

緩傾斜堤への波の打ち上げ速度及び戻り流れに関する 実験的研究

高橋 敏彦*・沼田 淳**・首藤 伸夫***

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した工法として、緩傾斜堤が築造されている。この緩傾斜堤は、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。また、建設省（建設省，1989；青木ら，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、築造されて日が浅いにもかかわらず、宇多ら（1991）の調査によると、調査対象とした緩傾斜堤の約 1/3 に被災がみられる。緩傾斜堤の被災の主な原因の一つに、波の遡上時に裏込め砂が吸い出されるとした前野ら（1990）の研究、マウンドの土砂が戻り流れによって流出することにより被災する宇多・柳澤（1991）の研究がある。一方、豊島（1986）は緩傾斜堤の目的は、波の反射率を弱め、打ち上げ高さを低くし、戻り流れの流速と量をできるだけ小さくすることであると述べている。しかし、これらの研究を含め、粗度と透水性を有する斜面上の波の打ち上げ速度、戻り流れ、透水層内の流速等については、ほとんど検討されていない。本研究では、緩傾斜堤の斜面上及び透水層内の波の打ち上げ流速と戻り流速を同時測定し、更に波の打ち上げ水量を計測し、緩傾斜堤の基本的特性について検討を行い、滑斜面と対比させながらその特性を把握することを目的とした。

2. 実験装置及び実験条件

実験は、長さ 18.0 m、幅 1.0 m、高さ 0.8 m の両面ガラス張り造波水路の水路幅を 2 分し、片側 0.3 m の水路で行った。水路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 の模型堤体を設置し、水深は 0.2 m に設定した。本実験では斜面堤として、滑面及び「有孔板＋透水層」を採用した。有孔板の空隙率は約 22 % で ϕ 14 mm、透水層厚は、約 20 mm である。入射波高、反射波高は Healy の方法で解析し、波の遡上、戻り流れの状況

は目視及びビデオで観測した。波の打ち上げ高さは、波が安定する 21 波から 40 波の平均値とした。周期は 1.26 s に固定して、波形勾配は $H_0/L_0=0.0055, 0.0118, 0.0259$ の 3 種類とした。流速の測定は、汀線を基準として沖側 0.8 m、岸側 0.4 m の区間で、10.0 cm 間隔の 13 点についてプロペラ流速計（ ϕ 5.0 mm）を用いて測定した。表層流速は滑面、「有孔板＋透水層」共斜面上 5 mm の位置に、透水層内の流速は透水層厚の中央にプロペラの中心がくるように設置して測定した。なお、「有孔板＋透水層」の場合は、表層と透水層内の流速を同時に測定した。流速の解析は 21 波から 30 波の 10 波を対象に行った。打ち上げ水量は、各波形勾配の起波後 21～23 波目の 3 波を対象にビデオ解析より求めた。図-1 に模型堤体概略図を示す。

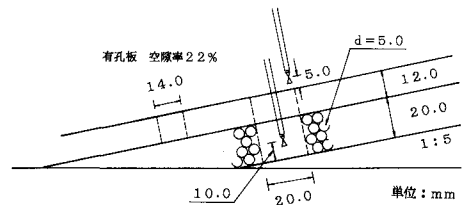


図-1 模型堤体概略図

3. 実験結果及び考察

3.1 相対打ち上げ高さ、反射率と沖波波形勾配の関係

図-2(a), (b) は、 R/H_0 （波の打ち上げ高 R と沖波波高 H_0 との比）、 K_r （反射率）と H_0/L_0 （沖波波形勾配）の関係である。 R, K_r は、流速の測定が設備、機器の制約上、前述の 13 地点で同時測定が出来ないため、測点を変えるごとに造波し計測している。そのため、 $R/H_0, K_r$ 共幾分ばらつきがみられる。図中には、比較のため滑面の 1/5 勾配に対する Saville (1960), Greslou-mahe (1955) の実験曲線も併記してある。両図より、 $R/H_0, K_r$ のいずれも滑面の実験値と実験曲線はほぼ対応している。また、滑面よりも「有孔板＋透水層」の場合の方が $R/H_0, K_r$ 共小さくなる傾向が認められる。なお解析には、各流速測

* 正会員 東北工業大学講師 土木工学科

** 正会員 工博 東北工業大学教授 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

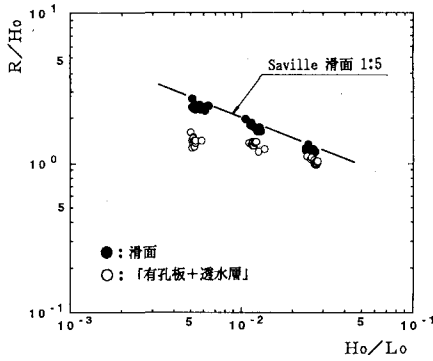


図-2(a) 相対打ち上げ高さと沖波形状勾配の関係

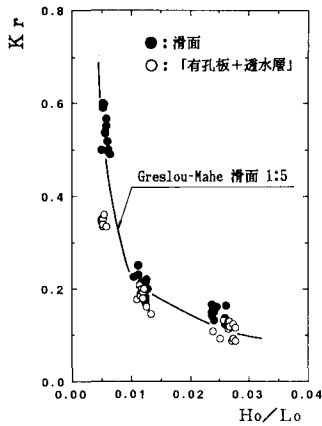


図-2(b) 反射率と沖波形状勾配の関係

定時の波形勾配の平均値 ($H_0/L_0=0.0055, 0.0118, 0.0259$) を用いている。

3.2 打ち上げ流速と戻り流速

a) プロペラ流速計の検定

図-3 は、斎藤ら (1985) と同様の方法で求めたプロペラ流速計の検定図である。プロペラ流速計の検定は、定常流において、プロペラ流速計の検出部を空中から水面

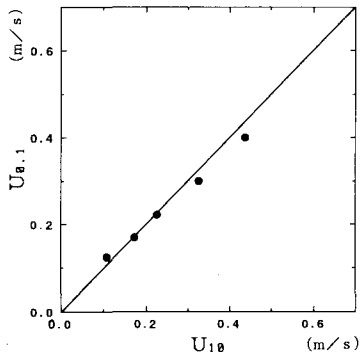
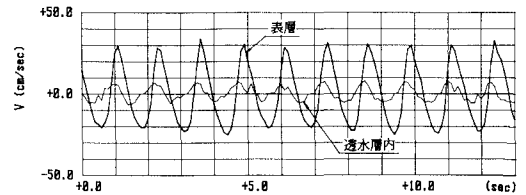
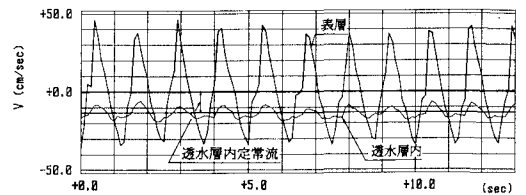


図-3 プロペラ流速計検定図

下約 1 cm の所に一気に下げて、プロペラ流速計の応答性能を検定した。検定に用いたサンプリング周波数は 100 Hz で、横軸は、流速が安定したと思われる点から 1000 個 (10 s) のデータの平均値を $U_{1,0}$ として示した。また、縦軸は流速に変化が現れた点から 10 個目 (0.1 s) のデータを $U_{a,1}$ として示した。両者はほぼ同程度の値を示すことから、サンプリング間隔を 10 Hz として以下の流速解析を行った。

b) 流速の同時測定例

図-4(a), (b) は、「有孔板+透水層」の表層と透水層内の流速変化の同時測定の一例である。図-4(a) は、 $H_0/L_0=0.0259$ の場合で、汀線より沖側 X/L_0 (汀線からの斜面上の距離/沖波波長) ≈ -0.2 のケースである。図-4(b) の方は、 $H_0/L_0=0.0118$ の場合で、汀線地点でのケースである。両図とも、当然のことながら透水層内の流速よりも表層の流速の方が大きい。また、打ち上げ流速の方が戻り流速よりも大きい値を示している。なお、図-4(b) の透水層内には、戻り流れの定常流が認められる。

図-4(a) 流速の同時測定例 ($X/L_0 \approx -0.2, H_0/L_0=0.0259$)図-4(b) 流速の同時測定例 (汀線, $H_0/L_0=0.0118$)

c) 打ち上げ流速と戻り流速

図-5 は、「有孔板+透水層」の表層における打ち上げ流速 V_u 、及び戻り流速 V_d の平均値 (21 波~30 波のアンサンブル平均値) を H_0/L_0 をパラメータとして図示したものである。縦軸は、 V_u, V_d をのり先水深を用いた $(gh)^{1/2}$ で無次元化した値で、正は岸、負は沖向きの流速を表す。横軸は、 X/L_0 の無次元量で 0.0 は汀線を表し、正は岸、負は沖側の地点を示す。図より、 H_0/L_0 が大きくなるにしたがい各地点の打ち上げ及び戻り流速は大きくなっていく。打ち上げ流速のピーク地点は、各波形勾配とも汀線地点であるが、戻り流速のピーク地点は、 H_0/L_0 が大きくなるにつれて沖側の方に移動していく傾向が認

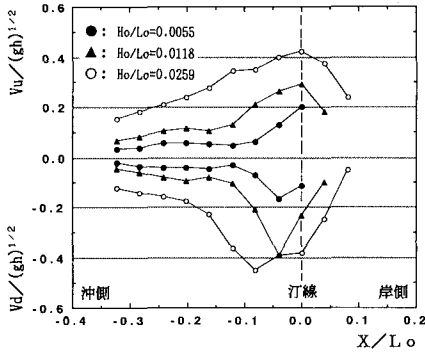
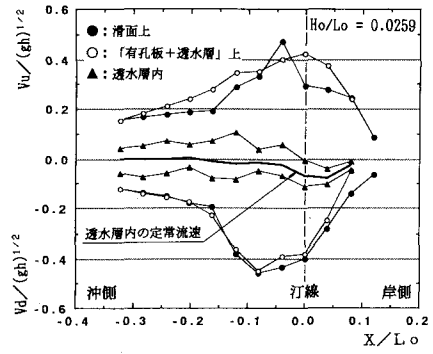
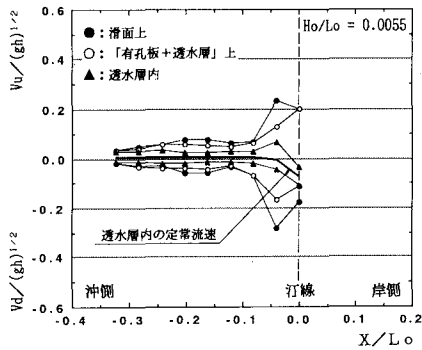
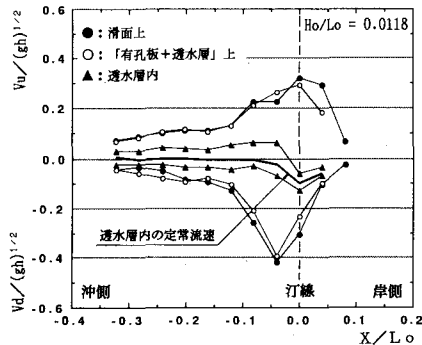


図-5 斜面上の打ち上げ流速と戻り流速


図-6(c) 斜面上及び透水層内の打ち上げ流速と戻り流速 ($H_0/L_0=0.0259$)

められる。

図-6(a)～(c) は、図-5と同様 $V_u/(gh)^{1/2}$, $V_d/(gh)^{1/2}$ と X/L_0 の関係を、 H_0/L_0 別に滑面(●印)及び「有孔板+透水層」の表層(○印)及び透水層内(▲印)の流速を図示したものである。図中には、透水層内の定常流も太線で示してある。斜面上の打ち上げ流速 V_u のピー


図-6(a) 斜面上及び透水層内の打ち上げ流速と戻り流速 ($H_0/L_0=0.0055$)

図-6(b) 斜面上及び透水層内の打ち上げ流速と戻り流速 ($H_0/L_0=0.0118$)

ク値は、「有孔板+透水層」の場合、前節で述べたように汀線地点にあり、滑面の場合、汀線とそれより沖側 $X/L_0 \approx -0.04$ の間で発生している。一方、戻り流速 V_d のピーク値は、滑面及び「有孔板+透水層」ともいずれの H_0/L_0 に対して同地点にあり、汀線よりやや沖側 $X/L_0 = -0.04 \sim -0.08$ の間で発生している。滑面と「有孔板+透水層」の流速の比較については、 H_0/L_0 が大きくなるにつれて、汀線付近の打ち上げ速度に大きな違いが認められる。戻り流速については、ほとんどの地点で同程度か「有孔板+透水層」の方が小さい値を示している。

また、透水層内の流速に関しては、 $X/L_0 \approx -0.04$ より沖側では、それぞれの H_0/L_0 に対しほぼ一定の値の流速を示しているが、汀線から岸側では、常に負の値、即ち常時戻り流速が現れていることが注目される。透水層内の定常流が発生する領域は、 H_0/L_0 が大きくなるにつれて汀線より沖側の方へ拡大していくが、流速の最大値は、常に汀線付近に表われている。

3.3 定常戻り流速と沖波波形勾配の関係

図-7 は、汀線地点における透水層内の各波形勾配に対する定常流速 V_p を入射波波高 H_i で無次元化した $V_p/(gH_i)^{1/2}$ と沖波波形勾配 H_0/L_0 との関係を示したも

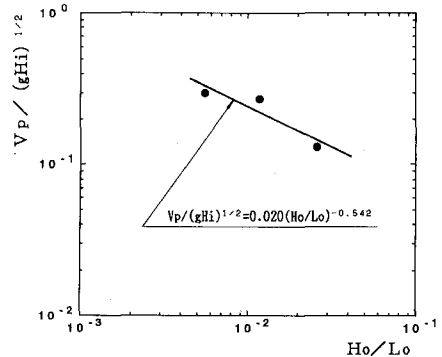
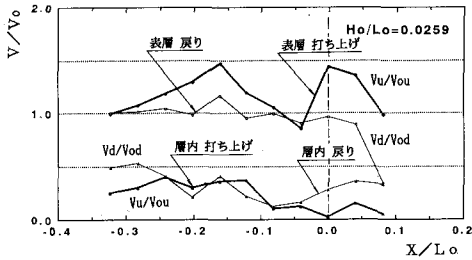


図-7 定常戻り流速と沖波波形勾配の関係



図—8 滑面に対する「有孔板+透水層」の場合 ($H_0/L_0=0.0259$)

のである。図より、 H_0/L_0 が大きくなるに従い、 $V_p/(gH_i)^{1/2}$ の値は小さくなっていく傾向が認められる。データ数は少ないが、近似式を求めると次式のような関係にある。

$$V_p/(gH_i)^{1/2} = 0.020(H_0/L_0)^{-0.542} \dots\dots\dots (1)$$

3.4 滑面上の流速との比較

a) 表層流速の場所的分布

図—8は、 $H_0/L_0=0.0259$ の場合の、滑面の打ち上げ及び戻り流速のアンサンブル平均流速 ($V_0 = V_{0u}, V_{0d}$) に対する「有孔板+透水層」の表層及び透水層内の平均流速 ($V = V_u, V_d$) の割合を示したものである。太線は打ち上げ流速、細線は戻り流速に対するものである。表層の場合、 $X/L_0 \approx -0.04$ で打ち上げ流速が滑面の場合より幾分か小さい値を示しているが、他の地点では同じかそれ以上の打ち上げ流速となっている。一方、戻り流速の場合は、 $X/L_0 \approx -0.08$ より沖側では、各地点とも滑面と同程度の値であるが、 $X/L_0 \approx -0.04$ より岸側では、9割から3割程度まで小さくなっている。

b) 透水層内流速の場所的分布

図—8の透水層内の場合、 $X/L_0 \approx -0.283 \sim -0.323$ と $X/L_0 \approx -0.08$ より岸側の地点では、戻り流速の割合が打ち上げ流速の割合よりも大きい値を示している。全体的には、透水層内の打ち上げ及び戻り流速の割合は、滑面の約1～5割程度の値となっていることが分かった。このような傾向は、 $H_0/L_0=0.0055, 0.0118$ の場合もほぼ同様である。

3.5 相対打ち上げ高さと最大打ち上げ流速の関係

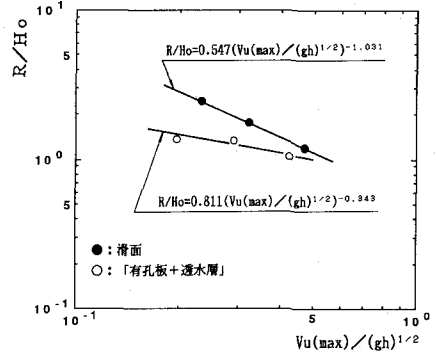
図—9は、滑面及び「有孔板+透水層」の R/H_0 と斜面上の最大打ち上げ流速 $V_u(\max)$ を $(gh)^{1/2}$ で無次元化した値との関係を示したものである。●印の滑面及び○印の「有孔板+透水層」の R/H_0 と $V_u(\max)/(gh)^{1/2}$ の間には、それぞれ次式の関係が認められる。

滑面の場合

$$R/H_0 = 0.547(V_u(\max)/(gh)^{1/2})^{-1.031} \dots\dots\dots (2)$$

「有孔板+透水層」の場合

$$R/H_0 = 0.811(V_u(\max)/(gh)^{1/2})^{-0.343} \dots\dots\dots (3)$$



図—9 相対打ち上げ高さと最大打ち上げ流速の関係

ただし、 $V_u(\max)/(gh)^{1/2} < 0.5$, $H_0/L_0 < 0.0257$

図より、「有孔板+透水層」の方が滑面に比べ、 R/H_0 の値をかなり減少させ、 $V_u(\max)/(gh)^{1/2}$ と R/H_0 の間には、線形的な関係があることが分かった。

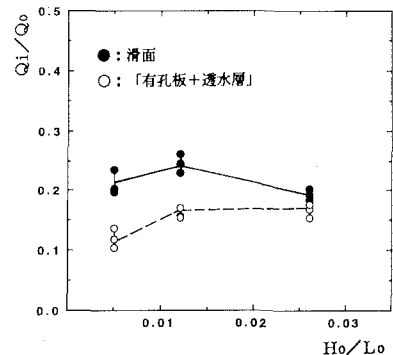
3.6 波の打ち上げ水量と沖波波形勾配の関係

図—10は、滑面及び「有孔板+透水層」に対する起波後21～23波目の3波の最大打ち上げ時の汀線以上総打ち上げ水量 Q_i (単位幅当り) と沖波1周期単位幅当りの波の輸送水量 $Q_0 (= H_0 \cdot L_0 / 2\pi$, 石原ら1957) の比と H_0/L_0 との関係を示したものである。図中の実線、破線はそれぞれのデータの平均値を結んだものである。図より、滑面で約0.18～0.26、「有孔板+透水層」では約0.10～0.18程度であるが、 H_0/L_0 が大きくなると滑面と「有孔板+透水層」の Q_i/Q_0 の差は小さくなる。

図—11は、上述で求めた滑面の総打ち上げ水量 $Q(S)$ に対する「有孔板+透水層」の総打ち上げ水量 $Q(r+p)$ の割合と H_0/L_0 の関係を図示したものである。図中の実線は、次式で表される近似式である。

$$Q(r+p)/Q(S) = 1.994(H_0/L_0)^{0.240} \dots\dots\dots (4)$$

図より、 $H_0/L_0=0.005$ の場合、約0.55となり $H_0/L_0=0.01, 0.02$ では、約0.66, 0.78となる。すなわち、 H_0/L_0 が大きくなるにつれて滑面と「有孔板+透水層」の総打



図—10 波の打ち上げ水量と沖波波形勾配の関係

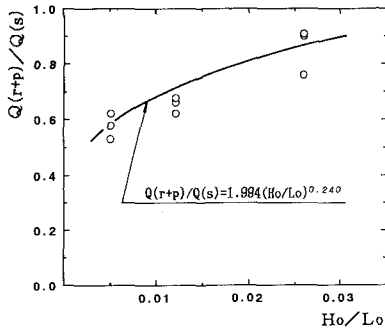


図-11 滑面に対する「有孔板+透水層」の波の打ち上げ水量の割合と沖波波形勾配の関係

ち上げ水量の割合は小さくなる。言い換えれば、 H_0/L_0 が小さい程緩傾斜堤の特性が大きくなると言える。

4. あとがき

緩傾斜堤の表層及び透水層内の打ち上げ及び戻り流れの流速、水量等について実験により検討を行った。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) 各 H_0/L_0 とも、滑面及び「有孔板+透水層」の斜面上の打ち上げ流速 V_u のピーク値は、汀線とそれより沖側 $X/L_0 = -0.04$ の間で発生する。一方、戻り流速 V_d のピーク値は、滑面及び「有孔板+透水層」とも汀線よりやや沖側で $X/L_0 = -0.04 \sim -0.08$ の間で発生している。

(2) 滑面と「有孔板+透水層」の流速の比較については、汀線付近の打ち上げ流速に大きな違いが認められる。

(3) 透水層内の打ち上げ流速及び戻り流速は、滑面の底面流速の約 0.1~0.5 倍程度の値である。

(4) 汀線付近の透水層内には、定常的な戻り流れ V_p が認められ、 $V_p/(gH_t)^{1/2} = 0.020(H_0/L_0)^{-0.542}$ の関係が認められる。

(5) 滑面及び「有孔板+透水層」の R/H_0 と

$V_u(\max)/(gh)^{1/2}$ の間には、それぞれ $R/H_0 = 0.547(V_u(\max)/(gh)^{1/2})^{-1.031}$, $R/H_0 = 0.811(V_u(\max)/(gh)^{1/2})^{-0.343}$ の関係が認められる。

(6) 滑面の総打ち上げ水量 $Q(S)$ に対する「有孔板+透水層」の総打ち上げ水量 $Q(r+p)$ の割合と H_0/L_0 の関係は、 $Q(r+p)/Q(S) = 1.994(H_0/L_0)^{0.240}$ で表される。 $Q(r+p)$ は $Q(S)$ より常に小さく、その差が透水層を通ずる戻り流れの主要部分になると考えられる。

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 伊藤智雄、熊谷勲児、栗原明、斉藤昭一 各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する。

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.
- 建設省河川局海岸課監修 (1989): 緩傾斜堤の設計の手引き, 全国海岸協会, 48 p.
- 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏 (1957): 海岸堤防の越し波防止効果について, 第 4 回海岸工学講演会講演集, pp. 99-109.
- 宇多高明・小菅 晋・柳澤 修 (1991): 緩傾斜堤の安定性に関する全国実態調査, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 651-655.
- 宇多高明・柳澤 修 (1991): 緩傾斜堤の被災機構と安定化のための方策, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 656-660.
- 斉藤 浩・松富英夫・鋒山 勉 (1985): 部分重複波の遡上高と汀線流速について, 昭和 59 年度東北支部技術研究発表会講演概要, pp. 84-85.
- 豊島 修 (1984): 緩傾斜のり面被覆工法, 海岸, No. 24, pp. 133-144.
- 豊島 修 (1986): 緩傾斜護岸 Q & A, 海岸, No. 26, pp. 95-104.
- 前野賀彦・山本方人・遠藤泰司 (1990): 緩傾斜護岸裏込め砂の吸い出し機構, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 499-503.
- 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.
- 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.