

工学的応用のための砕波統計量データの再整理

Reanalysis of Breaking Wave Statistics for Engineering Applications

合田良実¹

Yoshimi GODA

A review is made on the statistical features of breaking waves in the nearshore waters. The bed slope effect in the breaker index formula by Goda(1973) is reduced in a newly revised formula. The breaker index of regular waves should be treated as a statistical variable with the coefficient of variation ranging from 5% to 14%. The significant wave height rarely exceeds 0.6 times the local water depth. The wave nonlinearity as expressed in the form of skewness and the ratios of one-third and one-tenth highest wave height to the energy-based significant wave height increases toward the middle of surf zone, but it is destroyed by wave breaking process and disappears near the shoreline. Changes of characteristic wave heights across the surf zone are also exhibited.

1. ま え が き

浅水域で波が砕ける現象は, 流体力学的にも未解明の問題が多く, 乱れや渦など多くの研究が行われている。また, 工学的にも構造物への波の作用や海浜流の励起, 漂砂問題など, 非常に大きな影響を及ぼす。特に近年は数値計算モデルの発達に伴い, 砕波の取り込みについていろいろ工夫がなされている。

しかしながら, 既往の文献に記載されている砕波指標やエネルギー減衰過程を吟味せず, そのまま数値モデルに組み込む事例が海外・国内とも少なくない。そこで, 近年の諸文献・データを渉猟し, 工学的応用の立場から砕波統計量に関する知見を整理し, 若干のデータ解析を行った。本論文を今後の海岸工学発展の基礎資料として活用していただければ, 何よりも幸いである。

2. 砕波状態の定義と規則波の砕波指標

砕波の始まりを流体力学的に定義すると, ①波峰の水粒子の水平軌道速度が波速を超える, ②波峰の水粒子の上向き鉛直軌道加速度が重力加速度を超える, ③全水圧の鉛直勾配がゼロとなる, の三通りが考えられる。第1の定義は水平床におけるパーマメント波形の砕波限界の波の理論計算に用いられており, Yamada・Shiotani (1968) による周期波と Yamada ほか (1968) の孤立波の理論がもっとも計算精度が高い。この結果については合田 (1970) が紹介しているので, ここでは割愛する。第2の定義は2次オーダーの有限振幅重複波に対して岸 (1955) が用いており, 岩田 (1984) が紹介している。

第3の定義は灘岡ほか (1996) によるもので, 平山・原 (2002) と平山・平石 (2004) はブシネスク方程式に

よる時間領域計算において, 方程式の弱非線形性を考慮して波峰における圧力勾配ゼロの条件を緩和して適用し, 砕波現象の再現に成功している。

一般に, 砕波指標は砕波点における波高 H_b と水深 h_b の比を指すが, 換算沖波波高と砕波高や砕波水深との関係も含めていうことがある。ただし, 本論文では砕波指標を砕波高と砕波水深の比に限定して用いる。

砕波指標は, 理論計算では相対水深 h_b/L_0 の関数として表される (ここに L_0 は深海波長)。しかし, 実際の砕波では水底勾配 s が急になるほど砕波指標の値が増大するので, 実験データを参照する必要がある。著者 (1970) は先に砕波指標の実験曲線を取りまとめ, 後に実験曲線に適合するような関数式を次のように示した (合田, 1973)。

$$\frac{H_b}{h_b} = \frac{0.17}{h_b/L_0} \left[1 - \exp \left[-1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 15s^{4/3}) \right] \right] \quad (1)$$

しかし Rattanapitikon・Shibayama (2000) は, 式 (1) は勾配が急なときに砕波高を大きめに推定するとして, 修正式を提案している。そこで, 当初の指標曲線で検討したデータおよび最近の Lara ほか (2006) のデータで見直した結果として, ここに次の修正式を提案する。

$$\frac{H_b}{h_b} = \frac{0.17}{h_b/L_0} \left[1 - \exp \left[-1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 11s^{4/3}) \right] \right] \quad (2)$$

この修正によって, 水底勾配 $s=1/10$ では最大 11% の低減となるが, $s=1/50$ では 2% の低減にとどまる。

各種の実験データに対する適合度を図-1 に示す。勾配 $s=1/10, 1/30$ に対する結果は紙数の関係で割愛する (合田, 2007 を参照されたい)。図中の上下の破線・点線は視察によって当てはめた限界曲線である。各データの砕波指標の値 γ_{meas} と式 (2) による予測値 γ_{est} の比の 1 に対する残差である $E=1-\gamma_{\text{meas}}/\gamma_{\text{est}}$ を計算し, その平均値 (偏り) と標準偏差 (砕波指標の変動係数) を

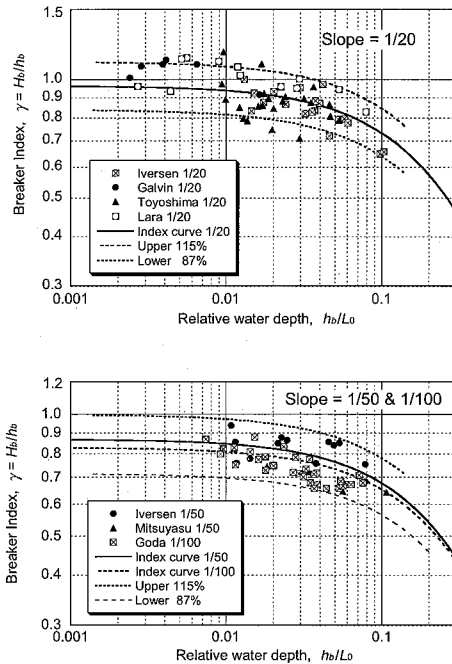


図-1 規則波に対する碎波指標式(2)と実験値の比較

表-1 碎波指標式(2)の偏りと変動係数

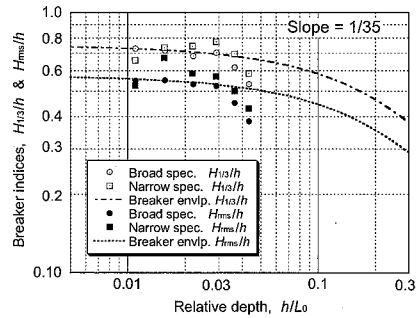
水底勾配	データ数	偏り	変動係数
1/10	29	-0.5%	14.0%
1/20	47	+3.9%	11.3%
1/30	63	+2.2%	9.0%
1/50	17	-2.0%	8.6%
1/100	32	+6.2%	5.5%

算出した結果を表-1に示す。この表にあるように、式(2)は推定値の偏りが $-2\% \sim 6\%$ の範囲に入っており、平均的な適合度が高い。

変動係数で表されるデータのばらつきは、実験誤差あるいは碎波指標式の適用誤差ではなく、碎波現象が確率変量であることを示している。規則波の碎波統計量が確率的に変動することはSmith・Kraus (1991)も指摘しており、碎波に係わる現象では留意すべき事項である。

3. 不規則波に対する碎波指標

不規則な波列中の個々波の碎波高を測定して解析したのは木村・瀬山 (1986)が最初である。4種類の勾配斜面上でそれぞれ約1000波の碎波を識別して碎波高を計測した。碎波指標のばらつきは、提示されたグラフで判断すると $18\% \sim 23\%$ と大きく、このため木村・瀬山は個々の波の峰と谷との中分面から水底までを水深と定義し直すことで、碎波指標の変動係数を $8\% \sim 11\%$ に縮めた。なお、通常の水深を用いた碎波指標の実験データの中央

図-2 水底勾配 $s=1/35$ における $H_{1/3}$ と H_{rms} の碎波指標

曲線は、式(2)による値の $85\% \sim 95\%$ に相当する。

Kriebel (2000)もまた勾配 $1/50$ における不規則波列中の個々波の碎波高を報告している。碎波指標の変動係数は約 12% 、式(1)の碎波指標式に対しては平均として 84% の値であった。さらにBlack・Rosenberg (1992)は、南オーストラリアのアボロ湾の水深 $1.0 \sim 1.5\text{ m}$ の自然海浜で個別碎波の判定・計測を行っており、測定された碎波指標の中央値は式(2)のほぼ 87% に相当した。

こうした個々波の碎波高が変動する特性は、著者が1975年に発表した、一様斜面における不規則波の碎波変形モデルにある程度組み込まれている。

個々波ではなく、有義波高などの代表波高に対する碎波指標として、Ting (2001, 2002)の実験データに基づく碎波指標を図-2に示す。有義波高 $H_{1/3}$ に対しては式(2)の 85% 値を1点鎖線、2乗平均平方根波高 H_{rms} に対しては同じく 65% 値を細破線で示している。いずれも実験データのほぼ上限となっている。

一方、Kamphuis (1991)は有義波の碎波点に関して、「初期碎波」(incipient wave breaking)の概念を提唱した。彼は沖合から汀線までの浅水・碎波変形全域の有義波高の岸沖変化を実験で測定してまず碎波帯の沖側の浅水変形の変化曲線を描き、一方で碎波帯内の波高の減衰曲線を引き、二つの曲線の交点をもって初期碎波点と定義した。そして、この地点の有義波高のデータを式(1)に当てはめたところ、比例係数 0.17 を 0.12 に低減することで最適な結果を得ている。すなわち、有義波高に対する碎波指標は規則波よりも約 30% 小さいことになる。

現地観測のデータでは、有義波高の碎波指標を直接に求めることができない。そこで、有義波高と観測水深の比を数多くのデータについてプロットし、その上限値として碎波指標を推定することを試みる。データには合田・永井 (1974)に記載の沿岸波浪の表面波形観測値、合田 (1975)が碎波変形検証用に用いた酒田港の水圧式波高計のデータ、堀田・水口 (1979, 1986)とHotta・

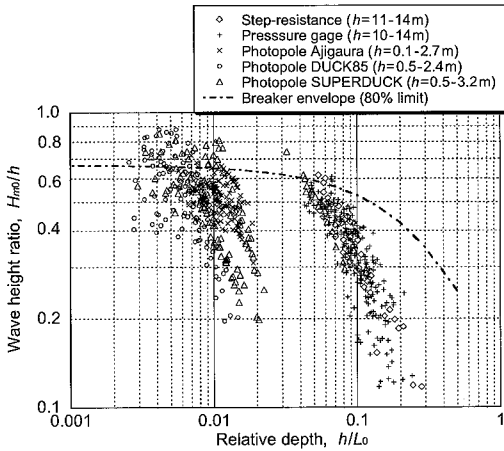


図-3 現地データにおけるエネルギー換算有義波高の砕波による上限値

Mizuguchi (1980) の 16 mm メモーションカメラによる茨城県阿字ヶ浦海岸での砕波帯内波形観測、堀田博士が参加して実施された米国ノースカロライナ州 Duck 海岸での DUCK85 および SUPERDUCK 総合観測のデータである。砕波帯内の観測値は 1 例を除いて波形勾配が 0.002 ~ 0.008 ときわめて小さいうねりである。

これらのデータをまとめてプロットしたのが図-3 である。ただし、後述のように砕波帯内のうねりのデータは非線形浅水変形を強く受けているため、 $H_{m0}=4.0m_0^{1/2}$ で定義されるエネルギー換算有義波高を用いている。ここで m_0 は、周波数スペクトルの 0 次モーメントである。

図中の 1 点鎖線は式 (2) の 80 % 値を示す。図中の右側のグループは沿岸波浪 (水深 11 ~ 20 m)、左側は砕波帯内の観測値 (水深 0.1 ~ 3.7 m) である。沿岸波浪のデータは有義波高の砕波指標が規則波のほぼ 80 % 以下である。有義波高の絶対値は水深のほぼ 0.6 倍以下である。砕波帯内のうねりのデータのうち、米国 DUCK 海岸の観測当時の海浜地形は勾配 1/30 とやや急であったため、砕波指標が若干大きくなった可能性がある。なお、水深は平均水位の変化を加味した値である。

以上の実験および現地データによる有義波の砕波限界波高をまとめると、データ間で差異が見られるけれども、規則波の砕波指標の 80 % 程度といえよう。

4. 波の非線形性の空間的变化

海の波は一般に線形性を仮定した上でスペクトル解析などを行う。しかし、波が海岸に近づいて水深が浅い領域に伝播すると、非線形性が強まる。非線形性を支配するパラメータは深海域では波形勾配、浅海域ではアーセルパラメータであるが、著者 (合田, 1983) は先にこの両者を統合した非線形性パラメータ $\Pi_{1/3}$ を提案した。

$$\Pi_{1/3} = \frac{H_{1/3}}{L_A} \coth^3 \frac{2\pi h}{L_A} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 L_A は微小振幅波の波長である。

波の非線形性の表示量として波形水位の歪み度 (skewness)、波高比 $H_{1/3}/H_{m0}$ 、および波高比 $H_{1/10}/H_{m0}$ について沿岸波浪と砕波帯内波浪のデータを整理したのが図-4 ~ 6 である。ここには Goda (1983) が解析したコスタリカ国カルデラ港のデータも使用している。いずれも左側の図は水深波高比が $h/H_0 > 2.5$ のデータを対象として非線形性パラメータ $\Pi_{1/3}$ に対してプロットし、右側の図は $h/H_0 < 2.5$ のデータについて波高水深比 H_0/h を横軸にとりてプロットしてある (相対水深 h/H_0 の逆数)。すなわち、 $H_0/h = 2.5$ を便宜的な砕波帯の境界として、左側は砕波帯の外部、右側は砕波帯の内部に相当する。いずれの図も、座標軸の左から右へ移動するにつれて水深が浅くなる。図中の破線の曲線は、有限振幅規則波に対して合田 (1983) が求めた関係に基づき、不規則波の個別波高の出現確率を重みとして加重平均した値を示す。

砕波帯の外部では非線形性パラメータの増大とともに波の非線形性が強まっており、波形勾配の非常に小さいうねりでは歪み度が最大 2.0、波高比 $H_{1/3}/H_{m0}$ と $H_{1/10}/H_{m0}$ の最大値はそれぞれ 1.6 と 2.1 にまでなっている。しかし、砕波帯の内部では H_0/h の増大、すなわち水深の減少につれて波の非線形性は急速に失われ、線形性が回復する。

なお、紙数の関係で紹介できないが、波形の尖鋭度 (kurtosis) および波高比 H_{rms}/H_{m0} については合田 (2007) を参照していただきたい。

5. 波高の頻度分布と代表波高間の波高比の変化

個別波高の頻度分布は沖合ではレーリー分布で近似されるけれども、周波数帯でのエネルギーの広がりの影響で分布幅がやや狭い傾向がある (合田・久高, 2006)。波が岸へ向かって伝播すると、非線形性が強まって分布幅が逆に広がるけれども、砕波する波が増えるにつれて波高の大きな階級の波が消滅し、波高分布の幅が狭まる。しかし、砕波で失われた後のエネルギーに見合う波が再生することによって、汀線近くでは波高分布が再びレーリー分布に近づく。砕波帯外縁までの波高分布については、合田 (1975) が現地波浪について頻度分布図を示しており、砕波帯全体については Ting (2001) が実験データから作成した頻度分布の変化図を例示している。

こうした波高頻度分布の変化は、 $H_{1/10}/H_{1/3}$ や $H_{rms}/H_{1/3}$ の波高比の変化として現れる。図-7 は砕波帯内の現地観測値、Ting (2001, 2002) の実験値、および段階的砕波変形モデル (合田, 2003; Goda, 2004) に

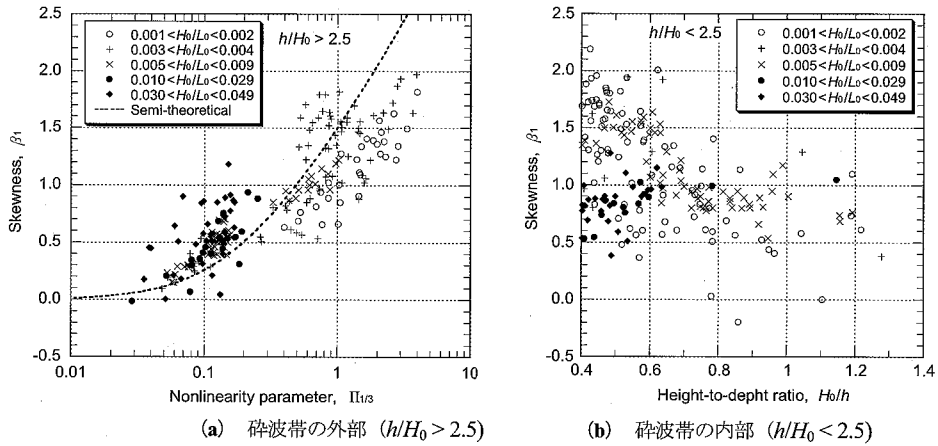


図-4 碎波帯内外の波形水位の歪み度の変化

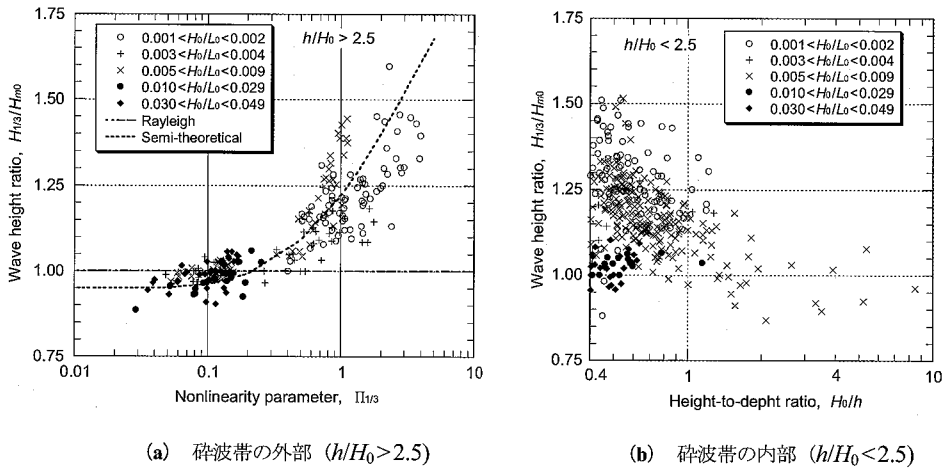


図-5 碎波帯内外の波別解析有義波高とエネルギー換算有義波高の比率の変化

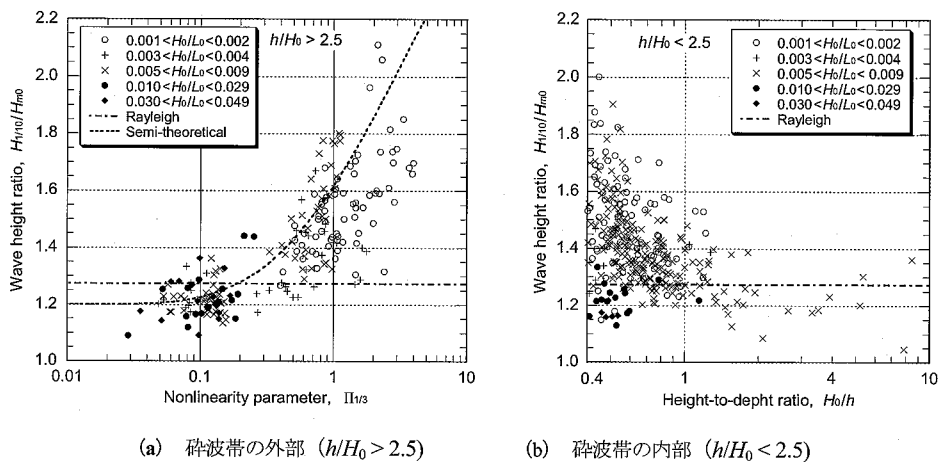


図-6 碎波帯内外の1/10最大波高とエネルギー換算有義波高の比率の変化

よる予測値を示している。このように、水深波高比 $h/H_0=1$ 付近で波高比 $H_{1/10}/H_{1/3}$ が最小、波高比

$H_{rms}/H_{1/3}$ が最大となり、さらに汀線に近づくにつれて波高比はレーリー分布の値に復帰する傾向を示す。

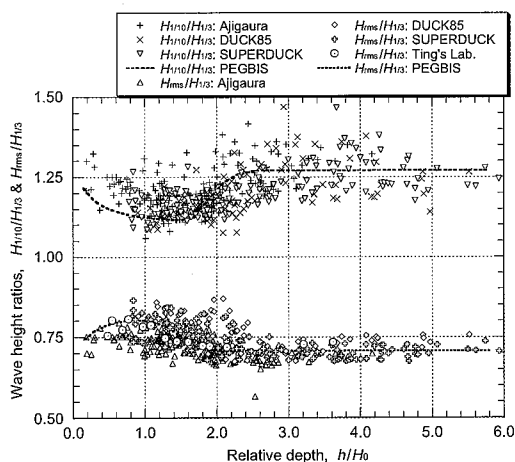


図-7 波高比 $H_{1/10}/H_{1/3}$ と $H_{rms}/H_{1/3}$ の空間的变化

6. む す び

海岸工学の応用においては、砕波現象を不規則波浪として取り扱わなければ、実務に役立つ適切な答えが得られない。規則波の砕波の知見を数値計算などにそのまま導入しても、良い結果が得られない。今回紹介した砕波高の確率的変動性や、波の非線形性の空間的变化などを十分に考慮されることを願う次第である。

なお、本論文のとりまとめに際しては日本大学教授堀田新太郎博士から阿字ヶ浦海岸の砕波帯内の波形の歪み度と尖鋭度のデータをご恵贈賜り、またアメリカ陸軍工兵隊研究センターの Hughes 博士からは Ebersole・Hughes (1987) 報告書コピーならびに SUPERDUCK のデータファイルをご恵贈していただいた。ここに記して両博士に深甚の意を表明する次第である。

参 考 文 献

- 岩田好一朗(1984): 砕波特論—砕波限界を中心として—, 第20回水工学夏期研修会講義集, B-3-1~19.
 岸 力(1955): 海岸堤防に関する研究(2) —有限振巾の浅水重複波, 土研報告, 90号.
 木村 晃・瀬山 明(1986): 斜面上の不規則波の砕波限界について, 第33回海講論文集, pp. 174-178.
 合田良実(1970): 砕波指標の整理について, 土木学会論文集, 180号, pp. 39-49.
 合田良実(1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港研報告, 12巻3号, pp. 31-59.
 合田良実・永井康平(1974): 波浪の統計的性質に関する調査解析, 港研報告, 13巻1号, pp. 3-37.
 合田良実(1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 14巻3号, pp. 59-106.
 合田良実(1983): 波浪の非線形性とその記述パラメータ, 第30回海講論文集, pp. 39-43.
 合田良実(2003): 段階的砕波係数を用いた不規則波浪変形計算

- モデルの改良, 海洋開発論文集, 19巻, pp. 141-146.
 合田良実(2004): 不規則波浪変形計算における段階的砕波係数の導入について, ECOH/YG 技術論文 No. 2, 18p.
 合田良実(2007): 既往資料に基づく砕波に係わる諸統計量の再整理, ECOH/YG 技術論文 No. 7, 18p. (テキスト掲載箇所: <http://www.ecoh.co.jp/comp/paper/paper.htm>)
 合田良実・久高将信(2006): 個別の波高分布に及ぼすスペクトル形状の影響, 海洋開発論文集, 22巻, pp. 127-132.
 灘岡和夫・大野修史・栗原 礼(1996): 波動場の力学状態に基づく砕波過程の解析と砕波条件, 第33回海講論文集, pp. 81-85.
 平山克也・原 信彦(2002): 時間領域の疑似段波モデルに基づく砕波モデルの開発, 海岸論文集, 49巻, pp. 121-125.
 平山克也・平石哲也(2004): ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性, 海岸論文集, 51巻, pp. 11-15.
 堀田新太郎・水口 優(1979): 砕波帯内の波の現地観測, 第26回海講論文集, pp. 152-156.
 堀田新太郎・水口 優(1986): 現地砕波帯における波の統計的性質, 第33回海講論文集, pp. 154-158.
 Ebersole, B. A. and S. A. Hughes (1987): DUCK85 photopole experiment, US Army Corps of Engrs., WES, Misc. Paper, CERC-87-18, pp. 1-165.
 Goda, Y. (1983): Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell, *Rept. PHRI*, 22(1), pp. 3-41.
 Goda, Y. (2004): A 2-D random wave transformation model with gradational breaker index, *Coastal Eng. J.*, 46(1), pp. 1-38.
 Hotta, S. and M. Mizuguchi (1980): A field study of waves in the surf zone, *Coastal Eng. Japan*, JSCE, 23, pp. 59-79.
 Kamphuis, J. W. (1991): Incipient wave breaking, *Coastal Engineering*, 15, pp. 185-203.
 Kriebel, D. (2000): Breaking waves in intermediate depths with and without current, *Coastal Eng. 2000(Proc. ICCE)*, pp. 203-215.
 Lara, J. L., I. J. Losada, and P. L.-F. Liu (2006): Breaking waves over a mild gravel slope: Experimental and numerical analysis, *J. Geophys. Res.*, 111(C11019), pp. 1-26.
 Rattanapitikon, W. and T. Shibayama (2000): Verification and modification of breaker height formulas, *Coastal Eng. J.*, 42(4), pp. 389-406.
 Smith, J. W. and N. C. Kraus (1991): Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, 117(4), pp. 307-325.
 Ting, F. C. K. (2001): Laboratory study of wave and turbulence velocities in a broad-banded irregular wave surf zone, *Coastal Engineering*, 43, pp. 183-208.
 Ting, F. C. K. (2002): Laboratory study of wave and turbulence characteristics in a narrow-banded irregular breaking waves, *Coastal Engineering*, 46, pp. 291-313.
 Yamada, H., G. Kimura and J. Okabe (1968): Precise determination of the solitary waves of extreme height on water of a uniform depth, *Rep. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ.* XVI(52), pp. 15-32.
 Yamada, H. and T. Shiotani (1968): On the highest water waves of permanent type, *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, 18-2(135), pp. 1-22.