

緩傾斜堤への波の打ち上げ高の一推定法

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を配慮した工法として、従来の直立護岸に代わって緩傾斜堤が築造されつつある。緩傾斜堤の大きな特徴は、被覆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にある(豊島, 1984)。この緩傾斜堤が注目され始めて日が浅いためその効果に関する研究例は少ない(例えば豊島, 1987)。なお、建設省(1989a, 1989b)より、「緩傾斜堤の設計手法について」、「緩傾斜堤の設計の手引き」が発表がされている。しかし、堤表面の粗度及び捨石層・フィルター層の透水性の効果については必ずしも解明されていない。著者らは、前報(高橋ら, 1990)において、粗面及び「粗面+透水層」の相対打ち上げ高さ R/H_0 を surf similarity parameter ξ を用いてそれぞれ $R/H_0 = C_R(\xi)^{n_R}$ 及び $R/H_0 = C_R C_{RP}(\xi)^{n_R n_{RP}}$ の形で表現できることを示した。

本研究では、さらにその係数 C_R , n_R 及び C_{RP} , n_{RP} を碎波形態別に、斜面上の波先端移動速度 V を用いた R_e 数で定式化することを試みた。また、この結果を用いて、波の打ち上げ高さ R を繰り返し計算によって推定する方法について検討した。

2. 実験装置及び実験条件

前報と同じであるので、要約して記述する。長さ 11.3 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の両面ガラス張り水路の一端に、法面勾配 1/5 の模型堤体(図-1)を設置した。

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(孔径 $D=14.0, 25.0, 40.0$ mm の3種類)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、粒径 $d=5.0, 10.0, 20.0$ mm の3種類の大きさのアルミナボールを使用した。実験は、滑面1ケース、粗面3ケース、「粗面+透水層」12

ケースの計16ケースで行った。

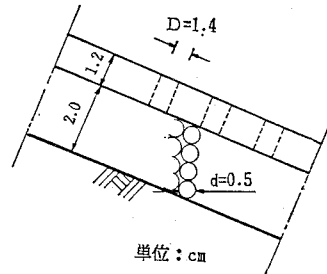


図-1 模型堤体概略図

3. 斜面上の波先端移動速度

3.1 波先端移動速度の定義

図-2 は、波の打ち上げ高さの模式図である。波先端移動速度は、目視観測による波の打ち上げ高さ R と入射波周期 T 及び、ビデオ解析(3/100 sec 毎)より求めた t_2 を用いてそれぞれ式(1), (2)で定義した。

$$V = 2R / \sin \alpha \cdot 1/T \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V = 2R / \sin \alpha \cdot 1/t_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

R : 静水面からの波の打ち上げ高さ

T : 入射波周期 α : 法面角度

t_2 : 汀線から X_m までの通過時間の倍

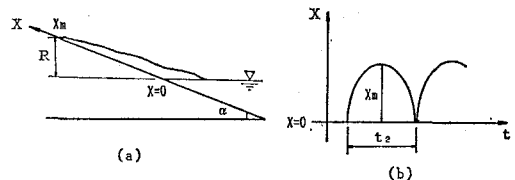


図-2 波の打ち上げ高の模式図

3.2 波先端移動速度

図-3 (a), (b) は、滑面と粗面及び「粗面+透水層」の実験結果から式(1), (2)により求めた波先端移動速度 V を比較したもので、縦軸、横軸はそれぞれ式(2)及び(1)による計算値である。図-3 (a), (b) より滑面、粗面及び「粗面+透水層」とも、同じ

* 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 工学部災害制御研究センター

*** 正会員 工博 東北工業大学教授 土木工学科

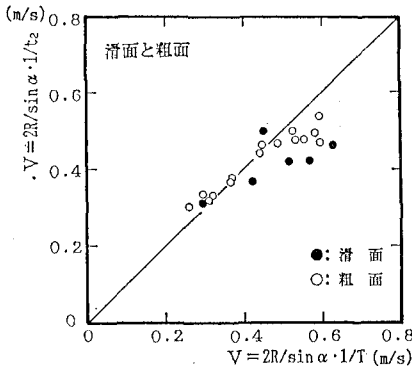


図-3(a) 式(1), (2)式による計算値の比較

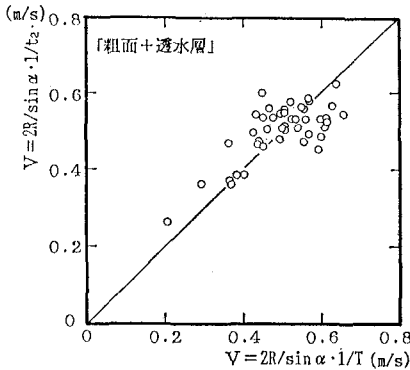


図-3(b) 式(1), (2)式による計算値の比較

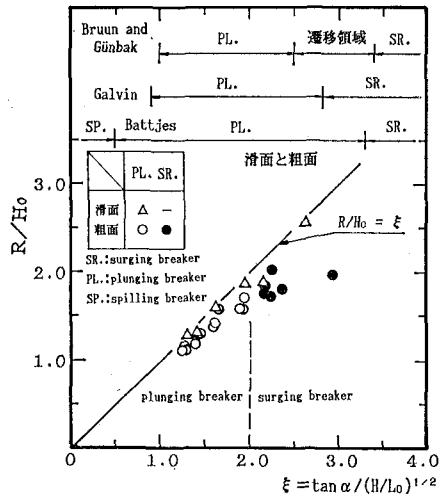
傾向を示しており $V \approx 0.5 \text{ m/s}$ を境にして, $V < 0.5 \text{ m/s}$ のときは式(2)による計算値の方が, $V > 0.5 \text{ m/s}$ のときは式(1)による計算値の方が幾分大きい値を示しているが全体的にはよく対応しており, (1) $\approx$ (2) と見なすことができる。したがって, 以下の解析は式(1)より求めた V を用いて行った。ただし, wave set-up の顕著な場合にはさらに検討が必要と思われる。

4. 斜面上の碎波形態

4.1 滑面及び粗面

図-4(a) は, 滑面及び粗面の場合の R/H_0 と $\xi (= \tan \alpha / (H/L_0)^{1/2})$ の関係を碎波形態をパラメータとして図示したものである。図中の実線は, $R/H_0 = \xi$ の直線を示している。比較のため, Bruun and Günbak (1976), Galvin (1968), Battjes (1974) らによる滑面に対する碎波形態と ξ の関係も併記している。ただし, Galvin のデータは $1/5$ 勾配のみの結果であり, Galvin と Battjes は $\xi_0 (= \tan \alpha / (H_0/L_0)^{1/2})$ として示しているがここでは, $\xi \approx \xi_0$ として示している。

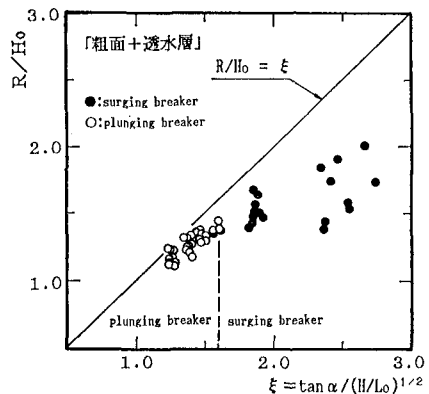
図中の Δ 印は, 滑面における plunging breaker であるが, 比較のために示した碎波形態の分類とはほぼ一致す

図-4(a) 碎波形態別 R/H_0 と ξ の関係

る範囲に分布している。しかし粗面の場合, surging breaker と plunging breaker の境界が, $\xi = 2.0$ 付近に現れ滑面に比べかなり小さい値になっている。これは, 戻り流れの強さの違いによるものと考えられる。

4.2 「粗面+透水層」

図-4(b) は, 「粗面+透水層」の場合の R/H_0 と ξ との関係を, 図-4(a) と同様に碎波形態をパラメータとして図示したものである。今回の実験は, $\xi = 1.25 \sim 2.8$ 程度の範囲であるが, この場合の plunging breaker と surging breaker の境界は, $\xi = 1.6$ 付近に現れる。滑面, 粗面に比べさらに小さい ξ 値で碎波形態が分類される結果となった。この主な原因は, 粗面の下に透水層を設けたことにより, 戻り流れが粗面より小さくなったためと思われる。

図-4(b) 碎波形態別 R/H_0 と ξ の関係

5. Re 数と (C_R, n_R) , (C_{RP}, n_{RP}) の関係

前報において, 粗面及び「粗面+透水層」の R/H_0 を ξ を用いてそれぞれ次式で表現できることを示した。

$$R/H_0 = C_R(\xi)^{n_R} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$R/H_0 = C_{RCRP}(\xi)^{n_R n_{RP}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

一方、滑面に対して Hunt (1959) が示した波の打ち上げ高さの実験式は

$$R/H = 1.01 \tan \alpha / (H/L_0)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

であり $H \doteq H_0$, $1.01 \xi \doteq \tan \alpha$ と仮定すれば

$$R/H_0 = \xi = \tan \alpha / (H/L_0)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となるから式 (3) の C_R , n_R は、粗面の粗度による効果、式 (4) の C_{RP} , n_{RP} は、透水層が加わることによる修正、すなわち透水層の透水性の効果と考えることができる。

5.1 粗面みの場合

a) surging breaker 領域

図-5(a) は、砕波形態が surging breaker の場合の C_R , n_R と Re 数 ($=V \cdot D/\nu$, V : 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。図より, $Re = 2.7 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^4$ の範囲では, $C_R = 1.20 \sim 1.30$ 程度, $n_R = 0.38 \sim 0.49$ 程度の値となっており, 近似的に $C_R = 1.24$, $n_R = 0.45$ 程度の常数とみなすことができる。従って surging breaker 領域の打ち上げ高の算定式として次式が得られる。

$$R/H_0 = 1.24(\xi)^{0.45} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし, $2.0 < \xi$, $2.7 \times 10^3 < Re < 1.3 \times 10^4$

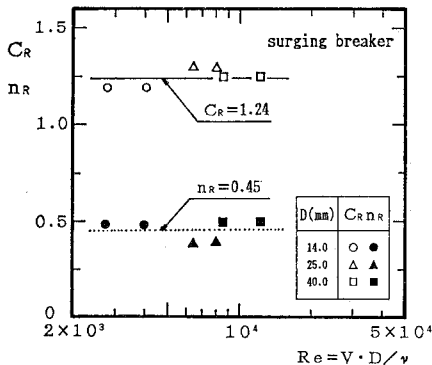


図-5(a) Re 数と (C_R, n_R) の関係

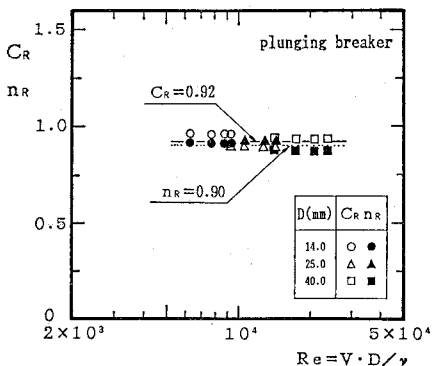


図-5(b) Re 数と (C_R, n_R) の関係

b) plunging breaker 領域

図-5(b) は、砕波形態が plunging breaker の場合の C_R , n_R と Re 数の関係を図示したものである。図より, $Re = 6.0 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$ の範囲で $C_R = 0.92$, $n_R = 0.90$ 程度の常数とみなせる。これらを用いて次式より, plunging breaker 領域の打ち上げ高さを推定することができる。

$$R/H_0 = 0.92(\xi)^{0.90} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし, $\xi < 2.0$, $6.0 \times 10^3 < Re < 2.5 \times 10^4$

5.2 「粗面+透水層」の場合

a) surging breaker 領域

図-6(a) は、粗面の孔径 $D = 14, 25, 40$ mm 及び透水層内の粒径 $d = 5, 10, 20$ mm の組合せの実験において砕波形態が, surging breaker の場合の C_{RP} , n_{RP} と Re 数の関数を図示したものである。

図より, $Re \doteq 10^4$ を境に C_{RP} , n_{RP} の値の傾向が異なっているが, これは Re の直接的な影響ではない。 $Re > 10^4$ の場合の D は 40.0 mm であり, 孔の大きさに関わらず空隙率を一定としたため, 図-7 に示しているように $D = 40.0$ mm の孔列間が他のケースよりも広く, そこを通過して波が打ち上げられ, 透水層の影響が余り表れないためと考えられる。

(C_{RP} , n_{RP}) の値は, Re 数を 10^4 で分けて考えると幾分ばらつきはあるものの, $2.8 \times 10^3 < Re < 10^4$ の範囲で (1.12, 0.32) 程度, $10^4 < Re < 2.2 \times 10^4$ の範囲で (0.79, 1.49) 程度の一定値とみなすことができる。したがって surging breaker 領域の打ち上げ高の算定式は次式のようにになる。

$$R/H_0 = C_{RCRP}(\xi)^{n_R n_{RP}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$= 1.39(\xi)^{0.14} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし $1.6 < \xi$, $2.8 \times 10^3 < Re < 10^4$

$$R/H_0 = C_{RCRP}(\xi)^{n_R n_{RP}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$= 0.98(\xi)^{0.67} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし $1.6 < \xi$, $10^4 < Re < 2.2 \times 10^4$

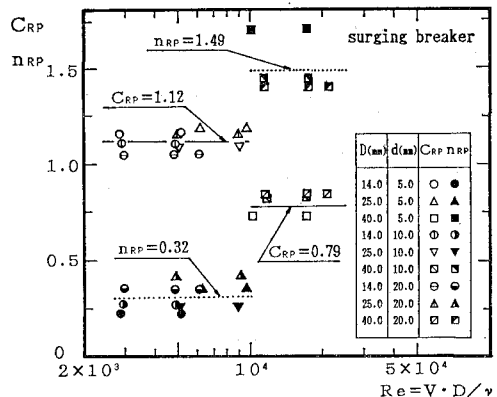


図-6(a) Re 数と (C_{RP}, n_{RP}) の関係

b) plunging breaker 領域

図-6 (b) は、砕波形態が plunging breaker の場合の C_{RP} , n_{RP} と Re 数の関係を図示したものである。 C_{RP} は 0.96~1.14 程度の範囲にあるが、 $C_{RP} \approx 1.05$ (一定) と見なすことができる。 n_{RP} はばらつきはあるが、次式で近似できる。

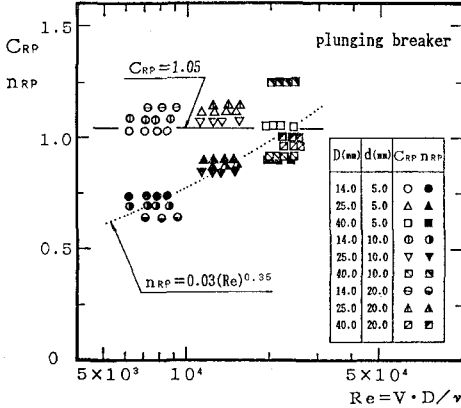


図-6(b) Re 数と (C_{RP} , n_{RP}) の関係

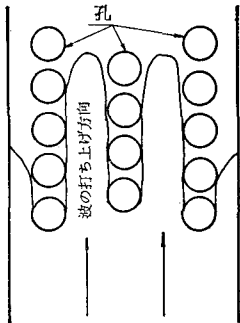


図-7 $D=40.0$ mm の場合の波の打ち上げ模式図

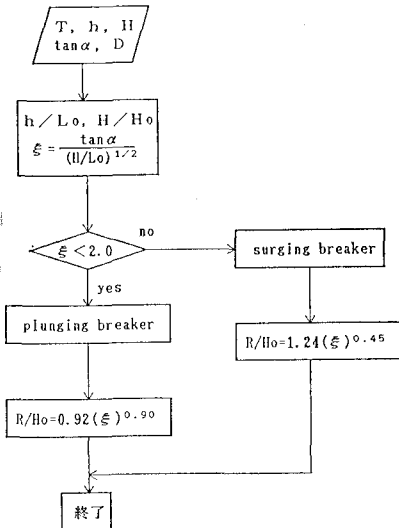


図-8 波の打ち上げ高推定法のフローチャート (粗面)

$$n_{RP} = 0.03(Re)^{0.35} \dots\dots\dots (11)$$

したがって、plunging breaker 領域の打ち上げ高の算定式は次のように表せる。

$$\begin{aligned} R/H_0 &= C_{RCRP}(\xi)^{n_{RCRP}} \\ &= 0.97(\xi)^{0.90 \cdot n_{RP}} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ただし $\xi < 1.6$, $6 \times 10^3 < Re < 2.6 \times 10^4$

6. 波の打ち上げ高の推定法

6.1 波の打ち上げ高の推定法

図-8, 9 は、粗面及び「粗面+透水層」の波の打ち上げ高さの推定方法をフローチャートとして図示したものである。以下フローチャートに従って説明する。

a) 粗面のみの場合

①既知量は、 T (周期), h (堤脚水深), H (入射波高), $\tan \alpha$ (斜面勾配), D (粗面の孔径) である。② h/L_0 (相対水深), H/H_0 ($=K_s$: 浅水係数), ξ (surf similarity parameter) を求める。③ $\xi > 2.0$ で砕波形態を surging breaker または、plunging breaker に分ける。④ surging breaker の場合 $R/H_0 = 1.24 (\xi)^{0.45}$, plunging breaker の場合 $R/H_0 = 0.92 (\xi)^{0.90}$ の推定式を用いて計算する。

b) 「粗面+透水層」の場合

①, ②までは粗面と同じである。③ $\xi > 1.6$ で砕波形態を surging breaker または、plunging breaker に分ける。④ R_i として波の打ち上げ高さを仮定する。⑤ R_i を用いて V 及びその V を用いて Re 数を計算する。

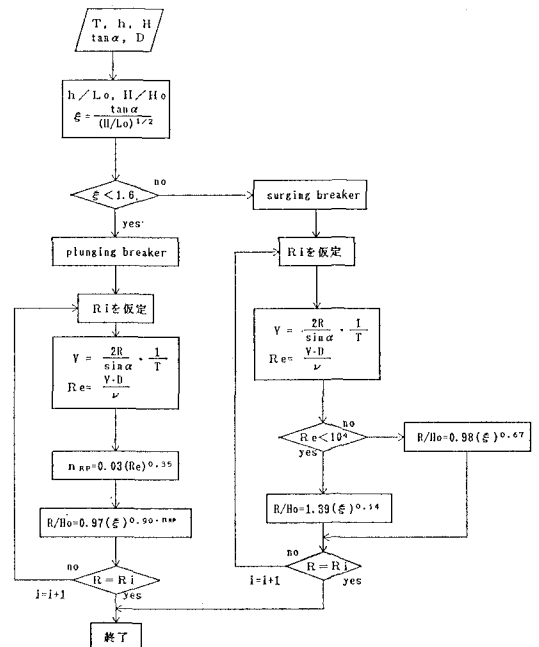


図-9 波の打ち上げ高推定法のフローチャート (粗面+透水層)

surging breaker の場合

⑥ $R_e > 10^4$ で推算式を選ぶ。⑦ $R_e < 10^4$ の場合 $R/H_0 = 1.39 (\xi)^{0.14}$, $R_e > 10^4$ の場合 $R/H_0 = 0.98 (\xi)^{0.67}$ 式で R/H_0 を求める。⑧ R_1 と⑦で求めた R が等しくなければ④まで戻り、⑦で求めた R を仮定値 R_2 として $R = R_i$ になるまで計算を繰り返す。

plunging breaker の場合

⑥ n_{RP} を⑤で求めた R_e 数を用いて計算する。⑦ $R/H_0 = 0.97 (\xi)^{0.90 \cdot n_{RP}}$ 式を用いて相対打ち上げ高さ R/H_0 を計算する。⑧ surging breaker と同様 R_1 と⑦で求めた R が等しくなければ④まで戻り、⑦で求めた R を仮定値 R_2 として $R = R_i$ になるまで計算を繰り返す。

6.2 実験値と計算値の比較

図一10, 11 は, 粗面及び「粗面+透水層」の場合の R/H_0 の実験値と計算値の比較を, 碎波形態別に図示したものである。図一10の粗面の場合, R/H_0 が約 1.75 以上で surging breaker, それ以下で plunging breaker となっておりいずれの場合もよく対応している。図一11の「粗面+透水層」の場合では, R/H_0 が約 1.50 で碎波形態が変わっているが, いずれの碎波形態でも実験値

と計算値の R/H_0 はよく対応しており, 誤差は最大で 10% 程度となっている。

7. あとがき

緩傾斜堤への波の打ち上げ高さの推定法を実験データを用いて検討した。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) 粗度と透水性を考慮した今回の推定法は, 実験値とよく対応し誤差は最大で 10% 程度である。

(2) 粗面 の場合, $\xi \approx 2.0$ を境にして $\xi > 2.0$ では surging breaker, $\xi < 2.0$ で plunging breaker と碎波形態が変わるが, この場合の (C_R, n_R) の値は, 前者で $R_e = 2.7 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^4$ の範囲で (1.24, 0.45) 程度, 後者では $R_e = 6.0 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$ の範囲において (0.92, 0.90) 程度の常数とみなすことができる。

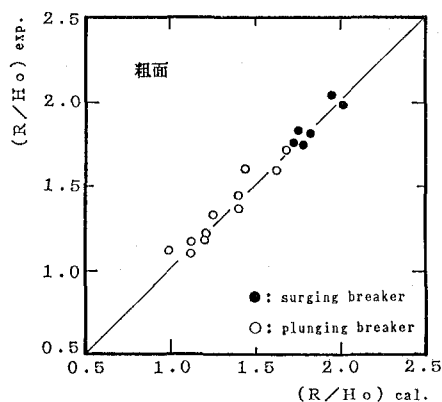
(3) 「粗面+透水層」の場合は, $\xi \approx 1.6$ で波の碎波形態が変化し surging breaker の場合 (C_{RP}, n_{RP}) の値は, $2.8 \times 10^3 < R_e < 10^4$ の範囲で (1.12, 0.32) 程度, $10^4 < R_e < 2.2 \times 10^4$ の範囲で (0.79, 1.49) 程度の一定値となる。一方, plunging breaker の場合, $R_e = 6.0 \times 10^3 \sim 2.6 \times 10^4$ の範囲で C_{RP} は 1.05 程度の一定値となるが, n_{RP} は R_e 数の関数として $n_{RP} = 0.03(R_e)^{0.85}$ のように表される。

なお, 現地へ適用するためには, さらに高 R_e 数領域のデータが必要となる。また, 波の打ち上げ高さを抑える場合に, 粗面の孔の配列が重要な要素の一つであると思われる。

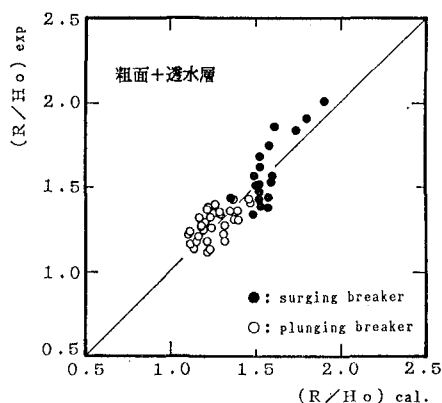
本論文の公表にあたり, 小川記念基金の補助を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 青木東雄・芦田義則・森 吉尚・宇多高明・小俣 篤 (1989a): 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.
- 建設省河川局海岸課監修 (1989b): 緩傾斜堤の設計の手引き, 全国海岸協会, 48 p.
- 高橋敏彦・首藤伸夫・沼田 淳 (1990): 緩傾斜堤の水理特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 509-513.
- 豊島 修 (1984): 緩傾斜の面被覆工法, 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.
- Battjes, J. A. (1974): Surf Similarity, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 466-480.
- Bruun, P. and Günbak, A. R. (1976): New design principles for rubble mound structures, 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 2429-2473.
- Galvin, C. J. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophysical Res., vol. 73, No. 12, pp. 3651-3659.
- Hunt, I. A. (1959): Design of seawalls and breakwaters, Proc., ASCE, vol. 85, No. WW3, pp. 123-152.



図一10 R/H_0 の実験値と推定値の比較



図一11 R/H_0 の実験値と推定値の比較