

複雑な断面をもつ海浜での波高、平均水位の変化と遡上

水 口 優*・大久保 義人**

1. はじめに

最近、わが国において沿岸域での波浪制御のために人工リーフを用いることが流行しようとしている。自然海浜状態ばかりでなく、そのような底面形状の変化として扱えるような構造物がある場合にも適用可能で、かつ比較的簡単な波浪変形モデルの出現が望まれるところである。人工リーフを設置した場合、または自然状態のリーフ海岸のように複雑な断面をもつ海浜における波浪の変形の研究は既にいくつかある（例えば津嘉山・仲座, 1987）。人工リーフの設計という観点からの波浪変形の検討は、今のところ実験的な検討に委ねられることが多い（宇多・小俣, 1987）。本論文では、まず、現在の規則波の浅水・碎波変形・遡上に関する知識を（素直に）総動員して、そのようなモデルを作る。ついで、そのモデルを人工リーフ設置による波浪制御の問題に適用し、そのために行われた模型実験の結果と比較する。あわせて、モデルの適用性および問題点を検討する。

2. モデルの作成と検定

(1) 波高・平均水位の変化と遡上のモデリング

ある断面形状をもつ海浜に、ある地点での入射波（規則波）が与えられた時を想定する。波高および平均水位の変化だけが欲しいものとする。最近海浜流の計算のための波浪場の算定を目的として、数値波動解析法に基づくモデルも提案されている（例えば、Dibajnia・渡辺, 1987）。しかし、碎波点付近の特徴ともいえるべき非線形性を取り込めるという事、さらに簡便さ、ひいては現象の見通しの良さを考慮して以下のようなモデルを作成した。

a) 与えられた波は、碎波するまでは Shuto (1974) のクノイド波一次近似モデルにより波高が変化するものとする。さらに、Isobe (1985) によるそのオーダーでの radiation 応力と波高の関係を用いて水平水位の変化 (set-down) を求める。

斜面勾配の影響を無視すれば、Sakai・Battjes (1980) のようにほぼ厳密な定形進行波の解に基づくエネルギー

流束法も考えられるが、今の場合、斜面上の、それも以下にのべるようにかなり急勾配の場合の浅水変形であり、それだけの労力を払う価値はないであろう。さりとて、碎波点まで微小振幅波理論を用いるというのにもかにも旧式となる。

b) 碎波条件は Goda (1975) の局所的な波高水深比で定まる実験式に、Izumiya・Isobe (1986) の修正勾配法を用いて断面地形の非一様性について補正する。

斜面上での碎波条件としては、現在のところこれ以上のものはないであろう。もちろん、もとのデータのばらつきも大きいのでそれなりの誤差は覚悟しなければならない。

c) 碎波後は、Mizuguchi (1980) の非一様勾配斜面上で、波の再成をも考慮するエネルギー逸散モデルを採用する。ただし、平均水位の変化は、逸散モデル中の水深に組み込み、波のエネルギー方程式と周期平均量の運動方程式を連立させて解く。碎波帯内の平均水位の変化を算定するにあたり波高と radiation 応力の関係にも一次のクノイド波理論を用いた。再成後の二次的な碎波条件としても一次碎波の時と同じ条件（ただし、水位は平均水位を取ることになる）を用いる。

(人工) リーフ上の波浪変形としては、その沖側端での入射波の碎波とリーフ内での碎波後の波の再成が大きな特徴である。リーフ上での波高減衰に指数関数を当てはめる実験式がいくつか提案されている（例えば、高山ら, 1977）が、碎波点がリーフ端から外れる場合、リーフ内の地形が一樣水深でない場合など、一般的な場合に拡張するのは難しい。なお、ここで用いたモデル中の実験定数は、碎波後一樣水深が続く場合の再成時の波高水深比となるパラメータのみで、その値は、0.5 とした。

d) 以上のモデルから計算される平均水位の上昇を考慮した上での水深が 0 となる地点を平均汀線とする。

遡上波のモデルとしては、次のように考えた。

e) 遡上波先端の運動は平均汀線を原点として入射波の周期でその斜面上を放物運動する（例えば Van Dorn, 1976）ものとして与えられる。

平均汀線は遡上波の運動の平均位置でもあるというのが、素直な気もするがここでは波が平均汀線まで来てそ

* 正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科

** 中央大学学生 理工学部土木工学科 (現(株)地崎工業)

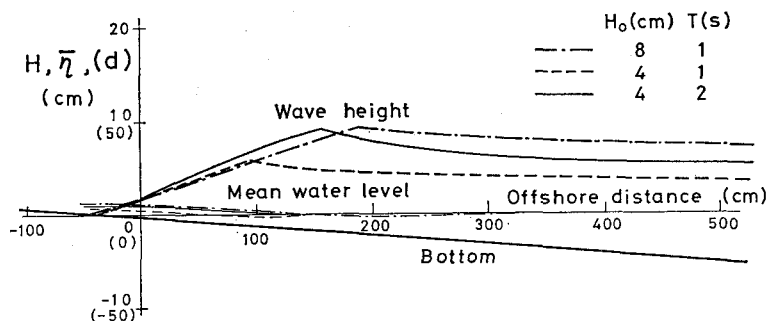


図-1 一樣勾配(1/20)斜面上での波高, 平均水位の変化の計算例. H_0 は沖波波高である.

こから投げ挙げられるというイメージに従った.

以上のような考え方に基いてマイコン(SORD M343 SXII) 上でプログラムを作成した.

(2) モデルの検定

作成したモデルの特性を見るために一樣勾配斜面上での計算を行った. 図-1 は, 波高および平均水位の変化の例である. 砕波後の波高減衰率を見積る際に, 一樣勾配斜面上では波高水深比が一定となるという条件を使っている. その通りになっている. 斜面勾配が緩い場合はこの仮定は砕波後の波高減衰率を過小評価することになる. この図で特徴的なのは, 当然の事であるが, 砕波帯内での波高はほとんど入射波によらないことである. 又, 砕波帯内の平均水位の上昇量はほとんど砕波点の位置によって決まる.

図-2, 3 は砕波帯外の波高変化モデルの妥当性を検証するために, 砕波水深 d_B および砕波波高 H_B について, 沖波波高を用いた合田(1970)の図表とモデルの結果とを比較したものである. 砕波点位置はほぼ一致するものの, 砕波波高については常にモデルの方が大きな値を示している. 斜面勾配が急なほど, 波形勾配が小さいほど, ずれが大きいことから, Shuto のモデルが誤差を生じているものと考えられる. 図-4 は, 遡上の最大値(静水時の汀線から測った打ち上げ高さ)について, Ogawa・

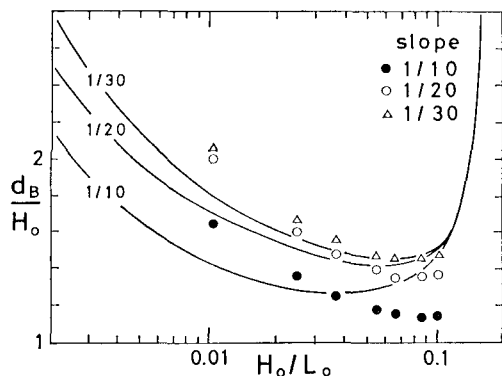


図-2 砕波水深 d_B の比較

図中の実線は合田(1970)による.

Shuto (1984) の実験式とモデルの結果とを比したものである. モデルでは, 波形勾配が大きくなる時の減少の程度がやや小さいものの両者の一致は, 砕波条件に比すれば満足すべきものである. 砕波波高が合わなくても打ち上げ高さが合うと言うのは, 一見おかしいものの, 打ち上げには砕波帯内の平均水位の上昇と遡上幅が効くと考えれ

ば, 前者については砕波前後の radiation 応力(平均水位の変化)だけが正しく見積もれていれば良いのである.

3. 人工リーフ設置による波浪および遡上の制御の実験

モデルの妥当性を確認するための実験の概要は以下の通りであ断面地形は図-5 中に示すように, 後浜で 1/20,

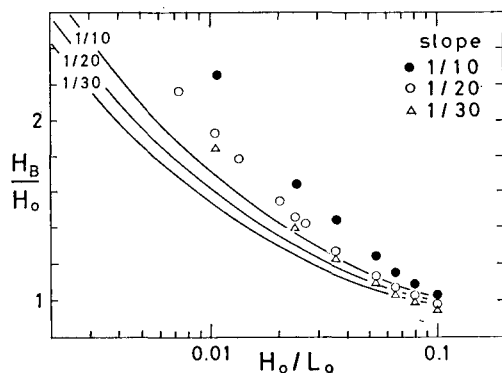


図-3 砕波波高 H_B の比較

図中の実線は合田(1970)による.

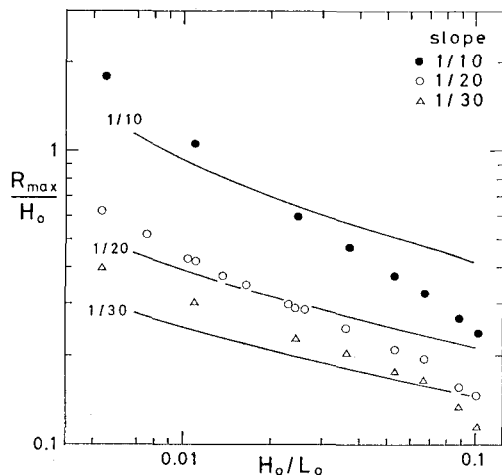


図-4 最大打ち上げ(遡上)高さ R_{max} の比較

図中の実線は Ogawa and Shuto (1984) による.

前浜で 1/6, その沖側水深が約 10 m から 1/100 という現地海岸の一つの典型例である。その前浜部から沖にかけて人工リーフの設置の計画があり, そのため 1/50 のスケールの模型実験を行ったものである。人工リーフの幅を模型上で 80, 120, 160 cm の 3 種類 (設置時の断面形状の例は図-6, 7 に示す), 水深 (潮位) を 2 種に対して周期を 3 種 (1.41 s, 2.13 s および 2.27 s) とし, 入射波高を変えて計 107 ケースの実験を行った。測定した項目は水深 39.6 cm (または 35.3 cm) 地点での入射波の水位変動, 碎波帯内外 5~60 地点での水位変動, および遡上波の最大値, 最小値である。水位変動は容量式波高計で測定し, 波高及び平均水位の岸沖方向分布を求めた。遡上高の観測については, 5 人の目視の平均値を取った。

4. モデルと実験の比較

モデルと実験の比較は全てのケースについて行ったが, ここでは代表的な例について示す。

図-5, 6, 7 は, 波高および平均水位の岸沖方向変化について実験とモデルを比較したものである。

図-5, 6 は高潮位に対応する水位 (沖側水深 39.6 cm) 時に, 設計波に対応する周期 (約 2.17 s) の波が入射する場合の例である。図-7 は低潮位時の水位時において日常的に見て大きい波が入射する場合にあたる。平均水位の変化についてはどのケースも良くあっているのに, 波高の変化については, 碎波点付近ではリーフの無い場合のみがほぼあっている。これは, リーフの沖側の勾配が 1/3 と急勾

配なために, 波高の浅水変化モデル, 碎波条件式共にその適用範囲を越えて, 過大評価となっていると考えられる。ただし, 平均水位は, 図-5 を除き, 碎波点の位置がそれ程ずれないことと radiation 応力の算定に一次のクノイド波理論を用いているために, その値はほぼ妥当

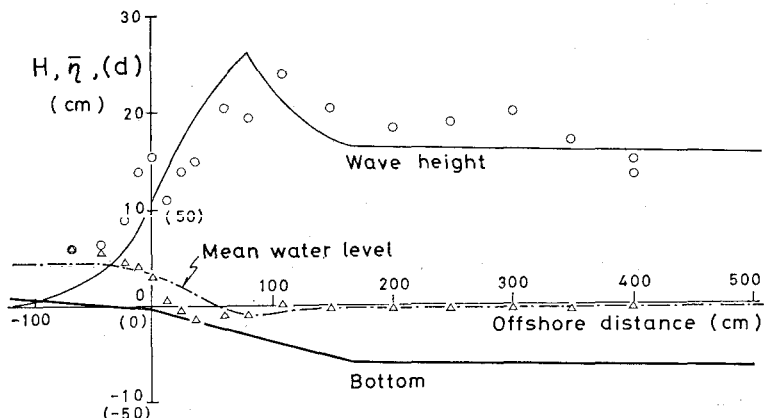


図-5 リーフの無い場合の波高と水位の変化 (沖波波高 $H_0=12.1$ cm, 周期 $T=2.15$ s)

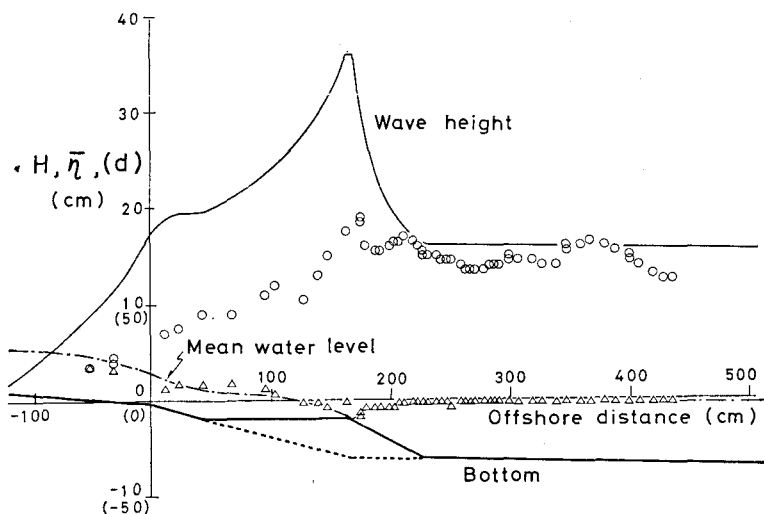


図-6 リーフ (幅 120 cm) 設置時の波高と水位の変化 ($H_0=12.3$ cm, $T=2.13$ s)

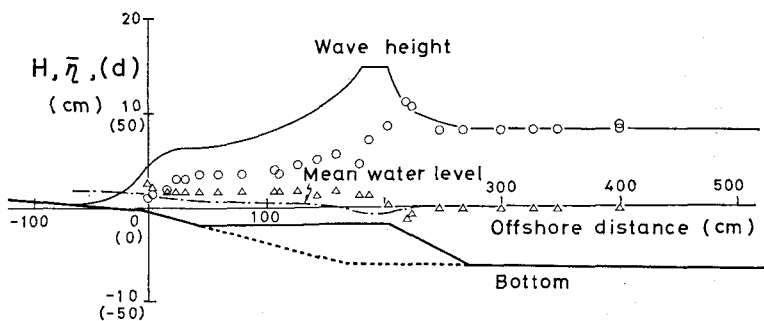


図-7 リーフ (幅 160 cm) 設置時の波高と水位の変化 ($H_0=8.0$ cm, $T=1.42$ s)

なもの得られて, 一致したものと考えられる。また, 実験では 図-6 に顕著のようにリーフ沖側斜面での反射も見られた。

図-8(a), (b), (c), (d), 図-9(a), (b), (c), (d), 図-10(a), (b), (c), (d) は, 地形, 水深, 周期は固定したま

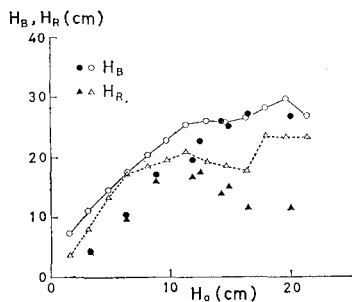
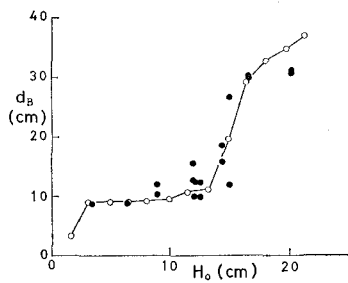
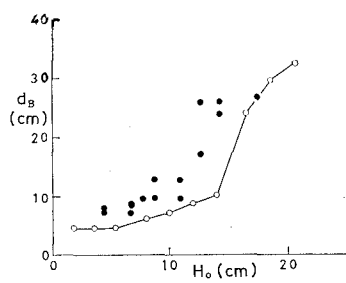
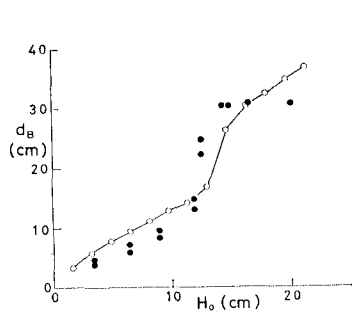
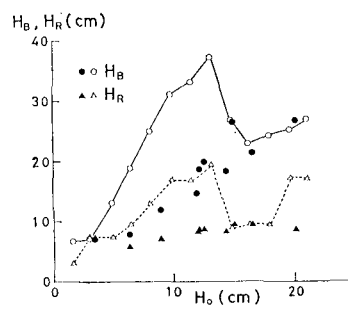
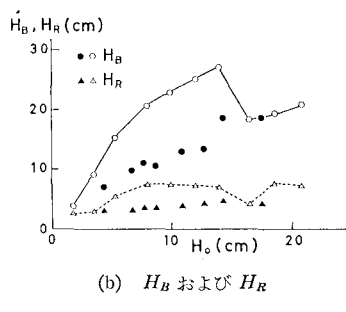
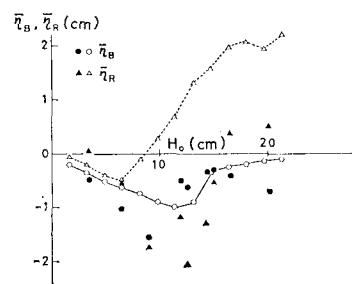
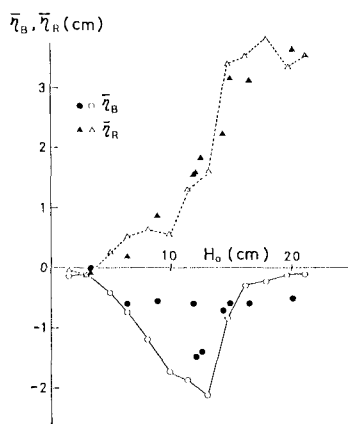
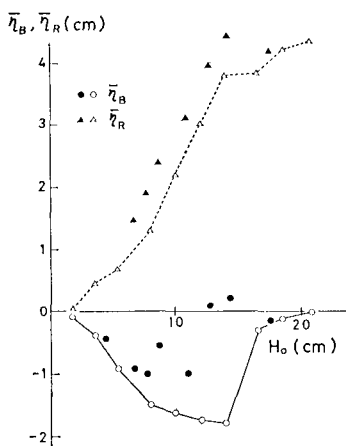
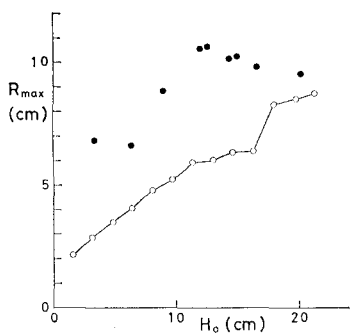
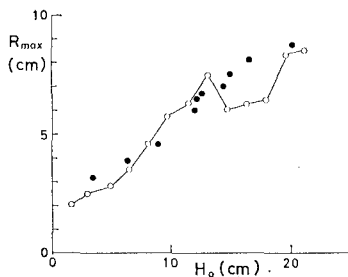
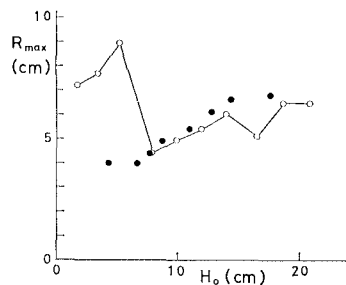
(a) 碎波水深 d_B (a) d_B (a) d_B (b) 碎波波高 H_B および設置予定リーフの岸側端での波高 H_R (b) H_B および H_R (b) H_B および H_R (c) 碎波点での水位 η_B および設置予定リーフの岸側端での水位 η_R (c) η_B および η_R (c) η_B および η_R (d) 最大打ち上げ高さ R_{max} (d) R_{max} (d) R_{max}

図-8 リーフ設置前の状態でのモデル(白抜き)と実験(黒塗り)の比較(高潮位時で、 $T=2.13$ s の場合)

図-9 リーフ設置(幅 120 cm) 状態でのモデルと実験の比較(高潮位時で、 $T=2.13$ s の場合)

図-10 リーフ設置(幅 160 cm) 状態でのモデルと実験の比較(低潮位時で、 $T=1.41$ s の場合)

ま入射波の波高を変えていった時の、碎波水深 d_B 、碎波波高 H_B 、リーフ設置時のその岸側端での波高 H_R 、碎波点での平均水位の低下量 $\bar{\eta}_B$ 、リーフ岸側端での平均水位の上昇量 $\bar{\eta}_R$ および最大打ち上げ高さ R_{max} について実験値とモデルによる計算値をプロットして比較したものの例である。図-8~10 においては、 d_B に関してはどの場合も比較的よく一致する。リーフの無い場合の図-8 においては、 H_B 、 $\bar{\eta}_B$ については、(特に波高が大きく 1/100 勾配斜面上で碎波する時) よく一致しているのに対し、 H_R 、 $\bar{\eta}_R$ はモデルの方が大きく出ている。図-5 の結果とあわせて以下のような解釈が可能であろう。まず、碎波水深および波高が合っているのは、最大勾配が 1/6 とそれほど急でないために碎波以前のモデル化が成功しているためである。碎波後の(特に平均水位の)不一致は、set-down の開始地点がモデルでは碎波点であるのに対し、実際には、突っ込み点となっていること、および碎波後の波の波形がクノイド波程にやせ細っていないことによるモデルでの平均水位の上昇の少なさのためである。 R_{max} については、 $\bar{\eta}_R$ の評価がうまくいっていないぶんだけ差を生じている。なお、このケースは初期の実験であり、実験の(特に遡上波の目視観測の)精度も問題である。

図-9 は、全体的にみて、最もよく一致したケースである。まず、モデル、実験共に人工リーフによる碎波点のコントロールがよくでている。しかし、図-6 にも見られるように、リーフ上およびその沖側斜面で碎波する場合は、 H_B 、 H_R 共にモデルの値が実験値の倍程度にもなっており、既に述べた急勾配斜面上での波高の浅水変位のモデル化や碎波条件における問題点が出てくる。佐藤ら(1985)の言う段落ち型碎波や戻り流れによる底部での跳水的な碎波と頂部での碎波が同時に発生すると言ったケースも見られた。平均水位の変化については既に述べたように結果としての一致はよい。それは、そのまま最大打ち上げ点の一致の良さにつながっている。

図-10 は、リーフの幅が最も広く、水位も低くかつ入射波の周期も小さいという、リーフの効果が最もよくでるケースである。傾向は、図-9 の場合と同じく両者の一致は悪くない。ただし、 H_0 が小さくリーフを通過する場合は R_{max} で両者の差が大きいが、原因は主として遡上域で斜面勾配が変わるためであろう。

最後に、遡上波の全振幅についてモデルの考え方と実験値の比較をしたものが図-11 である。十分満足すべき結果であり、最大打ち上げ高さにおける不一致は、主として平均水位の変化における差異によるものと考えられよう。

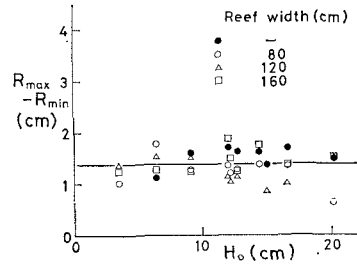


図-11 遡上波の全振幅
図中の実線は放物運動モデルによる。

5. おわりに

現地海浜のような複雑な断面形状の上に、さらに人工リーフなどの構造物を設置した場合にも適用できるように波高、平均水位の変化と遡上点を算定するモデルを作成した。モデルと模型実験を比較したところ両者の一致は定性的には満足すべきものであったが、定量的には解決すべき問題点は多いことがわかった。なかでも急勾配斜面(を含む複雑な断面地形上)での浅水変形(反射を含む)、碎波条件に関する理解を深めることが必要である。ついで、碎波後の波の合理的なモデルを作ることであろう。

謝 辞: 実験を行うに当たっては技術員の渡部武士君をはじめとして研究室のみんなに、論文を書き上げるに当たっては、日本大学の久保田進さん、元院生の赤井鈴子さんにお世話になった。

参 考 文 献

- 1) 宇多高明・小俣 篤: 海岸, (社) 全国海岸協会, No. 27, 67~76, 1987.
- 2) 合田良実: 土木学会論文報告集, 180号, pp. 39~49, 1970.
- 3) 佐藤道郎・羽田好勝・中江周作・吉松秀夫: 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 85~89, 1985.
- 4) 高山知司・神山 豊・菊池 治: 港研資料, No. 278, 32 p., 1977.
- 5) 津嘉山正光・仲座栄三: 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 76~80, 1987.
- 6) Dibajnia, M.・渡辺 晃: 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 291~295, 1987.
- 7) Dally, W. R., R. G. Dean and R. A. Dalrymple: Proc. 19th ICCE, pp. 82~98, 1987.
- 8) Goda, Y.: Coastal Eng. in Japan, 18, 13~26, 1975.
- 9) Isobe, M.: Coastal Eng., 9(4), 309~325, 1985.
- 10) Izumiya, T. and M. Isobe: Proc. 20th ICCE, pp. 318~327, 1986.
- 11) Mizuguchi, M.: Proc. 17th ICCE, pp. 278~289, 1980.
- 12) Ogawa, Y. and N. Shuto: Proc. 19th ICCE, pp. 198~205, 1984.
- 13) Sakai, T. and J. A. Battjes: Coastal Eng., 4, 65~84, 1980.
- 14) Shuto, N.: Coastal Eng. in Japan, 17, 1~12, 1974.
Van Dorn, W. G.: Proc. 15th ICCE, pp. 738~751, 1976.