数値波動水槽を用いた越流現象の特性解析

鈴木 武¹・柴木 秀之²・鈴山 勝之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

³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

高波が来襲する状況での越流現象の特性を把握するため、VOF法に基づく2次元数値波動水路(CADMAS-SURF)を用いて、海水が堤防から越流する状態の数値実験を行った。その結果、数値実験は、本間¹⁾の越流公式から求められる越流量を波なしの条件において概ね再現した。波がある場合は、波なしの場合よりも越流量が大きくなり、その増加量は完全越流の場合が、もぐり越流の場合より大きかった。堤防壁厚が薄い場合は、完全越流の場合に、壁厚が厚い場合よりも越流量が大きくなるが、もぐり越流の場合は明確な差が現れなかった。

Key Words : CADMAS-SURF, complete overflow, submerged overflow

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ため、大規模な高潮の際には、高波が押し寄せる中で海水が海岸堤防を越流する状態が起こる。近年、越波過程についてはVOF法に基づく2次元数値波動水路(CADMAS-SURF²⁾)を用いた検討が行われ、その妥当性と有用性が確認されているが(例えば、川崎ら^{3,4)})、越流過程については踏み込んだ検討事例がない。そのため本研究では、CADMAS-SURFを用いて越流の計算を行い、その結果を分析することで、高波が来襲する状況での大規模な越流現象の水理特性を把握する。

2. 数値計算の条件

(1) 計算条件

表-1に計算で使用し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。大規模越流時を対象に、波の有無が越流量に及ぼす影響について検討を行うために、図-1に示す2種類の波浪条件を用いた。波ありの計算で使用した波浪条件は、有義波高3.0m、波形勾配0.017(周期10.6s)の不規則波形、波なしの計算で使用した波浪条件は、有義波高0.001m、周

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	$H_0'=3.0\text{m}$, $H_0'/L_0=0.017$
		$H_0'=0.001\text{m}$, $T=1\text{s}$
格子間隔	x方向	$\Delta x=0.5\text{m}\sim 4.0\text{m}$
	z方向	$\Delta z=0.1\text{m}\sim 0.8\text{m}$
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 波浪の条件

期1sの、微小な不規則波形である。本来ならば波なしの計算を行う場合は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、図に示すような微小波浪を与えることとした。

(2) 計算領域

計算領域は図-2に示す現地スケールの地形を設定し、越流計算を主に行うため、以下のような条件を設定した。海側天端水深 h_1 と堤防壁厚 L は、本間¹⁾により流量係数（完全越流：0.35，もぐり越流：0.91）が求められたときの条件（ $L > 2h_1$ の矩形断面）を満たすよう $h_1=1.5\text{m}$ ， $L=6\text{m}$ とした。また、水路陸側端に胸壁を設置し、堤防陸側の水位を制御する。堤防と胸壁の距離は越流後の水位が安定するよう十分な長さを与えた。さらに、胸壁を設置したことで発生する戻り流れを抑制するため、堤防から胸壁へすりつく斜面を設置した。この斜面の設置の効果は、後述の3.で詳細に述べる。

3. 本間の越流公式の再現性

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、越流状態に応じて式(1)と式(2)に示す越流公式を用いて越流量を求める。ここで g は重力加速度， h_1 は海側天端水深， h_2 は陸側天端水深を表す。

$$Q = 0.35h_1\sqrt{2gh_1} \quad (1)$$

$$Q = 0.91h_2\sqrt{2g(h_1-h_2)} \quad (2)$$

本間の越流公式に対するCADMAS-SURFの再現性を調べるため、完全越流ともぐり越流の2種類の越流状態に対する計算を行った。完全越流ともぐり越流の条件としては、海側相対水深（ h_1/H_0 ： $H_0=3.0\text{m}$ ）を0.5で固定し、計算が安定状態に達したときの陸側相対水深（ h_2/H_0 ： $H_0=3.0\text{m}$ ）が、0.0（完全越流）及び0.47（もぐり越流）になるよう胸壁を調整した。この胸壁の設置により、陸側で戻り流れが発生すると考えられたため、戻り流れの

図-2 計算領域と設定諸元

抑制を目的として斜面を設置した。図-3は斜面がある場合とない場合の完全越流ともぐり越流の平均水位の分布である。縦軸は海底面からの高さ、横軸は造波位置からの距離を表す。堤防周辺を除けば堤防の海側と陸側の水位は概ね一定であるが、斜面ありとなしで陸側の水位に若干の違いが見られる。完全越流では、堤防陸側の約20mの範囲で水位の急激な低下が発生する。図-4は計算から得られる越流量（以下、「計算流量」という。）と本間の越流公式から得られる越流量（以下、「本間流量」という。）の比較である。計算流量は、造波位置から200mの地点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(3)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計測方法もあるが、本研究では本間（1940）の実験に倣い、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。

$$UQ = \int Fudz \quad (3)$$

本間流量は、造波位置から200mと1006m（堤防陸側200m）離れた地点の、堤防天端からの水位 h_1 と h_2 の平均値より算出した。さらに、斜面なしと斜面ありの比較により、斜面の有無による計算流量と本間流量の違いを確認した。完全越流では斜面の有無に関わらず、計算流量は本間流量を概ね再現したが、もぐり越流では斜面なしの場合に計算流量と本間流量の差が大きくなった。斜面の有無で計算流量に大きな違いが見られないため、その差は本間流量の算定に用いる h_2 の差に起因しており、その原因として胸壁の設置による戻り流れの発生が考えられる。図-5は、計算流量を計測している海側地点（W1）と、 h_2 を計測している陸側地点（W16）の平均流速の鉛直分布である。海側では、完全越流ともぐり越流、斜面ありとなしに関わらず、水面から底面までほぼ一様な流速分布となる。陸側では、完全越流のとき、斜面あり・なしともに、底層の戻り流れは確認できない。ただし、斜面ありは斜面なしよりも堤防陸側の流速が増加し、水位が低下する。これに対し、もぐり越流では、斜面なしの場合、地盤から1m程度の高さまで戻り流れが発生しており、これを補うために上層の流速が増加することで水位が低下する。斜面ありでは、戻り流れの発生を抑制できることから上層の流速の増加はなく、斜面なしと比較して水位が5cm程度高くなる（図-3）。もぐり越流時の本間流量の算出には、この微小な水位の差が影響を及ぼすことから、精度良く本間流量を算出するためには、斜面を設置して戻り流れを抑制した水位 h_2 を用いることが重要となる。また、完全越流時の本間流量の算出には、海側天端水深 h_1 のみを用い、陸側天端水深 h_2 を用いないため、斜面の有無に関わらず本間流量と計算

流量が一致したと考えられる。以上より、CADMAS-SRUFで計算される越流量は、本間の越流公式から算出される越流量を概ね再現可能である。ただし、もぐり越流の再現には堤防陸側に斜面を設置することが有効となる。以降で示す計算結果は全て、斜面ありものである。

図-3 平均水位の空間分布（斜面あり・なし）

図-4 本間流量と計算流量の比較

図-5 沖側地点と陸側地点の平均流速の鉛直分布

4. 大規模越流時の波が越流量に及ぼす影響

高潮発生時は波浪を伴いながらの越流になる。そこで波を考慮した場合の越流計算を行い、波の有無が大規模越流時の越流量に及ぼす影響について検討を行う。図-6は波がある場合とない場合の完全越流ともぐり越流の平均水位の分布である。縦軸は海底面からの高さ、横軸は造波位置からの距離を表す。堤防海側の平均水位は波のあり・なしに関わらずほぼ同じとなるが、堤防陸側では、波ありが波なしより6~8cm程度高くなる。図-7は、完全越流ともぐり越流に対する波ありとなしの計算流量の比較である。計算流量は、完全越流ともぐり越流ともに波ありの方が大きくなる。この流量増加の影響が、図-6で示した堤防陸側の数cmの平均水位の上昇に繋がったと考えられる。また、完全越流がもぐり越流より、波がある場合の流量の増加量が若干大きいことがわかる。波があることによって流量が増加する理由は、完全越流の場合、海水が堤防から落下する形で陸側に流れるため、波が砕波してできる海面付近の一方向流や波の峰を形成する海水が陸側に一方的に輸送されることで堤防陸側への越流量が大きくなるためである。また、もぐり越流の場合は、堤防海側や堤防上で波が砕波してできる海面付近の一方向流によって越流量が増加するためである。ただし、もぐり越流は、堤防陸側の水位が堤防天端より高いため、海側の水位が低くなると陸側から海側に海水が流れ、越流量が若干抑制される。図-8は、計算流量を計測している海側地点(W1)と、堤防の海側端(W7)の平均流速の鉛直分布である。海側では波の影響により海面近傍で局所的に平均流速が高くなる。その影響は水深10m程度までが顕著であり、それより深い範囲では波なしと同様、流速はほぼ一様となる。堤防の海側端の流速分布から、完全越流の流速が大きいのは明らかである。また、もぐり越流では、完全越流では見られなかった海側への戻り流れが確認できる。図には、海側地点(W1)と堤防の海側端(W7)の1周期分の流速ベクトルを併記するが、もぐり越流で波ありの場合のみ、陸側から海側への流速が確認できる。また、図-9は、沖合から陸域にかけての有義波高の分布であるが、完全越流では堤防付近で波高が減少することが確認できる。これは、完全越流がもぐり越流より多くの波が砕け、一方向流への変換が行われていることを示唆している。流れに変換された波は、堤防陸側で再びもぐり越流と同程度の波として再生する。以上より、波がある場合はない場合より越流量が増大し、その傾向は完全越流で大きく、もぐり越流で小さい。一般的な高潮シミュレーションでは、越流量の算出に本間の越流公式が用いられる。そのため、実現象と比較した場合、高潮シミュレーションの結果は越流量を過小評価している可能性がある。

図-6 平均水位の空間分布 (波あり・なし)

図-7 波なしと波ありの越流量の比較

図-8 海側と海側天端上の平均流速の鉛直分布

図-9 沖合から陸域にかけての有義波高の分布

5. 堤防の壁厚が越流量に及ぼす影響

堤防壁厚を胸壁を想定して1.5mにして計算を行い、壁厚の違いが計算結果に及ぼす影響を確認した。表-2は、それぞれの計算結果に対して海側天端水深 h_1 、陸側天端水深 h_2 と計算流量を整理したものである。表より、 h_1 は堤防壁厚が変化しても変化しないが、 h_2 は壁厚が薄くなると若干大きくなる。計算流量は、完全越流のときは、波のあり・なしに関わらず壁厚が薄い場合が厚い場合よりも大きくなる。これに対し、もぐり越流のときは明確な差は現れない。図-10は、堤防周辺の約30mの範囲で代表時刻の水面の形状と流速分布の比較を示したものである。完全越流で波なしの条件では、壁厚が6mの場合、堤頂面で水位の低下が見られるが、壁厚1.5mの場合は堤頂面の水位の低下はほとんど発生せず、海側の水塊がそのまま堤防陸側へ流入する。堤頂面で水位が低下するのは堤頂面で流速が増加していくためと考えられる。完全越流では海側と陸側の水位差が大きいため、海側から陸側へ水塊が激しく打ち込みながら流入することで強い流れが発生し、堤防陸側から約20mの範囲で水位が低下する。これに対し、もぐり越流で波なしの条件では、壁厚が6mの場合、広い天端が整流板に似た効果を発揮し、

堤防陸側では陸側へスムーズな流れが発生する。一方、壁厚1.5mの場合は、流れが堤防を通過する際に上層に乱れが発生し、堤防陸側で渦の生成が見られる。もぐり越流ではこの乱れの効果により、壁厚が薄い場合が厚い場合より越流量が若干抑制されている可能性がある。

波がある場合も基本的な現象は波なしの場合と同じとなる。完全越流で波ありの条件では、壁厚が6mの場合、天端上で波が砕けながら陸側へ流入するが、壁厚が1.5mの場合は堤防による砕波効果が小さく、波の峰を形作る海水が陸側に輸送されることで越流量が増加する。これ

表-2 h_1 と h_2 と越流量の比較

堤防壁厚	越流状態	波の有無	h_1 (m)	h_2 (m)	計算流量 ($m^3/m/s$)
6.0m	完全越流	なし	1.501	-0.088	2.758
		あり	1.503	-0.004	3.158
	もぐり越流	なし	1.500	1.404	1.548
		あり	1.502	1.465	1.865
堤防壁厚	越流状態	波の有無	h_1 (m)	h_2 (m)	計算流量 ($m^3/m/s$)
1.5m	完全越流	なし	1.501	0.053	3.199
		あり	1.503	0.139	3.722
	もぐり越流	なし	1.500	1.416	1.531
		あり	1.502	1.469	1.857

(a) 完全越流【波なし】

(c) 完全越流【波あり】

(d) もぐり越流【波なし】

(d) もぐり越流【波あり】

図-10 代表時刻の堤防周辺の水面の形状と流速分布の比較

関わらず堤防前面で波が砕け、陸側へ流入する。図-11は、完全越流に対して堤防の海側端（W7）と陸側端（W8）での平均流速の鉛直分布である。完全越流では波のあり・なしに関わらず、堤防海側では壁厚1.5mの場合が壁厚6mの場合よりも流速が大きい。堤防海側の流速分布を見ると、上層の流速は壁厚に関わらずほぼ同じになるが、下層の流速は壁厚1.5mが大きい。これに対し堤防陸側では、下層の流速は壁厚に関わらずほぼ同じになるが、上層の流速は壁厚1.5mの場合に大きくなる。この上層の流速の差は、壁厚6mの場合に壁厚1.5mの場合よりも堤防上で水位が低下することによるとみられるため、堤防上の流れには堤頂面での摩擦抵抗が作用している可能性がある（図-10）。また、壁厚の違いが越流量に影響を及ぼさないもぐり越流では、堤防前面及び陸側の流速分布に大きな差は見られなかった。

6. 結論

本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

- ①CADMAS-SURFを用いた越流計算と本間の越流公式から求められる越流量が概ね一致した。
- ②堤防陸側の水位は、戻り流れの影響を受ける。戻り流れを抑制するためには、堤防陸側に斜面を設置することが有効である。
- ③波がある場合は波による海水の輸送が起こり、越流量が増大する。その傾向は完全越流で大きく、もぐり越流で小さい。
- ④堤防壁厚が薄い場合、完全越流のときは壁厚が厚い場合と比較して越流量が大きくなる。これに対し、もぐり越流のときは越流量に明確な差が現れない。

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.

図-11 完全越流時の平均流速の鉛直分布の壁厚による差

- 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.
- 3) 川崎浩司・菊雅美・嶋田宏・柴多哲郎・板橋直樹・馬淵幸雄：現地リーフ地形における波浪変形と護岸周辺の越波に関する数値解析，海洋開発論文集，Vol.23, pp.201-206, 2007.
- 4) 川崎浩司・菊雅美・笹田泰雄：リーフ地形における直立護岸を対象とした数値波動水路による波浪・越波計算とその精度検証，海洋開発論文集，Vol.24, pp.945-950, 2008.

CHARACTERISTICS OF OVERFLOW IN WAVE-SIMULATING NUMERICAL FLUME

Takeshi SUZUKI, Hidenori SHIBAKI, Katsuyuki SUZUYAMA

In order to understand characteristics of overflow, we simulated with a wave-simulating numerical flume that sea water flowed over seawall. The numerical flume was CADMAS-SURF, which could simulate water flow in vertical cross-section by using Volume Of Fluid Method. The simulations executed under no-wave condition considerably reproduced flow rates calculated by Honma's formula (1940). Flow rates under wave condition were higher than under no-wave condition. Its increasing tendency in complete overflow was higher than in submerged overflow. Flow rates over thin wall was higher than over thick wall in complete overflow. In submerged overflow, obvious difference between thin wall and thick wall was not observed.