

不規則波の遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響に関する実験的研究

間 瀬 肇^{*}・土居 宏行^{**}・岩 垣 雄 一^{***}

1. ま え が き

海浜における風波の遡上波や戻り流れは、海浜変形を起す重要な外力の一つである。また、波の遡上高さは海岸堤防・護岸の天端高さや養浜工の高さを決定する要因であり、岸沖漂砂や沿岸漂砂の陸側の境界でもある。

従来の海岸堤防の法勾配は急なものがほとんどで、急勾配斜面に対する不規則波の打上げ高の実験的研究は非常に多い。急勾配の堤防前面の砂浜は暴風時に失われやすいこと、また、海岸の景観や利用が悪くなることなどから、最近では緩勾配の堤防が推奨されるようになってきた。しかし、緩勾配の堤防あるいは自然海浜の前浜勾配に近い緩斜面に対する不規則波の遡上特性に関する研究は少ない。

緩斜面になると、遡上波は前波の戻り流れのために遡上高が小さくなったり¹⁾、また、後続の遡上波に吸収されるようになる。戻り流れの時系列や遡上波相互の干渉は、汀線に襲撃する波の時系列に直接関係しているはずであるから、同じ有義波高・周期およびパワースペクトルを持った不規則波であっても、波の連なり状態 (wave group) によって、遡上特性が異なることが考えられる。

本研究は、緩勾配斜面を対象として、パワースペクトルは同じでも wave group が異なる不規則波を用いて遡上の実験を行い、不規則波の遡上特性を調べるとともに、wave grouping の影響について検討するものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は、京都大学工学部土木系教室地下実験室に設置されている長さ 27 m、幅 50 cm、深さ 70 cm の両面ガラス張り水槽で行った。この水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置されている。

遡上計は、現地波浪観測用の容量式波高計 (電子工業) の容量線 (長さ 200 cm、直径 2.2 mm のテフロン線)

を長さ 230 cm、幅 3 cm、深さ 2 cm のアルミ製の箱の中に縦方向に張り、水位検出器に接続したものである。容量線は途中でたるまないようにばねで引張るとともに、0.2 mm のナイロン糸で2か所支えた。アルミ製の箱の深さは中詰めを入れて1 cm とした。これを模型海浜 (アルミ製斜面) の中央に沿った溝にはめ込み、斜面表面と容量線を同じ高さになるようにした。

遡上計の検定は、遡上計を斜面に沿って上下させ、変位と出力との関係および線型性を確かめた後、実際に規則波を起し、目視による遡上高さと遡上計の出力結果を比べる方法を用いた。図-1 はその結果を示したものであり、横軸は目視による遡上高、縦軸は遡上計による値である。なお、斜面勾配は 1/10 の場合である。この図から、両者の相関係数は 0.99 であり、良く一致していることから、十分に遡上高を計測し得ることがわかった。

用いた不規則波は、岩垣ら²⁾による Pierson-Moskowitz 型スペクトルをもつようにシミュレートしたものであるが、同じスペクトルでも Case 1 と 2 の異なった2種類の wave group 特性を持つような不規則波を発生させた。そのピーク周波数は 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 および 1.2 Hz (Case 1 のみ) である。波高は不規則波発生機の外部入力端子の gain で変えることができるので、

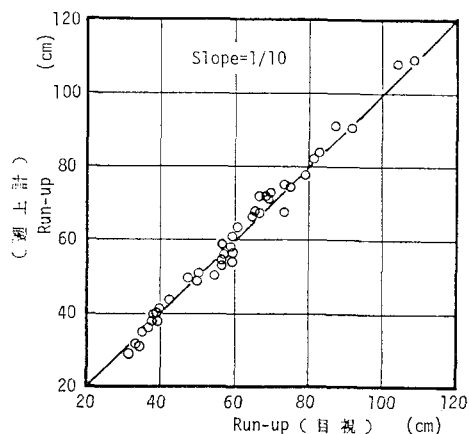


図-1 目視と遡上計による遡上高の比較

^{*} 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

^{**} 正会員 工修 (株)神戸製鋼所

^{***} 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

ピーク周波数が 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 Hz のものについては 3 通り, 他は 2 通りに波高を変えた。

斜面勾配は 1/5, 1/10, 1/20 および 1/30 の 4 種類であり, 一つの斜面勾配について, 30 ケースの遡上の実験を実施した。

一様水深部の水深は, 斜面勾配が 1/30 では 43 cm, 他は 45 cm とした。容量式波高計の設置水深は 5, 10, 15, 20, 45 cm (斜面勾配が 1/30 では 40 cm) である。

記録は 14 チャンネルデータレコーダーに収録した後, サンプル間隔 0.04 sec で A-D 変換し, 解析に用いた。

3. 実験結果および考察

(1) 入射波の特性

各斜面勾配に対してピーク周波数が対応する実験ケースは, 同じ不規則波信号を用い, また, 同じ入力レベルで波を発生させたので, 入射波の有義波高・周期はほとんど同じになるはずであるが, 設置された斜面からの波の反射のため若干異なっている。とくに, 斜面勾配が 1/5 の場合, ピーク周波数が 0.4 Hz のケースは他の斜面勾配のものに比べて有義波高で約 1 cm 大きくなっている。

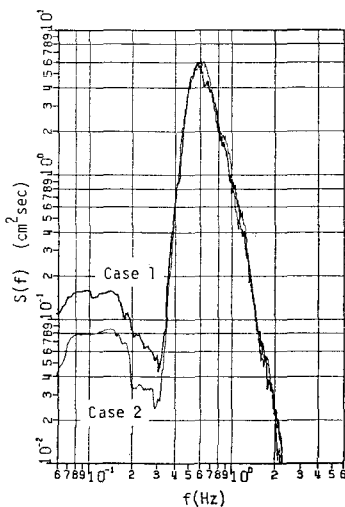


図-2 入射波のパワースペクトル

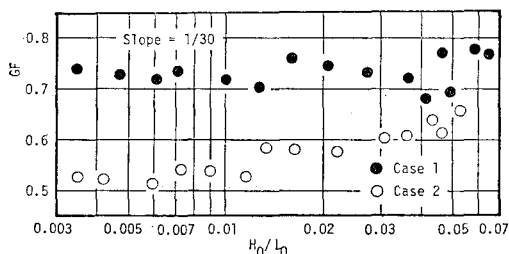


図-3 入射波の Groupiness Factor

図-2 は, ピーク周波数および有義波高は同じであるが, wave group 特性が異なる Case 1 と 2 のパワースペクトルを示した一例である。低周波数側で若干の差は見られるが, 主要部分はほとんど一致しているのがわかる。

図-3 は Case 1 と 2 の入射波の Groupiness Factor²⁾ GF の値を比較したものである。GF とは Funk-Mansard が提案した SIWEH (平滑化された波エネルギーの時間曲線) の変動の大きさを表す指標である。Case 1 では約 0.73, Case 2 では約 0.57 であるが, 沖波波形勾配によって変化している。とくに, 沖波波形勾配が 0.03 より大きくなると, Case 2 の GF は大きくなるが, この理由は明らかでない。

図-4 は, 入射波の波高の頻度分布に Weibull 分布をあてはめたときの母数 m の値を最尤推定法で求めた結果を示したものである。全体的に Case 2 の m は Case 1 より大きくなっており, また, GF と同様に沖波波形勾配によって変化している。

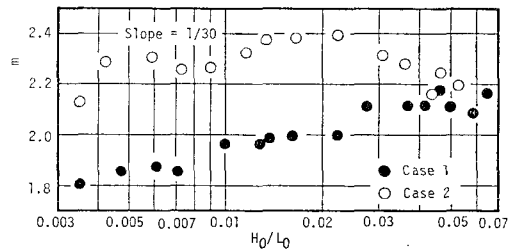


図-4 入射波の波高の頻度分布に Weibull 分布をあてはめたときの母数の値

(2) 遡上波の定義

波の定義法がいろいろあるように, 遡上波の場合も同様である。図-5 (a), (b) は crest 法と zero-up-cross 法で遡上波を定義したものである。zero-up-cross 法では crest 法に比べて 2 波少なくなっている。このように定義の仕方によって遡上波の数や代表遡上高が変わってくる。今回の実験結果から, 遡上波を zero-up-cross 法で定義し

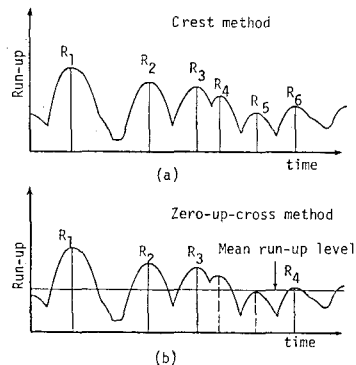


図-5 遡上波の定義法

た場合には, crest 法によるものに比べて, 波の数は斜面勾配によって 0.4~0.9 倍となり, 有義遡上高で約 1.1 倍, 平均遡上高で約 1.2 倍となる。

ここでは主に crest 法で整理した結果について考察する。

(3) 遡上波の数

ある波が陸へ遡上する時, 前波の戻り流れが大きければ遡上できず, また, 遡上して最大点に達する前に次の波に追い越されてしまう場合もあり, 遡上波の数は入射波の数より少なくなる。このことは遡上波の周期が入射波のそれより大きくなることを意味する。

図-6 は, このような観点から, 遡上波の数が入射波の数に対してどの程度減少するかを調べたものであり, 横軸は surf similarity parameter $\xi (= \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0})$, 縦軸は入射波の数に対する遡上波の数の割合 α である。実験結果を整理するにあたり, wave grouping による差はほとんどなかったで, まとめて図示している。この

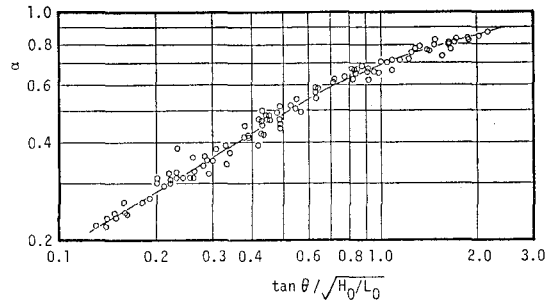
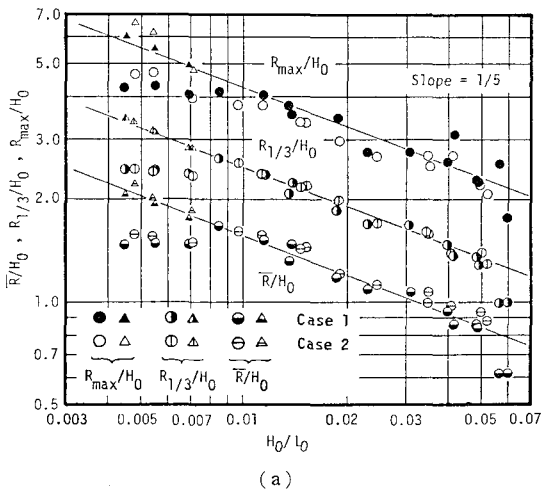


図-6 遡上波の数の入射波の数に対する割合

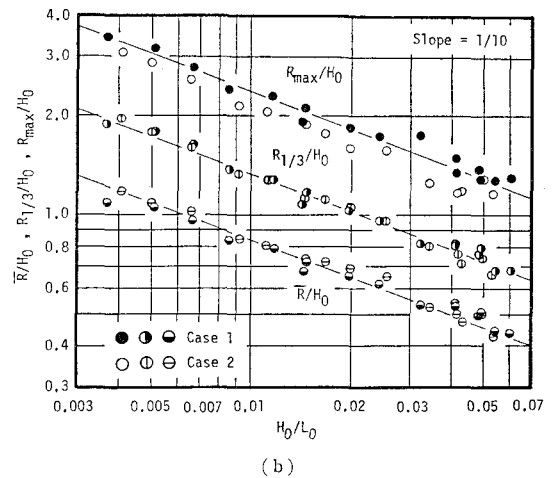
図から, ξ が小さいほど (斜面勾配が緩いほど, また沖波波形勾配が大きいほど), 遡上波の数が減少することがわかる。また, ξ が 3 以上になると, α がほぼ 1.0 となることが予想される。

(4) 沖波波形勾配および斜面勾配と相対遡上高

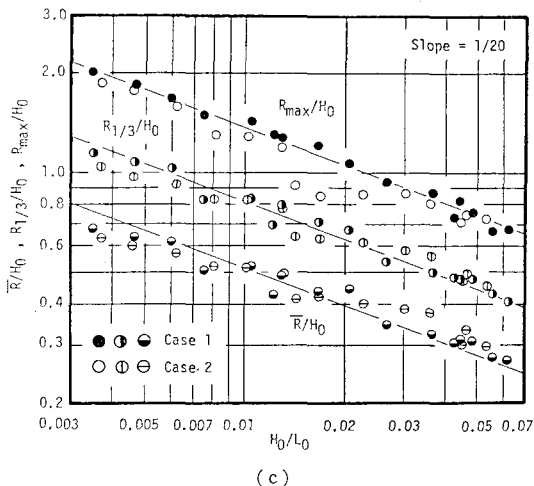
次元解析によれば, 不透水で滑面の場合の遡上高は次



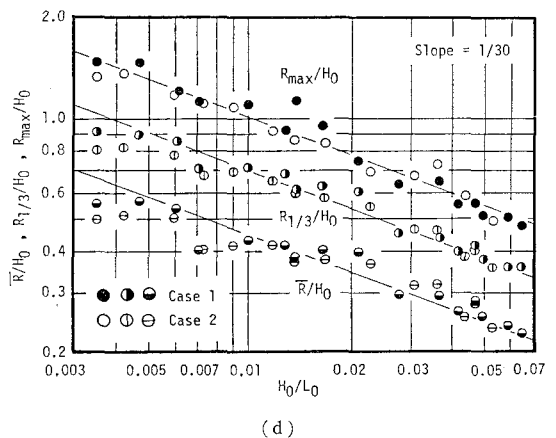
(a)



(b)



(c)



(d)

図-7 相対遡上高と沖波波形勾配の関係

のように表わされる。

$$\frac{R}{H_0} = f\left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \theta\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、これは $h_0/H_0 \geq 3$ の場合の式で、 h_0 は一様水深部の水深、 H_0 は沖波波高、 R は鉛直にはかった遡上高、 $\tan \theta$ は斜面勾配である。

Hunt³⁾ は、規則波の実験結果から、次式を提案した。

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

不規則波の遡上高について、式 (1) に基づいて考察する。なお、 H_0 は微小振幅波理論を用いて換算した沖波有義波高、 L_0 は有義波周期に対応する波長を用いる。

図-7 は、遡上波を crest 法で定義し、4 種類の斜面勾配について、沖波波形勾配と相対遡上高の関係を示したものである。図には wave group 特性の異なる Case 1 と Case 2 の実験結果を同時に示してある。また、遡上高としては、最大遡上高 $R_{\max}$ 、有義遡上高 $R_{1/3}$ および平均遡上高 $\bar{R}$ を用いている。図中の直線は、すべて平行に引いたものであるが、沖波波形勾配が 0.008 以上の波に対しては実験結果の傾向をうまく表わすことができる。斜面勾配が 1/5 の場合には、沖波波形勾配が 0.008 より小さいと図中の直線に比べてかなり小さくなっている。これは 3. (1) で述べたように、同じ入力信号を用いても斜面での波の反射のため、沖波有義波高が他のケースより大きくなっており、相対遡上高は沖波有義波高で無次元化されているため、図中の直線に比べ小さくなる原因ともなっている。そこで、他の斜面勾配の場合に得られている沖波有義波高を用いて整理し直したものが図中の Δ 印であり、このようにすると図中の直線に合ってくる。これらの図から斜面勾配が 1/20、1/30 と緩くなってくると、沖波波形勾配が 0.005 以下で、相対有義遡上高や平均遡上高は図中の直線では表わせないこと、入射波の wave grouping による遡上高の差は、有義遡上高や平均遡上高で表わしてもあまり顕著ではないが、最大遡上高で表わすと grouping の大きい Case 1 の方が Case 2 に比べ 10% 程度大きいことがわかる。

図中の直線の勾配を求めると -0.37 となり、この値は Hunt の式の -0.5 と比べて小さく、Chue⁴⁾ の提案式による値 -0.4 に近い。

図-8 は、両対数紙の横軸に斜面勾配 $\tan \theta$ 、縦軸に $(R/H_0)/(H_0/L_0)^{-0.37}$ をとり、斜面勾配と相対遡上高の関係を示したものである。図には最大遡上高、有義遡上高および平均遡上高について整理した結果をのせている。実験結果にはばらつきがあるので平均値と標準偏差で示している。この図から、遡上高は斜面勾配が増大するにつれて増加すること、両対数紙上で表わした直線の勾配は有義遡上高および平均遡上高については 0.69、最大遡上高については 0.77 であることがわかる。

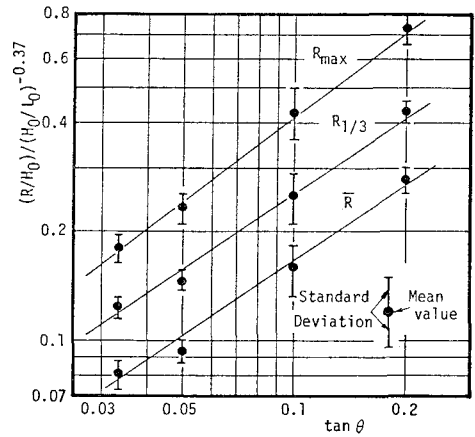


図-8 相対遡上高と斜面勾配の関係

以上のことから、相対遡上高を次のように 2通りの式で表わすことができよう。

$$\frac{R}{H_0} = a(\tan \theta)^b (H_0/L_0)^c \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{R}{H_0} = d \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \right)^e \quad \dots\dots\dots (5)$$

これらの係数 a, b, c, d および e を、斜面勾配が 1/5 の場合には沖波波形勾配が 0.007 以下、斜面勾配が 1/20 と 1/30 の場合には 0.005 以下の実験結果を除いたデータを用いて最小 2 乗法で求める。その結果得られる実験式と実験結果との標準偏差 σ を求める。これらの結果を表-1(a), (b) に示す。式 (5) のように surf similarity parameter の関数として遡上高を表わした場合の標準偏差は、式 (4) と置いたときの標準偏差とほとんど変わらない。本研究では、式 (5) を不規則波の遡上高の実験式として提案する。

表-1 遡上高の実験式

(a) $\frac{R}{H_0} = a(\tan \theta)^b (H_0/L_0)^c$

	Crest 法				Zero-up-cross 法			
	a	b	c	σ	a	b	c	σ
$R_{\max}$	2.565	0.783	-0.367	0.151	2.565	0.783	-0.367	0.151
$R_{1/3}$	1.308	0.696	-0.361	0.095	1.375	0.686	-0.363	0.088
$\bar{R}$	0.946	0.697	-0.336	0.072	0.992	0.668	-0.356	0.079

(b) $\frac{R}{H_0} = d \left(\frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \right)^e$

	Crest 法			Zero-up-cross 法		
	d	e	σ	d	e	σ
$R_{\max}$	2.319	0.771	0.159	2.319	0.771	0.159
$R_{1/3}$	1.378	0.702	0.094	1.497	0.695	0.086
$\bar{R}$	0.878	0.688	0.074	1.085	0.678	0.077

(5) 遡上高の連の長さ

海岸堤防の越波を考える場合、続けて何波越波するかといった問題も重要となる。ここでは、波高の連の長さ

表—2 遡上高の連の長さの度数分布

連の長さ j	一般の遡上高の連		R_{max} を含む遡上高の連	
	$R>R_{1/3}$	$R>\bar{R}$	$R>R_{1/3}$	$R>\bar{R}$
1	5396	6449	102	58
2	800	3162	18	36
3	138	1630		16
4	1	777		6
5	13	373		1
6	1	174		1
7		86		
8		36		
9		14		
10		12		
11		3		
平均	1.18	1.95	1.15	1.78

注：総遡上波数，54244

と同様に、遡上高の連の長さについて検討する。

表—2 は、全実験ケース 120 例について、遡上高の連の長さの度数分布を示したものである。規準値として、有義遡上高と平均遡上高を用いた。有義波高および平均波高を規準値としたときの波高の平均連長は 1.42 および 2.37 であり、遡上高の平均連長は波高の平均連長に比べて小さい。最大波高を含む波高の連は数波続くことが多いのに対し、最大遡上高を含む遡上高の連は 1 波で出現することが多い。

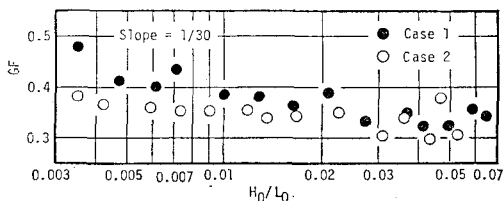
遡上高は、もどり流れが小さいとき（前の波の遡上高が小さいとき）に大きくなり、その戻り流れによって後続の波の遡上高は小さくなる。そのため、最大遡上高は単独で現われることが多いと思われる。

(6) 遡上高に及ぼす wave grouping の影響

Johnson ら⁵⁾は、wave grouping の顕著な不規則波の方が打上げ高が大きく、捨石の崩壊を助長すると指摘した。一方、van Oorschot ら⁶⁾はスペクトル幅が大きい波（これは wave grouping が小さいことを意味する）のほうが打上げ高が大きいと報告している。

今回の実験結果からは、最大遡上高についてみると、wave grouping の大きい波の方が 10% 程度大きいことがわかった。

図—9 は、水深が 5 cm の地点の水位変動の Groupiness Factor を調べたものであり、遡上前の wave grouping の程度を示したものである。入射波浪の GF の平均値は Case 1 で約 0.73、Case 2 で約 0.57 であるが、遡上前の地点にくると著しく減少することがわかる。また



図—9 砕波後の Groupiness Factor

wave grouping の差がほとんどなくなり、GF 値は Case 1 でも 2 でもあまり変わらなくなる。すなわち、斜面上での砕波によって入射波の wave group 特性が変化してしまい、有義遡上高や平均遡上高についてはその差が現われなくなることが理解される。

Johnson らの実験では、斜面勾配が 1:1.5 のような急な場合であり、斜面上で wave group 特性が変化することなく打上がるため、入射波の wave grouping の影響があまり消えないものと思われる。

4. あとがき

本研究は、パワースペクトルは同じでも wave group が異なる不規則波を用いて、緩斜面上の遡上特性を実験的に調べた。主要な結論は次のとおりである。

(1) 斜面勾配が緩く、沖波波形勾配が大きくなるにつれて、遡上波の数は入射波の数に比べて減少する。遡上波の数の入射波の数に対する比は surf similarity parameter の関数として表わすことができる。また、遡上波の数に対する wave grouping の影響はほとんどみられない。

(2) 相対遡上高は、沖波波形勾配が大きくなるにつれ、両対数紙上でほぼ直線的に減少し、一方、斜面勾配が大きくなるにつれて直線的に増加する。遡上高の算定式として式 (5) を提案した。

(3) 最大遡上高は、入射波の最大波高が前後に大きな波と連なって出現するのと異なり、単独で現われることが多い。

(4) wave grouping による遡上高の差は、平均遡上高や有義遡上高で表わしてもあまり顕著ではないが、最大遡上高で表わすと、wave grouping の大きい波の方が 10% 程度大きくなる。

最後に、本研究は文部省科学研究費奨励研究 (A) による研究の一部であることを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 木村 晃・瀬山 明・若狭 聡：波のうちあげにおよぼすもどり流れの効果，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 380～384，1982。
- 2) 岩垣雄一・間瀬 肇・北 直紀：Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 55～59，1982。
- 3) Hunt, I. A.: Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 123～152, 1959.
- 4) Chue, S. H.: Wave run-up formula of universal applicability, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2, pp. 1035～1041, 1980.
- 5) Johnson, R. R., E. P. D. Mansard and J. Ploeg: Effects of wave grouping on breakwater stability, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., pp. 2228～2243, 1978.
- 6) van Oorschot, J. H. and K. d'Angremond: The effect of wave energy spectra on wave run-up, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., pp. 888～900, 1968.