

長波遡上実験式の再検討(II)

中村 武弘*・富樫 宏由*

Reexamination of the Experimental Equations of Run up of Long Waves (II)

by

Takehiro NAKAMURA

(Department of Civil Engineering)

Hiroyoshi TOGASHI

(Department of Civil Engineering)

This paper presents the results of experimental studies of the vertical rise of long waves on uniform slopes connected with the horizontal bed.

It is proved that the Kaplan's experimental relationships can not be extrapolated outside his experimental region.

The theories of the run up of long waves of small amplitude on sloping beach obtained by Keller and Keller, and Shuto are verified and the new experimental equation is presented in the region of the non-linear long waves of finite amplitude that their theoretical results do not show a good agreement with the experimental results.

The theory of the breaking condition obtained by Shuto is verified and the reflection coefficients of 1/30, 1/40, and 1/60 slopes are calculated according to the Shuto's theory.

1. 序 論

津波の陸上遡上高を算定する理論式または実験式は、津波来襲時の防災ならびに被害予測にとって最も必要なものの一つであるが、現在もなお満足すべき算定式は得られていない。従来、比較的緩い斜面（勾配 $S = 1/30, 1/60$ ）上への陸上遡上実験式としてクノイド波¹⁾状分散波列の第1波目の波形による Kaplan の実験式がよく知られている。Kaplan は、この実験式からの外挿式と Green の式に近似する Shoaling 変形式を併用し、1946年アリューシャン沖津波のハワイ（ヒロ市）での陸上遡上高を推算した。しかし、実験範囲外への外挿

は厳正な科学的観点からすれば明らかに不合理であり、Kaplan 自身もその信頼性については正当化していない。そこで著者らは、Kaplan の外挿法の検討を行なうため $S = 1/60$ の場合について実験範囲を拡げて実験を行ない、Kaplan の外挿法が誤っていることを前報²⁾で報告するとともに、新たな実験式を提案した。

本研究は、まず前報に引き続き Kaplan 流の外挿法を検討するものであり、Kaplan の行なった $S = 1/30, 1/60$ の両斜面勾配の実験式については理論的に、さらに新たな $S = 1/40$ については追実験を行なうことにより実験的にそれぞれ検討した。続いて著者らの $S = 1/40, 1/60$ の実験結果に首藤の $S = 1/30$ の実験結果を整

* 土木工学科

理し直して加え、これらの実験結果に対して Keller & Keller⁴⁾、首藤^{3),5)}の微小振幅長波の完全重複波型の遡上理論式の適用性を検討するとともに、非線形効果が大きくなり理論式の適合性の悪い領域には著者らの最適実験式を提案した。また、首藤⁵⁾の碎波条件式の適用性を実験的に検討するとともに、実験範囲内の平均的な実験直線から得られる各斜面上の長波のおおよその反射率を見積った。

2. Kaplanの実験式とGreenの式との関係

著者らは、前報告で斜面勾配 $S=1/60$ の場合についてKaplanの実験式の $H/L < 10^{-3}$ 領域への外挿が誤っていることを実験的に証明した。ここでは、 $S=1/30$ の場合を含めてこのKaplanの外挿法の誤りを理論的に考察する。

次式はGreenの式である。

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{h_0}{h}\right)^{1/4} \tag{1}$$

ここで h は水深、 H は波高であり、添字₀は初期値を表わす。

いま周期 $T = \text{const.}$ と仮定すると式(1)は次式のように変形できる。

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{h_0}{h}\right)^{1/4} = \left(\frac{gh_0T^2}{ghT^2}\right)^{1/4} = \left(\frac{L_0}{L}\right)^{1/4} \tag{2}$$

ここで g は重力加速度、 L は波長である。

次に式(2)の両辺に $(H/H_0)^{3/4}$ を掛け、さらに $3/4$ 乗すると次式になる。

$$\frac{H_0}{H} = \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{3/4} \left(\frac{H}{L}\right)^{-3/4} \tag{3}$$

更に両辺に R_0/H_0 を掛けて次式を得る。

$$\frac{R_0}{H} = \left(\frac{R_0}{H_0}\right) \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{3/4} \left(\frac{H}{L}\right)^{-3/4} \tag{4}$$

ここで R は遡上高である。

一方、 $S=1/30, 1/60$ の両勾配に対するKaplanの実験式($10^{-3} \leq H/L \leq 10^{-1}$)を外挿直線($10^{-5} < H/L < 10^{-3}$)まで含めてFig. 6に実線で示す。いま仮にこの実線が成り立つとし、この実線が $H/L=10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-5}$ で取る三つの R/H の値を初期値とした式(4)の直線を同図に破線で示す。この図より式(4)の破線はKaplanの実線と殆んど一致し、 $R_0 = \text{const.}$ が成り立つことがわかる。これはKaplanの実験式の H/L の冪数が $-0.316, -0.315$ となっていて、幸運にも変形Green式(4)の H/L の冪数 $-1/3 \approx -0.333$ と近似していた結果である。これよりKaplanの外挿法には、Greenの式を以って外挿実験式として陸上遡上現象を説明する式であ

るかの如く見たてる錯綜した論理が隠れており、これによって外挿式に対する妥当性を云々することは基本的に誤っていると云える。

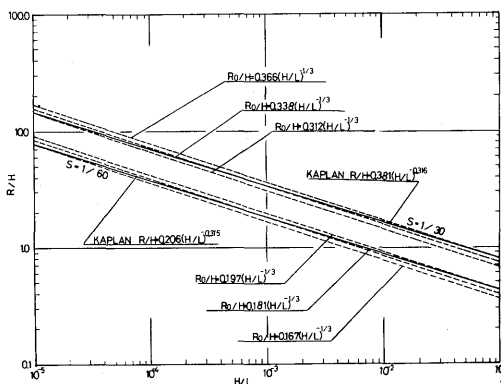


Fig.1 Experimental lines obtained by K.Kaplan and theoretical lines obtained by authors according to Green's equation.

3. 実験装置、器具、方法および波の諸元

横断面が幅1.0m、深さ1.0m、長さ60.0mの鉄筋コンクリート製長水路の一端に気圧式造波装置が設置されている。長水路の中には幅1.0m、終端の高さ1.0m、水平距離40.0mしたがって勾配 $S=1/40$ なる鋼板製の斜面が設けられている。波高計は容量式で、斜面のり先と汀線に置かれ、陸上遡上高(R)は目測によった。実験波の記号はFig. 2に示す通りであり、斜面のり先での入射波形は前報告と同様に孤立波に類似させた非周期的な非保存波で、 $\eta = H \sin^2 \sigma t$ 、($\sigma = \pi/T, 0 \leq t \leq T$)なる静水面上の1山の波を与えた。ここで入射波高 H は首藤³⁾にならって静水面上の最高水位(峰高) H' に等しいみかけの波高であり $H=H'$ 、周期 T も波先端から最高水位に達するまでの時間を半周期 $T/2$ とみなして2倍したみかけの周期である。また実験波の諸元は、静水深 $h=17.5 \sim 75.0\text{cm}$ を5~10cm間隔に11種類にとり、各 h に対して周期 $T=6.9 \sim 64.0\text{sec}$ を波形勾配と相対水深の実験範囲を考慮しながらできるだけ斑なく一様に分布するように任意間隔に設定し、波高 $H=1.2 \sim 14.2\text{cm}$ もdataが重複しない程度の適当な間隔に変化させた130個からなっている。

4. 一様勾配斜面上の遡上高に対する波形勾配の影響

実験結果を前報 $S=1/60$ の場合と同様に、 H/L に対する $H_s/H, R/H_s, R/H$ の値を両対数グラフにプロットし、それぞれFig. 3, 4, 5に示す。整理の方法

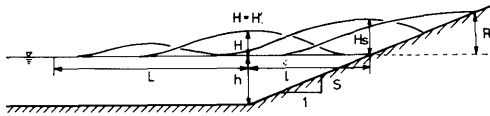


Fig.2 Schematic diagram of an aperiodic experimental wave.

はすべて前報と同様で、各波を汀線に於ける記録波形により

- a) breaking波(●)：砕波して遡上する波
- b) non-breaking波(○)：砕波せずに遡上する波
- c) surging波(◐)：a)とb)の間の過渡的狀態の波

のいずれかに分類し、また実験直線はbreaking波($1.3 \times 10^{-3} \leq H/L \leq 7 \times 10^{-3}$)に対するものと non-breaking波($6 \times 10^{-4} \leq H/L \leq 1.3 \times 10^{-3}$)に対するものとの二つに分け、最小二乗法により別々に求めた。また、Fig.3, 4, 5には比較のため前報 $S=1/60$ の実験直線を破線で示し、Kaplan の実験直線も記入した。さらにFig.3には首藤の砕波条件式(後述)より求めた実験値全体の平均的反射率 r (右側の縦軸)を鎖線で示した。 r を求めるにあたって $S=1/40$ についてはFig.6に示す $h/L=0.184(H/L)^{0.456}$ なる全実験値の平均特性式を使い $U=(4\pi/ST)\sqrt{h/g}=(4\pi/S)(h/L)=92.5(H/L)^{0.456}$ と置換し、 $S=1/60$ については平均特性式 $h/L=0.022(H/L)^{0.194}$ を使い $U=16.6(H/L)^{0.194}$ と置換した。以下それぞれの図について $S=1/40$ と前報 $S=1/60$ とを比較しながら考察しよう。

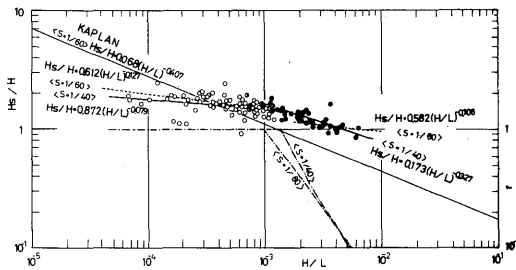


Fig.3 Relation between H_s/H and H/L and reflection coefficients.

(1) $H_s/H-H/L$ と反射率の関係(Fig.3)

breaking波(●)だけによる実験直線

$$S=1/40 \quad \frac{H_s}{H}=0.173 \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.327} \quad (5)$$

$$S=1/60 \quad \frac{H_s}{H}=0.582 \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.106} \quad (6)$$

non-breaking波(○)だけによる実験直線

$$S=1/40 \quad \frac{H_s}{H}=0.872 \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.079} \quad (7)$$

$$S=1/60 \quad \frac{H_s}{H}=0.612 \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.127} \quad (8)$$

平均反射率 r はあまり相関のよくない平均特性式から求められたにもかかわらず、 $r=1$ となる点は波形勾配(H/L)がnon-breaking波とbreaking波とのちょうど境界となる点($H/L=10^{-3}$ 附近)とよく一致している。このことは著者らの実験波の分類の妥当性を裏づけるものである。また r は、 $10^{-3} \leq H/L \leq 4.2 \times 10^{-3}$ の範囲では $S=1/40$ の場合が $S=1/60$ の場合より大きく、 $4.2 \times 10^{-3} < H/L$ の範囲ではその逆になっている。これはbreaking波(●)についての式(5)と式(6)の交点が $H/L=4.2 \times 10^{-3}$ 附近にあり、その点より H/L が小さい範囲では式(5)が、また H/L が大きい範囲では式(6)がそれぞれ大きいこととよく対応している。 $H/L < 10^{-3}$ の範囲では $S=1/40, 1/60$ 共にnon-breaking波(○)だけが存在し、その範囲では共に反射率は1で完全重複波となり、式(7)と式(8)をFig.3で見るとわかるように式(8)が少し大きめの値を取ってはいるがおおよそ同一の直線とみなされ、斜面勾配 S に無関係に同じ実験直線となるようである。以上のことより H_s/H の値つまり斜面のり先から汀線までの波の現象は反射率によって説明できるようである。

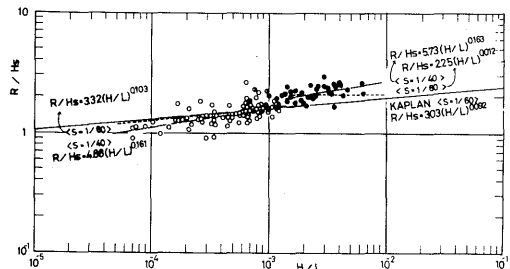


Fig.4 Relation between R/H_s and H/L .

(2) $R/H_s-H/L$ について(Fig.4)

breaking波(●)だけによる実験直線

$$S=1/40 \quad \frac{R}{H_s}=5.73 \left(\frac{H}{L}\right)^{0.163} \quad (9)$$

$$S=1/60 \quad \frac{R}{H_s}=2.25 \left(\frac{H}{L}\right)^{0.012} \quad (10)$$

non-breaking波(○)だけによる実験直線

$$S=1/40 \quad \frac{R}{H_s}=4.88 \left(\frac{H}{L}\right)^{0.161} \quad (11)$$

$$S=1/60 \quad \frac{R}{H_s}=3.32 \left(\frac{H}{L}\right)^{0.103} \quad (12)$$

前報 $S=1/60$ においては、breaking波について式(10)

より $R/Hs \approx const.$ となるという結論を得ているが、 $S = 1/40$ においては式(9)のようになり R/Hs は定数にはならないようである。

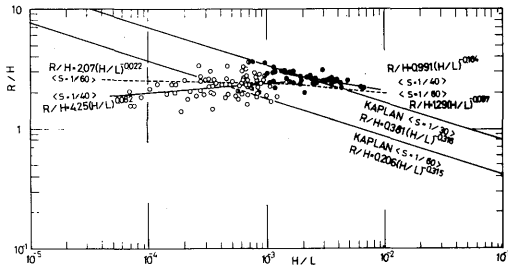


Fig.5 Relation between R/H and H/L.

(3) $R/H-H/L$ について (Fig. 5)

breaking波だけによる実験直線

$$S = 1/40 \quad \frac{R}{H} = 0.991 \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.164} \quad (13)$$

$$S = 1/60 \quad \frac{R}{H} = 1.29 \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.097} \quad (14)$$

non-breaking波だけによる実験直線

$$S = 1/40 \quad \frac{R}{H} = 4.25 \left(\frac{H}{L} \right)^{0.082} \quad (15)$$

$$S = 1/60 \quad \frac{R}{H} = 2.07 \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.022} \quad (16)$$

式(13)と式(15)を見るとわかるようにbreaking波だけによる実験直線とnon-breaking波だけによる実験直線との傾きが逆になっている。これより前報 $S = 1/60$ では明瞭には現われなかったpeakが $S = 1/40$ では明らかに存在することがわかり、ここでも Kaplan 流の津波推算法の誤りが再確認される。breaking波については、同一の斜面勾配では前報 $S = 1/60$ でくわしく述べたように実験波の相違によって著者らの実験値の方が、Kaplan の実験値より大きい値を示すが、斜面勾配 S が大きくなると R/H が大きくなるという傾向は著者ら ($S = 1/60$ と $1/40$) と Kaplan ($S = 1/60$ と $1/30$) の両実験において同様に現われている。

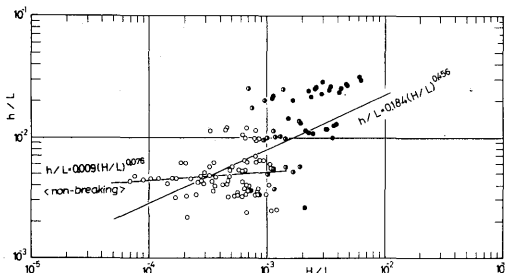


Fig.6 Relation between h/L and H/L.

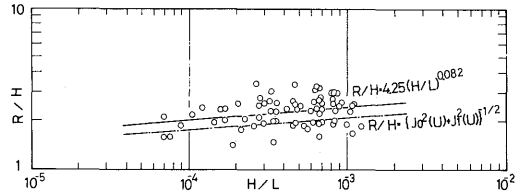


Fig.7 Experimental solid and theoretical broken lines.

(4) 理論式との比較

著者らの実験波のうちnon-breaking波(○)は碎波せずに遡上する波であるから、前報に於けると同様に Keller & Keller⁽⁴⁾、首藤の理論式(後述)を適用し、その結果を Fig. 7 に示す。適用にあたっては Fig. 6 に示すnon-breaking波だけについての $h/L = 0.009(H/L)^{0.076}$ なる平均特性式を使い、 $U = (4\pi/ST) \sqrt{h/g} = (4\pi/S)(h/L) = 4.52(H/L)^{0.076}$ と置換している。前報 $S = 1/60$ に於いてはよい一致が得られたが、 $S = 1/40$ においては全体的に実線で示す実験直線の方が大きくあまり適合性はよくない。

5. 一様勾配斜面上の遡上高に対する海岸水平長・波長比の影響

前報および前章 4 に於いては、Kaplan 流津波推算法の検討を行なうために相対遡上高 (R/H) に対する波形勾配 (H/L) の影響を調べてきたが、このような整理の方法では斜面勾配の違いによって各斜面勾配ごとの整理が必要となるため、ここでは斜面勾配を暗に含んだ変数として海岸水平長・波長比 (l/L) を取り、遡上高に対する l/L の影響を見る。 l は Fig. 2 および Fig. 8 に示されるように斜面のり先から汀線までの水平長であり、ここでは海岸水平長と仮称する。検討にあたっては著者らの $S = 1/40, 1/60$ の実験値に加うるに首藤の $S = 1/30$ の実験値を整理し直して使用した。この際、首藤の実験波は 1 山の正弦波形を周期波の一部とみなして著者らの孤立波に類似させた非周期波とは異なるので、取り扱い上の混乱を避けるため首藤の実験波に対する記号の取り方を Fig. 8 に示す。相違点は波高 (H) と波長 (L) の取り方に有り、Fig. 2 の非周期波では $H' = H$ であるのに対して Fig. 8 の周期波では H'

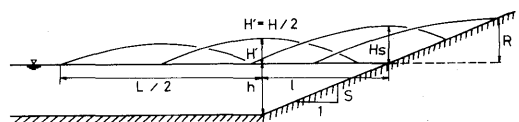


Fig.8 Schematic diagram of a periodic experimental wave.

=H'/2 なるごとくである。実験に於いてはみかけの波高H'が測定される。

首藤の理論式

$$\frac{R}{H'} = \frac{1}{J_0(U)}, \quad U = \frac{4\pi}{ST} \sqrt{\frac{h}{g}} = \frac{4\pi}{S} \cdot \frac{h}{L} = 4\pi \frac{l}{L} \quad (17)$$

は $0.20 \leq U \leq 1.5$, したがって $1.6 \times 10^{-2} \leq l/L \leq 1.2 \times 10^{-1}$ で与えられており

Keller & Keller, 首藤の理論式

$$\frac{R}{H'} = \frac{1}{\{J_0^2(U) + J_1^2(U)\}^{1/2}}, \quad U = 4\pi \frac{l}{L} \quad (18)$$

については特に適用範囲は与えられていない。

Fig. 9 に実験値, 理論式および著者らの実験曲線を示す。これを見ると $l/L \leq 10^{-1}$ では理論式(17)が, $2 \times 10^{-1} \leq l/L \leq 5 \times 10^{-1}$ では理論式(18)がよく適合しているが他の領域ではあまり適合性がよくない。もっとも両式は微小振幅長波の完全重複波型の遡上理論式であるから, breaking波(●, ▼), およびsurging波(○, ▽)のような非線形性の著しい現象を含む領域に適合しないことは当然と云える。従って著者らは両理論式の間隙を埋め, また有限振幅長波を対象とした次式を実験式として $10^{-1} \leq l/L \leq 1.3$ なる範囲で提案する。

$$\log\left(\frac{R}{H'}\right) = 0.421 - 0.095 \log\left(\frac{l}{L}\right) - 0.254 \left\{ \log\left(\frac{l}{L}\right) \right\}^2$$

$$10^{-1} \leq \frac{l}{L} \leq 1.3 \quad (19)$$

実験式(19)は, 著者らの $S=1/40, 1/60$ での実験値より求められたものでFig. 9 およびFig. 10に示される。

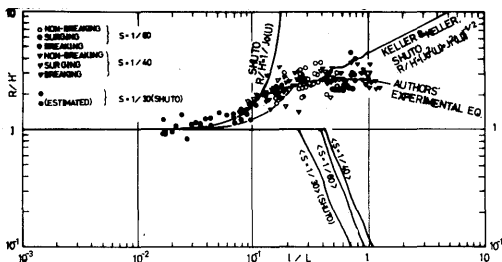


Fig. 9 Experimental values, experimental line, two theoretical lines and reflection coefficients.

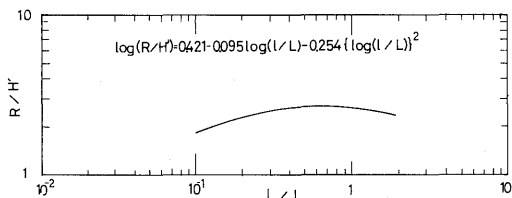


Fig. 10 Experimental equation and its line.

6. 一様勾配斜面上の碎波条件と反射率

斜面上の長波の碎波条件については種々問題があり未だ定説がみられないようであるが, ここでは著者らの実験結果の取りまとめに最も近い形式で提案されている首藤の碎波条件式への適用を試みた。

碎波条件式は

$$\frac{H'_m}{L} \cdot \frac{1}{S} = \frac{2}{\pi} U^{-1} \left\{ J_0^2(U) + J_1^2(U) \right\}^{1/2},$$

$$U = 4\pi \frac{l}{L} \quad (20)$$

と与えられるが, ここで沖合入射波高 $H_0 = 2a$ (a : 沖合入射波の振幅) に対して $H' \doteq H_0 = 2a$ と仮定し, $H'_m = 2a_m$ (a_m : 斜面上の碎波限界を与える入射波の最大振幅) とおいている。実験値および碎波条件式(20)をFig. 11に示す。これより首藤の碎波条件式は著者らの実験値の分類とよく符号し, surging波(○)の過渡領域を境として碎波と非碎波の領域に二分し, 碎波現象をかなり適確に説明していることがわかる。

次に首藤の反射率は次式のように定義されている。

$$r = \begin{cases} 1 & (H' < H'_m) \\ H'_m / H' & (H' \geq H'_m) \end{cases} \quad (21)$$

そこで $S=1/40$ であれば, Fig. 11より $S=1/40$ についての $(H'/L/S) = 0.093(l/L)^{0.875}$ なる平均特性式を求めこれで式(20)の両辺を割れば右辺は,

$$\left(\frac{H'_m}{L} \cdot \frac{1}{S} \right) / \left(\frac{H'}{L} \cdot \frac{1}{S} \right) = \frac{H'_m}{H'} = r \quad (22)$$

となり反射率を求めることができる。このようにして求めた各斜面勾配ごとの反射率をFig. 10の下側部分, (右側縦軸)に示す。これより, 各実験条件ごとの特性的な相違があるにもかかわらず平均的にほぼ似たような反射率になっていることがわかる。また, 上側部分(左側縦軸)の R/H' と対比してみると, そのピーク附近で反射率も最大となり $l/L < 4 \times 10^{-1}$ では完全反射することがわかる。特に $S=1/30$ の反射率は, 偶然か否か $l/L \doteq 2.5 \times 10^{-1}$ すなわち共振点近傍で $r=1$ となっていて甚だ興味深い。また従来 $l/L > 1$ であればGreenの式を使ったShoaling変形式が議論されてよいと云われているが, Fig. 10をみると約10%以下の反射率で反射を無視した進行波としての取扱いが保証されることを示している。

7. 実験波

Fig. 10およびFig. 11にプロットした全実験値をアーセル数 (U_r) との関係で示したものがFig. 12であり, 実験波がいかなる範囲に属する波であることを明示して

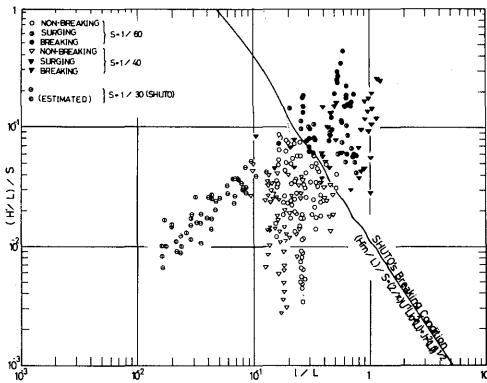


Fig. 11 Experimental waves and Shuto's breaking condition

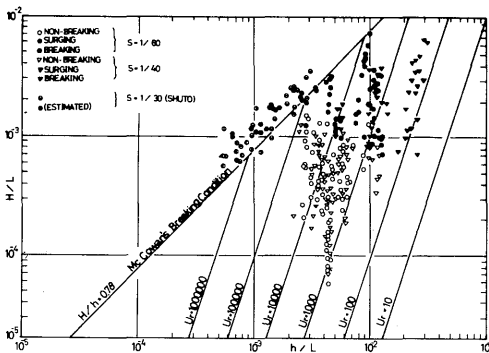


Fig. 12 Ursell's number of experimental wave.

おく。また参考のため同図に $H/h=0.78$ なる McCowan の碎波条件式も示しておく。

8. 結 論

(1) 前報に引き続き Kaplan の外挿法を検討し, Kaplan の行なった斜面勾配 $S=1/30$ および $S=1/60$ の両実験式の外挿については理論的にその誤りを解明し, 新たな $S=1/40$ についても追実験を行なった結果, やはり Kaplan 流の外挿法は誤っていることを確認した。

(2) 斜面勾配 S を暗に含む海岸水平長・波長比 (L/L) の陸上遡上高に対する影響を調べ, 従来の微小振幅長波の遡上理論式では十分説明し得ない部分に, 主として有限振幅長波を対象とした実験式として次式を提案した。

$$\log\left(\frac{R}{H'}\right) = 0.421 - 0.095 \log\left(\frac{L}{L}\right) - 0.254 \left\{ \log\left(\frac{L}{L}\right) \right\}^2$$

$$10^{-1} \leq \frac{L}{L} \leq 1.3$$

(3) 同様勾配斜面上の陸上遡上現象に密接に関連する碎波条件式を実験的に検証し, これから斜面上の長波の概略の反射率を見積った。

最後に, 本研究は昭和50年度文部省科学研究費補助金, 自然災害特別研究(I)「三陸大津波来襲時の被害予測(津波堤防破壊時を含む)」〔研究代表者: 岩崎敏夫東北大学教授〕による研究の一部であることを記して謝意を表す。また本実験全般にわたってご協力を頂いた本学土木工学科の平山康志技官ならびに卒業研究として協力頂いた行本啓二(現東洋建設K.K.), 前田一平(現日本国土開発K.K.)両君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kaplan, K.: Generalized Laboratory Study of Tsunami Run-up; Tech. Memo. No. 60, B. E. B., Corps of Engineers, Jan. 1955.
- 2) 中村武弘・富樫宏由: 長波遡上実験式の再検討; 長崎大学工学部研究報告, 第5号, 1974, pp. 83 ~ 88.
- 3) 首藤伸夫: 長波のうちあげ高; 第13回海岸工学講演会講演集, 1966, pp. 216 ~ 222.
- 4) Keller, J. B. and H. B. Keller: Water Wave Run-up on a Beach; Research Report No. NONR-3828(00), Office of Naval Research, Dept. of the Navy, 1964.
- 5) Shuto, N.: Standing Waves in front of a Sloping Dike; Coastal Engineering in Japan, Vol. 15, 1972, pp. 13 ~ 23.