

# 消波ブロックによる放水口減勢工の抵抗係数について — 実規模テトラポッドの抵抗係数

LOSS COEFFICIENT OF CONCRETTE ARMOUR UNIT MOUNDS IN FRONT OF COOLING WATER OUTLET  
— PROTOTYPE LOSS COEFFICIENT OF TETRAPODS

鹿島遼一<sup>1</sup>・長谷川寛<sup>2</sup>  
Ryoichi KAJIMA, Hiroshi HASEGAWA

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社 セレス (〒101-0052 東京都千代田区神田小川町1-6-1 宝ビル3F)

<sup>2</sup> 株式会社 セレス 我孫子事業所 水理環境部

Permeable mounds made with concrete armor units are placed in front of some of the cooling water outlets of steam or nuclear power generating stations in Japan, which not only diffuse discharge flow, but also prevent the channel systems connected to outlets from severe wave effect. Both high and low water levels at the upstream side of the energy dissipating mounds should be determined for the design of such channel systems. However, the prototype values of the loss coefficient of armor units have not been reported. A new method to determine the coefficient from the values of up- and downstream water depths and discharge per unit width is proposed, and applied to a set of prototype data. An evaluation of prototype loss coefficient for tetrapods and the method to calculate upstream water depth are shown. The drag coefficient of tetrapods to be used in the dynamic equations in the combined porous body and VOF model is mentioned as well.

**Key Words :** concrete armor units, friction loss, prototype loss coefficient, tetrapods, drag coefficient

## 1. はじめに

火力・原子力発電所の冷却水放水口には放出流の均等分布化と波浪の進入防止を兼ねて消波コンクリートブロック積み減勢工を設ける場合がある。しかし模型縮尺効果があるために減勢工の実規模抵抗(損失)係数は必ずしも明確でない。本報告は実規模のテトラポッドによる減勢工のデータに基づき、抵抗係数を同定し、この種の設計に資することである。これにより近年利用事例が増しつつある、透過構造物周辺の水理の解明を目指すポーラスボディモデル手法における抗力係数についても言及する。

## 2. 消波ブロックによる減勢工断面の例示

ブロックによる放水口減勢工の例として九州電力株式会社川内火力発電所で実施した抵抗係数把握実験時の仮設断面、および日本原子力発電株式会社敦賀発電所の2号機放水口と東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所放水口の減勢工の設計断面諸元を

表-1に示す。断面は台形である。川内の事例は幅6.8mの矩形断面水路に実験用に仮設したものである。単位幅流量と下流水深は川内・敦賀は実測時の条件、柏崎は想定された設計条件である。

表-1 放水口の消波ブロック型減勢工の設計諸元

	テトラポッド トン型	単位幅流量 m <sup>2</sup> /s	下流水深 m	高さ m
川内試験堤	4t	MAX 3.75	2.99-5.59	6.0
敦賀減勢工	16t	MAX 1.29	3.22-3.53	6.0
柏崎減勢工	8t	定格 2.12	3.50-4.10	6.5
	底幅 m	法勾配 下流側	法勾配 上流側	
川内試験堤	16.4	1 : 1	1 : 1	
敦賀減勢工	24.1	1 : 4 / 3	1 : 4 / 3	
柏崎減勢工	23.8	1 : 4 / 3	1 : 4 / 3	

## 3. ブロック積み構造の抵抗係数の既往の表示

消波ブロック積み透過構造の流水抵抗を記述する抵抗係数または損失係数の定義とその算定例として

は首藤・橋本<sup>1)</sup>と島田<sup>2)</sup>・<sup>3)</sup>が挙げられる。

首藤・橋本(1970)<sup>1)</sup>は次の3タイプを提案した。

①管路抵抗モデル

②急拡急縮抵抗モデル(立方塊抵抗モデル)

③阻柱体抵抗モデル

①はブロック間隙を管路と想定して、その壁面による摩擦抵抗と見なすモデルである。②は一様に整然と配置された立方塊により生じる抵抗と見なすモデルである。③は鉛直角柱列によって生じる抵抗と見なすモデルである。首藤・橋本は開水路および30cm×30cm断面のU字管路内に製作・設置した最大2kg(テトラポッドは8kg)までの消波ブロック模型による直方体型透過構造による水頭損失と流量のデータから抵抗係数を算出し、テトラポッドには管路抵抗モデル、中空三角ブロックには急拡急縮抵抗モデル、そして六脚ブロックには阻柱体抵抗モデルが、それぞれ適合すると指摘している。

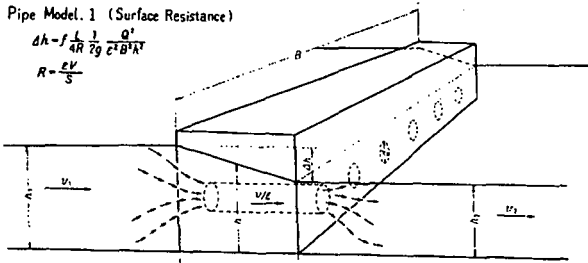


図-1 管路抵抗モデルの概念図(Shuto & Hashimoto<sup>1)</sup>)

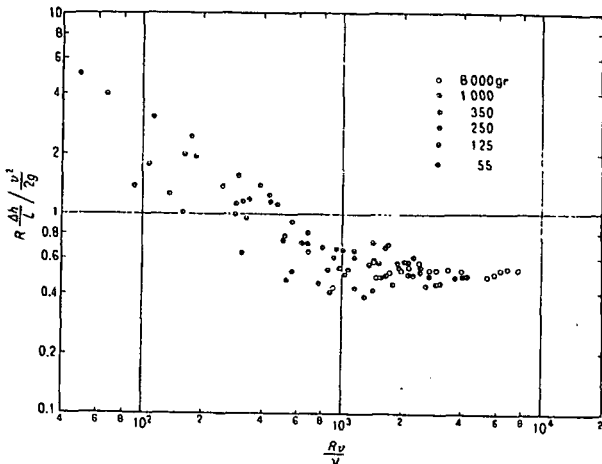


図-2 管路型抵抗係数とレイノルズ数

パラメータはテトラポッド単体質量(Shuto & Hashimoto<sup>1)</sup>)

本報告では乱積みテトラポッド透過堤を対象としているので、上記の管路抵抗モデルの概念図と首藤・橋本の抵抗係数実験値のプロットを図-1, 2に示す。概念図中の径深の表示については後述する。管路抵抗モデルでは減勢工前後の損失水頭  $h_f$  を次のように表示する。

$$h_f = f_{SH} \frac{L}{4R} \frac{1}{2g} \left( \frac{\bar{q}}{\epsilon h} \right)^2$$

$$= h_1 + \frac{1}{2g} \left( \frac{\bar{q}}{\epsilon h_1} \right)^2 - \left[ h_2 + \frac{1}{2g} \left( \frac{\bar{q}}{\epsilon h_2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで、 $f_{SH}$  : 首藤・橋本の抵抗係数、 $L$  : 透過構造内流下距離、 $R$  : 流路間隙の径深、 $\bar{q}$  : 単位幅流量、 $\epsilon$  : 空隙率、 $g$  : 重力加速度、 $h$  : 水深(添え字1, 2は透過構造の上下流端, 上バーは平均値(代表値)を表わす。(1)式中の $4R$ は想定管路の直径に相当する。また、小括弧の中は注目区間の平均透過流速である。水深~流量関係の実験値から得た抵抗係数とレイノルズ数の関係は、図-2に見られるように低レイノルズ数域ではレイノルズ数に反比例し、高レイノルズ数域では定数に近づく。実構造では高レイノルズ数領域で一定値になる抵抗係数が使用に適するので、後述するように、テトラポッド透過構造の実規模データに対して管路抵抗モデルを適用する。図-2の傾向は、層流域と乱流域の抵抗係数値が滑らかに接続している点も含めて粗面管路の摩擦抵抗係数の傾向に良く似ている。

島田(1978a)<sup>2)</sup>は次の一層簡易な形式を提案した。

$$h_1 - h_2 = f_s \frac{D}{R} \frac{1}{2g} \left( \frac{\bar{q}}{\epsilon \frac{2}{3} \bar{h}} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $D$  : 前記の $L$ に相当する台形透過堤の代表流下距離(図-3)。

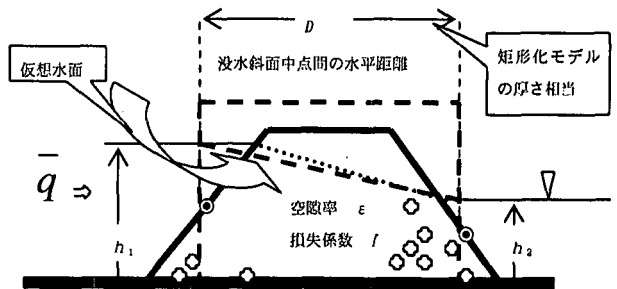


図-3 透過距離の島田による定義

首藤らの管路抵抗モデルとも急縮急拡モデルとも類似しているが、損失の中に速度水頭の効果を考慮しない形式である。島田は模型実験データにより抵抗係数値を算定して、レイノルズ数増加に伴い、減少する傾向から、設計で用いる抵抗係数として

$$f_s = 0.5 \quad (3)$$

を推奨しているが、この値に関しては確認するデータは示されていない(島田(1978b)は文献3では若干大きな値を推奨している)。

一方、榊山・阿部・鹿島(1990)<sup>4)</sup>、榊山・鹿島(1991)<sup>5)</sup>は透過構造を有する防波堤などを対象に、構造物近傍の水理現象を記述するポーラスボディモデルを導入した。簡略化して示せば、定常流における抵抗に相当する単位質量あたりの抵抗力を記述する抵抗項の水平成分を次のように表示している

(通常は時間変動のある鉛直断面2次元や3次元運動の基礎方程式として記述する)。

$$-\frac{\varepsilon}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u^* |U^*| \quad (4)$$

ここで、 $\rho$  : 流体密度、 $p$  : 圧力、 $C_D$  : 抗力係数、 $\gamma_x$  : 面透水性のx成分、 $u^*$  : 透過流速水平成分、 $|U^*|$  : 透過流速の大きさ、 $x$  : 水平座標、 $\Delta x$  : 水平計算メッシュの大きさ。

抵抗を透過流速の2乗に比例すると考えて係数を導入している点は前の4タイプと同じである。また、面透水性 surface permeability は軸に直行する断面に投影した空隙面積の比率であり、空隙が一樣に分布する時には体積空隙率  $\varepsilon$  と一致する。抗力係数  $C_D$  は乱流中に置かれた孤立固体の受ける抵抗の係数に相当するが、流速として固体近傍の局所流速を対象としている。抗力係数値は、計算と実験計測値の比較により同定するが、実規模値が確認されているとは言えない。

消波ブロック透過構造に対して抵抗係数や抗力係数の実規模値を同定した事例はまだほとんどない。

#### 4. 実規模抵抗係数の算定

##### — テトラポッド堤の管路抵抗型係数

##### (1) 抵抗係数算定式

テトラポッドを対象とし、首藤・橋本の管路抵抗タイプの抵抗が局所的に成り立つと仮定する。均質な透過体内部の流下水平微小区間  $dx$  の鉛直方向に一樣な水平に近い定常透過流の運動量方程式は管路抵抗型の抵抗を考慮すると、次の通りである。

$$\frac{\rho \bar{q}^{-2}}{\varepsilon} \left( \frac{1}{h(x+dx)} - \frac{1}{h(x)} \right) = \frac{\rho g \varepsilon}{2} (h(x)^2 - h(x+dx)^2) - \rho dx \times \frac{f_{4R}}{4R} \frac{1}{2} \left( \frac{\bar{q}}{\varepsilon h(x+dx/2)} \right)^2 \times \varepsilon h(x+dx/2) \quad (5)$$

ここで、圧力は静水圧分布、 $h(x)$  : 位置  $x$  における水深。

高次微小量を無視した式を減勢工の実質透過幅区間(島田の定義)で積分し、次の算定式を得る。

$$f_{4R} = \frac{8R}{3D} \left\{ \frac{\varepsilon^2 g (h_1^3 - h_2^3)}{\bar{q}^{-2}} - 3 \ln \left( \frac{h_1}{h_2} \right) \right\} \quad (6)$$

ここで  $h_1, h_2$  : 上下流水深、抵抗係数の添え字  $4R$  は(5)式の抵抗係数が長さのスケールとして4倍径深(管路直径相当)を採用していることを表示するためである。この算定式では代表平均流速値を用いる必要が無い点が既往の定義式と異なる。

#### (2) 実規模データ

首藤・橋本の図-2の模型実験で用いた最大のブロックは8kgである。実規模抵抗係数の同定に用いる実規模データとして、今回、九州電力株式会社の未公表の試験データ<sup>6)</sup>の存在が判明した。昭和59年に同社川内火力発電所放水路(内幅6.8mの矩形断面開渠)内に4トン型テトラポッド123個および側壁との空隙部に充填用2t型テトラポッド20個を用いて台形断面の透過堤を構築し、異なる潮位条件に対して流量を変化させ、堤体前・内・後の水位を計測して次の島田の抵抗係数値を得た。

$$f_s = 0.45 \sim 0.50 \quad (7)$$

もうひとつの系統の公表されているデータは長谷川(1999)<sup>7)</sup>の日本原子力発電株式会社敦賀2号機放水口減勢工のデータである。この事例では流れは3次元であるが、主流出部を仮定して2次元のデータとして扱うことにする。減勢工からの流出状況計測結果と写真を図-4, 5に示す。これらから主流出部を正面の55mとその両脇合計15m区間とした。

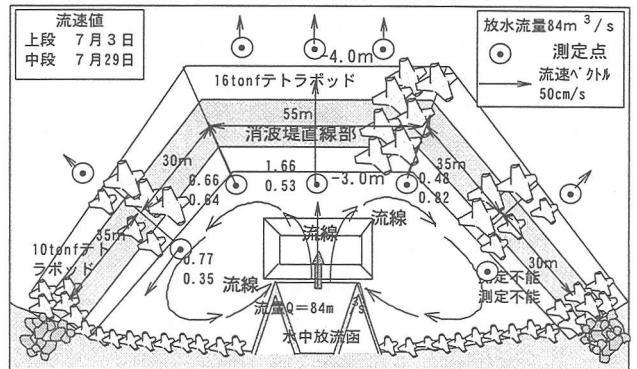


図-4 敦賀2号機放水口底の表層流況<sup>13)</sup>  
正面55m+αが主流出部と判断できる

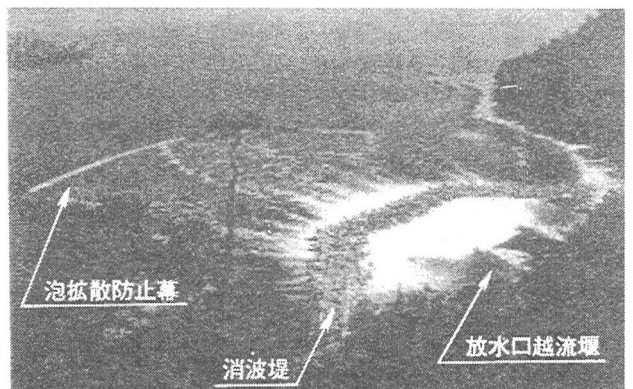


図-5 敦賀2号機放水口改良前の  
前面消波堤からの流出状況<sup>13)</sup>

これらの水位・流量データを表-2に、透過堤断面を図-6に示す。

##### (3) 透過堤間隙の径深

透過流路の径深は流路間隙の潤容積を流路間隙の潤側面積で除した量であり、管路では直径の1/4に相当する。一樣にブロックが充填されている没水空間では次のように表わせる。

表-2 実規模透過堤データ

川内実規模試験	4tテトラ乱積		上流	下流	水位差	透過距離
測定月日	測定時刻	実測流量 Q(m <sup>3</sup> /s)	水深 h <sub>1</sub> (m)	水深 h <sub>2</sub> (m)	h <sub>1</sub> -h <sub>2</sub> Δh(m)	D(m)
昭和59年	10:00	19.8	5.89	4.84	1.05	12.4
5月15日	11:00	20.6	5.59	4.19	1.4	12.4
	12:00	19.9	5.36	3.59	1.77	12.4
	13:00	21.3	5.39	3.14	2.25	12.3
	13:30	21.4	5.36	3.04	2.32	12.3
	14:30	21.5	5.36	2.99	2.37	12.3
	15:00	10.7	4.04	3.24	0.8	13.3
	15:30	10.8	4.14	3.39	0.75	13.3
	16:30	10.9	4.54	3.99	0.55	13.3
5月16日	9:00	23.1	6.35	5.59	0.76	12
	10:00	22.8	6.16	5.19	0.97	12
	11:00	22.5	5.87	4.59	1.28	12
	12:00	11	4.5	3.89	0.61	13.3
	13:00	10.8	4.13	3.34	0.79	13.3
	14:00	10.7	3.95	2.99	0.96	13.3
	14:30	10.7	3.89	2.89	1	13.3
	15:00	10.7	3.93	2.99	0.94	13.3
	16:00	10.8	4.08	3.29	0.79	13.3

透過堤延長B=6.8m, 空隙率ε=0.5, 5月15日10.8m<sup>3</sup>/sのDは13.3mと想定, 4t型テトラの高さdは1.79m

敦賀原発実験		上流	下流	水位差	透過距離	
測定月日	測定年	実測流量 Q(m <sup>3</sup> /s)	水深 h <sub>1</sub> (m)	水深 h <sub>2</sub> (m)	h <sub>1</sub> -h <sub>2</sub> Δh(m)	D(m)
6月25日	平成11年	44	3.53	3.41	0.12	19.5
6月26日		44	3.55	3.41	0.15	19.5
6月26日		62	3.69	3.48	0.21	19.3
6月26日		84	3.78	3.38	0.4	19.3
6月27日		84	3.77	3.37	0.4	19.3
7月3日		84	3.91	3.53	0.39	19.1
7月3日		84	3.65	3.22	0.43	19.5
7月29日		84	3.91	3.53	0.39	19.1

透過堤延長B=70mと仮定, 空隙率ε=0.5, 動粘性係数νは0.01cm<sup>2</sup>/s, 16t型テトラの高さdは2.83m

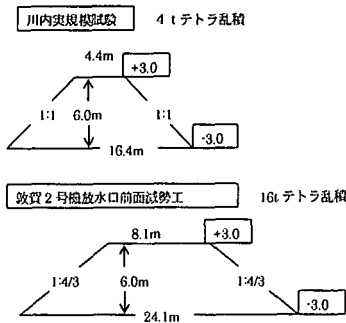


図-6 実規模データを取得した減勢工断面

$$R' = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \frac{V_B}{S_B} \quad (8)$$

ここで  $V_B, S_B$  : ブロック単体の容積, 表面積. 容積・表面積比はテトラポッドでは平坦面にブロックをおいたときの高さの0.103倍である. 図-1 中に書き込まれた首藤らの径深表示と異なり, (8)式はその約2倍である(空隙率50%のとき). 川内データでは水路幅はブロック高さの3.8倍と比較的に狭いので側壁と底面の効果も径深に考慮する. ただし, 湿潤側面を計算する場合に限り, 透過堤内の水面は上下流端水位を繋げる平面と仮定する. すなわち,

$$R = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \frac{V_B}{S_B} \times \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{2}{1-\epsilon} \frac{V_B}{S_B} \left( \frac{1}{B} + \frac{1}{h_1 + h_2} \right) \right\}} \quad (9)$$

ここで  $B$  : 流れの横幅 (減勢工の延長).

#### (4) 実規模抵抗係数の算定結果

テトラポッド乱積みの標準空隙率50%, 図-3の透過距離, 式(6)と(9)により表-2のデータから抵抗係数が算定できる. 得られた抵抗係数を, 上下流平均水深での平均透過流速と4倍径深で構成する次のレイノルズ数に対してプロットする(図-7).

$$Re_{4R} = \frac{2q \times 4R}{\nu \epsilon (h_1 + h_2)} \quad (10)$$

ここで  $\nu$  : 海水の動粘性係数. 図-7では10の5乗のオーダーのレイノルズ数に対して一定値の周りにばらついていて, 平均値と標準偏差で表示すれば, 川内データについては,

$$f_{4R} = 0.90 \pm 0.12 \quad (11)$$

であり, 全データについては0.90±0.10である. 敦賀の主流幅を±5m付加すると敦賀データに対応する抵抗係数平均値の変動は±0.13であった. 同じデータに基づく首藤・橋本および島田方式による算定係数のばらつきと比較するために変動係数を見ると, それぞれ首藤・橋本 0.23, 島田0.20, 本法0.11となり, 係数の算出過程で「平均水深での流速」を用いない算定は変動係数が他の1/2となって, ばらつきが少ない結果となった.

算定式は測定値から  $f_{4R} D / 4R$  を算定する形式に

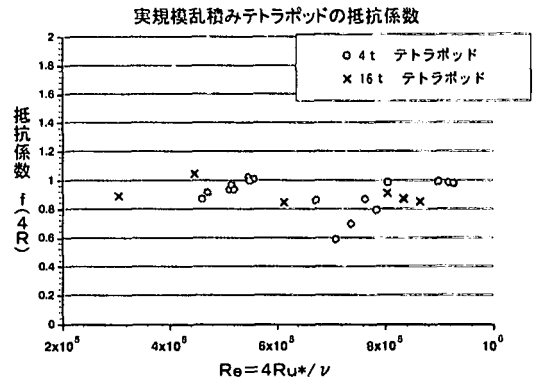


図-7 実規模抵抗係数(4倍径深基準)

なっていることから, 係数値は長さスケールおよび透過距離のとりかたに依存する. 抵抗を4倍径深基準でなく, 径深基準で記述すれば同じ抵抗に対して抵抗係数値は1/4になる.

今回のデータによる算定係数の平均値は, 島田: 0.43, 径深補正後の首藤・橋本: 1.20であった.

#### 5. 上流水深の算定法

通常, 減勢工の設計検討では, 潮位条件と放流量に対して減勢工上流の水位を算定する必要がある. 径深と透過距離が既知であれば, 抵抗係数, 下流水深, 単位幅流量に対して係数算定式を逆解析する形で上下流水深比  $x \equiv h_1 / h_2$  に関する次の方程式(12)~(14)を解くことになる.

$$\ln x - \frac{\varepsilon^2 g h_2^3}{q} (x^3 - 1) + \frac{f_{4R} D}{8R} = 0 \quad (12)$$

$$R = R' \times \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{2R'}{\varepsilon h_2} \times \frac{1}{1+x} \right\}} \quad (13)$$

ただし  $R' = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \times \frac{V_B}{S_B}$  : 底側面効果無視した径深.

$$D = D_b - \frac{h_2(n_2 + n_1 x)}{2} \quad (14)$$

ここで、台形堤の  $D_b$  : 底幅,  $n_1, n_2$  : 上下流面勾配. 解法は、Newton-Raphson法または逐次代入法で1より大の実根を求めることに帰する. 抵抗係数0.90を用いて、表-2の下流水深と流量から算定した上流水深を実測上流水深と比較した結果を図-8に示す.

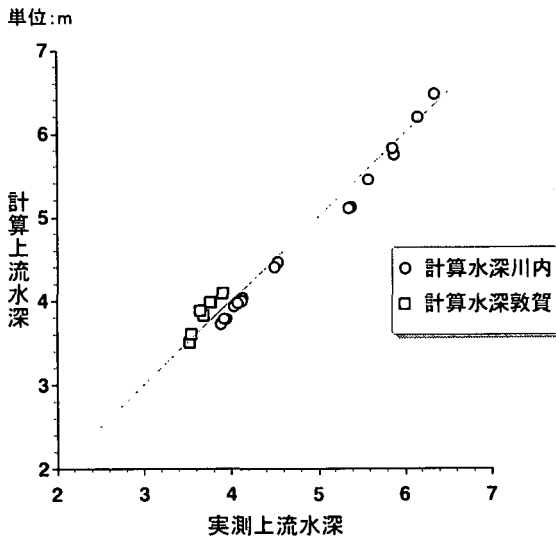


図-8 上流水深計算値と実測値の比較

## 6. テトラポッドの抵抗係数の一般表示式

前記の実規模の抵抗係数値をより広範囲のレイノルズ数に適合する表示式の一部と見なせるような、より一般的な表示を求めておく.

礫以下の細粒透水層の定常透過流に対する Ward(1964)<sup>8)</sup>-Dinoy(1971)<sup>9)</sup>-Sollitt & Cross(1978)<sup>10)</sup>らの基礎方程式は次の(15), (16)式である.

$$-\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho gz) = f_{K_p} \frac{u|u|}{\sqrt{K_p}} \quad (15)$$

$$f_{K_p} = 1/R_{K_p} + C_f, \quad R_{K_p} = |u| \sqrt{K_p} / \nu \quad (16)$$

ここで  $\nabla$  : 勾配演算子,  $u$  : 全断面平均想定流速ベクトル,  $f_{K_p}$  : 摩擦ファクター,  $K_p$  : 透過層の固有の透水係数,  $R_{K_p}$  : 長さ  $\sqrt{K_p}$  ・ 流速  $|u|$  のレイ

ノルズ数,  $\nu$  : 流体動粘性係数,  $C_f$  : 乱流損失係数.

固有の透水係数はDarcyの透水係数と同様に透水試験によって決定され、構成粒子の形状特性と大きさで決まる. 乱流損失係数は流速の大きいとき一定になるときの摩擦ファクターの値に相当し、Dinoy(1971)はこれが相対粗度に依存することを実験データで示した. これは直接に実規模抵抗係数と結びつく量である. すなわち、単位質量あたりの抵抗力を(15)・(16)式と(5)式で比較し、

$$C_f \frac{u|u|}{\sqrt{K_p}} = \frac{f_{p4R} u^* |u^*|}{8R} \quad (17)$$

を得る. ただし、鉛直平均流速に対する表示が局所流速にも成立すると仮定している. また抵抗係数には実物値としての添え字 p を付けた. (17)式右辺の流速は間隙中の透過流速であり、次式を得る.

$$\frac{C_f}{\sqrt{K_p}} = \frac{f_{p4R}}{8\varepsilon^2 R} \quad (18)$$

一方、WardおよびSollitt & Crossの実験データをプロットすると固有の透水係数と篩分けによる平均径には粒子形状により異なる比例関係が見られる.

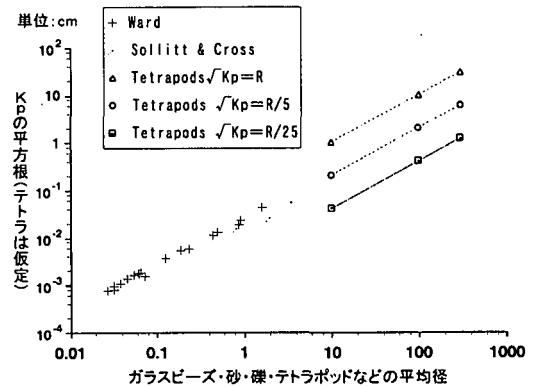


図-9 固有透水係数長さスケール  $\sqrt{K_p}$  と平均径  
テトラポッドの平均径は10倍径深と仮定

同一種のブロックの径深はその代表長さ按比例するので、上記比例関係が特殊形状のブロックにも敷衍できると仮定すれば、平均径に比例する透水係数長さスケールも径深に比例(係数  $1/\beta$ )する(図-9).

$$\sqrt{K_p} = R/\beta, \quad u = \varepsilon u^* \quad (19)$$

として(15)式を書き換えれば

$$-\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho gz) = \frac{1}{2} \left( \frac{8\beta^2 \varepsilon \nu}{u^* R} + f_{p4R} \right) \frac{u^* |u^*|}{4R} \quad (20)$$

ゆえに実規模値を含む4倍径深基準の抵抗係数(断面平均流速摩擦ファクターに対応)の表示式を得る.

$$f_{4R} = 32\beta^2 \varepsilon / \text{Re}_{4R}^* + f_{p4R} \quad (21)$$

ただし、レイノルズ数  $\text{Re}_{4R}^* = 4Ru^* / \nu$ .

50g, 300g, 2.14kgのテトラポッド模型による遷移領域 ( $Re_{4R}: 2 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ ) の28実験データにより  $\beta$  の平均値18.8, 標準偏差6.3を得たので, 暫定値20として図-10に抵抗係数の一般表示を示す。

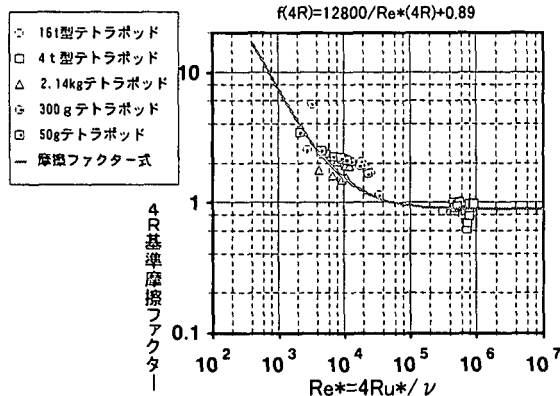


図-10 テトラポッドの4倍径深基準の抵抗係数

模型実験データのうち2.14kgのデータは文献7)により, 他は新たに実験を実施して得たデータである。更に層流側のデータによって  $\beta$  の値の確度を高められよう。この図からは,  $Re_{4R} = 4Ru^*/\nu > 5 \times 10^4$  が相似な実験の条件である。この点に関し, 首藤・橋本<sup>1)</sup>は単体500g以上のブロックの使用を推奨している。また, 榎木・井田・後藤・菅(1992)<sup>12)</sup>はテトラポッド単体と同体積の球直径と入射波の最大水平粒子速度で構成するレイノルズ数が  $(2 \sim 3) \times 10^4$  以上を相似な実験条件としている。

## 7. ポーラスボディモデル抗力係数への換算

構造物近傍の2次元波動問題一般のポーラスボディモデルのプログラムの共同研究開発の成果<sup>11)</sup>が公表されており, 近年その用例が増えている。ここでも抗力係数の実規模値がひとつの問題である。平均流速に対する係数を局所流速にも適用可とすれば式(4)と(20)を比べて

$$\frac{C_D(1-\gamma_x)}{\Delta x} = \left( \frac{32\beta^2 \varepsilon \nu}{4u^* R} + f_{p4R} \right) / (4R) \quad (22)$$

実規模で, かつ一様な空隙率50%を考慮に入れると

$$\frac{C_{Dp}}{\Delta x} = \frac{1}{1-\varepsilon} \frac{f_{p4R}}{4R} = \frac{0.45}{R} \quad (23)$$

ゆえにポーラスボディモデル抗力係数は計算メッシュに比例し, ブロックの径深に反比例する。抗力係数を計算メッシュの大きさと独立に水平x方向の抵抗を重視して設定すれば鉛直z方向の抵抗は  $\Delta x / \Delta z$  倍強調される。これに関して, 榎山・鹿島(2001)<sup>13)</sup>は抵抗項の長さスケールとして  $\Delta S = (\Delta x^2 + \Delta z^2)^{1/2}$  の採用を提案している。一方, 首藤・橋本<sup>1)</sup>はU字管路振動流で周期3.4~4.9秒の減衰往復流の抵抗係数が定常流抵抗係数よりやや小さいが, 著し

く異なるものではないと結論付けており, この定常流抵抗係数から非定常流の抗力係数への換算は有効であると考ええる。

## 8. おわりに

乱積みテトラポッドによる台形透過堤の鉛直平均局所透過流速の2乗に比例する抵抗力表示の抵抗係数の算定式を導き, 実規模データを用いて, その実規模値が長さ基準値として4倍径深を取る時に平均0.90となることを示した。また, これを等価なポーラスモデル抗力係数に換算する式を導き, 両方式のテトラポッドの抵抗係数の実規模値を示した。

謝辞: 19年前の放水口減勢工の実物試験データの使用・公開を許諾された九州電力株式会社土木部, 西日本技術開発株式会社の関係各位へ敬意と謝意を表わします。当時計測担当の現(株)テトラ妻夫木一秀, 半沢稔両氏のご教示, および東電設計株式会社港湾・海岸部阿部光信, 赤岡茂記氏のご討議に感謝します。

## 参考文献

- 1) Shuto, N. & Hashimoto, H.: Hydraulic Resistance of Artificial Concrete Blocks, *Coastal Engineering in Japan*, Vol.13, pp.43-54, 1970. (初出は12th ICCE Washington, D.C.)
- 2) 島田真行: 新潟原子力発電所冷却水放水口の水利設計に関する検討, 電中研依頼報告378533, 44p., 1978a.
- 3) 島田真行: 消波ブロック透過堤を有する放水口の水利特性について, 土木学会年次学術講演会概要集II-386, pp.744-745, 1978b.
- 4) 榎山勉, 阿部宣行, 鹿島遼一: ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, 土木学会, pp.554-558, 1990.
- 5) 榎山勉, 阿部宣行, 鹿島遼一: ポーラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電中研研究報告U91048, 48p., 1991.
- 6) 九州電力株式会社: 放水口泡対策現地実験, 131p., 1984.
- 7) 長谷川寛: 敦賀発電所2号機放水口発泡対策工の水利的検討, 電中研研究報告U98044, 21p., 1999.
- 8) Ward, J.C.: Turbulent flow in porous media, *J. Hydr. Div. ASCE*, Vol.90, No.HY5, pp.1-12, 1964.
- 9) Dinoy, A.A.: Friction factor and Reynolds number relationship in flow through porous media, M. Engng. Thesis, AIT, Bangkok, 1971. (文献10から引用)
- 10) Sollitt, C.K. & Cross, R.H.: Wave reflection and transmission at permeable breakwaters, *Technical Papers*, No.76-8, CERC U.S. Army Corps of Engineers, 172p., 1976.
- 11) 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会: 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発, 沿岸開発技術研究センター, 457p., 2001.
- 12) 榎木・井田・後藤・野口: 透過性構造物による波変形の模型実験の限界について, 海岸工学論文集, 第39巻, 土木学会, pp.616-620, 1992.
- 13) Sakakiyama, T. & Kajima, R.: Review of experimental research using CRIEPI FLUME, *Proc. ADMS21*, Port and Harbour Research Institute (PHRI), MLIT, pp.52-61, 2001