

放物型方程式による縦型傾斜式離岸堤周辺波浪場の解析

合田良実*・高橋真介**・高橋栄司***

1. まえがき

わが国では海岸侵食が進行しつつある箇所が少なくない。また、失われたなごさを取り戻し、人々の憩いの場を提供するために人工海浜を造ることが各地で行なわれている。こうした天然・人工の砂浜を波浪から守るために離岸堤その他が建設されるが、近年は海岸からの眺望を妨げないように没水型の人工リーフが試みられている。先に、合田・山田(1992)は人工リーフよりも消波効率が高く、水産協調型施設の特長を持つ新しい構造形式である縦型傾斜式離岸堤(図-1)を提案し、その水理特性について報告した(以下では前報と呼ぶ)。その際は、波高伝達率の概略の算定図表が得られたものの、波浪変形の詳細が不明確であった。また、不規則波に対する応答特性も未検討であった。今回、これらについての検討結果が得られたので、ここに報告する次第である。

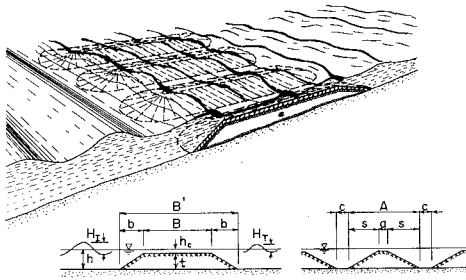


図-1 縦型傾斜式離岸堤の概略図

2. 検討の対象とする縦型傾斜式離岸堤

今、現地水深6m前後の地点に天端長 $B=50$ m程度の縦型傾斜式離岸堤が建設される状況を想定する。天端水深を $h_c=1.0$ mとし、模型縮尺を1/50と考えると、対象とする離岸堤は天端長が $B=100$ cm、堤高が $t=10$ cm、天端水深 $h_c=2.0$ cm、水深 $h=12$ cmとなる。これが前報で検討した離岸堤の基本形であり、今回もこれを対象とする。天端幅は10cmであり、横斜面勾配は1/2.5、前後

面の斜面勾配は1/2である。なお、離岸堤模型の形状については前報を参照していただきたい。

今回は、実験に使用する造波水路の幅が50cmと前回の1/1.2であったため、模型寸法は長さを前回の1/1.2に縮めて図-2のように模型を設置した。すなわち、実験を行なった離岸堤の天端長は83.3cm、堤高は8.3cm、水深は10cmである。ただし、前報との整合性からここでは長さをすべて1.2倍、周期は $\sqrt{1.2}=1.095$ 倍した数値で記述している。

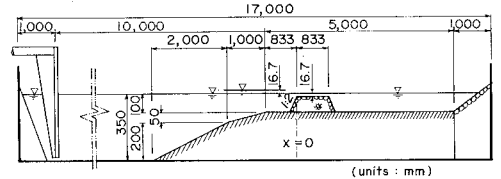


図-2 2次元実験水槽の概略図

今回の検討では、まず前報換算で天端水深 $h_c=2.0$ cmのケースについて波高を $H_I=4.2$ cmと固定したまま周期を $T=0.64\sim 1.39$ sと変化させて周期の影響を検討した。この結果の概要は合田・高橋(1993)で報告されている。次に、天端水深を $h_c=4.0$ cmと大きくし、周期が $T=0.7, 1.0$, および 1.4 sの3種類について波高をそれぞれ4通りに変化させたケースを取り上げた。これらの実験結果については、以下の数値計算結果と対比しながら説明する。なお、この周期範囲は模型縮尺を1/50とすれば、現地換算で5~10sに相当する。

3. 放物型方程式に基づく数値計算

(1) 基本式と計算条件

前報では理由は不明であるが、非定常緩勾配方程式に基づく数値計算で適切な結果を得ることができなかった。そこで今回は、放物型方程式に基づく解法のみならず平口・丸山(1986, 1987)の方法で計算を行なうこととした。この解法の基本式は次の通りである。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \left\{ i \left(k_x + \frac{k_y^2}{2k_x} \right) - \frac{1}{2k_x c c_g} \frac{\partial}{\partial x} (k_x c c_g) \right\} \phi + \frac{i}{2k_x c c_g} \frac{\partial}{\partial y} (c c_g \frac{\partial \phi}{\partial y}) - f_D \phi \dots \dots \dots (1)$$

* 正会員 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科
 ** (株)大林組 横浜支店
 *** 東急建設(株) 東京支店

ここに、 ϕ は速度ポテンシャル、 k_x, k_y は x, y 方向の波数、 c は波速、 c_0 は群速度、 i は虚数である。

この平口・丸山の解法は斜め入射波による屈折効果を表現できることが特長である。なお、数値解析のアルゴリズムは、電力中央研究所我孫子水理研究所のご好意によりご教授していただいた。

放物型方程式による計算では、定常状態における波高分布を直接に求めることができる。今回の計算では水路内に離岸堤1基が置かれている状況を対象とした。水路壁が完全反射なので、これは図-1のような配置のなから1基だけを切りだしたことに相当する。数値計算の格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 2.5 \text{ cm}$ とした。

(2) 有限振幅性を考慮した波速・波数の修正

実験状況を観察していると、離岸堤の天端上では水深が小さいにもかかわらず波峰の前進速度が大きく、特に波が砕けるときには横斜面の波峰よりも前方に突出する。これは波速が水深だけでなく波高の影響も受けているため、この結果、屈折による波の集中が減殺される。この有限振幅効果を取り入れるため、波速の修正式を試行錯誤によって次のように設定した。

$$c = \begin{cases} c_A \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{a}{h} \right)^2 \right]^{1/2} & : a < h \\ c_A \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{a}{h} \right) \right]^{1/2} & : a \geq h \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

上式の c_A は微小振幅波理論による波速、 a は波の振幅、 h は水深である。群速度 c_g には同一の増大率を乗じ、波数 k_x, k_y はこの波速増大率で除すことによって有限振幅効果の修正とした。

図-3は波速の修正効果を示す1例である。波速を微小振幅波の c_A として数値計算を進めると、等波高線が図(a)のように大きく変化し、天端後部の両側に波高の谷

が現われる。しかし、有限振幅効果を導入すると図(b)のように屈折による波の集中が緩和され、水理実験で観察される傾向と合致する。

(3) 砕波減衰項の取り扱い

式(1)中の f_D は砕波減衰を表す関数であり、平口・丸山(1986)は渡辺・丸山(1984)を参照してその関数形を次式のように設定した。

$$f_D = \begin{cases} 0 & : \text{砕波帯外} \\ \frac{a_D S_D}{2h} \left[\left(\frac{a}{\gamma h} \right) - 1 \right]^{1/2} & : \text{砕波帯内} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

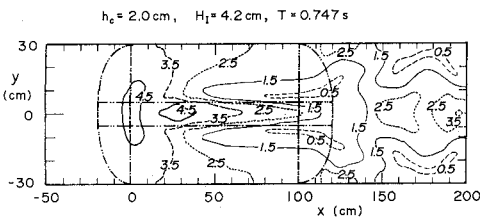
ここに、 a_D は砕波減衰係数、 S_D は海底勾配、 γ は砕波限界振幅と水深の比率である。砕波帯内外の判定は、波峰下の静水面の水粒子速度 u_{00} と波速 c との比に基づいて行なう。平口・丸山はこの比が0.35を超えた範囲を砕波帯内としたが、ここでは $u_{00}/c \geq 0.45$ を砕波帯内として取り扱う。

式(3)の砕波減衰項を用いた計算値を実験結果と比べると、砕波直後の波高減衰の度合いが弱い傾向がある。このため、Dallyほか(1985)のエネルギー減衰の考え方を参照し、次式のように修正した関数を採用した。

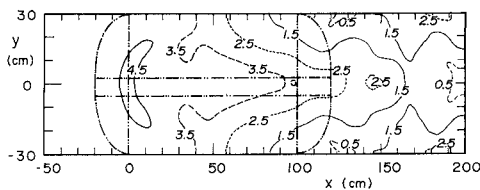
$$f_D = \begin{cases} 0 & : a < \gamma h \\ \frac{K}{2h} \left[\left(\frac{a}{\gamma h} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} & : a \geq \gamma h \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

なお、式(3)における海底勾配 S_D の項は、縦型傾斜式離岸堤のような急変地形では本来の意味を失っているため、砕波減衰係数 a_D とあわせて係数 K に一本化したものである。この新しい砕波減衰係数 K については、水理実験結果を比較的好く説明できる値として $K=0.125$ と定めた。この値は、Dallyほか(1985)が斜面および水平床上の砕波減衰に対して採択した $K=0.15$ の値とほぼ同等である。

さらに、砕波限界振幅と水深との比 γ については、水口ほか(1978)は0.35、渡辺・丸山(1984)は0.25を採択し、Dallyほか(1985)はHorikawa・Kuo(1966)のデータに基づいて0.175(波高比で0.35)を使用している。しかし、縦型傾斜式離岸堤の場合には周期や水深の影響がみられるので、合田(1973)の砕波指標式を導入して次のように設定した。



(a) Small Amplitude Wave Celerity



(b) Finite Amplitude Wave Celerity

図-3 離岸堤上およびその周辺の等波高線図

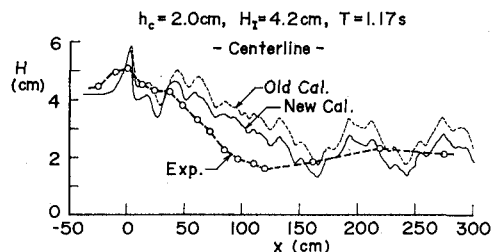


図-4 天端軸線上の波高分布に及ぼす砕波減衰項の影響

$$\gamma = 0.085 \frac{L_0}{h} \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15s^{4/3}) \right] \right\} \dots (5)$$

ここに L_0 は深海波長である。 s は本来は海底勾配であるが、縦型傾斜式離岸堤の場合には換算勾配の意味があり、今回は天端水深 $h_c = 2\text{ cm}$ に対して $s = 1/15$ 、 $h_c = 4\text{ cm}$ に対して $s = 1/30$ と設定した。この結果、前者に対しては $\gamma = 0.51 \sim 0.55$ 、後者に対して $\gamma = 0.40 \sim 0.45$ の値となった。

式(4)で導入した碎波減衰項の効果を式(3)によるものと比較した例が、天端軸線上の波高分布を示す図-4である。 γ が 0.55 と同一であっても New Cal. の式(4)の方が Old Cal. の式(3)よりも実験値に近い計算値が得られる。

(4) 不規則波に対する計算法

縦型傾斜式離岸堤による波の変形は天端上での碎波効果によるところが大きく、周期の影響はやや小さい。そこで不規則波に対してはスペクトル特性よりも波高分布に重点を置き、不規則波中の波高の出現確率を考慮した重ね合わせ計算を行なう。具体的には、波高のレーリー分布を仮定し、これを出現確率が等しい波高区間に分割した。各区間の波高代表値は次式で選定した。

$$H_m = 0.706(H_{1/3})_i [\ln(2N/(2m-1))]^{1/2} \dots (6)$$

ここに N は区間数で、今回は $N = 30$ とした。

4. 規則波に対する波高伝達率

天端水深 2 cm の実験では、縦型傾斜式離岸堤の堤頂部後端から 0.6 m、1.2 m、1.8 m、および 2.4 m の 4 測線で 6 cm 間隔で各 9 点の波高を測定した。また、天端水深 4 cm の実験では、堤頂部後端から 0.4 m、1.4 m、および 2.4 m の 3 測線で 8 cm 間隔で各 7 点の波高を測定した。数値はいずれも幅 60 cm の水路換算値である。離岸堤の伝達波高としては、前報と同じようにこれらの波高の 2 乗平均平方根値を求めて代表値とした。これはエネルギー的な平均値を用いたものである。入射波高は、離岸堤設置前に行なった波の検定結果に基づいて算定した。

数値計算における伝達波高としては、離岸堤の堤頂部後端から 0.5~1.5 m の範囲における全格子点の波高の 2 乗平均平方根値を採用した。これは数値計算による波高値は場所ごとの変動が大きいため、この場所的変動の影響を避けるためである。また、平均操作を行なう範囲が実験の範囲よりもやや狭いが、このことは計算結果にほとんど影響していない。

波高伝達率 $K_T = H_T/H_I$ に及ぼす周期の影響を示したのが図-5である。周期の違いは相対天端長 B/L の形で反映されている。天端水深は $h_c = 2\text{ cm}$ で、入射波高はすべて $H_I = 4.2\text{ cm}$ である。計算値は実験値よりもやや小さめであるが、相対天端長による波高伝達率の変化の状況は適切に表示されている。図には前報で求めた波高伝達率の実験曲線が併示されている。今回の実験値は前報の値よりも低いところに位置している。この理由として、堤体が前回よりも小さいにもかかわらず、前回と同じ径 20~30 mm の砕石で作ったために相対的に表面が粗くなったこと、前回は中心に 10~20 cm 級の割り石を入れていたために堤体全体の空隙率が小さかったことなどが考えられるが、明確ではない。

次に、天端水深を $h_c = 4\text{ cm}$ として波高を変えたときの波高伝達率を示したのが図-6である。図の横軸は相対天端水深 h_c/H_I である。相対天端水深が 1.0 以上でも波高が減衰しているのは、縦型傾斜式離岸堤による屈折効果によって天端上に波が集中し、碎波が起りやすくなっているためである。実験値と計算値を比べると、周期が 1.0 s と 1.4 s の場合はほぼ一致している。周期 0.7 s では波高の小さい(相対天端水深が大きい)ときでもかなりの減衰が生じており、このために計算値よりもかなり小さな波高伝達率となっている。これは、碎波による減衰よりも離岸堤天端および横斜面での摩擦損失による減衰が卓越したためではないかと思われる。

以上より、水理実験の結果と若干の差異がみられ、また K や γ などの係数値の設定に恣意性が残るものの、放物型方程式による数値計算によって縦型傾斜式離岸堤による波浪変形がかなり適切に予測できるといえる。

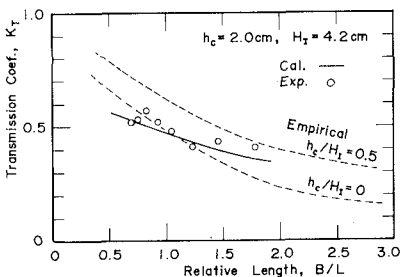


図-5 波高伝達率と相対天端長の関係 (天端水深 2.0 cm)

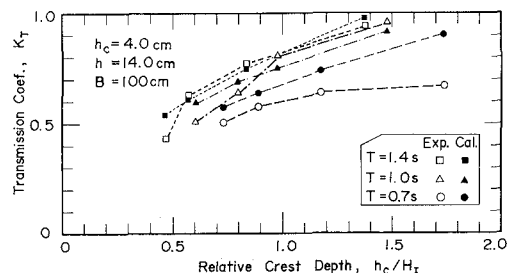


図-6 波高伝達率と相対天端水深の関係 (天端水深 4.0 cm)

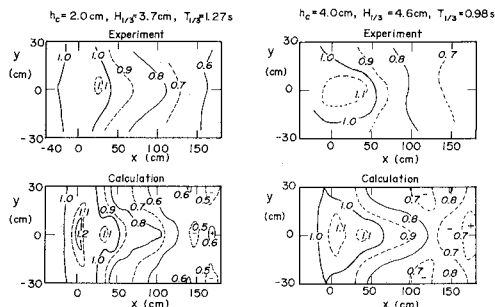


図-7 実験および計算による不規則波の等高線図

表-1 不規則波に対する波高伝達率

Case	h_c (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	K_T 実験値	K_T 計算値
A	4.0	2.58	0.96	0.729	0.927
B	4.0	4.57	0.98	0.666	0.711
C	2.0	3.64	0.83	0.482	0.437
D	2.0	3.32	1.09	0.561	0.533
E	2.0	3.72	1.27	0.557	0.539

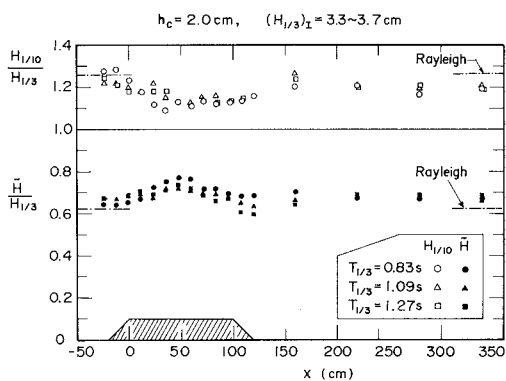


図-8 天端軸線上の $H_{1/10}$, $H_{1/3}$, \bar{H} 間の波高比の変化

5. 不規則波の変形特性

縦型傾斜式離岸堤の周辺の波高分布の例を図-7に示す。図の左側は天端水深 $h_c=2.0$ cm, 有義波高 $H_{1/3}=3.72$ cm, 右側は同じく $h_c=4.0$ cm, $H_{1/3}=4.57$ cm の場合で、いずれも上が実験、下が計算による等高線図である。実験は JONSWAP 型スペクトル ($\gamma=3.3$) を入力とした。実験値と計算値は細部では食い違いが見られるものの、全体としてはほぼ合っているといえる。また、有義波高で定義した波高伝達率と比較すると、表-1のように、放物型方程式による数値計算の適用性を例示している。なお Case A で実験値が小さいのは、図-6 の周期 0.7 s の場合と同じように砕波減衰よりも摩擦損失が卓越したためではないかと考えられる。

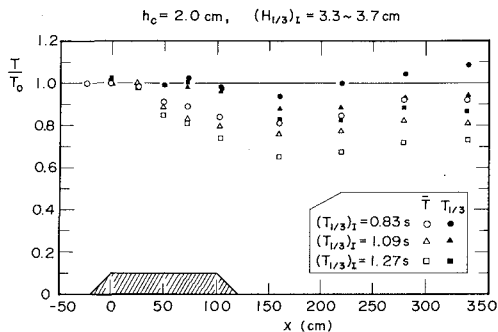


図-9 離岸堤上および背後での有義波周期と平均周期の変化

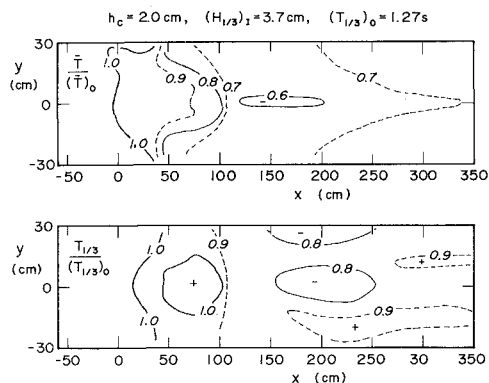


図-10 離岸堤上およびその周辺での周期の変化

不規則波では波高の大きい波ほど砕波減衰の影響を強く受けるので、波高分布が変化する。図-8 は Case C, D, E について、離岸堤中心線上における波高比 $H_{1/10}/H_{1/3}$ および $\bar{H}/H_{1/3}$ の変化の実験結果を示したものである。離岸堤の上でいずれの波高比も 1.0 に近付き、波高分布の幅が狭まっている。重ね合わせ方式による数値計算でもこうした傾向がみられたが、局所的な変動が大きいく、実験ほど明確ではなかった。

不規則波では周期もまた変化する。図-9 は、平均周期 \bar{T} と有義波周期 $T_{1/3}$ について離岸堤に直交する測線ごとの平均値を求め、これらの沖波の周期に対する比を示している。また、図-10 は Case E について周期比の分布を図示したものである。これらの図から、離岸堤の背後の中心線上で周期が短くなり、特に平均周期の減衰が著しい。これは離岸堤によって波の分裂が生じるためで、規則波の場合にも観察されている。また、人工リーフの実験でも既に報告されている現象である。有義波周期と平均周期の減衰率が異なることは、波高・周期の結合分布もまた変化することを示唆する。なお、図-9 においては、離岸堤から離れるにつれて周期比が 1 に向けて回復する傾向がみられる。ただし、この傾向は $T_{1/3}=0.83$ s の

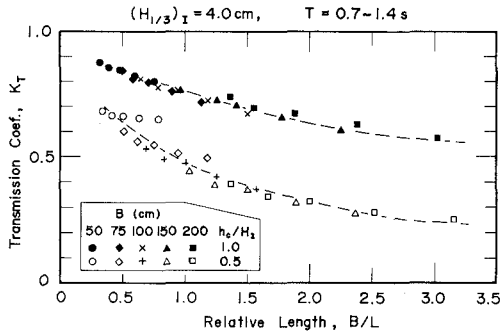


図-11 波高伝達率に及ぼす相対天端長 B/L の影響

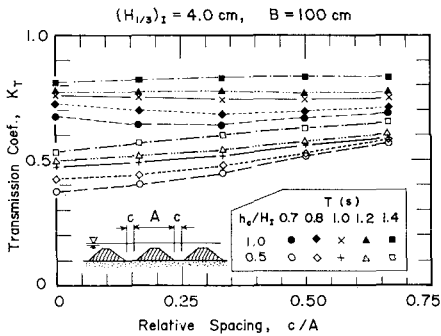


図-12 波高伝達率に及ぼす相対基底間距離 c/A の影響

波で顕著で、 $T_{1/3}=1.27$ sの波では弱い。水路実験に特有な、水面異質層による短周期波 ($f > 2$ Hz)の減衰(合田, 1968)によると考えられるので、実際にはこうした周期比の回復は起こらないであろう。

6. 天端長および基底間距離の影響

前報では天端長 B を 50~200 cm に変えて実験を行なったが、今回の実験は $B=100$ cm に限定している。そこで天端長の影響については、不規則波に対する数値計算で検討した。図-11 はその結果であり、天端長を 50 cm から 200 cm まで 5 段階に変え、それぞれ周期を 5 通りに与えた。入射波高 $H_{1/3}=4.0$ cm に対して、天端水深が 2 cm と 4 cm の 2 ケースであり、 $h_c/H_{1/3}=0.5$ (白印) と 1.0 (黒印) である。この計算結果から、波高伝達率は相対天端長 B/L と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ でほぼ定まることが分かる。ただし、天端長が $B=50$ cm で $h_c/H_{1/3}=0.5$ のデータは全体の傾向からやや外れている。

次に、縦型傾斜式離岸堤を少し間隔を広げて並べた場合(図-1で基底間距離 c を広げる)について計算した結果が図-12 である。天端長は $B=100$ cm であり、他は図-11 と同じ条件で、基底間距離を 10 cm ずつ 40 cm まで変化させた。計算結果では基底間距離を増しても波高伝達率の増加は緩やかであり、もともと伝達率の大きい

相対天端高 1.0 の場合には基底間距離を増したときに波高伝達率がやや低下するケースもみられる。したがって実際の計画では、ある程度の間隔をおいて縦型傾斜式離岸堤を設置することによって建設費を節約できよう。

7. むすび

前報ではその特性が十分に把握できていなかった縦型傾斜式離岸堤の波浪変形特性が、今回の検討によってかなり明らかにすることができた。特に、放物型方程式による数値計算において波の有限振幅効果を経験的に取り込み、波速・波数を振幅水深比の関数として修正することによって、離岸堤の天端上における波高分布を実際のものに近付けることができた。また、砕波減衰係数についても、一樣斜面や水平床における値を用いることで実験結果を説明することができた。

しかしながら、今回の実験は波高が数 cm 級の小さな波による砕波減衰を対象にしており、表面張力に起因する縮尺効果の影響を受けている懸念がある。縦型傾斜式離岸堤を実際に計画する場合には、実験の有義波高が 10 cm 以上の大縮尺模型で検討することが必要である。その場合には砕波減衰係数についても再吟味し、実験値に適合する係数値を採択すべきであろう。

前報にも述べたように、縦型傾斜式離岸堤は人工リーフに比べて没水型でありながら波高伝達率を低めることが可能であり、また建設費を低減できる可能性がある。今後、縦型傾斜式離岸堤が本格的に検討されることを期待する次第である。

参考文献

合田良実 (1968): 造波水路における波浪実験の二、三の問題点について、第 15 回海岸工学講演集, pp. 50-57.
 合田良実・山田晶子 (1992): 屈折効果を利用した縦型傾斜式離岸堤の水利特性, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 566-570.
 合田良実・高橋真介 (1993): 縦型傾斜式離岸堤周辺の波高分布, 土木学会第 48 回年次学術講演概要集, 第 II 部, pp. 866-867.
 平口博丸・丸山康樹 (1986): 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第 33 回海岸工学講演論文集, pp. 114-118.
 平口博丸・丸山康樹 (1987): 斜め入射波に対する波浪変形計算法—新しい放物型方程式の提案—, 電力中央研究所報告, U86045, 23 p.
 水口 優・辻岡和男・堀川清司 (1978): 砕波後の波高変化についての一考察, 第 25 回海岸工学講演論文集, pp. 155-159.
 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・砕波減衰を含む波浪場の数値計算法, 第 31 回海岸工学講演論文集, pp. 103-107.
 Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, J. Geophys. Res., Vol. 90, No. C6, pp. 11, 917-11, 927.
 Horikawa, K. and C. T. Kuo (1966): A study of wave transformation inside surf zone, Proc. 10th Int. Conf. Coastal Eng., pp. 217-233.