

不透過潜堤による波の変形と地形変化

伊 福 誠*・高石 盛大**・金澤 剛***

1. ま え が き

近年、海岸線の埋め立てによる自然海岸線の減少や海浜の消失といった海岸工学上極めて重要な問題が生じ、こうした問題に対処するため養浜によって海浜を取り戻そうとする努力がなされている。養浜海岸における消波や土砂の流出防止のための海岸構造物としては離岸堤や潜堤が考えられる。しかしながら、良質な海岸環境の整備が望まれる今日潜堤は重要な海岸構造物として築造されるものと考えられる。

これまで、波の特性と潜堤の天端幅や天端の水深等とを関連させようとする理論的および実験的研究がなされ、潜堤の消波効果に関する知識は現在までのところかなり得られている(井島・佐々木, 1971, 永井ら, 1975, 高山ら, 1985)。また、土砂の流出防止に関しては榎木(1957)の潜堤が漂砂におよぼす影響や田中(1976)の広天端幅の潜堤の築造にともなう砂浜安定効果について論じた研究もある。田淵・滝川(1981)は不透過あるいは透過潜堤近傍の消波効果について数値解析的に検討しているが、潜堤の前面や背後の波高分布および潜堤による波の反射は調べていないようである。これまで、潜堤を築造した海浜全域を対象とした波の変形や海浜変形等について数値解析的に検討したものは少ない。このことは海浜の反射をいかに取り扱い岸側の境界条件をどの様に設定するかが極めて困難な問題となるからであると思われる。本論文では著者ら(1989)が長波の解析に用いた数値モデルに碎波によるエネルギー損失項を導入して傾斜海浜上に潜堤を築造した場合の波の変形を波の諸特性と潜堤の天端幅や潜堤の天端水深等と関連させながら調べる。さらに、海岸構造物を築造した場合に問題となる構造物周辺の洗掘や海浜の変形についても解析しようとするものである。

2. 碎波によるエネルギー損失のモデル化

間瀬ら(1986)は不規則波の浅水変形ならびに碎波後

の波高変化に関する計算モデルを提案し室内実験結果と比較・検討している。彼らは碎波後の波高変化は Battjes (Singamsetti・Wind, 1980) の bore モデルを用いて定式化しており、碎波の限界波高の算定には合田(1975)が提案した式の中の係数を若干変えたものを用いている。

碎波後の波高変化を bore モデルを用いて記述した既往の数値モデルは、波高分布が実験結果と良く合うように決められるべき係数を含んでいる。

ここでは、碎波によるエネルギー損失に関して以下に示すような取り扱いを試みた。碎波によるエネルギー損失量は段波のエネルギー損失量によって評価する。碎波限界は合田が提案した式あるいは碎波の波高水深比で記述するのではなく、空間波形の水面勾配で記述する。

数値計算においては各断面におけるエネルギー損失量を以下のような方法で求める(図-1)。

①任意の時刻において断面 j で水面勾配が正から負、断面 $j+k$ で水面勾配が負から正に変わるものとする。

②エネルギー損失は断面 j と断面 $j+k$ 間で生ずるのである。各断面でのエネルギー損失量は水面勾配で按分する。断面 j のエネルギー損失量 $(E_0)_j$ は

$$(E_0)_j = m_j \Delta E / M / (k \Delta x) \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 m_j は断面 j の水面勾配、 $M = m_j + m_{j+1} + \dots + m_{j+k}$ 、 ΔE は段波のエネルギー損失量、 Δx は空間きざみである。

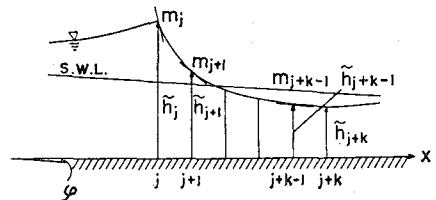


図-1 碎波によるエネルギー損失の評価

3. 波の伝播および地形変化の解析

(1) 基礎方程式

底面に沿って x 軸、底面より鉛直上向きに z 軸をと

* 正会員 工修 愛媛大学講師 工学部海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛県 土木部

*** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科

り、碎波によるエネルギー損失を考慮すると運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \cos \varphi \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + g(\sin \varphi + S_f + E_b) = 0 \quad (2)$$

と表せる。ここに、 u は流速、 g は重力の加速度、 φ は水平面と底面とのなす角、 $\bar{h}$ は水位 ($\bar{h} = h + \eta$, h : 静水深、 η : 水面変動量) E_b は碎波によるエネルギー損失量、 $S_f = n^2 u |u| / R^{4/3}$ (n : Manning の粗度係数、 R : 径深) である。

連続の式は

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial(u\bar{h})}{\partial x} + \frac{u\bar{h}}{B} \frac{\partial B}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

と表せる。ここに、 B は水路幅である。

漂砂量と海底地形の変動量との間には現象を二次元と考えた場合、底質の空隙率を λ とすると

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (4)$$

が成立する。ここに、 z_B は任意の高さを基準にした局所的な底面の高さ、 q は漂砂量である。

(2) 数値解析法

式 (2) の初期条件は

$$z(0) = \bar{h}_j (j=1, \dots, N) \quad (5)$$

とする。ここに、 $\bar{h}_j$ は岸側境界から仮想流量 Q_0 を流した際、不等流計算によって求めた各断面の水位、 N は断面の数である。

沖側および岸側境界における境界条件は

$$z(t) = h + \eta_L(t) + \eta_R(t) \quad (\text{沖側})$$

$$u(t) = -Q_0 / \bar{h}(t) \quad (\text{岸側}) \quad (6)$$

とする。ここに、 $\eta_L(t)$ および $\eta_R(t)$ は時刻 t における入射波、反射波の水面変動量である。

式 (4) に対する沖側および岸側境界における境界条件は

$$\partial q / \partial x = 0 \quad (7)$$

とする。

底質の移動限界流速 u_{bc} は Komar・Miller (1974) による経験式

$$u_{bc}^2 / (\rho_s \rho_f - 1) g d = 0.21 \{ u_{bc} T / \pi d \}^{1/2} \quad (8)$$

を用いて算出する。ここに、 ρ_s 、 ρ_f はそれぞれ底質および流体の密度、 T は波の周期、 d は底質の粒径である。

漂砂量式は現地観測および室内実験で得た結果に基づき著者の一人 (1990) が波動場における浮遊砂濃度分布および漂砂量の解析で得た波の半周期で平均した漂砂量式

$$q / w_0 d = 3.23 \theta^{0.61} \quad (9)$$

を準用する。ここに、 w_0 は静止流体中における物質の沈降速度、 θ は non-dimensional relative stress であり

$$\theta = \rho_f u_{bm}^2 / (\rho_s - \rho_f) g d \quad (10)$$

で与えられる。式 (10) 中の u_{bm} はポテンシャル理論で得られる底面における岸沖方向の最大水粒子速度であるが、ここでは式 (2) と式 (3) から得られる流速 u の値を使用するものとする。また、潜堤が築造された断面における漂砂量は 0 とする。

解析は特性曲線法により、空間きざみ Δx と時間きざみ Δt は Courant の条件を満足するように選ぶものとする。

碎波によるエネルギー損失量を評価するにあたって波が碎ける際の波頂角をいかに評価するかが問題になる。Stokes (Lamb, 1932) によればこの角度は 120° である。また、首藤 (1976) は海岸近くの津波の挙動を角谷の式に基づいて解析し孤立波の碎波条件を求め、碎波の波高水深比および波頂角は、それぞれ 0.89 および 110° であり、波頂角は Stokes の求めた 120° に極めて近いことを得ている。さらに、滝川ら (1983) の実験結果および数値解析結果によれば spilling 型碎波の波頂角はほぼ 120° である。こうしたことから、波が碎ける際の波頂角は 120° を基準にする。なお、水面勾配は最小二乗多項式近似により求める。Manning の粗度係数および単位幅当りの仮想流量は著者らの長波の伝播の解析において観測結果をよく再現した値、 $0.04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ および $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ を用いる。

式 (2) と式 (3) から得た流速をもとに式 (4) で地形変化を計算する訳であるが、海底地形が変化すれば、波や流れの場も変化し互いに干渉しあう。地形変化による波や流れの変化を考慮した非定常解析は可能であると思われるが、ここでは準定常の扱いをし、地形変化は波と流れの場に影響を及ぼさないと仮定する。なお、底質の粒径および空隙率はそれぞれ 0.2 mm および 0.5 、底質および流体の密度はそれぞれ 2.65 g/cm^3 および 1.025 g/cm^3 とする。

(3) 反射率

Guza ら (1984) に従い、一地点における水面変動量と岸沖方向流速から得られる“岸向き特性量”と“沖向き特性量”をもとに次式で反射率 K_R を算出する。

$$K_R = \frac{\text{沖向き特性量の最大値と最小値との差}}{\text{岸向き最大値の最大値と最小値との差}} \quad (11)$$

4. 解析結果

特性曲線法に基づく解析において固定格子法を使用する場合、水位や流速の内挿法として線形内挿法あるいは放物型内挿法が用いられるがここでは放物型内挿法を採用する。

(1) 水槽実験による結果との比較

図-2 に示す造波プールの中心線に沿う 8 測点において得た波高と実験条件をもとに計算したそれとを比較したのが図-3 である。碎波点は計算結果が幾分沖側にある。また、碎波点より岸側における波高は計算結果が小さめであるが概ね両者は一致しているのではないかと考える。

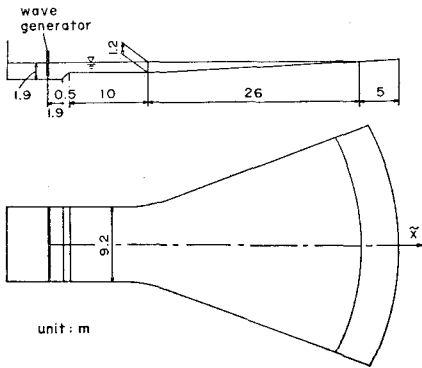


図-2 実験水槽の概略図

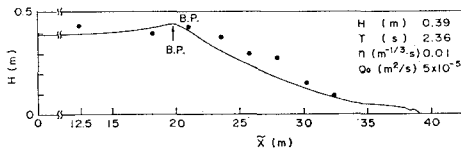


図-3 波高分布

(2) 現地海浜モデル

図-4 に示すような現地スケールの海浜の斜面上に潜堤が設置された場合を考える。沖側の境界から一様水深部までの水平距離が約 30m, そこから岸側の境界までの水平距離が約 180m, 海浜勾配は 1/30 である。潜堤ののり勾配は海岸保全施設築造基準解説（海岸保全施設築造基準連絡協議会, 1987）において 1/3~1/5 が適切

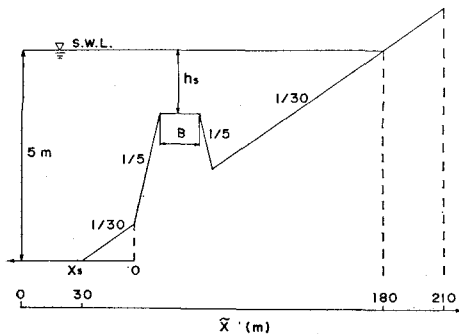


図-4 海浜モデル

であろうとされている。ここではのり勾配は 1/5 として解析する。波高の減衰に影響を及ぼす潜堤の天端水深は 1.5m と 2m の二通り、天端幅は 5m, 10m, 20m の三通りとする。

(3) 波高低減係数

図-4 に示す現地スケールの海岸を解析対象とした場合の初期波の波高は 1m, 周期は 8s と 10s とした。

潜堤による波高の低減効果について検討するため、波高低減係数を $R_D = H_{sb}/H_s$ (H_s , H_{sb} : 無堤および有堤の波高) で定義する(高山ら(1985)はこの比を潜堤の影響係数と定義している)。天端水深が 1.5m の場合の波高低減係数を沖側の境界からの水平距離の無次元量 $\bar{X}/H_0$ とともに示したのが図-5 である。図中の実線、一点鎖線および破線はそれぞれ天端幅が 5m, 10m および 20m の場合である。潜堤の沖側では潜堤の天端幅が 10m の場合波高低減係数は 0.92~1.05 であり、無堤の場合の波高とあまり変化がないが、潜堤の天端幅が 5m および 20m の場合には部分重複波の最小波高が生ずる付近では波高は 20~30% 程度小さくなる。潜堤の岸側の堤脚部から水深 0.8m 付近までの波高低減係数は天端幅が 5m, 10m および 20m の場合、それぞれ 0.66, 0.77 および 0.55 程度であり、潜堤の背後では潜堤の天端幅が広い場合ほど波高の低減効果が顕著であることがわかる。さらに水深が浅くなると潜堤による波高の低減効果は薄れ、汀線付近では無堤の場合とほぼ同一の波高になる。こうした傾向は広天端幅潜堤を用いた不規則波による高山らの実験結果と同一である。

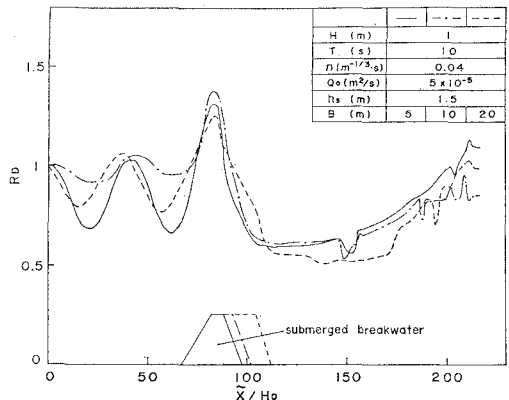


図-5 波高低減係数

(4) 反射率

a) 潜堤の堤脚部近傍の反射率

特性量から算出した反射率は天端水深が 1.5m および 2m の場合とも堤脚部からの距離が増大するとともに徐々に減少する。天端水深が 1.5m の場合、天端幅が 10m の反射率は天端幅が 5m および 20m のそれ

らの 1/3 程度である。一方、天端水深が 2m の場合、天端幅が 5m の反射率は天端水深が 1.5m の場合とほぼ同一であるが、天端幅が 10m の反射率は 20m のそれより僅かではあるが大きい。特性量から算出した反射率は堤脚部からの距離の増大とともに徐々に減少する傾向があり、その値は Healy の方法で算出したその 1.05~1.18 倍程度である。

b) 沖側の境界から汀線近傍までの反射率

潜堤の天端水深が 1.5m の場合の沖側の境界から汀線近傍までの反射率を無堤の場合の反射率とともに示したのが図-6である。図中の●は無堤の場合、◇, △, □は潜堤の天端幅が 5m, 10m および 20m の場合である。無堤の場合、反射率は汀線に近づくにつれ徐々に増大し、汀線近傍では 0.2 程度となる。潜堤の天端幅が 5m および 20m の場合、潜堤の沖側では潜堤に近づくにつれて反射率は増大し、潜堤ののり部付近で 0.25 および 0.2 程度となる。天端幅が 5m の場合、潜堤の岸側の堤脚部で最小となり、それより岸側では徐々に大きくなる。一方、天端幅が 20m の場合、潜堤の岸側ののり肩付近において一旦大きくなるが、それより岸側では天端幅が 5m の場合と似た傾向を示す。潜堤の天端幅が 10m の場合、潜堤の沖側とくに一様水深部における反射率は天端幅が 5m あるいは 20m の場合と比べるとその値は 1/2 あるいは 1/3 程度でありかなり小さい。また、潜堤付近において反射率が最大となる位置は潜堤の岸側ののり肩であり、天端幅が 5m あるいは 20m の場合と比較すると約 20m 程度岸側である。潜堤背後における反射率は天端幅が 5m および 20m の場合とほぼ同一である。(3)で示した波高の低減効果だけに着目すると潜堤の天端幅が最も大きい 20m の場合が有効であるようであるが、この場合潜堤の沖側の地点での反射率は天端幅が 10m の場合に比較すると 3 倍程度になる。

(5) 海浜変形

無堤の場合と天端幅が 20m、天端水深が 1.5m の潜堤を築造した場合の海浜変形を示したのが図-7である。図中の破線は初期海浜断面、実線および点線は計算

開始後10周期目の海浜断面を示す。なお、点線は底勾配の影響を考慮した渡辺ら(1984)の式によった場合であり式中の係数は1とした。無堤の場合、汀線近傍から沖側約 20m までは洗掘が生じ、その沖側約 5m で堆積量が最大となる。また、汀線から約 50m と 100m 付近に僅かな堆積領域がみられ、砂州の形成の可能性を示す地形変化をしている。計算に用いた波と底質の特性をもとに岩垣・野田(1971)の砂州の発生限界と比較すると、砂州の発生は Jonsson の発生限界よりも小さく深海波の波高と底質の中央粒径の比が大きくなると限界波形勾配は急激に小さくなり、波形勾配が小さくても沿岸砂州が発生することを示した岩垣・野田の分類と似た傾向を示す。

波高、周期、海浜勾配および底質粒径で海浜変形のパターンを整理した堀川ら(1974)の分類によれば、無次元パラメータはほぼ18で海浜変形のパターンは汀線が後退し沖側の領域において堆積が生ずる type 1 に属し、解析結果は彼らの分類と適合する様である。一方、有堤の場合、無堤の場合と比較すると、汀線近傍の侵食はかなり軽減される。潜堤の沖側においては部分重複波の最小波高が生ずる位置付近で洗掘、部分重複波の最大波高が生ずる付近と潜堤の沖側の堤脚部において堆積が生じている。潜堤の沖側の反射率が大きい天端幅が 5m, 20

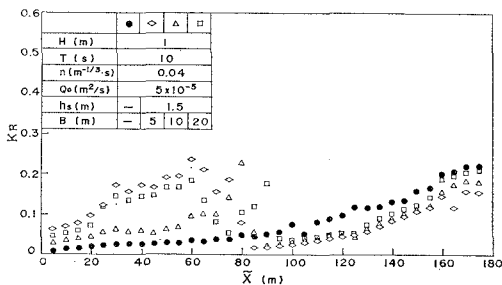
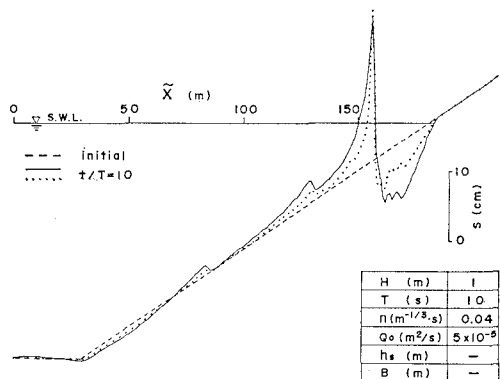
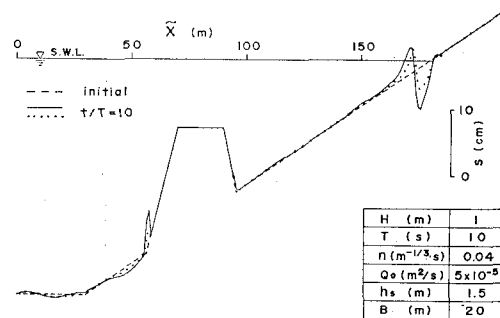


図-6 反射率



(a) 無堤



(b) 有堤

図-7 地形変化

m の場合の洗掘量および堆積量は天端幅が 10 m の場合に比べて大きく、とくに潜堤の沖側の堤脚部付近でその傾向が顕著である。

底勾配の影響を考慮した場合、無堤および有堤の場合とも汀線近傍の洗掘量および堆積量とも小さくなっているようである。また、有堤の場合、潜堤の沖側堤脚部に見られた堆積量は小さくなる。

榎木 (1967) は透過性の堤防基部の洗掘について検討し、その洗掘状況を三つのパターンに分類している。それによると、図-7 (b) の潜堤沖側堤脚部付近の地形変化は堤脚部において時間の経過とともに堆積する B 型である。榎木は最大洗掘深さは反射率が增大するにつれて増大することを得ている。数値解析によって得た潜堤の沖側における最大洗掘深さを榎木にならいう次元化した量と洗掘深さが最大となる地点における特性量から算出した反射率との関係を榎木の実験結果とともに示したのが図-8 である。図中の榎木の実験結果は堤防の設置位置が砕波点より岸側にある場合であり、洗掘量と反射率との関係を堤体の設置水深が砕波点より岸側と沖側の場合について検討した結果では、堤体を砕波点の沖側に設置した場合は岸側に設置した場合より洗掘量はかなり小さい。数値解析における砕波点は潜堤の天端水深が 1.5 m の場合、潜堤ののり肩付近であることから洗掘深さを比較するのは条件が異なるため適切ではないかも知れないが、反射率の増大につれて最大洗掘深さは増大するという傾向は榎木の実験結果と同一である。

5. あとがき

波高 1 m, 周期 8 s, 10 s の微小振幅波を初期波とし、潜堤を設置した場合の波浪変形や地形変化について調べた結果、波高の低減効果は潜堤の天端幅が深海波の波長のほぼ 1/8 である 20 m の場合が他の場合に比較して高いこと、潜堤の沖側では天端幅が 10 m の場合、天端

幅が 5 m および 20 m の場合に比較して反射率が小さいこと、潜堤の築造によって汀線付近の洗掘量は小さくなること、などが明らかになった。

なお、本研究は文部省科学研究費一般研究 c (研究代表者、山口正隆教授) の成果の一部である。

参 考 文 献

- 井島武士・佐々木富雄 (1971): 潜堤の効果に関する理論的研究-1. 不透過潜堤一, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 141~147.
- 伊福 誠・高石盛大・柿沼忠男 (1989): 傾斜海岸上における長波の伝播, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 99~104.
- 伊福 誠・後藤博光 (1990): 非対称波浪下における漂砂量, 愛媛大学工学部紀要, 第 12 巻, 第 1 号, pp. 373~382.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会 (1987): 改訂 海岸保全施設築造基準解説, pp. 222~223.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59~106.
- 榎木 亨 (1957): 沿岸漂砂に及ぼす海岸構造物の影響 (第 1 報), 第 4 回海岸工学講演会講演集, pp. 51~58.
- 榎木 亨 (1967): 海岸堤防基部の洗掘機構に関する研究 (その 1), 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 329~335.
- 首藤伸夫 (1976): 津波の計算における非線形項と分散項の重要性, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 432~436.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985): 広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 545~549.
- 滝川 清・岩垣雄一・中川政博 (1983): 有限要素法による斜面上の波の砕波変形と内部機構の解析, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 20~24.
- 田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 152~157.
- 田淵幹修・滝川 清 (1981): 離岸潜堤の消波機構に関する一考察, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 367~371.
- 土木学会編 (1971): 水理公式集, p. 542.
- 永井莊七郎・小田一紀・倉田克彦 (1975): 大水深緩斜面捨石潜堤に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 409~414.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右 (1974): 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 193~199.
- 間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一 (1986): 不規則波の浅水・砕波変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 375 号 / II-6, pp. 221~230.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 406~410.
- Guza, R.T., E.B. Thornton and R.A. Holman (1984): Swash on steep shallow beaches, Proc. 13th Conf. Coastal Eng., pp. 708~723.
- Komar, P. D. and M. C. Miller (1974): Sediment threshold under oscillatory waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 756~775.
- Lamb, H. (1932): Hydrodynamics, 6th ed., Dover Publ., p. 418.
- Singamsetti, S. R. and H. G. Wind (1980): Breaking wave-characteristics of shoaling and breaking periodic waves normally incident to plane beaches of constant slope, Delft Hydraulics Lab., Rept on Investigation, M 1371, 67p.

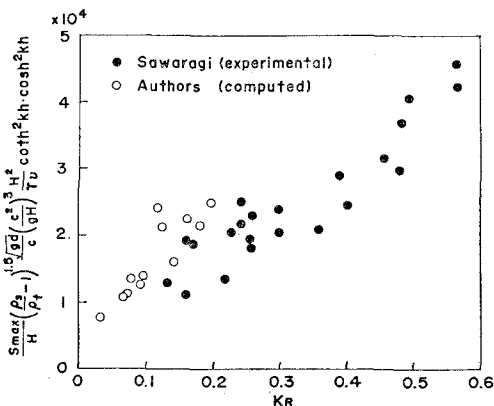


図-8 無次元洗掘深さと反射率