

数値波動水槽を用いた将来気候場における防波堤の性能評価について

澁谷 容子*・安達 昭宏**・中村 隆志***・北澤 健二****・坎 美瑞保*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 関西支部長

*** (株) エコー 上席技師

**** 前 国土交通省 近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 工務課 工務課長

***** 前 国土交通省 近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 工務課 工務係長

気候変動に伴う沿岸外力の変化による影響評価が様々行われており、港湾分野においても令和6年度に「港湾の施設の技術上の基準」が部分改訂され、各港湾において気候変動への適応策が進められている。水理模型実験により耐波性能やブロックの安定性が検討された防波堤に対して、気候変動対策を実施しようとした場合、費用及び時間的制約があることから新たに水理模型実験を実施することは困難である。そこで、数値波動水槽を用いて数値解析を実施し、水理特性の把握を試みた。解析結果をもとに波圧分布等の見直しを行った結果、将来外力や対策工に対する防波堤の安定性の照査を行うことが可能であることが確認された。

キーワード：消波ブロック被覆堤、上部パイラー形式、気候変動、数値波動水槽、波圧分布

1. はじめに

気候変動に伴う沿岸外力の変化は、海面上昇、波浪特性の変化、台風強度の増大による高潮偏差の増加などが予測されており、それらに伴う影響評価が様々行われている。港湾における気候変動対策については、令和2年8月に交通政策審議会より答申された「今後の港湾におけるハード・ソフト一体となった総合的な防災・減災対策のあり方」を受け、有識者委員会により実施方針が示された。これを受け、令和6年度に「港湾の施設の技術上の基準」が部分改訂され、各港湾で気候変動への適応策が進められている。一方、全国には水理模型実験を基に整備された防波堤が多数あるが、気候変動条件下では設計当時と外力条件が異なるため、適応策の検討には更なる水理模型実験等が必要である。本報告は、水理模型実験を基に設計された既存防波堤を対象に、CADMAS-SURF/3D¹⁾を用いて将来気候場における性能を評価した事例を報告するものである。対象施設である防波堤は、構造形式に「上部パ

イラー形式防波堤」が採用された特殊な構造である。消波ブロック被覆堤の上部コンクリート部にコンクリート製のパイラーを設置することで消波ブロックの使用量を減少させるとともに、堤体に作用する波力を低減させる特徴をもつ。このような特殊な構造であることから、原設計における耐波性能やブロックの安定性は水理模型実験^{2),3)}により検討されている。

対象施設の断面を図-1に示す。原設計の際には水理模型実験により波高伝達率および作用波圧を計測し、それらをもとに性能および安定性の照査が行われている。その後、原設計から津波作用時の粘り強い化による改良(後部パラペットの嵩上げ等)が行われている。この現況断面において、将来外力に対する各構造物の必要諸元や耐波安定性(水理特性)を適切に評価する必要があるものの、費用及び時間的制約から新たに水理模型実験を実施することは困難である。

そこで、将来外力に対する水理特性(波高伝達率および作用波圧)を把握するため、CADMAS-SURF/3Dを用いて数

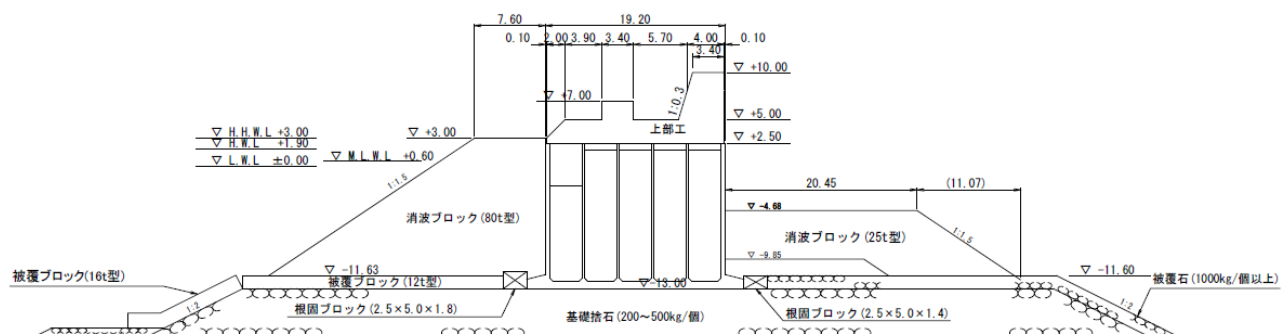


図-1 対象施設の断面図

値解析を実施した。原設計における水理模型実験の再現計算を行うとともに、現在および将来気候場における水理特性の把握を行った。再現計算を実施した際に、原設計で用いられた波圧分布と異なる形状の波圧分布が認められたため、波圧分布の見直しを行った。本稿では、波圧分布の見直し方法を中心に述べる。

2. 作用外力

本検討に用いた潮位条件および波浪条件(50年確率波)を表-1に示す。水理模型実験は50年確率波を対象として行われたが、目標の50年確率波の $H_{max} = 15.7\text{m}$ を造波できなかったことから、実験水槽で造波可能な波高が用いられている。表-1の括弧内は水理模型実験における波浪条件を示している。

将来気候における作用外力は、気候変動シナリオのうち 2°C 上昇シナリオ(RCP2.6)を前提に、設計供用期間中の作用の上振れの可能性を考慮して中位シナリオおよび上位シナリオを設定したが、計算コストから上位シナリオのみ検討を行った。なお、将来を設定するための設計供用期間末は、21世紀末の2090年とした。気候変動を踏まえた潮位条件や沖波諸元の算定には、国総研資料No. 1302⁴⁾で整理された将来変化比の値を適用した。

将来気候場における天文潮位(平均海面水位)の上昇量は図-2に示すように線形的に上昇し続ける時間変化モデルにより算出した⁵⁾。図中の ΔL はSI-CAT海洋モデル^{6),7)}による成果を参考に、中位シナリオ39cm、上位シナリオ55cmとした。潮位偏差も同様に時間変化モデルを仮定したが、1980年以前は変化せず、1980年以降は線形的に増加する時間変化モデルとした⁶⁾。また、 2°C 上昇シナリオにおいては、森ら⁸⁾より2040年まで線形的に増加し、その後は変化しないものとした(図-3)。

表-1 潮位条件および波浪条件

	潮位 [D. L. m]	H_{max} [m]	$T_{1/3}$ [s]
実験再現計算	H. H. W. L. +3.00m	15.70 (14.06)	14.50 (14.90)
将来外力 (上位シナリオ)	H. H. W. L. +3.64m	16.84	16.30

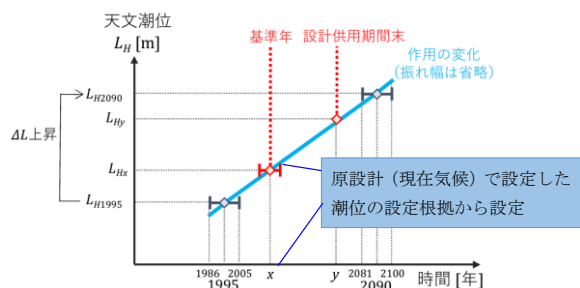


図-2 天文潮位(平均海面水位)の変化モデル(国総研資料No. 1281より引用に一部加筆)

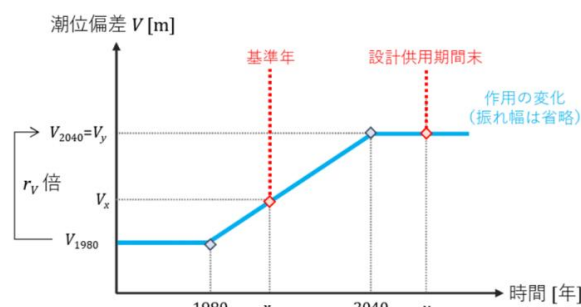


図-3 潮位偏差の変化モデル(国総研資料No. 1281より引用)

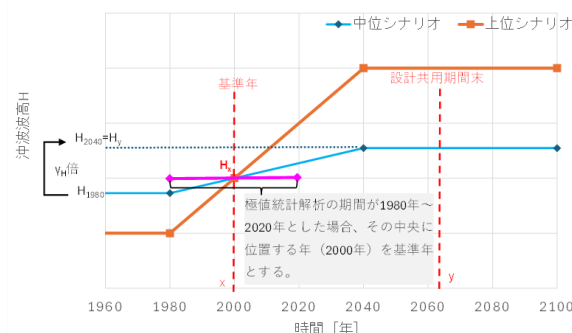


図-4 沖波波高の変化モデルイメージ

気候変動の影響を踏まえた沖波波高についても、潮位偏差と同様に1980年以前は変化せず、1980年以降は線形的に増加する時間変化モデルを仮定し、 2°C 上昇シナリオにおいても、2040年まで線形的に増加し、その後は変化しないものとした(図-4)。将来の沖波周期に関しては、基準年の沖波波高と周期の関係(沖波波形勾配)が同一となるよう設定した。さらに、設定した潮位条件および沖波条件をもとに設計波の算定を行い、対象施設の設計波の算定を行った。

3. 数値波動水槽モデルの設定

3.1 数値波動水槽のモデル化

水理模型実験時の模型床を図-5に、数値計算に用いた海底地形のモデル化のイメージを図-6に示す。また、計算両端部からの反射波が生じないように無反射条件とした。海底地形については、既往のH10年度の水理模型実験^{2),3)}より設定したが、作用波検定において構造物設置位置より沖側で碎波が生じたため、構造物設置位置で目標波高となるよう擦り付け部の勾配および水深を調整した。

3.2 構造物等のモデル化

消波ブロックやマウンド石材等の多孔質体は、D-F則(Dupuit-Forchheimer)による抵抗則を適用してモデル化を行った。上部パイラーは構造物として直接モデル化したためD-F則は適用しない。構造物については、既往の水理模型実験断面をベースにモデル化を行った。現況断面(津波(南海トラフ巨大地震)に対する粘り強い改修後)

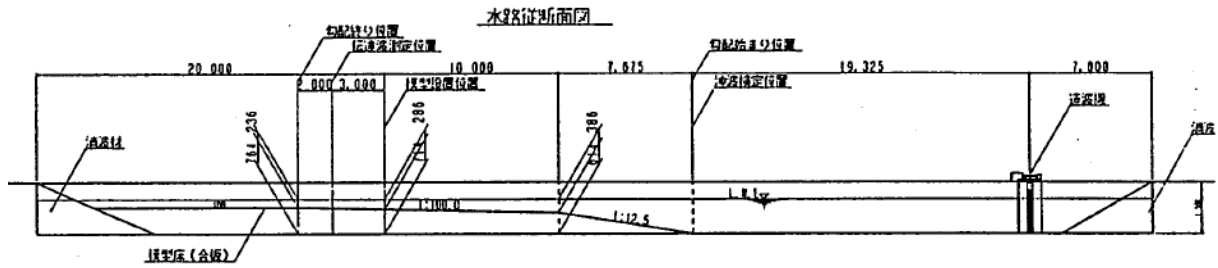


図-5 水理模型実験の模型床 (模型縮尺 1 : 70)

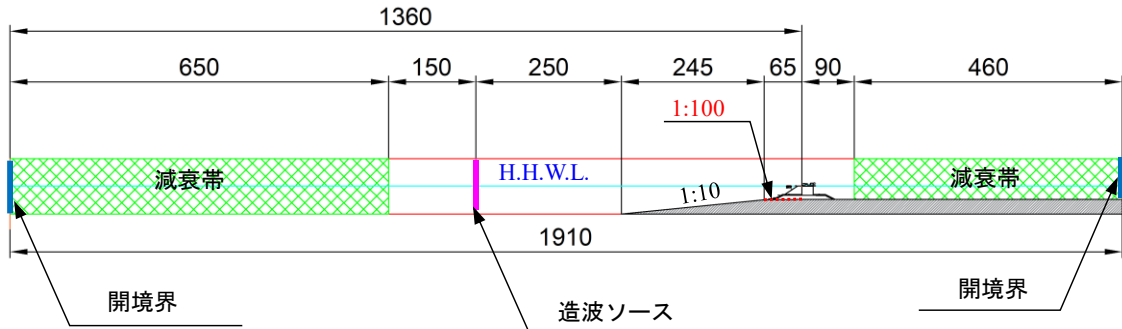


図-6 海底地形のモデル化

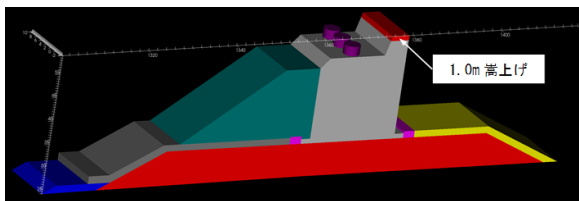


図-7 設定した構造物モデル (現況断面：粘り強い化)

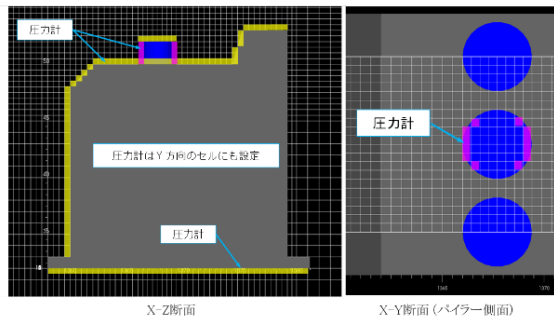


図-8 波圧計測位置

は、実験断面の後部パラペットを 1.0m 嵩上げた断面をモデル化した。設定した構造物モデルを図-7 に示す。

既往の水理模型実験では、波圧計の設置個数や設置可能位置に制限があり、全面を計測することができないため、耐波安定性を評価する波圧分布形状のモデル化を行っている。波圧の計測位置については、既往の水理模型実験の設置位置を参考に設定したが、CADMAS-SURF/3D による数値計算では、構造物全面の波圧を計測可能であり、本検討では各部材に作用する圧力および合成波力、作用波力の位相差を確認する観点から図-8 に示す位置を圧力計測点と設定した。なお、水理模型実験(縮尺 1/70)における圧力のサンプリング間隔は 1000Hz で実施されており、フルード則で実スケールに換算すると 120Hz であることから、本検討では圧力のサンプリング間隔は 100Hz とした。

3.3 作用波検定

表-1 に示す波浪条件を対象に構造物を設置しない状態で作用波検定を行った。作用波検定の結果を表-2 に示す。防波堤法線位置の波高に対して規則波を平均し、目標値に対して±5%以下の誤差となるよう造波信号の調整を行った。また、波浪到達時間を考慮し、水位変動の統計処理は、時系列結果のうち 60s～250s を対象に実施した。

表-2 作用波検定の結果

	H_{max} [m]			$T_{1/3}$ [s]		
	目標	計算	誤差	目標	計算	誤差
実験	15.70	15.19	-3.2%	14.90	14.81	-0.6%
将来	16.84	16.63	-1.2%	16.30	16.24	-0.4%

4 対象断面における水理特性把握

4.1 水理模型実験結果の概要

水理模型実験断面(原設計)を対象とした場合の波圧分布について確認を行った。既往の H10 年度の水理模型実験において 2 分力計で計測された波力の時系列波形を図-9 に示す。2 分力計で計測されているため、一般的に波が堤体に作用した瞬間に見られる衝撃的な挙動は現れていないことが確認できる。また、各位相での堤体にかかる波の状況を①から⑧のモードとして整理されている。滑動限界重量がピークとなる時点の波圧特性(モード⑤:原設計に用いられている波圧分布)を図-10 に示す。ケーソン前面と斜面、上部パイラーについて同時に波圧分布が作用するものとして整理されており、堤体に作用する波圧の位相差の影響は小さい結果となっている。しかし、一般的な後部パラペットを有する防波堤に作用する波圧は位相差が生じるため、特に後部パラペットに大きな波力

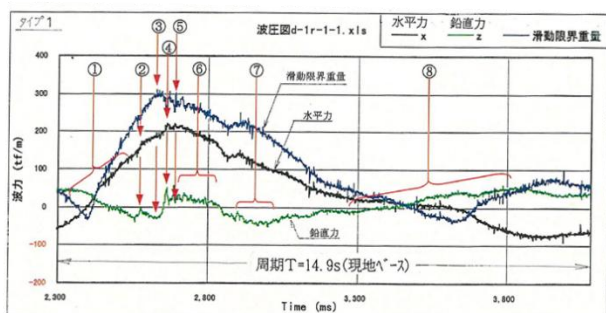


図-9 既往の水理模型実験の波力時系列図 (2 分力計の計測結果：豊島ら⁷⁾)

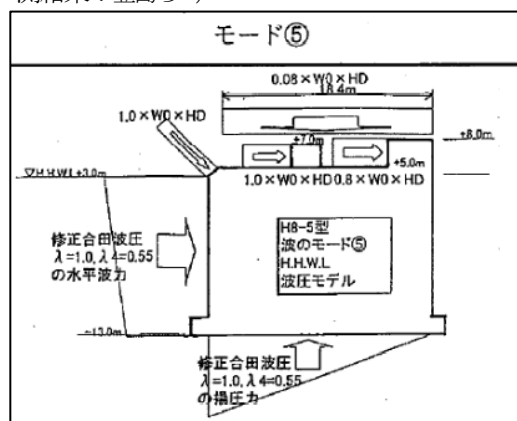


図-10 波圧特性 モード⑤ (原設計の安定性照査に適用されている波圧分布)

が生じるモード⑤の場合、後部パラペットに大きな波圧が作用した時点では前面波圧は低下している可能性が高い。このように原設計では安全側となるモードを用いて波圧分布がモデル化されていた。

4.2 水理模型実験の再現計算

既往の水理模型実験では、最も滑動に対して厳しい時点での波圧分布を整理し、波圧分布モデルを定式化している。本検討においても、滑動に対して最も厳しい時点の波圧分布を確認する観点から、1 波毎の滑動合成波力のピーク時の波圧分布について整理を行うものとし、滑動合成波力を以下で定義する。

$$\text{滑動合成波力} = P_H + \mu(P_V + P_u) \quad (1)$$

ここに、 P_H は堤体全体に作用する水平波力の合力、 P_V はケーソン前壁斜面部に作用する鉛直下向きの波力成分と上部工上面における鉛直波力の合力、 P_u はケーソン底面に作用する揚圧力の合力 (上方向の荷重) を表す。 μ は摩擦係数 (水理模型実験に合わせ 0.7 とする。) である。また、鉛直波力は上向きをプラス、下向きをマイナスとして取り扱う。

図-11 に解析結果の一例のスナップショットを示す。図化にあたっては、数値解析で算出された全水圧から初期の静水圧を控除し、波浪による変動圧のみを示している。波圧計測位置における波圧を集計し、各部材の波力と滑動合成波力として整理を行った。滑動合成波力最大時の各部材の作用波力を図-12 に、滑動合成波力が最大となっ

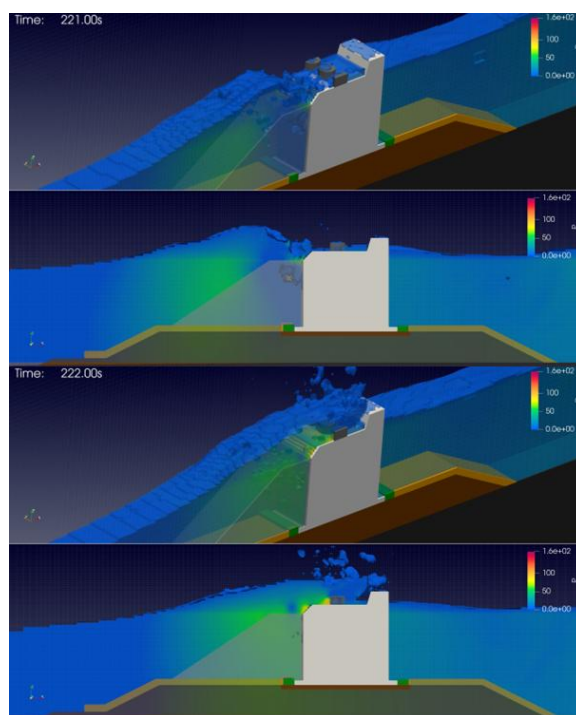


図-11 波圧作用時のスナップショット (実験断面)

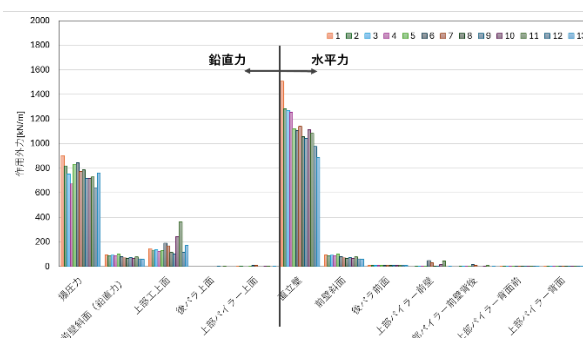


図-12 滑動合成波力最大時の各部材作用波力 (実験断面)

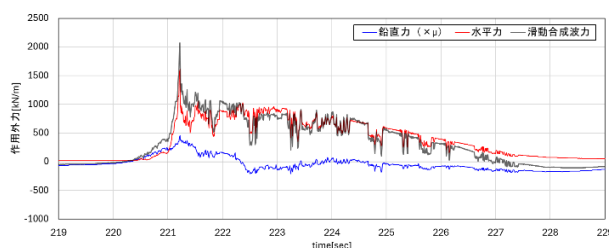


図-13 滑動合成波力の最大時の合成波力波形 (実験断面：1 波)

た 1 波の時系列波形を図-13 に示す。図-12 より最も厳しくなる滑動合成波力最大時は、ケーソン前壁の波力と底面の揚圧力が大きくなる時点であり、水理模型実験で確認されたような後部パラペットに大きな波力が作用する状況は確認できない。また、図-13 より CADMAS-SURF/3D の計算結果ではスパイク状の波力が作用した瞬間に滑動合成波力が最大となっているが、水理模型実験からはその傾向は確認されない。水理模型実験では、作用波検定時

に沖波で砕波が発生し目標波高よりも小さい波高で検討したとの記述があり、堤体に波が到達する前に砕波し、波形が崩れた状態で作用したものと推察される。滑動合成波力が最大時の特徴を以下に整理する。

- ・ ケーソン前面に作用する波圧分布は、既往設計で用いられた波圧分布形状に近いことが確認された。
- ・ ケーソン斜面部は、水理模型実験のような大きな波力は観測されていない。これは、波頭部の打ち込みが発生しなかったためである。
- ・ 揚圧力分布については、港外側の P_u は既往設計で用いられた分布よりも小さいが、台形状の波圧分布となることが確認された。
- ・ 上部工上面に作用する鉛直波圧は、パイラー部より背後に位置する範囲で、既往設計で用いられた波圧分布形状に一致している。一方、パイラー部よりも前面に位置する範囲では、ばらつきがあるものの、既往の波圧分布よりも鉛直力が大きくなった。
- ・ 上部パイラーには波圧が作用する場合と作用しない場合がある。
- ・ 後部パラペットには、大きな波力は作用していない。

以上のように、水理模型実験と数値解析では傾向が異なることが確認された。

5. 波圧分布のモデル化

CADMAS-SURF/3D の解析結果から耐波安定性に最も厳しい滑動合成波力最大時の波圧分布を整理した結果、原設計で適用された波圧分布とは異なる点を確認された。特に、ケーソン前壁と後部パラペットに作用する波圧の位相差が顕著に出ている点が重要である。水理模型実験は複数年に渡って実施されており、H8 年度の実験では CADMAS-SURF/3D の解析結果と同様にケーソン前壁から斜面部までに波圧が作用している状態が最も厳しい状況として整理されている⁹⁾。H10 年度の実験結果との波圧の作用状況の違いは、波頭部の打ち込み位置のばらつきが影響していると推察される。

後部パラペット構造の波圧の位相差に関する既往知見として、岡部ら¹⁰⁾の検討がある。岡部らは後部パラペット型上部斜面堤の作用波圧について水理模型実験結果を詳細に調べ、波力が直立部に作用する Phase-1 と、パラペット部に作用する Phase-2 に分類されること、またこの 2 つの Phase は同時に発生しないことを確認している(図-14)。H10 年度実験結果から、滑動限界重量最大時において後部パラペットに波圧が作用し、直立壁には合田波圧 ($\lambda_1=0.8$) 以下の波圧が作用している。また、CADMAS-SURF/3D による解析結果では揚圧力が台形分布であった。これらを踏まえ、水面より露出している部分は過去の実験式を、水中部は CADMAS-SURF/3D の計算結果を採用し、波圧分布のモデル化を行った。なお、港内側端の揚圧力は、CADMAS-SURF/3D の計算結果では港外側の揚圧力の 0.3 ~ 0.4 倍程度であったが、作用する際の波面のばらつき等を踏まえ、安全側となる 0.5 倍とした。モデル化した波圧分布を図-15 に示す。

次に、粘り強い化が行われている現況断面において将来気候場の計算を行った。滑動合成波力最大時の各部材

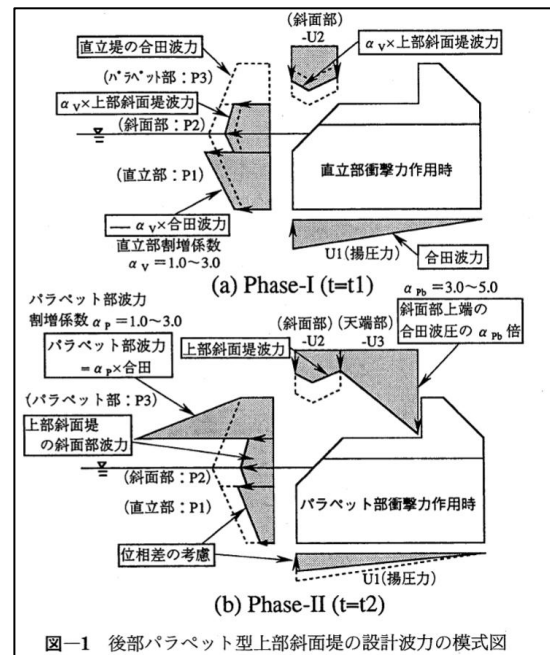


図-14 岡部ら⁹⁾が示した Phase 別の波圧分布

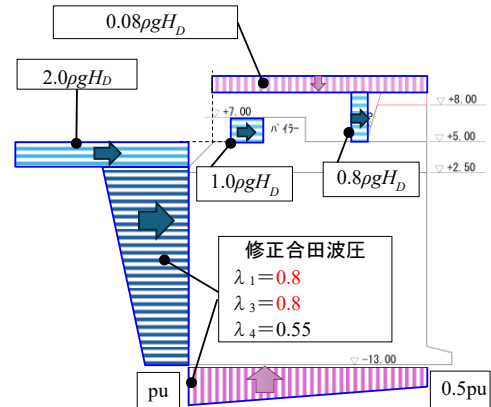


図-15 耐波安定性照査に用いるモデル化した波圧分布 (現況断面用)

の作用波力を図-16 に、合成波力の波形を図-17 に示す。図-16 より滑動合成波力最大時の波圧分布は、水理模型実験の再現計算(図-12)と同様の傾向を示していることが確認された。滑動合成波力の最大時の合成波力形状も似た形状を示している(図-13 および図-17)。よって、図-15 のモデル化した波圧分布を用いて現況断面における安定性照査の評価が可能である。また、対策断面案(消波工拡幅・嵩上げ)に対する滑動合成波力最大時の各部材の作用波力の例を図-18 に、合成波力の波形の例を図-19 に示す。図-16 と図-18 を比較すると後部パラペットと上部パイラーに作用する波力および抵抗側に作用する上部工上面の波力が増加していることが確認された。これらを踏まえ、直立壁、斜面部、上部工上面、揚圧力の作用波圧の見直しを行いモデル化した波圧分布を図-19 に示す。以上のように、水理模型実験の代替として、CADMAS-SURF/3D により得られた滑動合成波力の各部材の作用波力等により波圧分布をモデル化することで、将来気候場における様々な対策検討が可能であり、検討におけるコストおよび期間の縮減も図られる。

6. おわりに

本検討では、「上部パイラー形式」の特殊構造の防波堤を対象にCADMAS-SURF/3Dを用いて現在および将来気候場

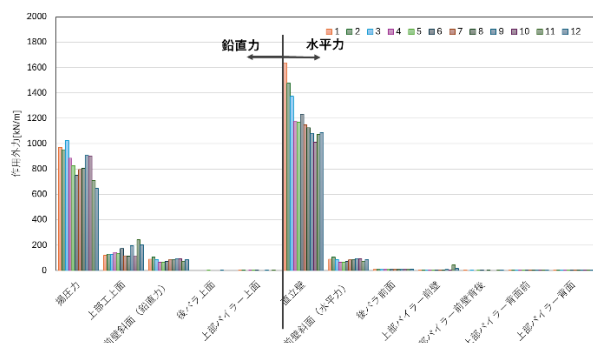


図-16 滑動合成波力最大時の各部材作用波力
(現況断面)

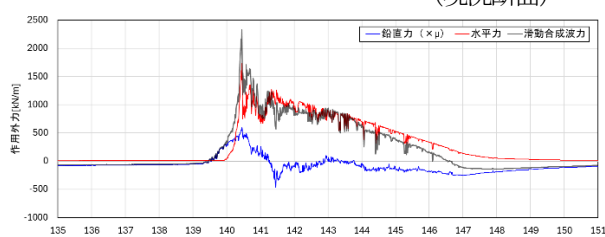


図-17 滑動合成波力の最大時の合成波力波形
(現況断面：1波)

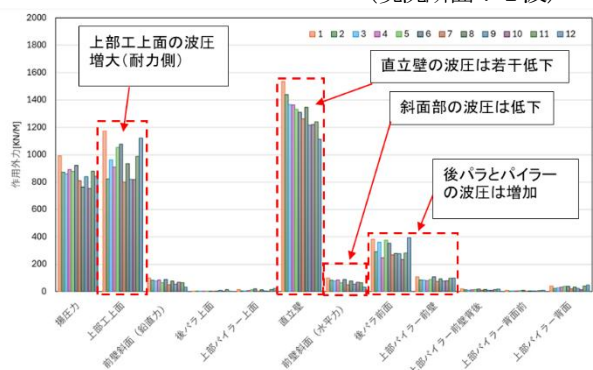


図-18 滑動合成波力最大時の各部材作用波力の例
(対策断面)

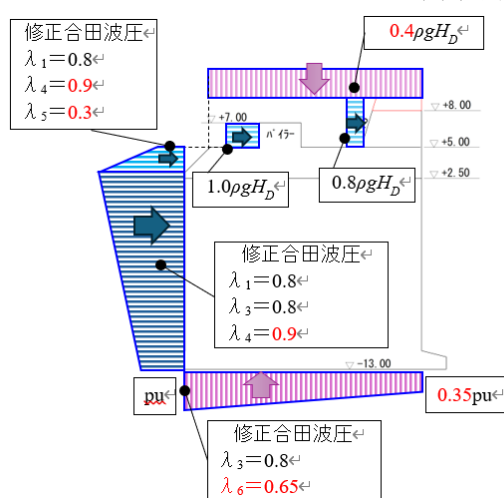


図-19 モデル化した波圧分布の例 (対策断面用)

における水理特性の把握を行った。水理模型実験の再現計算を行った結果、実験結果とは異なる波圧分布が確認され、実験結果を参考にモデル化された波圧分布は安全側に設定されていたことがわかった。そこで、水理模型実験結果を参考に数値計算の結果を反映させ、波圧分布の見直しを行った。最大クラスの津波（南海トラフ巨大地震）に対する粘り強い化の改良が行われている現況断面において、水理模型実験と同様の波圧分布が確認されたことから、水理模型実験結果を参考に見直した波圧分布を用いて安定性照査を行うことが可能となった。さらに同様の方法により、対策断面等においても、CADMAS-SURF/3D による計算結果により波圧分布をモデル化することで、様々な対策検討が可能となった。水理模型実験を行わずにCADMAS-SURF/3D で検討を行うことで、コスト縮減と調査の効率化を図ることが可能である。

謝辞

本稿は、国土交通省近畿地方整備局和歌山港湾事務所発注業務の成果の一部をまとめたものです。業務の遂行にあたっては、有識者の方々および関係者の皆さまから貴重なご意見、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) 財団法人 沿岸技術研究センター：沿岸技術ライブラリーNo. 39 CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，2012.
- 2) 櫻井定三・菅谷幹夫・榊俊博・遠山憲三：上部パイラー形式防波堤水理模型実験，土木学会第53回年次学術講演会概要集，pp.336-337，1998.
- 3) 豊島照雄，榊俊博，田宮厚実，河崎尚弘，森本徹，中嶋道雄：上部パイラー形式防波堤における波圧特性について，海洋開発論文集，第16巻，pp.13-18，2000.
- 4) 本多和彦・成田裕也・平山克也・高川智博・森 信人・千田 優：日本沿岸の主要港湾における高潮・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.1302，2025.
- 5) 小林怜夏・竹信正寛・本多和彦・蒔苗嘉人・村田誠：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，国土技術政策総合研究所資料No.1281，2024.
- 6) 文部科学省：気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology)，2020.
- 7) 文部科学省・気象庁：日本の気候変動2020，2020.
- 8) 森壮太郎，森信人，志村智也，宮下卓也：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_942，2021.
- 9) 国土交通省近畿地方整備局：平成8年度 日高港御坊地区防波堤（西）水理模型実験報告書，1996.
- 10) 岡部成光，畑元浩樹，白石貴司，榊山勉，清水琢三，片山裕之：急勾配海岸における後部パラペット型上部斜面堤の実用的な設計法，海岸工学論文集，44巻，pp.841-845，1997.