

斜面上の抽水植物群落による波高減衰に関する研究

茂木勇佑¹・谷本勝利²・湯谷賢太郎³

斜面上に存在する抽水植物群落の波高減衰機能を実験と解析モデルを用いて検討した。実験は水路に斜面と抽水植物を単純にモデル化した円柱を設置し、周期1.6sで波高5.4~11cmの波をかけたものである。その結果、浅水変形領域では円柱群の効果が顕著なのに対し、碎波帯ではほとんど効果がないことがわかった。これは碎波帯では碎波によるエネルギー損失が大きく、円柱群によるエネルギー損失はほとんど無視できる程度であることによっており、本研究ではそれを解析モデルにより定量的に評価した。また、本解析モデルを現地条件に適用して抽水植物群落の波高減衰機能を検討し、効果は潮位によって大きく異なることを示した。

1. はじめに

湖や河川の岸辺に生育する抽水植物群落には、風波や航走波を減衰させる護岸機能があると言われている(福岡ら, 1986; E. E. Bouter, 1991)。また一方では、波の作用が群落を衰退させる原因にもなっているという指摘もある(高崎ら, 2003)。そのため、波と抽水植物の相互作用に関し多くの研究が行われている(Hugo Coops ら, 1996; 林ら, 2000)。しかし、それらの研究の多くは一定水深を仮定しており、水深変化を考慮したものはほとんどない。そこで本研究では、より現実的に水深変化を考慮して、実験により検討するとともに、波高変化を推定する解析モデルを提案し、斜面上の抽水植物群落を持つ波高減衰効果に関する知見を得ることを目的とする。さらに、提案した解析モデルを用いて、現地条件での抽水植物群落について、特に潮位変化に注目した検討を行う。

2. 実験概要

実験は幅40cm、高さ75cm、長さ18mの二次元造波水路で行った。図-1に示しているように、この水路に勾配が前方部1/4.7(長さ0.73m)、後方部1/20.5(長さ7m)の木製2段斜面模型を設置した。抽水植物群落は直径 $D=0.5$ cmの木製円柱を千鳥配列で鉛直に設置することでモデル化した。円柱群の設置密度 β は325本/m²であり、円柱間隔 S は5.8cmである。この円柱群に入射する波の波高を斜面開始から汀線まで、ほぼ等間隔に約20点計測することで、円柱群中を伝播する波の波高変化を明らかにした。なお、実験は一定水深領域での水深 h は37.5cmの1種とし、実験波は周期 $T=1.6$ sの規則波で、一定水深領域での入射波高 H_i を5.4~11cmの間で5ケースに変化させた。また、円柱群の効果を検討するために円柱を取り外した状態でも同

様の条件で実験を行った。データの解析は記録の40sから80sまでを対象とし、波高、平均水位を求めた。

3. 解析モデルの概要

波が斜面上の植生群中を伝播するときの波高変化を評価するために、浅水・碎波変形と植物群落の影響を考慮した解析モデルを構築した。

(1) 浅水変形

浅水変形には、有限振幅性を考慮した浅水係数 K_s の近似式として提示された次式(岩垣ら, 1981)を用いる。

$$K_s = K_{si} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0} \right)^a \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^b \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 K_{si} は微小振幅波理論による浅水係数、 H_0 は換算沖波波高、 L_0 は深水波波長である。また、右辺第2項に含まれる指数は岩垣ら(1981)は $a=-2.8$ 、 $b=1.2$ としているが、合田(1977)は首藤(1974)の解に基づいて計算された浅水係数の算定図に近づけるためには $a=-2.9$ 、 $b=1.3$ とするのがよいと指摘している。本研究においては、実験結果との比較においては実験結果に合うように $a=-3.1$ 、 $b=1.15$ の値を用いた。これは本実験では沖側に急な斜面を設けたことによるためと考えられる。現地条件への適用に際しては、 $a=-2.9$ 、 $b=1.3$ としている。

(2) 碎波変形

碎波変形は碎波により失われる単位時間あたりのエネルギーをThornton and Guza (1983)によるbore modelを適用することによって評価する。この場合の単位時間あたりに失われる波のエネルギー ε_b は式(2)で与えられる。

$$\varepsilon_b = \frac{1}{4T} \rho g \frac{(BH)^3}{h} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 B は経験係数であり、本研究では1とする。

(3) 植物群落の影響

植物群落の影響を評価するために、実験同様抽水植物

1 正会員 工修 (株)三井共同建設コンサルタント
2 フェロー 工博 埼玉大学大学院教授理工学研究科
3 正会員 工修 埼玉大学大学院助理工学研究科

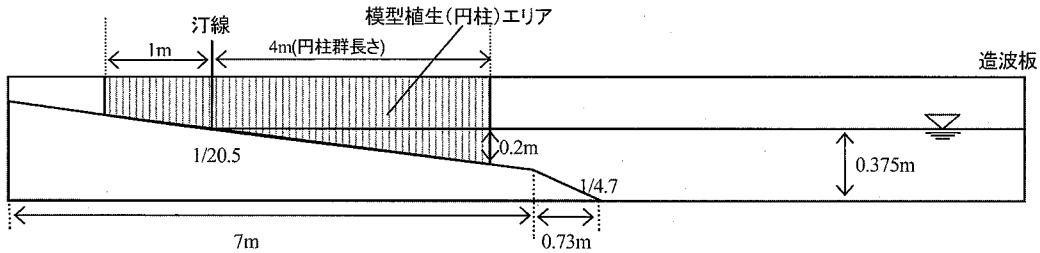


図-1 実験水路の概要

を円柱として考える。本実験での条件は円柱の間隔が円柱直径の10倍以上と広いので、円柱同士で干渉はなく、円柱群からの反射率も小さいと考えられる。このような場合、円柱群によって単位時間に失われるエネルギーは各円柱による仕事量の総量に等しいとおける。

円柱1本に作用する波の進行方向波力 F_x はモリソン式で評価でき、式(3)で与えられる。

$$F_x = \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho C_D u |u| D dz + \int_{-h}^{\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (3)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 C_M は質量係数である。また、 u は水粒子の水平速度成分、 t は時間、 z は鉛直上向きの座標、 η は波の水位である。

式(3)より円柱1本による単位時間あたりの損失エネルギー E_{loss1} は式(4)で与えられる。

$$E_{\text{loss1}} = \frac{1}{T} \left[\int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho C_D u |u| D dz + \int_{-h}^{\eta} \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} u dz \right] dt \quad (4)$$

本研究ではこの式(4)に微小振幅波理論を適用し、円柱密度を掛け合わせるにより、円柱群によって単位面積あたり失われる波の単位時間あたりのエネルギー ε_p を次式のように与える。

$$\varepsilon_p = \frac{1}{3} \beta \rho C_D \pi^2 D k \frac{H^3}{T} \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{\sinh^2 kh} \right) \quad (5)$$

ここに、 H は波高であり、 k は波数である。

(4) 平均水位の変化

ラディエーション応力場の場所的変動により平均水位の低下・上昇が生じる。本解析モデルでもこれを考慮する。円柱群の中での平均水位の変化については、波が円柱群から受ける外力をモリソン式の抗力の時間平均で評価することにより Dean and Bender (2006) が導いた次式を用いる。

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = \frac{1}{\rho g (h + \bar{\eta})} \frac{\beta C_D \rho g D H^3}{12 \pi \tanh kh} \left(\frac{(2n-1/2) (\cosh 2kh + 5)}{3n (\cosh 2kh + 1)} - 1 \right) \quad (6)$$

ここに、 $\bar{\eta}$ は平均水位、 x は波の進行方向座標、 n は微

小振幅波理論の波速と群速度の比で $n = 1/2 + kh / \sinh 2kh$ である。式(6)を差分式で表し、微小区間ごとに逐次計算をすることで平均水位の変化を求める。逐次計算の方法は次の(5)計算方法で述べる方法と同様である。

(5) 計算方法

計算は沖側の波高を基準に波進行方向の微小区間 Δx ごとに逐次計算をしていくものである。斜面は微小区間 Δx ごとの階段状で近似する。まず、浅水・碎波変形を無視して、エネルギーフラックスの変化は抽水植物群落により単位時間あたりに失われるエネルギーのみによると考えれば、次式が成り立つ。

$$\frac{d(EC_g)}{dx} = -\varepsilon_p \quad (7)$$

ここに、 E は波のエネルギー、 C_g は群速度である。式(7)に微小振幅波理論による E と C_g を適用して、差分式で表すと次式を得る。

$$\frac{\rho g C_g}{8} (H_{Ti+1}^2 - H_{Ti}^2) = -\varepsilon_p \Delta x \quad (8)$$

ここに、添え字の i は微小区間分割の番号であり、 H_{Ti} は当該微小区間に入る地点での既知の波高、 H_{Ti+1} は微小区間を出る地点での未知の波高である。式(8)を解くことにより Δx ごとの波高を得ることができる。

しかし、実際には浅水・碎波変形と同時に考えなければならない。そのうち、円柱群中であって碎波点より沖側の場合には、浅水変形を考慮した $i+1$ 地点での波高 H_{i+1} を式(9)のように与える。

$$H_{i+1} = K_{Sp} K_T H_0 \quad (9)$$

ここに、

$$K_{Sp} = K_{si} + 0.0015 \left(\frac{h}{L_0} \right)^a \left(\frac{K_T H_0}{L_0} \right)^b \quad (10)$$

$$K_T = \frac{H_{Ti+1}^2}{H_{i0}^2} \quad (11)$$

であり、 H_{i0} は円柱群沖側端での波高である。これは、円柱群により波高が減衰する分だけ換算沖波波高を小さくして、浅水係数を与えるものである。

一方、碎波後の領域においては、式(12)が成り立つ。

$$\frac{d(EC_0)}{dx} = -(\varepsilon_b + \varepsilon_p) \dots (12)$$

したがって、式(8)と同様に式(13)で計算する。

$$\frac{\rho g C_0}{8} (H_{i+1}^2 - H_i^2) = -(\varepsilon_b + \varepsilon_p) \Delta x \dots (13)$$

なお、砕波以前か砕波後かは波高が式(14)に示す合田(1975)による砕波限界波高 H_b より小さいか大きいかにによって判定する。

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} \left(1 + 15 \tan^3 \theta \right) \right] \right\} \dots (14)$$

ここに、 $\tan \theta$ は水底勾配である。

4. 実験と解析結果の比較

波高変化の実験結果と解析モデルによる計算結果を図-2に示す。ここでは汀線からの距離を円柱群の汀線からの沖側方向の長さで割ったものを横軸に、波高 H を入射波高 H_I で割ったものを縦軸にとった。入射波高が 5.4 cm の場合、円柱群を設置したとき波高の増大が抑えられ、砕波点が岸側に移っていることがわかる。解析モデルの結果は円柱群のあるなしにかかわらずほぼ一致している。また、入射波高が大きくなるにつれ、円柱群の効果が小さくなっており、入射波高が約 11 cm となる

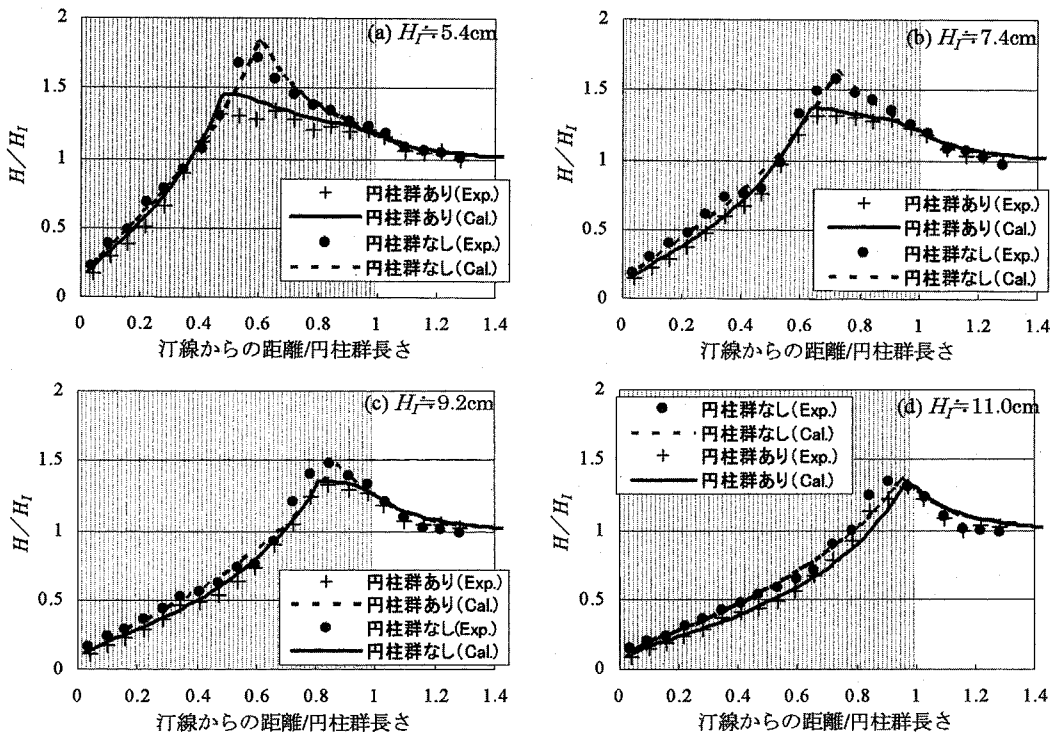


図-2 実験結果と解析モデルによる計算結果

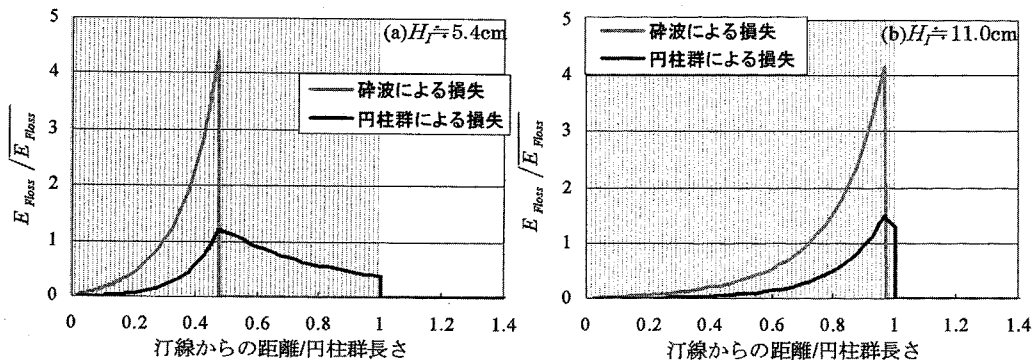


図-3 単位面積あたりの損失エネルギー分布

と円柱群の効果はほとんどみられない。この結果から円柱群の効果は砕波点の位置に依存し、砕波後においては円柱群の効果は期待できないことがわかる。入射波高が大きくなっても解析モデルの結果は波高変化をよく表しており、波高変化を推定する手段として有用であるといえる。

図-3は解析モデルにより、伝播中の波の単位面積あたり単位時間に失われるエネルギー E_{Floss} を損失要因別に算定したものを示した例である。ここで、横軸は汀線からの距離を円柱群の汀線からの沖側方向の長さで割ったものであり、縦軸は単位面積あたり単位時間に失われるエネルギー E_{Floss} を単位時間あたりの損失エネルギーの損失開始から汀線までの平均 E_{Floss} で割ったものである。他のケースにおいても同様の結果が得られている。これらの結果から砕波後の領域においてはエネルギー損失の大部分が砕波によるものであり、円柱群による損失は砕波による損失の2割から3割と小さくなることからわかる。このことが砕波後の領域において円柱群の影響が波高変化に見られなかった要因と考えられる。

5. 現地条件への適用

現地条件として荒川の河口から約9 km上流にある四つ木橋上流左岸のヨシ原を対象とした。このヨシ原は衰退が懸念されている(航走波対策検討業務報告書, 2001)。このヨシ原の地形条件を図-4に示す。ヨシの条件は荒川のヨシ原の一般的な値を用いることとし、茎径は0.8 cmで200本/m²で生育しているものとする。また植生生育範囲は満潮時(A.P.+2.10 m)での水深1 mまでとした。波の条件は荒川の一般的な航走波を想定し、波高30 cm, 周期2.5 sが入射してくるとする。なお、水底は図-4の点線で示すように単純化し、想定した波において深水域となる水深4.9 m以深は一定水深とした。

図-5は潮別別の植生がある場合とない場合の波高分布の比較である。横軸は汀線からの距離を満潮時の植物群落長さで割り、縦軸は波高を入射波高で割ったもので

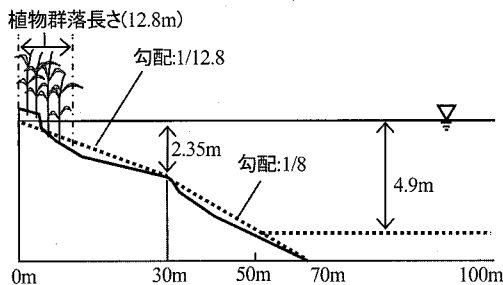


図-4 四つ木橋上流左岸地形概略(満潮時)

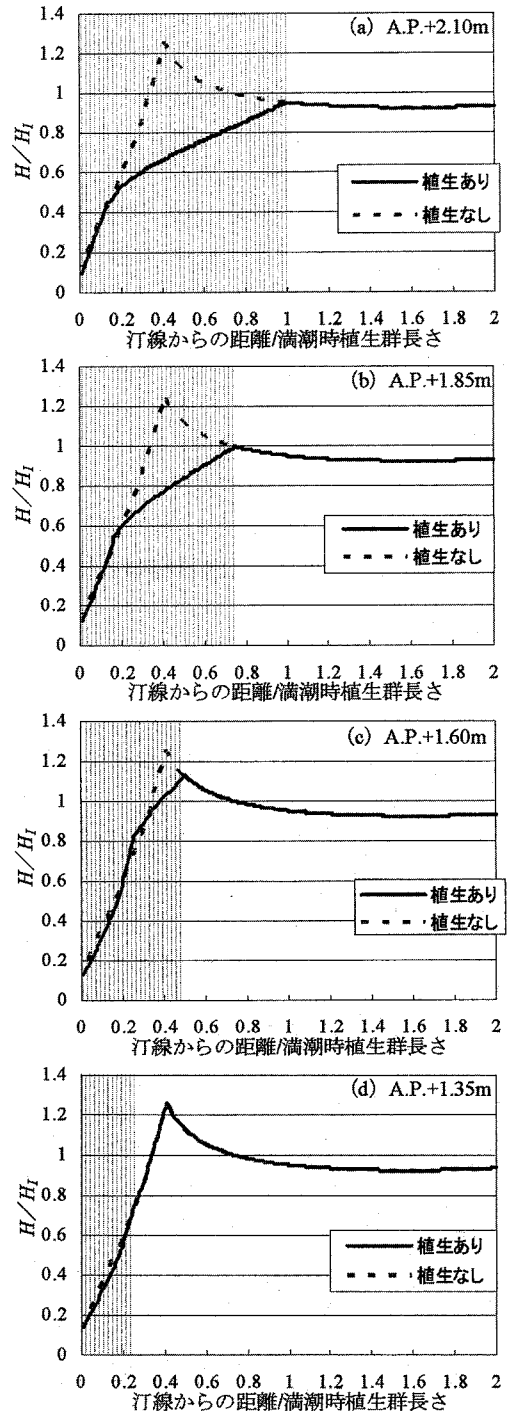


図-5 現地条件における波高分布

ある。満潮時では植生があることで砕波点は約3 m岸側となり、砕波波高は0.35倍に小さくなることからわかる。しかしそのほかの潮位のときを見ると、潮位が下がるにつれて、砕波点、砕波波高ともに植生がない場合に

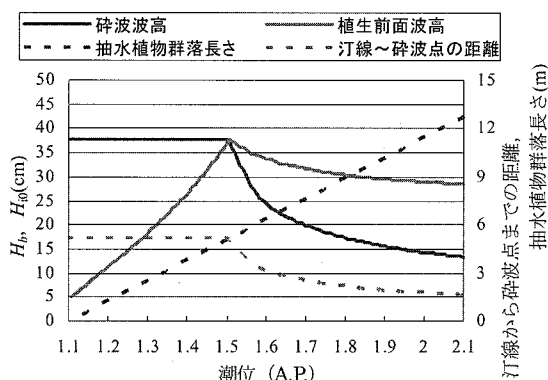


図-6 潮位による各波高の変化

近づいていき、抽水植物群落の効果も小さくなることがわかる。

図-6は横軸に潮位、縦軸に碎波波高 (H_b) と植物群落前面での波高 (H_0)、汀線から碎波点までの距離および抽水植物群落長さをプロットしたものである。グラフは汀線が植物群落の沖側端に一致する A.P.+1.1 m から満潮の A.P.+2.10 m の範囲を示している。潮位が A.P.+1.50 m のとき、汀線から碎波点までの距離と植物群落長さが一致しており、碎波はちょうど植物群落の沖側端で生じている。このとき植物群落への負担はもっとも大きくなると考えられる。潮位が A.P.+1.50 m 以上のときは碎波が植物群落の中で生じ、潮位が大きくなるとつれ、碎波波高は小さくなり、碎波点も岸側に移ることがわかる。これは潮位が大きくなるとつれ、波高減衰効果が期待でき、植生への負担も小さくなることを示している。しかし、潮位が A.P.+1.50 m 以下の場合には植物群落より沖側で碎波が生じるため、潮位が小さくなれば植物群落に到達する波の波高は小さくなるものの、碎波点に変化はなく、植物群落による波高減衰は期待できないといえる。

6. む す び

以上、斜面上の抽水植物群落 (円柱群) による波高減衰に関して、実験と解析モデルによって検討した。主要な結論は次のとおりである。

1) 斜面上の抽水植物群落 (円柱群) の波高減衰機能は碎波点の位置に依存し、碎波する前に植物群落へ入射する場合は効果を発揮するが、碎波してからは、効果は

期待できない。

2) 提案した解析モデルは円柱群中を伝播する波の波高変化を推定する方法として有用である。

3) 解析モデルにより、碎波した後で円柱群の効果が見られないのは、円柱群による損失エネルギーが碎波による損失エネルギーの3割程度にしかならず、波高変化に対してはほとんど無視できる程度になることが要因である。

4) 現地条件におけるヨシ原の波高減衰機能は潮位によって大きく変化し、満潮に近いときは効果を発揮するものの、潮位が低下するにつれて効果は無くなっていく。

なお、本研究は抽水植物群落を剛な円柱群で模擬したものであり、今後実植生の動揺特性や形状特性など考慮した解析モデルの構築が必要である。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・塩田啓介・土井宏行(1981): 有限振幅波の浅水変形と屈折変形, 海岸工学講演会論文集, 第28回, pp. 99 - 103.
- 合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計(補強改訂), 鹿島出版社
- 首藤伸夫(1974): 非線形長波の変形-水路幅, 水深が変化する場合-, 海岸工学講演会論文集, 第21回, pp. 57 - 63.
- 水理公式集(平成11年度版)(1999): 土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会編, 土木学会.
- 財団法人リバーフロント整備センター(2001): 平成12年度航走波対策検討業務報告書.
- 高崎忠勝・大嶋吉雄・市川義隆(2003): 荒川下流ヨシ原保全における航走波の影響について, リバーフロント研究所報告, 第14号, pp. 225 - 232.
- 林建二郎・藤井優宏・重村利幸・萩原運弘(2000): 粗な樹林密度に配置された円柱群に作用する波力と消波機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 766 - 770.
- 福岡捷二・甲村謙友・渡辺明英・三浦央晴(1992): 船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果, 水工学論文集, 第36巻, pp. 713 - 716.
- E. E. Bouter(1991): WAVE DAMPING BY REED An investigation in environmentally friendly bank protection, P.I.A.N.C., pp. 56-63.
- Edward B. Thornton, R. T. Guza(1983): Transformation of Wave Height Distribution, Journal of Geophysical research, vol.88 No.C10, pp. 5925-5938.
- Hugo Coops, Gerard Van der Velde, Effects of waves on helophyte stands (1996): mechanical characteristics of stems of Phragmites australis and Scirpus lacustris, Aquatic botany, vol.53, pp. 175-185.
- Robert G. Dean and Christopher J. Bender(2006): Static wave setup with emphasis on damping effects by vegetation and bottom friction, Coastal Engineering, vol.53, pp. 149-156.