

緩傾斜堤の水利特性に関する実験的研究

高橋敏彦*・首藤伸夫**・沼田 淳***

1. ま え が き

近年、海岸侵食対策の一つとして親水性や景観面も配慮された工法として、緩傾斜堤が築造されつつある。この緩傾斜堤は、1/3～1/6 程度の法勾配を有し、ブロックの孔などによる堤表面の粗度及び捨石層・フィルター層の透水性が大きな特徴(豊島, 1984)となっている。これまで、波の打ち上げ高に関して粗度及び透水性を考慮している主な研究例は、Savage (1959), Hunt (1961), 土屋ら(1978)等があるがいずれも捨石斜面に対しての研究例である。また、建設省(1989)より、「緩傾斜堤の設計手法について」の発表もされている。しかし、緩傾斜堤が注目され始めて日が浅いため被覆ブロックの孔などによる堤表面の粗度、および捨石層・フィルター層の透水性に関する研究例は少なく(例えば豊島, 1987), それらの効果の割合も必ずしも解明されていない。

本研究は、現在施工されている標準的な緩傾斜堤の縮尺 1/40 の模型を基本に実験を行い、波の打ち上げ高さ・反射率に及ぼす粗面及び透水層の効果を抽出し、エネルギー消費に占めるそれぞれの割合を見積り、さらに、水理学的に計算できる手法を探ることを目的としている。

2. 実験装置及び実験条件

長さ 11.3 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の両面ガラス張り水路(図-1(a))の一端にプランジャー型造波装置, 他端には法面勾配 1/5 の模型堤体(図-1(b))を設置した。入射波高, 反射波高は, Healy の方法で解析し, 遡上波は目視及びビデオで記録した。なお, 波の打ち上げ高さ R は, 同じ条件で 3 回ずつ実験を行い, 打ち上げ高さが安定する 15 波～40 波の平均値とした。

水深は 0.2 m に固定し, 波は沖波波形勾配 $H_0/L_0 = 0.005 \sim 0.03$ の範囲で変化させた。緩傾斜堤の表面は滑面及び粗面(有孔板)とした。粗面の場合, 孔の占める割合(空隙率)は孔径に関係なく, 現地緩傾斜堤の空隙率と同程度の約 22% とした。透水層として, 3 種類の大きさ

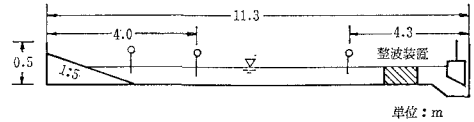


図-1(a) 実験水路

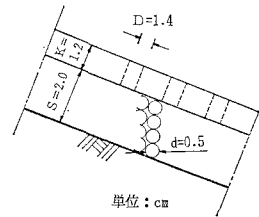


図-1(b) 模型堤体概略図

表-1 実験条件

No.	T (sec)	H (cm)	粒径 d (mm)	板孔 D (mm)
1	1.26	1.0	滑 面	
2				14.0
3				25.0
4				40.0
5			5.0	
6			10.0	
7			20.0	
8				14.0
9			5.0	25.0
10				40.0
11				14.0
12			10.0	25.0
13				40.0
14				14.0
15			20.0	25.0
16				40.0

のアルミナボールを使用した。透水層の厚さ S は, 図-1(b) に示すように 20.0 mm と一定である。表-1 に実験条件を示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 R/H_0 , K_r と H_0/L_0 の関係

図-2(a), (b) は, 滑面及び粗面の H_0/L_0 (沖波波形勾配) に対する R/H_0 (波の打ち上げ高 R と沖波波高 H_0)

* 正会員 東北工業大学助手 土木工学科
 ** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 東北工業大学教授 土木工学科

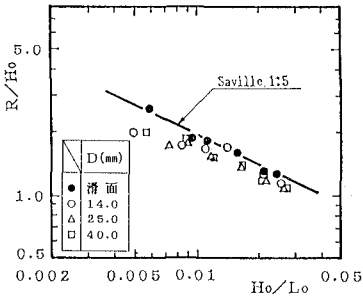


図-2(a) R/H_0 と H_0/L_0 の関係

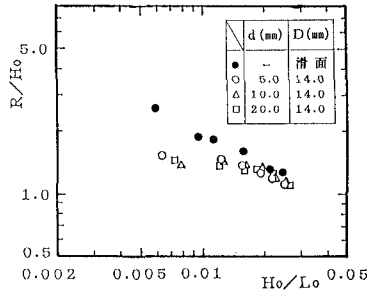


図-3(a) R/H_0 と H_0/L_0 の関係

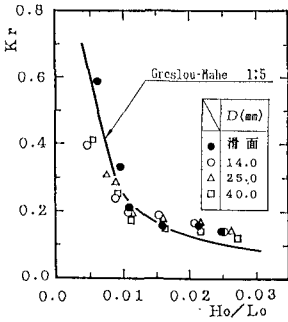


図-2(b) K_r と H_0/L_0 の関係

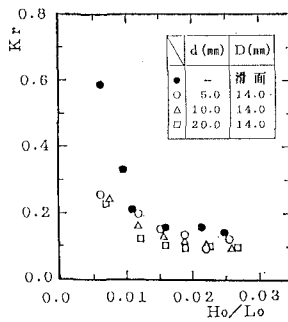


図-3(b) K_r と H_0/L_0 の関係

との比)と K_r (反射率) の関係を図示したものである。図中には、比較のため、滑面の1/5 勾配に対する Saville (1960) 及び Greslou-Mahe (1955) の実験曲線も併記している。図-3(a), (b)は、粗面の下に透水層を設置した場合の実験結果の一例である。

図-2, 3 より、 R/H_0 , K_r は、滑面より粗面のみの場合、粗面のみよりも粗面+透水層の場合の方が、より小さく、堤表面の粗度及び透水層の透水性が打ち上げ高さや反射率に影響を与えていることが分かる。この影響は H_0/L_0 が小さい程大きいようである。

3.2 エネルギー消費

各ケースの水表面単位面積当りの総エネルギー消費 E_{loss} は、次式で求めることができる。

$$E_{loss} = 1/8 \rho g H_i^2 - 1/8 \rho g H_r^2 \\ = 1/8 \rho g H_i^2 [1 - (K_r)^2] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 H_i : 入射波高、 H_r : 反射波高、 K_r : 反射率である。以下で述べるエネルギー消費は、(1) 式を用いている。

a) 粗度によるエネルギー消費

図-4 は、滑面によるエネルギー消費 ($E_b, loss$) と粗面(有板孔のみによる実験ケース No. 2~4) のエネルギー消費 ($E_r, loss$) の割合と、 H_0/L_0 の関係を図示したものである。滑面による総エネルギー消費=碎波によるエネルギー消費と考えれば、「1.0-実線の回帰曲線の値」は、粗面の総エネルギー消費に対する粗度の寄与率と考えることができる。図よりいずれのケースも H_0/L_0 が小さくなるほど粗度の影響が大きくなっている。

b) 透水性によるエネルギー消費

図-5 は、図-4 と同様の考え方で、粗面によるエネルギー消費 ($E_r, loss$) と「粗面+透水層」のエネルギー消費 ($E_p, loss$) の比を縦軸に、 H_0/L_0 を横軸にとり図示した一例である。ただし $E_r, loss$, $E_p, loss$ とともに同一孔径の粗面に対する実験値を使用し、透水性の効果を求めた。図より、 d —一定の場合、 D の違いにより透水性の効果は異なるようである。

c) 総エネルギー消費に対する各エネルギー消費の割合

図-6 は、 $D=14.0$ mm, $d=5.0$ mm の場合の総エネルギー消費に対する各エネルギー消費の割合を図示した

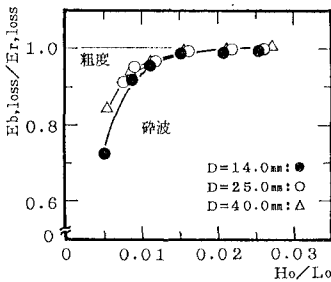


図-4 粗度によるエネルギー消費

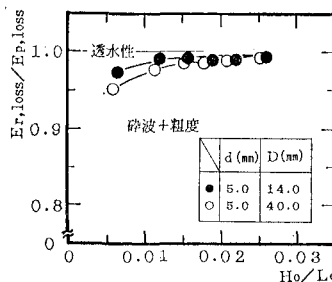


図-5 透水性によるエネルギー消費

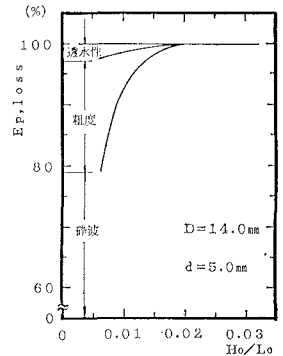


図-6 総エネルギー消費に対する各エネルギー消費

例で、粗度・透水性の効果は、図—4, 5 等で求めたものより決め、他を碎波によるエネルギー消費としたものである。 H_0/L_0 が小さいほど粗度、透水性の効果が大きく現われるが、 $H_0/L_0 \geq 0.025$ 以上では粗度、透水性の効果は、ほぼ 0 になっており、他のケースも同様の傾向を示している。

3.3 R/H_0 , K_r と ξ の関係

a) 透水層のない場合 (粗面のみの場合)

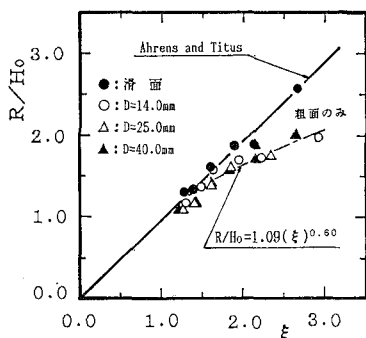
i) R/H_0 と ξ の関係

図—7 は、滑面及び粗面の R/H_0 と、 ξ (surf similarity parameter) の関係を図示したものである。ただし、 $\xi = \tan \alpha / (H/L_0)^{1/2}$ 、ここに、 $\tan \alpha$: 斜面勾配、 H : 入射波高、 L_0 : 沖波波長である。図中の実線は、滑面に対する Ahrens and Titus による実験直線 (1985) であり次式で示される。

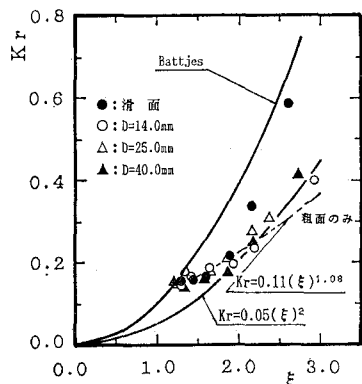
$$R/H_0 = 0.967\xi \quad \text{..... (2)}$$

ただし、 $\xi < 2.0$ Plunging breaker

本実験における各ケースの碎波形状は、ほとんど plunging breaker であり、(2) 式の条件に対応している。図より、Ahrens らの実験条件の範囲外で $2.0 < \xi$ の実験値ともよく対応している。しかし、粗面では ξ が大きくなるほど滑面との差は大きくなり、(2) 式では近似で



図—7 R/H_0 と ξ の関係



図—8 K_r と ξ の関係

きなくなるようであり、この差は、孔による粗度の効果と考えられる。図中の一点鎖線は、 $D=14.0$ mm に対する R/H_0 と ξ の関係を示したもので次式で表される。

$$R/H_0 = 1.09(\xi)^{0.60} \quad \text{..... (3)}$$

ただし、 $1.25 < \xi < 3.0$

ii) K_r と ξ の関係

図—8 は、滑面及び粗面の K_r と ξ の関係を図示したものであり図中には比較のために、Battjes (1974) による滑面に対する実験曲線 (4) 式及び (4) 式の 1/2 の曲線 (5) 式も示してある。

$$K_r = 0.1\xi^2 \quad \text{..... (4)}$$

$$K_r = 0.05\xi^2 \quad \text{..... (5)}$$

図より滑面の実験値は、全体的に Battjes による実験曲線よりも小さい値を示している。粗面の実験値は (4) 式と (5) 式の間であり、 $2.0 < \xi < 3.0$ の範囲においては、粗面の値が (5) 式にほぼ近似できるようである。一点鎖線は、 $D=14.0$ mm のケースの K_r と ξ の関係を示したもので近似的に次式が認められる。

$$K_r = 0.11(\xi)^{1.08} \quad \text{..... (6)}$$

ただし、 $1.25 < \xi < 3.0$

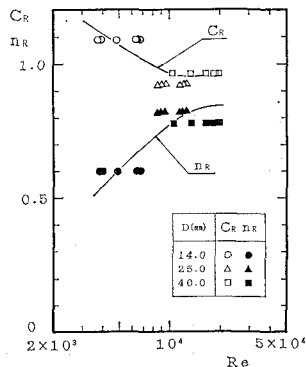
iii) Re 数と (C_R, n_R) , (C_r, n_r) の関係

前節より R/H_0 , K_r とともに $\xi \geq 1.25$ に対し、それぞれ次式の形がよく近似する。

$$R/H_0 = C_R(\xi)^{n_R} \quad \text{..... (7)}$$

$$K_r = C_r(\xi)^{n_r} \quad \text{..... (8)}$$

図—9 は、 (C_R, n_R) と Re 数 ($= V \cdot D / \nu$, ただし、 V : 斜面上の波先端移動速度、 D : 粗面の孔径、 ν : 動粘性係数) の関係を図示したものである。図中の実線は回帰曲線を示している。図より、 Re 数 $> 1 \times 10^4$ の場合 C_R, n_R はほぼ一定の値となり、 $C_R = 0.95$, $n_R = 0.8$ 程度の値となる。なお図は省略しているが、 C_r, n_r の値は Re 数 $= 3 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ の範囲で、0.1 および 1.0~1.3 程度の値となっている。ここに、 Re 数算定に用いた V は、ビ



図—9 C_R, n_R と Re の数の関係

デオ映像から読み取った波先端移動速度であるが、適用上の便宜を考慮し以下では、上記諸係数を D/K (粗面の孔径 D と有孔板の厚さ K との無次元量), d/S (透水層内の粒径 d と透水層厚 S との無次元量) を用いて定式化することを試みた。

図-10 は, (C_R, n_R) および (C_r, n_r) と D/K の関係を図示したものである。各係数と D/K との関係は, Re 数との関係とはほぼ同様の傾向を示す。

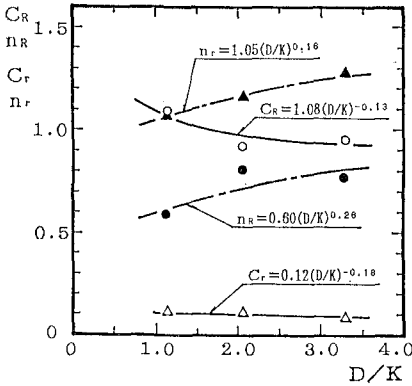


図-10 (C_R, n_R) , (C_r, n_r) と D/K の関係

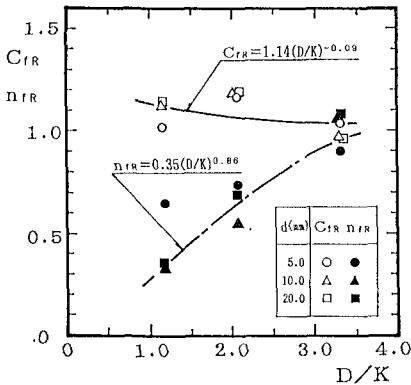


図-11 C_{fr}, n_{fr} と D/K の関係

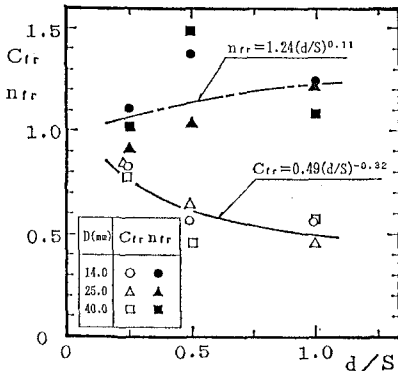


図-12 C_{fr}, n_{fr} と d/S の関係

b) 「粗面+透水層」の場合

i) 透水層が加わったことによる修正

透水層がない場合, すなわち粗面だけの打ち上げ高, 反射率はそれぞれ(7), (8)式の形で表わすことができる。さらに, 透水層が加わることによる修正として(9), (10)式に示すように (C_{fr}, n_{fr}) , (C_{fr}, n_{fr}) を導入して表現してみた。

$$R/H_0 = C_{fr} C_R (\xi)^{n_{fr} n_R} \dots\dots\dots (9)$$

$$K_r = C_{fr} C_r (\xi)^{n_{fr} n_r} \dots\dots\dots (10)$$

図-11, 12 は, (C_{fr}, n_{fr}) および (C_{fr}, n_{fr}) と D/K および d/S との関係を図示したものである。 R/H_0 の (C_{fr}, n_{fr}) は D/K の関数, K_r の (C_{fr}, n_{fr}) は d/S の関数としてまとめている。これは, 透水層の粒径の影響が比較的強く表れるのは, K_r に対してであり, R/H_0 に対してはほとんど認められないからである。 (C_{fr}, n_{fr}) 及び (C_{fr}, n_{fr}) の値はそれぞれ (0.9~1.2, 0.3~1.1), (0.4~0.8, 0.9~1.5) となっている。ただし, $D=40.0$ mm の場合, C_{fr}, n_{fr} の値は共に 1.0 程度の値となっている。言い換えれば, $D=40.0$ mm の場合 R/H_0 に対してほとんど透水層の影響は表れていない。これに, 有孔板の空隙率を, 孔の大きさに関わらず一定としたことと関連があるものと思われる。

ii) 実験値と実験式との比較

図-13, 14 は, 実験値と図-10~12 の諸係数を式(7)~(10)に代入した実験式との比較を示している。実線は前述したように, Ahrens 及び Battjes の滑面に対する実験式, 一点鎖線は粗面のみ, 破線は「粗面+透水層」に対応したものである。粗面, 「粗面+透水層」の実験式と実験値はよく近似している。また, 滑面と粗面及び粗面と「粗面+透水層」の差をそれぞれ粗面, 透水性の影響と考えることが出来る。

4. あとがき

緩傾斜堤の波の打ち上げ高さ・反射率に及ぼす, 粗面

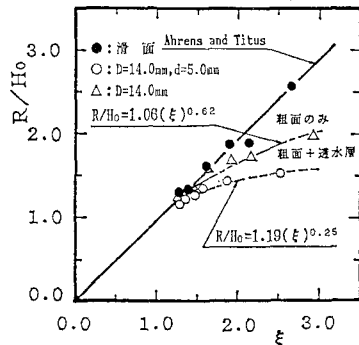
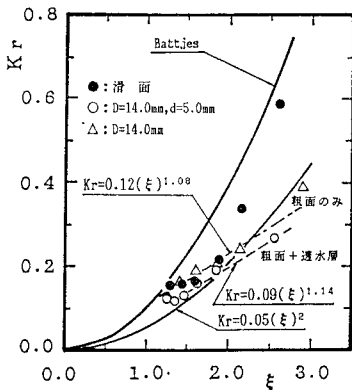


図-13 R/H_0 と ξ の関係

図-14 K_r と ξ の関係

・透水層の影響を実験により検討した。本研究によって得られた主要な結果を列挙すると次の通りである。

(1) 当然のことながら、滑面より粗面、粗面のみよりも透水層を有するものが、エネルギー消費が大きい、その差は、波形勾配が大きくなるにつれて無視できるものとなり、波形勾配 0.02 を越えると碎波による消費がきわめて大きく、他の原因は誤差の範囲の程度になってしまう。

(2) R/H_0 , K_r と ξ (surf similarity parameter) の関係では、 $\xi=1.25$ 付近から粗面、透水層の影響が現れ、 ξ が大きくなるほどそれぞれの効果は大きくなっていく傾向にある。

(3) 透水層のない場合、 $\xi \geq 1.25$ に対し $R/H_0 = C_R(\xi)^{n_R}$, $K_r = C_r(\xi)^{n_r}$ の形に表現することができる。

(4) 透水層がある場合は、上述の式を $R/H_0 = C_{fR}$

$C_R(\xi)^{n_{fR}n_R}$, $K_r = C_{fR}C_r(\xi)^{n_{fR}n_r}$ のように、 (C_{fR}, n_{fR}) , (C_{fR}, n_{fR}) を導入して表現できる。

最後に、本実験およびデータ整理には、当時東北工業大学学生、村岡徳一、山口英樹両君に協力していただいた。また、本論文の公表にあたり、小川記念基金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 青木東雄・芦田義則・森 吉尚・宇多高明・小俣 篤 (1989): 緩傾斜堤の設計手法について, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 658~662.
- 土屋義人・河田恵昭・矢下忠彦 (1978): 波のそ上に及ぼす粗度および透水性の効果, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 160~164.
- 豊島 修 (1984): 緩傾斜のり面被覆工法, 海岸, No. 24, pp. 133~144.
- 豊島 修 (1987): 緩傾斜護岸工法, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 447~451.
- Ahrens, J. P., M. F. Titus (1985): Wave run up formulas for smooth slopes, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 1, JAN., pp. 128~133.
- Battjes, J. A. (1974): Surf Similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 466~480.
- Greslou, L., et Y. Mahe (1955): Etude du coefficient de reflexion d'une houle sur un obstacle constitue par'un plan incline, Proc. 5th Coastal Eng. Conf., pp. 68~84.
- Hunt, I. A. (1959): Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 85, No. WW3, pp. 123~152.
- Savage, R. P. (1959): Wave run-up on roughened and permeable slopes, Trans. ASCE, Vol. 124, pp. 852~870.
- Saville, T. Jr. (1960): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Journal of the Waterways and Harbor Division, ASCE, Vol. 86, No. WW3, pp. 151~156.