

鉛直交差管を用いた 貯水池の選択取水方式に関する基礎的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON A NEW SYSTEM OF DRAINAGE DUCTS IN A RESERVOIR

梅田眞三郎¹・Wen-Jei Yang²・堀井清之³・宮崎隆⁴
Shinzaburo UMEDA, Wen-Jei YANG, Kiyoshi HORII and Takashi MIYAZAKI

¹正会員 学博 福山大学教授 工学部建設環境工学科 (〒729-0292 福山市学園町)

²Ph. D. ミシガン大学教授 工学部機械工学科 (Ann Arbor, Michigan 48109 U.S.A.)

³工博 白百合女子大学教授 (〒182-8525 調布市緑が丘1-25)

⁴正会員 (株)コプロス (〒752-8609 下関市長府安養寺1-15-13)

A new method has been developed to resolve water-quality environment problems in water reservoirs utilizing flow characteristics of flow networks, defined as a system of mutually intersecting flow passage. In this paper, an experimental study was conducted to investigate flow characteristics in a new system of drainage ducts using X-shaped intersecting ducts in a reservoir model. Flow characteristics of the new drainage system are disclosed, which can be utilized to enhance a mixing and a suction effect in the intersecting ducts. It will lead to the improvement of problems for the selective withdrawal and the reservoir sedimentation.

Keywords: Reservoir, Drainage duct, Intersecting ducts, Selective withdrawal, Sediment discharges

1. まえがき

河口堰や貯水池は、流水を停滞させ、富栄養化や濁水長期化など各種の水環境問題をもたらす。貯水池における堆砂を軽減する方策として、排砂門や排砂管が一部のダムで試験的に運用されている。しかし、排砂と同時に貯留されていたヘドロや栄養塩が下流へ流出するなど水質問題も併発する恐れがあり、その排砂施設の運用方法に検討すべき点が多くある。一方、選択取水は、これまで多くの貯水池で水温や濁水対策として運用されてきた。曝気循環と選択取水を併用すれば、富栄養化対策にも有効であることが報告されている¹⁾。選択取水施設には様々な型式があるが、いずれも放流水質を微妙に制御することは難しく、取水標高と流量を大まかに調整して運用しているのが現状である。また、選択取水装置を排砂に用いた事例はこれまでにない。

本論で提案する選択取水方式は、著者らがこれまでに検討してきたX字形鉛直交差管の吸引特性²⁾を応用したものである。本方式を用いれば、任意の水深から微妙な流量調節で所定の水質を選択的に取水できる他、堆砂層へ吸入口を設置して砂レキ混合流体を吸引することにより、排砂システムとして応用

することも可能である。また、本システムの基本原理は簡易であり、その実用化に際する施設費は、従来の施設に比べてかなり低廉になる見込みである。

これまで、筆者らはX字形交差管路に関して興味ある水理特性^{3)~5)}を明らかにしてきた。また、多数のX字形交差管からなるネットワーク管路についても検討し、管路内に生成される渦構造と管路下流端で発生する脈流振動との関連性⁶⁾を明らかにした。交差管の特性を用いて各管路要素の流量配分を制御すれば、貯水池の異なる層から取水された水質どおしを任意の比率で混合して排出したり、各交差管要素の吸引力を制御することによって複数の取水口の流量を精密に制御することが可能である。

本研究は、(1)貯水池の異なる二つの水深からの取水比率を、X字形鉛直交差管の幾何形状を変化させることにより制御する効率的で経済的な選択取水システムを提案すること、(2)X字形交差管における固液混相流体の吸引特性を利用して、出水時における貯水池濁水の早期排出方法を提案することを目指す。本報では、まず鉛直交差管内の流れを可視化して流況特性を明らかにする。次に、貯水池濁水の排出を想定して、交差管上流端の供給条件の違いに伴う固液混相流の固相排出特性の変化を実験的に明らかにする。

2. 実験方法

次の二種類の実験を行った。

(1)鉛直交差管内の流れの可視化実験

実験装置の概要を図-1に示す。上流側水槽に交差管を鉛直にして接続した。交差管断面を辺長が1.5cmの正方形断面とし、交差角 θ を 30° 、 60° 及び 90° の3種類の角度に変化させ、交差管長をいずれも30cmとした。各部の材質は、いずれも合成樹脂板で、交差管路の前面及び側面は、流れの可視化のために透明の材料を使用した。以下での上流側水槽及び交差管の左右の区別は、図-1の上方に(Left)と(Right)を示すように、上流側から下流側に向かっての左右の位置で行った。

まず、左の上流側の水槽に関係する実験条件は、水を供給せずに開放(Open)にしたままの場合と交差管路の上流端を閉鎖(Close)した場合の2種類について行った。一方、右の上流側水槽水頭(H_r)については、11.5、16.0、23.5 及び 30.0cmの4種類とした。また、白色の着色液と片栗粉を混合させ、熱を加えて製作したトレーサを上流側水槽に注入し、交差管内の流況を可視化した。 Re 数の範囲は、 $2.8 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$ である。

(2)交差管による濁水の排出実験

図-2に示すように、右側のヘッドタンク条件を変更して濁水を選択取水と排砂を想定した基礎的実験を実施した。図-3に概要を示すように、ここでの交差管路は貯水池前面での余水吐下流側付近に、右の上流側管路の供給口は貯水池内の堆積土砂のある下層付近に、左の上流側管路の供給口は貯水池の上層水面付近に、それぞれ設置されることを想定し

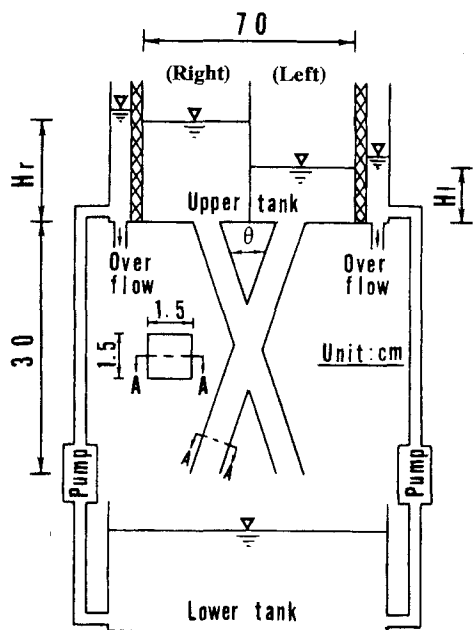


図-1 鉛直交差管実験装置の概要

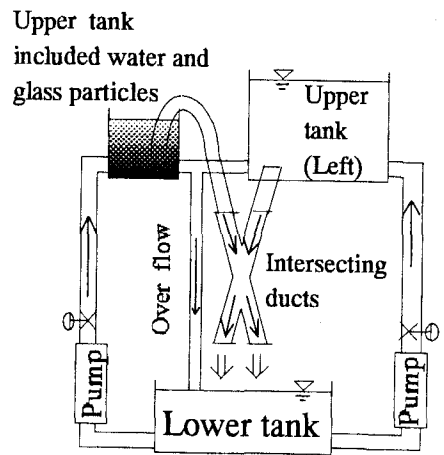


図-2 貯水池モデル用交差管実験装置の概要

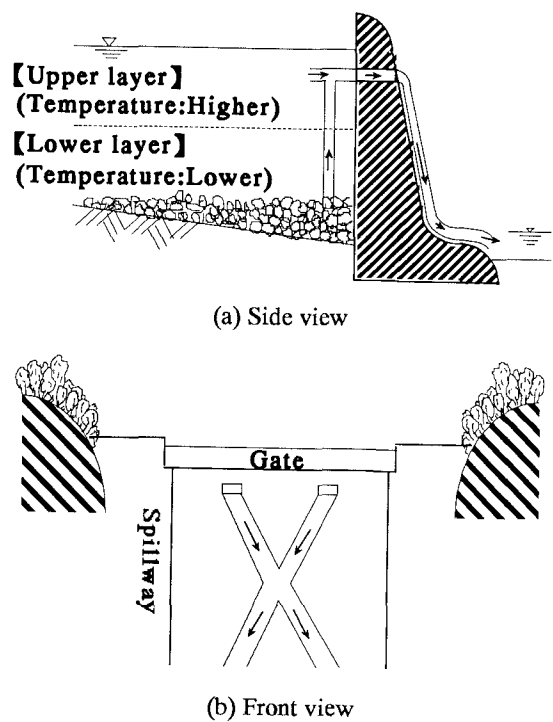


図-3 鉛直交差管を用いた貯水池の選択取水方式の概要

ている。今回の交差管路については、前述の流れの特性を考慮して、交差角が 30° の場合のみを対象とした。左側には給水のみのヘッドタンクを、右側にはガラスビーズと水をためた水槽を準備した。以下の説明において、左の上流側水槽を高圧水槽、右の上流側水槽をサイフォン用水槽という名前を便宜的に用いる。

交差管については、辺長が1cm (Type 1) 及び 2 cm (Type 2) である2種類の正方形断面のものを用いた。ガラスビーズの平均粒径は、1.2mm、3.7mm及び 5.0mmの3種類であり、それぞれをS、M及びLと記す。

左右の上流側水槽からの給水条件を種々に変化させて、交差管内での混合変化やガラスビーズの排出

量を調べた。

高圧水槽の水頭 H_0 は、5cm～105cmの範囲で変化させた。サイフォン用水槽では、水頭を40cmで一定にした場合に加え、Type 1に対しては10～40cm、Type 2に対しては20～40cmの範囲で水頭を変化させた。

上記の水だけを用いた実験では、1次元レーザ流速計(LDV)を用いて交差部への流入前及び交差部からの流出後の4つの管路断面の中央位置の1点における代表流速 U_{ul} 、 U_{ur} 、 U_{dl} 及び U_{dr} を計測した。各流速に断面積を乗じて流量 Q_{ul} 、 Q_{ur} 、 Q_{dl} 及び Q_{dr} をそれぞれ求める。また左右の下流端にて流量 Q_L と Q_R をそれぞれ計測し、それらの合計流量を Q_t とした。4つの Q_{ul} 、 Q_{ur} 、 Q_{dl} 及び Q_{dr} は、管路断面の中央位置での代表流速を用いて求めていることから、下流端流量よりもやや大きくなっていた。その他に、ガラスビーズの排出量も計測した。この場合、その流量をガラスビーズと水の合計流量及びガラスビーズだけの流量とに分けて計量した。それぞれの記号を $Q_{t,p}$ と Q_p とした。

3. 実験結果と考察

(1) 鉛直交差管内の流れの可視化結果

a) 流況パターン

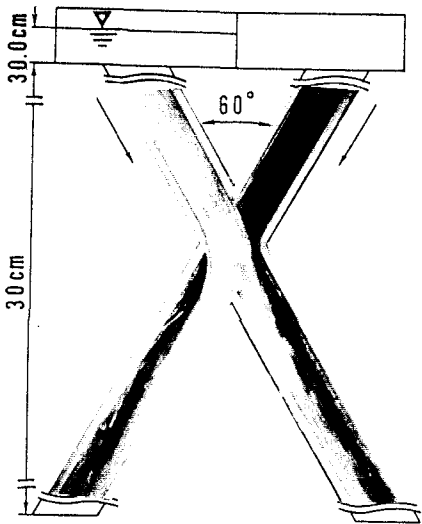
上流側水槽での右側水頭や左側の条件などにより交差部内での流況は異なる。これは、交差部内での圧力と右側管路での流速などの条件により、水脈の壁面への付着現象であるCoanda効果の発現がみられるためである。大きく分けると、表-1に示すような4つの流況パターンに分類され、それぞれの可視化結果については、紙面の都合でType 11とType 21の流況パターンについて、60°の交差角の場合のものを図-4(a)と(b)に示す。

まず、交差角が30°の左側の上流端を開放した場合には、交差部周辺での鉛直下向きの流れが大きいために、左側管壁へのCoanda効果による付着はみられず、ほとんどが右の下流側管路を経て流出している。この流況パターンがType 11である。しかしながら左の上流端を閉じた場合には、左の下流側管路にもかなり流出し、左の上流側管路の交差部付近に水面と旋回渦の形成がみられる。この流況パターンがType 21である。いずれにしても交差角が30°の交差管路では、上流側水頭の条件などを変化させても流況パターンはこの2種類のみであった。

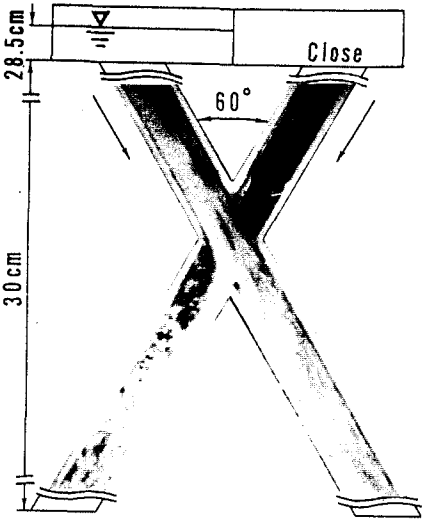
次に60°の交差角の場合では、まず上流端が開放時には、図-4(a)に示すように交差部から両下流側管路へと流出している。しかしながら、例えば左側上流端からわずかの水を流したり、左側下流端を一時的に調節すると、Coanda効果が発現し、ほとんど

表-1 鉛直交差管路内の流況パターンの分類

Type	$H_l=0.0$ Condition	Characteristics of flow
11	Open	No Coanda effect Flow in two ducts
12	Open	Coanda effect Flow in almost one duct
21	Close	Suction, Coanda effect Flow in two ducts
22	Close	Suction, Coanda effect Flow in almost one duct



(a) Type 11の流況パターン



(b) Type 21の流況パターン

図-4 鉛直交差管内の流況パターン

が左の下流側管路から流出する。これがType 12である。一方、図-4(b)に示すような左の上流端を閉じた場合には、右の上流側管路からの流れが交差部を通過すると、左の上流側管路内が密閉室となり、その交差部付近に渦を形成し、交差部が減圧される形となる。そのために交差部周辺での流速が増大し、右の上流側水槽からの供給流量が増加するようになる。この流れに対して、右の下流端からの流出をわずかに制御すると、左の上流側管路の交差部付近には同様の渦を形成し、交差部を過ぎた左の下流側管路では、Coanda効果が顕著にあらわれ、ほとんど左の下流側管路へ流出することになる。この流況パターンがType 22である。

最後に、交差角が90° の場合には、いずれの上流側水頭に対して60° と同じ4つの流況パターンを示す。

b) 交差部での吸引特性

交差部付近に水面と旋回渦を形成し、上流側からの給水流量の増加がみられた Type 21 の場合と片方の上流端を開放した Type 11 の場合での給水流量に対する下流端流量の変化を調べた。交差角度の異なる3種類の交差管は、同一断面となっているので、給水流量に関しては上流側水槽の水頭Huと位置水頭zによる流速 $\sqrt{2g(Hu+z)}$ (以下供給流速とする) を、下流端流量に関しては両下流端での合計流量を平均した流量Q_d と管路断面積Aによる流速Q_d/A (以下管路内流速とする) をそれぞれ調べた。それらの結果を図-5に示す。

Type 11の場合の結果では、いずれの交差角の場合も供給流速の増加に対してほぼ直線的に管路内流速が増大している。一方、Type 21の場合には、交差角が鋭角になるほど管路内流速の値が大きくなっている。Type 11とType 21での同じ供給流速の値に対する管路内流速の値の違いを比較すると、交差角が30° の場合のType 21の結果は、Type 11のものよりも約45%増大している。これは、同じ上流側供

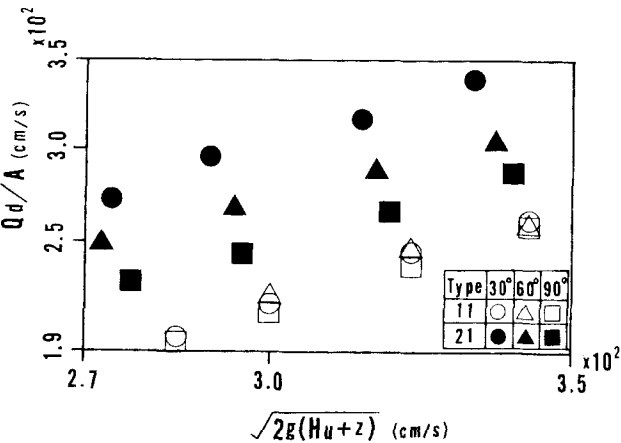


図-5 供給流速と管路内流速との関係

給水頭に対して、片方の上流端を閉じることによって交差部の減圧による吸引力が大きく作用し、交差管への給水流量が増大していることを示していると考えられる。

以上のように、交差管の片方の上流側管路の使い方によっては、交差部での流況に変化を生じさせ、下流側の流量等も大きく変化させることが可能であることが明らかとなった。

(2) 交差管による濁水の流出実験

a) 排出量の変化

高圧水槽及びサイフォン用水槽の両方から水だけを供給した場合のLDVによって求めた管路内の流量の変化を調べた。左右及び上・下流側の4つの管路の代表点における流量Q_{ul}、Q_{ur}、Q_{dl}及びQ_{dr}の基準流量Q_sに対する流量比Q/Q_sの変化を図-6に示す。ここでのQ_sは、交差管を高圧水槽と接続をせずにサイフォン用水槽とのみ接続し、その水槽水頭を40cmとした場合のQ_{ur}とした。

図-6に示すType 1では、Huの上昇に対してQ/Q_sにおいての流量に相当するQ_{ul}やQ_{dl}は、それぞれ増大している。しかしQ_{ur}は、Huの上昇に対してわずかながら減少し、そのQ_{ur}/Q_sの値は1より小さくなっている。またQ_{dr}/Q_sは、Huが小さいときにはわずかに上昇しているが、それ以外はほとんど一定となっている。Type 2の場合についてもType 1の結果とよく似ており、Huが高い場合には、いずれのTypeにおいてもQ_{ul}とQ_{dl}の方が右側のものに比べて多くなっている。しかしながら、Huが20~25cm前後までの低い場合の4つの交差管路内の流量については、Type 1でのQ_{ur}がQ_{ul}よりも多くなっているのに対して、下流側ではQ_{dl}の方がQ_{dr}よりも多くなっている。それに対してType 2

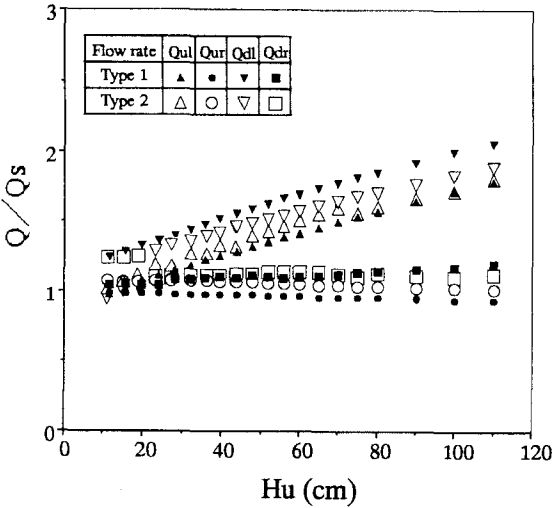


図-6 左右の上流側水槽から水だけを供給した場合の交差管内の流量の変化

では、 Q_{ul} が Q_{ur} よりも多く、 Q_{dr} が Q_{dl} よりも多くなり、Type 1とは全く逆になっている。これは、左右の上流側からの給水流量と交差部の断面の大きさのそれぞれの違いによって交差部での圧力の変化があらわれた結果によるものと思われる。すなわち、上流側からの給水流量が少ない場合には、交差部での左右の部分で圧力に関する不安定現象⁵⁾があらわれている。

これらの結果は、鉛直交差管の選択取水への応用において流量配分を決定する上で重要な情報である。

b) 排出粒子量の変化

サイフォン用水槽水頭の変化に対する流量及びガラスビーズの交差管からの排出量を調べた。この場合、左の上流端を開放にした場合と閉じた場合での排出量の変化を調べた。その結果を図7(a)と(b)に示す。その図では、サイフォン用水槽水頭 H_s の変化に対して基準流量 Q_s と水やガラスビーズの排出量 Q の比 Q/Q_s を示している。ここの Q_s は、左の上流端接続部分を開放にし、 $H_s=40$ cmとした場合での水だけの流量としている。

図7(a)に示されるType 1の場合の結果では、サイフォン用水槽に水だけを入れた場合の両下流端の Q_t/Q_s が H_s の上昇とともに直線的に増大し、当然ながら $H_s=40$ cmのときには1となっている。それに対して、左の上流端接続部分を閉じた場合には、開放した場合と同様の増大を示し、それらの結果を平均すると、開放にした結果のものとは比べて20%程度増えている。これは、前節までの結果と同様の吸引作用が交差部に働いたためであると考えられる。それに対して、サイフォン用水槽にガラスビーズを投入した場合には、ガラスビーズの粒径の違いによる $Q_{t,p}/Q_s$ の変化率が異なり、小さい粒径のものはその変化率が大きく、粒径が大きくなるとそれが小さくなり、水だけの場合とよく似た特性である。なお、ここでの排出量は、水とガラスビーズの両方の合計である。一方、交差管の左の上流端接続部分を閉じた場合には、粒径の大小に関係なく、水だけの場合と同様に吸引作用も働き、水頭に対する排出量比の変化率がほとんど同じである。

それに対して、図7(b)に示すType 2の結果では、 H_s に対する両下流端の $Q_{t,p}/Q_s$ の変化率については、左の上流端接続部分を開放にした場合に粒径による違いが少しみられるが、全体的にType 1の結果と似ている。しかしながら、左の上流端接続部分を閉じた場合には、開放にした場合よりも30%程度増えている。そのためそれぞれの粒径によって変化率の値の違いがみられる。すなわち、粒径の小さい場合の方が粒径の大きい場合や水だけの場合に比

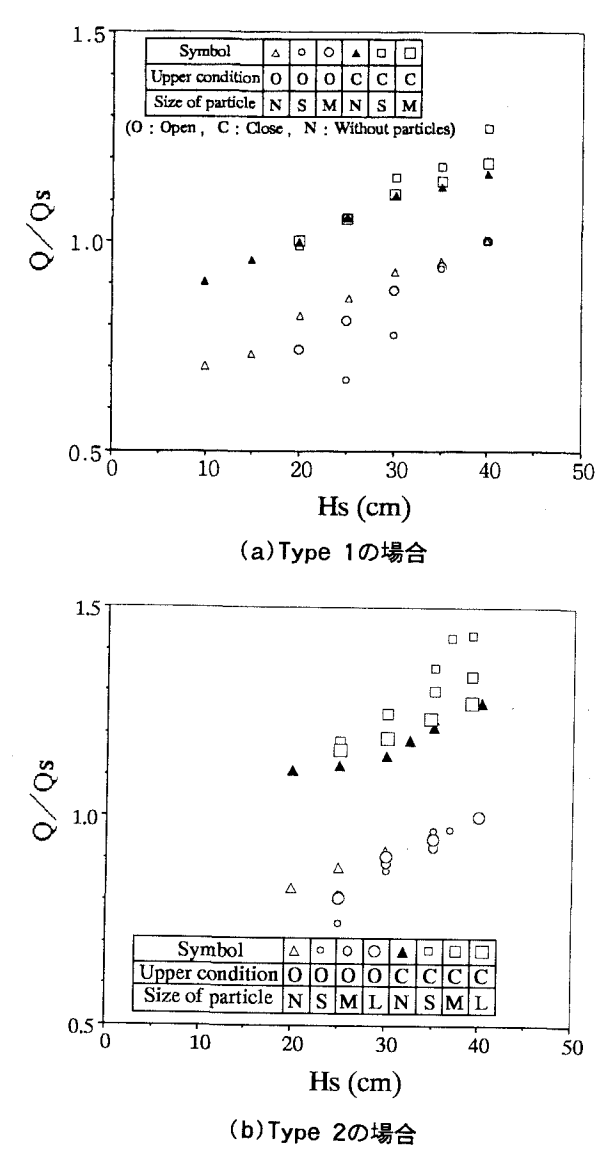


図7 サイフォン用水槽からのみ供給した場合の排出量の変化

べて排出量比の値が大きくなり、その差が顕著にあらわれている。これは、管路断面が大きくなった場合に小さい粒径のものの方が吸引作用の影響が顕著にあらわれるという結果を示している。

最後に、サイフォン用水槽にガラスビーズを投入し、高圧水槽の水頭を変化させた場合の両下流端でのガラスビーズと水の合計流量 $Q_{t,p}$ 及びガラスビーズだけの排出量 Q_p を調べた。それぞれの流量と基準流量との比 Q/Q_s を図8に示す。この場合の $Q_{t,p}$ に対する Q_s については、図7に示した Q_s と同じである。またガラスビーズだけの流量 Q_p に対する基準流量については、同じ上流側条件でのそれぞれの粒径のガラスビーズだけの流出量を基準流量とした。

まず、ガラスビーズだけの場合の Q_p/Q_s は、

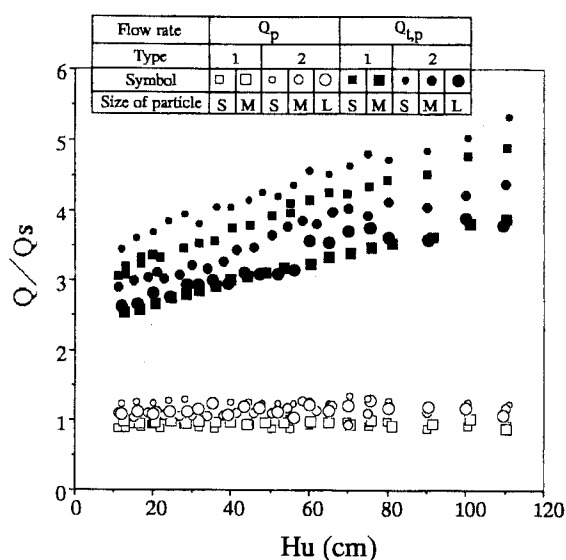


図-8 左右の上流側水槽からの水と粒子の排出量の変化

H_u の上昇に対しての変化が全体的に小さくなっている。また同じ H_u に対しての Q_p/Q_s を比較すると、Type 2 の場合のガラスビーズの小さいものの結果が最も大きくなっている。しかしながら、それら以外のガラスビーズに対する結果では、確かに Type 2 の場合の Q_p/Q_s の方がやや大きくなっているが、そうでない場合も一部みられる。また、Type 1 の場合のかなりのものは、 Q_p/Q_s が 1 より小さくなっているのに対して、Type 2 の場合には逆に Q_p/Q_s が 1 より大きくなっている。これは、基準流量の違いによるもので、Type 2 の場合の方の基準流量に関しては、管路断面が大きいために流速が小さくなり、粒子の排出量も少なくなったことによるものと考えられる。

一方、 $Q_{t,p}/Q_s$ の変化については、 H_u の増加に伴っていずれも増大している。ガラスビーズだけの場合と同様に、同一水頭に対しては Type 2 の粒径の最も小さい場合の $Q_{t,p}/Q_s$ が最大となり、その他の粒径のものについては、Type 1 の小、Type 2 の中、Type 2 の大、Type 1 の中の順に $Q_{t,p}/Q_s$ が小さくなっている。ただし、Type 1 の中の粒径のものと Type 2 の大のものの $Q_{t,p}/Q_s$ の差は、比較的小さくなっている。いずれにしても、 H_u に対する $Q_{t,p}/Q_s$ の変化は、2.5 から 5.0 前後までの大きな値となっているが、前述のガラスビーズだけの結果も考慮すると、高圧水槽から供給される流量の増加がそれらの値に大きく寄与している。すなわち、サイフォン用水槽から供給されるガラスビーズの排出量は、ほぼ一定のままで増加には至っていないことがわかる。

以上のように、交差管路断面の大きさやガラス

ビーズの粒径及び左右の上流側水槽からの給水流量の違いによって排出粒子量が異なることが明らかとなった。特に、今回の場合の排出粒子量の増加には、サイフォン用水槽水頭を高くすることや高圧水槽と交差管の接続部分を閉じた場合に生じる吸引作用の利用が大いに関係することが明らかとなった。

4. 結論

鉛直交差管路内の流れの可視化実験及び交差管によるガラスビーズを用いての粒子の排出量の計測実験を行った。その結果、次のような結論を得ることができた。

(1) 鉛直交差管における上流側供給条件の違いによって4つの流況パターンがあらわれること及び交差部付近にあらわれる吸引作用による給水流量の変化などを明らかにすることができた。

(2) 左右の給水流量の違いによってそれぞれの下流端流量が異なることを示すことができた。また片方の交差部の上流側を閉じ、吸引作用を働かせることによってもう一方の交差管の給水流量を増大させることができ、しかも両下流端へほぼ同様な流量配分を行うことができることも明らかとなった。

(3) 交差管の吸引特性を利用して水及びガラスビーズの排出量を数十%増加させることが可能であることが明らかとなった。またガラスビーズだけの流出量は、今回の場合にはサイフォンの条件によって決定されることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 丹羽薫, 他3名: 貯水池流動制御による水質保全対策, 水工学論文集, 第37巻, pp.271-276, 1993
- 2) 梅田眞三郎, 他1名: 合・分流角度の異なる交差管内の流れの可視化に関する研究, 可視化情報, Vol.16, No.62, pp.19-27, 1996
- 3) Umeda, S. et al.: Mechanics and correlations of flow phenomena in intersecting ducts, Experiments in Fluids, Vol.17, No.5, pp.323-329, 1994
- 4) Umeda, S. et al.: Mechanics of fluid flow in intersecting ducts, Proc. of the 4th Asian Symposium on Visualization (edited by Q. D. Wei), pp.223-228, 1996
- 5) Umeda, S. et al.: Dynamic behavior of shear layer in intersecting ducts, Proc. of the 9th International Symposium on Transport Phenomena, pp.784-788, 1996
- 6) Umeda, S. et al.: Improvement of water-quality environment in reservoir models using flow networks, Int. J. Environment and Pollution, Vol.10, No.2, 1998

(1999.9.30受付)