

護岸の保有性能評価に関する研究

EVALUATION OF PERFORMANCE LEVEL OF REVETMENTS

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 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

One of performance requirements for revetments should be determined in terms of vertical displacement because revetments should prevent wave overtopping. This study aims at evaluating the performance level of current revetments designed with the present design code. We collected datum of revetments constructed all over Japan and evaluated allowable vertical displacements considering the allowable wave overtopping rate for each revetment. Frequency distribution of evaluated allowable vertical displacements of revetments is presented. We then compared the allowable vertical displacements for revetments with allowable lateral displacements for quay walls by using the results of earthquake response analyses.

Key Words : Performance requirement, revetment, allowable overtopping rate, earthquake response analysis

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。ここで、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、要求性能としては地震動などの作用によって生じる護岸の沈下変形が許容値以下あるいは沈下変形後の天端高さが許容値以上であることが求められるといえる。この点、船舶の接岸を目的とした岸壁においては、護岸と類似の構造形式であっても荷重作用時に求められる性能が基本的に異なると考えられ、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と考えられる。

このように護岸と岸壁では求められる性能が異なるものの、現在用いられている両者の設計法は基本的に違いが無い。これは、現在の設計法が要求性能に基づく方法でないことが主要な原因と考えられる。また、護岸の天端高さは上述のように荷重作用時の沈下量を考慮して、沈下後の越波流量が許容値以下となるように設定されるべきであるが、現時点で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さ(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。このため、現在全国に建設されている護岸の保有する性能についての知見は皆無であるといつてよい。

しかしながら、性能設計の体系における護岸の天

端高さは護岸に要求される許容越波流量と各種荷重作用時の変形量許容値をもとに定められ、さらに堤体諸元は岸壁と同じ構造形式であっても異なる思想に基づいて設計が行われることとなるであろう。

以上の背景のもと、本研究では、護岸の性能設計法の開発の端緒として、現在全国に建設されている護岸の保持する性能について評価することを目的とする。

検討においては、全国に建設されている護岸 109 断面の条件を収集し、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¹⁾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²⁾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許容沈下量の算定を行った。ここで許容越波流量については、護岸の背後地の状況を考慮して永井ら³⁾の提案値をもとにして設定した。

さらに、得られた許容沈下量について、越波流量の推定値に関する誤差を考慮するため、合田ら¹⁾による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許容沈下量の頻度分布を算出した。

最後に、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、岸壁に求められる性能との比較を行った。このため、2次元の地震応答解析を実施し、重力式構造物の水平変形量と鉛直変形量の相関を検討した。次に、この相関性

を用いて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により、岸壁に求められる性能との比較を議論した。

2. 護岸の許容沈下量

(1) 護岸の許容越波流量

護岸の天端高の設定は、合田ら¹⁾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¹⁾の越波流量推定図は、不規則波による模型実験や越波計算に基づいて作成されたものであり、直立護岸及び直立消波護岸の海底勾配が1/30、1/10の場合、波形勾配が0.012、0.017、0.036の場合について提示されている。ここでは、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)を示す。 H_0' は換算沖波波高、 h は堤脚水深、 h_c は天端高、 g は重力加速度、 q は越波流量であり、横軸をのり先水深波高比 h/H_0' 、縦軸を無次元越波量 $q/(2g(H_0')^{3.0})^{0.5}$ とした図である。

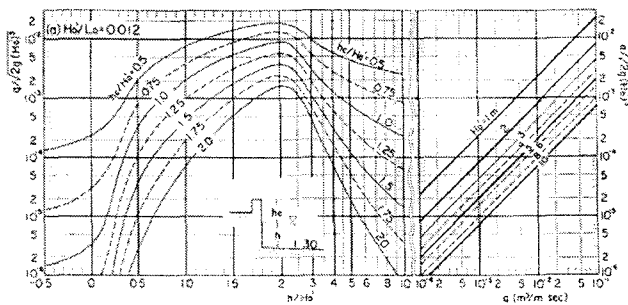


図-1 直立護岸の越波流量推定図¹⁾(海底勾配1/30 波形勾配0.012)

許容越波流量は、護岸の背後状況に応じて設定する必要がある。永井ら³⁾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。

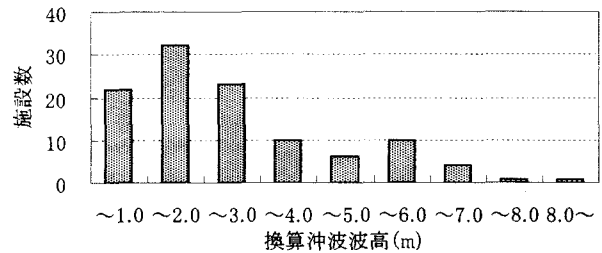
表-1 背後地の重要度から見た許容越波流量³⁾

(単位: $m^3/s \cdot m$)

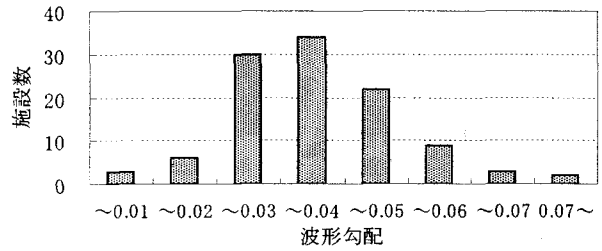
背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の侵入より重大な被害が予想される地区	0.01程度
その他の重要な地区	0.02程度
その他の区域	0.02~0.06

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⁴⁾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。そして、整理した護岸の背

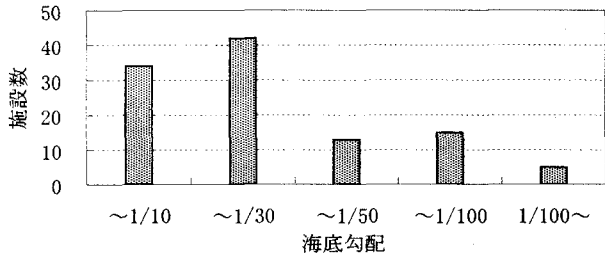
後状況から、永井ら³⁾の提示値(表-1)をもとに、人家密集、公共施設、石油コンビナート等の地区は $0.01m^3/s \cdot m$ 、人家散在、工場等の地区は $0.02m^3/s \cdot m$ 、山林、田畑等の地区は $0.04m^3/s \cdot m$ と各護岸の許容越波流量の設定を行った。検討対象護岸の各種条件は、図-2に示すとおりである。また、検討対象護岸109施設の許容越波流量の頻度分布を図-3に示す。設定した許容越波流量は $0.01m^3/s \cdot m$ 及び $0.02m^3/s \cdot m$ の施設が多いことがわかる。



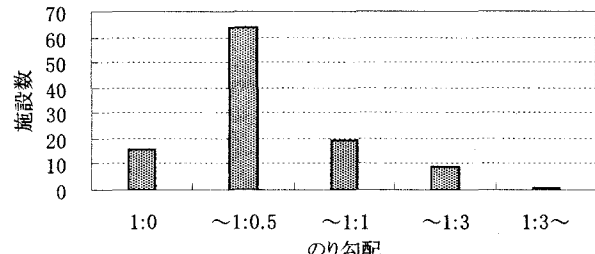
a) 換算沖波波高の頻度分布図



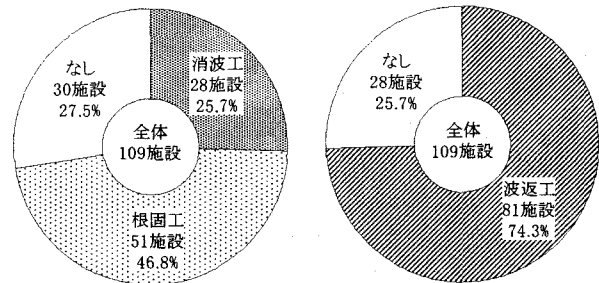
b) 波形勾配の頻度分布図



c) 海底勾配の頻度分布図



d) のり勾配の頻度分布図



e) 消波工・根固工の有無

f) 波返工の有無

図-2 検討対象施設の各種条件

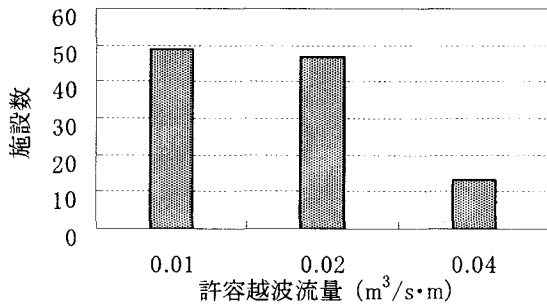


図-3 許容越波流量の頻度分布図

(2) 護岸の許容沈下量

合田ら¹⁾による図-1の越波流量推定図は、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。本研究では、この図をもとに、相対天端高 hc/H_0' に対する無次元越波流量の関係を作成した。結果を図-4、図-5に示す。図-4、図-5を用いることにより、許容越波流量をもとにして許容される相対天端高さが得られる。次に許容される相対天端高さと既存護岸の実際の相対天端高の差から、護岸の許容沈下量を算定することができる。

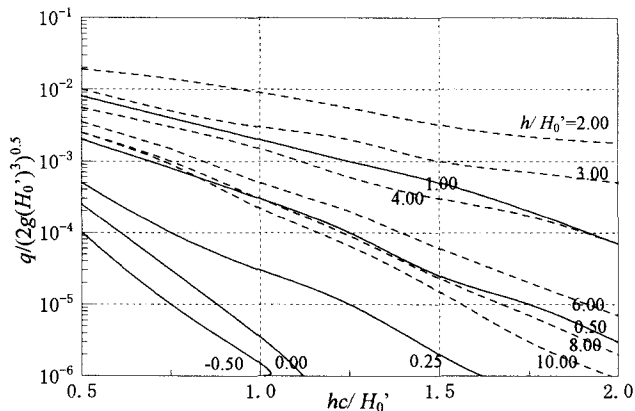
このように、直立護岸及び直立消波護岸については、合田ら¹⁾の越波流量推定図から作成した図-4、図-5の許容沈下量算定図より許容沈下量を算定することができる。また、その他の構造についても、関

本ら²⁾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、許容沈下量を算出することができる。

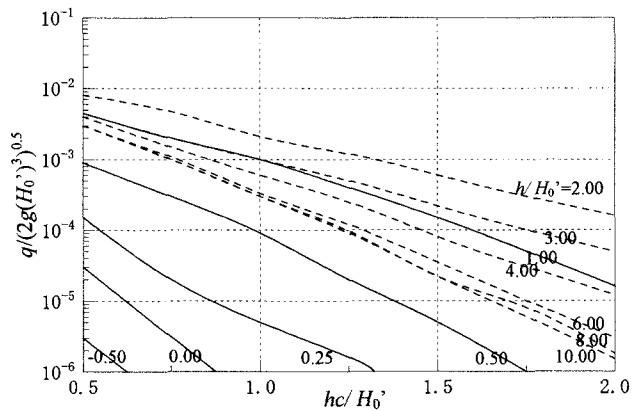
さらに、合田ら¹⁾は、実験データのばらつきや現地観測値との比較から、越波流量の推定値に対する真値の想定誤差範囲を示している(表-2)。表より分かるように、越波流量の推定値にはばらつきが非常に大きい。このばらつきは、港湾・海岸構造物の設計因子の有するばらつきとしては非常に大きい⁵⁾と考えられるため、越波流量の頻度分布の検討においては、越波流量の推定値のばらつきを考慮する必要があると考えられる。本研究では、越波流量の推定値のばらつきを考慮するため、表-2に示された真値の上下限値を参考に、上下限値を上回るかまたは下回る確率が非常に小さい正規分布を仮定して真値と算出値の比の値に対する標準偏差を設定した。表-3に設定した標準偏差を示す。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¹⁾

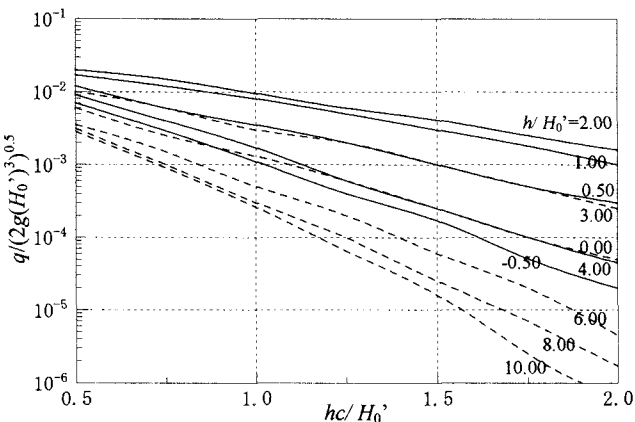
$q/(2g(H_0')^3)^{0.5}$	直立護岸	消波護岸
10^{-2}	0.7-1.5 倍	0.5-2 倍
10^{-3}	0.4-2 倍	0.2-3 倍
10^{-4}	0.2-3 倍	0.1-5 倍
10^{-5}	0.1-5 倍	0.05-10 倍



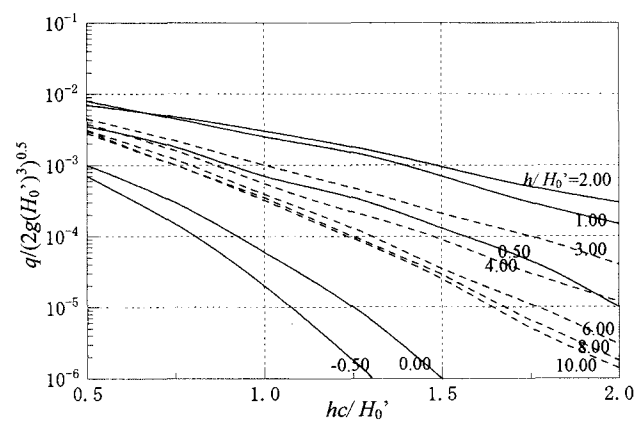
a) 直立護岸：海底勾配 1/30, 波形勾配 0.012



b) 直立護岸：海底勾配 1/30, 波形勾配 0.036

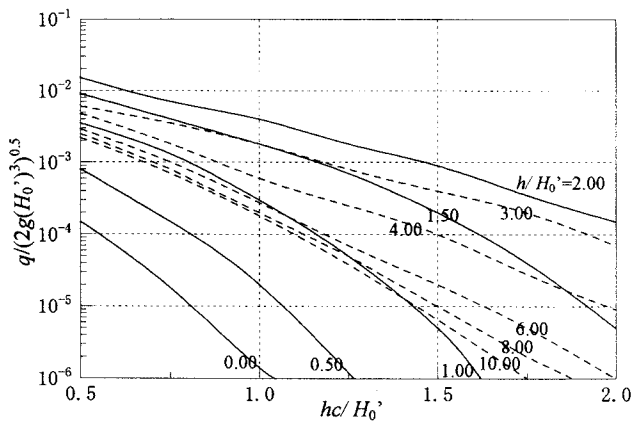


c) 直立護岸：海底勾配 1/10, 波形勾配 0.012

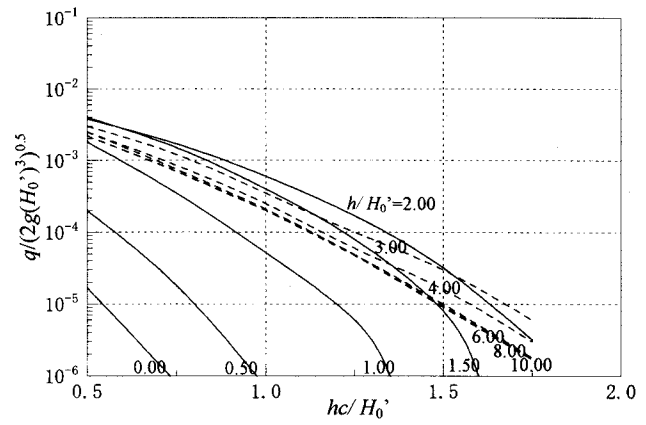


d) 直立護岸：海底勾配 1/10, 波形勾配 0.036

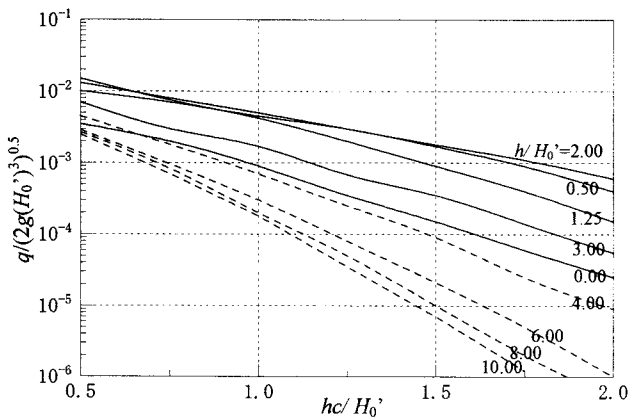
図-4 直立護岸の許容沈下量算定図



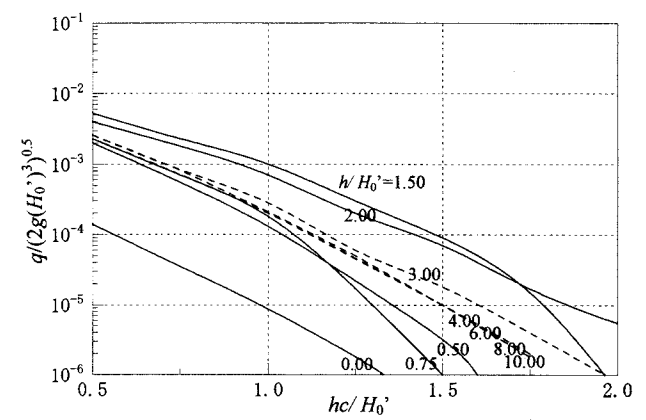
a) 直立消波護岸：海底勾配 1/30，波形勾配 0.012



b) 直立消波護岸：海底勾配 1/30，波形勾配 0.036



c) 直立消波護岸：海底勾配 1/10，波形勾配 0.012



d) 直立消波護岸：海底勾配 1/10，波形勾配 0.036

図-5 直立消波護岸の許容沈下量算定図

表-3 越波流量の推定値に対する推定精度の標準偏差

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

以上のように、各護岸の海底勾配、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、かつ越波流量のばらつきを考慮して、各護岸の許容沈下量の期待値を算定した。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-6 に示す。許容沈下量は許容越波流量が $0.01\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.02\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 、 $0.04\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ 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る。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⁹⁾。

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。

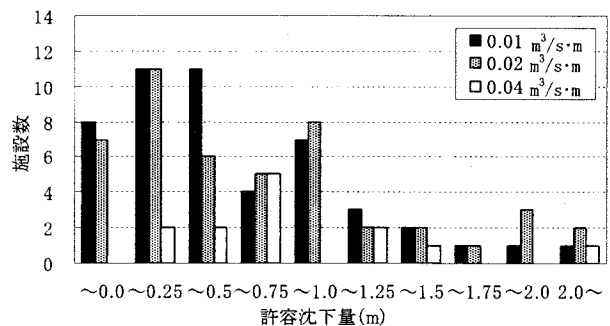


図-6 護岸の許容沈下量期待値の頻度分布図

3. 護岸の許容沈下量と岸壁の許容はらみ出し量の関係

(1) 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、以下ではまず、この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-7 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 FLIP⁷⁾である。地盤条件の影響を考慮するため、

地盤条件は図-8および表-4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-9)とし、加速度最大振幅を100,200,350Galとして図-7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。

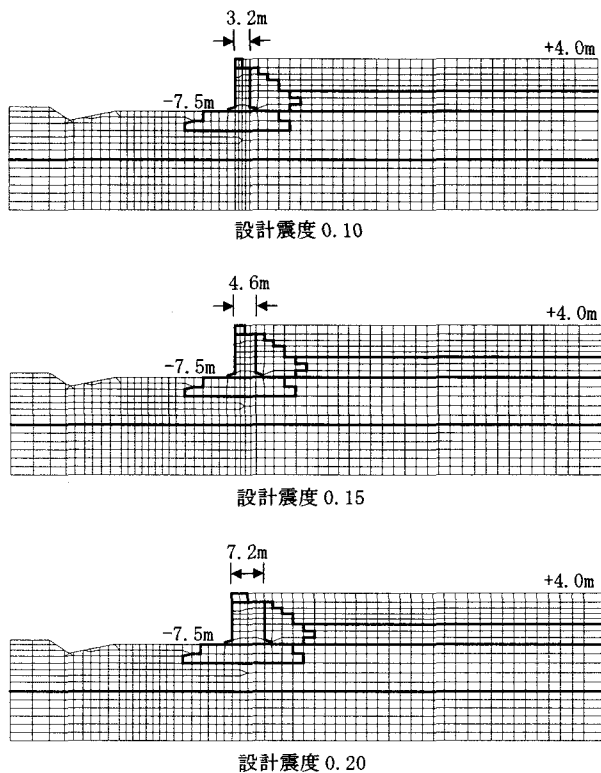


図-7 検討対象断面図

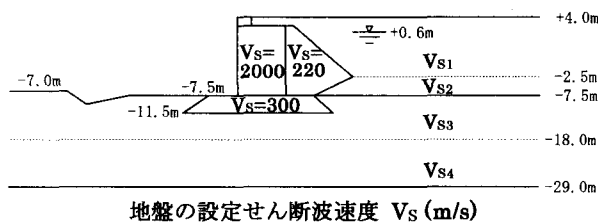


図-8 地盤条件

表-4 地盤のS波速度

地盤 Case	地盤の設定せん断波速度 (m/s)			
	Vs1	Vs2	Vs3	Vs4
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

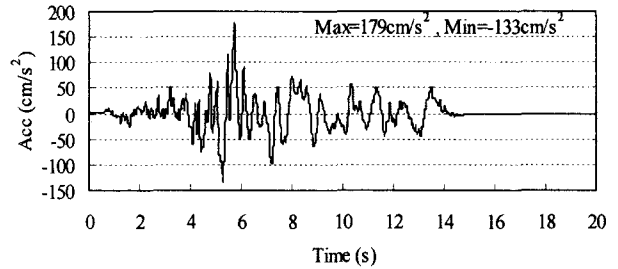


図-9 検討対象地震波形

解析結果から加振後の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-10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。

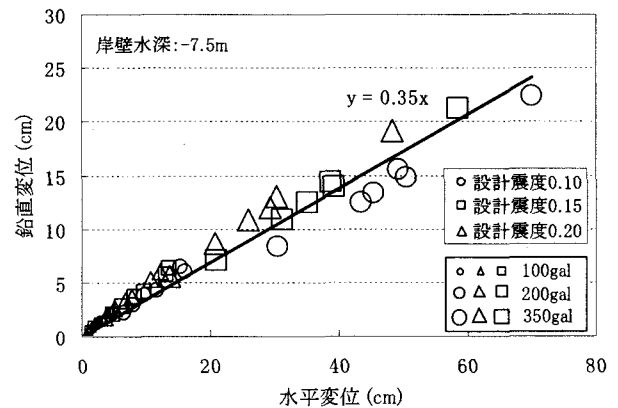


図-10 ケーソン式構造物における水平変位-鉛直変位の相関図

(2) 許容沈下量と許容はらみ出し量の相関

次に、岸壁に求められる要求性能と護岸に求められる要求性能の比較を行う。前節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ので、図-10に示した回帰関係を用いて図-6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-11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。

現在の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、本検討で扱った護岸が岸壁であると

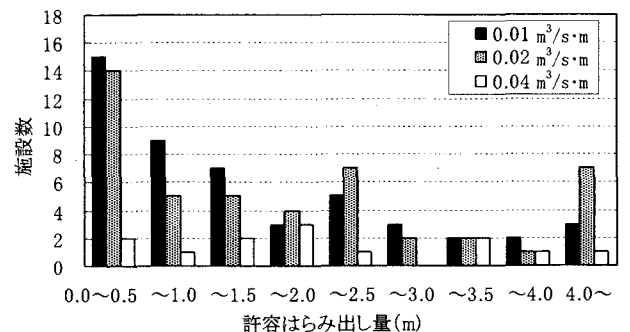


図-11 護岸の許容はらみ出し量の頻度分布図

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-5に岸壁のはらみ出し量に関する制限値の参考値を示す⁸⁾。

表-5 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

表-5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る。岸壁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。

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-12に示す。護岸の許容はらみ出し量が0.2m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さの設定によるところが大きいと判断される。

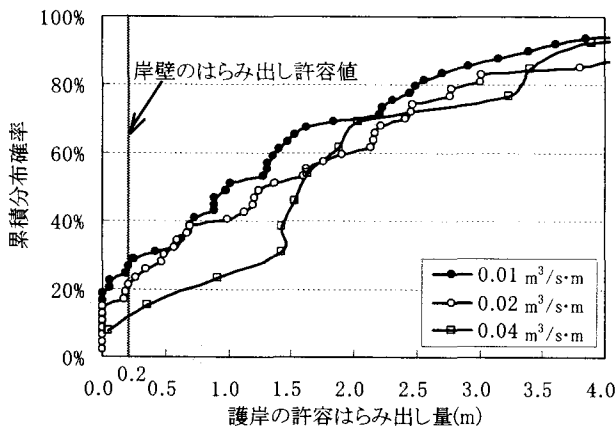


図-12 護岸の許容はらみ出し量の累積分布確率

4. まとめ

本研究では、護岸の性能設計法の開発の端緒として、現在全国に建設されている護岸の保持する性能について、岸壁との比較などの観点から検討した。本研究による主な知見は以下のとおりである。

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全国の護岸109断面をもとに、背後地の重要度を考慮して、許容越波流量ごとに護岸の許容沈下量の頻度分布について検討した。その結果、護岸の許容沈下量は2.7mまでの広い範囲に分布していることが分かった。

③地震応答解析を行うことにより、重力式構造物について、水平はらみ出し量と鉛直変形量の相関について検討した。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。このため、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、現在の天端高さの設定方法における余裕高さの設定によるところが大きいと判断される。

本研究は、護岸の性能設計体系の構築に向けた端緒となるものである。今後は、さらにモデル断面を用いて余裕高さの設定方法などについて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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, 投稿中。
- 3) 永井莊七郎, 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
- 4) 柴田鋼三, 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
- 5) 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
- 6) 海岸保全施設築造基準解説, (社) 全国海岸協会, 1988
- 7) 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
- 8) 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