

潜水圧気型構造物周辺の流速場と海底地形変化に関する研究

岩田好一期*・金 度 三**・村上宗隆***・川崎浩司****

1. 緒 言

近年、わが国では、海岸線を面的に防御する工法が多く用いられている。日本の海岸は、前浜勾配が急で、浅海域に消波構造物を設置する場合でも大規模な構造となる場合が多いため、離岸距離が短くなっているのが現状である。離岸距離が長くなった場合でも、施工性・経済的に優れた構造物の一形式として、海底に係留された浮体構造物を挙げる事ができる。潜水係留浮体は、当然波浪制御機能を有しているが、他に、(1) 海底面との間に遊水域を有するため海水交換性が良い、(2) 天端が静水面下にあるので景観を損なわない、(3) 圧気室を具備する浮体の場合は、圧気室内の空気量を調節することにより構造物の動揺を容易に制御できる、といった利点をもあわせて有している。潜水状態の係留圧気型浮体については、浮体による波の変形、係留索の張力および圧気室内の空気圧変動特性などが研究されているが(岩田ら、1989; 金, 1993)、海浜制御構造物として利用する場合に必要な浮体周辺の流速場、特に浮体上で碎波する場合の流速場および海底地形変化に関する研究は、極めて少ない(岩田ら、1990; Shimoda et al., 1990; 村上ら、1991)。そこで、本研究では一定水深の二次元波動場におかれた圧気型浮体周辺の碎波による流速場および海底地形を水理実験で詳細に計測し、流速場の特性および海底地形変化の機構を明らかにしようとするものである。

2. 水理模型実験

水理実験を、名古屋大学の二次元鋼製造波水槽(長さ25m×幅0.70m×高さ0.95m)を用いて行った。静水深 h は50cmで一定に保ち、周期 T は2種類(1.2秒と1.6秒)とした。発生波高は、後述の予備実験(実験I)では、各周期に対して5~6種変化させたが、本実験(実験II)では、その中から数ケース抽出し、波形勾配 H_1/L (H_1 :入射波高, L :水深50cmでの波長)として、0.031と0.023の2種類を採用した。なお発生波は全て規則波

であり、全ての発生波は構造物の天端水域で碎波する。実験に用いた浮体模型はアクリル製であり、その寸法は、長さ B が68cm、高さ D が34cmで、圧気室の有るもの(圧気室長さ B_1 が39.2cm、圧気室高さ h_2 が32cm)と無いものの両方を用いた。この模型を鋼製アングルで剛的に固定した場合と、水路床と係留索(ワイヤーロープ $\phi=5$ mm)のなす角が 45° になるように緊張係留した場合の2種類に対して実験を行った。また圧気室内の空気高さ h_2 を7cmと14cmの2種類、浮体の潜水深 h_1 を5cmと10cmの2種類それぞれ変化させた。

(1) 移動床実験

移動床実験では、浮体下部を中心にして水平方向約3mの範囲に亘り10cm厚さに砂(中央粒径 $\phi=0.38$ mm)を投入し、移動床を設置した(図-1(a))。まず予備実験(実験I)を行って、地形変化のパターンを調べた。すなわち、予備実験では、2種類の周期(1.2秒と1.6秒)に対して波高 H を3cmからほぼ1.5cm間隔で増大させて5~6種類変化させた。そして、約1時間波を作用させて構造物周囲の海底地形のパターンの分類を行った。なお予備実験の種目は約100ケースとなった。そしてこの予備実験結果をもとにして、特徴的な砂移動がみられるケースを表-1に示すように、6ケース抽出し(実験

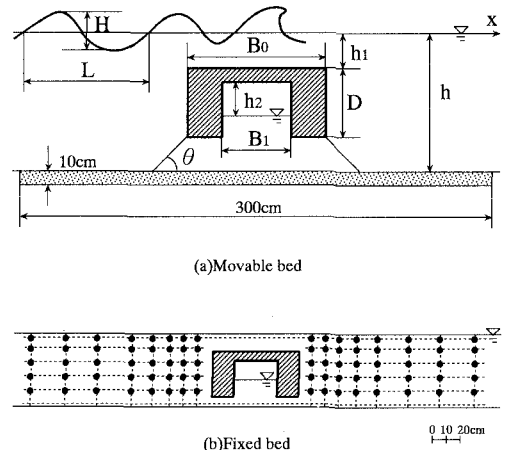


図-1 水理模型実験緒元

* 正会員 工博 名古屋大学 工学部 土木工学科

** 正会員 工博 韓国海洋大学校理工学大学院 港湾運送工学科

*** 正会員 工修 玉野総合コンサルタント(株)設計第1部第2課

**** 学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

表-1 実験諸元 (実験II)

Case	H_1 (cm)	T (sec.)	H_1/L	h_1 (cm)	h_2 (cm)	設置状況
1	6.3	1.2	0.031	5	14	浮体
2	7.1	1.6	0.023	5	14	浮体
3	7.1	1.6	0.023	10	14	浮体
4	7.1	1.6	0.023	10	7	浮体
5	7.1	1.6	0.023	10	7	固定
6	7.1	1.6	0.023	10	7	固定

II), 各実験ケースで0.5, 1, 2, 4時間の波作用後に現れる海底地形を測定した。波作用後1~2時間程度でほぼ海底地形が平衡状態になった。底面地形の計測には、造波をやめた後、ポイントゲージで正確に測定した。地形は水槽の幅方向に若干変化したがほぼ2次元地形と見なすことができた。

(2) 固定床実験

表-1に示す移動床実験(実験II)の全てのケースに対して固定実験を行い、水平・鉛直方向流速(u, w)を電磁流速計(ALEC ELECTRIC製: ACP-200 P)で、水位変動 η を電気容量式水位計(計測技研製: C-300, C-500)で計測した。流速の計測は詳細に行い、浮体から前後1/2波長程度れた範囲で水平方向に合計16測線を取り、各々の測線で水深方向に10cm間隔で5地点測定した。さらに底面では、測定間隔を3~5cmに縮めて92~110

地点で測定し(図-1(b)参照), 1ケースにつき、合計172~190地点の流速(u, w)を計測した。また、これと平行して、ビデオレコーダー(30コマ/秒)で流れの状況を撮影した。

(3) 解析方法

発生波のすべてが構造物天端水域で砕波して波形が乱れるため、理論的に流速を計算することはできない。このため本研究では実験結果を使って考察することにした。まず、造波開始後、計測を開始してから、流速の振幅が一定となった後、5波を抽出し、その5波の時間平均値として定常流(\bar{V})を定義して求めた。

$$\bar{V} = \frac{1}{5T} \int_0^{5T} V(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

また、その5波の平均最大振幅を V_{max} として定義して求めた。なお流速 V は流速計で計測された x 方向と z 方向の流速 $u(t)$ と $w(t)$ ベクトル合成して求めた。

3. 浮体周辺の流速場

実験によれば、図-2と図-3に例示するように、多少の差異はあるものの、全ケースで、浮体天端で岸向きに、下部で沖向きに卓越している循環流が存在していることが確認された。以下幾分詳しく流れの状況について記述していく。

(1) 浮体岸側の流れ

浮体岸側では、天端上で砕波が生じるため、静水面付

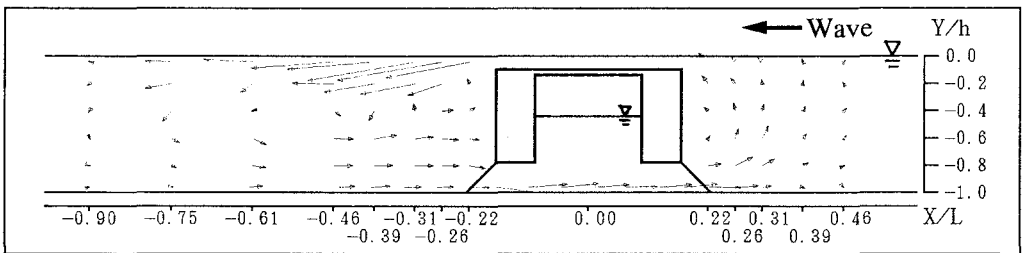


図-2 構造物周辺の定常流 (ケース1)

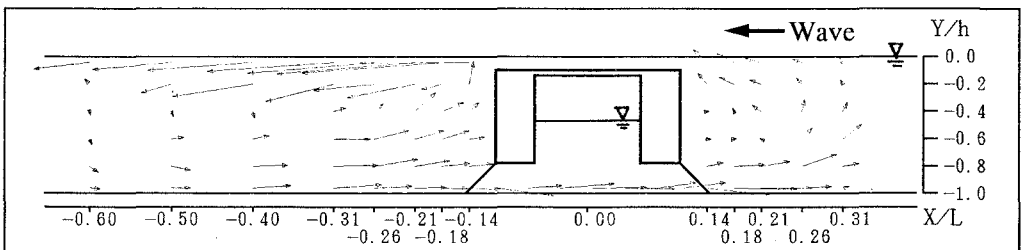


図-3 構造物周辺の定常流 (ケース2)

近で強い岸向きの定常流が生じる。入射波の特性や、浮体の設置条件によらず、浮体幅 ($B/L=0.22, 0.33$) 程度離れた地点までは、ほぼ一定の大ききで岸向きに流れ、それより岸側では、一定の割合で小さくなっていることがわかる。この定常流の大ききは、入射波の特性、浮体の設置条件等により変化する。入射波高が同じ場合には波形勾配が小さくなるほど、また浮体天端水深が小さくなるほど、定常流は大きくなることの本実験で認められた。静水面近傍の岸向き定常流の大きき $|\bar{V}|$ が、入射波の波形勾配 H_1/L_1 と浮体天端の水深と静水深の比 h_1/h で表現できるものとする、今回の実験の範囲では、図-4に示すように、

$$\frac{|\bar{V}|}{\sqrt{gh}} = 0.0178(H_1/L_1)^{-1.0}(h_1/h)^{-5/4} \dots\dots\dots (2)$$

で近似できる。

浮体岸側の底面付近では、静水面近傍と異なり沖向きの定常流が生じる。この流れは、静水面付近の岸向き流れと同様に、浮体幅 ($B/L=0.22, 0.33$) 程度離れた地点から、ほぼ一定の値で浮体近傍まで流れる。この大ききは、静水面近傍の岸向き流速の15~25%程度で、浮体下部の遊水域の高さ h_2 が小さいほど、強くなる傾向が認められた。

(2) 浮体下部の流れ

浮体の下部には、沖向きの定常流が存在する。浮体下部ではほぼ一様で、どのケースでも、浮体岸側の沖向きの定常流に対して、大きな値となる。これは、浮体による水深の急縮によるものと考えられ、 $h_2/h=0.22$ の場合は、浮体岸側の定常流の1.6倍となるのに対して、 $h_2/h=0.12$ の場合には、3.1倍より大きくなる。

(3) 浮体沖側の流れ

浮体沖側には、図-2と図-3に例示しているように、

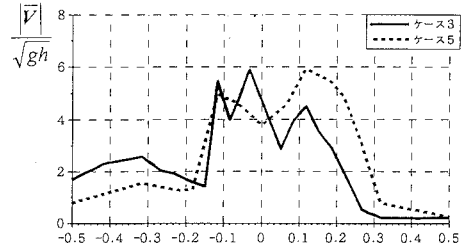


図-5 底面近傍の無次元定常流速 (絶対値)
(Case 3: Moored; Case 5: Fixed)

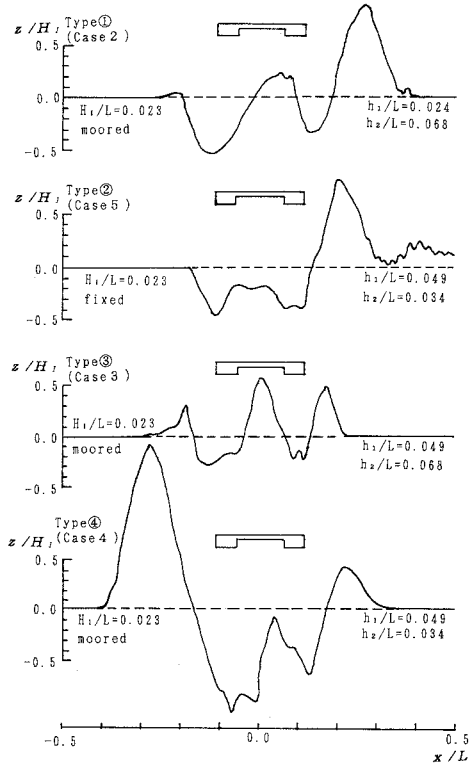


図-6 浮体周辺の海底地形変化

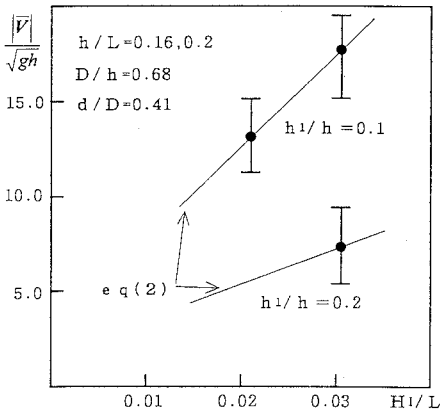


図-4 浮体岸側静水面付近の無次元流速と波形勾配
(●は各ケースにおける平均値を示す)

特に底面近傍において、強い沖向きの定常流が生じる。この定常流は、浮体下部の沖向きの定常流によって引き起こされるもので、浮体による水深の急縮のため、浮体から離れるに従って減少してゆく。浮体が固定されている場合に比べ、浮体が動揺する場合のほうが沖向き流れの流速は、図-5に示すように、早く小さくなる。このことは後述するように、浮体を動揺させることによって、浮体下部の砂の沖合いへの流出を低減させる効果がある事を示している。

4. 浮体周辺の海底地形変化

浮体部に形成される地形は、入射波の条件、浮体の設置条件等により異なるが、図-6に示すように、概ね4つのタイプに分類される。すなわち、浮体の沖側に堆積するタイプとして、①浮体の沖側端部が局所的に洗掘され、洗掘された箇所の両側に堆積する局所洗掘型、②浮体岸側端下部あるいは下部全体が侵食され、沖側に砂が堆積する全面侵食型、また、浮体の岸側に堆積するタイプとして、③浮体端部が侵食され、岸側、沖側、浮体下部に堆積が生じる中央堆積Ⅰ型、④浮体端部が侵食され、岸側と浮体下部に堆積が生じる中央堆積Ⅱ型、の4つである。沖側に砂が堆積するタイプ(①、②)は、浮体を固定した場合、または浮体の運動が非常に小さい場合に多く出現した。そして浮体の運動が大きくなるにつれて、岸側に堆積する量が増加し、③と④のタイプの地形が多く現れるようになる。この4つの地形変化のパターンの発生条件を決定するには、数多くの実験が必要であり、今後更なる検討が必要である。

漂砂形態は、ほとんど掃流で、1周期の間に岸・沖への移動を繰り返す。沖側に砂が堆積する場合には、浮体の沖側で浮遊漂砂が確認された。また、浮体中央部に堆積を生じる場合には、堆積土砂の上部で流れの剥離が起り渦が生じ、この渦の影響で、浮体両端部で砂が巻き上げられ浮遊漂砂が生じることが確認された。

5. 地形変化と流速場

図7に、岸側に堆積するタイプ(ケース3)と、沖側に堆積するタイプ(ケース5)の地形、および、図-8に

同一の条件下での固定床実験で得られた底面での定常流(\bar{V})と最大流速(V_{MAX})を示す。定常流は、ケース3と5共に、ほぼ同じ大きさであるのに対し、最大流速は、沖側に堆積するタイプの方が構造物下部と沖側でやや大きくなっていることがわかる。また、定常流・最大流速共に、係留した場合には、浮体岸側で最大値を取っているのに対して、浮体を固定した場合には、浮体沖側で最大値を取ることがわかる。さらに、矩形浮体と比較して、中央部に圧気室を有する浮体のほうが、下部の流速を低減させる効果があることもわかっている。堀川ら(1966)が示した移動限界流速と比較すると、図-8に示すように、定常流は全ての地点で、また最大流速についてもほとんどの地点で全面移動限界流速よりも小さい値を示している。しかし、構造物端部の最大流速は全面移動限界流速とほぼ同じか、あるいはそれより大きな値となっている。この事は、砂移動は浮体下部でまず最初に引き起こされている事を示している。

一般的に、移動床底面を $z(x, t)$ 、漂砂量を $q(x, z, t)$ とすると、移動床底面の変化量は連続式より、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\nabla \cdot q \dots\dots\dots (3)$$

となる。振動流成分によって生じた掃流漂砂は、定常流によって輸送されると考えるべきであり、漂砂量 q は、パワーモデルの概念では定常流速に比例するので、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\nabla \cdot q \propto -\nabla \cdot \bar{V} \dots\dots\dots (4)$$

と表せる。このことは、定常流速の空間勾配が負になる地点は堆積傾向に、逆に正になるところは侵食傾向になる事を示している。定常の空間勾配と、海底地形をつき

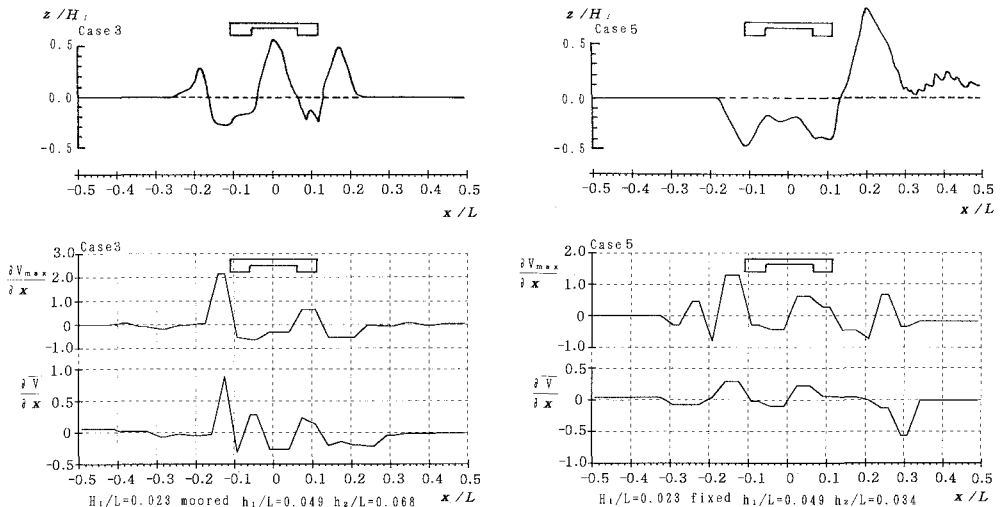


図-7 海底地形変化と定常流の空間勾配

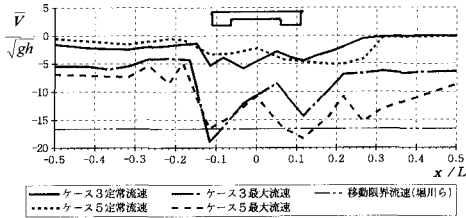


図-8 底面近傍の定常流と最大流速

あわせた図-7(a)と(b)によれば、下記のことが判明する。

浮体岸側の沖向き流れは、定常流・最大流速共に移動限界流速よりも小さいため、砂移動は生じないと考えられる。浮体周辺になると、急縮の影響のため、最大流速が移動限界流速より大きくなり、浮体岸側端下部では、掃流漂砂が引き起こされる。掃流漂砂は定常流によって輸送されるため、浮体岸側端下部の前後の、定常流が減少している箇所（定常流の空間勾配が負となる箇所）に堆積する。浮体を係留した場合、浮体の岸側と中央部に、また固定した場合は浮体の中央部に、定常流の空間勾配が負となる地点があり、このためこの位置に堆積するものと考えられる。

最大流速は、浮体下部で若干小さく減じた後、浮体沖側端で再度移動限界流速を超えるため、掃流漂砂が生じる。この掃流漂砂も定常流の空間勾配が負となる箇所に堆積するため、浮体を係留した場合には、浮体付近から沖側に堆積する。しかし、浮体を固定した場合には、 $x/L=0.25$ 付近までは定常流が減少しないため、堆積する箇所も係留した場合に比べ沖側となる。

浮体を固定した場合は堆積箇所と空間勾配が負となる地点が沖側で異なるが、これは、地形変化が大きくなったため、固定床で計測した流速と移動床で計測した流速と移動床で実際に生じていた流速の間に若干の相違があったためであると考えられる。

6. 結 言

本論では、潜水圧気型構造物を主に取りあげ、砕波に伴う底面地形の変化特性について水理実験で検証を加えてきた。潜水圧気型構造物周辺では、構造物天端で岸向き、その下部で沖向きの循環流が形成されることが明らかになった。今回の実験条件の範囲内ではあるが、この流れは、波形勾配と、潜水深と静水深の比でほぼ定量的に表す事は可能であった。

さらに、潜水圧気型構造物下部には、特徴的な地形が形成され、これらの地形は、(1)局所洗掘型、(2)全面侵食型、(3)中央堆積I型、(4)中央堆積II型の4種類に大別されることが判明した。さらに浮体を動揺させることによって、固定構造物より沖向き流れを押し返すことができ、さらに岸側への堆積を促す事がわかった。今後、さらに検討を加え、漂砂量を定式化して構造物周辺の地形変化を予測する計算手法の開発を行っていく所存である。なお、本研究に際してご協力を賜った当時名古屋大学大学院生浅井正君（現運輸省港湾技術研究所）に深甚の謝意を表す次第である。

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特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 567-571.
- 岩田好一朗・水谷法美・下田直克・村上宗隆 (1990): 潜水浮防波堤背後の海浜地形変化について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 414-418.
- 金 度三 (1993): 圧気型構造物による波の変形および波に構造物の動的応答に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, p. 192.
- 堀川清司・渡辺 晃 (1966): 波による砂移動に関する一考察, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 126-134.
- 村上宗隆・水谷法美・岩田好一朗・下田直克 (1991): 潜水浮防波堤周りの海浜流場と海浜地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 426-430.
- Shimoda, N., N. Murakami and K. Iwata (1990): Beach Erosion Control By Submerged Floating Structure. Proc. 22nd Conf. ICCE. pp. 2740-2753.