

# 幅広潜堤の消波特性の表示システム

片野明良\*・村上信一郎\*\*・服部昌太郎\*\*\*

## 1. はじめに

多くの地点で計画・施工されている幅広潜堤や人工リーフの消波効果は、これまで数多くの実験により様々な角度から検討がなされてきた(田中, 1976; 宇多・小俣, 1987; 樫木・出口・岡原, 1989; 谷野ら, 1989).

また、最近では数値解析によりその機構を解明する研究も進展している(泉宮・遠藤, 1989; Rojanakamthorn・磯部・渡辺, 1989; 灘岡・大山, 1991; 安田・原・榊原, 1992), しかし、潜堤の消波特性をより適切に表示するためには、力学的検討に基づく統一的な指標によって、消波特性諸量を表現することが必要であろう。そのためには、潜堤の消波特性が潜堤の規模、構造(不透過、透過)、入射波条件などによりどのように影響されるかを検討し、定式化する必要がある。

本研究は、潜堤周辺での非線形性の強い現象である、(1)波高伝達率、(2)潜堤背面水域での平均水位上昇量、および(3)強制碎波の形態とその発生条件に着目して実験を行い、理論解析との比較検討によって、消波機構に関する代表的指標を決定することを目的として行った。

## 2. 理論的検討

図-1のように、潜堤設置海滨地形を天端水深  $R$  の一様水深の海滨地形と単純化し、潜堤背後水域での波高伝達率と平均水位上昇を、線形長波理論によって解析を行う。

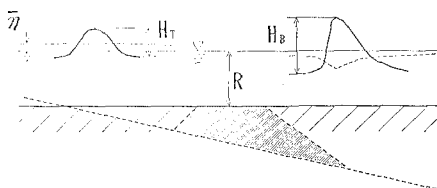


図-1 潜堤設置海滨地形と記号説明

### 2.1 波高伝達率 $K_T$

図-1 に示す座標系に対し、碎波によるエネルギー逸散を考慮した岸沖方向のエネルギー方程式(1)を適用する。

$$d(Ec_g)/dx = -\Phi_d \quad \dots\dots\dots (1)$$

線形長波仮定を適用すると、波動エネルギー  $E$  は  $\rho g H^2/8$ 、群速度は  $c_e$  と  $c_g = (gR)^{1/2}$  書ける。ここで、 $H$  は波高、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度である。エネルギー逸散関数  $\Phi_d$  として、泉宮・堀川(1983)の逸散式(2)を使用する。

$$\Phi_d = KE(g/R)^{1/2} \gamma \{\gamma^2 - \gamma R^2\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\gamma (=H/R)$  は波高水深比、 $K$  は比例常数である。また、添え字  $B$  と  $R$  は碎波位置と波の再生点での量を示す。以上の関係を用いて、式(2)を波高変化式に書き換えると、

$$d\gamma/dx = -(K/2R)\gamma^2 \{\gamma^2 - \gamma R^2\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

をうる。潜堤背後の伝達波高として、碎波後の再生波高を考え、入射波の碎波位置から波の再生地点までの距離をとると、波高伝達率  $K_T$  として式(4)をうる。

$$K_T = A_T \Phi_T = A_T \sqrt{2R/(K\gamma_i \gamma_B)} \times [(1 + (K\gamma_i/R)^2 \gamma_B^4)^{1/2} - 1]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $A_T$  は実験結果から決定される関数である。

### 2.2 平均水位上昇量 $\eta$

岸沖方向の運動量方程式で、碎波に伴うラディエーション応力の効果のみを考慮すると、平均水位上昇量  $\eta$  に対する式(5)をうる。

$$(\bar{\eta} + R) d\bar{\eta}/dx = -(3/8) dH^2/dx \quad \dots\dots\dots (5)$$

碎波位置での wave setdown  $\eta_B/R = -\gamma_B^2/16$  (Longuet-Higgins・Stewart, 1964) を考慮して  $\eta/R$  を計算すると、式(6)をうる。

$$\begin{aligned} \bar{\eta}/R &= A_S \Phi_S \\ &= A_S [-1 + \{1 + \gamma_B^2/2 - (3/8) \gamma_i^2 K_T^2\}^{1/2}] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $A_S$  は実験より決められる関数である。

以上の解析は、海滨地形に対して大胆な単純化を行っ

\* 正会員 日本大学短期大学部助手 建設科

\*\* 石川島播磨重工(株)

\*\*\* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

ただでなく、解析には碎波変形をする波に対して線形長波仮定を適用している。また、潜堤の形状とその構造などの関係諸量が、式(4)と(6)には含まれていない。潜堤の透過特性は背後水域での諸現象だけでなく、碎波条件にまで大きな効果をもたらすことが、これまでの実験からも認められる。したがって、これら各種の効果を解析結果に組み込むために、実験結果より実験係数を決定せざるをえない。しかし、簡単な解析結果より、 $K_T$ と $\bar{\eta}/R$ には、潜堤による強制碎波の条件が重要なパラメータであることが明かとなった。

### 3. 実験装置と測定方法

#### 3.1 実験装置

図-2に示すように、反射吸収式フラップ造波装置を備える両面ガラス張り二次元波動水槽(0.3m×0.55m×20m)内に設置した1/20勾配不透過斜面上に、天端幅 $B=0.5$ m、のり面勾配1/3の幅広潜堤(図-3)を設置して、実験を行った。潜堤模型は、モルタル製の不透過式と碎石(平均粒径25mm、空隙率35%)および消波ブロック(代表寸法50mm、空隙率50%)による透過式の三種類で、その形状寸法・新潟海岸などでの幅広潜堤を参考にして決定した。

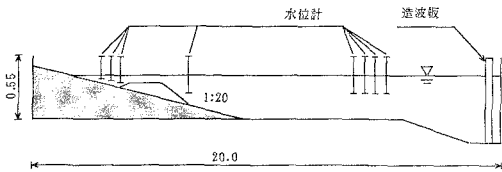


図-2 実験装置の配置 (単位: m)

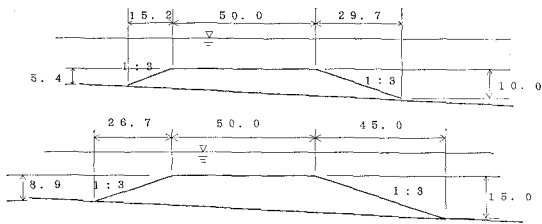


図-3 模型型潜堤形状 (単位: cm)

#### 3.2 測定方法

一様水深部( $h_I=0.29$ m~ $0.35$ m)での入射波高は $H_I$ 容量式波高計、潜堤前・背面水域での水面変動 $\eta$ は一組4本の分圧式波高計群によって検出し、デジタル記録計に収録後電算処理した。潜堤の反射率は、合田の方法(1990)で算定した。潜堤背後の波の再生域での水面変動の代表値を、潜堤岸側のり先から入射波の1/2波長点での測定値とし、平均水位上昇 $\bar{\eta}$ と $\eta_{rms}$ を算定した。 $\eta_{rms}$ と一様水深部でのそれとの比として伝達率 $K_T$ を

算定した。

潜堤天端と沖側のり面上での碎波状況を高速ビデオ(200コマ/s)で撮影記録し、波動水槽ガラス側面に設置した2.0cm正方格子を利用して、29インチ画面の静止画像から碎波形状と関係諸量を読み取った。

実験条件は、潜堤高さ $h_S=0.10$ mと $0.15$ m、天端水深 $R=0.025$ mと $0.050$ m、入射波周期 $T=0.8$ sと $1.2$ s、入射波高は $H_T=0.01$ m~ $0.20$ mである。

### 4. 実験と解析結果との比較

理論解析は、潜堤天端または沖側のり面上で入射波が碎波する条件を想定して、一定水深 $R$ の不透過海浜面上を伝達する碎波の減衰を対象として検討を行っている。したがって、解析結果と実験結果との比較は不透過潜堤に対するものを基本とし、次いで透過潜堤に対して検討を行う。

#### 4.1 波高伝達率

図-4は、式(4)で $K=1.0$ および $l=L$ ( $L$ :水深 $h_S$ での波長)として $K_T$ と $A_T\Phi_T$ との関係を、不透過潜堤の碎波発生時の測定結果を用いて示したものである。不透過潜堤に対する $A_T$ は、因子解析より相対天端水深の関係 $A_T=1.75-15(R/L_0)$ として決定された。これは潜堤天端水深による碎波減勢過程の変化が $K_T$ におよぼす効果を表すものと考えられる。

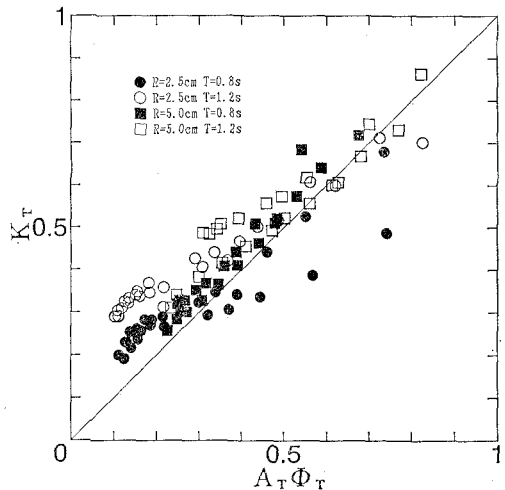


図-4 不透過潜堤の $K_T$ と $A_T\Phi_T$ との関係

不透過潜堤のり面上を射流で流下する戻り流れにより、写真-1に見られる跳水状碎波が発生する $A_T\Phi_T < 0.2$ では、実験は理論と若干異なる傾向を示している。この原因として、碎波波高と水深の決定方法があげられる(後出4.3参照)。しかし、測定結果に若干のばらつきが認められるが、実験結果は式(4)と良い一致

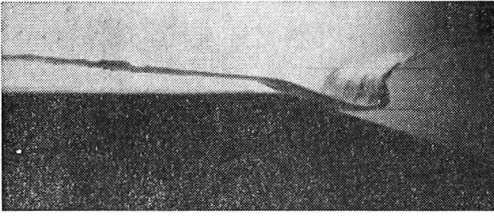


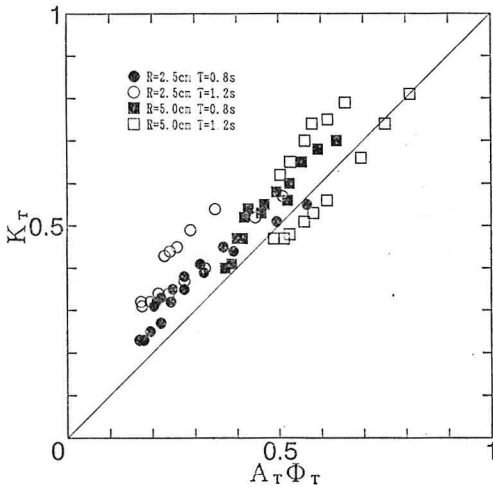
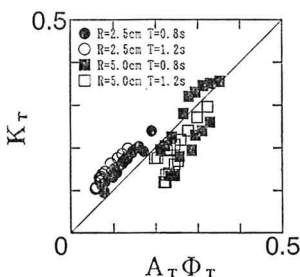
写真-1 不透過潜堤のり面上の跳水碎波

を示している。

透過潜堤では、堤体の透水効果により  $K_T$  は増大する。この効果を潜堤の空隙率  $\varepsilon$  を考慮して、

$$A_T = [1/(1-\varepsilon)][1.75-15(R/L_0)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

と表し、理論と実験との比較を行ったものが、図-5(碎石潜堤)と図-6(ブロック潜堤)である。不透過潜堤と同様に碎石潜堤に対しては、実験結果は式(4)の関係を十分満たしている。しかし、ブロック潜堤の場合には、潜堤断面に対してブロック層厚が十分でなく、また天端面の粗度効果が過大であるため、測定値のばらつきが大きくなっている。

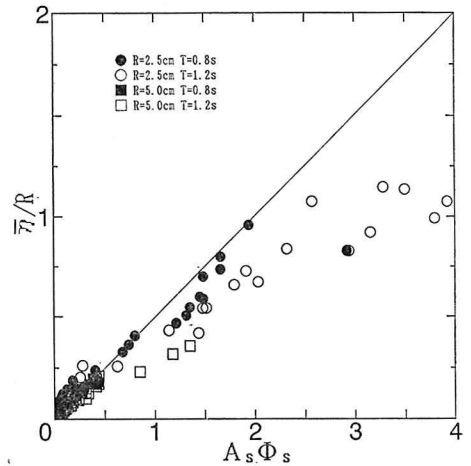
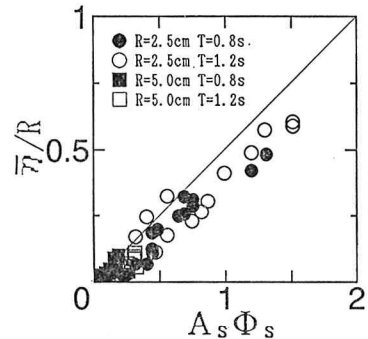
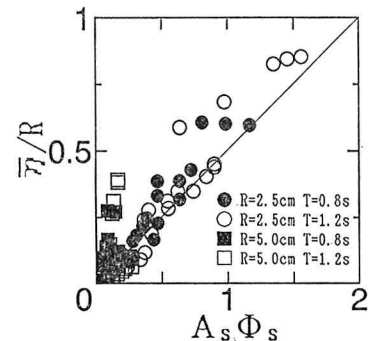
図-5 碎石潜堤の  $K_T$  と  $A_T \Phi_T$  との関係図-6 ブロック潜堤の  $K_T$  と  $A_T \Phi_T$  との関係

#### 4.2 平均水位上昇量

図-7~9は、三種の潜堤に対する平均水位上昇量の実験結果によって、式(6)の妥当性を検証したものである。式(6)の  $A_S$  は、 $\eta/R$  に対する潜堤の透水効果を考慮して、

$$A_S = [1/(1-\varepsilon)]^{-1} [1.75-15(R/L_0)] \quad \dots\dots\dots (8)$$

と決定した。図-7~9に見られるように、不透過・碎石潜堤に対しては比較的良好な結果がみられるが、波高

図-7 不透過潜堤の  $\eta/R$  と  $A_S \Phi_s$  との関係図-8 碎石潜堤の  $\eta/R$  と  $A_S \Phi_s$  との関係図-9 ブロック潜堤の  $\eta/R$  と  $A_S \Phi_s$  との関係

伝達率の場合と同様の理由により、ブロック潜堤での一致の程度が低下している。

#### 4.3 碎波形式と碎波条件

式(4)と(6)に見られるように、潜堤の水理特性には碎波条件  $\gamma_s$  が重要なパラメータとなっている。

Smith・Kraus (1991) は、バー・リーフが存在する緩勾配斜面上の碎波条件を surf similarity パラメータで表している。また、Rojanakamthosn・磯部・渡辺 (1990) は透過潜堤に対して Mich タイプの碎波指標を提案している。反射と引き波の効果が顕著となる、1/10勾配以上の急斜面上の碎波指標として合田の式は適用出来ないことが指摘されているが、これに代わるものはまだ確定されていないと言える。

筒井・磯部・渡辺 (1988) も認めているように、潜堤により発生する碎波の形式には、潜堤前面の緩勾配斜面の碎波形式に加えて、急勾配斜面の碎波にみられる特異な形態の碎波が発生する。引き波時に発生するのり面上の戻り流れの効果により、入射波波面に写真-1に示す様な跳水碎波と、入射波高が増大すると共に跳水碎波面と波頂部の碎波とが二段階に生ずる二段碎波が現れる。特に、潜堤背後域の平均水位上昇量が増大する不透過潜堤の場合に、その発生は顕著となる。この様な碎波に対する碎波波高  $H_B$  と水深  $h_B$  の判定は、まだ十分確定されていないことから、本研究では図-10のような状況での測定値を採用した。このため、測定結果は碎波位置を実際よりも沖側に判定する傾向となり、この影響が図-4 だけでなく潜堤のり面碎波条件(図-12)にも認められる。

図-11 と 12 は、 $h_s=0.10\text{m}$  の場合の天端とのり面碎波条件を、 $H_B/h_B$  と  $H_I h_s / R L_I$  の関係で示したもので、入射波周期の効果が残存している。潜堤天端上での碎波は、基本的には碎波の限界条件  $H_B/R$  で支配されていることが、実験結果からも読み取られる。不透過潜堤では天端上の戻り流れの影響を受けて、天端沖側のり肩から中央部付近にかけて碎波が発生することから、 $0.5 < H_B/R < 1.0$  が碎波条件となる。一方、透過潜堤の場合には碎波条件が若干増大し  $0.5 < H_B/R < 1.5$  となる。碎波に対する戻り流れの効果は、堤体を透過するため不透過潜堤の場合に較べて低下する。また、潜堤の反射効果も弱まることから、本実験では透過潜堤では天端碎波の発生率がのり面碎波を大きく上回った。

図-12 に見られるように、不透過潜堤のり面での  $H_B/h_B$  が砕石・ブロック潜堤の値より小さいのは、跳水・二段碎波に対する測定法によるものである。のり先碎波は、1/20 勾配に対する合田の碎波条件と、ほぼ一致することが認められた。

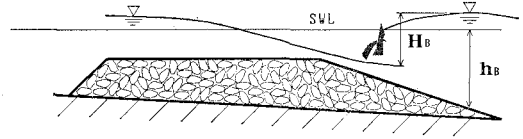


図-10 跳水・二段碎波の  $H_B$  と  $h_B$

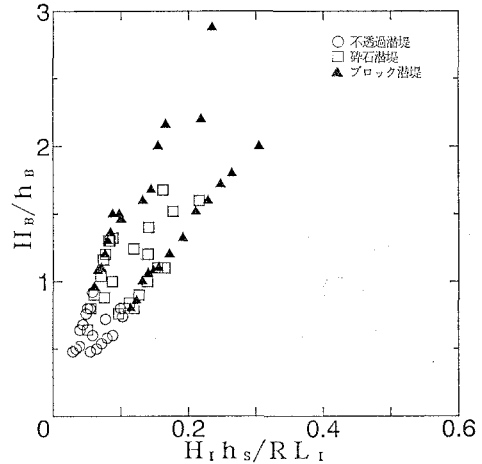


図-11  $H_B/h_B \sim H_I h_s / R L_I$  (天端碎波)

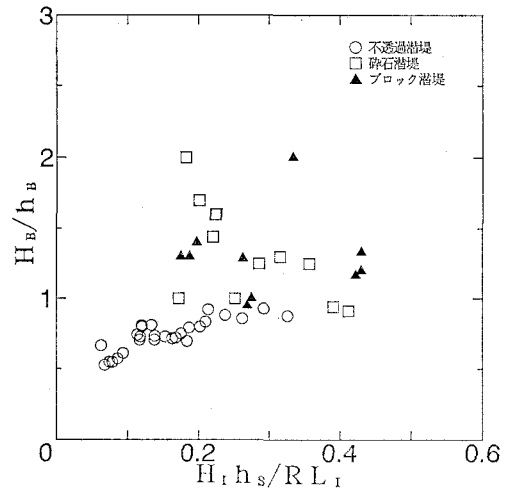


図-12  $H_B/h_B \sim H_I h_s / R L_I$  (のり面碎波)

#### 4.4 反射率 $K_R$

図-13 は、不透過と砕石潜堤の反射率  $K_R$  と  $H_I h_s / R L_I$  との関係を示したものである。高橋と首藤 (1988) の実験にも見られるように、潜堤の反射特性は入射波の碎波形式、天端とのり面の粗度と堤体の透水性などの効果により複雑な挙動を示す。このため、反射特性の基本的傾向は  $H_I h_s / R L_I$  により表示できるが、より一層の検討が必要がある。

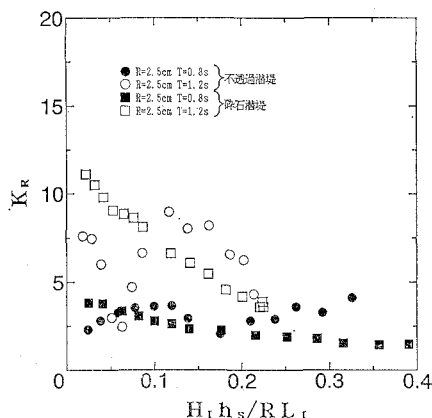


図-13  $K_R$  と  $H_1 h_s / R L_I$  との関係

## 5. 結 論

本研究でえられた主要な事柄を以下に示す。

(1) 単純化した条件の下での理論解析結果と実験との比較から、幅広潜堤の伝達率は砕波減衰を考慮したエネルギー方程式、またその背後水域での平均水位上昇はラディエーション応力と運動量方程式により説明付けられる。また、砕波条件がこれら現象に対して主要な支配要因であることが解った。

(2) 幅広潜堤背後での波高伝達率と平均水位上昇に対する実験結果と解析結果との一致は良好で、式(4)と(6)により、算定できる。

(3) 潜堤の透過効果は堤体空隙率で評価され、伝達率と平均水位上昇量に対する実験係数  $A_T$  と  $A_S$  は、それぞれ式(7)と(8)で与えられる。

(4) 入射波の潜堤のり面上砕波には、跳水砕波と二段砕波の二種類の特徴的な砕波形式が認められる。その発生は潜堤背後域での平均水位上昇と引き波とにともなう、のり面上の戻り流れに強く関係するため、透過潜堤ではその発生頻度は不透過潜堤に較べて低下する。

(5) 天端・のり面砕波条件は、入射波周期の影響が残存するが、 $H_b/h_b$  と  $H_1 h_s / R L_I$  の関係で表示することが出来る。また、のり先砕波条件は合田の砕波式とほぼ一致することが認められた。

(6) 潜堤の反射特性の基本的傾向は、 $L_1 h_s / R L_I$  で

表現することができるが、より適切な表示パラメータを検討する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費（重点領域、代表者 服部昌太郎）により行ったことを記して謝意を表する。

## 引用文献

- 泉宮尊司・堀川清司 (1983): 砕波帯における波のエネルギー方程式のモデリング, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 150-154.
- 泉宮尊司・遠藤雅人 (1989): 潜堤および透過性構造物のある海浜における波動場解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 638-642.
- 宇多高明・小俣 篤 (1987): 人工リーフの設計法, 土木技術資料, 29-12, pp. 26-31.
- 大山 巧・灘岡和夫 (1991): 数値波動水槽を用いた潜堤による波の分裂現象の解析, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 16-20.
- 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 253-258.
- 榎木 亨・出口一郎・岡原義典 (1989): 幅広潜堤の波浪減衰効果とその縮尺効果について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 633-638.
- 高橋敏彦・首藤伸夫 (1988): 波の打ち上げ高, 反射率に及ぼす粗度・透水性の効果に関する一検討, 土木学会, 第44回年次学術講演会概要集II, pp. 648-649.
- 田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 152-157.
- 筒井純一・磯部雅彦・渡辺 晃 (1988): 急勾配斜面上における砕波条件に関する実験的研究, 土木学会, 第44回年次学術講演会概要集II, pp. 610-611.
- 安田孝志・原 正典・梶原幸雄 (1992): BIM を用いた矩形潜堤による孤立波の変形と砕波, 土木学会論文集, No. 443/II-18, pp. 73-82.
- 谷野賢二・水野雄三・渡辺康玄・平沢充成 (1989): 人工リーフによる波の変形について, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 643-647.
- Rojanakamthorn, S.・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 643-647.
- Rojanakamthorn, S.・磯部雅彦・渡辺 晃 (1990): 透過潜堤上における波の砕波変形計算法, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 549-553.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964): Radiation stress in water waves; a physical discussion with applications, deep Sea Res., Vol. 11, pp. 529-562.
- Smith, E. R., and N. C. Kraus (1991): Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs, Proc. ASCE, J. Waterways, Harbors and Coastal Engrg. Div., 117(4).