

緩傾斜堤への波の打ち上げ高さ及び遡上特性に関する現地観測値の基礎的検討

THE BASIC EXAMINATION OF FIELD OBSERVATION VALUES OF WAVE RUN-UP HEIGHT FOR GENTLE-SLOPE SEA DIKE

高橋敏彦¹・沼田 淳²

Toshihiko TAKAHASHI and Atsushi NUMATA

¹正会員 博(工) 東北工業大学講師 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)

²正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35番1号)

Field observations of wave run-up height for Gentle-slope sea dike facing the Bay of Ishinomaki were carried out. The correlations between the representative waves were obtained as follows: $H_{1/10} = 1.265H_{1/3}$, $H_{1/3} = 1.590\bar{H}$ in offshore waves and $R_{1/10} = 1.146R_{1/3}$, $R_{1/3} = 1.263\bar{R}$ in wave run-up heights and $V_{1/10} = 1.122V_{1/3}$, $V_{1/3} = 1.234\bar{V}$ in wave uprush velocity. Frequency distribution of wave run-up heights and wave uprush velocity on this Gentle-slope sea dike were obtained. The values of relative run-up heights (R/H_o) tended to decrease, as wave deep steepness (H_o/L_o) was bigger, and as relative depth (h_i/L_o , h_i : water depth at toe of sea dike) was smaller.

Key Words : Gentle-slope sea dike, field observation, wave run-up height, wave uprush velocity

1. はじめに

遡上波に関する現地観測は、たとえば首藤¹⁾、久宝ら²⁾、Waddell, E.³⁾、小川ら⁴⁾、水口ら⁵⁾、久保田ら⁶⁾、等多くの研究が行われているが、多くは自然海浜に対しての現地調査である。緩傾斜堤が注目され始めて日が浅く、また適切な観測地点の選定が難しいため現地観測に関する研究例は少ない⁷⁾。しかし、現地の緩傾斜堤への波の打ち上げ高さを推定するためには、現地調査によって実際の波の打ち上げ高さ及び遡上特性を把握する事が重要である。著者らは、できるだけ多くの実測値を蒐集蓄積するため、宮城県北部に設置されている緩傾斜堤への波の打ち上げ高さに関する現地観測を行っている。本研究では、2ヶ年間の波の観測値を基に、波の打ち上げ高さ及び遡上特性に関する基礎的検討を行う事を目的とした。

2. 現地調査概要

波の打ち上げ高さに関する現地観測は、宮城県北部に設置されている緩傾斜堤を対象とした。場所は、宮城県桃生郡矢本町の大曲海岸で石巻湾内に位置している。図-1は、現地観測地の概略図を示している。

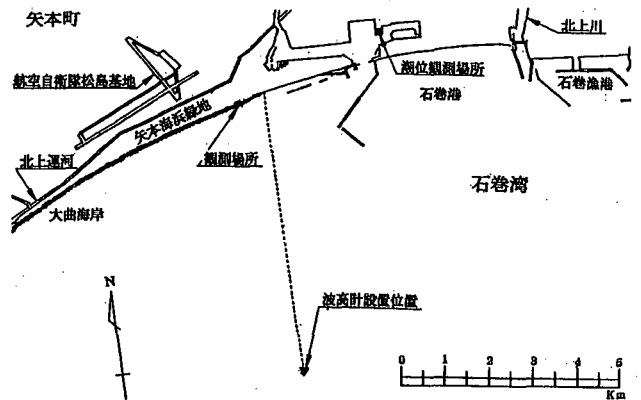


図-1 現地観測地の概略図

緩傾斜堤は、1個のブロックの空隙率が約15%の2tブロックで構成されているが、配列間の空隙を含めると約22%程度の空隙率を持つ4割勾配の緩傾斜堤である。堤前面の海底勾配は、約1/40である。波の打ち上げ高さの観測は、午前8時から午後4時までの毎偶数時前後10分間(計20分間)ずつ1日5回行った。打ち上げ高さ(R : 静水面からの鉛直高さ)は、のり面に0.5m毎にマーキング及び1m毎に鉄筋を設置して目視より読み取り、T.P.を基準に観測時の潮位補正を行って求めている。波先端移動速度は、波の打ち上げ高さの大きい波、数十波についてストップウォッチを用



写真-1 現地観測風景

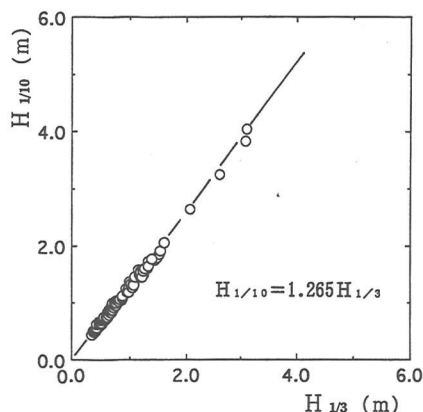


図-2(a) $H_{1/10}$ と $H_{1/3}$ の関係

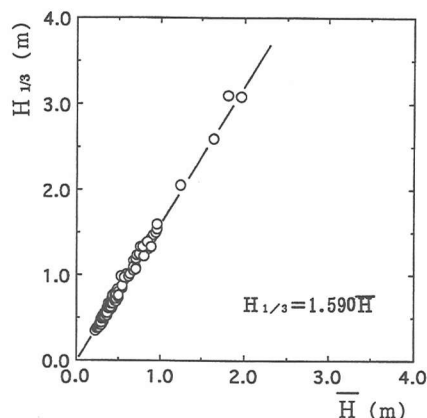


図-2(b) $H_{1/3}$ と $\bar{H}$ の関係

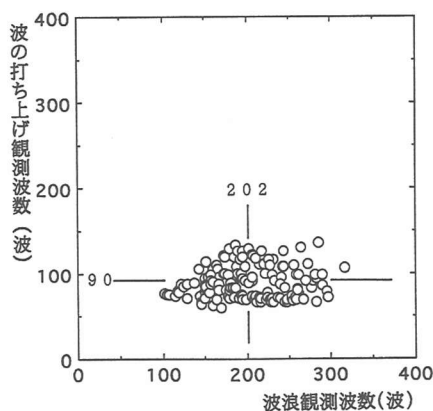


図-3(a) 波浪観測波数と波の打ち上げ観測波数

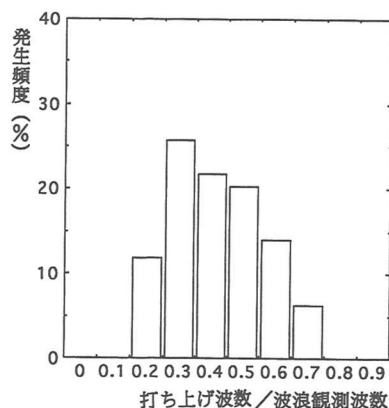


図-3(b) 打ち上げ波数/波浪観測波数の発生頻度

いて測定した。現地観測は、1996年7月8日～11月28日までと1997年9月3日～11月4日までの2年間計31日間の143回である。写真-1は、1996年9月12日の観測風景である。当日の沖波波形勾配は、0.0042～0.0064であり、相対水深(堤脚水深/沖波波長)は0または0.01となっており、比較的穏やかで堤脚水深としては浅い方の観測日である。

観測値の波浪諸元と潮位は、運輸省第二港湾建設局石巻港事務所(波浪は観測地より沖合約6.5km、設置水深約20mで観測)及び、宮城県石巻港湾事務所(観測地近くの港内で測定)の観測データを利用した。

3. 波浪及び波の打ち上げ高さの出現確率

(1) 波浪出現確率

図-2(a),(b)は、波の打ち上げ高観測時2年間分の波高計設置位置における波高の代表値間の相関図であり、いずれも $N=143$ 個である。図示の通り $H_{1/10}=1.265H_{1/3}$, $H_{1/3}=1.590\bar{H}$ となり、Longuet-Higgins⁸⁾が、Rayleigh分布と仮定して求めた値

($H_{1/10}=1.271H_{1/3}$, $H_{1/3}=1.597\bar{H}$) とほぼ同程度となっている。

図-3(a)は、計20分間の波浪観測波数と波の打ち上げ観測波数の関係を図示したものである。波浪観測地点における観測波数102～316波に対して波の打ち上げ観測波数は60～133波となっており、それぞれの平均値は、202波と90波となっている。図-3(b)は、横軸に波浪観測波数に対する波の打ち上げ観測波数の割合を、縦軸はその発生頻度(%)を示したものである。波浪観測波数に対して波の打ち上げ観測波数は、約25%～75%に減少している。全観測結果において最も観測頻度の多かったのは、0.3(3割台)であり、平均値は0.44である。波浪観測波数の約半数弱の波数に対して、打ち上げ高さの観測を行っていることになる。

久保田ら⁹⁾の種々の海岸での遡上波に関する現地観測によると、遡上斜面前面で測定した入射波に対して遡上波の波の数は10～60%の減少を示している。また豊島⁷⁾は、波の打ち上げ高観測において観測20分間の沖波波数が150～260波に対して、波の打ち上げ高の波数が70～120波となっていると報告している。これらのことから、今回の波浪観測波数と波の打ち上げ観測波数の関係は、既往の現地観測結果とほぼ同傾向を示していることがわかる。

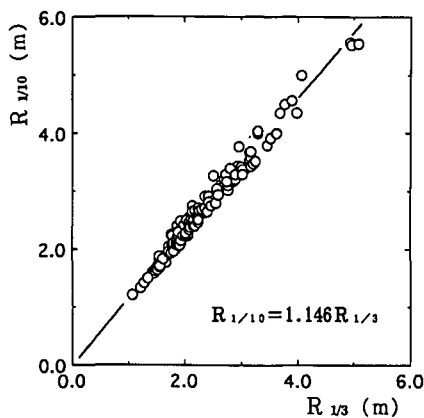


図-4(a) $R_{1/10}$ と $R_{1/3}$ の関係

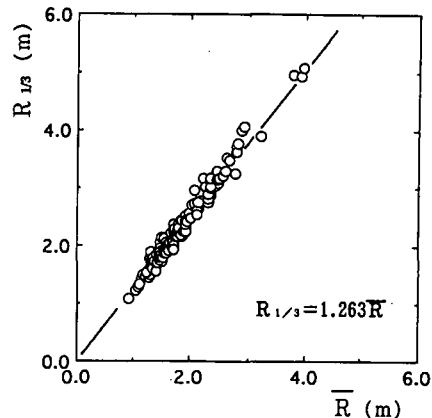


図-4(b) $R_{1/3}$ と $\bar{R}$ の関係

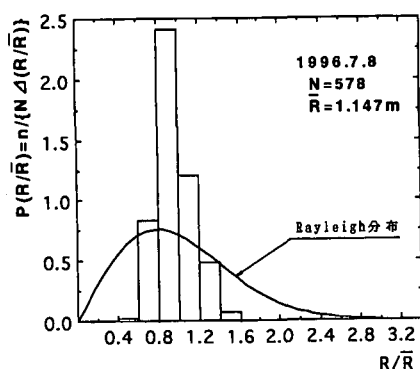


図-5(a) 波の打ち上げ高の
確率密度分布

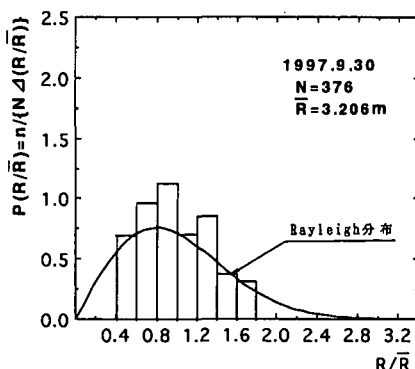


図-5(b) 波の打ち上げ高の
確率密度分布

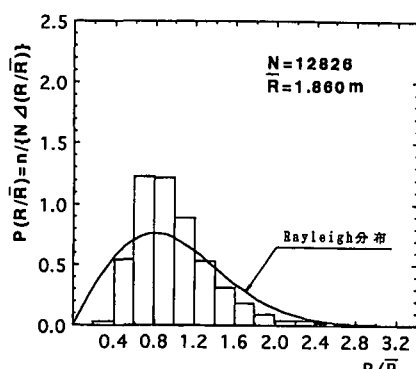


図-5(c) 波の打ち上げ高の
確率密度分布

(2) 波の打ち上げ高さの頻度分布特性

a) 代表打ち上げ高さ間の関係

図-4(a), (b)は、波の打ち上げ高 R の代表値($R_{1/10}$, $R_{1/3}$, $\bar{R}$)間の関係を示したものである。図-2で示した代表波高間の $H_{1/10}$ と $H_{1/3}$, $H_{1/3}$ と $\bar{R}$ より幾分ばらつきがあるが、 $R_{1/10}=1.146R_{1/3}$, $R_{1/3}=1.263\bar{R}$ の関係が認められる。この関係式の傾きは、代表波高間のそれぞれの傾きに比べて小さい値となっている。

b) 波の打ち上げ高さの頻度分布

次に、波の打ち上げ高さの確率密度分布について検討してみた。

図-5(a), (b)は、現地観測27年間の中で平均打ち上げ高さが最も小さいケースと最も大きいケースの波の打ち上げ高さの観測値 R を、平均打ち上げ高さ $\bar{R}$ で無次元化した値 $R/\bar{R}$ の確率密度を柱状グラフで示した例である。図中の実線は、Rayleigh分布¹⁰⁾曲線を示している。(a)は、1996年7月8日の観測値であり、平均打ち上げ高さ $\bar{R}$ が1.147mと最も小さいケースである。波の打ち上げ高の測定波数 $N=578$ 波は、1日の測定波数としては比較的多い方であるが、打ち上げ高の発生割合が $R/\bar{R}=0.6\sim 1.2$ に集中しており、特に $R/\bar{R}=0.8\sim 1.0$ の値が突出している。このケースは、全ケー

スの中でも狭い範囲に集中している特異な例である。これは、比較的波高の小さい揃った波が、ほとんど非砕波で遡上したため平均値付近の狭い範囲に集中したと思われる。(b)は、1997年9月30日の観測値である。当日は、台風接近中で海が荒れている状態の観測であり、平均打ち上げ高さが3.206mと最も高い値を示した例である。測定波数 $N=376$ 波と(a)よりデータが少ないにも関わらず、 $R/\bar{R}=0.4\sim 1.8$ の比較的広い範囲に分布しており、ばらつきはあるもののRayleigh分布と同じような傾向が伺われる。

図-5(c)は、27年間全観測データ $N=12,826$ 波を柱状グラフで示したものである。平均打ち上げ高さは、1.860mである。打ち上げ高さの小さい波を無視しているため、 $R/\bar{R}<0.4$ ($R<0.74$ m)の波はほとんど観測されていない。これらのことを考慮に入れると打ち上げ高の確率密度分布は、Rayleigh分布とほぼ同様と考えても良いように思われる。

4. 波先端移動速度

(1) 波先端移動速度の定義

著者等¹¹⁾は、緩傾斜堤の波の相対打ち上げ高さ R/H_0 をsurf similarity parameter ξ のべき乗に比例

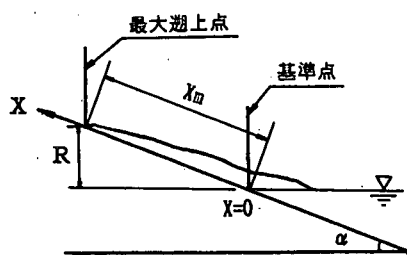


図-6 波の打ち上げ高さの模式図

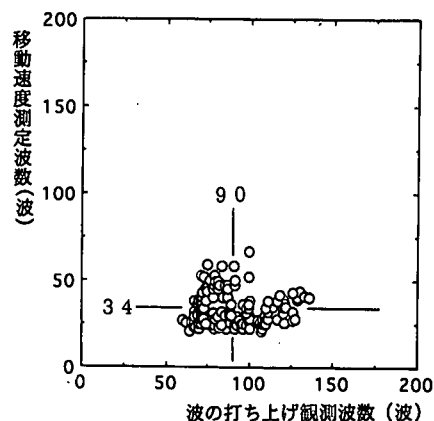
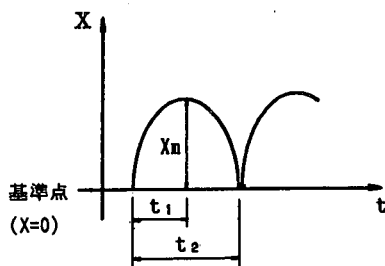


図-7 波の打ち上げ観測波数と波先端移動速度測定波数

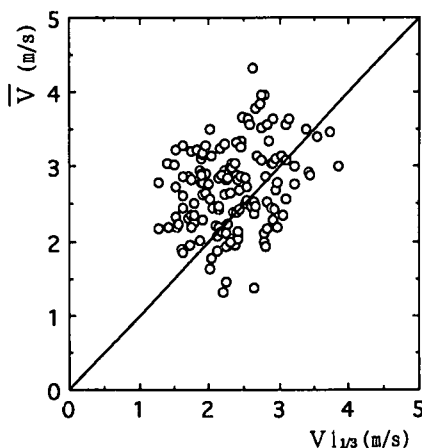


図-8 波先端移動速度 $\bar{V}$ と $V_{1/3}$ の比較

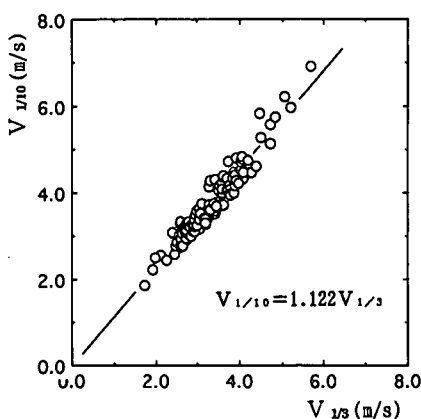


図-9(a) 波先端移動速度 $V_{1/10}$ と $V_{1/3}$ の比較

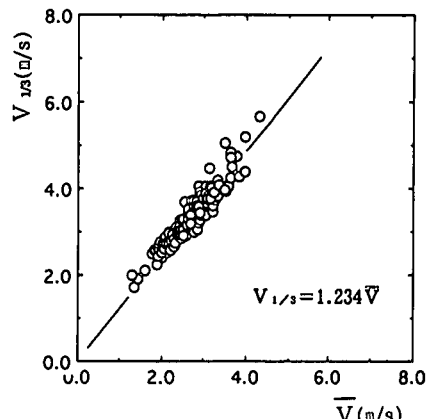


図-9(b) 波先端移動速度 $V_{1/3}$ と $\bar{V}$ の比較

すると考え、その比例定数とべき数を波の周期 T と打ち上げ高さ R から求めた波先端移動速度 V を用いた Reynolds 数と関連づけて実験式を提案している。本節では、 T と R から求めた V と現地観測値との整合性を調べるとともに、その統計量について考察した。

図-6は、波の打ち上げ高さの模式図である。実測の V は、波先端が X_m の斜面距離を通過した時間 t_1 をストップウォッチで測定し、式(1)より求めた。一方、式(2)は、 T と R を用いて求めた V の定義式である。

$$V = X_m / t_1 = \{2R / \sin \alpha \cdot 1 / t_2\} \quad (1)$$

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

X_m : 基準点(≡ 静水面)から波の打ち上げ高さまでの斜面距離(m)

t_2 : t_1 の2倍の時間(sec) , α : 法面角度

図-7は、観測20分間における波の打ち上げ高観測波数と波先端移動速度測定波数の関係を図示したものである。波の打ち上げ高観測波数60~133波に対して21~67波であり、それぞれの平均値は、90波と34波である。すなわち、打ち上げ高さの約1/3最大波について波先端移動速度を測定していることになると思われる。

図-8は、実測波先端移動速度の平均値($\bar{V}$)と、式

(2)において $R_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ を用いて計算した $V_{1/3}$ の値の比較図である。図より $\bar{V}$ の方が幾分大きい値を示し、ばらつきも大きい。全体的には両者とも同程度の値とみなしてよいように思われる。このことから、平均波先端移動速度($\bar{V}$)は、波の打ち上げ高さ($R_{1/3}$)、入射波周期($T_{1/3}$)より求めることが可能と考えられる。ただし、この場合の平均波先端移動速度は、打ち上げ高観測波数のほぼ1/3最大値に対応する遡上波である。

(2) 波先端移動速度の頻度分布

a) 代表波先端移動速度間の関係

図-9(a),(b)は、実測波先端移動速度 V の代表値

($V_{1/10}$, $V_{1/3}$, $\bar{V}$) の関係を示したものである。図-9より $V_{1/10} = 1.122 V_{1/3}$, $V_{1/3} = 1.234 \bar{V}$ の関係が認められる。両式の傾きは、観測波高、打ち上げ高の各代表間の関係式の傾きに比べ小さい値を示し、最も1に近い値となっている。

b) 波先端移動速度の頻度分布

図-10(a),(b)は、現地観測回数143回のうち平均波先端移動速度 $\bar{V}$ が最も小さいケースと最も大きいケー

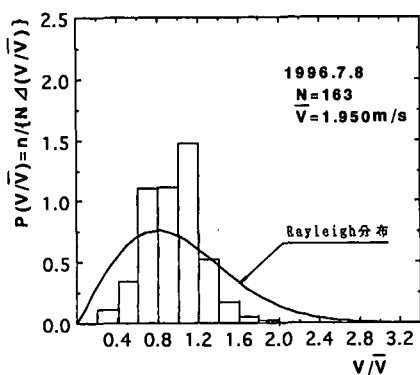


図-10(a) 波先端移動速度の
確率密度分布

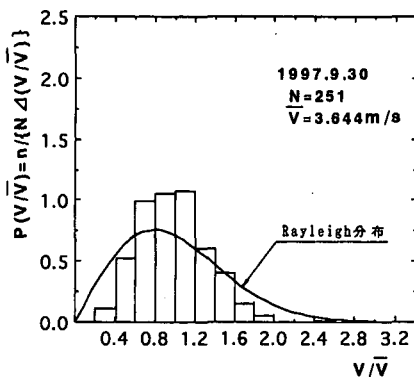


図-10(b) 波先端移動速度の
確率密度分布

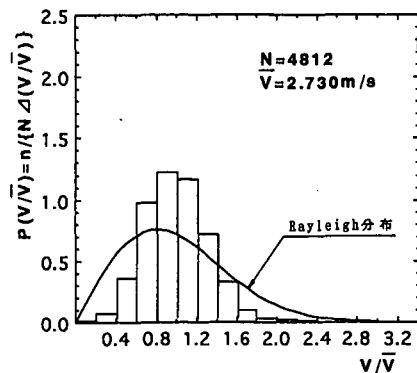


図-10(c) 波先端移動速度の
確率密度分布

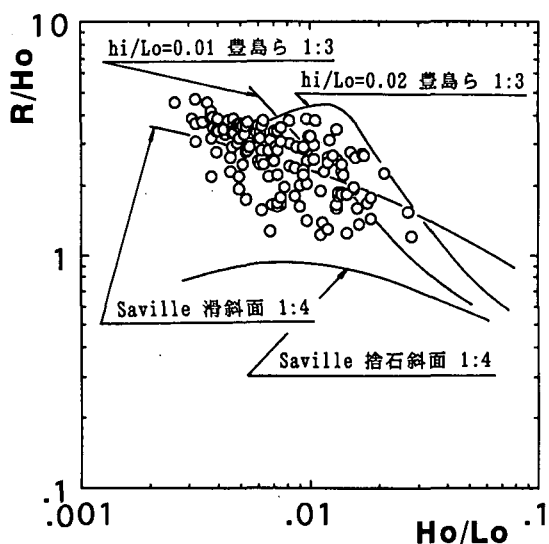


図-11(a) R/HoとHo/Loの関係 (1/10最大値)

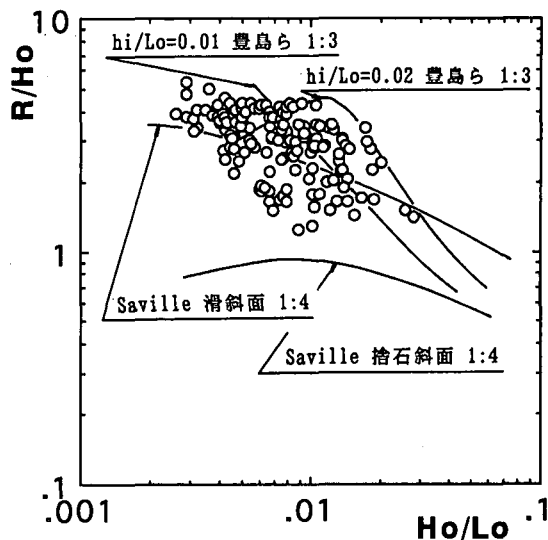


図-11(b) R/HoとHo/Loの関係 (1/3最大値)

スの波先端移動速度 $\bar{V}$ を V で無次元化した値の確率密度を柱状グラフで示した例である。図中の実線は、Rayleigh分布を表している。(a)は図-5(a)と同じ1996年7月8日の観測値で測定波数 $N=163$ 、 $\bar{V}=1.950\text{m/s}$ である。Rayleigh分布に比べ分布幅が狭く、図-5(a)と同程度の分布幅となっている。(b)は、図-5(b)と同じ1997年9月30日の観測値で $\bar{V}=3.644\text{m/s}$ で(a)の約1.9倍となっている。図-5(b)と同程度の分布形状を示し、(a)よりはRayleigh分布に近づいている。

図-10(c)は、27年間の全データ $N=4,812$ 波の波先端移動速度を柱状グラフで示したもので、平均波先端移動速度 $\bar{V}=2.730\text{m/s}$ となっている。図中の $V/\bar{V}<0.4$ ($V<1.09\text{m/s}$)と $V/\bar{V}>1.6$ ($V>4.37\text{m/s}$)の波先端移動速度はほとんど観測されていない。0.4以下の頻度が少ないのは、打ち上げ高の大きい波を対象としたためであり、1.6以上の頻度が少ないのはその結果 $\bar{V}$ が大きい値となり、 $V/\bar{V}$ が相対的に小さくなったためと考えら

れる。

5. 相対打ち上げ高さと沖波波形勾配の関係

図-11(a)(b)は、 $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ と $R_{1/10}$ 、 $R_{1/3}$ を用いて求めた相対打ち上げ高さ(R/H_o)と沖波波形勾配(H_o/L_o)の関係を図示したものである。比較のために、Saville¹²⁾の1/4勾配に対する滑面及び捨石斜面の実験曲線と、豊島¹³⁾らの1/3勾配の滑面に対する実験曲線も示している。ただし、Savilleの実験曲線は h_i/H_o (堤脚水深/沖波波高)が3.0以上での実験結果である。図-11(a)(b)とも R/H_o の値とばらつきの程度はほぼ同じで、観測値はSavilleの滑面曲線付近に分布している。豊島らの $h_i/L_o=0.01, 0.02$ と比較すると、観測値の方が全体的に小さめの値を示している。これは、豊島らの実験条件が滑面で勾配が1/3であるのに対し本観測値は有孔被覆ブロック+透水層で勾配が1/4であるためと思われる。

図-12は、有義波を用い h_i/L_o をパラメーターとして R/H_o と H_o/L_o の関係を拡大図示したものである。

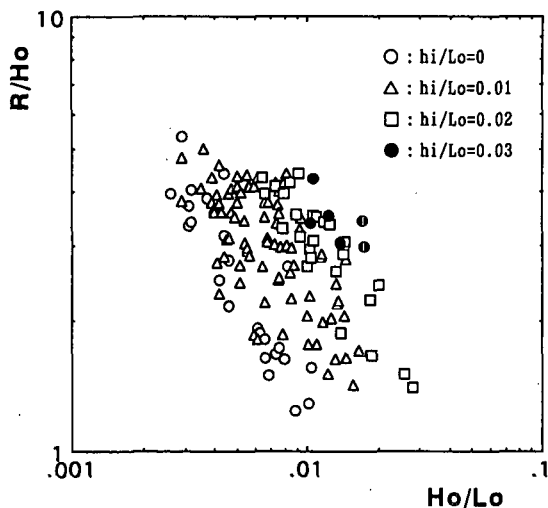


図-12 R/HoとHo/Loの関係

かなりばらつきはあるが、R/Hoの値はHo/Loが大きいくほど、またhi/Loが小さいほど小さくなる傾向が認められる。

6. おわりに

本研究では、2ヶ年間の波の観測値を基に、波の打ち上げ高さ及び遡上特性に関する基礎的検討を行った。主要な結論をまとめると次のとおりである。

(1) 波浪観測地点における代表波高間の関係は、 $H_{1/10}=1.265H_{1/3}$ 、 $H_{1/3}=1.590\bar{H}$ となり、波高出現確率をRayleigh分布と仮定した値($H_{1/10}=1.271H_{1/3}$ 、 $H_{1/3}=1.597\bar{H}$)とほぼ同程度の値となっている。

(2) 20分間の波浪観測波数102~316波に対して波の打ち上げ観測波数は60~133波となっており、波浪観測地点における入射波に対して波の打ち上げ観測波数は、約25%~75%の減少を示した。

(3) 代表遡上高さ間の関係は、 $R_{1/10}=1.146R_{1/3}$ 、 $R_{1/3}=1.263\bar{R}$ であり、また代表波先端移動速度間の関係は、 $V_{1/10}=1.122V_{1/3}$ 、 $V_{1/3}=1.234\bar{V}$ となる。いずれも代表波高間の傾きより小さい値となった。

(4) 波の打ち上げ高さR/ $\bar{R}$ の頻度分布と波先端移動速度V/ $\bar{V}$ の頻度分布は、ほぼ同様の分布形を示しR/ $\bar{R}=V/\bar{V}=0.4\sim 1.6$ の発生頻度が大きい。0.4以下の頻度が少ないのは、小さい遡上波を無視したためであり、V/ $\bar{V}$ の1.6以上の頻度が少ないのは打ち上げ高の大きい波を対象としたため、 $\bar{V}$ が大きい値となりV/ $\bar{V}$ が相対的に小さくなったためと考えられる。

(5) 斜面上の実測波先端移動速度($\bar{V}$)は、周期及び波の打ち上げ高さの1/3最大値($T_{1/3}$ 、 $R_{1/3}$)等を

用いて求めた計算値 $V_{1/3} (=2R_{1/3}/\sin\alpha \cdot 1/T_{1/3})$ とほぼ対応することが示される。

(6) 実測値はかなりばらついているが、既往の実験値とほぼ同程度の値を示し、hi/Loのパラメータは打ち上げ高さに大きく影響を与えると思われる。

謝辞:本研究を行うにあたり、運輸省第二港湾建設局石巻港事務所及び宮城県石巻港湾事務所より貴重な資料を提供して頂いた。また、現地調査は当時東北工業大学土木工学科の卒研生に協力して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 首藤伸夫: 不規則波の打ち上げ高, 土木学会第23回年次学術講演会講演概要集II, pp.49-50, 1968.
- 2) 久宝雅史, 遠藤茂勝: 現地海岸における波の打ち上げに関する一考察 (第2報), 土木学会第23回年次学術講演会講演概要集II, pp.51-52, 1968.
- 3) Evans Waddell: 自然海岸における打ち上げ波の特性に関する現地観測, 第20回海岸工学講演会論文集, pp.545-551, 1973.
- 4) 小川由信, 首藤伸夫: 波打帯の水理特性について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.135-139, 1982.
- 5) 水口 優, 苅部好伸, 堀田新太郎: 現地海岸における遡上波について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.109-113, 1983.
- 6) 久保田進, 水口 優, 堀田新太郎, 竹澤三雄: 急勾配前浜海岸における遡上波の現地観測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.118-122, 1988.
- 7) 豊島 修: 緩傾斜護岸工法, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.447-451, 1987.
- 8) Longuet-Higgins, M.S.: On the Statistical Distributions of the Heights of Sea Waves, *Jour. Marine, Res.*, Vol. 9, No. 3, pp. 245-266, 1952.
- 9) 久保田進, 水口 優, 竹澤三雄: 遡上・反射波分布の予測モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.21-25, 1992.
- 10) 土木学会水理公式集例題集 (昭和60年版): 第6編 海岸・港湾編, pp.247-250, 1985.
- 11) 高橋敏彦, 首藤伸夫, 沼田 淳: 緩傾斜堤への波の打ち上げ高の一推定法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.501-505, 1991.
- 12) Saville, T. Jr: Laboratory Investigation of Rubble-mound Breakwaters, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, Vol. 86, No. ww3, pp.151-156, sept., 1960.
- 13) 豊島 修・首藤伸夫・橋本 宏: 海岸堤防への波の打ち上げ高—海岸勾配1/20—, 第12回海岸工学講演会講演集, pp.180-185, 1965.

(1999.4.19受付)