

引波を含む津波の一次元遡上に関する実験的研究

岩崎敏夫*・真野 明**・荒井 唯***・吉田行伸****

1. 序 論

津波の一次元陸上遡上に関しては、Kaplan や富樫¹⁾に代表されるように、従来一山の入射波に対する実験が数多く行なわれ、それらの実験式が提案されている。しかし、実際の津波では、引波から始まったという記録や、数波の波が来たという記録が数多くあり、そこには必ず引波が含まれている。津波も線型領域であれば、押波・引波の別は単に水位の符号が逆になるだけのことであるが、遡上に際して非線型効果が強く作用することも考えられるので、この点に関する検討が必要と考えられる。

本研究は以上のような観点から一様斜面が水平床に接続している地形を用い、非砕波、砕波を含む広い領域において、引波を含む津波の一次元遡上の水理特性を明らかにしようとするものである。

2. 実験装置および方法

水理実験は、既存の津波大型平面水槽の中に、新たに製作した全長 37 m、幅 0.9 m、深さ 0.9 m の水路を用

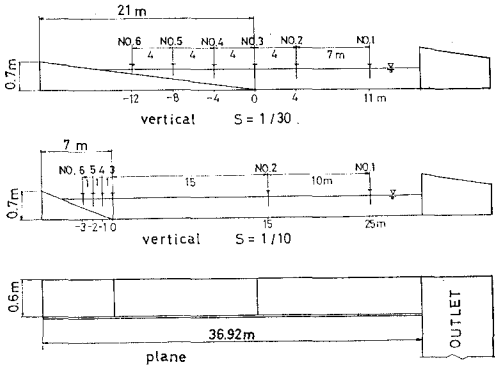


図-1 水路および波高計位置

いて行なった。水路の一端には、図-1 に示すように、勾配 1/10、1/30 の一様な斜面を作り、斜面表面は摩擦の影響を小さくするために塗装した。水路の他端は、長波発生用造波装置²⁾の吐出口に接続し、造波装置には引波または押波より始まる周期 8 秒から周期 20 秒の正弦波を入力した。実験ケースは表-1 に示すとおり、斜面勾配 S 、周期 T 、入射波高 $2a_0$ 、入射波初動の引・押を

表-1 実験ケースおよび波諸元

Case	S	T (sec)	T_0 (sec)	L (m)	$2a_0$ (cm)	h_0 (cm)	h_0/L	$2a_0/L$ $\times 10^{-3}$	$2a_0/h_0$	l/L	$R/2a_0$	a_0/am	Breaking type
1	1/30	8	8.0	17.74	1.38	50.2	0.028	0.78	0.027	0.849	1.64	3.14	C
2			7.0	15.47	1.90	49.8	0.032	1.23	0.038	0.967	1.98	5.94	
3			7.6	16.81	1.90	49.9	0.030	1.13	0.038	0.891	1.56	5.00	
4			6.3	13.94	2.25	49.9	0.036	1.61	0.045	1.075	1.26	9.38	
5			6.2	13.71	4.18	49.9	0.036	3.05	0.084	1.092	0.93	17.42	
6	1/30	9	7.8	17.24	2.30	49.8	0.029	1.33	0.046	0.868	1.81	5.48	C
7	1/30	10	9.0	19.93	0.78	50.0	0.025	0.39	0.016	0.753	2.63	1.39	C
8			9.0	20.04	1.55	50.6	0.025	0.77	0.031	0.758	2.23	2.77	
9			9.0	19.90	1.88	49.8	0.025	0.94	0.038	0.752	1.81	3.36	
10			10.0	22.09	2.38	49.7	0.023	1.08	0.048	0.676	1.83	3.14	
11			8.0	17.74	2.60	50.1	0.028	1.47	0.052	0.848	1.69	5.91	
12			8.0	17.67	4.26	49.7	0.028	2.41	0.086	0.845	1.32	9.68	
13	1/30	11	9.8	21.63	2.85	49.7	0.023	1.32	0.057	0.689	1.88	3.96	C
14	1/30	12	12.0	26.59	1.50	50.1	0.019	0.56	0.029	0.565	2.26	1.25	C
15			10.5	23.25	3.03	50.0	0.022	1.30	0.061	0.646	1.86	3.44	

* 正 会 員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
** 正 会 員 工博 東北大学講師 工学部土木工学科
*** 正 会 員 工修 群馬県 館林土木事務所工務第 1 課
**** 学生会員 東北大学大学院工学研究科

表-1 (つづき)

16	1/30	15	12.0	26.35	1.45	49.2	0.019	0.50	0.029	0.560	2.64	1.21	C
17			11.0	24.28	2.75	49.7	0.020	1.13	0.055	0.614	1.95	2.81	
18			11.0	24.44	3.05	50.3	0.021	1.25	0.061	0.618	1.77	3.11	
19			11.1	24.37	3.38	49.2	0.020	1.39	0.069	0.606	1.83	3.31	
20	1/30	20	15.0	33.16	1.85	49.8	0.015	0.56	0.037	0.451	2.13	0.90	C
21			13.5	29.77	2.70	49.6	0.017	0.91	0.054	0.500	1.89	1.75	
22			14.6	32.11	3.29	49.3	0.015	1.02	0.067	0.461	1.95	1.73	
23			13.5	29.98	3.98	50.3	0.017	1.33	0.079	0.504	1.49	2.65	
24	1/10	8	6.5	14.30	3.40	49.3	0.035	2.38	0.069	0.345	2.48	0.81	N
25		8	6.2	13.77	3.65	50.3	0.037	2.65	0.073	0.365	2.82	0.98	
26		10	8.0	17.61	2.84	49.4	0.028	1.61	0.057	0.281	2.44	0.44	
27		15	11.1	24.38	3.78	49.2	0.020	1.55	0.077	0.202	1.85	0.25	
28		20	14.6	32.10	4.04	49.3	0.015	1.26	0.082	0.154	1.46	0.12	S
29	1/30	8	10.0	22.07	1.90	49.7	0.023	0.86	0.038	0.676	2.49	2.50	
30		8	10.0	22.10	2.30	49.8	0.023	1.04	0.046	0.677	1.88	3.03	
31		10	12.0	26.55	2.60	49.9	0.019	0.98	0.052	0.564	2.18	2.17	
32		15	14.0	30.93	2.00	49.7	0.016	0.65	0.040	0.483	2.13	1.19	
33		20	16.0	35.37	2.00	49.8	0.014	0.57	0.040	0.423	2.33	0.80	

注 1. C: collapsing 型砕波, N: 非砕波, S: surging 型砕波

注 2. Case 1~28 は引波初動, Case 29~33 は押波初動

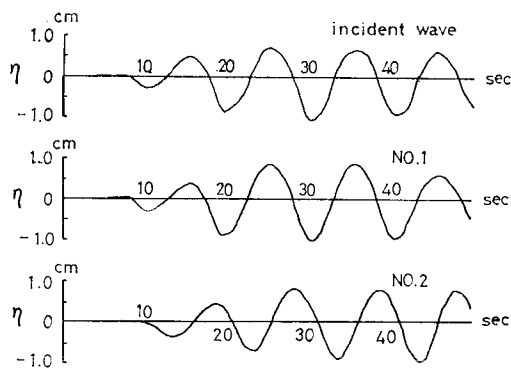
組み合わせた全 33 ケースである。沖側水深 h_0 は約 50cm, 入射波長 L との比はいずれも $h_0/L < 1/25$ であり, 波頂曲率の影響を無視出来る長波の範囲に入っている。また入射波高・水深比はいずれも 0.09 以下であり線型波と見なせる。波高計は 図-1 の No. 1~No. 6 に設置した。水平床上の No. 1~No. 2 の波高計は入射波を得るためのものである。流速の測定は超小型正逆プロベラ式流速計を用い, 汀線に設置した。また汀線付近の空間波形を得るために, モータードライブ付カメラによる写真撮影を行なった。

数値実験は, 水理実験を模擬するものとし, 水平床上では線型長波の方程式, 斜面上では慣性項を考慮した非線型長波の方程式を支配方程式として, 差分法により解いた。摩擦項は全域で無視した。差分間隔は, 最も計算条件の厳しい周期 8 秒, 斜面勾配 1/30 に対応させ, $\Delta x = 5\text{cm}$, $\Delta t = 0.01$ 秒とした。沖側境界条件は, No. 1 の波高データを用い周期 10 秒以下の短い周期の波に対しては強制水位として与え, それ以上の周期の波については, 前述の入射波を進行性特性曲線の上で与えた。波先端の条件は著者らの方法³⁾を用いた。

3. 結果と考察

3.1. 水理実験・数値実験の波形

一樣水路上の線型長波は, 変形しない入射波と反射波の重ね合わせで表わされるので, 2 地点の波形が与えられれば入射波を分離することが出来る。図-2 に, No. 1, No. 2 の波形を使って No. 1 の地点で分離した入射波の例を示した。No. 1 で波が始まって, それが斜面法先との間を往復する時間, 約 10 秒の間は, 入射波と No. 1 の波形がほとんど一致していることが確かめられる。得

図-2 入射波形 ($T=10$ 秒, $S=1/30$, Case7)

られる入射波は完全な正弦波ではないので, 第 1 波の特性量として, 引波から始まるケースでは, 第 1 波波谷から波峯までの経過時間の 2 倍を入射波周期 T_0 とし, 波谷と波峯の偏差を入射波高 $2a_0$ とした。押波から始まるケースでは, 初動から第 1 波波峯までを $T_0/4$ および a_0 とし, 各々 T_0 , $2a_0$ を定義した。これらの値を表-1 に示し, 以後の遡上高の解析に用いた。

水理実験と数値実験の波形の比較を 図-3~7 に示した。図-3 は非砕波の場合の時間波形の例で, 位相や形は比較的良く合っている。図-4 は, 砕波の例で, No. 5 と No. 6 の間で砕波し, No. 6 では段波状の波が到達したことが読みとれる。段波の到達時刻は両実験で一致しているが, 水理実験で得られた鋭いピークは表現されていない。図-5 は非砕波の場合の第 1 波押波の空間波形であり, 写真から読みとった水理実験の誤差が 5 mm 程度であることを考えれば, 比較的良く一致していると言えよう。図-6 には同じく砕波の場合の例を示す。水理実験では, 戻り流れの影響により押波が collapsing

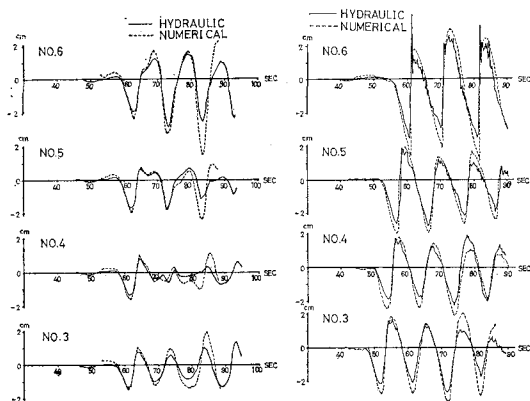


図-3 時間波形の比較
($T=10$ 秒, $S=1/10$,
Case 26)

図-4 時間波形の比較
($T=10$ 秒, $S=1/30$,
Case 12)

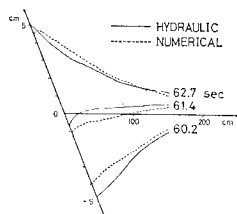


図-5 空間波形の比較 ($T=10$ 秒,
 $S=1/10$, Case 26)

型の砕波をし、気泡を連行しながら、段波状になって伝播している。この段波は汀線に達するまでに消滅し、Whitham⁴⁾の指摘した結果となる。数値実験でもこの傾向は表現されているが、段波波頭は水理実験のように滑らかではなく、差分格子二つの間隔で切り立っている。また段波波頭の振動は数値的不安定によるものであるが、これを数値的に除去しても、あとの遡上高にはほとんど影響がなかった。この図は両実験の対応が比較的良好のものであるが、悪い例を図-7に示す。汀線から陸上側で両者の差は拡大し、数値実験の遡上高が過大な結果を与える。数値実験の検討は今後の課題としたい。

表-1に示すとおり、斜面勾配 $1/30$ で引波より始まるケースでは、すべて collapsing 型の砕波であり、押波より始まるケースでは先端が砕波する surging 型砕波であった。

長波の砕波条件は、Carrier・Green-span⁵⁾、首藤⁶⁾、梶浦⁷⁾によって得られている。これらはいずれも波先端に対して適用される条件であり、surging 型砕波が対応する。collapsing 型砕波に対して

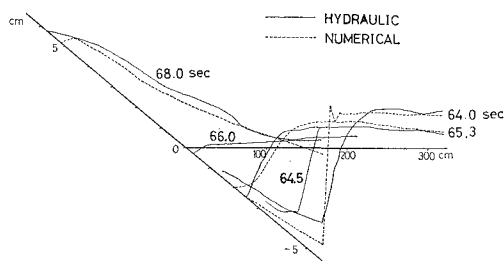


図-6 空間波形の比較 ($T=10$ 秒, $S=1/30$, Case 12)

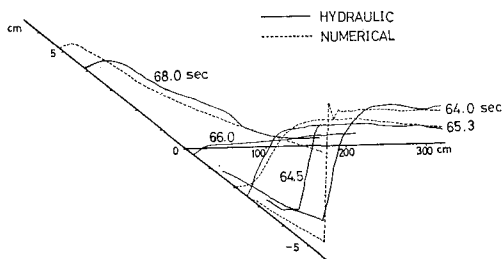


図-7 空間波形の比較 ($T=15$ 秒, $S=1/30$, Case 19)

は、他に適当な砕波条件がないので梶浦の条件 (1) を適用した。

$$Am = (\sigma/s)^{-2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、本実験のような地形に対しては $\sigma/s = 2\pi l/L$, l は汀線から斜面法先までの水平距離であり、

$$Am = 2a_m/h_0 \sqrt{J_0^2(2\sigma/s) + J_1^2(2\sigma/s)} \dots\dots\dots (2)$$

これより得られる砕波限界入射波振幅 a_m は、首藤の条件の $1/2$ となった。 $a_0/a_m > 1$ の場合に砕波であると考えれば、表-1より Case 20, Case 33 を除いてすべての条件を満足している。

3.2. 遡上高

図-8に第1波の相対遡上高 $R/2a_0$ を示す。各点の傍の数値は表-1のケース番号である。非砕波の場合の

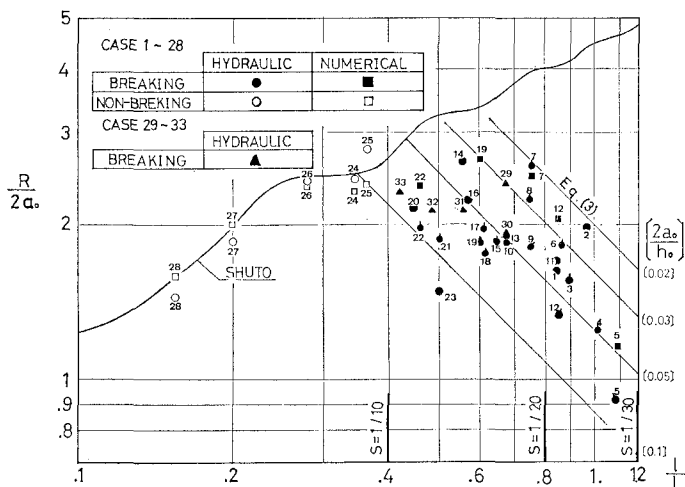


図-8 遡上高

遡上高の理論解には、Keller・Keller⁸⁾、首藤の解や、Carrier・Greenspan 変換を使った解がありそれらはいずれも一致している。この非砕波の場合については、本水理実験、数値実験の結果はこれらの理論解の通りであり、差異は 10% 程度であることがわかる。またこの結果から本実験における摩擦の影響は小さいことが確かめられる。

砕波の場合には、波長が短くなる程、遡上高が下る傾向を示しており、また引波初動の場合の黒丸印で比較すると、入射波高水深比が大きいものの相対遡上高は小さい。富樫⁹⁾は、浅水表面波の砕波の場合の Hunt¹⁰⁾ の実験式に着目し、それと長波の実験式との比較を行ない、接続出来ることを示した。本実験での引波初動の場合の遡上高は、Hunt の式と同様の傾向を示しており、係数 2.54 を本実験にあうように、1.76 に変え、

$$R/2a_0 = 1.76(2a_0/h_0)^{-1/2}(\sigma/s)^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

入射波高水深比 $2a_0/h_0$ が 0.02, 0.03, 0.05, 0.1 の場合の式を図中に示した。本実験の $2a_0/h_0$ の値がこの直線の間におさまるものには、黒丸に棒をつけて示した(詳細は表-1 参照)。黒丸 22 ケース中 16 ケースが適合しており、比較的妥当な結果と言えよう。ここで図中 $l/L = 1.2, 0.8, 0.4$ の軸上に勾配を示してあるが、それは各勾配に対して、その位置より左側の領域は、入射波が長波の領域 ($h_0/L < 1/25$) になることを示している。

一方押波初動の場合には、ケース数が少なく明確なことは言えないが、 l/L に対する減衰が小さく、入射波高水深比が 0.04~0.05 の値をもつ Case 30~Case 33 に対して直線をあてはめてみると、 $(l/L)^{-0.4}$ で変化していることがわかり、これは Kaplan の実験式の -0.316 乗と比較的近い値である。

他方数値実験の結果は、Case 7, Case 22 のように比較的水理実験と近いものもあるが、Case 5 や Case 19 は離れており、波形の所で述べたように問題が残されている。

3.3. 遡上高と汀線流速

非砕波定常振動の場合には、遡上高と汀線での流速を使った速度水頭との関係が、Carrier・Greenspan 変換を用いて次のように表わされる。

$$R/(u^2/2g) = 1/\{\sqrt{1+(\sigma/s)^4 A^2} - 1\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで A は (2) の a_m を a_0 に変えたものである。(4) は (1) の砕波限界の時、最低値 $\sqrt{2} + 1 \doteq 2.41$ をもつ。一方、Ho・Meyer¹¹⁾ は十分発達した段波の場合に、 $R = u^2/2g$ となることを指摘し、Amein¹²⁾ は弱い段波の場合に段波の後ろの波素が追つくため、 $R > u^2/2g$ となることを示した。(4) を図-9 に示す。

本実験における汀線流速の測定例を 図-10 に示す。最初の流速が負(沖向)の部分はプロベラに波先端が到達した瞬間に逆回転したものであり、水の運動方向とは

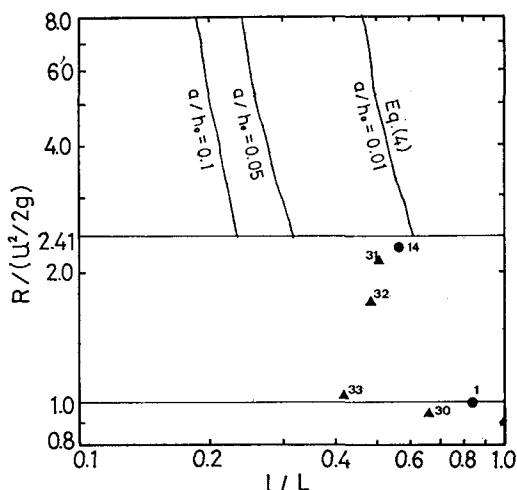


図-9 遡上高と汀線における速度水頭

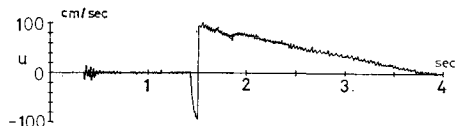


図-10 汀線流速 ($T=8$ 秒, $S=1/30$, Case 30)

関係ないものと考えられる。その後流速は 1/100 秒程度の時間で立上っている。プロベラ式流速計の感度は 10 ヘルツ程度以下と言われており測定精度には種々問題があるが、ピークの値から、実験値を求め、図-9 にプロットした。Case 1, Case 30, Case 33 の値が 1 に近く、Case 14, Case 31, Case 32 は 2 に近い値となっている。

4. 結 言

以上得られた結果を要約すると次の通りとなる。

- (1) 非砕波の場合には、水理実験・数値実験とも 10% 程度の差異で理論と合う。
- (2) 引波初動の砕波の場合の遡上高は、Hunt の実験式の係数をかえた、式 (3) で表わされ、押波初動の場合には $(l/L)^{-0.4}$ で変化する。いずれの場合も砕波限界は梶浦の式が良く合う。

最後に、本研究にあたり、東北大学大学院の日比谷穰君の熱心な協力を得た。また本研究は昭和 56 年度文部省自然災害科学特別研究(研究代表者、東京大学堀川清司教授)に研究費用の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 富樫宏由・中村武弘: 津波の陸上遡上高に関する実験的研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 371~375, 1975.
- 2) 岩崎敏夫・楊 沢民: 長波の研究用造波装置とその特性について (1), 第 13 回海岸工学講演会論文集, pp. 230~235, 1966.
- 3) 岩崎敏夫・真野 明: オイラー座標による二次元津波遡

- 上の数値解析, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 70~74, 1979.
- 4) Whitham, G. B.: On the propagation of shock waves through regions of non-uniform area or flow, J. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 337~360, 1958.
 - 5) Carrier, G. F. and H. P. Greenspan: Water waves of finite amplitude on a sloping beach, J. Fluid Mech., Vol. 4, pp. 97~109, 1958.
 - 6) Shuto, N.: Standing waves in front of a sloping dike, Coastal Engineering in Japan, Vol. 15, pp. 13~23, 1972.
 - 7) 梶浦欣二郎: 浅海での津波予測法の研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. A-52-2, pp. 115~123, 1977.
 - 8) Keller, J. B. and H. B. Keller: Water waves run-up on a beach, Research Rep. No. NONR-3828(00), Office of Naval Research, 1964.
 - 9) Togashi, H. and A. Fuhrböter: A study on relationships between run-up height of long-period waves on uniform sloping beaches, Rep. Fac. Engg., Nagasaki Univ., No. 17, pp. 87~92, 1981.
 - 10) Hunt, I. A., Jr.: Design of seawalls and breakwaters, Jour. of the Waterways and Harbors Division, Proc. of ASCE, Vol. 85, pp. 123~152, 1959.
 - 11) Ho, D. V. and R. E. Meyer: Climb of a bore on a beach, Part 1, J. Fluid Mech., Vol. 21, pp. 219~230, 1962.
 - 12) Amein, M.: Long waves on a sloping beach and wave forces on a pier deck, Contract NBy-32236, U.S. Naval Civil Engg. Lab., 1964.
-