

1. はじめに

現在、港湾および海岸構造物の設計法の性能設計化に関する検討が各方面で進められている。性能設計の設計体系においては、構造物に要求される性能を明確に規定する必要がある。本研究で対象とする護岸については、背後地を越波から防護することを主たる目的としているため、その要求性能としては越波流量が許容値以下であることが求められる。

ここで、越波流量の算定においては誤差が考えられることや、護岸建設後の天端高が地震動作用などの原因によって沈下することなどが想定されるため、現行設計法においては、設計潮位で不規則波に対する越波量が許容量以下となる高さに余裕高（1m程度とすることが多い）を見込むことで越波に対する安全性を確保している。

しかしながら、この余裕高の設定方法は経験的なものであり、合理的な設定方法は整備されていないのが現状である。そこで、本研究においては、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。

2. 直立護岸の許容沈下量算定図

2.1 越波流量推定図

護岸の天端高の設定においては、護岸が、背後地を越波から防護する目的より、越波流量が許容越波流量以下となる天端高としなければならない。

越波流量については、のり先水深、海底勾配、のり面勾配、天端高、断面形状、消波工の有無を考慮して、既往資料又は模型実験等により算定することとされている¹⁾。ここで、模型実験を実施する場合以外に、護岸の設計段階で越波流量算定に用いられている評価手法について簡潔にまとめてみる。

まず、直立護岸及び直立消波護岸に対しては、合田ら²⁾が、不規則波による模型実験や越波計算により海底勾配が 1/30、1/10 の場合及び波形勾配が 0.012、0.017、0.036 の場合についての越波流量推定図を提示している。ここに、海底勾配が 1/30、波形勾配が 0.012 の場合の越波流量推定図（図-1）について参考を示す。 H_o' は換算沖波波高、 h はのり先水深、 h_c は必要水面上天端高、 g は重力加速度、 q は越波流量であり、相対天端高 h_c/H_o' をパラメータとし、横軸をのり先水深波高比 h/H_o' 、縦軸を無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$ とした図である。

傾斜護岸については高山ら³⁾は、不規則波による越波

流量に対して、同一の越波流量となる複雑な断面形状の護岸天端高と直立護岸の天端高の比を換算天端高係数 $\hat{\beta}$ と定義し、のり面勾配 1:1/4~1:1/2 の傾斜護岸については $\hat{\beta}=1.2\pm 0.13$ 、階段護岸については $\hat{\beta}=1.1\pm 0.12$ と与えている。さらに、護岸勾配 1:3、1:5、1:7 の緩傾斜護岸については、玉田ら⁴⁾により合田らと同様な指標による越波流量推定図が作成されている。

また、許容越波流量については、護岸の背後状況に応じて設定する必要がある。永井ら⁵⁾は護岸の背後地の重要度を考慮した規則波による実験結果から表-1 のような許容越波流量を提示しており、本研究ではこの許容越波流量を用いて検討を行う。

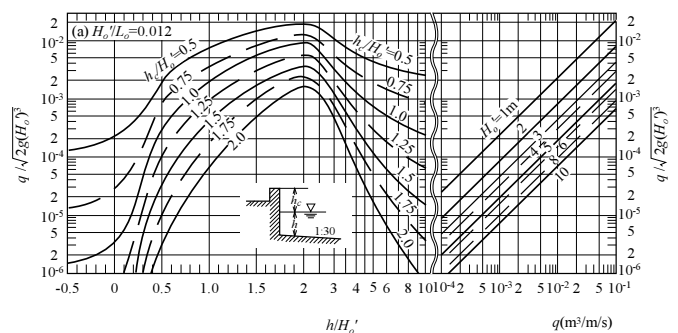


図-1 直立護岸の越波流量推定図²⁾ (海底勾配 1/30 波形勾配 0.012)

表-1 背後地の重要度から見た許容越波流量⁵⁾

(単位: $m^3/s \cdot m$)

背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の侵入より重大な被害が予想される地区	0.01 程度
その他の重要な地区	0.02 程度
その他の区域	0.02~0.06

2.2 直立護岸の許容沈下量算定図

合田ら²⁾による図-1の越波流量推定図は、相対天端高 h_c/H_o' をパラメータとして横軸にのり先水深波高比 h/H_o' 、縦軸に無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$ の関係の図である。

しかしながら、護岸の性能は、必要水面上天端高 h_c で評価するため、のり先水深波高 h は変化せず、必要水面上天端高 h_c のみ変化すると考えると、横軸に相対天端高 h_c/H_o' を取った図の方が便利である。そこで、本研究では、のり先水深波高比 h/H_o' をパラメータとし、横軸に相対天端高 h_c/H_o' 、縦軸に無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$ をとった許容沈下量算定図を作成した。作成した直立護岸の許容沈下量算定図については図-2、直立消波護岸については図-3に示す。この図-2、図-3を用いることにより、許容

越波流量をもとに許容される相対天端高が得られる。そして、その許容される相対天端高と既存護岸の実際の相対天端高の差から護岸の許容沈下量 Δh_c を算定することができる。

これらの許容沈下量算定図を用いることにより、許容沈下量 Δh_c および必要水面上天端高 h_c を簡便に算出することができる。算出方法について例を挙げて示す。いま、許容越波流量 $q=0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、沖波換算波高 $H_o'=1.2\text{m}$ 、のり先水深波高比 $h/H_o'=5.1$ 、海底勾配 $1/8$ 、波形勾配 0.029 の条件の直立護岸について考える。この護岸については、直立護岸、海底勾配 $1/10$ 、波形勾配が 0.036 の許容沈下量算定図(図-2(f))を適用することができ、算出に際しては、図-4に示すように許容越波流量 q 及び沖波換算

波高 H_o' より無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}$ を算出する。検討対象護岸においては $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}=1.7\times 10^{-3}$ となる。次に、縦軸が無次元越波流量 $q/(2g(H_o')^3)^{0.5}=1.7\times 10^{-3}$ の状態でのり先水深波高比 $h/H_o'=5.1$ の位置を探す。該当位置における横軸の値を読むことにより、相対天端高 $h_c/H_o'=0.7$ の値が得られる。この値をもとにして、必要水面上天端高 h_c を算出することができる。この護岸の必要水面上天端高 h_c は 0.84m となる。また、既存護岸の相対天端高 h_c/H_o' が 1.0 であった場合、その差 $\Delta h_c/H_o'=1.0-0.7=0.3$ から既存護岸の許容沈下量 Δh_c は 0.36m と算出することができる。

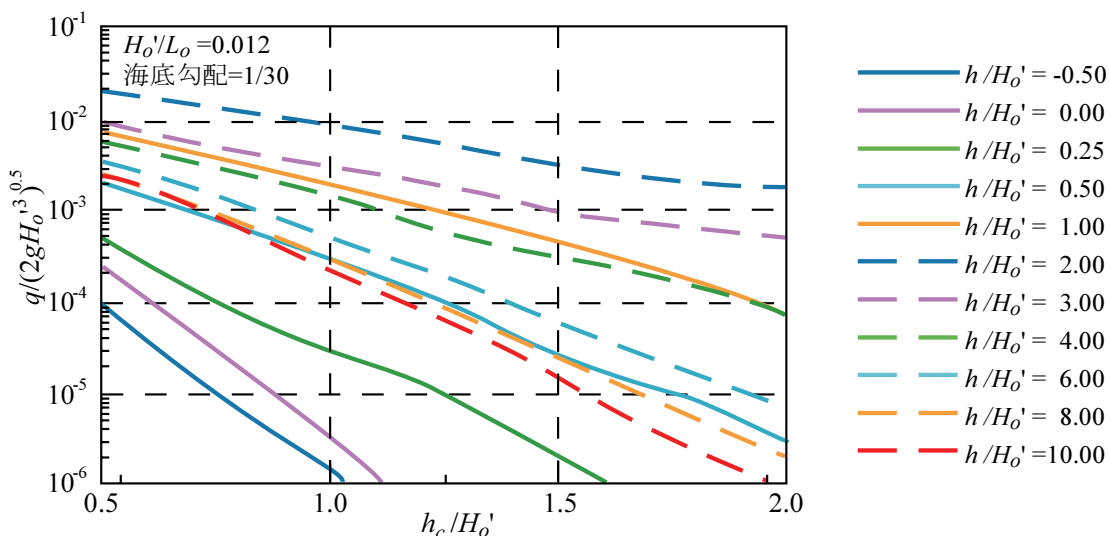


図-2(a) 許容沈下量算定図(直立護岸, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.012)

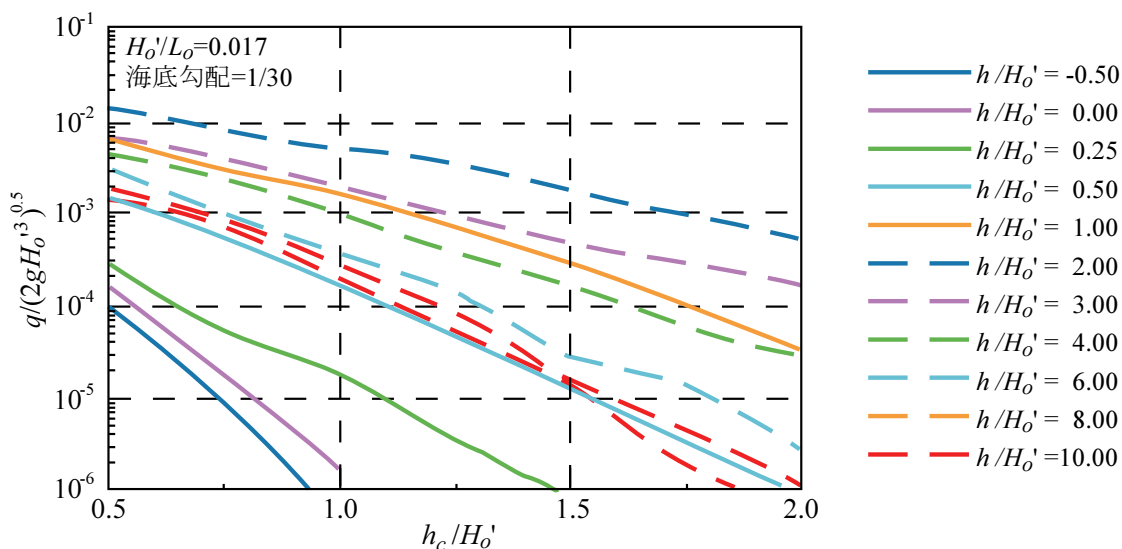


図-2(b) 許容沈下量算定図(直立護岸, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.017)

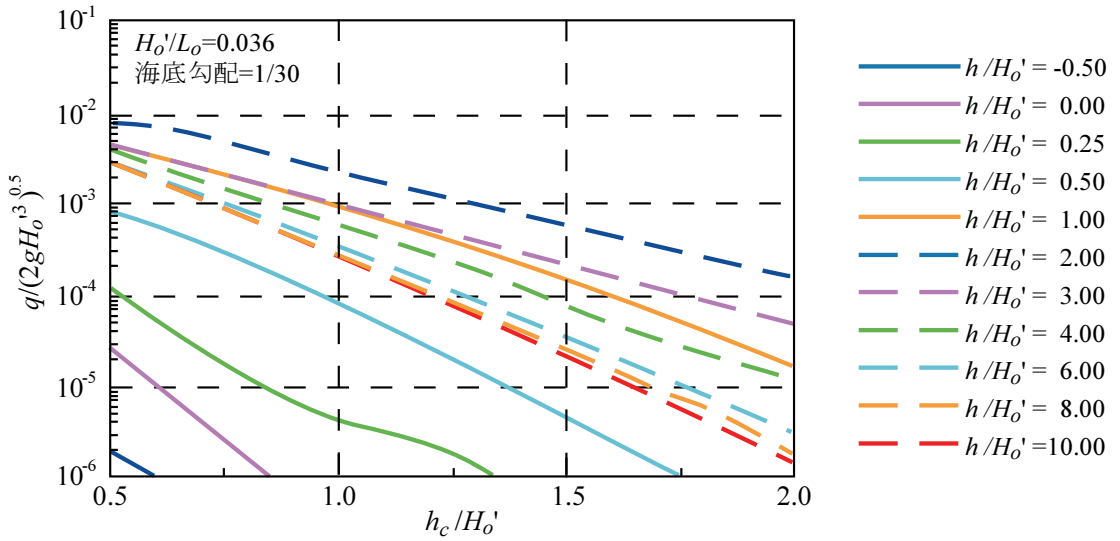


図-2(c) 許容沈下量算定図 (直立護岸, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.036)

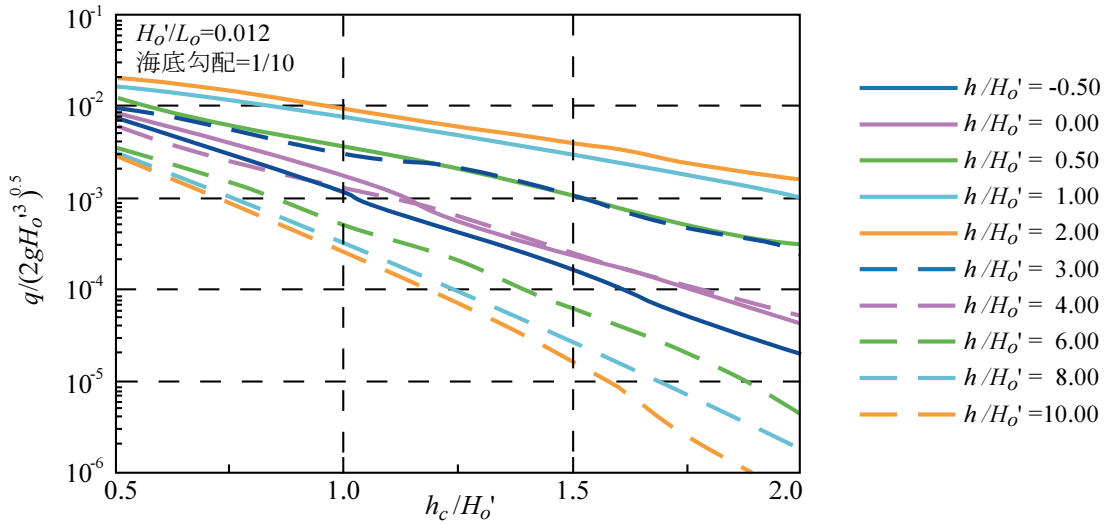


図-2(d) 許容沈下量算定図 (直立護岸, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.012)

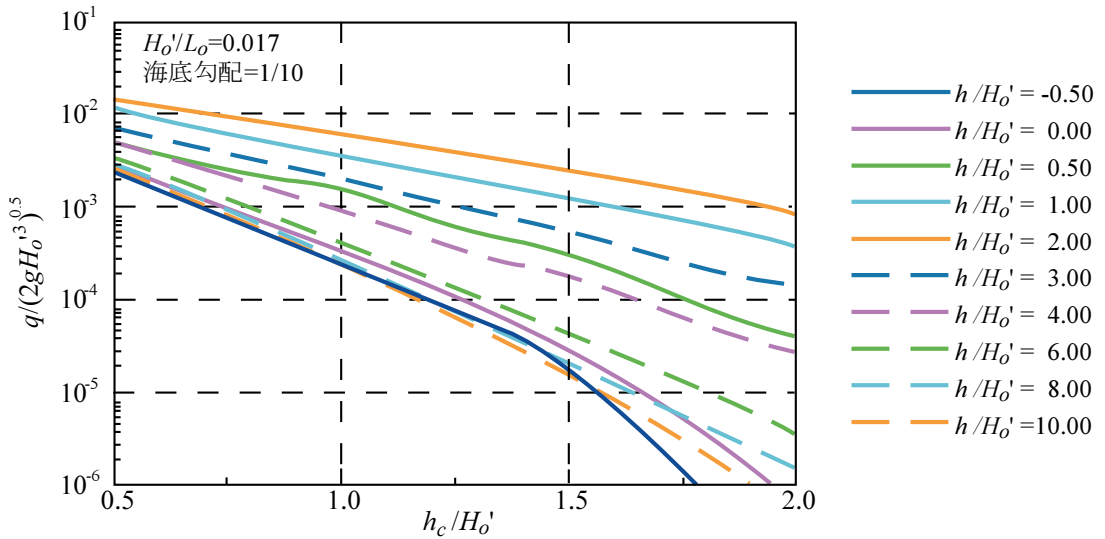


図-2(e) 許容沈下量算定図 (直立護岸, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.017)

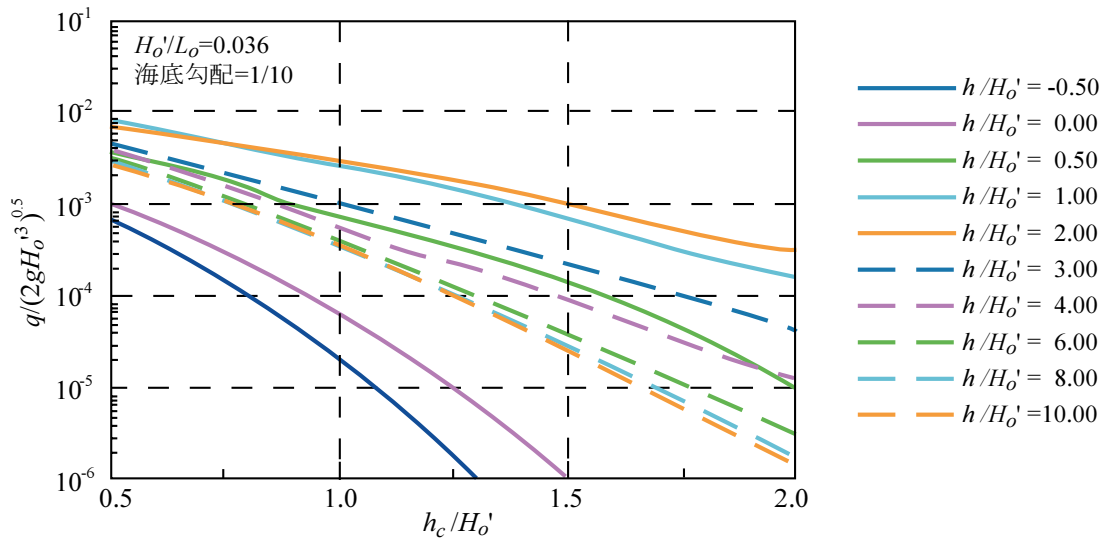


図-2(f) 許容沈下量算定図 (直立護岸, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.036)

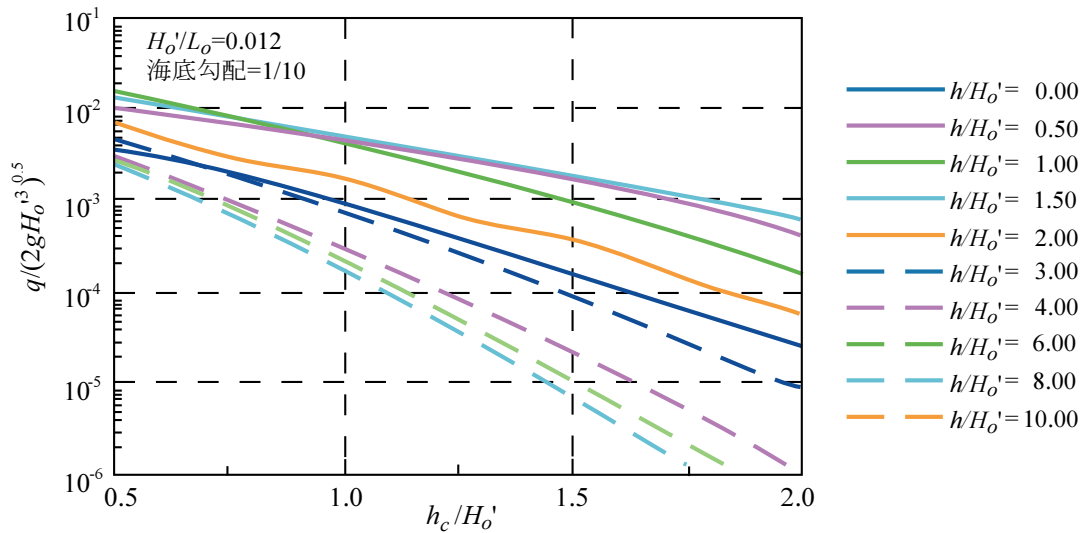


図-3(a) 許容沈下量算定図 (直立消波護岸, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.012)

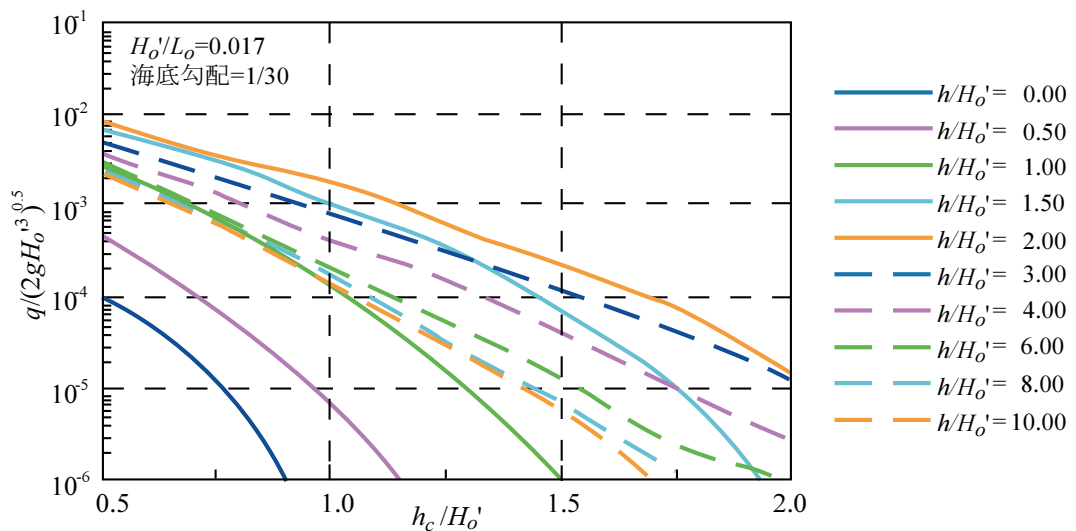


図-3(b) 許容沈下量算定図 (直立消波護岸, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.017)

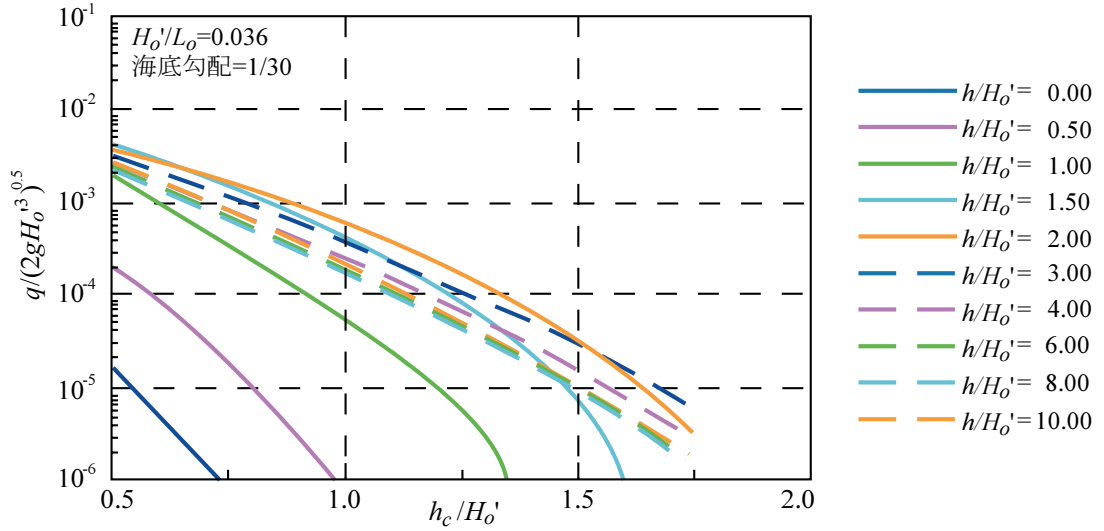


図-3(c) 許容沈下量算定図 (直立消波護岸, 海底勾配 1/30, 波形勾配 0.036)

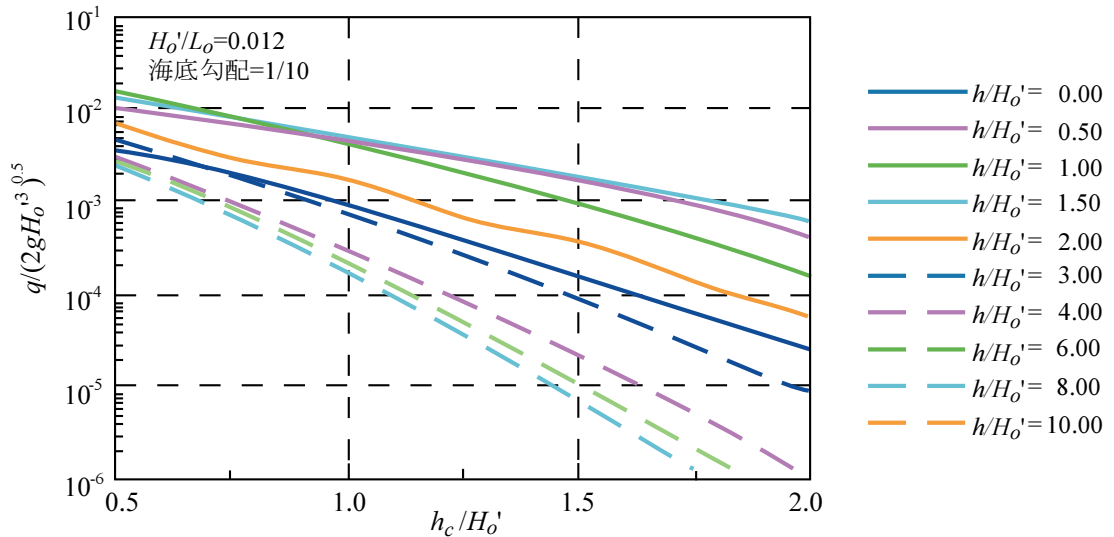


図-3(d) 許容沈下量算定図 (直立消波護岸, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.012)

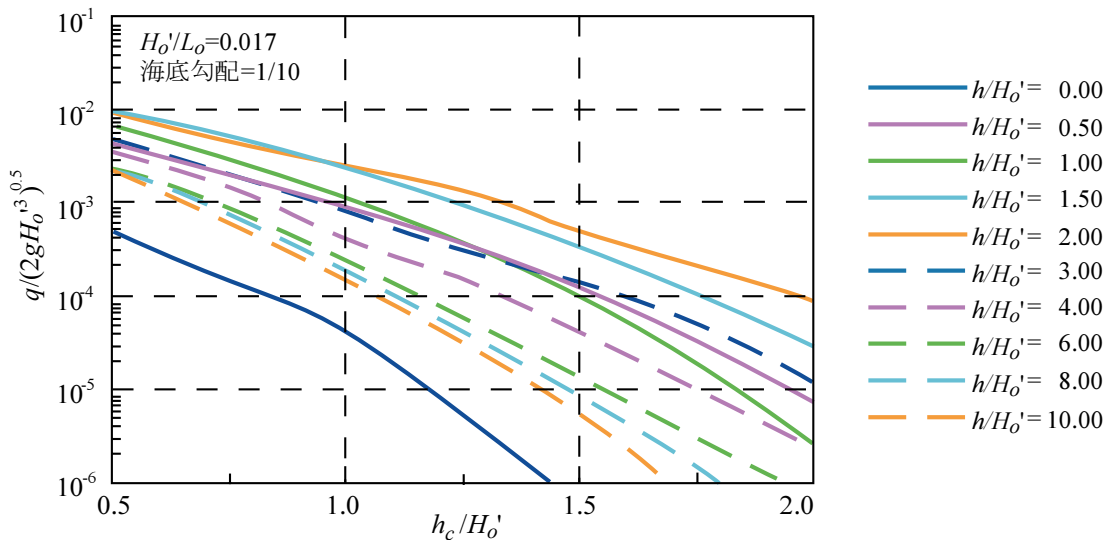


図-3(e) 許容沈下量算定図 (直立消波護岸, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.017)

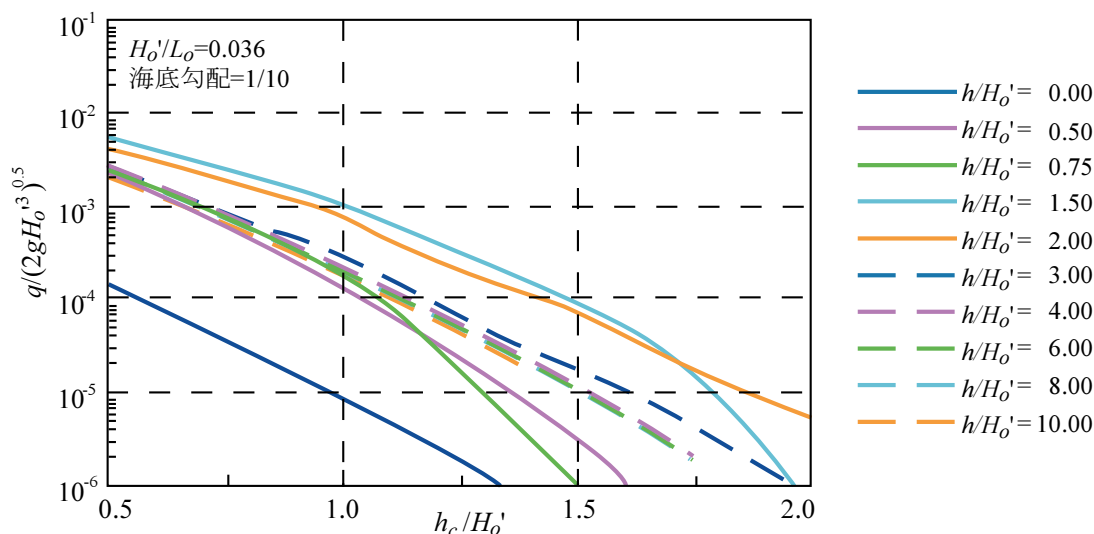


図-3(f) 許容沈下量算定図 (直立消波護岸, 海底勾配 1/10, 波形勾配 0.036)

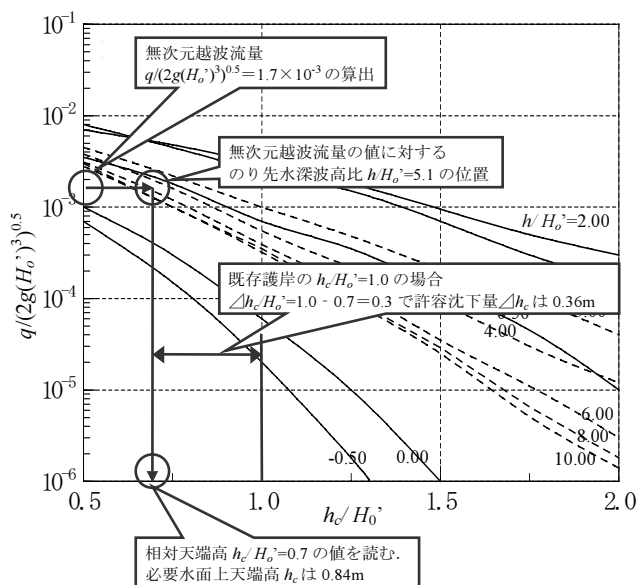


図-4 許容沈下量算定図²⁾をもとにした Δh_c および h_c 算出方法 (海底勾配 1/10, 波形勾配 0.036)

3. 傾斜護岸の許容沈下量算定図

3.1 傾斜護岸の越波流量算定について

2.1 で述べたように, ある程度の護岸条件に対しては越波流量推定図が提案されており, 設計者は推定図を補間するなどして越波流量を計算することができる. また, 波の不規則性に着目した短時間越波流量, 波の多方向性や入射角が越波に及ぼす影響に関する知見が得られており, 設計者はそれらを考慮して護岸の設計を実施することも可能となっている. しかしながら, これらは限られ

た条件に対するものであり, 護岸構造として比較的多いおり面勾配 1:1/2~1:3 の護岸については設計に用いることが可能な算定図は今のところ提案されていない. また, 数値モデルによる護岸の越波流量の計算手法もいくつか提案されているものの, 十分に確立されるには至っていないのが現状である. したがって, 護岸の性能設計を行うためにはのり面勾配 1:1/2~1:3 の傾斜護岸に対して設計に供することが可能な越波流量推定図および許容沈下量算定図を作成する必要がある. よって, 以下において, のり面勾配 1:1/2~1:3 の傾斜護岸の越波流量推定図および許容沈下量算定図を作成するための検討を行った.

3.2 水理実験手法

汎用性のある越波流量算定図を作成する上で必要となる検証用のデータを取得するため, 護岸の越波流量に関する断面水理模型実験を実施した.

実験に使用する水路仕様について, 図-5, 表-2 に示す. 実験に使用する水路は, 長さ 50m, 幅 0.6m, 高さ 1.2m の不規則造波水路で, 水路内に反射波吸収装置を備えたピストン型の造波装置を設置しており, 水路内での多重反射の影響を最小限にとどめた実験が可能である. また, 造波方式は 2 ウェイモードで, 短周期から長周期まで広い範囲で精度良く造波することが可能である. 堤体模型はアクリル板で作成し, 水槽側面との隙間をシリコンで止水した. 越波流量は, 堤体背後に越波升を取り付け, ロードセルによって越波水の重量を測定することにより評価した. また, 容量式波高計を用いて, 模型前面位置を含め実験水槽内の数カ所について水位を測定した.

実験においては、不規則波を入射させ、データのサンプリング周波数は20Hzとし、各波に対して300波程度(10分間)の造波を行った。波高検定に際しては、一様水深部に設けた波高計で入射波分離を行い、換算沖波波高および周期が目標とする値になっていることを確認した。

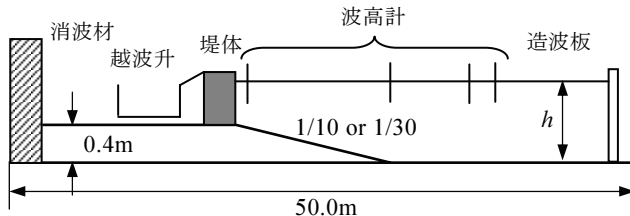


図-5 不規則波造波水路

表-2 不規則波造波水路仕様

水槽諸元	L50m×W0.6m×H1.2m
造波様式	2ウェイモード造波方式 (ピストン型)
発生波特性	発生最大波高：50 cm 発生最大有義波高：20 cm 発生波周期：0.5～50 s
発生流特性	最大流量：120 ℓ /min 単一方向流 (双方向) 往復流

3.3 水理実験条件

実験スケール1/25程度を想定して模型諸元を決定した。護岸形状は図-6に示す標準形状を基本として、のり面勾配、海底勾配を変えた検討を行うとともに、パラペットの曲率の有無(図-7)、消波工の有無(図-8)について検討した。

表-3 実験条件

のり面勾配	slope	1:1/2, 1:1, 1:3
相対天端高	h_c/H_o'	無限大(非越波), 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
のり先水深波高比	h/H_o'	0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0
波形勾配	H_o'/L_o	0.019, 0.038
海底勾配	i	1/10, 1/30

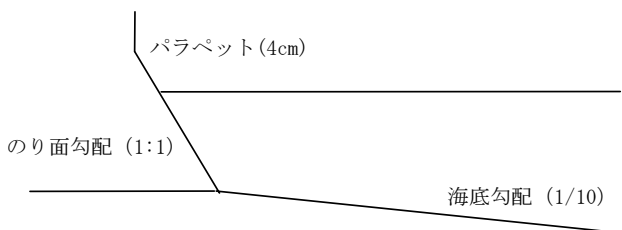


図-6 模型の標準形状 (実験室スケール)

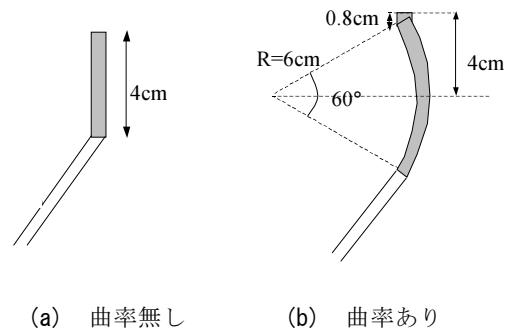


図-7 パラペットの形状 (実験室スケール)

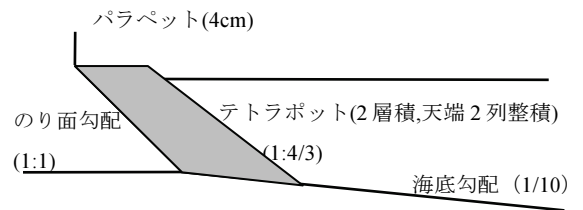


図-8 消波工の形状 (実験室スケール)

実験条件は表-3、表-4に示す。ただし、全ての条件の組み合わせについて実験を行うことは、ケース数が膨大となるため、のり面勾配は1:1、相対天端高 h_c/H_o' は1.0、のり先水深波高比 h/H_o' は1.0を基本条件とし、基本条件を固定して他のパラメータを変えた条件の実験を行った。また、のり面勾配1:1/2, 1:1の護岸に対しては海底勾配1/10で検討するが、のり面勾配1:3の護岸は主に緩い海底勾配上に建設されることが多いと思われることから海底勾配1/30で検討を行った。主な実験Caseの実験状況を写真-1に示す。なお、写真-1におけるCase番号は表-4に示した実験Case番号に対応している。



写真-1 (a) 直立壁越波実験 (Case4)

表-4 実験 Case 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	備考
1				15.0	非越波		直立護岸	1/10	-	1.00	無	無	直立護岸に対する数値計算の適用性の検討
2	15.0	1.60	0.038	15.0	15.0	30.0			1.00	1.00	無	無	
3				15.0	7.5	22.5			0.50	1.00	無	無	
4	10.0	1.31	0.038	10.0	10	20			1.00	1.00	無	無	
5	25.0	2.07	0.038	25.0	25	50			1.00	1.00	無	無	
6	15.0	1.6	0.038	7.5	非越波		1:1	1/10	-	0.50	無	無	遡上高さの検討
7	15.0	1.6	0.038	15.0	非越波				-	1.00	無	無	
8					30.0	30.0			2.00	0.00	無	無	設計波条件の違いによる検討
9	15.0	1.6	0.038	0.0	22.5	22.5			1.50	0.00	無	無	
10					15.0	15.0			1.00	0.00	無	無	
11					22.5	30.0			1.50	0.50	無	無	
12	15.0	1.6	0.038	7.5	15.0	22.5			1.00	0.50	無	無	
13					7.5	15.0			0.50	0.50	無	無	
14					22.5	37.5			1.50	1.00	無	無	
15	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0			1.00	1.00	無	無	
16					7.5	22.5			0.50	1.00	無	無	
17					22.5	52.5			1.50	2.00	無	無	
18	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0			1.00	2.00	無	無	
19					7.5	37.5			0.50	2.00	無	無	
20					22.5	67.5			1.50	3.00	無	無	
21	15.0	1.6	0.038	45.0	15.0	60.0			1.00	3.00	無	無	
22					7.5	52.5			0.50	3.00	無	無	
23					11.25	18.75			1.50	1.00	無	無	
24	7.5	1.6	0.019	7.5	7.50	15.0			1.00	1.00	無	無	
25					3.75	11.25			0.50	1.00	無	無	
26	7.5	1.6	0.019	0.0	7.5	7.50	1.00	0.00	無	無			
27					3.75	7.5	1.00	0.50	無	無			
28	7.5	1.6	0.019	15.0	7.5	22.5	1.00	2.00	無	無			
29					22.5	30.0	1.00	3.00	無	無			
30					22.5	37.5	1.50	1.00	有	無			
31	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0	1.00	1.00	有	無			
32					7.5	22.5	0.50	1.00	有	無			
33					7.5	15.0	1.00	0.50	有	無			
34	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	有	無			
35					45.0	60.0	1.00	3.00	有	無			
36					22.5	37.5	1.50	1.00	無	有			
37	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0	1.00	1.00	無	有			
38					7.5	22.5	0.50	1.00	無	有			
39					7.5	15.0	1.00	0.50	無	有			
40	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	有			
41					45.0	60.0	1.00	3.00	無	有			
42					22.5	37.5	1.50	1.00	無	無			
43	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0	1.00	1.00	無	無			
44					7.5	22.5	0.50	1.00	無	無			
45					7.5	15.0	1.00	0.50	無	無			
46	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	無			
47					45.0	60.0	1.00	3.00	無	無			
48					22.5	37.5	1.50	1.00	無	無			
49	15.0	1.6	0.038	15.0	15.0	30.0	1.00	1.00	無	無			
50					7.5	22.5	0.50	1.00	無	無			
51					7.5	15.0	1.00	0.50	無	無			
52	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	無			
53					45.0	60.0	1.00	3.00	無	無			
54	15.0	1.6	0.038	7.5	非越波		1:1	1/30	-	0.50	無	無	遡上高さの検討
55	15.0	1.6	0.038	15.0	非越波				-	1.00	無	無	
56					22.50	37.5			1.50	1.00	無	無	
57	15.0	1.6	0.038	15.0	15.00	30.0			1.00	1.00	無	無	
58					7.50	22.5			0.50	1.00	無	無	
59					7.5	15.0	1.00	0.50	無	無			
60	15.0	1.6	0.038	30.0	15.0	45.0	1.00	2.00	無	無			
61					45.0	60.0	1.00	3.00	無	無			



写真-1(b) 傾斜壁 (1:1) 越波実験 (Case15)



写真-1(f) 傾斜壁 (1:3) 越波実験 (Case58)



写真-1(c) 傾斜壁 (1:1) 越波実験 (Case31)

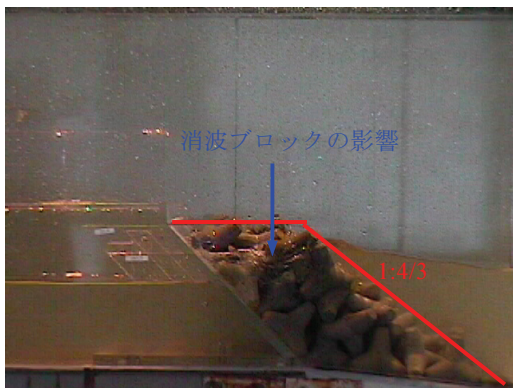


写真-1(d) 傾斜壁 (1:1) 越波実験 (Case34)



写真-1(e) 傾斜壁 (1:1/2) 越波実験 (Case43)

3.4 水理実験結果

水理実験結果を表-4に示す。表中の右から二番目には平均越波流量、一番目には平均越波流量を $(2g(H_o)')^{0.5}$ で無次元化した無次元越波流量を示す。

まず、傾斜護岸の実験を行う前に、予備実験として模型縮尺を1/15, 1/25および1/37.5とした直立護岸の越波流量測定実験を行った。図-9に予備実験結果を合田ら²⁾による越波流量と比較した結果を示す。図中の破線は、合田ら²⁾の越波流量推定図(波形勾配0.036, 海底勾配1/10)の $h_c/H_o'=0.5$, 実線は $h_c/H_o'=1.0$ を読み取ったものである。ここで、無次元越波流量が 10^{-2} のオーダーの場合、合田ら²⁾により提案されている越波流量の想定誤差は0.7~1.5倍であり、 10^{-3} のオーダーの場合、想定誤差は0.4~2倍である。予備実験結果によると、合田らによる越波流量と実験結果の誤差は0.7~1.0倍程度であり、今回の実験は十分な精度があり、また、模型縮尺の影響はほとんどないと考えられる。

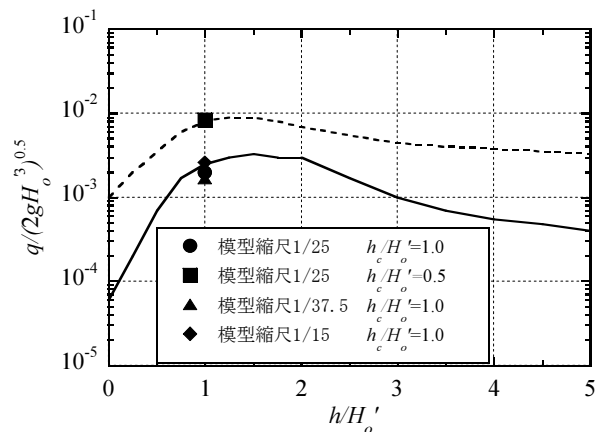


図-9 予備実験結果 (越波流量測定実験の精度および模型縮尺の影響, $H_o'/L_o=0.038$, 海底勾配 1/10)