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

荒尾 慎司¹・平塚 俊祐²・楠田 哲也³

¹正会員 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)

E-mail: arao@matsue-ct.jp

²学生会員 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: hiratsuka.shunsuke.62u@st.kyoto-u.ac.jp

³フェロー会員 九州大学名誉教授

既往の研究では、マンホールでの損失は管路の摩擦損失に比べて無視しえないことが明らかにされている。しかし、マンホールと管路の接続形態がマンホールでの損失に与える影響は未だ完全には明らかにされていない。本論文では、2本の流入管と1本の流出管が接続する3方向接合円形落差マンホールを対象として、管水路流れのもとで接続管路の管内径、管内流量、2本の流入管の接合角度および流入・流出管の間の落差を種々変化させた実験を行い、マンホールでのエネルギー損失特性を明らかにする。さらに実験結果を基に、管路とマンホールに関する種々の構造要素と水理学的要因を考慮したエネルギー損失係数の算定式を新たに開発する。本提案式により、流入・流出管の間に落差が設けられたマンホールに関しても、損失係数を算定できるようになった。

Key Words : connected pipe angle, drop manhole, formula on energy loss, urban storm drainage

1. はじめに

近年、これまでに経験したことのない大雨や局地的集中豪雨の増加によって、水害が頻発し、全国各地で外水氾濫や内水氾濫により大きな被害を受けている。洪水氾濫による被害を軽減するためには、ハード面の対策だけでなく、住民への迅速かつ正確な気象情報の伝達、洪水ハザードマップや防災訓練等による適切な避難誘導対策を議論した上で被害を最小にする施策を実施しなければならない。しかし、内水氾濫が考慮されていない洪水ハザードマップにおいては、実際には浸水している区域を計算では予測できていないケースが生じ問題となっている。洪水ハザードマップの信頼性向上のためには、浸水被害の危険性を定量的に評価することが必要不可欠であり、雨水の流れを正確に計算する必要がある。河川からの溢水や堤防の破堤には至らない内水氾濫解析においては、地表面流の計算精度向上とともに、雨水管から溢水し始める場所を正確に把握することが避難誘導の面からも非常に重要である。そのためには雨水管の流下能力を適切に評価する必要がある。マンホールを介して接続される雨水管の流下能力の評価には雨水管の摩擦損失とマンホールでの形状損失を組み合わせる必要がある。

既往の研究より、マンホールでの損失は管路の摩擦損失に匹敵するほど大きくなることもあり、無視しえないことが明らかにされている^{1), 2), 3), 4)}。海外で開発されている氾濫解析ソフト (XP-SWMM, InfoWorks, MOUSE) においては、マンホールでの損失を算定するのにそれぞれ異なる式が組み込まれている。これらの式では、流入管の本数や管路とマンホールの接続条件によっては損失係数として適切な値を与えることができていないのが現状である。また日本でも下水道を組み込んだ氾濫解析モデルが開発されているものの、ほとんどのモデルでマンホールでの損失係数は設定されていない。このような背景から、種々のモデルにおける内水氾濫解析結果には未だ問題点が残されている。流入管1本と流出管1本が接合する2方向接合円形落差マンホールにおいては、著者らによりエネルギー損失係数の定式化がなされている²⁾。しかし、道路のY字路やT字路交差点下等に設置される流入管2本と流出管1本が接合する3方向接合円形落差マンホールに関しては、既往の研究よりエネルギー損失係数の算定式がいくつか考案されているものの、マンホールや接続管路にかかわる構造上の変数が全て考慮されているわけではなく、算定式の適応範囲に制限がある。マンホールでのエネルギー損失をより正確に算出

するには、構造上の変数を全て考慮したエネルギー損失係数の算定式を開発する必要がある。

本論文では、3方向接合円形落差マンホールを対象に、管内径、管内流量、流入・流出管の接合角度および流入・流出管の落差を種々変化させた実験を行うことで、3方向接合円形落差マンホールのエネルギー損失特性を明らかにし、さらに、水理学的要因と種々の構造要素を全て考慮したエネルギー損失係数の算定式を開発する。

2. マンホール損失を定式化する際に考慮すべき 3方向接合マンホールの構造要因と変数

3方向接合マンホールでのエネルギー損失を引き起こす構造上の要因を分類すると以下のようになる。

- (1) マンホールの平面形状（正方形，長方形，円形），
底面形状，マンホール径
- (2) 接合管路の種類（円管，矩形管），管径，管勾配
- (3) 接合管路の鉛直接合状況（管頂接合，管中心接合，
管底接合，段差接合）
- (4) 接合管路の水平面接合角度

既往の研究では、流入管と流出管の鉛直方向の接合条件は管底接合，管頂接合，管中心接合がほとんどであり、段差接合に着目した研究は少ない。管水路流れでの3方向接合マンホールのエネルギー損失係数 K_e は、式(1)に示すように10個の無次元数の関数とマンホールの底面形状により表される(図-1参照)。管水路流れではフルード数 $V/\sqrt{gD}$ (V : 管路の断面平均流速， g : 重力加速度， D : 管路の内径)の影響は無視することができる。また既往の研究^{3), 4), 5)}においてレイノルズ数 VD/ν (ν : 流体の動粘性係数)が 10^4 以上でこの影響を無視できることが示されており、本研究においてもこの影響を無視して検討を進める。

$$K_e = f\left(\frac{b}{D_3}, \frac{D_1}{D_3}, \frac{D_2}{D_3}, \frac{y}{D_3}, \frac{Q_1}{Q_3}, \frac{Q_2}{Q_3}, \frac{S_1}{D_3}, \frac{S_2}{D_3}, \frac{\theta_1}{180}, \frac{\theta_2}{180}\right) \quad (1)$$

ここに、 b はマンホールの内径， D_1 ， D_2 はそれぞれ流入管1，2の内径， D_3 は流出管の内径， y はマンホール底面から水面までの距離， Q_1 ， Q_2 はそれぞれ流入管1，2の流量， Q_3 は流出管の流量($Q_3 = Q_1 + Q_2$)， S_1 ， S_2 はそれぞれ流入管1，2と流出管の間の落差， θ_1 ， θ_2 はそれぞれ流入管1，2と流出管の水平面接合角度である。なお式(1)には管勾配は含まれていないが、ここでは管水路流れを対象としているため、いずれの勾配でも差支えない。また、管路形状、マンホール形状をともに円形とし、変数として含めない。実験における3方向接合マンホールのエネルギー損失係数 K_e と圧力損失係数 K_p は、それぞれ式(2)，式(3)で定義される(図-2参照)。

平面図

図-1 定式化に際して考慮すべき変数とマンホール底面形状

図-2 マンホールでのエネルギー損失水頭差 ΔE

$$K_{e*} = \frac{\Delta E_*}{V_3^2/2g} \quad (2)$$

$$K_{p*} = \frac{\Delta P_*}{V_3^2/2g} = K_{e*} + 1 - \left(\frac{V_*}{V_3}\right)^2 \quad (3)$$

ここに、下付き添字*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。 ΔE_* はマンホールでのエネルギー損失水頭差， ΔP_* は圧力損失水頭差， V_* は流入管の断面平均流速， V_3 は流出管の断面平均流速， g は重力加速度である。

3. マンホールのエネルギー損失及び圧力損失に関する従来の研究

既往の研究において、管水路流れにおける2方向接合円形マンホールのエネルギー損失係数の算定式が著者らにより定式化されている²⁾。3方向接合マンホールの損失に関する研究は、Marsalek³⁾，Lindvall⁴⁾，Sangsterら⁶⁾，Johnston & Volker⁷⁾，Townsend & Prins⁸⁾，FHWA⁹⁾，著者ら^{10), 11), 12), 13), 14), 15)}等により行われている。これらの研究は、管内の流れを定常流とし、しかも管水路流れを対象としたものがほとんどであり、流入管と流出管の接合に落差を考慮した研究は非常に少ない。2本の流入管の接合角度は一方の管路の接合角度を 180° とし、もう一方の管路

の接合角度を 90° としたものがほとんどであり、 90° 以外の研究は、Townsend & Prins⁸⁾によるものだけである。流入・流出管の管径比を考慮しているのは、Marsalek³⁾、Lindvall⁴⁾、Sangster⁹⁾、著者ら^{14),15)}である。

Marsalek³⁾は、開水路流れと管路流れの両方について主流($\theta=180^\circ$)と横流入($\theta=90^\circ$)の流量配分を変化させることで詳細な実験を行った。彼は、Lindvall⁴⁾の理論を適用した結果、理論式が実験値を十分表現できることを示している。さらに、彼はマンホールの底面形状と横流入管と流出管の流量比及び損失係数との関係を表にまとめており、雨水管の設計上非常に参考になるデータを提供している。しかし、マンホール内の水深比は考慮されていない。

Lindvall⁴⁾は、マンホールへの流入管と流出管でのエネルギーフラックスの差を表す式を導入し、しかも流入する流れがお互いに影響し合わないと仮定することによりマンホールでの圧力損失水頭差に関する損失係数を導いている。彼は、実験結果から圧力損失係数 K_{P1} と流量比 Q_2/Q_3 との関係を次式のように表している。

$$K_{P1} = 0.27 - 0.12 \frac{b}{D_3} + 1.6 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^{\frac{3D_3}{b}} \times \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^{-a_1} \quad (4)$$

$$a_1 = 2.0 - 0.22 \frac{b}{D_3} \quad (5)$$

$$K_{P2} = 0.27 - 0.095 \frac{b}{D_3} + \left(1.1 + 0.09 \frac{b}{D_3} \right) \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^{\frac{3D_3}{b}} \times \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^{-a_2} \quad (6)$$

$$a_2 = 1.8 - 0.2 \frac{b}{D_3} \quad (7)$$

ただし、Lindvall の式にはマンホール内の水深 y の影響は考慮されておらず、問題が残る。

Sangster⁹⁾は、マンホールのエネルギー損失に影響を与える要因として、横流入管($\theta=90^\circ$)と流出管の流量比 Q_2/Q_3 、マンホール径比 b/D_3 があることを示した。また、主流管($\theta=180^\circ$)と横流入管($\theta=90^\circ$)に関する圧力損失係数をマンホールの入り口と出口において連続式と運動量保存式から理論的に算定する式を導いた。主流管と横流入管に関する圧力損失係数 K_{P1} 、 K_{P2} を次式に示す。

$$K_{P1} = \overline{K_{P1}} \times K_{P1}' \quad (8)$$

$$K_{P1}' = 1 - \left\{ \left(\frac{Q_1}{Q_3} \right) \times \left(\frac{D_3}{D_1} \right) \right\}^2 \quad (9)$$

$$K_{P2} = \overline{K_{P2}} \times K_{P2}' \quad (10)$$

$$K_{P2}' = 1 - \left\{ \left(\frac{Q_1}{Q_3} \right) \times \left(\frac{D_3}{D_1} \right) \right\}^{\frac{2D_3}{D_2}} \quad (11)$$

ここに、 Q_1 は主流方向の流入管の流量、 Q_2 は横流入方向の流入管の流量、 D_1 、 D_2 、 D_3 はそれぞれ主流方向の流入管、横流入方向の流入管、流出管の内径である。ただし、 $\overline{K_{P1}}$ 、 $\overline{K_{P2}}$ はマンホール径比 b/D_3 と D_3/D_2 の変化による実験に基づく損失係数の補正係数を表している。彼らは、マンホール径が流出管径に比べてかなり大きく主流管内径と横流入管内径が等しいときには、理論値と実測値が一致することを示している。しかし、マンホール内の水深の影響は考慮されていないので、マンホール内の水深が十分大きいときに適用可能と考えられる。

Johnston & Volker⁷⁾は、実験結果を基に主流管と横流入管に関する圧力損失係数と流量比の関係を以下のように定式化した。

$$K_{P1} = -3.26 + 11.0 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right) - 5.74 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^2 - 0.05 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^3 \quad (12)$$

$$K_{P2} = -2.99 + 10.78 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right) - 6.60 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^2 + 0.71 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^3 \quad (13)$$

しかし、この式は管径比を固定(流出管径は流入管径よりも大きい)して得られた実験結果による推定式であり、実験条件と異なる条件下では適用できず、マンホール内の水深の影響も考慮されていない。

FHWA⁹⁾は、*Urban Drainage Design Manual* (以下 UDDM と表記)をインターネット上で公開している (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hc22.pdf>)。この式は 3 方向接合マンホールのエネルギー損失係数を算定する上で、最も適用範囲が広いと考えられる。以下にその式形を示す。

$$K_e = K_0 C_D C_d C_Q C_P C_B \quad (14)$$

$$K_0 = 0.1 \left(\frac{b}{D_3} \right) \left(1 - \sin \theta_i \right) + 1.4 \left(\frac{b}{D_3} \right)^{0.15} \sin \theta_i \quad (15)$$

$$C_D = \left(\frac{D_3}{D_i} \right)^3 \quad (16)$$

$$C_d = 0.5 \left(\frac{y}{D_3} \right)^{0.6} \quad (17)$$

$$\left[0 \leq \frac{y}{D_3} \leq 3.2, \frac{y}{D_3} > 3.2 \text{ then } C_d = 1 \right]$$

$$C_Q = \left(1 - 2 \sin \theta_i \right) \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^{0.75} + 1 \quad (18)$$

$$C_P = 1 + 0.2 \left(\frac{z}{D_3} \right) \left(\frac{z-y}{D_3} \right) \quad (19)$$

ここに、 D_i は流入管の内径、 K_0 はマンホール径比 b/D_3 と流入・流出管の接合角度 θ_i に関する係数、 C_D は流入・流出管の管径比 D_3/D_i に関する係数、 C_d はマンホール内の水深比 y/D_3 に関する係数(管水路流れ($y/D_3 > 3.2$)で、水深の影響を考慮しない場合、 $C_d=1$)、 C_Q は流入・流出管の流量比 Q_i/Q_3 に関する係数、 C_p は突入流(マンホール内の水面へ自由落下して衝突する流れ)に関する係数(すべての管が管水路流れの場合、 $C_p=1$)、 z は最も高いところにある流入管からの突入流と流出管の中心線との鉛直距離である。 C_B はマンホールの底面形状に関する係数(管径の 1/2 のインバートが設置されている場合、 $C_B=0.95$)である。UDDM による式は管路形状やマンホール形状を円形としており、式(1)の変数の中で落差以外の変数をすべて網羅している。しかしながら、著者らの既往の研究^{12),13),14)}で管径の組合せや流量比によっては実測値と大きく差が生じることが分かっており、式の適用に関しては問題が残る(図-7、図-8 参照)。また著者らの研究¹⁴⁾では、直管における流入管及び横流入管と流出管との落差を考慮したマンホールでのエネルギー損失係数の算定式を開発している。しかし、この計算式では横流入管の接合角度しか変化させることができない。さらに著者らの研究¹⁵⁾では、流入・流出管の落差を考慮しない条件下で2本の流入管の接続角度の変化を考慮できる算

定式を考案しているが、式形に一部問題があるため、マンホール径と接続管路の寸法条件によっては、損失係数として適切な値が算出されないことがあり、式形を見直す必要が生じた。以上のように、これらの算定式にはマンホールや接続管路にかかわる構造上の変数が全て考慮されているわけではなく、算定式の適応範囲に制限がある。これは、検討すべき接続管路とマンホールに関する水理学的要因(マンホール内の水深、2本の流入管の流量比)や構造要素(3本の接続管の内径、流入・流出管の水平面接合角度など)が数多く存在するためであり、これらの式の適用にあたっては未だ問題点が残されている。また管水路流れを対象として流入・流出管の間の落差を考慮した実験的研究例はいくつか見られるものの、T字路交差点下の落差マンホールで損失係数の定式化を行っている研究は非常に少ない。本論文では、落差を含むこれらの構造上の変数を全て考慮したエネルギー損失係数の算定式を開発することを目的とする。

4. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本研究で用いている実験装置の概要を図-3、図-4に示

図-3 実験装置の概要($\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$)

Type H-K

図-4 2本の流入管が向かい合う場合($\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=90^\circ$)

表-1 管内径(D_1 , D_2 , D_3), 流入・流出管の接合角度(θ_1 , θ_2), 流入・流出管の間の落差(S_1 , S_2)の組み

	流入管1の 接合角度 θ_1	流入管2の 接合角度 θ_2	流入管1の 管内径 D_1	流入管2の 管内径 D_2	流出管の 管内径 D_3	流入管1と 流出管の落差 S_1	流入管2と 流出管の落差 S_2
Type A	180°	90°	5cm	5cm	5cm	0cm, 5cm	0cm, 2.5cm, 5cm
Type B			5cm	5cm	6cm	管中心接合	
Type C			5cm	4cm	6cm	1cm, 6cm, 11cm	2cm, 7cm, 12cm
Type D			4cm	5cm	6cm	2cm, 7cm, 12cm	1cm, 6cm, 11cm
Type E			5cm	3cm	6cm	管頂接合	
Type F			3cm	5cm	6cm		
Type G			3cm	3cm	6cm		
Type H	90°	90°	5cm	5cm	6cm		
Type I			5cm	3cm	6cm		
Type J			3cm	5cm	6cm		
Type K			3cm	3cm	6cm		

す。実験装置におけるマンホールと管路の材質は、透明なアクリルパイプである。図-3は2本の流入管の接合角度が $\theta_1=180^\circ$ と $\theta_2=90^\circ$ の場合、図-4は2本の流入管が向かい合う $\theta_1=90^\circ$ 、 $\theta_2=90^\circ$ の場合である。模型は実規模(マンホール径90cm, 管径25cm等)の1/5の縮小模型であり、マンホール形状を円筒として、実物よりも簡易なモデルとしている。マンホール底面には、日本で一般的に用いられる管内径の1/2に相当するインバートが設置されている。

(2) 実験方法

- 2ヶ所の流量調節バルブにより、管内を管水路流れにして流入管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。このときの流量は $\pm 1\%$ 以内の誤差で所定の値に設定している。
- 最も高い位置にある流入管の内壁頂部から水面までの距離をマンホール水深 h 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。
- 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。2本の流入管(管径はともに5cm)が向かい合う場合、マンホール内の水深が5cmのとき水面が激しく上下に揺れ、最大 $\pm 15\text{mm}$ 程度の水面変動を生じる。水深が深くなるにつれて水面変動は小さくなり、

水深が10cmのとき $\pm 2.5\text{mm}$ 程度、水深が20cmのとき $\pm 0.5\text{mm}$ 程度の水面変動を生じる。

- 4) 流入管1, 2及び流出管にそれぞれ3ヶ所ずつ取り付けられたマンメータによって管内の圧力水頭を2回測定し、その平均値に速度水頭($V^2/2g$)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_* を求める(図-2参照)。さらに、式(2)によりエネルギー損失係数 K_{e*} を、式(3)により圧力損失係数 K_{p*} を算出し、各流量比における水深比 h/D_3 が2以上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。後述するように、管水路流れにおける3方向接合円形落差マンホールでの損失を定式化する際には、水深の影響を考慮していない。

(3) 実験条件

表-1に既往の研究^{11), 12), 13), 14), 15)}も含めた管内径(D_1 , D_2 ,

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-5 流入管1のエネルギー損失係数 K_{e1} と水深比 h/D_3 の関係(流入・流出管の間の落差なし)

図-6 流入管2のエネルギー損失係数 K_{e2} と水深比 h/D_3 の関係(流入・流出管の間の落差なし)

D_3), 流入・流出管の接合角度(θ_1 , θ_2), 流入・流出管の間の落差(S_1 , S_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.

5. 実験結果及び考察

(1) 水深比の影響

図-5, 図-6 に流量比 $Q_2/Q_3=0, 0.5$ 及び 1.0 とした場合のエネルギー損失係数 K_{e1} , K_{e2} と水深比 h/D_3 の関係を示す. これらの図を含め, 以下で示す図の凡例の Type A(5-5-5) 等のかっこ内の数値は, 左から順に流入管 1, 流入管 2, 流出管の管内径(cm)を表す. また図中の点は実測値, 線は計算値を示す. Type B, G は $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ であり, Type H, K は $\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ である. 流量比が 0 の場合, Type B と Type H ($D_1=5\text{cm}$, $D_2=5\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$) を比較すると, K_{e1} , K_{e2} とともに水深比が 0.5 付近まではほぼ同じ値を示している. これは流入管 1 の接合角度を 180° (Type B) から 90° (Type H)に変化させたときの角度による影響よりも, Type B では直管のみに水が流れており, マンホール内の水深比 h/D_3 が 0.6 付近まで大きくなるにつれて, 流下方向に左右に分離する水平渦や単方向回転の水平渦が発生し, これらの渦による損失の方が大きくなるためである. 水深比が 0.5 付近よりも大きくなると, $\theta_1=180^\circ$ とした Type B, G ではスケールの大きな渦が消失し, 損失係数は低減する. 同様の傾向は Type G と Type K を比較しても見られる. 流量比が 0.5 の場合, Type B と Type H 及び Type G と Type K の K_{e1} , K_{e2} の値はほぼ同じ値を示している. これは流量比が 0.5 のとき, マンホール内では流入管 1 及び流入管 2 の流入水がマンホール内で互いに衝突するため, これによるエネルギー損失が大きくなり, 接合角度の影響は小さいためである. また, この流量比では損失係数が水深によらずほぼ一定値となることがわかる. 流量比が 1.0 の場合, 水深比が 0.5 より小さくなると, K_{e1} はすべての Type でほぼ同じ値になっているが, これも前述したように, マンホール内の水深が低くなるにつれてマンホール内で発生する渦の影響が支配的になるからである. また管内径の組合せが同じ Type であれば K_{e2} はほぼ同じ値となるが, これは流量比が 1.0 の場合, 流入管 1 に水が流れていないため, 流入管 1 の接合角度を変化させても K_{e2} に与える影響がないからである. さらに, いずれの流量比においても水深比が 2.0 より大きいところでは, K_{e1} , K_{e2} とともにほぼ一定の値を示しており, マンホール内の水深の影響は小さい. 各流量比におけるエネルギー損失係数の代表値を水深比が 2.0 以上の平均値としたのはこのためである.

図-7 流入管 1 のエネルギー損失係数 K_{e1} と流量比の関係 (流入・流出管の間の落差なし)

図-8 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} と流量比の関係 (流入・流出管の間の落差なし)

(2) 管径比および流量比の影響 ($\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$)

図-7 に流入管 1 ($\theta_1=180^\circ$)のエネルギー損失係数 K_{e1} と流量比 Q_2/Q_3 の関係を示す. Type B ($D_3/D_1= D_3/D_2=1.2$)と Type C ($D_3/D_1=1.2$, $D_3/D_2=1.5$)を比較すると, 流量比が 0.3 から 0.7 付近で Type C のエネルギー損失係数の方が大きくなっている. これは流入管 2 の内径 D_2 を 5cm から 4cm に小さくしたことで流入管 2 からの流入速度が大きくなり, 流入管 1 及び 2 からの流入水がマンホール内で衝突したときの影響が大きくなるからである. この衝突により流入管 1 からの流入水が流出管へ流下しにくくなりエネルギー損失係数が大きくなったと考えられる. また流量比 Q_2/Q_3 が 0 のときに損失係数がほぼ同じ値になっているのは, 流入管 2 の流量 Q_2 が 0 であるため, 流入管 2 の内径 D_2 の違いが流入管 1 のエネルギー損失係数に影響を与えないからである. Type B と Type D ($D_3/D_1=1.5$, $D_3/D_2=1.2$)を比較すると, 流量比が 0 から 0.8 の範囲で Type D のエネルギー損失係数の方が大きくなっている. これは流入管 1 の内径 D_1 を 5cm から 4cm に小さくしたことで流入管 1 からの流入速度が大きくなり, 流入管 1 からの流入水の一部がやや拡大しながらマンホ

ール下端内壁に衝突して失うエネルギーがより大きくなるからである。図-7 に UDDM による計算値との比較を示す。UDDM による式では管径比の組合せによっては実測値と大きく異なる値になることが分かる。特に Type D では流量比と損失係数の関係が逆の傾向になっており、実測値を全く表現できていない。さらに、この式では流入管 2 の管内径の変化を考慮できないという大きな欠点がある。

図-8 に流入管 2 ($\theta_2=90^\circ$) のエネルギー損失係数 K_{e2} と流量比 Q_2/Q_3 の関係を示す。いずれの Type においても、エネルギー損失係数は流量比が 1 のときに最大、0 のときに最小となっている。流量比が 0.5 より大きい場合、流入管 1 の流量 Q_1 に比べて流入管 2 の流量 Q_2 が多くなる。そのため流入管 1 からの流入水の影響が小さくなり、流入管 2 からの流入水が直接マンホール内壁に衝突し、流量比が 0.7 よりも大きくなると速度水頭に相当するエネルギーを失うため損失係数が大きくなったと考えられる。流入管 2 の内径が小さくなると、流入速度が大きくなることで衝突の影響がより大きくなるため、Type C ($D_2 = 4\text{cm}$) は他の Type に比べて損失係数が大きくなる。逆に流量比が 0.5 より小さくなると、流入管 1 の流量 Q_1 が流入管 2 の流量 Q_2 に比べて多くなるため、流入管 2 からの流入水は流入管 1 からの流入水に押され、流下しやすくなることにより、損失係数は小さくなる。流入管 1 の内径 D_1 が細くなるとよりスムーズにマンホール内を流下するため、Type D ($D_1=4\text{cm}$) は他の Type に比べて損失係数が小さくなる。また流量比が 0 から 0.2 付近では損失係数が負の値を示している。この範囲の流量比では流入管 1 からの流入水は流入管 2 からの流入水に遮られることなく勢い良くマンホール内を流下し、流出管へ流れこむ。このためベルヌーイの定理よりマンホール内の圧力が低下し、それに伴ってマンホール内の水位も低下する。マンホール内の水位が低下したことで流入管 2 の圧力が流出管のエネルギーよりも低くなったため流量比が 0 から 0.2 付近で損失係数が負の値となった。Type D は他の Type と比べて流入管 1 の内径 D_1 が小さいことから、流入管 1 からの流入水がマンホールを流下するときの速度がより大きくなったため負の値がより大きくなった。

図-8 に UDDM による計算値との比較を示す。UDDM による式では流入管の接合角度を 90° とし流量比を 0 とすると、いずれのケースでも損失係数が 0 になるという欠点がある。

(3) 流入・流出管の接合角度 θ の影響

図-9、図-10 に流入・流出管の接合角度を変化させた場合のエネルギー損失係数 K_{e1} 、 K_{e2} と流量比 Q_2/Q_3 の関係を示す(図-11、図-12 参照)。Type B, E, F, G は流入・流出管の接合角度が $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の場合、Type H, I, J, K は

		$D_1-D_2-D_3$ [cm]			
		5-5-6	5-3-6	3-5-6	3-3-6
$\theta_1=180^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	■ Type B	◆ Type E	● Type F	▲ Type G
$\theta_1=90^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	□ Type H	◇ Type I	○ Type J	△ Type K

図-9 流入・流出管の接合角度の影響
(流入・流出管の間の落差なし)

		$D_1-D_2-D_3$ [cm]			
		5-5-6	5-3-6	3-5-6	3-3-6
$\theta_1=180^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	■ Type B	◆ Type E	● Type F	▲ Type G
$\theta_1=90^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	□ Type H	◇ Type I	○ Type J	△ Type K

図-10 流入・流出管の接合角度の影響
(流入・流出管の間の落差なし)

$\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の場合である。

図-9 に示す流入管 1 のエネルギー損失係数 K_{e1} を見てみると、全体の傾向として、管内径の組合せが同じである場合(例えば Type B と Type H, Type E と Type I など)、流量比が 0.5 付近では流入管 1 の接合角度 θ_1 を 180° から 90° に変化させても K_{e1} はほぼ同じ値を示しているが、それ以外の流量比では特に $\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ で流入管 2 の内径 $D_2(=3\text{cm})$ が小さい Type I, K の方が $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ とした Type E, G に比べて大きい値を示している。流量比が 0.5 より小さい場合、Type H-K のように流入管 1 の流入角度 θ_1 を 90° にすると曲がりの影響が大きくなる。このため Type B, E-G のように $\theta_1=180^\circ$ の場合に比べて流入管 1 からの流入水は流出管へと流下しにくくなり、 K_{e1} が大きくなったと考えられる。特に Type J と Type K では、流入管 1 の内径 $D_1(=3\text{cm})$ が小さいため、管内流速が大きく、曲がりの影響も大きくなるため、流入管 1 の接合角度 θ_1 が 180° のときの Type F, G より大きな値となっている。また、流量比が 0.5 より大きい場合は、流入管

2の流量 Q_2 が流入管1の流量 Q_1 より多くなるため、特にType I, Kのように2本の流入管が向かい合い、さらに流入管2の内径 $D_2(=3\text{cm})$ が小さい場合には、流入管2の流速が大きく、流入管1は流入管2からの流入水の影響をより大きく受け、流入管1内の圧力が上がるため θ_1 が 180° のときより K_{e1} が大きくなったと考えられる。

図-10に示す流入管2のエネルギー損失係数 K_{e2} を見てみると、管内径の組合せが同じである場合、流量比が0.5より小さいとき、 $\theta_1=90^\circ$ 、 $\theta_2=90^\circ$ としたType H~ Kの方が $\theta_1=180^\circ$ 、 $\theta_2=90^\circ$ としたType B, E-Gに比べて大きい値を示している。これは流量比が0.5より小さいところでは、流入管1の流量が流入管2の流量より多く、Type H-Kのように2本の流入管が向かい合うような場合には前述したように流入管1からの流入水の影響で流入管2内の圧力が大きくなることから、損失が大きくなったと考えられる。特にType JとType Kのように流入管1の内径 $D_1(=3\text{cm})$ が小さい場合、流入管1の流速が大きく、流入管2に与える影響が大きくなるため、この傾向が顕著になる。また、流量比が0.5より大きいところでは、管内径の組合せが同じであれば、流入管1の接合角度 θ_1 を 180° から 90° に変化させても K_{e2} はほぼ同じ値を示している。これは流量比が0.5より大きい場合、流入管1の流量は流入管2の流量より少ないため、流入管1の影響は小さくなり、流入管2の曲がりの影響が支配的になるからである。すべてのTypeにおいて流入管2の接合角度は 90° であるので、流入管2の影響が支配的であれば、 K_{e2} に差は生じない。

(4) 流入・流出管の落差の影響 ($\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$)

図-15から図-20にそれぞれType A, C, D ($\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$)において流入管1及び2に流入・流出管の間の落差 S_1 , S_2 を設けた場合のエネルギー損失係数と流量比の関係を示す(図-13, 図-14参照)。

a) 流入管1のエネルギー損失係数 K_{e1}

図-15から図-17にそれぞれType A, C, Dの流入管1のエネルギー損失係数 K_{e1} と流量比 Q_2/Q_3 の関係を示す。まず流入管1の落差 S_1 の影響を見るため、図-15の $[S_1=0\text{cm}, S_2=0\text{cm}]$ と $[S_1=5\text{cm}, S_2=0\text{cm}]$ を比較すると、流量比が0から0.5の範囲で後者のエネルギー損失係数の方が大きくなっている。これは流入管1に5cmの落差を設けたことにより、流入管1からの流入水が直接流出管へと流下できず、マンホール内壁に衝突したためである。この流入水の衝突により速度水頭に相当するエネルギーを失い、エネルギー損失係数が大きくなったと考えられる。流量比が0.5より大きくなると、両者はほぼ同じ値を示しているが、これは流入管1の流量が流入管2の流量に比べて少なくなったことで流入管1の落差の影響(落差を設けたことによる衝突の影響)よりも流入管2からの流入水の影響が大きくなったためである。両者には

図-11 流入水の衝突
(流入・流出管の間の落差なし)

図-12 流入水の衝突
(流入・流出管の間の落差なし)

図-13 流入水の衝突
(流入・流出管の間の落差あり)

流入管2から流出管までの構造上の違いはないので同じ値になったと考えられる。これらのことから、流入管1の落差 S_1 が流入管1のエネルギー損失係数 K_{e1} に与える影響は流量比が0.5より小さいところで大きくなることがわかる。次に、流入管2の落差 S_2 の影響を見るため、図-15の $[S_1=5\text{cm}, S_2=0\text{cm}]$ と $[S_1=5\text{cm}, S_2=5\text{cm}]$ を比較すると、両者のエネルギー損失係数はほぼ同じ値を示している。これは流入管2からの流入水は落差の有無にかかわらずマンホール内壁に衝突することが原因である。同様の傾向が図-17の $[S_1=12\text{cm}, S_2=1\text{cm}]$ と $[S_1=12\text{cm}, S_2=11\text{cm}]$ を比較しても得られることから、流入管2の落差 S_2 が流入管1のエネルギー損失係数 K_{e1} に与える影響はほとんどないことがわかる。また図-16の $[S_1=6\text{cm}, S_2=7\text{cm}]$ と $[S_1=11\text{cm}, S_2=12\text{cm}]$ を比較すると、流量比によって後者の方のエネルギー損失係数が若干大きくなる程度である。同様の結果が図-17の $[S_1=7\text{cm}, S_2=6\text{cm}]$ と $[S_1=12\text{cm}, S_2=11\text{cm}]$ を比較しても得られることから、流入管1及び2の落差が流出管の内径以上の大きになると、落差の大きさの違いが流入管1のエネルギー損失係数に与える影響は非常に小さい。

図-14 マンホールの概略図(流入・流出管の落差あり)

図-15 流入・流出管の間の落差の影響(Type A, K_{e1})

図-18 流入・流出管の間の落差の影響(Type A, K_{e2})

図-16 流入・流出管の間の落差の影響(Type C, K_{e1})

図-19 流入・流出管の間の落差の影響(Type C, K_{e2})

図-17 流入・流出管の間の落差の影響(Type D, K_{e1})

図-20 流入・流出管の間の落差の影響(Type D, K_{e2})

b) 流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2}

図-18 から図-20 にそれぞれ Type A, C, D の流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} と流量比 Q_2/Q_3 の関係を示す。流入管 1 の落差 S_1 の影響を見るため、図-18 の $[S_1=0\text{cm}, S_2=0\text{cm}]$ と $[S_1=5\text{cm}, S_2=0\text{cm}]$ を比較すると、流入管 1 のエネルギー損失係数と同様、流量比が 0 から 0.5 の範囲で後者の方のエネルギー損失係数が大きくなっている。これは前述したように、流入管 1 に 5cm の落差を設けたことにより流入管 1 からの流入水が直接流出管へと流下できず、マンホール内壁に衝突したためである。流入管 1 からの流入水がマンホール内壁に衝突したことでマンホール内の圧力が上昇し、マンホール内の水位も上昇する。それに伴って流入管 2 内の圧力が増加したためエネルギー損失係数が大きくなったと考えられる。流量比が 0.5 より大きくなると両者がほぼ同じ値を示しているのも、前述した通り、流入管 1 の流量が流入管 2 の流量に比べて少なくなったことで、流入管 1 の落差の影響よりも流入管 2 からの流入水がマンホール内壁へ衝突したことによる影響の方が大きくなったためである。これらのことから、流量比が 0.5 より小さいところでは、流入管 1 の落差 S_1 が流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} に与える影響も大きくなることがわかる。

次に、流入管 2 の落差 S_2 の影響を見るため、図-18 の $[S_1=5\text{cm}, S_2=0\text{cm}]$ と $[S_1=5\text{cm}, S_2=5\text{cm}]$ を比較すると、両者の損失係数はほぼ同じ値を示しており、図-20 の $[S_1=12\text{cm}, S_2=1\text{cm}]$ と $[S_1=12\text{cm}, S_2=11\text{cm}]$ を比較しても流量比によって若干後者の方のエネルギー損失係数が大きくなる程度である。このことから、流入管 2 の落差 S_2 が流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} に与える影響は小さい。これは流入管 2 からの流入水が落差の有無にかかわらずマンホール内壁に衝突することが原因である。図-19 の $[S_1=6\text{cm}, S_2=7\text{cm}]$ と $[S_1=11\text{cm}, S_2=12\text{cm}]$ を比較すると、流入管 1 のエネルギー損失係数と同様に、後者のエネルギー損失係数の方が若干大きくなる程度であり、流入管 1 及び 2 の落差が流出管の内径以上の大きになると、落差の大きさの違いが流入管 2 のエネルギー損失係数に与える影響は非常に小さくなる。

6. エネルギー損失係数の定式化

(1) 定式化の考え方

本論文では、3 章で述べた UDDM に掲載されている式を基にエネルギー損失係数の定式化を進める。UDDM による式はエネルギー損失係数 K_{ei} を算出する上で、既往の研究の中でも適応範囲は広いと考えられる。

(2) 定式化

ここでは、実測値をより正確に計算できるように、エ

図-21 接合角度の適応範囲

ネルギー損失係数の算定式として、既往の研究成果^{14),15)}と本実験結果を基に以下の式(20)～式(33)を新たに提案する。これらの式は関数形が実験結果を表現しうるように、式(20)～式(33)中の種々の係数と乗数に検討を加えながら決定したものである。定式化はまず流出・流入管径比が 1.0 である Type A の実測値をもとに式(21)～式(23)に関わる係数、乗数に対して実測値を表現しうるように決定した。このとき式(24)～式(27)の値は 0 である。続いて管径比の違いによる影響を表現するために、Type B～Type G の実測値をもとに式(24)～式(27)に関わる係数、乗数を決定した。ここで流量比にかかる乗数は曲線の形を決定するものであり、各項の係数は曲線のスケールを決定づけるものである。また {管径比の 4 乗-1} にかかる乗数は流量比が 0 のとき(流量比の影響がないところ)の管径比の違いによる影響を表現しうるように決定した。

本提案式では、流入・流出管の間の落差がない場合には、2本の流入管の接合角度が $90^\circ \leq \theta_1, \theta_2 \leq 180^\circ$ の範囲、流入・流出管の間に落差がある場合には、一方の流入管の接合角度が 180° (固定) で、もう一方の接合角度が $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の範囲において計算が可能である(図-21 参照)。

$$K_{ei} = K_0 C_d C_Q C_P C_B + C_{Di} + C_{Dj} + C_{Si} + C_{Sj} \quad (20)$$

$$[(i,j)=(1,2) \text{ or } (2,1), C_d=1 (\text{管水路流れ})]$$

$$K_0 = 0.702 \left(\frac{b}{D_3} \right)^{0.63} \quad (21)$$

$$C_Q = \alpha_1 \left(\frac{Q_i}{Q_3} - 0.5 \right) + 0.4 \quad \left[0.5 \leq \frac{Q_i}{Q_3} \leq 1 \right] \quad (22)$$

$$C_Q = \alpha_2 \left(0.5 - \frac{Q_i}{Q_3} \right) + 0.4 \quad \left[0 \leq \frac{Q_i}{Q_3} \leq 0.5 \right] \quad (23)$$

$$C_{Di} = \alpha_3 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_i} \right)^4 - 1 \right\}^{1.45} \left(\frac{Q_i}{Q_3} \right)^{1.75} + \alpha_4 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_i} \right)^4 - 1 \right\}^{0.89} \left(\frac{Q_i}{Q_3} \right)^{2.5} \quad (24)$$

$$C_{Dj} = \alpha_5 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_j} \right)^4 - 1 \right\}^{0.3} \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^{0.28} + \alpha_6 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_j} \right)^4 - 1 \right\}^{0.95} \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^{3.5} \quad (25)$$

$$C_{Si} = 0.35 \left(\frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} - 0.2 \right) \left(\frac{Q_i}{Q_3} \right)^3 \quad (26)$$

$$C_{Sj} = 0.20 \left(\frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} - 0.2 \right) \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^3 \quad (27)$$

$$\left[0.2 \leq \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} < 1.2 \right]$$

$$\left[0.2 \leq \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} < 1.2 \right]$$

$$\alpha_1 = 1.1032 - 1.494(1 - \sin \theta_i) \left(1.2 - \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} \right) \quad (28)$$

$$\alpha_2 = -0.2232 - 1.6(1 - \sin \theta_j) \left(1.2 - \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} \right) \quad (29)$$

$$\alpha_3 = 0.17(1 - \sin^2 \theta_i) \left(1.2 - \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} \right) \quad (30)$$

$$\alpha_4 = 1.408 \left\{ 1 - \cos^2 \theta_i \left(1.2 - \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} \right) \right\} \quad (31)$$

$$\alpha_5 = 0.35(1 - \sin \theta_i) \sin \theta_j \left(1.2 - \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} \right) + 0.35 \left(\frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} - 0.2 \right) \quad (32)$$

$$\alpha_6 = \left\{ -0.6 + 0.6(1 + 1.5 \sin \theta_i) \sin \theta_j \right\} \times \left(1.2 - \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} \right) \quad (33)$$

$$\left[0.2 \leq \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} < 1.2 \right] \left[0.2 \leq \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} < 1.2 \right]$$

ここに、下付き添字 i はエネルギー損失係数の計算対象となる流入管の番号、 j は計算対象ではない流入管の番号を表す(表-3 参照)。 C_{Di} は流出管と計算対象となる流入管の管径比(D_3/D_i)に関する係数、 C_{Dj} は流出管と計算対象ではない流入管の管径比(D_3/D_j)に関する係数、 S_1 , S_2 はそれぞれ流入管 1, 2 と流出管の間の落差、 C_{Si} は計算対象となる流入管の落差 S_i に関する係数、 C_{Sj} は計算対象ではない流入管の落差 S_j に関する係数、 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は流入・

表-3 算定式の適用例

	$\theta_1=180^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=90^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=135^\circ$	$\theta_2=90^\circ$
K_{ei}	K_{e1}	K_{e2}	K_{e1}	K_{e2}	K_{e1}	K_{e2}
i	1	2	1	2	1	2
j	2	1	2	1	2	1
D_i	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2
D_j	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1
S_i	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2
S_j	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1
θ_i	$\theta_1=180^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=90^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=135^\circ$	$\theta_2=90^\circ$
θ_j	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=180^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=90^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_1=135^\circ$

表-4 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ の適用範囲

$(S_i + D_i - D_3)/D_i$ $(S_j + D_j - D_3)/D_j$	0~0.2	0.2~1.2	1.2~
α_1	1.1032-1.494(1-sin θ_i)	式(28)	1.1032
α_2	-0.2232-1.6(1-sin θ_j)	式(29)	-0.2232
α_3	0.17(1-sin $^2 \theta_i$)	式(30)	0
α_4	1.408sin $^2 \theta_i$	式(31)	1.408
α_5	0.35(1-sin θ_i)sin θ_j	式(32)	0.35
α_6	-0.6+0.6(1+1.5sin θ_i)sin θ_j	式(33)	0

流出管の接合角度及び落差に関する補正係数である。式(21)は、著者らによる 2 方向接合円形落差マンホールの損失特性に関する研究で得られた式²⁾を基に修正を行い定式化した。また、本研究ではいずれの管も管路流れを対象としているため、 C_{f1} , C_{f2} , マンホール底面形状に関する係数は $C_B=0.95$ とした。

式(22), 式(23)は UDDM に掲載されている式⁹⁾を基に、係数の修正を行い定式化した。特に式(23)は、図-8 に示す流入管 2 のエネルギー損失係数が流量比 0 付近で負の値になるように新たに追加したものである。

式(24)は流出管と計算対象となる流入管の管径比 D_3/D_i の影響を表しており、流入・流出管の間に落差がなく、計算対象となる流入管の接合角度が $\theta=180^\circ$ の場合は、 $\alpha_3=0.17$, $\alpha_4=0$ となる。また、 $\theta=90^\circ$ の場合は、 $\alpha_3=0$, $\alpha_4=1.408$ となり、 $\theta=90^\circ$ のときに D_3/D_i の影響が大きくなる。これは $\theta=90^\circ$ の場合に流入管からの流入水がマンホール内壁に衝突し、速度水頭に相当するエネルギーを失うことを考慮したためであり、マンホール内を流下しやすい $\theta=180^\circ$ のときに比べて D_3/D_i の影響が大きくなるようにしている。特に流入管の管内径が小さくなると速度水頭が大きくなることから、損失はより大きくなる。式(24)の右辺における $((D_3/D_i)^4 - 1)$ は、速度水頭が管内径の 4 乗の関数($V^2/2g - 8Q^2/(\pi^2 g D^4)$)であることから、マンホールが直管で接続されており、流入水がマンホール内をスムーズに流下する場合、ベルヌーイの定理より、流入管の内径が小さくなるのに伴って、マンホール水位が低下することを考慮したものである。

式(25)は流出管と計算対象でない流入管の管径比 D_3/D_j の影響を表している。特に流入・流出管の間に落差がなく $\theta=90^\circ$, $\theta=180^\circ$ の場合は $\alpha_5=0$, $\alpha_6=-0.6$ となり、 $C_{Dj} < 0$ となる。これは図-10 における $\theta_1(=\theta)=180^\circ$, $\theta_2(=\theta)=90^\circ$ の場合の流入管 2 のエネルギー損失係数 K_{e2} が流量比が 0

付近で負の値をとるようにしたためである。 K_{e2} の実測値が負の値を示した理由に関しては、5章(2)で前述したとおりである。この影響は UDDM による式には考慮されておらず、本提案式で新たに追加したものである。さらに式(24)、式(25)は管径比(D_3/D_1 , D_3/D_2)の影響を係数の積ではなく係数の和によって考慮するため、管径比により曲線形を変えることが可能になった。

式(26)と式(27)は著者らによる2方向接合円形落差マンホールの損失特性に関する研究で得られた式²⁾を基に、流入・流出管との間の落差の影響を考慮できるようにした式である。なお、落差比 $((S_1+D_1-D_3)/D_1$ や $(S_1+D_1-D_3)/D_2)$ が0.2よりも小さいときは、落差の影響は小さく無視し得る。

式(28)～式(33)は図-7から図-10、図-15から図-20に示す実験結果を基に開発した推定式であり、流入・流出管の間の落差が大きくなるにつれて、流入管の接合角度によらず補正係数が一定値をとるようにしている。これは落差を設けたことにより流入管からの流入水が接合角度によらずマンホール内壁に衝突することを考慮したためである(適用範囲については表-4を参照)。なお、流入・流出管の間の落差を定式化する際に、2本の流入管が向かい合う条件下では、流入管同士の落差の影響を表す変数が考慮できていないため、今後の検討課題としたい。

(3) 提案式の検証及び計算例

ここでは、提案式による計算値と実測値の比較を行い、計算式の妥当性を検証するとともに、いくつかの条件下での計算例を示す。図-22から図-25は流入・流出管の間に落差がない条件下で流入管の接合角度を変化させたときの影響を示したものである。図-22、図-23は $D_3/D_1=D_3/D_2=1.0$ 、図-24、図-25は $D_3/D_1=D_3/D_2=2.0$ の場合である。また図-22、図-24は流入管1の接合角度を、図-23、図-25は流入管2の接合角度をそれぞれ変化させたときのものである。ここで、図-22 a)の $\theta_1=\theta_2=90^\circ$ で流量比 $Q_2/Q_3=0$ のときの K_{e1} は、図-22 b)の $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ で $Q_2/Q_3=1.0$ のときの K_{e2} の値と等しくなるようにしている。また、図-22 b)の $\theta_1=\theta_2=90^\circ$ で流量比 $Q_2/Q_3=0$ のときの K_{e2} は、図-22 a)の $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ で $Q_2/Q_3=1.0$ のときの K_{e1} の値と等しくなるようにしている。

図-26から図-29に流入・流出管の間の落差の影響を示す。図-26、図-27は2本の流入管の接合角度が $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の場合であり、図-26は流入管1の落差のみを変化させた影響を、図-27は流入管1と流入管2の落差をいずれも等しく変化させたときの影響を表している。図-28、図-29は流入管1の接合角度を 180° と固定し、流入管2の接合角度を変化させた影響を示している。図-28は $S_1=10\text{cm}$, $S_2=3\text{cm}$ 、図-29は $S_1=3\text{cm}$, $S_2=10\text{cm}$ とした場

合である。

図-31から図-36、図-38から図-43及び図-45から図-47に本実験による実測値と提案式による計算値の比較を示す(図-30、図-37及び図-44参照)。図-31、図-32は2本の流入管の接合角度が $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の場合の流入・流出管の管内径の影響を、図-33から図-36は流入・流出管の接合角度の影響をそれぞれ表している。また、参考として圧力損失係数の実測値と計算値の比較を図-38から図-43に示す。図-45から図-47はそれぞれType A, C, Dにおける流入・流出管の間の落差の影響を示している。

図-31、図-32より、図-31のType B, C, Dでは計算値が実測値とやや合わないところも見られるが、概ね計算値が実測値をよく表現できている。特に図-33から図-36のように流入・流出管の接合角度が変化した場合でも、計算値が実測値を表現できるようになった。さらに図-45から図-47に示すように、 $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の場合に流入・流出管の間に落差を設けた場合でも提案式による計算値が実測値をよく表現できている。

7. 結論

本研究で得られた知見をまとめると以下ようになる。

- 1) 2本の流入管の接合角度が $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の場合、流入管2(横流入管)の内径 D_2 を小さくすると、流入管1(直管)のエネルギー損失係数 K_{e1} は流量比 Q_2/Q_3 (Q_2 は流入管2の流量, Q_3 は流出管の流量)が0.5付近で最大となり、流入管2のエネルギー損失係数 K_{e2} は流量比が0.3より大きいところで管径比の影響を大きく受ける。流入管1の内径 D_1 を小さくすると、 K_{e1} は流量比が1のときに最小となり、流量比が小さくなるにつれて K_{e1} は大きくなる。 K_{e2} は流量比の減少とともに小さくなり、特に流量比が0から0.2付近では負の値を示し、流入管1の内径が小さくなると負の値はより大きくなる。
- 2) 管内径の組合せが同じである場合、流量比が0.5付近を除いて、2本の流入管の接合角度が $\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の方が $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ のときより K_{e1} は大きくなる。これは曲がりの影響や2本の流入管を向い合せたことによるものである。また K_{e2} は流量比が0.5より小さいときには $\theta_1=90^\circ$, $\theta_2=90^\circ$ の方が大きな値をとり、流量比が0.5より大きくなると流入管1の接合角度 θ_1 を 180° から 90° に変化させてもほとんど差は生じない。これは流量比が0.5より大きいところでは、流入管2の曲がりの影響が卓越し、流入管1の接合角度の影響が小さくなるためである。
- 3) 接合角度が 180° の流入管(直管)に落差を設けると、流量比が0から0.5の範囲で、 K_{e1} , K_{e2} ともに大きい値を

 図-22 流入管 1 の接合角度 θ_1 を変化させた影響 ($D_1=D_2=D_3=5\text{cm}$, 流入・流出管の間に落差なし)

 図-23 流入管 2 の接合角度 θ_2 を変化させた影響 ($D_1=D_2=D_3=5\text{cm}$, 流入・流出管の間に落差なし)

 図-24 流入管 1 の接合角度 θ_1 を変化させた影響 ($D_1=D_2=3\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$, 流入・流出管の間に落差なし)

 図-25 流入管 2 の接合角度 θ_2 を変化させた影響 ($D_1=D_2=3\text{cm}$, $D_3=6\text{cm}$, 流入・流出管の間に落差なし)

 図-26 流入管 1 の落差 S_1 を変化させた影響 ($D_1=D_2=3\text{cm}, D_3=6\text{cm}, \theta_1=180^\circ, \theta_2=90^\circ, S_2=3\text{cm}$ で固定)

 図-27 $S_1=S_2$ で変化させた影響 ($D_1=D_2=3\text{cm}, D_3=6\text{cm}, \theta_1=180^\circ, \theta_2=90^\circ$ で固定)

 図-28 $S_1=10\text{cm}, S_2=3\text{cm}$ で流入管 2 の接合角度 θ_2 を変化させた影響 ($D_1=D_2=3\text{cm}, D_3=6\text{cm}, \theta_1=180^\circ$ で固定)

 図-29 $S_1=3\text{cm}, S_2=10\text{cm}$ で流入管 2 の接合角度 θ_2 を変化させた影響 ($D_1=D_2=3\text{cm}, D_3=6\text{cm}, \theta_1=180^\circ$ で固定)

図-30 マンホール平面図(接合角度の違い)

図-31 提案式による流入管1の計算値と実測値の比較

図-32 提案式による流入管2の計算値と実測値の比較

図-33 提案式による流入管1の計算値と実測値の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type B, H, G, K)

図-34 提案式による流入管2の計算値と実測値の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type B, H, G, K)

図-35 提案式による流入管1の計算値と実測値の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type E, I, F, J)

図-36 提案式による流入管2の計算値と実測値の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type E, I, F, J)

Type A~Type G

Type H~Type K

図-37 マンホール平面図(接合角度の違い)

図-38 提案式による流入管1の圧力損失係数の比較

図-39 提案式による流入管2の圧力損失係数の比較

図-40 提案式による流入管1の圧力損失係数の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type B, H, G, K)

図-41 提案式による流入管2の圧力損失係数の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type B, H, G, K)

図-42 提案式による流入管1の圧力損失係数の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type E, I, F, J)

図-43 提案式による流入管2の圧力損失係数の比較
(流入・流出管の接合角度の影響, Type E, I, F, J)

図-44 マンホールの概略図(流入・流出管の落差あり)

a) 流入管 1 の損失係数 K_{e1} と流量比の関係

b) 流入管 2 の損失係数 K_{e2} と流量比の関係

図-45 提案式による計算値と実測値の比較(流出・流入管の間の落差 S_1 , S_2 の影響, Type A)

a) 流入管 1 の損失係数 K_{e1} と流量比の関係

b) 流入管 2 の損失係数 K_{e2} と流量比の関係

図-46 提案式による計算値と実測値の比較(流出・流入管の間の落差 S_1 , S_2 の影響, Type C)

a) 流入管 1 の損失係数 K_{e1} と流量比の関係

b) 流入管 2 の損失係数 K_{e2} と流量比の関係

図-47 提案式による計算値と実測値の比較(流出・流入管の間の落差 S_1 , S_2 の影響, Type D)

とる。これは落差を設けたことで直管からの流入水がマンホール内壁に衝突するためである。

- 4) 接合角度が 90° の流入管(横流入管)に落差を設けても、エネルギー損失係数に与える影響は、 K_{e1} , K_{e2} ともに小さい。これは横流入管からの流入水は落差の有無にかかわらずマンホール内壁に衝突するためである。
- 5) 落差の大きさが流出管の内径を超える場合、落差の大きさによる違いがエネルギー損失係数に与える影響は非常に小さい。
- 6) 本提案式は流入・流出管の間の落差がない場合には、2本の流入管の接合角度が $90^\circ \leq \theta_1$, $\theta_2 \leq 180^\circ$ の範囲、落差がある場合には、一方の流入管の接合角度が 180° で、もう一方の接合角度が $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の範囲において計算が可能である。

今後は、2本の流入管が向かい合うときのお互いの落差を変えたり、Y字路などの条件下で実験を行うことにより、より汎用性のある計算式を開発していきたい。

参考文献

- 1) 荒尾慎司, 三原徹治, 楠田哲也: マンホール損失を考慮した雨水管網設計の最適化に関する一研究, 土木学会論文集, No. 614/II-46, pp. 109-120, 1999.
- 2) 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.
- 3) Marsalek, J.: Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report, No 52, American Public Works Association, Chicago, 1985.
- 4) 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.
- 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) Sangster, W. M., Wood, H. W., Smerdon, E. T. and Bossy, H. G.: Pressure Changes at Open Junctions in Conduits, *Trans. ASCE*, Vol. 126, pp. 364-396, 1961.
- 7) 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.
- 8) Townsend, R. D. and Prins, J. R.: Performance of Model Storm Sewer Junctions, *J. Hydraul. Div.*, Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 104 (HY), pp. 99-104, 1978.
- 9) Urban Drainage Design Manual, HEC22 (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hec22.pdf>), 2001.
- 10) 荒尾慎司, 楠田哲也: 3方向接合マンホール部のエネルギー損失特性—レビューと課題—, 下水道協会誌, Vol.33, No.397, pp.67-75, 1996.
- 11) 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.
- 12) 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. S 925-930, 2011.
- 13) 平塚俊祐, 野津翔平, 荒尾慎司, 楠田哲也, 広瀬 望, 浅田純作: 3方向接合円形落差マンホールの損失特性—定式化に向けて—, 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.
- 14) 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.
- 15) 平塚俊祐, 荒尾慎司, 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の定式化, 水工学論文集, 第57巻, pp.L 661-666, 2013.

(2013.3.26 受付)

FORMULA ON ENERGY LOSSES AT THREE-WAY CIRCULAR DROP MANHOLE UNDER SURCHARGE FLOW

Shinji ARAO, Shunsuke HIRATSUKA and Tetsuya KUSUDA

Energy loss at manholes under surcharged conditions is as important as the friction loss in pipes in the design of storm sewer networks and in flood-analysis. Some researchers have already proposed the formula to calculate the energy loss at three-way manhole under surcharged conditions. However, in most of these proposed formulas all variables of structural elements for the pipes and the manhole have not been considered enough yet. Therefore, development of the formula to exactly calculate the energy loss at three-way manhole is needed. In this paper, the effect of diameter ratios between inflow pipes and an outflow pipe, the ratios of flow rates between inflow pipes, connected angles among those pipes and drop gaps between inflow pipes and outflow pipe on the energy loss at three-way circular drop manholes were investigated. Based on the experimental results, a new formula was proposed for the energy loss coefficients at the manholes that considers all structural elements and the ratios of flow rates between inflow pipes. In the proposed formula, calculated energy loss coefficients reproduce measured values more exactly than existing formulas.