

海浜縦断面の可逆・非可逆的な変化過程に関する実験的研究

山本幸次*・鳥居謙一**

海岸保全施設としての「砂浜」の安定性を検討するために、大型水路内に一様勾配斜面の模型海浜を製作し、静穏波と暴浪波を交互に作用させて、海浜縦断面の可逆的な変化に関する実験を行った。それによると、静穏波と大きな暴浪波を交互に作用させた場合には、沖合にバーが残される非可逆的な変化となった。そこで、中間波（うねり性波浪）と大きな暴浪波を交互に作用させて海浜縦断面の変化過程を検討した。その結果、大きな暴浪波で形成されたバーは中間波の作用で岸側に移動し消滅することを確認し、海浜縦断面の可逆的な変化はうねり性波浪の作用で生じることを明らかにした。

1. はじめに

改正「海岸法」では防護・環境・利用の調和した海岸保全を推進することが義務づけられ、防護・環境・利用において優れた性能を持つ「砂浜」も海岸保全施設として指定・管理できることになった（磯部，1999）。また、2004年4月1日に「海岸保全施設の技術上の基準を定める省令」が施行されたこと（関，2004）から、早急に「砂浜」の指定基準等を定める段階にある。この指定基準等を策定するためには、「砂浜」の信頼性または安定性を評価する手法を確立しなければならない（例えば、鳥居ほか，2001）。しかし、「砂浜」の安定性を評価する妥当な指標や手法が提案されていないのが現状である。

そこで、まず、岸沖漂砂に伴う海浜縦断面の変化過程を検討し、「砂浜」の安定性の評価手法を確立するための知見を得ることとした。特に、本研究では、気象擾乱時の時間的に変動する波浪の作用による海浜縦断面の可逆的な変化過程（砂村，1985）に着目した。具体的には、従来の小型水路を用いた単一波浪の作用による海浜縦断面の変化に関する実験ではなく、大型水路を用いて静穏波と暴浪波を交互に作用させる実験、および中間波（うねり性波浪）と暴浪波を交互に作用させる実験を行った。そして、実験結果をもとに海浜縦断面の可逆・非可逆的な変化過程について考察した。

2. 実験方法

静穏波と暴浪波の相互作用による海浜縦断面の変化過程に関しては、砂村・倉田（1981）と岡田ほか（2000）によって小型水路を用いた実験で検討されている。これらの実験では海浜縦断面の可逆的な変化がほぼ再現されている。しかし、暴浪波の作用で深いところにバーが形

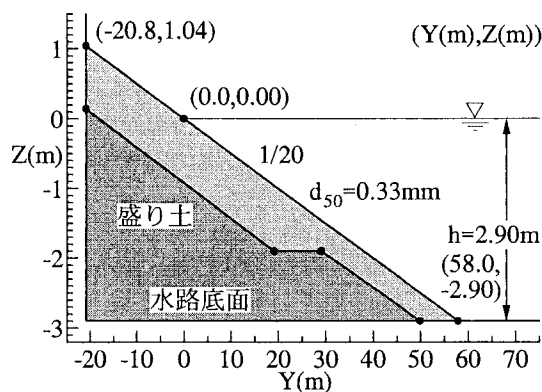


図-1 模型海浜の諸元と座標系

成された場合には、静穏波の作用ではバーの一部分は岸側に移動しないことも確認されている。これは、小型水路を用いた海浜変形実験における特有の現象とも指摘できる。そこで、本実験では大型水路を用いて静穏波と暴浪波を交互に作用させる実験を行い、海浜縦断面の変化過程を検討することにした。

実験は長さ135 m、幅2 m、深さ5 mの大型水路内に、中央粒径 $d_{50} = 0.33$ mm の均一砂を用いて、図-1に示すように初期の海浜縦断面が $\tan \beta = 1/20$ の一様勾配斜面の模型海浜を製作して行った。そして、水路底面からの水位が $h = 2.9$ m の静水面における初期の汀線位置を基準点として、鉛直上方をZ軸、岸沖方向をY軸とした座標系を設定した（図-1）。波浪条件は規則波とし、静穏波を波高 $H = 0.13$ m、周期 $T = 2.5$ s の1波浪、暴浪波を A ($H = 0.31$ m, $T = 2.5$ s), B ($H = 0.44$ m, $T = 3.0$ s), C ($H = 0.60$ m, $T = 3.5$ s) の3波浪に設定した。なお、実験縮尺はフルード則に従い、 $l_m/l_p = 1/9$ （時間縮尺は $t_m/t_p = 1/3$ ）と考えた。

ところで、海浜縦断面の変化過程に関する実験では波浪の作用時間が重要な条件となるが、海浜縦断面の可逆・非可逆的な変化過程に着目した研究は少ないため、静穏波や暴浪波の作用時間の設定手法はない。そこで、本実験では福島ほか（1999）を参考にして、各波浪の作

* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海浜研究室主任研究官

** 正会員 工修 国土交通省四国地方整備局大洲河川国道事務所長（元 国総研海岸研究室長）

用時間を静穏波は12.9時間、暴浪波 A は5.4時間、暴浪波 B は3.2時間、暴浪波 C は2.0時間とした。また、Sunamura・Horikawa (1974) の海浜縦断面の変化分類指標 (C_s 値) を求めると、静穏波では $C_s=5.7$ と中間型、暴浪波 (A: $C_s=13.6$, B: $C_s=17.1$, C: $C_s=21.0$) ではいずれも侵食型の変化が生じると予測される。

3. 実験結果

まず、静穏波を12.9時間、暴浪波 A を5.4時間、静穏波を12.9時間、暴浪波 B を3.2時間、その後に静穏波を12.9時間作用させた実験 (case ①) を行った。各測定時刻で計測された波高と周期は図-2 に示すとおりであり、波高にややばらつきが見られるものの、設定した静穏波と暴浪波 A および暴浪波 B の条件をほぼ満足している。初期の $\tan \beta=1/20$ の一様勾配斜面の模型海浜に静穏波を12.9時間作用させた後には、図-3 に破線で示すように、静水面より陸側に $Y=-0.8$ m に頂部があるバームが形成された。

この静穏波で形成された海浜縦断面に暴浪波 A を5.4時間作用させた $t=18.3$ h には、バームがやや岸側に移動し (頂部: $Y=-1.2$ m), $Y=4.1$ m~ 6.5 m に最深部が $Y=5.7$ m にあるトロフが、その沖側に頂部の位置が $Y=6.8$ m にあるバーが形成された。その後に静穏波を12.9時間作用させた $t=31.2$ h では、バーがほぼ消滅してトロフが埋め戻される変化が生じた。なお、 $Y=1.6$ m~ 4.1 m では砂が運び去られており、その砂はトロフの埋め戻しに寄与したと推定される。結局、 $t=12.9$ h~ 31.2 h では静穏波作用後のバームが形成されていた形状から、暴浪波 A の作用でのトロフ・バーの発達を経て、その後の静穏波の作用によるバーの消滅とトロフの埋め戻しという海浜縦断面の可逆的な変化となった。

$t=31.2$ h 後の模型海浜に暴浪波 B を3.2時間作用させた $t=34.4$ h には、 $Y=-3.0$ m~ 5.0 m に砂が堆積してバームが陸側にやや発達した (頂部: $Y=-1.8$ m)。また、 $Y=5.0$ m~ 9.3 m では砂が運び去られて最深部の位置が $Y=8.7$ m のトロフが、 $Y=9.3$ m~ 11.3 m に砂が堆積してバー (頂部: $Y=10.0$ m) が形成された。その後に静穏波を12.9時間作用させた $t=47.3$ h では、バーが侵食されたが完全には消滅せず、 $Y=6.5$ m~ 9.3 m のトロフが埋め戻される変化が生じた。なお、 $Y=0.5$ m~ 6.5 m では砂が運び去られており、その砂はトロフの埋め戻しと、 $Y=-3.0$ m~ 0.5 m の頂部の位置が $Y=-1.0$ m のバームの発達に寄与している。結局、 $t=31.2$ h~ 47.3 h では静穏波の作用でバームが形成されていた形状から、暴浪波 B の作用による中規模なトロフ・バーの発達を経て、その後の静穏波の作用によるバーの不完全な消滅とトロフの埋め戻しとバームの

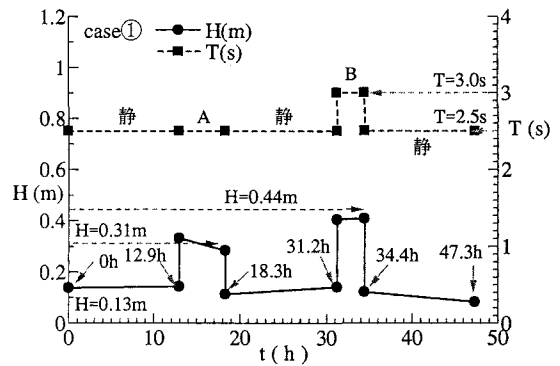


図-2 case ①で作用させた波浪条件

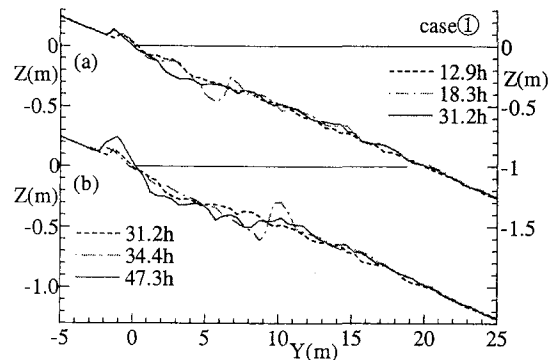


図-3 case ①における海浜縦断面の経時変化

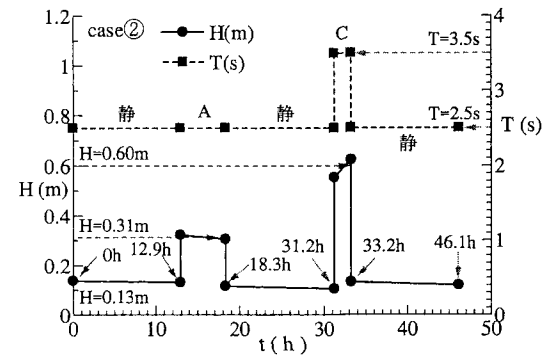


図-4 case ②で作用させた波浪条件

発達という、海浜縦断面のやや非可逆的な変化が生じたことになる。

次に、静穏波を12.9時間、暴浪波 A を5.4時間、静穏波を12.9時間、暴浪波 C を2.0時間、その後に静穏波を12.9時間作用させた実験 (case ②) を行った。各測定時刻で計測された波高と周期は図-4 に示すとおりであり、波高にややばらつきが見られるものの、設定した静穏波と暴浪波 A および暴浪波 C の条件をほぼ満足している。 $t=12.9$ h~ 31.2 h までの海浜縦断面の経時変化は case ①とほぼ同様であり、静穏波の作用でバームが

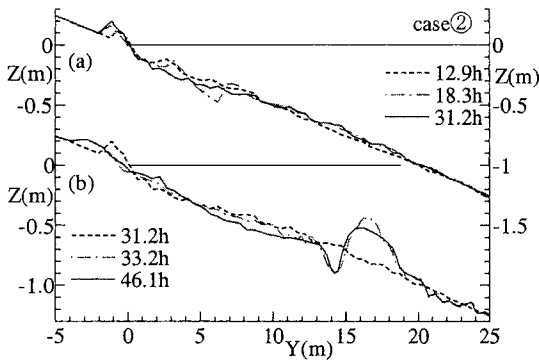


図-5 case ②における海浜縦断面の経時変化

形成された。そして、暴浪波 A の作用により小規模なトロフ・バーが発達し、その後の静穏波の作用によりバーの消滅とトロフの埋め戻しが生じた (図-5(a))。

$t=31.2$ h 後の模型海浜に暴浪波 C を 2.0 時間作用させた $t=33.2$ h には、 $Y=-4.0$ m $\sim$ 1.6 m では砂が堆積してバーがやや発達した。また、 $Y=5.0$ m $\sim$ 15.0 m では砂が運び去られてトロフ (最深部: $Y=14.2$ m) が、 $Y=15.0$ m $\sim$ 20.5 m に砂が堆積して大規模なバー (頂部: $Y=16.5$ m) が形成された (図-5(b))。その後、静穏波を 12.9 時間作用させた $t=47.3$ h では、大規模なバーはやや侵食されたがほとんど残存し、 $Y=12.5$ m $\sim$ 15.0 m のトロフも埋め戻されずに残された。結局、 $t=31.2$ h $\sim$ 47.3 h では静穏波の作用でバーが形成されていた形状から、暴浪波 C の作用による大規模なトロフ・バーの発達を経て、その後の静穏波の作用ではバーの消滅とトロフの埋め戻しが生じない、海浜縦断面の非可逆的な変化が生じたことが分かる。

case ①と case ②における各暴浪波の作用後の海浜縦断面を比較したのが図-6(a)であり、暴浪波が大きいほどトロフ・バーは沖側に形成されて、その規模も大きくなること分かる。また、各暴浪波の作用で形成された模型海浜に静穏波を作用させた海浜縦断面を比較したのが図-6(b)である。これによると、暴浪波 A の作用で形成されたトロフ・バーは消滅しており、暴浪波 B の作用で形成されたトロフ・バーはやや残され、暴浪波 C の作用で形成された大規模なトロフ・バーは残存していることが分かる。つまり、大きな暴浪波の作用で形成されたトロフ・バーは、静穏波の作用では消滅せずに残される海浜縦断面の非可逆的な変化となると言える。

case ②では暴浪波 A で形成されたトロフ・バーを静穏波で消滅させた後に暴浪波 C を作用させたため、先行海浜縦断面の影響で静穏波を作用させてもトロフ・バーが消滅しなかったとも考えられる。そこで、case ③では図-7 に示す波浪条件を、case ④では図-8 に示す波

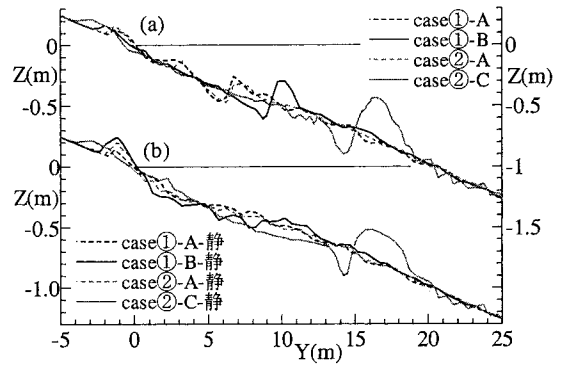


図-6 case ①と case ②の海浜縦断面の比較

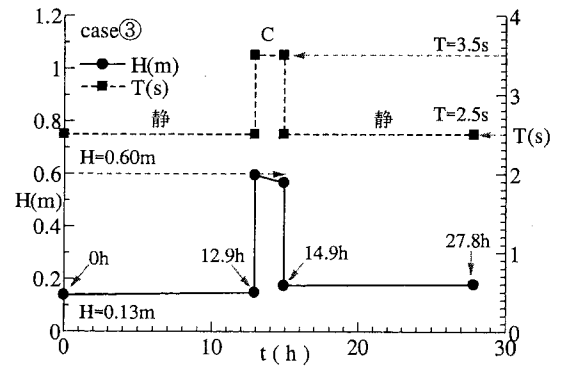


図-7 case ③で作用させた波浪条件

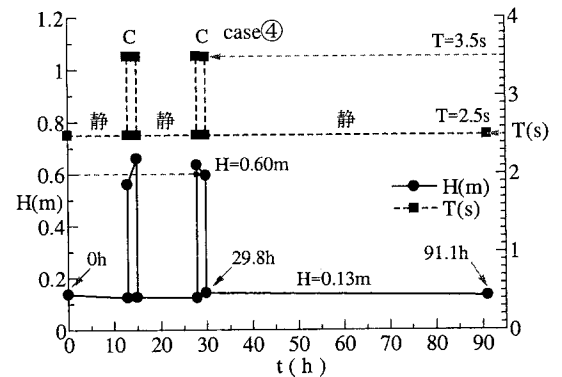


図-8 case ④で作用させた波浪条件

浪条件を作用させて海浜縦断面の変化過程を検討した。case ③と case ④の暴浪波 C 作用後とその後の静穏波作用後の海浜縦断面を図-9 に示す。暴浪波 C を 1 回のみ作用させた case ③では $t=14.9$ h に暴浪波 C の作用で大規模なトロフ・バーが形成され、その後の静穏波の作用では $t=27.8$ h にはトロフ・バーは小さくなったものの残存している。case ④では $t=0$ h $\sim$ 27.8 h までは case ③と同様の海浜縦断面の変化が生じたと推定され、縮小し残存したトロフ・バー付近で暴浪波 C が砕波したため、 $t=29.8$ h には沖側に大規模なトロフ・バーが

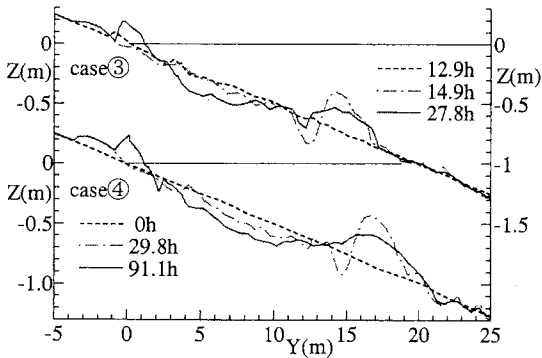


図-9 case ③と case ④における海浜縦断面の経時変化

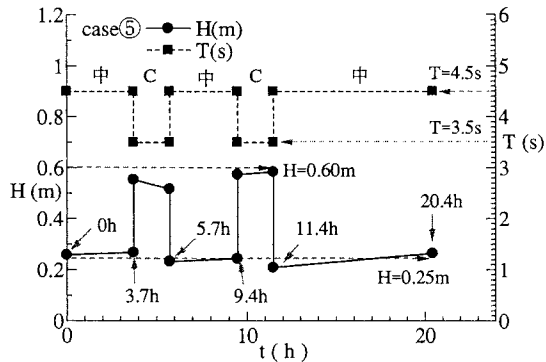


図-10 中間波と暴浪波 C を作用させた case ⑤の波浪条件

形成された。その後の静穏波の作用ではトロフは埋め戻されてがバーは残された。case ④では静穏波の 3 回と暴浪波 C の 2 回の作用によって非可逆的な変化が繰り返されて、定常的なバーが沖側に形成されたと考えられる。また、静穏波の作用時間が長い間バーがなだらかな形状になり、トロフが埋め戻されたものと推定される。

結局、静穏波と暴浪波 C を作用させた case ②～case ④では海浜縦断面の非可逆的な変化が生じ、定常的なバーが形成されたことが分かる。そこで、暴浪波 C で形成された大規模なトロフ・バーに中間波（うねり性波浪）を作用させる実験（case ⑤）を行うことにした。ここで、うねり性波浪に着目したのは、砂村（2002）による多段沿岸砂州の形成条件についての研究での次の指摘による。日本海沿岸では風波の減衰特性によりバーの形態が維持されるのに対して、太平洋沿岸では暴浪波の作用で一旦形成されたバーは、その後に来襲するうねり性波浪により平坦化されるという説である。なお、中間波は波高 $H=0.25$ m、周期 $T=4.5$ s に設定し、暴浪波 C に比較して波高を小さくし、周期を長くして中間型 ($C_s=7.4$) の海浜縦断面の変化が生じる条件とした。

case ⑤では設定した中間波を 3.7 時間、暴浪波 C を 2.0 時間、中間波を 3.7 時間、暴浪波 C を 2.0 時間、その

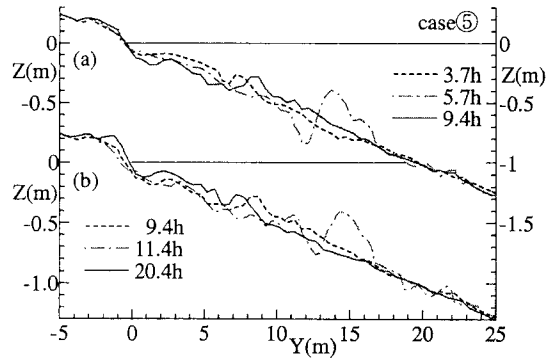


図-11 case ⑤における海浜縦断面の経時変化

後に中間波を 9.0 時間作用させた。各測定時刻で計測された波高と周期は図-10 に示すとおりであり、波高にややばらつきが見られるものの、設定した中間波と暴浪波 C の条件をほぼ満足している。そして、初期の $\tan \beta=1/20$ の一様勾配斜面の模型海浜に中間波を 3.7 時間作用させた後には、図-11 (a) に破線で示すように、静水面より陸側に $Y=-2.9$ m に頂部があるバームと、 $Y=7.2$ m に頂部があるバーが形成された。

この中間波で形成された海浜縦断面に暴浪波 C を 2.0 時間作用させた $t=5.7$ h には、静水面上ではほとんど変化がなく、 $Y=1.1$ m～ 12.6 m が侵食され最深部が $Y=12.0$ m にあるトロフが、その沖側の $Y=12.6$ m～ 17.0 m に頂部の位置が $Y=13.7$ m にあるバーが形成された。その後に中間波を 3.7 時間作用させた $t=9.4$ h では、バーがほぼ消滅してトロフが埋め戻される変化が生じた。なお、 $Y=-0.1$ m～ 6.9 m では砂が運び去られており、その砂はトロフの埋め戻しと $Y=8.6$ m に頂部がある小規模なバーの形成に寄与したと推定される。結局、 $t=3.7$ h～ 9.4 h では中間波作用後のバームと小規模なバーが形成されていた形状から、暴浪波 C の作用での大規模なトロフ・バーの発達を経て、その後の中間波の作用による大規模なバーの消滅とトロフの埋め戻し、および小規模なバーの形成という海浜縦断面の可逆的な変化となった。

$t=9.4$ h 後の模型海浜に暴浪波 C を 2.0 時間作用させた $t=11.4$ h には静水面上ではほとんど変化がなく、 $Y=5.2$ m～ 13.3 m では砂が運び去られてトロフ（最深部： $Y=12.6$ m）が、 $Y=13.3$ m～ 17.0 m に砂が堆積して大規模なバー（頂部： $Y=14.3$ m）が形成された（図-11 (b)）。その後に中間波を 9.0 時間作用させた $t=20.4$ h では、大規模なバーはほぼ消滅し、 $Y=9.3$ m～ -1.3 m に砂が堆積して $Y=-1.3$ m に頂部を持つバームと、 $Y=7.2$ m に頂部があるバーが形成された。結局、case ④では中間波の作用によるバームと小規模

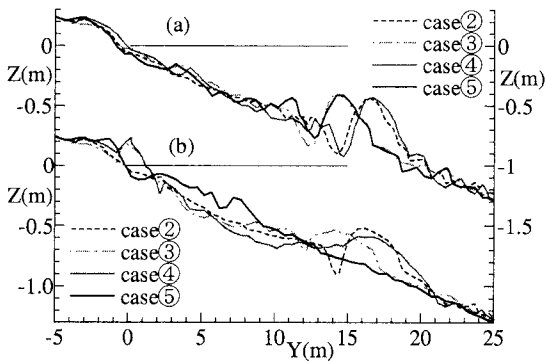


図-12 各 case の海浜縦断面の比較

なバーの形成、暴浪波 C の作用による大規模なトロフ・バーの発達という、海浜縦断面の可逆的な変化が生じた。

4. 考 察

case ②～case ⑤の最終の暴浪波 C を作用させた後の海浜縦断面と、その後に静穏波または中間波を作用させた最終的な海浜縦断面を比較した結果を図-12 に示す。case ②では暴浪波 C の作用で大規模なトロフ・バーが形成され、その後に静穏波を作用させてもトロフ・バーが残存する非可逆的な変化となった。case ③では case ②に比較して岸側に大規模なトロフ・バーが形成され、静穏波の作用によるトロフ・バーの変形も大きかった。case ④では暴浪波 C の作用で case ②とほぼ同じ位置に大規模なトロフ・バーが形成され、その後の静穏波の作用でトロフは埋め戻されたがなだらかな形状のバーが残存した。case ②と case ④静穏波作用後の海浜縦断面の違いは静穏波の作用時間の長さによる。case ④では暴浪波 C の作用で case ③とほぼ同じ位置に大規模なトロフ・バーが形成され、その後の中間波の作用でトロフ・バーは完全に消滅する可逆的な変化となった。

結局、case ②～case ④の静穏波と暴浪波 C の繰り返し作用では非可逆的な変化が生じ、case ⑤の中間波と暴浪波 C の繰り返し作用では可逆的な変化となった。暴浪波で形成された大規模なバーが、静穏波の作用で海浜断面形が変化する限界水深は、暴浪波で形成されたバーの沖側水深よりも浅いため、静穏波はバーの岸側への移動の外力となっていないと考えられる。一方、うねり性波浪の作用で海浜断面形の変化が生じる限界水深は、

暴浪波で形成されたバーの沖側水深とほぼ同じであり、うねり性波浪の作用が大規模なバーをほぼ完全に岸側に移動させた外力の大部分を占めると推定される。つまり、暴浪波の作用で形成されたバーが岸側に移動する可逆的な変化が生じるためには、周期の長いうねり性波浪の長時間の作用が不可欠であると考えられる。

5. おわりに

本実験の case ②～④のように、暴浪波の作用で形成されたバーが定常的に存在するようになると、岸側のトラフが浅くならないかぎり、バー上で碎波しない規模の波浪は前浜に直接作用する。この状態が長期間継続すれば、前浜部分では侵食が進行すると予測され、海岸保全施設としての「砂浜」が被災することになる。したがって、暴浪波の作用で前浜が侵食されるとともに、沖側に大規模なバーが形成された場合には、それが可逆的な変化か非可逆的な変化かを判定することが、海岸保全施設としての「砂浜」の安定性を評価するために必要とされる。このためには、深浅測量データと波浪観測データを十分に解析し、海浜縦断面の変化過程と波浪の来襲特性（波候特性）と関連づけて解明することが望まれる。

参 考 文 献

- 磯部雅彦(1999)：改正海岸法の理念の実現に向けて，海岸，第39巻第1号，pp. 14-18.
- 岡田 渉・浦南 満・出口一郎(2000)：沿岸砂州を有する海浜の断面変形に関する研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 606-610.
- 砂村継夫・倉田雄司(1981)：時間的に変動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.
- 砂村継夫(1985)：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.
- 砂村継夫(2002)：多段沿岸砂州の形成条件－日本地形学連合2002年春季大会講演要旨－，地形，第23巻，pp. 477-478.
- 関 健太郎(2004)：海岸保全施設の技術的基準について，海岸，第44巻第1号，pp. 48-50.
- 鳥居謙一・福島雅紀・佐藤慎司・高木利光・Ding Yan(2001)：海岸管理のための汀線変動量の確率的評価，海岸工学論文集，第48巻，pp. 1021-1025.
- 福島雅紀・山本幸次・佐藤慎司(1999)：時間変動波浪を用いた海浜変形実験，海岸工学論文集，第46巻，pp. 556-560.
- Sunamura, T. and Horikawa, K. (1974)：Two dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 920-938.