

豪雨時におけるマンホール内流況と損失係数

1 緒言

2 実験およびチャンバー内流況

3 圧力分布と損失水頭

4 噴流を仮定した損失水頭

5 まとめ

安川 浩*
宇井 正和*

要 約

下水管渠内の流況を解析する場合、管路内での解析の他に、マンホールや合流部分での管路接続用チャンバー内の水理的特性を明確にする必要がある。チャンバーの形状因子として、その大きさ、および上、下流側管路のレベル差（段差）を考え、そこでの流況とエネルギー損失を、被圧管内流を想定し、実験的に検討した。

チャンバーにおける損失係数 f は、段差ごとに値は変るが、一定値となることを確認した。しかし、段差と管内流量との値によってはチャンバー内に巨大な流出渦が出現し、 f も急激に増加するため管路の疎通能力を大きく減少させる危険性のあることが見いだされた。さらに、エネルギー損失の一般的特性を把握するために噴流の理論を適用し、段差やサイズの変化と損失係数の関係を検討した。

1 緒言

宅地造成や都市化の波は滞るところを知らず、河川敷を覆い、山間部を開き進んでいる。これらの開発や整備によって、降雨は地中へ浸透しえず、ほとんどが地表面を流れる。即ち、降った雨の大部分は、道路側溝等より集水されて下水管渠へと導かれ、次々と合流を重ねながら、忽ち管路の通水能力一杯の流量となって流下して行く。下水管渠は単純な断面をもつ一様な水路とは限らない。場所毎に、合流点や分岐点、あるいは断面拡大や勾配変化のために管路接続用柵（以下チャンバーと呼ぶ）を用いて連結されている。流れが一つの

チャンバーに到達すると、そこでは急激な断面の変化を経験し、壁面に衝突し、さらに他管からの流入と激しく混合しながら、持っていたエネルギーの大部分を失う。その代償として生じた水位の増加は、流れに対し“堰止め”として作用するため、止められた流量は管路を満管にすると同時に、余剰の流量は猛烈な勢いで満管部を上流へと突進させる。もし、この途中で別のチャンバーがある時には、満管部はそこでさらに大きな衝撃力をうけるため爆発的な形となってエネルギーを発散することになる。この力は、時にはマンホールの蓋を何十メートルもの高さへ吹き上げる威力を持つ程である。

筆者等は、これまで豪雨時を想定した下水管渠

* 東京都立大学都市研究センター・工学部

内の流れを解明するために、種々の実験を行い、又その現象をシミュレートしうる解析手法の開発に努力を重ねてきた。(安川他, 1984, 1985a, 1985b) その中で、管路内に急変流を起すために管路端部の流量を変化させたが、それは下水管渠内チャンバーでの流量変化と置き換えて考えることもできる。人為的に流れの状態を変える時には、そこでの何等かの量の変化を把握しておく必要があるが、チャンバーでの流量変化はチャンバー特有のものであり、形態や水位、そして管路内流量それ自身によって、時々刻々と変化する非定常現象である。このような複雑な現象を理論的に解明するのは不可能である上、境界条件として用いる場合には必ずしも詳細な解明は必要ではない。逆に、水流がチャンバーを通過する時の、エネルギーの減少や運動量の変化について、一般的な水理的特性を得ることが、管路内流体運動の解析上極めて重要なことであり、特に、チャンバーが多数付いた大規模な管路系にとっては不可欠のものといえる。

チャンバー内流体運動に関する研究は、その流況の複雑さの故か、極めて少い。その中でも、水路内での流れの数値解析法を研究してきた Cunge 等 (1982) は、合流および分岐用のチャンバー内エネルギー損失を与える式を提案しているが、チャンバーサイズ等が効果的に取り入れられてはいない。Sangster等 (1959) も合流部のチャンバー内損失を報告しているが、チャンバーサイズがエネルギー損失にとって重要な因子であることを実験的に示している。Marsalek (1984) は下水管渠のマンホール内でのエネルギー損失を、管の高さと床面との関係に於て実験的に調べているが、その水理的特性には言及していない。

この報告はチャンバーの形状の因子として、そこに接続する二つの管路の高さの差(段差)と、チャンバーサイズをとり、種々の段差に於けるチャンバー内流況とエネルギー損失を、被圧管内流を想定して実験的に検討し、解析的にはエネルギー損失の機構を噴流に求め、それをサイズの異なるチャンバーへ適用した結果を示すものである。

2 実験およびチャンバー内流況

2-1 実験装置

実験に用いた管路模型は図-1に示すように、全長約6m、内径10cmの亚克力製管路の中程にチャンバーを設置したものである。管路上流端は大型高架水槽と接続して安定した流量を維持すると共に、下流端には整流水槽を置きゲート高によって水位が適当な位置におさまるよう調節している。又管路上流側にはベンチュリー管を接続し、流量計測のために圧力差を測定した。チャンバーでの損失水頭を求めるため、その上流側35cmに1点、下流側には20cmより95cmの地点までに6点の圧力測定孔を設け、マンメータに接続した。下流側に多くの測定点を設けたのは、チャンバーからの乱れが、管内に一様分布するまでの距離が未定のためである。

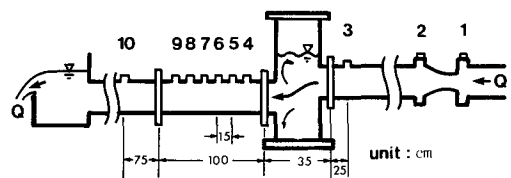


図-1 管路模型

実験に用いたチャンバーは図-2に示すように、3種類を用意した。チャンバーは用途上、合流分岐や流向を変えるもの等種々あるが、ここではチャンバーへの取付高に差のあるもの、即ち管路間に“段差”のある場合のみを検討対象とした。3種類のうちTYPE Iは、上下流管の取付高が等しい、つまり段差の無いもので、単にチャンバーの存在によって、流況およびエネルギー損失がどのように変化するかを調べるためのものである。TYPE IIの5cm段差チャンバーは、段差はあるものの流出入管の断面がある程度重なる場合を想定したもので、流入した流れがどのように分流するか確認したく、又TYPE IIIの15cm段差チャンバーでは、流出入管の断面が完全に離れているため、

流入した流れがチャンバー壁にあたり下流側へはダイレクトに流出しない事を期待したものである。

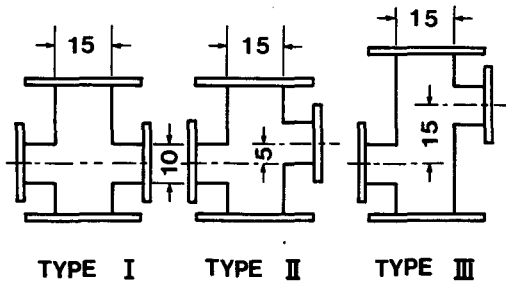


図-2 チャンバーの種類

チャンバーでの流れの損失を調べる事が目的であるため、出来る限り広い流量範囲での実験を目指したが、模型のサイズ上、最大流量は 10 l/sec 、そしてレイノルズ数では 1.3×10^5 が限界であった。

実験は、まず高架水槽と管路を継ぐバルブを開け、ベンチュリー管の差圧が所定の値になるようにして流量を調節した。流量が少ない場合には、管路内が開水路状態となるため、下流端整流水槽のゲートを調節してチャンバー内水位を上げ全管路を満管状態になるようセットした。しかし、流量とチャンバー内水位との関係も重要なため、一度設定したゲート高は変えないようにした。

チャンバー内の流況は、No.3地点から注入するトレーサーの流跡線で観察したが、ビデオカメラでも撮影し分析の用に供した。このトレーサーは直径 2 mm のステンレス管にて注入するものであるが、流れの拡散を調べるために、管頂と管中央および管底付近の3点から注入した。

2-2 チャンバー内流況

流れの状況をトレーサーによって可視化することは、非常に簡便で、又説得力に富むものである。しかし、この実験においては、少流量のケースの場合でも管内の流れは乱流になっているため、注入したトレーサーが乱され、必ずしも正確な軌跡を示すものとは言えない。さらに直径 2 mm の管を挿入するために、その管自身も乱れを作り、又注入状況も同等というわけではない。

しかし、チャンバーの中の流れは複雑で、詳細なトレーサーの追跡が可能であったとしても、実際にそれを分析する事は困難であろう。流体の微細な動きをみるよりも、ある程度平均化された動きによる方が流れの特徴を把握し易いことがよくある。今回のトレーサーによる観察はそれに当たる。

2-2-1 TYPE I型チャンバー

TYPE I型のチャンバーは、その上下流側に接続する管路の高さが等しく、段差の無いものである。この管路系を満管状態にするのは容易で、単に下流側管路を満管にすればよい。流量が少ない時も、管路内水面形はほとんど水平に近い勾配で流れているため、下流側管内で水面が管頂に達すれば、上流側管でも管頂に達するからである。

流量が少ない範囲では、水流に目立った乱れも生じず、チャンバー内水面は極めて静穏である。この事は、トレーサーによる可視化からも明らかで、写真-1に示すように、上流管からの色素のパターンが、チャンバーを通過し、そのまま下流管へと流下している。しかし、色素は直線的に伸びるのではなく、注入直後より折れ線状に見えることから、管路内の流れは螺旋状に流れており、チャンバーの中でも同じように流下することがわかる。

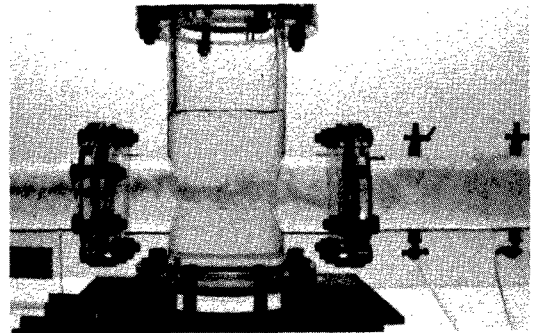


写真-1 チャンバー内の流れ

流量が増すと、チャンバー内下流側水面が盛り上ると共に波立つようになる。これはチャンバーに流入した水流の一部が(チャンバー)壁に衝たり、上昇流となったためであるが、それはチャンバーの上部領域がトレーサーによって急激に色づく事からも理解される。このように、上昇流の供

給をうけたチャンバー上部が、その水面高を一定に保つためには、同量の流体を、下方に送り出さねばならない。その下降流はチャンバーの左右の壁面に沿って行われるものと思われる。何故ならば管路中央を流れるトレーサーがほとんど乱されずにチャンバー内を通過するのを確認できることと、水面に生じた微小な空気泡が、下降流に引きずられてチャンバー両側面を下りて行くのが見られるためである。この空気泡は、浮力の方が強いいため、水深の1/2程度までの下降を限界とし、その後浮上してしまう。空気泡の連行現象は、流量と管頂以上の水かぶり高に関連していると見られ、チャンバー内水位が増すと発生しなくなる。

2-2-2 TYPE II型チャンバー

TYPE II型のチャンバーは、上流側管路が下流側管路より半径(5 cm)分高い位置に接続された段差付チャンバーである。このため、少流量1.5 l/sec以下の範囲では、チャンバー内水位が十分に高くなり、下流側管路が満管でも上流側管路が開水路状態になる可能性が生ずる。上流側を満管にするにはチャンバー内水位を上げればよく、それには下流端整流水槽のゲート高によっても調節することが出来るが、TYPE Iとの水理的相違を見るためにゲート高は一定に保ち、単に流量のみを変化させて満管状態を調整した。TYPE IIの流況の特徴は、段差の為にチャンバー壁に衝突して上昇流を起こす水流の割合が多くなり水面の乱れが顕著になった事である。

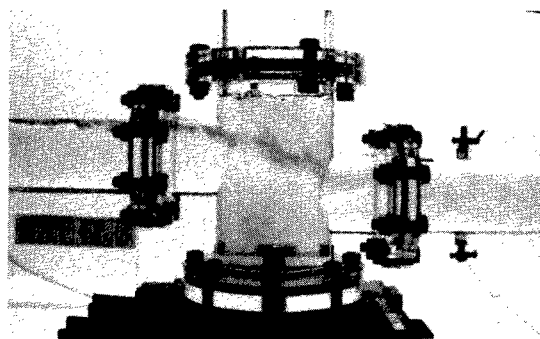


写真-2 底部へ色素の輸送

上、下流管路間に半径分の段落があることは、オーバーラップする断面積が39%となり、流入した水流が直進すると仮定しても、60%の水流がチャ

ンバー壁に衝突することになる。しかし、流量が3 l/secまでは、必ずしもそのような流況を呈するのではなく、比較的滑らかに流出管へと流下していくのが、トレーサーの軌跡からも解かる。即ち、流速の遅い流れでは、段差の効果は明確には現れにくいといえる。流量が多くなると、チャンバー壁に衝突する水流の割合が増加し、上昇流が強くなるのが、水面の乱れや、そこでのトレーサーの急速な混合によって知れる。同時に、この急速な上昇流に対し当然ながら、下降流も増加する。この下降流によってチャンバー上部の色素は底部に送られ、そこを着色し(写真-2)、上部と底部の間で対流が起っていることを明確に示してくれる。下降流の生ずる位置はTYPE Iでも述べたように、チャンバーの両側で、連行される空気泡の運動から解かるのであるが、渦巻き状の流れとなっている。視点を変えて水面上の運動を見ると、チャンバーの下流側壁面に沿った上昇流は湧き上がって水面を盛り上げ、上流方向への(つまり管内流とは逆方向の)流れを作っている。この流れは本流と共に水面の片側に渦を発生させる。渦は急速に発達し、水面を窪ませながら、空気を吸い込んでいくが、チャンバー断面一杯に広がると同時に消滅していく。すると他の片側に逆向きの渦が発生し、同様に発達しながら、完全な流出渦まで成長すると消えていく。このように、チャンバー側面からは見分けにくい交互渦の生滅が、水面上ではよく理解出来る。このような交互渦の発生も、流量が増し水位が高まるにつれ停止し、波長の大きな水面振動のみとなる。写真-3は交互渦が連行した空気泡によって可視化されたものである。

2-2-3 TYPE III型チャンバー

TYPE IIIの特徴は管路間の段差が $1.5d$ であるため、両管のオーバーラップする断面積が無く、チャンバーに入った水流全てが壁に衝突すると想定されるものである。

まず、段差が $1.5d$ であるため、上流管を満管にするにはチャンバー内水位をそれ以上に上げなければならない、これらの条件を満たす最少流量は約4.9 l/secであった。

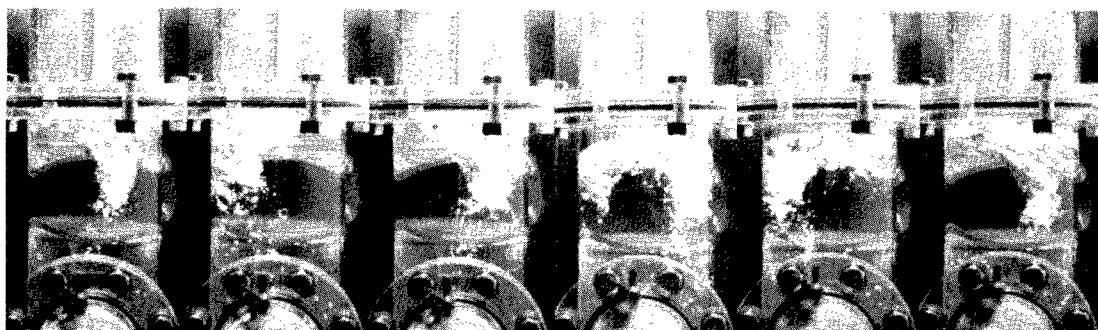


写真-3 交互に発生する渦

一般に、多少段差があっても水流は、自然にカーブして流れるものであるが、Ⅲ型では、最少流量の場合でも、水流が壁に衝突して曲げられ、ダイレクトには流下して行かない事が、トレーサーの軌跡からも読みとれる。

TYPE Ⅲでの特徴は、TYPE Ⅰ、Ⅱで生じた種々の現象が全て発生し、又その終焉までも演じてくれたことである。

管内流量が約6 l/secまでは、交互渦が発生する。流量の増加に従い、その渦の強さが増すと共に空気泡を管底近くまで引き込んで行き、あたかもTYPE Ⅱでの続きのような流況を示す。しかし、6.5 l/secを超すと交互渦の一つの渦がチャンパー全体に成長し、最早他方の渦と交換することなく、巨大な流出渦が出現する。

交互渦の時には、渦の回転が強くても、逆の渦と交換するために間もなく減衰したが、単独渦の場合は、渦の回転が強力になり、遠心力による水面の盛り上がりと中心部の吸い込みが増大し、極め

て激しく、巨大なロート状流出渦が作られる（写真-4）。

流出渦は先端が流出管へ続いているが、軸は、交互渦の場合と異り、チャンパーのやや中心部を通過している。又、常に空気泡を吸い込むため、流出側管内には細かな泡が多量に含まれることになる。渦の回転の向きは管とチャンパーの接続角度にも依存し、発生し易い回転方向も存在するが、一般的にはどちらの方向の渦も可能であると思われる。因みに、人為的に渦の回転を妨げ、逆方向の回転を与えると、その方向の流出渦が発達した。この流量範囲では、回転を抑えても、再び渦ができ始めるから、渦の存在が一つの安定状態を作っていると考えられる。この単独なロート渦の発生は、管路内流量とチャンパー内水位に大いに依存し、流量を増し、水位を上げると渦はおさまり、同時に空気の吸い込みも無くなる。さらに、水面上には交互渦も存在しない。後に述べるように、ロート渦が存在する流量範囲では、エネルギー損失係数も急激に増加し、その他の範囲と比し、特別な流況状態であることを示している。

3 圧力分布と損失水頭

チャンパーでの損失水頭を求めるために上流管および下流管内の圧力水頭の測定を行ったが、流量が増すにつれてマンメータ内水位が不安定になり、目測が困難になったため、全てオシログラフの記録を利用した。管路段差が大きくなったり、

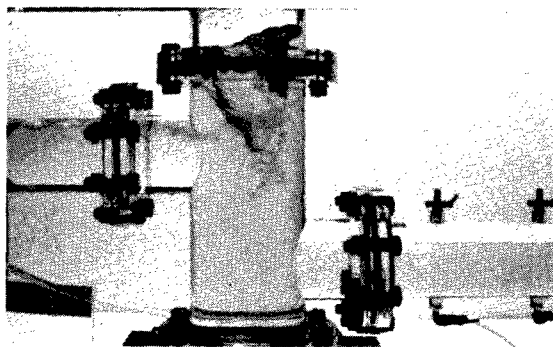


写真-4 流出渦

流量が増した場合にはチャンバー内の乱れも激しく、空気泡が管路へ引き込まれたりするため、下流側管内の圧力水頭も大きく乱れるものと予想されたが、実測による水頭勾配はこの管路の摩擦勾配に等しく、流入口近傍でわずかな乱れが入っているものの、チャンバーでの水頭ギャップと較べると無視できる量であった。この傾向は段差が最大のTYPE-Ⅲ型でも同様で、巨大な流出渦が発生し、空気泡が多量に連行される場合でも、チャンバー間の水頭差に影響を及ぼす程ではなかった。管内各場所での全水頭はベルヌイの式を用いた。

$$H_T = \frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \quad (1)$$

ここで、 H_T は全水頭、 u は管路内平均流速、 p は圧力、 z は管軸の高さ、 g は重力加速度である。

2点間の圧力水頭の差 h を求めると管径が等しいため、

$$\begin{aligned} h &= \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \\ &= (H_T - \frac{u^2}{2g} - z)_1 - (H_T - \frac{u^2}{2g} - z)_2 \quad (2) \\ &= (H_T - z)_1 - (H_T - z)_2 \end{aligned}$$

図-1の管路模型からもわかるように、圧力の測定点はチャンバーから離れているため、圧力水頭にはその点までの管内摩擦による損失が入ってくる。チャンバーそのものによる損失を求めるためには管上の圧力勾配をチャンバーまで延長し、摩擦損失分を補わねばならない。そのようにして得られたチャンバー両側の圧力水頭の差が、チャンバーでの損失水頭であり、それと運動エネルギーを比較したものが図-3である。図中の実測値が直線上に分布していることから、損失水頭は管路内の運動エネルギーと比例関係($h \propto u^2/2g$)にあることを示している。それ故、比例係数を f で表わせば、それは直線の傾きであると共に、チャンバーによるエネルギー損失係数となる。損失係数 f はチャンバーの段差に依存し、段差が増すと係数は大きくなる。ここでは、TYPE I, II, IIIに対し、 $f_I = 0.35$, $f_{II} = 0.72$, $f_{III} = 2.18$ が得

られた。

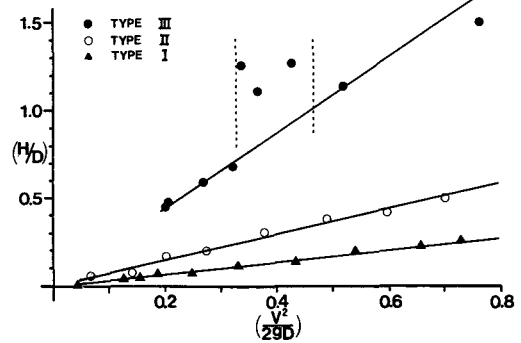


図-3 運動エネルギーと損失水頭

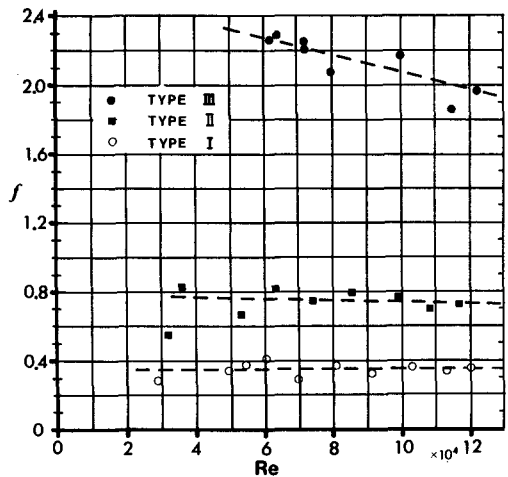


図-4 損失係数 f とレイノルズ数 Re

損失係数の値がどこまで大きくなるかは興味のあるところだが、例えば、管内流が大きな水槽へ流入しその速度を失った時には損失係数は1になることから、流出入時の損失を合わせて最大が2になるものと予想することができる。 f_{III} の値が既に2を越えていることから、このチャンバーの有する段差 $1.5d$ は、最大損失を生じさせる段差である可能性を示している。

注目すべきことは、TYPE IIIの実測値の中で大きく外れた点が数個集っているが、これらの領域は、前述の流出渦の発生する流量範囲と一致することである。即ち管路内流量には、渦を発生させてチャンバー内のエネルギー損失係数を急激に

増大させる範囲があり、流量がこの範囲に到達すると管路の疏通能力は極端に減じ、結局チャンバーによる閉塞効果が生じることを示している。しかし、渦の発生がチャンバーのサイズや形状や流量とどのように関連しているか明らかではない。

図-4は損失係数 f と管路内レイノルズ数(Re)との関係を表したものである。実測値の分布よりRe数の小さい範囲では f が大きくバラつくが、Re数が増すとそれぞれ固有の直線へ漸近するかのよう分散が小さくなる。図中の破線は、各々のTYPEに於ける漸近線であり、実測値から最小二乗法にて求めたものである。TYPE Iでは、直線の傾きが0に近く、 f がRe数には独立のように見える。しかし、TYPE II, IIIの直線は負の勾配を持ち、 f がRe数の増加に対して減少し、しかも、段差が増すと共にその依存度が強くなることを示している。TYPE IIIに関しては、Re数を小さくしていくと f が極めて大きくなってしまい不自然であるが、このチャンバーでは管路を満管にする最小Re数が大きいので、図中の直線の左端が f の限界値を示すものと考えている。

4 噴流を仮定した損失水頭

円形チャンバー内でのエネルギー損失を、段差の異なる3種のタイプに関して、実験的に検討してきた。しかし、実際のチャンバーは、大きさ、形状、段差や接続状態等において、設置される場所毎に異なるものと考えられるが、それぞれのチャンバーの特性を全て実験的に調べることは不可能であり、又実際的ではない。

ここで、段差とサイズをチャンバーの形状因子としてエネルギー損失の原因を考えてみる。その一つとして、チャンバーに入ってきた流れが、そのまま流出していくものなら、何の損失も生じない。しかし、一般に入ってきた水流の一部はチャンバー壁によって止められその方向の運動量を失うことになる。だが、流出管内の流体は再びもとの運動量を得ているのであるから、これらの運動量を失ったり、獲得する中で種々の損失が生じていると考えることができる。エネルギー損失に関

する以上のような仮定を満たしてくれる水流として“噴流”の概念を導入し、そのモデルの特性によってエネルギー損失を検討してみたい。

4-1 噴流

噴流とは、ある断面積を有するノズルから、同種の静止流体中へ一様な速度で放出される流れであり、ここでは円形ノズルからの噴流を対象とする。噴流はノズルから離れると共に、速度の違いからまわりの流体と激しく混合し、それらの乱流は噴流の大きさを増して行くと同時に、内部へも侵入し、一様な速度の領域を細らせる。それ故、噴流を考える場合に、ノズルからの距離に従い二つの領域に分けることができる(図-5参照)。一つは、ノズルから噴出した時の速度の一部を未だ有している発達領域(Development Region)と、それ以上離れ、既に噴出時の特性を乱流によって消し去られた完全発達領域(Fully Developed Flow Region)である。

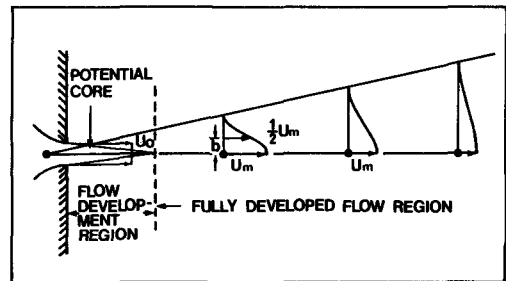


図-5 噴流の概念図

まず、後者の方について、チャンバー内での流れを念頭に置きながら、その特性を調べてみる。完全発達領域では、図-5に示すように、ノズルからの距離 x が増すにつれて、軸上の最大速度 U_m が減少していくが、半径方向にも流速が変化していき、 x の値によって流速分布が異ってくる。しかし、 b を流速 u が $U_m/2$ となる中心からの距離とし、 r/b に対する u/U_m をプロットすると、異なる x 点での流速分布が全て同型になる(図-6参照)。それ故、最大流速 U_m と b をノズルからの距離 x の関数として求められれば、必要な諸量

を計算することができる。

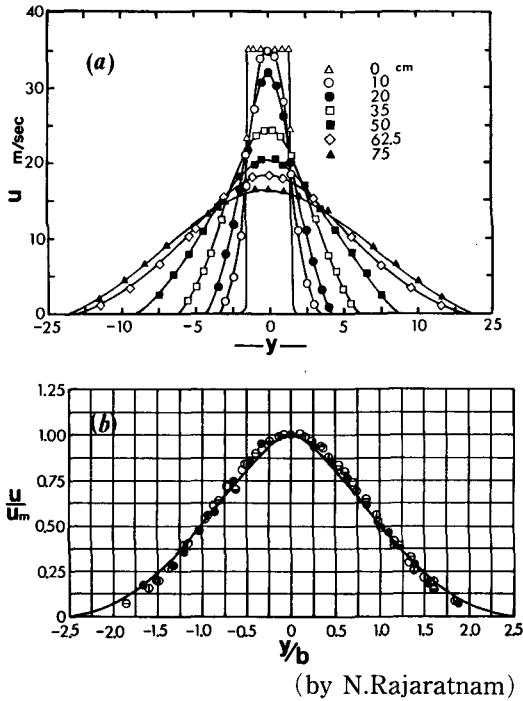


図-6 完全発達領域での噴流の速度分布

噴流の方程式は境界層の方程式を利用し、 x 軸方向の速度を u 、半径(r)方向の速度を v 、乱流摩擦応力 $\tau = -\rho u'v'$ とするならば、次式で表わされる。

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + V \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} ru + \frac{\partial}{\partial r} rv = 0 \quad (2)$$

P は噴流外の圧力で、外部の流体に圧力勾配が無いとすれば、(1)式は

$$U \frac{\partial u}{\partial r} + V \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \quad (3)$$

さて、(3)式に ρr を掛けて、 $r = 0$ から ∞ まで積分すると次式が導かれる。

$$\frac{d}{dx} \int 2\pi r \cdot dr \cdot \rho u^2 = 0 \quad (4)$$

(4)式は、軸方向の運動量fluxの変化は0、即ち、軸方向の運動量が保存されることを示している。

同様に(3)式に ρur を掛けて、 $r = 0$ から ∞ まで積分すると運動エネルギーに関する式が求まる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_0^\infty 2\pi ru \cdot dr \cdot \frac{\rho u^2}{2} \\ = - \int_0^\infty 2\pi r \cdot dr \cdot \tau \frac{\partial u}{\partial r} \end{aligned} \quad (5)$$

上式は、運動エネルギーの減少する割合が、その領域から作られる乱流の割合と等しいことを示している。

以上は噴流の一般的性質であるが、応力 τ の関数形を仮定することによって、(3)式より速度分布 $u(r)$ が解析的に計算される。中でも Tollmien や Goertler の解がよく知られている。しかし、解析解は必ずしも利用し易い形とは限らず、簡単な実験式が使われることもある。

$$U_m/U_0 = 6.3/(x/d) \quad (6)$$

$$b = 0.10x \quad (7)$$

ここで U は噴出時の噴流の速度である。今チャンバーへの適用のために上式を検討する。軸上の最大流速 U_m は、 $U_m \leq U_0$ であるから、(6)式より

$$1 \leq 6.3/(x/d) \quad (8)$$

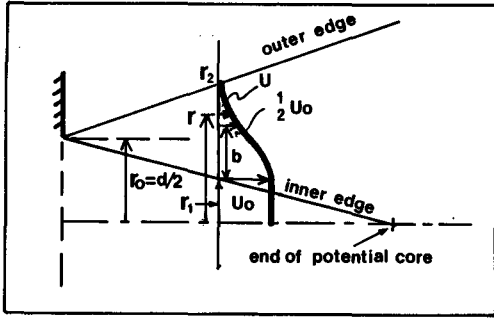
故に、 $x \geq 6.3d$ となり、完全発達領域内の噴流理論は、管径の6.3倍以上離れた領域で成立するものであり、特別な用途の除き、実際のチャンバーでこのような大きさは極めてまれであろう。

それ故、我々の想定するチャンバー内の流況に関しては完全発達領域での噴流理論ではなく、発達領域での理論を試みなければならない。

4-2 発達領域での噴流

図-7は発達領域での噴流の概念図である。半径 $r (=d/2)$ のノズルから噴出した速度 U_0 の部分は、とり囲む流体との剪断力によって次第に細く

なるが、 U_0 の領域はまだ半径 r まで残っている。



(by N. Rajaratnam)

図-7 発達領域の概念図

ここで用いる b は速度が $U_0/2$ になるまでの r からの距離である。このような発達途中の噴流の速度分布にどのような性質があるのか興味あるが、直径10cmのノズルからの流速40m/secの噴流について行ったAbramovichの実験によれば、図-8に示すように、 x 軸上の異なる2点での流速分布(a図)が、距離 b を用いた無次元距離によって b 図のように一つの分布形をなすことが確認された。この速度分布に於ても(3)式が成立するので、(4)式と同様の軸方向の運動量が保存されることが証明される。任意の距離 x における流速分布や、 r_1, b, r の値は解析的には求められないが、Rajaratnam等は実験によって、一様速度端 r_1 より噴流外縁 r_2 までの流速分布はCosine関数で近似することができ、 r_1, b, r_2 の値も次式で表わされることを示した。

$$\frac{r_1}{r_0} = 0.95 - 0.097 \frac{x}{r_0} \quad (9)$$

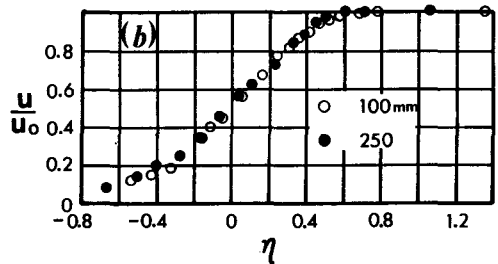
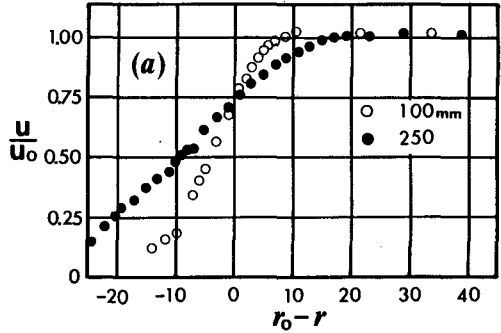
$$\frac{b}{r_0} = 0.1 + 0.111 \frac{x}{r_0} \quad (10)$$

$$\frac{r_2}{r_0} = 1.07 + 0.158 \frac{x}{r_0} \quad (11)$$

これらの関係式を用いると、発達領域内の噴流速度分布は次式のように導かれる。

$$\frac{u}{U_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \pi \left(\frac{r-r_1}{r_2-r_1} \right) \right\} \quad (12)$$

$$\frac{u}{U_0} = 1 \quad \text{for } 0 \leq r < r_1 \quad (13)$$



(by N. Rajaratnam)

図-8 発達領域での噴流の速度分布

4-3 噴流による損失水頭

上流側管からチャンバーに流入する流れを噴流とみなし、その噴流が拡大しつつ下流側の流出管口に到達した時に、壁に妨げられずスムーズに流下する割合が、管路段差やチャンバーサイズによってどのように変化し、エネルギー噴失と如何に関係するかを検討してみる。

計算する上で用いたパラメーターの変化は、管路段差 L については L/D が0から1まで、チャンバーサイズ B に関しては B/D が3になるまでとした。又噴流は側面からは影響をうけないものとしている。結果を図示したものが図-9および図-10であり、それぞれ運動量および運動エネルギーの欠損を、チャンバーサイズをパラメーターとして、管路段差と比較したものである。

図-9より、段差が小さい時は運動量の欠損は少く、段差が増すにつれて多くなり、段差が1、

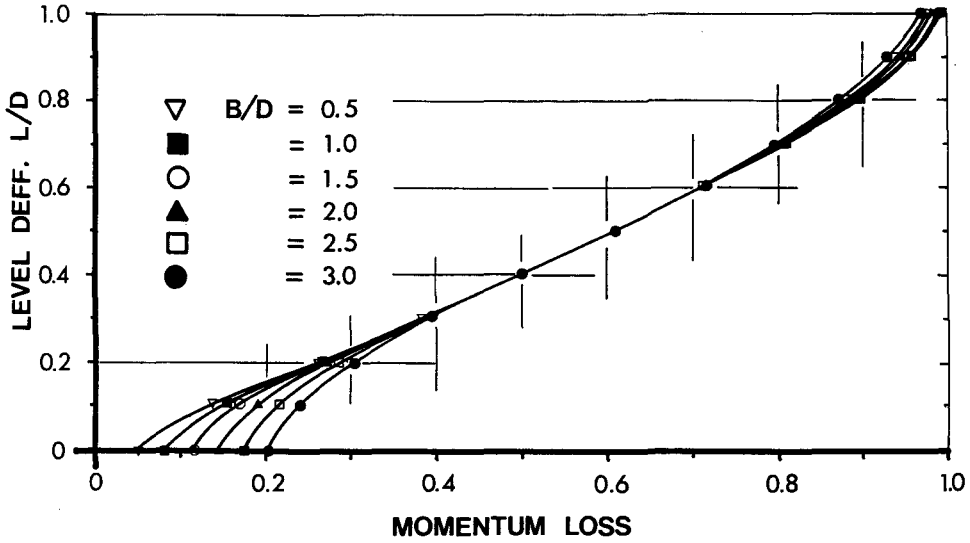


図-9 運動量の欠損

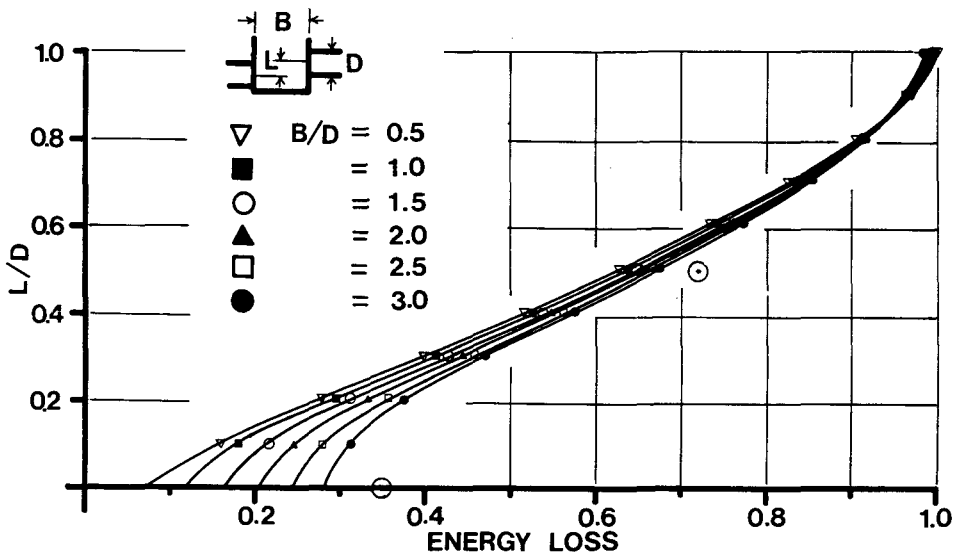


図-10 運動エネルギーの欠損

即ち管径分だけずれると流入するほとんどの運動量が失われ、下流管へはスムーズに流下しない事を示している。因みに、前述した TYPE III の損失係数が最大値である可能性を示唆したが、その段差は $1.5d$ であった。又、段差が小さい間はチャンバサイズの影響が強く、段差が 0.3 以上になるとサイズにはよらず同一の欠損量となっている。さらに、段差が 0.8 以上ではチャンバサイズの大きい方がわずかに少い欠損を示しているが十分

な説明は得られていない。しかし、その領域では、既に運動量の 97% が失われているため、もはや噴流の拡大による影響は小さいものといえる。段差が 0.5 程度の時は何故運動量欠損がサイズに依存しないのであろうか？ これは噴流の流速分布と二つの管路断面の重なり具合によるものと考えられる。流速分布としては、噴流が発達領域にあるため、運動量の多くを中心部が有している。しかし、サイズが大きくなると中心部の運動量が外側

へと分散してくるため、結局サイズの違いによって欠損量が増加してくることになる。しかし、段差が大きくなるにつれ、流出する運動量は、拡大された噴流の外縁部のものであり、それ自身全体と比して小さく、段差による効果が大きくは影響しないものと考えられる。

図-10は運動エネルギーの欠損を計算したもので、運動量の傾向と極めて相似な変化を示している。即ち、段差が小さい時の欠損はチャンバーの大きさに依存するが、段差が大きくなるとその影響は小さくなる。段差0の時の欠損量は、運動量に比べ、サイズの影響が強くてでているが、これはエネルギーの方がまわりへの拡散が強いためと考えられる。

筆者等が実験から得た損失係数をプロットしてみると図中の◎印の2点となる。これらの値は、段差0のとき約0.15、段差5のとき0.05程大き目にてでている。計算上のチャンバーでは側面の影響のない噴流を想定しているのに対し、実際には流入した流れが下流側壁にあたり大きな対流や渦を形成するのを考慮すれば、このズレは当然ともいえる。

5 まとめ

チャンバーに於けるエネルギー損失を管路段差とサイズをパラメーターとして実験的および解析的に検討した。段差付チャンバーでも、エネルギー損失係数は一定値をとることが明らかになった。しかし、ある流量範囲ではチャンバー内に大きな流出渦が発生し、疎通能力を急激に減らし、管路内流れに急変不定流を起こさせる原因の存在を示唆している。チャンバーサイズによる損失を説明

するために噴流の考え方を導入した。水流を極めて理想化した単純モデルではあるが、エネルギー損失の特性を与えるものと思われる。しかし、噴流理論による損失はRe数には独立であるのに対し、実測値はRe数への依存を明白に示し、噴流理論だけでは不十分なことを暗示している。さらに実験を重ね、チャンバーでの損失に関する因子の抽出と、それらの関係を明らかにして行く必要がある。

文献一覧

- 安川 浩・川口士郎
1984「下水管渠内水流の管理システムに関する研究」
『東京都下水道局委託昭和58年度研究報告書』
都立大学
- 宇井正和・安川 浩
1985「ライザー付管路内急変不定流へのDouble
Sweep法の適用」『第29回水理講演会論文集』
Vol. 29 pp675～680
- 安川 浩・宇井正和
1985「大都市下水道における豪雨時の水流管理方
式に関する一考察」
『総合都市研究』第26号 pp 3～14
- M.B.Abbott, J.A.Cunge
1982「Engineering Application of Computational
Hydraulics」Vol.5 Pitman
- W.M.Sangster, H.W.Wood, E.T.Smerdon, H.G.Bossy
1959「Pressure Changes at Open Junction in
Conduits」ASCE Vol.85 June
- J., Marsalek
1984「Head losses at Sewer Junction Manholes」ASCE
Vol.110 No.8

Key Words (キー・ワード)

Junction Chamber (接続用楯), Sewer Pipe (下水管渠), Pressurized Flow (被圧水流)

Heavy Rain Fall (豪雨), Head Loss (損失水頭), Coefficient of Head Loss (損失水頭件数), Jet (噴流)