

2 方向からの入射波の砕波について

三井 宏*・豊田 裕作**

1. 緒 言

砕波帯以後の波高および波向は、海浜変形予測あるいは漂砂量予測等の諸問題において重要な基本量である。埋立地、防波堤、離岸堤等の海岸構造物の規模が大きくなるにしたがって反射波や回折波が広範囲に存在することになる。入射波とこれらの波が共存する領域では、2 方向またはそれ以上の方向からの入射波が存在するものとみなせる。

本研究は、多方向の最も基本的形態である 2 方向波の砕波限界および砕波以後の波高、波向の変化について、実験および数値計算の両面から検討をし、多方向波の性質を明らかにしようとするものである。加えて、上記の検討により明らかとなった結果を用いて、砕波帯が存在する場合の一字堤背後の波高および波向の数値計算を試み、本研究結果の妥当性を検証しようとするものである。

2. 斜め重複波の砕波限界

(1) 斜め重複波の砕波

砕波は非線形性の強い現象であり、有限振幅波理論においても解明が困難な問題の一つである。こうした砕波現象と以下のように実験結果に基づく係数が微小振幅波理論を補正する手法を用いて考察する。まず、水面での波の水粒子速度の水平成分の最大値 $u_{\max}$ が波速に等しいと置いて、進行波の砕波限界を求めると、次式のようになる。

$$H_b/L_0 = (1/\pi) \tanh^2 kh \quad \dots\dots\dots (1)$$

微小振幅波理論では $L/L_0 = \tanh kh$ であるから、上式を変形する。

$$H_b/L = (1/\pi) \tanh kh \quad \dots\dots\dots (2)$$

Danel の実験結果¹⁾によれば、比較的深い場合には最大波形勾配 H/L は $1/(2\pi) = 0.159$ よりも小さい。したがって、ここでは簡単に次式のように $1/2$ の係数で補正する。

$$H_b/L_0 = (1/2\pi) \tanh^2 kh$$

$$= 0.159 \tanh kh \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$H_b/L = 0.159 \tanh kh \quad \dots\dots\dots (4)$$

なお、これらの式から逆算すると砕波条件は $c = 2u_{\max}$ となり、実際の $u_{\max}$ として微小振幅波理論の 2 倍の値を採用したことになる。

次に、水面における水粒子加速度の鉛直成分の最大値 $(\partial w/\partial t)_{\max}$ が $-g$ に等しいと置いて、完全重複波の砕波限界を求めると次式のようになる。ただし、この条件では水深 h の影響が入って来ないので、岸²⁾にならない $(\partial w/\partial t)_{\max} = -g \tanh^2 kh$ とする。こうすれば、深海では鉛直加速度は $-g$ に等しく、水深 0 では波高が 0 になる。

$$H_b/L = (1/\pi) \tanh kh \\ = 0.318 \tanh kh \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 H_b は重複波の砕波高である。岸の 2 次近似解によると、式 (5) の係数は 0.188、Penney と Price³⁾ の深海重複波の 5 次近似解によると 0.218 であり、いずれも式 (5) の係数より小さい。Dannel の実験結果も 0.218 よりやや小さいが、ここでは式 (5) をそのまま用いることにする。なお Wiegel⁴⁾ は Penney と Price による 0.218 を用いて式 (5) の形で浅海での重複波砕波高を与えている。

入射角が α' (壁面と波峰線のなす角) の場合の斜め重複波の砕波限界として、進行波で用いた $2u_{\max} = c$ および重複波で用いた $(\partial w/\partial t)_{\max} = -g \tanh^2 kh$ の二つを適用してみる。前者は、

$$H_b/L = (2\pi \sin^2 \alpha')^{-1} \tanh kh \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、後者は式 (5) と一致する。どちらの砕波条件が適用されるのかの限界入射角を見出すために、式 (5) と (6) を等しいと置くと、 $\alpha' = 45^\circ$ が得られる。すなわち、 45° より小さい入射角では重複波の砕波となり、 45° より大きければ進行波の砕波 (入射波の波速 c より大きい位相速度 $c/\sin \alpha'$ をもつ) となる。前述のように式 (5) の係数がやや大きすぎるので、もし小さい値を採用すれば、この限界入射角は 45° より大きくなる。たとえば式 (5) の係数を 0.20 とすると、限界入射角は 63° となる。

合田ら⁴⁾によれば、重複波のせつ動法による級数解の

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 日本テトラポッド(株)

次数が3次までは、 $(\partial w/\partial t + w\partial w/\partial z)_{\max} = -g$ の条件により砕波限界が計算できるが、4次近似解では砕波条件を満足する数値が存在せず、砕波限界を計算できなかった。この原因は、砕波限界のように波形勾配が非常に大きい場合に、せつ動法を無理に適用するためと述べている。Hsu⁵⁾ は斜め重複波の3次近似解を求め、進行波および重複波の砕波条件によりそれぞれ砕波限界を計算している。この場合にも入射角が約 20° 以上では重複波の砕波条件 $(\partial w/\partial t + w\partial w/\partial z)_{\max} = -g$ による砕波限界が存在せず、したがって入射角が約 20° 以上では進行波の砕波条件 $c = u_{\max}$ により砕波限界を計算している。

(2) 実験装置および実験方法

幅 15 m, 長さ 30 m, 一様水深の平面水槽に、波の入射角 α' (波峯線と鉛直壁のなす角) がそれぞれ 20° , 30° , 40° , 50° になるように木製鉛直壁を設置する。各入射角 α' において、斜め重複波がちょうど砕波する波を試行錯誤的に見出す。砕波位置には、鉛直壁に直角に 25 mm メッシュの鉛直金網を設置し、壁面に最も近い腹の位置 ($\alpha' = 0^\circ$ なら壁面から約 0.5 波長の地点) の波形を鉛直金網とともに 16 mm シネ・カメラで撮影し、入射波高は容量式波高計により記録する。このようにして測定した入射波の諸元は、水深 20 cm, 入射波高 4.0~9.0 cm, 周期 0.6~1.4 s である。撮影したフィルムから砕波高、砕波頂高を読み取るとともに、斜め重複波の砕波形態が進行波の砕波か重複波の砕波かを観察する。

(3) 実験結果

式 (1) の形に実験結果を整理し、最小 2 乗法で実験式を求めると、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha' = 20^\circ: & H_b/L_0 = 0.184 \tanh^{1.86} kh \\ \alpha' = 30^\circ: & H_b/L_0 = 0.200 \tanh^{2.85} kh \\ \alpha' = 40^\circ: & H_b/L_0 = 0.179 \tanh^{2.31} kh \\ \alpha' = 50^\circ: & H_b/L_0 = 0.165 \tanh^{2.25} kh \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

これらの実験によれば、 α' が小さい場合には岸や Wie-

gel の有限振幅波理論とほぼ同じ砕波高となり、 α' が大きくなるとそれより小さい値となる。

図-1 は、ある水深に存在可能な波高の極値を示すのに都合が良い形に実験結果および有限振幅波理論値をプロットしたものである。図-1 に記入した実線の上方は重複波の砕波である式 (5), 下方は進行波の砕波である式 (6) において $\alpha' = 50^\circ$ とした補正微小振幅波理論によるものである。1 点鎖線は Hsu の斜め重複波理論によるもので、 α' が 0° および 10° は重複波の砕波条を用いており、 45° は進行波の砕波条件を用いてある。2 点および 3 点鎖線はそれぞれ合田の 3 次近似および岸の 2 次近似による重複波理論、破線は Wiegel が Penney および Price の深海砕波を補正した重複波の砕波曲線、点線は進行波についての山田・塩谷⁶⁾ の理論値である。 α' が小さい場合には、岸、合田、Hsu ($\alpha' = 0^\circ$) の重複波理論曲線と実験結果はほぼ一致しているが、 α' が大きくなると Hsu の重複波理論曲線と逆の傾向を示し、 H_b/h の実験値は小さくなって進行波のそれに近づく傾向を示している。図-1 において、Hsu の斜め重複波理論値 ($\alpha' = 45^\circ$) が過大なのが目につく。 α' が 0° の場合には合田の重複波理論値とほぼ一致するのであるが、実験結果や前述の式 (5) および (6) による考察と逆に、 α' が大きくなるにつれて H_b/h の値が大きくなり、 α' が 45° ではこのような過大な値になってしまう。この原因は、前述のように重複波の砕波条件を満足する数値が存在しないので、やむなく進行波の砕波条件を採用したためと考えられる。

図-2 に、砕波頂高の砕波高に対する割合 η_b/H_b の実験結果と Hsu の斜め重複理論による計算値 ($\alpha' = 0^\circ$) を示す。相対水深 h/L_0 が小さい場合には実験値と理論値は一致するが、 h/L_0 が大きくなると実験値は理論値のように小さくならず、ほぼ 0.67 の一定値である。なお、入射角 α' も相対水深 h/L_0 と同様に、 η_b/H_b とは無関係のようである。

16 mm フィルムの観察結果では、 $\alpha' = 20^\circ$, 30° , 40° の場合は重複波型砕波であり、 $\alpha' = 50^\circ$ の場合は重複波型砕波と進行波型の砕波が混在するのが認められた。

3. 屈折を伴う 2 方向波の砕波

(1) 模型実験と数値計算

2. (2) で述べた平面水槽に、図-3 に示すような勾配 1/30 の一様勾配斜面を設け、消波材 (ステラシート)

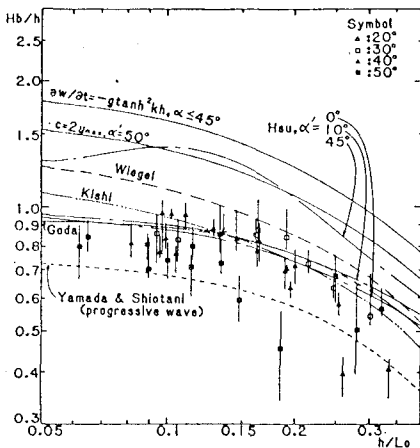


図-1 斜め重複砕波高

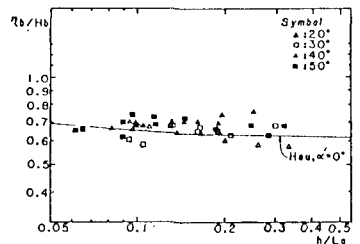


図-2 斜め重複砕波頂高の砕波高に対する比

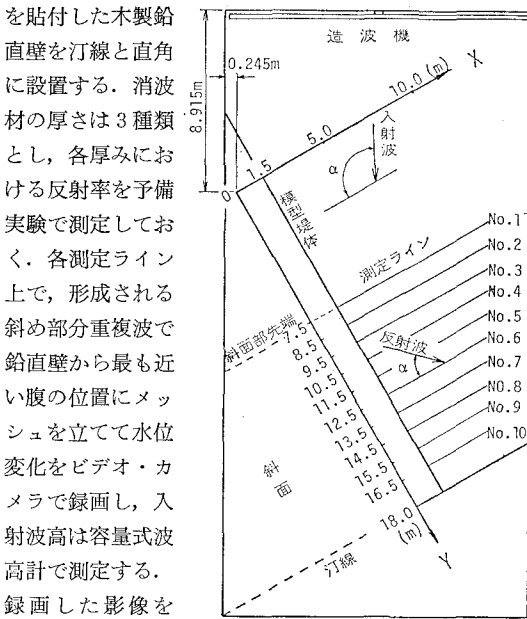


図-3 観測位置と座標

を貼付した木製鉛直壁を汀線と直角に設置する。消波材の厚さは3種類とし、各厚みにおける反射率を予備実験で測定しておく。各測定ライン上で、形成される斜め部分重複波で鉛直壁から最も近い腹の位置にメッシュを立てて水位変化をビデオ・カメラで録画し、入射波高は容量式波高計で測定する。録画した影像をCRTに写し、波高および斜め部分重複波の波峰部の通過位置を読み取る。斜め部分重複波の波向線は、各測定ライン上で波峰部が通過した位置をなめらかに結ぶことにより描くことができ、任意点で波向線の接線を引くと砕波角が求まる。実験に用いた入射波の諸元を表-1に示す。なお、この反射率は、Healyの方法で計算した見かけの反射率を合田の方法⁷⁾によって真の反射率に修正したものである。

数値計算は、前述の模型実験の各ケースについて、測定された斜め部分重複波の波向線上の任意点に到達する入射波と反射波の波高および波向を波向線法で求め、さらに、二つの波の値を合成することにより斜め部分重複波の波高、波向を算出するものである。入射波および反射波の計算では砕波条件を満足しているか否かのチェックを逐次行う。砕波条件は、 $H \geq H_b$ とする。ここに、 H は線形理論から求まる波高であり、 H_b は以下の式から求められる砕波限界波高である。

$$H_b/L_0 = A[1.0 - \exp\{-1.5\pi h/L_0 \times (1.0 + 15 \tan^{4/3} \theta)\}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

上式で、 L_0 は深海波長、 h は水深、 $\tan \theta$ は海底勾配である。 A の値は、予備実験の結果から0.17とした。また、砕波点波高を上式で与え、砕波後の波高 H' は砕波点からの距離 l に応じて減少するものとし、次式で求める。

$$H' = H_b \exp(-Bl/c_b T) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 B は係数で0.222とし、 T は周期、 c_b は砕波点での波速であり、孤立波速を用いる。なお、反射波

表-1 実験波の諸元

CASE	周期 T (sec)	ステラシート の厚さ (cm)	堤の反射率	入射波高 H (m)	波形勾配 H/L	深海波長 勾配 H_0/L_0	相当深海 波高 H_0' (m)
Case 1	0.90	0	0.80	0.096	0.080	0.08	0.10
Case 2	1.00	0	0.86	0.112	0.079	0.08	0.12
Case 3	1.10	0	0.89	0.108	0.066	0.06	0.12
Case 4	1.20	0	0.89	0.101	0.054	0.05	0.11
Case 5	0.90	20	0.41	0.096	0.080	0.08	0.10
Case 6	1.00	20	0.44	0.112	0.079	0.08	0.12
Case 7	1.10	20	0.48	0.108	0.066	0.06	0.12
Case 8	1.20	20	0.53	0.101	0.054	0.05	0.11
Case 9	0.90	50	0.40	0.096	0.080	0.08	0.10
Case 10	1.00	50	0.41	0.112	0.079	0.08	0.12
Case 11	1.10	50	0.44	0.108	0.066	0.06	0.12
Case 12	1.20	50	0.44	0.101	0.054	0.05	0.11

は、壁面における反射率を考慮するが、入射角と反射角は同一とする。反射率は、表-1に示す値を用いる。

(4) 実験結果および考察

図-4に、斜め部分重複波の極大波高の変化を示す。縦軸に波高比、横軸は図-3に示すY座標値を記入してある。図中の実線は、入射波高 a と反射波高 b を $\sqrt{a^2 + b^2}$ で合成した計算波高であり、破線は次式によるものである。

$$H^* = H_b^* \exp(-5l^*/c_b^* T) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、記号 $*$ は合成波の諸量であることを表す。 H_b^* は、式(8)から算出するが、係数 A については堤の反射率の大小に応じて0.153~0.186とする。 c_b^* は次式を用いて求める。

$$c_b^* = \sqrt{gh} \left\{ 1 + \frac{H_b}{2h} - \frac{3}{20} \left(\frac{H_b}{h} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

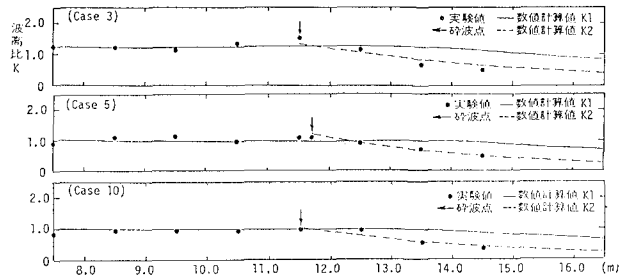


図-4 波高変化

図の左端から矢印までが非砕波領域で、矢印より右が砕波領域である。各ケースとも、非砕波領域における実験値と計算値は非常に良く一致している。このことから、非砕波領域における2方向の波の位相一致点における波高は、各成分波のエネルギー・フラックスの和により求めると言えよう。次に砕波以後の実験値は、式(10)による曲線に沿う傾向を示している。式(10)は、単一進行波に対するものと同じ形であるが、上記の結果から2方向波の砕波後の波高変化にも適用可能であることがわかる。ここで、斜め重複波の砕波限界の考察および実験から得られた結果、すなわち、2方向波の砕波形態が入射角度 $\alpha' = 50^\circ$ 前後で進行波的砕波と重複波的砕波に分けることができることから、 $\alpha' = 60^\circ$ の本実験では進行波的砕波形態をとっていると考えられる。よって、2方向波が進行波的砕波形態をとる場合には、単一進行波

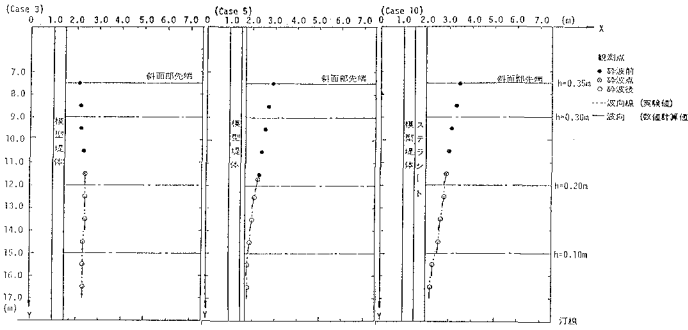


図-5 波向変化

の砕波後の波高変化式の係数を適当な値に変えることにより適用可能であることがわかる。

図-5 は、斜め部分重複波の波向線の実験結果および数値計算による波向を示したものである。数値計算は、二つの波の波高と波向を算出し、それぞれの波高を大きさとする二つのベクトルと考えて、合ベクトルの方向を合成波の波向とするものである。各実験ケースとも実験結果と数値計算結果は比較的良く一致している。砕波点より岸側の水深 h が非常に小さい領域では、孤立波理論によれば波高 H は h に比例して、砕波峯高 Y_b (海底より測った) は、 $Y_b = h + H = aH$ (a は比例定数) とすると波速 $c = \sqrt{agH}$ となるので、成分波のベクトルの大きさを c^2 としたのと同じである。なお、 H^2 をベクトルの大きさとした場合の合成波向についても検討したが、良好な結果を得ることができなかった。

4. 屈折と回折を伴う一文字堤背後の砕波

(1) 対象モデルと数値計算法

対象モデルは、一様勾配斜面上に設置された一文字堤とする。入射波と一文字堤の両端から発生する回折散乱波をそれぞれ別個の波として取扱うと、入射領域では3方向波、回折領域では2方向波の領域となる。三つの波を、時間項 $\exp(i\omega t)$ を考慮して表すと、

$$f_a = a e^{i(kr + \varepsilon_1)} e^{i\omega t_1} \quad (12)$$

$$f_b = b e^{i(kr + \varepsilon_2)} e^{i\omega t_2} \quad (13)$$

$$f_i = c e^{i(kr + \varepsilon_3)} e^{i\omega t_3} \quad (14)$$

となる。 f_a, f_b は、一文字堤両端からの回折散乱波、 f_i は入射波である。入射領域においては、初期位相差と到達時間差により f_a と f_i の位相差 E を求めると、

$$E = \varepsilon_1 + \sigma(t_1 - t_2) \quad (15)$$

となる。したがって、二波の合成振幅は次式で示される。

$$|f| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ac \cos E} \quad (16)$$

また、一文字堤の他端からの波 f_b については位相を考慮せず、振幅のみを考慮して合成すると次式になる。

$$|f| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + 2ac \cos E'} \quad (17)$$

回折領域においては、 f_a と f_b の位相差 E' が、

$$E' = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \sigma(t_1 - t_2) \quad (18)$$

で表されるので、この合成波の振幅は次式で示される。

$$|f| = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos E'} \quad (19)$$

数値計算にあたっては、屈折と回折が同時に起こる場合にも適用可能な波向線法⁸⁾を用いる。また、各成分波については逐次砕波、非砕波の判定を行い、砕波後の波高は式(9)で求められるものとする。

(2) 実験結果

模型実験には、3.と同様の一様勾配斜面を持つ平面水槽を用いた。堤設置位置と波高測定点を図-6に示す。実験に用いた波は、周期 1.41 s、水平部水深 35 cm での入射波高 6.62 cm、砕波水深 10 cm で、堤を設置しない場合の砕波限界波高 7.96 cm である。

図-7 に実験結果を示す。横軸の数値は、図-6 に示す X 座標値である。実験値と数値計算値を比較すると、非砕波領域内のライン 1 については比較的良く一致しているが、砕波領域内のライン 2 では回折領域内の数値計算値が過小な値を示しており、特に極大値において両者の差異が大きい。これは、入射領域と回折領域における波高分布の急変により生ずる波浪流によって、入射領域

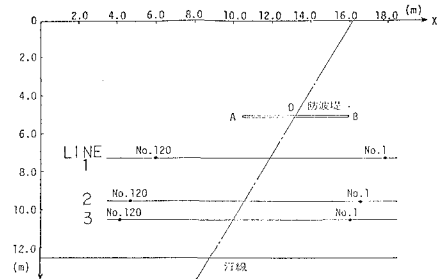


図-6 堤設置位置と測定位置

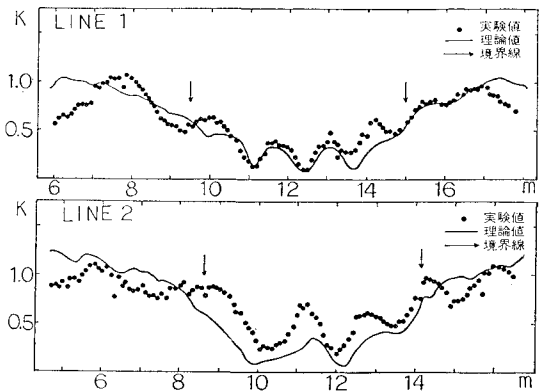


図-7 波高分布

から回折領域に相当量のエネルギー流入が存在するためと考えられる。回折領域内の砕波点以浅の波高が小さいため、砕波後の波高変化は測定できなかった。

5. 結 言

以上、本研究では 2 方向波の砕波限界、砕波後の波高および波向の変化について詳細な検討を行い、簡便な計算方法を提示した。以下、本研究で得られた結果を要約する。

(1) 斜め重複波の砕波限界波高は、入射角 α' が小さい場合には完全重複波理論値に近いが、 α' が大きくなるに従って進行波の砕波限界に近づく。

(2) 砕波限界における波高と波頂高の比は、入射角にかかわらずほぼ一定値である。

(3) 2 方向波の非砕波領域における波高（砕波点に近い）は、成分波のエネルギー・フラックスの合成和により求められる。

(4) 2 方向波の砕波後の波高は、砕波点から指数関数的に減少する。

(5) 2 方向波の合成波向は、各成分波の波高を大きさ、波向を方向とするベクトルを合成すると実験結果に良く一致する。

最後に、本研究の一部は自然災害特別研究費（研究代表：土屋義人京都大学防災研究所教授）によるものであることを付記して諸意を表す。

参 考 文 献

- 1) Wiegel, R. L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, p. 23, 1964.
- 2) Kishi, T.: The Possible Highest Gravity Waves in Shallow Water, Coastal Eng. in Japan, Vol. 2, pp. 9~16, 1965.
- 3) Penney, W. G. and A. Price: Finite Periodic Stationary Gravity Waves in a Perfect Liquid, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 224, 882, 1952.
- 4) 合田良実・柿崎秀作: 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 5, No. 10, pp. 1~57, 1966.
- 5) Hsu, J. R. C.: Short-Crested Water Waves, Thesis for Degree of Ph.D. at the Univ. of Western Australia, 1980.
- 6) Yamada, H. and T. Shiotani: On the Highest Water Waves of Permanent Type, Bull. Disaster Prevention Res. Inst. Kyoto Univ., Vol. 18, Part 2, No. 135, pp. 1~22, 1968.
- 7) 合田良実: 不規則波の砕波指標について, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 571~577, 1973.
- 8) 三井 宏・宮本佳明: 屈折と 2 次回折を考慮した大規模海岸構造物周辺の波高分布予測手法, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 105~109, 1982.