

天井川に関する二,三の水理学的特性

石原藤次郎・岩佐義朗・松尾和幸

SOME HYDRAULIC FEATURES OF FLOWS IN PERMEABLE CHANNEL

by Dr. Eng. Tojiro ISHIHARA, Dr. Eng. Yoshiaki
IWASA and Kazuyuki MATSUO

Synopsis

This paper deals with the theoretical characteristics of the hydraulic features of flows in a permeable channel like so-called Tenjo-river (which indicates the channel bottom is extremely higher in elevation than the outside ground level). In open channel hydraulics, the flow in a permeable channel is classified as the flow with decreasing discharge in the direction of running flow, so that the method of singular point in steady-state hydraulics will be used for the analysis.

The results obtained by the mathematical analysis are indicated in connection with the hydraulic conditions imposed up- and downstreams, and some engineering contributions to the design for the river-improvement projects of Tenjo-rivers are also presented.

1. 緒 言

天井川はいわば人類が長年に亘つて作り上げた一種の人工的な浸透性水路であり、それ自体普通の河川にみられるものと異なつた多くの水理学的特徴をもっている。しかしながら、従来よりこうした天井川の特異性を水理学的に研究したものはほとんど皆無といつても過言ではなく、したがつてまたそのような研究を基礎として取り扱うべき天井川の河道計画も、普通河川における方法に準拠して行なわれてきたにすぎないようである。

天井川の水理学的特徴は、上に述べたように水路が浸透性であることによつて代表される。したがつて、このような水路における流れの水理学的特性を十分に把握することが天井川の特性を明らかにする手がかりとなろう。浸透性水路における水流は流量が場所的に変化する流れとして水理学上分類される。この研究はすでに広く行なわれ、とくに上下水道における越流トラフの機構の解明、発電水力工学における横越流型余水路の設計、あるいは各種の水利事業における取水工法などとの関連において、多くの研究成果が欧州諸国であげられてきたことは、de Marchi¹⁾, Mostkow^{2),3)}, Nosedo⁴⁾らの研究にみられるところである。

しかしながら、これらの研究はいずれも水路の摩擦抵抗を無視した第1次近似解法のみで終始し、この種の問題を一般的に取り扱つたものではない。著者の一人⁵⁾が近年研究をすすめた定常流の水理学的特性を明らかにする特異点の方法は、この問題を解決する方法であつて、ここではそのような考えを基にして天井川における流れの水理学的特性を明らかにしよう。しかしながら、個々の天井川はそれぞれ特定の河道をもち、その特性を一般的に論ずることは容易でない。したがつてここでは、その最も簡単な例として長方形断面をもつ浸透性水路における流れの水理学的特性を明らかにするとともに、とくに天井川が不浸透性山地河道よりただちに浸透性扇状地に流下することから、浸透性水路の水理学的条件と山地の不浸透性水路の水理学的

条件との関係より天井川にあらわれる水面形状を分類し、あわせてこれらの水理学的条件によつてどのように天井川の河道計画をすすめるべきかについて若干の考察を試みよう。

2. 浸透性水路における流れの基本的特性

開水路の流れを力学的に取り扱う場合、普通には運動量あるいはエネルギー保存の原理が用いられる。これらの方法にはいずれも一長一短あり、一般的にはどちらがよいか一概に定めることはできない。しかしながら、天井川のような浸透性の人工水路においては、その河道は一般に簡単な断面形状をもつ様な水路であり、またその河床勾配もその流域に特有な河床材料などによりきめられることが多く、床固め工などにより一定とされている。したがつてこのような河道における水流現象は、その基礎方程式の流体力学的誘導⁶⁾よりみてもわかるように、運動量の解析法にしたがつて取り扱われる方が基礎的關係に導入される仮定も少なく、より合理的であると思われる。したがつてここでは、運動量の方法によつて流れの解析をすすめることにしよう。連続および運動量方程式は、以上のことから、

$$\frac{dQ}{dx} = -q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\sin \theta - \frac{n^2 Q^2}{b^2 h^{10/3}} \left(1 + \frac{2h}{b}\right)^{4/3} + \frac{2\beta q Q}{g b^2 h^2}}{\cos \theta - \frac{\beta Q^2}{g b^2 h^3}} = \frac{f_1(x, h)}{f_2(x, h)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。ここに、 Q ：流量、 q ：単位長さ当りの浸透量、 h ：水深、 b ：水路巾、 n ：Manning の粗度係数、 β ：Coriolis の運動量補正係数、 θ ：水路床勾配である。ただし、流出する浸透水のもつ運動量の流れの方向に関する分値は小さいものと仮定して、ここでは無視している。

(1)および(2)式を解析的に取り扱うにあたつてまず問題になるのは、水路の形状および浸透量である。すでに述べたように、天井川が様な断面形状をもつ人工水路であるとする、流下する方向に水路形状の変化はない。ところが、浸透量は河床構成材の粒径や空隙率のみならず、流れの水理学的条件によつて定められるから、これを一概に論ずることはできない。しかしながらいま問題を簡単化して、河床構成材の粒径および空隙率が一樣であると仮定すると、河床よりの浸透量は地下水位の高さと水路内の水深とによつて変化することになる。さらにまた、天井川においては河床面より地下水位までの深さはかなり深く、かつ河道内の水深に較べて非常に大きいため、浸透量は河床構成材のもつ浸透係数によつて定められることになり、すでに述べた仮定よりこれは一定とみなされる。

このように、いま取り扱っている天井川の流れに課せられた諸条件を単純化すると、(1)および(2)式の右辺は x を直接に含まなくなるから、その水面形状を流量 Q の関数として取り扱う方が解析上都合がよくなる。すなわち、

$$\sin \theta \approx \tan \theta = i, \quad \cos \theta \approx 1$$

とおき、

$$\begin{aligned} \eta &= h/b, & \xi &= x/b \\ \Omega^2 &= Q^2/(g b^5/\beta), & w^2 &= q^2/(g b^3/\beta) \\ n'^2 &= n^2/(\beta b^{1/3}/g) \end{aligned}$$

という無次元量を用いると、(1) および (2) 式より

$$\frac{d\eta}{d\xi} = -\frac{i - \frac{n'^2 \Omega^2}{\eta^{10/3}} (1 + 2\eta)^{4/3} + \frac{2w\Omega^2}{\eta^2}}{w \left(1 - \frac{\Omega^2}{\eta^3}\right)} = -\frac{f_1(\Omega, \eta)}{f_2(\Omega, \eta)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

という関係がえられる。この(3)式が様な浸透性水路における流れの力学的関係を表わす基礎方程式と

なる。この式の表わす水理学的特性は、すでに述べたように、特異点の方法によつて解析される。このためにまず、特異点の位置を求めると、それは(3)式の分母および分子をそれぞれ0とおいた式より与えられるから、特異点における無次元水深、無次元流量および無次元距離は、

$$i\eta_c^{1,2} = n^2\eta_c^{1,6}(1 + 2\eta_c)^{4/3} - 2w \dots\dots\dots(4)$$

$$\Omega_c = \eta_c^{3/2} \dots\dots\dots(5)$$

$$\xi_c = (\Omega_0 - \Omega_c)/w \dots\dots\dots(6)$$

と表わされる。ここに、添字の c および 0 はそれぞれ特異点および天井川が始まる点における値を示してい

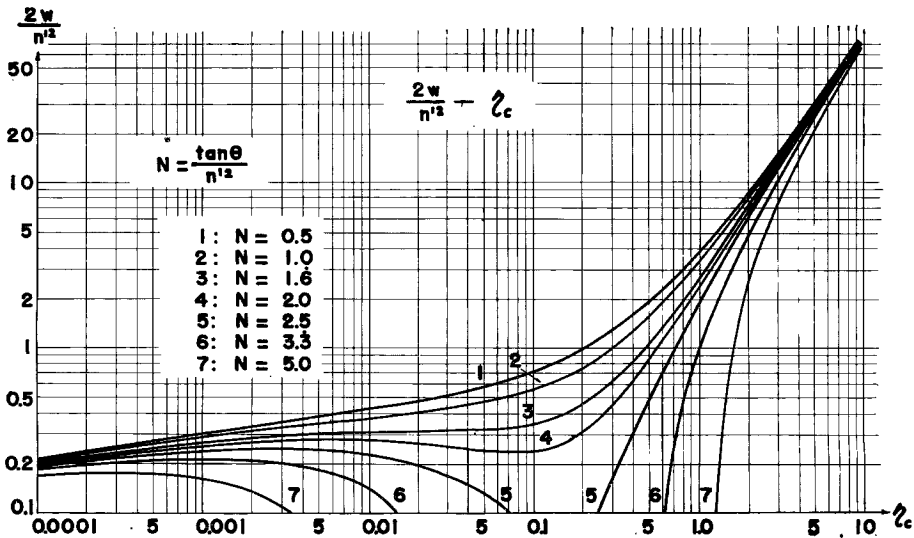


Fig. 1 Relationship between dimensionless depth of water and dimensionless seepage discharge at singular points

る。したがつて、特異点における無次元水深は一定の水路では河床構成材のもつ粗度と浸透係数とによつて一義的に与えられ、またその位置は水深のみならず天井川が始まる点における初期流量によつても変化することが知られよう。いま、種々の無次元粗度、無次元浸透量および河床勾配に対して(4)式より無次元水深を求めると、Fig. 1 に示すようになる。図より明らかなように、一定の河床構成材の水路では河床勾配により、また一定の勾配をもつ水路では浸透係数の大小により、特異点の数は1~3個となることがみられよう。また特異点の位置 ξ_c は(6)式より計算されるが、その1例として $\Omega_0^2 = 1 \times 10^{-2}$ に対する ξ_c の値を示したものが Fig. 2 である。この図において注目しなければならないことは、特異点の位置 ξ_c がほとんどの場合負の位置、すなわち天井川が始まる地点よりもさらに上流の山地流域にあらわれることである。このことは以下のように説明される。すなわち、天井川が始まった扇状地上端部の河道における流れの水理学的特性は、山地部河道内に仮想的に位置した特異点の数学的性質によつて規定される可能性があるということである。これは天井川の問題に限らず、ほとんどすべての場所的に流量が変化する流れとして分類される問題にあらわれることであつて、横越流せきや越流トラフでは、この点に注意を払つて水理設計を行なう必要がある。なお一例として、種々の w, Ω_0 に対する ξ_c の位置を詳細に計算して表示したのが Table 1 である。

水路における流れの水理学的特性を規定する最も重要な要素は、以上に計算した特異点のもつ数学的性質である。このためには、特異点の種類を分類し、それぞれの特異点の示す数学的性質を水理学的に解釈しな

ければならない。

いま (4), (5) および (6) 式によつて与えられる特異点へ座標原点を移動し, その近傍における (3) 式のもつ数学的性質を調べるため,

$$\eta = \eta_c + \eta', \quad \Omega = \Omega_c - \Omega'$$

$$\eta_c \gg \eta', \quad \Omega_c \gg \Omega'$$

とおくと, 近似的に (3) 式は,

$$\frac{d\eta'}{d\Omega'} = \frac{c\Omega' + d\eta'}{a\Omega' + b\eta'} \dots\dots\dots (7)$$

と表わされる。ここに,

$$a = 2w\Omega_c/\eta_c^3 > 0$$

$$b = 2w\Omega_c/\eta_c^4 > 0$$

$$c = (2/\eta_c^2)\{w + (i\Omega_c/\eta_c)\} > 0$$

$$d = 2\Omega_c(5i\Omega_c + 6i\eta_c\Omega_c + 4w\eta_c)/3\eta_c^4(1 + 2\eta_c) > 0$$

である。この (7) 式の特特性方程式の判別式は, 係数 a, b, c, d がいずれも正であるから, 常に正であり, またしたがつて特異点は鞍形点かあるいは結節点であることがわかる。特異点がそのいずれの種類であるかは $(ad - bc)$ の正負によつて分類されるから, 上式を用いて,

$$F(\eta_c) = 18w\eta_c^2 + (6i\Omega_c + w)\eta_c - i\Omega_c \dots\dots\dots (8)$$

とおくと,

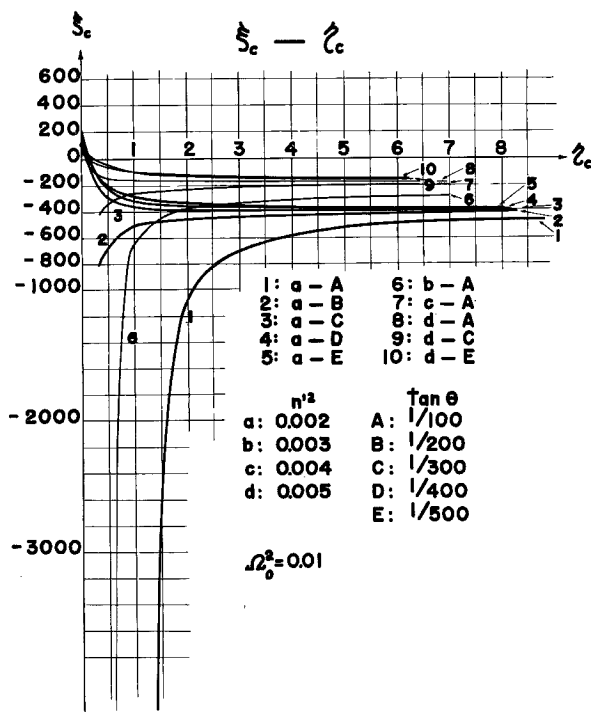


Fig. 2 Relationship between dimensionless depth of water and dimensionless distance at singular points

Table 1

$\tan \theta = 5 \times 10^{-3}, \quad n'^2 = 2 \times 10^{-3}$				
w	η_c	$\xi_c = (\Omega_0 - \Omega_c)/w$		
		$\Omega_0^2 = 0.01$	$\Omega_0^2 = 0.001$	$\Omega_0^2 = 0.0001$
5×10^{-2}	7.546	-412.58	-413.94	-414.38
2×10^{-2}	4.193	-424.30	-427.72	-428.80
1×10^{-2}	2.714	-437.11	-443.95	-446.11
5×10^{-3}	1.786	-457.37	-471.04	-475.37
2×10^{-3}	1.024	-468.11	-502.30	-513.11
1×10^{-3}	0.726	-517.95	-586.33	-607.95
5×10^{-4}	0.512	-532.71	-669.47	-712.71
2×10^{-4}	1.52×10^{-4}	499.99	158.10	49.99
"	1.84×10^{-2}	487.50	145.61	37.50
"	0.335	-469.48	-811.36	-919.48
1×10^{-4}	7.28×10^{-2}	803.57	119.80	-96.43
"	0.227	-81.53	-765.30	-981.53

$$F(\eta_c) \geq 0 \quad \begin{array}{l} \cdots \cdots \cdots \text{鞍形点} \\ \cdots \cdots \cdots \text{結節点} \end{array}$$

により判別される。

したがって、浸透性水路の幾何学的ならびに力学的特性がわかると、設計流量に対する流れの水理学的特性が(8)式の符号によつて決定されることになる。いま、実際の天井川における実測資料⁷⁾からえられた無次元浸透量および無次元粗度係数を基にしてこれをさらに拡張して考えれば、これらの値はほぼつぎに示す範囲にあると推定される。

$$\Omega^2 = 1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-7}$$

$$w = 1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-4}$$

$$n'^2 = 2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$$

このような値を用いて(4),(5),(6)および(8)式より計算される特異点の種類とその個数を無次元粗度および無次元浸透量の関数として示したものがFig. 3であつて、境界線を除いて特異点は1個あるいは3個あらわれ、どのような水路特性に対しても常に鞍形点が存在することがみられよう。

以上のようにして求めたFig. 1, 2, および 3 は天井川などのような浸透性水路が長方形断面をもつときの水理学的特性を与える重要な図表であつて、また以上の解析およびこれらの図よりつぎのような水理学的特性を明らかにすることができる。

(1) 天井川などの浸透性水路

路のもつ水路特性のなかで、流れに最も直接的な影響を与えるものは河道構成材の浸透係数であり、河床勾配、粗度係数などの特性は浸透係数に較べて比較的小さな影響を与えるにすぎない。

(2) 天井川が始まる点における初期流量および天井川の河道特性には関係なく、天井川の流れには常に鞍形点があられる。ところが、水理学的には鞍形点は支配断面を意味するから、支配断面の位置によつて流れの様相は決定されることになる。

(3) また、結節点があられるのは浸透係数が比較的小さい場合、すなわち水路が不浸透性に近づいた場合である。

(4) 理論上、鞍形点は一般的に仮想的な位置、すなわち天井川が始まる点よりもさらに上流の山地峡谷部にあらわれることが多い。したがって、天井川が始まる扇状地上流部における流れは、この仮想的な位置にある鞍形点の示す水理学的特性の影響をうけることになる。

(5) 鞍形点だけがあられるときは、特異点の数は1個であるが、結節点があられるときは必ず2個の鞍形点があられ、したがって特異点の数は常に3個であり、鞍形点、結節点、鞍形点の順序となる。

3. 天井川における水面形状

これまでの解析によつてえられた天井川の水路特性および初期流量と特異点の位置およびその分類との関

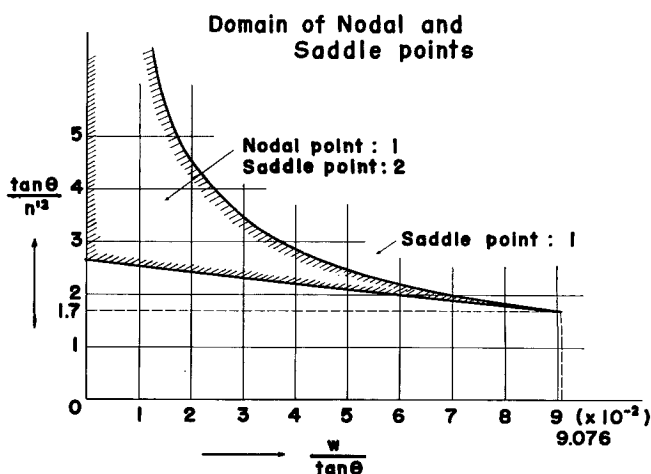


Fig. 3 Classifications and numbers of singular points in terms of channel characteristics

連性より、天井川のような浸透性水路における流れが種々の与えられた境界条件によつて示す水面形状を議論することができる。ところが天井川は山地溪谷部より急激に平地部へ流下するときあらわれるから、単に天井川となつている扇状地部の河道のみを対象として考えることは十分でなからう。したがつて、ここでは天井川における水面形状を上流部山地河川におけるものとの関連において考察をすすめることにする。

(1) 山地溪谷が緩勾配不浸透性水路であつて、これより天井川へ移行する場合

一般に山地溪谷部においては水路は急勾配であると考えられるが、天井川が発達しやすい地域の溪谷部はしばしば溪流砂防工事によつて緩勾配水路にきりかえられることがある。したがつて、まず山地溪谷部の水路が緩勾配であつて、平地部に至つて天井川が形成される場合の各種水面形状を境界条件との関連より考察をすすめる。この場合、一様な断面形状をもつ不浸透性水路はいわゆる限界勾配によつて緩勾配と急勾配とに分けられるが、浸透性水路においては、(2)式よりわかるように、普通に定義される限界勾配に浸透量が導入され、単に従来の緩勾配、急勾配などといった幾何学的な量のみで表示されなくなる。ところが、特異点の存在は、その性質より明らかなように、与えられた流量に対して水路の性格を規定するものであるから、浸透性水路部では特異点の種類によつて一応境界条件をあらわすものとする。

(i) 天井川に鞍形点のみがあらわれる場合 水面形方程式(2)の示す積分曲線と不浸透性水路におけるものとを組み合わせ示したすべての水面形状は Fig. 4 に示すようになる。このような例は、天井川の河床勾配が緩やかであるとき、粗度係数が大きいとき、あるいは浸透係数が小さくて天井川が不浸透性水路に近いときにあらわれる。Fig. 4 は水面形曲線のすべてを示したものであるが、実際にはこれらの曲線のうち、1 曲線のみが与えられた境界条件によつて示す水面形状となる。つぎに各種の境界条件によつて示される水面形状について考察をすすめよう。

a. 上・下流側に流れを調節するせき、ダムなどといった支配構造物がない場合。

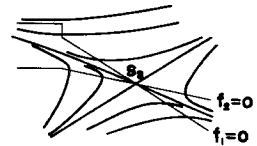
水面形状は Fig. 4 (1) に示す遷移水面形曲線によつて表わされる。明らかに鞍形点 S_s は支配断面の位置を示し、これより上流では流れは常流、逆に下流では射流となる。もし河道が限りなく続けば、流れは流下するにしがたい水深を減じ、やがてすべて滲透して河床に水はなくなる。この場合の水理計算は普通のように支配断面より上・下流側へすすめればよいことは明らかである。

b. 下流側に流れを調節する支配構造物がある場合、あるいは本川の影響が天井川に及ぶ場合。

これらの場合には水面形曲線は Fig. 4 (2), 4 (3), 4 (4) および 4 (5) によつてあらわされる。

いま下流側の条件によるせき上げが低いと、Fig. 4 (2) に示すような水面形状をもつ。せき上げの影響は鞍形点まで及ばず、鞍形点である支配断面より追跡した水深曲線と下流側の条件によつて規定される水深曲線とが共軛関係に達したところで跳水がおこる。すなわち、流れの状態は常流より射流へ遷移し、再び常流へ戻る。

またせき上げ高が高くなると、Fig. 4 (3), 4 (4) および 4 (5) に示すように、せき上げ高の影響が鞍形点



Remark.
 S_s : Saddle point.
 S_n : Nodal point.
 $f_1=0$: $f_1(x,h)=0$
 $f_2=0$: $f_2(x,h)=0$

Fig. 4 Schematic profiles of water surface when the stream flows down from an impermeable channel of mild slope to a permeable channel in which a saddle point occurs

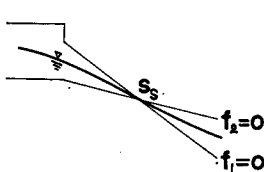


Fig. 4(1)

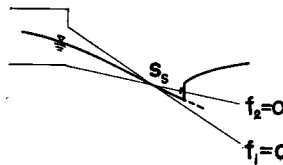


Fig. 4(2)

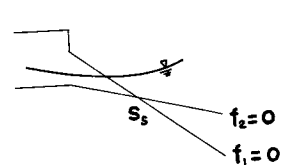


Fig. 4(3)

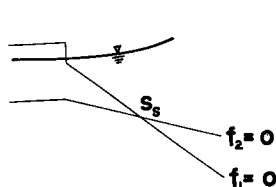


Fig. 4(4)

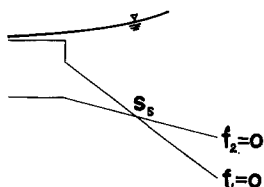


Fig. 4(5)

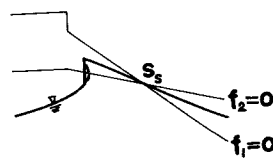


Fig. 4(6)

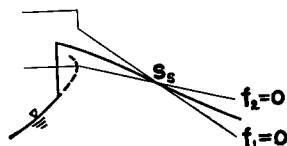


Fig. 4(7)

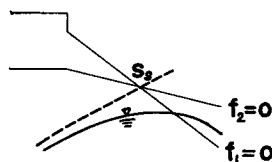


Fig. 4(8)

を越えてさらに上流の山地溪谷部にまで及ぶようになる。この場合には鞍形点よりも早水理学的な支配断面とならない。すなわち、天井川の流れは単に下流側の境界条件によつて定まることになる。

c. 上流側の山地溪谷部出口付近に樋門、水門などの水位調節を行なう支配構造物によつて Underflow を生ぜしめた場合。

天井川が始まる溪谷部出口付近には扇状地では表面水をえることがむずかしいから、かん漕用水用構造物としての樋門やその他の水門が設置されることが多い。このような条件における水面形状を图示したものが Fig. 4 (6), 4 (7) および 4 (8) である。

Fig. 4 (6), および 4 (7) は支配構造物による調節の度合いが比較的小さい場合、すなわち調節によつて生じた射流状態の流れの Froude 数が小さい場合を示した例であつて、天井川河道中に支配断面があらわれる状態を图示したものである。明らかに、天井川が始まる点の近傍で跳水がおこり、流れは一度常流状態に戻ることになる。

これに反して、支配構造物による水位調節が極端になり、Underflow のもつ Froude 数が大きくなると、天井川の流れは射流のまままで流下することになる。この例が Fig. 4 (8) であつて、このような場合には河床洗掘などの複雑な問題が惹起され、河道の維持・安定などに十分な注意を払つた工法をとる必要がおこる。

(ii) 天井川区間に結節点があられる場合 天井川の河床勾配が急になり、また粗度係数がそう大きくないとき、とくに浸透係数が大きくなつたいわゆる代表的な天井川においては、ここで論ずる型式がみられるようになる。この場合の一般的な水面形状は Fig. 5 に示すようになるが、天井川の始点はあたかも鞍形点であるかのような影響を流れに及ぼす。これは、すでに述べたように、結節点の前に鞍形点があり、それが実際には仮想的な位置、すなわち上流の不浸透性山地溪谷にあるから、あたかも天井川が始まる点が鞍形点であるかのような特性を示すのである。しかしながら、図からもみられるように天井川の始点付近では水面勾配が比較的急となるから、ここで考察をすすめているような第1次近似式のみでは、この付近の水理学的特性は十分に把握されないことも予想される。

前に述べた場合と同様な考察を進めると、このような浸透性水路における流れの特性もつぎのように分類されることがわらう。

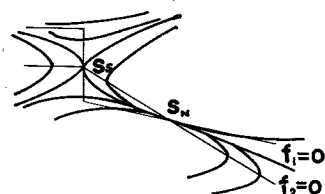


Fig. 5 Schematic profiles of water surface when the stream flows down from an impermeable channel in which a nodal point occurs

a. 上・下流側に流れを調節するせき、ダムなどといった支配構造物がない場合。

水面形状は **Fig. 5 (1)** に示すような遷移水面形曲線となる。山地より流下した流れは天井川区間に入つて常流より射流へと遷移し、再び常流に戻る。明らかに天井川が始まる点の近傍で支配断面があらわれるが、この場合とくに注意すべきことは天井川上流部では流れは射流状態であるから、床固めなどといった河床保護工法に十分な考慮を払わなければならないことである。

b. 下流側に流れを調節する支配構造物がある場合、あるいは本川の影響が天井川に及ぶ場合。

これらの場合には、下流における水位条件によつて異なる 4 種の水面形状、**Fig. 5 (2), 5 (3), 5 (4), 5 (5)** および **5 (6)** があらわれる。**Fig. 5 (2)** はせき上げによる影響がほとんどない特殊の例であつて、理論的にいえば、射流から常流へ滑らかに遷移する場合である。せき上げによる影響がやや大きくなると、**Fig. 5 (3)** に示すようになる。この場合には特異点 S_N はも早流れの水理学的特性にはほとんど影響を及ぼさなくなり、天井川の始まる点の付近で常流より射流に遷移した流れはせき上げ背水の影響によつて、跳水現象を示すようになる。したがつて、天井川の上流部では射流ならびに局所的な跳水現象があらわれるから、河道の維持安定には十分な注意を払う必要が生じることはいうまでもない。せき上げ高が極めて大きくなると、**Fig. 5 (4), 5 (5)** および **5 (6)** に示すような水面形状がえられる。この場合には、下流端における境界条件が天井川を越えてさらに上流の山地溪谷部にまで影響しており、河道計画は (i) - b. で述べたように行なえばよい。ここに **Fig. 5 (4)** および **5 (5)** は山地溪谷部で低下背水曲線となる例を、また **Fig. 5 (6)** はせき上げ背水曲線となる例を図示したものである。

c. 上流側の山地溪谷部出口付近に樋門、水門などの水位調節を行なう支配構造物によつて Underflow を生ぜしめた場合。

水面形曲線は **Fig. 5 (7), 5 (8), 5 (9)** および **5 (10)** に示すようなものである。ここに、**Fig. 5 (7)** は支配構造物による流れの調節の割合が小さい場合を、また **Fig. 5 (8)** および **5 (9)** はそれが大きい場合を例示したものである。いずれにしても天井川区間の流れは射流であり、また後者の例ではその程度が大きいため、すでに述べた同様の場合と同じ注意を払う必要がある。とくに **Fig. 5 (10)** の例のように極端な調節を行なえば、天井川区間の流れは特異点が直接的には流れの様相に影響を与えないほどの極度の射流となるか

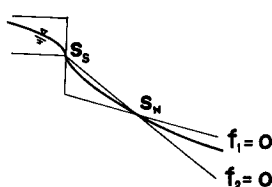


Fig. 5(1)

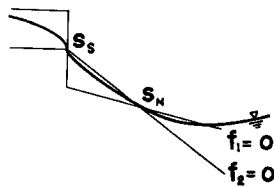


Fig. 5(2)

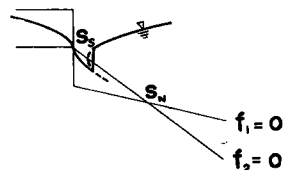


Fig. 5(3)

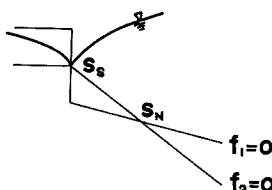


Fig. 5(4)

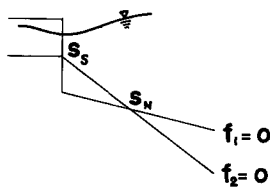


Fig. 5(5)

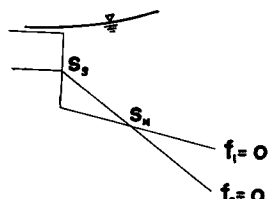


Fig. 5(6)

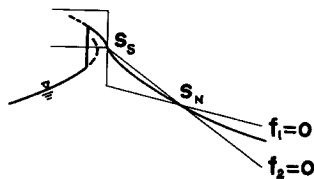


Fig. 5(7)

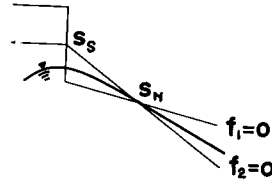


Fig. 5(8)

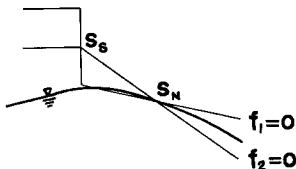


Fig. 5(9)

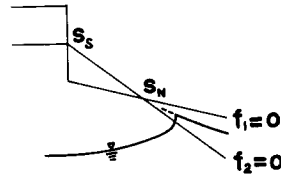


Fig. 5(10)

ら、天井川の護岸、床固めなどには万全の策を講ずるようにしなければならない。

(2) 山地溪谷部の急勾配水路から天井川へ移行する場合

山地溪谷部において急勾配水路をもつた河川が平地部へ出て天井川となる場合であつて、一般にみられるもつとも普通の例である。このような例において、もし天井川区間に特異点があらわれるならば、それは結節点でなければならない。というのは山地の不浸透性水路はすでに急勾配であるから、限界水深曲線の位置は等流水深曲線のそれより高いはずであり、また天井川へ移行する場合天井川区間における限界水深曲線は不浸透性水路のそれと連続しているから、特異点において限界水深曲線は等流水深曲線の上より交わることになるためである。したがつて、上流部の山地河道に仮想的な鞍形点が存在し、天井川区間における水路の水理学的特性は射流水路および結節点によって代表されることになる。さらに 1 個の鞍形点が天井川下流区間に存在するが、これは Fig. 1, 2 よりもわかるように極めて水深が浅いところにあることになる。

こうした場合の水面形状を一般的に図示したのが Fig. 6 であつて、下流側の鞍形点による水面形状は省略している。この例において各種の境界条件に対する特定の水面形状も前節までに考察をすめた方法にしたがつて求めることができるが、これらを図示したものが Fig. 6 (1), 6 (2), 6 (3), 6 (4) および 6 (5) である。明らかに、Fig. 6 (1) は上・下流に流れを調節すべき支配構造物のない場合の水面形状を示し、Fig. 6 (2), 6 (3) および 6 (4) は下流側に支配構造物を設置してせき上げ背水を作つた場合のものである。また Fig. 6 (5), 6 (6) および 6 (7) は上流側に支配構造物を設置し、流れを Underflow とした場合の調節の度合に対応した水面形状を表わしたものであることはいうまでもない。

これら各種の水面形状をみてわかるように、相当なせき上げ背水を人為的に与えない限り、天井川の流れは一般に射流であり、このことが天井川の河道改修計画に重要な意義を与えるものであることが予想される。すなわち、天井川の流れは極端な例を除いては一般に射流であるから、従来より経験的に考えられているように射流を対象とした河道改修工法によるべきであつて、射流現象は位置のエネルギーに較べて運動のエネ

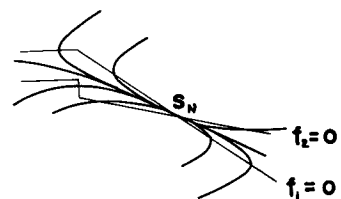


Fig. 6 Schematic profiles of water surface when the stream flows down from an impermeable channel of steep slope to a permeable channel in which a nodal point occurs

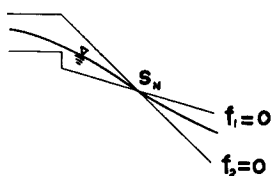


Fig. 6(1)

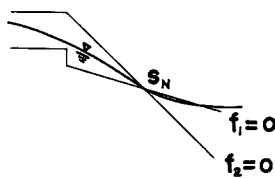


Fig. 6(2)

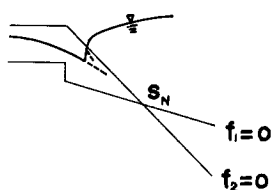


Fig. 6(3)

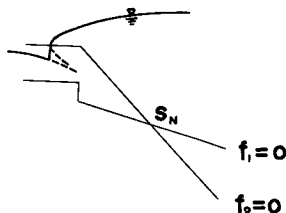


Fig. 6(4)

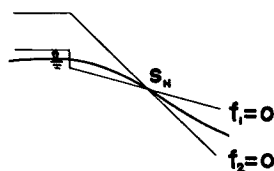


Fig. 6(5)

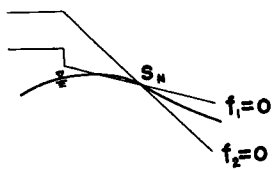


Fig. 6(6)

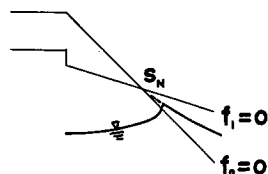


Fig. 6(7)

ルギーが大きくなることによつて代表されるから、そのような流れの運動エネルギーに対抗しうる護岸、床固め工法などを用いなければならないことになる。

以上は天井川にあらわれる各種の水面形状を与えられる多くの境界条件との関連において論じ、それぞれの示す水理学的特徴を比較したものである。ここでは、単に特異点が1個あらわれた場合について例示したが、それが結節点である場合には必ず下流側に1個の鞍形点があらわれるはずであるから、実際にはこれをも含めた水面形状を図示しなければならない。

実際の天井川においては、ここで述べたような単純化したモデルとは考えられない例が数多く存在するから、それらについては一つ一つ特定の条件にしたがつて解析をすすめなければならない。とくに天井川が床固め工などによつて幾段にも区切られる場合には、特異点があらわれないことが多い。このような場合でも流れの水理学的特性はその本質においては何ら変わることなく、以上の図例において特異点の付近を除けば個々の天井川区間における水面形状を表わすものとなり、床固め工という水理学的な段落ちが規定する条件によつて、水面形曲線をつなぎ合わせれば全天井川における水面形状を示すようになることはいうまでもない。さらにまた、浸透量が一樣でない場合、たとえば水深に比例するような場合も全く同様に取り扱えることは明らかであつて、これについてはボトム・インテーク工法による流量配分法として、別の機会に論じたいと考えている。

4. 結 論

この研究においては、天井川のような滲透性水路における流れのもつ水面形状を山地溪谷部の不浸透性水路におけるものとを組み合わせ、各種の境界条件によつて示す流れの特性の理論的な考察を行なつた。また

さらに、それらの結果を用いて天井川河道計画において注意すべき諸点について若干の説明を加えた。

すでに述べたように、実際の天井川はここで考察を加えたような単純なものではなく、それぞれの地域に対応した特定の河道特性をもつたものである。しかしながら、河道がどのような複雑なものであつても、その流れの基本的原理に変わりはないから、ここで用いた解析法を応用して流れの水理学的特性を明らかにすることができる。著者らは、現在実験的研究を行なつて以上に示した理論的解析の結果を比較検討しているが、それらの成果を十分に考察して近く天井川における河道設計法を明らかにしたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) de Marchi, G. : Saggio di teoria sul funzionament degli stramazzi laterali, L'Energia Elettrica, Nov. 1934.
- 2) Mostkow, M.A. : Handbuch der Hydraulik, VES Verlag Technik, Berlin, 1956.
- 3) Mostkow, M.A. : Sur le calcul des grilles de prise d'eau, La Houille Blanche, Grenoble, Sept. 1957.
- 4) Nosedo, G. : Operation and Design of Bottom Intake Racks, Proc. 6th General Meeting, IAHR The Hague, Netherlands, Vol. 5, 1955.
- 5) 岩佐義朗 : 開水路における定常流の一般理論について, 土木学公論文集, 第69号, 昭35.7.
- 6) Iwasa, Y. : Hydraulic Significance of One-Dimensional Method of Hydraulic Analysis for Free Surface Flows, paper presented to Seminary b, 9th General Meeting, IAHR Dubrovnik, Yugoslavia, Sept. 1961.
- 7) 沢田健吉 : 不動川の流出特性について, 京都大学工学部土木工学科卒業論文, 昭31.2.