

# 多孔管型集水装置の水力設計について\*

正員 末石 富太郎\*\*

## ON THE HYDRAULIC DESIGN OF PERFORATED-LATERAL UNDERDRAIN SYSTEM

By Tomitarō Sueishi, C.E. Member

**Synopsis :** The author describes a method to obtain a uniform rate of back wash through any portion of perforated-lateral underdrain system in rapid sand filter. Especially, he emphasizes that the conventional specifications, which have been used for a long time, in the design of underdrain system of this type are revised by introducing the uniformity of wash water distribution and the magnitude of head loss through the system. The basic analytical relations are composed of the equations for pipe flow with lateral outflow.

**要旨** 本論文では、横から流出のある場合の管路の基礎方程式を組合わせて、急速ろ過池多孔管型集水装置の水力計算式を導き、これを用いて逆流洗浄時の流量分布を均等にする方法を述べた。とくに本型式の集水装置の設計に際しては、流量分布比と比損失水頭を新たな要素として導入することにより、従来慣用されてきた基準が修正されることを強調している。

### 1. 緒 論

急速砂ろ過池において正常なろ過が行われるための諸条件のうち、下部集水装置の設計合理化も重要な一要素である。集水装置の目的は、ろ過水を流出管に集め、逆流洗浄水を洗浄水管からろ層へ逆に配分することにあるが、逆流洗浄の場合集水装置に対する水力条件がろ過水集水の場合よりはるかに厳しいものである。それは洗浄速度がろ過速度の数倍ないし 10 倍程度である関係上、流量分布の若干の不均等性が洗浄時には大きく拡大されるおそれがあるからである。そこで通常は逆流洗浄時に満足な結果がえられるように設計し、これが実現されたらろ過集水に対しても十分な機能を発揮するものと考えられてきたのである。

従来からの数種の集水装置も、こうした観点から発達してきたものであるが、逆流洗浄水を洗浄水管からろ層へ配分する機構によつて、つぎの二つに大別することができる。すなわち、[I]ろ過池底部に 1 本の主管 (Manifold または Header ともいう) とそれから分岐した多くの枝管 (Lateral) を配置したもの、[II]ろ過池底部に洗浄水管と直結した圧力水室 (Pressure chamber) を有するものである。前者に属するものとしては、Perforated-lateral, Pipe and strainer, Ridge and valley, Leopold block, Wagner block などがあるが、これらの各型式間の差異は、枝管の断面形とそれを構成する材料の相違、枝管に設ける多くの小孔 (Perforation または Orifice) の向きおよびストレーナーの有無の点だけである。一方、後者に属するものとしては、Wheeler bottom, Porous plate, Wood grating などがあり、圧力水室の上にある False bottom を洗浄水またはろ過水が通過する通路に差異がある。なお、両者を組合わせたものとして、主管を経て圧力水室に接続するものも考えられる<sup>1)</sup>。

米国およびカナダにおける人口 10 万以上の都市について調べると<sup>2)</sup>、約半数の浄水場は急速ろ過池の下部集水装置として多孔管型を採用しており、これとほぼ同型の Pipe and strainer や Wagner block を加えると約 60% に達する。以下 Wheeler bottom 15%, Leopold block 10% の順であるが、どちらかといえば Wheeler bottom は新浄水場に多いようである。これは集水装置のみについて比較した場合、Precast Wheeler block の発達によつて、現在では Wheeler bottom が最もやすいといわれており、かつ多孔管型よりも一般に洗浄水が均等に分布するからであろう。わが国でも最近までは新しく建設される急速ろ過池には、ほとんど Wheeler bottom を用いている。しかしろ過池全体についてみると、圧力水室の不要な多孔管型を用いた方が建設費が少なくなると思われ、多少の水利的損失を犠牲にできるような小型または簡易急速ろ過池では多孔管型がよく用いられているよう

\* 日本水道協会第 9 回上下水道研究発表会 (昭.33.8) にて一部発表

\*\* 京都大学助教授, 工学部土木工学教室

である。

以上は [I], [II] の両型式の代表的なものとして, 多孔管型と Wheeler bottom に関する従来の考え方を略述したのであるが, 集水装置の得失を論ずる場合には, 少なくとも水理学的条件として損失水頭と流量分布均等度, 経済的条件として建設費, 施工および維持管理の難易を考え, 総合的に比較する必要がある。しかし従来の報告<sup>3), 4)</sup>では, 枝管の小孔からろ層内へ洗浄水を配分する形式の良否とそれともなうろ層の構成, 装置の製作および耐久性にのみ重点がおかれ, 洗浄流量の均等性は損失水頭の増大, すなわち小孔総断面積のろ過面積に対する比の減少によつて実現されるというだけにとどまっているようである。この流量配分の均等化に応じた集水装置における損失水頭の増大は, [I], [II] の両型式に共通した欠点であり, 集水装置における洗浄水配分の機構を明らかにして, 洗浄ろ過効果の要求に適合した合理的設計を行うことが大切である。

最近塩化ビニールなどの新材料の発達によつて, 管類の工作や施工も一段と容易になつたから, 多孔管型が再び大型急速ろ過池に採用される機運にある。しかしこの型式に対する現在の設計基準には, 2節に述べるように水理学的に疑問が多く, さらにろ過速度が上昇されつつある一方表面洗浄の併用によつて逆流洗浄速度が低下され, 両者の開きが縮小されてくるのに対し, [I] の型式ではろ過水量の配分と洗浄時のそれとが大小逆になる点を考慮すると, 多孔管型集水装置に関する過去の研究を再検討することもあながち無意味ではないと思われる。

こうした観点から, 著者はさきに多孔管型集水装置による逆流洗浄水の流量および圧力の分布を, 横から流出のある管路の理論式の数値計算によつて求める方法を提案し, 本装置の水理機構を明確にするとともに, 小孔の大きさを段階的に変化させると, より合理的な流量配分がえられることを指摘した<sup>5)</sup>。本文ではこの線にそつた設計計算法を図式化するとともに, 現在用いられている設計基準に水理的条件を導入することにしたのである。

2. 多孔管型集水装置に対する従来の考え方とその検討

1920年米国サクラメント市において新しく急速ろ過池の計画を行うにあたり, 既設の多孔管型集水装置を調査した結果によると, 設計要素が広範囲に分布しており, それに応じて洗浄特性に相当の差異があつたようである。そこでより有効な設計を行うべく, Jenks<sup>6)</sup>が実験によつて確かめた洗浄速度 15~90 cm/min の場合に対する結論は, つぎのとおりであつた。

- i)  $L/D \leq 60,$
  - ii)  $1/4'' \leq d \leq 1/2''$  ( $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$ ),
  - iii) ii) に応じて  $3'' \leq S_P \leq 8''$  ( $75 \text{ mm} \leq S_P \leq 200 \text{ mm}$ ),
  - iv) ii) に応じて  $1/4 \leq \Sigma A_P / \Sigma A_L \leq 1/2,$
  - v)  $\Sigma A_P / A_F \cong 1/500,$
  - vi)  $S_L \leq 12''$  ( $S_L \leq 300 \text{ mm}$ ).
- } ..... (1)

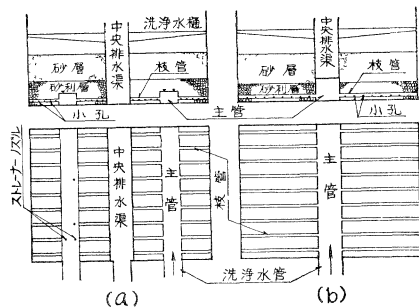
ここに,  $L, D, S_L, A_L$  はそれぞれ枝管の長さ, 内径, 中心間隔および断面積,  $d, S_P, A_P$  はそれぞれ小孔の直径, 中心間隔および断面積,  $A_F$  はろ過面積である。

この当時までは枝管の長さ  $L$  は 6~8ft を超過すべきでないと考えられていたから, 中央排水キョで二分されるろ過池の片幅がこれより大きい場合には, 図-1(a) のように池半分ごとに1本の主管を設け, その両側に枝管を配置することを要し, 主管の幅や深さに応じてその上部に洗浄効果の悪い部分のできることをさけるために, 主管の頂部にも小孔やストレーナーノズルを取り付けるという姑息な手段がとられ, 砂利層も厚くする必要があつた。

Ellms<sup>7)</sup> は Jenks の実験結果のうち,  $L/D$  によつて流量配分の均等化が支配されることに着目し, 適当な  $D$  のもとにおいてより長い枝管を採用すれば, 主管をろ過層のいかなる部分にも影響のない中央排水キョの下のみとして, 1本の枝管を池片幅に延長でき, 構造も簡素化される可能性があると考えた。こうして今日一般に用いられている 図-1(b) のような配管法になつたのであるが, その場合  $D$  または  $A_L$  と主管の断面積  $A_M$  との関係の妥当な値を求めるための実験を行つて, つぎの結論をえている。

図-1 多孔管型集水装置における主管および枝管の配置, (a) 初期の型式, (b) 現在の形式

Fig. 1 Layouts of manifolds and laterals in perforated-lateral under-drain systems: (a) old type and (b) existing type.



$$1/2 \leq \Sigma A_L/A_M \leq 4/7. \dots \dots \dots (2)$$

その後も、たとえば Enger および Levy<sup>8)</sup>, Malishevsky<sup>9)</sup> らが理論的実験的研究を行つたが、理論を誤るか  
 実用性を欠いて、根本的解決を見るに至らず、以来 (1), (2) の両式が設計基準となつており、若干の文献<sup>10)</sup>に採  
 録されているものもこれを少し修正したものに過ぎず、わが国の上水道施設設計指針にあるものも上記の数字を  
 換算しただけである。

しかしこれらの結論およびその基礎となつた実験を吟味すると、まず Jenks は種々の  $D, d, S_P$  の組合わせの  
 もとに枝管にそう圧力分布を測定して小孔からの流出量の均等性を論じたが、その数学的意味が明確でなく、主  
 管にそつても当然流量分布が考えられるのに、その関係がとりあげられていない。Ellms はこの点に注目して、一  
 応 Jenks の与えた関係を満足するような枝管に主管を組合わせ、ろ過池の四隅に相当する位置で測定した圧力が  
 均等になるように  $\Sigma A_L/A_M$  を求めているが、主管の配管に不備があり、かつ  $\Sigma A_L/A_M$  の値を種々変化する場合  
 に、主管を固定して枝管の本数を変えただけであつたから、水理学的にはかえつて複雑な現象を呈しており、普  
 遍性を欠いた特殊な例を示したに過ぎない。また Jenks は (1) 式の ii), iii), iv) の関係をみたく枝管の一部  
 をとり、その上においた厚さ 18" の砂利層の表面で洗浄水の分布を観察しているが、それまでは小孔から噴出し  
 た洗浄水を砂層底面に至るまでの砂利層中で完全に分布させるために必要な  $\Sigma A_P/A_F$  の値は 0.28~0.41% と考  
 えられており、(1) 式の ii), iii) の関係をみたく小孔に対しては、 $S_L$  を 9"~6" とすることによつて  $\Sigma A_P/A_F$   
 $= 0.28 \sim 0.41\%$  となる。Jenks は  $S_L$  の値を種々に変化して観察した結果、 $S_L$  を 12" 程度まで大きくしても、  
 砂利層表面における洗浄水の分布は満足であるとして、 $\Sigma A_P/A_F$  は 0.2% 程度までさげられると結論したが、  
 $S_L \leq 12"$  としたことは、 $\Sigma A_P/A_F$  を小さくした方がよいという結論とは考えられない。

常識的にもわかるように、多孔管型の流量配分系で主管または枝管の断面を一樣とすれば、こうした管内の流  
 れはその流量を漸減していくにつれて圧力を恢復し、この管内圧力変化を無視できる程度の損失水頭を小孔におい  
 て生ぜしめることによつて、より均等な流出量分布がえられるわけであり、換言すれば  $\Sigma A_P/A_F$  の値は小さい  
 方が分布均等度を高めることになる。この意味で、比較的損失水頭の少ない砂利層内ではろ過池全体としての洗  
 浄流量の均等化は十分でないので、主管一枝管一小孔の間で適当な均等度を期待できるような設計を行い、砂利  
 層は単に砂層を支持し、それぞれの小孔が分担する砂層底面へ洗浄噴出水を均分するのに必要な最小限の厚さと  
 することが望ましく、こうすることによつて理論的根拠も明快なものとなるであろう。

なお、(1), (2) 式で与えられる結論は、集水装置の管材料が主として鑄鉄管であつたときにえられたものであ  
 るから、新材料を用いる場合や小孔に Bushing を設けたりして流量係数が異なる場合には疑問が残り、また流量  
 分布機構が同じでも型式 [I] 以外の集水装置に対しては問題があるはずである。さらに (1) 式のうちの i),  
 ii), iii), iv) および (vi) の条件を組合せると、

$$\left. \begin{aligned} d=6 \text{ mm のとき, } \Sigma A_P/A_F > 0.001258, L \leq 692 \text{ cm} \\ d=12 \text{ mm のとき, } \Sigma A_P/A_F > 0.001885, L \leq 559 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

の関係がえられ、依然として  $L$  の値に制限があることがわかる。結局問題は実験が行われたときと同じ条件に限  
 つても、流量分布の均等度が不明のままかなり画一的な基準を作つたので、設計の弾力性を失つていともい  
 えよう。

3. 横から流出のある管路の理論とその多孔管型集水装置への適用

管壁に設けたスリットから流出がある場合、運動量の関係から流れの運動方程式を導くと、定常流では近似的  
 に

$$\frac{\alpha_m u}{g} \frac{du}{dx} + \frac{dz}{dx} + \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx} + \frac{\tau_0}{\rho g R} - \frac{\alpha_m u q}{g A} = 0 \dots \dots \dots (4)$$

となり、連続方程式は

$$\frac{dQ}{dx} = -q \dots \dots \dots (5)$$

となる。さらにスリットにおける流量方程式として、

$$q = ce \sqrt{2g \left( \frac{p}{\rho g} + z - \frac{p_0}{\rho g} - z_0 \right)} \dots \dots \dots (6)$$

がえられる。ここに、 $Q$  は管内流量、 $q$  は管路単位長当りの流出流量 ( $q$  を流入流量とするときは、(4) 式の左  
 辺第5項と (5) 式の右辺がともに + となり、かつ (6) 式の根号の中に (-1) をかける)、 $u$  は管内平均流速、  
 $A$  は管断面積、 $z$  は管軸の高さ、 $z_0$  はスリットの高さ、 $p$  は管軸における圧力、 $p_0$  はスリットの外側における

圧力、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $\tau_0$  は管壁摩擦応力、 $R$  は動水半径、 $\alpha_m$  は流速分布による運動量の補正係数、 $c$  はスリットにおける流量係数、 $e$  はスリットの幅、 $x$  は下流方向にとつた距離である。

上の各式を多孔管型集水装置に適用するには、主管に対する枝管または枝管に対する小孔が連続的になつていて、スリットと等価であると考え、また (4) および (6) 式は、管に対するスリットの幅が比較的小さいものと考え、流出量は管内流速水頭の影響を受けないものと仮定している。この考え方の適用限界については別に吟味を要するが、普通の多孔管型における主管と枝管ではこれらの仮定が十分であることは、数値計算の結果が実験値とよく一致したことからもうなずけるはずである<sup>1),5)</sup>。

本文では理論の単純化をはかるために一様管路を取り扱つて  $A_M$  および  $A_L$  をそれぞれ一定とし、さらにつきの仮定を設ける。すなわち (4) 式の  $\alpha_m$  は円管の場合約 1.03 となるが、管内流速分布がスリットまたは連続した小孔によつてうける影響は無視できるものとして  $\alpha_m \equiv 1$  とおく。また摩擦抵抗項もスリットのない通常の管路に対するものが適用できるものとし、Manning の粗度係数  $n$  を用いて  $\tau_0/\rho gR = n^2 u^2/R^{4/3}$  とあらわすことにする。

つぎに逆流洗浄中における集水系以後の損失水頭を考えると、これは砂利層中と砂層中の損失水頭およびトラフ越流損失落差がおもなものである。トラフ越流水深と砂利層中損失水頭は洗浄速度の大小によつて増減するが、砂層中または枝管の小孔におけるそれと比較してかなり小さく、また結果的に洗浄速度の分布がろ過池内で大差ないものとすれば、これらはろ過池内各部を通じて一様であるとみなせる。砂層中の損失水頭は前二者よりはるかに大であるが、通常の 30~90 cm/min の洗浄速度で砂粒が浮動してくると、洗浄速度の増減にともなう損失水頭の増減がきわめて少ないので、これもろ過池内を通じて均等と考えてよい。結局洗浄水が小孔を出てから後の損失水頭はおのおのの平均洗浄速度ごとに均等であるといえる。トラフの上縁は水平に設置されるから、砂利層底部すなわち小孔の外側における動水頭面もろ過池全域にわたつて水平と考えられる。もしこれを水平と考えなくても、洗浄流量の多い部分の方が当然損失水頭を増すから、ごくわずかではあるがさらに流量均分化の効果があるわけであつて、結局ろ過層中におけるこの効果したのである。この [砂利層底部動水頭面高さ] = [トラフ上縁高] + [越流深] + [砂層中損失水頭] + [砂利層中損失水頭] を  $z$  の測定の基準にとれば、 $z + p/\rho g$  は集水系各部の動水頭高さとして砂利層底部動水頭面との差となるので、これを枝管に対して  $y$ 、主管に対して  $Y$  とかく。

以上のようにして (4)、(5) および (6) の各式を変形すると、

$$\text{枝管に対し, } y = y_0 + \frac{u_0^2}{g} - \frac{u^2}{g} - \int_0^x \frac{n_L^2 u^2}{R_L^{4/3}} dx, \dots\dots\dots (7)$$

$$u = u_0 - \int_0^x \frac{q_L}{A_L} dx = \int_x^L \frac{q_L}{A_L} dx, \dots\dots\dots (8)$$

$$q_L = \frac{c_P A_P}{S_P} \sqrt{2gy}, \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{主管に対し, } Y = Y_0 + \frac{U_0^2}{g} - \frac{U^2}{g} - \int_0^X \frac{n_M^2 U^2}{R_M^{4/3}} dx, \dots\dots\dots (7')$$

$$U = U_0 - \int_0^X \frac{q_M}{A_M} dX = \int_X^M \frac{q_M}{A_M} dX, \dots\dots\dots (8')$$

$$q_M = \frac{c_L A_L}{S_L} \sqrt{2g(Y-y_0)} \dots\dots\dots (9')$$

となる。ここに  $x$  は枝管流入口からの枝管にそつ距離に限定し、 $X$  を主管にそつ同じく流入口からの距離とする。同様に大文字と添字  $M$  は主管、小文字と添字  $L$  は枝管、添字  $P$  は小孔、添字  $o$  は流入口における値を示す。なお  $M$  は主管の全長である。

つぎに主管からの流出量が枝管への流入総量となるから、集水系全体の連続方程式として、

$$S_L q_M = \int_0^L q_L dx \dots\dots\dots (10)$$

が成立する。

以上の関係は主管の片側にだけ枝管がある場合のものであるが、図-1 のように同じ長さの枝管が主管に対称に両側にある場合には、 $A_M, q_M$  は実際の値の 1/2 とするか、 $A_L, A_P, q_L$  を 2 倍にすればよく、以下において

も同様である。(7) または (7') 式は運動方程式 (4) を連続方程式 (5) を用いて積分して求めたもので、その際の境界条件として枝管または主管の流入口における  $y$  または  $Y$  と  $u$  または  $U$  を用いているが、前論文<sup>9)</sup> に示したように、流量または圧力分布を数値計算によつて求めるには、管終端 ( $u$  または  $U=0$ ) における  $y$  または  $Y$  を (7) または (7') 式の境界条件として与えた方が便利である。これは管終端においてちょうど  $u$  または  $U=0$  となるような流入口における  $y_0$  または  $Y_0$  と  $u_0$  または  $U_0$  を独立に与えることは本質的に不可能であり、 $X=M$ ,  $x=L$  における  $y$  の値をまず与え、最後に総洗浄流量と  $Y_0$  を知るという方法をとらざるをえないからである。いずれにしても数値計算にはかなり膨大な反覆計算を必要とし、実用的とはいえなかつた。

4. 多孔管型集水装置の簡易計算法と合理的設計法

4.1 基礎式

いま枝管にそつ流出量  $q_L$  が砂利層を上昇する間に枝管の間隔  $S_L$  の範囲に一様に分布するものとする、ろ過池各部における洗浄速度は  $q_L/S_L$  によつてあらわされる。 $S_L$  を  $x$ ,  $X$  に無関係に一定とした場合、洗浄速度をろ過池全域を通じて一様とするためには  $q_L$  も  $x$ ,  $X$  の値の如何にかかわらず一定とする必要がある。 $q_L$  を一定とすれば、(8) 式は

$$u = u_0 - \frac{q_L x}{A_L} = \frac{q_L}{A_L} (L - x) \dots \dots \dots (11)$$

となり、(10) 式によつて  $q_M = q_L L/S_L$  も一定となるから、(8') 式は

$$U = U_0 - \frac{q_M X}{A_M} = \frac{q_M}{A_M} (M - X) \dots \dots \dots (11')$$

(7) と (9) の両式から  $y$  を消去し、さらに (11) 式を代入すると、

$$y_0 = \frac{q_L^2 S_P^2}{2g c_P^2 A_P^2} - \frac{q_L^2 x}{g A_L^2} (2L - x) + \frac{n_L^2 q_L^2}{3 R_L^{4/3} A_L^2} (3L^2 - 3Lx + x^2)x$$

となる。上式の両辺を  $u_0^2/2g = q_L^2 L^2/2g A_L^2$  で割つて無次元化すると、

$$\frac{y_0}{u_0^2/2g} = \left(\frac{S_P A_L}{c_P L A_P}\right)^2 - 2 \frac{x}{L} \left(2 - \frac{x}{L}\right) + \frac{2g n_L^2 L}{3 R_L^{4/3}} \left(3 - 3 \frac{x}{L} + \frac{x^2}{L^2}\right) \frac{x}{L} \dots \dots \dots (12)$$

となり、同様に (7'), (9') および (11') 式から次式がえられる。

$$\frac{Y_0 - y_0}{U_0^2/2g} = \left(\frac{S_L A_M}{c_L M A_L}\right)^2 - 2 \frac{X}{M} \left(2 - \frac{X}{M}\right) + \frac{2g n_M^2 M}{3 R_M^{4/3}} \left(3 - 3 \frac{X}{M} + \frac{X^2}{M^2}\right) \frac{X}{M} \dots \dots \dots (12')$$

$A_P, S_P$  が一定値のときは、 $L/S_P$  が1本の枝管にある小孔の数を示すから、(12) 式の  $L A_P/S_P A_L$  は枝管断面積に対する小孔の総開口面積比を示し、Jenks の設計基準 (1) 式の  $\Sigma A_P/\Sigma A_L$  に相当する。同様に (12') 式の  $M A_L/S_L A_M$  も主管に対する枝管の総開口面積比で、Ellms の結論 (2) 式の  $\Sigma A_L/A_M$  に相当する。そこでこれらの開口面積比をそれぞれ  $\beta, \alpha$  とし、つぎのように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \beta &= c_P L A_P / S_P A_L, \\ \alpha &= M A_L / S_L A_M. \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

ここで  $\beta$  のみ流量係数を含ませたのは、小孔における流量係数  $c_P$  はさきに述べたように少なくともブッシングあるいはストレーナーの採否によりその値が一定でない。一方、主管に対しては枝管を直角に配管し、その始端が主管内面に一致するようにするのが普通であるので、特殊構造としない限り  $c_L = 1/\sqrt{1.5}$  となる。これらを加味して  $\beta$  には  $c_P$  を含めた有効値をとるのが望ましく、反対に主管に対しては (13) 式の  $\alpha$  で十分であるからである。このようにすると、ろ床面積に対する小孔の有効面積比  $r$  は、

$$r = c_P \frac{A_P}{S_L S_P} = c_P \frac{L}{S_P} \cdot \frac{M}{S_L} \cdot \frac{A_P}{L M} = c_P \frac{L A_P}{S_P A_L} \cdot \frac{M A_L}{S_L A_M} \cdot \frac{A_M}{L M} = \alpha \beta \frac{A_M}{L M} \dots \dots \dots (14)$$

とあらわされる。 $L M = A_F$  であるから  $A_P, S_P$  が一定の場合には  $r$  は Jenks の  $\Sigma A_P/A_F$  に  $c_P$  を乗じたものである。つぎに  $2g n_L^2 L/3 R_L^{4/3}$ ,  $2g n_M^2 M/3 R_M^{4/3}$  はそれぞれ枝管および主管における摩擦損失水頭の大きさをあらわす無次元量であり、これらを

$$\frac{2g n_L^2 L}{3 R_L^{4/3}} = N_L, \quad \frac{2g n_M^2 M}{3 R_M^{4/3}} = N_M \dots \dots \dots (15)$$

とかくことにする。 $y_0$  および  $Y_0$  は定義によりそれぞれ枝管流入口および主管流入口から砂利層底部に至る間の損失水頭を示し、 $y_0/u_0^2/2g$ ,  $Y_0/U_0^2/2g$  はそれぞれ流入口における流速水頭との比をとつたものである。特に  $Y_0/U_0^2/2g$  は全集水系中における損失水頭の無次元量であり、比損失水頭ともいうべき重要な要素となる。

(13) 式を用いて (10) 式をかき直すと、

$$U_0 = \alpha u_0 \dots\dots\dots(16)$$

となるので、(13)、(15)、(16) の各式を用いて、(12)、(12') 式は

$$\text{枝管に対し, } \frac{y_0}{u_0^2/2g} = \frac{1}{\beta^2} - 2\frac{x}{L}\left(2 - \frac{x}{L}\right) + N_L\left(3 - 3\frac{x}{L} + \frac{x^2}{L^2}\right)\frac{x}{L}, \dots\dots\dots(17)$$

$$\text{主管に対し, } \frac{Y_0}{U_0^2/2g} - \frac{y_0}{\alpha^2 u_0^2/2g} = \frac{1}{\alpha^2 c_L^2} - 2\frac{X}{M}\left(2 - \frac{X}{M}\right) + N_M\left(3 - 3\frac{X}{M} + \frac{X^2}{M^2}\right)\frac{X}{M} \dots\dots(17')$$

となる。 $A_L, S_L, A_M$  は一定とするので、 $\alpha$  は一定であり、(17') 式から  $y_0/u_0^2/2g$  を求め、(17) 式から  $\beta$  を求めれば、洗浄速度を一様にするような  $A_P, S_P$  が  $x, X$  のすべての値について決定できる。これを (7)~(9) 式および (7')~(9') 式にもどつて考えると、 $q_L, q_M$  が一定の場合、(7)、(7') 式は  $y, Y$  が一定でないことを示し、一方  $A_L, S_L$  を一定とすれば (9') 式から  $Y - y_0$  が一定で  $y_0$  が  $X$  の関数となり、したがつて  $y$  が  $x$  および  $X$  の関数になつて、(9) 式から  $A_P/S_P$  が  $x$  および  $X$  によつて変ることがわかる。

#### 4.2 小孔の孔径と間隔を段階的に変化させる方法

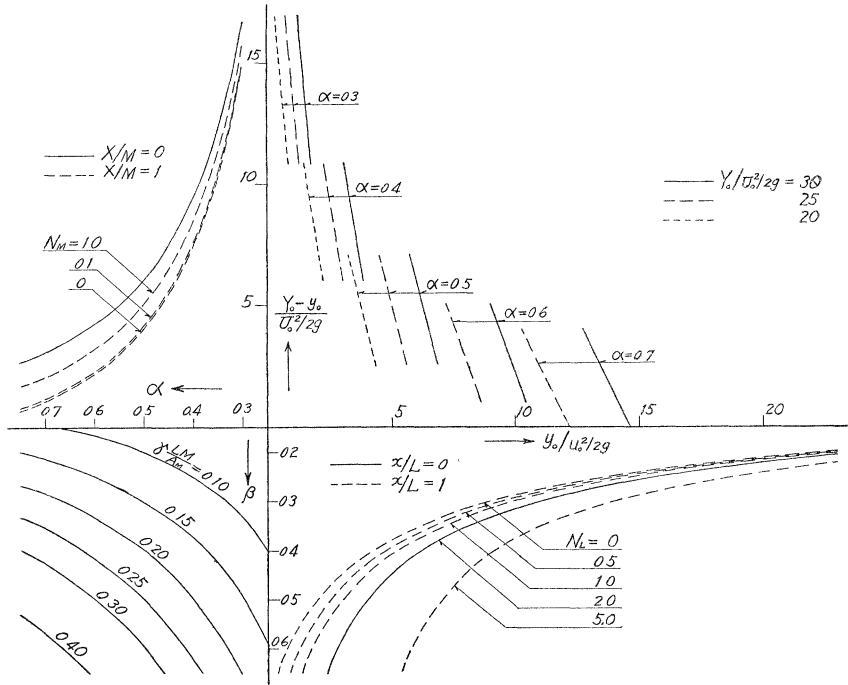
多孔管型集水装置では  $A_M, A_L, A_P, S_L, S_P$  などをすべて一様として前述の設計基準 (1)、(2) に従つた場合、洗浄速度は  $X=M, x=L$  において最も大、逆に  $X=0, x=0$  において最も小となり、その他の点においてはこの両極値の間を一様に変化している。本文では、ろ過中の集水現象についての解析は行わないが、通常  $X=M, x=L$  においてろ過速度が最も遅く、 $X=0, x=0$  において最も早い。このようにろ過速度の分布と洗浄速度のそれがまったく逆であるので、今後ろ過速度の上昇が考えられるような場合には、洗浄速度の分布が各小部分では若干不均等であつても、ろ過池全体としては均等にすることが合理的であり、そのための設計計算を行うには、(17)、(17') 式をそのまま用いればよい。まず  $L, M, A_L, S_L, A_M$  の値と用いる管種によつて (13)、(15) 式から  $\alpha, N_L, N_M$  を算出し、洗浄速度と洗浄時に利用できる水頭から適当に比損失水頭  $Y_0/U_0^2/2g$  を求めておく。 $S_P$  を一定として  $A_P$  を変化しようとする場合には、ろ過池を主管にそつて間隔  $S_L$ 、枝管方向に間隔  $S_P$  の矩形に分割し、各区域の平均の  $x/L, X/M$  について  $\beta$  を計算する。さらに小孔の形状によつて  $c_P$  の値を定めれば、(13) 式から  $A_P$  が求められるから、それに相当する孔径  $d$  の小孔を該区域の中央に設ければよい。しかし小孔を1個づつ変化させることは実際問題としては不可能であるので、適当数の区域ごとにそれらの中央径に統一することになる。また  $A_P$  を一定として  $S_P$  を変化させるときは、つぎに求められる  $S_P$  を予想してその区域の  $x/L, X/M$  の代表値を仮定し、順次  $S_P$  を決めて行けばよい。なお、 $S_L, S_P, d$  などの絶対値については、砂利層の厚さに応じて Jenks の結論 (1) も十分参考とすることができ、 $S_P > S_L$  となるような部分では  $d$  を小さくして  $S_P = S_L$  とすると、 $A_P$  すなわち  $d$  の変化が急激すぎるときは  $S_P$  も若干変化せしめて  $A_P$  の変化率を緩和することが必要な場合も生ずるのであろう。

以上の計算は (17)、(17') 式を図式化しておくことによつて非常に簡易となる。図-2 はこれらの関係を  $c_L = 1/\sqrt{1.5}$  として描いたものである。図-2 の第 II 象限は (17') 式によつて  $\alpha$  と  $(Y_0 - y_0)/U_0^2/2g$  の関係をも求めたもので、 $X/M, N_M$  の値が異なる各曲線は縦軸の方向に互に平行移動すればよい。同様に第 IV 象限は  $\beta$  と  $y_0/u_0^2/2g$  の関係を (17) 式から求めたもので  $x/L, N_L$  にしたがつて横軸方向に平行移動すればよい。第 I 象限は (17) および (17') 式のおのおの左辺の間の関係となり、 $Y_0/U_0^2/2g$  が等しければすべて縦軸上の一点で交わる勾配  $(-1/\alpha^2)$  の直線で示される。なお第 III 象限は参考のため (14) 式において  $rLM/A_M$  を一定とした場合の  $\alpha$  と  $\beta$  の関係を示す双曲線である。まず  $\alpha$  から  $X/M, N_M$  をパラメーターとして  $(Y_0 - y_0)/U_0^2/2g$  を求め、これから再び  $\alpha$  と  $Y_0/U_0^2/2g$  によつて  $y_0/u_0^2/2g$  を知り、ついで  $x/L, N_L$  をパラメーターとして  $\beta$  を得ることができる。このように 図-2 を用いると段階的設計法を容易に適用できるわけであつて、徒らに面倒な計算をして正確な値を知つても無意味であらう。

なお、図-2 からわかるように、一般に  $\alpha$  が小さい場合  $\beta$  を大きくできるが、ろ過池内における  $\beta$  の変化率が大きくなり、反対に  $\alpha$  が大きいほど  $\beta$  は小となり、ろ過池内におけるその変化率も少ない。また  $Y_0/U_0^2/2g$  を大にするほど  $\beta$  は均等になる。 $\beta$  の変化率が大きいときほど、 $A_P$  あるいは  $S_P$  の一方を一定としたときの他方の変化がはなはだしいことは当然である。また、 $N_L$  または  $N_M$  が 2.0 以下のときには、 $x/L=1$  または  $X/M=1$  における  $\beta$  がそれぞれ  $x/L=0$  または  $X/M=0$  における  $\beta$  より小さくなつてはいるが、 $N_L$  または  $N_M$  が 2.0 以上となると、これが逆になることは注意を要する。

図-2 (17), (17') 式の図式表示

Fig. 2 Graphic representation of Eqs. (17) and (17').



4.3 最大最小流量比と一様配管系の合理的設計法

ろ過池内の洗浄速度の分布を均等にするための一方法として、理論的には各点で全く均等な  $y$  の値を生じるように  $A_M$  と  $A_L$  の値を変化させることも可能である。しかし実際設計において施工できるのは、 $A_M$ ,  $A_L$ ,  $S_L$  を一定とし  $A_P$  または  $S_P$  を数段階に変化させる程度が限度でないかと考えたわけであるが、さらに施工を容易にする意味で  $A_P$  および  $S_P$  をとも一定とする従来の形式もなお重要である。この場合たとえば (1), (2) 式的设计基準によれば、洗浄速度のろ過池内における均等度がどの程度になるかを確かめる必要があり、かつこの基準に流量分布の均等度を導入するためには、多孔管型集水装置の水利機構を左右する種々の要素と均等度との関係を明らかにしておかねばならない。 $q_L$  が一定の場合の基礎式 (17), (17') を用いれば、つぎのようにして簡単に流量分布の均等度を求めることができる。すなわち、(9) 式は

$$q_L = c_P \frac{A_P}{S_P} \sqrt{2gy} = c_P \frac{LA_P}{S_P A_L} \cdot \frac{A_L}{L} \sqrt{2gy} = \frac{A_L}{L} \beta \sqrt{2gy}$$

とかけるから、(17), (17') 式から  $q_L$  を一定としたときの  $\beta$  が求めれば、各点の  $y$  の値  $y_1$  は、

$$\sqrt{2gy_1} = \frac{q_L L}{A_L} \cdot \frac{1}{\beta} = u_0 \frac{1}{\beta} \dots \dots \dots (18)$$

として求められる。いま  $\beta$  が一定値  $\bar{\beta}$  である場合にも  $q_L$  の分布がかなり均等であつて、その場合の  $y$  の分布が (18) 式で求めた  $y_1$  と大差ないものとする、

$$q_L \cong \frac{A_L}{L} \bar{\beta} \sqrt{2gy_1} = \frac{A_L}{L} \bar{\beta} u_0 \frac{1}{\bar{\beta}} \dots \dots \dots (19)$$

となり、 $A_L$ ,  $L$ ,  $\bar{\beta}$ ,  $u_0$  は一定であるから、 $q_L$  は  $\beta$  に逆比例することとなる。したがつて (19) 式において  $\beta$  を  $\beta_{min}$  とすれば  $q_{L,max}$  が得られ、 $\beta_{max}$  とすると  $q_{L,min}$  が得られる。ろ過池内洗浄速度の最大最小比を  $R_w$  とすると、

$$R_w = \frac{q_{L,max}}{q_{L,min}} \cong \frac{\beta_{max}}{\beta_{min}} \dots \dots \dots (20)$$

とかくことができる。

a)  $N_L=1.0$  の場合 設計基準 (1) の 1) は

$$L \leq 60 D = 240 R_L \text{ あるいは } L/240 R_L \leq 1.0$$

であるが、これはつぎのようにかき改められる。

$$(2gn_L^2L/3R_L^{4/3})(R_L^{1/3}/2gn_L^2 \cdot 80) = N_L R_L^{1/3} / 2gn_L^2 \cdot 80 \leq 1.0.$$

いま通常用いられる値として、 $n_L=0.013$ 、 $D=0.075$  m とすれば、 $R_L^{1/3}/2gn_L^2 \cdot 80 \cong 1.0$  となるから、  
 $N_L \leq 1.0$

となる。ところが主管の断面は大きいので摩擦の影響を無視し、 $N_M=0$ 、 $N_L=1.0$ 、 $1/c_L^2=1.5$  として、 $R_w$  を求めてみよう。この場合、 $\beta_{\min}$  ( $q_{L,\max}$ ) は  $x/L=X/M=1$  において生じるから、これらの値を (17)、(17') 式に代入して、

$$\beta_{\min} = 1 / \sqrt{\alpha^2 \left( \frac{Y_0}{U_0^2/2g} + 2 \right) - \frac{1}{2}} \dots\dots\dots (21)$$

同様に  $x/L=X/M=0$  として (17)、(17') 式を解いて、

$$\beta_{\max} = 1 / \sqrt{\alpha^2 \frac{Y_0}{U_0^2/2g} - \frac{3}{2}} \dots\dots\dots (22)$$

をえる。したがって

$$R_w = \sqrt{\alpha^2 \left( \frac{Y_0}{U_0^2/2g} + 2 \right) - \frac{1}{2}} / \sqrt{\alpha^2 \frac{Y_0}{U_0^2/2g} - \frac{3}{2}} \dots\dots\dots (23)$$

となる。(19) 式における一定の  $\bar{\beta}$  の値としては、分布した  $\beta$  の値をできるだけよく代表するものがよいが、簡単のために  $\beta_{\max}$  と  $\beta_{\min}$  の平均値をとるものとして、

$$\bar{\beta} = \frac{1}{2} (\beta_{\max} + \beta_{\min}) \dots\dots\dots (24)$$

とすれば、(14) 式より、

$$r \frac{LM}{A_M} = \alpha \bar{\beta} = \frac{1}{2} \left\{ 1 / \sqrt{\alpha^2 \frac{Y_0}{U_0^2/2g} + 2} - \frac{1}{2\alpha^2} + 1 / \sqrt{\alpha^2 \frac{Y_0}{U_0^2/2g} - \frac{3}{2\alpha^2}} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

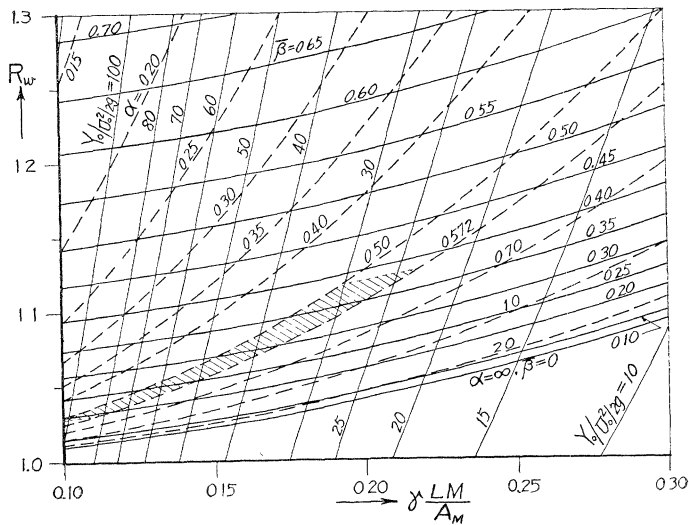
(23)、(25) の両式から  $R_w$  と  $rLM/A_M$  の関係として次式がえられる。

$$\left. \begin{aligned} r \frac{LM}{A_M} &= \sqrt{R_w^2 - 1} \frac{1 + R_w}{R_w} / 2 \sqrt{2 + \frac{1}{\alpha^2}} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(R_w^2 - 1)(1 + R_w)^2}{2R_w^2} - 2\bar{\beta}^2} \\ &= \sqrt{3R_w^2 - 1} \frac{1 + R_w}{R_w} / 2 \sqrt{2 \left( \frac{Y_0}{U_0^2/2g} + 3 \right)}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

(26) 式の関係を図示したものが 図-3 である。図からわかるように、 $\alpha$ 、 $\bar{\beta}$ 、 $rLM/A_M = \alpha\bar{\beta}$ 、 $Y_0/U_0^2/2g$  のうちの二つを与えれば他の二つと  $R_w$  が決定するわけで、しかも  $R_w$  は洗浄速度の大小に無関係である。また比損

図-3  $R_w$  と  $\alpha, \bar{\beta}, r, Y_0/U_0^2/2g$  の関係 ( $N_M=0, N_L=1.0$  の場合)

Fig. 3 Effects of  $\alpha, \bar{\beta}, r$  and  $Y_0/U_0^2/2g$  on  $R_w$  (where  $N_M=0$  and  $N_L=1.0$ ).





失水頭  $Y_0/U_0^2/2g$  も  $\alpha, \bar{\beta}$  のみの関数であり、やはり洗浄速度によつて変化しないことは顕著な特性である。しかし  $\alpha, \bar{\beta}$  のみを与えて  $R_w$  を決定した場合には、 $LM/A_M$  の値いかんによつては  $r=c_P A_P/S_L S_P$  をどのような値にでもすることができる。洗浄速度の最大最小比すなわち均等度  $R_w$  に対する各要素の影響をとりまとめると、つぎのようである。

(1) 一般的には  $\alpha, \bar{\beta}$  が小なる方が洗浄流量の均等度が高いが、 $\bar{\beta}$  あるいは  $\alpha$  を一定とする場合はそれぞれ  $\alpha$  あるいは  $\bar{\beta}$  を大きくすると  $\alpha\bar{\beta}=rLM/A_M$  が増加して  $R_w$  が大きくなる。また  $\alpha$  あるいは  $\bar{\beta}$  を一定としたときは、比損失水頭  $Y_0/U_0^2/2g$  を小にするほど  $R_w$  が大になるが、逆に  $(\alpha\bar{\beta})$  を一定としたときは比損失水頭を小にするほど  $R_w$  が小となる。ただ  $\alpha$  と  $\bar{\beta}$  をともに小さくすると、損失水頭が極度に増加するので、 $r$  を一定とするようなときは  $\bar{\beta}$  を小にして  $\alpha$  を大きくすると  $R_w, Y_0/U_0^2/2g$  の両者をともに減らすことができ好都合である。

(2)  $\alpha=\infty, \bar{\beta}=0$  の両線は一致し、この線以下の均等度は多孔管型において望むことはできない。ただしこの極限状態においては  $rLM/A_M=\alpha\bar{\beta}$  の値が不確定となり、 $R_w$  もこの線上の任意の値をとりうる。したがつて  $\alpha$  が大、 $\bar{\beta}$  が小になるにつれて  $R_w$  は小さくはなるが、不安定に近くなるわけであり、換言すれば実際施工にあつて  $\alpha$  および  $\bar{\beta}$  に相当する部分に少し不均等があつても  $q_L$  が局部的に変動したり、また洗浄中なんらかの攪乱によつても  $R_w$  が変る可能性を示すものと思われる。

(3) (1) および (2) 式で示される Jenks, Ellms の結論のすべてを完全に 図-3 の上に描くことは不可能であるから、いまかりに  $c_P=0.76$  として (1) 式の iv) と (2) 式をとりあげると、 $\alpha=1/2\sim 4/7, \bar{\beta}=0.19\sim 0.38$  の領域は、図に斜線を施した部分となり、 $R_w \cong 1.03\sim 1.13$  にあることがわかる。この  $R_w$  自身は別に過大ともいえないが、 $Y_0/U_0^2/2g \cong 100\sim 23$  となつて、さきに述べたように  $q_L$  の均等化が単に損失水頭の増加にのみ依存していることを如実に示している。

(4) 図-3 からわかるように、 $\bar{\beta}$  をパラメーターとする線群は他の値をパラメーターとするそれらと比較して特に勾配がゆるやかである。したがつて  $\bar{\beta}$  のみを与えれば、他の値の如何にかかわらず、 $R_w$  の値にはさして大きな変化はない。

そこで  $\alpha$  を与えてすでに与えた  $\bar{\beta}$  とから  $\alpha\bar{\beta}=rLM/A_M$  を決めるという方法をとらず、設計基準 (1) 式が成立するための条件式 (3) を満足するように適当に  $r$  を選び、さらに  $LM/A_M$  をも勝手に選定しても  $R_w$  がかなり小さくなる場合もあるわけである。これは  $\alpha$  の値には  $\bar{\beta}$  ほどの重要性のないことを示し、著者がすでに前論文<sup>9)</sup>で指摘したとおりである。この事実は枝管においては  $y$  の変化が直接  $q_L$  に影響するが、主管においては各枝管への流入量が若干変化することにより、主管中の  $Y$  と枝管流入口の  $y$  の差が一定に近くなることに基因している。すなわち (9) と (9') の両式の差異によるのである。

$\alpha$  および  $\bar{\beta}$  の変化率に対する  $R_w$  の変化率  $dR_w/R_w$  は (26) 式から

$$\frac{dR_w}{R_w} = \frac{8 R_w^2 \alpha^2 \bar{\beta}^2 \{ d\alpha/\alpha + (1+1/2\alpha^2) d\bar{\beta}/\bar{\beta} \}}{(1+R_w)^2(1-R_w+R_w^2)} \dots\dots\dots(27)$$

となる。ところが  $R_w > 1$  であるから、 $d\alpha=0$  すなわち  $\alpha$  =一定 または  $d\bar{\beta}=0$  すなわち  $\bar{\beta}$  =一定 のとき、それぞれ  $\bar{\beta}$  または  $\alpha$  の増加により  $R_w$  が増加することがわかるが、これは (1) に述べたとおりである。なお (27) 式からわかるように、 $\alpha$  の小さいところほど  $\bar{\beta}$  の変化による  $R_w$  の変化が大きいから、 $\alpha$  を増しても  $\bar{\beta}$  を減らすことによつて  $R_w$  を減少しうるのである。

結局 (1) 式の基準を用いた場合には、小孔の孔径を  $d=6\sim 12$  mm から決定するとそれにとりなつて  $A_P/S_P$  が決定され、したがつて  $\bar{\beta}$  を与えれば  $L/A_L = \bar{\beta} S_P/c_P A_P$  が定まり、 $L$  が短いほど  $A_L$  を小さくとれることになる。しかし施工上  $A_L$  はある限度以下には小さくできないので、 $L$  が (3) 式の限度以下大幅に短かいようなときには  $\bar{\beta}/c_P$  が  $1/4$  以下になる場合もあり、それによつてほとんど  $R_w$  がきまるから、小型ろ過池ほど  $R_w$  が小さくなりうるということがわかる。

**b)  $N_L=2.0$  の場合** さきに少しふれたように枝管あるいは主管においては  $N_L, N_M < 2.0$  の場合、 $\beta|_{x/L=0} > \beta|_{x/L=1}, \beta|_{X/M=0} > \beta|_{X/M=1}$  となる。(20) 式の  $R_w$  は

$$R_w \cong \left[ \frac{\beta_{\max}}{\beta_{\min}} \right]_{x/L=0} \times \left[ \frac{\beta_{\max}}{\beta_{\min}} \right]_{X/M=1}$$

ともあらわすことができ、しかも上述のように主として枝管における流量分布に依存しているから、いま任意の枝管における  $r_w$  の値

$$r_w \cong \left[ \frac{\beta_{\max}}{\beta_{\min}} \right]_{X/M=\text{const.}}$$

に対する  $N_L$  の影響をしらべてみる。このために  $d\beta/d(x/L)=0$  を満足する  $x/L$  の値は、(17) 式から

$$\frac{x}{L} = 1 - \frac{4}{3N_L} \dots\dots\dots (28)$$

かつこの場合  $d^2\beta/d(x/L)^2 = -2\beta^3 < 0$  であるから (28) 式を満足する  $x/L$  において  $\beta$  は極大値となり、 $\beta$  を一定値  $\bar{\beta}$  としたときには  $q_L$  が極小値になる。 $N_L$  の種々の値に対し枝管にそつた  $\beta$  の大小関係、 $\beta_{\max}$  と  $\beta_{\min}$  の位置およびその比を (17), (28) 式から求めると表-1 のようになる。 $y_0/u_0^2/2g$  を一定として  $N_L$  の各変域

表-1 枝管にそつ  $\beta$  の分布と  $r_w$

$N_L$	$\beta$ 分布の模様 ( $\circ$ 印は極大点) $0 \leq x/L \leq 1$	$x/L$		$r_w \cong \beta_{\max}/\beta_{\min}$ (ただし $K=y_0/u_0^2/2g$ )
		$\beta_{\max}$	$\beta_{\min}$	
$< 1 \frac{1}{3}$		0	1	$\sqrt{\frac{K+2-N_L}{K}}$
$= 1 \frac{1}{3}$		0	1	$\sqrt{\frac{K+2/3}{K}}$
$> 1 \frac{1}{3}$ $< 2$		$0 \sim \frac{1}{3}$	1	$\sqrt{\frac{K+2-N_L}{K+2-N_L-32/27 N_L^2}}$
$= 2$		$\frac{1}{3}$	1, 0	$\sqrt{\frac{K}{K-8/27}}$
$> 2$		$\frac{1}{3} \sim 1$	0	$\sqrt{\frac{K}{K+2-N_L-32/27 N_L^2}}$
$= \infty$		1	0	$\infty$

ごとに  $r_w$  がどう変化するかを調べると、通常  $N_L=2.0$  のときに枝管にそつ流量分布が最も均等になることがわかる。

一方主管については、 $\alpha, \bar{\beta}$  を適当な値にとれば、長さに比し大きな断面となり、 $N_M$  を増すには人工粗度を与える必要があると思われるので、かりに  $N_L=2.0, N_M=0$  とすると、ろ過池全域について  $\beta_{\min}(q_{L,\max})$  を生じるのは  $X/M=1.0, x/L=1.0$  あるいは  $0$  であり、 $\beta_{\max}(q_{L,\min})$  を生じるのは  $X/M=0, x/L=1/3$  であるから、 $N_L=1.0$  の場合の (26) 式に相当するものとして、

$$\left. \begin{aligned} \tau \frac{LM}{A_M} &= \sqrt{R_w^2 - 1} \frac{1+R_w}{R_w} \left/ 2 \sqrt{2 + \frac{4}{27\alpha^2}} \right. \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(R_w^2-1)(1+R_w)^2}{2R_w^2} - \frac{8}{27}\bar{\beta}^2} \\ &= \sqrt{89R_w^2 - 81} \frac{1+R_w}{R_w} \left/ 2 \sqrt{\frac{8Y_0}{U_0^2/2g} + 178} \right. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26')$$

がえられる。ここに、 $\bar{\beta}$  は (24) 式と同様に定義し、 $c_L^2=1/1.5$  としている。

(26') 式の関係を図示したのが 図-4 であつて、その一般的傾向は (26) 式を示す 図-3 と同様であるが、同じ  $\alpha, \bar{\beta}$  の値に対する  $R_w$  の値がさらに小さくなつており、この傾向は  $R_w$  の大きいほど顕著である。ただ  $\alpha = \infty, \bar{\beta} = 0$  なる限界線が 図-3 と同じ線であることと、比損失水頭が若干増加することに注意すればよい。この場合  $R_w$  に対する  $\alpha$  と  $\bar{\beta}$  の影響を示す式は、

$$\frac{dR_w}{R_w} = \frac{8R_w^2\alpha^2\bar{\beta}^2 \{ d\alpha/\alpha + (1+2/27\alpha^2)d\bar{\beta}/\bar{\beta} \}}{(1+R_w)^2(1-R_w+R_w^2)} \dots\dots\dots (27')$$

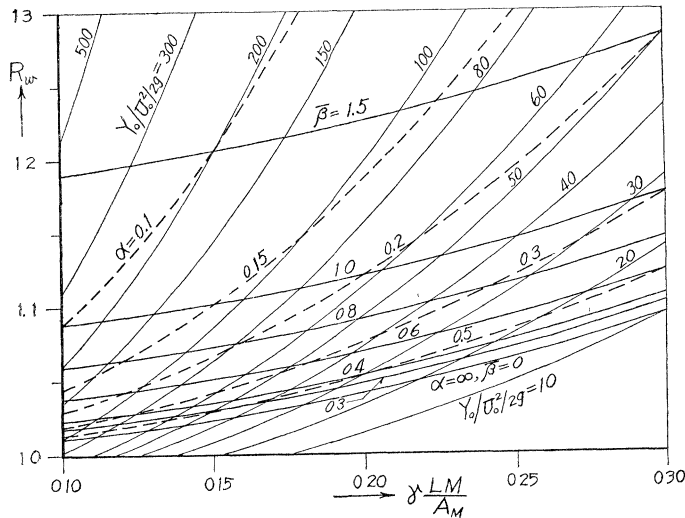
となり、(27) 式の場合と比較して、 $\bar{\beta}$  の影響に較べたときの  $\alpha$  の影響がやや大きくなつていることがわかる。

かくして洗浄特性の最も良好な一様配管の多孔管型集水装置を設計するには、図-4 を用いることが望ましいが、その計算順序はつぎのようである。

1. ろ過池の幅  $L$ 、用いる管種を決定すると、 $N_L=2.0$  をほぼ満たすように、 $A_L$  したがつて  $D$  を求める。
2. 所要の洗浄効果から  $R_w$  を定め、また利用しうる洗浄水頭と洗浄速度から  $Y_0/U_0^2/2g$  を与えると、図-4 から  $\alpha, \bar{\beta}, \tau LM/A_M$  が同時に求められる。 $S_P$  を与えると  $\bar{\beta}$  から  $A_P$  を計算でき、また  $S_L$  を与えると、 $c_P A_P/S_L S_P = \tau$  がわかるから、 $LM/A_M$  から  $A_M$  を決定できる。あるいはまず  $S_L$  を与えて  $\alpha$  から  $A_M$  を求め、つぎに  $A_P$  を与えて  $S_P$  を決定してもよい。いずれにしても  $S_L, S_P, A_P$  などが一義的に決定されることはないから、砂利層の構成や小孔の種類によつて、これらをともに妥当な値にする余裕が残されている。

図-4  $R_w$  と  $\alpha, \beta, \gamma, Y_0/U_0^2/2g$  の関係 ( $N_M=0, N_L=2.0$  の場合)

Fig. 4 Effects of  $\alpha, \beta, \gamma$  and  $Y_0/U_0^2/2g$  on  $R_w$  (where  $N_M=0$  and  $N_L=2.0$ )



4.4 その他

a) 急速ろ過池の大型化への貢献 上述のように  $N_L=2.0$  として一様多孔管を設計すれば合理的なことがわかつたが、

$$N_L = \{ 2 n_L^2 g / 0.75 (D/4)^{1/3} \} (L/D) = 2.0$$

とかき改めると、上式から最も能率のよい  $L/D$  が求められる。 $L/D$  は  $D$  そのものによつて若干変化するが、 $n_L=0.013$  としたとき種々の  $D$  に対する最も能率のよい  $L/D$  および  $L$  を求めると表-2 のようになり、 $n_L$  が小さく平滑な管ほど、 $L/D$  はさらに大となるはずである。多孔管型集水装置は (1) 式的设计基準によれば小型ろ過池におけるほど流量分布が均等となるが、事実は上述のようにむしろ大型ろ過池に好適とさえいえるのであつて、

表-2 最も能率のよい  $L/D$  ( $n_L=0.013$ )

D (mm)	L/D	L(m)
50	112	5.6
75	128	9.6
100	141	14.1
125	153	19.1
150	161	24.2

(3) 式のような  $L$  に対する制限はない。急速ろ過池の大型化を妨げていた一つの要素は、 $L$  の増大にともなう洗浄排水用トラフの断面増大であるが、表面洗浄の併用による逆流洗浄速度の低下が可能となり、この問題も解決されてきたから、今後はさらに大型ろ過池の建設が可能となるであろう。

b) 洗浄流量分布均等度 以上において洗浄流量分布の均等度を簡単に計算し、これを設計計算の基準として導入する方法を述べたが、通常の急速ろ過池にどの程度の流量の均等性が要求されるかということについては、確然とした理論がない。この問題はろ過池の大きさや用途、洗浄速度と洗浄時間、未ろ水の水質、表面洗浄の有無とその効果、洗浄中洗浄水が砂層中を横方向へ移動する現象などと関連してきわめて複雑であり、今後なお研究を必要とする。R. Hazen は洗浄中の水頭比が 12 : 8 ( $R_w$  に換算すると約 1.23) 程度であれば、砂粒が横方向へ移動することは不可能であるとしている<sup>3)</sup> が、その他の要素をも考慮せず  $R_w$  は 1.1 程度以下にするのがよいようである。

c) 近似計算法の精度 (26), (26') 式あるいは図-3, 4 は洗浄流量が均等という仮定から出発してその均等度  $R_w$  を求めたものであるから、 $R_w$  が大きくなるほど誤差が大きくなり、実際の最大最小流量比  $R_w'$  の方が  $R_w$  より常に大となる。いま  $N_L=N_M=0$  の場合につき厳密に求めた  $R_w'$  と上と同様の近似法による  $R_w$  を比較し、その誤差 ( $R_w'/R_w - 1$ ) を計算すると表-3 の程度となり、 $R_w < 1.20$  ぐらいでは図-3, 4 をこのまま用いてもならん差支えないことがわかる。

表-3 近似計算法の誤差 ( $N_L=N_M=0$ )

$\alpha$	$R_w$				
	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25
1.0	0.035%	0.15	0.37	0.70	1.12
0.5	0.055	0.23	0.54	0.99	1.55

## 5. 多孔管型集水装置の耐久性

多孔管型に限らず集水装置一般を通じて、これらが一旦設備されてる過池が運転をはじめると、厚い過層によつておおわれているため点検、補修を加えることは容易でない。したがつて従来からも集水装置の耐久性については種々論議されているが、ここでは水理学的な立場から耐久性について述べる。

上述のように  $\beta$  の値は小さい方が流量分布の均等度を高めるので、 $A_p$  を小さくするか、あるいは  $c_p$  を小さくするような小孔の形を選ぶとよい。しかしその結果必然的に小孔における流速が増大して小孔が磨滅拡大し、したがつて  $\beta$  が大きくなつて、長年月の間には漸次均等度が悪化してくる。小孔に磨滅に強いブッシングをはめることは、 $c_p$  したがつて  $\beta$  を小さくしつつ磨耗を防いで効果的であるが、上述の設計法によれば、 $\beta$  を若干小さくするかわりに  $\alpha$  を大きくし、 $R_w$  の値を変えずに  $r$  を増すことによつて全損失水頭および小孔からの噴出速度を減らすことができるので、あらかじめ急速ろ過池全体を考えた耐用期間の間に、逆流洗浄によつてどの程度小孔が拡大し、その流量係数が変化するかを実験などから推定し、その最終状態において所定の洗浄流量の均等性がえられるように設計を行えば、必ずしもブッシングを用いる必要がなく、かえつて経済的にもなる。

著者が大阪市工業用水道福島浄水場急速ろ過池に設けられた多孔管型集水装置につき実測した結果によると、当初 0.760 であつた流量係数  $c_p$  が約 400 回（延時間にして約 40 時間）の逆流洗浄を行った後には 0.768 となり、約 1% の増加を示した。この場合小孔の孔径そのものの変化は不明であるので、 $c_p$  の測定値はみかけの流量係数であるが、これがすなわち孔径の増大と  $c_p$  の増大とを総合した  $\beta$  の増加率を示すことになる。この程度であれば  $R_w$  の増加はほとんど問題とはならないと思われる。なお本集水装置は石綿セメント管の枝管に径 9 mm の小孔を設けてありブッシングは用いていない。また洗浄中の小孔における平均流速は 5.7~6.5 m/s であつた。

## 6. 総 括

以上述べたことのうち要点を列記すると、つぎのとおりである。

1. 従来用いられてきた多孔管型集水装置に対する設計基準 (1), (2) 式は、水理学的に不明確な点が多く、大型の急速ろ過池の場合ほど不合理性が顕著となる。
  2. 横から流出のある管路の基礎式を組合せて、洗浄速度を均等にする場合の多孔管型集水系の無次元表示計算式 (17), (17') を導き、これを用いて、より合理的な洗浄特性を与える階段的設計の図式計算法を提案した。
  3. さらに一様配管系の場合の洗浄流量の最大最小比を求める 図-3 あるいは 図-4 を作製したが、数値計算において各部寸法の異なるごとにいちいち手数を要する計算を必要としたのと比較するときわめて便利である。これらの図を用いることにより、設計基準に流量分布均等度と比損失水頭を導入することが可能となつた。
  4. 特に  $N_L=2.0$  とすれば一様配管系においても洗浄特性が合理的になり、また大型ろ過池に採用しても満足な結果をえることができる。
  5. 小孔にブッシングを設ける必要性は少なく、あらかじめ管の耐久性を予測すればこれを設計時に考慮することができる。
  6. 以上の計算法は単に多孔管型に限らず同様の流量配分機構をもつ他の型式にも適用することができる。
- 最後に本文をまとめるにあたり京都大学工学部 石原、岩井、合田各博士から種々有益な御助言を賜つたことを記し、また実測の便宜を与えて頂いた大阪市水道局関係各位に厚く謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 長谷川寛一、太野垣俊彦、末石富太郎 急速ろ過池逆流洗浄における圧力水室の水圧分布に関する実験、日本水道協会第7回上下水道研究発表会講演概要集、昭.31.6.
- 2) K.W. Cosens. Design and Operation Data on Large Rapid Sand Filtration Plants in United States and Canada, Jour. of A.W.W.A., vol. 48, No. 7, 1956, p. 819.
- 3) R. Hazen. Elements of Filter Design, Jour. of A.W.W.A., vol. 43, No. 3, 1951, p. 208.
- 4) M.L. Stuppy, F.C. Roe, R. Muller and J.R. Hartley Types of Filter Bottoms, Jour. of A.W.W.A., vol. 46, No. 6, 1954, p. 548.
- 5) 末石富太郎: 多孔管型集水装置による逆流浄水の流量・圧力分布について、水道協会雑誌, 271号, 昭 32 5
- 6) H.N. Jenks: An Investigation of Perforation of Perforated-Pipe Filter Underdrains, E.N.R., vol. 86, No. 4, 1921, p. 162.
- 7) J.W. Ellms: Design of Perforated Pipe Strainer Systems, Jour. of A.W.W.A., vol. 18, 1927, p. 664.
- 8) M.L. Enger and M.I. Levy: Pressure in Manifold Pipes, Jour. of A.W.W.A., vol. 21, 1929, p. 659.
- 9) N. Malishevsky: Pressure Head in Perforated Pipes, Jour. of A.W.W.A., vol. 27, 1935, p. 413.
- 10) たとえば G.M. Fair and J.C. Geyer: Water Supply and Waste-Water Disposal, J. Wiley and Sons, Inc., 1954, p. 688. (昭.33.9.2)