

海岸構造物斜面上の不規則波の遡上高算定モデル

韓国 釜山水産大学海洋工学科 正会員 柳 青 魯
 韓国 釜山水産大学海洋工学科 姜 洪 潤
 韓国 釜山水産大学海洋工学科 正会員 張 善 徳

1. 序論

波浪と構造物の相互作用による波の遡上(run-up)は越波量算定及び防波堤、海岸堤防、護岸等、海岸構造物の天端高の決定において最も重要な影響因子と言えよう。この斜面上の波の遡上特性に関する従来の研究は規則波を対象とした影響因子別作用mechanismの検討が主な成果であった。この規則波に対する結果を実際の海洋の不規則な波浪に適用して行く場合の適用性に対する問題点の指摘と代表波による遡上高算定の論議から不規則波の遡上高算定modelへの変化に関する研究は主に緩傾斜斜面を対象にしてきたが、最近急傾斜の構造物においてもその安定性及び越波量の評価などに関連して重要な意味を持つものとして、遡上波の波群特性を入射波の波群特性と関連付た究明の必要性を強調している^{1)~11)}。また、遡上高の分布がRayleigh分布になるとか成らないとかの分布特性を論議する事よりは入射波の特性をわかれば遡上波の高さが予測できる不規則波を対象とする遡上高推算modelの開発が要求されている。このような状況のもとで、本研究では詳細な水理模型実験を行い、まずは入射波の spectrum 特性及び波群特性による遡上高分布特性の変化を調べ、つぎには、統計的な遡上高と surf-similarity parameter ξ との関係式及び ξ の確率分布式を利用し、不規則入射波による遡上高算定のための確率分布modelを導いて実験値と比較検討しその有意性を確認することにする。

2. 水理実験及び解析方法

2.1 斜面上の遡上波特性に対する影響因子

規則波を対象とする場合、海岸構造物斜面上の遡上波特性に対する影響因子は次式のような水理量で表される。

$$\frac{Ru}{H} = f \left\{ R_e, h_a/h_o, \xi, h_o/L_o, d/l_a, h_o/H, r_a/l_a, \theta, i, \beta, e, q/c/\nu, q/\sqrt{g l_c} \right\} \quad (1)$$

ここで、 Ru はrun-up height, H は入射波高, f は()の関数, R_e は Reynolds数, l_a は被覆石の単位長さ, h_o は構造物法先水深, ξ はsurf similarity parameter ($\tan \theta / (H/L_o)^{1/2}$), d は被覆石の粗度, h_o は天端高, r_a は被覆層の厚さ, θ は斜面勾配, i は海底勾配, β は波の入射角, e は空隙率, q は浸透水の流速, l_c は core部材料の代表径, ν は動粘性係数, g は重力加速度である。一方、上式で考慮していない海波の不規則性による遡上波に対する影響因子として次式の水理量が考えられる。

$$\frac{Ru_{1/n}}{H_{1/n}} = f' \{ j_{(1)}, Q_p, e, T_{1/n}, H_{1/n}, \xi_{1/n} \} \quad (2)$$

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df$$

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2)'$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df$$

ここで、 $Ru_{1/n}$ は1/n 最大遡上波高, $j_{(1)}$ は()の条件を満足する波群の平均連長, Q_p は spectral peakedness parameter, e は spectral width parameter, $T_{1/n}$ は 1/n 最大波周期, $H_{1/n}$ は1/n最大波高, $\xi_{1/n}$ は1/n最大 surf-similarity parameterである。

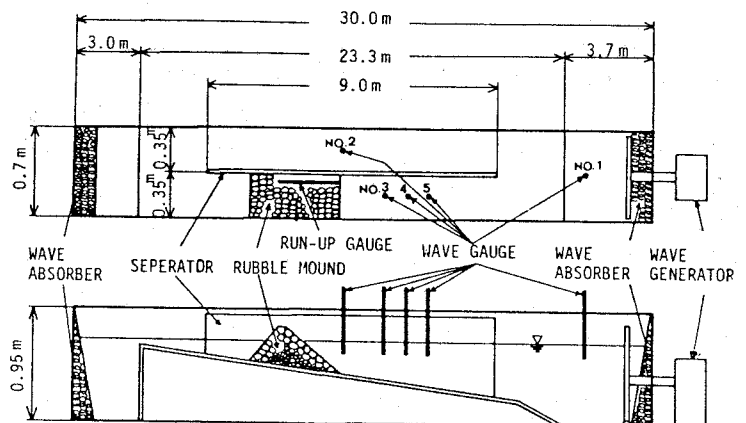


Fig.1. Layout of test flume and model structure.

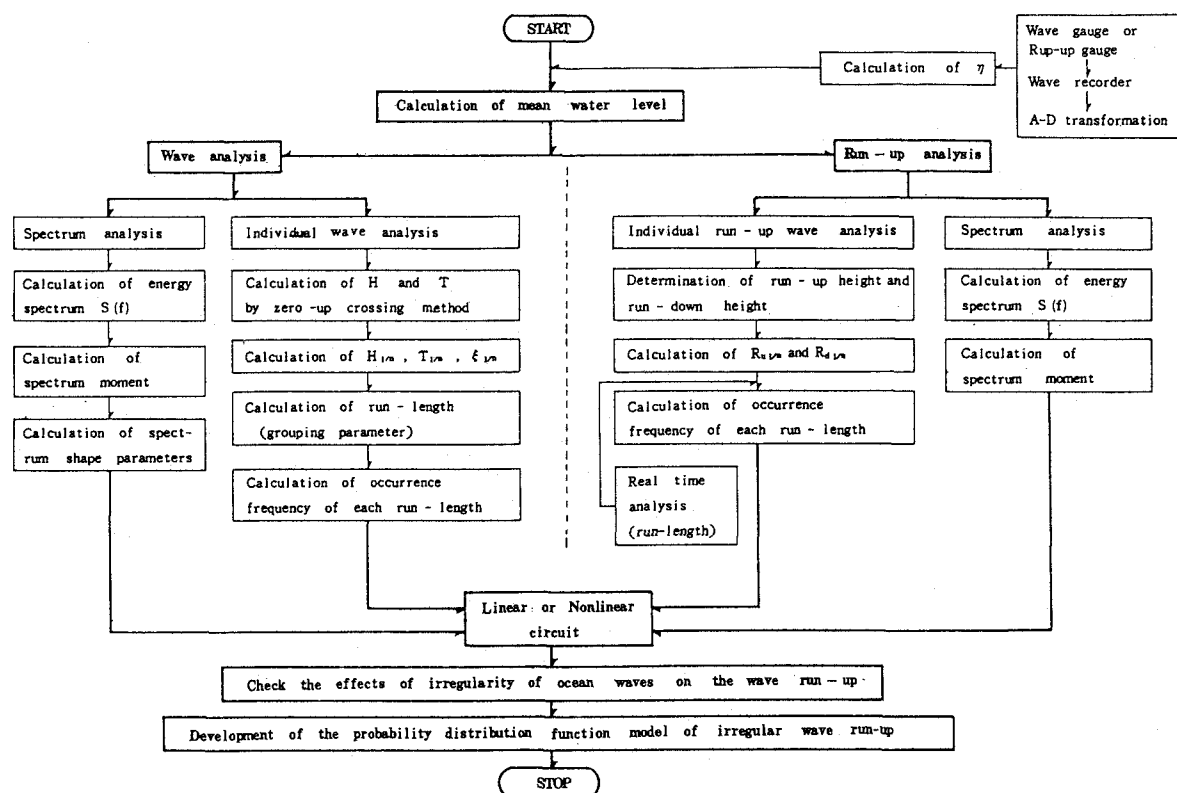


Fig. 2. Flow of the analysis.

2.2 実験装置および実験方法

代表波で表した式(1)と不規則波の特性による式(2)のような水理量の変化による遡上波の特性を検討するために水理模型実験を行った。造波水槽は Fig.1 に示したように入射波と遡上波を同時に測定するために2分割した。模型構造物は core 部と被覆層をもつ斜面傾斜が1:1.5, 1:2, 1:3である急勾配の海岸構造物を対象にし、入射波高・反射波高及び遡上波高は Fig.1 に示した場所で電気容量式 sensorにより測定した。

また、不規則波の造波のための入力信号は応答関数法で作成し^{3), 12)}、peak 周波数 f_p の異なる3種の Pierson-Moskowitz spectrum 形と3種の Neuman spectrum 形を基本 spectrum 形として energy level を変化させた 200case 余りの不規則波を simulation して実験に用いた。

2.3 解析方法

実験に用いた不規則入射波と実験結果得られた遡上波の統計的特性に対する解析項目とその流れは Fig.2 の通りである。この解析流れにおいて、data recorder に収録した時系列資料は $\Delta t=0.5s$ で A-D 変換して、主に波別解析法と spectrum 解析法を用いて解析した。実験結果の整理においては、先ず、実験に用いられた波の spectrum の形態、波高・周期の分布及び波群の特性の現地波浪との対応性を検証した。次に、Fig.2 に示した流れで遡上波の解析に入った。これらの結果に基づいて不規則波の特性が考慮できる遡上波高の確率分布 model を開発することにした。

3. 不規則波の遡上特性

3.1 遡上波の連なり(grouping)

従来の研究結果によると緩傾斜斜面上では前波の戻り流れが大きくなると後波の遡上高が小さくなり、前波の戻り流れが小さい時には続く波の遡上高が大きくなる遡上波時系列の特性が報告されている^{4), 13)}。最大波高

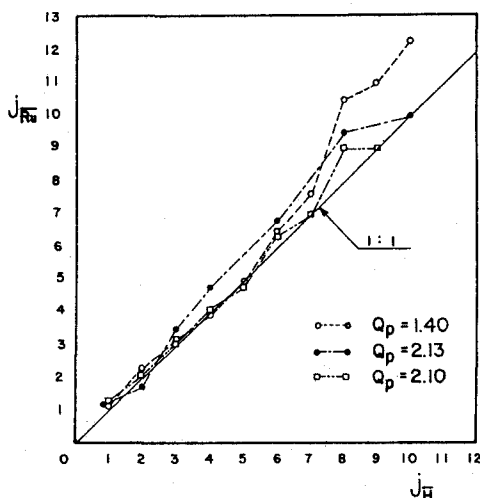


Fig.3. Relations between the run-length of higher waves (j_R) and the run-length of higher run-up (j_{Ru}).

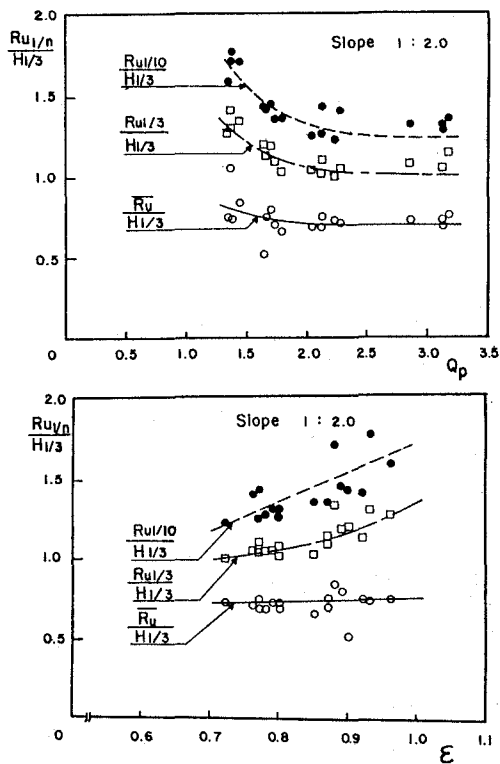


Fig.4. Irregular wave run-up versus Q_p and ϵ .

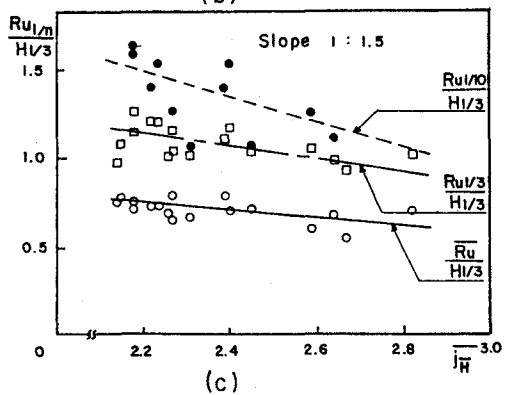
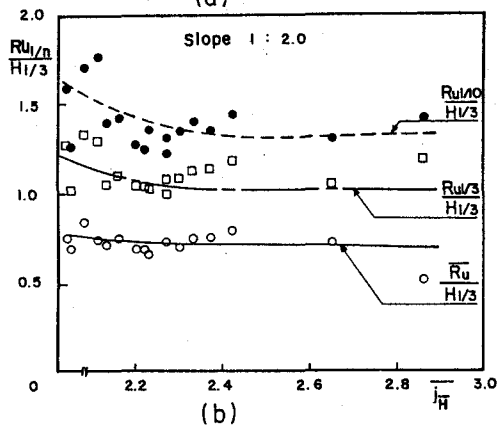
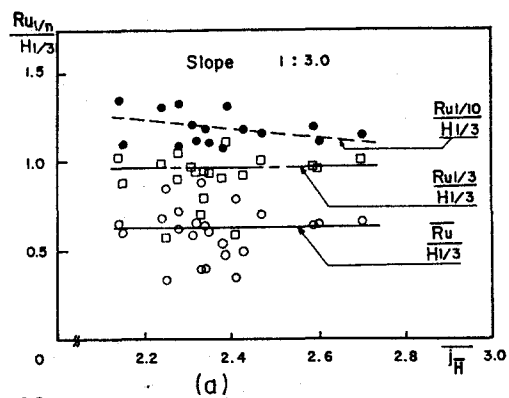


Fig.5. Irregular wave run-up versus $\bar{J}_H$ for various slopes.

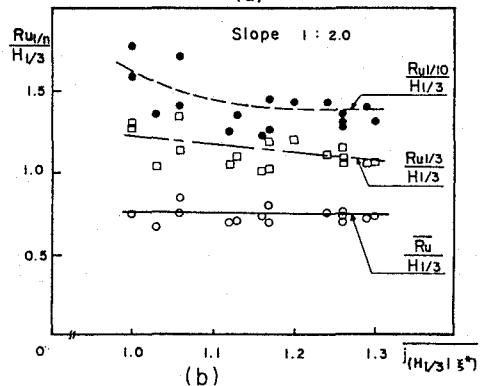
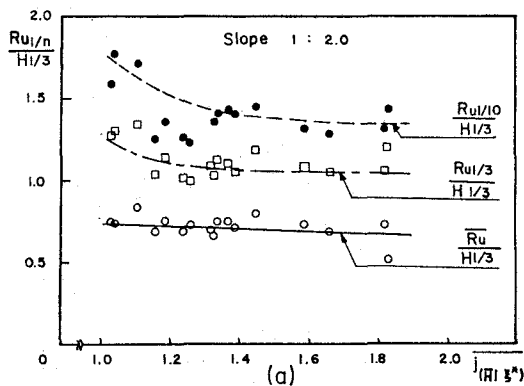


Fig.7. Irregular wave run-up versus $\bar{J}_{(\xi^*)}$.

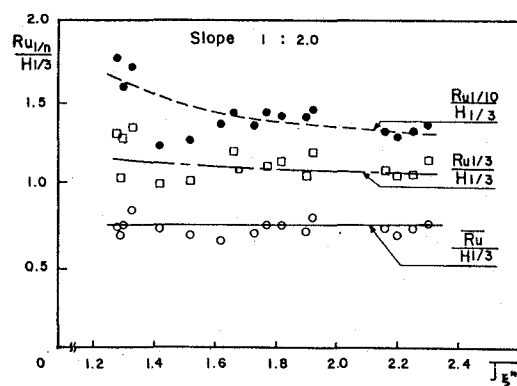


Fig.6. Irregular wave run-up versus $\bar{J}_{\xi^*}$.

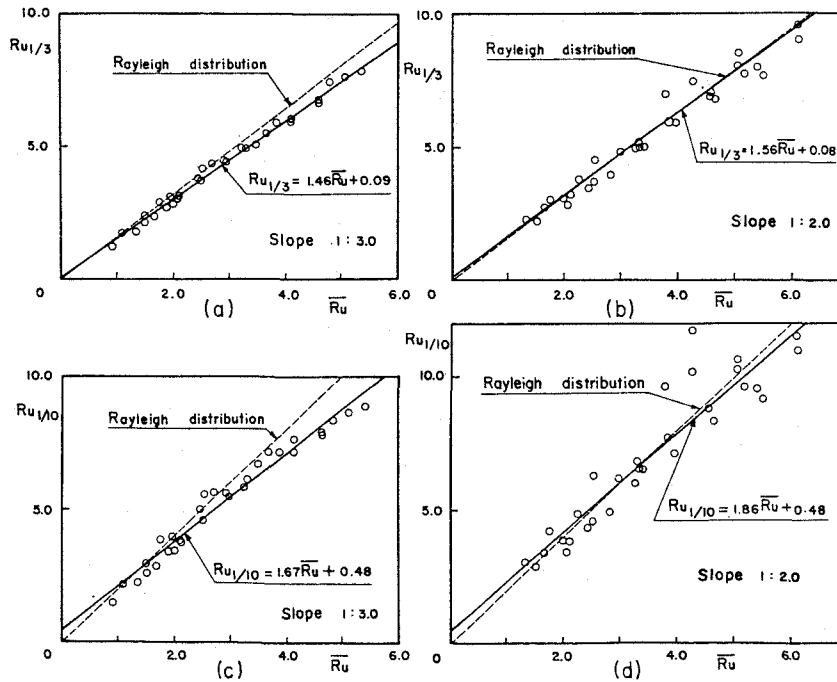


Fig.8. Relations between statistic run-up height parameters.

を含む高波の連長は長いのが一般的であるが、前述の現象などが原因になって最大遡上波を含む遡上波の連長は短くて、ほぼ1であることが多いことも報告されている。反面、実験中の観察及び資料処理の結果によると急斜面上では入射波の高波の連なる時、遡上波も連なる傾向がよく見える。Fig.3はこのような現象を示した一例であり、平均波高以上の波の連長と平均遡上波の連長を比較せ示したもので遡上波の連長は高波の連長よりやや長い傾向を示す。これは緩傾斜斜面上とは異なって碎波した前波が続く波の挙動にそれほど大きい影響を与えていない事を意味する。これらの現象から長い波群の中で最大遡上高は起こり難い状態になるかも知れないが、越波量対策及び安定性の検討において上述のような波群特性の考慮方法を考えるのは重要なことと言えよう。

3.2 Spectrum形状及び波群特性による遡上波の分布特性

Fig.4は spectrum 形状による遡上高の変化を示したもので、spectrum peakedness parameter Q_p が小さくなるほど、また spectrum width parameter ϵ が大きくなるほど遡上高の極値統計量は大きくなることが見受けられる。これは急傾斜斜面上に対するVan Oorschot and D'Angremondの結果と類似な傾向であり¹⁴⁾、緩傾斜に対する間瀬ら⁴⁾とは逆の結果が得られたと言えよう。その原因については正確に説明し難いが構造物全面での長周期性2次波浪の斜面勾配による差ではないかといえよう。

遡上波に与える波群の影響因子として高波の連(j_H)と斜面上の共振現象の発生条件を満たす波の連の平均連長³⁾(j_{ξ} 、または、 $j_{\xi,1H}$)と遡上高の統計値との関係を調べた結果がFig.5, Fig.6, Fig.7に示されている。いずれの場合においても連長が短いほど遡上高の極値統計量が大きくなっていく傾向を見せている。このような現象になるのはspectrum形とgrouping factorとは線形的な相関をもつものを考慮すると^{3), 4), 11), 12)}前述した spectrum 形の影響による原因と同様なものと考えられる。

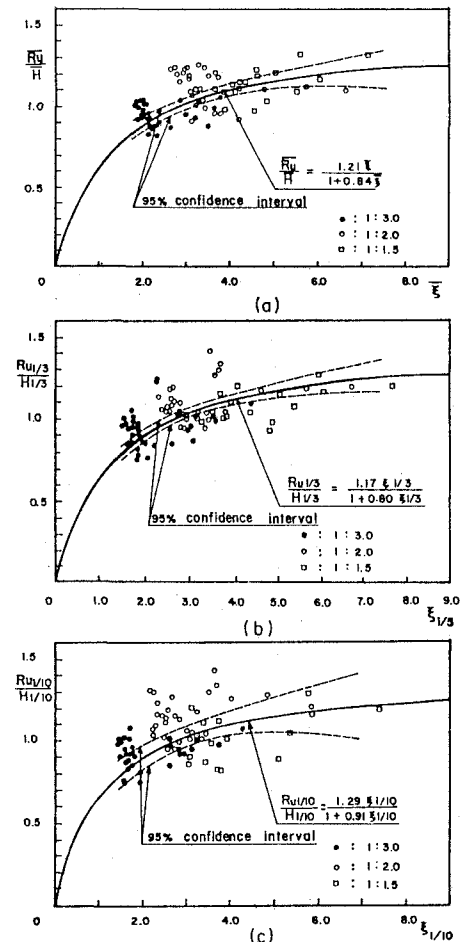


Fig.9. Irregular wave run-up versus ξ for various slopes.

3.3 不規則波による斜面上の遡上高算定model

Fig. 8 は不規則波の遡上高の統計分布を示したものである。図中においてRayleigh分布式と回帰式が比較的によくあっている事がわかる。しかし、Fig. 8 のような分布特性だけでは入射波特性から直接に遡上高が算定できない。そこで、本研究では規則波を対象とした遡上波の説明によく用いられてきたきと不規則波の遡上高の関係を検討し、 ξ の確率分布特性を考慮する model を考えていく。まず、式(3)のような遡上高分布model 式を用いて不規則波による実験値に当てはめて回帰曲線を求めると式(4)-(6)になり、これらに対する 95% 信頼区間は式(7)-(9)になり、それを示したのがFig. 9である。

$$R_u = \frac{a\xi}{1+B\xi} H \quad (3)$$

$$\frac{\bar{R}_u}{\bar{H}} = \frac{1.21 \bar{\xi}}{1 + 0.84 \bar{\xi}} \quad (4)$$

$$\frac{R_{u/3}}{H_{1/3}} = \frac{1.17 \xi_{1/3}}{1 + 0.80 \xi_{1/3}} \quad (5)$$

$$\frac{R_{u/10}}{H_{1/10}} = \frac{1.29 \xi_{1/10}}{1 + 0.91 \xi_{1/10}} \quad (6)$$

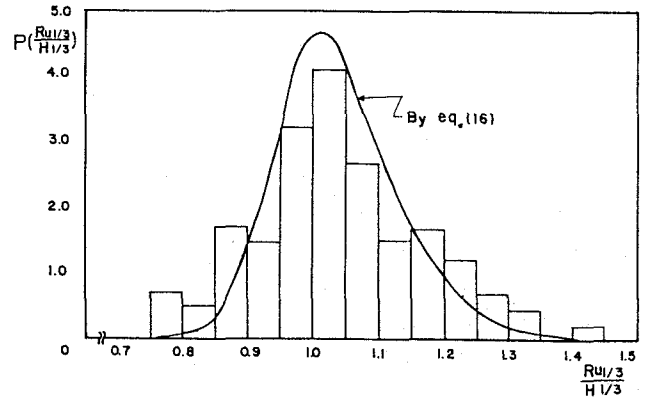


Fig.10 . Probability distribution of irregular wave run-up $\frac{R_u}{H_{1/3}}$

$$\frac{\bar{R}_u}{\bar{H}} - (2.365)(0.103) \sqrt{\frac{1}{83} + \frac{(\bar{\xi} - 3.34)^2}{107.90}} < \mu \frac{\bar{R}_u}{\bar{H}} | \bar{\xi} < \frac{\bar{R}_u}{\bar{H}} + (2.365)(0.103) \sqrt{\frac{1}{83} + \frac{(\bar{\xi} - 3.34)^2}{107.90}} \quad (7)$$

$$\frac{R_{u/3}}{H_{1/3}} - (2.365)(0.111) \sqrt{\frac{1}{83} + \frac{(\xi_{1/3} - 3.11)^2}{137.27}} < \mu \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}} | \xi_{1/3} < \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}} + (2.365)(0.111) \sqrt{\frac{1}{83} + \frac{(\xi_{1/3} - 3.11)^2}{137.27}} \quad (8)$$

$$\frac{R_{u/10}}{H_{1/10}} - (2.365)(0.218) \sqrt{\frac{1}{81} + \frac{(\xi_{1/10} - 2.86)^2}{110.77}} < \mu \frac{R_{u/10}}{H_{1/10}} | \xi_{1/10} < \frac{R_{u/10}}{H_{1/10}} + (2.365)(0.218) \sqrt{\frac{1}{81} + \frac{(\xi_{1/10} - 2.86)^2}{110.77}} \quad (9)$$

ここで、 μ は信頼区間を表す関数である。また、式(9)のような ξ の確率分布式が用いられる¹⁵⁾。

$$P(\xi) = \frac{8 \cdot \xi_d^4}{\xi^5} \exp(-2 \xi_d^4 \cdot \xi^{-4}) \quad (10)$$

$$\text{ここで} \quad \xi_d = \frac{\tan \theta}{\left[\left(\frac{2\pi}{g} \right) \left(\frac{H_{1/3}}{T^2} \right) \right]^{1/2}} \quad (11)$$

ここで、 θ は斜面傾斜角、 $H_{1/3}$ は有義波高、 T は入射波の平均周期である。
式(5)から $\xi_{1/3}$ に対して記すと次式の様に書くことができる。

$$\xi_{1/3} = \frac{\frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}}{1.17 - 0.8 \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}} \quad (12)$$

また、 ξ の確率変数を遡上高の確率変数に変換するために式(12)をJacobian変換すると次式のようになる。

$$d\xi_{1/3} = \frac{1.17}{(1.17 - 0.80 \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}})^2} d \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}} \quad (13) \quad \frac{d\xi_{1/3}}{d \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}} = \frac{1.17}{(1.17 - 0.80 \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}})^2} \quad (14)$$

式(10)と式(14)を結合すると、式(15)のようになり、

$$P\left(\frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}\right) = \frac{8 \xi_d^4}{\left[1.17 - 0.80 \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}} \right]^5} \exp \left[-2 \xi_d^4 \left(\frac{\frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}}{1.17 - 0.80 \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}} \right)^4 \right] \frac{d\xi_{1/3}}{d \frac{R_{u/3}}{H_{1/3}}} \quad (15)$$

式(15)を整理すると最終的に不規則波に対する海岸構造物斜面上の遡上高算定に関する確率分布式を次式のように導くことができる。

$$P\left(\frac{R_{u1/3}}{H_{1/3}}\right) = \frac{9.36 \xi_d^4 (1.17 - 0.80 \frac{R_{u1/3}}{H_{1/3}})^3}{\left(\frac{R_{u1/3}}{H_{1/3}}\right)^6} \exp \left[-2 \cdot \xi_d^4 \cdot \left(\frac{\frac{R_{u1/3}}{H_{1/3}}}{1.17 - 0.80 \frac{R_{u1/3}}{H_{1/3}}} \right)^4 \right] \quad (16)$$

Fig. 10は本研究で提案した式(5)のようなmodelの適用性を検証するために全体実験条件に対する測定値と比較せ占めたものである。Fig. 10から新しく提案した modelは実際の遡上高をよく再現していることが確認され、不規則波に対する遡上波の確率分布及び遡上高の算定に非常に便利でかつ有用な手法になるmodelと言える。

4. 結論

以上、不規則波を対象とする海岸構造物斜面上の遡上波特性を検討するために不規則波の spectrum 形および grouping特性による遡上波の時系列特性と統計的特性を調べた。また、。不規則波による遡上高の分布特性と入射波の分布特性を関連させて信頼性と確率論的概念が適用できるような不規則波に対する遡上高算定 modelを提案した。これは海岸構造物の最適化設計に応用できる成果を得たといえる。しかし、本研究でも基本的な性質に対しては論議したが入射波の波群の効果またはspectrum形、等による遡上高の変化をより正確に parameter化できなかったことと斜面傾斜の異なることにより包絡波形等と関連した長周期波動および前後波間の干渉効果が非常に異なってくるが、その境界とmechanism及び評価方法の定立が問題点として残っている。これらの問題に対しては今後の研究課題としたい。

参考文献

- 1) Johnson, R.R., E.P.D. Mansard and J. Ploeg (1978) : Effects of wave grouping on breakwater stability, proc. of 16th Coastal Eng., ASCE, pp. 2228-2243.
- 2) Sawaragi, T., C. Ryu and K. Iwata (1983) : Consideration of the destruction mechanism of rubble mound breakwaters due to resonance phenomenon, Proc. of 18th Int. Harbour Congress, pp. 2228-2243.
- 3) 柳 青鸞 : 捨石防波堤の水理学的最適設計に関する基礎的研究, 大阪大学工学部 土木工学科 博士学位論文, pp. 1-165.
- 4) 間瀬・土居・岩垣 (1983) : 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, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 114-118.
- 5) Ahrens, J.P. (1981) : Design of riprap revetments protection against wave attack, TP 81-5, U.S. Army, Corps of Engineers, C. E. R. C.
- 6) Sawaragi, T., K. Iwata and A. Morino (1977) : Wave run-up height on gentle slopes, Coastal Eng. in Japan, Vol. 20, pp. 83-94.
- 7) Sawaragi, T. and K. Iwata (1984) : A nonlinear model of irregular wave run-up height and period distributions on gentle slopes, Proc. of 19th Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 415-434.
- 8) 首藤伸夫 (1965) : 有義波のうちあげ高の関係, 土木研究所報告, 第126号.
- 9) 岩田好一郎 (1982) : 斜面上の不規則波の遡上, 1982年度 (第18回) 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-3-1~B-3-18.
- 10) 木村 晃 (1982) : 不規則波の連の統計学的特性とその応用, 1982年度水工学に関する夏期研修会講義集, pp. B-8-1~B-8-19.
- 11) Ryu, C. and T. Sawaragi (1986) : Wave control functions and design principles of composite slope rubble mound structures, Coastal Engineering in Japan, Vol. 29, pp. 227-240.
- 12) Kimura, A. (1976) : Random wave simulation in a laboratory wave tank, Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 368-387.
- 13) 木村 晃 (1982) : 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.
- 14) Van Oorschot, J. H. and K. D'Angremond (1968) : The effect of wave energy spectra on wave run-up, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., pp. 888-900.
- 15) Bruun, P. and A. R. Gunbak (1978) : Stability of sloping structures in relation to $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$, Coastal Eng., 1(4), pp. 287-322.