- 中国電力株式会社エネルギア総合研究所 正会員 仁科 晴貴
  - 中国電力株式会社電源事業本部 正会員 中本 健二
- 中国電力株式会社エネルギア総合研究所 正会員 河内 友一
  - 中国電力株式会社電源事業本部 正会員 樋野 和俊

# 1.はじめに

石炭灰の有効利用拡大施策のひとつとして,環境改善効 果のある石炭灰造粒物により海岸の浅場造成を行う工法が 期待される<sup>1),2)</sup>.浅場造成にあたり,設置水深,断面形状 などを設計するためには,波浪・流れによる石炭灰造粒物 の移動特性を把握しておく必要がある.移動特性のうち流 れによる限界掃流力の研究は古くから数多くなされてきた が,石炭灰造粒物は, 比重が1.8 と軽い, 造粒物であ るため砂や礫と比較して球形に近い, 平均粒径が20mm 前後と大きい, 内部摩擦角が明らかになっていないなど, これまでの研究で実施されてきた実験材料と異なる点が多 い.このため,石炭灰造粒物の限界掃流力を評価するには, 従来の提案式の石炭灰造粒物に対する適用性をあらかじめ 確認しておく必要がある.そこで,石炭灰造粒物の限界掃 流力を評価する水理実験を行い,実験結果と従来の提案式 とを比較し,それらの石炭灰造粒物への適用性を確認した.

#### 2.石炭灰造粒物の特徴

石炭灰造粒物は,石炭灰,セメント,水を原料として製造され,形状はほぼ球状で直径3~40mm程度が混在し(図-1),湿潤密度が1.8t/m<sup>3</sup>と砂(2.6t/m<sup>3</sup>程度)よりも軽いことが特徴である.また,石炭灰造粒物は富栄養化物質を吸着する効果があることから,湖沼や海に敷設することで水質・底質改善効果が期待される.

主な諸元を表-1 に,実験で使用した石炭灰造粒物の粒径 加積曲線を図-2 に示す.

## 3.実験概要

### (1) 限界掃流力の水理実験

長さ40m,幅1mの可変勾配式二次元水路のうち,水路 上流部15mを幅50cmに仕切り,その中央部約10mの区 間に表-2に示す各粒径の石炭灰造粒物を敷均し,水深10cm で等流となる流れを作用させた.勾配を変化させ,流れ作 用時の粒子の移動状況を観察し,移動限界状態となる勾配, 流速等を把握し,限界掃流力を算出した.ここで,移動限



図-1 石炭灰造粒物

表-1 石炭灰造粒物の諸元

項目	単位	規格値
湿潤密度	t/m <sup>3</sup>	1.8
自然含水比	%	15 ~ 35
透水係数	cm/s	$1.04{ imes}10^{0}$ ( 0Ec )
吸水率	%	15 ~ 25
圧壊強度	MPa	1.2 以上



図-2 石炭灰造粒物の粒径加積曲線

表-2 実験で使用する石炭灰造粒物

粒径 d (mm)	均等粒径(定義値)
2.36 ~ 4.75	3 mm
4.75 ~ 6.7	5 mm
9.5 ~ 13.2	10 mm
13.2 ~ 16.0	15 mm
19.0 ~ 26.5	20 mm
26.5-31.5	30 mm
37.5 以上	40 mm

界状態とは岩垣の実験<sup>3)</sup>に倣い「粒子が時々動く状態」と 「水路幅全体にわたって一様に連続的に移動する状態」の 中間的状態と定義した.

# (2) 石炭灰造粒物の比重および内部摩擦角の測定

それぞれの粒径の石炭灰造粒物について比重と水中における内部摩擦角を測定した.結果を表-3に示す.岩垣による砂の摩擦角の測定結果<sup>3)</sup>では,tan¢の値は0.907~1.118をとっており,今回測定した石炭灰造粒物の値と概ね一致している.よって,石炭灰造粒物の内部摩擦角は砂と同程度であることがわかる.

## 4.実験結果

#### (1) 粗度係数 *n* の比較

石炭灰造粒物を敷き詰めた水路の粗度係数の実験結果お よび Manning・Strickler の式から算出した値を表-4 に示す. 均等粒径の粗度係数は,若干のばらつきが見られるが,概 ね Manning・Strickler 式の値と同等であった.混合粒径の粗 度係数の実験結果は均等粒径10 mmの結果と同程度であっ た.これは,3~40 mmの粒径が混在することで空隙が補填 され,平均粒径よりも相対的な粗度高さが小さいためと考 えられる.

(2) 均等粒径の限界掃流力

実験から得られた無次元表示の限界掃流力  $u_{*c}^{2}/{(\sigma/\rho)-1}gd と u_{*c}d/v$ の関係と, Shields 曲線および岩垣 式との比較を図-5 に示す.岩垣式<sup>3)</sup>は,砂粒1個に作用す る力のつり合いから, Shieldsの関数関係を理論的に導き, 実験結果を参考に限界掃流力に関する式(1)を提案したもの である.

$671.0 \le R_*$	;	$u_{*c}^{2} = 0.05(\sigma / \rho - 1)gd$	
$162.7 \le R_* \le 671.0$	;	$= \{0.01505(\sigma / \rho - 1)gd\}^{25/22} v^{-3/11} d^{31/22}$	
$54.2 \le R_* \le 162.7$	;	$=0.034(\sigma / \rho - 1)gd$	(1)
$2.14 \leq R_* \leq 54.2$	;	$= \{0.1235(\sigma / \rho - 1)gd\}^{25/32} \upsilon^{7/6} d^{11/32}$	(1)
$R_{*} \leq 2.14$	;	$=0.14(\sigma / \rho - 1)gd$	
ここに, $R_* = \{(\sigma/ ho-1)g\}^{1/2}d^{3/2}/v$			

今回の石炭灰造粒物の実験結果は Shields 曲線,岩垣式と 値,傾向とも概ね一致している.図-6 に実験から得られた 限界摩擦速度と粒径との関係の岩垣式および栗原式との比 較を示す.ここで,栗原式<sup>4)</sup>は,限界掃流力の無次元表示  $u_{*c}^{2/}{(\sigma/\rho)-1}gdtan\phi$ および $u_{*c}d/v$ の関係にそれぞれ境<sup>5)</sup>の提 唱した $\beta($ 粒子の均一度を示す係数)を付加し提案したもの が式(2)である.ただし,式(2)でXの近似値を用いるときは

表-3 使用した石炭灰造粒物の粒径,比重,摩擦角

粒径 d (mm)	比重 $\sigma \rho$	tan <i>∳</i>
3	1.80	1.153
5	1.87	1.130
10	1.80	1.032
15	1.81	1.115
20	1.79	0.898
30	1.79	0.831
40	1.75	0.980

表-4 各粒径の粗度係数 n

粒径 d	粗度係数 <i>n</i>	
(mm)	実験結果	Manning・Strickler 式
3	0.0143	0.0158
5	0.0152	0.0172
10	0.0172	0.0194
15	0.0189	0.0207
20	0.0219	0.0217
30	0.0189	0.0232
40	0.0243	0.0244
混合粒径	0.0168	0.0216
		(d <sub>m</sub> =19.5mm による)



図-5  $u_{*c}^{2/}{(\sigma/\rho)-1}gd \ge u_{*c}d/v$ の関係



図-6 限界摩擦速度と粒径の関係

無次元量でなくなるので, *d* の単位として cm を使用する.こ こでは,均等粒径であるためβ=1 とした.

$$\log_{10} X < -1.0 : \frac{u_{*c}^{2}}{\beta(\sigma/\rho - 1)gd} = -0.047 \log_{10} X - 0.023$$
  
-1.0 < log\_{10} X < -0.6 : = 0.01 log\_{10} X + 0.034  
-0.6 < log\_{10} X : = 0.0517 log\_{10} X + 0.057  
$$\Box \Box \Box X = \{1.02 \times 10^{-7} (g/\beta v^{2})(\sigma/\rho - 1)\}^{1/3} d$$
  
$$\approx (\sigma/\rho - 1)^{1/3} d$$
 (2)

均等粒径の石炭灰造粒物の限界掃流力は,岩垣式とほぼ一 致していることがわかる.ただし,粒径3mmと5mmの限界 掃流力は岩垣式をやや下回るため,材料移動を極力避けたい 場合には栗原式を使用したほうが安全側である.

(3) 混合粒径の限界掃流力

混合粒径は,ふるい分けた各粒径をラッカーで色付けし, 粒径加積曲線に倣って再混合して作成した(図-7).図-8に今 回の実験結果(中間的移動状態),平野<sup>60</sup>による実験,Egiazaroff の式(3),芦田・道上の式(4),Egiazaroff・浅田の式(5)および中 川ら<sup>70</sup>の式(6)の,各粒径および均等粒径の無次元限界掃流力 の比<sub>でci</sub>/で<sub>tecn</sub>と各粒径と均等粒径の比*d*<sub>i</sub>/*d*<sub>m</sub>の関係の比較を示す. 中川ら<sup>70</sup>の式は粒度分布形状の効果を考慮し,特に大粒径分 の精度を向上させている.粒径3 mm については,粒子の移 動が確認できなかったため記録はない.

$$\frac{u_{*ci}^{2}}{(\sigma/\rho-1)gd_{i}} = \frac{0.1}{\{\log_{10}(19d_{i}/d_{m})\}^{2}}$$
(3)

$$\frac{\tau_{*_{ci}}}{\tau_{*_{cm}}} = \left\{ \frac{\log_{10} 23}{\log_{10} (21d_i / d_m + 2)} \right\}^2$$
(5)



図-7 混合粒径(粒径毎に色付け)





$$d_{i}/d_{m} \geq 0.4: \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left\{\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_{i}/d_{m})}\right\}^{2}$$

$$d_{i}/d_{m} \geq 0.4: = 0.85 \frac{d_{m}}{d}$$
(4)

$$\frac{d_{i}}{d_{i}} = f_{E}(\beta_{i}) \cdot \left[\frac{\ln 15.05}{\ln\{15.05(\eta_{m} / \eta_{e})d_{i} / d_{m}\}}\right]^{2}$$
(6)

$$f_{E}(\beta_{i}) = \frac{k_{1} \sin \beta_{0} + \cos \beta_{0}}{\sin \beta_{0}} \cdot \frac{\sin \beta_{i}}{k_{1} \sin \beta_{i} + \cos \beta_{i}}$$
(6)

ここに, $u_{*ci}$ :粒径 $d_i$ の砂礫の移動限界摩擦速度, $\tau_{*ci} = u_{*ci}^2/(\sigma/\rho \cdot 1)gd_i$ , $\tau_{*cm} = u_{*cm}^2/(\sigma/\rho \cdot 1)gd_m$ , $d_i$ :それぞれの河 床の各砂礫径 $d_m$ :平均粒径, $u_{*cm}$ :粒径 $d_m$ に対する移動限界摩擦速度, $k_1$ :揚力抗力比, $\ln \eta_m = (1/2)\ln^2 \sigma_g$ (粒度分 布が対数正規型の場合), $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ (粒度分布の広がりを示す), $\eta_e = k_s/d_{50}$ ( $k_s$ :相当粗度), $\beta_i$ :砂礫の抜け 出し角( $\beta_0$ :均一砂の値)である.

混合粒径の石炭灰造粒物の限界掃流力は粒径が小さい場合は Egiazaroff・浅田の式と比較的適合し,粒径が大きいところでは中川らの式と適合性が高いことがわかる.また,石炭灰造粒物の粒径別の無次元限界掃流力は平野による実験結果と同様の傾向であった.平野による実験<sup>60</sup>では中央粒径  $d_{50}=1 \text{ mm}$  程度,  $\sigma_g = 2.31$  の砂を使用しているのに対し,今回の実験では  $d_{50}=16 \text{ mm}$ ,  $\sigma_g = 1.94$  の石炭灰造粒物を使用している.中央粒径の比は 10 倍以上と大きいが,双方の実験結果は同様な傾向を示しており,密度・形状が異なり,中央粒径が大きい石炭灰造粒物の混合粒径においてもその分布形が同等であれば,砂による既往実験と同様な結果が得られることが確認できた.

5.おわりに

本研究では,石炭灰造粒物の流れによる限界掃流力を把握するために,均等粒径および混合粒径の材料を用い て水理実験を実施し,以下の結論を得た.

- (1) 均等粒径の石炭灰造粒物の限界掃流力は,岩垣式とほぼ一致する.
- (2) 石炭灰造粒物の混合粒径の限界掃流力は,粒径が小さい場合は Egiazaroff・浅田の式と,粒径が大きい場合は 中川らの式と適合性が高い.
- (3) 密度・形状が異なり中央粒径が比較的大きい混合粒径の石炭灰造粒物においても,粒度分布形が同等であれば,砂による既往の実験と同様な結果が得られる.

## 参考文献

- (1) 池田陵志,斉藤直,松崎和征,車田佳範:Hiビーズによる環境改善効果について,土木学会年次学術講演会, 第58回,pp.623-624,2003.9.
- (2) 福間晴美,日比野忠史,山本民次,斉藤直:石炭灰造粒物覆砂による環境修復効果 汽水域をフィールドとして ,海岸工学論文集,第56巻, pp.1026-1030, 2009.
- (3) 岩垣雄一:限界掃流力に関する基礎的研究 (I)限界掃流力の流体力学的研究 ,土木学会論文集 ,第41号 ,pp.1-21 , 1956.
- (4) 栗原道徳:限界掃流力に就いて,九州大学流体力学研究報告書,第4巻,第3号,pp.1-26,1948.
- (5) 境隆雄:河床砂礫に対する限界掃流力に就いて,土木学会誌,第31巻,第2号,pp.1-8,1946.
- (6) 平野宗夫: Armoringをともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp.55-65, 1971.
- (7) 中川博次, 辻本哲郎, 中野晋: 混合砂れき床の粗度と粒径別移動限界, 水工学論文集, 第25回, pp.67-72, 1981.