

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

A STUDY ON THE SETTING OF THE CROWN HEIGHT FOR REVETMENTS CONSIDERING THE ESTIMATION ACCURACY OF WAVE OVERTOPPING QUANTITY

長尾 毅¹・藤村公宜²・森屋陽一³

Takashi NAGAO, Masaki FIJIMURA and Yoichi MORIYA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

²国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

³正会員 工博 五洋建設(株)技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡塩原市四区町 1534-1)

The crown height of revetment is determined as the sum of freeboard and necessary height from the viewpoint of allowable wave overtopping quantity. However, there is no rational method for the determination of freeboard thus far and therefore the freeboard has been determined empirically. This paper presents the method of setting the crown height of revetment considering the estimation accuracy of wave overtopping quantity. Schematic chart for evaluating the crown height in accordance with the probability of exceedence of wave overtopping quantity is presented.

Key Words : revetment, allowable wave overtopping quantity, crown height

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。このため, 長尾ら¹⁾は, 護岸の許容越波流量をもとに許容沈下量の算定を行った結果, 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を示した。これは, 余裕高さの設定方法がまちまちであることが大きな原因と考えられる。このため, 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した。

検討においては, 全国に建設されている護岸断面の条件を収集し, 堤脚水深, 海底勾配, のり面勾配,

水面上天端高, 断面形状, 消波工の有無などの条件を整理した。次に, 直立護岸および直立消波護岸の越波流量については, 合田ら²⁾の越波流量推定図をもとに, また, その他の構造については関本ら³⁾の許容沈下量算定図をもとにして, 各護岸の許容越波流量をもとに護岸の必要水面上天端高 hc (設計潮位からの高さ) の算定を行った。ここで許容越波流量については, 背後地の施設の重要度を考慮した永井ら⁴⁾の提示値をもとにして設定した。

さらに, 得られた護岸の必要水面上天端高 hc について, 越波流量の推定値に関する誤差を考慮するため, 合田ら²⁾による越波流量の推定値に対する真値の想定誤差範囲をもとに, 正規分布を仮定して標準偏差を設定し, 確率分布を乗じることによって護岸の必要水面上天端高 hc の確率分布を護岸毎に算出した。

次に, 各護岸の hc の確率分布を, 設計で算定される必要水面上天端高 (hcd と呼ぶ) で正規化することにより, 各護岸の hc/hcd の確率分布を算出した。そして, 護岸背後地の重要度より設定した許容越波流量別および護岸の構造形式別に整理を行い, 許容越波流量別の hc/hcd の確率分布および護岸の構造形式別の hc/hcd の確率分布を求めた。

最終的に得られた確率分布から, 越波流量の許容値超過確率 (許容越波流量を満足できない確率) と護岸の必要水面上天端高 hc の関係を示し, 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。

2. 検討方法

(1) 護岸の必要水面上天端高算定方法

検討断面は、現在全国に建設されている護岸について柴田ら⁵⁾の海岸堤防・護岸構造集覧より89施設を収集し、堤脚水深、海底勾配、のり面勾配、水面上天端高、断面形状、消波工の有無などの条件の整理を行った。

許容越波流量は、護岸の背後状況に応じて、永井ら⁴⁾による表-1の許容越波流量を用いて、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 $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ と設定した。検討対象護岸89施設の許容越波流量の頻度分布を図-1に示す。設定した許容越波流量は $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ および $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の施設が多いことがわかる。

表-1 背後地の重要度から見た許容越波流量⁴⁾
(単位： $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$)

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

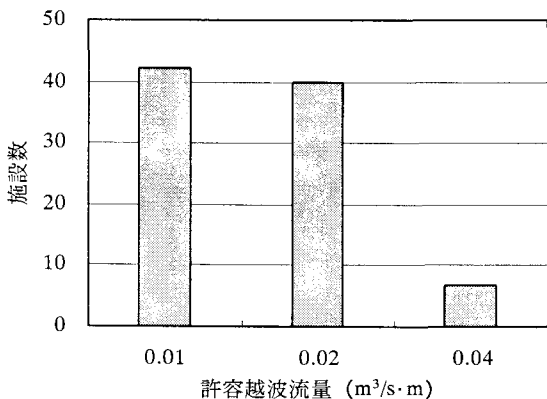


図-1 許容越波流量の頻度分布図

護岸の必要水面上天端高 hc は、合田ら²⁾の越波流量推定図を用いて越波流量を推定し、越波流量が許容越波流量を満足させる天端高としなければならない。合田ら²⁾による越波流量推定図は、のり先水深波高比 h/H_0' に対する無次元越波流量の関係である。この越波流量推定図をもとに、長尾ら¹⁾は、相対天端高 hc/H_0' に対する無次元越波流量の関係を示した許容沈下量算定図を作成している。この許容沈下量算定図を用いることにより、必要水面上天端高 hc を簡便に算出することができる。

ここで、必要水面上天端高 hc 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 $H_0'=1.2\text{m}$ 、のり先水深波高比 $h/H_0'=5.1$ 、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。この護岸では、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)を適用することができる。

必要水面上天端高さの設定にあたっては、まず許容越波流量 q 及び沖波換算波高 H_0' より無次元越波流量を算出する。検討対象護岸においては $q/(2g(H_0')^3)^{0.5}=1.7\times 10^{-3}$ となる。次に、図-2の許容沈下量算定図より、鉛直軸が無次元越波流量 $q/(2g(H_0')^3)^{0.5}=1.7\times 10^{-3}$ の状態で、のり先水深波高比 $h/H_0'=5.1$ の位置を探す。該当位置における水平軸の値を読むことにより、相対天端高 $hc/H_0'=0.7$ の値が得られる。この値をもとにして、必要水面上天端高 hc を算出することができる。この護岸の必要水面上天端高 hc は 0.84m となる。

このように、直立護岸及び直立消波護岸については、合田ら²⁾の越波流量推定図から長尾ら¹⁾が作成した許容沈下量算定図より必要水面上天端高 hc を算出することができる。また、その他の構造についても、関本ら³⁾が提示している護岸勾配 1:0.5~1:3 の傾斜護岸及び傾斜消波護岸と波返工がある護岸の許容沈下量算定図を適用することにより、必要水面上天端高 hc を算出することができる。

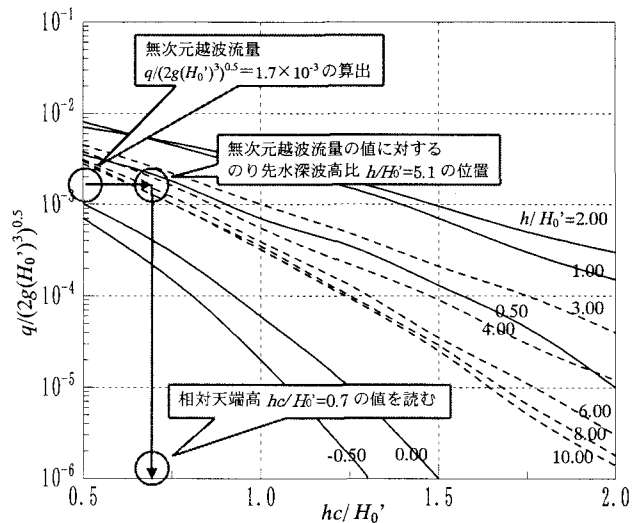


図-2 直立護岸の許容沈下量算定図¹⁾をもとにした必要水面上天端高の算出方法
(海底勾配 1/10、波形勾配 0.036)

(2) 必要水面上天端高の確率分布算定方法

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-2)。越波流量の推定値のばらつきが必要天端高に及ぼす影響を評価するため、表-2に示された真値の上下限値を参考に、上下限値を上回るかまたは下回る確率が非常に小さい正規分布を仮定して真値と算出値の比の値に対する標準偏差を設定する(表-3)。ここで、比の平均値は 1.0 とする。

表-2 越波流量の推定値に対する真値の想定²⁾

$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	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-3 越波流量の推定値に対する推定精度の標準偏差¹⁾

$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	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

必要水面上天端高 hc の確率分布の算定に当たり、まず表-3 で設定した越波流量の推定値に対する推定精度の標準偏差をもとに、各護岸について無次元越波流量 $q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$ の $\mu - 2\sigma$, $\mu - \sigma$, μ , $\mu + \sigma$, $\mu + 2\sigma$ の5段階の値を求めた。ここに、 μ は平均値、 σ は標準偏差である。次に、算出した5段階の無次元越波流量に対応する必要水面上天端高 hc 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て、必要水面上天端高 hc 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。

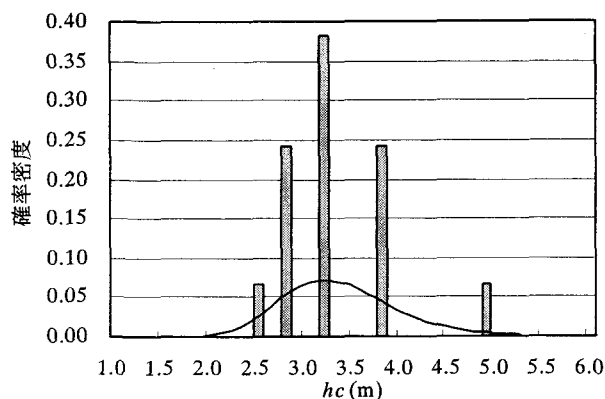
なお、必要水面上天端高 hc の確率分布を算出する上で、5段階評価の妥当性を確認した。このために上記5段階評価と、 $\mu - 2.5\sigma$ から $\mu + 2.5\sigma$ の間を 0.1σ 刻みにした51段階について、必要水面上天端高 hc の頻度分布を求め確率分布を算出することにより両者を比較した。検討は、ばらつきの大きな3断面を抽出した。比較結果を表-4 に示す。また、護岸①の5段階及び51段階の必要水面上天端高 hc の頻度分布および確率分布について図-3 に示す。両者はほぼ一致しており、確率分布の算定においては5段階の評価で問題ないことがわかる。

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 hc は、その平均値が $0.5 \sim 6.5\text{m}$ の広い範囲にばらついていることがわかった。 hc の平均値の頻度分布を図-4 に示す。

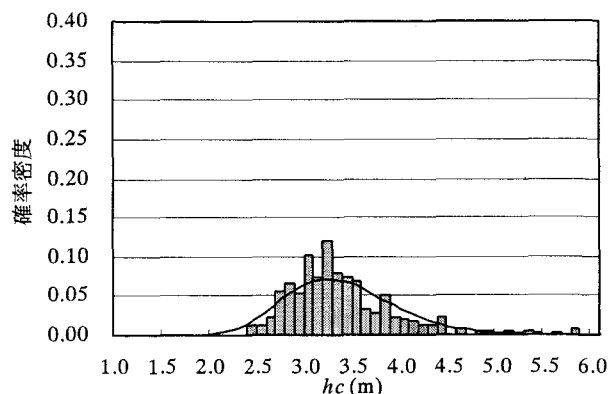
また、検討対象護岸89施設の必要水面上天端高 hc の確率分布の変動係数の幅を図-5 に示す。 hc の確率分布の変動係数の幅は $0.06 \sim 0.27$ となり、非常に大きな変動係数を示すケースもあった。変動係数の平均値は 0.14 であった。

表-4 5段階及び51段階における hc 確率分布

	平均値(m)	標準偏差(m)	変動係数
護岸①5段階	3.35	0.57	0.17
護岸①51段階	3.35	0.58	0.17
護岸②5段階	2.67	0.33	0.12
護岸②51段階	2.67	0.33	0.13
護岸③5段階	2.99	0.51	0.17
護岸③51段階	2.98	0.44	0.15



a) 5段階の護岸①の hc の確率分布



b) 51段階の護岸①の hc の確率分布
図-3 5段階及び51段階の hc の確率分布

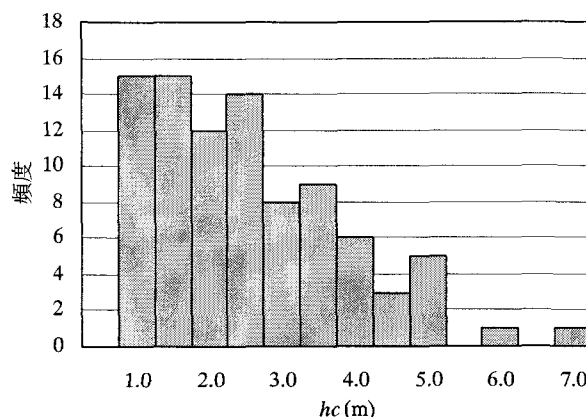


図-4 hc の平均値の頻度分布

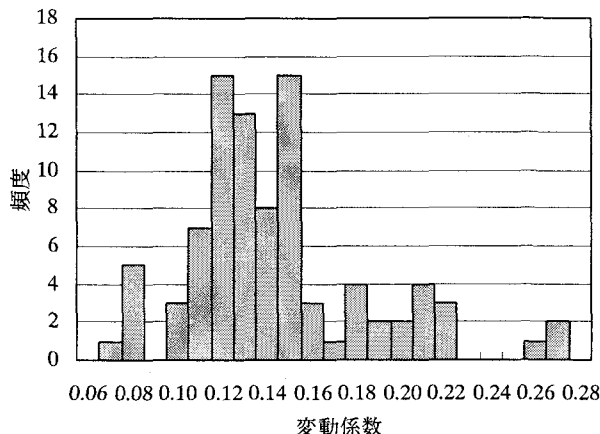


図-5 hc の変動係数の頻度分布

3. 検討結果

(1) 護岸の必要水面上天端高の確率分布

2. で述べたように、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。そこで、各護岸の hc の確率分布を、設計で算定される必要水面上天端高 hcd で正規化して、各護岸の hc/hcd 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、 hc/hcd 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 hc/hcd 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に集計し、これを平均することにより、許容越波流量別の平均的な hc/hcd の確率分布を求めた。

得られた許容越波流量別の hc/hcd の確率分布を図-6～図-8 に示す。許容越波流量が $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の hc/hcd 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 $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 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 hc/hcd 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 hc/hcd の確率分布を求めた。構造形式別については、護岸前面の勾配により、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-9 に示す。

得られた構造形式別の hc/hcd の確率分布を図-10～図-14 に示す。直立型の hc/hcd の確率分布の平均値は 1.02、標準偏差は 0.15、傾斜型の hc/hcd の確率分布の平均値は 1.03、標準偏差は 0.15、緩傾斜型の hc/hcd 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 hc/hcd 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 hc/hcd 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 hc/hcd の確率分布を平均し、護岸全体の平均的な hc/hcd の確率分布を求めた。護岸全体の hc/hcd の確率分布を図-15 に示す。得られた護岸全体の hc/hcd の確率分布の平均値は 1.03、標準偏差は 0.15 となった。

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-6～図-8 および図-10～図-15 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。

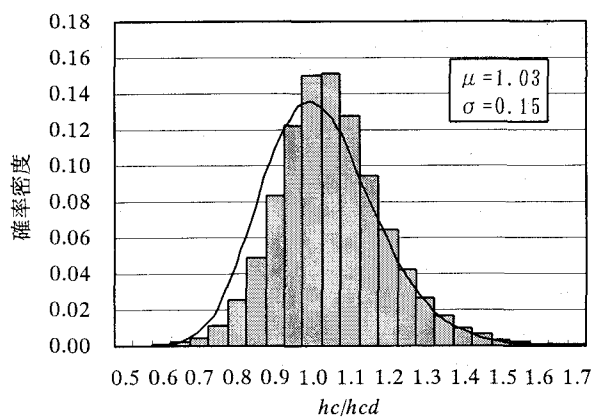


図-6 許容越波流量 $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の hc/hcd の確率分布

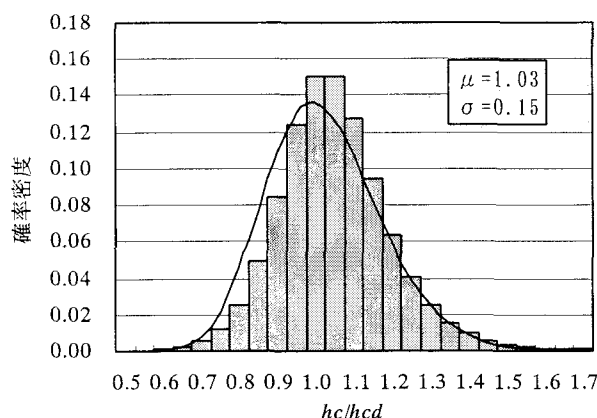


図-7 許容越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の hc/hcd の確率分布

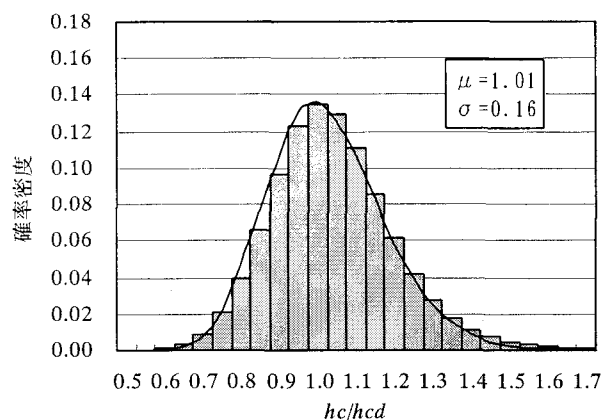


図-8 許容越波流量 $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の hc/hcd の確率分布

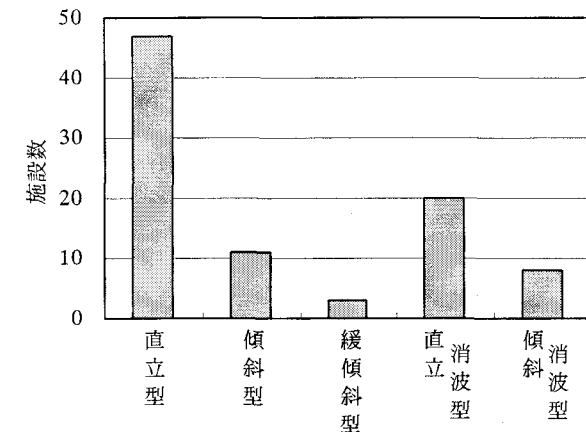


図-9 構造形式の頻度分布図

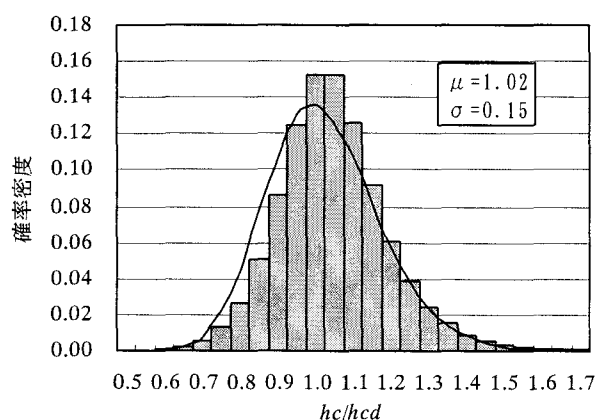


図-10 直立型護岸の hc/hcd 確率分布

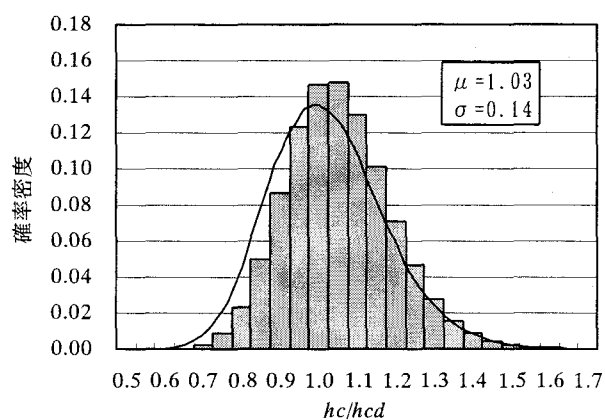


図-14 傾斜消波型護岸の hc/hcd 確率分布

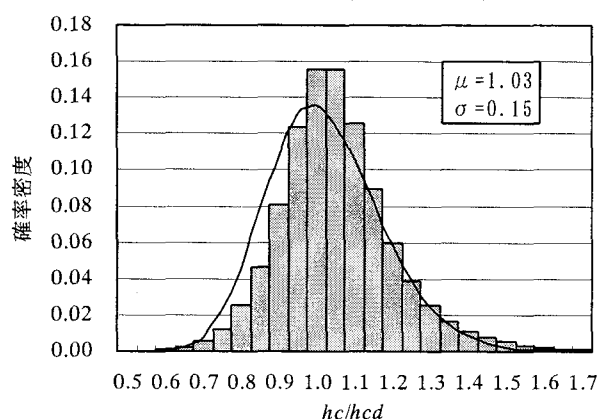


図-11 傾斜型護岸の hc/hcd 確率分布

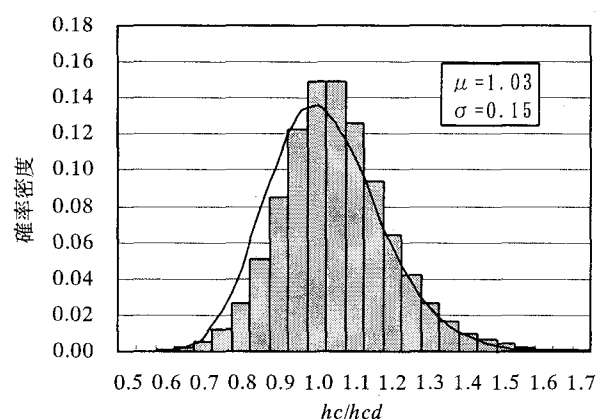


図-15 全護岸の hc/hcd 確率分布

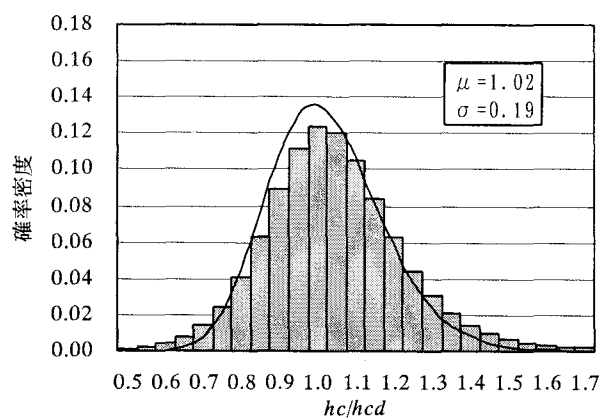


図-12 緩傾斜型護岸の hc/hcd 確率分布

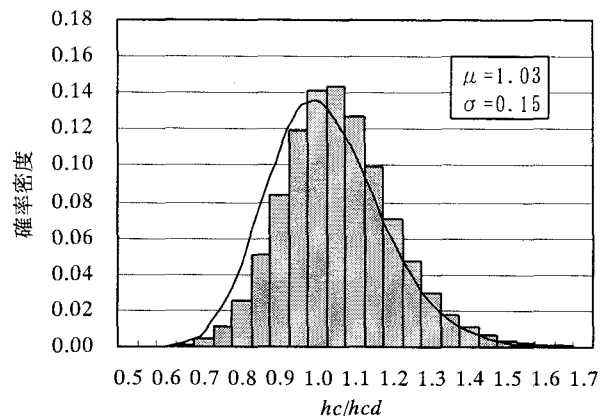


図-13 直立消波型護岸の hc/hcd 確率分布

(2) 必要水面上天端高の設定方法

前節の検討で、護岸の hc/hcd の確率分布は、許容越波流量別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、 hc/hcd 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 hc の関係を図-16 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 hcd 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、 hcd が大きいほど基本的に余裕高さも大きくする必要があるといえる。

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 hcd の平均値は 2.2m となった。この hcd の平均値に対して 1m の余裕高を見込むと 3.2m となるため、 $1.45hcd$ に相当する。図-16 より $1.45hcd$ の超過確率は 0.5% 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、天端沈下の影響を考慮しない超過確率としては 1% 程度となる。その場合、水面上必要天端高は $1.4hcd$ となる。

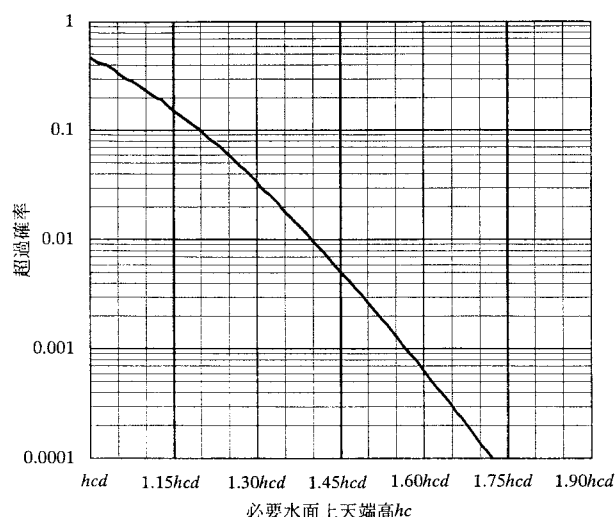


図-16 許容越波流量の超過確率と必要水面上天端高 hc との関係

最後に、護岸の水面上天端高の設定フローを図-17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 $hc1 + \Delta hc1$ 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度とすればよいものと考えられる。

4. まとめ

護岸の必要水面上天端高は、設計高潮位に設計波に対して必要な高さに余裕高を加えたものとし、自然条件、護岸の形状、消波工等の効果、越波の許容程度等を考慮して決定するものとしている。余裕高は1m程度とされることが多い。本研究では、水面上必要天端高 hc を算出する際に、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、許容越波流量の超過確率に対応して護岸の必要水面上天端高 hc を設定する方法について検討した。本研究による主要な結論は以下の通りである。

- ①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。
- ②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0.5~1%程度に相当するものと考えられる。

参考文献

- 1) 長尾 毅, 藤村公宜, 森屋陽一: 護岸の保有性能評価に関する研究, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.101-106, 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.3-44, 1975
- 3) 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
- 4) 永井莊七朗, 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
- 5) 柴田綱三, 上田寛, 大堀晃一: 海岸堤防・護岸構造集覧, 港湾技研資料, No.448, 1983

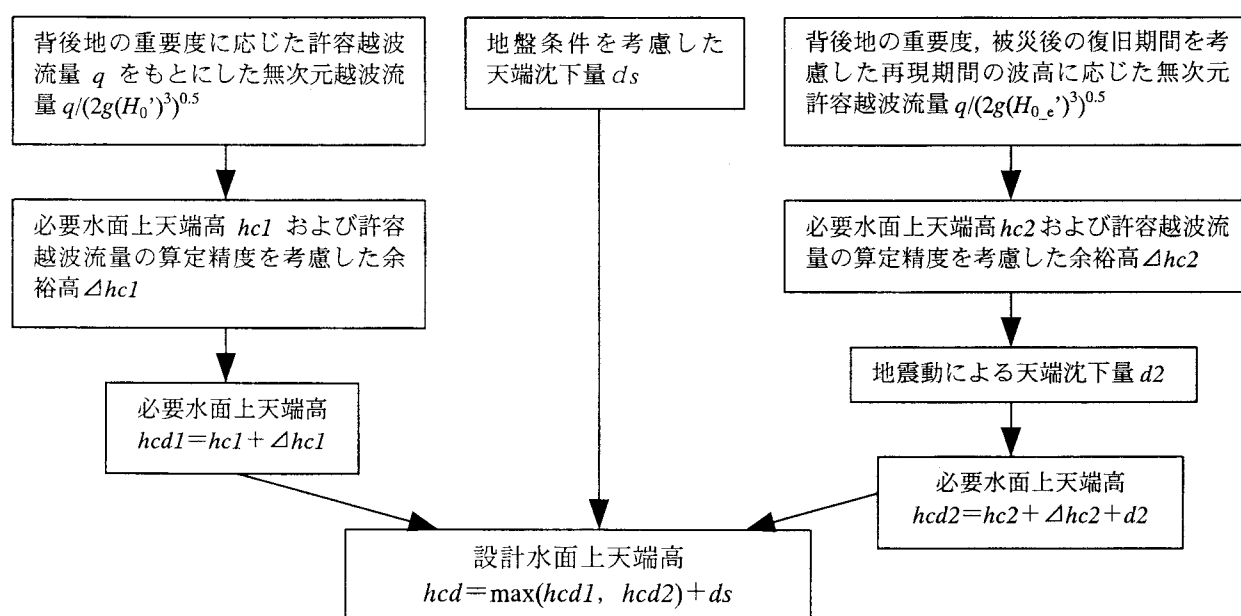


図-17 護岸の必要水面上天端高設定フロー