

2. 数値解析手法の導入による整備水準の精査

2-1 数値解析手法の適用に向けた既往資料の収集整理

海岸保全施設の天端高算定への数値解析手法の適用検討のため、全国の漁港海岸から海岸保全施設の整備事例を10地区程度選定し、既存報告書等から検討に必要な設計条件を収集整理する。

2-1-1 モデル地区の選定

(1) 選定フロー

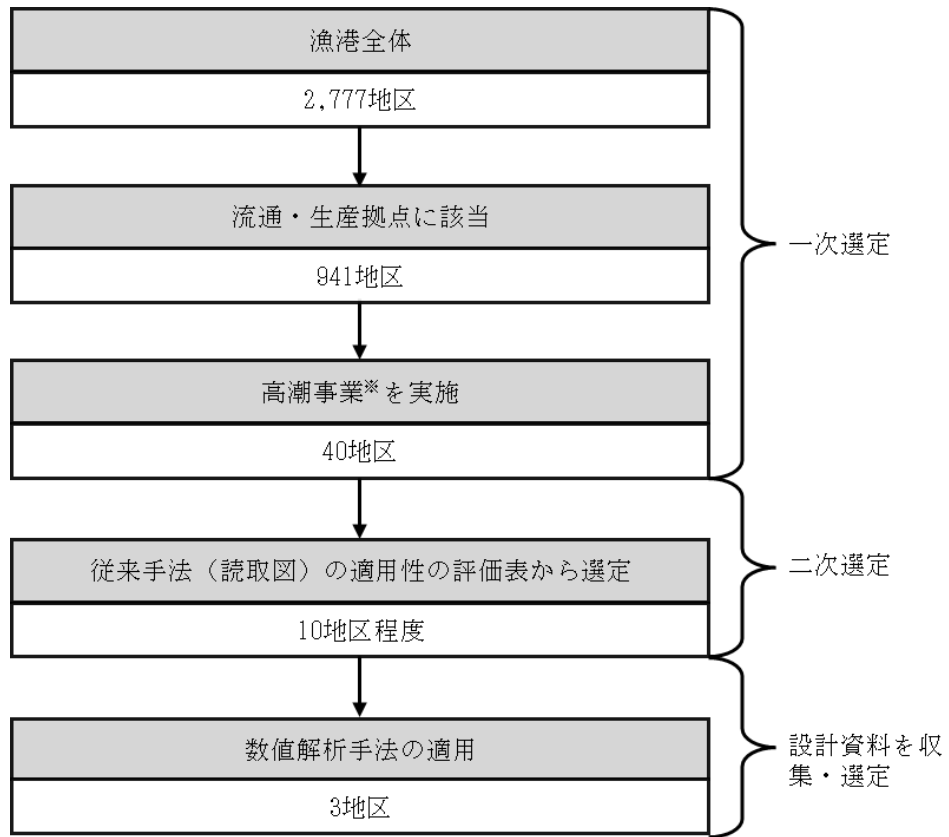


図 2-1.1 モデル地区の選定フロー

(2) モデル地区の一次選定

モデル地区の一次選定方法の詳細について記載する。

対象漁港の選定

- 対象漁港が、圏域総合水産基盤整備事業計画において、流通拠点漁港または生産拠点漁港に選定される、主要な漁港であること。
- 令和5年度以降に、高潮整備事業（漁港海岸事業または交付金事業）を実施している漁港であること。
- 上記に加え、過年度（令和3年度、令和4年度）調査のモデル地区6箇所では、読取図による必要天端高の算定、事業費算定・費用便益分析が実施されていることから、一次選定の候補とする。

代表施設の整理

- 高潮整備事業により整備された施設であること（例えば、測量関連業務などは対象外）。
- ヒアリング資料より施設の断面図が確認できる施設であること。
- 越波流量算定、打ち上げ高算定による性能照査をすることが想定される施設であること（護岸、堤防、水際付近の胸壁などが主な対象施設となる。沖合施設及び水門のみである場合は除く）
- 明らかに天端高算定詳細に適さない施設（例えば、前面に漁港市場のある胸壁）は除外する。

- 施設が重複する場合：
 - ・同一工区において複数年度にまたがって整備が進められている場合、基本的には最新年度（令和6年度）の整備断面を評価対象にする。
 - ・同等施設が複数工区に存在する場合、評定点※が低い施設を代表して抽出する。
 - ・一つに限定はしないが、明らかに評定点※が高い（天端高照査しやすい箇所）施設を除外することは妨げない

※評定点：従来の読取図で想定される条件への適用性（次頁）

(3) モデル地区の二次選定

一次選定したモデル地区に対して、従来の読み取り図で想定される条件（地形、施設）への適用性を整理する。

(a) 構造形式

- 直立・消波護岸：3点
- 緩傾斜護岸：2点
- 胸壁・陸閘：1点
 - 直立・消波護岸は、「漁港海岸事業設計の手引」などの基準書に記載された越波流量算定図や打ち上げ高算定図などを適用しやすいため、評価点を高くする。
 - 構造形式は、ヒアリング資料を基に確認する。

(b) 海底地形

- 1/10～1/30 勾配：5点
- 上記範囲外：3点
- 砂浜・浅瀬等：1点
 - 海底勾配が1/10～1/30である場合、上述の読み取り図の対象範囲内であるため、評価点を高くする。
 - 衛星写真などから堤体前面に砂浜・浅瀬などが確認される場合、評価点を1点とする。

(c) 沖合施設

- 沖合施設なし：2点
- 〃 あり：1点
 - 沖合施設の有無は、計画平面図や航空写真から確認する。

(4) モデル地区の選定結果

二次選定をしたモデル地区から10地区を選定する。なお、10地区の選定では地域特性（太平洋側/日本海側、外洋/内湾、等）が偏らないように留意する。また、津波対策によって整備されたことが想定される施設は選定しないように留意する（従来の読み取り図による天端高照査をしていない可能性がある）。

2-1-2 設計条件の整理

選定された10地区において、各施設の天端高照査と安定性照査資料を整理する。整理した資料を基に、数値解析による施設整備水準を更新する可能性を検討する。

2-1-3 対象施設の選定

10地区の設計資料を収集し、以下の通りに3地区を選定した。表2-1.1に選定根拠を示す。

表2-1.1に示す3地区に対して、数値解析手法の比較を実施する。

表 2-1.1 選定地区・施設 選定根拠

選定地区	選定根拠	
A 漁港	従来手法の適用性検証	堤前水深も十分に深く、一般的な消波護岸形状である。従来手法（越波流量算定図の読み取り）の適用性が高いことが想定されることから、数値解析手法の妥当性検証に活用する。
B 漁港	沖合施設の反映・設計手法の高度化	堤前水深も浅いことから従来手法の適用性が低い。また、海岸施設前面には離岸堤が整備されている。数値解析により離岸堤を同時に反映した検討を実施することで、従来手法の高度化を図る。
C 漁港	後退パラペットの反映	パラペットが岸壁法面から大きくセットバックしており、従来の設計手法の適用性が低いことが想定されることから、数値解析手法により従来手法の高度化を図る。

2-2 モデル地区への数値解析手法の適用

2-2-1 設計手法の比較整理

本業務では、表 2-2.1 の手法を比較する。従来の検討において打ち上げ高及び越波流量の算定手法に関しては、前者は改良仮想勾配法、後者は直立護岸と消波工付き護岸の越波流量算定図により照査されることが多い。

一方、物理実験における波動水路と同様に数値的に水路内での波の変形や越波の状況を調べることができる「数値波動水路（CADMAS-SURF、粒子法、OpenFOAM等）」が近年実用化されている。波の打ち上げ、越波の算定においては、不規則波の計算が可能であること、計算コストが比較的低いこと、そして国内の設計事例に多数用いられていることを踏まえ、本調査の数値解析手法は CADMAS-SURF を選定する。

また、波の打上げと越波を結びつける越波流量算定式（IFORM）が提案されている。IFORMでは、汀線近傍（陸上部を含む）における複断面（複数の勾配を組み合わせた断面）の堤防・護岸に対する越波流量を算定することができる。

表 2-2.1 比較する設計手法

設計手法	打ち上げ高	越波流量
改良仮想勾配法	○	—
越波流量算定図	—	○
数値波動水路	○	○
IFORM	○	○

○：適用性がある

2-2-2 数値波動水路の実施

前節で選定したモデル地区（3地区）を対象に、CADMAS-SURF/3D¹によって高潮波浪による必要天端高の算定を行う。（以降、特筆しない限りは CADMAS-SURF/3D を「CS」として呼称する。）

なお、CADMAS-SURF/3D モデルは 3次元計算を実施することができるが、本検討は全て鉛直 2次元断面（奥行方向 1メッシュ）で計算している。

(1) 計算の実施

本計算を実施するに際し、構造物を設置しない状態で不規則波に対する通過波検定を実施し、施設前面等の代表地点で所定の波高が得られるように各種パラメータを調整する。

<通過波検定>

- ① 進行波としての堤前波高を検証するために、設定した地形データから構造物部分の地形を除き、構造物の影響がない状態で造波する。
- ② 造波位置の有義波高 $H_{1/3}$ (a) と砕波位置での有義波高 $H_{1/3}$ (b) を算出し、目標堤前波と比較する。
- ③ $H_{1/3}$ (b) と目標値 $H_{1/3}$ (c) が概ね合致（誤差 5%程度を目処）するまで②を繰り返し、誤差が閾値以内になったときの入射波高を用いて、越波流量の算出を行う。

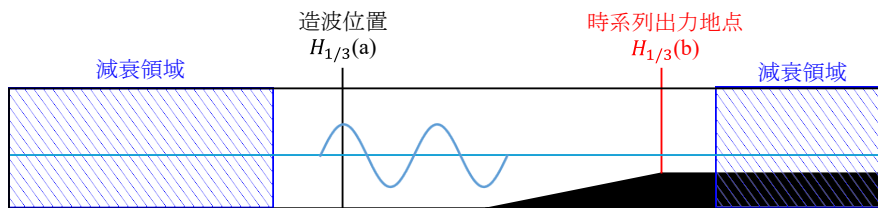


図 2-2.1 通過波検定 概略図

<本計算>

通過波検定により妥当性を検証した入射波浪を用いて、堤体の越波流量を算定する。

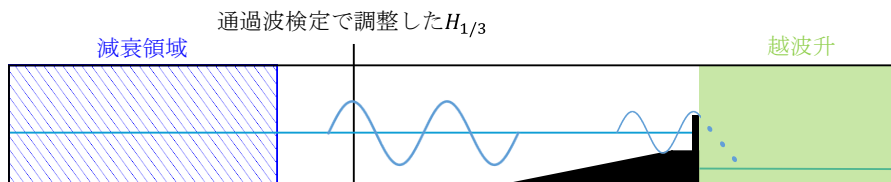


図 2-2.2 本計算 概要図

¹ 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究開発，沿岸技術ライブラリーNo. 39，235p.，2010.

1) A 漁港

① 検討ケース

A 漁港は、堤脚水深が深く、単純な構造形式（直立、消波護岸）である。また、沖合に施設がなく、前面水深が一様勾配（1/30）であることから、既往の設計手法と数値波動水路による手法とで求めた越波流量が同程度であることを確認するために検討を実施する。また、A 漁港は消波工の天端幅が既往の設計手法が想定しているよりも広いため、既往の設計手法の想定天端幅（2 個並び）でも検討を実施する。

表 2-2.2 検討ケース

ケース名	対象漁港	構造形式	海底勾配	堤体前面地形	目的
Case1-1	A 漁港	直立護岸	一様勾配 (1/30)	一様水深	・既往の設計手法（越波流量算定図）と比較し、同程度の越波流量が得られることを確認する。
Case1-2		消波護岸 (4 個並び)			
Case1-2'		消波護岸 (2 個並び)			

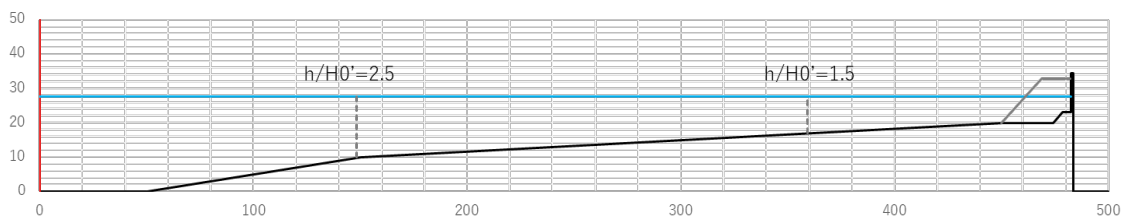


図 2-2.3 モデル化した海底地形の例

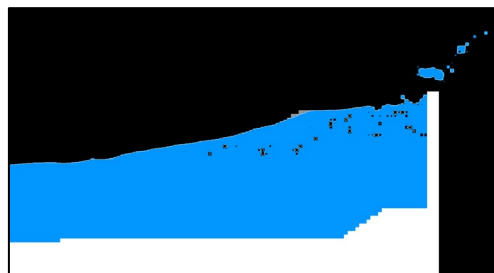


図 2-2.4 計算時のスナップショットの例

② 計算結果のまとめ

表 2-2.3 に、設計手法別に算出した越波流量、表 2-2.4 に必要天端高の比較表を示す。比較表より得られる考察を示す。

- 直立護岸の場合、越波流量算定図、IFORM、CS で求めた越波流量は概ね一致している。
- いずれの手法においても、水深が十分に深く、単純な構造である直立護岸に対する越波流量の算定結果は概ね一致するものと考えられる。
- 消波護岸の場合、越波流量算定図と比べて、IFORM 及び CS により求めた越波流量は小さい結果を示している。
- CS において越波流量が小さく計算されているのは、A 漁港の堤体断面と越波流量算定図が想定している断面とが異なるためであると考えられる。越波流量算定図が想定している消波工の天端幅が天端 2 個並びに対して、A 漁港では天端 4 個並びであり、越波流量算定図が想定しているよりも高い越波低減効果を発揮している可能性がある。
- また、Case1-2'として、A 漁港の断面図で消波工 4 個並びを 2 個並び、中空三角ブロックをテトラポッドとして計算したところ、越波流量は越波流量算定図で求めた結果と同程度となった。
- 一般に、消波工の天端幅が広くなると越波流量は低減される傾向にあり、天端幅が 2 個に対して 4 個の場合の必要天端高は 0.8 倍程度になるのに対し、CS では 0.6 倍程度となった。
- CS では標準断面図に基づき、精緻に防護水準を評価することができたものと考えられる。

表 2-2.3 設計手法別に算出した越波流量の比較

ケース名	対象漁港	構造形式	天端高	海底勾配	堤体前面 地形	越波流量 算定図	IFORM	CS
Case1-1	A 漁港	直立護岸	D.L. +11.8m	一様勾配 (1/30)	一様水深	0.02 m ³ /m/s	0.021 m ³ /m/s	0.017 m ³ /m/s
Case1-2		消波護岸 (4個並び)	D.L. +7.5m				0.005 m ³ /m/s	0.003 m ³ /m/s
Case1-2'		消波護岸 (2個並び)					0.029 m ³ /m/s	

表 2-2.4 設計手法別に算出した必要天端高の比較

ケース名	対象漁港	構造形式	海底勾配	堤体前面 地形	越波流量 算定図	CS
Case1-2	A 漁港	消波護岸 (4個並び)	一様勾配 (1/30)	一様水深	D.L.+7.5m	D.L.+5.14m
Case1-2'		消波護岸 (2個並び)				D.L.+7.72m

2) B 漁港

① 検討ケース

B 漁港では、海岸堤防の前面に消波堤が設置されている。既往の設計では、消波堤による波高低減効果を伝達率として考慮し、低減後の換算沖波波高を用いて越波流量を算定している。一方、数値波動水路では、透過堤（消波堤）をモデル内に直接考慮した上で越波流量を算定することが可能である。

Case2-1 では、数値波動水路を用いて、透過堤（消波堤）が存在する条件下においても、既往の設計手法（伝達率および越波流量算定図）と同程度の越波流量が得られるかを確認する。なお、既往設計では、局所洗掘を考慮した水深を設計水深として設定し、越波流量を算定しているため、数値波動水路においても、水深条件は既往設計と同様に設計水深を用いることとする。

Case2-2 では、数値波動水路を用いて堤脚水深が浅い条件における越波流量を算定し、その結果を既往の設計手法による算定結果と比較する。

表 2-2.5 検討ケース

ケース名	対象漁港	構造形式	海底勾配	堤体前面地形	目的
Case2-1	B 漁港	海岸堤防 +消波堤	一様勾配 (1/30)	設計時 地形	・透過堤（消波堤）がある場合でも、既往の設計手法（伝達率考慮・越波流量算定図）と数値波動水路による手法による越波流量が同程度であることを確認する。
Case2-2		海岸堤防 +消波堤		実地形 (浅海部)	・堤防前面に浅海部・傾斜部を有する場合に、既往の設計手法（越波流量算定図）と数値波動水路による手法の越波流量を比較する。

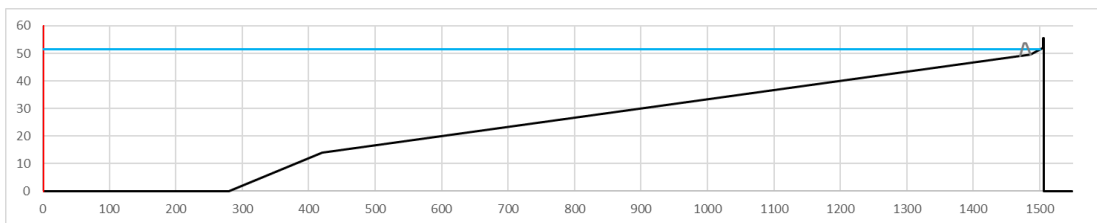


図 2-2.5 モデル化した海底地形の例



図 2-2.6 計算時のスナップショットの例

② 計算結果のまとめ

表 2-2.6 に設計手法別に算出した越波流量、表 2-2.7 に必要天端高の比較表を示す。比較表より得られる考察を示す。

- 設計時地形の条件 (Case2-1) を比較した場合、既往の設計手法 (越波流量算定図) と CS で求めた越波流量、必要天端高は概ね同程度である。
- 実地形の条件 (Case2-2) で比較した場合、既往の設計手法よりも CS で求めた越波流量の方が小さい。必要天端高で比較すると、越波流量算定図で算定した必要天端高は T.P. +5.4m であるのに対し、CS で算定した値は T.P. +3.44m となる。
- CS で既往の設計と同様の水深条件 (T.P. -1.0m) で計算した場合 (Case2-1) では、越波流量が同程度となる。一方で、実地形を反映した水深条件 (Case2-2) では、遡上過程による波浪の低減過程が計算されることで、既往の設計手法に比べて越波流量が小さく算定されたと考えられる。
- 既往の設計においては局所洗掘を見込んで安全側に設計されており、仮に実地形条件で必要天端高を算定したとすると、必要天端高は既往設計値よりも小さくなったと思われる。
- 地形条件の設定により必要天端高の値は変動するものであるが、越波流量算定図で考慮できるのは前面水深の変化のみである。一方、CS では複雑な地形条件を入力することができる点で、合田の越波流量算定図よりも実条件に合わせた照査が可能である。

表 2-2.6 設計手法別に算出した越波流量の比較

ケース名	対象漁港	構造形式	天端高	海底勾配	堤体前面地形	越波流量 算定図	IFORM	CS
Case2-1	B 漁港	海岸堤防 +消波堤	T.P.	一様勾配 (1/30)	設計時 地形	0.02 m ³ /m/s	0.054 m ³ /m/s	0.025 m ³ /m/s
Case2-2		海岸堤防 +消波堤	+5.4m		実地形 (浅海部)		0.021 m ³ /m/s	0.000 m ³ /m/s

表 2-2.7 設計手法別に算出した必要天端高の比較

ケース名	対象漁港	構造形式	海底勾配	堤体前面地形	越波流量 算定図	CS
Case2-1	B 漁港	海岸堤防 +消波堤	一様勾配 (1/30)	設計時 地形	T.P.+5.4m	T.P.+5.65m
Case2-2		海岸堤防 +消波堤		実地形 (浅海部)		T.P.+3.44m

3) C 漁港

① 検討ケース

C 漁港は、既往の設計手法（越波流量算定図）の想定範囲よりも海底勾配が緩やか（1/100）であるだけでなく、堤防区間には浅海部を有している地形である。上記のような条件の地形では越波流量算定図の適用性が低下し、越波流量が低下する可能性があることから、既往の設計手法と数値波動水路の手法により算定した越波流量を比較する（Case3-1）。

また、一部区間は、既往の設計手法とは異なる構造諸元（物揚場＋後退パラペット）であることから、既往の設計手法と数値波動水路の手法により算定した越波流量を比較する（Case3-2）。

表 2-2.8 検討ケース

ケース名	対象漁港	構造形式	海底勾配	堤体前面地形	目的
Case3-1	C 漁港	海岸堤防	1/100 ～1/10	浅海部	・既往の設計手法（越波流量算定図）の想定範囲よりも複雑な海底地形であり、また、浅海部を有する地形において、既往の設計手法と数値波動水路の手法により算定した越波流量を比較する。
Case3-2		物揚場 ＋後退パラペット	一様勾配 (1/100)	港内水域	・既往の設計手法（越波流量算定図）が想定とは異なる構造諸元（物揚場＋後退パラペット）において、既往の設計手法と数値波動水路の手法により算定した越波流量を比較する。

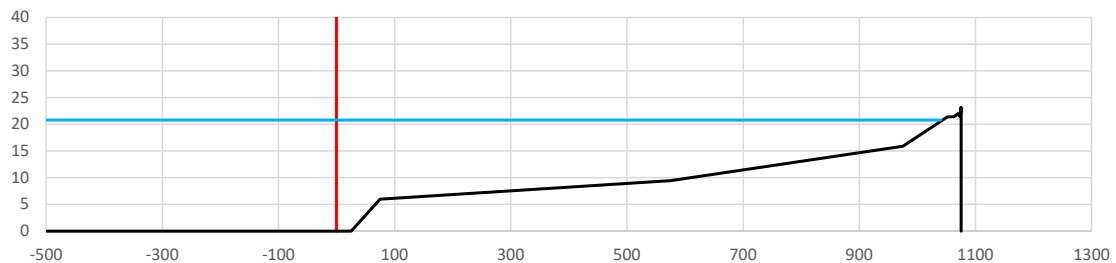


図 2-2.7 モデル化した海底地形の例

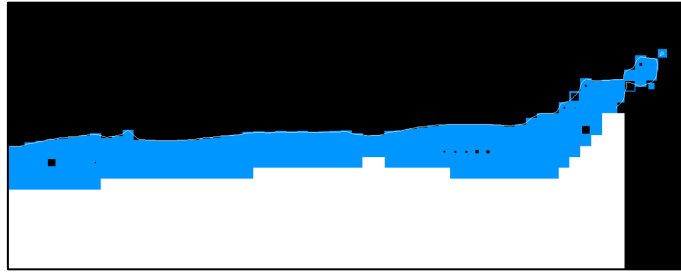


図 2-2.8 計算時のスナップショットの例

② 計算結果のまとめ

表 2-2.9 に設計手法別に算出した越波流量を、表 2-2.10 に算出した必要天端高を示す。比較表より得られる考察を示す。

- Case3-1 において、既往の設計手法および CS によって算定した越波流量、必要天端高は、概ね同程度の値を示した。
- 既往の設計手法では、護岸前面の海底地形を一様勾配 (1/30) と仮定して越波流量を算定している。一方、現地の海底地形は一様ではなく、全体としては 1/100~1/10 程度の勾配を有し、特に汀線前面付近では 1/14 程度と急峻である。また、護岸前面には浅場が存在している。
- 一般に、浅場の存在は波の減衰を促し、越波流量を低減させる要因となる。しかし、本検討対象では、汀線前面付近の急峻な地形の影響により越波流量が増加したものと推察される。これらの地形条件の影響が重なった結果、既往の設計手法による算定結果と CS による算定結果が、結果的に同程度となったものと考えられる。
- なお、既往の越波流量算定図は一様勾配を前提とした手法であり、実際の複雑な地形条件を直接的に反映することは困難である。一方、CS は実地形をモデル化することが可能であり、複雑な海底地形を考慮した越波流量の評価が可能である。
- Case3-2 は、物揚場の背後、後退パラペットの前面に斜面を有する陸域地形を考慮した条件で計算を実施している。
- 越波流量算定図や港湾基準に基づく既往の設計手法では、このような陸域を含む複雑な背後地形の影響を考慮することはできない。一方、数値解析では、後退パラペット及びその前面斜面による波の低減が表現されている。その結果、背後地形の影響により、越波は生じなかったものと考えられる。

表 2-2.9 設計手法別に算出した越波流量の比較

ケース名	対象漁港	構造形式	天端高	海底勾配	堤体前面 地形	越波流量 算定図	IFORM	CS
Case3-1	C 漁港	海岸堤防	T.P. +5.19m	1/100 ~1/10	浅海部	0.01 m ³ /m/s	0.001 m ³ /m/s	0.016 m ³ /m/s
Case3-2		物揚場 + 後退パ ラペット	T.P. +5.4m	一様勾配 (1/100)	港内水域	0.0002 m ³ /m/s	0.0000 m ³ /m/s	0.0000 m ³ /m/s

表 2-2.10 算出した必要天端高

ケース名	対象漁港	構造形式	海底勾配	堤体前面 地形	越波流量 算定図	CS
Case3-1	C 漁港	海岸堤防	1/100 ~1/10	浅海部	T.P. +5.19m	T.P.+5.43m

※Case3-2 は越波しないため必要天端高の算定なし

2-2-3 既往の設計手法と数値波動水路の適用性に関する考察

モデル地区への数値解析手法の適用結果を踏まえ、既往の設計手法と数値波動水路の適用性に関する条件を以下に整理する。

(1) 既往の設計手法の適用性が高い施設

① 水深が十分に深く、構造・地形が単純な条件

《条件》

- 直立、消波ブロック積み護岸、堤防
- 海底勾配 1/10～1/30 程度
- 堤脚水深が十分に深い ($h/H_0 > 1.0$ 程度)

(2) 既往の設計手法の適用性が低い施設

① 堤体前面の水深が浅い条件

《条件》

- 堤体前面に砂浜や浅場を有しており、堤脚水深が浅い

② 複雑な構造条件

《条件》

- 胸壁、陸閘、陸上部の不陸などを有している。

2-2-4 数値波動水路の活用範囲の提案

本業務で計算を実施した断面の他に、数値波動水路によって実条件に合わせてより必要天端高を算定することが効果的と考えられる断面を検討する際、以下のような評価点（再掲）で整理することが有効と考えられる。既往の設計手法の適用性が高いほど評価点を高くしており、評価点が低い断面である場合には数値波動水路を活用することが有効であると考えられる。

なお、本業務で実施することができた検討地区は3地区であり、評価点の基準値（○点以下であれば数値波動水路の有効性が高い、など）を定められるほどの事例数ではない。今後の展望としては、数値波動水路の活用事例を増やし、有効性の検証事例が蓄積されていくことが期待される。

(a) 構造形式

- 直立・消波護岸：3点
- 緩傾斜護岸：2点
- 胸壁・陸閘・陸上部の不陸：1点
 - 直立・消波護岸は、「漁港海岸事業設計の手引」などの基準書に記載された越波流量算定図や打ち上げ高算定図などを適用しやすいため、評価点を高くする。

(b) 海底地形

- 1/10～1/30 勾配：5点
- 上記範囲外：3点
- 砂浜・浅瀬等：1点
 - 海底勾配が1/10～1/30である場合、上述の読み取り図の対象範囲内であるため、評価点を高くする。
 - 衛星写真などから堤体前面に砂浜・浅瀬などが確認される場合、評価点を1点とする。

2-3 計画・設計上の留意点の整理

(1) 今後の展開

既存施設が設計された時代によっては、複雑な構造条件・地形条件の検討断面に対しては、妥当性を十分に検証できないまま既往手法を適用するか、高コストな水理模型実験を実施する以外に有効な検討手段が限られていた。

しかし、昨今では、数値波動水路を活用することで、既往の設計手法では十分に考慮できなかった地形条件や構造条件を反映し、より実態に即した条件下で越波現象等を評価することが可能となってきた。これにより、水理模型実験と比較して相対的に低コストで照査を実施できるだけでなく、検討条件によっては必要天端高の合理化を通じて整備コストの縮減につながる可能性がある。

一方で、数値波動水路は現時点において、計算モデルの適用範囲や再現可能な物理現象に一定の制約を有している。しかしながら、計算モデルや解析手法の継続的な改良・高度化が進むことで、これらの課題が解消され、今後は適用可能な条件や検討対象が拡大していくことが期待される。

また、数値波動水路の適用事例に関する知見が蓄積されることで、計算結果の妥当性を検証するための比較資料が充実し、解析結果の信頼性向上につながる。これにより、数値解析に基づく照査の精度が向上し、実務への適用性が段階的に向上していくものと考えられる。

(2) 課題点と留意点

1) 課題

① 計算モデルの適用性の制限

数値波動水路は、波の変形や越波現象を支配方程式に基づいて解析できる有効な手法である一方、計算モデルの特性上、すべての物理現象を再現できるわけではない。

例えば、CS では、構造物周辺の波浪・流れを解像できるものの、気層を介する揚圧力の発生や、地盤を対象とした洗掘・地形変化といった現象については、現行モデルでは直接的に解像することはできない。

そのため、数値解析結果は、あくまでモデルが再現可能な物理現象の範囲内で得られたものであることを認識し、必要に応じて既往文献の参照や水理模型実験との併用などにより評価することが必要である。

② 計算コストの制限

数値波動水路は、水理模型実験と比較すればコスト面の優位性を有するものの、三次元計算や広範囲を対象とした解析については計算負荷が大きく、実務への適用には制約がある。

このため、平面的な施設配置効果や斜め入射時の越波流量の変化等、三次元的な影響を詳細に評価することは難しく、基本的には代表的な断面を対象とした二次元断面に基づく検討が中心となる。

2) 留意点

① 数値波動水路の留意点

数値波動水路を用いるにあたっては、既往の文献や実務事例を参考とし、標準的かつ妥当な計算条件を設定することが不可欠である。格子解像度、造波条件、越波量の算定方法などは、計算結果に大きな影響を及ぼすため、恣意的な設定とならないよう留意する必要がある。また、既往の設計条件や標準的な断面条件の下で、波高検定や越波流量の比較検証を実施し、計算結果の妥当性を確認することが重要である。

② 事業費削減効果の留意点

数値波動水路による天端高照査により、防護水準が既往設計よりも低減される結果が得られた場合であっても、その結果をもって直ちに防護水準及び事業費低減が可能であるとは限らない。例えば、消波工 4 個ではなく 2 個並びで必要天端高が満足されることが確認された場合であっても、消波工の安定性などの観点から 2 個並びでは不足する可能性もある。数値波動水路による結果を踏まえ、構造安定性、景観性、利用性、経済性などの観点から、総合的に構造諸元を検討していく必要がある。