

砕波水位計の試作と多方向不規則波の砕波の計測

Trial Manufacture of the Breaking Wave Gauge and Measurement of Multi-Directional Random Wave Breaking

岩田好一朗*・川嶋直人**・新美達也***・富田孝史****・許 東秀*****・松本幸久*****
Koichiro Iwata Naoto Kawasima Tatuya Niimi Takasi Tomita Dong Soo Hur Yukihiisa Matsumoto

Abstract

The breaking limit of multi-directional random waves is still unknown and is requested to be formulated numerically from coastal and ocean engineering viewpoint. In this paper, a breaking wave gauge is newly devised to measure the wave breaking inception as accurately as possible. Indoor laboratory experiments have shown that the breaking wave gauge is able to measure the breaking inception and that the breaking limit of multi-directional random waves becomes smaller than that of the regular wave. The critical wave steepness of multi-directional random waves is revealed to become smaller as the spreading parameter S_{max} increases.

Keywords : Wave breaking, Breaking limit, Multi-directional random wave, Breaking wave gauge

1. 緒言：

砕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。海岸の波は、言うまでもなく、多くの方向から来襲してくるいわゆる多方向不規則波であると理解される。この多方向不規則波の砕波限界を明らかにし、砕波直前・直後の多方向不規則波の変形を精度高く予測することは沿岸海象力学、海域構造物の耐波設計及び海域環境保全の面で極めて重要である。

今まで、実験室レベルで多方向不規則波の砕波瞬時とその直前・直後の波を計測してその変形特性を論議した研究は少ない。本研究では、まず多方向不規則波の砕波瞬時を可能な限り正確に計測するために、新たに“砕波水位計”を試作する。ついで、この試作された砕波水位計を使って室内水理模型実験を行ない、潜堤により砕ける多方向不規則波の砕波を計測し、その波形の変化を考究するとともに、砕波限界について論議しようとするものである。

2. 砕波水位計の試作：

規則波の場合は、波はほぼ同じ位置で繰り返し周期的に砕けるので、規則波の砕波地点や砕波時の波の特性諸量を受感部が一つの従来型の水位計1台を上手に利用することにより計測することは可能である。しかし、多方向不規則波の場合は、異なった多くの位置で砕け、そしてまた繰り返して砕けることは稀なので、従来型の水位計1台で砕波地点を求め、そして砕波時の波の特性諸量を計測することは不可能に近いし、また従来型の水位計を複数台使っても極めて困難である。

このため、本研究では、多方向不規則波の砕波位置を可能な限り正確に特定し、そして砕波直前・直後の水位変動を詳細に計測するために、受感部を多数密に配置した水位計の試作を行った。受感部の数が多い方が望ましいが、製作費をできるだけ安くすること、受感部の相互干渉を起こさないことなどの諸要素を考慮して、図-1に示すような水位計を試作した。本論では、この水位計を“砕波水位計”と名づけて、以後この名称を使用することにする。試作した砕波水位計は、図-1に示されているように、4cm 間隔で配置された12個の受感部から構成されている。そして、各受感部は0.5mmの直径で長さ65.5cmのテフロンを絶縁材として使用しているワイヤーであり、12個の受感部より12個の水位変動を同時計測できるようになっている。水深40cmで周期1秒～2秒の波に対して、4cmの受感部の配置間隔は0.0273～0.0108波長に対応しており、12地点の水位変動の詳細な空間変化を計測できるよう工夫されている。

* 正会員 名古屋大学大学院工学研究科 教授 土木工学専攻 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

** 正会員 中部電力株式会社・電力技術研究所 水理グループ

*** 正会員 パシフィックコンサルタント(株) 東北支社

**** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 波浪研究室 主任研究官

***** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科 博士課程後期課程 土木工学専攻

***** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科 博士課程前期課程 地圏環境工学専攻

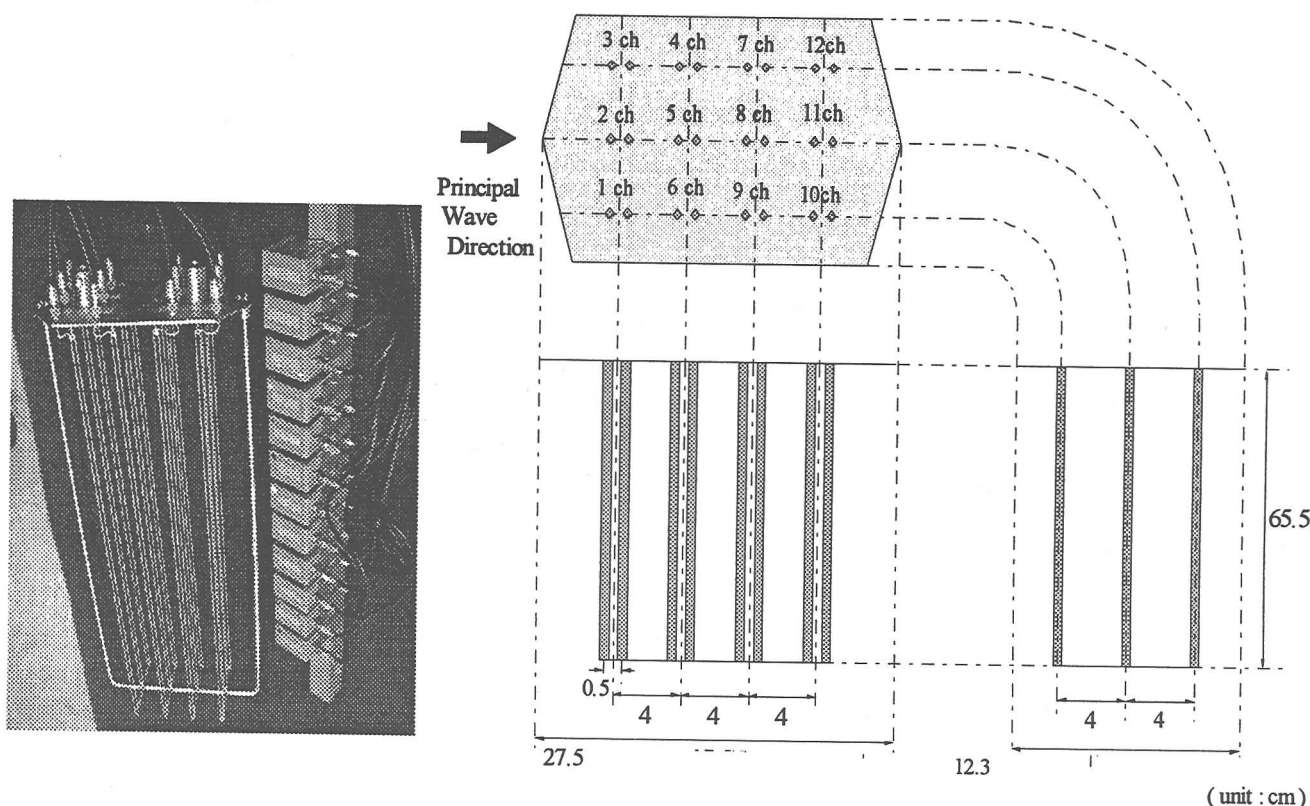


図-1 砕波水位計

3. 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 0.5m）を用いて行われた。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、木製の不透過矩形潜堤による砕波の実験を行った。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 $D=36.0\text{cm}$ の 2 種類である。この不透過潜堤を造波板から 600cm 離して設置した。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。

実験波は表-1 に示すように、主波向を潜堤に対して直角方向（主波向 $\theta(\text{deg})=90^\circ$ ）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。なお、多方向不規則波として式(1)で示す Bretschneider-光易型の周波数スペクトル(1970)、方向関数として光易型を持つ波(1975)を期待波として造波させた。

$$\begin{aligned}
 F(f) &= 0.257 (H_{1/3})^2 (T_{1/3})^{-4} f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^4] \\
 G(f, \theta) &= G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \\
 G_0 &= 1 / \left\{ \int_{-\pi}^{\pi} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right\} \\
 S &= \begin{cases} S_{\max} \cdot (f / f_p)^5 & : f \geq f_p \\ S_{\max} \cdot (f / f_p)^{-2.5} & : f \leq f_p \end{cases}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 f_p は周波数スペクトルのピークの周波数（ $= 1 / (1.05 T_{1/3})$ ）である。

実験では、静水深 h を 50cm の一定水深とした。まず、潜堤を設置して予備実験を行ない、8 種類の波を数回造波させて砕波地点を目視で予め求めておき、本実験では目視で求めておいた砕波地点に砕波水位計を設置するとともに、状況に応じて前後左右に砕波水位計を移動させて砕波の計測を行なった。また、造波機により発生する波を星形アレイに配置された電気容量式水位計 5 台により計測して式(1)の期待スペクトルを持つ波が造波され

ているかどうかの確認を行なった(松本(1998))。また、砕波点近傍の波の挙動を 8mm ヴィデオカメラ (SONY : CCD-TR705) を用いて撮影して、砕波水位計による水位記録とつぎ合わせるにより、砕波地点の確認を行なった。

表-1 入射波の実験条件

有義波周期 $T_{1/3}(s)$	有義波高 $H_{1/3}(cm)$	方向集中度 S_{max}	主波向 θ (deg.)
1.0	4.5	10, 25, 75, ∞	90
1.6	4.0		

砕波水位計および星形アレイで使用した水位計の時間波形は、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 $T_{1/3}=1.0s$ と $1.6s$ の場合それぞれ 10240, 20480 として AD 変換を行ないハードディスクに収録した。また、ゼロ・ダウncross法で波の時間波形の波別解析を行なって、波高と周期を定義した。

4. 実験結果とその考察：

4-1 砕波点近傍の水位変動

図-2 と図-3 は、潜堤の無次元潜水深が $R/h=0.28$ の場合で潜堤上で砕波するときの水位変動を砕波水位計で計測したものである。図-2 と図-3 はともに入射波の有義波周期 $T_{1/3}$ が $1.0s$, 波形勾配相当比 $H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.0046$, 水深波長相当比 $h/gT_{1/3}^2=0.0510$ に対するものであり、図-2 は方向集中度パラメター $S_{max}=10$ で図-3 は $S_{max}=75$ の場合である。図中の 12 個の時間波形は砕波水位計の 1ch~12ch の受感部に対応しており、図面の上から下に向かう方向が主波向きであり、 η と t はそれぞれ図中に○印で示す波について静水面からの波峰高さと造波開始からの時間である。また、点線の矢印に添えて表示した時間は、図中の○印で示す波が 2 つの受感部間を進行するのににかかった時間(秒)であり、この進行時間より波の進行方向が推測できる。

図中の Wave Breaking と記したところで η が最大になっているが、ほぼこの地点で砕波したことをヴィデオテープレコーダーの解析で確認している。このため、図中で η と t に下添字の b をつけて砕波点であることを明示している。したがって、図-2 と図-3 に示す波は砕波直前から砕波に至る変形過程を示していること

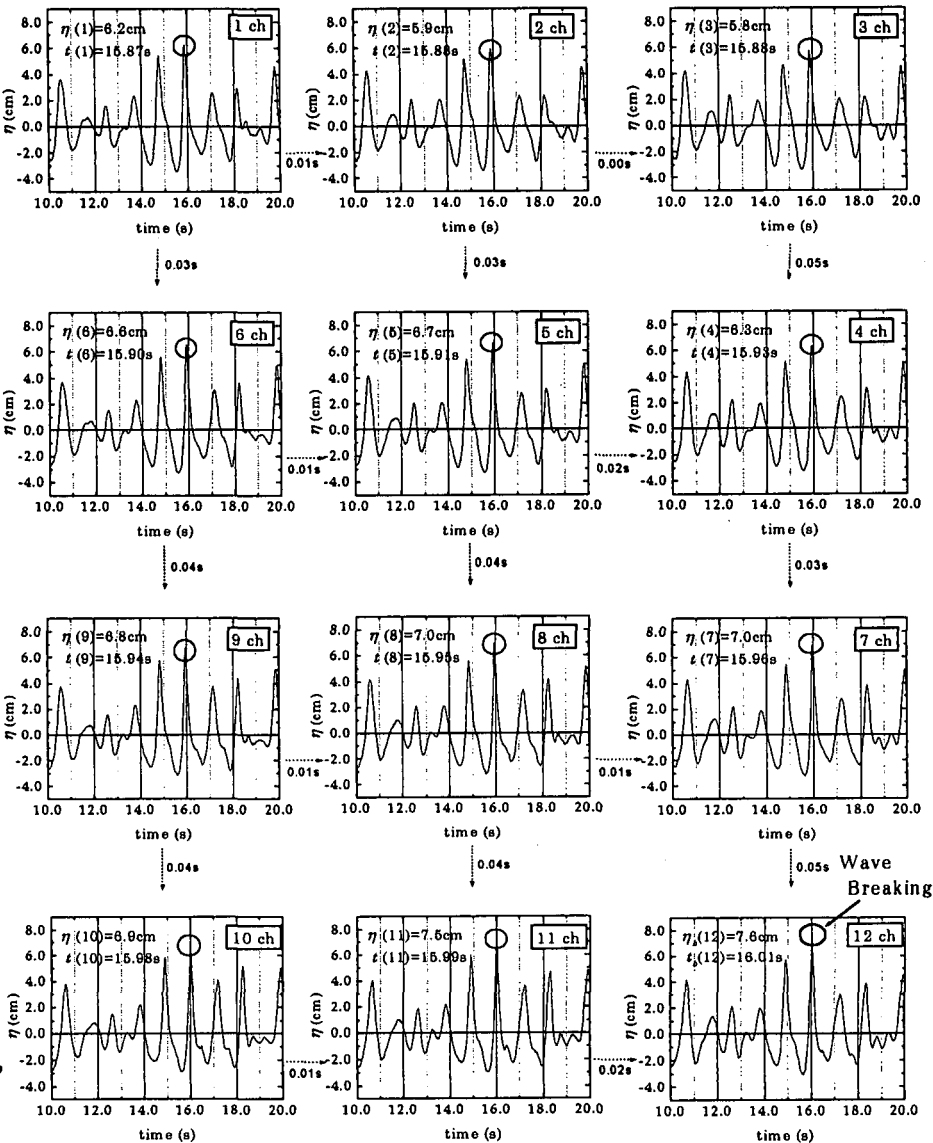


図-2 砕波水位計により計測された水位の時間波形
($S_{max}=10$, $R/h=0.28$, $H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.0046$, $h/gT_{1/3}^2=0.0510$)

がわかる。

さて、図-2と図-3に例示されているように、本実験では最大波峰高が生じる地点でほぼ砕波が発生したが、最大波峰高の波は必ずしも最大波高の波に対応しなかった。図-2と図-3に示すように、砕波近傍の波は波と潜堤の非線形干渉のために波峰が尖り、波谷が平偏になることが認められる。さらに、多方向性の強い波、言い換えると S_{max} が小さくなるにつれて、砕波のみならず砕波しない波についても水位の空間変化が大きくなるが、このことは $S_{max}=10$ の図-2の ch1～ch12の時間波形からも確認できる。すなわち、図-2の $S_{max}=10$ の場合受感部 ch1～ch12の時間波形に異なる部分があるが、図-3の $S_{max}=75$ の場合は受感部 1ch～12chの時間波形の差異は極めて小さいことが認められ、砕波に入射波の多方向性が影響することが指摘できる。

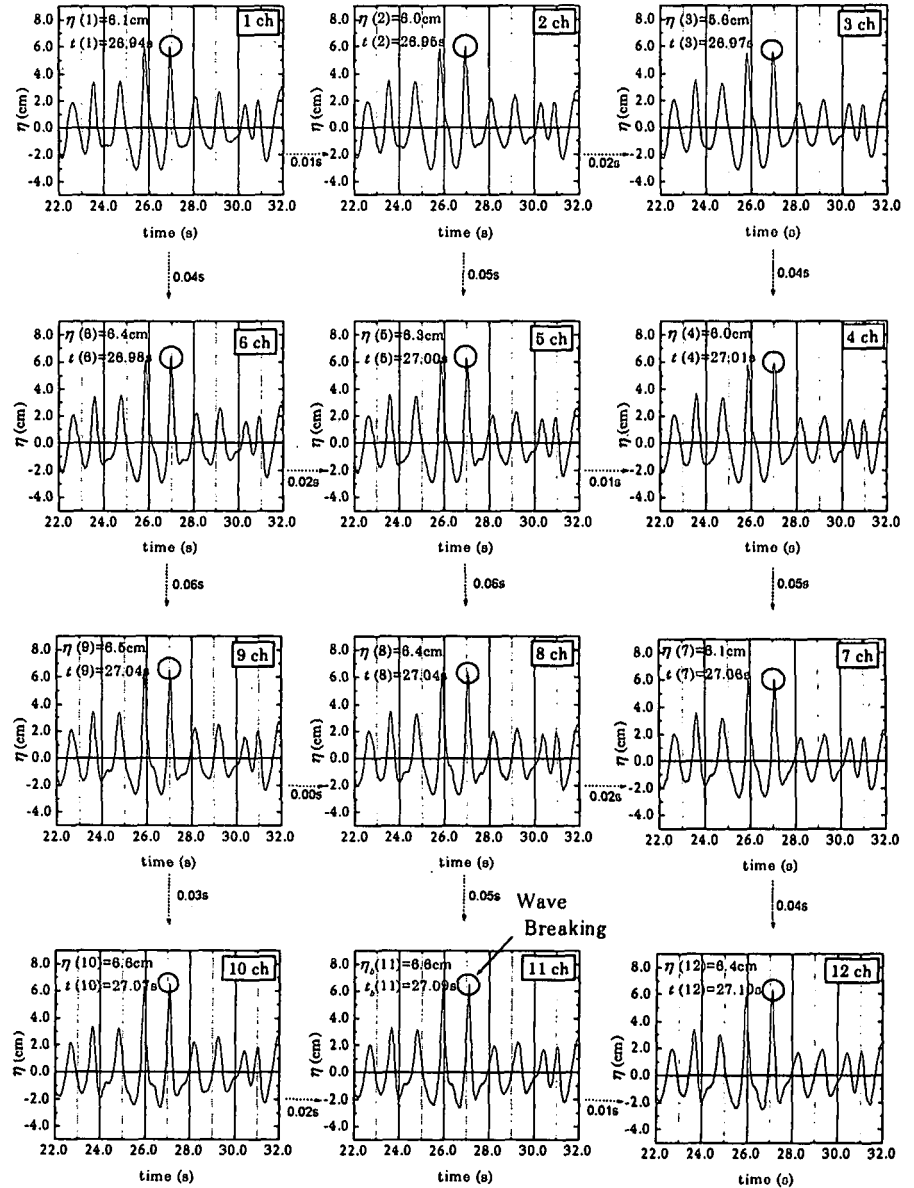


図-3 砕波水位計により計測された水位の時間波形
($S_{max}=75$, $R/h=0.31$, $H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.0046$, $h/gT_{1/3}^2=0.0510$)

4-2 砕波状況と砕波限界

本実験では、砕波形式は Spilling 型砕波（崩れ波）と Plunging 型砕波（巻き波）の中間型の砕け方であり、典型的な Spilling 型砕波および Plunging 型砕波は発生しなかった。

さて、潜堤による多方向不規則波の砕波は、本実験では、規則波と異なり、幾つかの地点で数波砕けるだけであり、図-4に例示するように、砕波の発生頻度は極めて小さい。図-4はゼロ・ダウクロス法で波別解析された波高と周期の関係を示したもので、図中の×印は砕波を、また●印は非砕波を表わしている。図-4に例示されるように、 $R/h=0.28$ と 0.31 に対し、砕波はほぼ入射波の有義波周期 $T_{1/3}$ に近い周期 ($0.8T_{1/3} \sim 1.2T_{1/3}$) を持ち、波高が入射波の有義波高 $H_{1/3}$ の1.5倍 ($1.5H_{1/3}$) より大きい場合に生じている。

図-5は方向集中度パラメータ S_{max} と無次元砕波位置 x_p/B の関係を示したものであり、 x_p は潜堤沖側前面から砕波点までの主波向軸に沿う距離、□○■●印は x_p/B の平均値、エラーバーは実験値のばらつきを示す。同図より、全ての実験値が $0.1 < x_p/B < 0.95$ にあることから、砕波は潜堤上で発生したことがわかるが、砕波位置 x_p/B に及ぼす相対水深 R/h の効果はほとんど認められない。これは $R/h=0.28$ と 0.31 に大差がないためと思われる。

また、図-5によれば、入射波の有義波周期 $T_{1/3}=1.0s$ ($H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.0046$ で $h/gT_{1/3}^2=0.0510$)の波の x_p/B が平均的に入射波の有義波周期 $T_{1/3}=1.6s$ ($H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.0016$ で $h/gT_{1/3}^2=0.0199$)の波より小さいことが認められる。この理由としては、 $T_{1/3}=1.0s$ の波の有義波高 $H_{1/3}$ が $T_{1/3}=1.6s$ の波の有義波高より0.5cm大きく、したがって波形勾配相当比 $H_{1/3}/gT_{1/3}^2=0.0046$ とかなり大きく、 $T_{1/3}=1.0s$ の周期の短い波の方が $T_{1/3}=1.6s$ の周期の長い波より潜堤の影響

を受けて変形し易くなり、このため $T_{1/3}=1.0\text{s}$ の波の方が $T_{1/3}=1.6\text{s}$ の波より沖側で砕けたものと推察される。

無次元砕波位置 x_b/B は入射波の方向集中度パラメータ S_{max} によっても変化する。 S_{max} が 10 から 25 にかけて x_b/B は一度小さくなるが、25 以上になると S_{max} の増加につれて x_b/B が岸側へ移動し、 $S_{max}=\infty$ の一方不規則波の場合が最も岸側となる。この理由の一つとして、波の多方向性が強くなると、潜堤により進行方向が異なる波の屈折や反射に伴う干渉が強くなり砕波し易くなり、このため S_{max} が小さくなるにともない x_b/B が小さくなった事が挙げられる。 $S_{max}=25$ の時 x_b/B が最も小さくなる理由はわからないが、潜堤の幾何スケールと造波した多方向不規則波の特性の関係で、 $S_{max}=25$ の波が潜堤で最も変形し易く不安定になり早く砕けたものと推測される。

図-6 は方向集中度パラメータ S_{max} と砕波時の相対波高 H_b/R (以後、限界相対波高と略称する) の関係を R/h , $H_{1/3}/gT_{1/3}^2$ と $h/gT_{1/3}^2$ をパラメータとして示したものである。比較のため同図には一定水深に対して提案された Miche の式 (1944) による値が示されている。なお Miche の値は次式で計算されている。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H_b}{L_b} &= 0.142 \tanh \frac{2\pi R}{L_b} \\ L_b &= \frac{g}{2\pi} T_z^2 \tanh \frac{2\pi R}{L_b} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、式(2)の T_z はゼロ・ダウンクロス法で定義される砕波の周期である。この式(2)は斜面上に設置された透過性潜堤に対する砕波限界式として精度は悪くないことが指摘されている (Rojanakamthorn ら(1990))。

図-6 によれば、 S_{max} が小さくなるにつれて H_b/R の値の変動幅が大きくなることが認められるが、これも砕波位置 x_b/B で指摘したように、波の多方向性が強くなると、波相互あるいは波と潜堤の干渉度合いが複雑になるので砕波限界に幅ができたものと考えられる。また、図-6 によれば、実験値はばらついてはいるが、 S_{max} が 10 から大きくなるにつれて限界相対波高 H_b/R が平均的に小さくなる。このことは多方向性の強い波ほど、平均的に限界相対波高 H_b/R が大きくなることを示している。これは、多方向不規則波では、 $S_{max}=\infty$ の一方不規則波と異なり、進行方向の異なる波が合成されて部分重複波の性質を帯びた切れ波の状態となるため波高が大きくなったためである。このように、図-5 と図-6 より、波の多方向性が強くなるにつれて潜堤の沖側天端上で波高が大きくなり早く砕波するようになることが指摘できる。さらに、多方向不規則波の限界相対波高 H_b/R は Miche の値 (式(2)) より小さく、多方向不規則波の限界相対波高を Miche の式 (式(2)) で推算すると過大評価となることに注意を要する。

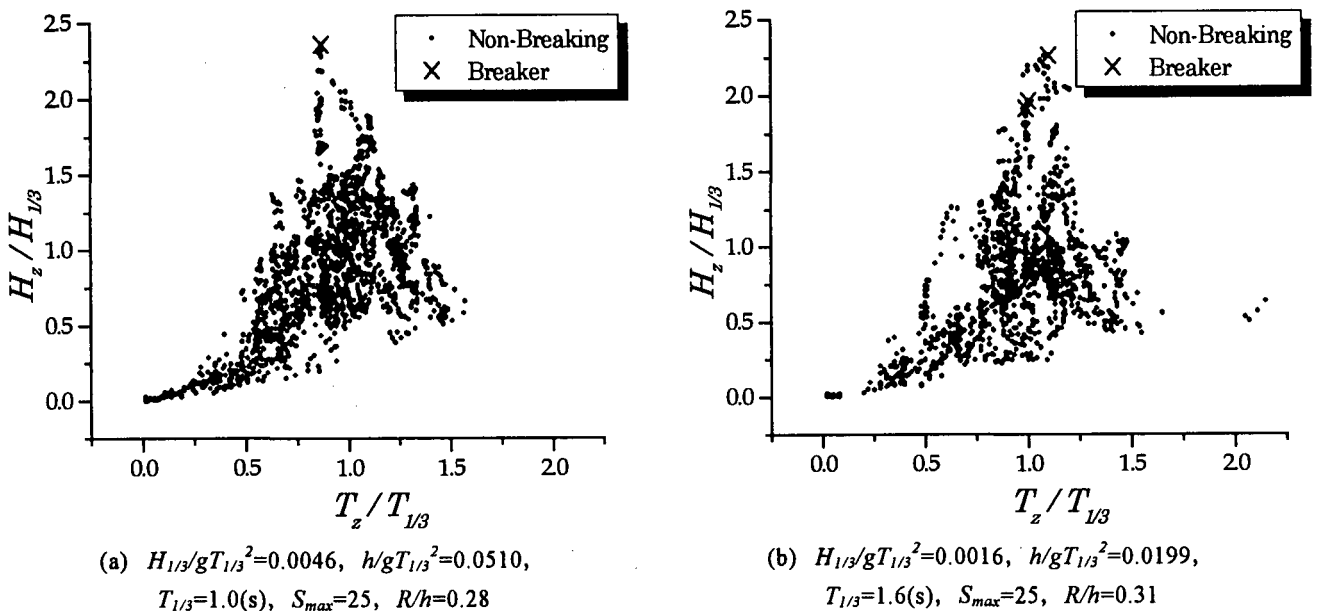


図-4 ゼロ・ダウンクロス法で定義した波の周期と波高の関係

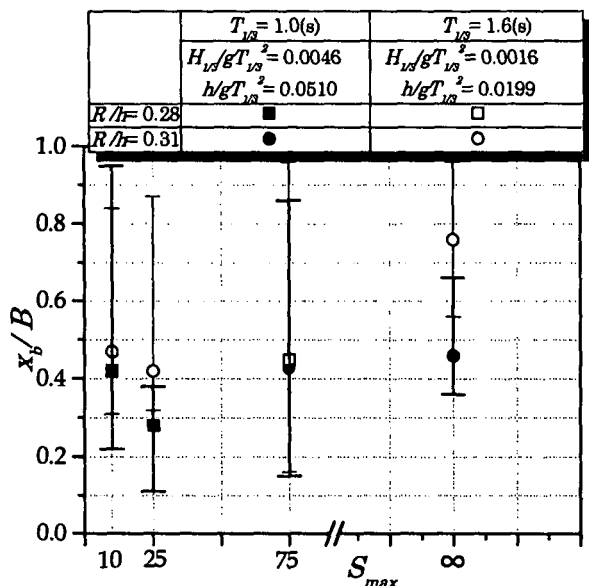


図-5 砕波位置と方向集中度の関係

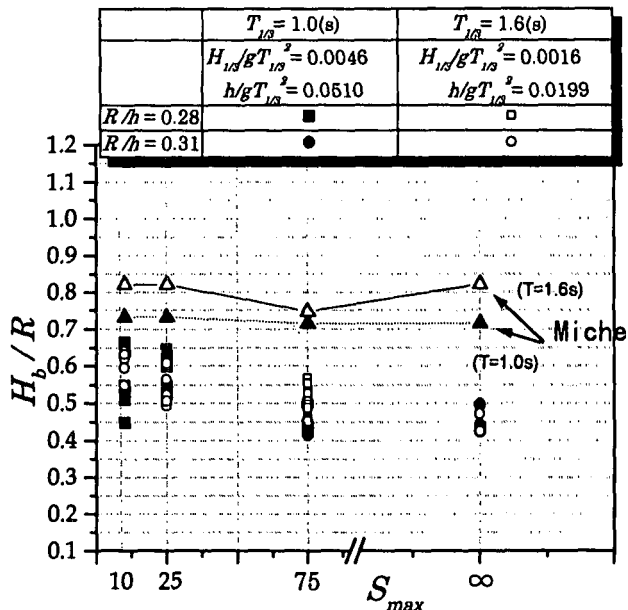


図-6 方向集中度と限界相対波高の関係

5. 結語：

本論では多方向不規則波の砕波を詳細に計測するためにまず砕波水位計を試作し、この砕波水位計を使って潜堤による多方向不規則波の砕波の水位変動を計測しその特性について記述してきた。得られた主要な結論は以下のように要約できる。

- (1) 本研究で試作した“Shot-gun”方式の砕波水位計により多方向不規則波の砕波状況、砕波限界、砕波直後の波の変形をかなり精度高く計測できることが判明した。特に、ビデオカメラを同時に使用すると、砕波位置の特定や砕波瞬時の水位変動を求めることが可能である。
- (2) 方向集中度パラメータ S_{max} が小さくなるにつれて、すなわち波の多方向性が強まるにつれて限界相対波高 H_b/R が平均的に大きくなるとともに H_b/R の分布が広がる。また、方向集中度パラメータ S_{max} が小さくなるにつれて、砕波位置 x_b/B が平均的に小さくなり、潜堤の沖側天端上で砕けるようになる。
- (3) 潜堤上で砕ける多方向不規則波の限界相対波高 H_b/R を一定水深域の規則周期波に対して提案された Miche の式で算定すると過大評価になる。

上記したような結果が得られたが、今後潜堤による多方向不規則波の砕波限界についてさらに検討を加えていく所存である。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）の助成をうけて行なわれたものであることを付記する。

参考文献：

- 合田良実・鈴木康正 (1975)：光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算，港湾研究資料，No.230, pp.1-45.
- 松本幸久 (1998)：潜堤による多方向不規則波の砕波限界に関する実験的研究，名古屋大学 卒業論文，25p.
- 光易 恒 (1970)：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.
- Miche, A. (1944)：Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Forme limit de la houle lors de som deferlement：Application aux digues maritimes, Ann. Ponts et Chausees, Tomell14.
- Rojanakamthorn, S.・磯部雅彦・渡辺 晃 (1990)：透過潜堤上における波の砕波変形計算法，海岸工学論文集，第37巻，pp.549-553.