

潜水浮防波堤背後の海浜地形変化について

岩田好一朗*・水谷法美**・下田直克***・村上宗隆****

1. 緒 言

近年の沿岸開発において、波浪制御とともに海岸線の保全、特に人工養浜砂浜の維持保全が、重要な課題となってきた。波浪制御の面からは、従来の着定式の構造物に変わりうる構造物として、浮防波堤が挙げられる。浮防波堤は、建設例が少ないものの、理論的・実験的研究が進んでおり、緊張係留することにより波浪応答を少なくできること、圧気室などを設けることにより応答特性も自由に変えられること（岩田ら、1988）、などがすでに知られている。さらに潜らせることにより、景観面で優れ、かつ海水交換性に富む没水構造物になり得ることからも、優れた構造物であるといえる。しかし、浮防波堤が、周辺の地形、とくに汀線付近の地形にどういった影響を及ぼすかについては、研究が極めて少なく（三井ら、1977）、解明すべき多くの問題点を残している。そこで本研究では、潜水浮防波堤を取り挙げ、二次元と三次元実験を行って、潜水浮防波堤の設置ともなり海浜地形の変化特性を、波浪状況、設置位置と関連づけながら明らかにしようとするものである。

2. 水理模型実験

2.1 実験条件と実験方法

水理模型実験は、名古屋大学工学部の三次元平面水槽（0.6 m×10 m×30 m）と、技研興業㈱の二次元造波水槽（1.0 m×1.5 m×50 m）の2つを使用して行われた。実験には中央粒径 $d_{50}=0.38$ mm の珪砂を使用した。波作用前の初期地形は、 $\tan \theta=1/10$ の一様勾配斜面とした。発生波は、全て規則波であり、浮体が設置されない場合、沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.06$ の時は侵食型海浜、それ以外の波の時は、堆積型あるいは中間型海浜地形が形成されるように決定した（表-1 参照）。

浮防波堤として二次元実験では、高さ（ D ）10 cm×幅

表-1 実験諸元

	T(s)	H_0/L_0	d/h	l_x/L	D/h	d_{50}/H_0	A/l_x
2-dimensional Experiment	1.0	0.007	0	0.63	0.286	0.0039	
	1.8	0.019	0.288	}	}	0.0040	
		0.030	0.333			0.0081	
		0.060	0.358			0.0111	
3-dimensional Experiment	1.0	0.007	0	0.63	0.500	0.0040	0.22
	1.4	0.020	0.10	}	0.588	0.0081	}
	1.8	0.060	0.25		0.833	0.0111	
			0.33	1.65			

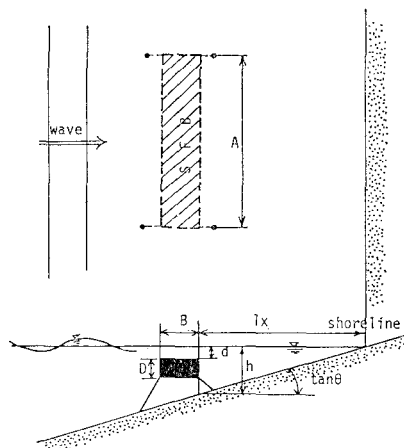


図-1 実験状況と記号の説明

（ B ）30 cm×幅（ A ）99 cm のアクリル製浮体、三次元実験では、形状の異なる3個のアクリル製浮体（10 cm×30 cm×67 cm, 10 cm×30 cm×130 cm, 5 cm×30 cm×130 cm）を使用し、浮防波堤を一基のみ設置した時の海浜地形変化を測定した（図-1 参照）。浮防波堤の係留は、浮体四隅に直径 2 mm のステンレスワイヤーを取り付け、係留索が、水平軸に対して約45度の角をなすように緊張係留した。浮体の潜水深・水深比 d/h 、汀線からの設置距離・波長比 l_x/A などの諸元を表-1に示す範囲で変化させた。なお、表-1で、 H_0 と L_0 はそれぞれ沖波の波高と波長、 T は波の周期、 L は浮体設

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 技研興業（株）総合技術研究所

**** 学生員 名古屋大学大学院 工学研究科

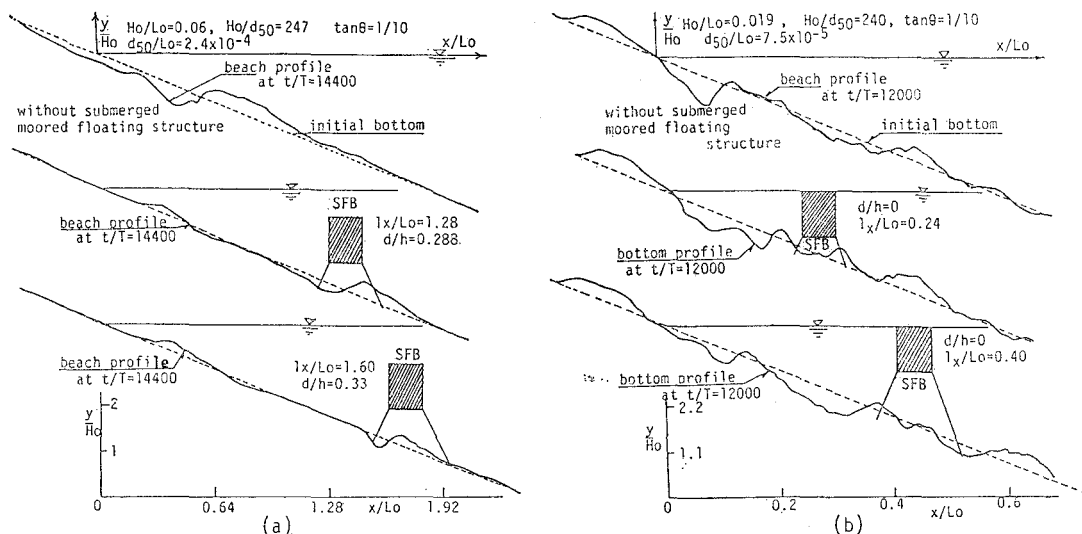


図-2 浮防波堤の設置にともなう地形変化(二次元実験)

置水深 h における波長である。

発生波の水位変動を電気容量式水位計で計測した。また波は、海底地形がほぼ平衡地形になるまで造波させ、波の作用にともなう海浜地形の経時変化（4時間～20時間）を測定した。また、代表的なケースについては、電磁流速計により底面近傍の流速を計測し、流速場の平面特性を求めた。

2.2 次元解析

次元解析によれば、潜水浮体一基による平衡状態の海底地形は、本実験条件の場合は、下記の6つの無次元変量に大きく支配されるものと考えられる。

$$\left[\frac{H_0}{L_0}, \frac{D}{h}, \frac{d}{h}, \frac{l_x}{L}, \frac{d_{50}}{H_0}, \frac{l_x}{A} \right] \dots\dots(1)$$

なお、二次元実験の場合は、 l_x/A は省略される。本論では、二次元実験については、 l_x/L と d/h の効果、三次元実験では、 l_x/A , d/h , D/h の効果を中心に検討する。

3. 実験結果とその考察

3.1 二次元実験

潜水浮防波堤の設置に伴い、浮体設置付近から汀線までの海底地形はかなり変化することが全実験ケースで認められた。汀線付近の地形に着目すると、浮防波堤を設置しない時に顕著な侵食型海浜であったものが、浮防波堤の設置に伴い汀線付近での堆砂が進み、最終的にはほぼ初期の海底地形に復元することが認められた（図-2 (a) 参照）。これは、浮防波堤の設置により、入射波が強制的に碎波させられて減衰し、このため向岸方向の漂砂量が汀線近傍で増大したためである。なお、図-2 は平衡状態に達したと認められる断面地形を示したもので

ある。

堆積型海浜の場合は、潜水浮防波堤の設置にともなう海浜地形は変化するが、図-2 (b) に示すように、堆積型海浜としての基本特性は保持される。また、中間型海浜の場合は、本論では図示していないが、堆積型海浜への移行が多くのケースについて認められた。

海底地形は、式(1)に示した6つの無次元変量の変化に伴って、複雑に変化するが、このうち D/h , d/h と l_x/L により大きく左右される。一般に、 D/h を大きく、 d/h と l_x/L を小さくすると、潜水浮体による入射波の碎波点、碎波の規模と碎波後の波の減衰が著しく変化するので、浮体のない場合の地形と比較すると、かなりの変化が海底地形に認められる。本実験では、 $H_0/L_0=0.06$ の侵食型海浜の場合、 $l_x/L \leq 2.5$ で $d/h=0$ および $l_x/L \leq 2.2$ で $d/h \leq 0.33$ の時、 $H_0/L_0=0.02$ の中間型海浜の場合は、 $l_x/L=1.1$ で $d/h=0$ および $l_x/L \leq 0.9$ で $d/h \leq 0.33$ の範囲に対して海底地形は大

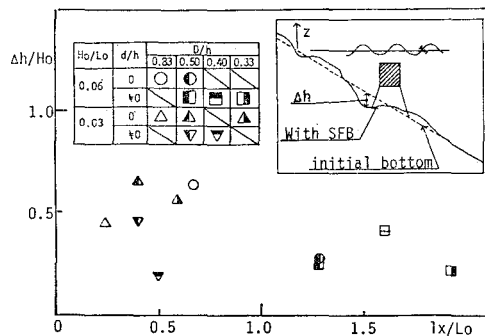
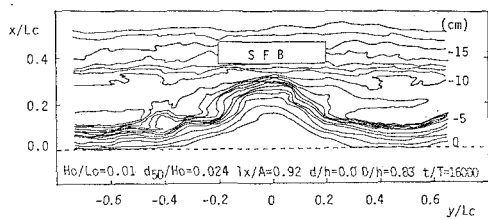
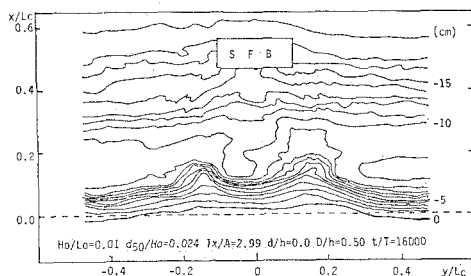


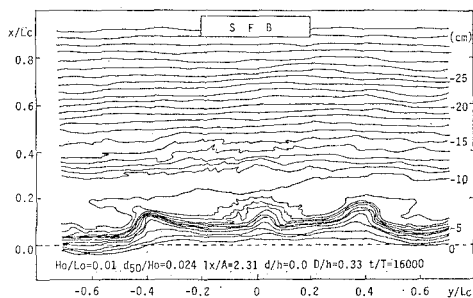
図-3 浮防波堤背後の洗掘状況(二次元実験)



単頭の尖角州

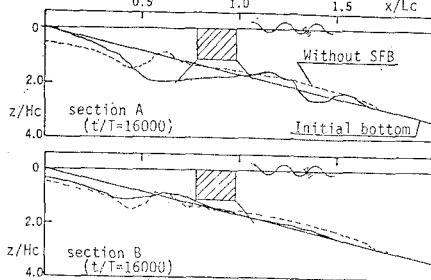
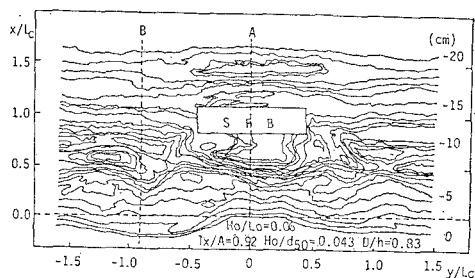


双頭の尖角州



三頭の尖角州

図—4 尖角州の分類



図—5 侵食型海浜への設置例

傾向がみられたが、沖合砂州上に浮体を設置すると、洗掘が大きくなることが確認された。

3.2 三次元実験

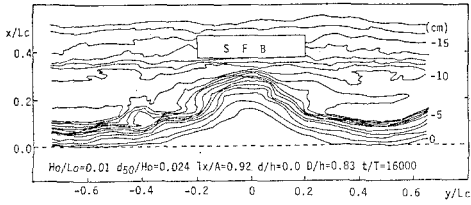
浮防波堤を設置しない状態で堆積型海浜及び中間型海浜となる場合は、浮防波堤を設置することにより、堤体岸側背後に尖角州 (cusped spit) の形成が確認された。これらの尖角州の形状は、①単頭の尖角州、②双頭の尖角州、③三頭の尖角州の3つに大別される。それぞれの代表的な地形を図—4に示す。なお、図中の L_c は $1/10$ 傾斜面前面での一定水深 (40 cm) での波長であり、平面地形はほぼ平衡状態に達したと思われる地形を図示したものである。

浮防波堤を設置しない時に、侵食型海浜となる場合においては、汀線付近には、潜水浮体の設置に伴う顕著な砂の堆積作用は認められなかった。図—5の断面Bの地形をみると、確かに浮防波堤の設置によって顕著な変化はみられない。しかし、浮防波堤中央の断面Aの地形においては、浮防波堤近傍の海底では侵食が進むものの、汀線付近では侵食は抑えられ、ほぼ初期状態が維持された。このことから、浮防波堤は、暴風型海浜においては、汀線近傍の侵食防止効果を発揮することがわかる。なお、図—5の H_c は $1/10$ 傾斜面前面での一定水深 (40 cm) における入射波の波高である。

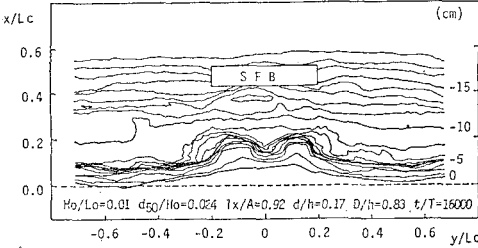
潜水浮防波堤によって形成される背後地形は、着定式離岸堤の背後に形成される地形と類似する。しかし、その地形を支配するパラメータは、着定式離岸堤と異なる。すなわち、従来の異形ブロックによる離岸堤の場合は、設置距離と堤体幅の比 l_d/A が支配パラメータといわれている (篠田ら, 1966) が、浮防波堤の場合に

大きく変動することが認められた。

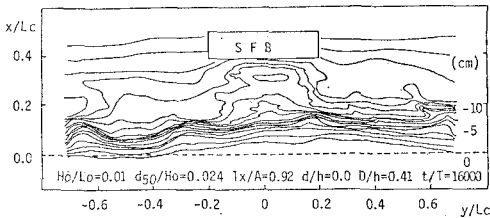
浮体周辺の地形変化については、全実験ケースにおいて浮防波堤の岸側で侵食が起り、その侵食された砂が浮防波堤の真下付近に著しく堆積しているのがわかる (図—2 参照)。これは、浮体上部で入射波が碎波する場合は、碎波が一種の噴流のように海底に衝突するため、浮体の岸側底面が洗掘される。そこで巻き上げられた砂の一部が、浮防波堤下部の沖方向の流れによって沖側に輸送されるからである。この洗掘は侵食型、中間型海浜において顕著であり、侵食型海浜においては、汀線からの設置距離が小さいほど、また潜水水深が小さいほど最大洗掘深は大きくなり、沖波波高 H_0 で無次元化した最大洗掘深 ($\Delta h/H_0$) の最大値は、図—3に示すように 0.65 であった。また、浮防波堤の下部の水深が沖波波高よりも大きい場合は、はっきりとした洗掘は、認められなくなる。中間型海浜においては、ほぼ侵食型海浜と同様の



(a) $d/h=0$, $D/h=0.83$ の場合



(b) $d/h=0.17$, $D/h=0.83$ の場合



(c) $d/h=0$, $D/h=0.41$ の場合

図-6 d/h および D/h の効果

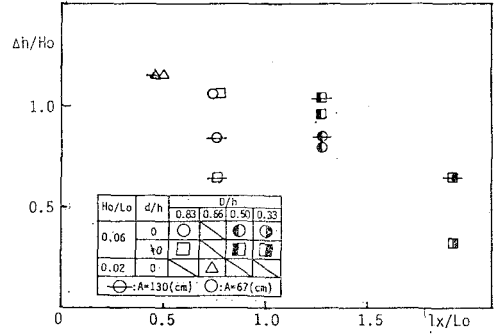


図-7 浮防波堤背後の洗掘状況(三次元実験)

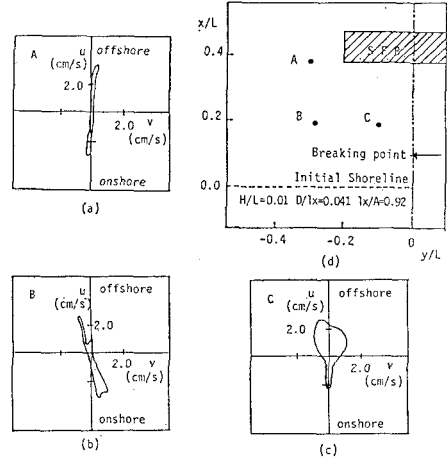


図-8 浮防波堤周辺の底面近傍における流速ベクトルの時間変化の例

は、式(1)に示すように、 d/h , D/h によっても大きく支配される。

図-6 は d/h と D/h の変化に伴う平衡状態の地形の変化を例示したものである。潜水深 d/h を大きくすると、堆積型海浜においては浮防波堤背後の堆積を抑え、侵食型海浜においては浮体背後の局所的な侵食を小さくする傾向がある(図-6 (a) と (b) を参照)。浮体背後の侵食は、二次元実験と同様に堤体天端で碎波が生じ、波頂部が堤体背後に突っ込むため、砂が巻き上げられるためであることが実験により確認された。したがって、浮防波堤背後の堆積量は碎波の規模に影響を及ぼす潜水深 d/h によって調節できる。

D/h は d/h 以上に重要なパラメータである。図-6 (b) と (c) に例示されているように、 D/h が大きくなると、浮防波堤による波の遮蔽率が大きくなり係留索も短くなるので、波の回折効果が顕著になり、このため浮防波堤の性質も着定式の離岸堤の性質に近づく。逆に D/h が小さくなると、回折効果により堤体背後に回り込んでくる流れが顕著ではなくなり、尖角州も形成されにくいことが明らかである。

以上の無次元量の他にも、実験砂の中央粒径 d_{50}/H_0 , $1x/L$ などが挙げられるが、今回の実験からは、その効果ははっきり考察することは難しく、今後の検討課題として残された。

浮防波堤背後には、碎波の影響により局所的な洗掘が生じる。無次元最大洗掘 $\Delta h/H_0$ を図-7 に示した。 d/h , $1x/L_0$, D/h の値により変化するが、 $\Delta h/H_0$ は最大で 1.15 程度になり二次元実験の場合より大きい。これは、三次元実験では、二次元の場合と異なり、浮体中央部で碎波の規模が大きくなり、このため局所的な洗掘が大きくなったものと考えられる。

3.3 浮防波堤周辺の砂の移動と尖角州の形成領域

いうまでもなく、浮防波堤周辺および背後の砂の移動は、波と流れ(wave-induced flow)に支配されるが、異形ブロックの着定式離岸堤の場合より波と流れの状況は複雑である。異形ブロックの着定式離岸堤の場合には、一般に波の回折効果により堤体背後に死水域が生じ、明瞭な流れの循環セルが形成される。一方、潜水浮

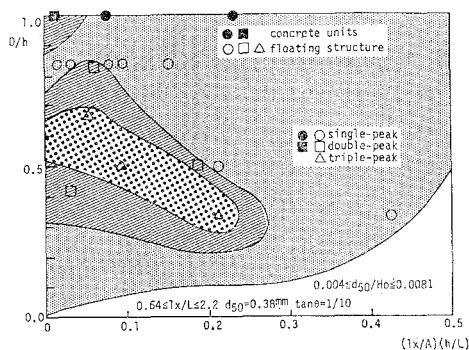


図-9 尖角州の発生領域

防波堤の場合では、回折効果は、 D/h の増大と l_x/A と d/h の減少に伴い、大きくなるものの、上部と下部に水域があり、波の伝達や流れの通過が大きいので明確な死水域は形成されず、着定式の離岸堤のような循環セルは一般的には形成されない。

図-8 は、浮体背後の3地点における底面近傍の流速ベクトルの時間変化を示した一例である。浮防波堤のほぼ真横にある地点Aでの流速ベクトルの時間変化が、岸沖方向に対して一次元的な運動をしているのに対して、浮防波堤背後の地点Cにおいては時間変化は楕円形を示し、 D/h の値が大きくなると、その時間変化は、岸沖方向に短く沿岸方向に長くなる傾向が確認されている。このように、浮体周辺における底面近傍の流速ベクトルは場所的により変化する。

浮防波堤を設置しない場合で、堆積型海浜や中間型海浜となる時、潜水浮防波堤の設置にともない、汀線付近に形成される尖角州 (cusped spit) の出現パターンをとりまとめて示したのが 図-9 である。同図では、縦軸に透過の程度をしめす D/h 、横軸に回折の効果を表す $(l_x/A)(h/L)$ をとった。同図には比較のため篠田ら

の着定式の離岸堤の実験結果 (図中、●, ■印) も示してある。なお、図左上の双頭型の領域は、着定式の離岸堤のような死水域が形成される領域である。同図は、 $\tan \theta = 1/10$, $0.64 \leq l_x/L \leq 2.2$ で $0.004 \leq d_{50}/H_0 \leq 0.008$ の限られた実験範囲に対する値であるが、単頭型、双頭型と三頭型の発生領域の概略が与えられる。

4. 結 言

本論では、潜水状態の緊張係留された浮防波堤を取り挙げ、その海浜地形に与える効果を考察した。

堆積型海浜に浮防波堤を設置した場合には、浮防波堤背後に尖角州地形が形成される。その形状は、単頭、双頭、三頭の3つに大別され、これらの地形の出現特性は、波の回折と透過を示す l_x/A , D/h と d/h により大きく支配される事が判明した。

侵食型海浜に浮防波堤を設置した場合には、浮体周辺に局所的な侵食が生じるが、浮防波堤背後の汀線近傍において堆砂が進み、ほぼ初期地形の段階に汀線がとどまることが確認された。

これらの結果から、浮防波堤は海岸侵食対策構造物としての機能を具備していることが判明した。浮防波堤は施工例も少なく、信頼性が必ずしも高くはない事を合わせ考えると、閉鎖性内湾で来襲波浪の小さい海域における海岸侵食の防止、あるいは人工養浜の土砂の流出防止の一工法として充分検討に値するものと著者らは判断している。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・中山和典・上田敏隆・下田直克 (1988): 潜水圧気型浮防波堤の消波効果と波浪動揺に関する研究, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 567~571.
- 篠田謹爾・池田 茂 (1972): 離岸堤による砂浜変形の特性, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 146~150.
- 三井 宏・越智 裕 (1977): 浮防波堤背後の海岸地形変化について, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 175~179.