侵食型波浪の組み合わせによって形成される 二次元砂州断面に関する実験的研究

伊豆 友貴¹・有田 守²

¹学生会員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

E-mail:b6701716@planet.kanazawa-it.ac.jp

²正会員 金沢工業大学准教授 環境・建築学部 環境土木工学科 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

E-mail:arita@neptune.kanazawa-it.ac.jp

多段砂州の形成要因は長周期定常波によるものと、中間型もしくは侵食型波浪の組み合わせによって形成されるとされる2つの説がある。本研究は砕波位置の異なる侵食型波浪の組み合わせによって多段砂州が形成されるかについて実験的に検証を行った。実験は、砕波位置の異なる3種類の規則波を二次元水路に設置した海浜勾配1/15、底質粒径0.2mmの移動床に順序を変えて作用させた。波高が低い順に波浪を作用させると波高の低い波浪で形成された砂州は、波高の高い波浪の作用で消失し最終的に波高の高い波浪で形成された砂州のみ存在する地形となった。逆に波高の高い順に波浪を作用させた場合は、砂州の沖側で掃流が発達し沖側の砂州を消失させる結果となった。本実験の条件下では、波暦の組み合わせによって多段砂州が形成されることが難しいことが示唆された。

Key Words : multiple longshore bar, erosion type wave, equilibrium, breaking position

1. はじめに

多段砂州の形成要因に関して、Bowen(1980)は岸沖方向の長周期定常波によって形成されるということを指摘している¹⁾。また、Holman et al.(1981)は、通常の長周期定常波には、底質を移動させる十分な流速がないことを指摘しており、加藤(1984)は、長周期定常波が多段砂州の形成において重要な役割を果たしているとは指摘している²⁾³⁾。一方、田中ら(1994)は二次元移動床水路実験において、1/100勾配の海浜に砕波位置の異なる堆積型の波浪や水位を変化させる環境下で複数の砂州の形成を示し、波暦の組み合わせによる複数の砂州、すなわち多段砂州の形成の可能性を示している⁴⁾。しかし、この研究では堆積型の波浪によって形成される汀線付近の堆砂を潮位を変化させることによって維持することでいくつもの砂州形成の可能性を示していると考えられる。このように、多段砂州の形成要因に関しては、長周期定常波や波暦の組み合わせによる可能性が示されているが、いくつかの研究例があるにも関わらず、いまだに統一的な結論を得ることができていないと考えられる。

現地海岸に形成される多段砂州は、例えば由比ら(2013)によって報告されている石川県の千里浜海岸の多段砂州が報告されているが、海浜勾配は1/100から1/200程度の比較的緩やかな遠浅の海岸に形成されることが示

されており、一般に多段砂州は遠浅の海岸に形成されることが知られている⁵⁾。多段砂州の形成が波暦の組み合わせによって形成されると考えられると、砂州形成は中間型もしくは侵食型の波浪によって形成されると考えられる。潮位変動が大きな場合は、堆積型波浪のみの波暦によって汀線付近の堆砂が維持されると砂州として維持される可能性も考えられるが、そこに侵食型波浪によって汀線付近の砂の移動が作用すれば、砂州の存在は難しいと考えられる。また、実験水槽において波暦の組み合わせによる複数の砂州形成を検討した研究は筆者の知る限り、田中ら(1994)によるもので、実験で作用させた波浪が堆積型の波浪であることから、侵食型波浪による複数の砂州形成のメカニズムとは異なると考えられる。

そこで、本研究では多段砂州形成の要因の1つと考えられている侵食型波浪の波暦の組み合わせによって多段砂州の形成が可能かという点について二次元水路に設置した移動床を用いた基礎的な実験により検討を行うことを目的とする。

2. 実験装置と測定方法

実験は幅0.5m、高さ1.0m、長さ23.7mの二次元水路内で行い、使用した造波装置は三井造船社製の反射波吸収型であり、砂浜海浜模型と造波装置の間で発生する反射

表-1 実験条件

波浪	波高 H (cm)	周期 T (cm)	C_1 値(堀川ら)	C_2 値(服部ら)
波浪1	7.0	1.0	8.6	1.1
波浪2	9.0	1.0	11.0	1.4
波浪3	12.0	1.0	14.7	1.9

図-1 断面図

定常波を低減して実験を行った。また、本実験では水位一定の条件下で行うため、水深を75cmに設定し、実験の波浪は規則波を使用し、堀川ら(1974)の提案した式(1)および服部ら(1978)の提案した式(2)の平衡海浜断面形状を表す C_1 値、 C_2 値がいずれも侵食型の波浪条件になる波高 H および周期 T を選定した⁶⁾⁷⁾。波浪条件は表-1に示す通りである。

$$C_1 = (\tan \beta)^{0.27} (H_0/L_0)(D/L_0)^{-0.67} \quad (1)$$

$$C_2 = (H_0/L_0) \tan \beta / (w_s / gT) \quad (2)$$

ここに、 $\tan \beta$: 海浜勾配、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長、 D : 底質粒径、 w_s : 沈降速度、 g : 重力加速度、 T : 周期であり、堀川ら(1978)が提案した式(1)によると、 $C_1 \geq 8$: 侵食型、 $8 > C_1 \geq 4$: 中間型、 $4 > C_1$: 堆積型であり、服部ら(1978)が提案する C_2 値によると、 $C_2 > 0.5$: 侵食型、 $C_2 = 0.5$: 平衡海浜、 $C_2 < 0.5$: 堆積型である。

砂浜模型海浜は、中央粒径 $d_{50}=0.2\text{mm}$ の実験砂を用いて、図-1のように形成した。一般的に多段砂州が形成される海岸の海浜勾配は1/100から1/200の海岸とされているが、本実験では実験施設の制約上、1/15の海浜断面を用いて実験を行った。海浜勾配に違いはあるものの波浪条件を設定する際に使用した堀川ら(1974)や服部ら(1978)が提案した平衡海浜形状を決定する C 値は、海浜勾配、入射波の波形勾配と底質粒径の関数になっており、 C 値が侵食型波浪になるように海浜断面に対する波浪を決定していることから、侵食型波浪の組み合わせによる多段砂州の形成の検証を再現していると考えられる。

実験は3つの波浪を整地した海浜断面に作用させ、平衡海浜断面になるまで30分おきに計測し、砂州の形成される位置と平衡海浜断面に達するまでの時間を計測する予備実験と、3種類の波浪の組み合わせによって、最終的な平衡海浜断面がどのような形で形成されるかを検証する実験を行った。Case1では初期断面に平衡海浜断面

に達するまで波高の低い順に波浪を作用させ、Case2では初期断面に平衡海浜断面に達するまで波高の高い順に波浪を作用させた。2次元断面実験において侵食型波浪を作用させた場合、砂村ら(1981)によれば波浪条件によっては24時間造波後も地形が変化し続けたことが報告されている⁸⁾。しかし、本実験は造波板と海浜断面の間で発生する反射定常波を抑制する造波装置を使用して実験を行っている点が砂村ら(1981)の実験と異なる。実験において平衡海浜断面に達したかどうかの判定は、各断面での時間経過による変化量を算出後、変化量が一定値となった時点と平衡海浜断面と判断した。

3. 実験結果と考察

初期断面に波浪1を作用させた際の実験結果を図-2に示す。初期状態から0.5hr波浪を作用させると $X=380\text{cm}$ 付近で碎波し、 $X=410\text{cm}$ 付近で砂州が形成され、さらに波浪を作用させると砂州は岸付近に移動し、最終的に $t=3.0\text{hr}$ では砂州は $X=420\text{cm}$ で安定したことが確認できる。初期断面に波浪1を作用させた際の各断面での変化量の時刻暦変化を図-3に示す。初期状態から $t=1.5\text{hr}$ までは波浪により沖側の変化量が1cm程度あるが $t=2.0\text{hr}$ 後は変化量が減少したところで安定している。このことから、初期断面に波浪1を作用させると、 $t=3.0\text{hr}$ で平衡海浜断面になったと考えられる。なお、 $t=0.5\text{hr}$ 、 $t=1.5\text{hr}$ で $X=0\sim$

図-2 初期断面に波浪1を作用させた際の断面の時刻暦変化

図-3 初期断面に波浪1を作用させた際の各断面での変化量の時刻暦変化

図-4 初期断面に波浪2を作用させた際の断面の時刻歴変化

図-6 初期断面に波浪3を作用させた際の断面の時刻歴変化

図-5 初期断面に波浪2を作用させた際の各断面での変化量の時刻歴変化

図-7 初期断面に波浪3を作用させた際の各断面での変化量の時刻歴変化

300cmで変化量がばらついたのは、砂漣が形成されていたためと考えられる。

初期断面に波浪2を作用させた際の海浜断面の実験結果を図-4に示す。0.5hr波浪を作用させるとX=360cm付近で碎波し、X=370cm付近で砂州及び砂州の岸側にトラフが形成され、その後砂州は岸側に移動し、t=1.0hr以降は、X=390cmで砂州の位置が安定した。初期断面に波浪2を作用させた際の各断面での変化量の時刻歴変化を図-5に示す。初期状態からt=1.0hrまで波浪を作用させた際に、砂州及びトラフが形成された、X=365cm、X=395cmで3.52cm、2.61cmは大きく変化しているが、t=2.0hr以降は各地点の変化量は減少し安定していることからt=2.0hrで平衡海浜断面になったと考えられる。

初期断面に波浪3を作用させた際の海浜断面の実験結果を図-6に示す。初期断面から1.0hr波浪を作用させるとX=315cm付近で碎波し、X=345cm付近で砂州が形成され、t=2.5hrでは砂州及びトラフの位置の変化はなくなり平衡海浜断面に達したと考えられる。初期断面に波浪3を作用させた際の各断面での変化量の時刻歴変化を図-7に示す。変化量は海浜断面の時刻歴変化の結果と同様に、各地点の変化量はt=1.0hr以降の変化量は安定していることがわかった。波浪1, 2, 3について初期断面から、平衡海浜断面に達するまでの断面変形実験を実施した結果、波高が低い波浪1, 2では砂州の位置の変化が見られたが、波高が高い波浪3のケースでは砂州の移動は見られな

った。また、平衡海浜断面に達する時間は2.5hr程度であることが確認できた。

(1) Case1実験結果

Case1は、波浪1, 2, 3を波高の低い順に平衡海浜断面になるまで作用し続け、最終的に形成される海浜断面の形状を計測した。初期断面に波浪1を作用させた際の海浜断面の実験結果は図-2と同様である。波浪1によって変化した初期断面に波浪2を作用させた際の海浜断面の実験結果を図-8に示す。0.5hr波浪を作用させるとX=360cm付近で碎波し、波浪1を作用させた際に形成されていた砂州及びトラフは消失し、X=410cm付近に砂州が形成さほぼ同等の地形となり、t=1.5hrではt=1.0hrで形成されて

図-8 波浪1によって変化した初期断面に波浪2を作用させた際の断面の時刻歴変化

れた．さらに0.5hr波浪を作用させた $t=1.0\text{hr}$ では $t=0.5\text{hr}$ といた砂州が発達し，砂州の形状が明確になった．その後， $t=2.0\text{hr}$ では $X=350\text{cm}$ 付近で碎波し， $t=1.5\text{hr}$ で形成されていた砂州は発達し，さらに砂州の形状が明確になった．その後， $t=2.5\text{hr}$ ではさらに砂州及びトラフの形状が明確になった．ここで，各波浪によって形成された断面に他の波浪を作用させた際の平衡海浜断面は予備実験と同様に変化量が一定値となった時点を平衡海浜断面として実験を終了した．平衡海浜断面に達する時間はどの波浪も3.5hr以下であった．

波浪1，波浪2によって変化した初期断面に波浪3を作用させた際の海浜断面の実験結果を図-9に示す．0.5hr波浪を作用させると $X=300\text{cm}$ 付近で碎波し，波浪2を作用させた際に形成されていた砂州及びトラフは消失し， $X=395\text{cm}$ 付近に砂州が形成された．しかし，0.5hr波浪を作用させた $t=1.0\text{hr}$ では $t=0.5\text{hr}$ と同様に $X=300\text{cm}$ 付近で碎波し， $t=0.5\text{hr}$ で形成された $X=395\text{cm}$ 付近の砂州は消失した． $t=1.5\text{hr}$ では $X=375\text{cm}$ 付近で碎波し， $X=355\text{cm}$ 付近に砂州が形成され， $t=2.0\text{hr}$ では， $X=280\text{cm}$ 付近で碎波し， $t=1.5\text{hr}$ で形成された砂州は発達し，砂州の岸側にトラフが形成された．その後， $t=2.5\text{hr}$ では， $t=2.0\text{hr}$ と同様に $X=280\text{cm}$ 付近で碎波し， $t=2.0\text{hr}$ で形成された砂州及びトラフは発達し， $t=3.0\text{hr}$ ， $t=3.5\text{hr}$ では砂州の形状がさらに明確になった．

図-9 波浪1，波浪2によって変化した初期断面に波浪3を作用させた際の断面の時刻暦変化

図-10 初期断面に波高の低い順に波浪を作用させた際の断面の時刻暦変化

Case1における初期断面に波高の低い順に波浪を作用させた際の断面の時刻暦変化を図-10に示す．波高の低い順に波が作用すると，波高の高い波浪を作用させた際に岸側で形成されていた砂州は消失し，沖側に1段砂州が形成される．このことから，最も波高の高い波浪が作用するとそれ以前に形成されていた砂州は消失してしまい，断面地形は最も波高の高い波浪に影響されることが考えられる．

(2) Case2実験結果

Case2は，波浪1，2，3を波高の高い順に平衡海浜断面になるまで作用し続け，最終的に形成される海浜断面の形状を計測した．初期断面に波浪3を作用させた際の海浜断面の実験結果は，図-6と同様である．波浪3によって変化した初期断面に波浪2を作用させた際の海浜断面の実験結果を図-11に示す．0.5hr波浪を作用させると $X=410\text{cm}$ 付近で碎波し，波浪3を作用させた際に形成されていた砂州及びトラフは消失し， $X=435\text{cm}$ 付近に砂州が形成された．しかし，0.5hr波浪を作用させた $t=1.0\text{hr}$ では $t=0.5\text{hr}$ と同様に $X=410\text{cm}$ 付近で碎波し， $t=0.5\text{hr}$ で形成された $X=435\text{cm}$ 付近に形成されていた砂州は沖向き移動し， $X=420\text{cm}$ に砂州が形成され，その岸側に明確なトラフが形成された．その後， $t=1.5\text{hr}$ ， $t=2.0\text{hr}$ では砂州及びトラフの形状は明確になり，地形はほぼ変化しなかった．

波浪3，波浪2によって変化した初期断面に波浪1を作用させた際の海浜断面の実験結果を図-12に示す．0.5hr波浪を作用させると $X=440\text{cm}$ 付近で碎波し，波浪2を作用させた際に形成されていた砂州及びトラフは消失し， $X=455\text{cm}$ 付近に砂州が形成され，その岸側に明確なトラフが形成された．0.5hr波浪を作用させた $t=1.0\text{hr}$ では $t=0.5\text{hr}$ と同様に $X=440\text{cm}$ 付近で碎波し， $t=0.5\text{hr}$ で形成された $X=455\text{cm}$ 付近に形成されていた砂州は沖向き移動し， $X=445\text{cm}$ に砂州が形成された．その後， $t=1.5\text{hr}$ ではトラフの形状が明確になり， $t=2.0\text{hr}$ では地形はほぼ変化しなかった．

図-11 波浪3によって変化した初期断面に波浪2を作用させた際の断面の時刻暦変化

図-12 波浪3, 波浪2によって変化した初期断面に波浪1を作用させた際の断面の時刻経変化

図-13 初期断面に波高の高い順に波浪を作用させた際の断面の時刻経変化

Case2における初期断面に波高の高い順に波浪を作用させた際の断面の時刻経変化を図-13に示す。図-13より、波高の高い順に波が作用すると高い波高で形成された砂州が消失してしまうことが確認できた。波高の高い順に波浪を作用させた各波浪で形成された砂州を維持して多段砂州の形成を期待した実験であったが、本実験では砂州の形成位置が近く、波高の低い波浪が作用しても砂漣が形成されていたため、掃流移動により砂州が消失してしまったと考えられる。

4. まとめ

本実験によって、3つの波高の異なる波浪の組み合わせによる海浜断面地形の変化の実験を実施した結果、Case1では、波高の低い順に波浪を作用させると、波高の低い波浪で形成された砂州は、波高の高い波浪の作用で消失し、最終的に最も波高の高い波浪によって形成された砂州のみが存在する平衡海浜断面となった。Case2では、波高の高い順に波浪を作用させると、碎波点の沖側で掃流が卓越し、波高の高い波浪で形成された砂州は、

それより低い波浪で消失する結果となった。

以上より、海浜勾配1/15で規則波を用いた実験では、侵食型波浪の碎波位置が異なる波浪を作用させると、最終的に作用した波浪により形成された1段砂州の平衡海浜断面が形成された。このことから、本実験条件下では波暦の組み合わせによって多段砂州が形成することは困難であると考えられる。

本実験では、実験の制約上、海浜勾配を1/15としたが、実際の多段砂州が形成される海浜は緩勾配の海浜である。そのため、波暦の組み合わせによっては、本実験のように碎波位置付近で形成される砂州の前後で発生する掃流砂によって、それ以前に形成された砂州が消失してしまう現象が、掃流砂の影響範囲が十分遠く以前の波浪で形成された砂州に影響を及ぼさないことも考えられる。しかし、波浪は徐々に高波浪から低波浪、またはその逆に変化するために規則波のみが作用する海岸では勾配を問わず、最終的に作用した侵食型波浪によって形成される砂州が残ると考えられる。本研究により実際の海浜では、波暦の組み合わせによって多段砂州が形成される可能性は非常に低く、長周期定常波、多段碎波などの現象によって多段砂州が形成されていると考えられる。

参考文献

- 1) Bowen, A. J.: Simple models of nearshore sedimentation, Beach profile and longshore bars, Geol. Survey of Canada, pp.1-11, 1980.
- 2) Holman, R. A.: Infragravity energy in the surf zone, J. G. R., Vol.86, No.C7, pp.6442-6450, 1981.
- 3) 加藤一正: 反射定常波による多段沿岸砂州の形成, 港湾技術研究所報告, Vol.23, No.3, pp.3-46, 1984.
- 4) 田中茂信, 張達平, 山本幸次: 波高, 水位の変化する条件下での緩勾配海岸の変形に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol.41, pp.381-385, 1994.
- 5) 由比政年, 松山正之: 千里浜海岸周辺における砂州の周期移動特性とその沿岸方向変化, 海岸工学論文集, Vol.69, No.2, pp.656-660, 2013.
- 6) 堀川清司, 砂村継夫, 近藤浩右, 岡田滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 海岸工学講演会論文集, Vol.23, pp.329-334, 1975.
- 7) 服部昌太郎, 井崎嘉幸: 平均水位変動下での岸沖漂砂と海浜地形, 海岸工学講演会論文集, Vol.28, pp.202-206, 1981.
- 8) 砂村継夫, 倉田雄司: 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, 海岸工学講演会論文集, Vol.28, pp.222-226, 1981.

(2017. 3. 15 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT A BEACH SECTION TO BE FORMED OF A PLURAL EROSION TYPE WAVES

Tomoki IZU and Mamoru ARITA

In this study, We inspected whether the multiple longshore bar is formed by the combination of three kinds of different erosion type waves of the breaking position experimentally. When the wave acted in low order of the wave height, the bar which was formed of a low wave of the wave height was disappeared by the action of a high wave of the wave height, and became the equilibrium beach section which existing only the bar which was formed of the high wave of the wave height. In contrast, when the wave acted in high order of the wave height, the traction excelled in the offing side of the breaking position, and the bar which was formed of the high wave of the wave height was disappeared by the action of the wave which was lower than it. Therefore, in the experiment using the rule wave in beach incline $1/15$, when it acted by the different erosion type wave of the breaking position, the equilibrium beach section of one step of the bar was formed by the wave which acted finally. From this, it is thought that it is difficult for the multiple longshore bar to form it by the combination of waves under this experiment condition.