

一定水深域に設置された潜堤による 不規則波の碎波について

A STUDY ON BREAKING OF MULTI-DIRECTIONAL RANDOM WAVES DUE TO A SUBMERGED BREAKWATER

許 東秀¹・川嶋 直人²・松本 幸久³・岩田 好一朗⁴・富田 孝史⁵・水谷 法美⁶
Dong Soo HUR, Naoto KAWASHIMA, Yukihiisa MATSUMOTO, Koichiro IWATA, Takashi TOMITA and Norimi MIZUTANI

¹学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 中部電力(株) 電力技術研究所 研究員 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町北関山20-1)

³学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 地圏環境工学専攻

⁴正会員 名古屋大学大学院 工学研究科 教授

⁵正会員 運輸省 港湾技術研究所 水工部 主任研究官 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 名古屋大学大学院 工学研究科 助教授

The objective of this study is to investigate experimentally the breaking limit of waves due to a submerged breakwater in a multi-directional random wave field. Experiments have been conducted in a 3-D wave basin equipped with a multi-directional random wave generator. In this study, a special type of wave gages has been employed to record the water surface fluctuations at wave breaking with favorable accuracy. This study investigates the influence of incident wave conditions and wave directionality parameter $S_{\max}$ on the wave breaking limit. An equation has been introduced to predict the wave breaking limit in regular wave field using the least square technique applied to the results. This equation has been revealed to work well over a wide domain of wave conditions ranging from crossing waves to multi-directional random waves.

Key Words : Submerged breakwater, breaking limit, wave directionality parameter
multi-directional random waves

1. はじめに

碎波に関する研究は古くて新しい研究課題の一つであり、解明すべき問題が多く残されている。近年、海岸・海洋構造物の設置海域が多様化しており、そのため、海象条件や地盤条件などの自然条件がより厳しい海域、つまり水深の大きな海域にその建設位置が移ってきている。この様に海洋空間の利用が沖合へと展開するにつれ、外力となる風波は屈折の影響をあまり受けなため多方向性を強く保持する。このため、こういった多方向不規則波動場の特性について解明する必要性が生じている。碎波により消波効果を発揮する潜堤に関しても建設水深が深くなるにつれて、潜堤による多方向不規則波の碎波限界や碎波過程を明らかにすることが極めて重要である。そこで、本研究では、一定水深域に設置された潜堤による多方向不規則波の碎波瞬時を可能な限り正確に計測するために、岩田ほか(1998)¹⁾によって開発された“碎波水位計”を用いて室内水理模型実験を行うことによって、一定水深域の潜堤により碎ける多方向不規則波の碎波をより詳細に計測し、主として

規則波および斜交波の碎波と比較しながら論議しようとするものである。

2. 水理模型実験

実験は中部電力(株)電力技術研究所の平面波浪水槽(長さ30m×幅23m×深さ1.2m)を用いて行われた。図-1に示すように水槽の一端には、造波板幅0.5mの独立した駆動系を持つピストン型造波装置41台で構成される全幅21mの多方向不規則波造波装置が設置されており、他端と両側壁には反射波を極力消波さすために、それぞれ1/5と1/2の勾配を持つ消波用碎石斜面が設置されている。

本実験では、一定水深域に設置された不透過矩形潜堤による碎波の実験を行った。模型潜堤の寸法は、堤長 $W=300\text{cm}$ 、堤幅 $B=60\text{cm}$ 、堤高 $D=34.5\text{cm}$ と、堤長 $W=300\text{cm}$ 、堤幅 $B=60\text{cm}$ 、堤高 $D=36\text{cm}$ の2種類である。この不透過潜堤の中心と造波板の距離が6mとなるように設置した。なお、この地点は多方向不規則波の造波有効水域内に入っている。

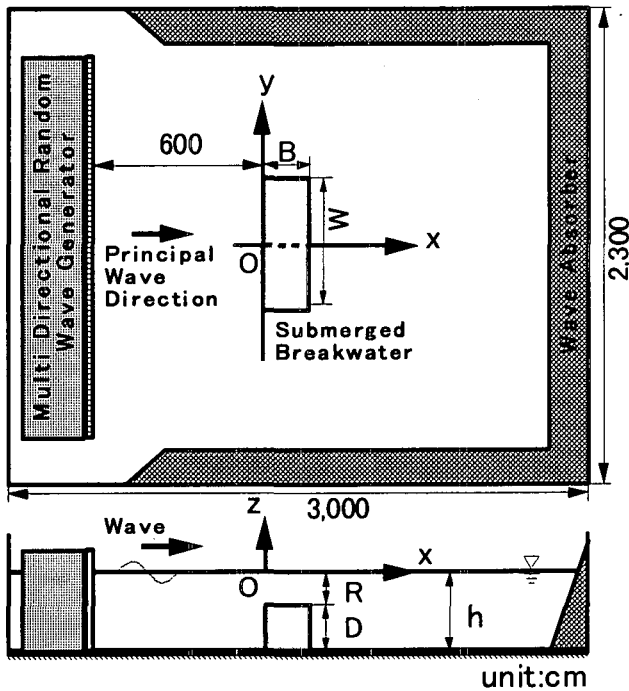


図-1 実験水槽

実験波は規則波、斜交波と多方向不規則波である。規則波については波向を構造物に直角とした。そして、表-1に示すように、周期を1.0～2.0sの6種類とし、それぞれの周期に対して波高を碎波が起こるまで注意深く徐々に大きくした。斜交波は、構成する二つの波（A波、B波）の交差角 θ_{AB} を30, 45, 60degの3種類とし、A波は周期を1.2, 1.6s, それぞれの波高を6.0, 4.0cmと固定し、B波の波高を潜堤上で碎波が起こるまで徐々に大きくした。多方向不規則波においては、主波向を潜堤に対して直角方向（主波向 $\theta=90\text{deg.}$ ）で固定し、有義波周期 $T_{1/3}$ を1.0s, 1.6sの2種類、方向集中度パラメータ S_{max} を10, 25, 75と ∞ の4種類変化させた。ここで、 $S_{max}=10, 25, 75$ はそれぞれ、風波、減衰距離の短いうねり（波形勾配が比較的大）、減衰距離の長いうねり（波形勾配が比較的小）を想定しており、 ∞ は一方向不規則波に対応する。

表-1 入射波の実験条件
(a) 規則波

周期 $T(\text{s})$		波高 $H(\text{cm})$	
1.0~2.0		3.8~6.8	
(b) 斜交波			
A波の周期 $T_A(\text{s})$	A波の波高 $H_A(\text{cm})$	B波の周期 $T_B(\text{cm})$	交差角 $\theta_{AB}(\text{deg.})$
1.2	6.0	0.8~2.0	30,45,60
1.6	4.0	0.8~2.0	30,45,60
(c) 不規則波			
有義波周期 $T_{1/3}(\text{s})$	有義波高 $H_{1/3}(\text{cm})$	方向集中度 S_{max}	主波向 $\theta(\text{deg.})$
1.0	4.5	10,25,75, ∞	90
1.6	4.0	10,25,75, ∞	90

なお、多方向不規則波として、Bretschneider-光易型の周波数スペクトル(1970)²⁾、方向関数として光易型を持つ波(1975)³⁾を期待波として造波させた。

実験では、一定水深域の静水深 h を50cmで一定とした。まず、潜堤を設置して予備実験を行い、目視観測により碎波位置を判定し、その地点へ碎波水位計を移動させて水位変動及び碎波位置を計測した。また、碎波点近傍の波の挙動を8mmビデオカメラ（SONY：CCD-TR705）で撮影して、碎波水位計による水位記録とつぎ合せて、碎波の決定および碎波状況と碎波地点の確認を行った。なお、比較のため、表-1(a)に示す、規則波の碎波実験も行った。

碎波水位計で計測した不規則波の時間波形は、パーソナルコンピュータを使ってサンプリングタイム0.01s、データ数を $T_{1/3}=1.0\text{s}$ と1.6sの場合それぞれ10240, 20480としてAD変換を行い、ハードディスクに収録し、ゼロ・ダウncロス法で波の時間波形の波別解析を行って、波高と周期を定義した。このようにして得られた、碎波波高 H_b 、碎波周期 T_b 、碎波位置 x_b, y_b などの値は付録の表-Aにまとめて示されている。

3. 実験結果とその考察

まず、碎波波高・沖波波長比に対して相対天端水深 R/L_0 がどのように影響するかを調べる。なお、 L_0 は、ゼロ・ダウncロス法で定義された個々波の碎波周期 T_b がそのまま沖波の周期として保存されるという仮定の下で計算された沖波波長であり、式(1)で計算している。

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_b^2 \quad (1)$$

2次元波動場における透過性潜堤についてSomchaiほか(1990)⁴⁾が規則波に対して式(2)を提案している。

$$H_b/L_0 = 0.127 \tanh(k_0 h_b) \quad (2)$$

ここに、 H_b は碎波波高、 L_0 は深海波の波長、 k_0 は深海波の波数（ $k_0=2\pi/L_0$ ）であり、 h_b は潜堤表面の碎波水深である。

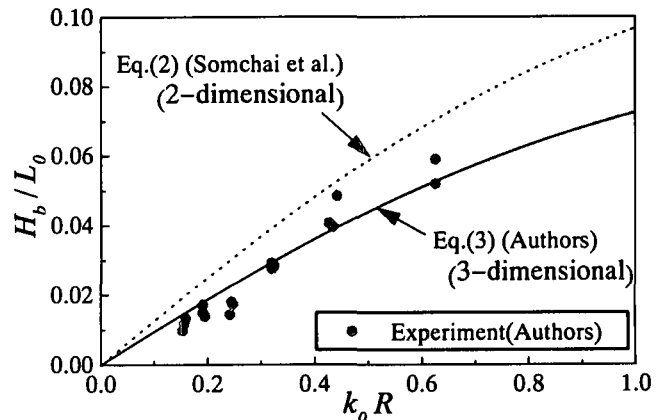


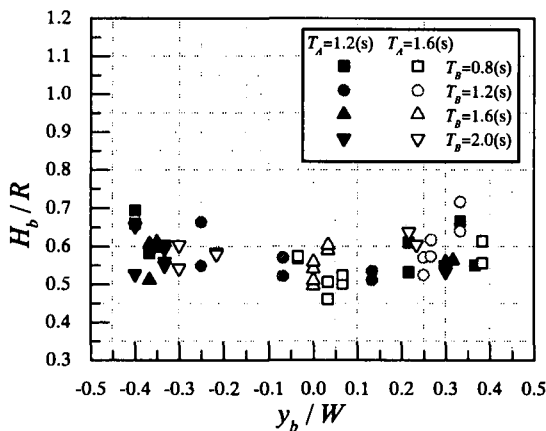
図-2 規則波の H_b/L_0 と $k_0 R$ の関係

本実験の3次元波動場で得られた不透過潜堤による規則波の碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 は、図-2に示すようにSomchaiほかの結果より小さくなり、最小自乗法により、式(3)を得る。

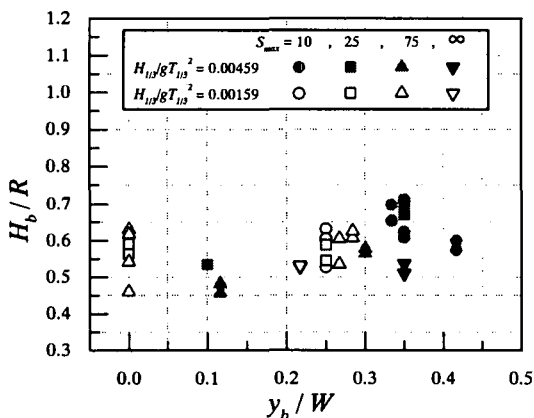
$$H_b/L_0 = 0.095 \tanh(k_0 R) \quad (3)$$

式(2)に比べ式(3)および実験値の値が小さくなっているのは、3次元波動場と2次元波動場の差異、潜堤が不透過であるため、透過性潜堤内のエネルギー逸散が起らないことと透過性潜堤の場合に比べて戻り流れの影響が大きくなることが考えられる。

図-3は、無次元碎波位置 y_b/W と限界相対波高 H_b/R の関係について示したものであり、図-3(a), (b)はそれぞれ斜交波と多方向不規則波の場合を示している。なお y_b は潜堤中心から碎波計測地点までの主波向軸に直角方向の距離である(図-1参照)。



(a) 斜交波



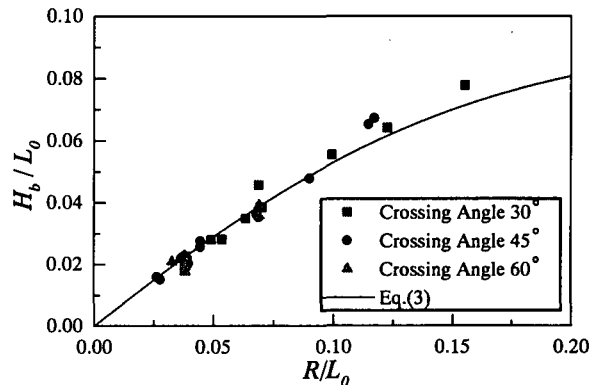
(b) 多方向不規則波

図-3 y_b/W と H_b/R の関係

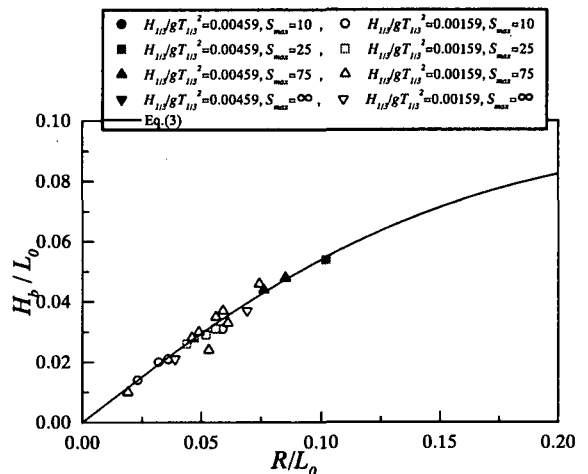
図-3(a)及び(b)の両図から、無次元碎波位置 y_b/W の絶対値が大きくなるにつれすなわち潜堤中心から端部へ向かうにつれて、限界相対波高 H_b/R が大きくなる傾向があることがわかる。特に $|y_b/W| > 0.3$ の範囲では、顕著に現れている。これは規則波の場合について岩田ほか(1996)⁹⁾が示したように、斜交波と

多方向不規則波の場合についても、潜堤端部では水深急変部での波の屈折や潜堤による散乱波の影響から局所的に波高が増大するためであり、それに伴い碎波波高も増大すると考えられる。このように、一定水深域における3次元波動場の碎波に対しては、潜堤の中央部と端部で分けて考える必要がある。

図-4は、潜堤中央部における天端水深・沖波波長



(a) 斜交波



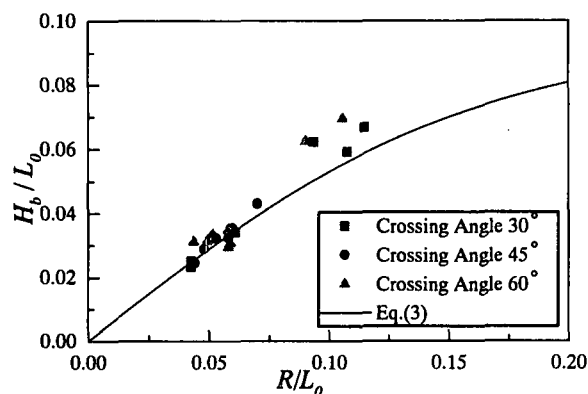
(b) 多方向不規則波

図-4 潜堤中央部における R/L_0 と H_b/L_0 の関係

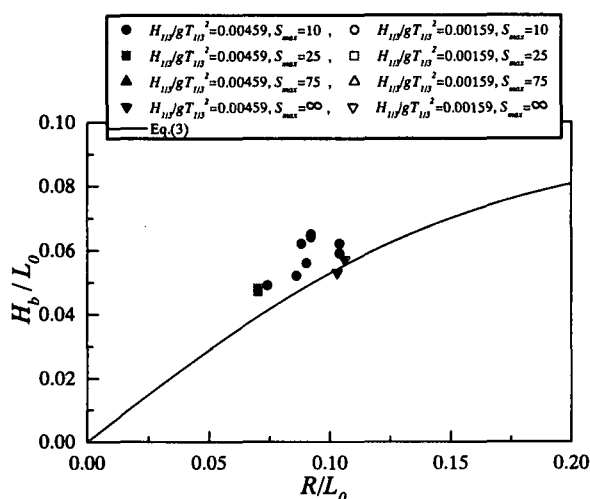
比 R/L_0 と碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 の関係について示したものであり、図-4(a), (b)はそれぞれ斜交波と多方向不規則波の場合である。同様に図-5(a), (b)は潜堤端部の場合の図である。ここで、潜堤中央部は $|y_b/W| \leq 0.3$ 、端部は $|y_b/W| > 0.3$ で定義する。なお、式(3)を求めるために用いた規則波の碎波波高は、潜堤中央部で測られたものである。

図-4、図-5から、斜交波の交差角による違いおよび多方向不規則波の S_{max} による違いは見られない。また、図-4(a), (b)に示す中央部での碎波の場合、斜交波、多方向不規則波ともに実験値の全体的な分布は、式(3)で表す曲線の周りに集中している。このことから式(3)は、斜交波と多方向不規則波の潜堤中央部での碎波波高・沖波波長比を精度良く算定していると思われる。しかし、図-5(a), (b)に示す端部での碎波の場合では、天端水深・沖波波長比 R/L_0 が大き

くなるにつれ、斜交波および多方向不規則波の碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 の値は式(3)より大きくなっている。これは、前述したように潜堤端部では、波の屈折や潜堤による散乱波の影響が大きくなるためであり、斜交波と多方向不規則波の碎波の複雑さが認められる。



(a) 斜交波



(b) 多方向不規則波

図-5 潜堤端部における R/L_0 と H_b/L_0 の関係

4. 結論

本研究により得られた主要な結論は以下のようである。

- ・3次元波動場に設置された不透過潜堤による規則波の碎波実験で提案した式(3)は、2次元波動場に設置された透過潜堤による規則波の碎波実験（断面2次元実験）でSomchaiほか(1990)が提案した式(2)に比べて係数が小さくなった。
- ・潜堤端部において水深急変部での波の屈折や潜堤による散乱波の影響のため波高が局所的に増大し、碎波波高も増大する。
- ・式(3)を用いると、斜交波と多方向不規則波の潜堤中央部における碎波波高・沖波波長比 H_b/L_0 を精度良く算定できる。ただし、波の屈折や潜堤による散乱波の影響が大きい潜堤端部では、過小評価する。

なお、本研究は文部省科学研究補助金（基盤(B)(2)；研究代表者 名古屋大学 岩田好一郎）の助成を受けて行われたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 岩田好一郎，川嶋直人，新美達也，富田孝史，許東秀，松本幸久：碎波水位計の試作と多方向不規則波の碎波の計測，海洋開発論文集，Vol. 14，pp.161-166，1998.
- 2) 光易恒：風波のスペクトルの発達(2)―有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について―，第17回海岸工学講演会講演集，pp.1-7，1970.
- 3) Mitsuyasu, H. et al. : Observation of directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Physical Oceanography, Vol. 5, No. 4, pp.750-760, 1975.
- 4) Somchai Rojanakamthorn, 磯部雅彦，渡辺 晃：透過潜堤上における波の碎波変形計算法，海岸工学論文集，第37巻，pp549-553，1990.
- 5) 岩田好一郎，川崎浩司，亀崎大輔：碎波に伴う潜堤周辺の波・水粒子速度場の細部構造に関する実験的研究，海岸工学論文集，第43巻，pp56-60，1996.

付録

表-A 砕波の波に関する実験データの概要

S_{max}	$H_{1/3}(\text{cm})$	$T_{1/3}(\text{s})$	$D(\text{cm})$	$H_b(\text{cm})$	$T_b(\text{s})$	$x_b(\text{cm})$	$y_b(\text{cm})$	$H_f^d(\text{cm})$	$T_f^d(\text{s})$	$H_r^d(\text{cm})$	$T_r^d(\text{s})$	$H_f^u(\text{cm})$	$T_f^u(\text{s})$
10	4.5	1.0	36.0	9.77	0.99	52.7	95.0	5.37	1.17	5.43	1.06	7.47	1.01
10	4.5	1.0	36.0	9.16	1.10	52.7	95.0	6.98	1.05	6.42	1.18	7.59	1.13
10	4.5	1.0	36.0	9.97	0.99	14.0	100.0	8.28	1.18	4.90	1.24	8.72	1.15
10	4.5	1.0	36.0	8.51	1.02	14.0	100.0	4.73	0.99	4.47	1.42	5.57	1.06
10	4.5	1.0	36.0	9.91	1.01	14.0	100.0	8.13	1.17	5.16	1.23	8.66	1.14
10	4.5	1.0	36.0	8.72	1.00	14.0	100.0	5.08	0.98	4.59	1.44	8.66	1.14
10	4.5	1.0	36.0	8.40	0.93	22.8	-120.0	4.06	1.05	3.31	0.89	5.46	1.02
10	4.5	1.0	36.0	8.02	0.93	22.8	-120.0	4.18	1.04	3.63	0.89	5.34	1.03
25	4.5	1.0	36.0	9.36	1.13	23.2	100.0	4.68	1.23	10.05	1.06	5.64	1.17
25	4.5	1.0	36.0	9.65	1.13	23.2	100.0	4.70	1.22	9.76	1.06	5.64	1.17
25	4.5	1.0	36.0	7.47	0.94	3.1	25.0	0.06	0.03	4.44	1.05	1.91	0.63
75	4.5	1.0	34.5	8.95	1.14	23.9	85.0	5.11	1.23	9.21	1.06	6.42	1.20
75	4.5	1.0	34.5	8.75	1.08	43.7	85.0	5.05	1.20	8.75	1.11	6.42	1.20
75	4.5	1.0	34.5	7.46	0.70	9.1	30.0	1.94	0.94	2.78	1.00	2.93	0.86
75	4.5	1.0	34.5	7.09	0.70	27.8	30.0	3.04	0.88	3.02	1.07	2.93	0.86
99	4.5	1.0	34.5	8.31	0.97	27.8	100.0	3.07	0.91	2.05	1.82	4.70	1.13
99	4.5	1.0	34.5	7.90	0.98	27.8	100.0	6.59	0.84	2.46	1.12	7.43	1.01
10	4.0	1.6	34.5	9.30	1.67	18.6	70.0	4.50	1.48	9.70	1.72	5.95	1.76
10	4.0	1.6	34.5	9.79	1.75	38.4	70.0	4.15	1.37	9.85	1.45	5.95	1.76
10	4.0	1.6	34.5	9.38	2.06	18.1	-70.0	4.76	2.05	4.26	1.39	6.65	1.67
10	4.0	1.6	34.5	8.19	1.30	37.4	-70.0	4.24	2.06	1.97	0.76	5.63	1.72
25	4.0	1.6	34.5	8.74	1.38	7.2	0.0	5.46	1.58	3.83	1.79	7.38	1.44
25	4.0	1.6	34.5	9.15	1.46	21.8	0.0	5.95	1.58	0.06	0.02	7.26	1.49
25	4.0	1.6	34.5	—	1.54	23.5	70.0	0.95	0.50	8.42	1.62	7.26	1.49
25	4.0	1.6	34.5	9.10	1.51	44.6	70.0	3.24	1.61	6.65	1.34	4.50	1.80
25	4.0	1.6	34.5	8.43	1.33	27.2	-70.0	3.98	2.06	1.65	0.70	5.81	1.70
75	4.0	1.6	36.0	8.48	1.35	27.3	80.0	7.00	1.52	0.05	0.02	7.61	1.59
75	4.0	1.6	36.0	8.75	1.23	45.5	80.0	7.61	1.47	1.82	0.42	8.08	1.59
75	4.0	1.6	36.0	7.58	2.17	5.9	0.0	2.55	1.38	4.76	1.63	8.08	1.59
75	4.0	1.6	36.0	8.81	1.27	5.9	0.0	2.55	0.88	3.63	1.76	6.04	1.57
75	4.0	1.6	36.0	6.42	1.30	27.6	0.0	2.11	1.90	3.27	0.82	3.04	1.81
75	4.0	1.6	36.0	8.63	1.10	27.6	0.0	4.52	1.67	0.05	0.03	5.80	1.62
75	4.0	1.6	36.0	8.46	1.40	17.5	-75.0	2.00	1.12	1.62	0.66	4.45	1.69
75	4.0	1.6	36.0	7.49	1.21	37.0	-75.0	2.08	1.10	1.15	0.38	3.65	1.74
99	4.0	1.6	34.5	8.19	1.60	33.7	60.0	8.54	1.96	2.67	1.98	8.57	1.85
99	4.0	1.6	34.5	8.22	1.20	33.7	60.0	3.34	1.74	0.78	0.31	4.73	1.68

ここで、 $B=60.0(\text{cm})$ 、 $W=300.0(\text{cm})$ で一定である。また、表中の上付き d 、 u はそれぞれゼロ・ダウンクロス法とゼロ・アップクロス法で解析したことを意味しており、下付きの f 、 r はそれぞれ砕波の前波と後波を意味している。（例： H_f^d はゼロ・ダウンクロス法で定義した砕波の前波の波高である。）

(1999. 4. 19受付)