

河口部における塩水楔の挙動と塩水侵入の制御に関する基礎的研究

The Behaviour of Saline Wedge and the Control of Saline
Water Intrusion into the Mouth of Tidal River Estuary

大阪大学工学部 室田 明 A. Murota

大阪大学大学院 李 文沃 M. O. Lee

大阪大学大学院 中村浩一 K. Nakamura

1. はじめに

河口で生じる塩水楔の挙動は常に非定常的であり、潮汐、波浪、風だけでなく河川流量や河道形状によってもその様相が変わる。淡水と海水との混合形態はこうした水理現象によって支配され時・空間的に絶えず変化する。しかし、河口条件または河川流量の時間的変化が非常に小さい近似的な定常状態を考え、それによって得られた塩水楔の挙動に関する解析結果は実用面で有効に用いられるべきものである。塩水楔の形状およびその長さを適確に予測するための研究が従来より数多く行われて来たが、その際必要な界面抵抗係数の評価について未だ十分とは言い難い。

本研究ではまず幅の狭い実験水路で得られた結果を河川に適用する際問題となる定常塩水楔の界面抵抗係数に及ぼす水路の側壁による摩擦効果を定量的に明らかにする。そこで、漸変一次元二層流解析によっては河口での急な界面形状の再現ができないことを指摘し、急変密度流としての理論的検討を行う。また塩水楔の非定常的な挙動特性を解明する目的で、潮汐作用下においての実験を行い、その結果を数値計算結果と比較する。さらには塩害を防止し水資源を確保するため河口部の河道内に起伏型の潜り堰を想定したsillを設置した場合に生じる塩水楔の界面侵食過程について実験的な検討を行なう。

2. 基礎式

幅一定の長方形断面開水路において下層から上層への連行を考慮した場合の漸変一次元二層流解析に基づく塩水楔の形状を求める基本式は次式のように表される。

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{1}{\Phi} \left[- (1 - \epsilon F_{d2}^2) i_{f1} + i_{f2} - \epsilon F_{d2}^2 i_0 - \left\{ (1 - \epsilon F_{d2}^2) \frac{h_1}{2\rho_1} - \frac{h_1}{\rho_2} \right\} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \right. \\ \left. - \left\{ (1 - \epsilon F_{d2}^2) \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) F_{d1}^2 + \frac{2u_1}{u_2} F_{d2}^2 \right\} \epsilon \frac{W_e}{u_1} \right. \\ \left. + (1 - \epsilon F_{d2}^2) \frac{2u_1}{gh_1} \frac{\partial h_1}{\partial t} - \frac{2u_2}{gh_2} \frac{\partial h_2}{\partial t} - \frac{(1 - \epsilon F_{d2}^2)}{B g h_1} \frac{\partial Q_1}{\partial t} + \frac{1}{B g h_2} \frac{\partial Q_2}{\partial t} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial x} = \frac{1}{\Phi} \left[(1 - \epsilon) i_{f1} - (1 - \epsilon F_{d1}^2) i_{f2} + \epsilon (1 - F_{d1}^2) i_0 \right. \\ \left. + \left\{ (1 - \epsilon) \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) F_{d1}^2 + (1 - \epsilon F_{d1}^2) \frac{2u_1}{u_2} F_{d2}^2 \right\} \epsilon \frac{W_e}{u_1} - (1 - \epsilon) \frac{2u_1}{g h_1} \frac{\partial h_1}{\partial t} \right. \\ \left. + (1 - \epsilon F_{d1}^2) \frac{2u_2}{gh_2} \frac{\partial h_2}{\partial t} + \frac{1 - \epsilon}{B g h_1} \frac{\partial Q_1}{\partial t} - (1 - \epsilon F_{d1}^2) \frac{1}{B g h_2} \frac{\partial Q_2}{\partial t} \right] \quad (2)$$

$$\Phi = \epsilon (1 - F_{d1}^2 - F_{d2}^2 + \epsilon F_{d1}^2 F_{d2}^2) \quad (3)$$

ここに、 Q , u , h および ρ はそれぞれ流量、流速、水深および密度を表し、添字1, 2 は上層、下層の水理量であることを意味する。 W_e は連行速度、 ϵ は相対密度差、 B は水路幅、 i_0 は水路床勾配、 F_d は密度Froude数である。また i_{f1} , i_{f2} はそれぞれ上層、下層における摩擦勾配であり、側壁の影響を考慮した場合次式のように表わされる。

$$i_{f1} = \frac{\tau_1 B + 2\tau_w h_1}{\rho_1 g A_1} = \frac{f_1}{2g h_1} (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| + \frac{f_w}{4gB} u_1 |u_1| \quad (4)$$

$$i f_2 = \frac{\tau_b B - \tau_i B + 2\tau_w h_2}{\rho_2 g A} = \frac{f_b}{2g h_2} u_2 |u_2| - \frac{f_i}{2g h_2} (1-\epsilon) (u_1 - u_2) |u_1 - u_2| + \frac{f_w}{4g B} u_2 |u_2| \quad (5)$$

ここに、 τ 、 f は剪断応力および抵抗係数を表し、添字 i 、 w および b はそれぞれ界面、壁面および底面に対するものである。また A は断面積を示す。

以上の式(1)、(2)において実験値から $\partial h_1 / \partial x$ 、 $\partial h_2 / \partial x$ が与えられ、連行係数 $E (=2 \times 10^{-3} F d_1^3)$ 、底面抵抗係数 $f_b (=0.01)$ および壁面抵抗係数 $f_w (=0.224 Re^{-0.25}, Re = u_1 h_1 / \nu \cdot B / (B + 2h_1))$ を用いるならば、式(1)～(5)により界面抵抗係数 f_i が逆算できる。

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図1に示す。河床勾配が1/22.5で、長さ800cm、幅10cm、高さ25cmの亚克力製の長方形断面開水路を、海に相当する長さ274cm、幅183cm、高さ91cmの鋼製の水槽の中央に連結したものをを用いている。塩水楔は水槽に一定濃度の塩水を満たした後に淡水を水路の上流端から流して生起させたが、この際塩水楔の先端ならびに界面位置を一定に維持するため水槽の下流端の底部より塩水補給を行い定常に達してから測定を開始した。塩分濃度は導電率計で測定し、ペンレコーダーによって記録した。流速測定は水素気泡法を用い、ビデオ画像解析を行った。成層構造はメチレンブルー溶液あるいはウラン溶液により可視化した。一方、潮汐作用は塩水楔が定常に達したことを確認した後水槽下流端の越流堰を手動で上下させると同時に水槽内での淡水と塩水の体積変化に応じて塩水補給量を調節することによって引き起こした。補給量は上げ潮には36 l/min、引き潮には0～4 l/min に一定にした。潮位および界面の変化は2台のサーボ水位計により測定し、ペンレコーダーに出力させた。また塩水侵入を制御する目的で行われた河道内でのsillの設置は定常の場合のみ行われた。sillは長方形の亚克力製で、水路横断面上に亘って設けたが、その厚みと高さはsillの設置角および界面位置に応じて変化させた。なおsillの設置条件は界面を基準とし、それより低い場合、同一な場合およびそれより高い場合の三つに分けて変化させた。sillの設置位置は初期段階の実験では河口から塩水楔の先端まで変化させたが、定性的には全く同様であることからその以降では河口より100 cmの上流地点に固定した。sillの設置からの界面侵食の経時変化は2台のサーボ水位計により測定し、sillの上流面での渦運動および界面低下の様子はアルミニウム粉末や色素による可視化手法を用いている。

4. 結果とその考察

(1) 界面抵抗係数に及ぼす水路側壁の影響

前述の式(1)～(5)により界面抵抗係数の逆算を行った結果を図2および図3に示す。ここに、図2は連行を考慮しない場合の、図3は連行を考慮した場合の結果である。同図より、界面抵抗係数が小さいほど、側壁の影響を考慮することによる効果が大きく、側壁の摩擦効果の考慮有無による差が大きくなることが分る。それは摩擦勾配の大きさは界面勾配より決められるため壁面摩擦を考慮した場合の界面抵抗係数は小さくなるが、この際壁面摩擦抵抗係数はReynolds数のみの関数で密度Froude数に関係なくorder的に同様であるためである。また連行を考慮した場合は考慮しない場合に比べて河口部($x/L_0 < 0.3$)において他の区間での値とのずれが大きいようである。これは河口部では淡水深が小さいために密度Froude数が大きくその結果連行係数が大きく算出されるためと思われる。図4は河口での全水深と塩水深の実験値を式(1)～(3)に代入し、ここで得られた界面抵抗係数を用いて塩水楔形状の計算を行なった一例を示す。同図より、壁面摩擦の考慮によって塩水楔の長さが実験値により近くなると連行が界面形状に与える影響は小さいことが分る。また岩崎の

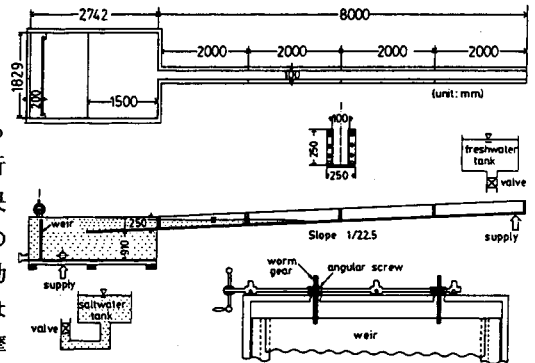


図1 実験装置の概要

式($f_i=7.88\psi-0.836$)を用いた場合の界面抵抗係数は金子の式($f_i=0.2\psi-0.5$)に比べ大きく評価され、河口部では実験値と良好に一致するが、全体的には実験値より大きくずれていることが分る。このように二層流に対する漸変一次元解析では水路側壁による影響を考慮し、界面抵抗係数

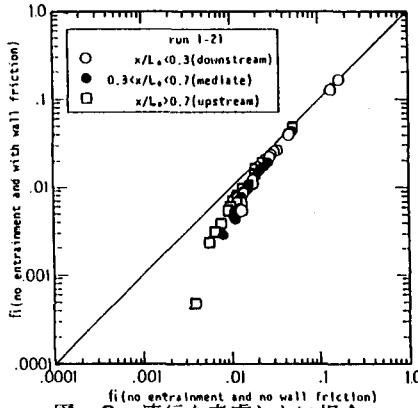


図 2 連行を考慮しない場合の界面抵抗係数 f_i の比較

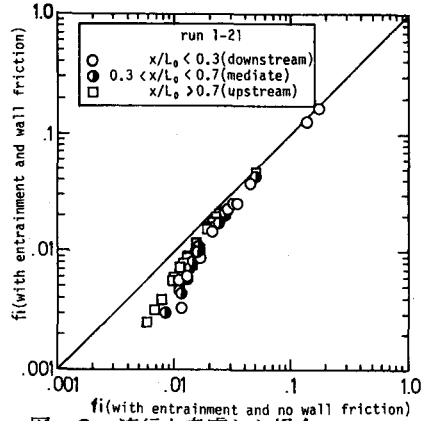


図 3 連行を考慮した場合の界面抵抗係数 f_i の比較

として金子の式を用いるならば、塩水楔の長さについては実験値とよく一致するが、こうした連行や壁面摩擦を考慮したことが塩水楔の形状に与える影響は小さく、河口部で見られるような急な界面形状の再現はできない。従って、河口部においては急変密度流としての解析が必要であると考えられる。

そこで、河口部での塩水楔の急な形状を再現するために今、二層流における上・下層の流れがポテンシャル流であると仮定すると、上・下層についてそれぞれ次式のような Bernoulli 式が成り立つ。即ち、

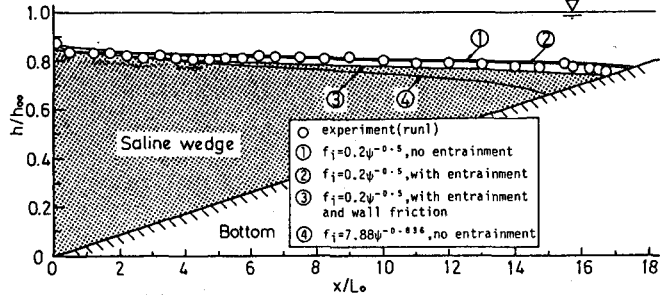


図 4 塩水楔形状の計算結果の比較

上層において

$$\frac{\rho_1}{2} (\psi_{1x}^2 + \psi_{1y}^2) + \rho_1 g y + P_1 = \rho_1 R_1 \quad (6)$$

下層において

$$\frac{\rho_2}{2} (\psi_{2x}^2 + \psi_{2y}^2) + \rho_2 g y + P_2 = \rho_2 R_2 \quad (7)$$

ここに、 R_1, R_2 は上・下層における単位幅当りのエネルギーであり、 g は重力加速度を表す。また添字 x, y は x および y に対する微分であることを示す。 ψ は流れ関数、 ρ は密度、 P は圧力、添字 1, 2 は上・下層であることを示す。

界面は一つの流線であるので界面に沿って式(6)と式(7)は成立し、また界面においては $P_1 = P_2$ であることから界面高さを $y = \eta$ よすると同式により次式が得られる。

$$\rho_1 R_1 - \rho_2 R_2 = \frac{\rho_1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial y} \right)^2 \right\} - \frac{\rho_2}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi_2}{\partial y} \right)^2 \right\} + (\rho_1 - \rho_2) g \eta \quad (8)$$

ここで、下層での流速を無視すると、界面高さ η は次式のように表される。

$$\eta = \frac{1}{(\rho_2 - \rho_1) g} \left[-\frac{\rho_1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial y} \right)^2 \right\} - \rho_1 R_1 + \rho_2 R_2 \right] \quad (9)$$

また河口から十分離れた上流側において静水圧近似が成立する位置での界面における Bernoulli 式は次式のようになる。

$$\rho_1 R_1 = -\frac{\rho_1}{2} \left(-\frac{q_1}{h_{1f}} \right)^2 + \rho_1 g h_{1f} + \rho_1 g \eta f \quad (10)$$

$$\rho_2 R_2 = \rho_1 g h_{1f} + \rho_2 g \eta f \quad (11)$$

ここに、 q は単位幅当りの流量、 h は水深、添字 f は静水圧近似が成立する位置での値を示す。以上より、界面での流速が分れば、式 (9)~(11) を用いることによって界面高さが求められる。しかし、界面での流速分布は界面の曲率によって変化するので、結局界面形状が分らなければ、求めることができない。そこで、実験値から得られる界面形状をもとに流速分布を求め、次に同式による界面形状を求めることにする。図 5 は河口付近で測定した鉛直方向の密度分布より決められた界面形状をもとにリラクゼーション法を用いて求めた流線図を示す。ここに、 x^* 、 h_{10} は x 座標と淡水深をそれぞれ河口での淡水深 h_{10} で無次元化したものであり、 ψ^* は無次元流れ関数で次式により無次元流速 u^* および v^* が求められる。

$$u^* = -\frac{\partial \psi^*}{\partial y^*} \quad v^* = \frac{\partial \psi^*}{\partial x^*} \quad (12)$$

また図 6 は上式により求めた界面での流速分布を前述の式 (9) に代入して得られた界面形状を実験値および漸変流一次元解析による計算結果との比較を示す。同図より、漸変流一次元解析では界面勾配が小さくほぼ水平に近いことに対し、急変流解析では河口付近の界面形状を良好に再現していることが認められる。

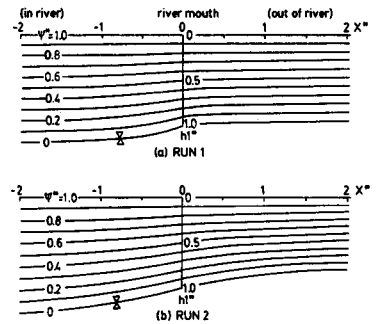


図 5 リラクゼーション法による流線図

(2) 潮汐作用下での塩水楔の非定常的挙動について

潮汐作用に伴う塩水楔の非定常的挙動を把握するために行った実験結果を計算結果と比較したものを図 7 に示す。数値計算には須賀亮三¹⁾の陰形式の差分方式を採用し、界面抵抗係数には定常時と同様に金子の式を用いている。またここでは連行と壁面摩擦の影響を考慮している。図中の記号の説明は次のとおりである。 η 、 η_0 ：河口における任意時刻の潮差および最大潮差、 h_{10} ：河口での淡水深、 u_1 、 u_2 ：上層および下層平均流速、 ρ_1 、 ρ_{10} ：任意時刻および初期の上層密度、 ℓ ：塩水楔先端の移動距離、 t ：時間、 T ：潮汐周期。同図では u_2 が u_1 に対し 10 倍誇張されている。まず同図より上層の平均流速 u_1 は下流に近いほど、下流端条件である h_{10} に強く影響され、周期的変化はほぼ見られないことが分る。これに対し、下層の平均流速 u_2 は u_1 に比べ周期的変化が顕著であるが、先程と同様に下流端条件の影響によって不規則的な変動がもたらされており、同図の (a)、(b) のい

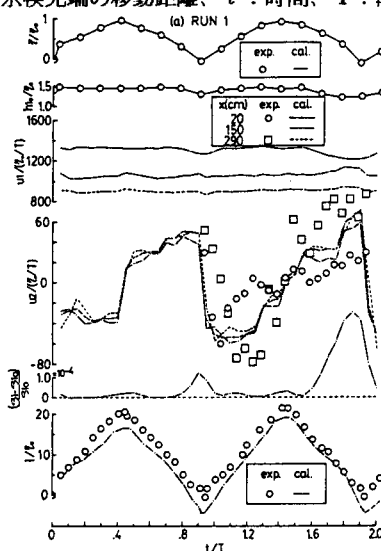


図 7 非定常塩水楔の実験結果と計算結果との比較

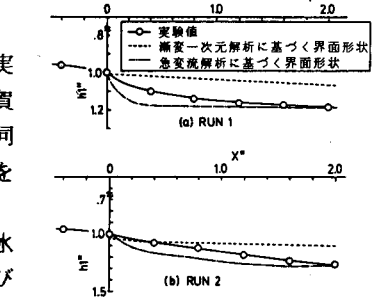


図 6 河口部における塩水楔形状の実験値と計算値との比較

ずれも潮位の変化より位相が遅れることが分る。また計算結果を実験結果と比較すると、 $x=20\text{cm}$ の場合(a)では明確な周期性は見えず、計算値は実験値より多少大きい、(b)では両者間に良好な一致が見られる。これは相対密度差の違いに起因するものと推察される。即ち、(a)では相対密度差が $\epsilon=0.0230$ で、成層が安定しているのに対し、(b)では $\epsilon=0.0114$ で、成層が(a)に比べ弱く、その結果潮汐作用に対する流れ場の応答がより生じやすいためと見られる。一方、上層密度 ρ_1 の変化を見ると、潮汐作用による周期的変化はほとんど現れず、 $x=20\text{cm}$ では先程の流速と同様に h_{10} が小さくなると ρ_1 が上昇する傾向にある。最後に塩水楔先端の移動距離 l 、即ち、先端位置の変化は河口での潮位変化に対応しており、計算結果は実験結果を良好に再現しているのが同図より認められる。

(3) sillの設置による塩水侵入の制御

塩水楔が存在する河道内の水路横断面上に亘ってsillを設けるならば、その上流面ではrollerが形成され、そのrollerと連行現象によって界面侵食が進行し最終的には平衡状態または完全侵食状態に達する。図8は可視化手法により撮られた界面侵食深の変化に伴う渦径の変化を示す。ここに、横軸は任意時刻における渦の半径を示すが、それぞれsillの厚み D により無次元化されている。同図より、渦径が界面侵食の進行に伴い線形的に増加する傾向が見られ、橋脚周辺部で生じる局所洗掘において洗掘の進行に伴い渦径の線形的変化を論じたBaker²⁾の仮定を裏付けている。しかし、sillの界面上からの突出高さ $(h_s-h_2)/H_0$ や密度Froude数 F_0 による傾向の違いは不明である。同結果より、渦径と界面侵食深との間には次式のような回帰関係が得られる。

$$\omega(\xi) = \omega_0 (1 + k_w \xi) = 0.347 (1 + 0.0418 \xi) \quad (13)$$

但し、 $\omega \equiv r_0/D$ 、 $\xi \equiv Z_s/D$ 、添字0は初期の値を示す。これより、 $\omega \equiv r_0/D = 0.347$ 、 $k_w = 0.418$ で、円柱橋脚周辺部での局所洗掘の場合の ω_0 の値0.2よりもやや大きく、実験定数 k_w の値1/7よりは小さい。即ち、sillを設置した初期の渦径は局所洗掘の場合よりも大きい、それ以降では渦径の成長がだいぶ弱まっていることが分る。ところで、sillの設置高さが界面以下である場合には塩水楔の形状に全く影響しないことが実験および計算の結果より明らかとなった。図9はsillの高さを界面上までにして鉛直に設けた場合にその上流側に残された塩水体積の各地点ごとの経時変化を示す。ここに、横軸と縦軸はsillの設置からの経過時間および任意時刻の残留塩水の体積を示し、それぞれ平衡状態に達するまでの時間 t_s および初期の体積 V_0 により無次元化している。また図中の x は河口からの距離でsillの設置地点を河口側に置くほど、初期に残留した塩水体積に対する変化量が大きく、即ち、残留塩水の排除に効率的であることが分る。例えば、sillを河口に設けるならば初期の残留塩水の約2割程度が排除可能となる。図10はsillの設置高さが界面高さとはほぼ同程度である場合の塩水楔長さの経時変化を示す。横軸と縦軸はそれぞれsillの高さ h_s と初期の楔長さ l_0 により無次元化した経過時間 t および塩水楔長さ l を示す。なお同図より、sillを鉛直に設けた場合には塩水楔長さが時間とともに徐々に変化し、初期値より約2割程度短くなって、ある時間後にはそれ以上の変化はせず、平衡状態に達することが分る。これに対し、sillを河口に向けて設けた場合には平衡状態は得られず、初期には θ が 60° および 45° の場合も同様な傾向で塩水楔長さが減少してゆくが、その以降では θ が 60°

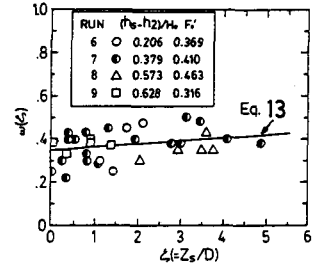


図 8 界面侵食深の変化に伴う渦径の変化

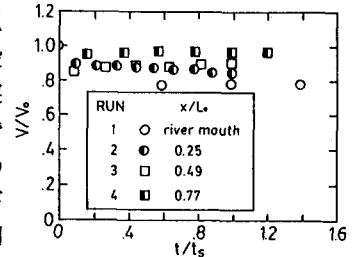


図 9 sillの上流側の残留塩水体積の経時変化

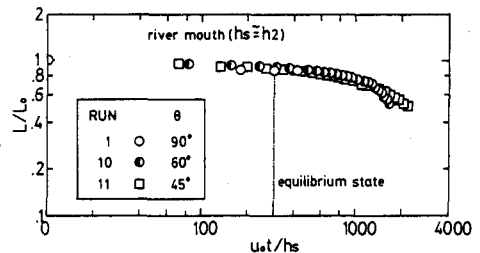


図 10 塩水楔長さの経時変化

はせず、平衡状態に達することが分る。これに対し、sillを河口に向けて設けた場合には平衡状態は得られず、初期には θ が 60° および 45° の場合も同様な傾向で塩水楔長さが減少してゆくが、その以降では θ が 60°

の場合が45° のより時間的変化率が大きくなる。一方、図11は河口より上流地点($x/L_0=0.3$)において、sillを界面上より高く設けた場合の塩水楔長さの経時変化を示す。横軸は経過時間 t を上流側での淡水の平均流速 u_0 およびsillの界面上からの突出高さ(h_s-h_2)により無次元化している。図中の Re はReynolds数を、 F_0 は密度Froude数である。なお同図の(a) はsillを鉛直に設けた場合を、(b) は河口に向けて60° 傾けて設けた場合を示す。まず同図の(a) により、塩水楔長さの時間変化率は設置後からの時間経過とともに増加し、その変化率はsillの界面上からの突出高さ(h_s-h_2)/ H_0 に比例していることが明らかである。また同(b) においては(a) の場合と同傾向は同様であるが、楔長さの時間変化量は先程の(a) に比べやや小さいことが分る。これは明らかにsillの設置角 θ の違いによるものと考えられる。図12はsillの設置高さを界面上にまでした場合におけるその上流面での界面侵食深 Z_s の経時変化を示す。同図より、侵食深の変化がsillの設置初期には緩慢であるが、中期に若干急になってから末期にはゆるやかになる傾向が見られ、これより、界面侵食は三つの段階を踏み進行することが分る。これは界面侵食現象において最も大きく貢献しているのが前述したようなrollerであって、侵食の進行とともにその渦による侵食力が低下することを反映しており、円柱前面での局所洗掘過程と同様な傾向を示す。また図13はsillを界面上から突出して設けた場合における界面侵食深の経時変化を示すが、同図より、次のようなことが分る。

i) 本実験範囲において界面侵食深の経時変化のパターンは大きく四つに分けられるが、その時間変化率は大概一致している。しかし、sillを鉛直に設け、かつReynolds数が大きいほど同一時間内に生じる侵食深は大きくなる。ii) Reynoldsが全く同様であるならば、sillの界面上からの突出高さに多少の差があっても、侵食深の変化の傾向は一致する。しかし、sillの設置角が90° である場合(RUN 6~8) がそれよりReynolds数が大きい場合(RUN 14 と15) よりも同一時間内の侵食深が大きいことから、sillの設置角による影響がReynolds数よりももっと効いていると考えられる。

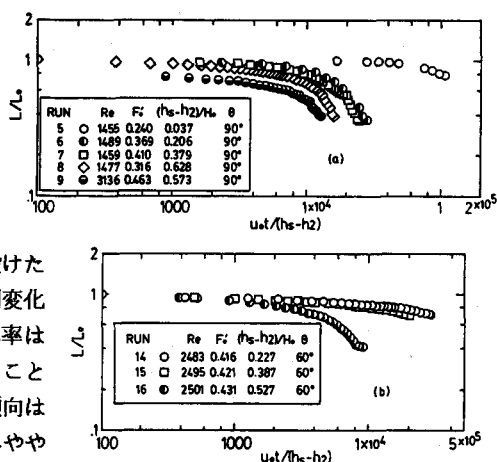


図 11 塩水楔長さの経時変化

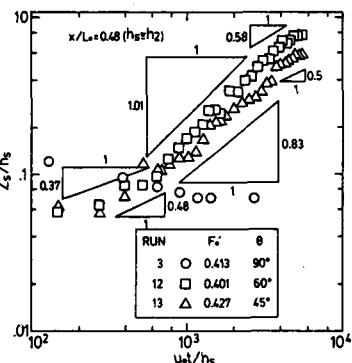


図 12 界面侵食深の経時変化

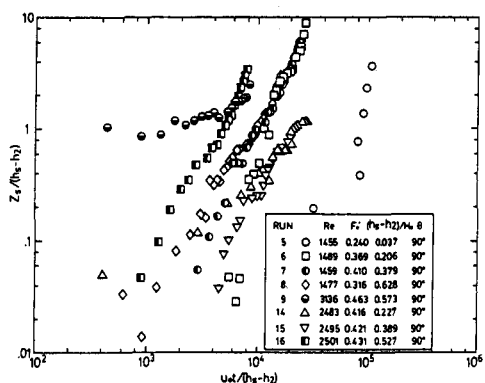


図 13 界面侵食深の経時変化

参考文献

- 1) 須賀亮三：感潮河川における塩水くさびの水理に関する基礎的研究，建設省土木研究所資料，第1537号，pp. 1~255, 1979. 2) Baker, C.J. : Theoretical approach to prediction of local scour around bridge piers, J. Hydraulic Research, Vol. 18, No.1, pp. 1~12, 1980. 3) 李文沃・室田 明：河口部潜り堰による塩水侵入制御に関する実験的研究，第42回年次学術講演会講演集，pp. 476~477, 1987.