

消波ブロック被覆堤の消波工形状と越波伝達波の特性について

(国研) 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム

○酒井 和彦
平野 誠治
久保 純一

設計外力としての波浪が増大した場合、通常、既設防波堤では堤体直立部や消波工の高上げ、天端幅の拡幅が必要となる。一方、既往研究により、限られた条件下であるが、消波工天端幅の拡幅のみで消波機能の確保が可能であることが水理模型実験にて確認されている。

本稿は、消波ブロック被覆堤の消波工天端高及び天端幅を変化させたときの波高伝達率及び直立部に作用する波圧分布について、海底勾配及び波浪諸元が既往研究と異なる条件下で水理模型実験を行い、確認した結果を報告するものである。

キーワード：水理模型実験、消波ブロック被覆堤、消波工形状、波高伝達率、波圧分布

1. はじめに

設計外力としての波浪が増大した場合、通常、既設の消波ブロック被覆堤では堤体直立部や消波工の高上げ、天端幅の拡幅等の改良が必要となる。このとき、増大した波浪の外力による既設消波工の被災を防ぐことを目的として、**図-1**の左側に示すように既設消波ブロックより大きな規格の消波ブロックを覆う必要がある。一方で、既設消波工は堤体と新設消波工に拘束されていることから、増大した外力に対して既設消波工を新設消波工で被覆せずとも、安定性が確保できる可能性が考えられた。

そこで、コスト削減を考慮した改良断面として、同じく**図-1**の右側に示すような消波工天端幅のみを拡幅する

断面が検討された。

既往研究^{1) 2)}では、限られた条件下であるが、水理模型実験により、既設消波工の安定性と消波機能の確保が可能であることが確認され、改良に必要なコストと工期の縮減が可能であることが示唆された。

一方で、**図-1**に示す改良方法の汎用性を実証するためには、様々な地形条件や波浪条件などの実験条件下において水理模型実験を行う必要がある。

本稿は、消波ブロック被覆堤の消波工の拡幅・嵩上げ、直立部の嵩上げと波高伝達率と直立部に作用する波力の関係を、海底勾配及び波浪諸元が既往研究^{1) 2)}と異なる条件下で水理模型実験を行った結果を報告するものである。



図-1 コスト削減を考慮した消波ブロック被覆堤の改良例(出典：北海道の港湾・漁港の技術開発ビジョン)

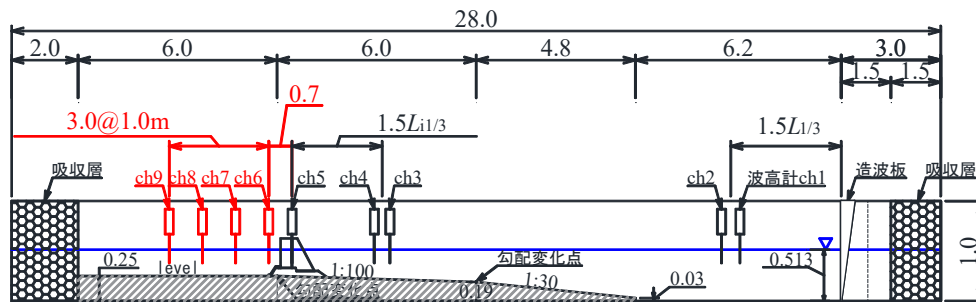


図-2 実験水路(Unit:m)

2. 実験方法

(1) 実験水路と計測の概要

a) 実験水路

実験は、**図-2**に示す吸収制御式の不規則波発生装置を備えた2次元造波水路（長さ28.0m、幅0.8m、深さ1.0m）で行った。水路床は造波板から6.2m区間が水平床であり、続いて4.8m区間が1/30勾配、さらに岸側の6.0m区間が1/100勾配としてあり、あとは水平床である。また、造波板背後に1.5m、水路岸側端部に2.0mの吸収層を設けている。

b) 計測機器

図-2に示す位置に波高計を合計9本設置した。各波高計の設置目的は次の通りである。ch1~4は波浪変形のモニタリング、ch5は直立部直前の水位変動の計測、ch6~9は伝達波の計測である。なお、ch6は直立部前面壁から0.7mの位置に設置し、ch6~9は1.0m間隔に設置した。

図-3に示すように、水平波圧の計測を目的に直立部前面に、天端高によって6~7個の波圧計を設置し、揚圧力の計測を目的に底面に3個の波圧計を設置した。

1回の造波において、波高計測と波圧計測を同時に実施した。なお、波圧計測時のサンプリング周波数は200Hzである。

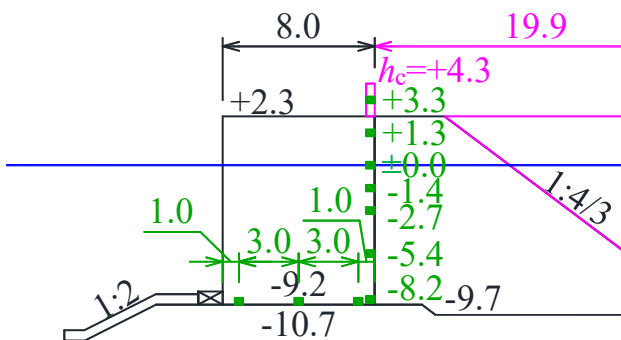


図-3 波圧計設置位置 (Unit:m)

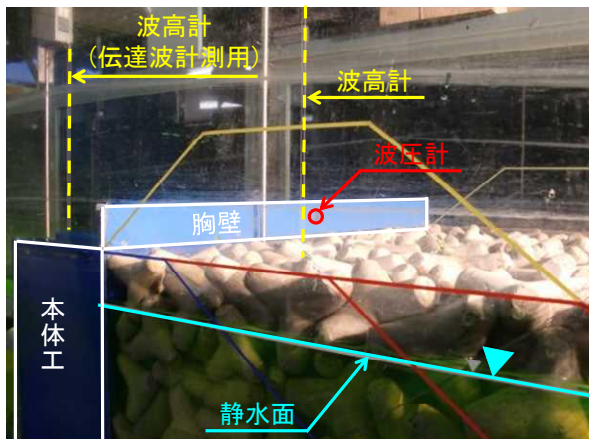


写真-1 堤体模型と計測機器設置状況

(2) 実験条件

実験縮尺は1/40であるが、本稿で示す数値はフルード相似則による現地換算値とする。

a) 実験波の諸元

実験波はBretschneider・光易型のスペクトルを目標とする不規則波を用いた。波浪条件は堤体に入射する有義波周期 $T_{i1/3}$ =8.0s、10.0s、12.0sの3種類とした。有義波高は $H_{i1/3}$ =4.5m、5.0m、5.5m、6.0mの4種類を目標とし、実際に作成できた、周期毎の波高の組合せを**表-1**に示す。

b) 堤体模型の諸元

全ての堤体幅を8.0m、設置位置は1/100勾配の斜面と水平床との境界がマウンド内となるように調整し、設置水深を $h=-10.7$ m、マウンド天端水深を $h_F=-9.2$ mとした。消波工については既設消波工に異形ブロック16t型、新設消波工に異形ブロック32t型を使用し、消波工法面の傾斜は1:4/3、消波工のマウンド天端水深を $h_{dB}=-9.7$ mとした。なお、波高伝達率と波力の計測を目的としているため、直立部及び消波工、被覆工、基礎工の全ての模型は実験時に動かないように固定した。

また、消波工の拡幅及び嵩上げ並びに直立部の嵩上げが伝達率及び波力に与える影響を調べることを目的としていることから、直立部天端高及び消波工天端高・天端幅を変化させ、**図-4-1~6**に示す9断面について実験を実施した。

以下に各断面の特徴及び直立部天端高 h_c 、消波工天端高 h_{dB} 、消波工天端幅 B を示す。

図-4-1は既設断面であり、消波工には異形ブロック16t型を使用している。また、 $h_c=+2.3$ m、 $h_{dB}=+2.3$ mであり、

表-1 実験波浪の諸元一覧

有義波周期 $T_{i1/3}$	有義波高 $H_{i1/3}$
8.0s	4.5m、5.0m
10.0s	4.5m、5.0m、5.5m、5.8m
12.0s	4.5m、5.0m、5.5m、6.0m

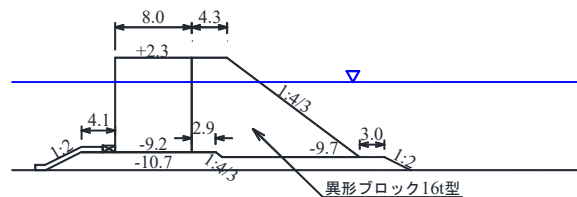


図-4-1 既設断面 (Unit:m)

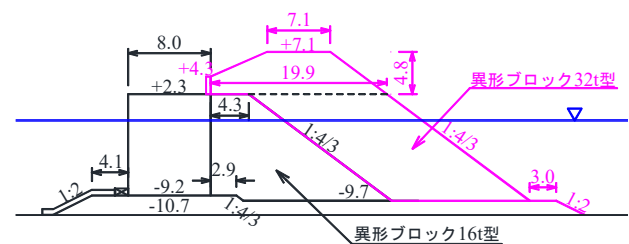


図-4-2 改良断面A (Unit:m)

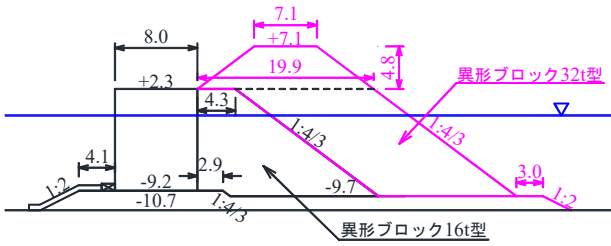


図-4-3 改良断面B (Unit:m)

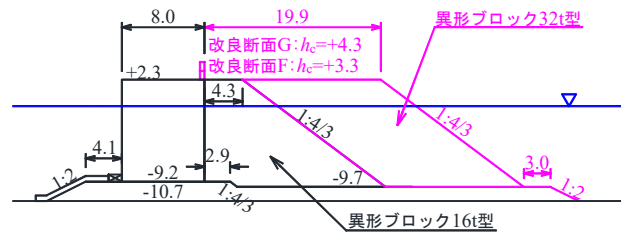


図-4-5 改良断面F、G (Unit:m)

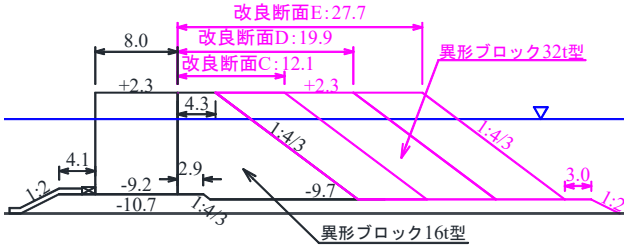


図-4-4 改良断面C、D、E (Unit:m)

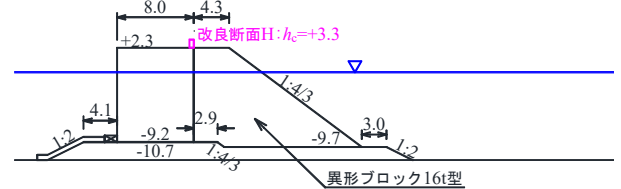


図-4-6 改良断面H (Unit:m)

消波工天端幅 B は異形ブロック16t型2個並びである $B=4.3\text{m}$ である。

図-4-2は既設消波工天端面の被災を防ぐため、新設消波工で被覆すると同時に直立部天端高を2.0m嵩上げし、 $h_c=+4.3\text{m}$ としたものである。以下、改良断面Aとする。なお、新設消波工天端幅は異形ブロック32t型2個並びである $B=7.1\text{m}$ とし、天端高は2層厚分嵩上げし、 $h_{cb}=+7.1\text{m}$ とした。

図-4-3は改良断面Aと同様に既設消波工天端面を新設消波工で被覆したものであるが、直立部天端高は嵩上げていない断面である。以下、改良断面Bとする。なお、新設消波工天端幅と天端高の諸元は改良断面Aと同じである。

図-4-4は、消波工天端幅と伝達率の低減効果の関係を明らかにすることを目的に、天端幅を $B=12.1\text{m}$ 、 19.9m 、 27.7m の3種類に変化させたものである。それぞれ、改良断面C、D、Eとする。なお、改良断面Dは改良断面Bから既設消波工天端高 $h_{cb}=+2.3\text{m}$ 以上の新設消波工を除去した断面である。

なお、本稿で報告する実験においては、消波工の安定性の検討は対象としていないが、既往研究⁹⁾によると、改良断面A、Bのように既設消波工天端面を新設消波工により被覆せずとも、既設消波ブロックの安定性が確保される場合もあることが明らかになっている。

図-4-5は消波工幅に加えて、直立部天端を嵩上げたものである。消波工断面は改良断面Dと同じとし、直立部天端を1.0m嵩上げによって $h_c=+3.3\text{m}$ としたものを改良断面F、2.0m嵩上げによって $h_c=+4.3\text{m}$ としたものを改良断面Gとする。

図-4-6は既設断面の直立部天端を1.0m嵩上げを行い、 $h_c=+3.3\text{m}$ としたもので、改良断面Hとする。

3. 実験結果と考察

(1) 伝達有義波高 $H_{t1/3}$ の特徴

図-5は伝達波計測地点毎の伝達有義波高 $H_{t1/3}$ の一例を示したものである。横軸は直立部前面を $x=0.0\text{m}$ として計測地点の距離を示しており、岸向きを正としている。ch6が $x=28.0\text{m}$ 、ch7が $x=68.0\text{m}$ 、ch8が $x=108.0\text{m}$ 、ch9が $x=148.0\text{m}$ に位置している。縦軸は伝達有義波高 $H_{t1/3}$ である。なお、図-5における実験条件は、有義波周期 $T_{1/3}=8.0\text{s}$ の場合は有義波高 $H_{t1/3}=5.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.0\text{s}$ 及び 12.0s の場合は $H_{t1/3}=5.5\text{m}$ である。

断面諸元によらず、伝達波の有義波高 $H_{t1/3}$ は場所によってやや変動がある。この変動は図-5に示した実験波以外でも見られた。

直立堤及び混成堤の伝達波高の一般的特性を明らかにした合田ら⁹⁾の実験結果においても、計測場所によって伝達波高にやや変動があるため、伝達波高は模型背後の平均値を使用している。このことから、本稿においても伝達波の有義波高 $H_{t1/3}$ は堤体模型の背後に設置した4本の波高計で計測された平均値とした。

(2) 波高伝達率 K_T

a) 消波工形状と波高伝達率 K_T の関係

森下ら¹⁰⁾は消波工天端幅 B と沖波波長 L_0 との比である B/L_0 が波高伝達率 K_T に影響を与えることを明らかにしている。なお、高橋ら¹¹⁾は消波ブロックの並び個数、すなわち、消波工天端幅 B と入射波長 $L_{t1/3}$ の比である $B/L_{t1/3}$ が消波効果に影響を与えることを明らかにしている。本稿では、 $B/L_{t1/3}$ と波高伝達率 K_T の関係を分析した結果を示す(図-6)。

なお、改良断面A及びBでは、消波工天端幅 B だけではなく、消波工天端高 h_{cb} も変化させている。そこで、消波工の天端高の影響を評価するため、図-6においては、

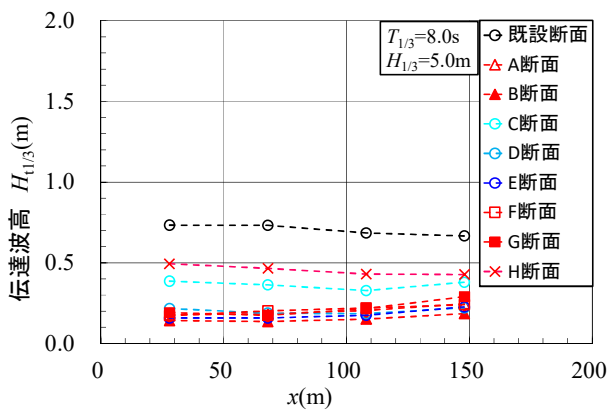


図-5-1 各波高計の伝達波高 $H_{i1/3}$ ($H_{i1/3}=5.0\text{m}$, $T_{i1/3}=8.0\text{s}$)

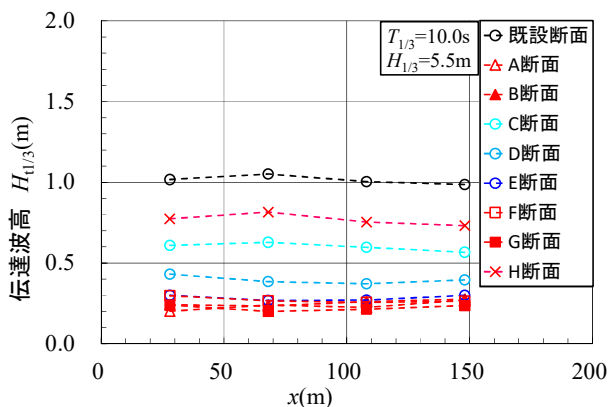


図-5-2 各波高計の伝達波高 $H_{i1/3}$ ($H_{i1/3}=5.5\text{m}$, $T_{i1/3}=10.0\text{s}$)

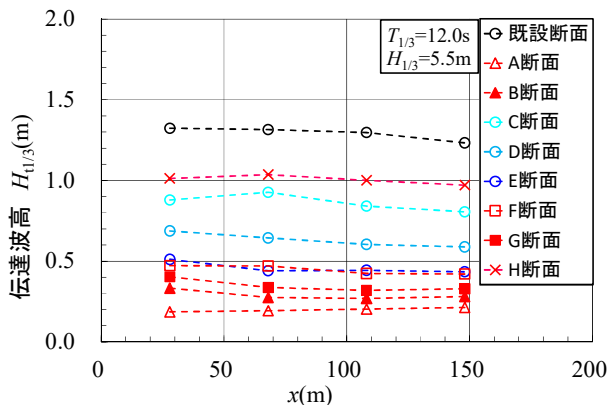


図-5-3 各波高計の伝達波高 $H_{i1/3}$ ($H_{i1/3}=5.5\text{m}$, $T_{i1/3}=12.0\text{s}$)

既設天端高を基準として、既設天端高以下の消波工断面積を S 、既設天端高以上の消波工断面積を S_1 として、既設天端高以下の消波工断面積 S と消波工全断面積である $S+S_1$ との比である $(S+S_1)/S$ を $B/L_{i1/3}$ に乘じた値の位置にプロットしている。

近藤ら⁹⁾が提案した、式(1)に示す消波ブロック被覆堤の波高伝達率の計算式より、標準的な天端高である $h_c=0.6H_{i1/3}$ (以下、「標準断面」と呼ぶ)の波高伝達率 $K_T=0.15$ を図中に破線で示す。なお、式(1)は規則波を使用した実験結果に基づくものであるが、谷本ら⁷⁾により有義波高の伝達率については規則波の実験とそれほど違わないことが明らかにされている。

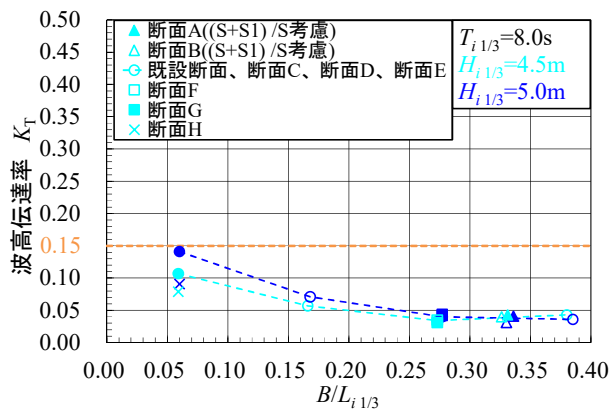


図-6-1 消波工形状と伝達率 K_T の関係 ($T_{i1/3}=8.0\text{s}$)

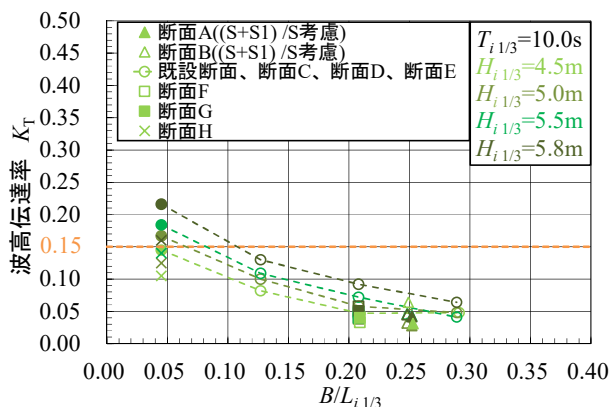


図-6-2 消波工形状と伝達率 K_T の関係 ($T_{i1/3}=10.0\text{s}$)

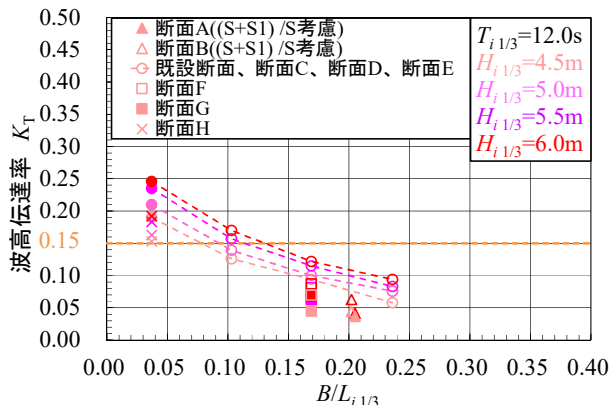


図-6-3 消波工形状と伝達率 K_T の関係 ($T_{i1/3}=12.0\text{s}$)

$$K_T = 0.3 \left(1.1 - \frac{h_c}{H_{i1/3}} \right) \quad (1)$$

図-6より、既設消波工天端を新設消波工によって被覆する断面である改良断面A、Bの K_T は0.05前後であり、 $h_c=0.6H_{i1/3}$ のときの $K_T=0.15$ を大幅に下回ることから、防波堤の消波能力を満たす範囲で消波工断面を縮小できる可能性がある。

図中の、○印は消波工天端幅のみを実施したものである。なお、塗りつぶした●印は既設断面である。これらに着目すると、 $T_{i1/3}=8.0\text{s}$ の場合、既設断面でも $K_T=0.15$ を下回っており、 $B/L_{i1/3}$ が大きくなると、 K_T は更になくなっていく。 $T_{i1/3}=10.0\text{s}$ の場合、改良断面が少なくなると

も $B/L_{1/3}=0.127$ 以上であれば、 $T_{1/3}=12.0s$ の場合、改良断面が少なくとも $B/L_{1/3}=0.170$ 以上であれば標準断面と同程度の防波性能を確保できることができた。

一方で、消波工天端幅を拡幅すればするほど波高伝達率 K_T は直線的に低下するのではなく、拡幅幅が狭いときには波高伝達率 K_T が低下する割合が高いが、拡幅幅が広くなるにつれて、波高伝達率 K_T は下げ止まる傾向にある。この要因は、実験の観察結果によると、消波工天端幅 B が広くなるにしたがって消波工内からの排水が滞ることにより、時間が経過するとともに消波工内の水位が上昇して、越波が生じやすい状態になるためと推察される。

b) 直立部天端高 h_c と伝達率 K_T の関係

図中の×印は、消波工の拡幅は行わず既存断面の直立部の嵩上げ高を $1.0m$ ($\Delta h_c=1.0m$ 、 $\Delta h_c/H_{1/3}=0.17\sim 0.22$ 程度)とした改良断面Hを示す。いずれの有義波周期 $T_{1/3}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ においても、改良断面Hの波高伝達率 K_T は、消波工天端幅を $7.9m$ 拡幅 ($\Delta B=7.9m$ 、 $B/L_{1/3}=0.07\sim 0.11$ 程度)した改良断面Cと同程度であった。

(3) 波圧分布

a) 消波工天端幅と水平波圧分布

既設断面及び改良断面Dの水平波圧分布を図-7に示す。図中の直線は、高橋ら⁵⁾が提案した波圧低減係数を導入した合田式⁶⁾による計算値であり、プロットは堤体に作用する合成波力が最大となる瞬間の実験値を示している。なお、波圧計測は各ケースで5回行っており、実験値は5回分の平均値である。

$T_{1/3}=8.0s$ では、改良断面Dに作用する水平波圧は既設断面と比較して小さく、消波工天端幅の拡幅によって消波性能が向上している。

$T_{1/3}=10.0s$ では、改良断面Dの静水面以上に作用する水平波圧が既設断面と比較して小さくなっている。

一方で、 $T_{1/3}=12.0s$ では、両者の水平波圧は概ね同程度である。

このように、消波工天端幅の拡幅による波圧低減効果は、入射波の周期によって異なる結果となった。

b) 消波工に完全被覆されていない場合の水平波圧分布

消波工により完全に被覆されていない直立部部分には、完全に被覆された部分と比較して大きな波圧が作用することが知られている。

消波工拡幅及び直立部嵩上げを組み合わせた改良断面Gに実験波 $H_{1/3}=5.5m$ 、 $T_{1/3}=12.0s$ が作用した際の水平波圧分布を図-8に示す。また、図中の点線は現行基準⁷⁾に記載されている計算式、一点鎖線は上久保¹⁰⁾らが提案した消波工によって完全被覆されていない直立部に作用する衝撃波圧の計算式による計算値を示す。また、前述のように計測は5回行った。後述するように嵩上げ部には衝撃的な水平波圧が作用しており、計測ごとのばらつきが大きいことから、5回分の実験値をプロットしている。

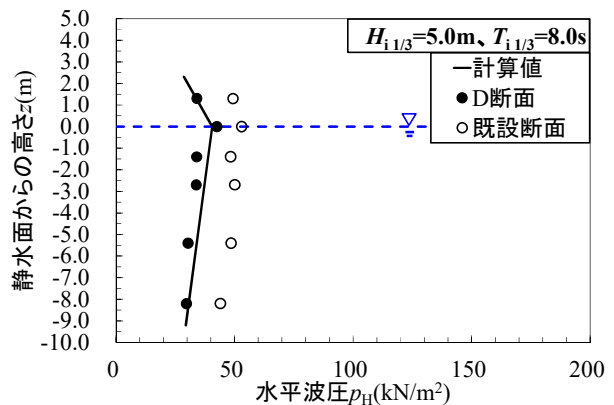


図-7-1 水平波圧分布 ($H_{1/3}=5.0m$ 、 $T_{1/3}=8.0s$)

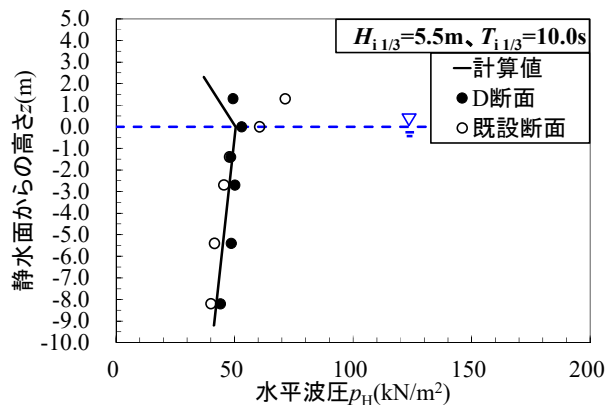


図-7-2 水平波圧分布 ($H_{1/3}=5.5m$ 、 $T_{1/3}=10.0s$)

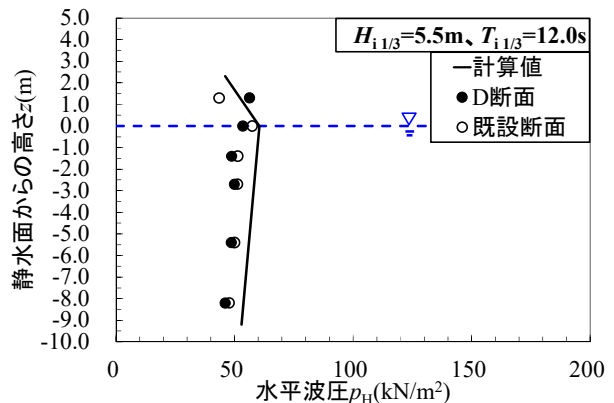


図-7-3 水平波圧分布 ($H_{1/3}=5.5m$ 、 $T_{1/3}=12.0s$)

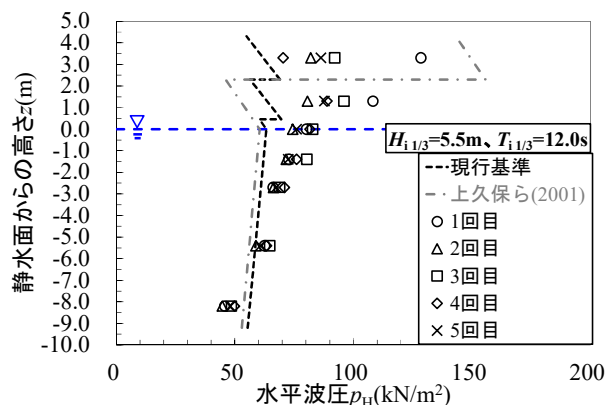


図-8 水平波圧分布 (改良断面G、 $H_{1/3}=5.5m$ 、 $T_{1/3}=12.0s$)

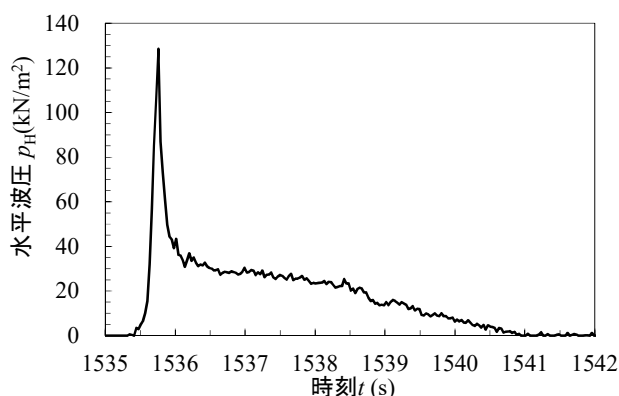


図-9 嵩上げ部における衝撃波圧の作用状況（改良断面G、 $H_{1/3}=5.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=12.0\text{s}$ ）

また、高さが+3.3mに位置するプロットが嵩上げ部において計測した水平波圧であり、最大で128.49kN/m²相当の波圧となった。このときの衝撃的な波圧の作用時間は図-9に示すように0.5s程度であった。このように衝撃的な波圧は、不規則波群中の波の山が消波工天端を上回った際に、速い流れの水脈に変形した後に嵩上げ部に衝突することによって作用するものと推測される。

また、上久保ら¹⁰⁾の実験結果と同様に、消波工によって被覆されている部分も計算値を上回っている。このような傾向は、他の実験波においても現れていた。

以上より、直立部嵩上げの際に消波工により完全に被覆しない場合には、嵩上げ部に衝撃的な水平波圧が作用することについて、留意が必要である。

4. まとめ

消波ブロック被覆堤の消波工幅の拡幅が、波高伝達率と直立部に作用する波圧に与える影響について、水理模型実験の結果をまとめると以下のとおりである。

- a) 既設消波工天端を新設消波工によって覆う断面である改良断面A、Bの K_T は0.05前後であり、防波堤に要求される消波能力を満たす範囲で、消波工断面を縮小できる可能性がある。
- b) 消波工天端拡幅のみを実施した場合、 $T_{1/3}=10.0\text{s}$ では $B/L_{1/3} \geq 0.127$ 、 $T_{1/3}=12.0\text{s}$ では $B/L_{1/3} \geq 0.170$ であれば、 $h/H_{1/3}=0.6$ とした断面と同程度の防波性能を確保された。
- c) 波高伝達率 K_T は消波工天端幅の拡幅に伴い直線的に低下するのではなく、拡幅幅が狭いときには K_T が低下する割合が高いが、拡幅幅が広がるにつれて、 K_T は下げ止まる傾向にある。

- d) 直立部を1.0m嵩上げした際（ $\Delta h/H_{1/3}=0.17\sim 0.22$ 程度）の波高伝達率 K_T は、消波工天端幅を7.9m拡幅した改良断面C（ $B/L_{1/3}=0.10\sim 0.17$ 程度）と同程度であった。
- e) 消波工天端幅の拡幅による波圧低減効果は、入射波の周期によって異なる結果となった。
- f) 既往研究で明らかなどおり、直立部嵩上げの際に消波工により完全に被覆しない場合には、嵩上げ部に衝撃的な水平波圧が作用することについて、留意が必要である。

参考文献

- 1) 酒井和彦、上久保勝美、青井晃樹：既設改良時における消波ブロック被覆堤の水理特性について、平成27年度北海道開発局技術研究発表会論文集、
- 2) 増田 亨、上久保勝美、船橋雄大：既設改良時における消波ブロック被覆堤の水理特性について（その2）、平成29年度北海道開発局技術研究発表会論文集、2018
- 3) 合田良実、竹田英章：越波による防波堤背後への波高伝達率、海岸工学講演会講演集、第13回、pp.87-92、1966
- 4) 森下敏夫、綿貫 啓：消波ブロック被覆混成堤の波高伝達率に関する実験的研究、海岸工学講演会講演集、第28回、pp.348-351、1981
- 5) 高橋重雄、谷本勝利、下迫健一郎：消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック重量、港湾技術研究所報告、第29巻、第1号、pp.53-75、1990
- 6) 近藤俣郎、佐藤 功：防波堤天端高に関する研究、北海道開発局土木試験所月報、第17号、pp.1-15、1963
- 7) 谷本勝利、北谷高雄、大里睦男：不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例、港湾技術研究所資料、No.321、pp.1-60、1979
- 8) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）、日本港湾協会、pp.213-217、2018
- 9) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）、日本港湾協会、pp.224-225、2018
- 10) 上久保勝美、山本泰司、梅沢信敏、木村克俊、土井善和：消波工と直立部の天端高さが異なる消波ブロック被覆堤の水理特性、海岸工学論文集、第48巻、pp.706-710、2001