(B－3)　底部取水工を有する開水路流れの特性について

京都大学工学部　　岩佐義朗
京都大学防災研究所　中川博次

1. 緒　言

底部取水工は水路底に格子あるいは多孔板を設けた取水・分水構造物であって，ヨーロッパ各国では渓流取水を目的として広く用いられ，その水理機能に関する研究も盛んに行なわれてきた。しかしながら，従来の解析法は古典水理学的な仮定にもとづくものあるいは単なる実験的考察にとどまるものが多く，構造物上の流れが示す水理学的性状に関する基礎的研究は十分に行なわれていない現状である。

不等速定流の示す一般性状については，すでに岩佐がエネルギーおよび運動量の一次元解析法にもとづく漸変流理論を展開し，とくにその遷移特性に関する水理学的意義を明らかにした[1]。この解析法をより高度化し，また各種水理構造物の機能設計理論を確立することを目的として，流量が一定な流れについては鋭縁ぜき，円頂ぜきおよび各種フルームを対象とし，また流量が場所的に変化する流れについては浸透性水路，横越流ぜきなどを対象とした基礎的実験を行なってきた。本文は，これらの研究の一環としての一様水路内に設けられた底部取水工上の流れの挙動に関する考察を述べたものである。

2. 基礎方程式とその水理学的特性

(1) 基礎方程式　底部取水工上の流れに関する従来の解析法は，Nosedaの研究[2]にもみられるように，取水工上では流量が変化しても主流の比エネルギーは変化しないという仮定と，実験係数を含む連続式とから水面形を表わす線型微分方程式を導くもの，あるいは漸変流の基礎方程式を与えられた条件のもとで解くという方法である。前者の方法は実用目的には有利であるが，流れに影響する諸要素の効果を力学的に説明するには余りにも不備である。したがって，ここでは次に示される流量が場所的に減少する一様水路における漸変流の基礎方程式にもとづいて解析をすすめる。

$$\frac{dH}{dX} = \sin\theta - \frac{n^2Q^2}{R^{4/3}A^2} + \frac{2\beta pqQ}{gA^2} \tag{1}$$

$$\frac{dx}{dX} = \cos\theta - \frac{\beta Q^2}{gA^3}\frac{\partial A}{\partial H} \tag{2}$$

$$\frac{dQ}{dX} = -q(\cos\theta - \frac{\beta Q^2}{gA^3}\frac{\partial A}{\partial H} \tag{3}$$

いま，一様長方形断面水路を対象とした場合，断面形状，底勾配はxに無関係であり，上式中に含まれる諸係数が水深Hのみの関数で表わしうるならば，Q～H面での二次元解析が可能である。粗度係数n，運動量係数β（またはエネルギー係数α），流出にともなう運動量（またはエネルギー）の変化の大きさを表わす係数pおよび連続式を決定するための流量係数の値は解析的表示が困難であるから，実験による経験的関係によって表示されねばならない。

(2) 水面形特性　取水工に特異点があらわれる場合の遷移特性について論じる。開孔部からの流出

流量は一般に次式で表わされる。

$$q = C_H b \phi \sqrt{2gH} \tag{4}$$

ここに，C_H：流量係数，b：水路巾，ϕ：開孔部巾と水路全巾との比（開度）である。いま，巾の広い長方形一様断面水路を考え，またn，β，p，ϕの値はHに無関係に一定と仮定する。さらに，次式で与えられる無次元量η，ζ，ξおよびγを用いて，(1)および(3)式を無次元化すると，

$$H=b\eta,\ Q^2=g\cos\theta\ b^5\zeta^2/\beta,\ n^2=\beta\tan\theta b^{\frac{1}{3}}\gamma^2/g,\ C_H=\sin\theta\,\xi/2^{\frac{1}{2}}\beta^{\frac{1}{2}}\cos^{\frac{1}{2}}\theta p\phi$$

$$\frac{d\eta}{d\zeta}=\frac{\eta^{\frac{5}{2}}-(\gamma^2\zeta^2/\eta^{\frac{5}{6}})+2\zeta\xi\eta}{\xi(\zeta^2-\eta^3)} \tag{5}$$

が得られる。特異点の位置は明らかに，

$$\eta_c^3=\zeta_c^2\ ,\quad \gamma_c^2/\eta_c^{\frac{1}{3}}=1+2\xi_c \tag{6}$$

であり，特異点近傍の線型化方程式は，ξをηのみの関数とみなせば次式で表わされる。

$$\frac{d\eta'}{d\zeta'}=\frac{c\zeta'+d\eta'}{a\zeta'+b\eta'} \tag{7}$$

ここで，$a=2\xi_c\eta_c^{\frac{3}{2}}$，$b=-3\xi_c\eta_c^2$，$c=-2\eta_c(1+\xi_c)$，$d=(\eta_c^{\frac{3}{2}}/3)\{10+11\xi_c+6\xi_c(\partial\xi/\partial\eta)_c\}$

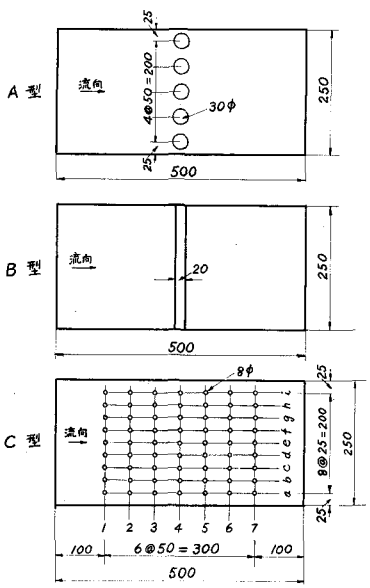
である。特性方程式の判別式$D=(a-d)^2+4bc>0$であり，また，

$$ad-bc=(2\xi_c\eta_c^3/3)\{1+2\xi_c+6\eta_c(\partial\xi/\partial\eta)_c\}$$

において，後述のように，円形孔および流下方向と直角な格子では，一般に$\partial\xi/\partial\eta>0$の関係が成立することが確認されたから，$ad-bc>0$であり特異点は常に結節点となることがわかる。一方，流下方向と平行な格子の場合には，Noseda の実験で確かめられたように，$\partial\xi/\partial\eta<0$となるから，鞍形点の発生が考えられる。

3. 実験および結果の考察

(1) 実験装置　基礎方程式(1)～(3)に含まれる諸係数の力学的特性を明らかにし，また取水工上の流れの挙動を考察するために，巾25cmの長方形断面を有する木製一様水路で実験を行なった。取水部は塩化ビニール製とし，その型式としては図－1に示すA，BおよびC型の3種を採用したが，A，B型は常に取水工上で急変流的特性を示したため，それらに関する資料は流出量の検討のみに用いられた。水路勾配は全実験を通じて一定で1/200とした。各開孔部からの流出流量，縦横断面水面形状，C型模型の代表的流れについての流速分布および開孔間の底面圧力が測定された。開孔部からの流出流量の初期流量に対する比（取水率）はA型で16～55%，B型で13～76%C型で10～30%が得られた。



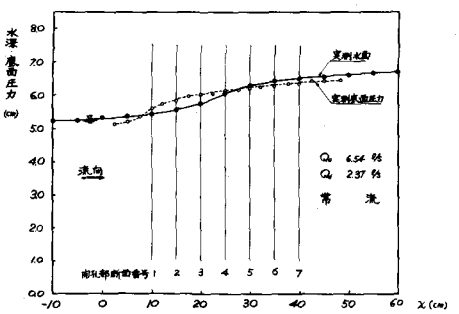
図－1　取水工型式

(2) 定性的考察　上述の水路および水理条件で得られた遷移水面形状は，射流から射流，下流のせき上げによる常流から常流および取水工上で跳水が形成されるものの3種であって，取水部に特異点を有するような流況をうることはできなかった。以下漸変流としての取り扱いが可能であると考えら

れるC型取水工上の流れに関する考察の結果をのべる。

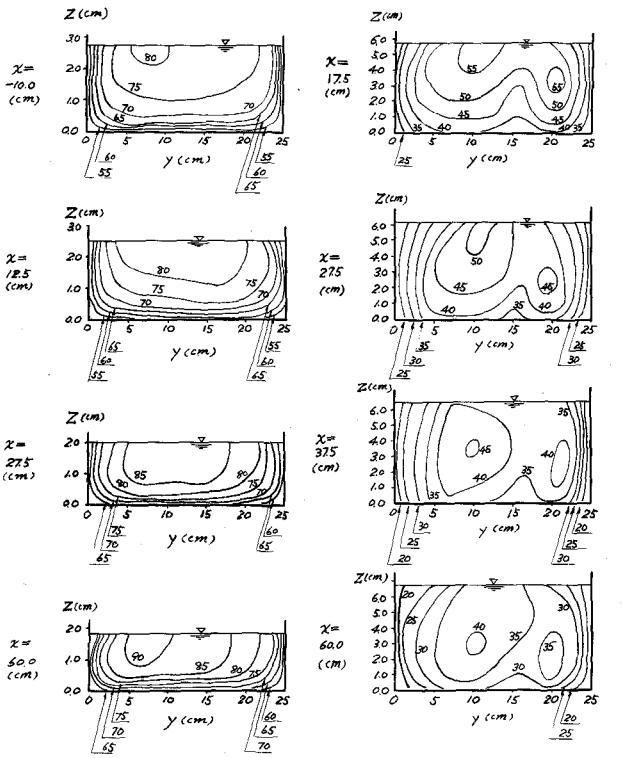
開孔部からの流出にともなう主流の横断水面の変化はほとんどなく，どの断面でもほぼ一様であった。ただ，せき上げ水深が小さい場合の常流流れでは取水工上での水面の波立ちが顕著であり，擾乱の減衰にかなりの流下距離を必要とした。また，取水工上に跳水が形成される場合には開孔部からの流出量が不安定に変化するために跳水始端位置が大きく変動し，その移動量は最大±10cmに達した。開孔部からの水の流出状況を観察すると，常に開孔部下流側の壁面に沿って鉛直方向に落下するが，落下水脈巾は同じ開孔部水深に対し主流流速が大きいほど小さくなることが認められた。底面圧力と水面形の実測値を図－2に比較して示す。水面形の凹凸部での底面圧力値がその点での水深より増減しており，静水圧分布からのずれを明確に示しているが，測定圧力の水深値に対する最大偏差は5％以内であったから，漸変流としての取り扱いが可能であると考えられる。

開孔部からの流出水は横方向および鉛直方向の速度成分を有するから，取水工上の主流の流速分布は流量の変化しない流れのものと異なるはずである。取水による流れの状態の変化を支配するものは取水率と流れの特性すなわち射流か常流かということである。いま，取水率がともに23％の射流と常流の



図－2　水面形と底面圧力

流れについて取水工上各断面で測定された流速分布を図－3に示す。射流では取水部を含む水路全区間にわたって同様な流速分布を示し，最大流速の発生位置は常に水路全巾にわたりほぼ一様に水面近くに認められた。水面低下による流速の増大がうかがわれるが，開孔部からの流出は主流の流速分布に何らの影響も及ぼさないことが確かめられた。一方，常流の流れでは最大流速発生位置が流下距離とともに水面から底部へ移行し，また取水工上で明瞭な左右対称の分布形を示した。このような流速分布を示す原因を開孔部からの流出の影響のみに帰することには問題があろうが，底面付近での流速分布の歪みなどを考察すれば，常流状態では開孔部からの流出が主流の状態にかなりの変化を与える

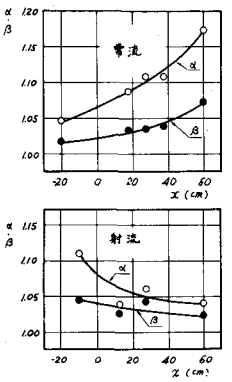


図－3　流速分布

ものと判断される。

(3) 定量的考察　基礎方程式(1)～(3)の各項に含まれる係数の値を実測値にもとづいて検討し，水面形追跡にあたってのその適合性について論じる。

i) α および β　図－3に示される流速分布図から求められた運動量およびエネルギー補正係数 β および α の値の水路沿いの変化を図－4に示す。常流状態では α，β とも流下距離とともに増大する傾向にあり，取水部での乱れの影響が下流まで伝わることを示している。一方，射流状態では図に示されるように初期断面での補正係数の値が大きいために明確な結論は下しがたいが，取水工上では下流へ向かってわずかに増加するが，きわめて短区間で正常な流速分布にもどることが示され，距離に無関係にほぼ一定の α および β の値をとるものとみなしてよいであろう。一般に，α の値の変動は β のそれに比べて大きいから，この点でも運動量解析法が有利である。

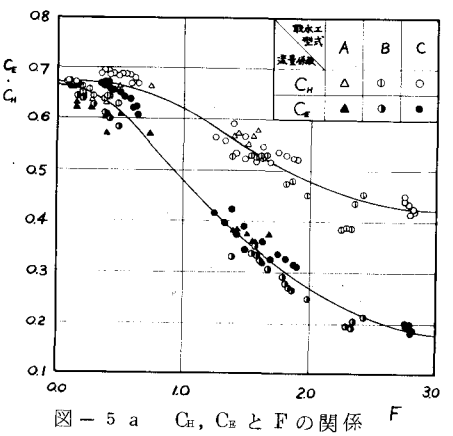


図－4　α，β の変化

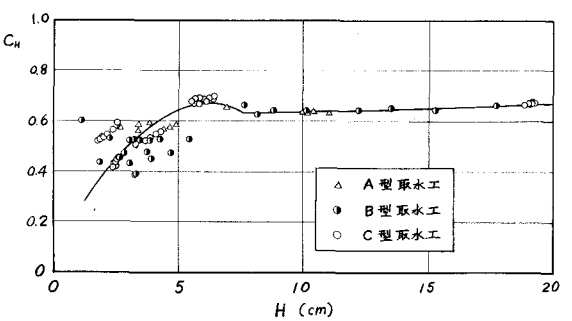
ii) C　開孔部からの流出流量は流下方向と平行に設けられた格子では一般に流出過程でのエネルギー損失が無視されるから，次式で表わされる。

$$q = C_E b \phi \sqrt{2gE} \qquad (8)$$

一方，多孔板などでは開孔部側面でのエネルギー損失がおこり，その大きさはほぼ開孔部主流の速度水頭に等しいとされており，(4)式で表わされる。各開孔部断面ごとの実測流出流量から(4)および(8)式を用いて計算された C_H および C_E の値とその断面での主流の平均フルード数Fならびに水深Hとの関係を示したのが，それぞれ図－5aおよびbである。図から明らかなように，実験された3種の取水工については同じフルード数に対する流量係数の値にほとんど差が認められないから，横方向格子と円形多孔板では一定の水理条件のもとでエネルギー損失の大きさは同程度であり，同じ流量係数の値を採用してもよいと判断される。流量係数の変化について考察すると，射流領域ではフルード数の増加とともに，また水深の減少とともに流量係数は減少する傾向を示し一方，常流領域では水深の小さい範囲を除き，水深に無関係にほぼ一定の流量係数を示すことが認められた。したがって，一般に先に述べた $d\xi/d\eta > 0$ の関係が成立するものとみてよい。ただ，常流領域で開孔部水深が約6cmのときに流量係数の最大値を示したが，これは丁度開孔部周辺での主流流速と，開孔直径に等しい直径をも



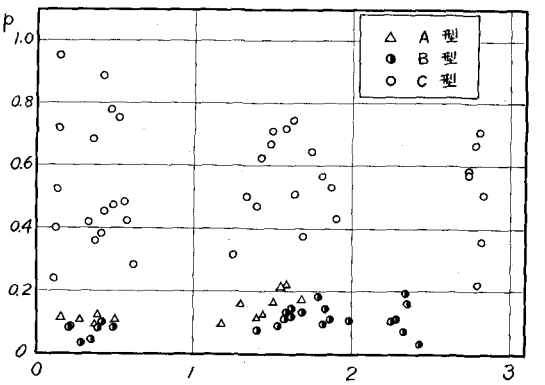
図－5 a　C_H，C_E と F の関係



図－5 b　C_H と H の関係

つ半球形の等速度面を開孔上の静水中に仮定した場合の球面上流速にほぼ等しい領域に相当し，開孔部からの噴出流の断面収縮係数が最大になる点であると考えられる。

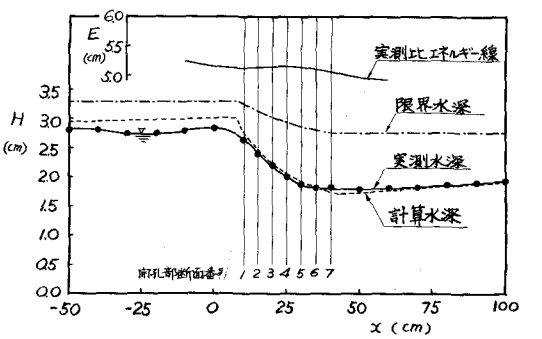
iii) p　運動量解析法によれば，$p=1-(u_b/2\beta\ u_m)$（u_m：主流の平均流速，u_b：開孔部から流出する流れの主流方向速度成分），エネルギー解析法によれば，$p=(1/4)\{3-u_b^2/\alpha u_m^2)\}$で表わされ，従来の解析で流出水のもつ運動量およびエネルギーを無視した場合にともに1/2が与えられている。いま，実測水面勾配から運動量式を用いて逆算されたpの値と開孔上主流の平均フルード数との関係を図－6に示すが，急変流的性状を示したAおよびB型取水工については，非常に小さい値を示し，開孔部からの流出水の流下方向速度が主流の平均流速に比べ卓越していることが認められた。pの値はA型で0.1～0.2，B型で0～0.2であり，Fの増加に比例するようであるが，この場合には取水工上での静水圧分布の仮定が成立せず基礎方程式の適用に問題があろう。C型取水工でもその上下流端では急変流的性質を示したから，pは非常に小さい値を示した。pの計算過程では一般に水面勾配が支配的な影響を及ぼすから計算値がかなりばらつき，Fとの明確な相関を見出すことはできなかったが，射流では0.6，常流では0.4位の値を採用するのが妥当であると考えられる。



図－6　pとFの関係

4. 水面形

基礎方程式に含まれる諸係数のうち，粗度係数nの値として開孔部を設けぬ場合の実測値0.010を用い，またβおよびpの値は水路全体にわたりそれぞれ1.03および0.6の一定とし，さらに図－5aで与えられるC_Hの値を用いて計算された水面形の一例を実測水面と比較して図－7に示す。上流端の開孔を含む微小区間では，予測されたように実測水面と計算水面との間に不一致がみられたが，取水工上では両者の間に十分満足すべき一致が得られ，取水工延長が比較的長く，また流量の場所的変化が小さい場合には基礎方程式は十分な精度で取水工上の流れの性状を表わすことが確認された。比エネルギー一定の仮定による従来の解析法の妥当性を検討するために，実測比エネルギー線を図－7に併示するが，射流から射流への遷移状態ではこの仮定は正しいことが実証された。一方，常流から常流への遷移では比エネルギーが下流へ向かって増加することが認められた。この事実は，射流では開孔部で



図－7　実測水面形と計算水面形

の主流のエネルギー損失が開孔部のない場合の開孔部分に相当した摩擦損失にほぼ等しいことを示し，常流状態では流出によるエネルギー損失が，開孔部に相当した摩擦損失より小さいことを示している。

5. 結　語

以上，底部取水工上の開水路流れについて，基礎方程式に含まれる諸係数の性状ならびに取水工上での流れの特性に関する若干の考察を行なったが，基礎方程式を適用する際の問題点をあげれば次のとおりである。

(1) 取水工上に特異点があらわれる場合，円形孔や横方向格子では一般に結節点となり，縦方向格子では結節点または鞍形点となる。

(2) 流量係数は開孔部断面での主流の平均フルード数と一定の関係をもち，主流の状態が常流であるか，射流であるかによってその変化の傾向を異にする。

(3) 基礎方程式(1)式の右辺の各項の大きさを比較すると，一般に第1および第2項の和は第3項の約1/5以下のオーダーであり，基礎方程式の適用にあたってpおよびqの推定精度が計算精度を支配するものといえる。pについては水理量との十分な相関関係が得られなかったから，さらに綿密な検討を加えねばならない。

(4) 取水工上下流端の不連続部付近では計算水面と実測水面との間に若干の差異があらわれる。このような急変流の水面形推定法に関する考察が進められねばならない。

(5) 取水比が小さく，取水工延長が比較的大きい場合には，取水部上下流端を除いて静水圧分布の仮定は正しいと認められる。

なお，特異点が取水工上に発生した場合の水面性状に関する実験的考察ならびに他の取水工型式との水理特性の比較については講演時に述べる。

参　考　文　献

1) 岩佐義朗：開水路における定常流の一般理論について，土木学会論文集，第69号，昭35.

2) Noseda, G:Operation and design of bottom intake racks, Proc. of the 6th General Meeting, IAHR, The Hague, 1955.