

塩水楔遡上防止法に関する研究

Study on the Prevention of
the Intrusion of Saline Wedge

有田 正光*・古谷 智史**

By Masamitsu ARITA and Satoshi FURUYA

From engineering aspects, the techniques for the prevention of the intrusion of saline wedge are quite important. This paper proposed boundary layer control method using barrier settled on the river bed to reduce the length of the saline wedge. Various type of barriers were tested their effectiveness.

Theoretical and experimental study were conducted on the critical intrusion length of the saline wedge due to the barrier. Both results were compared and revealed good comparison. Eaves effect which attached downstream side of the barrier to control the motion of lower layer was also studied and found its effectiveness.

Keywords: saline wedge, two-layered flow, estuary, density flow

1. まえがき

河川中に長く進入する塩水楔の遡上を河口付近で阻止する技術の開発は環境水理学上の観点から重要である。著者の一人等は既に河床に境界層の排除厚に等しい高さの堰を設置して密度楔の流動形態である塩水楔を密度カレントの流動形態に変化させる技術の基礎原理についての考察を実施するとともに¹⁾、その原理を利用して塩水楔の遡上を河口近傍に設置された堰地点で阻止する工学的手法について検討している²⁾。本研究はその続報であり、各種形状を持つ堰の塩水楔遡上阻止効果の比較、堰による限界塩水楔遡上長、底による塩水層流動制御が塩水楔遡上阻止におよぼす効果、流れの可視化による流況の把握、等について実験的および理論的に詳細に検討しようとするものである。

2. 本研究で考える塩水楔遡上防止法

図-1に本研究で考える流れの場を示す。同図に示すように水路床に境界層の排除厚に等しい高さ: Δh の堰を河口からの距離: ℓ の位置に設置し、水路底面付近の境界層流れを堰によって加速する事によって堰地点で一樣流を得る。この事によって、長さ: L の密度楔である塩水楔を長さ: ℓ の密度カレントに変化させて堰地点で塩水楔の遡上を阻止しようとするものである。

図-1中で破線は塩水楔の密度界面の位置を示している。また、 u_0 , ρ_0 , F_0 , h_0 はそれぞれ塩水楔始点

* 正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

** 学生員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

の河川流速，河川水密度，
 河川密度フルード数，河川
 水深であり， U ， F ， H は
 堰頂における一様流速，密
 度フルード数，水深であ
 る。なお， F_o および F はそ
 れぞれ， $F_o = u_o / (\epsilon g h_o)^{1/2}$
 $F = U / (\epsilon g H)^{1/2}$ で定義
 される。ここに， $\epsilon = \Delta \rho_o /$

ρ_s ， $\Delta \rho_o = \rho_s - \rho_o$ ， g = 重力加速度， ρ_s = 下層塩水の密度，である。

ところで，図中に破線で密度界面（ i -界面）の位置を，一点鎖線で零流速面（ j 界面）の位置を示している。一般に塩水楔は密度界面で定義されるが，後章で示すように密度カレントの侵入厚を評価する場合には零流速面の位置が重要となる。図中の記号で h_1 ， h_2 は密度界面で界面を定義する場合の上下層厚， Z_1 ， Z_2 は零流速面で界面を定義する場合の上下層厚，また， u = 任意の地点の流速， ρ = 任意の地点の密度，である。

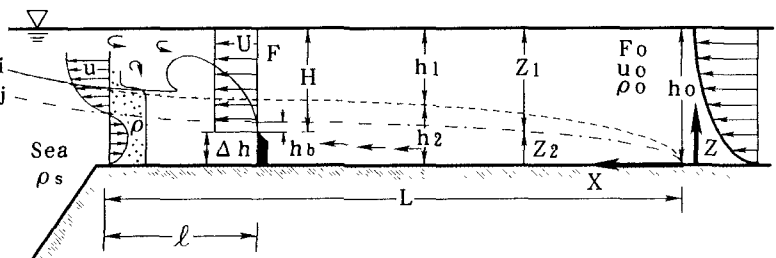


図-1 堰を使用した塩水楔遡上防止法

3. 実験装置および実験要領

実験装置の概要を図-2に示す。実験水路部は，長さ654cm，幅5cm，高さ20cmの透明アクリル製の矩形断面水路である。実験においては上流から淡水を流すとともに下流端河口部の下層より染料で着色された0.5%濃度の塩水を放流した。なお，塩水を下流端下層より放流する事は塩水楔の侵入力を模擬する事であり，十分な下層塩水流量を与えれば海域の条件が模擬しうる事となる。

実験で使用した堰は図-3に示す様にType A～Type Iの9種である。図中においてType Iは堰の効果をより高めるために長さ1cmの底を高さ： l' の位置に設置する手法の検討の為の模型である。実験に当たっては模型右側を河川上流部に向けて設置した。またいずれの堰も高さ： $\Delta h = 20\text{mm}$ に設計されている。 Δh は境界層の排除厚と一致させるが，境界層流れの流速分布を $1/7$ 乗則に従うと仮定すると水路水深： h_o と Δh の関係は $\Delta h = h_o/8$ ，となる。従って，本実験における h_o は $h_o = 8\Delta h = 16\text{cm}$ の一定とした。

実験は河川密度フルード数： F_o を種々変化させて実施した。なお，堰による塩水楔遡上阻止効果は塩水が堰頂を超えない最小の河川密度フルード数（以下に限界河川密度フルード数： F_{oc} と呼ぶ）を実験的に定める事によって評価した。その結果，算出された F_{oc} の値が小さい程，堰の塩水楔遡上阻止効果が強いと判定される。なぜならば実験では ϵ ， h_o を一定としているので F_{oc} が小さい事はより少ない河川流量で塩水楔の遡上を阻止しうる事を意味している為である。

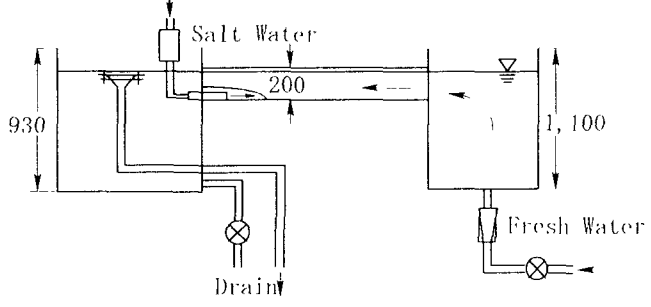


図 2 実験装置（単位:mm）

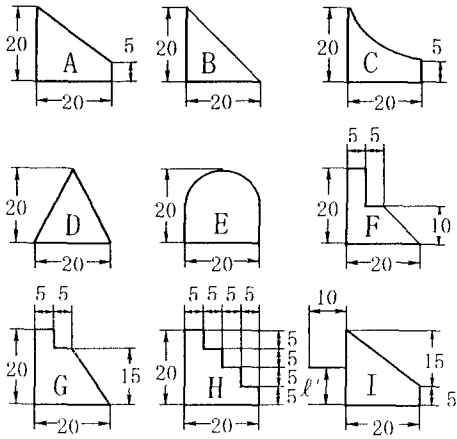


図-3 実験に使用した堰(単位:mm)

4. 堰による限界塩水楔遡上長に関する理論的考察

本章においては堰によって阻止しうる塩水楔の最小遡上長さ、つまり限界塩水楔遡上長: ℓ_c を求める為の理論的考察を以下に示す。

Benjamin³⁾ は非粘性流体を仮定し一様流中に発生する密度カレントに関する理論解を導いた。一方、本論文で考える様に堰を設置して堰頂において密度カレントを発生させようとする場合は河床付近の流速が小さくエネルギーの小さな部分の流れが堰頂に至る事になるのでそこの激み圧力は Benjamin の解の誘導に当たって使用するものより小さくなる。その事の補正のために Jirka-Arita¹⁾ は次式に示す効果的接近流速: U_e の概念を導入した。

$$U_e = U \left\{ \frac{2n}{1+n} + \frac{1-n}{1+n} \left[1 + \frac{\alpha_b - \alpha_1}{(1+\Delta)^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 $n = h_b/H$ 、 h_b = 密度流の侵入厚、 $\Delta = \Delta h/H$ 、 α_1 = 河川流れの運動量補正係数 = 1.045、 α_b = 堰によって置き換えられる堰上流の境界層部分の平均的エネルギー補正係数 = $\alpha_1 \{ \Delta h / (H + \Delta h) \}^{3/7}$ 、である。

一方、Britter-Simpson⁴⁾ はベルトコンベアで境界層を加速したうえで密度流に対する接近流速を一様流として密度カレントを発生させ、その挙動についての詳細な検討を実施している。著者等の堰を使用して密度カレントを発生させるケースの実験結果を彼等の実験結果と比較するには上述の様に堰上での U の値の代わりに U_e の値を使用し、かつ次式に示す効果的密度フルード数: Fe を定義する必要がある。

$$Fe = \frac{U_e}{(\varepsilon g H^3)^{1/2}} = F \frac{U_e}{U} = \frac{Fo}{(1-p)^{5/2}} \frac{U_e}{U} \quad (2)$$

ここに、 $p = \Delta h/h_o$ 、である。

図-4 は密度カレントにおける Fe と n の関係を示すものである。同図中に Benjamin の理論解を実線で、Britter-Simpson の実験データおよび式(2)を使用して再計算された Jirka-Arita の実験データ¹⁾ のプロットされる範囲を斜線で示すとともにそのベストフィットラインを破線で示している。

以上の準備のもとに限界塩水楔遡上長: ℓ_c を求める為の過程を以下に箇条書きにして示す。

(a) 式(1), (2)より次式を得る。

$$Fe = \frac{Fo}{(1-p)^{5/2}} \left\{ \frac{2n}{1+n} + \frac{1-n}{1+n} \left[1 + \frac{\alpha_b - \alpha_1}{(1+\Delta)^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

本論文においては $p = 1/8$ 、 $\Delta = 1/7$ 、であるので、 Fo を与えれば n の関数として Fe の値が上式より定まる事となる。

(b) 図-4 中に任意の Fo のもとに式(3)の与える曲線を描き、図中の実験結果のベストフィットラインである破線との交点を求める。その交点の値を読み取る事によって任意の Fo の値における $n = h_b/H$ の値が定まる事となる。 H は実験条件より与えられるのでこの n の値より堰による塩水楔遡上阻止が可能となる h_b の値が定まる。

(c) 塩水楔中で h_b に対応する位置を定める事が必要となる。図-5 は Sargent-Jirka⁵⁾ の塩水楔の実験結果より得られた流速および密度の鉛直分布を示している。図中の記号で $\Delta \rho = \rho - \rho_o$ 、 u_m = 上層最大流速、である。同図に示すように分布形状は塩水楔全長に渡ってほぼ相似な分布形状を示している。また実験結果より零流速界面の高さ: Z_2 と密度界面の高さ: h_2 には $Z_2 = \alpha h_2$ 、 $\alpha = 0.57$ の関係が認められる。本論文で

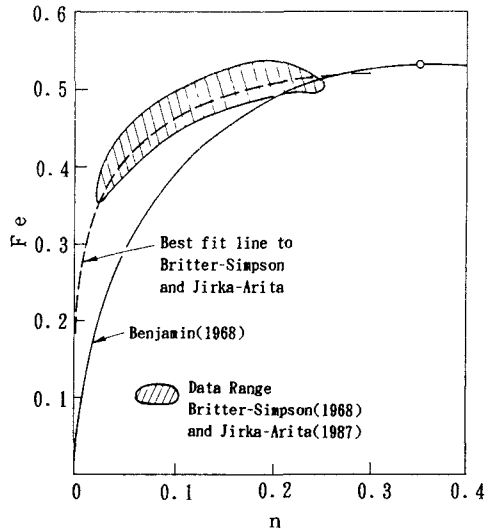


図-4 Fe と n の関係
(文献[1]より抜粋)

は堰に向かって侵入する密度流部分の高さは Z_2 と考える。従って、 h_b の値は $h_b = Z_2 - \Delta h$ である。よって遡上阻止される塩水楔は $h_2 = (h_b + \Delta h) / \alpha$ より h_2 の値が小さい部分となる。このようにして求められる h_2 の高さを以下に h_{2c} と表す。

(d)最終的に限界塩水楔遡上長： ℓ_c を求める為には塩水楔の密度界面の予測モデルが必要となる。本論文においては既に著者等⁶⁾によって提案されている予測モデルを使用して密度界面形状を計算し、その結果より h_2 の値が h_{2c} と一致する地点を ℓ_c の理論値とした。

ところで著者等は本章の理論と同様の理論を発表済み²⁾であるが、既報においては h_b を $h_2 - \Delta h$ とし、本論文においては $h_b = Z_2 - \Delta h$ とした点がその取り扱い上の主たる相異点である。また、既報においては ℓ_c に関する理論と実験結果は比較されていないが、本論においては後章に示す様に両者が比較され本報の取り扱いの妥当性が示されている。

5. 実験結果と考察

本章では以下に今回実施した実験結果とその考察を示す。

5.1 各種堰の塩水楔遡上阻止効果の比較

図-6は各種堰を $\ell = 20\text{cm}$ の位置に設置して、それぞれの堰の限界河川密度フルード数： For についての比較を示すものである。同図中には3ケースの実験例が比較されているが全体としてType AもしくはType IIの塩水楔遡上阻止効果が顕著である事が認められる。これは両タイプの堰の縮流部が長くスムーズな縮流が得られる事と堰の下方に段差を有し河床付近の極めて流速の遅い部分を堰頂へ導かず上流側へ反転させうる構造になっている為であると考える。

上述の様に比較的大きな効果が認められたType A、Type Hの堰の流況の可視化写真を写真-1に示す。同写真には河川水が堰によって縮流される様子、堰下方の段差で極めて流速の遅い部分が上流側へ反転している様子、堰後部において強い乱れを伴うカルマン渦が発生している様子、等が可視化されている。

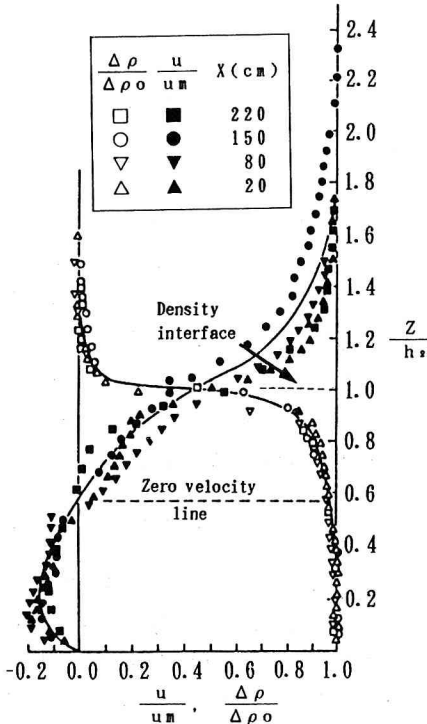


図-5 塩水楔内の流速および密度分布
(文献[6]より抜粋)

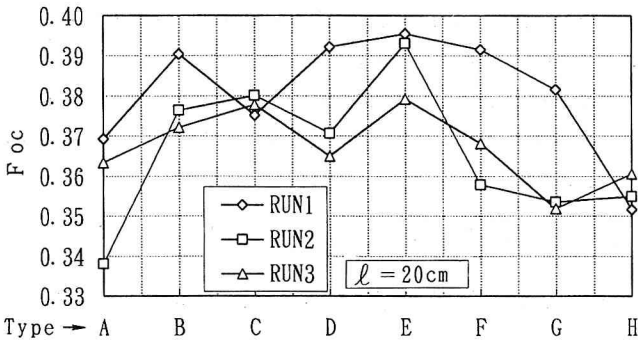


図-6 各堰の限界河川密度フルード数

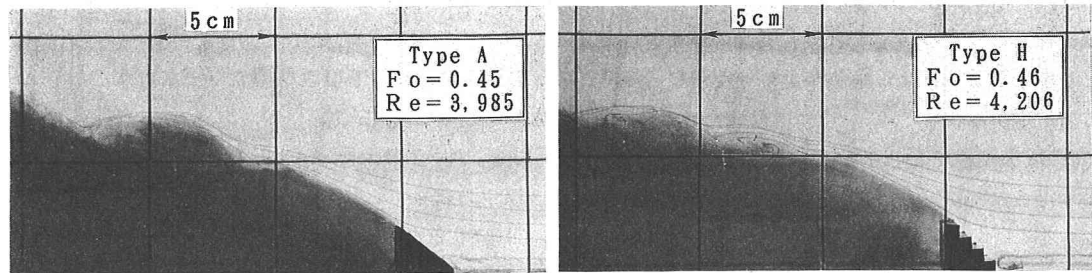


写真-1 堰周りの流況の可視化

5.2 限界塩水楔遡上長に関する実験結果および理論との比較

図-7は今回実験の対象とした堰の中では比較的効果的であると認められたType Aの堰を使用してその設置位置の変化が密度界面形状に与える影響を実験的に調べた結果を示している。同図中において実線は堰を設置しない場合の密度界面形状を示している。なお、図中に示す実験においてはいずれの場合も堰地点で完全に塩水楔の遡上が阻止されていた。また、 $\ell=20\text{cm}$ より堰を河口側に接近させた場合には塩水が堰より上流側へ越水する事が認められた。つまり本ケースの場合の限界塩水楔遡上長は約20cmと見なされる。これは堰によって塩水楔遡上長を約10%程度と極めて短くする事が可能な事を示している。

写真-2は図-7に示す実験の流況の可視化写真である。同写真より分かるように河口から離れた位置($\ell=80\text{cm}$)に堰を設置した場合は堰付近で密度カレントの特徴であるカルマンヘッドの存在が顕著である。一方、河口に近い位置($\ell=20\text{cm}$)に堰を設置した場合はカルマンヘッドが大きくなるとともに激しい混合が認められる。

工学的には任意の Fo に対応する限界塩水楔遡上長の理論値をあらかじめ求めておく事は重要である。この観点に立って第4章に既述した理論と水理条件を変化させて実施した実験結果との比較を図-8に示す。同図に示すように理論と実験値との一致の度合いは比較的良好である事から理論の妥当性が検証されていると考える。

図-8より堰による塩水楔遡上阻止効果は Fo が大きいほど強い事および塩水楔完全阻止の条件はほぼ $Fo \sim 0.5$ で与えられる事が分かる。ところで実際に ℓ_c の理論値を求める為にはArita-Jirka⁶⁾のモデルで塩水楔長: L を計算後、図-8を使用して Fo の値に対する ℓ_c/L を求め、その結果より ℓ_c を定める事となる。この様にして求められる ℓ_c の理論値の精度はモデルによる塩水楔長の計算の精度に大きく左右されるが、Arita-Jirkaのモデルによって予測された堰の無い場合の塩水楔長とその実験結果は極めて精度良く一致するものであった事を付記する。

5.3 下層流動制御が塩水楔遡上阻止効果に及ぼす影響

Type Aの堰の下流側側面に底を設置した場合(図-3, Type I参照)の塩水楔遡上阻止効果について実験的に検討した。本手法の概念は上流へ向かって流動し、堰地点で上昇する下層塩水の流動を抑制する事によって塩水楔の遡上阻止効果を高めようとするものである。

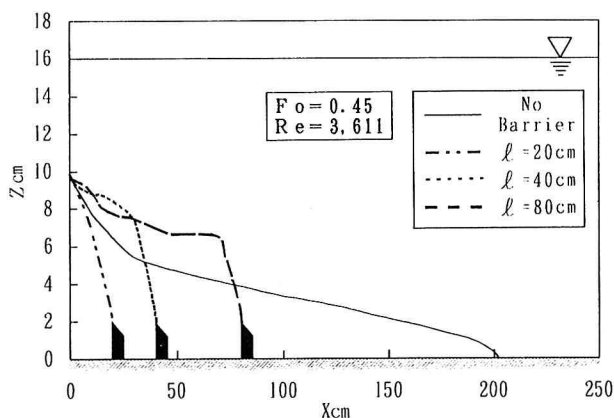


図-7 堰位置による密度界面形状の変化

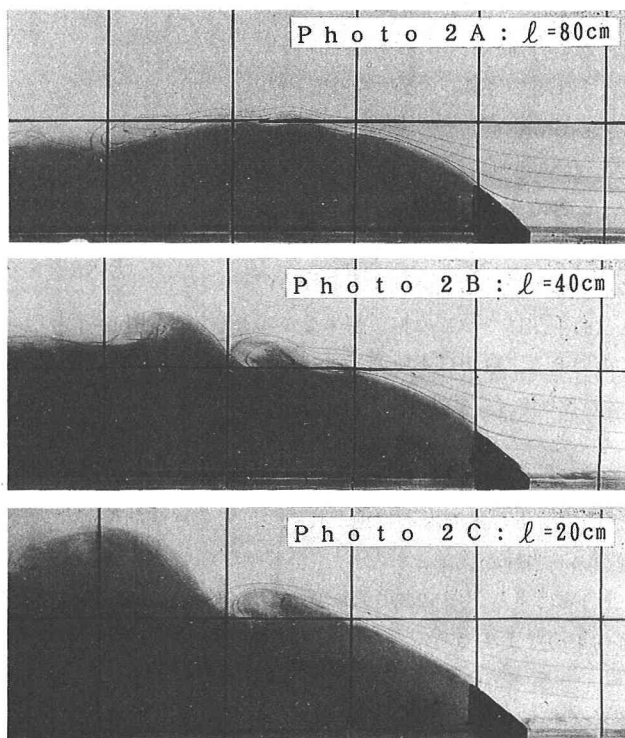


写真-2 堰位置の変化による流況の変化の可視化写真

図-9に実験結果の一例を示す。実験は河口から上流80cmの位置に堰を置き、その堰に長さ1cmの底を高さ ℓ' を $\ell'=1.0\text{cm}$, 1.5cm , 2.0cm と変化させて実施したものである。図中に示す様に ℓ' が1cmもしくは1.5cmの場合には明らかな塩水楔遡上阻止効果が認められる。この場合の底の高さはほぼ零流側面の位置から下層逆流が最大となる位置の中間に当たる。この様に下層流をうまく制御する事によって塩水阻止効果を高める事が可能である。なお紙面の都合によりその詳細は割愛するが、実験によれば底による塩水楔遡上阻止効果の強いケース程密度界面の位置は全体として高いものとなっていた事を記しておく。

6. まとめ

本論文は堰を使用した境界層制御によって塩水楔の遡上を阻止するための工学的手法についての検討結果を示すものである。以下に本研究によって得られた知見の概略を簡条書きにして示す。

- (a)各種タイプの堰の効果が比較検討され、Type AもしくはType Hの堰が比較的效果的である事が明らかになった。これは両タイプの縮流部が長く、かつ下層の極めて流速の遅い部分の流れを堰頂に導かず上流側へ反転せしめる構造になっているためであると考えられる。
- (b)堰による限界塩水楔遡上長についての理論的検討が実施され、かつその結果と実験の結果が比較され理論の妥当性が検証された。
- (c)底による下層塩水の流動制御の塩水楔遡上阻止効果が実験的に検討され、底の設置位置が適当であれば効果的な手法である事が明らかとなった。

参考文献

- 1) Jirka,G.H. and Arita,M.:Density currents or density wedges—boundary layer influence and control method, J.F.M., Vol.177, pp.187-206, 1987.
- 2) 有田正光:塩水楔の制御法とその効果. 第32回水講演文集, pp.179-184,1988.
- 3) Benjamin,T.B.:Gravity current and related phenomena, J.F.M., Vol.31, pp.209-248, 1968.
- 4) Britter,R.E. and Simpson, J.E.:Experiments on the dynamics of a gravity current head., J.F.M., Vol.88, pp.223-240, 1978.
- 5) Sargent,F.E. and Jirka,G.H.:A comparative study of density currents and density wedges, Tech. Report, Cornell Univ, 1982.
- 6) Arita,M. and Jirka,G.H.:Two-layer model of saline wedge. part II:Prediction of mean properties, Jour. of Hy. Div., ASCE, Vol. 113, No.10, pp.1229-1263, 1987.

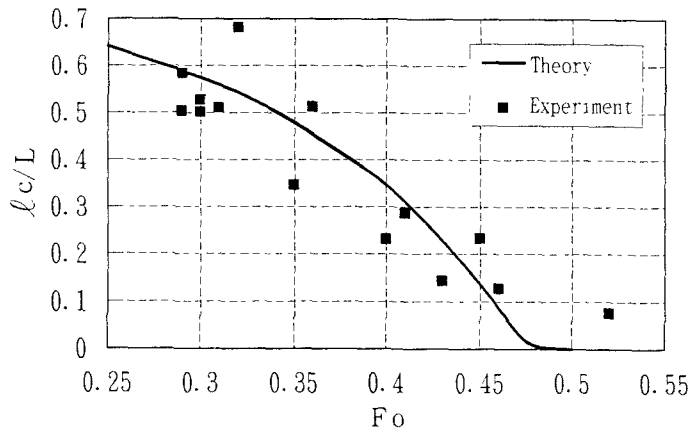


図-8 限界塩水楔遡上長の理論と実験結果との比較

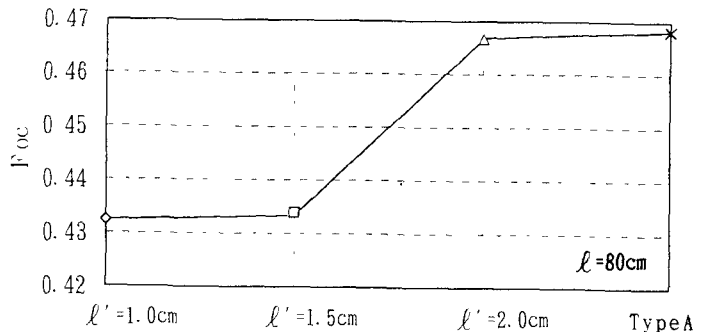


図-9 Type 1の堰の塩水楔遡上阻止効果の比較