

実務設計のための CADMAS-SURF/3D 運用指針
— 精度・安定性を確保する数値波動水槽の活用手引き —

波浪の伝播・越波 Ver.1.0.2

CADMAS-SURF 設計実務研究会
一般財団法人 沿岸技術研究センター
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

発行にあたって

海洋構造物の耐波設計においては、従来から水理模型実験や経験的な設計公式に基づいて波力等を評価する手法が用いられてきました。しかし、これらの手法にはコストや時間、適用条件の限界といった課題がありました。こうした中、近年のコンピュータ技術の発展とともに、数値解析を設計に活用する動きが進み、特に自由表面を精度よく扱える VOF 法を用いた数値波動水路が注目されるようになりました。

このような背景のもと、平成 10 年には官・学・民からなる研究会が設立され、数値波動水路「CADMAS-SURF」の開発と実務適用に向けた検討が始まりました。その成果として、平成 13 年に初版「CADMAS-SURF」が、平成 22 年には「CADMAS-SURF/3D」が公開され、耐波設計分野において広く用いられるようになっていきます。

しかしながら、近年の実務設計の現場では、CADMAS-SURF を用いた解析において計算精度や安定性、越波量の再現性といった技術的課題が指摘されてきました。これを受けて、CADMAS-SURF 設計実務研究会（以下、本研究会）が発足し、利用者の声を反映しながら 2 年間にわたり運用上の課題や改善点の整理、標準的な運用手法の検討を進めてまいりました。

本書は、こうした活動を踏まえ、CADMAS-SURF の実務利用において信頼性の高い数値解析を行うための技術的な指針を示すものです。格子生成、自由表面境界の処理、越波流量の算定手法などに関する標準的な考え方を整理し、実例を交えながら実務者にとって実用的な構成を目指しました。

今後も技術の進展や新たな知見の蓄積を反映しつつ、本手引きは更新を重ねていく予定です。本手引きが、港湾・海岸構造物の安全性・信頼性の向上に寄与する一助となることを願ってやみません。

令和 7 年 9 月

CADMAS-SURF 設計実務研究会

更新履歴

(令和 8 年 5 月時点)

- 令和 7 年 9 月 「実務設計のための CADMAS-SURF/3D 運用指針－精度・安定性を確保する数値波動水槽の活用手引き－ 波浪の伝播・越波 Ver.1.0」の公開.
CADMAS-SURF/3D-MP Ver.1.8 の公開.
- 令和 7 年 10 月 「実務設計のための CADMAS-SURF/3D 運用指針－精度・安定性を確保する数値波動水槽の活用手引き－ 波浪の伝播・越波 Ver.1.0.1」に更新.
- 令和 8 年 5 月 「実務設計のための CADMAS-SURF/3D 運用指針－精度・安定性を確保する数値波動水槽の活用手引き－ 波浪の伝播・越波 Ver.1.0.2」に更新.

以上

修正箇所一覧

■ Ver. 1.0.1 >> Ver. 1.0.2

編	頁番号※	修正対象※	Ver.1.0.1	Ver.1.0.2	備考
本編	4	表 1.4-2	—	Ver. 1.10の行を追加	・ ツールの更新に伴う追加.

■ Ver. 1.0 >> Ver. 1.0.1

編	頁番号※	修正対象※	Ver.1.0	Ver.1.0.1	備考
本編	4	表 1.4-2	造波ソース沖側のメッシュ幅を変更 -3L<X<0: 基本幅 X<-200L: 等比級数 (公比1.02)	造波ソース沖側のメッシュ幅を変更 -3L<X<0: 基本幅 X<-3L: 等比級数 (公比1.02)	・ 誤字の修正.
本編	25	図 3.2-1			・ 水槽の長さの説明にフォーカスし、図 3.3-1との違いを明確化。 ・ 本研究会での推奨値 (区間長さ) を明記。 ・ 公開プログラムを用いる場合に、ユーザ指定部分と自動設定部分を明記。
本編	25	表 3.2-1	input_mesh.datで減衰帯の幅を設定 推奨値: 2~200L	input_mesh.datで減衰帯の幅を設定 推奨値: 2L~3L ※水位上昇抑制のための総水路長の調整としても用いる	・ 200L 程度は水位上昇の抑制が目的であり、減衰目的であれば2L~3L程度で十分であるため、その旨を明記。
本編	25	表 3.2-1	input_mesh.datで減衰帯の有無を選択 減衰帯ありの場合は幅を設定 推奨値: 2~3L	input_mesh.datで減衰帯の有無を選択 減衰帯ありの場合は幅を設定 推奨値: 2L~3L	・ 数値の追記.
本編	27	表 3.3-4	—	項目設定値	・ 説明の追記.
本編	27	表 3.3-4	$h/L_0=0.05$, $h/H=3.5$ に対する水深の大きいほう	$h/L_0=0.05$, $h/H=3.5$ に対する水深の大きいほう	・ 誤記の修正 (変数記号) .
本編	27	図 3.3-1			・ 水深による格子間隔の変化の説明にフォーカスし、図 3.2-1との違いを明確化。 ・ 本研究会での推奨値 (格子間隔や関値) を明記。 ・ 公開プログラムを用いる場合に、ユーザ指定部分を明記。
本編	28	本文	$h/L_0=0.05$: 造波水深20~50mの場合、波長が1/2となる安全側の水深の大きさ	$h/L_0=0.05$: 造波水深20~50mの場合、波長が1/2となる安全側の水深の大きさ	・ 誤記の修正 (変数記号) .
本編	28	本文	ここに、 H 及び h はそれぞれ造波ソースより沖側の幅及び公比である。公比は $r=1.02$ 程度に設定し、沖側のエネルギー減衰帯内の格子幅は2L程度を基本幅とする。	ここに、 H 及び h はそれぞれ造波ソースより沖側の幅及び公比である。公比は $r=1.02$ 程度に設定し、沖側のエネルギー減衰帯の長さ h は2L~3L程度を基本とする。	・ 誤記の修正.
本編	31	本文及び図 3.3-5	—	コラム3: 構造物天端高を格子幅に合わせる方法 -(中略) 図 3.3-5 天端高に合わせた格子幅修正イメージ	・ 説明の追記. (注)本頁以降、新旧で頁番号のずれが生じる。
本編	88	図 5.5-33			・ 誤字の修正 (凡例) .
巻末資料編	12	本文	『標準メッシュ』による計算格子は、造波水深 L_0 や周期 T を基に基本格子幅が設定されるが、格子の水平幅を変化させる関値については、ユーザ側で任意に指定できるようにした。	『標準メッシュ』による計算格子は、造波水深 L_0 や周期 T を基に基本格子幅が設定されるが、格子の水平幅を変化させる関値については、ユーザ側で任意に指定できるようにした。	・ 誤記の修正 (変数記号) .
巻末資料編	12	表 2.2-2	—	項目設定値	・ 説明の追記.
巻末資料編	12	表 2.2-2	$h/L_0=0.05$, $h/H=3.5$ に対する水深の大きいほう	$h/L_0=0.05$, $h/H=3.5$ に対する水深の大きいほう	・ 誤記の修正 (変数記号) .
巻末資料編	12	本文	また、沖側のエネルギー減衰帯の長さ h は、図 2.2-4に示す黄枠内で設定できる。なお、デフォルトでは標準値として提案値 (波長 L の200倍) が入力されている。	沖側のエネルギー減衰帯の長さ h は周期や造波水深より自動で設定されるが、必要な総水路長 B を任意に指定することで、不足分は自動的に延長される。必要な総水路長 B は、図 2.2-4に示す黄枠内で設定できる。なお、デフォルトでは標準値として波数600波程度の計算を想定した場合の提案値 (波長 L の200倍) が入力されている。	・ 誤説明の修正.
巻末資料編	17	本文	本節における入出力ファイルを表 2.2-1に示す。	本節における入出力ファイルを表 2.2-1に示す。	・ 誤字の修正.
巻末資料編	18	本文	本節における入出力ファイルを表 2.2-1に示す。	本節における入出力ファイルを表 2.2-1に示す。	・ 誤字の修正.

※修正後の頁番号、図表番号で記載

CADMAS-SURF 設計実務研究会

研究会構成（敬称略）

【全体統括】

鈴木 高二朗 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
特別研究主幹

【研究会】

成毛 辰徳 いであ株式会社 沿岸・港湾事業部 沿岸技術部 上席研究員
関口 諒 いであ株式会社 沿岸・港湾事業部 港湾部 研究員
峯村 浩治 株式会社エコー 構造解析部 部長
金 智哉 株式会社エコー 構造解析部
安藤 興太 日本工営株式会社 港湾空港事業部 港湾部
山部 道 株式会社日本港湾コンサルタント 沿岸防災部 部長
池田 剛 株式会社日本港湾コンサルタント 沿岸防災部 第二課 課長
田中 晴規 株式会社日本港湾コンサルタント 沿岸防災部 第二課
真期 俊行 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ 海岸・海洋チーム 特任技師
福井 秀平 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ 海岸・海洋チーム
長田 直樹 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ 海岸・海洋チーム
久保田 博貴 パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 港湾部
港湾海岸室 課長補佐
高橋 武志 パシフィックコンサルタンツ株式会社 国土基盤事業本部 港湾部
港湾海岸室 技術主任
鈴木 樹 パシフィックコンサルタンツ株式会社 九州支社 九州国土基盤事業部
港湾室 技術主任
永澤 豪 パシフィックコンサルタンツ株式会社 グローバルカンパニー
国際インフラ開発部 港湾・海岸室
阿部 洋士 復建調査設計株式会社 東京支社 第一技術部 洋上風力プロジェクト室 主任
萩尾 和央 復建調査設計株式会社 東京支社 第一技術部 沿岸・地震防災課 課長
高橋 研也 五洋建設株式会社 東京土木支店 横浜営業支店 営業部 担当部長
水野 辰哉 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部 海岸海洋グループ 主任
本田 隆英 大成建設株式会社 技術センター 社会基盤技術研究部
水理研究室 海洋水理チーム チームリーダー
栗原 明夫 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター 水圏技術グループ 課長
原 知聡 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター 水圏技術グループ 研究員
山野 貴司 東洋建設株式会社 総合技術研究所 研究統括部・鳴尾 上席研究員
三井 順 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 研究開発室
第二研究開発グループ 専門役

【幹事会】

鶴田 修己	国立研究開発法人 沿岸水工研究領域	海上・港湾・航空技術研究所 耐波研究グループ	港湾空港技術研究所 グループ長
山縣 史朗	国立研究開発法人 沿岸水工研究領域	海上・港湾・航空技術研究所 耐波研究グループ	港湾空港技術研究所 主任研究官
後藤 友亮	国立研究開発法人 沿岸水工研究領域	海上・港湾・航空技術研究所 耐波研究グループ	港湾空港技術研究所 研究官
野上 経矩	国立研究開発法人 沿岸水工研究領域	海上・港湾・航空技術研究所 耐波研究グループ	港湾空港技術研究所 依頼研修員
田中 智也	国立研究開発法人 沿岸水工研究領域	海上・港湾・航空技術研究所 耐波研究グループ	港湾空港技術研究所 依頼研修員
(鈴木 樹)	(国立研究開発法人 沿岸水工研究領域)	(海上・港湾・航空技術研究所 耐波研究グループ)	(港湾空港技術研究所 依頼研修員)
酒井 和彦	国立研究開発法人	土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム	寒地水圏研究グループ 研究員
荒木 和博	みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社	サイエンスソリューション部	
坂本 大樹	みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社	サイエンスソリューション部	
小林 諒也	みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社	サイエンスソリューション部	
高橋 重雄	一般財団法人	沿岸技術研究センター	上席客員研究員
下迫 健一郎	一般財団法人	沿岸技術研究センター	審議役
津田 宗男	一般財団法人	沿岸技術研究センター	調査役
藤原 隆一	一般財団法人	沿岸技術研究センター	調査役
山田 貴裕	一般財団法人	沿岸技術研究センター	調査部 主任研究員
澁谷 容子	一般財団法人	沿岸技術研究センター	調査部 主任研究員

所属は令和7年8月のもの、()内は前任者を示す。

目 次

1.	総説	- 1 -
1.1	背景と目的	- 1 -
1.2	既往資料との関係	- 2 -
1.3	用語の定義	- 3 -
1.4	プログラムバージョン情報	- 4 -
2.	数値波動水路・数値波動水槽による水理模型実験の代替方法	- 7 -
2.1	概説	- 7 -
2.2	標準格子作成指針と水路形状設定方法	- 8 -
2.2.1	水理模型実験に対応した形状及び格子構築について	- 8 -
2.2.2	計算精度及び安定性	- 9 -
2.3	自由表面の境界条件の改良と波浪伝播計算の安定化（変動勾配外挿の導入）	- 10 -
2.3.1	概要	- 10 -
2.3.2	自由表面流速の計算方法の改良	- 10 -
2.3.3	その他	- 14 -
2.3.4	入力方法	- 14 -
2.4	越波流量算定精度向上のための新手法	- 16 -
2.4.1	概要	- 16 -
2.4.2	検証	- 16 -
2.4.3	入力方法	- 20 -
3.	標準的なモデル構築方法の提案	- 22 -
3.1	『標準メッシュ』の概要	- 22 -
3.1.1	『標準メッシュ』の入出力ファイル	- 22 -
3.1.2	地形データの作成について	- 23 -
3.2	CS の計算に必要な構成要素	- 25 -
3.3	適切な造波水深と計算格子	- 26 -
3.3.1	造波水深	- 26 -
3.3.2	計算格子	- 26 -
3.3.3	水位上昇の抑制	- 28 -

4.	伝達波の算定事例	- 33 -
4.1	再現対象とする水理模型実験の概要	- 33 -
4.2	再現計算の方法	- 34 -
4.2.1	断面水路の設定	- 34 -
4.2.2	防波堤の形状	- 34 -
4.2.3	計算条件	- 35 -
4.2.4	波高伝達率及び反射率の算出方法	- 36 -
4.2.5	CS3D で用いたパラメータ	- 37 -
4.3	計算結果	- 38 -
4.3.1	通過波検定	- 38 -
4.3.2	直立堤の波高伝達率	- 38 -
4.3.3	混成堤の波高伝達率	- 39 -
5.	越波計算事例集	- 43 -
5.1	検討内容	- 43 -
5.2	計算事例に対する越波流量の再現性の整理	- 45 -
5.3	計算事例の詳細	- 47 -
5.3.1	計算事例 1[五洋建設（株）]	- 47 -
5.3.2	計算事例 2[大成建設（株）]	- 53 -
5.3.3	計算事例 3[東亜建設工業（株）]	- 61 -
5.3.4	計算事例 4[東洋建設（株）]	- 67 -
5.3.5	計算事例 5[（株）不動テトラ]	- 73 -
5.3.6	計算事例 6[パシフィックコンサルタンツ（株）]	- 83 -
5.3.7	計算事例 7[いであ（株）]	- 89 -
5.3.8	計算事例 8[（株）エコー]	- 104 -
5.3.9	計算事例 9[（株）日本港湾コンサルタント]	- 116 -
5.3.10	計算事例 10[（株）ニュージェック]	- 126 -
5.3.11	計算事例 11[復建調査設計（株）]	- 135 -
5.4	工夫・留意点	- 149 -

1. 総説

1.1 背景と目的

近年、数値波動水路を始めとする数値解析手法を設計業務に導入する取り組みが積極的になされている。令和 2 年度には、一般社団法人 港湾技術コンサルタント協会（以降、港コン協）は「調査設計業務の特記仕様書作成事例と積算の考え方」を公開し、数値波動水路を活用する業務の特記仕様書の事例と解説、標準歩掛（案）及び積算事例を公表した。その後、令和 6 年度には、「港湾土木請負工事積算基準」（令和 6 年 4 月）に、“数値波動水路（CADMAS-SURF）（2 次元）”の標準歩掛が制定されることとなった。

CADMAS-SURF は、Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、VOF 法によって自由表面を表現する数値波動水路である。平成 10 年に立ち上げられた研究開発委員会によって開発が進められ、平成 13 年に CADMAS-SURF、平成 22 年に CADMAS-SURF/3D が公開された。従来の水理模型実験に代わり得る手法として耐波設計の分野に普及し、広く用いられている。水理模型実験による検討コストを下げることであれば、設計の省力化に繋がることであろう。

しかし、利用者からのヒアリングによれば、数値波動水槽には計算精度のばらつき、計算の不安定性、越波流量の推定精度といった課題が存在していた。具体的には、格子設定の違いによる計算結果のばらつき、長時間計算時の不安定停止、越波量の再現精度不足などが指摘されている。こうした背景を踏まえ、CADMAS-SURF 設計実務研究会（以下、本研究会）を発足し、2 年間の活動を通じて「実務設計のための CADMAS-SURF/3D 運用指針－精度・安定性を確保する数値波動水槽の活用手引き－」（以下、本手引き）を取りまとめた。

本手引きの目的は、数値波動水槽の計算精度と安定性を向上させ、実務設計における信頼性の高い数値解析手法を確立することである。本研究会では、『標準メッシュ』による格子作成手法の標準化、自由表面境界の取り扱い改良（変動勾配外挿法の導入）、越波流量算定精度の向上といった改善策を検討してきた。本手引きは、それらの新たな手法を適切に活用するための指針を提供するものである。

なお、本手引きは、本研究会の活動を積み重ねることで、内容を随時更新していく。

1.2 既往資料との関係

CADMAS-SURF の研究、開発とともに公開された既往資料を表 1.2-1 に示す。既往資料 4 は、CADMAS-SURF のみならず、数値波動水槽に関する最新のモデルの開発について詳説されている。なお、本手引きには既往資料を引用する箇所が多数あるため、それぞれの資料の名称を「略称」で記載する場合がある。

本手引きと共に公開する CADMAS-SURF のバージョンは、既往資料 3 と共に公開された CADMAS-SURF/3D Ver.1.5 に改良を加えたものであり、主な基礎方程式や使い方は共通のものである（バージョン更新履歴は 1.4 節を参照）。したがって、一般的なモデル説明や使い方は、適宜既往資料を確認されたい。また、既往資料 1～3 においても、CADMAS-SURF による計算事例が多数収録されているため、参考にされたい。本手引きに示す事例は、既往資料よりもより実務設計に近い条件設定や結果整理を目指したものであり、実務利用者にとって簡明なものになるよう心掛けた。

表 1.2-1 既往資料

	書籍名	発行機関	発行年月	略称	備考
1	沿岸技術ライブラリーNo.12 CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発－数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書－ ¹⁾	沿岸技術研究センター	平成 13 年 10 月	CS 報告書	—
2	沿岸技術ライブラリーNo.30 CADMAS-SURF 実務計算事例集 ²⁾	沿岸技術研究センター	平成 20 年 5 月	CS 事例集	—
3	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 ³⁾	沿岸技術研究センター	平成 22 年 12 月	CS3D 報告書	—
4	数値波動水槽－碎波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して ⁴⁾	土木学会海岸工学委員会 数値波動水槽研究小委員会	平成 24 年 7 月	小委員会報告書	—

1.3 用語の定義

本手引きでは表 1.3-1 に示す用語を使用する。なお、ここで示す用語は、本手引きで取り扱う基本的な事項について定義したものであり、狭義の意味での用語に関する定義は表 1.2-1 の既往資料等を参照されたい。

表 1.3-1 本手引きで使用する用語の定義

用語	定義
標準メッシュ	CADMAS-SURF で用いる合理的な計算格子の作成方法を標準化したもの。概要は 3 章を参考にされたい。
数値波動水路	2 次元断面で波の現象を解析する数値シミュレーション手法。
数値波動水槽	3 次元空間で波の現象を解析する数値シミュレーション手法。
CADMAS-MESH	CADMAS-SURF のデータ作成用のプリツール。特に指定がなければ、CADMAS-MESH Ver.2.02 を指す。
本研究会	CADMAS-SURF 設計実務研究会のこと。
CS	CADMAS-SURF のこと。
CS2D	2 次元を解析対象とした CS プログラム (CADMAS-SURF/2D) を指す。
CS3D	3 次元を解析対象とした CS プログラム (CADMAS-SURF/3D) を指す。本書では、単相モデルの CS プログラム (CADMAS-SURF/3D-MP) を取り扱う。
CS 報告書	“沿岸技術ライブラリーNo.12 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF)” ¹⁾ のこと。
CS 事例集	“沿岸技術ライブラリーNo.30 CADMAS-SURF 実務計算事例集” ²⁾ のこと。
CS3D 報告書	“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” ³⁾ のこと。
小委員会報告書	“数値波動水槽一碎波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して” ⁴⁾ のこと。

1.4 プログラムバージョン情報

本手引きで扱う各プログラムのバージョン更新履歴を表 1.4-1～表 1.4-3 に示す。

表 1.4-1 CS3D の更新履歴

Ver.	更新日	更新内容
1.5	平成 22 年 11 月 22 日	—
1.6	平成 24 年 10 月 12 日	行列ソルバーの微修正
1.7	令和 5 年 2 月 3 日	変動勾配外挿機能の追加 TVD スキームの追加 断面流量出力機能の追加 領域毎の初期水位の指定機能の追加
1.8	令和 7 年 2 月 26 日	総水量補正機能の追加 領域毎の初期水位の指定機能の修正

表 1.4-2 『標準メッシュ』作成補助ツール (tmake_standard-mesh_ver●.exe) の更新履歴

Ver.	更新日	$\Delta X/\Delta Z$	推奨幅を 1/2 とする 領域	推奨幅を 1/4 とする領域	推奨幅を 1/4 と する領域設定	備考	
1.1	令和 6 年 5 月 20 日	2.0	$h/L_0 \leq 0.05$ $h/H \leq 3.5$	オプション	$\Delta X, \Delta Z$	構造物付近の鉛直幅を考慮して $\Delta X/\Delta Z=2.0$ を選定	
1.2	令和 6 年 5 月 22 日				ΔZ		
1.3	令和 6 年 6 月 28 日	1.0		$h/H < 2.0$	なし 〈自動〉		計 算 精 度 及 び 演 算 速 度 より $\Delta X/\Delta Z=1.0$ に変更
1.4	令和 6 年 7 月 3 日						水位抑制考慮
1.5	令和 6 年 7 月 29 日						メッシュ幅初期値の修正
1.6	令和 6 年 8 月 14 日						水位抑制する際の水深補正を削除
1.7	令和 6 年 8 月 27 日						沖側減衰帯幅 B/L を入力可能 $Z_{\max}$ を静水面上 5 波高に変更
1.8	令和 6 年 8 月 29 日						造波ソース沖側のメッシュ幅を変 更 -3L<X<0：基本幅 X<-3L：等比級数（公比 1.02）
1.9	令和 7 年 2 月 13 日						「地形なし」かつ「縮尺が模型ス ケール」の時に発生する不具合を 修正
1.10	令和 7 年 12 月 18 日						

表 1.4-3 入力ファイル（data.in）作成ツール（tmake_datain_ver●.exe）の更新履歴

Ver.	更新日	更新内容
1.0	令和 6 年 4 月 23 日	—
2.0	令和 6 年 8 月 29 日	コメント文の内容修正 一部密度に関する不具合の修正
2.1	令和 6 年 9 月 9 日	コメント文の内容修正 累積越波流量機能の追加
2.2	令和 6 年 9 月 26 日	コメント文の内容修正 一部不具合の修正
3.0	令和 6 年 2 月 12 日	規則波における入力波信号緩和時間に関する部分の修正

第 1 章の参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発－数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書－，沿岸技術ライブラリー，No. 12，2001.
- 2) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，沿岸技術ライブラリー，No. 30，2008.
- 3) 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. 39，2010.
- 4) 土木学会海岸工学委員会 数値波動水槽研究小委員会：数値波動水槽－砕波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して，土木学会，2012.

2. 数値波動水路・数値波動水槽による水理模型実験の代替方法

2.1 概説

本手引きでは、これまで数値波動水路・数値波動水槽による設計適用に際して課題となっていた点を整理し、それらを解決するための新たな手法を提案した。具体的には、2.2 節から 2.4 節において、次の課題とその改善策を示している。

まず、従来は標準的な格子の作成方法が存在しておらず、計算者の設定に依存して計算結果が異なるリスクがあった。格子間隔を粗く設定すると計算時間は短縮できるが、精度低下を招く場合があり、設計の信頼性確保の観点から問題となっていた。このため、2.2 節では標準的な格子設定手法を示し、誰が計算しても同等の精度が得られるような格子作成方法を提案している。

次に、CS においては自由表面の境界条件の取り扱いによる数値的不安定性が課題であった。特に長時間にわたる不規則波の計算において、計算が途中停止する問題が生じていた。これに対して、2.3 節では自由表面流速の新たな計算方法（変動勾配外挿法）を導入し、計算の安定性向上と波浪伝播精度の両立を図っている。

さらに、越波現象に関しては、従来手法では越波流量を正確に把握することが困難であり、数値誤差が問題となっていた。2.4 節では、指定断面における流量測定を導入することにより、より高精度な越波量の算定方法を示している。

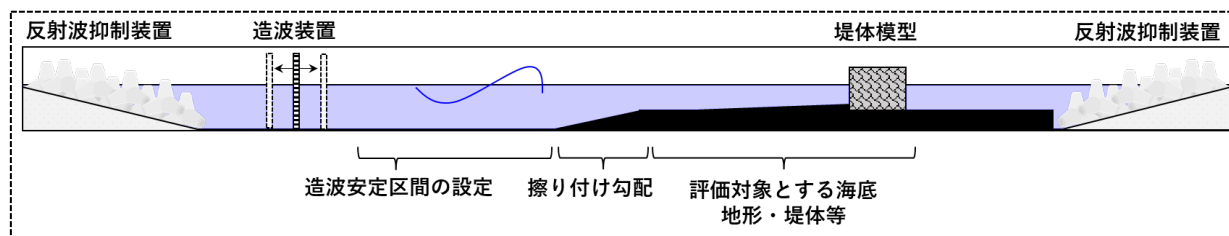
これらの取り組みにより、数値波動水路・数値波動水槽の設計適用における精度・安定性・信頼性を総合的に向上させることを目指している。

2.2 標準格子作成指針と水路形状設定方法

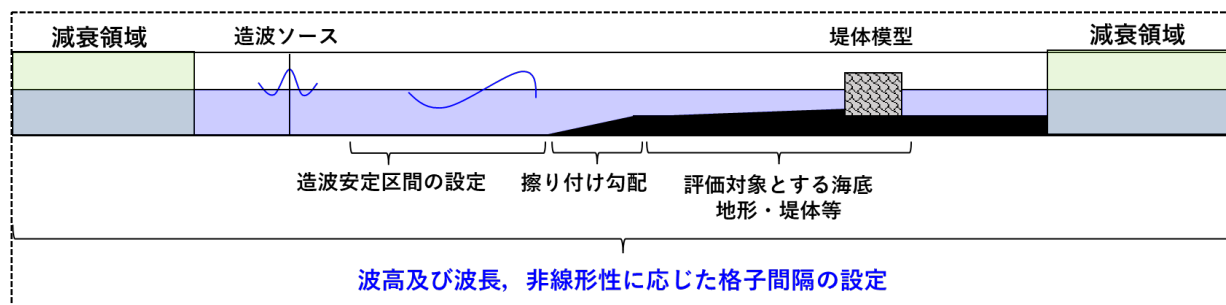
2.2.1 水理模型実験に対応した形状及び格子構築について

CS の基本形状は、水路実験の代替を目指す中で実験と同様の設定方法を踏襲する必要がある。例えば、造波入力する振幅に対して造波地点の水位が極端に小さい場合、造波直後に意図しない碎波が発生する可能性がある。そのため、実験条件は水路形状や造波条件、さらには解明すべき現象に応じて適切に設定されるべきである。この考え方は数値波動水槽においても同様であり、検証対象を正確に評価するためには、適切な数値水路の形状の設定が不可欠といえる。

図 2.2-1 に、水理模型実験と CS での模型作成方法の違いを明記する。結論から述べると両者の設定方針は大局的にみると同様のものとなる。水理模型実験において、評価対象とする海底地形の再現をする際、例えば 1/100 勾配の海底地形を水路形状に落とし込むことになると、極めて長い水路が必要となる。同時に、数値波動水槽の場合は、ユーザーの設定次第で長い水路をモデル化することは可能であるが、格子数の増加に伴う計算負荷や長距離を伝播する波の数値減衰が顕在化する。したがって、水理模型実験並びに数値波動水槽の両手法とも、実際の海底勾配から造波水深の間に擦り付け勾配を設け、水路長の節約や数値的な負荷の軽減を図ることが必要とされる。他にも、反射波抑制装置（減衰領域）や造波安定区間の設定は、海岸現象を実験・数値計算に落とし込む上で無くてはならない対応である。



(a)水理模型実験での水路形状



(b)数値波動水槽の形状

図 2.2-1 水理模型実験及び数値波動水槽の形状概形

一方で、CS でのみ考慮すべき設定が、差分計算のための格子間隔である。格子間隔は波の波高や波長、非線形性に応じて適切に設定する必要がある。特に碎波過程の追跡においては必要な空間解像度が必然的に小さくなるため、数値計算の精度と安定性に大きく影響する。この点について、非線形性の影響を考慮した結果として推奨される設定値を3章（表 3.3-2）に示す。

ただし、上記の考え方に基づいた CS の格子設定を実施するのは技術的に熟練している必要がある。とはいえ基本的な格子間隔の設定思想は、造波諸元並びに水深変化に対応した波の非線形性に追従して決定されるため、この両者を満たすような設定方法を考えると良い。

以上の背景より、数値波動水槽の基本形状及び格子作成方法を提案したものが、3章で示す『標準メッシュ』である。概説すると、造波信号に応じた造波水深の設定、水深変化に伴う波の非線形性に対応した格子作成方法、さらには水路内での反射波を低減する手法など、各種考慮事項を反映したモデルとなっている。

2.2.2 計算精度及び安定性

前述の通り、計算精度と数値安定性の向上は重要であるが、実際の設計では CS を構築し、計算実施及び計算結果の理解及び評価を行う必要がある。すなわち、実務上は最低限の計算時間で最大限の精度を得ることが望まれるため、両立は容易ではない。特に、CS では自由表面の流速の取り扱いが波浪伝播精度に大きく影響する。

従来 of CS で用いられていた自由表面の境界条件に対し、変動勾配外挿を新たに実装することで（「2.3 自由表面の境界条件の改良と波浪伝播計算の安定化」を参照）、計算精度を担保しながら数値安定性を確保する手法が提案されている。

さらに、越波現象に関しては、従来、越波升による水塊の計測では数値アルゴリズム上、数値誤差が混入することで越波流量の過小評価が問題となっていたが、新たに指定断面を通過する流量に基づいて越波量を計測する機能を実装し、算定精度の向上を見込んだ（「2.4 越波流量算定精度向上のための新手法」を参照）。

2.3 自由表面の境界条件の改良と波浪伝播計算の安定化

2.3.1 概要

CS は VOF 法で自由表面を表現し、自由表面境界流速は流体内部から外挿される。外挿方法として線形外挿が標準であるものの、速度勾配が強い条件下では計算安定性が低下する。一方、計算安定性が高いゼロ勾配外挿は、波浪減衰や砕波鈍化等の欠点がある。

2.3.2 自由表面流速の計算方法の改良

(1) 既存の表面流速の外挿手法の概説と長所・短所

砕波をはじめとした波浪伝播計算を精度よく、かつ安定的に計算する方法が望まれる。そこで、高橋・鈴木 (2022) ¹⁾ は、内部のセルにおける速度勾配によって外挿速度を調整する「変動勾配外挿」を実装した。

既存の線形外挿とゼロ勾配外挿の 2 種類の外挿手法を説明する。説明を単純化するため、鉛直 1 次元で気液界面の表面セルを想定する (図 2.3-1)。

まず、線形外挿を行う際、自由表面における流速 u_n (表面流速と呼称する) は下層 2 セルの流速を用いて算出する。下付きの添え字はグリッド番号を表している。

$$u_n = u_{n-1} + \frac{u_{n-1} - u_{n-2}}{\Delta z_{n-2}} \times \Delta z_{n-1} \quad (2-1)$$

ここで、 $(u_{n-1} - u_{n-2})/\Delta z_{n-2}$ は、下層 2 セルから求めた速度勾配であり、その勾配で流速を外挿することで表面流速を算出している。

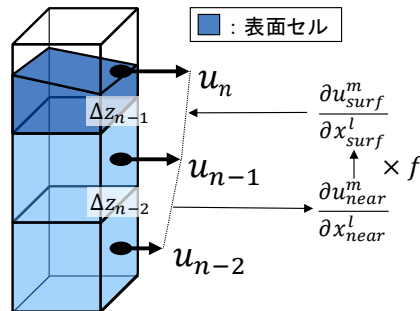


図 2.3-1 表面流速の算出方法の概要図

次に、ゼロ勾配外挿を行う際、表面流速 u_n は、下層 1 セルの流速を用いて算出する。端的に言えば $u_n = u_{n-1}$ であるが、式(2-1)と対応させて標記すると、式(2-2)のようになる。

$$u_n = u_{n-1} + 0 \times \Delta z_{n-1} \quad (2-2)$$

式(2-2)は、下層 2 セルから求めた速度勾配がゼロであり、ゼロ勾配を用いて流速を外挿すると解釈できる。

式(2-1)及び式(2-2)の違いが、それぞれの外挿手法に長所・短所を生むこととなる。まず、線形外挿の短所である「計算不安定性の増加」は、式(2-1)に速度勾配が含まれることに起因する。例えば、砕波波面が静水面に衝突するとき、衝突した瞬間に隣接したセル間に非常に大きな速度勾配が発生する。速度勾配が大きくなれば、外挿して求めた表面流速も大きくなる。過剰に推定された表面流速が CFL 条件を満たさないほど大きくなると、計算不安定を招くことがある。その点、ゼロ勾配外挿は、表面流速の過剰推定が発生しないため、計算安定性は高い。

次に、ゼロ勾配外挿の短所である「波浪伝播過程での波高減衰」や「砕波点の再現性低下」は、むしろ表面流速を過小評価することによって起因する。波浪中の水粒子の楕円運動は、本来自由表面に近いほど振幅が大きい。しかし、ゼロ勾配外挿で求めた表面流速は、自由表面より下方のセルと等しく、自由表面付近の解像度が粗い場合には、本来の流速を過小評価してしまう。表面流速が疑似的な抵抗（数値粘性）を受けているような状況となり、波高減衰や砕波点の再現性低下を招いてしまう。

(2) 変動勾配外挿

変動勾配外挿を導出する前に、式(2-1)、式(2-2)を 3 次元に適用する。まず、式(2-1)、式(2-2)を、偏微分形式で以下のように書き直す。

$$\frac{\partial u_n}{\partial z_n} = f \frac{\partial u_{n-1}}{\partial z_{n-1}} \quad (2-3)$$

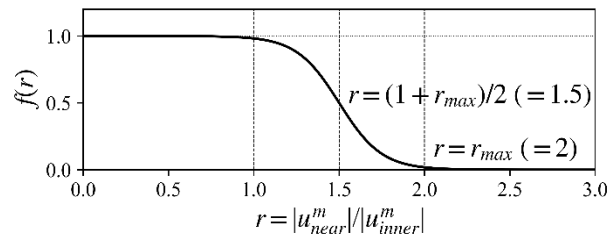


図 2.3-2 変動勾配外挿における連続関数 $f(r)$

f は、線形外挿の場合は $f=1$ であり、ゼロ勾配外挿の場合は、 $f=0$ である。CS3D では、式(2-3)は 3 次元に適用され、 z 、 u は任意の軸方向の座標(x, y, z)と流速(u, v, w)の組み合わせに入れ替え可能である。また、外挿方向が負方向の場合、流体内部は $n+1$ 番目のセルとなる。

対象とする自由表面セルの座標を x_{surf}^l と定義する．上付きの添え字 $l(=1,2,3)$ はそれぞれ (x,y,z) を示す．また，表面流速を u_{surf}^m と定義する． $m(=1,2,3)$ は (u,v,w) を指す．前節は， $l=3, m=1$ の例と考えてよい．今， m 方向流速を l 方向に外挿することを想定し，隣接するセルの座標と流速を x_{near}^l, u_{near}^m ，その内部を x_{inner}^l, u_{inner}^m と定義する．以上の変数を用いると，既存の外挿手法は式(2-4)のように表現できる．

$$\frac{\partial u_{surf}^m}{\partial x_{surf}^l} = f \frac{\partial u_{near}^m}{\partial x_{near}^l} \quad (l, m = 1, 2, 3) \quad (2-4)$$

次に，式(2-4)で用いた f を，速度勾配が強い場合はゼロ勾配外挿に，弱い場合は線形外挿となるような連続関数で表現したい．自由表面流速と隣接セル流速の比 $r = |u_{near}^m|/|u_{inner}^m|$ を引数として，関数 f を表現し，式(2-5)及び式(2-6)を提案する．

$$\frac{\partial u_{surf}^m}{\partial x_{surf}^l} = f(r) \frac{\partial u_{near}^m}{\partial x_{near}^l} \quad (l, m = 1, 2, 3) \quad (2-5)$$

$$f(r) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[\frac{4}{r_{max} - 1} \left(r - \frac{1 + r_{max}}{2} \right) \right] \right\} \quad (2-6)$$

流速比 r が1.0以下の場合， $f(r)$ は1.0である．これは，線形外挿に相当している．次に， r が1.0以上の場合， $f(r)$ は次第に小さくなり． $r = r_{max}$ 程度になると， $f(r) = 0$ になる．これは，ゼロ勾配外挿に相当している．この外挿手法を「変動勾配外挿」と呼称する．

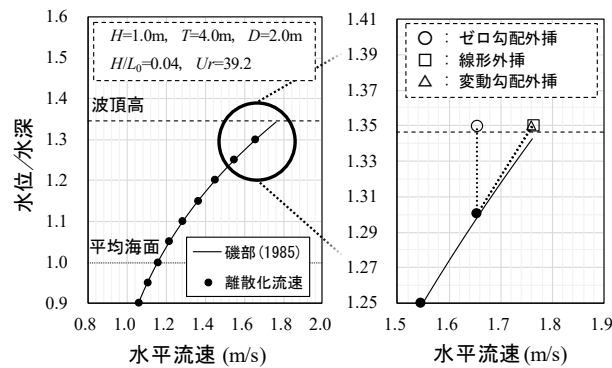


図 2.3-3 クノイド波における表面流速の外挿値

ここで， r_{max} の値は，本研究では2.0を想定している．

図 2.3-3 は， r_{max} を2.0とした場合に，クノイド波の1つを例に算出した離散化水平流速を示す．流速の算出方法は磯部²⁾に従う．鉛直解像度は，推奨値 ($dz = H/10$) とする．離散化流速に変動勾配外挿を適用して求めた表面流速は，線形外挿を用いた場合と近い値であり，磯部の近似解値と同

等である．非線形性の強いときほど $r = |u_{near}^m|/|u_{inner}^m|$ が大きく，式(2-6)による速度勾配の制限を受けやすいが，この場合は上限の制限には当たっていない．通常伝播する非線形性の強いクノイド波に対して，変動勾配外挿は線形外挿の長所を保持していると言える．

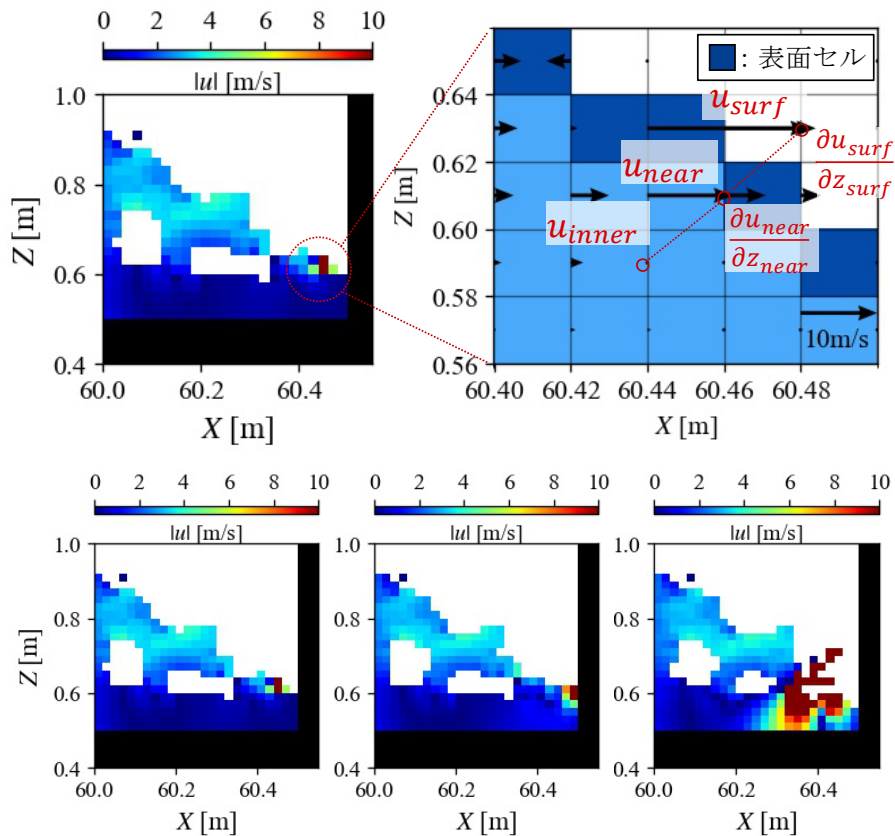


図 2.3-4 碎波面の静水面突入後の水平流速分布（線形外挿）

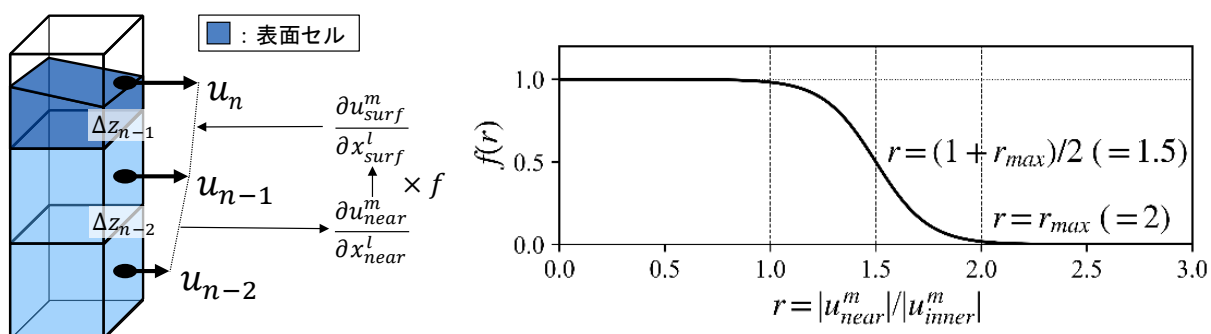


図 2.3-5 表面流速の算出方法の概要図

2.3.3 その他

設計波が砕波限界に近い条件では、数値波動水槽による計算において設計波との合わせ込みが困難となる場合がある。数値波動水槽による結果が設計波算定時の砕波の有無と整合しているか、また、入力波信号の選定において適切な波の出現頻度を再現しうる波形を抽出できているかが再現性向上の鍵となるが、それに加えて、波の継続時間すなわち波数や設計波推定、計算法の精度など、設計波の信頼度を把握することが肝要である。これらを踏まえつつ、安全側の設計となるように配慮して計算の設定を行うことが望ましい。なお、本書では、波高伝播及び越波流量に焦点を当てて、提案する計算モデル（変動勾配外挿）及び計算設定（標準メッシュ）を活用した計算事例集とその精度検証を第4章及び第5章に記載している。今後、計算結果の収集・蓄積に合わせて計算事例を随時追加・更新していく予定である。

安定性や再現性の確保のためのその他の対応方法については、5.4 節も参照されたい。

2.3.4 入力方法

以下に、data.in への入力方法を示す。

■表面セルの流速を変動勾配外挿モデルで求める

OPTION S-CELL-VEL VAR [rmax]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
rmax	変動勾配外挿の重み係数	R*8	2.0	>1.0

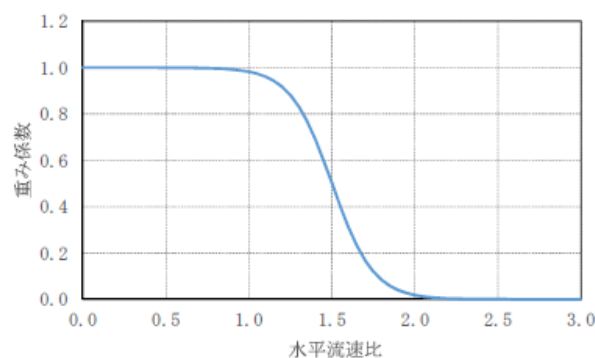


図 2.3-6 変動勾配外挿モデルにおける重み係数 ($r_{max}=2.0$)

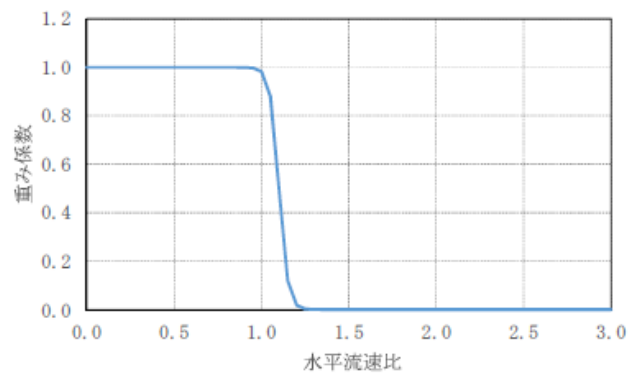


図 2.3-7 変動勾配外挿モデルにおける重み係数 ($r_{max}=1.2$)

2.4 越波流量算定精度向上のための新手法

2.4.1 概要

従来の越波升による F 値の積分に加え、任意断面における通過流量を測定するための機能を追加し、時系列データファイル (data.tran) で出力できる変数に、流量の時間積分値(m^3)と流量(m^3/s)の2種類を追加した。流量の計算方法は、VOF 関数の F の移流量が計算された直後に、移流量の測定を指定した断面で積分し、通過流量として出力する。なお、領域分割にも対応しており、断面が複数領域にまたがる場合には、各領域で計算された流量を合計して出力する。

2.4.2 検証

(1) ダムブレイク

検査のため、図 2.4-1 に示す 3 次元のダムブレイク体系で流量を計測した。計算では、図に示した X 断面、 Y 断面 1、 Y 断面 2、 Z 断面の 4 つの断面で流量を計測した。また、従来機能で、越波升内部の VOF 関数 F の体積積分値も出力した。同図に示す計算格子と初期水位分布について、計算は越波升の水量がおおよそ定常となる 30 秒まで実施した。なお、並列計算の検査を兼ねて、 X 方向を 4 等分、 Y 方向を 2 等分割の領域分割によって計算した。

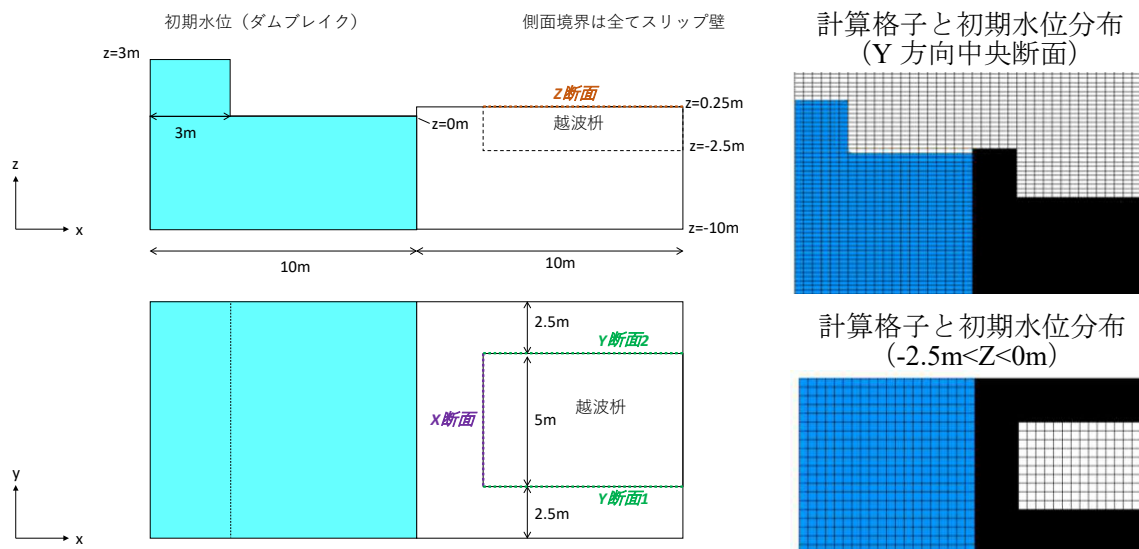


図 2.4-1 流量測定の様式図

図 2.4-1 に示す各断面の流量と流量の時間積分値を以下のように定義する。また、越波升内部の VOF 関数 F の体積積分値を Ve とする。この時、定常時にはおおよそ以下の関係が成立するはずである。

$$Qx + Qy1 - Qy2 = -Qz = Ve \quad (2-7)$$

表 2.4-1 断面の流量の定義

位置	流量(m ³ /s)	流量の時間積分値(m ³)
X 断面	q_x	Q_x
Y 断面 1	q_{y1}	Q_{y1}
Y 断面 2	q_{y2}	Q_{y2}
Z 断面	q_z	Q_z

30 秒後の水位分布を図 2.4-2 に示す。30 秒時点において床面に残った水があり、越波升への流量も完全には 0 となっていないが、越波升内の水量はほぼ定常となっている。流量及びその時間積分値の変化を図 2.4-3 に示す。ダムブレイクによる流量計測として概ね妥当な計算がされていることが確認できる。

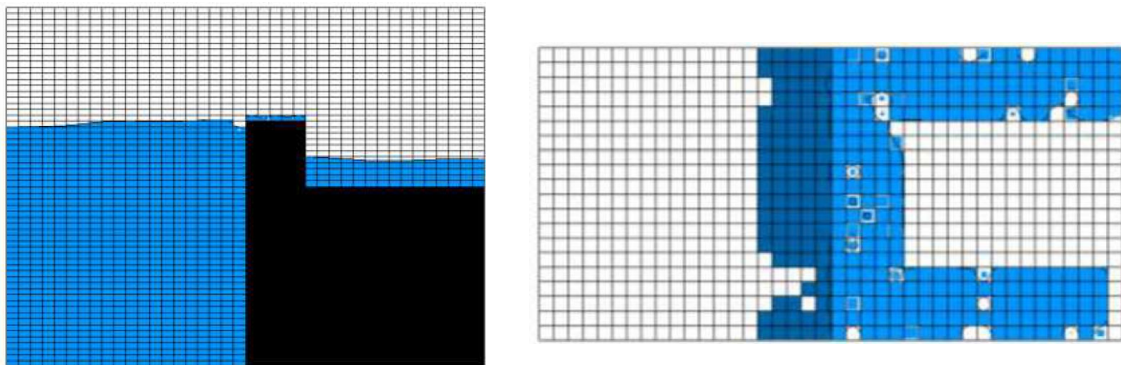


図 2.4-2 30 秒後の水位分布（左：Y 方向中央断面，右：遡上域の底面）

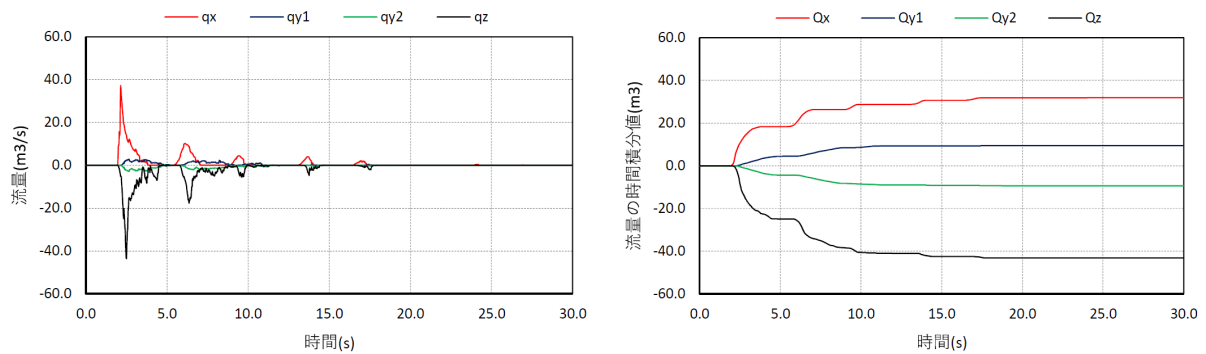


図 2.4-3 流量の時間変化（左図）及び流量の時間積分値の時間変化（右図）

定量的に比較するため、式(2-7)の各辺で示した変数毎での比較を図 2.4-4 に示す。定常時には $-Qz$ と Ve がおおよそ一致していることが確認できる。 $Qx + Qy1 - Qy2$ と Ve が 7.5m^3 程度ずれているが、これは F 値の分布の補正の影響に加えて、水塊の落下時において水面が崩れる際にカットオフが発生するためと想定される。計算開始直後の全水量が $1,090\text{m}^3$ であったのに対して、30 秒後には $1,073.3\text{m}^3$ となっておりトータルで 16.7m^3 の水量が減少しており、越波升における 7.5m^3 程度の水量の減少は妥当な範囲と考えられる。

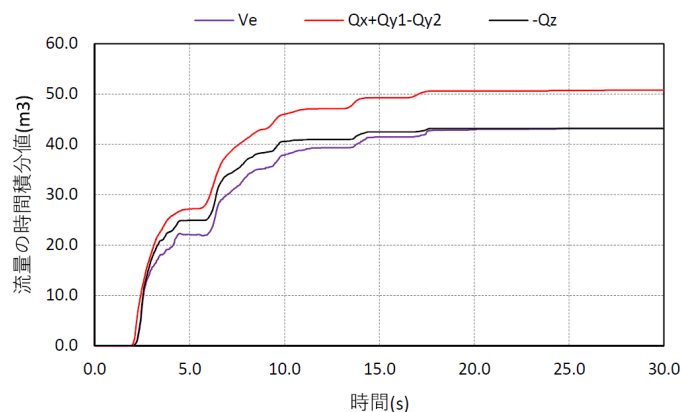


図 2.4-4 流量の時間積分値の比較

(2) 規則波検証

前述のダムブレイクによる通過流量の精度検証に加え、規則波による堤体越波時の通過流量を越波升法と比較する。図 2.4-5 は解析モデルの概形であり、水路右端に越波升を設けている。なお、越波升内には数値安定性のためにあらかじめ低水位を設定している。造波位置ではストークス波及びクノイド波による規則波の造波関数を適用し、波浪諸元として波高を 3m 、周期を 5 秒として造波する。

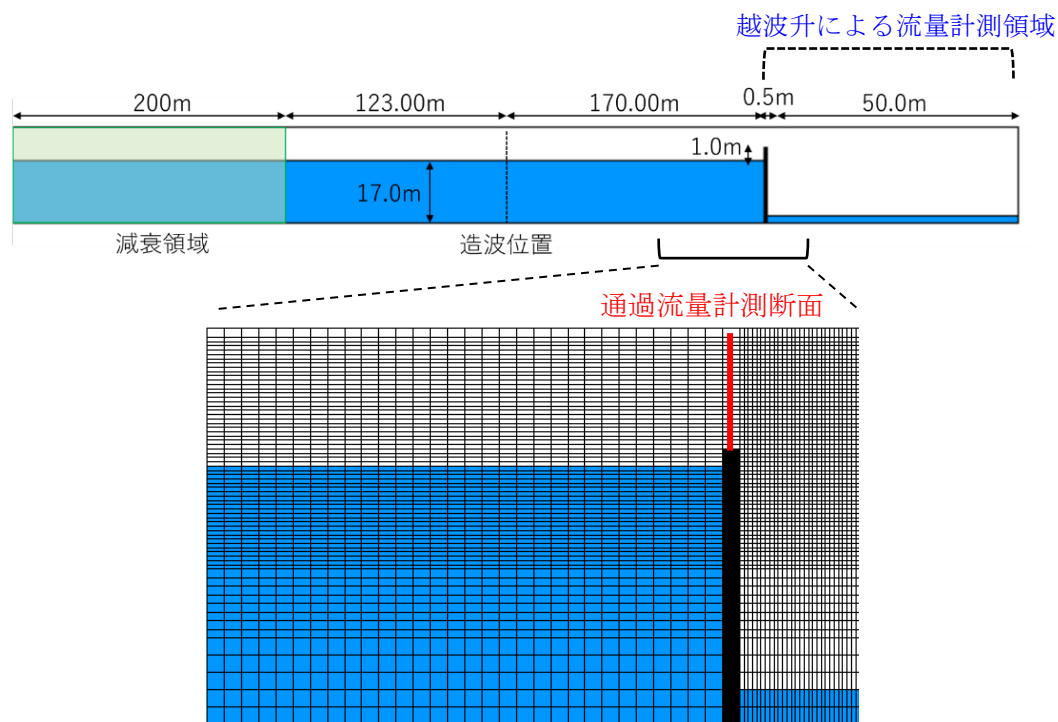


図 2.4-5 解析モデルの設定及び流量計測状況

通過流量及び越波升により計測した越波量の計算結果を図 2.4-6 に示す．なお，瞬間越波量を通過流量による計測で実施し，これを併せて図示している．解析時間が約 48s 以降で規則的に越波が生じていることが瞬間越波量により確認でき，それに対応して累積越波量が徐々に増加している様子が確認できる．

通過流量（赤線）及び越波升（赤点線）による累積越波量の最終値を比較すると，通過流量による累積越波量が $186.54\text{m}^3/\text{m}$ ，越波升による累積越波量が $174.80\text{m}^3/\text{m}$ と算定される．両者の比率を取ると，通過流量に対して越波升による計測は 7%程度の過小評価となる．これは，ダムブレイク検討と同様に，越波水塊の落下時において水面が崩れる際にカットオフが発生するためと想定されるため，CS3D を用いた越波量の計測には計算結果の過小評価を防ぐためにも通過流量による計測が望ましい．

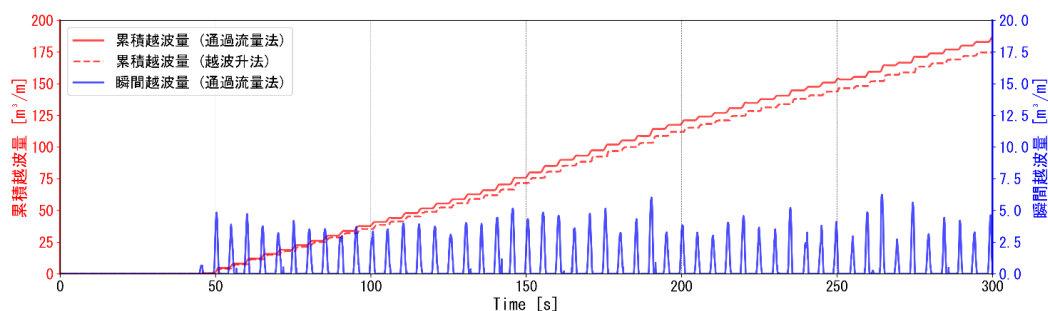


図 2.4-6 越波流量の比較

通過流量法による計測を行う際に、越波流量が小さい場合（無次元越波流量で 10^{-4} のオーダー程度）には、越波量の計測値が敏感に上下する懸念がある点に注意が必要である。これは、通過流量法が護岸上のセルの水体积及び通過流速により流量を計算するため、計測セル上に水塊が残存・停滞等する場合には算定精度が悪くなることに由来する。したがって、越波流量が小さいと想定される計算ケースの場合、通過流量法を基本としつつも、越波流量の計測断面の直背後に越波升を設置する等の方法を採用し、越波流量の妥当性を確認することが望ましい。

2.4.3 入力方法

以下に、通過流量を計測する場合の **data.in** への入力方法を示す。なお、FLOWRATE は瞬間越波量、TOTALFLOW は累積越波量に対応する。

■時系列ファイル出力制御データ

FILE TRN FLOWRATE-X [IG1][JC1][KC1][IG1][JC2][KC2]

FILE TRN FLOWRATE-Y [IC1][JG1][KC1][IC1][JG2][KC2]

FILE TRN FLOWRATE-Z [IC1][JC1][KG1][IC1][JC2][KG2]

FILE TRN TOTALFLOW-X [IG1][JC1][KC1][IG1][JC2][KC2]

FILE TRN TOTALFLOW-Y [IC1][JG1][KC1][IC1][JG2][KC2]

FILE TRN TOTALFLOW-Z [IC1][JC1][KG1][IC1][JC2][KG2]

変数名	意味	型	デフォルト	制限事項
IG1	X 方向格子番号（矩形の始点）	I*4	-	1=IG1=<IG2=<NI
JG1	Y 方向格子番号（矩形の始点）	I*4	-	1=JG1=<JG2=<NJ
KG1	Z 方向格子番号（矩形の始点）	I*4	-	1=KG1=<KG2=<NK
IG2	X 方向格子番号（矩形の終点）	I*4	-	1=IG1=<IG2=<NI
JG2	Y 方向格子番号（矩形の終点）	I*4	-	1=JG1=<JG2=<NJ
KG2	Z 方向格子番号（矩形の終点）	I*4	-	1=KG1=<KG2=<NK
IC1	X 方向セル番号（矩形の始点）	I*4	-	1=IC1=<IC2=<NI-1
JC1	Y 方向セル番号（矩形の始点）	I*4	-	1=JC1=<JC2=<NJ-1
KC1	Z 方向セル番号（矩形の始点）	I*4	-	1=KC1=<KC2=<NK-1
IC2	X 方向セル番号（矩形の終点）	I*4	-	1=IC1=<IC2=<NI-1
JC2	Y 方向セル番号（矩形の終点）	I*4	-	1=JC1=<JC2=<NJ-1
KC2	Z 方向セル番号（矩形の終点）	I*4	-	1=KC1=<KC2=<NK-1

第 2 章の参考文献

- 1) 高橋武志, 鈴木高二朗 : CADMAS-SURF3D における自由表面境界流速の外挿手法の改善とその効果について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 78, No. 2, pp. I_13~I_18, 2022.
- 2) 磯部雅彦 : 有限振幅波の諸理論と適用範囲, 水工学シリーズ 85-B1, pp.1-25, 1985.

3. 標準的なモデル構築方法の提案

3.1 『標準メッシュ』の概要

CS の計算にあたっては、計算格子サイズや各種パラメータを設定する必要があり、沿岸技術ライブラリーでは推奨値が記載されている。実際には水深変化を考慮した計算格子の作成が必要であり、CS において使用する合理的な計算格子を作成する方法として、『標準メッシュ』を提案する。『標準メッシュ』を使用した CS3D の条件ファイル (data.in) 作成までの流れを図 3.1-1 に示す。

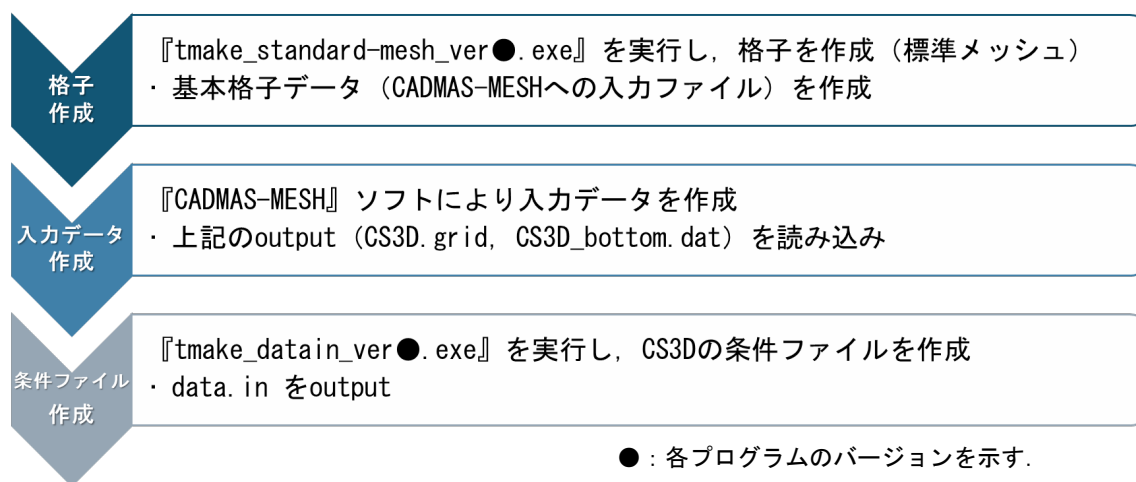


図 3.1-1 『標準メッシュ』を用いた CS3D 条件ファイル (data.in) の作成の流れ

3.1.1 『標準メッシュ』の入出力ファイル

『標準メッシュ』による格子作成に必要な入力ファイル及び出力ファイルを以下に示す。

■ 実行ファイル :

tmake_standard-mesh_ver●.exe

■ 入力ファイル :

input_mesh.dat : 入力値ファイル (データ作成用入力シート※より作成)

tikei.dat : 地形データ

■ 出力ファイル :

CS3D.grid : CADMAS-MESH で必要となる格子データ

CS3D_bottom.dat : CADMAS-MESH で必要となる地形データ

datain.dat : data.in の作成時の読み込みデータ

make_input.dat : 『標準メッシュ』作成の入力値確認用

zahyo-cell_no.dat : 『標準メッシュ』の座標値とセル番号の対応表

※データ作成用入力シートの記入方法は、巻末資料を参考にされたい。

3.1.2 地形データの作成について

地形データの作成例を図 3.1-2 に示す。造波水深 10m とし、X=100 から X=500 に 1/5 の勾配の地形を設定した場合の地形データ「tikei.dat」の例である。なお、地形を設定しない場合、「tikei.dat」は不要である。

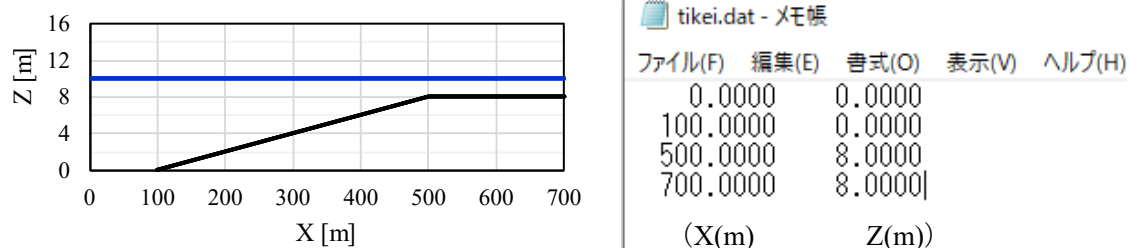


図 3.1-2 サンプル地形（左図）と地形データファイル（右図）の例

また、現バージョンの CS3D においては、地形が直角あるいは鋭角に変化する形状には対応していない。ただし、直角の場合でもわずかに鈍角になっていれば適応できる。適用可能な地形または不可能な地形の例を図 3.1-3 に示す。格子を変更したい場合は出力ファイル「CS3D.grid」を修正し、CADMAS-MESH を実行することで可能である。

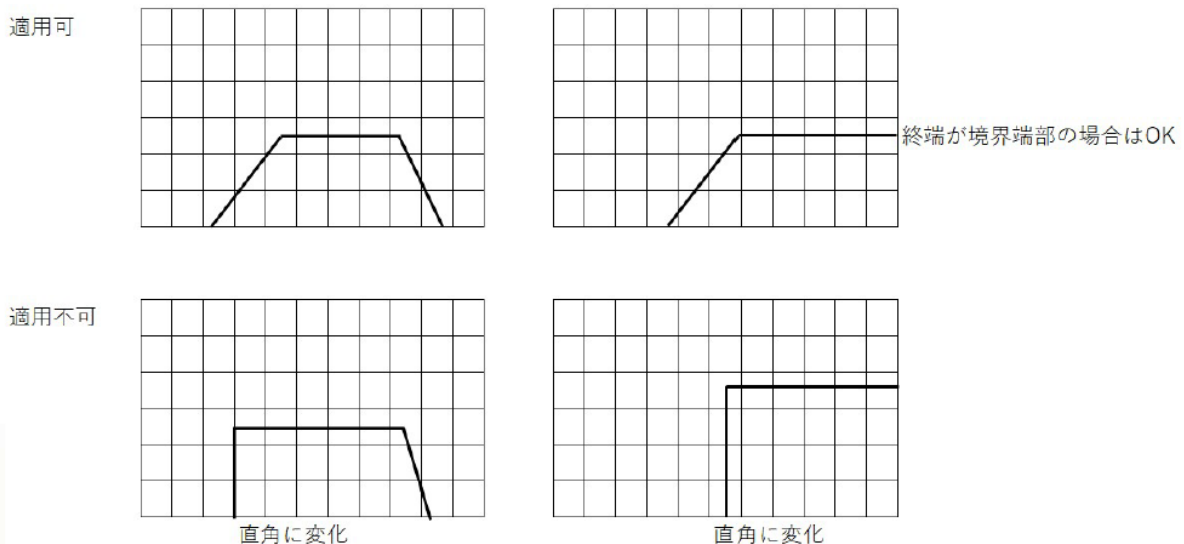


図 3.1-3 設定可能及び不可能な地形の例

実務的には、海底地形の勾配が緩やかな場合、その勾配に応じた水路長が必要となるため、水理模型実験同様に擦り付け勾配を設定し、2 段階に地形を設定することが望ましい。堤体を設置した場合の地形の例を図 3.1-4 に示す。

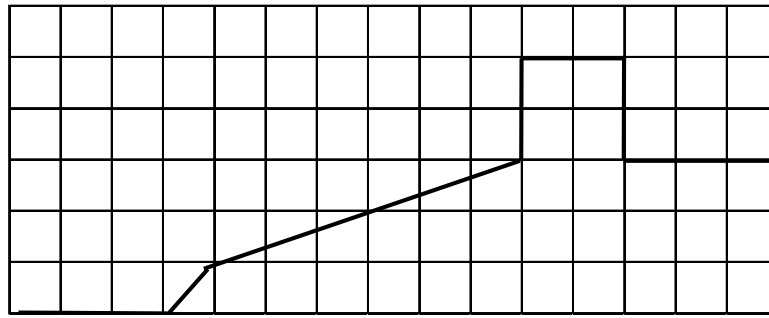


図 3.1-4 堤体を設置した場合の擦り付け勾配の設定例

3.2 CS の計算に必要な構成要素

CS の計算には水理模型実験と同様に計算領域（水路部）の他に減衰領域（消波部）及び造波領域（造波ソースまたは造波境界）が存在する．計算領域のイメージ図を図 3.2-1 に示す．座標の定義及び減衰帯の設定方法については表 3.2-1 に示す．減衰領域及び計算格子の設定方法については「3.3.2 計算格子」及び「3.3.3 水位上昇の抑制」で後述する．

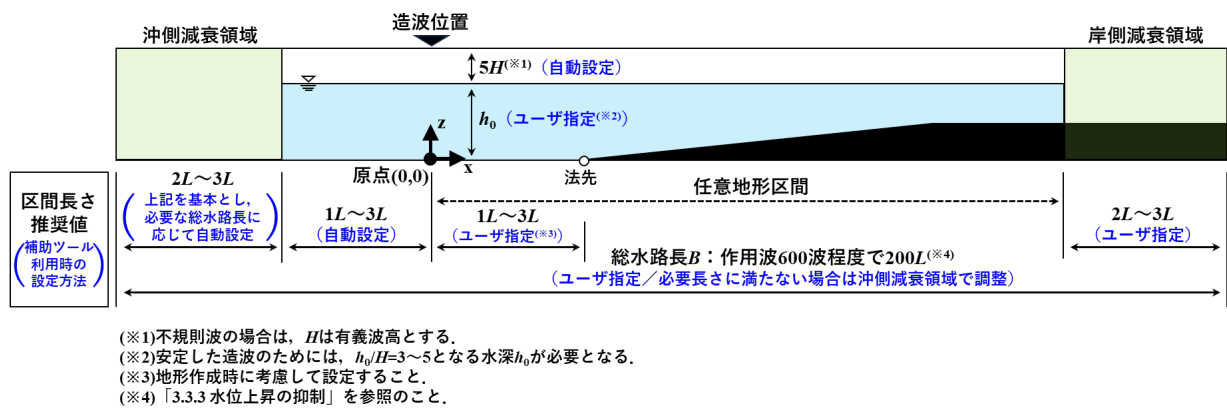


図 3.2-1 計算領域のイメージ図

表 3.2-1 座標の定義と減衰帯の設定方法

項目	定義・設定方法
水平座標	造波位置を原点とし，岸向きが正
鉛直座標	造波位置の海底面を原点とし，鉛直上向きが正 最大値 $Z_{\max}$ は静水面上5波高の位置に自動的に設定される
沖側減衰帯	input_mesh.dat で減衰帯の幅を設定 推奨値： $2L\sim 3L$ ※水位上昇抑制のための総水路長の調整としても用いる
岸側減衰帯	input_mesh.dat で減衰帯の有無を選択 減衰帯ありの場合は幅を設定 推奨値： $2L\sim 3L$

3.3 適切な造波水深と計算格子

CS のモデル設定は data.in ファイルを用いて行う。以下では，その中で計算精度に直結する計算格子及び計算で用いる種々のパラメータの設定方法を説明する。以下の説明では実務で用いることが多い二次元断面を対象に説明をする。

3.3.1 造波水深

造波水深 h_0 の基本的な設定値を表 3.3-1 に示す。実験における経験等から，造波位置で砕波することなく，かつ安定した造波が可能な水深である。規則波の場合，造波位置で砕波することなく安定した造波が可能な水深は $h_0/H=3.0$ (H ：入射波高) 程度，不規則波の場合は最高波を考慮して $h_0/H_{1/3}=5.0$ ($H_{1/3}$ ：有義波高) に設定するのが望ましいと考えられる。

表 3.3-1 造波水深の基本的な設定値

規則波	$h_0/H=3.0$ 程度
不規則波	$h_0/H_{1/3}=5.0$ 程度

3.3.2 計算格子

CS において精度のよい計算結果を得るためには，格子設定が重要であり，沿岸技術ライブラリー¹⁾により表 3.3-2 のように整理されている。

表 3.3-2 格子幅の設定範囲（沿岸技術ライブラリー¹⁾ より）

	推奨する格子設定	波の非線形性が弱い ケースでの格子設定
$\Delta X:\Delta Z$	5:1 以下	10:1 未満
$H/\Delta Z$	10 以上	5 以上
ΔX	$L/80\sim L/100$ 程度	$L/40$ 以上
差分スキーム	DONOR-0.1～1.0, QUICK-0.2	

※ ΔX , ΔZ 及び L はそれぞれ格子の水平幅，鉛直幅及び波長

実務においては，検討対象（波力，越波量，遡上高等）や要求する計算精度に応じた計算格子を設定する必要がある。表 3.3-2 は対象地点における波の非線形に応じた格子幅を示したものであり，これを基に造波位置における基本格子幅を整理した結果が表 3.3-3 である。

水深変化がある場合は表 3.3-4 に示すように波の非線形性に応じ格子幅を変化させる。一方，一

様水深の場合、 h/L 及び h/H に応じ、格子幅を 1/2 または 1/4 とする。なお、表 3.3-3 に示す計算格子は『標準メッシュ』作成補助ツール (tmake_standard-mesh_ver●.exe) を実行し得られる結果と同様である。

表 3.3-3 基本格子幅

$h(m)$ $T(s)$	12.5以下	12.5~17.5	17.5~25.0	25.0~35.0	35.0~45.0	45.0以上
5.5以下	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
5.5~6.5	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6.5~7.5	1.00			2.00	2.00	2.00
7.5~8.5						
8.5~9.5		2.00	2.00			
9.5~10.5						
10.5~11.5	3.00			3.00	4.00	4.00
11.5~12.5						
12.5~13.5		4.00	4.00			
13.5~15.5						
15.5~17.5	3.00			4.00	4.00	4.00
17.5~19.5						
19.5以上						

表 3.3-4 格子幅の変化方法

項目	設定値
基本幅 ΔX	非線形性が弱い場合の推奨値
$\Delta X/2$ とする水深 h	$h/L=0.05$, $h/H=3.5$ に対する水深の大きいほう
$\Delta X/4$ とする水深 h	$h/H=2$ に対する水深
$\Delta Z/\Delta X$	1.0

※不規則波の場合は $H=H_{1/3}$ とする

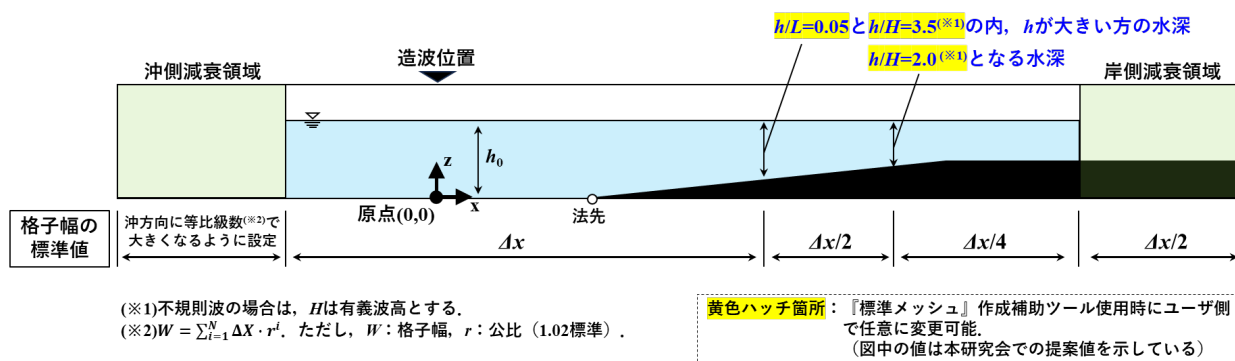


図 3.3-1 計算格子サイズと水深の関係

格子サイズの変化点となる水深の考え方は以下の通りである。

【水平幅を 1/2 とする水深の設定方法】

- ・ $h/L=0.05$: 造波水深 20～50m の場合、波長が 1/2 となる安全側の水深の大きさ
- ・ $h/H=3.5$: 不規則波では $h/H_0=2\sim3$ 程度で $H_{1/3}$ が最大となるので、安全側と考えられる水深の大きさ

【水平幅を 1/4 とする水深の設定方法】

- ・ $h/H=2.0$: $H_{\max}/h=0.78$ (規則波, 一様水深) の逆数となる $h/H_{\max}=1.28$ より大きい水深の大きさ

また、構造物部分の格子幅は一般に上述の格子幅より小さくする必要があり、構造物の代表長 (例えば、ブロックの高さ、スリット幅など) の 1/2～1/3 程度とすればよいと考えられる。なお、規則波の場合、波の非線形性が強い条件でも造波は可能であり、その場合は表 3.3-3 の値を 1/2 倍とした格子幅を用いるのが望ましい。

3.3.3 水位上昇の抑制

CS において不規則波を取り扱う場合、従来の総水路長は $10L$ 程度で作用波数が 150～200 波程度であったため、水位の上昇量は大きくても 3～4%程度であった。ただし、600 波程度 ($H_{\max}=1.8H_{1/3}$) となる波群を対象とすると水位上昇量は 10%近くになり無視できなくなる。水位の上昇を抑制するには総水路長を長く設定する必要があるが、沖側のエネルギー減衰帯の長さを長くすることで抑制可能となる²⁾³⁾⁴⁾。総水路長を造波位置の波長 L の約 200 倍と設定 (『標準メッシュ』入力シート) することで、水位上昇量を 0.2%程度に抑制できる。上記のように設定することで、水深を 1m の場合の水位上昇量は 2mm 以内となる。減衰帯の格子サイズについては、造波位置から沖側のエネルギー減衰帯までの約 1 波長及び減衰帯内の約 2 波長までは標準幅 ΔX とし、それより沖側では式(3-1)に示す等比級数式を用い、格子数の低減を図る。

$$W = \sum_{i=1}^N \Delta X \cdot r^i \quad (3-1)$$

ここに、 W 及び r はそれぞれ造波ソースより沖側の格子幅及び公比である。公比は $r=1.02$ 程度に設定し、沖側のエネルギー減衰帯の長さは $2L\sim3L$ 程度を基本とする。それより沖側では等比級数を用いて与えればよいと考えられる。

『標準メッシュ』作成補助ツール (tmake_standard-mesh_ver●.exe) では上記の考え方により減衰帯の格子サイズを計算し出力される。

コラム1：水位上昇量とアーセル数

水位上昇量は入射波の非線形性が強くなると増加するため、波の非線形性の分類に用いられる無次元数であるアーセル数 Ur を用いて水位上昇量 $\Delta h/h_0$ と Ur の関係を調べた。ここに h_0 は造波水深である。

$$Ur = HL^2/h^3$$

図 3.3-2 に総水路長を $8L \sim 190L$ とした場合の $\Delta h/h_0$ とアーセル数 Ur の関係を示す。図中に示した曲線は総水路長を約 $190L$ としたときの近似曲線及びそれを基に各水路長に対して水路長比による補正値を計算した結果となっている。 $\Delta h/h_0$ とアーセル数 Ur は比例関係にあるが、総水路長を約 $190L$ とすれば $Ur < 10$ の領域で水位上昇量が 0.2% 以下に抑えられていることが確認できる。よって、不規則波の場合は造波位置のアーセル数 $Ur=10$ 程度となる造波水深を上限とし

$$H_{1/3}L^2/h_0^3 \leq 10.0$$

となる造波水深 h_0 を設定することで安定した計算が可能となる。総水路長を短くすると水路長比に応じて水位上昇量は増加するため、図 3.3-2 中に示した曲線を参考に適切な造波水深を設定することが望まれる。なお、 Ur が大きくなると、図 3.3-3 に示すように造波位置における水位と信号の差が大きくなり、 $Ur > 20$ では造波中に計算の発散が確認された。

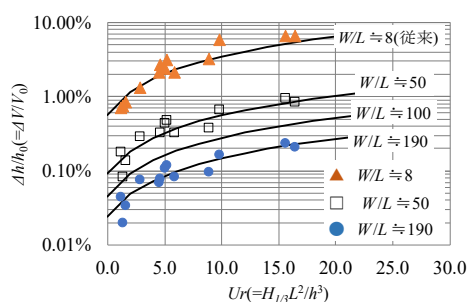
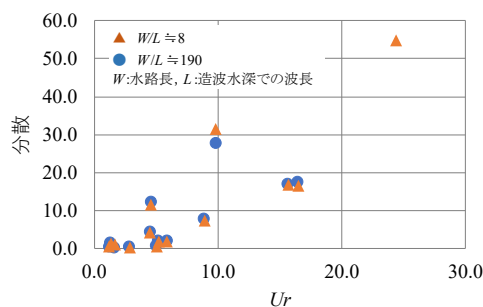


図 3.3-2 水位変化量とアーセル数の関係



(※ $Ur > 20$ では造波中に計算が発散する場合がある)

図 3.3-3 造波位置の水位変動と信号の差とアーセル数の関係

コラム 2：規則波の碎波を取り扱う場合の格子幅

図 3.3-4 に規則波に対する碎波波高とサーフシミュリティパラメタ ξ_0 の関係を示す。碎波波高は碎波限界波高で無次元化している。無次元碎波波高は ξ_0 が小さくなり崩れ波の領域になると小さくなるが、巻波領域ではほぼ 1.0 に近く碎波限界波高とほぼ同じ大きさとなっている。崩れ波領域で無次元碎波波高が小さくなる場合の格子幅は $\Delta Z/H > 10$ (H ：造波位置での波高) となっていた。そこでこれらのケースに対する格子幅を $\Delta Z/H < 10$ として計算した結果を合わせて図中に $\triangle$ で示した。この結果、碎波波高は 4～16%改善し、水理模型実験で得られる碎波波高のばらつきとほぼ同じになった。表 3.3-5 には計算時の碎波位置での格子幅を示した。したがって、規則波の碎波波高の精度が対象となるような場合の格子幅の設定は、碎波位置付近の格子幅が $\Delta Z/H < 10$ となるように設定すれば碎波波高の精度を向上することができる。

※これらの計算では $\Delta Z/\Delta X=1.0$ の正方形格子としている

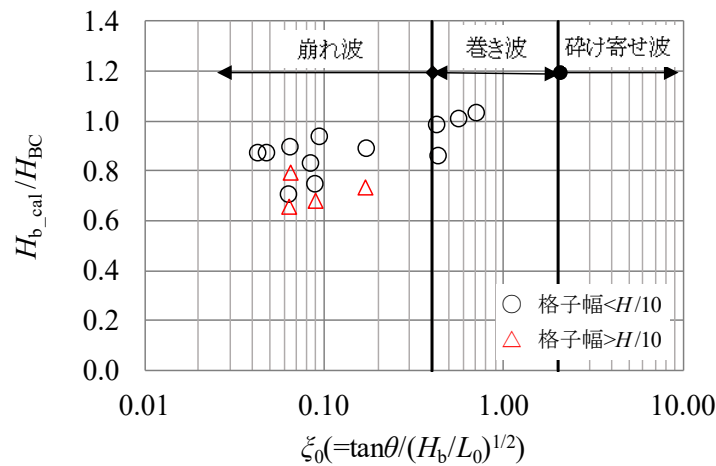


図 3.3-4 無次元碎波波高とサーフシミュリティパラメタの関係

表 3.3-5 造波位置の水位変動と信号の差とアーセル数の関係

$i=\tan\theta$	$H_0'(m)$	$T(s)$	H_0'/L_0	$\xi_0^{(*)}$	h_b/L_0	H_{b_cal}/H_{BC}	$h_b(m)$		$\Delta X/4$ となる水深(m)	$H/10(m)$	碎波位置の格子幅(m)
							理論	計算			
1/10	1.06	8.00	0.011	0.71	0.200	1.03	2.50	2.50	2.00	0.11	0.25
	6.76	15.00	0.019	0.57	0.027	1.00	9.50	9.50	15.60	0.68	1.00
	9.90	12.00	0.044	0.43	0.056	0.98	12.50	12.50	18.00	0.99	0.75
	8.55	10.00	0.055	0.44	0.077	0.85	10.00	12.00	23.00	0.86	0.50
1/50	1.08	8.00	0.011	0.17	0.025	0.89	2.50	2.25	2.00	0.11	0.50
	7.41	15.00	0.021	0.07	0.046	0.89	12.50	14.00	14.00	0.74	2.00
	9.70	12.00	0.043	0.09	0.067	0.93	14.40	15.00	18.00	0.97	0.75
	8.56	10.00	0.055	0.08	0.103	0.83	12.60	16.00	20.00	0.86	0.50
1/100	1.07	8.00	0.011	0.09	0.025	0.74	2.10	2.40	2.00	0.11	0.50
	7.41	15.00	0.021	0.06	0.051	0.70	12.40	18.00	14.00	0.74	2.00
	9.70	11.95	0.044	0.05	0.072	0.87	14.60	16.00	18.00	0.97	0.75
	8.56	10.00	0.055	0.04	0.090	0.87	12.40	14.00	20.00	0.86	0.50

※ $\xi_0 = \tan\theta / (H_0'/L_0)^{1/2}$

※碎波位置の格子幅 $> H/10$

コラム 3：構造物天端高を格子幅に合わせる方法

越波計算などで構造物を用いた計算を実施する場合、標準的な格子作成方法では天端部分が透水性の取扱いになる場合がある。このような場合に格子と天端を一致させるには、鉛直方向の格子幅を調整すればよい。修正する場合に1メッシュでの修正が格子幅の変化が大きくなるような場合は、複数の格子を用いて調整すればよい。図 3.3-5 に修正のイメージを示す。

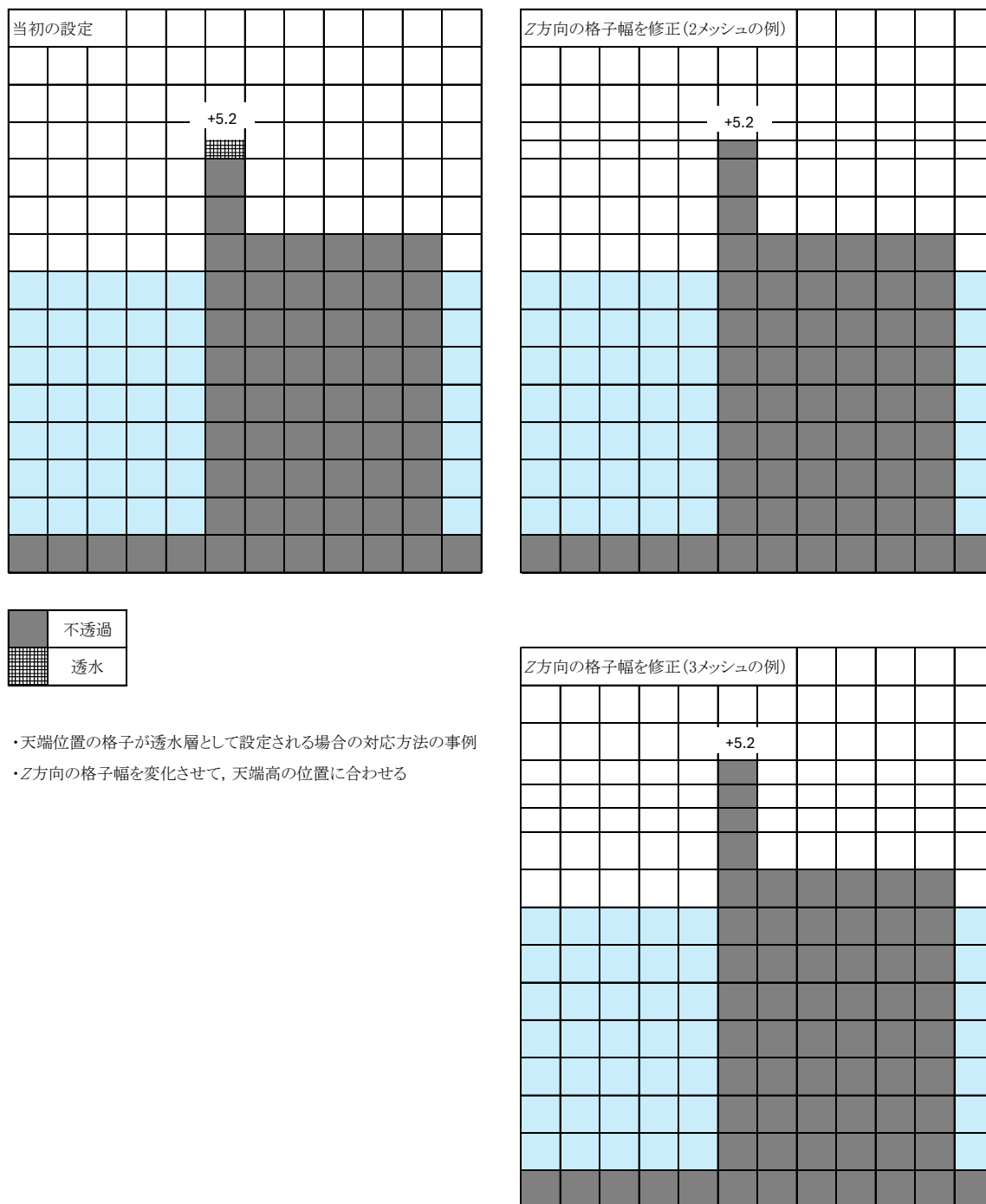


図 3.3-5 天端高に合わせた格子幅修正イメージ

第 3 章の参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発－数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書－，沿岸技術ライブラリー，No. 12，p. 65，2001.
- 2) 藤原隆一・高橋武志・鈴木樹：実用的な CADMAS-SURF のメッシュ作成方法，土木学会論文集，Vol.80，NO.18，24-18040，2024.
- 3) 藤原隆一・高橋武志・鈴木樹・下迫健一郎・津田宗男：CADMAS-SURF の合理的なメッシュ構築方法，沿岸技術研究センター論文集，No.24，pp. 39～48，2024.
- 4) 藤原隆一：線形理論を用いた不規則波信号作成における流速の補正方法，海洋開発論文集，Vol.24，pp.873～878，2008.

4. 伝達波の算定事例

港湾基準に採用されている波高伝達率の算定図を作成する際に実施された直立堤及び混成堤に対する水理模型実験¹⁾²⁾を再現した事例を示す。

4.1 再現対象とする水理模型実験の概要

本章で再現対象とする水理模型実験で用いられた断面水路を図 4.1-1 に示す。防波堤の堤体は直立堤及び混成堤（マウンド部は不透過構造）であり，越波による伝達波を対象とした実験である。実験時の反射率 K_R は線形理論に基づく Healy の方法で求められ，この K_R を用いて入射波高 H_I を算出されている。また，伝達波高 H_T は，模型より岸側から消波斜面の近傍までの間の平均値とし，伝達率 K_T は H_T/H_I として算出されている。さらに，Healy の方法で求められた K_R は入射波の非線形性が強くなると見かけ上反射率が小さくなり入射波高を過大に見積もることから，有限振幅波の部分重複波理論に基づき実験結果が補正されている。なお，実験では規則波が用いられている。

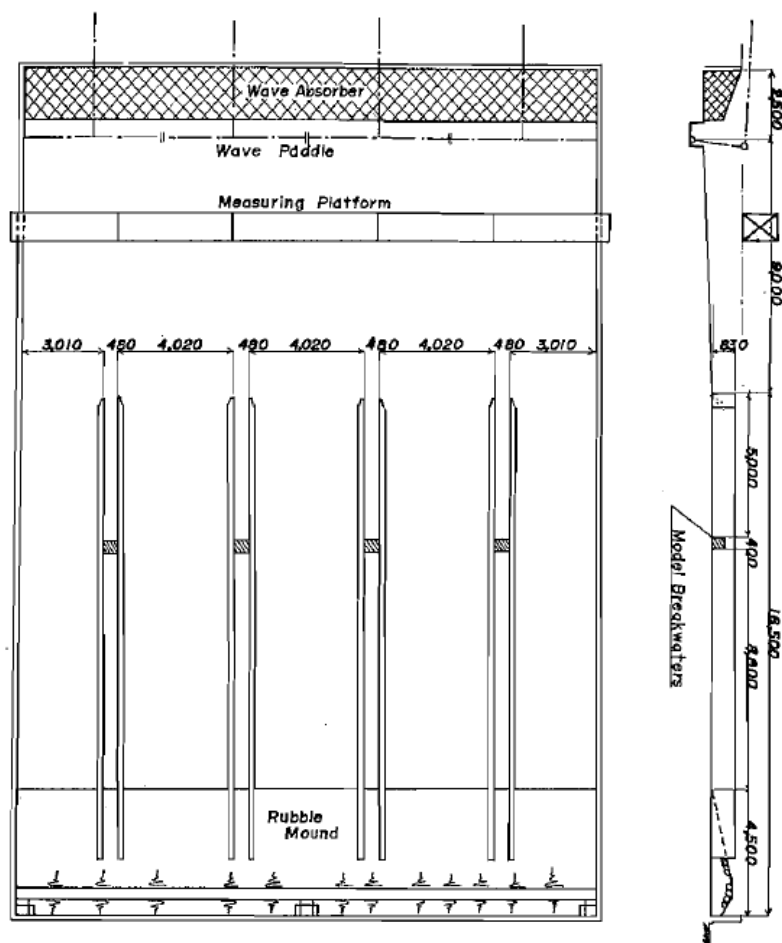


図 4.1-1 水理模型実験が実施された平面水槽及び断面水路の設置状況

4.2 再現計算の方法

4.2.1 断面水路の設定

計算に用いた水路断面は前述の図 4.1-1 を参考に表 4.2-1 に示す通り設定した。造波水深が 1.0m の場合を例として計算で用いた断面を図 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 再現計算の設定条件

造波位置の水深	1.0m または 0.85m
斜面の勾配	1/20
造波位置から斜面勾配までの距離	9.0m
造波方式	造波ソース
エネルギー減衰帯	設定領域（水路）の両端部に設定

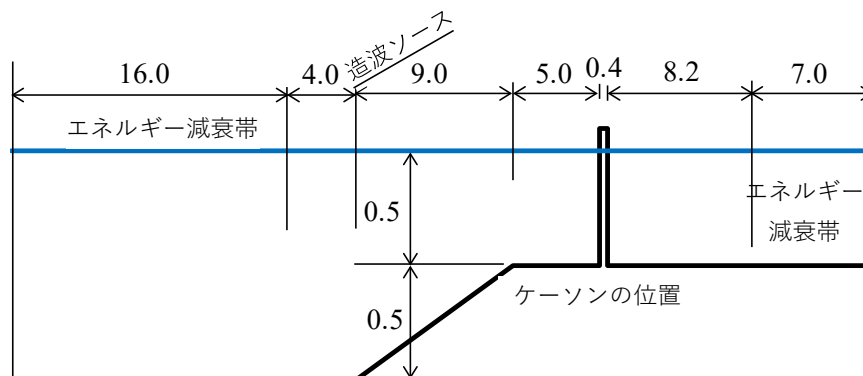
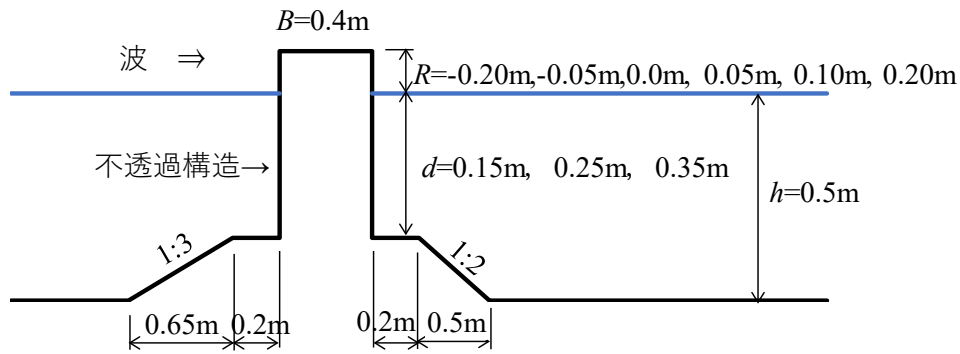


図 4.2-1 断面水路

4.2.2 防波堤の形状

防波堤として、直立堤及び混成堤を再現した。水理模型実験と同じく混成堤のマウンド部は不透過構造とした。混成堤の断面形状を図 4.2-2 に示す。混成堤は、図中に示す通りマウンド上水深の異なる 3 ケースをそれぞれモデル化した。直立堤の場合は混成堤のマウンド部が存在しない形状とした。天端高についても図中に示す 6 ケースを対象とするが、形状及び波浪条件によって異なる（表 4.2-2 参照）。



B:幅, R:天端高, d:マウンド上水深

図 4.2-2 混成堤の断面形状

4.2.3 計算条件

本章における再現計算では4.1節に記述したHealyの方法による補正を行った入射波高を用いるが、実験結果はそれらの上限及び下限となる範囲を対象に評価されている。再現計算においては、実験範囲と同等の範囲とし、入射波高はきりのよい値で与えた。計算ケースを表4.2-2に示す。 h は水深、 T は周期、 R は天端高である。混成堤についてはマウンド上水深 d が異なる3ケース($d=0.15\text{m}$, 0.25m , 0.35m)についてそれぞれ計算を行った。

また、本計算事例では、CS3D Ver.1.7を使用している。

表 4.2-2 計算ケース

(a)直立堤				(b)混成堤			
$h=50\text{cm}, T=1.05\text{s}$		$h=50\text{cm}, T=1.8\text{s}$		$h=35\text{cm}, T=1.5\text{s}$		$h=35\text{cm}, T=2.8\text{s}$	
$R(\text{cm})$	$H(\text{cm})$	$R(\text{cm})$	$H(\text{cm})$	$R(\text{cm})$	$H(\text{cm})$	$R(\text{cm})$	$H(\text{cm})$
-10	7.5	-5	3	-5	4	-5	5
-10	5	-5	5	-5	5	0	5
0	5	0	5	0	5	5	5
5	5	5	5	5	5	10	5
-10	10	-5	15	10	5	-5	10
0	10	0	15	-5	10	0	10
5	10	5	15	0	10	5	10
-10	12.4	10	15	5	10	10	10
0	12.4	-5	20	10	10	-5	15
5	12.4	0	20	-5	15	0	15
-20	12.4	5	20	0	15	5	15
		10	20	5	15	10	15
		-20	15	10	15	10	20
				-20	15	20	5
						20	10
						20	15
						20	20

4.2.4 波高伝達率及び反射率の算出方法

通過波検定を行い、入射波の入力条件を設定した。堤体を設置しない断面における堤体位置の通過波高 H_t を入射波高 H と定義する。伝達波高及び反射波高の算出時は、それらの波エネルギーが十分に到達したとみなされる時間帯を対象に行った。波高伝達率は H_t/H で算出し、堤体沖側から 2～6m 離れた区間を平均値とした。越波の影響で分裂や平均水位の変化を引き起こす場合は、平均水位の補正を行い、ゼロアップクロス法を適用し伝達波高を算出した。それでも波が分裂して短周期の波になる場合は与条件の周期で 1 波を定義し、最低水位と最高水位の差を波高として算出した。反射率は堤体から岸側 3.0m 及び 3.5m の位置の水位時系列を用いて、入・反射波分離推定法³⁾によって算出した。

4.2.5 CS3D で用いたパラメータ

再現計算に用いたパラメータを表 4.2-3 に示す.

表 4.2-3 CS3D で用いたパラメータ

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	35～40s
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	STK-CND
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：2 <i>L</i> 程度，岸側：2 <i>L</i> 程度
5	連立 1 次方程式の解法		デフォルト（M-ILUBCGSTAB 法）
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト（設定しない）
9	スカラー量		デフォルト（設定しない）
10	初期値等		デフォルト（設定しない）
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.1.exe を使用
12	ポーラスの下限値		0.01
13	障害物データ		設定なし
14	ポーラスメディア法	空隙率	—
		(<i>x, y, z</i> 方向)面積透過率	—
		慣性力係数	—
		抵抗係数	—
15	D-F 則：テトラポッド	α_0	—
16		β_0	—
17		$d_r(=V^{1/3})$	—
18	D-F 則：マウンド	α_0	—
19		β_0	—
20		$d_r(=V^{1/3})$	—
21	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
22	リストファイル出力制御		適宜設定
23	詳細ファイル出力制御		適宜設定
24	リスタート制御		なし
25	時系列ファイル出力制御		適宜設定
26	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0（変動勾配外挿モデル）
		圧力計算	なし
		越波升	なし
		D-F 則	なし
時系列データの記載事例			
特になし			

4.3 計算結果

4.3.1 通過波検定

通過波検定の計算結果の例を図 4.3-1 に示す。横軸はデータ入力における波高 H_{in} を縦軸は堤体位置における通過波高 H_{cal} を表している。異なる波高 3 ケース程度の計算を実施し内挿により目的の入射波高となる入力値 H_{in} を決定した。

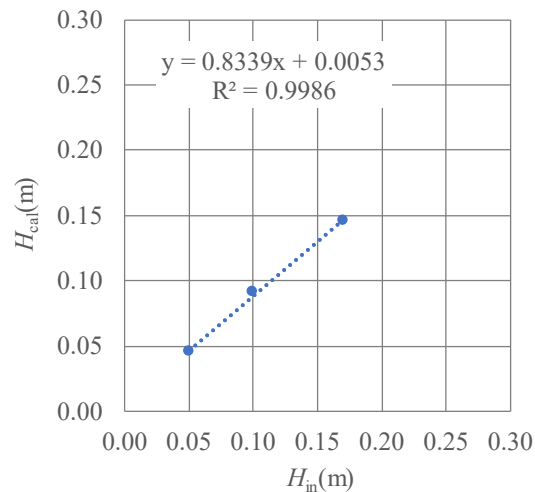


図 4.3-1 入射波検定結果の事例 ($T=1.05s$, $h=1.0m$)

4.3.2 直立堤の波高伝達率

直立堤の波高伝達率の結果を図 4.3-2 に示す。図中の曲線は実験値のほぼ上限及び下限を示す。波高伝達率の計算値は実験値の範囲に分布していることが確認された。

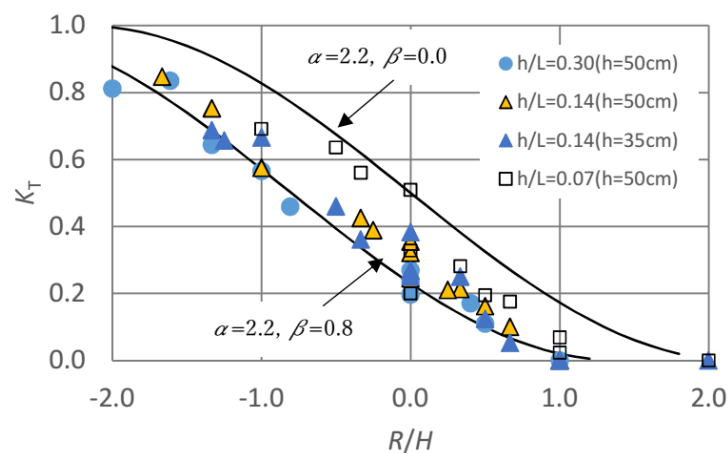


図 4.3-2 直立堤の伝達率の計算結果（全データ）

直立堤の反射率の計算結果を図 4.3-3 に示す。図より反射率は無次元天端高の増加に応じて大きくなり、 $R/H \geq 0.0$ では静水面上に天端がある直立堤の反射率の概略値となる $K_R = 0.7 \sim 1.0$ の範囲に分布していることが確認できる。

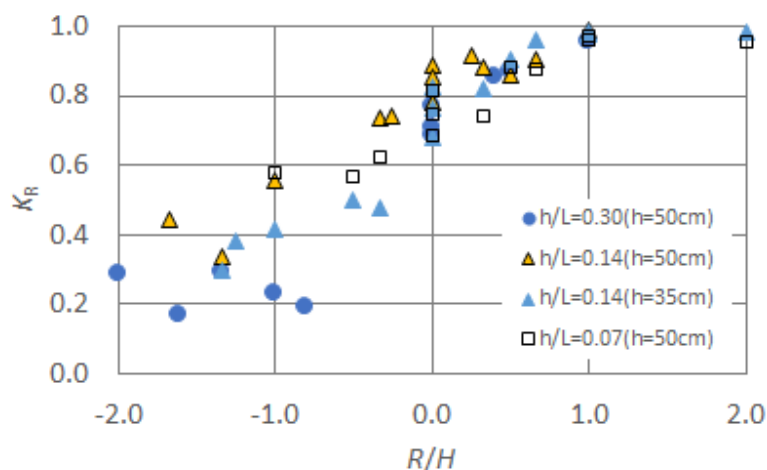


図 4.3-3 直立堤の反射率の計算結果（全データ）

4.3.3 混成堤の波高伝達率

混成堤の波高伝達率及び反射率の計算結果を図 4.3-4～図 4.3-6 に示す。図中の曲線は実験値のほぼ上限値を算定式より図化したものである。実験結果における波高伝達率及び反射率は、有限振幅性の影響を反映した補正入射波を用いたものである。マウンド上水深の異なるいずれの結果も波高伝達率の計算値は実験値の範囲にほぼ分布していることが確認できる。それぞれの水深に対する結果を以下に示す。

●マウンド上水深 $d=0.15\text{m}$

反射率の計算値は R/H に比例して大きくなり、 $R/H > 0.0$ では $0.7 \sim 0.9$ となり水面上に天端がある直立堤の反射率の概略値と同程度であることが確認された。

反射率の実験値はばらつきが大きいものの、 $R/H = 0.5 \sim 0.6$ で極大となるような分布が確認された。

●マウンド上水深 $d=0.25\text{m}$

反射率の計算値と実験値ともに R/H に応じて増加し、 $R/H > 0.5$ ではほぼ $K_R = 1.0$ となることが確認された。

●マウンド上水深 $d=0.35\text{m}$

反射率の計算値は R/H に応じて大きくなるのに対し、実験値は $R/H = 0.5$ 付近で急激に大きくなり 1.0 に近づくことが確認された。

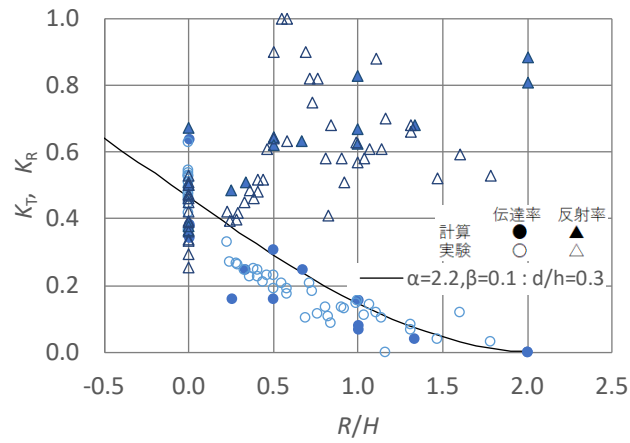


図 4.3-4 混成堤の伝達率・反射率の計算結果 ($d=15\text{cm}$)

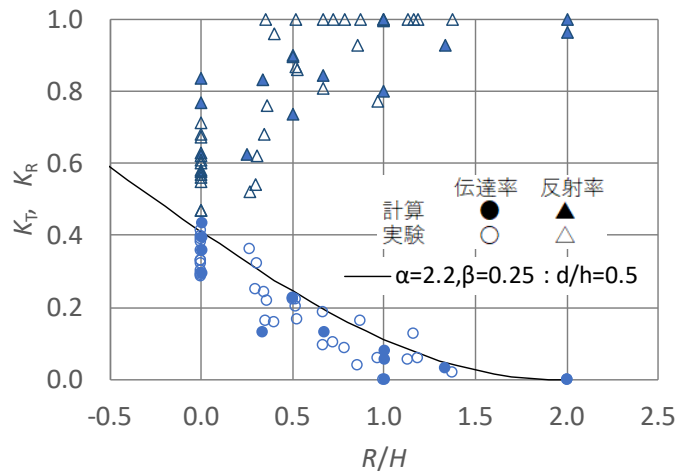


図 4.3-5 混成堤の伝達率・反射率の計算結果 ($d=25\text{cm}$)

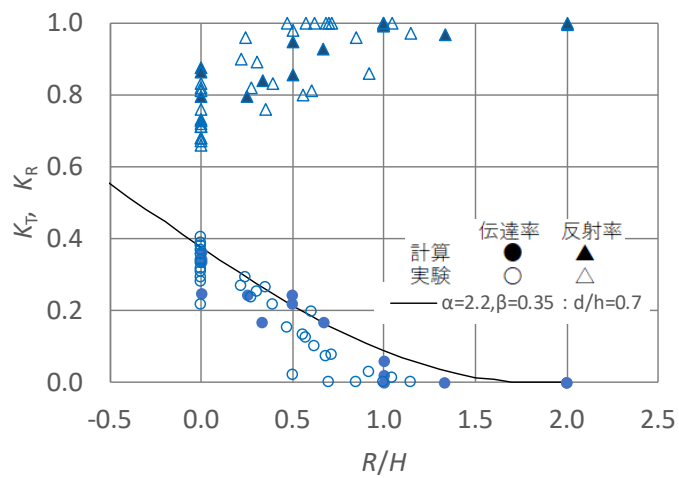


図 4.3-6 混成堤の伝達率・反射率の計算結果 ($d=35\text{cm}$)

以上のように、波高伝達率の計算値はマウンド高にかかわらず実験値をよく表していることが分かった。反射率の計算値は無次元天端高に比例して大きくなり、 $R/H > 1.0$ では静水面上に天端がある直立堤の反射率の概略値となる $K_R = 0.7 \sim 1.0$ の範囲に分布しており、妥当と考えられる。一方、反射率の実験値は、マウンド高が高い条件では $R/H < 1.0$ で過大に評価される傾向にあり、有限振幅波理論に基づいた補正が過大になっている可能性がある。より詳細な結果及び考察は藤原ら (2024)⁴⁾を参照されたい。

第4章の参考文献

- 1) Goda.Y, H.Takeda and Y.Moriya : Laboratory Investigation on Transmission over Breakwaters, Report of P.A.R.I., No. 13, pp. 1～38, 1967.
- 2) Goda.Y : Re-analysis of Laboratory Data on Transmission over Breakwaters, Report of P.A.R.I., Vol. 8, No. 3, pp. 3～18, 1969.
- 3) 合田良實, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治 : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No. 248, p. 24, 1976.
- 4) 藤原隆一, 高橋武志, 鈴木樹 : 実用的な CADMAS-SURF のメッシュ作成方法, 土木学会論文集, Vol.80, NO.18, 24-18040, 2024.

5. 越波計算事例集

5.1 検討内容

水路模型実験及び合田の越波流量算定図^りを対象に越波計算に対する『標準メッシュ』の妥当性及び適用性を検証する。表 5.1-1 に、民間企業各社による本計算の実施状況を示す。

計算事例 1～6 については、本研究参加メンバーの各社が保有する越波実験データ（あるいは港湾空港技術研究所保有データ）を用いて、『標準メッシュ』による再現計算を行っているものである。

計算事例 7～12 については、合田の越波流量推定図において、護岸形式や海底勾配、波形勾配を種々変更しつつ、実務設計で越波許容値となることが多い $q=0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 付近の越波流量を目標とし再現計算を実施したものである。これらにつき、相対天端高や水深波高比 h/H_0 の大小による違い等の観点から『標準メッシュ』の適用性に関し、整理を行った。

また、各種計算事例は、図 5.1-1 に示す港湾土木請負工事積算基準（令和 6 年度）において制定された検討フロー並びに項目に準じて整理をしている。

また、本計算事例では、CS3D Ver.1.7 を使用している。

表 5.1-1 『標準メッシュ』を用いた越波計算（民間企業各社により実施）

計算事例	計算対象	実施者	検討の詳細
1	水路模型実験	五洋建設（株）	直立護岸，海底勾配=1/30
2		大成建設（株）	ダブルパラペット護岸，海底勾配=1/10
3		東亜建設工業（株）	直立護岸，海底勾配=1/10
4		東洋建設（株）	消波護岸，海底勾配=1/30
5		（株）不動テトラ	直立護岸，海底勾配=1/10
6		パシフィックコンサルタンツ（株）	消波護岸，海底勾配=1/10
7	合田の越波流量算定図	いであ（株）	直立護岸，海底勾配=1/10， $H_0/L_0=0.036$
8		（株）エコー	直立護岸，海底勾配=1/30， $H_0/L_0=0.012$
9		（株）日本港湾コンサルタント	消波護岸，海底勾配=1/10， $H_0/L_0=0.012$
10		（株）ニュージェック	消波護岸，海底勾配=1/10， $H_0/L_0=0.036$
11		復建調査設計（株）	消波護岸，海底勾配=1/30， $H_0/L_0=0.036$

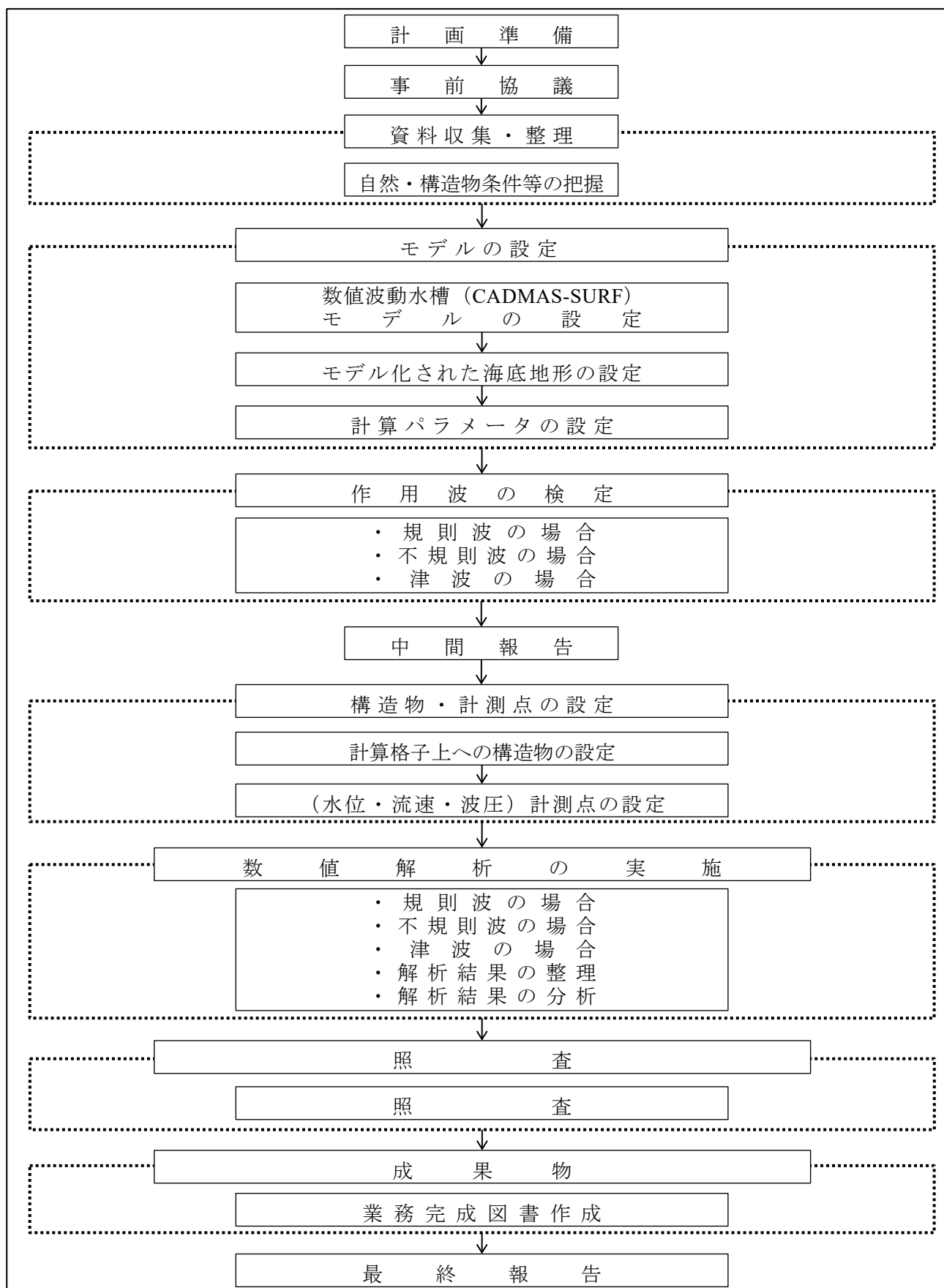


図 5.1-1 検討フロー図（令和 6 年度改訂積算基準より抜粋）

5.2 計算事例に対する越波流量の再現性の整理

図 5.2-1 及び図 5.2-2 に、それぞれ実験結果に対する『標準メッシュ』の再現性（計算事例 1～6）及び合田の越波流量算定図に対する『標準メッシュ』の再現性（計算事例 7～12）を示す。各図中の赤点線は、越波流量の推定値に対する真値の想定範囲を示す。なお、越波流量の算定に関して具体的な計算条件及び詳細は 4.3 節を照会されたい。

まず図 5.2-1 について、水理実験との比較では直立護岸や消波護岸に加え、二重パラペットといった複雑な構造形式が再現対象に含まれるものの、全体的にプロットが真値の想定範囲（図内の赤点線は表 5.2-1 の直立護岸に相当）に収まることを確認した。

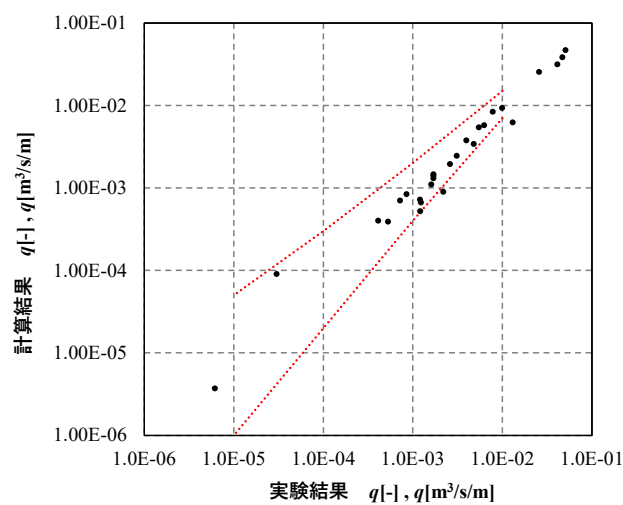


図 5.2-1 実験結果と計算結果の比較（計算事例 1～6 の結果を集計）

※無次元化されていない越波流量・規則波による比較結果もプロットされている

表 5.2-1 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲²⁾

$q/\sqrt{2g(H_0')^3}$	直 立 護 岸	消 波 護 岸
10^{-2}	0.7～1.5 倍	0.5～2 倍
10^{-3}	0.4～2 倍	0.2～3 倍
10^{-4}	0.2～3 倍	0.1～5 倍
10^{-5}	0.1～5 倍	0.05～10 倍

次に図 5.2-2 に示す合田の越波流量算定図との比較をみると、直立護岸、消波護岸ともに全てのプロットが真値の想定範囲内に収まっている（各図内の赤点線は表 5.2-1 の直立護岸並びに消波護岸にそれぞれ相当）。また、『標準メッシュ』による算定結果は、合田の越波流量算定図の読み取り結果に対して上ブレまたは下ブレのどちらか一方に偏るような系統的な誤差は見られず、真値に対する変動幅は波数及び波群といった作用条件の影響によるものと考えられる。

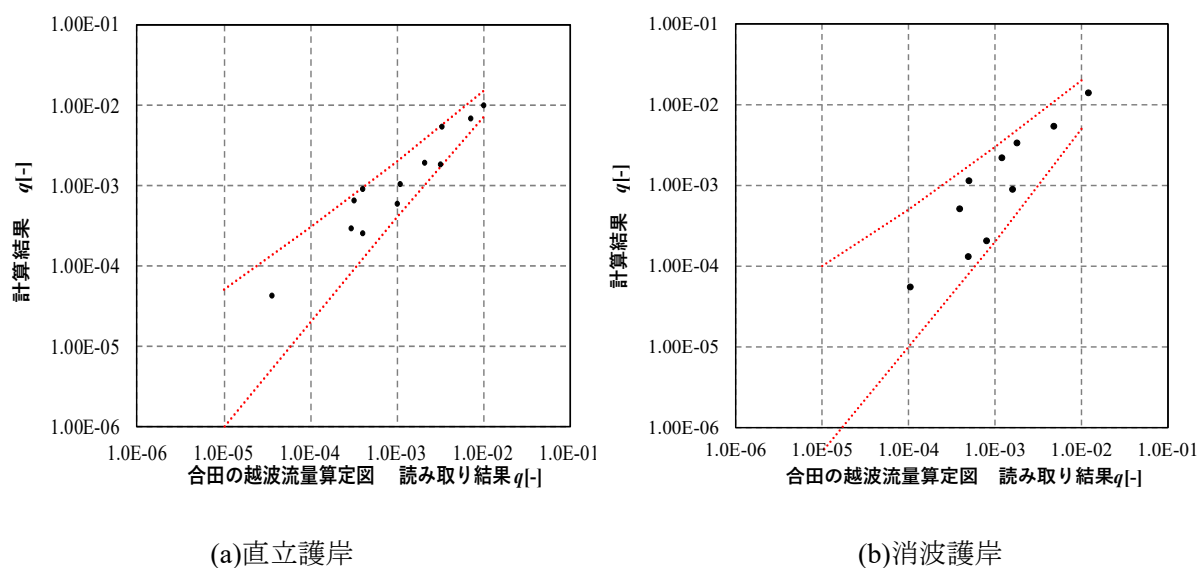


図 5.2-2 合田の越波流量算定図と計算結果の比較（計算事例 7～12 の結果を集計）

5.3 計算事例の詳細

5.3.1 計算事例1[五洋建設（株）]

(1) 計算ケース

直立型護岸を対象とした越波実験を対象に、CS3D による再現計算を行った。実験はフルードの相似則に基づく 1/25 縮尺で実施し、再現計算は実験スケールにて実施した。波浪条件は波高 10cm, 周期 2.0s の不規則波とし、造波時間は実験にあわせ 540 秒（構造物位置で約 300 波作用）とした。また、不規則波信号作成時の初期乱数を変え、3 波群に対して実験・再現計算を行った。

(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

計算領域を図 5.3-1 に示す。格子データは『標準メッシュ』作成補助ツール Ver.1.6 (tmake_standard-mesh_ver1.6.exe) で作成し、格子幅に乘じる係数 dmod を 2.0（標準解像度）と 1.0（高解像度）の 2 パターンとした。格子サイズは標準解像度で $\Delta X = \Delta Z = 0.08\text{m}$ 、高解像度で $\Delta X = \Delta Z = 0.04\text{m}$ である。

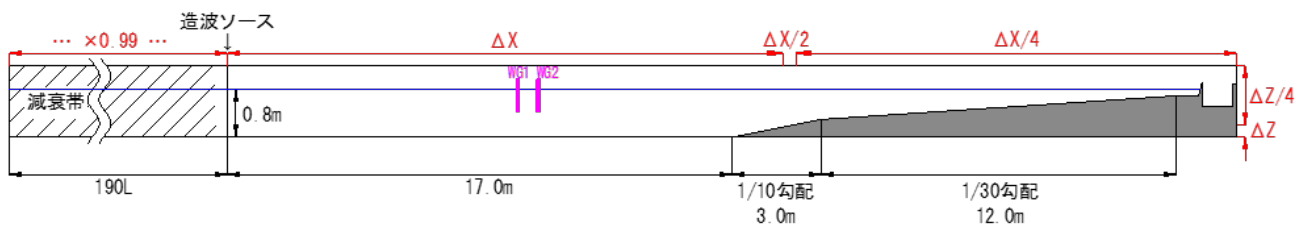


図 5.3-1 計算領域図（縦横比 2 : 1）

② 構造物位置

構造物周辺を拡大したものを図 5.3-2 に示す。

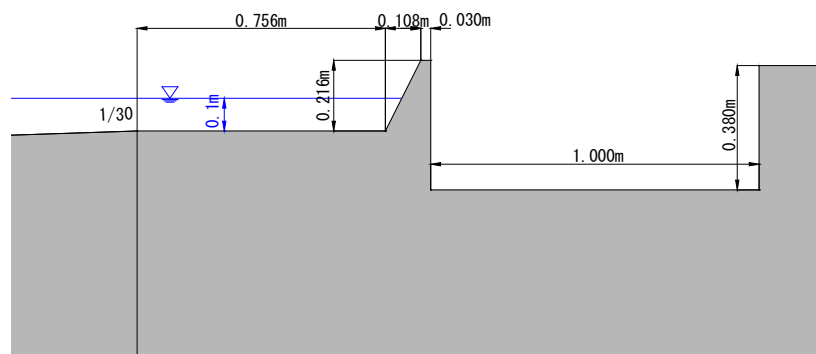


図 5.3-2 構造物及び越波升の形状

③ 減衰帯位置

減衰帯は図 5.3-1 に示すように造波ソースから沖側に 190 波長（約 940m）設けた。

(3) モデル化された海底地形

実験条件に準拠し、造波ソースから岸側に 17m の地点から 1/10 勾配、1/30 勾配を設けた。水深 0.1m の地点から水平床とし、水平床端部から 0.756m の位置に直立型護岸を設けた。直立型護岸の背面は越波升とした。

(4) 計算パラメータの設定

① 造波モデル

造波ソース：マトリクスデータ。

実験時の入力値である $H_{1/3}=0.10\text{m}$, $T_{1/3}=2.0\text{s}$ を用いて不規則波信号を作成した。造波時間を 540s, 乱数の初期値を 1, 101, 201 とし 3 波群作成した。

② 差分方法

VP-DONOR=0.2.

③ 減衰帯の特性値

デフォルト。

④ 消波ブロック等の多孔質体抵抗値等

設定なし。

⑤ その他の計算パラメータの設定

デフォルト。

表 5.3-1 計算パラメータの設定

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	540s
2	造波モデル	造波モデル	マトリクスデータ
		造波関数	-
3	開境界		沖側：水深0.80m, 周期100.0s 岸側：なし
4	減衰領域		沖側：190L程度 岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.6.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
		水平格子[m](標準)	0.000～19.760m
			19.760～26.000m
			26.000～34.100m
	鉛直格子[m](標準)		0.000～0.320m
			0.320～0.520m
			0.520～1.200m
	水平格子[m](高解像度)		0.000～18.800m
			18.800～19.000m
			19.000～34.100m
	鉛直格子[m](高解像度)		0.000～0.200m
			0.200～1.200m
13	ポーラスの下限值		0.01
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	設定しない
		(x,y,z方向)面積透過率	設定しない
		慣性力係数	設定しない
		抵抗係数	設定しない
16	D-F則：テトラポッド	α_0	設定しない
17		β_0	設定しない
18		$d_r(=V^{1/3})$	設定しない
16	D-F則：マウンド	α_0	設定しない
17		β_0	設定しない
18		$d_r(=V^{1/3})$	設定しない
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		FILE TRN W-LEVEL 470 1 # 水位
			FILE TRN W-LEVEL 479 1 # 水位
			FILE TRN INT F 1096 1 10 1145 1 28 # 越波升
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 1096 1 11 1145 1 28 0.000
		D-F則	-

(5) 作用波の検定

図 5.3-3 に示す WG1 (X=9.8m) と WG2 (X=10.5m) で取得した水位時系列データに合田の入反射分離を用いて入射波高を算定した。入射波高を W1・W2 設置水深における浅水係数で除し換算沖波波高を算定し、無次元越波流量の評価に用いた。

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

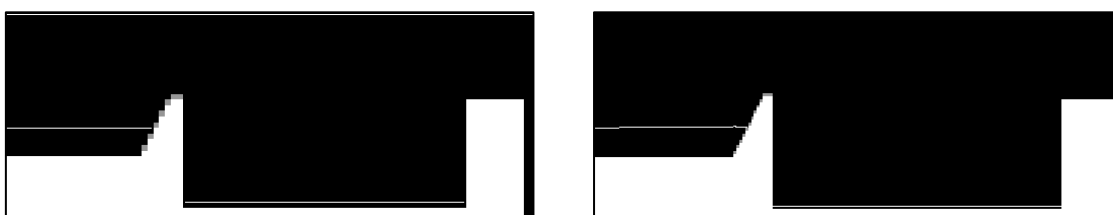


図 5.3-3 構造物の設定（左：標準解像度，右：高解像度）

② 水位・流速・波圧・越波量モニタリング位置の設定

図 5.3-1 に示す WG1 (X=9.8m) と WG2 (X=10.5m) において水位を、護岸背後の越波升において VOF 値の時間積分値から越波流量を評価した。

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

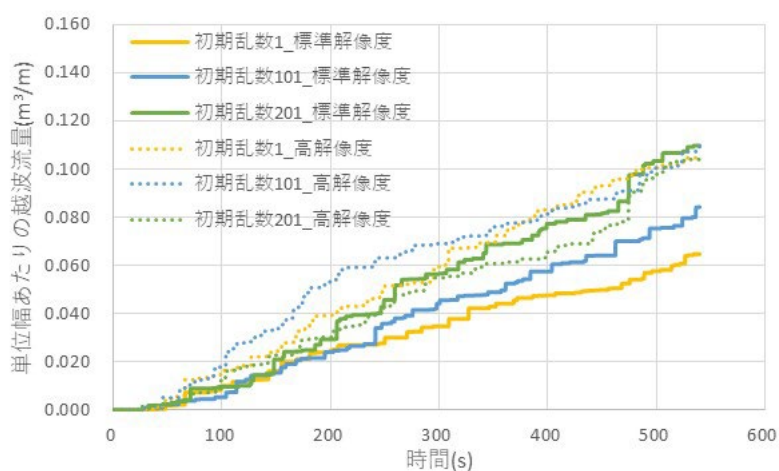


図 5.3-4 解析における越波流量の時間推移

表 5.3-2 越波量（実験結果）

	$H_l(m)$	K_s	$H_0'(m)$	$q(m^3/m/s)$	$q/\sqrt{gH_0'^3}$
波群1	0.098	0.917	0.107	2.4.E-04	1.6.E-03
波群2	0.096	0.917	0.104	2.5.E-04	1.7.E-03
波群3	0.094	0.917	0.103	2.5.E-04	1.7.E-03

表 5.3-3 越波量（解析結果：標準解像度）

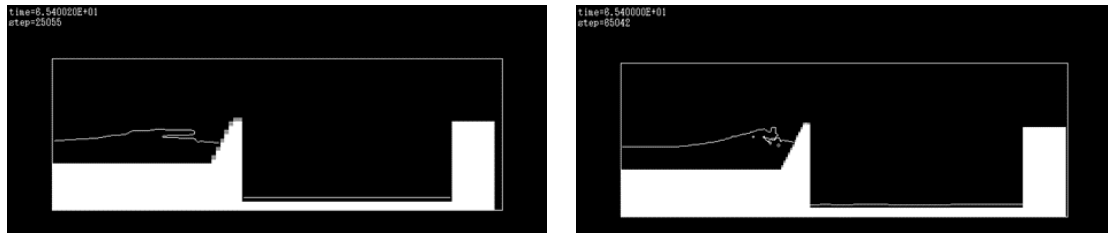
	$H_l(m)$	K_s	$H_0'(m)$	$q(m^3/m/s)$	$q/\sqrt{gH_0'^3}$
初期乱数1	0.082	0.917	0.089	1.3.E-04	1.1.E-03
初期乱数101	0.089	0.917	0.097	1.7.E-04	1.3.E-03
初期乱数201	0.097	0.917	0.106	2.2.E-04	1.4.E-03

表 5.3-4 越波量（解析結果：高解像度）

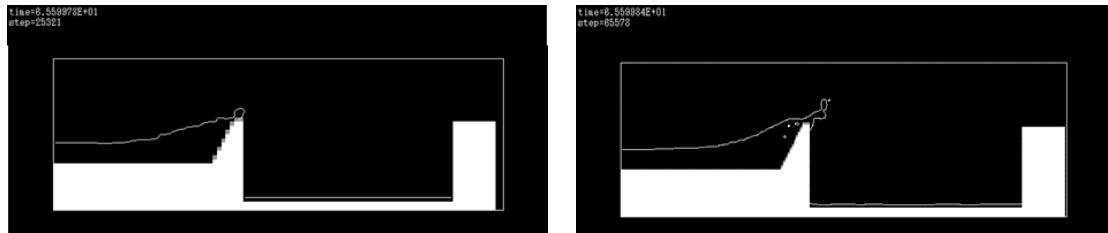
	$H_l(m)$	K_s	$H_0'(m)$	$q(m^3/m/s)$	$q/\sqrt{gH_0'^3}$
初期乱数1	0.085	0.917	0.093	2.1.E-04	1.7.E-03
初期乱数101	0.093	0.917	0.101	2.2.E-04	1.5.E-03
初期乱数201	0.106	0.917	0.115	2.1.E-04	1.2.E-03

② 解析結果の分析

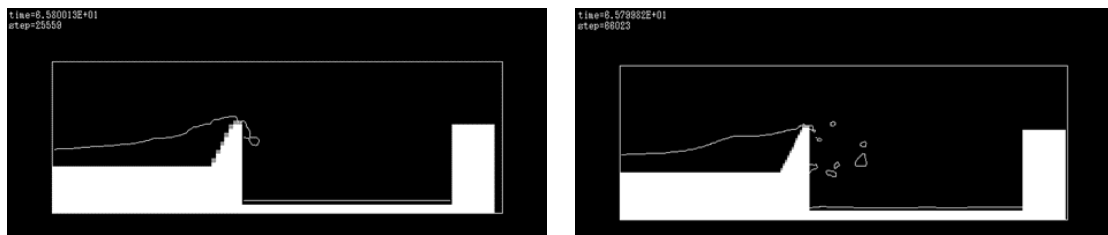
図 5.3-4 は越波升で計測された単位幅あたりの越波流量の時間推移を示す。時間経過に伴い、概ね直線的な増加傾向となった。無次元越波流量を高解像度化前後で比較すると初期乱数 1 のケースで標準解像度の結果に対して 1.52 倍、初期乱数 101 で 1.22 倍、初期乱数 201 で 0.83 倍となった。従来 CS では非線形性が強い条件では、鉛直方向解像度の推奨値が波高の 1/10 以下とされている。それに対し、本計算の標準解像度のケースでは鉛直方向の最小格子幅が 0.02m であり波高 0.10m に対して 1/5 とやや粗い設定となっている。そのため、標準解像度のケースでは高解像度のケースと比較して碎波など非線形性の強い現象の解析精度が低下し、無次元越波流量に差が生じているものと考えられる。しかしながら、無次元越波流量に対する格子解像度の影響は小さく、標準解像度・高解像度のいずれも実験結果と同オーダーの無次元越波流量が得られ、本ケースのように比較的単純な護岸形状であれば $d_{mod}=2.0$ の標準的な解像度の計算で十分な解析精度を有することを確認した。



(a) time=65.4s (左：標準解像度，右：高解像度)



(b) time=65.6s (左：標準解像度，右：高解像度)



(c) time=65.8s (左：標準解像度，右：高解像度)

図 5.3-5 碎波・越波状況の比較

5.3.2 計算事例 2[大成建設（株）]

(1) 計算ケース

二重パラペットを有する護岸の越波実験³⁾のうち、後側パラペット高 2 ケース、周期 2 ケースの計 4 ケースの規則波条件を対象に再現計算を実施し、越波流量の比較を行った。

越波実験³⁾の実験断面図を図 5.3-6 に、二重パラペット護岸部の断面図を図 5.3-7 に示す。実験の想定縮尺は 1/20 である。水深は 0.5m とし、造波位置から 25.2m～35.7m の 10.5m 区間に 1/30 勾配を設置し、その後に二重パラペット型の直立護岸を設置した。前側パラペットの前面水深は 0.15m である。実験では、規則波を造波し後側パラペットに対する越波量を計測し、波作用時間で除することで越波流量を求めた。

上記の実験ケースを対象に、表 5.3-5 に示す再現解析を実施した。入射波高は実験と同じ 0.10m とし、入射波周期 $T=1.3, 1.8\text{s}$ の 2 ケース、後側パラペット高さ $h_b=3.5\text{cm}$ の 2 ケースの組合せで解析を行った。その他の解析パラメータについては、表 5.3-6 に示す通りである。

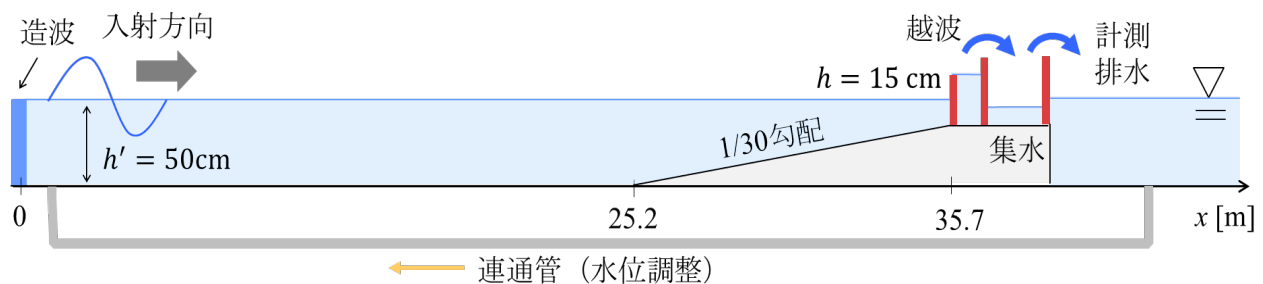


図 5.3-6 実験断面図

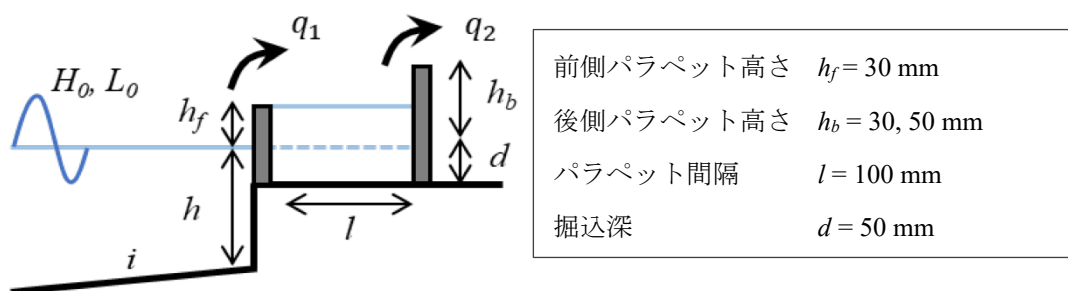


図 5.3-7 二重パラペット護岸のパラメータ

表 5.3-5 解析ケース

ケース名	入射波高(m)	入射波周期(s)	後側パラペット高さ(mm)
T13hb3	0.10	1.3	30
T13hb5	0.10	1.3	50
T18hb3	0.10	1.8	30
T18hb5	0.10	1.8	50

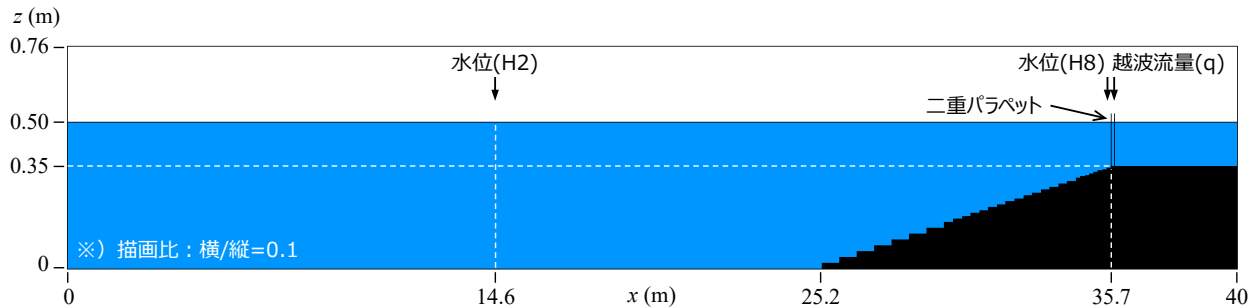
表 5.3-6 計算パラメータ

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	60s
2	造波モデル	造波モデル	造波境界
		造波関数	ストークス波またはクノイド波
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：なし，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.3.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	0.0～29.72m	0.02m
		29.72～34.20m	0.01m
		34.20～40.0m	0.005m
	鉛直格子[m]	0～0.16m	0.02m
		0.16～0.31m	0.01m
		0.31～0.76m	0.005m
13	ポーラスの下限值		－
14	障害物データ		OBST
15	ポーラスメディア法	空隙率	－
		(x, y, z 方向)面積透過率	－
		慣性力係数	－
		抵抗係数	－
16	D-F則：テトラポッド	α_0	－
17		β_0	－
18		$d_r (= V^{1/3})$	－
16	D-F則：マウンド	α_0	－
17		β_0	－
18		$d_r (= V^{1/3})$	－
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブループ	－
		越波升	FILE TRN FLOWRATE-X 2256 1 1 2256 1 112 FILE TRN TOTALFLOW-X 2256 1 1 2256 1 112 FILE TRN INT F 2256 1 1 3095 1 112 # 越波升
		D-F則	－

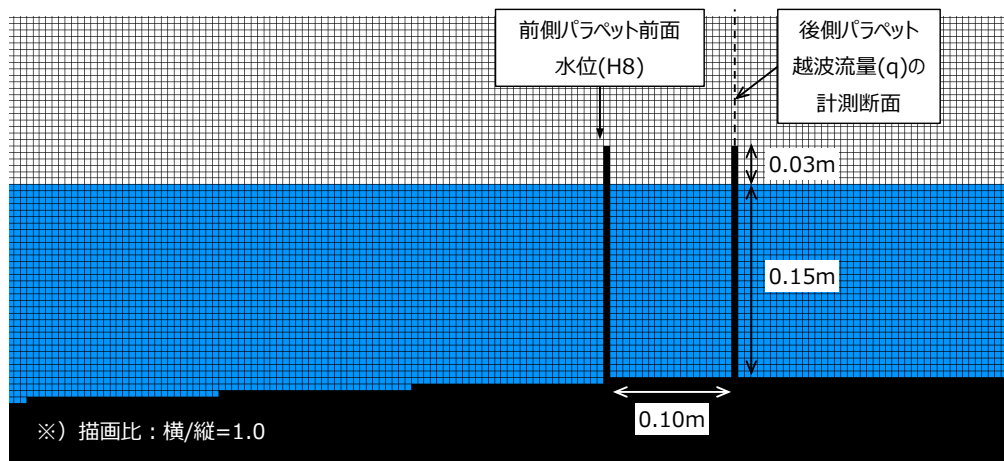
(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

越波実験³⁾の実験断面図（図 5.3-6）に基づき，図 5.3-8 に示す計算領域を設定した．



(a)全体



(b)二重パラペット周辺の格子図

図 5.3-8 計算領域（ケース T13hb3 の場合）

② 構造物位置

図 5.3-7 を参照．

③ 減衰帯位置

減衰帯なし（再反射波が二重パラペットに来襲する前に越波流量を評価）．

(3) モデル化された海底地形

図 5.3-8 を参照．

(4) 計算パラメータの設定

① 造波モデル

ストークス波またはクノイド波.

② 差分方法

VP-DONOR=0.2.

③ 減衰帯の特性値

該当なし.

④ 消波ブロック等の多孔質体抵抗値等

該当なし.

⑤ その他の計算パラメータの設定

表 5.3-6 を参照.

(5) 作用波の検定

二重パラペットへの作用波として、沖合位置（H2，図 5.3-8 参照）での水位時系列を図 5.3-9 に示す。波が発達した 10s 以降から護岸からの反射波が到達する約 35s まで，CS3D による波高及び周期は実験結果を良好に再現していることが確認できる。

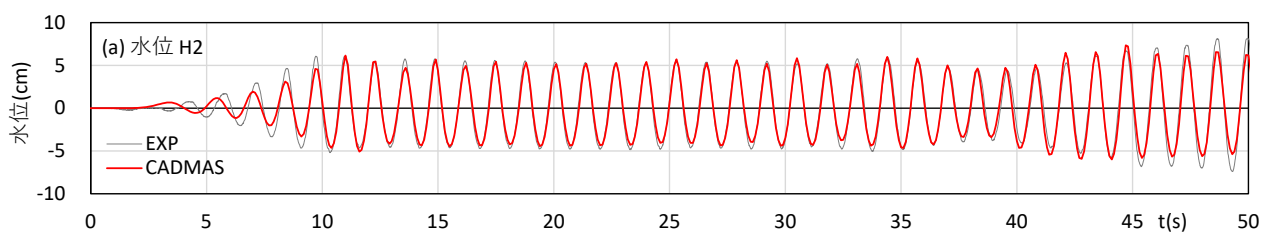


図 5.3-9 沖合位置 (H2) における水位の再現性 (ケース T13hb3 の場合)

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

図 5.3-8 を参照.

② 水位・流速・波圧・越波流量モニタリング位置の設定

水 位 : H2 (沖合), H8 (前側パラペット前面) の 2 点

越波流量 : q (後側パラペットの直上) の 1 断面

(図 5.3-8 を参照)

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

図 5.3-10～図 5.3-13 に、各ケースにおける前側パラペット直前位置 H8 での水位及び後側パラペットの越波流量の時系列結果を示す。実験では 5 波分の越波量を計測していたことから、解析では後側パラペットで有意な越波が確認された後、実験同様に 5 波分（流量時系列図のうち 2 本の破線の範囲）から越波流量を求めた。

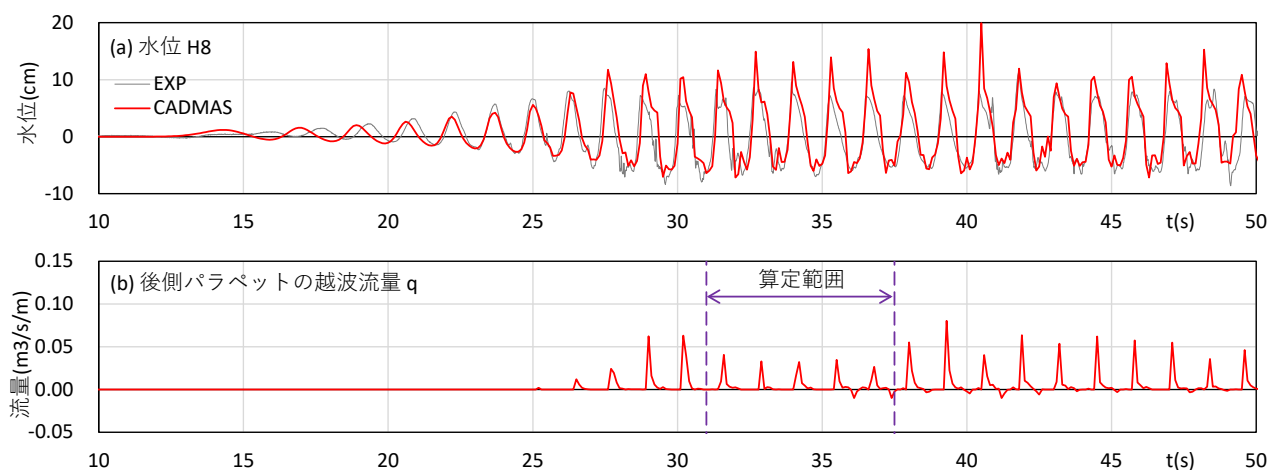


図 5.3-10 T13hb3 ($T = 1.3$ s, $h_b = 30$ mm) の時系列結果

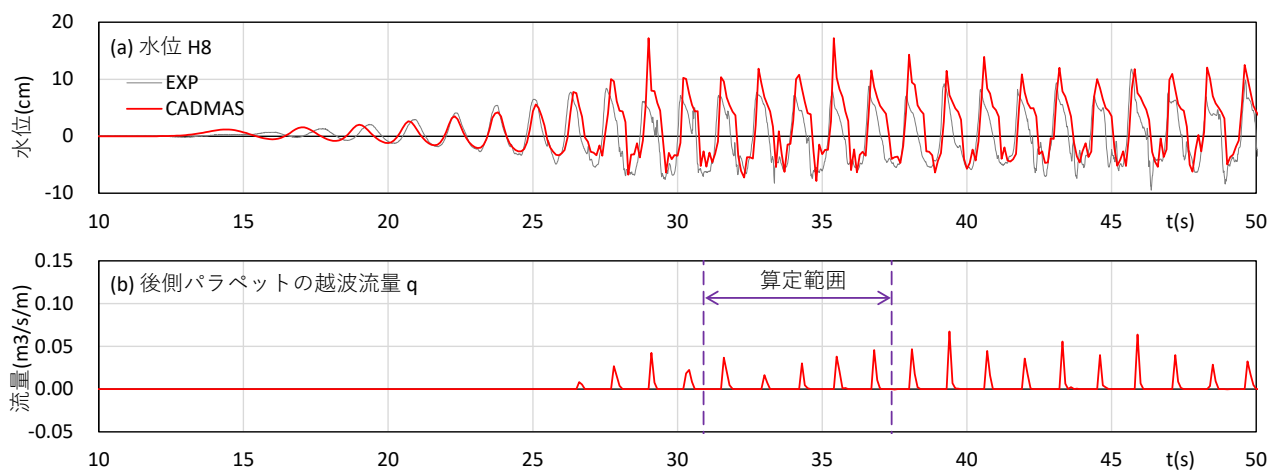


図 5.3-11 T13hb5 ($T = 1.3$ s, $h_b = 50$ mm) の時系列結果

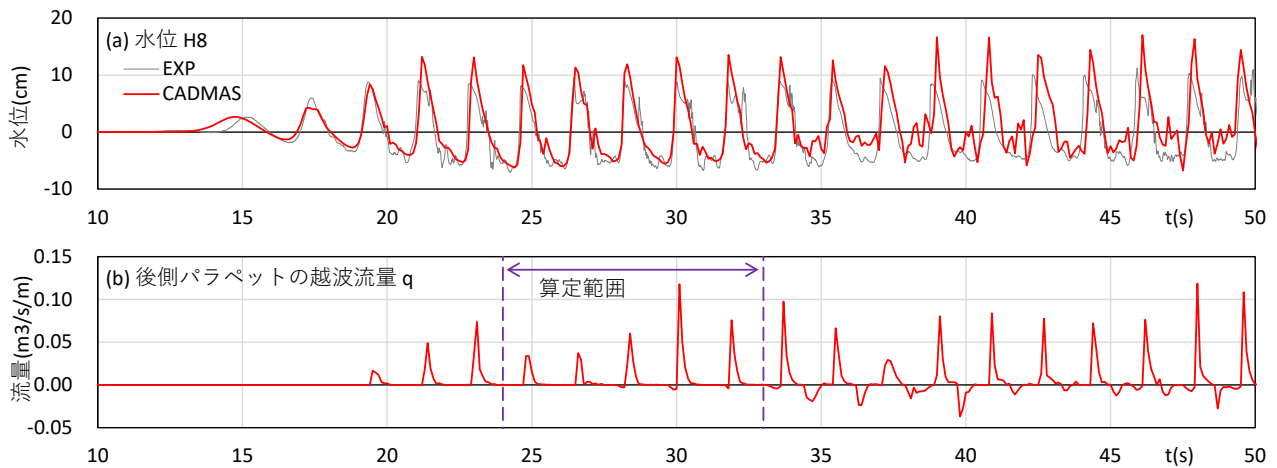


図 5.3-12 T18hb3 ($T = 1.8$ s, $h_b = 30$ mm) の時系列結果

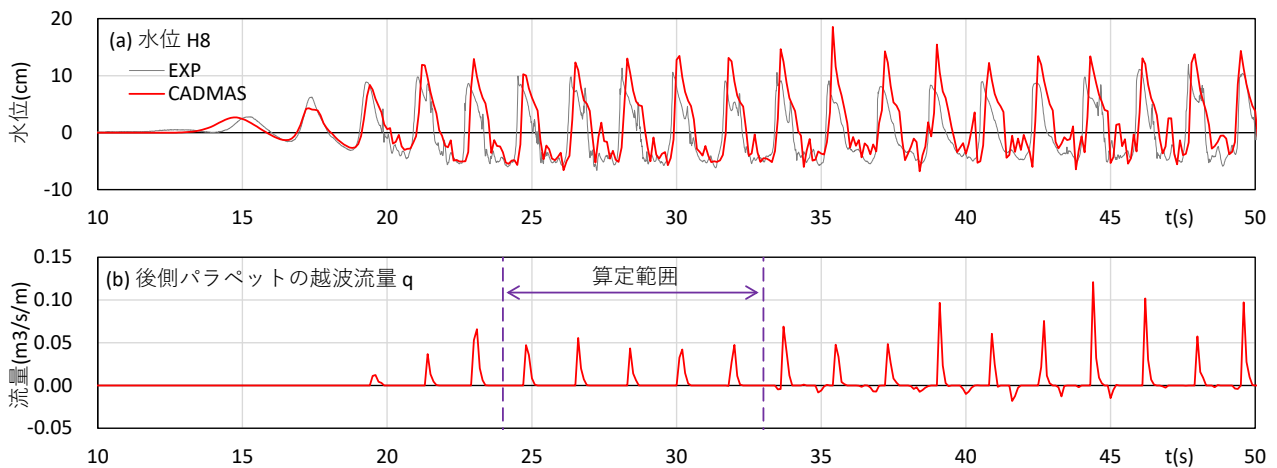


図 5.3-13 T18hb5 ($T = 1.8$ s, $h_b = 50$ mm) の時系列結果

無次元越波流量について、実験と解析の比較を表 5.3-7 及び図 5.3-14 に示す。本再現解析の主な結果を以下に列挙する。

- ・ 後側パラペット高が高くなると、越波流量は小さくなる。周期が大きくなると、越波流量は大きくなる。実験で得られたこれらの傾向に対し、解析でも同様の結果が得られた。
- ・ 今回実施した 4 ケースの無次元越波流量は 10^{-2} のオーダーであり、この範囲においては、『標準メッシュ』の CS3D により二重パラペット護岸の越波量をおおむね良好に算定できていると考えられる。
- ・ ただし、解析による二重パラペット直前の水位は実験よりやや過大である一方で、無次元越波流量は実験より過小（最大 23%）の傾向となっている。護岸法面や二重パラペット間の流況について、格子サイズや乱流モデル等の検討を行うことで、解析精度の更なる向上が期待できる。

表 5.3-7 無次元越波流量の結果

ケース名	無次元越波流量 $q / (2 g H_0'^3)^{0.5}$		比率 (解析／実験)
	解析	実験	
T13hb3	3.14×10^{-2}	4.10×10^{-2}	0.77
T13hb5	2.54×10^{-2}	2.57×10^{-2}	0.99
T18hb3	4.68×10^{-2}	5.06×10^{-2}	0.93
T18hb5	3.83×10^{-2}	4.66×10^{-2}	0.82

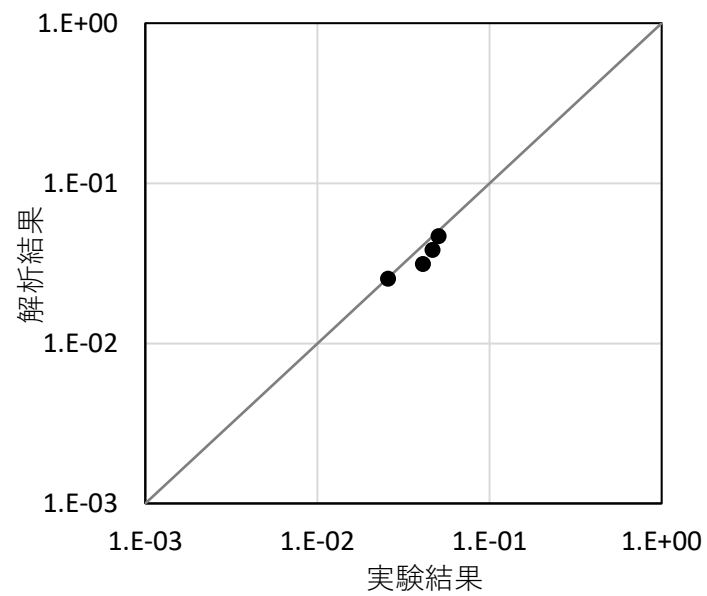


図 5.3-14 実験と解析による無次元越波流量の比較

② 解析結果の分析

表 5.3-8 計算結果の評価

項目	評価結果
比較対象	水理模型実験（二重パラペット護岸）
結果の評価	・後側パラペット高が高くなると、越波流量は小さくなる．周期が大きくなると、越波流量は大きくなる．実験で得られたこれらの傾向に対し、解析でも同様の結果が得られた． ・今回実施した 4 ケースの無次元越波流量は 10^{-2} のオーダー（越波流量としては 10^{-3} のオーダー）であり、この範囲においては、『標準メッシュ』の CS3D により二重パラペット護岸の越波量をおおむね良好に算定できていると考えられる． ・ただし、解析による二重パラペット直前の水位は実験よりやや過大である一方で、無次元越波流量は実験より過小（最大 23%）の傾向となっている．護岸法面や二重パラペット間の流況について、格子サイズや乱流モデル等の検討を行うことで、解析精度の更なる向上が期待できる．
計算時間	21 ～ 30 時間程度 （格子数 $T = 1.3 \text{ s}$: $N_x \times N_z = 2,407 \times 112 = 269,584$ $T = 1.8 \text{ s}$: $N_x \times N_z = 2,765 \times 112 = 309,680$ ） （CPU : Intel Core i7-8700）
不安定化の有無	無
プレポスト処理 の改善点	特になし

5.3.3 計算事例3[東亜建設工業（株）]

(1) 計算ケース

既往論文に記載されている実験⁴⁾⁶⁾を対象として、表 5.3-9 に示す Case4, Case15 を選定してモデル化を行った。

表 5.3-9 計算ケース

case	水路勾配	波種別	波群	波数	堤前水深 h (m)	天端高 h_c (m)	換算沖波波高 H_0' (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	沖波波長 L_0 (m)	相対水深 h/H_0'	相対天端高 h_c/H_0'	波形勾配 H_0'/L_0
4	1/10	不規則波	1	300	0.0	0.26	0.164	1.63	4.14	0.00	1.59	0.040
15	1/10	不規則波	1	300	0.3	0.12	0.164	2.83	12.49	1.83	0.73	0.013

(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

計算領域を図 5.3-15 に示す。

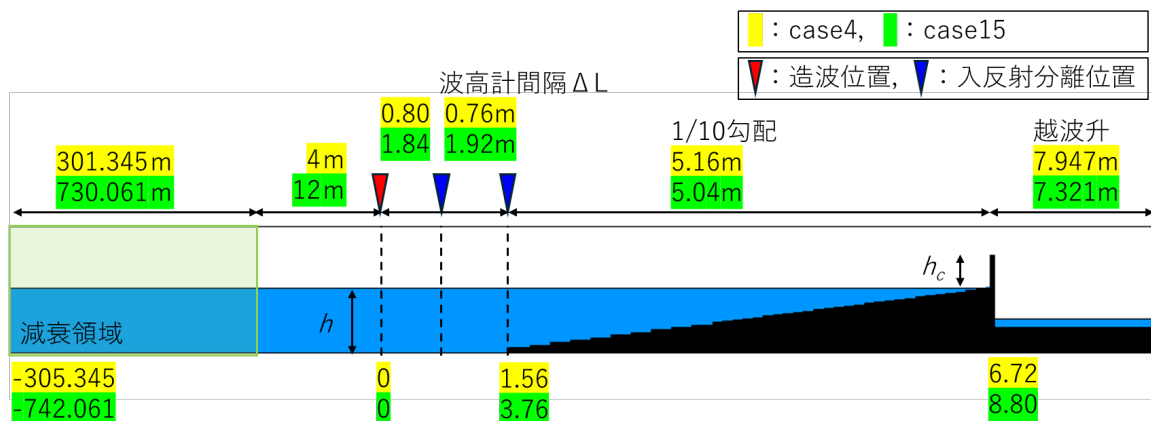


図 5.3-15 解析モデル

② 構造物位置

図 5.3-15 に示すように、直立壁は造波ソース位置 (0m) から case4 で 6.72m, case15 で 8.80m の位置に配置した。また天端高 h_c はそれぞれ 0.26m, 0.12m とし、護岸背後にはそれぞれ 7.947m, 7.321m の越波升を設置した。なお、越波升には初期水位として、それぞれ 0.2m, 0.5m を与えている。

③ 減衰帯位置

減衰帯は造波ソース位置から岸側に case4 で 4m, case15 で 12m 離れた位置に設置し, 減衰帯幅はそれぞれ約 300m, 約 730m とした.

(3) モデル化された海底地形

海底地形は, 造波ソース位置からそれぞれのケースで 1.56m, 3.76m までは一様水深とし, そこから構造物位置までは海底勾配 1/10 の一様勾配とした.

(4) 計算パラメータの設定

計算パラメータを表 5.3-10 に示す. なお, 格子データは『標準メッシュ』作成補助ツール Ver.1.5 (tmake_standard-mesh_ver1.5.exe) を使用し, 作成した.

表 5.3-10 計算パラメータの設定

項 目		内 容
1	造波モデル	造波ソース
2	差分方法	VP-DONOR=0.2
3	減衰帯の特性値	MODEL DAMP X- DEGREE 2 MODEL DAMP X- WIDTH 301.345(case4), 730.031(case15) MODEL DAMP X- DEPTH 0.513(case4), 0.813(case15)
4	消波ブロック等の多孔質体抵抗値等	該当しない
5	その他の計算パラメータの設定	POROUS LIM 1.00e-04 B. C. D VP SLIP B. C. D F FREE OPTION T-DOOR BUB 0.2 OPTION T-DOOR DROP FREE-RUNDOWN OPTION SUB-LOOP 1

(5) 作用波の検定

不規則波作成ツールを使用し, 入射波の有義波高, 有義波周期が目標値内となる信号を作成した.

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

図 5.3-16 に構造物周辺の計算格子を示す.

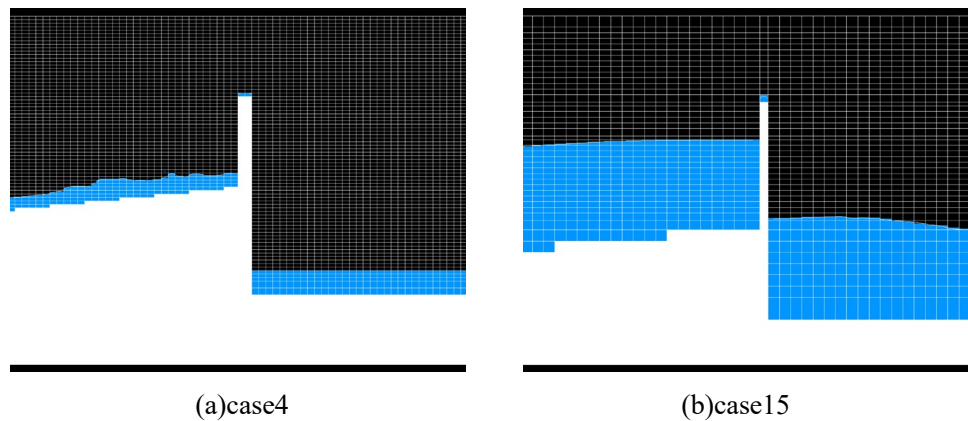


図 5.3-16 構造物付近の計算格子

② 水位・流速・波圧・越波量モニタリング位置の設定

図 5.3-15 に水位，流量の計測位置を示す．入力データでの設定を以下に示す．

[水位計測位置]

Case4

FILE	TRN	W-LEVEL	437	1	#	X=0.00m	造波ソース
FILE	TRN	W-LEVEL	457	1	#	X=0.80m	入反射分離 1
FILE	TRN	W-LEVEL	476	1	#	X=1.56m	入反射分離 2
FILE	TRN	W-LEVEL	596	1	#	X=4.14m	スロープ中間点
FILE	TRN	W-LEVEL	724	1	#	x=6.72m	堤体前面

Case15

FILE	TRN	W-LEVEL	455	1	#	X=0.00m	造波ソース
FILE	TRN	W-LEVEL	478	1	#	1.84m	入反射分離 1
FILE	TRN	W-LEVEL	501	1	#	3.76m	入反射分離 2
FILE	TRN	W-LEVEL	541	1	#	6.28m	スロープ中間点
FILE	TRN	W-LEVEL	604	1	#	8.80m	堤体前面

[流量計測位置]

Case4

FILE	TRN	INT	F	727	1	15	905	1	39	#	越波升
FILE	TRN	INT	F	1	1	1	905	1	75	#	全体

Case15

FILE	TRN	INT	F	606	1	5	784	1	25	#	越波升
FILE	TRN	INT	F	1	1	1	785	1	45	#	全体

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

表 5.3-11～表 5.3-14 に計算条件等を整理し、表 5.3-15 に実験、CS3D 及び合田の越波流量による越波流量を示す。

越波量の少ない条件（case4）では、合田の越波推定値と比べて CS3D の計算値は過大な結果となった。ただし、水理実験結果と比べて無次元越波流量の小数桁は一致している。また、格子サイズを細かくすることで精度向上が見込まれるものと推定される。

越波量の多い条件（case15）では、合田の越波推定値と比べて CS3D の計算値はやや過小な結果となったが、実験結果と比較すると無次元越波流量は一致していることがわかる。

表 5.3-11 計算条件

CASE	護岸型式	水路勾配	目標入射波			堤前水深 h (m)	天端高 h_c (m)	相対水深 h/H_0'	相対天端高 h_c/H_0'	波形勾配 H_0'/L_0
			波	換算沖波 H_0' (m)	有義周期 $T_{1/3}$ (s)					
4	直立	1/10	不規則波	0.15	1.63	0.00	0.26	0.00	1.73	0.036
15	直立	1/10	不規則波	0.15	2.83	0.30	0.12	2.00	0.80	0.012

表 5.3-12 入反射分離

CASE	波高計間隔 ΔL (m)	水深 h (m)	反射率 K_R	反射率計算パラメータ			
				Lmin	Lmax	fmin	fmax
4 実験	0.41	0.545	0.209	0.91	8.2	0.2742	1.3083
4 解析	0.76	0.513	0.215				
15 実験	0.97	0.888	0.83	2.16	19.4	0.1501	0.8463
15 解析	1.94	0.813	0.735				

表 5.3-13 合成波高

CASE	波高				周期			
	H_{max} (cm)	$H_{1/10}$ (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	H_{mean} (cm)	T_{max} (s)	$T_{1/10}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	T_{mean} (s)
4 実験	28.23	19.85	15.37	9.87	1.40	1.66	1.67	1.51
4 解析	21.30	16.78	13.67	8.92	1.95	1.80	1.80	1.50
15 実験	34.75	25.70	20.89	13.29	3.14	2.59	2.50	1.92
15 解析	31.54	24.23	19.71	12.71	2.40	2.55	2.50	2.05

表 5.3-14 入射波高, 反射波高

入射波 H_I					反射波 H_R				
波高				浅水係数	入射換算沖波波高	波高			
H_{imax} (cm)	$H_{i1/10}$ (cm)	$H_{i1/3}$ (cm)	H_{imean} (cm)	K_s	H_0' ($H_{i1/3}/K_s$) (cm)	H_{imax} (cm)	$H_{i1/10}$ (cm)	$H_{i1/3}$ (cm)	H_{imean} (cm)
27.63	19.43	15.04	9.66	0.919	16.37	19.43	15.04	9.66	0.919
20.82	16.41	13.36	8.72	0.928	14.40	16.41	13.36	8.72	0.928
26.74	19.78	16.07	10.23	0.981	16.38	19.78	16.07	10.23	0.981
25.41	19.52	15.88	10.24	0.995	15.96	19.52	15.88	10.24	0.995

表 5.3-15 越波流量の算定

CASE	入射換算沖波波高	相対水深	相対天端高	波形勾配	計測時間	集水量
	H_0' (m)	h/H_0'	h_c/H_0'	H_0'/L_0	(s)	(m ³)
4 実験	0.164	0.000	1.589	0.038	450	4.06E-05
4 解析	0.144	0.000	1.806	0.028	400	4.47E-04
15 実験	0.164	1.831	0.733	0.017	800	1.16E-01
15 解析	0.160	1.880	0.752	0.016	850	2.23E+00

単位幅当たりの越波量	越波流量	無次元越波流量	目標波浪における合田の推定値	越波流量
導水幅=5cm (実験)	q_{exp}	$q_{Exp}/\sqrt{(2gH_0')^3}$	$q/\sqrt{(2gH_0')^3}$	実験値/合田の推定値
(m ³ /m)	(m ³ /s/m)			
8.11.E-04	1.80E-06	6.15E-06	3.34.E-07	18.41
4.47.E-04	8.93E-07	3.69E-06	3.34.E-07	11.06
2.32.E+00	2.91E-03	9.90E-03	1.38.E-02	0.72
2.23.E+00	2.62E-03	9.30E-03	1.38.E-02	0.67

② 解析結果の分析

以下に項目ごとに計算結果のまとめを示す.

表 5.3-16 計算結果まとめ

項目	結果評価
比較対象 計算条件	水理模型実験 『標準メッシュ』により, 下表に青: case4, 赤: case15 で示す解像度で計算を実施. <Case4> 造波水深: $h_0/H_0' = 3.42$ 堤脚水深: $h/H_0' = 0$ (解像度 1/2, 1/4 が適用されている) <Case15> 造波水深: $h_0/H_0' = 5.42$ 堤脚水深: $h/H_0' = 2.0$ (解像度 1/2, 1/4 が適用されている) 解析モデル (参考文献: 港空研報告_阿部ら (2023) ³⁾ 図-5.1)
結果の評価	通過波検定: ※入射波の合わせ込みはしていない. 不規則波作成ツールにおいて波高, 周期の目標値内となる信号を作成して計算 越波計算: ・越波量の少ない条件 (case4) では, 合田の越波推定値と比べて過大. ただし, 水理実験結果と比べて無次元越波流量の小数桁は一致 (格子サイズを細かくすることで精度向上は見込まれる) ・越波量の多い条件 (case15) では, 合田の越波推定値と比べてやや過小 実験結果と比べて無次元越波流量は一致
計算時間	・ Intel Xeon Gold 6240R(2.40Gz)*2CPU, TBT4.0GHz, 48 コア ※4 並列計算 Case4 : 6 時間程度 (格子数: $N_x \times N_z = 905 \times 86 = 77,830$) Case15 : 2 時間程度 (格子数: $N_x \times N_z = 785 \times 45 = 35,325$)
不安定化の有無	なし
プリプロの改善点	【『標準メッシュ』作成ツール】 ・ Z 方向の領域拡大 越波の計算では, 護岸への波の打ち上げ高も考慮する必要がある. ・ 総水量補正機能の追加 現状, 沖側計算領域を拡大することで総水量の減少割合を軽減させているが, 計算コストに影響. 【data.in 作成ツール】 ・ 流体密度が読み込みファイルを変えてもデフォルトで 1035 kg/m^3 になっている.

5.3.4 計算事例 4[東洋建設（株）]

(1) 計算ケース

既往文献で実施された水理模型実験⁵⁾を対象に，再現計算を行った．

(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

計算領域は，実験条件にあわせ，図 5.3-17 に示す通りとした．

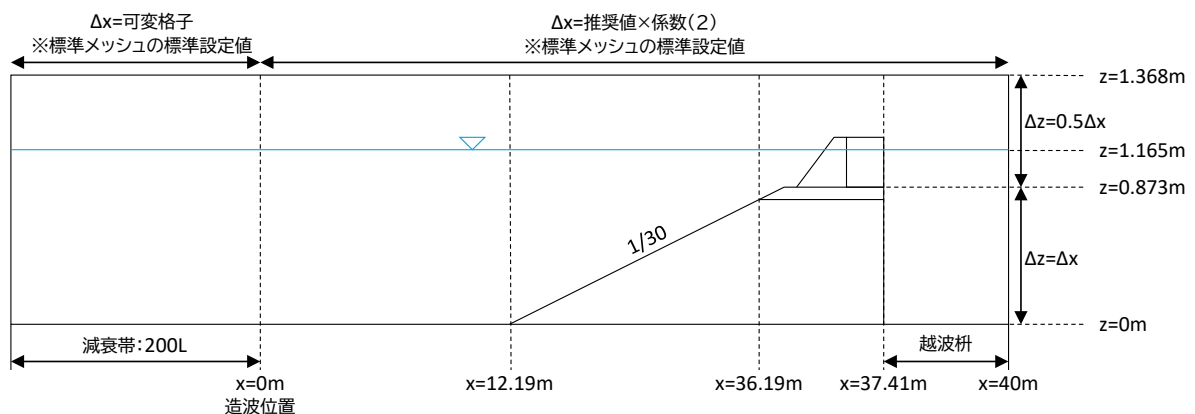


図 5.3-17 計算領域

② 構造物位置

構造物は，実験条件のうち堤体 A を対象とし，天端高 $h_c=0.044\text{m}$ ，消波ブロックの天端幅 $B^*=0.087\text{m}$ とした．

③ 減衰帯位置

図 5.3-17 に示す通り，沖側の減衰帯は『標準メッシュ』での標準設定値である $200L$ とし，岸側は越波柵を設定したため，減衰帯は設定しなかった．

(3) モデル化された海底地形

海底地形は，図 5.3-17 に示す通り，実験と同条件で海底勾配 $1/30$ とした．

(4) 計算パラメータの設定

各種計算パラメータは表 5.3-17 に示す通りである。

表 5.3-17 計算パラメータ

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	$250T_{1/3}$ 程度
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：200L 程度，岸側：なし
5	連立 1 次方程式の解法		デフォルト (M-ILUBCGSTAB 法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト (設定しない)
9	スカラー量		デフォルト (設定しない)
10	初期値等		デフォルト (設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.6.exe を使用
12	ポーラスの下限值		0.001
13	障害物データ		10D-4 (CADMAS-MESH 利用)
14	ポーラスメディア法	空隙率	消波ブロック：0.43，マウンド：0.43
		(x,y,z 方向)面積透過率	設定しない
		慣性力係数	1.2
		抵抗係数	1.0
15	D-F 則：テトラポッド	α_0	-
16		β_0	-
17		$d_r(=V^{1/3})$	-
18	D-F 則：マウンド	α_0	-
19		β_0	-
20		$d_r(=V^{1/3})$	-
21	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
22	リストファイル出力制御		適宜設定
23	詳細ファイル出力制御		適宜設定
24	リスタート制御		なし
25	時系列ファイル出力制御		適宜設定
26	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 943 1 5 984 1 34 0.000
		D-F 則	-

(5) 作用波の検定

作用波の検定結果を表 5.3-18 に示す。実験における沖側の波高計設置位置で計測された波浪を設定値として、不規則波作成プログラムで作成した不規則波を作用させたが、堤体前面位置での波高は目標波高に対して小さくなる傾向であったため、不規則波作成プログラムにおける設定波高を調整することで、目標の波高に近づけた。

表 5.3-18 波浪検定結果

目標値		設定値		計測値	
$T_{1/3}[\text{s}]$	$H_{1/3}[\text{m}]$	$T_{1/3}[\text{s}]$	$H_{1/3}[\text{m}]$	$T_{1/3}[\text{s}]$	$H_{1/3}[\text{m}]$
1.10	0.06	1.10	0.092	1.363	0.065
	0.08	1.10	0.124	1.363	0.081
	0.10	1.10	0.150	1.372	0.098
1.41	0.08	1.41	0.108	1.576	0.074
	0.10	1.41	0.156	1.613	0.097
	0.12	1.41	0.200	1.597	0.121
	0.14	1.41	0.250	1.701	0.140
1.87	0.08	1.87	0.116	1.695	0.082
	0.10	1.87	0.134	1.849	0.098
	0.12	1.87	0.151	1.831	0.112
	0.14	1.87	0.200	2.186	0.144
	0.16	1.87	0.250	2.234	0.166

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

構造物周辺の計算格子を図 5.3-18 に示す。天端高は構造物と計算格子の境界を調整したが、『標準メッシュ』における適用性を確認するため、その他の格子間隔は敢えて調整せず、『標準メッシュ』において波浪条件に従い自動設定される計算格子のままとした。

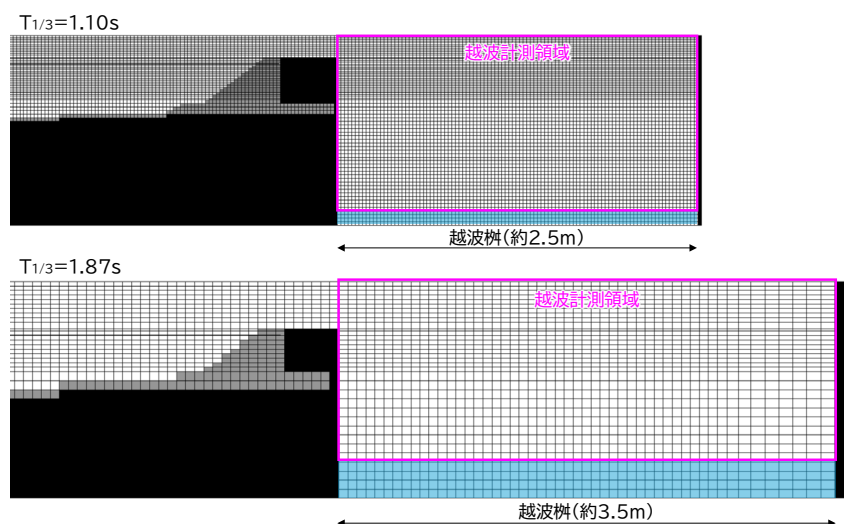


図 5.3-18 構造物周辺の計算格子

② 水位・流速・波圧・越波量モニタリング位置の設定

越波量モニタリングとして，構造物背面に越波升を設置し，図 5.3-18 に示す越波計測領域における VOF 関数 F の面積積分値を計測した．

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

越波流量の実験結果と計算結果の一覧を表 5.3-19 に示す．また，越波量の時系列の一例を図 5.3-19 に示す．

表 5.3-19 越波流量一覧

$T_{1/3}[\text{s}]$	$H_{1/3}[\text{m}]$	H/L	実験値 $q[\text{m}^3/\text{m}/\text{s}]$	計算値 $q[\text{m}^3/\text{m}/\text{s}]$
1.10	0.06	0.036	0.00003	0.00009
	0.08	0.048	0.00041	0.00040
	0.10	0.060	0.00085	0.00084
1.41	0.08	0.034	0.00121	0.00052
	0.10	0.043	0.00259	0.00194
	0.12	0.051	0.00395	0.00376
	0.14	0.060	0.00546	0.00542
1.87	0.08	0.024	0.00170	0.00146
	0.10	0.030	0.00309	0.00244
	0.12	0.036	0.00479	0.00341
	0.14	0.043	0.00626	0.00573
	0.16	0.049	0.00780	0.00836

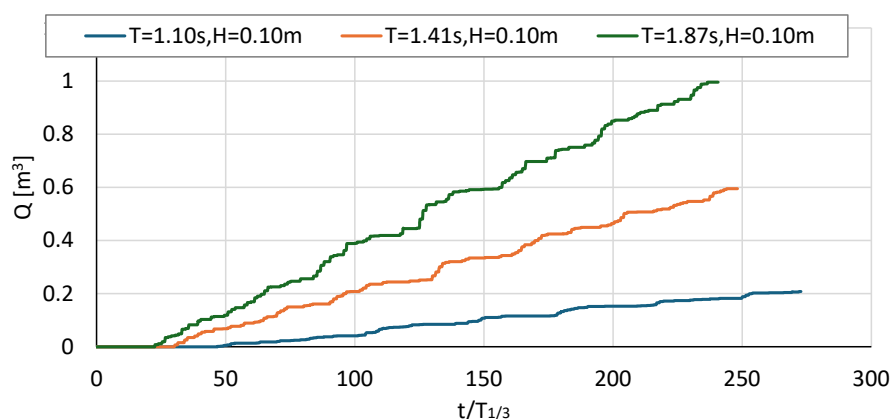


図 5.3-19 越波量時系列

② 解析結果の分析

実験と計算の越波流量の比較結果を図 5.3-20 に示す。越波流量は実験結果にならい，模型縮尺を 1/15.5 として実スケールに換算した。非碎波条件下において， $T_{1/3}=4.3\text{s}$ （実験スケール 1.10s）の条件では計算値と実験値はよく整合しており，周期が大きいほど越波流量は若干計算値が過小であるが，実験結果の再現性は比較的高い。実験値と計算値の差異の原因としては，図 5.3-18 に示す通り $T_{1/3}=7.4\text{s}$ （実験スケール 1.87s）の構造物周辺の計算格子解像度が低いことが考えられる。構造物の形状を正確に再現するために，構造物周辺の計算格子を細分化することで計算精度が向上する可能性があるが，細分化による格子数の増加に伴う計算時間の増加や，適切な格子間隔を設定するための経験的なノウハウが必要であり，非碎波条件における越波計算においては，『標準メッシュ』による波浪条件に従った計算格子の自動設定でも一定の精度は確保されていると考えられる。

なお，本計算での計算時間と，計算に使用した PC のスペックは表 5.3-20 に示す通りであり，波数の多い不規則波による越波計算であるが，一般的な PC でも十分に実用的な計算時間であるといえる。

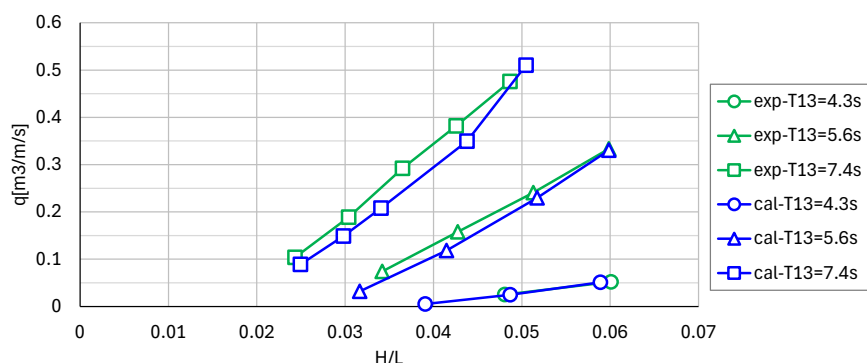


図 5.3-20 越波流量比較

表 5.3-20 計算コスト

計算時間	$T_{1/3}=4.3s$	約 14 時間 (格子数 : $N_x \times N_z = 1,906 \times 71 = 135,326$, 造波数 320 波)
	$T_{1/3}=5.6s$	約 3 時間 (格子数 : $N_x \times N_z = 1120 \times 35 = 39,200$, 造波数 250 波)
	$T_{1/3}=7.4s$	約 1 時間 (格子数 : $N_x \times N_z = 984 \times 29 = 28,536$, 造波数 290 波)
PC スペック	CPU : 12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900KF 3.19 GHz 実装 RAM : 64.0 GB OS : Windows10Pro	

5.3.5 計算事例 5〔株）不動テトラ〕

(1) 計算ケース

既往論文に記載されている実験⁴⁾⁶⁾を対象として再現計算を実施した。

実験概要を以下に示す。越波実験は図 5.3-21 に示す港湾空港技術研究所所有の長さ 105 m×幅 3.0 m×深さ 2.5 m の大型水路で実施されたものである。

水位計は、堤体から数波長沖側に 2 点（WG1 及び WG2，入反射分離推定用），堤体前面に 1 点（WG3），越波升に 1 本（WG4）を設定している。反射率及び浅水係数については，WG2 及び WG1 で計測した水位変動量から推定している。上記の反射率を加味することで WG2 及び WG1 における入射有義波高を算定し，その平均値を K_s で割り戻すことで入射波の換算沖波波高を算定している。なお，波高計の設置位置に関して，WG3 は堤体から 0.1 m の位置であり，WG1 及び WG2 は図に示す通りであり，図中の L は当該地点における波長である。

上記の論文で実施された実験の「直立護岸」，「海底勾配 1/10」のケースの中から，表 5.3-21 に示す CASE1，CASE 9，CASE 20 の 3 ケースを対象として再現計算を実施した。これらのケースはそれぞれ堤前水深，天端高，波浪の有義周期が異なる。

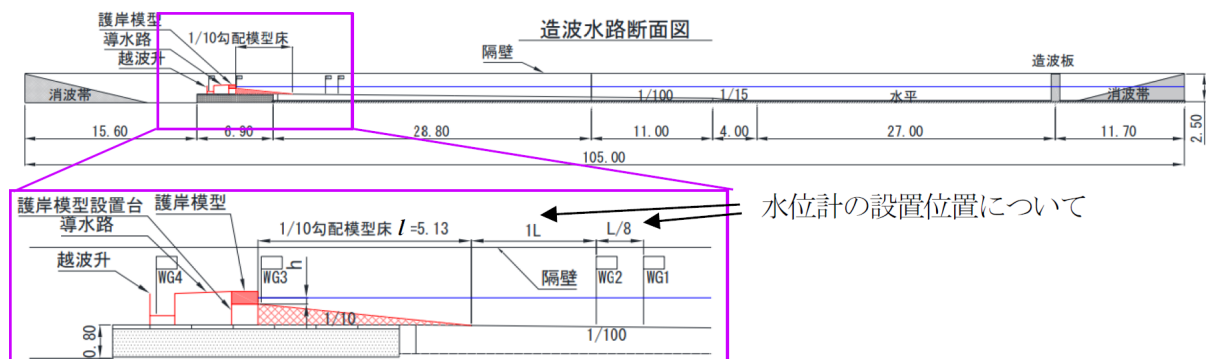


図 5.3-21 実験概要

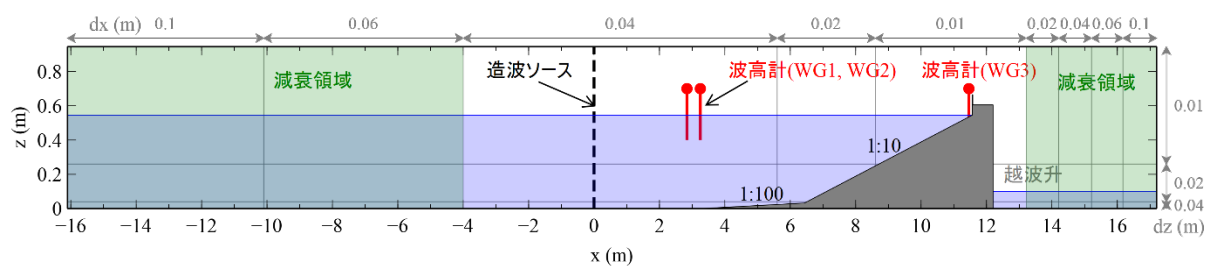
表 5.3-21 再現計算対象ケース

実験ケース CASE	水路勾配 $\tan \theta$	波種別	波群	波数	堤前水深 h (m)	天端高 h_c (m)	換算沖波波高 H_0' (m)	有義周期 $T_{1/3}$ (s)	沖波波長 L_0 (m)	相対水深 h/H_0'	相対天端高 h_c/H_0'	波形勾配 H_0'/L_0
1	1/10	不規則波	1	300	0.00	0.12	0.15	1.63	4.14	0.00	0.80	0.036
9	1/10	不規則波	1	300	0.15	0.12	0.15	2.83	12.49	1.00	0.80	0.012
20	1/10	不規則波	1	300	0.30	0.26	0.15	2.38	8.84	2.00	1.73	0.017

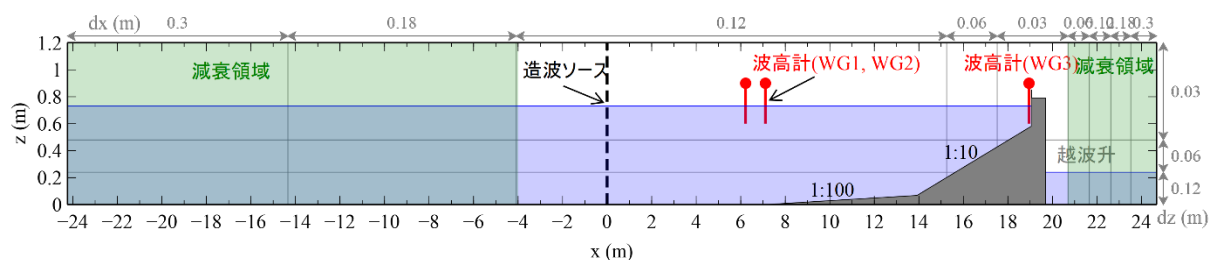
(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

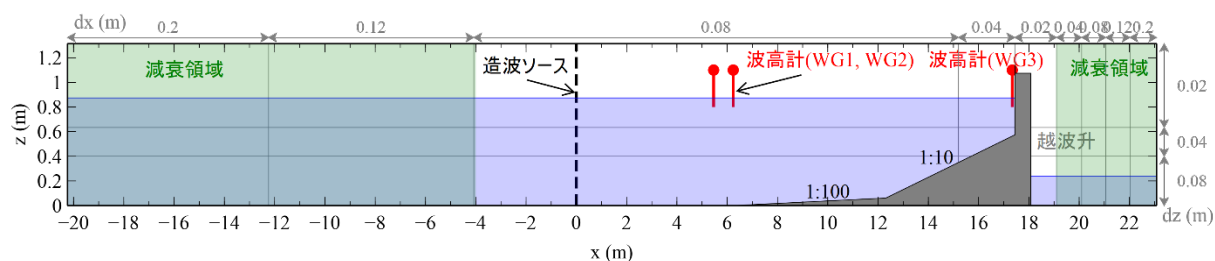
計算領域を図 5.3-22 に示す。



(a) CASE 1



(b) CASE 9



(c) CASE 20

図 5.3-22 計算領域図

② 構造物位置

造波位置の水平座標を $x=0\text{m}$ とし、各ケース (CASE 1, CASE 9, CASE 20) の護岸前面位置をそれぞれ 11.56m, 19.05m, 17.44m とした。また、護岸の背後に長さ 5m の越波升を設置した。

③ 減衰帯位置

計算領域の沖側と岸側に減衰帯を設置した。沖側の減衰帯は造波ソースから 4m 離れた位置に設置し、減衰帯の幅は 3 波長程度とした。岸側の減衰帯は越波升内に設置し、減衰帯の幅は 4m とし

た.

(3) モデル化された海底地形

基本的には実験水路の海底地形を再現するように計算の海底地形を設定したが、計算時間の短縮のために結果に影響を及ぼさないと考えられる範囲で実験水路を短縮して計算領域を設定した。

実験水路の海底地形は、護岸前面から沖側に向かって 1/10 勾配の区間が 5.13m, 続いて 1/100 勾配の区間が 38.07m, 1/15 勾配の区間が 4m, 水平勾配の区間が 27m という地形である。計算では 1/100 勾配の区間の長さを 1 波長分 (1/10 勾配と 1/100 勾配の接続位置での波長を基準) に短縮し、そこから沖側の造波位置までの区間も水平勾配で 1 波長分に短縮した。

(4) 計算パラメータの設定

計算パラメータの設定例として、CASE 1 のパラメーター一覧を表 5.3-22 に示す。

表 5.3-22 計算パラメーター一覧 (CASE 1)

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO 安全率0.1
		解析終了	549.1s (60s + 300 $T_{1/3}$)
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：12.10m(3L程度), 岸側：4.00m
5	連立1次方程式の解法		デフォルト (M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト (設定しない)
9	スカラー量		デフォルト (設定しない)
10	初期値等		デフォルト (設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.4.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
		水平格子[m]	-4.00~5.60m
			5.60~8.60m
			8.60~13.21m
		減衰領域内 (沖側・岸側)	段階的に格子間隔を大きく設定
	鉛直格子[m]	0.00~0.04m	0.04m
		0.04~0.26m	0.02m
		0.26~0.945m	0.01m
			静水面と護岸天端が格子位置になるように調節
13	ポーラスの下限值		0.0001
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	-
		(x,y,z 方向)面積透過率	-
		慣性力係数	-
		抵抗係数	-
16	D-F則：テトラポッド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r (=V^{1/3})$	-
16	D-F則：マウンド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r (=V^{1/3})$	-
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		FILE TRN TIME 0.000 549.000 0.050 FILE TRN W-LEVEL ANS SRC FILE TRN W-LEVEL 334 1 # WG1 FILE TRN W-LEVEL 344 1 # WG2 FILE TRN W-LEVEL 839 1 # WG3 FILE TRN INT F 851 1 1 1113 1 80 # 越波升
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL VAR 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブグループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 913 1 5 1113 1 80 0.000
		D-F則	-

(5) 作用波の検定

構造物を設置した状態での WG1, WG2 での入射波の実験値を目標として、計算での作用波を設定した。目標とした波浪条件を表 5.3-23 に示す。波高については WG1, WG2 地点における入射有義波高から求められる換算沖波波高を目標値とし、周期については WG1, WG2 地点における有義波周期を目標値とした。

表 5.3-23 目標とした波浪条件

	設定値		実験値 WG1, WG2地点						再現計算の目標値 WG1, WG2地点		
	有義波周期 T_{13} (s)	換算沖波波高 H_0' (m)	有義波周期 T_{13} (s)	有義波高 H_{13} (m)	反射率 Kr	入射有義波高 H_1 (m)	浅水係数 Ks	換算沖波波高 H_0' (m)	有義波周期 T_{13} (s)	浅水係数 Ks	入射有義波高 H_1 (m)
CASE 1	1.63	0.15	1.68	0.153	0.207	0.150	0.919	0.163	1.68	0.916	0.149
CASE 9	2.83	0.15	2.39	0.181	0.610	0.155	1.013	0.153	2.39	0.997	0.152
CASE 20	2.38	0.15	2.25	0.207	0.913	0.153	0.940	0.162	2.25	0.934	0.151

造波信号（マトリクスデータファイル）作成時の主な条件は以下の通りである。

- ・ スペクトル：修正ブレットシュナイダー・光易型
- ・ 周波数分割数：200
- ・ 出力時間間隔：0.05s
- ・ 乱数発生 of 初期値：1
- ・ 成分波の振幅の求め方： $a = \sqrt{(2Sdf)}$ （変動を考慮しない）

有義波周期と有義波高の計算結果が目標値と合うように、マトリクスファイル作成時の入力周期及び入力波高の微調整を行った。WG1, WG2 地点での波浪諸元の目標値と計算結果を比較したものを表 5.3-24 に示す。有義波周期、有義波高については目標値とほぼ一致していることが確認できる。また、反射率についても実験結果と同程度であることがわかる。沖側（WG1, WG2）のスペクトルを比較したものを図 5.3-23 に示す。図中の TARGET の線は再現計算の目標周期と目標波高に対する目標スペクトルである。実験値と計算値を比較すると、CASE 1 と CASE 20 は概ね一致しており、CASE 9 の計算結果は実験結果よりもやや高周波数側に偏っていることがわかる。

表 5.3-24 波浪諸元の目標値と計算結果の比較

	再現計算の目標値 WG1, WG2地点				計算結果 WG1, WG2地点					
	換算沖波波高 H_0' (m)	有義波周期 T_{13} (s)	反射率 Kr	入射有義波高 H_1 (m)	有義波周期 T_{13} (s)	有義波高 H_{13} (m)	反射率 Kr	入射有義波高 H_1 (m)	浅水係数 Ks	換算沖波波高 H_0' (m)
CASE 1	0.163	1.68	0.207	0.149	1.69	0.150	0.220	0.146	0.916	0.159
CASE 9	0.153	2.39	0.610	0.152	2.41	0.174	0.582	0.151	0.997	0.151
CASE 20	0.162	2.25	0.913	0.151	2.28	0.205	0.903	0.152	0.934	0.163

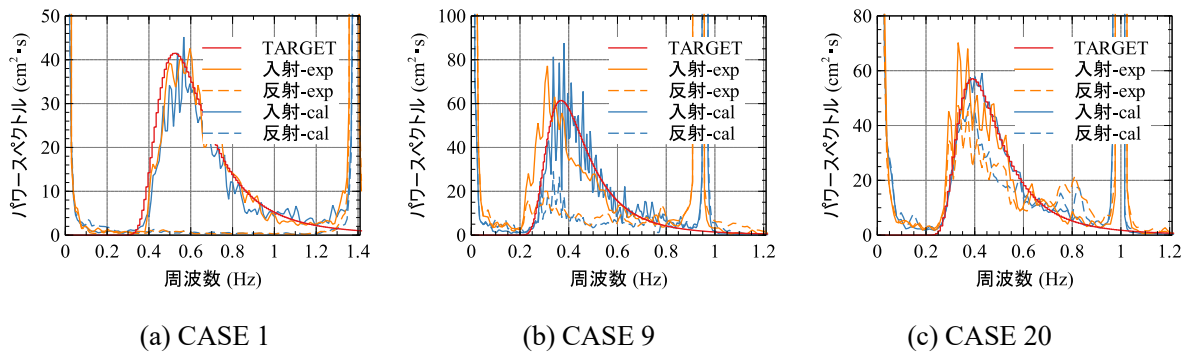


図 5.3-23 WG1, WG2 のスペクトルの比較

堤前位置（WG3：直立壁から 10cm 離れた位置）における波浪諸元の実験値と計算値を比較したものを表 5.3-25 に示す．有義波高に着目すると，全体的に計算値の方が大きめとなっていた．また，平均水位を比較したものを表 5.3-26 に示す．堤前位置の平均水位の差（計算値）－（実験値）は，CASE 1 が－6mm，CASE 9 は－17mm，CASE 20 は+10mm であった．

表 5.3-25 堤前(WG3)の波浪諸元の比較

	$H_{\max}$		$H_{1/20}$		$H_{1/10}$		$H_{1/3}$		H_{mean}	
	実験値 (m)	計算値 (m)	実験値 (m)	計算値 (m)	実験値 (m)	計算値 (m)	実験値 (m)	計算値 (m)	実験値 (m)	計算値 (m)
CASE 1	0.169	0.194	0.138	0.138	0.122	0.128	0.093	0.106	0.055	0.063
CASE 9	0.437	0.399	0.363	0.362	0.338	0.343	0.286	0.300	0.180	0.204
CASE 20	0.519	0.571	0.408	0.465	0.380	0.436	0.321	0.363	0.212	0.235

表 5.3-26 平均水位の比較

	WG1, WG2 (平均)			WG3		
	実験値 (m)	計算値 (m)	計算-実験	実験値 (m)	計算値 (m)	計算-実験
CASE 1	0.000	0.004	0.004	0.025	0.019	-0.006
CASE 9	0.000	-0.005	-0.005	0.012	-0.005	-0.017
CASE 20	0.001	0.011	0.010	0.005	0.015	0.010

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

計算格子間隔は，構造物付近及び静水面付近の空間解像度が高くなるように設定した（計算格子間隔は図 5.3-22 の上端及び右端に記載した）．構造物付近の計算格子を図 5.3-24 に示す．各ケース（CASE 1，CASE 9，CASE 20）の格子間隔(Δx ， Δz)の最小値は，それぞれ(1cm, 1cm)，(3cm, 3cm)，(2cm, 2cm)である．ただし，CASE 20 は護岸前面の Δx は最小値ではなく，4cm となっている．鉛直方向の格子については，護岸の天端高と初期水位の鉛直座標が計算格子の分割位置と一致するよう

に格子間隔の微調整を行った。なお、計算格子の作成には、『標準メッシュ』を使用した。『標準メッシュ』の作成に用いる入力値として、実験縮尺は論文に記載がなかったため 1/25 とした。また、周期と波高は実験値（WG1，WG2 地点）を用いた。

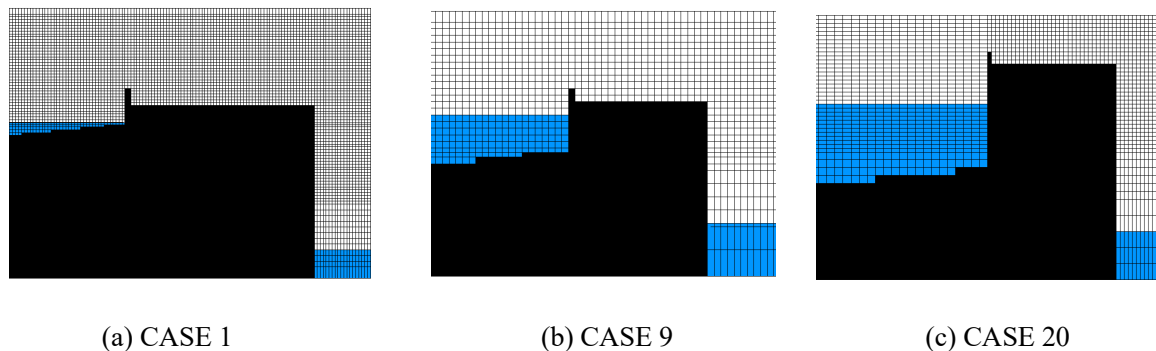


図 5.3-24 構造物付近の計算格子

② 水位・流速・波圧・越波量モニタリング位置の設定

水位は、沖側一様水深部の 2 箇所（WG1，WG2）と護岸前面の 1 箇所（WG3）の計 3 箇所で測定した。WG2 は 1/100 勾配開始地点に設置し，WG1 と WG2 の 2 箇所の水位データから入反射分離をするために，波高計間隔が $L/8$ 程度となるように設置した。WG3 は護岸前面位置から 10 cm 離れた位置に設置した。波量に関しては，図 5.3-25 に示すように，護岸のパラペットの背面位置より陸側の領域（護岸の天端上を含む）を越波量算定領域とし，領域内の総水量の時系列を測定した。なお，水位や越波量は造波開始 60 秒後から有義波周期 300 波分を解析対象とし，0.05s 間隔で出力した。

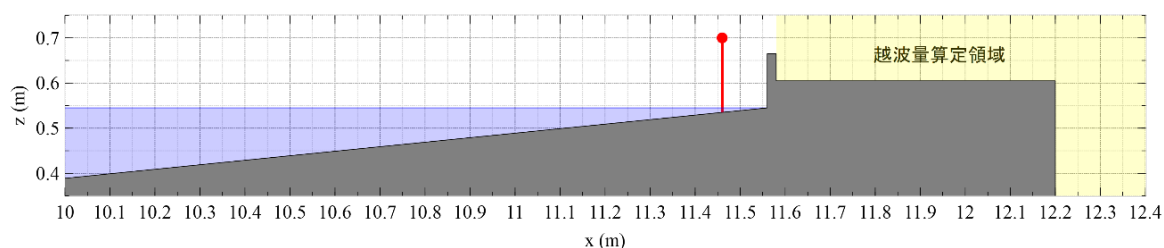


図 5.3-25 越波量算定領域の模式図（CASE 1）

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

単位幅あたりの累積越波量の時系列について，実験値と計算値を比較したものを図 5.3-26 に示す。また，越波流量の実験値と計算値を比較したものを表 5.3-27 に示す。無次元越波流量について見ると，CASE 1 は実験値と同程度，CASE 9 と CASE 20 は実験結果と比較してやや小さめの値で

あった。

合田の越波流量推定図により求めた無次元越波流量と真値の想定範囲も併せて比較したものを図 5.3-27 に示す。実験結果を真値と仮定したときの推定精度という観点で CS3D による計算結果と越波流量推定図による算定結果を比較すると、CS3D による計算結果は合田の推定図と概ね同程度の推定精度が得られているものと考えられる。

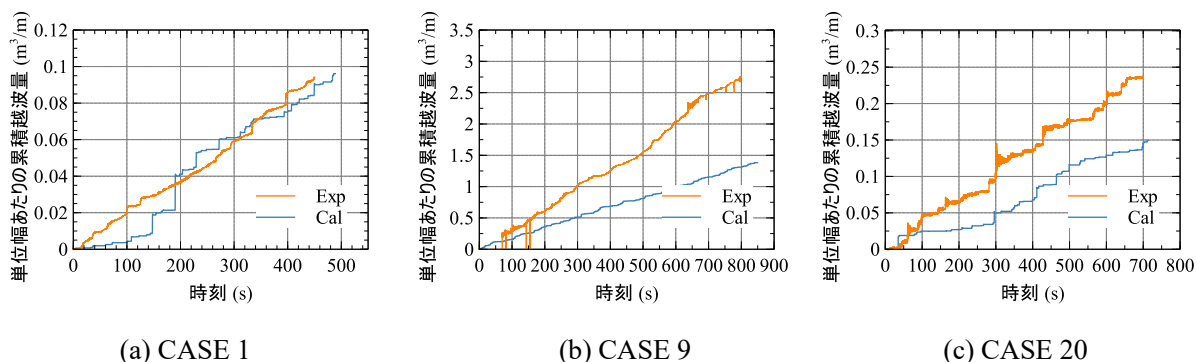


図 5.3-26 単位幅あたりの累積越波量の時系列（計測開始時点の時刻と越波量を 0 として表示）

表 5.3-27 越波流量の実験値と計算値の比較

	H_0/L_0		h/H_0		h_c/H_0		q (m³/m/s)		$q/\sqrt{(2gH_0^3)}$		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	計算/実験
CASE 1	0.037	0.036	0.00	0.00	0.74	0.75	2.1E-04	2.0E-04	7.2E-04	7.0E-04	0.97
CASE 9	0.017	0.017	0.98	0.99	0.79	0.79	3.4E-03	1.6E-03	1.3E-02	6.2E-03	0.48
CASE 20	0.021	0.020	1.85	1.84	1.60	1.60	3.4E-04	2.1E-04	1.2E-03	7.2E-04	0.61

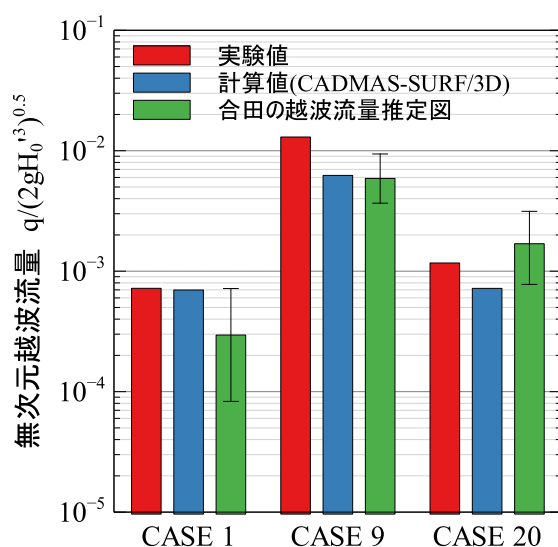


図 5.3-27 無次元越波流量の比較

② 解析結果の分析

上述のように、CS3D による再現計算の結果は概ね妥当であると考えられるが、計算精度に影響を及ぼすと考えられるいくつかの要因に関して、分析・考察を行う。

空間解像度の影響

計算格子の解像度の影響を調べるために、計算領域全体の格子間隔を水平方向、鉛直方向ともに 1/2 として計算を行った。結果を表 5.3-28 及び表 5.3-29 に示す。元の計算格子での無次元越波流量（表 5.3-27）と比較すると、CASE 1 は 0.86 倍、CASE 9 は 1.08 倍、CASE 20 は 1.44 倍となった。CASE 20 の計算結果は、計算格子の細分化によってやや実験値に近づく結果が得られた。

表 5.3-28 越波流量の実験値と計算値の比較（格子間隔 1/2）

	H_0/L_0		h/H_0		h_c/H_0		q (m ³ /m/s)		$q/\sqrt{2gH_0^3}$		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	計算/実験
CASE 1	0.037	0.037	0.00	0.00	0.74	0.74	2.1E-04	1.7E-04	7.2E-04	6.0E-04	0.83
CASE 9	0.017	0.018	0.98	0.96	0.79	0.77	3.4E-03	1.8E-03	1.3E-02	6.7E-03	0.52
CASE 20	0.021	0.022	1.85	1.82	1.60	1.58	3.4E-04	3.1E-04	1.2E-03	1.0E-03	0.89

表 5.3-29 平均水位の実験値と計算値の比較（格子間隔 1/2）

	WG1, WG2 (平均)			WG3		
	実験値 (m)	計算値 (m)	計算-実験	実験値 (m)	計算値 (m)	計算-実験
CASE 1	0.000	-0.005	-0.005	0.025	0.015	-0.010
CASE 9	0.000	-0.009	-0.009	0.012	-0.010	-0.022
CASE 20	0.001	0.009	0.008	0.005	0.014	0.009

入射波のスペクトル（入力周期）の影響

前述したように CASE 9 に関して入射波のスペクトルが実験値と計算値で多少差異が生じており、越波流量の計算結果が過小となっている要因として考えられた。そこで、造波信号の入力周期を設定値である 2.83s として計算を実施した。計算格子は 1/2 に細分化した条件とした。その結果得られた波浪諸元、スペクトル、平均水位をそれぞれ表 5.3-30、図 5.3-28、表 5.3-31 に示す。有義波周期は実験値より大きくなっているが、スペクトルは実験値に近づいていることがわかる。越波流量は表-12 に示すように、入力周期変更前と比較して多少実験値に近づく結果が得られた。

表 5.3-30 波浪諸元の目標値と計算結果の比較（入力周期変更後）

	再現計算の目標値				計算結果					
	WG1, WG2地点				WG1, WG2地点					
	換算沖波波高 H_0' (m)	有義波周期 T_{13} (s)	反射率 Kr	入射有義波高 H_1 (m)	有義波周期 T_{13} (s)	有義波高 H_{13} (m)	反射率 Kr	入射有義波高 H_1 (m)	浅水係数 Ks	換算沖波波高 H_0' (m)
CASE 9	0.153	2.39	0.610	0.152	2.74	0.186	0.590	0.160	0.997	0.161

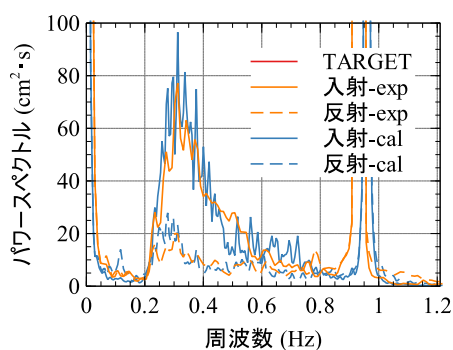


図 5.3-28 WG1, WG2 のスペクトルの比較（入力周期変更後）

表 5.3-31 平均水位の実験値と計算値の比較（入力周期変更後）

	WG1, WG2 (平均)			WG3		
	実験値 (m)	計算値 (m)	計算-実験	実験値 (m)	計算値 (m)	計算-実験
CASE 9	0.000	-0.014	-0.014	0.012	-0.013	-0.025

表 5.3-32 越波流量の実験値と計算値の比較（入力周期変更後）

	H_0/L_0		h/H_0		h_c/H_0		q (m³/m/s)		$q/\sqrt{2gH_0^3}$		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	計算/実験
CASE 9	0.017	0.014	0.98	0.93	0.79	0.75	3.4E-03	2.3E-03	1.3E-02	8.1E-03	0.62

平均水位の影響

堤前の平均水位は実験結果と計算結果で最大 2cm 以上の差が見られ、越波流量の計算精度に影響している可能性が考えられた。そこで、平均水位の影響がどの程度あるかを見積もるために、合田の越波流量推定図により、実験値の H_0/L_0 、 h/H_0 、 h_c/H_0 を用いて推定した越波流量と、天端高 h_c が $\pm 1\text{cm}$ 変化した値を用いて推定した越波流量をそれぞれ求め、その比を求めた。

その結果を表 5.3-33 に示す。天端高の影響は CASE 1 で最も大きく、 $\pm 1\text{cm}$ の変化で越波流量は 70%～140%に変化する結果となった。CASE 9 についても $\pm 1\text{cm}$ の変化で越波流量は 1 割以上変化すると推定されるため、CASE 9 の実験値と計算値の差異については、平均水位の影響が大きいと考えられる。

表 5.3-33 越波流量算定図に基づく平均水位の影響の推定

	H_0/L_0	h/H_0	h_c (m)			h_c/H_0			q (m³/m/s) 越波流量算定図より			越波流量の比	
	実験値	実験値	実験値	+1cm	-1cm	実験値	+1cm	-1cm	実験値	+1cm	-1cm	+1cm	-1cm
CASE 1	0.037	0.00	0.12	0.13	0.11	0.74	0.80	0.68	3.0E-04	2.1E-04	4.1E-04	70%	140%
CASE 9	0.017	0.98	0.12	0.13	0.11	0.79	0.85	0.72	5.9E-03	5.1E-03	6.8E-03	87%	115%
CASE 20	0.021	1.85	0.26	0.27	0.25	1.60	1.66	1.54	1.7E-03	1.5E-03	1.9E-03	88%	113%

5.3.6 計算事例 6[パシフィックコンサルタンツ（株）]

(1) 計算ケース

『標準メッシュ』を用いた越波流量の算定結果について、水路実験で得られた結果と比較する。再現対象とする実験は、港湾空港技術研究所所有の 105m 長水路で実施された消波被覆堤における越波実験である。水路条件や実験方法については先行研究⁴⁾と同様であるが、堤前水位を 0.40m の実験ケースを追加した条件による結果より再現計算を実施する。

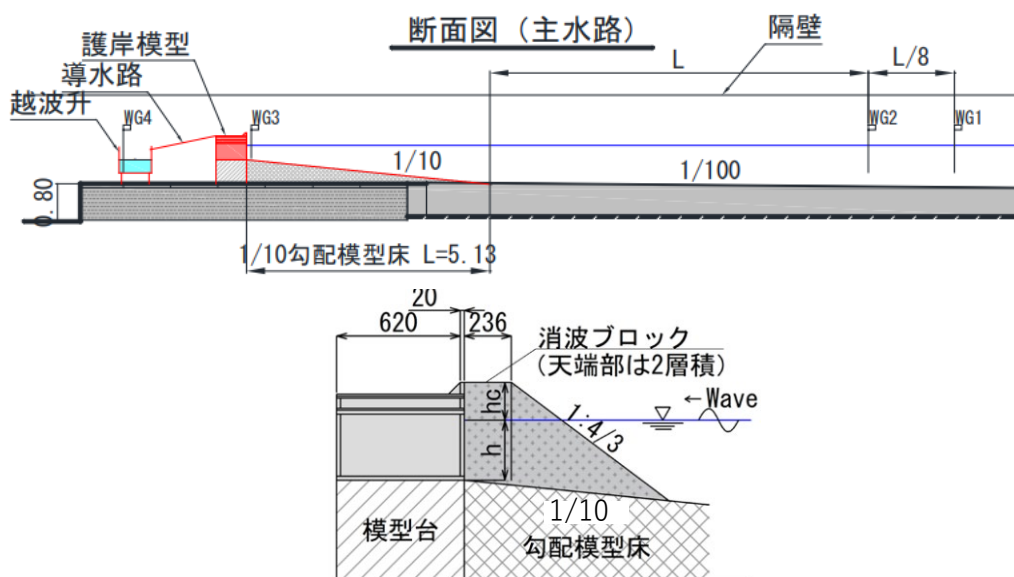


図 5.3-29 水路実験で対象とした直立消波護岸

なお、本検討では『標準メッシュ』の設定方針（3 章参照）を反映した Python スクリプトにより入力データの作成を行った。これにより、『標準メッシュ』の作成及びそれに対応した地形生成、並びに以下の機能を実装した。

- ・ 実験スケールで用いられる低周期帯を直接反映した『標準メッシュ』の作成
- ・ 「海底地形を入力→『標準メッシュ』を作成→堤体（構造物）等そのほか構造をモデル化」のフローに Stl を使用せず、直接構造物及び消波工をモデリング（指定した多角形の内側のセルを抽出、例：複雑断面（フレア護岸等）への対応）

前述の消波護岸、海底勾配 1/10 の検討ケースの中から、以下表の 3 波形勾配を選び、再現計算を行った。表には、実験で得られた越波流量並びに同条件下における合田の越波流量算定図による読み取り結果、さらにそれらの比を掲載する。

表 5.3-34 水路実験による越波流量の計測結果

ケース名	換算沖波波高[m]	堤脚水深[m]	有義波周期[s]	水面上天端高[m]	沖波波長[m]	相対水深[m]	相対天端高	波形勾配
CASE1	0.15	0.40	1.63	0.15	4.14	2.67	1.00	0.036
CASE2	0.15	0.40	2.38	0.15	8.84	2.67	1.00	0.017
CASE3	0.15	0.40	2.83	0.15	12.49	2.67	1.00	0.012

反射率	有義波高[m]	有義波周期[s]	波数	入射波高[m]	浅水係数	実験結果q① 無次元量[-]	合田図読み取りq② 無次元量[-]	①/②
0.641	0.157	1.677	290	0.132	0.921	5.27E-04	4.60E-04	1.15
0.540	0.171	2.474	338	0.150	0.935	1.23E-03	1.30E-03	0.95
0.645	0.184	2.910	315	0.155	0.977	2.18E-03	2.51E-03	0.87

(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

なお、本検討では『標準メッシュ』（作成補助ツール Ver.1.8）の設定方針を反映した Python スクリプトにより入力データの作成を行った。



図 5.3-30 計算領域（CASE1, $T=1.63s$ を例）

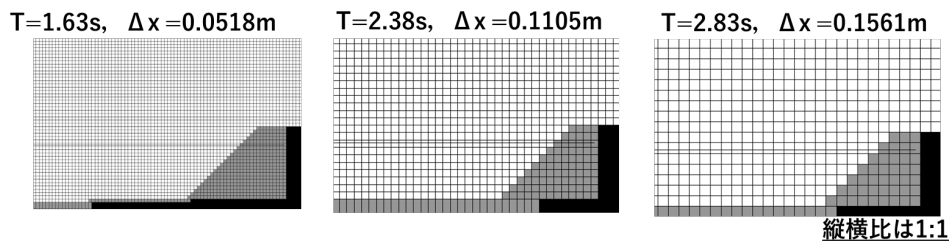


図 5.3-31 入力周期に応じた堤体周辺の格子間隔

② 構造物位置

図 5.3-30 及び図 5.3-31 に示す位置に海底及び堤体を設置している。

③ 減衰帯位置

図 5.3-30 に示す位置に、約 190 波長分の減衰領域（0.5 波長分のエネルギー減衰帯を設置しないならし領域を含む）の設定位置を示す。

(3) モデル化された海底地形

モデル化された海底地形を図 5.3-30 に示す.

(4) 計算パラメータの設定

表 5.3-35 に計算パラメータの一覧を示す. ただし, 表に記載のない格子間隔等は図 5.3-30 及び図 5.3-31 に示す通りである.

表 5.3-35 計算パラメータの設定

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	200 $T_{1/3}$ 程度
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		あり
4	減衰領域		沖側: 190L程度, 岸側: なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		標準メッシュ (作成補助ツールVer.1.8) の考え方に基づき作成
12	格子間隔の設定	設定領域	本文中に示す
13	ポーラスの下限值		0.01
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	ブロック: 0.5, 石: 0.44
		(x, y, z 方向)面積透過率	設定しない
		慣性力係数	1.2
		抵抗係数	設定しない
16	D-F則: テトラポッド	α_0	2100
17		β_0	2.2
18		$d_r (= V^{1/3})$	0.1
19	D-F則: -	α_0	-
20		β_0	-
21		$d_r (= V^{1/3})$	-
22	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
23	リストファイル出力制御		適宜設定
24	詳細ファイル出力制御		適宜設定
25	リスタート制御		なし
26	時系列ファイル出力制御		適宜設定
27	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブグループ	-
		越波升	本文中に示す
		D-F則	OPTION DRAG-DF 0.00000131 2 0.0001 2100 2.2 #DF1 5.0001 2100 2.2 #DF2

(5) 作用波の検定

作用波は，堤体を設置した条件において，図 5.3-30 に示す水位計設置位置における入射波条件を取得し，実験と比較した．沖合に設置した波高計では非砕波条件となるが，同地点の換算沖波波高で実験に対して計算が 3～10%程度の過小評価となった（表 5.3-36）．

表 5.3-36 波高検定結果

ケース名	換算沖波波高[m] [※]		有義波周期[s]	
	実験値	計算値	実験値	計算値
CASE1	0.132	0.141	1.677	1.614
CASE2	0.150	0.140	2.474	2.270
CASE3	0.155	0.137	2.910	2.611

(6) 構造物・計測点の設定

図 5.3-30 に示す水位計設置位置において，水位変動量を計測した．

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

表 5.3-37 に越波流量の算定結果を示す．表 5.3-36 に示した波高検定で実験値に対する過小評価と同様に，CASE2 及び CASE3 については実験結果の 0.54 倍及び 0.41 倍となった．

表 5.3-37 越波流量の計算結果（ $\Delta x=L/80$ 一律）

ケース名	換算沖波波高[m] [※]		有義波周期[s]		無次元越波流量[-]		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験	計算	合田
CASE1	0.132	0.141	1.677	1.614	5.27E-04	3.90E-04	4.60E-04
CASE2	0.150	0.140	2.474	2.270	1.23E-03	6.65E-04	1.30E-03
CASE3	0.155	0.137	2.910	2.611	2.18E-03	8.96E-04	2.51E-03

② 解析結果の分析

表 5.3-37 で見られた過小評価について堤体周辺の格子間隔をみると（図 5.3-32），CASE1 と比較しても格子間隔が粗いことが分かる．不規則波なので各波による相互評価は難しいが，越波流量の算定結果として，CASE1 では越波流量の過小評価は大きくない（実験値に対して 0.74 倍）のに対して，他 2 ケースは実験値の半分程度である．

そのため CASE1 で使用した格子を CASE2 及び CASE3 に再適用し，波長に対して比較的細かい空間格子をもって再計算を実施する．

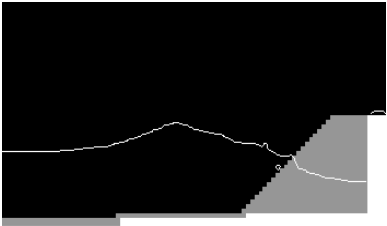
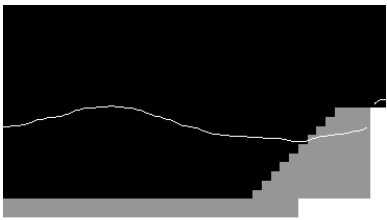
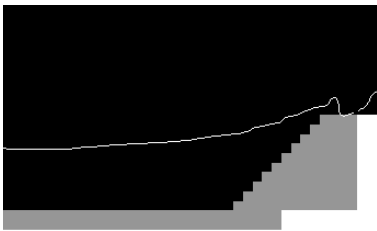
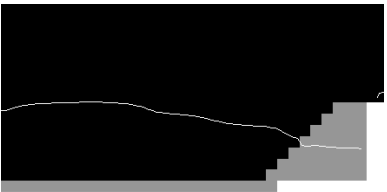
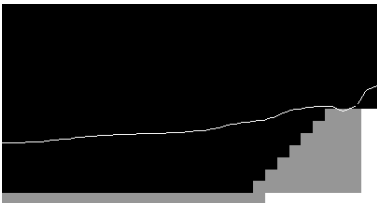
	
CASE1：越波直前	CASE1：越波直後
	
CASE2：越波直前	CASE2：越波直後
	
CASE3：越波直前	CASE3：越波直後

図 5.3-32 各ケースにおける越波直前後のスナップショット

表 5.3-38にCASE1の空間格子を使用したCASE2及びCASE3の結果を示す(CASE*(再)と示す)。
さらに、図 5.3-33 に格子変更前を含めた越波流量の算定結果を示す。また、図中には合田が指摘した、推定値の真値に対する想定範囲を合わせて示す。

これより、CASE1 で作成した格子を他ケースに適用することで越波流量の実験値に対する誤差が小さくなることが分かる。その一方で、格子変更前であっても真値に対する想定範囲には収まる結果となった。

表 5.3-38 越波流量の計算結果 (CASE2, 3 のみ再計算)

ケース名	換算沖波波高[m]※		有義波周期[s]		無次元越波流量[-]		
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験	計算	合田
CASE1	-	-	-	-	-	-	-
CASE2(再)	0.150	0.147	2.474	2.270	1.23E-03	9.98E-04	1.30E-03
CASE3(再)	0.155	0.145	2.910	2.611	2.18E-03	1.81E-03	2.51E-03

※水位計設置位置での反射率及び浅水係数より算定

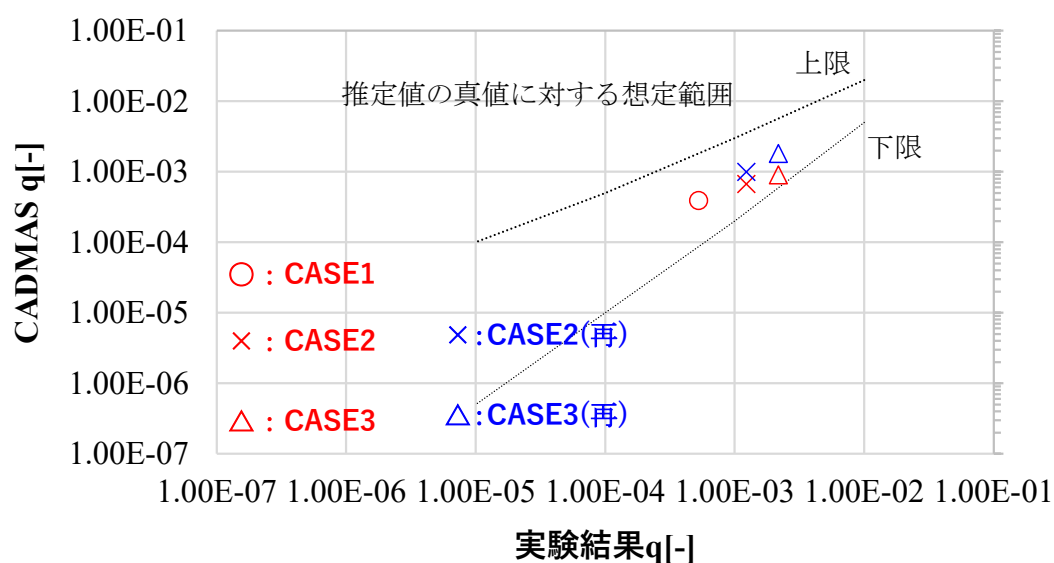


図 5.3-33 実験に対する計算の無次元越波流量の評価

5.3.7 計算事例 7[いであ（株）]

(1) 計算ケース

高山ら（1982）⁷⁾は越波流量の特性を検討する際に、波の浅水変形における定量的な領域区分を行っている（図 5.3-34）。本検討で採用した計算ケースは、領域区分ごとの水深と越波流量の関係を示した越波流量の近似モデルのイメージ（図 5.3-35）に基づき、5つの領域区分から設定した。

また、本検討における作用波は、連続した 600 波とした。

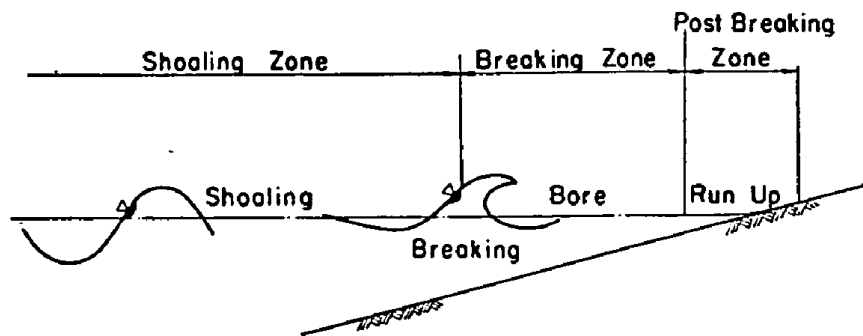


図 5.3-34 波の変形における領域⁷⁾

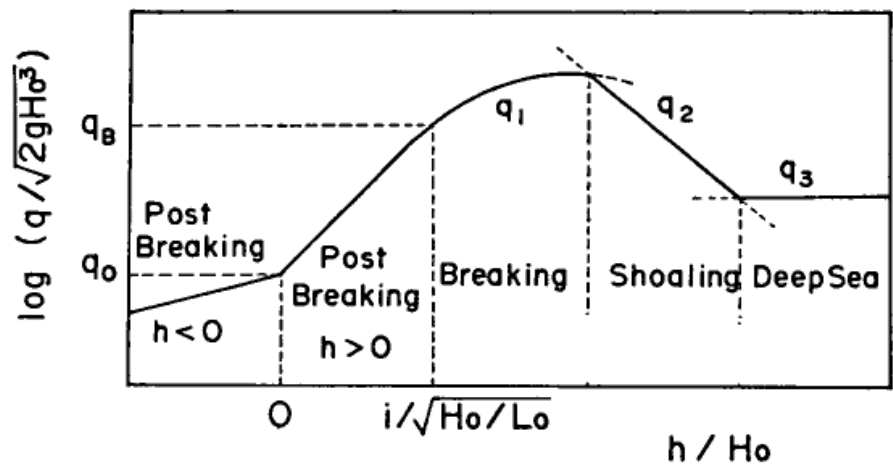


図 5.3-35 越波流量の近似モデル⁷⁾

(2) 数値波動水槽モデル

計算領域の設定結果を表 5.3-39 に示す.

表 5.3-39 数値波動水槽モデルの設定結果 (計算領域)

項目		前面水深：浅い	前面水深：浅い	基本ケース
検討ケース		A	B	C
領域区分		Post Breaking $h < 0$	Post Breaking $h > 0$	Breaking
計算領域	水平格子 (m)	0.00~660.50	0.00~630.50	0.00~570.50
	鉛直格子 (m)	0.00~37.00	0.00~37.00	0.00~37.00

項目		前面水深：深い	前面水深：深い	天端高：低い
検討ケース		D	E	F
領域区分		Shoaling	Deep Sea	Breaking
計算領域	水平格子 (m)	0.00~800.50	0.00~660.50	0.00~570.50
	鉛直格子 (m)	0.00~73.00	0.00~73.00	0.00~37.00

項目		天端高：高い	天端高：高い
検討ケース		G	H
領域区分		Breaking	Breaking
計算領域	水平格子 (m)	0.00~570.50	0.00~570.50
	鉛直格子 (m)	0.00~37.00	0.00~37.00

① 構造物位置

構造物位置の設定結果を表 5.3-40 に示す.

表 5.3-40 数値波動水槽モデルの設定結果 (構造物位置)

項目		前面水深：浅い	前面水深：浅い	基本ケース
検討ケース		A	B	C
領域区分		Post Breaking $h < 0$	Post Breaking $h > 0$	Breaking
構造物位置 (m)		620.00	591.00	535.00

項目		前面水深：深い	前面水深：深い	天端高：低い
検討ケース		D	E	F
領域区分		Shoaling	Deep Sea	Breaking
構造物位置 (m)		760.00	620.00	535.00

項目		天端高：高い	天端高：高い
検討ケース		G	H
領域区分		Breaking	Breaking
構造物位置 (m)		535.00	535.00

② 減衰帯位置

減衰帯位置の設定結果を表 5.3-41 に示す.

表 5.3-41 数値波動水槽モデルの設定結果 (減衰帯位置)

項目		前面水深：浅い	前面水深：浅い	基本ケース
検討ケース		A	B	C
領域区分		Post Breaking $h < 0$	Post Breaking $h > 0$	Breaking
減衰帯	沖側	190L程度	190L程度	190L程度
	岸側	なし(越波升)	なし(越波升)	なし(越波升)

項目		前面水深：深い	前面水深：深い	天端高：低い
検討ケース		D	E	F
領域区分		Shoaling	Deep Sea	Breaking
減衰帯	沖側	190L程度	190L程度	190L程度
	岸側	なし(越波升)	なし(越波升)	なし(越波升)

項目		天端高：高い	天端高：高い
検討ケース		G	H
領域区分		Breaking	Breaking
減衰帯	沖側	190L程度	190L程度
	岸側	なし(越波升)	なし(越波升)

(3) モデル化された海底地形の設定

ケース A～H の海底地形の設定結果を図 5.3-36～図 5.3-43 に示す.

【ケース A】 前面水深：浅い

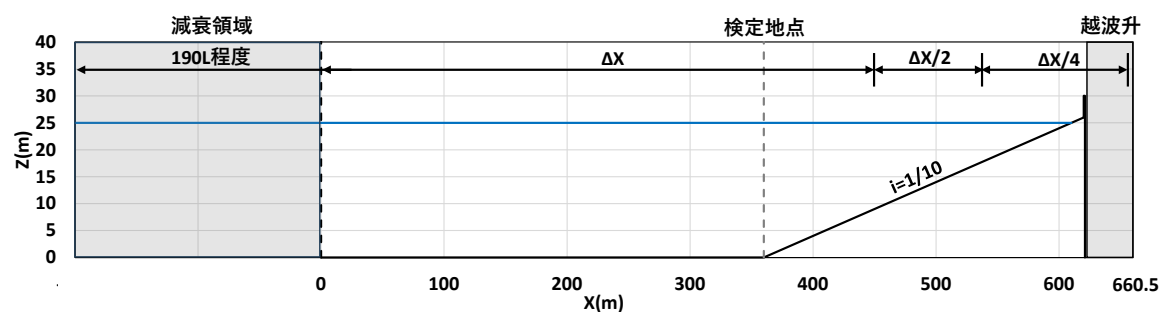


図 5.3-36 計算モデル模式図 (ケース A)

【ケース B】 前面水深：浅い

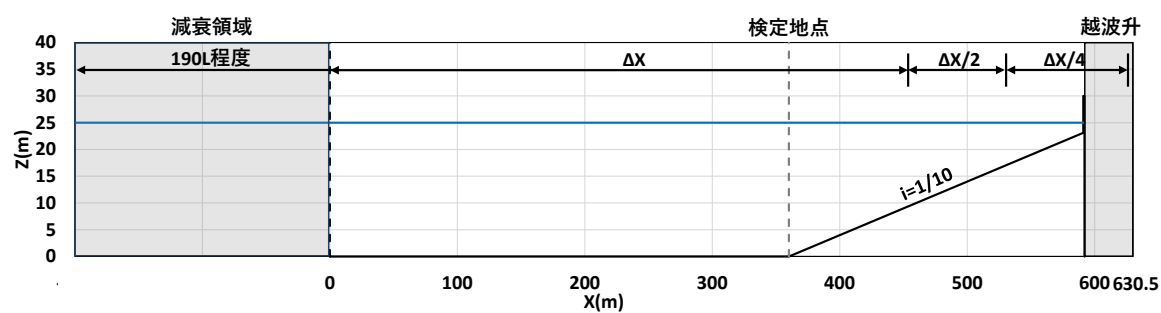


図 5.3-37 計算モデル模式図（ケース B）

【ケース C】 基本ケース

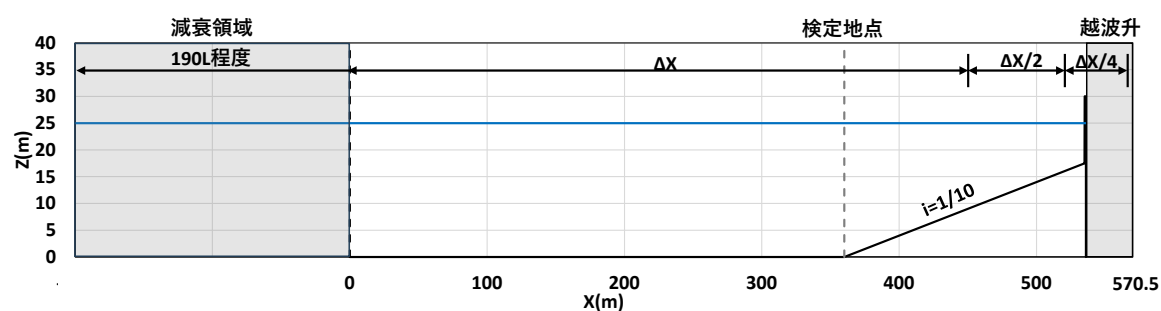


図 5.3-38 計算モデル模式図（ケース C）

【ケース D】 前面水深：深い

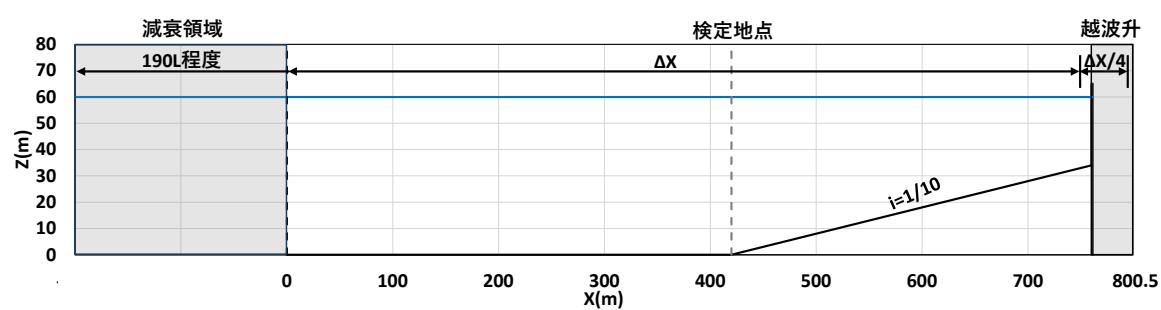


図 5.3-39 計算モデル模式図（ケース D）

【ケース E】 前面水深：深い

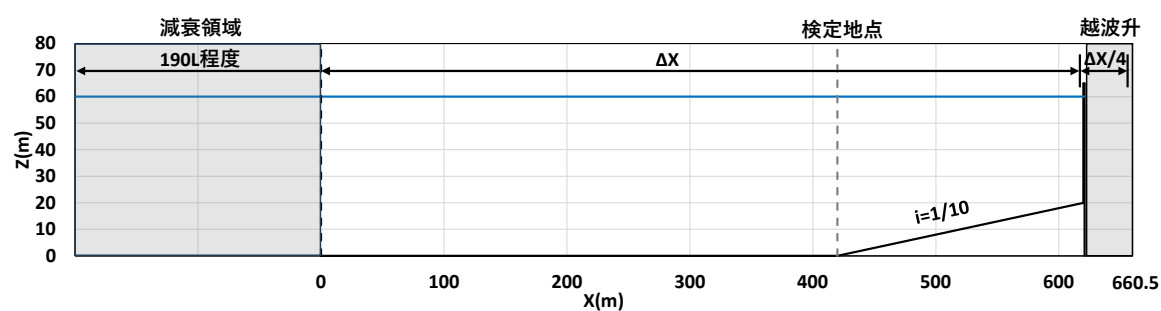


図 5.3-40 計算モデル模式図（ケース E）

【ケース F】 天端高：低い

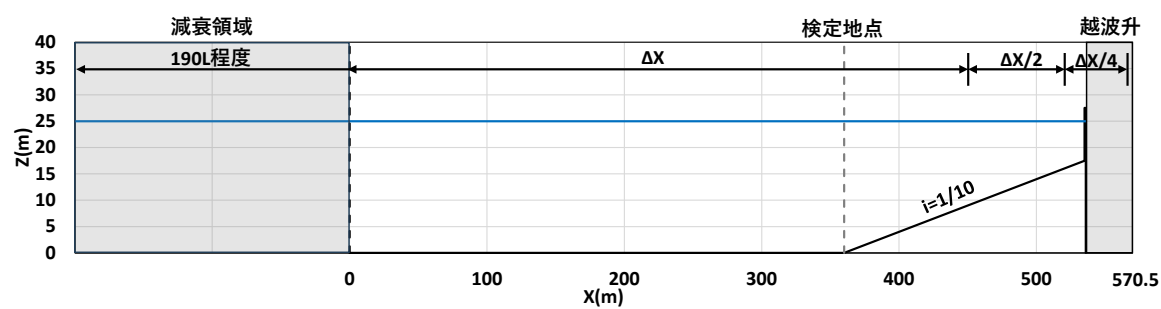


図 5.3-41 計算モデル模式図（ケース F）

【ケース G】 天端高：高い

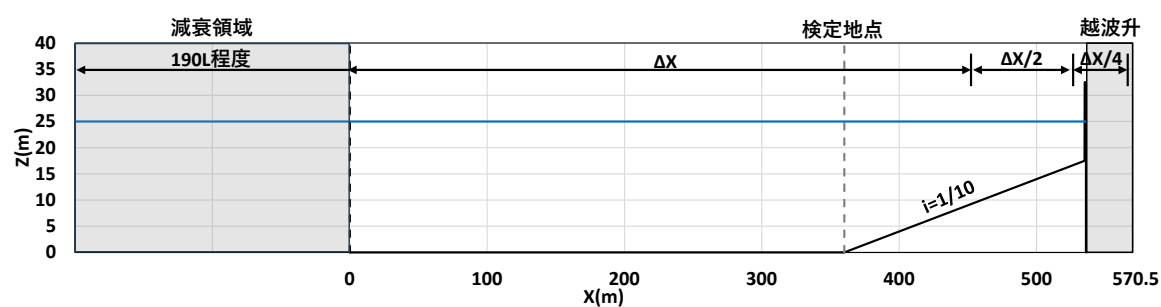


図 5.3-42 計算モデル模式図（ケース G）

【ケース H】 天端高：高い

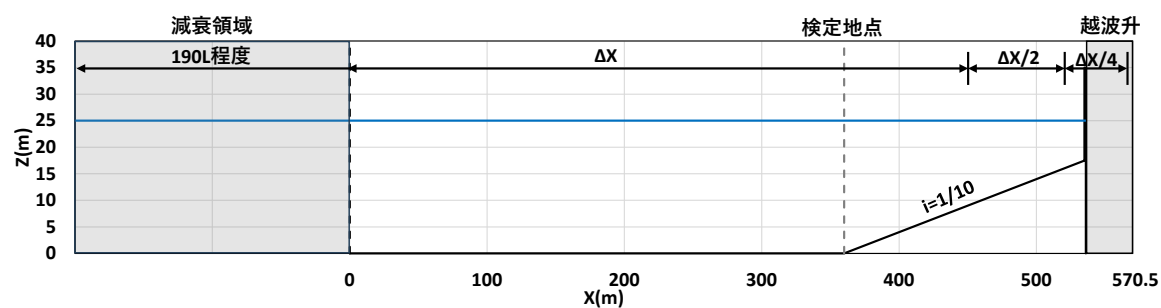


図 5.3-43 計算モデル模式図（ケース H）

(4) 計算パラメータの設定

ケース A～F における計算パラメータは以下の通り設定した．全ケース共通となるパラメータの設定結果を表 5.3-42 に示す．ケース毎に設定の異なるパラメータの設定結果を表 5.3-43～表 5.3-45 に示す．

表 5.3-42 計算パラメーター一覧（全ケース共通項）

項目			内容
検討ケース			全ケース共通
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	625T1/3
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：190L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.6.exeを使用
13	ポーラスの下限值		0.1
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	設定しない（直立壁のため）
		(x,y,z 方向)面積透過率	設定しない（直立壁のため）
		慣性力係数	設定しない（直立壁のため）
		抵抗係数	設定しない（直立壁のため）
16		α_0	設定しない（直立壁のため）
17	D-F則：テトラポット	β_0	設定しない（直立壁のため）
18		$d_r(=V^{1/3})$	設定しない（直立壁のため）
19		α_0	設定しない（直立壁のため）
20	D-F則：マウンド	β_0	設定しない（直立壁のため）
21		$d_r(=V^{1/3})$	設定しない（直立壁のため）
22	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
23	リストファイル出力制御		FILE L/P TIME 0.000 5900.000 100.00 FILE L/P OFF NF FILE L/P OFF F FILE L/P OFF K FILE L/P OFF E FILE L/P OFF VISC FILE L/P OFF BC FILE L/P OFF V FILE L/P OFF P
24	詳細ファイル出力制御		FILE RSL TIME 0.000 5900.000 500.000
25	リスタート制御		なし
27	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブグループ	-
		D-F則	設定しない（直立壁のため）

表 5.3-43 計算パラメーター一覧（ケース A～C）

項目			内容											
検討ケース			A				B				C			
7	物性値等データ		MATE W-LEVEL 24.979				MATE W-LEVEL 24.979				MATE W-LEVEL 24.979			
			MATE DENSITY 1035.0				MATE DENSITY 1035.0				MATE DENSITY 1035.0			
			MATE K-VISC 1.0D-6				MATE K-VISC 1.0D-6				MATE K-VISC 1.0D-6			
			MATE GRAVITY 9.8				MATE GRAVITY 9.8				MATE GRAVITY 9.8			
12	格子間隔の設定		設定領域		格子間隔		設定領域		格子間隔		設定領域		格子間隔	
	水平格子[m]	0.00～450.00m		1.00m		0.00～450.00m		1.00m		0.00～450.00m		1.00m		
		450.00～519.00m		0.50m		450.00～519.00m		0.50m		450.00～519.00m		0.50m		
		519.00～660.00m		0.25m		519.00～630.00m		0.25m		519.00～570.00m		0.25m		
		660.00～660.50m		0.50m		630.00～630.50m		0.50m		570.00～570.50m		0.50m		
	鉛直格子[m]	0.00～ 9.00m		1.00m		0.00～ 9.00m		1.00m		0.00～ 9.00m		1.00m		
		9.00～ 16.00m		0.50m		9.00～ 16.00m		0.50m		9.00～ 16.00m		0.50m		
		16.00～ 37.00m		0.25m		16.00～ 37.00m		0.25m		16.00～ 37.00m		0.25m		
26	時系列ファイル出力制御		FILE TRN TIME 0.000 5900.000 0.500				FILE TRN TIME 0.000 5900.000 0.500				FILE TRN TIME 0.000 5900.000 0.500			
			FILE TRN W-LEVEL ANS SRC				FILE TRN W-LEVEL ANS SRC				FILE TRN W-LEVEL ANS SRC			
			FILE TRN W-LEVEL 394 1				FILE TRN W-LEVEL 394 1				FILE TRN W-LEVEL 394 1			
			FILE TRN W-LEVEL 514 1				FILE TRN W-LEVEL 514 1				FILE TRN W-LEVEL 514 1			
			FILE TRN W-LEVEL 634 1				FILE TRN W-LEVEL 634 1				FILE TRN W-LEVEL 634 1			
			FILE TRN W-LEVEL 754 1				FILE TRN W-LEVEL 754 1				FILE TRN W-LEVEL 754 1			
			FILE TRN W-LEVEL 904 1				FILE TRN W-LEVEL 904 1				FILE TRN W-LEVEL 964 1			
			FILE TRN W-LEVEL 1286 1				FILE TRN W-LEVEL 1170 1				FILE TRN W-LEVEL 1045 1			
			FILE TRN W-LEVEL 1385 1				FILE TRN W-LEVEL 1269 1				FILE TRN W-LEVEL 1110 1			
			FILE TRN W-LEVEL 1465 1				FILE TRN W-LEVEL 1369 1				FILE TRN INT F 1050 1 1 1186 1 106			
			FILE TRN INT F 1390 1 1 1546 1 106				FILE TRN INT F 1274 1 1 1426 1 106							
27	オプション	越波升	DEBUG F-BOX 1390 1 12 1546 1 106				DEBUG F-BOX 1274 1 12 1426 1 106				DEBUG F-BOX 1050 1 12 1186 1 106			

表 5.3-44 計算パラメーター一覧（ケース D～F）

項目			内容											
検討ケース			D				E				F			
7	物性値等データ		MATE W-LEVEL 59.989				MATE W-LEVEL 59.989				MATE W-LEVEL 24.979			
			MATE DENSITY 1035.0				MATE DENSITY 1035.0				MATE DENSITY 1035.0			
			MATE K-VISC 1.0D-6				MATE K-VISC 1.0D-6				MATE K-VISC 1.0D-6			
			MATE GRAVITY 9.8				MATE GRAVITY 9.8				MATE GRAVITY 9.8			
12	格子間隔の設定		設定領域		格子間隔		設定領域		格子間隔		設定領域		格子間隔	
	水平格子[m]	0.00～761.00m		1.00m		0.00～621.00m		1.00m		0.00～450.00m		1.00m		
		761.00～800.00m		0.25m		621.00～660.00m		0.25m		450.00～519.00m		0.50m		
		800.00～800.50m		0.50m		660.00～660.50m		0.50m		519.00～570.00m		0.25m		
		0.00～ 43.00m		1.00m		0.00～ 43.00m		1.00m		570.00～570.50m		0.50m		
	鉛直格子[m]	43.00～ 50.50m		0.50m		43.00～ 50.50m		0.50m		0.00～ 9.00m		1.00m		
		50.50～ 73.00m		0.25m		50.50～ 73.00m		0.25m		9.00～ 16.00m		0.50m		
										16.00～ 37.00m		0.25m		
26	時系列ファイル出力制御		FILE TRN TIME 0.000 5900.000 0.500				FILE TRN TIME 0.000 5900.000 0.500				FILE TRN TIME 0.000 5900.000 0.500			
			FILE TRN W-LEVEL ANS SRC				FILE TRN W-LEVEL ANS SRC				FILE TRN W-LEVEL ANS SRC			
			FILE TRN W-LEVEL 403 1				FILE TRN W-LEVEL 404 1				FILE TRN W-LEVEL 394 1			
			FILE TRN W-LEVEL 543 1				FILE TRN W-LEVEL 544 1				FILE TRN W-LEVEL 514 1			
			FILE TRN W-LEVEL 683 1				FILE TRN W-LEVEL 684 1				FILE TRN W-LEVEL 634 1			
			FILE TRN W-LEVEL 823 1				FILE TRN W-LEVEL 824 1				FILE TRN W-LEVEL 754 1			
			FILE TRN W-LEVEL 963 1				FILE TRN W-LEVEL 964 1				FILE TRN W-LEVEL 964 1			
			FILE TRN W-LEVEL 1103 1				FILE TRN W-LEVEL 999 1				FILE TRN W-LEVEL 1045 1			
			FILE TRN W-LEVEL 1138 1				FILE TRN W-LEVEL 1023 1				FILE TRN W-LEVEL 1110 1			
			FILE TRN W-LEVEL 1162 1				FILE TRN W-LEVEL 1102 1				FILE TRN INT F 1050 1 1 1186 1 106			
			FILE TRN W-LEVEL 1240 1				FILE TRN INT F 1025 1 1 1181 1 147							
			FILE TRN INT F 1164 1 1 1320 1 147											
27	オプション	越波升	DEBUG F-BOX 1164 1 31 1320 1 147				DEBUG F-BOX 1025 1 31 1181 1 147				DEBUG F-BOX 1050 1 12 1186 1 106			

表 5.3-45 計算パラメーター一覧（ケース G～H）

項目			内容			
検討ケース			G		H	
7	物性値等データ		MATE W-LEVEL	24.979	MATE W-LEVEL	24.979
			MATE DENSITY	1035.0	MATE DENSITY	1035.0
			MATE K-VISC	1.0D-6	MATE K-VISC	1.0D-6
			MATE GRAVITY	9.8	MATE GRAVITY	9.8
12	格子間隔の設定		設定領域	格子間隔	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]		0.00～450.00m	1.00m	0.00～450.00m	1.00m
			450.00～519.00m	0.50m	450.00～519.00m	0.50m
			519.00～570.00m	0.25m	519.00～570.00m	0.25m
			570.00～570.50m	0.50m	570.00～570.50m	0.50m
	鉛直格子[m]		0.00～ 9.00m	1.00m	0.00～ 9.00m	1.00m
			9.00～ 16.00m	0.50m	9.00～ 16.00m	0.50m
			16.00～ 37.00m	0.25m	16.00～ 37.00m	0.25m
26	時系列ファイル出力制御		FILE TRN TIME	0.000 5900.000 0.500	FILE TRN TIME	0.000 5900.000 0.500
			FILE TRN W-LEVEL ANS SRC		FILE TRN W-LEVEL ANS SRC	
			FILE TRN W-LEVEL	394 1	FILE TRN W-LEVEL	394 1
			FILE TRN W-LEVEL	514 1	FILE TRN W-LEVEL	514 1
			FILE TRN W-LEVEL	634 1	FILE TRN W-LEVEL	634 1
			FILE TRN W-LEVEL	754 1	FILE TRN W-LEVEL	754 1
			FILE TRN W-LEVEL	964 1	FILE TRN W-LEVEL	964 1
			FILE TRN W-LEVEL	1045 1	FILE TRN W-LEVEL	1045 1
			FILE TRN W-LEVEL	1110 1	FILE TRN W-LEVEL	1110 1
			FILE TRN INT F	1050 1 1 1186 1 106	FILE TRN INT F	1050 1 1 1186 1 106
27	オプション	越波升	DEBUG F-BOX	1050 1 12 1186 1 106	DEBUG F-BOX	1050 1 12 1186 1 106

(5) 作用波の検定

水深 25m 地点から波浪を入射するケース（A～C, F～H）と、水深 60m から波浪を入射するケース（D, E）について、一定水深の水槽を用いて入射波検定を行った。検定地点は、斜面の法先位置である造波ソースからの距離 $3L$ の地点に設定した。

入射波検定は 2 回実施し、2 回目は 1 回目の入射波検定結果をもとに、入射波を補正したものをを用いた。越波計算においては、2 回目の入射波浪を採用した。入射波検定結果を表 5.3-46 及び表 5.3-47 に、検定結果の周波数スペクトルを図 5.3-44 に示す。

表 5.3-46 入射水深 25m のケースの入射波検定結果

	目標値	1 回目	2 回目
有義波高	4.57m	4.35m(95.2%)	4.45m(97.4%)
有義波周期	9.44s	9.75s(103.3%)	9.81s(103.9%)

表 5.3-47 入射水深 60m のケースの入射波検定結果

	目標値	1 回目	2 回目
有義波高	4.91m	4.65m(94.7%)	4.65m(94.7%)
有義波周期	9.44s	10.00s(105.9%)	9.33s(98.8%)

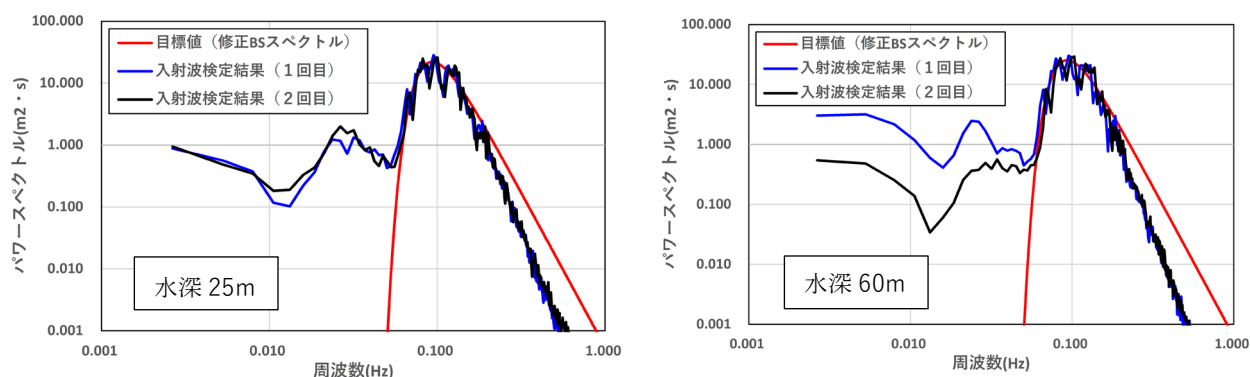


図 5.3-44 入射波のスペクトル

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

構造物モデルは表 5.3-40 及び図 5.3-36～図 5.3-43 に示す通り設定した。

② 水位・越波量モニタリング位置の設定

水位のモニタリング位置は図 5.3-36～図 5.3-43 に示す検定地点とした。越波流量は護岸背後に設けた越波升より算出した。

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

越波計算結果のまとめを図 5.3-45 及び表 5.3-50～表 5.3-52 に示す。平均水位の低下（後述）や計算の不安定性が確認されたケースもあるが、算出された越波流量は、港湾基準に示される越波流量の推定値に対する真値の想定範囲内であるため、計算結果は概ね妥当であるとする。

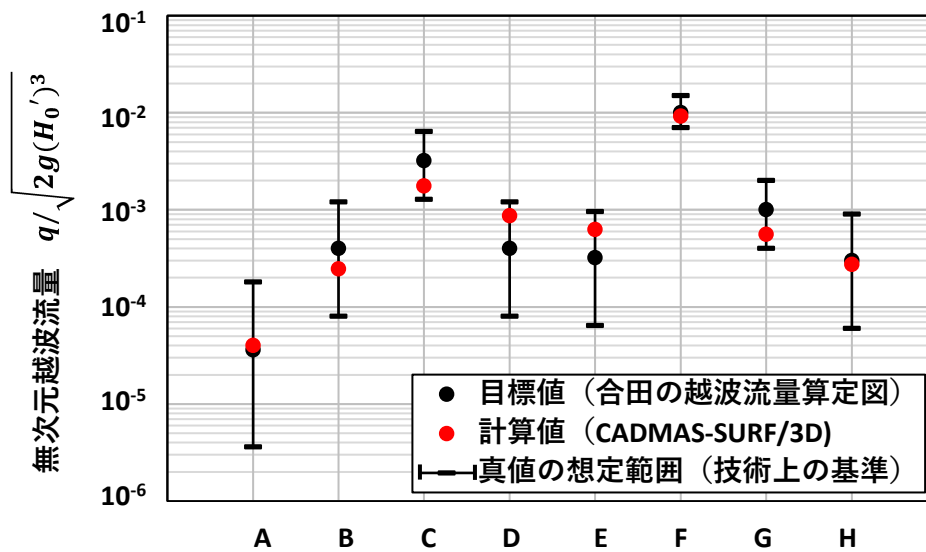


図 5.3-45 越波計算結果のまとめ

表 5.3-48 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲²⁾

$q / \sqrt{2g(H_0')^3}$	直立護岸	消波護岸
10^{-2}	0.7～1.5 倍	0.5～2 倍
10^{-3}	0.4～2 倍	0.2～3 倍
10^{-4}	0.2～3 倍	0.1～5 倍
10^{-5}	0.1～5 倍	0.05～10 倍

表 5.3-49 本検討における計算機環境

項目	内容
OS	Rocky Linux 8.6 (Green Obsidian)
CPU	AMD EPYC 9654 96-Core Processor×2
コンパイラ	インテル® oneAPI ベース & HPC ツールキット
並列数	8core

表 5.3-50 解析条件及び解析結果のまとめ（ケース A～C）

項目			前面水深：浅い	前面水深：浅い	基本ケース
検討ケース			A	B	C
領域区分			Post Breaking $h < 0$	Post Breaking $h > 0$	Breaking
海底勾配	i		1/10	1/10	1/10
波形勾配	$H0'/L0$		0.036	0.036	0.036
相対天端高	$hc/H0'$		1.0	1.0	1.0
水深波高比	$h/H0'$	(m)	-0.2	0.4	1.5
換算沖波波高	$H0'$	(m)	5.00	5.00	5.00
沖波の周期	$T0$	(s)	9.44	9.44	9.44
沖波の波長	$L0$	(m)	138.9	138.9	138.9
造波水深	h	(m)	25.00	25.00	25.00
造波水深における 目標有義波高	$H1/3$	(m)	4.57	4.57	4.57
造波水深における 目標有義波周期	$T1/3$	(s)	9.44	9.44	9.44
造波水深hにおける波長	L	(m)	120.0	120.0	120.0
護岸前面水深	h'	(m)	-1.0	1.9	7.5
天端高	hc	(m)	5.0	5.0	5.0
護岸天端幅	B	(m)	1.0	1.0	1.0
越波流量（合田の図）	q	(m ³ /m/s)	0.0018	0.0200	0.1600
$q/\sqrt{2g(H0')^3}$			0.00004	0.00040	0.00323
越波流量（CADMAS）			0.002	0.0123	0.0876
越波流量の比			1.11	0.62	0.55
越波解析波数		(波)	240	600	600
x方向計算格子数			1546	1426	1186
z方向計算格子数			106	106	106
総計算格子数			163,876	151,156	125,716
計算の不安定性			不安定	不安定	安定
計算終了時刻	TEND	(s)	1884.5	5900.0	5900.0
計算所用時間		(hour)	6.3	19.9	11.1
計算領域	水平格子	(m)	0.00～660.50	0.00～630.50	0.00～570.50
	鉛直格子	(m)	0.00～37.00	0.00～37.00	0.00～37.00
構造物位置		(m)	620.00	591.00	535.00
減衰帯	沖側		190L程度	190L程度	190L程度
	岸側		なし(越波升)	なし(越波升)	なし(越波升)

検討ケースの要点（基本ケースとの違い）、

数値実験の都合上、変更した項目

表 5.3-51 解析条件及び解析結果のまとめ（ケース D～F）

項目			前面水深：深い	前面水深：深い	天端高：低い
検討ケース			D	E	F
領域区分			Shoaling	Deep Sea	Breaking
海底勾配	i		1/10	1/10	1/10
波形勾配	$H0'/L0$		0.036	0.036	0.036
相対天端高	$hc/H0'$		1.0	1.0	0.5
水深波高比	$h/H0'$	(m)	5.2	8.0	1.5
換算沖波波高	$H0'$	(m)	5.00	5.00	5.00
沖波の周期	$T0$	(s)	9.44	9.44	9.44
沖波の波長	$L0$	(m)	138.9	138.9	138.9
造波水深	h	(m)	60.00	60.00	25.00
造波水深における 目標有義波高	$H1/3$	(m)	4.91	4.91	4.57
造波水深における 目標有義波周期	$T1/3$	(s)	9.44	9.44	9.44
造波水深hにおける波長	L	(m)	137.7	137.7	120.0
護岸前面水深	h'	(m)	26.0	40.0	7.5
天端高	hc	(m)	5.0	5.0	2.5
護岸天端幅	B	(m)	1.0	1.0	1.0
越波流量（合田の図）	q	(m ³ /m/s)	0.0200	0.0160	0.5000
$q/\sqrt{2g(H0')^3}$			0.00040	0.00032	0.01010
越波流量（CADMAS）			0.0433	0.0312	0.4582
越波流量の比			2.17	1.95	0.92
越波解析波数		(波)	600	600	600
x方向計算格子数			1320	1181	1186
z方向計算格子数			147	147	106
総計算格子数			194,040	173,607	125,716
計算の不安定性			不安定	不安定	安定
計算終了時刻	TEND	(s)	5900.0	5900.0	5900.0
計算所用時間		(hour)	24.0	26.7	14.5
計算領域	水平格子	(m)	0.00～800.50	0.00～660.50	0.00～570.50
	鉛直格子	(m)	0.00～73.00	0.00～73.00	0.00～37.00
構造物位置		(m)	760.00	620.00	535.00
減衰帯	沖側		190L程度	190L程度	190L程度
	岸側		なし(越波升)	なし(越波升)	なし(越波升)

検討ケースの要点（基本ケースとの違い）、

数値実験の都合上、変更した項目

表 5.3-52 解析条件及び解析結果のまとめ（ケース G～H）

項目			天端高：高い	天端高：高い
検討ケース			G	H
領域区分			Breaking	Breaking
海底勾配	i		1/10	1/10
波形勾配	H0' / L0		0.036	0.036
相対天端高	hc/H0'		1.5	2.0
水深波高比	h/H0'	(m)	1.5	1.5
換算沖波波高	H0'	(m)	5.00	5.00
沖波の周期	T0	(s)	9.44	9.44
沖波の波長	L0	(m)	138.9	138.9
造波水深	h	(m)	25.00	25.00
造波水深における 目標有義波高	H1/3	(m)	4.57	4.57
造波水深における 目標有義波周期	T1/3	(s)	9.44	9.44
造波水深hにおける波長	L	(m)	120.0	120.0
護岸前面水深	h'	(m)	7.5	7.5
天端高	hc	(m)	7.5	10.0
護岸天端幅	B	(m)	1.0	1.0
越波流量（合田の図）	q	(m ³ /m/s)	0.0500	0.0150
$q/\sqrt{2g(H0')^3}$			0.00101	0.00030
越波流量（CADMAS）			0.0278	0.0137
越波流量の比			0.56	0.91
越波解析波数		(波)	600	600
x方向計算格子数			1186	1186
z方向計算格子数			106	106
総計算格子数			125,716	125,716
計算の不安定性			安定	安定
計算終了時刻	TEND	(s)	5900.0	5900.0
計算所用時間		(hour)	10.6	10.9
計算領域	水平格子	(m)	0.00～570.50	0.00～570.50
	鉛直格子	(m)	0.00～37.00	0.00～37.00
構造物位置		(m)	535.00	535.00
減衰帯	沖側		190L程度	190L程度
	岸側		なし(越波升)	なし(越波升)

検討ケースの要点（基本ケースとの違い），

数値実験の都合上，変更した項目

② 解析結果の分析

ケース A～H の計算結果に共通する傾向を整理した．代表例として，基本ケースであるケース C の計算結果を示す．

越波流量の算定結果より，下記の傾向が確認できた．

【越波流量算定結果の傾向】

- ・ 計算開始時は越波流量が多く，計算が進むにつれて減少していく傾向が確認できた．
 - ・ 入射波検定計算及び越波流量算定計算における $X=360\text{m}$ 地点（波長 $L \times 3$ 地点）の平均水位を確認すると，徐々に水位が下がっていることが確認できた．水位が下がる原因として，CS2D で行っていた総水量の補正を CS3D では行っていないことが影響している可能性が考えられる※．
- ※：今後，総水量補正スキームを追加・改良予定．

表 5.3-53 計算条件及び計算結果のまとめ（ケース C）

項目			基本ケース
検討ケース			C
領域区分			Breaking
海底勾配	i		1/10
波形勾配	$H0'/L0$		0.036
相対天端高	$hc/H0'$		1.0
水深波高比	$h/H0'$	(m)	1.5
換算沖波波高	$H0'$	(m)	5.00
沖波の周期	$T0$	(s)	9.44
沖波の波長	$L0$	(m)	138.9
造波水深	h	(m)	25.00
造波水深における 目標有義波高	$H1/3$	(m)	4.57
造波水深における 目標有義周期	$T1/3$	(s)	9.44
造波水深 h における波長	L	(m)	120.0
護岸前面水深	h'	(m)	7.5
天端高	hc	(m)	5.0
護岸天端幅	B	(m)	1.0
越波流量（合田の図）	q	($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$)	0.1600
$q/\sqrt{2g(H0')^3}$			0.00323
越波流量（CADMAS）			0.0876
越波流量の比			0.55
越波解析波数		(波)	600
x方向計算格子数			1186
z方向計算格子数			106
総計算格子数			125,716
計算の不安定性			安定
計算終了時刻	TEND	(s)	5900.0
計算所用時間		(hour)	11.1
計算領域	水平格子	(m)	0.00～570.50
	鉛直格子	(m)	0.00～37.00
構造物位置		(m)	535.00
減衰帯	沖側		190L程度
	岸側		なし(越波升)

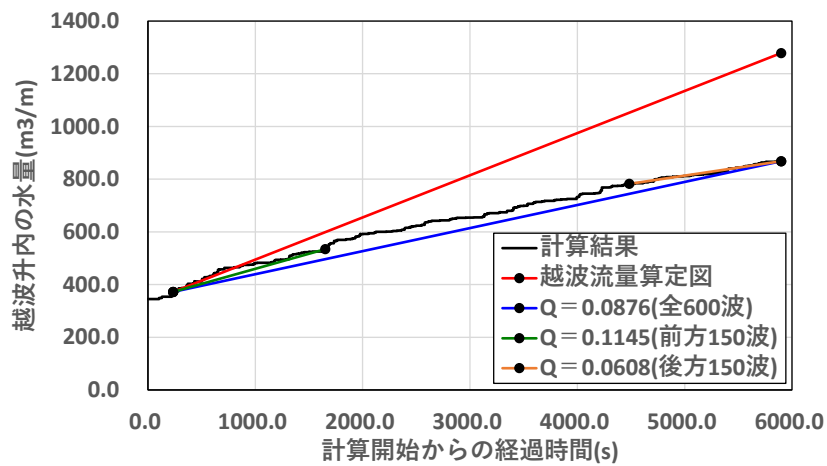


図 5.3-46 越波流量算定結果 ケース C

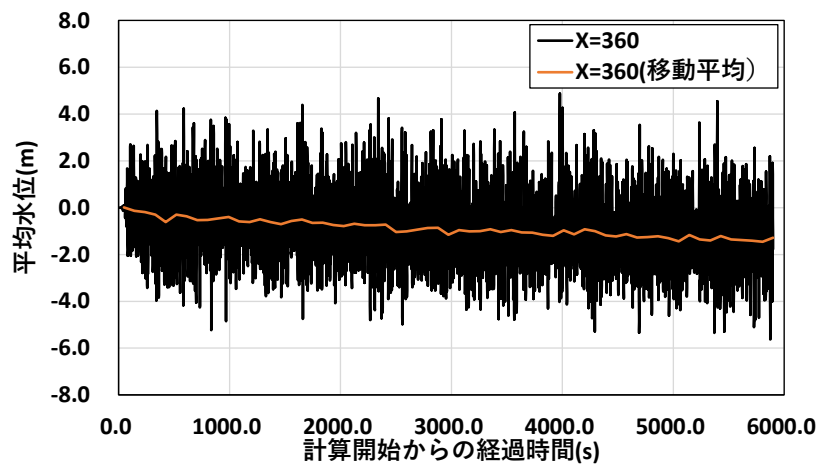


図 5.3-47 越波流量算定計算における $X=360\text{m}$ 地点の平均水位 ケース C

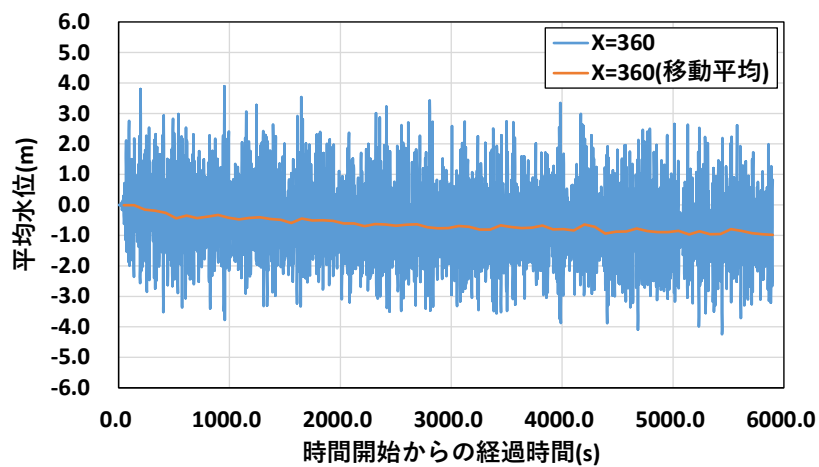


図 5.3-48 入射波検定計算における $X=360\text{m}$ 地点の平均水位 ケース C

5.3.8 計算事例 8〔株〕エコー

(1) 計算ケース

『標準メッシュ』を用いて、計算領域を設定し、合田の越波流量算定図との比較を行った。本検討では、直立護岸、海底勾配 1/30、波形勾配 $H_0'/L_0=0.12$ の図表（図 5.3-49 参照）との比較を行うものとした。また、以下の観点から、CS3D に用いる波浪条件、構造条件を設定した。

- ・ 実務で用いられることの多い、越波流量 $q=0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 付近となる条件。
 - ・ 入射波の非線形性が『標準メッシュ』に与える影響を考察できるように h/H_0' が広く分布する条件
- 波浪条件の目標値及び構造条件を表 5.3-54 に、目標波浪に対する越波流量算定図の読み値を図 5.3-49 示す。

表 5.3-54 波浪条件の目標値及び構造条件

case	与条件					目標値		構造条件	
	H_0'/L_0	h/H_0'	hc/H_0'	q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	H_0' (m)	T_0 (s)	h (m)	hc (m)
case1	0.012	1.05	0.55	0.02	$8.00\text{E}-03$	0.68	6.0	0.70	0.40
case2	0.012	1.30	1.50	0.02	$1.00\text{E}-03$	2.73	12.1	3.60	4.10
case3	0.012	2.30	1.75	0.02	$2.00\text{E}-03$	1.72	9.6	4.00	3.00
case4	0.012	3.70	0.75	0.02	$3.50\text{E}-03$	1.19	8.0	4.40	0.90

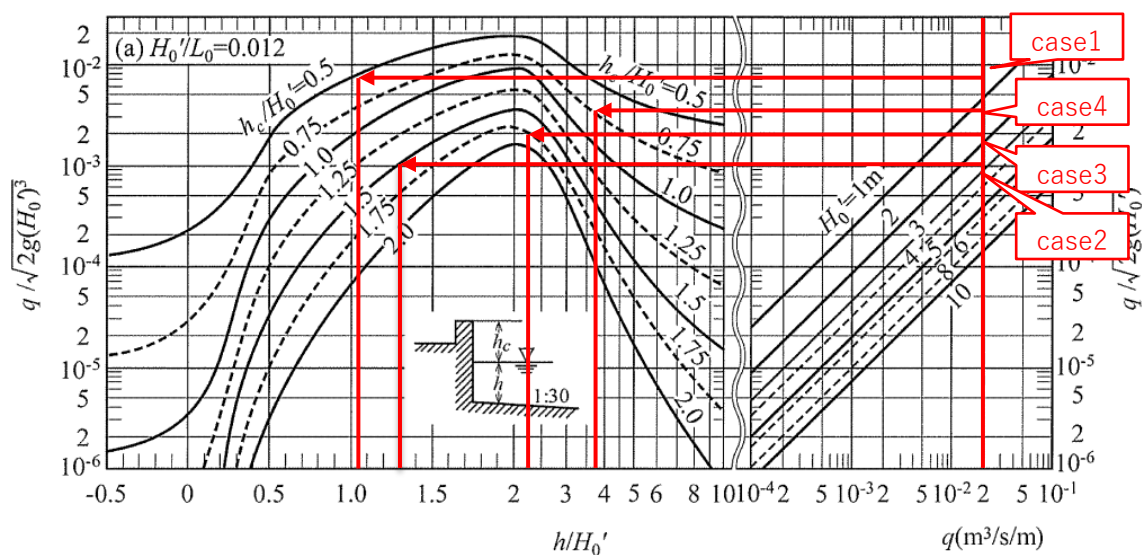


図 5.3-49 波浪条件の目標値に対する越波流量の算定図読み値

設定した波浪諸元の目標値から入射波諸元及び解析時間を表 5.3-55 に示すように設定した。

造波位置での波浪諸元は、以下のように設定した。

- i) 造波位置の水深は、安定した造波ができるように $5H'_0$ 以上となる値を設定する。
- ii) 目標とした換算沖波波高 H'_0 、周期 T_0 及び造波位置の水深 h から、入射位置の浅水係数 K_s を算出する。
- iii) 換算沖波波高 H'_0 に求めた K_s を乗じ、その波高を入射波高として設定する。

また、本検討では、各ケース 150 波程度の 1 波群を対象として解析を行うものとし、設定した条件から、150 波程度の波を解析できるように計算時間を設定した。

表 5.3-55 入射波諸元及び解析時間

case	目標値		造波位置での諸元						計算時間	
	H'_0 (m)	T_0 (s)	h (=5H程度) (m)	h/H'_0	h/L_0	K_s	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	計測開始 (s)	計測終了 (s)
case1	0.68	6.00	4.0	5.86	0.070	0.97	0.66	6.00	130.0	1030.0
case2	2.73	12.10	14.0	5.12	0.061	0.99	2.70	12.10	220.0	2035.0
case3	1.72	9.60	9.0	5.23	0.063	0.99	1.70	9.60	170.0	1610.0
case4	1.19	8.00	10.0	8.44	0.101	0.93	1.11	8.00	170.0	1370.0

(2) 数値波動水槽モデル

図 5.3-50～図 5.3-53 に解析モデル図を示す。格子の大きさは、『標準メッシュ』をもとに設定した。いずれのケースにおいても、『標準メッシュ』の水平幅を 1/2, 1/4 とする閾値には、標準値である表 5.3-56 の値を用いた。なお、構造物の天端と z 方向の格子位置が一致しない場合には、一致するように構造物天端付近の数格子で調整を行っている。解析領域全体で越波による水量の減少を小さくするために減衰帯の幅は 100L 程度を設定した。直立壁の幅は、いずれのケースにおいても 1.0m とし、背後の越波枡の幅は 5m 程度とした。

表 5.3-56 格子幅を 1/2, 1/4 にする際の閾値

項目	入力値	備考
■水平幅を1/2とする h/L_0 のしきい値	0.05	標準0.05 ($h/L_0 < 0.05$ で $\Delta x/2$)
■水平幅を1/2とする h/H のしきい値	3.5	標準3.5 ($h/H < 3.5$ で $\Delta x/2$)
■水平幅を1/4とする h/H のしきい値	2	標準2.0 ($h/H < 2$ で $\Delta x/4$)

(3) モデル化された海底地形の設定

海底地形は一様勾配とし、比較を行う越波流量算定図と同様の 1/30 の勾配とした（図 5.3-50～図 5.3-53 参照）。

(4) 計算パラメータの設定

各ケースの計算パラメータは、表 5.3-57～表 5.3-60 に示すように設定した。

表 5.3-57 case1 計算パラメータの設定値

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	1030s
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：100L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.8.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	-3342.2747～0.0m	等比級数で格子幅を設定
		0.0～96.0m	0.80m
		96.0～140.0m	0.40m
		140.0～165.0m	0.20m
	鉛直格子[m]	0.0～1.6m	0.80m
		1.6～2.8m	0.40m
		2.8～8.0m	0.20m
13	ポーラスの下限值		1.00E-04
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	-
		(x,y,z方向)面積透過率	-
		慣性力係数	-
		抵抗係数	-
16	D-F則：テトラポッド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
16	D-F則：マウンド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブグループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 607 1 3 633 1 30 0.000
		D-F則	-

時系列データの記載事例											
FILE TRN	W-LEVEL	276	1	# 造波位置							
FILE TRN	W-LEVEL	351	1	# 斜面開始位置							
FILE TRN	W-LEVEL	600	1	# 斜面終了位置							
FILE TRN	INT F	607	1	1	633	1	30	# 越波升			
FILE TRN	TOTALFLOW-X	607	1	13	607	1	30	# 流量の時間積分値			

表 5.3-58 case2 計算パラメータの設定値

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	2035.0s
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：100L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.8.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
		水平格子[m]	-12369.459～0.0m
			0.0～278.0m
			278.0～458.0m
			458.0～519.0m
	鉛直格子[m]	0.0～4.0m	2.00m
		4.0～9.0m	1.00m
		9.0～29.0m	0.50m
13	ポーラスの下限值		1.00E-04
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	-
		(x,y,z方向)面積透過率	-
		慣性力係数	-
		抵抗係数	-
16	D-F則：テトラポッド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
16	D-F則：マウンド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブグループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 734 1 5 744 1 46 0.000
		D-F則	-

時系列データの記載事例									
FILE TRN	W-LEVEL	305	1	#	造波位置				
FILE TRN	W-LEVEL	405	1	#	斜面開始位置				
FILE TRN	W-LEVEL	732	1	#	斜面終了位置				
FILE TRN	INT F	734	1	1	744	1	46	#	越波升
FILE TRN	TOTALFLOW-X	734	1	1	734	1	46	#	流量の時間積分値

表 5.3-59 case3 計算パラメータの設定値

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	1610.0s
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：100L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.8.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
		水平格子[m]	-7866.5273～0.0m
			0.0～185.0m
			185.0～280.0m
			280.0～286.5m
	鉛直格子[m]	0.0～2.0m	1.00m
		2.5～6.0m	0.50m
		6.0～20.0m	0.25m
13	ボーラスの下限值		1.00E-04
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ボーラスメディア法	空隙率	-
		(x,y,z方向)面積透過率	-
		慣性力係数	-
		抵抗係数	-
16	D-F則：テトラポッド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
16	D-F則：マウンド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブグループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 700 1 10 720 1 57 0.000
		D-F則	-

時系列データの記載事例									
FILE TRN	W-LEVEL	321	1	#	造波位置				
FILE TRN	W-LEVEL	451	1	#	斜面開始				
FILE TRN	W-LEVEL	696	1	#	斜面終了				
FILE TRN	INT F	700	1	1	720	1	57	#	越波升
FILE TRN	TOTALFLOW-X	700	1	1	700	1	57	#	流量の時間積分値

表 5.3-60 case4 計算パラメータの設定値

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	1370.0s
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：100L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.8.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	-7866.5273～0.0m	等比級数で格子幅を設定
		0.0～261.0m	1.00m
		261.0～278.5m	0.50m
		278.5～284.5m	0.25m
	鉛直格子[m]	0.0～5.0m	1.00m
		5.0～20.0m	0.50m
13	ポーラスの下限值		1.00E-04
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	-
		(x,y,z方向)面積透過率	-
		慣性力係数	-
		抵抗係数	-
16	D-F則：テトラポッド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
16	D-F則：マウンド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブループ	-
		越波升	DEBUG F-BOX 606 1 3 627 1 34 0.000
		D-F則	-

時系列データの記載事例						
FILE TRN	W-LEVEL	309	1	#	造波位置	
FILE TRN	W-LEVEL	419	1	#	斜面開始	
FILE TRN	W-LEVEL	604	1	#	斜面終了	
FILE TRN	INT F	606	1	1	627	1 34 # 越波升
FILE TRN	TOTALFLOW-X	606	1	1	606	1 34 # 流量の時間積分値

(5) 作用波の検定

計算領域に表 5.3-55 で設定した波を入射させ、入射波検定を行った。検定の際には、計算領域の岸側に減衰帯を設定し、構造物がない状態で計算を行った。また、検定には、斜面法先（一様水深部）の波高計を用いた。

入射波検定の結果を表 5.3-61 に、case1 の水位変動の計測結果を図 5.3-54 に示す。表 5.3-61 より、概ね目標の波高程度となることを確認した。また、図 5.3-54 のように他のケースにおいても、異常な水位変動が起こらないことを確認した。

以降の検討では、入射波検定の結果を用いて算定した値（換算沖波波高及び周期）を用いて、整理を行った。

表 5.3-61 入射波検定の結果

case	目標値				一様水深（斜面開始位置）					
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	H_0' (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	h (m)	K_s	H_0' (m)	$T_{1/3}$ (s)
case1	0.66	6.00	0.68	6.00	0.66	6.16	4.0	0.98	0.67	6.16
case2	2.70	12.10	2.73	12.10	2.69	12.40	14.0	1.00	2.70	12.40
case3	1.70	9.60	1.72	9.60	1.69	9.79	9.0	0.99	1.72	9.79
case4	1.11	8.00	1.19	8.00	1.08	8.12	10.0	0.94	1.18	8.12

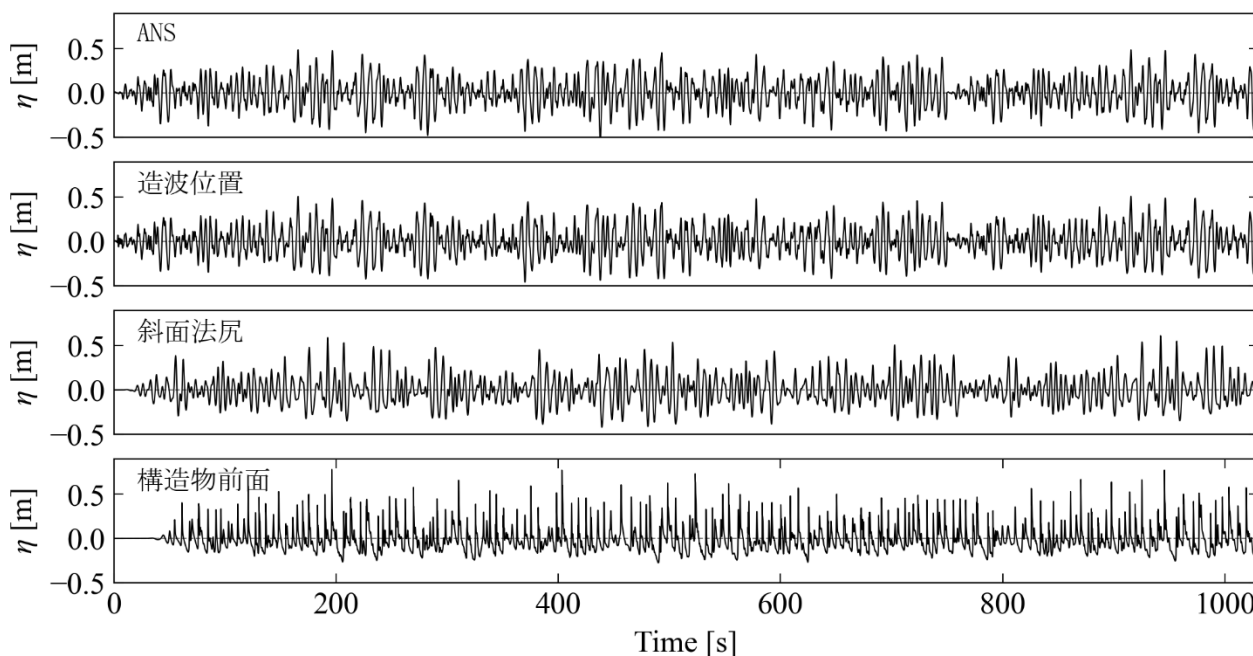


図 5.3-54 水位変動の計測結果（case1）

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

構造物は、斜面の法肩に設置し、天端幅は一律で 1.0m とした。例として case1 の構造物配置図を図 5.3-55 に示す。

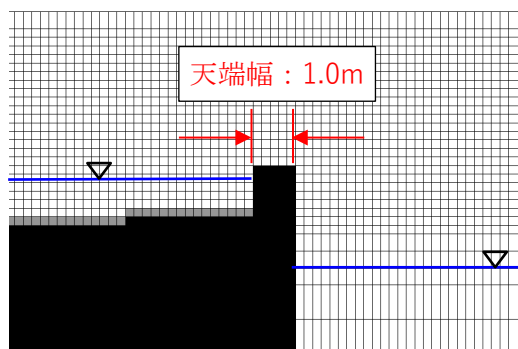


図 5.3-55 case1 構造物配置図

② 水位・越波量モニタリング位置の設定

水位の計測は、造波位置、斜面の法尻及び構造物前面で行った。越波流量のモニタリング位置は、構造物背後に設定した。越波流量の計測においては、計測方法による違いを確認するために、流量の時間積分値及び VOF 値を計測している。例として、case1 のモニタリング位置を図 5.3-56 に示す。

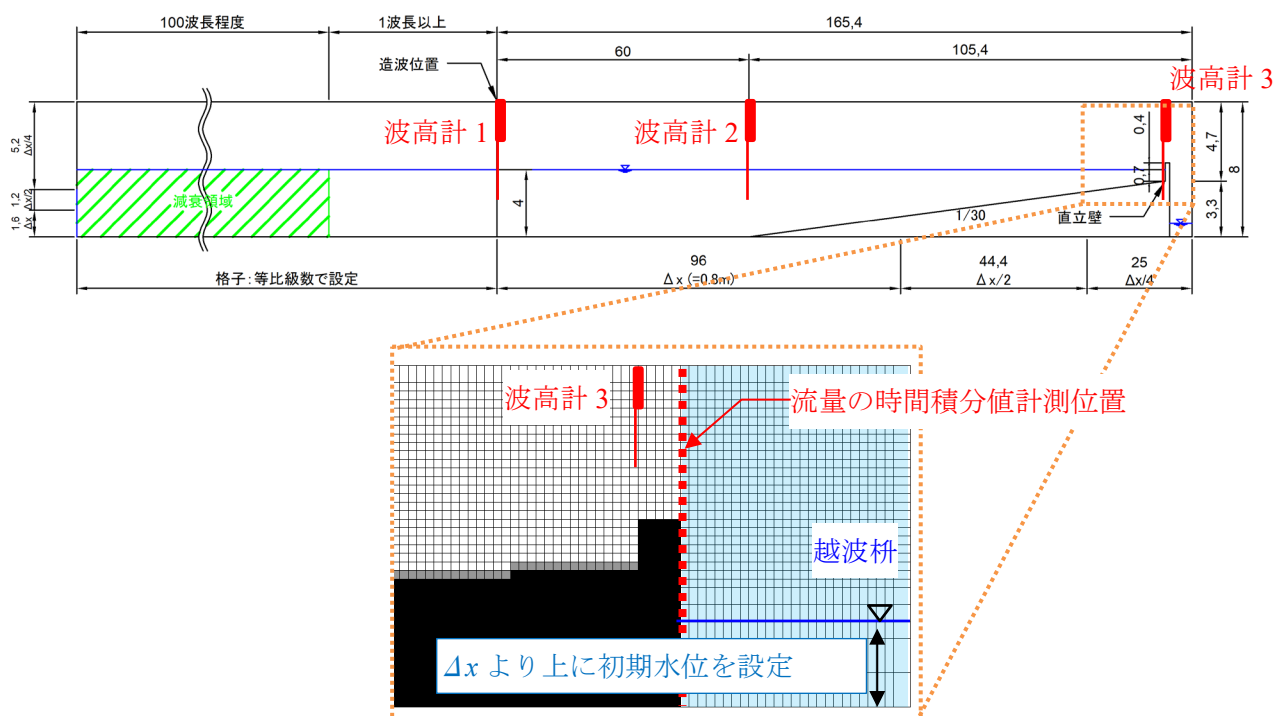


図 5.3-56 case1 モニタリング位置

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

各ケースの VOF 値による計測結果 (INT F) 及び流量の積分値による計測結果 (TOTAL FLOW) の時系列を図 5.3-57～図 5.3-60 に示す。図 5.3-57～図 5.3-60 には、累積越波流量 (流量の積分値による計測) のステップごとの差分値を越波流量として黒線で示している。また、CS3D による越波流量の算定結果を表 5.3-62 に示す。

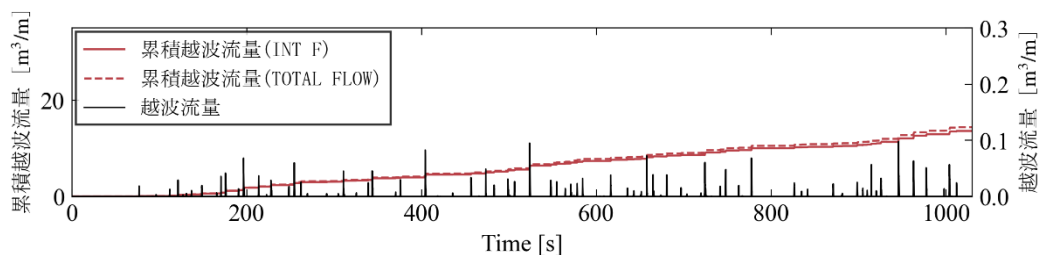


図 5.3-57 越波流量の計測結果 (case1)

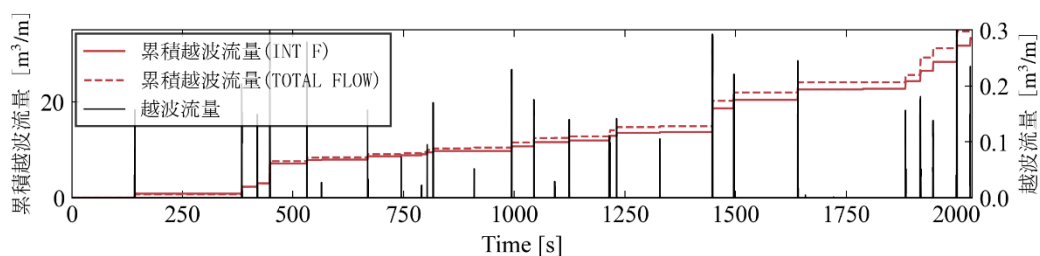


図 5.3-58 越波流量の計測結果 (case2)

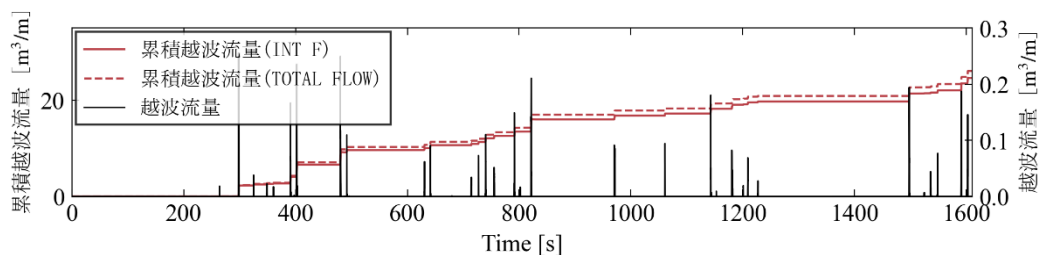


図 5.3-59 越波流量の計測結果 (case3)

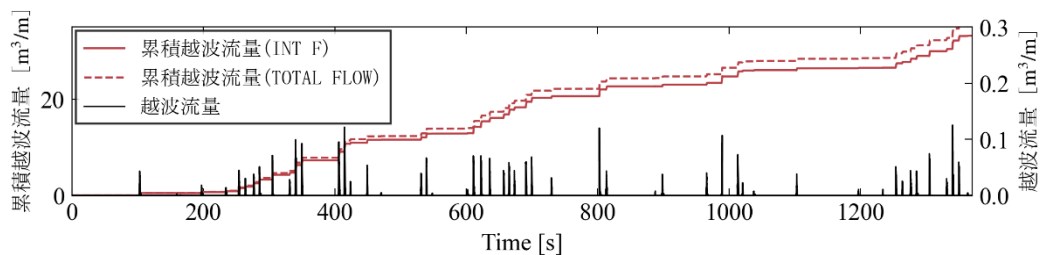


図 5.3-60 越波流量の計測結果 (case4)

表 5.3-62 越波流量の算定結果

case	波浪条件			構造条件				CADMAS結果		算定図		算定図との差
	H_0' (m)	$T_{1/3}$ (s)	H_0'/L_0	h (m)	hc (m)	h/H_0'	hc/H_0'	$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	q ($m^3/s/m$)	$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	q ($m^3/s/m$)	$q_{cadmas}-q_{算定図}$ ($m^3/s/m$)
case1	0.67	6.16	0.011	0.70	0.40	1.04	0.60	6.45E-03	1.57E-02	7.08E-03	1.72E-02	-1.53E-03
case2	2.7	12.4	0.011	3.60	4.10	1.33	1.52	9.98E-04	1.96E-02	1.09E-03	2.14E-02	-1.78E-03
case3	1.72	9.79	0.012	4.00	3.00	2.33	1.74	1.81E-03	1.81E-02	2.13E-03	2.13E-02	-3.22E-03
case4	1.18	8.12	0.011	4.40	0.90	3.73	0.76	5.15E-03	2.93E-02	3.35E-03	1.90E-02	1.03E-02

② 解析結果の分析

『標準メッシュ』を用いる際には、水深の大きい地点の格子が大きくなる。これが、越波流量の計測に与える影響を評価する目的で、越波桁の初期水位を低くした場合（表 5.3-62 参照）の計算を別途行った。その結果を表 5.3-63 及び図 5.3-62 に F 値(2)として示している。

表 5.3-63 より、CS3D による越波流量は、流量の積分値 $>F$ 値 $\geq F$ 値(2)となっており、初期水位及び計測方法によって計測結果が異なることが確認された。この要因としては、初期水位周辺の格子サイズが粗いときには、越波水塊に対する近似精度が低くなることが挙げられる。このことから、VOF 値による計測を行う際には格子サイズの影響を抑えるために、 $\Delta x/2$ 未満に該当する地点に初期水位を設定する必要があると推察される。また、時間積分値による計測を用いることで越波流量の計測値が大きくなることと、合田の越波流算定図に最も近い越波流量となっているケースが多いことが確認された。よって、設計において越波流量を安全側に評価したい場合は、時間積分値を選択することも視野に入れると良い。

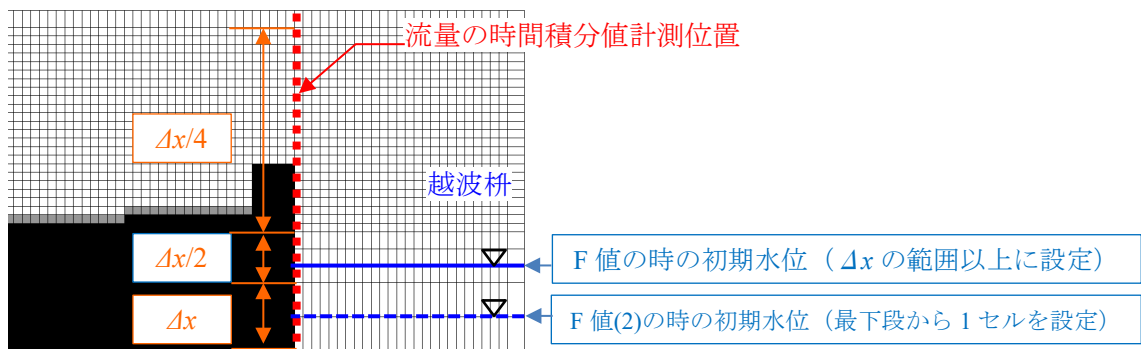


図 5.3-61 越波流量の初期水位

表 5.3-63 初期水位，計測方法による越波流量の解析結果の違い

case	q (m ³ /s/m)		
	積分値	F値	F値(2)
case1	0.016 (1.00)	0.015 (0.95)	0.015 (0.95)
case2	0.020 (1.00)	0.018 (0.91)	0.012 (0.63)
case3	0.018 (1.00)	0.017 (0.94)	0.015 (0.83)
case4	0.029 (1.00)	0.027 (0.93)	0.027 (0.91)

※下段は、q/q(積分値)

ケースごとに CS3D と算定図の無次元越波流量とを比較した結果を図 5.3-62 に示す．図 5.3-62 には，算定図表の真値の想定範囲を併せて示している．

『標準メッシュ』による越波流量の評価結果に関しては，水深波高比 (h/H'_0) にかかわらず，真値の想定範囲に解析結果は収まっており，『標準メッシュ』の解析結果は妥当であると評価できる．このことから，『標準メッシュ』の解像度は妥当であり，『標準メッシュ』の有用性が確認された．一方で，case4 以外のケースでは，算定図の読み値より過小評価となっていることから，設計で用いる際には注意が必要である．過小評価の原因としては，本検討では 1 波群を対象としたことや解析対象波を 150 波としたことから，解析時間中で $H_{\max}$ (1/250 波程度の確率) 相当の波が出現しなかったことが挙げられる．

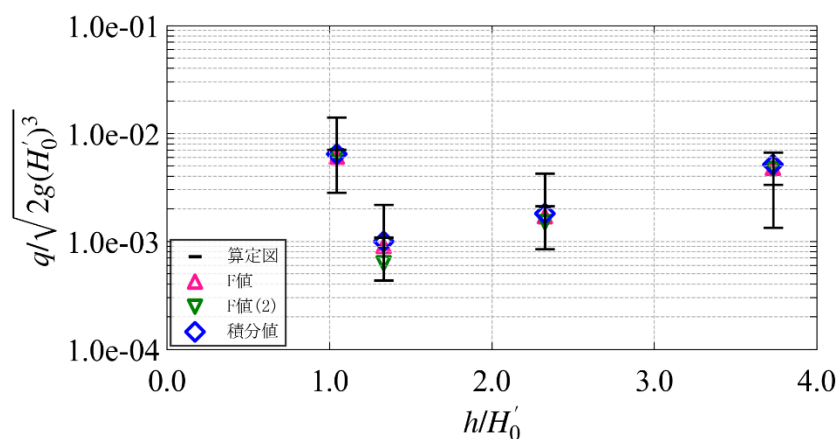


図 5.3-62 CADMAS と算定図との無次元越波流量の比較

5.3.9 計算事例 9〔（株）日本港湾コンサルタント〕

(1) 計算ケース

合田の越波流量算定図（消波護岸，海底勾配 1/10， $H_0/L_0=0.012$ ）を対象に，越波流量の算定を行った．

表 5.3-64 計算ケース

計算ケース		条件								越波流量算定図	
		Ho' (m)	To (s)	Lo (m)	Ho' /Lo	h/Ho'	h (m)	hc (m)	hc/Ho'	q/(2g (H ₀ ')) ^{3/5}	q (m ³ /s/m)
case1	越波流量0.02m ³ /s/m	2.00	10.3	165.50	0.0121	2.25	4.50	3.00	1.500	1.60E-03	0.0200
case2	越波流量0.01m ³ /s/m	2.00	10.3	165.50	0.0121	0.45	0.90	3.50	1.750	7.98E-04	0.0100
case3	越波流量0.15m ³ /s/m	2.00	10.3	165.50	0.0121	1.10	2.20	1.00	0.500	1.20E-02	0.1500

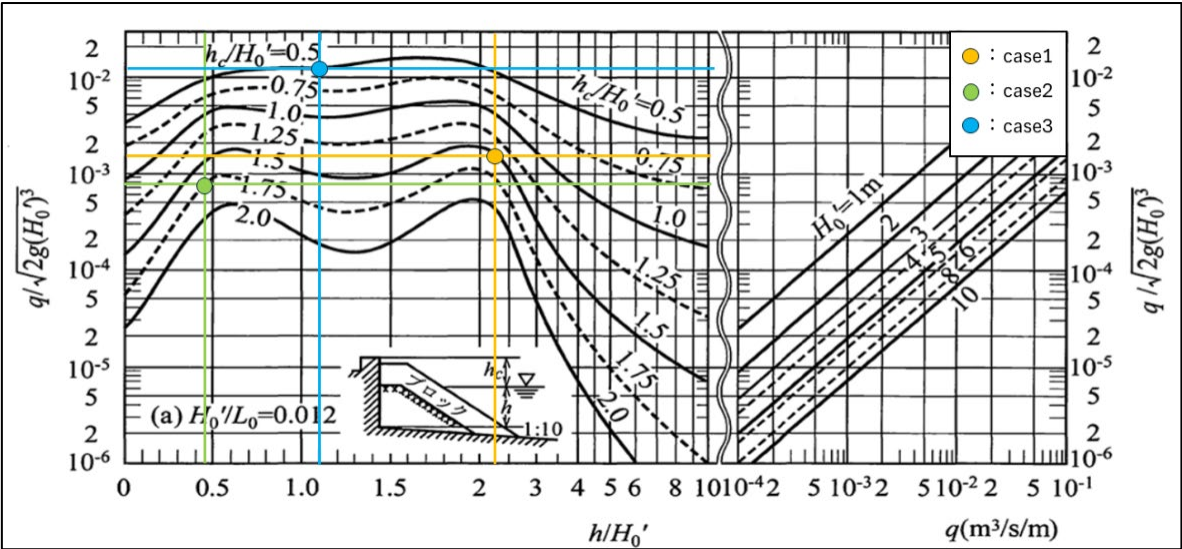


図 5.3-63 計算ケース（計算ケース別の条件を図示）

(2) 数値波動水槽モデル

図 5.3-64～図 5.3-66 に解析モデルの全体図を示す。減衰帯は、沖に 3 波長程度とした。また、海底地形及び消波護岸は、表 5.3-64 に示す各 case の水深 h 、水位面上高さ h_c となるように設定した。越波升の大きさ及び越波升内の初期水位は、想定される越波量に応じて各 case でそれぞれ設定した。

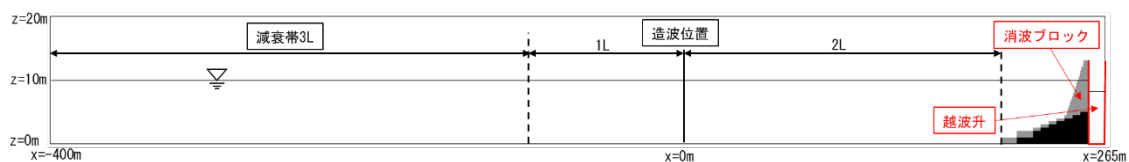


図 5.3-64 解析モデルの設定 (case1, 描画比 $X/Z=0.25$)

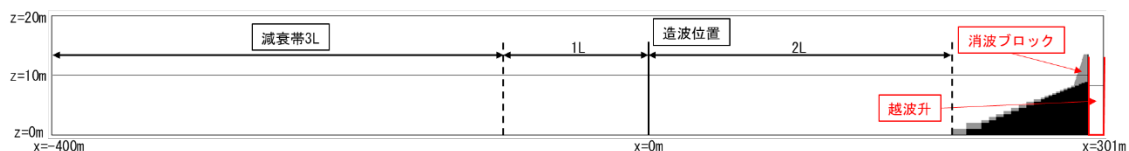


図 5.3-65 解析モデルの設定 (case2, 描画比 $X/Z=0.25$)

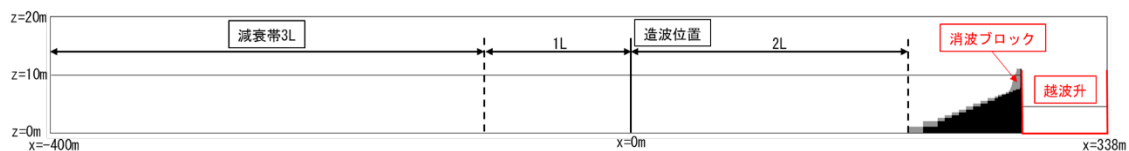


図 5.3-66 解析モデルの設定 (case3, 描画比 $X/Z=0.25$)

(3) モデル化された海底地形モデル

海底地形は、図 5.3-64～図 5.3-66 に示す通りであり、造波位置から $2L$ の地点より海底勾配 1/10 となっている。

(4) 計算パラメータの設定

表 5.3-65 及び表 5.3-66 に計算パラメータを示す。

表 5.3-65 計算パラメータ (1)

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	1500s(150T _{1/3} 程度)
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：3L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.5.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	case1		
	水平格子[m]	-400~-250m	1.25m
		-250~-100m	0.75m
		-100~215m	0.50m
		215~265m	0.25m
	鉛直格子[m]	0~2m	1m
		2~20m	0.5m
	case2		
	水平格子[m]	-400~-250m	1.25m
		-250~-100m	0.75m
		-100~215m	0.50m
		215~260m	0.25m
		260~301m	0.25m
	鉛直格子[m]	0~2m	1m
		0~6m	0.5m
		6~20m	0.25m
	case3		
	水平格子[m]	-400~-250m	1.25m
		-250~-100m	0.75m
		-100~215m	0.50m
		215~260m	0.25m
		260~338m	0.125m
	鉛直格子[m]	0~2m	1m
		0~6m	0.5m
		6~20m	0.25m

表 5.3-66 計算パラメータ (2)

項目			内容
13	ポーラスの下限値		0.01
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	ブロック：0.5, 石：0.44
		(<i>x,y,z</i> 方向)面積透過率	設定しない
		慣性力係数	1.2
		抵抗係数	1.0
16	D-F則：テトラポッド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
16	D-F則：マウンド	α_0	-
17		β_0	-
18		$d_r(=V^{1/3})$	-
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	デフォルト (0.2m/s)
		水滴落下速度	デフォルト (自由落下+斜面処理)
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		越波升	
		case1	DEBUG F-BOX 1112 1 15 1151 1 24 0.000
		case2	DEBUG F-BOX 1381 1 20 1460 1 41 0.000
		case3	DEBUG F-BOX 1277 1 8 1756 1 31 0.000

(5) 作用波の検定

作用波の検定を行うため，構造物を設置しない条件で解析を行った．検定は，造波地点の波高と周期がそれぞれ 2.0m 程度，10.3s 程度となること目標に実施した．

検定の結果，造波地点において $H_{1/3}=2.02\text{m}$ ， $T_{1/3}=10.31\text{s}$ となり，目標波浪程度となったため，この造波信号で越波流量の計算を実施する．

表 5.3-67 計算条件

項目	条件
計算時間	1500s (150波程度)
計算格子間隔	$\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0.5\text{m}$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z = 1940 \times 1 \times 60 = 116400$

表 5.3-68 波高検定の条件

	条件							
計算ケース	H_o' (m)	T_o (s)	L_o (m)	h (m)	h/L_o	H_o'/L_o	K_s	$H_{1/3}$
case1	2.00	10.3	165.50	10.00	0.0604	0.01	1.00	2.00
case2	2.00	10.3	165.50	10.00	0.0604	0.01	1.00	2.00
case3	2.00	10.3	165.50	10.00	0.0604	0.01	1.00	2.00

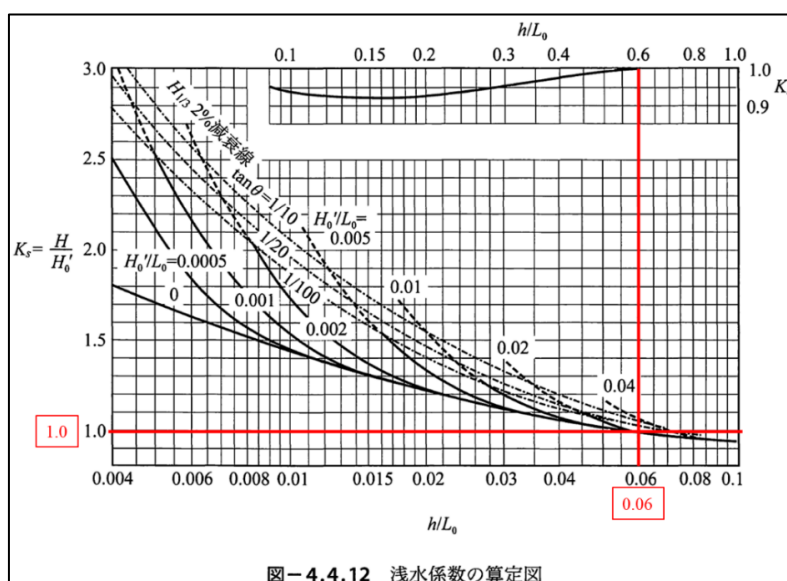


図-4.4.12 浅水係数の算定図

図 5.3-67 波高検定の条件

表 5.3-69 波高検定結果

造波指示条件		造波地点		
$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	波数
1.76	9.84	2.02	10.31	167

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

② 水位・越波量モニタリング位置の設定

構造物は、図 5.3-68～図 5.3-70 のように設定した。越波量は、護岸背後の越波升部の指定セル範囲（赤枠）の積分値として設定した。

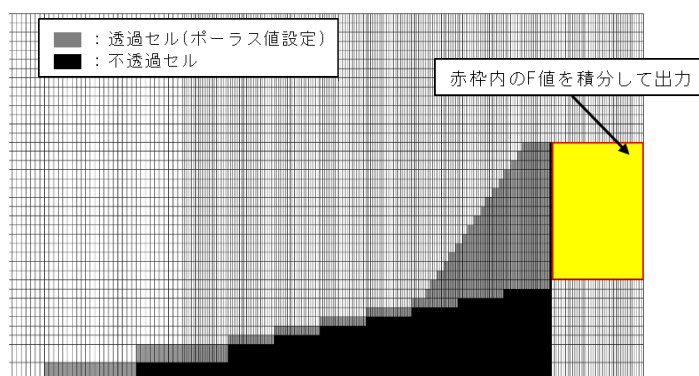


図 5.3-68 構造物・計測点の設定 (case1, 描画比 $X/Z=0.50$)

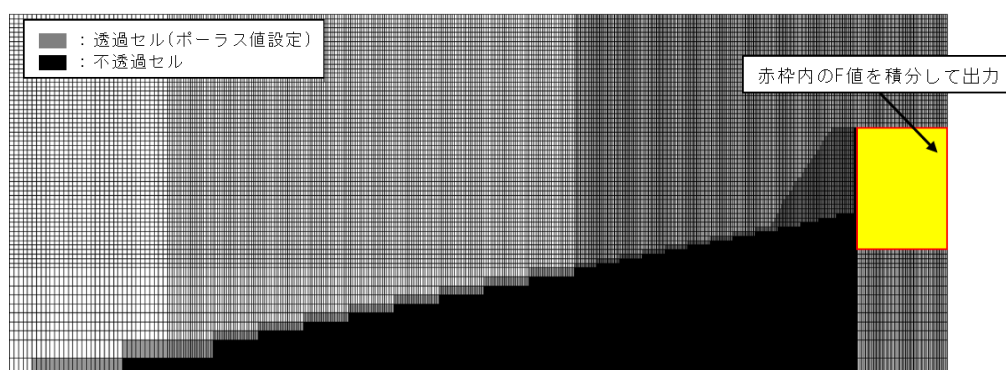


図 5.3-69 構造物・計測点の設定 (case2, 描画比 $X/Z=0.50$)

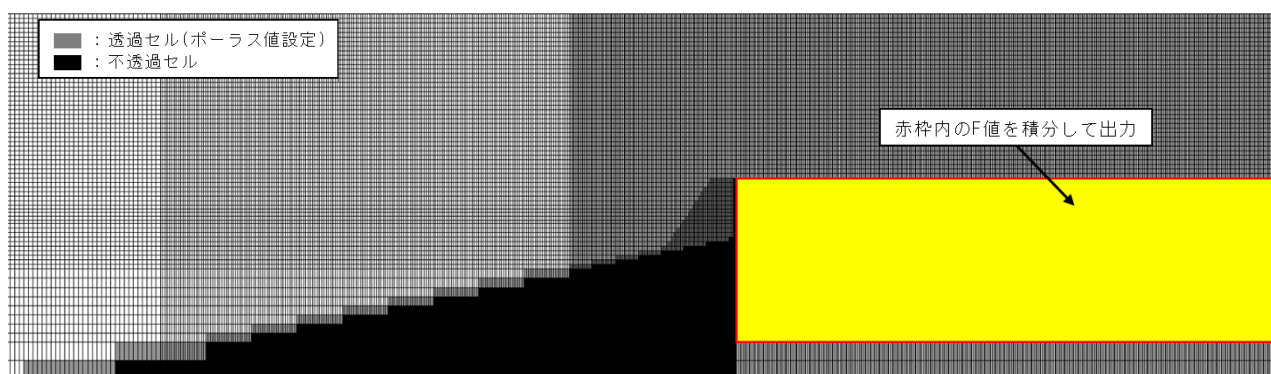


図 5.3-70 構造物・計測点の設定 (case3, 描画比 $X/Z=0.50$)

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

表 5.3-70 に各ケースの越波流量算定結果を示す。また、図 5.3-71～図 5.3-73 に各ケースの F 値積分値，図 5.3-74～図 5.3-76 に各ケースの 1 ステップ毎の越波量を示す。

表 5.3-70 越波流量算定結果

計算ケース	CADMAS計算値	
	F値積分値 (m ³)	q (m ³ /s/m)
case1	7.83	0.0112
case2	1.80	0.0026
case3	123.17	0.1760

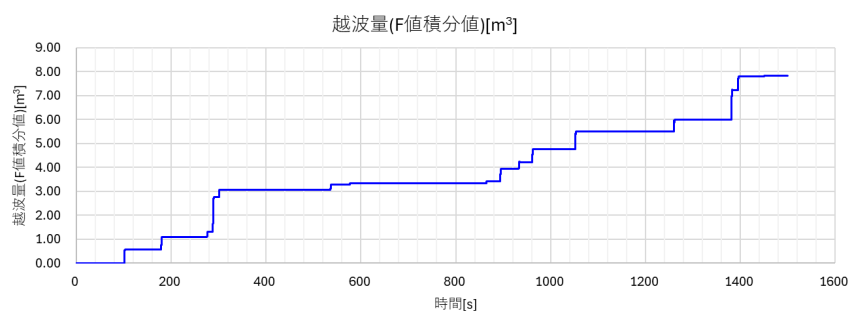


図 5.3-71 越波量 (F 値積分値, case1 (q=0.02m³/s/m))

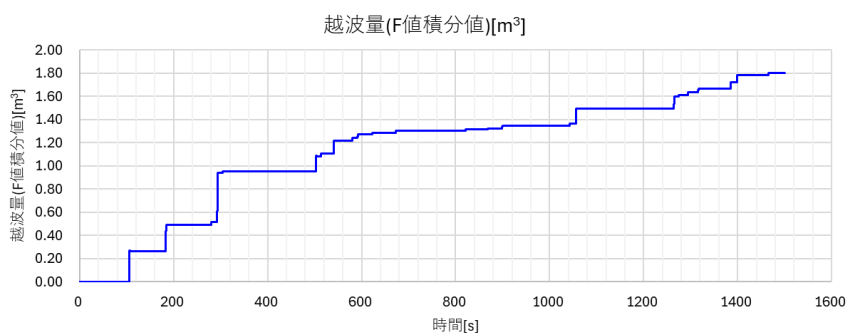


図 5.3-72 越波量 (F 値積分値, case2 (q=0.01m³/s/m))

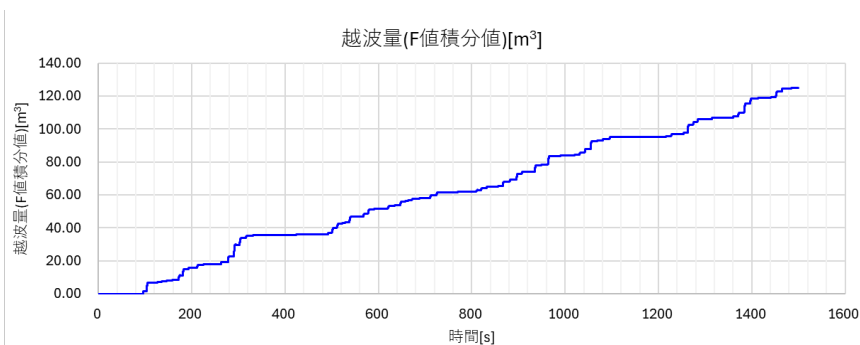


図 5.3-73 越波量 (F 値積分値, case3 (q=0.15m³/s/m))

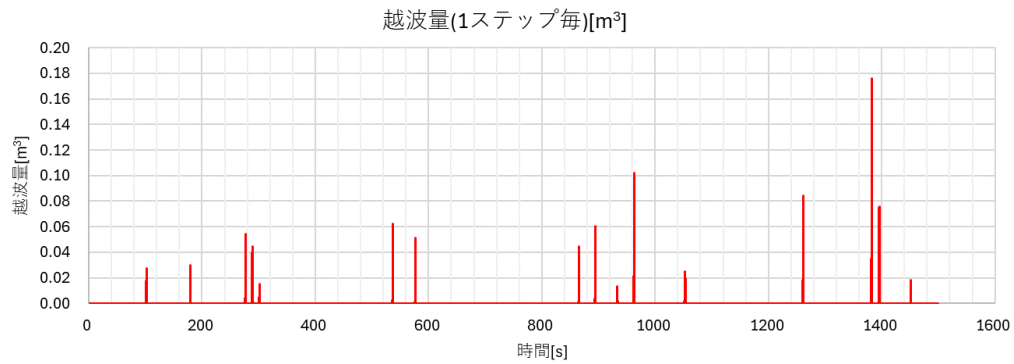


図 5.3-74 1 ステップ毎の越波量 (case1 ($q=0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))

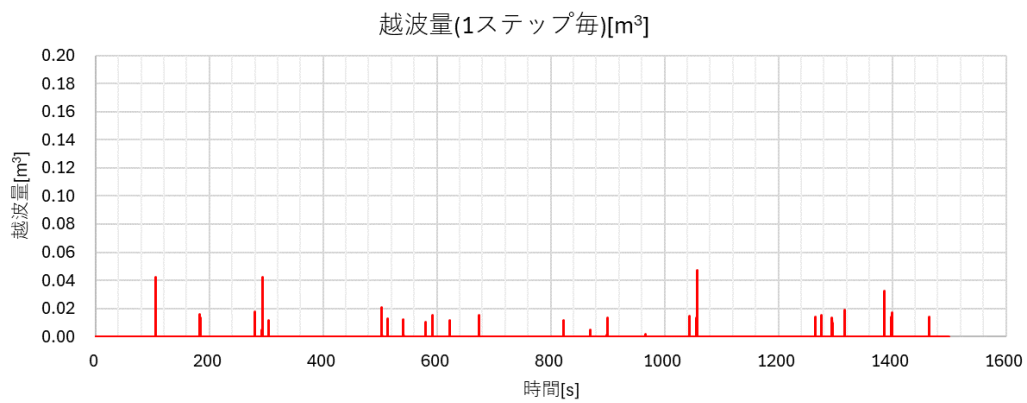


図 5.3-75 1 ステップ毎の越波量 (case2 ($q=0.01\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))

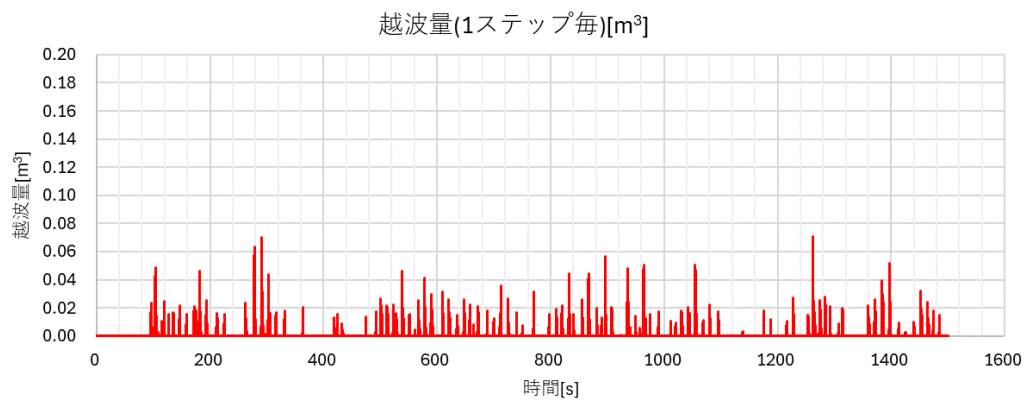


図 5.3-76 1 ステップ毎の越波量 (case3 ($q=0.15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))

② 解析結果の分析

CADMAS 計算値は、case1, case2 では合田の越波流量推定値よりも少なくなり、case3 では合田の越波流量推定値よりも多い結果となった。

表 5.3-71 越波流量算定図と CADMAS 計算値の比較

計算ケース	合田の越波流量算定図		CADMAS計算値		比較
	$q \text{ (m}^3\text{/s/m)}$	$q / (2g(H_0')^3)^{0.5}$	F値積分値 (m ³)	$q / (2g(H_0')^3)^{0.5}$	
case1	0.0200	1.60E-03	7.83	8.93E-04	算定図 > CADMAS
case2	0.0100	7.98E-04	1.80	2.06E-04	算定図 > CADMAS
case3	0.1500	1.20E-02	123.17	1.40E-02	算定図 < CADMAS

図 5.3-77, 表 5.3-72 に合田の越波流量推定値と CADMAS 計算値の無次元越波流量の比較結果, 及び推定値に対する真値との想定範囲を示す. 越波流量が少ない条件では, 合田の推定値に対して過小となる傾向が見られた. また, case1~case3 全てのケースで「港湾の施設の技術上の基準・同解説」p.169 に示されている推定値に対する真値の想定範囲内となった。

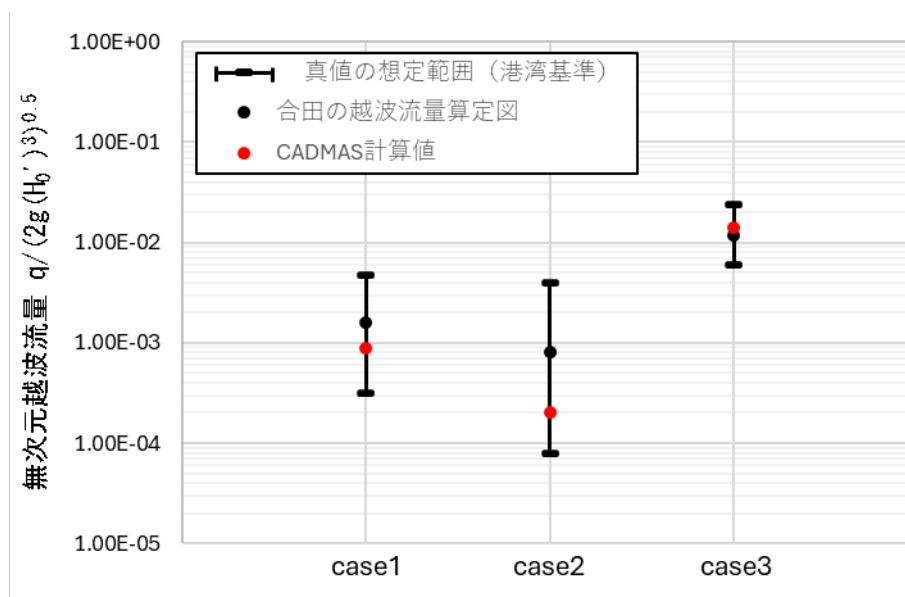


図 5.3-77 合田の越波流量推定値と CADMAS 計算値の無次元越波流量の比較

表 5.3-72 越波流量の推定値に対する真値との想定範囲²⁾

計算ケース	無次元越波流量 $q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	
	$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	真値との想定範囲
case1	1.60E-03	0.2～3倍
case2	7.98E-04	0.1～5倍
case3	1.20E-02	0.5～2倍

※港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.169

表-4.4.4 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲

$q/\sqrt{2g(H_0')^3}$	直立護岸	消波護岸
10^{-2}	0.7～1.5 倍	0.5～2 倍
10^{-3}	0.4～2 倍	0.2～3 倍
10^{-4}	0.2～3 倍	0.1～5 倍
10^{-5}	0.1～5 倍	0.05～10 倍

5.3.10 計算事例 10〔（株）ニュージェック〕

(1) 計算ケース

護岸の越波流量算定に対して CS3D の適用性を検証するため、表 5.3-73 に示す条件を実施した。沖波の波形勾配 0.036 の波浪が消波護岸に作用することを想定して構造物の諸元及び波浪条件を決定し、合田らの越波流量算定図との比較を行った。設定した構造物及び波浪の条件を表 5.3-73 に示す。各ケース 200 波程度の不規則波を消波護岸に作用させ、越波流量を計測した。越波計算に使用する造波信号は通過波検定を行い、1 波形を選定した。

表 5.3-73 波浪条件（目標値）及び構造条件

ケース	与条件					波浪条件 (目標値)		構造条件	
	H_o'/L_o	h/H_o'	h_c/H_o'	q ($m^3/s/m$)	$q/\sqrt{2g(H_o')^3}$	H_o' (m)	T_o (s)	h (m)	h_c (m)
case1	0.036	0.50	0.50	0.02	2.00E-03	1.72	5.5	0.9	0.9
case2	0.036	1.60	1.50	0.01	9.50E-05	8.27	12.1	13.2	12.4
case3	0.036	4.00	1.00	0.01	3.00E-04	3.84	8.3	15.4	3.8

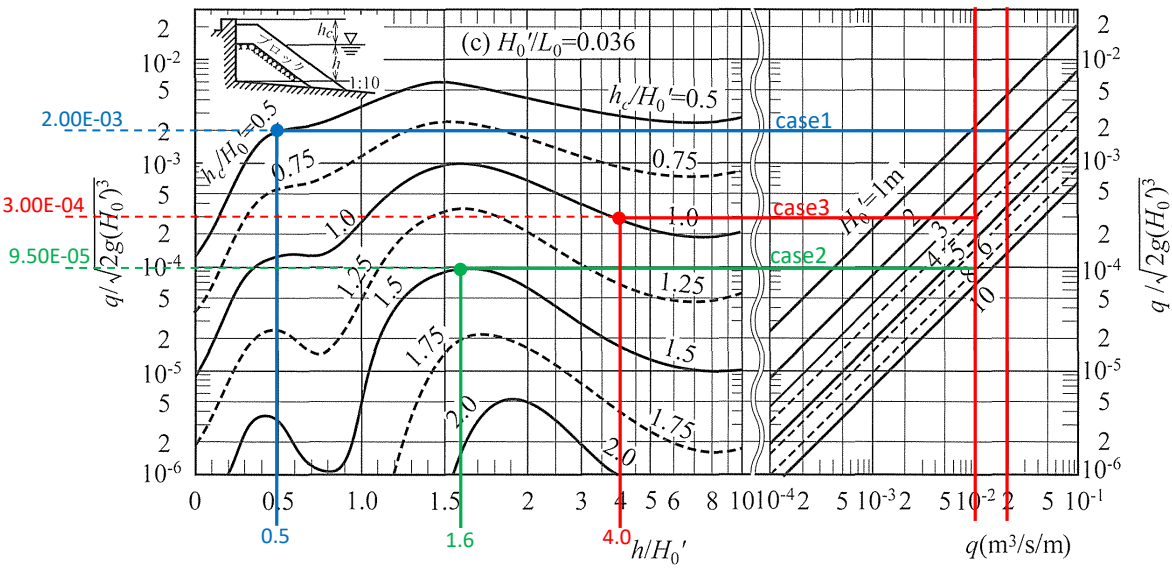


図 5.3-78 目標波浪に対する越波流量読み値

(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

図 5.3-79～図 5.3-81 にモデル化した消波護岸の越波試験の水路模式図を示す。

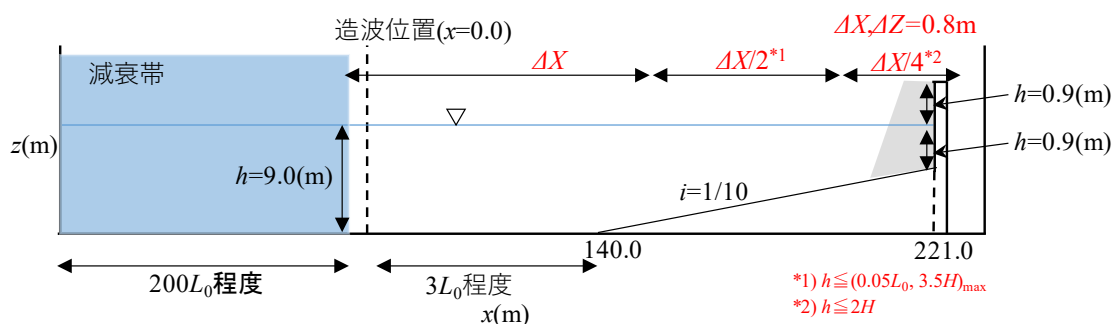


図 5.3-79 計算領域 (case1)

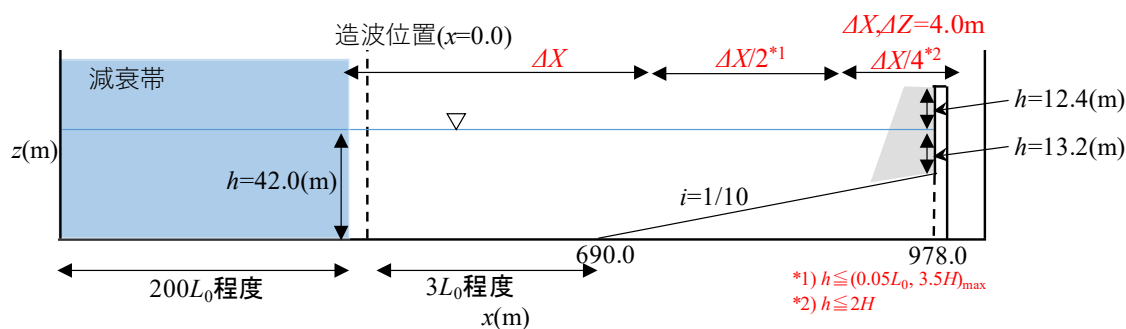


図 5.3-80 計算領域 (case2)

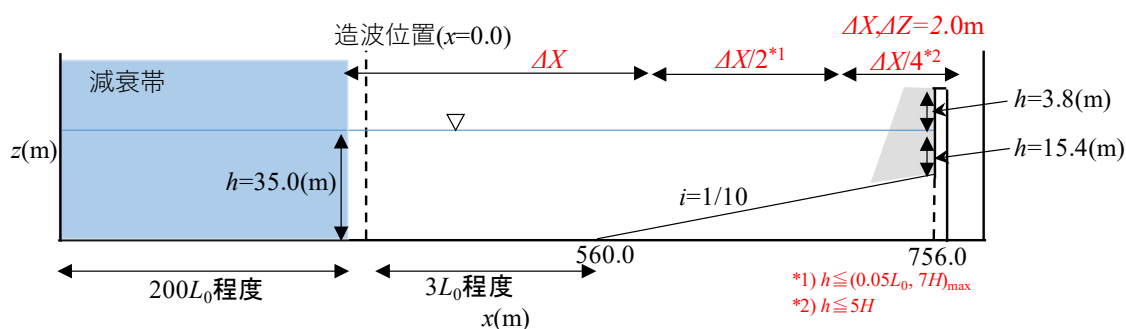


図 5.3-81 計算領域 (case3)

② 構造物位置

各ケースの水深波高比及び無次元天端高に応じて護岸の諸元を設定した。一様海底の上端にモデル化した護岸を設置した。消波部については case1 を 0.5t 型，case2 及び case3 については，8t 型の施工断面の諸元を参考にモデル化した。

③ 減衰帯位置

造波位置より沖側に $200L_0$ 程度の吸収帯を設定した。

(3) モデル化された海底地形

造波水深を $5H_0$ 程度確保し、碎波が顕著になる $5H_{1/3}$ より若干造波水深を深く設定した。また、斜面水平方向の長さが L_0 程度以上になるように case3 については、 $9H_0$ 程度に設定した。

(4) 計算パラメータの設定

表 5.3-74 に各ケースで適用した計算パラメータの共通を示す。

表 5.3-74 計算パラメータ（ケース間共通）

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	$250 T_{1/3}$ 程度
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：200L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		デフォルト
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.9.exeを使用
13	ポーラスの下限值		0.01
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポーラスメディア法	空隙率	ブロック：0.5
		(x,y,z方向)面積透過率	設定しない
		慣性力係数	1.2
		抵抗係数	設定しない
19	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
20	リストファイル出力制御		適宜設定
21	詳細ファイル出力制御		適宜設定
22	リスタート制御		なし
23	時系列ファイル出力制御		適宜設定
24	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブループ	-

表 5.3-75 計算パラメータ (case1)

項目			内容
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	吸収帯～176m	0.8m
		176～198m	0.4m
		198～270m	0.2m
	鉛直格子[m]	0～4m	0.8m
		4～6m	0.4m
		6～7.2m	0.2m
		7.2～9.9m	0.18m
		9.9～17.7m	0.2m
16	D-F則：テトラポッド	α_0	2100
17		β_0	2.2
18		$d_r (=V^{1/3})$	0.600
23	時系列ファイル出力制御	斜面開始位置	FILE TRN W-LEVEL 599 1
		構造物前面	FILE TRN W-LEVEL 810 1
		越波升	FILE TRN INT F 819 1 22 1059 1 50
24	オプション	越波升	DEBUG F-BOX 819 1 22 1059 1 50 0.000
		D-F則	0.600 2100 2.2

表 5.3-76 計算パラメータ (case2)

項目			内容
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	吸収帯～848m	4.0m
		848～960m	2.0m
		198～1051m	1.0m
	鉛直格子[m]	0～16m	4.0m
		16～24m	2.0m
		24～28.8m	1.6m
		28.8～37.8m	1.0m
		37.8～39.4m	0.8m
		39.4～41.2m	0.6m
		41.2～52.4m	0.8m
		52.4～80.4m	1.0m
16	D-F則：テトラポッド	α_0	2100
17		β_0	2.2
18		$d_r (=V^{1/3})$	1.515
23	時系列ファイル出力制御	斜面開始位置	FILE TRN W-LEVEL 588 1
		構造物前面	FILE TRN W-LEVEL 700 1
		越波升	FILE TRN INT F 701 1 24 771 1 65
24	オプション	越波升	DEBUG F-BOX 701 1 24 771 1 65 0.000
		D-F則	1.500 2100 2.2

表 5.3-77 計算パラメータ (case3)

項目			内容
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	吸収帯～642m	2.0m
		642～718m	1.0m
		718～900m	0.5m
	鉛直格子[m]	0～8.0m	2.0m
		8.0～15.0m	1.0m
		15.0～16.6m	0.8m
		16.6～37.6m	0.5m
		37.6～40.0m	0.4m
		40.0～52.5m	0.5m
16	D-F則：テトラポッド	α_0	2100
17		β_0	2.2
18		$d_r(=V^{1/3})$	1.515
23	時系列ファイル出力制御	斜面開始位置	FILE TRN W-LEVEL 704 1
		構造物前面	FILE TRN W-LEVEL 858 1
		越波升	FILE TRN INT F 861 1 30 1147 1 60
24	オプション	越波升	DEBUG F-BOX 861 1 30 1147 1 60 0.000
		D-F則	1.500 2100 2.2

① 造波モデル

造波ソースを適用.

反射波発達後 200 波程度が構造物へ作用することを想定して造波時間を決定.

② 差分方法

VP-DONOR : 0.2.

③ 減衰帯の特性値

表 5.3-78 に各ケースで設定した吸収帯の特性値を示す.

表 5.3-78 各ケースの減衰帯の特性値

	case1	case2	case3
吸収帯幅	8104.506	39077.594	19892.652
水深	9.00	42.00	35.00

④ 消波ブロック等の多孔質体抵抗値等

ポーラスモデル消波ブロックの一般的な設定値を参考に以下のような値を設定した.

- ・ 空隙率：0.5
- ・ 慣性力係数：1.2

各ケースの Dupuit-Forchheimer 則の設定値については、表 5.3-79 に示す値を設定した。

表 5.3-79 各ケースの Dupuit-Forchheimer 則の設定値

	case1	case2およびcase3
α_0	2100	
β_0	2.2	
$d_r (= V^{1/3})$	0.6	1.515

⑤ その他の計算パラメータの設定

特になし。

(5) 作用波の検定

作用波の検定として、海底斜面のみを設置した水路で通過波検定を実施した。通過波検定結果を表 5.3-80 に示す。本検討では目標波浪条件に対する合わせこみは精緻に行わず、通過波検定結果から得られた波浪条件をもとに $H_0'/L_0=0.036$ 程度となることを確認し、越波流量算定図より算定した越波流量との比較を行う。

表 5.3-80 通過波検定結果

ケース	目標値		検定位置での諸元						構造物無し(斜面開始位置)				
	Ho' (m)	To (s)	h(=5H程度) (m)	h/Ho'	h/Lo	Ks	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (s)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (s)	Ho' (m)	T _{1/3} (s)	Ho'/Lo
case1	1.72	5.5	9.0	5.23	0.191	0.916	1.58	5.5	1.58	5.92	1.72	5.92	0.032
case2	8.27	12.1	42.0	5.08	0.184	0.915	7.57	12.1	7.75	13.24	8.47	13.24	0.031
case3	3.84	8.3	35.0	9.11	0.326	0.945	3.63	8.3	3.51	8.88	3.72	8.88	0.030

(6) 構造物・計測点の設定

① 計算格子上への構造物の設定

護岸の直立壁部については、障害物セルのみで表現できるよう Δz を調節した。堤脚及び天端は z 方向の格子に一致することを確認した。

② 水位・流速・波圧・越波量モニタリング位置の設定

斜面開始位置及び構造物前面で水位を計測した。越波流量算定時には越波枡内の矩形領域を指定し、セルの F 値をゼロにした上で、同一領域の流量の増加を計測した。

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

越波量の算定にあたって、不規則波が初めに構造物到達後、十分時間経過後計測を開始し、200 波程度の不規則波を作用させた。

越波流量計算結果及び検定で得られた波浪条件と合田らの算定図を用いて算定した結果を表 5.3-81 に示す。越波流量算定図の算定値に対する現地観測の想定範囲を各ケースで算定した許容値の範囲も示している。

表 5.3-81 越波流量算定結果及び算定図との比較

ケース名	波浪条件			構造条件				算定図		CADMAS計算結果	
	Ho'(m)	T(s)	Ho'/Lo	h(m)	hc(m)	h/Ho'	hc/Ho'	$q/\sqrt{2g(Ho')^3}$	$q(m^3/s/m)$	$q/\sqrt{2g(Ho')^3}$	$q(m^3/s/m)$
case1	1.72	5.92	0.031	0.90	0.90	0.52	0.52	1.80E-03	0.018	3.35E-03	0.0335
case2	8.47	13.24	0.031	13.20	12.40	1.56	1.46	1.05E-04	0.011	5.52E-05	0.0060
case3	4.28	8.84	0.035	15.40	3.80	3.60	0.89	5.00E-04	0.020	1.14E-03	0.0446

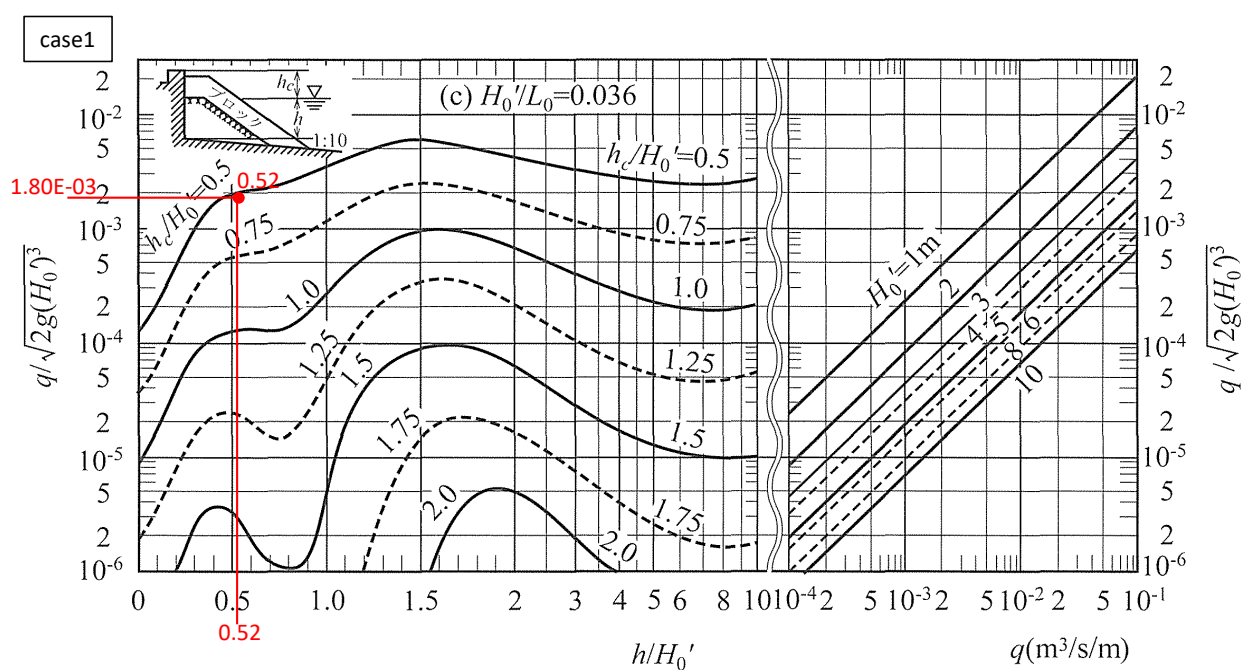


図 5.3-82 合田らの越波流量算定図の算定結果 (case1)

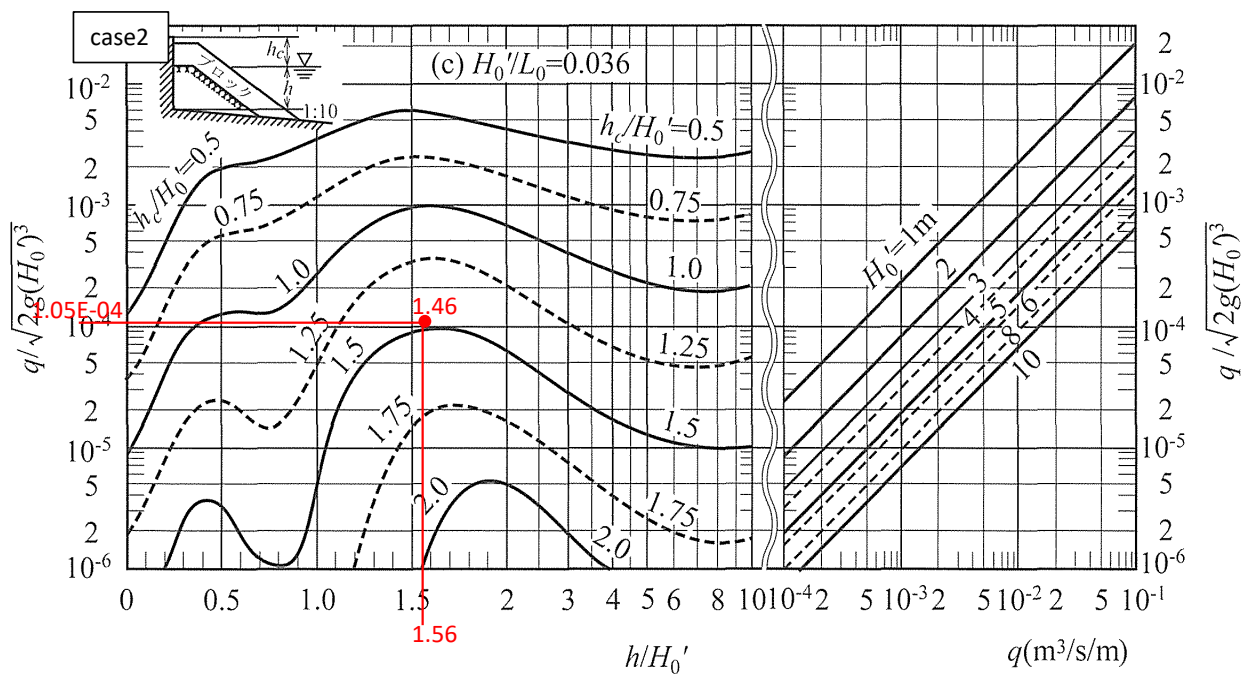


図 5.3-83 合田らの越波流量算定図の算定結果 (case2)

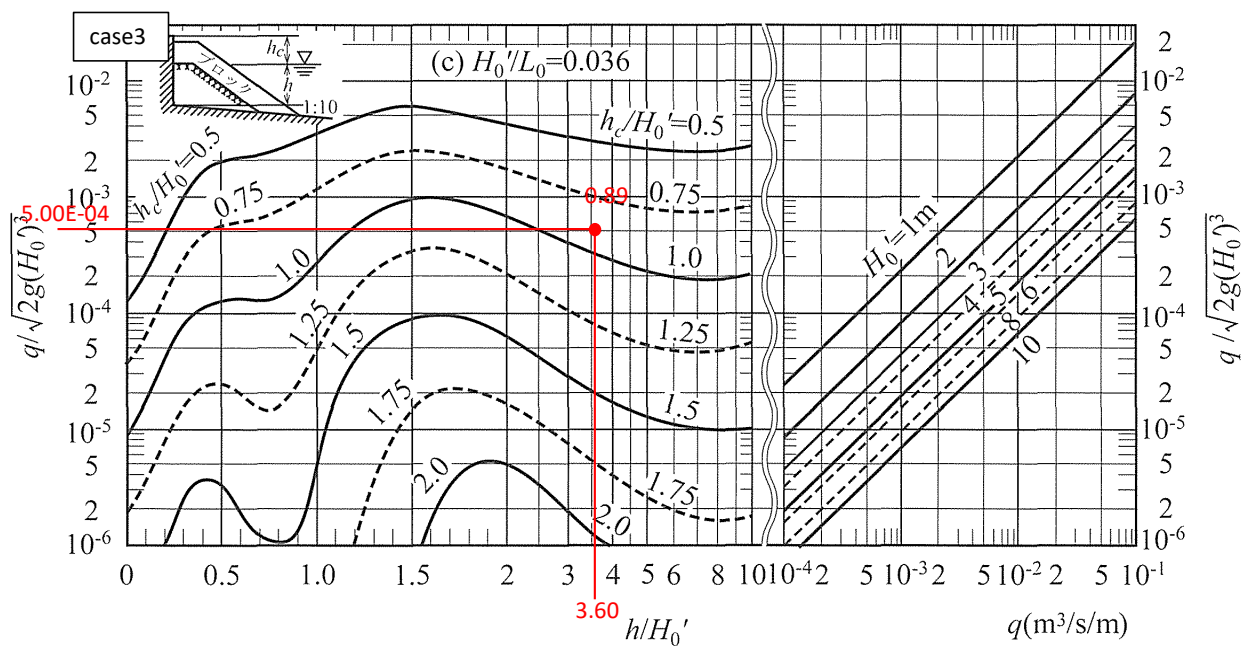


図 5.3-84 合田らの越波流量算定図の算定結果 (case3)

② 解析結果の分析

- ・ 図 5.3-85 より現地観測の想定範囲と各ケースの計算結果を比較したところ、3 ケースとも許容範囲内であることを確認した。
- ・ ただし、case1 と case3 は、算定図と比較して過大評価傾向であった。特に、case1 では、水深波高比が小さく護岸位置では極浅海域の条件となるため、非線形性による波高及び周期変化に伴い波形勾配の変化が比較的大きい。加えて、セットアップやサーフビートの影響が考えられる。
- ・ case2 では、算定図を用いた算定結果と比較して CADMAS による計算結果が過小評価となった。波高が極端に高い条件であり、『標準メッシュ』の設定では構造物上部の格子解像度が不足している可能性や薄い流れに対する精度が十分でない可能性がある。加えて、越波・越流のイベントが低頻度であり波群間のバラつきが大きく、越波流量算定図が作成された実験の波高の小さい条件から外挿された領域で相対誤差が大きい可能性がある。

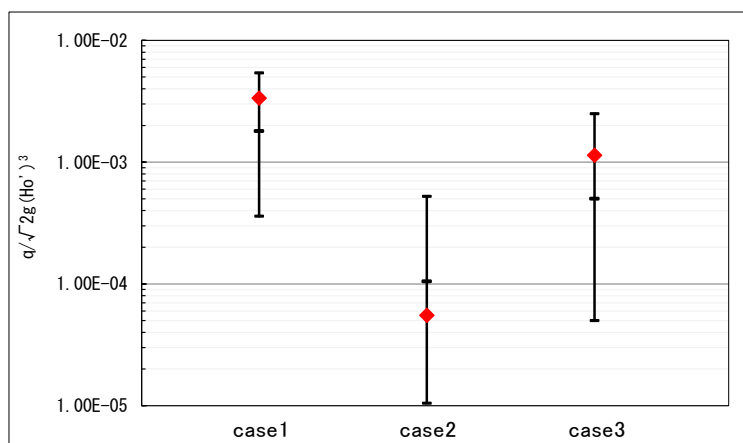


図 5.3-85 CADMAS による計算結果と越波流量算定図の真値の想定範囲との比較

5.3.11 計算事例 11[復建調査設計（株）]

(1) 計算ケース

『標準メッシュ』の適用性（算定結果の幅）を確認するために、網羅的な条件で越波流量を評価した。検討条件は消波護岸の海底勾配 1/30、波形勾配 $H_0'/L_0=0.036$ の条件とし、合田の越波流量推定図と比較を行った。計算ケースを表 5.3-82 に示す。目標とした越波流量 q は、設計実務でよく利用される許容越波流量 $q_a=0.02$ [m³/m/s] とした。

表 5.3-82 計算ケース

Case	与条件							目標条件						
	護岸形式	海底勾配	波形勾配	相対水深	相対天端高	越波流量	無次元越波流量	換算沖波	周期	沖波波長	堤脚水深	天端高	波数	波群
	θ	H_0'/L_0	h/H_0'	h_c/H_0'	q	$q/(2gH_0'^3)^{0.5}$	H_0'	T_0	L_0	h'	h_c			
	[-]	[-]	[-]	[-]	[m³/s/m]	[-]	[m]	[s]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	
1	消波護岸	1/30	0.036	1.05	0.75	0.02	4.00E-04	5.03	9.50	140.79	5.30	3.80	150	1
2	消波護岸	1/30	0.036	1.60	0.50	0.02	4.00E-03	1.08	4.40	30.20	1.70	0.50	150	1
3	消波護岸	1/30	0.036	2.30	1.00	0.02	5.00E-04	4.34	8.80	120.81	10.00	4.30	150	1
4	消波護岸	1/30	0.036	3.30	0.75	0.02	1.00E-03	2.73	7.00	76.44	9.00	2.00	150	1

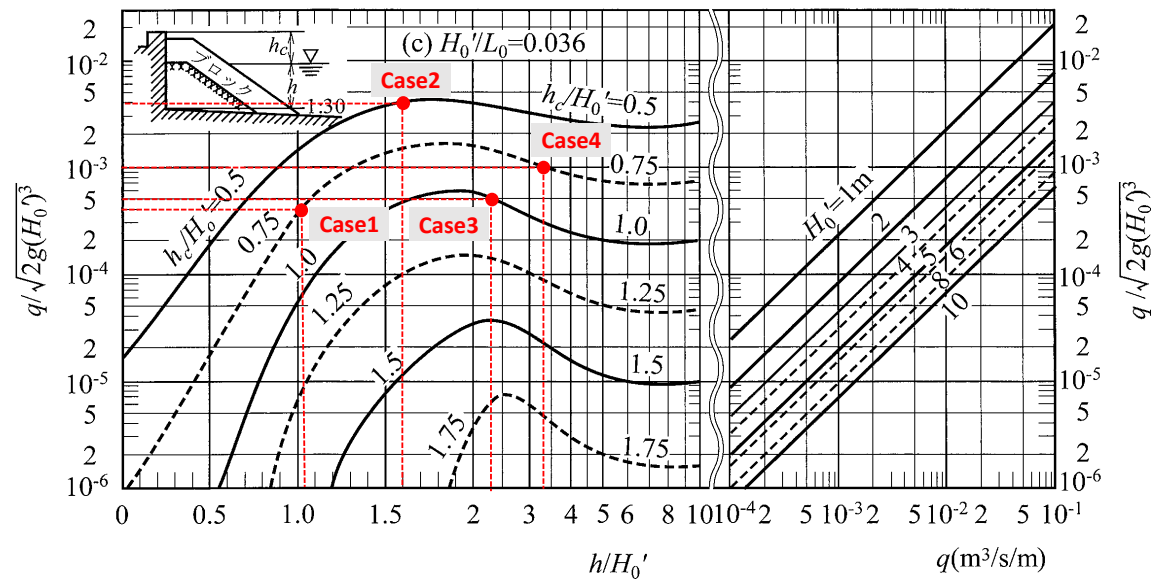


図 5.3-86 目標条件に対する合田の越波流量推定値の読み取り

(2) 数値波動水槽モデル

① 計算領域

各ケースの計算領域図を図 5.3-87～図 5.3-90 に、構造物位置の拡大図を図 5.3-91 に示す。なお、 y 方向は 1 格子 ($dy=1.0\text{m}$) としている。

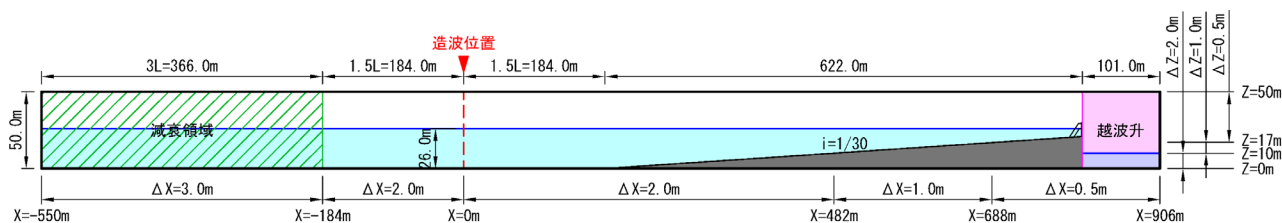


図 5.3-87 計算領域図 (Case1, 描写比 $X/Z=0.5$)

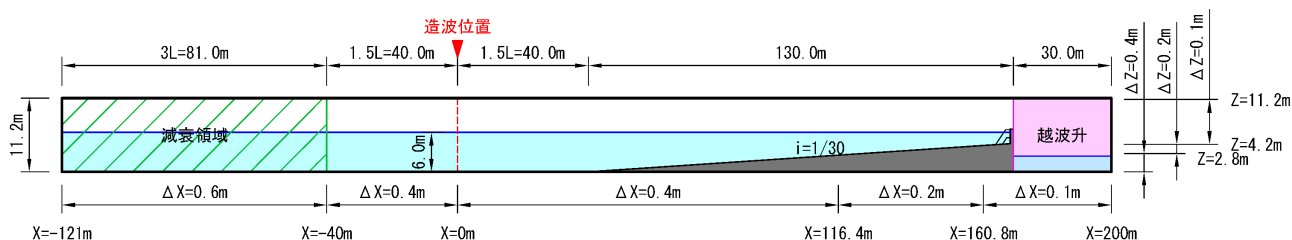


図 5.3-88 計算領域図 (Case2, 描写比 $X/Z=0.5$)

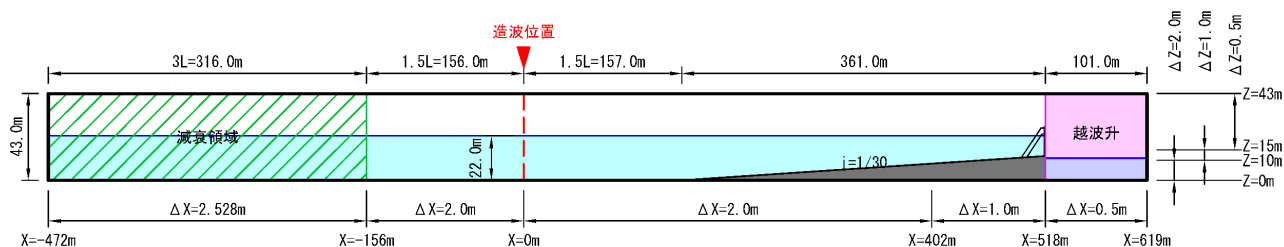


図 5.3-89 計算領域図 (Case3, 描写比 $X/Z=0.5$)

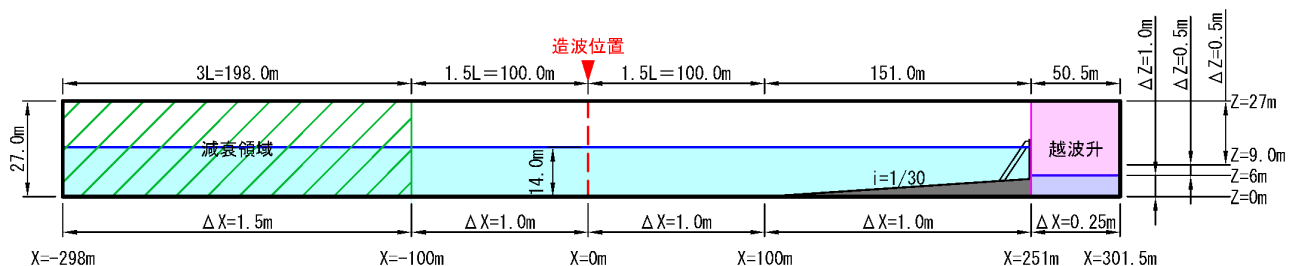
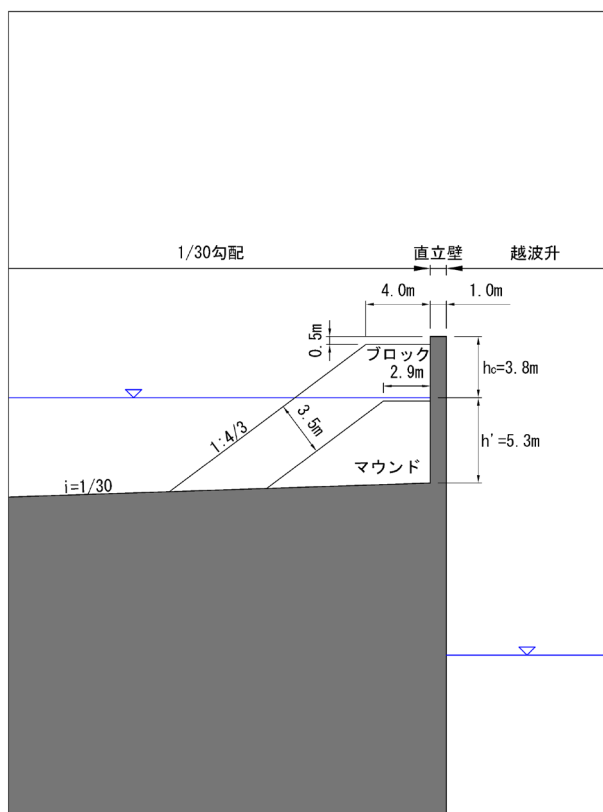
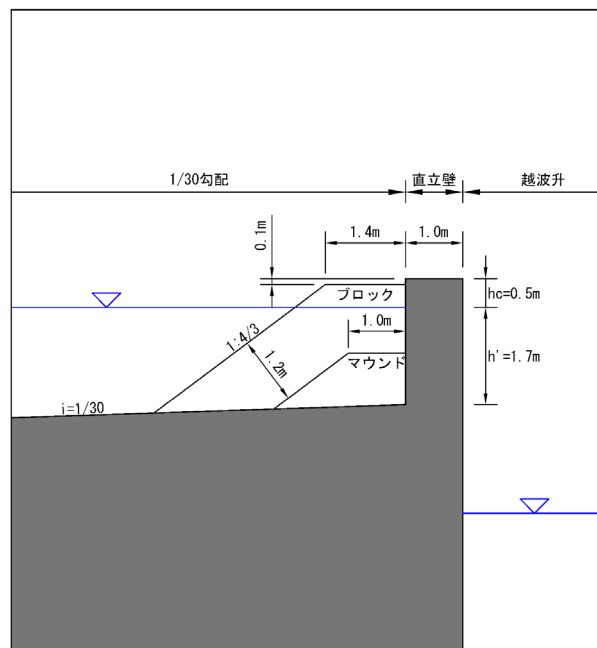


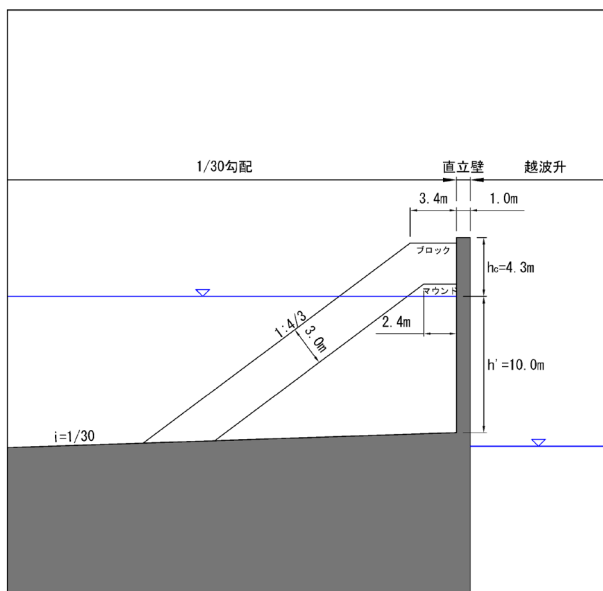
図 5.3-90 計算領域図 (Case4, 描写比 $X/Z=0.5$)



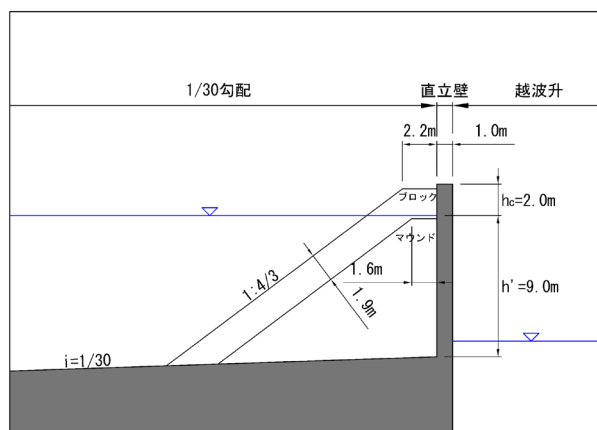
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

図 5.3-91 構造物位置拡大図 (描写比 $X/Z = 1.0$)

② 構造物位置

構造物は図 5.3-91 に示すように、1/30 勾配斜面の法肩に設置し、所定の堤脚水深 h' 及び天端高 h_c となるようにした。構造物の模式図を図 5.3-92 に、及び表 5.3-83 に示す。消波工の断面は合田ら (1975) ¹⁾ の実験やテトラポッドのカタログ値を参考に設定した。直立壁の天端幅は全ケース 1.0m とした。

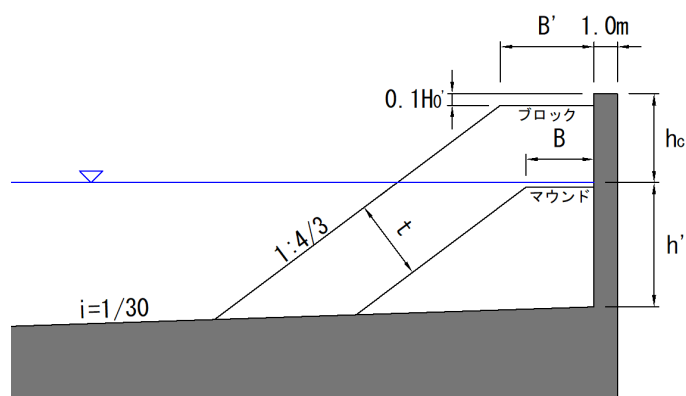


図 5.3-92 構造物の模式図

表 5.3-83 構造物の諸元

Case	消波ブロック		被覆形式諸元			堤脚水深	天端高
	トン型 [t]	体積 [m ³]	t [m]	B [m]	B' [m]	h' [m]	h _c [m]
Case1	12.5	5.0	3.5	2.9	4.0	5.3	3.8
Case2	0.5	0.2	1.2	1.0	1.4	1.7	0.5
Case3	8.0	3.2	3.0	2.4	3.4	10.0	4.3
Case4	2.0	0.8	1.9	1.6	2.2	9.0	2.0

③ 減衰帯位置

沖側に $3L$ 程度の長さの減衰帯を設定した。

(3) モデル化された海底地形

海底地形は、図 5.3-87～図 5.3-90 に示す通り 1/30 勾配とした。造波位置から $1.5L$ の一様水深部を設け、そこから 1/30 勾配の斜面を接続した。

(4) 計算パラメータの設定

表 5.3-84 に全ケース共通の計算パラメータの設定値を示す．表 5.3-85～表 5.3-89 にケース毎に異なるパラメータの設定値を示す．

表 5.3-84 計算パラメーター一覧（全ケース共通）

項目			内容
1	時間制御	時間刻み	AUTO
		解析終了	150 $T_{1/3}$ 程度
2	造波モデル	造波モデル	造波ソース
		造波関数	マトリクスデータ
3	開境界		なし
4	減衰領域		沖側：3L程度，岸側：なし
5	連立1次方程式の解法		デフォルト(M-ILUBCGSTAB法)
6	差分方法		VP-DONOR=0.2
7	物性値等データ		別表に示す
8	乱流モデル		デフォルト(設定しない)
9	スカラー量		デフォルト(設定しない)
10	初期値等		デフォルト(設定しない)
11	格子座標の標準値		tmake_standard-mesh_ver1.9.exeを使用
12	格子間隔の設定	設定領域	別表に示す
13	ポアラスの下限値		0.01
14	障害物データ		10D-4(CADMAS-MESH利用)
15	ポアラスメディア法	空隙率	ブロック：0.5，石：0.43
		(x, y, z 方向)面積透過率	設定しない
		慣性力係数	1.2
		抵抗係数	設定しない
16	D-F則：テトラポッド	α_0	2100
17		β_0	2.2
18		$d_r (=V^{1/3})$	別表に示す
19	D-F則：マウンド	α_0	1500
20		β_0	3.6
21		$d_r (=V^{1/3})$	0.02
22	境界条件	流速・圧力	VP SLIP
23	リストファイル出力制御		適宜設定
24	詳細ファイル出力制御		適宜設定
25	リスタート制御		なし
26	時系列ファイル出力制御		適宜設定（別表に示す）
27	オプション	気泡上昇速度	0.2m/s
		水滴落下速度	自由落下+斜面処理
		表面流速	OPTION S-CELL-VEL 2.0 (変動勾配外挿モデル)
		流速・圧力計算のサブループ	-
		越波升	別表に示す
		D-F則	別表に示す

表 5.3-85 計算パラメータ（物性値データ）

項目		Case1	Case2	Case3	Case4
7	物性値等データ	MATE W-LEVEL 26.000	MATE W-LEVEL 6.000	MATE W-LEVEL 22.000	MATE W-LEVEL 14.000
		MATE DENSITY 1035.000	MATE DENSITY 1035.000	MATE DENSITY 1035.000	MATE DENSITY 1035.000
		MATE K-VISC 1.0D-6	MATE K-VISC 1.0D-6	MATE K-VISC 1.0D-6	MATE K-VISC 1.0D-6
		MATE GRAVITY 9.8	MATE GRAVITY 9.8	MATE GRAVITY 9.8	MATE GRAVITY 9.8

表 5.3-86 計算パラメータ（格子間隔の設定）

項目		Case1		Case2		Case3		Case4	
12	格子間隔の設定	設定領域	格子間隔	設定領域	格子間隔	設定領域	格子間隔	設定領域	格子間隔
	水平格子[m]	-550.0 ~ -184.0m	dx=3.0m	-121.0 ~ 40.0m	dx=0.6m	-472.0 ~ 156.0m	dx=2.528m	-298.0 ~ -100.0m	dx=1.5m
		-184.0 ~ 482.0m	dx=2.0m	-40.0 ~ 116.4m	dx=0.4m	-156.0 ~ 402.0m	dx=2.0m	-100.0 ~ 251.0m	dx=1.0m
		482.0 ~ 688.0m	dx=1.0m	116.4 ~ 160.8m	dx=0.2m	402.0 ~ 518.0m	dx=1.0m	251.0 ~ 301.5m	dx=0.25m
		688.0 ~ 906.0m	dx=0.5m	160.8 ~ 200.0m	dx=0.1m	518.0 ~ 618.0m	dx=0.5m		
	鉛直格子[m]	0.0 ~ 10.0m	dz=2.0m	0.0 ~ 2.8m	dz=0.4m	0.0 ~ 10.0m	dz=2.0m	0.0 ~ 6.0m	dz=1.0m
		10.0 ~ 17.0m	dz=1.0m	2.8 ~ 4.2m	dz=0.2m	10.0 ~ 15.0m	dz=1.0m	6.0 ~ 9.0m	dz=0.5m
		17.0 ~ 29.0m	dz=0.5m	4.2 ~ 11.2m	dz=0.1m	15.0 ~ 25.5m	dz=0.5m	9.0 ~ 27.0m	dz=0.25m
		29.0 ~ 30.0m	dz=0.1m			25.5 ~ 26.5m	dz=0.1m		
		30.0 ~ 50.0m	dz=0.5m			26.5 ~ 43.0m	dz=0.5m		

表 5.3-87 計算パラメータ（D-F 則：テトラポッド）

項目		Case1	Case2	Case3	Case4
16	D-F則： テトラポッド	α_0	2100	2100	2100
17		β_0	2.2	2.2	2.2
18		$d_r (=V^{1/3})$	1.710	0.585	1.474

表 5.3-88 計算パラメータ（時系列ファイル出力制御）

項目			Case1	Case2	Case3	Case4
26	時系列ファイル出力制御		FILE TRN TIME 0.000 1584.000 0.475	FILE TRN TIME 0.000 734.000 0.220	FILE TRN TIME 0.000 1467.000 0.440	FILE TRN TIME 0.000 1167.000 0.350
			FILE TRN W-LEVEL ANS SRC	FILE TRN W-LEVEL ANS SRC	FILE TRN W-LEVEL ANS SRC	FILE TRN W-LEVEL ANS SRC
			FILE TRN W-LEVEL 215 1	FILE TRN W-LEVEL 236 1	FILE TRN W-LEVEL 204 1	FILE TRN W-LEVEL 233 1
			FILE TRN W-LEVEL 230 1	FILE TRN W-LEVEL 304 1	FILE TRN W-LEVEL 209 1	FILE TRN W-LEVEL 249 1
			FILE TRN W-LEVEL 245 1	FILE TRN W-LEVEL 305 1	FILE TRN W-LEVEL 214 1	FILE TRN W-LEVEL 265 1
			FILE TRN W-LEVEL 260 1	FILE TRN W-LEVEL 306 1	FILE TRN W-LEVEL 219 1	FILE TRN W-LEVEL 281 1
			FILE TRN W-LEVEL 275 1	FILE TRN W-LEVEL 307 1	FILE TRN W-LEVEL 224 1	FILE TRN W-LEVEL 297 1
			FILE TRN W-LEVEL 276 1	FILE TRN W-LEVEL 308 1	FILE TRN W-LEVEL 229 1	FILE TRN W-LEVEL 299 1
			FILE TRN W-LEVEL 277 1	FILE TRN W-LEVEL 309 1	FILE TRN W-LEVEL 234 1	FILE TRN W-LEVEL 300 1
			FILE TRN W-LEVEL 278 1	FILE TRN W-LEVEL 310 1	FILE TRN W-LEVEL 239 1	FILE TRN W-LEVEL 301 1
			FILE TRN W-LEVEL 279 1	FILE TRN W-LEVEL 311 1	FILE TRN W-LEVEL 244 1	FILE TRN W-LEVEL 302 1
			FILE TRN W-LEVEL 280 1	FILE TRN W-LEVEL 312 1	FILE TRN W-LEVEL 249 1	FILE TRN W-LEVEL 303 1
			FILE TRN W-LEVEL 281 1	FILE TRN W-LEVEL 313 1	FILE TRN W-LEVEL 254 1	FILE TRN W-LEVEL 304 1
			FILE TRN W-LEVEL 282 1	FILE TRN W-LEVEL 314 1	FILE TRN W-LEVEL 255 1	FILE TRN W-LEVEL 305 1
			FILE TRN W-LEVEL 283 1	FILE TRN W-LEVEL 315 1	FILE TRN W-LEVEL 256 1	FILE TRN W-LEVEL 306 1
			FILE TRN W-LEVEL 284 1	FILE TRN W-LEVEL 316 1	FILE TRN W-LEVEL 257 1	FILE TRN W-LEVEL 307 1
			FILE TRN W-LEVEL 285 1	FILE TRN W-LEVEL 317 1	FILE TRN W-LEVEL 258 1	FILE TRN W-LEVEL 308 1
			FILE TRN W-LEVEL 286 1	FILE TRN W-LEVEL 318 1	FILE TRN W-LEVEL 259 1	FILE TRN W-LEVEL 309 1
			FILE TRN W-LEVEL 287 1	FILE TRN W-LEVEL 319 1	FILE TRN W-LEVEL 260 1	FILE TRN W-LEVEL 310 1
			FILE TRN W-LEVEL 288 1	FILE TRN W-LEVEL 320 1	FILE TRN W-LEVEL 261 1	FILE TRN W-LEVEL 311 1
			FILE TRN W-LEVEL 289 1	FILE TRN W-LEVEL 321 1	FILE TRN W-LEVEL 262 1	FILE TRN W-LEVEL 312 1
			FILE TRN W-LEVEL 290 1	FILE TRN W-LEVEL 322 1	FILE TRN W-LEVEL 263 1	FILE TRN W-LEVEL 313 1
			FILE TRN W-LEVEL 291 1	FILE TRN W-LEVEL 323 1	FILE TRN W-LEVEL 264 1	FILE TRN W-LEVEL 314 1
			FILE TRN W-LEVEL 292 1	FILE TRN W-LEVEL 324 1	FILE TRN W-LEVEL 265 1	FILE TRN W-LEVEL 315 1
			FILE TRN W-LEVEL 293 1	FILE TRN W-LEVEL 325 1	FILE TRN W-LEVEL 266 1	FILE TRN W-LEVEL 316 1
			FILE TRN W-LEVEL 294 1	FILE TRN W-LEVEL 326 1	FILE TRN W-LEVEL 267 1	FILE TRN W-LEVEL 317 1
			FILE TRN W-LEVEL 295 1	FILE TRN W-LEVEL 327 1	FILE TRN W-LEVEL 268 1	FILE TRN W-LEVEL 318 1
			FILE TRN W-LEVEL 296 1	FILE TRN W-LEVEL 328 1	FILE TRN W-LEVEL 269 1	FILE TRN W-LEVEL 319 1
			FILE TRN W-LEVEL 297 1	FILE TRN W-LEVEL 329 1	FILE TRN W-LEVEL 270 1	FILE TRN W-LEVEL 320 1
			FILE TRN W-LEVEL 298 1	FILE TRN W-LEVEL 330 1	FILE TRN W-LEVEL 271 1	FILE TRN W-LEVEL 321 1
			FILE TRN W-LEVEL 299 1	FILE TRN W-LEVEL 331 1	FILE TRN W-LEVEL 272 1	FILE TRN W-LEVEL 322 1
			FILE TRN W-LEVEL 300 1	FILE TRN W-LEVEL 332 1	FILE TRN W-LEVEL 273 1	FILE TRN W-LEVEL 323 1
			FILE TRN W-LEVEL 301 1	FILE TRN W-LEVEL 333 1	FILE TRN W-LEVEL 274 1	FILE TRN W-LEVEL 324 1
			FILE TRN W-LEVEL 302 1	FILE TRN W-LEVEL 334 1	FILE TRN W-LEVEL 275 1	FILE TRN W-LEVEL 325 1
			FILE TRN W-LEVEL 303 1	FILE TRN W-LEVEL 335 1	FILE TRN W-LEVEL 276 1	FILE TRN W-LEVEL 326 1
			FILE TRN W-LEVEL 304 1	FILE TRN W-LEVEL 336 1	FILE TRN W-LEVEL 277 1	FILE TRN W-LEVEL 327 1
			FILE TRN W-LEVEL 305 1	FILE TRN W-LEVEL 411 1	FILE TRN W-LEVEL 278 1	FILE TRN W-LEVEL 328 1
			FILE TRN W-LEVEL 306 1	FILE TRN W-LEVEL 486 1	FILE TRN W-LEVEL 279 1	FILE TRN W-LEVEL 329 1
			FILE TRN W-LEVEL 337 1	FILE TRN W-LEVEL 595 1	FILE TRN W-LEVEL 280 1	FILE TRN W-LEVEL 330 1
			FILE TRN W-LEVEL 367 1	FILE TRN W-LEVEL 745 1	FILE TRN W-LEVEL 281 1	FILE TRN W-LEVEL 331 1
			FILE TRN W-LEVEL 397 1	FILE TRN W-LEVEL 830 1	FILE TRN W-LEVEL 282 1	FILE TRN W-LEVEL 332 1
			FILE TRN W-LEVEL 427 1	FILE TRN INT F 841 1 1 1140 1 83	FILE TRN W-LEVEL 312 1	FILE TRN W-LEVEL 333 1
			FILE TRN W-LEVEL 458 1		FILE TRN W-LEVEL 342 1	FILE TRN W-LEVEL 363 1
			FILE TRN W-LEVEL 518 1		FILE TRN W-LEVEL 372 1	FILE TRN W-LEVEL 393 1
			FILE TRN W-LEVEL 578 1		FILE TRN W-LEVEL 402 1	FILE TRN W-LEVEL 423 1
			FILE TRN W-LEVEL 638 1		FILE TRN W-LEVEL 459 1	FILE TRN W-LEVEL 453 1
			FILE TRN W-LEVEL 734 1		FILE TRN W-LEVEL 519 1	FILE TRN W-LEVEL 482 1
			FILE TRN W-LEVEL 854 1		FILE TRN INT F 521 1 1 721 1 73	FILE TRN INT F 484 1 1 684 1 87
			FILE TRN W-LEVEL 895 1			
			FILE TRN INT F 898 1 1 1098 1 85			

表 5.3-89 計算パラメータ（オプション）

項目			Case1	Case2	Case3	Case4
27	オプション	越波升	DEBUG F-BOX 898 1 6 1098 1 44 0.000	DEBUG F-BOX 841 1 7 1140 1 37 0.000	DEBUG F-BOX 521 1 7 721 1 40 0.000	DEBUG F-BOX 484 1 7 684 1 44 0.000
		OPTION DRAG-DF 1E-6 2		OPTION DRAG-DF 1E-6 2	OPTION DRAG-DF 1E-6 2	OPTION DRAG-DF 1E-6 2
		D-F則	0.02 1500 3.6	0.020 1500 3.6	0.020 1500 3.6	0.020 1500 3.6
			1.71 2100 2.2	0.585 2100 2.2	1.474 2100 2.2	0.928 2100 2.2

(5) 作用波の検定

構造物を設置しない状態（海底地形のみ）で、目標とした作用波となっているか検定を行った。造波水深 h から入射位置の浅水係数 K_s を算出し、目標換算沖波波高 $H'_{0,tar}$ に浅水係数を乗じ、その波高を入射波高 $H_{1/3}$ とした。造波水深は、目標換算沖波波高の 5 倍程度とした。表 5.3-90 に入射波高の条件を示す。なお、作用波検定では、図 5.3-87～図 5.3-90 に示す計算領域の岸側に減衰領域を設定している。

表 5.3-91 に作用波の検定結果を示す。作用波の検定は、一様水深部である 1/30 勾配斜面の法先で実施した。計算で得られた有義波高 $H_{1/3,cal}$ を浅水係数 K_s で除することで換算沖波波高 $H'_{0,cal}$ を算定した。計算値と目標値の比率は、換算沖波波高が 0.97～1.01、有義周期が 0.98～1.06 であり、概ね目標値に近い結果となっていることを確認した。

表 5.3-90 入射波の条件

Case	目標条件		造波位置での入射波諸元						
	換算沖波波高 $H'_{0,tar}$ [m]	周期 $T_{0,tar}$ [s]	造波水深		水深波高比 h/H_0' [-]	水深波長比 h/L_0 [-]	浅水係数 K_s [-]	有義波高 $H_{1/3}$ [m]	有義周期 $T_{1/3}$ [s]
			$5H_0'$ [m]	h [m]					
1	5.03	9.50	25.15	26.00	5.17	0.18	0.915	4.60	9.50
2	1.08	4.40	5.40	6.00	5.56	0.20	0.918	0.99	4.40
3	4.34	8.80	21.70	22.00	5.07	0.18	0.915	3.97	8.80
4	2.73	7.00	13.65	14.00	5.13	0.18	0.915	2.50	7.00

表 5.3-91 作用波検定の結果

Case	目標条件				入射波条件				検定結果（斜面法先位置）			
	構造物位置		有義波高	有義周期	有義波高	有義周期	有義波高	有義周期	波数	換算沖波波高	計算値/目標	
	H _{0',tar} [m]	T _{0,tar} [s]									H _{1/3,tar} [m]	T _{1/3,tar} [s]
Case1	5.03	9.50	4.60	9.50	5.00	9.50	4.448	9.687	171	4.861	0.97	1.02
Case2	1.08	4.40	0.99	4.40	1.10	4.40	0.971	4.484	176	1.058	0.98	1.02
Case3	4.34	8.80	3.97	8.80	4.65	8.00	4.007	9.366	172	4.379	1.01	1.06
Case4	2.73	7.00	2.50	7.00	2.80	7.00	2.462	6.873	171	2.691	0.99	0.98

(6) 構造物・計測

① 計算格子上への構造物の設定

消波工（消波ブロック，マウンド）は，CADMAS-MESH で STL 形式の構造物データを読み込んで作成した．『標準メッシュ』で作成した格子が，構造物天端と一致しない場合には，天端高にあうように構造物上端付近の Z 方向の数格子で調整を行った．

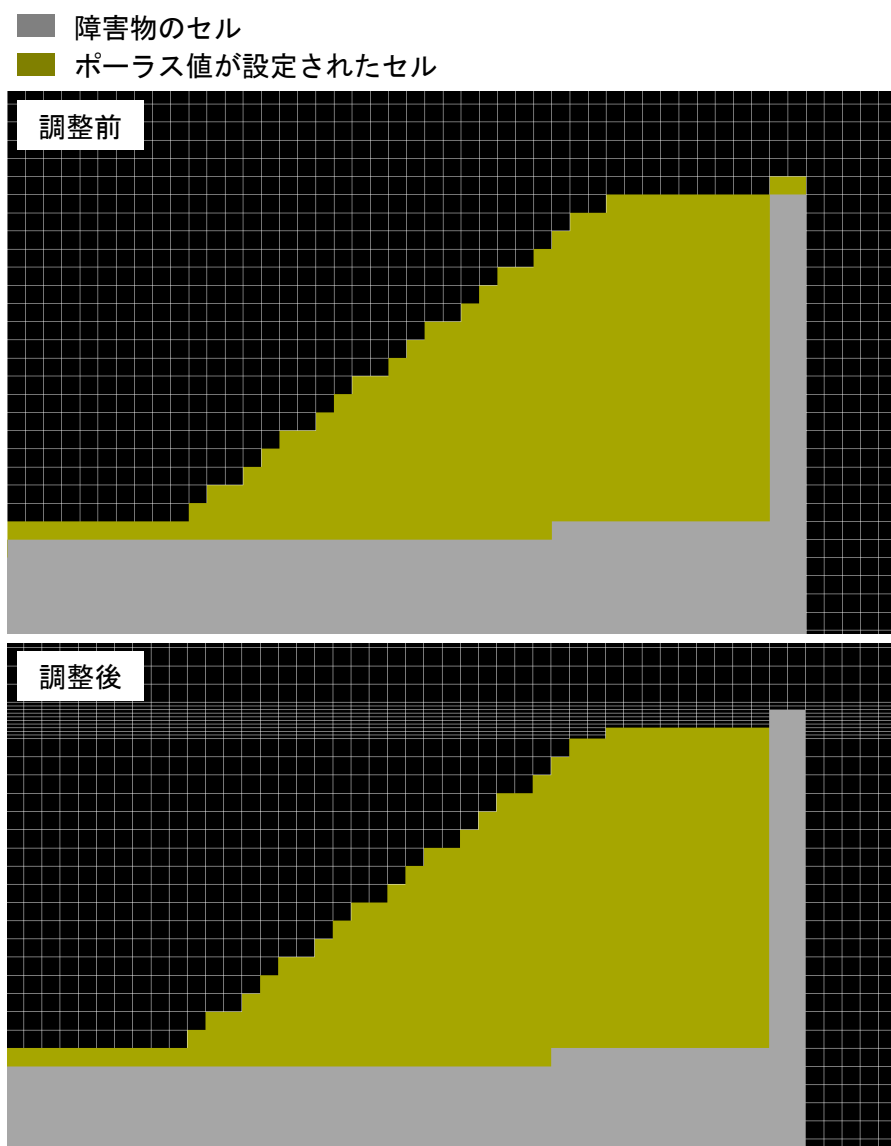


図 5.3-93 CADMAS-MESH での Z 方向格子の調整例 (Case1)

	CADMAS-MESH	CS3D-『標準メッシュ』
Case1		
Case2		
Case3		
Case4		
凡例	消波ブロック マウンド 障害物のセル ポラス値が設定されたセル	障害物のセル ポラス値が設定されたセル

図 5.3-94 CADMAS-MESH と CS3D-『標準メッシュ』の構造物の設定図（描写比 $X/Z=1.0$ ）

② 水位・流速・波圧・越波量モニタリング位置の設定

図 5.3-95 に Case1 の水位と越波量のモニタリング位置を示す. 水位の計測位置は, 造波位置から直立壁前面までの任意の地点とした. 図 5.3-96 に Case1 の越波量の算定領域を示す. 単位長さ当たりの越波量 Q [m^3/m] は, 直立壁を超えた越波升全領域の VOF 関数 F 値を積分することで算出した. Case2~Case4 のモニタリング位置も Case1 と同様の設定とした.

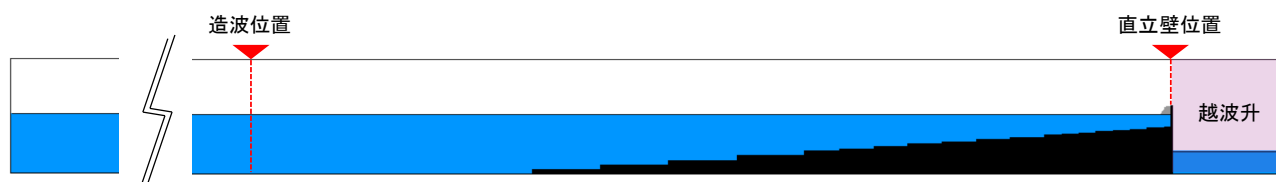


図 5.3-95 水位・越波量のモニタリング位置概要図 (Case1, 描写比 $X/Z=0.5$)

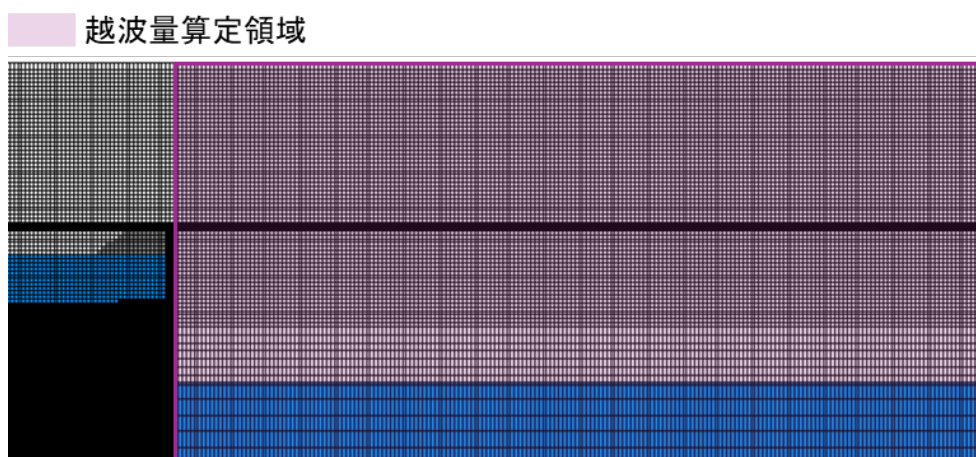


図 5.3-96 越波量の算定領域 (Case1)

(7) 数値解析の実施

① 解析結果の整理

作用波の検定で採用した入射波浪を用いて、越波量の計算を行った。構造物位置で 150 波程度が作用するようにした。図 5.3-97～図 5.3-100 に各ケースの越波量の時系列図を示す。

越波流量は、越波量 Q [m³/m] を計算時間で除することで、単位幅・単位時間当たりの平均越波流量 q [m³/m/s] を算出した。さらに、作用波の検定で得られた換算沖波波高 $H'_{0,cal}$ で除した無次元越波流量 q^* ($=q/(2g(H'_{0,cal})^3)^{0.5}$) を算出した。表 5.3-92 に無次元越波流量の算定結果を示す。

表 5.3-92 無次元越波流量の算定結果

Case	目標条件				作用波検定結果					越波量計算結果			
	換算沖波 H'_0 [m]	周期 T_0 [s]	堤脚水深 h' [m]	天端高 h_c [m]	換算沖波波高 $H'_{0,cal}$ [m]	周期 $T_{1/3,cal}$ [s]	波形勾配 $H'_{0,cal}/L_0$ [-]	相対水深 $h'/H'_{0,cal}$ [-]	相対天端高 $h_c/H'_{0,cal}$ [-]	合田推定値 q^*_{Goda} [-]	越波流量 q_{cal} [m ³ /s/m]	無次元越波流量 q^*_{cal} [-]	計算値/推定値 q^*_{cal}/q^*_{Goda} [-]
Case1	5.03	9.50	5.30	3.80	4.861	9.687	0.033	1.09	0.78	3.90E-04	2.42E-02	5.10E-04	1.31
Case2	1.08	4.40	1.70	0.50	1.058	4.484	0.034	1.61	0.47	4.80E-03	2.59E-02	5.38E-03	1.12
Case3	4.34	8.80	10.00	4.30	4.379	9.366	0.032	2.28	0.98	4.90E-04	5.32E-03	1.31E-04	0.27
Case4	2.73	7.00	9.00	2.00	2.691	6.873	0.037	3.34	0.74	1.20E-03	4.28E-02	2.19E-03	1.82

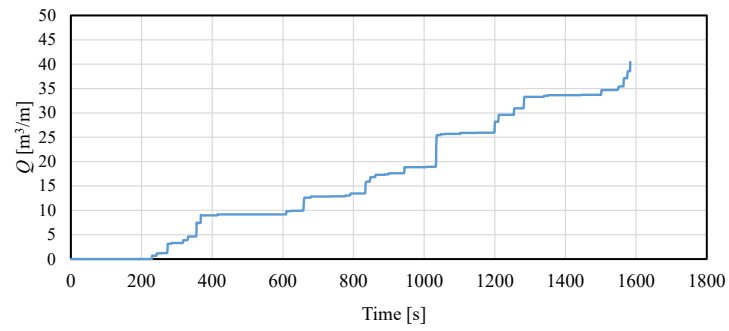


図 5.3-97 越波量の時系列図 (Case1)

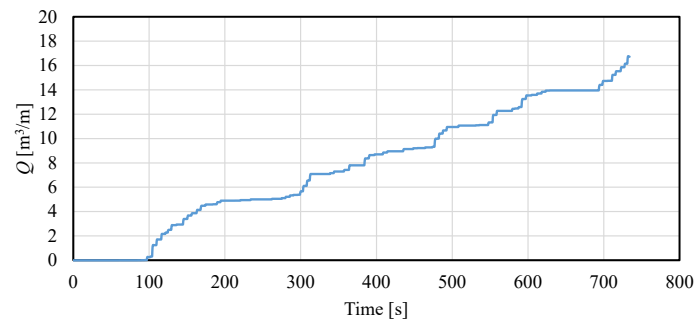


図 5.3-98 越波量の時系列図 (Case2)

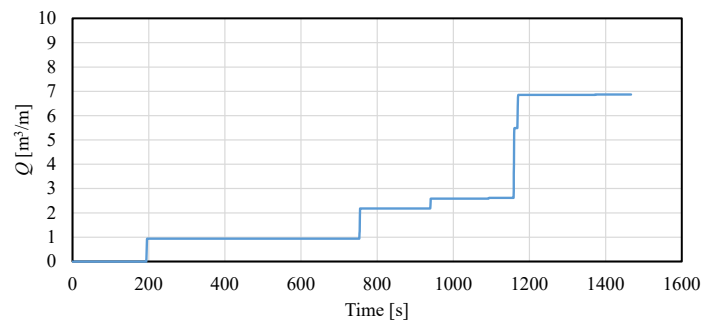


図 5.3-99 越波量の時系列図 (Case3)

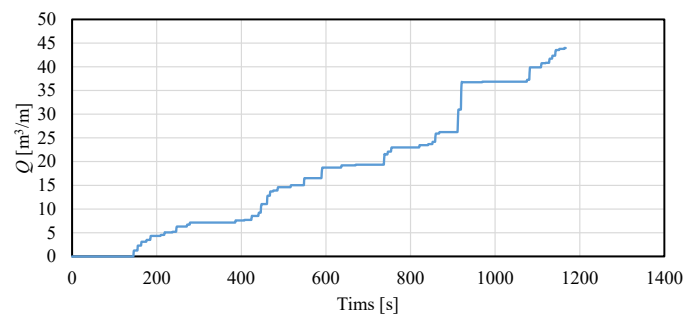


図 5.3-100 越波量の時系列図 (Case4)

② 解析結果の分析

図 5.3-101 は、計算で得られた無次元越波流量 q^*_{cal} と合田の越波流量推定図から読み取った無次元越波流量 q^*_{Goda} を比較した図である。図中には、表 5.3-93 に示す越波流量の推定値に対する真値の想定範囲を点線で示している。いずれのケースも合田の真値の想定範囲内に収まる結果となった。Case1～Case4 の計算値と推定値の比はそれぞれ、1.31, 1.12, 0.27, 1.82 であり、Case3 のみ計算値 < 推定値となり過小評価となった。

表 5.3-93 に示す越波流量推定図の推定精度を考慮すると、『標準メッシュ』を用いた越波流量の計算結果は実用上十分な精度で算定することが可能と考えられる。しかし、越波現象はばらつきがあり、特に越波流量が少ないケースは、1 波の影響が大きいいため、十分に留意する必要がある。

表 5.3-93 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲¹⁾

$q/\sqrt{2g(H'_0)^3}$ のオーダー	直立護岸	消波護岸	該当する計算ケース
10^{-2}	0.7 ～ 1.5 倍	0.5 ～ 2 倍	-
10^{-3}	0.4 ～ 2 倍	0.2 ～ 3 倍	Case2, Case4
10^{-4}	0.2 ～ 3 倍	0.1 ～ 5 倍	Case1, Case3
10^{-5}	0.1 ～ 5 倍	0.05 ～ 10 倍	-

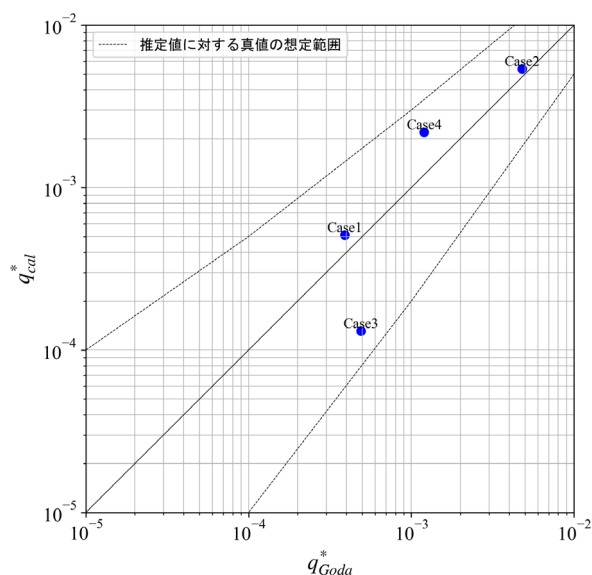


図 5.3-101 計算値と合田の推定値の無次元越波流量の比較

5.4 工夫・留意点

「5.3 計算事例の詳細」より、『標準メッシュ』による数値モデル及び空間格子の作成並びにそれによる波の伝播及び越波の計算を行った。この一連の検討に関して、作業上の工夫点や留意点、越波流量の評価方法に関して研究会内で活発に議論された。

これらの議論が実務上の検討においても有用な手引きとなることを期待して、その内容を表 5.4-1 に整理する。

表 5.4-1 主な工夫点・留意点等

内容	事例番号
護岸の天端高や初期水位の鉛直座標が計算格子の分割位置と一致するように格子間隔の微調整を行った。	計算事例 5
入射波検定に用いる鉛直方向の計算格子間隔は、「構造物あり」の条件と同一であることが望ましいが、『標準メッシュ』は、鉛直計算格子を地形条件に合わせて設定することから、斜面や構造物がない入射波検定の条件下では鉛直方向格子が細分化されない。そこで本検討では、入射波検定用の鉛直計算格子を「構造物あり」の条件と同様となるように手動で調整した。	計算事例 7
計算が不安定なケースについては、計算タイムステップの安全率を変更して途中からリスタートする等により、予定していた波数 600 波までの計算を完了した。ただし、防波堤の堤脚水深が汀線より岸側に位置するケースでは、計算が特に不安定となったことから、265 波程度で計算を打ち切り、240 波程度の波数で越波流量を算定した。600 波の計算を 1 計算実施して解析作業をするほうが、作業工数は少ないが、計算が不安定な場合には、200 波を 3 波群、150 波を 4 波群等の工夫をして計算精度を担保することも検討する必要があると考えられる。	計算事例 7
VOF 値で越波流量を評価する際の初期水位は格子間隔が粗い位置に設定してしまうと、過小評価の要因となるため、 $\Delta x/2$ 未満の格子サイズの位置に設定する方がよい。また、流量の積分値で計測を行う方がより VOF 値の計測より大きめの解析結果が得られる。	計算事例 8

第5章の参考文献

- 1) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 14, No. 4, pp. 3~44, 1975.
- 2) 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 (上巻), p. 169, 2018.
- 3) 千綿蒔, 織田幸伸: 護岸における二重パラペットの越波流量特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp. I_391~I_396, 2022.
- 4) 阿部洋士, 高橋武志, 鈴木高二朗, 中澤祐飛: 改良型護岸の越波流量低減効果と CADMAS-SURF の再現性の検証, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 62, No. 3, 2023.
- 5) 西尾彰文, 荒木進歩, 澁谷容子, 神田泰成, 久保田真一: 水理機能とライフサイクルコストを考慮した消波工の最適な補修断面の推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), No. 78, Vol. 2, pp. I_679~I_684, 2022.
- 6) 阿部洋士, 高橋武志, 中澤祐飛, 鈴木高二朗: 改良型護岸の越波量低減効果に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 78, No. 2, pp. I_607~I_612, 2022.
- 7) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 2, pp. 151~205, 1982.