

不規則波のうちあげ高の分布特性の推算

高 田 彰*

1. ま え が き

越波量の算定は防災基準を確立するためにも重要なことであるが、まず不規則波の越波の頻度分布を明らかにする必要がある。そのためには、不規則波のうちあげ高の分布特性を検討することが先決問題であろう。

Saville (1962)¹⁾ は「不規則波の各成分波のうちあげ高と規則波のうちあげ高とは近似的に一致する」という仮定に基づいて、斜面堤における不規則波のうちあげ高の分布特性を統計的に始めて明らかにした。その後、首藤 (1965)²⁾、Battjes (1971)³⁾、楳木・岩田・森野 (1976)⁴⁾ およびその他の研究者らがさらに興味ある研究を進めているが、これまでの研究対象はおもに、不規則波の各成分波がすべて斜面で砕波するという特殊な場合についてであった。鉛直壁の場合のように砕波、非砕波の混合する不規則波のうちあげ高の分布特性についてはまだ十分検討されていないようである。

そこで、本研究は、鉛直壁における不規則波のうちあげ高の分布特性が堤脚水深によってどのように変化するかを Saville (1962)¹⁾ の手法を用いて推算したものである。なお、今回の報告は、海底勾配 $\tan \alpha = 1/10$ における汀線より海側にある鉛直壁を対象としており、有義波の波形勾配 $(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0 = 0.04$ についてである。

2. 波の分布特性の設定

(1) 沖波波高 H_0 の分布特性

H_0 の出現確率は近似的にレーリー分布が成り立つとして、超過発生確率 $P(\eta)$ に式 (1) を用いる⁵⁾。

$$P(\eta) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \alpha^2 \eta^2\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\alpha = (H_{1/3})_0/\bar{H}_0$ 、 $\eta = H_0/(H_{1/3})_0$ 、 $(H_{1/3})_0$: 有義波の沖波波高、 $\bar{H}_0$: 平均波の沖波波高、 $P(\eta)$: η の超過発生確率。

この研究では、 $\alpha = 1.6$ を用いる。

(2) 周期と波高との相関性

周期 T が一定の場合と変化する場合 (T^2 がレーリー分布をする) について考え、 H_0 と T^2 の結合分布を

次の3種類に限定する。

a) $\xi = 1$ の場合 ($\xi = T/T_{1/3}$, $T_{1/3}$: 有義波の周期)

$$P(\eta) = \exp(-0.64\pi\eta^2) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\eta \leq 0.142\{(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0\}^{-1}$, $(H_0/L_0 \leq 0.142$ の条件より)。

なお、式 (2) の計算の過程で $H_0/L_0 > 0.142$ の波の出現確率は、すべて、 $\eta_{\max} = 0.142\{(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0\}^{-1}$ (すなわち、 $H_0/L_0 = 0.142$) の波の出現確率に加算できると近似的に考える (後述の式 (3) についても同様に扱う)。

b) H_0 と T^2 との相関係数 $\sigma = 0$ の場合 (Bretschneider の分布⁶⁾)

$$P(\eta, \xi) = \exp(-0.64\pi\eta^2) \exp(-0.675\beta^4\xi^4) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\beta = T_{1/3}/\bar{T}$, $\bar{T}$: 平均波の周期、 $(\eta/\xi^2)\{(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0\} \leq 0.142$, $P(\eta, \xi)$: (η, ξ) の波の超過発生確率。

設計の条件に $T_{1/3}$ が与えられるのが一般であるので、これまでの統計資料からこの研究では、実用上、 $\beta = 1.1$ を適用する (なお、 $\bar{T}$ が与えられると計算では、 $\sigma = 0$ において $\beta = 1.0$ である⁷⁾)。

c) $\sigma = 1$ の場合 (1 相関)

$$\left. \begin{aligned} P(\eta, \xi) &= \exp(-0.64\pi\eta^2) \\ \eta &= \xi^2 \quad (H_0/L_0 = \text{const. の条件より}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

3. 成分波のうちあげ高の推算

(1) 堤脚水深の分類

うちあげ高が最大になる堤脚水深 h_R を境に $h = 0 \sim h_R$ と $h \geq h_R$ の2領域に分ける。 h_R については著者 (1975)⁸⁾ の提案した方法によって近似的に推算できる。

(2) $\tan \alpha = 1/10$ における鉛直壁のうちあげ高 R/H_0

一様な不透過斜面堤および鉛直堤の R/H_0 は著者 (1975)⁸⁾ の提案した $h = 0 \sim h_R$, $h \geq h_R$ の2領域の推算式より求めることができる。

4. 不規則波のうちあげ高 $R/(H_{1/3})_0$ の推算

有義波の $(H_{1/3})_0$, $(L_{1/3})_0$ および $(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0$ を基準

* 正会員 工博 中部工業大学教授 工学部土木工学科

量として、 $R/(H_{1/3})_0$ は規則波に関する著者の推算法を用いて、次のように推算できる。

(1) $h \geq (h_R)_{\eta, \xi}$

$$\frac{R}{(H_{1/3})_0} = \eta(1 + \delta_{\eta, \xi})K_{\xi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$\delta_{\eta, \xi} = \frac{\pi}{4} \frac{\eta}{\xi^2} \frac{(H_{1/3})_0}{(L_{1/3})_0} \coth 2\pi \frac{h}{L_{\xi}} \\ \times \left(3 \coth^2 2\pi \frac{h}{L_{\xi}} + \tanh 2\pi \frac{h}{L_{\xi}} \right) K_{\xi} \\ \left(\text{ここに、} \eta = H_0/(H_{1/3})_0, \xi = T/T_{1/3} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$K_{\xi} = \left(\frac{\sinh 4\pi \cdot h/L_{\xi} \coth 2\pi \cdot h/L_{\xi}}{\sinh 4\pi \cdot h/L_{\xi} + 4\pi \cdot h/L_{\xi}} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{h}{(L_{1/3})_0} = \xi^2 \frac{h}{L_{\xi}} \tanh 2\pi \frac{h}{L_{\xi}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

なお、式(5)の適用限界は、 $(\eta/\xi^2)\{(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0\} \leq 0.142$ 。

(2) $h = 0 \sim (h_R)_{\eta, \xi}$

$$\frac{R}{(H_{1/3})_0} = \left\{ \frac{R_{\max}}{(H_{1/3})_0} - \frac{R_0}{(H_{1/3})_0} \right\} \frac{h}{(h_R)_{\eta, \xi}} + \frac{R_0}{(H_{1/3})_0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$$\frac{R_{\max}}{(H_{1/3})_0} = \eta \{ 1 + (\delta_{\eta, \xi})_R \} (K_{\xi})_R \quad \dots\dots\dots (10)$$

$(\delta_{\eta, \xi})_R$: 式(6)の h に $(h_R)_{\eta, \xi}$ を代入して求まる値

$(K_{\xi})_R$: 式(7)の h に $(h_R)_{\eta, \xi}$ を代入して求まる値

$$\frac{R_0}{(H_{1/3})_0} = 0.18 \eta^{1/2} \xi \left\{ \frac{(H_{1/3})_0}{(L_{1/3})_0} \right\}^{-1/2} \\ (\tan \alpha = 1/10 \text{ の場合}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、適用範囲は、 $0.0008 \leq (\eta/\xi^2)\{(H_{1/3})_0/(L_{1/3})_0\} \leq 0.142$ であり、 $(h_R)_{\eta, \xi}$ は式(12)で求まる値である。

$$\frac{(H_{1/3})_0}{(L_{1/3})_0} = \frac{(\xi^2/\eta)(0.6 \tan \alpha + 0.12) \{ \tanh 2\pi (h_R/L_R)_{\eta, \xi} \}^2}{(K_R)_{\eta, \xi}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、

$$(K_R)_{\eta, \xi} = \left\{ \frac{\sinh 4\pi (h_R/L_R)_{\eta, \xi} \coth 2\pi (h_R/L_R)_{\eta, \xi}}{\sinh 4\pi (h_R/L_R)_{\eta, \xi} + 4\pi (h_R/L_R)_{\eta, \xi}} \right\}^{1/2} \\ \frac{(h_R)_{\eta, \xi}}{(L_{1/3})_0} = \xi^2 \left(\frac{h_R}{L_R} \right)_{\eta, \xi} \tanh 2\pi \left(\frac{h_R}{L_R} \right)_{\eta, \xi} \quad \dots\dots\dots (13)$$

5. 不規則波のうちあげ高の分布特性

(1) うちあげ高の超過発生確率 $P(R/R_{\eta=\xi=1})$

図-1は、有義波のうちあげ高 $R_{\eta=\xi=1}$ を基準量として、 $R/R_{\eta=\xi=1}$ を求め、 $R/R_{\eta=\xi=1}$ の超過発生確率 $P(R/R_{\eta=\xi=1})$ を調べたものである。これらは、3種類の波の分布 ($\xi=1, \sigma=0$ および 1) について、また、堤脚水深によって $P(R/R_{\eta=\xi=1})$ がどのように変化するかを調べ

たものである。これらより、波の分布特性によってうちあげ分布が著しく異なる。また、堤脚水深の影響も大きく、 $h=0$ および $h/(L_{1/3})_0 \geq 0.08$ ではレーリー分布に近似しているが、砕波水深前後および砕波以浅領域ではレーリー分布とかなり異なった分布をすることがわかる。

一方、うちあげ分布の特性を示す係数として式(14)と(15)を提案することができる。これは、砂礫の特性表示に用いる Trask⁹⁾ のふり分け係数と偏わり度を応用したものである。

$$\text{うちあげ分布の分散係数 } S_0 = \sqrt{\frac{R_{25}}{R_{75}}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{うちあげ分布の偏わり度 } S_k = \frac{R_{75} R_{25}}{(R_{50})^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 R_{75} および R_{25} : それぞれ、 R の超過発生確率が 75%、25% に相当するうちあげ高さ。

S_0 の値が 1 に近いほど R が平均化されて出現していることを示す分散係数である。 S_k は R_{50} に比べてかなり大きい R とかなり小さい R との割合を示す係数であり、その値が 1 より大きければ R の分布は R_{50} より大きい方向へかたより、1 より小さければ、 R_{50} より小さい方向へかたよっていることを示す。

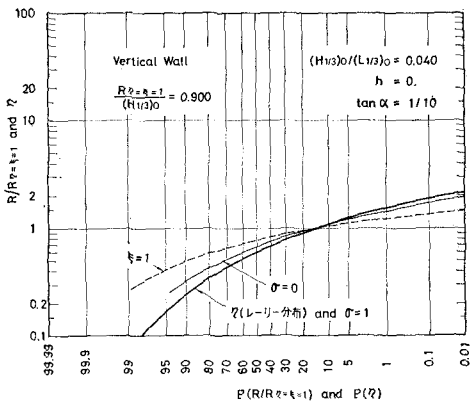
図-2は S_0 と $h/(L_{1/3})_0$ との関係を $\xi=1, \sigma=0$ および 1 について示したものである。これより、 R の分布は一般に $S_0 > 1$ であるが、 h の大きい方が小さい方より R の分布の分散度が大きいことがわかる。

図-3は同様に S_k について表わしたものである。これより、 $h/(L_{1/3})_0 = 0.01$ 前後では、 $S_k \geq 1$ であり、その領域の R は R_{50} より大きい分布にかたよっていることを示す。また、それ以外の領域では $S_k < 1$ であり、その領域では R_{50} より小さい分布にかたよっていることを示している。以上より、 S_0 および S_k の表示によって R の分布特性をかなりよく説明できることがわかる。

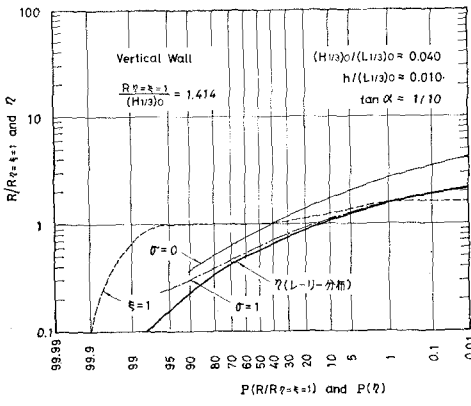
(2) $R_{\eta=\xi=1}$ および $R_{1/3}$ より大きい R の出現確率

$R_{\eta=\xi=1}$ より大きい R の超過発生確率 $P(R_{\eta=\xi=1})$ は図-4に示される。これより、 $P(R_{\eta=\xi=1})$ は h による影響が一般にかなり大きい。このことは、有義波のうちあげ高 $R_{\eta=\xi=1}$ を設計に用いることが堤防の防災機能の基準に何ら統一した基準を与えていないことになり、実際問題としても再検討しなければならないことを示唆している。

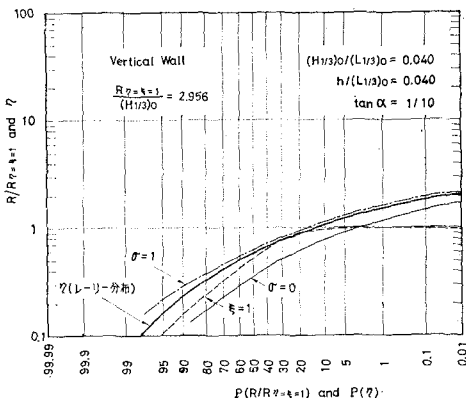
一方、 $1/3$ 最大うちあげ高 $R_{1/3}$ より大きい R の超過発生確率 $P(R_{1/3})$ は図-5に示される。これより $P(R_{1/3})$ は図-4の $P(R_{\eta=\xi=1})$ に比較して h の影響がかなり小さいので、防災基準をかなり統一して議論できることがわかる。



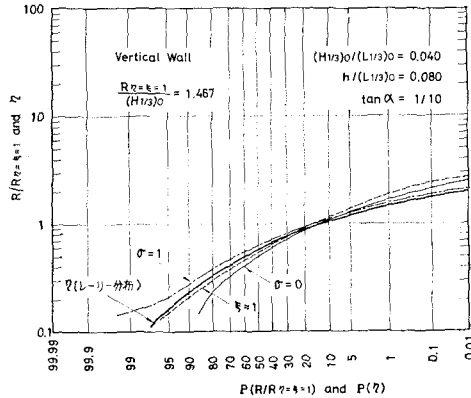
(a) $h=0$



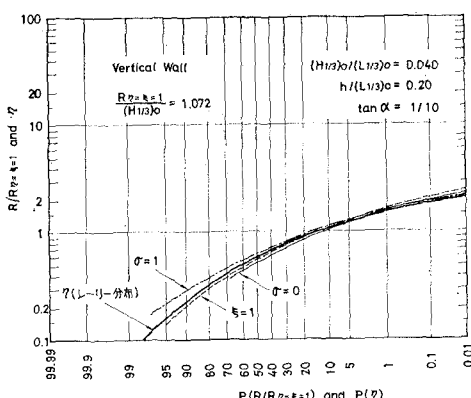
(b) $h/(L_{1/3})_0=0.01$



(c) $h/(L_{1/3})_0=0.04$

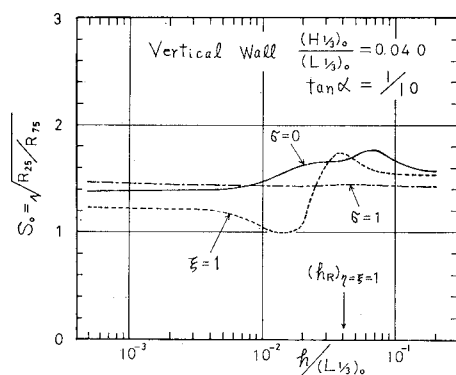
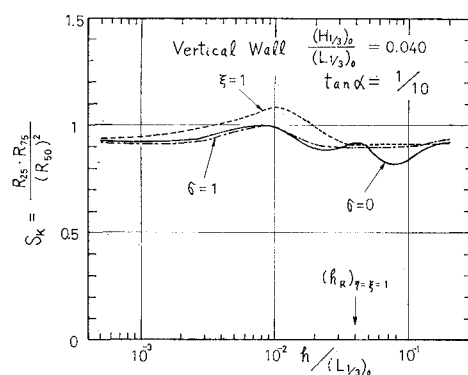
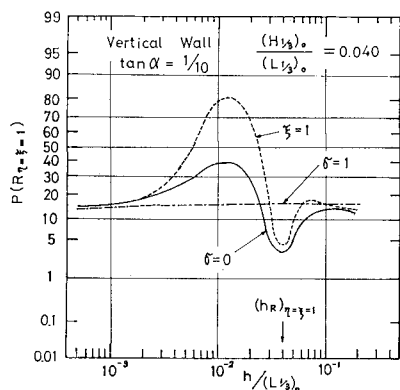
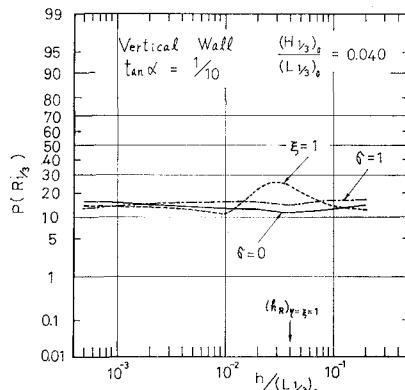


(d) $h/(L_{1/3})_0=0.08$



(e) $h/(L_{1/3})_0=0.20$

図-1 うちあげ高の超過発生確率

図-2 うちあげ分布の分散係数 S_δ 図-3 うちあげ分布の偏わい度 S_κ 図-4 有義波のうちあげ高より大きい R の出現確率図-5 $1/3$ 最大うちあげ高より大きい R の出現確率

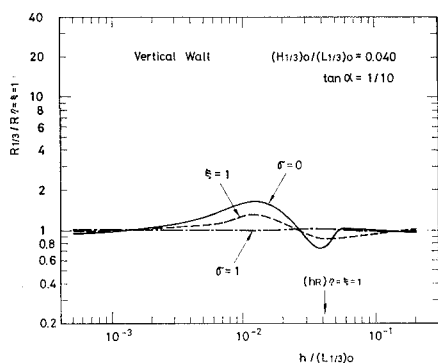
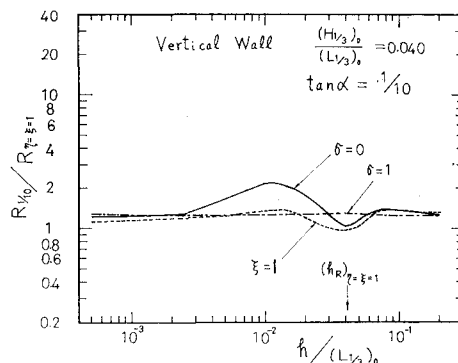
(3) $R_\eta/R_{\eta=\xi=1}$ と $h/(L_{1/3})_0$ との関係

波高の分布特性を表示する統計処理の方法 ($\bar{H}$, $H_{1/3}$, $H_{1/10}$ および $H_{\max}$ などの表示) を応用して, 50% 最大うちあげ高 R_{50} , $1/3$ 最大うちあげ高 $R_{1/3}$, $1/10$ 最大うちあげ高 $R_{1/10}$, $1/1000$ 最大うちあげ高 $R_{1/1000}$ および最大うちあげ高 $R_{\max}$ を推算し, $R_{\eta=\xi=1}$ を基準量にして検討した¹⁰⁾. なお, 計算の際に, $\eta=0.05 \sim 2.25$ の範囲で 22 区分, $\xi=0.05 \sim 1.95$ の範囲で 18 区分とし, こ

れを組み合わせる 396 種類の成分波に分けた。

なお, 全波数 1000 に対して, これらの区分に含まれる波数は 994.929 である。

図-6 は $R_{1/3}/R_{\eta=\xi=1}$ について, 図-7 は $R_{1/10}/R_{\eta=\xi=1}$ について, そして, 図-8 は $R_{1/1000}/R_{\eta=\xi=1}$ あるいは $R_{\max}/R_{\eta=\xi=1}$ についてそれぞれ $h/(L_{1/3})_0$ との関係を示している。これらより, 波の分布特性によってかなり異なるが, $\xi=1$ と $\sigma=0$ の場合に, 堤脚水深の影響がか

図-6 $R_{1/3}/R_{\eta=\xi=1}$ と $h/(L_{1/3})_0$ との関係図-7 $R_{1/10}/R_{\eta=\xi=1}$ と $h/(L_{1/3})_0$ との関係

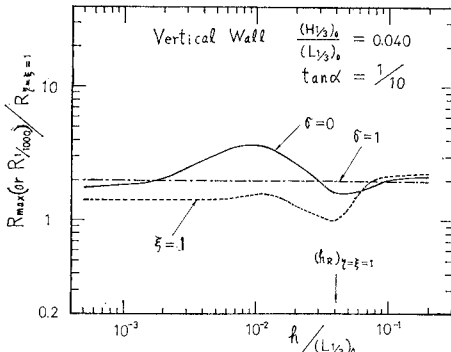


図-8 $R_{\max}(\text{or } R_{1/1000})/R_{\eta=\xi=1}$ と $h/(L_{1/3})_0$ の関係

なり大きいことがわかる。

(4) $R_n/R_{1/3}$ と $h/(L_{1/3})_0$ の関係

図-9 は $R_{1/3}$ を基準量として $R_{50}/R_{1/3}$ および $R_{1/10}/R_{1/3}$ について、図-10 は $R_{\max}/R_{1/3}$ あるいは $R_{1/1000}/R_{1/3}$ についてそれぞれ $h/(L_{1/3})_0$ との関係を示している。これらより、 $R_{\eta=\xi=1}$ を基準量にした図-6~8 に比較して h による $R_n/R_{1/3}$ の変動幅がかなり小さい。このことは防災基準を統一する意味で非常に意義のあることであり、 $R_n/R_{1/3}$ の有用性が指摘できる。

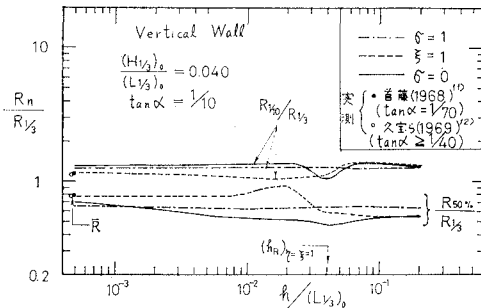


図-9 $R_{50}/R_{1/3}$ および $R_{1/10}/R_{1/3}$ と $h/(L_{1/3})_0$ の関係

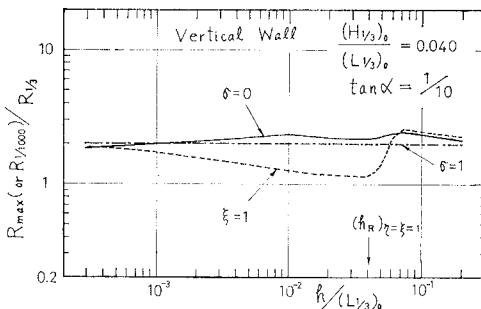


図-10 $R_{\max}(\text{or } R_{1/1000})/R_{1/3}$ と $h/(L_{1/3})_0$ の関係

6. あとがき

(1) 波高の統計処理の方法を応用し、うちあげ分布を $\bar{R}$ (あるいは R_{50})、 $R_{1/3}$ 、 $R_{1/10}$ 、 $R_{1/1000}$ 、 $R_{\max}$ で代表させ、一方、 $R_{1/3}$ を基準量とし、 $R_n/R_{1/3}$ を設計に組み入れることが防災機能の基準の統一にかなり合理的な方法であると考えられる。

(2) $\bar{R}$ 、 R_{50} 、 $R_{1/3}$ 、 $R_{1/10}$ 、 $R_{\max}$ など、確率うちあげ高 R_n に対応する確率越波量 Q_n あるいは確率越波流量 q_n との関連を定量化することが今後の重要な課題となる。

(3) 砕波以浅域ではサーフビートの影響があつて、Saville のこの種の手法では過小に推算する傾向にあることが分つていたので^{(13),(14)}、不規則造波装置および現地観測による比較検討が今後の課題として重要である。

参考文献

- 1) Saville, T., Jr.: An approximation of the wave run-up frequency distribution, Proc. 8th Conf. on Coastal Engg., pp. 48-59, 1962.
- 2) 首藤伸夫: 有義波とうちあげ高の関係, 土木研究所報告, 第126号, pp. 19-30, 1965.
- 3) Battjes, J. A.: Run-up distributions of waves breaking on slopes, Proc. ASCE, 97, WW1, pp. 91-113, 1971.
- 4) 榎木 亨・岩田好一朗・森野彰夫: 緩斜面上への波の遡上特性について, 第23回海岸工学講演会論文集, pp. 164-169, 1976.
- 5) Longuet-Higgins, M. S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. Marine Res., Vol. II, No. 3, pp. 245-266, 1952.
- 6) Bretschneider, C. L.: Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves, B.E.B. Tech. Memo., No. 118, p. 191, 1959.
- 7) 合田良実: 波浪の統計的性質とその応用, 1975年度(第11回)水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会水理委員会, pp. 1-29, 1975.
- 8) 高田 彰: 規則波の打上げ高および越波量の定式化について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 377-386, 1975.
- 9) 例えば, 佐藤昭二・合田良実: 海岸・港湾, 彰国社, p. 174, 1975版.
- 10) 前出2).
- 11) 首藤伸夫: 不規則波のうちあげ高, 土木学会第23回年次学術講演会講演概要集, 第II部, 1968.
- 12) 久宝雅史・遠藤茂勝: 現地海岸における波のうちあげに関する一考察(第3報), 土木学会第24回年次学術講演会講演集, 第2部, pp. 33-34, 1969.
- 13) 合田良実・鈴木康正・岸良安治: 不規則波浪実験とその特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 237-242, 1974.
- 14) 合田良実・岸良安治・神山 豊: 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 4, 1975.