

第 1 編 漁 港 施 設

第1章 防波堤及び護岸の消波工

1.1 概要

漁港施設における消波工は、主として直立堤、混成堤などの防波堤、及び護岸などの施設に作用する波力の低減や越波の防止を目的として施設前面に設置される異形ブロックを積み上げた構造物である。図-1.1 に防波堤や護岸などに設置される消波工の模式図を示す。

異形ブロックで被覆された直立壁に作用する波圧は「参考図書 p.84 第2編第4章 4.2 直立壁に作用する波力」に示されるように、波圧補正係数を用いて波力を低減することができる。また、異形ブロックで被覆された混成堤では「参考図書 p.77 第2編第3章 3.7.3 伝達波高」に示されるように、堤体を越える伝達波が低減される。また、消波工付護岸では、「参考図書 p.70 第2編第3章 3.7 越波量と打ち上げ高と伝達波高」で示されるように、越波量や波の打ち上げ高を低減することができる。

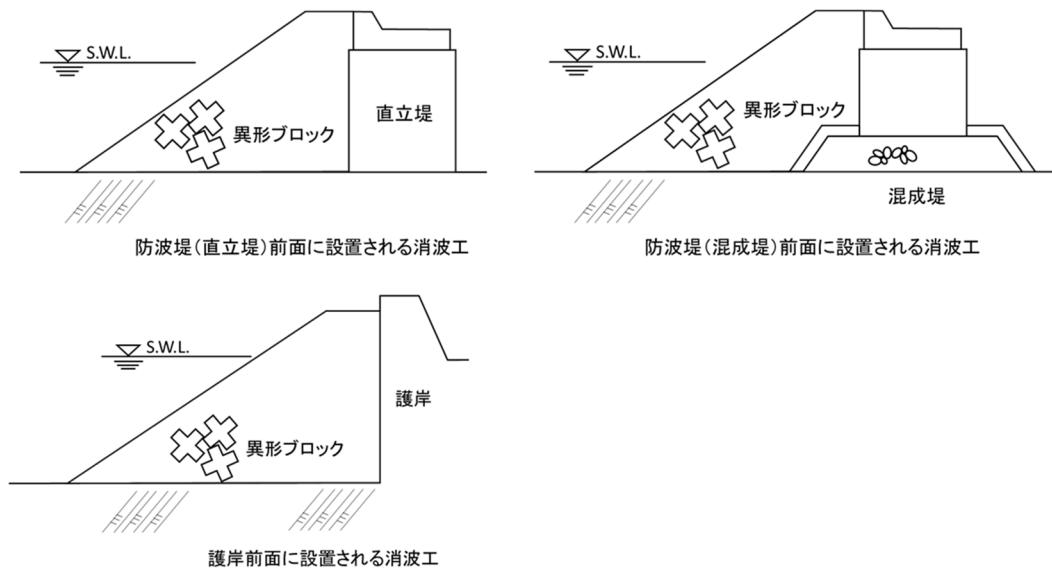


図-1.1 消波工の模式図

1.2 消波工構造の選定

消波工の断面の形式には、全断面式（異形ブロックで全断面を構成するもの）と中詰式（中詰として捨石あるいはコンクリートブロックを使用するもの）がある（図-1.2）。全断面式で消波工断面が大きく、ブロック規格が大きい場合は下層にあるブロックの破損やそれに伴う断面変化に留意する必要がある。また、中詰式の被覆層（被覆石または被覆ブロック）は中詰材が吸出しを受けないように留意する必要がある。

構造形式の選定は、施工性や経済性を考慮して選定するが、選定のための各構造の一般的な特徴を、参考として表-1.1 に示す。一般的には波浪や水深が比較的小さく、使用する異形ブロック質量が小さくなる場合や消波工断面が小さくなる場合には全断面式が用いられることが多く、消波工断面が大きい場合は中詰式が用いられることが多い。

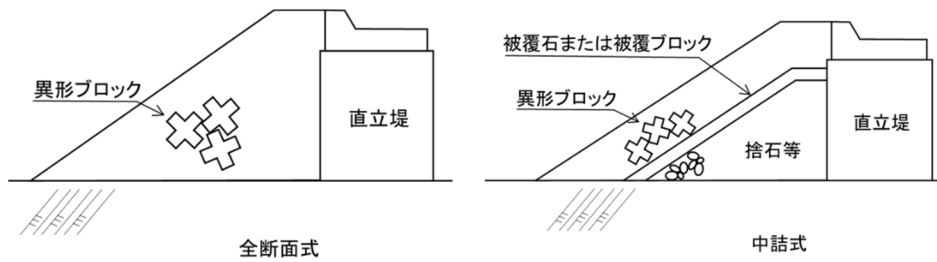


図-1.2 消波工構造形式の模式図

表-1.1 各構造形式の特徴

	全断面式	中詰式
自然条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 地盤が比較的良い箇所（砂礫・岩盤など）に適する。地盤が悪い箇所（粘性土地盤・緩い砂質地盤など）では砂の吸出しやブロックの不同沈下が生じやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● ブロックの不同沈下が生じにくいため、地盤が比較的悪い箇所（粘性土地盤・緩い砂質地盤など）にも適する。
施工性	<ul style="list-style-type: none"> ● ブロック据付が主な工種であるため、施工性が優れる ● ブロックの製作個数が中詰式と比べて多いため、広い製作・ストックヤードが必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 捨石投入・被覆石設置・均しなど、工種が多く、施工が煩雑であり、一般に施工期間が長くなる。 ● ブロックヤード以外にも石材のストックヤードが必要である。
材料条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 異形ブロック（型枠、コンクリート）が主たる材料であるため、材料の入手が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 異形ブロック材料の他に多量の捨石や被覆石が必要となる。
安定性	<ul style="list-style-type: none"> ● ブロック単体の安定性は中詰式と変わらないが、断面規模が大きい場合、ブロックの設置後に上部ブロックの荷重により下部ブロックの損傷が生じ、断面変形が生じる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ● ブロック単体の安定性は全断面式と変わらないが、法先の洗掘などによりブロックがずり下がり、被覆層が露出すると、中詰材の吸出しなどにより急激に破壊が生じる可能性があるため、法先を中心とした端部処理に十分な配慮が必要である。
経済性	<ul style="list-style-type: none"> ● 上記の施工性や自然条件などの特徴により、施工規模が比較的小さい場合に優位となりやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 上記の施工性や自然条件などの特徴により、施工規模が比較的大きい場合に優位となりやすい。

1.3 設計条件の設定

1.3.1 設計潮位

防波堤の消波工の設計に用いる潮位は照査項目により異なり、消波工天端高の算定では「**参考図書 p.371 第5編第2章 2.1.5 (1) 利用性に関する性能照査**、**p.442 第5編第3章 3.5.1 (1) 設計潮位**」に示されるように朔望平均満潮面 ($H.W.L.$)、あるいは、これに高潮又は砕波による水位上昇を勘案した適切な偏差 (η) を加えた潮位を用いる。このうち、砕波による平均水位上昇量 η は「**参考図書 p.66 第2編第3章 3.6 波による平均水位の上昇**」で算定できる。一方、消波工に用いる異形ブロックの質量算定では、進行波の算定を行う過程で砕波などによる水位上昇を含んでいるため、朔望平均満潮面 ($H.W.L.$) とすればよい（「**参考図書 p.65 第2編第3章 3.5.3 不規則波砕波を考慮した水深のみによる波高の変化**」参照）。

なお、既往最高潮位 ($H.H.W.L.$) が設定されている水域では、異形ブロックの質量算定を行う場合、 $H.H.W.L.$ を設計潮位としてもよい。

1.3.2 設計波

設計波の諸元は「**参考図書 p.44 第2編第3章 3.2 設計に用いる波の決定方針**」により定める。天端高や異形ブロックの質量などの算定を行う場合、それぞれで使用する設計波が異なる。防波堤及び護岸の天端高の算定に使用する波高は、「**参考図書 p.371 第5編第2章 2.1.5 (1) 利用性に関する性能照査**」より、壁体前面での有義波高を使用する。異形ブロックの安定質量の算定に使用する波高は、「**参考図書 p.98 第2編第4章 4.4 波力に対するブロック等の安定質量**」より、防波堤の消波工ではブロックなどの法先水深における進行波としての有義波高とする。

1.3.3 波の入射角

防波堤及び護岸に作用する波圧の算定では、入射角 β を確認して補正を行う。入射角とは波の主方向と防波堤の法線の垂線とのなす角度であり、「**参考図書 p.85 第2編第4章 4.2.1 直立壁に作用する波力**」より、砕波あるいは消波工付きの防波堤に作用する波力を算定する場合には、 $\pm 15^\circ$ の範囲において危険側の角度に補正して用いる。なお、通常は消波工の安定質量の検討においては、入射角 β の補正は行わない。

1.3.4 海底勾配

設計波などの算定で用いる海底勾配は、 $1.0 \leq h/H_0' \leq 2.5$ の範囲の平均海底勾配を採用する。ただし、 $1.0 \leq h/H_0' \leq 2.5$ の範囲で海底勾配が急激に変化する場合は、急勾配側の勾配を採用することを基本とする。

1.3.5 砕波後の平均水位上昇量

防波堤が砕波帯内にある場合は、砕波にともなう水位の上昇が生じる。防波堤の天端高算定時に考慮し、「**参考図書 p.66 第2編第3章 3.6 波による平均水位の上昇**」により算定する。

1.4 構造諸元の設定

1.4.1 斜面勾配

異形ブロックには、それぞれブロックの種類に応じた標準勾配があるので、勾配はその使用するブロックによって決定される。一般的には1:1.3~1:1.5程度のものが多い。この点については「**本**

書 p.1-3-3 第1編第3章 傾斜型異形ブロック式防波堤 3.4.1 斜面勾配」を参照。

1.4.2 異形ブロックの質量算定

異形ブロックの1個あたりの質量は、式(1-1-1)のハドソン式により算定する。式中の安定数 K_D は、水理模型実験により適切に設定することが望ましい。各ブロックの K_D 値は「本書 p.4-1-1 第5編第1章 ブロック別水理特性値一覧」に一括して示す。また、海底地形が複雑な箇所などにおいて、ハドソン式に拠りがたい場合には、水理模型実験により安定性を確認する。(水理模型実験については「本書 p.4-1-1 第4編第1章 水理模型実験」を参照)

$$W = \frac{\rho_r H^3}{K_D \cot \theta \left(\frac{\rho_r}{\rho_0} - 1 \right)^3} \quad (1-1-1)$$

ここに、

W : ブロックの安定質量 (t)

H : 設計波高 (m)

ρ_r : ブロックの密度 (t/m^3)

ρ_0 : 海水の密度 (t/m^3)

θ : 法面が水平面となす角度 ($^\circ$)

K_D : ブロックの安定数

1.4.3 天端高

(1) 防波堤の消波工

防波堤の消波工の天端高は原則として堤体と同じとする。防波堤の天端高は設計潮位に式(1-1-2)に示す高さ(R_L)を加えた高さを標準とする。

$$R_L = 1.0H \quad (1-1-2)$$

ここに、

R_L : 朔望平均満潮面(+偏差)上の天端高

H : 壁体前面の有義波高

ただし、泊地面積が狭く、著しい越波を阻止したい場合の R_L としては式(1-1-3)を適用してもよい。

$$R_L = 1.25H \quad (1-1-3)$$

なお、泊地や航路を確保している防波堤の沖側に、さらに港内の静穏度を向上させるために設置される防波堤において、ある程度の越波を許容しても泊地や航路の静穏度に支障がない場合には、 R_L を $0.6H$ まで下げてもよい。

また、海底地形の複雑な箇所などにおいて、上述の算定式に拠りがたい場合には、水理模型実験により、天端高を決定してもよい。(水理模型実験については「本書 p.4-1-1 第4編第1章 水理模型実験」を参照)

一方、堤体を越える伝達波の低減を目的とした消波工では、「参考図書 p.77 第2編第3章 3.7.3 伝達波高」に従って所要の港内波高が得られる天端高とすることができる。

(2) 護岸の消波工

護岸の消波工の天端高は、「参考図書 p.443 第5編第3章 3.5.2 安全性に関する性能照査」に示さ

れるように、 $0.8h_c$ (h_c : 護岸の天端高) を標準とする。また、護岸の天端高 h_c を波の打ち上げ高により決定する際に、消波工の効果을期待する場合には表-1.2、図-1.3 を満足することを原則とする。護岸の天端高 h_c を波の越波流量で決定する際は消波工の天端高は護岸天端高 h_c から $0.1H_0$ 程度下げた高さにする²⁾。

表-1.2 護岸の消波工の所要天端高 h_m (護岸天端高を打ち上げ高により決定する場合)

異形ブロックの天端幅 B	消波工の所要天端高 h_m
ブロック 2 個並び	$0.8h_c$ 以上
ブロック 3 個並び	$0.7h_c$ 以上
ブロック 4 個並び	$0.5h_c$ 以上

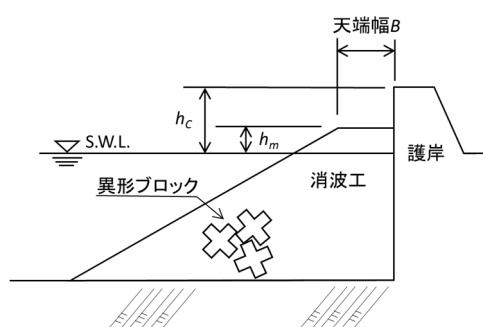


図-1.3 護岸の消波工の模式図

護岸の天端高 h_c の算定は、式 (1-1-4) を標準とする。

$$\text{天端高 } h_c = \text{設計潮位 } (H.W.L. + \eta) + \text{設計波に対する必要高} + \text{余裕高} \quad (1-1-4)$$

設計潮位については「**本章 p.1-1-31.3.1 設計潮位**」に示すように $H.W.L. + \eta$ とする。設計波に対する必要高は「**参考図書 p.442 第5編第3章 3.5 護岸の性能照査**」を参照とするが、越波量、打ち上げ高、又は簡便法により必要高を算定する。なお、必要高を波の打ち上げ高、又は簡便法で算定する場合、消波工の天端幅・天端高が表-1.2 を満足する場合は護岸の天端高 h_c を必要高の 70% まで下げてもよい。なお、表-1.2 で用いる h_c は低減された天端高を対象とする。

1.4.4 天端幅

防波堤の消波工の天端幅は、「**参考図書 p.386 第5編第2章 2.2.5 (3) 構造細目**」に示されるように、消波効果及び実施例を参考として天端でのブロック個数は 2 個並びを標準とする。

なお、消波工付き防波堤に作用する波力は、消波工の天端高、天端幅のみならず、波長などにも影響を受けるので、波圧低減効果は来襲する波の波長に対して十分な消波工の幅が必要である。山本の研究³⁾では、消波工の設計潮位面上での幅 B_0 については波長 L に対して $B_0 > 0.05L$ を満足する必要があることが示されている。

護岸の消波工の天端幅は、ブロック 2 個並びを標準とする。また、波の打ち上げ高の算定図、または簡便法で求めた所要天端高の低減を期待する場合は表-1.2 に示すように消波工の天端高 h_m に

応じてブロック 2～4 個並びとする。

1.4.5 中詰材

中詰式の消波工の細部検討（被覆ブロックの層厚、中詰材の質量など）については「**本書 p.1-3-6 第1編第3章 傾斜型異形ブロック式防波堤 3.4.7 中詰式**」を参照。

1.4.6 局所的な消波工の取り扱い

(1) 防波堤の堤頭部

「**参考図書 p.371 第5編第2章 2.1.5 防波堤の性能照査**」より、防波堤の堤頭部は、波の集中や巻波の発生及び地形条件などによる急激な流れなどが発生することがあり、標準部に比べて異形ブロックの飛散などが生じる可能性が高い。したがって、堤頭部の異形ブロックの質量は標準部の質量を割り増ししたものをを用いることが望ましい。

直立堤や混成堤を異形ブロックで被覆する場合の異形ブロックの割り増し範囲については、波向、波の収れん範囲及び波のエネルギー分布などを考慮して決定する必要があるが、必要に応じて水理模型実験を行うことが望ましい。（水理模型実験については「**本書 p.4-1-1 第4編第1章 水理模型実験**」を参照）

堤頭部の検討にあたっては、次の事項を参考にしてもよい。

- 堤頭部の異形ブロックの質量は、標準部の 1.5 倍以上としている事例が多い。
- 消波工付直立堤又は混成堤における異形ブロックの割り増し範囲については、消波工の天端で、割り増しするブロックの 2 個分以上としている例が多いが、ケーソン堤やセルラーブロック堤については、安全性の観点から少なくとも堤頭幅分の長さについて異形ブロックを割り増ししている例が多い。

また、堤頭部における異形ブロックの処理（巻立て）方法については、波向、波のエネルギー分布、防波堤の位置、航路への影響、港内進入波、巻波の発生状況、堤体及び異形ブロックの大きさなどを勘案し決定することが望ましいが、堤頭部は波が複雑に変化し、その現象は未だ定量的に解明されていないのが実状である。このため、設計計算では考慮できない不測の波による被災を防止する目的で、堤頭部の巻立ては図-1.4 により行ってもよい。

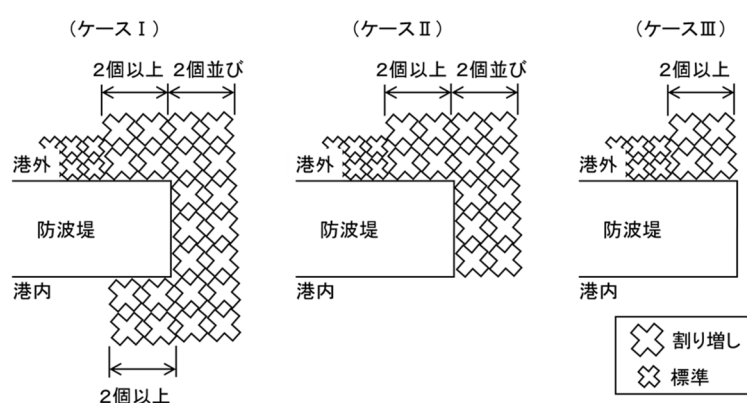


図-1.4 防波堤堤頭部における異形ブロックの巻立て方法（ブロック 2 個分割り増す場合）

図-1.4 の各ケースの選定にあたっては、波の主方向、波のエネルギー分布及び巻波の発生状況を考慮し、以下を参考として適切なものを選定する必要がある。

- i) 図-1.4 の各ケースの選定にあたっては、防波堤法線と波の主方向とのなす角度により、図-1.5 を目安としてよい。

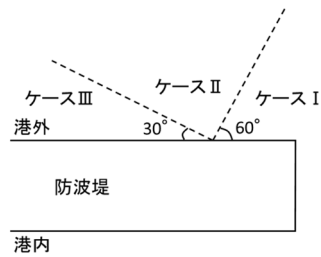


図-1.5 防波堤法線と波の主方向とのなす角度による巻立て方法選定の目安

- ii) 設計条件が類似した近隣の防波堤などの堤頭部において、巻波がかなり激しく発生していたり、堤頭部への波の集中度が高くなる状況が確認される場合などにおいては i)) によらずケース I やケース II を選択してもよい。
- iii) 航路への反射波の影響や進入波の港内施設への影響が大きい場合には、i)) によらず適宜ケースを選定してもよい。

(2) 防波堤の隅角部

「参考図書 p.374 第5編第2章 2.1.5 防波堤の性能照査」より、防波堤の隅角部の性能照査にあたっては、波の集中などによる波高の増大を考慮することを原則とする。

1) 隅角部の波高増大を考慮する条件

防波堤の隅角部周辺では、傾斜堤や消波工付防波堤の場合を除き、波の集中などにより波高が増大するため、このことに十分留意して照査することが望ましい。波高の増大を考慮する条件は次の a)、b) の両方を満足する場合とする (図-1.6)

- a) 隅角部の角度が 165° よりも小さいこと
 b) ハネ堤の長さが隅角部地点の波長の $1/2$ より長い凹状の隅角部であること

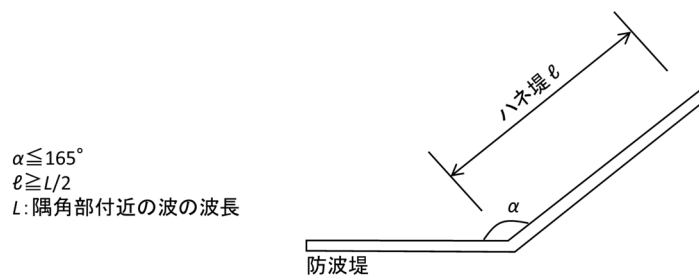


図-1.6 防波堤の隅角部

2) 隅角部の照査

隅角部が碎波の影響を受ける領域にあるかどうかによって、次のように検討を行うことができる。

a) 隅角部が砕波の影響を受けない領域の場合

砕波の影響を受けない領域における防波堤の隅角部付近の波高分布には、隅角部の角度、波の入射角、ハネ堤などの長さによって防波堤沿いに1~2波長(1L~2L)の長さにわたり隅角部の影響があることが、理論的にも実験的にも確かめられている。

この影響範囲全てに何らかの対策を講じるには莫大な建設コストを要することから、特に影響の著しい法線変化点の両端それぞれL/2の範囲について消波工を設置することを標準とする。この場合、天端高の決定やブロック質量算定においては、標準部と同一の波高を用いる。

ただし、沖防波堤などで背後の越波をある程度許容できる場合については、経済性、施工性の観点から消波工は設置しなくてもよい。

b) 隅角部が砕波の影響を受ける領域の場合

隅角部が砕波の影響を受ける領域にある場合には、法線変化点の両側L/2の範囲に消波工を設置する必要がある。この場合、天端高の決定やブロック質量算定においては、標準部と同一の波高を用いる。

1.5 設計計算例

図-1.7に示す漁港の北防波堤の波圧の低減を目的とした消波工の設計例を示す。防波堤はコンクリート単塊式直立堤とし、防波堤本体の設計は含まないものとする。

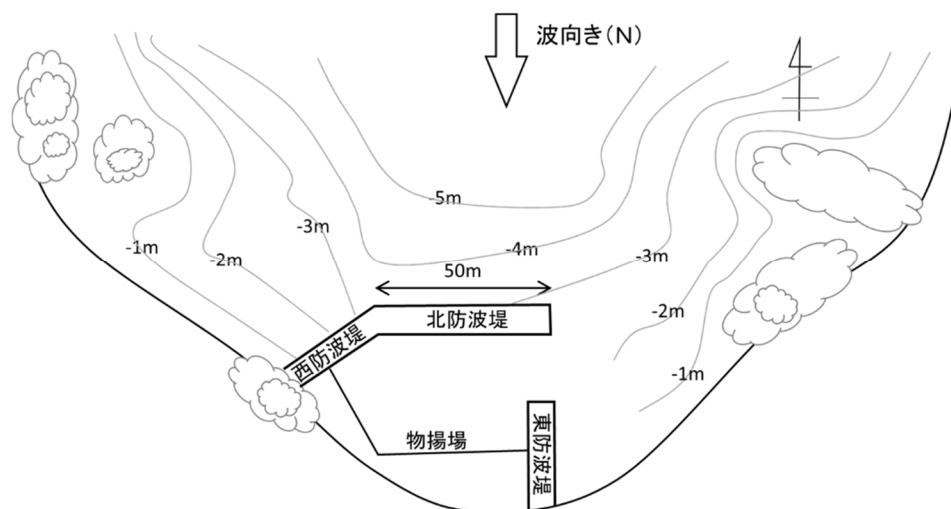


図-1.7 漁港全体平面図

(1) 設計条件

1) 設置条件

- a) 設置目的：防波堤に作用する波圧の低減
- b) 施工延長：50m
- c) 設置水深：-3.00m（標準断面における防波堤基部水深）
- d) 海底勾配：1/30（ $1.0 \leq h/H_0' \leq 2.5$ の範囲の平均海底勾配）

2) 海象条件

- a) 潮位 : $H.W.L. + 1.00m$ $L.W.L. \pm 0.00m$
- b) 設計波 : $H_0' = 5.10m$ 、 $T_0 = 10.0sec$ 、 $L_0 (=1.56 \times T_0^2) = 156.00m$ 、波向き N
 $H_0'/L_0 = 0.033$ 、 $h/H_0' = (3.00 + 1.00)/5.10 = 0.78$
- c) 平均水位上昇量 : $\bar{\eta} = 0.18m$ (本計算例では偏差として碎波による平均水位上昇量を見込むものとする。「参考図書 p.69 平均水位の上昇量」より、 $\bar{\eta}/H_0' = 0.036$)
- d) 設計潮位 : $1.18m (H.W.L. + \bar{\eta})$
- e) 防波堤前面での有義波 : $H = 2.99m$ 、周期 $T = 10.0sec$ 、波長 $L = 60.90m$ (「参考図書 p.64 水深による波高変化」より、 $H_{1/3}/H_0' = 0.587$)
 ブロック質量の算定に用いる法先位置での波諸元は後述する。

3) その他の条件

基礎地盤の土質条件 : 岩盤 (軟岩)

(2) 消波工構造の選定

本計算例では、消波工の構造は全断面式とする。本計算例では消波工の施工断面の規模が比較的小さく、中詰式とした場合の中詰材の規模が小さくなり、経済比較の結果、全断面式の経済性が良好であったためである。なお、ブロックは乱積で施工する。

(3) 構造諸元の算定

1) 使用ブロック

消波工に使用する異形ブロックは図-1.8 に示すAブロックとする。Aブロックの性能値から決まる、斜面勾配などの構造諸元を表-1.3 に示す。

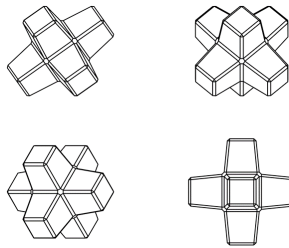


図-1.8 Aブロックの形状

表-1.3 ブロック性能値から決まる構造諸元

項目	値	備考
斜面勾配	1 : 1.3	1 : 1.3 ~ 1 : 1.5 の範囲
K_D 値	8.1	
公称トン数 (規格)	2、3、4、5、8、12、16 トン	一部抜粋 (最小 1 トン、最大 80 トン)

2) 天端高

防波堤の消波工の天端高 h_m は防波堤の天端高 h_c と同じとする。 h_m 及び h_c は、式 (1-1-4) などより、

$$h_c = (H.W.L. + \bar{\eta}) + R_L = (1.00 + 0.18) + 1.0 \times 2.99 = +4.17 \quad (m)$$

$$\rightarrow +4.20$$

となる。なお、本箇所は基礎地盤が岩盤であるため、ブロックの不同沈下などが生じる可能性が小さい。したがって、余裕高は考慮しない。

3) ブロック質量の算定

ブロック質量は近隣漁港の防波堤消波工で用いられているものを参考に5トンブロックと想定する。公称5トン型のAブロックで消波工を構築した場合、消波工の法先位置の地盤高は3.44mとなる（ブロック2個並びの天端幅 $B=3.25\text{m}$ （カタログより））。この水深における有義波高は $H=3.26\text{m}$ となる（「参考図書 p.64 水深による波高変化」より、 $H_0'/L_0=0.033$ 、 $h/H_0'=(3.44+1.00)/5.10=0.87$ 、 $H_{1/3}/H_0'=0.639$ ）。この波高に対するブロック質量は式 (1-1-1) より、

$$W = \frac{\rho_r H^3}{K_D \cot \theta \left(\frac{\rho_r}{\rho_0} - 1 \right)^3} = \frac{2.3 \times 3.26^3}{8.1 \times 1.3 \times \left(\frac{2.30}{1.03} - 1 \right)^3} = 4.037 \quad (t) \quad (t)$$

ここに、

W ：ブロックの安定質量 (t)

H ：設計波高 $H = 3.26\text{ m}$

（5トンブロックを用いた場合の消波工法先での有義波高）

ρ_r ：ブロックの密度 $\rho_r = 2.30\text{ t/m}^3$

ρ_0 ：海水の密度 $\rho_0 = 1.03\text{ t/m}^3$

θ ：法面が水平面となす角度 $\cot \theta = 1.3$

K_D ：ブロックの安定数 $K_D = 8.1$

となるため、想定したブロック質量である公称5トン型（実質量=4.596t）は安定である。

4) 天端幅

防波堤の消波工の天端幅 B は、天端での5トンブロックの並び個数が2個となる $B=3.25\text{m}$ とする（Aブロックのカタログより）。

なお、このときの設計潮位面上での幅 B_0 は、下式で計算できる。

$$B_0 = B + R_L \cdot \cot \theta = 3.25 + 2.99 \times 1.3 = 7.14 \quad (m) \quad (m)$$

したがって、 B_0 は $B_0 > 0.05L$ ($=0.05 \times 65.26 = 3.263\text{m}$) (L ：設計潮位時の法先水深における波長) となり、本構造は防波堤の波圧低減効果を期待できる。

(4) 標準断面図

標準断面図は図-1.9 のようになる。

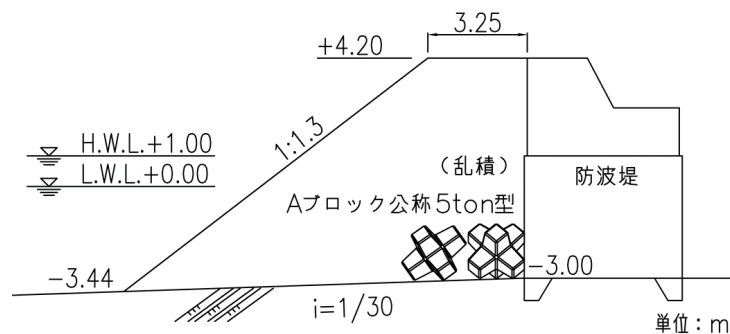


図-1.9 標準断面図

(5) 堤頭部の検討

1) ブロック質量

使用する異形ブロックは標準部と同様にAブロックとする。堤頭部の消波工のブロック所要

質量は堤幹部における算定による所要質量(=4.037t)を1.5倍とした6.056tである。
したがって、表-1.3より、堤頭部の使用ブロックは公称8トン型(実質量=7.659t)とする。

2) 巻立て方法(割り増し範囲)

堤頭部においてブロック質量を割り増した消波工の巻立て方法(割り増し範囲)は、図-1.5に本箇所の波向きを当てはめて決定する。図-1.5に波向きを当てはめた模式図を図-1.10に示す。

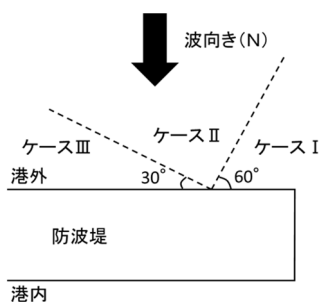


図-1.10 巻立て方法選定のための模式図

従って、巻立て方法は「**本章 p.1-1-6 1.4.6(1) 防波堤の堤頭部**」の図-1.6のケースIIとなる。
従って、本計算例の平面図は、図-1.11のようになる。ただし、図中の消波ブロックは天端ブロックの配列模式図を示している。

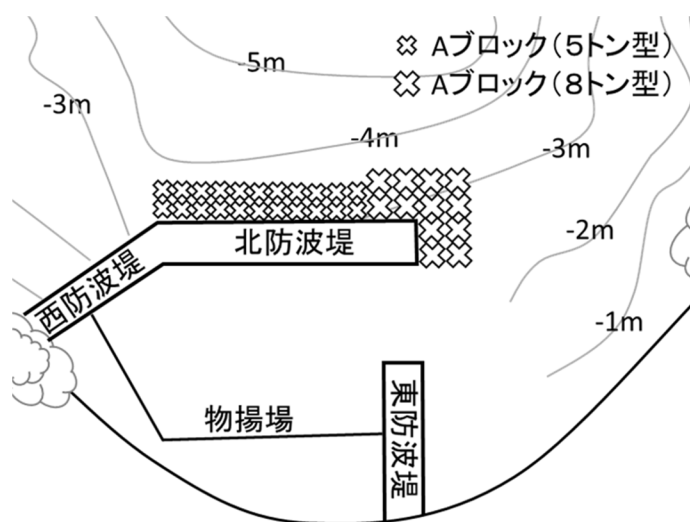


図-1.11 漁港平面図(消波工部拡大)

1.6 参考文献

- 1) Hudson, R.Y. : Laboratory study of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, Vol.85, WW3, 1959.
- 2) 合田良實 : 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版社, 1990 増補改訂, pp.124.
- 3) 山本正昭 : 消波工付防波堤にかかる外力, 第27回全国漁港建設技術研究発表会, 1982, pp.1-15.