

潮位の上昇に伴う越波から越流への移行過程 における流量算定手法

ESTIMATION OF FLOW RATE IN THE TRANSITION PROCESS FROM OVERTOPPING TO OVERFLOW DUE TO SEA LEVEL RISE

鈴木武¹・柴木秀之²
Takeshi SUZUKI, Hidenori SHIBAKI

¹正会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) 株式会社エコー 防災水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

Numerical simulations of transition process from overtopping to overflow are performed by using VOF method (CADMAS-SURF). In these simulations, several conditions, wave condition (H_0'/L_0), bottom condition (h/H_0' , bottom slope), mean sea level (hc/H_0'), are selected. The results of numerical simulation correspond with the standard estimation diagrams for the design of coastal structures produced by Goda (1975). According to these simulation results, database of flow rate over the coastal dikes are made at the time of storm surge. With the database, a new convenient estimation method of flow rate in the transition process from overtopping to overflow is developed. The accurate flow rates can be calculated by this method. This method is incorporated to the storm surge inundation model.

Key Words : overtopping, overflow, VOF, sea level rise, coastal dike

1. はじめに

日本沿岸は、台風や冬季風浪の常襲地帯であるため、高潮・高波による浸水災害がたびたび発生している。さらに、近年注目されている地球温暖化による海面上昇及び台風の強大化により、沿岸の高潮災害リスクは高まることが予想される。ハード・ソフト面からの適切な防護対策を考えるうえで、高潮・高波の発生に伴う海岸護岸等からの越波・越流による浸水量の推定精度を高めることは重要である。

台風来襲時は高潮と高波が同時発生する。この場合の海岸護岸等から防護区域への流入量を予測するには、時々刻々と潮位が上昇するのに伴い、越波から越流へ移行する過程で流量を評価する手法を確立する必要がある。越波流量の評価方法は、合田ら¹⁾が期待越波流量の算定図を提案し、海岸保全施設の設計に活用されている。ただし、算定図の適用範囲は、潮位が低い条件に限定され、潮位が護岸天端を超過する状況下では利用できない。そのため、柴木ら²⁾は、算定図の外挿値と越流公式を併用し、高潮浸水シミュレーションに組込む便宜的な方法を採用した。しかし、計算精度の課題が残った。一方、数値波動水路 (VOF法) による越波流量の計算技術が進展し、高い精度の越波量の推定が可能になった。本研究は、高潮浸水シミュレーションへの導入を目

的とし、数値波動水路を用いて、越波から越流への移行過程における流量の数値解析を行い、その結果をもとに、推定精度を確保しつつ、簡単に流量を算定するためのモデルを提案する。

2. 越波から越流への移行過程の数値計算

(1) 越波・越流量の数値計算の概要

越波から越流への移行過程に関する数値解析は、複数の平均水位及び波浪条件を設定した数値波動水路 (VOF法: CADMAS-SURF 5.1³⁾) を用いた護岸通過流量の算定シミュレーションにより行う。

対象護岸形状は直立堤と消波堤の2種類、海底勾配は1/10, 1/30の2種類とする。入射波条件は不規則波とし、波形勾配 (H_0'/L_0) 0.012, 0.017, 0.036の3種類、波高水深比 (h/H_0') 及び平均水位 (堤防天端高と平均水位の差 hc , 平均水位が堤防天端高より低い場合を正として表現) と波高の比 (hc/H_0') は複数設定する。表-1に計算条件をまとめる。また、数値波動水路に関する条件 (水路延長, 水路形状, 水平・鉛直の格子幅) を表-2にまとめる。

越波・越流の数値計算の1例として、 $hc/H_0'=-0.5$, $h/H_0'=2.0$, $H_0'/L_0=0.017$ の場合を図-1に示す。図中、越波・越流共存時の瞬間断面図 (造波開始後480s) と、計算開始から1,500sまでの造波位置及び護岸前

面における波高と累積した護岸からの通過流量（越波・越流量の累積値）の時系列を表す。波形の時系列を見ると、平均水位は0を維持し、潮位上昇時の越波・越流が正常に計算されていることが確認できる。単位時間当たりの期待越波流量の算定は、計算開始から1,500s後の累積越波量をもとに行う。

(2) 期待越波流量の再現性

平均水位が護岸天端高よりも低い場合（ $hc/H_0' \geq 0.5$ ）の期待越波流量と合田らの期待越波流量算定図を比較し、海岸構造物の設計に採用されている既往研究成果の再現性を確認する。

図-2は直立堤及び消波堤の比較結果の一例である。直立堤に関する期待越波流量の計算結果は、算定図よりも幾分大きい値となるものの、整合のとれたものとなっている。一方、消波堤の計算結果は、波高水深比が1.0以下で碎波状態の越波が発生する場合に、算定図との差が顕著となる。

表-1 越波・越流シミュレーションの計算条件

条件項目	条件設定
波高 (H_0')	3.00m
波形勾配 (H_0'/L_0)	0.012, 0.017, 0.036
海底勾配	1/10, 1/30
相対水深 (h/H_0')	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
相対天端高 (hc/H_0')	-3.0, -2.0, -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0
造波モデル	造波ソース 修正ブレッグドシュナイダー光易型のスペクトルを有する不規則波
計算時間, 時間刻み幅	1500s, 自動
消波材の空隙率, C_M , C_D	空隙率0.50, $C_M=1.2$, $C_D=1.0$

表-2 数値波動水路の設定諸元

	波形勾配 (H_0'/L_0)	水平方向 dx			
		左端~④	④~⑤	⑤~右端	
格子幅	0.012	2.0m	1.0m	2.0m	
	0.017	2.0m	1.0m	2.0m	
	0.036	1.0m	0.5m	1.0m	
	波形勾配 (H_0'/L_0)	鉛直方向 dz			
		高さ -75m~-35m, +25m~+45m	高さ -35m~-15m, +15m~+25m	高さ -15m~+15m	
格子幅	0.012				
	0.017	0.8m	0.4m	0.2m	
	0.036				
	波形勾配 (H_0'/L_0)	水平方向			
		総延長	左端~④	④~⑤	⑤~右端
水平延長	0.012	2250m	1500m	250m	500m
	0.017	1800m	1200m	200m	400m
	0.036	900m	600m	100m	200m
エネルギー減衰係数					
①	②	③	④	⑤	
2 波長程度	1 波長程度	1 波長程度	1 波長程度	2 波長程度	≈ 0 m (護岸前面水位)
波/板: 1/6 のひずみ変形					2 波長程度 ~75m

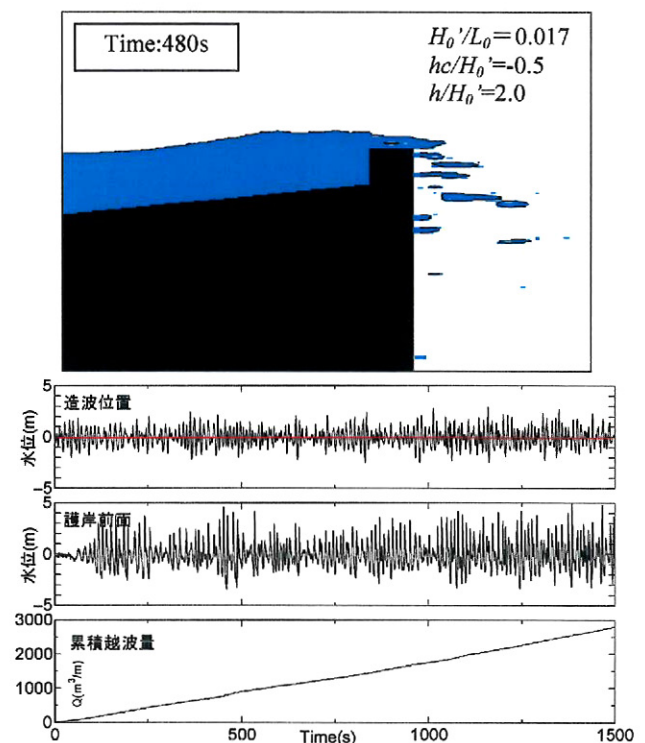


図-1 越波・越流の数値シミュレーションの出力例

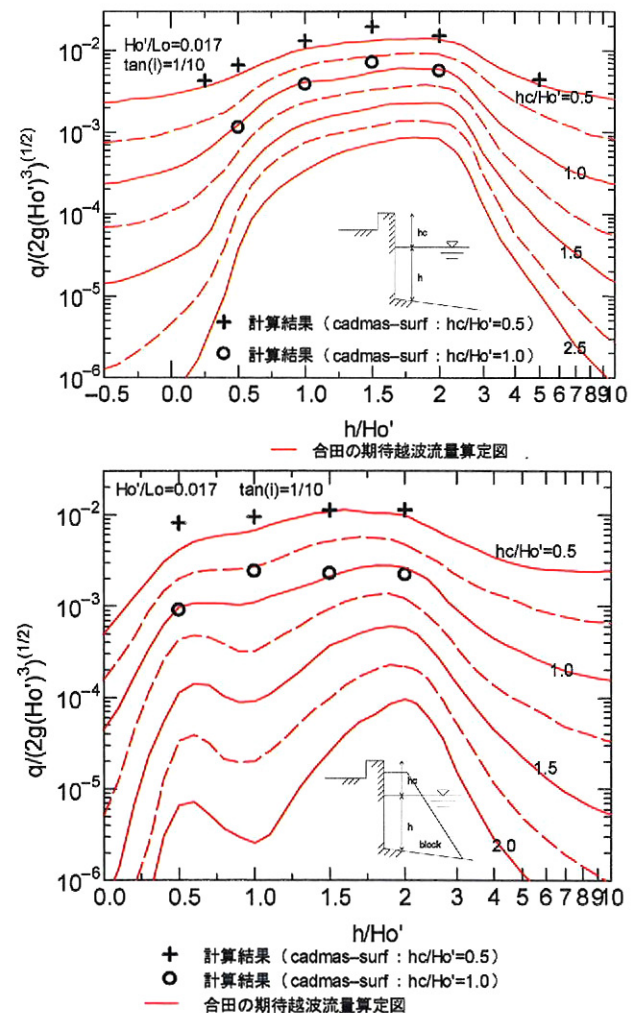


図-2 期待越波流量算定図との比較
(上: 直立堤, 下: 消波堤)

図-3は、期待越波流量算定図と数値波動水路の越波流量計算結果との相関図を表す。図中、実験値等に基づく期待越波流量算定図の真値の想定範囲も示す。直立堤の場合、真値の想定範囲は、無次元越波流量が 10^2 オーダーで0.7～1.5倍、 10^3 オーダーで0.4～2.0倍となる。数値波動水路による越波流量計算結果は、全条件で真値の想定範囲内にある。また、消波堤の場合、真値の想定範囲は、期待越波流量が 10^2 オーダーで0.5～2.0倍、 10^3 オーダーで0.2～3.0倍、 10^4 オーダーで0.1～5.0倍となり、同様に、全条件で想定範囲内となり、両者の整合性は高い。

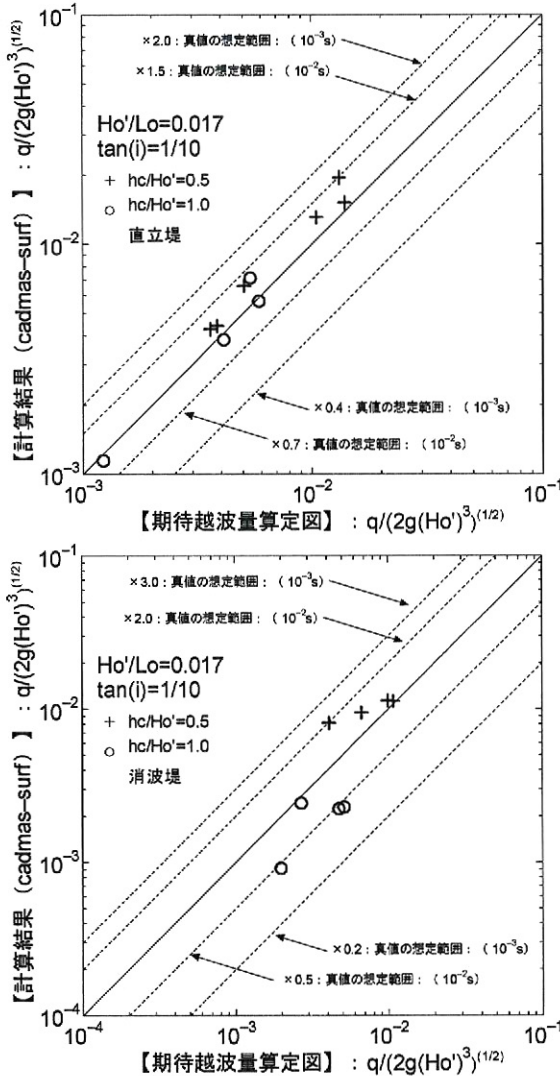


図-3 期待越波流量算定図と数値計算結果の相関

(3) 越波から越流への移行過程の流量予測

平均水位が上昇し、越波から越流状態に移行する場合 ($hc/H_0' < 0.5$) 及び平均水位が護岸天端高を超過する場合 ($hc/H_0' < 0.0$) の期待越波流量及び越流量と合田の期待越波流量算定図を比較し、流量増加傾向を推定する。図-4によれば、潮位が増加するとともに、期待越波流量は増加し、水深の変化には大きく依存しないことがわかる。なお、図-4には、後述する期待越波・越流計算モデルにより計算される越波から越流への移行過程の流量も示している。

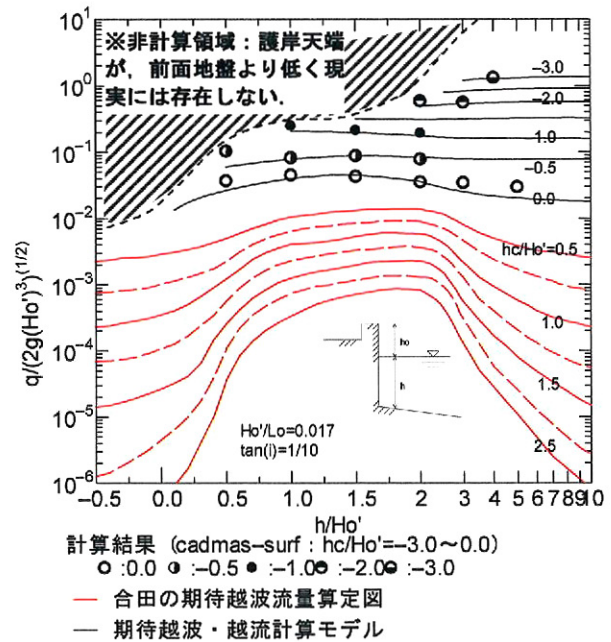


図-4 潮位上昇時の期待越波流量の変化状況（直立堤）

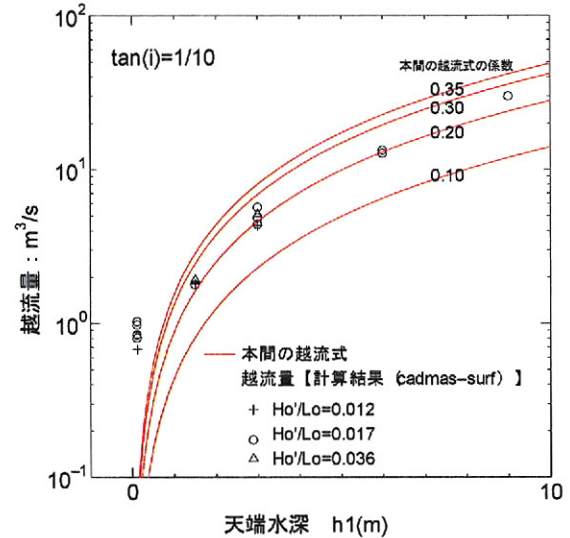


図-5 越流公式と数値シミュレーション結果の比較

(4) 越流公式との関係

既往の高潮浸水シミュレーションでは、越流量の計算で式(1)に示す本間公式⁴⁾を用いる。

$$q = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

ここに、 μ ：越流係数 (0.35)， h_1 ：平均水位から護岸天端高間の水位である。

平均水位が護岸天端高を超過する場合 ($hc/H_0' < 0.0$) の越流状態における期待越波流量及び越流量と本間の越流公式を比較し、波浪影響下の越流量の変化傾向を推定する。図-5によれば、平均水位が堤防天端高を超過する場合、越流公式（越流係数0.35に相当）の流量よりも小さくなる。平均水位の超過量が大きくなると、越流公式に漸近する傾向はあるものの、越流係数0.20～0.25程度の流量となる。

3. 期待越波・越流量の算定モデル

(1) 期待越波・越流算定モデルの定式化

越波から越流への移行過程で越流式を用いると、越波の影響が含まれず、平均水位が護岸天端に近い場合に過小評価となる。合田の期待越波流量算定図は越流状態が適用外のため、算定図の外挿処理を行い、越波と越流の流量算定に不連続性が生じる。

本論文は、式(2)～式(4)に示す合田の期待越波流量算定図の基本となる合田モデル（不規則波の碎波変形モデルと越流せきとしての越波量計算）¹⁾を引用し、モデル中のパラメータ調整を行うことにより、越波から越流に移行する状態の流量推定モデル（期待越波・越流計算モデル）を提案する。

式(3)は、吉川ら⁵⁾の規則波の越流モデルを基本式とし、不規則波の越流モデルに変形したものである。

$$\frac{q_{\text{exp}}}{\sqrt{2g(H_0')^3}} = \int q^*(x)p(x)dx \quad (2)$$

$$q^* = \frac{q(x)}{\sqrt{2g(H_0')^3}} = A_0 \left(\frac{K}{1+K} \right)^{3/2} x^{3/2} \left[1 - \frac{h_c}{H_0'} \cdot \frac{1}{Kx} \right]^{5/2} \quad (3)$$

$$K = \frac{\eta_c}{H} = \min \left\{ 1.0 + a \frac{xH_0'}{h} + \frac{b}{K_{sb}} \left(\frac{xH_0'}{h} \right)^2, c \right\} \quad (4)$$

ここに、 A_0 ：越流係数に対応する係数（0.10）， $x=H/H_0'$ ， $p(x)$ ：無次元波高 x の確率密度関数， $K_{sb}=H_{1/3}/H_0'$ ：非線形浅水効果及び碎波減衰による有義波高変化率， K ：波頂波高比， $\min\{A,B\}$ ： A または B のいずれか小の値である。なお、無次元波高 x の確率密度 $p(x)$ は、合田の不規則波の碎波変形モデル⁶⁾から計算される。波浪条件となる H_0'/L_0 ， h/H_0' と海底勾配は、確率密度 $p(x)$ に含まれる。また、間接的に、水位上昇やサーフビートの効果も含む。

(2) 越波から越流への移行過程の流量の算定

期待越波・越流計算モデルによって計算された流量の算定例を図-6 に実線で表す。図の上段，中段は、海底勾配 1/10， $H_0'/L_0=0.017$ の直立堤と消波堤の算定結果である。 $h/H_0' > 1.0$ ， hc/H_0' が大きい条件では、幾分の差は見られるものの合田の期待越波流量算定図の値と比較的良く一致する。一方、海底勾配 1/10， $h/H_0' < 1.0$ では、波が非線形化し急激な変形が生じ、碎波、碎波後の流れ、ウェーブセットアップ等の複雑な現象となる。それに伴い、特に消波堤の場合に違いが顕著となる。それに対し、図の下段に示す海底勾配 1/30， $H_0'/L_0=0.017$ の消波堤の場合は、期待越波流量算定図と良く一致する。

図-6 に表すように期待越波・越流計算モデルは、モデル中のパラメータ調整により、越波から越流に移行する状態の流量を連続的に推定できる。

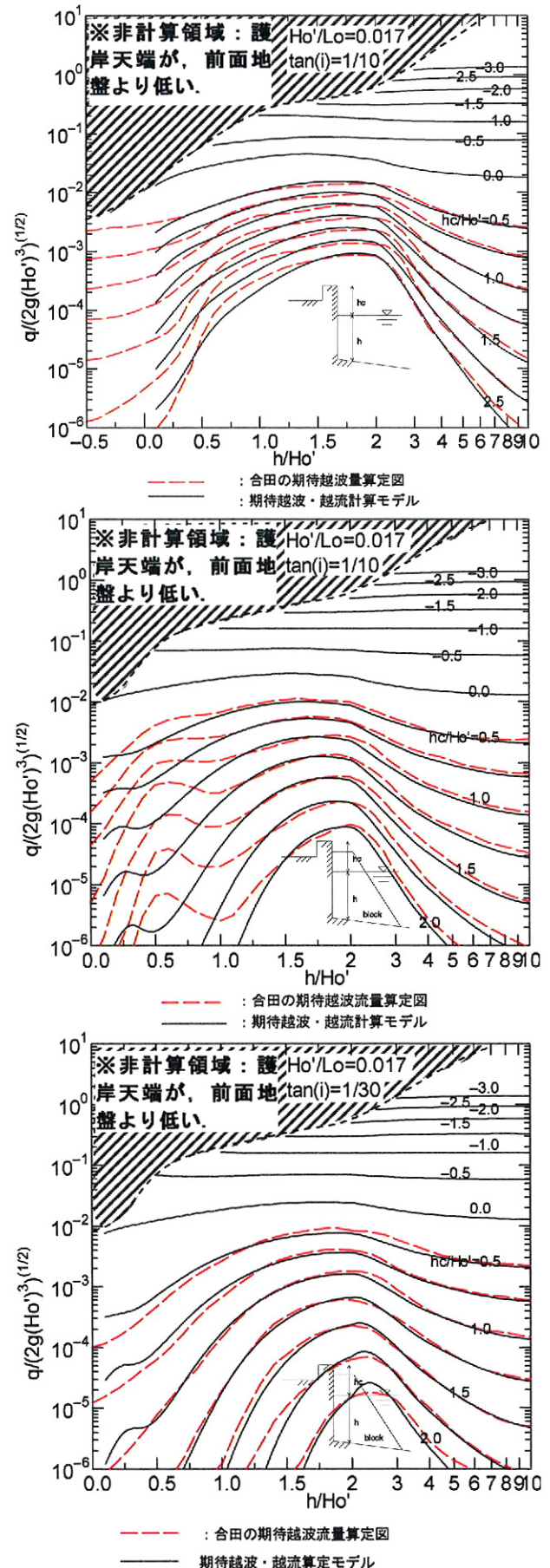


図-6 期待越波・越流モデルによる流量算定結果
(期待越波流量算定図との比較)

4. 期待越波・越流算定モデルの調整

(1) 算定モデルのパラメータ調整

合田モデルは、 h/H_0' が小さくなるのに従い、直立堤では、越波流量が過大評価となり、消波堤では、過小評価になる傾向にある。そこで、期待越波・越流計算モデルは、合田モデルの式(4)に含まれる係数 a , b , c の調整を行い、計算精度を高める。

係数 a が含まれる式(4)の第 2 項は、重複波的に波高水深比に比例して K が増大する効果を表している。合田らは、係数 a について構造物の反射率相当の諸元を提案している。そのため、係数 a は直立堤で $a=1.0$ 、消波堤で $a=0.5$ を採用している。

係数 b が含まれる式(4)の第 3 項は、砕波後の流れに似た性質を表現している。合田らは、係数 b について、実験結果による調整を行い、直立堤で $b=0.8$ 、消波堤で $b=0.0$ 程度を提案している。係数 b については明確な定義がなく、また複雑な現象を表現する係数でもあり、モデル化は難しい。そこで、本論文では、直立堤については合田らの提案する $b=0.8$ を用い、消波堤については、 h/H_0' が小さい場合に越波流量の過小評価の補正と砕波後の流れに似た性質の影響を加味するため $b=0.1$ とする。

係数 c は、 K の値が極端に大きくなることを避けるために設定している。合田は、係数 c について、経験的に存在しない限界の波頂波高比 (η_c/H) となるように一定値を与えている。しかし、限界の波頂波高比は、水深条件や波浪条件等により異なると考えられる。そこで、条件毎に係数 c を変化させることにより最適値を試行的に選定する。

護岸前面の波頂波高比は、通常、波高が大きくなるのに従い大きくなる。砕波が伴うようになると激しく水塊が舞い、飛沫が打ち上がる。砕波時の飛沫も越波に対して重要な要素ではあるものの、必ずしも飛沫の打ち上げ高が越波流量に寄与する波頂波高比に相当するとは限らない。また、飛沫の打ち上げ高は、様々な要素に左右されるため一般化は難しい。このことから、限界の波頂波高比が任意の水深で存在する砕波限界波高に対応する値となるように、式(4)右辺の H に砕波限界波高を、 h に砕波限界水深を入力し、計算される値を係数 c とする。

図-7 は、直立堤で、海底勾配を $1/10$ と $1/30$ 、 $H_0'/L_0=0.012$, 0.017 , 0.036 とする場合に、期待越波・越流モデルで設定した係数 c の値を表す。係数 c は、全条件で同様な傾向を示し、 h/H_0' が小さくなるのに伴い次第に大きくなり、 $h/H_0'<1.0$ で指数関数的に大きくなる。

図-8 および図-9 は、直立堤で、 $H_0'/L_0=0.017$ 、 $hc/H_0'=0.5$ 、 $h/H_0'=0.25$ と 0.50 の条件における合田の係数 c と期待越波・越流計算モデルの係数 c を用いた場合の K , q^* , $p(x)$ の関係を表す。図中の Pt.1, Pt.2 は、図-7 の Pt.1, Pt.2 の位置に相当する。

図-8 をみると、期待越波・越流計算モデルの K

は、砕波が伴う $H/H_0'>0.27$ において、係数 c の項が効き一定となる。合田モデルでは、 $H/H_0'>0.27$ の状況でも、 K は増加を続け $K=10$ で一定となる。

このように、砕波が伴う条件での K および q^* の増大を抑制することにより、 h/H_0' が小さい場合の越波流量の過大な値が修正できる。図-9 では、 $H/H_0'>0.53$ の場合に、係数 c の値が有効となり、 K および q^* の増大を抑制し、越波流量の過大な値が修正される。 h/H_0' が大きくなるのに伴い、砕波を伴う H/H_0' が存在しなくなり、合田モデルと一致するようになる。

期待越波・越流計算モデルでは、越波状態だけでなく、越波から越流の移行過程も計算できるように、式(3)についても修正を加える。式(3)は、 K が大きくなるとともに、波の山の継続時間が短縮されることを考慮し、吉川らの式⁵⁾ に対し $2/(1+K)^{3/2}$ を乗じている。この効果は、平均水位が護岸より低い場合には有効である。しかし、平均水位が護岸より高い、越波から越流の移行過程では、波の谷付近も越波し、最終的には全ての波が越波する。そのため、必ずしも有効でない。そこで、 $hc/H_0'<0.5$ の条件では、越波・越流の状態を考慮して、 $2/(1+K)^{3/2}=0.5$ の一定値とする。

(2) 算定モデルの課題

期待越波・越流計算モデルは、越波状態及び越波から越流への移行過程の流量算定を簡易化するため、複雑な現象に対して、簡単なパラメータを設定し、その値に一定値を設定している。そのため、幾つかの課題が生じる。

式(4)の第 3 項で計算される砕波後の流れに似た現象、式(4)の係数 c によって一定値となる砕波時の飛沫の打ち上げ高等が、簡易化した例である。これらの現象について、より最適なモデル化をすることにより、 $h/H_0'<1.0$ 、 hc/H_0' の大きい条件でも、流量の推定精度を向上させることが可能となる。また、式(4)の第 2 項の係数 a についても、構造物の形式毎に一定値としている。しかし、反射率は、構造形式のみではなく、波形勾配によっても変化する。任意の波形勾配に対して、適切に係数 a を変化させることにより、任意の波形勾配について越波流量の精度を向上させることが可能となる。

本論文では、消波堤の場合に、消波工の天端幅として、 $H_0'=3.0\text{m}$ に対して安定する消波ブロック 2 個並びの幅を設定している。しかし、消波工の天端幅によっても反射率は変化する。任意の波形勾配と消波工天端幅の関係を分析し、これを越波流量の算定に反映させることが必要である。

さらに、本論文で提案した現段階の期待越波・越流計算モデルは、直立堤と消波堤の限定された構造形式についてのみ扱っている。海岸堤防で一般的に設置されている三面張り構造や、最近の海岸環境を重視した多様な構造形式に対しては、十分な精度で流量推定を行うことができない。

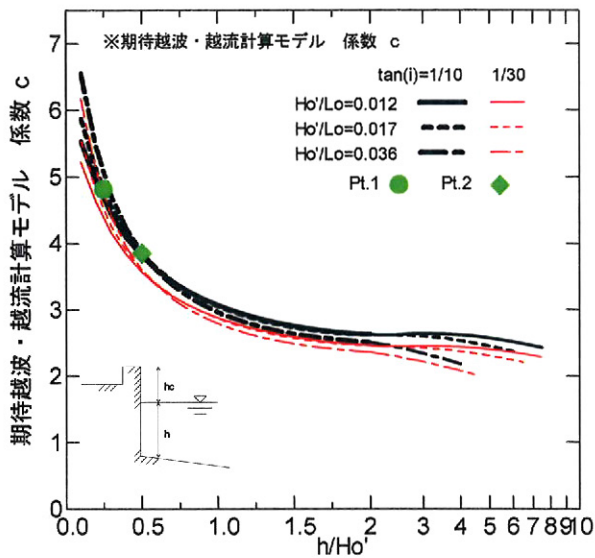


図-7 期待越波・越流モデルの係数 c (直立堤)

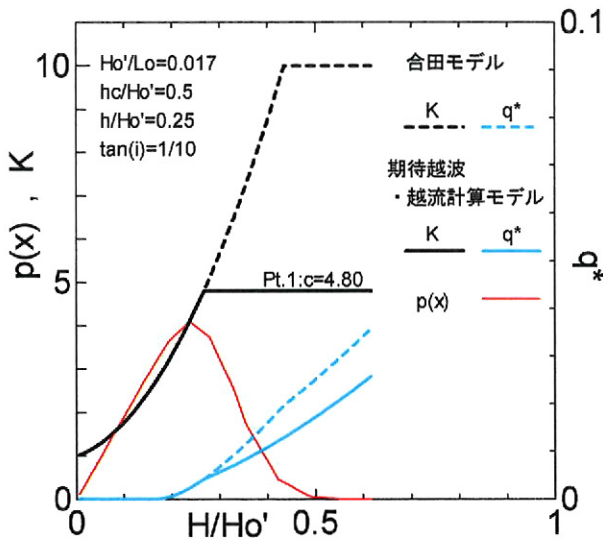


図-8 期待越波・越流モデルの係数 c を用いた場合の K , q^* , $p(x)$ の関係 (直立堤, $h/H_o'=0.25$)

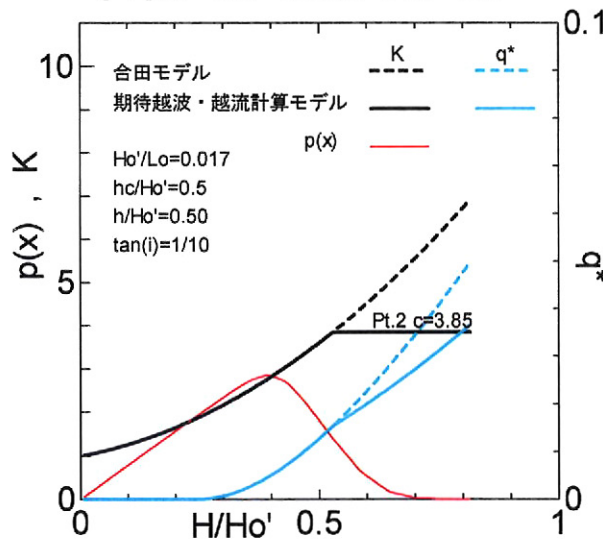


図-9 期待越波・越流モデルの係数 c を用いた場合の K , q^* , $p(x)$ の関係 (直立堤, $h/H_o'=0.50$)

5. 結論

高潮・高波共存時の高潮浸水シミュレーションに導入するための期待越波・越流算定モデルを提案した。以下に主な成果をまとめる。

(1) 数値波動水路による越波量の数値シミュレーションは、平均水位が海岸護岸の天端高よりも十分に低い場合 ($hc/H_o' > 0.5$) に、合田の期待越波流量算定図より幾分大きいものの、誤差の想定範囲にあるほぼ整合のとれた越波流量を計算する。

(2) 越波から越流への移行過程における数値シミュレーションの結果によれば、平均水位が上昇すると越波流量が増加し、越流と越波が共存する流量が計算できる。平均水位が護岸天端高を超過する場合 ($hc/H_o' < 0.0$)、流量は波高水深比 (hc/H_o') に依存せずほぼ一定値となり、波浪条件に大きく影響しない越流の特性が強くなる。

(3) 平均水位が海岸護岸の天端高を超過する場合、数値シミュレーション結果は、越流公式による流量よりも過少となり、越流係数が0.20～0.25程度となる。平均水位の超過に伴い、越流公式に漸近する。

(4) 期待越波・越流計算モデルを提案した。このモデルは、合田モデル中のパラメータを調整することにより、越波から越流に移行する状態の流量を連続的に推定できる。この簡易計算モデルにより、任意の水位・波浪条件下でも越波から越流への移行過程の流量を推定できる。

今後、多様な構造形式の海岸堤防について、数値波動水路による数値シミュレーションを行い、越波・越流量の結果をデータベース化する。これらの結果と整合するように、提案計算モデル中のパラメータを調整することで、多様な形状の海岸堤防に適用することが可能となる。また、本論文の課題として挙げた、波長（周期）に対する感度分析や碎波状態の越波量の推定精度を向上させるモデル改良を行い、より精度の高い実用的な計算モデルの構築に取り組む予定である。

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 4号，pp.3～44，1975。
- 2) 柴木秀之・鈴山勝之・江崎竜夫：越波と越流を考慮した高潮浸水の数値計算，海洋開発論文集，第24巻，pp.459-464，2008。
- 3) CADMAS-SURF実務計算事例集，沿岸技術ライブラリーNo.30，(財)沿岸技術研究センター，2008
- 4) 土木学会編：水理公式集 昭和60年度版，pp.287-288，1985。
- 5) 吉川秀雄・椎貝博美・河野二夫：海岸堤防の越波に関する現地観測（1），第14回海岸工学講演会講演集，pp.118-122，1967。
- 6) 合田良実：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 13号，pp.59～106，1975。