

## 粗粒材養浜後の円磨度の変化とすりへり試験 Change in Roundness of Beach Materials after Gravel Nourishment and Abrasion Test

黒澤 祐司\*・小林 昭男\*\*・宇多 高明\*\*\*・野志 保仁\*\*\*\*  
遠藤 将利\*・古谷 真広\*\*\*\*\*

Yuji KUROSAWA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Yasuhito NOSHI  
Masatoshi ENDO and Masahiro KOYA

**要旨:** 粗粒材養浜は細砂養浜と比べて安定性が高いために茨城県の神向寺海岸や明石海岸など、各地で行われるようになった。多くの粗粒材養浜では、砕石が利用されており、材料が尖っているため利用障害となる恐れがある。そこで粗粒材養浜に用いられる礫について、上記2海岸での実測データと、すりへり試験から円磨度の変化を調べた。この結果、粗粒材に用いられた砕石は、初期に円磨度が0.2と小さく尖っているが、波の作用下で円磨度は0.4~0.5まで二ヶ月程度で大きくなり、短時間で角が取れることが分かった。また、すりへり試験によれば、2000回転後での現地試料でも礫が53%を占めることから、当初養浜量のほぼ1/2は残存し、粗粒材としての機能が続くことが分かった。

**キーワード:** 粗粒材養浜, 円磨度, すりへり試験, 神向寺海岸・明石海岸

### 1. はじめに

礫は細砂と比較して安定性が高いために、礫を含む粗粒材養浜が各地で行われるようになった(石川・宇多<sup>1)</sup>(2011))。しかし粗粒材として砕石を用いた場合、角が尖っているため海水浴など裸足での海浜利用上障害となる恐れがある。砕石も波浪による磨耗作用によって丸みを帯びると推定されるが、どの程度の時間を経てどの程度の丸みを帯びるかという点についての定量的評価はなされていない。そこで、本研究では、砕石を用いた粗粒材養浜の行われた神向寺・明石海岸(松浦ら<sup>2)</sup>(2009))において、投入礫の円磨度の変化を

実証データに基づいて調べるとともに、ロサンゼルス試験機による粗粒材のすりへり試験を行い、粗粒材の質的变化について調べた。

### 2. 円磨度の調査方法

#### 2.1 現地試料の分析

円磨度の測定に用いた現地試料は、2005年11月から粗粒材養浜が行われた神向寺海岸と、これを受けて2008年11月より粗粒材養浜が始められた明石海岸で採取した(図1)。神向寺海岸と明石海岸は7号ヘッドランド(HL)を境に南北に隣り合っており、鹿島灘に面している。この付近の海

\*学生会員 日本大学大学院理工学研究科, \*\*正会員 日本大学教授理工学部海洋建築工学科,  
\*\*\*正会員 財団法人土木研究センター, \*\*\*\*正会員 有限会社アイコムネット, \*\*\*\*\*非会員 栗田工業株式会社

岸での潮位は、H.W.L., M.W.L., L.W.L.がそれぞれ T.P. 0.45m, T.P. 0.02m および T.P. -0.56m にあり<sup>3)</sup>、また鹿島港と常陸那珂港の波浪観測結果を参照すると、夏季・冬季のエネルギー平均波高は 0.72m (T=7.8 s) と 1.24m (T=7.9s)<sup>4)</sup>である。

前浜構成材料は、図1に示すように神向寺海岸では測線 No.6, No.20, No.32 で、明石海岸では7号 HLの北90mに設けた測線で採取した。各測線上において、バームの頂部、T.P.+1m, ±0m, -0.5m 地点で2010年8月25日に試料を採取した。一方、明石海岸では粗粒材の円磨度の経時変化を調べるために、2010年8月25日、10月21日、11月2日、11月30日にバーム頂部と汀線の2箇所ですりへり試料を採取した。試料はいずれも表層5cm程度を採取した。

礫のすりへりに伴う円磨度の変化については、Krumbein<sup>5)</sup>(1941)が目視により円磨度の変化を調べる方法を提案している。図2(a)はKrumbeinの示した円磨度印象図を示す。円磨度は0.1~0.9に分布し、円磨度が大きいほど礫が丸みを帯びる。神向寺海岸と明石海岸でサンプリングした礫の円磨度の階級も図2(a)と同様の手法を用い、図2(b)のように定めた。また、採取礫については早川・小口<sup>6)</sup>(2003)と同様にして長径aと短径cを測定した。

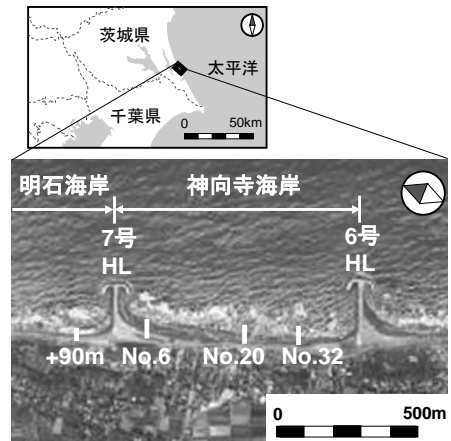
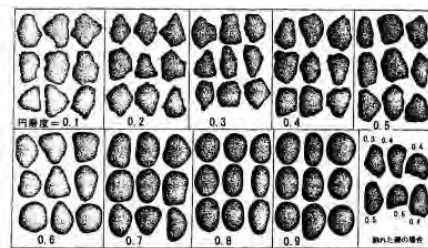
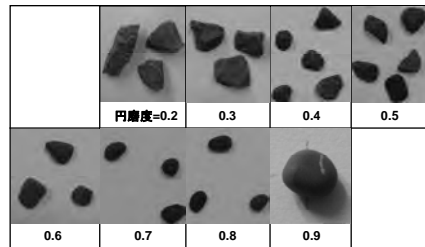


図1 神向寺・明石海岸の位置



(a) Krumbein(1941)の円磨度印象図



(b) 神向寺・明石海岸で採取した礫で作成した円磨度印象図

図2 円磨度印象図

## 2.2 ロサンゼルス試験機による粗粒材のすりへり試験

粗粒材の円磨度変化の機構を実験的にも調べるために、ロサンゼルス試験機を用いた粗粒材のすりへり試験 (JIS A1121) を行った。ロサンゼルス試験のフローを図3に示す。試験では粒度区分がA~Hの8区分とされているが、神向寺海岸の養浜に用いられた粗粒材の粒径レンジが2.5~13mmのため、粒径5~15mmに対応する粒度区分Cを選定した。粒度区分Cでは、粒径5~

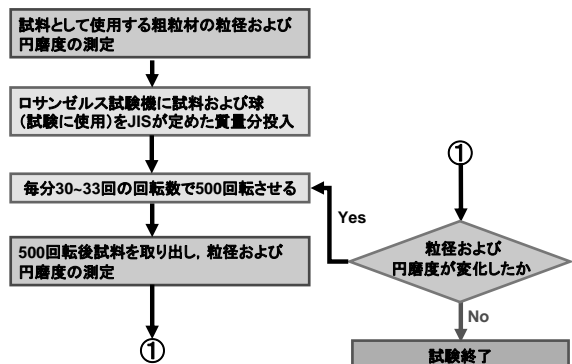


図3 すりへり試験のフロー

10mm の試料を 2.5kg, 粒径 10~15mm の試料を 2.5kg, 合わせて 5kg を必要とする。一方, 試験機に入れる鉄球は, 粒度区分 C では 8 個必要とし, 8 個の全重量は 3.33kg と定められている。なお, 神向寺海岸と明石海岸とも投入礫の原産地は茨城県笠間市であり, 6 号 7 号砕石である。一般的にはアスファルト材料として使用され, 岩質は硬質砂岩であり, 平均圧縮強度は  $1.37 \times 10^5 \text{kN/m}^2$  である。

### 3. 神向寺・明石海岸の海浜材料の円磨度の変化

#### 3.1 投入礫の円磨度

神向寺海岸と明石海岸への投入礫には同じ材料が用いられた。そこで図 1 に示す 7 号 HL 背後の波の作用を全く受けず, 投入礫がそのまま残され

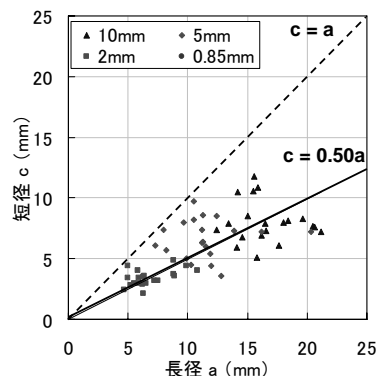


図 4 投入礫のアスペクト比

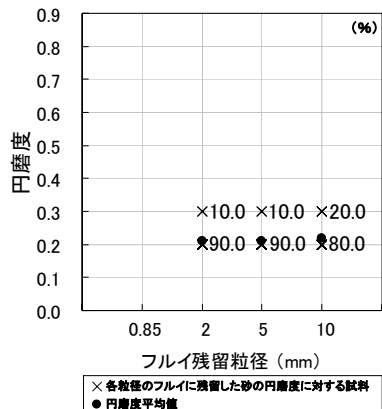


図 5 投入礫のフルイ残留粒径と円磨度

ている場所を掘削して材料を採取し, これを分析に用いた。図 4 は, この試料より求めた土砂の長径と短径の関係, およびその比 (アスペクト比) を示す。これによれば, 投入礫のアスペクト比については  $c = 0.5a$  の関係が成立し, 短径は長径のほぼ 1/2 であった。一方, 図 5 はフルイ残留粒径と円磨度の関係を示すが, 投入材料の円磨度は粒径に依存せず円磨度 0.2 が 80% 以上を占めた。図 2 を参照すれば, 粗粒材養浜に用いられた礫は角張った礫であったことが分かる。

#### 3.2 前浜に堆積した礫のアスペクト比と円磨度

神向寺海岸の測線 No.6, 20, 32 上の各点の表層から採取した試料から求めた粒度組成を図 6 に示す。海岸南部の測線 No.32 のバーム頂のデータ

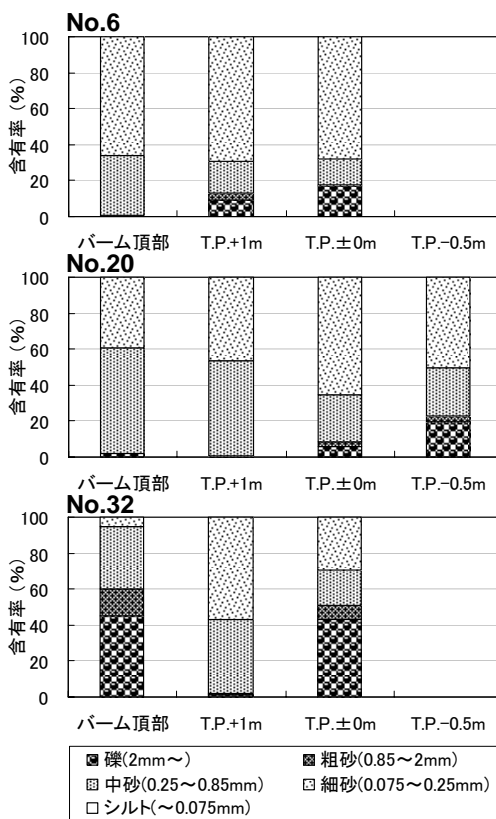


図 6 神向寺海岸における各地点の粒度組成

を除き、バーム付近は中砂と細砂でほとんど構成されていた。また、礫は主にバーム頂と汀線付近で確認された。図7は、各地点の採取試料をもとに標高別に求めたアスペクト比を示す。バーム頂部、T.P.+1m、±0m、-0.5mの順にそれぞれ平均で  $C=0.63a$ ,  $0.43a$ ,  $0.61a$ ,  $0.74a$  の関係が成立し、T.P.+1m 以外の場所では長径と短径の長さが等しいものもあり、投入礫より円に近い値となった。

### 3.3 バーム頂と T.P. ±0m で採取した砂礫の粒径ごとの円摩度

図8はバーム頂で採取した砂礫のフルイ残留粒径(d)ごとに円摩度の占める割合を求めたものである。バーム頂においては、 $d=0.85\text{mm}$  の場合円摩度は0.3にピークがあるが、 $d=2\text{mm}$  および  $5\text{mm}$  ではそれぞれ円摩度のピークは0.4と0.5であって、円摩度が高まっている。一方、 $d=10\text{mm}$  では円摩度は0.3にピークがあり、投入時と比べて高まりが少ない。これらより  $d=5\text{mm}$  の場合に円摩度が高まり易く、それに  $d=2\text{mm}$  の場合が統

くことが分かる。同様にして T.P.±0m で採取した試料より求めたフルイ残留粒径(d)ごとの円摩度の占める割合を求めた結果を図9に示す。この場合も  $d=2\text{mm}$  と  $5\text{mm}$  において円摩度0.4にピークがあって正規分布に近いことから、バーム頂と

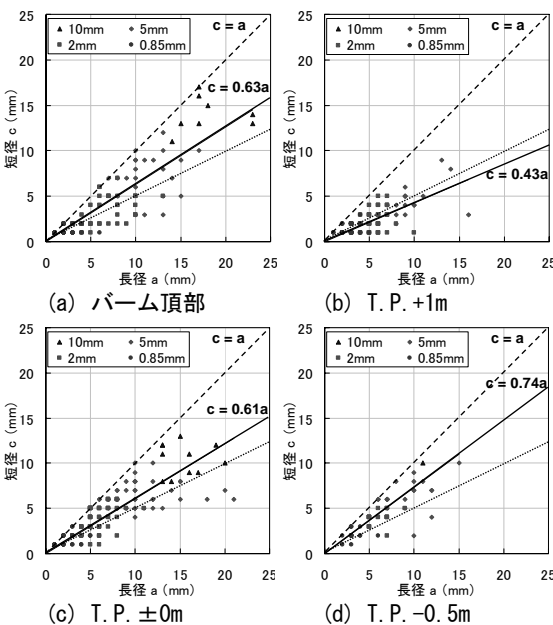


図7 神向寺海岸における各標高のアスペクト比

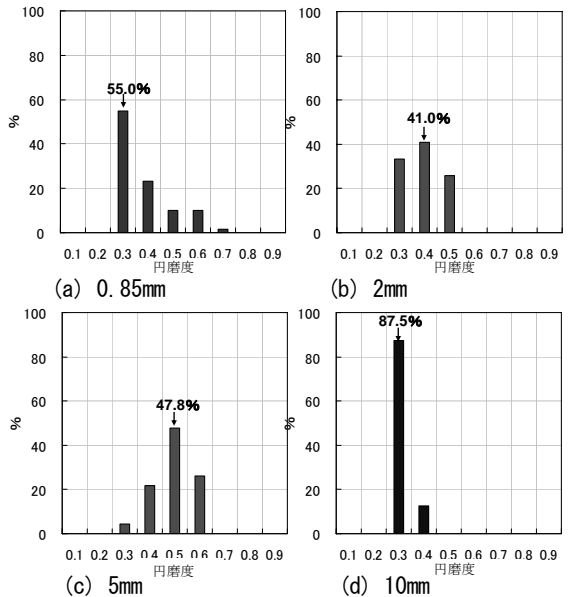


図8 バーム頂部におけるフルイ残留粒径ごとの円摩度の割合

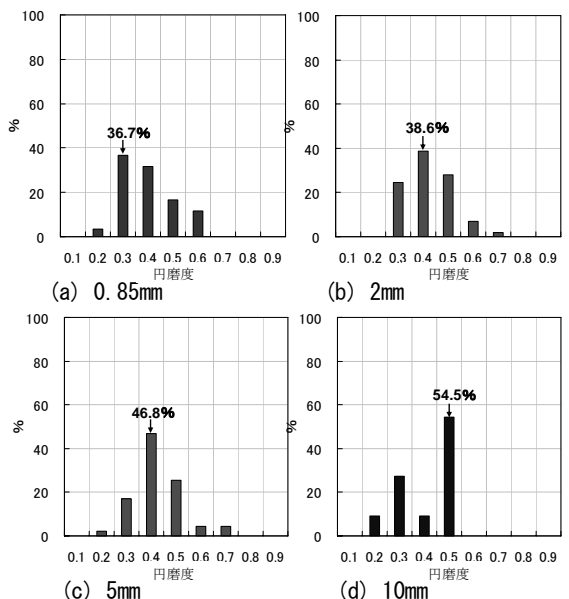


図9 T.P.±0m 地点におけるフルイ残留粒径ごとの円摩度の割合

同じ傾向が読み取れる。一方、 $d=10\text{mm}$  では円磨度 0.5 が集中的に表れており、バーム頂と違い汀線では波による砂礫の混合が著しいため円磨度が急速に高まると考えられる。また  $d=0.85\text{mm}$  の場合はバーム頂とよく似た分布となった。

図 10 は、同じ試料から求めた各標高別の円磨度とフルイ残留粒径の関係を示す。図中の数字は図 8, 9 に示したと同じフルイ残留粒径 (d) ごとの含有率を示す。円磨度の平均値はいずれの標高でも 0.4 に近い値となり、投入礫の角がとれて若干丸みを帯びたことが明らかである。また投入礫の円磨度は当初 0.2~0.3 であったが、各測点では円磨度のレンジが 0.2~0.8 と広がった、これは地中に埋まっていたため円磨が進んでいなかった礫と、表面で円磨が進行している礫の混合が起きたためと考えられる。また粒径が細かくても円磨度が小さいものが見出された理由は、円磨の進行によって粒径が小さくなったのではなく、砂礫が欠けたことによると考えられる。表 1 は各場所の粒径別の平均円磨度を示す。これからも投入礫より丸みを帯びていることが明らかである。そして標高が低くなるほど平均円磨度が高まり、波の作用により円磨の進行が促がされていることが分かる。

### 3.4 明石海岸での円磨度の経時変化

図 11 は明石海岸のバーム上と汀線における平均円磨度の変化を示す。なお、表 2 は明石海岸の 7 号 HL の北側隣接部での粗粒材の投入時期を示しており、粗粒材はまず 2008 年 11 月 17 日~12 月 8 日に  $7,300\text{m}^3$  が、続いて 2009 年には  $13,200\text{m}^3$  が、さらに 2010 年 6 月 12 日~8 月 27 日と 10 月 19 日~11 月 4 日にも  $7,000\text{m}^3$  ずつ投入された。したがって観測期間は 2010 年の第一回目の粗粒材養浜がほぼ終了する時期から始められ、海浜に堆積した最も古い時期の材料は 2008 年 11 月 17 日のものとなる。また、図 11 に示すように、試験

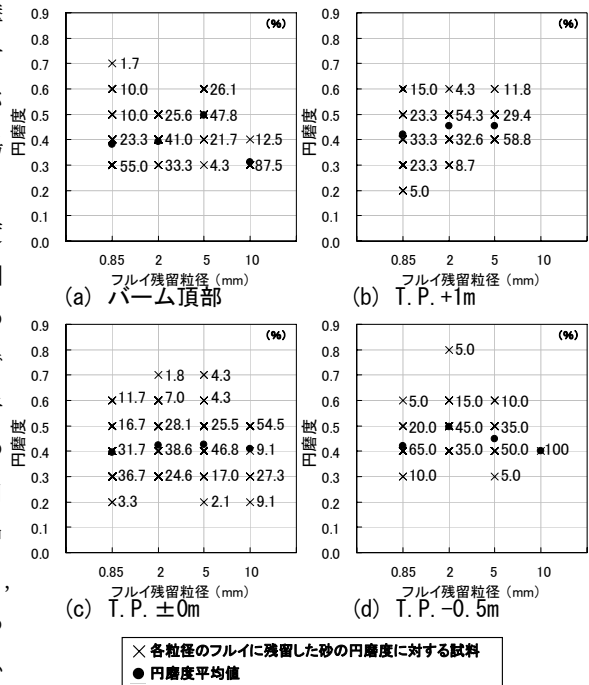


図 10 神向寺海岸における各標高のフルイ残留粒径と円磨度

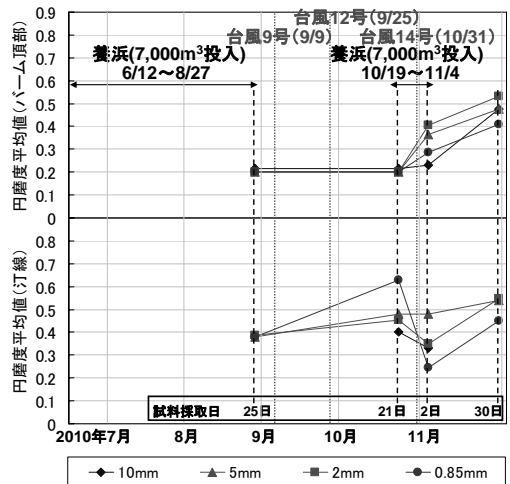


図 11 明石海岸のバーム頂部と汀線における円磨度の経時変化

表 1 投入礫と神向寺海岸における各標高での円磨度平均値

フルイ残留粒径 (mm)	投入礫	バーム頂部	T.P. +1m	T.P. ±0m	T.P. -0.5m
0.85		0.38	0.42	0.40	0.42
2	0.21	0.39	0.45	0.42	0.50
5	0.21	0.50	0.45	0.43	0.45
10	0.22	0.31		0.41	0.40

期間中には台風 9, 12, 14 号が襲来している。鹿島港での波浪観測によれば、台風時の最大有義波高 ( $H_{1/3max}$ ), 平均有義波高 ( $\bar{H}_{1/3}$ ), 周期は表 3 のようであった。波高はとくに 2010 年 9 月 25 日の台風 12 号と 10 月 31 日の台風 14 号時に高かった。図 11 においてバーム頂のデータを参照すると、粗粒材養浜は 2008 年 11 月 17 日に開始されて以来、台風 14 号来襲前の 2010 年 10 月 21 日まで 1 年 11 ヶ月が経過したものの平均円磨度は 0.2 と一定であった。2009 年までに投入した粗粒材については円磨度が向上したと推定されるが、その砂礫上に 2010 年 8 月 27 日までに新たな砂礫が投入されたため、新たに投入された砂礫の特徴が色濃く反映されたため円磨度が 0.2 と低かったと考えられる。しかし台風 14 号の通過後平均円磨度は急速に増大し、2010 年 11 月 30 日には 0.4~0.5 へと増大している。バーム付近の礫は高波浪の作用により円磨が急速に進んだだけでなく、バームより汀線に近い場所で円磨が進行していた砂礫との混合も進んだことが円磨度の上昇の理由と考えられる。10 月 31 日に襲来した  $H_{1/3max}=6.64m$  の高波浪により平均円磨度が急に上昇したことから、少なくともバーム付近の粗粒材の円磨度は高波浪の作用により 0.4~0.5 まで円磨が急速に進行することが分かる。

表 2 明石海岸における粗粒材養浜の履歴

年	期間	投入量(m <sup>3</sup> )
2008	11月17日~12月8日	7,300
2009	7月22日~8月6日	6,200
	10月13日~10月28日	7,000
2010	6月12日~8月27日	7,000
	10月19日~11月4日	7,000
	合計	34,500

表 3 台風時の最大・平均有義波高

台風番号	年月日	$H_{1/3max}$ (m)	$T_{1/3max}$ (s)	$\bar{H}_{1/3}$ (m)	$\bar{T}_{1/3}$ (s)
9号	2010年9月9日	3.40	6.6	2.56	6.8
12号	2010年9月25日	6.88	11.3	5.38	10.7
14号	2010年10月31日	6.64	11.2	4.26	10.7

一方、汀線での測定結果では、8 月 25 日から 10 月 21 日まで約 2 ヶ月間で円磨度は 0.4 程度の水準を保ちながら次第に上昇していたが、台風 14 号通過後円磨度の低下が起き、11 月 2 日には 0.25 まで低下している。これは円磨度の上昇した粗粒材が前浜へとうち上げられたため、結果的に円磨度の低い粗粒材が地層から露出したためと考えられる。バーム上の粗粒材の円磨度の上昇と逆の変化となっていることがその理由である。しかしバームの場合と同様、台風 14 号の通過後約 1 ヶ月の 11 月 30 日では平均円磨度は 0.4 以上となっている。以上より、粗粒材養浜で形成された海浜表面の礫材の円磨度は、2 ヶ月程度の波の作用でも 0.2 から 0.4 程度まで上昇することが分かった。

#### 4. ロサンゼルス試験機による粗粒材のすりへり試験

ロサンゼルス試験は 2000 回転まで行った。図 12 には回転数と粒度組成の変化を示す。初期に 100%であった礫の含有率は、回転数の増加とともに減少し、2000 回転後には 53%まで低下し、その分粗砂と中砂の含有率がそれぞれ 16%, 20%まで増加した。また、中央粒径は初期の 9.4mm から 2000 回転後には 2.3mm まで低下した。また、図 12 の組成図より 2000 回転後の 2mm 以上の礫の

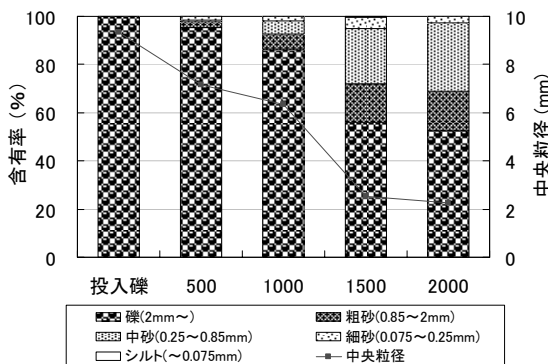


図 12 ロサンゼルス試験機での粒度組成と回転数の関係

粒度組成は53%であった。このことより、礫（粒径2mm以上）は、少なくとも当初投入量の1/2は残り、粗粒材としての機能が続くと考えられる。

図13には500~2000回転後に測定したアスペクト比を示す。これによると回転数を増加させてもアスペクト比には大きな変化は見られず、ほぼ $c=0.49a$ の関係が成立する。現地海岸では粗粒材同士の衝突によって円磨が進むのに対し、ロサンゼルス試験では鉄球の衝撃で円磨が進むことがこのような違いをもたらしたと考えられる。また現地のデータと比較して、分布が $c=0.49a$ 周辺に集まっており、長径と短径が同一のものがないことも分かる。

図14, 15には1000回転と2000回転時におけるフルイ残留粒径(d)ごとの円磨度の出現頻度を示す。d=0.85mmの場合、円磨度のピークは0.3にあって図8と同様な特性があることが分かる。一方、d=2mmと5mmの場合にははもに円磨度のピークが0.4で、分布形も実測値とよく似た結果が得られた。さらにd=10mmの場合には円磨度

が0.3で円磨が進んでいない点も現地との対応が良好である。2000回転後のデータでは図15に示すように、d=0.85mmの場合、円磨度のピークは0.3にあって1000回転と変化がないが、d=2mmと5mmの場合にははもに円磨度のピークが

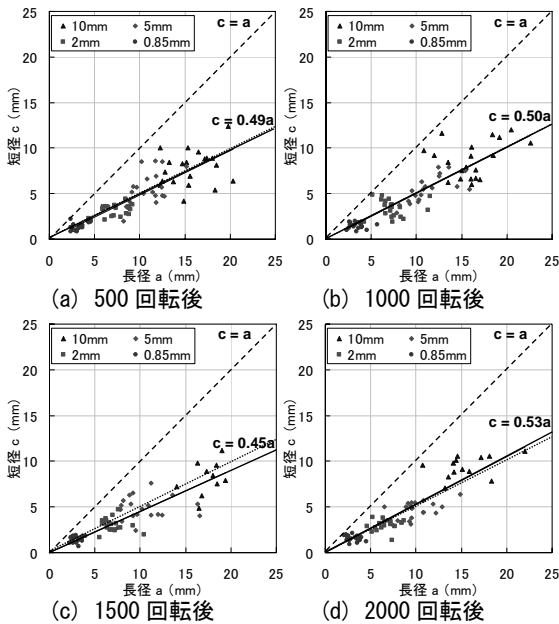


図13 回転数ごとのアスペクト比

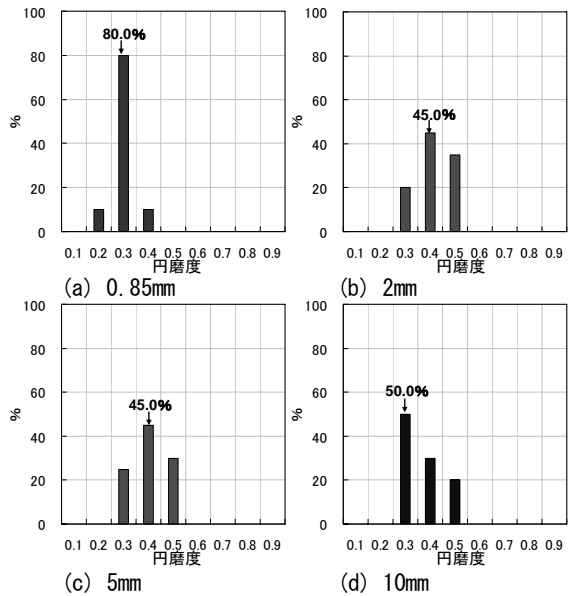


図14 1000回転後におけるフルイ残留粒径ごとの円磨度の割合

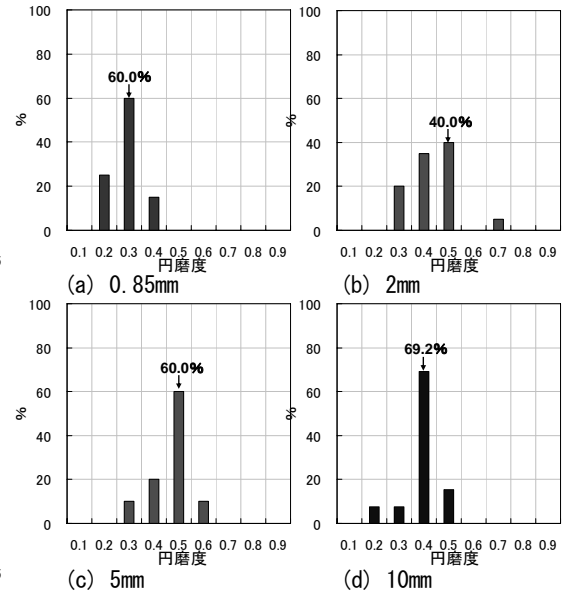


図15 2000回転後におけるフルイ残留粒径ごとの円磨度の割合

0.5 と円磨が進んでいる．これに対し， $d=10\text{mm}$  では，円磨度が 0.3 から 0.4 へ高まっている．実測値との対応がよいのは 1000 回転後の結果であった．平均円磨度は 1000 回転後には 0.4 に近づくが，1000 回転後の平均円磨度の変化は小さいことから，円磨度は 0.4 に収束すると考えられる．円磨度の最大値は 0.7 であり，これも現地に近い値

となった．図 16 は回転数ごとのフルイ残留粒径と円磨度の関係を示す．1000 回転以上の場合，平均円磨度とその周りでの分布状態も含めてほぼ同じ分布形となっている．さらに，図 17 は平均円磨度と回転数の関係を示すが，この図からも平均円磨度は回転数の増加とともに増加し，平均円磨度は 1000 回転までで急速に増加し，その後ほぼ一定値を保つことが分かる．

### 5. まとめ

神向寺海岸では 2005 年 11 月より粗粒材養浜が行われたが，これにより形成された海浜から 2010 年 8 月 25 日に採取した試料を分析したところ，4 年 9 ヶ月間で円磨度が当初の 0.2 から 0.4~0.5 と高まり，円磨度の向上により丸みを帯びた．同様な試験を同じ材料を用いて粗粒材養浜の行われた明石海岸で行ったところ，粗粒材養浜で形成された海浜表面の礫材の円磨度は，2 ヶ月程度の波の作用でも 0.2 から 0.4 程度まで上昇することが分かった．明石海岸での測定結果を基に考えると，神向寺海岸では砂礫の投入後，円磨度が急速に高まり，ほぼ安定状態に達していたと考えられる．また，ロサンゼルス試験の結果によれば，円磨度の変化は神向寺海岸と明石海岸での実測値と同一傾向を示し，円磨度が 1000 回転程度で 0.2 から 0.4~0.5 まで高まった．このことから，2 ヶ月程度が本実験での 1000 回転にほぼ相当すると考えられる．現地のその後の円磨度の進行は緩やかであった．これより礫は比較的短時間で角が取れるため，碎石の尖りが海浜利用へもたらす影響はそれほど大きくないと考えられる．また，ロサンゼルス試験で得られた粒度組成図において，2000 回転後の 2mm 以上の礫の粒度組成は 53% であり，これより礫については少なくとも当初投入量の 1/2 は残存することになり，粗粒材としての機能が期待できることが分かった．

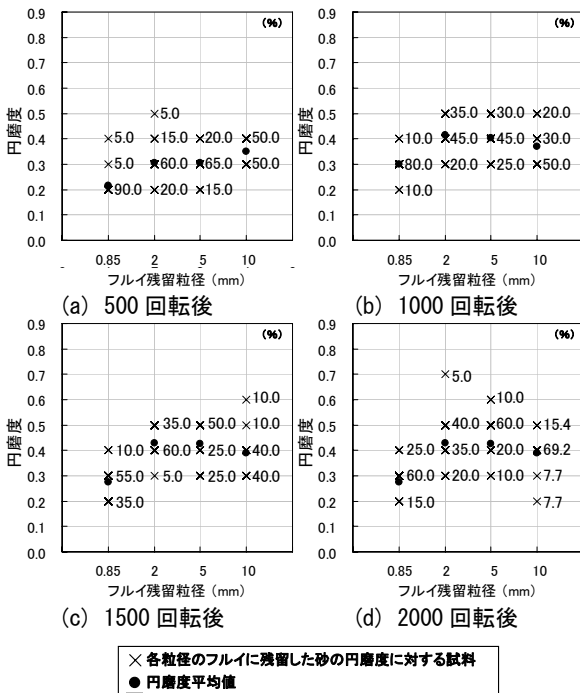


図 16 回転数ごとのフルイ残留粒径と円磨度の関係

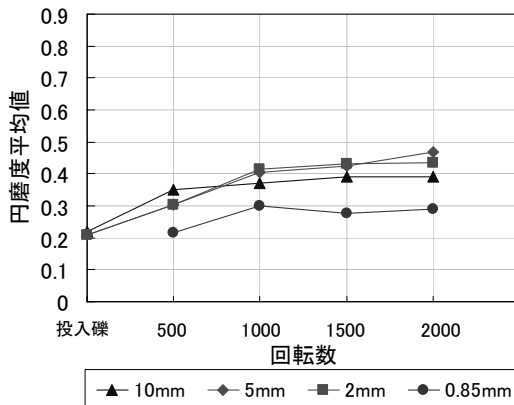


図 17 平均円磨度と回転数の関係



## 引用・参考文献

- 1) 石川仁憲・宇多高明：閉空間と開空間での粗粒材養浜がもたらす効果・影響の相互比較，海洋開発論文集，第 27 巻， pp.1153-1158，2011.
- 2) 松浦健郎・宇多高明・諏訪義雄・山田浩次・福本崇嗣：砂浜の海岸保全施設指定に向けた粗粒材養浜の有効性の検討，海洋開発論文集，第 25 巻， pp.1119-1124，2009.
- 3) 気象庁：推算潮位，銚子漁港，2011.
- 4) ナウファス：有義波状況，鹿島港・常陸那珂港，2010.
- 5) Krumbein, W. C. : Measurement and geologic significance of shape and roundness of sedimentary particles, Jour. Sed. Petrol., 11, pp. 64-72, 1941.
- 6) 早川裕一・小口 高：レーザースキャナ計測に基づく礫の三次元形状分析，地形，Vol.24 巻， pp.349-350，2003.

## 著者紹介



黒澤 祐司（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（千葉県船橋市習志野台 7-24-1），昭和 62 年生まれ，平成 22 年 3 月日本大学理工学部海洋建築工学科卒，同年 4 月同大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻入学，土木学会会員。



小林 昭男（正会員）

日本大学理工学部海洋建築工学科教授（千葉県船橋市習志野台 7-24-1），

日本大学大学院理工学研究科博士課程（海洋建築工学専攻）修了，工学博士，Pacific Congress on Marine Science and Technology，日本建築学会，土木学会，日本水産工学会，日本船舶工学会，日本コンクリート工学協会等会員。



宇多 高明（正会員）

財団法人土木研究センター常務理事 なぎさ総合研究室長（東京都台東区台東 1-6-4 タカラビル 3F），東京工業大学大学院修士課程（土木工学）修了，工学博士，土木学会会員，日本地形学連合副会長。



野志 保仁（正会員）

有限会社アイコムネット（東京都江東区青梅 2-7-4-627），日本大学大学院理工学研究科博士後期課程（海洋建築工学専攻）修了，博士（工学），日本地形学連合，土木学会会員。

遠藤 将利（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（千葉県船橋市習志野台 7-24-1），日本大学大学院理工学研究科博士前期課程（海洋建築工学専攻）修了，修士（工学），土木学会会員。

古谷 真広（非会員）

栗田工業株式会社（東京都新宿区西新宿 3-4-7），日本大学大学院理工学研究科博士前期課程（海洋建築工学専攻）修了，修士（工学）。

## Change in Roundness of Beach Materials after Gravel Nourishment and Abrasion Test

Yuji KUROSAWA, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Yasuhito NOSHI,  
Masatoshi ENDO and Masahiro KOYA

**ABSTRACT :** Beach nourishment using gravel is one of the effective measures against beach erosion because of the high stability of gravel compared with fine sand. In many cases, the macadam gravel is used for nourishment material so that the sharp-pointed shape of gravel is of concerned. In this study, the change in the shape of gravels due to wave abrasion was investigated. Gravel samples were collected from the Jinkoji and Akashi coasts in Ibaraki Prefecture, where beach nourishment using coarse materials have been carried out since 2005. Samples were taken from the different cross-shore locations while changing the elevation of the beach. Grain size and roundness were measured. It was found that roundness of gravels with an initial value of 0.2 rapidly converges to 0.4-0.5 within approximately two months, implying that the macadam gravels can be safely used as the nourishment materials. In addition, due to the abrasion test of sampled gravels, the content of gravel was as high as 53% of all the volume after the rotation of 2000 times, implying that the nourishment gravels can be kept at least by a half while exhibiting the nourishment effect.

**KEYWORDS :** *Beach Nourishment Using Gravel, Roundness, Abrasion Test, Jinkoji and Akashi Coasts*