

礫浜斜面上の碎波特性に関する実験的研究

CHARACTERISTICS OF WAVE BREAKING IN A GRAVEL BEACH

李光浩¹・藤井俊明²・水谷法美³

Kwang-Ho LEE, Toshiaki FUJII, Norimi MIZUTANI,

¹正会員 博(工) 名古屋大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工修 名古屋市上下水道局 (〒460-8508 名古屋市中区三の丸三丁目1号1番)

³正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

The purpose of this study is to investigate the characteristics of breaking waves on a gravel beach, considering the effects of the groundwater table. Wave breaking in 835 hydraulic model tests results is studied. The experimental results of breaking index including the breaking wave height and breaking depth in a gravel beach are compared with the proposed breaking wave formula for computing breaker height and depth. The experimental results indicate that breaking wave heights and waters depth are smaller than those in a sandy beach, and the higher the groundwater table, the higher breaking wave height and water depth.

Key Words : Wave breaking, gravel beach, groundwater, breaker height, breaker depth

1. はじめに

碎波は波力や漂砂移動による海岸侵食を誘因する要因の一つとなる。そのため、碎波現象の解明は海岸工学において極めて重要な課題の一つである。これまで、砂浜海岸の碎波現象に関する研究は(例えば, 合田¹⁾; Rattanapitikon・Shibayama^{2), 3)})は数多く行われてきている。一方、礫浜の碎波現象に関する研究についてはLara et al.⁴⁾などで行われているものの、対象としている勾配が1種類であることや礫浜で重要となる地下水の影響を考慮していないことなど、十分な検討が行われているとは言い難い。砂浜海岸と礫浜海岸ではその特性が大きく異なることが予想されるため、砂浜に対して得られている知見をそのまま礫浜海岸に適用可能かどうかは一考の余地が残されている。そこで、本研究では、まず底面勾配の異なる礫浜斜面を対象に、斜面背後の水位を上下させることにより斜面内の浸透流を変化させた水理模型実験を行った。ついで、測定した碎波波高及び碎波水深から、底面勾配と地下水位が礫浜斜面上の碎波特性に及ぼす影響について、砂浜斜面に対して提案されている実験式と関連付けて考究することを目的とする。

2. 水理模型実験の概要

(1) 実験装置

水理模型実験は、名古屋大学大学院工学研究科の長さ 30m, 幅 0.7m, 高さ 0.9m の片面ガラス張り二

次元造波水路を用いて行った。造波水路の一端にはピストン型造波装置が備えられている。また、図-1に示すように水路内の岸側に中央粒径 5.0mm, 比重 2.65 の礫を敷きならして、勾配 1/7, 1/10 および 1/12 の移動床斜面を製作した。実験中の水位を一定に保つため、板で仕切りを作ることで水槽を幅 0.3m と 0.4m に分割した。また、地下水位を考慮するため、斜面背後にアクリル製水槽(写真-1)を

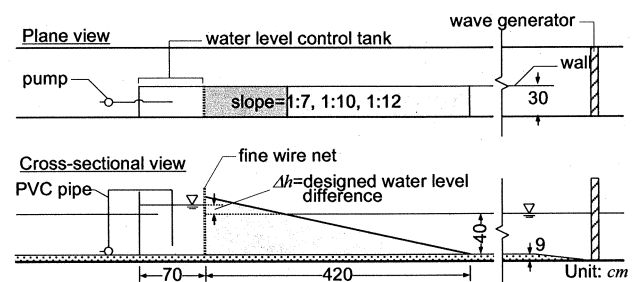


図-1 実験装置の概略図

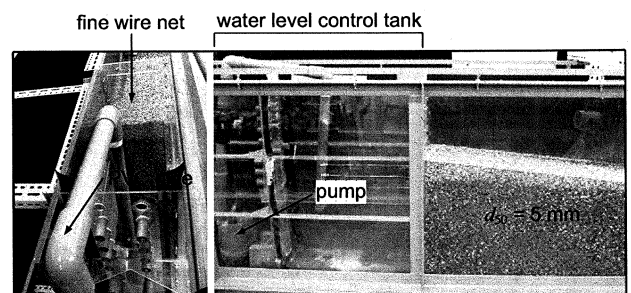


写真-1 アクリル製水槽

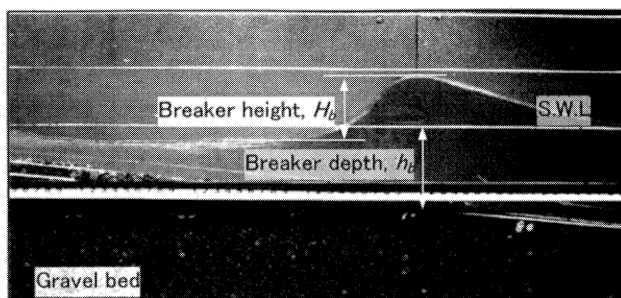


写真-2 画像解析の一例

設置し、ポンプによる注・排水を行なうことにより地下水位を操作するとともに水槽内で水を循環させた。斜面とアクリル製水槽とは底質と比べて十分に細かい目の網によって接しているため斜面からアクリル製水槽への底質の移動はなく、また、水の移動が妨げられないように配慮している。

(2) 実験条件および実験方法

実験では静水深 h を 40.0cm で一定とした。入射波は規則波とし、波高 H を約 3.0cm から約 8.0cm の 11 種類、造波板の押し出す周期 T を 1.0s から 2.0s の 11 種類、斜面背後の水位と静水深の差 Δh (以下、水位差) を 0.0cm, 7.5cm, 12.5cm, 17.5cm, -12.5cm の 5 種類ずつ変化させて、計 835 ケースの実験を行った。実験中は、砕波点近傍をハイスピードデジタルカメラで撮影し、写真-2 に示すように砕波水深と砕波波高をそれぞれ定義し、画像解析からその値を求めた。

3. 実験結果および考察

(1) 既往の砕波指標式

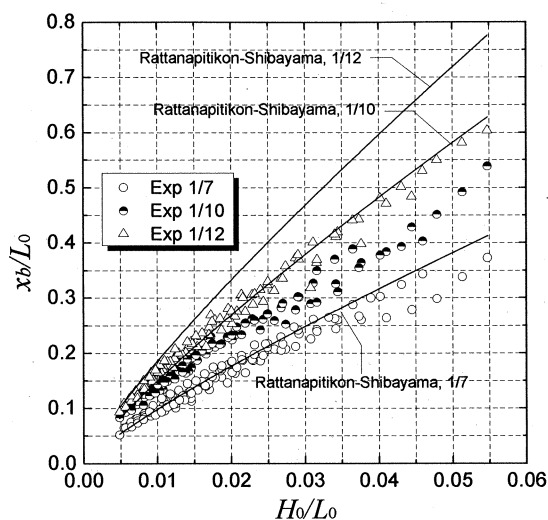
本研究では、水理模型実験から得られた砕波に関する実験データの妥当性を確保するとともに、礫浜斜面上の砕波特性を把握するため、砂浜斜面上の砕波データを整理して導かれた砕波指標式と関連付けて検討を行う。砕波指標式には、式(1)に示す合田¹⁾の式、式(2)に示すRattanapitikon et al.⁵⁾の式および式(3)に示すRattanapitikon・Shibayama³⁾の式を用いた。

$$\frac{H_b}{h_b} = \frac{A}{h_b/L_0} \left\{ 1 - \exp \left[-1.5\pi \frac{h_b}{L_0} (1 + 11s^{4/3}) \right] \right\} \quad (1)$$

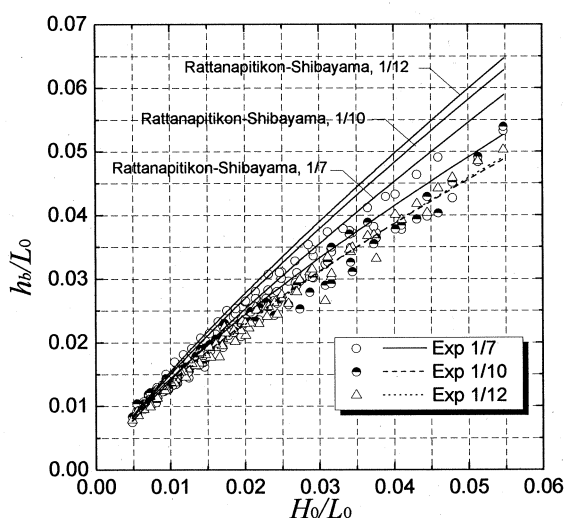
$$\frac{H_b}{L_b} = (-1.40s^2 + 0.57s + 0.23) \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.35} \quad (2)$$

$$\frac{h_b}{L_0} = (3.86s^2 - 1.98s + 0.88) \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.84} \quad (3)$$

ここに、 H_b : 砕波波高、 h_b : 砕波水深、 L_b : 砕波波長、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長、 s : 底面



(a) H_0/L_0 と x_b/L_0 の関係



(b) H_0/L_0 と h_b/L_0 の関係

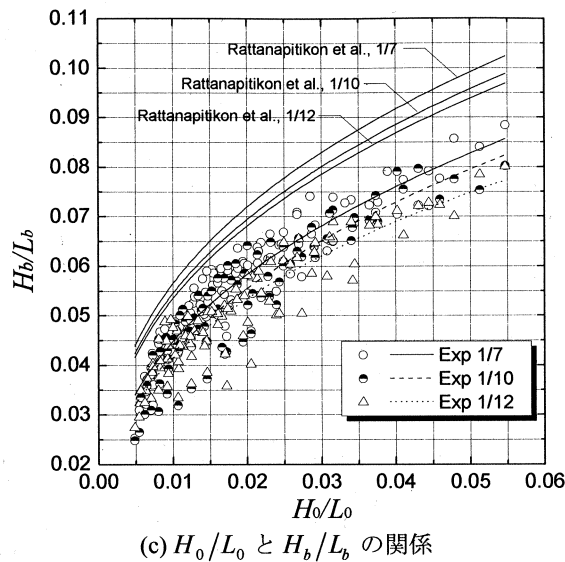
図-2 底面勾配の影響

勾配である。なお、式(1)の A は定数であり、砂浜斜面上の規則波に対しては 0.17 程度の値を用いればよいことがわかっている。また、 $x_b = h_b/s$ (x_b : 汀線から砕波地点までの距離) の関係を用いると、式(3)は以下のように表現できる。

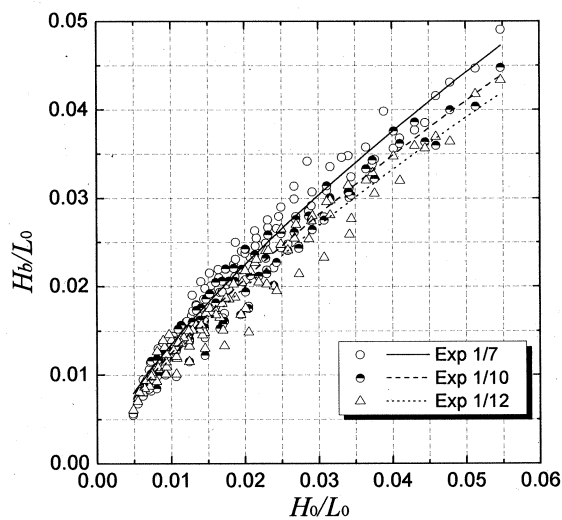
$$\frac{x_b}{L_0} = (3.86s^2 - 1.98s + 0.88)(s)^{-1} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{0.84} \quad (4)$$

(2) 砕波指標式との比較および底面勾配の影響

砂浜海岸と礫浜海岸では透水性の違いなどにより、砕波を含めた波浪場の特性は大きく異なると予想される。また、既往の研究で指摘されているように(例えば、合田¹⁾)、斜面上の砕波を考える上で底面勾配の影響を考慮することが必要である。ここでは、まず砂浜斜面に対して提案された砕波指標式と本実験結果を比較することにより、礫浜斜面上の砕波特性について考察する。ついで、底面勾配の変化



(c) H_0/L_0 と H_b/L_b の関係

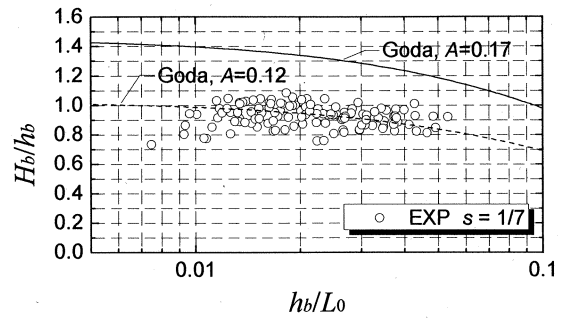


(d) H_0/L_0 と H_b/L_0 の関係

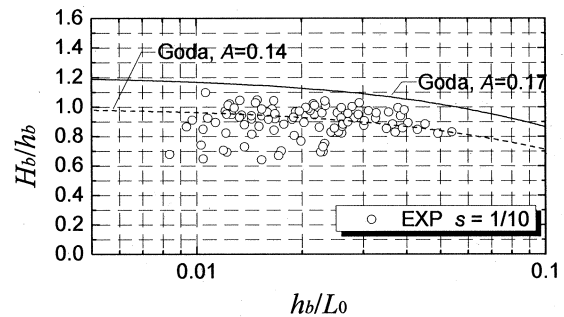
図-2 底面勾配の影響

が礫浜斜面上の碎波現象に与える影響について述べる。底面勾配を変化させたときの沖波波高 H_0/L_0 と碎波地点と沖波波長の比 x_b/L_0 (以下, 碎波地点), 碎波水深と沖波波長の比 h_b/L_0 (以下, 碎波水深), 碎波時の波形勾配 H_b/L_b (以下, 碎波波形勾配) および碎波波高と沖波波長の比 H_b/L_0 (以下, 碎波波高) の関係を図-2に示す。なお, 図中の実験データは水位差 Δh が 0.0cm のものである。図中には既往の碎波指標式 (1) ~ (3) だけでなく, 実験データから得られた近似式も示してある。近似式の表示式および実験データに対する決定係数を章末に示す表-1に載せた。

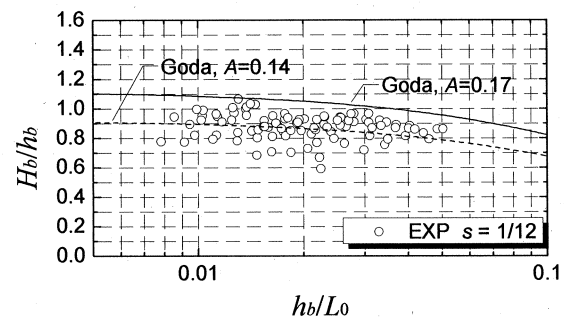
図-2(a), (b) より, 沖波波高の増加にともない碎波地点や碎波水深が大きくなることが確認でき, 沖波波高が大きい不安定な波ほど沖側で碎波するという波の性質が本実験結果からも確かめられた。ここで, 本実験結果と Rattanapitikon・Shibayama³⁾ による碎波指標式を比較する。図-2(a) の碎波地点



(a) 底面勾配 1/7



(b) 底面勾配 1/10



(c) 底面勾配 1/12

図-3 h_b/L_0 と H_b/h_b の関係

および図-2(b) の碎波水深をみると, すべての底面勾配で碎波指標式が本実験結果を過大評価していることがわかる。これは, 礫浜斜面では砂浜斜面に比べ, より岸側で碎波することを意味している。この原因として, 礫浜斜面における透水性が挙げられる。具体的には, 礫浜斜面上で碎波した波は遡上域で斜面内に浸透するため, 砂浜斜面上に比べて遡上域に水が残りにくく, 次に入射してくる波の妨げとならないために碎波地点が岸側に移動したと考えられる。もう一つ考えられる原因として, 礫浜斜面のエネルギー消散効果が挙げられる。すなわち, 礫浜斜面上では砂浜斜面上に比べてエネルギー消散効果が高いため (Lara et al.⁴⁾), 碎波帯に到達する前にエネルギーが減衰し浅水変形による波高増大が抑制されるため, 碎波地点が岸側に移動したと考えられる。また, 図-2(c) の碎波波形勾配でも, すべての底面勾配で実験式が本実験結果を過大評価している。上述のように, 礫浜斜面では砂浜斜面に比べて碎波水深

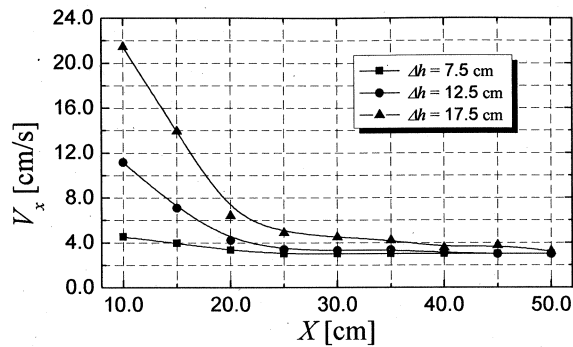


図-4 冲向き流速の空間分布

が小さくなるため、砕波波長は短くなり、砕波波形勾配は大きくなると予想される。しかし、実際には礫浜の砕波波形勾配は砂浜に比べて小さくなっている。このことから、礫浜の砕波波高が砂浜に比べてかなり小さくなることが指摘できる。これも前述のエネルギー消散効果によるものであり、礫浜斜面のエネルギー消散効果によって波高の増大が抑制されたと考えられる。なお、礫浜斜面では砂浜斜面に比べて砕波波高が減少することはLara et al.⁴⁾および出口ら⁶⁾の結果と同様である。

つづいて、底面勾配の変化が礫浜斜面上の砕波特性に与える影響について考察する。図-2(a)の本実験結果から、底面勾配が緩くなると砕波地点が沖側に移動することが確認できる。これは、底面勾配が緩くなると、より沖側で浅水変形による波高の増大が起こるためである。また、沖波波形勾配が大きく底面勾配が緩いほど、本実験結果とRattanapitikon・Shibayama³⁾の砕波指標式の差が大きくなることがわかる。これは、礫浜斜面上では勾配が緩いほど、より沖側でエネルギー消散が起こることに起因すると考えられ、エネルギー消散の効果は沖波波形勾配が大きいほど強くなると推察される。そのため、図-2(b)にみられるように、礫浜斜面では砂浜斜面とは異なり、底面勾配が緩くなると砕波水深が小さくなると考えられる。ここで、図-2(d)をみると、勾配が急になると砕波波高が増加していることが確認できる。この原因としては、勾配が急になると岸に到達するまでの斜面の抵抗によるエネルギー減衰が少なく、浅水変形による波高の増大が大きいことが考えられる。さらに、図-2(c)の本実験結果は砕波指標式と同様に、勾配が急になると砕波波形勾配が増加している。この原因について考察を行う。

図-2(b)から、勾配が急になると砕波水深が小さくなるということがわかる。すなわち、勾配が急になると砕波波高が大きく、砕波水深が小さくなる。砕波水深が小さくなると砕波波長が短くなるため砕波波形勾配は大きく、砕波波高が大きくなると砕波波形勾配が大きくなる。そのため、勾配が急になると砕波波形勾配が大きくなったと考えられる。

つづいて、礫浜斜面の砕波波高が砂浜斜面に比べてどれくらい小さくなるのかについて言及する。

図-3は本実験結果を $A=0.17$ とした式(1)の合田¹⁾の砕波指標式と比較したものである。なお、横軸は相対水深、縦軸は砕波指標 $\bar{H}_b/h_b$ である。図中には、誤差評価尺度であるScatter Index (SI)を用いて本実験結果と最も対応の良い A の値を用いた砕波指標式を示してある(表-2参照)。SIは式(5)のように2乗平均平方根誤差を実験値の平均値で除した無次元誤差尺度である。

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}} \quad (5)$$

ここに、 x_i ：実験値、 y_i ：予測値、 $\bar{x}$ ：実験値の平均値、 n ：データ数である。

図-3から、底面勾配が急になるほど砕波指標が大きくなる傾向にあり、礫浜斜面上の砕波現象を考える上で底面勾配の影響を考慮する必要があると判断される。また、表-2から勾配1/7では $A=0.12$ 、勾配1/10と1/12では $A=0.14$ のときが最もSIが小さくなり、実験値との対応が良くなることがわかる。砂浜の規則波に対しては $A=0.17$ が提案されていることから、礫浜斜面の砕波指標は砂浜斜面の70～80%程度になることが明らかとなった。

(3) 地下水位の影響

透水性の高い礫浜斜面上の波浪場は砂浜斜面上に比べ地下水位の影響を受けやすいことが指摘されている(Lee et al.⁷⁾)。そこで、ここでは地下水位が砕波波高と砕波水深に与える影響に着目する。まず、図-4に水位差を変化させたときの汀線付近から滲出する冲向き流速の空間分布を示す。なお、底面勾配は1/7であり、縦軸は冲向きを正とした水表面での流速、横軸は汀線から沖方向への距離である。同図から、水位差が大きいほど冲向き流速が大きくなることが確認できる。また、 $x > 30\text{cm}$ では水位差によ

表-2 合田の砕波指標式に対するSI (%)

底面勾配 s	SI (%)							
	$A = 0.17$	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1
1/7	44.1	35.9	27.8	19.9	12.8	8.5	11.1	17.8
1/10	27.6	21.2	15.7	12.3	12.8	16.8	22.6	29.1
1/12	21.4	14.4	10.9	9.8	13.1	18.6	24.9	31.5

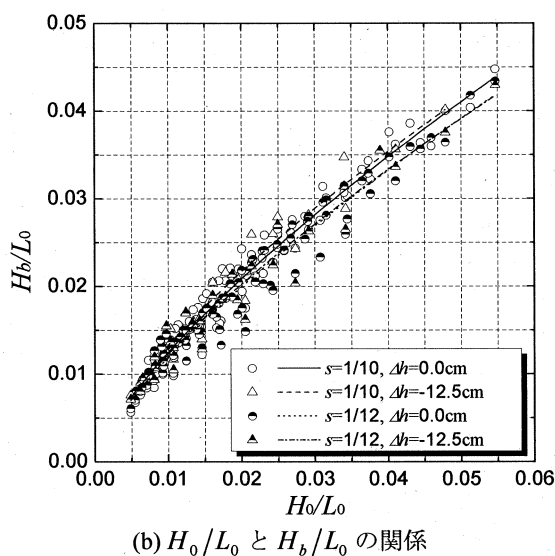
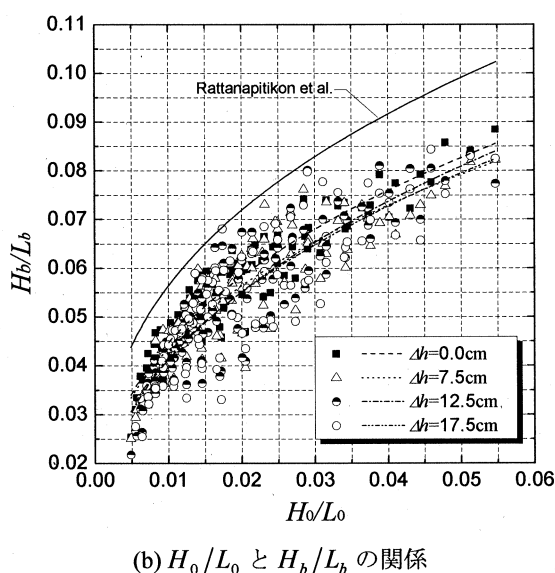
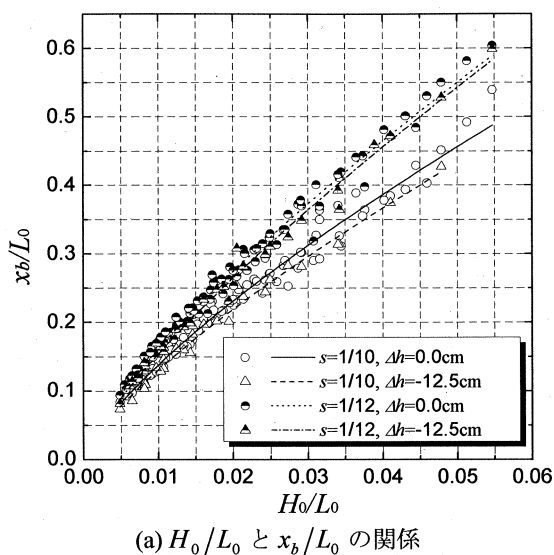
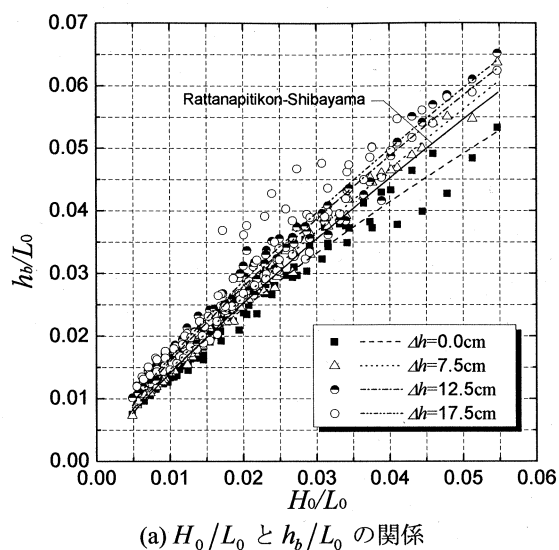


図-6 地下水位の影響 ($\Delta h = -12.5$ cm)

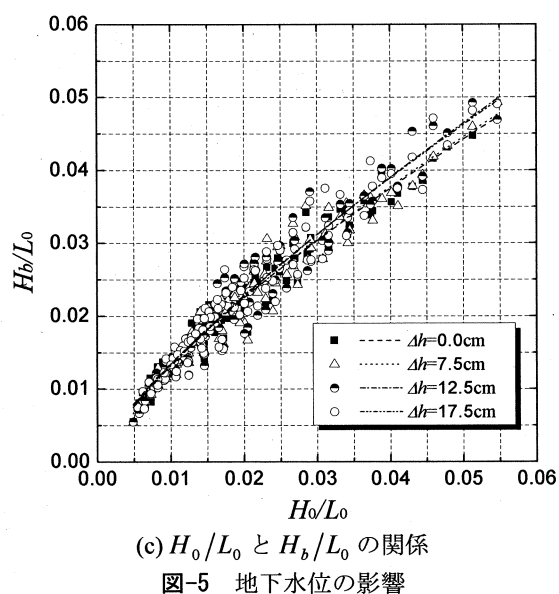


図-5 地下水位の影響

る流速の差はほとんど無くなっている。

図-5に水位差を変化させたときの沖波波形勾配と碎波水深、碎波波形勾配および碎波波高の関係を示す。なお、地下水位の影響を調べるために、底面勾配1/7の実験データのみをプロットしてある。また、図-2と同様に、図中には既往の碎波指標式と実験データから得られた近似式を示してある。

図-5(a)から、水位差が大きいほど碎波水深が増加していることがわかる。この原因として、水位差が大きいほど斜面内に発生する冲向き流速が大きくなることが挙げられる。具体的には、水位差が大きいほど斜面内への浸透が少なくなり、次に入射してくる波と激突する水の量が増えるため、碎波地点が沖側に移動し、碎波水深が大きくなったと考えられる。また、本実験結果の近似式に着目すると、 $\Delta h = 0.0$ cmと $\Delta h = 7.5$ cmでは碎波水深の差が大きいが、 $\Delta h = 7.5$ cmと $\Delta h = 12.5$ cm、 $\Delta h = 17.5$ cmではその差が小さいことが確認できる。これは、図-4に示したよ

うに、 $x > 30\text{cm}$ の範囲では水位差による滲出流速の差が小さくなっていることに起因すると考えられる。また、 $\Delta h = 0.0\text{cm}$ と $\Delta h = 7.5 \sim 17.5\text{cm}$ の近似式を比較すると、沖波波形勾配が小さい範囲では砕波水深の差が小さいものの、沖波波形勾配が大きくなるとその差が大きくなることが確認できる。これは、沖波波形勾配が大きく不安定な波ほど斜面内からの滲出流の影響を受けやすいためであると考えられる。つづいて、図-5(c)の沖波波形勾配と砕波波高の関係について考察する。同図から、水位差が大きくなると砕波波高が大きくなることがわかる。この原因は、砕波水深が沖側に移動したことで同様に、水位差が大きいほど斜面内への浸透が少なくなり、次に入射してくる波と激突する水の量が増えるために砕波波高が大きくなったと考えられる。このように、水位差が大きくなると砕波水深と砕波波高がともに大きくなることが明らかとなった。一方、図-5(b)にみられるように水位差が大きくなると砕波波形勾配が小さくなる。このことから、水位上昇による砕波波高の増大に比べ砕波波長(砕波水深)の増大が大きいと推察される。

ここまでは、斜面背後の水位を静水面よりも上げた場合について考察してきた。ここでは、静水面よりも水位を下げた場合について検討する。図-6は底面勾配を1/10および1/12と変化させ、 $\Delta h = -12.5\text{cm}$ としたときの沖波波形勾配と砕波地点および砕波波高との関係を示したものである。図-6(a)の砕波地点について、勾配1/10では $\Delta h = -12.5\text{cm}$ が $\Delta h = 0.0\text{cm}$ よりも砕波地点が岸側に移動するものの、勾配1/12では $\Delta h = -12.5\text{cm}$ と $\Delta h = 0.0\text{cm}$ の差がほとんどない。また、図-6(b)の砕波波高については、どちらの勾配でも $\Delta h = -12.5\text{cm}$ と $\Delta h = 0.0\text{cm}$ による差異はほとんど認められないことがわかる。本来、水位を下げると、水位を上げた場合とは反対に斜面内への浸透が促進され、次に入射してくる波と激突する水の量が少なくなるため、砕波地点が岸側に移動するとともに砕波波高が小さくなると予想される。本実験結果では水位を下げてでも明瞭な違いが見られなかった原因として、底面勾配が緩かったことが挙げられる。具体的には、底面勾配が緩くなると透水層が岸沖方向に長くなるとともに砕波地点が沖側に移動するため、図-4に示す沖向き流速や斜面内の浸透・滲出流の影響を受けにくくなったと考えられる。すなわち、1/10よりも勾配が急な斜面、例えば1/7などで実験を行えば違いが表れた可能性が高いと考えられる。

4. おわりに

本研究では、斜面背後の水位を操作することにより斜面内の浸透流を変化させた水理模型実験を行い、測定した砕波波高及び砕波水深から、地下水位の影響を含めた礫浜斜面上の砕波特性について考究した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 砂浜海岸より透水性の高い礫浜海岸では、斜面内への浸透やエネルギー消散効果により砕波波高及び砕波水深が砂浜海岸に比べて小さくなる。この傾向は沖波波形勾配が大きい場合に顕著である。
- 2) 礫浜斜面背後の水位を上げた場合、斜面内から滲出する沖向き流れが強まり、斜面内への浸透が弱まるため、砕波地点が沖側に移動するとともに砕波波高が大きくなることを示した。一方、水位を下げた場合、斜面内への浸透が強まるため、砕波地点が岸側に移動することが確認された。
- 3) 底面勾配が緩くなると、透水層が岸沖方向に長くなるとともに砕波地点が沖側に移動するため、砕波現象に及ぼす地下水位の影響が弱くなる。

参考文献

- 1) 合田良実：既往資料に基づく砕波にかかわる諸統計量の再整理，ECOH/YG技術論文，No.7，22p，2007。
- 2) Rattanapitikon, W. and Shibayama, T.: Verification and modification of breaker height formulas, Coastal Engineering Journal, JSCE42, pp.389-406, 2000.
- 3) Rattanapitikon, W. and Shibayama, T.: Breaking wave formulas for breaking depth and orbital to phase velocity ratio, Coastal Engineering Journal, JSCE48, pp.395-416, 2006.
- 4) Lara, J. L., Losada, I. J. and Liu, P. L.-F.: Breaking waves over a mild gravel slope: Experimental and numerical analysis, Journal of Geophysical Research, vol.111, pp.1-26, 2006.
- 5) Rattanapitikon, W., Vivattanasirisak, T. and Shibayama, T.: A proposal of new breaker height formula, Coastal Engineering Journal, JSCE45, pp.28-48, 2003.
- 6) 出口一郎・小野正順・森脇清：礫浜上の波の変形に関する研究，海岸工学論文集，第42巻，pp.41-45，1995。
- 7) Lee, K.-H., Mizutani, N., Hur, D.-S. and Kamiya, A.: The effect of groundwater on topographic changes in a gravel beach, Ocean Engineering, Vol.34, pp.605-615, 2007.