

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和7年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号：令和7年2月25日付 第15－4号

研究開発項目：(⑧) その他、当センターの目的に合致するもの

係留式越波対策工の実現に
向けた基礎的検討

令和8年4月30日

九州大学大学院工学研究院
山城 賢

目次

1. はじめに	1
2. 係留式越波対策工の概略.....	2
3. 水理模型実験および最適条件の選定手法.....	3
3.1 水理模型実験の概略.....	3
3.1.1 実験装置および計測方法.....	3
3.1.2 入射波条件.....	7
3.1.3 対策工の条件.....	8
3.2 最適条件の選定手法の検討.....	9
3.2.1 最適条件の選定フロー.....	9
3.2.2 実験結果の整理.....	10
3.2.3 最適条件選定図の作成.....	11
3.2.4 最適条件選定手順	14
3.3 斜め入射波に対する検討.....	15
3.3.1 実験概要	15
3.3.2 実験条件	16
3.3.3 実験結果	17
4. 数値シミュレーションによる作用張力評価の高精度化と 3 次元化	20
4.1 これまでの開発状況.....	20
4.2 数値シミュレーションモデル.....	20
4.3 作用張力評価の高精度化に関する検討.....	20
4.4 現地適用を考慮した寸法の対策工についての検討.....	23
4.5 斜め入射波を考慮した 3 次元数値シミュレーション.....	24
4.5.1 水槽と対策工の配置に関する検討.....	24
4.5.2 斜め入射波の再現性に関する検討.....	25
4.5.3 張力のシミュレーション結果.....	26
5. おわりに	27
参考文献	28

1. はじめに

台風や低気圧接近時に沿岸域で発生する越波は、護岸背後の地域に様々な被害をもたらす。加藤ら(1999)は越波被害について、海岸構造物被災、家屋の損壊、浸水、飛沫、砂礫の打上げ、塩害、通行規制の 8 種類を挙げている。越波についてはこれまでに数多くの研究がなされ、護岸の設計手法も確立されているが、近年では、気候変動による海面の上昇や台風の強大化が懸念されており、これまで越波していなかった護岸においても将来的に越波が発生するようになると考えられる。実際に、2018 年台風 21 号では関西空港（伊藤ら，2019）や南芦屋浜（中條ら，2019），2019 年台風 15 号では横浜市金沢区臨海部（高木ら，2020）など、これまで被害を受けていない護岸において、越波による浸水被害が発生し大きな社会問題となった。

越波被害の増加への対策としては、護岸の嵩上げや消波工の設置などが考えられるが、設置する空間や地形、社会情勢の変化に伴う国や自治体の財政悪化などの制約により、これらの対策工を新設するのは困難な場合もある。このような観点から、既存の護岸に越波低減効果を持つ対策工を付加する簡易な越波対策工について研究が行われており、川崎ら(2010)は既存の護岸に浮体パネルを併設し、水理模型実験によりその越波低減効果を示した。また、榎田ら(2013)は防波柵の越波低減効果について検討を行っている。著者らは、図-1.1 に示すような円柱状のものを係留する低コストかつ簡易な越波対策工（以後、係留式越波対策工と呼ぶ）を提案し、実現を目指して、水理模型実験と数値シミュレーションによる検討を進めている。

本研究では、係留式越波対策工の実現に向け、これまでの断面 2 次元的な検討を継続し、入射波や対策工の条件が異なるデータをさらに追加して、対策工の最適条件の選定手法を提案した。並行して、今後、斜め入射波や対策工の配置の影響を詳細に評価するため、平面水槽を用いた水理模型実験と 3 次元数値シミュレーションに関する基礎的な検討を行った。

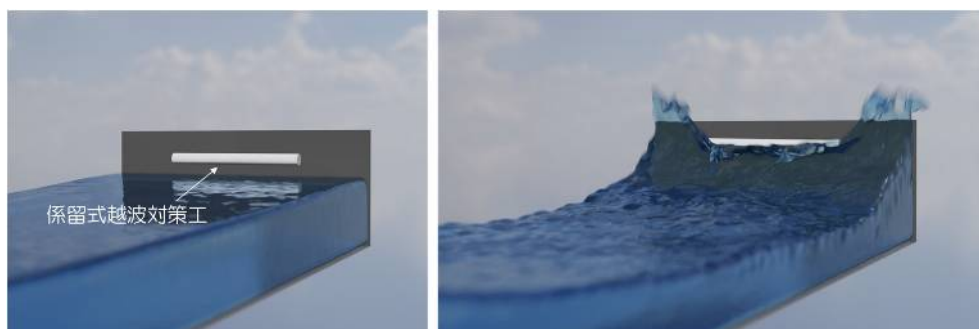


図-1.1 係留式越波対策工のイメージ

（左：設置状況，右：越波を防ぐ様子（数値シミュレーション結果））

2. 係留式越波対策工の概略

著者らが提案する係留式越波対策工は、図-1.1 に示すようなもので、越波水塊の力を直接受け止めるパラペットや越波防止柵などの剛構造物ではなく、軽量円柱を 2 本の係留索で既存の護岸に吊り下げる柔構造物で、波に追従して上下に動く点が特徴である。本対策工は越波の頻度が高い場所や護岸天端の越流被害が懸念される場所ではなく、気候変動にともなう海面上昇によって図-2.1 のような護岸を遡上するタイプの越波被害が生じると予想される場所での使用を想定している。そして、越波を完全に防止するのではなく、あくまでも許容越波流量に収まるように低減するものである。また、既往の技術である鉄筋コンクリートでの嵩上げや消波工とは異なり、本対策工は係留索などの定期的なメンテナンスが必要となる。ただし、既往技術に比べると設置・撤去が容易（大きな施工機械が不要、施工日数も短い）で、初期コストも大幅に低減することができる。ライフサイクルコストや費用対効果を考慮すると、本対策工が有利になると考えている。また、既設護岸よりも低い位置に設置するため、陸上から海を眺めたときの景観は変化しないことから、工事を行う際の利用者等からの同意も得やすいと考える。

これまでの検討で、本対策工が高い越波低減効果を有することを確認している。さらに、対策工の重量によって波の打上げへの応答が異なり、越波低減効果に差が生じることや、波が作用した際に対策工がたわむことで係留索に作用する張力が低減する可能性があることなどが分かった（中谷ら，2019，山城ら，2020，坂本ら，2021，向田ら，2024）。

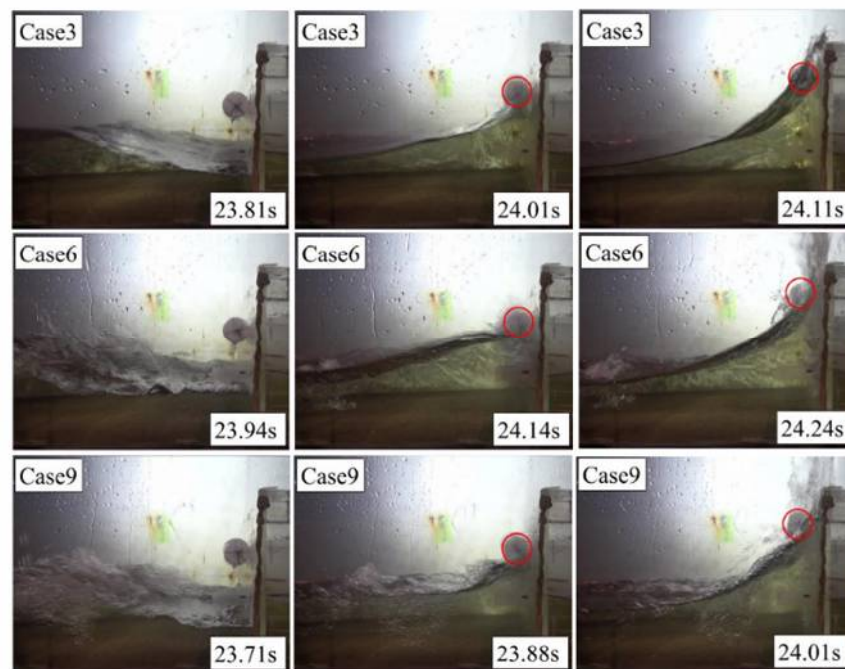


図-2.1 対策工に波が作用する様子

3. 水理模型実験および最適条件の選定手法

3.1 水理模型実験の概略

3.1.1 実験装置および計測方法

本研究には図-3.1.1, 図-3.1.2 に示す反射吸収式二次元造波水路（長さ 23.5m×高さ 1.2m×幅 0.6m）を用いた。水深は 54cm とし、実験の様子を水路の側面および上面からビデオカメラを用いて撮影した。

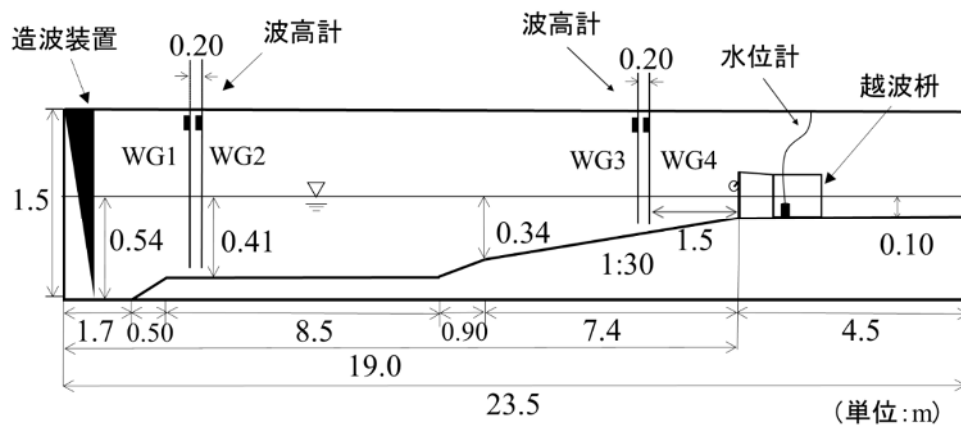


図-3.1.1 反射吸収式断面 2 次元造波水路の概略図



図-3.1.2 水路内

本実験で使用した模型護岸は縮尺を 1/45 として作成した。発泡スチロール製の対策工（直径 1～5 cm，長さ 5～30 cm，重さ 1.2～38.71 g）をナイロン製の釣り糸（3 号）により係留した。なお，後述するが，対策工については幾つか寸法が異なる模型を作成して実験を行った。護岸に穴をあけて係留索を通し，堤内に設置したひずみゲージに取り付けた。図-3.1.3 は模型護岸の概略図であり，図-3.1.4 のように模型護岸を設置した。護岸の高さは 24cm であり，護岸前面の水深は 10cm と設定したため天端高は 14cm である。

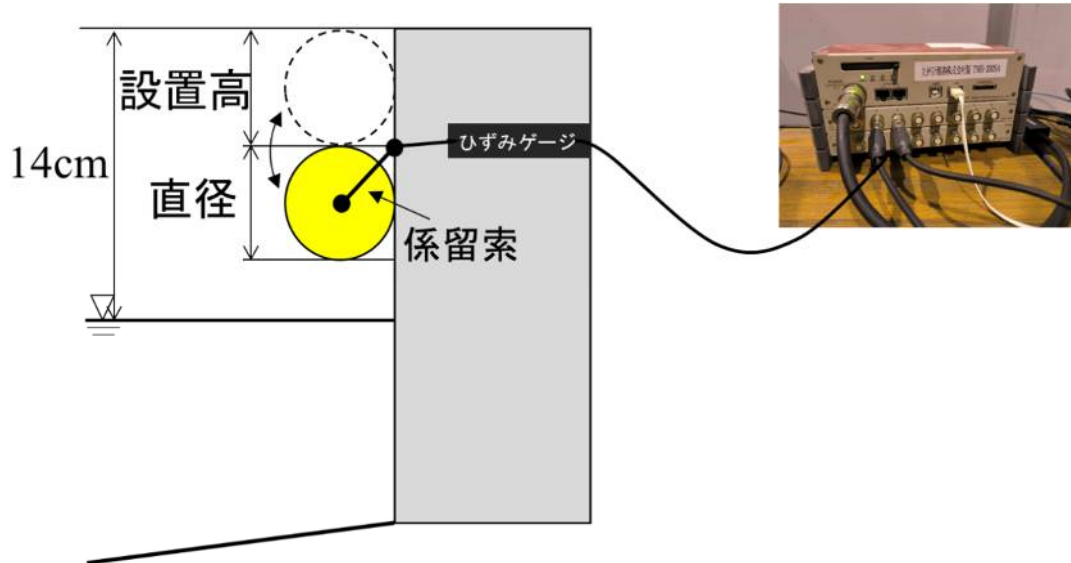


図-3.1.3 模型護岸の概略図

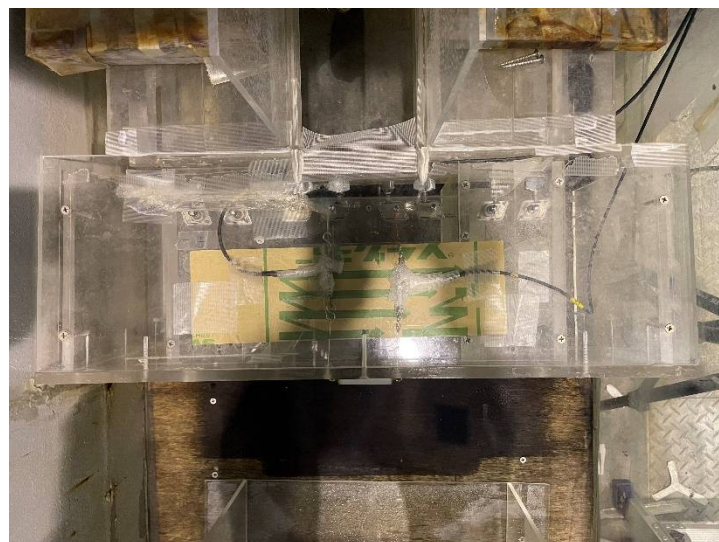


図-3.1.4 模型護岸（上面）

図-3.1.5 に示す位置に計 4 本の波高計を設置し、サンプリング周波数 10Hz で水面変動を計測した。各波高計は沖から順に WG(Wave Gage)1, WG2, WG3, WG4 となっており、WG1 と WG2 は造波装置近傍(水深 0.41m), WG3 と WG4 は護岸から 1.5m 沖の地点に設置した。WG1 と WG2, WG3 と WG4 の波高計の間隔はどちらも 0.20m とした。

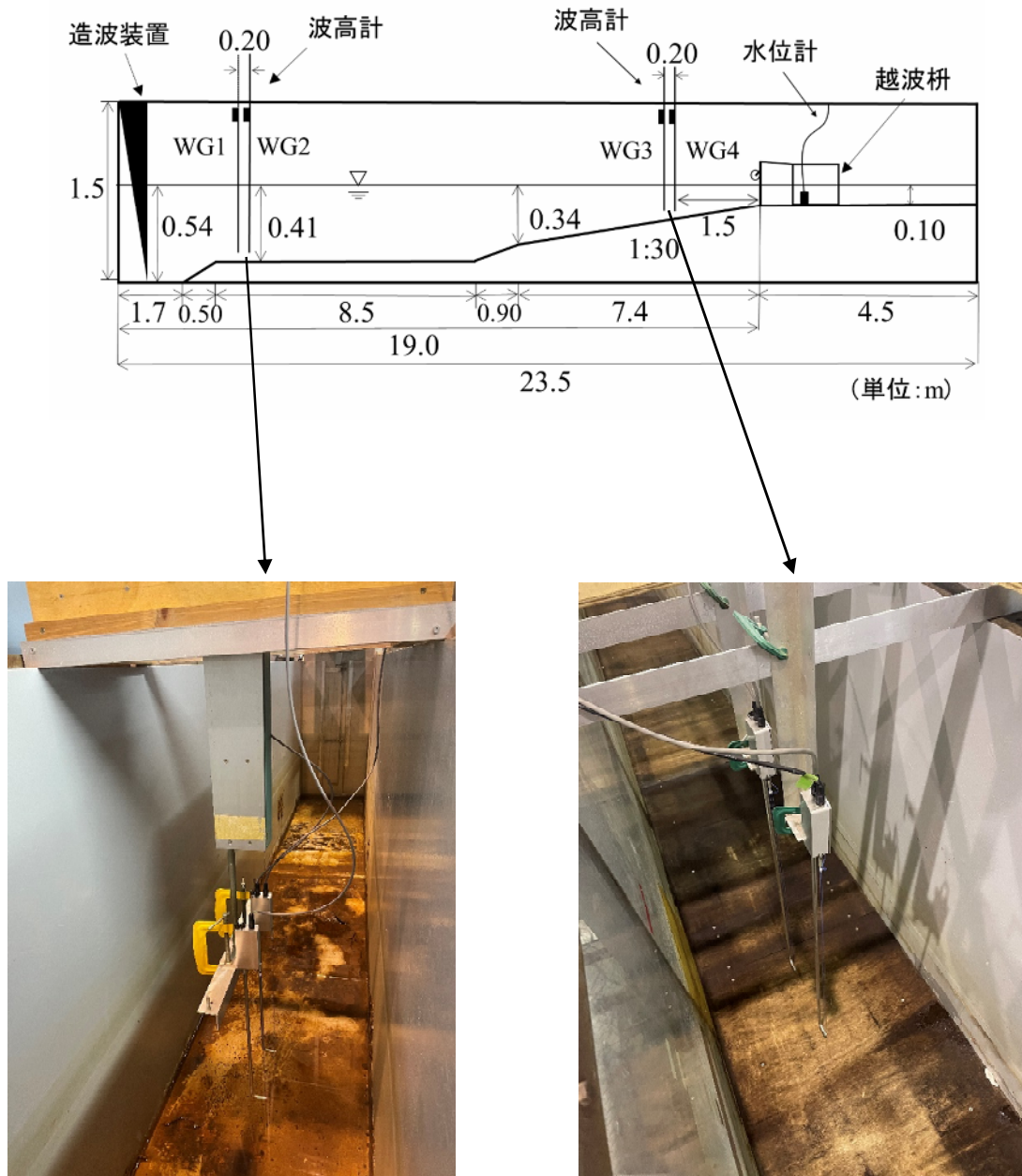


図-3.1.5 波高計の設置状況

係留索に作用する張力については、図-3.1.6 に示すように、対策工両端の係留索を護岸の内部に設置したひずみゲージに繋ぎ、サンプリング周波数 1,000 Hz で測定した。なお、係留索に作用する張力については、対策工が水平に係留できていない、あるいは、一方の係留索が緩いなどのアンバランスが計測精度に大きく影響する。そのため、対策工模型の設置および係留索とひずみゲージの接続にあたっては、対策工が水平に係留され、両端の係留索に均等に力が作用するよう確認しつつ細心の注意を払い設置した。

越波流量の計測については、図に示すように護岸模型の背後に越波柵を設置し、護岸中央の 10cm あるは 5 cm の幅で越波水が越波柵に流れ込むようにして柵内の水位の経時変化を水位計で計測した。

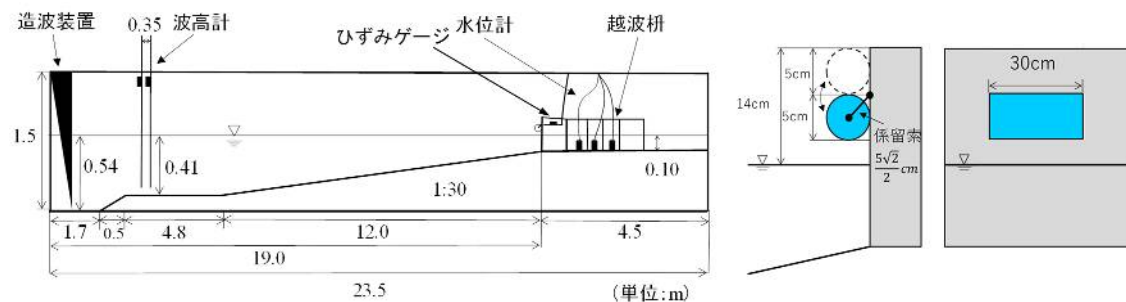


図-3.1.6 係留索に作用する張力および越波量の計測

3.1.2 入射波条件

係留索に作用する張力の検討では、最大波を想定した規則波を用いた。前述のとおり、本対策工は激しい越波を想定したおらず、これまで越波しなかった護岸が海面上昇等の影響により越波が生じるようになった場合を対象としていることから、極端に大きな入射波ではなく、通常は静穏な海域で生じる荒天時の波を想定し、瀬戸内海における 2020 年台風 10 号来襲時の波浪観測データを参考に、表-3.1.1 に示す 9 種の規則波とした。なお、表中の H は造波装置前（水深 0.41m）での浅水変形を考慮した波高である。また、張力の計測は、各ケース 5 回ずつ行った。

表-3.1.1 張力計測の実験に用いた入射波

	T(s)	H ₀ (cm)	H(cm)
Case1	0.745	6.67	6.59
Case2	1.04	6.67	6.21
Case3	1.34	6.67	6.11
Case4	0.745	8.89	8.79
Case5	1.04	8.89	8.28
Case6	1.34	8.89	8.16
Case7	0.745	11.1	11.0
Case8	1.04	11.1	10.4
Case9	1.34	11.1	10.2

3.1.3 対策工の条件

坂本ら(2021), 新免ら(2022), 向田ら(2024), 沢本ら(2025)により実施された実験の条件を表-3.1.2 に整理する. 表中の設置高は, 図-3.1.3 に示すように, 護岸天端から対策工までの距離を示す.

共振対策とは, 長時間造波し続けることで水路幅方向に生じる共振を, 模型護岸の両端からそれぞれ 15cm 内側にアクリル板 (縦 59cm, 横 15cm) を設置して対策したものである.

たわみ対策とは, 細長い対策工が波作用時にたわむことで張力が低下する点を改善するため, たわみを抑制したものである. 真鍮棒を使用したものは長さ 30cm の対策工模型 (発泡スチロール製) に直径 1.5mm と 1.0mm で長さが 30cm の真鍮棒を 2 本ずつ (計 7.9g) を差し込んだものである. 塗料を用いたものは, 発泡スチロールに塗料を塗ることで表面を固めたものである.

表-3.1.2 実験条件一覧

	質量[g]	長さ[cm]	直径[cm]	設置高[cm]	係留策[cm]	共振対策	たわみ対策
①	38.7	30	5.0	5.0	3.54	なし	－
②	6.4	30	2.5	5.0	1.77		－
③	6.4	30	2.5	5.0	1.77	あり	－
④	14.3	30	2.5	5.0	1.77		真鍮棒 (計7.9g)
⑤	14.3	30	2.5	2.5	1.77		塗料
⑥	16.2	30	2.5	2.5	1.77		－
⑦	15.8	30	2.5	2.5	1.77		－
⑧	15.8	30	2.5	2.5	4.00		塗料
⑨	3.4	5.0	2.5	2.5	1.77		－
⑩	1.2	5.0	1.0	2.5	0.71		－
⑪	1.2	5.0	1.0	1.5	0.71		－

3.2 最適条件の選定手法の検討

3.2.1 最適条件の選定フロー

係留式越波対策工の最適な条件を選定するフローを図-3.2.1に示す。波の打ち上げ状況については、諸条件から水理模型実験や数値シミュレーションにより把握できる。原ら(2023)によれば、打ち上げ波面の形状は、図-3.2.2に示すように、静水面と壁面を遡上する最大打ち上げ高からなる三角形を求め、打ち上げ角度 $\tan\theta$ として整理することで、非線形性の弱い三角型と非線形性の強い放物型に大別される。三角型に比べて放物型は護岸天端を超える打ち上がりが多いと述べているため、放物型の打ち上げを対象とする。対策工は、最大波の打ち上げ高から越波流量と係留索に作用する張力を推定し、許容越波流量を満たす寸法（直径、長さ）と設置高および係留索を決定する。

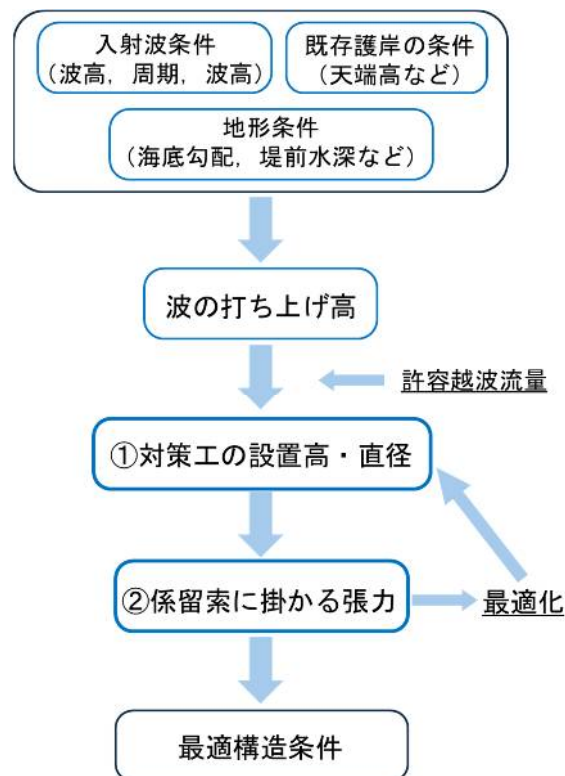


図-3.2.1 最適条件選定フロー

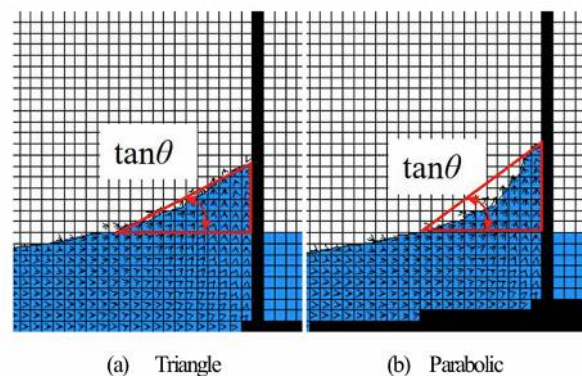


図-3.2.2 打ち上げ角度と打ち上げ形状の定義（原ら(2023)より引用）

3.2.2 実験結果の整理

表-3.1.2 で示した条件で行われた実験結果をまとめると、図-3.2.3 および図-3.2.4 のようになる。どちらも横軸が打ち上げ高と天端高の比および設置高と対策工の直径の比としており、図-3.2.3 の縦軸は無次元越波流量 $[\times 10^{-4}]$ 、図-3.2.4 は重力で無次元化した係留索に作用する張力である。図の凡例は表-3.1.1 で示した 9 ケースの入射波の条件を示し、プロットの大きさは対策工の直径を示している。

同じ横軸の値でも縦軸に複数の値を取るのは、共振対策やたわみ対策の有無、係留索の長さの違いなど、グラフに使用しているパラメータ以外の条件が異なるためである。

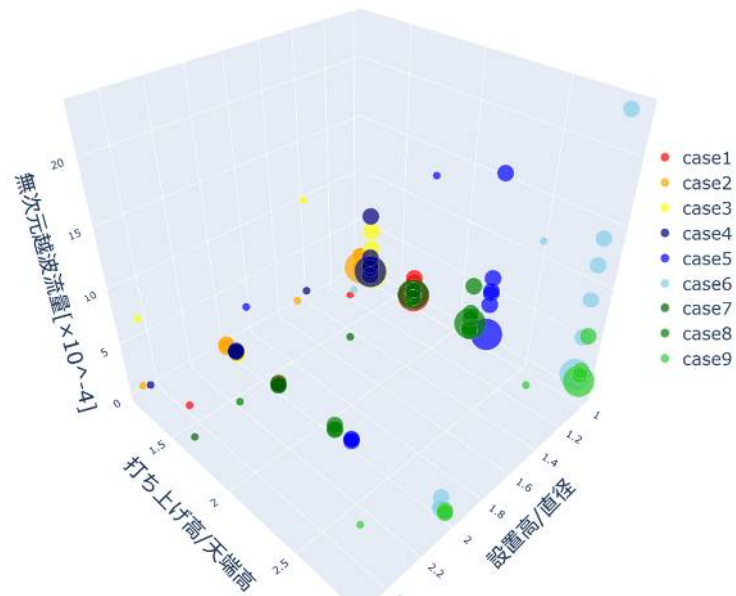


図-3.2.3 無次元越波流量の比較

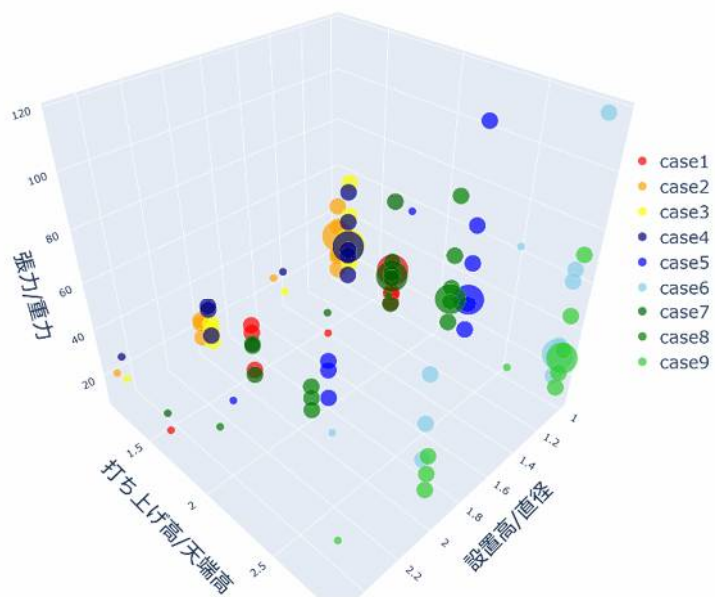


図-3.2.4 無次元張力の比較

3.2.3 最適条件選定図の作成

図-3.2.3 および図-3.2.4 から共振対策やたわみ対策の有無によるばらつきを除くことと、45 倍した現地での実寸が長さ 30cm の模型は 13.5m となり非現実的であることを考慮し、表-3.1.2 の⑨～⑪の 3 条件のみ選択して作成したものが図-3.2.5 および図-3.2.6 である。軸のパラメータ，凡例，プロットサイズは図-3.2.3 および図-3.2.4 と同じである。また，極大値を包絡する曲面を合わせて示している。

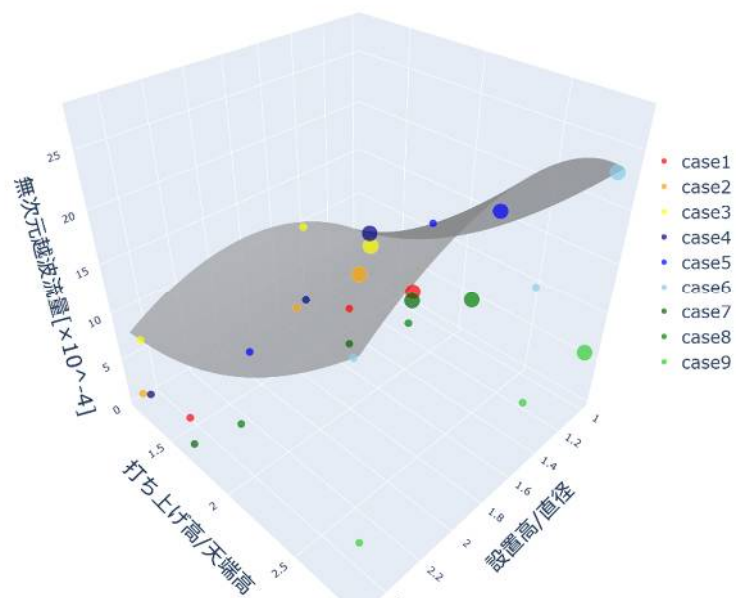


図-3.2.5 無次元越波流量による選定図

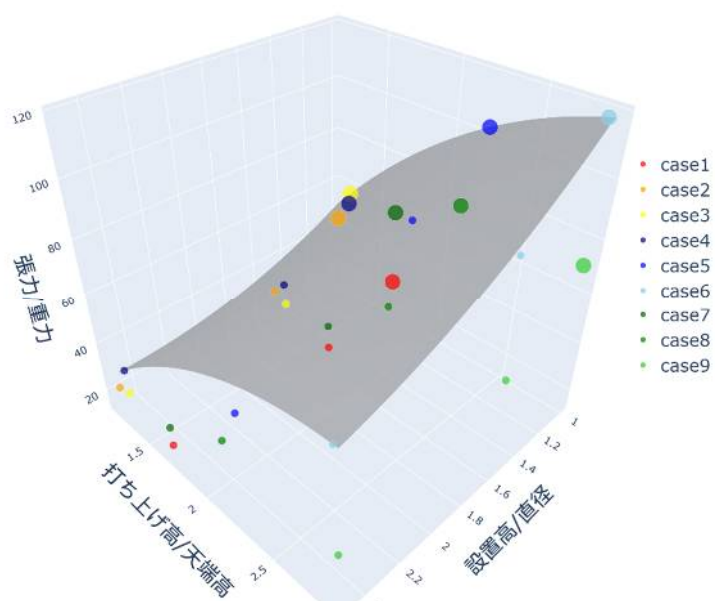


図-3.2.6 無次元張力による選定図

図-3.2.5 および図-3.2.6 の投影図を図-3.2.7～図-3.2.10 に示す.

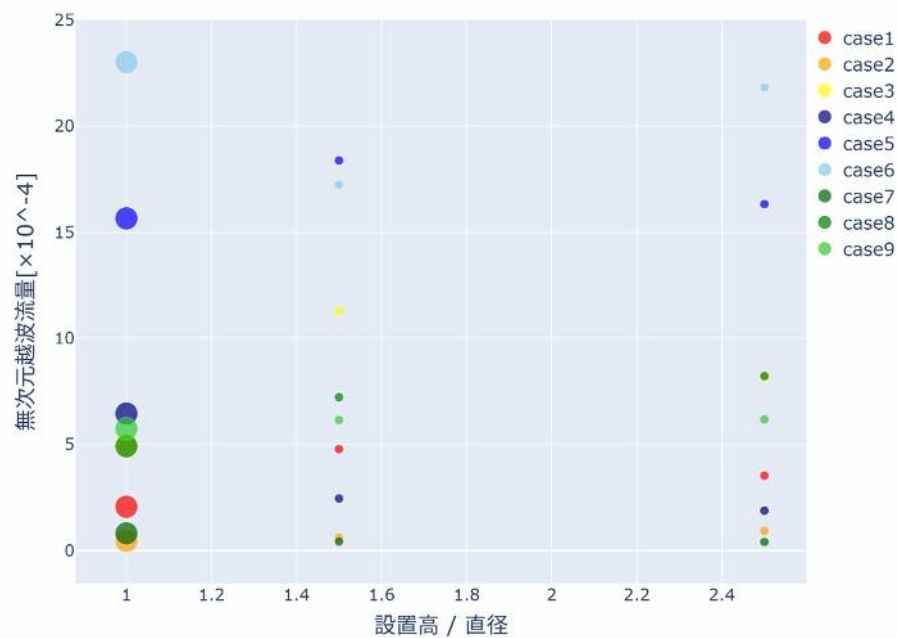


図-3.2.7 設置高／直径に対する無次元越波流量

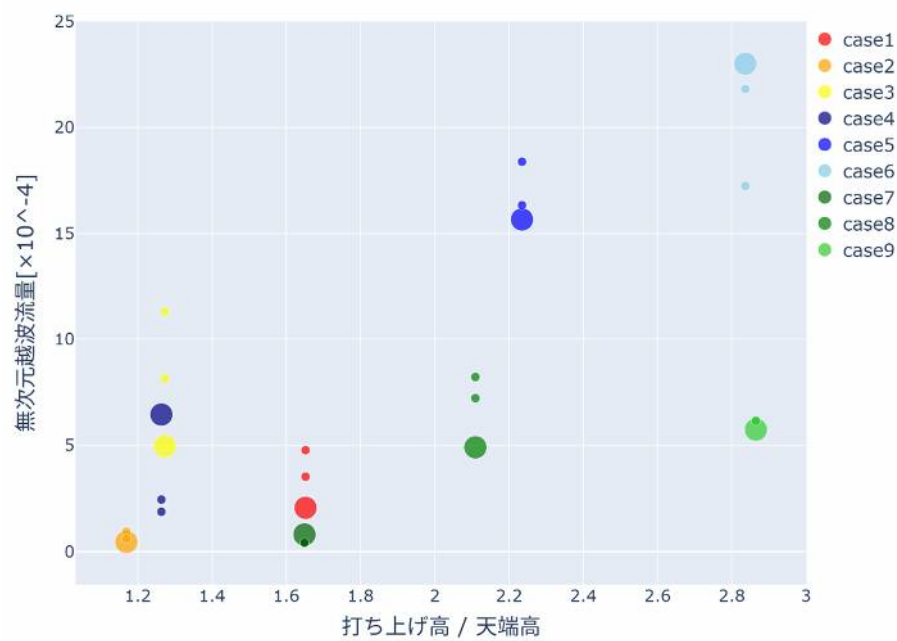


図-3.2.8 打ち上げ高／天端高に対する無次元越波流量

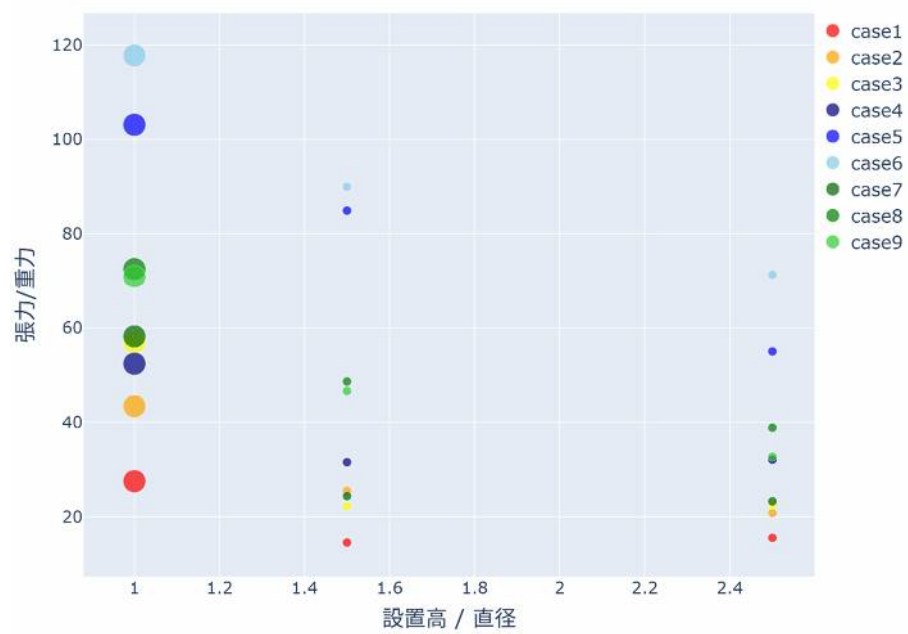


図-3.2.9 設置高／直径に対する無次元張力

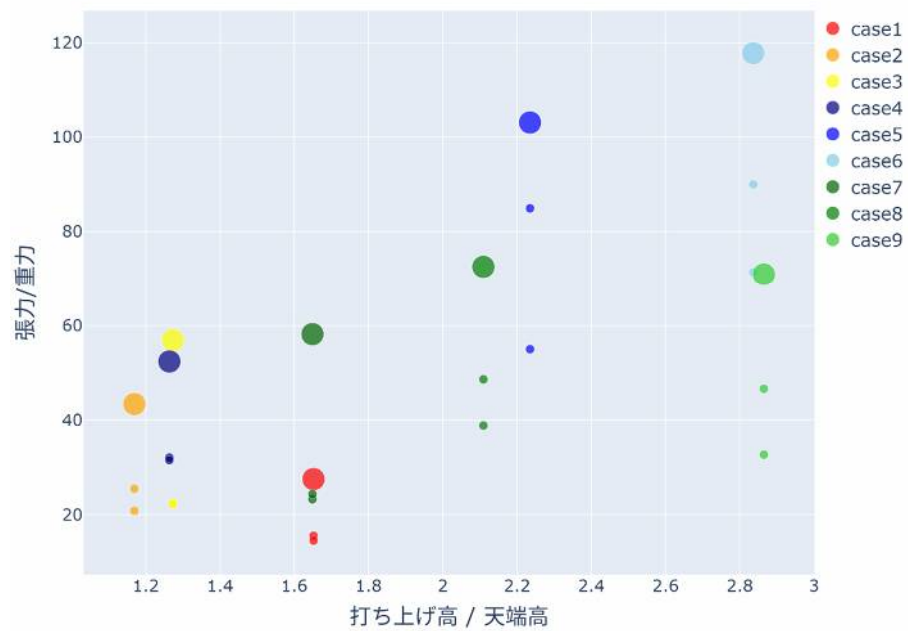


図-3.2.10 打ち上げ高／天端高に対する無次元張力

3.2.4 最適条件選定手順

最適条件の選定は図-3.2.5 および図-3.2.6 を用いて、図-3.2.11 に示す手順で行う。

まず、与えられた波や護岸の条件から、横軸の「打ち上げ高／天端高」が決定する。また、対象護岸の許容越波流量も与条件であるため、それをもとに無次元許容越波流量を計算する。決定した「打ち上げ高／天端高」に対して、図-3.2.5 より、計算した無次元許容越波流量を包絡面が下回る「設置高／直径」の条件を選定する。次いで、図-3.2.6 から先に決定した「打ち上げ高／天端高」および「設置高／直径」に対する最大作用張力が求まる。これらの条件をもとに、設置場所の状況や施工性、コストなどを考慮して、対策工の長さや直径を決定する。

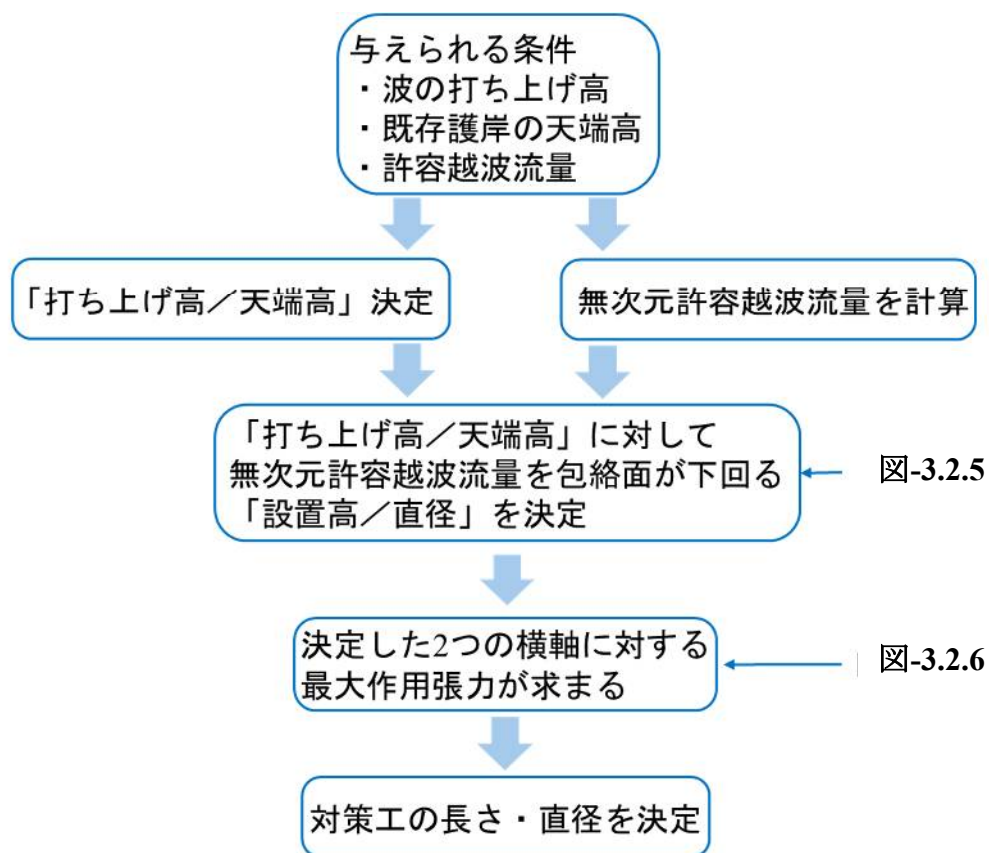


図-3.2.11 最適条件の選定手順

3.3 斜め入射波に対する検討

実海域は3次元であり波が垂直に入射するとは限らない。また、対策工の構造上、斜め入射波により片側の係留索に大きな負荷がかかる状況も想定される。したがって、実用化に向けては3次元的な検討が必要である。なお、3次元の検討では、複数の対策工を配置した場合の連動の効果などについても検討する必要がある、検討項目は多種多様であるため、本研究においては、今後の詳細な検討のための予備的な基礎的検討を行った。

3.3.1 実験装置

実験は、図-3.3.1、図-3.3.2に示す平面水槽（長さ20m×高さ0.6m×幅9.0m）で実施した。なお、模型より背後は他の模型等が常設されているため、造波版側の4m程度の範囲を使用した。

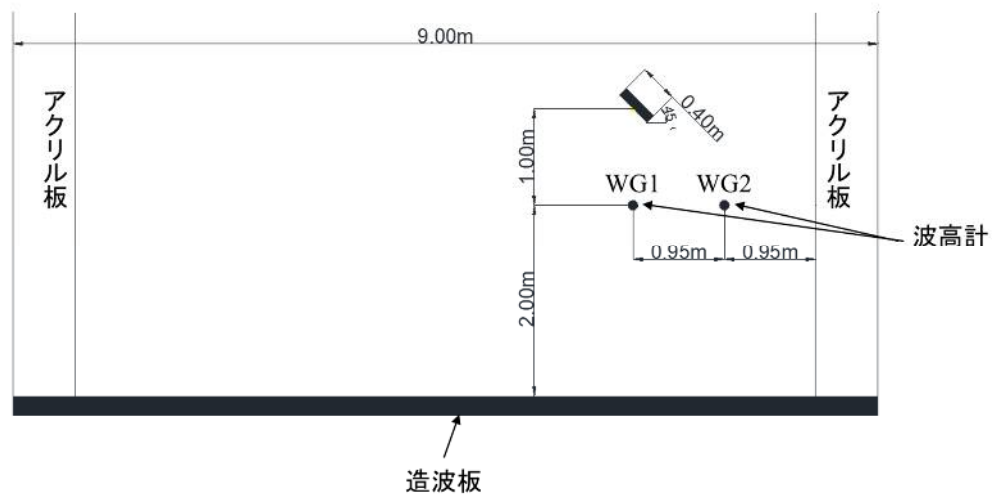


図-3.3.1 平面水槽の概略



図-3.3.2 平面水槽

使用した対策工模型は図-3.3.3 に示す直径 2.5cm、長さ 5.0cm、重さ 3.4g で、断面 2 次元の検討における表-3.1.2 の⑨のケースに対応する。斜め入射波の場合、壁面に沿う波になり、直入射のように激しく打ち上らない。対策工の効果や係留策に作用する張力を検討するには、波が対策工に作用する必要があるため、図に示すように、水深を 25cm として水位を上げて、天端高を 9cm として実験を行った。入射波は、断面 2 次元の検討と同じく、現地スケールで沖波波高 $H: 3.0\text{m}, 4.0\text{m}, 5.0\text{m}$ 、周期 $T: 5.0\text{s}, 7.0\text{s}, 9.0\text{s}$ を組み合わせた 9 種類の規則波であり、水深 25cm での浅水変形を考慮して縮尺した。入射波条件の一覧を表-3.3.1 に示す。なお、実験は、全ケースではなく Case1, 4, 5, 7, 8, 9 について行い、各ケースで 2 回ずつ計測した。



図-3.3.3 係留式越波対策工模型および水深、天端高と設置位置の関係

表-3.3.1 入射波条件

	現地 H ₀ (m)	現地 T(s)	実験 H ₀ (cm)	実験 T(s)	H(cm)
case1	3.0	5.0	6.67	0.745	6.31
case2		7.0		1.04	6.13
case3		9.0		1.34	6.38
case4	4.0	5.0	8.89	0.745	8.43
case5		7.0		1.04	8.20
case6		9.0		1.34	8.56
case7	5.0	5.0	11.1	0.745	10.55
case8		7.0		1.04	10.28
case9		9.0		1.34	10.77

3.3.3 実験結果

図-3.3.4 および図-3.3.5 に例として Case7 および Case9 の水面変動の時系列を示す。上が図-3.3.1 における WG1, 下が WG2 である。Case7 では護岸前面の WG2 で波が非常に小さくなった。入射波の周期が短く、反射波との重ね合わせで砕波しやすかったことが一因と考えられるが、今後はより安定した波を作用できるよう改善が必要である。一方、Case9 については、十分に安定している。

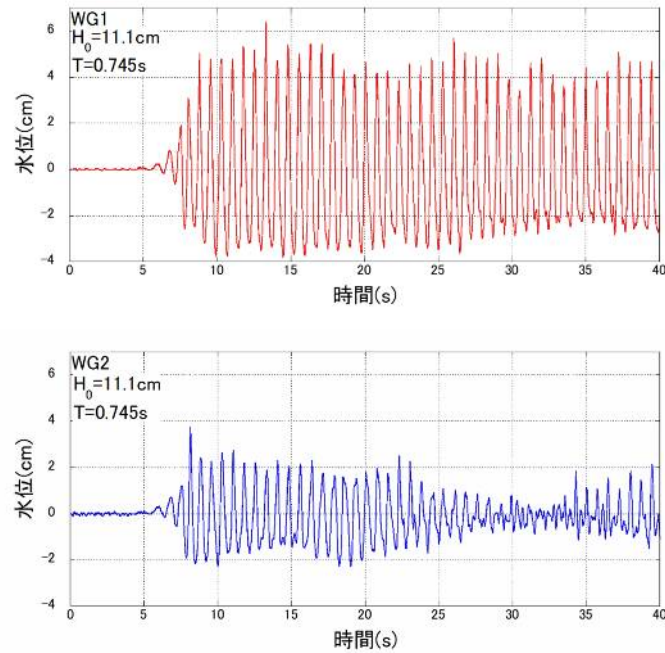


図-3.3.4 水面変動の時系列の例 (Case7)

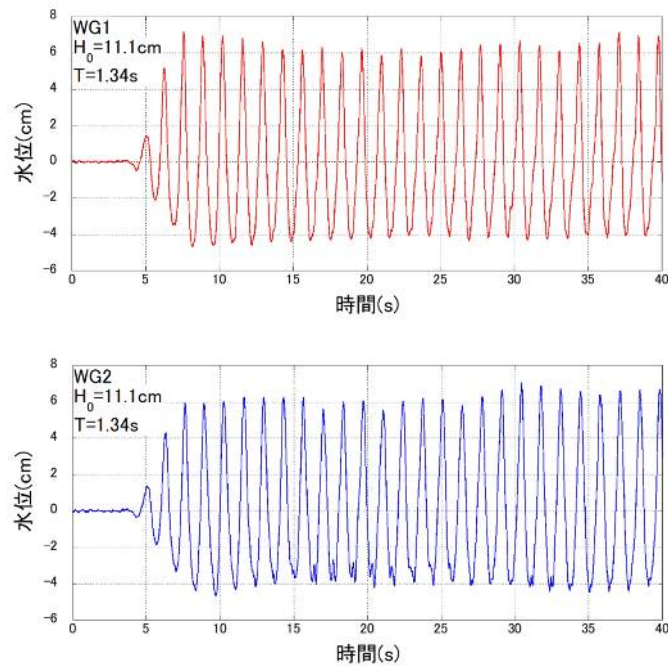


図-3.3.5 水面変動の時系列の例 (Case9)

図-3.3.6 に例として Case7 および Case9 の張力の時系列を示す．周期が短い Case7 では造波板から近い SG2 で継続的に係留策に力が作用する結果となった．一方，Case9 では波が作用したタイミングで造波板から遠い SG1 でより大きな値を取る結果となった．

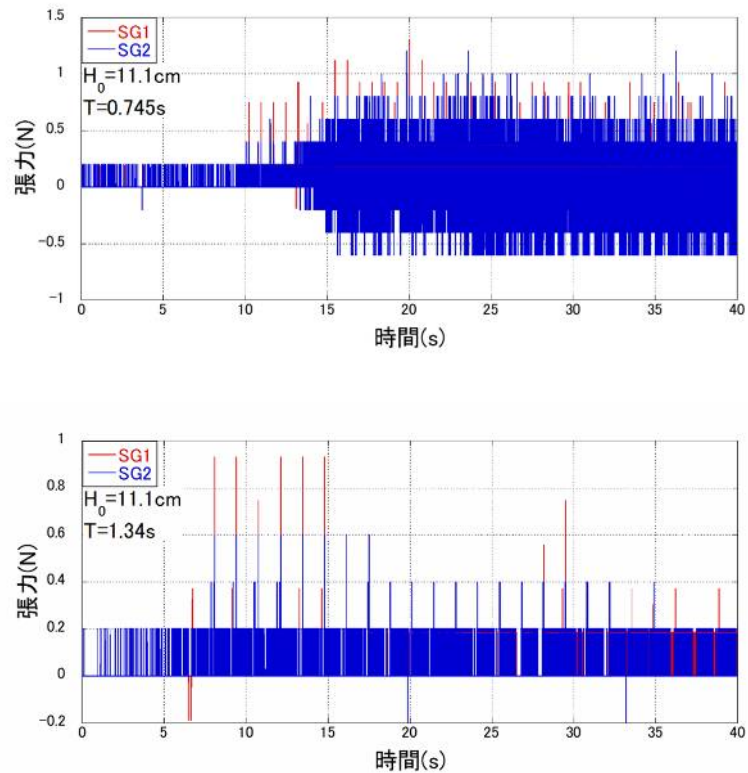


図-3.3.6 係留策に作用する張力の例（上：Case7，下：Case9）

図-3.3.7 に、沢本ら(2025)により断面 2 次元造波水路を用いて行われた結果と、本研究で行った直入射波（水深 0.20m）と斜め入射波（水深 0.25m）による最大張力の比較を示す。なお、直入射波は平面水槽での実験で予備的に断面 2 次元での検討と同じ条件で垂直入射波を作用させたものである。また、斜め入射波は前述のとおり 6 ケースで実験を実施した。断面 2 次元の検討では護岸前面に海底斜面を設置しており、Case5, 6 で張力が大きくなっているが、平面水槽による実験では周期が短い Case1, 4, 7 で波が不規則になることにより打ち上げ高が大きくなりやすいことから、張力も大きな値を取った。直入射波と斜め入射波を比較すると、斜め入射波では沿い波のようになるため打ち上げ高が小さくなり、作用する張力も小さくなるのが今回の実験で明らかになった。

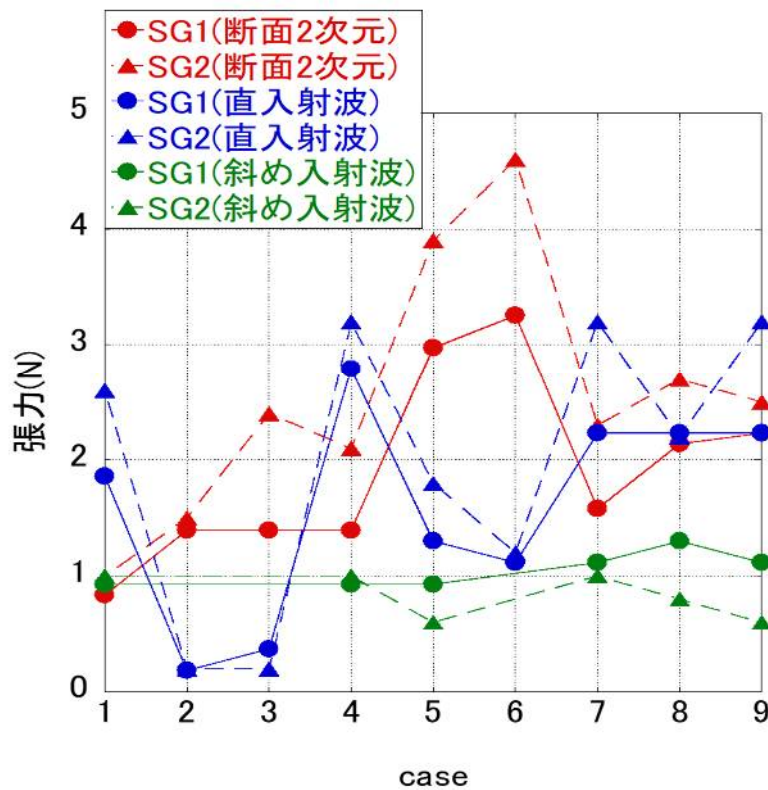


図-3.3.7 断面 2 次元実験，平面水槽実験（直入射および斜め入射）による最大張力の比較

4. 数値シミュレーションによる作用張力評価の高精度化と 3 次元化

4.1 これまでの開発状況

将来的に本越波対策工を実用化するためには、水理模型実験により多くのことを検討する必要があるが、検討の一部を数値シミュレーションにより行うことができれば非常に効率的である。そこで著者らは、係留式越波対策工の越波低減効果や係留索に作用する張力を様々な条件で評価可能な数値シミュレーションモデルの構築を継続して実施している。まず、数値シミュレーションには、オープンソースとして公開されている DualSPHysics v4.2 (Crespo et al., 2015) を使用した。しかし、当時の数値シミュレーションでは係留索を再現できず、対策工を固定した簡単な条件での計算であった(中谷ら, 2019)。その後、DualSPHysics v5.0 を用いて、対策工の可動を再現し、係留索に作用する張力と越波流量をある程度再現できることを確認した(坂本ら, 2023)。しかし、当時の DualSPHysics の境界処理法(Dynamic Boundary Condition, DBC (Hall and A. Goupee, 2015))では、対策工と波面あるいは護岸壁面の間に粒子が侵入しない空白の領域(ギャップ)が生じる問題があり、計算精度には改善の余地があった。それに対し、新免ら(2024)は、新しく DualSPHysics に実装された対策工周りの空白領域をなくす境界処理法である修正動的境界条件(modified Dynamic Boundary Condition, mDBC (English et al., 2022))を用いることで、対策工の係留索に作用する張力の再現性が向上することを確認した。

本研究では、実用化に向けたより詳細な検討を可能とするため、数値シミュレーションによる作用張力の再現の更なる高精度化を目指すとともに、現地適用がより容易な寸法の対策工について検討した。さらに、これまでの検討は全て断面 2 次元での垂直入射波が対象であるため、斜め入射波を対象とした 3 次元数値シミュレーションについて基礎的な検討を行った。

4.2 数値シミュレーションモデル

本研究では、DualSPHysics v5.4 を用いた。DualSPHysics は粒子法の SPH 法に基づく流体解析ソルバーである。粒子法は、格子法では高精度な計算が困難である激しい碎波などの大変形を伴う現象においても精度良く計算することができる。また、GPU を用いた並列計算により、CPU 単体の場合と比べて大幅に計算時間を短縮できる。DualSPHysics v5.4 には動的係留ラインモデルの MoorDyn が実装されている。MoorDyn ではランプドマス法に基づいて係留ラインを再現でき、係留索に掛かる張力を出力できる。本研究ではこの機能を用いて係留索を再現した。

4.3 作用張力評価の高精度化に関する検討

係留索に作用する張力の再現精度の向上を図るため、海底面および壁面との境界条件に no-slip 条件を適用した。no-slip 条件は物体表面に接する流体の速度を物体と同じ速度とみなす境界条件であり、粘性流体では流体が壁面に対してすべらないという物理仮定に基づくものである。係留式越波対策工の数値シミュレーションにおいては、対策工や護岸などの固体境界上での流体速度の接線成分および法線成分をゼロとすることで、境界近傍のせん断応力や圧力分布をより現実的に再現できるようになり、対策工周りの流れの回り込みや壁面に沿った流速分布が滑らかに表現され、係留索に作用する張力の再現精度の向上が期待される。図-4.3.1 に計算領域を示す。対策工の寸法は新免ら(2024)による数値シミュレーションに合わせて図-4.3.2 に示すとおりに設定し、長さは 30cm とした。係留索の再現には MoorDyn を用い、必要なパラメータは模型実験で使用した 3 号の釣り糸を参考に表-4.3.1 の

とおり設定した．入射波条件には表-4.3.2 に示す 9 通りの規則波（表中の H は水深 0.3m での浅水変形を考慮した波高）を用いた．また, 対策工と護岸の衝突を再現する Project Chrono で必要なパラメータを表-4.3.3 に，その他の計算条件を表-4.3.4 に示す．

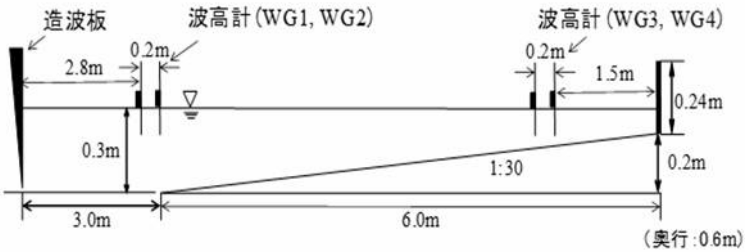


図-4.3.1 計算領域

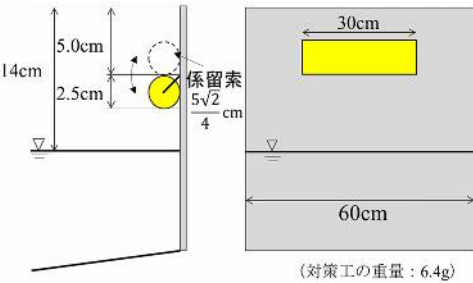


図-4.3.2 対策工の条件

表-4.3.1 係留策に関するパラメータ

ライン剛性(N)	2.9×10^3
直径(m)	3.66×10^{-3}
1m当たりの質量(kg/m)	6.07×10^{-2}
減衰比	0.8

表-4.3.2 入射波条件（2次元）

	T(s)	H ₀ (cm)	H(cm)
Case1	0.745	6.67	6.43
Case2	1.04	6.67	6.12
Case3	1.34	6.67	6.24
Case4	0.745	8.89	8.58
Case5	1.04	8.89	8.17
Case6	1.34	8.89	8.35
Case7	0.745	11.1	10.7
Case8	1.04	11.1	10.2
Case9	1.34	11.1	10.5

表-4.3.3 Project Chrono に関するパラメータ

	対策工	護岸
反発係数	0.20	0.60
動摩擦係数	0.35	0.48
distancedp	0.5	

表-4.3.4 その他の計算条件

coefh	1.5
粒子間距離	5 mm
境界条件	mDBC
タイムステップ	Verlet
カーネル関数	Wendland
粘性	Laminar+SPS (value= 10^{-6})
coefDtMin	0.01
造波時間	22 s

図-4.3.3 に no-slip 条件適用前後の数値シミュレーション結果と実験における最大張力の比較を示す。SG1 は沖からみて右側、SG2 は左側の係留策に作用した張力である。no-slip 条件を適用することで、全てのケースで最大張力は低下し、適用前に実験結果より小さい張力であった Case1 を除いた全てのケースで実験結果との差が縮小した。しかし、no-slip 適用後もシミュレーション結果は依然として実験結果より大きい。この点については、実験において対策工が波作用時にたわむことが確認されており、対策工を剛体として仮定している数値シミュレーションに比べて実験では張力が低減していることが主な要因であると考えられる。

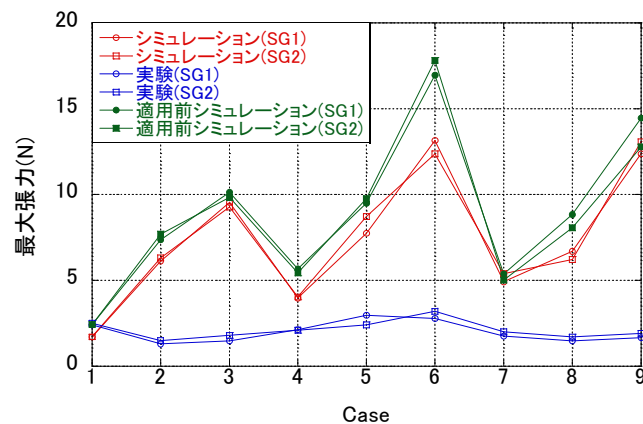


図-4.3.3 最大張力の比較

4.4 現地適用を考慮した寸法の対策工についての検討

係留式越波対策工の現地適用を念頭に、可搬性や施工性を考慮して寸法を設定した対策工について作用張力特性を検討した。これまでの模型実験および数値シミュレーションでは長さ 30cm の対策工を対象としてきたが、現地換算では 13.5m となる。車両での運搬や施工の容易さを考えると、実スケールで長さ 2~3m 程度が適していると考えられる。そこで、対策工長さを 2.25m（実験スケールで 5cm）に設定して数値シミュレーションを行った。対策工は図-4.4.1 のとおりに設置し、計算領域、入射波は前節と同一とした。図-4.4.2 に数値シミュレーションと沢本ら(2024)による実験結果との最大張力の比較を示す。シミュレーション結果は実験結果と概ね同程度の大きさであり、入射波条件による作用張力の増減の傾向もほぼ同様であることから、現地適用を考慮した比較的小さな対策工についても、数値シミュレーションにより係留索に作用する張力を妥当に再現できることが確認された。長さ 30cm の模型での実験では、対策工のたわみにより張力が過小評価される場合があったが、本条件では実験時に対策工のたわみがほぼ生じず、そのことが対策工を剛体として扱う数値シミュレーションの再現性が良好であることの一因と考えられる。

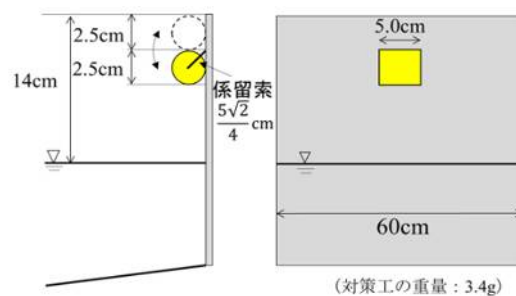


図-4.4.1 対策工の条件

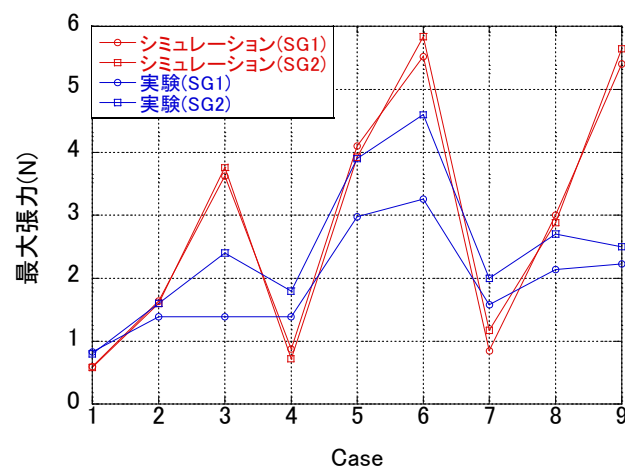


図-4.4.2 最大張力の比較

4.5 斜め入射波を考慮した3次元数値シミュレーション

4.5.1 水槽と対策工の配置に関する検討

斜め入射波の再現方法として、図-4.5.1 に示す Case1～5 について検討を行った。まず、Case1 では、護岸を水槽に対して斜めに配置することで斜め入射波の再現を試みた。しかし、図-4.5.2 に示すように護岸底面と水槽床との境界に隙間が生じ、この隙間から流体粒子が護岸の背後へ漏出する現象が確認された。その結果、護岸前面の水位が時間とともに低下し、安定した波動場が形成されなかった。次に Case2 では、造波板を斜めに配置し、水槽内に斜め入射波を発生させた。このケースでは護岸背後への粒子の漏出は解消されたものの、透過境界を設定できず、計算の経過とともに水槽側壁や端部からの反射波の影響が大きくなり、対策工前面で目標とする波高・周期を有する入射波が十分に再現されなかった。Case3 では、水槽内に独立した護岸を新たに設置し、その前面に係留式越波対策工を取り付けた。その結果、対策工および係留索は安定した挙動を示し、護岸前面において側壁からの反射波の影響を受けない安定した波動場を再現できた。しかし、波が同心円状に広がり、護岸に所定の波を作用させるのが容易ではなかった。Case4 では Case3 の設定を基に独立した護岸を斜めに、造波板を水平にすることで斜め入射波を作用させたが、図-4.5.3 に示すように、計算開始直後に対策工が護岸にめり込む不安定な挙動が発生した。係留索の初期条件の調整を行っても改善はみられず、この設定をそのまま用いることは困難であると判断した。Case5 では、正方形の水路内に斜め 45° に導波板を2枚配置して水路を形成し、その内部に護岸を配置した。これにより、造波板から斜め方向に一様に伝播する波が対策工に作用する過程を、水槽側壁からの反射波の影響を抑制しつつ再現できることがわかった。

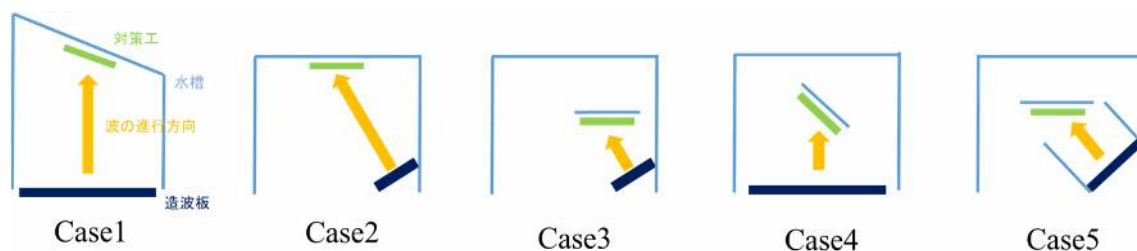


図-4.5.1 検討ケース



図-4.5.2 流体粒子の流出 (Case1)

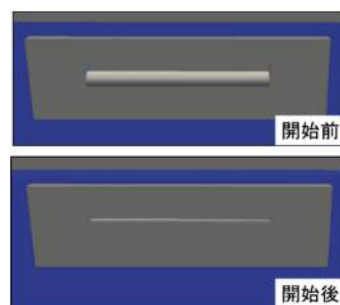


図-4.5.3 対策工のめり込み (Case4)

4.5.2 斜め入射波の再現性に関する検討

前節での検討を踏まえ、本研究では図-4.5.4 に示すように正方形の水槽内に斜め 45 度に導波板を二枚設置して水路を形成し、その内部に Case3 のように護岸を配置した。なお、導波板は護岸までとし、導波板からの反射波が護岸に極力向かわないようにした。これにより、造波板から斜め方向に一様に伝播する波が対策工に作用する過程を、水槽側壁からの反射波の影響を抑制しつつ再現できる。波高計は、護岸中央から斜め水路方向へ 0.5m 離れた位置に WG1 を、さらに造波板に平行に護岸端部と側壁との間の中央部分に WG2 をそれぞれ配置した。この条件で沖波波高 8.34cm、周期 1.04s の規則波を入射したところ図-4.5.5 ようになった。WG1、WG2 とともに各波の波高はほぼ一定で推移しており、反射波の影響を受けていない入射波を数波確保できている。図-4.5.6 はスナップショットで、対策工に斜めに波が作用している状況が再現できている。

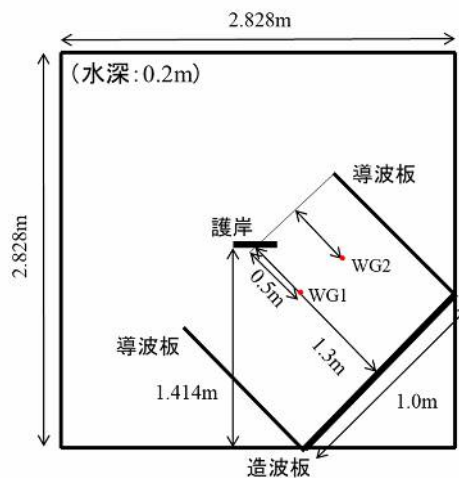


図-4.5.4 計算領域の設定

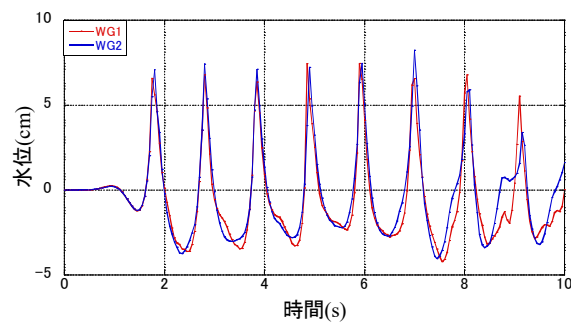


図-4.5.5 水面変動の時系列



図-4.5.6 対策工に斜め入射波が作用する様子

4.5.3 張力のシミュレーション結果

図-4.5.4 に示す計算領域を用いて係留索に作用する張力の検討を行った。入射波条件を表-4.5.1 に示す。これは 2 次元の検討で使用した表-4.3.2 の入射波を、浅水変形を考慮して水深 0.2m での波高に換算した。そのうち、断面 2 次元の検討において、張力が比較的小さなケースとして Case1, 2, 逆に張力が大きなケースとして Case5, 6 の 4 ケースを選定して斜め入射波の数値シミュレーションを実施した。図-4.5.7 に各ケースにおける張力の時系列を示す。Case1($T=0.745s$)では、張力の変動は小さくほぼ一定の値で推移しており、斜め入射波であっても安定している。一方、Case2($T=1.04s$)では、時間の経過とともに張力が一旦増加した後減少しており、周期が同じ Case5 も同様の傾向がみられた。Case6($T=1.34s$)では最初の一波のみ大きな張力が作用し、その後は波が対策工に作用していない時間帯が認められる。斜め入射波では周期等の条件により張力の傾向が異なっており、より詳細な検討が必要である。

表-4.5.1 入射波条件 (3 次元)

	T(s)	H ₀ (cm)	H(cm)
Case1	0.745	6.67	6.20
Case2	1.04	6.67	6.22
Case3	1.34	6.67	6.63
Case4	0.745	8.89	8.28
Case5	1.04	8.89	8.34
Case6	1.34	8.89	8.94
Case7	0.745	11.1	10.4
Case8	1.04	11.1	10.5
Case9	1.34	11.1	11.3

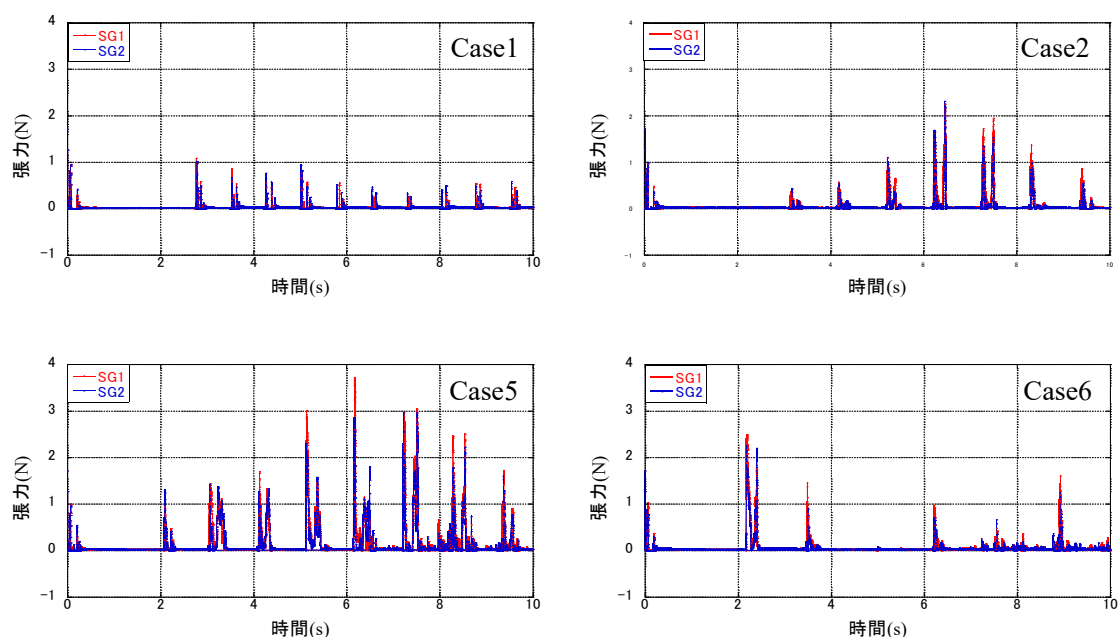


図-4.5.7 係留策に作用する張力の時系列

5. おわりに

本研究では、係留式越波対策工の実現に向け、これまでの断面 2 次元的な検討を継続し、入射波や対策工の条件が異なるデータをさらに追加して、対策工の最適条件の選定手法を提案した。並行して、今後、斜め入射波や対策工の配置の影響を詳細に評価するため、平面水槽を用いた水理模型実験と 3 次元数値シミュレーションに関する基礎的な検討を行った。

まず、これまでに実施されてきた実験条件を整理し、対策工の最適条件の選定フローを提案した。波の打ち上げの状況については、設置場所の入射波・既存護岸・地形の条件から模型実験や数値シミュレーションより把握できるため与条件とし、その打ち上げ状況から越波流量と係留索に作用する張力を推定し、許容越波流量を満たす寸法（直径）と設置高を決定する。その寸法や設置高の選定に使用するための「対策工の設置高・直径」および「係留索にかかる張力」に関する選定図を作成し、これら図を用いて対策工の最適条件を選定する手順を示した。次いで、今後、対策工の 3 次元的な挙動を詳細に検討するため、平面水槽による水理模型実験について基礎的な検討を行った。斜め入射波では、護岸前面で激しい打ち上げが生じず壁面に沿う波となるため、作用する張力が抑えられることが確認された。

数値シミュレーションに関する検討においては、まず、境界条件として no-slip 条件を適用することで、すべてのケースで最大張力が低下し、実験結果に近づくことを確認した。次いで、実験において対策工が波作用時にたわむことにより張力が抑えられていることを明確にするため、沢本ら(2024)によるたわみ対策を施した実験条件に合わせた数値シミュレーションを行った。その結果、たわみ対策を施した実験値とシミュレーション結果がよく一致することが確認され、実験結果におけるたわみによる張力抑制効果が明確となった。さらに、現地での車両による運搬や施工の容易さを考えると、実スケールで長さ 2~3m 程度が適していると考えられることから、小規模の対策工を対象とした数値シミュレーションを実施した。その結果、シミュレーション結果は実験結果と概ね同程度の大きさで、入射波条件による作用張力の増減の傾向もほぼ同様であり、小規模な対策工についても数値シミュレーションで十分に検討できることが確認された。最後に、係留式越波対策工の 3 次元挙動を把握するための基礎的な検討を行った。現状の DualSPHysics では、境界処理等に問題があり、斜め入射波による検討を行うためには計算領域や対策工の設置に工夫が必要となる。検討の結果、正方形の水槽内に 45 度に傾けた導波板を 2 枚配置して斜め水路を形成することで、比較的安定して斜め入射波を対策工に作用させることができた。

参考文献

伊藤康佑, 片木聖樹, 水上純一, 熊谷健蔵: 関西国際空港における台風 201821 号による浸水要因と浸水状況の再現, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.75, No.2, pp.I_307-I_312, 2019.

榎田真也, 斎藤武久, 古路裕子, 中口彰人, 石田啓: 防波護岸上に設置された防波柵による越波及び波力の低減効果に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.766-770, 2013.

加藤史訓, 笠井雅広, 佐藤慎司, 今村能之: 越波被害の実態に関する全国調査, 海洋開発論文集, Vol.15, pp31-36, 1999.

川崎浩司, 船橋徹, 福本正: 浮体パネルによる越波低減効果の有効性に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.66 No.1, pp.741-745, 2010.

坂本聡太, 中谷和博, 山城 賢, 児玉充由, 原 知聡, Ain Natasha Balqis, 倉原義之介, 武田将英: 簡易越波対策工の越波低減効果と作用張力に関する基礎的研究, 令和 3 年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集, 2021.

坂本聡太, 山城 賢, 新免和明, 児玉充由, 原 知聡, Ain Natasha BALQIS, 倉原義之介, 武田将英: 係留式越波対策工の基本特性評価のための数値シミュレーション, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 79, No. 18, 23-18155, 2023.

沢本宗大, 向田優菜, 山城 賢, 児玉充由, 武田将英, 原 知聡, 柴田雄也: 係留式越波対策工の係留条件の影響に関する基礎的検討, 令和 6 年度土木学会西部支部研究発表会概要集, 2025.

新免和明, 坂本聡太, 山城 賢, 児玉充由, 原 知聡, Ain Natasha Balqis, 倉原義之介, 武田将英: 係留式越波対策工に作用する最大張力の推定に関する水理模型実験, 令和 4 年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集, 2022.

新免和明, 山城 賢, 児玉充由, 原 知聡, 柴田雄也, 倉原義之介, 馬込伸哉, 武田将英: 係留式越波対策工の開発のための数値シミュレーション, 土木学会論文集特集号 (海洋開発), Vol.80 (No.18), <https://doi.org/10.2208/jscej.24-18121>, 2024.

高木泰士, 高橋篤平, 杉生高行, 古川郁貴: 2019 年 9 月台風 15 号による神奈川・千葉・茨城の高波被害および東京湾の波浪追算, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.1, pp.12-21, 2020.

中條壮大, 重松孝昌: 2018 年台風 21 号による高潮・高波被害の現地調査～大阪湾奥部～, 都市防災研究論文集, Vol.6, pp.39-44, 2019.

中谷和博, 山城賢, 児玉充由, 武田将英, 倉原義之介, 原知聡, 西山大和: 新たな越波対策工の提案とその効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I_145-I_150, 2019.

原 知聡, 武田将英, 倉原義之介, Ain Natasha BALQIS, 山城 賢, 児玉充由, 坂本聡太, 新免和明, 間瀬 肇: 直立護岸におけるブルノーズの設置高と突出距離に関する数値実験, 土木学会論文集特集号 (海岸工学), 79 卷 (17 号), <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17110>, 2023.

向田優菜, 新免和明, 山城賢, 児玉充由, 原知聡, 柴田雄也: 係留式越波対策工に作用する張力特性に関する水理模型実験, 令和 6 年度土木学会全国大会年次学術講演会概要集, 2024.

山城 賢, 柴田雄也, 中谷和博, 児玉充由, 原 知聡, Ain Natasha Balqis, 倉原義之介, 武田将英: 簡易越波対策工の越波低減効果と作用張力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_97-I_102, 2020.

Crespo, A.J.C. Domínguez, J.M. Rogers, B.D. Gómez-Gesteira, M. Longshaw, S. Canelas, R. Vacondio, R. Barreiro, A. García-Feal, O.: DualSPHysics: open-source parallel CFD solver on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Computer Physics Communications, Vol.187, pp.204-216, 2015.

English A, J. M. Domínguez, R. Vacondio, A. J. C. Crespo, P. K. Stansby, S. J. Lind, L. Chiapponi, and M. Gómez-Gesteira: Modified dynamic boundary conditions (mDBC) for general-purpose smoothed particle hydrodynamics (SPH): application to tank sloshing, dam break and fish pass problems. Computational Particle Mechanics, Vol. 9, No. 5, pp. 1-15, 2022.

M. Hall and A. Goupee: Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data, Ocean Engineering, Vol. 104, pp. 590-603, 2015.