九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 風作用下での越波量の出現頻度に関する実験的研究

山城，賢
九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター ： 助教

改田，将平
九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

知念，卓
沖縄県庁

吉田，明德
九州大学大学院工学研究院 ： 特任教授

https://hdl.handle.net/2324/7178619

出版情報：Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering). 69 (2), pp.I_771-I_775, 2013-11-12. Japan Society of Civil Engineers
バージョン：
権利関係：© 2013 by Japan Society of Civil Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 69, No. 2, 2013, I_771-I_775

# 風作用下での越波量の出現頻度に関する実験的研究

# Experimental Study on Frequency Distributions of Wave-Overtopping Quantity under Windy Conditions

山城　賢[1]・改田将平[2]・知念　卓[3]・吉田明徳[4]

Masaru YAMASHIRO, Shohei KAIDA, Suguru CHINEN and Akinori YOSHIDA

Authors have developed a measurement technique using Particle Image Velocimetry(PIV) for the purpose of accurate measurement of individual wave-overtopping volumes in two dimensional wind-wave flume experiments. In order to clarify the characteristics of appearance frequencies of individual wave-overtopping volumes for a vertical seawall, model experiments were conducted generating irregular waves and winds at the same time. The main conclusions are as follows: 1) Frequencies of large wave-overtopping increase as the wind becomes stronger. Probability Density Functions for normalized wave-overtopping volumes, however, are constant and agree with an exponential distribution with the expected value of 1.0. 2) Mean wave-overtopping volume can be estimated from wave overtopping rate.

## 1. はじめに

不規則波中の個別波の越波量は，時間平均量である越波流量に比べて相当に大きくなることがあり，沿岸防災を考えるうえで，越波流量だけでなく，個別波の越波量の出現頻度を把握することの重要性が指摘されている．越波量の出現頻度に関する既往の研究例は幾つかあり，井上ら（1989，1990），Francoら（1994），Victorら（2012）は，水理模型実験を行い，個別波の越波量（あるいは個別波の越波流量）が2母数あるいは3母数のWeibull分布で表されることを示し，各母数と構造物や波浪の条件との関連を検討している．また，泉宮ら（2006）および泉宮（2009）は消波護岸における越波の現地観測結果から個別波の越波流量の出現頻度が，形状母数が1のWeibull分布，つまり指数分布に適合することを示し，理論的にも妥当であることを説明している．このように，個別波の越波量の出現頻度に関する知見は蓄積されつつあるといえる．

ところで，現実に越波が生じる状況を考えると，通常は強風が作用していることから，風が作用する状況での越波の出現特性を明らかにすることが望まれる．しかしながら，越波流量に対する風の影響を検討した例はあっても，これまでに風作用下における越波量の出現頻度について検討された例はないと思われる．実際にそのような検討を行うには，風洞装置を備えた造波水路を用いた水理模型実験が有効な手段と考えられるが，一般的に，模型実験であっても個別波の越波量を計測することは難しく，現在においても確立された方法はない．加えて，風洞内に風の妨げにならないよう計測機器を設置して，個別波の越波量を計測することは，なおさら難しい．このような観点から，著者らは，水理模型実験により強風作用下での不規則波における越波量の出現頻度を検討することを目的に，画像解析を用いた越波量の計測手法を提案し，これまでに，風と不規則波を同時に作用させる越波実験を行って提案した計測手法の有用性について検討した（山城ら，2012a，2012b）．本研究では，直立堤で打ち上がる越波を対象に，本計測手法により得られた実験結果に基づいて，風が作用する状況での不規則波による越波量の出現頻度の特性を明らかにした．

1 正会員　博(工)　九州大学助教　大学院工学研究院附属アジア防災研究センター
2 学生会員　九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻
3　沖縄県庁
4 正会員　工博　九州大学特任教授　大学院工学研究院工学系国際交流支援室

## 2. 計測手法と実験内容

### (1) 越波量計測手法の概略

本計測手法では，図-1に示すように断面2次元造波風洞水路に設置された護岸模型の前面での流体運動（波の打上げや越波）を可視化し，高速度カメラで撮影する．撮影した映像からPIV（Particle Image Velocimetry）により流速ベクトルを求める．図-2にPIVによる解析結果を示す．この流速ベクトルから，護岸天端の高さに設けた検査ライン上の鉛直流速の時系列を抽出する．得られた流速の時系列を検査ラインについて積分すれば，検査ラインを上下に通過する水量の時系列が得られ，さらに1周期間で積分すれば，1波当りの正味の越波量が求められる．このとき，ある1波の作用時間は，護岸の壁面に沿って計測した水位変動データから判断する．

越波のような複雑な現象の場合，PIV結果に計測誤差や欠測が生じやすく，流速データに対し何らかの補正が

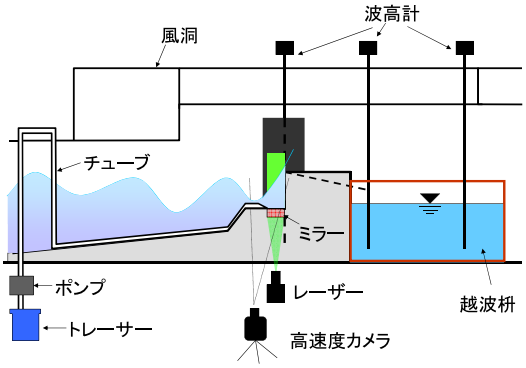


図-1　可視化実験の概略

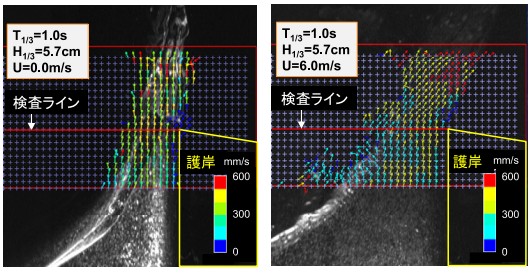


図-2　PIVによる解析結果の例（左：無風，右：風速6.0m/s）

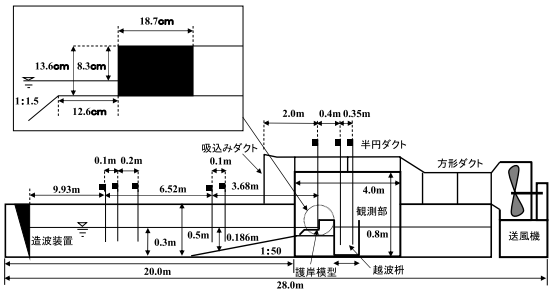


図-3　断面二次元造波風洞水路

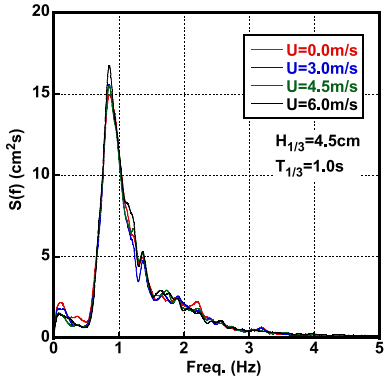


図-4　護岸前面の水面変動のスペクトル（$H_{1/3}$=4.5cm，$T_{1/3}$=1.0s）

必要となる．本計測手法では2段階の補正を行う．第1段階では，前後のデータからかけ離れた異常値を検出し前後のデータの平均値で置き換える．第2段階の補正では，基準となる累積越波量のデータを使用するため，実験の際に，図-1に示すように護岸模型の背後に越波枡を設置し枡内の水位変化を計測しておく．越波枡では個別波の越波量の計測は困難であるが，全体的な増加過程である累積越波量の時間変化は妥当に得られる．これを利用し，PIVから求めた累積越波量が越波枡で計測した累積越波量と全体的に一致するように，越波量算定の元である流速データを補正する．

本計測手法は，単に越波量を求めるだけでなく，構造物前面での流体運動そのものを計測するため，例えば，天端から打ち上がる水量，護岸前面に戻る水量，打ち上がる水塊や越波水の速度などを得ることができる．

**（2）実験条件**

実験は，図-3に示す断面二次元造波風洞水路（長さ28m，高さ0.5m，幅0.3m）に海底斜面および直立堤の模型を設置して行った．トレーサーにはマイクロバブルを使用し，グリーンレーザーシートを照射して可視化した．高速度カメラ（㈱ライブラリー製 GV200）の撮影条件はフレームレート400fps，シャッター速度1/500sである．入射波は修正Bretschneider-光易型スペクトルを有する2種類の不規則波で，有義波高をそれぞれ$H_{1/3}$=4.5cmおよび5.7cm，有義波周期はともに$T_{1/3}$=1.0sと設定した．風の条件は，護岸壁面の位置での静水面上20cmと30cm（それぞれ天端上11.7cm，21.7cm）における風速を平均したものを代表風速として，0.0m/s（無風），3.0m/s，4.5m/s，6.0m/sを設定した．各実験ケースとも波と風を同時に約470秒間作用させ，その間，高速度カメラによる撮影を行った．

同時に，越波升内の2か所および護岸壁面の1か所を含む水路内の計8か所で水面変動を波高計によりサンプリング周波数10Hzで記録した．データ数は4696個である．なお，PIV解析には市販のソフトウェア（㈱ディテクト製Flownizer2D）を使用した．また，可視化の詳細，および前述の越波量の算定と補正手順の詳細については，山城ら（2012b）を参照されたい．

**（3）予備的検討**

**a）風の波への影響**

越波に対する風の影響を調べるうえでは，風が越波水のみに作用し，できるだけ波には影響しないことが望まれる．そのため本実験においては，護岸模型上の風速が安定するために必要な最小限の風洞設置範囲を模型から沖側に2.0mとして，その範囲にのみ風洞を取り付けた（図-3参照）．また，風速についても波への影響を考え6.0m/sまでとした．この設定が妥当であるか確認するため，護岸前面の水位変動を調べた．図-4に有義波高$H_{1/3}$=4.5cmのケースにおける護岸前面の水位変動のスペ

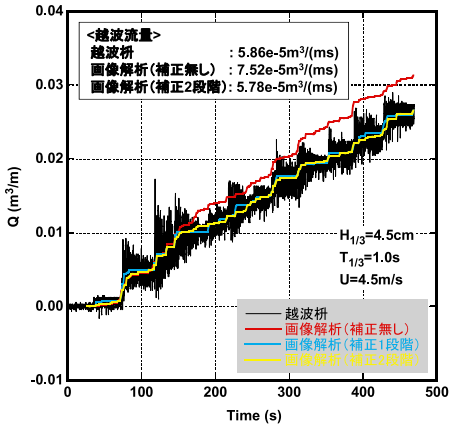


図-5　累積越波量の比較（$H_{1/3}$=4.5cm，$T_{1/3}$=1.0s，U=4.5m/s）

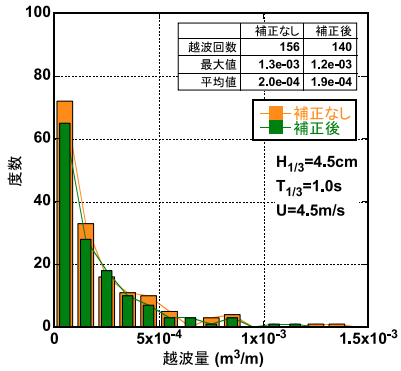


図-6　流速補正の出現頻度への影響

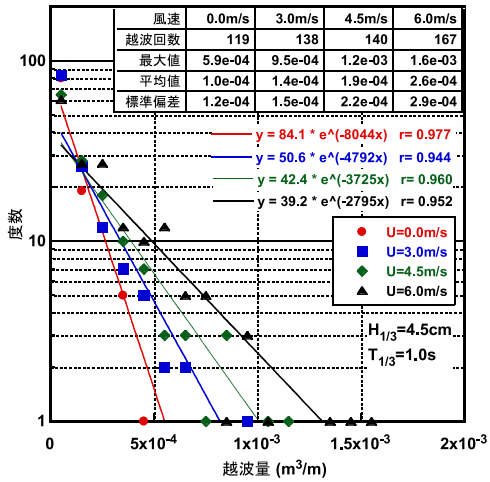


図-7　風による越波量出現頻度分布の変化($H_{1/3}$=4.5cm, $T_{1/3}$=1.0s)

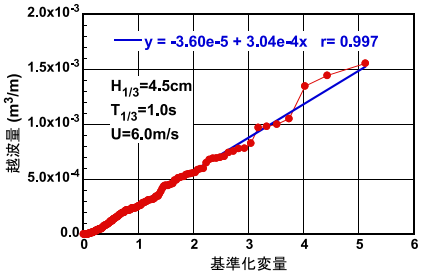


図-8　個別波の越波量の指数分布への適合性

クトルを示す．風洞内では風により短周期の波が発生し，風速が大きくなるほど顕著になる．図より，水位変動のスペクトルはほぼ同一であり，風による顕著な短周期成分は認められない．したがって，本実験の範囲では，波に対する風の影響は小さいと考えられる．

**b）流速補正の効果と越波量出現頻度への影響**

前述した流速データの補正について，効果と越波量の出現頻度への影響について検討した．図-5はPIVより求めた累積越波量（図中では「画像解析」と表記）と越波枡により計測した累積越波量を比較した例である．越波枡で求めた累積越波量は，枡内に越波水が着水した際に生じる水面の振動により激しく振動している．このため個別波の越波量を求めることは難しい．しかし，前述したように，越波水の増加過程は妥当に得られている．PIVによる累積越波量は補正の有無により3つの結果を示している．それらを比較すると，補正をしていない結果は過大であるが，異常値を除く第1段階の補正により，越波枡による累積越波量の中心を通るように修正されている．第2段階の補正による変化は小さく，異常値を取り除くことで妥当な結果が得られることがわかる．別の言い方をすれば，累積越波量を基準にして流速を調整する第2段階の補正が小さくて済むということは，元の流速データが妥当に得られていたと考えられ，その意味で第2段階の補正量は可視化実験の成否の目安といえる．なお，図中に示す越波流量をみると，当然であるが補正によってほぼ一致している．図-6は，図-5の補正なしと2段階補正後の結果について求めた越波量の出現頻度分布である．図-5で示したように，累積越波量に対しては流速補正の効果が大きく見えるけれども，1波毎の越波量に対する補正量は小さいため，出現頻度の大きな変化はない．このことから，流速の補正は越波量の出現頻度には大きく影響しないといえる．

## 3. 風作用下における越波量の出現頻度の特性

図-7に，$H_{1/3}$=4.5cmのケースについて個別波の越波量の頻度分布を示す．縦軸は対数表示しており，また，図中には平均越波量や標準偏差等の統計量も示している．頻度分布は越波量が大きくなるほど頻度が減少しており，既往の研究報告と同様の結果となっている．風速が大きくなるにつれて頻度分布の裾が広がり，大きな越波量の発生頻度が増加して，越波回数や平均越波量も増加して

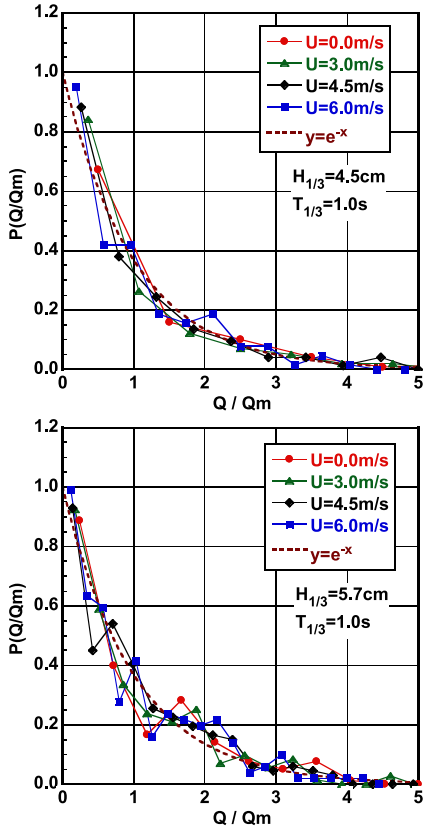


図-9　越波量の確率密度分布

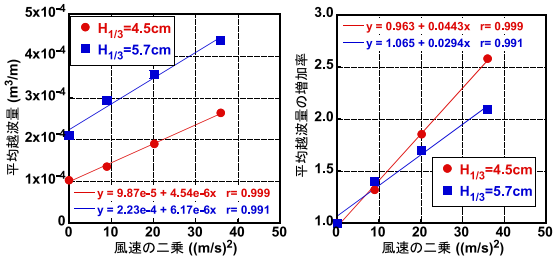


図-10　風速の二乗と平均越波量および増加率の関係

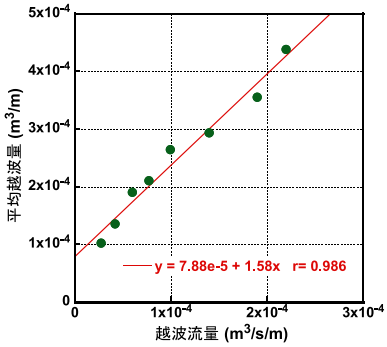


図-11　平均越波流量と越波流量の関係

いる．図中に示すラインは指数関数による近似で，泉宮ら（2006）が述べたように，頻度分布は指数分布で表わされるものと推測される．そこで，図-8に示すように，確率紙にプロットして，越波量の指数分布への適合性について調べたところ，全てのケースでほぼ直線上にプロットされ，指数分布への適合性が高いことが示された．

図-9は図-7に示した出現頻度から求めた確率密度分布である．ただし，横軸は平均越波量で基準化している．なお，越波量の基準化において，位置母数については，図-8に示す回帰式の切片が小さいことから0とした．また，図中には期待値1の指数分布を破線で示している．図より，$H_{1/3}$=5.7cmのケースで多少のばらつきがみられるものの，全てのケースで確率密度分布がよく一致している．すなわち，風の影響により出現頻度は変化するが，基準化した越波量に対する確率密度分布は期待値1の指数分布に帰着する．このことは，平均越波量のみで越波量の出現確率が定まることを意味する．

平均越波量は風速に応じて変化している．本研究では直立堤で打ち上がる越波形態を対象としており，風が作用する場合，図-2にみられるように，打ち上がった波が風圧で陸側に押されるために越波量が増加する．そこで，図-10に風速の二乗に対する平均越波量の変化と無風時の平均越波量に対する増加率を示した．図より平均越波量は風速の二乗に比例することが確認できる．また，波高により平均越波量の増加率は異なり，平均越波量が小さい$H_{1/3}$=4.5cmのケースで増加率が大きい．

## 4. 平均越波量の推定

平均越波量により越波量の出現頻度が定まることから，平均越波量を推定することを考える．通常の越波の検討では，ある一定時間での平均量である越波流量を対象とすることが多い．したがって，越波流量から平均越波量を推定できれば都合がよい．図-11に平均越波量と越波流量の関係を示す．このように，両者には明確な比例関係が認められる．ところで，平均越波量$Q_m$（$m^3/m$）は個別波の越波量の総和を越波した波の数nで除したもので，越波流量q（$m^3/s/m$）は個別波の越波量の総和を継続時間$NT_m$（Nは作用した波の数，$T_m$は平均周期（s））で除した時間平均量であるので，両者の関係は次のようになる．

$$Q_m = \frac{T_{1/3}}{\beta\left(n/N\right)} q \quad \cdots\cdots(1)$$

ただし，平均周期$T_m$（s）は係数$\beta$を用いて，より利用しやすい有義波周期$T_{1/3}$（s）に変換している．なお係数$\beta$はスペクトル形に依存して変化するが，概ね$\beta$ = 0.9～1.4とされている（合田，2008）．また，n/Nは越波率である．式（1）より，越波流量から平均越波量を推定するには

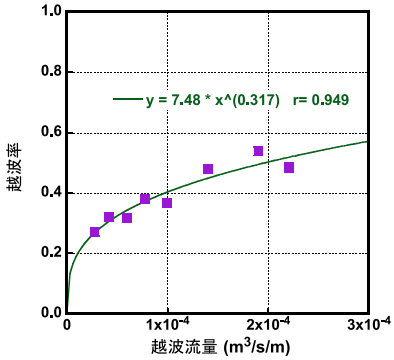


図-12　越波流量と越波率の関係

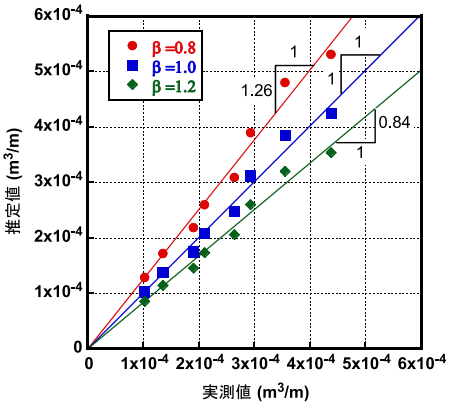


図-13　平均越波量の推定値と実測値の比較

越波率が必要となる．越波率については，井上ら（1989，1990）やVictorら（2012）により，相対水深や相対天端高などとの関係が検討されているが，風速の影響は不明である．簡単に越波流量との関係をみてみると図-12のようになり，越波流量の累乗で概ね近似できるようである．そこで，図-12の近似式で越波率を推定し，式（1）により越波流量から平均越波量を求めて実測値と比較すると図-13のようになった．ただし，図の推定値は有義波周期と平均周期の換算係数$\beta$を0.8，1.0，1.2とした場合について算定している．図より，本実験の結果との比較では$\beta$=1.0とした場合に精度よく平均越波量を推定できている．

## 5. おわりに

本研究では，造波風洞水路により不規則波と風を同時に作用させた越波の実験を行い，画像解析を用いた越波量の計測手法により個別波の越波量を計測し，風作用下における越波量の出現頻度について検討した．その結果，越波量の出現頻度は風により変化するが，平均越波量で基準化した越波量に対する確率密度分布は期待値1の指数分布に帰着することが示された．したがって，越波の出現確率は平均越波量のみで定まる．平均越波量に対する風の影響は明確であり，平均越波量は風速の二乗に比例して増加する．また，越波率や有義波周期と平均周期との比率について検討の余地があるが，それらを用いて，越波流量から平均越波量を推定できることを示した．したがって，例えば，越波流量を模型実験で調べた際に，その越波流量から平均越波量を推定でき，さらに，越波の出現頻度を知ることができる．

本研究では，直立堤で波が打ち上がる越波を対象とした．この越波形態の場合，越波量に風が強く影響する．一方，例えば消波護岸で越流する越波形態では，風の影響は相対的に小さい．しかし，本研究で得られた越波の出現頻度に関する特性そのものは，護岸の構造形式を問わず当てはまるものと期待される．

また，本研究では，越波の出現頻度に対する風の影響について模型実験を行ったが，越波の実験における風速の相似則が不明という問題が依然として存在しており，現状では，実験結果から現地での越波に対する風の影響を定量的に評価することは難しい．今後は，これまでに得られた知見をもとに，越波実験における風速の相似則に関する検討が必要である．

**謝辞**：本研究は科学研究費補助金（課題番号：22686047）の助成を受けたものである．ここに記して謝意を表する．

## 参　考　文　献

泉宮尊司・濱田良平・石橋邦彦（2006）：消波護岸の越波流量の確率分布特性に関する研究，海洋開発論文集，第53巻，pp. 716-720.

泉宮尊司（2009）：消波護岸の越波流量の確率分布の理論的推定とその適用性に関する研究，海洋開発論文集，第25巻，pp. 563-568.

井上雅夫・島田広昭・殿最浩司（1989）：不規則波における越波量の出現分布特性，海岸工学論文集，第36巻，pp. 618-622.

井上雅夫・島田広昭・殿最浩司（1990）：不規則波による緩傾斜護岸の越波特性，海岸工学論文集，第37巻，pp. 514-518.

合田良實（2008）：耐波工学－港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，430p.

山城　賢・村上邦宏・吉田明徳（2012a）：画像解析を用いた水理模型実験における越波量計測，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 68，No. 2，pp. I_324-I_329.

山城　賢・改田将平・村上邦弘・吉田明徳（2012b）：水理模型実験における画像解析を用いた越波量計測手法の有用性について，土木工学論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.2，pp.I_736-I_740.

Franco, L., M. de Gerloni and J. W. van der Meer (1994) : Wave overtopping on vertical and composite breakwaters, Proc. 24th ICCE, pp. 1030-1044.

Victor, L., J. W. van der Meer and P. Troch (2012) : Probability distribution of individual wave overtopping volumes for smooth impermeable steep slopes with low crest freeboards, Coastal Engineering, Vol.64, pp. 87-101.