

波のそ上に及ぼす粗度および透水性の効果

土屋 義人*・河田 恵昭**・矢下 忠彦***

1. 緒 言

海浜は、白砂青松の美しい景観を提供し、海水浴をはじめとする各種レクリエーションの場として、また海と陸の境界における生態系に対して重要であるばかりでなく、防災上すぐれた消波機能をもっており、これらの観点から海浜の積極的な保護・育成が望まれている。近年、海浜が本来備えている機能や役割を担うことなく、むしろ調和する可能性をもつ新しい海岸侵食制御工法、たとえば head land defense works¹⁾ や sub-sand filter system²⁾ などの開発が試みられ、一方ではすでに海岸侵食や埋立によって失われた海浜を養浜によって再現しようとの計画が随所で実現されようとしている。

こうした海岸侵食制御工法の開発や人工海浜の計画は、海浜変形機構、とりわけ swash zone における漂砂機構と、粗度と透水性をもつ海浜におけるこの外力となる波のそ上機構に立脚して推進されるべきであることは言うまでもないことであろう。ところで、周知のように、波のそ上に関する従来の研究はほとんど、海岸堤防を対象としたものであって、透水性の海浜における波のそ上を取り扱った研究は、わずかに Savage^{3),4)} と Hunt⁵⁾ のものが挙げられるに過ぎない。Savage は透水性および不透水性海浜において、海浜勾配を 9 通り、砂粒を 5 種類変化させてそ上高に関する系統的な実験を行い、次のように結果を得ている。すなわち、1) 波の周期 T および底質の中央粒径 d をパラメーターとして、沖波波高で無次元化したそ上高 R/H_0 と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係および 2) 沖波波形勾配をパラメーターとして、中央粒径と透水係数 k'' を基準量とした無次元量 R/d と $H_0/L_0/d^2$ および R^2/k'' と $H_0/L_0/k''$ との関係である。次元解析の考察をするまでもなく、粗度は砂粒の粒径によって、透水性は透水係数を用いて、そ上に及ぼすそれぞれの影響が評価できるものと考えられるが、1) では粗度として用いた砂粒の粒径のほかにもそ上高に周期の影響が入り、2) ではそ上高と波の特性をいずれも中央粒径あ

るいは透水係数で無次元化しているため、粗度と透水性がそ上高に及ぼす影響を別個に評価することはできない。一方、Hunt は Beach Erosion Board で行われた実験結果から、透水性海浜における波のそ上高は、不透水性滑面の海浜のそ上高に粗度と透水性の影響をそれぞれ独立に表す係数を掛けることによって得られると考え、簡単な実験式でそ上高を表している。もとより、これらの関係式では、海浜の粗度や透水性のそ上高に及ぼす影響が線形的であるという仮定に基づくものであるが、後述するようにこれが適用できるのは、たとえば波形勾配や海浜勾配のごく限られた範囲であって、一般的にこの関係は成立していないものと考えられる。

本研究では、次元解析によって Savage の実験結果を再整理し、波のそ上に及ぼす海浜の粗度と透水性の効果を見出すとともに、最近の海岸侵食制御工法の 1 つである sub-sand filter system の稼働によって海浜に suction が働く場合、すなわち透水係数の人為的な増加と同様の効果が期待される場合のそ上高の変化について若干の検討を行う。

2. 波のそ上に及ぼす粗度の効果

いま、次元解析によれば、海浜の粗度と透水性を考慮した場合のそ上高は、次式で与えられよう。

$$\frac{R}{H_0} = f_1 \left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \beta, \frac{H_0}{h_0}, \frac{d}{H_0}, \frac{\sqrt{k''}}{H_0} \right) \dots (1)$$

ここに、 $\tan \beta$: 海浜の勾配、 h_0 : 一樣水深および k'' : $[L^2]$ の次元をもつ透水係数であって、 $[LT^{-1}]$ の次元のいわゆる透水係数 k とは、次のような関係式で表される。

$$k'' = \frac{k\nu}{g} \dots (2)$$

ここに、 ν : 動粘性係数および g : 重力の加速度である。さらに、波のそ上に及ぼす粗度と透水性の効果は、波の作用した海浜長に比例すると考えられるので、波高 H_0 よりむしろ汀線からのそ上距離 $R_0/\sin \beta$ によって表示されるとき、式 (1) は次のようになる。

$$\frac{R}{H_0} = f_2 \left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \beta, \frac{H_0}{h_0}, \frac{d \sin \beta}{R_0}, \frac{\sqrt{k''} \sin \beta}{R_0} \right) \dots (3)$$

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 ** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
 *** 正会員 工博 運輸省第四港湾建設局

表-1 Savage による波のそ上の実験条件

Sand Dia. d (mm)	Impermeable slope								
	1/30	1/10	1/6	1/4	4/9	2/3	1/1	2	Vertical
Smooth	x	x	x	x	x	x	x	x	x
0.2	x	x	—	—	—	—	—	—	—
1.0	x	x	x	x	x	x	x	x	—
2.0	x	x	x	x	x	x	x	x	—
3.5	x	x	x	x	x	x	x	x	x
10.0	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Permeable slope								
	0.2	x	x	x	—	—	—	—	—
	1.0	x	x	x	x	—	—	—	—
	2.0	x	x	x	x	x	x	x	x
	3.5	x	x	x	x	x	x	x	x
	10.0	x	x	x	x	x	x	x	x

Slopes tested indicated by x

ここに、 R_0 は滑面における波のそ上高である。式(3)において、右辺の第4の無次元量は粗度の効果を表し、第5の無次元量は透水性の効果を示している。さて、表-1に示したように Savage による膨大な実験結果を再整理するにあたり、実験水槽の一樣水深が全実験にわたって $h_0=38.1$ cm であって、沖波波高が水深のほぼ $1/3$ 以下であることから、法先水深の直接的な効果を省略できるものとし⁹⁾、そ上高に及ぼす粗度と透水性の効果を見出すことにすれば、式(3)は次式のように近似される。

$$\frac{R}{H_0} = f_3 \left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \beta, \frac{d \sin \beta}{R_0}, \frac{\sqrt{k''} \sin \beta}{R_0} \right) \dots \dots \dots (4)$$

また、不透水性海浜および滑面の海浜では式(4)はそれぞれ次のようになる。

$$\frac{R_i}{H_0} = f_4 \left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \beta, \frac{d \sin \beta}{R_0} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{R_0}{H_0} = f_5 \left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \beta \right) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 R_i は不透水性海浜におけるそ上高を表す。

図-1 は不透水性海浜において、 d/R_0 をパラメーターとして、海浜勾配 $\tan \beta$ が $1/10$ と $1/30$ の場合のそ上高を再整理したものであり、 d/R_0 を一定とすれば、無次元そ上高が波形勾配のみの関数として与えられ、式(5)の関係が成立していることがわかる。図中、 $d/R_0=0$ の曲線は図-2に示した滑面の海浜における波のそ上高 R_0 を与えるものであり、滑面における無次元そ上高 R_0/H_0 は式(6)の表示の通り、海浜勾配が一定であれば、波形勾配のみの関数で表されることが再確認される。ただし、滑面の海浜においても海浜勾配が大きくなると、波そのもののそ上高と飛沫のうちあ

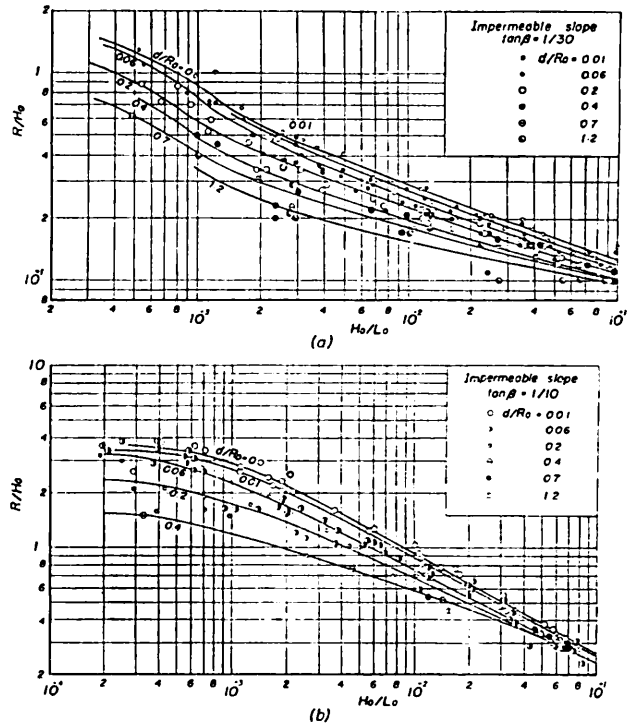


図-1 不透水性海浜における波のそ上高

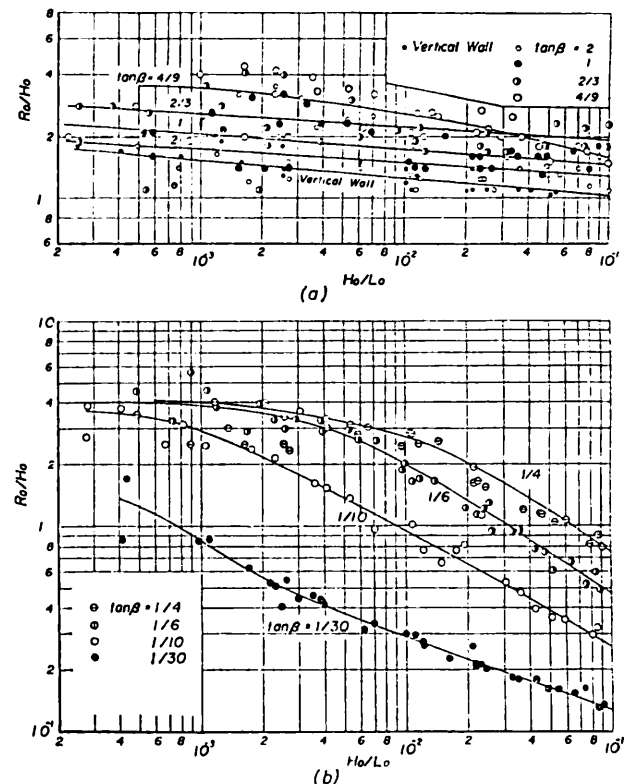


図-2 滑面の海浜における波のそ上高

げ高の区別が明瞭でなくなり、またその機構も異なるので、実験値の散乱が目立つようになる。それ故、上述した取り扱いの限界は図-2 から、 $\tan \beta = 4/9$ 程度であると推定される。

さて、波のそ上に及ぼす粗度の効果を明らかにするために、図-1 に示すような関係を各勾配ごとに求め、図-2 に示した滑面におけるそ上高との比 R_i/R_o を求めたものが図-3 である。なお、図-4 からわかるように、 $\tan \beta = 4/9$ 以上の海浜勾配になるとそ上距離が短くなるため、そ上に及ぼす粗度の効果は減少し、これが実験値の散乱と精度上同程度になるので、これより緩勾配のそ上高についてのみ再整理した。この図から、いずれの勾配においても無次元粗度 d/R_o が増加すると、そ上高に及ぼす粗度の効果が大きくなり、そ上高が滑面の場合に比べてかなり減少し、たとえば $\tan \beta = 1/4$ および $d/R_o = 0.2$ の場合には、波形勾配が 10^{-3} から 10^{-1} の範囲で不透水性海浜におけるそ上高が、滑面の海浜での値の約 60% 程度にもなることがわかる。さらに詳しく検討すると、海浜勾配が $1/10$ 以下になれば、波形勾配の増加に従ってそ上高に及ぼす粗度の効果はほぼ単調に減少するが、 $1/6$ 以上の場合には極小値をとる波形勾配が存在することがわかる。また、そ上高に及ぼす粗度の効果は、各海浜勾配ごとに変化し、特に海浜勾配が $1/30$ のような緩勾配では、 $\tan \beta = 1/6$ および $4/9$ の場合に比べて小さくなっていることは注目される。いずれにしても、図-2 および 3 を用いると、これらの実験条件の範囲内で波のそ上高に及ぼす海浜の粗度の効果が定量的に評価できよう。

3. 波のそ上に及ぼす透水性の効果

一般に海浜などの砂層が水が浸透するときの透水係数の値は、水温のほかに砂粒の空隙率および粒径が関係するといわれており、Darcy の法則が成立する範囲内で、砂粒の平均径または有効径と空隙率を用いて透水係数は

表示されてきた。代表的な例を挙げると、Slichter や Terzaghi は透水係数 k'' に対して次式を与えている⁷⁾。

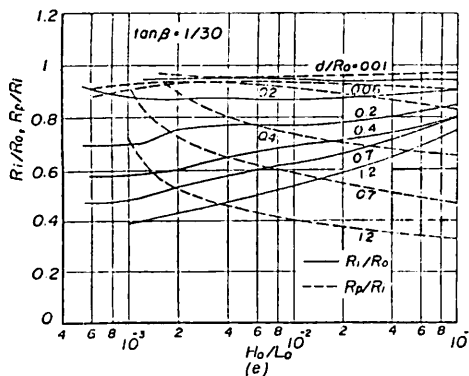
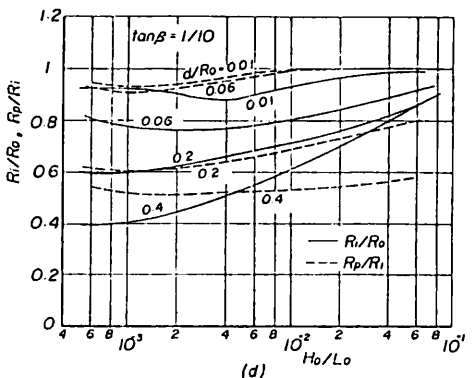
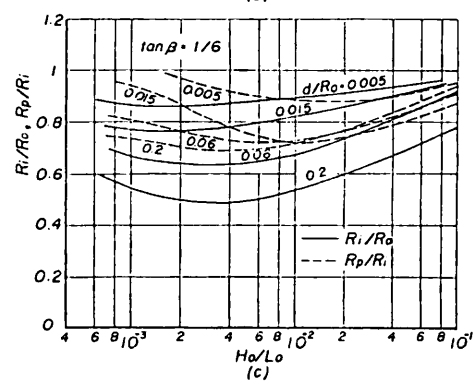
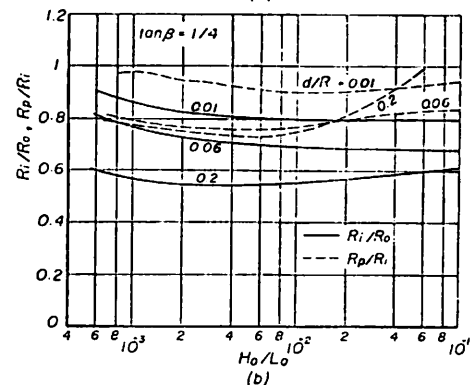
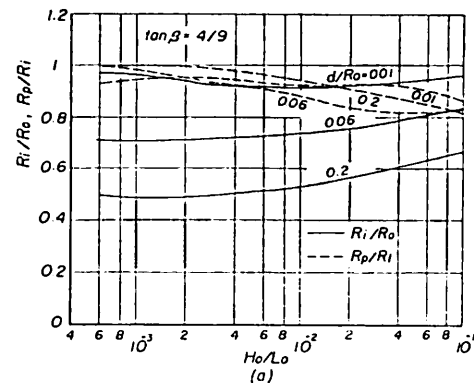


図-3 波のそ上高に及ぼす海浜の粗度と透水性の効果

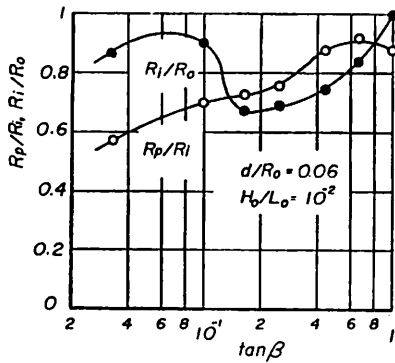


図-4 波のそ上高と海浜勾配との関係の1例

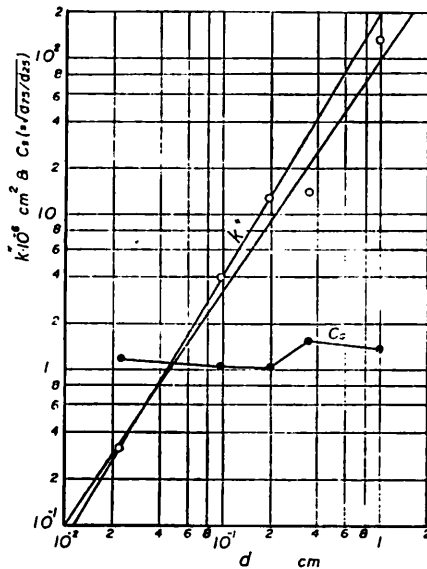


図-5 実験砂の透水係数とふるい分け係数

$$k'' = f(\lambda) d_e^2 \quad (7)$$

ここに、 λ ；空隙率で $f(\lambda)$ は λ の関数および d_e ；砂粒の有効径である。図-5 は Savage が用いた砂粒の透水係数およびふるい分け係数と中央粒径との関係を示したものであり、これから砂粒が一樣砂に近づくとき透水係数と中央粒径の関係は両対数紙上でほぼ直線で表すことができ、その勾配は2より若干小さいが、式(7)との関連から近似的に

$$k'' \propto d^2 \quad (8)$$

が成立すると仮定すれば、式(8)を式(4)に代入して、透水性海浜における波のそ上高 R_p は、次式で与えられる。

$$\frac{R_p}{H_0} = f_6 \left(\frac{H_0}{L_0}, \tan \beta, \frac{d \sin \beta}{R_0} \right) \quad (9)$$

すなわち、透水性海浜における波のそ上高に及ぼす粗度と透水性の効果は式(9)の右辺第3項に共通に含まれることになる。

図-6 は透水性海浜において、海浜勾配 $\tan \beta$ が 1/10

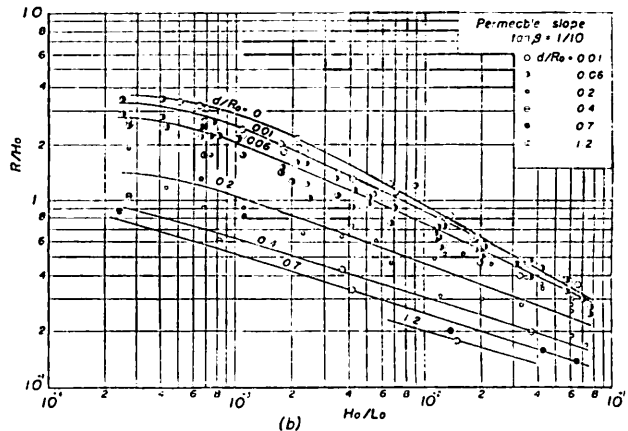
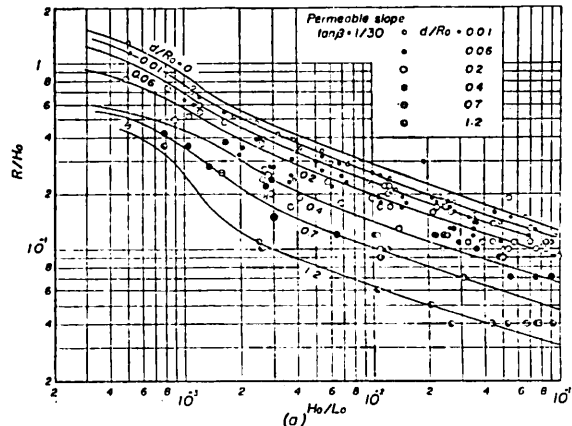


図-6 透水性海浜における波のそ上高

と 1/30 の場合のそ上高を d/R_0 をパラメーターとして再整理したものである。これは粗度と透水性の両効果が d/R_0 によって表示され、式(9)の関係が成立していることがわかる。また、図-6 から、図-1 に示した不透水性海浜のそ上高に比べて、透水性の効果のためにそ上高がさらに減少することが認められるが、透水性の効果のみを定量的に評価するために、 d/R_0 をパラメーターとして、透水性および不透水性海浜での波のそ上高の比 R_p/R_0 と波形勾配との関係を図-3 の破線で示してある。ただし、この場合にも $\tan \beta$ が 2/3 以上では図-4 に示すように、海浜の表面条件の相違の影響が顕著に現れないので、 $\tan \beta \leq 4/9$ の透水性海浜での実験結果について再整理した。これから、不透水性海浜の場合と異なり、海浜勾配が緩くなるほど透水性の効果が大きく現れるが、この実験の範囲ではそ上高に及ぼす透水性の効果は、粗度の効果のたかだか 50% 以下であることがわかる。

4. 結 語

以上、本論文では、波のそ上に及ぼす粗度と透水性の効果の定量的に把握するために、次元解析に基づいて

Savage の実験結果を再整理して検討した。その結果、これら両効果を表すパラメーターとして砂粒の中央粒径と滑面の海浜上におけるそ上高の比を用いると、海浜勾配ごとにそ上高と波形勾配との関係がかなりよくまとまることがわかった。さらに、波のそ上に及ぼす粗度と透水性の効果を表す系統的な図表を作ったが、これによると海浜における波のそ上に及ぼす粗度の効果は、透水性の効果に比べて全般的に大きいことがわかった。最後に、図面整理に熱心にご協力いただいた芝野照夫助手に謝意を表するとともに、資料整理に協力していただいた海岸災害部門学生諸氏に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Silvester, R.: Coastal Engineering, II, Elsevier,

1974.

- 2) Machemehl, J. L., T. J. French and N. E. Huang: New method for beach erosion control, Civil Engg. in the Oceans, ASCE, 1976, pp. 142~160.
- 3) Savage, R. P.: Laboratory data on wave run-up on roughened and permeable slopes, B.E.B., Tech. Memo., No. 109, 1959, pp. 1~26.
- 4) Savage, R. P.: Wave run-up on roughened and permeable slopes, Trans. ASCE, Vol. 124, 1959, pp. 852~870.
- 5) Hunt, I. A.: Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, 1957, pp. 123~152.
- 6) Saville, T.: Wave run-up on shore structures, Trans. ASCE, Vol. 123, 1958, pp. 139~150.
- 7) 本間 仁・安芸俊一 編: 物部水理学, 岩波書店, 1962.