向い合う 2 本の流入管の段差を考慮した 3 方向接合円形落差マンホールのエネルギー損失特性

ENERGY LOSSES AT THREE-WAY CIRCULAR DROP MANHOLES WITH OPPOSED INFLOW PIPES

荒尾慎司¹・小川恭佑²・山根匠馬²・岩崎浩茂³・平塚俊祐⁴・楠田哲也⁵

Shinji ARAO, Kyosuke OGAWA, Takuma YAMANE, Hiroshige IWASAKI,

Shunsuke HIRATSUKA and Tetsuya KUSUDA

¹正会員 工博 松江工業高等専門学校教授 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)

²非会員 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)

³非会員 国土交通省中国地方整備局 (〒730-8530 広島県中区上八丁堀 6-30)

⁴学生会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁵名誉会員 工博 九州大学名誉教授 (〒819-0395 福岡市西区大字元岡 744 番地)

Authors have already investigated characteristics of the energy loss in a three-way circular drop manhole and formulation of the energy loss coefficients in consideration of six dimensionless variables for structural elements of pipes and manhole, and hydraulic parameters. However, the calculation formula of the energy loss for drops between two opposed inflow pipes and an outlet pipe has not existed yet. In this study, for a three-way circular manhole with drops between two opposed inflow pipes and an outlet pipe, energy loss is examined experimentally. From the experimental results on the energy loss at the manhole with drop gaps between the opposed inflow pipes, the increase of the pressure head in an inflow pipe brings head loss depending on collision conditions of water flow into the manhole from another opposed inflow pipe. These experimental results brought a more versatile formula than the proposed formula by authors before.

Key Words : Energy loss, drop manhole, opposed pipes, surcharge flow, urban storm drainage

1. はじめに

近年、日本で多発しているゲリラ豪雨等による洪水時の浸水深、浸水面積や避難経路等の情報を住民に周知させるため、各自治体で洪水ハザードマップが作成されている。しかし、内水氾濫を含む洪水ハザードマップ作成時の浸水予測計算では、雨水管の接合部であるマンホールでの損失が現在でも軽視または無視されており、実際の浸水現象を必ずしも的確には予測できていない。

この課題を解決するために、著者らや欧米を中心に、これまで 2 本の流入管と 1 本の流出管を伴う 3 方向接合マンホールに関する研究が行われてきた^{1)~11)}。しかし、マンホールと管路に関する構造寸法や水理学的要因等、数多くの変数を考慮しなければならないため、マンホールのエネルギー損失係数の定式化が未だ検討課題として残されている。そこで著者らは既往の研究^{8)~12)}において、

2 本の流入管と流出管と間の水平面接合角度が 180° と 90° の場合(図-1 参照)、2 本の流入・流出管の水平面接合角度がいずれも 90° の場合(2 本の流入管が向い合う)の 3 方向円形マンホールのエネルギー損失特性を明らかにしてきた。著者らはこれらの実験結果をもとに、マンホールと接合管路の内径、流入・流出管の水平面接合角度、流入・流出管の間の落差及び流入量と流出量の比(流量比)に関する 6 個の無次元変数を考慮することにより、3 方向円形落差マンホールのエネルギー損失係数の算定式を開発している¹²⁾。

図-1 3 方向接合円形落差マンホール

著者らの提案式¹²⁾の適用範囲を図-2に示す。本式では流入・流出管が管頂接合で接続されている場合には、2本の流入・流出管の水平面接合角度が $90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲であれば計算できる。また、流入・流出管の間に落差がある場合は、片方の流入管と流出管の水平面接合角度を 180° と固定して、もう一方の流入管の接合角度を $90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で計算できる。しかし、提案式¹²⁾ではこのように流入・流出管の間に落差がある場合、一方の流入管の接合角度を 180° に固定した条件下でしか計算できない。

そこで本研究では、T字路交差点下における2本の流入管が向かい合って接続するマンホールを対象に、流入・流出管の流量、マンホール内の水深及び2本の流入・流出管の間の落差を種々変化させた実験を行うことで、マンホールでのエネルギー損失特性を明らかにし、従来の提案式¹²⁾より汎用性の高い計算式を考案するための基礎データを得ることを目的とする。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本研究で用いた実験装置の概要(平面図)を図-3に示す。図-3は2本の流入管の接合角度が $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ であり、平成24年度に流入管と流出管の鉛直方向の接合を管頂接合(Type A)として検討した¹²⁾。

本研究では、流入管径を $D_1 = D_2 = 5\text{cm}$ 、流出管径を $D_3 = 6\text{cm}$ に設定し、一方の流入管に段差を設けた場合として $S_1 = 3.5\text{cm}$ 、 6cm 、 11cm の3種(Type B, C, and D)、2本の流入管ともに段差を設けた場合として $S_1 = S_2 = 3.5\text{cm}$ 、 $S_1 = 6\text{cm}$ 、 $S_2 = 3.5\text{cm}$ 及び $S_1 = S_2 = 6\text{cm}$ の3種(Type E, F, and G)を検討対象とした。また、流入管径を $D_1 = D_2 = 3\text{cm}$ 、流出管径を $D_3 = 6\text{cm}$ (管頂接合, Type H)に設定し、一方の流入管に段差を設けた場合として $S_1 = 4.5\text{cm}$ 、 6cm 、 10cm の3種(Type I, J, and K)を検討対象とした。実験模型のサイズは実規模の1/5である。マンホール底面には管径の1/2のインパートが設置されている。

(2) 実験方法

①2ヶ所の流量調節バルブにより、管内を圧力流れにして流入管1の流量 Q_1 と流入管2の流量 Q_2 を所定の流量に設定する。

図-2 著者らの提案式の適用範囲¹²⁾

②最も高い位置にある流入管内壁頂部から水面までの距離をマンホール水深 h (図-1)とし、それが所定の値になるように流出管末端部の越流水槽内の堰高を調整する。

③マンホール水深 h は、マンホール外壁に取り付けた4点のメジャーにより測定し、それらの平均値を測定値とする。

④流入管1・2及び流出管にそれぞれ3ヶ所ずつ取り付けたマンメータによって管内の圧力水頭を測定し、これに速度水頭($V_i^2/2g$)を加えたものからエネルギー線を計算することにより、マンホール部でのエネルギー損失水頭差 ΔE_i を求める(図-4参照、 $\theta = 180^\circ$)。さらに、式(1)によりエネルギー損失係数 K_{ei} を、式(2)により圧力損失係数 K_{pi} を算出し、各流量比における水深比 h/D_3 が2以上での損失係数の平均値をそれぞれの流量比における損失係数の代表値とする。これは水深の変化によらず損失係数がほぼ一定となる範囲を考慮するためである。

$$K_{ei} = \frac{\Delta E_i}{V_3^2/2g} \quad (1)$$

$$K_{pi} = \frac{\Delta P_i}{V_3^2/2g} = K_{ei} + 1 - \left(\frac{V_i}{V_3}\right)^2 \quad (2)$$

ここで、下付き添字 i は、1のとき流入管1から流出管への流れ方向を、2のとき流入管2から流出管への流れ方向を表す。 V_3 は流出管の断面平均流速、 g は重力加速度、 ΔP_i はマンホール部での圧力損失水頭差である。

(3) 実験条件

表-1と図-5に既往の研究^{7)~12)}も含めた管内径(D_1 , D_2 , D_3)、流入・流出管の接合角度(θ_1 , θ_2)の組み合わせを示す。

また表-2に示すように、流入管1の流量 Q_1 、流入管2の流量 Q_2 を変化させ、流量比 Q_2/Q_3 ($Q_3 = Q_1 + Q_2$)を9種設定し、それぞれの条件下でマンホール内の水深 h を 1cm から 30cm の間で変化させて実験を行った。既往の研究よりレイノルズ数 Re の影響はほとんどないと考えられる^{2),3),5)}。

図-3 2本の流入管が対向する場合($\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$)

図-4 マンホール部でのエネルギー損失水頭差 ΔE

表-1 管内径、流入・流出管の接合角度の組み合わせ

	流入管1	流入管2	流出管3	流入管1	流入管2	流入管1	流入管2	備 考
	D_1	D_2	D_3	S_1	S_2	θ_1	θ_2	
Type A	5cm	5cm	6cm	1cm	1cm	90°	90°	管頂接合
Type B	5cm	5cm	6cm	3.5cm	1cm			片側段差
Type C	5cm	5cm	6cm	6cm				
Type D	5cm	5cm	6cm	11cm				
Type E	5cm	5cm	6cm	3.5cm	3.5cm			両側段差
Type F	5cm	5cm	6cm	6cm	3.5cm			
Type G	5cm	5cm	6cm	6cm	6cm			
Type H	3cm	3cm	6cm	3cm	3cm	90°	90°	管頂接合
Type I	3cm	3cm	6cm	4.5cm				片側段差
Type J	3cm	3cm	6cm	6cm				
Type K	3cm	3cm	6cm	10cm

図-5 2本の流入管の内径及び段差の設定条件（代表的なもの）

3. 実験結果および考察

(1) マンホール内の水深と損失係数との関係

図-6～9にマンホール内の水深比 h/D_3 とエネルギー損失係数 K_{e1} , K_{e2} との関係の例（片側段差の Type A ～Type D, $Q_2/Q_3=0.33, 0.57$ ）を示す。Type A や Type D では、 h/D_3 が 2 を超えると損失係数は水深の変化によらず、ほぼ一定となることがわかる。その他のタイプでは、 h/D_3 を 2 以上としたデータしかとっていないが、水深によらず損失係数はほぼ一定となっている。この理由は、 h/D_3 が 2 を超える本実験の水深の範囲では、マンホール内に目視で確認できるようなロータ状のスケールの大きな吸い込み渦が発生せず、渦構造の違いがあっても損失係数が大きく変化することはないためである。この結果は、流入・流出管が 1 本ずつ接合するマンホールに関する既往の研究¹³⁾でも確認されている。本研究では、管路流れで、しかも水深変化の影響を大きく受けないところの損失係数を定式化することを最終目的としていることから、以下では、マンホール水深比 h/D_3 が 2 以上の損失係数の平均値を算定し、後述する流量比 Q_2/Q_3 との関係を明らかにする際にこの値を用いる。

表-2 実験ケース（流量比一覧）

実験ケース	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
流入管1 Q_1 [l/sec]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	0.50	0.25	0
流入管2 Q_2 [l/sec]	0	0.25	0.50	0.75	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
流出管 Q_3 [l/sec]	1.0	1.25	1.50	1.75	2.0	1.75	1.50	1.25	1.0
流量比 Q_2/Q_3	0	0.20	0.33	0.43	0.50	0.57	0.67	0.80	1.0

図-6 流入管1のエネルギー損失係数 K_{e1} ($Q_2/Q_3=0.33$)

(2) 流量比 Q_2/Q_3 とエネルギー損失係数の関係

($D_1=D_2=5\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$ の場合)

流量比 Q_2/Q_3 とエネルギー損失係数 K_{e1} , K_{e2} との関係について、片側段差を図-10 と図-12 に、両側段差を図-11 と図-13 に示す。

a) 流入管 1 に関するエネルギー損失係数 K_{e1}

図-10 に示す片側段差においては、Type D を除くとある流量比で損失係数の極小値をとることがわかる。流量比 Q_2/Q_3 が 0.5 の場合を流量比が 0 の時と比べると、表-2 より流出管の速度水頭は 4 倍となるため、式 (1) から算定された損失係数は見かけ上小さくなるものの、エネルギー損失水頭 $\angle E_i$ はいずれの流量比でも同程度となる。流量比 Q_2/Q_3 が 0 から 0.5 までは段差 S_1 が大きくなるほど損失が大きくなる傾向にあるが、これは流入管 1 からの流入量が多く、段差が大きくなるほど流入水のマンホール側壁に衝突する割合が増加し、流入水がマンホールから流出しにくくなるためである。また、 Q_2/Q_3 が 0.5 より大きくなるにつれて Type D の損失は減少し、 Q_2/Q_3 が 1.0 では他のタイプと比べて損失がかなり小さくなった。

Q_2/Q_3 が 1.0 のとき、Type D の損失が減少した理由は、流入管 2 にのみ水が流れており、段差が 11cm と大きいことから、段差が小さい他のタイプと異なり、流入管 2 からマンホールへ流入する水が流入管 1 の圧力上昇には寄与しないからである (図-14 参照)。 Q_2/Q_3 が 0.8 ではいずれのタイプでもほぼ同じ値となった。図-11 に示す両側段差において、Type A, Type E 及び Type G を比較すると、両側に同じ段差があると段差が大きくなるにつれて損失係数が大きくなる傾向にある。この原因のひとつは段差が大きくなるにつれてインバートの効果が小さくなるためである。Type F ではいずれの流量比でも Type G と損失係数はほぼ同じか Type G より小さくなるが、 $Q_2/Q_3=1.0$ のときを除くと Type E と近い値になっている。 Q_2/Q_3 が 1.0 のとき Type F が Type E や Type G よりも損失係数がかなり小さくなるのは、Type F では 2 本の流入管の段差が $S_1=6\text{cm}$, $S_2=3.5\text{cm}$ と 2.5cm 異なるため、流入管 2 からの流入水の半分に満たない面積しか流入管 1 の圧力上昇へは寄与しないためと推察される (図-5, 図-14 参照)。

b) 流入管 2 に関するエネルギー損失係数 K_{e2}

図-12 に示す片側段差においては、いずれのタイプにおいても、ある流量比で損失係数が極小値をとることがわかる。また、いずれの流量比でも段差が大きくなるにつれて損失が大きくなる傾向にある。流量比 Q_2/Q_3 が 1.0 の時、いずれの Type でも損失係数がほぼ同じになるのは、流入管 2 にしか水が流れていないため、段差の増大に伴い流入管 2 からの流入水が流入管 1 の出口あるいはマンホール側壁に衝突することにより失う運動エネルギーが同程度になるからである。図-13 に示す両側段差においては、流入管 1 に関するエネルギー損失係数 K_{e1} と同様、両側に同じ段差を有し、より段差が大きいほど損失が大きくなる傾向にあることが解った。

以上の実験結果から、段差を流出管の直径と同じ大きさにすると、流量比 Q_2/Q_3 が 0.2~0.8 の範囲では、エネルギー損失係数 K_{e1} , K_{e2} はいずれも管頂接合よりも 0.3~0.5 程度増加することが明らかとなった。

図-7 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} ($Q_2/Q_3=0.33$)

図-8 流入管 1 のエネルギー損失係数 K_{e1} ($Q_2/Q_3=0.57$)

図-9 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} ($Q_2/Q_3=0.57$)

図-10 流入管 1 のエネルギー損失係数 K_{e1} (片側段差)

(3) 流量比とエネルギー損失係数の関係

($D_1=D_2=3\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$ の場合)

流量比 Q_2/Q_3 とエネルギー損失係数 K_{e1} , K_{e2} との関係について、片側段差の場合をそれぞれ図-15 と図-16 に示す。

a) 流入管 1 に関するエネルギー損失係数 K_{e1}

図-15 に示す片側段差の実験結果は以下の通りである。 $D_1=D_2=5\text{cm}$ で管頂接合の場合、マンホールと管路の接合部のインバートの深さは 2.5cm あるが、 $D_1=D_2=3\text{cm}$ では管頂接合でも流入管と流出管の間に 3cm の段差があるため、インバートの効果は小さい。 Q_2/Q_3 が 0 か 0.5 までは段差 S_1 の影響は全く見られない。これは、流入管 1 からの流入量が流入管 2 よりも多いか同じであり、流入管 2 からの流入量が、流入管 1 の圧力水頭に影響しないためである。流量比 Q_2/Q_3 が 0.5 を超えると、流入管 2 からの流入量が流入管 1 からの流入量よりも多いため、流入管 2 からの流入水が流出管 1 の圧力水頭に影響を与える。この影響は、流入管 1 の段差 S_1 が大きいほど小さくなる。この結果は図-14 に示すように、流入管 2 本の段差の違いによる向い合う流入管の重なる部分の面積に関係している。

b) 流入管 2 に関するエネルギー損失係数 K_{e2}

図-16 に示すように、流入管 1 に関するエネルギー損失係数 K_{e1} とは逆に、 Q_2/Q_3 が 0.4 付近から 1.0 までは段差 S_1 の影響は全く見られない。 Q_2/Q_3 が $0 \sim 0.4$ 付近までは、流入管 1 からの流入量が流入管 2 からの流入量よりも多いため、流入管 1 からの流入水が流入管 2 の圧力水頭の増加に影響を与えていることがわかる。

図-11 流入管 1 のエネルギー損失係数 K_{e1} (両側段差)

図-12 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} (片側段差)

本研究の実験結果を基に、参考文献 12) で提案した式を改良し、2 本の流入管が $90^\circ \sim 180^\circ$ のいずれの流入角度で接続する場合でも、流入・流出管の落差の影響を考慮できる損失係数の算定式を開発する予定である。

図-13 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} (両側段差)

図-14 段差の違いによる 2 本の流入管の重なり (斜線部分が重なる面積)

図-15 流入管 1 のエネルギー損失係数 K_{e1} (片側段差)

図-16 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} (片側段差)

4. 結論

本研究では、3方向接合円形落差マンホールに関して、向かい合う2本の流入管に片側及び両側に段差を設けた実験を行った結果、下記の知見が得られた。

- 1) $D_1=D_2=5\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$ の場合、流量比によっては異なる場合もあるが、流入・流出管の間の段差が大きくなるにつれ、損失係数は大きくなる。これは、段差が大きくなるのに伴い、マンホール底面のインバートの効果が低減することと、片側段差では、管路から流入した水が直接マンホール内壁に衝突するためである。
- 2) 片側段差 Type D で流量比 Q_2/Q_3 が 1.0 のとき、落差が大きくなっても必ずしも損失係数 K_{e1} が大きくならない。これは、流入管 2 にしか水が流れていないため、流入・流出管の落差が大きくなり、しかも流入管 1 の落差が 6cm を超えると、流入管 2 からマンホールへ流入する水が流入管 1 の圧力水頭の上昇に直接的な影響を与えないからである。
- 3) 両側段差の場合、流量比によっては両側に同じ落差のあるタイプの方が両側の落差が異なるタイプのものよりも損失係数がやや大きくなる。これは、両側に同じ落差がある方が、片方の流入管からの流入水がもう一方の流入管の圧力水頭に与える影響がより大きくなるためである。
- 4) 片側段差、両側段差のいずれにおいても2本の流入管同士の段差を流出管の直径と同じ大きさにすると、流量比 Q_2/Q_3 が 0.2~0.8 の範囲では、エネルギー損失係数 K_{e1} , K_{e2} はいずれも管頂接合の場合よりも 0.3~0.5 程度増加することが明らかとなった。
- 5) $D_1=D_2=3\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$ の場合、エネルギー損失係数 K_{e1} に関しては、流量比 Q_2/Q_3 が 0 から 0.5 までは段差 S_1 の影響は全く見られない。 Q_2/Q_3 が 0.5 を超えると、流入管 2 からの流入量が流入管 1 からの流入量よりも多いため、流入管 2 からの流入水が流出管 1 の圧力水頭に影響を与える。この影響は、流入管 1 の段差 S_1 が大きいほど小さくなる。
- 6) エネルギー損失係数 K_{e2} に関しては、流量比 Q_2/Q_3 が 0.4 付近から 1.0 までは段差 S_1 の影響は全く見られない。流量比 Q_2/Q_3 が 0 から 0.4 付近までは、流入管 1 からの流入量が流入管 2 からの流入量よりも多いため、流入管 1 からの流入水が流出管 2 の圧力水頭の増加に影響を与えている。
- 7) 上記の結果から片側段差、両側段差いずれにおいても、今回設定した落差以上の段差を設けても、本実験結果を超えて極端に損失が大きくなるようなことはないと思察される。

今後は、本研究の実験結果を基に、参考文献 12) で提案した式を改良し、2本の流入管が $90^\circ \sim 180^\circ$ のいずれの流入角度で接続する場合でも、流入・流出管の落差の影

響を考慮したマンホールにおけるエネルギー損失係数の算定式を開発していきたい。また、向かい合う流入管の内径が異なるもの（例えば、 $D_1=5\text{cm}$, $D_2=3\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$ ）で実験を行い、改良式の検証を行う予定である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、本研究室を卒業した学生諸氏に実験、データ整理等で多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerdon, E.T. and Bossy, H.G.: Pressure Changes at Open Junctions in Conduits, *Trans.*, ASCE, 126, pp.364-396, 1961.
- 2) Marsalek, J. : Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report 52, American Public Works Association, Chicago, IL, 1985.
- 3) Lindvall, G. : Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and 90° Lateral, Proc. 3rd Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goetborg, Sweden, pp.137-146, 1984.
- 4) Johnston, A. J. and Volker, R. E. : Head Losses at Junction Boxes, J. Hydraul. Eng. Am. Soc. Civ. Eng. Vol.116, No.3, pp.326-341, 1990.
- 5) Kerenyi, K. and Jones, S. : Energy Losses in Storm Drain Access Holes, January/February 2006 Publish Road, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2006.
- 6) Urban Drainage Design Manual, HEC22 (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hec22.pdf>), 2001.
- 7) 荒尾慎司, 楠田哲也 : 3方向接合マンホールの損失特性に関する実験的研究, 環境工学研究論文集, Vol.40, pp.421-429, 2003.
- 8) 平塚俊祐 : 3方向接合円形落差マンホールの損失特性一定式化に向けて一, 平成 23 年度(第 63 回)土木学会中国支部研究発表会概要集, 2011.
- 9) 荒尾慎司, 森山克美, 浅田純作, 広瀬望, 楠田哲也 : 管水路流れにおける3方向接合円形マンホールのエネルギー損失特性, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.925-930, 2011.
- 10) Arao, S., Kusuda, T., Moriyama, K., Hiratsuka, S., Asada, J. and Hirose, N. : Energy Loss at Three-Way Circular Drop Manhole under Surge Flow, 12th Int. Conf. on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil, 11-16 September 2011.
- 11) Arao, S., Kusuda, T., Moriyama, K., Hiratsuka, S., Asada, J. and Hirose, N. : Energy losses at three-way circular drop manholes under surcharged conditions, *Water Science & Technology*, Vol.66, No.1, pp.45-52, 2012.
- 12) 荒尾慎司, 平塚俊祐, 楠田哲也 : 管水路流れにおける3方向接合円形落差マンホールのエネルギー損失の定式化, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.2, pp.105-122, 2013.
- 13) 荒尾慎司, 楠田哲也 : 管水路流れにおける2方向接合円形落差マンホール部の形状損失の定式化, 土木学会論文集 G, Vol.62, No.1, pp.162-170, 2006.

(2014. 9. 30 受付)