

急勾配・大波浪海域に建設する 人工海浜の安定に関する二次元不規則波実験

永井紀彦* ・ 守屋義一** ・ 及川恵悦***
宮崎和行****・ 永松宏一****

1. はじめに

人工海浜の建設は、余暇時間の増大やレジャー需要の高まりに伴って、漸時進められてきている。完成した砂浜は、夏期の海水浴場のみならず、年間を通じて人々の憩いの場として活用されるとともに、その防災機能も注目されている。しかしながら、海底勾配が急で、波が大きい自然条件の厳しい海岸に人工海浜を建設する場合、安定な養浜形状として緩勾配と成らざるを得ず、養浜断面が大きくなり、建設コストが巨額になる。このような問題の解決策としては、養浜断面を小さくするための小断面人工海浜工法の検討および低コストの波浪制御構造物の開発などが考えられる。

本研究では、大きな粒径の底質で養浜することによって養浜断面を安定に導き、かつ養浜断面を小規模化することを目的として二次元移動床実験を実施し、法止め堤を有する養浜断面の安定限界と波浪・底質粒径との関係を検討した。実験波はすべて不規則波を用いて波形勾配ごとに現象を把握するとともに、均一な粒径のみでなく混合粒径を用いた場合の有効性についても検討を行なった。

2. 実験条件および方法

ピストン型不規則波造波機を有する長さ 38 m、幅 1.0 m、高さ 1.5 m の水槽を用い、現地急勾配海岸を想定して 1:10 の海底模型を設置した。この模型上に 1:10 勾配の養浜断面を 20 cm の被覆厚で設置するとともに、汀線より沖側 4.0 m の位置に養浜端部と同じ高さで幅 10 cm の法止め堤を設けた(図-1 参照)。

底質粒径は、現地での礫養浜の可能性を考慮して粒径の大きなものも対象とし、細粒径(中央粒径 $d_{50}=0.185$ mm)、中粒径($d_{50}=0.38$ mm)、粗粒径($d_{50}=1.40$ mm)とした。また、これらを等比率で混合($d_{50}=0.41$ mm)

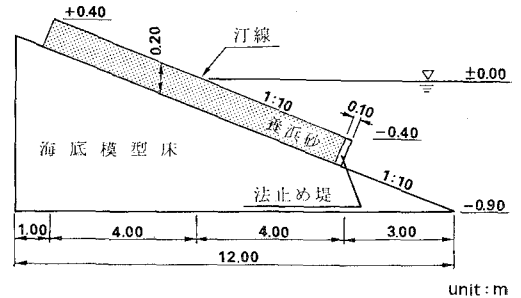


図-1 実験断面配置図

し、この 4 種類を対象とした。

作用させた波浪は Bretschneider・光易型のスペクトル形を有する不規則波であり、波形勾配を 0.01~0.05 の間で 0.01 ごとに 5 種類に変化させた。作用させた波高・周期は表-1 に示すように底質によって異なるが、波高 4.7~25.3 cm、周期 1.0~3.3 sec とし、波形勾配ごとに段階的に波高・周期を変化させて波浪と底質、地形変化との関係を検討した。

地形測定は、波作用前、2.5 時間後および 5.0 時間後に砂面測定器を用いて行なった。この他に、波高は容量式波高計、流速は電磁流速計、砂中の浸透流速は染料を用いて測定するとともに、堤外に流出する養浜砂をサンドトラップによって捕獲し、メスシリンダーによって計測した。また、混合粒径による実験では、代表的な断面位置において底質のサンプリングを行ない、粒度分布を調べた。

3. 実験結果

3.1 地形変化

図-2 は、4 種類の底質に同一波浪(沖波有義波高 $H_0=18.7$ cm、沖波有義波周期 $T_0=2.0$ sec、沖波波形勾配 $H_0/L_0=0.03$) を作用させた場合の波作用 5 時間後における地形断面変化の一例を示したものである。これによると、底質粒径が細粒径、中粒径および混合粒径の場合には前浜が削り取られて汀線が後退し、沿岸砂洲(以下バーとする)が生じ、粒径が細かいほど汀線の後退量、

* 正会員 (前)運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所次長
(現)運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官
** 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所調査課長
*** 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所水工係長
**** 工務 株式会社エコー第一技術部水理課

表-1 実験ケース

ケース (No.)	波形 勾配	波高 (cm)	周期 (sec)	底質粒径
1-1	0.01	6.2	2.0	細粒径 $d_{50} = 0.185\text{mm}$ $S_0 = 1.31$ $S_k = 0.96$
1-2	0.01	7.6	2.2	
1-3	0.01	9.0	2.4	
1-4	0.01	12.2	2.8	
1-5	0.01	17.0	3.3	
1-6	0.02	8.0	1.6	
1-7	0.02	12.5	2.0	
1-8	0.02	18.0	2.4	
1-9	0.03	4.7	1.0	
1-10	0.03	6.7	1.2	
1-11	0.03	12.0	1.6	
1-12	0.03	18.7	2.0	
2-1	0.02	8.0	1.6	中粒径 $d_{50} = 0.38\text{mm}$ $S_0 = 1.35$ $S_k = 0.92$
2-2	0.02	12.5	2.0	
2-3	0.02	18.0	2.4	
2-4	0.03	4.7	1.0	
2-5	0.03	12.0	1.6	
2-6	0.03	18.7	2.0	
2-7	0.04	9.0	1.2	
2-8	0.04	12.2	1.4	
2-9	0.04	16.0	1.6	
2-10	0.05	20.0	1.6	
3-1	0.03	15.2	1.8	粗粒径 $d_{50} = 1.40\text{mm}$ $S_0 = 1.44$ $S_k = 0.94$
3-2	0.03	18.7	2.0	
3-3	0.03	22.7	2.2	
3-4	0.04	9.0	1.2	
3-5	0.04	16.0	1.6	
3-6	0.04	25.0	2.0	
3-7	0.05	15.3	1.4	
3-8	0.05	20.0	1.6	
3-9	0.05	25.3	1.8	
4-1	0.02	8.0	1.6	混合粒径 $d_{50} = 0.41\text{mm}$ $S_0 = 2.44$ $S_k = 1.85$
4-2	0.02	12.5	2.0	
4-3	0.02	18.0	2.4	
4-4	0.03	6.7	1.2	
4-5	0.03	12.0	1.6	
4-6	0.03	18.7	2.0	
4-7	0.04	9.0	1.2	
4-8	0.04	12.2	1.4	
4-9	0.04	16.0	1.6	

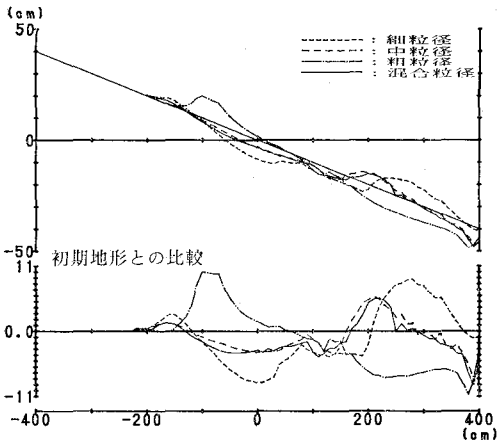


図-2 地形断面図

バーの規模が大きくなっている。一方、粗粒径では断面変化が異なり、前浜部分に堆積してバームを形成し、汀線が前進している。また、4底質とも法先部分での侵食が見られ、一部堤外への流出が生じている。

本研究では、このような波浪と底質、地形変化との関係を一度に解釈するために、時系列データの解析に用いていた経験的固有関数法を独立した実験ケースデータに適用して、地形変化形状を分類することを試みた(柳嶋ら, 1990)。初期地形に対する5時間後の地形変化を対象として、経験的固有関数法を用いて表わすと次式で示される。

$$\Delta y(X, N) = \sum_n c_n(N) \cdot e_n(X) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $y(X, N)$ は X の位置でケース N の地形変化量、 $c_n(N)$ はケース N の係数、 $e_n(X)$ は X の位置でモード n の固有関数である。

図-3 は経験的固有関数法によるケース間比較結果であり、寄与率の最も高いモード1の結果を示してある。なお、地形変化量は正の場合を侵食、負を堆積として入力を行なっているため、係数と固有関数との積が正の場合が侵食、負の場合が堆積を示している。

モード1の解析結果を前浜付近に着目して見ると、固有関数は負の値を示しているため、係数 c_1 が正の場合には堆積が、負の場合には侵食が生じることになる。

図-4 は、図-3 をもとに $c_1 > 0$ (堆積型)、 $c_1 \div 0$ (不明確)、 $c_1 < 0$ (侵食型) として地形変化の解析結果をプロットしたものであり、縦軸に沖波波高と底質中央粒径との比を用いてある。図-4 より、岩垣・野田による沿岸砂洲の発生限界(合田・佐藤,

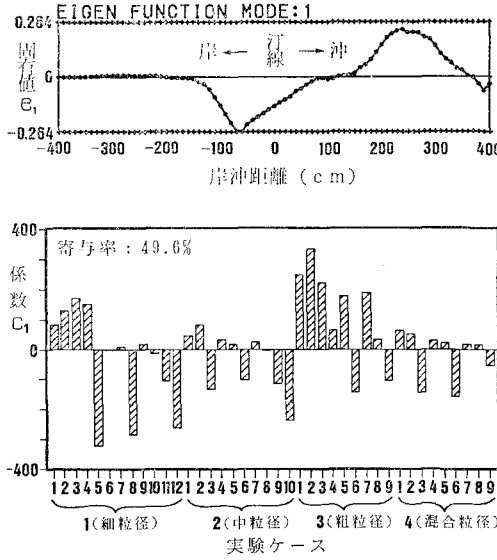
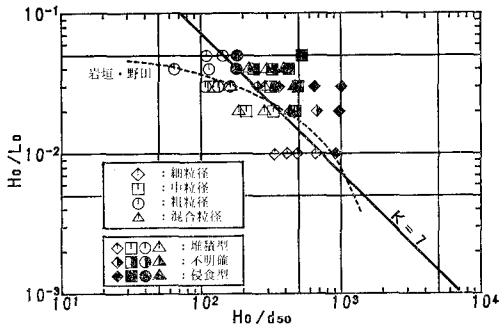


図-3 経験的固有関数法による解析結果 (モード 1)



図—4 地形変化の解析結果

1981)とも比較的良く一致している。一方、砂村(1985)が海浜変形過程を説明するのに用いたパラメータの碎波波高を沖波波高に置き換えて、次式で定義した K で整理した結果、養浜断面変化は $K=7$ 付近で分けられ、本実験結果からは $K>7$ の場合に侵食型の断面を形成し易いことがわかった。

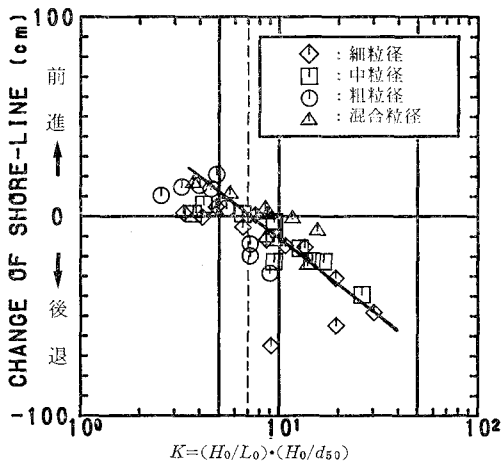
$$K = \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \cdot \left(\frac{H_0}{d_{50}} \right) = \frac{H_0^2}{L_0 \cdot d_{50}} \quad \text{.....(2)}$$

3.2 汀線変化

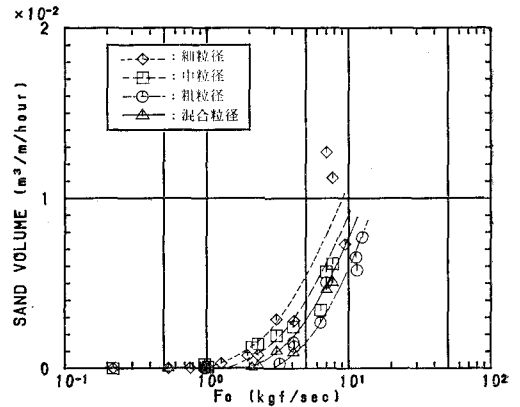
図—5は横軸に式(2)で示した K を、縦軸に初期汀線に対する5時間後汀線の変化量を用いており、プラス側が前進を、マイナス側が後退を示している。これによると、汀線変化は K で整理されることがわかり、ほぼ $K>7$ の場合に後退、 $K<7$ の場合に前進し易いことを示している。これは経験的固有関数法を用いた養浜断面変化の分類で示した値と一致するものであり、本実験結果からは作用する波浪に対して、 $K<7$ となる底質粒径を用いることで海浜を堆積性にできることがわかった。

3.3 養浜砂の流出量

地形を変化させる外力として式(3)に示す深海波のエ



図—5 汀線変化量と K との関係



図—6 エネルギーフラックスと流出量との関係

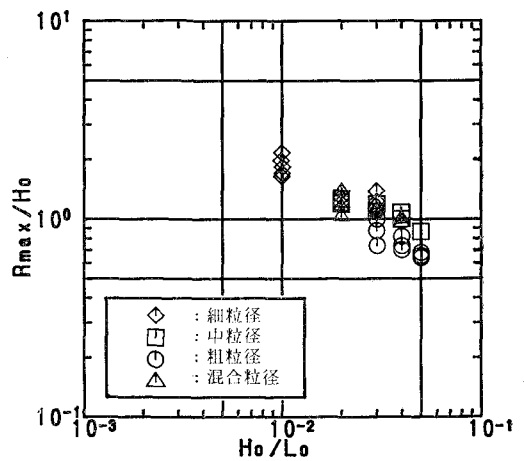
ネルギーフラックス(F_0)を考慮した。

$$F_0 = \frac{\rho}{16} \cdot \frac{g}{2\pi} \cdot H_0^3 \cdot T_0 \quad (\text{kgf/sec}) \quad \text{.....(3)}$$

図—6は横軸にエネルギーフラックスを、縦軸に養浜砂の流出量を用い、底質をパラメータとして整理したものである。その結果、養浜砂の流出量とエネルギーフラックスの間には強い関係があり、エネルギーフラックスが大きくなるに従って、流出量が大きくなっていることがわかる。また、細粒径、中粒径、混合粒径、粗粒径それぞれに対応して、1.0, 1.5, 2.0 ならびに 3.0 kgf/sec 程度以上のエネルギーフラックスで流出が見られ、混合粒径の場合には粗粒分が含まれるために中粒径よりも流出しにくくなっている。

3.4 波の遡上高さ

人工海浜を建設する際に後浜の天端高は、年数回発生するような荒天時の波浪を対象とした波の遡上高さによって決定される(海岸保全築造基準, 1987)。



図—7 波形勾配と最大遡上高・波高比との関係

図-7 は、一定の測定時間内に得られた遡上高の最大値をプロットしたものであり、横軸に波形勾配を、縦軸に最大遡上高さと沖波有義波高との比を用いている。これによると、波形勾配が大きくなるにしたがって、遡上高さと波高との比は小さくなっている。底質粒径との関係を見ると、細粒径、中粒径および混合粒径とはあまり大きな差は見られないが、粗粒径の場合には、全体に遡上高さと波高との比は小さくなっている。これは、砂中の浸透流速の測定結果から透水性が高いために遡上高さが低減できたものと考えられ、大きな粒径を用いることによって、後浜の天端高が低く押えられる可能性を示している。

3.5 混合粒径の効果

宇多ら(1987)は、混合粒径に関する移動床実験より、波などによって細粒分が流出されても、表面に粗粒分による被覆層(アーモアコート)が形成され、海浜安定化工法としての可能性を示している。また、加藤ら(1988)は、トラフ形成地域で時化時には、小粒径の砂が沖方向に運ばれて、中粒径の砂が岸方向に、大粒径の砂はトラフに残されるふるい分け作用があることを示している。

そこで、混合粒径を用いた場合の底質の粒度組成より、次式で定義される(合田・佐藤, 1981)ふるい分け係数(S_0)、偏わい度(S_k)と地形変化との関係について検討を行なうとともに、中粒径を用いた場合との比較を行なった。

$$S_0 = (d_{75}/d_{25})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$S_k = (d_{75}/d_{25})/(d_{50})^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 d_{75} 、 d_{50} 、 d_{25} は粒度加積曲線で累加百分率がそれぞれ75%、50%、25%に対応する粒径である。

図-8 は、断面位置ごとの中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度を初期条件との比(それぞれ d_{50}/d_{50}' 、 S_0/S_0' 、 S_k/S_k')として示してある。なお、初期底質は中央粒径が0.41 mm、ふるい分け係数が2.44、偏わい度が1.85程度であり、ふるい分け度が悪く、偏わい度が大きい条件である。

図-8によると、ふるい分け係数および偏わい度は全体に小さくなっており、波によって底質が淘汰されることがわかる。これを、地形変化を生じた領域別に見ると、トラフや侵食部分において初期粒径よりかなり粒径の大きいものが目立ち、バーや堆積部においては逆に粒径が小さくなっている。このことは、波浪の大きい場合には波によって細かい粒径が舞い上って沖向きに運ばれてバーを形成し、侵食域には粗い粒径が残され、アーモアコートを形成したことを示している。バーでは堆積型の断面変化の場合には粒径は初期底質にほぼ等しいかあるいは大きく、侵食型の場合には細粒径によって形成される傾向が見られる。また、法先部および流出砂

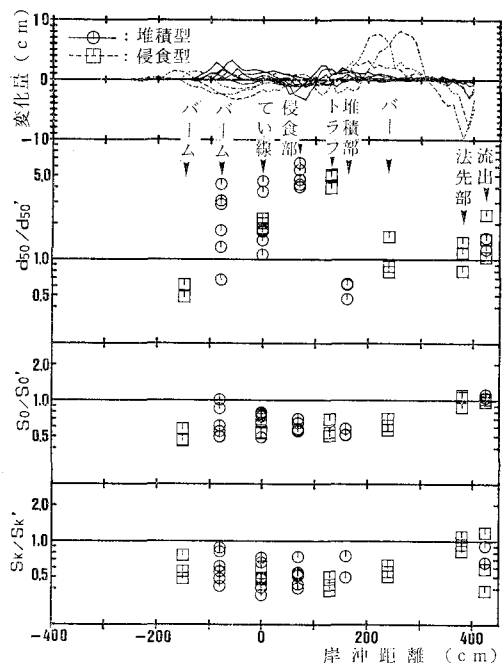


図-8 地形変化領域別の中央粒径、ふるい分け係数、偏わい度と初期底質との比の分布

の粒径は初期底質とほぼ等しいかやや大きい程度であり、ふるい分け係数が初期底質にほぼ等しいことから判断すると、波によるふるい分け作用をあまり受けずに堤外に流出したことになる。

図-9 は、中央粒径がほぼ等しく、ふるい分け係数、偏わい度が異なる混合粒径($d_{50}=0.41$ mm, $S_0=2.44$, $S_k=1.85$)と中粒径($d_{50}=0.38$ mm, $S_0=1.35$, $S_k=0.92$)の地形変化量を、同一の波浪を作用させたケースについて断面位置別に比較したものである。中粒径に比較して混合粒径の方が中央粒径がやや大きいので、変化量(Δy)を中央粒径(d_{50})で除して比較を行なった。その結果、全体的に中粒径の方が変化量が大きくなっており、特にトラフや侵食部ではほとんどのケースで変化量が大きく

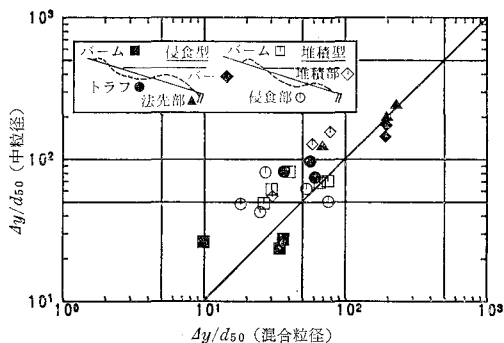


図-9 混合粒径と中粒径による地形変化量比較

なっていることがわかる。これと先に示した粒度組成の変化を合わせて考えると、混合粒径の場合には侵食域において粗粒分によるアーマーコートが形成されて、地形変化を低減できたものと判断され、偏わい度の大きな底質で養浜することによって、均一な粒径を用いるよりも侵食量を抑えることが可能であると考えられる。

4. おわりに

本研究の主要な結論を以下に示す。

- ①地形変化および汀線変化を解析した結果、式(2)で定義した K によって整理され、作用する波浪に対して $K < 7$ となる底質粒径を用いることによって、海浜を堆積型にできることがわかった。ただし、これは室内実験による結果であり、現地への適用について更に検討が必要である。
- ②法止め堤外に流出する養浜砂の量と波のエネルギーフラックスとの間には強い関係があり、底質粒径をパラメータとして整理した結果、粒径が大きいほどあるいは粗粒分を多く含むほど流出量は小さくなった。
- ③粗粒径を用いた場合には波の遡上高さが小さくなった。これより、粒径を粗くすることによって透水性が向上し、後浜の天端高を低く抑えられる可能性が示された。
- ④混合粒径を用いた場合、トラフや侵食部分において粗い粒径が残され、バーは逆に細かい粒径によって形成された。これは、波によって細かい粒径が舞い上って沖向きに運ばれてバーを形成し、侵食域には粗い粒径が残されてアーマーコートを形成したものと考えられる。
- ⑤中央粒径がほぼ等しく、ふるい分け係数、偏わい度が

異なる混合粒径と中粒径の地形変化量を比較した結果、全体的に中粒径の方が変化量が大きく、特に侵食域において顕著であった。混合粒径の場合には、侵食部分にアーマーコートが形成されて、地形変化を低減できたものと判断され、偏わい度の大きな底質で養浜することによって、侵食量を抑えることが可能であると考えられる。

なお、本研究はまず養浜断面自体の安定性に着目したために、波浪制御構造物の検討は行っていない。したがって、今後は経済性および景観に優れた波浪制御構造物と一体になり、かつ親水性を備えた人工海浜を自然条件の厳しい海域に建設する場合について検討を進めたい。

最後に、運輸省港湾技術研究所水工部加藤一正漂砂研究室長より貴重な御意見を賜ったことを記して感謝の意を表する。

参考文献

- 宇多高明・酒井佳治・竹渕 勉 (1987): アーマーコートによる安定海浜の形成, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 421-425.
- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編 (1987): 改訂海岸保全施設築造基準解説, pp. 235-242.
- 加藤一正・藤田 誠・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児 (1988): バー・トラフ地形変化と底質特性の変動, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 332-336.
- 合田良実・佐藤昭二 (1981): 海岸・港湾, 新訂版, わかり易い土木講座, 彰国社, 396 p.
- 砂村継夫 (1985): 海浜地形, 海岸環境工学, 海岸過程の理論・観測・予測方法, 東京大学出版会, pp. 133-146.
- 柳嶋慎一・加藤一正・榊原芳昭 (1990): 経験的固有関数を用いた移動床模型実験結果の比較検討—那覇港波之上地区模型実験への適用例, 港研資料, No. 670, pp. 1-69.