

水平ステップ上の碎波限界に関する実験的研究

合田良実*・森信耕太**・岡崎健一***

1. ま え が き

近年は海岸保全施設として、防災機能だけでなく景観にも配慮した構造物の設置が要望されている。離岸堤よりも、海岸からの眺望を妨げないように天端を水面下に抑えた人工リーフが好まれる。著者らが提案している縦型傾斜式離岸堤も、そうした没水型構造物の一つである(合田ら1996)。

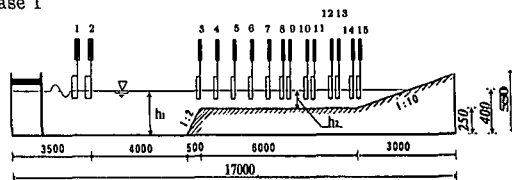
没水型構造物はその天端上で碎波を起こさせ、波のエネルギーを減衰させることによって背後への伝達波高を減殺する。したがって、その波浪減殺効果を的確に予測するためには、天端上の碎波現象の解明が不可欠である。しかし、これまでの諸研究においては縮尺模型実験で現地を予測したり、波浪場の数値計算で碎波係数の値を試行錯誤によって設定するにとどまっていた。

人工リーフ上の碎波を一つの対象とすれば、それは斜面に接続する水平床での碎波現象である。斜面の勾配が非常に緩やかであれば、一様水深における極限波高の理論解に接近すると考えられる。しかし先に Nelson(1983)は種々の実験データの解析により、水平床上の碎波限界波高は水深の55%を超えることはないと主張した。本論文は、Nelsonの主張を実験データで批判するとともに、水平床上の碎波に及ぼす前面の斜面勾配の影響を解明することを目的とする。

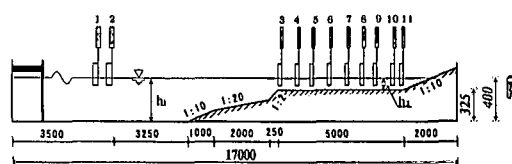
2. 碎波限界に対する縮尺効果の実験

碎波の現象に関しては縮尺効果のあることが早くから知られており、波高10 cm以上の波を用いるのが望ましいといわれる。しかし、人工リーフ上の碎波を検討する場合にはそれよりも小さな波高を対象とすることが少なくない。そのため、まず水平床上での水深を変えて縮尺効果を検討した。実験は前面勾配が1:2の台形ステップを対象とし、一様水深部の水深を $h_1=40$ cm、水平床上の水深 h_2 を15 cmとしたときを基本のCase 1とし、縮尺をその1/2としたCase 2($h_2=7.5$ cm)、さらにその1/2

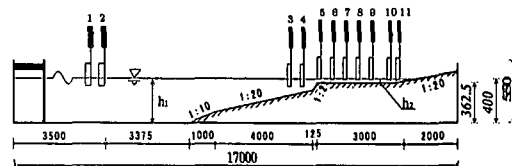
Case 1



Case 2



Case 3



Units: mm

図-1 縮尺効果検討のための地形模型

としたCase 3($h_2=3.75$ cm)の3通りの模型を製作した。図-1に地形模型を示す。

実験は規則波を対象とし、周期はCase 1で0.7~3.4 sの間で等比級数となるように14通りとし、Case 2, 3ではフルード相似則で地形および実験波の周期を縮小した。ただし、周期が0.5 sとなる場合には水面の汚れによる波高減衰が顕著になるため、実験から除外した。波高は、あらかじめ目視によって水平床上のいずれかの地点で碎波が見られる条件を確認し、その波高を挟んで8~11通りに細かく設定した。碎波限界は、水平床上に設置した7~13台の波高計の記録のうちで、碎波寸前の最大の $H_{1/3}$ を用いて定義した。なお、碎波前の波では個々の波高はほとんど同一であり、波高の定義による差は小さかった。

碎波限界波高と水平床上の水深との比率は、周期が長くなるにつれて大きくなる傾向があり、合田(1973)の碎波指標で底面勾配の項を0と置いた次式を当てはめ

* フェロー 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究科
 ** 東洋建設(株)九州支店
 *** 横浜国立大学大学院 工学研究科

た。

$$H_b/h_2 = A(h_2/L_0)^{-1}[1 - \exp(-1.5\pi h_2/L_0)] \cdots (1)$$

この結果, Case 1~3 で定数 A として次の値を得た。

$$A = \begin{cases} 0.14 : h_2 = 15.0 \text{ cm} \\ 0.14 : h_2 = 7.5 \text{ cm} \cdots \cdots \cdots (2) \\ 0.12 : h_2 = 3.75 \text{ cm} \end{cases}$$

すなわち, Case 3 ($h_2 = 3.75 \text{ cm}$) では明らかに縮尺効果によって砕波限界が低下した。Case 2 ($h_2 = 7.5 \text{ cm}$) では砕波限界には影響が見られない。ただし, 砕波後の安定波高に式 (1) を当てはめると Case 1 ($h_2 = 15 \text{ cm}$) では $A \approx 0.11$ であるのに対し, Case 2 では $A \approx 0.10$ となって若干の縮尺効果が認められた。したがって, 水平床上の砕波に関しては, 水深 10 cm 以上で実験を行うのが適切である。

3. 砕波限界に及ぼす前面の勾配の影響の実験

水平ステップの前の取付け斜面の勾配を $1:5, 1:10, 1:20, 1:40$, および $1:80$ の 5 通りに変えることとし, 一様水深部を $h_1 = 40 \text{ cm}$ に設定した。水平床上的水深は, 上述の実験結果を参照して $h_2 = 12 \text{ cm}$ に定めた。図-2 は前面勾配が $1:10$ の場合の実験地形と波高計の配置である。実験水路の長さが制約されていたため, 勾配 $1:20$ 以下のケースでは先端に高さ 10 cm の $1:10$ 勾配斜面を設け, 水路床から高さ $10 \sim 28 \text{ cm}$ の範囲を所定の勾配とした。

実験波の周期は, $0.74 \sim 2.77 \text{ s}$ の間を等比級数に分割した 9 通りを選定した。波高は, あらかじめ目視によって砕波寸前と見られる状況のときの造波信号用の波高を定めておき, それから 2 mm ずつ大きくした 3 ケース, 2 mm ずつ小さくした 2 ケース, さらに基準波高の $1/4, 1/2, 3/4$ の 3 ケースと合計 9 通りに変化させた。

測定は, 水路内の波が定常状態となると判断された造波開始 $90 \sim 120 \text{ s}$ 以降に 100 波以上を記録するようにし, 得られた波形はゼロダウクロス法で解析し, 各種の代表波高を算出した。ただし, 各波高間の差異は小さかったので以下においてはすべて $H_{1/3}$ の値で表示している。図-3 は波高の場所的变化の例である。目視で砕波

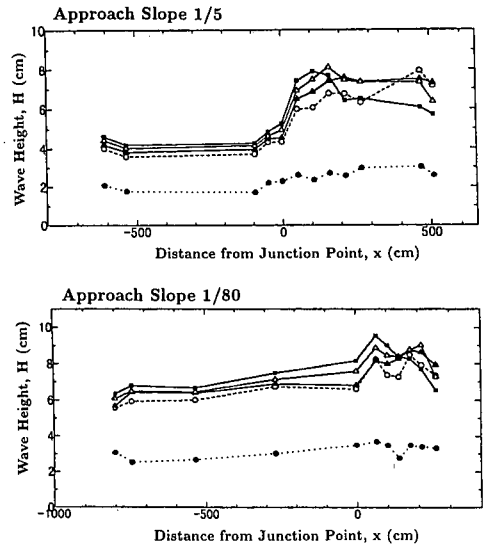


図-3 周期 $T = 2.0 \text{ s}$ のときの波高の場所的变化 (上は $1:5$ 勾配, 下は $1:80$ 勾配)

表-1 砕波定数 A と前面勾配の関係

前面勾配	1:5	1:10	1:20	1:40	1:80
定数 A	0.135	0.136	0.145	0.155	0.159

寸前と判定された条件の波は $\blacktriangle$ であり, $\triangle$, $\blacksquare$ は砕波, $\bigcirc$, $\bullet$ は非砕波の波である。

実験結果から砕波指標をまとめたものが図-4 である。縦軸は砕波限界波高と水深の比, 横軸は水深波長比である。図中の黒丸は砕波寸前と判定した条件の波のときの水平床上的最大波高, 白丸は造波信号用波高がそれよりも 2 mm 低い条件の波における最大波高である。砕波寸前と判断していても, 個々の波では砕波しかかるものもあったので, 砕波限界としては黒丸と白丸の間にあると考えられる。図中の実線はそうにして設定した砕波指標曲線であり, 破線は田合 (1973) が一様水深における極限波の理論に基づいて定めた $A = 0.17$ の定数による砕波指標である。5 通りの前面勾配に対して求めた砕波定数は表-1 のようになった。

図-4 および表-1 の結果から明らかなように, 水平床上の砕波限界波高は前面の取付け斜面の勾配が急になるにつれて低下する。前面勾配 $1:5$ と $1:10$ では一様水深の砕波限界波高の約 80% であるのに対し, 前面勾配 $1:80$ では一様水深の約 94% にまで達している。今回の実験では水路長が制約されていたので, 一様水深における砕波極限波浪の理論値を検証することができなかったが, そうした制約がなくて十分な長さの緩勾配斜面を設置できるならば, 砕波限界波高の理論値を検証することが可能であろう。また図-4 によれば, 水深波長比の小さい場

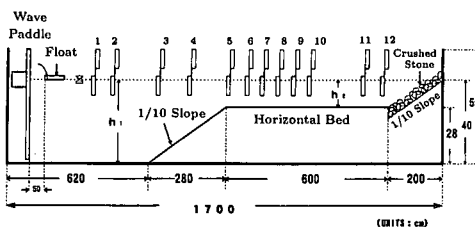


図-2 $1:10$ 勾配斜面の実験地形の波高計配置

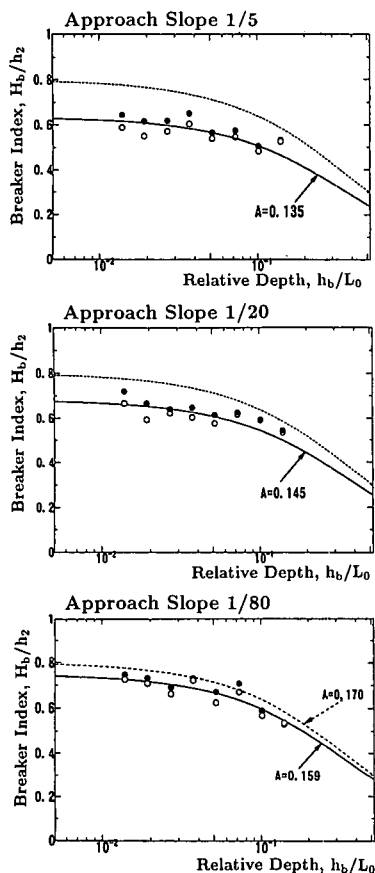


図-4 砕波限界の波高水深比と水深波長比の関係

合には波高水深比が0.7を超えており、Nelson (1983) による水平床上の砕波限界波高が水深の55%以下との説は成立しない。

なお、前節の縮尺効果の実験では前面勾配1:2に対して $A=0.14$ であったので、表-1の1:5の結果よりもわずかに砕波限界波高が大きいことになる。この差が実験条件やデータ解析の差異などによるものか否かについては今後の検討に待ちたい。

4. 地形急変による波形変化の解析

(1) 波形の前傾状況

前面の取付け斜面の勾配が急な場合には、波形が前に著しく傾く形状を示す。図-5はその例で、周期1.69 sで砕波寸前よりも波高が2 mm 小さい波の場合である。左側が前面勾配1:5、右側が1:40であり、上は斜面と水平ステップの接合地点、下はそれから1 m 前後進行した地点での波形である。造波板前面ではどのケースも前後対称な波形であるが、斜面を進行するにつれて波形が前に傾き、1:5勾配の場合には水平床の始点で鋸歯状の波形となり、その後顕著な波峰分裂を示す。

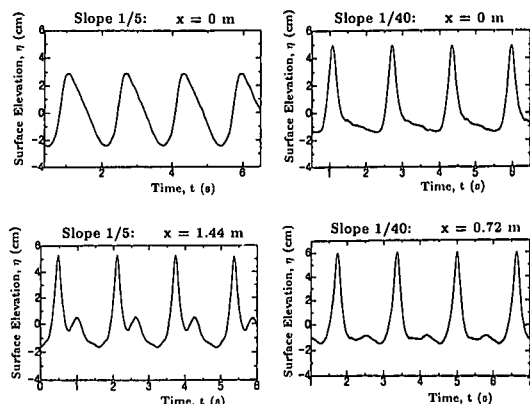
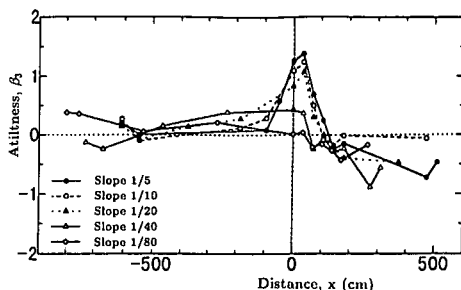


図-5 水平床上の測定波形の例(上は水平ステップの開始地点、下左は始点から1.4 m、下右は0.7 m 地点)

図-6 波形の前傾度の空間分布 ($T=1.69$ s の非砕波の波)

波形の前傾の度合いを合田 (1985) による次式の前傾度パラメータ β_3 で算定すると、図-6 のようになる。なお、式中の N はデータ個数である。

$$\beta_3 = \sqrt{N-1} \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\eta_i - \bar{\eta})^3}{\left[\sum_{i=1}^{N-1} (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{3/2}} \quad (3)$$

図-6 で明らかなように、波形は水平ステップに乗り上げた直後に大きな正の値 (前傾) を示し、その度合いは勾配が急なほど著しい。ステップの始点から1 m 程度離れると、前傾度は0あるいはやや負の値となり、波形の前傾は解消される。

(2) フーリエ振幅の場所的変化

波形の前傾を生じさせるのは高調波成分の振幅が増大し、その位相が基本周波数成分からずれるためである。そこで非砕波のうちで波高の最も大きなケースについて測定波形をフーリエ解析し、基本・2倍・3倍周波数成分の振幅を求めた。図-7は台形ステップ上でのフーリエ振幅の場所的変化の1例である。各振幅は一定間隔で増減を繰り返す、しかも基本周波数成分と2倍・3倍周波数成分とは逆位相の関係にある。

こうしたフーリエ振幅の再帰的变化は、既に矩形ステップや潜堤について報告されている (大山・灘岡

(1992) その他). そのメカニズムは, 地形急変部で励起された 2 倍周波数の自由波および入射した基本波との 3 次干渉波の重畳現象と推測される (合田・賀川 1997). 図一7 の中の上向き, 下向きの矢印は, 次式による二次波峯の再帰間隔に基づき, 二次波峯の出現地点および主峰による追越し吸収地点をそれぞれ示している.

$$\lambda = \pi / (k_2/2 - k_1) \dots \dots \dots (4)$$

ここに, k_1 , k_2 はそれぞれ分散関係式を満足する基本・2 倍周波数の自由波の波数である.

また, 図一8 は水平ステップ上のフーリエ振幅の解析結果の例である. この実験では砕波の出現地点を中心に波高計を配置したので, フーリエ振幅の再帰的变化を十

分に捕捉できていないが, 波がステップに乗り上げてから高調波振幅が増大して基本波振幅が減少し, それらの変化が極大点に達した付近で砕波が起きている. 図一8 の上の前面勾配 1:5 と下の 1:40 を比べると, 前者では変化が急に起きているのに対し, 後者ではステップの前の斜面の途中から徐々に変化しているところが異なっている. そこで, ステップ地形の各地点におけるフーリエ振幅が波高の増大によってどのように変化するかを調べてみた. 図一9 はその結果の例であり, ○, ▲, □ の記号は基本・2 倍・3 倍周波数成分の振幅の実験値, 各 3 本の曲線は 3 次近似ストークス波理論による計算値である. なお, 左は前面勾配 1:5, 右は勾配 1:40 の結果である.

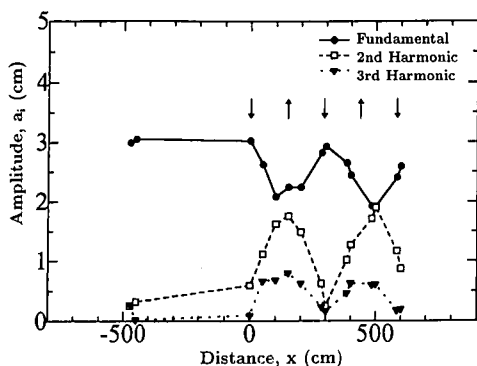
なお, 3 次近似ストークス波理論における波形は次のように表される.

$$\eta = a_1 \cos(kx - \omega t) + a_2 \cos 2(kx - \omega t) + a_3 \cos 3(kx - \omega t) \dots \dots \dots (5)$$

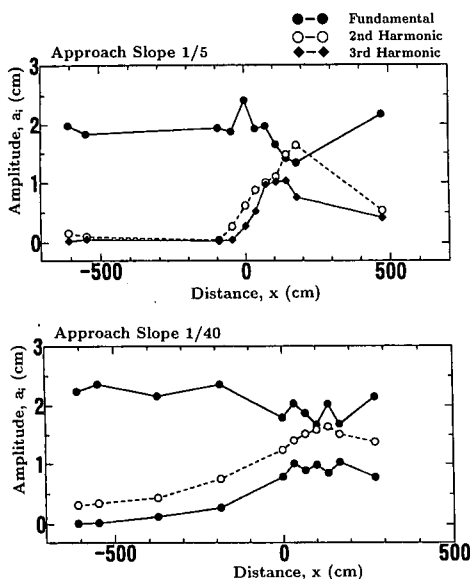
ここに, 各成分波の振幅は次式で与えられる.

$$a_1 = a \left(1 + \frac{1}{2} k^2 a^2 b_{11} \right) \dots \dots \dots (6)$$

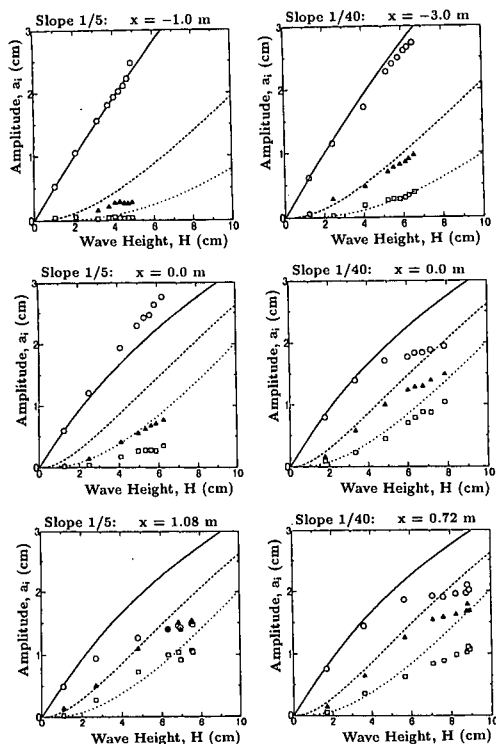
$$a_2 = k a^2 b_{22} \dots \dots \dots (7)$$



図一7 台形ステップ上のフーリエ振幅 (水深 $h_2=15$ cm, 周期 $T=1.4$ cm, 波高 $H \approx 7$ cm)



図一8 水平ステップ上のフーリエ振幅 (水深 $h_2=12$ cm, 周期 $T=1.69$ s, 上は前面勾配 1:5, 下は前面勾配 1:40)



図一9 ステップ地形上のフーリエ振幅の実験値と理論値の比較 (周期 $T=1.69$ cm, 上: ステップ前の斜面上, 中: ステップ開始点, 下: 始点から約 1 m 地点)

$$a_3 = \frac{1}{2} k^2 a^3 b_{33} \dots\dots\dots (8)$$

$$b_{11} = \frac{1}{8} (3c^4 + 8c^2 - 9) \dots\dots\dots (9)$$

$$b_{22} = \frac{1}{4} (3c^3 - c) \dots\dots\dots (10)$$

$$b_{33} = \frac{3}{32} (9c^2 - 3c^4 + 3c^2 - 1) \dots\dots\dots (11)$$

$$c = \coth kh \dots\dots\dots (12)$$

なお、 k は波数、 ω は角周波数である。

前面勾配 1:40 の場合は各地点とも、波高の増加につれて各成分波の振幅がほぼ理論で予測されるように増大している(波高約 6 cm 以上で理論値以下であるのは、波の非線形性が強くて 3 次近似解では精度が不足するためである)。すなわち、高調波成分は基本波の波形に拘束され、同一の波速で伝播する拘束波である。これに対して、前面勾配 1:5 の場合にはステップ開始地点で高調波の振幅がストークス波理論で予測される値に達しておらず、ステップ上をしばらく進行してから高調波の振幅が増大する。しかし、これは基本波に拘束された成分波ではなく、その主要部分は分散関係式に従う自由波であり、図-7 のフーリエ振幅の再帰的变化を生み出すものである。

5. 考 察

水平ステップの前面勾配が急な場合に碎波限界波高が低下する現象は、水平ステップ上で自由波としての高調波成分が発達する現象と表裏一体をなしている。すなわち、波形一定の有限振幅波としての高調波成分の振幅がそれぞれの水深における値に発達するためには、ある程度の伝播距離を必要とする。しかし前面が急勾配であると、高調波成分の振幅が十分に成長しないうちに、波はさらに浅い地点に進行してしまう。波が水平ステップに達したとき、高調波成分はその水深に対応すべき振幅にまで発達していない。このため、その差を補うべく 2 倍・3 倍周波数の成分波が自由波として励起されると推測される。

波形一定の有限振幅波と自由な成分波の重畳波形との違いの一つは、波形の伝播速度である。有限振幅波では波高の増大とともに波速が徐々に増加する。しかし、自由波の重畳の場合には、それぞれ微小振幅波としての波速で独立に進行する。このため、波高が同じ有限振幅波よりも波形の伝播速度は小さいと考えられる。一方、波頂における水平粒子速度は自由波の重畳であれば次式のように表される。

$$u_{\text{crest}} = \sum_{i=1}^n n \omega a_n \frac{\cosh[k_n(h + \eta_c)]}{\sinh k_n h} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 a_n と k_n はそれぞれ n 倍周波数の成分波の振幅と波数であり、 η_c は波頂高である。この自由波の重畳による波頂の水平粒子速度は n が増すにつれてかなり大きくなり、その結果、同一波高の有限振幅波の波頂の粒子速度を上回ると予測される。

碎波の現象は、理論的には波頂の水平粒子速度が波形の伝播速度を超えたときに発生する。高調波成分が有限振幅波として基本波に拘束されている場合に比べ、自由波として基本波に重畳されているときは波形の伝播速度が遅く、粒子速度が大きいのであるから、波高がより小さい段階で碎波条件に達してしまい、碎波を生じるものと考えられる。

6. む す び

本論文で明らかになった事項は以下の通りである。

- (1) 水平床上の碎波限界波高は前面の取付け斜面の勾配が急になるにつれて低減し、勾配 1:5 では一様水深における碎波限界の約 80% となる。
- (2) 前面勾配が 1:80 の場合には碎波限界波高が一様水深の値の約 94% であり、さらに勾配を緩やかにして斜面長を十分に大きくすることによって、一様水深の理論的碎波限界を検証できる可能性が高い。
- (3) 碎波限界の低下は、取付け斜面上で有限振幅波の高調波成分が未成熟であったことを補償するため、水平ステップ上で自由波としての高調波が発達することと表裏一体をなしている。
- (4) ステップ上の碎波現象に関しては縮尺効果を避けるために水深 10 cm 以上で実験を行うのが適切である。

参 考 文 献

- 大山 巧・灘岡和夫 (1992): 潜堤を通過する非線形波列の分裂現象の解析, 土木学会論文集, No. 450/II-20, pp. 31-40.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 12 巻 3 号, pp. 31-69.
- 合田良実 (1985): 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 24 巻 4 号, pp. 65-102.
- 合田良実・賀川真有 (1997): 造波水路内の波峯分裂のメカニズムについて, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 6-10.
- 合田良実・吉崎龍太郎・原田智弘 (1996): 縦型傾斜式離岸堤周辺の波高分布と海浜流について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 121-125.
- Nelson, R. C. (1983): Wave heights in depth limited conditions, *Proc. 6th Australian Conf. Coastal & Ocean Engrg.*, pp. 27-31.