

長周期波を対象とした直立消波構造物の開発

池野勝哉*・熊谷隆宏**・森屋陽一***
大島香織*・関本恒浩***

多くの港湾において、周期 1 分程度の長周期波が係留船舶動揺等の問題を引き起こしており、その対策が工学的な課題となっている。著者らは対策の一つとして、港内長周期波の反射を低減させる消波構造物を開発した。開発した消波構造物は、前面がスリット壁でレキ材が投入された透水室とその背後に遊水室を設けた 2 室で構成されており、隔壁に設けられた隔壁孔により両室間の海水移動が可能となっている。本研究では、開発した構造物の消波性能を水理模型実験にて評価し、数値波動水路による数値実験で消波構造物の最適な断面を検討する。また、モデル港湾を対象に消波構造物の消波性能を確認し、最適なレイアウトの設定方法の提案を行う。

1. はじめに

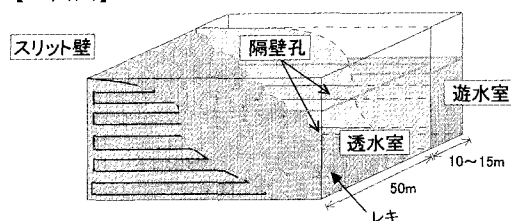
近年、周期 1 分程度の長周期波が港湾における船舶の荷役稼働率の低下、船舶運行の不安定、係留索の破断事故等が発生させる支配的要因として注目されており、その対策が工学的な課題となっている。ソフト対策として、①係留索の材質を変更し、共振現象を軽減する（白石ら、1995）、②長周期波の波高変化を予測し、未然に港外へ避泊する（菅原ら、1995）などが挙げられ、また、ハード対策として、③沖合の防波堤を最適方向に延伸する（平石ら、1997）、④消波構造物を設置する（平石ら、2003）などが行われており、その対策効果は船舶の荷役稼働率を指標として定量的に評価されている。しかし、ハード対策として沖合防波堤の整備には多大なコストと施工領域の確保が必要となる。また、従来の消波構造物（例えば平石ら、2003）は、消波層が波長の 0.2 倍程度のとき効果的な消波を発揮することが多く、一般に周期 1 分程度の長周期波の波長が 500 m 以上であることを考慮すると、消波層として 100 m 以上の幅が必要となり、現実的に適用することが難しい状況にある。

そこで本研究では、長周期波を効果的に消波できる比較的小規模な消波構造物の開発を目的とし、構造物の消波性能を水理模型実験により評価するとともに、構造物の最適な断面を数値解析によって検討する。また、モデル港湾を対象にブシネスク方程式による波浪場解析と、汎用動揺解析から係留船舶の船体動揺量を評価し、消波構造物の消波性能の確認と、最適な平面レイアウトの設定方法の提案を行う。

2. 消波構造物の概要

本研究で開発した消波構造物の模式図を図-1 に示す。構造物は前面がスリット壁である幅 50 m の透水室と、その背後に設けられた幅 10~15 m の遊水室で構成

【立面図】



【断面図】

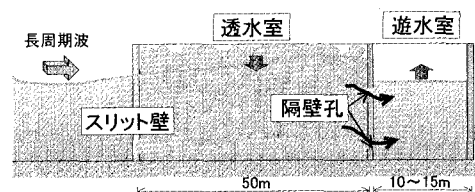


図-1 消波構造物の模式図

されている。また、両室間の隔壁に設けられた隔壁孔により海水の移動が可能である。このような構造により本構造物は、①スリットでの縮流効果による流速場の乱れ、②波が透水層（レキ層）を通過する際の、粘性による波浪エネルギーの損失、③透水室と遊水室間に生じた水位差から、海水が両室間を移動することによる水位変動制御、の 3 つの消波メカニズムを有している。

また、本構造物は透水室と遊水室を合わせても 60~65 m と従来に比べて比較的小規模であり、周期 1 分程度の長周期波の波長に対して 0.1~0.15 倍に相当する堤体幅で、効果的に反射率を低減することができる。

3. 水理模型実験

(1) 実験概要

実験装置を図-2 に示す。沖側には無反射装置付きの造波装置を設置し、長さ 50 m・幅 60 cm・深さ 1.2 m の 2 次元造波水路に、1/50 勾配の斜面とアクリルで製作した消波構造物を据え付けて実験を行った。水槽内の水位測定には容量式波高計を図-2 に示すように 7 台設置

* 正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所

** 正会員 Ph.D. 五洋建設(株) 技術研究所

*** 正会員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所

し、サンプリング周波数を 20 Hz として計測した。反射率は、波高計 No. 3~5 で測定された時系列の水位波形を用いて、合田ら (1976) による入反射分離推定法により評価した。データ収録は造波開始から 120 秒間とし、反射率算定に用いるデータは造波板による再反射の影響を排除するため、入射波が堤体に到達してからの 25.6 秒間とした。また、模型縮尺はこの実験水路にて実験可能な波浪条件を考慮し、50 分の 1 に設定した。

(2) 実験条件

実験は表-1 に示す条件の規則波を用いて行った。実験に使用した消波構造物は図-3 に示すように、消波構造物の遊水室幅 (B2) を透水室幅 (B1) に対して $1/1 \cdot 1/2 \cdot 1/4 \cdot 1/8$ に 3 種類変化させた Type.1, 片面スリットケーソンの Type.2, 片面スリットケーソンの中にレキ材を投入した Type.3 の計 3 タイプとした。また、レキ材の流出を防止するため、スリットと隔壁孔には金属製のネットを張った。なお、透水室内に投入したレキ材は現地スケールで 30~150 cm 程度を想定しており、実験では粒径 1~3 cm のレキ材を用いている。構造物は現地

表-1 入射波条件

ケース名	周期 (s)	波長 (m)	波高 (m)
Case. 1	30 (4.24)	264 (5.28)	0.5 (0.01)
Case. 2	40 (5.66)	353 (7.06)	
Case. 3	50 (7.07)	442 (8.84)	
Case. 4	60 (8.49)	530 (10.6)	
Case. 5	70 (9.9)	619 (12.38)	

() は実験スケール

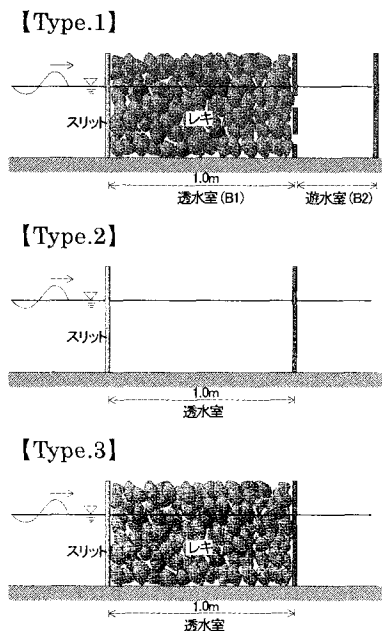


図-3 消波構造物とその諸元

スケールで透水室の幅を 50 m, 設置水深を 8 m と想定し、実験ではそれぞれ 1.0 m, 0.16 m とした。スリットは断面 2 次元の数値解析が可能な様に横スリットとし、開口率を 0.5 に設定した。

(3) 実験結果

スリットケーソン (Type.2) とレキ材の有無および粒径 (Type.3) による消波効果を比較するため、周期と反射率の関係を図-4 に示す。Type.2 および Type.3 ともに周期が短いほど高い消波性能を示しているが、これは堤体幅が実験ケースの中で最も周期の短い 30 秒における波長の 1/4 程度に近くなるためであると考えられる。また、今回使用したレキ材の中では、粒径 (d) が大きいほど反射率は低下している。

次に、遊水室幅の変化 (Type.1) による消波効果を比較するため、粒径 3 cm のレキ材を用いた場合の周期と反射率の関係を図-5 に示す。Type.1 は他のタイプと比較すると高周期帯の消波性能が高く、反射率として 0.7 弱に抑えることができた。また、遊水室幅を透水室幅に対して、 $B2/B1=1/1, 1/2, 1/4, 1/8$ と変化させた場合、 $B2/B1=1/4$ のケースが最も効果的な消波性能を示した。なお、周期 60 秒を境に高周期帯で反射率が上昇する傾向にあり、消波したい長周期波の周期帯によっては透水室幅を変化させる必要があると考えられる。

4. 数値解析による検証

(1) 構造物係数の設定

数値解析による検証は VOF 法を用いた数値波動水路 (CADMAS-SURF) で行った。CADMAS-SURF の基礎

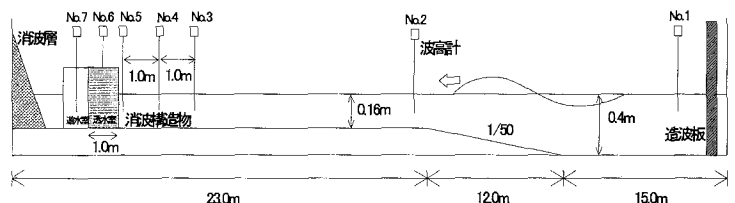


図-2 実験装置

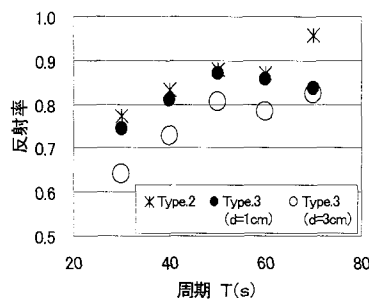


図-4 Type.2 および Type.3 の反射率

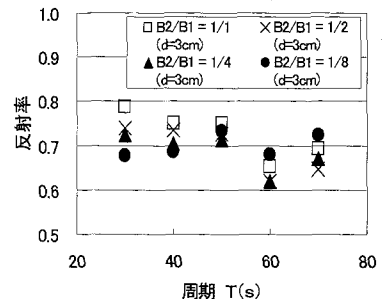


図-5 Type.1 の反射率

方程式は、透過性構造物を取り扱えるようにするため、Navier-Stokes 方程式がポーラスメディアモデルに基づいて拡張されており、慣性係数 (CM)・抵抗係数 (CD)・空隙率 (E) 等の構造物係数を適切に設定することにより、本消波構造物におけるレキ層を表現できる。そこで、図-6 に示すような環流水槽を用いた透水試験を行い、水理模型実験と CADMAS-SURF による数値実験とで同程度の透水係数が得られる様に構造物係数を設定した。

(2) 解析条件

入射波条件は水理模型実験と同じとし、Type.1 について解析を行った。消波構造物の遊水室幅 (B2) を透水室幅 (B1) に対して $1/4 \cdot 1/6 \cdot 1/8$ の 3 種類、隔壁孔のパターンを図-7 に示すように実験で用いたパターンを含めた計 3 パターンとした。また、造波方法は造波ソースを用い、沖側境界は Sommerfeld の放射条件と減衰帯を設けることで、堤体からの反射波を吸収する無反射造波境界としている。解析領域の空間格子間隔 ($\Delta X, \Delta Y$) は図-8 に示すように、消波構造物周辺で密になるよう配置し、時間刻み幅は自動計算とした。数値解析で用い

た代表的な条件を表-2 に示す。

(3) 解析結果

数値解析の適用性を確認するため Pattern.1 について、実験結果と数値解析結果の周期による反射率変化を図-9 に示す。図-9 より、周期 60 秒の反射率に関して、数値解析はやや小さい値を示しているが、おおむね実験結果を再現しており、数値解析を用いた消波構造物の断面検討が可能であると言える。次に、自由水面位置に孔を開けた Pattern.3 と実験で用いた Pattern.1 とを比較した結果を図-10 に示す。図-10 より、パターンの違いによる有意な消波性能の違いは確認できない。これは、実港湾の潮位変動において、本構造物が安定的に消波効果を発揮することを示唆している。また、 $B2/B1=1/6$ のタイプは $B2/B1=1/4$ と $1/8$ の間の傾向を示しており、本解析条件の中では実験結果と同様、 $B2/B1=1/4$ が最も消波効果の高い断面であることが言える。なお、Pattern.2 の反射率は Pattern.3 と同様の結果であった。

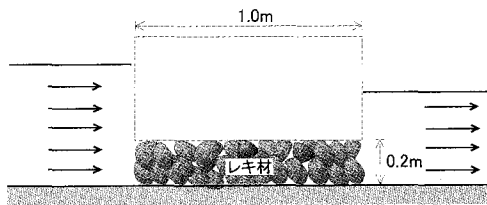


図-6 透水試験の概要

表-2 解析条件

造波モデル	造波ソース
ΔX (m)	0.01~0.1
ΔZ (m)	0.002~0.01
空隙率	0.45
C_D	1.0
C_M	1.2

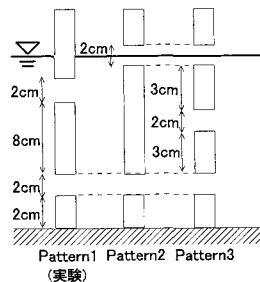


図-7 隔壁孔パターン

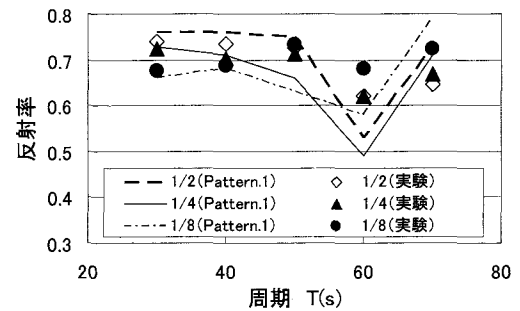


図-9 水理実験と数値解析 (Pattern.1) の比較

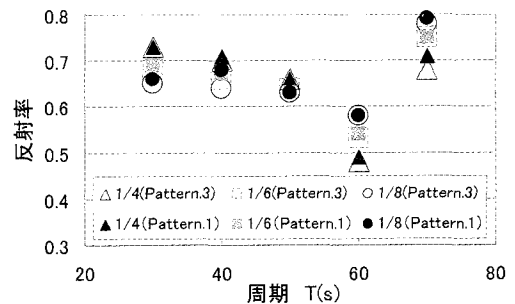


図-10 Pattern.1 と Pattern.3 の比較

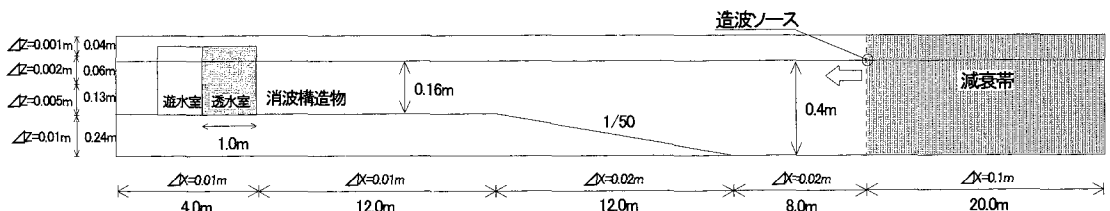


図-8 解析断面

5. 消波構造物の最適なレイアウトについて

(1) 消波構造物のモデル港湾への適応

消波構造物を対象港湾に適用する場合、設置位置・延長等について、港湾機能の確保・施工コストの観点から係留船舶の荷役稼働率が効果的に改善する様、適切な平面レイアウトを決定しなければならない。そこで、本研究で開発した消波構造物の平面的な消波効果と最適な設置位置の関係を明らかにするため、船体動揺量を評価指標として数値解析を行った。

(2) 波浪変形計算

計算に用いたモデル港湾の形状を図-11に示す。また、Madsenら(1991)の修正ブシネスク方程式(補正係数 $B=1/21$)を用い、表-3に示した計算条件で港内の波浪変形計算を行った。

入射波は長周期波を考慮した多方向不規則波とし、その周波数スペクトルの設定は、短周期波はB-M型スペクトル、長周期波はSand(1982)に従った。また、入射波の時系列は藤畑ら(1998)を参考に作成した。

港内の岸壁は直立壁で反射率1.0に、港外側は消波ブロックを想定して反射率0.4に、岸側は反射率0.2になるようスポンジ層を設定した。消波構造物の反射率は実験結果を参考に幅50m、周期60sで反射率0.7程度になるように設定した。

以上の条件で、図-12に示す6ケースの位置に消波構造物を設置した場合と消波構造物がない場合の7ケースの波浪変形計算を行った。図-13に消波構造物がない場合の周波数帯毎の有義波高分布図の一例を示す。

(3) 船体動揺量の算出

短周期波と長周期波が共存した波浪条件を扱うため、久保ら(1988)のメモリー影響関数を用いた動揺解析手法にて、図-12に示す11点の船体動揺量を算出した。計算対象船舶は、上田ら(1994)を参考に10,000DWTの一般貨物船を採用した。対象船舶の諸元を表-4に示す。

(4) 消波構造物設置位置と船体動揺量

船体動揺計算で求めた、各ポイントのSURGE, SWAY, の最大値を図-14, 15に示す。

図-14, 15より、今回計算したモデル港湾では、岸に対して鉛直方向の防波堤に消波構造物を設置した場合(CASE 5, 6)に、港内全体の船体動揺量を抑える効果があると考えられる。さらに詳細に見ると図-12に示したポイント1～3の地点の動揺量を低減するには、CASE 5と6の配置が有効である。最も荷役作業が行われると考えられる岸側のポイント4～8には、CASE 3と4が船体動揺量を低減させる効果が大きいことが明らかになった。この岸側のポイントでCASE 3と4の動揺量に大きな差がないため、経済性を考慮するとCASE 3が最も適

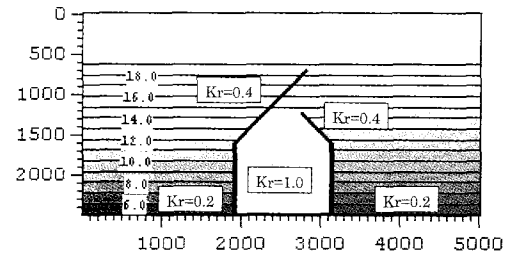


図-11 計算に用いたモデル港湾の地形条件

表-3 計算条件

ΔX (m)	10.0	$H_{1/3}$ (m)	2.0
ΔY (m)	10.0	$T_{1/3}$ (s)	8.0
Δt (s)	0.2	θ (°)	0
cal time (h)	1.0	S_{max}	25

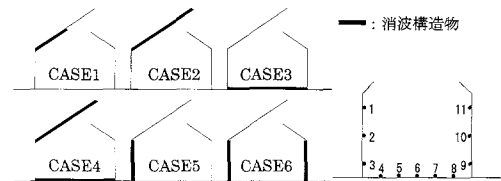


図-12 消波構造物の設置位置と動揺量算出位置

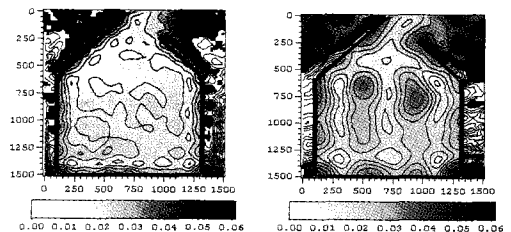


図-13 周波数帯毎の有義波高分布例(対策なし)
(左:0.025~0.045 Hz, 右:0.016~0.025 Hz)

表-4 動揺量計算対象船舶の諸元

トン数	DWT	10,000
全長	m	137
垂線間長	m	127.5
幅	m	19.9
深さ	m	11.1
喫水	m	4.32
排水量	kN	69,854

した配置と考えられる。ポイント9～11では、CASE 6が最も動揺量低減効果大きい。

(5) 長周期波対策工評価方法

本検討では、モデル港湾に対する消波構造物の効果を評価する指標として船体動揺量を用いた。実際の港湾に消波構造物を適応する際には、荷役稼働率を指標に用いることが有効であると考えられる。以下に荷役稼働率を

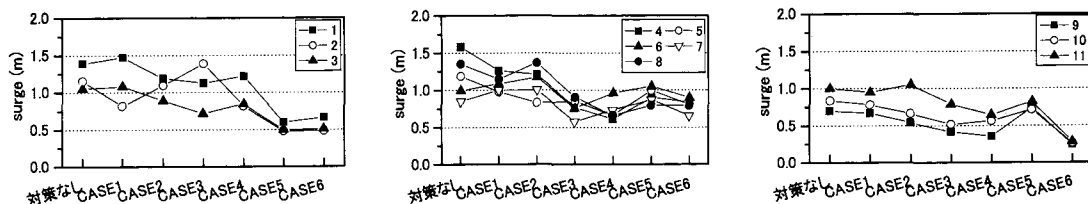


図-14 最大船体動揺量 (SURGE)

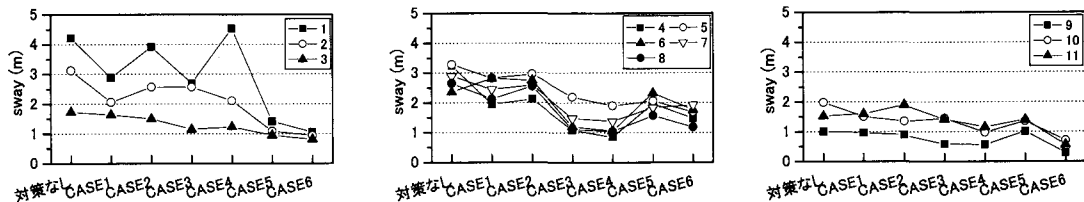


図-15 最大船体動揺量 (SWAY)

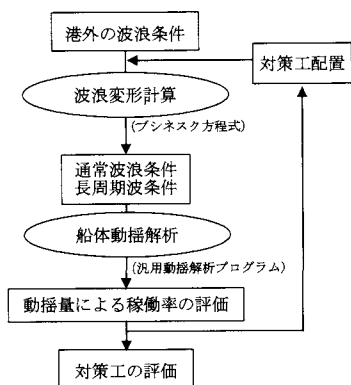


図-16 長周期波対策工評価フロー

算出する手順を示す。

まず始めに港外波浪の頻度分布等より入射波条件をいくつか決定し、精度良く長周期波を評価できるブシネスク方程式を用いた港内波浪変形計算を行う。その結果を外力とし、長周期波の影響を考慮した動揺解析を行うことで、精度の高い船体動揺量を求めることができる。そして、対象とする船舶の荷役限界動揺量と、港外波浪の頻度分布より決定した条件毎の船体動揺量を用いることで荷役稼働率を求めることができる。

ここで長周期波対策工評価フローを図-16に示す。船舶係留位置での荷役稼働率とその経済性を比較することで、長周期波対策工の最適な平面配置を決定することが可能となる。

6. おわりに

本研究において、全幅60～65mと比較的小規模で効

果的な消波構造物を開発した。反射率は0.7弱と長周期波に対する消波構造物の消波性能としては画期的であり、数値解析により最適な断面形状の検討が可能であることを示した。また、モデル港湾に対して消波構造物の最適な平面配置の評価方法を数値的に検討し、長周期波対策工の最適な平面配置を決定するフローを示した。

参考文献

- 上田 茂・白石 悟・大島弘之・朝野恒平 (1994): 係留船舶の動揺に基づく荷役限界波高の提案および稼働率, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 916-920.
- 久保雅義・斉藤勝彦・下田直克・岡本俊策 (1988): 岸壁前面係留浮体の不規則波による船体動揺の時系列解析について, 海岸工学論文集, 第35巻, pp. 687-691.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 白石 悟・久保雅義・上田 茂・榊原繁樹 (1995): 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 941-945.
- 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男 (1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 951-955.
- 平石哲也・白石 悟・永井紀彦・横田 弘・松渕 知・藤咲秀可・清水勝義 (1997): 長周期波による港湾施設の被害特性とその対策工法に関する調査, 港湾技研資料, No. 873, 39 p.
- 平石哲也・永瀬恭一 (2003): 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 801-805.
- 藤畑定生・秦 禎勝・森屋陽一・中山晋一・関本恒浩 (1998): 現地観測による港内長周期波浪流速特性とその予測方法に関する検討, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 306-310.
- Madsen, P. A., R. Murray and O. R. Sorensen (1991): A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics, Part 1, A slowly-varying bathymetry, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388.
- Sand, S. E. (1982): Long waves in directional seas, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 195-208.