

第3章 新技術

3.1 没水型長周期波対策工の設計例

3.1.1 設計計算の手順

設計計算は次の手順によるものとする。

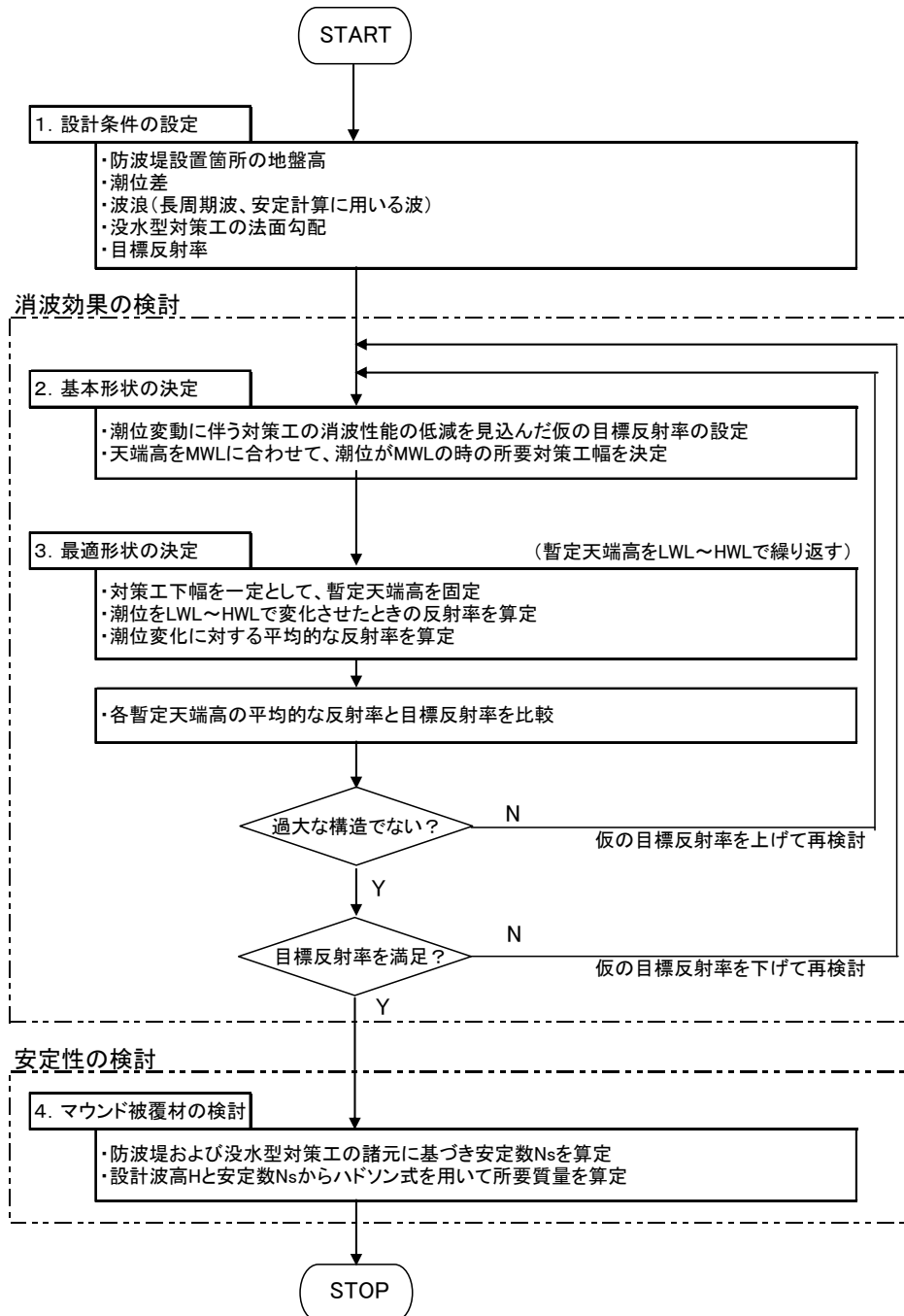


図-4.1 没水型長周期波対策工の設計フロー

3.1.2 設計条件

設置位置の地盤高；-6.0m
 防波堤の沖側海底勾配：1/30
 海象条件

潮位；H.W.L.+1.00m

L.W.L.±0.00m

M.W.L.+0.50m

設計波；長周期波 波高 $H=0.1\text{m}$ 、周期 $T=50.0\text{s}$

安定計算に使用する波 波高 $H=4.50\text{m}$ 、周期 $T=11.0\text{s}$

目標反射率： $K_R=0.90$

対策工の法面勾配：1:1.5

図-4.2 に対象とする堤体断面を示す。

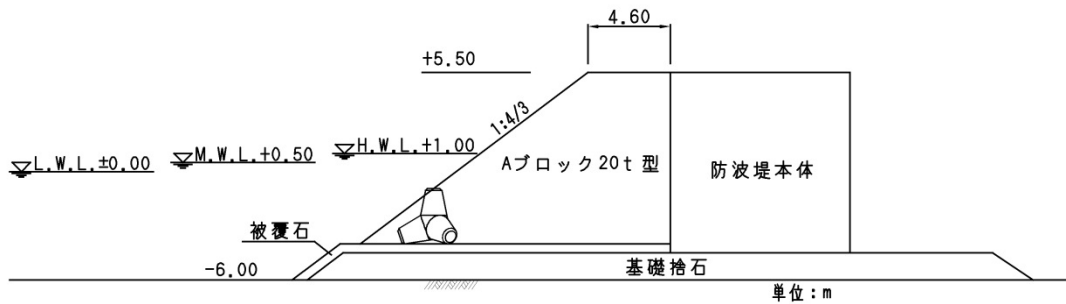


図-4.2 堤体断面図

3.1.3 消波効果の検討

(1) 初回検討

1) 基本形状の決定

初めに、天端高を設計潮位に合わせた場合の目標反射率に対する所要天端幅を田中ら¹⁾の方法で算定する。対象潮位はM.W.Lとする。図-4.3は没水型長周期波対策工の模式図である。 B^* は構造物断面の没水部をそれと等しい高さの矩形に置き換えた等価構造物幅であり、式(3-3-1)で与えられる。

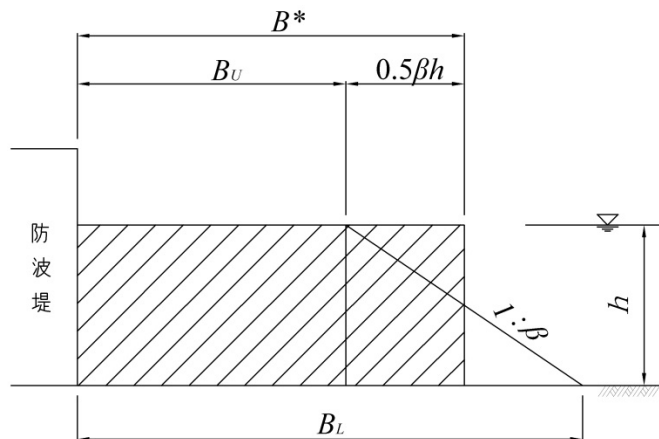


図-4.3 没水型長周期波対策工の模式図(天端が水面に一致する場合)

$$B^* = B_U + 0.5\beta h \quad (3-3-1)$$

ここに、
 B_U : 天端幅 (m)
 β : 法面勾配
 h : 水深 (m)

図-4.4 は所要対策工幅算定図であり、長周期波の波長 L で無次元化した等価構造物幅 B^*/L と反射率 K_R の関係を示している。この算定図を用いて目標反射率 K_R に対する所要天端幅を算定する。なお、本構造は天端の高さが水面に一致する場合に消波効果が最大であり、潮位が上昇・下降すると反射率が増加するため、設計における目標反射率は $K_R=0.90$ であるが、設計潮位 M.W.L に対しては仮の目標反射率を 0.88 として天端幅を定める。

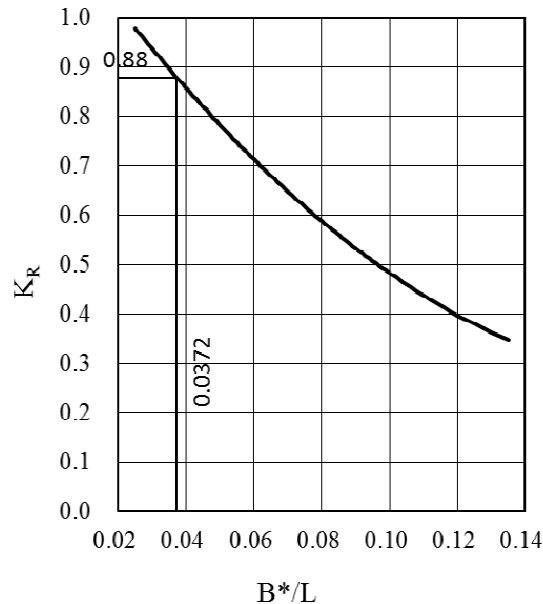


図-4.4 所要対策工幅算定図

いま、仮の目標反射率を $K_R=0.88$ とすると、図-4.4 より無次元等価構造物幅 B^*/L は 0.0372 と読み取れる。また、M.W.L.の時の水深 $h=6.50\text{m}$ および長周期波の周期 $T=50\text{s}$ より、波長は $L=398.4\text{m}$ となる。よって、等価構造物幅 B^* 、天端幅 B_U および防波堤背面から対策工法先までの距離 B_L は以下のとおりとなる。

$$B^* = 0.0372L = 0.0372 \times 398.4 = 14.82$$

$$B_U = B^* - 0.5\beta h = 14.82 - 0.5 \times 1.5 \times 6.50 = 9.945$$

$$B_L = B^* + 0.5\beta h = 14.82 + 0.5 \times 1.5 \times 6.50 = 19.695$$

2) 最適形状の検討

没水型対策工は消波効果が潮位の影響を受けるため、以下の手順により潮位変化を考慮した対策工の天端高を算定した。

- a) 天端高を 0.2m 刻みで暫定的に設定し、潮位が L.W.L., M.W.L., H.W.L. および天端高に一致したときの R/h および B^*/L をそれぞれ計算した。ここで、天端高と潮位の位置関係により B^* の定義が若干異なる。すなわち、 B^* は天端が静水面に一致するかそれ以下の場合 ($R/h \geq 0$ 、図-4.5 参照) は対策工の天端幅と対策工の厚さで定義され、天端が水面よりも上に位置する場合 ($R/h < 0$) は静水面の高さでの対策工の幅と水深で定義する。図-4.6 と式(3-3-2)に潮位ごとの B^* の定義を示す。表-4.1、表-4.2 に R/h および B^*/L の値を示す。

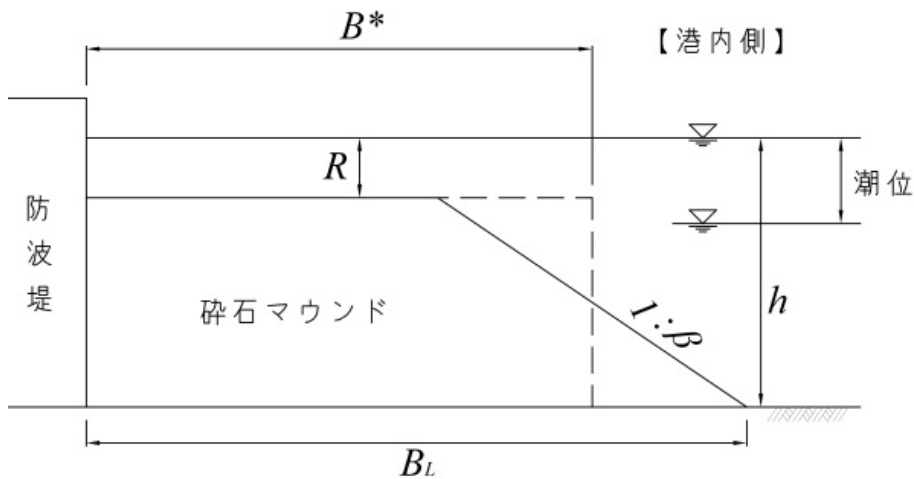


図-4.5 没水型対策工の模式図 ($R > 0$ のケース)

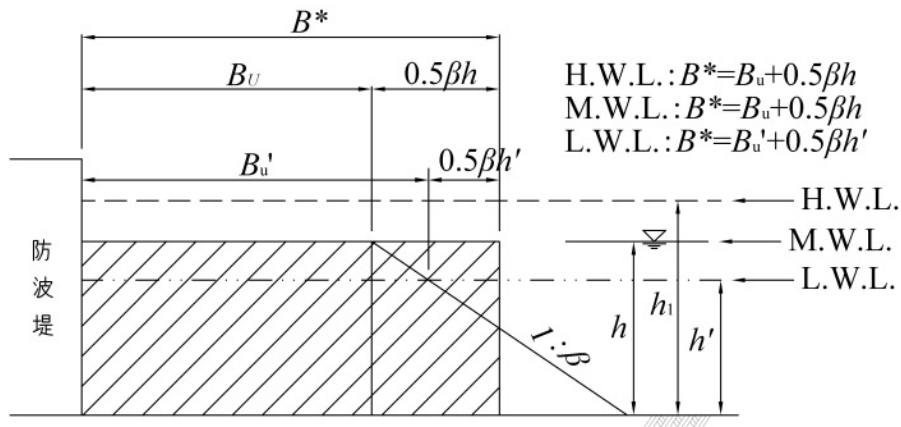


図-4.6 潮位ごとの B^* の定義

$$\begin{aligned}
 B^* &= B_U + 0.5\beta h && (R/h \geq 0 \text{ の場合}) \\
 B^* &= B_U' + 0.5\beta h' && (R/h < 0 \text{ の場合})
 \end{aligned}
 \tag{3-3-2}$$

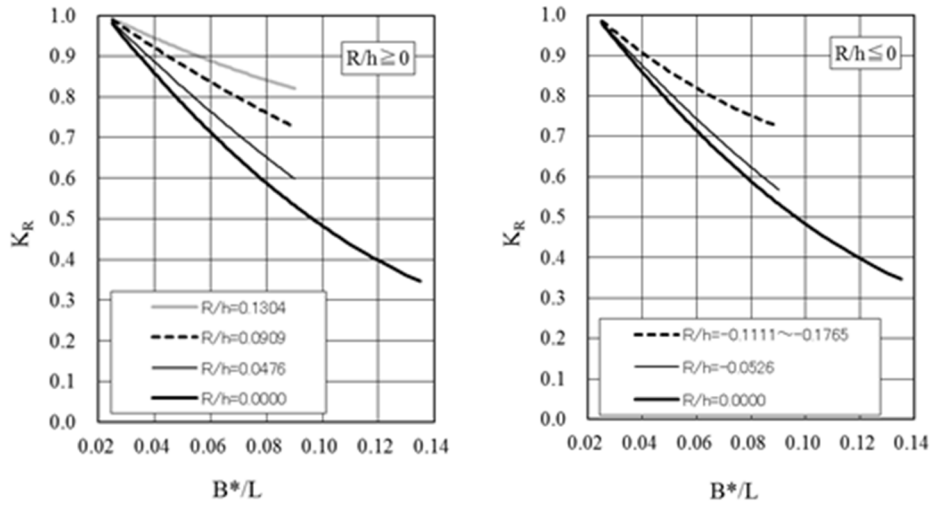
表-4.1 暫定天端高と検討潮位ごとの R/h の値 (初回検討)

暫定天端高	検討潮位			
	LWL±0.00m	MWL+0.50m	HWL+1.00m	天端高に一致
HWL +1.00m	-0.1667	-0.0769	0.0000	
+0.80m	-0.1333	-0.0462	0.0286	0.0000
+0.60m	-0.1000	-0.0154	0.0571	0.0000
MWL +0.50m	-0.0833	0.0000	0.0714	
+0.40m	-0.0667	0.0154	0.0857	0.0000
+0.20m	-0.0333	0.0462	0.1143	0.0000
LWL ±0.00m	0.0000	0.0769	0.1429	

表-4.2 暫定天端高と検討潮位ごとの B^*/L の値 (初回検討)

暫定天端高	検討潮位			
	LWL±0.00m	MWL+0.50m	HWL+1.00m	天端高に一致
HWL +1.00m	0.0397	0.0372	0.0350	
+0.80m	0.0397	0.0372	0.0353	0.0358
+0.60m	0.0397	0.0372	0.0357	0.0367
MWL +0.50m	0.0397	0.0372	0.0359	
+0.40m	0.0397	0.0374	0.0361	0.0377
+0.20m	0.0397	0.0378	0.0364	0.0387
LWL ±0.00m	0.0397	0.0382	0.0368	

- b) 表-4.1、表-4.2 に示した R/h および B^*/L から、図-4.7 に示す田中ら²⁾の提案による潮位が変化したときの反射率算定図を用いて反射率を算定した。左側が潮位が天端高以上のとき ($R/h \geq 0$)、右側が潮位が天端高以下のとき ($R/h \leq 0$) の算定図である。ここでは、防波堤背面から対策工法先までの距離 B_L は 19.7m に固定して検討した。図-4.8 に暫定天端高が+0.6m、検討潮位が HWL+1.0m の場合の反射率算定結果を例示した。表-4.1、表-4.2 に示したようにこの条件では $R/h=0.0571$ 、 $B^*/L=0.0357$ である。図-4.7(a)で $B^*/L=0.0357$ に対して図中の $R/h=0.0476$ と 0.0909 の2本の算定線から内挿して $R/h=0.0571$ に対する反射率 $K_R=0.92$ を得た。
- c) 潮位ごとに算定した反射率から潮位変化に対する反射率の総計を求め、これを潮位差 1.0m で除した値を暫定天端高に対応する平均的な反射率とした。図-4.9 に暫定天端高 +0.6m の場合の反射率変化の模式図を示す。表-4.3 はこのようにして求めた各天端部高に対する平均的な反射率を示している。この平均的な反射率と目標反射率を比較して最終的な対策工天端高を決定するわけであるが、暫定天端高を+0.6m とすると平均的な反射率は 0.89 となり目標値 0.90 に対してはやや過大な構造となった。よって、図-4.1 に従い仮の目標反射率を大きくして再検討することとした。



(a) $R/h \geq 0$ (b) $R/h \leq 0$

図-4.7 潮位が変化したときの反射率算定図

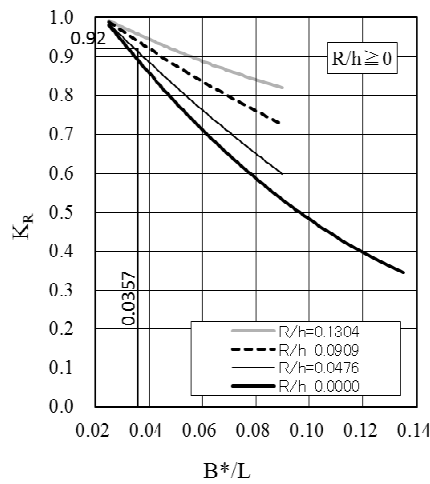


図-4.8 潮位が変化したときの反射率算定例（暫定天端高+0.6m、検討潮位 HWL+1.0m）

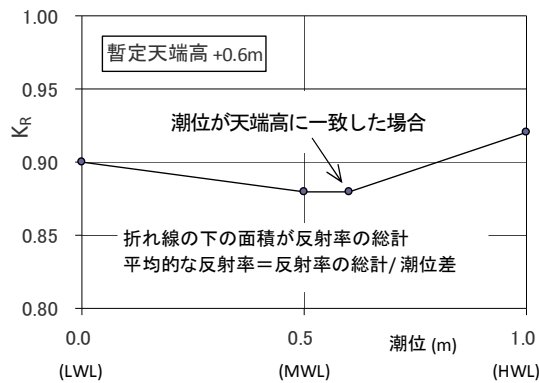


図-4.9 反射率変化の模式図（暫定天端高+0.6m）

表-4.3 平均的な反射率算定結果（初回検討）

暫定天端高	検討潮位				平均的な 反射率
	LWL±0.00m	MWL+0.50m	HWL+1.00m	天端高に一致	
HWL +1.00m	0.91	0.90	0.90	-	0.90
+0.80m	0.91	0.89	0.91	0.89	0.90
+0.60m	0.90	0.88	0.92	0.88	0.89
MWL +0.50m	0.89	0.88	0.93	-	0.90
+0.40m	0.88	0.89	0.94	0.88	0.90
+0.20m	0.87	0.90	0.95	0.87	0.90
LWL ±0.00m	0.86	0.92	0.96	-	0.92

(2) 再検討

1) 基本形状の決定

仮の目標反射率を0.88とした初回の検討ではやや過大な構造となったため、仮の目標反射率を0.89に変更して再検討した。図-4.10に示すように、仮の目標反射率0.89に対しては無次元等価構造物幅 B^*/L は0.0360となる。

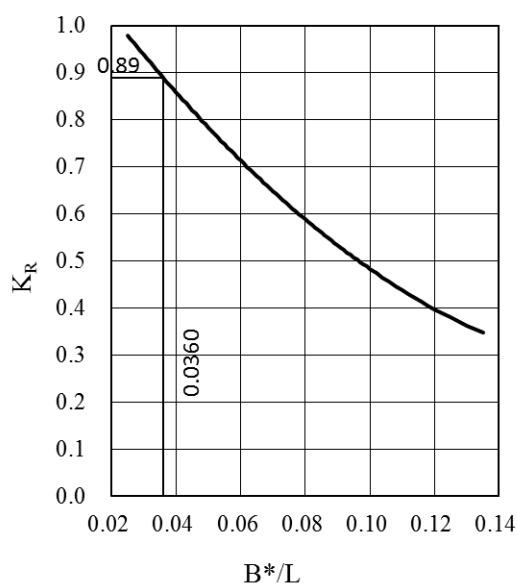


図-4.10 所要対策工幅算定図

このとき、等価構造物幅 B^* 、天端幅 B_u および防波堤背面から対策工法先までの距離 B_L は以下のとおりとなる。仮の目標反射率を緩和したため、構造物幅は初回検討時の値よりも0.48m短くなった。

$$B^* = 0.0360L = 0.0360 \times 398.4 = 14.34$$

$$B_u = B^* - 0.5\beta h = 14.34 - 0.5 \times 1.5 \times 6.50 = 9.465$$

$$B_L = B^* + 0.5\beta h = 14.34 + 0.5 \times 1.5 \times 6.50 = 19.215$$

2) 最適形状の決定

1)で定めた基本形状に基づき、暫定天端高と検討潮位ごとの B^*/L の値を計算した。結果を表-4.4に示す。ここでは、防波堤背面から対策工先までの距離 B_L は19.2mに固定した。以降、初回検討と同様に、表-4.1の R/h と表-4.4の B^*/L の値を図-4.7に適用し、表-4.5に示す平均的な反射率を得た。

表-4.4 暫定天端高と検討潮位ごとの B^*/L の値（再検討）

暫定天端高	検討潮位			
	LWL±0.00m	MWL+0.50m	HWL+1.00m	天端高に一致
HWL +1.00m	0.0384	0.0360	0.0338	
+0.80m	0.0384	0.0360	0.0341	0.0346
+0.60m	0.0384	0.0360	0.0345	0.0355
MWL +0.50m	0.0384	0.0360	0.0347	
+0.40m	0.0384	0.0361	0.0348	0.0364
+0.20m	0.0384	0.0365	0.0352	0.0374
LWL ±0.00m	0.0384	0.0369	0.0356	

表-4.5 平均的な反射率算定結果（再検討）

暫定天端高	検討潮位				平均的な 反射率
	LWL±0.00m	MWL+0.50m	HWL+1.00m	天端高に一致	
HWL +1.00m	0.92	0.91	0.91	-	0.91
+0.80m	0.92	0.90	0.92	0.90	0.91
+0.60m	0.91	0.89	0.93	0.89	0.90
MWL +0.50m	0.90	0.89	0.93	-	0.90
+0.40m	0.89	0.90	0.94	0.89	0.91
+0.20m	0.88	0.91	0.95	0.88	0.91
LWL ±0.00m	0.87	0.93	0.96	-	0.92

表-4.5に示すように、暫定天端高が+0.5mと+0.6mのときに平均的な反射率は目標値の0.90となる。このうち天端高+0.5mが工費が安く経済的であるため、これを最適形状として採用した。このとき、対策工天端幅 B_U は以下の値となる。

$$B_u = B_L - \beta t = 19.2 - 1.5 \times 6.50 = 9.45$$

ここに、

t : 対策工の厚さ (m)

この断面の潮位に対する反射率の変化の模式図を図-4.11 に示す。

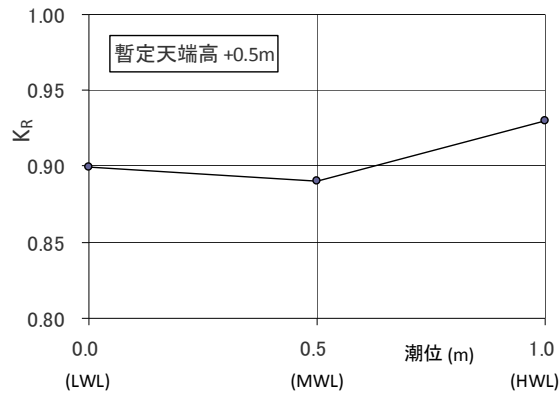


図-4.11 反射率変化の模式図

3.1.4 安定性の検討

マウンド被覆材としてAブロックを使用した場合の所要質量を求める。所要質量は、式(3-3-3)に示す N_s を用いたハドソン式で求める。

$$M = \frac{\rho_r^3 H^3}{N_s^3 (\rho_r / \rho - 1)^3} \quad (3-3-3)$$

ここに、

M : 被覆材の所要質量 (t)

ρ_r : 被覆材の密度

ρ : 海水の密度

N_s : 被覆材の安定数

安定数 N_s は式(3-3-4)で表現される。

$$N_s = C_H \{ p(N_0 / N^{0.5})^r + q \} \quad (3-3-4)$$

ここに、

N_0 : 被覆材の被災度

N : 作用波数

C_H : 碎波効果係数 (=1.4/($H_{1/20}/H$))

$H_{1/20}$: 防波堤前面から $5H$ 沖側での $1/20$ 最大波高

断面諸元別係数 p 、 q 、 r は、防波堤の形式、設計波高 H で無次元化したケーソンの静水面上天端

高 h_c/H および対策工の天端幅 B_U/H により定まる値であり、A ブロックについては田中ら³⁾が表 4-6 の値を提案している。

表-4.6 安定数の断面諸元別係数 (A ブロック)

形式	断面諸元		断面諸元別係数		
	h_c/H	B_U/H	p	q	r
混成堤	0.6	2.0	3.82	1.79	0.60
	0.6	4.0	3.15	2.06	//
	1.0	2.0	6.32	2.08	//
消波ブロック被覆堤	0.6	2.0	2.48	2.19	0.60
	0.6	4.0	3.44	2.38	//
	1.0	2.0	4.37	2.62	//

このように、 p と q は防波堤の構造形式ごとに h_c/H と B_U/H の組み合わせ 3 通りについて値が定まっている。これら 3 点を通る平面の方程式に基づき p と q を以下のように表した。式中で h_c' は h_c/H を、 B_U' は B_U/H を意味する。

$$p = 6.250h_c' - 0.335B_U' + 0.740$$

$$q = 0.725h_c' + 0.135B_U' + 1.085$$

(混成堤)

$$p = 4.725h_c' + 0.480B_U' - 1.315$$

$$q = 1.075h_c' + 0.095B_U' + 1.355$$

(消波ブロック被覆堤)

本検討の場合、 $h_c=4.5\text{m}$ 、 $B_U=9.45\text{m}$ 、 $H=4.5\text{m}$ である。したがって、

$$h_c/H = 4.5/4.5 = 1.0$$

$$B_U/H = 9.45/4.5 = 2.1$$

であり、検討対象が消波ブロック被覆堤であるから、断面諸元別係数は以下の値となる。

$$p = 4.725h_c' + 0.480B_U' - 1.315 = 4.725 \times 1.0 + 0.480 \times 2.1 - 1.315 = 4.42$$

$$q = 1.075h_c' + 0.095B_U' + 1.355 = 1.075 \times 1.0 + 0.095 \times 2.1 + 1.355 = 2.63$$

$$r = 0.60$$

断面諸元別係数 p 、 q 、 r が与えられた場合、安定数 N_s は作用波数 N 、被災度 N_0 、碎波効果係数 C_H により定まる。以下では作用波数を 1000 波に固定し、被災度と碎波効果係数を変化させた場合の 3 ケースの組み合わせについて検討した。

a) 作用波数 $N=1000$ 、被災度 $N_0=0.3$ とし、碎波の効果を考慮せずに $C_H=1.0$ とした場合

$$N_s = C_H \{ p(N_0/N^{0.5})^r + q \} = 4.42(0.3/1000^{0.5})^{0.6} + 2.63 = 2.90$$

$$M = \frac{\rho_r^3 H^3}{N_s^3 (\rho_r/\rho - 1)^3} = \frac{2.3^3 \times 4.5^3}{2.90^3 \times (2.3/1.03 - 1)^3} = 24.3$$

b) 作用波数 $N=1000$ 、被災度 $N_0=1.0$ とし、碎波の効果を考慮せずに $C_H=1.0$ とした場合

$$N_s = C_H \{ p(N_0/N^{0.5})^r + q \} = 4.42(1.0/1000^{0.5})^{0.6} + 2.63 = 3.19$$

$$M = \frac{\rho_r^3 H^3}{N_s^3 (\rho_r/\rho - 1)^3} = \frac{2.3^3 \times 4.5^3}{3.19^3 \times (2.3/1.03 - 1)^3} = 18.2$$

c) 作用波数 $N=1000$ 、被災度 $N_0=1.0$ とし、碎波の効果を考慮する場合

防波堤の沖側海底勾配は 1/30、HWL 時の設置水深は $h=7.0\text{m}$ 、周期は $T=11.0\text{s}$ 、到達波高は $H=4.5\text{m}$ であるから、合田⁴⁾により換算沖波波高は $H_0'=4.20\text{m}$ となる。このとき防波堤前面から 5H 沖側での 1/20 最大波高は $H_{1/20}=5.96\text{m}$ と算定される。したがって、 $C_H=1.4/(H_{1/20}/H)=1.4/(5.96/4.5)=1.06$ と求められる。その場合、

$$N_s = C_H \{ p(N_0/N^{0.5})^r + q \} = 1.06 \{ 4.42(1.0/1000^{0.5})^{0.6} + 2.63 \} = 3.38$$

$$M = \frac{\rho_r^3 H^3}{N_s^3 (\rho_r/\rho - 1)^3} = \frac{2.3^3 \times 4.5^3}{3.38^3 \times (2.3/1.03 - 1)^3} = 15.3$$

これらのうちで、設計断面としてどれを採択するかは、現地条件や構造物の重要度等を考慮して決定すればよい。その際、所要質量の直近上位のブロックだけではなく、上位 3 ランク程度で工費を比較し、経済的な質量のブロックを選定する。ここでは、ケース c) の方法で設計した場合の標準断面図を図-4.12 に示す。A ブロックの種別は所要質量 15.3t の直近上位の 20t 型（実質量 18.4t）とした。

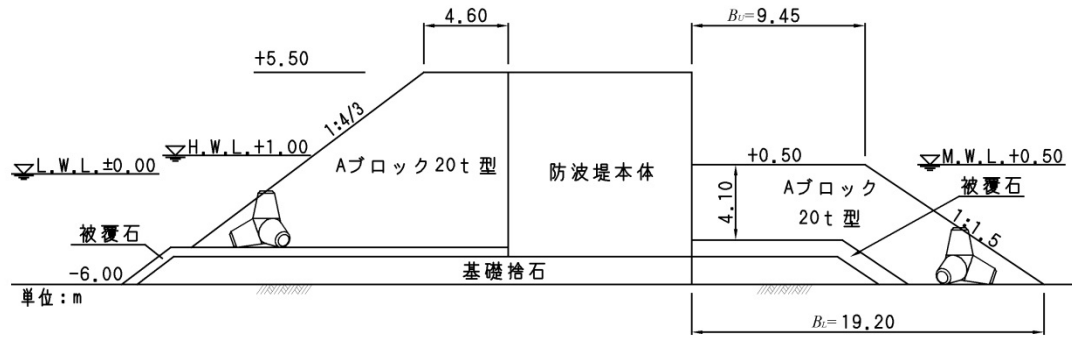


図-4.12 没水型長周期波対策工標準断面図

参考文献

- 1) 田中真史, 松本朗, 半沢稔: 没水型長周期波対策工の消波特性に関する実験的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第 68 巻, 第 2 号, pp.816-821, 2012.
- 2) 田中真史, 高山知司, 惟住智昭, 荒田育弥: 志布志港における港内静穏度向上策の検討, 沿岸技術研究センター論文集, No. 17, pp.9-13, 2017.
- 3) 田中真史, 松本朗, 半沢稔: 混成堤背面に適用した没水型長周期波対策マウンド構造物の越波に対する安定性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第 69 巻, 第 2 号, pp.I_664-I_669, 2013.
- 4) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻 第 3 号, pp.59-106, 1975.