

粒子形状による海浜断面変形の差異に関する実験的研究

本田隆英*・藤原弘和**・佐藤慎司***・磯部雅彦****

自然と共生し親水性の高い養浜は、構成材料の粒度・比重・粒子形状（空隙率）などの底質パラメーターが養浜の効率性や安定性に大きく依存する。本研究は、粒子形状による海浜縦断面の変形特性の解明を目的とした。角珪砂および丸珪砂を用いて、様々な波浪条件と初期底面勾配の下で海浜縦断面変形実験を行った。得られた断面形状についてバームの形状・砂漣発生・限界位置・岸沖土砂移動量・バーの移動速度を比較検討し、両底質で構成される海浜断面の変形特性の差異や海浜断面形状の指標である C 値との相関性を調べた。その結果、角張った砂で構成された海浜は波浪外力に対して安定傾向になることが明らかとなった。

1. はじめに

海岸保全事業として、自然と共生し親水性の高い養浜工が近年注目されている。構成材料の粒度・比重・粒子形状（空隙率）などの底質パラメーターは養浜の効率性や安定性に大きく影響する。効果的な養浜を行うためには、これら特性量ごとの漂砂に対する影響を再整理する必要がある。粒度の影響については豊富な研究例があり、また比重に関しても、比重の小さな底質を用いた縮尺効果の小さな模型実験が過去にいくつか実施されている（例えば、堀川・佐々木, 1970；田中・新保, 1973）。近年では、本田ら（2004）は底質比重による海浜変形、漂砂機構の違いを、比重の異なる 2 種類の底質を用いた海浜断面変形実験および数値シミュレーションにより検討している。その結果、比重の大きな底質で構成された海浜では、底質移動が抑制され、波浪外力に対して安定傾向であることを定量的に再確認している。底質の粒子形状に関しては、土屋ら（2003）は細長く角張っている比重の大きいカンラン岩砂と丸みを帯びた石英砂を用いて振動流装置による漂砂量測定実験を行い、比重と形状の違いが漂砂量に及ぼす影響を検討している。その結果、均一砂の漂砂量よりも混合砂の漂砂量はさらに小さくなるのが分かり、その要因として砂粒子の形状やかみ合わせが最も影響するとしている。一方、現地における施工例としては、富士海岸では 1996 年からこれまでに約 30 万 m³ の礫養浜が行われており、そのうち約半分の養浜礫は投入地点に残存している（佐藤ら, 1999）。富士海岸の養浜材には角張っている砕石も多く含まれているため、角張った底質を用いた養浜の有効性が示唆される。

しかしながら、粒子形状が漂砂機構や海浜変形特性に及ぼす影響を扱った研究例は未だ無い。

そこで本研究では、粒子形状の異なる底質として角珪砂と丸珪砂を用い、粒子形状による海浜断面の変形特性を解明することを目的とした。海浜縦断面変形実験から得られた断面形状変化について、バームの形状・砂漣発生・限界位置・岸沖土砂移動量・バーの移動速度などを比較検討し、波浪外力に対する海浜の安定性を評価した。

2. 実験概要

(1) 底質条件

海浜変形実験の底質には、粒度分布および比重はほぼ共通で粒子形状のみが異なる角珪砂と丸珪砂を用いた。底質の粒度分布はふるいによる JIS A 1204 に従い、比重は JIS A 1202 に従って計測した。両底質の粒度分布を図-1 に、物理諸元を表-1 に、粒子形状を写真-1 に示す。写真-1 より角珪砂は粒子が角張っており、丸珪砂は粒子が丸みを帯びていることが分かる。粒子形状が異なることで、空隙率、静止摩擦角および沈降速度に差異が現れている（表-1）。

(2) 実験方法と実験条件

厚さ 1 cm のアクリル板で二分した長さ 30 m、幅 0.6 m、深さ 0.8 m の二次元造波水路に角珪砂および丸珪砂

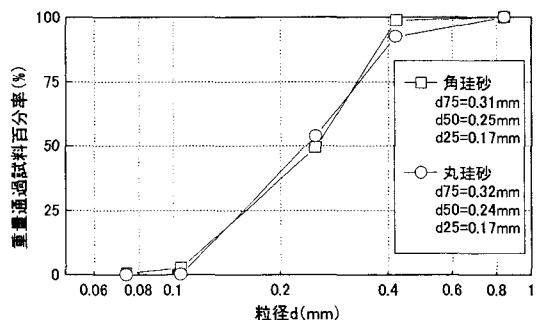


図-1 角珪砂と丸珪砂の粒度分布

* 正会員 修(上) 東京大学助手 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
** 学生会員 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
*** フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻
**** フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

表-1 底質条件

	角珪砂	丸珪砂
中央粒径 d_{50} (mm)	0.25	0.24
淘汰係数	1.34	1.36
比 重	2.64	2.64
空 隙 率	0.45	0.39
静止摩擦角(°)	41.3	37.3
沈降速度 (cm/s)	3.24	2.76

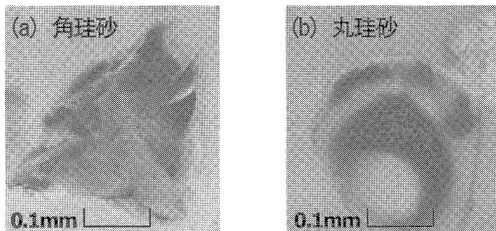


写真-1 角珪砂と丸珪砂の粒子形状

表-2 実験ケース

CaseNo.	初期底面勾配 $\tan \beta$	入射波周期 T (s)	入射波高 H_m (cm)
1	1/30	1.0	2.6
2	〃	〃	7.1
3	〃	〃	12.3
4	〃	1.5	3.4
5	〃	〃	9.9
6	〃	〃	16.1
7	〃	2.0	4.9
8	〃	〃	11.9
9	1/20	1.0	2.7
10	〃	〃	6.5
11	〃	〃	11.1
12	〃	1.5	3.4
13	〃	〃	8.7
14	〃	〃	15.5
15	〃	2.0	4.2
16	1/10	1.0	9.0
17	〃	1.5	11.4
18	〃	2.0	13.5

をそれぞれ敷き均し、同一の規則波を入射させ、初期海浜形状および24時間後の海浜形状をレーザー式砂面計を用いて計測した。

同時に、24時間後の碎波波高と碎波位置を計測し、実験中は流況・碎波形態・漂砂形態を観察した。実験ケースを表-2に掲げる。規則波は、初期底面勾配を $\tan \beta = 1/10, 1/20, 1/30$ の3種類、入射波周期を $T = 1.0, 1.5, 2.0$ s の3種類、換算沖波波高を $H_0 = 2 \sim 16$ cm で3段階の全18ケースを設定した。初期底面勾配によらず沖合一様水深は35 cm で一定とした。堀川ら (1973)

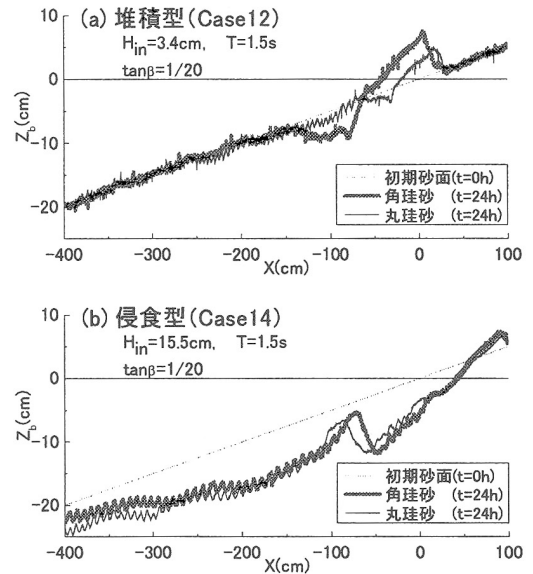


図-2 実験結果の一例

は20時間以降の汀線変化は非可逆状態になると結論付けていることから、波作用時間は24時間とした。鉛直座標、岸沖座標は、静水汀線位置を原点として上向き、岸向きをそれぞれ正にとる。

3. 海浜断面の分類

24時間後の海浜形状として、堆積型、侵食型の典型例を図-2に示す。同一の波を作用させたにもかかわらず、粒子形状の違いにより変形海浜断面に差異が明瞭に現れていることが分かる。図-2(a)の堆積型のケースでは、丸珪砂海浜に比べて角珪砂海浜の前浜が発達している。碎波帯では大きな違いは見られない。次に図-2(b)の侵食型のケースでは、丸珪砂海浜に比べて角珪砂海浜のバーが岸側に位置している。ただし、前浜付近の海浜形状に大きな差はない。

Sunamura・Horikawa (1974) は長時間波作用後の海浜形状を侵食・中間・堆積型に分類し、次式で定義される C 値を用いて整理している。

$$C = (H_0/L_0) \cdot (\tan \beta)^{0.27} \cdot (d_{50}/L_0)^{-0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 L_0 は沖波波長、 d_{50} は底質の中央粒径である。室内実験においては、 $C > 8$ で侵食型、 $8 > C > 4$ で中間型、 $C < 4$ で堆積型に分類できる。

Sunamura・Horikawa (1974) にならい、本実験結果を侵食・中間・堆積型に分類した結果を図-3に示す。角珪砂海浜で中間型、丸珪砂海浜で侵食型となったケースが1ケースのみ(Case13)見られたものの、粒子形状による海浜変形パターンの違いはほとんど見られない。しかしながら実験中の観察において、バームの形状、砂

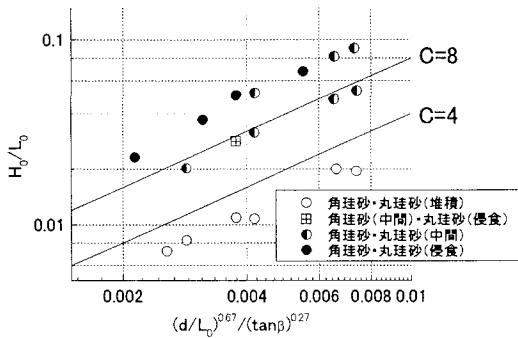


図-3 侵食型・堆積型の分類

連発生の限界位置，岸沖土砂移動量，バーの移動速度などに粒子形状による違いが明瞭に現れた．次章ではこれらの項目に対して定量的な検討を行う．

4. 海浜変形状の量的検討

(1) バームの形状

a) 汀線の移動距離

波作用24時間後の初期汀線位置からの汀線移動距離を図-4に示す．ほとんどのケースで角珪砂海浜，丸珪砂海浜ともに汀線の移動方向は同じで，汀線の移動方向が異なったケースはCase13のみであった．全体的に，角珪砂海浜の方が堆積傾向であることが見てとれる．さらに，両海浜が堆積した場合，角珪砂海浜，丸珪砂海浜のどちらの汀線が前進したかにかかわらず，汀線の移動距離に比較的大きな差が見られる．一方，両海浜が侵食した場合には，汀線の移動距離の差はいずれも7 cm 以内と比較的小さい．

次に，各底質海浜における汀線の移動距離の差と C 値との相関を図-5に表す．汀線の移動距離の差は，角珪砂海浜の汀線が丸珪砂海浜に比べて前進する場合に正をとる．侵食条件 ($C > 8$) では，汀線の移動距離の差は比較的小さくなっている．

b) 前浜勾配

24時間後の前浜勾配を図-6に示す．角珪砂海浜の前浜勾配が大きくなったケースが15ケース，丸珪砂海浜の前浜勾配が大きくなったケースが3ケース現れた．全体的な傾向としては，角珪砂海浜の方が前浜勾配は急になっている．

次に，各底質海浜の前浜勾配の差を C 値に関して図-7に整理した．汀線移動距離と同様に，侵食条件 ($C > 8$) では粒子形状の違いによる前浜勾配の差は小さい．

c) 平均化した無次元海浜形状

両底質海浜の変形状をおおまかに把握するために，得られた海浜断面について岸沖距離には碎波水深 h_b を，

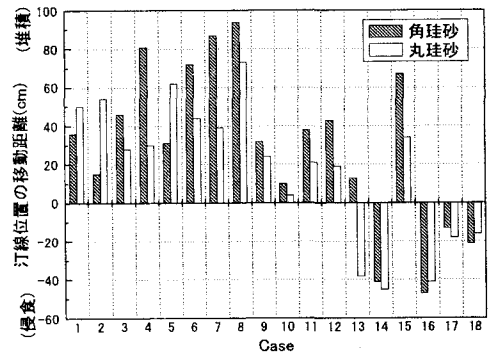


図-4 波作用24時間後の汀線移動距離

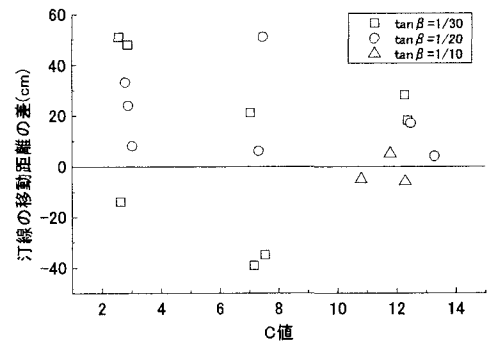
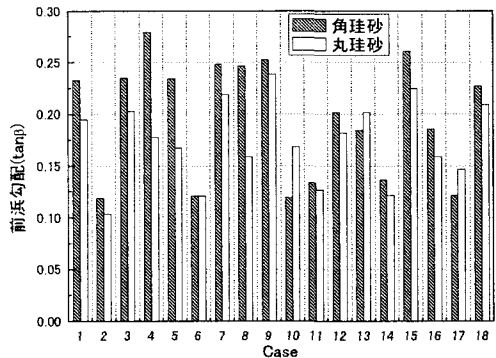
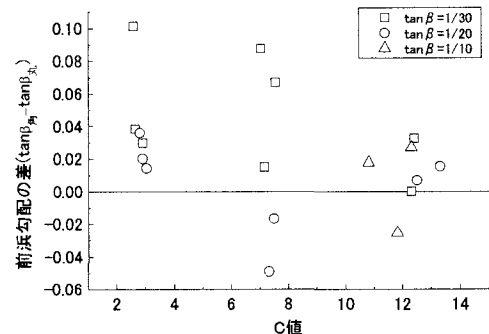
図-5 汀線移動距離の差と C 値

図-6 波作用24時間後の前浜勾配

図-7 前浜勾配の差と C 値

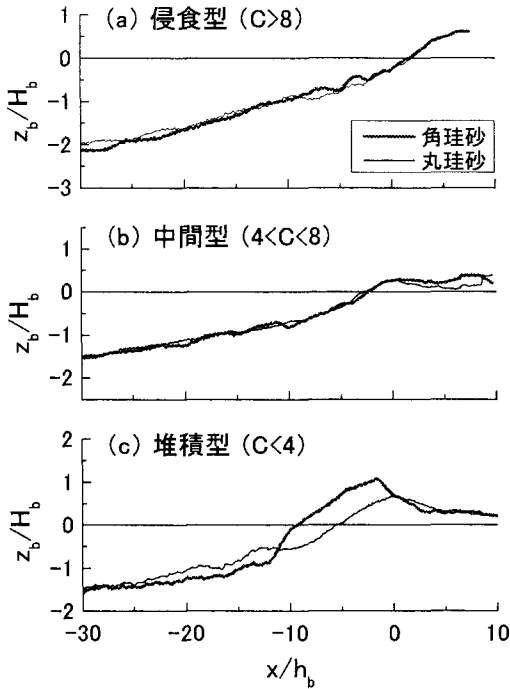


図-8 海浜変形パターンの傾向

砂面高 z_b には碎波波高 H_b を用いて無次元化し、堆積、中間、侵食型ごとに平均をとった、その結果を図-8に示す。中間、侵食型では大きな違いは見られないが、堆積型においては角珪砂海浜で汀線が前進し、前浜勾配が急になり、前浜に土砂が多く堆積する傾向がよく分かる。

d) 波打ち帯の漂砂機構

波打ち帯に関する以上の結果から、底質の粒子形状が異なるために、波打ち帯の漂砂機構は侵食過程ではさほど大きな違いは見られないものの、堆積過程においては顕著な違いが見られた。表-1より、角珪砂と丸珪砂に差異が現れる物理量は、空隙率、静止摩擦角および沈降速度である。角珪砂に着目すると、空隙率が大きい浸透流の影響を大きく受け、静止摩擦角が大きいため局所的に急峻な地形を形成し、沈降速度が大きいため砂粒子が沈降しやすい。これらの因子が前浜の堆積に有利に働き、角珪砂海浜で前浜の堆積が促進したと推察される。今後は流体と底質の遡上運動を解析し力学的考察を加えることで、空隙率、静止摩擦角および沈降速度が波打ち帯の漂砂に与える影響を詳細に把握することが必要である。

(2) 砂漣発生限界

ほとんどのケースで砂漣は沖合いの一樣水平床まで到達していた。沖側で砂漣限界の発生位置が確認できたケースは4ケースあったが、いずれのケースにおいても砂漣発生限界は角珪砂海浜の方が岸側に位置していた。

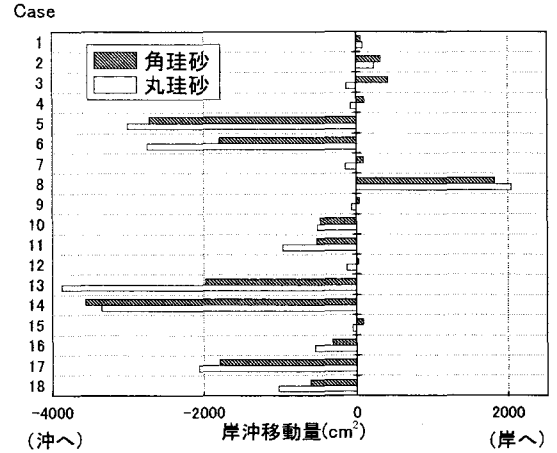


図-9 岸沖移動土砂量

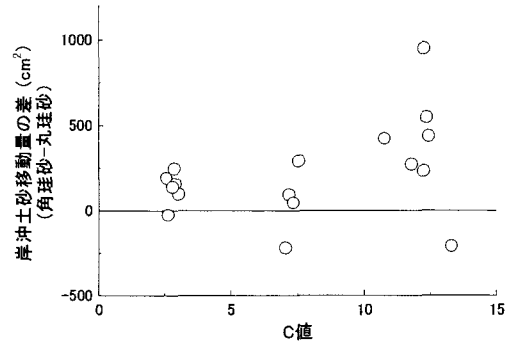


図-10 岸沖移動土砂量の差とC値

Sunamura (1980) によると砂漣上での浮遊砂は沖向きに移動することから、掃流状態から砂漣への遷移が早い丸珪砂は、角珪砂に比べて沖向き漂砂が活発であることが推察される。

掃流状態では、空隙率が大い流体運動が地盤中により深く伝播し底質は動きやすくなる反面、静止摩擦角が大い流体のせん断力に対する底質の抵抗力が増大して底質は動きにくくなる。海浜変形実験において砂漣発生限界付近では、角珪砂は丸珪砂に比べて移動しにくい結果が得られている。したがって掃流状態から砂漣状態にかけての底質移動には、底質の空隙率より静止摩擦角の影響が支配的であることが分かった。

(3) 岸沖土砂移動量

沖合一樣水深の半分の水深となる岸沖位置を境界断面とし、勾配が始まる岸沖位置から境界断面までを沖側領域、境界断面から静水汀線より1m岸側までを岸側領域として、実験終了後の砂面高から境界断面を岸側に通した単位幅あたりの正味土砂移動量を算出した。図-9に結果を示す。角珪砂海浜、丸珪砂海浜ともに沖方向への土砂移動が目立つ。これらは中間、侵食型のケースに

相当する。沖側に移動した土砂量はほとんどのケースで丸珪砂海滨の方が多く、これは前節で述べた砂漣発生限界による推察とも整合している。この結果からも分かるように、特に砂漣が発達した碎波帯では、角珪砂海滨に比べて丸珪砂海滨の方が沖に流出する傾向が明瞭に現れている。

さらに、両底質海滨の岸沖土砂移動量の差を C 値について図-10 に整理した。侵食条件に近づく (C 値が増大する) につれ、丸珪砂海滨に比べて角珪砂海滨の沖側への流出土砂量は抑制される傾向にあることが分かる。

(4) バーの移動速度

全ケースにおいて、造波開始直後にバーの発生位置は両海滨ともに同じであった。しかしながら、バーの移動速度には違いが確認でき、24時間後のバーの位置を図-11 に示す。値は静水汀線からの岸向き距離で、棒グラフがないケースはバーが発生していないことを表す。図-11 より角珪砂海滨の方が岸へ早く移動する様子が分かる。これについてはいくつか要因が考えられるが、バー付近では底質の舞い上がりが最も顕著であったことから、静止摩擦角の影響は小さいと考え、ここでは沈降速度がバーの移動に大きく寄与していると考えられる。碎波によってバー付近で岸方向に巻き上げられた底質は沈降速度の大きい角珪砂の方がバーの岸寄りに多く沈降し、沖向き流速時に沖へ運ばれる底質は丸珪砂よりも少ないと考えられる。

5. 結 論

本実験の海滨断面形状の分析から、丸珪砂海滨に比べて角珪砂海滨では、沖合への底質の移動が抑制され、底質の砂漣発生の限界位置はより岸側に現れ、汀線は前進傾向にあり、前浜勾配は急になり、発生したバーは岸方向へ移動しやすいことが分かった。

また底質の粒子形状により、海滨変形パターンが大きく変わることはほとんどないものの、堆積型ではバームの形状に、侵食型では岸沖土砂移動量に、また全体を通して砂漣発生の限界位置やバーの移動に違いが現れた。これにともなう、掃流・浮遊砂状態の漂砂量に違いが現れ、角張った砂で構成された海滨は波浪外力に対して安定傾向になることが確認された。

今回は粒子形状による海滨変形特性の傾向を把握することに主眼を置き、底質の移動メカニズムまでは追求しなかった。漂砂機構を解明する上で、力学的機構の把握は不可欠である。底質の空隙率、摩擦力、沈降速度などと底面流速を絡めた力学的考察が必要である。

謝辞: 本論文はみらい建設工業(株)および東邦オリビン工業(株)と東京大学が共同で実施した研究成果の一部である。さまざまな面で援助を頂いた関係諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 佐藤慎司・山本幸次・桜井 亘・村野幸宏・高木利光・厚坂裕次(1999): 富士海岸における侵食対策としての動的養浜の効果, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 676-680.
- 田中則男・新保修(1973): 移動床模型実験用底質材料としての石炭粉の特性について, 港湾技研報告, 第12巻第1号, pp. 3-58.
- 土屋啓佑・佐藤慎司・島田伊浩・嶋田浩治(2003): 比重と形状が異なる底質のシートフロー漂砂に関する実験的研究, 年講概要集, 第58回II-267, 土木学会 (CD), pp. 533-534.
- 堀川清司・佐々木民雄(1970): 養浜工に関する基礎実験, 第17回海講論文集, pp. 241-249.
- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三(1973): 波による海滨変形に関する一考察, 第20回海講論文集, pp. 357-363.
- 本田隆英・本多弘明・佐藤慎司・渡辺 晃・磯部雅彦(2004): 底質比重による海滨断面変形の差異に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 501-505.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, pp. 920-938.
- Sunamura, T. (1980): A laboratory study on off-shore transport of sediment and a model for eroding beaches, Proc. 17th ICCE, pp. 1051-1070.

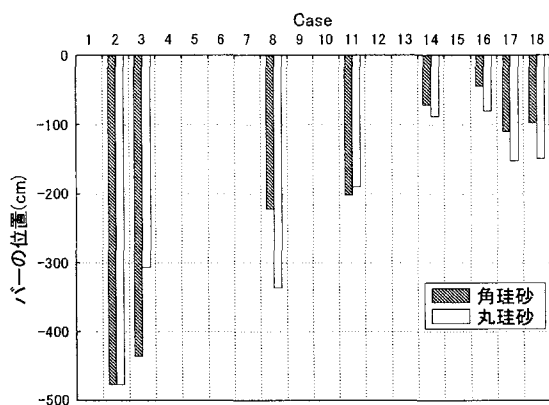


図-11 波作用24 時間後のバー位置