

## 横流入管の落差の違いを考慮した4方向接合円形マンホールのエネルギー損失特性

東北大学大学院 学生会員 ○岡本 彩果  
 松江工業高等専門学校 正会員 荒尾 慎司  
 (株) 和建設事務所 正会員 小田 耕平

### 1. はじめに

雨水管や合流管の接合部であるマンホールにおけるエネルギー損失は、設計や洪水氾濫解析に与える影響が必ずしも小さくないことが知られているが、日本ではその重要性がほとんど議論されずに今日に至っている<sup>1)</sup>。

本研究の対象とする十字路交差点下に敷設される4方向接合マンホールにおいては考慮すべき変数が多く、これまでエネルギー損失係数の定式化を困難にしてきた。そこで著者らは、圧力管水路流れを対象に十字路交差点下で流入管3本と流出管が管頂接合する4方向接合円形マンホールにおけるエネルギー損失特性を実験的に明らかにするとともにエネルギー損失係数の算定式を開発してきた<sup>2),3),4),5)</sup>。さらに、マンホールに接続する横流入管の1本に大きな落差を伴う場合のエネルギー損失係数の算定式も考案している<sup>6)</sup>。しかし、この提案式で横流入管の落差が種々変化したときにエネルギー損失係数の実測値を再現できるかどうかは未だ確認されていない。

そこで本研究では、図-1に示すように対向する2本の横流入管の断面の一部が鉛直方向に重なるような落差を有する場合のエネルギー損失特性を実験的に明らかにする。

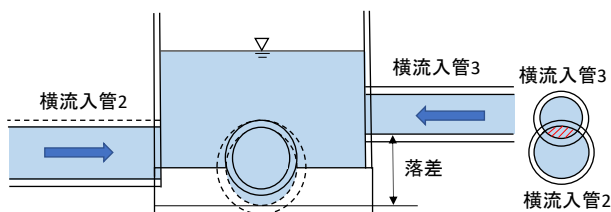


図-1 2本の対向する横流入管の断面の一部が鉛直方向に重なっている状態（赤い斜線部分）

### 2. エネルギー損失係数の定義

実験における4方向接合マンホールのエネルギー損失係数  $K_{ei}$  と圧力損失係数  $K_{pi}$  は、それぞれ式(1)、

式(2)で定義される（図-2参照）。エネルギー損失係数  $K_{ei}$  を算出できれば、式(2)により圧力損失係数  $K_{pi}$  が求められ、マンホール水位を推定することができる。これらの損失係数の定義は、世界中で用いられている共通の定義で、研究者間で研究成果を比較し議論できるようになっている。

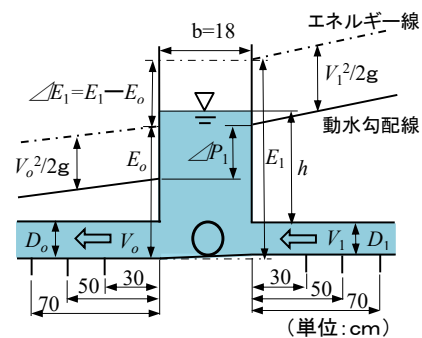


図-2 マンホールで生じるエネルギー損失（実験模型）

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

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

ここで、 $b$  はマンホールの内径、 $D_1, D_2, D_3$  はそれぞれ流入管 1, 2, 3 の内径、 $D_o$  は流出管の内径、 $Q_1, Q_2, Q_3$  はそれぞれ流入管 1, 2, 3 の流量、 $Q_o$  は流出管の流量 ( $Q_o = Q_1 + Q_2 + Q_3$ )、 $S_1, S_2, S_3$  はそれぞれ流入管 1, 2, 3 と流出管との間の落差である。また、 $V_1, V_2, V_3$  はそれぞれ流入管 1, 2, 3 の断面平均流速、 $V_o$  は流出管の断面平均流速である。また、下付き添字  $i$  は 1 のとき流入管 1 と流出管との関係を、2 のとき流入管 2 と流出管との関係を表す。

### 3. 実験装置

本研究で用いている実験装置の概要を図-3 と図-4 に示す。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。模型は実規模（マンホール径 90cm、管径 25cm 等）の 1/5 程度の縮小模

キーワード 十字路交差点, 下水管, マンホール, エネルギー損失, 横流入管の落差

連絡先 〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4 松江工業高等専門学校 TEL:0852-36-5225

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、マンホール入り口に流入管の内径の 1/2 の寸法、マンホール出口に流出管の内径の 1/2 の寸法に相当するインバートを設置している。

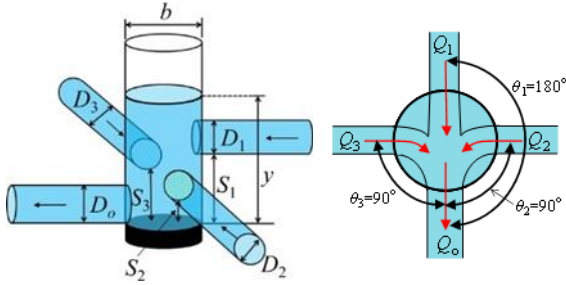


図-3 4方向接合円形マンホールの概要

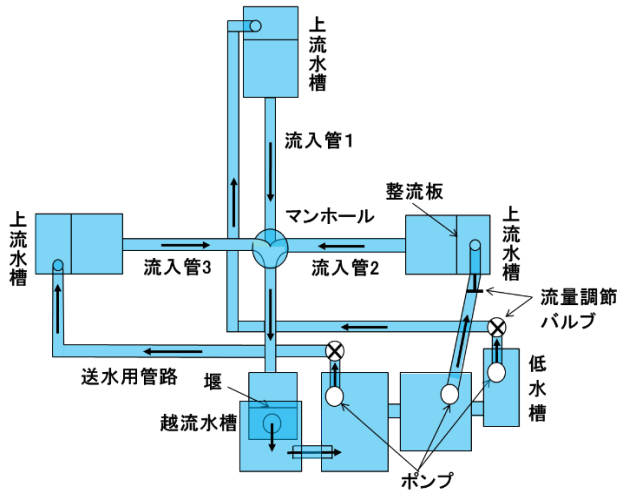


図-4 実験装置の全体図（平面図）

4. 実験方法と実験条件

最初に、3ヶ所の流量調節バルブにより、管内を管路圧力流れにして流入管 3 本の流量をそれぞれ所定の流量に設定する。次に、図-2 に示すように、流入管の内壁頂部からマンホール内の水面までの鉛直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。さらに、3 本の流入管及び流出管においてマンホールの入り口と出口から 70cm, 50cm, 30cm 離れた位置に取り付けたマンメーターによって管内のピエゾ水頭を 2 回測定しその平均値を採用する(図-2 参照)。このピエゾ水頭に速度水頭 ( $V^2/2g$ ) 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  $\Delta E_i$  を求

める(図-2 参照)。

表-1 に管内径 ( $D_1, D_2, D_3, D_o$ ) の組み合わせを示す。各 Type において流入管 1 の流量  $Q_1$ 、横流入管 2 の流量  $Q_2$  及び横流入管 3 の流量  $Q_3$  を様々な値に設定した。その例として Type F において設定した流量 46 ケースを表-2 に示す。Type E, Type G, Type H, Type I 及び Type J では、表-2 の Type F よりも流量条件をやや少なくして検討を行っている。なお、既往研究<sup>6)</sup>で Type A~Type D に関しては簡易的に流量比  $Q_{lat}/Q_o$  ( $Q_{lat}=Q_2+Q_3, Q_2=Q_3$ ) を 6 種のみ設定して検討を行っている。それぞれの条件でマンホール内の水深  $h$  を 5cm から 30cm の間で変化させた。

表-1 管内径の組み合わせ

	$D_1$ (cm)	$D_2$ (cm)	$D_3$ (cm)	$D_o$ (cm)	実施年	落差の有無
Type A	5	5	5	5	2017	管頂接合
Type B	5	5	5	6	2017	管頂接合
Type C	4	4	4	6	2018	管頂接合
Type D	3	3	3	6	2018	管頂接合
Type E	3	5	4	6	2018	管頂接合
Type F	4	5	3	6	2019	管頂接合
Type G	5	4	3	6	2019	管頂接合
Type H	5	4	3	6	2020	横流入管3の落差8cm
Type I	5	4	3	6	2021	横流入管3の落差5.5cm
Type J	5	4	3	6	2021	横流入管3の落差4.5cm

表-2 流量の設定 (Type F)

$Q_1$ の設定	No.	$D_1=4cm, D_2=6cm, D_3=3cm, D_o=6cm$				$Q_1/Q_o$	$Q_2/Q_o$	$Q_3/Q_o$	$\Sigma Q_i/Q_o$		
		$Q_1$ ( $l/s$ )	$Q_2$ ( $l/s$ )	$Q_3$ ( $l/s$ )	$Q_o$ ( $l/s$ )						
$Q_1=0.04l/s$	1	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0		
	2	0.0	0.125	0.875	1.0	0.0	0.125	0.875	1.0		
	3	0.0	0.25	0.75	1.0	0.0	0.25	0.75	1.0		
	4	0.0	0.375	0.625	1.0	0.0	0.375	0.625	1.0		
	5	0.0	1.0	1.0	2.0	0.0	0.5	0.5	1.0		
	6	0.0	1.25	0.75	2.0	0.0	0.625	0.375	1.0		
	7	0.0	1.5	0.5	2.0	0.0	0.75	0.25	1.0		
	8	0.0	1.75	0.25	2.0	0.0	0.875	0.125	1.0		
	9	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	1.0	0.0	1.0		
$Q_1=0.25l/s$	10	0.125	0.0	0.875	1.0	0.125	0.0	0.875	1.0		
	11	0.125	0.125	0.75	1.0	0.125	0.125	0.75	1.0		
	12	0.125	0.25	0.625	1.0	0.125	0.25	0.625	1.0		
	13	0.25	0.75	1.0	2.0	0.125	0.375	0.5	1.0		
	14	0.25	1.0	0.75	2.0	0.125	0.5	0.375	1.0		
	15	0.25	1.25	0.5	2.0	0.125	0.625	0.25	1.0		
	16	0.25	1.5	0.25	2.0	0.125	0.75	0.125	1.0		
	17	0.25	1.75	0.0	2.0	0.125	0.875	0.0	1.0		
	18	0.25	0.0	0.75	1.0	0.25	0.0	0.75	1.0		
$Q_1=0.50l/s$	19	0.25	0.125	0.625	1.0	0.25	0.125	0.625	1.0		
	20	0.5	0.5	1.0	2.0	0.25	0.25	0.5	1.0		
	21	0.5	0.75	0.75	2.0	0.25	0.375	0.375	1.0		
	22	0.5	1.0	0.5	2.0	0.25	0.5	0.25	1.0		
	23	0.5	1.25	0.25	2.0	0.25	0.625	0.125	1.0		
	24	0.5	1.5	0.0	2.0	0.25	0.75	0.0	1.0		
	$Q_1=0.667l/s$	25	0.667	0.667	0.667	2.0	0.333	0.333	0.333	1.0	
		26	0.375	0.0	0.625	1.0	0.375	0.0	0.625	1.0	
		27	0.75	0.25	1.0	2.0	0.375	0.125	0.5	1.0	
28		0.75	0.5	0.75	2.0	0.375	0.25	0.375	1.0		
29		0.75	0.75	0.5	2.0	0.375	0.375	0.25	1.0		
30		0.75	1.0	0.25	2.0	0.375	0.5	0.125	1.0		
31		0.75	1.25	0.0	2.0	0.375	0.625	0.0	1.0		
$Q_1=1.0l/s$		32	1.0	0.0	1.0	2.0	0.5	0.0	0.5	1.0	
		33	1.0	0.25	0.75	2.0	0.5	0.125	0.375	1.0	
	34	1.0	0.5	0.5	2.0	0.5	0.25	0.25	1.0		
	35	1.0	0.75	0.25	2.0	0.5	0.375	0.125	1.0		
	36	1.0	1.0	0.0	2.0	0.5	0.5	0.0	1.0		
	$Q_1=1.25l/s$	37	1.25	0.0	0.75	2.0	0.625	0.0	0.375	1.0	
		38	1.25	0.25	0.5	2.0	0.625	0.125	0.25	1.0	
		39	1.25	0.5	0.25	2.0	0.625	0.25	0.125	1.0	
		40	1.25	0.75	0.0	2.0	0.625	0.375	0.0	1.0	
$Q_1=1.50l/s$		41	1.5	0.0	0.5	2.0	0.75	0.0	0.25	1.0	
		42	1.5	0.25	0.25	2.0	0.75	0.125	0.125	1.0	
		43	1.5	0.5	0.0	2.0	0.75	0.25	0.0	1.0	
		$Q_1=1.75l/s$	44	1.75	0.0	0.25	2.0	0.875	0.0	0.125	1.0
			45	1.75	0.25	0.0	2.0	0.875	0.125	0.0	1.0
	$Q_1=2.0l/s$		46	2.0	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0	0.0	1.0

5. エネルギー損失係数の実験結果と考察

ここでは、3 本の流入管が管頂接合の場合と横流入管 3 の落差を 8cm<sup>6)</sup>、5.5cm、4.5cm とした場合のマンホールのエネルギー損失係数の実験結果を述べる。

### 5.1 落差 8cm<sup>6)</sup>

ここでは、3本の流入管が管頂接合の場合と流入管3に8cmの落差を設けた場合の実験結果について比較考察する<sup>6)</sup>。図-5の(a)と(b)に2種の流量比 $Q_1/Q_0$ におけるエネルギー損失係数 $K_{ei}$ と流量比 $Q_2/Q_0$ との関係を示す。

#### 1) $K_{e1}$ について

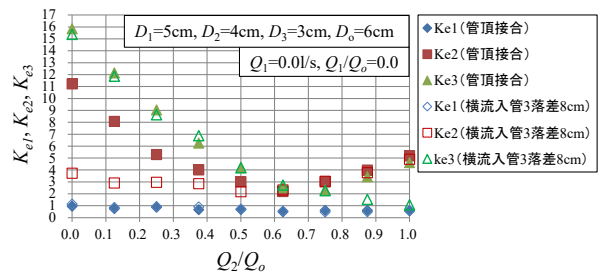
いずれの図においても $K_{e1}$ は0.5から1.0の間にあり、実験誤差を考慮すれば、流量比の変化に伴う $K_{e1}$ の変化は小さい。この結果から、横流入管3に落差を設けた場合、 $K_{e1}$ は落差の影響を受けないことが示された。

#### 2) $K_{e2}$ について

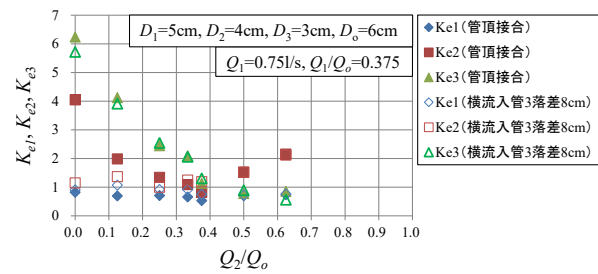
2種の流量比 $Q_1/Q_0$ によって影響する流量比 $Q_2/Q_0$ の範囲は異なるが、 $Q_2/Q_0$ が0~0.4の範囲で落差の有無により $K_{e2}$ の値に顕著な差が見られる。特に図-5の(a)では、横流入管3が管頂接合の場合、流量比 $Q_2/Q_0$ の増加に伴い $K_{e2}$ は大きく減少し、一方落差を有する場合の $K_{e2}$ は管頂接合の場合より大きく減少するとともに、流量比 $Q_2/Q_0$ による変化は非常に小さくなることがわかる。これは落差が無い場合、横流入管3の流量が少なくなるほど横流入管2の圧力水頭に与える影響が小さくなるからである。一方で、横流入管3に大きな落差を設けた場合、横流入管3からの流入水はマンホールの側壁に衝突することから、横流入管2に直接的な影響を与えない。したがって、片側の横流入管のみに大きな落差がある場合は、横流入管3の流入水が横流入管2の圧力水頭にほとんど影響を与えないため、 $K_{e2}$ はほぼ一定値をとることになる。

#### 3) $K_{e3}$ について

図-5の(a)と(b)において、流量比 $Q_2/Q_0$ が0~0.6付近までは落差の有無に関わらず $Q_2/Q_0$ の増加に伴い $K_{e3}$ の値は減少しながらほぼ同じ値をとる。また、図-5の(a)に示すように、 $Q_2/Q_0$ が0.8より大きくなると落差がある場合、 $K_{e3}$ が減少するのに対して、横流入管3が管頂接合の場合、逆に $K_{e3}$ は増加している。これは、 $Q_2/Q_0$ が0.8を超えると横流入管2からの流入水の速度が管内径の小さい横流入管3からの流入速度より大きくなることから、横流入管3が管頂接合の場合、対向する横流入管2からの影響を受け圧力水頭が上昇するからである。



(a)  $Q_1/Q_0=0$  (管頂接合と落差 8cm)



(b)  $Q_1/Q_0=0.375$  (管頂接合と落差 8cm)

図-5 管頂接合と横流入管3が8cmの落差を有する場合のエネルギー損失係数の実測値の比較

### 5.2 落差 5.5cm

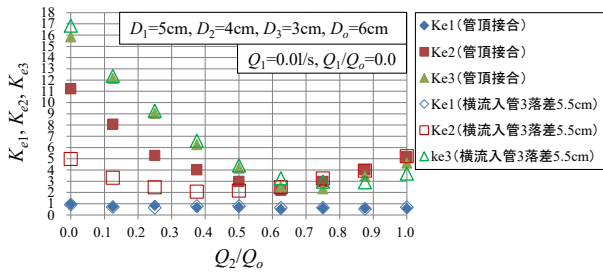
ここでは、3本の流入管が管頂接合の場合と横流入管3に5.5cmの落差を設けた場合の実験結果について比較考察する。図-6の(a)と(b)に2種の流量比 $Q_1/Q_0$ におけるエネルギー損失係数 $K_{ei}$ と流量比 $Q_2/Q_0$ との関係を示す。

#### 1) $K_{e1}$ について

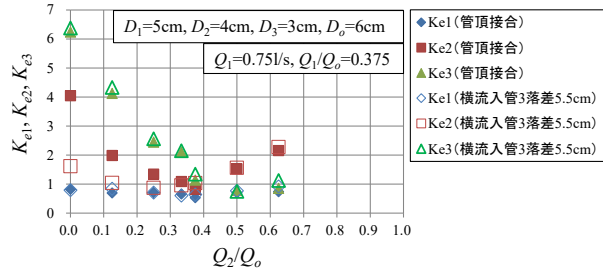
いずれの図においても落差8cmと同様に、 $K_{e1}$ は0.5から1.0の間にありその変化は小さい。

#### 2) $K_{e2}$ について

2種の流量比 $Q_1/Q_0$ によって影響する流量比 $Q_2/Q_0$ の範囲は異なるが、落差8cmの場合と同様、 $Q_2/Q_0$ が0~0.4の範囲で落差の有無により $K_{e2}$ の値に顕著な差が見られる。特に図-6の(a)では、横流入管3が管頂接合の場合、流量比 $Q_2/Q_0$ の増加に伴い $K_{e2}$ は大きく減少し、一方5.5cmの落差を有する場合の $K_{e2}$ は8cmの落差を有する場合と同様、大きく減少するとともに、流量比による変化は小さくなることがわかる。また、落差5.5cmの場合、横流入管2と横流入管3の鉛直方向に管断面の一部が重なるものの、重なる部分の面積が小さいこともあり、 $Q_2/Q_0=0$ を除くと $K_{e2}$ の値は落差8cmの場合と同程度となっている。

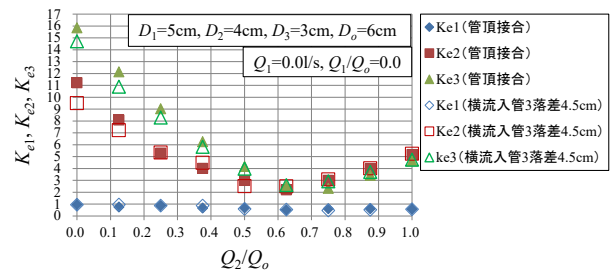


(a)  $Q_1/Q_0=0$ （管頂接合と落差 5.5cm）

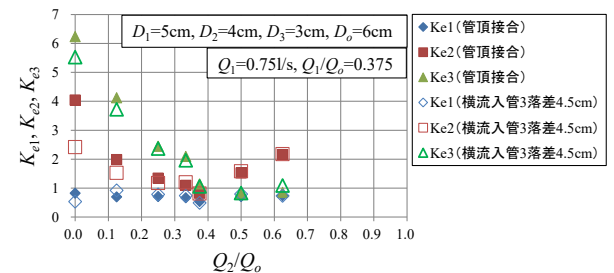


(b)  $Q_1/Q_0=0.375$ （管頂接合と落差 5.5cm）

図-6 管頂接合と横流入管 3 が 5.5cm の落差を有する場合のエネルギー損失係数の実測値の比較



(a)  $Q_1/Q_0=0$ （管頂接合と落差 4.5cm）



(b)  $Q_1/Q_0=0.375$ （管頂接合と落差 4.5cm）

図-7 管頂接合と横流入管 3 が 4.5cm の落差を有する場合のエネルギー損失係数の実測値の比較

3)  $K_{e3}$  について

図-6の(a)と(b)においては、 $Q_2/Q_0$ の変化に伴う  $K_{e3}$  の変化状況は落差の有無に関わらずほぼ同じであり、図-6の(a)に示すように、 $Q_2/Q_0$ が0.8より大きくなると横流入管3が管頂接合、落差5.5cmのいずれの場合でも  $K_{e3}$  がやや増加している。これは落差8cmのところでも説明したように横流入管2と横流入管3の流速の大小関係が逆転するからである。

5.3 落差 4.5cm

ここでは、3本の流入管が管頂接合の場合と横流入管3に4.5cmの落差を設けた場合の実験結果について比較考察する。この落差4.5cmでは、横流入管3と横流入管2の管断面の半分弱程度が鉛直方向に重なっている状態である。図-7の(a)と(b)に2種の流量比  $Q_1/Q_0$  におけるエネルギー損失係数  $K_{ei}$  と流量比  $Q_2/Q_0$  との関係を示す。

1)  $K_{e1}$  について

いずれの図においても落差8cmや落差5.5cmと同様に、 $K_{e1}$ は0.5から1の間にありその変化は小さい。

2)  $K_{e2}$  について

$Q_2/Q_0=0$  のとき、落差の有無により  $K_{e2}$  の値に差がみられる程度であり、落差を4.5cmにすると、流入管3からの流入水の流線がマンホール内でやや下向きに流下することで管頂接合に近い損失係数が得られたのではないと思われる。

3)  $K_{e3}$  について

図-7の(a)と(b)においては、 $Q_2/Q_0$ の変化に伴う  $K_{e3}$  の変化状況は落差の有無に関わらずほぼ同じである。

6. おわりに

以上の通り、十字路交差点下で横流入管の1本に3種の異なる落差を伴う4方向接合円形マンホールのエネルギー損失を実験的に明らかにした。今後は、この条件でエネルギー損失係数の定式化を図りたい。

参考文献

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説一前編一，第4章管路施設，日本下水道協会，pp.281-334，2019.
- 2) 荒尾慎司，平塚俊介，楠田哲也：管路路圧力流れにおける4方向接合円形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, Vol. 75, No. 1, pp. 49-60, 2019.
- 3) 荒尾慎司，岡本彩果，平塚俊介，楠田哲也，小田耕平：十字路交差点における4方向接合円形マンホールのエネルギー損失算定式の改良，下水道協会誌学術論文，Vol. 57, No. 695, pp. 60-67, 2020.
- 4) 岡本彩果，荒尾慎司，平塚俊介，楠田哲也：十字路交差点における4方向接合円形マンホールのエネルギー損失特性，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol. 76, No. 2, pp. I\_925-I\_930, 2020.
- 5) 荒尾慎司，岡本彩果，広瀬 望，楠田哲也，小田耕平：十字路交差点における4方向接合円形マンホールの3本の流入管の流量の違いを考慮したエネルギー損失係数の算定式，下水道協会誌学術論文，Vol.58, No.706, pp. 108-121, 2021.
- 6) 岡本彩果，荒尾慎司，広瀬 望，楠田哲也，小田耕平：横流入管の落差を考慮した4方向接合円形マンホールのエネルギー損失の算定式，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol. 77, No.2, I\_805-I\_810, 2021.