

# 礫浜における細砂中砂の挙動に関する 実験的研究

## EXPERIMENT OF MOVEMENT OF FINE AND MEDIUM SAND ON GRAVEL BEACH

古谷真広<sup>1</sup>・小林昭男<sup>2</sup>・宇多高明<sup>3</sup>・野志保仁<sup>4</sup>・清水達也<sup>5</sup>・遠藤将利<sup>1</sup>  
Masahiro KOYA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Yasuhito NOSHI,  
Tatsuya SHIMIZU and Masatoshi ENDO

<sup>1</sup>学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻  
(〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なぎさ総合研究室長兼日本大学客員教授  
理工学部海洋建築工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル)

<sup>4</sup>正会員 博(工) (有) アイコムネット  
(〒100-0014 東京都千代田区永田町2-10-2 永田町TBRビル201)

<sup>5</sup>学生会員 修(工) 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

The movement of fine and medium sand nourished on a gravel beach with a steep slope was experimentally investigated through a two-dimensional movable bed experiment. Five cases of the experiment were carried out, changing the grain size. Model beaches with a steep slope of 1/3 were made using sand of  $d_{50}=0.3$  mm, 1.3 mm, 4.3 mm, and the subsequent movement of sand of  $d_{50}=0.2$  mm and 0.3 mm placed on the shoreline were traced. The thickness of the gravel layer was altered to study the effect of the percolation to sand deposition. It was found that fine sand tends to deposit on a gravel layer because of the percolation effect.

**Key Words :** *Movable-bed experiment, gravel beach, mixed grain size, sand movement*

### 1. まえがき

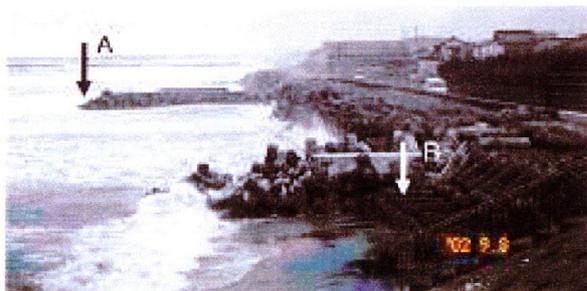
侵食の結果、汀線付近の勾配が比較的急となった海岸における養浜を考えたとき、養浜材に細粒分が含まれていると細砂の持つ平衡勾配が小さいことから、養浜砂は容易に沖へ流失する。茨城県神向寺海岸では、このように安定的に前浜を形成するのが難しく、したがって汀線付近での養浜効果が出にくい細粒材を用いた養浜に代わり、従来の養浜材よりも粒径の大きい粗粒材を用いた養浜が行われてきている<sup>1) 2) 3) 4)</sup>。この結果、図-1(a)に示すように養浜前には護岸・消波工に直接波が作用していた状況が、養浜後には図-1(b)のように十分な浜幅が確保されている。このように粗粒材は汀線付近に歩留まることが明らかになったが、その後の継続観察によれば、高波浪の作用する条件では図-2(a)のように粗粒材が海浜表面に露出するが、静穏な波浪条件では図-2(b)のように粗粒材上に細砂が堆積し、粗粒材がほ

とんど見えなくなるという結果が観察された。この原因には、礫床では遡上波が浸透し易く、その際、遡上波に含まれる細砂の堆積が助長されたためと考えられる。しかしながら、過去に礫床上での細砂の挙動を明らかにした実験は行われていない。そこで本研究では、急勾配海岸における細砂養浜時の砂移動特性と、礫養浜時における細砂の堆積効果について移動床2次元水路実験により検討した。

### 2. 実験条件

実験にはピストン式造波装置を備えた片面ガラス張りの2次元水槽を用いた。表-1には実験ケースを示す。ケース1~4では、図-3(a)のように $d_{50}=0.3$ mmの中砂、 $d_{50}=1.3$ mmの粗砂、 $d_{50}=4.3$ mmの礫を用いて1/3勾配の急斜面を造り、中砂で斜面を造った場合には $d_{50}=0.2$ mmの細砂を、また粗砂および礫で斜面

(a) 2002年9月8日17時, 潮位T.P. +0.7m



(b) 2008年10月23日7時, 潮位T.P. -0.3m



図-1 神向寺海岸での粗粒材養浜前後の海岸の変化

(a) 2007年10月20日, 潮位T.P. +0.3m



(b) 2008年8月26日, 潮位T.P. -0.3m



図-2 海浜表面に粗粒材が露出していた時期と細砂が堆積した時期における海浜状況の違い

表-1 実験ケース

ケース	構成材料	初期勾配	養浜砂	
1	中砂( $d_{50}=0.3\text{mm}$ )	1/3	細砂( $d_{50}=0.2\text{mm}$ )	
2	粗砂( $d_{50}=1.3\text{mm}$ )		養浜前に海底勾配を1/5に変更	
3	礫( $d_{50}=4.3\text{mm}$ )		初期勾配	中砂( $d_{50}=0.3\text{mm}$ )
4				
5	礫( $d_{50}=4.3\text{mm}$ )	1/4	1/15	
6	中砂( $d_{50}=0.3\text{mm}$ )	1/4		

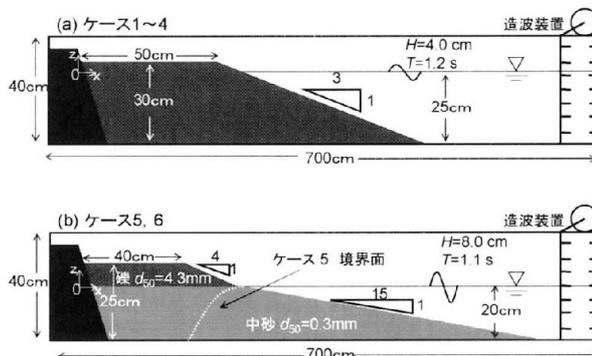


図-3 造波水路と模型海浜

を造った場合には $d_{50}=0.3\text{mm}$ の中砂を汀線上に集中養浜することで、急勾配海岸における細砂中砂の挙動を調べた。一方、神向寺海岸における粗粒材養浜では、礫がほぼ-2m以浅に層状に堆積したこと<sup>3) 4)</sup>を考慮するとともに、礫層厚は浸透流に大きく関係すると考えられることから、ケース5,6では図-3(b)のように礫層の下面が厚い場合(ケース5)と、水平の場合(ケース6)に分けて実験を行った。これらの場合の海浜勾配は、静水時汀線より陸側は礫による1/4勾配、海側は中砂による1/15勾配とした。ケース1~4では、入射波高4cm、周期1.2sの波を、ケース5,6では礫斜面の上部まで波が遡上するように、入射波高8cm、周期1.1sの波を作用させた。実験では、縦断形の時間的変化を水路側面からの写真撮影により測定した。また最終形状について高さにより6区画に区分した上で、各区画内の海底面から水槽の底まで全体で砂礫を採取し、その中に含まれている養浜砂をフルイ分け試験により抽出し、養浜土砂量全体に対する区画内に堆積した養浜砂の含有率を求めた。またケース5,6では礫層内への浸透流を観察するために波の遡上限界点に注射器で染料50ccを注入し、染料の広がりをビデオカメラで記録した。

### 3. 実験結果

#### (1) 急勾配海岸に養浜された細砂中砂の挙動

ケース1では、中砂により勾配1/3の初期海浜を造り、これに波高 $H=4.0\text{cm}$ 、周期 $T=1.2\text{s}$ の波を12時間作用させ、縦断形がほぼ安定形状となった後、汀線付近に黄色の細砂4kgを投入し、同じ条件の波浪を作用させて細砂の移動状況を調べた。図-4は、

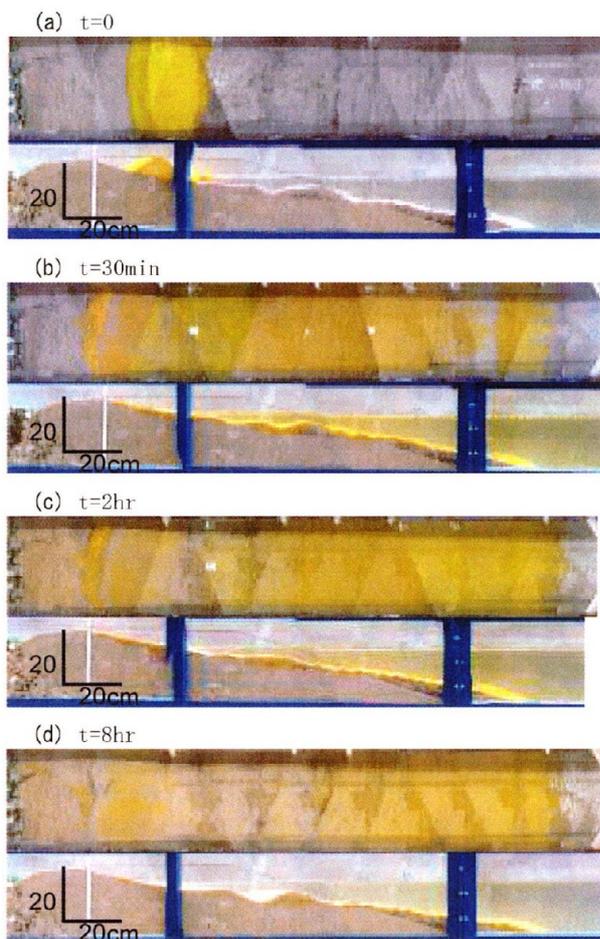


図-4 黄色の細砂の広がり状況 (ケース 1)

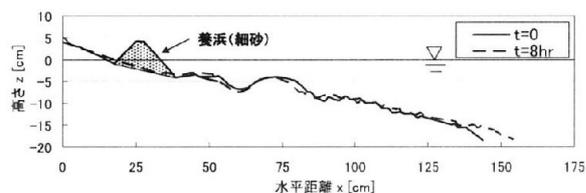


図-5 ケース 1 の縦断形変化

細砂投入直後、投入後 30 分、2、8 時間後において水路上部と側面から細砂の移動状況を写真撮影によって調べたものである。汀線付近に投入された細砂は砕波帯内で急速に拡散し、最終的に沖合へと運ばれ堆積した。図-5 には縦断形変化を示すが、細砂のみでなく、中砂の初期断面においても砕波帯から沖向きに砂が移動しており、このような条件下では細砂は容易に沖向きに流出することが分かる。

ケース 2 では  $d_{50}=1.3\text{mm}$  の粗砂で初期海浜を造り、これに波高  $H=4.0\text{cm}$ 、周期  $T=1.2\text{s}$  の波を 4 時間作用させ、ほぼ安定形状となった後、汀線付近に白色の中砂 4kg を投入し、同じ条件の波浪を作用させて中砂の移動状況を調べた。中砂投入後、初期、30 分、2 時間後の中砂の移動状況を水路上部と側面から写真撮影によって調べたのが図-6 である。白い中砂は 30 分後には砕波帯全体に拡散したが、2 時

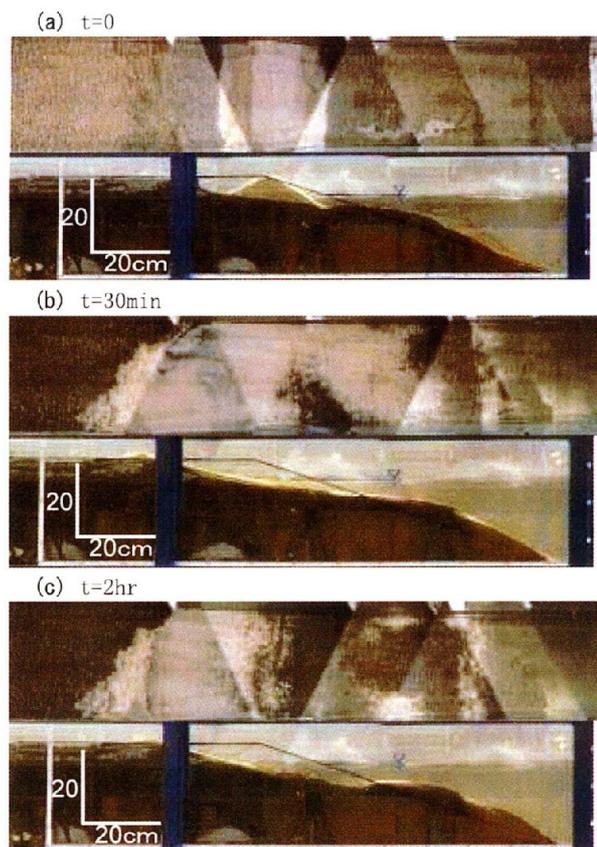


図-6 白い中砂の広がり状況 (ケース 2)

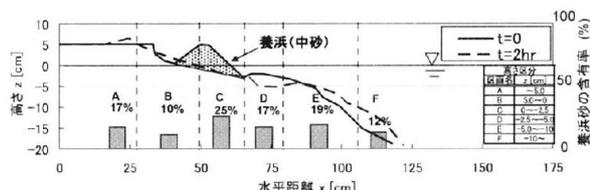


図-7 ケース 2 の縦断形変化と中砂の含有率

間後には沖向きに運ばれた中砂は海底面から見えなくなった。これと対照的に、前浜上では中砂が集中的に堆積している。図-6 のみから判断すれば、投入された中砂は前浜に集中的に堆積したように見えるが、実際には砕波帯内に広く分布した。図-7 は縦断形変化と中砂の含有率の縦断分布を示すが、中砂は前浜では 10%~17%含まれているのに対し、砕波帯および沖合でも同程度含まれている。このことから、粗砂による海浜面上に置かれた中砂は岸沖方向に広く拡散した上で、砕波帯および沖合では中砂が粗砂の間に入り込み、結果として海底面上で見られる中砂が少なくなったことが分かる。

ケース 3 では、 $d_{50}=4.3\text{mm}$  の礫で構成した海浜に初期海浜を造った後、これに波高  $H=4.0\text{cm}$ 、周期  $T=1.2\text{s}$  の波を 3 時間作用させ、ほぼ安定形状となった後汀線付近に白色の中砂 4kg を投入し、同じ波を作用させて中砂の移動状況を調べた。図-8 は、中砂投入後、初期、30 分、2 時間後の中砂の移動状況を水路上部と側面から写真撮影によって調べたものである。中砂を養浜したが、沖への中砂の移動が

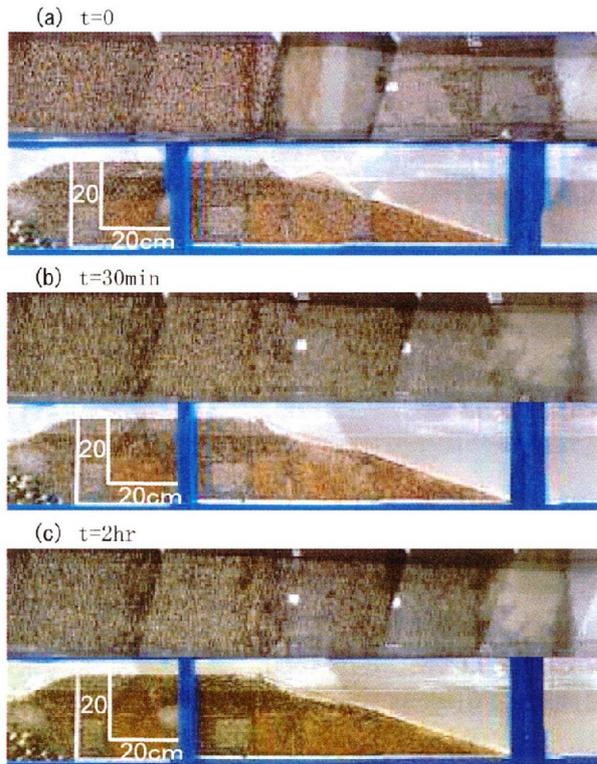


図-8 白い中砂の広がり状況（ケース3）

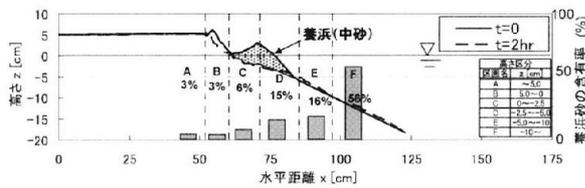


図-9 ケース3の縦断形変化と中砂の含有率

著しかった。これは初期海底勾配が 1/3 と急であったためと考えられる。投入した中砂の全体に対する含有率は、図-9 のように沖合ほど高く、区域 F では 56%にまで高まり、投入した中砂の大半が沖へと流出することがわかった。

ケース4ではケース3の結果を踏まえ、礫で構成した海浜に中砂を養浜する前に、水深0cm以下の海底勾配を1/3から1/5と緩勾配とし、沖浜の底上げを図った。図-10は、中砂投入後、初期、30分、2時間後の中砂の移動状況を水路上部と側面から写真撮影によって調べたものである。ケース3と比較すると、沖へ流失する中砂は減少し、前浜に定着する養浜砂が増加した。図-9と比較すると図-11では前浜の礫間への養浜砂の顕著な吸い込みが確認された。図-12に、ケース3,4のバームの形成状況の詳細を拡大して示す。両ケースともに中砂養浜前に礫によるバームが形成されているが、中砂養浜後ではケース3のバームに中砂が含まれていないのに対し、沖浜の海底勾配を緩くしたケース4では中砂の岸向き移動が活発となりバームに中砂が多く含まれたことが分かる。

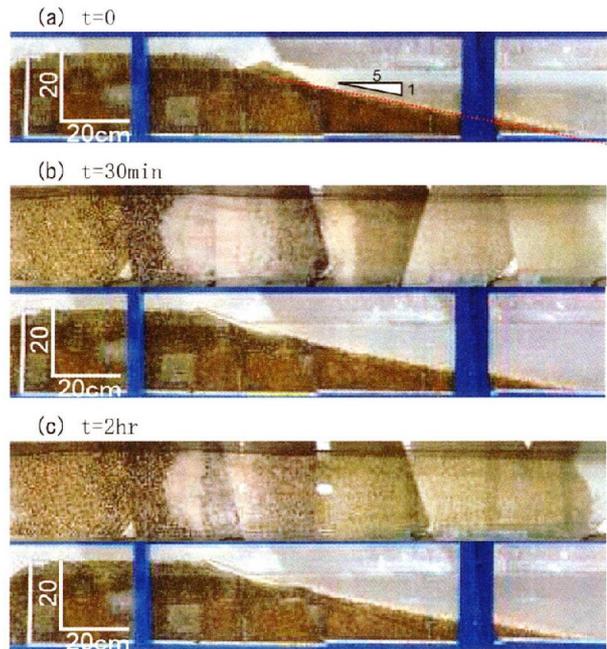


図-10 白い中砂の広がり状況（ケース4）

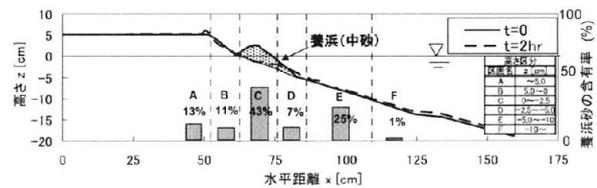


図-11 ケース4の縦断形変化と中砂の含有率

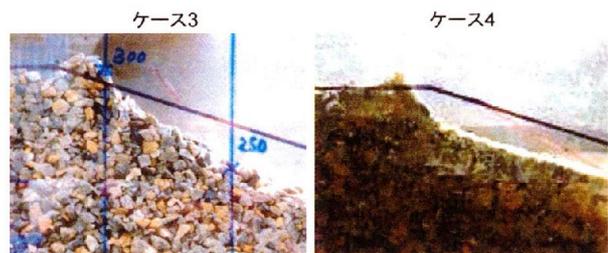


図-12 ケース3,4における前浜への中砂の吸い込み状況の比較

## (2) 礫と中砂からなる海岸での中砂の挙動

ケース5,6では神向寺海岸の現地状況<sup>3)4)</sup>を参考に、汀線より岸側は初期勾配1/4の礫斜面、沖側は中砂による初期勾配1/15とし、 $H=8.0\text{m}$ 、 $T=1.1\text{s}$ の波を海浜形状が安定するまで造波した。これらの実験では、神向寺海岸で起きた礫床の上に細砂が堆積する現象を再現し、岸向き漂砂によって移動した沖の砂が、礫で構成された前浜に定着する過程を調べた。

礫と中砂の境界面を非水平とし、前浜から後浜地中部の大部分を礫で構成したケース5では、図-13に示すように岸向き漂砂により運ばれた中砂は、遡上波の浸透に伴い前浜に吸い込まれながら徐々に堆

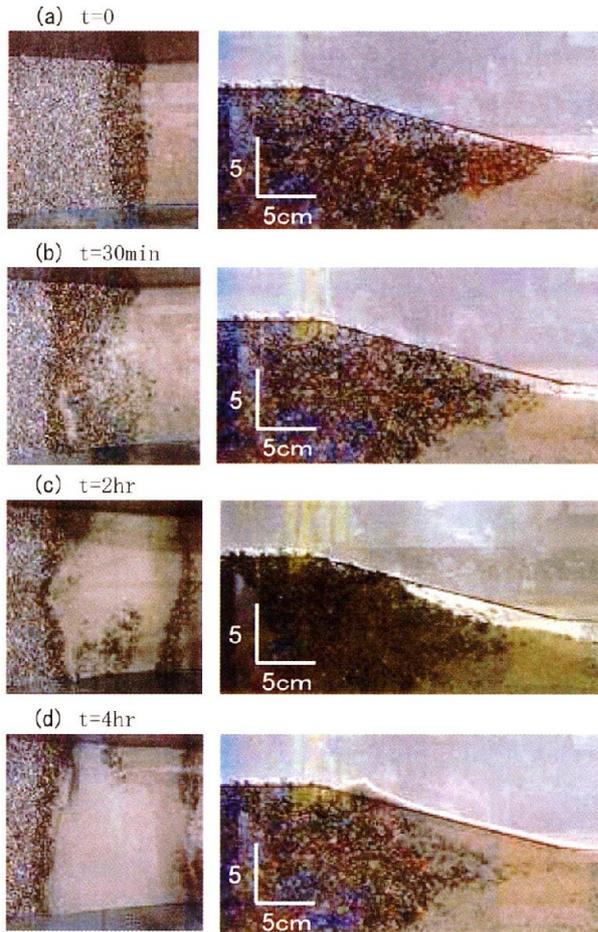


図-13 礫層への白い中砂の混入状況 (ケース 5)

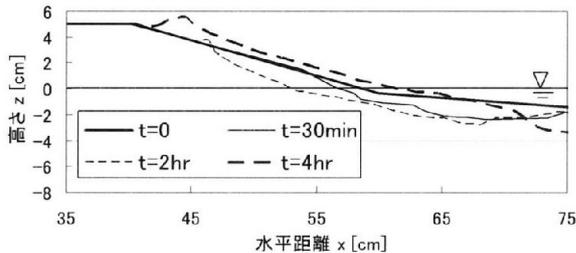


図-14 ケース 5 の縦断形変化

積し、最終的に礫斜面上に中砂のみからなるバームを形成した。また堆積過程において中砂が礫間に吸い込まれ、間隙が目詰まりを起こした直後に前浜表層の礫が滑り落ちる現象が観察された(図-13 (b), (c)参照)。これは礫間に中砂が入り込んだことにより、礫が動きやすくなったためと考えられる。このとき前浜から滑り落ちた礫は沖へ流失することはなかったが、滑り落ちた礫があった空間は中砂で埋められた。さらに中砂層上を波が遡上することで、中砂が岸向きに運ばれ、浸透効果とも相まって中砂が遡上限界点まで堆積した(図-13(d))。図-14にはケース 5 の縦断形変化を示す。

礫と中砂層の境界面を水平としたケース 6 では、染料を用いた浸透流の可視化実験によれば、前浜へ

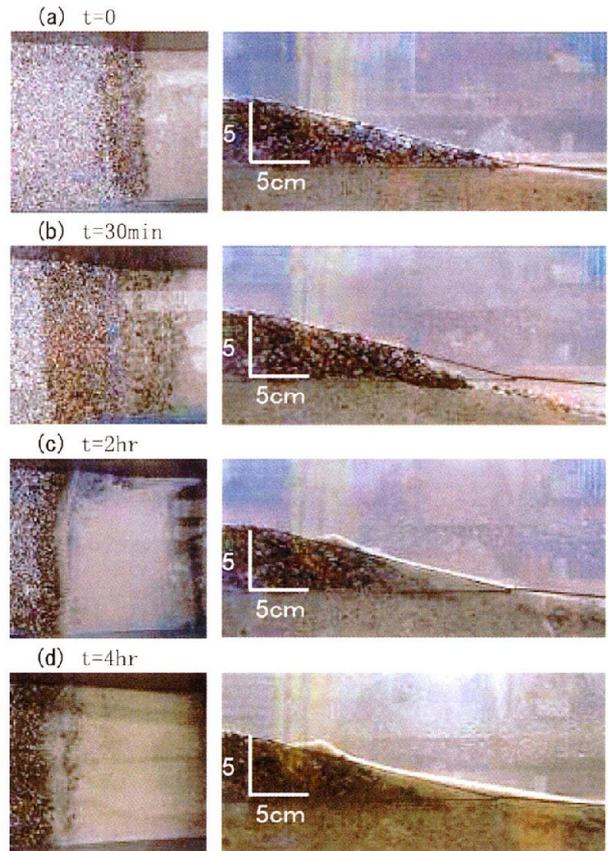


図-15 礫層への白い中砂の混入状況 (ケース 6)

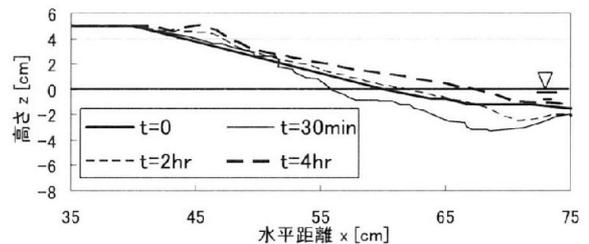


図-16 ケース 6 の縦断形変化

浸透した水が境界面に沿って冲向きに流れるのが確認された。図-15 は造波開始から 4 時間までの海浜状況の変化を示す。実験開始直後は、礫の水平層に沿った浸透水の排水により、前浜地中部の中砂が沖側へと流出し、浸透流の流出地点付近の地盤高が低下する。それに伴い汀線付近の礫層が低下したため、図-15 (b)では前浜が初期断面より大きく侵食されている。その後、ケース 5 と同様、礫があった空間は中砂で埋まった。しかし、ケース 5 に比べ前浜の浸透効果が低いため、前浜の礫床における中砂の吸い込みはケース 5 ほど顕著ではなかった。図-16 は縦断形変化を示す。

図-17, 18 は、ケース 5, 6 の前浜形状の比較であるが、礫層の厚いケース 5 ではケース 6 より深部まで中砂が礫間に入り込んでいるのが分かる。またバーム高で比較すると礫層の厚いケース 5 のバーム高 5.6cm に対し、ケース 6 では 4.9cm と、礫層が厚



図-17 ケース 5, 6 における礫層への  
白い中砂の混入状況の比較

いほうが波の遡上高が高まった。これはケース 5 ではケース 6 よりも礫層の中に中砂が多く吸い込まれた結果、間隙が中砂で埋まり、波が遡上しやすくなったことによると考えられる。

#### 4. まとめ

神向寺海岸での粗粒材養浜での粗粒材粒径は2.5～13mm<sup>1)</sup>であり、そこに $d_{50}$ が0.2mm程度の細砂が堆積した。図-2に示した現象はこのような粒径条件で起きたものである。一方、本研究の実験では、 $d_{50}=4.3$ mmの礫と $d_{50}=0.3$ mmの中砂が用いられた。波高のスケールを比較すると、実験波高10cmに対して現地波浪は1～2mであり、縮率は10～20となる。これに対して実験に用いた砂礫の粒径はほぼ同一レベルである。したがって波の作用による砂移動は相似則から見て非相似であるが、実験に使用した礫と現地の礫の径がほぼ同一であることから、礫層における浸透流の効果は実験と現地海岸とでほぼ同様であったことになる。このことから神向寺海岸で観察された礫層上への細砂の堆積機構については、バーム高などを除けば本実験により現地と同じ現象が再現されたと考えられる。以上より、礫床における細砂の堆積効果には、礫と細砂の著しい粒径差から生じる礫間への細砂の吸い込み現象が重要な要因とな

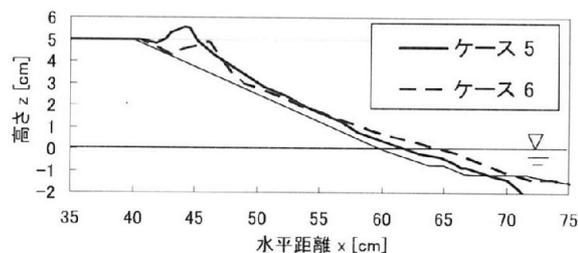


図-18 ケース 5, 6 における縦断形変化の比較

ると考えられる。礫浜には、柳嶋ら<sup>5)</sup>による透水層埋設工法やBMSと同様、前浜への堆砂助長効果があり、今後の粗粒材養浜の価値をさらに高める可能性が高いと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 石井秀雄・中村友和・宇多高明・大木康弘・熊田貴之・芹沢真澄：茨城県神向寺海岸での粗粒材養浜による砂浜の安定化，海洋開発論文集，第 22 巻，pp. 887-892，2006a.
- 2) 石井秀雄・中村友和・宇多高明・高橋 功・大木康弘・熊田貴之：粗粒材養浜による砂浜の安定化に関する現地実験，第 53 巻，海岸工学論文集，pp. 681-685，2006b.
- 3) 宇多高明・石井秀雄・阿部 良・長山英樹・大木康弘：神向寺海岸における礫養浜の追跡調査，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 1093-1098，2007.
- 4) 野川康利・宇多高明・松浦健郎・阿部 良・長山英樹・大木康弘：神向寺海岸における礫養浜の歩留まり検討，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 766-770，2008.
- 5) 柳嶋慎一・佐藤勝弘・原 隆・齊藤正文・岩佐直人・堀 謙吾・長谷川 巖・長谷川準三：透水層埋設による海浜安定化工法の開発，港湾空港技術研究報告，第 42 巻，第 1 号，pp. 1-113，2003.