

海成粘性土の侵食限界と侵食予測シミュレーション手法

松本正毅*・戸田圭一**・大槻英樹***

1. はじめに

発電所の温排水が高流速で水中放流される際に、放水口前面の海底地盤が局所的に侵食される場合がある。このときの侵食範囲や侵食深さを正しく予測することは、海域の環境上または侵食に対する構造物の防護対策上、重要な検討課題である。

一方、海底地盤が、含水比の小さい比較的せん断強度の大きい粘性土で構成されている場合には、流体力による侵食特性、たとえば侵食限界摩擦速度や侵食速度等に関して未知な面が多いのが実情である。

本研究は、温排水による海成粘性土の局所侵食現象を精度よく予測するための知見を得ることを目的としたものであり、まず、モデル地点の現地粘性土を用いた室内基礎実験を行って、粘性土の侵食特性把握とその表示方法の検討を行った。

さらに、乱流モデルを用いた放水口前面の海域流れ場の三次元数値解析手法を開発するとともに、数値解析結果に基づく海底面摩擦速度分布と、基礎実験より得られた侵食限界摩擦速度、および現地侵食実績を比較検討し、侵食範囲の予測手法について考察した。

2. 室内侵食実験

2.1 実験試料

実験に用いた試料は、瀬戸内海、大阪湾の2地点で採取した現地海成粘性土、および市販粘性土を用いて現地海成粘性土を模擬した調査試料に大別される。後者は、入手および物性コントロールの容易な市販材料に基づく現地評価が可能かどうかをみるための比較ケースである。

実験試料は表-1に示す6種類である。

各試料の物理特性の概要を表-2に、概略の粒度組成を図-1に示す。

2.2 実験装置

実験水路の概要を図-2に示す。水路は全長11m、一

辺15cmの正方形断面一様管路（一部のケースは開水路）である。ただし、上流端から2mの区間は整流区間であり、また、水路中央部に設けた幅10cm、長さ1mの供試体敷設区間を含んで5mにわたる区間の断面高さを10cmと縮小し、大きな掃流力を出せるようにした。

供試体は、水路底面と供試体表面が一致するように設置した。水路は鋼製としているが、供試体敷設区間およびその周辺は透明アクリル製で、可視構造としている。

水路勾配は、管路実験の場合は0とし、開水路実験で

表-1 実験試料

記号	概 要
NA	大阪湾N地点で採取した現地海成粘土。
NB	NAを基に $d > 74\mu\text{m}$ の成分を除去。砂分の影響をみる。
HA	瀬戸内海H地点で採取した現地海成粘土。河口に近い場所で採取。
HB	HAの沖合い約1kmで採取。
KL	カリオン：ベントナイト=1:1で調合した模擬試料。
NS	カリオン：笠岡粘土=1:1で調合した模擬試料。

表-2 実験試料の物理特性

試料名	最大粒径 (mm)	60%粒径 (mm)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	強熱減量 (%)
NA	0.84 ~ 2.00	0.014	76	37	—
NB	0.047 ~ 0.074	0.0051	95	39	10 ~ 11
HA	0.25 ~ 0.42	0.0078	105	50	18
HB	0.25 ~ 0.42	0.0056	105	42	15 ~ 16
KL	0.25 ~ 0.42	0.0062	67	30	6 ~ 7
KS	0.25 ~ 0.42	0.0069	74	31	6 ~ 7

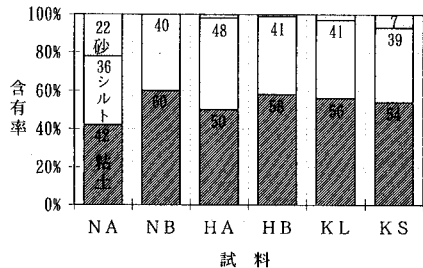


図-1 実験試料の粒度組成

* 正会員 関西電力(株) 土木建築室 土木課長
 ** 正会員 Ph.D. (財)河川環境管理財団 河川環境総合研究所 大阪研究所 主任研究員
 *** 正会員 工修 (株)ニュージェック 水工部 河海調査室課長

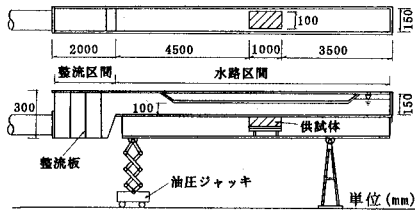


図-2 実験装置

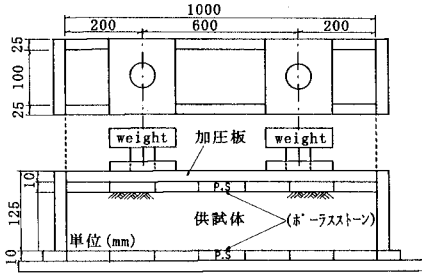


図-3 試料圧密装置

は 1/100 から 1/10 の範囲で条件を設定した。

2.3 供試体の作成

実験試料に用いる粘性土を図-3 に示す載荷圧密装置によって圧密し、種々の強度の供試体を作成した。

圧密装置は幅 10 cm、長さ 1 m、深さ 12.5 cm のアルミ製で、試料圧密時は、試料の上下面に排水のためのポーラスストーン (厚さ 10 mm) を敷く。上部より載荷することにより加圧板に均一な加重がかかる構造となっている。

侵食実験の際には、この圧密装置を水路床に設置し、試料表面と水路床面が一致するよう調節する。

なお、強度の小さい供試体を作成する場合は、水路床に設置した圧密容器内に所定のせん断強度の試料を充填した後に、試料表面と水路床面が一致するよう成形した。

また、イボ粗度形成の際には、圧密装置底面のポーラスストーンの上にイボ粗度形成型枠を敷き、試料を充填し以降はフラットベッドの場合と同様に圧密を行った。

2.4 せん断強度の評価

供試体のせん断強度は、粘着力 C によって評価する。

測定は、室内ベーンせん断試験器 (ベーン高さ H=4 cm、幅 D=2 cm) により、供試体下面の粘着力を測定した。圧密装置内の供試体粘着力は、ほぼ一樣であることを確認している。

2.5 実験手順

a) 一樣流フラットベッドによる侵食実験

最も基礎的な条件として、試料表面を平坦に成形し、管路 (一部のケースは開水路) 一樣流の下での侵食限界条件を検討した。

- ① 供試体を水路床に設置した後微量で冠水する。
- ② 流量を段階的に増加させる。流量増加ステップは 1 l/s、各流量の通水時間は 2 分とする。
- ③ 目視観察により、侵食限界を判定する。粘性土の侵食は、掃流力の増加にともなって表層から徐々に粘土粒子が流出する段階を経て侵食破壊に至る場合と、前者の過程を経ない場合とがみられたが、今回は侵食破壊時点を侵食限界とみなした。
- ④ あらかじめ計測しておいた、流量とピエゾ水頭勾配 I_e の関係に基づいて、次式より侵食限界摩擦速度 u_{*c} を評価する。

$$u_{*c} = \sqrt{gRI_e} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 g : 重力加速度、 R : 径深、 I_e : 侵食破壊時点でのピエゾ水頭勾配 (エネルギー勾配) である。

b) 侵食への影響要因評価に関する実験

i) 一樣流イボ粗度ベッドによる侵食実験

現地海底面の凹凸を反映させるためのモデルとして、表-3 に示す諸元のイボ粗度 (円柱状の突起) を供試体表面に形成し、イボ破壊に対する $C \sim u_{*c}$ の関係を評価した。諸元は、現地海底面の凹凸のスケールを考慮して設定した。各ケースとも、イボ粗度は千鳥状に配置した。

以降の実験手順はフラットベッドの場合と同じである。

イボ粗度の侵食限界は、イボ粗度がせん断破壊を生じて塊状で流出し始める時点を目視観察によって判定した。実験によると、このせん断破壊はほとんどのイボ粗度要素でほぼ同時に発生した。

摩擦速度 u_* の評価は、滑面の抵抗係数 (Moody, 1944) とイボ粗度部分の抵抗係数 (足立, 1964) を仮定することにより、イボ粗度部分が受け持つ抵抗の割合を推定し、断面平均水理量による u_* を基にその割合に応じた抵抗に相当する摩擦速度を算定した。

ii) 壁面噴流フラットベッドによる侵食実験

外力形態の違いによる影響を調べるために、フラットベッドに壁面噴流を与えて $C \sim u_{*c}$ の関係を評価した。これは放水口前面の流れの乱れを考慮したものである。

図-4 に示す水路条件において、流量を段階的に増加すると、ある流量段階で急激な侵食破壊が生じる。実験

表-3 イボ粗度諸元

CASE	イボ高さ (m)	イボ径 (m)	イボ個数 (個)	イボ密度 (イボ頂面積/イボ設置領域面積)
S1	0.010	0.02	8	0.025
S2	0.005	0.01	125	0.098
S3	0.005	0.02	63	0.20
S4	0.010	0.02	63	0.20

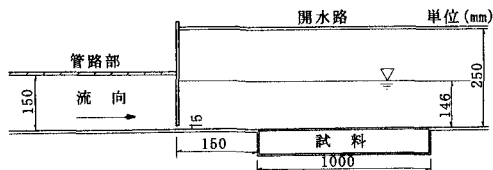


図-4 壁面噴流実験水路諸元

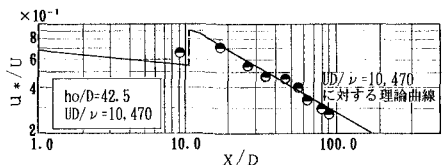


図-5 底面摩擦速度の分布 (土屋, 1962)

ではこの時点で流量増加を中止し、一定流量で侵食が静的な平衡状態に達するまで20~60分程度通水を継続した。

侵食限界摩擦速度は、侵食破壊が生じたときの侵食区間最下流端での摩擦速度を、図-5に示す土屋(1962)による研究成果を参考に評価した。図中、 U は噴流の流速、 x は噴流出口からの距離、 D は噴流出口の高さ、 h_0 は下流水深、 ν は動粘性係数である。

iii) 長期的外力によるフラットベッドの侵食実験

現地海域での外力の変動および継続時間の影響を考慮し、つぎの2種類の実験を行った。

A: 粘性土のクリープ的な破壊を対象とした実験

流量増加時の各流量の通水時間を24時間として、一樣流フラットベッドと同様の実験を行った。

B: 流速の変動とクリープ的な破壊を対象とした実験

一樣流フラットベッドにおける u_{*c} の70%, 53%, 35%の摩擦速度に相当する流量を周期的に与え、 u_{*c} に対する影響を調べた。一流量の継続時間は1時間程度で、総通水時間は48時間~120時間である。実験では上記流量通水中には侵食が生じなかったため、その後はaと同様の方法で流量を段階的に増加し、 u_{*c} を見いだした。

2.6 実験結果

a) 一樣流フラットベッドによる侵食実験

現象を支配する因子は、 C (粘着力)、 ρ (水の密度)、 μ (粘性係数)、 u (代表流速)、 R (径深)、 k_s (相当粗度) と考えられることから、侵食が発生する限界条件として次式が成立するものと仮定する。

$$f_1\left(\frac{C}{\rho u_*^2}, \frac{u_* k_s}{\nu}, \frac{R}{k_s}\right) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\nu = \mu/\rho$, u は u_* で代表させた。これより、

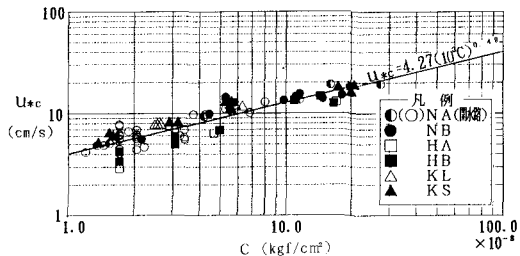


図-6 一樣流フラットベッド実験結果

$$\frac{C}{\rho u_*^2} = f_2\left(\frac{u_* k_s}{\nu}, \frac{R}{k_s}\right) = f_3\left(\frac{U}{u_*}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

の形に表現でき、同式が成り立つ u_* を u_{*c} とみなすことができる。ここで、 U は断面平均流速である。

上式は、 u_{*c} が C の1/2乗に比例し、粘性土表面の状態によってその比例係数が支配されることを示唆している。

この関係を調べたものが図-6であり、全データより、つぎの回帰式を得た。

$$u_{*c}(\text{cm/s}) = 4.27(10^3 C)^{0.49} \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式は、実験で再現した基本的な条件下における侵食限界条件と考えることができる。

なお、今回の実験結果からは、実験材料の相違、管路・開水路の相違による有意な差はみられず、 u_{*c} は C のみで表示できることが明らかとなった。

b) 一樣流イボ粗度ベッドによる侵食実験

実験結果を図-7に示す。同図より、イボ粗度ベッドの場合は明らかに u_{*c} が小さくなる傾向にあり、フラットベッドの場合の40~100%の値で分布することがわかる。

データを詳細にみると、イボ諸元による影響がある程度みられる。一元配置の分散解析により要因の影響を検討した結果、イボ高さやイボ径の相違による傾向の違いはみられず、むしろイボ密度が増加することにより u_{*c} が大きくなるといった明らかな傾向が認められた。

これより、実験回帰式の係数と指数をイボ密度の関数で表わすことも可能と思われるが、現段階ではデータが

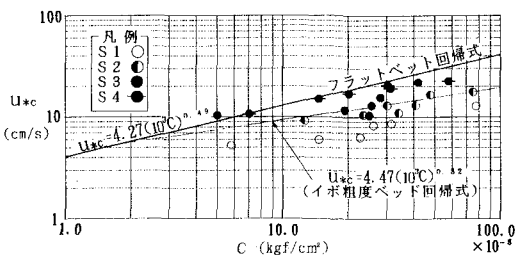


図-7 一樣流イボ粗度ベッド実験結果

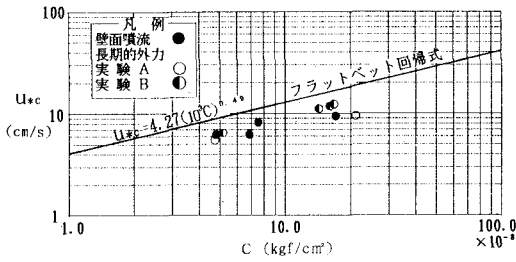


図-8 壁面噴流および長期的外力による実験結果

不足しており危険であるとともに、現地海域においてイボ密度に相当する値を推定することにも困難さが残る。

したがって、ここでは実験結果の平均的な値として、イボ粗度実験全データの回帰式を示すにとどめる。

c) 壁面噴流および長期的外力による実験結果
両実験で得た結果を図-8に示す。

壁面噴流による u_{*c} の実験値は、一様流の場合の 1/2 程度の値で分布する。これは、壁面噴流にみられるような流れの乱れや圧力変動といった要因が、粘性土の侵食に関与していることを示唆するものである。

長期的外力による実験については、実験 A, B で外力履歴が異なるが、両者とも同程度の u_{*c} を与えることがわかる。これより、今回変数とした流量変化過程や通水時間による影響はあまり大きくはなく、粘性土にはある程度長時間外力を受けることにより、一定の範囲で u_{*c} が低下するといった性質があることがうかがえる。

実験結果によると、長期的外力を与えることによって、 u_{*c} は基礎的な実験の場合の 50~80% まで低下した。

現地海域での侵食限界条件を推定する際には、これらの要因の影響を考慮しておくことも重要と思われる。

3. 三次元温排水解析モデル

3.1 基礎方程式

三次元温排水解析モデルの基礎式は、連続式、運動方程式、および温度の拡散式よりなり、総和規約を用いて示すと以下のとおりである ($i=1, 2, 3$ は x, y, z 方向に対応)。なお、運動方程式には Boussinesq の近似を用いた。

a) 連続式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

b) 運動方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \delta_{ij} \frac{g_i}{\rho_0} (\rho - \rho_0) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\tau_{ij} = \nu_{ij} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

であり、 ν_{ij} は渦動粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーの δ 、 g_j は重力加速度の j 方向成分、 ρ は海水の密度、 ρ_0 は環境水温における海水の密度である。

c) 温度の拡散式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i} = \nabla \cdot \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 K は渦動拡散係数である。

3.2 Smagorinsky-Deardorff モデル

Smagorinsky-Deardorff モデルを用いると渦動粘性係数および渦動拡散係数は以下のように示すことができる。(Deardorff, 1969, 1970)

$$\nu_{ij} = c_l^2 \Delta x_i \Delta x_j \left\{ D^2 \left(D^2 - \gamma g \alpha \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \right\}^{1/4} \dots\dots\dots (8)$$

$$K_i = 2(c_l \Delta x_i)^2 \left(D^2 - \gamma g \alpha \frac{\partial T}{\partial x_3} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 c_l は定数で 10^{-1} のオーダー、 α は熱膨張係数、 γ は定数で、 $\partial T / \partial x_3 > 0$ のとき 0、 $\partial T / \partial x_3 \leq 0$ のとき 56 である。また、

$$D^2 = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 \dots\dots\dots (10)$$

である。

3.3 海底面におけるせん断力の取扱い

海底面におけるせん断力は便宜上 Manning の抵抗則の式形で表現し、以下のように取り扱った。

$$\tau_{13} = g n^2 u_1 U / \Delta z^{1/3} \dots\dots\dots (11)$$

$$\tau_{23} = g n^2 u_2 U / \Delta z^{1/3} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 n : 粗度係数、 U : 水平面における絶対流速 ($= (u_1^2 + u_2^2)^{1/2}$)、 Δz : 海底面直上の格子の鉛直方向分割長さである。

3.4 数値解析モデルの現地への適用

上記数値解析モデルの信頼性を、3次元プリューム実験の再現計算を行うことにより確認した後、モデル地点 (A 現地) の温排水放流による流れの解析に適用した。

A 現地では直径 1.56 m の放流管 9 条により約 50 m³/s の温排水が海域に放流される。解析領域は沖合い方向、汀線方向ともに 300 m とした。格子分割は水平方向 1.38~20.0 m、鉛直方向 0.25~0.75 m の不等分割差分で取り扱った。環境水温は 15°C、温排水の水温は 22°C とし、定数 $c_l = 0.1$ 、粗度係数 $n = 0.02$ として解析を行った。なお、解析では現地の潮流、波浪等による流れは無視している。

解析結果より、代表的な放流管前面の流速および水温の鉛直分布を図-9 に、解析の結果得られた海底面の摩擦速度の分布を現地の侵食状況と比較して図-10 に示す。

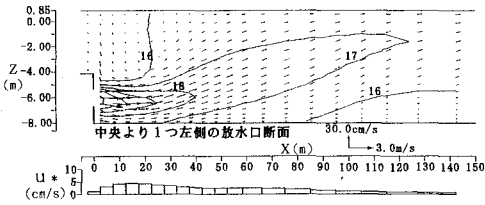


図-9 代表断面における流速・水温分布

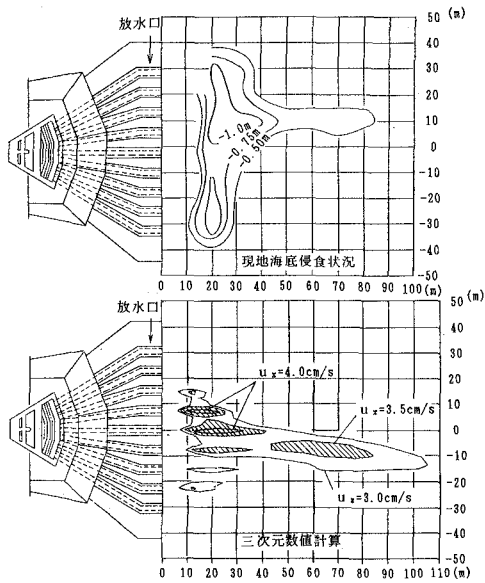


図-10 海底面摩擦速度の分布と現地侵食状況

解析の結果得られた海底面の摩擦速度の分布と侵食状況を比較すると現地の侵食限界摩擦速度 u_{*c} は 3.5 cm/s 程度と推察される。

A 現地の粘着力 $C=1.875 \text{ kgf/cm}^2$ (0.184 MPa) に対応する u_{*c} は、図-6 に示した一様流フラットベッド実験結果によると 5.8 cm/s となり、現地の u_{*c} はこの約6割の値と類推される。この結果は、前述した海底面の凹凸の影響、外力の変動や継続時間の影響等を考慮すると、妥当なものと考えられる。

4. 侵食予測手法についての考察

室内侵食実験結果より、現地侵食予測に当たっての u_{*c}

は、一様流フラットベッドによる実験回帰式を基本とし、これに現地海底面の凹凸、外力の変動、継続時間、およびクリープ的な破壊等を考慮した適切な割引率を乗じた値を設定すべきと考えられる。

しかしながら、現地海底面の状況を基に本研究で取り上げたイボ密度に相当するパラメータを決定することが困難なことや、現地海域での流れの乱れや時間のスケール等、個々の要因評価においての問題が残されている。

よって現段階では、これら個々の要因の影響は今回の実験結果をおよその目安としておき、当面はモデル地点を対象とした数値シミュレーションによって提案された割引率 (60%) 程度が現地海域での各要因の複合的な影響の現れと考えておくこととし、今後の同様な検証データの蓄積によって、精度向上を図るべきと思われる。

5. おわりに

現地粘性土を用いた侵食実験により、①侵食限界摩擦速度は粘着力の関数で表示できること、②その関数形は粘性土の表面状態や、外力の変動および継続時間等による影響を受けることが明らかとなった。また、③これらの要因の影響の度合いがモデル地点検証計算によって把握され、侵食予測に際してのひとつの目安が与えられた。

最後に、本研究を遂行するに当たっては、名城大学理工学部長岩垣雄一教授より多大なご指導を賜った。また、数値解析検討においては (株) ユニック大阪事務所長西田壽夫氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 足立昭平 (1964): 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第104号, pp. 33-44.
- 土屋義人 (1962): 水門下流部における洗掘限界に関する研究, 土木学会論文集, 第82号, pp. 21-49.
- Deardorff, J. W. (1969): Numerical study of heat transport by internal gravity waves above a growing unstable layer, High-speed Computing in Fluid Dynamics, Physics of Fluids, Supplement II, pp. 184-194.
- Deardorff, J. W. (1970): A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds number, J. Fluid Mech., Vol. 41, pp. 453-480.
- Moody, L. F. (1944): Friction factors for pipe flow, Trans. ASME, Vol. 66, pp. 671-684.