

砂留潜堤背後域の流況及び波高分布 に関する研究

Study on Wave and Wave-Induced Flow Behind a Sand Protection Submerged Dike

許 東秀¹・牛木 賢司²・水谷 法美³・岩田 好一朗⁴
Dong-Soo HUR, Kenji USHIKI, Norimi MIZUTANI and Koichiro IWATA

¹正会員 博(工) 名古屋大学助手 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学修士課程 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 名古屋大学助教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴フェロー 工博 名古屋大学教授 工学研究科土木工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Recently, construction of artificial shallow area has been increasing to recover environmental functions of lost natural ones. At offshore end of artificial tidal flats, a submerged dike has been usually installed in order to prevent sediment wash-out by waves. After construction of artificial shallow area, remarkable deformation of bottom topography is sometimes taken place due to wave action, which results in losing functions of tidal flats. In this study, characteristics of 3-dimensional water particle velocity field, which effect directly on deformation of bottom topography, in artificial shallow area have been investigated using both hydraulic model tests and numerical calculation. It is revealed that circulating flow is dependent on wave steepness and relative wave height to crest height. Wave height distribution was also discussed.

Key Words : artificial shallow area, submerged dike, velocity field, numerical calculation

1. 緒言

沿岸域の開発に伴い、干潟を含む浅場の消失が進行している。しかし、近年、浅場の持つ水質浄化機能や多様な生物生息場としての機能などが再評価され、浅場の修復や創出の動きが活発になっており、人工干潟や人工藻場のような人工浅場の施工例が増えている。しかし、浅場における波と流れによる底質の流出や局所的な洗掘等、造成後の浅場の地形が著しく変形し、期待した機能を十分発揮できない地形に変化してしまうなどの問題も生じている。したがって、波による人工浅場の地形変化の特性を解明する必要があるが、人工浅場造成後の地形変化に関する研究は数少ないのが現状である。したがって、まず、浅場における底面地形変化の外力である波とそれによる流動場を解明する必要がある。

ところで、波の作用の軽減や流出砂の軽減のため人工浅場の前面には砂留潜堤の設置が考えられる。そして、砂留潜堤背後の浅場における流況や波浪場の内部構造を正確に把握することは、人工浅場の設

計面で重要な課題となっている。鷲見ら¹⁾は、既に高天端部と低天端部を持つ砂留潜堤を取り上げ、高天端部が静水面と同じになる条件下で、水理模型実験を行い、高天端部と低天端部より構成される不陸型砂留潜堤は、砂留潜堤背後の浅場内での循環流の形成や海水交換性に優れていることを確認した。

本研究では、この不陸型砂留潜堤を沖側部に持つ浅場を取り上げ、高天端部が水面下になる条件下で固定床水理模型実験を行い、主に、高天端部水深の違いによる流況と波の変化について考究することを目的とする。また、VOF法による3次元直接数値計算を行い、数値解析手法の適用性の検討を行うこととする。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置

実験を名古屋大学大学院工学研究科土木工学教室の平面造波水槽(長さ28.0m, 奥行き8.0m, 高さ

0.8m)を使って行った。図-1に示すように、造波板から波進行方向8.3mの位置に不透過矩形型の砂留潜堤を設置し、その直配後から長さ7mの浅場模型(水平固定床)を設置した。なお、その岸側端部を鉛直護岸とした。図-2に示すように、砂留潜堤模型は高天端部と低天端部を持つ不陸型であり、高天端部では堤長 $W^H=1.5m$ 、天端幅 $B=22.0cm$ 、天端水深 $R^H=5.0cm$ とし、低天端部では天端幅 $W_L=1.5m$ 、 $B=22.0cm$ 、 $R_L=13.0cm$ とした。潜堤沖側の静水深を $h_1=33cm$ とし、入射波を3種類変化させた。測定項目は水平流速、鉛直流速、波高分布であり、流速は電磁流速計を用いて、図-1で示す人工浅場周辺(図中のハッチ部)の計360点(図-3参照)で、それぞれ底面よ

り3.0, 8.0, 12.0cmの3層の合計1080点で計測を行った。ただし、鉛直流速についてはY方向(波進行方向の直交方向(図-1参照))の計測間隔をすべて30cmにした。波高の計測については流速と同様、図-3に示す格子点で、電気容量式波高計を使って行った。なお、流速の値としては、現象がほぼ定常になった直後の5周期の値を解析の対象とし、その平均値を算術平均して求めた。

(2) 実験条件

鷺見ら¹⁾の実験条件を参考にして、本実験の条件を表-1に示すように決めた。なお、本研究では比較のため鷺見ら¹⁾の実験結果も使用しているので、鷺見ら¹⁾の条件も表-2にあわせて示しておく。

表-1と表-2に示す全実験ケースにおいて、高天端上で碎波が発生しており、特に、Case3とCase5の場合では、低天端上での碎波も確認された。また、Case2とCase3の場合の高天端上での碎波は規模が大きく、その形式は部分重複波性の碎波であり、碎波後の水塊は波進行方向に飛び出すものであった。

表-1 本実験の実験Case ($h_1=33cm$, $R^H=5cm$)

Case	T(s)	$H_1(cm)$	W_L/L_1	H_1/L_1	R_L/H_1
1	1.0	2.5	1.07	0.018	5.20
2	0.7	5.0	1.98	0.066	2.60
3	1.0		1.07	0.036	

表-2 鷺見ら¹⁾の実験Case ($h_1=28cm$, $R^H=0cm$)

Case	T(s)	$H_1(cm)$	W_L/L_1	H_1/L_1	R_L/H_1
4	1.0	2.5	1.11	0.019	3.20
5	0.7	5.0	2.00	0.067	1.60
6	1.0		1.11	0.037	

3. 波高分布

図-4に浅場における無次元波高分布(H/H_1 , H_1 : 入射波高)の実験結果を例示する。図-4(a)と(b)は、それぞれ、本研究で行ったCase1と鷺見ら¹⁾が行ったCase4の無次元波高分布を示したものである。同図から、 $R_L/H_1=5.20$ のCase1の方が、 $R_L/H_1=3.20$ のCase4より、天端の高低にかかわらず砂留潜堤背後の無次元波高の値は大きくなっている。これについて以下に検討する。

まず、高天端部背後に着目する。Case1の場合、高天端上での碎波規模は大きく碎波による波高減衰

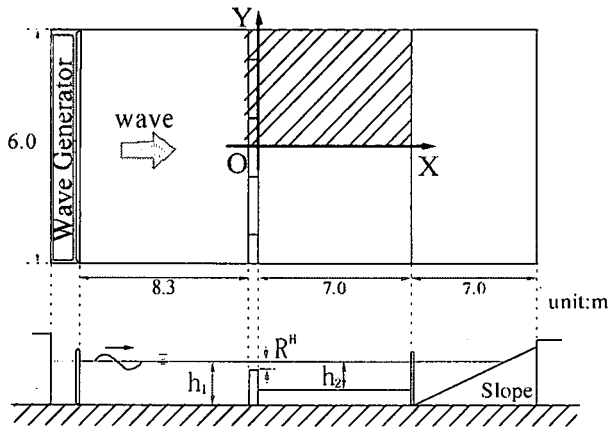


図-1 実験水槽の概要

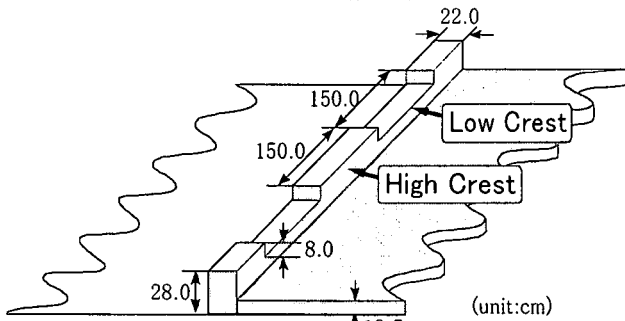


図-2 砂留潜堤の概要 (unit:cm)

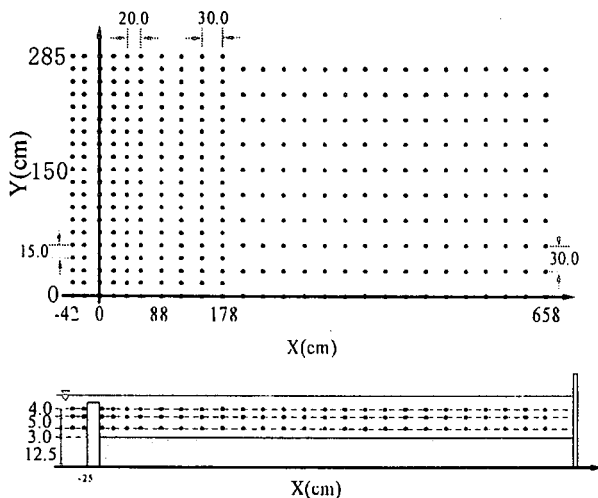
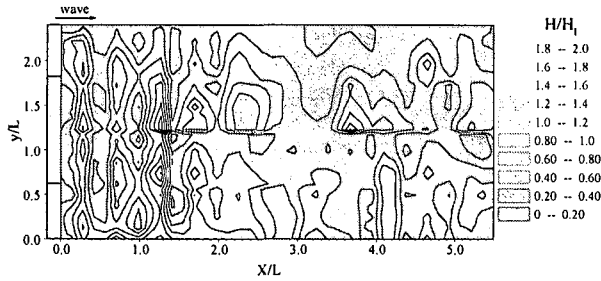
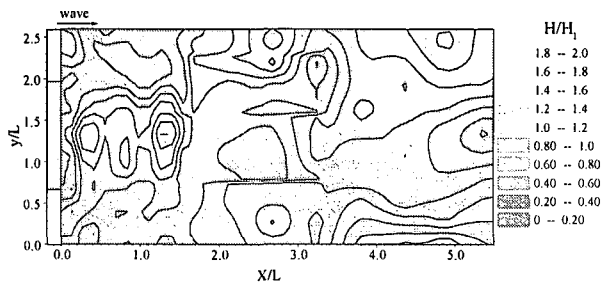


図-3 計測点



(a) Case1

($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.018$, $R_L/H_1=5.20$, $R^H/H_1=2.00$)



(b) Case4

($h_1=28\text{cm}$, $H_1/L_1=0.019$, $R_L/H_1=3.20$, $R^H/H_1=0.00$)

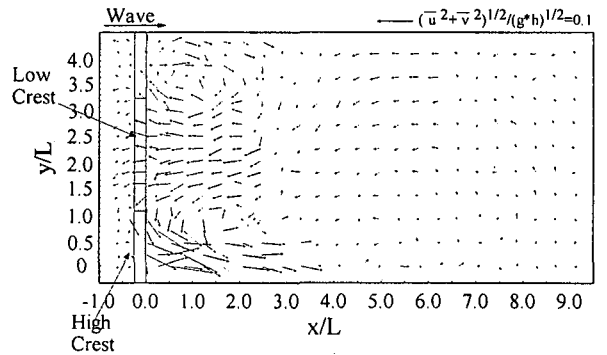
図-4 波高分布

が大きいものの、高天端高が水深と同じであるCase4の方($R^H/H_1=0.00$)が、ほとんど越波に近い状況で波が高天端部を伝達するため、かなり伝達波が小さくなり、このため、Case1の場合($R^H/H_1=2.00$)より無次元波高が小さくなっている。また、低天端部背後では両ケース共に低天端上での碎波は発生しなかったため、低天端部水深の小さいCase4の方($R_L/H_1=3.20$)が、Case1の場合($R_L/H_1=5.20$)より、低天端部背後域の無次元波高が小さくなっている。したがって、無次元高天端水深 R^H/H_1 や無次元低天端水深 R_L/H_1 を調節することにより砂留潜堤背後域の浅場の静穏度の確保が可能であると考えられる。

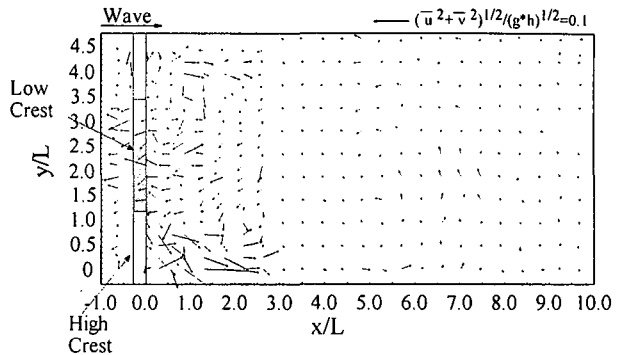
また、上述したように、構造物岸側端を直立壁にしている。図-4に示すように、浅場の岸側では波長に比べ計測点が十分ではなかったため、明確には部分重複波の形成が確認できないが、5章で後述するように数値計算では砂留潜堤背後の波全体場を通して部分重複波の形成が確認できた。

4. 流れ場の特性

まず、平面二次元場での平均流の特性について検討する。図-5(a)と(b)は、それぞれ、Case2とCase5の上層(水平固定床から12cm)での平均流ベクトルの分布を例示しており、図中のベクトルは $(gh)^{1/2}$ (g :重力加速度)で無次元化した値を示す。なお、 z は静水面を原点とする流速測定水深である。同図から、砂留潜堤背後に1対の循環流が形成されているのが確認

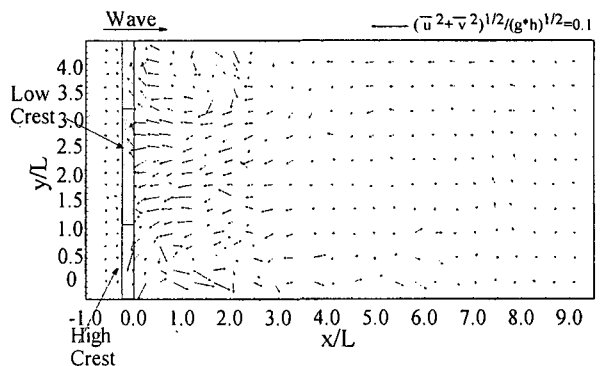


(a) Case2 ($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.066$, $R_L/H_1=2.60$, $R^H/H_1=1.00$, $z/h_2=-0.41$)

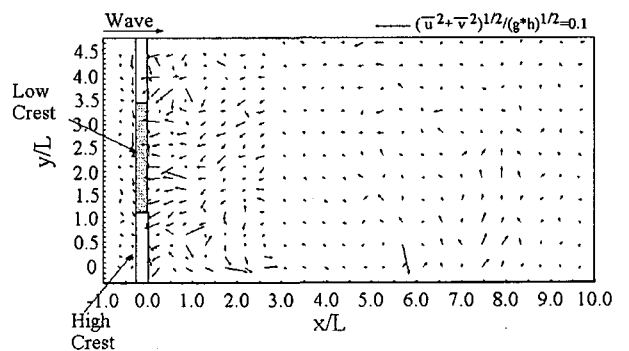


(b) Case5 ($h_1=28\text{cm}$, $H_1/L_1=0.067$, $R_L/H_1=1.60$, $R^H/H_1=0.00$, $z/h_2=-0.23$)

図-5 上層における平均流ベクトル



(a) Case2 ($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.066$, $R_L/H_1=2.60$, $R^H/H_1=1.00$, $z/h_2=-0.85$)



(b) Case5 ($h_1=28\text{cm}$, $H_1/L_1=0.067$, $R_L/H_1=1.60$, $R^H/H_1=0.00$, $z/h_2=-0.81$)

図-6 下層における平均流ベクトル

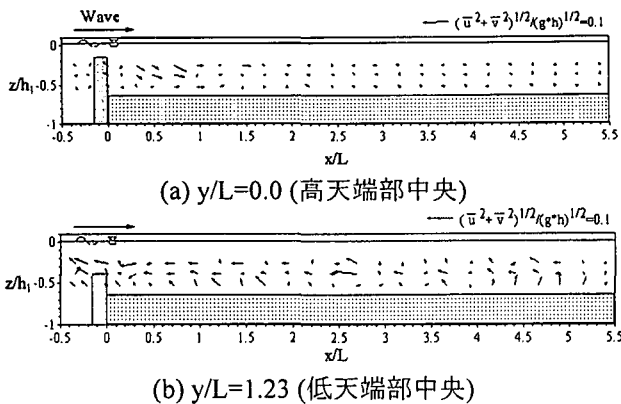


図-7 Case1における鉛直方向の平均流ベクトル
($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.018$, $R_L/H_1=5.20$, $R^H/H_1=2.00$)

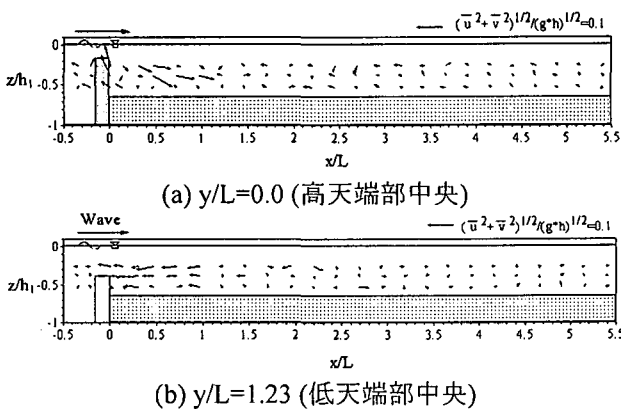


図-8 Case3における鉛直方向の平均流ベクトル
($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.036$, $R_L/H_1=2.60$, $R^H/H_1=1.00$)

できる。しかし、 $H_1/L_1=0.066$, $R_L/H_1=2.60$, $R^H/H_1=1.00$ の Case2 の場合より、 $H_1/L_1=0.067$, $R_L/H_1=1.60$, $R^H/H_1=0.00$ の Case5 の方が幾分複雑な循環流となっている。これは、Case5 の低天端上での砕波が一原因であると考えられる。また、本論で図示はしないが、波形勾配がほぼ同じである Case3 と Case6 の場合においても、高天端上と低天端上共に砕波が確認された Case3 では多少複雑な循環流が確認される反面、Case6 の場合には明確な循環流が形成されている。

このことから、本研究で用いた不陸型砂留潜堤背後の浅場での循環流の形成には、波形勾配 H_1/L_1 より無次元天端水深 R_L/H_1 や R^H/H_1 が支配パラメータであることがわかる。また、ほとんどの実験ケースで低天端部での冲向き流れが発生しており、不陸型砂留潜堤は海水交換性の面で利点のあることが確認できた。

Case2 と Case5 の下層(水平固定床から 3cm)での平均流ベクトル分布をそれぞれ図-6(a)と(b)に例示する。測定水深の違いによる流速場の特性を検討するために、Case2 の図-5(a)(上層)と図-6(a)(下層)のベクトル分布を比較すると、 $z/h_2=-0.41$ での図-5(a)よりも水

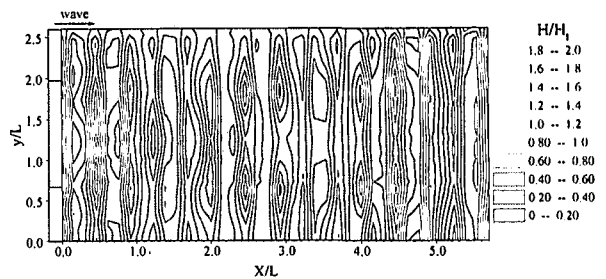
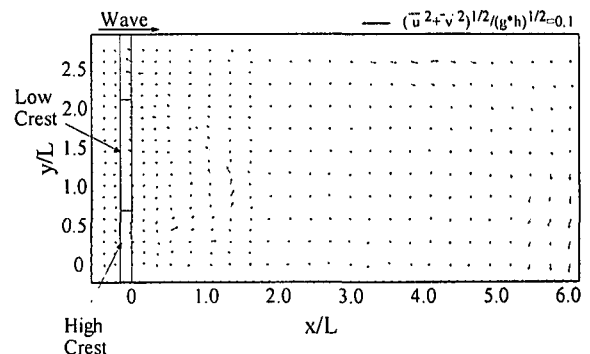
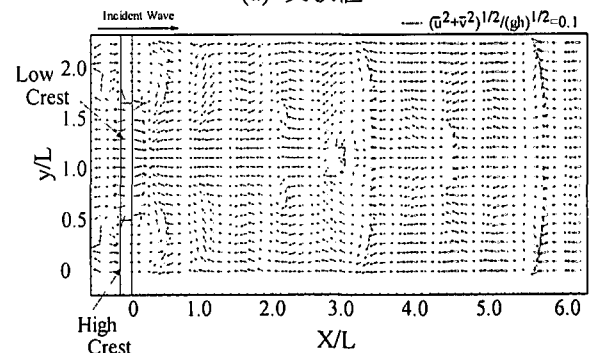


図-9 Case1の波高分布(計算値)
($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.018$, $R_L/H_1=5.20$, $R^H/H_1=2.00$)



(a) 実験値



(b) 計算値

図-10 Case1の平均流ベクトル
($h_1=33\text{cm}$, $H_1/L_1=0.018$, $R_L/H_1=5.20$, $R^H/H_1=2.00$)

深の深い $z/h_2=-0.85$ での図-6(a)の流速は小さくなっているが、底面近傍でも上層と同じように循環流の形成が認められる。しかし、Case5 の場合、 $z/h=-0.81$ の底面近傍の流速場(図-6(b))には上層(図-5(b))で認められた循環流は形成されておらず、離岸流と向岸流が不規則に発生していることが確認できる。これは、Case5 では前述したように低天端上でも砕波が生じており、砕波による影響が底面近傍まで及んでいるためである。

図-7と図-8は、それぞれ、Case1とCase3の鉛直方向の平均流ベクトルを例示したものであり、図-7(a)と図-8(a)は $y/L=0.0$ (高天端部中央)の鉛直平均流ベクトルを、図-7(b)と図-8(b)は $y/L=1.23$ (低天端部中央)の鉛直平均流ベクトルをそれぞれ示している。図-7(a)と図-8(a)の高天端部中央背後域の $x/L=0.3 \sim x/L=1.1$ 付近で上層と中層とで流速ベクトルの大きさ

が周りに比べ急激に大きくなっている。これは、砂留潜堤高天端上で砕波した波が流れ込んでいることを示している。また、図-7(a)と図-8(a)から、2章で前述したように、Case1よりCase3の高天端上で砕波規模が大きいということがわかる。なお、図-7(b)と図-8(b)から低天端部中央背後近傍の $x/L < 1.0$ において、流速ベクトルの大きさには若干差があるものの、平均流は上層、中層、下層ともに沖側へ向かう流れが発生していることが確認される。これは、平面平均流の場合にも表されたように、不陸型砂留潜堤の海水交換面での有効性を示している。

5. 数値解析手法の適用性の検討

実験で計測された砂留潜堤背後の人工浅場上の流動場の機構を解明するために、三次元の数値解析を行った。数値計算には許²⁾によるVOF法にポーラスボディモデルを組み合わせた数値解析手法を用いた。基礎方程式は3次元非圧縮性流体の連続式と運動方程式、および自由表面の形状を模擬するためのVOF関数 F の移流方程式である²⁾。

(1) 波高分布の比較

数値計算手法の適用性を検討するために、図-9にCase1における無次元波高分布(H/H_1)の計算値を示した。実験結果(図-4(a))と比較すると、計算値は、浅場の砂留潜堤背後近傍($x/L < 1.5$)での部分重複波の形成を良好に再現していることがわかる。また、実験では、波長に比べ計測点が十分ではなかったため浅場の岸側では部分重複波の形成が明確にできなかったが(図-4(a))、計算結果からは浅場の全領域にわたって部分重複波の形成が確認できる。

また、図-9の計算値の $x/L=3.0$ 、 $y/L=1.25$ の周辺には部分重複波の形成が弱くなっている。これは、低天端上を透過した波の回折によるものである。

(2) 流れ場の比較

図-10(a)と(b)は、それぞれ、平面平均流の実験値と計算値を例示しており、Case1の上層での平均流ベクトル分布を示したものである。実験値の図-10(a)には、小さい規模の循環流が確認できるが、計算値の図-10(b)においては、明確な循環流は形成さ

れていない。なお、ほとんどの平均流ベクトルの流向は冲向きとなっている等、実験値とは違う結果となっている。これは、計算値に用いられた平均流ベクトルの値は、造波開始から $14T \sim 16T$ の2周期分のデータで求められたが、本計算での広い解析領域を考慮すると、まだ流速場が定常状態に達していないのが原因ではないかと思われる。

6. 結言

本研究では、不陸型砂留潜堤沖側部に持つ人工浅場での波の変化や流況特性について水理模型実験に基づいて検討を加えると共に、3次元直接数値解析手法の適用性の検討を行った。本研究で明らかとなった結果を以下に要約する。

- 1) 無次元高天端水深 R^H/H_1 や無次元低天端水深 R_L/H_1 を調節することにより砂留潜堤背後域の浅場の静穏度の確保が可能であると考えられる。
- 2) 不陸型砂留潜堤背後の浅場での循環流は、砕波発生と密接に関係する無次元天端水深 R^H/H_1 や R_L/H_1 に大きく支配される。
- 3) 低天端部では強い冲向き流れが発生しており、不陸型砂留潜堤は海水交換の面で利点がある。
- 4) 本計算手法による波高分布の計算値は実験値との対応性は悪くないが、平均流についてはさらなる計算時間があるなど計算の効率化も念頭に入れた計算手法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 鷺見浩一・牛木賢司・水谷法美・岩田好一朗：人工干潟の砂留潜堤周辺の流況と波高分布に関する実験的研究，海洋開発論文集第，Vol.17，pp.293-298，2001。
- 2) 許東秀：潜堤による多方向不規則波の砕波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究，名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士論文，177p，2000。
- 3) 宇多高明・小俣篤・横山揚久：人工リーフ周辺に生じる海浜流と地形変化，海岸工学論文集，第34巻，pp.337-341，2001。