

沖合人工島の設置位置による 海浜変形の相違について

THE DIFFERENCE OF BEACH PROCESS ACCORDING TO OFFSHORE DISTANCE OF ARTIFICIAL ISLAND

申 承鎬¹・入江 功²・一田 剛³
Seungho SHIN, Isao IRIE and Tsuyoshi ICHIDA

¹学生会員 工修 九州大学大学院工学研究府海洋システム工学専攻(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

²正 会 員 工博 九州大学教授 工学研究院海洋システム工学専攻(同 上)

³学生会員 九州大学大学院工学研究府海洋システム工学専攻(同 上)

In recent years, large scale structures have been built on offshore for utilization of coastal zone as offshore airport and marine terminals. Those big scale structures, however, may act as significant barriers against wave and severe beach erosion may take place on the coast.

The present study deals nearshore topography change affected by construction of an offshore structure with different distance from the shore. The series of three dimensional movable bed experiments have been examined in detail. Moreover, in order to make clear the relation of nearshore currents and local erosions behind offshore structure, the nearshore currents are calculated by boussinesq equation model with the same scale condition of the experiments.

Key Words : Offshore structure, three dimensional movable bed experiment, local erosion, offshore distance, cusped spit, boussinesq equation, nearshore current

1. はじめに

最近, 海上空港や沖合人工島などのように, 陸域に広大な用地を確保することが困難な場合, これを外洋に面した海上に求めることが行われる。しかし, 対岸が白砂青松の自然海浜である場合には, 人工島設置による海浜変形を最小限に抑えることがミチゲーションの観点からも重要である。

構造物背後の平面的な海浜変形を実験的に取り扱った研究としては, 平面移動床実験自体の煩雑さもあって多くないが, Sinohara and Tsubaki¹⁾, 三村ら²⁾, Sunamura and Mizuno³⁾らの研究などが挙げられる。中でも三村らの実験は離岸堤背後の海浜流および海浜変形を検討しており, 海浜変形モデルの開発においてモデルの検証手段としてしばしば使われている。しかし, このような既往の研究においてもまだ構造物背後の複雑な流体動力学かつ漂砂メカニズムなどが完全に説明できるまでには至っていないし, 特に構造物の離岸距離と構造物背後の侵食, 堆積特性に関する検討はまだなされていない。

人工島背後におけるの漂砂の移動は, 波浪場の特徴や沿岸地形など, 多くの要素に影響されるが, 人工島設置地点から海浜までの距離(対岸距離)と沿岸

方向の規模なども大きな要素であろう。

本研究は, 沖合人工島など(以後沖合構造物と呼ぶ)の岸沖方向の設置位置およびその規模によって海浜への影響がどのように異なるかを, 詳細な3次元移動床実験および実験と同じケースの海浜流数値計算結果を比較検討することで調べたものである。特に, 沖合構造物設置の対岸距離については, 局所的侵食に極大値を与えるような条件があるかについて重点をおいて検討した。

2. 断面2次元および小型平面移動床水槽実験

3次元移動床実験をおこなうにあたり, まず, 断面2次元移動床実験で与えられた諸条件での海浜断面変化の特性を把握した。続いて, 小型平面移動床実験で本実験となる3次元移動床実験のための予備実験を行い, 3次元移動床実験においての側面境界処理の問題を解決し, また, 沖合構造物の離岸距離別の流れや地形変化のおおよその特性を把握した。

(1) 断面2次元移動床実験

実験は, 長さ28m, 幅 0.3m, 高さ0.5mの2次元造波水槽で行った。水路端には, 1/20勾配の斜面を設

置しその上に砂厚0.06m($d_{50}=0.16\text{mm}$)で砂を敷いた。沖合での一様水深は0.3mで、周期1.0s、沖合波高0.05mで造波した。連続砂面計を用いた地形の測定は図-1のような時間間隔でおこない、断面図および漂砂量を算出し、また、造波4時間の時には濁度計を用い、碎波帯内(4箇所)・外(3箇所)の浮遊状態も把握した。

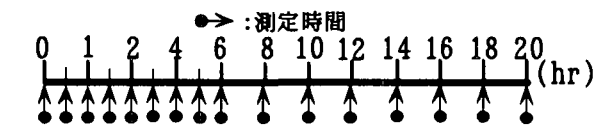


図-1 断面2次元移動床実験の地形測定時間

実験過程で砂れんの形成は、碎波点付近から始まり、4時間までには時間とともに沖方向へ発達して3.5mに達した。その後徐々に成長し10時間以降には4.4m(水深約0.22m)になってそれ以上拡大しなかった。

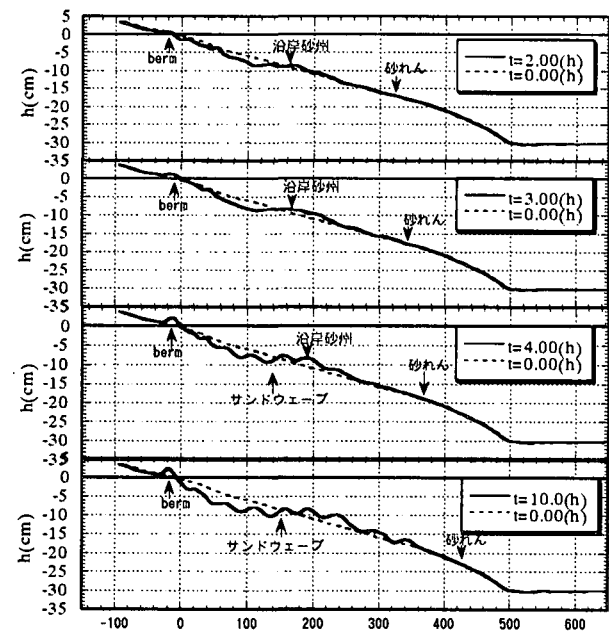


図-2 断面形状の変化(2, 3, 4, 10時間)

図-2は造波後2, 3, 4, 10時間目の断面形状を示したもので、砂れんの矢印は砂れんの沖合限界を示す。図からわかるように造波3時間後には、バーム、沿岸砂州、砂れんなどの典型的な自然海岸の断面形状が形成された。4時間頃に砂の移動が少なくなりかなり安定した断面が形成されたが、さらにサンド・ウェーブが現れ始め8-10時間後にははっきり目立つようになった。3次元の本実験において、構造物だけの影響を取り出すためには自然海浜を作り出す必要があり、初期1/20勾配から造波4時間後の準平衡状態の地形を構造物を設置するのに適している断面と考え、準平衡状態と仮定した。また、沖合での砂移動限界水深は0.22mとした。

(2) 小型平面移動床実験

3次元移動床実験において長時間定常の波条件を保つためには、両側の境界処理問題および構造物がもたらす乱反射による攪乱を防ぐ方法について検討が必要になるため、長さ2.5m、幅1.65m、深さ0.3mの小型平面水槽を用い、3次元移動床実験の1/3スケールの相似実験をおこなった。水槽の内部には $d_{50}=0.09\text{mm}$ のガラス・ビーズで1/20の一様勾配を造って直角入射の条件で波を作用させた。諸条件は表-1に示す。

表-1 小型平面移動床実験の諸条件

沖合構造物の離岸距離 (設置水深)			現象の対称性を 考慮した 構造物の幅	入射波高 (周期)
Scase1	Scase2	Scase3		
0.67m (0.033m)	1.0m (0.05m)	1.33m (0.067m)	0.5m (1mに相当)	0.0167m (0.58s)

移動床水槽実験において長時間一定の波浪場を保つためには構造物による波の乱反射を抑制する必要がある。実験は、直角入射を想定したので、その対称性を利用して半分の長さの構造物を設置し、その対称面の側面は直立面とした。一方、波の進行方向に対する右側面には吸収剤を設置して検討したところ、長時間の造波においても波浪場の攪乱は十分抑えられたが、吸収剤の中を通過する波は岸のほうに進むにつれ波高が減少し、類似回折効果が起こった。このような効果は吸収剤付近に波高および波速の差を作り上げ、波の進行とともに実験領域内部へその影響範囲を広げ、結局、実験領域を縮める効果をもたらした。そこで本実験では右側面を直立不透過壁面処理し、その代わり構造物前面および造波板前面のウェブ・フィルタ(wave filter)に吸収剤を補強して安定した波浪場を得ることにした。

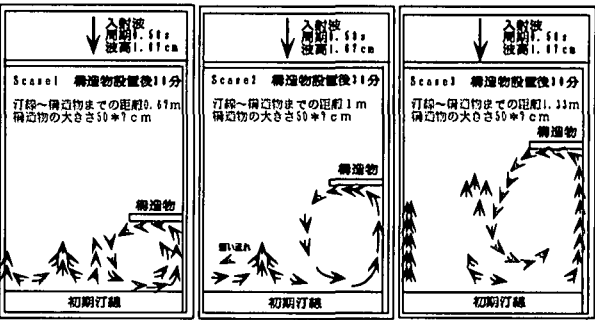


図-3 離岸距離による構造物背後の流れ

図-3は小型平面移動床実験で離岸距離が異なる三つのケースにおける構造物背後の流れを観察したものである。構造物は初期勾配から2時間30分造波し、自然海岸を形成してから設置し、改めて造波を始め30分後に染料を用いて流れを観察した。どのケースにおいても構造物背後には循環流が存在しており、中心は構造物先端の若干内側に位置している。また、

循環流の汀線付近の流速は、後述する3次元移動床実験および海浜流の計算と同様、Scase2の場合が最も大きかったことが特徴として確認された。

3. 3次元移動床実験(本実験)

(1) 実験の概要と手順

前述した断面2次元および小型移動床実験を踏まえて3次元移動床実験(以後本実験と呼ぶ)で沖合構造物による地形変化を測定した。

本実験は、図-4に示すように長さ20m、幅9m、深さ0.6mの平面水槽を用いて行った。水槽の内部に初期断面として1/20勾配の一般勾配斜面を作って中央粒径0.16mmの砂を厚さ約0.06mに敷き均し、直角入射の条件で波を作用させた。実験を通して、沖合一様水深部の水深は0.3m、入射波は規則波としての沖合波高 0.05m、周期 1.0sという一定条件で固定した。座標系は岸沖方向にX軸、沿岸方向にY軸を設定し、測定領域は図-4の破線で囲まれた範囲で、Y軸方向(沿岸方向)に77m、X軸方向(岸沖方向)に43.5mとした。図-5は、地形の測定時間間隔を示しており、地形の測定は連続式砂面計を用い、沿岸方向0.1mここの77側線でおこなった。

本研究で対象にしているのは、沖合人工島または海上空港のような大規模海上構造物による背後の海浜変形であるので、沖合構造物を想定した離岸堤の規模は比較的大きい 3mであるが、現象の対称性を利用して離岸堤の半分の現象を対象にし、1.5mを用いた。構造物の前面には、波の反射による波浪場の攪乱を防ぐため吸収剤を取り付けた。また、構造物

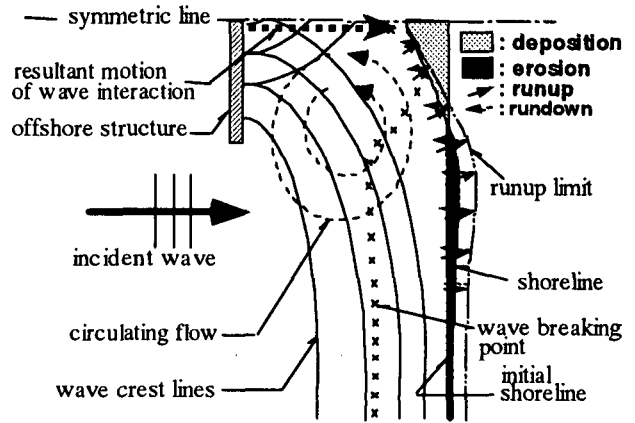


図-6 海上構造物背後の海浜過程

の設置による地形変化だけを取り出すため、初期の1/20勾配に4時間造波し準平衡状態の海浜(以降自然海浜と呼ぶ)を作り上げた後、極力地形を乱さないように注意して設置した。離岸距離は4つのケース(case1~4; 2.0, 3.0, 4.0, 5.5m)とした。

(2) 海浜の変形過程と舌状砂州の形成

a) 波の運動と循環流の発生

図-6は本実験において観察した大規模沖合構造物による背後の海浜過程を示している。当初自然海浜にほぼ直角に入射し浅水変形だけ起していた波は、構造物設置後には回折により、先端から同心円を描きながら構造物による遮蔽域を広がっていく。このような同心円状の回折波は構造物の内部へ振幅が指数的に減少しつつ進行するが、対称になる反対側からの回折波との相互干渉により、構造物の中心(本実験の場合、対称中心線の壁)付近の波峰線は網状になり、沿岸方向に直角な波が見られる。

構造物設置域を外れた区域の波は、浅水変形によって波高が増大し、ついに碎波してボア状で碎波帯を通り汀線付近で汀線に直角に打ち上げられる(遡上高3-4cm)。しかし、図-6に示したように、波峰線は構造物へ近づくとつれ、汀線に対してある角度を持ち、前浜での打ち上げも斜めの方向になる。打ち下げ時は、前浜斜面の最大勾配の方向に向かうため、前浜領域および汀線付近ではジクザグ運動が活発になる。

一方、構造物背後には反時計回りの循環流が形成されている。循環流の形成機構は二つに分けて考えられる。まず、第一に、前浜領域や汀線付近でのジクザグ運動が挙げられる。碎波帯をボア状で通過した水塊は、遡上帯での斜め打ち上げおよび打ち下げが作り出すジクザグ運動により、汀線付近で構造物内部への沿岸流を創る。沿岸流は構造物の中央部で対称域からの沿岸流と遭遇し、構造物方向へ流れることになり、背後の循環流形成に直接的に影響を及ぼす。第二に平均水位差が考えられる。入射した波が斜面を登り外浜帯に進むと、浅水変形や碎波によって波高が場所的に変化し、碎波線を中心に沖側では平均水位が低下、そして、碎波帯内では急激に

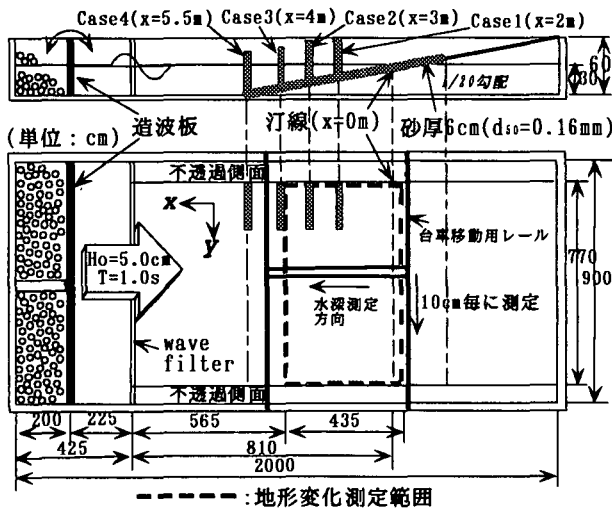


図-4 実験水槽の概要と測定領域

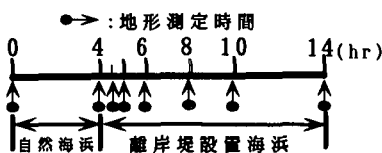
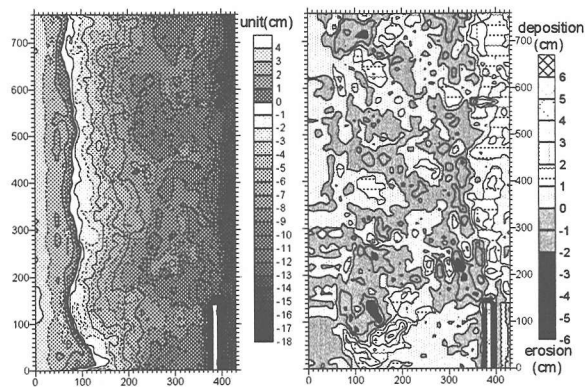
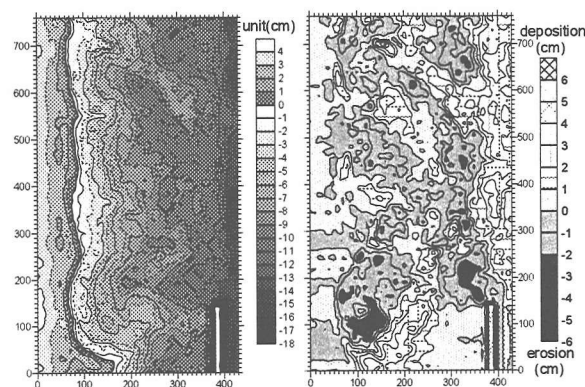


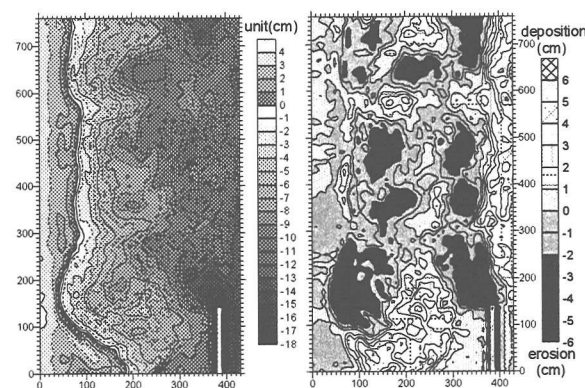
図-5 3次元移動床実験の手順



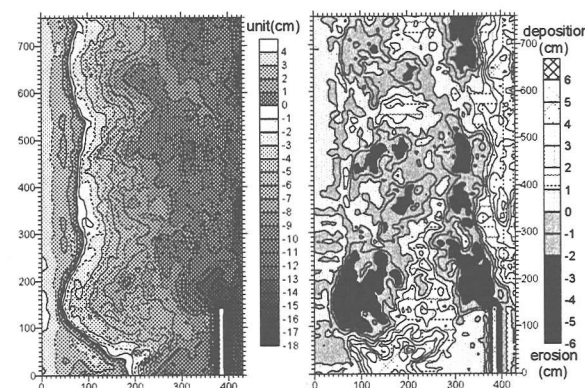
(a) case2(D=3m), 構造物設置後1時間



(b) case2(D=3m), 構造物設置後2時間



(c) case2(D=3m), 構造物設置後4時間



(d) case2(D=3m), 構造物設置後6時間

図-7 地形変化の経時変化

上昇するいわゆる wave setbackとwave setupが発生する。図-6に示したような構造物による遮蔽域が存在する場合、平均水位は、wave setupが生じる碎波帯が最も高く、次に構造物背後の遮蔽域、そして、構造物外側の碎波線沖側の水域が最も低くなる順の段差が生じる。本実験で平均水位は調べてないが、同スケールの固定床で波・流れを詳しく調べた申ら⁴⁾の実験および本研究の海浜流計算でも確認された。このような平均水位の場所的な勾配は、構造物背後での流れを引き起こす重要な外力として作用し、水塊のジグザグ運動による循環と相俟って、構造物背後の循環流をもっと発達させていると考えられる。

b) 漂砂の移動と舌状砂州の形成
沖合構造物による海浜変形や舌状砂州の形成過程においては、構造物の離岸距離(D)と幅が1:1になることを標準として考え、ケース2(D=3m)の変化過程を説明する。

図-7は自然海浜に構造物を設置し、図-5の手順で測定した地形の中で設置後1, 2, 4, 6時間での結果を示している。図の横軸は岸沖方向(X), 縦軸は沿岸方向(Y)で、左は等水深図, 右は自然海浜から地形測定時間までの水深変化量図である。

構造物周辺の砂は造波してからすぐ定常に達した波・流れによって動き始めた。造波再開の初期段階から、構造物の先端を結ぶ波打ち帯でのジグザグ運動による浜漂砂と、汀線付近での最も早い沿岸流によって、X=80~90, Y=50~200の砂は構造物中央の汀線に向かった移動して行き、移動した砂は構造物中央のX=100~170, Y=20~100の汀線近くに堆積し、水面下に舌状砂州形状で成長する。

一方、構造物外側の碎波帯内(X=100~300, Y=200~300)で浮遊した砂は構造物背後の循環流に乗って移動して行くが、流速が弱まった循環の中心付近(X=160~270, Y=40~140)で沈降して堆積する。これらの砂の堆積は、まず、中央の汀線付近の水面下に起こり、ある程度堆積した後、引き続き供給される浜漂砂によって水面上に舌状砂州として現れる(図-2(a))。

このような過程は本実験の全ケースで起こり、時間の経過とともに舌状砂州は発達するが、大体6時間以降になると、波の打ち上げや打ち下げはほぼ同じ経路になり、構造物先端を結ぶ汀線付近の局所的な激しい侵食および背後の舌状砂州の成長も安定していた(図-7(c),(d))。

しかし、構造物外側の碎波帯内からの浮遊砂が循環流によって移動し、循環の中心付近(X=160~270, Y=40~140)で沈降して堆積する現象は続き、汀線から離れた水面下には、まだ、安定状態まで達していなかったことを言うて置きたい。

4. 離岸距離による海浜変形と海浜流

図-8は、本実験において構造物の離岸距離別地形変化の結果として、設置後6時間での等深線図および水深変化量である。構造物を設置して波を作用させると、構造物の背後に循環流が生じ、砕波帯で激しく巻き上げられた砂が、循環流により構造物の背後へ運ばれ沈降することと、構造物背後の汀線付近および波打ち帯での浜漂砂による堆積し、舌状砂州を形成する過程は、全てのケースにおいて確認できた。

しかし、構造物が及ぼす地形変化の範囲を $0 \leq X \leq 200$, $0 \leq Y \leq 300$ と仮定して見ると、Case2(図-8(b), 離岸距離3m)が局所的な侵食量、舌状砂州の規模、汀線の後退量が最も大きく、続いてCase3(図-8(c), 離岸距離4m), Case1(図-8(a), 離岸距離2m), Case4(図-8(d), 離岸距離5.5m)の順であった。特に、最も変化が激しかったCase2の場合は、再現性の確認のため、同様の条件での実験を再びおこなったが、ほぼ同じ結果を得た。本研究では、このような沖合構造物設置の対岸距離について海浜変形に極大値を与える条件が存在すると考え、まず、本実験と同じケースの海浜流数値計算をおこない、その結果と比較検討した。

本研究での海浜流計算は、非線形分散波動方程式で、深海域まで適用範囲が広げられた修正ブシネスク方程式⁵⁾に砕波による運動量混合項および底面摩擦項を加えたものを用いた(式(1), (2), (3), (4), (5))。

$$\eta_t + p_x + q_y = 0 \quad (1)$$

$$p_t + \left(\frac{p^2}{D}\right)_x + \left(\frac{pq}{D}\right)_y + gD\eta_x - M_1 + F_1 + \varepsilon p = \psi_1 \quad (2)$$

$$q_t + \left(\frac{q^2}{D}\right)_y + \left(\frac{pq}{D}\right)_x + gD\eta_y - M_2 + F_2 + \varepsilon q = \psi_2 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \psi_1 = & \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2(p_{xxt} + q_{xyt}) + Bgh^3(\eta_{xxx} + \eta_{xyy}) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{3}p_{xt} + \frac{1}{6}q_{yt} + 2Bgh\eta_{xx} + Bgh\eta_{yy}\right) \\ & + hh_y\left(\frac{1}{6}q_{xt} + Bgh\eta_{xy}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \psi_2 = & \left(B + \frac{1}{3}\right)h^2(q_{yyt} + p_{xyt}) + Bgh^3(\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) \\ & + hh_y\left(\frac{1}{3}q_{yt} + \frac{1}{6}p_{xt} + 2Bgh\eta_{yy} + Bgh\eta_{xx}\right) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{6}p_{yt} + Bgh\eta_{xy}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 p, q は x, y 方向の線流量、 h は水深、 η は水面変動量、 $D = \eta + h$ である。 M, F は各々砕波による運動量混合項、底面摩擦項、式(4), (5)は

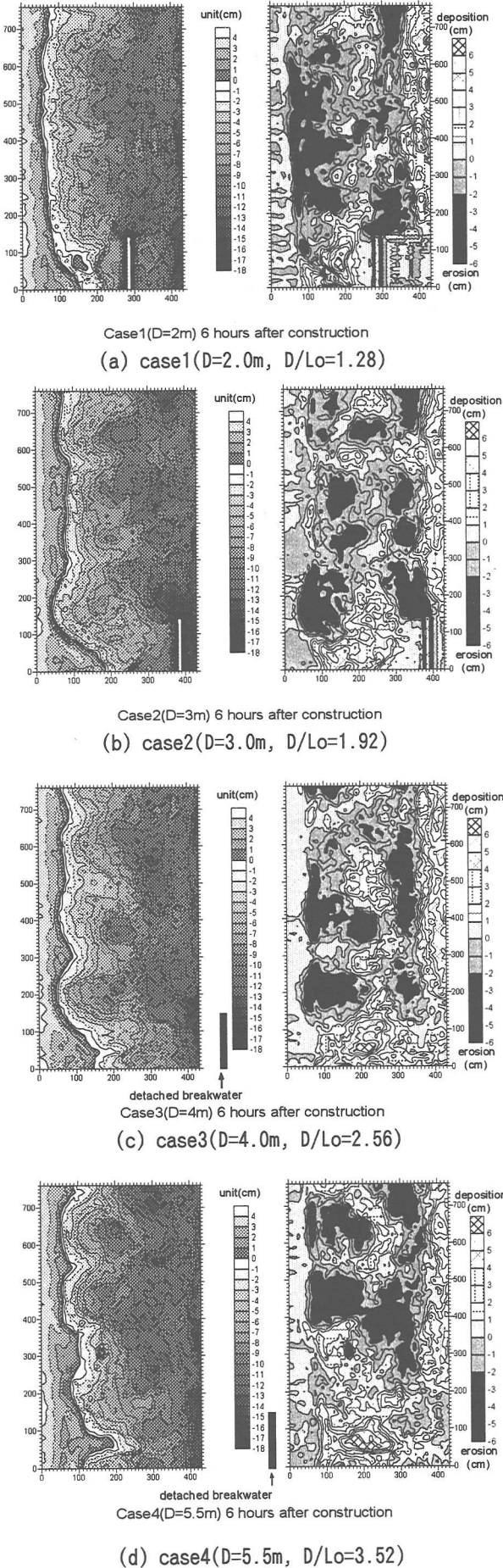


図-8 離岸距離による海浜変形

分散項を表しており、 ε は透過境界での波エネルギー吸収係数、 B は補正係数である。

計算範囲は水槽実験と同一なスケールでおこない、計算格子間隔0.1m、時間間隔 0.5×10^{-2} sとした。碎波は水粒子の速度と波速の比で判定⁶⁾したが、本計算では固定床での再現性を考慮して0.45になると碎波として判断した。

まず、沖合構造物の離岸距離と海浜流との関係を明らかにするため、沖合での水深を0.3mとし、1/20の一樣勾配においての計算をおこなった。入射境界での入射波は実験と同様の波高0.05m、周期1.0sの規則波で、構造物長さ1.5m(長さ3mに相当)、汀線からの離岸距離(D)=2.0m(case1), 3.0m(case2), 4.0m(case3), 5.5m(case4)など、すべての条件を本実験の諸条件に合わせておこなった。

海浜流の計算結果図-9に示している。Case2(3.0m, D/Lo=1.92)の場合は、構造物先端から背後、岸との1/2の位置に反時計回りの循環の中心があり、汀線付近での最大流速は0.15m/sであった。Case1(2.0m, D/Lo=1.28)は同様の循環は明確に存在するが、位置はCase2に比べ若干構造物の方へ移動しており、循環の規模も多少小さくなっていた。汀線付近での最大流速は0.13m/s程度であった。Case3(4m, D/Lo=2.56)はそれほど明確ではないものの循環が存在しており、岸側の最大流速は約0.14m/sであった。Case4(5.5m, D/Lo=3.52)の場合は循環というより背後での沿岸流の形態で0.13m/s程度であった。これらの海浜流計算結果は前節で述べた小型移動床実験での流れ観察結果とも同じ結果を示していることから、汀線と碎波位置までの距離と、汀線から沖合構造物までの距離との相関関係が大きな要素あり、case2の場合が最も循環流を発達させる条件になっていると考えられる。

5. おわりに

移動床平面水槽実験により、沖合構造物の離岸距離による背後の地形変化傾向を分析した結果、いずれも碎波帯で激しく巻き上げられた砂を構造物の背後に運んでいき舌状砂州を形成していく様子が確認できたが、離岸距離による海浜流分布の相違で舌状砂州形成に大きな割合で寄与する周辺の侵食範囲や程度が異なることがわかった。特に、Case2(図-8(b))の場合、一樣勾配での海浜流パターン(図-9(b))がよく反映され、汀線付近の影響範囲と局所的な侵食度合が一致しており、構造物設置直後の海浜流パターンが海浜への影響を支配する主要要素であることがわかった。

謝辞：本実験をおこなうにあたり、建設省の高畑栄治氏(当時九州大学大学院生)、若築建設(株)の山口洋氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

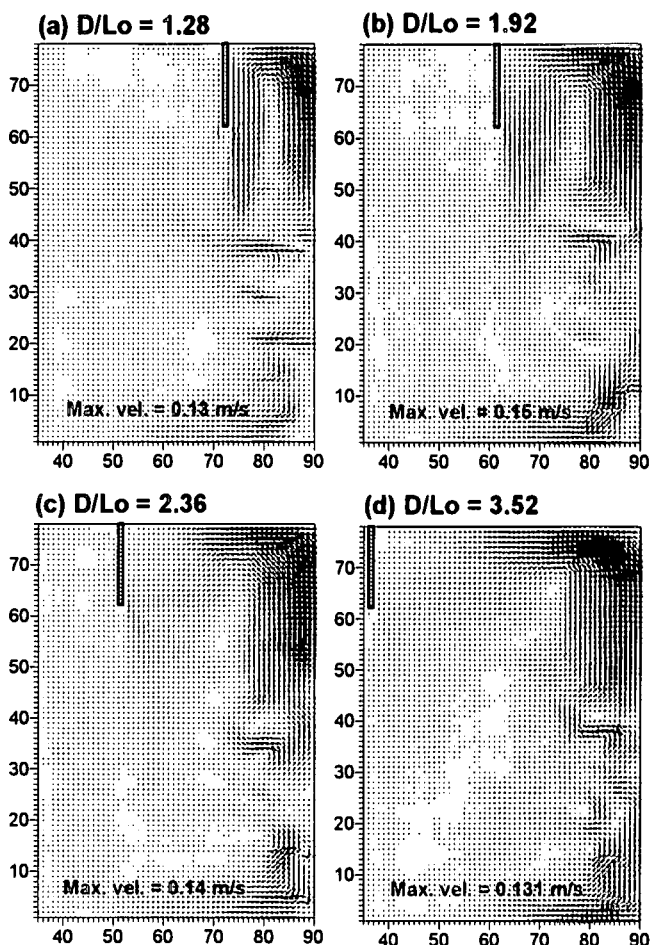


図-9 離岸距離による海浜流

参考文献

- 1) Shinohara, K. and Tsubaki, T.: Model study on the change of shoreline of sandy beach by the offshore breakwater, *Proc., 10th Int. Coast. Eng. Conf.*, pp.551-563, 1966.
- 2) 三村信男, 清水琢三, 渡辺 晃: 離岸堤による波浪海浜流場の変化と海浜変形, *海岸工学論文集*, 第29巻, pp.299-303, 1982.
- 3) Sunamura, T. and Mizuno O.: A study on deposition shoreline forms behind an island, *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, No. 13*, pp.71-73, 1987.
- 4) 申 承鎬, 高畑栄治, 入江 功, 吉田明徳: Boussinesqモデルを用いた沖合の構造物による波浪・海浜流の数値計算の適用性, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp.206-210, 1999.
- 5) Madsen, P. A. and O.R. Sørensen: A new form of the boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics *Part 2*, *Coastal Eng.*, Vol.18, pp.183-204, 1992.
- 6) 佐藤慎司, Kabiling M.: Boussinesq方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算, *海岸工学論文集*, 第40巻, pp.386-390, 1993.