

消波ブロック被覆堤における消波工の設置形状 の工夫による波高伝達率の低減効果について

港湾空港部 港湾建設課 ○佐藤 功坪
川口 拓也
日本データーサービス（株） 平郡 聖士

気候変動に伴う将来の潮位・波高の増大により、防波堤の機能低下が懸念されている。そのため、既設消波ブロック被覆堤では将来的に堤体・消波ブロックの嵩上げが必要となる。一方、嵩上げを行わず消波工の拡幅のみで防波堤の要求性能を満たす改良工法を適用できれば改良コストの削減が期待される。本稿は、数値解析・水理模型実験を実施し、消波工拡幅による波高伝達率との関係について整理し、設計実務に使用可能な本改良工法の一般式の提案を行った。

キーワード：消波工拡幅、波高伝達率、消波ブロック被覆堤

1. はじめに

気候変動に伴う潮位上昇、波高の増大といった海象変化により、将来的に港湾・漁港の施設に作用する外力増大、防波堤の機能低下が懸念されている。「日本の気候変動2020」¹⁾では日本沿岸の平均海面水位等の将来予測が示され、実務では「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾の部分改訂（令和6年4月）により、気候変動の影響を考慮した設計が規定された。また、令和7年4月には

「気候変動に対応した港湾の施設の設計事例集」³⁾が公表され、防波堤、岸壁を対象に気候変動の影響を考慮して設計する場合の設計条件の設定事例が整理された。既設の消波ブロック被覆堤に対しては、図-1左のように堤体直立部、消波工の嵩上げや堤体の拡幅が気候変動の影響を考慮した改良方法として想定される。一方で、図-1右のように直立部の嵩上げを行わず、消波工の拡幅のみで防波堤の要求性能を満たす改良工法が適用できれば、改良コストの削減が期待される。

消波工の拡幅による改良方法について、酒井ら^{4,5,6)}は水理模型実験により、実験を実施した波浪条件下において波高伝達率、波力の低減効果が期待できることを報告

した。平野ら⁷⁾は堤体および消波工の嵩上げを行う従来の改良方法に比べ、消波工の拡幅による改良方法が約15%のコスト縮減になることを試算した。消波工の拡幅による改良方法は気候変動への対応に効果的である可能性が先行研究により示されてきた。しかし、設計実務において本改良方法を適用するための設計手法は提案されていない。特に、気候変動を考慮した設計により、増大した設計波に対して消波工の拡幅幅をどのように設定すればよいか、その設定方法は確立されていない。

そこで、本稿では消波ブロック被覆堤を対象に数値シミュレーション、水理模型実験を実施し、消波工の拡幅幅と波高伝達率の低減効果について整理し、波高伝達率に関する本改良工法の一般式を提案する。加えて、提案した一般式を利用した消波工の拡幅による消波ブロック被覆堤の試設計を行った。

2. 水理模型実験、数値シミュレーション

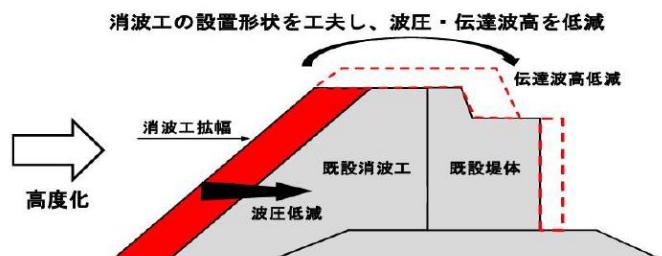
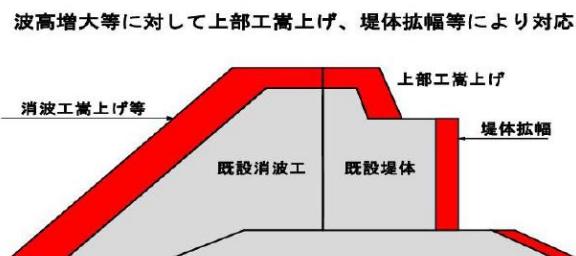


図-1 消波ブロック被覆堤の改良方法（左：従来の改良方法 右：消波工の拡幅による改良方法）

出典：北海道の港湾・漁港の技術開発ビジョン

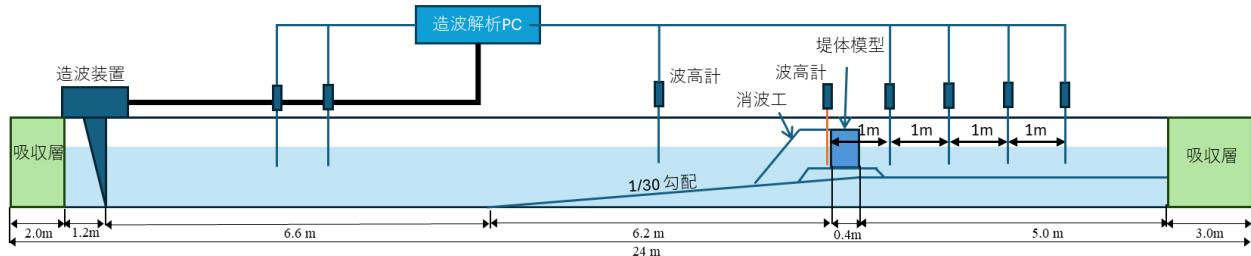


図-2 実験水路（海底勾配 : 1/30）

(1) 水理模型実験

実験は図-2に示す吸收制御式の不規則波造波装置を備えた長さ24m、幅0.8m、高さ1.0mの2次元造波水路において、波高伝達率の測定を行った。水路には反射波を軽減するために水路後部および造波装置の背後に吸収層を設置している。造波装置から6.6mは水平床、そこから6.6mを1/30勾配とした。1/30勾配地形と模型背後の水平床はモルタルにより製作した。実験縮尺は1/50とし、フルード相似則による現地換算値とする。

実験波は修正Bretschneider・光易型のスペクトルを目標とする不規則波とし、換算冲波波高 H_0' が4m, 6m, 7m, 8m, 10m, 12mの6種類、堤体模型に入射する有義波高を $H_{1/3} = 3.9\text{m} \sim 10.6\text{m}$ 、有義波周期が12s, 16sの波を200波作用させた。水深は気候変動による潮位の上昇を考慮し、 $h = 15.4\text{m}$, 16.2m （潮位上昇 : 0.8m）に設定した。

伝達波高の測定は堤体背後の水平床に1m間隔で設置された波高計4本により計測された有義波高の平均値を用いて求めた。実験において波高伝達率 K_T はこの伝達波高と堤体模型に入射する有義波高 $H_{1/3}$ の比である。

実験断面は図-3に示すように天端高を+7.7、+9.4の2種類とした。消波工天端幅 B は消波ブロック50t型の8.4m（消波工2個並び）、16.0m（消波工4個並び）、23.6m（消波工6個並び）の3種類に変化させて実験を行った。堤体模型は1/30勾配の変化点から6.2mの位置に堤体前面が合うようマウンドを設けて設置した。なお、マウンド材は中割石30kg～300kgを想定し、その中央値である95kg（実験縮尺で0.75kg）になるようふるいにかけた碎石を使用した。伝達波高の計測を目的としているため、堤体模型は実験時に動かないよう鉛を模型内に入れて固定した。

(2) 数値シミュレーション

水理模型実験のデータを補完するため、数値シミュレーションによる伝達波高の算定を実施した。自由水面を有する流体の数値計算方法としてVOF (Volume of Fluid) が広く用いられている。本検討では、VOF法を実装した数値波動水路であるCADMAS-SURFを使用した。CADMAS-SURFは水理模型実験の造波水路をコンピューター上に再現し、水路内で発生する水理現象を再現することを目的としたソフトウェアである^{8,9)}。

数値シミュレーションでは水路の形状や、構造物等の諸元は実施した水理模型実験と同じになるよう設定し、水理模型実験と同様に波高伝達率を算定した。

(3) 水理模型実験と数値シミュレーションの整合性

本検討では、水理模型実験と数値シミュレーションの両方を用いて実施した。そのため、同一条件下で、数値シミュレーションの計算結果が水理模型実験を適切に再現しているか確認する必要がある。図-4は水理模型実験と数値シミュレーション（CADMAS-SURF）の波高伝達率について比較結果を示している。図中の黒実線は両者の結果が完全に一致する直線であり、黒破線はその近似直線を示している。相関係数は0.82と高く、数値シミュレーションの結果は波高伝達率の増減傾向を良好に再現している。一方で、両者のデータは黒実線の近傍に分布していない。また、RMSE（2乗平均平方根誤差）は0.026であり、水理模型実験の平均波高伝達率0.038の約70%に相当するため、波高伝達率の絶対値については比較的誤差が大きい。よって、CADMAS-SURFによる数値

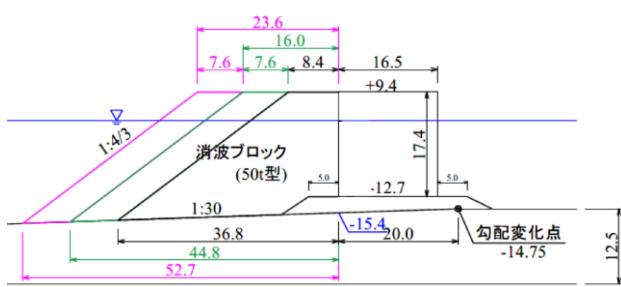
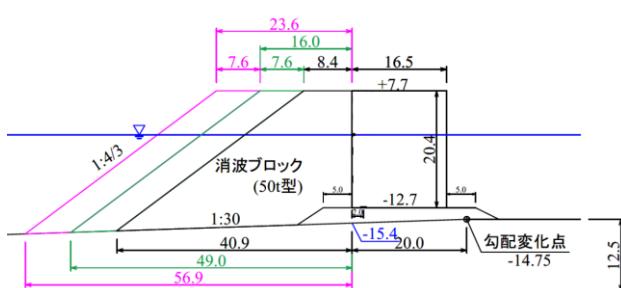


図-3 模型断面図（単位m、上 : +7.7、下 : +9.4）

シミュレーションの波高伝達率は、増減傾向を良く再現しているものの、定量的には誤差が大きい結果であると考えられる。ただし、本検討では定性的に数値シミュレーションの再現性は全体として良好であるため、以降の検討では両者が同等の結果を示すものとして扱った。

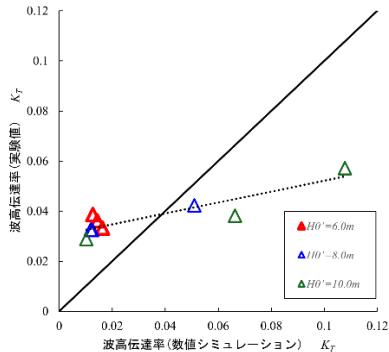


図-4 波高伝達率に関する水理模型実験と数値シミュレーションとの比較結果

3. 消波工の拡幅による波高伝達率の一般化

(1) 海底勾配による波高伝達率 K_T への影響

本節では海底勾配の変化が波高伝達率 K_T へ与える影響について検討する。図-5は消波工が2個並びの断面において1/30勾配、1/100勾配による波高伝達率 K_T と相対天端高 h_d/H_{l3} の関係を示している。1/100勾配の実験データは酒井ら⁵⁾と近藤・佐藤¹⁰⁾の実験結果を流用した。図-5より、相対天端高が0.3~0.6では、1/30勾配と1/100勾配の波高伝達率 K_T に大きな差は見られず、海底勾配による波高伝達率 K_T の影響は軽微であると考える。また、相対天端高 h_d/H_{l3} の増加により波高伝達率は減少し、この傾向は近藤・佐藤らの結果と一致する。さらに、消波工が4個並び、6個並びにおいても上記と同様の傾向が確認された。したがって、海底勾配の違いによる波高伝達率の影響はないと考え、次に消波工の拡幅による波高伝達率の検討を行った。

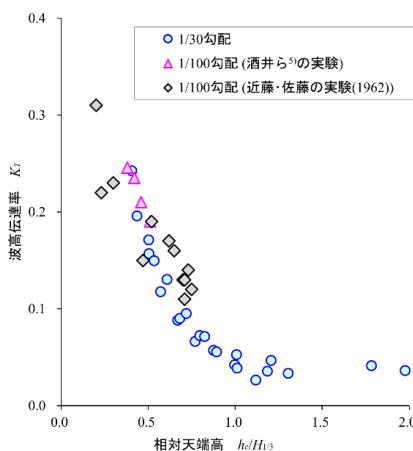


図-5 海底勾配による波高伝達率 K_T への影響

(2) 消波工の拡幅による波高伝達率の検討

近藤・佐藤は一般に波高伝達率 K_T は相対天端高 h_d/H_{l3} の関数として示され、 $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$ の範囲において式(1-a)を提案している。式(1-a)は越波による伝達波だけではなく、捨石マウンドを透過した伝達波を含む。なお、式(1-a)の適用範囲を $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$ としているのは、消波ブロック被覆堤の場合、 $h_d/H_{l3} = 0.75$ が越波限界となるためである。また、混成堤の場合、 $h_d/H_{l3} = 1.25$ が越波限界である。

$$K_T = 0.3 \left(1.1 - \frac{h_d}{H_{l3}} \right) \quad (1-a)$$

森下・綿貫¹¹⁾は碎波型越波が生じる場合、無次元消波工天端幅 B/L_0 が波高伝達率に影響を与えることを明らかにした。また、谷本ら¹²⁾は消波工上部・下部の天端幅の平均値を波長で無次元化したパラメーターを用いて、消波工の有効幅が広いほど、波高伝達率が低下することを示唆している。図-6は水理実験結果、数値シミュレーションの結果を用いて谷本らを参考に無次元消波工天端幅 B/L_0 ごとの相対天端高 h_d/H_{l3} と波高伝達率 K_T との関係を示している。図-6より以下、波高伝達率の算定式を提案する。

a) $B/L_0 < 0.04$ の場合

$B/L_0 < 0.04$ は消波工が天端に2個配置されている場合に該当する。提案する算定式は近藤・佐藤を参考に相対天端高 h_d/H_{l3} に基づき $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$ 、 $0.75 < h_d/H_{l3} \leq 1.25$ 、 $h_d/H_{l3} > 1.25$ の3区間に分割する。

- $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$ は消波ブロック被覆堤において越波が発生する区間で、近藤・佐藤による式(1-a)を準用する。
- $h_d/H_{l3} > 1.25$ は越波が生じず、マウンド透過波が一定値になる区間であり、式(1-b)に基づき、 $h_d/H_{l3} = 1.25$ での値 $K_T = 0.032$ の一定値とした。

• $0.75 < h_d/H_{l3} \leq 1.25$ は上記の $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$ と $1.25 < h_d/H_{l3}$ を結ぶ区間である。この区間では越波がほとんど発生しないため、伝達波は越波に起因するものではなく、マウンド透過波によるものである。そのため、波高伝達率の低減傾向は $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$ の区間と異なる。そこで、この区間では式(1-a)により $h_d/H_{l3} = 0.75$ で求めた波高伝達率と $1.25 < h_d/H_{l3}$ 区間の $K_T = 0.032$ を結ぶ指數関数を提案する。

以上を踏まえた波高伝達率の算定式を以下に示す。

- $0 < h_d/H_{l3} \leq 0.75$

近藤・佐藤による式(1-a)を準用する。

- $0.75 < h_d/H_{l3} \leq 1.25$ のとき

$$K_T = 0.61 e^{-2.35 \frac{h_d}{H_{l3}}} \quad (1-b)$$

- $1.25 < h_d/H_{l3}$ のとき

$$K_T = 0.032 \quad (1-c)$$

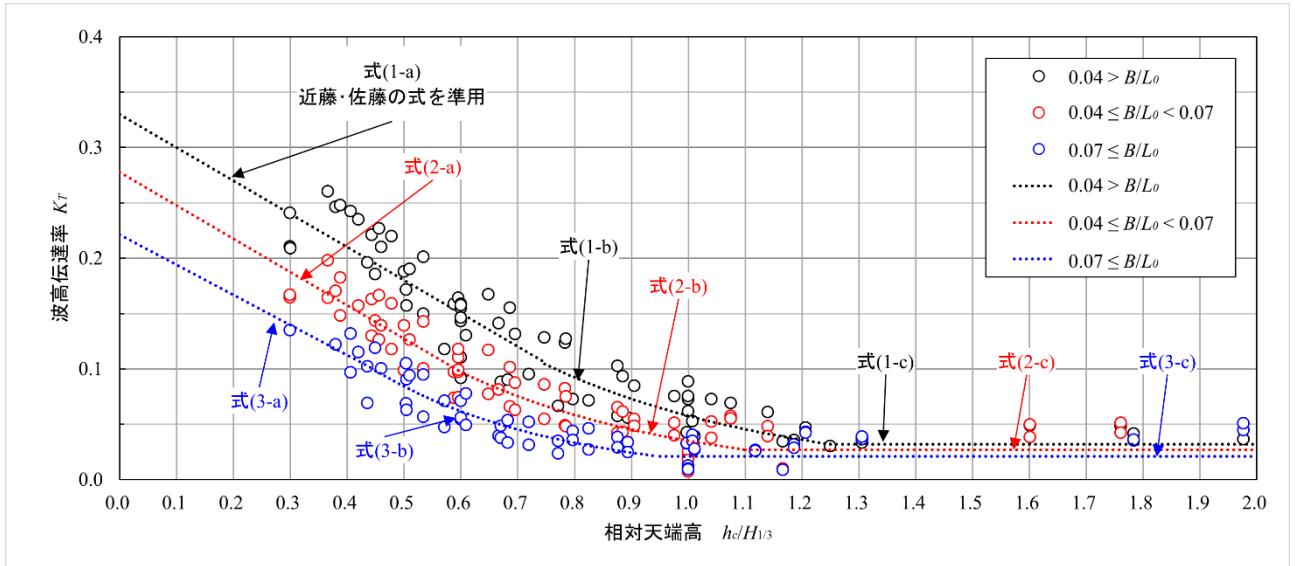


図-6 相対天端高と波高伝達率との関係

b) $0.04 \leq B/L_0 < 0.07$ の場合

$0.04 \leq B/L_0 < 0.07$ は消波工が天端に4個程度配置される場合に該当する。消波工の天端幅が広がると、 $B/L_0 < 0.04$ で越波していた波は拡幅した消波工内へ落下するため、越波が減少し、越波限界に相当する相対天端高は小さくなる。佐藤ら¹³⁾は複雑な海底地形を対象に水理模型実験を実施し、消波工の拡幅による越波流量の減少を示唆している。そこで、 $0.04 \leq B/L_0 < 0.07$ では消波工が天端2個並びの $h_c/H_{1/3} = 0.75$ 、 $h_c/H_{1/3} = 1.25$ における波高伝達率と同等となる相対天端高をそれぞれ算出し、 $0 < h_c/H_{1/3} \leq 0.6$ 、 $0.6 < h_c/H_{1/3} \leq 1.1$ 、 $1.1 < h_c/H_{1/3}$ の3区間に分割した。これらを踏まえ、以下に波高伝達率の算定式を提案する。

・ $0 < h_c/H_{1/3} \leq 0.6$ のとき

$$K_T = 0.3 \left(0.92 - \frac{h_c}{H_{1/3}} \right) \quad (2-a)$$

・ $0.6 < h_c/H_{1/3} \leq 1.1$ のとき

$$K_T = 0.45 e^{-2.55 \frac{h_c}{H_{1/3}}} \quad (2-b)$$

・ $1.1 < h_c/H_{1/3}$ のとき

$$K_T = 0.027 \quad (2-c)$$

c) $B/L_0 \geq 0.07$ の場合

$B/L_0 \geq 0.07$ は消波工が天端に6個以上配置される場合に該当する。この場合も $0.04 \leq B/L_0 < 0.07$ と同様に、 $h_c/H_{1/3} = 0.75$ 、 $h_c/H_{1/3} = 1.25$ における波高伝達率と同等となる相対天端高をそれぞれ算出し、 $0 < h_c/H_{1/3} \leq 0.45$ 、 $0.45 < h_c/H_{1/3} \leq 0.95$ 、 $0.95 < h_c/H_{1/3}$ の3区間に分割した。以下に波高伝達率の算定式を提案する。

・ $0 < h_c/H_{1/3} \leq 0.45$ のとき

$$K_T = 0.27 \left(0.81 - \frac{h_c}{H_{1/3}} \right) \quad (3-a)$$

・ $0.45 < h_c/H_{1/3} \leq 0.95$ のとき

$$K_T = 0.4 e^{-3.10 \frac{h_c}{H_{1/3}}} \quad (3-b)$$

・ $0.95 < h_c/H_{1/3}$ のとき

$$K_T = 0.021 \quad (3-c)$$

ここまで、提案した算定式は、有義波高 $H_{1/3}$ 、沖波波長 L_0 が決定していれば、任意の相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ 、消波工天端幅 B に対し、容易に波高伝達率を求めることができる。このため、実務上利用しやすく、気候変動により増大した設計波に対して既設消波ブロック被覆堤と同等の波高伝達率を確保するために必要な消波工の拡幅幅が算出可能である。さらに、 B/L_0 を採用したことで、提案した算定式は消波ブロックの規格による天端幅の違いに依存せず、波高伝達率が算出可能である。したがって、規格が大きい消波ブロックを用いて消波工を拡幅する場合でも、必要な消波工の拡幅幅を容易に算出できる。

4. 消波工拡幅による試設計

本検討で提案した算定式を用いて、以下に既設消波ブロック被覆堤を消波工拡幅により改良する場合の試設計を行った。既設の防波堤に対し、気候変動により0.6 mの潮位上昇、波高の増大を考慮した場合、堤体天端高の嵩上げを行わずに既設消波ブロック被覆堤と同等の波高伝達率を確保するために必要な消波工の拡幅幅 ΔB を算出することを目的に試設計を行うものとする。

(1) 設計条件

検討対象の防波堤として図-7のような既設消波ブロック被覆堤を想定した。ここで、 h_c はH.W.Lを基準にした天端高、 R はC.D.L基準とした天端高を示している。既設の消波ブロックは40t型とする。

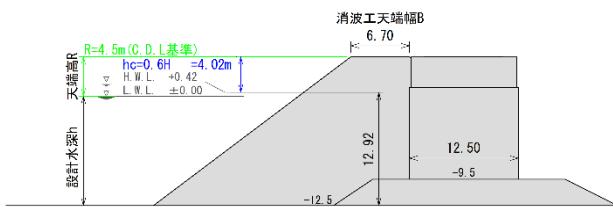


図-7 既設消波ブロック被覆堤の断面（単位:m）

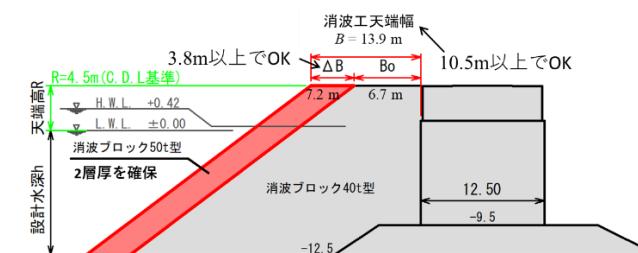


図-8 改良後消波ブロック被覆堤の断面（単位:m）

表-1 試設計の諸元

	既設設計時 (現在)	気候変動後 (将来)
潮位	+0.42	+1.1
有義波高 $H_{1/3}$	6.7m	7.4m
天端高 h_c	4.02m	3.40m
相対天端高 $h_c/H_{1/3}$	0.60	0.46
波高伝達率 K_T	0.15	0.19

表-1は、既設防波堤および気候変動後（上位シナリオ）の設計条件と波高伝達率をそれぞれ示している。波高伝達率は近藤・佐藤の式(1-a)より算出した。気候変動によって、潮位と波高が上昇した結果、相対天端高は0.6から0.46へ低下し、波高伝達率は0.15から0.19へ増加した。なお、気候変動を考慮した場合、相対天端高を0.6とするために必要な天端高は $R = +5.6\text{ m}$ になり、約1.1mの嵩上げが必要となる。

(2) 消波工天端幅 B 、拡幅に必要な消波ブロック個数の算出方法

a) 既設防波堤と同等の波高伝達率になる B/L_0 を求める。

設計条件が整理された後、図-6および提案した算定式を用いて既設防波堤の波高伝達率 ($K_T = 0.15$) と同等以下となる B/L_0 を求める。

$0.04 \leq B/L_0 < 0.07$ の場合（図-6の赤破線、消波工4個並び相当）、 $h_c/H_{1/3} = 0.46$ のとき、式(2-a)より波高伝達率 $K_T = 0.14$ が得られる。これは既設防波堤の波高伝達率 ($K_T = 0.15$) より小さくなるため、 $0.04 \leq B/L_0$ が消波工の拡幅に必要な条件となり、消波工を天端4個並びに設定することで気候変動を考慮した場合でも嵩上げせずに既設防波堤と同等以上の防波性能を満たすことができる。

既設の消波ブロック被覆堤が古い施設の場合、設計計

算書が存在せず、相対天端高や既設防波堤の波高伝達率を求められないことがある。その場合は、技術基準、防波堤天端高の設定根拠より、以下の目標値を設定すればよい¹⁴⁾。

- ・越波を極力防止する : $K_T < 0.10$
- ・越波を抑制する : $K_T = 0.2$

これらの目標値に基づき、図-6や算定式を用いて B/L_0 を決定することで、合理的な設計が可能となる。

b) 消波工天端幅 B 、消波工の拡幅幅 ΔB を求める。

a)で得られた $0.04 \leq B/L_0$ より、気候変動後の沖波波長を $L_0 = 262.14\text{ m}$ として用いると必要な消波工の天端幅は $B \geq 10.5\text{ m}$ となる。したがって、消波工天端幅 B は 10.5 m 以上に設定する必要がある。また、既設の消波工天端幅は $B_c = 6.7\text{ m}$ であるため、必要な消波工の拡幅幅は $\Delta B = 10.5\text{ m} - 6.7\text{ m} = 3.8\text{ m}$ 以上となる。

c) 消波ブロックの必要質量を求める、拡幅する消波ブロックの個数を設定する。

次に、ハドソン式を用いて増大した設計波に対する消波ブロックの必要質量を算出する。本試設計では、消波ブロックの規格は50t型となる。消波ブロック50t型の1個並びにはカタログ¹⁵⁾より3.3mであり、 $\Delta B = 3.8\text{ m}$ を満たさない。2個並びの場合は、7.2mとなり、 $\Delta B \geq 3.8\text{ m}$ を満足する。このときの消波工天端幅は $B = 13.9\text{ m}$ となる。したがって、既設40t形消波ブロックに加え、50t形消波ブロックを2層厚で配置し、消波工を天端に計4個並びとすることで、既設防波堤と同等以下の波高伝達率を達成できる。図-8は本試設計結果から得られた消波工の拡幅による消波ブロック被覆堤の改良断面である。

(3) 設計時の留意点

ここまで、既設消波ブロック被覆堤の消波工拡幅による改良について、波高伝達率に着目した検討を行った。一方、設計時には堤体の安定性を確保するため、消波工の拡幅が波力に及ぼす影響を考慮しなければならない。酒井ら¹⁶⁾による水理模型実験では消波工天端を6個並びとした場合に波力低減が確認されている。しかし、同実験では一部の波浪条件下において消波工天端4個並びが2個並びよりも大きな波力を示す結果も確認できる。このことから、消波工拡幅による波力への影響は十分に解明されておらず、拡幅によって波力が増大する可能性も否定できない。そのため、設計時には波力について慎重な検討が必要である。しかし、現状では消波工拡幅と波力の関係について体系的な知見が乏しいため、波力の計算には通常の消波ブロック被覆堤と同様に合田準用式を採用するのが妥当であると考える。

4. まとめ

本検討では消波ブロック被覆堤を対象に数値シミュレーション、水理模型実験を実施した。消波工天端幅と波高伝達率の関係について明らかにし、既設消波ブロック被覆堤と同等の波高伝達率を実現可能な算定式の提案を行った。加えて、提案した算定式を利用した消波工の拡幅による消波ブロック被覆堤の試設計を行った。以下に本検討の結果をまとめる。

- (1) CADMAS-SURFによる波高伝達率は増減傾向を良く再現しているものの、定量的には誤差が大きい結果となった。
- (2) 海底勾配の違いによる波高伝達率の影響は小さいことを確認した。また、消波工を拡幅した場合でも近藤・佐藤らと同様に相対天端高の増加に伴い、波高伝達率が減少する傾向を確認できた。
- (3) 既設消波ブロック被覆堤と同等の波高伝達率を満足する消波工天端幅が算定可能となる一般式を提案した。
- (4) 提案した算定式を用いて試設計を行い、消波工拡幅による設計事例を示した。

参考文献

- 1) 文部科学省及び気象庁：日本の気候変動2020, 2020.
- 2) (公社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻）令和6年4月部分改訂版, 第1章, pp.21, 22, 2018.
- 3) 国土交通省港湾局：気候変動に対応した港湾の施設の設計事例集, 2025.
- 4) 酒井和彦, 平野誠治, 久保純一：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, 第65回（令和3年度）北海道開発技術研究発表会, 2022.
- 5) 酒井和彦, 平野誠治, 久保純一：消波ブロック被覆堤の消波工形状と波高伝達率について, 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所月報, 第833号, pp.35–40, 2022.
- 6) 酒井和彦, 平野誠治, 鈴木慧, 船橋雄大, 早川哲也, 佐藤典之, 鈴木高二郎, 木村克俊：設計波の増大に対応した消波ブロック被覆堤の順応的改良工法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 24-18159, 2024.
- 7) 平野誠治, 奈良俊介, 水口陽介, 早川哲也, 本多和彦, 森信人, 渡辺靖憲, 木村克俊：気候変動による防波堤の安定性低下と順応的対策, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 23-18141, 2023.
- 8) 磯部雅彦, 余錫平, 梅村幸一郎, 高橋重雄：数値波動水路の開発に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.36–40, 1999.
- 9) 「数値波動水路（CADMAS-SURF）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～, 沿岸技術研究センター, 2001.
- 10) 近藤淑郎, 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117号, pp.1~5, 1964.
- 11) 森下敏夫, 綿貫啓：消波ブロック被覆混成堤の波高伝達に関する実験的研究, 第28回海岸工学論文集, 1981.
- 12) 谷本勝利, 高橋重雄, 木村克俊：防波堤の構造と水理特性－日本における防波堤設計の現状－, 港湾技術研究所報告, 第26巻第5号, pp.11-55, 1987.
- 13) 佐藤功坪, 酒井和彦, 平野誠治：複雑な海底地形に位置する護岸の越波流量及び作用波力に関する研究, 第66回（2022年度）北海道開発技術研究発表会, 2023.
- 14) (公社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（中巻），施設編, 第4章, pp.917~919, 2018.
- 15) 技研工業株式会社：消波根固ブロック 六脚ブロック, http://www.gikenko.co.jp/product/block1-pdf/hexaleg_block/hex.pdf , 2025年12月15日閲覧.