

フラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波力

川崎 浩 司* ・ 富田 孝 史** ・ 下迫 健一郎***
高野 忠 史**** ・ 熱田 浩 史*****

本研究では、海域の環境と利用に配慮した高潮対策施設の一形式であるフラップゲート型高潮防潮堤を対象に、その越波特性および作用波力・波圧特性を、入射波高、ゲートの傾斜角度と関連づけながら、VOF 法に基づく数値解析と水理実験により議論した。さらに、精度良く作用波圧を算定できるように、数値波動水路 CADMAS-SURF の構造物形状入力方法を改良した。波高伝達率の結果より、港湾内を静穏に保ちながらフラップゲートを効率的に稼働させるには、港外側からゲートを立ち上げるのが有効であることを明らかにした。ゲートに作用する波力特性に関しては、ゲートの傾斜角度が同じ場合、ゲートが港外側に傾斜している方が増大することが判明した。

1. はじめに

1959 年の伊勢湾台風以後、全国で高潮に対する海岸保全施設が整備されてきた。しかし、1999 年台風 18 号による熊本県不知火町での高潮被害に代表されるように、未だ高潮は甚大な被害をもたらしている (例えば、河合ら、2000)。一方、1999 年に海岸法が改正され、防護面のみならず環境・利用面においても重要視されるようになった。以上のことから、海域の環境や利用に配慮した高潮対策施設の整備の必要性が高まっている。そのような施設の一形式として、フラップゲート型高潮防潮堤があげられる (図-1 参照)。その特徴として、通常時には海底に防潮堤を格納しているため海水交換性に優れ、また締め切り時間が短いことから異常波浪時には十分な防護機能を発揮できることなどの利点があり、イタリア・ベニスの高潮対策 (モーゼ計画) でも検討されている構造形式である。しかし、フラップゲートが沖側に傾斜しているときの耐波安定性など、検討の余地が多く残されている。

本研究では、フラップゲート型高潮防潮堤を取り上げ、その越波特性および作用波力・波圧特性を、入射波高、ゲートの傾斜角度と関連づけながら、VOF 法に基づく数値解析と水理実験の両面より検討する。

2. 水理模型実験

フラップゲート型防潮堤が海底から浮上する際の性能評価を詳細に議論するために、フラップゲートが静的に傾斜した場合を取り扱う。使用した実験水路は低慣性直流動機駆動のピストン型造波機を有する大型造波水路 (長さ 105 m, 幅 3.0 m, 深さ 2.5 m) である。なお、同水路は途中から隔壁によって幅 0.8 m の主水路と 2.0 m

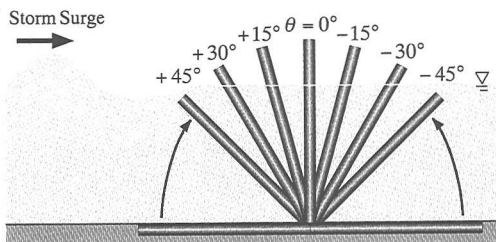


図-1 フラップゲート型高潮防潮堤の概略図

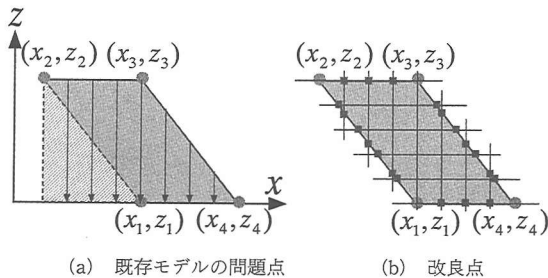
の副水路に分割されており、今回の実験では主水路を使用した。実験では、現地換算値 (模型縮尺 1/16) で、静水深 10.8 m と一定に保ち、有義波高 1.0 m~3.3 m, 有義周期 8.0 s の不規則波を発生させた。ゲートの高さを 14.8 m と設定し、傾斜角度を $\pm 45^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 15^\circ$ 傾けた場合 (港外側を+, 港内側を-) と 0° (直立) の 7 種類変化させた (図-1 参照)。フラップゲート周辺の波浪特性を把握するために、容量式波高計をゲート沖側に 2 台、前面に 1 台、岸側に 2 台配置した。さらに、ゲート前後表面には小型波圧計を 5 台取り付け、作用波圧を計測した。

3. 数値解析

(1) 数値波動水路 CADMAS-SURF の概要

本研究で活用する数値波動水路 CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure) は、海域構造物の耐波設計に適用可能な断面 2 次元数値波動モデルで、砕波のように自由表面が多価関数の場合でも解析できる VOF (Volume Of Fluid) 法を採用している。基礎方程式は、透過性構造物の空隙率、流体抵抗を導入した Porous Body Model に基づいて拡張した、2 次元非圧縮性粘性流体に対する連続式と Navier-Stokes 運動方程式である。なお、数値波動水路 CADMAS-SURF の詳細は、数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2002)、財団法人沿岸開発技術研究センター (2001)、磯部ら (1999) を参照された

* 正会員 博(工) 大阪大学助手大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
*** 正会員 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
**** 正会員 国土交通省北陸地方整備局伏木富山港湾事務所
***** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻



図一2 構造物の設定方法

い。

(2) 数値波動水路 CADMAS-SURF の改良

a) 既存の構造物形状入力方法の問題点

既存の入力方法は、構造物頂点の x 座標の小さい順から、 (x_1, z_1) , (x_2, z_2) , $\dots$, (x_m, z_m) , (x_{m+1}, z_{m+1}) , $\dots$ と座標を定義し、頂点を結ぶことにより構造物表面を決定する。そして、 $x_{m+1} - x_m \geq 0$ の条件下で、構造物表面から z 軸の負方向に x 軸まで垂直に下ろした範囲を全て構造物とみなす。しかし、図一2(a)に示すように、本研究で対象とするフラップゲートは立ち上がる際あるいは倒れ込む際にゲート下部に水域が生じるため、 $x_{m+1} - x_m \geq 0$ の条件を満足することができず、正確に構造物形状を設定することが不可能である。したがって、フラップゲートのような構造物を含めた任意形状を有する構造物を設定できるようにプログラムを改良する必要がある。なお、Porous Body Model を使用しない場合には任意形状構造物の設定が可能であるが、斜面は階段状に近似されるため、精度良く作用波圧・波力を算定することは難しい。

b) 構造物形状入力方法の改良点

まず構造物の頂点の座標 (図一2(b) の●印) を設定し、それらを結ぶことで構造物表面を決定する。ついで、構造物表面と x - z 格子線の交点 (図一2(b) の■印) を求め、その交点間を構造物とみなすことにより、任意形状構造物の設定を行う。ここで、計算セルを、セル全体が構造物である「構造物セル」、セル内の一部が構造物である「ポーラスセル」、それら以外の「その他セル」に大別する。よって、各セルの面積透過率、空隙率は、構造物セル、その他セルに対しそれぞれ 0, 1 となる。ポーラスセルの面積透過率・空隙率は既存モデルと同様に算定される。なお、上述の一連の処理を行った後、VOF 関数 F を用いて、その他セルを「流体セル ($F=1$)」、「表面セル ($0 < F < 1$)」、「気体セル ($F=0$)」に分類する。

(3) 計算条件

不規則波を対象に実施された水理実験と比較検討するためには、一般に入射波を不規則波にする必要がある。しかし、藤原ら (2002) も指摘しているように、不規則波動場を対象とした検討には少なくとも 100~200 波を

表一1 計算条件

計算領域	水路長	430.4 m
	水路高	22.0 m
格子間隔	水平方向	0.4 m (160.0 m~306.4 m) 0.8 m (上記以外の計算領域)
	鉛直方向	0.4 m
計算時間	時間間隔	0.001 s or 0.005 s
	終了時間	80.0 s
波浪条件	入力波形	規則波 (Stokes 波第 5 次近次解)
	静水深	10.8 m
	入射波高	2.0 m, 2.54 m, 3.6 m
	周期	8.0 s
	波長	72.9 m
フラップゲート	設置位置	233.2 m
	ゲート幅	1.6 m
	ゲート長	14.8 m
	傾斜角度	0°, ±15°, ±30°, ±45°

作用させる必要があり、有意な統計データを得るには多大なる計算時間を要することから。本計算では、入射波を規則波とし、入射波高を 3 種類変化させた。具体的には、不規則波の有義波高 2.0 m に対し、数値計算における入射波高を、2.0 m、その 1.27, 1.8 倍で定義される 1/10 最大波高 2.54 m、最高波高 3.6 m の 3 種類とした (合田, 1990)。水平方向の計算格子間隔は、フラップゲート周辺の波浪特性を詳細に再現するために、ゲート設置位置から港内外側のそれぞれ約 1 波長の範囲を 0.4 m、それ以外の範囲を 0.8 m と設定した。一方、鉛直格子間隔は 0.4 m と一定にした。計算条件の詳細は表一1 に示すとおりである。

境界条件に関しては、計算領域の左端に造波境界条件、右端に計算領域から波を透過させるための開境界処理として Sommerfeld 放射境界条件を設定し、底面にはスリップ境界条件を課した。

4. フラップゲートの越波特性

図一3 にフラップゲート周辺の波浪変形と水粒子速度場の時系列変化を同時に示す。なお、(a), (b) はそれぞれゲート傾斜角度 θ が -30° , $+30^\circ$ の場合である。図一3 (a) より、港内側にゲートが傾斜している場合、入射波はゲート上を滑らかに遡上・越波しており、斜面上での波浪変形と同様な傾向を呈している。また、越波した水塊が港内の水面に衝突することによって、循環流 ($t=47.5$ s) やスプラッシュ ($t=49.0$ s) の発生がみられる。一方、港外側傾斜時の越波特性に関しては、図一3 (b) に

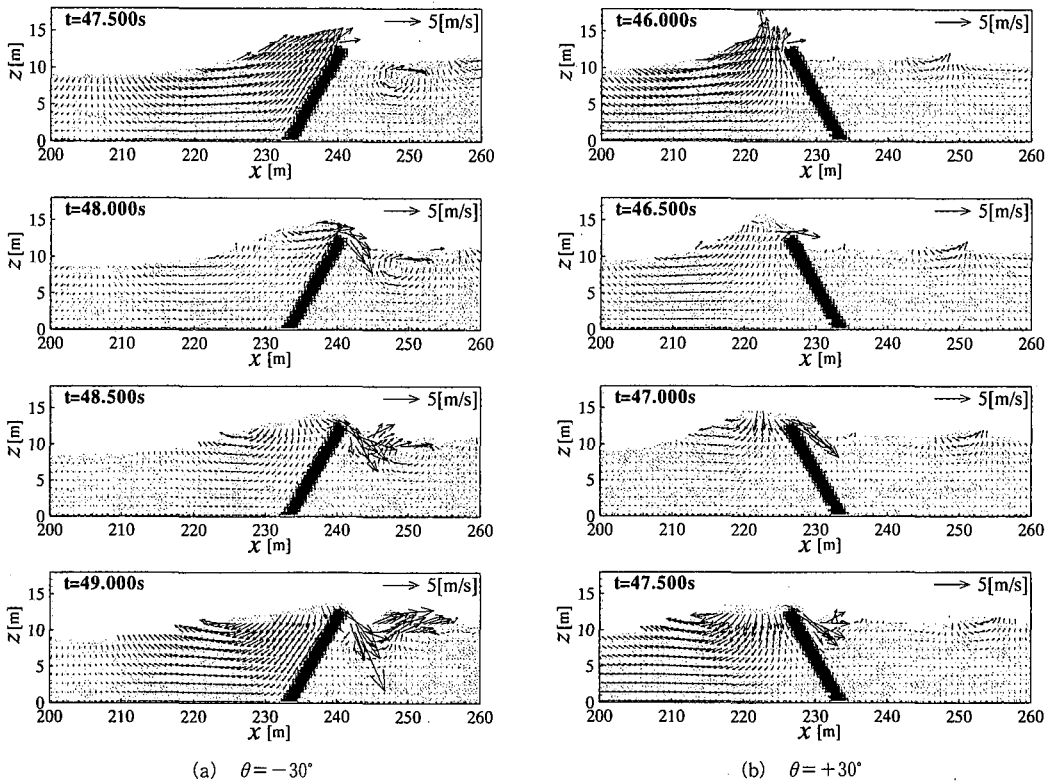
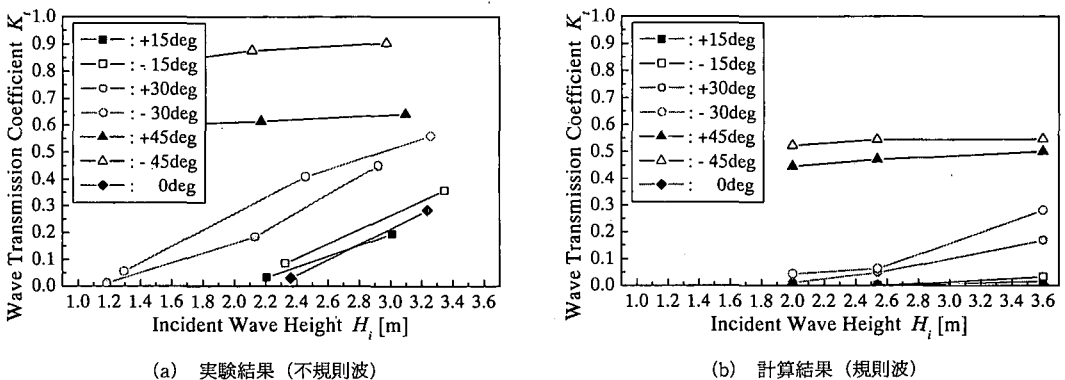

 図-3 フラップゲート周辺での越波特性 ($H_i = 3.6$ m)


図-4 波高伝達率

示すように、フラップゲートの影響を強く受け、部分重複波の流速場と同様、ゲート沖側前面の水粒子速度が上方に向かい、そして沖側への小さな砕波を伴いながら越波する形態が確認される。

以上のことから、海底に格納されていたフラップゲートの浮上によって波浪場、水粒子速度場が大きく変化することがわかり、フラップゲート型高潮防潮堤の耐波設計には、越波・砕波を含む複雑な波動場の形成を十分に考慮することが必要である。

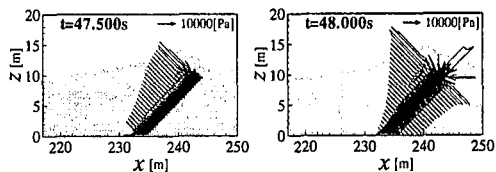
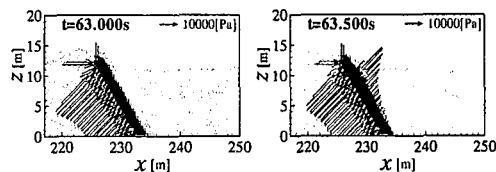
ついで、フラップゲート背後に伝播する波浪特性を、波高伝達率 $K_t (= H_t/H_i)$ 、ここで、 H_t は伝達波高、 H_i は入射波高) により評価する。数値計算での伝達波高の算定には、フラップゲート設置位置から港内側に約 1.0 波長、約 1.3 波長、約 1.5 波長離れた 3 地点における波高の平均値とした。波高伝達率の実験結果と計算結果をそれぞれ図-4(a)、(b) に示す。両図から、ゲートの傾斜角度によらず、波高の増大に伴い波高伝達率は大きくなることが確認される。また、港内側、港外側への傾斜に関

表-2 波高伝達率の実験結果と計算結果の比較

傾斜角度	実験結果		計算結果	
	有義波高	伝達率	入射波高	伝達率
-45°	2.0 m	0.87	2.00 m	0.52
			2.54 m	0.54
			3.60 m	0.55
-30°		0.26	2.00 m	0.04
			2.54 m	0.06
			3.60 m	0.28
-15°		—	2.00 m	0
			2.54 m	0
			3.60 m	0.032
0°		—	2.00 m	0
			2.54 m	0
			3.60 m	0
+15°	—	2.00 m	0	
		2.54 m	0	
		3.60 m	0.016	
+30°	0.16	2.00 m	0.01	
		2.54 m	0.05	
		3.60 m	0.17	
+45°	0.61	2.00 m	0.45	
		2.54 m	0.47	
		3.60 m	0.50	

係なく、ゲート傾斜角度の絶対値が大きくなるにつれて天端高が低くなるため、波高伝達率は大きくなっている。しかし、同じ絶対値の傾斜角度でも、マイナス側、つまり港内側に傾斜している場合の方が波高伝達率は大きい。これは、前述したように、港内側傾斜時にフラップゲート上を波が滑らかに遡上し越波していくためである。

計算結果の妥当性を、実験結果と比較した表-2によって示す。なお、図-4(a)からわかるように、水理実験では、有義波高が正確に2.0 mのケースがないため、入射波高2.0 m前後の実験条件の波高伝達率を使って線形内挿から求めた。また、表中の「—」は内挿補間から波高伝達率を算定できないケースであるが、ほぼ0を示す。表-2から、フラップゲートが完全に没水してしまうゲート傾斜角度±45°の場合を除き、入射波高3.6 mの場合の計算結果は実験結果を良好に再現している。このことから、不規則波による越波は不規則波のうちの大きな波高を有する波が支配的であることが判明する。したがって、不規則波動場での波高伝達率を規則波計算で評価するためには、不規則波中の最高波に相当するような大きな波高を入射波高として選択する必要がある。

(a) $\theta = -45^\circ$ (b) $\theta = +30^\circ$ 図-5 フラップゲートに作用する波圧分布 ($H_i=3.6$ m)

5. フラップゲートに作用する波圧特性

図-5(a), (b)は、それぞれゲート傾斜角度が-45°, +30°の場合で、フラップゲートに作用する波圧分布を示す。ゲート傾斜角度によらず、ゲート側面に対して垂直に波圧が作用していることがわかる。このことは、本研究で改良した数値波動水路CADMAS-SURFの構造物形状入力方法により、精度良く波圧が算定できることを示す。ゲート側面にかかる作用波圧の特性としては、水位が初期水位10.8 mよりも高くなる場合、初期水位の位置で最大となり、一方、初期水位よりも水位が低くなる場合には実水位で波圧が最大となっている。

図-5(a)に示すように、ゲート傾斜角度が大きくて没水してしまうような場合では、フラップゲート上を波が通過する際、ゲート上端部に瞬間的に急激な波圧が発生する。この圧力はヒンジに直接大きな力を与える。よって、越波時のゲート上端部にかかる急激な作用圧力もヒンジ部分の設計に十分考慮する必要があるといえる。没水状態でないフラップゲートの場合を示す図-5(b)より、ゲートを越波した水塊の作用に伴い、ゲート岸側背面の波圧が急激に増大している。これは、ゲート背面に水塊が落ちることによって瞬間的に衝撃波圧が現れること、またその水塊による水位変動が影響している。

6. フラップゲートに作用する波力特性

フラップゲートに作用する波圧をゲート面に沿って線積分することにより、単位幅あたりの作用波力を算定した。図-6は作用波力の計算結果と実験結果を示したものであり、(a), (b)はそれぞれゲート傾斜角度の絶対値が30°, 15°の場合である。計算波力は最大波力を示す。実験波力は波力の有義値であり、不規則な水位波形から有義波高を求める手法と同様に算定した。なお、ゲートの

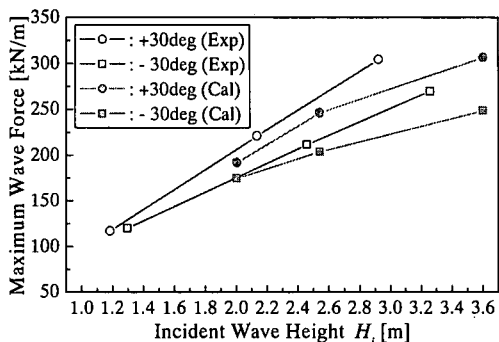
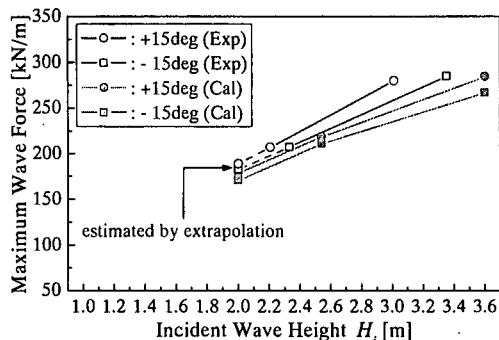

 (a) ゲート傾斜角度の絶対値 $|\theta| = 30^\circ$ の場合

 (b) ゲート傾斜角度の絶対値 $|\theta| = 15^\circ$ の場合

図-6 作用波力と入射波高の関係

傾斜角度が $\pm 15^\circ$ の場合、有義波高 2.0 m 以下の実験値がないため計算値との比較が困難である。そこで、既存の実験値を用いて有義波高 2.0 m に対する実験波力を線形外挿により評価した。図-6 より、計算波力と実験波力ともに、入射波高の増大に伴い、ほぼ直線的に増加している。同じ絶対値のゲート傾斜角度に対しては、フラップゲートが港外側に傾斜している方が港内側傾斜時よりも作用波力が大きくなっている。図-6(a) と (b) の比較からは傾斜角度による作用波力の違いが明確でないが、ゲート傾斜角度が 0° と $\pm 45^\circ$ の結果も含めて検討すると、ゲート傾斜角度の絶対値が小さくなるにつれて、すなわちゲートが直立に近づくことにより、作用波力は増大している。数値計算では、水理実験で測定していないゲート上面に作用する波圧や水面付近で急激に増大する波圧も考慮し作用波力を算出しているため、実験結果と比較すると多少相違がみられる。しかし、本研究で得られた計算結果は概ね妥当であると考えられ、改良した数値モデルは波力の算定にも適用可能である。

先述した波高伝達率の結果も含めてフラップゲートの耐波設計を考えると、港湾内を静穏に保ちながらゲートを稼働させるためには港外側からゲートを浮上させるのがよいが、ゲートに作用する波力は港内側傾斜時に比べ

て増大するため、十分注意する必要がある。

7. ま と め

本研究では、入射波高、ゲートの傾斜角度と関連づけながら、数値計算と水理実験により、フラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波圧・波力の諸特性を明らかにした。以下に主要な結論を示す。

- 1) 数値波動水路 CADMAS-SURF の構造物形状入力方法を改良することにより、任意形状構造物を設定できるようにした。これにより、フラップゲートのような任意形状構造物に対しても、精度良く作用波圧を算定可能となった。
- 2) 波高伝達率は、ゲート傾斜角度の絶対値が同じ場合、港内側に傾斜している方が大きくなることが判明した。このことから、港湾内を静穏に保ちながらフラップゲートを効率的に稼働させるためには、港外側からゲートを立ち上げるのが有効であると判断できる。
- 3) 不規則波動場でのフラップゲートの波高伝達率を、規則波を対象とした数値計算で評価するためには、不規則波の最高波に相当するような大きな波高を入力波とする必要がある。
- 4) ゲートに作用する波力は、入射波高の増大に伴いほぼ直線的に増加すること、ゲート傾斜角度が同じ場合、フラップゲートが港外側に傾斜している方が増大することが明らかとなった。また、作用波力の計算結果と実験結果の比較から、改良した数値モデルは波力の算定にも十分適用可能であることが検証された。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・柳山 勉・藤間功司・川崎浩司・蔭 勤・秋山 実・大山洋志 (1999): 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究—VOF 法基本プログラムの作成—, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326.
- 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男・古屋正之・石井伸治 (2000): 八代海と周防灘における台風 9918 号の高潮・波浪災害の現地調査, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 311-315.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 85-117.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路 CADMAS-SURF の研究・開発 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書, 296 p.
- 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会 (2002): 海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発とその将来展望, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 1-17.
- 藤原隆一・山崎智弘・橘川正男・早瀬松一 (2002): 複合断面地形の波の遡上に対する VOF 法の適用性と不規則波モデルへの拡張, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 136-140.