

スリットを有する複断面護岸の反射特性と 越波量低減効果について

WAVE REFLECTION AND OVERTOPPING DUE TO A COMPOSITE SEAWALL WITH SLITS

劉 非¹・村上啓介²・杉尾 哲³

Fei LIU, Keisuke MURAKAMI and Satoru SUGIO

¹学生会員 工修 宮崎大学大学院工学研究科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

²正 会 員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

³正 会 員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

A composite seawall with a berm front of quadrant cross section has a lower wave reflection than that with a berm front of vertical one. Although a certain berm length is required to reduce the wave overtopping rate to an acceptable quantity. In this study, the horizontal slits are set up on the curved surface of the berm front with quadrant cross section to more effectively decrease the wave overtopping rate, specially in case of a short berm length. The efficiency of the quadrant-shaped berm front with the horizontal slits in reducing the wave overtopping rate is examined through the laboratory experiments. The results show that the quadrant-shaped berm front with the horizontal slits decelerates fluid motion on its face and the wave overtopping rate can be effectively reduced even within the shorter berm length while keeping the lower wave reflection.

Key Words: *Berm, composite seawall, wave reflection, wave overtopping rate*

1. はじめに

沿岸域の利用の多様化に伴い、海岸環境や景観に配慮した親水性護岸の開発が望まれている。防災機能を十分に有しながら、天端高さが低い親水性護岸形式の一つとして、護岸前面に小段を持つ複断面護岸がある(例えば、参考文献^{1)~5)})。複断面護岸の一般的な断面形状は、その小段先端部に斜面を有し、小段長が十分長ければ波の打上げ高さや越波量を相当に低減できる。一方、小段長が短いと十分な低減効果が得られない問題点がある。この問題点を解決する一方策として、小段先端部の断面形状を従来ものより高い低減効果が得られる断面に改良することが考えられる。著者らは、小段先端部に円弧断面を有する複断面護岸の水理特性について実験的検討を行ってきた^{6), 7)}。その結果、小段先端部の形状を円弧断面とすることで反射率を相当に低減できることや小段上での平均水位の上昇量を小さくできることなどを示した。一方、越波量を十分に低減するた

めには他の断面と同様に十分な小段長が必要であった。本研究では、小段長が短い場合でも十分な越波量の低減機能を有し、かつ低反射である護岸断面の開発を目的に、小段先端の四分円部に横スリットを設けた複断面護岸の越波量の低減効果と反射率の特性について検討することを目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

実験は、図-1に示す複断面護岸模型を2次元水槽(長さ15m, 幅0.6m, 深さ1.0m)内に設置して行った。小段先端部の形状は、四分円断面と鉛直断面の2種類である。四分円断面は中空の構造で、その表面が不透過(スリット開口率 $\varepsilon=0\%$)のものとは $\varepsilon=10\%$, 20% , 30% の3種類の異なる横スリットのものを作成した。小段高さは $S=30.4\text{cm}$ で、沖側水深を $h=30.4\text{cm}$, 33.8cm の2種類とし、小段天端水深比を $s/h=1.0$, 0.9 とした。小段上の堤防の高さは $Z=7.0\text{cm}$ で、堤防の設置位置を小段

先端部から $L_m=0\sim100\text{cm}$ の範囲で 25cm の間隔で変化させた。入射波は規則波を用い、波高 $H_0=5.1\text{cm}\sim11.5\text{cm}$ 、周期 $T=0.8\sim2.2$ 秒とし、沖波波形勾配を $H_0/L_0=0.015\sim0.09$ の範囲で 7 種類を変化させた。

越波量の測定では、堤防背後に集水箱を設置して集水量を計量し、1 波当たりの平均越波量を求めた。越波量の計測は同一条件で 2 回行い、越波水量の誤差が 10% 以上あれば再度計測をやり直した。次に、小段先端部 ($L_m=0$) と堤防前面 25cm 地点の二ヶ所で小型プロベラ式流速計を用いて流速変動を計測した。また、小段上の堤防からおよそ 200cm の範囲に容量式波高計を $10\text{cm}\sim20\text{cm}$ 間隔で設置し、小段上と小段先端近傍の水面変動をデジタルデータレコーダーに記録した。反射率は小段先端より 120cm 沖側に 20cm の間隔で 2 本の波高計を設置して水面変動を記録し、合田らの分離推定法⁸⁾ で求めた。

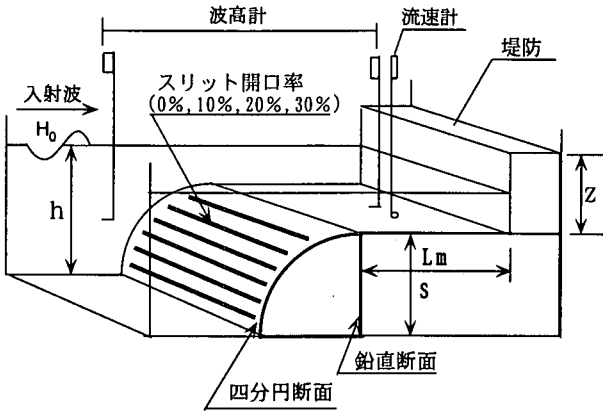


図-1 実験に用いた複断面護岸模型の概略

3. 実験結果と考察

(1) 小段先端部の断面形状が越波量に及ぼす効果

図-2～4 は、小段先端部にスリットを有する四分円断面を設けたときの、スリット開口率に対する越波量の低減効果を $s/h=0.9$ の場合について示したものである。各図の入射波の波形勾配は $H_0/L_0=0.024, 0.034, 0.057$ で、縦軸 $\bar{Q}$ は 1 波当たりの平均越波量 Q を Kikkawa et al. の提案した次式⁹⁾ で無次元化したものである。

$$\bar{Q} = \frac{Q}{TBH_0\sqrt{2gH_0}} \quad (1)$$

ここで、 T は周期、 B は水路幅、 H_0 は沖波波高、 g は重力加速度である。

図中には小段の長さが異なる場合の実験結果を示

している。図-2～4 について見ると、スリット開口率が大きくなるにしたがって越波量は減少する傾向を示している。この傾向は小段長が異なる場合でも変わらない。ただし、開口率が 20% を超えると、越波量の低減効果は小さくなる傾向があり、必要以上に開口率を大きくしても高い越波量の低減効果は望めないことが分かる。

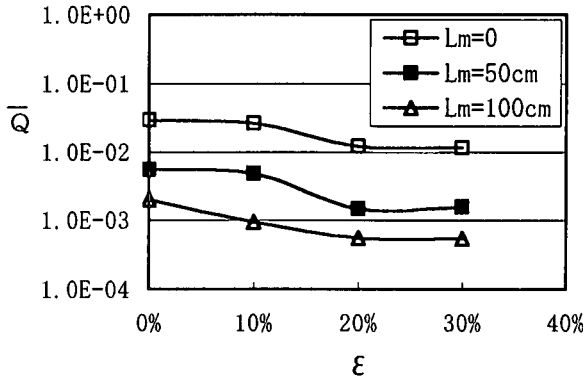


図-2 スリット開口率が越波量に及ぼす効果 ($s/h=0.9, H_0/L_0=0.024$)

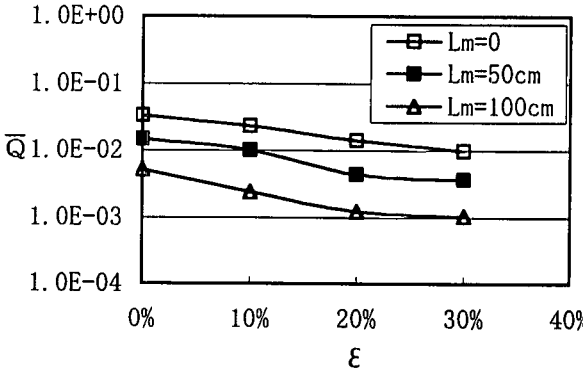


図-3 スリット開口率が越波量に及ぼす効果 ($s/h=0.9, H_0/L_0=0.034$)

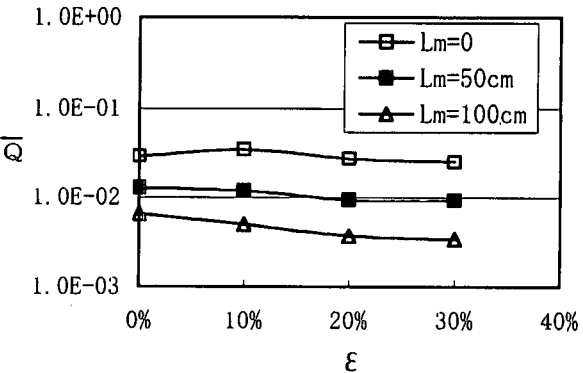


図-4 スリット開口率が越波量に及ぼす効果 ($s/h=0.9, H_0/L_0=0.057$)

図-5 と図-6 は、小段の長さに対する越波量の変動特性を示したものである。各図の波形勾配は

$H_0/L_0=0.024, 0.034$ で、小段先端部が鉛直断面の場合と四分円断面（スリット開口率が 0%と 20%）の場合について比較している。横軸 Lm は小段長、 L_0 は沖波波長である。小段先端部の断面形状が異なるいずれの場合も、越波量は小段長の増加に伴ない単調に減少する傾向を示している。四分円断面のスリット開口率が 0%の場合の越波量は堤防の設置位置によらず、鉛直断面よりも常に大きい値を示している。ただし、開口率が 20%程度の場合、越波量は鉛直断面とほぼ同程度まで低減され、特に小段長が短い場合に高い低減効果が見られる。このことから、四分円断面にスリットを設けることは越波量を低減することに非常に効果的と考えられる。

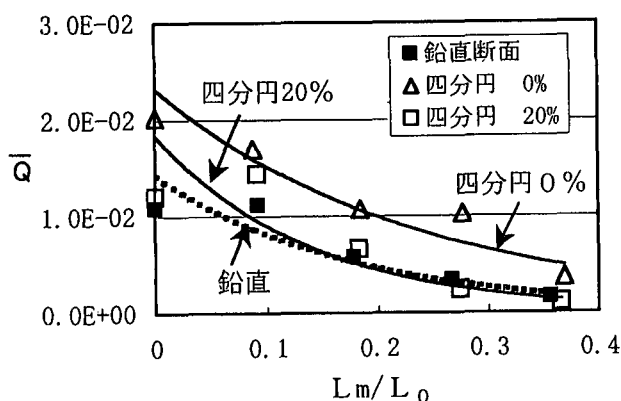


図-5 小段長に対する越波量の変動特性
($s/h=0.9, H_0/L_0=0.024$)

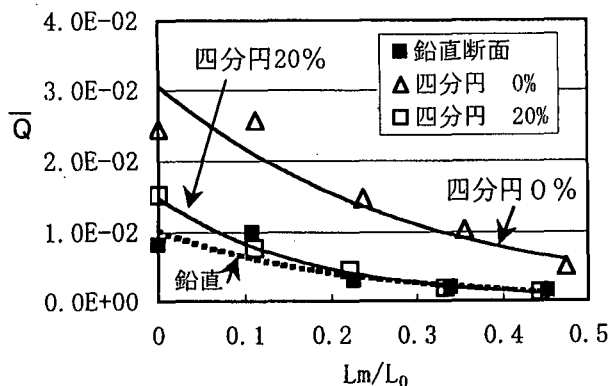


図-6 小段長に対する越波量の変動特性
($s/h=0.9, H_0/L_0=0.034$)

(2) 小段上の堤防前面における最大水平流速の特性

四分円断面にスリットを設けることにより、小段長が短い場合においても越波量が低減される理由の一つとして、スリット部でのエネルギー損失効果による堤防前面での水平流速の減少が考えられる。そこで、小段上に設けた堤防前面における水平流速を測定し、小段先端部の断面形状の違いが堤防前面の

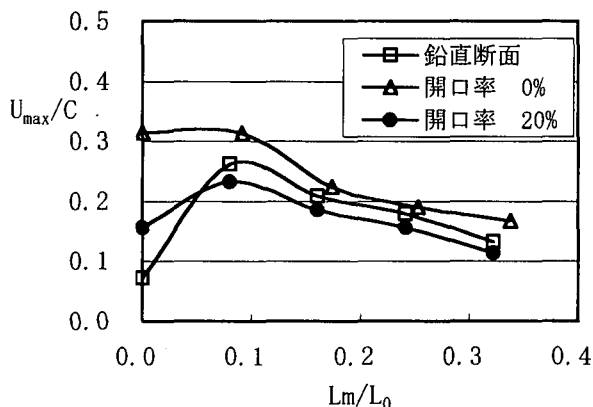


図-7 堤防前面の平均最大流速
($s/h=0.9, H_0/L_0=0.024$)

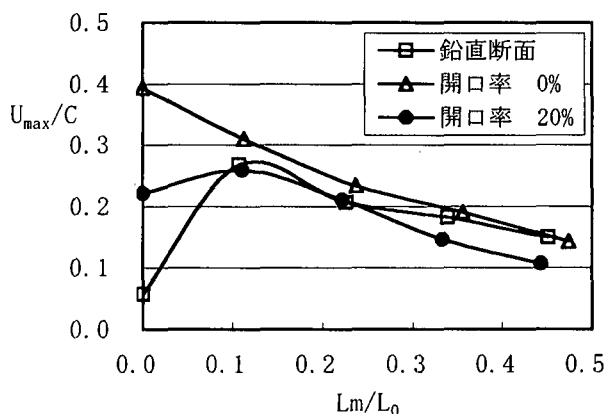


図-8 堤防前面の平均最大流速
($s/h=0.9, H_0/L_0=0.034$)

水平流速の特性に及ぼす効果を検討した。小段上では、短周期の波動成分に小段上での共振成分や定常流成分が混在した複雑な流れ場が形成されているものと考えられる。ここでは、流速の時間変動記録に移動平均を施し、時間変動記録と移動平均値の差を求めて短周期の波動成分を抽出し、その岸向き流速の最大値を最大水平流速 (U_{max}) と定義した。

図-7と図-8は、小段の長さに対する小段前面における最大水平流速の特性を、 $s/h=0.9$ の場合について示したものである。各図の入射波の波形勾配は $H_0/L_0=0.024$ と 0.034 で、最大水平流速 U_{max} は沖波の波速 C で無次元化して示している。小段長が短い範囲 ($0 < Lm/L_0 < 0.1$) について見ると、鉛直断面の場合は、小段前面で重複波が形成されるため $Lm=0$ において最大水平流速は他の断面に比べて相当に小さく、 $Lm/L_0=0.1$ 前後で極大値を取っている。開口率が 0%の四分円断面の場合は、その曲面に沿って流れが加速されるため $Lm=0$ で水平流速は極大となり、 Lm/L_0 の増加に伴ない流速値は減少している。一方、四分円断面のスリット開口率が 20%の場合は、曲面に沿った加速の程度は小さくなるため、開口率が 0%の場合に比べて最大水平流速値は大幅に低減され、その特性は鉛直断面に近づく傾向

が見られる。このように、四分円断面小段先端部に設けたスリットは、その先端部に沿った流れを効率的に減速させることで、堤防前面での水平流速を小さくし、結果として小段長が短い場合でも越波量は低減されることが分かる。

（３）小段近傍の波高分布特性

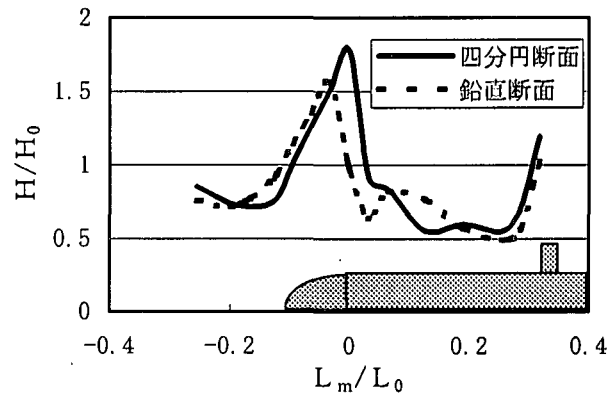
ステップ形状のリーフ上での波の変形については多くの研究例がある（例えば、参考文献 10）、11）。ここでは、小段先端部の形状による小段近傍の波高分布特性の違いを考察する。

図－９と図－１０は小段先端部から $L_m=100\text{cm}$ のところに堤防を設置した場合の波高分布で、沖波波高勾配 H_0/L_0 は 0.029 と 0.079 で、 $s/h=0.9$ の場合について示している。図に示すように、波は沖側から小段上に進行する過程で小段先端部において碎波し、比較的短い距離で波高は急に減衰している。また、堤防前面では、波の打上げにより波高は大きくなっている。波形勾配の小さい図－９では、四分円断面と鉛直断面の波高分布はほぼ同じであり、先端部形状の違いの効果は明確に表れない。一方、波形勾配が大きい図－１０では、碎波後の分布形状は類似しているが、小段先端部沖側の重複波領域で、分布形状は大きく異なっている。これは、次節で述べる波の反射特性の違いによるもので、鉛直断面は四分円断面に比べて反射率が相対的に大きいため、小段前面で重複波が強く形成されることによる。

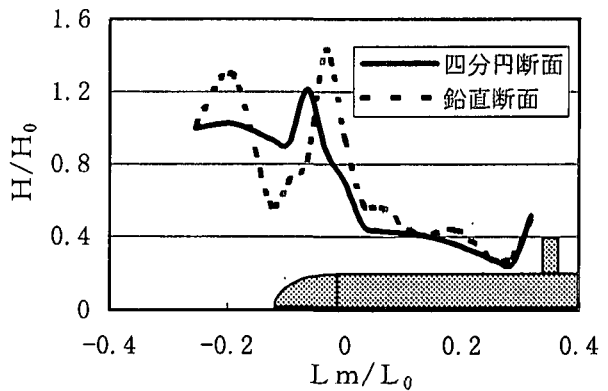
（４）小段先端部の断面形状が反射率に及ぼす効果

図－１１は、小段先端部の形状を鉛直断面および四分円断面（両断面ともに不透過）としたときの相対水深 kh に対する反射率の特性を $s/h=0.9$ 、 $L_m=50\text{cm}$ の場合について示したものである。相対水深が小さい長波領域では先端部形状の違いが反射率に及ぼす効果は小さく、両断面ともほぼ同程度の反射率を示している。一方、相対水深が大きくなるに従い、四分円断面の反射率は鉛直断面に比べて相当に低減され、先端部の断面形状の違いが強く現れる。

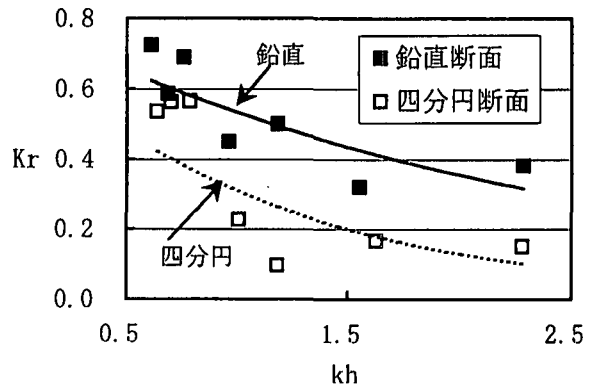
図－１２は、スリットの開口率 ε が反射率 K_r に及ぼす効果を、 $s/h=0.9$ 、 $L_m=50\text{cm}$ の場合について示したものである。開口率が 10% および 20% の場合の反射率は、開口率が 0%（不透過断面）の反射率とほぼ同程度か若干小さい値を示しているのに対して、開口率が 30% になると反射率は不透過の場合よりも増大している。図－２～図－４で示したように、開口率を 20% 以上に取っても越波量の低減効果は小さいことと図－12 に示した反射率の特性を考え合わせると、越波量を低減し、かつ低反射の特性を損わない最適な開口率は 20% 程度と考



図－９ 小段近傍の波高分布
($H_0/L_0=0.029$, $L_m=100\text{cm}$)



図－10 小段近傍の波高分布
($H_0/L_0=0.079$, $L_m=100\text{cm}$)



図－11 鉛直断面と四分円断面の反射率特性
($s/h=0.9$, $L_m=50\text{cm}$)

えられる。
図－１３は、小段長 L_m が反射率の特性に及ぼす効果を、 $kh=1.63$ 、 $s/h=0.9$ の場合について示したものである。スリット開口率が 10%、20%、30% のいずれの場合も、小段長が変化しても反射率はほぼ一定の値を取ることから、反射率は小段先端部の形状により決まることが分かる。

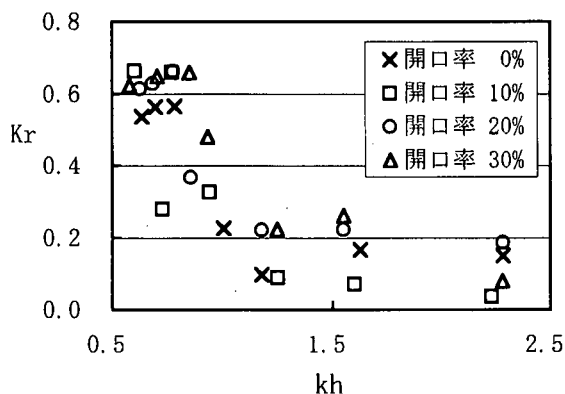


図-12 スリット開口率が反射率に及ぼす効果
($s/h=0.9$, $L_m=50\text{cm}$)

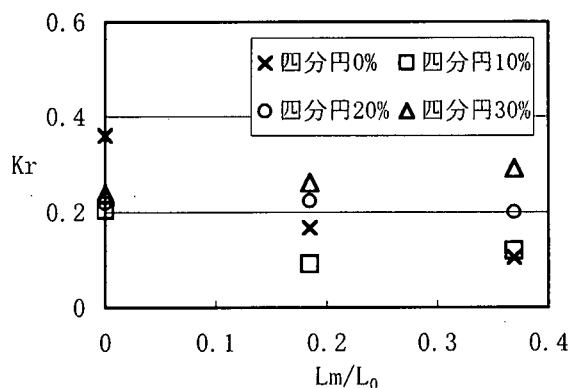


図-13 小段長が反射率に及ぼす効果
($s/h=0.9$, $kh=1.63$)

4. 結 論

短い小段長でも十分な越波量の低減機能を有し、かつ低反射となり得る複断面護岸の開発を目的に、小段先端の四分円断面部にスリットを有する複断面の越波量の低減効果と反射率の特性を実験により検討した。本研究で得られた主な結論としては次の通りである。

(1) 小段先端の四分円断面部に横スリットを設けると、その曲面に沿った流れが低減される。その結果、小段長が短い場合でも越波量は鉛直断面の場合と同程度に低減される。ただし、スリット開口率の増加に伴ない越波量の低減効果は頭打ちになる傾向がある。

(2) スリット開口率が 20% 程度であれば、四分円断面が鉛直断面に比べて低反射である特性は損なわれず、かつ十分な越波量の低減効果が得られる。

謝辞：実験の実施にあたり、高野重利氏（元技官）、学生の上田大輔君、馬場忠彦君の協力を得たことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Hunt, I. A.: Design of sea-walls and breakwaters, Trans., ASCE, Vol.126, Paper No.3214, pp.542-570, 1961.
- 2) 豊島 修：表小段を持つ複断面型堤防への波の打上げ高について，第 11 回海岸工学講演会論文集，Vol.11, pp.266-272, 1964.

- 3) 高田 彰，藤川浩生：パラペット後退型護岸の打上げ，越波および波圧の特性，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp.283-287, 1978.
- 4) 高田 彰，吉田吉治，藤川浩生：海岸堤防・護岸の断面形状と越波量との関係，第 25 回海岸工学講演会論文集，pp.285-289, 1979.
- 5) 高山知司，古川正美，立石義博：複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験，港湾技研資料，No.592, pp.1-30, 1987.
- 6) 河野二夫，劉 非，石場良一：表小段を持つ護岸による波の変形と越波量について，海岸工学論文集，Vol.43, pp.701-705, 1996.
- 7) Liu, F., Murakami K. and Sugio, S.: Wave transformation due to a berm, Proceedings of Techno-Ocean'98 Int. Symposium, pp.249-252, 1998.
- 8) 合田良実，鈴木康正，岸良安治，菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248, 24p., 1976.
- 9) Kikkawa, H., Shi-igai, H. and Kono, T.: Fundamental study of wave overtopping on levees, Coastal Eng. Japan, Vol.11, pp.107-114, 1968.
- 10) 佐藤道郎，羽田好勝，中江周作，吉松秀雄：ステップ型リーフ上での波の変形に関する実験的研究，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp.85-89, 1985.
- 11) 高山知司，神山豊，菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究，港湾技研資料，No.278, 32p. 1977.

(1999.4.19 受付)