人工リーフ開口部における流況に関する実験と 準3次元海浜流モデル適用性の検討

Quasi-3D Numerical Model and Experimental Study on Current field in the Opening of Artificial Reef

安本善征¹・黒岩正光²・松原雄平³・津留秀臣⁴・間瀬 肇⁵・市村 康⁶

Yoshiyuki YASUMOTO, Masamitsu KUROIWA, Yuhei MATSUBARA, Hideo TSURU
Hajime MASE and Yasushi ICHIMURA

This study focuses on the hydrodynamics in the opening of artificial reefs and the applicability of a quasi-three dimensional nearshore current model with the wave-current interaction. First, the characteristics of the waves and steady currents in the opening area were investigated using the wave flume under irregular wave conditions. Secondly, the numerical model was calibrated and verified by comparing with the experiment results. Finally, the numerical model was applied to the results of a field investigation conducted at Uradome Beach in Tottori, Japan. The computed wave and steady current fields in the opening of two artificial reefs were compared with the measured data. From the computed results, we found that the numerical model gives reliable results to the prediction of the hydrodynamics around the artificial reefs.

1. はじめに

砂浜の侵食対策工法のひとつである人工リーフは景観を損なわず消波効果があり、効果が期待されるとして、全国の多くの海岸に施工され（清水ら，1993，宇多ら，2009），1992年には，「人工リーフの設計の手引き」が出版された．しかしながら，近年，人工リーフ背後に発生する流れによる汀線の後退や開口部での離岸流による洗掘などが問題となっている．

鳥取県東部の岩美海岸（浦富地区）では，侵食対策として平成7年に天端水深2mの人工リーフ2基が設置され，平成19年度からリーフの沖側に天端を拡張し，天端水深0.5mとする改良工事（第二期工事）が実施された．しかしながら，平成19年から20年にかけて，開口部において非常に深い洗掘が発生し始めている（黒岩ら，2012）．このような問題を解決するためには，人工リーフの形状や設置方法などを再検討し，新たな設計基準が必要と考えられる．

本研究では，その第1段階として，人工リーフ開口部における波高分布と流れの関連性に着目した模型実験により，天端幅や天端水深の違いによる流れの発生について検討し，さらに，黒岩ら（2010）が提案した波と流れの相互干渉を考慮した準3次元海浜流モデルの人工リー

フ開口部の流況再現性を検討することを目的とする．

2. 模型実験

(1) 実験概要

実験は，鉛直2次元不規則波造波水槽を用いて行った．図-1に示すように，水槽内に人工リーフ模型を設置し，開口部における波高と流れを測定した．流れの測定点は，底層（底面から3cmの高さ），中層，表層の3点設定した．なお，人工リーフの天端幅，設置位置，天端水深の違いを検討しやすくするため，リーフ設置部は水平床とした．

まず，規則波の下で開口幅を20cmと固定し，天端幅を2パターン（20cmと40cm），設置位置（水平床沖合距離）を3パターン，天端水深を3パターン（0cm，1.5cm，4.5cm），波浪を3パターン変化させた全54ケース，さらに不規則波の条件で，開口幅を20cmと10cmとした場合も追加し，不規則波18ケースの実験を行った．規則波の波浪条件は，周期を1.1 sに固定し，沖波波形勾配をおおよそ0.02，0.035，0.05程度とした波高を3パターン変化させた．不規則波の波浪特性は，有義波周期を1.1s，有義波波高を7～8cmで沖波波形勾配が0.05程度の1パターン

図-1 人工リーフ模型の設置概要

1 正会員	鳥取県 鳥取県土整備事務所
2 正会員	博(工) 鳥取大学教授 大学院工学研究科
3 正会員	工博 鳥取大学教授 大学院工学研究科
4 正会員	修(工) いであ株式会社 港湾AM事業本部
5 正会員	工博 京都大学教授 防災研究所
6 正会員	博(工) 日本ミクニヤ株式会社 大阪支店長

表-1 不規則波におけるリーフ模型諸元

Case	R (cm)	B (cm)	X_L (cm)	W_f (cm)
1	1.5	20	0	20
2	1.5	20	20	20
3	1.5	20	40	20
4	1.5	20	0	10
5	1.5	20	20	10
6	1.5	20	40	10
7	1.5	40	0	20
8	1.5	40	15	20
9	1.5	40	30	20
10	1.5	40	0	10
11	1.5	40	15	10
12	1.5	40	30	10
13	4.5	20	0	20
14	4.5	20	20	20
15	4.5	20	40	20
16	4.5	40	0	20
17	4.5	40	15	20
18	4.5	40	30	20

R:天端水深, B:天端幅, X_L :設置位置, W_f :開口幅

とした。波高は容量式波高計を、流速は水平2成分の電磁流速計を用いて測定した。表-1は不規則波の下におけるリーフ諸元の実験条件を示したもので、後述する数値解析の計算条件である。

(2) 実験結果

紙面の都合上、表-1に示した不規則波の下における実験結果の一例を図-2および3に示す。なお、流速の方向は、後述する数値モデルの座標系に合わせ、岸向きを正としている。図-2より、開口部では、強い沖向きの流れが発生しているのが明らかで、開口部において沖向きに最大となる流れが存在し、設置離岸距離によってその位置が異なることがわかる。図-3より、開口幅 W_f が狭いほど、沖向きの流れは強くなること、天端水深 R が小さい方が沖向き定常流速が大きくなる傾向があることがわかる。また、同下図より、Case1と7の比較では、天端幅の違いによって沖向き最大流速の発生位置が異なるが、他のケースでは明確な違いは見られなかった。つぎに、沖向き定常流速の最大値を抽出し、波形勾配と天端水深で整理した結果を図-4に示す。同図より、波形勾配が大きくなるにつれて沖向き定常流速は大きくなることが明らかである。また、天端水深0cmの場合を除き、波形勾配が大きく天端水深が浅いほど($R=1.5\text{cm}$)沖向き流れが強くなることがわかる。不規則波の場合は、流速値は小さいが、規則波の場合と同様に、天端水深が小さくほど沖向き定常流速が大きくなることがわかる。

図-2 開口部における沖向き定常流速
(開口幅10cm, 天端幅20cm)

図-3 開口部における沖向き定常流速
(各諸元の違いによる比較)

図-4 沖波波形勾配と沖向き最大定常流速との関係

3. 数値解析

(1) 数値モデル

検討するモデルは、黒岩ら (2010) の波と流れの相互干渉を考慮した準3次元海浜流モデルで、波浪場は間瀬ら (2004) の、回折項を考慮した波作用量平衡方程式

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\sigma} \left\{ (CC_g \cos^2 N_y) y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta N_{yy} \right\} - \varepsilon_b N$$

..... (1)

を用いた。ここに、 N は波作用量、 C は波速、 C_g は群速度、 C_x 、 C_y および C_θ は流れと波向きに関する特性速度である。 σ は流れに相対的な角周波数である。右辺第2項の係数 ε_b は碎波減衰係数で、Zhengら(2008)を参考にBattjes and Janssen(1987)のモデルを採用した。

(2) 計算条件

本研究では、波浪モデルが多方向不規則波を対象としたものであることから、不規則波の実験条件を用いて行った。海浜流場の計算を行う上で、まず、波浪場の計算結果の再現性を確認する必要がある。波浪場のモデル式(1)における回折の効果を表すパラメータ κ の与え方と碎波減衰項の与え方を検討した。また、海浜流計算においては、摩擦係数や渦動粘性係数についても検討した。

(3) 実験結果との比較

図-5は開口部における波高分布の計算結果の実験結果と比較した一例で、式(1)の回折の効果を表すパラメータ κ の影響を調べたものである。図より、 κ の与え方で波高分布が大きく異なることがわかる。間瀬ら(2000)によれば、回折項の係数は2.5程度に設定するとされているが、本計算では、小さめの0.25程度とすることで実験結果を良く再現できることがわかった。波浪場の計算モデルの設定後、再度、波浪場と海浜流場の計算を行った。なお、波と流れの相互干渉については、式(1)と海浜流場の運動方程式との繰り返し計算は3回程度としたが、海浜流速の値が小さく波浪場の計算には大きくは影響しなかった。

図-6および7はそれぞれ天端幅 B が20cmおよび40cmのケースで、開口部における冲向き定常流速の計算結果と実験値を比較したものである。図中には、断面平均定常流速と、底面における定常流速の岸沖分布を示している。実験結果と同様に、リーフの設置位置によって冲向きに最大となる地点が異なることが明らかで、計算結果は実験値の傾向を良く再現できていることがわかる。断面平均された定常流速と底面におけるそれとの比較では、計算結果では底面における流速は大きい、実測値ではその差は明確ではない。ただし、分布の傾向は概ね再現されている。なお、海浜流場の計算では、リーフ上の底面摩擦係数を大きくして場所的に値を変え、また、開口幅 $W_r=10\text{cm}$ の場合の渦動粘性係数は、 $W_r=20\text{cm}$ の場合と比較して小さく設定した。また、碎波減衰モデルにおける碎波パラメータ γ は0.55とした。

図-5 開口部における波高分布の比較

図-6 開口部における定常流速の比較(B=20cm)

図-7 開口部における定常流速の比較(B=40cm)

4. 現地適用性

(1) 現地観測結果

鳥取県東部の岩美海岸(浦富地区)において、平成22年12月14日～平成23年2月1日まで、人工リーフ開口部周辺2地点において波浪と海浜流の観測を行った(図-8)。図-9(a)～(e)は平成23年度における観測結果で、有義波高、有義波周期、波向き、St.1およびSt.2における定常流速の北方成分と東方成分の時間的変化を示したものである。同図(d)および(e)の北方成分は、北向きを

図-8 浦富地区の深浅測量結果(平成23年3月)

正としたもので表示している。同図(a)より、浦富地区での来襲波の特性は鳥取港沖での波浪と類似した特性であることが確認できるが、鳥取港での波高が3m以上となるとSt.1では、碎波の影響による波高は小さくなっている。また、リーフ背後付近のSt.2では、鳥取港での波高が2m程度であっても1m程度であることがわかる。同図(d)および(e)より、高波浪時には北方成分の流速が大きくなること、すなわち、冲向きの流れが発生していることがわかる。また、図-10からもSt.1では、鳥取港での有義波高が2.5m以上、St.2では、1m以上のときに、冲向きの流れが発生していることがわかる。

(2) 計算条件の設定

図-9および10に示したように、来襲波(鳥取港沖での波浪)と海浜流速の発生との関係についてはバラツキがあり、すべての波浪に対して計算して適用性を検討するのは困難であるため、定性的にどの程度の波浪に対してどの程度再現可能であるのかを検討することとした。まず、鳥取港で2時間毎に観測された有義波波高を階級別に分け、その階級毎の平均値を算出し、それを計算における入射条件とした。その階級に対応した浦富地区の観測値の平均値を算出し、その平均値と比較を行った。階級別に整理した波浪条件および観測値の平均値を表-2に示す。計算領域は図-8に示す沿岸方向2,000m、岸沖方向1,250m、計算格子間隔は10mとして波浪場と海浜流場の繰り返し計算回数は3回とした。波浪場の計算における κ や碎波減衰項の設定、海浜流場計算における底面摩擦係数や渦動粘性係数の設定については、再現性を確認しながら決定した。

図-9 平成23年度現地観測結果

図-10 有義波高と平均流速との関係

(3) 計算結果

図-11(a)および(b)は、それぞれ平均有義波高が2.42mの場合の波浪場と海浜流場の計算結果を示したものである。同図(b)より、人工リーフの天端上では、強い向岸流が発生している。一方、開口部では、冲向きの流れが再現されている。リーフ背後では局所的には循環流の発生が見られるが、リーフ西側では田後港へ向かう流れが計算されている。つぎに、波浪、流れ観測点St.1と2に沿って岸沖方向に波高分布と海浜流分布を抽出して観測値と比較した結果を図-12および13に示す。図-12より、沖側のSt.1の計算結果は、観測結果より小さくな

表-2 観測期間中の階級別の波浪特性と観測値の平均値

階級分け	鳥取港沖観測値 (ナウファスより)				St.1 観測値				St.2 観測値			
	$H_s(m)$	$T_s(s)$	$\alpha_{obs}(^{\circ})$	$\alpha_{cal}(^{\circ})$	$H_s(m)$	$T_s(s)$	$\alpha_{obs}(^{\circ})$	$V(m/s)$	$H_s(m)$	$T_s(s)$	$\alpha_{obs}(^{\circ})$	$V(m/s)$
1m 以上～2m 未満	1.53	6.94	-2.89	11.1	1.47	7.67	-12.5	0.075	0.86	7.77	-9.38	0.378
2m 以上～3m 未満	2.42	7.82	-15.9	-1.95	2.21	8.78	-16.7	0.178	1.23	8.97	-11.3	0.738
3m 以上～4m 未満	3.38	8.40	-20.01	-6.02	2.64	9.70	-17.9	0.402	1.37	9.89	-13.4	0.915
4m 以上	4.22	8.93	-23.1	-9.14	2.84	10.2	-18.3	0.796	1.49	9.94	-10	0.988

※ α_{obs} は磁北からの角度(北東寄りを正), α_{cal} は数値モデル座標軸xに対する角度(正:北西寄り, 負:北東寄り)

図-11 数値計算例 ($H_s=2.42\text{m}$, $T_s=7.82\text{s}$)

図-13 開口部における岸沖方向の底面定常流速の比較

図-12 人工リーフ開口部の有義波高の岸沖分布の比較

る傾向がある。特に、来襲波の波高が大きくなるほどより過小評価する傾向にあることがわかる。St.2の岸側では過大評価する傾向にある。しかしながら、波浪場の計算結果は開口部の波浪の変化を良く捉えていることがわかる。

図-13より、リーフ開口部岸側のSt.2では、計算結果は実測値と良く一致している。一方、沖側のSt.1の計算結果では、来襲波の波高が大きくなるほど、観測結果より小さくなる傾向がある。特に、波高が4m以上の場合、観測値は0.7m/sとなっている。一方、計算結果では、St.2付近の流速は来襲波の波高が大きくなるほど流速は大きくなっているが、St.1付近では、それほど強い流れは再現されないことがわかる。

なお、この現場での計算では、式(1)による波浪場の計算では κ の値は通常の2.5とし、砕波減衰モデルの砕波パラメータ γ は0.6としたことを付記しておく。

5. おわりに

本研究では、人工リーフ開口部における流れに着目した模型実験を行い、さらに、黒岩ら(2010)が提案した

波と流れの相互干渉を考慮した準3次元海浜流モデルの人工リーフ開口部の流況再現性、現地適用性を検討した。実験結果より、開口部では常に沖向きの流れが発生し、その強さは開口部の幅と天端水深が影響することが確認できた。数値モデルについては、砕波減衰項の設定や渦同動粘性係数、摩擦係数などのパラメータを設定すれば高い精度で再現でき、現地への適用も可能であることが確認された。

最後に、本研究を遂行するにあたり、鳥取県岩美海岸での調査資料を提供していただいた鳥取県土整備部河川課に感謝の意を表す。

参考文献

- 宇多高明・森川数美・上橋 昇・大木孝志・芹沢真澄・神田康嗣・福本崇嗣(2009): 皆生海岸のクレスト型人工リーフ周辺の地形変化実態とその予測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第65巻, pp.571-575.
- 黒岩正光, 松原雄平, 市村 康, 丸毛裕治, 中野伸太郎, 津留秀臣(2012): 人工リーフ開口部における地形変化に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp. I_566-I_570
- 黒岩正光・Ahmed KHALED SEIF・松原雄平・間瀬 肇・Jinhai ZHENG(2010): 波と流れの相互干渉を考慮した3次元海浜変形予測モデル, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 第66巻, pp.551-555.
- 清水琢三, 今井澄夫, 寺田賢二(1993): 人工リーフ建設に伴う地形変化, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.546-550
- 間瀬 肇・由比政年・雨森洋司・高山知司(2004): 波・流れ共存場における砕波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.6-10.
- 建設省河川局海岸課監修(1992): 人工リーフ設計の手引き, 社団法人 全国海岸協会, 92p.
- Battjes and Janssen (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings of the 16th ICCE, vol.1, pp.569-587.
- Zheng, J., H. Mase, Z. Demirbilek, and Lin, Li (2008): Implementation and evaluation of alternative wave breaking formula in a coastal spectral wave model, Ocean Engineering, 35, pp.1090-1101.