

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和6年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号：令和6年2月21日付 第18-5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7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. 水理模型実験による最適条件の検討.....	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 最適条件の検討	13
3.2.1 実験結果	13
3.2.2 越波低減効果の評価.....	16
3.2.3 たわみの影響.....	16
3.2.4 係留索の長さの影響.....	18
3.2.5 対策工の寸法および設置位置の影響	19
3.3 最大張力の簡易推定式の提案.....	22
4. 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モデルの構築.....	24
4.1 これまでの開発状況.....	24
4.2 数値シミュレーションモデル.....	24
4.3 境界処理問題の改善による越波流量と係留索張力の検証.....	24
4.3.1 越波流量の計算精度の検証.....	24
4.3.2 係留索張力の計算精度の検証.....	26
5. おわりに	28
参考文献	29

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、楳田ら(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資する基礎資料を蓄積するため、対策工の越波低減効果および係留策に作用する張力について、入射波条件、対策工の材質（比重、たわみ）、寸法、設置位置などの影響を水理模型実験により調べる。それらの結果から、越波低減効果はもちろん、運搬や設置などの施工性を考慮して、対策工の最適な設置位置や寸法、具体的には、対策工の直径、長さ、設置高について検討する。また、係留式越波対策工の基本特性の詳細な評価が可能な数値シミュレーションモデルを構築する。

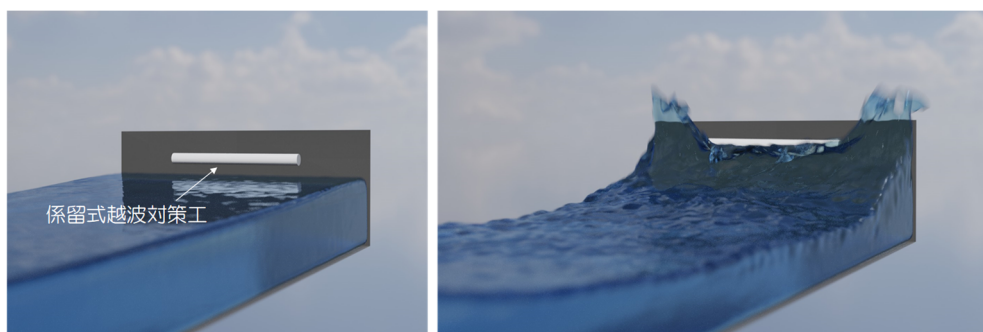


図-1.1 係留式越波対策工のイメージ
(左：設置状況，右：越波を防ぐ様子（数値シミュレーション結果）)

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）。

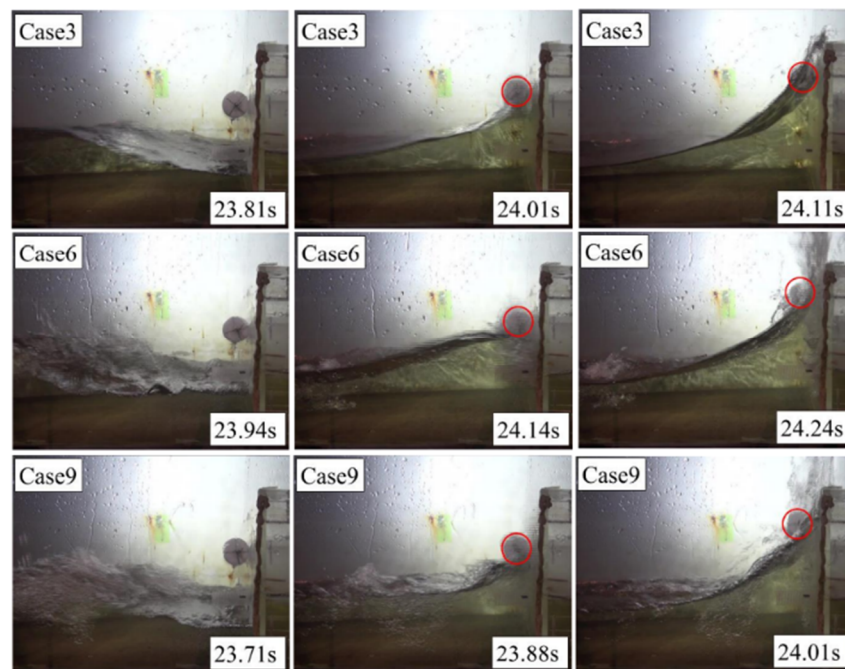


図-2.1 対策工に波が作用する様子

3. 水理模型実験による最適条件の検討

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．

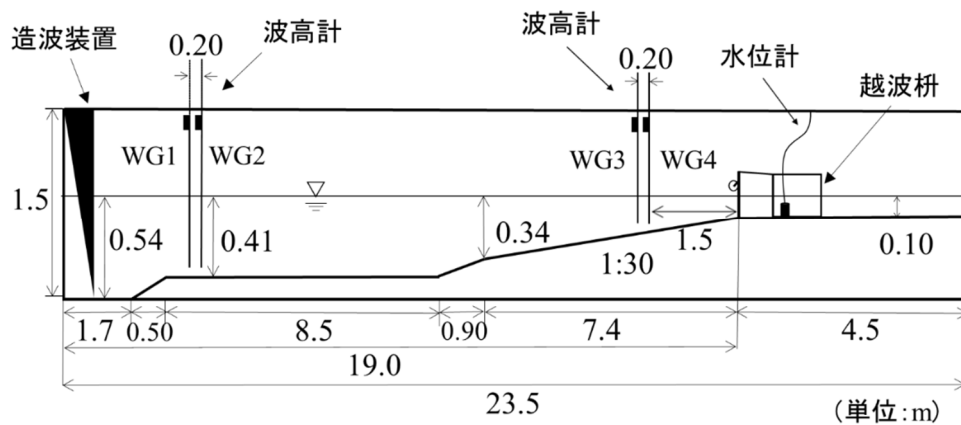


図-3.1.1 反射吸収式断面 2 次元造波水路の概略図



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。

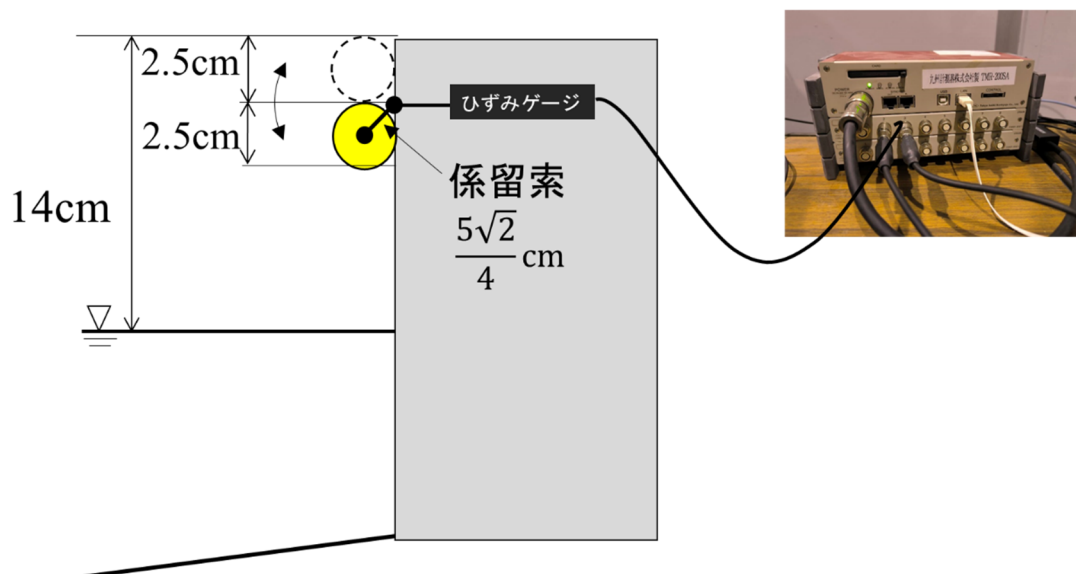


図-3.1.3 模型護岸の概略図

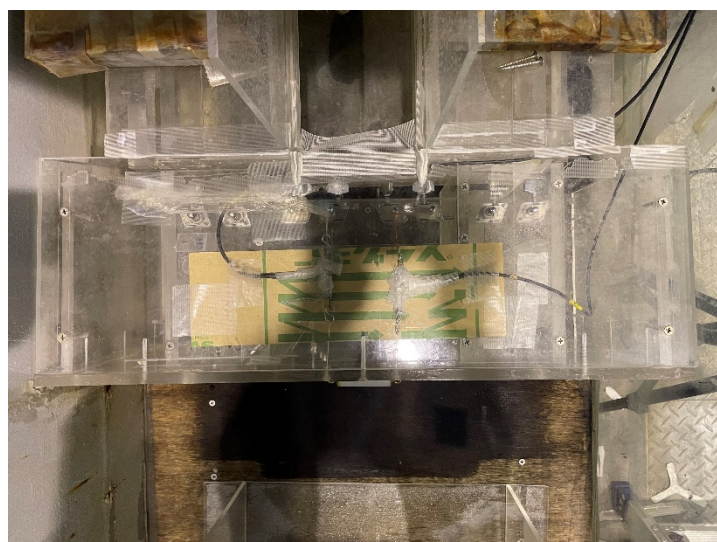


図-3.1.4 模型護岸（上面）

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。

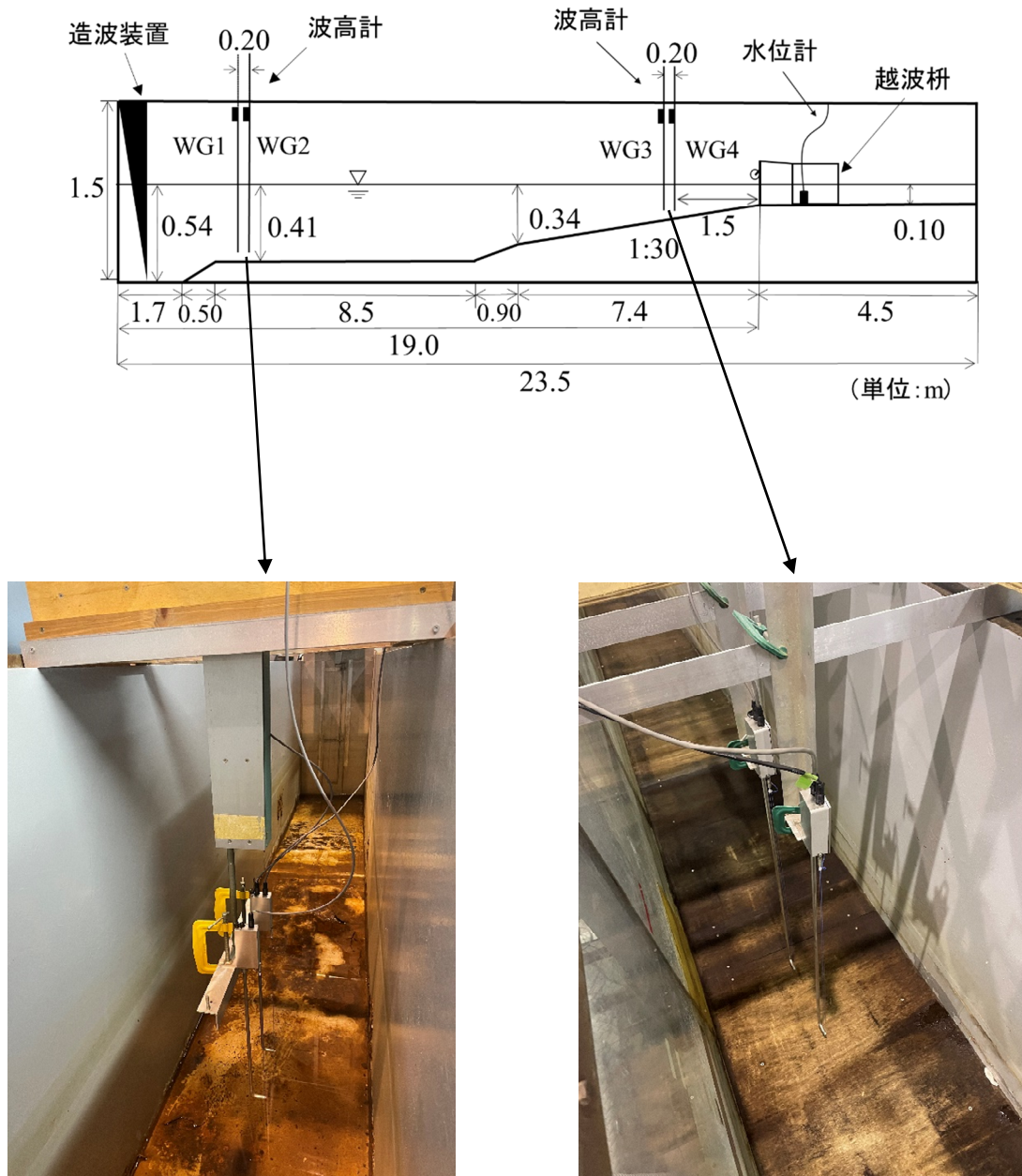


図-3.1.5 波高計の設置状況

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枡を設置し、護岸中央の 5 cm の幅で越波水が越波枡に流れ込むようにして枡内の水位の経時変化を水位計で計測した。

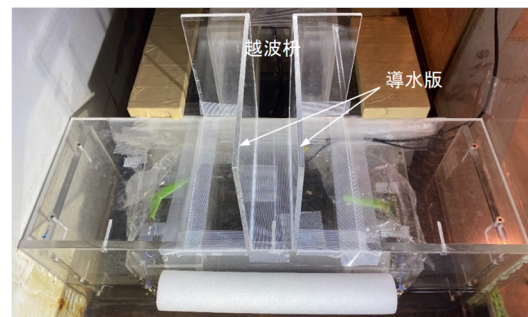
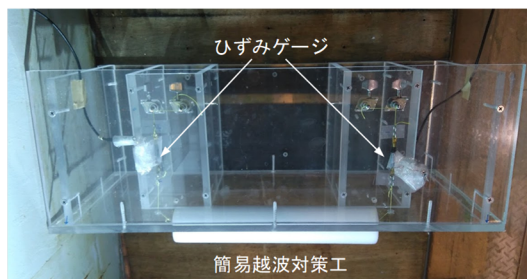
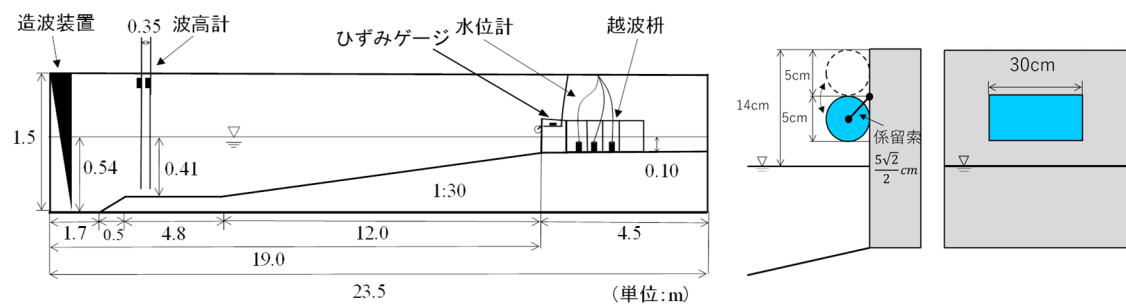


図-3.1.6 係留索に作用する張力および越波量の計測

3.1.2 入射波条件

越波流量の検討では不規則波を対象とした．修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波で，合田の越波流量推定図をもとに，有義波高と有義波周期の組み合わせを($H_{1/3}$, $T_{1/3}$) = (6.67 cm, 1.09 s), (10.0 cm, 1.33 s), (14.0 cm, 1.58 s)の 3 種類(いずれも $H_o'/L_o=0.036$)とし，入射波分離推定法により入射波のスペクトルを推定して合わせ込みを行った．造波時間は 700 秒間とし，波のエネルギーが十分に伝達している造波開始 60 秒以後のデータを対象に検討を行った．なお，同じ条件であっても実験結果に差異があるため，各ケースについて，実験結果を確認しつつ同じ波を作用させて複数回の実験を行った．

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_o (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

本検討で使用した係留式越波対策工は図-3.1.7に示すような円柱状の物体をひずみゲージを取りつけた 2 本の係留索で模型護岸に吊り下げるもので、材料には発泡スチロールを用いた。係留索にはナイロン製の釣り糸（3 号）を使用した。

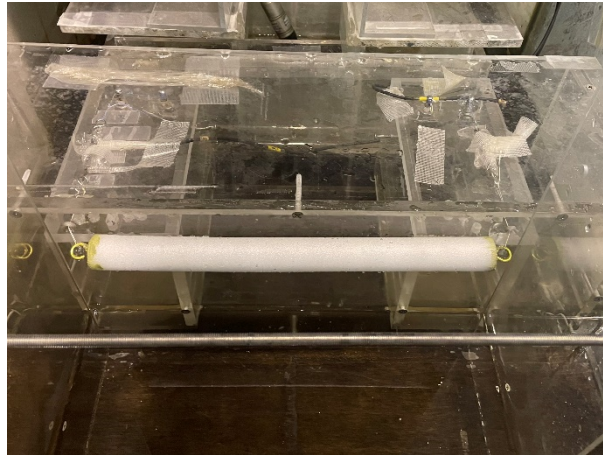


図-3.1.7 係留式越波対策工（発泡スチロール）

対策工の最適条件を検討するにあたり、以下の条件を設定し実験を行った。図-3.1.8 に示すように、基本となる対策工は直径 2.5cm、長さ 30cm である。後述するたわみによる影響の検討の際に、重さの違いが張力に与える影響を抑制するため、対策工模型の両端にテープを巻くことで重さを調整し 15.8g とした。設置高は 2.5cm であり、係留索の長さは $1.70\text{cm}(=2.5 \times \sqrt{2} \div 2)$ である。

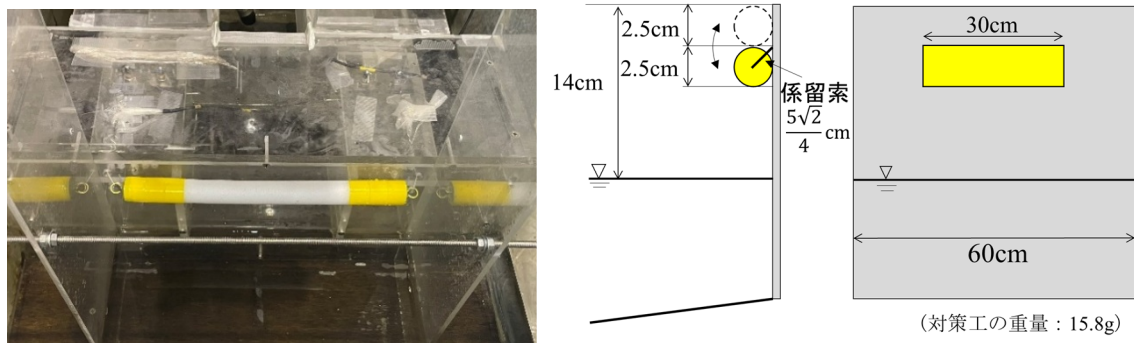


図-3.1.8 基本条件の対策工模型（直径 2.5cm、長さ 30cm）

a) たわみの影響

対策工のたわみによる影響を検討するため、図-3.1.9 に示すように、発泡スチロールに塗料を塗ることで表面を固め、対策工のたわみの抑制を行った。図-3.1.10 に示すように、基本条件となる模型と塗料により表面を加工した模型の中央部分をばねばかりを用いて 0.2N の荷重で引っ張り、たわみ具合を観察した。その結果、塗料による加工がたわみを抑制する効果を十分に有することが確認された。図-3.1.11 に示すように、加工後の対策工の寸法は、長さ 30cm、直径 2.5cm、重さ 16.2g、設置高 2.5cm であり、係留索の長さは 1.70cm である。

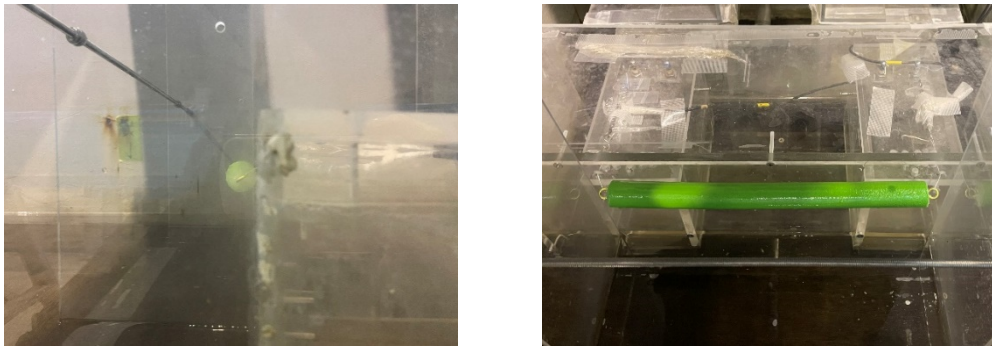


図-3.1.9 たわみ対策後の係留式越波対策工（左：側面図，右：上面図）

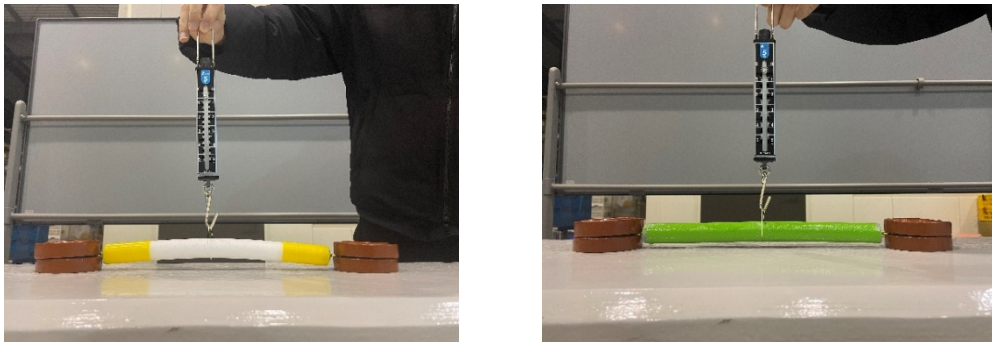


図-3.1.10 模型ごとのたわみ具合の比較

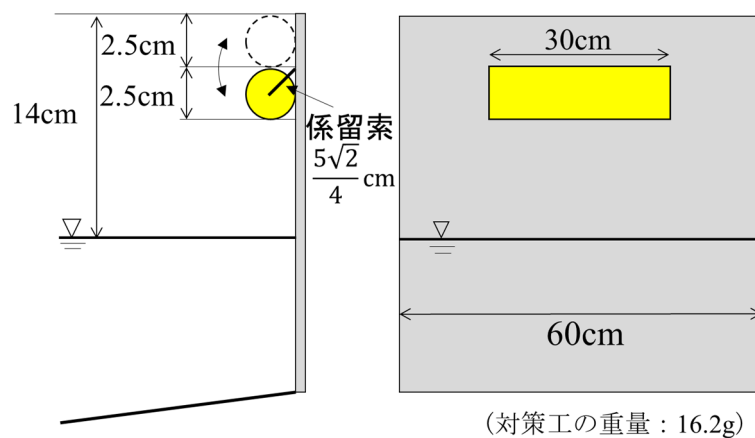


図-3.1.11 たわみ対策後の係留式越波対策工の概略図

b) 係留索の長さの影響

係留条件の違いによる影響を検討するため、図-3.1.12、図-3.1.13 に示すように、係留索の長さを 4.00cm に変更して実験を行った。対策工の模型は基本条件と同じものを用いているため、長さ 30cm、直径 2.5cm、重さ 15.8g、設置高 2.5cm である。

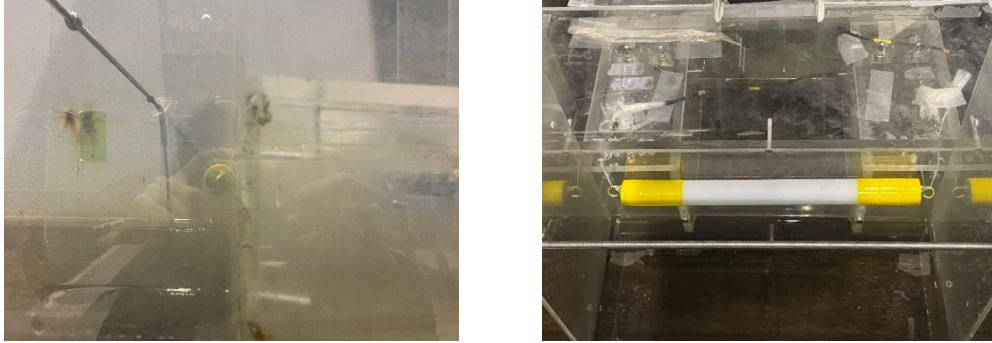


図-3.1.12 係留条件変更後の係留式越波対策工（左：側面図，右：上面図）

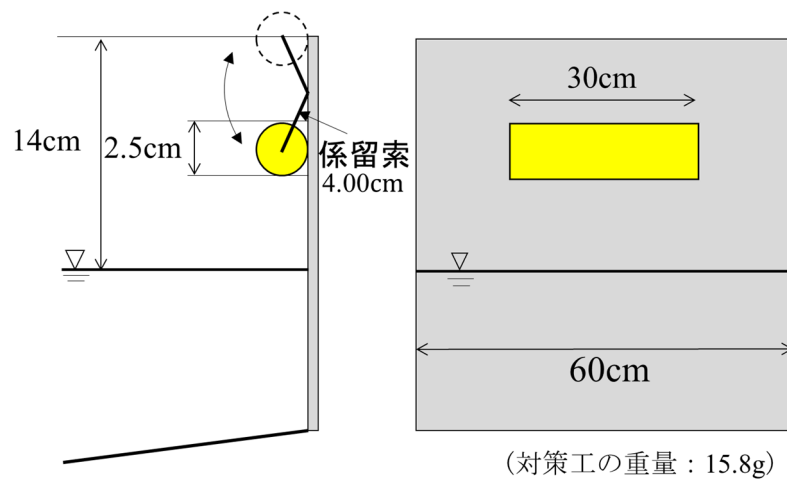


図-3.1.13 係留条件変更後の係留式越波対策工の概略図

c) 係留索の寸法および設置位置の影響

寸法や設置位置の違いによる影響を検討するため、表-3.1.2 に示す対策工の直径、長さ、設置高の異なる 4 つの条件で実験を行った。この検討に用いた、対策工の長さが 30cm の場合の条件は、前述の図-3.1.9 の条件である。図-3.1.14、図-3.1.15、図-3.1.16 に 3 つの条件の側面図、上面図、概略図を示す。

表-3.1.2 対策工の寸法および設置高の条件

	対策工模型				
	素材	長さ[cm]	直径[cm]	重さ[g]	設置高[cm]
①	発泡 スチロール	30	2.5	16.2	2.5
②		5.0	2.5	3.4	2.5
③		5.0	1.0	1.2	2.5
④		5.0	1.0	1.2	1.0

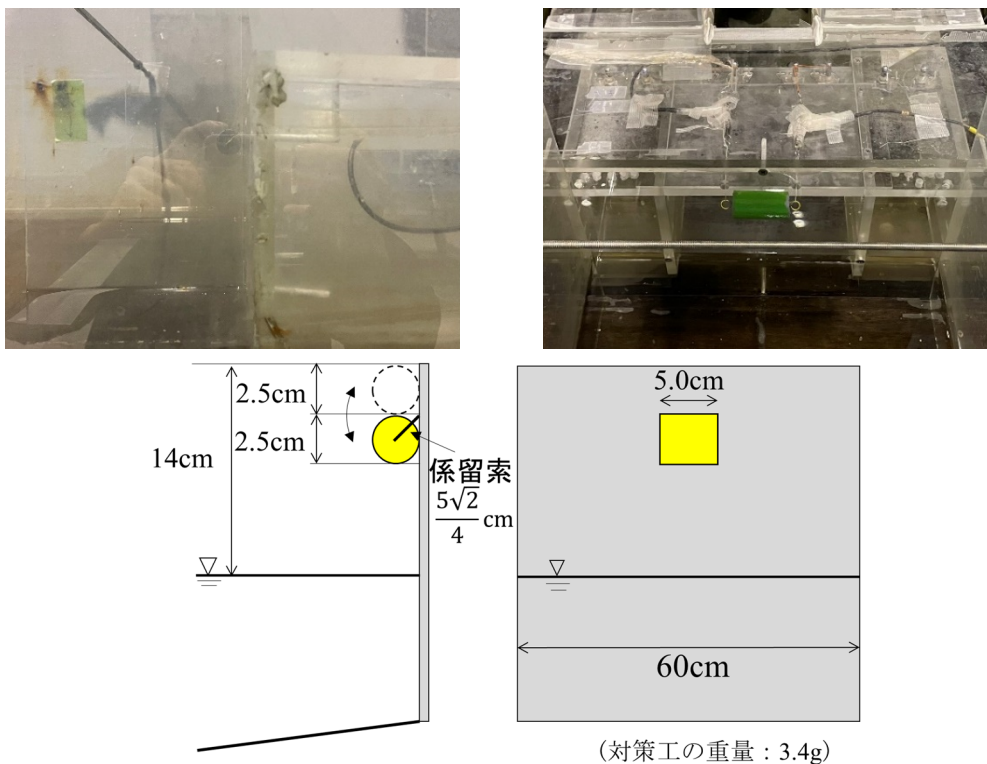


図-3.1.14 直径 2.5cm、長さ 5.0cm、設置高 2.5cm の係留式越波対策工
(左上：側面図，右上：上面図，下：概略図)

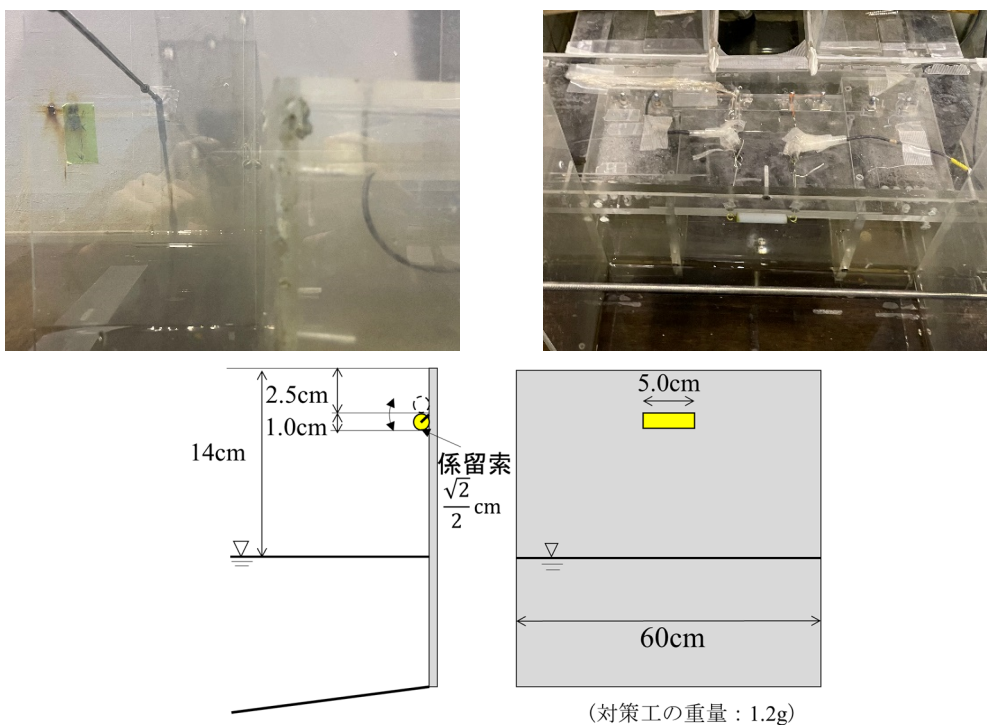


図-3.1.15 直径 1.0cm, 長さ 5.0cm, 設置高 2.5cm の係留式越波対策工
(左上：側面図, 右上：上面図, 下：概略図)

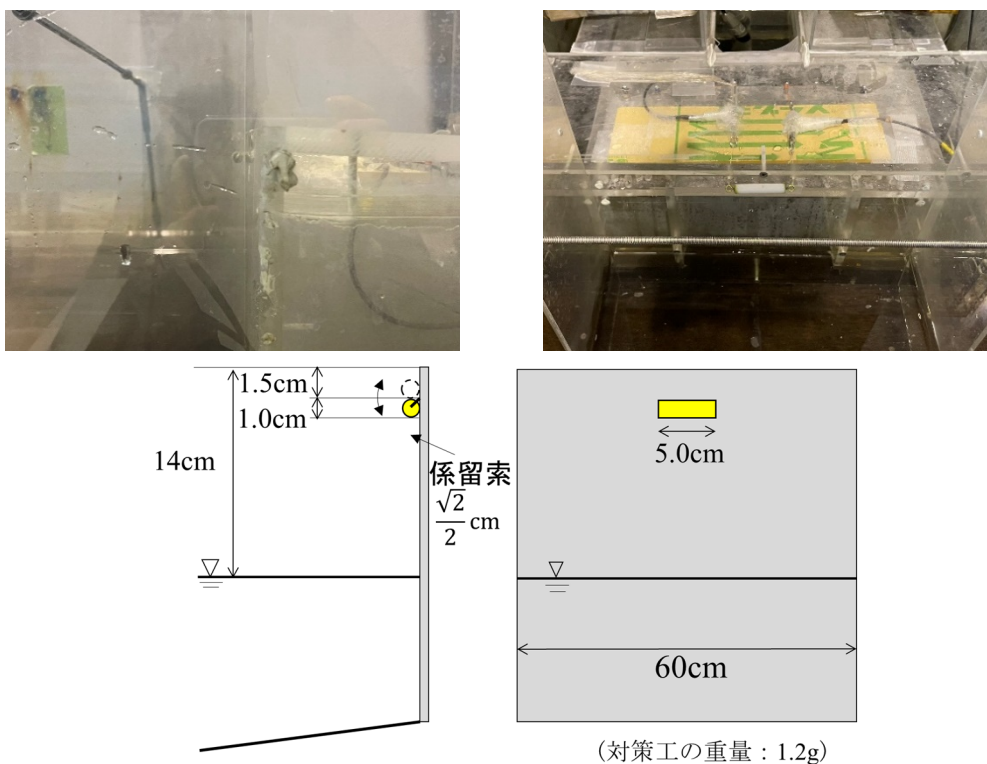


図-3.1.16 直径 1.0cm, 長さ 5.0cm, 設置高 1.5cm の係留式越波対策工
(左上：側面図, 右上：上面図, 下：概略図)

3.2 最適条件の検討

3.2.1 実験結果

図-3.2.1 に基本条件の対策工における Case9($H=10.2\text{cm}$, $T=1.34\text{s}$)での水面変動, 張力, 累積越波量の時系列データを示す. なお, 計測は同条件で 5 回行っており, 図の結果はそのうちの 1 回の結果である.

水位の WG1 は造波装置付近, WG3 は護岸付近である. WG1 のデータから造波開始後 30 秒以降には, 反射波の影響が含まれているが, それまでは比較的安定して造波できていることがわかる. 護岸付近 WG3 をみると, 波形が歪んでおり, 浅水変形や非線形効果が顕著にあらわれている. 実際には, WG3 付近で砕波が生じており, 砕波した波が護岸に衝突し, 壁面に沿って打上げが生じている.

張力の時系列は, SG1 が海側から護岸を見て右側, SG2 が左側の係留索である. この図より, 波の作用に合わせて張力が生じていることが分かるが, 大きさは一波毎に異なり, 規則波による実験であっても, 反射や砕波の状況の僅かな違いや水路幅方向の若干の変動が影響し, 張力の値が比較的大きく変動していると思われる.

累積越波量の時系列は, 実際には越波枡内の水位の時間変化を示しており, 枡内の擾乱の影響でノイズのような変動が含まれるが, 基本的には規則波による越波であるため, 直線的に水位が増加している.

全てのケースについて同様の時系列データが得られているが, 比較として, 直径 1.0cm, 長さ 5.0cm, 設置高 2.5cm の対策工における Case9 の実験結果を図-3.2.2 に示す. この結果も 5 回実施したうちの 1 回の時系列である.

水面変動については, 入射波条件が同じであるため, 基本条件の結果と同様の変動を示している. つまり, 護岸に作用する波はほぼ同じと考えられる. しかし, 張力については大きく異なる. 時系列には電氣的なノイズが含まれているが, 波の作用による張力は基本条件に比べて, 1/10 程度であることがみてとれる. このケースでは, 基本条件に比べて, 直径が 1/2.5 で長さが 1/6 であるので, 投影面積は元の 7%程度であり, それに応じて打上げから受ける力(波力に相当)が大幅に小さくなるため, 必然的に係留索に作用する張力も大きく低減する. その一方で累積越波量(越波枡内水位)は約 2 倍となっているため, 本来の目的である越波量の低減という意味では, 基本条件に比べて効果は劣っているといえる. このように, 入射波, つまりは打上げの状況に対して, 対策工の寸法と設置位置により越波低減効果と係留索に作用する張力は大きく変化する. 実用化に向けては, 高い越波低減効果と係留索に作用する張力の低減を両立する必要がある, 最適条件の把握が重要となる.

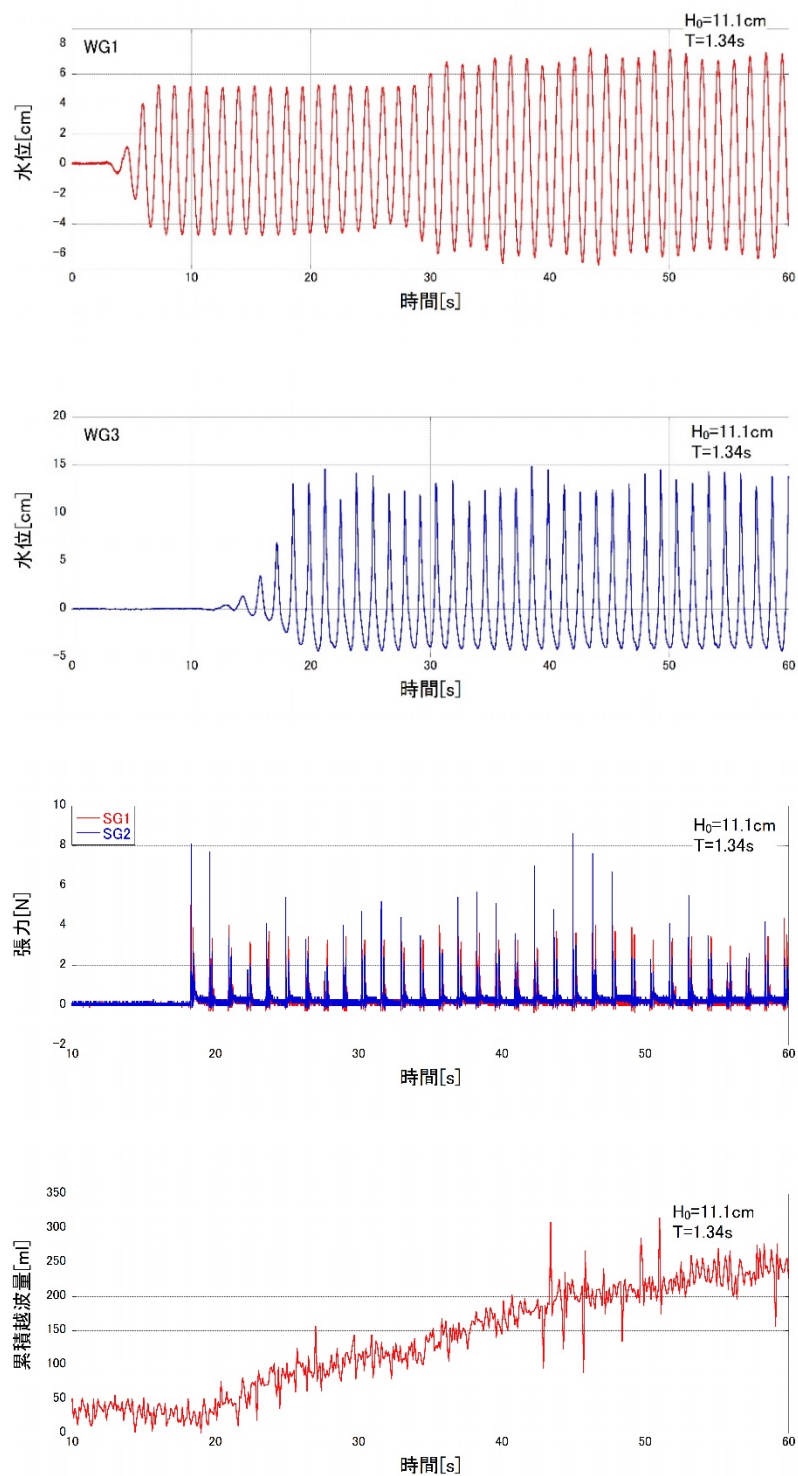


図-3.2.1 水面変動，張力，累積越波量の時系列データ
基本条件（直径 2.5cm，長さ 30cm，設置高 2.5cm），Case9($H=10.2\text{cm}$ ， $T=1.34\text{s}$)

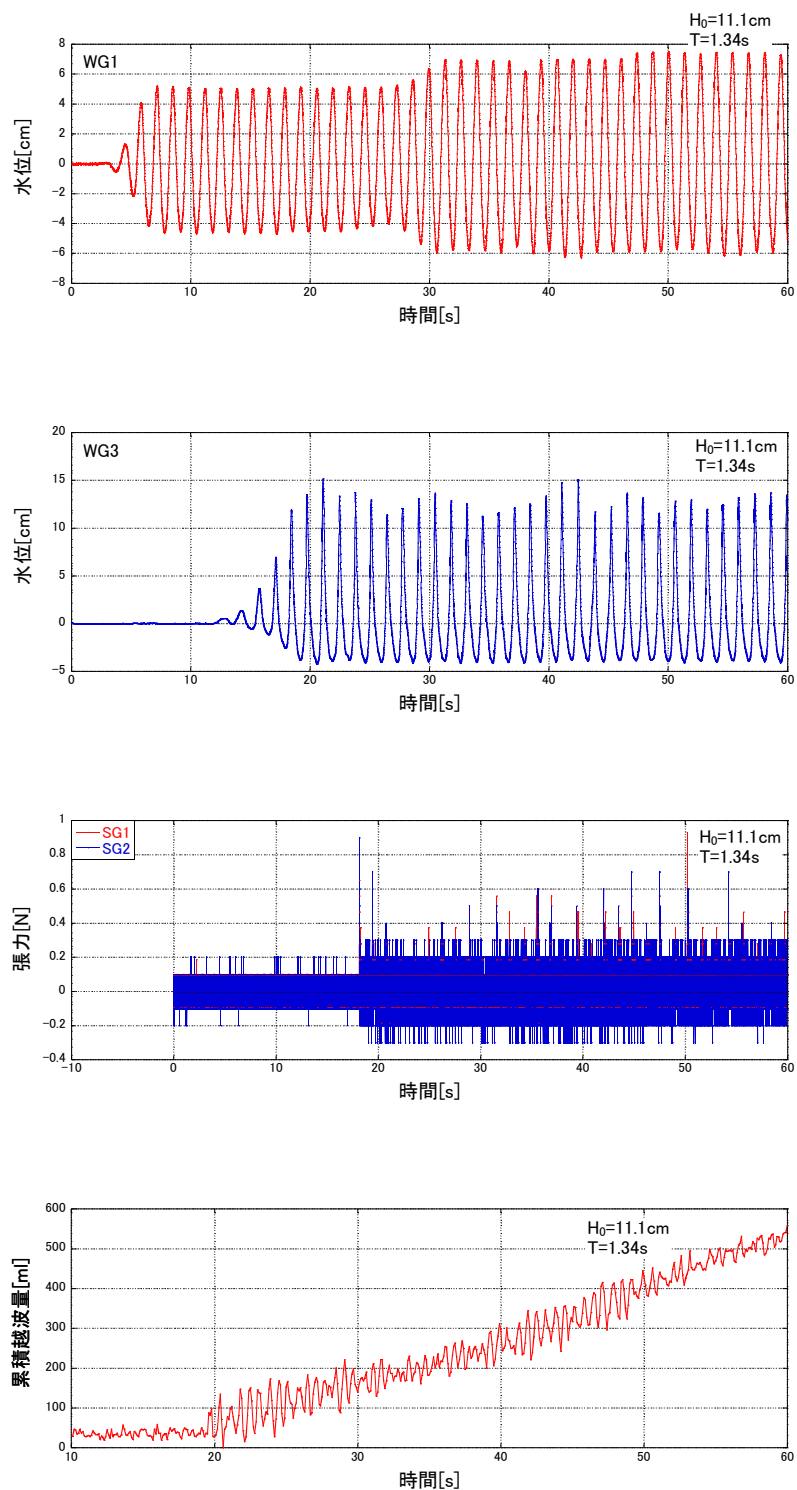


図-3.2.2 水面変動，張力，累積越波量の時系列データ
(直径 1.0cm，長さ 5.0cm，設置高 2.5cm)，Case9($H=10.2\text{cm}$ ， $T=1.34\text{s}$)

3.2.2 越波低減効果の評価

越波低減効果を評価するにあたり、各ケースの無次元越波流量と越波流量低減率を求めた。越波流量の算出には、波が比較的安定している状態の越波量を評価に用いるため、張力計の時系列データから、5波目から10波目までの波が護岸に作用した時間を読み取り、5波目が作用してから10波目が作用する間の累積越波量の時系列データを抜き出した。抜き出したデータを直線近似して傾きを求め、その値を単位時間当たりの越波量[m³/s]とした。なお、累積越波量が非常に少なく、ノイズや水面が振動する影響で傾きが負になるような場合には単位時間当たりの越波量を0[m³/s]とした。このようにして求めた単位時間当たりの越波量[m³/s]を5回の計測で平均し、越波柵に流れ込む護岸延長の長さ(0.10m)で除して越波流量[m²/s]を算出した。それを、 $\sqrt{2g(H_0)^3}$ で除して無次元越波流量とした。ただし、式中のgは重力加速度、 H_0 は沖波波高である。

また、対策工を設置していない直立護岸の越波流量との比較により、以下の式で越波流量低減率を求めた。

$$\text{越波流量低減率(\%)} = \frac{\text{無次元越波流量(対策工なし)} - \text{無次元越波流量(対策工あり)}}{\text{無次元越波流量(対策工なし)}} \times 100$$

3.2.3 たわみの影響

図-3.2.3 にたわみに対する対策の有無による張力の最大値の比較を示す。横軸はケース番号、縦軸は張力の最大値[N]である。各ケースの最大値は、計5回の測定でそれぞれ波が比較的安定している5波目から10波目を対象とし、計測回ごとに6データを対象とした計30の張力データから最も大きいものを抽出した。

全てのケースにおいて、たわみ対策を施している対策工の方が、張力が大きくなっていることが確認された。すなわち、対策工がたわむことで、打上げの力がある程度吸収され、係留索に作用する張力が低減したものと考えられる。したがって、対策工がたわみやすい素材であれば、現地においても係留索に作用する張力を低減できる可能性がある。

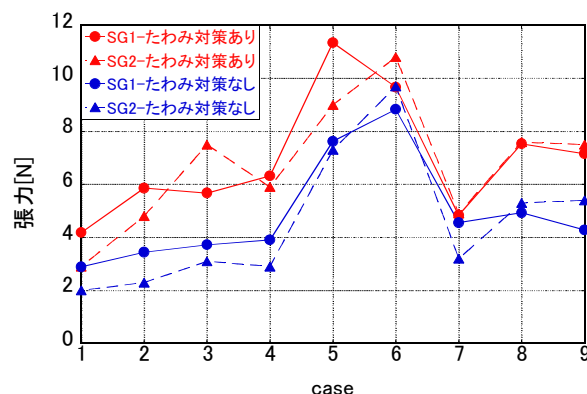


図-3.2.3 最大張力の比較

図-3.2.4 にたわみに対する対策がある場合とない場合の無次元越波流量 $[\times 10^{-4}]$ の比較を示す。図中の直立護岸の無次元越波量は坂本ら(2021)の結果である。直立護岸を含むすべての条件において、Case5, 6の無次元越波流量が他のケースに比べて大幅に大きくなっているが、これは、Case5, 6では護岸前面で顕著な碎波がみられず、波の減衰が小さいために、打上げが激しくなったためと考えられる。また、Case5, 6と同じ周期で、より沖波波高が大きいCase8, 9はCase5, 6よりも無次元越波流量が小さくなっている。これは、実験時のビデオ映像や目視での観察から、Case8, 9では浅水変形により波高が増大し、護岸前面で碎波しているためである。周期や沖波波高が小さいCase1, 2, 4, 7では、直立護岸における越波量が小さいため、対策工がある場合でも無次元越波流量が非常に小さくなっている。Case5, 6ではたわみに対する対策がない場合の方が、わずかに無次元越波流量が大きくなっているが、これは、対策工に波が作用した際に対策工がたわむことで対策工と護岸の間に僅かな隙間が生じ、遡上した波がその隙間から護岸に流入するためである。

図-3.2.5 にたわみ対策の有無による越波流量低減率[%]の比較を示す。Case2では越波流量低減率が負（対策工ありの方が越波量が多い）となるが、これは、前述のように、そもそも越波量が非常に小さいため、越波枡内に水が流入したときの水面変動の影響など、越波実験における結果の変動性が大きいことが影響したと考えられる。その他のケースでは、多少の誤差はあるものの、2つの条件で同様な傾向がみられ、たわみの有無にかかわらず同程度の越波低減効果が確認された。

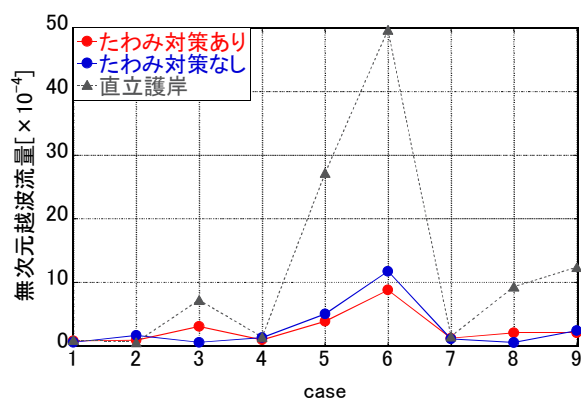


図-3.2.4 無次元越波流量の比較

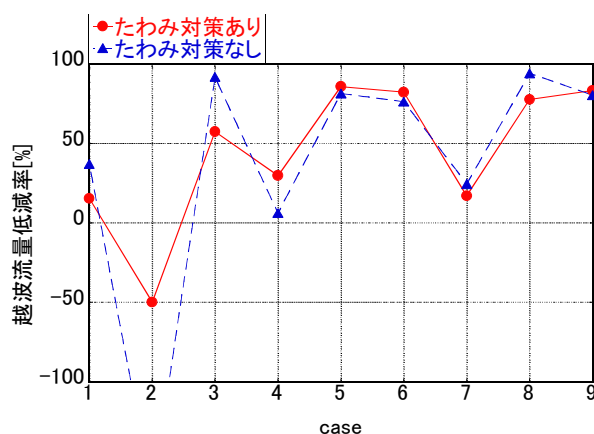


図-3.2.5 越波流量低減率の比較

3.2.4 係留索の長さの影響

図-3.2.6 に係留索の長さによる張力[N]の最大値の比較を示す。各ケースの最大値の求め方は前述のとおりである。係留索が短い場合の Case5, 6 で大きな張力が作用しており、この傾向は対策工の寸法が異なる条件でも同様にみられた。Case5, 6 のように護岸前面での激しい砕波がなく減衰せずに波が作用すると、係留索が短い場合は、対策工の可動域が小さいために対策工に波力が作用する時間が長くなることや、波が作用した際に対策工が護岸に沿って持ち上げられ波の作用を強く受けることなどの要因により、最大張力の値が大きくなったと考えられる。しかし、係留索が長い場合にはその傾向は見られなかった。係留索が長い場合は、対策工の可動域が大きくなることで、波が作用した際に対策工が護岸に沿わず斜め方向に持ち上げられ、波からの力が十分に作用しなかったことや、係留索が長くなったことで係留索が伸びきるまでの時間が長くなり、最大張力が作用するまでにより大きくたわむことで、先に検討したようなたわみによる影響が大きくなったことなどが要因となり、最大張力の値が小さくなったと考えられる。Case8, 9 では、波高が大きいにもかかわらず、最大張力の値が Case5, 6 よりも小さくなり、Case7 と同程度となっているが、これは、波が護岸前面で砕波し減衰するためである。この傾向は対策工の寸法が異なる条件でも確認された。

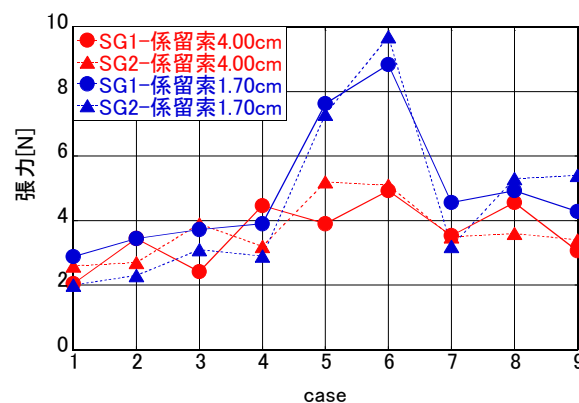


図-3.2.6 最大張力の比較

図-3.2.7 に係留索の長さによる無次元越波流量 $[\times 10^{-4}]$ の比較を示す。図-3.2.4 と同様に、直立護岸を含むすべての対策工の条件において、Case5, 6 の無次元越波流量が他のケースに比べて大きく、Case8, 9 は Case5, 6 よりも小さく、Case1, 2, 4, 7 では無次元越波流量が非常に小さいことが確認された。多くのケースで、係留索が長い方が、無次元越波流量が大きくなっている。これは前述のとおり、係留索が長い場合は、対策工の可動域が大きくなったことで、波が作用した際に対策工が護岸に沿わず斜め方向に持ち上げられるため、護岸を遡上した波が対策工と護岸の間を通りぬけて護岸に水が流入することが原因であると考えられる。

図-3.2.8 に係留索の長さによる越波流量低減率[%]の比較を示す。Case1, 2, 4 においては越波流量低減率が負（対策工ありの方が越波量が多い）となる場合があったが、前述のとおり、そもそも越波量が非常に小さいことや、越波柵内に水が流入したときの水面変動の影響、越波実験における結果の変動性が影響したと考えられる。Case7 においても大きな差がみられるが、これも同様にそもそも越波量が非常に小さいことや越波実験における結果

の変動性が影響したと考えられる。その他のケースでは、多少の差はあるものの、係留索の長さの影響は小さい。

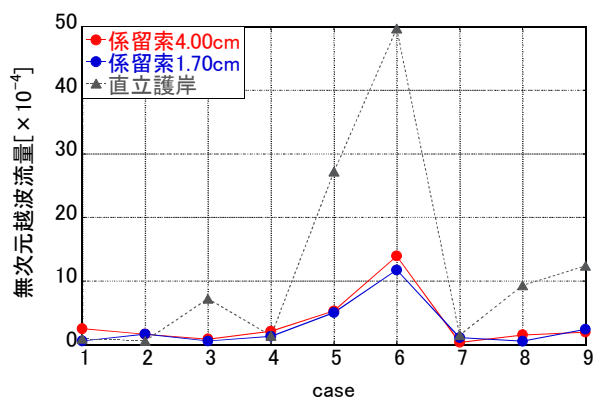


図-3.2.7 無次元越波流量の比較

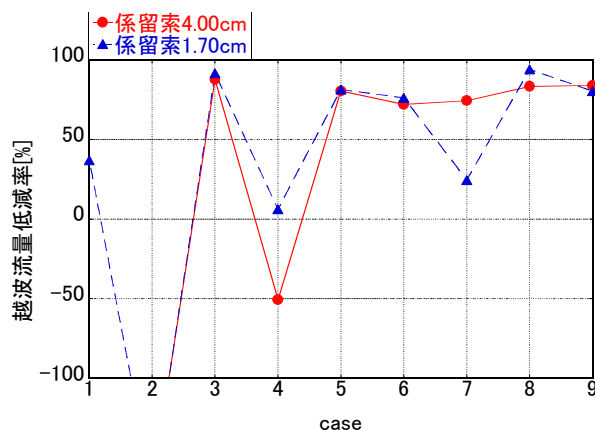


図-3.2.8 越波流量低減率の比較

3.2.5 対策工の寸法および設置位置の影響

図-3.2.9 に対策工の寸法および設置位置による張力[N]の最大値の比較を示す。いずれの条件においても、これまでの結果と同様に Case5, 6 で大きな張力が作用する傾向がみられた。Case8, 9 でも同様に、波高が大きいにもかかわらず、最大張力の値が Case5, 6 よりも小さくなり、Case7 と同程度となる傾向が見られた。4つの条件を比較すると、対策工の長さが 30cm の場合の最大張力の値が最も大きく、寸法が小さくなるにつれて最大張力の値は減少している。これは、波が作用する対策工の面積が小さくなることで、波力が小さくなったことが主な要因であると考えられる。さらに、対策工の重量の違いも影響する。また、護岸を遡上する波は上方に行くほど波の形状が細くなり勢いも弱まる。したがって、高い位置に設置する方が張力も小さくなると予想され、基本的にはそのようになっている。しかし、直径 1.0cm、長さ 5.0cm、設置高 2.5cm の結果は、同じ寸法でより高い位置に設置されている、直径 1.0cm、長さ 5.0cm、設置高 1.5cm の結果に比べて、張力の最大値が若干小さい傾向にあり、より詳細な検討が必要である。

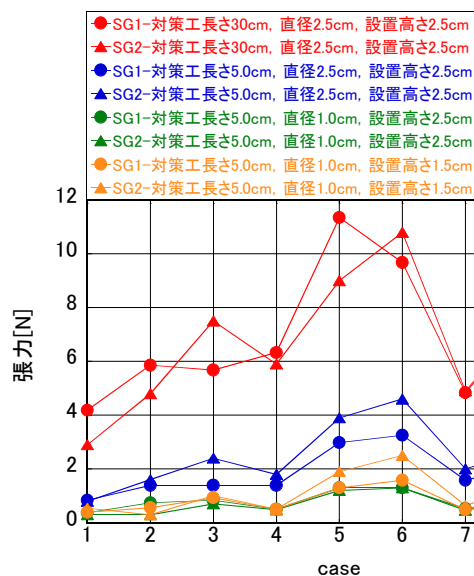


図-3.2.9 最大張力の比較

図-3.2.10 に対策工の寸法および設置位置による無次元越波流量 $[\times 10^{-4}]$ の比較を示す。図-3.2.4と同様に、直立護岸を含むすべての対策工の条件において、Case5, 6の無次元越波流量が他のケースに比べて大きく、Case8, 9はCase5, 6よりも小さく、Case1, 2, 4, 7では無次元越波流量が非常に小さいことが確認された。対策工の長さが5.0cmの3つの条件では、類似した傾向がみられ、これは、対策工の長さが30cmの場合に比べて、3つの条件の波を受ける面積の違いがそれほど大きくないことが要因として考えられる。

図-3.2.11 に対策工の寸法および設置位置による越波流量低減率[%]の比較を示す。Case1～4においては越波流量低減率が負（対策工の方が越波量が多い）の値となるが、前述の理由と同じく、これらのケースはそもそも越波量が非常に小さく、越波実験における結果の変動性が大きいことが影響したと思われる。Case5～9では、直立護岸の場合には有意な越波量であったが、対策工の全ての条件で越波低減効果が認められ、対策工の寸法が大きいほど高い効果を示す傾向がみられた。

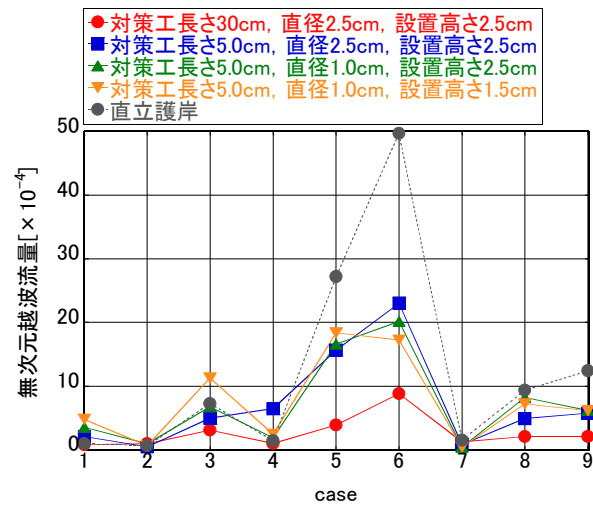


図-3.2.10 無次元越波流量の比較

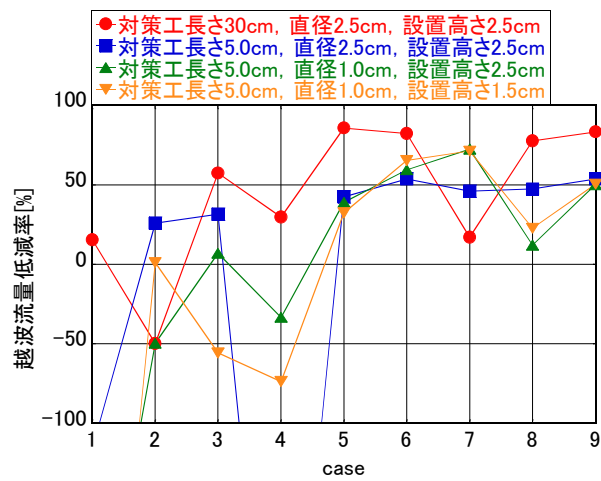


図-3.2.11 越波流量低減率の比較

3.3 最大張力の簡易推定式の提案

係留索に作用する張力には打上げの速度が大きく影響すると考え、最大張力を推定する簡易推定式の構築を試みた。まず、直立護岸を対象に、打上げの様子を高速度カメラで撮影し、また護岸前面に波高計を取り付け、それらの記録から、波の打上げ高および水位上昇速度を計測した（新免ら、2022）。

図-3.3.1 に打上げの状況（Case3）を示す。波が壁面に作用すると大きく打ち上がる様子が分かる。図-3.3.2 上図は同じケースにおける直立壁前面での護岸に波が到達してからの水位変化を示しており、波が壁面で打ち上がり水位が急激に変化することが分かる。図-3.3.2 下図は、水位変化の時系列から水位変化の速度を求めたもので、正が上昇、負が下降である。水位の変化に応じて、最高水位（速度 0m/s）の前後で上昇から下降に急激に変化している。実験時の観察によると、係留式越波対策工の係留策に作用する張力は、波によって対策工が可動範囲の上限まで持ち上げられたときに最大となることが多い。そこで流体中に置かれた円柱に作用する以下の抗力の式をもとに張力を推定することを試みた。

$$D = C_D \frac{\rho}{2} U^2 A \cdots (3.3.1)$$

抗力係数 C_D は田古里らを参考に 0.74 とした。

対策工に作用する張力の推定には、図-3.3.3 に示すように係留策の角度、浮力、重力を考慮した。浮力是对策工の下半分が水中に沈んでいると仮定して求めた。張力の推定式は以下の式(3.3.2)のようになる。

$$\text{張力推定値} = (\text{抗力値 } D + \text{浮力} - \text{重力}) \div \cos \frac{\pi}{4} \cdots (3.3.2)$$

Case3 の張力について、式(3.3.2)による推定値と坂本ら(2021)の実験値との比較を図-3.3.4 に示す。図は、入射波がほぼ定常となった第 5 波から 10 波を示している。全体的に推定値が小さいが、ある程度は表せているといえる。図-3.3.5 は全ケースにおける 5 波から 10 波の平均張力を推定値と比較したものである。Case6 など推定値が過大評価しているが、これは、直立壁で計測している波高計に飛沫が作用し、水位上昇速度が過大に算定されたためと思われる。それらのケースを除けば、推定式は観測結果と同程度の張力を推定できるといえる。

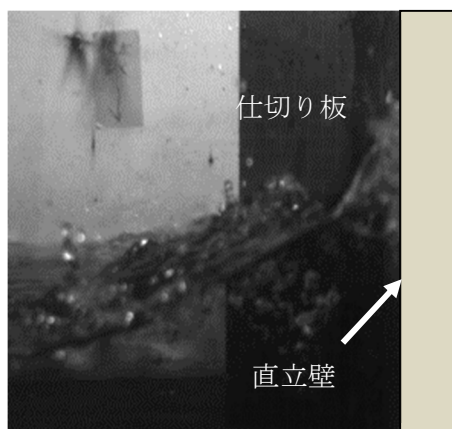


図-3.3.1 打上げの様子

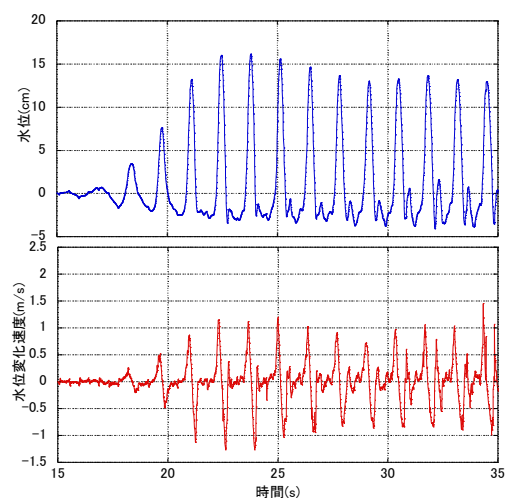


図-3.3.2 護岸前面の水位，水位の変化速度

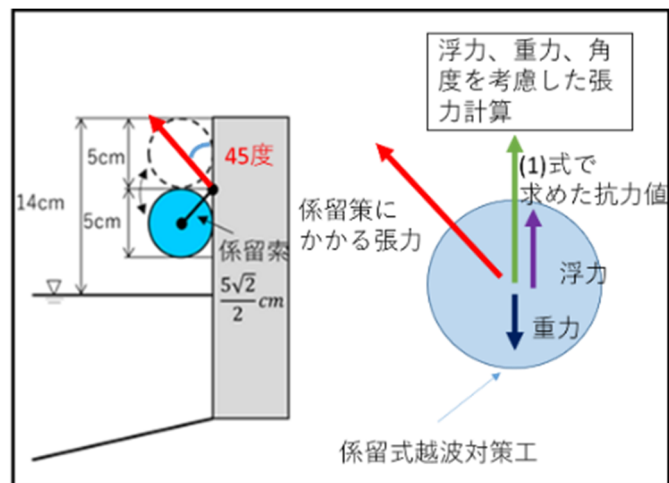


図-3.3.3 対策工に作用する力の概略図

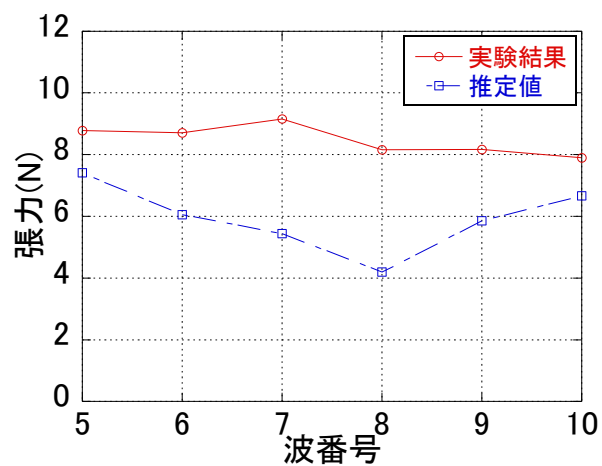


図-3.3.4 最大張力の推定値と実験値の比較(case3)

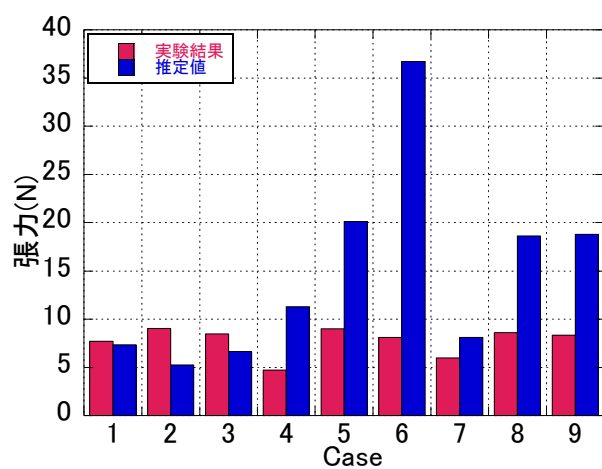


図-3.3.5 最大張力の推定値と実験値の比較

4. 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モデルの構築

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。

本研究では、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))を用いたときの、越波量と対策工の係留索に作用する張力の再現性向上について検討を行った。

4.2 数値シミュレーションモデル

本研究では、DualSPHysics v5.2 を用いた。対策工の係留索の再現は、坂本ら(2023)と同様に、DualSPHysics に実装されているランプドマス法に基づく動的係留ラインモデルの MoorDyn7)を用いた。DualSPHysics による計算結果の可視化は、オープンソースの Blender v2.92 にアドオンの VisualSPHysics を追加して行った。

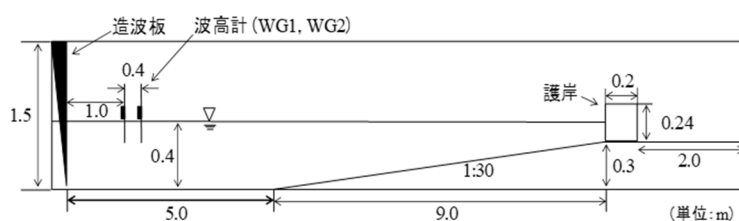
本研究では、DualSPHysics のデフォルトの境界条件である DBC を用いたときに対策工と波面あるいは護岸壁面の間に空白の領域が生じる問題について、mDBC の適用によって改善を試みた。mDBC は、DBC を修正したもので、より滑らかで現実的な圧力および密度場を形成する境界条件である。

4.3 境界処理問題の改善による越波流量と係留索張力の検証

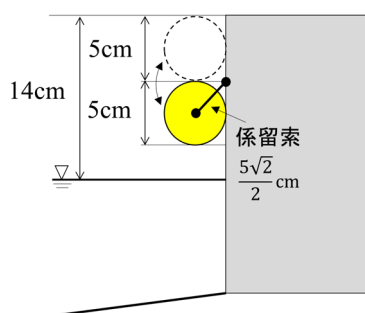
4.3.1 越波流量の計算精度の検証

山城ら(2020)の縮尺 1/45 の水理実験を再現する数値計算を行い、mDBC 適用前後の越波流量の違いについて検討を行った。ここで、mDBC 適用前とは、坂本ら(2023)と同様の DBC による境界条件である。図-4.3.1 に計算領域と対策工の詳細を示す。不規則波を数百波作用させる必要があるため、計算負荷の観点から鉛直 2 次元断面での解析を行った。水路は、長さ 16.2 m、高さ 1.5 m で、勾配 1/30 の斜面上に高さ 0.24 m の直立護岸があり、直径 $D = 0.050$ m の対策工(密度 $\rho = 64.51$ kg/m³)が設置されている。対策工は、長さ $L_m = 0.035$ m、ライン剛性 $EA = 29.4$ N のバネで係留されている。造波板前の水深は $h = 0.40$ m で、領域全体の粒子間距離を $D_p = 0.003$ m に設定した。入射波は、表-4.3.1 に示すように、山城ら(2020)と同じ造波装置前で定義された修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する 3 種類の不規則波を用い、300 秒間の造波を行った。ただし、不規則波における成分波の位相は、実験と同じにはできていない。

図-4.3.2 に同一の波が作用した時の対策工近傍のスナップショットを示す。DBC では対策工と波面の間に物理的な隙間があっても、粒子が侵入しない問題が存在していたが、mDBC では対策工と壁の隙間に流体粒子が入り込み、壁面に沿って波が打ち上がる様子が再現されている。図-4.3.3 に、各造波ケースにおける無次元越波流量を示す。Case 2($H_{1/3} = 0.100$ m) は、mDBC 適用前では越波が発生せず無次元越波流量はゼロであったが、mDBC 適用後では越波が発生し無次元越波流量が得られるようになった。これは、図-4.3.2(b)に示すように、対策工と護岸の隙間を通り抜けて、護岸を乗り越える越波を再現できるようになったためであると考えられる。



(a) 計算領域

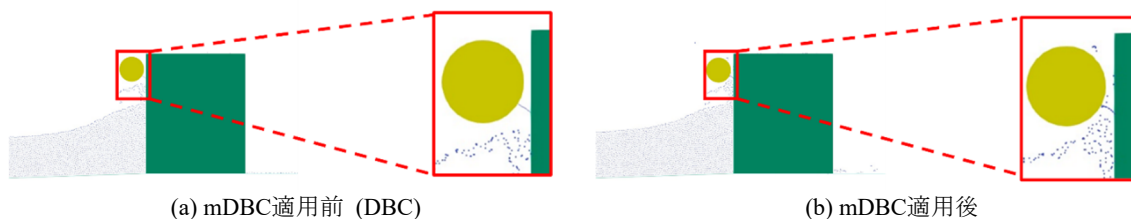


(b) 対策工の詳細（護岸部拡大）

図-4.3.1 計算領域と対策工の詳細

表-4.3.1 入射波条件（鉛直 2 次元断面）

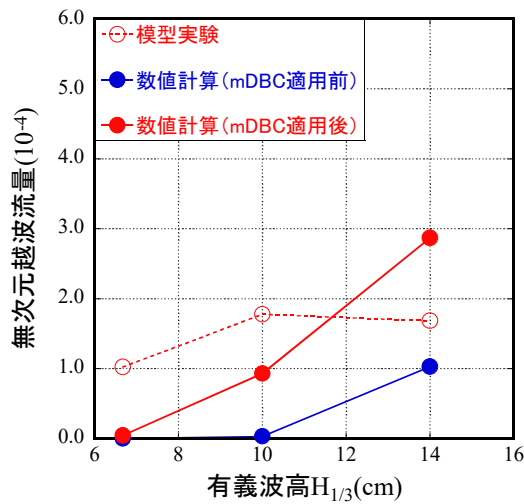
Case	水深 h (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)
1	0.40	1.09	0.067
2	0.40	1.33	0.100
3	0.40	1.58	0.140



(a) mDBC適用前 (DBC)

(b) mDBC適用後

図-4.3.2 護岸前面の様子



4.3.2 係留索張力の計算精度の検証

mDBC が係留索の張力に与える影響を検討するため、3次元計算を行った。水槽の奥行を山城ら(2020)の実験と同じ $B = 0.60$ m として、 $D = 0.050$ m、長さ $L = 0.30$ m の対策工両端の係留索に生じる張力をそれぞれ算出した。図-4.3.4 に計算領域の断面図を示す。計算負荷を考慮して山城ら(2020)の実験よりも水路長を短く設定した。対策工は図-4.3.1(b)と同じ高さに設置し、質量 m は山城ら(2020)と同じ $m = 38.7 \times 10^{-3}$ kg とした。造波板前の水深は $h = 0.30$ m で、領域全体の粒子間距離は、 $D_p = 0.005$ m に設定した。MoorDyn で 2 本の係留索を再現する際に必要なパラメータは、坂本ら(2023)の伸び率を考慮する方法を用いて、表-4.3.2 のとおりに設定した。入射波は、実験と同じ規則波（周期 $T = 1.34$ s、沖波波高 $H_0 = 0.089$ m）を用い、22 秒間の造波を行った。

図-4.3.5 に係留索張力の時系列を示す。上から、実験、計算(DBC)、計算(mDBC)の結果である。沖から見て SG1 が右側、SG2 が左側の係留索である。mDBC を用いた場合の張力は、DBC の結果から平均して約 2 N 減少しており、DBC よりも実験により近い結果が得られた。つまり、DBC に代えて mDBC を用いることで張力の再現性が向上することが分かった。なお、計算と実験とで、張力のピーク出現時刻に違いが生じていた。これは、護岸前面で繰り返し碎波することにより、実験と数値シミュレーションとで、護岸前面における波の状況や対策工の運動に違いが生じたこと等が原因と考えられる。

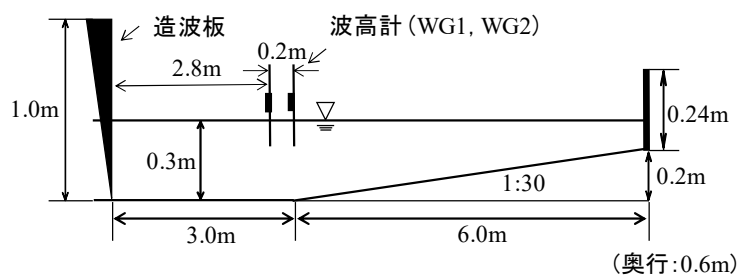
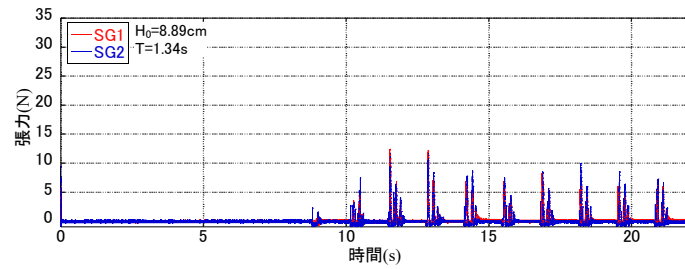
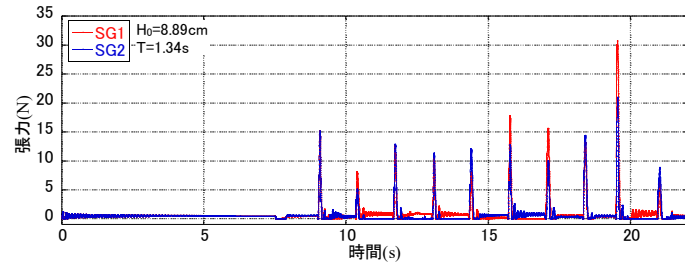


表-4.3.2 係留索に関するパラメータ

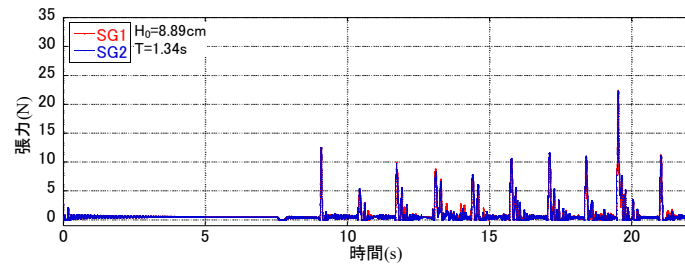
パラメータ	対策工 $D = 0.050 \text{ m}$	対策工 $D = 0.025 \text{ m}$
ライン剛性	29.4 N	16.2 N
係留索の直径	$3.30 \times 10^{-4} \text{ m}$	
係留索の単位質量	$9.75 \times 10^{-5} \text{ kg/m}$	
減衰比	0.8	



(a) 実験



(b) 計算 (DBC)



(c) 計算 (mDBC)

図-4.3.5 係留索張力の時系列 ($D = 0.050 \text{ m}$, $L = 0.30 \text{ m}$)

5. おわりに

本研究では、対策工のたわみや係留索の長さの影響、対策工の最適な寸法および設置位置を明らかにするため、様々な条件で水理模型実験を行い、張力と越波量の比較を行った。その結果、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こと、係留索を長くすることで突発的な大きな張力を防げる可能性などが確認された。さらに、対策工の寸法と設置位置により越波低減効果および係留索に作用する張力が大幅に変化することが示され、実用化に向けた重要な知見が多く得られた。さらに、係留索に作用する最大張力を波の打上げ速度から推定する簡易推定式を提案し、ある程度推定できることを示した。

数値シミュレーションモデルの構築については、係留式越波対策工の詳細な検討を行う際に、これまで問題となっていた対策工周りの境界処理を改善し、再現精度の向上を試みた。その結果、流体と護岸壁面および対策工との境界処理に修正動的境界条件(mDBC)を適用することで越波や作用張力の再現精度の向上が確認された。このことから、数値シミュレーションが係留式越波対策工の開発に向けて有効な手段となり得ることを示した。

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.

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

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.

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.