

締まり度向上による海浜変形制御に関する実験的研究

西 隆一郎*・佐藤道郎**・宇多高明***・内田洋海****

1. 序 論

河川では多自然型工法がごく一般的に採用されているが、海岸では依然として海岸堤防、海岸護岸、突堤あるいは離岸堤などの固い構造物を用いた海岸保全工法が主流を占めている(例えば、山下ら, 1997)。しかし、自然の砂質海浜は波のエネルギーを吸収する上で最も有効な消波構造物であり、また、環境保全および海域利用の観点から国民の自然海浜を求める要望がますます高くなってきている。加えて、動植物の生息領域としての砂浜環境も保全しなければならず、今後、養浜が主要な海岸保全工として用いられる可能性が高い。したがって、従来の固い構造物はあくまでも柔らかい養浜工などを補充するための 2 次的な海岸保全工法として設計されるべきであり、そのためにも養浜に関する幅広い研究が必要と考えられる。

本研究では、養浜の締まり度を人工的に高めることで岸沖漂砂量を制御し、結果として侵食量の低減を図る柔らかな海浜制御保全工法が可能であるか、移動床海浜模型を用いて実験的に検討することにした。

一般に、侵食された海浜は表面が堅く締まり、堆積時の海浜では粒径の粗い底質から堆積し空隙が大きくなるために前浜が柔らかく締まりが悪い。また、海岸域に生息する間隙生物は砂浜の空隙サイズによって生息条件が左右されるために、締り度はこれらの間隙生物によって行われる有機物の浄化作用にも密接に関係する。したがって海浜の締まり度は海岸過程の中で考慮されるべきパラメータであり、締まり度に関する幾つかの研究(例えば、西ら 1996, 1997)も既に行われている。加えて、養浜海岸の締まり度と海岸の貴重種(例えば、図-1 に示すような海ガメ)の生息・産卵に関する問題が米国では生じているが(Steinitz ら, 1998; Davis ら, 1999 参照)、海ガメ保護に関する同様な問題は日本でも起こりうる。養浜の寿命を延ばす上でも締り度を高めることは有効ではないかとも考えられるが、養浜を行う場合に締まり度



図-1 自然海浜で産卵を終えたアカウミガメ

を高めることが効果的な工法かという観点に立った研究は、これまででない。

本研究では、これらの問題を考える基礎的研究として、締まり度の異なる 3 つの砂質海浜模型に侵食型と堆積型の波浪を作用させて、海浜地形、締まり度、net の岸沖漂砂量、汀線変化量、侵食量と堆積量等について調べ、締まり度を変化させることで海浜変形の制御が可能か実験的に明らかにする。

2. 実験概要

実験は、図-2 に示す鹿児島大学工学部海洋土木工学科の長さ 13 m、幅 0.4 m、深さ 0.4 m の 2 次元水路を用いて行った。水路内に、中央粒径 0.2 mm、比重 2.6 g/cm³ の豊浦標準砂を用いて、1/10 の一様勾配海浜模型を製作し、侵食型、堆積型の波浪条件の規則波を 2 時間づつ作用させた。用いた波浪条件は、表-1 に示す。

それぞれの海浜模型の製作に当たり、実験 1 ケース毎に海浜材料として使用している豊浦標準砂を水路外に搬出して十分自然乾燥させ、その後、この砂を水路内に再度搬入し、所定の海浜勾配になるように整形した。それぞれの海浜模型の締まり度を制御するために、コンクリート打設用のパイブレータを全く用いないものと、パイブレータを 30 分、あるいは 50 分作用させて、強制的に砂浜を締め固める手法を採用した。地形測定と締まり度の測定は、規則波の作用前と作用後に行い、2 時間規則

* 正会員 博(工) 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 正会員 工 博 鹿児島大学教授 海洋土木工学科

*** 正会員 工 博 建設省土木研究所河川部長

**** 扶養建設工業株式会社九州支店

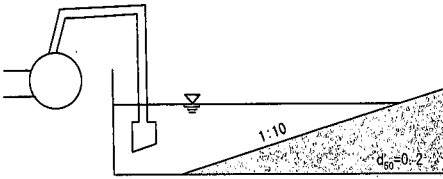


図-2 模型海浜の設置概要

表-1 波浪条件

ケース名	波高 (cm)	周期 (s)	備考
Case 1	9.8 cm	1.1	Normal
Case 2	9.8 cm	1.1	Compact 1
Case 3	11.1 cm	1.1	Compact 2
Case 4	4.5 cm	2.0	Normal
Case 5	3.8 cm	2.0	Compact 1
Case 6	4.7 cm	2.0	Compact 2

波を作用させる間の5, 10, 20, 30, 60, 120分に、それぞれ砕波点、砕波波高等を計測した。

3. 実験結果

3.1 地形変化

海浜縦断形状は、ポイントゲージを用いて2 cm毎に測定した。ただし、ポイントゲージを使用しても、平均的な海浜表面上にある砂粒子1個の上あるいは下を読むかにより、最大で底質粒径0.2 mm程度の測定誤差が出る可能性はある。縮まり度については、図-3に示す様にポイントゲージの先端を砂表面から10 cm離し、自由落下させて砂浜内部への貫入長を物差しで、岸沖方向4 cm間隔で計測した。

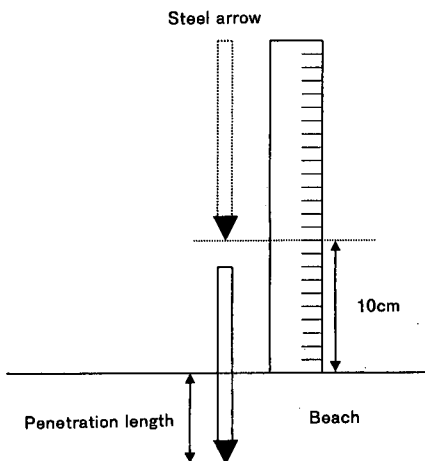


図-3 縮まり度の簡易測定法 (実験室用)

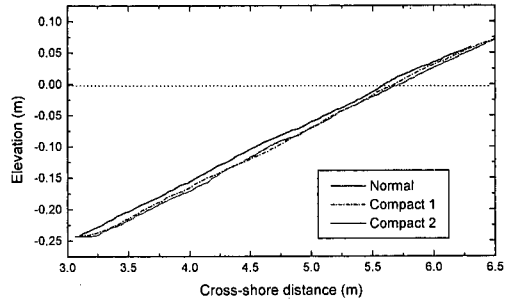


図-4 縮まり度の異なる海浜模型の初期断面形状 (堆積型)

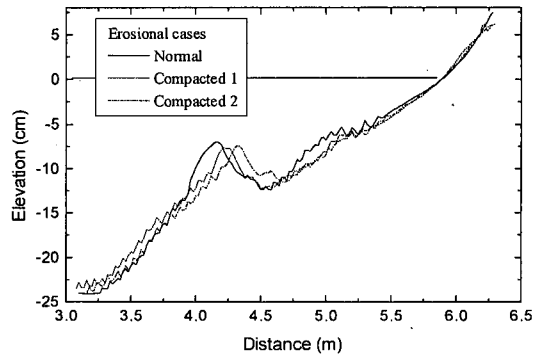


図-5 異なる縮まり度を持つ模型海浜の断面変化 (侵食型)

図-4は、縮まり度を変化させて整形した堆積型3ケースの初期海浜断面形状を表している。実線がパイプレタを全く用いずに、一点鎖線がパイプレタを30分使用し、点線がパイプレタを50分使用して製作した模型海浜断面である。今回の実験では、それぞれの海浜模型を作るためのnetの砂量は変化させていないため、パイプレタを用いて締め固めたことで、海浜が平均的に沈下し、また、海浜幅が若干狭くなっていることが分かる。このような傾向は、侵食型の波浪を作用させた海浜模型でも同じである。

侵食性の波浪作用後の断面形状を図-5に示す。図より縮まり度を高めるほど岸側に沿岸砂州が形成され、その高さが若干低下している。また、波浪作用前後の汀線の変動量は、縮まり度を高めるほど小さくなっていることが分かった。これは、砕波帯内で波浪による底質移動量が、縮まり度を高めるほど小さくなるのが原因と考えられるが、岸沖漂砂量分布については後述する。

図-6に示す堆積型の縦断形状変化では、縮まり度を高めるとバームが若干岸側に形成され、その高さは1割程度しか減少していない。また、各ケース毎の汀線変動量には、ほとんど差が生じていなかった。このことは、実験条件の範囲内で縮まり度を高めても海浜の回復機能や回復量に対する、負の効果が比較的大きくないことを

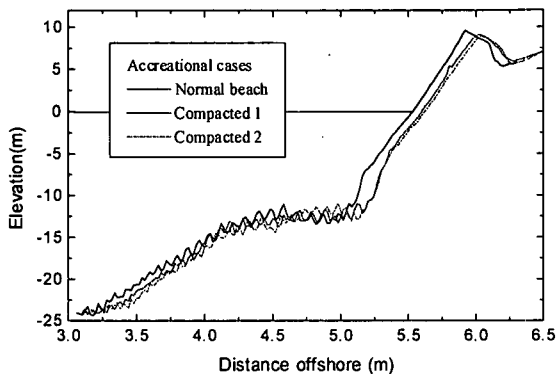


図-6 異なる締めり度を持つ模型海浜の断面変化 (堆積型)

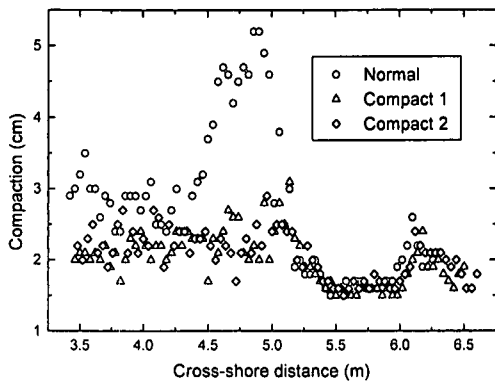


図-8 実験後における締めり度の空間分布 (堆積型)

示している。

3.2 締めり度の分布

侵食型3ケースと堆積型3ケースの、波浪作用後の締めり度の岸沖分布を図-7, 8にそれぞれ示す。図より、締めり度は侵食型、堆積型のケースどちらでも、締め固めたケースの方が、空間的なばらつきが小さいことが分かった。また、一般に初期海浜と波浪作用後の海浜での締めり度については、波作用後の地形での締めり度は、バーやバーム地形に応じてばらついている。なお、ケース1から6までの初期海浜の平均締めり度はそれぞれ2.78, 1.99, 1.89, 2.40, 1.81, 1.84 cmであった。

波浪作用後の侵食型の海浜では、岸沖方向3.8m~4.5mで砂が溜まる沿岸砂州部で、その他の領域より締めり度が高い。バーム部分では海側斜面で波浪作用後に締めり度が高くなっているが、一方、バームの頂部を超えた陸側の逆勾配領域では、締めり度が上記の領域に比べてゆるくなっている。沿岸砂州が硬くなるのは自然海浜と一致するが、混合粒径の底質からなる自然海浜上のバームの締めり度については、混合粒径の自然海浜条件とは異なる

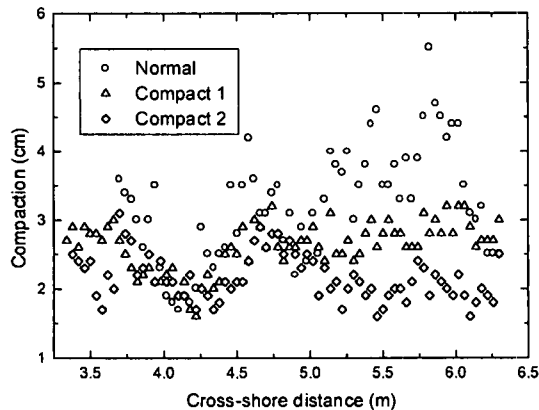


図-7 実験後における締めり度の空間分布 (侵食型)

ようである。それは、自然の海浜では前浜に砂が堆積しバームが成長する場合、比較的比重が小さく粒径の粗い底質が溜まるために、空隙が大きく柔らかい海浜が形成されやすいと考えられるので、今後は粒度分布の狭い単一粒径の底質以外にも、混合粒径の底質を用いた実験を行う必要もある。

3.3 空隙率の推定

パイブレータを全く用いず、自然に整形した初期海浜の平均空隙率を0.3と仮定して、他のケースの海浜模型の平均空隙率を、初期海浜断面積の比で求めた。各ケースの平均締めり度と平均空隙率の関係を、図-9に示す。これより、平均空隙率と平均締めり度の回帰直線が相関係数 $R=0.86$ 、標準偏差0.036のもとで次式のように求まる。

$$\lambda = 0.16C - 0.071 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 λ は平均空隙率、 C は平均締めり度を表す。この実験式は、岸沖方向の各点で計測した局所締めり度 $C(x)$ と局所空隙率 $\lambda(x)$ に対しても式(2)のように拡張することが可能であると仮定する。

$$\lambda(x) = 0.16C(x) - 0.071 \dots\dots\dots (2)$$

式(2)から求めた局所空隙率の空間分布を図-10に示す。ただし、実際の自然海浜では0.45を越えたり、0.1より小さい空隙率が生じることは通常ないと考えられるので、局所締めり度から求める局所空隙率は、0.45および0.1を上限・下限として岸沖漂砂量の補正に用いた。

3.4 岸沖漂砂量分布

波浪作用前後で移動床海浜模型の締めり度は時・空間的に変化し、同時に空隙率自体も変化するが、一般に波浪作用時間や海浜模型の制作状況の違いに関らず、0.3~0.4程度の空隙率を用いて net の岸沖漂砂量を算定する機会が多い。そこで、ここでは締めり度と空隙率を考慮

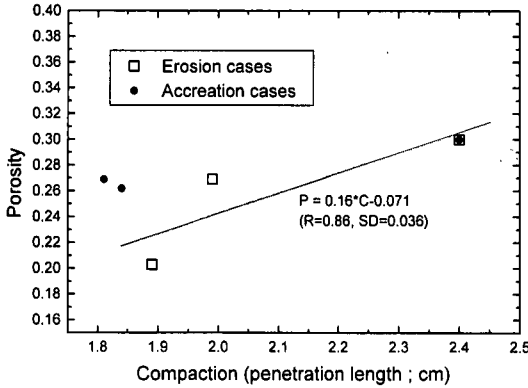


図-9 平均縮まり度と平均空隙率の関係

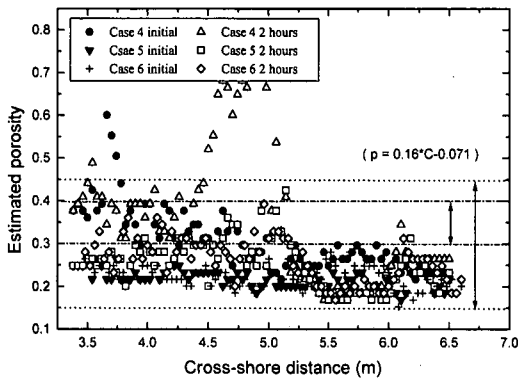


図-10 局所空隙率の推定値

して、netの岸沖漂砂量を精度良く求める手法についても考察する。

実験前後における海浜模型のnetの底質量は一定であるから、締め固めないで自然に設置した海浜模型の平均空隙率 λ_1 が既知であれば、実験後の平均空隙率 λ_2 は以下のように定まる。

$$\lambda_2 = \frac{V_2 - (1 - \lambda_1)V_1}{V_2} = 1 - (1 - \lambda_1) \frac{V_1}{V_2}$$

$$= 1 - (1 - \lambda_1) \frac{\sum_{i=1}^N h_{1i}}{\sum_{i=1}^N h_{2i}} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、海浜模型に波浪を作用させた前後での諸量を、それぞれ添え字1, 2をつけて区別する。また、 h は砂層厚さ、 V は空隙を含む見かけのボリュームで、 x は沖に向かい正の座標である。したがって、波浪による海浜の平均的な縮まり具合は、実験前後で次のように評価される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} > 1 &\dots\dots \text{Compacted} \\ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1 &\dots\dots \text{const} \\ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} < 1 &\dots\dots \text{loosen} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

さて、波浪作用後の海浜の平均空隙率 λ_2 が求まったので、簡易的に平均岸沖漂砂量を計算する場合には、以下のようにして求める。

$$q(x) = \int_0^x \left(1 - \frac{\lambda_1(x) + \lambda_2(x)}{2} \right) \frac{\partial h}{\partial t} dx \dots \dots \dots (5)$$

netの岸沖漂砂量算定に重要な空隙率は、 λ_1 から λ_2 のように時間的に平均して変化するだけでなく、空間的にも $\lambda_{1,2}(x)$ の様な分布を持つ。ところが、空隙率の岸沖分布を細かい間隔で計測するのは煩雑であるので、計測が容易な局所縮まり度 $C_{1,2}(x)$ から求めた局所空隙率 $\lambda_{1,2}(x)$ を用いて、netの岸沖漂砂量の補正を行う方法を考える。底質の連続式に、本実験で得られた空隙率と縮まり度の回帰直線 $\lambda_{1,2}(x) = 0.16 C_{1,2}(x) - 0.071$ を適用すれば、局所空隙率に基づく岸沖漂砂量は、次式で計算できる。

$$q(x) = \int_0^x \frac{\left[(1 - \lambda_1(x))h_1(x) - (1 - \lambda_2(x))L_{mix}(x) \right] - (1 - \lambda_2(x))(h_2(x) - L_{mix}(x))}{\partial t} dx \dots \dots \dots (6)$$

式(6)が縮まり度および空隙率が変化すると考えられる波による底質混合深さまで考慮したnetの漂砂量近似式である。実験前後において空隙率が変化する場合には、底質移動の生じていない砂浜内部の下層では間隙水圧の効果を考えても、空隙率の大きな変化が生じるとは考えられない。しかし、本実験では空隙率の変化する砂浜内部水深 $L_{mix}(x)$ のデータが直接計測されていないために、本解析では平均空隙率 $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$ から求めた漂砂量分布だけを図-11に示す。

図中の上の3ケースが侵食型、下の3ケースが堆積型の漂砂量分布を表す。入射波条件が同じでも初期海浜模型の縮まり度が高くなれば、netの岸沖漂砂量の最大値も低下し、また、縮り度が高くなると地形変化に結びつく岸沖漂砂量の勾配も若干小さくなるようである。加えて、侵食型のケースでは、縮まり度を高めることにより、岸側での漂砂量の絶対値も低減されていることが分かる。

3.5 静水位汀線背後域の単位幅体積変化量

海浜の保全や利用においては、初期静水位汀線背後で波の作用によりどれだけ底質量(体積量)の変化が起こるか知ることが重要である。そこで、図-12に初期汀線背後の単位幅当たりの体積変化量と初期海浜の平均縮まり

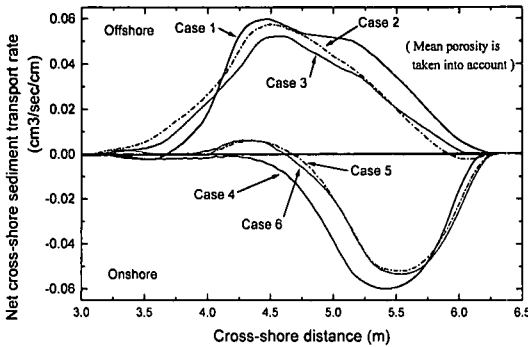


図-11 平均空隙率を用いた岸沖漂砂量の空間分布 (侵食型+堆積型)

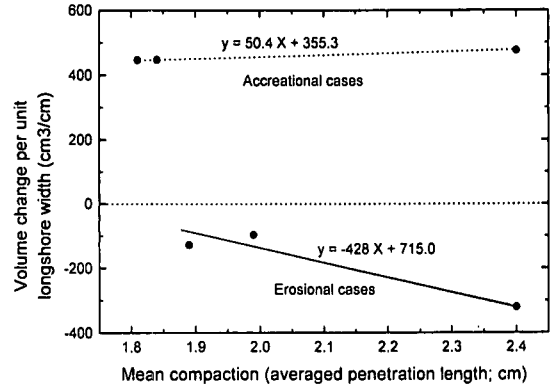


図-12 平均空隙率と単位汀線長当りの体積変化量

り度の関係を示す。ただし、ここでの体積変化量には空隙が含まれている。それは、海浜を保全・利用する場合には、汀線背後で利用できる領域がどれだけあるかということが重要であり、砂浜内部の空隙がいくらかということは副次的な問題であるからである。図中、横軸は計測用の矢の砂浜内部への貫入長を表す。侵食性の実験の場合、締めり度を高めることにより、初期汀線背後の侵食量が1/3程度に低減されていることが分かる。これに対して堆積性の実験の場合には、均一粒子を用いたことが一因とも考えられるが、堆積量は1.06倍しか減少していない。

4. 結 論

本研究では、単一粒径の底質を用いた砂質海浜の締めり度を人工的に変化させることで、汀線後退量や侵食量を含む地形変化や、岸沖漂砂量を人為的に制御できるかどうかの基礎研究を2次元移動床模型を用いて行った。その結果、以下のことが分かった。

(1) 締めり度を高めると沿岸砂州が岸側に形成され、その高さも低下し、同時に汀線変動量も小さくなる。ただし、バーム地形については、バーム形状に顕著な違いが生じなかった。

(2) 初期汀線背後の侵食量が締めり度を高めることで1/3近くに低減されたが、堆積過程では、締めり度が堆積量を顕著に低減させておらず、締めり度を高めること

によるマイナス効果は小さかった。

(3) 侵食量を低減しかつ堆積量はほとんど低下しないということから、少なくとも実験室レベルでは締めり度を人工的に高めることが、侵食制御のために効果的なことが示された。

養浜や自然海浜における締めり度の制御は、柔らかい海岸環境保全工法としての十分な可能性を持つと考えられるが、さらに、混合粒径の底質を用いた検討ならびに現実の海浜における試験などが必要と考えられる。

参 考 文 献

- 西 隆一郎・大見真治・佐藤道郎・宇多高明・N. C. Kraus (1996): 砂丘と海浜の締めり度について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 681-685.
- 西 隆一郎・佐藤道郎・宇多高明・N. C. Kraus (1997): 岸沖漂砂量の補正と締めり度について, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 776-780.
- 山下隆男・土屋義人・D. R. Basco・M. Larson (1997): 日, 米, 欧の海岸保全の相互評価(1), 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 691-695.
- Steinitz, M. J., M. Salmon, and J. Wynken (1998): Beach renourishment and loggerhead turtle reproduction: A seven year study at Jupiter Island, Florida, *Journal of Coastal Research*, 14 (3), 1000-1013.
- Davis, R. A., M. V. Fitzgerald, and J. Terry (1999): Turtle nesting on Adjacent nourished beaches with different construction styles: Pinellas County, Florida, *Journal of Coastal Research*, 15 (1), pp. 111-120.