

表-5 実験結果一覧

Case	沖波有義波高 H_o' (cm)	有義波周期 (s)	波形勾配 H_o'/L_o	のり先水深 h (cm)	水面上天端高 h_c (cm)	護岸高 (cm)	のり面勾配	海底勾配	相対天端高 h_c/H_o'	のり先水深波高比 h/H_o'	曲率	消波工	越波流量 (g/s)	無次元越波流量		
1				15.0	非越波				-	1.00	無	無	-	-		
2	15.0	1.60	0.038	15.0	15.0	30.0	直立護岸	1/10	1.00	1.00	無	無	51.0	1.98E-03		
3				15.0	7.5	22.5			0.50	1.00	無	無	無	215.0	8.36E-03	
4	10.0	1.31	0.038	10.0	10	20			1.00	1.00	無	無	無	23.2	1.66E-03	
5	25.0	2.07	0.038	25.0	25	50			1.00	1.00	無	無	無	144.0	2.60E-03	
6	15.0	1.6	0.038	7.5	非越波						-	0.50	無	無	-	-
7	15.0	1.6	0.038	15.0	非越波				-	1.00	無	無	-	-		
8					30.0	30.0	1:1	1/10	2.00	0.00	無	無	0.2	7.06E-06		
9	15.0	1.6	0.038	0.0	22.5	22.5			1.50	0.00	無	無	無	0.9	3.47E-05	
10					15.0	15.0			1.00	0.00	無	無	無	6.6	2.56E-04	
11					22.5	30.0			1.50	0.50	無	無	無	14.9	5.79E-04	
12	15.0	1.6	0.038	7.5	15.0	22.5			1.00	0.50	無	無	無	45.8	1.78E-03	
13					7.5	15.0			0.50	0.50	無	無	無	176.0	6.84E-03	
14					22.5	37.5			1.50	1.00	無	無	無	33.4	1.30E-03	
15	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0			1.00	1.00	無	無	無	91.4	3.55E-03	
16					7.5	22.5			0.50	1.00	無	無	無	246.0	9.56E-03	
17					22.5	52.5			1.50	2.00	無	無	無	22.2	8.63E-04	
18	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0			1.00	2.00	無	無	無	82.7	3.22E-03	
19					7.5	37.5			0.50	2.00	無	無	無	285.5	1.11E-02	
20					22.5	67.5			1.50	3.00	無	無	無	16.1	6.26E-04	
21	15.0	1.6	0.038	45.0	15.0	60.0			1.00	3.00	無	無	無	68.5	2.66E-03	
22					7.5	52.5			0.50	3.00	無	無	無	259.0	1.01E-02	
23					11.25	18.75			1.50	1.00	無	無	無	15.2	1.67E-03	
24	7.5	1.6	0.019	7.5	7.50	15.0			1.00	1.00	無	無	無	39.6	4.35E-03	
25					3.75	11.25			0.50	1.00	無	無	無	103.3	1.14E-02	
26	7.5	1.6	0.019	0.0	11.25	11.25			1.50	0.00	無	無	無	0.3	3.45E-05	
27					3.75	7.5	1.00	0.50	無	無	無	24.4	2.68E-03			
28	7.5	1.6	0.019	15.0	7.5	22.5	1.00	2.00	無	無	無	34.7	3.82E-03			
29					22.5	7.5	30.0	1.00	3.00	無	無	28.3	3.11E-03			
30					22.5	37.5	1.50	1.00	有	無	無	7.3	2.85E-04			
31	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0	1.00	1.00	有	無	無	54.5	2.12E-03			
32					7.5	22.5	0.50	1.00	有	無	無	224.0	8.71E-03			
33					7.5	15.0	22.5	1.00	0.50	有	無	無	19.6	7.62E-04		
34	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	有	無	無	70.7	2.75E-03			
35					45.0	60.0	1.00	3.00	有	無	無	58.4	2.27E-03			
36					22.5	37.5	1.50	1.00	無	有	有	0.3	1.24E-05			
37	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0	1.00	1.00	無	有	有	4.0	1.54E-04			
38					7.5	22.5	0.50	1.00	無	有	有	108.0	4.20E-03			
39					7.5	15.0	22.5	1.00	0.50	無	有	有	0.6	2.37E-05		
40	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	有	有	12.2	4.72E-04			
41					45.0	60.0	1.00	3.00	無	有	有	15.8	6.14E-04			
42					22.5	37.5	1:1/2	1/30	1.50	1.00	無	無	29.2	1.13E-03		
43	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0			1.00	1.00	無	無	無	72.1	2.80E-03	
44					7.5	22.5			0.50	1.00	無	無	無	228.0	8.86E-03	
45					7.5	15.0	22.5	1.00	0.50	無	無	無	43.2	1.68E-03		
46	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	無	無	61.7	2.40E-03			
47					45.0	60.0	1.00	3.00	無	無	無	45.4	1.76E-03			
48					22.5	37.5	1:1	1/30	1.50	1.00	無	無	13.6	5.27E-04		
49	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0			1.00	1.00	無	無	無	54.3	2.11E-03	
50					7.5	22.5			0.50	1.00	無	無	無	208.0	8.09E-03	
51					7.5	15.0			22.5	1.00	0.50	無	無	無	8.3	3.22E-04
52	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0			1.00	2.00	無	無	無	71.6	2.78E-03	
53					45.0	60.0	1.00	3.00	無	無	無	55.2	2.14E-03			
54	15.0	1.6	0.038	7.5	非越波		1:3	1/30	-	0.50	無	無	-	-		
55	15.0	1.6	0.038	15.0	非越波				-	1.00	無	無	無	-	-	
56					22.50	37.5			1.50	1.00	無	無	無	8.1	3.15E-04	
57	15.0	1.6	0.038	15.0	15.00	30.0			1.00	1.00	無	無	無	52.5	2.04E-03	
58					7.50	22.5			0.50	1.00	無	無	無	214.5	8.34E-03	
59					7.5	15.0			22.5	1.00	0.50	無	無	無	3.9	1.52E-04
60	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	無	無	103.5	4.02E-03			
61					45.0	60.0	1.00	3.00	無	無	無	95.6	3.72E-03			

次に、護岸勾配の影響として、**図-10**に海底勾配が 1/10 で護岸勾配が 1:1/2 および 1:1 のときの無次元越波流量、**図-11**に海底勾配が 1/30 で護岸勾配が 1:1 および 1:3 のときの無次元越波流量を示す。

傾斜護岸の場合、基本的には図中に破線で示した直立護岸の結果に比べて、越波流量が多くなっていることがわかる。高山ら³⁾によると護岸勾配が 1:1/2 のときの換算天端高係数は平均 1.2、標準偏差±0.13 である。本実験結果より、海底勾配 1/10 の場合の護岸勾配 1:1/2, 1:1 に対する換算天端高係数は 1.0~1.2 程度となり、高山らの提案する護岸勾配が 1:1/2 のときの換算天端高係数とほぼ同じ値となる。しかし、海底勾配 1/30 の場合の護岸勾配 1:1, 1:3 に対する換算天端高係数は 1.2~1.5 程度となり、高山らの提案する護岸勾配が 1:1/2 のときの換算天端高係数より大きな値となることがわかった。

また、海底勾配が 1/30 の場合には、のり先水深波高比

が 1.0 より小さくなるとのり面勾配が急な方が越波流量が多くなる。これは護岸が砕波領域内にあり、護岸の手前で波が減衰し、護岸への遡上高が小さくなるためであると考えられる。このことは、玉田ら⁴⁾が相対天端高が 1.0 以下での実験結果に基づいて、のり面勾配が緩いほど越波流量が減少するとした結論に一致する。

さらに、パラペットの曲率および消波工による影響として**図-12**にパラペットの曲率および消波工があるときの無次元越波流量を示す。パラペットの曲率による越波流量は最大で 60%程度になり、消波工があることによる越波流量は消波工がない場合に比べ 5~20%程度になる。合田らの実験と今回ののり面勾配 1:1 の傾斜護岸の実験では、消波工の中にマウンドが無いなど消波工の構造に異なる部分があるため越波流量の変動曲線も多少異なるものの、のり先水深波高比や相対天端高の違いによる減少傾向は、直立護岸の場合と同様である。

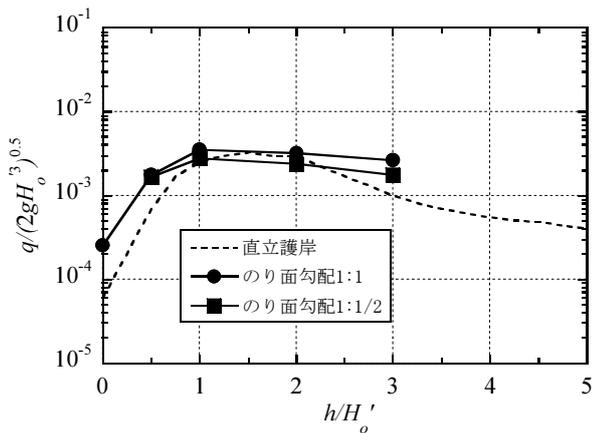


図-10(a) のり面勾配による影響 (のり先水深波高比に対する無次元越波流量, $H_o'/L_o=0.038$, $h_c/H_o'=1.0$, 海底勾配 1/10)

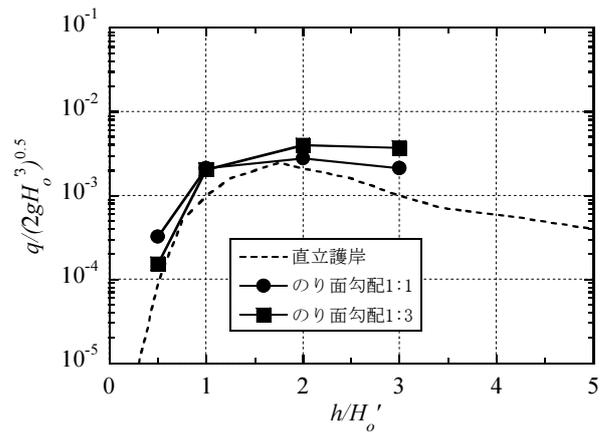


図-11(a) のり面勾配による影響 (のり先水深波高比に対する無次元越波流量, $H_o'/L_o=0.038$, $h_c/H_o'=1.0$, 海底勾配 1/30)

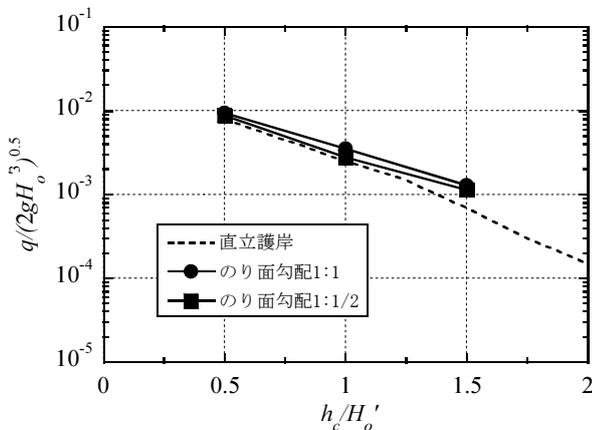


図-10(b) のり面勾配による影響 (相対天端高に対する無次元越波流量, $H_o'/L_o=0.038$, $h/H_o'=1.0$, 海底勾配 1/10)

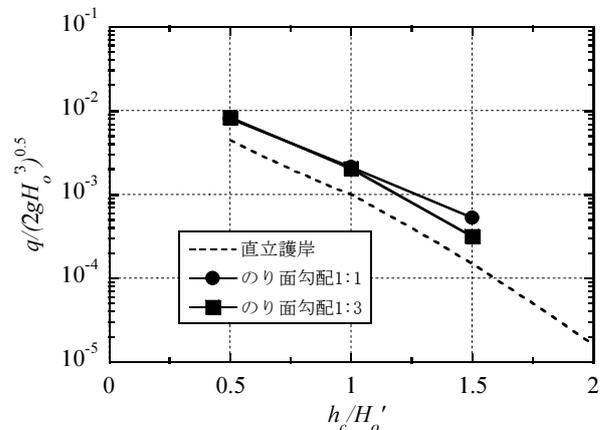


図-11(b) のり面勾配による影響 (相対天端高に対する無次元越波流量, $H_o'/L_o=0.038$, $h/H_o'=1.0$, 海底勾配 1/30)

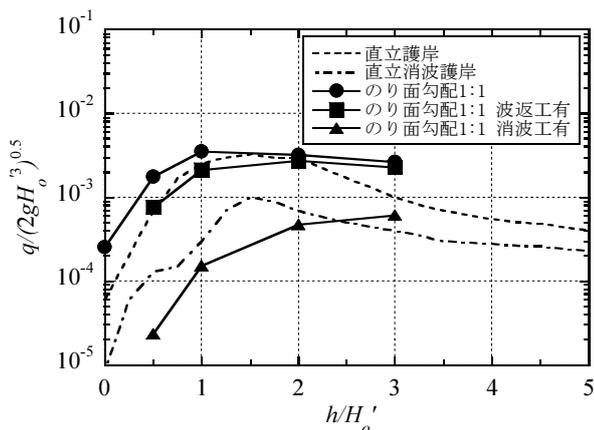


図-12(a) パラペットの曲率および消波工による影響 (のり先水深波高比に対する無次元越波流量, $H_o'/L_o=0.038$, $h_c/H_o'=1.0$, 海底勾配 1/10)

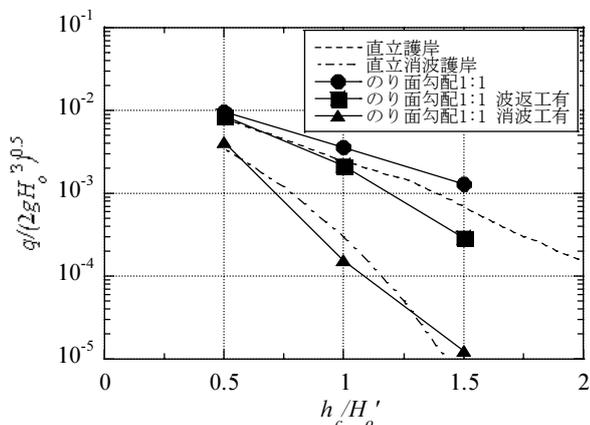


図-12(b) パラペットの曲率および消波工による影響 (相対天端高に対する無次元越波流量, $H_o'/L_o=0.038$, $h/H_o'=1.0$, 海底勾配 1/30)

3.5 数値モデルの適用

ここで、水理模型実験の他に、効率的に越波流量を算定するために、数値モデルによるアプローチを行った。数値モデルの適用に関しては、計算精度と計算時間などの面での有利さから、ブシネスク方程式に堰の越流公式を適用したモデルによる越波流量の算定が行われている^{6),7)}。しかし、ブシネスク方程式を越波問題に適用したこれまでの研究から、以下の点で課題があると考えられる。

- ・ 非線形性の強い波浪場に対する適用性
 - ・ 護岸の傾斜に対する適用性
 - ・ 護岸形状 (消波工や波返し) に対する適用性
- 波の非線形性に関しては、ブシネスク方程式が弱非線形しか扱えないために、強非線形の波浪場は、方程式自

体の適用範囲外となる。また、護岸前面の波浪場は部分重複波となっており、越波流量が少ない場合には反射波の影響で波峰高は2倍を越えてくる。そのため、入射波高による非線形性の評価では、非線形性を過小評価することになり、ブシネスク方程式の適用においては、重複波を考慮した非線形性の評価が必要である。

また、傾斜護岸上では、波は斜面上を遡上し、条件によっては碎波する。数値モデルにより、傾斜護岸における越波流量を評価する場合には、斜面上の碎波後の水位波形を精度良く評価する必要がある。ブシネスク方程式により遡上を計算する研究⁸⁾も行われているが、碎波現象まで含めてパラペット前面の水位を精度良く求めることは現状では難しい。また、ブシネスク方程式を用いて、パラペットの曲率や消波工がある場合についての水位波形を精度良く評価することも、現状では困難である。

これらの課題を踏まえて、ブシネスク方程式を越波問題へ適用するために、簡易的に計算結果に係数を乗じて水位を補正する方法を採用した。

ここで、検討に用いたブシネスク方程式は、Madsenタイプのモデル⁹⁾とし(分散性に関する補正係数 B は $1/21$)、海底摩擦および碎波による減衰項¹⁰⁾を付加したものを用いた。越波のメカニズムを考えた場合、越波流量は波峰高だけでなく波峰の幅や平均水位も影響して決まると考えられるため、補正係数は波峰高に着目するのではなく、結果として越波流量が精度良く評価できるように決めるべきであると考えた。そこで、越波流量算定は以下に示す手順①～③により行った。

- ① ブシネスク方程式の計算結果の水位変動に補正係数を乗じて、新たに水位変動の時系列 $\eta(t)$ を作成する。

$$\eta(t) = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \eta_B(t) \tag{1}$$

ここで、 $\eta_B(t)$ は非越波 (天端高が無限大) の直立護岸に対するブシネスク方程式の計算による護岸直前の水位変動、 m_1 は非線形性に起因する係数、 m_2 は護岸の傾斜に関する係数、 m_3 は護岸の形状に関する係数である。

- ② 堰の越流公式に新たに定義した水位変動の時系列を入力し、越波流量の時系列を評価する。

$$q(t) = \frac{2\sqrt{2g}}{3} m(\eta(t) - h_c)^{3/2}, \quad \eta(t) > h_c \tag{2}$$

ここで、 g は重力加速度、 m は越流係数、 h_c は必要水面上天端高である。越流係数 m は佐貫⁶⁾を参考に一律0.5

とした。

③ 越波流量の時系列より，平均越波流量を評価する．ここで，非線形性に起因する係数 m_1 は，数値モデルによる越波流量と合田ら²⁾による越波流量推定図による越波流量の比較により決定した．また，護岸の傾斜に関する係数 m_2 および護岸の形状に関する係数 m_3 は，本研究で行った実験結果と数値モデルによる越波流量を比較して決定した．また，実験を行っていない条件については，物理的なメカニズムを考慮した上で実験結果を用いて評価した係数の値を参考に決定した．

補正係数の値は条件毎に決まり，本研究において検討した条件においては，係数 m_1 の値は0.78~3.46 (h/H_o' が小さいときに大きな値をとる)，係数 m_2 の値は0.96~1.39，係数 m_3 の値は0.50~0.97となった．

3.6 傾斜護岸の越波流量算定結果

水理模型実験およびブジネスク方程式を用いた数値モデルにより傾斜護岸の越波流量を算定した結果を図-13に示す．図中の塗りつぶしてある点は水理模型実験結果に基づいた結果によるものであり，白抜き部分はブジネスク方程式を用いた数値モデルによる計算結果である．そのため，白抜き部分及びそれらをつなぐ点線部については，誤差も含まれることが予想される．

3.7 傾斜護岸の許容沈下量算定図

3.6で作成した越波流量推定図をもとに，2.2で作成した直立護岸の許容沈下量算定図と同様に，のり先水深波高比をパラメタとし横軸に相対天端高，縦軸に無次元越波流量を取った許容沈下量算定図を作成した．作成した許容沈下量算定図を図-14に示す．

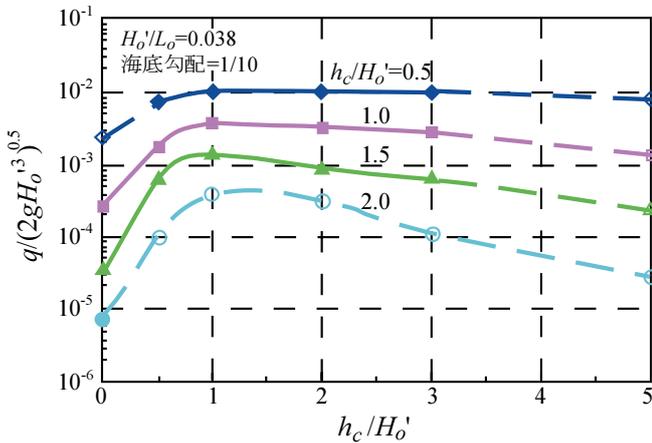


図-13(a) 越波流量推定図(のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038)

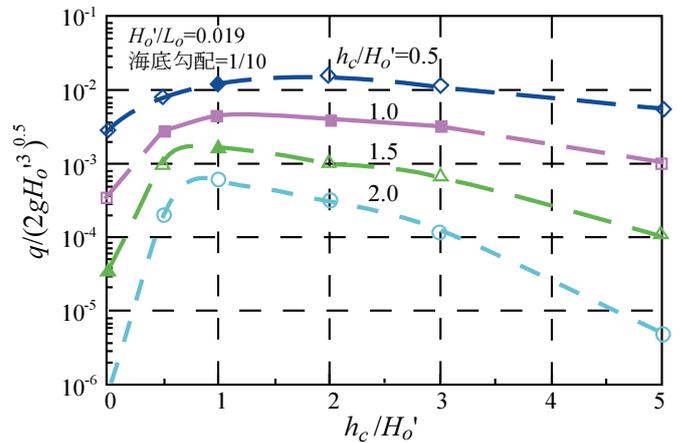


図-13(c) 越波流量算定図(のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.019)

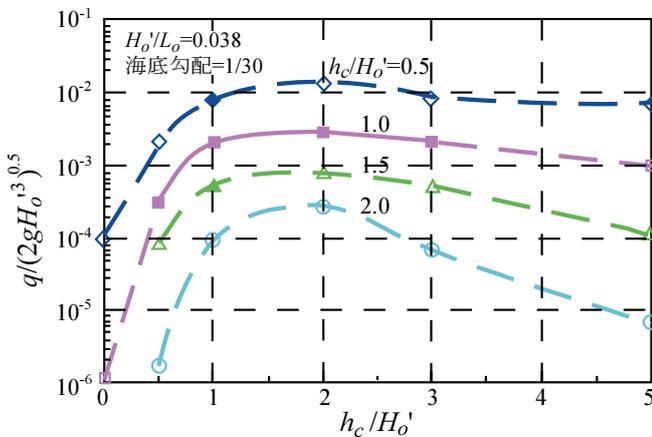


図-13(b) 越波流量推定図(のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.038)

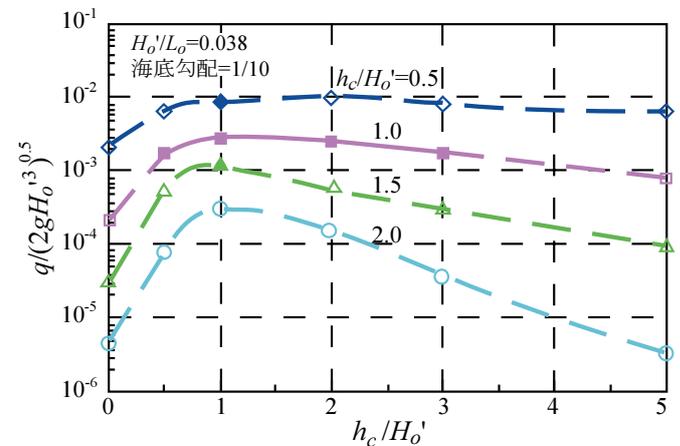


図-13(d) 越波流量算定図(のり面勾配 1:1/2, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038)

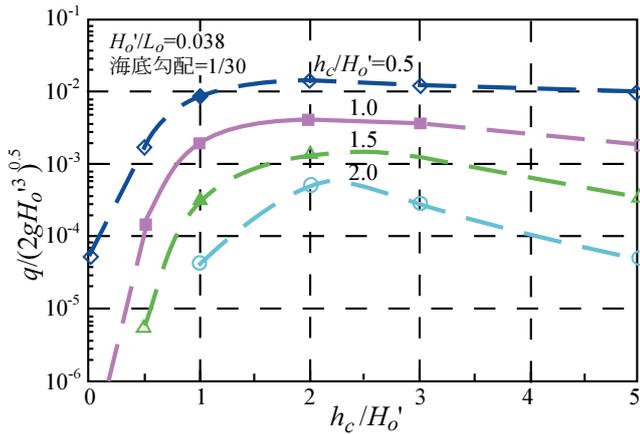


図-13(e) 越波流量算定図 (のり面勾配護岸 1:3, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.038)

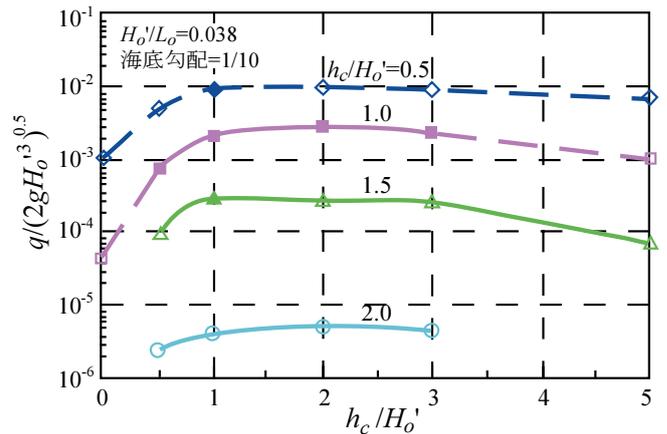


図-13(g) 越波流量算定図 (のり面勾配護岸 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038, 波返工有)

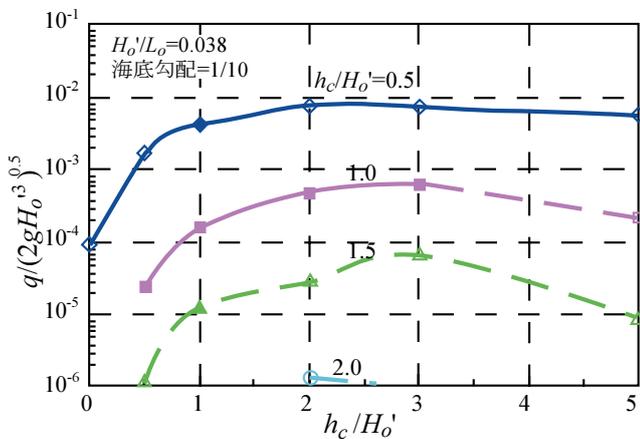


図-13(f) 越波流量算定図 (のり面勾配護岸 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038, 消波工有)

4. 護岸の保有性能評価

4.1 既存護岸の許容沈下量

前章までで作成した、直立護岸および傾斜護岸の許容沈下量算定図を用いて、現在全国に建設されている護岸の許容沈下量について検討を行う。

まず、検討断面の抽出のため、現在全国に建設されている護岸について柴田ら¹¹⁾の海岸堤防・護岸構造集覧より109施設を選び、堤脚水深、海底勾配、のり面勾配、天端高、断面形状、消波工の有無、沖波換算波高、波向、波形勾配、パラペット及び後退型パラペット、波返工の有無、護岸の背後状況などの条件について整理を行った。

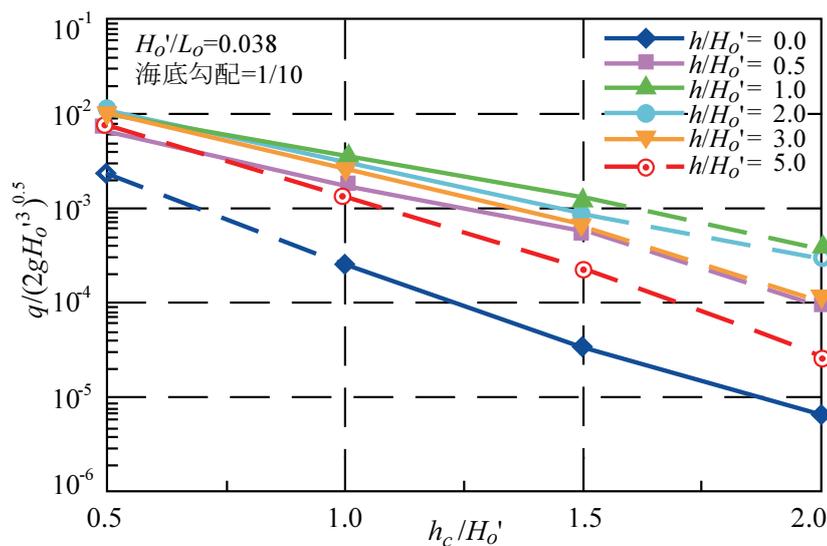


図-14(a) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038)

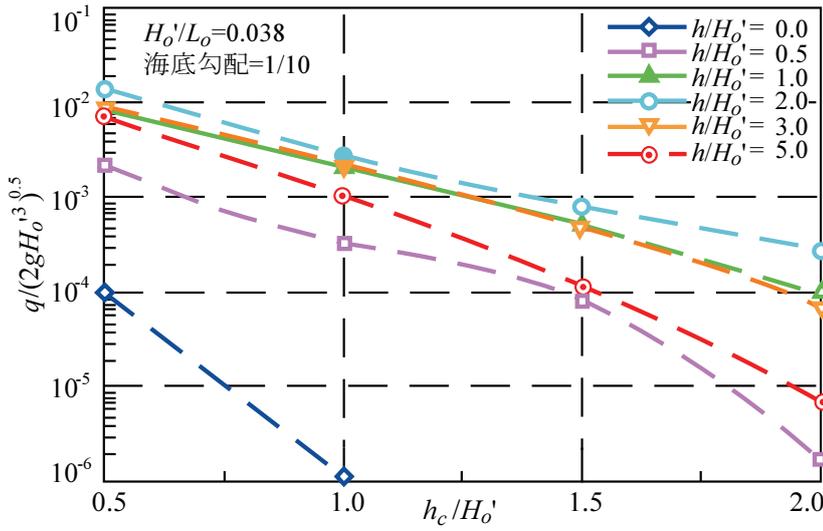


図-14(b) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.038)

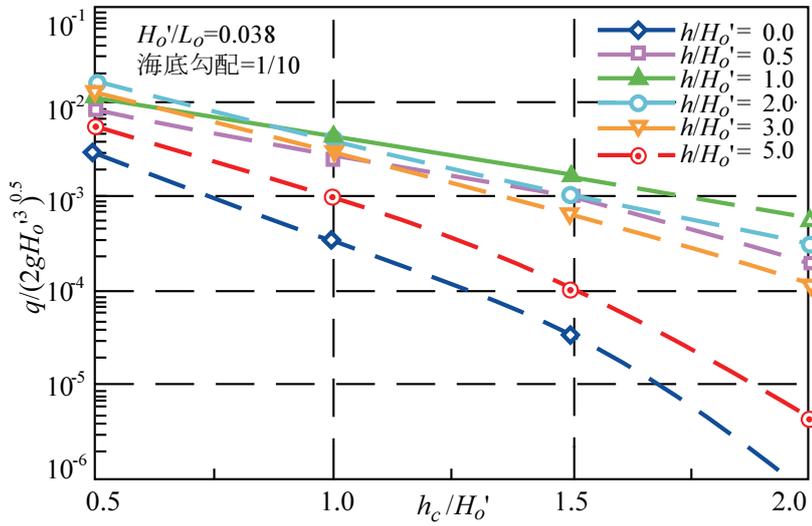


図-14(c) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.019)

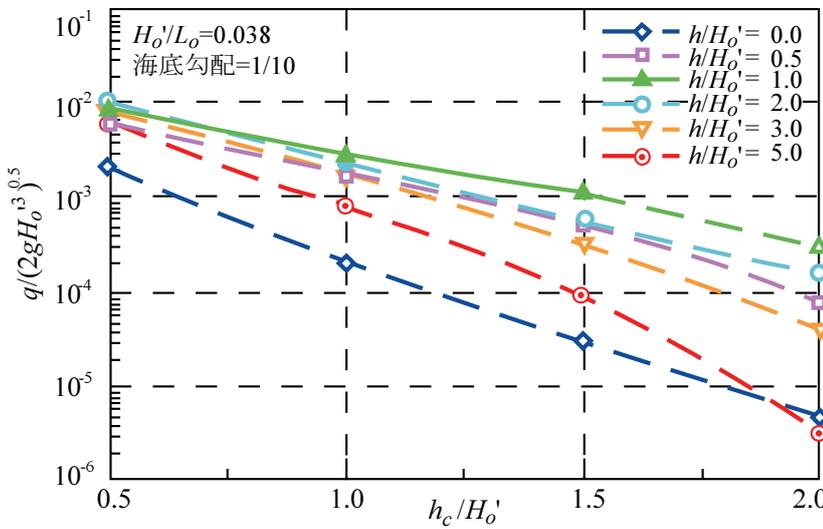


図-14(d) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:1/2, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038)

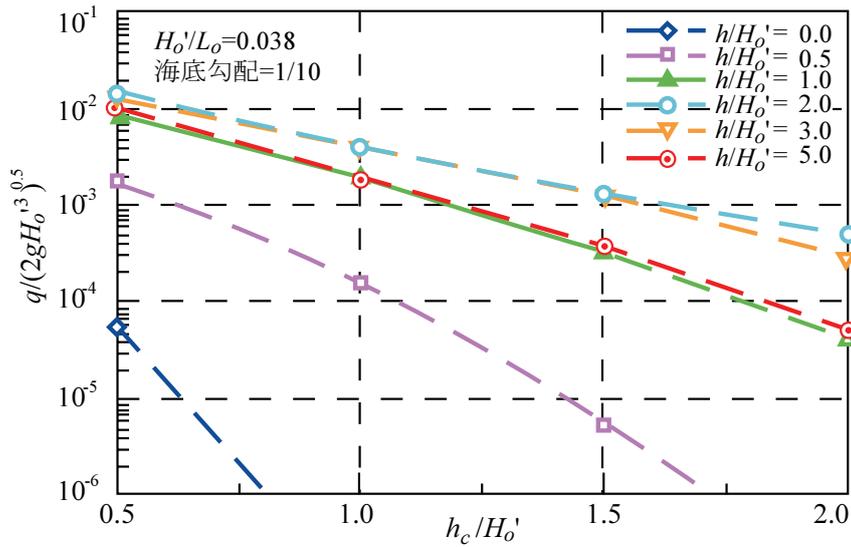


図-14(e) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:3, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.038)

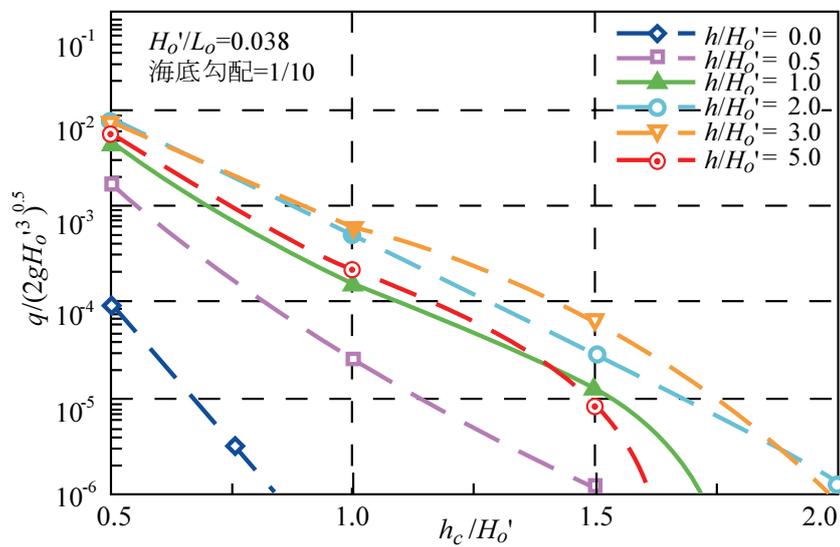


図-14(f) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038, 消波工有)

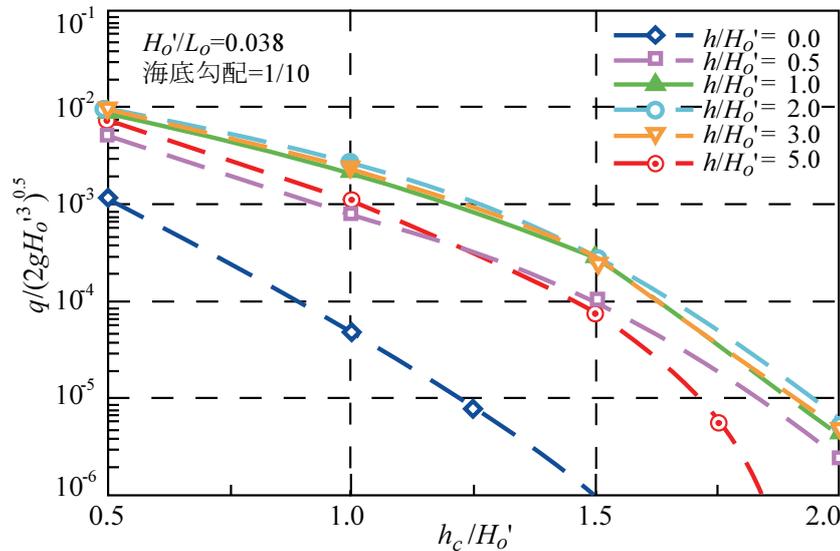


図-14(g) 許容沈下量算定図 (のり面勾配 1:1, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.038, 波返工有)

ここで、既存護岸の許容越波流量の設定においては、統一的な値が示されておらず、設計年次および設定手法によりまちまちであると推測できる。しかしながら、護岸は背後地を越波から防護するのが主たる目的であることから、永井ら⁵⁾の提示値(表-1)をもとに護岸の背後状況により許容越波流量を設定した。具体的には、人家密集、公共施設、石油コンビナート等の地区は $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、人家散在、工場等の地区は $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、山林、田畑等の地区は $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ と各護岸の許容越波流量について設定を行った。検討対象護岸の各種条件は、図-15に示すとおりである。また、設定した検討対象護岸109施設の許容越波流量の頻度分布を図-16に示す。設定した許容越波流量は $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 及び $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の施設が多いことがわかる。

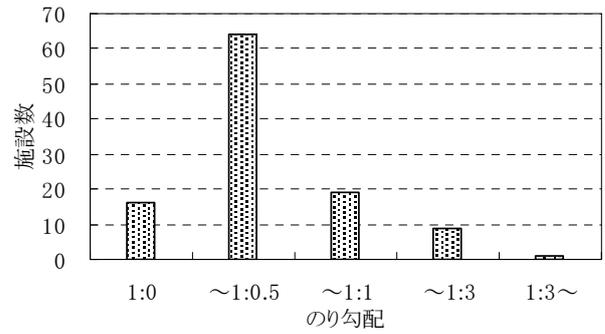


図-15(d) のり勾配の頻度分布図

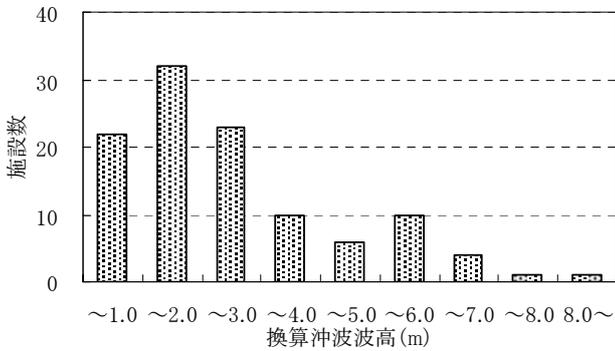


図-15(a) 換算沖波波高の頻度分布図

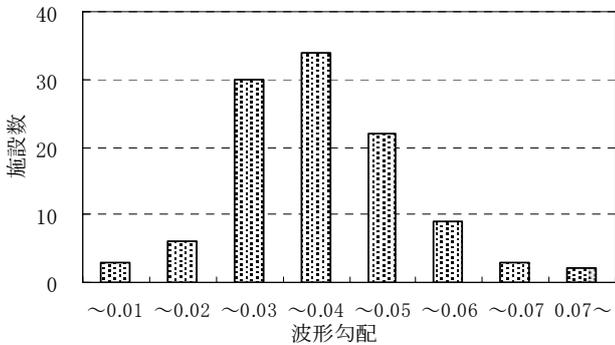


図-15(b) 波形勾配の頻度分布図

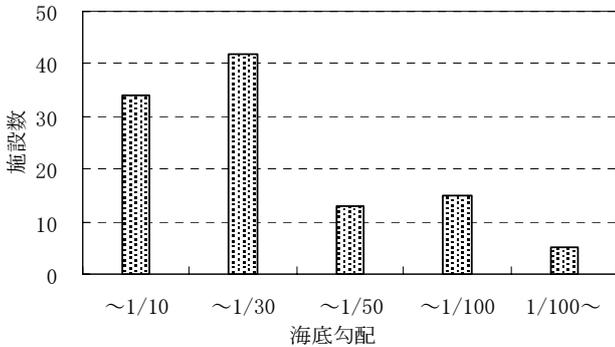


図-15(c) 海底勾配の頻度分布図

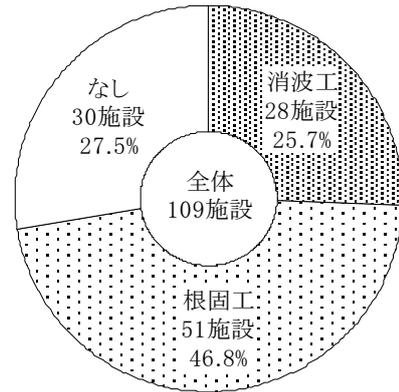


図-15(e) 消波工・根固工の有無

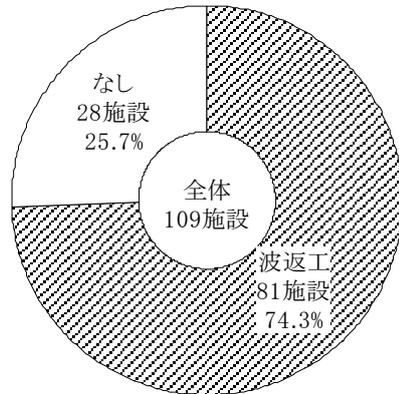


図-15(f) 波返工の有無

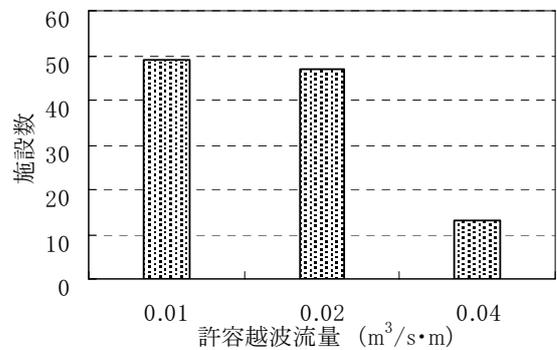


図-16 許容越波流量の頻度分布図

次に、検討対象護岸 109 施設の護岸条件をもとに各護岸の許容沈下量の算定を行う。まず、無次元越波流量の算出に際して、合田ら²⁾は、実験データのばらつきや現地観測値との比較から、越波流量の推定値に対する真値の想定誤差範囲を示している(表-6)。表より分かるように、越波流量の推定値にはばらつきが非常に大きい。このばらつきは、港湾・海岸構造物の設計因子の有するばらつきとしては非常に大きい¹²⁾と考えられるため、越波流量の頻度分布の検討においては、越波流量の推定値のばらつきを考慮する必要があると考えられる。そこで、越波流量の推定値に対する真値のばらつきを考慮するために正規分布を仮定した。正規分布は表-6 に示した推定値に対する真値の上下限界を参考に、越波流量は非負であることを考慮して、下限値が -2σ すなわち下限値を下回る確率が 0.023 程度となるような正規分布を仮定した。表-7 に設定した真値と算出値の比の値に対する標準偏差 σ を示す。ここで、比の平均値は 1.0 とする。

表-6 越波流量の推定値に対する真値の想定²⁾

$q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$	直立護岸	消波護岸
10^{-2}	0.7-1.5 倍	0.5-2 倍
10^{-3}	0.4-2 倍	0.2-3 倍
10^{-4}	0.2-3 倍	0.1-5 倍
10^{-5}	0.1-5 倍	0.05-10 倍

表-7 越波流量の推定値に対する推定精度の標準偏差

$q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$	直立護岸	消波護岸
10^{-2}	0.15	0.25
10^{-3}	0.3	0.4
10^{-4}	0.4	0.45
10^{-5}	0.45	0.5

そして、仮定した正規分布をもとにして越波流量のばらつきを考慮し、許容沈下量の期待値について算出した。許容沈下量の期待値とは、許容越波流量算定図を用いて算出する際の越波流量のばらつきの重みを考慮した許容沈下量の平均値である。許容沈下量の期待値の算出においては、まず、表-7 で設定した標準偏差 σ をもとに、各護岸について $\mu - 2\sigma$, $\mu - \sigma$, μ , $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ に位置する 5 段階の無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$ の値を求めた。 μ は平均値、 σ は標準偏差であり、5 段階で値を求めたのは計算負荷の低減のためである。次に、算出した 5 段階の無次元越波流量に対応する許容沈下量について、海底勾配、波形勾配、のり勾配、断面形状、消波工の有無、波返工の有無などの条件ごとに許容沈下量算定図を適用し各々算出した。そして、 $\mu - 2\sigma$, $\mu - \sigma$, μ , $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ の 5 段階の許容沈下量に付する確率密度

を正規分布に基づき考慮して、各護岸の許容沈下量の期待値について算定した。

検討対象護岸 109 施設における許容越波流量別の許容沈下量の期待値の頻度分布を図-17 に示す。許容沈下量の期待値は最大 2.7m までの広い範囲に分布していた。また、許容越波流量が $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$, $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$, $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ のどの場合においても 1.0m 以下になる施設が多いことがわかった。これは、既存護岸が天端高の設定にあたり、設計潮位及び設計波高、沈下量等の不確実性を考慮して余裕高を設定しているためと考えられる。余裕高は、護岸背後地の重要度を 1 つの目安とし、最大 1.0m 程度を限度として設定すれば良いこととされている¹⁾。

なお、護岸の造成に際して大規模な盛土を伴う場合は粘性土の圧密沈下の問題があるが、本研究で対象とする護岸については、そのような場合は置換砂による改良工が行われている。従って、圧密沈下の問題は本研究では対象外とする。

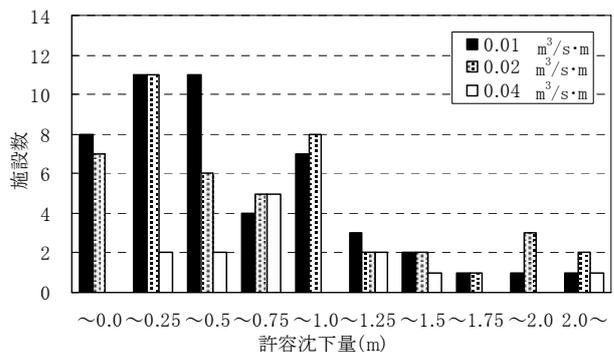


図-17 護岸の許容沈下量期待値の頻度分布図

4.2 沈下量とはらみ出し量の相関

ここまでの検討で、現在全国に建設されている護岸の許容沈下量は最大 2.7m までの広い範囲に分布していることが明らかとなった。そこで、得られた許容沈下量の頻度分布を護岸の保有性能という観点から評価するために、現在用いられている設計法に基本的に違いが無いが、構造物に求められる性能が異なる護岸と岸壁について性能の比較を行った。

岸壁は、船舶の接岸を目的とした構造物であり、要求性能として、船舶の接岸を保証するために法線のはらみだし量が許容値以下であることが求められる。

ここで、岸壁に求められる性能が、はらみだし量すなわち水平変形量であるため、護岸と岸壁に求められる性能との比較を行うためには、許容沈下量の頻度分布を水平変形量の頻度分布に換算することが必要である。よって、ここでは、沈下量が水平方向のはらみ出し量とどの

ような相関性があるかを検討する。検討対象として重力式護岸を想定し、図-18 に示すようなケーソン式構造物を対象として地震応答解析を行うことにより地震後の護岸の水平方向はらみ出し量と鉛直方向沈下量の相関性を検討した。用いた地震応答解析コードは FLIP¹³⁾である。地盤条件の影響を考慮するため、地盤条件は図-19 および表-8 に示すような6ケースを想定した。これは、地盤固有周期が 0.6-1.2 秒の範囲で分布するように設定したものである。また、設計震度の影響についても考慮するため、設計震度として 0.10, 0.15, 0.20 の3ケースを考慮する。検討に用いた地震波形は港湾構造物の耐震設計で用いられている八戸波(図-20)とし、加速度最大振幅を 100,200,350Gal として図-18 に示す検討モデル底面より入射した。以上により検討ケース数は 54 ケースである。

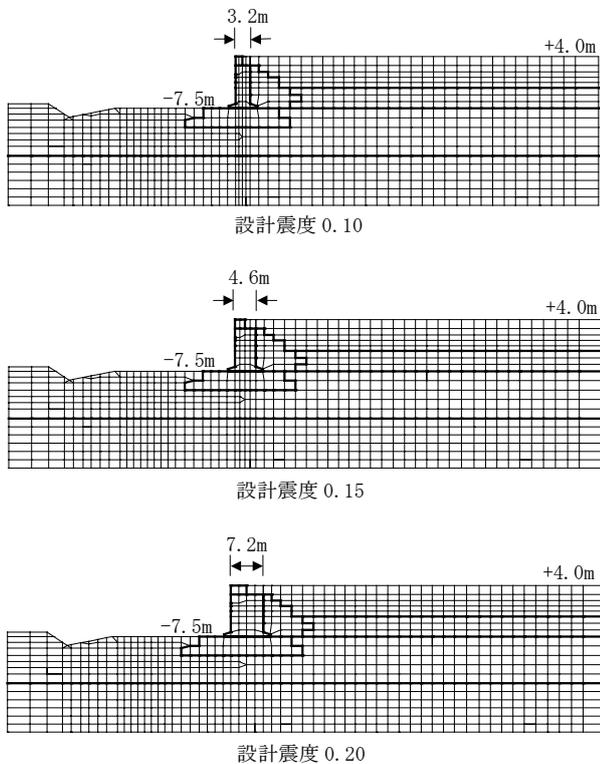


図-18 検討対象断面図

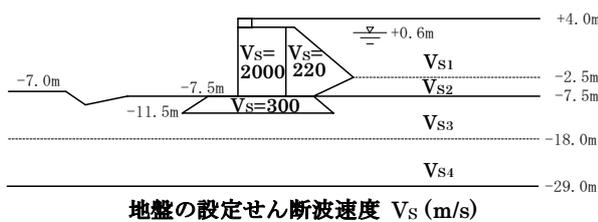


図-19 地盤条件

表-8 地盤の S 波速度

地盤 Case	地盤の設定せん断波速度 (m/s)			
	V _{S1}	V _{S2}	V _{S3}	V _{S4}
Case-1	114	114	150	150
Case-2	199	199	100	100
Case-3	171	171	190	250
Case-4	199	199	150	270
Case-5	199	250	280	450
Case-6	285	285	210	300

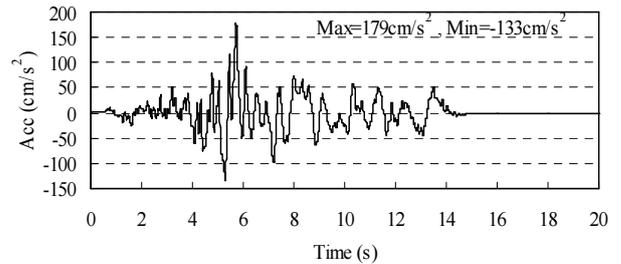


図-20 検討対象地震波形

解析結果より加振後の構造物天端における水平方向のはらみ出し量と鉛直方向の沈下量を算出し、両者の相関関係を検討した。結果を図-21に示す。地盤条件、設計震度、入力地震動レベルのいずれについても影響は少なく、水平方向はらみ出し量に対する鉛直方向沈下量の関係はほぼ一定であることがわかる。

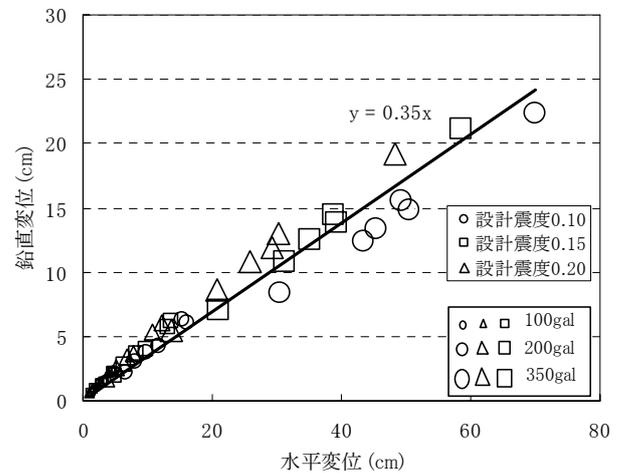


図-21 ケーソン式構造物における水平変位-鉛直変位の相関図

4.3 護岸の許容沈下量と岸壁の許容はらみ出し量の関係

前節 4.2 の検討結果よりはらみ出し量に対する沈下量の関係はほぼ一定であるということがわかった。そこで、図-21 に示した回帰関係を用いて図-17 の護岸の許容沈

下量頻度分布をはらみ出し量頻度分布に換算することが出来る。図-22 にその結果を示す。護岸の許容はらみ出し量は 0m-7.7m の範囲に分布していることがわかる。

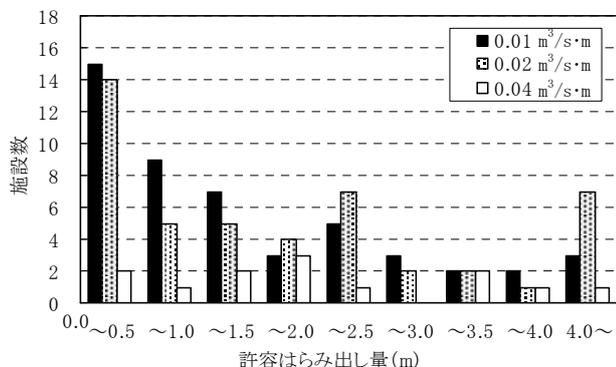


図-22 護岸の許容はらみ出し量の頻度分布図

ここで、現在、用いられている護岸と岸壁の設計法には違いがないため、仮に、護岸が岸壁であると仮定した場合、船舶接岸の関係から地震等の荷重作用後のはらみ出し量が許容値以下であることが求められることとなる。表-9に岸壁のはらみ出し量に関する制限値の参考値を示す¹⁴⁾。この表-9に示した許容変形量の参考値は、過去の地震被災を受けた岸壁について、変形量と供用制限の有無の関係を検討した結果をもとに示されたものであり、本検討でのはらみ出し許容値は、水深-7.5m未満のケースがほとんどであったため0.2mと想定した。

以上の検討をふまえ、岸壁のはらみ出し許容値 0.2m と護岸の許容はらみ出し量の累積分布確率の関係を比較した結果を図-23に示す。護岸の許容はらみ出し量が 0.2m 以下となるのは、護岸背後の重要度にはほとんど依存せず、全体の 30%未満であり、護岸の許容はらみ出し量は岸壁のはらみ出し許容値と比較すると安全側であることが分かった。これは、現在の天端高さの設定方法における余裕高の設定によるところが大きいと判断される。

このように、構造物の堤体諸元が同じであっても、求められる性能が異なれば、構造物が保有する性能も違ってくる。よって、設計においても各々の構造物の要求性能の思想に基づき設計を行わなければならないと考えられる。

表-9 岸壁の許容変形量参考値

構造形式	重力式係船岸	
岸壁水深	-7.5m 以上	-7.5m 未満
供用可能	0~30cm	0~20cm
供用制限	30~100cm	20~50cm

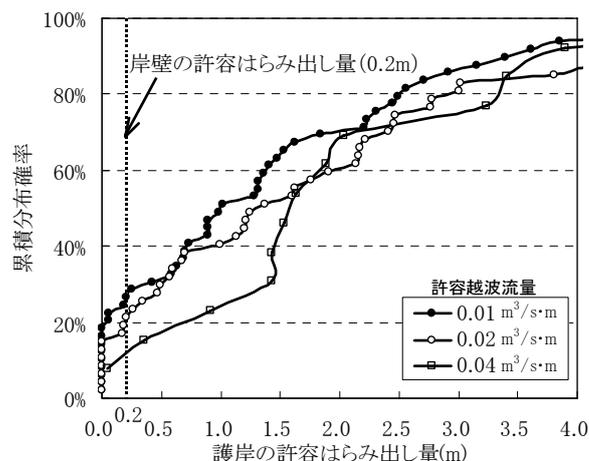


図-23 護岸の許容はらみ出し量の累積分布確率

5. 越波流量の算定精度を考慮した護岸天端高の設定方法

5.1 必要水面上天端高の確率分布算定方法

ここまでで、要求性能に基づいた設計を行わなければならないことがわかった。護岸においては、要求性能として越波流量が許容値以下であることが求められ、天端高を適切に設定しなければならない。ここで、合田ら²⁾により越波流量の算定における想定誤差が示されていることや余裕高の経験的に設定されていることを踏まえて、本研究では、越波流量の算定精度を考慮した護岸の天端高の合理的な算定方法について検討を行った。

検討においては、4.1 で抽出した、現在全国に建設されている 109 護岸のうち、余裕高が考慮している施設という観点から必要水面上天端高 h_c が 0.5m 以上の 89 施設を選んだ。そして、越波流量の推定値に対する真値のばらつきを考慮した必要水面上天端高 h_c の確率分布について算定を行った。必要水面上天端高 h_c の確率分布の算出においては、越波流量の算定精度を考慮するために、4.1 で示したのと同様に、表-6 の合田ら²⁾の越波流量の推定値に対する真値の想定誤差範囲を考慮して正規分布を仮定した。そして、その正規分布の標準偏差 σ (表-7) をもとに、 $\mu - 2\sigma$, $\mu - \sigma$, μ , $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ に位置する 5 段階の無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$ の値を各護岸ごとに求めた。

次に、算出した 5 段階の無次元越波流量に対応する必要水面上天端高 h_c を許容沈下量算定図を用いて算出した。そして、 $\mu - 2\sigma$, $\mu - \sigma$, μ , $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ の 5 段階の確率密度を正規分布に基づき考慮し、必要水面上天

端高 h_c の頻度分布を求め確率分布を算出した。確率分布の評価においては、正規分布、対数正規分布を想定して χ^2 検定を行い、適合度の高い分布を採用した。検討の結果、全ての護岸について対数正規分布が採用された。

なお、必要水面上天端高 h_c の確率分布を算出する上で、5段階評価の妥当性を確認した。このために5段階評価と、 $\mu - 2.5\sigma$ から $\mu + 2.5\sigma$ の間を 0.1σ 刻みにした51段階について、必要水面上天端高 h_c の頻度分布を求め確率分布を算出することにより両者を比較した。検討においては、ばらつきの大きな3断面を抽出した。そしてその3断面を仮に護岸A、護岸B、護岸Cとする。5段階および51段階の h_c 確率分布について比較した結果について表-10に示す。また、護岸Aの5段階及び51段階の h_c の頻度分布および確率分布について図-24に示す。両者はほぼ一致しており、確率分布の算定においては5段階の評価で問題ないことがわかる。

表-10 5段階及び51段階における h_c 確率分布

	平均値(m)	標準偏差(m)	変動係数
護岸A 5段階	3.35	0.57	0.17
護岸A 51段階	3.35	0.58	0.17
護岸B 5段階	2.67	0.33	0.12
護岸B 51段階	2.67	0.33	0.13
護岸C 5段階	2.99	0.51	0.17
護岸C 51段階	2.98	0.44	0.15

このようにして得られた検討対象護岸89施設の必要水面上天端高 h_c は、その平均値が0.5~6.5mの広い範囲にばらついていることがわかった。 h_c の平均値の頻度分布を図-25に示す。また、必要水面上天端高 h_c の確率分布の変動係数の幅について図-26に示す。 h_c の確率分布の変動係数の幅は0.06~0.27となり、非常に大きな変動係数を示すケースもあった。変動係数の平均値は0.14であった。

5.2 護岸の必要水面上天端高の確率分布

これまでの検討で、算出された各護岸の必要水面上天端高は広い範囲にばらついているため、これを統一的に扱うことができないことが分かった。そこで、各護岸の h_c の確率分布を、設計で算定される必要水面上天端高 h_{cd} で正規化して各護岸の h_c/h_{cd} の確率分布を算出した。正規化にあたっては、適合度の検定を行った各々の護岸の確率分布をもとに、 h_c/h_{cd} の値を0.05刻みの分布幅で算出した。このように算出した各護岸の h_c/h_{cd} の確率分布を護岸背後地の重要度より設定した許容越波流量別を集計し、これを平均することにより、許容越波流量別の平

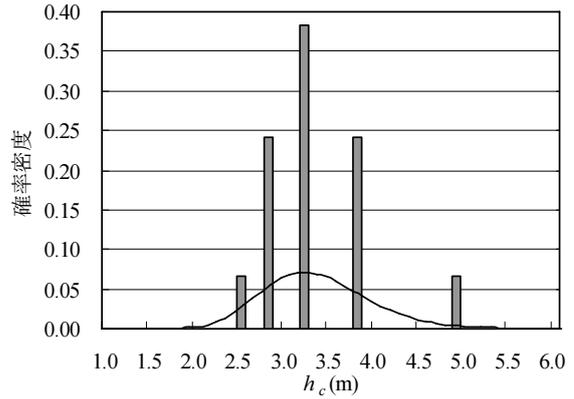


図-24(a) 5段階の護岸Aの h_c の確率分布

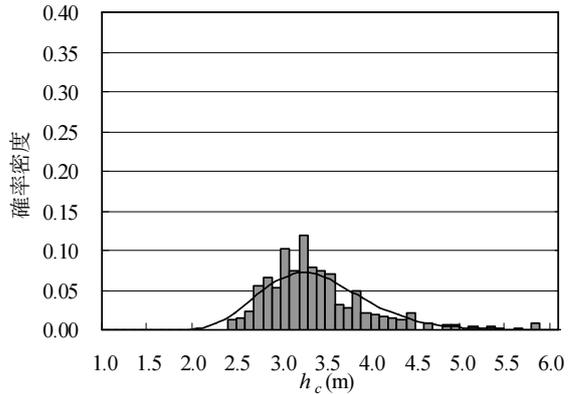


図-24(b) 51段階の護岸Aの h_c の確率分布

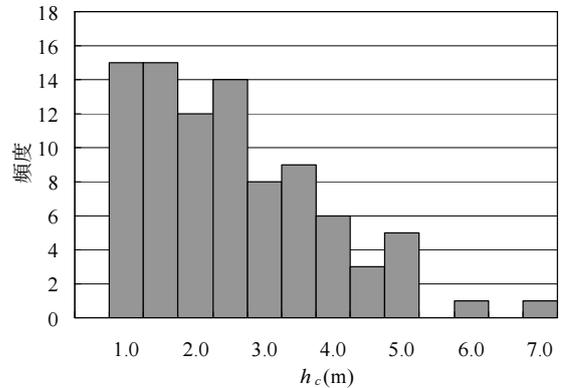


図-25 h_c の平均値の頻度分布

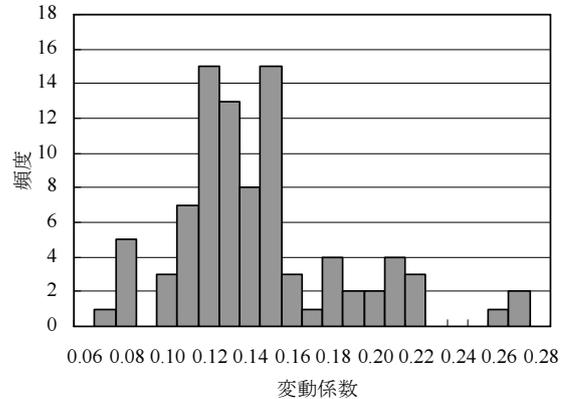


図-26 h_c の変動係数の頻度分布

均的な h_c/h_{cd} の確率分布を求めた。

得られた許容越波流量別の h_c/h_{cd} の確率分布を図-27に示す。許容越波流量が $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.03, 標準偏差は 0.15, 許容越波流量が $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の平均値は 1.03, 標準偏差は 0.15, 許容越波流量が $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の平均値は 1.01, 標準偏差は 0.16 となった。許容越波流量の違いによる分布の違いは少ないといえる。

また, 許容越波流量別と同様に護岸の構造形式別についても各護岸の h_c/h_{cd} の確率分布を集計し, これを平均することにより, 構造形式別の h_c/h_{cd} の確率分布を求め

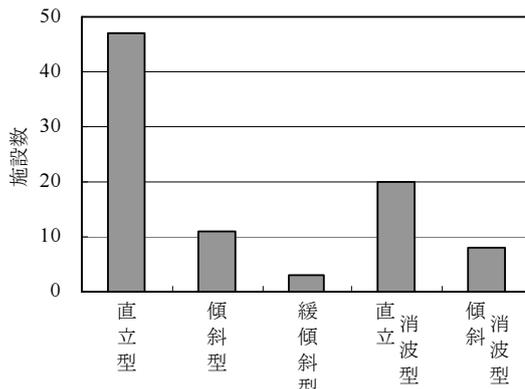


図-28 構造形式の頻度分布図

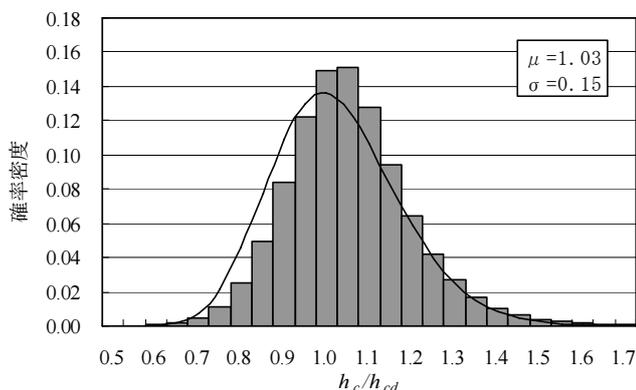


図-27(a) 許容越波流量 $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の h_c/h_{cd} の確率分布

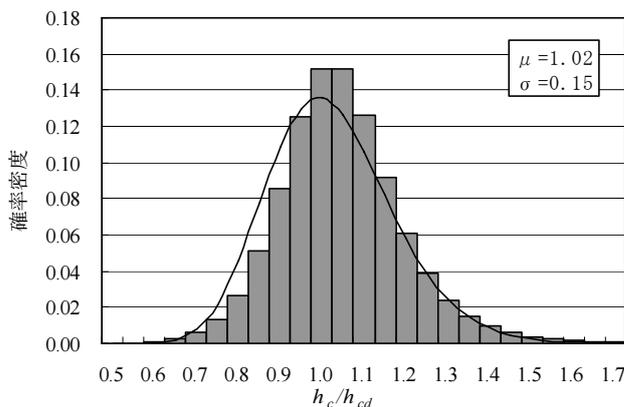


図-29(a) 直立型護岸の h_c/h_{cd} 確率分布

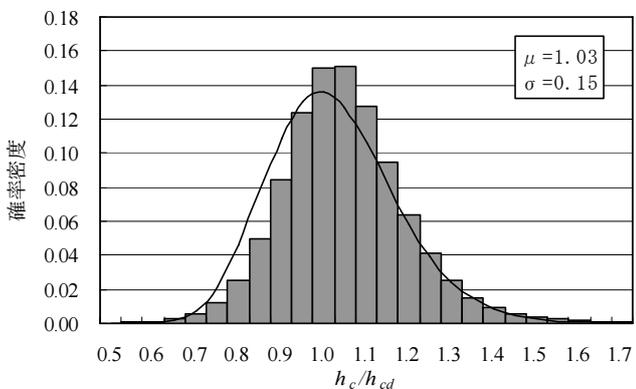


図-27(b) 許容越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の h_c/h_{cd} の確率分布

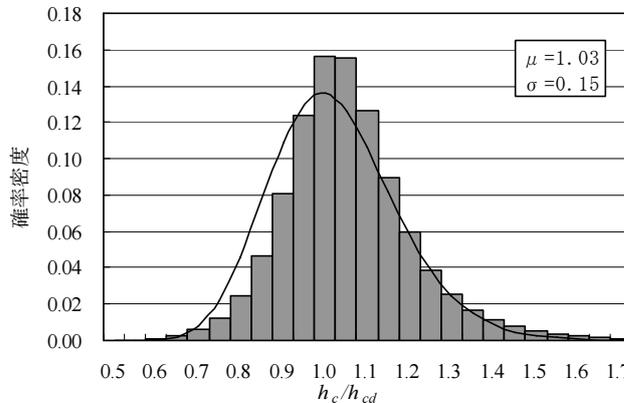


図-29(b) 傾斜型護岸の h_c/h_{cd} 確率分布

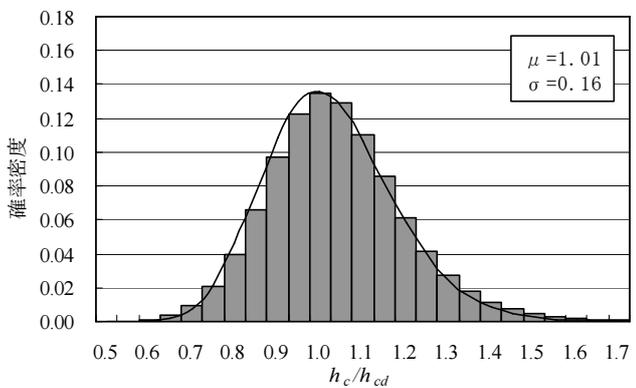


図-27(c) 許容越波流量 $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の h_c/h_{cd} の確率分布

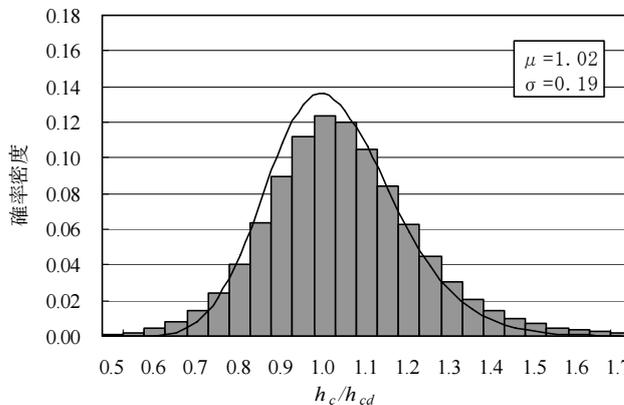


図-29(c) 緩傾斜型護岸の h_c/h_{cd} 確率分布

た. 構造形式別については, のり面勾配により, 勾配が 1:1 より急な護岸を直立型, 勾配が 1:1 より緩い護岸を傾斜型, 傾斜型の中で勾配が 1:3 より緩い護岸を緩傾斜型として分類し, 消波構造を備えた護岸については, 直立消波型, 傾斜消波型として分類した. 検討対象護岸 89 施設の構造形式の頻度分布を図-28 に示す.

得られた構造形式別の h_c/h_{cd} の確率分布を図-29 に示す. 直立型の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.02, 標準偏差は 0.15, 傾斜型の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.03, 標準偏差は 0.15, 緩傾斜型の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.02, 標準偏差は 0.19, 直立消波型の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.03, 標準偏差は 0.15, 傾斜消波型の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.03, 標準偏差は 0.14 となった. 護岸の形式の違いによる確率分布の違いも少ないことがわかる. 緩傾斜型護岸については変動係数がやや大きい, これはデータ数が 3 と少ないために, 変動係数の大きな断面の影響が強く出た結果であると考えられる.

さらに, 全護岸の h_c/h_{cd} の確率分布を平均し, 護岸全体の平均的な h_c/h_{cd} の確率分布を求めた. 全護岸の h_c/h_{cd} の確率分布を図-30 に示す. 得られた全護岸の h_c/h_{cd} の確率分布の平均値は 1.03, 標準偏差は 0.15 となった.

また, 得られた確率分布の形状は値の大きい部分の裾が広く, 対数正規分布の適合度が高いことが分かる. 図-27 および図-29, 図-30 には比較のために平均値 1.00, 標準偏差 0.15 の対数正規分布を併せて示してある.

5.3 必要水面上天端高の設定方法

前節 5.2 の検討で, 護岸の h_c/h_{cd} の確率分布は, 許容越波流量及び構造形式別の値にかかわらず平均値は 1.0, 標準偏差は 0.15 程度となり, 確率分布としては対数正規分布の適合性が高いことがわかった. このため, h_c/h_{cd} の確率分布を標準偏差 0.15 の対数正規分布として用い, 許容越波流量の超過確率と護岸の必要水面上天端高 h_c の関係を図-31 に示すように作成した. この図の横軸は, 必要水面上天端高の比で示しており, 許容越波流量の超過確率ごとに護岸の必要水面上天端高を求めることができる. これまでは設計で算定される必要水面上天端高 h_{cd} の値の大きさと余裕高の関係は論じられることは少なかったが, h_{cd} が大きいほど基本的に余裕高さも大きくする必要がありといえる.

以上のことを踏まえ, これまで慣用的に用いられることの多かった余裕高 1m を解釈することを試みる. 検討対象護岸 89 施設の設計で算定される必要水面上天端高 h_{cd} の平均値は 2.2m となった. この h_{cd} の平均値に対して 1m の余裕高を見込むと 3.2m となり $1.45 h_{cd}$ に相当する.

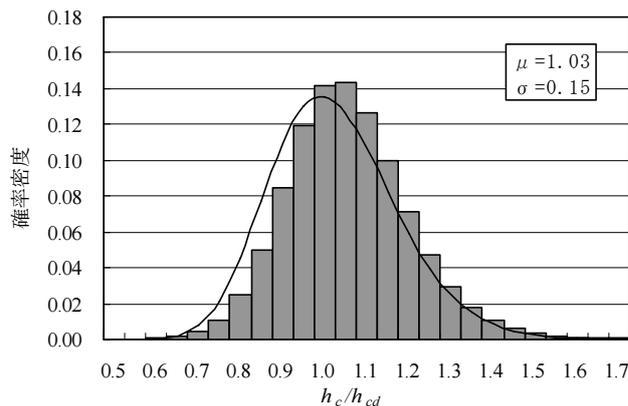


図-29(d) 直立消波型護岸の h_c/h_{cd} 確率分布

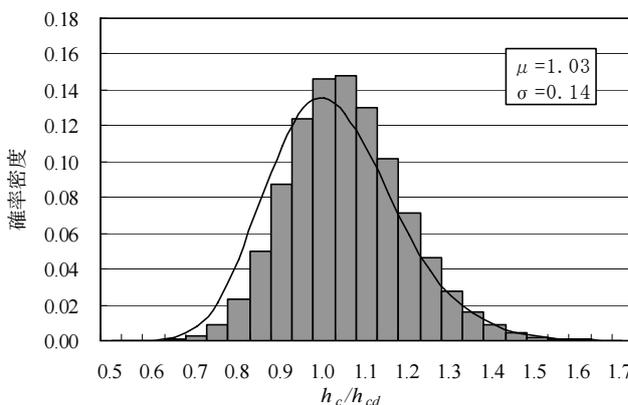


図-29(e) 傾斜消波型護岸の h_c/h_{cd} 確率分布

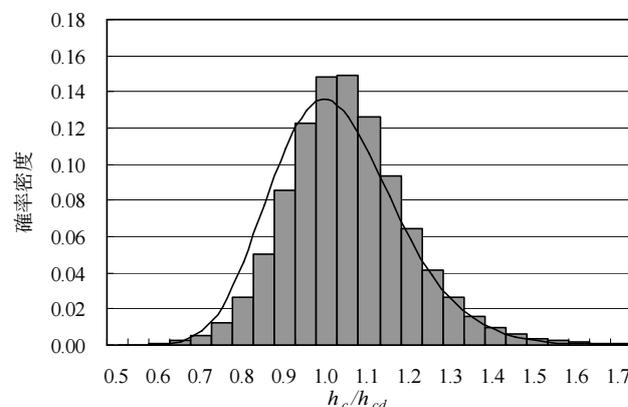


図-30 全護岸の h_c/h_{cd} 確率分布

そして, 図-31 より必要水面上天端高 $1.45 h_{cd}$ の超過確率は 0.005 となる. なお, この余裕高には後述する地盤沈下の影響などが含まれている可能性があることに注意する必要がある. このため, 例えば, 設計供用期間中の地盤沈下量が 10cm の場合, 水面上必要天端高は $1.41 h_{cd}$ となり, 天端沈下の影響を考慮しない超過確率としては 0.01 程度となる. このように, 慣用的に用いられてきた余裕高 1m は, 超過確率としては平均的に 0.005~0.01 程度に相当するものと考えられる. ただし, ここで示した

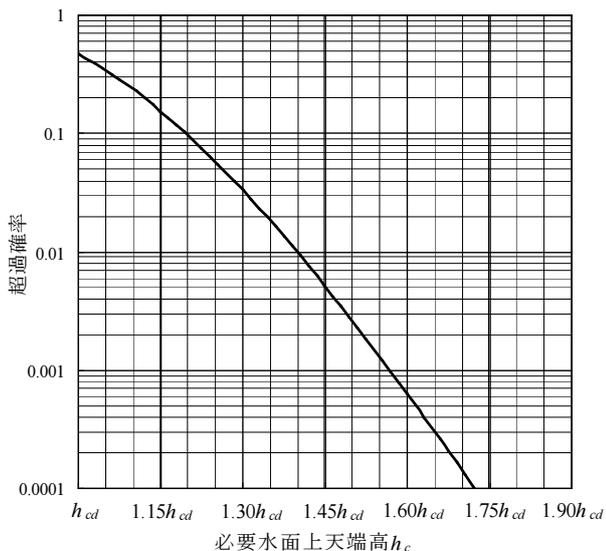


図-31 許容越波流量の超過確率と必要水面上天端高 h_c との関係

必要水面上天端高 h_{cd} の平均値は 2.2m については、必要水面上天端高 h_{cd} の頻度分布がばらついていたため、超過確率の設定の際には、十分注意する必要がある。

最後に、護岸の水面上天端高の設定フローを図-32 に示す。護岸水面上天端高を決定するにあたっては、以下の3つの事項を検討する必要がある。まず第一に、本研究で検討した設計波高による越波流量を許容越波流量以

下におさめるための必要高で、これには越波流量算定誤差を考慮する必要がある、必要高は $h_{cd}l + \Delta h_{cd}l$ となる。次に護岸建設に伴う圧密等の地盤沈下を考慮した必要高 ds である。地盤沈下は徐々に進行するものであるため、随時天端嵩上げが行える状況において、ここに余裕高を設定する必要は基本的にはないものと考えられる。最後に地震動の影響による護岸天端沈下の影響を考慮した必要高である。この場合、地震による被災後から復旧に要する期間を考慮し、波浪の再現期間は概ね数年程度とすればよいものと考えられる。

6. まとめ

本研究により得られた知見をまとめると次のとおりである。

- ①合田らによる越波流量推定図をもとに、直立護岸および直立消波護岸について、護岸の許容沈下量を算定する図表を作成した。
- ②傾斜護岸の越波に関する水理模型実験を実施し、ブシネスク方程式を用いた数値モデルに補正係数を導入して越波問題への適用性を検討した。そして、実験結果および数値計算結果により、越波流量に基づく傾斜護岸の許容沈下量算定図を作成した。
- ③護岸の保有性能を評価するため、岸壁に求められる性

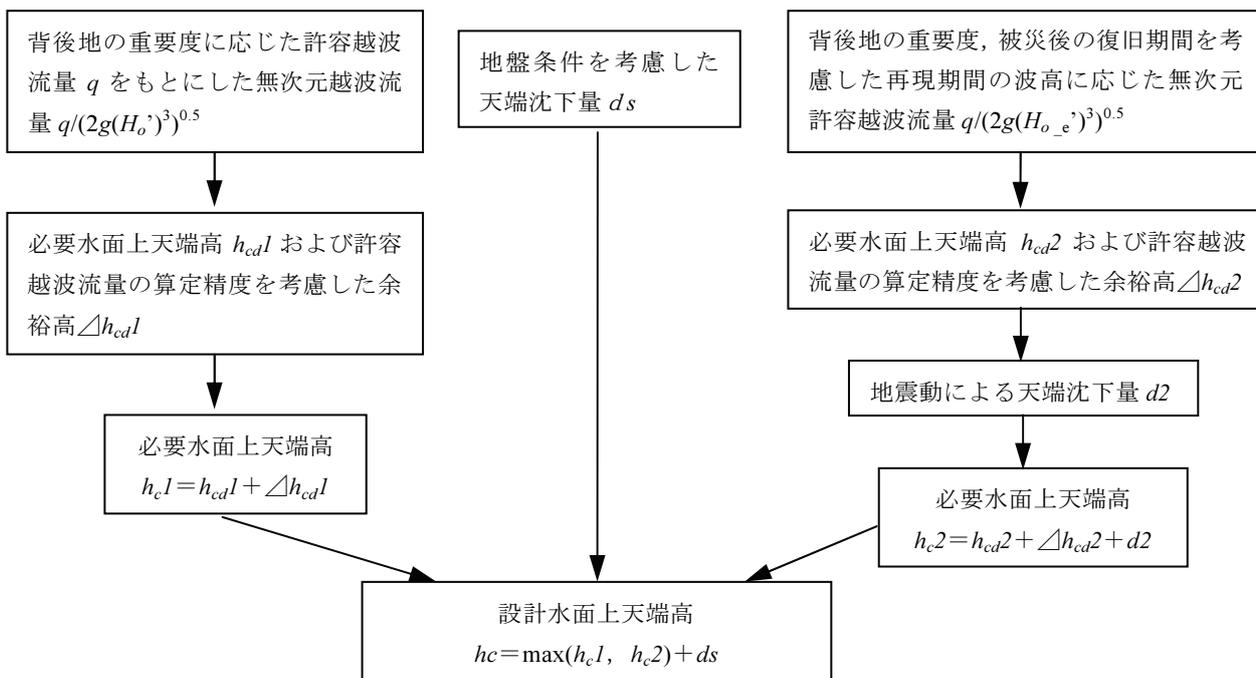


図-32 護岸の必要水面上天端高設定フロー

能との比較を行った。具体的には、重力式構造物の水平はらみ出し量と鉛直変形量の相関について検討するために地震応答解析を行い、その結果、水平はらみ出し量と鉛直変形量の間には強い相関があることが分かった。この相関関係を用いて護岸の許容沈下量を許容水平変形量に換算し、護岸の許容はらみ出し量の累積確率分布を求めた。その結果、護岸の許容はらみ出し量は岸壁のはらみ出し許容値と比較すると安全側であることが分かった。これは、現在の天端高の設定方法における余裕高の設定によるところが大きいと判断される。

④越波流量の推定値に対する真値の想定誤差範囲を考慮した護岸の必要水面上天端高の従う確率分布は、対数正規分布の適合性が高く、許容越波流量や護岸の構造形式による違いは少ない。対数正規分布の変動係数の平均値は0.15程度である。

⑤越波流量の許容値超過確率ごとに護岸の必要水面上天端高を求める方法を示した。従来の余裕高の目安1mは、超過確率としては平均的には0.005~0.01程度に相当するものと考えられる。

謝辞

本研究は、護岸の性能設計に関する一連の研究^{15),16),17)}を取りまとめたものである。各研究においては、中部地方整備局 岩田直樹氏（前港湾施設研究室研究員）、五洋建設(株)技術研究所 森屋陽一氏（前港湾施設研究室研究員）、関本恒浩氏の御協力を得ました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 海岸保全施設技術研究会編：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，2004
- 2) 合田良実，岸良安治，神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，pp.3-14，1975.
- 3) 高山知司，永井紀彦，西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，pp.151-205，1982.
- 4) 玉田崇，井上雅夫，手塚崇雄：緩傾斜護岸の越波流量算定図とその越波低減効果に関する実験的研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.641-645，2002.
- 5) 永井荘七朗，高田 彰：海岸堤防の越波に及ぼす消波堤の効果，第11回海岸工学講演会講演集，pp.279-286，1964.
- 6) 佐貫宏，藤田龍，関本恒浩，清水琢三：数値モデルによる越波流量の評価に関する研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.736-740，2001.
- 7) 藤田龍，森屋陽一，関本恒浩：数値モデルによる隅角部を有する護岸越波流量の評価法，海岸工学論文集，第48巻，pp.746-750，2001.
- 8) Madsen, P. A., O. R. Sorensen and H. A. Schaffer : Surf zone dynamics simulated by Boussinesq type model. Part 1. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coastal Eng., Vol.32, pp.255-287, 1997.
- 9) Madsen, P. A., R. Murray and O. R. Sorensen : A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol.15, pp.371-388, 1991.
- 10) 佐藤慎司，M. Kabiling : Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算，海岸工学論文集，第40巻，pp.386-390，1993.
- 11) 柴田鋼三，上田寛，大堀晃一：海岸堤防・護岸構造収攬，港湾技研資料，No.448，1983.
- 12) 長尾 毅，森屋陽一：港湾構造物の目標安全性水準に関する研究，構造工学論文集，Vol.50A, pp.187-197, 2004.
- 13) Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, Tomohiro Kameoka : *Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility*, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 14) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(社)日本港湾協会，1999
- 15) 長尾毅，藤村公宜，森屋陽一：護岸の保有性能に関する研究，海洋開発論文集，第20巻，pp.101-106, 2004.
- 16) 関本恒浩，森屋陽一，長尾毅：越波量に基づく傾斜護岸の許容沈下量算定手法，海洋開発論文集，第20巻，pp.113-118，2004.
- 17) 長尾毅，藤村公宜，森屋陽一：越波流量の算定精度を考慮した護岸天端高の設定方法に関する研究，海洋開発論文集，第21巻，pp.773-778，2005.