

不規則波動場での透水層式護岸の越波に関する直接数値計算

Direct Numerical Simulation of Wave Overtopping of Upright Seawall with Permeable Wave Chamber in Irregular Wave Field

藤原隆一¹・川崎浩司²・藤間功司³・馬場慎太郎⁴

Ryuichi FUJIWARA, Koji KAWASAKI, Koji FUJIMA and Shintaro BABA

There are mainly two ways to compute wave overtopping phenomena. One of them is a numerical method which employs a non-linear wave transformation equation combined with an overtopping formula. Another is a direct numerical method for solving Navier-Stokes equation. Only a few numerical studies with the direct numerical method have so far been made on irregular wave overtopping. In the present study, the applicability of the CADMAS-SURF, which is based on the VOF method, for the numerical simulation of irregular wave overtopping of an upright seawall has been verified by comparison with the hydraulic model experiments. Moreover, some consideration for calculating irregular waves has been shown.

1. はじめに

沿岸域を高度に利用するわが国では, その防護はもちろんのこと, 環境と利用面のバランスの取れた防災対策が求められるようになった。越波は構造物の天端高を決定する重要な現象であるが, 従来は水理模型実験や実験資料を元に作成された図表を用いるなど平均的な越波流量に対する設計が行われてきた。

冒頭の要望に応えるには, 1波ごとの越波量や構造物上の水位変動・流速を対象とするようなきめ細かい設計手法が必要となるが, それには数値シミュレーションが有力な道具となる。越波現象を取り扱うことができる数値モデルとして, 1) 非線形波動方程式に越流公式を組み合わせた手法, Navier-Stokes方程式を直接解く2) 粒子法および3) 格子法がある。2) と3) の方法は越波量を始め水位, 圧力および流速を直接的に計算できるため設計者に利用しやすいが, 前者は相対的に計算負荷が大きい。一方, 格子法も非線形波動方程式に比べると計算負荷が大きく, 不規則波を対象に越波を検討した事例は少ない(例えば, 藤原, 2005; 藤原ら, 2006; 藤原ら, 2007; Liら, 2004)。

本研究では, 格子法の一つであるVOF法に基づく数値波動水路CADMAS-SURF(磯部ら, 1999)を対象に, 不規則波の越波に対する適用性を水理模型実験結果との比較によって評価するとともに, 数値シミュレーションによる設計手法の有意性を示し, その高度化を目指す。

また, 不規則波動場計算を行う際のCADMAS-SURFの留意点についても明示する。

2. 水理模型実験

水理模型実験は藤原ら(2006)の結果を用いた。以下に実験概要を説明する。実験では, 図-1に示すような1/30勾配斜面上に設置された堤体背後の越波量が測定された。模型堤体は図-2に示すように前面に中詰部を有する透水層式直立護岸(藤原らの断面I-I)を対象とした。

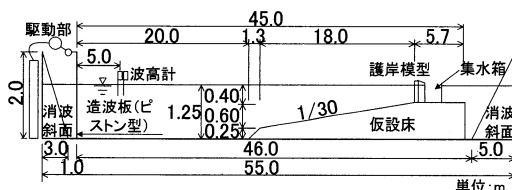


図-1 水理模型実験の断面

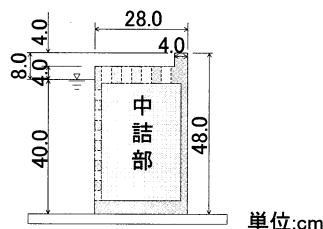


図-2 透水層式護岸の検計断面

堤体位置の周波数スペクトルとして式(1)に示す修正 Bretschneider-光易型を目標とする不規則波を作用させ, 越波量の測定値から平均越波流量(造波開始後300sから410s間)が算出された。実験結果の抜粋は表-1に示す通りである。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp \left[-0.75 (T_{1/3} f)^4 \right] \quad (1)$$

1 正 会 員 博(工)東洋建設(株)鳴尾研究所 副所長
2 正 会 員 博(工)名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
3 正 会 員 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科
4 正 会 員 修(工)東洋建設(株)鳴尾研究所 主任研究員

表-1 波浪条件および実験結果

$T_{1/3}(s)$	$H_{1/3}(cm)^{*)}$	$H_0(cm)$	H_0/L_0	$q/\sqrt{2gH_0^3}$
1.6	7.4	7.9	0.020	7.2×10^{-4}
	11.2	12.0	0.030	2.9×10^{-3}
	15.2	16.3	0.041	6.0×10^{-3}
2.0	7.9	8.0	0.013	1.6×10^{-3}
	11.8	12.0	0.019	4.9×10^{-3}
	15.1	15.4	0.025	8.9×10^{-3}

*) 堤体位置の通過波高

3. 不規則波越波計算の概要

(1) 計算断面

入射波検定時および越波計算時の断面をそれぞれ図-3および図-4に示す。なお、一様水深部の長さを実験断面より短く設定し、計算時間の短縮を図った。端部にはエネルギー減衰帯を配置して反射波のエネルギーを減衰するとともに、開境界にして長周期成分の抑制を図った。

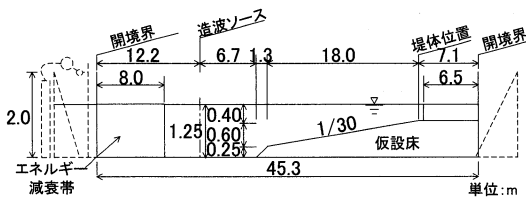


図-3 入射波検定時の計算断面

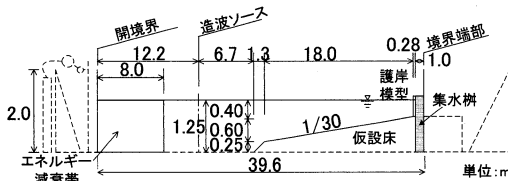


図-4 越波計算時の計算断面

(2) 検討ケース

検討ケースは、越波の規模が大きく異なるように表-2に示す2ケースを表-1から選定した。なお、不規則波信号は著者の一人が流速の補正方法を改良した方法(藤原, 2008)を用い、堤体位置で修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルとなるよう設定した。計算時間は250sとした。

表-2 検討ケース

ケース名	$T_{1/3}(s)$	$H_{1/3}(cm)^{*)}$	$H_0(cm)$	H_0/L_0	$q/\sqrt{2gH_0^3}$
Run1	2.0	15.1	15.4	0.025	8.9×10^{-3}
Run2		7.9	8.0	0.013	1.6×10^{-3}

*) 堤体位置の通過波高

(3) 解析方法

入射波の解析は、模型位置に不規則波のエネルギーが十分到達したと考えられた造波開始後50sから250sまでを対象に行った。越波量は集水槽に貯留された水量から

算出した。

4. 透水層式護岸の不規則波越波の計算結果

(1) 入射波の検定結果

入射波の検定結果を図-5に示す。それぞれの図の横軸は入力信号作成時の有義波高の入力値 H_m である。通過波高(有義波高 $H_{1/3}$)は一様水深部および堤体位置ともに H_m に応じて線形に増加しており、堤体位置における結果は図中に示す一次式で表すことが可能と判断した。一方、有義周期 $T_{1/3}$ の図には実験の検定結果を併せて示したが、実験値および計算値ともに堤体位置の周期は一様水深部より長くなっている。

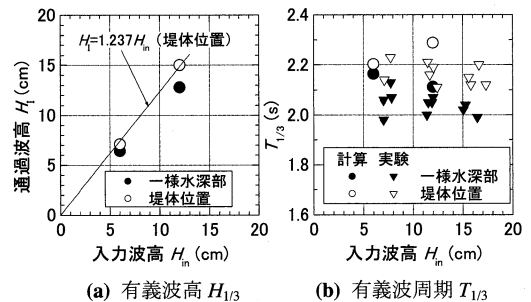


図-5 入射波の検定結果

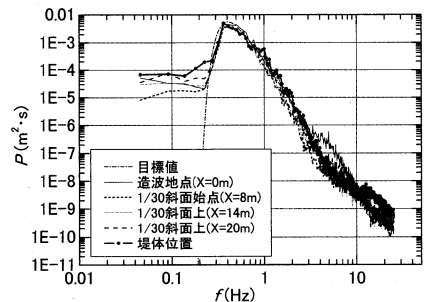


図-6 Run1に対する周波数スペクトル

そこで、上述した周期の違いが周波数スペクトル形状に及ぼす影響について検討した。図-6および図-7は、図-5(a)に示す検定曲線を用い、表-2に示す波高に設定したときの周波数スペクトルを表している。図中には、実験時の堤体位置における $T_{1/3}$ の平均値(=2.17s)に対する修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを併せて図示した。堤体位置における周波数スペクトルは、Run1およびRun2の計算値ともに、ピーク周波数付近のパワーが大きい領域では実験時のスペクトル形状とよく一致していた。したがって、堤体位置の有義波周期が若干長くなることの影響は小さいと考え、本検定結果を用いて越波量を算出することとした。

なお、実験では、堤体位置における $T_{1/3}$ が造波地点より長くなることから造波信号作成時に $T_{1/3}$ を2.5%短く設

定 ($T_{1/3}=1.95\text{s}$) していたことを付記する。

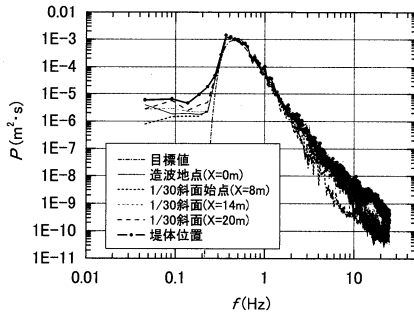


図-7 Run2に対する周波数スペクトル

(2) 平均越波流量

無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ を実験値と比較した結果を表-3に示す。合田ら(1975)によると、消波護岸で無次元越波流量のオーダーが 10^{-3} の場合、越波流量推定図表の誤差は0.2~3倍とされており、越波現象の変動性や実験精度を勘案すると、計算値は実用上十分な精度を有していると言える。

表-3 無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ の比較

ケース	実験値	計算値	計算値 実験値
Run1	8.9×10^{-3}	5.5×10^{-3}	0.62
Run2	1.6×10^{-3}	3.7×10^{-3}	2.31

(3) 越波量の時間変化

本シミュレーション結果を用いれば、越波量の時間変化も容易に検討することができる。例えば、累積越波量の時間変化は、図-8に示されるように、Run1に比べて相対天端高が大きくなるRun2では、越波しない時間帯が長く継続していることなどの理解が容易となる。

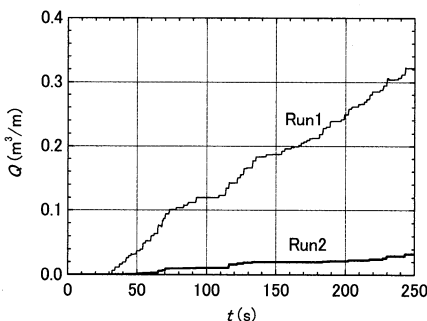


図-8 累積越波量の時間変化

次に、この累積越波量から無次元越波流量の時間変化を算出した結果を図-9に示す。越波流量 $q(t)$ は、式(2)に示すように、入射波のエネルギーが十分届いたと考えられる時刻 t_0 (造波開始後30s) から対象時刻 t までの越波

量を用いて算出した。

$$q(t) = (Q(t) - Q(t_0)) / (t - t_0) \quad (2)$$

無次元越波流量は、作用波数が有義波周期換算で40波程度以下ではかなり不安定であり、平均的な越波流量を得るには100波程度以上の作用波数が必要であることが分かる。特に、相対天端高が大きいか、越波する回数が少なく、越波流量が安定するまでの変化が大きい点に留意する必要がある。

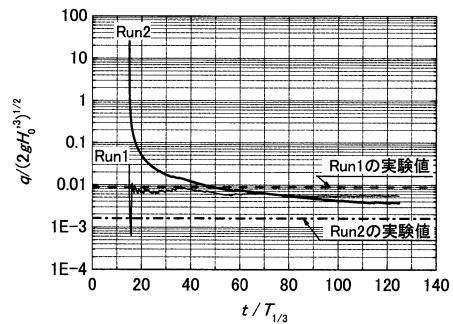


図-9 無次元越波流量の時間変化

(4) 短時間越波流量

関本ら(1992)は、実験で短時間越波流量を高精度に測定する連続量測定装置の有効性とその結果を用いて経済的な設計を行う方法を示した。図-10は、式(3)で算出された有義波周期に相当する短時間越波流量と全波作用時間での平均越波流量の比率C (増幅率)の時間変化を示す。Cは関本らによる1波間平均越波流量に相当すると考えられる。Run1に対するCの最大値は約4.5となったが、Run1と無次元天端高に近い条件の1波間平均越波流量は4-5程度と読みとれた。実験条件が異なる(関本らは前面消波被覆ブロック被覆堤で海底勾配が1/100)ため直接的な比較はできないが、消波護岸として類似の越波現象が発生していたことが推察される。

$$C(t) = \frac{\{Q(t + T_{1/3}) - Q(t)\} / T_{1/3}}{\{Q(t_e) - Q(t_0)\} / (t_e - t_0)} \quad (3)$$

ここに、 t_e : 計算終了時刻、 Q : 越波量である。

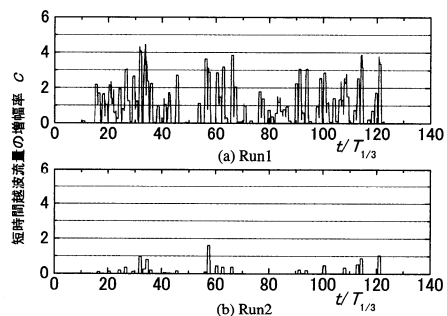


図-10 短時間越波流量の増幅率

5. CADMAS-SURFによる不規則波計算時の留意点

(1) 不規則波が安定するまでの周期と波高の変化

a) 造波地点からの距離との関係

前述のように、造波地点 ($X=0$) から離れた地点の有義波周期 $T_{1/3}$ は入力時の設定値 $T_{1/3, in}$ に比べて長くなった。そこで最初に $T_{1/3}/T_{1/3, in}$ と造波地点からの距離 $X/L_{1/3}$ ($L_{1/3}$ は造波水深から算出) の関係を調べた結果を図-11に示す。検討に用いたデータは入射波検定の結果 (1/30 勾配)、藤原 (2005) の実験および計算結果 (1/20 勾配)、藤原ら (2006) の入射波検定時の実験結果 (1/30 勾配) および一様水深における追加計算結果である。なお、実験結果の中で一様水深部のデータは黒丸で表した。計算は、表-4および図-12に示す計算条件のもとで実施した。造波地点 ($X=0$) から $X/L_{1/3}=3$ 程度までの区間は、有義波周期 $T_{1/3}$ が入力時の設定値 $T_{1/3, in}$ に比べて長くなっており、また計算値と実験値の一致度は良好である。この区間の周期の増大は造波した波が安定化する遷移状態を表

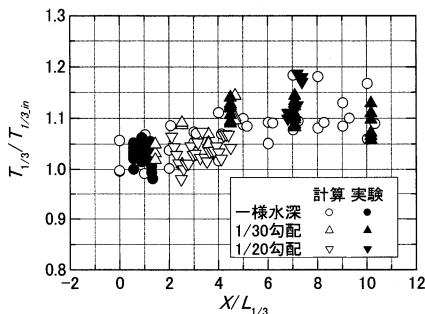


図-11 周期の増大と $X/L_{1/3}$ の関係

表-4 追加計算の検討条件

Run	h (m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$L_{1/3}$ (m) [*]	$H_{1/3}/L_{1/3}$	造波方法
A	12	2	10	99.7	0.020	造波ソース
B				0.040		
C	10	3	6	48.4	0.062	

^{*} $T_{1/3}$ に対する波長

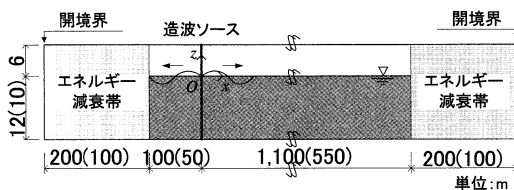


図-12 追加計算の検討断面 (括弧内はRun C)

していると考えられる。

次に $X/L_{1/3}=3$ の有義波の諸元 ($H_{1/3, 3L}$, $T_{1/3, 3L}$) を基準に有義波高比、 $H_{1/3}/H_{1/3, 3L}$ および有義波周期比 $T_{1/3}/T_{1/3, 3L}$ を算出した結果を図-13に示す。このときの対象データは追加計算のデータのみとした。 $H_{1/3}/H_{1/3, 3L}$ は $X/L_{1/3}$ に応じて減

少するが $X/L_{1/3}>3$ での減少割合はほぼ一定であることから数値粘性による波高減衰が生じていると考えられる。 $X/L_{1/3}<3$ の区間で波形勾配が0.04以上のときに波高減衰が大きいのは、入射波高が大きいときに造波ソースで発生する異常に高い水位の影響 (藤原ら, 2008) による。

$T_{1/3}/T_{1/3, 3L}$ は全体的には増加傾向にあるが、 $X/L_{1/3}>3$ ではばらつきはあるものの増加の割合は小さくなっており、造波した波が安定化するまでの距離としては、造波板から有義波周期相当の波長の3倍程度が最低必要と考えら

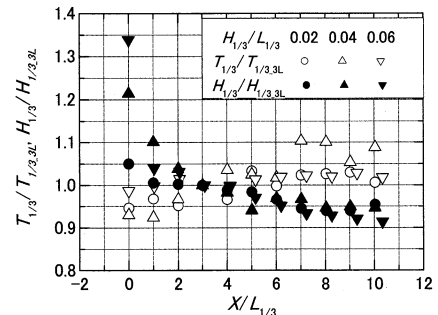


図-13 $X/L_{1/3}=3$ を基準とした時の $T_{1/3}$ と $H_{1/3}$ の変化率

れる。

b) 波高水深比との関係

$T_{1/3}/T_{1/3, in}$ と測定地点の有義波高に対する波高水深比 $H_{1/3}/h$ の関係を図-14に示す。これらの結果には造波した波が安定化するまでの周期の増大が含まれている。しかし、図中に示した斜面勾配によって分類したデータの傾向を表す最小自乗曲線からは、 $H_{1/3}/h$ による影響がうかがえる。すなわち、周期の増大には斜面上での波の変形が影

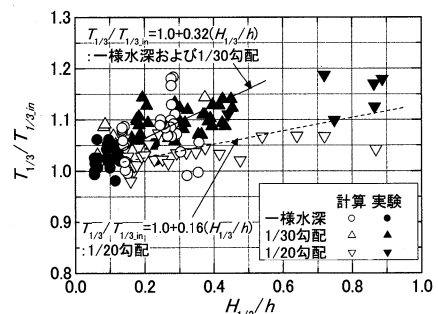


図-14 周期の増大と $H_{1/3}/h$ の関係

響を及ぼしていることが推察される。

(2) 計算時の合わせ込みに対する検討

造波地点と目標周波数スペクトルに合わせ込む水深が異なる場合、上述のような波の変形によってスペクトル形状が改善できない場合がある。Run1に対して堤体位置における周波数スペクトルを用いて合わせ込みを実施した結果を例示すると、図-15に示すよう周波数スペクトル形状の改善効果は小さく、また堤体位置における有義

波周期も図-16に示すよう合わせ込み前後ではほぼ同じであった。

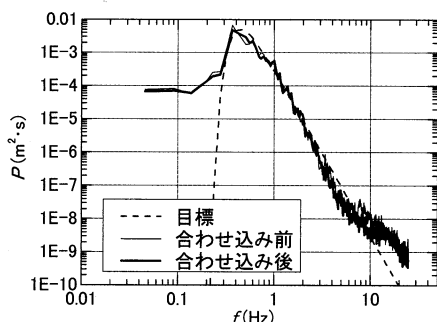


図-15 周波数スペクトルの比較 (Run1)

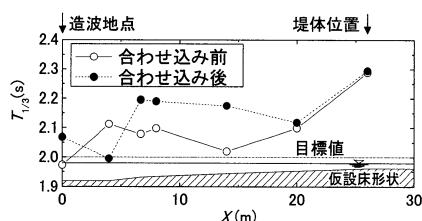


図-16 有義波周期の変化 (Run1)

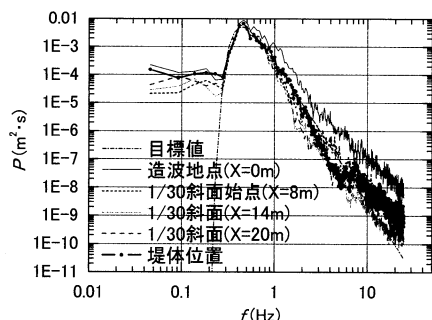


図-17 周波数スペクトルの場所的な変化 (入力: $T_{1/3}=1.85s$)

このような場合、実用的には造波信号で与える有義波周期を短く設定する手法が簡便である。Run1に対して検討したところ、 $T_{1/3,m}=1.85s$ とした場合に堤体位置における有義波周期が目標値である $T_{1/3}=2.0s$ となった。すなわち、 $T_{1/3}/T_{1/3,m}=1.081$ となった。この条件に対して図-11を用いると $X/L_{1/3}=7.1$ なので $T_{1/3}/T_{1/3,m}=1.06\sim 1.19$ と推定される。一方、図-14を用いると $H_{1/3}/h=0.2$ なので図中の近似式(一様水深および1/30勾配)を用いると $T_{1/3}/T_{1/3,m}=1.064$ となる。これらのことから、図-11または図-14を用いることで、合わせ込み地点における代表波、周波数スペクトルを目標値に設定することが可能と考えられる。いずれの場合もばらつきがあるが、相対的には図-14を用いるほうがばらつきが小さいようである。合わせ

込み前後の周波数スペクトルは図-17に示すようであり、堤体位置におけるスペクトル形状は目標値を良好に表し、よく一致していることを確認した。

6. おわりに

- CADMAS-SURFによる不規則波に対する越波流量の計算値は水理模型実験結果をよく表し、実用上十分な精度を有していることが確認された。
- 越波量や越波流量の時間変化、また短時間越波流量が容易に算出可能であり、設計手法の高度化に有用性が高いことが示された。
- 不規則波の伝播状況を実験結果と比較した結果、一様水深および斜面上の波の変形などを計算結果はよく説明した。
- 越波量検討時(計算、実験)の不規則波の合わせ込み方法に関して、周期の変化を考慮した信号設定法を示した。

謝辞：本研究は、数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会(事務局(財)沿岸技術研究センター)において行われた越波WGおよび波の伝播WGで行われた作業内容から発展したものであり、関係各位に深謝を表する次第である。

参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・川崎 浩司・蔣 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一, 海洋開発論文集, 第15巻, pp.321-326.
- 合田良実・岸良安治・神山豊(1975): 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, 第4号, pp.3-44.
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷修・鹿島遼一(1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.581-585.
- 藤原隆一(2005): 数値波動水路内で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性および適用限界に関する一考察, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.41-45.
- 藤原隆一(2008): 線形波理論を用いた不規則波造波における流速の補正方法, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.873-878.
- 藤原隆一・熊谷 裕・宮田佳和(2007): 被災限界となる波浪作用下でのCADMAS-SURFによる越波量の検討, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.177-182.
- 藤原隆一・榊木 享・三宅達夫・松村章子(2006): 被災護岸の廃材を復旧に利用する越波低減工法, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.265-270.
- 藤原隆一・藤間功司・成毛辰徳・稲垣 聡・安井章雄・和田 匡央(2008): CADMAS-SURFで発生させた不規則波の伝播特性, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.885-890.
- Li, T., T. Troch and J. D. Rouck (2004): Wave overtopping over a sea dike, Journal of Computational Physics, Vol.198, pp.686-726.