

# 消波ブロック被覆層厚が波の反射に及ぼす影響

伊藤政博\*・岩垣雄一\*・村上 廣\*\*  
根本建治\*\*\*・山本方人\*\*\*・半沢 稔\*\*\*

## 1. はじめに

防波堤や海岸堤防の前面には、波の反射と波圧の軽減、越波および洗掘の防止などの目的で各種の消波ブロックが設置されている。波に対する消波ブロックの安定重量は、Hudson 公式によれば来襲波高の 3 乗に比例するので、波高が大きくなるにつれて、飛躍的に増大することになる。そのために波高が大きくなるにつれて、消波ブロックの重量が重く、形状寸法も大きくなるので、消波工断面も大きくなる。これに関連して、消波工設置用地の制約、あるいは運搬・据え付けのクレーン船の能力の制約など、施工上の各種の問題が起こることも少なくない。そこで、普通コンクリートより比重を大きくした高比重ブロックを使用すると、重量を小さくすることができ、また形状が小さくても、波に対する安定性は良くなると考えられる。このような立場から、伊藤ら(1992a, 1992b, 1993)は、比重を幅広く変えたテトラポッドの模型を使って数多くの実験を行い、波に対する安定性を実験的に検討した。その結果、消波ブロックの比重が変化してもブロックの安定係数はほとんど変化することがないが、砕波帯相似パラメータやレイノルズ数によって安定係数が変化することなどを明らかにした。一方、高比重ブロックは外力としての波の特性が一定であれば、ブロック形状を小さくすることができる。そのため、被覆層の厚さが相対的に薄くなり、被覆層部分の断面積および空隙が小さくなるので、波の反射及び遡上等の特性の変化が無視できなくなる(伊藤ら, 1992c)。

消波ブロックによる波の反射率に関する研究として、榊山・斉藤(1988)は、消波ブロック重量が 20 倍異なる大小のテトラポッド、ドロス、コウケンブロックを用いて、波の反射率に及ぼす実験縮尺の影響を実験的に詳しく調べ、諸条件が一定であっても、小さな規模の実験は、大きなものに比べて波の反射率が相対的に小さくなることなどを指摘している。この縮尺効果の原因として、ブロック間の空隙を流れる流体の抵抗係数が変化するため

であるとしている。また、高橋ら(1990)は、滑面及び透水層を有する法面勾配 1:5 の緩傾斜面における波の反射率及び波の打ち上げ高を実験的に調べた。その結果、反射率については、砕波帯相似パラメータが 1.25 以上になると、粗面及び透水層の影響が無視できなくなることを指摘している。

しかしながら、高比重ブロックの使用に伴う被覆層厚の減少と波の反射の関係については、ほとんど研究されていない。

ここでは研究の第一歩として、傾斜堤あるいは防波堤にテトラポッドを二層乱積みにした、いわゆる二層被覆堤を対象にして、ブロックの被覆層厚の変化と波の反射との関係を実験的に調べる。

## 2. 次元解析

高比重ブロックによる二層被覆堤に、波が直角に入射する 2 次元の場合を対象にすると、波の反射率  $K_r$  に関係する水理量は、次の諸量が考えられよう。

### (1) 消波ブロックに関係する水理量

$B_{2h}$ ; ブロックの二層被覆層厚  
 $B_T$ ; 法面の状態(ブロックの積み方, 捨石, 滑面)  
 $B_e$ ; ブロックの空隙率  
 $B_u$ ; 被覆層の下層の状態(捨石, 滑面)  
 $\tan \theta$ ; 法面勾配

### (2) 波の特性に関係する水理量

$h$ ; 堤脚部の水深  
 $H$ ; 波高  
 $T$ ; 波の周期  
 $\rho$ ; 流体の密度  
 $\mu$ ; 流体の粘性係数  
 $g$ ; 流体に作用する重力の加速度

従って、反射率  $K_r$  は以上の 11 個の物理量で次のように表わされる。

$$K_r = f_1(h, H, T, \mu, \rho, g, B_{2h}, B_T, B_e, B_u, \tan \theta) \quad (1)$$

基本次元量を  $H, \rho, g$  として次元解析をすれば、式(1)は、次のように表せる。

\* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科  
\*\* 正会員 名城大学大学院工学研究科  
\*\*\* 正会員 日本テトラポッド(株)

$$K_r = f_2 \left( \frac{h}{H}, \frac{T}{\sqrt{H/g}}, \frac{\sqrt{gH} \cdot H}{\nu}, \frac{B_{2h}}{H}, B_T, B_s, B_u, \tan \theta \right) \dots \dots \dots (2)$$

式(2)の右辺第2項  $T/\sqrt{H/g}$  は、第1項  $h/L$  と  $L = \sqrt{gH} \cdot T$  の関係を用いると、 $L/H$  と表わせるので、波形勾配に相当する無次元量である。また、式(2)の右辺第2項は、第4項  $B_{2h}/H$  を用いると、

$$\frac{T}{\sqrt{H/g}} = \frac{\sqrt{gH} \cdot T}{B_{2h}} \dots \dots \dots (3)$$

となる。この式の右辺の  $\sqrt{gH}$  は、速度の次元を有するので、 $\sqrt{gH} \rightarrow U$  とみなすと、 $UT/B_{2h}$  と表わせるので、Keulegan と Carpenter によって定義された渦の発生と離脱に関する KC 数に対応する量となる。したがって、式(2)の右辺第2項は被覆層厚に関する KC 数でもある。また、式(2)の右辺第3項も同様に、 $B_{2h}/H$  を用いて書きなおすと、

$$\frac{\sqrt{gH} \cdot H}{\nu} = \frac{\sqrt{gH} \cdot B_{2h}}{\nu} \dots \dots \dots (4)$$

となるので、式(4)は波と被覆層厚に関するレイノルズ数である。

以上の議論をまとめると、式(2)は次のように表せよう。

$$K_r = f_3 \left\{ \frac{h}{L}, \frac{L}{H} \left( \text{or } \frac{\sqrt{gH} \cdot T}{B_{2h}} \right), \frac{B_{2h}}{L}, \frac{\sqrt{gH} \cdot B_{2h}}{\nu}, B_T, B_s, B_u, \tan \theta \right\} \dots \dots \dots (5)$$

本研究では、二層被覆堤の法面勾配を一定 ( $\tan \theta = 3/4$ ) にするので式(5)から法面勾配を省略する。また、テトラポッドの空隙率  $B_s$  については、テトラポッドを乱積みにし、テトラポッドが完全に(テトラポッド上面まで)水没した状態で空隙率を測定した。この測定に使用したテトラポッドの模型は、鉛直高さ約3.0~16 cmまで変化させた。空隙率の測定結果は、表-1に示してある。この表から、テトラポッドの形状が小さい。(鉛直高さ3.2 cm)と空隙率が53%であるが、形状が大きく(鉛

直高さ6~16 cm)なると空隙率は57~63%で、ほとんど一定である。このように、テトラポッドの大きさが違ってても空隙率  $B_s$  はあまり変化しないので、空隙率の影響を無視することができる。

以上から、波の反射率に影響する無次元物理量は、沖波の特性を用いると、結局、次のように表すことができる。

$$K_r = f_4 \left\{ \frac{h}{L_0}, \frac{H_0}{L_0} \text{ (or KC)}, \frac{B_{2h}}{L_0} \left( \text{or } \frac{B_{2h}}{H_0} \right), \frac{\sqrt{gH_0} \cdot B_{2h}}{\nu}, B_T, B_u \right\} \dots \dots \dots (6)$$

### 3. 反射率の実験方法

テトラポッドの大きさに直接関係する被覆層の厚さが、波の反射にどのような影響を及ぼすかを実験的に調べる。実験には、図-1の平面水槽を使用し、この水槽中をA~Cの小水路に区切って、小水路間には波の再反射波の吸収斜面を設置して、多重反射を抑えるようにした。小水路中に法面勾配1:4/3の二層被覆堤の模型を造った。この模型は、被覆層の下層部分は碎石(A、B水槽では13.6~110.6 gf、C水槽8.5~19.4 gf、D水槽2.2~6.0 gf)で造り、その上をテトラポッドを乱積で二層被覆した。またテトラポッド被覆層の下層の状態が波の反射に及ぼす影響を調べるできるように、下層を滑面(鉄板)にした場合についても同様の実験を行った。表-1に示してあるように、テトラポッド模型の鉛直高さは、3.1、5.78、7.84、10.48、14.15、16.62 cmである。写真-1には、これらの模型の大きさの比較が示してある。

実験は、水深を一定  $h = 50$  cmにした。波は規則波とし、周期は  $T = 1.0 \sim 3.0$  sまでを0.5 s間隔で変化させ、波の大きさは、造波機の最大造波能力(波高30 cm)までとした。沖波波形勾配は、 $H_0/L_0 = 0.01 \sim 0.12$  の範囲で変化させた。波の作用に際して、消波ブロック及び捨石の

表-1 実験に用いたテトラポッドの各種の模型

ブロック Type No.	ブロックの鉛直高さ (cm)	二層厚 $B_{2h}$ (cm)	空隙率 $B_s$ (%)	使用個数	Marks
C-1	3.10	5.2	53	1800	⊙
E-1	5.78	8.3	61	1048	▽
E-2	7.84	12.0	57	572	◇
E-3	10.48	14.6	63	287	□
E-4	14.15	18.5	61	223	⊙
D-5	16.62	22.5	59	108	△

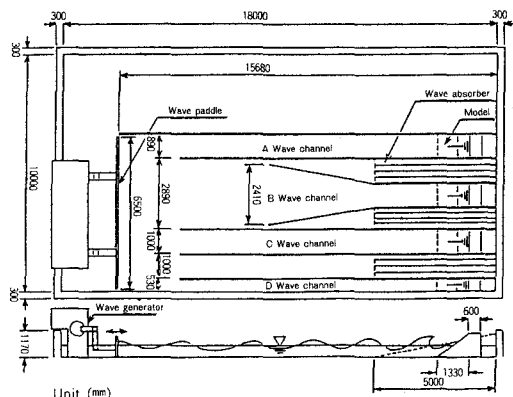


図-1 実験水槽

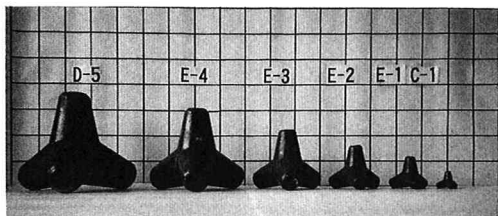


写真-1 実験に用いた各種のテトラポッド模型 (1マス5cm)

表-2 実験条件の概要

実験波 (規則波)	法先水深 $h$ : 50cm
	波高 $H$ : 5~30cm
	周期 $T$ : 1.0~3.0s (0.5s間隔)
	波形勾配 $H_0/L_0$ : 0.01~0.12
二層被覆堤	法面勾配 $\tan\theta$ : 1:4/3 { 下層は捨石(碎石) }
海底勾配	水平床
消波ブロック	テトラポッド (表-1参照)

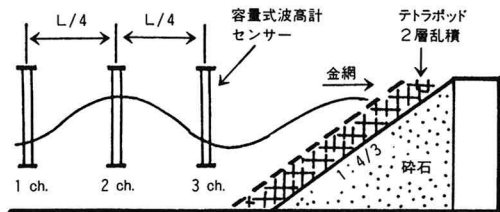


図-2 二層被覆堤と波の反射の測定

移動・脱落を防ぐために、テトラポッド及び捨石が外にでない程度の網目の金網で覆った。ただし、非越波とした。反射率は合田の入射波分離法で計算するために、被覆堤法先前面に3本の波高をそれぞれ1/4波長間隔に設定した(図-2参照)。測定は、波高計からの波形信号をADボードを介して、直接パーソナルコンピュータに100ms間隔でデータとして取り込み、FDに記録した。反射率の計算は、波高計1と2チャンネル及び2と3チャンネルの測定データを使用して行い、平均値を求めた。なお、全実験を通じて、非碎波、崩れ波および碎け寄せ波型の碎波で、巻き波碎波の発生はほとんど見られなかった。以上の実験条件の概要が表-2にまとめてある。

4. 検 討

二層被覆堤の反射率に及ぼす要因は、数多く考えられるが、式(6)の無次元水理量に基づく、水深沖波波長比  $h/L_0$ 、沖波波形勾配  $H_0/L_0$  あるいは被覆層厚に関係するKC数  $\sqrt{gH} \cdot T/B_{2h}$ 、相対被覆層厚  $B_{2h}/L_0$ 、レイノルズ数  $\sqrt{gH} \cdot B_{2h}/\nu$ 、法面の状態  $B_T$ 、およびブロックの下層の状

態  $B_u$  があげられる。これらの要因が波の反射率  $K_r$  にどのような影響を及ぼすかを実験データに基づいて調べる。さらに、被覆層のみによる波の反射率を調べるために、滑面あるいは捨石法面による波の反射率  $K_r'$  と、それぞれにテトラポッドで二層被覆したときの波の反射率  $K_r$  との差を

$$\Delta K_r = K_r' - K_r \dots\dots\dots (7)$$

で表す。この  $\Delta K_r$  をここでは被覆層の反射率軽減効果と定義する。特に、反射率軽減効果については、実用的な観点から捨石法面とこれにテトラポッドで二層被覆したケースを対象に、 $h/L_0$ 、 $H_0/L_0$ 、KC数、 $B_{2h}/L_0$  及びレイノルズ数が  $K_r$  に及ぼす影響を調べた。その結果、波の反射率に対して大きな影響を及ぼす要因のみを取り上げて、以下で検討を加えることにする。なお、実験データの整理結果は、表-1の凡例に従って図示してある。

(1) 相対水深

法先の相対水深が波の反射率に及ぼす影響が、法面の特性(滑面、捨石、滑面上にテトラポッド二層被覆及び捨石上にテトラポッド二層被覆)で分けて、図-3および4に示してある。図-3(b)及び図-4(a),(b)のプロットデータはかなりばらついているので、概略の傾向が実線で、さらにばらつきの範囲が破線で示してある。図-3と4から、相対水深が波の反射に及ぼす影響は、法面の状態によってかなり異なっている。すなわち、滑面と捨石で反射率はかなり異なる。しかしながら、図-3(b)と図-4(b)からは、被覆層の下層の状態(滑面、捨石)による反射率の違いが見いだせない。そこで、式(7)に従って、滑面上と捨石上の被覆層のみの反射率軽減効果を求めた結果が図-5に示してある。通常の被覆堤(下層が捨石)の反射率軽減効果を示す図-5(b)から、相対水深が大きくなるにつれて、反射率軽減効果は大きくなっている。また、図-5(a)から、下層が滑面であると、被覆層の反射率軽減効果は、捨石に比べて大きく、その値は10~80%である。このように相対水深が大きくなるにつれて、反射率が減少し、反射率軽減効果の増大する理由の一つとして、相対水深の増大によって、被覆層の水中部分の体積が大きくなるので、被覆層の空隙による波エネルギー吸収が大きくなって、反射率が低下するものと考えられる。

(2) 波形勾配

波形勾配と反射率軽減効果との関係を整理した結果が、図-6に示してある。図-6(a)のプロットデータにばらつきがあるが、平均的な傾向が実線で図中に示してある。この傾向は、 $H_0/L_0 > 0.01$  で、反射率が小さくなっている。また、図-6(b)に示したように、反射率軽減効果と波形勾配との間には、はっきりした傾向が見られない。

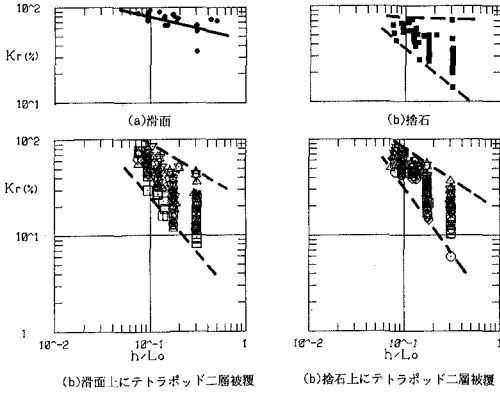


図-3 滑面の反射率と相対水深(図中の印は表-1を参照) 図-4 捨石斜面の反射率と相対水深(図中の印は表-1を参照)

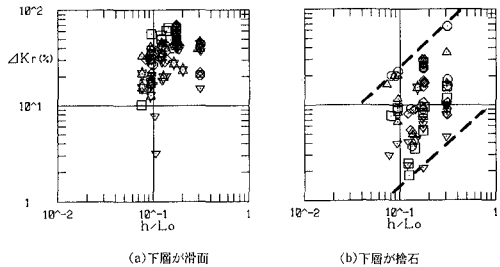


図-5 被覆層の下層の違いによる反射率軽減効果(図中の印は表-1を参照)

(3) 相対被覆層厚

相対被覆層厚と波の反射率並びに反射率軽減効果との関係が、図-7に示してある。この図-7(a)から、相対被覆層厚が厚くなるにつれて、反射率は低下することがわかる。 $B_{2h}/L_0 > 0.01$ では、 $K_r \propto (B_{2h}/L_0)^{-0.7}$ の関係が見られる。反射率軽減効果は図-7(b)に整理して、概略の傾向が示してある。この傾向は、相対被覆層厚が厚くなるにつれて反射率軽減効果が大きくなっている。すなわち、 $B_{2h}/L_0 > 0.01$ では、高比重ブロックを使用すると、相対被覆層厚は薄くなるので、反射率軽減効果は小さくなり、波の反射率が大きくなる。

(4) 砕波帯相似パラメータ

式(5)を参考に沖波波形勾配  $H_0/L_0$  と  $\tan \theta$  から、Battjes (1974) が提案した砕波帯相似パラメータ  $\xi = \tan \theta / \sqrt{H/L_0}$  が得られる。

Battjes は緩勾配の滑面： $\tan \theta = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$  における反射実験データを砕波帯相似パラメータで整理し、次の実験式を提案している。

$$\left. \begin{aligned} K_r &= 10\xi^2, & (K_r < 100\% \text{ のとき}) \\ K_r &= 100, & (K_r = 100\% \text{ のとき}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

本研究の実験では、法面勾配を一定 ( $\tan \theta = 3/4$ ) にし

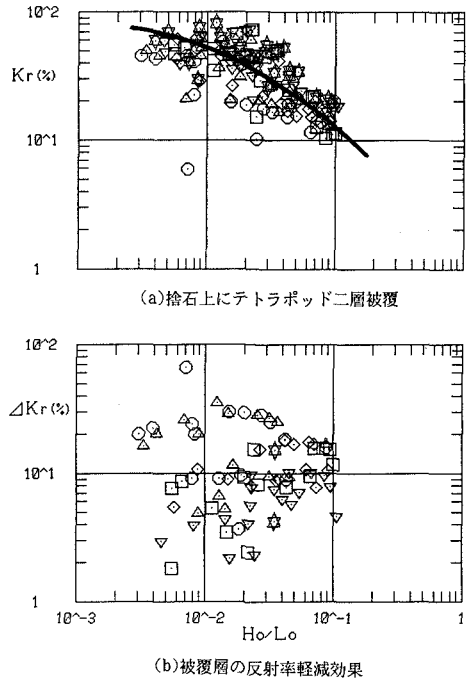


図-6 反射率と波形勾配(図中の印は表-1を参照)

ているから、 $\xi$  は沖波波形勾配に依存することになる。砕波帯相似パラメータと反射率並びに反射率軽減効果について整理した結果が図-8に示してある。この図-8(a)には反射率の最大の包絡する傾向が破線で示してある。この破線は、

$$K_r \leq 4\xi^2 \dots\dots\dots (9)$$

で表される。このように、被覆斜面からの反射率 ( $K_r \propto \xi^2$ ) が滑面と同様砕波帯相似パラメータに比例することは興味深いことである。一方、図-8(b)に示した反射率軽減効果は、ばらつきが大きく、砕波帯相似パラメータとの間にはっきりした関係が見られない。

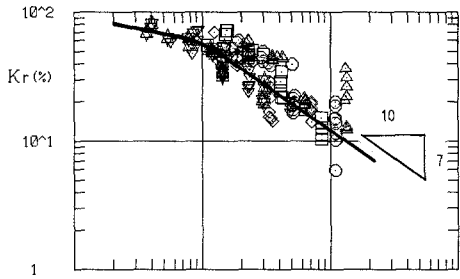
(5) レイノルズ数及び KC 数

レイノルズ数及び KC 数と反射率および反射率軽減効果の間には、明確な関係がみられなかった。

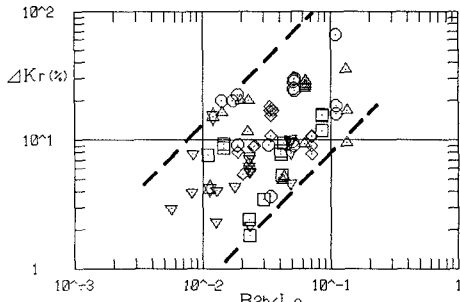
5. ま と め

大小のテトラポッド模型による二層被覆堤を対象にして、被覆層の特性が波の反射率並びに反射率軽減効果に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果をまとめると、次のようである。

- (1) 相対水深  $h/L_0 < 0.1$  になると、被覆層厚の反射率軽減効果が大きくなって、波の反射率が急激に小さくなる。
- (2) 波形勾配が大きくなるにつれて、反射率は低下する傾向にある。波形勾配は被覆層による反射率軽減効

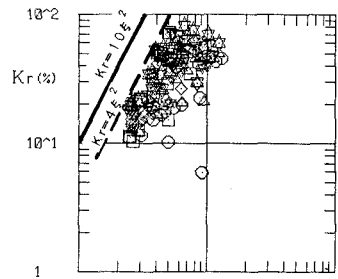


(a)捨石上にテトラポッド二層被覆

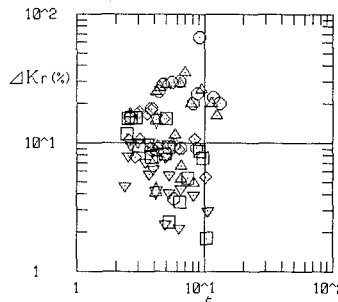


(b)被覆層の反射率軽減効果

図-7 反射率と相対被覆層厚 (図中の印は表-1を参照)



(a)捨石上にテトラポッド二層被覆



(b)被覆層の反射率軽減効果

図-8 反射率と碎波帯相似パラメータ (図中の印は表-1を参照)

果にほとんど影響を及ぼさない。

(3) 相対被覆層厚  $B_{2h}/L_0 > 0.01$  で、被覆層が厚くなるにつれて、反射率は小さくなる。この関係は  $K_r \propto (B_{2h}/L_0)^{-0.7}$  で表される。さらに、相対被覆層厚が大きくなるにつれて反射率軽減効果が顕著になる。

(4) 碎波帯相似パラメータとテトラポッド二層被覆斜面の反射率との間には、 $K_r < 4\xi^2$  の関係がある。碎波帯相似パラメータと反射率軽減効果との間には、はっきりした関係がみられない。

最後に実験および結果の整理に際して、平成4年当時名城大学大学院；山田卓生・学部生；増田健太郎・三崎隆央・森 勇・篠田泰伸君らをはじめとする研究室の関係者の協力を得たことを付記して感謝の意を表明する。

参 考 文 献

伊藤政博・岩垣雄一・根本建治・山本方人・半沢 稔 (1992a): 消波ブロックの比重変化が安定性に及ぼす影響, 土木学会海洋

開発論文集, Vol. 8, pp. 75-80.

伊藤政博・岩垣雄一・山田卓生・根本建治・山本方人・半沢 稔 (1992b): 高比重ブロックの安定性に及ぼす碎波帯相似パラメータの影響, 土木学会海岸工学論文集, 第36巻, pp. 666-670.

伊藤政博・岩垣雄一・山田卓生・根本建治・山本方人・半沢 稔 (1992c): 捨石斜面上の消波ブロック被覆層が波の反射に及ぼす影響について, 土木学会年次学術講演会論文集, pp. 1080-1081.

伊藤政博・岩垣雄一・山田卓生・根本建治・山本方人・半沢 稔: 高比重ブロックの水理特性に関する実験的研究(3) (1993), 一安定性に及ぼす碎波帯相似パラメータの影響一, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 272-273.

礪山 勉・齊藤昭三 (1988): 消波ブロック被覆層の反射率と遡上波特性, 電力中央研究所, 研究報告 No. U88023, 41 p.

高橋敏彦・首藤伸夫・沼田 淳 (1990): 緩傾斜堤の水理特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 509-513.

Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14th Int. Coastal Engineering Conf., ASCE, Vol. 1, pp. 466-479.