

緩斜面上への波の遡上特性について

榎木 亨*・岩田好一朗**・森野 彰夫***

1. 緒 言

近年、自然破壊阻止と自然回復・保全が強調され、自然砂浜海岸の保護・維持と平行して、人工養浜の設置が各所において計画あるいは実施されてきている。こういった人工養浜工の計画に際しては、工学的あるいは防災面からは緩斜面の養浜のり面への波の遡上特性を正確に把握しておくことが必要とされる。従来、傾斜面上への波の遡上高さ、あるいは波の打ち上げ高さについては、孤立波、規則波などに対して、理論的、実験的研究¹⁾が数多くなされて成果が得られているが、それは主に比較的急勾配のり面を有する海岸構造物に対してなされており、人工養浜のような比較的緩斜面に対しては、規則波についてもその遡上特性は十分検討されたとはいえない。また、不規則波に対する遡上の研究は、Battjes²⁾が波高と周期の任意の相関についての結合分布から遡上高さの分布を調べているが、波浪特性ならびに斜面勾配との間の十分な定量的な関係を導くにはいたっていない。したがって本論では、緩勾配の緩斜面をとりあげ、規則波と不規則波の遡上特性を主に水理実験の面から明らかにしようとするものである。

2. 実験装置、実験方法と解析方法

(1) 実験装置

a) 実験水槽：実験は本学の屋内2次元鋼製造波水槽(長さ)30m×(高さ)0.95m×(幅)0.7m(片面ガラス張り)を用いて行った。模型海浜は、 $S=1/5, 1/10, 1/15, 1/20, 1/30, 1/40$ の1様勾配木製傾斜面を用い、造波板直前に波形を整えるための整流装置として整流板を、他端には波の反射を防ぐため砕石より構成された消波装置を設けた。

b) 遡上高さ測定装置：遡上高さ測定に用いた遡上計は、幅18cm、長さ50cm、厚さ0.2cmのベークライト製板上に、厚さ0.2cm、幅0.3cmの銅板を5.3cm

の間隔で2列張り付けた一種の電気抵抗線式水位計である。遡上高さの測定原理ならびに測定に際してのキャリブレーションは従来の電気抵抗線式波高計と同様であるが、銅線上の水のかぶりが2mm以下になると正確に水位変動を計測しない場合があるので、同遡上計上に設けてある目盛(スケール)で実際の遡上高さを目視観測した場合によっては遡上計で計測された値を補正したが、本実験のような緩傾斜面での遡上高さについてはそれほど大きな補正とはならない。

(2) 実験方法と解析方法

実験は1様水深域での水深を $h=30$ cmと一定にしている。造波方法は規則波はフラップ型造波機を用いて生起せしめ、不規則波はホワイトノイズをバンドパスフィルターにより遮断し、それを入力として造波板を不規則振動せしめて発生させる方法を用いている。斜面上の汀線部に設置した遡上計により遡上波形を記録すると同時に、造波板より9m離れた水槽水平部と斜面のり先の2地点において電気抵抗線式波高計を設置して、沖波波形ならびに緩斜面への入射波形を記録したが、以下の解析には前者の計測値をもって整理している。なお、実験諸元は表-1に示すようであり、実験は規則波については78種目、不規則波については36種目行っている。遡上高さの定義は従来通り、静水位面から遡上波形の峰ま

表-1 実験諸元

h cm	30.0
T sec	0.7, 1.0, 1.5
H_0 cm	0.21~11.83
H_0/L_0	0.0027~0.0768
h/L_0	0.085~0.392
S	1/5, 1/10, 1/15, 1/20, 1/30, 1/40
(a)	
h cm	30.0
f_p c.p.s.	1.250~1.641
$H_{1/3}$ cm	2.55~6.81
ε	0.52~0.79
Q_p	2.07~2.99
S	1/5, 1/10, 1/15, 1/20, 1/30, 1/40
(b)	

* 正会員 工博 大阪大学工学部教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 大阪大学工学部講師 工学部土木工学教室

*** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻

での垂直変位をもって遡上高さ $R_{\max}$ とし、また、得られた遡上波形を積分して求めた平均水位と静水位との垂直偏差を平均遡上高さ $\bar{R}_m$ としている。不規則波の解析に際しては、波高、周期および遡上高さは crest-to-trough 法で 100 波相当量を対象にして読みとり、スペクトル算定においては、160 sec の水位記録より、サンプリング周期 1/12.5 sec, データ数 2000 個, 自由度 50 で B-T 法により計算した。

3. 規則波の遡上特性の再検討

まず、遡上高さ $R_{\max}$ と平均遡上高さ $\bar{R}_m$ の関係について述べる。図-1 は $R_{\max}/\bar{R}_m$ と H_0/L_0 (沖波波形勾配) の関係を S と h/L_0 をパラメーターにして示したものである。 $R_{\max}/\bar{R}_m$ に及ぼす H_0/L_0 の効果は S によりかなり異なり、 $S=1/5 \sim 1/20$ の場合は H_0/L_0 の増加に伴い $R_{\max}/\bar{R}_m$ は減少するが、 $S=1/30$ と $1/40$ の緩勾配の場合は H_0/L_0 の効果はほとんどなく、 $S=1/30$ と $1/40$ でおおの $R_{\max}/\bar{R}_m=1.04, 1.02$ の一定値を示し、 $R_{\max}$ と $\bar{R}_m$ はほぼ等しい。これは、 S が小さいほど、また、 H_0/L_0 が大きいほど砕波点から汀線までの過剰の質量輸送量が Longuet-Higgins^{3),4)} が指摘したように radiation stress により平均水位に変換される量が多いことによると推測される。図-2 は

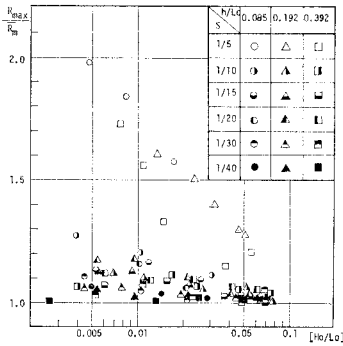


図-1 $R_{\max}/\bar{R}_m$ に及ぼす $S, h/L_0$ と H_0/L_0 の効果

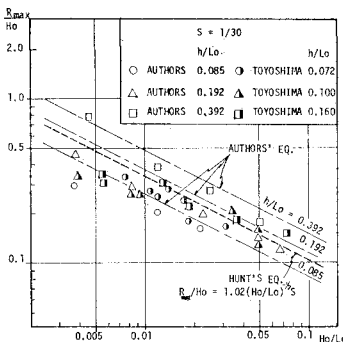


図-2 $R_{\max}/H_0$ に及ぼす h/L_0 と H_0/L_0 の効果 ($S=1/30$ の場合)

$R_{\max}/H_0$ と H_0/L_0 の関係を示したものである。図-2 には豊島らの実験値⁵⁾ および Hunt の実験式⁶⁾ も同時に示されている。実験値は Hunt の式の値近傍にばらついている。このばらつきは、図-2 に示すように傾斜面先端ののり先水深・沖波波長比 h/L_0 の効果によることが認められ、従来考慮されていなかった h/L_0 は Raichlen & Hammack⁷⁾ も指摘しているように無視できない重要な要素であることが判明した。 $R_{\max}/H_0$ に及ぼす h/L_0 の効果は 図-3 に一例として示すように水底勾配 S により変化する。 $S < 1/10$ の場合は h/L_0 の増加に伴い $R_{\max}/H_0$ は増大するが、 $S=1/10$ では h/L_0 に関係なく、 $S=1/5$ では h/L_0 の増加に伴い $R_{\max}/H_0$ は減少する。このように、従来の Hunt の式のような h/L_0 の効果を有しない式では $R_{\max}/H_0$ の算定は不十分であるため、著者らの行った 78 ケースの実験結果をもとに、 h/L_0 の要素を含む実験式として式 (1) を提案する。

$$R_{\max}/H_0 = P(S) \times (H_0/L_0)^{-1/2} \times (h/L_0)^{Q(S)} \quad (1)$$

ここに、

$$P(S) = 4.56 \times 10^{-2} \times S^{-0.138}, \quad 1/5 \leq S \leq 1/40 \quad (2)$$

$$Q(S) = -0.421, \quad S=1/5 \\ = 5.85 \times 10^{-3} \times S^{-1.246}, \quad 1/10 \leq S \leq 1/40 \quad (3)$$

なお、 $P(S), Q(S)$ は 図-4 に示されているような曲線である。

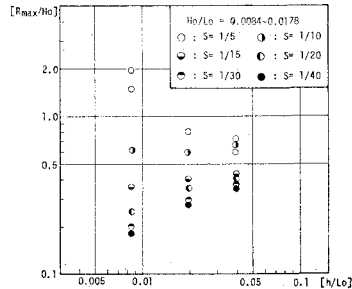


図-3 $R_{\max}/H_0$ に及ぼす h/L_0 と S の効果

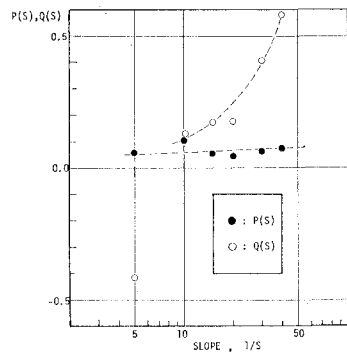


図-4 $P(S)$ と $Q(S)$ の値

4. 不規則波の遡上特性

不規則波の遡上特性として、遡上高さ分布、遡上変動スペクトルの2つをとり上げて、来襲波の特性と斜面勾配との関連性について検討を加える。

(1) 遡上高さの分布について

a) 斜面勾配の効果

本実験で用いた不規則波の特性及び遡上波の諸特性を表-2に示す。ここに、 $H_{1/3}$ 、 $R_{1/3}$ は波高、遡上高さの1/3有義量であり、 m_0 は波のスペクトル密度、 ε はスペクトル幅、 Q_p はスペクトルピークの尖度である。図-5は遡上高さ分布を超過確率で示した例であり、図中の点線はRayleigh分布の理論値である。この図より遡上高さの分布は斜面勾配が緩やかになるにつれてRayleigh分布からはずれ、その尖度がRayleigh分布より大きくなるのがわかる。これは、遡上の変動は打ち上げ波と引き波との相互作用によって大きく影響を受けるが、緩斜面上においては遡上波の走行に伴うエネルギー逸散が大きいため、この相互作用が小さくなって遡上変動量が減少するためと考えられる。

b) スペクトル形状の効果

図-6、図-7は同様に遡上高さの分布を超過確率で示したものであり、図-6は ε 、 Q_p がパラメーター、図-7では f_p がパラメーターになっている。図-6に示すように、 $f_p=1.250$ c.p.s.の波については ε が小さい

表-2 不規則波の遡上特性 ($f_p=1.25$ Hz)

S	1/5	1/10	1/15	1/20	1/30	1/40
$\bar{H}$ cm	2.46	2.60	3.17	3.28	3.65	2.84
$H_{\max}$ cm	6.21	7.78	7.05	8.05	8.48	7.33
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.63	1.63	1.56	1.69	1.63	1.66
$\bar{T}$ sec	0.66	0.67	0.76	0.74	0.77	0.65
ε	0.57	0.59	0.58	0.59	0.64	0.66
Q_p	2.76	2.77	2.73	2.71	2.36	2.64
f_p c.p.s.	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
m_0 cm ²	1.10	1.28	1.71	1.92	2.42	1.59
$R_{\max}$ cm	2.95	1.97	1.63	1.34	1.36	0.69
$R_{1/3}$ cm	1.90	1.22	0.85	0.76	0.78	0.45
$R_{1/3}/\bar{R}$	1.52	1.65	1.49	1.43	1.63	1.25

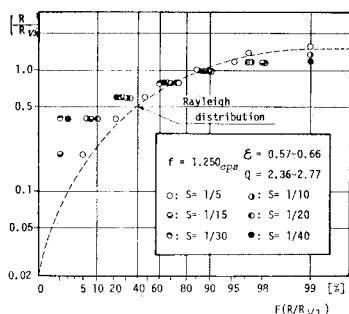


図-5 $R/R_{1/3}$ の分布特性に及ぼす S の効果

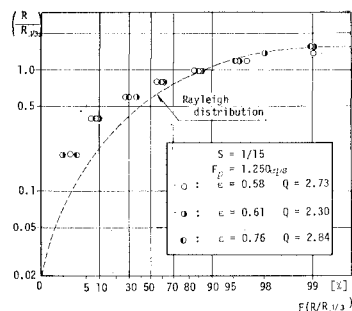


図-6 $R/R_{1/3}$ の分布特性に及ぼす ε の効果

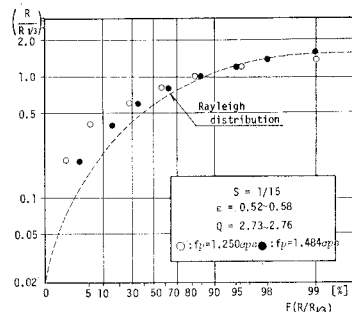


図-7 $R/R_{1/3}$ の分布特性に及ぼす f_p の効果

方が遡上高さの分布はRayleigh分布よりはなれる傾向が顕著にみられる。この傾向は、本論で示していないが、 $S=1/20$ 、 $1/30$ についても同様に見出すことができた。また、 $R/R_{1/3}$ は図-7に示すようにパワースペクトルのピーク周波数 f_p が変わると分布特性が変わることが認められ、 f_p も $R/R_{1/3}$ を支配する重要な要素となることが指摘できる。これは岩垣ら⁸⁾が指摘しているように、 f_p によって周期 T の分布が異なるためで当然予想される。

(2) 遡上変動スペクトルについて

a) 斜面勾配の効果

図-8は来襲波と遡上波のパワー・スペクトルの代表例(表-2に示す波)を示したものである。表-2に示すように不規則来襲波の特性が各勾配について若干異なる

$S(f)$ (cm² sec)

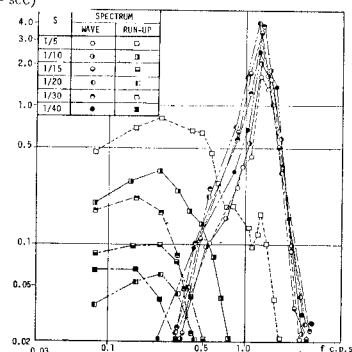


図-8 遡上波のパワー・スペクトルに及ぼす S の効果

っているので完全な比較はできないが、遡上変動スペクトルのピーク周波数 f_p は来襲波のそれより著しく低周波数側になることは十分認められる。さらに、水底勾配 S が緩やかになるほど遡上変動スペクトル密度は減少することが一般的な傾向として指摘できる。これは規則波についても観測されたように、傾面勾配が緩やかになると碎波、摩擦などの効果によって波動エネルギーの減少が著しくなり、このため斜面上を遡上する水塊中の水粒子速度が小さくなって遡上変動が小さいものとなるためと考えられる。

b) スペクトル形状の効果

図—9、図—10 は同様に来襲波の水位変動スペクトルと遡上変動スペクトルを比較したものであり、図—9 は ϵ がパラメーター、図—10 は f_p がパラメーターになっている。図—9 に示すように、来襲波の水位変動スペクトルにおける周波数分布幅 ϵ が大きい方、さらには図—10 に示すように f_p が比較的低周波数にある方が遡上変動スペクトルは大きくなる傾向がみとめられる。この傾向は本論で示していないが、 $S \leq 1/15$ のすべての勾配についても認められた。しかし、図—9、図—10 に示す来襲波のパワー・スペクトルのレベルが各波によりかな

り異なり、それが低周波数域に顕著であるから、 ϵ と f_p の効果というよりむしろ低周波数域のスペクトル密度の大小の効果と考えられ、この傾向は規則波と同様であり、平均周期が大きくなるに伴い遡上波のスペクトルが大きくなっている。なお、遡上波のパワー・スペクトルのピーク周波数が来襲波のそれより著しく低周波数側になるのは、のり面で打ち上げ波と引き波の相互干渉により高周波数成分が低周波数成分によりのみこまれてしまうこと、緩斜面では碎波帯が長くなるため高周波数成分の減衰が大きいことに大きく帰因すると考えられる。

(3) 不規則波の遡上高さの算定方法に対する検討

著者らは、3. で提案した規則波についての遡上高さの算定式を用いて、波高と周期の結合分布より遡上高さの分布特性がどの程度説明できるかについての検討を行う。この結合分布については Battjes が Bretschneider の提案に基づいて、波高、波長が共に Rayleigh 分布すると仮定した際の Bivariate Rayleigh 分布を求め、波高と波長との相関係数をパラメーターとして、この Bivariate Rayleigh 分布の特性を明らかにしている。しかしながら、岩垣らは、周期の分布はけっして T^2 -Rayleigh 分布ではなく、スペクトルの特性によって、その分布が異なり、一般的な確率分布である Weibull 分布を用いた表示が好ましいことを指摘している。

統計的に独立な2変数、 H, T の結合確率密度関数 $p(H, T)$ はそのおのおのの確率密度の積の形でもって表示できる。2変数 H, T がおのおのその形状母数を m_H, m_T とする Weibull 分布であるとするとき、その結合分布 (Bivariate Weibull 分布) は次式 (4) で示される。

$$\begin{aligned} p(H, T) &= p(H) \cdot p(T) \\ &= A_H \cdot m_H \cdot (H/H_r)^{m_H-1} \\ &\quad \times \exp[-A_H \cdot (H/H_r)^{m_H}] \cdot 1/H_r \\ &\quad \times A_T \cdot m_T \cdot (T/T_r)^{m_T-1} \\ &\quad \times \exp[-A_T \cdot (T/T_r)^{m_T}] \cdot 1/T_r \\ &\quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

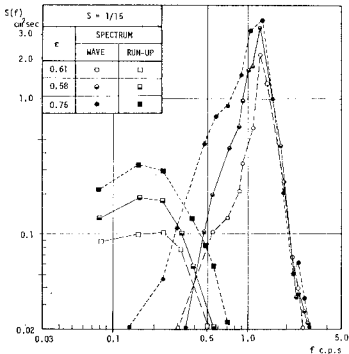
H, T, R の関係式として前述 3. の式 (1) を用い、さらに波高分布が Rayleigh 分布をするので、 $m_H=2.0$ 、 $A_H=1.0$ とおけば、遡上高さの分布式 $F(r)$ は、一般的に周期 T の分布特性 m_T の関数とし、若干の代数計算の後次式で与えられる。

$$F(r) = \int_0^r f(r) dr \dots\dots\dots (5)$$

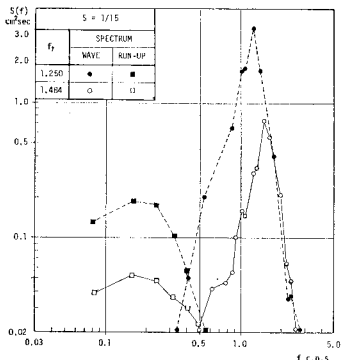
$$f(r) = k_1(r) \int_0^\infty k_2(t) dt \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\begin{aligned} k_1(r) &= 4A_T \cdot m_T \cdot r^3, \\ k_2(t) &= t^{m_T-1-8b(s)} \cdot \exp(-t^{8b(s)} \cdot r^4 - A_T \cdot t^{m_T}), \\ A_T &= \Gamma\left(\frac{m_T+2}{m_T}\right)^{m_T/2}, \end{aligned}$$



図—9 遡上波のパワー・スペクトルに及ぼす ϵ の効果



図—10 遡上波のパワー・スペクトルに及ぼす f_p の効果

$$b(S) = 0.5 - Q(S),$$

$$Q(S) = 5.85 \cdot 10^{-8} \cdot S^{-1.246} \quad (\text{for } S=1/10 \sim 1/40)$$

$$= -0.421 \quad (\text{for } S=1/5)$$

$$r = \frac{R}{a(S) \cdot H_{or}^{1/2} \cdot T^{b(S)}},$$

H_{or} = 沖波の2乗平均波高,

$$a(S) = p(S) \cdot h^{Q(S)} \cdot (g/2\pi)^{b(S)}.$$

図-11は実測した遡上高さの分布とBivariate Weibull 分布式による値の比較を行ったものである。なお、 $m_T = 5.0$ は実験波から読みとった T の値を Weibull 確率紙上で最小2乗法により求め、小数点以下は四捨五入した値である。各勾配について、この Bivariate Weibull 分布形状をみると、図-12 に代表例として示すように ($m_H = 2.0$, $m_T = 5.0$ の場合) $S=1/5$ については比較的 Rayleigh 分布に似た形状であり、勾配が緩やかになるにつれて、わずかずつではあるがその峰は急峻になり、分布のピーク値を示す r については1に近づいている。実測値は勾配変化に伴う分布形状の定性的な傾向とある程度一致するが、図-11 に一例として示すように、そのピーク位置およびピークの尖鋭度については、その絶対値にかなりの相異がみられる場合が多い。

ところで、実際の遡上高さを評価する場合、その $1/3$ 有義遡上高さ $R_{1/3}$ に対する遡上高さ R の分布曲線が与えられればきわめて設計上好ましい。遡上高さの分布に対し前述した Bivariate Weibull 分布式を用い、その変数 R を $R/R_{1/3}$ 表示してその確率密度分布より式(5)、式(6)より累積確率を求めた。図-13, 14 中には上述の Bivariate Weibull 分布式に基づいて求めた

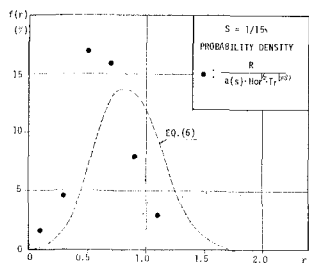


図-11 計算値と実験値の比較

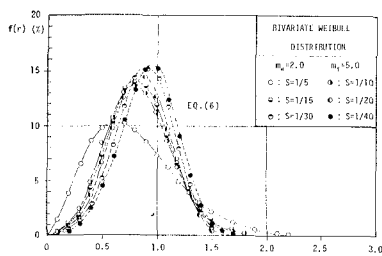


図-12 結合確率密度関数 (計算例, $m_H=2.0$, $m_T=5.0$ の場合)

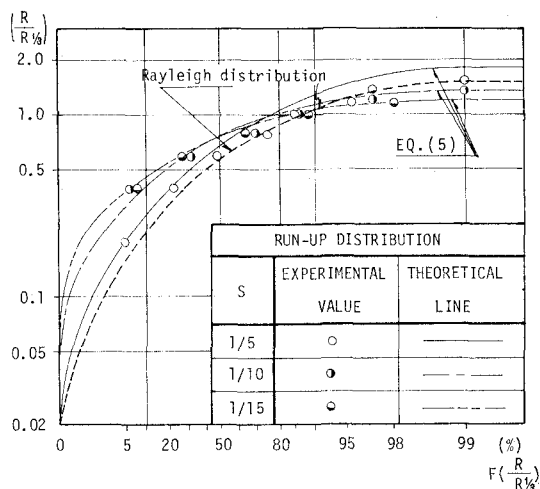


図-13 $R/R_{1/3}$ の計算値と実験値の比較 ($S=1/5$, $1/10$ と $1/15$)

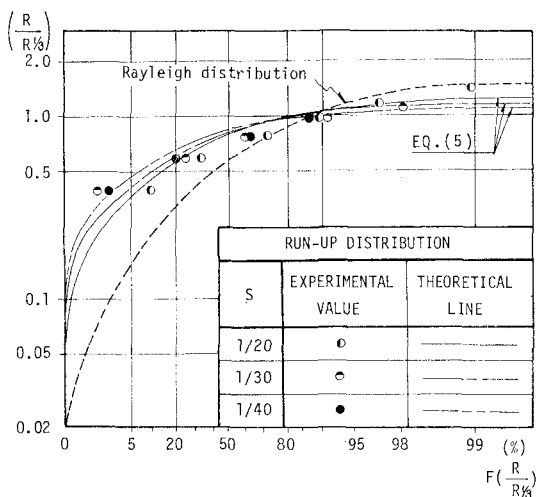


図-14 $R/R_{1/3}$ の計算値と実験値の比較 ($S=1/20$, $1/30$ と $1/40$)

値を理論式として実線および鎖線で示し、参考のため Rayleigh 分布式を点線で示してある。同図によれば、Bivariate Weibull 分布から求めた $R/R_{1/3}$ の計算値は、かなり精度よく実測値と一致し、 $R/R_{1/3}$ のように無次元化させた Bivariate Weibull 分布式を遡上高さ分布特性を表示する式として実際に用いることは十分に適切なものであるとの確証をえた。

5. 結 語

本論では、電気抵抗線式遡上計を用いて、 $S=1/5$, $1/10$, $1/15$, $1/20$, $1/30$, $1/40$ の6種類の一様緩斜面上への遡上現象について、まず規則波遡上特性については、従来の遡上高さの表示式においてふれられていないのり先水深の影響が重要な要素であることを明らかにし

て新しい算定方法を提案した。ついで、不規則波による遡上特性を遡上高さの分布と遡上変動スペクトルの2点に着目して、不規則波の特性と斜面勾配の効果について実験的に考察を行った。さらに、規則波に対する新しい遡上算定式に基づいて沖波特性と遡上特性との間に応答関数を設定して不規則波の遡上高さの算定式について検討を加え、遡上高さの分布は沖波の波高と周期の結合分布より Bivariate Weibull 分布として与えられることを明らかにした。なお、スペクトルの応答関数については目下検討中であり、この結果については後日報告するつもりである。

参 考 文 献

- 1) たとえば, Hunt, I.A.J.: Design of Sea-Walls and Breakwaters, Proc., ASCE. WW 3, Sep, 1959.
- 2) Battjes, J. A.: Run-up Distuistributions of Waves Breaking on Slopes, Proc., ASCE, WW 1, Feb, 1971.
- 3) Longuet-Higgins M. S. and R. M. Stewart: Radiation stress and mass transport gravity waves, with application to "surf-beats" J. Fluid. Mech. pp. 481-504, 1962.
- 4) Longuet-Higgins M. S. and R. M. Stewart: Radiation stress in water waves: a physical discussion, with application, Deep-Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562, 1964.
- 5) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏: 海岸堤防への波のうちあげ高一海底勾配 1/30一, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 260~265, 1964.
- 6) 前出 1).
- 7) Raichlen, F. and J. L. Hammack: Run-up due to Breaking and Non-Breaking waves, Proc. of 14th Conf. on Coastal Engineering, pp. 1937-1955, 1974.
- 8) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波の周期の確率特性に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, 1975.