

堤防に斜めに波が入射する場合のうちあげ高について

細井正延*・首藤伸夫**

1. 緒言

従来、堤防高さを決定するのに用いたうちあげ高に関する実験は、そのほとんどが2次元水槽におけるものであった。したがって現実の海岸でのように、堤防のり線に対してある入射角をもって波がおしよせる場合に、うちあげ高がどう変化するであろうかということは、考慮できないのが普通であった。

われわれは、以下に紹介するような平面水槽において実験を行ない、その結果を図にまとめるとともに、オランダ、またはソ連で行なわれたこの種の結果との比較をした。

2. 実験装置および実験方法

実験水槽：土木研究所赤羽分室にある幅 13.5 m、長さ 21.5 m のものを使用した。実験水深は 45 cm であった。造波装置はフラッター型で、造波板は幅 13 m のものである。周期はベルト式変速機で連続的に変えることができ、波高はブーリーでのアーム位置を階段的に変えることによって変化させる。

模型堤防：高さ 80 cm、のり勾配 2 割、入射角は 0° 、 30° 、 45° 、 60° の 4 種類である。

実験使用波：波高は 2.0~12 cm、周期 1.2~1.6 sec とした。これから $d/H_0=3.8\sim22.5$ 、 $d/L_0=0.11\sim0.22$ の程度となる。

(1) 入射波の測定

造波板のすぐ近くでは波形がきれいでなく、しかもある程度はなれなければ、その間での波高減衰もいちじるしい。われわれの実験では造波板より約 8 m 程度、波の数にして 3 波以上造波板からはなれることが必要であった。

また、波峯線の方角についても波高は必ずしも一定とは考えられず、中心線をはさんで幅 4 m 程度のところだけが一定であり、そこから側壁に向かって波高が落ちていくことがわかった。

周期についても測定を行なった結果、 $T=1.2\sim1.6$ sec の間では、周期から微小振幅波理論を用いて求めた波長と、実測波長とが一致することがわかった。

このようなことを考えに入れて、入射波測定位置を造波板より 9 m の位置にきめ、中心をはさんで幅 4 m の間に、抵抗線型波高計を 3 本設置した。これを市販のひ

ずみ増幅器に入れ、電磁 オッシロ グラフ で記録した。キャリブレーションを行なった結果、この波高計は 0 点をばさんで上下 20 cm 程度は線型性が保たれることがわかっていてる。

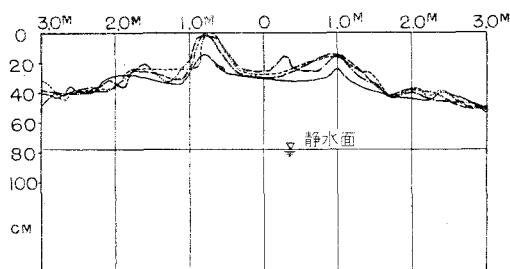
(2) うちあげ高の測定

われわれの水槽は長さが限られているので、長時間運転を行なうことは不可能である。模型堤防から反射された波が造波板でまた反射され、再び堤防に達するまでにうちあげ高の測定をやめねばならない。このため、1 回の試行においては平均して 15 波程度しか利用できない。そのうえ入射波について述べたように、中心の幅 4 m 程度しか入射波波高が一定でないで、この幅の中でのうちあげ高を測定しなければならない。

このように、時間的、場所的に一定の特性を有する波がおしよせるようにしても、うちあげ高は一般に時間的、場所的に変動する。

時間的変動を平均するためには長時間運転を行なえばよいのであるけれども、大体 15 波程度の資料を得れば、その間にあらわれてくる値以上あるいは以下の値のでてくる確率はきわめて小さく、またそのような極端な値が平均値におよぼす影響はほとんどないに思われた。測定にあたって問題となったのは時間的変動でなく、場所的な変動であった。2 次元水槽の実験においてさえ、場所によってうちあげ高が異なるのであるが、ここで行なった実験のように平面的な拡がりをもつ場合には、場所によってうちあげ高がいちじるしく異なってくる。この例を図-1 に示そう。図-1 は、1 回の試行中最大はいあがり高を示した位置を堤防のり面にそって測定したものである。図には 8 回の試行中の 4 回の例を示してある。この例での入射波波高は約 9 cm であるにもかかわらず、のり面にそっての最大はいあがり高と最小値の差は約 40 cm、これを高さになおすと約 18 cm、したがって、この場所的変動だけでも $R/H \approx 2$ の程度となる。図-1

図-1 うちあげ高の場所による違い
($H_0 \approx 9.4$ cm, $H_0/L_0 = 0.025$)



* 正員 工博 建設省土木研究所 海岸研究室長

** 正員 建設省土木研究所 海岸研究室

は、各試行中の最大はいあがり高のみをしるしているの
であるが、その最大値、最小値を生ずる位置はだいたい
一定しているようであり、また一試行中の各波ごとの傾
向もだいたい似かよっているようであった。われわれの
実験では、だいたい最大値を与えるところ、平均値を与
えるところ、最小値を与えるところ、という代表点を3
カ所選びだし、ここでのうちあげ高を読むこととした。
この3カ所で約15波によるうちあげ高を読み、それ全
体の平均を行なったものを平均値、3カ所の記録のどれ
かにふくまれている最大のものを最大値、これと逆のも
のを最小値とした。

3. 実験結果

まず、平均値についての結果を図-2(a), (b), (c),
(d)に示す。ここで入射角 α は波峯線と堤防のり線のな
す角である。Saville¹⁾の実験によると、 $d/H_0 > 3$ なら
 R/H_0 は H_0/L_0 のみによるのであるし、また佐藤・岸²⁾
によると、 $h/L_0 > 0.12$ では R/H_0 はほとんど h/L_0 に
はよらない。ここでの実験では $d/L_0 > 0.11$, $d/H_0 > 3.8$
の程度であるから、 R/H_0 はほとんど H_0/L_0 によって変
わるだけであろうと期待される。図-2をみると d/L_0
の差で若干異なる結果がでているようであるけれども、
資料数も少ないため、 d/L_0 による差を明確にすること
ができないので、ここでは区別せずに1本の平均的曲線
を与えることとした。

図-2(a) のり勾配2割に対するうちあげ高($\alpha=0^\circ$)

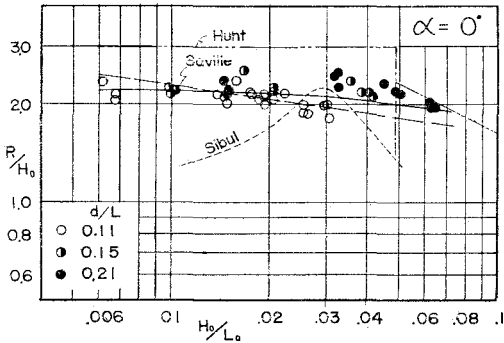


図-2(b) のり勾配2割に対するうちあげ高($\alpha=30^\circ$)

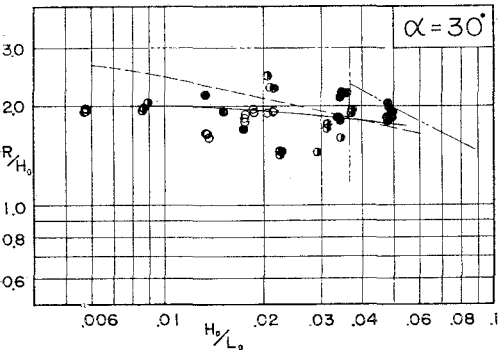


図-2(c) のり勾配2割に対するうちあげ高($\alpha=45^\circ$)

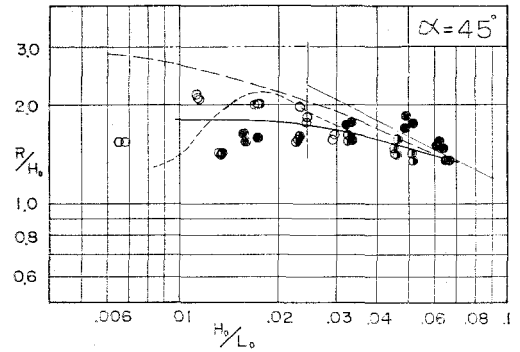
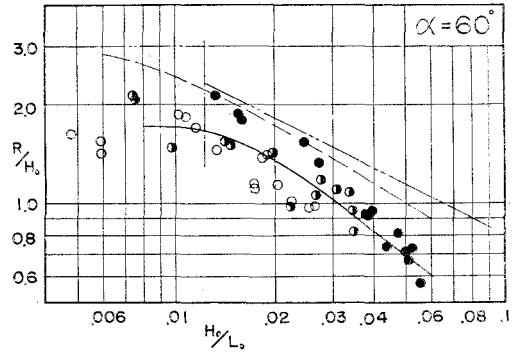


図-2(d) のり勾配2割に対するうちあげ高($\alpha=60^\circ$)



いま、堤防のり面が水平面となす角を i 、波峯線が堤
防のり線となす角を α とし、波入射の方向にそってはか
った堤防の傾射角を i' としよう。これらの角の間には

$$\tan i' = \tan i \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

がなりたつ。こうしてみると、ごくせまい幅にかぎって
考えると $\tan i'$ の勾配を有する堤防が、波の入射方向に
直角に相対していると考えてみる事ができる。そうし
て、2次元水槽における Saville, Sibul³⁾ などの実験値、
また Hunt⁴⁾ の曲線を記入しておく。Saville の実験値と
われわれの実験値とはだいたい似かよっており、一般に
われわれの実験値が Saville のものにくらべて下方にあ
る。ただし、 H_0/L_0 の大きいところで d/L_0 が大きくな
ると、われわれの実験値が Saville のものより大きな値を
与えることがある。こういう点は d/L_0 の影響がでてき
ているためであろう。Sibul の実験値は、ほかにくらべ
て違いすぎる。Hunt の曲線は、だいたい大きい側を包
絡しているようである。

ここで見られる一般的特徴として、波進行方向にはか
った堤防勾配が等しい場合には、波峯線と堤防のり線と
が一致せずにある角度を有している方が、うちあげ高は
小さくなるといえる。波峯線と堤防のり線とが一致しな
い場合には、部分重複波形式に役だつ反射波の成分が、
一致しているときよりも少なくなるため、このような現
象が現われるのであろう。

4. 入射方向性の影響

波峯線と堤防のり線のなす角 α が大きくなるにつれ、堤防勾配が同じでも うちあげ高は小さくなっていく。 $\alpha=0^\circ$ のうちあげ高に対して、各角度に対するうちあげ高の比をとって考えてみることにし、これを入射方向係数 K_α と呼ぶ。オランダの考えにしたがうと

$$R_n/H_{1/3}=A \cdot B \cdot \sin 2i \dots\dots\dots (2)$$

A : 波の条件によって変わる係数

B : 堤体条件によって変わる係数

i : 堤防傾斜角で、 $15 \sim 22^\circ$ の範囲

堤体条件のうち、波峯線と堤防のり線のなす角による係数 B_1 は

$$B_1 = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \dots\dots\dots (3)$$

である⁵⁾。また

$$B_1 = \cos \alpha - \frac{B}{L} \dots\dots\dots (4)$$

B : バーム幅, L : 波長

という実験結果もある。 $B=0$ とした

$$B_1 = \cos \alpha \dots\dots\dots (5)$$

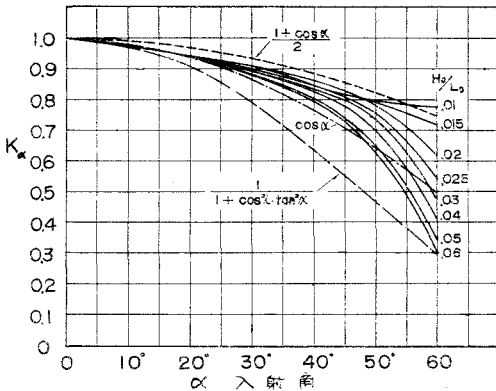
と、われわれの結果とをくらべる。

ソ連のシドロバは、詳細は不明であるが、

$$K_\alpha = \frac{1}{1 + \cos^2 i \cdot \tan^2 \alpha} \dots\dots\dots (6)$$

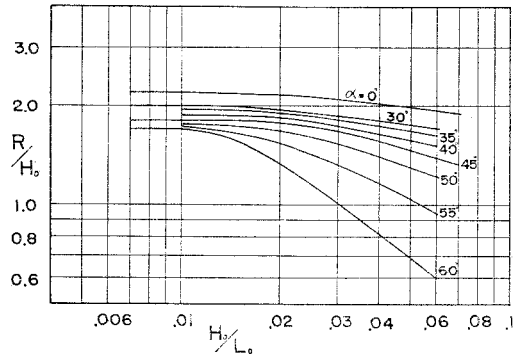
を提案している⁶⁾。

図-3 入射方向係数



これら3つの曲線を図-3に書きいれておく。われわれの結果は、 $\alpha=45^\circ$ くらいまでは $(1+\cos \alpha)/2$, $\cos \alpha$ の間の値を与え、 H_0/L_0 によって異なる曲線となっている。 $\alpha=45 \sim 60^\circ$ では、 K_α はかなり急激に変化する。シドロバの値は、われわれの実験値やオランダの結果とも違いすぎるようである。図-3にみられるとおり、 K_α は単に入射角や堤防の傾斜角だけによって変化するものではなく、 H_0/L_0 なども関連するようであるから、上記3式のような簡単な式ですべてを表わすことはできないであろう。

図-4 さまざまな入射角に対する2割堤へのうちあげ高



さまざまな入射角に対するうちあげ高を 図-4 に示す。これは 図-3 を利用して書いたものであり、入射角 5° おきにそのうちあげ高の平均値を示す曲線だと考えてよい。しかし、うちあげ高の最低側には一般にある限界がある。つまり $\alpha=90^\circ$ となって堤防からの反射波がなく、単に進行波となって波が進んでいくときの波峯の位置よりも R の値が小さくなることは、のり勾配2割のようなときにはないものと考えられる。したがって次式で表わされる η の最高値より R が小さくなることはない。無限級数による表示では⁷⁾

$$\eta_{\max} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{k} \cdot \beta^n k^n \dots\dots\dots (7)$$

$$k = \frac{2\pi}{L},$$

$$B_n = \frac{1}{2^{n-1} \cdot n!} \left[\sum_{r=0}^m (-1)^r \cdot {}_n C_r \cdot (n-2r)^{n-1} \cdot \sinh\{(n-2r)kd\} \right]$$

$$m = \frac{n}{2} - 1, n \text{ が偶数}$$

$$= \frac{n-1}{2}, n \text{ が奇数}$$

d : 水深

β と波高 H の関係は

$$H = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{2n-1}}{k} \cdot \beta^{2n-1} \cdot k^{2n-1}$$

また、3次までの展開では⁸⁾

$$\eta_{\max} = \frac{1}{8} k H^2 \cdot \coth kd + \frac{H}{2} + \frac{1}{8} k H^2 \cdot \coth kd + \frac{1}{32} k H^3 \left(\frac{1}{2} + \coth^2 kh \right)$$

ただし、

$$\frac{H}{2} = \beta (\sinh kd) \left[1 + \frac{3}{4} k^2 \beta^2 \left\{ 1 + \frac{3}{2} \sinh^2 kd \right\} \right]$$

それゆえ、 $H/2$ がだいたい半波高であることから

$$\eta_{\max} = R_{\min} = \frac{H}{2} + \frac{1}{4} k H^2 \cdot \coth kd$$

$$\therefore \frac{R}{H} = 0.5 + \frac{1}{4} k H \cdot \coth kd \dots\dots\dots (8)$$

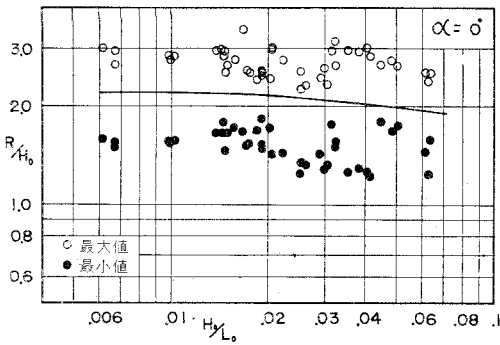
この値より R/H の値が小さくなることは考えられないから 図-4 を用いて得た値が、式 (8) で求めた値より

小さいときは式(8)の結果を用いる必要がある。

5. 平均値と最大値, 最小値の幅

いままで, 平均値についてのみ議論してきた。Savilleの値も平均値の曲線となっている。しかし, すでにみたように R/H_0 は一定の入射波によっても, 場所的, 時間的に変動するものであった。そして最大値と最小値の差は, それだけでも $R/H_0 \approx 2$ に相当する大きさであった。 $\alpha = 0^\circ$ のときの平均値曲線と最大値, 最小値の分布を図-5に示す。このように変動の幅が大きいから, 設計にあたり平均値曲線を用いるか, または最大値を包絡するような曲線を用いるかについての再考慮がなされてしかるべきであろう。

図-5 最大値, 最小値と平均曲線



Hunt は反射率 0.5 を与えるような H_0/L_0 の値 (Iribarren-Nogales の式より計算される) よりも小さい H_0/L_0 に対しては, 最大値を包絡する $R/H_0 \approx 3.0$ を与えることを提案している。

このように, 実験値の大きな側を包絡する曲線を設計に用いるという考え方を採用する必要があるのではなかろうか。

6. 結 論

① 平面的なひろがりをもつ水槽での実験では, うち

あげ高は時間的, 場所的に変動することがみられ, その最大最小の差だけでも $R/H_0 \approx 2.0$ の程度である。

② $d/L_0 > 0.12$ では, R/H_0 の値はほとんど d/L_0 によらないといわれるが, 若干 d/L_0 による差があるように思われる。ただし, われわれの場合, 資料数が少ないので, この差を明確にすることができなかった。

③ 波進行方向にそっての堤防勾配が同じであれば, 波峯線と堤防のり線のなす角が 0 のときにくらべ, ある角度を有するものの方が, R/H_0 は小さい。重複波生成にあずかる反射波成分が小さいためであろう。

④ 入射方向係数 K_a の値は, 波入射角のほか, 一般に H_0/L_0 などの値が関係しているようにみえる。 $\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$ の間では, $\cos \alpha < K_a < (1 + \cos \alpha)/2$ の値をとる。

⑤ さまざまな入射角に対するうちあげ高を図-4に示す。最小のうちあげ高は, $R/H = 0.5 + \frac{1}{4} kH \cdot \coth kd$ である。

⑥ 測定精度の良好な実験においても, 実験値は平均値のまわりに大きな幅をもって分布する。したがって, 設計の規準として平均値を用いることには, 再考慮の余地があるのではなかろうか。

参 考 文 献

- 1) Saville, T.J. : Wave run-up on shore structure, J.W.W. H., Proc. of A.S.C.E., Apr. (1956).
- 2) 佐藤清一・岸 力 : 海岸堤防の形状特性ならびに陸岸への週上, 海岸工学講演集, 第3回, (1956).
- 3) Sibul, O.J. : Flow over reefs and structures by wave action, Trans. A.G.U., Vol. 36, No. 1 (1955).
- 4) Hunt, J.A.Jr. : Design of seawall and breakwaters, J.W.W.H., Proc. of A.S.C.E.
- 5) Wassing, F. : Model investigation on wave run-up carried out in the Netherlands during the past twenty years, Coastal Engineering, (1958).
- 6) 周 銘 : 斜面上波浪上捲高的研究, 土木工学學報, (1953. 3.).
- 7) 首藤伸夫 : 有限振幅波について, 高次級数解による進行波の碎波限界, 土研報告 第111号, (昭和36年11月).
- 8) 応用水理学, 上.