

斜面上の砕波の水粒子速度の鉛直分布と砕波型について

岩 垣 雄 一*・酒 井 哲 郎**・月 岡 康 一***・沢 井 信 樹****

1. ま え が き

斜面上を進行し変形して砕波に至る波の峯および谷の位相における水平方向水粒子速度の鉛直分布の変化については、すでに第18回海岸工学講演会¹⁾において発表した。特に、砕波点での波の峯の位相における水平方向水粒子速度の実験値は、同じ水深、波の周期、波高を用いて求めた従来の一様水深の有限振幅波理論による値よりもかなり小さいことがわかった。しかし、実験で用いた斜面勾配が 1/20 の 1 種類であったことから、その相違を系統的に明らかにすることができなかった。

従来、砕波点付近の波の水粒子速度に関しては、数多くの実験的研究があるが、特に斜面上の砕波に限るとその数は少なく、流速の時間変化を時間波形と関連づけたもの²⁾および Biesel の理論を数値計算して実験値と比較したもの³⁾などがあるにすぎない。

ここでは、特に斜面上の砕波の水粒子速度場を実験的に明らかにするために、沖波波形勾配を変化させ、かつ 1/20 の底勾配以外に 1/10 および 1/30 の底勾配についても実験を行なった。水粒子速度の測定方法としては、前回は水素気泡をトレーサとする方法を用いたが、今回は中立粒子をトレーサとし、16 mm 高速度カメラを用いてその運動を撮影した。フィルムには砕波点付近の空間波形も撮影されているので、波形変化についても検討し、沖波波形勾配と底勾配とから決定される砕波型と比較して、波の峯および谷の位相における水平方向水粒子速度の鉛直分布のパターンを、沖波波形勾配と底勾配の値の組合せによって、すなわち砕波型に基づいて分類することを試みた。

2. 実験装置、方法および解析方法

(1) 実験装置

実験に用いた波浪水槽は、前回¹⁾と同様、京都大学工学部土木工学教室の水槽を用いた。水槽の長さは 30 m、幅は 50 cm、高さは 75 cm であり、造波板から 19 m は両側面ともガラス張りになっている。一様勾配斜面 (勾

配 1/10, 1/20, 1/30) は、いずれの場合も造波板から 14 m の位置より後方にかけて設置した。斜面の最上端は、静水面より高くとり、砕波後の波が遡上したのちもど流れとなって逆流するようにした。波高計は、2 台を一樣水深部に 1 台を斜面上の砕波点に設置した。波の峯および谷の位相における水平方向水粒子速度の鉛直分布は、中立粒子をトレーサとし、その運動を 16 mm 高速度カメラで撮影して測定した (476 コマ/sec)。中立粒子としては、水面下の流速と水面上の流速を別個に測定できるように、それぞれ比重 1.02 直径約 2 mm の白色スチロール樹脂球および比重 0.98 直径約 2 mm の白色ポリエチレン球を用いた。16 mm 高速度カメラは水槽側方に波の峯と同じ高さに設置し、焦点距離 100 mm の望遠レンズを用いて写真のひずみを小さくするとともに、波の峯から底面まで写せるようにした。

(2) 実験方法

実験においては、一樣水深部の水深 h_1 を常に 26.5 cm とし、3 種類の勾配の各斜面について、波の周期を 1.0, 1.5 および 2.0 sec の 3 種類 (ただし斜面勾配 1/10

表—1 実験条件

No.	T (sec)	H_1 (cm)	c_1 (cm/sec)	L_1 (cm)	H_0/L_0	i
1	1.0	8.2	133	133	0.058	1/10
2		5.9	133	133	0.042	
3		4.0	133	133	0.028	
4		7.7	146	220	0.023	
5	1.5	6.2	143	214	0.019	
6		4.4	152	228	0.013	
7		10.4	130	130	0.073	
8		7.2	133	133	0.051	
9	2.0	4.4	132	132	0.031	1/20
10		10.7	169	254	0.032	
11		6.3	151	226	0.019	
12		3.5	158	237	0.010	
13	2.0	6.9	179	358	0.011	
14		5.3	172	343	0.008	
15		3.6	164	328	0.005	
16	1.0	7.3	133	133	0.051	1/30
17		5.6	133	133	0.039	
18		3.7	135	135	0.026	
19		8.4	162	243	0.025	
20	1.5	5.5	146	220	0.016	
21		7.1	167	333	0.011	
22		5.3	173	346	0.008	
23		3.2	172	343	0.005	

* 正会員 工博 京都大学 教授 工学部土木工学教室
 ** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学教室
 *** 正会員 工修 川崎重工業鉄構事業部東京設計事務所
 **** 正会員 三井建設株式会社

の場合は 1.0 および 1.5 sec の 2 種類) にかえ, さらに波高も 3 種類とした (ただし斜面勾配 1/30, 周期 1.5 sec の場合は 2 種類のみ)。表-1 に, 各実験ケースの波の周期 T , 一樣水深部での波高 H_1 , 波速 c_1 , 波長 L_1 ($=c_1 \times T$) および斜面勾配 i を示す。実験においては, まず波を起こして, 波が安定した後に斜面上での砕波点を決定し, 波高計およびカメラを砕波点に合わせて設置した。なお, 砕波点としては, 峯の水面がなめらかでなくなる瞬間の峯の位置とした。砕波点決定後に一度波を止め, 再び波を起こして 3 台の波高計で水位の時間変化を測定するとともに, 波が安定したのち砕波点近傍の中立粒子の挙動を約 7 sec 間撮影した。

(3) 解析方法

撮影されたフィルムから, 砕波開始時の波の写っているコマを決定した。そのコマに写っている波の峯の位置が, (2) で述べた撮影前の目視による砕波点と若干異なる場合があったので, その場合はフィルムから決定した方を採用することにした。同様に砕波水深 h_b を決定し, また砕波高 H_b は砕波点での時間波形からも読みとれるが, フィルムから得られる峯高と谷高の差として求めたものを採用した。次に砕波点付近での空間波形の変化を, 砕波点を峯が通過する前から後 20 コマおき (20/476 sec) に読み取った。砕波点における波の峯の位相での水平方向水粒子速度 u_0 は, 砕波開始時のコマと, それより 5 コマ (5/476 sec) 後のコマの同一の中立粒子の水平位置の差から求めた。また波の谷の位相での u_0 は, 同様に砕波点を谷が通過した瞬間のコマとそれより 10 コマ後のコマとから求めた。

3. 実験結果とその検討

波形変化および水粒子速度の結果を議論する前に, 砕波指標および砕波形式を検討するため, 一樣水深部の波高 H_1 から, 微小振幅波の shoaling の曲線を用いて相当沖波波高 H_0 を求めた。表-1 には, こうして求めた各ケースの相当沖波波形勾配 H_0/L_0 も示している。次に, 2.(3) で述べた方法によって求めた各ケースの砕波水深 h_b および砕波高 H_b を相当沖波波高 H_0 でわり, 沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を底勾配 i をパラメーターとして示したのが, 図-1 および 図-2 である。図-1, 2 には, 合田⁴⁾が過去の測定結果から経験的に求めた砕波指標曲線をも示している。砕波水深 h_b/H_0 の方は, 実験値にかなりのばらつきはあるが, 各勾配ともその傾向は合田の曲線群とほぼ一致している。一方, 砕波高 H_b/H_0 の方は, 全体的傾向はほぼ一致しているが, 合田の曲線群のような底勾配による差異が見られない。図-3 は, 限界波高 H_b/h_b を示したもので, 同じく合田による経験曲線をも示している。全体として実験値の方が, 合田の経験曲線より小さいが, 底勾配が大きいほど限界波高が

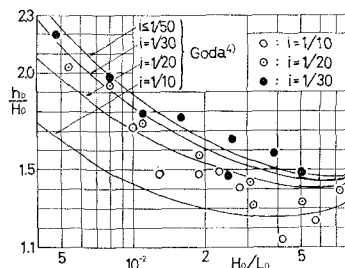


図-1 砕波水深

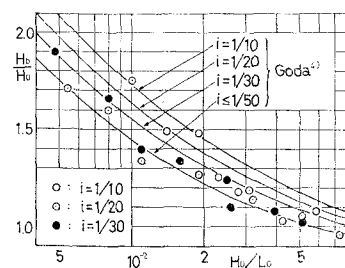


図-2 砕波高

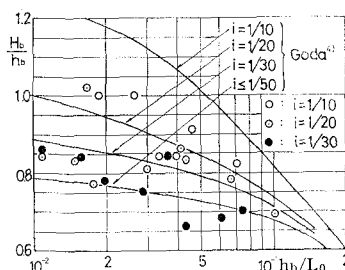


図-3 限界波高比

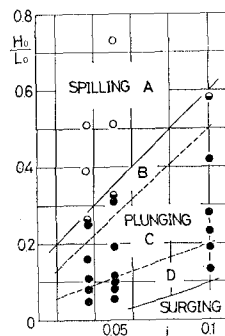
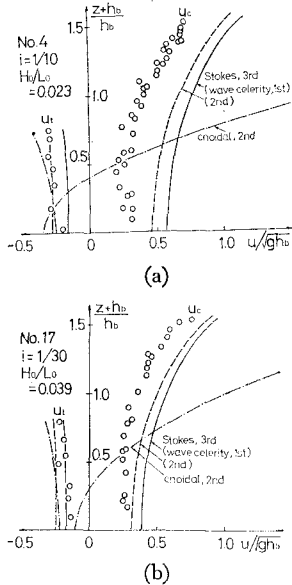


図-4 砕波型

大きくなる傾向は一致している。

次に, 各ケースの沖波波形勾配 H_0/L_0 と底勾配 i を, それぞれ縦軸と横軸にとって示したのが 図-4 である。図中の○印は崩れ波, ●印は巻き波, ◐印は両者の中間と考えられるものである。図中には, 従来砕波形式として崩れ波, 巻き波およびくだけ寄せ波の 3 つの形式を分類する曲線^{5), 6)}をも示している。もちろん 3 つの型を分

類する曲線の位置そのものは確定的なものではないが、この図からわかるように、今回の実験の範囲の砕波の形式は、崩れ波と巻き波を分ける曲線によって説明しうる。

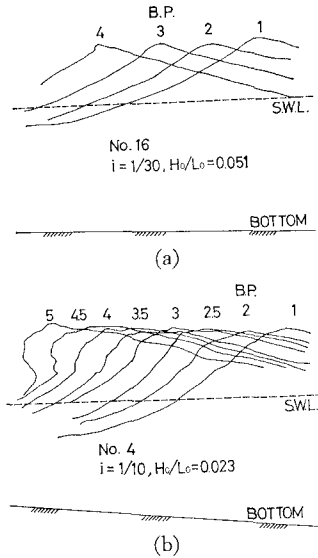


図—5 砕波の水平方向水粒子速度の鉛直分布

図—5 (a), (b) は、前回¹⁾同様、波の峯および谷の位相における水平方向水粒子速度 u_c および u_t の鉛直分布を示したものである。ただし今回は砕波点のものに限っている。横軸は砕波点の水深 h_b を用いて $\sqrt{gh_b}$ で割り、縦軸は底面からの高さ $z+h_b$ を h_b で割ってそれぞれ無次元化している。図の (a) は斜面勾配 1/10 の場合、(b) は 1/30 の場合の例である。図中には砕波水深 h_b 、波の周期 T および砕波高 H_b の実験値を用いて求めた Stokes 波の第 3 次近似解およびクノイド波の第 2 近似解による理論曲線の他に、Stokes の波速の第 2 定義を用いた Stokes 波の第 3 次近似解⁷⁾ による理論曲線をも示している。ここに示さなかった他の実験の結果も含めて、特に波の峯の位相における水平方向水粒子速度の実験値は、従来の一様水深の有限振幅波理論の値の傾向と大きく異なっている。ただし図を見てもわかるように、Stokes 波の理論曲線は、クノイド波の理論曲線に比べればまだ実験値の傾向に近く、ただ全体に実験値より大きくなっている。その点、Stokes の波速の第 2 定義を用いた場合の波の理論値の方が第 1 定義のものよりやや小さく実験値に近い。なお底勾配が 1/30 の場合で、沖波波形勾配の大きいものは実験値と理論値との差が少なく、実験値が Stokes の波速の第 2 定義を用いた Stokes 波の理論値とほぼ一致する場合もあった。

上述のように、一般に 1/10, 1/20 および 1/30 の 3 種類の勾配の斜面上で砕ける波の水平方向水粒子速度の波の峯の位相での値は、前回の 1/20 のみの実験結果と同様、

一様水深の有限振幅波理論によっては説明できない。その理由としては数多くのことが考えられるが、その 1 つとして対称な波形を有する有限振幅波理論と異なって波形そのものが砕波点では非対称になっていることが考えられる。図—6 (a), (b) は、フィルムからよみとった砕波



図—6 砕波点近傍の空間波形の変化

点近傍の空間波形の時間的変化の例を示したものである。図中の数字は相対的な時間を示し単位は約 1/24 sec である。また B. P. は、2. (3) で述べた方法によって決定した砕波の瞬間の波形であることを示している。(a) は図—4 で崩れ波型領域の場合の例であり、(b) は巻き波型領域の場合の例である。フィルムに 1 波長全体を写し込むことができないので、1 波長全体にわたる波形はわからないが、峯付近の波形からだけでも砕波時の波形が非対称になっていることがわかる。また (b) の場合、砕波後の波形は典型的な巻き波型の様相を呈していることがわかる。なお、この波形の非対称性に注目して、砕波の水平方向水粒子速度の実験結果が Dean⁹⁾ の Stream function wave theory を用いて説明できるかを現在検討しており、その一部は今年度の土木学会年次学術講演会⁹⁾ で発表した。本来この Stream function wave theory は一様水深の波形が変形しない波に適用されるべきもので、斜面上の砕波にはもともと適用し得ないが、これまでの検討の範囲内では、このような問題点があるにもかかわらず、波の峯の位相に関しては上述の Stokes の波速の第 2 定義を用いた理論値⁷⁾ よりもさらに実験値に近い値を示すようである。

さてここでは、上述の水平方向水粒子速度の鉛直分布の実験結果が、従来の一様水深の有限振幅波理論では説明できないことから、その傾向を砕波型と関係づけて検討することにした。図—4 の砕波形式の分類の曲線は確

定的なものではないので、一応図中の2本の破線によって巻き波型領域をさらに3つに細分し、崩れ波型領域を含めて、沖波波形勾配の大きい順に4つの領域をA, B, C, Dと名づけ、それぞれの領域における碎波の峯および谷の位相における水平方向水粒子速度の鉛直分布のパターンの相違を検討する。

この場合、各ケースによって波の峯および谷の高さが異なるため、水粒子速度の実験値の存在する高さが異なってくる。したがって鉛直分布図の縦軸としては、静水深 h_0 で無次元化せず、波の峯の位相の場合は η_0 を静水面からの峯高として $(z+h_0)/(\eta_0+h_0)$ を、また谷の位相の場合は $\eta_t(<0)$ を静水面からの谷高として $(z+h_0)/(\eta_t+h_0)$ を用いることにした。図-7(a)~(d)は、それぞれ上述のA~D領域のケースの実験結果を各領域

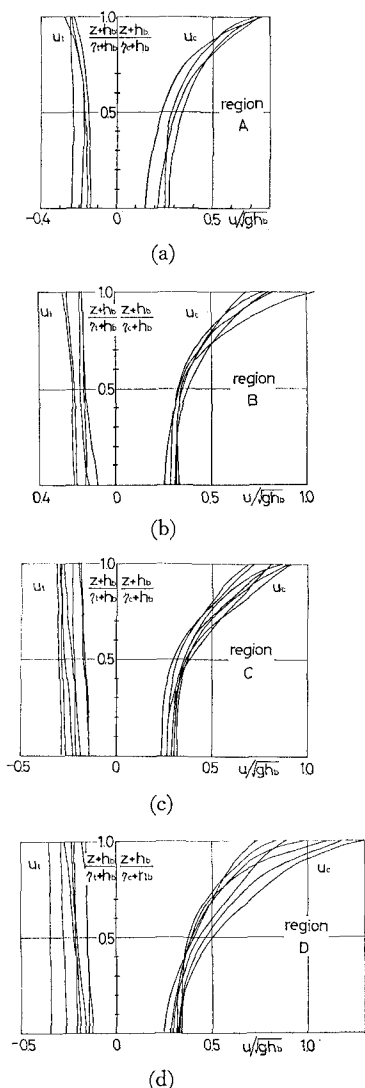


図-7 碎波の水平方向水粒子速度の鉛直分布と碎波型の関係

表-2 碎波の水平方向水粒子速度の鉛直分布と碎波型の関係

$\frac{z+h_0}{\eta_0+h_0}$	0.0	0.5	1.0
region			
A	0.15~0.30	0.20~0.35	0.65~0.75
B	0.25~0.35	0.30~0.40	0.70~1.05
C	0.25~0.35	0.30~0.40	0.70~0.95
D	0.25~0.35	0.35~0.55	0.75~1.30

ごとにまとめて描いたものである。ただし、この場合は多少のばらつきのある実験値をなめらかな曲線で表現している。4つの領域の鉛直分布の傾向を見るために、特に峯の位相の場合の、 $(z+h_0)/(\eta_0+h_0)=0, 0.5, 1.0$ での $u_c/\sqrt{gh_0}$ の実験値の範囲を示したのが表-2である。 $(z+h_0)/(\eta_0+h_0)=1.0$ でのBの場合の上限1.05を除けば、0, 0.5, 1.0のいずれの場合も、Aから順に $u_c/\sqrt{gh_0}$ の値が増加していることがわかる。一方、谷の位相での $u_t/\sqrt{gh_0}$ の実験値は、0.1~0.35の範囲に含まれており、ただA, B, C, Dの順に実験値の分布の範囲が広がっているようである。斜面上の碎波の水粒子速度に関しては、単に従来碎波型を支配する2つの量としての底勾配と沖波波形勾配以外に関係する量があるかもしれないが、このように一応碎波型を分類する $i \sim H_0/L_0$ 平面の領域によって、その特徴を量的に表現しようのではないかと考えられる。

4. あとがき

以上のように、この研究は、斜面上で碎ける波の峯および谷の位相での水平方向水粒子速度の鉛直分布を、従来的一様水深の有限振幅波理論では説明することができないことから、碎波型を支配する底勾配と沖波波形勾配の値によって実験的にその傾向を明らかにしたものである。他にも支配的な量は存在するかもしれないが、碎波水深、碎波高および碎波の峯高 η_0 が底勾配と沖波波形勾配によって決まる⁴⁾とすれば、少なくとも峯の位相での水平方向水粒子速度の鉛直分布 ($u_c/\sqrt{gh_0} \sim (z+h_0)/(\eta_0+h_0)$) は、ほぼ底勾配と沖波波形勾配とによって決まると考えてもよいといえる。最後に、この研究の一部は文部省科学研究費によったことを付記する。

参考文献

- 1) 岩垣雄一・酒井哲郎・川島 毅: 斜面上の波の水粒子速度の鉛直分布について, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 93~96, 1971.
- 2) Adeyemo, M. D.: Velocity fields in the wave breaker zone, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., pp. 435~460, 1970.
- 3) 堀川清司・西村仁嗣・福井直治: 碎波機構に関する一考察, 第27回年次学術講演会講演概要集, 第

- 2 部, 土木学会, 1972.
- 4) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第 180 号, pp. 39~49, 1970.
- 5) 速水頌一郎: 碎波の機構 (II), 第 2 回海岸工学講演会講演集, pp. 13~15, 1965.
- 6) Weggel, J. R.: Maximum breaker height, Proc. ASCE, Jour. WW Div., Vol. 98, No. WW 4, pp. 529~548, 1972.
- 7) Tsuchiya, Y. and M. Yamaguchi: Some considerations on water particle velocities of finite amplitude wave theories, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, pp. 43~58, 1972.
- 8) Dean, R. G.: Stream function representation of nonlinear ocean waves, Jour. Geophysical Res., Vol. 70, No. 18, pp. 4561~4572, 1965.
- 9) 酒井哲郎・山田雄三: Stream function theory の水粒子速度場への適用性, 第 28 回年次学術講演会講演概要集, 第 2 部, 土木学会, 1973.
-