

◆ 報 文 ◆

# 養浜により造成した海浜の断面変形に関する実験的研究

山本幸次\* 佐藤慎司\*\*

## 1. はじめに

近年、海岸侵食が全国各地で問題となっており、自然の砂浜や砂礫浜が失われたところも少なくない<sup>1)</sup>。このような海岸では、異形ブロックを用いた消波堤などによる海岸保全が図られてきた。しかし、最近では環境問題がクローズアップされ、消波効果が高いだけでなく、利用空間を創出し海岸景観も損なうことのない養浜による海浜の造成が行われるようになってきた<sup>2)</sup>。

養浜による海浜の造成では、静穏時には前浜にバームが形成され安定し、暴浪時には汀線付近から底質が運搬され、沖合にバーが形成されて消波効果を発揮する機構を期待している。しかし、海浜を造成するにあたっては、突堤などの補助施設の整備が不十分な場合や、波浪条件が厳しい場合には、養浜砂の流出が問題となる。この問題を解決するためには、造成した海浜の波浪作用後の断面変形を予測しておく必要がある。

造成した海浜の波浪作用後の断面変形を予測する有効な手法として、移動床模型実験による検討があげられる。そこで、本報ではこれまでに行った海浜断面変形に関する実験結果<sup>3)~5)</sup>をとりまとめ、海底勾配、底質粒径、粒度組成、規則波・不規則波の違いが海浜の断面変形にどう影響するか検討した。また、実験結果をもとに、造成した海浜の波浪作用後の断面変形を予測するための指標<sup>6)</sup>について考察した。

## 2. 海浜の造成とその断面変形

養浜により海浜を造成する場合には、図-1に示すように一様勾配斜面の断面形で設計される場合が多い<sup>7)</sup>。このような一様勾配斜面の海浜に波浪を作用させた場合の断面変形に関しては実験的に検討され、堆積型、中間型、侵食型の3タイプに分類されている<sup>6)</sup>。堆積型の断面変形は、砕波帯から汀線付近までが侵食され、底質が前浜へうちあげられバームを形成するタイプである。中間型

の断面変形の場合は、砕波帯内から汀線付近が侵食され、底質が前浜にうちあげられバームを形成するとともに、沖合にも底質が運ばれバーを形成する。侵食型の断面変形では、前浜から砕波帯内が大きく侵食され、底質が沖合に運ばれバーが形成される。

## 3. 一様勾配斜面の海浜の断面変形実験

図-1に示した断面変形は、底質の粒径、作用する波浪の波高と周期、一様勾配斜面の初期勾配などにより左右される。そこで、底質粒径の断面変形への影響を実験 No.1~9 の比較で、波高・周期の影響を No.7~13 の比較で、初期勾配の影響は No.14~16 の比較で検討した。また、混合粒径底質と断面変形の関係については、実験 No.17、18

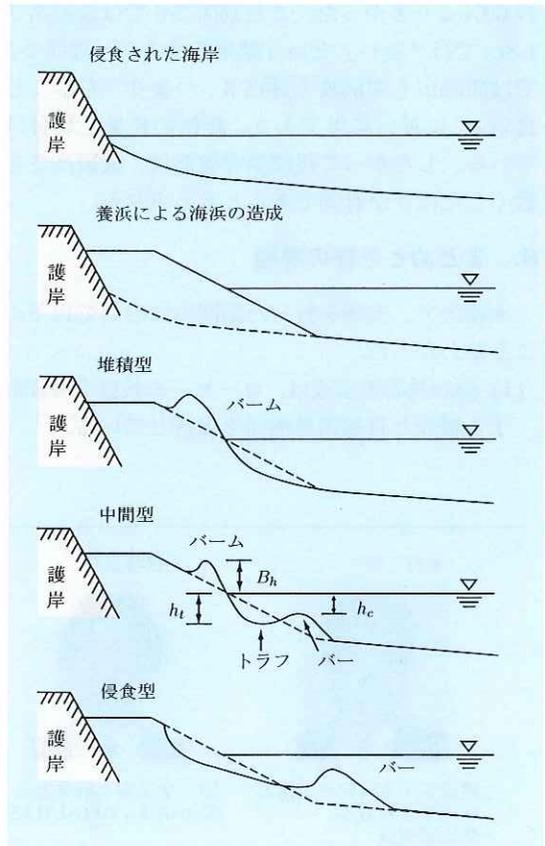


図-1 海浜の造成とその断面変形

Laboratory Study of Beach Profile Changes of Artificially Nourished Beach

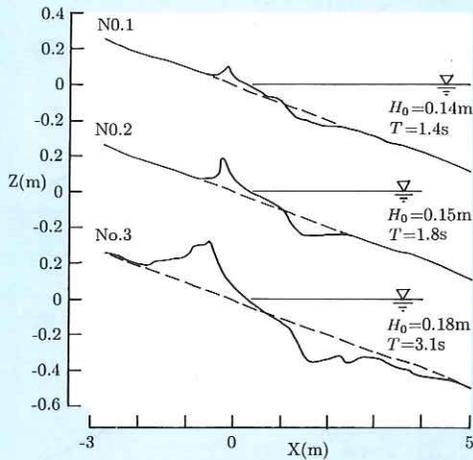


図-2 底質の粒径が  $d_{50}=4.0\text{mm}$  の場合

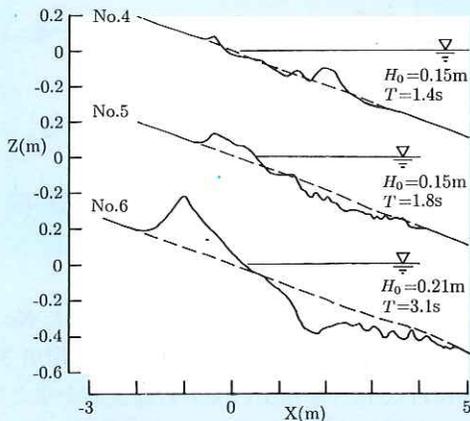


図-3 底質の粒径が  $d_{50}=1.0\text{mm}$  の場合

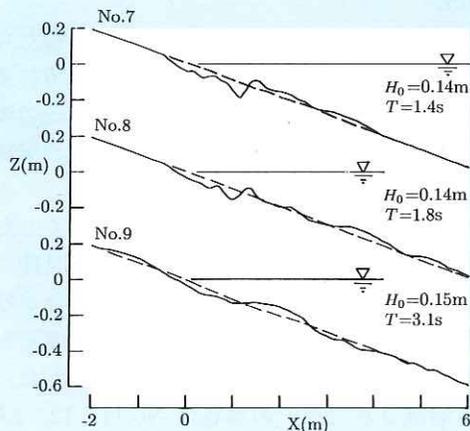


図-4 底質の粒径が  $d_{50}=0.3\text{mm}$  の場合

で、不規則波を作用させた場合については、実験 No.19、20 で検討した。

(1) 底質粒径の断面変形への影響

まず、底質の粒径を変化させ、波高と周期を変えた場合の断面変形に関する実験を行った。この場合、一様勾配斜面の初期勾配は 1/10 とした。底質の粒径が  $d_{50}=4.0\text{mm}$  の No.1~3 では、いずれも砕波帯内が侵食され、汀線付近に底質が堆積してバームが形成される堆積型の断面変形となった(図-2)。形成されたバームの規模と沖合の侵食域の規模は、波高をほぼ一定とした場合、周期が長くなるほど大きくなる事が分かる。

底質の粒径が  $d_{50}=1.0\text{mm}$  の場合 (No.4~6) には、周期が短い No.4 では砕波帯内が侵食され汀線付近と沖合に底質が堆積し、中間型の断面変形となった(図-3)。一方、周期を長くした No.5、6 では砕波帯内が侵食され、汀線付近に底質が堆積してバームが形成された。

底質の粒径が  $d_{50}=0.3\text{mm}$  の場合 (No.7~9) には、No.7、8 では波打ち帯から砕波帯内が侵食され、底質が沖合に堆積してバーが形成される侵食型の断面変形となった(図-4)。一方、No.9 では砕波帯内が侵食され汀線付近と沖合に底質が堆積する中間型の断面変形となった。

底質の粒径の影響は、ほぼ同じ波浪条件である No.1、4、7 で、堆積型、中間型、侵食型の断面変形になったことに生じた。同様に No.2、5、8 と、No.3、6、9 の比較でも底質の粒径が小さくなると堆積型から侵食型に移行することが分かる。また、波高をほぼ一定とした場合、周期が長くなると堆積型の断面変化が生じやすくなる傾向にある。

(2) 波高・周期の断面変形への影響

次に、底質の粒径を No.7~9 と同じにし、波高と周期を大きくした場合について実験した(図-5)。No.10~13 では、いずれの場合も波打ち帯から砕波帯内が侵食され、沖合に底質が堆積してバーが形成される侵食型の断面変形が生じた。

周期が同じである No.9、10、11 を比較すると、波高が大きくなるに従い中間型から侵食型の断面変形に移行することが分かる。また、侵食域の規模とバーの規模は、波高が大きいくほど拡大する。波高がほぼ同じで、周期が異なる No.11、12 を比較すると、周期が長い場合には侵食域の規模とバーの規模は小さくなる傾向にあることが分かる。

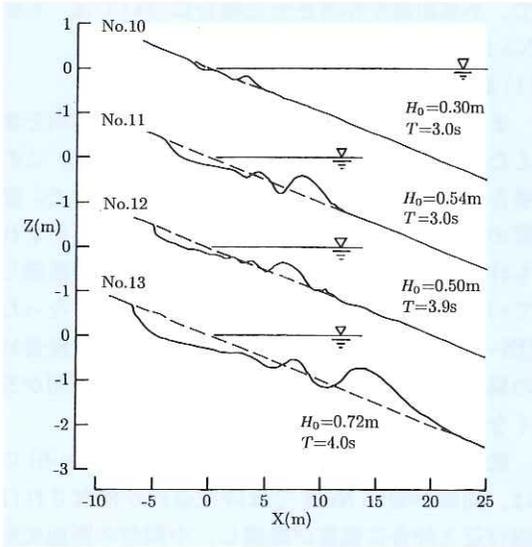


図-5 底質の粒径が  $d_{50}=0.3\text{mm}$  の場合

(3) 斜面勾配の断面変形への影響

底質の粒径を  $d_{50}=0.3\text{mm}$  とし、一様勾配斜面の初期勾配を 1/10、1/20、1/30 と変えた場合の断面変形を図-6 に示す。初期勾配が 1/10 の No.14 は、前浜から碎波帯内が侵食され、沖合にバーが形成される侵食型の断面変形となった。これは、波高がほぼ同じである No.10 とほぼ同様の断面変形を示す。

初期勾配が 1/20 の No.15 では、前浜にバームが形成され、汀線付近が侵食、その沖合にバーが形成された。また、バーの沖側も侵食された。断面変形としては、汀線付近と沖合が侵食されて、その中間に底質が堆積してバーが形成されたパターンを示す。この場合は、バームとバーが形成されていることから中間型の断面変形とした。

初期勾配が 1/30 の No.16 でも No.15 と同様の断面変形となった。この場合は、形成されたバーの規模は No.15 とほぼ同じであったが、前浜に形成されたバームの規模はやや大きくなり、堆積傾向が強くなった。No.14、15、16 の比較から波浪条件が同じ場合では、一様勾配斜面の初期勾配が緩くなるに従い、侵食型から中間型(堆積型)の断面変形に移行することが分かる。

(4) 混合粒径底質を用いた場合の断面変形

一様勾配斜面の初期勾配を 1/20 とし、中央粒径  $d_{50}=1.6\text{mm}$ 、ふるい分け係数  $S_0 = 3.1$  の混合粒径底質を用いた場合の断面変形を図-7 に示す。

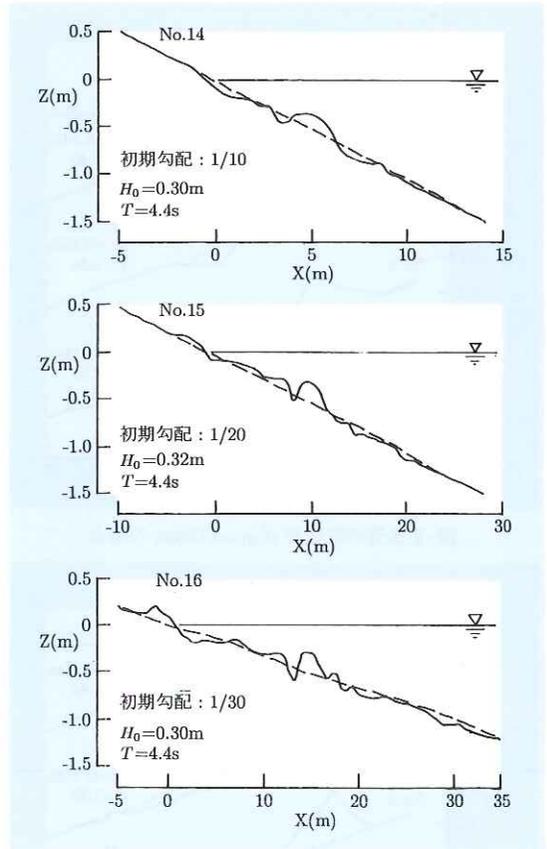


図-6 初期勾配が異なる場合

同じ初期勾配で中間型の断面変形が生じた No.15 より波高が大きく、周期が短い波浪を作用させた No.17 では、堆積型の海浜断面変形が生じた。No.15 と同じ粒径であれば侵食型の断面変形が生じる波浪条件であったが、底質の中央粒径が大きくなったために堆積型の断面変形になったと考えられる。

また、形成されたバームは鉛直上方になだらかな凸な形状であり、No.2、3、6 の鉛直上方に尖角的な形状のバームとは異なる。これは単一の波浪を作用させた場合の混合粒径底質を用いた実験の海浜断面変形の一つの特性と考えられる。

No.17 よりも波高を大きく、周期を短くした波浪を作用させた No.18 では、No.15 と同様に前浜にバームが形成され、碎波帯内と沖合が侵食され、その中間にバーが形成される断面変形が生じた。この断面変形も中間型と判断した。また、形成されたバーの形状は No.11、12、13 に比較すると尖角的であることが特徴としてあげられる。

(5) 不規則波の作用による断面変形

不規則波の作用による断面変形についての実験は、一様勾配斜面の初期勾配を 1/20 とし、中央粒径  $d_{50}=0.3\text{mm}$  の均一砂を用いて行った。同じ初期勾配の No.15 よりも有義波で波高を大きく、周期を短くした No.19 では、汀線から砕波帯内が侵食され、前浜にバームが、沖側にバーが形成される中間型の断面変形が生じた(図-8)。

No.19 よりも波高と周期を大きくした No.20 では、前浜から砕波帯内が侵食され、沖側に底質が堆積してバーが形成される侵食型の断面変形が生じた。初期勾配が 1/20 で規則波を作用させた No.15(No.17, 18) では、バーの沖合で侵食が生じていたが、同じ初期勾配で不規則波を作用させた No.19, 20 ではバーの沖側では変形は生じていないことが指摘される。

(6) 断面変形のタイプと形成された地形の諸元

(1)~(5) の実験条件と、断面変形のタイプ、形成されたバームの高さ ( $B_h$ )、トラフの水深 ( $h_t$ ) とバーの水深 ( $h_c$ )、前浜勾配 ( $\tan \alpha$ ) を表-1 に示す。この場合、 $B_h$ 、 $h_t$ 、 $h_c$  は図-1 の中間型の断面変形に示した諸元とし、 $\tan \alpha$  は汀線付近の勾配とした。

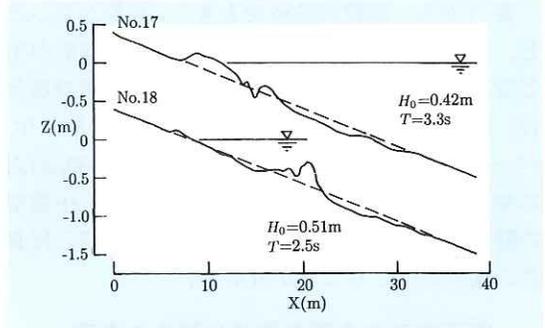


図-7 混合粒径底質を用いた場合

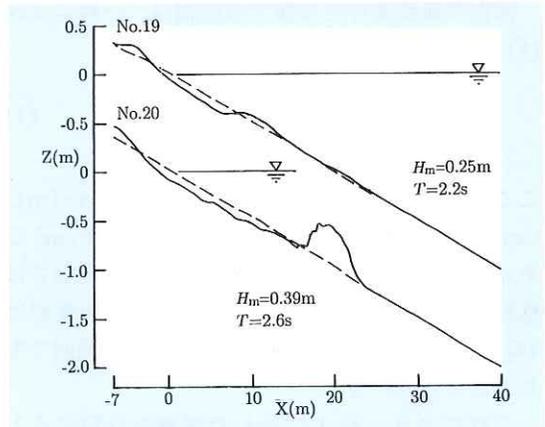


図-8 不規則波を作用させた場合

表-1 断面変形のタイプと形成された地形の諸元

No.	作用時間 (hr)	波高 $H_0$ (m)	周期 $T$ (S)	初期勾配 $\tan \beta$	粒径 $d_{50}$ (m)	海浜変形のタイプ	バーム高さ $B_h$ (m)	トラフ水深 $h_t$ (m)	バー水深 $h_c$ (m)	前浜勾配 $\tan \alpha$	備考
1	1.6	0.14	1.4	0.100	0.0040	堆積型	0.11	-	-	0.187	規則波 均一砂
2	2.0	0.15	1.8	0.100	0.0040	堆積型	0.17	-	-	0.238	
3	3.4	0.18	3.1	0.100	0.0040	堆積型	0.33	-	-	0.288	
4	1.6	0.15	1.4	0.100	0.0010	中間型	0.07	0.17	0.09	0.140	規則波 混合砂
5	2.0	0.15	1.8	0.100	0.0010	堆積型	0.13	-	-	0.189	
6	3.4	0.21	3.1	0.100	0.0010	堆積型	0.40	-	-	0.272	
7	2.3	0.14	1.4	0.100	0.0003	侵食型	-	0.19	0.10	0.152	規則波 均一砂
8	3.0	0.14	1.8	0.100	0.0003	侵食型	-	0.16	0.09	0.138	
9	0.4	0.15	3.1	0.100	0.0003	中間型	0.17	0.13	0.12	0.114	
10	4	0.30	3.0	0.100	0.0003	侵食型	-	0.31	0.19	0.095	規則波 均一砂
11	4	0.54	3.0	0.100	0.0003	侵食型	-	0.81	0.44	0.116	
12	4	0.50	3.9	0.100	0.0003	侵食型	-	0.59	0.36	0.086	
13	4	0.72	4.0	0.100	0.0003	侵食型	-	1.22	0.76	0.100	規則波 均一砂
14	21	0.30	4.4	0.100	0.0003	侵食型	-	0.44	0.32	0.100	
15	21	0.32	4.4	0.050	0.0003	中間型	0.20	0.43	0.21	0.102	
16	21	0.30	4.4	0.033	0.0003	中間型	0.18	0.59	0.29	0.099	規則波 混合砂
17	8	0.42	3.3	0.050	0.0016	堆積型	0.13	0.46	0.30	0.082	
18	8	0.51	2.5	0.050	0.0016	中間型	0.12	0.50	0.30	0.067	
19	18	0.25 (0.40)	2.2 (2.5)	0.050	0.0003	中間型	0.32	0.41	0.38	0.062	不規則波 均一砂
20	18	0.39 (0.65)	2.6 (3.1)	0.050	0.0003	侵食型	***	0.78	0.52	0.056	

表-1 から、底質の粒径が大きく、周期が長いほど、バームの形成が著しい堆積型の断面変形が生じることが分かる。また、同じ粒径の底質の場合は、波高が大きいくほど侵食型の断面変形となり、バーの発達が顕著である。さらに、一様勾配斜面の初期勾配が緩いと底質粒径が小さくても中間型の断面変形が生じ、初期勾配が急になるほど侵食型の変形が生じることが分かる。

#### 4. 断面変形の種類に関する考察

海浜の断面変形を分類する指標は、一般には式 (1) で与えられる<sup>6)</sup>。

$$\frac{H_0}{L_0} = C(\tan \beta)^{-0.27} \left(\frac{d}{L_0}\right)^{0.67} \quad (1)$$

ここに、 $H_0$  : 沖波波高 (m)、 $L_0$  : 沖波波長 (m)、 $\tan \beta$  : 初期海底勾配、 $d$  : 底質の平均粒径 (m) である。 $C$  は無次元定数であり、小規模の実験では堆積型の断面変形は  $C < 4$ 、中間型の断面変形は  $4 \leq C \leq 8$ 、侵食型の断面変形は  $C > 8$  の範囲で生じるとされている。

これにより、表-1 に示した実験を分類すると図-9 となる。なお、混合粒径底質を用いた No.17、18 では中央粒径を  $d$  として与え、不規則波を作用させた No.19、20 では平均波により分類した。堆積型と侵食型の断面変形は図-9 により分類がほぼ可能であるが、実験で中間型の断面変形が生じた場合は、図-9 では侵食型の断面変形が生じる範囲に入る。

これは、断面変形のタイプを分類する  $C$  値が、主に小型水路を用いた波高粒径比 ( $H_0/d$ ) が小さい条件での実験<sup>8)</sup> をもとに検討されていることによる。その実験では  $H_0/d = 50 \sim 380$  の範囲での海浜断面変形が扱われているが、表-1 に示した実験は  $H_0/d = 35 \sim 2,400$  の範囲で行った。特に、No.10~20 の実験は  $H_0/d = 260 \sim 2,400$  と Sunamura and Horikawa<sup>8)</sup> の実験より 1 オーダー大きい条件であった。ここで、現地の砂質海岸における底質の粒径を  $d = 0.3\text{mm}$  とし、波高  $H_0 = 6\text{m}$  の波浪が作用する場合を想定すると、 $H_0/d = 20,000$  とさらに 1 オーダー大きくなる。すなわち、表-1 に示した実験は小規模実験と現地海岸の中間的な波高粒径比の条件にあり、現地との海浜断面変形の相似性が高くなったと考えられる。

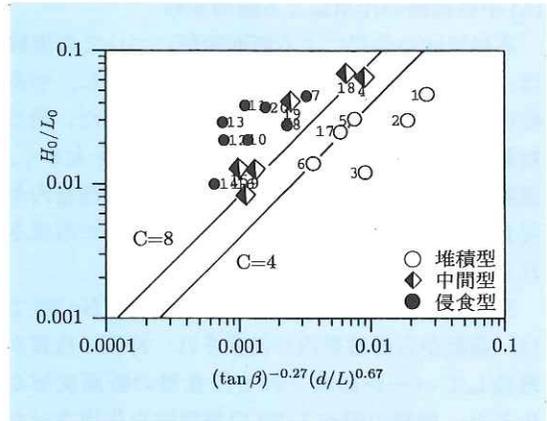


図-9 砂村の指標<sup>6)</sup> による断面変形の分類

式 (1) では初期斜面の勾配が断面変形に及ぼす影響を過小評価しているため、波浪条件を一定とし勾配を変えた No.14、15、16 が、図-9 ではほぼ同じ位置に分布する。今回の実験によれば一様勾配斜面の初期勾配が緩くなると、断面変形は侵食型から堆積型へと移行する傾向にあった。そこで、式 (1) よりも初期勾配の影響を積極的にとり入れた断面変形の判定指標について検討した。

Kraus ほか<sup>9)</sup> は、海浜における波浪作用後の汀線の前進・後退をいくつかのパラメタにより判定できるとしている。しかし、初期斜面の勾配と海浜断面変形の関係については言及していない。そこで、Kraus ほか<sup>9)</sup> の検討で用いられたフルードタイプ・ナンバー ( $F$ ) と、バーの形成に影響する碎波形態の判定指標であるサーフ・シミュラリティ・パラメタ ( $\xi_b$ ) により断面変形の分類を試みた。

$$F = w/(gH_b)^{0.5} \quad (2)$$

$$\xi_b = \tan \beta (H_b/L_0)^{-0.5} \quad (3)$$

ここに、 $H_b$  : 碎波波高 (m)、 $g$  : 重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )、 $w$  : 底質の沈降速度 (m/s) であり、碎波波高  $H_b$  は式 (4) で与えることができる<sup>8),10)</sup>。

$$\frac{H_b}{H_0} = (\tan \beta)^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-0.25} \quad (4)$$

縦軸に  $\xi_b$  を、横軸に  $F$  を初期勾配の 1.5 乗で除したパラメタをとり、各実験の値を図-10 に示した。なお、混合粒径底質を用いた No.17、18、不規則波を作用させた No.19、20 についての取り扱いを図-9 の場合と同様にした。図-10 では、

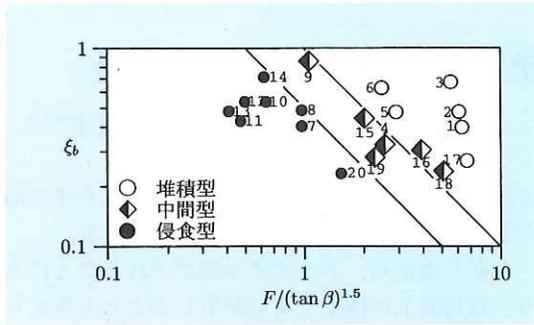


図-10 新しい指標による断面変形の種類

堆積型、中間型、侵食型の断面変形を良好に分類でき、大規模実験における断面変形がサーフ・シミュラリティ・パラメータとフルードタイプ・ナンバーによっても分類可能なことが分かる。

ここで、図-10の関係をもとにすれば、断面変形を分類する指標を式(5)のように与えることができる。

$$P = (1/\xi_b) / (F/(\tan \beta)^{1.5}) \quad (5)$$

$$= (\tan \beta)^{0.5} (g/L_0)^{0.5} H_b/w$$

なお、今回の実験結果を用いた場合には、堆積型の断面変形は  $P < 1.0$ 、中間型の断面変形は  $1.0 \leq P \leq 1.9$ 、侵食型の断面変形は  $P > 1.9$  の範囲で生じた。

式(1),(5)により海浜の断面変形を分類する場合においては、混合粒径底質を用いた場合の代表粒径は中央粒径で、不規則波を作用させた場合の代表波高・周期は平均波で与えればよい。しかし、これらの場合の海浜変形後のバームやバーの形状は、均一な底質を用いた規則波を作用させた場合と異なるため、バームやバーの諸元の予測については別途検討する必要がある。

### 5. おわりに

本報では、養浜により造成した海浜の断面変形を予測するために、大規模実験における海浜の断面変形を示し、断面変形のタイプ分類を試みるとともに、タイプ分類の新しい指標を提案した。しかし、ここで示した実験結果のみでは、データ数が不足しており、大規模実験および現地海岸のデータを追加した海浜の断面変形に関する解析をさらに進めて指標の普遍性の確認と現地海岸との対応を明らかにする予定である。また、これ

らの解析などを通じて、養浜後の海浜の断面変形をさらに精度良く予測する手法を開発する必要がある。

### 参考文献

- 1) 宇多高明：「日本の海岸侵食」, 山海堂, 442p, 1997.
- 2) 宇多高明、伊藤弘之：東播海岸における養浜工に関する研究, 土木研究所報告, 191号, 37p, 1993.
- 3) 張達平、田中茂信、山本幸次：大型2次元水路による海浜砂の分級機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.361-365, 1994.
- 4) 張達平、佐藤慎司、戸崎正明、田中茂信：混合砂海浜の断面変形と粒径別漂砂量に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.461-465, 1996.
- 5) 張達平、佐藤慎司、山本幸次、田中茂信：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, 1997.
- 6) 砂村継夫：海浜地形, 堀川清司編「海岸環境工学」, 東京大学出版会, pp.130-146, 1985.
- 7) 海岸保全施設築造基準連絡協議会：「海岸保全施設築造基準解説」, (社)全国海岸協会, 269p, 1987.
- 8) Sunamura, T. and Horikawa, K. : Two dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, ASCE, pp.920-938, 1974.
- 9) Kraus, N.C., Larson, M., and Kriebel, D.L. : Evaluation of beach erosion and accretion predictors, Coastal Sediments '91, pp.572-587, 1991.
- 10) Sunamura, T. : Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modeling, V.C.Lakhan and A.S. Trenhaile (editors), *Applications in Coastal Modeling*, Elsevier, Amsterdam, pp.159-213, 1989.

山本幸次\*



建設省土木研究所河川部  
海岸研究室研究員  
Koji YAMAMOTO

佐藤慎司\*\*



東京大学助教授  
大学院工学系研究科  
(前 海岸研究室長、工博)  
Shinji SATO