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

ENERGY LOSS AT THREE-WAY CIRCULAR MANHOLE UNDER SURCHARGE FLOW

荒尾慎司¹・森山克美²・浅田純作¹・広瀬 望³・楠田哲也⁴

Shinji ARAO, Katsumi MORIYAMA, Jyunsaku ASADA, Nozomu HIROSE, 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 正会員 工博 九州共立大学教授 工学部環境土木科 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

³ 正会員 工博 松江工業高等専門学校准教授 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)

⁴ フェロー会員 工博 北九州市立大学教授 国際環境工学部 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの 1-1)

The energy loss at manholes in a storm sewer network is often compared with the friction loss in pipes under a surcharge flow. It is important to estimate the energy loss at manholes exactly in the design of a storm sewer network and in a flood-analysis. Some researchers have already investigated the energy loss at three-way manholes. However, the relationship between the energy loss and the water depth in manholes has not been enough studied yet.

In this study, the effect of the water depth and the ratio of the flow rates in the lateral and in the downstream pipes on the energy loss at a three-way circular manhole was investigated. This study also proposed a modified formula for energy loss coefficients described in Urban Drainage Design Manual, USA (2001) for the three-way manhole.

Key Words : Urban storm drainage, energy loss, three-way manhole, model test

1. はじめに

近年, 全国各地の市町村で洪水ハザードマップが公表され, 住民が避難行動をとる上で有用な資料となっている. しかし, 公表されている洪水ハザードマップにおいて, 内水氾濫が考慮されていない場合, 実際に浸水している区域を計算では予測できていないケースも生じており問題となっている.

内水氾濫計算において, 降雨強度, 降雨の空間分布, 地表面の平面二次元氾濫解析モデルのメッシュサイズ, 地表面の道路, 宅地や粗度係数の設定, 雨水管をどこまでモデル化するかなどにより, 浸水面積, 浸水深や氾濫流の流速が異なってくる. 道路や宅地に降った雨は雨水マスを通して雨水管に流入するため, 雨水の流れをより正確に計算するには, 雨水管をモデル化する必要がある. 雨水管をモデル化する上で, 無視できないのが雨水管を接続するマンホールでの損失である. 従来の研究より, マンホールでの損失が管きよの摩擦損失に匹敵するほど

大きくなることもあり, 決して無視しえないことが明らかにされている^{1)~6)}. マンホールでの損失を全く無視するか, 考慮したとしても過小に見積もった損失係数を与えて計算を行うと, 実際には浸水している区域が, 計算では浸水しないということも起こりうる. このような計算結果を基に, 住民の避難行動計画を策定するのは極めて危険であり, より正確な洪水ハザードマップを住民に周知させることが, 減災上, 非常に重要である.

マンホールでの損失に関しては, 流入管 1 本と流出管 1 本が接続する 2 方向接合マンホールにおいて, 著者らが既に定式化している⁷⁾. しかし, T 字路や十字路の交差点下に設置されているマンホールに関しては, 流入管の本数が増加し, 流入・流出管の間には段差を有することもあることから, 考慮しなければならない構造上の変数はより多くなる. このようなことから, 現在でも, 全ての変数を組み込んだ定式化が図られておらず, これまでに開発されたマンホール損失の算定式では適用範囲が限られている⁸⁾.

そこで本論文では、T字路下の3方向接合円形マンホールを対象として、管内径、管内流量、マンホール内の水深を種々変化させた実験を行い、マンホールのエネルギー損失特性を明らかにする。さらに、これまでに考案されている算定式の中でも適用範囲が広く有用と考えられる Urban Drainage Design Manual (2001)⁸⁾ (以下ではUDDMと表記)を取り上げ、本式の問題点を実験データにより明らかにするとともに、実測値をより正確に算定できる修正式を提示する。

2. 従来の研究及び課題

管水路流れにおける3方向接合マンホールでの損失に関する従来の主な研究は、Sangster ら (1961)⁹⁾、Marsalek (1985)¹⁰⁾、Lindvall (1984)¹¹⁾、UDDM (2001)⁸⁾、著者ら (2003)^{12), 13)} などによって行われている。著者らを除く研究では、3方向接合マンホールにおけるエネルギー損失係数や圧力損失係数の算定式が種々考案されているものの、マンホールや接続管路に関わる構造上の変数が全て考慮されているわけではなく、算定式の適用範囲に制限がある。一般的に、道路勾配が急なところでは、設計流速が上限値¹⁴⁾を超えないように流入・流出管との間に段差を設けるが、平坦なところでも、地中の他の埋設物との位置関係によりやむを得ず段差を設けることがある。しかし、従来の研究で段差を考慮して検討を行っているものは少ない^{6), 8), 13)}。

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のがUDDMに掲載されている式である。本式は、管路勾配が緩勾配である場合に利用される。その式形を以下に示す。

$$K_E = K_o C_D C_d C_Q C_P C_B \quad (1)$$

$$K_o = 0.1 \left(\frac{b}{D_d} \right) (1 - \sin \theta) + 1.4 \left(\frac{b}{D_d} \right)^{0.15} \sin \theta \quad (2)$$

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

$$C_d = 0.5 \left(\frac{y}{D_d} \right)^{0.6} \quad (4)$$

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

$$C_Q = (1 - 2 \sin \theta) \left(1 - \frac{Q_i}{Q_d} \right)^{0.75} + 1 \quad (5)$$

$$C_P = 1 + 0.2 \left(\frac{z}{D_d} \right) \left(\frac{z-y}{D_d} \right) \quad (6)$$

ここに、 b はマンホールの内径、 D_d は流出管の内径、 D_i は流入管の内径、 y はマンホール底面から水面までの距離 (水深)、 K_o はマンホール径比 (b/D_d) と流入・流出管の接続角度 (θ) に関する係数、 C_D は流入・流出管の管径比

(D_d/D_i) に関する係数、 C_d はマンホール内の水深比 (y/D_d) に関する係数 (ただし、この係数には、マンホール内の渦による損失の増大までは考慮されていない)、 C_Q は流入・流出管の流量比 (Q_i/Q_d) に関する係数、 C_P は突入流 (Plunging flow) に関する係数で、いずれの管路からも突入流がなく、全て管水路流れである場合は、 $C_P = 1$ として (6) 式を考慮しなくてよい。 z は最も高いところにある流入管の流れ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で、マンホール底面に接続管路の1/2のインバートが設置されている場合、 $C_B = 0.95$ とする。

(1) 式には、全ての管が管水路流れになったとき、流入・流出管の段差が考慮されておらず、段差の影響が無視できない場合に、本式を用いるとマンホールでの損失を過小に見積もることとなり、実際には溢れているのに、計算では溢れないという結果になることも起こりうる。

3. 実験装置及び実験方法

(1) 実験装置

本研究で用いている実験装置 (実規模の 1/5 の縮小模型) の概要を図-1 に示す。マンホール底面には、日本で一般的に用いられている管内径の 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

① 2ヶ所の流量調節バルブにより、流れを surcharge にして上流管流量 Q_u と横流入管流量 Q_i を所定の流量に設定する。

② 下流管内壁頂部から水面までの距離をマンホール水

図-1 実験装置の概要 (平面図)

③マンホール水深 h は、マンホール外壁に取り付けた 4ヶ所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上・下流管及び横流入管にそれぞれ 3ヶ所ずつ取り付けたマノメーターによって管内の圧力水頭を測定し、これに速度水頭 ($V^2/2g$) を加えたものからエネルギー線を計算することにより、マンホール部のエネルギー損失水頭 ΔE を求める (図-2 参照)。さらに、(7) 式によりエネルギー損失係数 K_{es} を算定する。また、(8) 式により圧力損失係数 K_{ns} を算定できる。

$$K_{e*} = \frac{\triangle E}{v_d^2 / 2g} \quad (7)$$

$$K_{p*} = K_{e*} + 1 - \frac{V_*^2}{V_{*c}^2} \quad (8)$$

(3) 実験条件

エネルギー線

動水勾配線

$b=18$

∇

$\Delta E = E_u - E_d$

h_u

E_u

h

E_d

h_d

$D_u=5$

流入管

30

50

70

30

50

70

流出管

(単位: cm)

図-2 マンホールのエネルギー損失水頭 ΔE の定義

表-1 接続管の管内径

管路の組み合わせ	横流入管内径	上流管内径（主流方向）	下流管内径
Type A	4cm	5cm	6cm
Type B	5cm	5cm	6cm
Type C	5cm	5cm	5cm

表-2 流量比の設定

実験ケース	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
上流管流量 Q_1 (l/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.75	0.5	0.25	0.0
横流入管流量 Q_2 (l/s)	0.0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
下流管流量 Q_3 (l/s)	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	1.75	1.5	1.25	1.0
流量比 Q_2/Q_1	0.0	0.2	0.33	0.43	0.5	0.57	0.67	0.8	1.0

(1) マンホール内の水深比、管径比及び流量比の影響

図-3 から図-5 に流量比 $Q_i/Q_d=0, 0.5$ 及び 1 とした場合の主流方向のエネルギー損失係数 K_{ei} とマンホール内の水深比 h/D_u との関係を示す。流量比 Q_i/Q_d が 0 の場合、 h/D_u が 0.5 付近で水面に流下方向に左右に分離する渦や単一方向回転渦などが発生するため、損失が増大する。横流入管からの流入量の割合が増加すると、損失係数が極大となるときの h/D_u は 1 付近から 2.5 付近の値をとることがわかる。 h/D_u が 2 以上のところで損失係数が大きく変化しているケースは、水深が深くなるため鉛直方向に回転するスケールの大きな渦も影響しているものと推察される。また、水深比の変化に伴う損失係数の変化状況は、流量比や管径比によってかなり異なる。これは、マンホール内での渦構造が複雑であるためと考えられる。渦構造と損失係数との関係に関しては、別途検討する必要がある。3本の管内径をいずれも 5cm としたものの (Type C) と下流管の管内径のみを 6cm と大きくしたもの (Type B) を比較すると、後者の方が損失係数は大きくなっている。これは、(7) 式に示すように、マンホールでの損失水頭を下流管の速度水頭で除しているからであり、見掛け上損失係数が大きくなっているだけある。実際には、下流管の管内径が大きくなった分だけ、下流管での流れの急縮後の急拡大による損失水頭は小さくなる。主流方向の上流管と下流管の内径をそれぞれ 5cm , 6cm とし、横流入管の内径を 5cm から 4cm (Type A) にすると、横流入管からの流入速度が大きく、上流管からの流入水が流下しにくくなることや、上流管と横流入管からの流入水の衝突により失うエネルギー損失が横流入管の内径を 5cm としたものよりも大きくなることなどから、流量比 Q_i/Q_d が 0.5 のとき、Type B よりも損失は大きくなる。

図-3 主流方向の K_{cu} と h/D_u の関係 ($O_l/O_d=0$)

図-4 主流方向の K_{eu} と h/D_u の関係 ($Q_u/Q_d=0.5$)

図-5 主流方向の K_{eu} と h/D_u の関係 ($Q_u/Q_d=1$)

b) 横流入方向のエネルギー損失係数

図-6 から図-8 に流量比 $Q_u/Q_d=0, 0.5$ 及び 1 とした場合の横流入方向のエネルギー損失係数 K_{ei} とマンホール内の水深比 h/D_u との関係を示す。損失係数は流量比 Q_u/Q_d が 1 のときに最大、0 のときに最小となり、しかも流量比によって損失係数が大きく異なることがわかる。この理由は、上流管流量が小さいと、横流入管からの流れがマンホール内壁へ衝突し、損失が大きくなり、逆に横流入管流量が小さくなると、速度水頭が小さくなり、横流入管のエネルギー水頭が下流管のエネルギー水頭に近づくためである。また、流量比が 0 のとき損失係数が負の値となっている。これは、横流入管の速度水頭 ($V^2/2g$) が 0 となることから、下流管とマンホールの接合点におけるエネルギー水頭よりも横流入管のエネルギー水頭 (= 圧力水頭) が小さくなるからである。また、流量比が 1 のとき、いずれの管径比でも、マンホール内の水深比が 2 付近で損失係数が極大値をとることがわかる。これは、水平方向に回転するスケールの大きな渦の影響によると考えられる。

図-6 横流入方向の K_{ei} と h/D_u の関係 ($Q_u/Q_d=0$)

図-7 横流入方向の K_{ei} と h/D_u の関係 ($Q_u/Q_d=0.5$)

図-8 横流入方向の K_{ei} と h/D_u の関係 ($Q_u/Q_d=1$)

c) UDDM (2001)⁸⁾ による計算式の適用と問題点

図-9 と図-10 にそれぞれ主流方向、横流入方向のエネルギー損失係数と流量比 Q_u/Q_d との関係を示す。図中には UDDM に掲載されている式の中で、(1) 式から (3) 式及び (5) 式を用いたときの損失係数の計算値を示す。なお、計算値では、水深の変化までは考慮しておらず、(4) 式の C_d は 1 としている。図-9 に示すように、主流方向の計算

値では、2本の曲線しか現れない。これは(3)式で、管径比の影響を主流方向（上流管→下流管）で表現しており、Type A と Type B は管径比 $D_d/D_f=6/5=1.2$ となり、同じ値になることによる。主流方向のエネルギー損失係数 K_{eu} は、流量比 Q_l/Q_d が 0.5 付近のとき最大となっている。これは前述したように、上流管流量と横流入管流量が同程度のときに、流水間の衝突に伴う損失が大きいことによると考えられる。実測値と計算値を比較すると、Type B や Type C の計算値では流量比が大きくなるにつれて損失係数は増加しており、実測値とは合致していないものの、実測値に近い値となっている。しかし、Type A に関しては、流量比によっては、実測値よりもかなり小さい値になっており、計算式では再現できていない。

一方、図-10 に示すように、横流入方向のエネルギー損失係数 K_{el} は、前述したように流量比 Q_l/Q_d が 1 のとき最大、0 のとき最小となる。UDDM に掲載されている式を適用すると、横流入方向の損失係数に関しては、流量比が 0.4 付近から 1 の間では実測値をよく再現しているが、流量比が小さくなるにつれて、計算値との差が大きくなっている。これは、(5)式において、流入・流出管の接続角度 θ を 90 度とした場合、横流入量を 0 にすると、 C_Q が常に 0 となるからである。

(2) 修正式の提示と今後の検討課題

前述したように、UDDM に掲載されている式によって損失係数を計算すると、流量比や管径比によっては、実測値とはかなり差を生じることが明らかとなった。そこで、ここでは、特に横流入方向の損失係数の実測値をより正確に計算できるように C_Q の計算式(9)式を新たに作成した。なお、(2)式と(3)式に関しては、2方向接合円形落差マンホールの損失特性に関する著者らの研究⁷⁾で得られた修正式(10)式と(11)式を採用する。(9)式の作成手順は以下の通りである。まず、図-9 の Type A を除く主流方向と横流入方向の実測値 K_{eu} 、 K_{el} をもとに、(10)式と(11)式で求めた K_o 、 C_D 及び(1)式から C_Q を算出した。次に、 C_Q の値をもとに主流方向と横流入方向のそれぞれについて最小二乗法による回帰式を求め、 $\sin\theta$ を変数とした一つの式に合成した。なお、モデル式の精度はF検定によると 5%の有意性は認められる結果となっている。

$$C_Q = (-1.634 \sin \theta + 1.252) + (0.816 \sin \theta + 0.579) \frac{Q_l}{Q_d} \quad (9)$$

$$K_o = 0.09 \left(\frac{b}{D_d} \right) (1 - \sin \theta) + 1.3 \left(\frac{b}{D_d} \right)^{0.15} \sin \theta \quad (10)$$

$$C_D = \left(\frac{D_d}{D_i} \right)^{3.2} \quad (11)$$

図-11 と図-12 に(1)式と(9)式から(11)式を用いた損失係数の計算値と実測値との比較を示す。主流方向に関して(9)式を用いた場合、(5)式を用いた計算結果とそれほど大きな差はないが、横流入方向に関しては、流量比が小さいところで、実測値をほぼ再現できている。現場に設置されているマンホールに接合する管内径の組み合わせは非常に多く、全ての組み合わせに対して実験的に検証することはほとんど不可能であるが、組み合わせの種類を十分に精査した上で研究を進めれば、より汎用性の高い計算式を提示できるものと考えている。現在、図-13 に示すように流入・流出管の段差を考慮した実験を行っているところであり、今後管内径の組み合わせを変えた実験などを行い、(9)式のさらなる検証と段差を考慮した定式化を行う予定である。

図-9 主流方向の損失係数 K_{eu} と流量比 Q_l/Q_d との関係

図-10 横流入方向の損失係数 K_{el} と流量比 Q_l/Q_d との関係

図-11 主流方向の損失係数 K_{eu} と流量比 Q_l/Q_d との関係

図-12 横流入方向の損失係数 K_{el} と流量比 Q_l/Q_d との関係

図-13 段差の設定 (側面図)

5. 結論

- 1) 横流入管の管内径が小さくなると、主流方向、横流入方向、いずれもエネルギー損失係数は大きくなる。
- 2) 主流方向では、いずれの管径比でも流量比が 0.5 付近のとき、エネルギー損失係数は最大となる。
- 3) 横流入方向では、いずれの管径比でも横流入管の流量が増加するにつれて、エネルギー損失係数も増加する。この主な理由は、横流入管の流量の増加に伴い、横流入管からの流入水が直接マンホール側壁へ衝突し、速度水頭の大部分を失うからである。
- 4) 適用範囲が最も広いと考えられる UDDM (2001)⁸⁾ に掲載されている式によりエネルギー損失係数を求めると、主流方向では、管内径が全て異径のときに、流量比によっては、実測値とかなり異なることがわかった。また、横流入方向では、流量比が 0 から 0.3 付近で実測値を再現できないことがわかった。
- 5) 横流入方向のエネルギー損失係数がより実測値に合う

ように修正式を提示した。

今後は、本論文とは別に 3 本の管内径が異なる実験を行い、修正式の妥当性を検証する。さらに、流入・流出管の段差を考慮した実験を行い、段差をも考慮した式を考案する。これに関しては、現在実験中であり、より汎用性の高い計算式を考案する予定である。

参考文献

- 1) 荒尾慎司, 楠田哲也: 2 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.396, pp.75-86, 1996.
- 2) Kusuda, T., Arai, S. and Moriyama, K.: Energy Losses at Junctions and Transient Flow in Sewer Networks, *Proc. 6th Int. Conf. Urban Storm Drainage*, Vol.1, pp.122-127, 1993.
- 3) Arai, S. and Kusuda, T.: Energy Losses at Circular Drop Manholes, *Proceedings of the 7th ICUSD*, Hanover Germany, Vol.1, pp.85-90, 1996.
- 4) Yen, B. C.: *Hydraulics of Sewers*, Advances in Hydrosiences, Academic Press, Orland, Florida, Vol.14, pp.1-122, 1986.
- 5) Larry, W. Mays: *STORMWATER COLLECTION SYSTEMS DESIGN HANDBOOK*, McGraw-Hill, pp.6.65-6.84, 2001.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) *Urban Drainage Design Manual, HEC22* (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hec22.pdf>), 2001.
- 9) 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.
- 10) Marsalek, J.: Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report 52, American Public Works Association, Chicago, IL, 1985.
- 11) Lindvall, G.: Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and 90° Lateral, *Proc. 3rd Int. Conf. on Urban Storm Drainage*, pp. 137-146, 1984, Chalmers Univ. of Technology, Goetborg, Sweden.
- 12) 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.
- 13) 阿部正毅, 小橋川洋平, 田中敬一: 3 方向接合円形マンホールの損失特性に関する実験的研究, 一下流管径の違いと段差の影響-, 平成 15 年度九州共立大学工学部土木工学科卒業研究概要集, pp.81-86, 2003.
- 14) 下水道施設計画・設計指針と解説-前編-, 第 2 章管路施設, 第 7 節マンホール, 日本下水道協会, pp.164-176, 1994.

(2010. 9. 30 受付)