

CLASHデータベースを利用した統一的 越波流量推定式の作成

Derivation of Unified Wave Overtopping Formulas Based on CLASH Database

合田良実

Yoshimi GODA

土木学会名誉会員 工博 横浜国立大学名誉教授 (株) エコー (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)
Honorary Member of JSCE, Dr.Eng., ECOH Corp.

A set of unified formulas for prediction of wave overtopping rate at coastal structures have been derived by analyzing the CLASH database. The new formulas are applicable for vertical seawalls, smooth impermeable slopes, and composite seawalls with frontal mounds built with tetrapods. The formulas are simple but cover the full range of water depth from the shoreline to deep water. The effects of the toe depth and the seabed slope on wave overtopping rate are duly incorporated in the formulas. Prediction performance of the new formulas is better than the EurOtop formula for both vertical walls and inclined seawalls.

Key Words: *Wave overtopping rate, vertical seawall, sloped seawalls, seawalls with tetrapods, CLASH database*

1. まえがき

海岸護岸や海岸堤防の計画では最初に天端高を設定する必要があり、そのため計画潮位・波浪による越波流量を適切に推定することが要求される。重要な海岸保全施設については、設計のつど水理模型実験を行って防波機能を確認するけれども、基本設計の段階では合田・岸良・神山(1975)による越波流量推定図表その他が利用される。ただし、図表のままでは設計に不便な場合があり、高山・永井・西田(1982)は直立護岸の越波流量図表を複数の経験式の組合せで近似している。一方、緩傾斜護岸については玉田・井上・手塚(2002)が3割, 5割および7割勾配傾斜護岸の越波流量算定図表を公表しているが、越波流量の推定式は未だ作成されていない。

ヨーロッパ諸国, 特にイギリス, オランダ, ドイツでは高潮防御が重要な課題であり, 堤防への波の打ち上げや越波についての活発な研究が行われてきた。この三国では, それまで独自に展開してきた越波流量算定法の統一を図るために共同研究を行い, 2007年7月に「EurOtop越波マニュアル」と略称される報告書を公表した。このマニュアルの全文181頁

はwww.overtopping-manual.comからダウンロードできる。

このマニュアルのデータは, それまでにEUの科学技術推進予算制度で実施された幾つもの共同プロジェクトの成果に基づいており, なかでもCLASHプロジェクト(Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping.)に負うところが大きい。このCLASHプロジェクトでは, これまでに各研究機関で実施された越波実験ならびに現地越波観測のデータを収録した大規模なデータベース(Van der Meer et al. 2005)も構築している。このデータベースに基づいてニューラルネットワークを開発し, データベースの内容を解説したVerhaeghe(2005)の論文およびデータベースそのものは, www.clash-eu.org からダウンロードできる。

「EurOtop越波マニュアル」では傾斜護岸と直立護岸の越波流量推定式が記載されており, いずれも堤前有義波高をパラメータとしている。これはわが国で使われている越波流量図表のパラメータが換算沖波波高であることと異なっている。また, 無次元越波流量を相対天端高の上昇に応じて指数関数的に

低減するとして扱っている。しかしながら、これらの越波流量推定式の信頼度については明確には記述されていない。

そこで、CLASHデータベースに記載されている諸データのうちから直立護岸ならびに不透過滑面傾斜堤のデータを抽出し、「EurOtop越波マニュアル」が提案している越波流量算定式を吟味するとともに、新しい統一した越波流量推定式を案出した。この成果が今後の海岸保全施設の計画・設計に役立つことを期待するものである。

2. ヨーロッパの越波流量推定式

「EurOtop越波マニュアル」における越波流量の算定式は、傾斜護岸に対するものと直立護岸に対するものとに分けられている。なお、以下ではこれを併せてEurOtop方式と仮称する。傾斜護岸に対する推定式は次のようなものである。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,toe}^3}} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha_s}} \gamma_b I_{r,m,-1} \\ \times \exp \left[-4.75 \frac{h_c}{I_{r,m,-1} H_{m0,toe} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right] \\ 0.2 \exp \left[-2.6 \frac{h_c}{H_{m0,toe} \gamma_f \gamma_\beta} \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここに、 q は単位時間・単位幅当たりの平均越波流量、 $H_{m0,toe}$ は護岸設置位置におけるスペクトル有義波高($=4m_0^{1/2}$)、 g は重力加速度、 α_s は傾斜護岸の法面が水平面となす角度、 h_c は水面上の天端高、 γ_b はバーム影響係数、 γ_f は粗度影響係数、 γ_β は波向影響係数、 γ_v は堤防頂部にパラペットなどを設ける場合の影響係数であり、一様な滑斜面に波が直入射し、パラペットがない場合にはこれらの影響係数はすべて1.0となる。また、 $I_{r,m,-1}$ はスペクトル有義波高 $H_{m0,toe}$ とスペクトル有義周期 $T_{m-1,0}$ を用いて定義されるイリバレン数であり、次のように定義される。なお、記号は本論文の末尾にまとめて掲載してある。

$$I_{r,m,-1} = \frac{\tan \alpha_s}{\sqrt{H_{m0,toe}/L_{0,-1}}} \quad ; \quad L_{0,-1} = \frac{g}{2\pi} T_{m-1,0}^2 \quad (2)$$

なおこの論文では、有義波高をスペクトルの0次モーメント m_0 から算定したものをスペクトル有義波高と呼んでいる。すなわち、 $H_{m0} = 4m_0^{1/2}$ である。また、ここでスペクトル有義周期と呼ぶのは、次式のように周波数のスペクトルのモーメントから計算される周期である。

$$T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0 \quad ; \quad m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad (3)$$

越波流量算定式(1)では、右辺の大括弧内の2項の値を計算した上で、小なる値を用いる。法面が急

でイリバレン数大きいときには第1項が越波流量を与え、法面が緩やかでイリバレン数が小さいときには第2項で決まる。式(1)では波形勾配を導入することで波周期の影響を考慮しているけれども、堤脚水深と海底勾配の影響は全く考慮されていない。

一方、直立護岸に対してEurOtop方式では、次のように護岸の設置水深に応じて三つの算定式を使い分ける。なお、この算定式は以前からイギリスで開発されていた方式を改良したものである。

(1) $h_* > 0.3$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,toe}^3}} = 0.04 \exp \left[-2.6 \frac{h_c}{H_{m0,toe}} \right] \quad (4)$$

$$: \quad 0.1 < \frac{h_c}{H_{m0,toe}} < 3.5$$

ここに、

$$h_* = 1.35 \frac{h_t}{H_{m0,toe}} \frac{h_t}{L_{0,-1}} \quad ; \quad L_{0,-1} = \frac{g}{2\pi} T_{m-1,0}^2 \quad (5)$$

(2) $h_* \leq 0.2$

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh_t^3}} = 1.5 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{h_c}{H_{m0,toe}} \right)^{-3.1} \quad (6)$$

$$: \quad 0.03 < h_* \frac{h_c}{H_{m0,toe}} < 1.0$$

$$\frac{q}{h_*^2 \sqrt{gh_t^3}} = 2.7 \times 10^{-4} \left(h_* \frac{h_c}{H_{m0,toe}} \right)^{-2.7} \quad (7)$$

$$: \quad h_* \frac{h_c}{H_{m0,toe}} < 0.02$$

ここに、 h_t は護岸の堤脚水深、 $H_{m0,toe}$ はその地点のスペクトル有義波高である。なお、 $0.2 \leq h_* \leq 0.3$ の領域については式(4)と式(6)の両方で推定し、大きなほうの値をとることを勧めている。また、式(6)と式(7)の本来の適用範囲にはギャップがあるけれども、「EurOtop越波マニュアル」では式(6)の適用範囲の下限を $h_* = 0.02$ まで引き下げて使用することを勧めている。

さらに、天端高 $h_c/H_{m0,toe} = 0$ の場合に対しては、一定値 $q/\sqrt{gH_{m0,toe}^3} = 0.062 \pm 0.0062$ を与えている。

このEurOtop方式の越波流量算定方式はかなり複雑であり、また $h_t = 0$ の汀線には適用できない難点がある。

3. CLASHデータベースと検定データの抽出

このデータベースはCLASHプロジェクトの一つとして企画され、これまでに実施された各種の越波実験・観測データを整理し、広く利用されることを目的としたもので、2002年の段階で5909データが収集された(De Rouck et al. 2002)。著者もこの企画に賛同して港湾技術研究所の実験データ(合田ら、1975)のデータを提供した。また、電力中央研究所

の現地観測データ(榊山・鹿島, 1997)も榊山氏が提供した。2005年に完成したときには、163種類の実験・観測シリーズから引き出された10,532個のデータを記載している。

このデータベースの記載事項は、波浪諸元と越波量に関する11項目、護岸・堤防の形状諸元に関する17項目、データセット番号ほかの5項目からなっている。波は最も沖側の測定地点と構造物の前面地点(バームがあればその上)の2個所のスペクトル有義波高と3種類の周期(T_p , $T_{m-1,0}$, および T_{mean})の測定結果が記入されている。ただし、全ての波高・周期が観測されているわけではなく、沖波のみのデータに対してはSWANモデル(Booij et al. 1997)を適用して構造物の前面地点のスペクトル有義波高を計算している。その場合には得られた波高を青字で記入しているため、区別が明瞭である。

今回の解析では、このCLASHデータベースから3通りのグループのデータを抽出した。第1のグループは砕波帯内の波高推定法の検定用のもので、沖側と構造物前面の両地点で波が計測されているものである。ただし、越波実験では同一の波浪条件の下で模型護岸の天端高や形状を変えて実験している場合がある。そうした波浪条件が重複しているものは1データのみを抽出した。この結果、付表-1に示す33シリーズのデータセットから1525組のデータが得られた。

第2のグループは、直立壁の越波データであり、付表-2に示す11シリーズのデータセットから715組のデータを抽出した。このうち、DS-802は港湾技術研究所のデータである。CLASHデータベースには、これ以外にも壁面が不透過滑面以外のデータや、波返し工が付いた護岸の実験データも記載されていたが、これらは対象外とした。

第3のグループは一様な滑斜面の越波データである。斜面が不透過であって、形状が複雑でない(データベースで複雑度係数CF=1, 2と判定されたもの)1254データを24シリーズのデータセットから抽出した。このデータの概要を付表-3に示す。第2, 3グループとも、直入射のデータに限定している。

付表-1~3には、各データセットにおける諸元の変動範囲を示しているが、それとともに今回導いた経験式およびEurOtop方式による推定値と実験値と比率の平均値と標準偏差も記入してある。

4. 浅海域の波浪変形の推定法の検定

ヨーロッパの方式による越波流量算定式を検定する際には、まず浅海域の波高推定の精度を確認する必要がある。また、近年ヨーロッパでは周期として式(3)のスペクトル有義周期 $T_{m-1,0}$ を用いるのが大勢となっている。この周期と波浪記録からゼロアップクロス法で解析される有義波周期 $T_{1/3}$ の関係を明らかにしておかないと、ヨーロッパのデータの比較が難しくなる。

まず後者については、以前に著者が有義波周期とスペクトルピーク周期の関係を数値シミュレーションで調べており、Wallops型スペクトルとJONSWAP型スペクトルについては合田(1990)に表-2.4として記載済みである。式(3)のスペクトル有義周期はスペクトルのモーメント計算によって容易に求められるので、 $T_{m-1,0}/T_p$ の比を計算して $T_{1/3}/T_p$ と比べたのが表-1である。

表-1 有義波周期とピーク周期の関係

スペクトル	パラメータ	周期比	
		$T_{1/3}/T_p$	$T_{m-1,0}/T_p$
Wallops型	$m = 3$	0.78	0.77
	$m = 5$	0.88	0.86
	$m = 10$	0.93	0.93
	$m = 20$	0.96	0.97
JONSWAP型	$\gamma = 3.3$	0.93	0.90
	$\gamma = 10$	0.97	0.94
	$\gamma = 20$	0.98	0.96
双峰型	$\alpha = 0.2$	0.90	0.92
	$\alpha = 1$	0.97	1.10
	$\alpha = 5$	1.41	1.58
	$\alpha = 25$	2.26	2.08

ここで、双峰型スペクトルというのはうねりと風波が重畳したスペクトルを模したもので、次のような関数形が与えられている(Goda 1970)。

$$S(f) \approx f^{-5} \exp[-1.25f^{-4}] + \alpha(2.5f)^{-10} \exp(-1.25[(2.5f)^{-8} - 1]) \quad (8)$$

: $f_{\min} = 0.3$, $f_{\max} = 6.0$

すなわち、右辺第1項はピークが $f_{p1} = 1$ にある風波のスペクトルを表し、第2項はピークが $f_{p2} = 0.4$ にあるうねりのスペクトルを表す。後者に掛かる係数 α は風波に対するうねりのエネルギーレベルである。表-1ではこの係数を0.2から25まで変えている。なお、この双峰型スペクトルの形状はGoda・Kudaka(2007)が例示している。

この表に示されるように、Wallops型スペクトルでは $T_{1/3}/T_p$ と $T_{m-1,0}/T_p$ がほとんど同一であり、JONSWAP型スペクトルでは後者がやや小さいものの差は小さい。双峰型スペクトルでは、ケースによって二つの周期比の大小関係が異なる。これは与えられたスペクトルに対応する表面波形の数値シミュレーションが行われたのが1960年代末であり、当時のコンピュータの能力不足から各スペクトル5ケースしか波形を模擬できなかったため、ケースごとの変動が大きかったことによると考えられる。したがって、表-1の結果は波形解析による有義波周期 $T_{1/3}$ とスペクトル解析による周期 $T_{m-1,0}$ がほとんど同等であることを示すものである。

次に、護岸前面の波高の推定については、著者の不規則砕波モデル(合田, 1975)による簡略式を用いることにする。この方法では、水深 h における有義

波高 $H_{1/3}$ を次式で算定する。

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{\beta_0 H_0' + \beta_1 h, \beta_{\max} H_0', K_s H_0'\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 H_0' は換算沖波波高、 K_s は浅水係数であり、 β_0 、 β_1 、および β_{\max} は式 (10) のように海底勾配 $\tan\theta$ と波形勾配 H_0'/L_0 の関数として与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= 0.028(H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta] \\ \beta_1 &= 0.52 \exp[4.2 \tan \theta] \\ \beta_{\max} &= \max\{0.92, 0.32(H_0'/L_0)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

なお浅水係数は、本来は非線形浅水効果を考慮して算定するけれども、ここでは計算を簡単にするため次式の線形浅水係数を使用した。

$$K_s = \sqrt{\frac{(c_g)_0}{c_g}} = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tanh kh \right]^{-1/2} \quad (11)$$

$$= \left[\tanh kh + kh(1 - \tanh^2 kh) \right]^{-1/2}$$

ここに、 k は波数 ($=2\pi/L$) である。

以上の式 (9) ~ (11) を用いる波高推定法をここでは合田方式と略称する。そして、その適用性を確認するため、付表 - 1 の 1525 データについて沖波の諸元から護岸前面の波高を推定し、実測波高 $H_{m, \text{meas}} = H_{m0, \text{toe}}$ と比較した。この際、沖側での測定波高 $H_{m0, \text{deep}}$ は次式を用いて換算沖波波高に変換した。

$$(H_{1/3})_0' = H_{m0, \text{deep}} \times K_r / (K_s)_{\text{deep}} \quad (12)$$

ここに K_r は屈折係数であり、斜め入射のケースである DS-003 および DS-380 のデータに適用した。入射角 β は沖波の値と見なし、直線状平行等深線海岸に対する Snell の法則を用いて計算した。また、 $(K_s)_{\text{deep}}$ は沖側の波高測定点における浅水係数である。

なお、CLASH データベースに記載されている波高はすべてスペクトル有義波高であり、一方、合田方式で得られるのはゼロアップクロス法による有義波高である。水深が十分に大きい個所では、平均的に $H_{1/3} \approx 0.95 H_{m0}$ の関係があることが知られている。その意味では、式 (12) においても両者の差に対する補正を行うことが考えられる。しかし、砕波帯では二つの波高の関係が必ずしも明確でなく、データの多くは護岸前面が砕波帯内に位置している。このため、本論文ではスペクトル有義波高からゼロクロス有義波高への換算は行わないことにした。

以上の方法で護岸前面の波高を推定した結果を H_{Goda} と表し、実測波高 H_{meas} との比を全 1214 データについて計算したところ、波高比の平均値と標準偏差として次の値が得られた。

$$\left. \begin{aligned} (H_{\text{Goda}}/H_{\text{meas}})_{\text{mean}} &= 1.106 \\ \sigma(H_{\text{est}}/H_{\text{meas}}) &= 0.155 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

すなわち、データセットごとの変動は大きいものの、

平均的には合田方式で推定した波高が実測値と一致しており、この波高推定法の信頼度が高いことが確認された。図 - 1 は、全データに対する波高比の頻度分布を確率密度の形で示し、正規分布と比べたものである。

特に DS-111 は、有義波高 $H_{m0} = 0.36 \sim 1.40$ m という大規模実験（データベースには場所が記載されていないが、デルフト水理研究所あるいはドイツのハノーバーの海岸研究センターでの実験と推測される）であり、このデータセットについては 80 データに対する波高比の平均が 1.047、標準偏差が 0.059 という良好な結果が得られている。

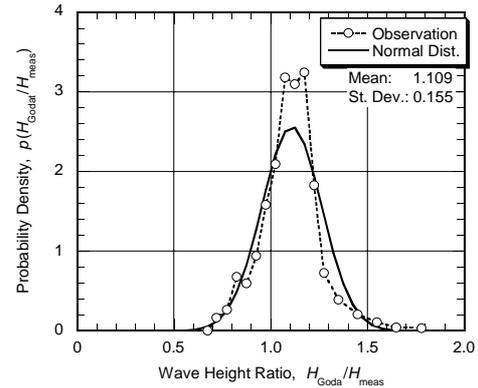


図 - 1 波高推定値と実験値との比の頻度分布

なお、DS-381 はイタリアのオスティアヨットハーバーでの現地観測データであり、これについては波高比の平均が 1.212、標準偏差が 0.038 と推定波高が大きめである。この理由としては、現地の沖波がオスティアから北へ約 50 km 離れたチビタベッキオの水深 100 m の地点の方向波浪ブイで計測されたものであって、場所の違いによる波の補正が行われていないことが考えられる。

特に、今回の解析では直線状平行等深線海岸に対する屈折係数を使ったけれども、Briganti et al. (2005) が報告している越波現地観測の論文を見ると現地の等深線はかなり屈曲しており、屈折の度合いがさらに大きかったと推測される。ただし、当該海域の深線図ならびに個別の波浪データが入手できないため、詳しい解析は行っていない。

5. 直立護岸に対する越波流量の推定式

(1) 越波流量の推定式

越波流量の推定式としては、次式の関数表示を用いる。

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{s, \text{toe}}^3}} = q^* = \exp \left[- \left(A + B \frac{h_c}{H_{s, \text{toe}}} \right) \right] \quad (14)$$

すなわち、式 (14) の左辺のように越波流量を護岸前面の有義波高 $H_{s, \text{toe}}$ を用いて無次元越波流量 q^* に変

換する。CLASHデータに対する無次元越波流量の計算では、前面波高として実測値がデータベースに記載されているものはそのまま使用し、SWANモデルで計算されたものは合田方式で再計算した波高を使用した。なおこの方法では、式(10)の β_0 の係数を用いて水深 $h=0$ の汀線の波高も $H_{s,h=0} = \beta_0 H_0'$ として算定される。

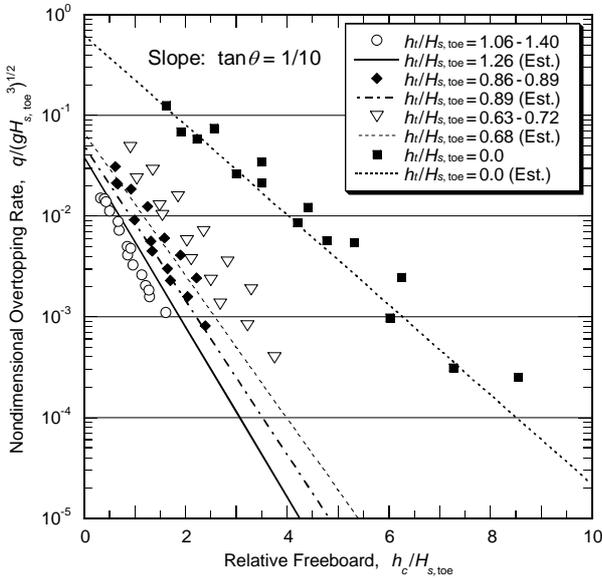


図 - 2 越波流量の指数関数表示 (海底勾配1/10)

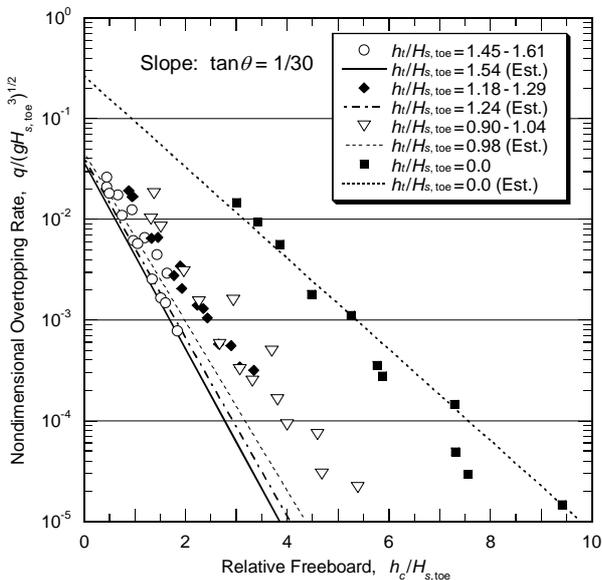


図 - 3 越波流量の指数関数表示 (海底勾配1/30)

式(14)は無次元越波流量を相対天端高 $h_c/H_{s, toe}$ の指数関数として表示したもので、「EurOtop越波マニュアル」の方式を採用したものである。ただし、波高は沖波でなく、堤脚水深における値 $H_{s, toe}$ を用いる点が越波流量算定図表と異なる。また、図表では無次元化に際して左辺の分母に $2g$ を用いているが、式(14)では単に g を用いる点が異なる。図表作成のときに $2g$ を用いたのは、期待越波流量の計算に際して堰の越流量公式を参照したためである。

式(14)の指数関数表示の妥当性を示したのが図-2, 3である。データは著者らの実験値(1975)であり、元々は $H_0'/L_0 = 0.012, 0.017$, および 0.036 の三通りの実験値であったけれども、式(9)を用いて堤前波高に換算することによって、沖波波形勾配の差異がほぼ解消されている。また、汀線における越波流量は絶対値としては最小であるけれども、波高が小さくなっているために、堤前波高を用いた無次元流量としては最大となっている。図-2は海底勾配1/10、図-3は海底勾配1/30の実験値である。データとしてはそれぞれもう一組の実験値があるけれども、他のデータと値が近接しているの、ここでは表示していない。

なお、図-2, 3に示す各種の直線は、後述する越波量推定式によるものである。海底勾配1/10のケースでは相対水深 $h_t/H_{s, toe} = 0.89$ 、海底勾配1/30では相対水深 $h_t/H_{s, toe} = 0.89$ と 1.24 に対する推定値が過小となっている。これは、付表-2の全データに対して最適となるように推定式の係数を設定したためで、この程度の不具合は受容せざるを得ない。

(2) 越波流量推定式の係数の定式化

越波流量の測定データに式(14)を適用する際には、原式を次のような線形式に変換する。

$$y = -\ln q^* = A + Bx \quad : \quad x = h_c/H_{s, toe} \quad (15)$$

そして、 x と y の関係に直線回帰式を当てはめて係数 A と B を求める。この係数 A をここでは越波流量の比例係数、 B を勾配係数と名付ける。

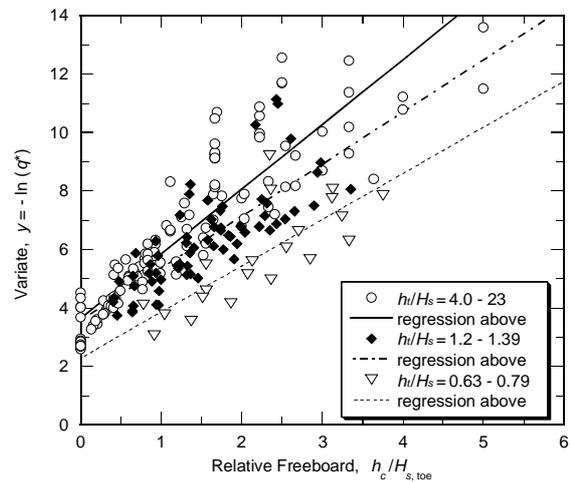


図 - 4 直立壁の越波流量データに対する直線回帰式の当てはめの例示

図-4はCLASHデータベースから抽出した直立護岸の715データ(付表-2)を相対水深 $h_t/H_{s, toe}$ によってグループ分けし、そのうち3グループのデータならびに各グループに当てはめられた直線回帰式(相関係数が最大のもの)を表示したものである。データの散らばりが大きいけれども、相対水深が小さいも

のほど縦軸の $y = -\ln q^*$ の値が小さい, すなわち無次元越波流量が大きい傾向が認められる。

ここに示した3グループのうち, $h_t/H_{s,toe} = 4 \sim 23$ のグループには131データが含まれている。しかしこのデータでは, 無次元越波流量が相対水深 $h_t/H_{s,toe}$ の影響をほとんど受けず, 変動が大きいものの, 相対天端高のみによって決まっている。著者らが1975年に取りまとめた越波流量図表では, 大水深域の越波流量を次のように推定した。すなわち, 直立壁前面の波頂高が相対水深に依存することを考慮し, 個々の波の越波量を堰の越流公式で推定し, 期待越波流量を計算した。これによって, 大水深域では相対水深が増すにつれて越波流量が顕著に減少する結果が得られた。しかし, CLASHデータベースに記載されている実験値では, $h_t/H_{s,toe} > 4$ の範囲における相対水深の影響が見られない。

このCLASHデータベースのデータを尊重するならば, 大水深護岸に対しては越波流量算定図表の適用を見合わせ, 越波流量を水理模型実験で確認する必要がある。これに関連して, 関本ほか(1992)は大水深護岸の越波実験において無次元越波流量が 10^{-3} 以下では実験値が図表による推定値の2~3倍であることを報告している。この相違の一因として, 算定図表による越波流量が大水深域で過小に推定された可能性が考えられる。今後の諸研究を通じて, この点が解明されることを期待したい。

直立護岸の越波流量は海底勾配にも影響され, 特に相対水深が小さいときに顕著に現れる。これは図-2, 3を比べると明らかであるけれども, 図-5は堤脚水深が0の場合を取り出して示したものである。明らかに, 勾配1/10のほうが $y = -\ln(q^*)$ の値が小さく, すなわち無次元越波流量が大きくなっている。

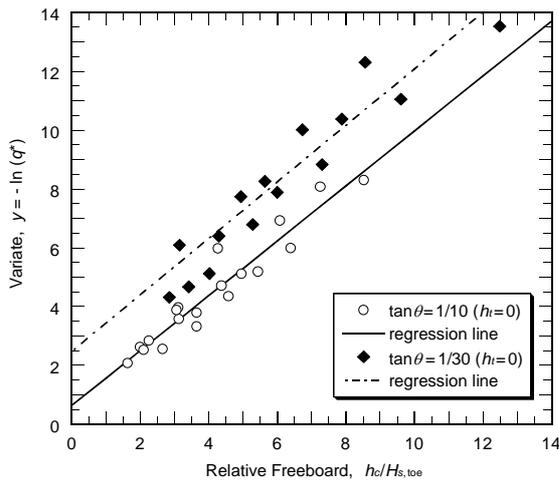


図-5 海底勾配による無次元越波流量の差異 (堤脚水深0の場合)

しかし, CLASHデータベースは多数の研究機関のデータを集成したものであるため, データセットごとの特性が異なる。相対水深ごとにグループ分け

して直線回帰式を当てはめると, 相対水深によっては全体の傾向から外れるものも現れる。そうしたグループに対しては, 図-4のようなプロット図上で相関係数最大の回帰式にこだわらず, データからのずれが大きくなる範囲で回帰直線を引き直し, 係数値が相対水深によって比較的滑らかに変化するように選定した。

海底勾配については, 勾配1/10と勾配1/20以下とに二分してデータを解析した。このようにして求めた回帰直線の切片A(比例係数)と勾配B(勾配係数)の値を表-2に示す。対象とした総計715個のデータのうち, 170データは合田ら(1975)の実験値であり, これらは主として相対水深が小さい範囲のものである。

表-2 直立護岸の相対堤脚水深のグループごとの回帰直線の係数値

相対堤脚水深 $h_t/(H_{1/3})_{toe}$	比例係数A		勾配係数B			
	海底勾配	海底勾配	海底勾配	海底勾配		
範囲	代表値	データ数	1/10	1/100	1/10	1/100
4.0~23	6	131 (0)	-	3.64	-	2.21
3.0~3.9	3.5	61 (0)	-	3.72	-	2.34
2.0~2.9	2.5	117 (1)	3.8	3.5	2.67	2.14
1.80~1.99	1.9	47 (3)	3.6	3.5	2.16	2.33
1.60~1.79	1.7	59 (2)	3.4	3.5	2.03	2.06
1.40~1.59	1.5	78 (28)	3.5	3.24	2.0	1.81
1.20~1.39	1.3	65 (28)	3.4	3.15	2.0	1.97
1.00~1.19	1.1	47 (29)	3.22	3.5	2.3	2.0
0.80~0.99	0.9	57 (30)	3.45	3.1	1.97	1.71
0.63~0.79	0.72	21 (15)	2.27	-	1.58	-
0	0	34 (34)	0.62	2.0	0.93	1.0

注: 1) データ数の括弧内は合田ら(1975)のデータである。
2) 海底勾配1/100は勾配1/20~1/1000の略記である。

このようにして選定した係数AとBの値に対して, これらを定式化することを考えた。まず, CLASHデータベースのうち $h_t/H_{s,toe} = 4 \sim 23$ のデータには相対水深の影響が見られないので, $h_t/H_{s,toe} > 4.0$ 以上では一定値をとるものと仮定し, そうした特性を持つ漸近関数として双曲線正接関数 ($\tanh x$) を選んだ。すなわち, 式(1)の比例係数Aと勾配係数Bをまず次のように相対設置水深 $h_t/H_{s,toe}$ の関数で表した。

$$A = A_0 \tanh \left[b_1 \frac{h_t}{H_{s,toe}} + c_1 \right]$$

$$B = B_0 \tanh \left[b_2 \frac{h_t}{H_{s,toe}} + c_2 \right]$$
(16)

これらの関数の定数 A_0, B_0 は, $h_t/H_{s,toe}$ が十分に大きいときの漸近値を表す。また, 係数 b_1, b_2 は定数 A_0, B_0 への漸近の速度をコントロールする。一方, 係数 c_1, c_2 は関数の切片の値を制御する。表-2に示した係数A, Bの値を図-6, 7のように相対水深に対してプロットし, (b_1, c_1) と (b_2, c_2) の値をいろいろ変え, 式(16)の関数がほぼ表-2の値に適合するよう

な係数値を試行錯誤的に選定した。この結果が表 - 3 である。

表 - 3 係数 A, B に対する当てはめ関数式 (16) の係数

海底勾配 $\tan\theta$	係数A			係数B		
	A_0	b_1	c_1	B_0	b_2	c_2
1/10	3.6	1.4	0.1	2.3	0.6	0.8
1/20 ~ 1/1000	3.6	1.0	0.6	2.3	0.8	0.6

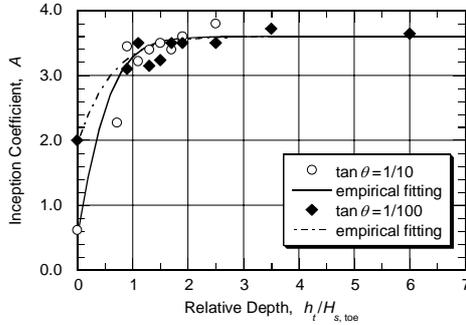


図 - 6 直線回帰式の係数 A の値とその推定曲線

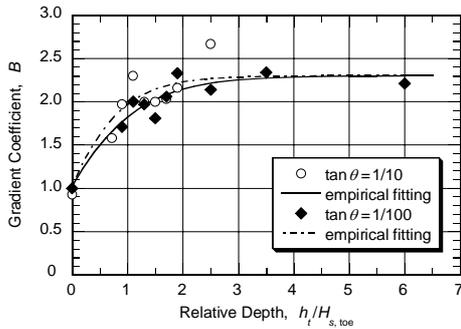


図 - 7 直線回帰式の係数 B の値とその推定曲線

回帰直線の当てはめによって得られた比例係数 A と勾配係数 B の値は、必ずしも相対水深に応じて滑らかに変化しているわけではない。このため、図 - 6, 7 の曲線の当てはめと $b_1 \sim c_2$ の係数値の選定には恣意的な要素が残る。特に、図 - 7 の二つの曲線は海底勾配ごとの当てはめが逆のようにも見える。しかし、データのばらつきが大きくて判定が難しいことと、最終的に直立護岸のデータ全体に対する適合度を勘案して、このように設定したものである。

表 - 3 の係数の (b_1, c_1) と (b_2, c_2) の組に対し、これらの値は海底勾配 $\tan\theta$ に比例すると仮定（ただし、 c_1 については $\tan\theta$ の 1/4 乗に比例と仮定）し、勾配 1/20 ~ 1/1000 の代表値として 1/100 を用いて、これらを海底勾配の関数として表示して定めたところ、係数 A, B の推定式が次のように求められた。

$$A = A_0 \tanh \left[\begin{array}{l} (0.956 + 4.44 \tan \theta) \\ \times (h_t / H_{s,toe} + 1.242 - 2.032 \tan^{0.25} \theta) \end{array} \right] \quad (17)$$

$$B = B_0 \tanh \left[\begin{array}{l} (0.822 - 2.22 \tan \theta) \\ \times (h_t / H_{s,toe} + 0.578 + 2.22 \tan \theta) \end{array} \right] \quad (18)$$

ここに、

$$A_0 = 3.4, \quad B_0 = 2.3 \quad (19)$$

この定式化においては、式 (19) の比例定数を本来の $A_0 = 3.6$ から $A_0 = 3.4$ に低減させている。これは、全データに当てはめた結果の適合度を高めるための措置である。この 3.4 の数値は、式 (14) に戻すと $\exp(-3.4) = 0.033$ となり、これは直立護岸に対する EurOtop 方式の式 (4) の係数 0.04 とかなり近い値である。

なお、CLASH データベースには収録されていないが、Grüne et al. (2004) は $H_{s,toe} = 0.60 \sim 1.45$ m という大きな波を使って直立護岸の越波流量を測定し、式 (14) の推定式で $A = 4.3, B = 1.65$ に設定したものが実験データを説明するとしている。護岸前面の海底勾配は 1/13.3、堤脚の相対水深は $h_t / H_{s,toe} = 0.9 \sim 2.5$ である。この条件に対して式 (17), (18) を適用すると $[A = 3.36, B = 1.82] \sim [A = 3.40, B = 2.24]$ となる。

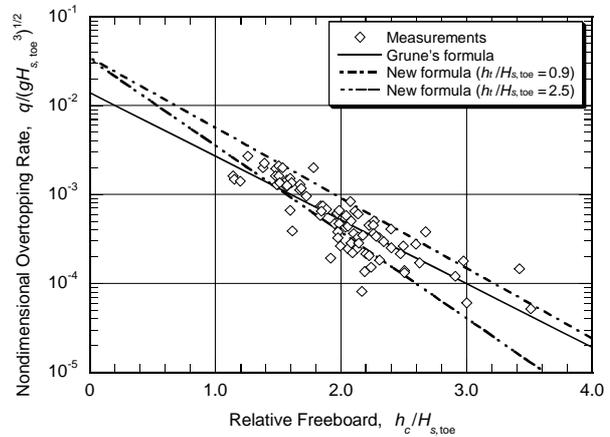


図 - 8 Grüne ほか (2004) の実験データに対する当てはめ

この実験値を論文の図表から読みとって再プロットしたのが図 - 8 である。図中には $h_t / H_{s,toe} = 0.9$ と 2.5 に対する二つの推定式ならびに Grüne et al. の経験式も示しており、式 (17), (18) による推定式が Grüne et al. の実験データをほぼ上下に挟む形となっている。したがって、式 (17) ~ (19) の係数を用いた越波流量の推定式は、この大型実験によっても検証されたと言える。

(3) 直立護岸に関する CLASH データベースに対する新越波流量推定式の適合度

新しく導いた式 (17) ~ (19) の係数を使い、式 (14) を用いて付表 - 2 の 715 データの越波流量 q_{est}^* を推定した。この推定流量を CLASH データベースに記載されている越波流量の実験値 q_{meas}^* と比較した結果を図 - 9 に示す。ただし、推定値、実験値ともに無次元流量で示している。図には推定値が実験値に等しいケースおよび推定値が実験値の 10 倍と 0.1 倍の範囲を示す斜めの直線を引いてある。データのばらつきが大きいため、この限界値を超えるものもか

なり見られる。

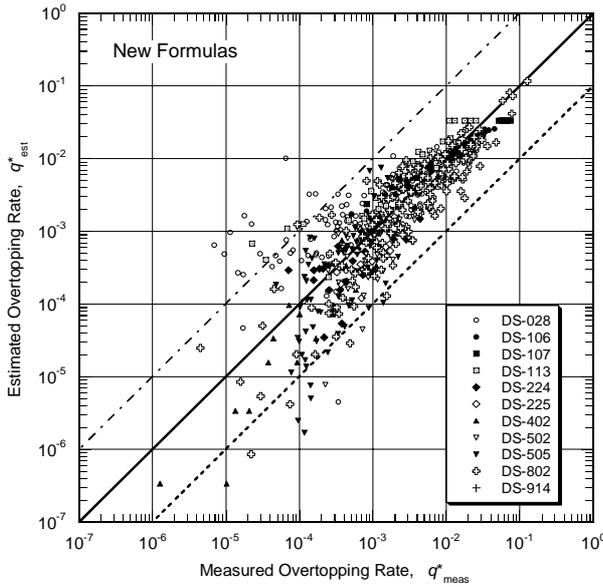


図 - 9 CLASHデータベースの直立護岸の越波流量の実験値と推定値の比較

新しい越波流量の推定式による値 q^*_{est} と実験値 q^*_{meas} の比の幾何平均は1.023, その幾何標準偏差は3.09である。すなわち, q^*_{est}/q^*_{meas} の比が正規分布をしていることを前提として, 推定値が実験値の1/5 ~ 5倍の範囲に全体の89%が入っているといえる。

ここに, 幾何平均というのは次の定義による。すなわち, 越波流量比の自然対数の平均値を求め, それを指数関数の値に変換したものである。

$$\begin{aligned} \bar{x}_G &= \left[\prod_{i=1}^N x_i \right]^{1/N} = \exp \left\{ \ln \left([x_1 \times x_2 \times \dots \times x_N]^{1/N} \right) \right\} \\ &= \exp \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \right] : x = \frac{q_{est}}{q_{meas}} \end{aligned} \quad (20)$$

また, 幾何標準偏差は次式で定義したものである。すなわち, 越波流量比の自然対数の標準偏差を求め, それを指数関数の値に変換したものである。

$$\sigma(x_G) = \exp \left\{ \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((\ln x_i)^2 - (\ln \bar{x}_G)^2 \right) \right]^{0.5} \right\} : x = \frac{q_{est}}{q_{meas}} \quad (21)$$

このように幾何平均を導入したのは, 今回のデータのように流量比の変動範囲の下限値が0であって上限値がきわめて大きくなるときには, 値の大きな個別データに影響されて, 算術平均が1.0以上の大きな値となるなど, 適切な答えが得られないためである。

なお, データセットごとの流量比の幾何平均と幾何標準偏差は付表 - 2 に記載している。越波流量の推定値と実験値との比の幾何平均は, データセットによってかなり変化し, 最も小さいのはデータセット DS-001 の 0.41 であり, 最も大きいのはデータセット DS-914 の 3.68 である。合田ら (1975) のデー

タセット DS-802 については, 幾何平均比が 0.722 であり, 式 (17) ~ (19) の係数を用いた式 (14) がやや小さな推定値を与えている。これは, CLASH データセットの全体に対して最適となるように係数値を設定したことによる。

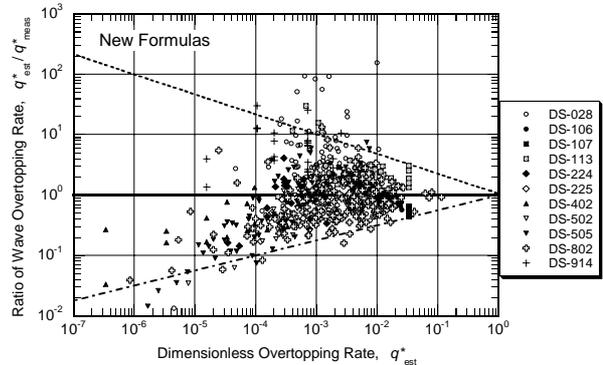


図 - 10 直立護岸に対する新方式による越波流量推定値の誤差範囲

付表 - 2 には EurOtop 方式による越波流量の推定値に対する流量比の幾何平均と幾何標準偏差も記載してある。各データセットに対する流量比の幾何平均は新推定式によるものと異なるけれども, データセットによって流量比が大きく変動する状況は同じであり, 流量比の変動が推定式の精度よりも実験ごとの諸条件の差異によることを示唆している。

また, 越波流量の推定値と実験値との差は, 無次元越波流量が小さくなるにつれて増大する。無次元越波流量の推定値 q^*_{est} を横軸とし, 流量比 q^*_{est}/q^*_{meas} を縦軸にとって, 誤差範囲の形で図示したのが図 - 10 である。

一部に実験値の100倍近い推定値を与えるケースもあるけれども, 大半のデータは図中の破線に挟まれる次の変動範囲に入っている。

$$\frac{q^*_{est}}{q^*_{meas}} = 1.0 \times q^{*1/4}_{est} \leftrightarrow 1.0 \times q^{*-1/3}_{est} : q^* < 1.0 \quad (22)$$

ここに, q^*_{est} は式 (14) で推定した無次元越波流量である。この変動幅は, 合田・岸良・神山 (1975) が越波流量推定図表に対して与えたものよりも相当広くなっている。すなわち, 直立護岸の越波流量図表では $q^*_{est} = 1.4 \times 10^{-4}$ のときの変動範囲が 0.4 ~ 1.8 倍と見積もられており, 今回はこれが約 0.1 ~ 20 倍と大幅に増大している。これは, CLASH データベースの多様なデータに対して適用可能な推定式を導いたことによるものである。

一方, 付表 - 2 のデータに対して「EurOtop 越波マニュアル」に紹介されている式 (4) ~ (7) を用いて越波流量を推定してその誤差範囲を調べると, 図 - 11 のような結果となる。ただし, この方式では汀線, すなわち $h_t = 0$ の越波流量を推定できないので, 対象は 681 データであり, 全体としての幾何平均は 1.103, 幾何標準偏差は 2.88 と僅かに過大評価気味である。しかしながら図 - 11 で明らかなように, 無

次元越波流量の推定値が大きくなるときの過大な越波流量を与えるという特定の傾向を示しており、破線で示す変動範囲は次式のような偏った形となる。

$$\frac{q_{est}^*}{q_{meas}^*} = 2.0 \times q_{est}^{*2/7} \leftrightarrow 20 \times q_{est}^{*1/6} \quad ; \quad q^* < 1.0 \quad (23)$$

すなわち、変動幅は小さいものの流量比の変動の中心軸が右上がりに傾斜しており、越波流量の推定公式としての妥当性に疑問を投げかける。なお、ここでの q_{est}^* は式 (4) ~ (7) で推定した無次元越波流量である。

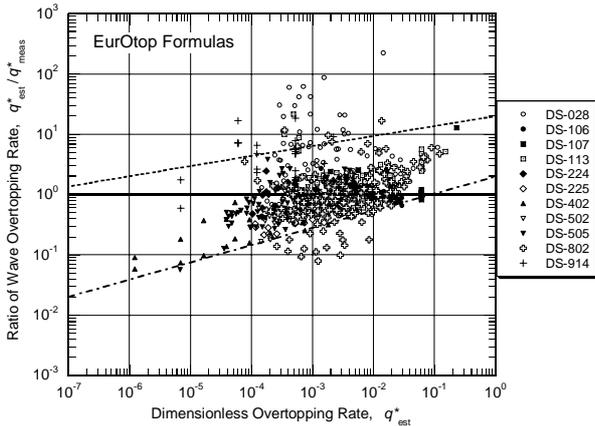


図 - 11 直立護岸に対するEurOtop方式の越波流量推定値の誤差範囲

6. 傾斜護岸に対する越波流量の推定式

(1) 法面傾斜に対する係数補正の導入

CLASHデータベースには全体で 10,532 データが収録されており、主体は緩傾斜の海岸堤防であって、バーム付きの斜面や捨石その他の粗度・透水性被覆層のものも数多く含まれている。この中から構造が複雑でない一様傾斜の滑斜面であって越波流量が非ゼロであり、波が直入射の 1254 データを抽出した。付表 - 3 はデータセットごとに波浪条件その他の範囲を記載したものであり、また後述する新しい越波流量推定式による推定流量と実験値との比の幾何平均および幾何標準偏差、ならびに EurOtop 方式による結果も記載している。

また、玉田・井上・手塚 (2002) の法面勾配 3 割、5 割、および 7 割の緩勾配傾斜堤の実験データについても、Excel ファイルを玉田 崇氏のご厚意によって提供して頂いたので、これも検討データとして用いた。このデータ概要を付表 - 4 に示した。

今回検討したデータはすべて室内実験の結果であり、そのうち DS-217 はドイツで行われた $H_{m0, toe} = 0.56 \sim 1.48$ m という大型実験である。ただし、水深一様の大型水路に 6 割勾配の滑斜面を設置したもので、 $H_{m0, deep}$ は斜面前の波高を転記したものである。傾斜護岸は法面勾配が主パラメータであるので、

1254 データを法面勾配に応じて付表 - 5 のようにグループ分けした。

CLASHデータベースに記載されている滑斜面の越波流量データは、相対堤脚水深が $h_t/H_{s, toe} > 1.0$ という条件のものである。そのうち、326 データが $1.0 < h_t/H_{s, toe} < 2.0$ であり、残りの 928 データが $h_t/H_{s, toe} > 2.0$ である。なお、玉田・井上・手塚 (2002) の実験は、相対水深が $h_t/H_{s, toe} = 0 \sim 1.3$ と小さく、データの大半は $h_t/H_{s, toe} < 1.0$ である。

堤脚水深の影響については、直立護岸を対象として式 (17), (18) の経験式が得られているので、滑斜面の越波流量に対してもこの両式が適用できるものと仮定し、定数 A_0, B_0 に法面勾配の影響を取り入れることにした。すなわち、 $1.0 < h_t/H_{s, toe} < 2.0$ では堤脚水深の影響が若干予測されるけれども、データ数を多く取るために堤脚水深の影響を無視し、法面勾配ごとに分類した各グループに対して式 (15) の直線回帰式を当てはめ、係数 A, B の値を求めた。この係数は、式 (17), (18) における比例定数 A_0, B_0 に対応するものであり、付表 - 4 には $A_{0, reg}, B_{0, reg}$ としてその値を記入した。なお法面勾配のうち、 $\cot \alpha_s = 1.19 \sim 1.69$ および $5.21 \sim 7.0$ のデータはそれぞれ同じグループとした。

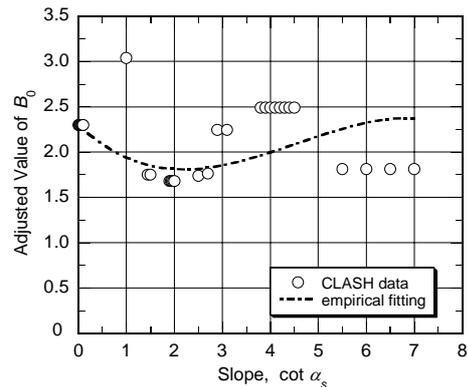


図 - 12 越波流量の比例定数 B_0 と法面勾配との関係

二つの定数のうち $A_{0, reg}$ は法面勾配によって大きく変動し、一定の傾向を見いだせない。しかし、 $B_{0, reg}$ は法面が 2 割勾配付近で最小となるような傾向を示している。そこで、直立護岸に対する $B_0 = 2.3$ も検討対象に加えて、定数 B_0 を法面勾配 $\cot \alpha_s$ に対してプロットしたのが図 - 12 である。プロットに際しては、グループごとのデータ数が多いものはその数を考慮して点の数を増している。

図中の一点鎖線は、データに対して当てはめた 3 次回帰曲線の各係数をやや恣意的に調整した結果である。調整を行ったのは、 $\cot \alpha_s = 4.0$ および 6.0 付近のデータ群に引きずられて回帰曲線の 3 次項の影響が強くなり過ぎるのを抑えるためである。また、 $\cot \alpha_s = 1.0$ の B_0 の値が突出しているのは、付表 - 5 に示されるように、対をなす A_0 の値が小さすぎるためである。定数 B_0 に対する当てはめ関数は次の通りである。

$$B_0 = 2.3 - 0.5 \cot \alpha_s + 0.15 \cot^2 \alpha_s - 0.011 \cot^3 \alpha_s \quad (24)$$

$$: 0 \leq \cot \alpha_s \leq 7$$

勾配定数 B_0 を式 (24) で設定してデータに当てはめると、比例定数 A_0 は直線回帰で求めた $A_{0,reg}$ の値が必ずしも適切でなくなる。このため、法面勾配ごとに分類した各グループについて、式 (24) の勾配定数を用い、比例定数の値 $A_{0,opt}$ をいろいろ変えて越波流量の推定値を試算し、越波流量比の幾何平均が 1.0 となるような比例定数の値 $A_{0,opt}$ を試行錯誤で算定した。この結果は付表 - 5 に記載した通りである。

さらに、玉田・井上・手塚 (2002) の法面勾配 3 割, 5 割, および 7 割の緩勾配傾斜堤の実験データについても、法面勾配ごとに最適な比例定数の値を試行錯誤で算定し、この結果も付表 - 5 に記入した。

そして、直立護岸 ($\cot \alpha_s = 0$) の比例定数 $A_0 = 3.4$ も含め、 $A_{0,opt}$ の全ての結果を法面勾配 $\cot \alpha_s$ に対してプロットしたのが図 - 13 である。ここでも、各グループのデータ数に応じてプロットする点の数を増やしている。このデータに対して 3 次曲線を当てはめたところ、次の結果が得られた。この回帰曲線は図中に示してある。

$$A_0 = 3.4 - 0.734 \cot \alpha_s + 0.239 \cot^2 \alpha_s - 0.0162 \cot^3 \alpha_s \quad (25)$$

$$: 0 \leq \cot \alpha_s \leq 7$$

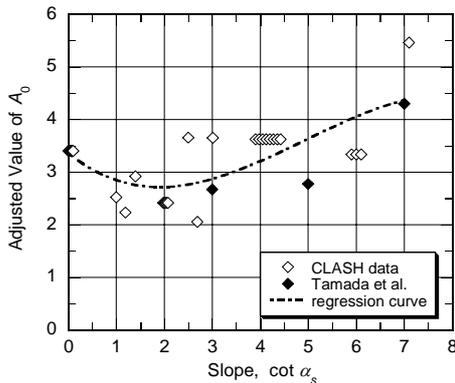


図 - 13 越波流量の比例定数 A_0 と法面勾配との関係

無次元越波流量は式 (1) から明らかなように、 $\exp(-A)$ に比例する。したがって、天端高 0 の条件では $\cot \alpha_s = 1.9$ のときに越波流量が最大となり、直立護岸の 1.9 倍となる。ただし、相対天端高の比例係数 B が $\cot \alpha_s = 2.1$ 付近で最小となるため、傾斜護岸の越波流量は相対天端高の増大につれて直立護岸よりも一層大きくなる。ただし玉田・井上・手塚 (2002) が提示したような、直立護岸に対する傾斜護岸の越波流量の比率が相対水深に影響される状況については、検討していない。

(2) 傾斜護岸に関する CLASH データベースに対する越波流量推定式の適合度

付表 - 3 の不透過滑面の傾斜護岸に対する実験条件について、式 (19) の定数 A_0, B_0 を式 (24), (25) で置

き換え、式 (14) に式 (17), (18) の係数を代入して越波流量 q_{est}^* を推定した。そして、CLASH データベースに記載されている越波流量の測定値 q_{meas}^* と比較した結果が図 - 14 である。両者とも、無次元越波流量の形で表示している。

図中には、推定値が実験値に等しいケース、推定値が実験値の 10 倍と 0.1 倍の範囲を示す斜めの直線を引いてある。ここでは法面勾配ごとにグループ分けしてデータを表示している。 $\cot \alpha_s = 4$ のグループその他で一部のデータに対する推定値が実験値の 10 倍を超えたり、逆に $\cot \alpha_s = 6$ のグループその他で推定値が実験値の 0.1 倍以下になっているなど、法面勾配のグループによって推定値の適合度が異なる。ただし、法面勾配による特定の傾向はみられない。なお、法面勾配のグループごとの幾何平均と幾何標準偏差は付表 - 5 に記載してある。この表には EurOtop 方式の式 (1) を用いて越波流量を推定したときの結果も記載してある。

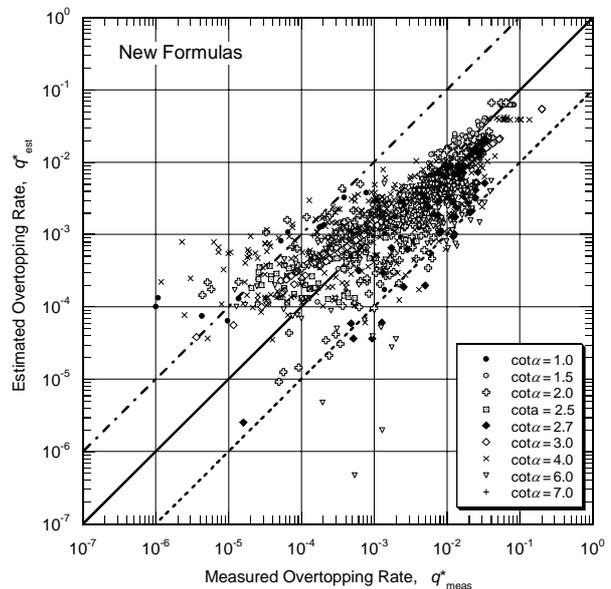


図 - 14 CLASH データベースの滑斜面の越波流量の実験値と推定値の比較

図 - 14 に示した 1254 データ全体に対する流量比の幾何平均は 1.004 であって、平均的には的確な推定値を与えている。ただし、幾何標準偏差は 3.78 であるので、流量比の正規分布を仮定すると全体の 90% が含まれる推定値の範囲が測定値の 0.16 ~ 6.2 倍と見積もられる。このようにデータの分散が大きいのは、付表 - 3 に示すようにデータセットごとの偏りが大きいためである。たとえば、データセット DS-221 は流量比の幾何平均が 5.16 ときわめて大きく、一方、DS-501 では幾何平均が 0.193 ときわめて小さい。

これら二つのデータセットに対して EurOtop 方式で越波流量を推定すると、越波流量比の幾何平均がそれぞれ 1.79 と 0.054 と、過大あるいは過小の値であって、これらのデータセットが全体から外れた傾

向にあることが示唆される。なお、EurOtop方式を用いたときの全体としての推定結果は、流量比の幾何平均が0.776であって平均的に過小となっている。ただし、幾何標準偏差は3.03とやや小さめである。

一方、堤脚水深が小さい玉田・井上・手塚(2002)の実験条件にEurOtop方式を適用すると、式(1)による越波流量の推定値が平均で実験値の0.15倍ときわめて小さい。図-15は付表-4に概要を示した玉田ほかの実験データに対する推定越波流量を実験値と対比した結果である。ただし、汀線のデータには適用していない。

図中の $q_{est}^* = q_{meas}^*$ の斜めの直線の上にあるものは全体の約10%に過ぎず、推定値が実験値を大幅に下回ることが明瞭である。また、海底勾配1/10のデータが勾配1/30のデータよりも一層過小評価となっている。すなわち、極浅海域での海底勾配の影響を無視しているために、こうした過小評価を招いている。

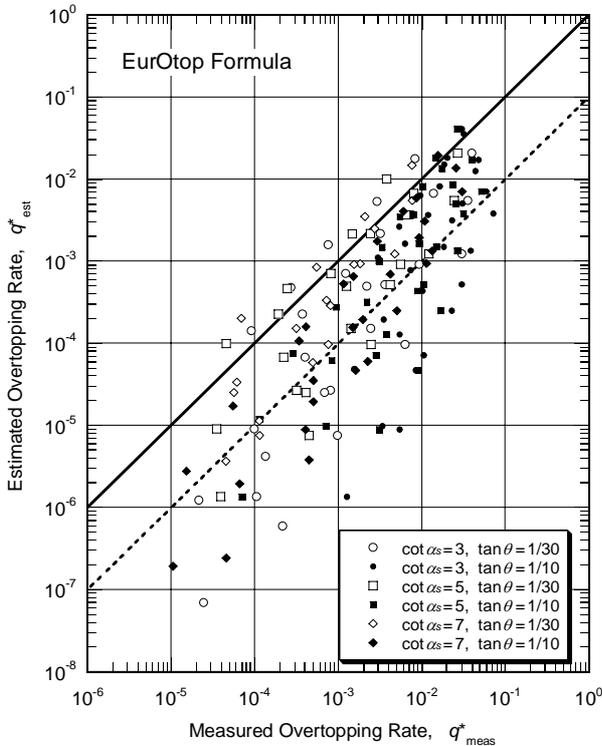


図-15 玉田ほかの傾斜護岸の越波流量実験値とEurOtop方式の推定値との比較

EurOtop方式が玉田ほかの実験値に対して過小評価となるのは、式(1)そのものに相対水深の影響を取り入れていないためである。すなわち、EurOtop方式を相対堤脚水深 $h_t/H_{s,toe} < 1.0$ の領域で適用することは避けるべきであろう。

(3) 傾斜護岸に対する推定越波流量の誤差範囲

傾斜護岸の越波流量の推定精度を表示するもう一つの方法は、推定越波流量の変動範囲を無次元越波流量に対して示すことである。図-16は式(24)、(25)の定数 A_0 、 B_0 を用いる方式による推定越波流量と実

験値の比の変動範囲、いわば誤差範囲を示したものである。

図中の二本の破線は、データの範囲を大まかに示したもので、次式で表される。

$$\frac{q_{est}^*}{q_{meas}^*} = 1.0 \times q_{est}^{*1/3} \leftrightarrow 1.0 \times q_{est}^{*-2/5} : q^* < 1.0 \quad (26)$$

直立護岸に対する式(22)に比べて、推定値の誤差範囲が広がっている。また $q_{est}^* = 10^{-4} \sim 10^{-2}$ の範囲で推定値が測定値の10~400倍となるデータも見られるなど、推定値の信頼度が高いとは言えない。

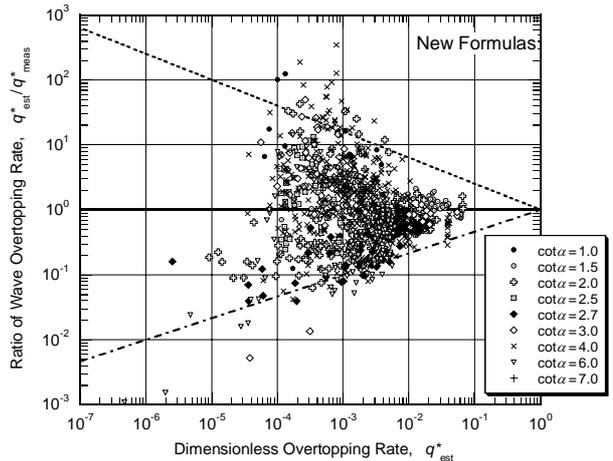


図-16 傾斜護岸に対する新方式による越波流量推定値の誤差範囲

一方、EurOtop方式で越波流量を推定した場合の誤差範囲は、図-17に示すようになる。図中に破線で示すデータの大きな変動範囲は、次式で示すものである。

$$\frac{q_{est}^*}{q_{meas}^*} = 3.0 \times q_{est}^{*1/2} \leftrightarrow 10.0 \times q_{est}^{*1/10} : q^* < 1.0 \quad (27)$$

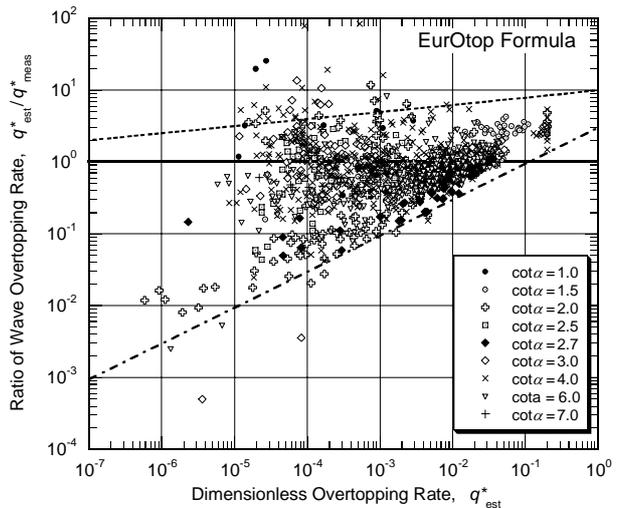


図-17 傾斜護岸に対するEurOtop方式による越波流量推定値の誤差範囲

すなわち、変動範囲の中心軸がやや右上がり傾いており、越波流量の大きいときに過大に推定し、越

波流量の小さいときに過小に推定する傾向がある。図 - 10の直立護岸の場合ほど極端ではないが、越波流量の推定方式としては問題を抱えていると言える。なお、この図には図 - 15に示した玉田・井上・手塚(2002)のデータは記載していない。

さらに、新方式の適用性を玉田ほかのデータに対して検討した結果を図 - 18に示す。このデータに関しては、付表 - 5の法面勾配ごとの平均値が示すように、5割勾配護岸に対する推定値がやや過小となっており、その傾向は図中でも認められる。越波流量比の変動範囲はほぼ次式で表され、CLASHデータに対する式(26)よりは狭くなっている。

$$\frac{q_{est}^*}{q_{meas}^*} = 1.0 \times q_{est}^{*/3} \leftrightarrow 1.0 \times q_{est}^{*-1/3} : q^* < 1.0 \quad (28)$$

また、図 - 16のように上限を超えて大幅に過大となるデータは存在せず、今回の越波流量推定式が玉田ほかのデータに対してもかなりよく適用できることを示している。

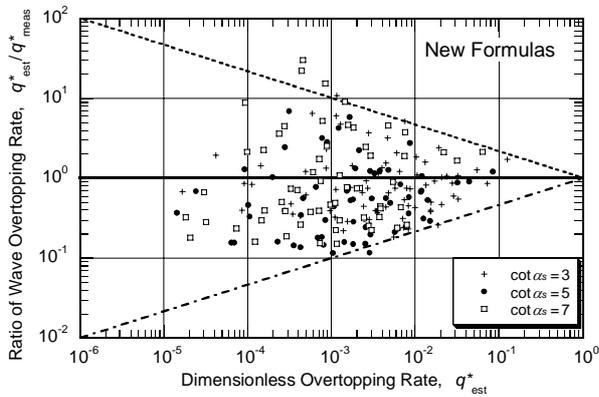


図 - 18 玉田ほか(2002)の傾斜護岸データに対する新方式による越波流量推定値の誤差範囲

7. 消波護岸の越波流量推定式

これまで述べてきたように、式(14)の越波流量推定式は直立護岸と傾斜護岸の広い範囲に対して適用できることが分かったので、この方式を消波護岸に適用することを検討した。データとして使用したのは、合田・岸良・神山(1975)の付表 - 3, 4の122個のデータ(陸上部を除く)である。なお、このデータはCLASHデータベースにも掲載されている。

ここではこれまでの直立護岸および傾斜護岸に対する越波流量算定式を参考にし、消波護岸の越波流量算定式として次のようなものを案出した。

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{s,toe}^3}} = q^* = \exp \left[- \left(A_D + D \frac{h_c}{H_{s,toe}} \right) \right] \quad (29)$$

ここに、

$$A_D = 3.4 \tanh \left[\begin{aligned} &(0.956 + 4.44 \tan \theta) \\ &\times (h_t/H_{s,toe} + 1.242 - 2.032 \tan^{0.25} \theta) \end{aligned} \right] \quad (30)$$

$$D = (1.90 - 90 \tan^2 \theta) \times \exp[(0.348 + 87.7 \tan^2 \theta) \times h_t/H_{s,toe}] \quad (31)$$

式(30)の係数 A_D は、統一的推定式の比例係数 A に対する式(17)を直立護岸に対する定数 $A_0 = 3.4$ のままで用いたものである。一方、係数 D については統一的推定式の勾配係数 B に対する式(18)を修正する方式では適切な結果が得られなかったため、消波護岸のデータに最も適合するように、試行錯誤によって新しく設定したものである。

この算定式を消波護岸の実験ケースに当てはめて推定した越波流量を実験値と比較した結果が図 - 19である。この図は、越波流量の推定値の変動範囲を無次元越波流量の推定値に対して表示したもので、越波流量比の変動範囲は直立護岸に対する式(22)と下限は同じであるが、上限は低くなっている。すなわち、

$$\frac{q_{est}^*}{q_{meas}^*} = 1.0 \times q_{est}^{*/4} \leftrightarrow 1.0 \times q_{est}^{*-1/4} : q^* < 1.0 \quad (31)$$

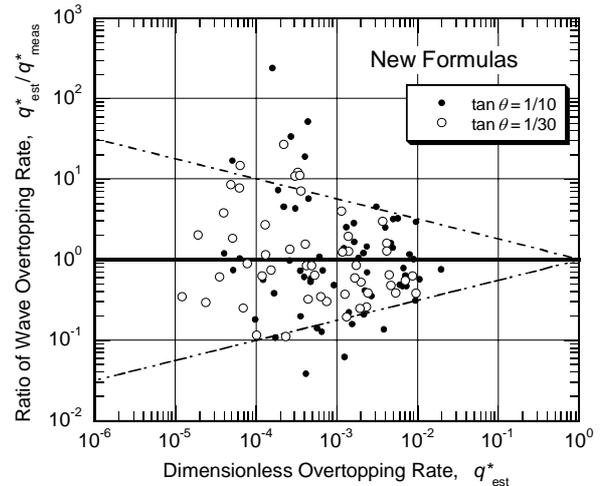


図 - 19 消波護岸に対する新方式による越波流量推定値の誤差範囲

消波護岸の越波流量推定図表については、その変動範囲を合田・岸良・神山(1975)がまとめており、たとえば $q_{est}^* = 1.4 \times 10^{-4}$ のときの変動範囲を0.3~2.0倍と見積もっている。式(31)ではこのときの変動範囲が0.1~10倍であるので、推定精度が低下している。これは、推定図表を単純な算定式で近似したことの結果であり、計算の便利さと精度は両立しがたいと言える。

なお、消波護岸に対する越波流量の推定値と実験値との比の幾何平均は1.034、幾何標準偏差は4.33であり、海底勾配による差は小さい。ただし、幾何平均は勾配1/10が4.89、勾配1/30が3.69であり、前者のほうがデータのばらつきが大きい。

8. まとめ

近年のEUにおけるCLASHプロジェクトによる多様かつ大量の越波実験データを解析し、直立護岸、滑面傾斜護岸、および消波護岸の越波流量を推定する統一算定式を導いた。以下はそのまとめである。

- (1) CLASHデータベース中の1525データを用いて合田モデル(1975)による浅海域の有義波高の簡略算定式を検定したところ、測定値に対する推定波高の比の総平均値が1.053、標準偏差が0.203となり、ばらつきは大きいものの平均的な信頼度が高いことが検証された。
- (2) 越波流量は護岸設置位置における有義波高を基準として計算する。
- (3) 護岸の越波量推定には、護岸の相対天端高を主パラメータとする式(14)の指数関数型を用い、その比例係数および勾配係数は海底勾配、護岸設置個所の相対水深、および法面勾配を複パラメータとして算定する。
- (4) 越波量推定式の比例・勾配係数は式(17)、(18)で算定し、傾斜護岸については比例係数の定数を式(24)、(25)で補正する。
- (5) 消波護岸の越波流量は、勾配係数を式(31)で算定して推定する。
- (6) CLASHデータベース中の直立護岸の715データについて越波流量を推定したところ、測定値に対する比率の幾何平均が1.023、幾何標準偏差が3.09であり、新推定式の信頼性が確認された。
- (7) CLASHデータベース中の不透滑面の傾斜護岸の1254データについて越波流量を推定したところ、測定値に対する比の幾何平均が1.004、幾何標準偏差が3.78であり、新推定方式の信頼性が確認された。
- (8) イギリス・オランダ・ドイツ三国が2007年に取りまとめた「EurOtop越波マニュアル」で紹介されている越波流量推定式のうち、直立護岸に関するものは越波量が多いときに過大に推定する傾向が顕著であり、推奨できない。
- (9) 同じく傾斜護岸に関するものは、相対水深の小さい玉田・井上・手塚(2002)の実験値に対して過小な推定値を与えるので、相対水深1.0以下の条件に対しては推奨できない。
- (10) 直立護岸、滑面傾斜護岸、および消波護岸の越波流量は、浅海域の有義波高を合田モデルで算定することによって、多様な条件に対して容易に計算可能である。ただし、越波流量推定図表に比べて推定精度が低いので、推定値の取り扱いには注意する必要がある。
- (11) 越波流量算定図表のうち、護岸前面水深がその場所における有義波高の4倍以上の大水深護岸については越波流量を過小に評価する可能性があり、水理実験で確認する必要がある。

なお、本文中に述べたように玉田・井上・手塚

(2002)の緩傾斜護岸の越波実験データは、(株)いであの玉田 崇技師より頂戴したものである。ここに記してご厚意に感謝する次第である。

参考文献

- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻 第3号, pp.59-106.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計(増補改訂), 鹿島出版会, 333 p.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 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.
- 神山 勉・鹿島遼一 (1977): 消波護岸の越波に関する現地観測と水理実験の比較, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 736-740.
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 581-585.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 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.
- 玉田 崇・井上雅夫・手塚崇雄 (2002): 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.
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M. (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng.*, Hamburg, ASCE, pp. 1-19.
- Booji, N., Ris, R.C., and Holthuijsen, L.H. (1999): A third-generation wave model for coastal regions: Part I, model description and validation, *J. Geophys. Res.*, 104 (C4), pp. 7649-7666.
- Briganti, R., Bellotti, G., Franco, L., De Rouck, J., and Geeraerts, J. (2005): Field measurements of wave overtopping at the rubble mound breakwater of Rome-Ostia yacht harbour, *Coastal Engineering*, 52 (12), pp. 1155-1174.
- De Rouck, J., van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Franco, L. and Verhaeghe, H. (2002): Wave overtopping at coastal structures: Development of a database toward up-graded prediction model, *Coastal Engineering 2002 (Proc. 28th Int. Conf., Cardiff, Wales)*, ASCE, pp. 2140-2152.
- EA (UK)・ENW (NL)・KFKI (DE): *EurOtop Wave Overtopping of Sea Defenses and Related Structures – Assessment Manual*, June 2007, Section 5.2.1.
- Goda, Y. (1970): Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, 9(3), pp. 3-57.
- Goda, Y. and Kudaka, M. (2007): On the role of spectral width and shape parameters in control of individual wave height distribution, *Coastal Engineering Journal*, 49 (3), pp. 311-335.
- Grüne, J., Wang, Z., Bullock, G., and Obharai, C. (2004): Violent wave overtopping on vertical and inclined walls: Large scale model tests, *Coastal Engineering 2004 (Proc.*

29th Int. Conf., Lisbon), ASCE, pp. 4456-4468.

Van der Meer, J.W., Verhaeghe, H., and Steendam, G.J. (2005): *Database on Wave Overtopping at Coastal Structures*, CLASH WP2 database, Infram, Marknesse, The Netherlands.

Verhaeghe, H. (2005): *Neural network prediction of wave overtopping at coastal structure*, Doctorate Dissertation to Dept. Civil Eng., Ghent University.

記号表

A : 越波流量推定式の比例係数
 A_0 : 比例係数 A の定数
 $A_{0, \text{mod}}$: 傾斜護岸の法面勾配グループに対して、試行錯誤によって当てはめた比例定数 A_0 の最適値
 $A_{0, \text{reg}}$: 傾斜護岸の法面勾配グループに対して、直線回帰式で求めた比例定数 A_0 の値
 B : 越波流量推定式の相対天端高に乘じられる勾配係数
 B_0 : 勾配係数 B の定数
 $B_{0, \text{reg}}$: 傾斜護岸の法面勾配グループに対して、直線回帰式で求めた比例定数 B_0 の値
 c : 波速
 c_0 : 深海波の波速
 c_g : 波の群速度
 f : 波の周波数
 f_p : スペクトルピーク周波数
 g : 重力加速度
 H_{est} : 合田モデルの簡略式で求めた堤前有義波高
 H_{meas} : CLASHデータベースに $H_{m0, \text{toe}}$ として記載されている構造物前面の有義波高 ($= 4m_0^{1/2}$)
 $H_{m0, \text{deep}}$: 沖合地点のスペクトル有義波高 ($= 4m_0^{1/2}$)
 $H_{m0, \text{toe}}$: 構造物前面の測定有義波高 ($= 4m_0^{1/2}$)
 H_{rms} : 2乗平均波高
 H_0' : 換算沖波 (有義波) 波高
 $H_{1/3}$: ゼロアップクロス法で定義された有義波高
 $H_{s, \text{toe}}$: 護岸前面の有義波高 (実測あるいは合田モデルの簡略式で推定した値)
 h : 水深
 h_t : 構造物の前面水深
 K_r : 屈折係数
 K_s : 浅水係数
 $(K_s)_{\text{deep}}$: 沖波測定地点の浅水係数
 k : 波数 ($= 2\pi/L$)
 L : 波長
 L_0 : 深水波長
 m : Wallops 型スペクトルのべき指数
 m_n : スペクトルの n 次モーメント
 m_0 : スペクトルの 0 次モーメント
 n : データの個数
 q^* : 無次元越波流量
 q_{est} : 越波流量の推定値
 q_{meas} : 越波流量の実験値
 $S(f)$: 波の周波数スペクトル

T : 波の周期

$T_{m-1,0}$: スペクトルモーメント m_{-1} と m_0 で定義される周期

T_p : スペクトルのピーク周波数に対応する周期

$T_{1/3}$: ゼロアップクロス法で定義される有義波周期

α : 双峰型スペクトルにおける風波成分に対するうねり成分のエネルギーの比率

α_s : 傾斜護岸の法面が水平面となす角度

β : 構造物の垂線に対する波の入射角

β_{deep} : 深水域における波の入射角

β_{max} : 砕波帯内の最大有義波高の略算係数

β_0 : 汀線における有義波高の略算係数

β_1 : 砕波帯内の有義波高の水深比例係数

γ : JONSWAP型スペクトルのピーク増幅率

θ : 海底面が水平面となす角度

付録：越波流量推定の計算事例

本論文で案出した越波流量推定の新方式の適用事例として、ある一つの設計条件を取り上げて、直立護岸、傾斜護岸、および消波護岸の越波流量を推定してみる。

(1) 護岸の計画地点：

設置水深： $h_t = 5.0$ m，海底勾配： $\tan \theta = 1/50$

(2) 護岸の種類：

1) 直立壁： $\cot \alpha_s = 0$

2) 2割勾配斜面： $\cot \alpha_s = 2$

3) 消波護岸

4) 天端高 (共通)： $h_c = 5.0$ m

(3) 波浪条件：

1) 換算沖波波高： $H_0' = 4.0$ m

2) 有義波周期： $T_{1/3} = 10.0$ s

3) 波形勾配： $H_0'/L_0 = 4.0/(1.56 \times 10^2) = 0.0256$

(4) 堤前有義波高：

水深波長比が $h_t/L_0 = 0.032$ であるので、式 (9) の第 2 式によって計算する。式 (10) の係数は次のように求められる。

$$\beta_0 = 0.1192, \quad \beta_1 = 0.5656, \quad \beta_{\text{max}} = 0.9714$$

したがって、護岸設置地点の有義波高は次のように算定される。

$$H_{s, \text{toe}} = 0.1192 \times 4.0 + 0.5656 \times 5.0 = 3.305 \text{ m}$$

(5) 直立護岸の越波流量

まず、式 (17), (18) を用いて比例係数 A , および勾配係数 B を求める。その際の定数としては式 (19) の値、すなわち $A_0 = 3.4$, $B_0 = 2.3$ を用いる。相対堤脚水深 $h_t/H_{s, \text{toe}} = 5.0/3.305 = 1.380$ および海底勾配 $\tan \theta = 0.02$ を代入すると、次の値が得られる。

$$A = 3.296, \quad B = 2.140$$

したがって、越波流量が式 (14) によって次のよ

うに推定される。

$$q^* = \exp[-(3.296 + 2.140 \times 5.0/3.305)] \\ = 1.455 \times 10^{-3}$$

$$q_{\text{est}} = q^* \times (9.81 \times 3.305^3)^{1/2} = 0.0274 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

この推定越波流量の変動範囲を調べるため、式(22)によって範囲を求めると、流量比が $q^*_{\text{est}}/q^*_{\text{meas}} = 0.195 \leftrightarrow 8.83$ と推定される。したがって、推定越波流量は次のようになる。

$$q_{\text{est}} = 0.0031 \leftarrow 0.027 \rightarrow 0.14 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

(6) 傾斜護岸の越波流量

傾斜護岸の場合には、比例定数 A_0 を式(25)、減衰定数 B_0 を式(24)で算定する。 $\cot \alpha_s = 2.0$ として両式を適用すると、次の定数値が得られる。

$$A_0 = 2.758, \quad B_0 = 1.812$$

したがって、比例係数 A, B が次の値となる。

$$A = 2.674, \quad B = 1.686$$

越波流量の算定式は直立護岸と同じ式(14)であるので、越波流量が次のように推定される。

$$q^* = \exp[-(2.674 + 1.686 \times 5.0/3.305)] \\ = 5.39 \times 10^{-3}$$

$$q_{\text{est}} = q^* \times (9.81 \times 3.305^3)^{1/2} = 0.101 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

すなわち、直立護岸の約4倍の越波流量である。この越波流量の変動範囲は、式(26)によって $q^*_{\text{est}}/q^*_{\text{meas}} = 0.175 \leftrightarrow 8.08$ であるので、次のように推定

される。

$$q_{\text{est}} = 0.0125 \leftarrow 0.101 \rightarrow 0.58 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

(7) 消波護岸の越波流量

消波護岸については、比例定数 A_D と勾配係数 D を式(30)、(31)で算定する。ただし、 A_D は直立護岸に対する式(17)と同一の値である。そこで、勾配係数を計算すると次の値が得られる。

$$D = 3.459$$

越波流量の算定式(29)を適用すると、次の結果が得られる。

$$q^* = \exp[-(3.296 + 3.459 \times 5.0/3.305)] \\ = 1.977 \times 10^{-4}$$

$$q_{\text{est}} = q^* \times (9.81 \times 3.305^3)^{1/2} = 0.00372 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

すなわち、直立護岸の約1/7の越波流量と推定される。この越波流量の変動範囲を式(31)を用いて検討すると、 $q^*_{\text{est}}/q^*_{\text{meas}} = 0.119 \leftrightarrow 8.43$ であるので、次のように推定される。

$$q_{\text{est}} = 0.00044 \leftarrow 0.0037 \rightarrow 0.031 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

以上の計算例に見られるように、越波流量の推定値は大きな誤差範囲を伴っている。したがって、ここで求められる越波流量はあくまでも予備計画・設計段階の資料として扱い、実務設計では水理模型実験を行ってより信頼度の高い越波流量を求めることが望ましい。

付表 - 1 波高算定式の検定に用いたCLASHデータベースのデータセット一覧

データ セット	デー タ数	データ範囲						推定/実測 波高比	
		$H_{m0, \text{deep}}$ (m)	$T_{m-1,0 \text{ deep}}$ (s)	$\cot \theta$	β (°)	h_t (m)	$H_{m0, \text{toe}}$ (m)	平均	標準 偏差
DS-003	58	0.073 - 0.160	1.05 - 1.43	44-1000	0 - 45	0.096 - 0.144	0.029 - 0.137	0.905	0.280
DS-004 - 023	32	0.080 - 0.211	0.93 - 2.17	0 - 195	0	0.048 - 0.267	0.048 - 0.140	0.892	0.271
DS-042	111	0.030 - 0.242	1.08 - 4.30	10 - 50	0	0.200 - 0.400	0.035 - 0.221	1.088	0.091
DS-043	28	0.066 - 0.143	1.24 - 1.58	30	0	0.109 - 0.171	0.053 - 0.101	1.231	0.186
DS-111	80	0.360 - 1.400	2.27 - 13.64	50	0	1.500 - 1.830	0.403 - 1.281	1.047	0.064
DS-114	137	0.065 - 0.176	1.30 - 2.23	25-63	0	0.167 - 0.267	0.067 - 0.192	0.879	0.096
DS-221	33	0.095 - 0.220	1.44 - 2.61	100	0	0.180 - 0.600	0.103 - 0.190	1.103	0.044
DS-224	35	0.125 - 0.201	1.29 - 3.00	50	0	0.200 - 0.500	0.119 - 0.197	1.044	0.051
DS-226	92	0.132 - 0.153	1.32 - 2.25	100-250	0	0.047 - 0.353	0.023 - 0.146	1.183	0.137
DS-227	32	0.107 - 0.214	1.38 - 2.23	100	0	0.033 - 0.302	0.021 - 0.162	1.152	0.101
DS-307, 330, 375	32	0.079 - 0.274	0.92 - 2.12	23-250	0	0.145 - 0.200	0.064 - 0.190	1.041	0.383
DS-381	77	1.88 - 5.92	6.82 - 10.82	65	0.8 - 40	4.01 - 4.44	1.74 - 2.40	1.212	0.038
DS-502	47	0.050 - 0.148	0.97 - 1.51	10-50	0	0.090 - 0.247	0.031 - 0.099	1.394	0.245
DS-503	30	0.065 - 0.122	0.97 - 1.50	10	0	0.088 - 0.248	0.053 - 0.099	1.281	0.122
DS-504	29	0.063 - 0.122	0.97 - 1.50	10	0	0.086 - 0.245	0.053 - 0.094	1.265	0.120
DS-507	35	0.626 - 0.643	1.95 - 3.96	13	0	0.530 - 1.280	0.225 - 0.603	1.086	0.057
DS-601	56	0.075 - 0.190	0.91 - 1.83	24	0	0.159 - 0.192	0.081 - 0.159	1.043	0.194
DS-602, 604	74	0.075 - 0.220	1.00 - 1.86	24	0	0.134 - 0.196	0.070 - 0.135	0.975	0.113
DS-706	82	0.099 - 0.185	1.14 - 1.73	20	0	0.050 - 0.470	0.078 - 0.150	0.868	0.216
DS-916	45	0.151 - 0.277	1.45 - 2.93	30	0	0.250 - 0.300	0.144 - 0.210	1.067	0.065
DS-917	54	0.032 - 0.105	1.14 - 2.90	100	0	0.290 - 0.416	0.033 - 0.142	1.008	0.148
DS-953	69	0.065 - 0.123	1.20 - 1.50	42-107	6	0.103 - 0.138	0.060 - 0.080	1.053	0.050
DS-955	93	0.043 - 0.126	1.15 - 2.33	36-58	0	0.195 - 0.262	0.042 - 0.113	1.147	0.084
DS-956	165	0.056 - 0.202	1.04 - 2.02	38-67	0	0.086 - 0.210	0.064 - 0.144	0.962	0.209
Total	1525							1.053	0.203

付表 2: 直立壁のデータセットごとの諸元と推定式の適合度

データ セット	データ 数 n	海底勾配 $\cot \theta$	$T_{m-1,0, \text{deep}}$ (s)	$H_{s, \text{toe}}$ (m)	h_r (m)	h_c (m)	EurOtop $q_{\text{est}}/q_{\text{meas}}$ 幾何平均 (幾何偏差)	New $q_{\text{est}}/q_{\text{meas}}$ 幾何平均 (幾何偏差)
DS-028*	173	10, 30, 100	1.10~2.31	0.037~0.185	0.050~0.200	0.035~0.200	1.898 (3.25)	1.855 (3.32)
DS-106	28	1000	0.972~1.96	0.054~0.262	0.700~0.775	0.025~0.200	1.148 (1.44)	1.144 (1.57)
DS-107	55	1000	1.02~5.11	0.047~0.247	0.600~0.800	0.00~0.200	1.156 (1.55)	0.840 (1.56)
DS-113	47	1000	0.91~1.55	0.025~0.156	0.150~0.400	0.00~0.250	1.856 (2.22)	1.817 (2.26)
DS-224	35	50	1.29~3.00	0.119~0.197	0.200~0.500	0.130~0.400	0.805 (1.50)	0.736 (2.13)
DS-225*	18	20	1.27~2.37	0.114~0.173	0.167~0.409	0.165~0.400	0.365 (1.39)	0.510 (1.50)
DS-402	32	1000	0.69~1.07	0.030~0.091	0.700~0.700	0.070~0.150	0.283 (2.82)	0.463 (2.15)
DS-502	47	10, 50	0.97~1.52	0.031~0.099	0.090~0.247	0.085~0.150	0.662 (3.00)	0.591 (2.42)
DS-505	71	10, 50	0.88~1.47	0.034~0.106	0.069~0.158	0.090~0.220	0.645 (2.08)	0.616 (3.85)
DS-802*	170 (34)	10, 30	1.61~2.66	0.014~0.214	0.00~0.225	0.065~0.264	0.947 (2.84)	0.722 (2.51)
DS-914	39	1000	1.00~1.73	0.060~0.150	0.400~0.500	0.100~0.200	2.706 (2.22)	3.682 (2.32)
Total	715 (34)						1.103 (2.88)	1.023 (3.09)

注: 1) データセット名に * が付されたものは、護岸前面波高を合田方式で計算している。

2) データ数の括弧内は堤脚水深 0 のデータで、EurOtop方式の越波流量推定の対象外である。

付表 3: 不透過滑斜面のデータセットごとの諸元と推定式の適合度

データ セット	データ 数 n	法勾配 $\cot \alpha_s$	$T_{m-1,0, \text{deep}}$ (s)	$H_{s, \text{toe}}$ (m)	h_r (m)	h_c (m)	EurOtop $q_{\text{est}}/q_{\text{meas}}$ 幾何平均 (幾何偏差)	New $q_{\text{est}}/q_{\text{meas}}$ 幾何平均 (幾何偏差)
DS-030*	171	1.0~4.5	0.67~1.28	0.017~0.203	0.040~0.160	0.00~0.120	1.069 (3.05)	1.917 (4.56)
DS-035	17	2.0	1.31~2.18	0.091~0.185	0.400~0.500	0.200~0.300	0.774 (1.55)	0.942 (1.61)
DS-042	219	4.0	1.51~4.30	0.130~0.221	0.300~0.400	0.200	0.683 (2.12)	0.614 (2.05)
DS-101	33	6.0	1.29~6.19	0.068~0.200	0.700	0.100	0.830 (1.72)	0.271 (2.70)
DS-102	25	4.0	1.31~5.17	0.076~0.185	0.700~0.800	0.00~0.100	1.641 (1.75)	0.588 (1.84)
DS-103	15	3.0	1.37~3.52	0.108~0.197	0.700~0.800	0.00~0.100	1.259 (2.50)	0.776 (1.24)
DS-104	110	6.0	1.00~2.15	0.044~0.116	1.000	0.050	0.738 (1.63)	0.451 (2.00)
DS-108	57	1.50	1.09~6.52	0.057~0.228	0.600~0.800	0.00~0.200	2.814 (1.24)	1.170 (1.30)
DS-109*	17	6.0	1.09~1.57	0.081~0.101	0.140	0.120	0.119 (1.75)	0.779 (2.14)
DS-110	20	6.0	3.30~10.03	0.360~1.101	3.50~5.01	0.99~2.50	0.319 (2.09)	0.271 (5.54)
DS-217	13	6.0	4.55~6.64	0.560~1.480	1.30~2.30	1.30~2.30	0.456 (1.50)	2.058 (3.15)
DS-218	56	2.0~7.0	1.39~1.86	0.099~0.158	0.495~0.500	0.080~0.350	1.025 (1.59)	3.199 (2.26)
DS-219*	18	4.0	1.42~2.15	0.112~0.204	0.367~0.567	0.113~0.313	1.142 (2.31)	1.297 (2.32)
DS-220	18	2.5~4.0	1.10~2.48	0.110~0.137	0.540~0.700	0.150~0.333	1.228 (1.91)	3.043 (4.31)
DS-221	69	3.0~4.0	1.26~2.61	0.110~0.194	0.180~0.600	0.210~0.390	1.787 (2.28)	5.155 (3.02)
DS-222	31	2.5~4.0	1.09~2.66	0.100~0.154	0.720	0.150~0.300	1.162 (1.89)	2.815 (3.63)
DS-226	62	2.5~4.0	1.38~2.25	0.045~0.146	0.094~0.353	0.160~0.400	0.837 (3.08)	2.380 (2.54)
DS-227	98	3.0~6.0	1.15~2.29	0.021~0.184	0.029~0.500	0.057~0.550	0.640 (4.84)	1.079 (5.27)
DS-501	41	2.0	0.75~1.11	0.025~0.063	0.235~0.284	0.090~0.265	0.054 (2.23)	0.193 (1.42)
DS-703	29	1.19	0.78~1.72	0.048~0.162	0.500	0.087	0.948 (1.17)	0.544 (1.15)
DS-954	22	4.4	1.25~2.18	0.066~0.145	0.213~0.300	0.160~0.247	0.331 (1.37)	0.332 (2.32)
DS-955	40	2.7	1.16~2.17	0.042~0.110	0.195~0.262	0.118~0.185	0.297 (2.06)	0.362 (1.73)
DS-956	38	2.72	1.61~1.64	0.074~0.144	0.156~0.210	0.094~0.148	0.721 (1.35)	0.600 (1.33)
DS-959	26	1.7~5.9	0.68~0.90	0.027~0.063	0.045~0.095	0.045~0.095	0.624 (1.79)	1.906 (2.34)
Total	1254						0.772 (3.03)	1.004 (3.78)

注: 1) データセット名に * が付されたものは、護岸前面波高を合田方式で計算している。

2) 右2欄の流量比 $q_{\text{est}}/q_{\text{meas}}$ の数値は幾何平均であり、括弧内が幾何標準偏差である。

付表 - 4 滑斜面の解析に使用した玉田ほか (2002) のデータセットの諸元と推定式の適合度

データ セット Id.	データ 数	法勾配 $\cot \alpha_s$	$T_{1/3}$ (s)	$H_{s, toe}$ (m)	h_{toe} (m)	h_c (m)	EurOtop q_{est}/q_{meas} 幾何平均 (幾何偏差)	New q_{est}/q_{meas} 幾何平均 (幾何偏差)
TIT-03*	73 (13)	3.0	1.0	0.0039~0.0302	0.00~0.040	0.0133~0.0842	0.102 (7.27)	0.838 (2.37)
TIT-05*	65 (12)	5.0	1.0	0.0039~0.0302	0.00~0.040	0.0133~0.0842	0.177 (4.89)	0.518 (2.72)
TIT-07*	60 (12)	7.0	1.0	0.0039~0.0302	0.00~0.040	0.0133~0.0842	0.199 (4.22)	0.919 (3.76)
Total	198 (37)						0.150 (5.55)	0.736 (2.98)

注：1) データ数の括弧内は汀線 ($h_{toe} = 0$) のデータ数である。

2) 海底勾配は1/10と1/30の2種類である。

3) 流量比は幾何平均であり，括弧内は幾何標準偏差である。

4) 換算沖波波高は2.65 cmと5.62 cmの2種類であり，傾斜護岸前面の有義波高はいずれも合田方式で推定した。

付表 5: 不透過滑斜面の法勾配別の越波流量推定式の適合度

データ セット	法面勾配 $\cot \alpha_s$			係数			EurOtop q_{est}/q_{meas} 幾何平均 (幾何偏差)	New q_{est}/q_{meas} 幾何平均 (幾何偏差)
	範囲	代表 値	データ数	$A_{0,opt}$	$A_{0,reg}$	$B_{0,reg}$		
CLASH	1.0	1.0	42 (0)	2.521	0.901	3.043	1.159 (3.24)	1.493 (4.92)
	1.19	1.19	29 (0)	2.228	-	-	0.731 (1.09)	0.948 (1.17)
	1.50 ~ 1.69	1.51	62 (0)	2.918	2.778	1.750	2.400 (1.81)	1.147 (1.30)
	1.77 ~ 2.00	2.0	269 (0)	2.413	2.567	1.678	0.521 (3.89)	0.766 (3.23)
	2.50	2.5	59 (0)	3.658	3.749	1.739	0.749 (2.93)	1.705 (2.91)
	2.70 ~ 2.72	2.7	78 (0)	2.055	2.061	1.762	0.458 (1.884)	0.300 (2.29)
	3.00	3.0	88 (0)	3.650	2.661	2.244	1.029 (3.76)	2.043 (3.95)
	4.00 ~ 4.40	4.1	404 (0)	3.625	2.716	2.491	0.977 (2.51)	1.450 (4.03)
	5.21 ~ 6.00	5.9	213 (0)	3.335	-	-	0.602 (2.45)	0.478 (3.58)
	7.00	7.0	10 (0)	5.465	3.931	1.811	0.554 (1.23)	3.090 (1.95)
小計	-	-	1254(0)	-	-	-	0.776 (3.03)	1.004 (3.78)
玉田ほか (2002)	3	3.0	73 (58)	2.667	-	-	0.102 (7.27)	0.838 (2.37)
	5	5.0	65 (51)	2.775	-	-	0.177 (4.89)	0.518 (2.72)
	7	7.0	60 (50)	4.297	-	-	0.199 (4.22)	0.919 (3.76)
小計	-	-	198 (159)	-	-	-	0.150 (5.55)	0.736 (2.98)

注：1) データ数の括弧内は相対堤脚水深 $h_t/H_{s,toe} < 1.0$ のデータ数である。

2) 係数の $A_{0,reg}$, $B_{0,reg}$ は各グループに対して式 (15) の直線回帰式を当てはめて得た係数である。

3) 係数の $A_{0,opt}$ は各グループの越波流量比の幾何平均が1.0となるように試行錯誤で求めた値である。