

波のうちあげ高におよぼすもどり流れの効果

木村 晃*・瀬山 明**・若狭 聡***

1. はじめに

数多くの研究者によりすでに指摘されているように、緩斜面への波のうちあげにおいては、前波のもどり流れが大きな影響を与える。もどり流れの原因となる1波前の波はさらにその1波前の波のもどり流れの影響を受けている。したがって、ある時点における波のうちあげには少なくとも先行する何波かの波の履歴が関係している訳であり、規則波のうちあげ高も何波かの特性の等しい波の連続したうちあげの結果であると考えなければならない。不規則波の場合、連続する波の組み合わせは多様であり、うちあげる波1波の特性が与えられても、もどり流れの影響が正しく評価されない限りそのうちあげ高さを算定することはできない。すでに不規則波のうちあげ高さに関していくつかの研究が行われ、その確率特性も与えられているが、規則波のうちあげ高さと、入射波の確率特性を結合して導いたものが多く、前述したように緩斜面の場合、規則波のうちあげ高さがすでに前波のもどり流れの影響を受けたものであることを考えると、緩斜面へのうちあげに関してこの結果を利用することには問題がある。

この研究は、緩斜面への不規則波のうちあげの特性を解明する第1歩として、実験的な検討を行ない、従来規則波を用いた検討が行われて来たため見過されて来た前波のもどり流れの影響を評価し、規則波との差異を明確にすることを試みたものである。

2. 不規則波のうちあげに関する実験

実験に用いた水槽は京都大学工学部土木工学科に設置された長さ 27 m、深さ 75 cm、幅 50 cm の両面ガラス張り、水槽の一端には電気油圧式不規則波発生機が設置してあり、他端には鋼製スロープ (1/10) を設置した。斜面上の波のうちあげる部分には、長さ 2 m、幅 2 cm、深さ 1 cm の溝を切り、遡上計をはめ込み、うちあげ高を測定した。波高計は一樣水深部 ($h=50$ cm) と斜面上

の水深 45 cm, 20 cm, 15 cm, 10 cm, 5 cm, 2 cm の各点に設置した。実験に用いた不規則波は Pierson-Moskowitz スペクトル形をもつもので、ピーク周波数 f_p を 0.4 Hz から 0.2 Hz 間隔で 1.2 Hz まで変化させたものである¹⁾。

本研究では、規則波との対応において不規則波のうちあげについて検討を行った。このため、入射波のうちあげ波に 1 対 1 の対応が取れなければならない。不規則波の場合には斜面勾配がゆるやかになるほど、 f_p が大きくなるほど多くの入射波が斜面上で重なり合って 1 回のうちあげを示すようになり、入射波とそのうちあげ高に個別の対応が取れなくなる。今回行った実験のうち、入射波のうちあげ波が 1 波ごとに対応していたのは $f_p=0.4$ Hz と 0.6 Hz の 2 つのケースだけであったので、この 2 つのケースのデータを用いて検討を行った。

入射波の諸元 (波高 H , 周期 T 等) は $f_p=0.4$ Hz のケースは $h=20$ cm, $f_p=0.6$ Hz のケースでは $h=15$ cm の位置での記録からゼロアップクロス法で決定し、沖波に変換して解析に用いた。さらに、うちあげ記録よりうちあげ波形のピーク値を読み取り、静水面からの高さでうちあげ高 R_r を決めた。解析に用いたデータは両ケースとも 1000 波である。実験値の相対うちあげ高 R_r/H_0 と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係をプロットしたところ、規則波のような一定の関係はみられず、データは広範囲に分布した。図-1 (a), (b) はデータの分布の様子を示したもので、(a) は $f_p=0.4$ Hz, (b) は 0.6 Hz の実験結果である。図中の分布は個々のデータの H_0/L_0 を表-1 に示すランクに分け、各々のランクの中ではデータの波形勾配は各ランクごとの平均値 $(\overline{H_0/L_0})_i$ に等しいとして R_r/H_0 の頻度分布を示したものである。両図とも R_r/H_0 はかなりの幅で分布し、その分布形状はほぼ左右対象となる。前述したように、入射波の H , T は砕波直前の水深で定義しており、速度分散による変形はほぼ無視し得る程度であるので、この分布は不規則波特有のものである。図中には Saville²⁾ による規則波の実験結果を示したが、図からもわかるように、データは Saville の結果 R_s/H_0 を越えるものが多く、表-1 に示すように、 $(\overline{H_0/L_0})_i$ が大きいほどその割合は増加し、

* 正員 工博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 正員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

*** 正員 中央開発(株) 技術部技術課

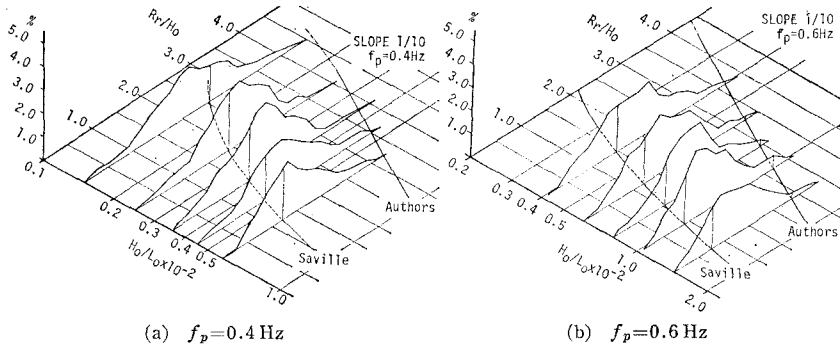


図-1 不規則波の相対うちあげ高の分布

表-1 不規則波のうちあげ高

$f_p = 0.4 \text{ Hz}$					
$H_0/L_0 \times 10^3$	1~2	2~3	3~4	4~5	5~7
$(H_0/L_0)_i \times 10^3$	1.52	2.50	3.52	4.48	5.75
R_s/H_0	2.52	1.88	1.58	1.39	1.22
$\bar{R}_r/\bar{H}_0$	2.32	2.13	1.90	1.88	1.77
$R_r/H_0 > R_s/H_0$ (%)	38	65	70	72	77

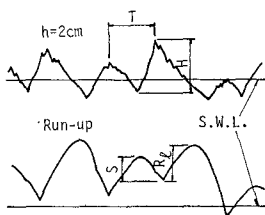
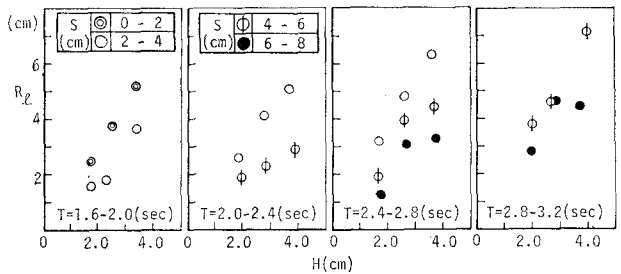
$f_p = 0.6 \text{ Hz}$					
$H_0/L_0 \times 10^3$	3~5	5~7	7~9	9~12	12~20
$(H_0/L_0)_i \times 10^3$	4.06	6.01	7.94	10.29	14.54
R_s/H_0	1.47	1.20	1.04	0.93	0.74
$\bar{R}_r/\bar{H}_0$	1.94	1.71	1.66	1.54	1.33
$R_r/H_0 > R_s/H_0$ (%)	70	77	88	86	87

あげる直前の水深 2cm に設置した波高計の記録から図のように、 H は trough-to-crest 法で、 T は crest-to-crest 法で定義した。この付近の波は砕波後の bore 状態の波であり、 T は周期というよりむしろ、bore の来襲間隔の性格を持つ。

図-3 は $f_p = 0.4 \text{ Hz}$ のデータ 1000 波分の S 、 T の値を図中に示したランクに区分けし、各ランクの H と R_L との平均値相互の関係をプロットしたものである。図から、 T の各ランクの中では R_L と H の間にほぼ直線的な比例関係があり、その勾配は S が減少するほど大きくなることがわかる。

$f_p = 0.6 \text{ Hz}$ の $(H_0/L_0)_i = 0.0145$ では実に 90% 近くのデータが規則波の値を越える。

規則波との間にこのような差が生ずる最大の原因は、最初にも述べたように、前波のもどり流れの存在であると考えられる。したがってここでは、もどり流れの強さとうちあげ高との関係を検討することにする。ただし、うちあげ高はもどり流れと次のうちあげ波との相対的な関係で決まる現象であり、静水面等の絶対的な基準点からの高さとして定義するよりも前波のもどり流れとの相対的な関係で決まる値を使う方が詳細な検討が可能であると考えて、図-2 に示すようにうちあげ波形の trough と crest との高さの差をうちあげ高さ R_L とした。またもどり流れの影響を厳密に評価することは困難であったので、前波のうちあげ波形のピークと次のうちあげ波の trough との差 S で評価することにした。また入射波は、うち

図-2 R_L , S , H , T の定義図-3 $R_L \sim H$

S は図-2 に示したように、前の波のうちあげの最高点と、ひき波の wave front が次のあげ波の wave front に遭遇する点との差である。したがってこれが大きいほど、位置エネルギーから変換される運動エネルギーは大きくなり、次のうちあげ波はこれを遡上する過程において砕波し、著しくエネルギーを消耗しうちあげ高を低下させる。つぎに T による影響に関して、これは前述したように周期と云うより、入射波の来襲間隔と考えることができる。すなわち、これが大きくなるほど次のうちあげ波はもどり流れとのかかり合いが短くなり、エネルギーの消耗が少なくなり高くうちあげる。 T が大きくなり過ぎると、もどり流れの流下が完了してしまい、 T の影響は小さくなる。この場合にはうちあげ波形の trough が丸みを帯びるようになる²⁾。逆に T が小さくなり過ぎると、前波を追いつく波が出て来るため、入

射波とうちあげ波との対応が取れなくなる。ここで解析に用いたデータには、 T に関してこれら両極端のデータはわずかであった。したがってほとんどのデータは何らかの形でもど流れの影響を受けていると考えてよい。結局、 S 、 T は直接、間接的にもど流れの影響の程度をあらわすパラメーターになっており、図-3から結論できる、 S が小さいほど、逆に T は大きいほど R_t が大きくなるという結果は、もど流れの影響が小さいほどうちあげ高が大きくなることを示している。

不規則波の場合、上のような状況は前波の波高に比して次のうちあげ波の波高が大きい場合、つまり Burcharth⁴⁾ のいう波高の jump がおこった時とか、前波の周期がもど流れの流下時間より十分長い場合にこのような現象が起る。後に示すように、このような状況の生起確率は決して小さくない。図-1、表-1に示したように、 R_T/H_0 が R_S/H_0 を大きく上まわる現象はこうした波の不規則性に起因するものと考えられる。

3. 限界うちあげ高さ

2.で示したように、前波のもど流れの影響が小さいほど次の波のうちあげは大きくなる。これより、ここで対象とする緩斜面ではもど流れのない場合が最大のうちあげを生ずる場合と考えてよい。したがって最大のうちあげ高がどの程度に達するかという点について検討するためには、もど流れを除去して実験を行う必要がある、ここでは次のような工夫により実験を行った。

実験に用いた水槽は鳥取大学工学部の長さ20m、幅50cm、深さ65cmのコンクリート製一部ガラス張り水槽で、造波機はピストンタイプである。実験はすべて規則波を用いて行い、図-4に示すように水槽の一端に設置した塩ビ製スロープ(1/10)へのうちあげ高を測定した。実験ケースは単純に規則波を作用させた Case-I、斜面上の水深20cmの点に薄い反射板(上下に可動)を設置して行った Case-II、さらに水深9cmの位置に止水壁(可動)を設置してそれより岸側の水を反射板と止水壁の中に汲み上げて行った Case-III の3通りの実験を行った。Case-II では反射板より岸側は静水面であり、入射

波の zero-up-cross 点が丁度反射板の位置にきた瞬間に反射板を引き上げると、波はもど流れのまったくない状態で斜面上にうちあげる。静水面を伝播する間の波形の変化はここで用いた波(周期1sec~2sec)ではほぼ無視し得る程度であった。Case-III では反射板を引き上げるタイミングは同じであるが、止水壁を取り去るタイミングを調整し、これを取り去ることにより発生する波の2度目のうちあげが最も高く達した時に入射波がその上を追い越してうちあげていくような状況を作り、波が dry bed 上をうちあげることによる摩擦等によるエネルギーの損失が少なくなるようにした。一様水深部の水深は各ケースとも35cmとし、周期を3種類変えて実験を行った。実験結果を示したものが図-5であり、図中の

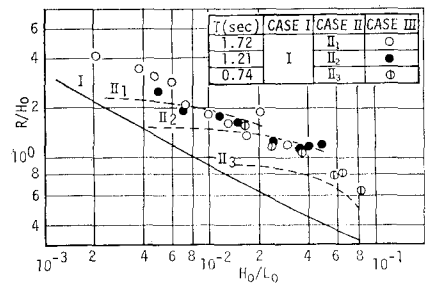


図-5 $R/H_0 \sim H_0/L_0$ (1/10)

実線 I は Saville²⁾ の実験結果を示したもので、ここで行った Case-I の実験結果もほぼこの線に載り良い対応を示した。ただしうちあげ高 R は従来と同様静水面から最も高くうちあげた点までの高さで定義した。図中の破線 II₁~II₃ はそれぞれ Case-II の実験結果を示したものである。図からわかるように、周期ごとに R/H_0 と H_0/L_0 の関係が異なり、周期が短くなるほどデータは右下方にずれてくる。さらに各周期とも共通して、 H_0/L_0 の増加にともない規則波のように R/H_0 が低下せず、ほぼ一定値かわずかに右下りの傾向を示している。規則波の場合、もど流れの最盛時、汀線付近で巻波形砕波が見られるが、このケースでは砕波せずにうちあげる。ただ破線が中断している部分より H_0/L_0 が大きくなると、この方法による実験でも砕波が生じ、うちあげ高の急激な低下が見られたので実験をうち切った。図中の丸印は Case-III の実験結果で、図からわかるようにデータはいずれも規則波の実験値 (I) の2倍程度の値を示す。ただ、前波(順流)の存在や、見かけ上の水深の変化により逆上特性が若干変化すると考えられるので破線 (II) との差がすべて摩擦によるものではないが、set-up 等で平均水位の上昇した場合にはこの程度のうちあげも存在し得るわけである。しかし図からもわかるように、データは II の各破線に対してほぼ包絡線を形成しており、各破線の先端部では Case-III のような工夫をして

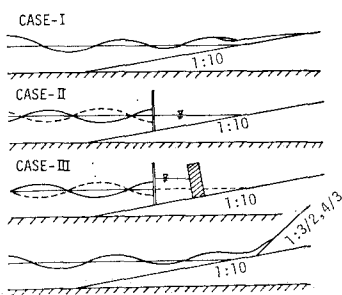


図-4 実験装置及び実験方法

も Case-II とうちはげ高にほとんど差はない。前述したように、Case-II でも破線の先端より H_0/L_0 の大きな部分では砕波のために R/H_0 が低下する。Case-III においてもほぼ同じ H_0/L_0 で砕波したので同様に実験を打ち切った。このように、Case-III のデータはうちはげを阻止する要因が除去してあり、Case-II の結果から見れば一種の限界に達している訳でもあり、それぞれの H_0/L_0 におけるうちはげの限界と考えてよい。

図-1 (a), (b) に Authors として示したのは Case-III のデータの平均的な傾向を記入したものである。同図からもわかるように、うちはげ限界線は不規則波のうちはげ高の分布の上限とほぼ一致しており、規則波、不規則波を問わず最大のうちはげは Case-III の状況で発生することがわかる。図-1 (b) で H_0/L_0 が 1.0×10^{-2} より大きな部分でわずかに、曲線を越えるものもあるが、個別に検討した結果、ほとんどが T が小さいデータであり、速度分布等によるうちはげまでの変形によるものと考えられるが、それぞれの分布におけるデータの高々 4% 以下であり、うちはげ限界線を引き上げる必要はないと考える。

4. 堤体へのうちはげ

3. で説明したように、前波のもどり流れ、摩擦等のうちはげの阻止要因を軽減すれば規則波のうちはげの最大 2 倍程度までうちはげることがわかった。次にこの斜面上に設置された堤体には最大どの程度までうちはげるかという点について検討する。実験に用いた堤体は図-4 の下部に示すように、1/10 斜面上に水平から見て勾配が 3/2 と 4/3 の 2 種である。

図-6 は勾配 4/3 の堤体の設置位置を沖から岸の方へ徐々に位置を変えて設置し、それぞれの点での堤体へのうちはげ高を測定したもので、丸印が Case-I、三角印が

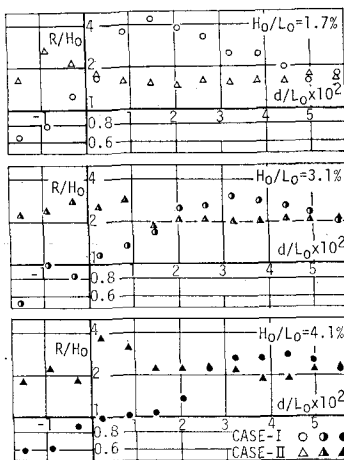


図-6 設置水深による相対うちはげ高の変化 (4/3)

Case-II の結果である。図中に示したように、3 種の波を用いて実験したが、いずれも沖側では Case-I (規則波) の方が高くうちはげる。特に $H_0/L_0=0.017$ のケースの $d/L_0=0.015$ (d は堤体ののり先水深) 付近でかなり顕著な極大値が見られるが、これは Bruun らの指摘する resonance の条件をほぼ満足した点である。水深の減少とともに規則波のうちはげ高は徐々に低下し、汀線より少し沖側で Case-II の実験結果と逆転する。規則波の結果は以後も徐々に低下する。Case-II の結果は堤体が汀線より岸側に設置された場合もしばらくは一定のうちはげ高を保つが、やがて減少を始める。しかしこの間 Case-I のうちはげ高との間にかかなり大きな差が生ずる。これより汀線より沖側では規則波の方が大きなうちはげを生じ、場合によっては resonance 点のようにかかなり大

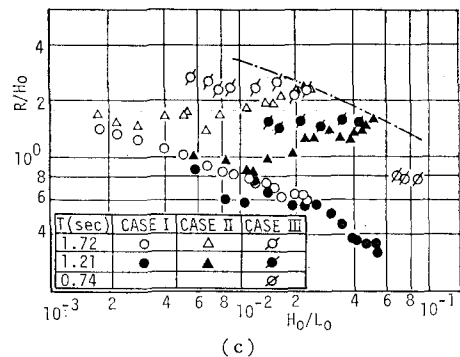
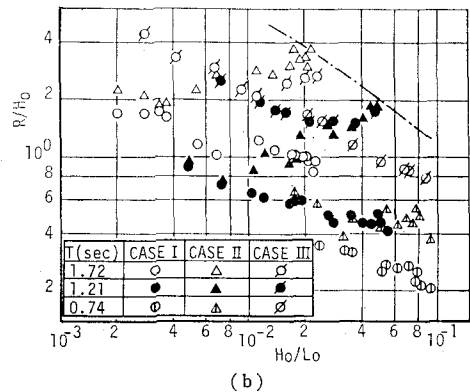
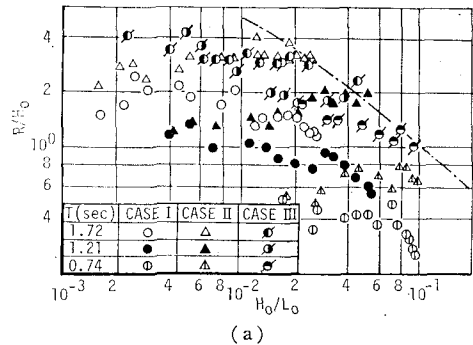


図-7 $R/H_0 \sim H_0/L_0$ (3/2)

きなうちあげ高になる場合もある。しかし堤体が汀線より岸側にある場合には不規則波のうちあげ高は規則波のそれより大きくなる場合が多い。しかし, resonance 現象が何波かの同じ波の連なりにより発生する現象であるとすれば, 不規則波の場合この現象が存在するかどうか疑問である。

つぎに 3. で行った実験と同様にして堤体を設置した場合の限界うちあげ高について検討を行った。その結果を示したのが, 図-7 (a)~(c) である。堤体の法面勾配は 3/2 である。(a) は汀線上, (b) は汀線より斜面に沿って 30 cm, (c) は 50 cm 岸側に堤体を設置した場合の結果である。各図とも丸が Case-I, 三角が Case-II, 斜線の入った丸が Case-III の結果である。Case-I のデータに周期ごとにわずかに異なる傾向が見られ, H_0/L_0 の増加にともなう R/H_0 の低下が 図-5 の規則波の結果に比してわずかに緩やかになっているが, この傾向も堤体の設置位置が汀線から離れるにつれて小さくなる。

Case-II の相対うちあげ高は H_0/L_0 の増加とともに, 大きくなり, 前述した限界うちあげ高は規則波に比して (a) で 2.5 倍, (b) で 4 倍, (c) で 3.5 倍程度にまで達することがわかる。ここでは示さなかったが, 堤体がさらに汀線から上方に離れると, 規則波では波が堤体に到達しない場合でも同じ波を用いた Case-II の実験では到達する場合があった。また Case-III は Case-II とは若干異なるうちあげ特性を示すが, 各周期における最大うちあげ高の生ずる点では両者の結果はほぼ一致しており, 各図中に一点鎖線で示した付近に限界うちあげ高の存在が予測される。

5. 波高の jump

3. 4. ではもどり流れのない状態で実験を行ない, 対象としたスロープ, 堤体とその設置位置ごとに限界うちあげ高の存在することを示した。本文中でも述べたように不規則波の場合, このような状況はかなりの頻度で起こり得る。すなわち, Burcharth のいう波高の jump とは連続する 2 波の波高 H_1 と H_2 において H_1 が十分小さく, H_2 が大きい場合である。表-2 は h_1 と h_2 の値を種々変化させて $\text{Prob}[H_1 < h_1, H_2 > h_2]$ となる確率を示したものである⁹⁾。ただし入射波は Pierson-Moskowitz

表-2 Prob [$H_1 < h_1, H_2 > h_2$]

$h_1 \backslash h_2$		$H_2/H_{1/3}$			
		1.0	1.25	1.50	1.75
$H_1/H_{1/3}$	0.1	0.0019	0.0005	0.0001	—
	0.2	0.0073	0.0019	0.0004	0.0001
	0.3	0.0157	0.0043	0.0009	0.0001
	0.4	0.0272	0.0074	0.0015	0.0002
	0.5	0.0403	0.0112	0.0023	0.0004

スペクトル型の不規則波である。表からも, 3. 4. で行った Case-II, III の実験が仮想的なものではなく, このような状況がかなりの確率で出現し得ることがわかる。

一方, 周期に関して Bruun⁹⁾はすでもどり流れの流下時間を与えているが, これは規則波を用いた結果であるので, 一般の不規則波に対しては適用できない。したがって前述したように, 流下時間と入射波の来襲時間の関係から, 大きなうちあげ高の発生する確率を推定することは, 現状では困難であり, 今後検討を要する。

謝 辞

最後に, 不規則波のうちあげ実験に際し, 装置の利用を快諾していただいた京都大学岩垣雄一教授, 実験ならびに解析に協力していただいた京都大学間瀬肇助手に感謝するとともに, 実験に協力していただいた島根県庁佐々木謙二氏, フジタ工業玉川昌之氏 (いずれも当時学生) ならびに鳥取大学大学院糟谷恭啓君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波発生機による現地波浪のシミュレーションシステム, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 231~236, 1974.
- 2) Saville, T. Jr.: Wave run-up on shore structures, Trans. ASCE, Vol. 123, pp. 139~150, 1958.
- 3) Bruun, P. and A. R. Günbak: Stability of sloping structures in relation to $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0}$ risk criteria in design, Coastal Engg., 1, pp. 287~322, 1977.
- 4) Burcharth, H. F.: A comparison of nature waves and model waves with special reference to wave grouping, Proc. 17th International Conf. Coastal Engg., pp. 2992~3009, 1980.
- 5) Kimura, A.: Statistical properties of random wave groups, Proc. 17th International Conf. Coastal Engg., pp. 2955~2973, 1980.