

多方向不規則波に対する堤頭部上の流速特性と被災パターン

松 見 吉 晴*・大 野 賢 一**

1. 緒 言

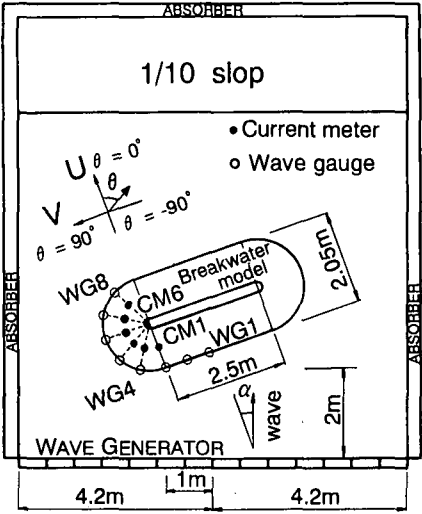
外海に面した防波堤の堤頭部の安定性は、例えば Jensen (1984) や Vidal ら (1991) の一方向の直角および斜め入射波の実験結果によると、波の反射、回折、屈折および浅水変形等の影響により、堤頭部の被覆捨石材の安定重量が堤幹部の約 1.5~4 倍になることが報告されている。さらに多方向不規則波浪場における堤頭部では、上記の波変形以外に波の方向分散性の影響により、局所的に一方波浪場での作用波高や作用流速より大きくなる可能性がある。Matsumi ら (1994) による多方向波浪での堤頭部の安定性に関する実験では、多方向不規則波における堤頭部の被災が、一方向不規則波の場合より大きくなるケースが確認されている。この研究において、特に堤頭部中央部から背面の被災パターンが一方向と多方向不規則波では異なり、その原因が堤頭部に発生する非常に強い流れと定性的に関係づけられている。

本研究は、多方向および一方向不規則波における島堤の堤頭部上およびその周辺の波浪場の水位変動および流速変動の計測実験より、まず多方向および一方向波浪に対する堤頭部における波浪場の空間的な変化特性を調べ、ついで計測された作用流速の大きさとその方向を考慮し、捨石の安定性について堤頭部の斜面勾配をも考慮に入れた考察を行うと共に、先の堤頭部の被災実験の結果とリンクしながら被災パターンについて検討したものである。

2. 実験の内容

2.1 実験装置

実験は、図一に示す 14 枚の造波板 (幅 60 cm) からなるスネーク型の多方向不規則造波水槽 (9 m×16 m×0.6 m) を用いて行った。なお、造波周波数帯は 0.2~5 Hz の範囲である。水槽側壁には、ステラシートの 2 層構造からなる遊水部をもつ消波工が設けられており、その反射率は 0.2 以下である。また、岸側には 1/10 のスロープ



図一 島堤模型の配置状況

が消波工として設置されている。

島堤モデル周辺の水位変動は、図一に白丸の印で示す 8 ヶ所で測定された。その内、3 本の波高計は堤幹部外縁に 50 cm 間隔で設置され、残りの 6 本は堤頭部外縁に 30°間隔で設置された。また、堤頭部上の流速変動は、図一において黒丸の印で示す 6 ヶ所で平面 2 成分 (u , v) 電磁流速計を用いて測定された。これらの位置は、堤体の静水面位置から水平方向に 10 cm 離れた位置である。流速計の水槽の座標系に対する設置誤差角は、島堤模型を設置していない状態で、一方向規則波による予備実験より求めている。

島堤モデルは、鉄筋丸棒 (6 mm 径) のフレーム構造で、コア部と 2 層被覆捨石層より構成されている。堤幹部および堤頭部のサイズは図一に示すとおりである。堤体の高さは、水深 30 cm で越波が起らないように、50 cm に設定された。堤頭部および堤幹部の法面勾配は 1:2 である。コア部および被覆捨石の材質とサイズは、それぞれ碎石 2.5~5 mm および碎石 40~60 mm である。本実験では、一方向と多方向波浪における堤頭部上の流速変動の相違を明確に測定するため、堤頭部の被災から生じる断面形状変化に伴う波浪場の変動要因を削除する

* 正 会 員 工 博 島取大学助教授 工学部社会開発システム工学科
 ** 学生会員 島取大学大学院 工学研究科社会開発システム工学専攻

目的で、堤体全体を透過性防護ネットで覆って捨石の移動を拘束している。

島堤模型の配置に当たっては、堤体周辺の多方向波浪場が均一になる水域に設置する必要がある。水槽のサイズの関係から、本実験では、筆者らの多方向波浪場の計算モデル (1994) より得られた造波有効領域内に、堤頭部および堤幹部前面部の大部分が位置するように決定した。また、造波板からの再反射を出来る限り避けるため、島堤模型は図-1に示すように造波板に対して20°傾けて設置された。

2.2 実験条件および方法

本実験に用いた波浪条件を表-1に示す。本実験では、堤頭部上の流体運動に及ぼす直角と斜め入射の影響に注目しているため、主波向 α は0°と-15°の2種類を設定した。有義周期 T_p は1sと1.4sの2種類変化させた。各入射波波長 L に対する堤幹部長 L_t および堤頭部の直径 D の比は、それぞれ表-1に示すとおりである。

本研究では、全ケースの有義波高を表-1の実験条件とほぼ同じ値に設定するため、フレーム構造の堤体を設置した条件で予備実験を行った。予備実験より最終的に設定された有義波高 H_{s-n0} を表-2に示す。なお、 H_{s-n0} の値は、図-1に示す8ヶ所の波高計より得られた有義波高の平均値である。全ケースの計測は、造波開始後20分間で、サンプリングタイムが48msで行われた。

3. 堤頭部での波浪の変化特性

堤頭部周辺における有義波高 H_s の空間的な変化を図-2に示す。全ての図に共通して波高計WG1からWG6の位置 (堤頭部の中央先端) までの有義波高の空間変化には、島堤模型の長さが有義波長の約3倍以下であるため、有義周期および波向によって堤体前面に沿って波高分布が変動すること (合田, 1991) から、大きな変動が見られる。堤頭部背面のWG7とWG8の位置では、 $T_p=1s$ の場合、主波向に関係なく一方向および多方向不規則波共に、ほぼ同程度の有義波高になっている。しかし、 $T_p=1.4s$ の場合は、斜波条件下で有義波高がわずかに増大している。この $T_p=1s$ と $T_p=1.4s$ におけるWG7とWG8の波高の変化は、入射波の有義周期と回折

表-1 実験条件

周波数スペクトル	JONSWAP ($\gamma=3.3$)
方向関数	光易型 ($S_{max}=10, 20, \infty$)
主波向 (α)	0°, -15°
造波信号のサイクル時間	20分間
有義波高 (H_{m0})	6.0 cm, 8.5 cm
有義周期 (T_p)	1.0 s, 1.4 s
水深 (h)	30cm
造波信号中の波の数	1440 ($T_p=1.0$ s), 1028 ($T_p=1.4$ s)
D/L	1.49 ($T_p=1.0$ s), 0.95 ($T_p=1.4$ s)
L_t/L	1.82 ($T_p=1.0$ s), 1.16 ($T_p=1.4$ s)

表-2 実験波の設定有義波高

	H_{m0}	H_{s-n0} ($T=1.0$ s)	H_{s-n0} ($T=1.4$ s)	H_{m0}	H_{s-n0} ($T=1.0$ s)	H_{s-n0} ($T=1.4$ s)
$S_{max}=\infty$, $\alpha=0^\circ$	6.0	6.01	6.17	8.5	8.68	8.42
$S_{max}=\infty$, $\alpha=-15^\circ$	6.0	6.12	6.15	8.5	8.65	8.66
$S_{max}=20$, $\alpha=0^\circ$	6.0	5.99	5.99	8.5	8.75	8.70
$S_{max}=20$, $\alpha=-15^\circ$	6.0	6.16	6.16	8.5	8.77	8.49
$S_{max}=10$, $\alpha=0^\circ$	6.0	6.01	6.05	8.5	8.63	8.40
$S_{max}=10$, $\alpha=-15^\circ$	6.0	6.13	5.94	8.5	8.70	8.52

波の関係、すなわち周期が短いほど回折し易いことと、多方向不規則波の場合はそれぞれの成分波が回折によりその方向が収斂されることによるものと考えられる。堤幹部から堤頭部に沿う波高分布に及ぼす波の方向分散性の影響は、本実験条件では堤頭部中央部より前方で主に現れることになる。

次に、計測された流速成分 u と v の時系列データより、堤頭部上の合成流速の大きさ v_r とその作用方向 θ の結合頻度分布について、一方向と多方向不規則波 ($S_{max}=\infty, 10$) の結果を示したのが図-3である。この図は、 $\alpha=0^\circ$, $T_p=1s$, $H_{m0}=6cm$ の場合のCM1, 2 (堤頭部前面), CM4 (中央) およびCM6 (背面) の各位置における時系

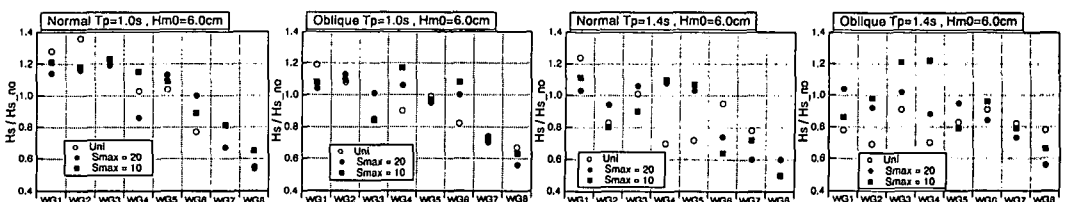


図-2 堤頭部周辺の波高の空間変化

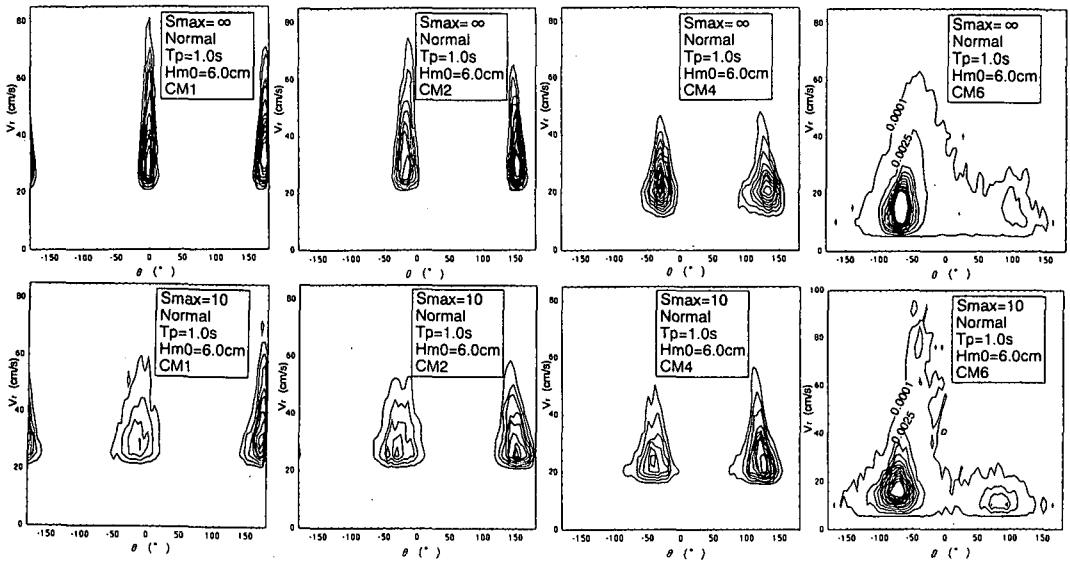


図-3 堤頭部上の合成流速の大きさとその方向の結合頻度分布

列合成流速の最大値から1/3最大値までのものについて、流速は5 cm/s間隔で、方向は5°間隔で求められた結合度数分布を1/3最大流速以上の総個数で無次元化した相対頻度分布を示したものである。図中の等相対頻度線の初期値は0.0025で、その増分は0.0025である。なお、CM6については0.0001の等相対頻度線も併記している。各図の紙面向かって左側の等相対頻度線群が順流の合成流速を示し、右側が戻り流れを表している。これらの図より、合成流速の卓越方向は、堤頭部上での波の屈折、回折によって、堤頭部背面に進むに従って θ のマイナス方向へシフトし、一方向不規則波と多方向不規則波における卓越方向の差は各位置でほとんど認められない。また、一方向不規則波の場合、成分波の周期毎に回折が異なることから、等相対頻度線群の裾野が堤頭部背面でかなり拡がることわかる。

合成流速の大きさに及ぼす波の方向分散性の影響について、相対頻度0.0025における順流と戻り流れのそれぞれの最大流速の空間変化を一方向と多方向不規則波で比較すると、順流では明らかに一方向不規則波の場合が堤頭部前面で大きな値をとるが、戻り流れには両者の違いは認められない。また、他の実験ケースについても、同様の比較を行った結果、まず順流方向の合成流速については、 $T_p=1.4$ s, $\alpha=0^\circ$ の場合は堤頭部背面で急激な増大がみられ、 $\alpha=-15^\circ$ の場合は堤頭部全域で一方向不規則波の合成流速が大きかったことがわかった。ついで、戻り流れの方向の合成流速については、 $T_p=1$ sの結果と同じ変化を示し、一方向と多方向不規則波の間に顕著な差は認められなかった。

次に、堤頭部上の流速場に及ぼす波の方向分散性を、

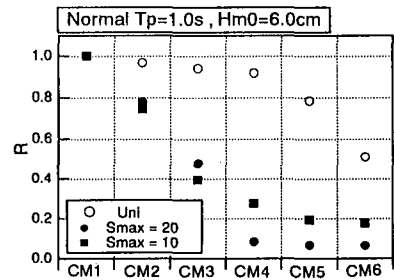


図-4 合成流速の空間的な相関関係

合成流速の空間的な相関係数 R についてCM1を基点として調べた結果の1例として、 $T_p=1$ s, $\alpha=0^\circ$, $H_{m0}=6$ cmのケースを図-4に示す。多方向不規則波の場合、他のケースも含めて主波向に関係なくCM3の位置から相関係数が急激に減少する。この結果と、先の合成流速の空間変化において多方向不規則波の場合、堤頭部前面から中央部域で合成流速に顕著な変動が認められなかったことを考慮すると、多方向不規則波浪場では、堤頭部中央部に対して波が直撃することが推察できよう。

4. 堤頭部の捨石の安定性に関する考察

一様斜面上の捨石の安定性は、作用流速の方向が斜面の上りと下りの方向では大きく異なり、また斜面の勾配によっても異なる。堤頭部の場合、同じ位置であっても、合成流速の作用方向によっては、上り斜面になったり下り斜面になったり、またその斜面の勾配も変化する。従って、堤頭部の安定性は、特に流速の作用方向を考慮して検討する必要がある。ここでは、実験より得られた合

成流速の大きさと方向を基に、堤頭部の捨石の安定性を検討する。

4.1 堤頭部の捨石の平衡関係式

ここでは、堤頭部の捨石の移動限界流速を、捨石に作用する流体力と抵抗力との平衡関係から誘導する。図-5に示すような堤頭部上の捨石Aに合成流速がx軸に関して θ の角度で、大きさ v_r で作用しているとする。合成流速の作用方向に対する堤頭部の鉛直断面の上面形状は、堤頭面を円錐面と仮定すると双曲線になる。ここで、同図に示すような双曲線に沿って配列された半径 r の捨石の安定条件について、点Oに関する回転モーメントを考えると、次式の平衡関係式が得られる。

$$\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) W [\cos a_t + f \sin a_u [1 + \cos (a_t - a_u)]] \\ = F \left(\sin a_t + \frac{b}{r} \right) \quad (1)$$

ここに、 W は捨石の空中重量、 ρ および ρ_s は流体および捨石の密度、 f は捨石間の摩擦係数、 b は流体力 F の作用位置、 a_u および a_t はそれぞれ捨石Aと捨石B、Cの中心を結んだ直線と水平軸とのなす角である。本研究では、流体力として捨石の断面積に比例する抗力のみを考え、 F を次式で表されるものと仮定する。

$$F = m' \rho \pi r^2 v_r^2 \quad (2)$$

ここに、 m' は係数である。式(2)を式(1)に代入して整理すると、次式のように表される。

$$\frac{v_r^2}{gr} = \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) [\cos a_t + f \sin a_u [1 + \cos (a_t - a_u)]]}{\frac{3}{4} m' \frac{\rho}{\rho_s} \left(\sin a_t + \frac{b}{r} \right)} \quad (3)$$

ここに、 g は重力加速度である。式(3)において未知数は、 f 、 m' 、 r 、 b で、各捨石間の接地角 a_u および a_t は堤頭部の斜面勾配より次のように与えられる。

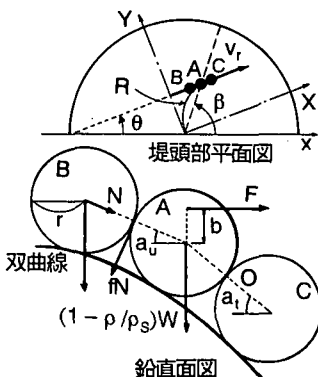


図-5 堤頭部上の捨石に作用する合成流速と力

4.2 堤頭部の斜面勾配の誘導

堤頭部面は、円錐面と仮定していることから、図-5に示すXY座標系に対して次式で与えられる。

$$Z = a - \frac{1}{2} \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

ここに、 a は堤頭部中心の高さ、 Z は底面からの距離である。堤頭面の点Aの座標は、図-5よりXY座標系で $(R \cos (\beta - \theta), R \sin (\beta - \theta))$ となる。そして、式(4)を X について偏微分して点Aの座標を代入すると、点Aでの合成流速の作用方向に対する堤頭部面の傾きが次のように与えられる。

$$\text{傾き} = -\frac{1}{2} \cos (\beta - \theta) \quad (5)$$

各捨石間の接地角 a_t と a_u は、便宜的に等しいと仮定すると、それぞれ次式で与えられる。

$$a_t = a_u = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \cos (\beta - \theta) \right\} \quad (6)$$

4.3 捨石の移動限界流速

式(6)を式(3)に代入して整理すると、捨石の移動限界流速 v_{rc} は最終的に次式で与えられる。

$$\frac{v_{rc}^2}{gr} = \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) [1 + f \cos (\beta - \theta)]}{\frac{3}{4} m' \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \left[\frac{\cos (\beta - \theta)}{2} + \frac{b}{r} \sqrt{1 + \left(\frac{\cos (\beta - \theta)}{2} \right)^2} \right]} \quad (7)$$

また、斜面が上り勾配の場合は、式(7)の分子の摩擦係数 f の前の係数をマイナスに換えるだけで与えられる。

式(7)に含まれる未知数の内、捨石の粒径 r については、本実験で対象とした有義波高および有義周期に対応した安定重量から与えられる。本研究では、捨石の安定重量をVan der Meerの設計公式(1987)を用いて計算した。その際、damage levelの S の値は、本研究が捨石の移動限界を目的とすることから、 $S=1$ を採用した。一方、作用流体力の評価式に含まれる係数 m' 、流体力の作用位置 b および捨石間の摩擦係数 f の値は、ここでは便宜的に $m'=1$ 、 $b=0.5r$ 、 $f=0.4$ と仮定した。

4.4 合成流速からみた堤頭部の安定性

図-6は、各計測位置の合成流速の時系列結果に対して、式(7)より計算した捨石の移動限界流速を越える発生頻度を示したもので、縦軸には全時系列のデータ数で無次元化された相対発生頻度 P をとっている。これらの図より、CM6の位置における P は、有義周期が長い $T_p=1.4$ sの方が一方向および多方向不規則波共に大きい値を示す。このCM6の位置の P の値を主波向について比較すると、特に $T_p=1$ sの場合、有義周期が短いため、主波向の違いによる回折波の影響があらわれ易いこ

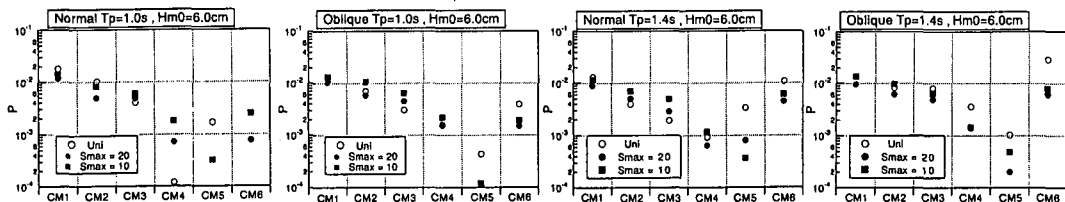


図-6 堤頭部の捨石の移動発生頻度

とから、一方向不規則波の斜め入射における P の値が極端に大きくなることがわかる。一方、多方向不規則波の場合、この現象が認められないことから、本実験条件の範囲では、堤頭部の安定性に及ぼす多方向不規則波の主波向の影響は弱く、むしろ S_{max} の値による差が大きく、波の分散性の影響が強いと言えよう。

一方向と多方向不規則波に対する堤頭部の安定性の違いは、堤頭部前面では両方の P の間に顕著な差がないが、堤頭部中央部(CM4)から背面にかけて両者の差が明確に現れ出す。例えば、 $T_p=1s$ の $\alpha=0^\circ$ 場合、CM6の位置では作用流速の方向が $-60^\circ < \theta < 120^\circ$ の範囲で斜面が下り勾配になり、図-3のCM6の両図からも明らかなように、多方向不規則波の P が極端に大きくなっている。

Matsumiら(1995)の堤頭部の被災実験では、有義周期1.7s(本実験の $T_p=1.4s$ に対応する)の直角入射条件の場合、堤頭部中央から背面部にかけての被災パターンが一方向と多方向不規則波では異なり、前者の場合は一様な被災パターンになり、後者の場合がCM3とCM5付近にスポット状の被災が生じるパターンになった。これらの被災パターンを図-6の $T_p=1.4s$ の直角入射の結果とリンクすると、一方向不規則波の結果にはこの区間で P の大きな変化はないが、多方向不規則波の P は堤頭部背面に向かって減少し、CM6の位置で急激に増大する。このような P の空間変化の違いが被災パターンに関係したものと推測できる。

先の被災実験で得られた堤頭部の捨石の初期移動個数を、前面(FH:CM1-CM3)、中央部(MH:CM3-CM5)および背面(BH:CM5-)に区分して表-3に示す。なお、ここでは捨石の移動個数を、初期位置から捨石1個分以上移動したもので定義している。表-3と図-6の一方向および多方向不規則波($S_{max}=10$)の P の比較より、本研究で定義した捨石の移動限界式が捨石の移動個数の大小を定性的に良く評価していることが確認できる。

5. 結 語

本研究は、多方向および一方向不規則波浪場での島堤

表-3 堤頭部の捨石の初期移動個数

$T_p(s)$	Wave Condition	FH	MH	BH
1.0	Normal Uni	4	3	0
	Normal Multi	0	5	2
1.0	Oblique Uni	5	8	3
	Oblique Multi	0	7	2
1.4	Normal Uni	2	7	2
	Normal Multi	4	5	4
1.4	Oblique Uni	9	4	2
	Oblique Multi	2	1	0

堤頭部における波浪特性に関する実験的検討より、作用流速とその方向に伴う堤頭部の斜面勾配の変化を考慮した捨石の移動限界流速に関する算定式を提案し、多方向および一方向不規則波浪場における堤頭部の安定性を検討した。捨石の移動限界流速の算定式は、定性的に実験結果を良く評価することが確認できた。しかし、定量的には、算定式に含まれる未知数、特に作用流体力の算定方法とその作用位置について問題が残されており、今後さらに検討を進めていく予定である。

参 考 文 献

- 合田良実(1991): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 77-78.
- 松見吉晴・E. P. D. Mansard・大野賢一(1994): 多方向波浪場における防波堤周辺の波動場の計算モデル, 海岸工学論文集, 第41巻(2), pp. 131-135.
- Jensen, O. J. (1984): A Monograph on Rubble Mound Breakwaters, DHI, 116 p.
- Matsumi, Y., E. P. D. Mansard and J. Rutledge (1994): Influence of wave directionality on stability of breakwater heads, Proc. 24th ICCE, in printing.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layers design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 219-239.
- Vidal, C., M. A. Losada and R. Medina (1991): Stability of mound breakwater's head and trunk, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 117, No. 6, pp. 570-587.