

海岸に放出する水力発電所放水路への海水侵入について

中 村 宏*

1. ま え が き

水力発電所の放水口を海岸に設け、淡水を海へ放流する計画があるが、このような場合発電所の落差を少しでも大きくしようとすると、水車を海面以下に設置することになる。このような発電所で発電を停止すると放水路内へ海水がくさび状に侵入し、淡水は海へ流出して、最終的には放水路内は海水で満たされる。尖頭負荷をうけもつ発電所では発電停止は頻繁に行なわれ、運転を休止している時間の方が運転を行なっている時間より長い。したがって水車の海水による腐食を防止する必要があるが、その一つの方法として放水路上流端付近にゲートを設け発電所が運転を停止してから海水が放水庭へ到達するまでの間にこのゲートを降ろして海水の侵入をしゃ断することが考えられる。このような操作を行なうためには発電停止時に放水路へ海水がどのように侵入してくるか、また発電を停止してから海水が放水庭へ到達するまでの時間はどのくらいかを把握しておく必要がある。

水力発電所で発電を停止すると流れの急しゅ断によって段波を生じ、これが放水路内を往復してかなりの時間にわたって波動の伝播が起こることはよく知られてい

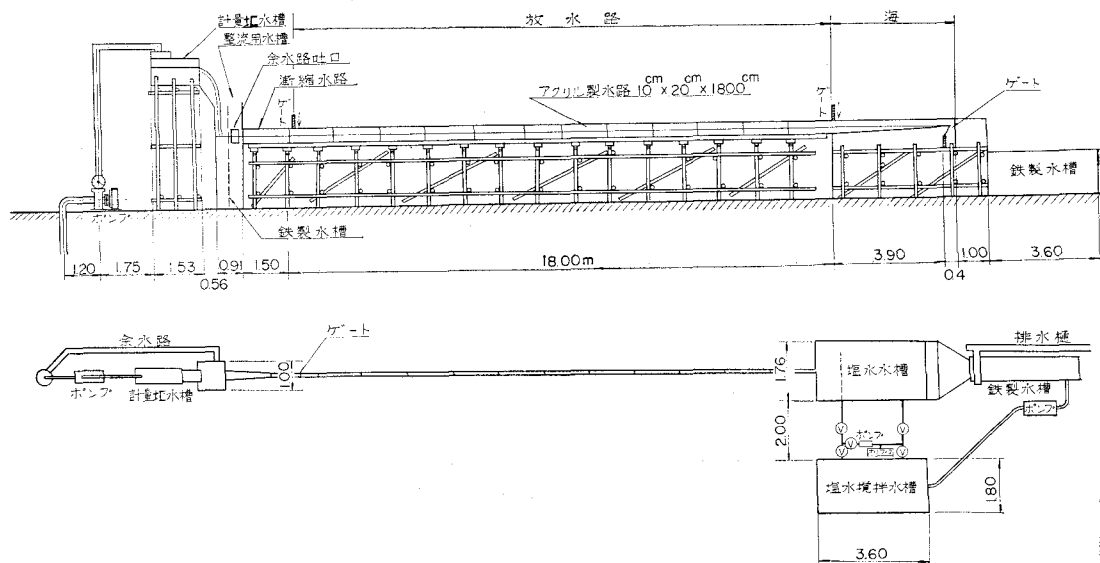
る。海岸に放出する放水路ではこのような水面における波動の伝播が海水の侵入に影響をおよぼすはずであるが、従来このような問題を取りあげた研究は全くない。これは開水路非定常流と非定常二層流とが一つの水路の中に共存する場合を取り扱うものであり、解析的取り扱いには容易ではない。水路内の淡水と塩水とが入れかわる密度流は一般に交換密度流といわれているが、水面に波動のない単純な交換密度流についてはすでにいくつかの実験的研究が発表されている^{1), 2)}。これらの研究の多くは一次元水路内に隔板を設け、その両側に淡水・塩水を貯め、隔板を引き抜いたあとの淡水・塩水の運動を調べたものであって、一方が淡水水路、他方が海の場合について塩水の淡水水路への侵入を調べたものは少ない。

そこでこの研究ではまず水面に波動のない場合について海から淡水水路への塩水侵入を、つぎに実際に発電所で発電停止を行なったのと同じ条件、すなわち放水路上流端で流れを急しゅ断した場合について放水路への塩水侵入を実験的に調べることにした。

2. 実験装置

実験装置は図-1に示すとおりであって、放水路に相

図-1 実験装置概要図



当する長方形断面の亚克力製水路と海に相当する塩水水槽から成る。亚克力製水路は長さ 18 m, 幅 10 cm, 高さ 20 cm, 塩水水槽は長さ 3.9 m, 幅 1.76 m, 高さ 50 cm である。亚克力製水路の底は塩水水槽の底より 27 cm 高くなっている。塩水水槽の横には塩水搅拌水槽を設置し, ここで食塩に水に溶解しさらにロードミンBで着色して所要密度の塩水を作り, 実験を行なう際はポンプでこれを塩水水槽に入れ, 実験が終ると再び塩水搅拌水槽に戻してつぎの実験に必要な密度の塩水を作る。塩水水槽の終端にはゲートを設け塩水水槽内の水位を一定に保てるようにした。また亚克力製水路と塩水水槽の取付部すなわち放水口と放水路の上流端には水路の壁面, 底面に溝を設け隔板を挿入できるようにした。亚克力製水路につながる整流水槽の上には三角ぜきを取付けた水槽を設け, この水槽内の水位をポイントゲージで読んで淡水流量を測定した。また整流水槽には余水吐を設け, アクリル製水路への流れを隔板によってしゃ断した時, ここから水があふれるようにした。

3. 水面に波動のない淡・塩水交換密度流の実験

(1) 実験方法

この実験では放水路の勾配は 0 にした。

放水口にまず隔板を挿入しておき, 水路内に淡水, 水槽内に塩水を所定の水位まで貯留する。隔板を引き抜くと塩水はただちに水路内へ侵入するが, くさび先端の位置, 形状はあらかじめ定めた時間間隔で写真撮影を行なって求めた。またあわせてくさび全体の形状を写真撮影ならびに水路の壁面に貼りつけたスケールの直接読取りによって求めた。実験に際しては塩水水槽内に淡水の層ができないように塩水水槽内へは一定流量の塩水を供給し, 淡水と一部塩水は水槽下流端のゲート上を越流させ排水した。なお塩水水槽内の水位は実験中一定に保った。

実験範囲は, 全水深 $5 \text{ cm} \leq H \leq 10 \text{ cm}$, 密度差 $0.0099 \leq \Delta\rho/\rho_2 \leq 0.0741$ である。

(2) 実験結果

a) 塩水くさびの形状

塩水くさびの形状の時間的変化の代表例は図-2に示すとおりであって, くさびの進行にともない二層境界面

図-2 塩水くさび形状の変化

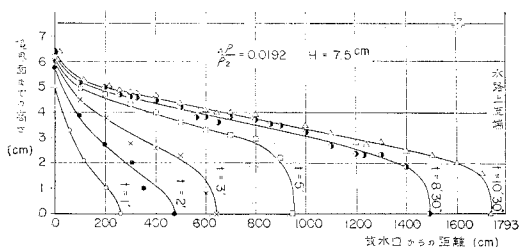
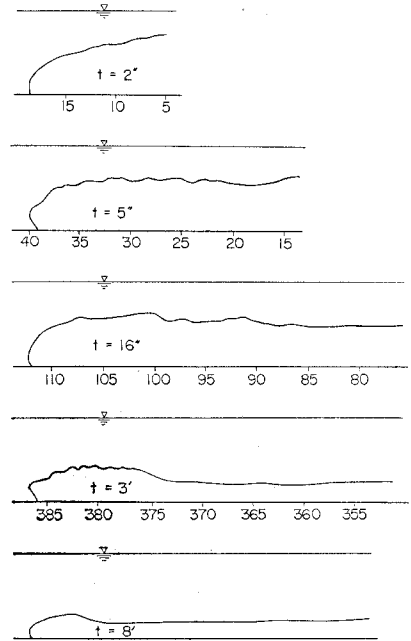


図-3 くさび先端形状の変化
($\Delta\rho/\rho_2=0.0192$, $H=7.5 \text{ cm}$)



は徐々に上昇し, かつその勾配はゆるくなる。くさび先端の形状は隔板引き抜き直後は流線形で, くさびが進行するにつれてしだいにその先端はふくらみを持つようになり, Kármán らが指摘したような拡散 head が形成される。先端は前面の淡水を前方へ押すとともに背後にはねのけ, 進行するにつれてそのふくらみはしだいに小さくなってゆく。その状況は図-3に示すとおりである。

b) くさび先端の進行速度

隔板を引き抜いてからの経過時間とくさび先端の進行距離との関係の一例は図-4のとおりであって, くさびが進行するにつれてその先端速度は減少する。

くさび先端の進行速度 V は, 従来ダムが欠壊した場合のサージの伝播から類推して

$$V = KV_d = K\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_2}gH} \quad \dots\dots\dots(1)$$

としている。

ただし, ρ_2 : 塩水の密度, K : 実験によって定める係数である。

係数 K は抵抗効果を表わしているが, Barr¹⁾ は densimetric Froude-Reynolds 数

$$(F_d R) = \frac{V_d H}{\nu} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(ν : 動粘性係数)

が K を支配する重要なパラメーターと考えている。しかしこのパラメーターを用いて実験値を整理してもかなり散乱するようである。室田・神田²⁾ はくさび先端の形状が外的条件に支配されて変動し, その形状抵抗の変動が K 値に影響するから, 先端厚 δ をかなり主要な

図-4 くさび先端の進行距離-時間曲線

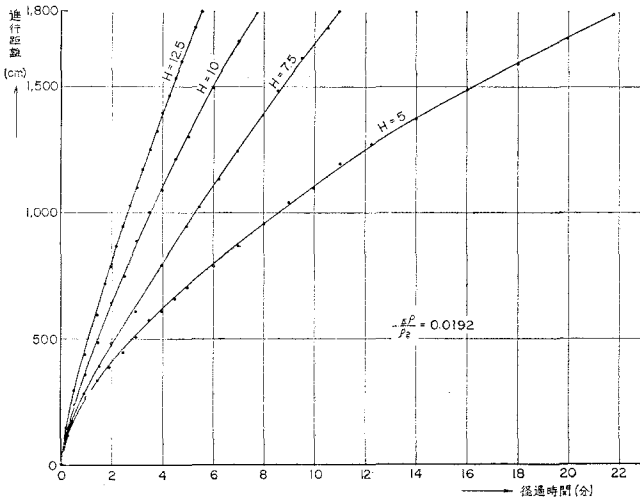


図-5 $L/H \sim K$ の関係 ($H=5$ cm)

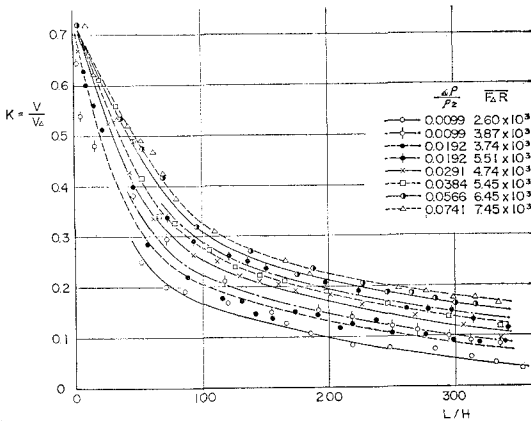
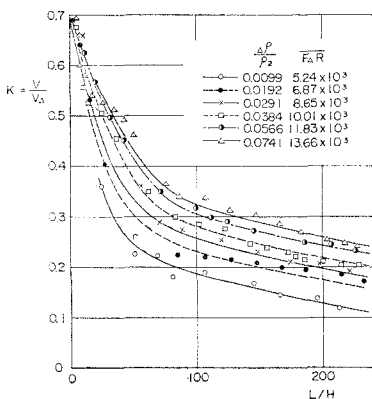


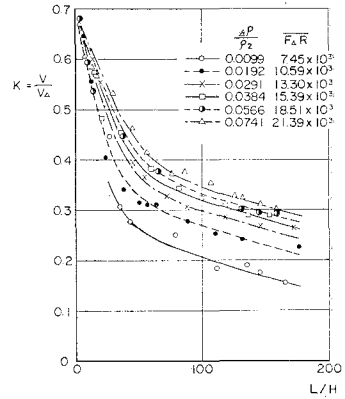
図-6 $L/H \sim K$ の関係 ($H=7.5$ cm)



factor として考えねばならぬとしている。

実験結果から得られた L/H (L : くさびの長さ) と K との関係は図-5, 6, 7 に示すとおりであって、実験値はやや散乱していて、とくに L/H の小さいところで著

図-7 $L/H \sim K$ の関係 ($H=10$ cm)



しいが、パラメーター ($F_d R$) を用いて整理すると、($F_d R$) のそれぞれの値ごとに実験

値はほぼ一つの曲線上にのり、同一の L/H に対して ($F_d R$) が大きいほど K の値は大きくなる。

隔板を引き抜いた直後の K 値は平均約 0.70 であるが、これは従来の実験における値より大きい。水門開放直後の K 値として Keulegan は 0.57, Harleman は 0.45 を得ているし、また室田・神田の実験でも 0.3~0.6 の範囲にある。本実験でこのような大きな K 値を得た理由としては、隔板を引き抜いた直後の塩水の侵入条件が異なるためと考えられるのでこの点については今後検討する予定である。

($F_d R$) が増加すれば、 K 値も増加するが、それは図-8 に示すとおりであって、 K 値はしだいに一定の値に近づいてゆくようである。また同一の ($F_d R$) では H の小さいほど K 値は大きく、これは H が小さいほど、側壁の抵抗が少なく、かつ塩水層の流速が小さいため境界面および底面の抵抗が少ないことによるのであろう。

つぎに先端厚 δ が K 値にどのように影響しているかを示したのが図-9 である。点はかなり散乱しているが、 δ/H が増すにつれて K 値は増加する傾向にある。図-9 中には室田・神田の実験から得られた結果を併記したが、これは筆者の実験の $H=10$ cm の場合とほぼ一致している。 δ/H が増すにつれて K 値が増加することは境界面および壁面における抵抗がくさび先端の形状抵抗より卓越していることを意味すると考えられる。

くさび先端厚はくさびの進行にともなって小さくなってゆくが、 L/H と δ/H の関係は図-10 のようであっ

図-8 ($F_d R$) と K の関係

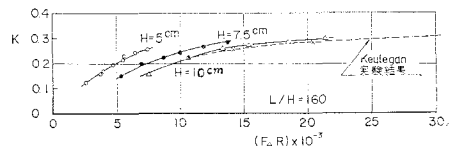


図-9 $\delta/H \sim K$ の関係

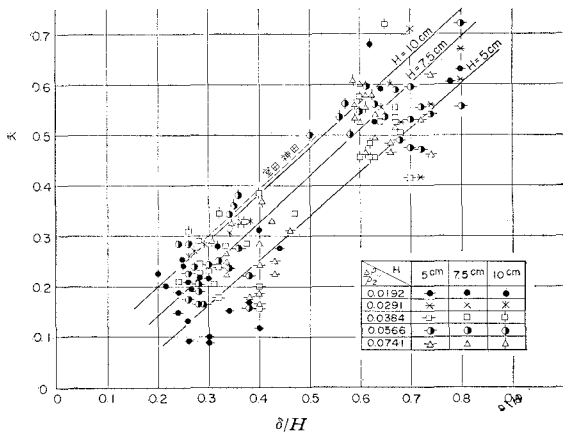
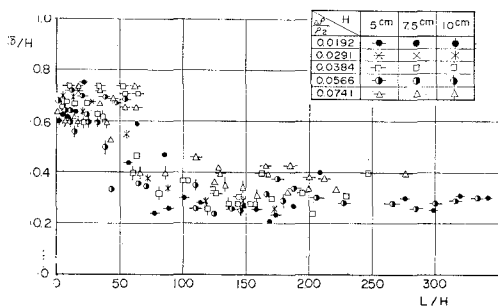


図-10 $L/H \sim \delta/H$ の関係



て L/H の小さいところでは先端厚はかなり大きい。 L/H の小さいところで K 値が急激に減少しているのはくさびの長さが短い点よりみて先端の形状抵抗がかなり影響しているようである。しかし L/H が大きくなれば先端厚の変化は少なく、 K 値に影響するのはほとんど境界面および壁面における抵抗と考えられる。

4. 放水路上流端で流れを急し断した場合の塩水侵入の実験

(1) 実験方法

この実験ではまずアクリル製水路に一定流量の淡水を流し、塩水水槽内の塩水上にひろがった淡水流は水槽下流端に設けたゲート上を塩水攪拌水槽から供給される一定流量の塩水とともに越流させ排水しておく。水路内の流れが定常状態になったらただちに水路上流端（放水口からの距離：17.93 m）に隔板を挿入して流れをしゃ断し、段波

および塩水くさびの進行を観測した。実験中、下流端ゲートを調節して塩水水槽内の水位は一定に保った。また塩水水槽内には淡水層を生じないようにした。

水位の測定は、抵抗式水位計を 5 カ所に設置して行なった。また塩水くさびの進行状況およびその形状の変化は 8 ミリカメラ 3 台によって撮影した。実験条件は放水路勾配 $i=1/1200$ 、しゃ断前の放水路淡水流量 $Q=2.88$ l/sec、放水口水深 7.5 cm である。淡水と塩水の密度差 $\Delta\rho/\rho_2$ は 0.0192 および 0.0291 の 2 種類とした。

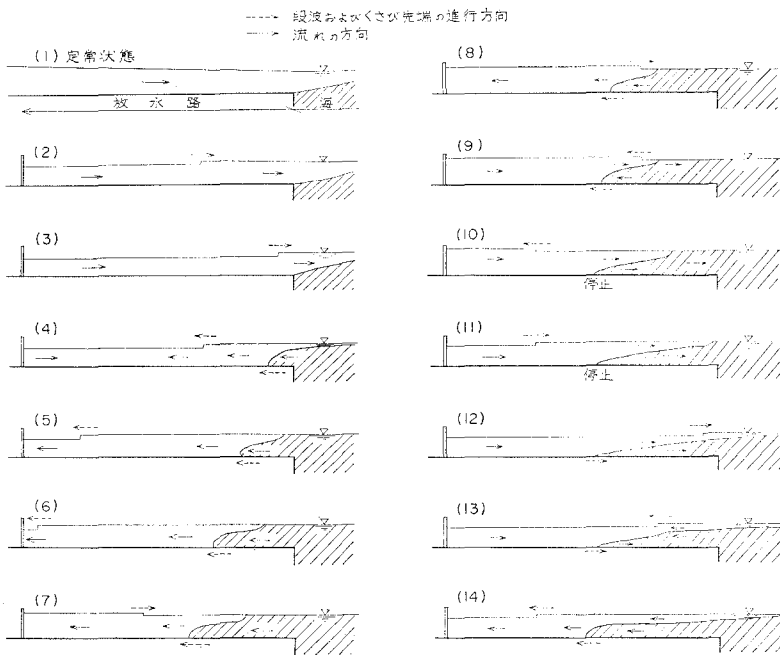
(2) 実験結果

a. 段波と塩水くさびの進行状況

放水路上流端で流れを急し断したあとの放水路内の段波および塩水くさびの進行状況は 図-11 に示すとおりである。すなわち急し断によって生じた負の段波が下流へ伝播し、これが放水口に到達すると反射して正の段波となって上流へ伝播してゆく。この時塩水くさびが侵入しはじめ上流へ向かって前進する。段波の波速はくさびの前進速度よりはるかに大きいから、放水路上流端で反射し、再び放水路を下流へ伝播する正の段波は上流へ向かって前進してきた塩水くさびに衝突する。塩水くさびはこのあとも前進を続けるが、先端速度は徐々に遅くなる。段波が放水口で反射して再び放水路を上流へ伝播して塩水くさび先端上を通過すると先端は進行を停止し、段波が放水路内を一往復して再び塩水くさび上を上流に向かって通過するまでの間、くさび先端は若干距離後退する。

放水口からの距離を横軸に、放水路上流端で流れを急

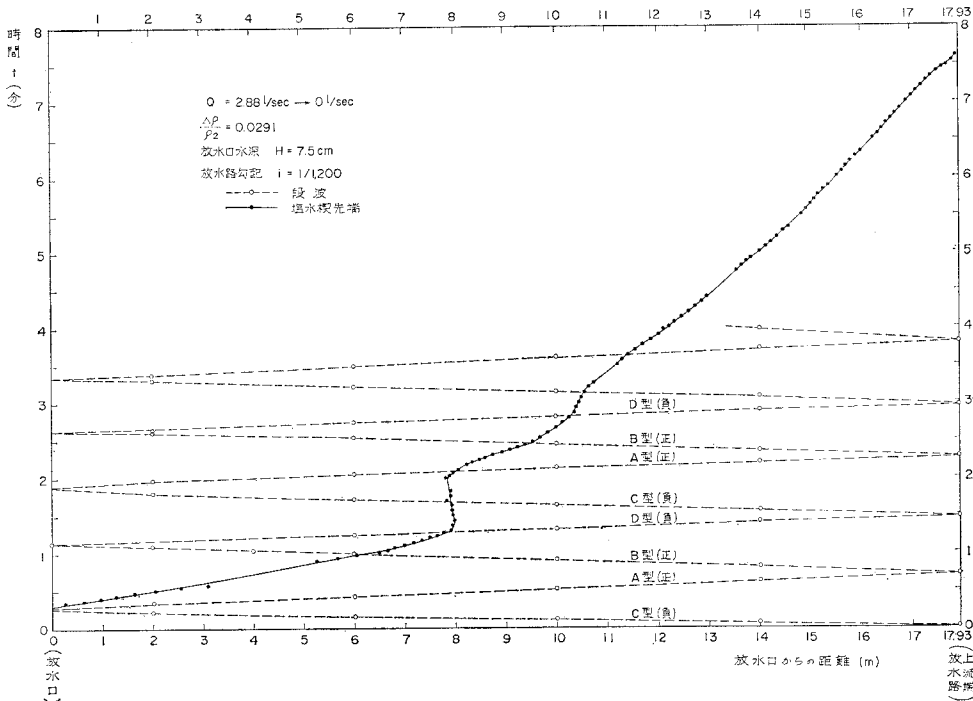
図-11 段波と塩水くさびの進行状況説明図



挿入して流れをしゃ断し、段波

しゃ断てからの時間を縦軸にとり $\Delta\rho/\rho_2=0.0291$ の場合について段波およびくさび先端位置の時間的変化を示したのが 図-12 であって、塩水くさびの前進速度が遅くなるのは、くさび先端が下流へ伝播する第 2 回目および第 4 回目の段波と衝突した時である。また上流へ伝播

図—12 段波と塩水くさびの進行状況



する第2回目の段波がくさび先端上を通過すると先端は前進を停止するし、上流へ伝播する第4回目の段波がくさび先端上を通過するといったん遅くなった前進速度はさらに遅くなる。段波は上に述べたように放水路内を往復して塩水くさびの運動に影響を与えるが、水路、塩水くさびとの摩擦および水路勾配によってしだいにその波高は減衰してゆき、図-12からも明らかなように塩水くさびの運動への影響は小さくなる。

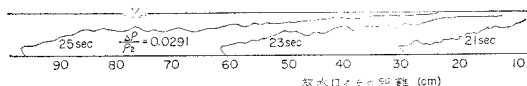
以上に述べたような放水路内の段波の往復が塩水くさびの進行状況におよぼす影響は $\Delta\rho/\rho_2=0.0192$ の場合も同様である。

b. 塩水くさび形状の変化

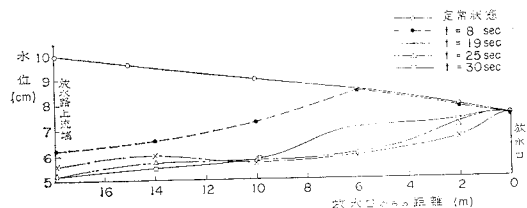
塩水くさびが放水路内へ侵入してしばらくすると、放水口から全水深にわたって塩水が侵入し、塩水くさび上の淡水は上流へ後退してゆく。その状況は 図—13、に示すとおりである。なお 図—13 に記されている時刻は放水路上流端で流れを急しゃ断してから経過時間を示すもので、以下の図においても同様である。図—14 はこの前後の放水路内の水面形を示したものである。

塩水くさびの形状が大きく変化するのは上流へ伝播する第2回目の段波がくさび先端上を通過してからである。この前後のくさび先端形状は図-15に示してある。下流へ伝播する第2回目の段波と衝突したのちも、くさび先端はふくらみをもった形状を保っているが、放水口で反射し上流へ伝播する段波がくさび先端上を通過して先端が前進を停止するとその形状はとがった形となり、二層境界面は押し下げられて塩水層内の流れは下流向き

図一13 侵入直後のくさびの形状



図—14 放水路内の水面形の変化



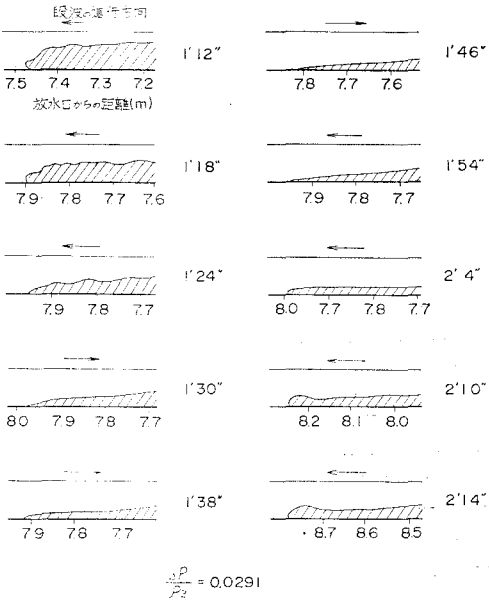
になる。図-16 には放水口から 4 m の地点の水位および境界面の高さの時間的変化を示したが、上流へ伝播する第 2 回目の段波が通過すると境界面は急激に低下している。この時、放水路内へ侵入していた塩水の一部は海に相当する塩水水槽へ押し出される。

いったん停止した塩水くさびが再び前進をはじめるのは上流へ伝播する第3回目の段波がくさび先端上を通過した時であるが、図—15に示すようにこのとき先端は前進しつつ再びふくらみをもった形状となる。また図—16に示すように放水口から4mの地点の境界面は上昇する。すなわち下流向きであった塩水層内の流れは再び上流向きになる。

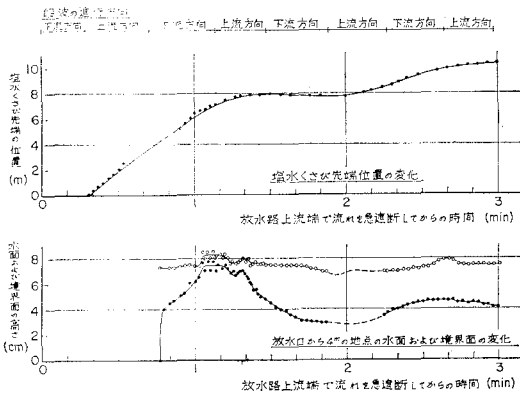
c. 段波の型式と塩水くさびの運動

段波には理論上 図-17 に示す4つの形式がある。この実験では水面形の変化およびウォーターブルー粉末

図—15 段波と塩水くさび先端が衝突した後のくさび先端形状の変化



図—16



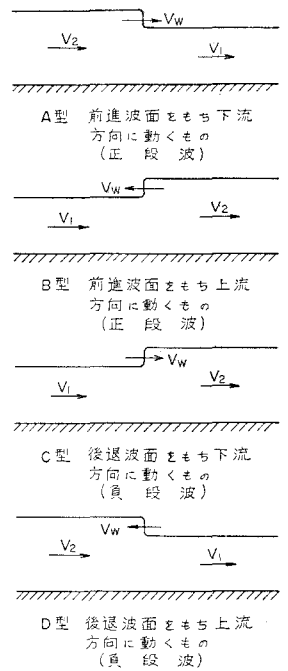
を投入して得た流向から判断すると 図—12 に記したようにC型の負段波（波動，流れとともに下流向き）A型の正段波（波動，流れとともに上流向き）B型の正段波（波動は下流向き，流れは上流向き）D型の負段波（波動は上流向き，流れは下流向き）がこの順で現われ，一順すると再び下流へ向かうC型の段波を生ずる。すなわち段波の進行にともなう淡水流の流向・流速の変動が塩水くさびの運動に影響しているのであって，D型，C型の負段波を生じている時は淡水の流れは下流向きで，塩水くさびの前進は阻止され，A型，B型の正段波を生じている時は淡水の流れは上流向きで，塩水くさびの前進は促進される。

d. 表面に波動のない場合の塩水侵入との比較

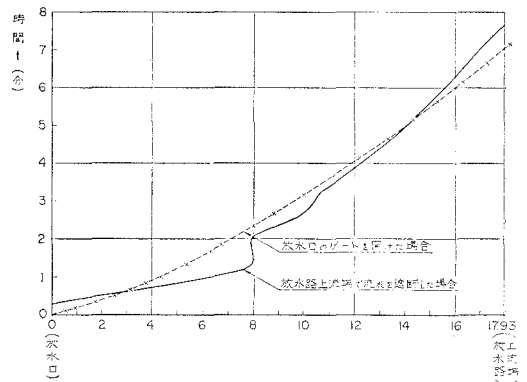
放水路上流端で流れを急断した場合，上に述べたように塩水くさびは淡水流によって加速，減速を受けな

がら前進してゆく。これを放水口に設けた隔板を引き抜いた時の放水路への塩水侵入状況と比較してみる。くさび先端の進行速度は淡・塩水の密度差が同一であっても densimetric Froude-Reynolds 数 ($F_d R$) が異なれば異なってくるから，流れを急断した実験と ($F_d R$) が等しい場合について比較する必要がある。図—6 からこの ($F_d R$) での $L/H \sim K$ の関係を求め，逐次計算を行なって得たくさび先端の位置の変化は 図—18 のようになり，放水路へ達するまでの時間にあまり大きな違いはない。これが常に成立すれば実用上はなほだ便利であり今後検討したいと考えている。

図—17 段波の4つの形式



図—18 塩水侵入状況の比較



5. あとがき

塩水くさびの非定常侵入についてはまだ解決すべき問題が多く残されている。ここにとりあげた問題もその一つであるが，実験結果については目下解析的検討を行っているし，さらに詳細な実験も予定しているので，つぎの機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1) Barr, D.I.H.: Densimetric Exchange Flow in Rectangular Channels, La Houille Blanche, No. 7, 1963, No. 6, 1967.
- 2) 室田 明・神田 徹：水門からの海水侵入に関する基礎的研究，第 11 回海岸工学講演会講演集，1964.