

不規則な波のはい上り高に関する一実験

堀 川 清 司*・小 森 修 蔵**

1. 緒 論

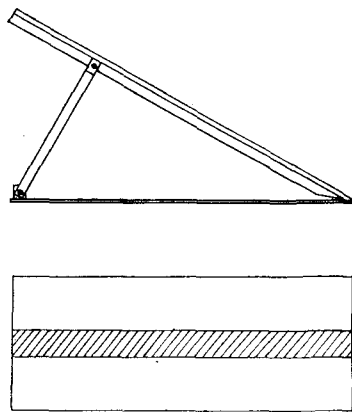
海岸堤防, 海岸護岸などの構造物設計にあたっては, 襲来する波によるうち上げ高さがどの程度になるか, またどのような分布を示すかを検討しておくことが一つの重要な事項である。

規則波による実験ならびに解析はこれまで多く行なわれており, 水理公式集¹⁾, その他²⁾ によくまとめられているが, 不規則波に関する解析は Saville³⁾ と首藤⁴⁾ があるのみである。Saville はうち上げ高 R と有義うち上げ高 $R_{1/3}$ の比がある値になる確率を超過確率の形で整理している。首藤は波の分布とうち上げ高曲線とを若干理想化したものを用いることによって, うち上げ高の分布関数を計算し, 一般に行なわれている有義波による設計が時としてうち上げに関し危険であることをかなり綿密に示している。われわれはこの2つの論文を出発点にし, 実験室で不規則波を発生させることにより, 不規則波によるうち上げ高さの連続記録をとり, 周波数分析などを行なった。その結果をここに報告する。

2. 実験装置ならびに実験方法

実験に使用した水路は, 東京大学生産技術研究所千葉実験場にある幅 0.6 m, 高さ 0.9 m, 長さ 50 m の風洞付実験水路である。水路の一端にはフラッター式造波板があり, また他端には図-2 に示すような木製の斜面を置いた。斜面の中央部には幅 10 cm, 長さ 150 cm, 厚さ 1 cm の板をはめこめるようにしてある。その板には間隔 3 cm, 高さ 5 mm で鋼線が張り渡してあり, これによってはい上りを測定した。これは一種の波高計であり, 板をはめこみにしたのは板ごとはい上り計を取りはずし, 深いバケツの中でキャリブレーションをするためである。斜面の勾配は 30°, 水深は 30 cm に保った。また波高計は斜面の下端より沖側 1.1 m の点と 8.0 m の

図-2 うち上げ高測定装置

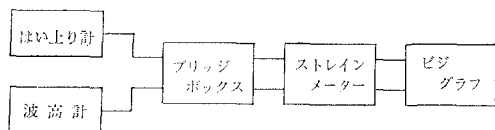


点に設置し, 堤前波形ならびに沖波波形を記録した。不規則波の発生には風とフラッターの両方を用いた。そして

- (1) 風のみによる不規則波——風波
 - (2) フラッター式造波機+風——合成不規則波
- の2通りで発生させたものを用いた。

風速測定には気象庁検定のピラム風速計を用いた。ピトー管にくらべて取り扱いが簡単であり, しかも正確である。計器類は図-3 に示すように接続し, 実験記録をとった。従来波形記録はペン書きオシログラフにとる例が多かったが, 同じ水路に同時にたくさんの波高計を入れる時はビジグラフの方が適していることがわかったので, それについて以下に述べる。

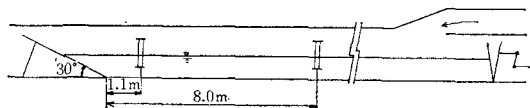
図-3 計器配置図



3. 波高計の相互干渉について

実験室で使用されている波高計の1つに抵抗線式波高計がある。これは現在のところ最も多く使われている形式であり, 精度もかなりよいものとされていた。しかし同じ水路に同時に何本も波高計を入れた場合には, 波高計間の相互干渉がかなりみられることが2~3年前あたりから問題になり始め, その原因についていろいろ検討

図-1 実験水路



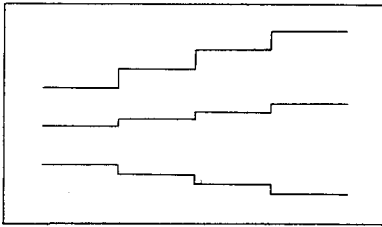
* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 東京大学大学院

し、対策を考えてきた。これについてある程度の成果が得られたのでここに簡単に報告しておく。

まず波高計の「相互干渉」について簡単に述べる。いま波高計を同じ水路に3本入れたとする。1本ずつキャリブレーションをしてみよう。おのおのが完全に独立しており、波高計相互間の干渉がないものとする、1本を1cm 上げて他は0を保ったままのはずであるが、他のものも少しずつ動いてしまう。この現象をわれわれは波高計間の「相互干渉」と呼んでいる。記録紙に記録された例は 図-4 のごときである。この場合1番上の波高計のキャリブレーションを行なっているのであるが、2番目、3番目も調子を合わせて動いてしまう。こういったことが起る原因として

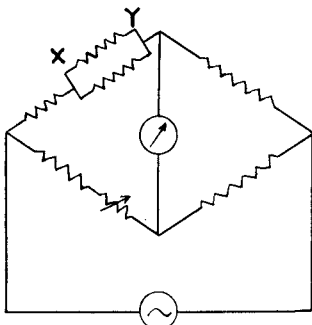
図-4 波高計の相互干渉



- (1) 水路が鉄製であること
- (2) 導体である水を使っていること
- (3) ブリッジボックス、ストレインメーター内での問題
- (4) その他

が考えられる。われわれがこの現象をはっきり認識したのは2年前である。水路の一端にいろいろな消波模型を置いた時の反射率を測定するのが目的で、4~5本の波高計を25cmの間隔で設置した。そして1本ごとにキャリブレーションを始めたところ 図-4のような「相互干渉」が見られたのである。検討の結果(1)、(2)の理由ではなく(3)であることがわかった。ストレインメーターは、元来材料の stress, strain を調べる目的のために開発された計器であり、これを波高計に応用するにはかなり注意をする必要がある。たとえば波高計として

図-5 ブリッジ回路図



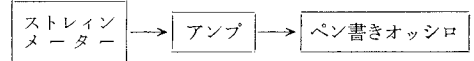
XY 間が波高計

用いる場合には、一般に 図-5 のような組みかたをするが、この理論計算をしてみると stress (われわれの場合、実際の波形) と strain (われわれの場合、記録波形) は linear の関係にない。

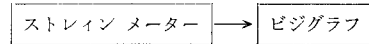
最近ではこうい

った欠点のないステップ式の波高計やキャパシタンスタイプの波高計が各所で開発されてきているが、まだ実験室での波高計の決定版といったものが生まれていないのが現況である。そこでわれわれは従来用いられてきた抵抗線式波高計をより上手に使用方法を考えてみた。

結論を先にいうと



という形式で、アンプで増幅すると、どうしても相互干渉がおこる。そこで

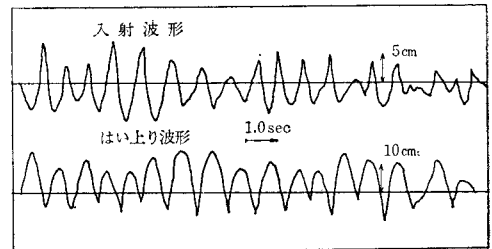


という形にし、ストレインメーターの gain はなるべく小さくし、ビジグラフの中のガルバノメーターの感度を上げると、相互干渉はせいぜい2%のオーダーで、測定上ほとんど問題はない。どうしてこういう結果になるのか理論的裏付けは今のところ不明であるが、いろいろな水路で調べたところこの方法によればどれだけ多くの波高計を同時に入れても相互干渉がおこる心配はないものと思われる。

4. 実験結果と考察

実験で得られた記録例を 図-6 に示した。上側が不規則波形の沖測での記録例であり、下側が30°傾斜面をはい上る波の連続記録である。はい上り波形が入射波形をさかさまにしたような形をしているのは注目してよいことだと思われる。すなわち入射波形は山がとがっているのに対し、はい上り波形は谷の方がとがっている。これは斜面の上方では水がゆっくり動くのに対し、斜面の下方では水が速く動くことを意味しており、目視観測でもわかることであるが、連続記録をとってみてはじめて定量的にわかった事実である。

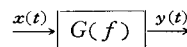
図-6 波形記録例



(1) 周波数応答関数⁵⁾

ここでは周波数応答関数を導入し、入射波形とはい上り波形を応答関数で結びつけることを考える。

いま入力 $x(t)$ が出力 $y(t)$ になったとし、その間の周波数応答関数を $G(f)$ としよう。



すなわち前頁図のような系を考える。

われわれの場合入力が入射波形に、また出力がはいり波形に相当する。一方入射波形の パワー スペクトルを $P_i(f)$ 、はいり波形のそれを $P_R(f)$ とすると

$$P_R(f) = |G(f)|^2 P_i(f) \dots\dots\dots (1)$$

が成立する。変形して

$$G(f) = \sqrt{\frac{P_R(f)}{P_i(f)}} \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。ところで

$$P_R(f) \Delta f = R_i'^2, \quad P_i(f) \Delta f = H_i^2 \dots\dots (3)$$

ここに、 R_i' ：はいり波形を成分波にわけた時の各振幅

H_i ：入射波形を成分波にわけた時の各振幅

なる関係が成立しているので

$$G(f) = \frac{R_i'}{H_i} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで R_i' ははいり波形を成分波に分解した時の各振幅であり、従来規則波の場合に使われている静水面からとったはいり高さ R とは少々意味が異なっている。そこで不規則波の場合でも R に相当する R_i を考えてみることにする。規則波、不規則波の実験結果によれば表-1 のようであり、平均して

$$R_i = 0.67 R_i' \dots\dots\dots (5)$$

の関係が得られた。この関係により $R_i' \rightarrow R_i$ に変換して整理した。

表-1

Case	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	平均
R_i/R_i'	0.65	0.70	0.63	0.72	0.66	0.67

まず 図-7 に入射波形とはいり波形のパワー スペクトルの一例を示す。両曲線はピークの位置、全体の形などよく似ているといえよう。

横軸に周波数 f 、縦軸に R_i/H_i をとって示したのが 図-8 である。このグラフを見ると f の増加にしたがって R_i/H_i は減少し、高周波数域ではほぼ 1.0 に漸近する。すなわち成分波の周波数が高くなって深海波の条件にあたるような場合は、入射波高と同じだけはい上るという結果である。一方低周波数域ではだいたい 4.0 程度であり、これは従来規則波で行なわれた実験結果とほぼ一致する。

横軸を f から h/L_{oi} に無次元換算したのが 図-9 である。前の 図-8 と同様の傾向であるが、 $h/L_{oi} \propto f^2$ であり高周波数域がひきのぼされるため、図-8 より点のちらばりが小さくなりまとまりがよくなる。

横軸に入射波形を成分波に分解した時の各成分波の

図-7 パワー スペクトルの計算例

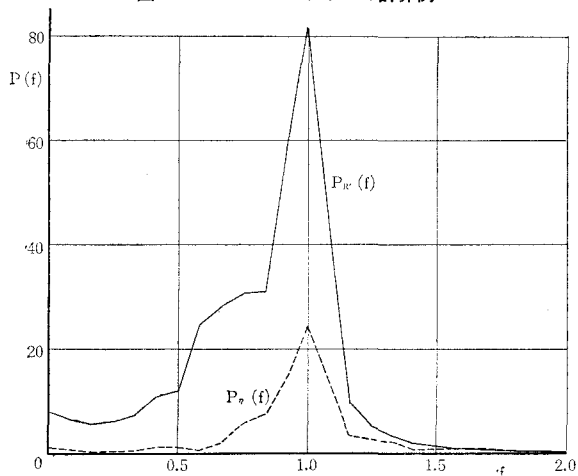


図-8 波の周波数とはいりとの関係

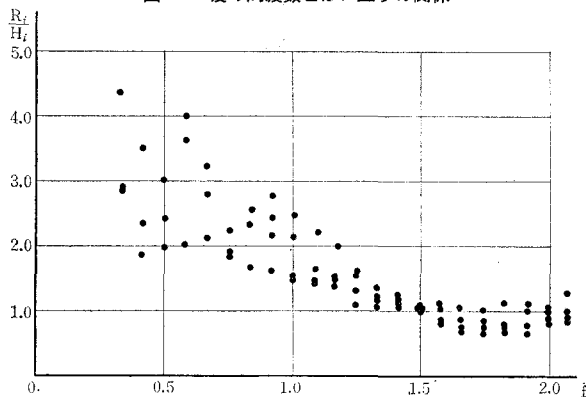
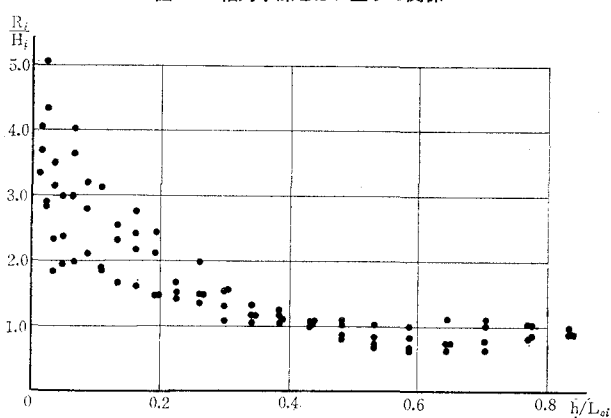


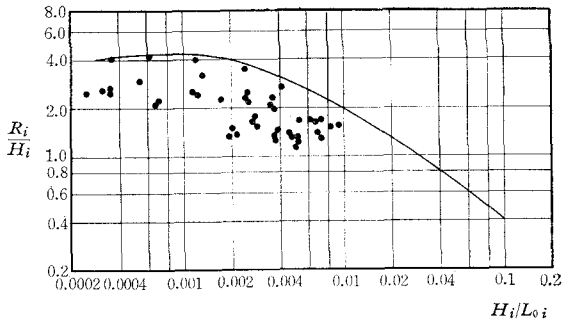
図-9 相対水深とはいりとの関係



steepness をとって示したが 図-10 である。図中の曲線は、従来規則波で行なわれた実験結果を示してある。 H_i/L_{oi} の大きい領域でのデータが不足のため断言できないが、規則波の時の曲線より全体にやや小さくなっている。

5. 検討ならびに今後の方針

図-10 波の steepness とはい上りの関係



はいり波形を連続して測定する方法についてはいろいろ考えたが、結局前述したような方法で測定記録した。しかしながらこの方法にしてもまだ問題点が残っている。すなわち斜面と鋼線の間には 5 mm のすき間があるが、波の種類によってはこのすき間をぬうようにはい上る場合があり、そういったものを正確におさえることは完全にできていない。今後、測定方式をさらに改良し、より正確なデータをとるよう努力するつもりである。

はいり高 R_i と波高 H_i との比 R_i/H_i は、波の steepness, 相対水深, 斜面の角度の関数と考えることができる。すなわち

$$\frac{R_i}{H_i} = f\left(\frac{H_i}{L_{0i}}, \frac{h}{L_{0i}}, \alpha\right) \dots \dots \dots (6)$$

α : 斜面の角度

である。このうち steepness と相対水深については規則波と対比しながら計算結果の一部を報告したが、斜面の角度をパラメーターとして考えた検討は今後に残された課題であり、ひき続き実験を継続し、データを解析中である。

またこの論文では波の統計的な特性を議論するまでに

いたらなかったが、うち上げ高さを論ずる場合やはり一度考えておくべきことだと思われる。

Bretschneider⁵⁾ によると完全に発達した波の分布関数は、波高を H_0 , 周期を T , 平均波高を $\bar{H}_0$, 平均周期を $\bar{T}$ とすると

$$P(H_0, T) = \left[1 - \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \frac{H_0^2}{\bar{H}_0^2}\right\} \right] \times \left[1 - \exp\left\{-0.675 \frac{T^4}{\bar{T}^4}\right\} \right] \dots \dots (6)$$

であるとされている。この式は波高と周期は無相関であることを示しており、物理的には必ずしも適当でない。たとえば、波形勾配にはある限界値が存在する。Michell⁷⁾ によると $H_0/L_0 < 0.142$ であり、首藤⁸⁾ によれば $H_0/L_0 < 0.12$ 程度である。首藤はこの関係式よりうち上げ高さの分布関数を計算している。

最後に終始御指導下さった本間仁教授に心より謝意を表す。また実験は、港湾研究室研究員砂村継夫氏の協力により行なわれた。あわせて感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 水理公式集, 土木学会
- 2) Saville, T.Jr.: "An Approximation of the Wave Run-up Frequency Distribution", Coastal Engineering, 1963.
- 3) "Shore Protection Planning and Design", Beach Erosion Board Technical Report No. 4, 1961.
- 4) 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 号の 2, 1964.
- 5) 本間 仁・堀川清司・小森修蔵: 水圧変動波形と水面波形の相関性, 第 12 回海岸工学講演会講演集, 1965.
- 6) Bretschneider, C.L.: "Revisions in Wave Forecasting: Deep and Shallow Water", Proc. 6th Conf. Coastal Engineering 1958.
- 7) Michell: "The Highest Waves in Water", Phil. Mag. Vol 36 1893.
- 8) 首藤伸夫: 有限振幅波について——一高次級数解による進行波の碎波限界——, 土木研究所報告 111 の 4, 1961.