波浪が越流量に与える影響の見積と特徴

鈴木 武¹・鈴山 勝之²・柴木 秀之³

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

E-mail: suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

²株式会社エコー 技術本部 防災解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

E-mail: suzuyama@ecoh.co.jp

³正会員 株式会社エコー 技術本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

E-mail: shibaki@ecoh.co.jp

波による越流量の変化を把握するため、2次元数値波動水路 (CADMAS-SURF) を使って、越波から越流 (完全越流) に遷移する状態を対象に防潮壁上の流れの数値実験を行った。数値実験から得られる通過流量はRao&Muralidharの越流公式から求められる越流量と概ね一致した。天端上水位 h_1 が3mより大きい場合は、波がない場合の通過流量にほぼ一致する。これに対し、 h_1 が3mより小さい場合は、波がある場合、波の作用によって波がない場合よりも通過流量が大きくなる。本研究で設定した計算条件の範囲では、通過流量は波高や壁高が大きくなると大きくなる傾向が見られた。また、数値実験の結果を基に波による通過流量の増分を推定する式を構築し、その整合性を確認した。

Key Words : overflow rate, surplus overflow, wave effect

1. まえがき

台風来襲時には高潮と高波の双方が生起する。大規模な高潮発生時の浸水の特徴は、越波から越流への遷移が起こり、高波を伴って海水が防潮壁等を越流するところにある。通常、越流量の推定は本間¹⁾が求めた流量係数を使った越流公式を用いて行われるが、波浪の影響が考慮されていないため、推定された流量が現実と十分に一致しない可能性がある。また、既往研究でも越波に関する検討は行われているが、波浪を伴う越流過程については踏み込んだ検討事例が少ない。そこで本研究では、VOF法に基づく2次元数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いて越波から越流状態への遷移過程を対象とした計算を行い、波浪が越流量に与える影響を見積もるとともにその特徴を明らかにする。

2. 数値計算の条件

(1) 計算条件

表-1に計算で使った各パラメータを示す。パラメータは、実務計算事例集²⁾を参考に標準的な設定を用いた。また、波の有無が越流量に及ぼす影響を検討するため、

表-1 解析条件

計算時間	間隔 Δt	0.01s
	終了時刻	1500s
造波方法	造波境界 (入射波の条件)	$H_0'=1.5\text{m}, 3.0\text{m}, 6.0\text{m}$ ($H_0'/L_0=0.017$)
		$H_0'=0.001\text{m}, T=1\text{s}$
差分スキーム	DONORパラメータ	0.2
TimerDoor法	気泡上昇量	0.2m/s
	水滴落下速度	自由落下
境界条件	速度・圧力	スリップ条件
	VOF関数F	フリー条件

図-1 入射波の波形の一例

造波境界より図-1に例示する入射波を与えた。波ありの計算では、波形勾配を0.017に固定し、有義波高を1.5m, 3.0m, 6.0m(周期7.5s, 10.6s, 15.0s)と変化した不規則波形を用い、波なしの計算では、有義波高0.001m, 周期1sの微小な不規則波形を用いた。波なしの計算は、一般的な越流公式との比較による計算精度の確認や、波がある場合の越流量との比較を行うために実施した。波なしの計算を行う場合、本来ならば波を入射させる必要はないが、現在のCADMAS-SURFの仕様上、水位の保持機能を使用するためには何らかの波を入射させる必要があるため微小波浪を与えることとした。

(2) 計算領域

計算領域は現地スケールの地形として設定した。図-2に、計算領域の諸元と水位計及び流速計の設置位置を示す。水理現象が複雑になる防潮壁周辺では、最小格子間隔(水平格子0.5m, 鉛直格子0.1m)で地形近似を行い、壁厚 L は1.5m, 壁高 W は1.5m, 3.0m, 6.0m, 9.0mの4種類を設定した。また、本研究では完全越流を対象とし、越波から越流への遷移過程を表現できる複数の天端上水位 h_1 (-0.5m, 0.0m, 0.5m, 1.0m, 3.0m)を設定した。表-2に計算条件を示す。

検討に用いる防潮壁の通過流量(以下、計算流量と記す。)は、造波位置から52mの地点(ch.1)に検査断面を設定し、ある時刻における検査断面を通過する水塊の水平流量フラックス UQ を式(1)で示される鉛直積分によって求めた。CADMAS-SURFでは越波升を用いた流量の

表-2 計算条件

越流状況	壁高 W (m)	沖波波高 H_0' (m)	天端上水位 h_1 (m)
完全越流	1.5, 3.0, 6.0, 9.0	0.0	-0.5
		1.5	
		3.0	
		6.0	
		0.0	0.0
		1.5	
		3.0	
		6.0	
		0.0	0.5
		1.5	
		3.0	
		6.0	
		0.0	1.0
		1.5	
		3.0	
		6.0	
		0.0	3.0
		1.5	
		3.0	
		6.0	

※沖波波高 $H_0'=0.0$ mのケースは、波なしの計算ケースである。

図-2 計算領域の諸元

計測方法もあるが、本研究では鈴木ら³⁾に倣い流量の流入部で計測を行った。ここで、 F はVOF関数 F 値、 u は水平方向流速である。

$$UQ = \int Fudz \quad (1)$$

図-3及び図-4は、壁高 $W=6.0\text{m}$ 、天端上水位 $h_1=-0.5\text{m}$ 、 3.0m 、沖波波高 $H_0'=1.5\text{m}$ 、 6.0m の条件での平均水位と有義波高の分布を例示するものである。図-3は各水位計で計測された平均水位であり、縦軸が海底面からの高さ、横軸が造波位置からの距離を表す。図より防潮壁海側(ch.10)までの水位は沖波波高によらずほぼ一定である。 $h_1=-0.5\text{m}$ の場合は、初期水位が防潮壁天端高より低く、防潮壁への波の打ち上がりが発生するため、沖波波高が大きいくほど防潮壁頂部の水位は高くなる。一方、 $h_1=3.0\text{m}$ の場合は、初期水位が防潮壁天端より高いため越流状態となり、防潮壁頂部での水位は低くなる。 h_1 が大きい場合は小さい場合と異なり、沖波波高の違いが防潮壁頂部の平均水位に及ぼす影響は小さい。平均水位に関する特性は、壁高 $W=1.5\text{m}$ 、 3.0m 、 9.0m の場合も同様となる。図-4は沖合から陸域にかけての有義波高の分布である。 $h_1=-0.5$ の場合は、 $H_0'=1.5\text{m}$ でch.10、 $H_0'=6.0\text{m}$ でch.9の波高が小さくなり、ch.9とch.6で波高が大きくなる。これらの地点は防潮壁からの相対距離 x/L_w (x : 壁からの距離、 L_w : 波長) が0.3と0.5付近となり、合田⁴⁾に示される不規則波の重複波高の場所的変化傾向と一致する。 $h_1=3.0\text{m}$ の場合は、 $H_0'=6.0\text{m}$ で重複波の形成による有義波高の場所的変化が見られるが、 $H_0'=1.5\text{m}$ では h_1 に対して波高が小さいため、顕著な重複波の形成は見られず、水深変化による波高の減衰が見られる。

3. 越流公式の再現性

越流量を算出する一般的な方法として、本間¹⁾の流量係数を使った流量推定法があり、完全越流に対する越流公式として式(2) (以下、本間式と記す。)が用いられる。ここで g は重力加速度、 h_1 は天端上水位を表す。

$$Q = 0.35h_1\sqrt{2gh_1} \quad (2)$$

本間式は台形堰に対し、壁厚 L と天端上水位 h_1 が $L > 2h_1$ の条件下で提案された実験式であるため、壁厚 L が薄い防潮壁を対象とする場合、適用範囲を外れた条件に対しては計算結果の再現性が十分に確認できないと考えられる。そこで本研究では、長方形堰に対する流量係数 C を、天端上水位 h_1 、壁厚 L 、壁高 W を変数として設定できるよう提案された実験式である、Rao&Muralidhar⁵⁾の越流公式 (以下、Rao式と記す。)を併用する。

$$Q = Ch_1^{3/2} \quad (3a)$$

$$0 < h_1/L \leq 0.1; C = 1.642(h_1/L)^{0.022} \quad (3b)$$

$$0.1 < h_1/L \leq 0.4; C = 1.552 + 0.083(h_1/L) \quad (3c)$$

$$0.4 \leq h_1/L \leq (1.5 \sim 1.9); C = 1.444 + 0.352(h_1/L) \quad (3d)$$

$$(1.5 \sim 1.9) \leq h_1/L; C = 1.785 + 0.237(h_1/W) \quad (3e)$$

図-5は、壁高 $W=6.0\text{m}$ 、天端上水位 $h_1=-0.5\text{m}$ 、 3.0m 、沖波波高 $H_0'=0.0\text{m}$ 、 6.0m の条件における計算流量と、本間式及びRao式から得られる越流量の比較である。 $h_1=-0.5\text{m}$ の場合は、波なし($H_0'=0.0\text{m}$)で計算流量と本間式及びRao式の越流量は概ね一致する。沖波波高が大きくなり、波浪による海水流入量の増加とともに計算流量は増大する。一方、 $h_1=3.0\text{m}$ の場合は、波なし($H_0'=0.0\text{m}$)では計算流量とRao式の越流量は概ね一致するが、本間式は適用範囲($L > 2h_1$)から外れることから計算流量を過小評価する。 h_1 が大きくなると沖波波高の大小が越流量に及ぼす影響は小さくなり、沖波波高に関わらず計算流量はRao式の越流量とほぼ同じになる。図-6は $h_1=-0.5\text{m}$ 、 3.0m

図-3 沖合から陸域にかけての平均水位の空間分布

図-4 沖合から陸域にかけての有義波高の空間分布

の場合の防潮壁頂部 (ch.11) の平均流速の鉛直分布の比較である。 $h_1=0.5\text{m}$ の場合は、沖波波高 $H_0=1.5\text{m}$ より 6.0m の流速が大きい。 $H_0=1.5\text{m}$ の時は、防潮壁頂部付近のみで顕著な流速が発生するのに対し、 $H_0=6.0\text{m}$ では波浪の影響が及ぶ広い範囲で流速が発生する。一方、 $h_1=3.0\text{m}$ の場合は、上層部分において沖波波高の違いによる影響が若干見られるものの、下層部分の流速はほとんど同じになる。これは、 h_1 が小さい場合は、防潮壁頂部の越流現象に対して波浪に起因する現象が及ぼす影響が大きいのに対し、 h_1 が大きくなり越流が大規模になると、越流現象に対して波浪に起因する現象が及ぼす影響が相対的に小さくなることが原因と考えられる。

4. 波浪が越流量に与える影響

(1) 波浪が越流量に与える影響の特徴

図-7は、計算で得られる通過流量 Q と天端上水位 h_1 の関係を示す。図には、壁高 $W=1.5\text{m}$ 、 6.0m の場合を代表ケースとして示し、白マークが $W=1.5\text{m}$ 、黒マークが $W=6.0\text{m}$ の計算値を表し、沖波波高 H_0 の違いを各種マークで表している。また、赤線が本間式、青線がRao式の越流量を表す。Rao式は、式(3d)及び(3e)で示したように式の選択時に h_1/L に幅を持つため、便宜的に $h_1/L > 1.9$ で式(3e)への切り替えを行った。波なしの計算値 ($\diamond$ 、 $\blacklozenge$) と2種類の越流公式の比較を行うと、本間式は $L > 2h_1$ の条件に近い $h_1=1.0\text{m}$ までは計算値との適合は良いが、適用範囲を大きく外れる $h_1=3.0\text{m}$ では計算値を過小評価する。これに対しRao式と計算値の適合性は高い。壁高が高くなると防潮壁海側の水深が増大して碎波が少なくなるため、同じ沖波波高でも壁高が高い方が通過流量が大きくなる。この傾向は碎波の状態によって結果が異なる可能性がある。 h_1 が 3.0m より大きい領域では、沖波波高や壁高の影響がほとんどなくなり、Rao式に概ね一致する。この結果から、越波・越流量に対する波浪の影響が大きい h_1 が 3.0m より小さい領域で波浪による越流量の増分を見積もることができれば、その値をRao式から得られる越流量に加えることで、高波を伴う大規模越流時の通過流量の推定が可能となる。

(2) 波浪が越流量に与える影響の見積

波がない場合の越流量に対する波がある場合の越流量の増分 ΔQ は、式(4a)に示すように、平均水面から波の頂部までの高さ $H/2$ を指標とする通水断面の高さと、 $H/2$ を指標とする位置エネルギーから生じる流速の積に比例すると考えられ、 a はその比例定数である。ここで H は ch.11 (防潮壁の海側壁面位置) で計測される有義波高であり、 b は通水断面を補正する係数である。天端上水位

図-5 計算流量と越流公式による流量の比較

図-6 天端上水位 h_1 の違いが

平均流速の鉛直分布に及ぼす影響

図-7 通過流量と天端上水位 h_1 の関係

h_1 が正の場合 (越流時) は通水断面の補正は行わない。一方、 h_1 が負の場合は、 h_1 の大きさに対応して通水断面が小さくなるため、通水断面を何らかの方法で補正する必要がある。本研究では h_1 が負になる計算条件は $h_1=0.5$ のみであるため、補正関数を推定することができない。そこで式(4b)に示すように、便宜的に係数 b_0 を乗じることによって通水断面を低減させることにした。 ε は海水

の輸送効率を表す係数である。波による海水の輸送は、水粒子運動が楕円運動の上側で作用する場合、越流と同じ向きの水輸送のみが生じると考えられる。これに対し、天端上水位 h_1 が正の方向に大きくなると越流と逆向きの水粒子運動も生じると考えられる。そのため、波の位置エネルギーからもたらされる流速と通水断面の積から決まる通過流量に、輸送効率 ε を乗じることにより低減させるものとする。輸送効率 ε は、 $h_1=0$ で1、 $\alpha H/2$ で0になる直線に従って低下していくものと想定する。また ε は h_1 の増大に伴って減少していくが、防潮壁頂部付近では水粒子運動の下側の運動が制限されることや波による輸送があることなどから、 ε は ε_0 より小さくならないと考える。また4. (1)より、 h_1 が3mより大きいときに $\Delta Q/Q$ が無視できる程度に小さくなるため、ここでは h_1 が3m以下の範囲で考えることにする。

$$\Delta Q = a b (H/2) (H/2)^c \varepsilon \quad (4a)$$

$$b = \begin{cases} b_0, & h_1 < 0 \\ 1, & h_1 \geq 0 \end{cases} \quad (4b)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & h_1 < 0 \\ 1 - h_1 / (\alpha H / 2), & \alpha H / 2 > h_1 \geq 0 \\ \varepsilon_0, & h_1 \geq \alpha H / 2 \end{cases} \quad (4c)$$

図-8に波による越流量の増分 ΔQ とch.11の有義波高 $H_{1/3}$ を示す。あわせて、 ΔQ と $H_{1/3}$ を用いて壁高 W 別に式(4)の係数 a , b_0 , c , α , ε_0 を最小自乗法で同定し、得られた ΔQ の推定式を表す曲線を示す。図より ΔQ と $H_{1/3}$ には良好な関係が見られ、波高が大きくなるのと波浪による越流量の増分が大きくなる。ただし、壁高が高くなると波浪による越流量の増分は少し小さくなる。図-9は壁高別に推定した式(4a)~(4c)の係数 a , b_0 , c , α , ε_0 を整理した結果である。図より、通水断面の補正係数 b と海水の輸送効率を表す係数 ε_0 は、壁高によらずほぼ一定の値となる。位置エネルギーから生じる流速に関する係数 c は、防潮壁海側において碎波が発生し易い壁高 $W=1.5\text{m}$, 3.0m で大きく、前面水深が深くなり碎波が起こりにくくなる $W=6.0\text{m}$, 9.0m で小さい値となる。本研究で計算した範囲では、 a は壁高 W が大きくなるにつれて大きくなるが、 c が小さくなるなどの影響で ΔQ は必ずしも大きく

図-8 波による越流量の増分と有義波高の関係

ならない。図-10は、CADMAS-SURFによる数値実験から求められた ΔQ と推定式(4)から求めた ΔQ を比較したものである。推定式(4)を用いて求めた ΔQ は2次元数値波動水路から求められた ΔQ とよく一致し、相関係数は0.984である。推定式(4)によって波による越流量の増分を良好に推定することが可能である。

5. 結論

波による越流量の変化を把握するため、2次元数値波動水路（CADMAS-SURF）を使って、越波から越流（完全越流）に遷移する状態を対象に防潮壁上の流の数値実験を行った。それをもとに以下の知見を得た。

- ① CADMAS-SURFを用いた越流計算とRao式から求められる越流量は概ね一致する。
- ② 天端上水位 h_1 が3.0mより小さい状態では、波の作用によって波なしの場合よりも通過流量が大きくなる。そして通過流量は、沖波波高および壁高が増大すると増加する。ただし、この傾向は碎波の状態によって結果が異なる可能性がある。
- ③ h_1 が3.0mより大きい領域では、波がない場合の通過流量にほぼ一致する。
- ④ 数値実験による防潮壁海側端の有義波高と通過流量から、波による通過流量の増分 ΔQ （波ありの場合と波なしの場合の差）を推定する式を考案し、式のパラメータを同定した。その推定式から求められる ΔQ が数値実験による結果とよく一致する。

参考文献

- 1) 本間仁：低溢流堰堤の流量係数（第二編），土木学会誌，Vol.26, No.9, pp.849-862, 1940.
- 2) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SRUF 実務計算事例集，沿岸技術ライブラリー，No.30, 2008.

図-9 壁高毎の係数の比較

図-10 推定式を用いた数値実験結果の推定

- 3) 鈴木武，柴木秀之，鈴山勝之：越流現象に対する数値波動水路の解析特性，土木学会論文集 B3（海洋開発），vol.69, pp.1006-1011, 2013.
- 4) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊池治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248, 24p., 1976.
- 5) Rao, N. S. G. and Muralidhar, D. : Discharge characteristics of weirs of finite-crest width, La Houille Blanche, No.5, pp.537-545, Aout/Sep., 1963.

ESTIMATION AND CHARACTERIZATION OF SURPLUS OVERFLOW RATE CAUSED BY WAVES

Takeshi SUZUKI, Katsuyuki SUZUYAMA and Hidenori SHIBAKI

In order to understand effect on overflow rate caused by waves, we simulated with a 2D wave-simulating numerical flume that sea water flowed over seawall on complete overflow condition with waves. The flow rates from the simulations on no wave condition were considerably consistent with overflow rates calculated by Rao & Muralidhar's formula. On wave condition, surplus flow rate over seawall caused by waves was undetected when sea level height from top of seawall, h_1 was larger than 3m. When h_1 was smaller than 3m, the flow rate on wave condition was larger than on no wave condition. The surplus flow rate caused by waves increased with increasing wave height and height of seawall. And, we developed the formula to estimate surplus flow rate over seawall caused by waves based on the results of numerical simulations, and verified that outputs of the formula fit the simulation results considerably.