

孤立波の打ち上げ高さに関する実験的研究

正 員 ○ 佐 伯 浩*
正 員 尾 崎 晃**

1 緒 論

津波は、大陸棚から陸岸に近づくにつれて、海底地形の影響で、その波高が増し、巨大な水塊となって陸上に打ち上げる。この津波の打ち上げ高さの大小は、津波の規模・海底地形・陸岸の地形・津波の波形勾配等によって異なる。津波の波形勾配と云う表現は適当ではないが一応、見掛けの波形勾配である。本研究は、この津波の陸岸への打ち上げ高さとし、陸上に津波堤を設けた場合の津波の越波量を対称としたものである。本論に入る前に、この津波の陸上への打ち上げ高さに関する今まで研究の概要を説明する。まず津波を長波とし、この長波の打ち上げ高さを理論的に求めた研究に首藤等の研究がある。しかしこれらの研究においては、波は砕波しない事・dry bedには摩擦は作用しない事等の条件があり、現実の津波の様相と違っている。

津波の打ち上げ高さを数値計算によって求めたものに、Freeman・M'ehaut'eの研究が著名である。これは、沖波として孤立波を与え、これが水深変化に伴なって、砕波し、砕波後の波が終には段波となって汀線まで進行し、

汀線からRerafaction wave となってdry bed 上に打ち上げる状態を克明に数値計算を行なった。しかし、この数値計算には、砕波が始まってから、完全な段波に移行するまでの計算過程とdry bed 上の流れは非定常流であるが、これに定常流の摩擦係数を用いている。たとえ定常流の摩擦係数を用いてよいとしても、dry bed 上の流れの摩擦係数の見積りに難点がある。この他に段波がdry bed 上に打ち上げるのを数値計算した富樫の研究がある。

津波の打ち上げ高さを実験的に求めた研究はTable—1に示されている。Hall & Watts は急勾配での打ち上げ実験を行こなっている。表中のSは海底勾配、S_D はdry bed の勾配、I は水路幅の変化率である。Kaplan、花安等は比較的緩勾配で実験を行こなっている。佐伯、高木等は、海底勾配と水路幅が同時に、一様に変化する場合を取りあつかっている。

また各実験に用いた水路床は、Kaplan は滑らかなモルタル仕上げであり、岸等は板上に砂粒をビニール塗料で張り付けたもので、表面粗度は大きい。花安、佐伯等

表 — 1

	S , S _D	I
Hall & Watts	S=S _D = 1/1 , 1/2.1 , 1/3.7 , 1/5.7 , 1/11.4	0
Kaplar	S=S _D = 1/30 , 1/60	0
	S = 1/60 , S _D = 1/2	
Kishi , Saeki & Kato	S=S _D = 1/10 , 1/15,1/20,1/30	0
Hanayasu , Saeki & Ozaki	S=S _D = 1/15, 1/75,1/100	0
	S = 1/50. S _D = 1/15 ,S = 1/50. S _D = 1/30	
	S = 1/100・ S _D = 1/15,S = 1/100. S _D =1/30	
Saeki , Takagi & Ozaki	S=S _D = 1/50	1/15,1/20,1/25
	S=S _D =1/100	

* 北海道大学工学部土木工学科 助教授
** 〃 教授

は塩化ビニール板で滑らかである。Hall & Watts の水路床が向で出来ているか不明であるが、勾配が急なので、表面の粗度は問題にならないと考えられる。各実験とも津波のモデルとして孤立波を用いている。各実験において Kaplan は造波板を押し出す事によって再現性のある孤立波を発生させている。岸、花安、佐伯等は、タンク内の水を落下させる事により再現性のある孤立波を発生させ、発生せしめられた波が、波速、波形において孤立波理論とよく一致している事を認めている。

2 津波のモデル化の問題

津波の打ち上げ高さの実験には、全て孤立波が用いられているが、果して、孤立波が津波のモデルとして適当であるか否かは疑問の残る問題である。ここでは、津波のモデルとして孤立波を用いた理由を以下に述べる。

1. 実際に得られた津波の観測データは、そのほとんどが、陸地の沿岸で得られたもので、津波の大洋での波形をそのまま表わしてはいないが、周期・波高も異なっていて、複雑なスペクトル構造となっている。つまり種々の周期と振幅を持つ波の合成されたものであり、また、同一の津波でも、各観測所で得られた波形は各々異なっている。以上の事から、津波の一般化は困難で向らかの方法で津波を近似する必要がある。

2. 孤立波が斜面上を進行する状況を観測すると、その運動は今まで目撃されてきた津波の状況と良く似かよっている事が判る。またその力学的な性質もよく似ている。つまり、斜面上の孤立波は、斜面の勾配が急な場合と波形勾配が非常に緩い場合には碎波を起こさない。

3. 孤立波が理論的には波長・周期が無限に長く、いわゆる長波であるし、碎波後、略々完全な段波状になって汀線まで進行するが、これは実際に観測された大きな津波と同じ現象である。

4. Kaplan の実験結果を Kaplan と佐々木が実際の津波の打ち上げ高さと比較したところよく一致していた。

以上の事から、打ち上げ高さの実験に孤立波を用いてもさしつかえないと思われる。実験結果も、ある程度の誤差を認めるならば充分な設計資料となるであろう。

3 孤立波の打ち上げ高さについて

(1) 水路幅が一定 ($I = 0$) で、海底勾配 S と dry bed の勾配 S_D が同一の場合。

この場合の実験データを整理すると、次の結果が得られた。R は静水面より打ち上げ高さの鉛直距離である。

$$\frac{R}{H_o} = K_e \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{-n} \quad (1)$$

$$\frac{R}{H_o} = K_s \left(\frac{H_o}{h_o} \right)^{-m} \quad (2)$$

$$\frac{R}{h_o} = K_h \left(\frac{H_o}{h_o} \right)^a \quad (3)$$

H_o , h_o は沖波の波高・水深であり、 L_o は孤立波理論から H_o と h_o を用いて計算される有効波長である。各実験式の係数 K_e , K_s , K_h と n , m , a は海底勾配 S の関数で表わす事ができる。各係数の表が Table - 2 である。(3)式の係数 K_h , a を図化したものが (Fig-1) である。

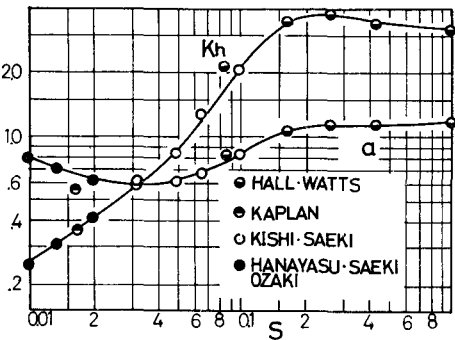


図-1

(Fig-1) から判断すると明らかなように、海底勾配 S が $S > (1/5)$ では、係数 K_h , a 共に略々一定である。これは、孤立波では、 $S > (1/7)$ では、碎波は起こらないので、打ち上げ高さも安定しているようである。また、(1), (2), (3)式において、

表-2

	S	K_e	K_s	K_h	n	m	a
Kishi	1/10	2.250		2.050	0.315		0.821
Saeki	1/15	0.920		1.510	0.230		0.670
	1/20	0.550		0.832	0.270		0.622
Kato	1/30	0.360		0.591	0.310		0.615
Kaplan	1/30	0.381		0.595	0.316		0.617
	1/60	0.206		0.361	0.315		0.570
Hanayasu	1/50	0.300	0.321	0.400	0.237	0.450	0.625
Saeki	1/75	0.230	0.282	0.300	0.213	0.340	0.684
Ozaki	1/100	0.189	0.260	0.240	0.185	0.250	0.740

(H_o/h_o) が小さくなるにつれて、即ち (H_o/L_o) が小さくなるにつれて、相対打ち上げ高さ (R/H_o) はますます大きくなる事になる。一般に周期波の打ち上げ高さにおいては、必ず Peak を持つのであるが、岸等の実験においては、(H_o/h_o) ≈ 0.01 ぐらいでも、未だ (R/H_o) は増加の傾向にある。しかし、水底勾配 S が比較的緩い実験を行なった花安の結果においては、(H_o/h_o) ≈ 0.03 より (H_o/h_o) が小さい範囲では (R/H_o) は、略々一定か減少の傾向にある。この花安等の結果から、すぐ、長波の打ち上げ高さに Peak があるとは速断できない。この緩勾配での実験には、底部に塩化ビニール板を用いているが、塩ビ板と水との付着力が強いために、水面は盛り上るので当然打ち上るべきなのに、打ち上がらない。底部の板にビニル塗料を塗った岸等の実験では、花安等のような事は起こらなかった。(H_o/h_o) を小さくするためには、波高 H_o を小さくするために、運動量が小さいため、表面張力・付着力等の影響も大きく作用する。

(2) 水路幅が一定 ($I = 0$) で海底勾配 S と dry bed の勾配 S_D が異なる場合。

この実験は花安、佐伯等によってのみなされている。(Fig - 2), (Fig - 3) にその一例を示す。両図ともに (H_o/h_o) ≈ 0.3 で実験曲線は折れている。また汀線までは、波は段波であって、(Fig - 2), (Fig - 3) は同じ状態で dry bed に打ち上げがあるのであるから、両実験値の違いは、dry bed の勾配 S_D の効果によるものである。一般に $S_D = (1/15)$ の方が打ち上げ高さは若干大きい。これは $S = S_D = (1/15)$ の方が、 $S = S_D (1/30)$ の実験値より大きい事から明らかである。しかし、(H_o/h_o) が小さい値の場合には、 $S_D = (1/30)$ の方が大きい。今後は複断面の海底勾配を有する時の打ち上げ高の実験が必要である。

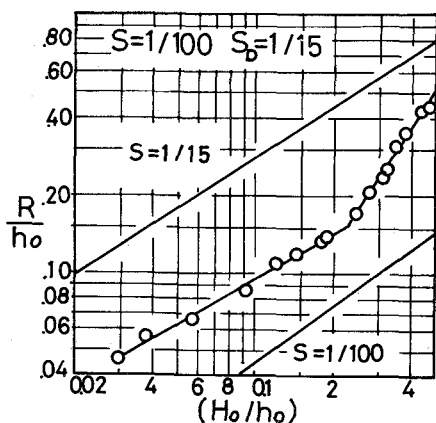


図-2

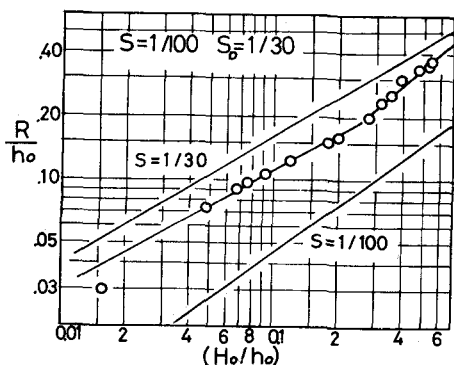


図-3

(3) 水路幅 B と海底水深が直線的に変化する場合。この実験は、佐伯・高木等によってのみなされている。結果の一部を (Fig - 4) に示す。

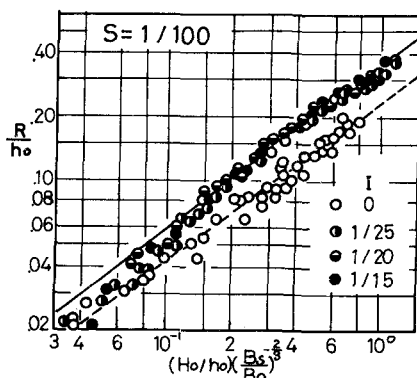


図-4

B_o , B_s は、沖波の位置の水路幅と汀線部の水路幅を示し、 I は水路幅の変化率である。これによると、水路幅の変化率 I の実験範囲がせまいため、 $I = 1/15, 1/25$ の実験値には、ほとんど差は見られないが、 $I = 0$ との間には、明瞭な差がある。一般に水路幅が一定の場合は、 S が大きい程、打ち上げ高さ (R/h_o) が大きくなっている。また、(Fig - 4) と同じ、 $S = 1/50$ で I を変えて行なった結果は、傾向は (Fig - 4) と全く同じであるが、 $S = 1/50$ の実験値の方が $S = 1/100$ より (R/h_o) は大きい値を示している。佐伯は、沖波の全エネルギーが、dry bed に打ち上げられた水塊の Potential Energy に等しいと仮定して、打ち上げ高さの簡易式を導びいたが、それを、水深、水路幅が共に変化する場合

に適用すると次式が得られる。

$$\frac{R}{h_o} \propto \left\{ \left(\frac{B_s}{B_o} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{H_o}{h_o} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4)$$

しかし、実験値と比較して結果、次式を得た。\$S=1/50\$の時、\$I=1/15, 1/20, 1/25\$に対して、

$$\frac{R}{h_o} = 0.460 \cdot \left\{ \left(\frac{B_s}{B_o} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{H_o}{h_o} \right) \right\}^{0.669} \quad (5)$$

\$S=1/100\$の時、\$I=1/15, 1/20, 1/25\$に対しては

$$\frac{R}{h_o} = 0.350 \left\{ \left(\frac{B_s}{B_o} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{H_o}{h_o} \right) \right\}^{0.598} \quad (6)$$

となる。\$I=0\$に対しては、(Table-2)に示されている。以上の(5)、(6)式より、実験式は、理論式である(4)式より勾配は急になっている。

以上打ち上げ高さに関する(1)、(2)、(3)をまとめると、次の結論が得られる。①単純な断面変化をしている水路に対する打ち上げ高さの実験式が求まった。②打ち上げ高さは、水路の断面積の変化率が大きい程大きくなる。よって水路幅一定の場合には、海底勾配\$S\$が急な程、打ち上げ率は大きくなる。同じ海底勾配\$S\$であれば、\$I\$の値が大きい程、打ち上げ高さは大きくなる。③同一の断面変化の水路の場合には、\$(H_o/h_o)\$が大きい程、\$(R/h_o)\$は大きくなり、\$(R/H_o)\$は小さくなる。この変化は両対数紙上で直線である。④断面積の変化率が大きい程、打ち上げ高さが大きくなるのは、波の砕波点の位置がそれによって変化するからである。つまり、断面積の変化が大きいと、汀線近傍で砕波が起こり、また、砕波の形態は、巻き波に近くなり、砕波から打ち上げまでのエネルギー・ロスが少なく、また断面変化がゆるやかな場合には沖の方で砕波が起こり、砕波した波は汀線まで段波となって進行し、エネルギー・ロスは著るしい。

4 沖波の取り扱い方

今まで、度々、沖波と云う表現をしてきた。以上の実

験値において沖波とは、断面変化してない部分での波を云っているの、実際の海における沖波とは意味を異にする。そこで、佐伯、加藤は、実験水路における砕波点より沖側の数個所に測定点を取り、その点の波高、水深を沖波として、打ち上げ高さを実験式より求めて見ると、それらから得られる打ち上げ高さは、実験式で沖波とした波により求めた打ち上げ高と比較したところ4~5%の誤差であった。この事は、波が砕波を起こす点より沖側の点であれば、どの点でも数%の誤差で打ち上げ高さを求める事が出来る。

あ と が き

本研究は、現産業安全研究所の花安繁郎君、現東亜港湾\$K\$ \$K\$勤務の高本和博、橋瓜俊明の両君、現東京都庁の佐々木真君、現在運輸省勤務の加藤寛君の実験結果と解析結果を取りまとめたものであり、ここに協力を感謝して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Kaplan, K (1955) Generalized laboratory study of Tsunami run-up ; Tech. Memo. No. 60, B. EB.
- 2) Kishi, T. & Saeki, H. (1966) The shoaling, breaking and run-up of the solitary Wave on impermeable slope ; Proc. Tenth Conf Coastal Eng.
- 3) Hall, T. Tr & Watts, G. M. (1953) "Oceanographical Engineering", by R. L. Wiegel
- 4) 佐々木忍 (1959) ; 三陸沿岸の津波対策について、第6回海岸工学講演会講演集
- 5) 花安繁郎・佐伯浩・尾崎晃 (1970) ; 斜面上における孤立波の変形に関する研究(1)17回海岸工学論文集
- 6) 佐伯浩・高本和博・尾崎晃 (1971) ; 孤立波の変形に関する研究(2)、第18回海岸工学講演会論文集