天端面に傾斜を設けた人工リーフ岸側の平均水位の特性について

Wave Setup behind an Artificial Reef with Inclined Crown

村上啓介¹・真木大介²・新宮裕雅³

Keisuke MURAKAMI, Daisuke MAKI and Yuga SHINGU

This study investigates the characteristics of wave setup behind a multipurpose artificial reef that protects shores properly as well as provides spots for marine recreations. The artificial reef has an inclined crown to obtain suitable wave breakers for surfing and bodyboard. Through a series of hydraulic experiments in two-dimensional flume, it was clear that the multipurpose artificial reef shows lower wave setup in the wide range of incident wave period and wave height in comparison with a conventional artificial reef with flat crown. This result suggests the smaller mass transport over the reef crown and it may reduce the velocities of peculiar nearshore circulation around the reef.

1. はじめに

天端面が海面下に没した人工リーフは、景観への影響が少なく、また、水産資源との協調も期待されることから、海岸環境と調和した海浜保全施設としての可能性が期待できる（例えば、谷野ら、1997）。また、サーフィン利用を目的とした人工リーフの施工事例にも見られるように、レクリエーション利用との調和の可能性も期待できる（例えば、Borrero et al., 2003, Shaw Mead, 2003）。

このような背景を含め、国内では吉田ら（1991）や中野ら（1994）がデルタ型と呼ばれる形状の人工リーフを提案し、限られた波浪条件に対してではあるが、平面波浪場においてサーフィン利用への適用性と海浜保全機能を水理模型実験で評価している。

サーフィン利用に配慮した人工リーフは、リーフ天端面に傾斜を設けて入射波を適当に増幅させサーフィンに適した砕波を得る点で共通している。他方、暴浪に対しては波浪減殺機能が期待されることから、サーフィン利用と海浜保全機能の協調を目指した人工リーフ（ここでは、天端面に傾斜を設けた人工リーフ）の有用性を示すためには幅広い波浪条件に対して天端上での砕波特性や波浪減衰機能を評価する必要がある。

村上ら（2009）は、天端面に傾斜を設けた人工リーフ上における砕波特性を水理模型実験で検討し、天端面の傾斜により砕波形式や透過波特性が大きく変化することを示した。人工リーフの岸側では、天端上での強制砕波に伴う岸向きの質量輸送によって過剰な平均水位上昇や特有の海浜循環流が生じることが知られている（例えば、土木学会、2000）。従って、上記の天端面の傾斜による強制砕波時の波高や砕波形式の相違は、リーフ岸側にお

ける平均水位の上昇特性に影響を与えることが推察され、その特性変化を把握することは海浜保全施設としての機能評価において重要と考える。

本研究では、海浜保全機能とサーフィン利用機能を併せ持つ多目的人工リーフの開発を目的に、天端面に傾斜を設けた人工リーフ岸側の平均水位の特性とその制御について検討する。

2. 水理実験の条件と模型諸元

水理模型実験には長さ15m、高さ0.6m、幅0.4mの反射吸収式の2次元造波水路を用いた。また、実験の模型縮尺は1/30を想定した。図-1は実験で用いた人工リーフの断面と波高計の設置位置を示したものである。Case-AとCase-Bはサーフィンに適した砕波を期待する目的でリーフ天端面に1/10の傾斜を設けている。また、Case-Cは比較として天端面が水平な人工リーフ断面である。Case-AとCase-Cのリーフ断面積は等しく（リーフ長 $B=60\text{cm}$ ）、Case-Bのリーフ長はCase-Aの2倍である。なお、いずれのリーフも不透過堤体である。

造波水路内に勾配1/20の不透過傾斜面を設け、その上に図-1に示す人工リーフ模型を設置した。水路内の沖水深は $h_0=40\text{cm}$ とし、人工リーフの岸端部の天端水深（以

図-1 人工リーフ模型の諸元

1 正会員 博(工学) 宮崎大学准教授工学部
2 正会員 工修 宮崎大学工学部
3 トスカンパニー

図-2 人工リーフの設置水深と碎波水深の関係

下、最小天端水深と呼ぶ)が $hc=2\text{cm}$ となる位置にリーフ模型を設置した。この場合、リーフ沖端部の天端水深はCase-Aが 8cm 、Case-Bが 14cm となる。また、沖端部の設置水深はCase-Aが 13.5cm 、Case-Bが 18cm 、Case-Cが 10.5cm となる。

入射波緒元に対するリーフ上での碎波形式や碎波位置とリーフ背後の平均水位上昇量や透過波高の関係を把握することを目的に、規則波を造波して実験をおこなった。入射波周期を1秒から2.4秒まで0.2秒刻みで変え、各周期について入射波高を4cmから9cmまで概ね1cm刻みで変えて実験をおこなった。

図-2は実験波に対してリーフを設置しない場合の碎波水深 h_b' と各人工リーフ岸端部の設置水深 h_2 との比を、入射波の波形勾配(H_0 は入射波高、 L_0 は沖波波長)に対して示したものである。碎波水深 h_b' は碎波指標 $\gamma=0.83$ として浅水理論から求めた。Case-AとCase-Bの設置位置は、ほとんどの実験波に対して碎波帯外($h_2/h_b' > 1$)となり、Case-Cは一部の実験波については碎波帯内となる。

3. 人工リーフ背後の平均水位上昇と透過波高

(1) 平均水位の特性

Case-AとCase-Bのリーフ背後における平均水位の上昇量 η の入射波高 H_0 に対する比を図-3に示す。平均水位の上昇量は、図-1に示す位置で透過波をサンプリング間隔 50Hz で計測し、計測波高がほぼ定常になった後の波形記録について移動平均を取ることで求めた。図は入射波高

図-3 人工リーフ背後の平均水位の特性

が比較的大きい $H_0=7\text{cm}$ 、 8cm 、 9cm について示しており、図中の各線は高山ら(1977)が提案した式(1)から求めた平均水位上昇量を表している。

$$\frac{h_0 + \eta_w}{H_0} = 0.989 \sqrt{\left[\frac{h_0 + \eta_0}{H_0} \right]^2} + 0.21 \left[\frac{(H_{1/3})_{x=0}}{H_0} \right]^2 \quad \dots (1)$$

式中の h_0 はリーフ水深を意味し、ここでは天端面が傾斜していることから天端上の平均水深を用いた。また、 $(H_{1/3})_{x=0}$ と η_0 は合田(1975, 2005)の提案式に従い算定した。なお、式(1)は十分に長いリーフ地形に対して導かれたもので、ここでは比較の意味で示している。

天端面に傾斜を設けたCase-Aでは入射波高に対して18%~25%の平均水位の上昇、Case-Bでは19%~29%、Case-Cでは30%~40%の平均水位上昇が見られた。各断面とも、波高天端水深比 hc/H_0 による平均水位上昇量の差は小さく、長波長の入射波ほど上昇量が大きくなる傾向にある。式(1)で求めた平均水位の上昇量は、リーフ水深 h_0 に天端上の平均水深を用いることで、Case-BやCase-Cでは若干の過小評価ではあるが、10%程度の誤差

図-4 人工リーフ背後の平均水位上昇の比較

範囲で算定されている。

天端面に傾斜を設けた人工リーフ背後の平均水位の上昇量は、天端面が水平なCase-Cに比べて小さい。この関係は入射波高 H_0 が4cm, 5cm, 6cmの場合にも同様である。

図-4は、波高天端水深比 hc/H_0 が異なる幾つかのケースについてCase-A, Case-BおよびCase-Cの平均水位上昇量を比較したものである。図の横軸 h/L_0 はリーフ沖端部での相対水深を表している。入射波高が小さい条件を含め、幅広い入射波条件に対してCase-AとCase-Bの平均水位の上昇量はCase-Cに比べて抑制されていることが確認できる。このような平均水位の差は、各人工リーフの設置水深の違いの影響も一要因として考えられるが、主にリーフ天端上における碎波の形式とそれに伴う波高減衰の相異に起因すると考えられる。

図-5は、Case-AとCase-Bのリーフ天端上での碎波位置

図-5 Case-AおよびCase-Bの碎波位置と碎波形式

図-6 リーフ上での碎波状況 ($H_0=9\text{cm}$, $T=1.6\text{sec.}$)

と碎波形式を示したもので、図中の Xb はリーフ沖端部から碎波点までの距離を表している。また、図-6にはリーフ天端上での碎波状況の一例を示している。

Case-AとCase-Bでは、図-5に示すようにほぼ全ての入射波条件で図-6に見られるようなPlunging型碎波かそれに近い碎波形式がリーフ天端上で確認され、碎波後の波は波高減衰を伴いながらリーフ背後に伝播していた。一方、Case-Cでは図-6のように人工リーフの沖側端部で強い引き波を伴って天端面に激しく突っ込む形式の碎波(Backwash型碎波)が発生し、入射波はリーフの沖側端部で急激に波高減衰した後にリーフ上を伝播していた。本実験では碎波点近傍の波高分布の詳細は計測していないが、実験観察より碎波の形式とそれに伴う波高減衰の相異が平均水位の差に表れたものと考えられる。

(2) 天端面が傾斜した人工リーフの波浪減殺機能

人工リーフ等の構造物は碎波点近傍の浅海域に設置される場合が多く、入射波高に対する透過波高の比で波浪減殺機能を評価すると、リーフ前面での碎波の影響を含んで適正に評価できない場合がある。高山ら(1985)は、潜堤がない場合の波高に対する潜堤がある場合の波高比を影響係数と定義し、その値を用いて潜堤の波浪減殺機能の評価している。ここでは高山ら(1985)と同様に影響係数 K_H を求めて天端面が傾斜した人工リーフの波高減衰効果を評価する。影響係数の評価地点はリーフの直背後(図-1のCh3の地点)とし、人工リーフがない場合の

波高は便宜的に合田（1975）の浅海域における碎波変形の式を用いて算定した。

図-7は、波高天端水深比が異なる幾つかのケースについて各リーフの影響係数を比較したものである。波高天端水深比が大きい $hc/H_0=0.4$ 場合、影響係数は各リーフ断面によって明確に異なるが、波高天端水深比が小さくなるに従いほぼ同じ特性を持つ傾向にある。

波高天端水深比が大きい図-7(c)では、天端面に傾斜を設けたCase-AやCase-Bは沖側天端水深が大きいためにCase-Cに比べて天端上での波高減衰効果が十分ではなく、影響係数の差が明確に表れたものと考えられる。特に、Case-Cではリーフ沖端部でのBackwash型碎波による波高減衰が顕著であるため影響係数はCase-AやCase-Bに比べて小さくなっている。また、Case-Bは天端上での碎

波減衰距離が長いいため、Case-Aに比べ影響係数が小さくなったものと考えられる。

図-7では波高天端水深比が小さくなるに従い各リーフ断面による影響係数の差は小さくなっている。波高天端水深比が小さくなるに従いCase-Cではリーフ沖端部でのBackwash型碎波による波高減衰がより顕著になる。他方、Case-AやCase-Bにおいてもリーフ上での波高増幅とその後の強制碎波による急激な波高減衰が生じ、碎波形式は異なるが影響係数は類似した値を示したものと考える。

4. 連通管による平均水位の抑制効果

人工リーフの岸側では、リーフ天端での強制碎波に伴って平均水位が上昇することが知られている。図-4で述べたように、天端面に傾斜を設けた人工リーフは天端面が水平なリーフ断面に比べて平均水位の上昇量は抑制されるものの水位上昇は生じる。平均水位の上昇は越波量の増大等の問題を生じさせる場合があるため、極力低減することが望ましい。ここでは、人工リーフの堤体内部に設けた連通管による平均水位の抑制について検討した結果を述べる。

(1) 実験模型の概要

連通管を設けた人工リーフ模型の概略を図-8に示す。図中のCase-DとCase-Eの断面寸法は、それぞれ図-1に示したCase-AとCase-Bと同じである。連通管には内径13mmの塩ビ管を用い、10本の連通管がリーフ堤体の中心を等間隔で貫通するように配置した。連通管の空隙率は4.7%である。実験に用いたリーフ模型の設置位置と入射波条件等は前章と同じである。

(2) 連通管による平均水位上昇の抑制と波浪減殺機能

図-9は連通管の設置による平均水位と影響係数の変化をCase-AとCase-Dの比較により評価したものである。また、図-10はCase-BとCase-Eの比較である。両図において、波高天端水深比が大きい $hc/H_0=0.4$ の場合、明らかに連通管による平均水位の抑制効果が見られ、その割合はCase-DとCase-Eのそれぞれにおいて入射波高に対して

図-7 人工リーフの影響係数の比較

図-8 連通管を設けた人工リーフ模型の概略

最大で6%程度である。平均水位の抑制効果は波高天端水深比が小さい $hc/H_0=0.22$ の場合についても見られるが、波高天端水深比が小さくなるに従って抑制効果は低下している。平均水位の抑制は連通管による還流効果によるものと考えられ、入射波高の増大に伴い還流効果が低下したためと推察される。一方、影響係数は連通管の設置による変化は波高水深比によらずほとんど見られない。

連通管による平均水位の抑制効果は、入射波の特性や波高天端高比に加えて空隙率にも依存すると考えられる。人工リーフの施工性から空隙率を大きく取ること

は限界はあるが、異なる空隙率について比較検討して効果を確認する必要がある。

5. まとめ

海浜保全機能とサーフィン利用機能を併せ持つ多目的人工リーフの開発を目的に、天端面に傾斜を設けたリーフ背後の平均水位の特性とその制御について検討した。

天端面に傾斜を設けた人工リーフは、入射波高が小さい条件を含め幅広い入射波条件において、天端が水平なリーフに比べて平均水位の上昇量が抑制されることを確認した。平均水位の抑制効果は、主にリーフ天端上における碎波とそれに伴う波高減衰の相異に起因すると考えられる。平均水位上昇の抑制はリーフ上での岸向きの質量輸送の抑制を意味しており、人工リーフの設置による強い海浜循環流の発生など、従来の人工リーフが持つ海岸防護機能上の問題を軽減することが期待される。

本研究では、天端面が傾斜した人工リーフの堤体内部に連通管を設け平均水位の抑制効果と波浪減殺効果について検討した。連通管による平均水位の抑制効果は、波高天端水深比が大きい場合に入射波高に対して数%程度見られ、波高天端水深比が小さくなるに従って抑制効果は低下する傾向を示した。連通管による平均水位上昇の抑制効果はその空隙率にも依存すると考えられ、異なる空隙率について効果を確認する必要がある。

参考文献

- 合田良実 (1975) : 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106.
- 合田良実 (2005) : 方向スペクトル波浪による Wave Setup と沿岸流速の設計図表, 海洋開発論文集, Vol.21, pp.301-306.
- 高山知司・神山 豊・菊池 治 (1977) : リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾技研資料, No.278, pp.3-32.
- 高山知司・永井紀彦・関口忠志 (1985) : 広天端潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 海岸工学論文集, 第32巻, pp.545-549.
- 谷野賢二・綿貫 啓・山本泰司・明田定満・廣瀬紀一 (1997) : 高天端潜堤の水理特性と生物相, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.1141-1145.
- 土木学会編 (2000) : 海岸施設設計便覧, pp.449-451.
- 中野 晋・三島豊秋・中野孝二・三井 宏 (1994) : サーフィンに適するデルタ型人工リーフ周辺の波浪特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.721-725.
- 村上啓介・真木大介・的場勇喜 (2009) : 天端面に傾斜を設けた人工リーフの水理機能に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.931-935.
- 吉田善昭・中野 晋・増味康彰・三井 宏 (1991) : サーフィンに適する波と人工リーフの関係, 海洋開発論文集, Vol.7, pp.113-118.
- Borrero J. C. and C. Nelsen (2003) : Results of comprehensive monitoring program at Pratte's Reef, Proc. 3rd International Surfing Reef Symposium, pp. 83-98.
- Shaw Mead (2003) : Surfing science, Proc. 3rd International Surfing Reef Symposium, pp. 1-36.

図-9 連通管の効果 (Case-A と Case-D の比較)

図-10 連通管の効果 (Case-B と Case-E の比較)