

(45) 3 方向接合マンホールの損失特性に関する実験的研究

Energy Loss at Three-way Circular Manhole

荒尾 慎司*, 楠田 哲也**

Shinji Arao*, Tetsuya Kusuda**

ABSTRACT; The energy loss at manholes in a storm sewer network is often compared with the friction loss in pipes under surcharge flow. Especially the energy loss at three-way manholes under road crossings is much large due to collision of flows from upstream pipes and occurrence of large-scale vortices in the manholes. 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 studied yet. In this study, the effect of water depth on energy loss at a three-way circular manhole was examined. Experimental results indicated that the loss coefficient on the main pipes and the lateral pipe was influenced by water depth in the manhole and the ratio of the flow rates in the lateral and in the downstream pipes.

KEYWORDS; urban storm drainage, storm sewer, three-way manhole, model test

1. はじめに

浸水防除施設として、道路下に設置されている雨水管の普及率（整備済区域面積／整備対象区域面積）は、平成13年度末時点で50.6%（全国平均）となっている。政令都市及び一般都市での整備率はそれぞれ75.8%、44.8%であり、一般都市での整備は大都市に比べかなり遅れている。公共事業費が大幅に削減され、厳しい国家財政ではあるが、現況での浸水被害が特に大きいと予想される都市においては、雨水管の整備を進める必要がある。雨水管の接合部であるマンホールは、その構造上、雨水をスムーズに流下させるものとはなっておらず、上流管からの流入水がマンホール壁面へ衝突したり、スケールの大きな渦が発生することにより、管路の摩擦損失に匹敵するほど大きな損失を生じることがある。そのため、この損失がマンホール水位の上昇をもたらし、都市型浸水の一因になっていると思われる。近年、各市町村で浸水予想マップが公表されるようになってきているが、洪水時の避難等を考慮した場合、必ずしも十分な浸水予測結果を提供しているとはいえない。より精度の高い浸水予測計算を行うためには、管水路流れにおけるマンホールでの損失を適正に評価する必要がある。雨水管は道路に沿って設置されるため、マンホールに接合する流入管と流出管の平面的な接合形態は様々である。著者らは、これまでに、流入管と流出管がそれぞれ1本ずつ接合する2方向接合円形落差マンホールのエネルギー損失に関する実験的検討を行い、その損失特性を明らかにしてきた^{1)~5)}。T字路等の交差点下では、流入管2本と流出管1本が接合する3方向接合マンホールが設置されている（図-1、2参照）。2本の流入管がマンホールへ接合するため、流水間の衝突や渦の影響で2方

*九州共立大学工学部土木工学科 (Department of Civil Engineering, Kyushu Kyoritsu University)

**九州大学大学院工学研究院環境都市部門 (Department of Urban & Environmental Engineering, Kyushu University)

向接合マンホールよりも大きな損失を生じる。このため、これらの損失特性を明らかにすることは、さらに重要である。管水路流れにおける3方向接合マンホールの損失特性に関する研究は、これまでもいくつか見られるが^{6)~11)}、未だ検討課題が残されている。本研究では、管水路流れにおける3方向接合マンホールの損失特性に関する従来の研究及び検討課題について述べるとともに、マンホール水深の変化が3方向接合円形マンホールの損失に及ぼす影響を実験的に明らかにする。

2. エネルギー損失に関する3方向接合マンホールの構造上及び水理学的要因⁶⁾

3方向接合マンホールのエネルギー損失に関する構造上及び水理学的要因を分類すると以下のようになる。

・構造上の要因

- ①マンホール形状(正方形、長方形、円形、マンホール底面のbenching形状)、マンホール径
- ②接合管路形状(円形、矩形)、管径、管勾配
- ③接合管路の水平面接合形態(図-1参照)
- ④接合管路の鉛直接合形態(管頂接合、水面接合、管中心接合、管底接合、段差接合(図-2参照))

マンホールのエネルギー損失に特に大きな影響を与える構造上の要因は、マンホール径比(マンホール径/管径)、管径比(流入管径/流出管径)、接合管路の水平面接合形態及び鉛直接合形態である。

・水理学的要因

- ①開水路流れ、管水路流れ、②常流、射流、③マンホール内の水深

雨水管が開水路流れの場合、管路の摩擦損失に比べてマンホール損失はかなり小さくなる。この理由は、管路の長さに対してマンホール内での雨水の流下距離が無視できるほど短いことと、マンホール底面のインバートに沿って雨水が流下するためである。一方、管水路流れでは、マンホール内でのスケールの大きな渦の発生や2本の流入管からの流入水の衝突等により、損失は非常に大きくなる。

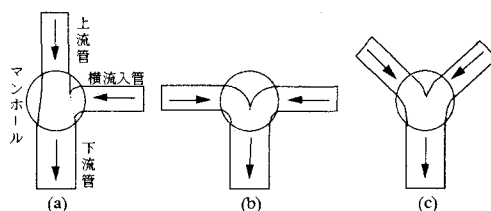


図-1 雨水管の水平面接合形態

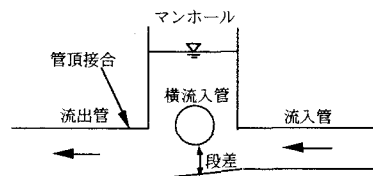


図-2 雨水管の鉛直接合形態

3. 3方向接合マンホールの実態調査

流入管が2本以上接合する会合点におけるマンホール径比 b/D (b :マンホール内径 D :管内径)を表-1¹²⁾に示す。図-1のマンホールタイプ(a)について、川崎市荏宿地区の下水道台帳をもとに実態調査を行った結果¹³⁾を図-3(D_u :上流管内径、 D_l :横流入管内径、 D_d :下流管内径)と図-4に示す。

表-1 会合点におけるマンホール径と管内径との関係

マンホール種別(円形)	1号	2号	3号	4号
マンホール内径 b (mm)	900	1200	1500	1800
管内径 D (mm)	250、300、350、400 450	250、300、350、400 450、500、600	250、300、350、400 450、500、600、700 800	250、300、350、400 450、500、600、700 800、900
b/D	3.6、3.0、2.57、2.25 2.0	4.8、4.0、3.43、3.0 2.67、2.4、2.0	6.0、5.0、4.29、3.75 3.33、3.0、2.5、2.14 1.88	7.2、6.0、5.14、4.5 4.0、3.6、3.0、2.57 2.25、2.0

図-3に示す通り、マンホール径比 b/D は下流管との接続を除くと3.6（内径25cmの管と内径90cmのマンホールを設置）が最も多い。また、図-4より $D_l/D_u=1.0$ 、 D_u/D_d と D_l/D_d は0.833、1.0のものが多用されている。

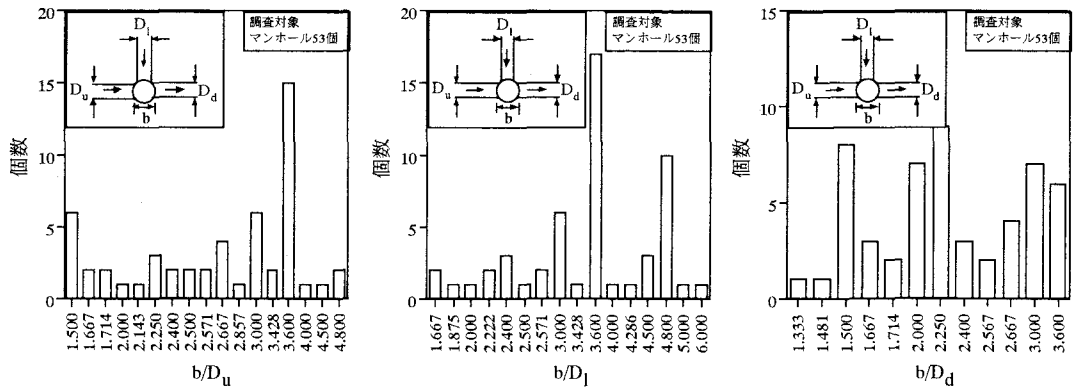


図-3 マンホール内径 (b) と管内径 (D_u 、 D_l 、 D_d) との比

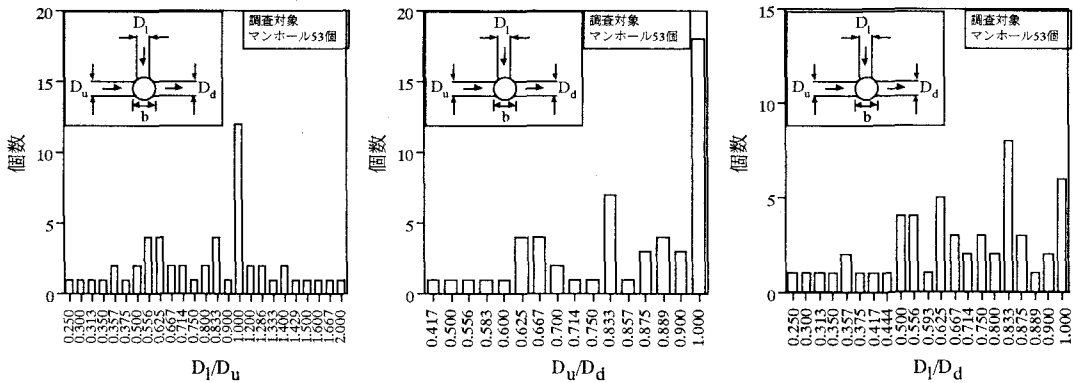


図-4 管内径 (D_u 、 D_l 、 D_d) の比

4. 従来の研究と検討課題

表-2は管水路流れにおける3方向接合マンホールの損失特性に関する既存研究の概要である^{6)~10)}。

表-2 管水路流れにおける3方向接合マンホールの損失特性に関する従来の研究

研究者	マンホール形状とマンホール内径(b)	管路形状と 上流管内径(Du) 横流入管内径(Dl) 下流管内径(Dd)	マンホール径比 $\left(\frac{b}{Dd}\right)$	流入管と流出管の比率		管路の水平面接合形態 図-1中のタイプ	管路の鉛直方向の接合形態	マンホール底面にインパートの有・無	備 考
				$\frac{Du}{Dd}$	$\frac{Dl}{Dd}$				
Sangsterら (1958,1961)	正方形 152,159,178, 254mm 円形 175,251mm	円形 Du=76,95,121,145mm Dl=76,95,121,145mm Dd=76,95,121,145mm	正方形 1.00,1.05,1.09, 1.22,1.32,1.47, 1.75,1.87,2.10 円形 1.20,1.73,2.08	0.52, 0.63, 0.80, 0.83	0.65, 0.79, 0.83, 1.00, 1.20	(a), (b)	管底接合	無	いずれも定常流 マンホール水深と 損失係数との関係 の記述なし
Lindvall (1984)	円形 245,374,590mm	円形 Du=Dd=144mm Dl=56,99,144mm	1.7, 2.6, 4.1	1.0	0.389, 0.688, 1.00,	(a)	管中心接合	有(2種)	
Marsalek (1985)	正方形 344mm 円形 344mm	円形 Du=Dd=75,152mm Dl=75,152mm	正方形 2.26,4.59 円形 2.26,4.59	1.0	0.5,1.0	(a), (b)	管底接合	無と 有(2種)	
Johnston (1990)	正方形 160mm	円形 Du=45mm Dl=64mm Dd=70mm	2.29	0.64	0.914	(a)	管底接合	有(1種)	

従来の研究では、管路の水平面接合形態として図-1のタイプ(a)が多用されている。マンホール径比 b/D_d (D_d :下流管内径)や管径比 D_u/D_d 、 D_l/D_d (D_u :上流管内径、 D_l :横流入管内径)を種々変化させて検討しているのは、Sangsterら^{6),7)}だけである。他の研究では、構造上の設定条件を限定しているため、研究成果の現場への適用も限られたものとなっている。2方向接合マンホールに関する従来の研究²⁾⁻⁴⁾により、マンホール水位が管頂付近にあるとスケールの大きな渦の影響で、マンホールでの損失は非常に大きくなることが知られている。しかし、表-2の備考欄にも示すように、3方向接合マンホールに関する従来の研究では、マンホール内の水深と損失係数との関係は明らかにされていない。また、流入管と流出管の段差を考慮した研究は皆無である。図-1のマンホールタイプ(a)を用いたSangsterら¹¹⁾(マンホール底面にインバートなし、図-7参照)とMarsalek⁹⁾(マンホール底面にインバートあり、図-8参照)の研究成果を図-5に示す。 K_{E*} 、 K_{P*} は、それぞれエネルギー損失係数、圧力損失係数であり、(1)~(3)式により算定される(図-6参照)。添字の*は、 u が主流方向(上流管→下流管)、 l が横流入方向(横流入管→下流管)を表している。また、 h は圧力水頭、 Z は位置水頭、 V_d は下流管の断面平均流速、 g は重力加速度である。図-5からは、マンホール水位の影響を把握することはできない。 $A_l/A_u=1.0$ 、 $A_l/A_d=1.0$ (A_u :上流管の断面積、 A_l :横流入管の断面積、 A_d :下流管の断面積)では、マンホール底面にインバートがないSangsterらの結果はインバートを有するMarsalekのものよりもやや小さくっており、Sangsterらは $Q_u/Q_d=1$ (Q_u :上流管の流量、 Q_d :下流管の流量)で主流方向の圧力損失係数 $K_{pu}=0$ としていることから、Sangsterらの結果は損失係数をやや過小評価していると考えられる。 $A_l/A_u=1.0$ で、 A_l/A_d を種々変化させているのは、Sangsterらだけであるので、断定はできないが、他の A_l/A_d においても、同様のことが推察される。図-5におけるMiller¹⁴⁾、Fried&Idelchik¹⁵⁾、Serreら¹⁶⁾の結果は、マンホールを介せず管路のみが接合したのもので、マンホールを考慮した場合よりも損失係数は小さくなる。以上に述べた従来の研究成果に基づき、本研究では管水路流れにおける3方向接合マンホール(図-1のタイプ(a))を対象に、 Q_u/Q_d 及びマンホール内の水深と損失との関係を明らかにする。さらに、マンホール内の水深と損失係数との関係は明らかにされていないが、マンホール底面にインバートがないSangsterらの結果と比較検討する。

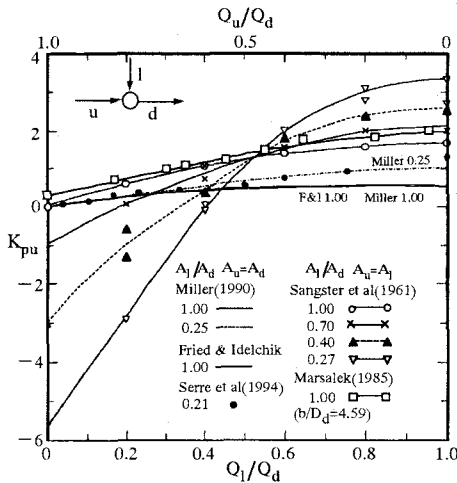


図-5 横流入管が接合する場合の主流方向の圧力損失係数 K_{pu}

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_u - E_d \\ &= \left[\frac{V_u^2}{2g} + h_u + Z_u \right] - \left[\frac{V_d^2}{2g} + h_d + Z_d \right] \\ &= \left[\frac{V_u^2}{2g} - \frac{V_d^2}{2g} \right] + [(h_u + Z_u) - (h_d + Z_d)] \\ &= \left[\frac{V_u^2}{2g} - \frac{V_d^2}{2g} \right] + \Delta P\end{aligned}\quad (1)$$

$$K_{E*} = \frac{\Delta E}{V_d^2/2g} \quad (2)$$

$$K_{P*} = \frac{\Delta P}{V_d^2/2g} = K_{E*} + 1 - \frac{V_u^2}{V_d^2} \quad (3)$$

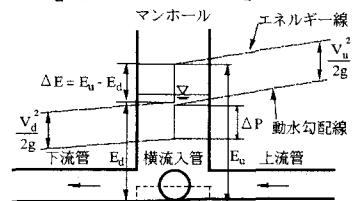


図-6 損失水頭 ΔE 、 ΔP の定義

5.1 実験装置の概要

図-7 Sangsterらが用いたマンホール
(インバート無)

図-8 Marsalekが用いたマンホール(インバート有)

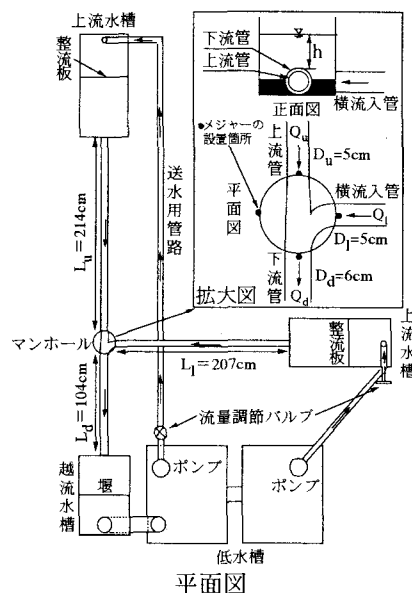


図-9 実験装置の概要

実験方法は以下の通りである。①2ヶ所の流量調節バルブにより、上流管流量 Q_u と横流入管流量 Q_l を所定の流量に設定する(図-9参照)。②下流管内壁頂部から水面までの距離をマンホール水深 h とし、それを3本の管とマンホールとの接合部及び主流方向の上流管から見てマンホール右側壁面に取り付けた4ヶ所のメジャーにより測定し(図-9参照)、それらの平均値を測定値とする。なお、マンホール水深 h は、下流管端部の越流水槽内の堰高を変えることにより変化させている。③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-10参照)。さらに、前述した(2)式と(3)式によりエネルギー損失係数 K_{F_m} 、圧力損失係数 K_{p_m} を算定する。

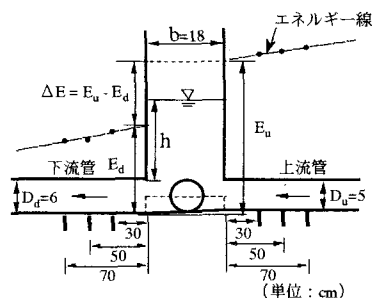
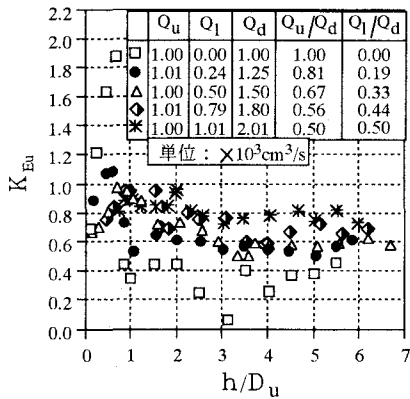


図-10 損失水頭 ΔE の定義

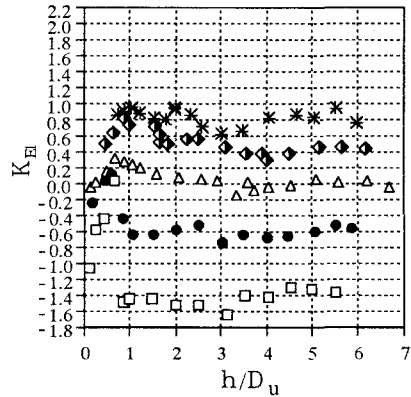
6.1 主流方向の上流管流量 Q_u を一定とした場合

上流管流量 Q_u (約 $1.0 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{s}$) を一定とした場合の主流方向及び横流入方向のエネルギー損失係数の変化状況をそれぞれ図-11と12に示す。なお、横流入管流量 Q_l は図-11の凡例に示すように、5種変化させている。横流入管流量 Q_l を増加させると、水深の変化に伴うエネルギー損失係数 K_{fu} の変化幅(極大値と極小値の差)は小さくなるのがわかる。これは、横流入量の増加に伴い、

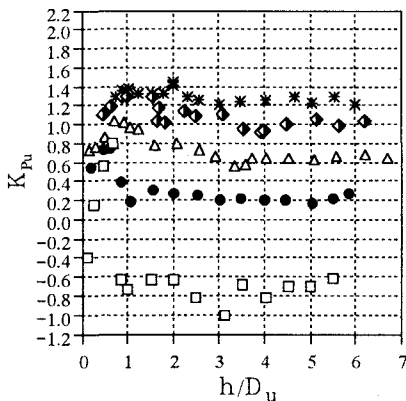
マンホール内部での流況（渦）がかなり変化するためと推察される。マンホール内の流況と損失の関係については、別途検討する必要がある。横流入量 $Q_l = 0 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合（図－11 参照）、マンホール水深比 h/D_u が 1 を超えると主流方向の損失係数 K_{Eu} は 0.2～0.4 程度であり、他の流量条件よりも損失係数は小さい。この水深比の範囲では、横流入量の増加に伴って、損失係数は大きくなる傾向にある。 $Q_u/Q_d=0.5$ では、主流方向の損失係数 K_{Eu} は 0.7～1.0 程度となる。この理由は、上流管及び横流入管からの流入水の流速がともに大きく、それだけ流水間の衝突やマンホール壁面への衝突による損失が大きくなるためである。図－12 において、横流入方向のエネルギー損失係数 K_{El} が負の値になっているものは、横流入管の圧力水頭が下流管よりも小さいことと、横流入管の速度水頭 ($V_l^2/2g$) が非常に小さいためである。また、横流入量の増加に伴って、横流入方向のエネルギー損失係数 K_{El} の変化が主流方向よりも大きいのは、上流管の速度水頭 ($V_u^2/2g$) を一定にしているためである。管路において動水勾配線を計算するには、圧力損失係数が必要となる。(3) 式から求めた主流方向及び横流入方向の圧力損失係数の変化状況を図－13 と 14 に示す。図－13 からわかるように、横流入量 Q_l の増加に伴い、主流方向の圧力損失係数 K_{pu} はエネルギー損失係数 K_{Eu} よりも大きく変化する。この理由は、(3) 式に示すように、圧力損失係数 K_{pu} を算定する際に、上流管の速度水頭 ($V_u^2/2g$) は一定であるが、下流管の速度水頭 ($V_d^2/2g$) が大きく変化するためである。



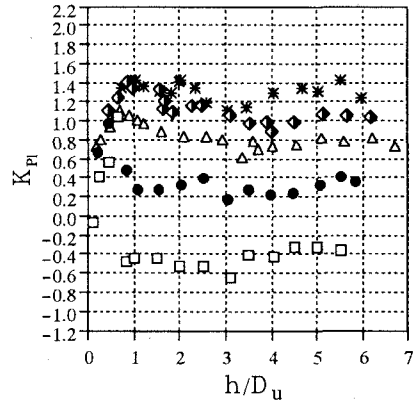
図－11 主流方向のエネルギー損失係数



図－12 横流入方向のエネルギー損失係数



図－13 主流方向の圧力損失係数



図－14 横流入方向の圧力損失係数

6.2 横流入管流量 Q_l を一定とした場合

横流入管流量 Q_l (約 $1.0 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{s}$) を一定とした場合の主流方向及び横流入方向のエネルギー

損失係数の変化状況をそれぞれ図-15と16に示す。主流方向の上流管流量 Q_u は図-15の凡例に示すように、5種変化させている。上流管流量 $Q_u = 0 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合(図-15参照)、横流入管からの流入水の上半分の流れがマンホール壁面へそのまま衝突し、流れが大きく曲げられ、発生するスケールの大きな単一方向回転渦の影響で、主流方向、横流入方向いずれもエネルギー損失係数は水深によってかなり変化する。主流方向のエネルギー損失係数 K_{Eu} は0.4~1.2程度、横流入方向のエネルギー損失係数 K_{El} は1.9~2.9程度変化する。横流入方向の損失係数 K_{El} が大きいのは、上流管の速度水頭($V_u^2/2g$)が0 cmであることから、上流管のエネルギーは圧力水頭のみになるのに対して、横流入管のエネルギーは圧力水頭に速度水頭($V_l^2/2g$)を加えたものとなり、上流管よりも横流入管の方が高いエネルギーを持つことになるためである。また、主流方向、横流入方向いずれの流量条件でも、マンホール水深比 h/D_u が2~3付近で損失係数は極大値をとることがわかる。この結果は、上流管流量 Q_u を一定とした場合の結果(図-11と12参照)と異なっており、渦の発生条件(流れの向き、水深)や渦の大きさの違いに起因している。図-17と18にそれぞれ主流方向及び横流入方向の圧力損失係数の変化状況を示す。図-17に示すように、上流管流量 Q_u の増加に伴い、主流方向の圧力損失係数 K_{pu} は小さくなる。また、上流管の流量増加に伴う横流入方向の圧力損失係数 K_{pl} の変化は、エネルギー損失係数 K_{El} の変化(図-16参照)よりも小さくなっている。この理由は、(3)式に示すように、圧力損失係数 K_{pl} の算定において、横流入管の速度水頭($V_l^2/2g$)は一定であり、上流管の流量増加に伴い下流管の速度水頭($V_d^2/2g$)が増大するためである。

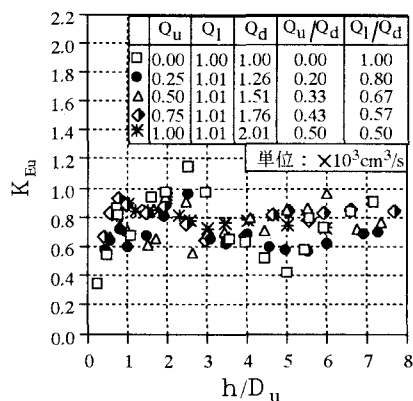


図-15 主流方向のエネルギー損失係数

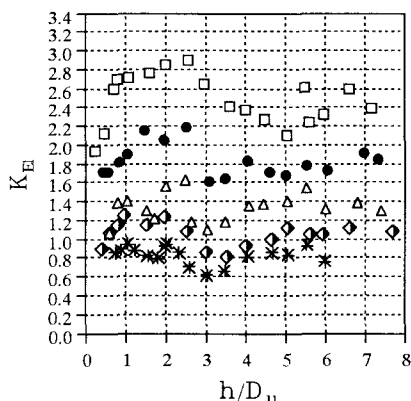


図-16 横流入方向のエネルギー損失係数

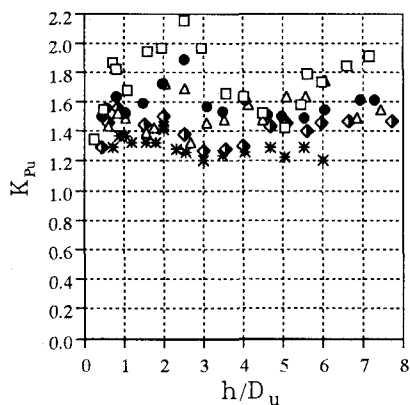


図-17 主流方向の圧力損失係数

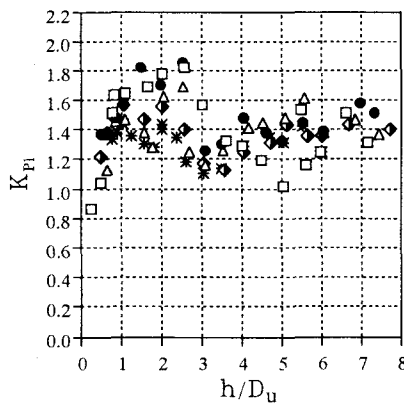


図-18 横流入方向の圧力損失係数

7. Sangster らの結果との比較¹¹⁾

図-7に示すように、Sangster らが用いたマンホール底面には、インバートは設置されておらず、本研究で用いたモデル（図-9 参照）とは異なっている。本モデルの方が上流管あるいは横流入管からの流入水が下流管へ流出しやすくなるため、Sangster らの結果よりも損失係数は小さくなると予想される。主流方向と横流入方向の圧力損失係数に関する本実験結果と Sangster らの結果¹¹⁾ との比較をそれぞれ図-19と20に示す。なお、Sangster らの結果は、いずれの水深で損失係数を求めたのか不明である。図-19 及び20 中の本実験結果は、それぞれの設定流量比 Q_l/Q_d において、マンホール内の水深の変化に伴う圧力損失係数の変化幅（実験範囲での最小値と最大値）を示している。これらの図からわかるように、 Q_l/Q_d が0.5 付近よりも小さい場合、本実験結果の方が Sangster らの結果よりも、主流方向、横流入方向いずれの圧力損失係数も大きくなっている。前述したように、Sangster らの結果は、損失係数を過小評価している可能性もあり、現時点では、この原因は明らかではない。 Q_l/Q_d が0.5 付近よりも大きくなると、Sangster らの結果よりも圧力損失係数は小さくなっており、これはマンホール底面のインバートの効果であると考えられる。以上のことから、雨水管の設計や浸水予測計算に Sangster らの結果を用いると、マンホール底面のインバートやマンホール水深の影響が考慮されていないため、流況によっては無視できない計算誤差を生じると考えられる。そのため、Sangster らの式に修正を施すか、別途式を構築する等の検討が必要と思われる。これについては、本実験条件だけでは不十分な面もあるため、追加実験を行った上で別途検討したい。

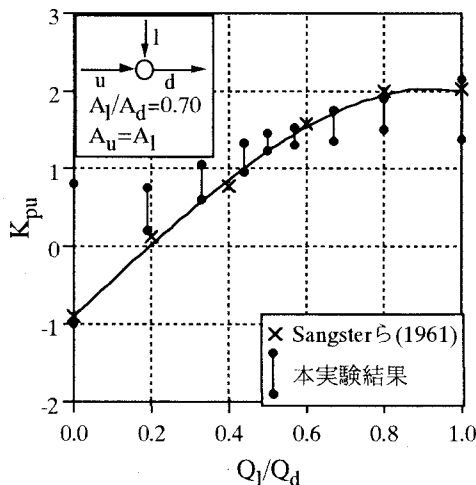


図-19 Sangster らとの比較（主流方向）

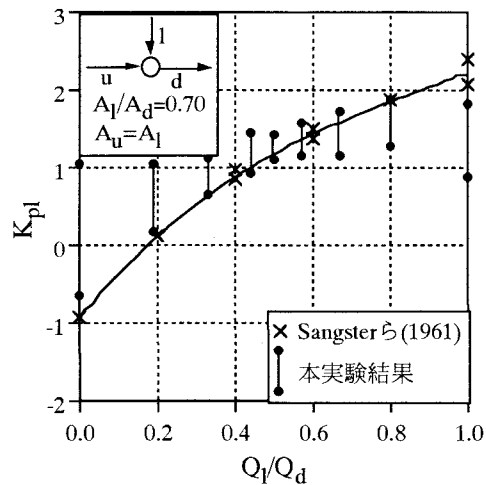


図-20 Sangster らとの比較（横流入方向）

8. まとめ

日本で一般的に利用されている3方向接合マンホールの損失特性に関して、従来の研究では接合管路やマンホールに関わる構造上の要素や水理学的要因を十分に満たした検討が未だなされていない。

流量比 Q_l/Q_d やマンホール水深比 h/D_u を種々変化させて、3方向接合マンホールの損失特性を実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 主流方向の上流管流量 Q_u を一定とした場合、横流入量 Q_l が少なく、しかもマンホール水深が小さいときにスケールの大きな渦の影響で損失係数はかなり増大する。また、いずれの流量比 Q_l/Q_d でもマンホール水深比 h/D_u が1を超えたところでは、水深の変化に伴う損失係数の変化は小さくな

る。

2) 横流入管流量 Q_l を一定とした場合、いずれの流量比 Q_l / Q_d でもマンホール水深比 h / D_u が2から3付近で損失係数は極大値をとる。この結果は、上流管流量 Q_u を一定とした条件下での結果と異なっており、マンホール内での流向、水深等渦の形成される条件が違うためである。

3) 流量比 Q_l / Q_d を0.5付近よりも大きくすると、予想していた通り、インバートを設置していない Sangster らの結果よりも、圧力損失係数は小さくなった。しかし、流量比 Q_l / Q_d を0.5付近よりも小さくすると、逆に Sangster らのものよりも、圧力損失係数は大きくなった。この結果や従来の研究から判断して、Sangster らの結果は損失係数をやや過小評価していると推察される。

今後は、管径比や流入管と流出管の段差を考慮した実験を行い、種々のパラメーターを考慮したより精度の高い損失係数の算定式を考案していきたい。

参考文献

- 1) 荒尾, 楠田: 2方向接合円形落差マンホール部のエネルギー損失特性, 下水道協会誌論文集No.18, pp14-28, 1997.
- 2) Arao, S. and Kusuda, T.: Energy Losses at Circular Drop Manholes, Proceedings of the 7th ICUSD, Hanover Germany, Vol.1, pp.85-90, 1996.
- 3) 荒尾, 楠田: 上・下流管の水平接合角度の違いが2方向接合円形落差マンホール部のエネルギー損失に及ぼす影響, 環境工学研究論文集 Vol.35, pp.467-475, 1998.
- 4) Arao, S. and Kusuda, T.: Effects of Pipe Bending Angle on Energy Losses at Two-Way Circular Drop Manholes, Proceedings of the 8th ICUSD, Sydney, Australia, Vol.4, pp.2163-2168, 1999.
- 5) 荒尾, 楠田: 遮断隔壁を伴う2方向接合円形落差マンホールの損失特性, 環境工学研究論文集, Vol.39, pp.177-184, 2002.
- 6) 荒尾, 楠田: 3方向接合マンホール部のエネルギー損失特性ーレビューと課題ー, 下水道協会誌, Vol.33, No.397, pp.67-75, 1996.
- 7) 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.
- 8) Lindvall, G.: Head Losses at Surcharged Manholes with a Main Pipe and a 90° Lateral, Proceedings of the 3rd ICUSD, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, pp.137-146, 1984.
- 9) Marsalek, J.: Head Losses at Selected Sewer Manholes, Special Report No.52, Am. Public Works Association, Chicago, 1985.
- 10) Johnston, A.J., and Volker, R.E.: Head Losses at Junction Boxes, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.116, No.3, pp.326-341, 1990.
- 11) Larry, W. Mays: STORMWATER COLLECTION SYSTEMS DESIGN HANDBOOK, McGraw-Hill, pp.6.65-6.84, 2001.
- 12) 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.164-165, 1994.
- 13) 山田: 川崎市荏宿地区における雨水管路網の調査検討, 平成6年度九州共立大学卒業論文.
- 14) Miller, D.S.: Internal Flow Systems, 2d ed., Gulf Publishing Co., Book Division, Houston, TX, 1990.
- 15) Fried, E., and I. E. Idelchik: Flow Resistance, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1989.
- 16) Serre, M., A. J. Odgaard, and R. A. Elder: Energy Loss at Combining Pipe Junction, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.7, pp.808-830, 1994.