

## わが国における単位図の特性について\*

正員 工学博士 石原 藤次郎\*\*  
 准員 田中 要三\*\*\*  
 准員 金丸 昭治\*\*\*\*

## ON THE CHARACTERISTICS OF UNIT HYDROGRAPHS IN JAPAN

(JSCE March 1956)

*Dr. Eng., Tōjirō Ishihara, C.E. Member, Yōzō Tanaka,  
 C.E. Assoc. Member, Akiharu Kanamaru, C.E. Member.*

**Synopsis** The authors are now engaging in the studies on the runoff phenomena by unit hydrograph method, based on the results of hydrological observations in the Yura River, Kyōto Prefecture, from 1951 to the present. In this paper, the characteristics of unit hydrographs resulted from every storm runoff in the Yura River computed by usual practice were made clear. A few problems to be furthermore discussed were also indicated and considered to some extent.

**要旨** 本論文は、過去4年間由良川をモデル河川として行つた水文観測の資料を用い、従来の慣用方法で求めた各出水ごとの単位図について、比較検討を行つてその特性を究明するとともに、残された若干の問題点を指摘してある程度の考察を加えたものである。

## 1. 緒言

近年わが国においては、相次ぐ大水害にかんがみ、根本的治水対策の確立が要望されているが、そのためには洪水流出曲線を解析し、洪水の実態を適確に把握することがきわめて大切である。米国においては過去20年来、流出曲線解析法として単位図法が高く評価され、広く実用化されている。ところがわが国の河川は米国のそれといちじるしく性格を異にし、降雨の特性も相当違つているから、信頼すべき水資料にとぼしいことと相まつて、米国における単位図法をそのままわが国の河川に適用しがたいことはいうまでもない。そこでわが国の河川に適合した単位図と、その河川計画への応用を研究目標とし、由良川の大野ダム地点より上流(流域面積約350 km<sup>2</sup>, 流路延長40 km)をモデ

ル河川として、雨量計総数26(自記雨量計4, 普通雨量計13, 積算雨量計9)を設置するとともに、下流端の大野ダム地点に自記水位計を設けて流量を求めようようにし、過去4年間にわたつて詳細な水文観測を続けてきた。

こうして得られた観測結果を用いて、従来の慣用方法その他によつて作製した単位図は、以下に述べるように各出水ごとに変化することがわかつた。この事実は米国における単位図法がそのままわが国に適用しがたいことを実証するものであり、単位図法の適用に支障をきたすに至つた原因を究明するとともに、あらためてわが国河川に適應した単位図法を考えなければならぬことを意味するわけである。この論文は、こうした観点から研究の第一段階として、従来の考え方によつて単位図を作製してその変化の実態を究明し、さらに解決すべき若干の問題点を指摘したものである。

## 2. 由良川における単位図

Sherman および Bernard によつてそれぞれ提唱された単位図法および分布図法は、出水解析の水文図学的方法として最近大いに注目されてきたが、わが国河川への適用には上述のように多くの問題点があり、工学的な実用性に重点をおいたとしても、さらに詳細な研究を必要としている。このような研究の基礎段階として、由良川流域の水文資料から各出水ごとの単位図を求めた方法はつぎのようである。

(1) 流域概況と観測施設 由良川は標高776 mの三国嶽にその源を発し、丹波高原を西に流れ、福知山市付近で北折して日本海に注ぐ、流域面積約1500

\* 本論文は、石原・田中が“由良川出水の単位図的解析”として土木学会第10回年次学術講演会(昭.29.5.30)で発表し、田中が徳島大学工学部研究報告第5巻第6号(昭.30)に掲載したものに、その後の研究成果その他を加えて総合的な考察を行い、われわれの単位図法による河川流出の研究の目的と方針を明らかにしたものである。

\*\* 京都大学教授, 工学部土木工学教室

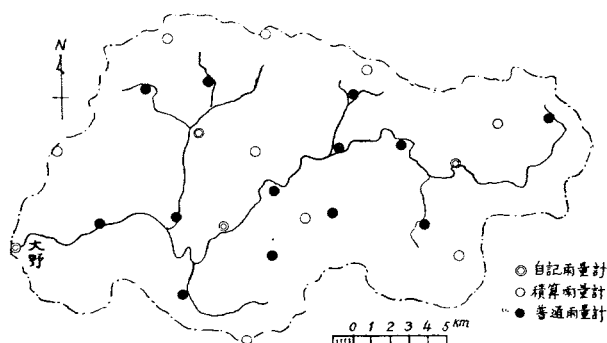
\*\*\* 徳島大学講師, 同

\*\*\*\* 京都大学助手, 同

km<sup>2</sup>の中河川である。本研究の対象として選んだ流域は、大野ダム地点より上流部であつて、流路延長は約40 km、流域面積は350.3 km<sup>2</sup>であり、標高300~800 m程度の比較的なだらかな形態をもち、ダム地点の標高は約160 mである。流域の大部分は山地で森林面積が多く、潤葉樹林がその過半を占めている。ダム地点より約16 kmの田歌より上流はV字型溪谷をなしているが、それより下流は谷が少しひらけ、それに沿つて若干の耕地も見られ、鶴ヶ岡をはじめとして一部には沖積平野もあつて、比較的緩やかな中流的形態の流れを呈している。大体において羽状河川であるが、支川の数が少なく、最大の支川棚野川でもその流域面積は全体の約20%を占めるにすぎない。地質は主として秩父古成層である。

大野ダム地点の流量曲線は、自記水位計の記録にもとづき、従来の水位流量曲線を用いて求めたものであり、雨量記録は図一1のように、平地に自記雨量計4および普通雨量計13、山地に積算雨量計9を設立して求めたものである。

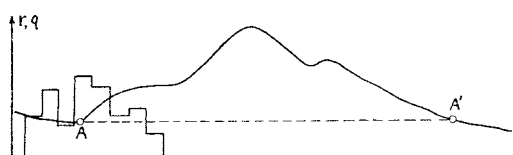
図一1 由良川流域の雨量計配置図



(2) 流出曲線の諸成分とその分離 降雨が流路に達するまでの経路によつて流出曲線の成分を類別すると、表面流出、中間流出、地下水流出および河道降雨の4つとなる<sup>1)</sup>。これらの成分はそれぞれ性格を異にし、降雨条件および河道条件の変動による変化もそれぞれ相違し、流出曲線の形は各成分の相対比によつて左右される。したがつて流出曲線を正確に解析するには、各成分に相当する部分をはつきりと分離する必要があり、Barnes<sup>2)</sup> や Linsley および Ackermann<sup>3)</sup> などの方法が提案されているが、各成分を独立に測定しがたい関係上、なかなか正確を期しにくく、単なる推定にすぎないことが多い。それでわれわれは河道降雨を表面流出に含め、中間流出も雨の降り方、特にその強度によつて流出状態がはなはだしく異なるなど、

表面流出と相似な性格をもつものとして、表面流出と一緒に考えて、これら三成分をあわせて直接流出とした。一方、地下水流出はその運動が地下水面の勾配によつて支配され、地下水面への流入量がその上の土壌の滲透能によつて左右されるから、降雨強度そのものには直接影響されないと考えられ、上記三成分とは別に基底流として取り扱うことにした。従つて直接流出と基底流とに分離するのであるが、その目的は一連降雨にともなう直接流出量を決定することであつて、特別な方法を用いてもその相違ははなはだしくないことを考慮し、個人差のはいらない一つの方法を一貫して適用することを重要視した。

図一2 流出曲線の分離法



こうした観点からここでは、図一2のように最も簡単で実用的な水平線 A-A' によつて、上の二成分に分離する方法を採用することにした。この場合一般に直接流出はかなり長い time base をもち、それが出水ごとに変化して、一連降雨による流出曲線の立上り点 A における流量に左右される欠点があるが、由良川では出水ごとの差異はほとんどなく、約5日の time base を与える結果となつた。なお、基底流は常に 100 m<sup>3</sup>/sec 以下と考えられ、その変化量は直接流出のそれに対しほとんど無視できる程度であつて、種々の出水に対して同じ time base を用いても、真の値との差は実用上さしつかえないほどわずかなものである。

(3) 降雨とその分離 降雨量は水文研究における最も基本的な資料であるから、多数の雨量計を流域内に均等に配置することが望ましい。このために図一1のように26の雨量計を設置したのであるが、降雨の地域的分布その他の成果については、説明の都合上つぎの機会に発表したい。単位図を求める場合にぜひとも必要なものは、流域平均雨量と流域平均時間雨量とであり、前者の求め方に等雨量線図法と加重法とがある。等雨量線図法は、多数の観測所があつて降雨機構が明らかな場合には相当の精度が期待されるが、単位図法では単位時間ごとに流域平均雨量を求める必要が

あるから、単位時間ごとの等雨量線図を画かねばならず、繁雑でしかも個人誤差が介入しやすい。そこでここでは観測点の支配面積内の高低差が少ないことを考慮して加重法を採用し、個人誤差がはいらないようにした。こうして求めた流域平均雨量  $\bar{R}$  から、各時間ごとの流域平均時間雨量  $\bar{r}_t$  を求めるには、次式によることにした。

$$\bar{r}_t = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n r_{it} / R_i}{n} \right] \bar{R}$$

ここに、 $R_i$  は時間雨量観測所  $i$  における一連の総雨量、 $r_{it}$  は同じく時間雨量である。

つぎにこれらの雨量を前述の直接流出と基底流とに相当する各部分に

分離することが必要である。一般に降雨開始直後の雨量は、樹木その他による遮断と地中への滲透のために表面流出とならないが、さらに連続して降雨がある場合には、遮断能力と滲透能の減少にともない表面流出が起つてくる。したがって、いま任意状態で生じうる単位時間当りの雨量損失を損失能とすれば、この損失能は降雨の継続時間とともに減少し、十分長時間降雨が連続する場合にある一定値に達し、その時間的減衰は主として滲透能のそれに左右されるものと考えてよい。ところが滲透能の時間的減衰については、Horton<sup>4)</sup>が Neal の試験地撒水実験結果を用いて、仕意時刻の滲透能  $f$  と降雨開始後の時間  $t$  との関係を次式で表わしている。

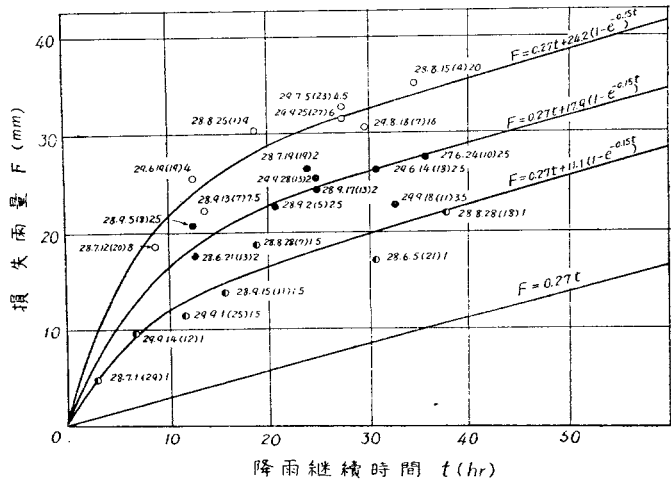
$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

ここに、 $f_0$  および  $f_c$  はそれぞれ初期および最終の滲透能、 $k$  は常数である。この実験式が上述のようにして天然流域における損失能の時間的変化を与えるものと仮定すると、 $f_0, f_c$  および  $k$  を決定することによって、降雨期間中の刻々の損失能、したがって有効雨量を算定できることになる。ただし  $f_0$  は降雨開始時の土湿状態によつて変化し、その時刻の流量の函数とも考えられるが、ここでは室内実験の結果とも合わせ考察する意味から、 $f_0$  を前期降雨終止後の無降雨日数の函数として考察することにした。実際の流域全体については、 $f$  の時間的変化を測定することができないが、その期間中の累加損失雨量  $F$  を知る事ができる。いま累加雨量を  $R$ 、総直接流出量を  $Q$  とすれば、

$$F = R - Q$$

であつて、 $F$  は次式で表わされる。

図-3 損失雨量と継続時間の関係



図中の実測値の説明は、前三つの数字は降雨の年月日、( )内の数字は基底流量 (m<sup>3</sup>/sec)、最後の数字は前期乾燥日数 (日) を表わす。

$$F = \int_0^t f dt = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt})$$

したがって種々の降雨継続時間とそれに対応する累加損失雨量  $F$  とを用いて、 $f_0, f_c$  および  $k$  を求めることができる。図-3 は由良川における記録にもとづいてこれらの値を計算し、前期降雨終止後の降雨日数によつてグループに分類し図示したものである。この図で実線で表わした曲線の勾配が、そのグループの損失能の時間的変化を示すわけであり、各グループについて損失能減衰曲線が求められる。いま二つのグループの損失能減衰曲線がそれぞれ、

$$f_m = f_c + (f_{m0} - f_c)e^{-kt}$$

$$f_n = f_c + (f_{n0} - f_c)e^{-kt'}$$

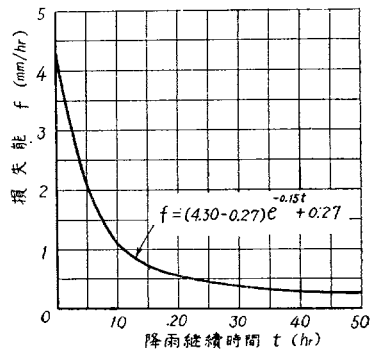
で表わされたとし、 $f_m(t=t_0) = f_n(t'=0)$  であつたとすれば、

$$f_c + (f_{m0} - f_c)e^{-kt_0} = f_{n0}$$

となり、これを  $f_n$  の式に代入すると、

$$f_n = f_c + (f_{m0} + f_c)e^{-k(t'+t_0)}$$

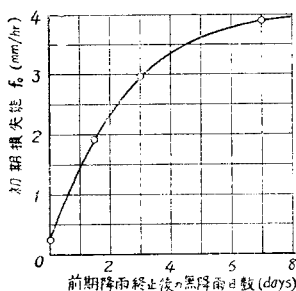
図-4 標準損失能減衰曲線



となる。したがって各損失能減衰曲線は、一つの標準損失能減衰曲線の時間の原点を移動させたものにすぎないことになるが、この標準損失能減衰曲線を示したものが図-4である。

任意時刻に記録された降雨量のうちで、上述の損失能に相当する雨量を損失雨量とし、これを降雨量から差引いたものを有効雨量とした。なお、初期損失能は上述のように前期

図-5 初期損失能回復曲線



降雨終止後の無降雨日数によつて変化するとしたが、図-5はこれらの関係を示す初期損失能回復曲線である。以上の図-4および図-5によつて、任意時刻の任意降雨を有効雨量と損失雨量とに分離できるが、これらは過剰降雨、すなわち損失能以上の降雨ばかりを取り扱つた場合であつて、非過剰降雨に対しては当然補正を加えなければならない。この点についてはCook<sup>3)</sup> その他の方法が提案されているが、いずれも仮定の域を脱していないようである。したがつてここでは一応比較的大洪水のみを考へてその誤差が無視できるものとし、図-4および図-5をそのまま用いることにしたが、さらに詳細な論議は現在実施中の室内および現地実験の成果を用いて改めて行うつもりである。

#### (4) 単位図の算定

1) 単位時間および単位降雨の決定：前述の方法で求めた直接流出量曲線と有効雨量とを用いて単位図を作成するが、この場合まず問題になるのは単位時間のとり方である。米国では普通1日を採用しているが、流域の規模が小さく出水の速いわが国河川には不適當であることはいうまでもない。一般に単位時間の決定基準として、出水の遅れ  $t_0$  が採用されており、従来の研究では実用上  $t_0$  をとつて十分であり、その1/2をとれば申分がないと考えられている<sup>6)</sup>。しかし洪水予報のごとく流量上昇部の単位図形をくわしく知る必要がある場合は、 $t_0$  の1/4をとるべきであり、単位図の応用部面と流域の特性を勘案して単位時間を適宜決定することが必要である。単位図法の基本仮定の一つである降雨の一樣分布という点から考えると、単位時間を大きくとつて降雨の地域的分布の平均化をはかる方が好ましいが、降雨強度の分布を正確に把握しにくくなるので、適合性が低下する。また単位時間を小

さくとりすぎると計算が煩雑になるだけでなく、流出機構に關与する各要素の影響がひびきすぎて互いに消しあう傾向を失い、単位図法の意義を脱脚するおそれがある。したがつて適合性の許容範囲内であるべく大きくとることが好ましいが、由良川では慎重な検討の結果単位時間を2時間とし、流域の雨量から考へて単位雨量を20mmとした。

2) 単位図の算定：直接流出量と有効雨量とから単位図を求めるのに、代数学的方法と幾何学的方法の二つが考へられているが、天然河川の流域を対象とした場合、いずれも合理的普遍的な結果としての単位図を与えない。最後の段階で試算法により、その流域の特性を加味した単位図に変へることが必要である。こうした意味からここでは、まず幾何学的近似法を採用して、次式から近似値を求めることにした<sup>7)</sup>。

$$S_0 = S_n' / \bar{r},$$

$$q_0 = \left[ Q_m + \frac{S_n' t}{\bar{r}} \{ (n-1)r_1 + (n-2)r_2 + \dots \right. \\ \left. \dots + r_{n-1} \} \right] / \bar{r},$$

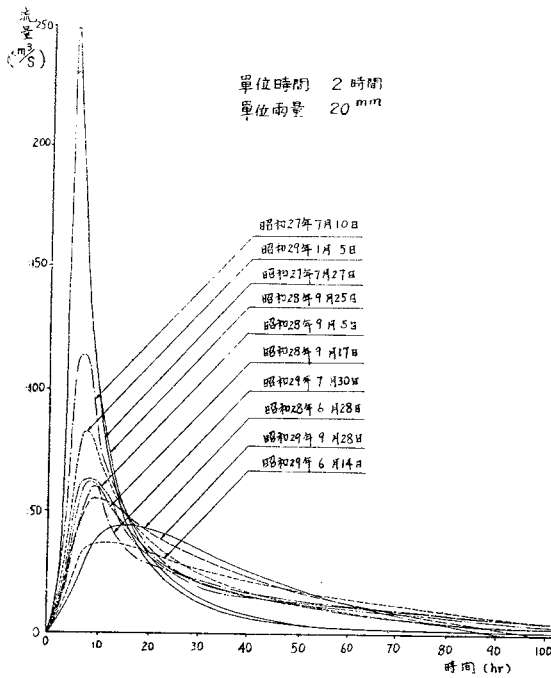
ここに、 $S_n'$  は流出曲線上の最大流量の点と単位時間後の点とを結ぶ直線の勾配、 $\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$ 、 $R_i$  は単位時間雨量、 $R_0$  は単位雨量、 $Q_m$  は流出曲線の最大流量、 $t$  は単位時間、 $r_i = R_i / R_0$ 、 $S_0$  は単位図の最大流量の点と単位時間後の点とを結ぶ直線の勾配、 $q_0$  は単位図の最大流量値である。

上の二つの式の右辺の各項は出水ごとの観測値として与えられるから、単位図の  $q_0$  と  $S_0$  が計算される。また流出曲線の逓減率と単位図のそれとは相等しいとして、単位図の逓減部の各縦距が決定される。つぎに単位図のピークまでの時間は、一連降雨のピークから流出曲線のピークまでの時間をとつて、第一近似値とする。time baseは一連降雨の終了時から直接流出の終りまでの時間と考へる。以上のようにして求めた単位図の第一近似値から試算法によつて、その出水に最もよく適合すると思われる単位図を各出水ごとに求めたが、図-6はその代表的なものを一括図示したものである。

#### 3. 単位図の特性について

図-6から明らかのように、出水の大小またはそのときの出水制御能力の変化によつて、求められた単位図が異なつてくることは注目すべき事実であつて、わが国における各方面の研究によつても実証されているところである。この事實は、従来の考え方による単位図がそのままわが国のような小規模の中小河川に適用

図一6 由良川大野ダム地点における単位図



されがたく、異なつた条件の出水に対し同一の単位図を用いることの不適合性を示唆するものである。単位図法の基本仮定である“同一流域には同一の単位図”ということは、あくまでも工学的な実用性に重点を置いたもので、米国のような緩勾配で出水の遅い河川に対し、相当の精度で適用されると考えるのが至当なようである。しかし、わが国河川において単位図の出水ごとの変化が確認されている現在、その変化の原因を考究することはきわめて大切であり、こうしてはじめてわが国における単位図法の価値が検討され、単位図法適用の精度を明らかにすることができよう。以下若干の考察の結果を説明しよう。

(1) 流出曲線および降雨の分離法の影響 地中における滲透能に左右される基底流は、降雨強度の変化よりもむしろ降雨継続時間に影響され、後者が大体等しければ、われわれが用いた分離法による基底流と真の基底流との差は、各出水ごとに大体同じ程度のものであつて、単位図の変化に対する影響はほとんどないと考えてよい。一方、有効雨量と損失雨量との分離も、分離された流出曲線と関係づけるので、単位図の変化に対する影響は少ないようであるが、主として滲透能のみを考えたわれわれの損失能の取扱いに問題があることはいうまでもない。ことに Horton の実験式がそ

のまま天然河川の流域に適用できるかどうかが問題である。損失雨量は降雨の流出機構の解析で最初にとりあげられることがらであり、最も重要なことであるが、合理的な解決は今後の研究にまつところが少なくない。この意味において、立神博士が流出解析の最後に流出指示率<sup>8)</sup>なる新概念を導入し、この問題の取扱いに有力な示唆を与えられたことは注目に値するものである。

## (2) 降雨条件及び河道条件の変動による影響

まず降雨の地域的分布が一樣でなく、出水ごとに変化すれば当然流出曲線も変化して、単位図のもつ各要素に影響すると考えねばならない。しかし、流域の降雨の特性、形および大小によつては、あまり影響がない場合もあるようである。つぎに降雨強度の変化は、直接流路における水位に影響して河道条件に変化を与え、流出曲線に最も大きい影響を与える。例えば降雨強度が大となれば、流出曲線のピークが増大し前進するから、単位図のピークも同様な変化をする。これらは洪水流下現象の非線型性から見て当然であり、単位図法そのものの大きい問題点といわねばならない。

従来の単位図法的な考え方をういた場合の上記諸問題の定量的な考察は、次報以下に詳述するつもりである。

## 4. 結 語

本論文では計算の途中で種々の仮定を設けているが、基本的には従来の考え方にもとづいて由良川の単位図を求め、図一6のように単位図が出水ごとに異なつていたことを明らかにした。その原因については若干の考察を加えたが、わが国の河川が米国のそれと性格を異にすることから見て、米国の単位図法そのものの価値を一義的に評価するわけにはゆかない。むしろこうした結果を生じた原因を究明し、わが国河川への適合性のある単位図法的方法を考え、工学的な実用性において満足されるかどうかを検討することが必要である。この意味で立神博士の研究<sup>9)</sup>は注目に値するものであり、われわれも上述の問題点に対する研究の結果を改めて発表するつもりである。

この研究は文部省科学試験研究費および京都府土木部の補助によつて行つたものであり、研究を担当された 上山惟康、石原 寿、秋篠文夫の各氏並びに協力された 片瀬貴文、加門 勝、近藤正己、中川博次、瀬尾貞甚その他の学生諸君に対し深謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) R.K. Linsley, Jr., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus: "Applied Hydrology", 1st ed., p. 387-390, McGraw Hill, New York, 1949.

- 2) B.S. Barnes : Structure of Discharge Recession Curves, Trans. Am. Geophys. Union. Vol.20, pp.721-725, 1939.
- 3) R.K. Linsley and W.C. Ackermann : A Method of Predicting the Runoff from Rainfall, Trans. ASCE, Vol.107, pp.825-835, 1942.
- 4) R.E. Horton : The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.14, pp.446-460, 1933 ; and etc.
- 5) H.L. Cook : The Infiltration Approach to the Calculation of Surface Runoff, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.27, pp.726-747, 1946.
- 6) 中安米蔵：“雨量より洪水量の推定について” p.16, 昭和 25 年。R.K. Linsley, Jr., M.A. Kohler and J.L.H. Paulhus：“Applied Hydrology”, 1st ed., pp.445, McGraw, Hill, New York, 1949.
- 7) 石原藤次郎・上山惟康：単位図に関する研究，石狩川本流洪水調査書，pp.37-38, 昭和 26 年。
- 8) 立神弘洋：“洪水流出の新解析法”，p.46, 昭和 30 年。
- 9) 立神弘洋：“木曾川洪水の水文学的研究”，建設省中部地方建設局，昭和 29 年。

(昭.30.7.22)

## スリット管の水理に関する一考察

正 員 荒 木 正 夫\*

### SOME HYDRAULIC PROBLEMS OF SLIT CONDUITS

(JSCE March 1956)

Masao Araki, C.E. Member

**Synopsis** In order to relieve the defects of ordinary sand-drain conduits, sand-draining areas of which are restricted in the neighborhood of their entrance, we devised “the slit conduits”. The slit conduits are special conduits having narrow slits along conduit walls. Gravels and sands are sucked through these slits into the conduits, and discharged out of them. Hydraulics of these slit conduits are described in this paper, to clarify their functions.

**要 旨** 従来の排砂管による排砂域が入口付近に局限される欠点を改良するため、筆者等（村 幸雄・荒木正夫・加藤鉄義）はスリット管を考案した。ここにいるスリット管とは、管の一部に狭いスリットを切つた特殊な管水路であつて、このスリットを通して管内に転石・砂礫を吸引し管外に排出するものである。本論はこのようなスリット管の機能を解明するために、その理論について記述する。

#### 1. 総 論

従来、排砂管により堆積土砂を十分に排出させるのははなはだ困難とされているが、これは管入口より少しく離れると接近流速が急速に落ちるため、排砂される区域は入口付近に局限され、遠くの砂礫を管入口まで運搬することができないからである。すなわち端的に表現するならば、従来の排砂法は点排砂と呼ぶことができる。

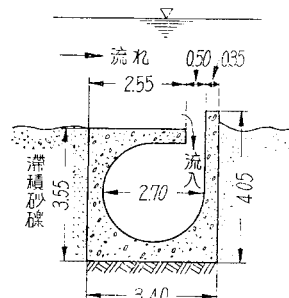
筆者等はこの点排砂の欠点を改良するために、種々研究の結果、上部にスリットを切つた特殊な構造の管、すなわちスリット管を考案することができたが、このスリット管の着想点としては、スリット幅を適当に

\* 建設技官，建設省土木研究所

設計することにより、管入口部まで管内に転石を流送するに足る相当大きな流速を保たせるとともに、転石・砂礫をこのスリットを通して管内に吸引し、管水路流れにのせて管外に排出するものである。このスリット管を前と対応する表現法を用いて呼べば、線排砂と称してさしつかえなく、例えば次のごとき場合には従来の排砂法に比して格段の進歩であると信じている。

(1) 流下土砂による貯水池の埋没を防止する目的等のために、ダム上流の適当な地点において河川を横断してスリット管を設置し、河川上流から流送される

図-1 排砂スリット管  
(藤井川防災ダム)



掃流物質を、このスリットを通して適当な場所に排除する。この種の実例としては、筆者等の設計により茨城県藤井川防災ダムにおいて、ダム近傍の堆砂防止のために設置した<sup>1)</sup>(図-1)。