

不規則波による砕波の回折

高山 知司*・菊地 治**・西田 一彦***

1. ま え が き

港内波高の問題は、適用対象によって大きく2つに分類することができる。一つは船舶の荷役効率に関連する港内静穏度の問題であり、他の一つは荒天時における港内避泊や港内構造物の設計の問題である。前者は年間に起る港内波高の平均的な発生頻度を問題にしているためその対象波浪は常時波浪が主体となる。一方、後者は港内に発生する最大級の波を問題にしているため、荒天時、つまり異常時波浪が主体となる。

常時波浪の波高は一般に小さく、線型理論による回折波の計算¹⁾で港内波高を算定することができる。しかし港内避泊や港内構造物の設計で対象にする異常時波浪は数十年に一回発生するような非常に波高の高い波であるため、港口部の水深が浅い港では砕波が来襲する場合があり、このような場合にも線型理論を用いた計算が適用できるかどうか検討しておく必要がある。

砕波による波の変形や砕波帯内の波のスペクトル変化に関しては多くの研究がなされているが、砕波の回折のように砕波現象と回折現象が同時に起る問題について解析された例はない。そこで、本研究では、砕波の回折に関して従来慣用的に用いられていた線型理論による計算の適用性について不規則波を用いた回折実験によって検討すると同時に、砕波の回折の算定方法について考察する。

2. 実験装置と実験条件

(1) 実験装置

実験に用いた水路は、運輸省港湾技術研究所大型水工実験所内に仮設した内側幅 5.03 m、長さ 30 m、深さ 1.0 m の水路であるが、水路内には片側側壁から 60 cm 離れた位置に長さ 23 m の仕切壁が設けてあるので、水路の実質幅は約 4.3 m である。水路床は、造波板の運動中心から 5.1 m の間を水平とし、これから岸側では 1/50 の一様斜面になっている。水路終端部には消波装置

としてこう配 1/10 の砕石斜面が設けてある。

造波装置としては、大型水工実験場内に付設する可搬式の造波機を用いた。この造波機はビストン型の造波機で、不規則波も発生することができる。

模型防波堤としては、逆T字型の鋼製模型を用い、模型前面には造波板と模型との間の多重反射による波高増大を避ける意味もあって、約 1:1.5 の砕石マウンドを設置した。

波高計としては 20 cm 用容量式波高計を 3 台用い、波形はデータレコーダで記録した後、A/D 変換して電子計算機で統計解析を行った。

(2) 実験条件

防波堤開口部は造波板から 15 m の地点に設置することにし、その地点の水深は 15 cm とした。その結果、造波板から約 5 m 区間の水平水路床部の水深は 35 cm となる。この水平水路床部で入射不規則波の最高波が砕波しないという条件を設定し、水深 35 cm における実験波の有義波高を $H_{1/3}=7$ cm と 10 cm の 2 種類用いることにした。ただし、波の周期は、波形こう配が $H_{1/3}/L \approx 0.035$ になるようにそれぞれ $T_{1/3}=1.1$ sec と 1.3 sec とした。

実験に用いた防波堤配置は、図-1 (a) と (b) の 2 種類で、開口幅は 1 m と一定にしている。防波堤背後では水路側壁からの反射波を除くため模型消波ブロックを側壁沿いに設置している。波高測点は図-1 に小円で示してある。

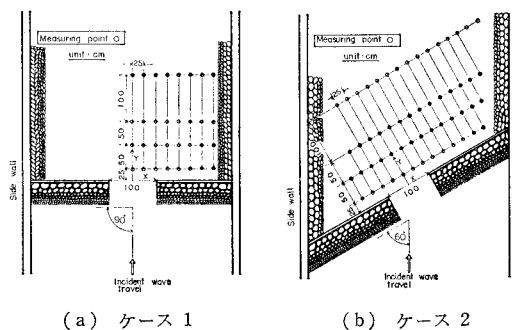


図-1 防波堤配置と測点

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長
 ** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室
 *** 学正会員 同所

3. 入射不規則波の特性

回折実験に先立って、防波堤を配置しない状態で入射波の特性を調べた結果、表-1 のようになった。表-1

表-1 入射波の諸元

Wave	$h=35\text{ cm}$		$h>\frac{1}{2}L_0$		$h=15\text{ cm}$ (at the Opening)			
	$H_{1/3}$ [cm]	$T_{1/3}$ [sec]	H_0 [cm]	H_0/L_0	$H_{1/3}$ [cm]	$T_{1/3}$ [sec]	h/L	B/L
I	6.96	1.16	7.57	0.036	6.92	1.25	0.106	0.704
II	9.44	1.34	10.26	0.037	8.78	1.48	0.088	0.585

の数値は同一の波の条件で、波列の異なる波について行った2回の実験の平均値を示したものである。水深35 cmにおける有義波高・周期共に目標波に非常に近い。波Iでは水深が15 cmになっても有義波高はほとんど変化していないが、波IIでは水深35 cmで $H_{1/3}=9.44\text{ cm}$ であったものが水深15 cmでは $H_{1/3}=8.78\text{ cm}$ と約0.7 cm低下している。波の周期は水深が浅くなることによって約1割増大している。

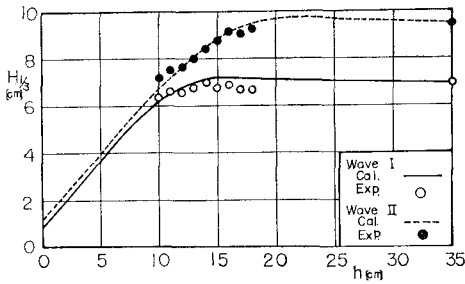


図-2 水深変化に伴う波高変化

図-2 は水深による有義波高の変化を示したものである。図-2 中の実線および点線で示される計算値は合田²⁾の砕波変形理論を用いて計算したものである。計算値は実験の波高変化特性を非常によく表わしている。開口部に当る水深15 cmの位置は、波Iでは波高が浅水変形で増大してきて、砕波の影響で波高が減衰し始めようとする地点に当り、波IIでは波高が砕波の影響で減衰している地点に当る。

図-3 は水深変化による波IIのスペクトル変化を示したものである。水深が浅くなるに従って、 $f<0.4\text{ Hz}$ の低周波側ではサーフビートによって波のエネルギーは増加する傾向にある。 $f=0.75\text{ Hz}$ のスペクトルのピーク周波数付近では、砕波によって波のエネルギーが失われるためスペクトルのピーク値は低下する。一方、 $f>1.0\text{ Hz}$ の高周波側ではスペクトルは増大し、高周波側の波のエネルギーが増えている。このスペクトル変化からだけで判断すると、砕波によって失われる波のエネルギーはビ

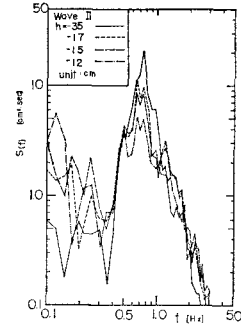


図-3 波のスペクトル変化

ーク周波数付近に限られているように見える。 $f>1.2\text{ Hz}$ の高周波側における波のスペクトル減衰は水深35 cmでほぼ $f^{-4.5}$ であったものが浅くなるにつれて $f^{-3.5}$ 程度になる。この値は、榎木・岩田³⁾による f^{-3} より少し急こう配である。

4. 回折波に関する計算値と実験値との比較

(1) 波高比の比較

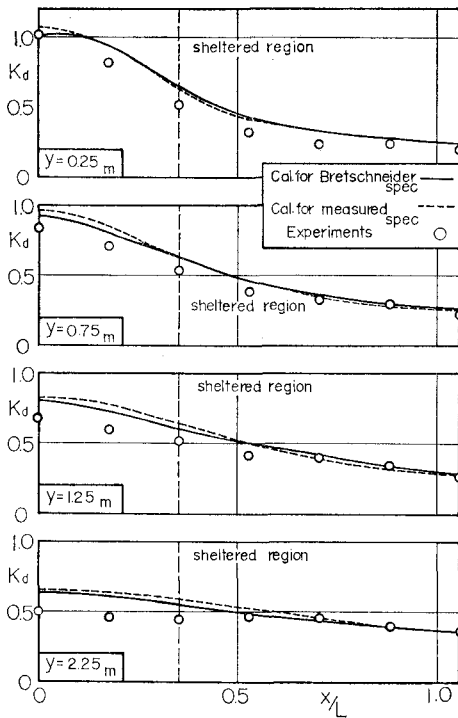
実験値と計算値は開口部の有義波高に対する回折波の有義波高の比として与え、波高比の形で比較を行った。計算値における波高比 K_d は次式で求めた。

$$K_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{di}^2 \Delta S_i}{\sum_{i=1}^N \Delta S_i}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

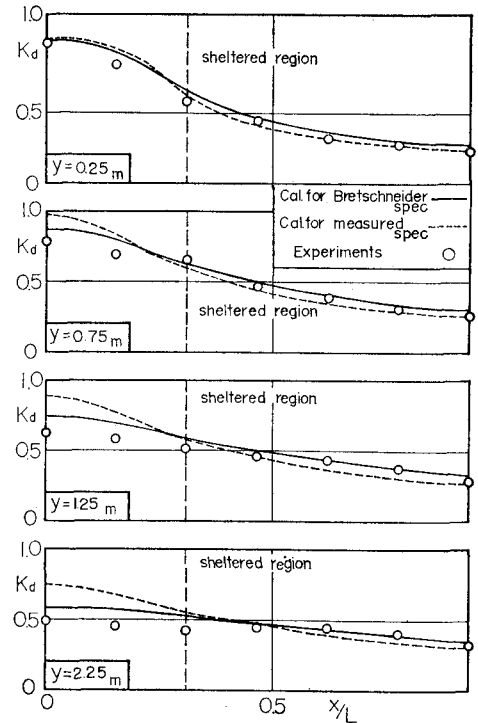
ここに、 K_{di} は*i*番目の周波数分割区域内の代表周波数に対する規則波の回折係数で、 ΔS_i は*i*番目の分割区域内のスペクトルの積分値である。ただし、 K_{di} の計算では防波堤の前面を消波にしても回折波の波高は完全反射堤の場合とほとんど変わらないため、模型防波堤の反射率を1.0として計算した。実験値はゼロアップクロス法で求めた有義波高の比で与えた。

ケース1 (図-1 (a)) に関して実験値と計算値とを比較したのが図-4 (a)と(b)である。図-4 (a)は波I、図-4 (b)は波IIが作用した時の比較図である。図中の実線は開口部(水深15 cm)における有義波高および周期を用いて求めたBretschneiderのスペクトルによる計算値、点線は開口部における実測スペクトルを用いた計算値を示している。

図-4 (a)の波Iに関しては、両計算値は最大で0.02程度の差で、お互により一致を示している。しかし実験値は、計算値より全体的に小さく、開口部を通過して波が直進する領域では開口部から離れるに従って計算値からずれ、最大で0.15程度の差を示すが、防波堤の遮蔽領域では計算値と比較的良好一致を示している。図-4 (b)のような入射波高の高い波IIの場合、実測スペクトルを用いた計算値は、波の直進領域では開口部から離れるに従ってBretschneiderのスペクトルによる計算値からず



(a) 波 I



(b) 波 II

図-4 波高比に関する実験値と計算値の比較 (ケース 1)

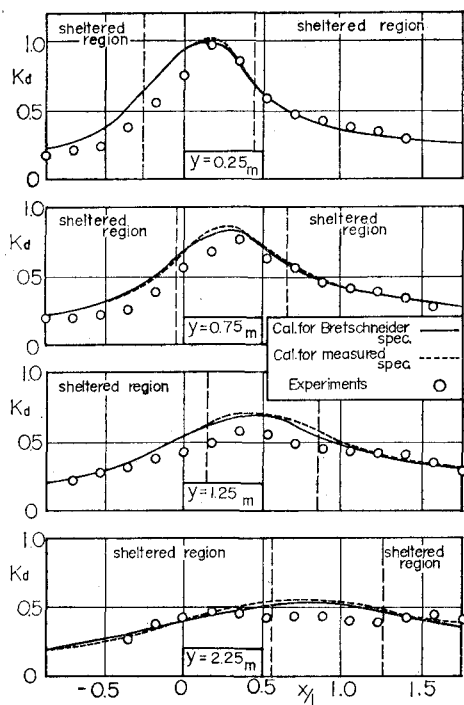
れ、 $y=2.25$ m では最大 0.15 程度大きな値となる。一方、遮蔽領域では逆に実測スペクトルによる計算値が小さくなるが、両者の差は 0.1 以内で比較的小さい。実験値は 図-4 (a) の場合と同様に、波の直進領域では開口部から離れるに従って計算値より小さくなり、特に、実測スペクトルを用いた計算値よりは 0.3 も小さくなる点がある。一方、防波堤の遮蔽域では実験値は両計算値から 0.05 以内にあり、計算値とよい一致を示している。実験値は Bretschneider のスペクトルを用いた計算値に比較的良好一致し、0.1 以内の差に収まっている。

防波堤が波向に対して 60° 傾いたケース 2 (図-1 (b)) に関する実験値と計算値の比較が 図-5 (a) と (b) に示してある。図-5 (a) の波 I の場合、両計算値はお互によく一致し、両者の差は 0.02 以内に収まっている。実験値は計算値より低い傾向を示し、特に波の直進領域でこの傾向が顕著で、最大で 0.15 程度低くなる。しかし計算値は実験値の波高変化特性をよく表わしており、計算値が大きくなる部分では実験値も増大している。波高の大きい波 II では、両計算値は 図-4 (b) と同じ傾向を示し、波の直進領域では差が大きく、防波堤から離れるに従ってこの傾向が強くなり、 $y=2.25$ m では両者の差は約 0.15 にもなる点がある。一方、遮蔽域では両者の差は 0.05 以下と小さい。実験値は全般に計算値より小さく、Bretschneider のスペクトルを用いた計算値とは $y=0.25$

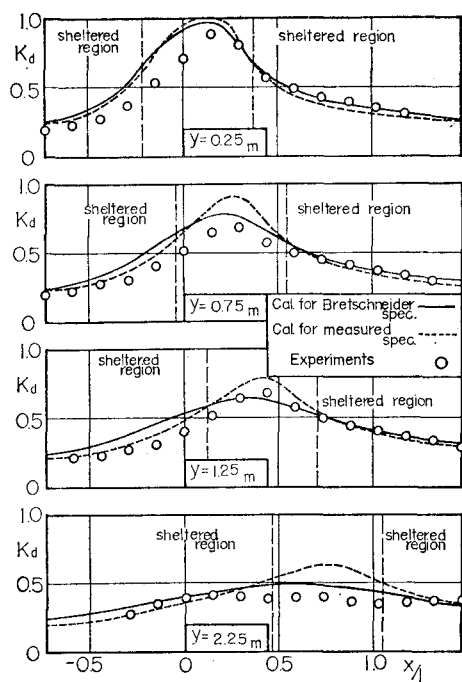
m の $x/L=0$ 付近で 0.2 程度の差を除けば、0.15 以内の差で比較的良好一致を示すが、実測スペクトルを用いた計算値とは波の直進領域で特に差が大きく、0.2 以上の差が現われる点がある。

(2) 回折波の実測スペクトルと計算スペクトルの比較

実験値と計算値との比較の結果、波高の大きい波 II の場合、実験値は波の直進領域では実測スペクトルを用いた計算値より Bretschneider のスペクトルを用いた計算値に近く、遮蔽領域では両計算値はあまり差がなく、実験値に比較的近い値を示すことが明らかになった。では、なぜこのようなことが起るのか調べるために、波が開口部に直角入射するケース 2 で、波 II の場合について、計算によって求めた回折後の波のスペクトルと回折波の実測スペクトルとを比較してみた。この比較図が 図-6 である。比較した点は $y=2.25$ m の測線上の $x/L=0$ と 0.44 ($x=75$ cm) の 2 点である。図-6 (a) は計算値と実験値が大きな差を示す点 ($x/L=0$) における比較図で、図-6 (b) は差が小さい点 ($x/L=0.44$) における比較図である。これらの図中で実線は開口部における入射波のスペクトルを示し、点線は実線のスペクトルに各周波数の波の回折係数 K_{di} の自乗を乗じて求めた計算スペクトルを示す。また、一点鎖線は実測スペクトルを示している。

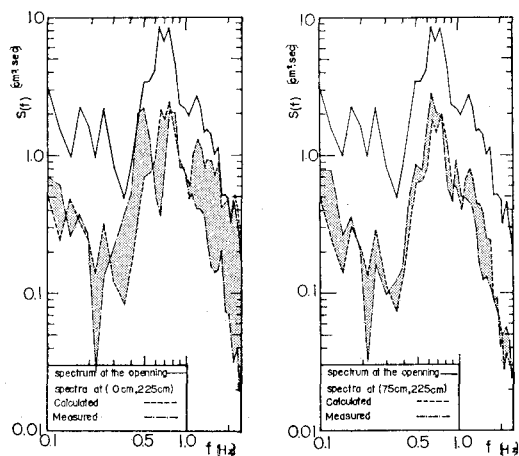


(a) 波 I



(b) 波 II

図-5 波高比に関する実験値と計算値の比較 (ケース 2)



(a) 波の直進領域

(b) 波の遮蔽領域

図-6 計算スペクトルと実測スペクトルの比較

図-6(a)の計算スペクトルは、周期の長い波では $K_{di} < 1.0$ となるため、低周波側では開口部のスペクトルより小さくなり、短周期の波では回折係数が大きく、 $f > 1.5 \text{ Hz}$ では $K_{di} \approx 1.0$ となって、開口部のスペクトルにほぼ等しくなる。一方、一点鎖線の実測スペクトルは、 $f = 0.5 \text{ Hz}$ と 0.75 Hz 付近で同レベルのピークを持つ 2 山型のスペクトルになっている。 $f = 0.75 \text{ Hz}$ は開口部のスペクトルのピーク周波数に対応するが、 $f = 0.5 \text{ Hz}$ に現われるピークについては、図-3 の $h = -12 \text{ cm}$

の地点のスペクトルでも $f = 0.5 \text{ Hz}$ に山が現れており、本水路特有の現象ではないかと考えられる。両スペクトルを比較すると、実測スペクトルは計算スペクトルより $f = 0.5 \text{ Hz}$ 付近で大きく、 $f = 0.65 \text{ Hz}$ 付近で小さく、 $f > 1.0 \text{ Hz}$ の高周波側では特に小さくなっている。両スペクトルの積分値を考えると、 $f \leq 1.0 \text{ Hz}$ までは $f = 0.5 \text{ Hz}$ と 0.65 Hz における波のエネルギーの差は相殺され、両スペクトルのエネルギーはほぼ等しくなるが、 $f > 1.0 \text{ Hz}$ では計算スペクトルが非常に大きなエネルギーを示すため、この高周波側における波のエネルギーの差が計算値の波高を実験値より大きくしたものである。

波高比の差が小さい図-6(a)についてみると、この点は防波堤の遮蔽領域にあるため、 $K_{di} < 1.0$ となって、計算スペクトルは開口部のスペクトルより全体的に低下する。一方、実測スペクトルは $f = 0.5 \text{ Hz}$ で小さなこぶはあるものの図-6(a)のようなずれは見られず、計算スペクトルに近い形を示している。このスペクトル形の一致が両波高比をよく一致させたと考えることができる。

5. 碎波の回折計算法

計算スペクトルと実測スペクトルとの比較によって、計算値と実験値の波高比の間に大きな差が現われるときは、高周波側において両スペクトルが大きくずれること

が明らかになった。このずれは、高周波側における計算スペクトルが $f^{-2} \sim f^{-3}$ に比例して、緩こう配で減少するのに対し、実測スペクトルでは常に約 $f^{-4.5}$ と急こう配になっていることによる。このように計算スペクトルが緩こう配で減少する原因としては、開口部の実測スペクトルの高周波側に含まれる波の非線型成分は自由波の成分ではないので、波の回折には直接関係ないにもかかわらず、計算では非線型成分も含めたスペクトルに対して K_{ai} を乗じて回折波のスペクトルを求めている結果、高周波側の波のエネルギーを大きく見積り過ぎる結果になったためだと考えられる。このように考えると、計算値と実験値の波高比が波の直進領域で大きくずれ、遮蔽域でよく一致する理由が以下のように説明できる。直進領域では K_{ai} は短周期の波になるほど大きくなるため、高周波側の波のエネルギーの割合が特に増し、その結果、計算波高比が大きくなる。一方、波の遮蔽領域では全周波数に対し $K_{ai} < 1.0$ となり、計算スペクトルは全体的に開口部のスペクトルより低下する。その結果、高周波側のエネルギーは非線型成分を含んでいたとしても割合が小さくなって、波高比に大きな影響を及ぼさないため、計算波高比が実験値と一致するようになる。また、直進領域でも開口部に近いと、常に $K_{ai} \approx 1.0$ となり、高周波側の影響は小さく計算値は実験値に比較的よく一致する。

砕波のように非線型性の強い波では開口部のスペクトルをそのままの形で用いることはできず、深海波に関して光易ら^{4),5)}が行ったように非線型成分を算定し、これを取り除くことが必要となる。しかし実用的な面から考えると、砕波のスペクトル形が確定しておらず、非線型成分を除く方法も不明な現状では、本実験結果を下にして以下のように算定することが考えられる。4. (1) で示したように Bretschneider のスペクトルを用いて計算した波高比は実験値と大差ないので、開口部における自由波のスペクトルの代りにこのスペクトルを採用し、こ

のスペクトルを用いて線型回折理論で回折波を算定すればよい。ただし、開口部のスペクトルが求められていても、このスペクトルをそのままの形で用いず、一度 Bretschneider のスペクトルに変換して用いることになる。

6. あとがき

砕波の回折に関して不規則波実験を行い、線型理論計算値と比較した結果では、開口部のスペクトルをそのままの形で用いたのでは過大な波高を与えることになるため、開口部での有義波の諸元を用いて Bretschneider のスペクトルに直し、このスペクトルを用いて計算する方法を提案した。この方法は現状における便宜的な方法であるため、将来、砕波のスペクトルや非線型干渉について明確になった時点では修正することが必要となる。

なお、砕波の回折における周期比の変化などについても詳細に検討した結果は、後日港湾技術研究所報告に発表する予定である。

参考文献

- 1) 高山知司・神山 豊：不規則波の回折計算，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 112~116, 1977.
- 2) 合田良実：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，Vol. 14, No. 3, pp. 59~106, 1975.
- 3) 樫木 亨・岩田好一郎：浅海砕波帯における不規則波のパワー・スペクトル形状について——特に高周波数域のスペクトル勾配について——，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 105~108, 1979.
- 4) Mitsuyasu, H., Yi-Yo Kuo and A. Masuda: The dispersion for wind waves in decay area, Turbulent Fluxes through the Sea Surface, Wave Dynamics, and Predictions edited by A. Faure and K. Hasselmann, pp. 221~233, 1978.
- 5) Yi-Yo Kuo, H. Mitsuyasu and A. Masuda: Experimental study on the phase velocity of wind waves, Part 1 Laboratory wind waves, Rept. of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. XXVII, No. 83, 1979.