

数値流体解析ツール OpenFOAM による越波流量推定の適用性検討

大成建設（株） 正会員 ○千綿 蒔
 大成建設（株） 正会員 羽角華奈子
 大成建設（株） 正会員 織田 幸伸
 大成建設（株） 正会員 伊藤 一教

1. 背景と目的

海面上昇や台風強度の増大に伴い、高潮時に海面が既設の護岸高を超えることによる、越流の発生が今後懸念される。この場合、越波と越流の両者を検討する必要があるが、越波・越流の同時生起や遷移状態に関する研究例は少ない。そこで、数値流体解析ツール OpenFOAM を用いた数値実験により、越波と越流を同時に考慮した場合の流入量を算定する数値実験を行った。このうち本論文では、OpenFOAM による越波流量推定の妥当性を検討した結果を示す。具体的には、越波流量の算定式として提案されている高山モデル及び田中モデルと OpenFOAM による計算結果の比較を行い、計算結果の妥当性評価を行った。

2. 既往の越波流量評価方法

合田¹⁾は不規則波による越波流量算定のための水理模型実験を行い、越波流量算定図を作成した。これは高山²⁾によって定式化され、波形勾配、海底勾配等を任意で与えることが可能になった。合田の算定図及び高山の算定式は、ともに換算沖波波高 (H'_0) によって取りまとめられており、護岸設計時の越波流量算定の際に一般的に用いられている。さらに、合田³⁾は、10,000 ケース以上の越波実験の結果をまとめた CLASH データベースに基づき、堤前波高 ($H_{s,toe}$) による越波流量の算定手法を提案した。さらに田中⁴⁾は、合田³⁾の越

波モデルを修正し、越流領域も統一的に評価できるモデルを提案している。

高山モデルでは、合田⁵⁾の浅海砕波の理論が用いられ、砕波帯における平均水位や波高の変化を組み込んでいる。一方で、田中モデルは堤前波を使用したモデルであ

表-1：計算条件

計算格子間隔		計算領域図に記載
計算時間間隔		自動調整 (最大クーラン数 0.5)
動粘性係数 ν	水	$1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
	空気	$1.59 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
密度 ρ	水	$1 \text{ kg}/\text{m}^3$
	空気	$1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
乱流モデル		なし
境界条件	壁面	empty
	上面	大気圧開放
	底面	slip
界面数値拡散抑制係数 c_α		1

表-2：計算ケース

計算時間・ケース数		1800s × 118
入力波	波高 H'_0	1.5 m
	周期 T_0	5.2, 7.5 s
相対水深 h/H'_0		0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0
相対天端高 h_c/H'_0	非越流	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 1.0, 1.5, 2.0
	越流	-0.1, -0.2, -0.3 -0.5, -1.0

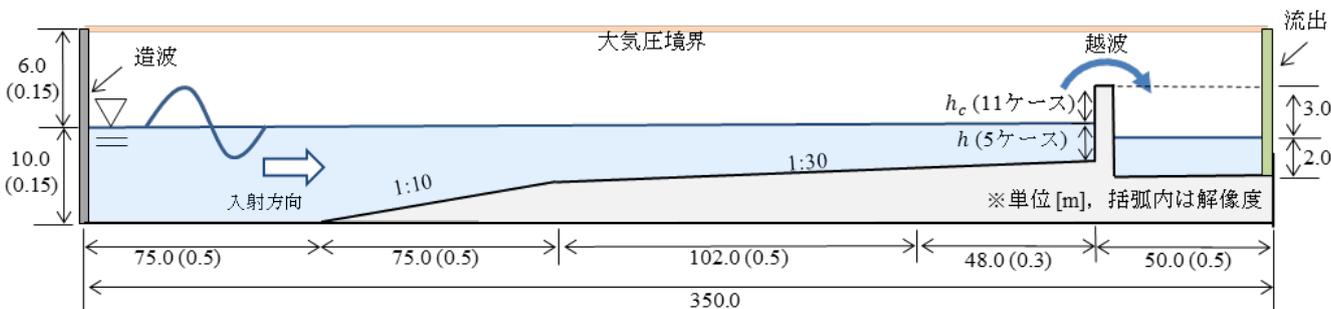


図-1：計算領域

キーワード 越波, 越流, 高潮, 数値流体解析, OpenFOAM, 不規則波

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 334-1 大成建設（株） TEL 045-814-7234

るため、護岸前面水深 $h \leq 0$ の範囲は適用対象外となっている。

3. 数値実験手法

数値実験には OpenFOAM の interFoam ソルバーを用いた。解析対象領域を図-1 に示す。1/30 勾配の長水路に対して、断面二次元の計算を実施した。計算条件及び検討ケースを表-1, 2 に示す。入射波は修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルによる不規則波で与え、水深 10m の一様水路を用いた入射波検定によってその妥当性を確認した。護岸前面の相対水深 (h/H'_0)、相対天端高 (h_c/H'_0) を変えた合計 118 ケースの計算を実施した。このうち、高山の算定式の適用範囲内 ($h_c/H'_0 \geq 0.5$) の 40 ケースについて、計算結果と高山の越波流量算定式の比較を行い、OpenFOAM による計算結果の妥当性を評価した。また、堤前波高によって越波流量を推定する田中モデルとの比較も行った。

4. 越波流量算定結果

護岸通過流量（越波流量）は、護岸断面の各格子において液相体積率（VOF 値）と流速の積として算出した。また、計算の安定性確保のため、空気層の流速が液相の流速を超えないという流速制限を設けた。計算出力結果の一例を図-2 に示す。あるケースでの VOF 値の断面分布を示しており、護岸に到達した波が護岸を超える越波現象が再現されていることが確認できる。

5. 既存の越波モデルとの比較

高山モデル及び田中モデルによって計算した越波流量の推定値と、OpenFOAM による計算値を比較した結果を図-3 に示す。なお、越波した回数が 10 未満のケースは、不規則波による越波流量の評価には不適切であるため、比較の対象外とした。図中の点線は、1/5～5 倍の範囲を示している。OpenFOAM による計算結果は、高山及び田中の推定値に対して過大評価の傾向があるものの、越波流量の推定値としては、概ね妥当な結果であると言える。ただし、護岸前面の初期水深 h が 0 のケースでは、高山モデルとの誤差が大きくなっている。 $h = 0$ においては、ラディエーションストレス等による水位上昇の寄与が大きく、砕波帯における水位や波高のモデル化が重要になる。OpenFOAM による計算では、高山モデルが用いている合田の砕波変形モデルに比べて護岸付近における水位上昇量を過大評価している可能性がある。護岸水深が小さい場合には計算結果の信頼性に注意が必要である。

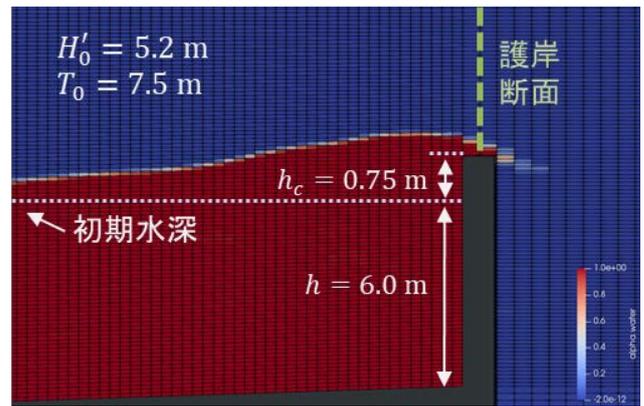


図-2：越波計算における VOF 値のスナップショットと計算格子

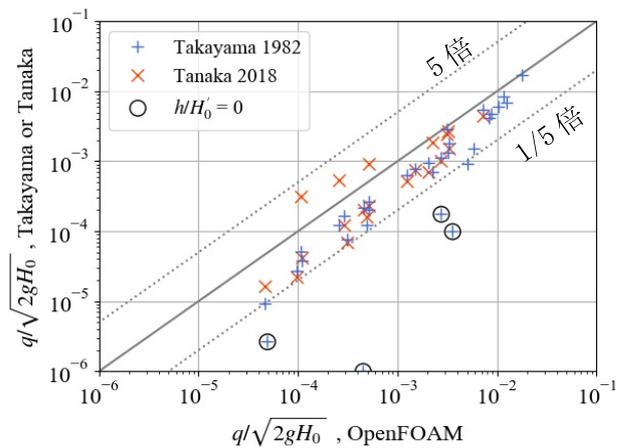


図-3：高山 1982，田中 2018 モデルとの比較。
(黒丸：相対水深 $h/H'_0 = 0$ のケース)

6. まとめ

越波流量を算定する手法を検討するために、OpenFOAM による数値実験を実施した。越波流量の評価は OpenFOAM によって概ね可能であることが示された。ただし、護岸水深が小さい場合、本計算は過大評価の傾向があり、計算結果の信頼性に注意が必要である。

参考文献

- 1) 合田良美・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，vol. 14, No. 4, pp.3-44, 1975.
- 2) 高山知司，永井紀彦，西田一彦：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，vol.21, No.2, pp.151-205, 1982.
- 3) 合田良美：CLASH データベースに基づく統一的越波流量推定式の提案，海洋開発論文集，vol.24, pp.939-944, 2008.
- 4) 田中陽二，鈴山勝之，樋口直人，柴木秀之：堤前波高を用いた越波モデルの改良と越波越流統合モデルの作成，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，vol.74, No.2, pp.I_1015-I_1020, 2018.
- 5) 合田良美：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，vol.14, No.3, pp.59-106, 1975.