

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420531

研究課題名(和文) 礫養浜後の堆砂機構の解明と数値予測モデルの構築

研究課題名(英文) Investigation on the mechanism and predicting model of formation of sand layer on the gravel bed

研究代表者

小林 昭男 (KOBAYASHI, Akio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：80318360

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究目的は、侵食が進行した海岸への礫養浜を想定し、養浜後の礫の動態を、現地調査、水理模型実験によって明らかにし、数値計算モデルに反映することであった。現地調査は、茨城県神光寺・明石海岸と千葉県幕張海岸において実施し、外海と内海に面する海岸での養浜に伴う海岸地形に変化特性とその相違を明らかにした。移動床水理模型実験では、礫養浜を模擬した実験および、礫と砂の粒径差が大きい混合砂礫を用いた実験を行い、礫養浜特有の地形変化を明らかにした。これらにより、既往の地形変化モデルを礫養浜の動態に対応させるための改良を実施した。

研究成果の概要(英文)：The objectives of the study is clarify the characteristic of beach changes after gravel nourishment by using the results of field investigation and wave flume experiments to develop a numerical model for beach changes. Field investigation were carried out at the Jinkoji coast facing to the Pacific Ocean in Ibaraki Prefecture and the Makuhari coast facing to the Tokyo Bay in Chiba Prefecture to investigate the movement of gravels on beaches. The movable-bed experiment was carried out using a wave flume to investigate the effect of gravels to beach profiles. The numerical model for predicting of beach change after the gravel nourishment was improved by using the results of field investigations and experiments.

研究分野：海岸工学

キーワード：漂砂 礫養浜 海岸調査 移動床実験 数値計算モデル

1. 研究開始当初の背景

1999年に「海岸法」が改正され、防護・環境・利用の調和した海岸保全が義務づけられた。砂浜も海岸保全施設として位置づけられ、砂浜の維持・回復は防護・環境・利用のすべてを向上させるための基盤であると指摘されている。したがって、今後の海岸保全においては、養浜などによる砂浜の創成と、その維持・回復を推進していくことが望まれている。

根本的な対策として土砂供給を確保する総合土砂管理が行われているが、現状の侵食への効果発現には時間がかかる。早急な侵食対策には離岸堤や突堤等の施設の建設が有効に働く場合もあるが、浜幅の復元が不可能な場合には、護岸の倒壊防止と共に越波対策として消波ブロックによる防護が必要になる。この浜幅の復元と既設護岸の安定確保が可能な対策として、海浜地形の安定が良好な10mm程度の礫を用いた養浜の検討が増加している。

礫養浜の実施例の中には礫上には砂が堆積する効果を示すものもあり、砂浜の維持・回復に対する有効な手段とも考えられている。しかし、研究開始当初までの研究成果は、例えば、礫浜の安定や砂の堆積促進に関する研究(古谷・小林ら, 土論 B2, 2010)があったが、現象の説明が主であり、本質的な礫の移動特性や堆砂機構は示されてはいなかった。そのため、数値予測モデルの正確さも不十分であり、的確な事前検討を行うことは容易ではなかった。

2. 研究の目的

本研究は、この浜幅の復元と既設護岸の安定確保が可能な礫を用いた養浜とその効果を研究の対象とした。効果的な礫養浜の計画を行うためには、対象海岸の漂砂機構、海浜の地形、干満の潮位差、波浪を勘案し、礫養浜後の地形や堆積砂の安定性の確保とその妥当性を正確に評価する方法が必要である。

そこで、本研究では、礫養浜計画の的確な事前評価と礫養浜実施の可否判断の合理化のために、既設の礫養浜海岸での詳細な調査と水理模型実験により堆砂機構と堆砂に必要な条件を明確にし、これらに基づいた礫養浜後の海浜変形予測のための数値モデルを構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 礫養浜を実施した海岸の現地調査

効果の状況を詳細に調べるために現地調査を実施した。調査対象海岸は、潮位差があり波浪の季節変動がある事例として太平洋に面する茨城県鹿島灘神向寺・明石海岸と、潮位差はあるが波浪が年間を通じて低い事例として東京湾に面する千葉県幕張海岸侵食海岸を対象とした。調査項目は、地形測量、掘削による層構造計測、サンプリング、地下水位とした。また、調査時期は、海岸地形変化の季節変動を検討するために、春と秋の2時期において実施した。

(2) 移動床模型実験

波による礫と砂の移動状況を把握するために、移動床模型実験を実施した。実験は、はじめに侵食海岸における礫養浜を模擬した実験を実施した。実験のパラメーターは、礫と砂の粒径、波高と周期とした。この実施結果から新たな現象が示されたので、これを詳細に調べるために、砂礫混合土砂を用いた移動床実験を実施した。この実験のパラメーターは、砂と礫の粒径と混合比とし、波浪条件は前実験中の1ケースのみとした。

(3) 数値計算

現地調査および移動床模型実験の成果を反映した海浜変形の数値計算モデルを検討した。数値計算モデルは等深線変化モデルを対象として、既往モデルに対して礫養浜に適応させるための改良を試みた。

4. 研究成果

(1) 礫養浜を実施した海岸の現地調査

①神向寺・明石海岸における調査
調査項目：図-1に示す神向寺海岸の測線①②③において縦断測量および砂のサンプリング調査を行うとともに、定点写真撮影を行った。

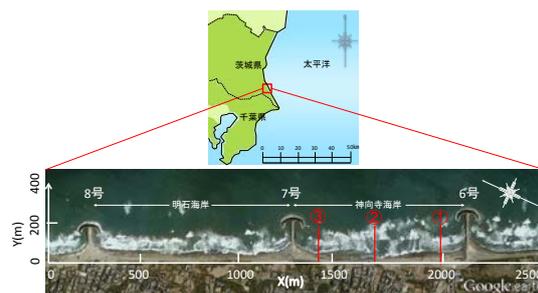


図-1 神向寺・明石海岸の位置

さらに図-1に示す座標系の下で汀線変化を調べ、NOWPHAS鹿島港での波浪観測データより作用波浪の有義波高と波向を調べた。海浜の掘削調査は、冬季風浪後、静穏波の作用が20日程度続いた後の2013年4月27日と、その後夏季の静穏波の作用により前浜への堆砂が顕著に起きた2013年9月6日に行った。測線①②③では汀線直角方向にそれぞれ18m、16m、10m区間海浜を掘削し、砂層状況を写真撮影するとともに、下部の礫層が初めて現れる地盤高を測定した。また2013年4月27日には海浜表面砂のサンプリングを行った。サンプリング地点数は測線①で7点、②で5点、③で6点とした。

縦断地形の季節変化：測線①②③のうち例として①の縦断形変化を図-2に示す。いずれの測線でも2013年4月27日から2013年9月6日までに前浜への著しい堆積が起きた。各測線での堆積域の陸側端の標高は2.29m(測線①)、1.41m(②)、1.44m(③)と、その標高は北側で高かった。また、前浜での堆積断面積は6.52m²(測線①)、20.45m²(②)、16.38m²(③)であり、中央部と北端の測線②③では

南端の測線①と比べて堆積量が大きかった。また、いずれの測線でも砂が堆積して前浜勾配が緩くなった。

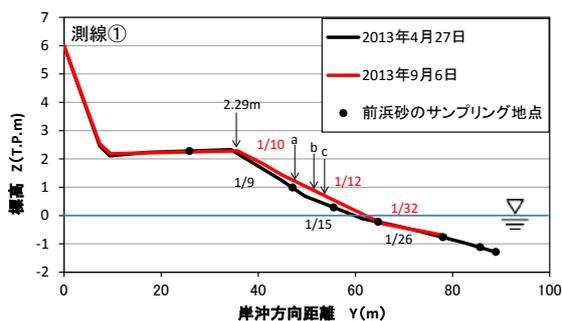


図-2 測線①の海浜縦断形比較

前浜表面砂の粒度組成：測線①の前浜では中砂が90%以上を占めたが、中砂の含有率は汀線へ向かって低下し、 $z = -0.7, -1.1$ mでは礫の集中的な堆積が起きていた。しかし、 $z = -1.3$ mでは再び中砂のみで構成されていた。中央の測線②では、陸端には投入された粗粒材がそのまま残されていたが、 $z = 0.1$ mより海側は10~40%の含有率の細砂で覆われ、残りは中砂が占めた。北端の測線③では、他の測線と比べ礫の含有率が高かったが、 $z = 0.9, 0.2, -0.2$ mでは中砂の含有率が高まり、とくに $z = -0.2$ mでは90%もの中砂が含まれていた。

砂の堆積過程：各測線で前浜の掘削を行い、堆積層の状況を写真で記録するとともに、上層に載る砂層が礫層へと変わる変化点の地盤高を測定した。図-3に測線①の結果を例示する。各測線で礫が確認できた地点の中で最も厚い砂層は、測線①②③の順に0.3 m, 0.6 m, 1.0 mであった。観測された砂層厚は、従来の数値モデル化に際して設定した閾値0.28 mを大きく上回った。

平面地形の季節変化：図-4は、2013年4月27日、9月6日および12月21日の汀線の測定結果と、2013年4月27日基準での汀線変化を示す。神向寺海岸および明石海岸ともに4月27日から9月6日までは全域で岸向き漂砂により堆積が起きたが、その際、北向きの沿岸漂砂による地形変化も生じ、その後9月6日から12月21日では、夏季に前浜に堆積していた砂が沖向き漂砂により運び去られ、汀線が後退したことが分かった。

②幕張海岸における調査

調査項目：空中写真を利用して汀線変化を調べた。次に図-5に示す幕張海岸の測線ABCにおいて2013年4月23日に縦断測量および砂のサンプリング調査、海浜の掘削調査、定点写真撮影を行った。

海岸上の礫の分布：幕張海岸では全体として北向きの沿岸漂砂が卓越しており、南突堤付近で前浜幅が40 mと狭く、越波対策として中央突堤が伸ばされ、南突堤と中央突堤間で2010年に粗粒材養浜が行われた。その後、駐車場前面に投入された粗粒材は北向きに運ば

れ、図-6に示すように中央突堤の天端の一部を埋めつつその南側隣接部に集中的に堆積した。養浜後両突堤間の中央部では汀線がほとんど前進していないが、両端の突堤の近傍では汀線が前進しており、南突堤の北側隣接部では8 m程度の汀線前進が、また中央突堤の南側隣接部では5 m程度の前進が起きた。

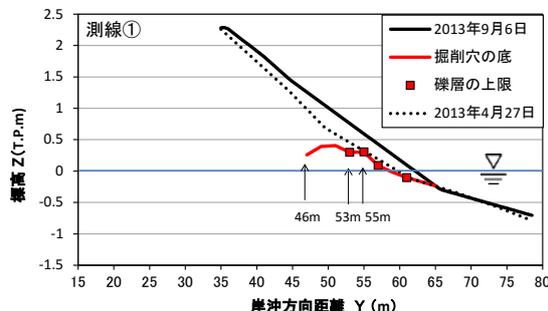


図-3 掘削穴の底と礫層の上限

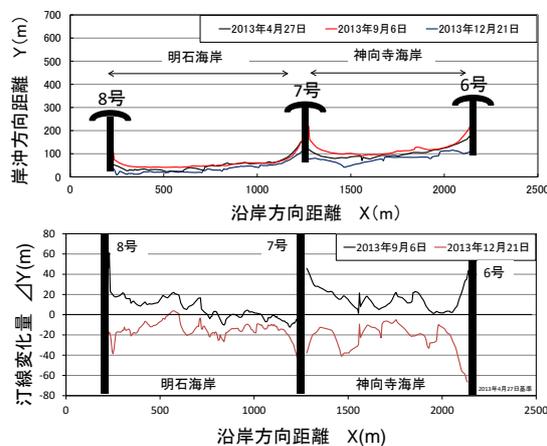


図-4 季節毎の汀線形状と汀線変化量の比較

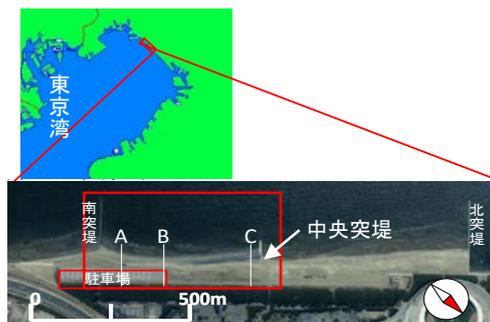


図-5 幕張海岸の位置と空中写真



図-6 中央突堤南側の礫の堆積状況

礫養浜の効果: 礫養浜は海浜土砂総量の増加の意味では有効であるが、粒径が大きくても投入土砂は卓越沿岸漂砂により運び去られるため、前浜狭小区間の浜幅を広げる意味ではその効果は高くない。当海岸での侵食対策としては粒径の選択だけではなく、海浜の幾何学的形状の変更も必要であると考えられる。

(2) 移動床模型実験

① 侵食海岸における礫養浜を模擬した実験
目的: 神向寺海岸を想定した海浜砂に対して粒径が異なる3種類の養浜材料(砂と礫)を用い、模擬海浜と養浜を表現した水理模型実験を行い、礫養浜後の海浜縦断面地形の変化特性の把握と前浜と外浜の生じる現象の系統的な解釈を目的とした。

実験条件: 実験は、日本大学テクノプレース15に設置されている長さ8m、幅0.4m、深さ0.5mの二次元造波水槽を用いて実施し、実験の縮尺は1/30とした。これは、水槽の大きさと造波能力、および側面のガラス面から地形変化が観測できる実験規模を勘案して決めた。ただし、砂礫の粒径にこの縮尺を適用すると、材料が紛体となり砂礫の運動を対象にした実験が成立しない。したがって、縮尺効果は、波浪諸元と海浜地形寸法のみ適用した。

実験に用いた砂礫は、神向寺海岸の現地の砂と同等の中砂 $d_{50}=0.35\text{mm}$ とし、養浜砂には、この中砂の他に、粗砂 $d_{50}=1.2\text{mm}$ 、細礫 $d_{50}=3.3\text{mm}$ 、中礫 $d_{50}=7.0\text{mm}$ を用いた。

波浪条件は、神向寺海岸での粗粒材養浜後の海浜変形の計算条件の設定に用いられた波浪データと同様に、夏季 $H=1.49\text{m}$ 、 $T=8\text{s}$ 、冬季 $H=1.85\text{m}$ 、 $T=8\text{s}$ とし、実験での諸元は、夏季 $H=5\text{cm}$ 、 $T=1.5\text{s}$ 、冬季 $H=6\text{cm}$ 、 $T=1.5\text{s}$ とした。

予備実験結果: それぞれ初期勾配を1/5とした単粒径での地形変化後の前浜勾配と地形特性をはじめに調べた。図-7に模擬海底の側面図を示す。

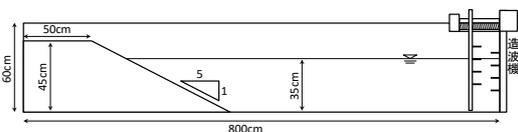


図-7 予備実験の模型海浜

中砂の海浜では、前浜勾配は1/7の緩傾斜になり岸側の遡上限界に浜崖が形成され、前浜の侵食土砂が冲向きに移動して外浜に堆積し、2段のバーとトラフが形成され、バーの沖には比高の低い波状の地形が形成された。

粗砂の海浜では、前浜勾配は1/7の緩傾斜になり岸側の遡上限界に浜崖が形成された。前浜の侵食土砂が冲向きに移動して外浜に堆積したが、外浜では中砂の場合とは異なる棚状地形が形成された。

細礫の海浜では、前浜勾配は1/3.5の急傾斜になり、バームが形成された。汀線下から外浜端部までは勾配が1/6で滑らかに下に凹の外浜が形成された。

中礫の海浜では、前浜勾配は1/1.7の急傾斜になりバームが形成された。汀線下から外浜端部までは前浜から連続する滑らかな下に凹の地形が形成された。

養浜の実験結果: 中砂 $d=0.35\text{mm}$ を用いた海浜の最終地形の前浜に、各養浜材を盛土した状態を初期地形とした。実験は冬季波浪と夏季波浪の順に2回繰り返して作用させた。それぞれの波浪を作用させた時間は、地形が安定するまでとした。図-8に模擬海底の側面図を示す。

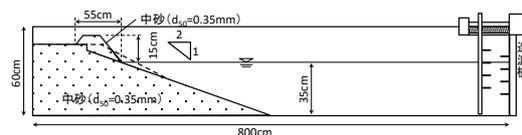


図-8 養浜実験の模型海浜

中砂を養浜した場合には、前浜では汀線の前進し、外浜ではトラフを浅くして棚状地形に近い地形を形成し砕波帯幅を広げる効果が認められた。

粗砂を養浜した場合には、粗砂を主とした緩傾斜の外浜が形成され、前浜に作用する波浪エネルギーを低減させ、その結果、中砂のみでは侵食型であった海浜の汀線後退が止まった。外浜に形成された粗砂の砂層厚は波高の変化により変化し徐々に中砂と混合する傾向があった。安定した外浜が形成されると夏季波浪により前浜に中砂のバームが形成され、汀線付近に堆積した粗砂上に中砂が堆積して、汀線が前進した。

細礫を養浜した場合には、粗砂の場合に加えて次のことが示された。外浜に形成された細礫の層厚は波高が変化しても変化しなかった。安定した外浜が形成されると夏季波浪により汀線付近には細礫と中砂の混合材料が堆積して汀線が前進し、前浜に中砂のバームが形成された。外浜において波浪エネルギーが減少するので遡上高が低くなり冬季波浪時に浜崖が形成された。

中礫を養浜した場合は初期地形と最終地形を図-9に示す。粗砂や細礫の場合に加えて次のことが示された。中礫は間隙が大きいために中砂との混合が他のケースよりも進むが、一方で波高が高い場合には、中砂が選択的に侵食された。前浜でも薄い混合層が形成され、中砂よりも急な勾配1/5の前浜が形成された。中礫の盛土養浜付近では浸透効果によりさらに急勾配の混合層が形成された。



図-9 中礫を養浜した場合の地形変化

以上のことは、縮尺効果を含む結果であることは否めないが、海浜構成材料と養浜材料との粒径差は地形変化に対して大きな影響があることを示唆した。

②砂礫混合土砂を用いた移動床実験

目的：礫養浜を模擬した実験では、養浜の効果は再現されたものの、粒径差が大きく異なる混合土砂の動態については十分に明らかにされなかった。数値計算においても、等深線変化モデルなどでは平衡勾配が粒径に応じて変わるとしてモデル化が行われているものの、礫と砂の含有率の変化が地形変化に及ぼす影響を直接取り入れる手法は未解明である。そこで、中央粒径 (d_{50}) 7 mm の中礫と 0.3 mm の中砂の含有率を変えて混合した材料により模型海浜を整形し、波に対する応答性を調べることを目的とした。

実験条件：水槽の一端に中礫と中砂の混合材料を用いて模型海浜を造った。模型海浜の初期勾配は 1/5 とし、波浪条件は一定 (入射波高 5 cm, 周期 1.5 s) として唯一の変量として中礫と中砂の含有率を 5 種類変えた。実験条件と実験装置を表-1 及び図-10 に示す。なお、実験では、中砂の混合比を増加させるとバームの形成がなくなることが分かったため、その閾値を調べるために、さらに礫と中砂の含有率を 0.9 : 0.1, 0.8 : 0.2 と変化した場合も追加使討した。また現象を詳細に調べるために、砂の礫中への浸透や地下水位の変化と合わせて、混合砂礫に透水係数を調べた。

表-1 実験条件

ケース	1	2	3	4	5
中砂 ($d_{50}=0.3$ mm)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
礫 ($d_{50}=7.0$ mm)	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00

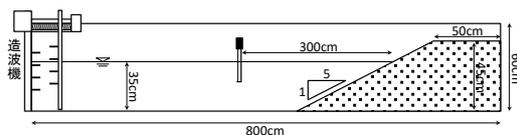


図-10 二次元移動床模型実験の装置

実験結果：表 1 の実験条件では、礫のみのケースでは岸向き漂砂が卓越したのに対し、中砂の割合を 25%以上になると沖向き漂砂が卓越した。そして縦断形変化は図-11 の A, AE, E の 3 種に区分された。すなわち、ケース 1 は A 型、ケース 2 は AE 型、ケース 3, 4 および 5 は E 型となった。このような 3 種の縦断形変化には礫と中砂の含有率が深く係ることが分かった。しかし表-1 の実験条件では中

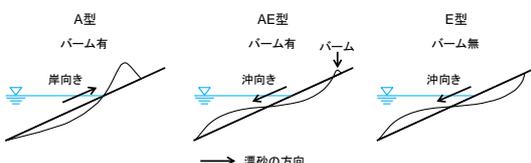
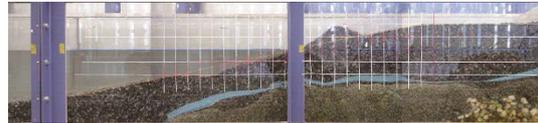


図-11 A, AE, E 型の縦断形変化の定義

砂の含有率は 25% 間隔で変えており、A, AE, E 型の変化が起こる閾値は不明であった。

そこで、中砂の体積比を 0.0 から 0.3 まで 0.05 刻みで変化させて、波による応答性を調べた。その結果、中砂の体積比が 0.0, 0.05, 0.1 の場合は A 型の地形、0.15, 0.2, 0.25 の場合は AE 型、0.3 の場合は E 型の地形となった。図-12 に中砂の体積比が 0.0 から 0.3 の場合の造波 6 時間後の実験結果を示す。

(a) 中砂の体積比が 0.0 の場合



(b) 中砂の体積比が 0.1 の場合



(c) 中砂の体積比が 0.2 の場合



(d) 中砂の体積比が 0.3 の場合



図-12 波作用 6 時間後の水路側面写真

この結果を分析すると、A 型地形の場合は、中砂が中礫の間隙を埋めることにより浸透流が弱まり、結果的に海底面上の戻り流れ成分が強まったことが原因と推定された。このとき、断面では上部の礫層とその下部の礫間を埋めた砂礫層が観察され、礫層表面からの砂礫層表面までの深さは、砂の体積比の増加に伴って減少した。AE 型の場合には、その深さはさらに薄くなり、その沖に向かってほぼ礫層表面の地形に漸近した。また、E 型の場合には、その境界面の位置は海底面とほぼ重なった。

以上の現象を平衡勾配概念に基づいてまとめると、礫層が上部に、中砂混じりの砂礫層が下部にあると、寄せ波時には礫間で浸透流が生じるため引き波時の沖向き流れが弱まり、ネットでは岸向き漂砂が強まる。これに対し中砂が礫間を埋めた層が海底面近くまで達すると、砂による目詰まりが起こって寄せ波時の浸透が弱まり、引き波時の沖向き流れが強まる結果、沖向き漂砂が卓越したと考えられる。

そこで、浸透効果を検討するために、各混合比の場合の透水係数を計測したところ、E 型地形の生じた中砂の体積が 0.3 の時の透水係数は 0.4 cm/s であり、A 型の地形が生じた中砂の体積が 0.1 の時の透水係数は 0.7 cm/s であった。透水係数の実験結果を図-13 に示す。これらにより、本実験ケースでは、岸向き漂

砂が卓越し前浜に礫が堆積する A 型と、沖向き漂砂が卓越し前浜が削られる E 型の地形変化は、透水係数がそれぞれほぼ $k = 0.7 \text{ cm/s}$ 以上と、 $k = 0.4 \text{ cm/s}$ 以下により区分されることが明らかになった。

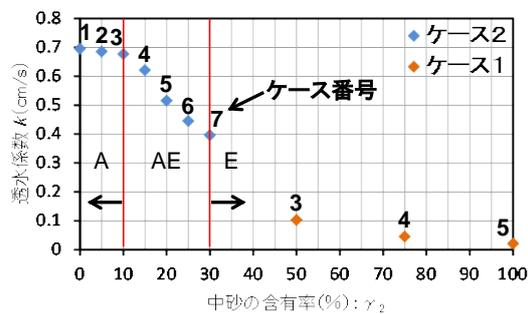


図-13 中砂の堆積比と透水係数 k の関係

(3) 礫養浜に対する数値計算モデルの検討
以上の現地調査と実験の結果から得られた条件を基に礫養浜に対する数値計算モデルを考察した。すなわち、等深線変化モデルに対しては、実験結果で得られた礫と砂の透水係数を堆積と侵食のモデル化を検討した。モデルの概念図を図-14 に示す。また、現地観測で得られた礫上への砂の堆積層厚を閾値としたモデルを検討した。しかし、実現象と実験の現象には計測による相違があり、さらなる検討が必要であることが分かった。これについては、本研究終了後にも継続して研究を実施することとした。



図-14 礫層と砂礫層での浸透の模式図

(4) 研究成果の総括

本研究を通して、浸透流に着目した砂礫混合土砂の平衡勾配の合理的な設定を可能にして、粗粒材養浜のように砂浜に礫が投入された場合の海浜安定化効果の予測方法の提示が必要であることが明らかになった。今後は、さらに現地調査と移動床模型実験を行い、一層高度な地形変化モデルの構築を行う所存である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ① Kobayashi, A., Uda, T. and Noshi, Y., Monitoring of Gravel Nourishment on Makuhari Beach in Tokyo Bay, Proc. 35th ICCE, 査読あり, 2016 (掲載予定)
- ② 小林昭男・宇多高明・野志保仁・吉野貴之: 礫と砂の含有率が異なる海浜の波浪応答に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読あり, Vol. 71, No. 2, 2016 (掲載予定)

- ③ Kobayashi, A., Uda, T. and Noshi, Y., Shoreline Devastation of Hota Coast by Man-Made Causes, Proceedings of 8th International Conference on Asian and Pacific Coast, 査読あり, 171-178, 2015
- ④ 小林昭男, 宇多高明, 野志保仁, 吉野貴之, 三上康光: 礫と砂の含有率が異なる海浜の 2 次元波浪応答実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読あり, Vol. 71, No. 2, pp. I_541-I_546, 2015.
- ⑤ Kobayashi, A., Uda, T., Serizawa, M., Miyahara, S. and Endo, M., Numerical simulation of deformation of sand bar formed at tip of Futtsu cusped foreland by the 2011 Tsunami, Proc. 34th ICCE, 査読あり, USB, pp. 1-11, 2014
- ⑥ 小林昭男, 草木大地, 宇多高明, 野志保仁: 神向寺・明石海岸での礫層上への砂の堆積機構の観測, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読あり, Vol. 70, No. 2, p. I_690-I_695, 2014

〔その他〕

ホームページ等

http://www.ocean.cst.nihon-u.ac.jp/teacher/laboratory_7.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 昭男 (KOBAYAASHI, Akio)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 80318360