

越波量に基づく傾斜護岸の許容沈下量算定手法

ESTIMATION OF ALLOWABLE SETTLEMENT OF SLOPING REVETMENT BASED ON WAVE OVERTOPPING RATE

関本恒浩¹・森屋陽一¹・長尾毅²

Tsunehiro SEKIMOTO, Yoichi MORIYA and Takashi NAGAO

¹ 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)

² 正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

In the performance based design, the settlement of a revetment should be verified against the design earthquake motion. The allowable settlement is determined from the difference between the design crown height and the crown height at which one expects the allowable wave overtopping rate.

Wave overtopping rates on vertical revetments or mild slope revetments can be evaluated by using previous calculation figures. However, 53.8% of current revetments in Japan have slopes ranged from 1:1/2 to 1:3 as a result of reference research. Calculation figures for estimating the wave overtopping rates on revetments with these sloping walls are not proposed.

In this research, we first performed the hydraulic experiments to explore the wave overtopping rate on revetments with sloping walls. Secondly, we developed the predicted model for wave overtopping rates from the wave conditions predicted by Boussinesq equations. Utilizing the predicted model, finally, we developed the figure that determines the allowable settlement as a function of wave overtopping rates.

Key Words : Allowable settlement, sloping revetment, wave overtopping

1. はじめに

構造物の設計体系は仕様規定型から性能規定型に変わりつつある。性能規定型の設計体系においては、構造物の安全性や使用性に関する要求性能を定量的に定め、要求性能を適切な手法により照査することになる。護岸を対象に考えた場合、その安全性に関わる要求性能の一つは‘地震作用に対して天端の沈下量が許容沈下量以下とすること’となるであろう。許容沈下量は護岸の背後地の重要度等に応じて許容越波流量から規定されるべきものである。

護岸の設計においては、従来から越波流量に関する検討は行われているが、許容沈下量という観点からの検討は行われていない。防災の観点から、既設の護岸の保有性能を適切に評価するためにも、許容沈下量に関する検討を行うことになるであろう。

許容沈下量は、設計結果(もしくは現状)の天端高と設計波が来襲した場合に越波流量が許容越波流量となる天端高の差により評価できる。許容越波流量は、背後地の重要度に応じて、技術基準などにより定められるべきものである。鉛直護岸と消波護岸に対しては合田ら¹⁾により提案されている越波流量算定図より、許容越波流量に対する天端高が算定で

きるため、護岸の許容沈下量を評価することが可能である。護岸勾配1:1/4~1:1/2の護岸や階段護岸などに対しては、高山ら²⁾が提案した換算天端高係数を導入することで許容沈下量の評価が可能である。また、護岸勾配1:3, 1:5, 1:7の緩傾斜護岸については、玉田ら³⁾により合田らと同様な指標による越波流量算定図が作成されているため、これを用いれば許容沈下量の評価が可能である。しかしながら、全国の海岸堤防および護岸124施設を調べた結果^{4),5)}、124施設中53.8%は護岸勾配が1:1/2~1:3の傾斜護岸であった。護岸勾配が1:1/2~1:3の傾斜護岸については、越波流量算定図等が十分に整備されていないため、現状ではこれらの施設の許容沈下量の評価は水理模型実験等に頼らざるを得ない。

一方、効率的に許容沈下量を算定するためには、数値モデルによるアプローチも必要である。N-S方程式を用いる検討⁶⁾も行われているが、不規則波に対して検討を行うには非常に計算時間がかかり実用的ではない。不規則波に対しては、ブシネスク方程式に境界条件として堰の越流公式を用いた手法で精度良く越波流量を評価できることが示されている⁷⁾。しかしながら、検討ケースが少ないため適用範囲が明確でなく、また、傾斜護岸に対する適用性に問題

がある。

そこで、本研究では、傾斜護岸の越波に関する水理模型実験を実施するとともに、ブシネスク方程式を用いた数値モデルの越波問題への適用性を検討し、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。

2. 水理実験

(1) 実験方法

実験に使用する水路は、図-1に示す長さ50m、幅0.6m、高さ1.2mの不規則波造波水路である。水路内には反射波吸収装置を備えたピストン型の造波装置が設置されている。

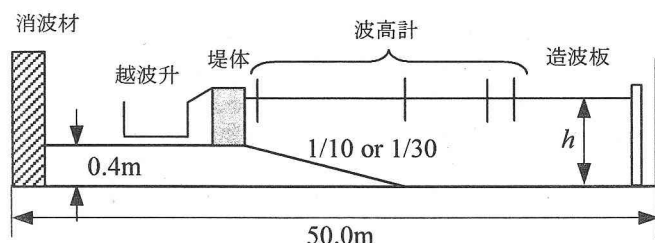


図-1 不規則波造波水路

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・反射波分離を行い、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。

(2) 実験条件

縮尺1/25程度を想定して模型諸元を決定した。護岸形状は図-2に示す標準形状を基本として、護岸勾配、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（図-3）の有無、消波工の有無（図-4）についても検討した。

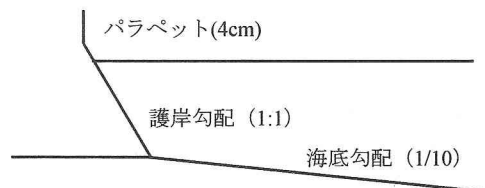
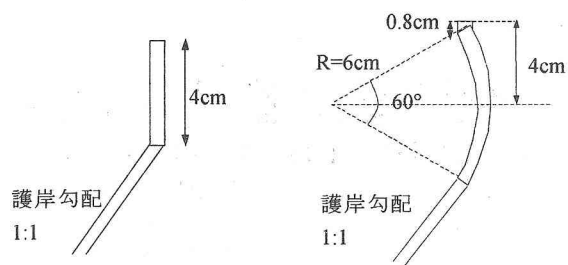


図-2 模型の標準形状（実験室スケール）



(a) 曲率無し (b) 曲率あり
図-3 パラペットの形状（実験室スケール）

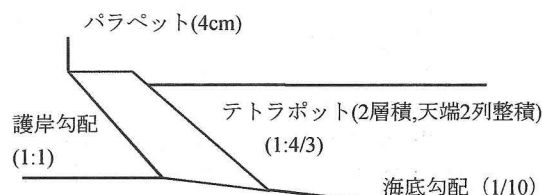


図-4 消波工の形状（実験室スケール）

実験条件は表-1に示す。 H_0' は換算沖波波高、 h_c は天端高、 h は護岸の前面水深である。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、護岸勾配は1:1、 h_c/H_0' は1.0、 h/H_0' は1.0を基本条件と設定し、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。写真-1に基本条件での実験状況写真を示す。また、護岸勾配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、護岸勾配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。

表-1 実験条件

護岸勾配	slope	1:1/2, 1:1, 1:3
天端高波高比	h_c/H_0'	無限大（非越波）, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
水深波高比	h/H_0'	0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0
波形勾配	H_0'/L_0	0.019, 0.038
海底勾配	i	1/10, 1/30

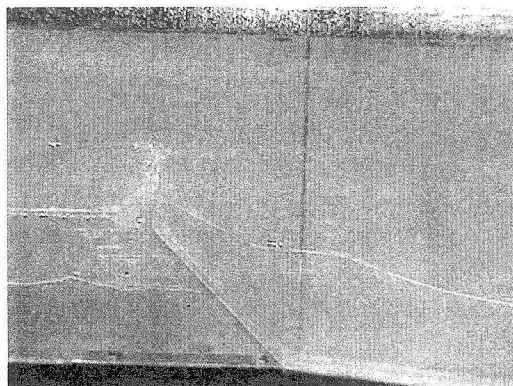


写真-1 実験状況の例（基本条件）

(3) 実験結果

1) 実験精度の確認

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とした鉛直護岸の越波流量測定実験を行った。図-5に予備実験結果を合田ら¹⁾による越波流量と比較した結果を示す。無次元越波流量が 10^{-2} のオーダーの場合、合田ら¹⁾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。

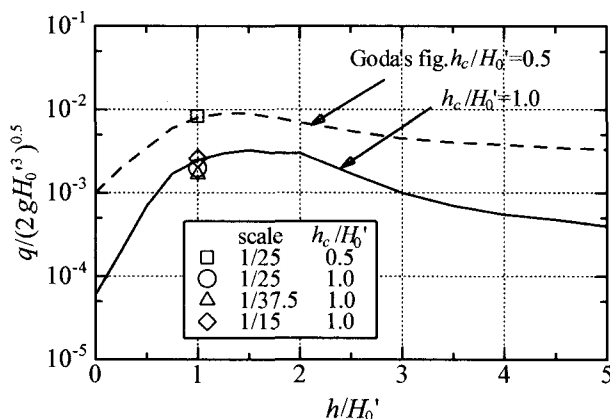


図-5 水深波高比に対する無次元越波流量（越波流量測定実験の精度および模型縮尺の影響， $H_0'/L_0=0.038$ ，海底勾配1/10）

2) 護岸勾配による影響

図-6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-7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。ただし，海底勾配が1/30の場合に

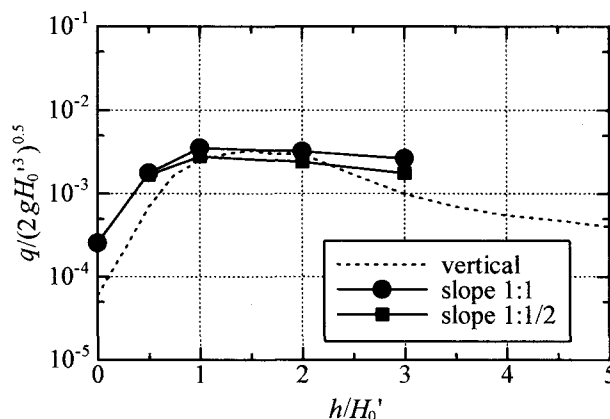


図-6(a) 水深波高比に対する無次元越波流量（護岸勾配による影響， $H_0'/L_0=0.038$ ， $h_c/H_0'=1.0$ ，海底勾配1/10）

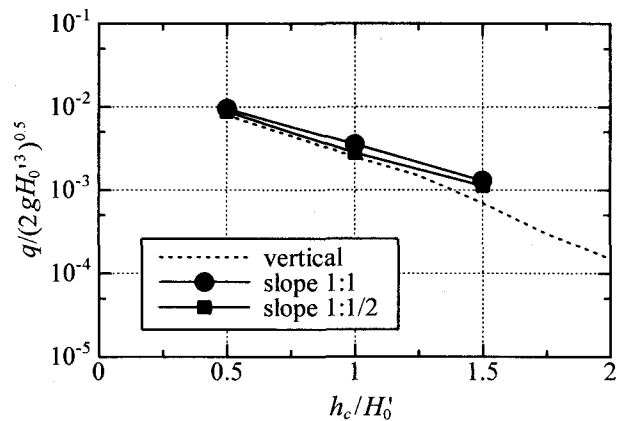


図-6(b) 相対天端高に対する無次元越波流量（護岸勾配による影響， $H_0'/L_0=0.038$ ， $h/H_0'=1.0$ ，海底勾配1/10）

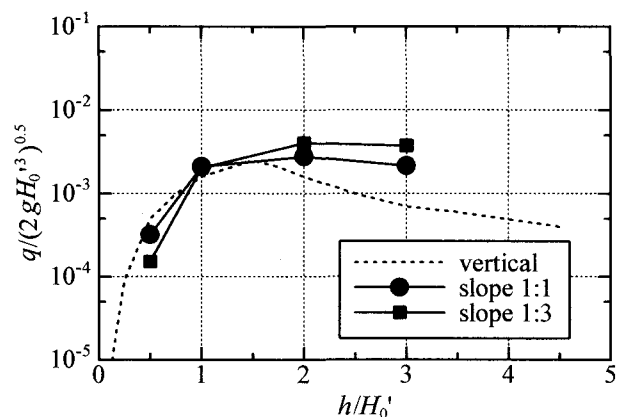


図-7(a) 水深波高比に対する無次元越波流量（護岸勾配による影響， $H_0'/L_0=0.038$ ， $h_c/H_0'=1.0$ ，海底勾配1/30）

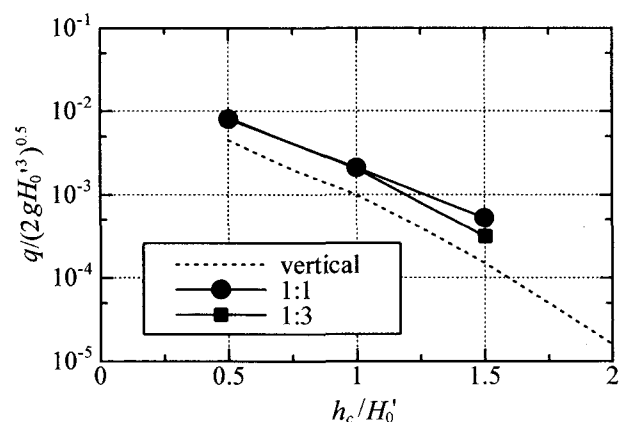


図-7(b) 相対天端高に対する無次元越波流量（護岸勾配による影響， $H_0'/L_0=0.038$ ， $h/H_0'=1.0$ ，海底勾配1/30）

は，水深波高比が1.0より小さくなると護岸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³⁾が相対水深が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。

高山ら²⁾によると護岸勾配が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1/2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1/2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。

3) パラペットの曲率および消波工による影響

図-8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傾斜護岸の実験では, 消波工の中にアンコ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, 相対水深や相対天端高の違いによる減少傾向は, 鉛直護岸の場合と同様である。

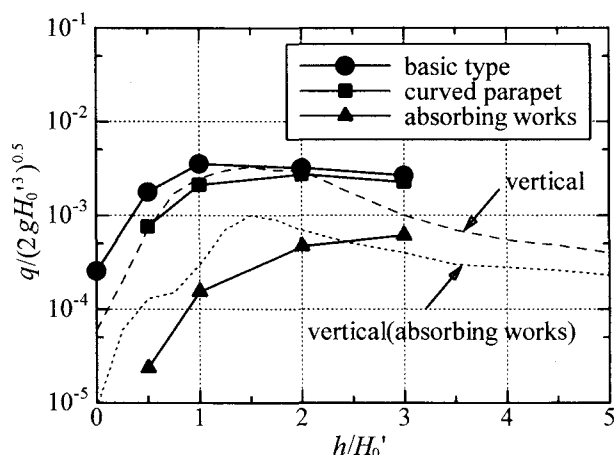


図-8(a) 水深波高比に対する無次元越波流量 (パラペットの曲率および消波工による影響, $H_0'/L_0=0.038$, $h_c/H_0'=1.0$, 海底勾配1/10)

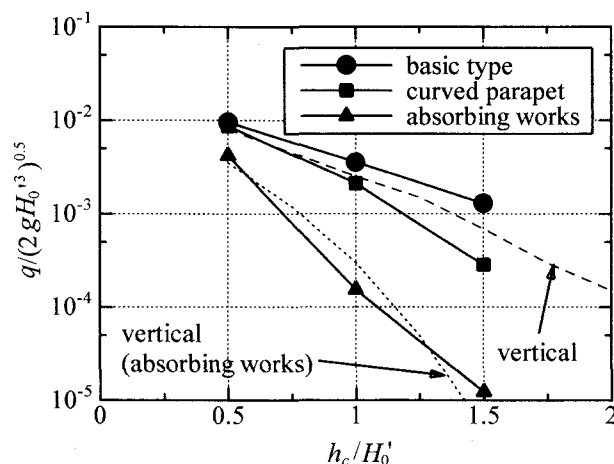


図-8(b) 相対天端高に対する無次元越波流量 (パラペットの曲率および消波工による影響, $H_0'/L_0=0.038$, $h/H_0'=1.0$, 海底勾配1/30)

3. 越波問題への数値モデルの適用

近年, 越波問題への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。

傾斜護岸上では, 波は斜面上を遡上し, 条件によっては砕波する。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, 斜面上の砕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, 砕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有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は1/21), 海底摩擦および砕波による減衰項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。

$$\eta(t) = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \eta_B(t) \quad (1)$$

ここで, $\eta_B(t)$ は非越波 (天端高が無限大) の鉛直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。

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

ここで、 g は重力加速度、 m は越流係数、 h_c は天端高である。越流係数は佐貫ら⁹⁾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による越波流量算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_0' 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。

4. 傾斜護岸の許容沈下量算定図

通常、護岸の設計に用いられる越波流量算定図は、合田ら⁹⁾が示したように、相対天端高 (h_c/H_0') をパラメータとして横軸に水深波高比 (h/H_0') を取っている。しかしながら、はじめに述べたように、護岸の要求性能が沈下量で規定されることになると、護岸の性能評価のためには、水深波高比をパラメータとし横軸に相対天端高を取った図の方が便利である。そこで、本研究では、水深波高比をパラメータとし横軸に相対天端高、縦軸に無次元越波量を取った図を許容沈下量算定図と呼ぶこととし、水理模型実験結果およびブシネスク方程式を用いた数値モデルにより評価した。

評価した許容沈下量算定図を図-9～図-15に示す。凡例は図-9に示してあり、図-10～図-15の記号も図-9と同様である。また、黒印の記号は実験を行った条件を示しており、白抜きの記号は数値的に越波流量を評価した条件を示している。

護岸の背後地の重要度から許容越波流量を決めれば、図-9～図-15により、設計波条件に対して許容越波流量となる天端高を算定し、その天端高と設計結果（もしくは現状）の天端高との差を取れば、許容沈下量が評価できる。

5. おわりに

本研究では、傾斜護岸の越波に関する水理模型実

験を実施し、以下の結論を得た。

- ① 傾斜護岸は、基本的には直立護岸に比べて越波流量が多くなる。ただし、海底勾配が1/30の場合には、水深波高比が1.0より小さくなると護岸勾配が急な方が越波流量が多くなる。
- ② 海底勾配1/10の場合の傾斜護岸の換算天端高係数は1.0～1.2程度、海底勾配1/30の場合の傾斜護岸の換算天端高係数は1.2～1.5程度となった。
- ③ 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。

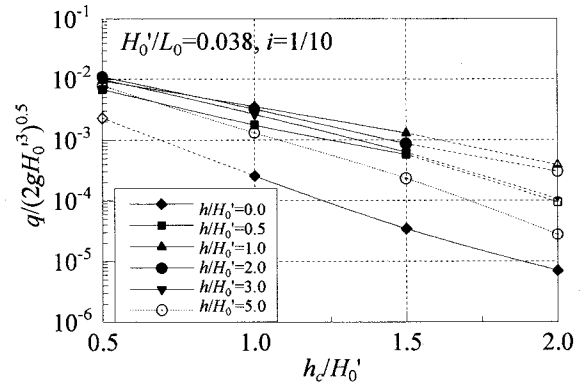


図-9 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.038$, 海底勾配1/10, 護岸勾配1:1)

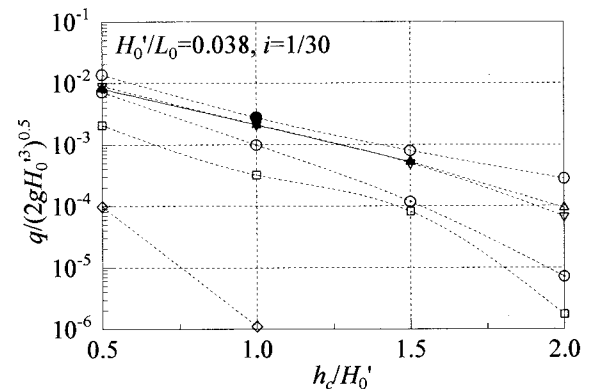


図-10 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.038$, 海底勾配1/30, 護岸勾配1:1)

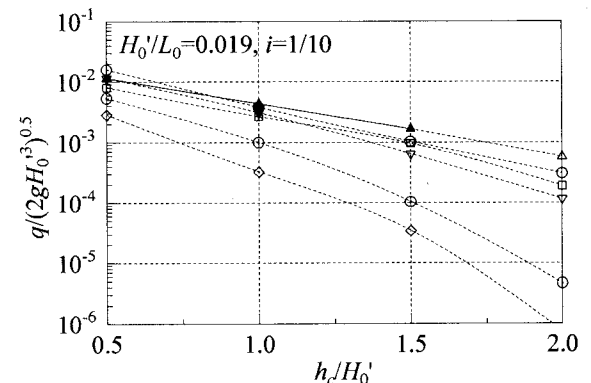


図-11 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.019$, 海底勾配1/10, 護岸勾配1:1)

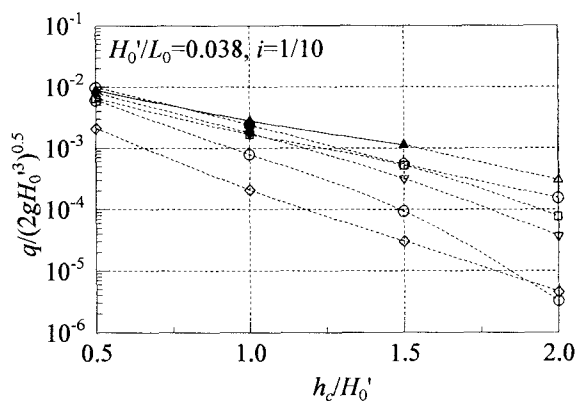


図-12 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.038$, 海底勾配1/10, 護岸勾配1:0.5)

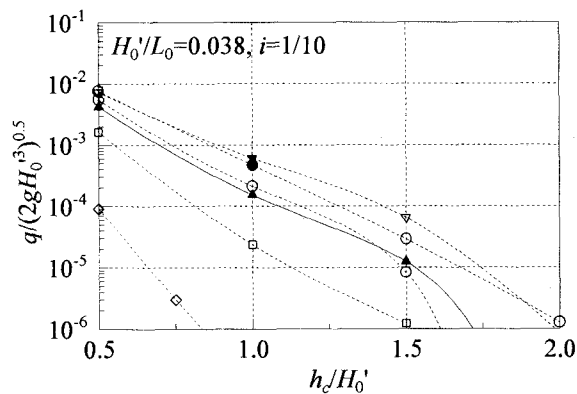


図-14 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.038$, 海底勾配1/10, 護岸勾配1:1, 消波工有)

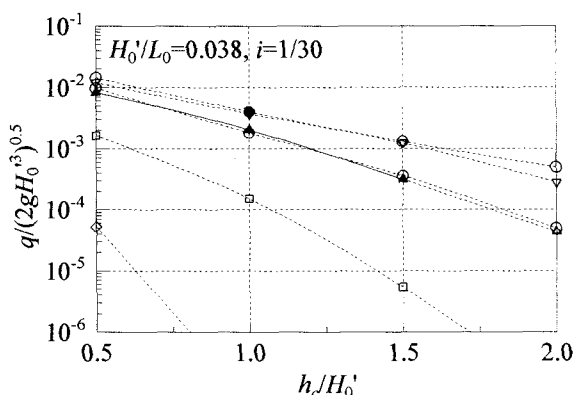


図-13 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.038$, 海底勾配1/30, 護岸勾配1:3)

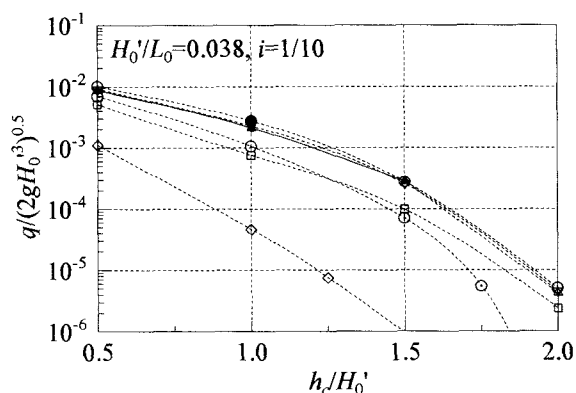


図-15 許容沈下量算定図 ($H_0'/L_0=0.038$, 海底勾配1/10, 護岸勾配1:1, パラペットの曲率有)

また、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、越波量に基づく傾斜護岸の許容沈下量算定図を作成した。

本研究により作成した許容沈下量算定図により、越波量に基づく護岸の保有性能の評価が可能となった。長尾ら¹¹⁾により、本研究で作成した許容沈下量算定図を用いた既設の護岸の保有性能に関する研究が行われている。

謝辞

本研究の実施にあたり、元五洋建設(株)技術研究所(現 University College London 大学院)の藤田龍氏の助力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表す。

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.3-14，1975。
- 2) 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。
- 3) 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。

- 4) 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。
- 5) 建設省河川局海岸課：海岸保全施設構造例集，(社)全国海岸協会，1982。
- 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) 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，掲載予定。