

流路設計法の再検討

教授 荻原 貞夫

Sadao OGIHARA :

Reconsideration of Design of an Open Channel

目 次

主 旨	15	Ⅳ 石径 b の問題	18
I 序 説	15	Ⅴ 勾配 I の問題	22
Ⅱ 直接解法への接近	16	Ⅵ 設計の直接性——結論	23
Ⅲ 流速 V の問題	17		

主 旨

洪水に対して安全な流路を設計する方法を、従来の試索的のものから直接的にする試みであつて、その 1 部はすでに東京大学演習林報告第 43 号に“*A Direct Method of Designing an Open Channel*”として発表した。その後、本学学生の砂防実習に際し、この問題について種々の質問がなされ、解法の不確定さが痛感された。察するに、実際の現場事業に従事する技術者の間にも同じような疑問を抱く人が多いに違いないであろう。

問題は複雑で決定的に正確な答は出し得ないにしても、設計に当つても少し容易に応用できる確定的な方法を示すことは望ましい。この点について、砂防工学教室では折に触れて研究論議を重ねており、現在までに本文に紹介する程度のことがまとまつた。未完成ではあるが、少しでも早く現場技術者の役に立てたいとの考えから、一応発表することにした。ゼミナールに参加する人々は助教授 野口陽一、助手 山口伊佐夫、大学院学生 塚本良則、及び砂防専攻学生の諸君であり、その研究に対する熱意と活潑な意見の開陳には常に感謝している次第である。

なお、本文中には先に掲げた報告中の記事の引用が多く、説明の都合上重複した箇所も少くないことをお断りしておく。

I 序 説

本文にいう流路とは、主として砂石¹⁾の流送の激しい荒廃溪川の流路を指す。その溪床は砂石の堆積よりなつていて、それらは常に交代している。このような流路を安全にするということは次の 2 つの点、すなわち

1) 砂石とは、荒廃溪床にある大小様々の土砂石礫を総括していうもので、簡単には砂礫と記したいところであるが、礫の字が当用漢字から削除されているので、砂石と記すことにした。

- (i) 予想の最大流量を完全に疎通し、
- (ii) その際に溪床侵蝕を生ぜしめない。

ようにすることである。

以上の条件を満足する安全流路の設計には、次の方法が採用されている。それは F. Wang 氏の著書 “Grundriss der Wildbachverbauung” 中にあり、故諸戸北郎博士が著書「理水及砂防工学」の中に紹介したもので、要約すれば次のようである。

最初に行うべきことは、

将来起るであろう最大流量 Q の推算 である。

これは溪流及び河川工学上はなほ重要な問題で、これだけでも充分研究価値はあるが¹⁾、本文では触れずに適当な方法で推算値が得られるものとする。

Q の推算値が定まつてから、後の計算には従来次の 2 通りの方法が考えられている。

第Ⅰ法 i V の仮定

- ii 適当な平均流速式 $V=f(C \cdot R \cdot I)$ から平均水深 R の算定²⁾
- iii $A=Q/V$ から横断面積の算定
- iv A と R に適合するように、横断面の形状を試作する

第Ⅱ法 i 横断面形状の仮定 これにより A と潤辺 p が定まる

- ii $R=A/p$ より R の算定
- iii $V=f(C \cdot R \cdot I)$ より V の算定³⁾
- iv $Q=AV$ より Q を計算して、予想のものに一致するか否かの検定
- v (iii) の V は流路を破壊しない程度であることの検定
- vi 前 2 項の検定に不合格ならば、(i) からやり直す

前記の 2 法中Ⅱの方法が広く用いられている。

Ⅱ 直接解法への接近

§Ⅰに於ける第Ⅰ法は第Ⅱ法より一層直接的であるのに、後法の方が多く用いられて来た。第Ⅱ法では結局後で流速の検定を行うのであるから、始めから限界の流速を定めておいて第Ⅰ法による方が賢明のように思う。さらに、第Ⅰ法に以下述べることを附け加えれば、その直接性は一層高められる。

-
- 1) 荻原貞夫：増水曲線の研究，東大演習林報告 第 47 号 昭和 29 年 11 月
 - 2) C は流速係数。また勾配 I が与えられなければ、第Ⅰ法 (ii) の R 及び第Ⅱ法 (iii) の V の算定はできないが、この I の決め方については簡単に考えている。§Ⅴに於て詳しく説明する。
 - 3) 上 2) に同じ

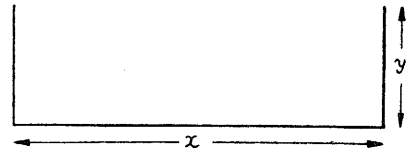
流路横断面積 A と平均水深 R が求められた場合に、これに適する横断面の形状の決定は試行的に行う必要はなく、次のように直接にできるのである。

(i) 矩形横断面の場合

$p=A/R$ から p を求めれば

$$xy=A$$

$$x+2y=p$$



の連立方程式が得られるから、これを解いて

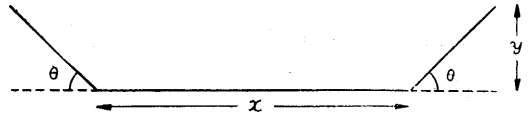
$$y = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - 8A}}{4}$$

ここに $p^2 < 8A$ ならば解はない。また、根号の前の附号は流路として一層適当な形を与える方のものをとる。

(ii) 梯形横断面の場合

側面の傾斜角を θ とすれば

$$\begin{cases} (x+y \cot \theta)y=A \\ x+2y \operatorname{cosec} \theta=p \end{cases}$$



これを解いて

$$y = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - 4(2 \operatorname{cosec} \theta - \cot \theta)A}}{2(2 \operatorname{cosec} \theta - \cot \theta)}$$

$\theta=45^\circ$ ならば

$$\begin{cases} (x+y)y=A \\ x+2.83y=p \end{cases}$$

$$y = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - 7.31A}}{3.66}$$

根号内が負ならば解はなく、またその前の附号は良い形を与える方をとることは (i) と同様である。

Ⅲ 流速 V の問題

第Ⅰ法では最初に V を仮定するが、第Ⅱ法では假定横断面を通過する V を計算して、後でこの大きさの検定を行う。何れにせよ、 V は一定の大きさ以上であつてはならない。それは侵蝕を起さぬためである。この意味から V は限界流速といつてよい。この限界を定めるには、

- (i) 流路構成材料と限界流速との関係を示す既成の表による法
 - (ii) 限界流速に関する理論式によつて算定する法
- の2通りがある。

(i) によるとすれば、すこぶる簡単で適当な表さえあれば何らの手数を要しない。この種の表はいろいろの研究者によつて発表されているが、溪流工事設計に应用する場合にどの値を用いる

かに迷わざるを得ない。実例を示せば次表のようであり、吾々が設計の対象とする荒廃溪流の新しい土砂石礫の堆積で構成されているような溪床には適用困難である。

水路構成材料	限界平均流速 m/sec
細微土, 泥土, 陶土	0.10
細微砂	0.15
埴土	0.25
壤土	0.45
珪砂土	1.00
礫土	1.25
礫岩及び片岩	1.85
水成岩	2.25
硬い火成岩	3.15

(諸戸北郎：理水及砂防工学（本論）p 225 より）

(ii) によれば、各々の石に対する限界流速式を用いて計算するのであるから、一層理論的といわれる。ただし、如何なる石を対象とするかに問題はありますが、この点は後に詳述する。

石に関する限界流速公式は

$$V_l = \sqrt{\frac{\beta b (d-r)(f \cos \alpha - \sin \alpha)}{r}} \quad (1)$$

ただし V_l ……限界流速

d ……石の比重

r ……流水の比重

α ……溪床傾斜角（厳密には水面勾配であるが、等流と見なして近似的に等しとおく）

f ……石と溪床との間のマサツ係数

β ……石の形状に関する係数

b ……石の径（問題があるが後述）

こゝで (1) 式を実用目的から簡単化するために、溪床勾配を無視して $\alpha=0$ とし、石の形状を方体と球体として

$$\beta = \frac{1}{0.08} \sim \frac{1}{0.04} \quad (\text{m/sec}^2)$$

さらに $f=0.75$, $d=2.5$, $r=1$ とすれば,

$$V_l = \underbrace{3.7 \sim 5.3}_{\text{平均 4.5}} \sqrt{b} \quad (\text{m/sec}) \quad (2)$$

の式が得られる。係数は安全を希望するならば、小さい方の値をとる。

Ⅳ 石 径 b の 問 題

b は石の長径とするもの、中径とするもの、或いは単に径としているもの、などがある。Wang の限界流速理論に従えば、長径は流水の方向に平行するものと考えて、これを b としたのに対

し、伊藤武夫博士は楕円体などでは長径は流水の方向へ水平的に直角をなし、中径が平行すると考えて、これを b とした。後者は恐らく転動する場合、或いは障害物によつて留る場合の在り方によつたものと想像される。単に径という場合には、どの径を採用してよいか解らないが、球体に近いものならば問題はなく、その他の場合には 3 径の平均値を採るのが常識であろう。従つて特に平均径と断つているものも少なくない。しかし b を定める場合に、ただ 1 個の石によらずに数個を採用するときにも、やはり平均径と呼ぶことに注意を要する。何れにせよ b を小さく選べば、限界流速は小さくなり、これを基として設計される流路横断面及び希望する勾配の侵蝕に対する安全度は高まる。

石の交代が起る溪流の侵蝕に関する問題を解く場合には、予想流量に次いでこの b の選定が重要といえる。これによつて限界流速を算出し得るからである。従来、例えば流路安全横断面の設計などでは、先ず流速を仮定し、しかも後にこれを侵蝕に対して安全であるか否かを検定して不合格ならば設計のやり直しをする方法が行われていた。後に検定をするくらいならば、最初に限界流速を求めておく方が賢明であり、これには b を手懸りとするのが近道である。

次に本質的の問題は、考える溪床に安全横断面或いは侵蝕に対して安全な勾配を設計する場合に如何なる石の b を採用するかである。要する予想の最大流量の際の流速を限界流速とするような石の大きさを知りたいのであるが、この手懸りは現在の溪床を構成する砂石に求めるより他に方法はないであろう。しかし、溪床には種々様々の大きさの石が存在するのが普通であるから、設計資料として用いる石の選び方も一定しない。このように、本問題に対する決定的な解答は未だ下されておらないのである。実際に設計をするに当つて、この b の選定は常に問題となるところであるから、次に 1 つの試案を示すことにする。

先ず b の関係する公式は

$$\text{限界流速式(簡易式)} \quad V_L = kv\sqrt{b}$$

であつて、 b の大→小に伴つて大→小の変化をする。従つて b を小さく採れば、それだけ V_L は小さくなる。このことは、溪床侵蝕という点では設計の安全度を増すわけである。勿論、安全度ばかりを考えて、工費の点を無視したのでは、非実際的な設計に終つてしまう。こゝに安全度の点から許容し得る最小の b の大きさの選定ということが問題となる。次にその実行方法について述べるが、こゝでは従来に行われていた方法を批判しつつ、新しい考え方を紹介することにした。まず

(i) 溪床にある最大の石を採用する方法 がある。

b として最大のものを採用すれば、 V_L 及び I は最大となり、最も経済的な設計ができることはいふまでもない。最大の石といつても、上流から流水による各個運搬の法則に従つて流下したと考えられるものでなければならぬことは勿論である。このような最大の石を採用するという論

抛は次の点にあると思われる。すなわち、その最大の石は何時かの大水によつて流されて来たものである。従つて、設計に當つて将来起ると予想される最大流量の際にも恐らくその程度の石の限界流速に相当する流速は生じ得ると考えてよからう。そうすれば、その限界流速に相当する石、すなわち現在溪床に存在する最大の石は上流から流下して来る可能性はあると見てよい。最大の石が流下して来れば、それ以下の石と交代する。その量が充分あつて、考える区間全部がこの最大の石で被われたとすれば、もはや侵蝕は生じない。

Wang の法則によれば、一度飽和に達した流水はその後に石の交代はあつても、取捨同量の故に溪床を損じないとある。従つて、上流より来る流水が最大の石で飽和されている場合か、一步譲つて少くともその中に最大の石を含む飽和状態ならば、侵蝕は生じないことになるから、最大の石の b を採用してよいことになる。しかし、自然勾配に関する新しい考え方からすれば、飽和という現象は各々の石について瞬間的に存在するだけである。そして溪床上にある石の中、その限界流速が流水の速度より小さいものは、引きつづき小さいものから順次に流送される。流水は含有砂石の増加に伴つて流速を減じていき、含有しているものの限界流速に等しくなれば、その石が沈む。かようにして流水は一方に於て小さい石を流送すると同時に、他方に於ては流送して来たものの中の大きいものから順次に沈めていくのである。従つて、上流から最大の石に相当する大きさのものだけが流下して来る場合の外は、当然侵蝕が起ると考えてよい。最大の石の他に小さい石を含んでいる場合にも最大流量が相当長い期間続き、その間に溪床を被うに充分な最大の石が流下して来れば、結局に於て最大の石に相当する勾配になることも確かである。上に用いた溪床を被うという言い廻し方は、厳密には構成するという方が適當である。何故ならば、最大の石より小さい石は平均水深が等しければ緩かな勾配を造るから、最大の石で被われた一層急な勾配を造るには、溪床を被うに充分な量より多量に要するからである。

最大流量継続期間を通じて、最大の石の補給が充分であるとの仮定を認めても、なお最大の石による流床被ふくが完成するまでには、一時的ではあるにせよ所望の勾配より緩かな勾配の形成されることはあり得て、このとき危険な状態が起る。例えば、階段ダムの場合に上流にあるダムの基部が露出するなどで、これが大出水の最中であるだけに、底抜けや倒壊を起し易い。最も不合理な点は、最大の石と断つてある以上、他はそれより小さいはずである。過去に於て流下した僅かに 1 個の最大の石が将来起ると予想される最大流量の場合に、考える溪床全部を被うに充分なだけ流下して来ると予定するのは行過ぎといわなければならない。かように、溪床上にある最大の石を標準とする方法は、安全度の点で不満足であるとして次の方法が考えられた。

(ii) 溪床の大部分を占める石から選ぶ法

この種の思操は別に新しいものではなく、「最も多く存在する」ものといった表現は、かなり古くから見えていた。しかしこれではすこぶる不明瞭である。最も多くといつても、数の点か、面積的か、或いはまた体積的か解らない。このうち数の点は問題にはならない。一般には小粒のもののほど数は多いからである。次に、面積的に多いというのは意味があり、筆者自身もかつて「面積的に見て溪床を支配しているもの」との言い表わし方を用いたこともあつた。この場合には、支配する石が等大ではないから、その中の小さいものを選ぶほど安全になる。この限界を定めるには、工費の点を考慮に入れる必要があり、この詳細は (iii) に述べる方法に準ずる。

数量的より面積的の方が合理的である理由は、面積的に広い部分が安定することが溪床全体として見た場合の侵蝕に対して一層安全なことを意味するからである。

更に労を惜しまないならば、現在の溪床の下部にある古い堆積層までも考慮に入れれば、一層合理的であり、これが次の (iii) 考え方である。

(iii) 溪床下の堆積も含めて選石する法

先ず本論に入る前に、溪床下の堆積体の構造について考えてみる。少しく古い堆積の縦断面を見ると、粒径の異なる石の互層から成っている場合が多い。これは、上流の侵蝕状態の変化に伴う溪床下砂石の大きさの差異に基因するが、この他にその地点の溪巾の変化や、さらにその上流の溪巾との関係なども影響する。しかし、結局はその地点に於ける水の流れ方、とくに流速が決定的の因子といわれる。大石の層は大きい流速のときにでき、小石の層は小さい流速に対応したものと考えてよく、他の条件が一定との仮定を許すならば、前者は大出水の場合に、後者は小出水の場合の構成と見ることができる。

ここで参考までに次のことを附記しておく。それは、もし Wang 氏以来の「流水による砂石の各個運搬の法則」を認めるとすれば、大石層上の小石層は次の大出水の際に大石と交代すべきであるから、溪床の堆積は流量の大きさの順に最下部から上部に向つて配列すべきではないかということである。すなわち、過去に於ける最大の流量に対応する大石の層が最下部を占め、その上には第2番目に大きい流量に対応する第2の大石の層が乗り、さらにその上には第3番目のものといった具合である。相隣る階級の間に構成される一層小さい流量に対応する石層は、その後の一層大きい流量の際に一応流下されるとの考え方による。しかし、現実には大石の層の下に小石の層があつたりしている。このような互層が構成されるのは、主として次の理由によるものと思う。すなわち、問題の層が極めて薄い場合は、次の流量増加の場合にその総てが流送され、一層大きい石と置き代ることもあろう。しかし、その層が相当の厚さを持つ場合には、大きい流量による石の交代が生じて、前の層の凡てを侵蝕しない内に大石の層で被われてしまえば、その下部の小石層はそのまゝ残ることになる。

再び本筋の選石の問題に入るが、要するに溪流の堆積を立体的に調査して、その中から適当な

大きさを採用するのが理想といつても、厚い堆積層になれば実施上の困難を伴う。また、将来流下して来るであろう石は、溪床下の或る深さまでの間の堆積物に近似で、余り深い部分のものは時代的の隔りがあると考えられる。そこで適当な深さを定め、これより上部の溪床を立体的に見て、最大の石を含む層の中から選石すればよいと思う。最大の石を含む層を採用したのは、その層が他の層より大きい石で構成されているからに他ならない。こうして、最大の石から順次小さい石を含めていき、それらが大体溪床を被うと思われる石径の下限を定める。この際、石の間に細粒の砂などがあつても、これは無視してよい。それらは流量が減少する頃か、或いはその後の小流量の際に堆積したもので、最大流量の時の溪床侵蝕には殆んど影響がなかつたと考えられるからである。以上のような方法で、資料としての石の下限界が求められたならば、その下限界の石径を採用すれば安全度が高まり、工費の節約の要求が強ければ、それ以上の石を採用する。ただし、この場合には将来起るであろうと予想される最大流量は、大石を充分多量に運搬して来ることを期待するのである。しかし、最大石径を採用することの危険さはすでに述べた。

上述の方法を精密に行うとすれば、溪床の縦断面を処々に作つて調査する必要がある。簡単に行うには、現在下方侵蝕の盛んな部分に自然に現われている縦断面を利用し、また平面的には流路の中の狭い部分に現われている大石の溪床構造から判定することもできる。要するに、近い過去に於て発生した最大流量の時に大量に流下して来た比較的に大きい石を知ることが目的である。将来発生する予想の最大流量の時に、そのくらいの石は多量に流下して来て、問題の流路に一時的にも激しい侵蝕が生じない内に、希望の径及びそれ以上の径の石で予定の溪床勾配を形成するものとの考え方をするのである。

V 勾 配 I の 問 題

勾配は水理学上では水面勾配になつてゐるが、問題の区間では等流をなすものと仮定して、溪床勾配とする方が便利である。従来、この勾配の決め方について確定的な方法が示されていない。例えば、§ I に述べたように、第 I 法の (ii) 及び第 II 法の (iii) では、何れも平均流速式を用いているが、この中に含まれる I については、何ら立入つた説明がされていない。現在の溪床勾配を採用するか、これより緩かにするか、或いは急にするか、もし現在のものと変えたとすれば、どのくらいにするか、これらの点に関する明確な指示がないのである。それならばどう考えるかがこれからの問題である。

この I の決め方そのものを説明する前に、本問題すなわち流路の設計に用いる最も主要な公式は何であるかを考えると、結局流速 V を限界流速 V_l とした場合の流速公式

$$V_l = C\sqrt{RI}$$

といふことができる。ここに V_l は § III に述べたように石径 b の函数であり、また R は流路横

断面の大きさと形状が与えられれば定まる値である。従つて上式は石径、横断面、勾配の3者の関係を表わす式と考えてよい。この内で石径は主として上流から問題の流路に供給されて、その溪床構成に与るものであるから、最初に決定しなければならぬ性格のものである。これを定めれば、 V_i も定まるから、残る問題は横断面 (R に関係ある) と勾配の相互関係に縮少される。すなわち、横断面と勾配はその何れかを定めれば、他は自から定まるものである。この簡単な事柄を明確にしておくことが設計を円滑にする所以なのである。しかし、横断面の形状と勾配の何れを先に決めるかは、現場の状況や設計の方針によつて異なる。例えば、良いダムサイトがあればこれを利用するのが有利であるから、放水路の幅は自から先に定まる。これと反対に、或る区間の溪床固定の計画に当り、経費を節約する目的で新しく形成される溪床の勾配を先に予定する場合もある。何れの場合にも、設計者は現場の事情や予算を勘案して希望の設計をするのに何ら躊躇の必要はない。残る因子は後の計算によつて自然に定まるからである。残りの因子の計算値が現場の状況に当てはまらなかつたり、或いは多額の工費を要するような場合には初めの希望条件を多少変更して、残りの因子の計算値を補正していくだけのことである。

Ⅶ 設計の直接性——結論

これまでに述べたところを総合すれば、流路の安全横断面の設計は従来一般に採用されていた方法に比して、一層直接的にできることが解ると思う。ただし、この直接法でも最後に決定する因子の計算値が現状に不適當の場合、或いは計算不能の場合も起る。これらの場合には、再計算を行うことになる。しかし、流速も勾配もさらに横断面さえも仮定或いは仮設計による試算計算の反ぶくを要する今までの方法に比較するならば、はるかに合理的といふ得る。次に、新しい方法による設計の順序を記する。第Ⅰ法は、先に横断面を決定して、後に勾配を計算上求める方法で第Ⅱ法に比して一層直接的であるが、勾配の計算値が余り緩な場合には不経済であり、余り急な場合には、場所によつては土砂による埋没の害を引起すことがある。第Ⅱ法は勾配を先に決定して後に横断面を定める方法で、横断面積 A と計算上求められる R とから水深を計算する場合の2次方程式解法に於て虚根が求められたり、または現場に則しない横断面の形になつたりすることがある。不当な解の場合に再計算の要のあることは、前節に断つてある通りである。

第Ⅰ法

1. 最大流量 Q の推算
2. 石径 b の選定
3. 限界流速 $V^{(1)}$ の計算 ($V = k\sqrt{b}$ による)
4. 横断面積 A の計算 ($A = Q/V$ による)

1) §Ⅲ及び§Ⅳでは V_i としている。

5. 横断面形状の設計 (A に適合するように)
6. 平均水深 R の計算
7. 勾配 I の計算 (流速公式を変化した $I = V^2/C^2R$ による)

Bazin 旧式によるとすれば

$$C = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \frac{\beta}{2}}}$$

であるから

$$I = \frac{V^2}{R^2} (\alpha R + \beta) = \frac{V^2}{R^2} (0.0004 R + 0.0007)$$

計算例

$$Q = 2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$b = 0.10 \text{ m } (\sqrt{b} = 0.32)$$

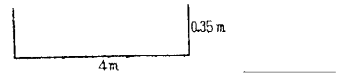
$$V = k\sqrt{b} = 4.5 \times 0.32 = 1.4 \text{ m/sec}$$

$$A = Q/V = 2.0 \div 1.4 = 1.4 \text{ m}^2$$

横断面の仮定 右図に示すようにに

$$R = A/p = 1.4/4.7 = 0.3$$

$$I = \frac{V^2}{R^2} (\alpha R + \beta) = \frac{1.96}{0.09} (0.0004 \times 0.3 + 0.0007) = 0.018$$



第Ⅱ法

1.
2.
3. 第Ⅰ法に同じ
4.
5. I を定める
6. R の計算 (流速公式を変化した $R = V^2/C^2I$ による)

Bazin 旧式によるとすれば

$$R = \frac{\alpha V^2 + \sqrt{(\alpha V^2)^2 + 4\beta IV^2}}{2I}$$

7. A と R を有する横断面形状の決定 (この直接法は § Ⅱにある)

計算例

$$Q = 2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$$

$$b = 0.10 \text{ m}$$

$$V = 1.4 \text{ m/sec}$$

$$A = 1.4 \text{ m}^2 \text{ は, 前例に同じ場合を考え}$$

$$I = 0.018 \text{ として } R \text{ を求めると}$$

$$R = \frac{\alpha V^2 + \sqrt{(\alpha V^2)^2 + 4\beta IV^2}}{2I} = \frac{0.000784 + \sqrt{0.00000061 + 0.00009878}}{0.036} = 0.3 \text{ m}$$

となる。

次に § II に述べた直接法により、矩形横断面の場合の幅 x と深さ y を求める。

$$A = 1.4 \text{ m}^2 \quad R = 0.3 \text{ m} \quad \text{として}$$

$$p = A/R = 4.7$$

$$xy = 1.4, \quad x + 2y = 4.7$$

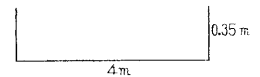
これを解いて

$$y = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - 8A}}{4} = \frac{4.7 \pm \sqrt{22.1 - 11.2}}{4} = \frac{4.7 \pm 3.3}{4}$$

$$y = 2 \text{ m} \text{ 或いは } 0.35 \text{ m}$$

流路の形として 0.35 m の方が適当である。

$$x = 1.4/0.35 = 4 \text{ m}$$



上記の方法で求められる勾配 I 及び横断面の形状は限界の値であるから、一層安全を期するためには I を一層緩かに、横断面を一層広くすればよい。

(昭和 30 年 12 月)