

複合断面地形における規則波の碎波減衰過程に関する研究

The study of energy dissipation of regular wave on the arbitrary profile

権 赫珉*, 合田良実**

Hyuck Min Kweon, Yoshimi Goda

The procedure of wave energy dissipation after breaking have been investigated with trains of the regular wave. To obtain the data for wave breaking and its deformation, experiments have been conducted by utilizing a horizontal step adjoining to a combined slope of 1/20 and 1/10.

After breaking, the wave height decreases by dissipation but attains a stable value at some distance from the breaking point. Experimental results show that the stable wave is affected considerably by the wave period. The study gives the general form of stable wave height.

A new one dimensional wave deformation model is proposed, being coupled with an approximated shoaling coefficient before wave breaking and the new energy dissipation term after breaking. It was compared with the experimental data. It predicts well the wave height deformation before and after wave breaking even on the abrupt change of the depth.

keywords:(wave energy dissipation, wave breaking, stable wave height)

1. はじめに

一様斜面での碎波現象は多くの研究によってかなり明らかになっている。しかし、現実の海底の地形は沿岸砂州が存在する複合断面地形の場合が多く、そのような地形での碎波現象は十分に解明されていない。本研究では、複合断面での碎波減衰過程を検討する基礎的地形として斜面に接続する水平床をとりあげ検討する。この地形をここでは、水平ステップと呼ぶ。水平ステップ上での既往研究として、堀川・郭(1966)、水口(1978)などがあげられる。堀川・郭は碎波始点から内部エネルギーの減衰が指数関数で表現できるとの仮定の下で、減衰の速度の係数を経験的に求めた。しかし、堀川・郭の解析では碎波減衰後に波高が一定値に安定するという過程までは検討していない。この碎波減衰終了後の波高をここでは安定波高と称する。

水口は、碎波後に到達する安定波高と水深との比率を考慮し、渦動粘性モデルを発表した。しかし、そのモデルではこの安定波高水深比を約 0.5 と見積ったにとどまり、安定波高に到達する過程や、それに対する周期の影響などは吟味していない。

本研究は、斜面および水平ステップ上で波浪が砕けたあと進行を続けて安定した波に再生される過程を解明してこれを一般化し、エネルギー減衰項の適切な表現式を得ることを目的とする。

2. 実験方法

碎波減衰の基礎データを得るために全長17m、幅0.5m、深さ0.55mの二次元造波水槽で実験を行った。また、水平床上で碎波する限界の波高を見出すため、水深 10、12 cm で 5種類の周期について入射波高を微細に変化させた実験を行った。長さ 1mの1/10斜面に続けて、長さ 3mの 1/20勾配斜面を設け、そのあとに長さ 5mの水平床を設置した。水平床の高さは水路床上 25 cmであり、水平床上の水深は 6 cm, 10 cm

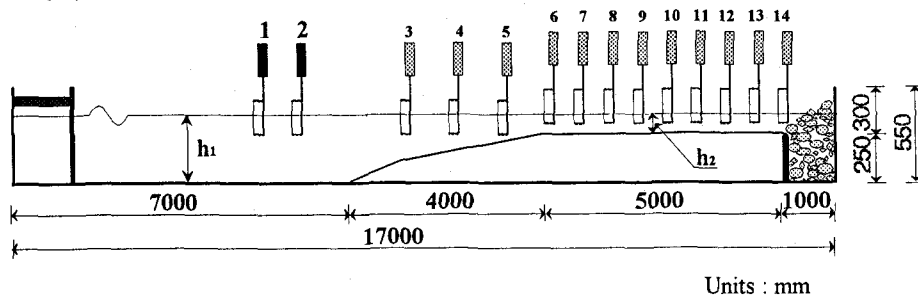


Figure 1. Sketch of experimental setup

* 学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究科

** 正会員 横浜国立大学教授 工学部 建設学科

で実験を行った。一つの波浪に対して、波形は14地点で測定した。このため順番に波高計を移動し、6地点の同時測定を3回ずつ行った。波高計#1は、造波板から3m離れている所に設置し、#2をその位置を調整して、合田・鈴木ら(1976)によって提案された入反射波分離を試みた。斜面1/20が始まる所から波高計#3、#4、#5、さらにステップと斜面の境界に波高計#6を1m間隔で設置した。ステップの上では#7から#14まで8個の波高計を60cm間隔で設置した。2種類の水深において、5通りの周期に対して波高を4通り変化させながら実験を行った。波高は一樣水深部 2地点、斜面上 3地点および水平床上の 9地点で測定した。

データのサンプリング時間は0.05 secとして一回に1024個のデータを取得した。そして、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform)を利用したバンドパスフィルターにより周波数0.3Hz から3.6Hzまでの範囲の波形を抽出し、これについて解析を行った。波高はゼロダウクロス法で決定した。

一樣水深での非砕波最大限界波高の場合は、目測によって砕け始まる波浪の波高レベルを判定し、その前後に0.2cm間隔で5段階に波高を変えて実験を行った。解析された波高の値は水平床上の底面摩擦のために距離とともに減少する。そこで波高を半対数紙上に距離に対してプロットし、砕波以前と判断されるデータに対して直線の当てはめを行った。そして水平ステップの始点における波高を読み取って、その最大のものを非砕波最大限界波高として推定した。この実験は水深10cmと12cmについて行った。

3. 安定波高の推定

水平床上の砕波減衰過程の波高データに対しては $H=H_0 \exp(-\epsilon x/d)+H_s$ の関係を仮定し、逐次最小2乗法によって安定波高 H_s を求めた。この解析は堀川・郭の実験値に対しても適用した(Fig. 2)。なお、岩垣(1965)の層流境界理論に基づいて底面摩擦影響を補正した。ただし、摩擦影響係数は岩垣ほかに従い理論値の40%増の値を用いた。この図から、水深が同じであっても周期の長い波ほど安定波高が大きいことが明らかである。

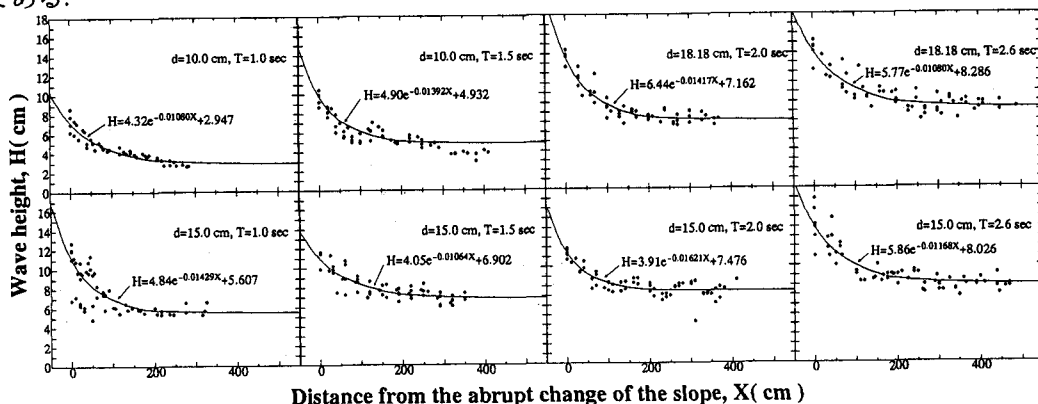


Figure 2. Estimation of a stable wave height

Fig. 3 は、今度および堀川・郭の実験で得られた水平ステップ地形での安定波高と砕波限界波高の水深に

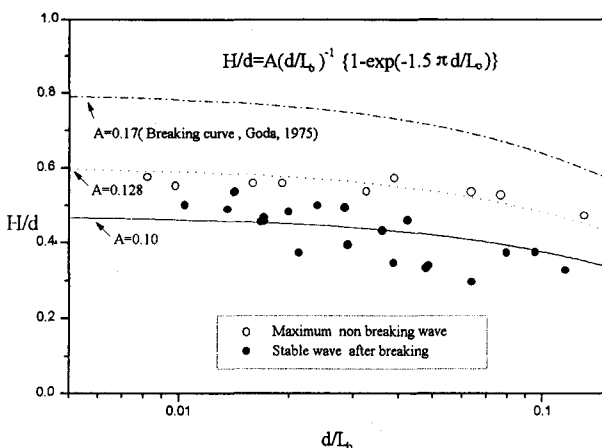


Figure 3. Height to depth ratios of maximum nonbreaking waves and stable waves after breaking

対する比を示したもので、合田(1975)の砕波指標(勾配 0)と比較してある。この図から、水平ステップでの限界波高は一樣斜面のものよりも小さいことがわかる。これは 1/20勾配斜面から水平床上に地形が変化することの影響ではないかと考えられる。そして、水平床上の安定波高は周期の影響を受け、水深波長比(d/L_0)の関数であることがわかる。安定波と一樣水深での砕波限界波高は合田(1975)の砕波指標を用いて係数 A をそれぞれ 0.10および0.128に変えることによって推定できた。下の式(1)は安定波高に関する一般式であり、式(2)は一樣水深での非砕波最大限界波高の一般式である。

$$H/d = 0.10(d/L_0)^{-1/2} \{1 - \exp(-1.5\pi d/L_0)\} \quad (1)$$

$$H/d = 0.128(d/L_0)^{-1/2} \{1 - \exp(-1.5\pi d/L_0)\} \quad (2)$$

4. 一次元波浪変形モデル

経験的に得られた安定波高水深比および水平床での碎波限界波高水深比をパラメータとするエネルギー減衰項を定式化し、これをエネルギー平衡方程式に代入して波高減衰を計算し、実験結果と比較した。

4-1. 基礎方程式および差分化

一次元波浪変形モデルは、基礎方程式として、エネルギー平衡式を用いて差分法で数値計算するものである。

$$\frac{\partial(EG)}{\partial x} = 0 \quad : \text{碎波前} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(EG_s)}{\partial x} = \frac{-K}{h} [EC_g - (EC_g)_s] \quad : \text{碎波後} \quad (4)$$

ここに、添字sは碎波後の安定波を示す。式(4)を波高に対するものに書き直すと

$$\frac{\partial[H^2 C_g]}{\partial x} = \frac{-K}{d} C_g [H^2 - \Gamma^2 d^2] \quad (5)$$

ここで、

$$H_s = \Gamma d, \quad \Gamma = 0.10(d/L_0)^{-1} \{1 - \exp(-1.5\pi d/L_0)\}$$

ここで、 d は水深、 H_s は安定波高、 K は減衰速度係数、そして Γ は安定波の波高水深比である。

式(3)、(5)を前進差分を用いて書き直すと次のようになり、これを用いて計算を進める。

$$(EC_g)_{i+1} = (EC_g)_i \quad (6)$$

$$\frac{(H_{i+1})^2 (C_g)_{i+1} - (H_i)^2 (C_g)_i}{\Delta x} = -\frac{K}{(d)_i} (C_g)_i [(H_i)^2 - (\Gamma d_i)^2] \quad (7)$$

4-2. 非線形浅水係数の近似式

波浪の浅水変形は、水深が浅くなるにつれて非線形性が強まる傾向がある。首藤(1974)はクノイド波の浅水変形を検討し比較的簡単な式で浅水効果を表現している。本研究では非線形性を考慮した首藤のモデルに対する浅水近似式を求めることにする。一方、岩垣ら(1981)はストークス波と Chappellear (1962)のクノイド波理論に基づくハイパボリック波に対する浅水変形近似式を提案した。本研究では、岩垣らの近似式のパラメータである水深波長比と波高波長比のべき指数を変えた場合について、近似精度を検討し、首藤による理論値との誤差が最小となるべき指数を求めた。適用した近似式は、岩垣らによって提案された次式である。

$$K_s = K_{so} + 0.0015(h/L_0)^\alpha (H_0'/L_0)^\beta \quad (8)$$

ここで、 K_{so} は線形理論による浅水係数である。

水深波長比は、 $0.005 \leq h/L_0 \leq 0.500$ 範囲とし、波高波長比は $0.002 \leq H_0'/L_0 \leq 0.080$ の範囲で首藤の浅水係数との間の誤差を検討した。その比較の条件と結果は次の通りである。

Table 1. Comparison of error deviate from the Shuto's nonlinear shoaling coefficient

tanθ=1/10	Iwagaki et al.			New		
	α=-2.8	β=1.2		α=-2.87	β=1.27	
Ho/Lo	Maximum	Average	Minimum	Maximum	Average	Minimum
0.002	0.31998	0.03203	0.00001	0.19891	0.01514	0.00000
0.004	0.19134	0.02312	0.00001	0.11106	0.01079	0.00001
0.010	0.15431	0.02022	0.00004	0.09984	0.01054	0.00003
0.020	0.05871	0.01072	0.00010	0.02748	0.00431	0.00008
0.040	-0.03211	0.00103	0.00022	-0.04402	-0.00288	0.00018
0.080	-0.05877	-0.00285	0.00050	-0.06392	-0.00449	0.00044

* 負号は首藤のモデルより小さいことを示している。

岩垣らが提案した浅水近似式は $0.040 \leq H_0/L_0 \leq 0.080$ の範囲でややよい結果を見せている。しかし、他の所ではNewの誤差が小さいことがわかる。そして、首藤のモデルと比較したFig. 4を見ると $H_0/L_0 = 0.08$ の場合を除いてはよく当てることがわかる。従って、本研究では式(5)に $\alpha = -2.87$, $\beta = 1.27$ を導入した新たな式を浅水係数の算定式として用いることにした。

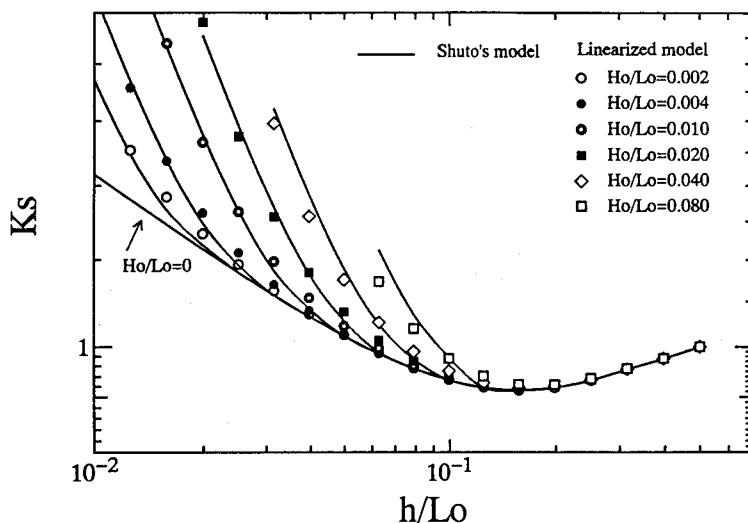


Figure. 4 Comparison of empirical coefficient with Shuto's model.

4-3. 新たな一次元波浪変形モデルの考え方および手順

波浪の浅水変形・碎波モデルは碎波前と碎波後に大きく分けられる。碎波帯に到達する波浪は非線形性が強いので、有限振幅波を用いて計算するのが一般的であろう。しかし、モデルに要求される問題の中で精度と効率性は、重要な要素である。

本モデルでは非線形波を用いた場合生じる効率性の低下あるいは線形理論を用いた場合の精度の低下を相補した新たな考えを提案する。左のFig. 5は碎波前後の連続的な波浪の変形過程を考えた図である。

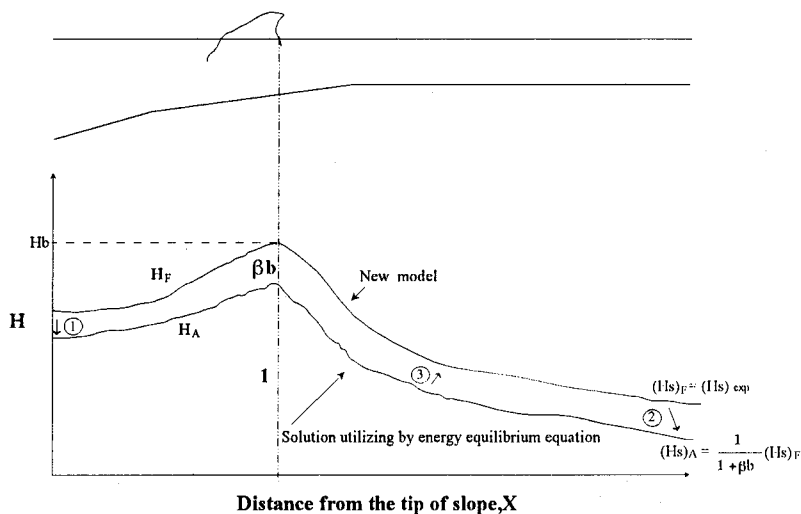


Figure 5. Conceptual sketch of treatment of wave heights in new model

まず、実験から得た入射波は既に非線形波浪になっているため、実験で得られた波高 H_F が式(8)の浅水変形を受けていると見るし、繰り返し収束計算によって微小振幅波としての相当深海波高 H_0' を推定する(①)。エネルギー平衡方程式による計算は微小振幅波としての波高(H_A)を用いて行う。その結果は非線形性を考慮した式(8)を用いて非線形波高に換算する(H_F)。碎波地点は、新たに計算された非線形波高を碎波指標と比較して判断する。碎波地点が決められればその地点での非線形波高と線形波高の比率($1 + \beta_b$)を計算しておいて、碎波後の全過程に同じ比率で計算していく(③)。特に、碎波してからの碎波減衰過程には、まず実験で得た安定波高(H_S) $_F$ を線形波高(H_S) $_A$ に変更させて計算して行く(②)。つまり、碎波地点の有限振幅波と微小振幅波の比率($1 + \beta_b$)を計算して、碎波後の全過程でも同じ比率で計算するものである。さらに、この計算過程は効率的にも非線形波を用いたより、早い方法である。その具体的な計算の手順はFig. 6で示している。

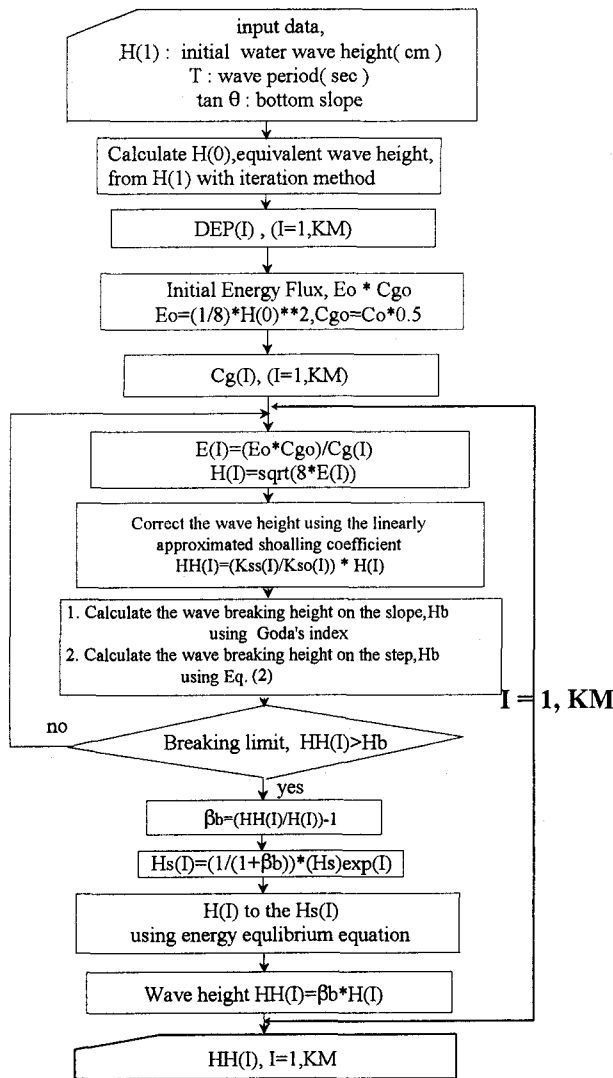


Figure 6. Flow chart of one-dimensional wave deformation model

6. 主要な結論

水平ステップでの限界波高は一樣斜面のものよりも小さいことがわかる。これは 1/20 勾配斜面から水平床上に地形が変化することの影響ではないかと考えられる。そして、水平床上の安定波高は周期の影響を受け、水深波長比(d/L_0)の関数であることがわかる。安定波高と一樣水深での碎波限界波高は合田(1975)の碎波指標を用いて係数 A をそれぞれ 0.10 および 0.128 に変えることによって推定できた。

さらに、水平床での碎波減衰過程の波高変化は、新たに定式化したエネルギー減衰項を用いて適切に推定できることが確められた。

碎波の有無は斜面上では合田の指標、水平ステップ上では式(2)を用いて判断することにする。しかし、一樣水深部に到達する前に碎けなかった場合の波浪が水平ステップ上の最大限界波高より大きい時には、到達した波高を碎波波高として推定する。これは、Fig. 3に示したように一樣水深での最大限界波高は斜面のものより小さいため、その間の波浪は不連続的な状態、つまり波高が1個所で急減するという、物理的にはあり得ないことが生じるのを避けるためである。

5. 実験結果と一次元モデルの比較

Fig. 7は実験値と一次元モデルの比較を示した図である。ステップの始まる地点 400cmからは、総てのデータが摩擦影響を補正したのに対し、400cmの前は補正していない。計算の場合、式(5)の速度減衰係数 K は0.15を用いて行った。全体的には両方がよくあてている。特に、碎波地点の予測がよい場合には碎波して減衰する過程が精度高く再現されている。(Run group 1, Case 4, 7)。しかし、長い周期の波浪がステップの上で碎け始まる場合は今のモデルではまだ説明出来ていない(Run group 2, Case 13, 17)。また碎波後の減衰速度は長い周期を持つ波浪が比較的遅いことが分かる(Run group 1, Case 20)。

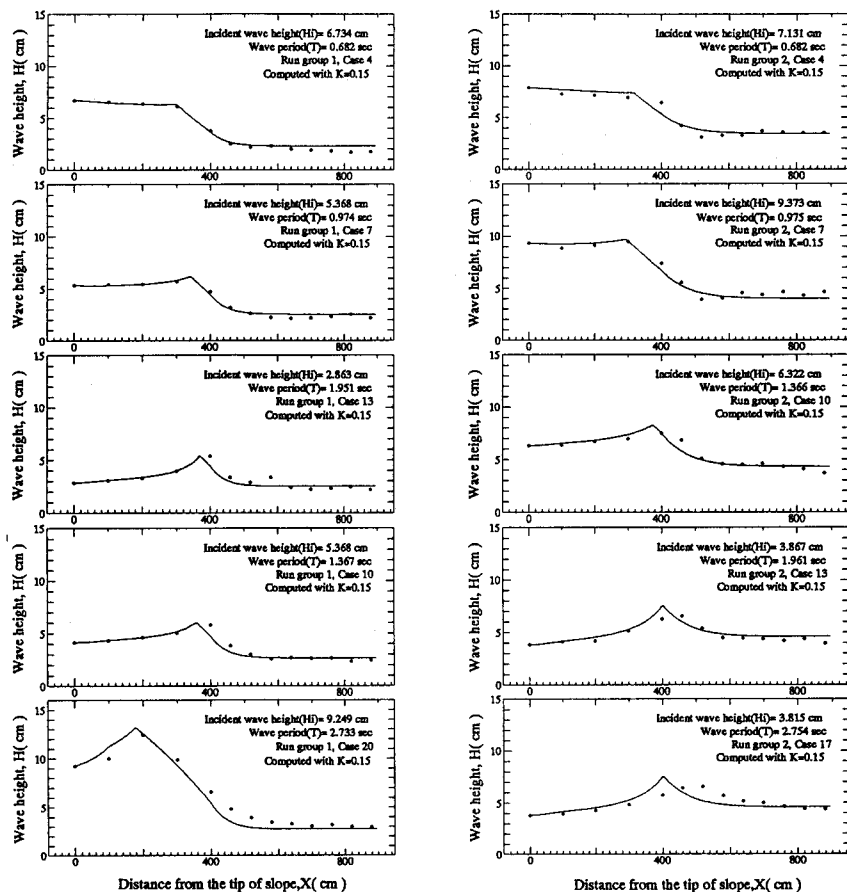


Figure 7. Comparison of 1-D wave deformation model with experimental data

参考文献

- 岩垣雄一・土屋義人・陳 活雄(1965): 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(3), 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 41-49.
- 岩垣雄一・塩田啓介・土屋宏行(1981): 有限振幅波の浅水変形と屈折係数, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 99-103
- 合田良実(1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究報告, 第14巻第3号, pp. 59-106
- 首藤伸夫(1974): 非線形長波の変形, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 郭 金棟(1965) 碎波後の波の変形に関する研究, 東京大学修士論文
- 水口 優・辻岡和男・堀川清司(1978): 碎波後の波高変化についての一考察, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 155-159.
- Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, J. of Geophysical research, Vol. 90, No. C6, pp. 11,917-11,927.