

# 大型 2 次元不規則波実験によるバーとバームの形成過程 に関する研究

山 本 幸 次\*・佐 藤 慎 司\*\*

## 1. はじめに

海浜は静穏時には前浜にバームが見られ安定しており、暴浪時には汀線付近から底質が運搬され砕波点付近にバーが形成される。このバーは波浪が静穏になると全体的に岸方向に移動し、最終的には前浜に乗上げて再びバームを形成する。これが、岸沖漂砂の卓越する場合の可逆的な海浜変形の基本モデルである(砂村, 1985)。このモデルによれば、バーは暴浪時における底質の一時的な貯蔵庫、および波や流れに対する一種の可動の障害物であり、海浜過程の重要な構成要素と言える(砂村, 1985)。このため、バーとバームの可逆的な形成過程や、バーの波や流れに対する機能を解明することは、海岸保全計画を立案する場合に重要な意味を持つ。

このバーとバームの諸元に関してはいくつかの研究がある(Sunamura, 1989)。しかし、バーとバームの可逆的な形成過程に関しては、規則波による小規模な 2 次元実験で検討されているにすぎない(砂村・倉田, 1981)。また、不規則波を用いた大型 2 次元実験による海浜変形の検討も行われている(清水ほか, 1996; 張ほか, 1997)が、可逆的な海浜変形を対象としたものは少ない。そこで、本研究では可逆的な海浜変形に関する大型 2 次元不規則波実験を行い、バーとバームの形成過程と、沖合のバーが砕波帯内の波や流れを制御する機能について検討した。

## 2. 実験方法

実験は幅 2 m, 長さ 150 m, 深さ 5 m の大型 2 次元水路を用いて、1/20 勾配の模型海浜を粒径 0.3 mm の砂で製作して行った(図-1)。0~20 時間では汀線位置が後退する条件の波浪(暴浪波)を、20~80 時間では汀線位置が前進する条件の波浪(静穏波)を作用させた。また、

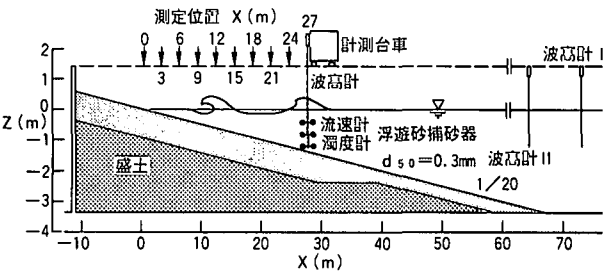


図-1 実験の諸元と測定位置

表-1 設定した波浪条件

| 波の作用時間<br>(時間) | 波の種類   | 有義波高<br>$H_{1/3}$ (cm) | 有義波周期<br>$T_{1/3}$ (s) | $C_s$ 値 | 平均波高<br>$H_m$ (cm) | 平均波周期<br>$T_m$ (s) | $C_s$ 値 |
|----------------|--------|------------------------|------------------------|---------|--------------------|--------------------|---------|
| 0~20           | 暴浪波 I  | 69                     | 3.6                    | 26      | 42                 | 2.9                | 18      |
| 20~80          | 静穏波    | 40                     | 6.0                    | 11      | 24                 | 4.7                | 7.6     |
| 80~100         | 暴浪波 II | 60                     | 4.5                    | 20      | 36                 | 3.6                | 14      |
| 100~160        | 静穏波    | 40                     | 6.0                    | 11      | 24                 | 4.7                | 7.6     |
| 160~180        | 暴浪波 II | 60                     | 4.5                    | 20      | 36                 | 3.6                | 14      |

80~100 時間では再び暴浪波を作用させ、0~100 時間で暴浪波→静穏波→暴浪波の条件下での海浜変形を調べた。

次に、大規模構造物の建設に伴う沿岸漂砂の不均衡などにより沖合のバーが消失した場合を想定し、その影響が 2 次元海浜変形にどのように現れるか検討した。この場合、100 時間後に形成されたバーを削除し、まず、静穏波を作用させて(100~160 時間)、汀線付近が 80 時間後の位置まで回復するか調べた。その後、160~180 時間では暴浪波を作用させ、バーが再形成されるか検討した。

実験では、Bretschneider・光易型のスペクトルをもつ不規則波を作用させることとし、表-1 に示す沖波換算値の暴浪波 I, II, 静穏波を設定した。なお、80~100 時間、160~180 時間でも、暴浪波 I を作用させる予定であったが、0~20 時間の暴浪波 I の作用後に造波機が不調となったため、波高を小さく周期を長くした暴浪波 II に再設定し、実験を継続した。

設定した波浪は現地スケールに近いので汀線位置の前

\* 正会員 建設省土木研究所河川部海岸研究室研究員  
\*\* 正会員 工博 建設所土木研究所河川部海岸研究室長

進・後退を判定する  $C_s$  値の限界を  $C_s=18$  (Sunamura, 1989) として、沖波換算有義波と初期海底勾配で計算される  $C_s$  値をもとに暴浪波、静穏波を区別した。大塚ほか (1984) は、実験室では不規則波による海浜変形は、沖波換算平均波でタイプ分類できるとしている。これによれば、設定した暴浪波 I, II では  $C_s > 9$  で侵食型、静穏波では  $3.5 < C_s < 9$  で中間型の海浜変形が生じる条件となる。

実験では海浜断面形状の測定を 0, 20, 80, 100, 160, 180 時間に行った。また、海浜断面形状の測定に合わせて沖側 2 地点で水面変動を測定し、入射波と反射波を求めた。さらに、 $X=0$  m を基準とし、3 m 間隔で沖側に 10 地点の計測地点を設定して、水面変動、流速、浮遊砂濃度などを測定した。この場合、10 地点で同時計測を行うことが困難なので、各地点で 7 分間の計測とし、順次、沖側から岸側へと移動して計測する方法とした。

### 3. 実験結果

#### (1) 海浜変形の状況

海浜断面形状の経時変化と、沖側の波高計 I で計測された有義波の値を図-2 に示す。1/20 勾配の模型海浜に暴浪波 I を作用させた 0~20 時間では、汀線位置を含む  $X=-6\sim 18$  m が侵食され、 $X=8$  m に小規模のバー I が、 $X=23$  m に規模の大きなバー II が形成された。このバー II の頂部水深は 62 cm で、トラフの水深は 93 cm であった。また、 $X=-8$  m には小規模のバーム (頂部高さ 55 cm) が見られる。

20 時間後の地形に静穏波を作用させた 20~80 時間では、沖側のバー II が規模を縮小しつつ岸側 ( $X=15$  m) に移動し、岸側のバー I が規模を拡大しつつ沖 ( $X=10$  m) へ移動した。また、 $X=-9\sim 0$  m に砂が堆積し汀線位置が前進するとともに、 $X=5$  m に頂部 (高さ 60 cm) を持つバームが形成された。なお、バー II の水深は 48 cm、トラフの水深は 70 cm と浅くなった。

80 時間後の地形に再び暴浪波を作用させた 80~100 時間では、バー II が沖側 ( $X=25$  m) に移動し規模が大きくなり、岸側のバー I ( $X=13$  m) も発達しつつ沖に移動した。バー II の水深は 64 cm、トラフの水深は 98 cm であった。また、汀線位置を含む  $X=-1\sim 20$  m が侵食されたが、 $X=-5$  m のバームは発達し、頂部高さは 80 cm となった。

100 時間後に形成されたバーを削除し、静穏波を作用させた 100~160 時間では  $X=2\sim 16$  m、 $X=24\sim 32$  m が侵食され、 $X=18$  m に頂部を持つバー II' が形成された。このバーの水深は 55 cm で、トラフの水深は 80 cm であった。水面上のバームはやや発達し、頂部高さは 93 cm となった。静穏波の条件下で、前浜のやや沖側 ( $X=$

2~16 m) が侵食され深くなり、汀線が前進しないことは海浜変形の可逆性が失われたことを示す。このことは、現地で何らかの要因でバーが消失した場合には、その後、静穏波が継続しても汀線の前進は期待できないことを示している。

160 時間後の地形に暴浪波を作用させた 160~180 時間では、バー II' が発達しつつ  $X=18$  m から  $X=24$  m と沖に移動した。バー II' の水深は 70 cm であり、水深 107 cm のトラフの岸側にはバー I' も見られる。また、汀線位置を含む  $X=-5\sim 2$  m が侵食され、バームは頂部高さ 100 cm とさらに発達した。

結局、暴浪波の作用では汀線位置の後退と、バーの形成もしくは沖側への移動が確認された。また、静穏波の作用では汀線位置の前進と、バーの岸側への移動およびバームの発達が見られた。暴浪波の条件は、表-1 に示したようにいずれも侵食型に分類されるが、今回の大型実験では 2 段のバーが形成され、汀線岸側にもバームが形成される結果となった。バー削除後に静穏波を作用させた場合には、前浜のやや沖側が侵食され深くなり、その砂が沖側へと運ばれ、バーを形成することが明らかになった。この場合、バームはやや発達したが、汀線は前進しないことが確認された。このことから、何らかの要因でバーが消失すると可逆的な海浜変形機構が失われ、前浜のやや沖側が侵食され深くなることを含めて、海岸保全上問題が生じることが分かった。

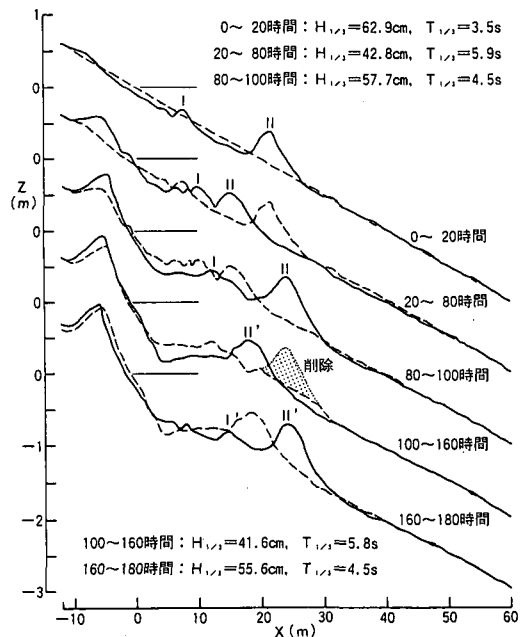


図-2 断面形状の経時変化

## (2) 波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布

暴浪波を作用させた0～20時間において、0時間と19時間に計測した波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布を、0時間と20時間後の断面形状とともに図-3に示す。波高の岸沖分布は、0時間の場合は沖から汀線位置に向かってなだらかに波高が減衰する分布形を示す。パーIIが形成された19時間では、沖側 ( $X=21\sim 27$  m)の波高は0時間とほぼ同じで、パーIIより岸側 ( $X=12\sim 18$  m)の波高は0時間より小さい。このことから、パーには岸側の波高を小さくする消波機能があることが分かる。

海底面上約10 cmでの岸沖方向の流れは、0時間では  $X=15$  mより沖側では見られず、 $X=15$  mより岸側で  $X=9$  mで冲向きのピークを持つ分布形を示す。19時間では  $X=18$  mで冲向きのピークを持ち、冲向き流れが沖側、岸側に向かって小さくなる分布形となる。冲向きの流れが大きくなる位置はトラフと一致する。これはパーの形成により不規則波の碎波位置がほぼ固定されたためと考えられる。また、 $X=12$  mより岸側では0時間より19時間の方が冲向き流れが弱くなっており、パーには岸側の戻り流れを弱くする機能もあることが分かる。

採水により海底面上約10 cmで計測した浮遊砂濃度については、0時間では  $X=18$  mにピーク ( $C=2.7$  kg/m<sup>3</sup>)を持ち、沖側、岸側に向かって浮遊砂濃度が小さくなる分布形を示す。浮遊砂濃度が大きい位置は20時間後のトラフの位置と一致する。19時間後では  $X=24, 21$  mで浮遊砂濃度が大きく ( $C=2.9, 2.7$  kg/m<sup>3</sup>)、パーが形成された位置に対応する。また、パーより岸側では0時間に比べ19時間の方が浮遊砂濃度が小さい。

岸沖方向の流速と浮遊砂濃度の積として求めたフラックスは、0時間では  $X=12, 9$  mでピークを持つ分布形であり、 $X=6\sim 15$  mの砂が沖へと運ばれることを示す。これは、20時間後に  $X=6\sim 15$  mが侵食され、 $X=18\sim 27$  mにパーが形成されたことと一致する。19時間になると  $X=21$  mでピークを持ち、それより岸側、沖側では徐々に小さくなる。いずれの場合も  $X=27$  mではフラックスはほとんどなく、 $X=27$  mより沖への砂の移動は少ないと考えられる。19時間においてパーより岸側で浮遊砂フラックスが0時間より小さいことから、地形が平衡状態に近づいていることが分かる。

20時間後の地形に静穏波を作用させた場合においては、波高の岸沖分布は、沖から汀線位置に向かってなだらかに波高が減衰する分布形を示す (図-4)。パーIIの頂部 ( $X=21$  m)で波高が大きく、この位置付近で主に碎波が生じていると推定される。岸沖方向の流れは冲向き流れが卓越し、 $X=27$  mでは流れは見られず、 $X=3\sim 21$  mでは  $u=10$  cm/sとほぼ一定である。浮遊砂濃度は、 $X=3\sim 9$  mで  $C=1$  kg/m<sup>3</sup>よりやや大きく、それよ

り沖側では徐々に小さくなる分布形を示す。浮遊砂フラックスは岸側 ( $X=3\sim 9$  m)で大きく、沖に向かい徐々に小さくなり  $X=27$  mでほぼゼロになる分布形となる。20～80時間ではパーIIが岸側に移動したが、20時間に計測された流れや浮遊砂濃度の岸沖方向の分布形との

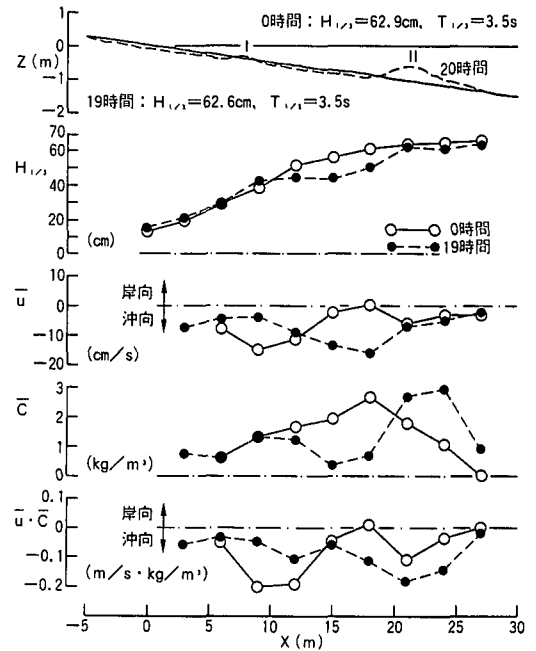


図-3 波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布 (0, 19時間)

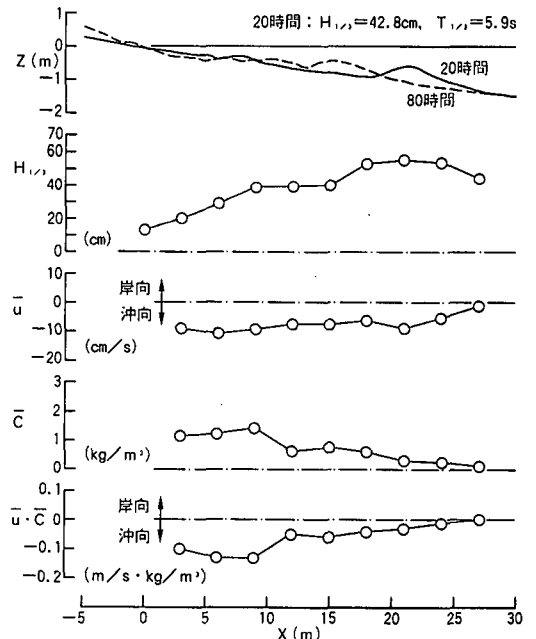


図-4 波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布 (20時間)

対応はよくない。

80時間後の地形に暴浪波を作用させた場合においては、波高の岸沖分布は  $X=21\sim 27$  m ではほぼ一定で、 $X=18$  m で波高が大きくなり、それより岸側では急激に小さくなる (図-5)。この分布形から平均的な碎波位置は、 $X=18$  m と推定される。岸沖方向の流れは  $X=21\sim 27$  m ではほぼゼロで、 $X=9\sim 21$  m では冲向き流れが徐々に大きくなり、 $X=3\sim 9$  m では徐々に小さくなる分布形を示す。浮遊砂濃度は  $X=18\sim 27$  m で徐々に大きくなり、 $X=18$  m で  $C=2.5$  kg/m<sup>3</sup> とピーク値を持ち、それより岸側では徐々に小さくなる分布形を示す。浮遊砂フラックスは  $X=21\sim 27$  m ではほぼゼロで  $X=15\sim 21$  m で急激に大きくなり、それより岸では徐々に小さくなる。100時間後には  $X=6\sim 18$  m が侵食され、 $X=21\sim 27$  m にバーIIが岸から移動しており、地形変化とフラックスはよく対応する。

100時間後の地形からバーIIを削除して静穏波を作用させた100～160時間において、100時間と159時間に計測した波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布を図-6に示す。波高の岸沖分布は、バーIIが形成された159時間では、100時間と比較して、推定される碎波位置が  $X=18$  m と沖側へとずれており、 $X=18$  m より岸側では波高が小さくなっている。このことから、図-3と同様に形成されたバーIIに消波機能があることが分かる。流れについても、 $X=12$  m より岸側では100時間より159時間の方が冲向き流れが小さくなっており、バーには岸側の戻り流れを弱くする機能もあることが分かる。

浮遊砂濃度については、100時間では  $X=3\sim 18$  m ではほぼ  $C=1$  kg/m<sup>3</sup> であり、 $X=18\sim 27$  m では沖に向かい小さくなる。159時間では  $X=18\sim 27$  m では100時間とほぼ同じ値であるが、 $X=3\sim 18$  m では小さくなる。このため、 $X=18$  m にピークを持つ分布形を示し、ピーク的位置はバーIIの頂部の位置と一致する。浮遊砂フラックスは、100時間では  $X=3\sim 9$  m で大きく沖に向かって徐々に小さくなる分布形を示し、160時間後に  $X=6\sim 15$  m が侵食され、 $X=15\sim 24$  m にバーが形成されたこととよく対応する。159時間になると  $X=18$  m でピークを持ち、それより岸側、沖側では徐々に小さくなる。159時間においてバーより岸側で浮遊砂フラックスが100時間より小さいことから、地形が平衡状態に近づいていることを示す。

160時間後の地形に暴浪波を作用させた場合においては波高の岸沖分布は、 $X=21\sim 27$  m では徐々に大きくなり、それより岸側では急激に小さくなる。この分布形から平均的な碎波位置は  $X=21$  m と推定される。岸沖方向の流れは、 $X=24\sim 27$  m ではほぼゼロで、 $X=12\sim 21$  m では冲向きの流れが徐々に大きくなり、 $X=3\sim 12$  m

では徐々に小さくなる分布形となる。浮遊砂量は、 $X=21\sim 27$  m で徐々に大きくなり、 $X=21$  m で  $C=1.9$  kg/m<sup>3</sup> とピーク値を持ち、それより岸側では徐々に小さくなる分布形を示す。浮遊砂フラックスは  $X=21\sim 27$  m で

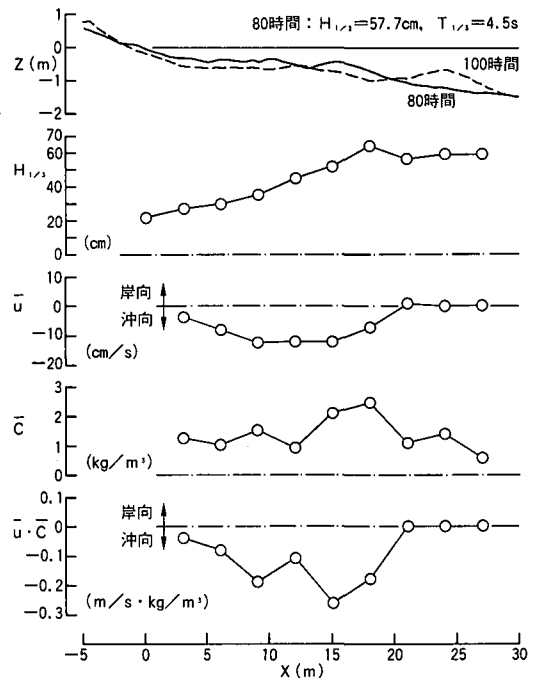


図-5 波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布 (80 時間)

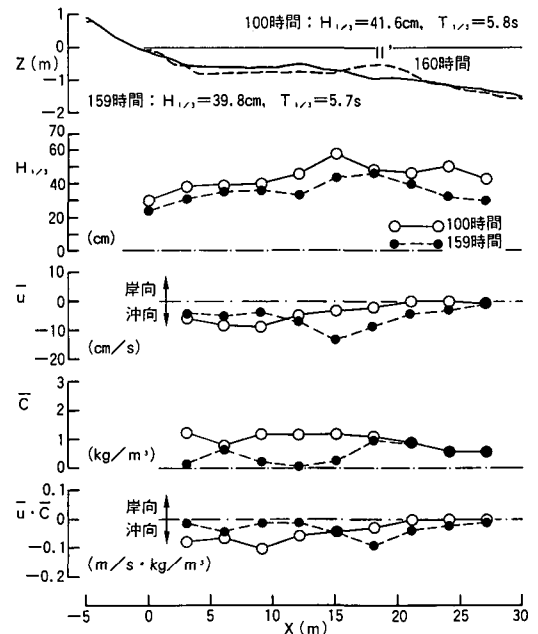


図-6 波、流れ、浮遊砂濃度の岸沖分布 (100, 159 時間)

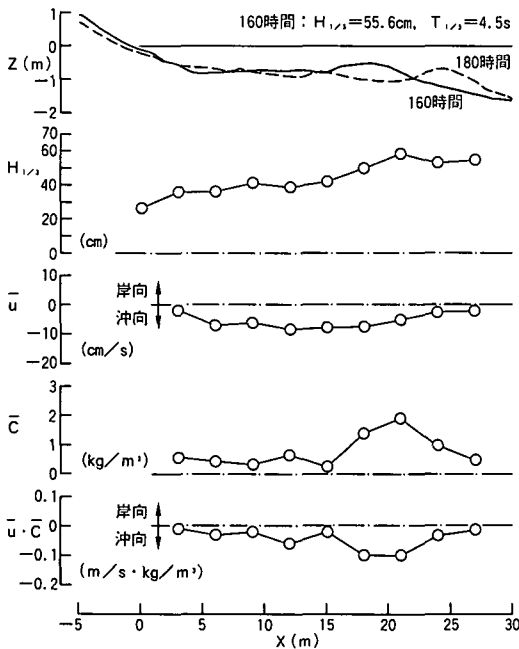


図-7 波, 流れ, 浮遊砂濃度の岸沖分布 (160 時間)

は徐々に大きくなり, それより岸側では徐々に小さくなる。180 時間後には  $X=15\sim 21$  m が侵食され, フラックスが少ない  $X=24\sim 27$  m にはバー II' が岸から移動しており, 地形変化とフラックスの分布形はよく対応する。

結局, 0 時間と 19 時間, 100 時間と 159 時間のバー形成前後の同じ波浪の作用条件下で計測した波, 流れ, 浮遊砂濃度の岸沖分布形から, バーが形成されることにより岸側の波高は小さくなることが確認され, バーの消波機能が明らかになった。また, バーの岸側の沖向き流れ, 浮遊砂濃度も小さくなり, バーの形成により流れが抑制されるとともに, 地形が均衡状態に近づくことも分かった。

#### 4. 考 察

暴浪波を作用させた場合 (0, 80, 160 時間) では, 汀線から碎波帯内にかけて侵食され, その砂の一部分は陸上部にうちあげられバームが, 大部分が沖側に運ばれてバーが形成された。この場合, 流れの岸沖方向の分布形は, 平均的な碎波位置のやや岸側で沖向き流れがピークを持ち, 岸側, 沖側に向かって徐々に小さくなる。また, 浮遊砂濃度の岸沖分布は, 平均的な碎波位置でピークを持ち, 岸側, 沖側に向かって小さくなる分布形を示す。したがって, 碎波帯内の砂は沖側に運ばれることになり, 海浜変形の特徴とよく対応する。

静穏波を作用させた場合 (20, 100 時間) では, 汀線から碎波帯内が侵食されて陸上部にバームが, 碎波点より

やや沖側が侵食されて碎波点付近にバーが形成された。この場合, 流れと浮遊砂濃度の岸沖方向の分布形は, 岸側で沖向き流れが大きく, 沖側に向かって徐々に小さくなる。したがって, 沖側へ砂が運ばれることになるが, 海浜変形の特徴とは対応がよくない。これは, 汀線からバーム頂部までの波打ち帯の砂の移動が, 暴浪波の場合に比較して支配的なためと考えられる。

佐藤ほか (1996) によれば, 現地海岸における碎波帯内で波高  $H_{rms}=0.55$  m,  $u=-0.22$  m/s,  $C=1.2$  kg/m<sup>3</sup> という値が計測されている。本実験では, 暴浪波の作用時の碎波帯内 (19 時間,  $X=18$  m) で, 波高  $H=0.50$  m,  $u=-0.16$  m/s,  $C=0.8$  kg/m<sup>3</sup> という計測値もあり, 現地観測で得られたデータとほぼ一致する。このことから, 今回の実験結果は穏やかな波浪条件の現地海岸の現象にほぼ匹敵するスケールを有していると言える。

したがって, 本実験で得られた暴浪波作用時および静穏波作用時の底面付近の流れ, 浮遊砂濃度の岸沖分布形をもとにモデルを構築すれば, バーの形成や岸沖方向への移動の予測が可能となると考えられる。しかし, バームの形成・発達に関しては, 本実験では計測できなかった波打ち帯の流れや砂の動きが重要な要因となる。今後は, 波打ち帯での現象の計測と把握が求められ, それらによるバーとバームの形成を含む 2 次元海浜変形予測モデルの確立が期待される。

謝辞: 実験を行うにあたっては, 張 達平特別研究員 (現 上海大学) に協力していただいた。ここに記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 大塚行則・三村信男・渡辺 晃 (1984): 不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 321-325.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・加藤史訓 (1996): うねりによる長周期変動と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 101-111.
- 清水隆夫・池野正明・岡安章夫・栗山善昭・佐藤慎司・島田広昭・清水琢三・武若 聡・西 隆一郎 (1996): 不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同期計測, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 491-495.
- 砂村継夫 (1985): 海浜地形の変化, 1985 年度 (第 21 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, pp. B-7-1~B-7-17, 土木学会水理委員会.
- 砂村継夫・倉田雄司 (1981): 時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 222-226.
- 張 達平・佐藤慎司・山本幸次・田中茂信 (1997): 不規則波による浮遊砂輸送とバー地形の発達に関する大型実験, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 481-485.
- Sunamura, T. (1989): Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling, V. C. Lakhan and A. S. Trenhaile (editors), *Applications in Coastal Modeling*, Elsevier, Amsterdam, pp. 159-213.