

砕波指標の整理について

A SYNTHESIS OF BREAKER INDICES

合 田 良 実*
By Yoshimi Goda

1. ま え が き

海岸に寄せては砕け、砕けては引く海の波は、いつ見ても興味のつきないものであろう。しかし、海岸や港湾の工事にたずさわる者にとって、海の波は第1に考えなければならない外力であり、その大きさは構造物の設計、施工を直接に左右する。なかでも砕波は、波力としても最大の力を発揮するため、その起こる位置と波高を推定することは、設計の重要な手順となる。このため砕波に関する理論、実験、現地観測は数多く行なわれており、こうした結果からいくつかの砕波指標が提案され、実用に供されている。

砕波指標の中では1944年に米国海軍水路部から発表されたもの¹⁾が最初と思われ、とくに米国の Beach Erosion Board によって海岸工学の技術者に紹介²⁾されて以来、広く知られているもので、単に砕波指標といえはこれを指すことが多い。この砕波指標は、主として観測値に基づくもので、図表の形にまとめられているが、1949年に Munk³⁾は孤立波理論に基づくつぎの関係式を示している。

$$\frac{H_b}{H_0} = \frac{1}{3.3 \sqrt[3]{H_0/L_0}} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{h_b}{H_b} = 1.28 \left(\text{または} \frac{H_b}{h_b} = 0.78 \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 H_b ：砕波高、 h_b ：砕波水深、 H_0 ：沖波波高、 L_0 ：沖波波長、である。Munk は実験値および観測値と比較して、データのばらつきは大きいけれども、平均的には式(1)、(2)が合うとしており、米国の海岸工事の設計指針⁴⁾では、主にこれを採用している。

この二つの砕波指標では海底勾配の影響が取り入れられていないが、その後間もなく海底勾配が急なときには

砕波高が大きいことが認められ⁵⁾、米国のカリフォルニア大学などで系統的な実験が行なわれ、この結果が Iversen の実験曲線として1951、1952年に発表された^{6),7)}。

以上3種の砕波指標は、砕波諸元と沖波の諸元との関係を表わすものである。一方、砕波限界にある波の特性については早くから研究が行なわれており、深海波の砕波に関しては、1893年に Michell⁸⁾が $(H_0/L_0)_b = 0.142$ と計算し、また浅海波の極限としての孤立波については、1894年に McCowan⁹⁾が $(H/h)_b = 0.78$ の値を示している。この二つの極限の間にある浅海表面波については、1944年に Miche¹⁰⁾が次式を導いている。

$$\left(\frac{H}{L} \right)_b = 0.142 \tanh 2\pi \left(\frac{h}{L} \right)_b \dots \dots \dots (3)$$

また、浜田¹¹⁾も Miche とは別に同じ式を導き、実験でその妥当性を検証している。さらに、Suquet と Walle¹²⁾は一様水深における砕波限界の実験曲線を1953年に発表している。

その後、砕波に関する研究は数多く行なわれ、また他の問題に関する研究の一環として砕波を扱って実験データを発表したものも多数あり、砕波に関するデータの蓄積は著しい。しかしながら、これらのデータも相互に比較してみると、かなりの不一致が目につく。たとえば、前述の米国水路部の砕波指標、Munk の孤立波理論、および Iversen の実験曲線は、標準的な砕波指標として多くの参考書に記載されているが、この3種の指標にしても砕波高や砕波水深に20%以上の差を示す場合がある。こうした砕波指標の不一致は、砕波現象の変動性をそのままに表わしているといえるけれども、使用する立場から見れば誠に不統一で、どれを採用すべきか判断に苦しみどころである。また、Iversen の曲線では、砕波高が浅海における微小振幅波としての波高よりも小さい場合が出てくる。たとえば、 $T=9$ sec、 $H_0=5$ m とすると $H_0/L_0 \approx 0.04$ であるから、海底勾配が1/50以下のときは水理公式集(昭38版)¹³⁾の図-2.21、2.22 (pp.

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部

† 本報告に用いた記号のうち主要なものは本文最後に一括して示した。

481~482) によって, $H_b/H_0=0.94$, $h_b/H_0=1.11$ となり, これから $H_b=4.7$ m, $h_b=5.6$ m の値が得られる。しかし, $T=9$ sec の沖波が $h=5.6$ m の浅海に進んだときは, 水深の変化によって波高が $K_s=1.04$ 倍, すなわち $H=5.2$ m になるはずであり, $H_b=4.7$ m は過小な推定値である。

このような碎波データの不一致や矛盾をそのままにしておくのは実用上好ましくないので, 著者は最近の研究成果などを参照して碎波データの整理を行ない, あまり矛盾の生じない碎波指標を作成したので, ここに報告する次第である。

2. 碎波点における波の特性

(1) 碎波限界波高

碎波の大きさに関する問題は, 沖波の諸元との関係として捉える場合と, 特定的水深における碎波限界波高として解析する場合の二つのアプローチがある。構造物の設計において, その設置位置にある程度の選択が許されれば, 碎波帯を避けるようにすることも可能である。しかし, 構造物の設置位置が既定の場合には, その直前において碎波し, 強大な波力をおよぼす波がまず考慮される。すなわち, 所定的水深における碎波限界の波の検討が必要になる。

こうした碎波限界波高については, Miche および浜田が式(3)を示したのを始めとして, 級数表示による有限振幅波の計算^{14)~17)}や, 碎波限界においては波頂が 120° となる条件をあらかじめ与えて限界波形勾配を計算した結果^{18)~23)}など, いろいろ発表されている。また, Reid と Bretschneider²⁴⁾ は深海波と孤立波の計算値の

中間を観測値や実験値で補った半経験的な曲線を示しており, 著者も先に直柱に働く波力に関連して限界波高比の実験曲線²⁵⁾を提案した。しかしながら, 現時点においては, 山田・塩谷²³⁾の計算が最も精度が高いと考えられるので, その計算結果から工学的に重要と思われる数値を算出したのが表-1である。この表からたとえば, 碎波限界の波の波速は微小振幅波理論による値にくらべて, 深海波で 19.3%, 孤立波で 28.5% 大きく, 浅海表面波でも $h/L_0 \approx 0.11$ を極小点として約 13% 以上の波長増大率を示すことなどもわかる。

この計算は, 一様水深における碎波限界を対象としたものである。一方これと対比すべき実験データとしては, Suquet と Wallet¹¹⁾の実験があげられるけれども, これはデータ表が付されていないのでくわしい検討ができない。そこで, 水底勾配 1/100 における著者の実験値と, 水底勾配 1/50 のときの Iversen⁶⁾ および光易²⁶⁾のデータについて比較したのが図-1である。碎波限界は, $(H/L)_b$ と $(h/L)_b$ の関係として表示されることが多いけれども, この表示法では, i) $(h/L)_b$ の小さい傾

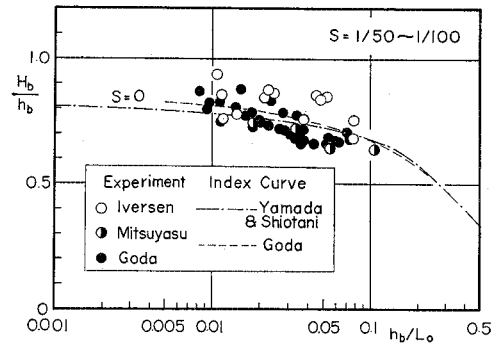


図-1 H_b/h_b と h_b/L_0 の関係 (水底勾配 1/50~1/100)

表-1 山田・塩谷²³⁾による碎波限界の波の特性の計算結果

No	h_b/L_0	h_b/L_0^*	h_b/L_b	C_b/C_A	H_b/L_0	H_b/L_b	H_b/h_b	$(\eta_c/H)_b$	Y_b/h_b
1	∞	∞	∞	1.193	0.1684	0.1412	0		1.0000
2	0.935	0.935	0.7868	1.189	0.1675	0.1409	0.1791	0.6706	1.1201
3	0.471	0.474	0.4011	1.181	0.1629	0.1386	0.3456	0.6765	1.2338
4	0.286	0.300	0.2597	1.154	0.1407	0.1277	0.4919	0.6908	1.3398
5	0.1886	0.216	0.1885	1.143	0.1105	0.1115	0.5912	0.7165	1.4236
6	0.1117	0.1510	0.1331	1.134	0.0746	0.08897	0.6683	0.7619	1.5092
7	0.0763	0.1198	0.1050	1.141	0.0538	0.07410	0.7059	0.7939	1.5604
8	0.0474	0.0915	0.07915	1.156	0.0346	0.05771	0.7293	0.8392	1.6120
9	0.0284	0.0694	0.05909	1.174	0.0213	0.04430	0.7496	0.8766	1.6571
10	0.01669	0.0525	0.04398	1.193	0.01280	0.03371	0.7666	0.9061	1.6946
11	0.01095	0.0422	0.03499	1.207	0.00851	0.02720	0.7774	0.9242	1.7185
12	0.00575	0.0306	0.02483	1.231	0.00454	0.01962	0.7904	0.9453	1.7472
13	0.00239	0.01953	0.01570	1.244	0.001918	0.01260	0.8028	0.9649	1.7746
14	0.001144	0.01351	0.01075	1.257	0.000926	0.00871	0.8099	0.9757	1.7902
15	0.000437	0.00833	0.00660	1.263	0.000357	0.00538	0.8160	0.9849	1.8037
16	0	0	0	1.285**	0	0	0.8261**	1.0000	1.8261

* C_A, L_A は微小振幅波としての波速および波長, $C_A = \frac{g}{2\pi} T \tanh \frac{2\pi h}{L_A}$, $L_A = C_A T$ である。

** 山田・木村・岡部²²⁾の孤立波の計算による。

域におけるデータの差が十分に表われない, ii) 波長 L_b を実測あるいは正確に計算することがむずかしく, これを微小振幅波の波長で代用すれば前述のように13~28%の誤差を生ずる, などの問題を生ずる。そこで, 本報告では 図-1 のように H_b/h_b と h_b/L_0 の関係として表示し, 検討を行なった。

図-1 を見ると, 実験データが平均値から $\pm 15\%$ の範囲に散らばっているため厳密な比較はできないが, 表-1 の計算値は実験値とかなり良く一致しているといえよう。とくに計算値はどちらかといえば実験値の平均よりもやや低目であり, 以下に述べる水底勾配の影響によって H_b/h_b が増大する傾向をあわせ考えると, 表-1 の値は水底勾配0のときの碎波限界波高比として十分信頼できるものと思われる。なお以前に著者が作成した実験指標²⁵⁾は, 計算値と若干の差があるけれども実用上はほぼ同一と見なすことができる。

つぎに, 水底が傾斜しているときの碎波現象については, いくつかの理論的研究が行なわれているけれども, 碎波指標の参考になるような計算結果は発表されていないように思われる。そこで, 既往の各種実験報告のうち, 実験条件や実験データが記載されているもの^{6), 25)~31)} について, 水底勾配別に 図-1 の形に実験値を整理したが, 図-2~4 である。なお, これらの実験の諸元は 表-2 にまとめて示した。

図-2~4 を見ると実験データの散らばりが大きく, 水底勾配 1/30 のように Iversen⁶⁾ のデータと豊島ほか²⁹⁾ のデータとで系統的な差が見られる場合や, 水底勾配 1/10 の Galvin³¹⁾ のデータのように, 同一の実験の中でも大きな差を生じている場合などがある。また水底勾配が 1/10 の場合, Iversen は h_b/L_0 がある程度小さくなると H_b/h_b が減少するような実験曲線を示している。しかし他の水底勾配のデータの傾向や, 水底勾配が 1/10 のときの Galvin のデータが h_b/L_0 のさらに小さい所で大きな H_b/h_b の値を示していることなどをあわせ考えると, Iversen の実験曲線の引き方は碎波限界波高比の一般的傾向に合致していないと考えられよう。

このように実験データの散らばりなど問題はありますが, とくに全体からはずれているデータを除外して考えれば, 各水底勾配ごとに実験曲線を描くことが可能で

ある。したがって, ほぼ実験値の平均を表わすように, また水底勾配による変化が滑らかに表わせるように考慮して, 実験曲線を 図-2~4 の実線のように定めた。

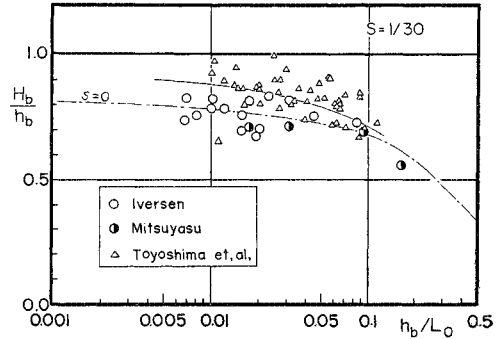


図-2 H_b/h_b と h_b/L_0 の関係 (水底勾配 1/30)

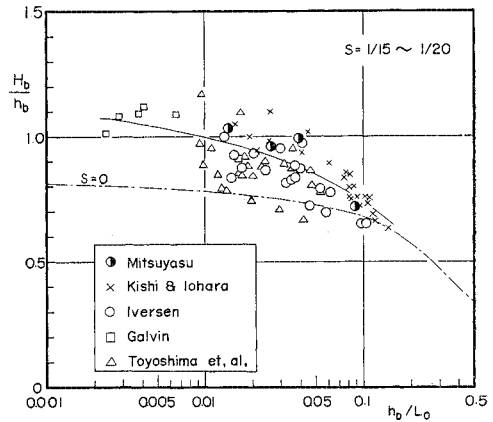


図-3 H_b/h_b と h_b/L_0 の関係 (水底勾配 1/15~1/20)

表-2 碎波限界の波に関する実験データの概要

実験者	水底勾配 s	周期 $T(\text{sec})$	碎波高 $H_b(\text{cm})$	碎波水深 $h_b(\text{cm})$	実験水路 長さ×深さ×幅(m)
Iversen ⁶⁾	1/10	0.80~2.50	4.9~12.2	4.3~13.7	16.4×0.9×0.3
~	1/20	0.74~2.24	4.3~12.8	4.9~16.2	
~	1/30	1.49~2.65	5.3~12.7	7.0~15.5	
~	1/50	0.90~2.65	5.5~12.1	6.5~15.6	
岸・庵原 ²⁷⁾	1/9	0.9~2.0	7.0~10.6	7.9~10.0	13.0×0.5×0.6
~	1/17	0.65~2.0	5.0~12.5	6.5~13.5	
光易 ^{28)*}	1/15	1.02~2.57	10.4~15.0	12.4~14.5	22.0×0.5×0.6
~	1/30	1.02~2.57	9.6~11.1	15.3~20.6	
~	1/50	1.02~2.57	9.8~14.1	17.7~19.0	
合田 ²⁶⁾	1/100	2.30~7.30	41.7~93.1	60.3~125.0	105.0×2.5×3.0
合田・原中・北畑 ²⁸⁾	1/10	1.36~2.24	14~21.5	11~18	33.1×0.9×0.5
豊島・富永・橋本 ²⁹⁾	1/20**	1.84~3.04	6.2~40.8	7.3~61.0	112.0×2.5×1.5
~	1/30	1.94~3.75	11.9~50.0	13.1~61.6	
Bowen et. al ³⁰⁾	1/12	0.82~2.37	4.4~13.0	4.2~9.7	40.0×0.75×0.5
Galvin ³¹⁾	1/10	1.00~6.00	3.8~15.0	3.9~12.0	29.3×0.6×0.46
~	1/20	2.00~6.00	9.3~17.6	10.0~18.2	

* このデータは, 著者が以前に光易博士の実験ファイルから転記させて頂いたものである。

** このうち No. 39, 40 のデータは $H_b \leq 2.0 \text{ cm}$ であり, また他とかけ離れた値を示すので除外した。

+ 原論文では h_b/H_b と H_b/L_0 の関係で示されているが, これは H_b/h_b と h_b/L_0 の関係に変換することができる。

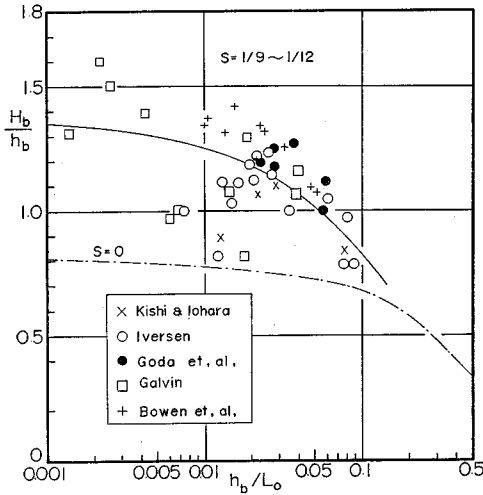


図-4 H_b/h_b と h_b/L_0 の関係
(水底勾配 1/9~1/12)

(2) 碎波の峯高

碎波点における波の特性としては、その峯高も重要である。これは、海洋構造物のプラットフォームなどが波で叩かれないようにするための設計諸元として直接に必要な。碎波限界波高比と同じように、水底勾配別に実験データをプロットし、実験曲線を引いたのが図-5~8である。ここで、縦軸には水底から碎波の波峯までの高さ Y_b と碎波水深 h_b との比をとっている。こ

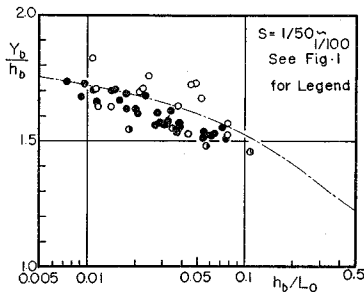


図-5 Y_b/h_b と h_b/L_0 の関係
(水底勾配 1/50~1/100)

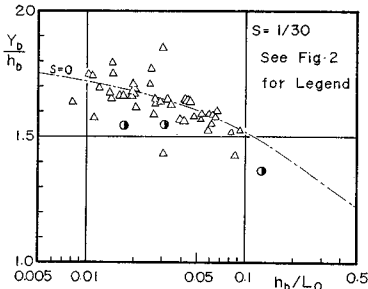


図-6 Y_b/h_b と h_b/L_0 の関係
(水底勾配 1/30)

の表示は豊島ほか²⁹⁾が用いたもので、実用上便利な表示法と思われる。

図-5~8 の実験曲線のうち、水底勾配 1/50~1/100 および 1/30 のものは、表-1 に示した山田・塩谷の計算値であり、実験データはこの計算値の上下にほぼ平均して散らばっている。すでに図-1~4 において水底の傾斜によって H_b/h_b が増大する傾向が表われているのであるから、 Y_b/h_b の値が $s=1/30$ 以下では変化しないことは、波の山の部分の相対的割合 $(\eta_c/H)_b$ が水底の傾斜とともに減少することを意味している。実際に $(\eta_c/H)_b$ と h_b/L_0 との関係を実験データについて調べてみると、この傾向が表われており、水底勾配 1/10 などでは $(\eta_c/H)_b$ の平均値が 0.75 程度にしかならない。なお、図-7 および 図-8 の実験曲線は、あらかじめ実験データについて $(\eta_c/H)_b$ と h_b/L_0 との関係を求め、これと H_b/h_b と h_b/L_0 の関係を組み合わせて求めたものである。

(3) 限界設計波高

碎波を設計の対象とする場合、もう一つ考えなければならない問題は、最大の波力を生ずるのは構造物の設置地点でちょうど碎ける波よりも、むしろそのやや前方で碎け始める波である^{26), 28)} ことである。すなわち、水深としてやや深い所の碎波が対象となるから、碎波高とし

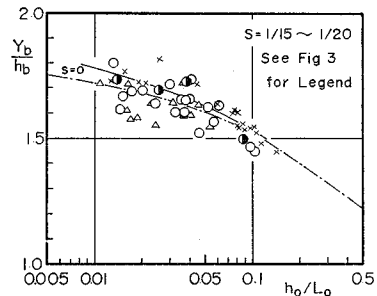


図-7 Y_b/h_b と h_b/L_0 の関係
(水底勾配 1/15~1/20)

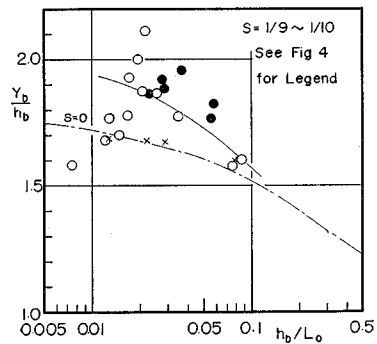


図-8 Y_b/h_b と h_b/L_0 の関係
(水底勾配 1/9~1/10)

でもやや大きなものを考慮しなければならない。図-1~4 に示した砕波限界は、実験者によって若干の差異はあるが、ほぼ波が砕け始める初期砕波点に関するものである。したがって、設計波の選定の際に構造物の設置水深を h_b として 図-1~4 を用いたのでは、波高を過小に見積ることになる。Galvin³¹⁾ はこうした観点から、巻き波が砕け始めてからその先端が水面に落下するまでにどのくらいの距離を進行するかを実験的に調べ、水底勾配が 1/5~1/20 ではこの距離が (1.5~4.9) H_b 程度であり、水底勾配が急なときは距離がやや短くなることを示している。

いま、水深 h の地点に設置された構造物に対して、最大の波力をおよぼすような波の波高を限界設計波高 H_{BM} と仮称³²⁾ し、 H_{BM}/h と h/L_0 との関係を探ると 図-9 のようになる。このような解析を行ない得るデータは、鉛直壁に働く波力に関する光易²⁶⁾ の実験値、および直柱に働く砕波力に関する Hall³³⁾ ならびに著者²⁸⁾ の実験値で、数が少ないために、限界設計波高の概

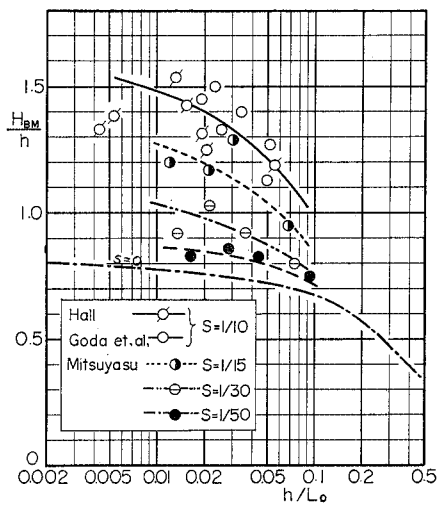


図-9 限界設計波高 H_{BM} の概略値

略値を示すにとどまる。しかし、図-1~4 とくらべてみるとわかるように、 H/h の値にして、水底勾配 1/10 で 0.15~0.25, 水底勾配 1/30 で 0.06~0.15, 水底勾配 1/50 で 0.05~0.10 程度増大している。したがって、水底勾配が急な場合は、とくにこうした砕波点と最大波力を生ずる点の差を考慮することが重要になる。

3. 沖波の諸元と砕波諸元との関係

(1) 水深変化による波高変化の理論値

つぎに、沖波の波高 H_0 および周期 T から砕波水深 h_b と砕波高 H_b を推定する問題の場合、いままでは主に観測あるいは実験値の平均曲線として砕波指標が求められてきた。しかし、波が深海から浅海へ進んだときの波高変化は理論的に計算されているので、砕波指標の決定にあたっては、こうした波高の理論値を考慮に入れるのが至当である。

まず第1次近似としての微小振幅波の理論では、波高の変化がつぎのように表わされる。

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \sqrt{\frac{2 \cosh^2 2\pi h/L}{4\pi h/L + \sinh 4\pi h/L}} \dots\dots (4)$$

しかし、実際には有限振幅の影響で波高変化率は式(4)による値よりやや大きくなり、とくに砕波点のように波形勾配が大きい場合には、この差が無視できなくなる。このような有限振幅の波の波高変化については、LeMéhauté と Webb³⁴⁾ および Koh と LeMéhauté³⁵⁾ がストークス波について計算を行ない、岩垣^{36), 37)} はクノイド波理論の初等関数表示であるハイパボリック波について計算している。そこで、この計算結果を示した図表³⁶⁾ で砕波限界と記されている曲線から波高変化率その他を読み取ると、表-3 のようになる。ただし図表から読み取りのため若干の誤差は生じていよう。

このうち、ストークス波の砕波限界としてどのような

表-3 有限振幅波の shoaling の計算結果³⁶⁾

H_0/L_0	計 算 値					修 正 値 ($s=1/50$ 以下)				備 考
	H_b/H_0	H_b/L_0	h_b/L_0	h_b/H_0	H_b/h_b	h_b/L_0	h_b/H_0	H_b/h_b	H_b/H_0	
0.12	0.945	0.113	0.19	1.58	0.60	0.195	1.62	0.57	0.94	ストークス波
0.10	0.950	0.095	0.14	1.40	0.68	0.150	1.50	0.63	0.94	
0.08	0.975	0.078	0.11	1.37	0.71	0.118	1.48	0.66	0.98	
0.06	1.006	0.061	0.084	1.38	0.72	0.088	1.47	0.69	1.01	
0.04	1.056	0.042	0.060	1.51	0.70	0.059	1.47	0.71	1.05	
0.020	1.24	0.0248	0.040	2.00	0.62	0.033	1.65	0.74	1.22	ハイパボリック波
0.015	1.33	0.0200	0.0315	2.09	0.64	0.026	1.73	0.75	1.30	
0.010	1.46	0.0146	0.023	2.30	0.64	0.019	1.90	0.76	1.45	
0.008	1.54	0.0123	0.0195	2.44	0.63	0.016	2.00	0.77	1.54	
0.006	1.66	0.0100	0.016	2.67	0.62	0.0129	2.15	0.77	1.66	
0.004	1.86	0.0074	0.0115	2.88	0.64	0.0095	2.38	0.78	1.85	
0.003	2.01	0.0060	0.0091	3.05	0.65	0.0077	2.57	0.78	2.01	
0.002	2.25	0.0045	0.0066	3.30	0.68	0.0057	2.85	0.79	2.26	

指標が用いられたかは明示されていないが、結果から判断すると式(3)に近いものようである。一方、ハイパボリック波の計算では、基礎式に用いた Laitone³⁸⁾ の理論における碎波限界が $(H/h)_{\max}=0.73$ であるところから、 $h/L \rightarrow 0$ でこれに収束するような碎波指標が用いられている。したがって、表-3 の H_b/h_b の計算値の欄に見るように、ストークス波の下限である $H_0/L_0=0.04$ からハイパボリック波の上限である $H_0/L_0=0.02$ に移るところで、 H_b/h_b の値が急に減少している。実際には表-1 の計算に示されているように H_b/h_b の変化は連続であるから、ハイパボリック波の計算値については H_b/H_0 および h_b/H_0 の両者あるいはそのいずれかについての修正が必要と考えられる(この修正については(3)で述べる)。

(2) 実験データに対する波高減衰の補正

以上の波高変化の理論値を実験値と比較し、碎波指標を作成する作業を進めるためには、まず実験データを吟味しておく必要がある。すでに Iversen の実験^{9),7)} でも、波が水路内を進行するにつれて波高が減衰することが示されており、Iversen 自身もこの補正方法について検討している。しかし彼の試みた方法は、あらかじめ沖波波高と減衰の影響を受けた水路内の波高との関係を実験的に求めておき、一様水深部における波高の測定値から減衰する前の沖波波高を推定するやり方であり、結局はこうした補正を行わない場合の実験曲線を採用した。

しかし、Iversen の試みた方法は、補正のしかたが逆であった。すなわち、補正が必要なのは沖側の波高測定点から碎波点に波が進行する間の減衰であり、これによって相当沖波波高がどの程度に減少したかを見積ることが必要である。いま、実験の手法を考えてみると、斜面の先端から沖側の一様水深部で波高 H_1 を測定し、これから沖波波高 H_0 を式(4)に基づいて

$$H_0 = H_1 / (K_s)_1 \dots \dots \dots (5)$$

で推定するのが普通である。ただし、 $(K_s)_1$ は一様水深部の水深 h_1 に対する浅水係数である。この波が水深 h_2 の地点にまで進んだとき、もし底面および側面の摩擦による減衰の影響がなければ、波高 H_2 は水深 h_2 に対する浅水係数を $(K_s)_2$ としてつぎのようになる。

$$H_2 = (K_s)_2 \times H_0 \dots \dots \dots (6)$$

しかし、実際には摩擦による減衰作用が働いているから、これによる波高の減少率を K_f として、水深 h_2 における波高はつぎのようになる。

$$H_2' = K_f \times (K_s)_2 \times H_0 = (K_s)_2 \times H_0' \dots \dots (7)$$

ここに、

$$H_0' = K_f \times H_0 \dots \dots \dots (8)$$

すなわち、水深 h_2 の地点に対する沖波波高は、水深 h_1 の地点の測定波高から式(5)で推定した H_0 。そのままではなくて、これに水路内の摩擦作用によって減少した割合 K_f を乗じた式(8)の H_0' である。

この補正計算において重要なのは、波高減少率 K_f の算定である。岩垣ほか³⁹⁾の研究によると、水深 h 、幅 B の水路を距離 x だけ進行したときの波高減少率の理論値はつぎのように表わされる。

$$K_f = \frac{H_2}{H_1} = \exp[-\epsilon_{b+w} x/L]$$

ここに、

$$\epsilon_{b+w} = \frac{4\pi^2}{L} \sqrt{\frac{\nu T}{\pi}} \left(1 + \frac{1}{\psi}\right) \cdot \frac{1}{kh + \sinh kh}$$

$$\psi = \frac{kB}{\sinh 2kh} \cdot \{1 - (1.086 \operatorname{sech} kh + 0.197)\epsilon\}$$

$$\epsilon = \frac{\pi H}{L} \cdot \frac{1}{\sinh kh}, \quad k = \frac{2\pi}{L}$$

ν : 水の動粘性係数

.....(9)

ただし、実験の結果は平均して式(9)による値よりも減衰が著しく、 ϵ_b の値にして 20~30% 大きいと報告されている。したがって、本報告では

$$\epsilon_{b+w}' = 1.25 \epsilon_{b+w} \dots \dots \dots (10)$$

として波高減少率を計算することにした。

この補正計算を碎波データについて行なう場合は水深が変化するので、沖側の測定点から碎波点までをいくつかの区間に分割して式(9)を適用することが必要になる。本報告では、水底があらかじめ定めた高さ Δh だけ上昇する所で区間を切り、全体として 20~30 区間になるように Δh を与えた。また、 ϵ で表示されている波形勾配の影響については、有限振幅波としての波高を求めるのが大変なので、式(4)の浅水係数を用いて計算した。表-2 にあげた実験データのうち、波高減衰の補正計算を行なったものについてその諸元を記すと、表-4 のようになる。ただし一様水深部の波高測定位置など報告に明記されていないものについては、水路の大きさや斜面先端の位置などから判断した想定値を用いた。

表-4 の結果では、Iversen の実験が水路幅が狭いためあって波高減衰の影響が最も大きく、波高が最大約 13% 減少したものと推定される。また、大型水路を使用した豊島ほかの実験でも、比較的短周期の波を使ったためか最大約 6% の波高減少があったものと推定される。

本章でデータとして用いた実験値は、すべてこの波高減衰の補正計算を行ない、沖波波高として式(8)の値を用いた。また、 H_1 から H_0 を求める際、厳密には有限振幅の影響を考慮すべきであるが、これは計算が大変であり、また今後の実験データとの比較の便宜も考え

表-4 波高減衰率の計算諸元

実験者	水底勾配 s	沖波測定点		斜面上の 減衰距離 x_2 (m)	波高減衰率 K_f 最小値~最大値 (平均値)
		h_1 (cm)	x_1 (m)*		
Iversen	1/10	65.5~70.1	(3.0)**	5.7~6.4	0.888~0.970 (0.941)
"	1/20	44.8~54.9	(2.1)	6.8~8.2	0.866~0.958 (0.929)
"	1/30	42.7~50.3	(1.2)	10.4~11.1	0.897~0.950 (0.933)
"	1/50	46.9	(0.6)	4.8~9.3	0.898~0.976 (0.936)
光 易	1/15	35.0	0.0	3.1~3.4	0.978~0.985 (0.982)
"	1/30	"	0.0	7.3~8.9	0.967~0.981 (0.975)
"	1/50	"	0.0	8.0~8.8	0.944~0.970 (0.959)
合 田	1/100	100.0, 150.0	5.7	21.8~37.0	0.979~0.995 (0.988)
豊島・宮永・橋本	1/20	100.0~150.0	(33.0)	(18.0~20.0)	0.937~0.975 (0.956)
"	1/30	"	(18.0)	(18.0~20.0)	0.947~0.975 (0.966)
Bowen et. al.	1/12	(60.0)	(5.0)	(6.1~6.8)	0.893~0.965 (0.939)

* 斜面先端から沖波測定点までの距離。

** カッコでくくったものは、数値が明示されていないため著者が想定した値である。

て、一応微小振幅波としての浅水係数を用いることにした。

(3) 砕波高および砕波水深の実験曲線の決定

沖波の諸元と砕波諸元との関係を調べる場合、(1)で述べた理論計算の結果が一つの基準となるけれども、その前にこれを実験値とくらべてみる必要がある。理論計算はもともと水底の傾斜が非常に緩やかな状態を対象しているから、実験値としても水底勾配が最も緩やかな 1/100 および 1/50 のデータとくらべるのが妥当である。そこで、 H_b/H_0 と H_0/L_0 との関係について実験値と計算値を比較したのが 図-10 である。これを見ると、Iversen のデータに計算値をかなり下まわるものがあることを除けば、実験値は計算値と良く一致しているといえる。また、Iversen の実験指標は実験データの平均値より低く、ほぼ下限値に近い。したがって、以後の作業においては 表-3 の計算値のうち H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係を基準値に用いることにした。

つぎの砕波水深について h_b/H_0 と H_0/L_0 との関係を実験値について調べてみると、データの散らばりが大き

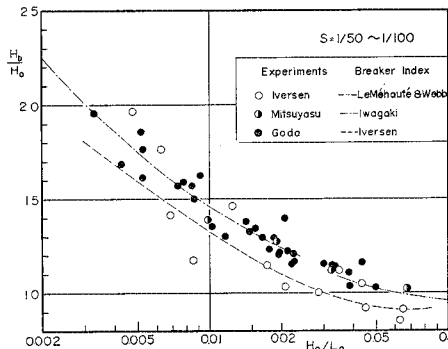


図-10 H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係
(水底勾配 1/50~1/100)

く、また H_0/L_0 の小さい所では 表-3 の計算値よりもかなり低い値を示す。したがって、(1)の最後で述べた H_b/h_b の不連続性の修正としては、 h_b/H_0 について行なうのが適当と考えられる。ただし、実験データから直接 h_b/H_0 と H_b/L_0 との関係曲線を描くのは、データの散らばりのために不正確になる。そこで、まず h_b/L_0 と H_0/L_0 との関係を求め、この結果から h_b/H_0 の実験曲線を決定することにした。

ところで、 h_b/L_0 と H_0/L_0 の関係は、表-1 と 表-3 の計算結果を用いて求めることが可能である。すなわち、山田・塩谷²³⁾の計算では沖波波高との関係は求められていないけれども、 H_b/L_0 と h_b/L_0 の関係は与えられている。一方、岩垣と酒井³⁵⁾の計算値のうち H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係は 図-10 のように実験的に検証されている。したがって、これを H_b/L_0 と H_0/L_0 の関係に書き改め、山田と塩谷の計算値と比較すれば、 h_b/L_0 と H_b/L_0 の関係が求められる。こうして計算した結果を水底勾配が 1/50~1/100 の実験値と比較したのが 図-11 であり、実験値との一致は良好である。そこで、この h_b/L_0 と H_0/L_0 の関係から h_b/H_0 の値を計算し、実験値と比較したのが 図-12 である。なお、この修正計算の結果は 表-3 の修正値の各欄に示してある。実験値の散らばりが大きいので、はっきりはいえないが、計算値は実験値のほぼ平均的な値を与えているといえよう。また、Iversen の実験指標はこの場合の自分のデータには則しているが、他のデータの傾向とは一致していない。

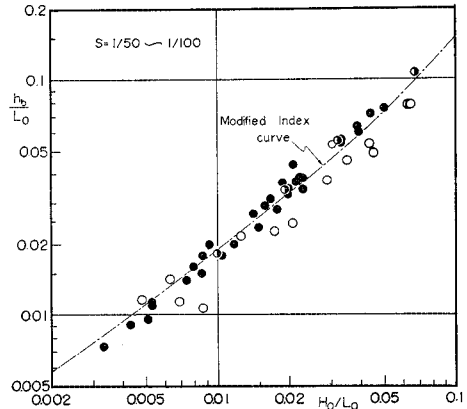


図-11 h_b/L_0 と H_0/L_0 の関係
(水底勾配 1/50~1/100)

同様に水底勾配が 1/30, 1/20, および 1/10 について h_b/L_0 の実験値を H_0/L_0 に対してプロットし、図-11 の計算値を参考にして実験曲線を定め、これを h_b/H_0 と H_0/L_0 の関係に換算して実験値と比較したのが図-13~15 である。また、図-2~4 の H_b/h_b と h_b/L_0 の実験曲線と組み合わせて H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係を算定し、実験値と比較したのが図-16~18 である。

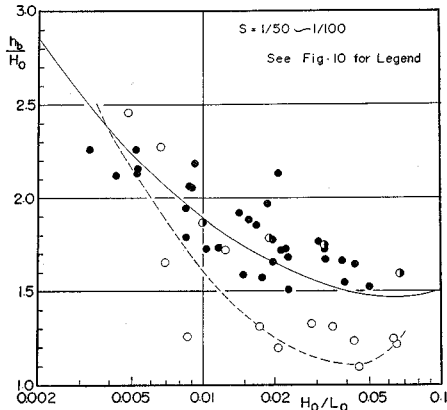


図-12 h_b/H_0 と H_0/L_0 の関係
(水底勾配 1/50~1/100)

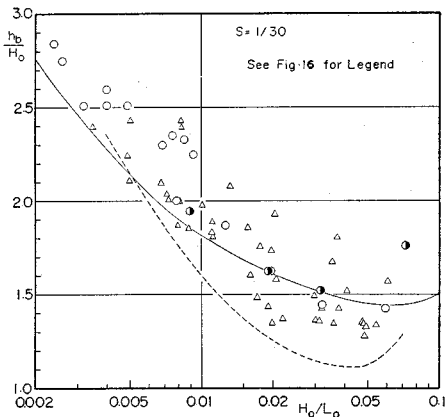


図-13 h_b/H_0 と H_0/L_0 の関係
(水底勾配 1/30)

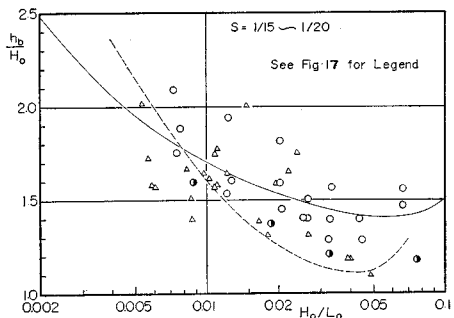


図-14 h_b/H_0 と H_0/L_0 の関係
(水底勾配 1/15~1/20)

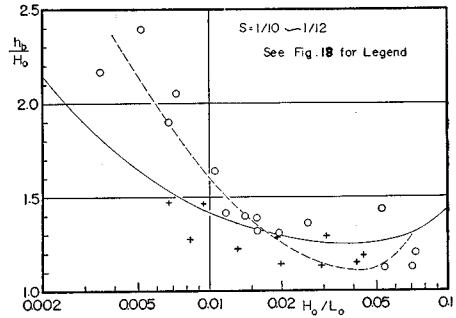


図-15 h_b/H_0 と H_0/L_0 の関係 (水底勾配 1/10~1/12)

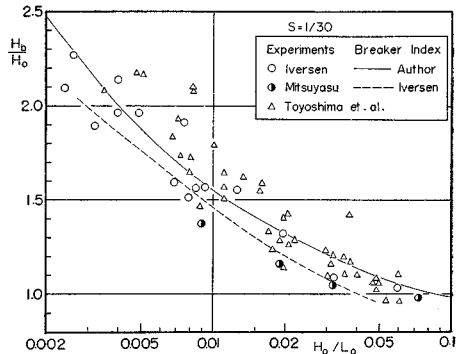


図-16 H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係 (水底勾配 1/30)

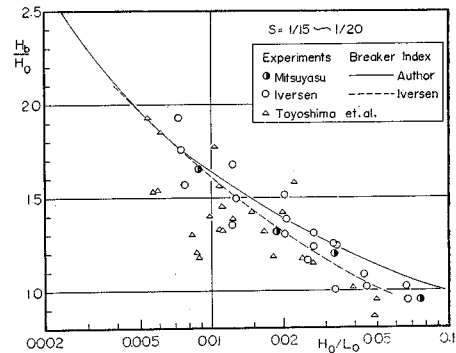


図-17 H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係 (水底勾配 1/15~1/20)

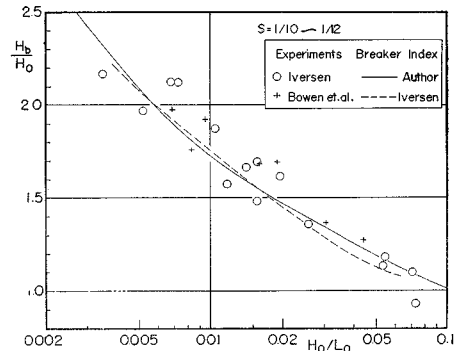


図-18 H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係 (水底勾配 1/10~1/12)

表-5 水底勾配 1/10~1/30 に対する砕波指標の算定結果

H_0/L_0	水底勾配 1/30				水底勾配 1/20				水底勾配 1/10			
	h_b/L_0	h_b/H_0	H_b/h_b	H_b/H_0	h_b/L_0	h_b/H_0	H_b/h_b	H_b/H_0	h_b/L_0	h_b/H_0	H_b/h_b	H_b/H_0
0.12	0.195	1.62	0.58	0.94	0.195	1.62	0.59	0.95	0.195	1.62	0.60	0.98
0.10	0.150	1.50	0.64	0.96	0.150	1.50	0.65	0.97	0.145	1.45	0.70	0.98
0.08	0.117	1.46	0.68	1.00	0.114	1.42	0.72	1.02	0.108	1.35	0.79	1.07
0.06	0.086	1.43	0.73	1.05	0.084	1.40	0.77	1.09	0.077	1.28	0.90	1.15
0.04	0.059	1.47	0.77	1.14	0.057	1.42	0.83	1.18	0.050	1.25	1.01	1.26
0.03	0.045	1.51	0.80	1.21	0.044	1.46	0.86	1.26	0.038	1.26	1.07	1.35
0.02	0.032	1.60	0.82	1.32	0.031	1.55	0.90	1.39	0.026	1.30	1.14	1.48
0.015	0.025	1.68	0.84	1.41	0.024	1.63	0.92	1.50	0.020	1.33	1.18	1.58
0.010	0.0182	1.82	0.85	1.55	0.0172	1.72	0.96	1.64	0.0141	1.41	1.21	1.71
0.008	0.0152	1.90	0.86	1.64	0.0142	1.78	0.97	1.72	0.0119	1.49	1.23	1.84
0.006	0.0123	2.05	0.87	1.79	0.0113	1.88	0.99	1.86	0.0095	1.58	1.25	1.98
0.004	0.0091	2.27	0.88	2.00	0.0083	2.08	1.01	2.10	0.0070	1.75	1.27	2.23
0.003	0.0074	2.47	0.89	2.19	0.0067	2.23	1.03	2.29	0.0057	1.90	1.29	2.44
0.002	0.0055	2.75	0.89	2.46	0.0051	2.55	1.04	2.65	0.0043	2.15	1.30	2.80

なお、この算定結果は表-5に一括して示した。

まず、砕波水深について h_b/H_0 と H_0/L_0 の関係を図-13~15に見ると、実験値の散らばりが大きいけれども、算定曲線はほぼ実験値の平均を示しているといえよう。もっとも、水底勾配 1/10 の場合の Iversen のデータのうち $H_0/L_0 < 0.01$ の4点が算定曲線からはずれて非常に大きな値を示しているけれども、これは図-4で H_b/h_b が他のデータよりも低い値を示していることに対応しており、実験波の状況など他と異なるものがあったのではないと思われる。また、Iversen は h_b/H_0 が水底勾配に関係しないとして単一の実験指標を与えているけれども、図-13, 14に見られるように自分自身のデータからもはずれている。実験データは水底勾配が急になるにつれて h_b/H_0 が減少する傾向を示しており、表-5の算定結果とあわせ考えると、 h_b/H_0 の指標も水底勾配によって変化するということができる。

一方、砕波高について H_b/H_0 と H_0/L_0 の関係を示す図-16~18を調べると、やはり実験データの散らばりが大きいけれども、今回求めた算定曲線はほぼ妥当な指標を与えているといえよう。また、Iversen の実験指標は水底勾配が急になると今回の算定曲線とほとんど差がなくなる。

4. 新砕波指標の算定図表

以上の図中に示した実験および算定曲線をまとめて砕波指標の算定図表としたのが図-19~22である。図-19, 20は砕波点における波の特性として H_b/h_b および Y_b/h_b と h_b/L_0 の関係、図-21, 22は沖波との関係を表わすものとして、 h_b/H_0' および H_b/H_0' と H_0'/L_0 の関係をそれぞれ示す。ただし、 H_0' は屈折の影響を考えた相当沖波波高で $H_0' = K_r \cdot H_0$ である (K_r は屈折係数)。なお、これらの算定図表は、表-1, 3, 5の計算

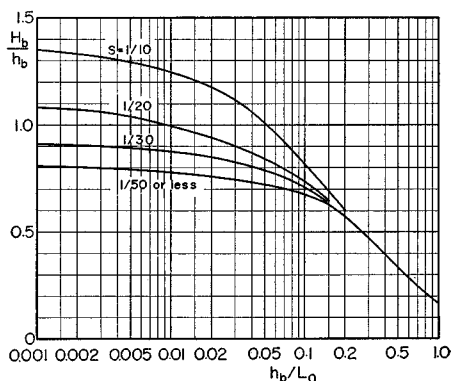


図-19 H_b/h_b の算定図表

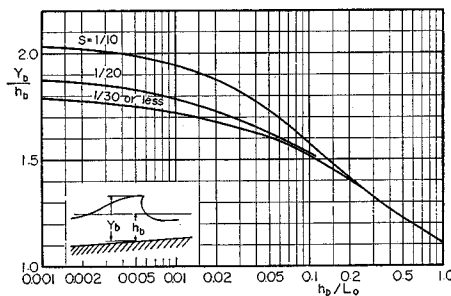


図-20 Y_b/h_b の算定図表

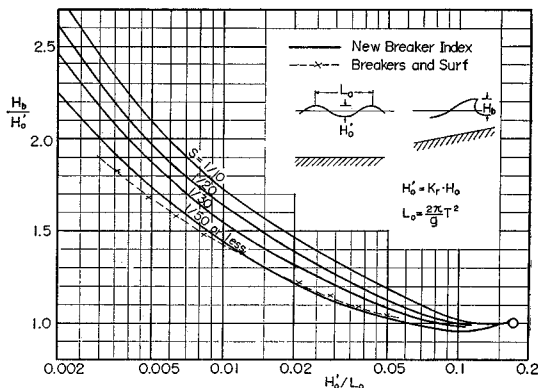
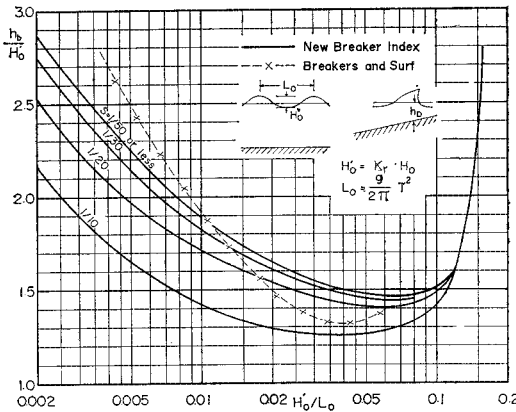


図-21 H_b/H_0' の算定図表



図—22 H_b/H_0' の算定図表

結果を用いて実験データの無い部分にまで拡張してある。また図—21, 22には、比較のため旧砕波指標 (Breakers and surf)¹⁾ も併示した。このうち H_b/H_0' の指標は水底勾配 1/50 以下の今回の指標とほとんど一致しているが、 h_b/H_0' の指標は H_0'/L_0 による変化が今回の指標よりも大きく表わされている。ただし、旧砕波指標はこれから H_b/h_b の値を計算してみると明らかなように、 $h_b/L_0 \approx 0.04$ で最大値 $H_b/h_b \approx 0.84$ を取り、 h_b/L_0 がこれよりも小さくなると H_b/h_b の値が減少するようになり、図—19 の傾向とは一致しない。

ここで、1. で触れた数値例、 $T=9 \text{ sec}$ 、 $H_0=5 \text{ m}$ 、水底勾配 1/50 以下の砕波水深および砕波高の推定を図—21, 22 を使って行なうと、つぎのようになる。

$$\frac{H_0}{L_0} = \frac{5}{1.56 \times 9^2} \approx 0.04,$$

$$\frac{h_b}{H_0} = 1.50 \quad \therefore h_b = 7.5 \text{ m}$$

$$\frac{H_b}{H_0} = 1.06 \quad \therefore H_b = 5.3 \text{ m}$$

Iversen の実験指標から求めた値は、 $h_b=5.6 \text{ m}$ 、 $H_b=4.7 \text{ m}$ であったから、砕波水深の推定値は 34% 増大し、砕波高の推定値も 10% 増えることになる。

5. あ と が き

本報告で述べた砕波指標の整理は、i) 実験データについて波高減衰の補正を行なったこと、ii) h_b/L_0 が小さくなるにつれて H_b/h_b の比が増大する理論計算の結果を基準値に採用したこと、iii) 有限振幅波の波高変化に関する理論計算結果を参照して沖波諸元との関係を調べたこと、の3点に特徴がある。ただし、理論計算結果を基準値として参照してはいるものの、相当部分は実験値に基づいており、ここに示した砕波指標の信頼度もかなり実験データの精度に左右される。

一般に、砕波に関するデータは変動が大きいのが特徴

である。図—1~18 に用いたのはすべて実験データであり、一定周期、一定波高の規則波を使って十分制御された条件の下で求められたデータであるにもかかわらず、実験値のばらつきは大きい。現地の観測値もデータに含まれば、ばらつきはさらに大きくなる。もともと砕波の現象は、波が安定性を失なって波面が不連続となる限界における現象であり、その不安定性の発現が外部条件のわずかの差によって左右される以上、こうしたデータのばらつきは砕波現象の本質から見てある程度やむを得ないものといえよう。したがって、図—19~22 では、各砕波指標として水底勾配ごとに、それぞれ1本の曲線で示しているけれども、これは平均的な概略値を与えるに過ぎず、個々のデータはこれから相当程度のばらつきを示すことを考えておく必要がある。

また、砕波指標を実際の海岸における波に適用する場合、現地の波の不規則性が大きな問題となる。砕波帯内における H_b/h_b や Y_b/h_b の特性であれば、1波ずつ切り離して考えてみれば、データのばらつきは大きくなるけれども、平均的には図—19, 20 などを使うことができよう。しかし、沖の波と岸近くの波を1波ごとに対応させることは、波の不規則性から考えて無意味なことである。したがって、図—21, 22 などの沖波諸元との関係については、これがそのまま現地に適用できるか否か問題が残されている。沖波の諸元として現行の設計法にしたがって有義波を用い、砕波水深や砕波高を推定したとしても、実際の海岸の砕波は特定の水深だけで起こるのではなくて、広い幅の砕波帯の中の各所で起こるものであるから、どの地点の砕波水深や砕波高を推定したことになるのが不明といわざるを得ない。こうした問題の解明は、波の不規則性を考慮した現地観測とその解析、あるいは不規則波水路による実験データの集積などを待たなければならないであろう。

さらに、現地の波の不規則性の観点からは、たとえば $H_{1/3}/h$ が大きいときに波群中の波高分布が Rayleigh 分布からはずれて分布幅がどのように狭くなるか、などが実用上の大きな問題となろう。砕波に関する問題は、今後こうした波の不規則性との関連において検討が進められるのではないと思われる。

主要記号一覧表

- h : 水深
- h_b : 砕波水深
- H_b : 砕波高
- H_{BM} : 限界設計波高 (与えられた水深において最大の波力をおよぼす波高)
- H_0 : 沖波波高
- H_0' : 相当沖波波高 $= K_r \cdot H_0$ または $K_f \cdot H_0$

K_f : 水路底面および側面の摩擦による波高減少率
 K_r : 屈折係数
 K_s : 浅水係数
 L : 波長
 L_0 : 沖波波長 $= 2\pi T^2/g$
 s : 水底勾配
 T : 波の周期
 Y_b : 砕波の峯高 (水底から砕波の波峯までの高さ)
 η_c : 静水面から波峯までの高さ

参 考 文 献

- 1) U.S. Navy Hydrographic Office: Breakers and surf: principles in forecasting, H.O. Pub. No.234, 1944.
- 2) Mason, M.A.: The transformation of waves in shallow water, Proc. 1st Conf. Coastal Eng., Long Beach, 1950, pp. 22-32. (海岸工学 I, 丸善, 昭 30, pp. 23-36)
- 3) Munk, W.H.: The solitary wave theory and its application to surf problems, Annals New York Acad. Sciences, Vol. 51, 1949, pp. 376-424.
- 4) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore protection, planning and design, Tech. Rep. No. 4 (3rd ed.), 1966, pp. 101-104.
- 5) Wiegel, R.L.: Oceanographical Engineering, Prentice Hall, 1964, p. 173.
- 6) Iversen, H.W.: Laboratory study of breakers, Proc. Symposium on Gravity Waves, U.S. National Bureau of Standard, Circular 521, 1951, pp. 9-32.
- 7) Iversen, H.W.: Waves and breakers in shoaling water, Proc. 3rd Conf. Coastal Eng., Cambridge, 1952, pp. 1-2. (海岸工学 II, 丸善, 昭 30, pp. 487-497.)
- 8) Michell, J.H.: On the highest waves in water, Phil. Mag., Ser. 5, Vol. 36, 1893, pp. 430-435.
- 9) McCowan, J.: On the highest wave of permanent type, Phil. Mag. Ser. 5, Vol. 38, 1894, pp. 351-358.
- 10) Miche, M.: Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante, Annales des Ponts et Chaussées, Vol. 114, 1944, pp. 25-406.
- 11) Hamada, T.: Breakers and beach erosion, Rep. Transportation Tech. Res. Inst., Ministry of Transportation, No. 1, 1951, 165. pp.
- 12) Suquet, F., and A. Wallet, : Basic experimental wave research, Proc. Minnesota Int. Hydr. Convention, 1953, pp. 173-191.
- 13) 土木学会: 水理公式集 (昭和 38 年増補改訂版), 1963, 603. pp.
- 14) 佐藤清一: 漂砂に関する研究 (4) —浅水表面波について—, 土木研究所報告, 第 82 号, 1952.
- 15) 岸 力: 海岸堤防に関する研究 (4) —進行波の砕波限界—, 土木研究所報告, 第 91 号, 1955, pp. 43-50.
- 16) 首藤伸夫: 有限振幅波について—高次級数解による進行波の砕波限界—, 土木研究所報告, 第 111 号, 1961, pp. 111-119.
- 17) Dean, R.G.: Breaking wave criteria, a study employing a numerical wave theory, Proc. 11th Conf. Coastal Eng., London, 1968, pp. 108-123.
- 18) Chappellear, J.E.: On the theory of highest waves, U.S. Army Beach Erosion Board, Tech. Memo, No. 116, 1959, 28. pp.
- 19) Yamada, H.: Highest waves of permanent type on the surface of deep water, Rep. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ., Vol. V, No. 18, 1957, pp. 37-52.
- 20) Yamada, H.: On the highest solitary wave, Rep. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ., Vol. V, No. 18, 1957, pp. 53-67.
- 21) Yamada, H.: Permanent gravity waves on water of uniform depth, Rep. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ., Vol. VI, No. 23, 1958, pp. 127-139.
- 22) Yamada, H., G. Kimura, and J. Okabe: Precise Determination of the solitary wave of extreme height on water of a uniform depth, Rep. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ., Vol. XVI, No. 52, 1968, pp. 15-32.
- 23) Yamada, H., and T. Shiotani: On the highest water waves of permanent type, Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 18. Pt. 2, No. 135, 1968, pp. 1-22.
- 24) Reid, R.O., and C.L. Bretschneider: Surface waves and offshore structure, Texas A. and M. Res. Foundation, Tech. Rep., 1953, 36. pp.
- 25) Goda, Y.: Wave forces on a vertical circular cylinder: experiments and a proposed method of wave force computation, Rep. Port and Harbour Res. Inst., Ministry of Transport, No. 8, 1964, 74. pp.
- 26) Mitsuyasu, H.: Experimental study on wave force against a wall, Rep. Transportation Tech. Res. Inst., No. 47, 1962, 39. pp.
- 27) 岸 力・庵原照太郎: 海岸堤防に関する研究 (7) —波の変形と砕け波に関する実験的研究—, 土木研究所報告, 第 95 号, 1958, pp. 185-197.
- 28) 合田良実・原中祐人・北畑正記: 直柱に働く衝撃砕波力の研究, 港湾技術研究所報告, 第 5 卷 6 号, 1966, 30 pp.
- 29) 豊島 修・富永正照・橋本 宏: 砕波後の波の変形に関する実験的研究, 土木研究所報告, 第 133 号, 1968, pp. 121-129.
- 30) Bowen, A.J., D.L. Inman, and V.P. Simmons: Wave "set-down" and set-up, Jour. Geophysical Res., Vol. 73, No. 8, 1968, pp. 2569-2576.
- 31) Galvin, C.J.Jr.: Breaker travel and choice of design wave height, Jour. Waterways and Harbors Div., ASCE, Vol. 95, No. WW 2, 1969, pp. 175-200.
- 32) 合田良実: 構造物に働く波力, 1967 年度水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, 1967 年, pp. 10-1~34.
- 33) Hall, M.A.: Laboratory study of breaking wave forces on piles., U.S. Army Beach Erosion Board, Tech. Memo., No. 106, 1958, 24. pp.
- 34) Le Méhauté, B., and L.M. Webb: Periodic gravity waves over a gentle slope at a third order of approximation, Proc. 9th Conf. Coastal Eng., Lisbon, 1964, pp. 23-40.
- 35) Koh, R.C.Y., and B. LeMéhauté: Wave shoaling, Jour. Geophysical Res., Vol. 71, No. 8, 1966, pp. 2005-2012.
- 36) 岩垣雄一・酒井哲郎: 有限振幅波の shoaling について (2), 第 15 回海岸工学講演集, 1968, pp. 10-15.
- 37) Iwagaki, Y.: Hyperbolic waves and their shoaling, Coastal Eng. in Japan, Vol. 11, 1968, pp. 1-12.
- 38) Laitone, E.V.: The second approximation to cnoidal and solitary waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 9, Pt. 3, 1960, pp. 430~434.