人工リーフ背後流況に関する水理模型実験の 3次元海浜流数値モデルによる 再現シミュレーション

田中 和広¹・山部 道²・平石 哲也³

¹ 株式会社日本港湾コンサルタント 沿岸海洋本部 沿岸海洋部 海洋課
(〒141-0031 東京都品川区西五反田 8-3-6 TK 五反田ビル)

E-mail: kazuhiko_tanaka@jportc.co.jp

² 正会員 株式会社日本港湾コンサルタント 沿岸海洋本部 沿岸海洋部
(〒141-0031 東京都品川区西五反田 8-3-6 TK 五反田ビル)

E-mail: toru_yamabe@jportc.co.jp

³ 正会員 京都大学教授 防災研究所 流域災害研究センター
(〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

E-mail: hiraishi.tetsuya.2c@kyoto-u.ac.jp

3次元海浜流・海浜変形数値モデルによる人工リーフ周辺の流況および海浜変形シミュレーションについて、野口ら¹⁾が行った水理模型実験の再現計算を実施し、数値モデルの適用性を検討した。数値モデルは、波浪変形解析はSWAN、3次元海浜流場の解析はPOM、地形変化解析は波・流れ共存場の漂砂モデルで構成される。海浜流の駆動力として砕波帯砕波エネルギー減衰から効率を考慮して求められる海面せん断応力を適用した。人工リーフ周辺の流況に関する計算結果は表層および底層の実験結果を比較的好く再現できた。流速値についても計算結果は概ね実験を再現した。地形変化計算は汀線近傍の堆積傾向の再現性に課題があるが、波高が高いケースではある程度の地形変化傾向を再現した。用いた3次元海浜流、海浜変形モデルが概ね良好な適用性を有することを確認することができた。

Key Words : artificial reef system, 3D nearshore current, beach change simulation, SWAN, POM

1. はじめに

人工リーフ設置による背後の海浜地形変化を数値計算により予測する場合、現地で生じた現象を数値計算で説明できないことなどがあるのは、人工リーフ背後における流況が複雑で十分に解明されていないことが一因にある¹⁾。そこで野口ら¹⁾は、検証データを十分に提供することが数値モデルの進展を図るものと期待し、数値計算の検証データとすることを念頭におき、一般的な波浪・底質・構造物配置条件に対して水理模型実験を行った。

そこで本研究では、3次元の解析が可能な海浜流数値モデルおよびそれに伴う海浜変形（地形変化）数値モデルにより、野口らが行った水理模型実験の再現計算を実施し、実験データにより検証することで提案する数値モデルの適用性を確認することを目的とした。

2. 検証対象とした水理模型実験方法の概要

野口ら¹⁾が行った水理模型実験は、一般的な人工リーフ配置条件に対する実験縮尺1/25の35ケースの固定床実験（表-1）と流況タイプを変化させた移動床実験である。1/30勾配の固定床を有する幅16mの造波区域を半分に区切り、天端幅2m×堤長8mの人工リーフ模型を離岸距離と天端水深の組合せにより4種類の条件で設置した（図-1）。人工リーフは側壁から4m離れてあり、延長8m、開口幅8mの人工リーフ複数基の連堤配置を模擬した。作用波浪は規則波で、配置条件毎に9種類とした（表-1）。表-1は野口らの表に現地スケールの波浪諸元を追記した。

(1) 固定床実験

波高及び流速の計測器の配置を図-2に示す。H1～H12が波高測定点、V1、V2、Vc3～Vc7（端部測線）、Vc3～Vc7（中央部測線）が流速測定点である。流速は10点について表層と底層で計測した。

図-1 水理模型実験の人工リーフ配置条件 (図は野口ら¹⁾を元に加筆)

表-1 水理模型実験および数値実験のケース別波浪条件 (表は野口ら¹⁾を元に編集)

No.	人工リーフ 設置条件	ケース 番号	水理模型実験		現地スケール	
			波高	周期	波高	周期
			H (cm)	T (s)	H (m)	T (s)
1	I	I-1	16.0	1.2	4.0	6.0
2		I-2	4.0	1.2	1.0	6.0
3		I-3	10.0	1.6	2.5	8.0
4		I-4	20.0	2.0	5.0	10.0
5		I-5	16.0	2.0	4.0	10.0
6		I-6	4.0	2.0	1.0	10.0
7		I-7	20.0	2.4	5.0	12.0
8		I-8	16.0	2.4	4.0	12.0
9		I-9	4.0	2.4	1.0	12.0
10	II	II-1	16.0	1.2	4.0	6.0
11		II-2	4.0	1.2	1.0	6.0
12		II-3	10.0	1.6	2.5	8.0
13		II-4	20.0	2.0	5.0	10.0
14		II-5	16.0	2.0	4.0	10.0
15		II-6	4.0	2.0	1.0	10.0
16		II-7	20.0	2.4	5.0	12.0
17		II-8	16.0	2.4	4.0	12.0
18		II-9	4.0	2.4	1.0	12.0
19	III	III-1	16.0	1.2	4.0	6.0
20		III-2	4.0	1.2	1.0	6.0
21		III-3	10.0	1.6	2.5	8.0
22		III-4	20.0	2.0	5.0	10.0
23		III-5	16.0	2.0	4.0	10.0
24		III-6	4.0	2.0	1.0	10.0
25		III-7	20.0	2.4	5.0	12.0
26		III-8	16.0	2.4	4.0	12.0
27		III-9	4.0	2.4	1.0	12.0
28	IV	IV-1	16.0	1.2	4.0	6.0
29		IV-2	4.0	1.2	1.0	6.0
30		IV-4	20.0	2.0	5.0	10.0
31		IV-5	16.0	2.0	4.0	10.0
32		IV-6	4.0	2.0	1.0	10.0
33		IV-7	20.0	2.4	5.0	12.0
34		IV-8	16.0	2.4	4.0	12.0
35		IV-9	4.0	2.4	1.0	12.0

流況の把握は、表層部と底層部を移動する浮子についてPTV (粒子像追跡流速) 解析を行った。浮子は直径2cmで、表面を浮遊する比重0.90~0.91のポリプロピレン球と、沈降し底層を移動する比重1.13~1.14のナイロン球を用いた。所定の位置から浮子を投入し、10周期間を流況解析の対象とした。

図-2 計測器の配置 (図の出典は野口ら¹⁾)

表-2 移動床実験の地形変化の経過時間設定と波浪条件 (表は野口ら¹⁾を元に編集)

ステージ	波浪 区分	ケース	水理模型実験				現地スケール			
			波高 (cm)	周期 (s)	作用 時間	通算 経過 時間	波高 (m)	周期 (s)	作用 時間	通算 経過 時間
1	低波浪	III-6	4.0	2.0	5h	0~5h	1.0	10.0	25h	0~25h
2	高波浪	III-5	16.0	2.0	3h	5~8h	4.0	10.0	15h	25~40h
3	低波浪	III-6	4.0	2.0	5h	8~13h	1.0	10.0	25h	40~65h

(2) 移動床実験

人工リーフ背後の底層流況が、野口ら¹⁾が定義したタイプAとタイプBが交互に発生するシナリオを設定して、流況タイプが変化することによる地形変化を把握した。タイプAはケースIII-5、タイプBはケースIII-6を採用した。波浪は、タイプB→タイプA→タイプBの順に造波した。各波浪条件の期間をステージと呼び、表-2に示す造波時間とした。海底地形は、固定床上に0.1 m厚で中央粒径約0.3 mmの珪砂を整形し初期地形を形成した。

3. 数値モデル(波浪変形, 海浜流, 海浜変形)の概要

本研究で適用した数値モデルは、波浪場の解析は第3世代波浪推算モデルSWAN(Simulating WAVes Nearshore²⁾)

を用いた。SWANは浅海域の地形性砕波やウェーブセットアップを考慮できるモデルであり、また定常状態の波浪場であれば、沖合から浅海域まで比較的広範囲を少ない計算負荷で計算可能であるため、SWANを適用した。

3次元海浜流場の解析は海洋モデル POM(Princeton Ocean Model³⁾)を用いた。鉛直方向はシグマ座標系で定義される。平均流の駆動力は、ラディエーション応力勾配、並びに砕波帯砕波エネルギー減衰率(W/m^2)を水面波の群速度で除した砕波せん断応力(N/m^2)の各応力を用いた計算をそれぞれ行い、砕波せん断応力を求める際の砕波エネルギー減衰率の割合を効率と定義し、効率を調べることを目的の一つとした。

地形変化の解析は、Van del Werfモデルを基盤とした波・流れ共存場の漂砂モデル⁴⁾を適用した。これは、波の峰の位相と谷の位相での、合成流速ベクトル場に対して、波・流れ共存場の漂砂量を解析するもので、砂れんおよびシートフロー層からの巻き上げ砂の流れによる移動を考慮している。この場合、海底面付近の平均流速の流速ベクトルが漂砂量ベクトルを決める重要な要素となるので、3次元海浜流場の流速分布の計算が必要である。漂砂量則の定義式は田中ら⁵⁾を参照されたい。

4. 数値モデルによる再現計算条件

数値モデルの縮尺は、野口らの水理模型実験縮尺をフルード相似則により現地縮尺(1/1)に換算した。水理実験

表-3 数値モデルの計算条件

モデル	項目	条件
共通条件	計算領域、格子間隔	横方向800 m, 縦方向500 m, 格子間隔 縦横5 m
	水深地形データ	1/30 勾配, 図-1の1/25地形を現地縮尺に拡大
	人工リーフ	延長200 m, 天端幅50 mの人工リーフを2基, 開口幅200 mで配置
波浪	波浪条件	表-1の現地スケール波浪諸元
海浜流	鉛直分割数	シグマ座標 11 層
	計算時間間隔	$dt=0.025$ s
地形変化	代表粒径	$D_{50}=0.30$ mm (水理模型実験と同じとした.)
	パラメータ	漂砂 $\beta=1$, 波による漂砂強度 $Q_w=0.5$, 流れによる漂砂強度 $Q_c=1.0$

図-3 波浪場の数値計算結果例 (ケースIII-9)

による地形変化は現地で生じる現象に対する相似則が確立されていないため、単純に現地縮尺で実施した数値モデルと比較できないが、本研究では一定の相似則が成立していると仮定して比較を行った。

数値モデルの計算条件を表-3に示す。水理実験は人工リーフ1基の半幅で行われたが、連堤の配置を模擬されたものであり、また数値計算では境界での計算誤差を含まないように連堤配置とした。実験ケースは現地縮尺に換算した波浪条件(表-1)による流況把握と、表-2のシナリオによる地形変化とした。定常状態の波浪場を解析した結果を用いて、流況場の解析を3時間分実施した。地形変化の解析は、固定床で求めた流況場を各ステージに適用したため、地形変化による流況の変化は考慮していない。ケースIII-9を例として、図-3に波浪場解析結果を、図-4に流況場解析結果を示す。図-3の赤い矢印は波向を表す。

浮子の軌跡計算は、浮子は質量を持たない点として、表層は表層の、底層は底層の3時間目の流速ベクトル解

図-4 海浜流の数値計算結果例 (ケースIII-9)

図-5 水理模型実験による浮子軌跡図と数値計算による流況ベクトル、浮子軌跡図 (図の水理模型実験は野口ら¹⁾)

析結果をもとに、それぞれ 1.25 s 毎に軌跡を計算した。

地形変化は底層の流況解析結果をもとに、表-2 に示すステージの順序で現地スケールの作用時間を解析した。

5. 数値モデルによる再現計算結果と検証

(1) 人工リーフ端部背後の流況

複数基の人工リーフを密に配置した場合、幅の狭い開口部ができるため、開口部底層での強い沖向きの戻り流

れが生じ、開口部の洗掘や人工リーフ背後の砂の流出が発生し、沖方向漂砂を助長することが指摘されている。そのため、人工リーフ端部周辺から開口部の流況や流速場の把握が重要である。

水理実験で整理された人工リーフ端部背後の流況について、表層と底層の水理実験結果と碎波せん断応力を用いた数値計算結果を図-5 に示す。ケース I-4 は、水理実験で見られる底層で直線的に開口部へ向かう流れを数値計算はよく再現している。ケース II-6 の数値計算は、人工リーフ端部を中心とした循環流と底層では岸側から

図-6 人工リーフ端部背後測点(Ve6)での底層の沿岸方向流速の水理実験結果と数値計算結果

ステージ 1: ケースⅢ-6

ステージ 2: ケースⅢ-5

ステージ 3: ケースⅢ-6

図-7 地形変化の移動床水理実験結果と数値計算結果(左図(a)の出典は野口ら¹⁾)

開口部へ向かう流れが確認できる。ケースⅢ-9の数値計算は、水理実験で見られる開口部を中心とした大きな循環流が認識される。

(2) 人工リーフ端部背後の流速

野口ら⁹⁾は人工リーフ背後において向岸流よりむしろ沿岸流が周辺の漂砂環境に広い影響を及ぼしている可能性があることを指摘している。ここでは、人工リーフ配置条件ⅢとⅣにおいて、人工リーフ端部背後測点 Ve6 (図-2)の底層の沿岸方向流速を比較した結果を図-6に示す。

砕波の減衰エネルギーは大規模乱流場の形成と平均流の駆動力に変換されるため、ローラーモデルを併用しない平均流の数値計算では、砕波エネルギー減衰の何%が流れを駆動する砕波せん断応力として作用するのかという効率を議論しておく必要がある。

本解析では全砕波エネルギーが流れの駆動に貢献する効率 100%とした場合と、効率 33%とした 2 条件を仮定して流れの解析を行った。それぞれ結果を橙色、緑色として図-6に示す。また、ラディエーション応力勾配を用いて計算した結果を薄赤色で示した。ここで、数値計算値は比較のため水理模型実験縮尺に換算(1/5)した。

数値計算結果は、砕波減衰エネルギーの効率を 33%とした場合はほとんどのケースで水理実験値に対し流速がかなり過小となったが、効率 100%とした場合はケースにもよるが概ね水理実験値に近い値となった。

100%とした結果をみると、水理実験に対し全体として入射波高が小さいケースでは流速が遅く、入射波高が大きいケースでは流速が早い。特に配置条件Ⅲ、Ⅳとも波高が大きい波浪条件 7 (現地縮尺で波高 5 m, 周期 12 s) では数値計算は流速値が過大となった。波浪条件 7 (Ⅲ-7, Ⅳ-7) のような高波浪条件では、砕波エネルギー減衰を 33%とした方が水理実験値に近い結果となった。これは、高波浪となるほど砕波による波のエネルギー減衰のうち、乱流エネルギーとなり消散する割合が増え、流れの生成に寄与する割合が減るためと推察される。

ラディエーション応力勾配を駆動力として解析した流況場の数値計算結果との比較は、高波浪条件 (Ⅲ-5, Ⅳ-5) では効率 33%の砕波帯砕波応力の結果に近いが水理実験値に比べ過小評価となる。一方、低波浪条件 (Ⅲ-6, Ⅲ-9) では効率 100%に近く水理実験値に概ね近い流速となった。以上より、人工リーフ周辺の砕波による波浪流の形成には、入射波条件の違いによる人工リーフ上の砕波特性の相違により効率が大きく変化することがわかる。入射波高が小さい場合には、効率は高くなるが、入射波高が大きく人工リーフ上での砕波変形が相対的に大きい場合には、効率が低くなると考えられる。

(3) 地形変化

地形変化の水理実験結果と数値計算結果をステージ順に図-7に示す。ステージ 1 は変化量が少ないが数値計算結果は人工リーフ背後の堆積と更にその背後の侵食は良いが、汀線近傍の堆積は再現されていない。波高が大きいステージ 2 では、数値計算結果は人工リーフの脇および直背後の堆積傾向と、底層流況に沿って生じる侵食傾向をよく再現しているが、汀線近傍の堆積傾向は再現されていない。ステージ 3 は数値計算では水理実験結果のような複雑な分布傾向は計算されていない。

汀線近傍で堆積傾向が再現されない理由の 1 つに、適

用した波浪場の解析モデルでは遡上を考慮していないため、遡上域の流況を再現していないことが挙げられる。

6. おわりに

本研究の主たる成果は、次のとおりである。

- (1) 人工リーフ周辺の流況に関する数値計算結果は、水理模型実験の表層および底層の流況パターンを比較的良好に再現した。
- (2) 人工リーフ周辺の砕波による波浪流の形成には、入射波条件の違いによる人工リーフ上の砕波特性の相違により効率が大きく変化した。入射波高が小さい場合には、効率は高くなるが、入射波高が大きく人工リーフ上での砕波変形が相対的に大きい場合には、効率が低くなると考えられる。
- (3) 地形変化計算は波高が高いケースではある程度の地形変化傾向を再現した。しかし、汀線近傍の堆積傾向は再現できていない。これは波浪場の解析で遡上を考慮しておらず遡上域の流況が再現されていないためと推察される。波浪の遡上を考慮した流況場解析と地形変化解析は今後の課題である。
- (4) 提案した3次元海浜流の解析が可能な数値モデルとそれに基づく地形変化解析の数値モデルによる水理模型実験の追算結果は概ね良好で、モデルの適用性を確認することができた。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室から人工リーフ背後の数値計算検証のための水理模型実験のデータを平石研究室宛への貸与と、同室野口賢二主任研究官よりご助言と

ご協力を賜りました。また、数値モデルの構築と実行の指導では株式会社日本港湾コンサルタント技術顧問 広島大学名誉教授 山下隆男氏のご協力を賜りました。海岸研究室並びに両氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 野口賢二, 岩佐隆広, 二瓶功, 諏訪義雄, 鳥居謙一, 下園武範, 佐藤慎司: 波浪等の違いによる人工リーフ背後流況に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.71, No.2, p.1763-1768, 2015.
- 2) N. Booij, L.H. Holthuijsen, R.C. Ris : The "SWAN" wave model for shallow water, Proceedings of 25th Conference on Coastal Engineering, Vol.1, pp.668-676, 1996.
- 3) George L. Mellor : USERS GUIDE for A THREE-DIMENSIONAL, PRIMITIVE EQUATION, NUMERICAL OCEAN MODEL, Princeton University, 2002.
- 4) 祭田佳奈江, 鷲田正樹: 岸沖漂砂の卓越する海岸における岸沖・沿岸漂砂統合モデル開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.68, No.2, p.1612-1617, 2012.
- 5) 田中和広, 山部道, 平石哲也: 人工リーフ周辺の波浪変形・3次元海浜流・海浜変形の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.74, No.2, p.1937-1942, 2018.
- 6) 野口賢二, 福原直樹, 加藤史訓, 岩佐隆広, 白山昌義, 平野宜一, 大西史哲: 人工リーフの設置による沿岸漂砂量の変化に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.74, No.2, p.1943-1948, 2018.
- 7) 田中和広, 山部道, 中三川大輔, 平石哲也: 3次元海浜流・海浜変形モデルによる人工リーフ周辺の侵食・堆積測量結果の追算, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.75, No.2, p.1683-1688, 2019.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

FOLLOW-UP COMPUTATION OF HYDRAULIC EXPERIMENT OUTPUT OF CURRENT AND BEACH CHANGE AROUND ARTIFICIAL REEF SYSTEM BY THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL

Kazuhiro TANAKA, Toru YAMABE and Tetsuya HIRAISHI

A follow-up computation of the hydraulic model experiment of Noguchi et al. (2015) was conducted by three-dimensional coastal current and beach change model. The numerical model reproduced the experimental outputs of current and beach changes around the artificial reef system to confirm the applicability of the model which consists of SWAN for wave computation, POM for three-dimensional coastal current field, and the Van del Werf sediment transport formulation under wave and current coexisting field. The calculation results reproduced the surface and bottom layer current patterns around the artificial reef and the velocities relatively well. Although the topographic change calculation has a problem in the reproducibility of the sedimentation near the shoreline, a certain amount of topographic change tendency can be reproduced in the case of a high incident wave. It was confirmed that the three-dimensional beach current and beach deformation model had generally good applicability.