

越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の 越波量に関する数値計算

平山克也¹・長谷川準三²・長谷川巖³

直接解法によって不規則波の波群特性まで考慮した越波量を算定することは容易でない。そこで、非線形波動方程式で得られる水面変動を越流公式に代入する手法が提案されているが、設計上の許容値程度に越波量が少ない場合を対象として、越流公式を適用することの妥当性及び計算精度を検証した例はあまり見られない。そこで本研究では、護岸前面水深や天端高、波形勾配を変えた 400 $T_{1/3}$ 以上の不規則波による越波実験を行い、一定値ではない越流係数の推定式を新たに提案するとともに、一部修正した越流公式による越波計算法を導入したブシネスクモデルによる再現計算を行い、同様な短時間および時間平均越波量が算定できることを確認した。

1. はじめに

VOF 法や MARS 法、あるいは粒子法などの波動運動に関する直接解法では、護岸上の水塊運動や越波量を直接的かつ高精度に計算できる反面、計算負荷が大きいため不規則波による越波量の計算には多大な労力を要する(例えば、中野ら, 2001, 安田ら, 2003, 後藤ら, 1999)。一方、波動方程式により護岸直前の水面波形を計算し、越流公式を用いて越波量を求める方法は、計算負荷が小さく不規則波の計算や平面波浪場への適用も容易である(例えば、森屋・水口, 1996)が、越波水塊を流出させる境界処理が導入されない場合には、越波に伴う平均水位の変化や護岸反射率の低減が考慮されない等の問題がある。また、佐貫ら(2001)は直立壁の越波に着目して、それぞれ直接解法と波動方程式法による越波量の算定方法について考察し、少なくとも非線形波動方程式による方法では、波群に伴う長周期水位変動を考慮した越波量の算定が可能なことを示している。

本研究では、越流公式による遡上モデルを導入したブシネスクモデル(平山・平石, 2004, 2005)に改良を加え、護岸上の越流水塊の運動やそれに伴う護岸周辺の水位変化等も計算可能な手法を提案した。そして、前造波時間を含め 400 $T_{1/3}$ 以上の不規則波を造波した断面越波実験に対する再現計算を行い、実験結果を整理して得られる越流係数の評価と合わせて、波群特性を考慮した時間平均および短時間越波流量に対する計算精度を検証した。

2. 越波実験による越流係数の推定

(1) 越波実験の概要

越波実験は、吸引制御機能を有する長さ 35 m, 幅

0.6 m の不規則波造波水路に 1/30 勾配(水深 4 m 以浅は 1/6 勾配)の海底地形模型と、前面水深 h と天端高 h_c の異なる計 10 種類の護岸模型を設置し、2 種類の波形勾配(沖波波高 $H_0=5$ m)に対しそれぞれ 3 波群の不規則波を造波した。これらの実験条件を表-1 および表-2 に、海底地形模型の設置例($h=-2$ m)を図-1 に示す。なお模型縮尺は 1/40 とし、とくに断らない限り以下では現地量で記した。

護岸背後への越波量 q_{box} は集水ますにより計測したが、越波量の時間変化を計測できるよう、小穴を設けた隔壁背後の静水面の高さを容量式波高計で計測して集水ます内の水量を求めた。また、護岸前面で計測した水位を式(1)に示す越流公式に代入することでも越波量 q_{flow} を求めた。ここで、 η は護岸直前の水位である。なお、このとき用いた越流係数 C_o は、両者の総越波量が

表-1 越波に関する断面模型実験条件(縮尺: 1/40)

造波水深	: h_0	20 m
護岸前面水深	: h	12, 8, 4, 0, -2 m
斜面勾配 (4 m 以深)	: s	1/30
斜面勾配 (4 m 以浅)	:	1/6
護岸天端高	: h_c	5 m, 7 m
沖波波高 (1/3 有義値)	: H'_0	5 m
沖波周期 (1/3 有義値)	: $T_{1/3}$	8.9 s, 12 s
波形勾配 (1/3 有義値)	: H'_0/L_0	0.040, 0.022
周波数スペクトル	:	修正 BS スペクトル
波群および成分波数	:	3 波群, 100 成分波

表-2 実験データ収録条件(縮尺: 1/ $\sqrt{40}$)

前造波時間	1138.4 s
データ収録時間	2590.2 s, 3626.3 s
サンプリング時間	0.316 s, 0.442 s
収録データ数	8192
収録波数	322 波, 331 波

1 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 正 会 員 (独法)港湾空港技術研究所 研修生
3 正 会 員 (株)エコー 水理実験部

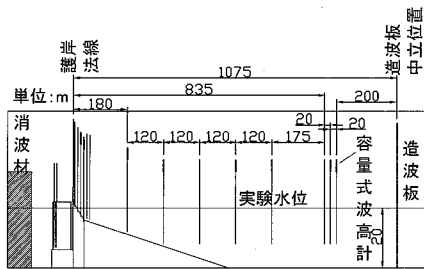
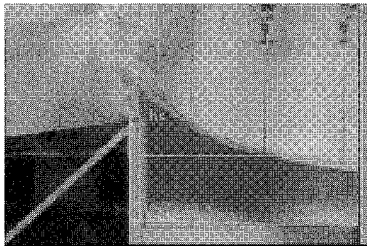
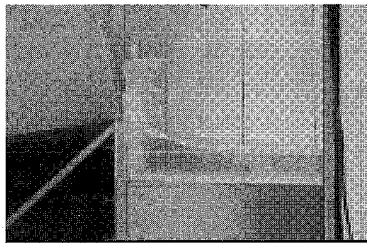
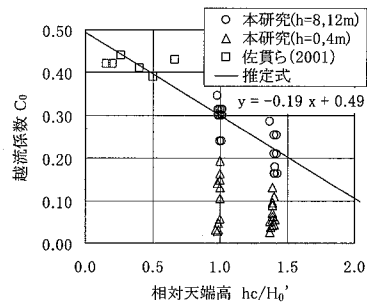
図-1 海底地形模型 ($h=-2\text{m}$) (現地量, 単位: m)(a) $h=8\text{m}$, $T=12\text{s}$ (b) $h=4\text{m}$, $T=12\text{s}$

写真-1 護岸前面の越波状況

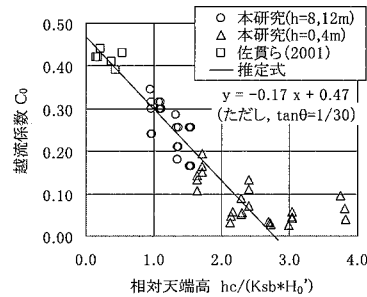
等しくなるように設定した。これらを含め計 17 本の容量式波高計を水路内に設置して、それぞれ各地点における水面変動と護岸や斜面による不規則波の反射率を計測した。

$$q_{flow} = C_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} (\eta - h_c)^{3/2} \quad \text{ただし, } \eta > h_c \quad (1)$$

実験結果を以下に示す。まず、護岸前面水深による越波状況の違いをみると、少なくとも $h=8, 12\text{m}$ の場合には、浅水変形した波峰の水塊が護岸を越流する様子が確認できた (写真-1(a))。一方、 h が 4m 以下の場合には斜面上での砕波が顕著となり、護岸前面では飛沫を多く含んだ越波が上方に発生する様子が観察された (写真-1(b))。このとき、とくに本実験のように容量式波高計を用いた場合には、護岸直前での計測水位と越波量がうまく対応しないことが懸念される。そこで、まず $h=8, 12\text{m}$ の場合に得られた越流係数を沖波波高に対する相対天端高 h_c/H_0' に対して図-2 のように整理した。また、図には VOF 法を用いて佐貫ら (2001) が推定した越流係数も合わせて示した。彼らは、比較的 h_c/H_0' が低い護岸の越流係数を一定値 (0.40~0.45 程度) と



※確認済みの適用範囲: $\begin{cases} H_0'/L_0=0.040 \text{ のとき } 0.065 < h/L_0 \\ 0 < h_c/H_0' < 1.4 \text{ において, } \end{cases} \begin{cases} H_0'/L_0=0.022 \text{ のとき } 0.036 < h/L_0 \end{cases}$

図-2 相対天端高: h_c/H_0' に対する越流係数の変化

※確認済みの適用範囲: $\begin{cases} H_0'/L_0=0.040 \text{ のとき } 0.032 < h/L_0 \\ 0 < h_c/(K_{sb}H_0') < 2.5 \text{ において, } \end{cases} \begin{cases} H_0'/L_0=0.022 \text{ のとき } 0.018 < h/L_0 \end{cases}$

図-3 相対天端高 $h_c/(K_{sb}H_0')$ に対する越流係数の変化

みなしたが、 h_c/H_0' がより高い護岸に対する越流係数は、多少のばらつきはあるものの、例えば h_c/H_0' を変数とする式 (2) で与えられることが明らかとなった。さらに、この推定式によって、佐貫ら (2001) の推定値も説明できることは非常に興味深い。なお、式 (2) の適用範囲については後述する。

$$C_0 = 0.49 - 0.19 h_c/H_0' \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2) 越流係数推定式の修正

ところで、図-2 ではさらに $h=0, 4\text{m}$ の場合に推定された越流係数を△印で示した。明らかに、先程提案した式 (2) とは一致していないが、これは、斜面地形による非線形な浅水変形に伴う護岸前面波高の増大が考慮されていないためである。そこで、護岸前面で計測された波高 $H_{1/3}$ に対する相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ に対して越流係数を整理し直し、改めて $h=8, 12\text{m}$ のプロットに対する C_0 の近似直線を描いたところ、 $h=0, 4\text{m}$ のプロットは予想通り近似直線に沿うものの、全体的に左側に分布した。これは、すでに写真-1(b) で見たように、越波に伴う飛沫高さを水面として計測することによる、波高の過大評価によるものと考えられる。一方、この近似式で得られる越流係数を式 (1) に代入して越波量を推定する

場合には、護岸前面波形の統計値を得るまで、既知であるべき越流係数 C_0 値が定まらないという不便がある。

以上の検討を踏まえ、本研究では、護岸前面の斜面上での碎波が顕著となる場合にも適用可能な、以下に示す越流係数の推定式を提案する。すなわち、 $h_c/H_{1/3}$ に代えて、合田 (1975) による碎波波高の略算式を利用し相対天端高 $h_c/(K_{sb}H_0')$ を定義した。ここで、 K_{sb} は沖波波高に対する碎波帯内の波高比に相当する量であり、式 (3) で与えられる。ただし、実際に計測される護岸前面波高には反射波も含まれているはずである。つまり $K_{sb}H_0'$ は、護岸前面波高を推定するものではないことに注意されたい。

$$K_{sb} = \begin{cases} K_s & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\left\{\left(\beta_0 + \beta_1 \frac{h}{H_0'}\right), \beta_{\max}, K_s\right\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 β_0 , β_1 , $\beta_{\max}$ は $H_{1/3}$ の略算係数(合田, 1975) 相対天端高 $h_c/(K_{sb}H_0')$ に対して越流係数を整理した結果を図-3 に示す。 $h=8, 12$ m のプロットに対して得た近似式は、佐貫ら (2001) の推定値だけでなく、 $h=0, 4$ m の場合のプロットもよく近似できていることがわかる。ここで、 $h_c/(K_{sb}H_0')$ が約 2.5 以上のプロットは $h=0$ m, $h_c=7$ m の場合であり、越波飛沫が極めて顕著であって、もはや越流公式 (1) の適用が困難な状況にあると推測される。そこで、本研究では便宜上、 $h_c/(K_{sb}H_0')$ がこれより大きい場合には、越流係数は一定値をとるものとした。また、 $h=0$ m での K_{sb} は $h=0.05$ m として算出した。このようにして得た越流係数の推定式を次式に示す。

$$C_0 = \begin{cases} 0.045 & : h_c/(K_{sb}H_0') > 2.5 \\ 0.47 - 0.17h_c/(K_{sb}H_0') & : h_c/(K_{sb}H_0') \leq 2.5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

このように、式 (4) は、護岸前面の斜面上での非線形な浅水変形と碎波変形を考慮した越流係数を与えることができる。本研究で確認した適用範囲は、 $H_0'/L_0 = 0.040$ のとき $0.032 < h/L_0$, $H_0'/L_0 = 0.022$ のとき $0.018 < h/L_0$ であった。これに対し式 (2) は、これらの波浪変形の影響が顕著でない波浪条件において適用可能であると考えられる。本研究では、 $H_0'/L_0 = 0.040$ のとき $0.065 < h/L_0$, $H_0'/L_0 = 0.022$ のとき $0.036 < h/L_0$ の範囲で適用できることを確認した。

3. ブシネスクモデルによる越波量の再現計算

(1) 越流を考慮したブシネスクモデル

遡上モデルを導入したブシネスクモデル (平山・平石, 2004, 2005) では、越流公式 (越流係数は 0.6 で一定) で算定される流量 flux を用いて計算領域を拡張するこ

とにより、勾配 1/1 程度までの比較的緩やかな斜面上において、波の遡上計算を実施することができる。一方、護岸前面と天端上の計算格子間では水深が急激に変化するため、従来の方法をそのまま適用すると途端に計算が破綻する。そこで本研究では、格子間隔に対する海底勾配が 1 を越える場合は新たに越波境界を定義し、それにより分割される計算領域ごとに独立した運動方程式を立てて、それらの間でやりとりされる流量 flux を越流公式で与えるという計算モデルを開発した。これにより模型実験と同様、越波・越流による護岸反射率の低減や、護岸上の越波水塊の挙動を考慮した安定な越波計算の実現が期待される。

ところで、越流公式を用いて護岸越波量を推定する場合に、その精度に大きな影響を与えるものは、護岸前面水位 η と越流係数 C_0 である。本計算モデルにおいては、これらを以下のように取り扱うものとした。

まず、式 (1) から明らかなように、この方法では前面水位が護岸天端高を越えない限り越波量は算定されない。つまり、越波量が少ない場合ほど、護岸前面での平均水位上昇と 1 波毎の水面変動を正確に算定することが要求される。しかし、弱非線形性のブシネスク方程式を離散化した本モデルでは、護岸前面の水深が浅い、あるいは周期が短いケースほど波の非線形化に対する誤差や差分誤差が顕著に現れるようになるが、これらの発生を十分に抑制することはそれほど容易ではない。そこで本研究では、越流公式を適用するときだけ仮想的に天端高を下げることを考え、式 (1) を次式のように修正した。

$$q_{bsq} = C_0 \frac{2}{3} \sqrt{2g} (\eta - \beta_T \gamma_T h_c)^{3/2}$$

$$\text{ただし、} \eta > \beta_T \gamma_T h_c \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_T = \sin^{0.15}(K\pi) \quad \text{ただし、} 0 < K < 1$$

$$K = L/T \cdot \Delta t / \Delta x : \text{クーラン数, } L : \text{波長}$$

$$\Delta x : \text{差分格子間隔, } \Delta t : \text{差分時間間隔}$$

$$\gamma_T = 1 - \frac{(K_{sb} - K_{st})}{h_c/H_0'} \quad \text{ただし、} K_{sb} > K_{st}$$

$$K_{st} : \text{線形波の浅水係数}$$

ここで、 β_T , γ_T は、模型実験で越波が生じた時刻に後述する数値計算でも越波が生じるよう経験的に定めた補正係数であり、 β_T はブシネスクモデルの差分誤差に対する補正係数、 γ_T はブシネスク方程式の弱非線形性に対する補正係数である。ただし、碎波帯内では $\gamma_T = 1$ とした。

一方、越波境界に適用する式 (5) 中の越流係数 C_0 は模型実験で得た推定式 (4) で与えることができる。しかし、越流公式を適用する際に見かけ上の天端高を下げることに対応して、式 (4) 中の h_c にも $\beta_T \gamma_T$ を乗じることとした。この結果、再現計算に用いた越流係数は、

h_c に $\beta_T \gamma_T$ を乗じない場合に比べ、 $h=8, 12$ mの計算ケースでは概ね1.0~1.3倍程度に増加した。ただし、碎波によって急激に減衰した波が高天端護岸をわずかに越波するケース($h=4$ m, $h_c=7$ m, $H_0'=5$ m, $T=8.9$ s)では、ケース中最大の増加率となる約3倍の越流係数が与えられた。なお、陸上にある護岸を波が越波する場合($h=0, -2$ m)でも天端高が極端に低い場合には、越流公式を適用し得ると考えられる。そこで、この場合には沖波波高の1%に相当する護岸前面水深を便宜上設定して、 K_{sb} および C_0 を算出した。

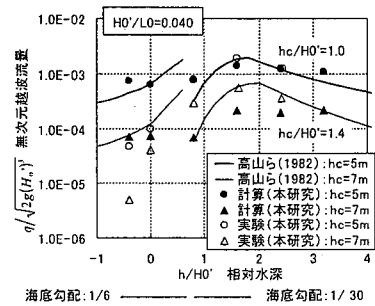
(2) 越波量の再現計算

越流を考慮したブシネスクモデルによる越波量の再現計算は、表-1, 2および図-1に示した越波実験と基本的に全く同じ条件を設定して実施した。すなわち、実験で使用した3波群の不規則波をそのまま造波し、入反射波共存場での波形や波群特性をも再現できるように配慮するとともに、底面摩擦や重複波の碎波などの影響も考慮することとした。ここで、底面摩擦係数は若干の試行計算の結果 $f=0.02$ と設定した。また、碎波判定には鉛直方向圧力勾配を用い、進行波と部分重複波の碎波を生じさせる閾値として平山・原(2002)を参考に0.7を設定した。一方、護岸前面で密に設置された波高計群の間隔と差分格子間隔の違いのために、再現計算で得た水位変動データの出力位置は模型実験のものとは少し異なっている。

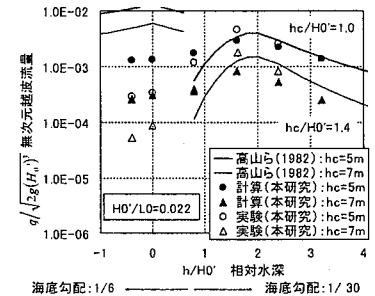
再現計算の差分条件は、 $\Delta x=4$ m ($L_0/31$ m または $L_0/56$ m), $\Delta t=1.58 \times 10^{-2}$ s ($T_{1/3}/560$) または 2.21×10^{-2} s ($T_{1/3}/543$) とした。なお、エネルギー吸収帯を含めた $1680 \text{ m} \times 24 \text{ m}$ の数値水路において、総計算時間の演算に要した実計算時間は、CPU: 2.2 GHz (Pentium4), RAM: 1 GB のパソコンで1ケース当り約40分であった(コンパイラ: Intel Fortran6.0, 最適化あり)。

(3) 越波量に関する計算精度の検証

合田による越波流量推定図の近似式(高山ら, 1982)に対して、越波実験および再現計算で得られた無次元越波流量(波群平均値)をプロットした結果を図-4に示す。なお図では、護岸前面水深 $h=4$ m (相対水深 $h/H_0'=0.8$) を境に、以深は1/30, 以浅は1/6の海底勾配に対する結果を示すことに注意されたい。まず、 $h=4$ m 以深の場合を見ると、いずれの波形勾配($H_0'/L_0=0.040, 0.022$)でも、模型実験で得られた越波量は高山ら(1982)による近似式とよく一致するほか、模型実験に追加して行った $h=16$ m の計算ケースを含め、ブシネスク計算による再現精度も比較的良好であった。一方、前面水深が4 m 以浅の場合に模型実験で得られた越波流量は、近似式よりも1オーダー程度小さかった。これは、模型実験では4 m 以深の斜面勾配を1/30としたために、1/6勾配斜面に到達するまでに碎波



(a) $H_0'/L_0=0.040$



(b) $H_0'/L_0=0.022$

図-4 時間平均越波流量の比較

減衰が生じたことが原因と考えられる。これに対し、ブシネスク計算で得られた越波流量は実験結果に比べ1オーダー程度大きかったが、斜面上での波高変化等は、飛沫の影響を除けば実験結果を比較的良好に再現できている。したがってこれらのケースでは、ブシネスクモデルにおける自由境界処理の制約条件や、越流公式(5)の適用限界に留意する必要があると考えられる。

ところで、直立壁護岸の越波流量は、図-5に示すように、波形勾配の区別なく護岸前面波高 $H_{1/3}$ に対する相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ と非常に良い相関が認められ、式(6)のような関係式が見出された。また、ブシネスク計算でも $h=4$ m 以深のケースではこれらとよく一致した。しかし、模型実験では $h=-2$ m, 数値計算では $h=0$ m 以浅のケースでそれぞれ式(6)よりも右側にプロットされる傾向が顕著であり、それぞれ $H_{1/3}$ が過小に計測あるいは算定された。これらは、 $h=-2$ m の実験ケースで発生した越波飛沫の高さは $h=0$ m 以深での傾向に比べ低く計測され、 $h=0$ m 以浅の計算ケースで算定された $H_{1/3}$ は、越波飛沫の発生を許容しないブシネスクモデルや越流公式(5)の適用限界のために実験値よりも小さく算定されたためと考えられる。

$$q_{box} = 0.0044 (h_c/H_{1/3})^{-4.9} \dots \dots \dots (6)$$

一方、入反射波分離スペクトル法で推定された護岸および斜面による反射率は、模型実験、数値計算ともに、越波流量が多いほど反射率が低下する傾向が確認された。

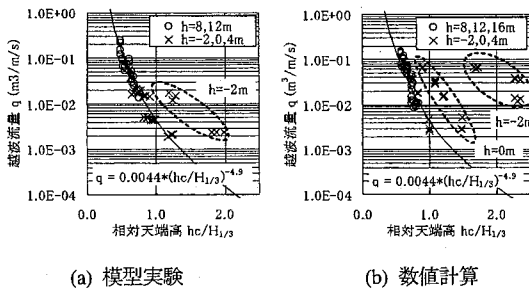


図-5 相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ に対する越波流量の変化

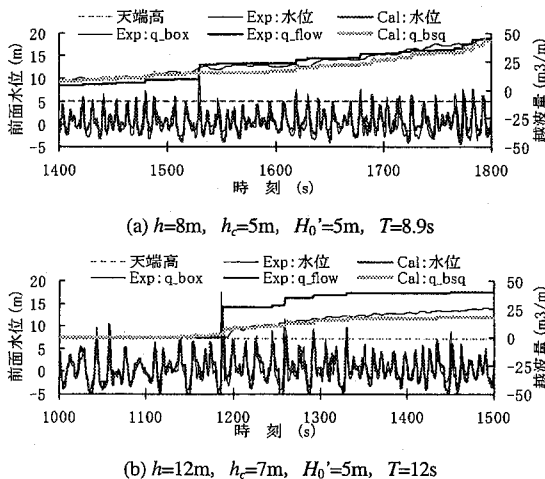


図-6 護岸前面波形および累積越波量の時系列変化

しかし、その値はごく僅かであり、斜面上の碎波減衰による反射率の低減ほどの効果は認められなかった。

つぎに、代表2ケースについて、越波実験および再現計算で得られた護岸直前の水位変動と累積越波量の時系列変化を図-6(a), (b)に示す。両ケースでの無次元越波流量はともに 1.0×10^{-3} 程度であるが、護岸前面水深、天端高、波形勾配(周期)はすべて異なる。まず両図において、ブシネスク計算で出力された護岸直前の水位変動は、実験結果と概ねよく一致しているものの、とくに実験値が天端高を越える時刻での水位は全体的に過小に算定されていることがわかる。しかし図-6(a)では、集水ます内で直接計測した越波量 q_{box} の時間変化に対し、ブシネスク計算から得られる越波量 q_{bsq} は、式(5)のように修正した越流公式によって、実験結果から算出される q_{flow} と同程度に、よく一致していることが確認できる。一方、図-6(b)では、護岸前面の飛沫高さまで水位として計測される僅か数波のために、実質的な短時間越波量の見積りを誤り、 q_{flow} の累積越波量の時系列変化に違いが生じていることがわかる。これに対し、越波飛沫の発生を考慮しない q_{bsq} ではこのような誤差は生じ

ず、累積越波量の変化傾向は q_{box} と比較的良好に一致している。しかし、これらよりもさらに越波量が少ないケースでは、図-3でみられる推定式(4)に対する越流係数の若干のばらつきと、式(5)で考慮したブシネスク計算における差分誤差と弱非線形性の影響のために、1波毎の短時間越波流量の再現性は必ずしも十分でない。この改善が今後の課題である。

4. おわりに

本研究では、相対天端高 $h_c/H_0' = 0 \sim 1.4$ 、あるいは碎波帯内での波高変化を考慮した相対天端高 $h_c/(K_{sb}H_0') = 0 \sim 2.5$ 程度の護岸を対象として、越流公式による越波境界を導入したブシネスクモデルを用いて $400 T_{1/3}$ 以上の不規則波による越波量を算定し、その計算精度を、細部に渡り条件を揃えた縮尺 1/40 の模型実験結果により検証した。

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 一定とされてきた越流係数が相対天端高の関数で表されることを明らかにし、その推定式を提案した。
- (2) 越流を考慮したブシネスクモデルを提案し、越波飛沫の影響が小さいとき、実験と同様に、短時間および時間平均越波流量を算定できることを確認した。
- (3) 実験では、飛沫を含んだ数波のために越流公式で算定した累計越波量の変化に違いが生じることを確認した。

参考文献

- 合田良実 (1975)：浅海域における波浪の碎波変形，港研報告，第14巻，第3号，pp.59-106。
- 後藤仁志・酒井哲郎・目見田哲・沖和哉・林稔 (1999)：粒子法による直立護岸前面の碎波・越波過程の数値解析，海工論文集，第46巻，pp.46-50。
- 佐貫宏・藤田龍・関本恒浩・清水琢三 (2001)：数値モデルによる越波量の評価に関する研究，海工論文集，第48巻，pp.736-740。
- 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，港湾技研報告，第21巻，第2号，pp.151-205。
- 中野修・興野俊也・藤井直樹・榊山勉・大熊義夫 (2001)：数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算，海工論文集，第48巻，pp.731-735。
- 平山克也・原 信彦 (2002)：時間領域の擬似段波モデルに基づく碎波モデルの開発，海工論文集，第49巻，pp.121-125。
- 平山克也・平石哲也 (2004)：ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性，海岸工学論文集，第51巻，pp.11-15。
- 平山克也・平石哲也 (2005)：平面2次元ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法の開発と現地適用，海岸工学論文集，第52巻，pp.11-15。
- 森屋陽一・水口優 (1996)：回折散乱波を考慮した越波問題，海工論文集，第43巻，pp.711-715。
- 安田誠宏・平石哲也・永瀬恭一・島田昌也 (2003)：流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析，海工論文集，第50巻，pp.303-305。