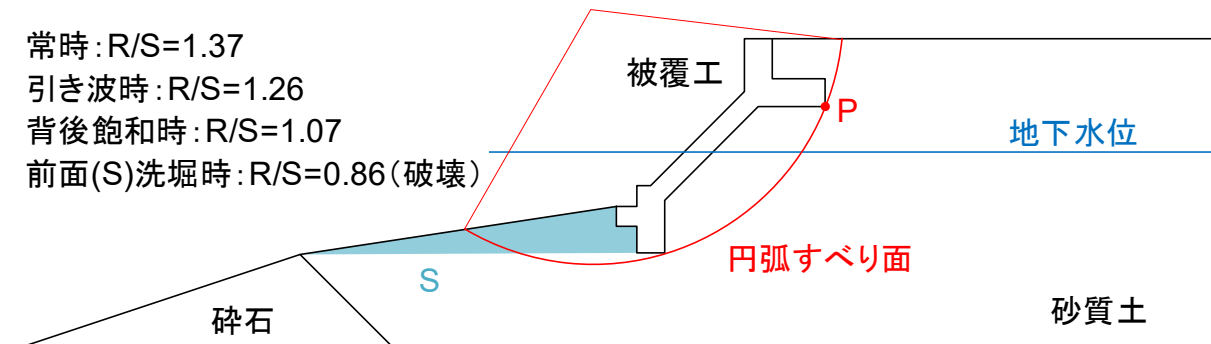
護岸前の水位や地盤内の地下水面・飽和状態が地盤の安定性に影響を与えることが分かってきているが、現行の安定性照査では水理条件が十分に考慮されていない。

遠心模型実験による破壊現象の再現

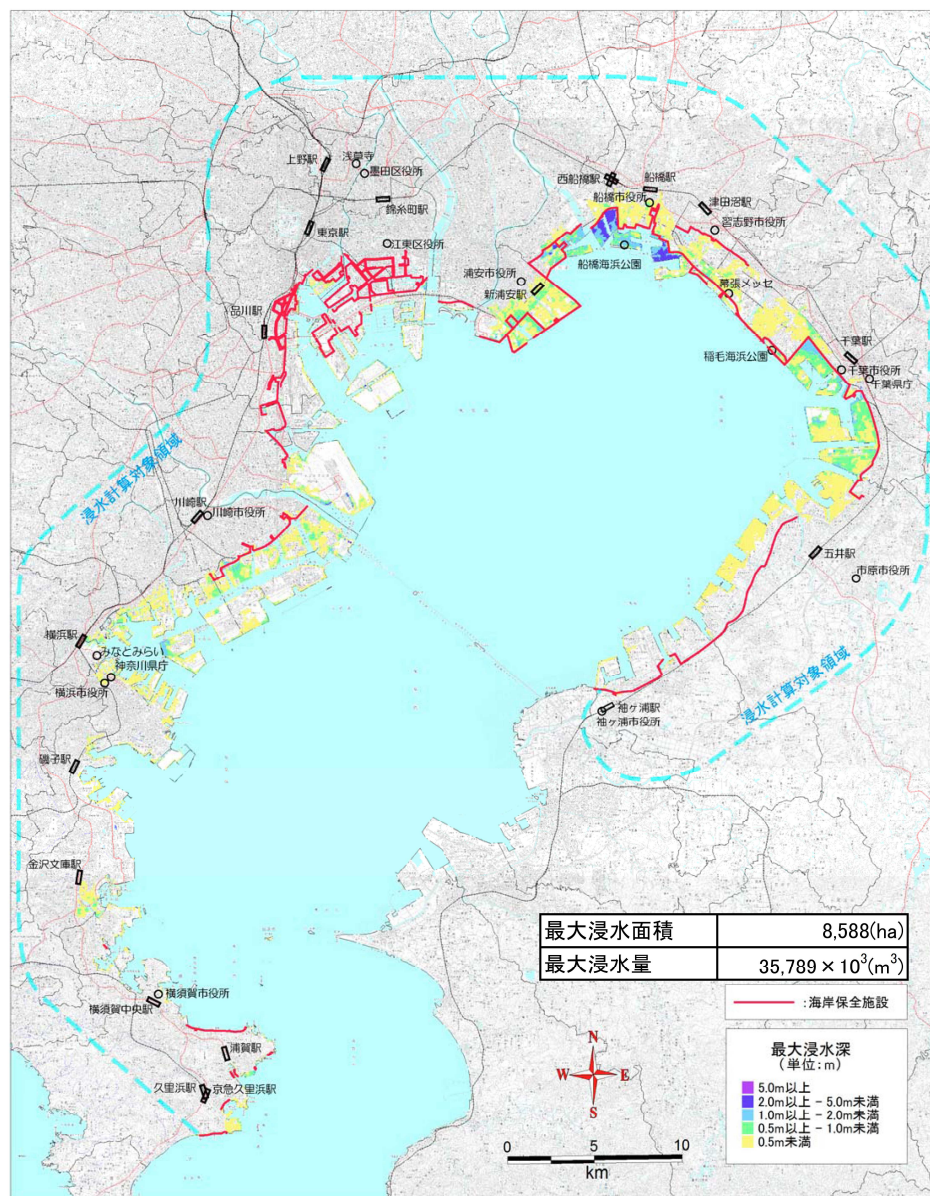


円弧すべり解析

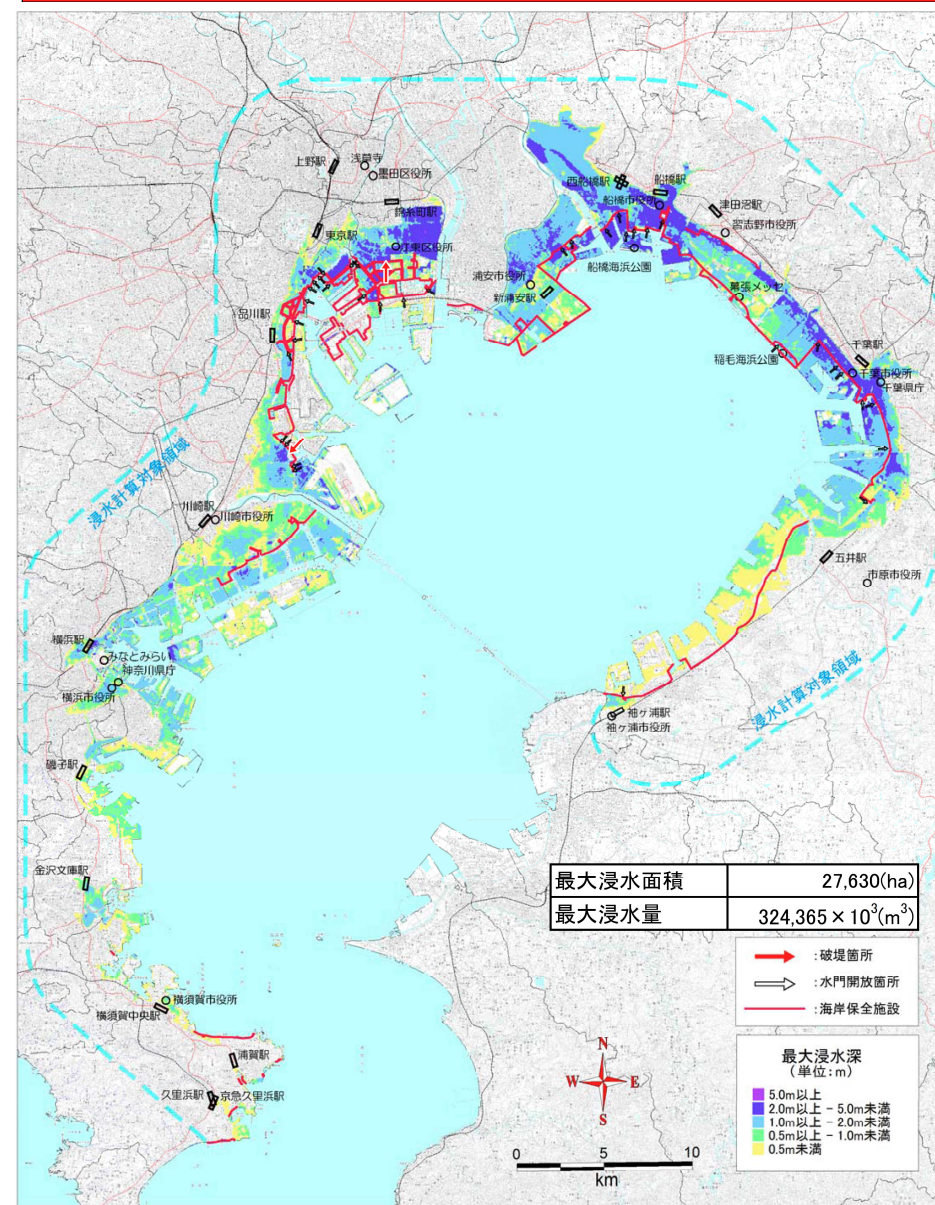
常時: $R/S=1.37$
 引き波時: $R/S=1.26$
 背後飽和時: $R/S=1.07$
 前面(S)洗堀時: $R/S=0.86$ (破壊)



シナリオA 海岸保全施設等の機能は正常、伊勢湾台風級
温暖化による水位上昇考慮しない



シナリオF 全水門開放及びゼロメートル地帯で破堤
室戸台風級、温暖化による水位上昇を考慮 (+0.6m)



注1: 海岸保全施設については海岸省庁(水産庁、農林水産省農村振興局、国土交通省河川局(当時))及び海岸管理者の協力を得て、平成20年度末の天端高及び耐震化状況を設定。

注2: 本想定は、東京湾沿岸部分からの越波・越流等による浸水想定結果を示したものであり、河川からの氾濫浸水及び排水については考慮していない。

注3: 本想定は、東京湾沿岸全体で影響人口が最も大きくなると推測される台風コースを設定した場合の最大浸水深を示したものである。

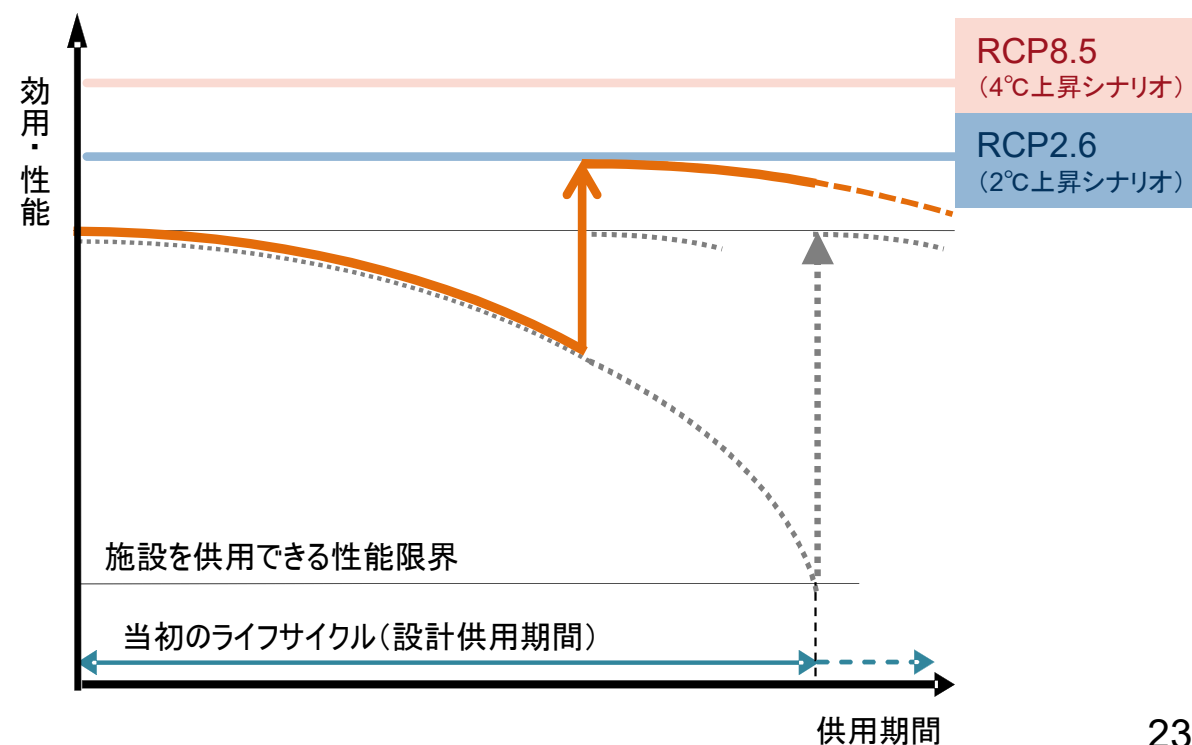
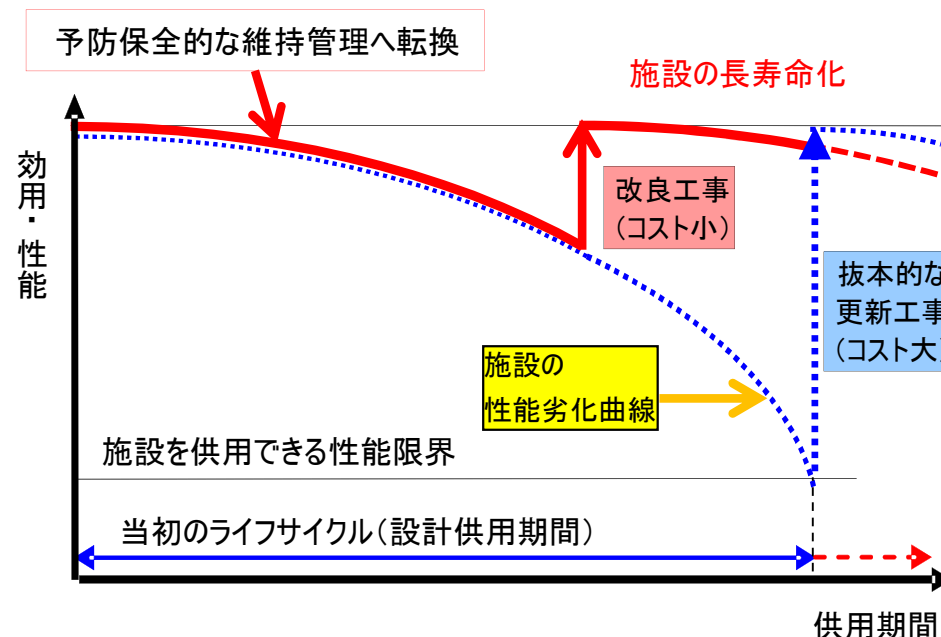
地域によっては、台風コースにより、本想定よりも最大浸水深が大きくなる可能性がある。

予防保全型維持管理

- 維持管理計画に基づく適確な維持管理の推進。
(特に将来においても確実な機能確保が必要な施設については重点的に維持管理を実施。)
- あわせて更新・修繕費の縮減・平準化を図るため、
予防保全の考え方に立った維持管理を推進。

気候変動の影響を考慮した維持管理のイメージ

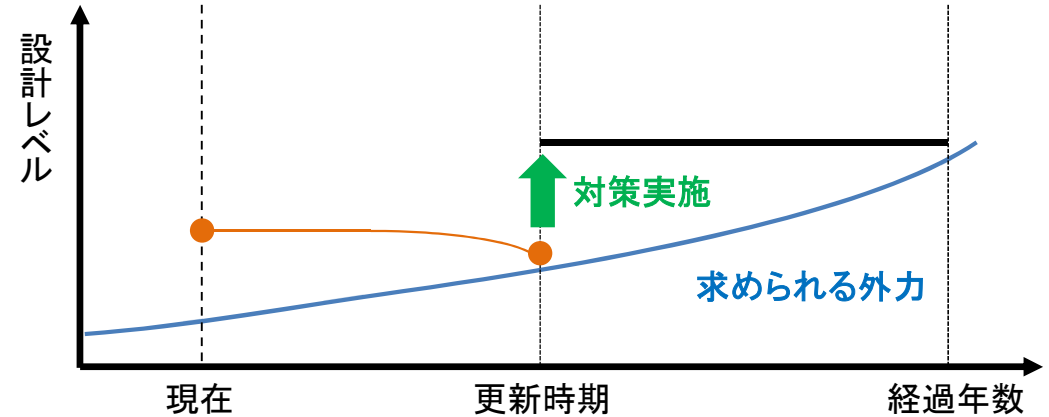
- 上記の予防保全型維持管理を想定しつつ、補修の段階で、今後の外力増大を見据えた更新を行う必要があるのではないか。



気候変動適応策の実施タイミング

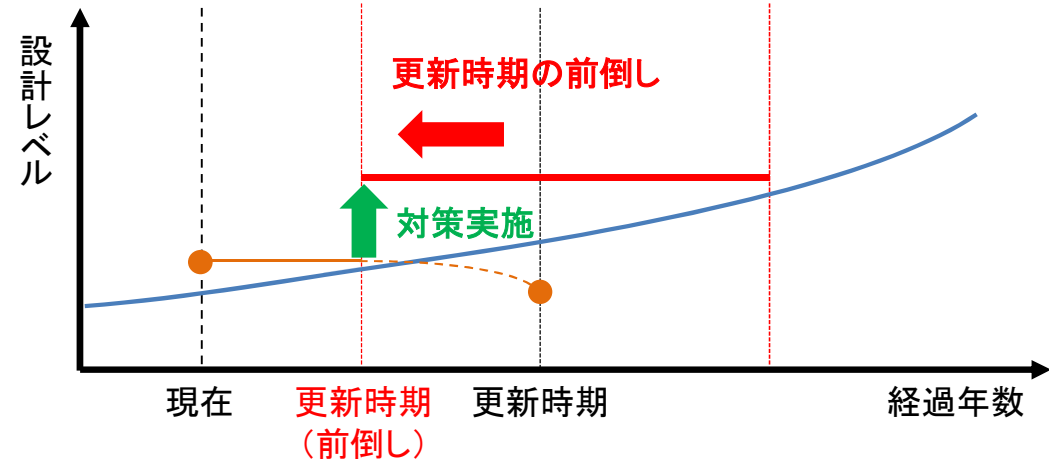
更新時まで必要な性能を満たすケース

- 更新時に将来の気候変動影響の見込みを加味した必要な外力レベルを設定し、それに基づいて対策を実施



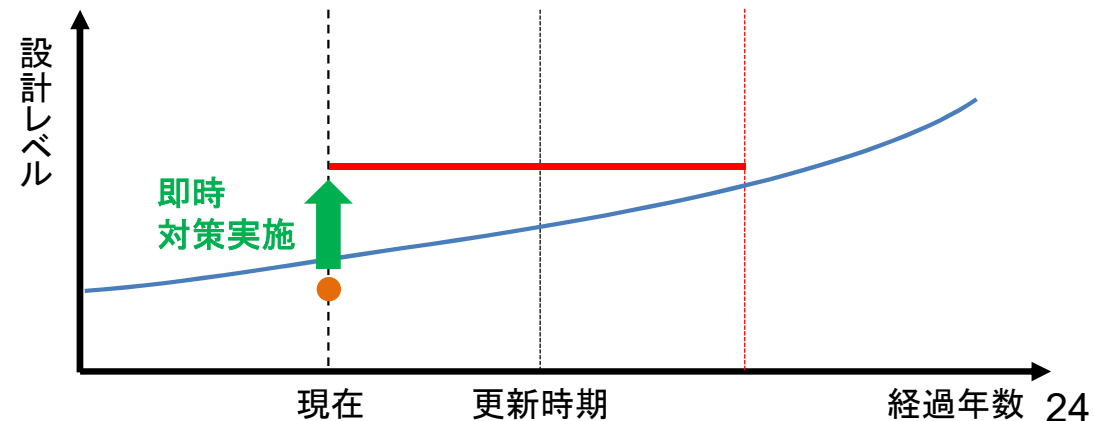
現在は必要な性能を満たしているが、更新時期までに不足するケース

- 更新時期を前倒して、その時点における気候変動影響の見込みを加味した必要な外力レベルを設定し、それに基づいて対策を実施



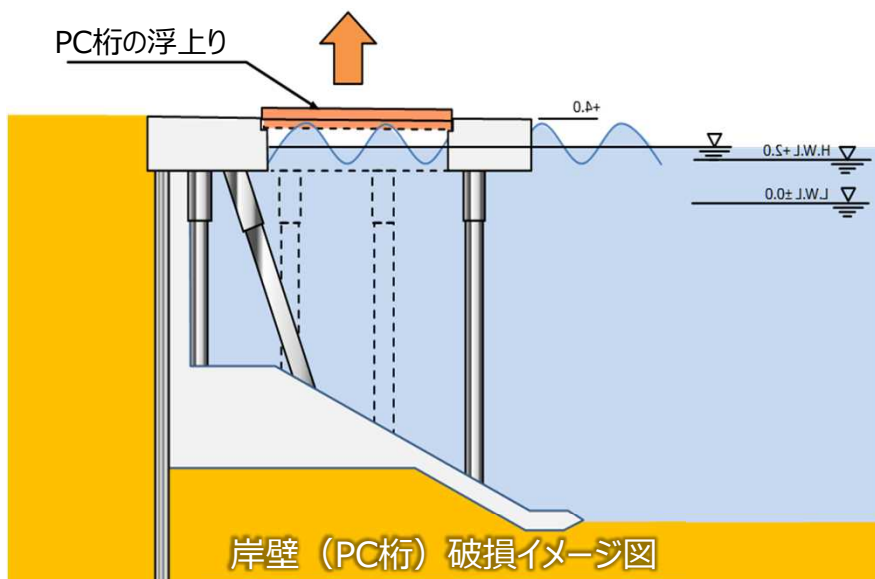
現在、必要な性能を満たしていないケース

- 速やかに気候変動影響の加味した必要な外力レベルを設定し、それに基づいて対策を実施



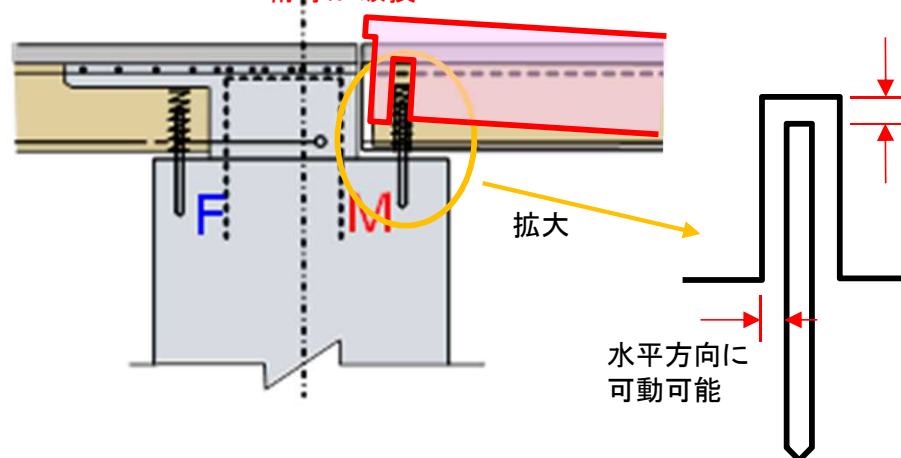
被災外力に対応した復旧（川崎港（東扇島地区）コンテナターミナルの例） E-④

- 令和元年東日本台風では、川崎港東扇島地区において、揚圧力で栈橋の床版が破損する被害が発生。
- 今後も同様の被害が発生することが懸念されるため、再度災害防止の観点から改良復旧を行っているところ。



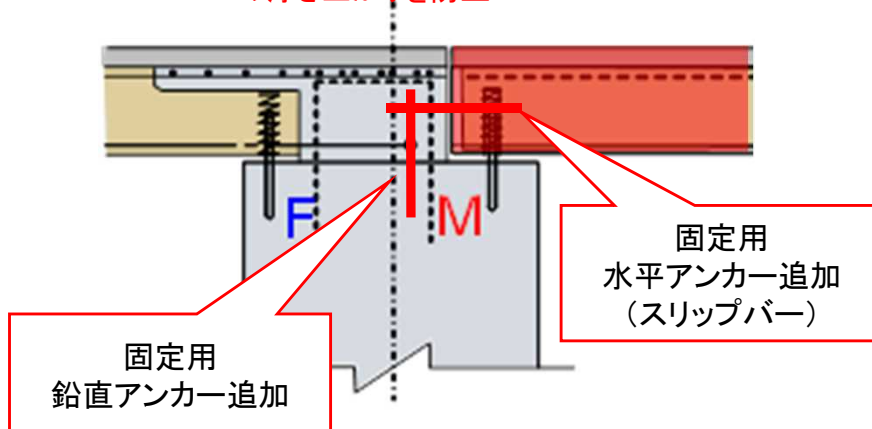
被災断面

PC桁とアンカー固定されていないため、波浪による揚圧力によりPC桁が浮き上がり、PC桁等が破損



復旧断面

固定用鉛直アンカーを新たに設置し、PC桁と鉛直アンカーとを水平アンカーで固定することにより、PC桁の浮き上がりを防止

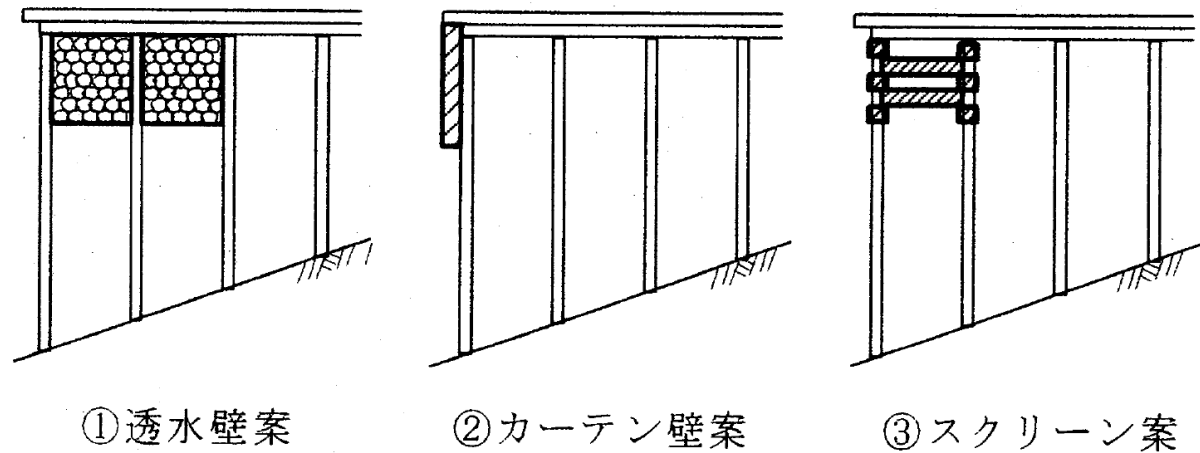


○波力を低減する工法の検討が必要ではないか。

栈橋海側で入射波を低減

栈橋前面に前垂れ壁等を設置

大中晋, et al. "消波用スクリーンを有する
栈橋に作用する揚圧力に関する実験的研
究." 海洋開発論文集 20 (2004): 743-748.



栈橋下部に入射した波の エネルギーを消費

陸側護岸前面に消波ブロック
を設置

木村克俊, et al. "床版下に消波工を有する
栈橋の水理特性について." 海岸工学論文
集 52 (2005): 786-790.

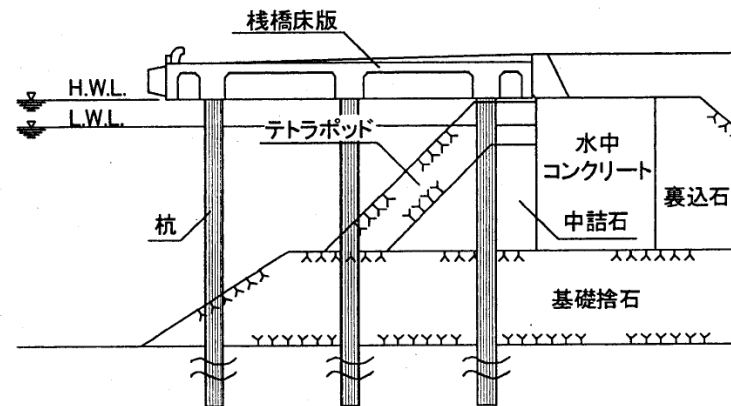


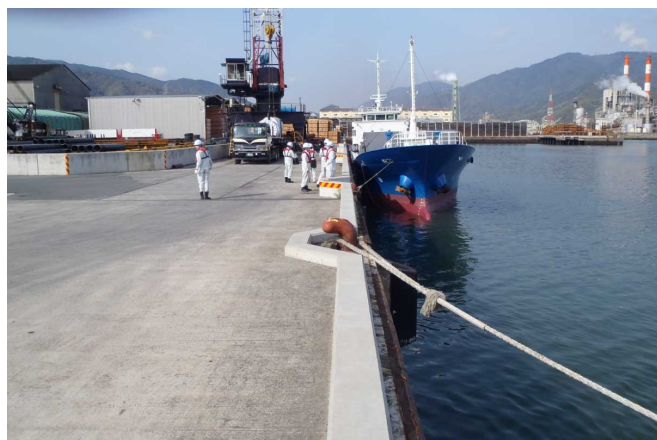
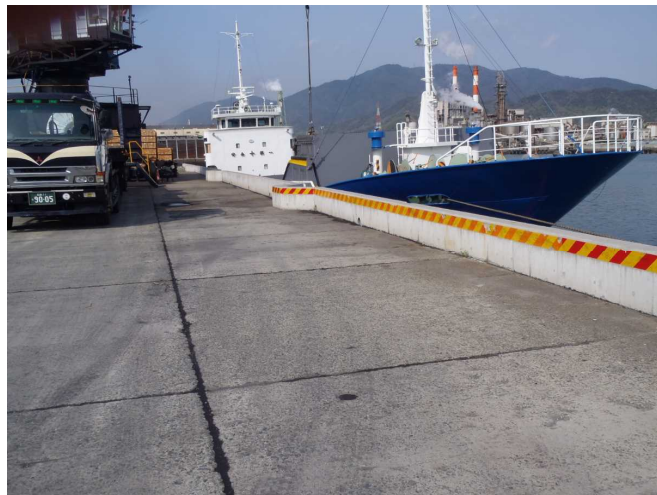
図-1 消波型栈橋

係留施設上の車止めを活用した暫定的な高潮対策(呉港の例)

- 呉港では、老朽化の進展により1m沈下した栈橋が、通常の大潮高潮時にも岸壁上まで冠水し、荷役作業に支障をきたしていたことから、港湾管理者である呉市が緊急的な対応として、既存の車止めを撤去し、新たに連続した壁上の車止めを整備。(最大60cm)
- その後、予防保全事業を実施したため、現在、車止めは撤去されているが、暫定的な高潮対策として越波の抑制効果が期待できる。



岸壁沈下に伴うエプロン浸水(呉港広地区)



浸水被害防止のための暫定対策としての車止め嵩上げ

- ハンブルク港では、高潮による被害を防止するため、コンテナターミナルの岸壁法線に防潮壁を設置。
- 海外の事例を参考に、技術的な検討を行う必要があるのではないか。

