

圧力管流れにおけるマンホール損失に関する実験的研究

MANHOLE LOSS IN PRESSURE PIPE FLOW - EXPERIMENTAL STUDY

井藤 元暢*・高部 一彦**

Motonobu ITO and Kazuhiko TAKABE

For frequent excessive rain, new inundation measures that utilize existing sewer facilities are necessary. The study focuses on manhole loss in pressure pipe flow that occurs from excessive rainfall. Hydraulic model experiment reproducing manhole was conducted at inlet pipe and outlet pipe to calculate manhole loss for each flow rate and water level and identify hydraulic problems of the manhole from excessive rainfall. Next, with the aim of manhole loss decrease, shapes of upstream and downstream pipe inlets were examined at several invert shapes to measure and evaluate their effects. Finally, as one of anti-inundation measures using the existing stocks, manhole loss control for inundation reduction throughout an entire area is proposed.

Keywords : sewer pipe, manhole loss, pressure flow, hydraulic experiment, invert shape, excess rainfall

1. はじめに

近年、頻発しているゲリラ豪雨等の超過降雨時には、下水道管路は圧力管（満管）流れとなることが多い。この圧力管流れにおいて、管の摩擦損失は通常の動水位計算で評価可能であるのに対し、マンホール損失については一般的な評価方法が確立されていない。また、流出解析シミュレーションの活用等により圧力管流れを前提とした既設管の能力評価が行われているが、通常はマンホール損失を無視して計算を行うことから、損失の程度によっては、危険側の評価となっている可能性がある。一方、これらのマンホール損失の低減を図ることができれば、浸水対策に寄与することが可能である。

本研究は、超過降雨時等の圧力管流れにおける浸水対策の一手法として、マンホール損失に着目したもので、マンホール損失の基礎的データを整理するとともに対策工を検討した。マンホールと流入管、流出管を再現した水理模型実験により、マンホール種別、流量や水位ごとのマンホール損失を計測し、超過降雨時におけるマンホールの水理的課題について整理した。マンホール損失の低減を目的としてマンホールの上流管口、下流管口、インバートの形状を検討し、その効果を水理模型実験により計測・評価した。以上の検討結果を踏まえ、既存ストックを活用した浸水対策として、マンホール損失等の局所的な損失を積極的にコントロールすることで、流域全体の浸水を軽減するための検討手法を提案した。

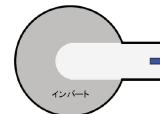
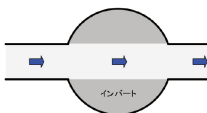
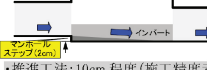
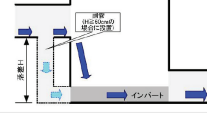
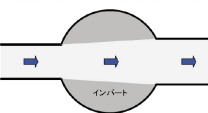
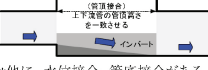
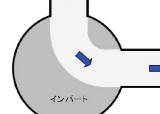
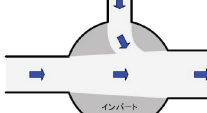
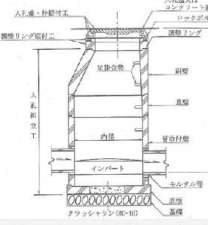
2. マンホール損失の概要と課題

(1) マンホールの設置目的と基本構造

下水道の管路施設は、主として管きょとマンホールで構成さ

れる。マンホールの設置目的と基本構造を、表－1に示す。

表－1 マンホールの目的と基本構造

種別	イメージ図	【マンホールの設置箇所】
起点		①維持管理上必要な箇所 ②管きょの起点 ③管きょの方向又は勾配が著しく変化する箇所 ④管きょ径の変化する箇所 ⑤段差の生じる箇所 ⑥管きょの会合する箇所
中間点	直線 上流管径＝下流管径の場合  (流入/流出管の落差なし) *マンホールステップ2cm確保  *推進工法:10cm程度(施工精度考慮) *小口径推進工法:5cm程度(注) *開削工法:2cm程度(水理損失を考慮) (流入/流出管の落差あり) 	上流管径<下流管径の場合  (流入/流出管の落差なし) *管頂接合の場合  *他に、水位接合、管底接合がある。
	曲がり 	
会合点		【マンホールの基本構造】  1号マンホール(内径90cm)の場合(適用範囲)・起点 ・会合点(φ400mm以下) ・中間点(φ600mm以下) 【インバートの例】 (中間点) (会合点)  *インバートの高さは下流管径の1/2高(但し、最大50cm)

* コンサルタント国内事業本部 流域・都市事業部 上下水道部

** 技術本部 中央研究所 総合技術開発第1部

(2) 設計における取扱い

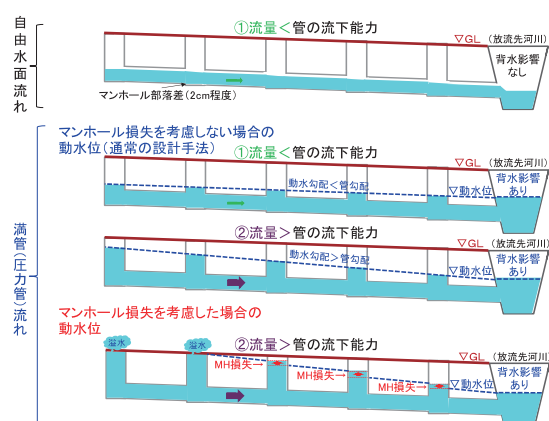
表－2 に下水道施設におけるマンホールと管きよの設計手法の比較を示す。管きよは、所定の流下能力を満足するように、管きよの粗度、断面、勾配を適切に定めるのに対し、マンホールでは流下能力等の水理機能の評価は行わず、マンホール部での水理損失を考慮して 2cm 程度の落差を設置するものとされている¹⁾。しかし、この 2cm の根拠は明確ではなく、さらに満管時において十分であるかは明らかではない。

表－2 管きよとマンホールにおける設計手法等の比較

項目	内容
通常の設計手法 (新設時等)	【管きよ】設計対象流量(例えば、合流管の場合、汚水量＋雨水流出量)に対して、余裕率を考慮した流下能力を有するように適切な管径と勾配を定める。なお、外水位等の影響で圧力管流れとなる場合は、動水位計算を行い、地表面に対して十分に低いことを確認。 【マンホール】マンホールの形状や種別(起点、中間、会合等)別に定められた適用管径を満足するように、規模(内径等)を決定する。 ①管径の変化点等では、管頂接合が原則 ②管径変化がない場合、上下流管の落差として 2cm 程度(開削工法の場合)を確保 ③落差が 60cm 以上の場合には副管を設置 ④下水の円滑な流下のためインバートを設置(下流管径の 1/2 とし最高 50cm まで)
既存施設の能力評価等の手法	【管きよ】通常の設計手法に加え、流出解析シミュレーションを実施し、浸水発生なし若しくは計算水位が地表面に対して十分に低いことを確認。 【マンホール】能力評価において考慮しない。

(3) マンホール損失と浸水発生

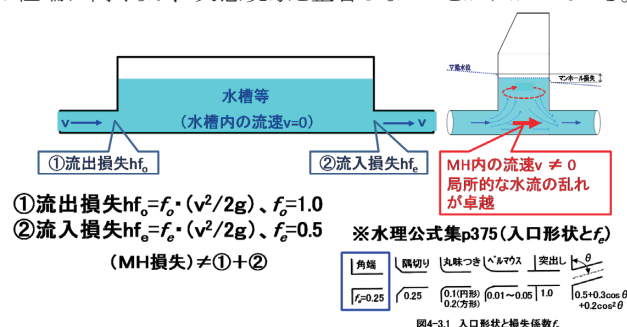
下水道管路における浸水現象は、図－1 に示すように、自由水面を持つ流れ(フリーフロー)から満管状態(圧力管流れ)に移行し、動水位が上昇する結果として生じる。通常の動水位計算や流出解析シミュレーションにおいては、管の摩擦損失は評価するもののマンホール等の局所構造物の損失については一般には評価していない。したがって、マンホール損失を考慮しない通常の設計手法において、浸水が発生しないと評価された下水道管路が、実際にはマンホール損失の影響により、浸水が発生する可能性がある。



図－1 管きよの流れの形態とマンホール損失

(4) マンホール損失の評価方法と既往研究

マンホールで発生する損失は、管路からマンホール部への流出損失、マンホール部から管路への流入損失等が考えられる。管径に対してマンホール内径は数倍程度であり、マンホールへ流入する流れは速度エネルギーを保持したまま、マンホールから流出する。また、マンホール内部での局所的な水流の乱れが生じることから、流出・流入損失に加え、マンホール内の水理挙動が組み合わさった複合的な現象となっている。単純な流出損失や流入損失であれば、図－2 に示すように、 $H_f = f \cdot v^2 / 2g$ (f は、管口の形状によるが、例えば、流出損失係数 $f_o = 1.0$ 、流入損失係数 $f_e = 0.5$) として算出可能²⁾ であるが、マンホールごとと同計算を行い累加すると、算定される動水位は極端に高くなり、実態現象と整合しないことがわかっている。



図－2 流入・流出損失とマンホール損失のイメージ

マンホール損失は、管きよとマンホールの形状寸法や角度、インバートの形状、流量や水位の条件等、様々な要因が影響する。マンホール損失の評価方法については、下水道施設計画・設計指針と解説¹⁾ には記載がないが、水理公式集¹⁾ には、以下に示すようにマンホールにおける損失水頭に関する記載があり、マンホールの下流管内流速基準の速度水頭 ($V^2 / 2g$) に損失係数 K_e を乗じることで算定するとしている。損失係数 K_e はマンホール径と下流管径との比率にマンホール形状で定まる係数を乗じて算出するとしており、その適用範囲や他の損失係数式については、参考文献によるとしている。

3.4.3 マンホールにおける損失水頭²⁾

$$h_e = K_e \frac{V^2}{2g}$$

$$K_e = \zeta(b/D_d)$$

ここに、 h_e : マンホールにおける損失水頭(m)、 K_e : 損失係数、 b : マンホール径(m)、 D_d : 下流管径(m)、 V : マンホール下流の断面平均流速(m/s)、 ζ : マンホールの形状で定める係数。

【解 説】損失係数式は、Bo Pederson によって、提案されたものである。この式の適用範囲や損失係数式については、荒尾、楠田の文献を参照されたい。

マンホール損失については、多くの既往研究成果があるが、いずれも小規模な模型 (1/5 もしくは 1/10) を用いたフルードの相似則に基づく水理実験の結果から、損失算定式、ならびに係数が提案されている³⁾。

今後、マンホール損失を設計等で活用していくためには、より実規模に近い模型で水理実験を行い、評価すべきである。

3. 水理模型実験によるマンホール損失の検証⁴⁾

(1) 対象としたマンホール

実際の管路網からモデル流域を抽出して、マンホールの種別や形状を整理し、構成比率の大きいものとして、表－3に示す6形状を選定した。マンホールは、全て1号マンホール（内径90cm）で中間マンホールが4形状、会合マンホールが2形状の合計6形状とした。また、インバート形状は、下流管径の1/2高とした。

表－3 実験対象としたマンホール

	中間マンホール 直線				会合マンホール 2方向流入	
	落差無		落差有		落差無	落差有
マンホール	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
流入管	1号 (900mm) φ450mm	1号 (900mm) φ300mm	1号 (900mm) φ250mm	1号 (900mm) φ300mm※ ※落差有 (2D=600mm)	1号 (900mm) φ300mm※ φ250mm※ ※落差無	1号 (900mm) φ300mm※ φ250mm※ ※落差有
流出管	φ450mm	φ300mm	φ250mm	φ300mm	φ450mm	φ450mm
形状図						

(2) 流量条件等

流量条件は、表－4に示すように管径ごとに、降雨強度50mm/hrかつ流出係数50%相当（以下、50mm/hr-50%相当という）、50mm/hr-80%相当、75mm/hr-80%相当の3段階を設定した。流量の設定は、管径と勾配、粗度係数（鉄筋コンクリート管を想定して $n=0.013$ ）から決定される管の流下能力（満管流量）が、50mm/hr-50%の雨水流出量の2割余裕に相当するものとして、管径ごとに流域面積（ha）を想定した。その流域面積（ha）を元に、50mm/hr-80%相当、75mm/hr-80%相当の流量を算定した。なお、管径と勾配の組み合わせは、東京都下水道局の標準勾配表（ $n=0.013$ 、管きょ再構築設計の手引き⁵⁾）を参照した。また、雨水流出量算定は、東京都下水道局で採用している降雨強度式を用いた。

- ・50mm/hrの降雨強度式： $I=5000/(t+40)$ (mm/hr)
- ・75mm/hrの降雨強度式： $I=1700/(t^{0.7}+4.8)$ (mm/hr)

下流端水位は、模型下流端の水位調整装置により、マンホールと流出管の接続部水位を1.0D（ただし、Dは下流管径）から最大1.6D程度（ケース4は2.4D程度）まで変化させた。

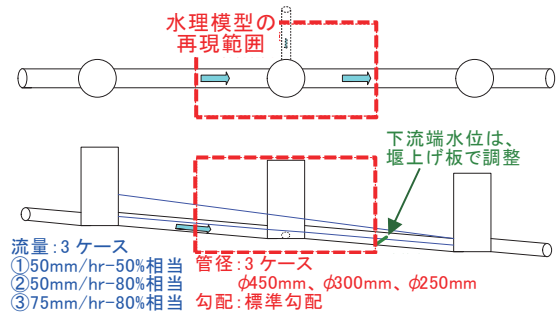
表－4 管径ごとの流量条件

流入管径 (mm)	勾配 (%)	流下能力 満管(m³/s)	流量① 50mm/hr-50%	流量② 50mm/hr-80%	流量③ 75mm/hr-80%
φ450mm	5.5‰ 1/182	0.211 m³/s (1.0)	0.176 m³/s (0.83)	0.280 m³/s (1.33)	0.500 m³/s (2.37)
φ300mm	8.0‰ 1/125	0.086 m³/s (1.0)	0.072 m³/s (0.84)	0.115 m³/s (1.34)	0.215 m³/s (2.50)
φ250mm	10‰ 1/100	0.059 m³/s (1.0)	0.050 m³/s (0.85)	0.079 m³/s (1.34)	0.146 m³/s (2.47)

(3) 実験方法

1) 模型の再現範囲

模型の再現範囲は、図－3に示すように、マンホールと流入管、流出管の一部とした。



図－3 水理模型の再現範囲

2) 模型縮尺と相似則

模型は、1/2縮尺とし、実験はフルードの相似則^{*}により行った。模型縮尺（1/2）とフルードの相似則から水理諸量の縮尺を算定した結果を表－5に示す。

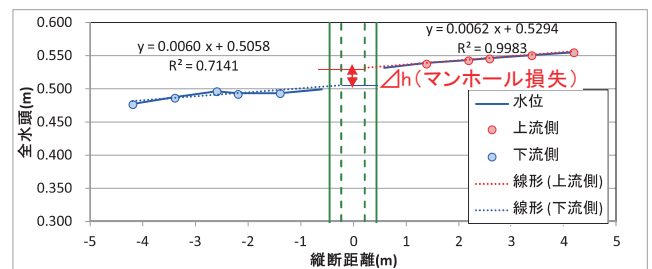
※フルード数 $Fr = V/\sqrt{gh}$ を実物と模型で一致させる。

表－5 模型および水理諸量の縮尺

項目	記号および算式	模型縮尺、および 水理諸量の縮尺
長さ	λ_L	1/2
粗度係数	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1/1.12
時間	$\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$	1/1.41
流速	$\lambda_V = \lambda_L^{1/2}$	1/1.41
流量	$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$	1/5.66

3) マンホール損失 Δh 、ならびに損失係数 f の算定

管路内の縦断水位（動水位、ピエゾ水頭）をマノメータにより計測した。水位の計測結果に、速度水頭を加算し、全水頭の縦断分布を算定し、マンホール上流と下流の全水頭差をマンホールにおける損失 Δh として算定した。なお、マンホール壁部の損失は、図－4に示すように、管路内のエネルギー線（全水頭線）から外挿して求めた。



図－4 マンホール損失の算定方法（ Δh がマンホール損失）

また、マンホール損失の指標として、マンホール損失 Δh を下流管の流速基準とした速度水頭（ $V_L^2/2g$ ）で除して、マンホール損失係数 f （ f 値という）を算定した。

$$\Delta h = f \frac{V_L^2}{2g}$$

Δh : マンホール損失水頭(m)
 f : マンホール損失係数
 V_L : マンホール下流部の流速(m/s)

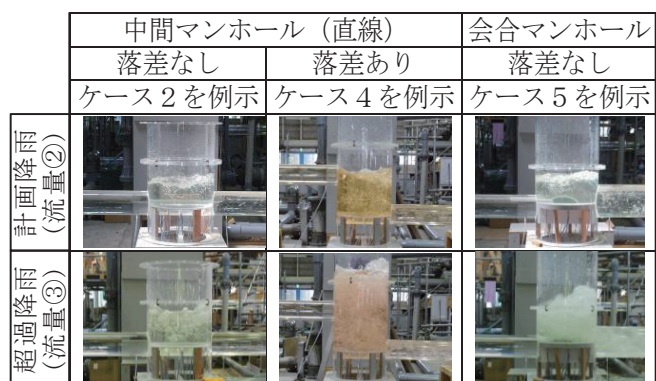
(4) 実験結果

1) マンホール内の流況

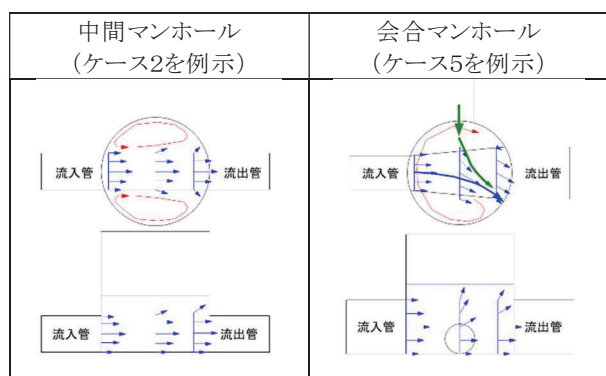
マンホール内の流況を図－5、また中間マンホール、会合マンホールそれぞれの流れの特徴を模式的に表現したものを図－6に示す。中間マンホールでは、流入管からの流れがマンホール内へ流入後、流線が水平および上部方向に広がり、流れの一部は流出管口上部のマンホール壁に衝突するととも

に、流出管口部上部から左右対称の平面的な渦が発生した。また、落差あり（2D）のケースでは、流量や下流端水位が小さい場合は、流入管からの流れが流出管口付近に落下し、そのまま流出した。しかし、流量や下流端水位が増加すると、流向は直線に近づき、流出管口上部のマンホール壁部に衝突する流れとなった。

一方、会合マンホールでは、直線方向の流入管の流れが、横方向からの流入管の流れにより曲げられ、マンホール壁に衝突し、マンホール内の上部に平面渦が発生した。



図－5 水理実験におけるマンホール内の流況



図－6 マンホール内の流況の説明図

2) マンホール損失 Δh および損失係数 f の結果

各ケースのマンホール損失 Δh および損失係数 f の計測結果を表－6に示す。

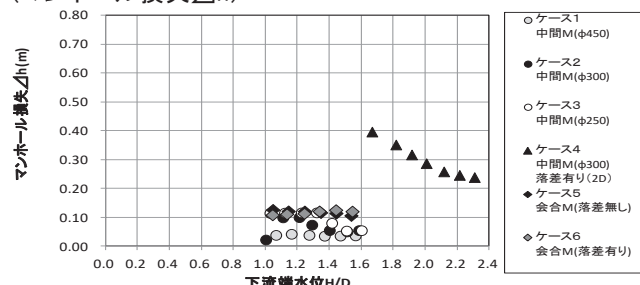
表－6 マンホール種別 / 形状別のマンホール損失 Δh 、損失係数 f 値

* 下流端水深 $H/D=1.2$ 時の値、 H は下流端水位、 D は下流管径。ただし、ケース4は、マンホール損失 Δh が最大となる下流端水位時の値。

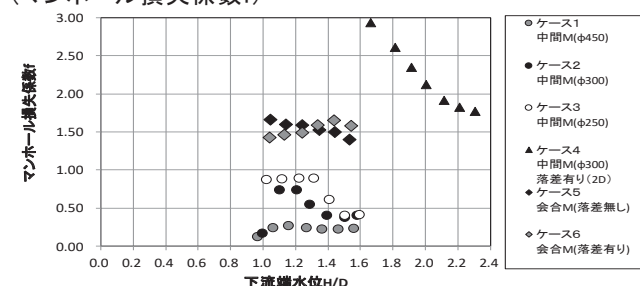
マンホール種別	流入管形状	ケースNo	計画降雨		
			50mm/hr-50% (流量①)	50mm/hr-80% (流量②)	75mm/hr-80% (流量③)
中間マンホール	直線 (落差無)	ケース1 $\phi 450\text{mm}$	$\Delta h=1.7\text{cm}$ [$f=0.272$]	$\Delta h=4.1\text{cm}$ [$f=0.262$]	$\Delta h=9.4\text{cm}$ [$f=0.185$]
		ケース2 $\phi 300\text{mm}$	$\Delta h=2.9\text{cm}$ [$f=0.547$]	$\Delta h=9.9\text{cm}$ [$f=0.736$]	$\Delta h=16.1\text{cm}$ [$f=0.358$]
		ケース3 $\phi 250\text{mm}$	$\Delta h=3.6\text{cm}$ [$f=0.686$]	$\Delta h=11.5\text{cm}$ [$f=0.882$]	$\Delta h=10.9\text{cm}$ [$f=0.239$]
	直線 (落差有)	ケース4 $\phi 300\text{mm}$	$\Delta h=9.9\text{cm}$ [$f=1.880$]	$\Delta h=39.6\text{cm}$ [$f=2.941$]	$\Delta h=73.3\text{cm}$ [$f=1.632$]
会合マンホール	2方向流入 (落差無)	ケース5 $\phi 250\text{mm}$	$\Delta h=5.4\text{cm}$ [$f=1.827$]	$\Delta h=12.0\text{cm}$ [$f=1.596$]	$\Delta h=39.7\text{cm}$ [$f=1.554$]
		ケース6 $\phi 300\text{mm}$	$\Delta h=3.8\text{cm}$ [$f=1.286$]	$\Delta h=11.0\text{cm}$ [$f=1.463$]	$\Delta h=44.1\text{cm}$ [$f=1.731$]
	2方向流入 (落差有)	ケース5 $\phi 250\text{mm}$	$\Delta h=5.4\text{cm}$ [$f=1.827$]	$\Delta h=12.0\text{cm}$ [$f=1.596$]	$\Delta h=39.7\text{cm}$ [$f=1.554$]
		ケース6 $\phi 300\text{mm}$	$\Delta h=3.8\text{cm}$ [$f=1.286$]	$\Delta h=11.0\text{cm}$ [$f=1.463$]	$\Delta h=44.1\text{cm}$ [$f=1.731$]

また、50mm/hr-80% 相当流量（流量②）、75mm/hr-80% 相当流量（流量③）の場合における下流端水位（ H/D ）とマンホール損失 Δh 、損失係数 f との関係を、図－7、図－8に示す。

(マンホール損失 Δh)



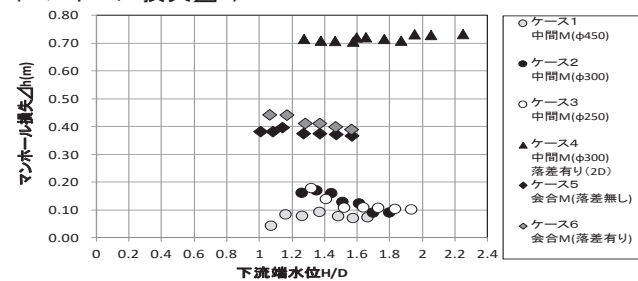
(マンホール損失係数 f)



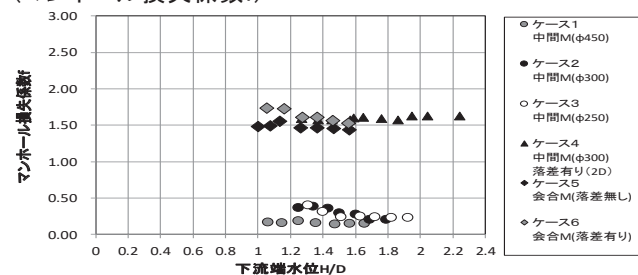
* 流量規模: 50mm/hr-80%相当 (流量②) の場合

図－7 下流端水位とマンホール損失 Δh ならびにマンホール損失係数 f との関係（流量②）

(マンホール損失 Δh)



(マンホール損失係数 f)



* 流量規模: 75mm/hr-80%相当 (流量③) の場合

図－8 下流端水位とマンホール損失 Δh ならびにマンホール損失係数 f との関係（流量③）

3) マンホール損失 Δh の評価

① 中間マンホール（落差なし）では、流量②におけるマンホール損失は、ケース1が4.1cmであるのに対し、ケース2、3は10cm程度であった。流量③では ϕ ケース1が9.4cm、ケース2、3が10cm以上となった。なお、

ケース 3 のマンホール損失は、流量②が 11.5cm、流量③が 10.9cm で、流量③の方が若干低い値となったが、これは $H/D = 1.2$ の場合のみの現象であり、図 8 から流量③のマンホール損失は、 $H/D = 1.3$ で 18cm 程度であることから、基本的には流量③ > 流量②となると判断できる。また、中間マンホール（落差なし）では、流量規模が大きいほど、管径が小さいほどマンホール損失は増加しているが、これは管径が小さい方が、マンホール（内径）との形状変化が大きくなるため、マンホール内部での水流の乱れも多くなるためと推察される。

- ② 中間マンホール（落差あり、ケース 4）では、落差なしのケース（ケース 2）と比較して、マンホール損失が大きく、流量②で最大 40cm 程度、流量③では 70cm 以上となった。なお、流量②では、下流端水位（ H/D ）が増加するとマンホール損失は低下する傾向が見られたが、これはマンホール内の水位が高くなると、マンホール内上方の水塊がその重量によって水流の乱れを抑制するためと推察される。
- ③ 会合マンホールでは、落差のあり（ケース 5）／なし（ケース 6）ともマンホール損失は中間マンホールよりも大きく、流量②で 10cm 以上、流量③で 40cm 程度となった。

マンホール損失 Δh は、流量規模が多いほど増加することから、損失 Δh の程度を流量規模別に整理する。流量②では、中間マンホール（落差なし）、会合マンホールともに最大で 10cm 程度であり、中間マンホールの落差ありの場合のみ最大で 40cm 程度となった。これが流量③になると、中間マンホール（落差なし）ではマンホール損失は増加するものの 15cm 程度であるのに対し、会合マンホールでは 40cm 程度、中間マンホール（落差あり）では 70cm 以上となるため、計画上注意が必要である。

4) マンホール損失係数 f の評価

- ① 中間マンホール（落差なし）では、流量②において、ケース 1 の f 値は下流端水位に関係なくほぼ一定で、ケース 2、3 は、下流端水位が増加すると f 値が減少する傾向が見られた。各ケースの f 値は、ケース 3 が 0.882、ケース 2 が 0.736、ケース 1 が 0.262 と、管径が小さいほど f 値が高くなった。これは、マンホール（内径）との形状変化が大きくなるため、マンホール内部での水流の乱れも多くなるためといえる。また、流量③では、下流端水位との相関は低くなり、いずれのケースも 0.18 ～ 0.40 の範囲に収まった。流量③で f 値が減少したのは、流量規模の増加により、マンホール内の水位が上昇するため、流水断面の上部の水塊が多くなり、これがマンホール底部の流水の乱れを抑制したものと考えられる。
- ② 中間マンホール（落差あり、ケース 4）の f 値は、落差なしのケース（ケース 2）よりも高く、流量②では 1.77 ～ 2.94、流量③では 1.60 程度であった。

- ③ 会合マンホールでは、流量②において、下流端水位が増加すると、落差なし（ケース 3）の f 値は微減傾向、落差あり（ケース 4）では逆に微増傾向となるものの下流端水位との相関は低く、両ケースとも f 値は 1.50 程度となった。また、流量③における f 値は 1.50 を上回った。

マンホール損失係数 f は、中間マンホール（落差なし）では、流量規模別にその値が異なり、流量②では最大 0.90 程度、流量③では最大 0.40 程度となった。一方、中間マンホール（落差あり）や会合マンホールにおける f 値は、流量規模の影響は少なく、少なくとも 1.50 以上となった。これは、一般的な流入・流出損失（ $0.5+1.0=1.5$ ）と同等程度の値である。

4. マンホール損失の原因と対策工の検討⁶⁾

(1) マンホール損失の原因

中間マンホール（直線型、流入部落差なし）を再現した水理模型実験の結果からマンホール内の流況を整理すると、図 9 の通りである。

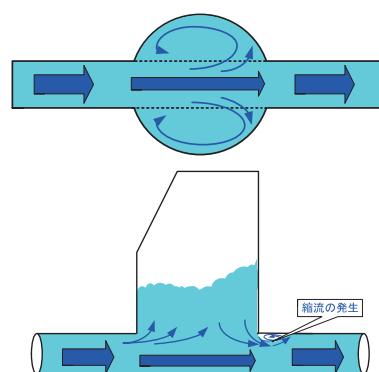


図 9 圧力管流れにおけるマンホール内の流況

マンホール内の水面は管頂よりも高く乱れた状態にあり、流出管口の方が高くなる。流入管口部からマンホール内へ流入した流れの大半は、インバートに沿って流出管口に達するが、流れの一部は左右に広がり、インバート上部を旋回し渦流を生じさせるとともに、上方に吹き上がった流れは流出管の上部壁面に衝突し、マンホール内水面の局所的な水面上昇の原因となっている。マンホール損失の原因は、上述した流入管からの流れがマンホール内で解放されることで生じる水流の乱れによるエネルギー損失と、マンホール内の水が流出管へ流入する際に発生する縮流による損失に大別される。この流出管口部での縮流は、マンホールとの接続部において管内へ流入する流水が接続部背面（底部を除く）で剥離し、渦流が発生する。このため、流水断面の一部が縮小されるとともに、渦流によるエネルギー損失が発生する。

(2) 対策工の検討

前項で整理した原因のうち、マンホール内の水塊から流出管

に流入する際に発生する縮流による損失については、対策工としてベルマウスが知られている³⁾。ベルマウスは、図-10に示すように、管口をラップ状に広げた形状で、ポンプの吸い込み口によく用いられるが、この場合、管内に生じる縮流の抑制効果に加えて、拡大形状による吸い込み部接近流速の低減により、ポンプ井内での流況を安定化させる目的がある。なお、ベルマウスの形状は、楕円を組み合わせたのが一般的である。



図-10 ベルマウスのイメージ

なお、ベルマウスは、流入管口に適用すると、マンホール内に流入する流れがベルマウス頂部の R 形状に沿って上方に吹き上がる現象を促進することになり、対策としては不適と考えられることから、流出管口にのみ適用するものとした。

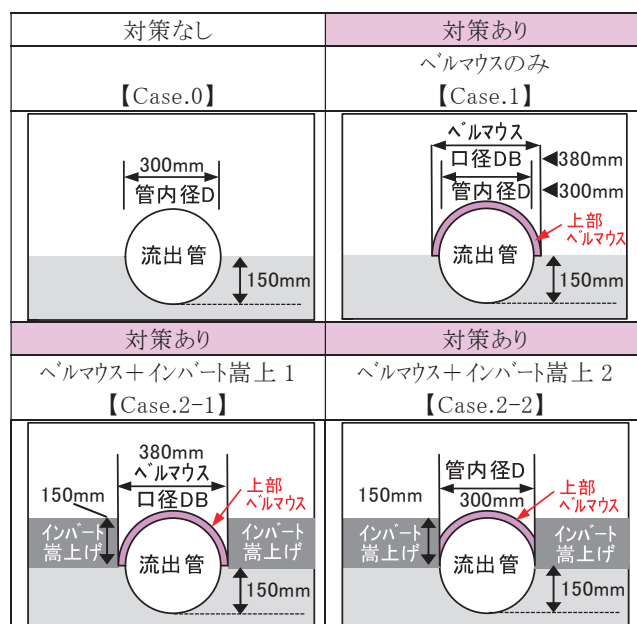
マンホール内での水流の乱れについては、管の半分の高さまでしかないインバートの高さを管頂程度まで嵩上げすることで、インバート内を直進する流線がインバートの上面で左右に広がる現象を防止することができるため、マンホール内の流況の乱れを改善することが期待できる³⁾。

マンホール損失対策の考え方を図-11に示す。

【対策なし】	対策なし	対策なし
【対策あり】 ベルマウス*のみ *下流管口上半分	対策なし	ベルマウス
【対策あり】 ベルマウス* *下流管口上半分 + インバート嵩上げ	対策なし	ベルマウス インバート嵩上げ

図-11 マンホール損失対策の考え方

本研究では、マンホール損失の低減を目的とした対策工として、図-11に示すように流出管口のベルマウス(上半分)と、ベルマウスにインバート嵩上げを組み合わせた形状を想定し、その効果の程度を水理模型実験により定量的に把握することとした。また、ベルマウスを設置する場合、嵩上げするインバートの幅は、ベルマウスの口径に合わせる場合と管内径に合わせる場合の2通りが考えられる。したがって、水理模型実験による検討ケースは、図-12に示す4形状とした。



* 図中の数値は水理模型実験の諸元(実物値)

図-12 マンホール損失対策の検討ケース

(3) 実験対象施設と再現範囲

実験対象とするマンホールは、表-3のケース2と同様に、中間マンホール(直線型)とし、1号マンホール(内径90cm)とした。流入管と流出管の口径は ϕ 300mm、管底高は同一である。また、模型の再現範囲は、3.(3)1) 模型の再現範囲と同一である。対策なしのインバートは、管径の1/2高(150mm)とし、対策ありのケースは、図-12に示す通りとし、ベルマウスの口径は ϕ 380mm、インバートの嵩上げ高は、流出管の管頂迄とした。また、模型の再現範囲は、マンホールと流入管、流出管の一部とした。対策工のCase.2-1とCase.2-2のインバートの再現については、全体を高くするのではなく、水路側に厚4cm(実物値)の壁を立ち上げる方法で行った。

(4) 実験条件等

流量条件、模型縮尺と相似則、マンホール損失 Δh 、ならびに損失係数 f の算定方法は、3.(2) 流量条件、(3) 実験方法に示した方法と同一である。

(5) 実験結果

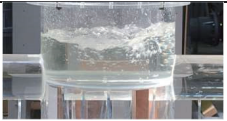
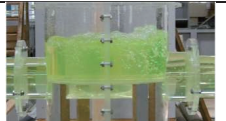
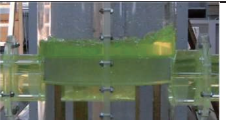
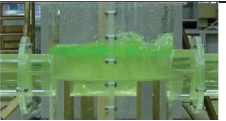
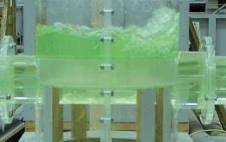
各ケースのマンホール損失 Δh および損失係数 f の計測結果、ならびに超過降雨時のマンホール内の流況を、表-7に、各ケースのマンホール損失 Δh の比較を、図-13に示す。

対策ありのケースのマンホール損失は、いずれの流量条件でも対策なしのケース(Case.0)よりも低く、Case.1 > Case.2-1 > Case.2-2の順に低い値となった。

超過降雨を想定した流量③では、対策なし(Case.0)のマンホール損失は16.1cmであったのに対し、流出管口の上部

表 7 マンホールの形状別のマンホール損失 Δh 、損失係数 f 値

* 下流端水深 $H/D=1.2$ 時の値、 H は下流端水位、 D は下流管径。

流量条件	項目	対策なし 【Case. 0】	対策あり		
			ベルマウスのみ 【Case. 1】	ベルマウス＋ インバート嵩上 1 【Case. 2-1】	ベルマウス＋ インバート嵩上 2 【Case. 2-2】
50mm/hr -50%相当 (流量①)	マンホール損失 Δh	2.9cm	1.9cm	0.9cm	0.4cm
	損失係数 f	0.547	0.359	0.172	0.080
	比率	(1.00)	(0.66)	(0.31)	(0.14)
50mm/hr -80%相当 (流量②)	マンホール損失 Δh	9.9cm	8.1cm	3.6cm	2.5cm
	損失係数 f	0.736	0.599	0.268	0.188
	比率	(1.00)	(0.81)	(0.36)	(0.25)
	(流況写真)				
75mm/hr -80%相当 (流量③)	マンホール損失 Δh	16.1cm	10.5cm	8.9cm	6.8cm
	損失係数 f	0.358	0.233	0.199	0.151
	比率	(1.00)	(0.65)	(0.55)	(0.42)
	(流況写真)				

ベルマウスを設置したケース（Case.1）では 10.5cm と対策なしの 65% 程度まで低減し、さらにインバート幅を流出管の内径に合わせて管頂部まで嵩上げたケース（Case.2-2）では 6.8cm と対策なしの 42% まで低減した。

図 13 に示すように流量②ではベルマウスの効果よりもインバート嵩上げの効果の方が高いのに対し、流量③ではマンホール損失低減効果のほとんどがベルマウスによるものであり、流量条件によって対策工の効果に違いが認められた。これは、流量規模が増加すると、マンホール内の水位も高くなるため、インバート嵩上げによるマンホール内の水平的な流れの制御の影響範囲が限定的となることに加え、流出管内の流速も増加するため、ベルマウスによる縮流軽減効果が強く表れたものと考えられる。

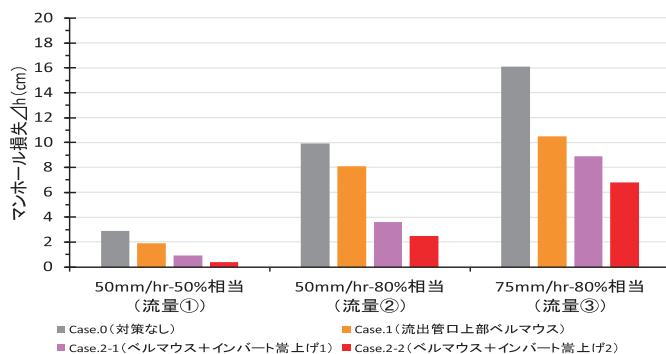


図 13 各ケースのマンホール損失の比較

5. 流出解析シミュレーションによる評価

(1) 概要

実際の下水道管路網において、マンホール損失の有無や程度が、降雨時にどのような影響を与えているかを把握するために、水理模型実験で得られた知見を参考に、マンホール損失を流出解析モデルに反映させて、シミュレーションを行った。

ケーススタディとして採用したモデル地区は、過去に浸水実績を有する大都市域の流域で、流域面積は約 10ha、流域内の高低差は約 12m である（表 8 参照）。

表 8 モデル流域の概要

流域面積	9.61ha
管路延長	2,494m
スパン数	130 スパン
管径分布	φ 250～1200mm

(2) シミュレーション条件

1) 基本条件

流出解析シミュレーションは、「XP-SWMM」を使用した。対象降雨は、50mm/hr ならびに 75mm/hr 相当の計画降雨とし、中央集中型ハイエトを設定した。降雨強度式は 3. (2) 流量条件等に示した通りである。また、降雨損失は、流出係数モデルとし、流出係数 $C=70\%$ とした。なお、流域の最下流は幹線に接続されるが、流出先の水位条件はフリーとした。

シミュレーションケースは、以下の 3 ケースである。

- ①マンホール損失なし
- ②マンホール損失考慮（標準インバート）
- ③マンホール損失考慮（対策インバート）

なお、標準インバートとは、下流管径の 1/2 高のインバート（表－1 参照）を示し、対策インバートとはマンホール損失を低減するための対策を施したインバート形状を示す。

2) マンホール損失の反映方法

流出解析ソフトに入力するマンホール損失については、XP-SWMM が管路（リンク）の入口部と出口部にエネルギー損失を入力することが可能なため、マンホール損失 f の値を、上流管の出口部、下流管の入口部の 2 つに分割して入力した。

3) マンホール損失係数 f 値の想定

マンホール損失係数 f の値は、水理模型実験の結果を参考に、中間マンホール（落差なし）については管径別の値を想定した。また、中間マンホール（落差あり）については、本モデル流域が比較的高低差を有し、上流管に背水影響が生じるまでは、上流部に損失の影響が及ばない管路縦断形状であることから、中間マンホール（落差なし）と同等の f 値とした。

一方、会合マンホールについては、水理模型実験の結果を参考に、形状によらず $f=1.600$ と設定した。なお、曲がり部についても、会合マンホールと同程度の f 値と想定した。

また、マンホール損失低減対策後のケース（対策インバート）におけるマンホール損失は、表－7 に示した水理模型実験の結果から、ベルマウス+インバート嵩上 2 のケースが、標準インバートの 50% 以下の f 値となっていることから、標準インバートの f 値の 50% 相当として想定した。

表－9 にシミュレーションで考慮したマンホール損失係数 f 値の一覧を示す。

表－9 マンホール損失係数 f 値の設定一覧

マンホール形式		管径(mm)	マンホール損失なし	マンホール損失考慮	
				標準インバート	対策インバート
中間	落差なし	φ 250	($f=0.00$)	$f=1.00$	$f=0.50$
		φ 300	($f=0.00$)	$f=0.80$	$f=0.40$
		φ 350	($f=0.00$)	$f=0.60$	$f=0.30$
		φ 400	($f=0.00$)	$f=0.40$	$f=0.20$
		φ 450	($f=0.00$)	$f=0.30$	$f=0.15$
		φ 500 以上	($f=0.00$)	$f=0.20$	$f=0.10$
	落差あり		($f=0.00$)	同上	同上
	曲がり		($f=0.00$)	$f=1.60$	$f=0.80$
会合			($f=0.00$)	$f=1.60$	$f=0.80$

* マンホール損失考慮（標準インバート）の f 値は、表－6 に示す水理模型実験の結果のうち f 値が高位となる 50mm/hr-80% の結果から、安全を見て丸めた値。中間マンホール（落差なし）では、φ 250mm の $f=0.262$ 、φ 300mm の $f=0.736$ 、φ 450mm の $f=0.882$ から、管径をパラメータとした関係式（ $f=-0.0031 \cdot D+1.6646$ 、 f : マンホール損失係数、 D : 管径 (mm)、相関係数 $R^2=0.9998$ ）を求め、この関係式から管径を入力して求めた値に、安全を見て丸めた数値。

(3) シミュレーション結果

1) 浸水発生量

マンホール損失を考慮した浸水シミュレーションの結果を表－10 に示す。マンホール損失を考慮したケースでは、マンホール損失を考慮しないケースと比較して、浸水発生箇所数、溢水量ともに増加した。また、標準インバートで想定したマン

ホール損失を 50% 程度に減じるとした対策インバートでは、浸水発生箇所数で 20% 程度、溢水量で 25% 程度減少した。

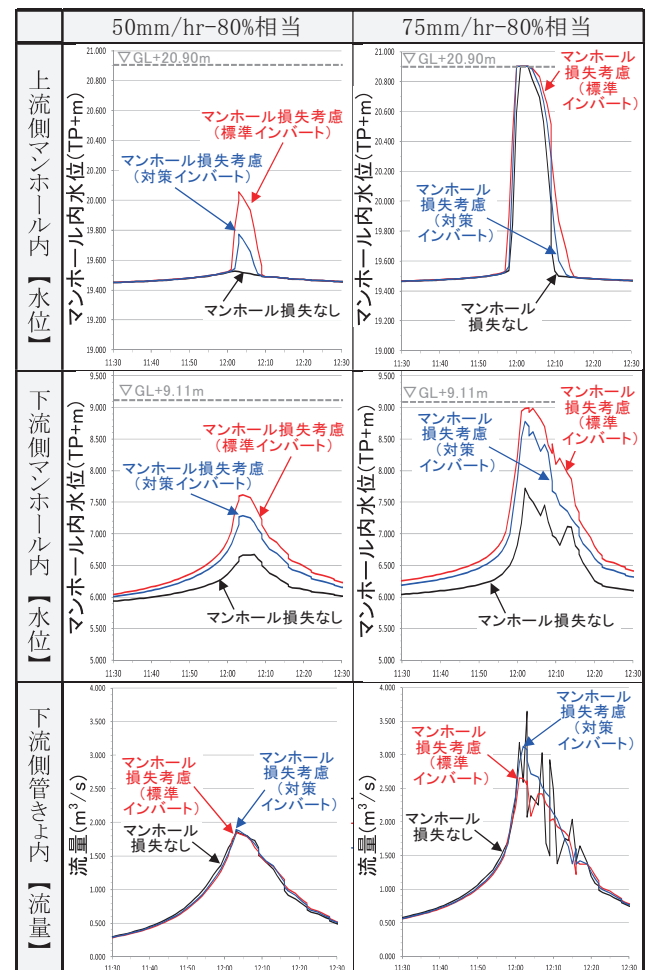
表－10 マンホール損失を考慮したシミュレーション結果

流量条件 (降雨規模)		マンホール 損失なし	マンホール損失考慮	
			標準インバート	対策インバート
50mm/hr -80%相当	溢水 ノード数	2 箇所 <全体の 1.5%>	5 箇所 <全体の 3.8%>	4 箇所 <全体の 3.1%>
	(浸水発生 箇所数)	(1.00)	(2.50)	—
	—	—	(1.00)	(0.80)
	溢水量	2~20m ³ <合計 22m ³ >	1~26m ³ <合計 43m ³ >	2~23m ³ <合計 31m ³ >
	(1.00)	(1.92)	—	(0.73)
75mm/hr -80%相当	発生時間	4~8 秒	4~10 秒	3~9 秒
	溢水 ノード数	22 箇所 <全体の 16.8%>	38 箇所 <全体の 29.0%>	31 箇所 <全体の 23.7%>
	(浸水発生 箇所数)	(1.00)	(1.73)	—
	—	—	(1.00)	(0.82)
	溢水量	2~73m ³ <合計 386m ³ >	1~80m ³ <合計 647m ³ >	1~77m ³ <合計 494m ³ >
	(1.00)	(1.68)	—	(0.76)
	発生時間	3~16 秒	2~19 秒	2~17 秒

* 溢水量 1m³ 以上となるノードを集計

2) 水位および流量

マンホール損失を考慮したシミュレーション結果からマンホール内水位と管きよ内流量を抽出したものを図－14 に示す。



図－14 マンホール損失を考慮したシミュレーション結果（マンホール内水位・管きよ内流量）

水位は、「マンホール損失考慮（標準インバート）」＞「マンホール損失考慮（対策インバート）」＞「マンホール損失なし」となっており、浸水発生箇所と溢水量と同じ傾向となった。

一方、下流側の流量（ピーク値）は、50mm/hr-80% 相当では各ケースの差異は見られなかったが、75mm/hr-80% 相当では、「マンホール損失なし」＞「マンホール損失考慮（対策インバート）」＞「マンホール損失考慮（標準インバート）」となった。

(4) 考察

シミュレーションの結果から、マンホール損失を考慮したケースは、マンホール損失を考慮しないケースよりも、浸水発生箇所数、溢水量ともに増加することがわかった。また、標準インバートよりも対策インバートの方が、浸水発生箇所数、溢水量ともに減少した。これらの結果は、管内の動水位の傾向とも一致することから、実際の浸水発生現象は、マンホール損失の影響を考慮する必要があること、また、マンホール損失の低減を図ることで、浸水対策に寄与しうることが示唆された。

一方、下流側の流量は、マンホール損失を考慮したケース（標準インバート）は、マンホール損失を考慮しないケースより少なくなることから、実際の管路施設では、設計上見込んでいないマンホール部での流出抑制効果が生じていると推察され、放流規制を受けている場合等では、その許容量を有効に活用できていない可能性がある。また、対策インバートの方が標準インバートよりも下流側の流量が若干増加する傾向が認められたことから、マンホールにおける損失低減対策を実施する場合は、下流側への流出量（ピーク）が増加する可能性があることに留意し、その影響を評価することが必要となる。

6. 浸水対策としての活用方法

(1) マンホール損失を考慮すべき区域

浸水の発生原因は、降雨規模や特性、雨水流出係数、管きよの流下能力（放流規制を含む）、放流先河川からの背水影響等に加えて、地形条件が重要となる。

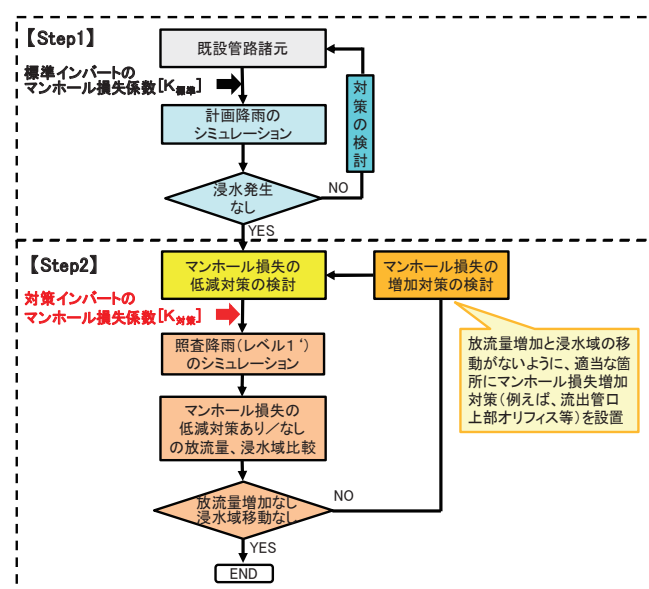
マンホール損失が浸水の原因となる可能性がある区域は、超過降雨や背水影響等で管きよが満管となり、マンホール損失の累積により動水位が上昇するような区域である。具体的には、河川沿いや台地部等で土かぶりの浅い路線が連続する区域であるといえる。

(2) マンホール損失低減対策の検討方法

整備水準の範囲内の降雨では、下水道管きよ内に流入した雨水の全量を速やかに放流先河川等に排除することが基本であるが、整備水準以上の降雨規模の場合、流域内での浸水を許容せざるを得ない。マンホール損失の低減対策を行った場合、対策なしと比較して動水位の上昇が抑えられるため、浸水の発生箇所や溢水量は減少するが、下流側でのピーク流

量が増加する可能性がある。特に、下流側の幹線の流下能力に問題がある場合や放流先河川で放流規制を受けている場合等では留意が必要である。加えて、浸水域の移動が生じないことも重要である。

以上を踏まえて、マンホール損失の低減対策を活用した浸水対策として、図-15 に示す 2 段階の検討フローを提案する。



* 照査降雨の定義は雨水管理総合計画策定ガイドライン(案)⁷⁾による

図-15 マンホール損失低減対策を活用した浸水対策の検討フロー

【Step1】標準インバート相当のマンホール損失を再現した計画降雨規模のシミュレーションを実施し、浸水発生の有無を確認する。ここで、浸水が発生する場合は、マンホール損失の有無での挙動を確認し、その対応策を検討する。

【Step2】対策対象地区内で、マンホール損失低減対策を実施した場合を想定したシミュレーションを行う。この場合の対象降雨は、対象流域内での浸水発生が再現できる規模相当の超過降雨（照査降雨レベル1'⁷⁾）とする。シミュレーション結果から、放流量の増加や浸水域の移動が見られた場合には、その対策として流域内の適当な箇所にマンホールの流出管口の上部にオリフィスを設置する等、マンホール損失の増加対策を組み合わせ、再度シミュレーションで確認する。

管きよの設計は、流速は下流に行くに従い漸増させるのが一般的²⁾である。しかし、雨水管の設計として、上流域等で地表勾配設計を行い流速が増加しても、下流に低流速区間を設置して、流達時間を調整することで、標準的な設計と同等の雨水流出量とする設計法（自在流速選択方式）が報告⁸⁾されている。本提案は、この流速制御の手法として、マンホールの活用に着目したものである。

(3) 超過降雨等における流域全体での浸水被害最小化

整備水準を上回る規模の降雨では、浸水発生を許容した上で、地域での浸水被害を最小化させることが重要となる。浸水被害の大小は、地域特性と浸水深さの影響が大きいことか

ら、下水道施設の流下能力を上回る雨水については、地域内で分担して地表面貯留（浸水）することで、許容浸水深さ以下にできると考えられる。マンホール損失をコントロールすることで、流域内での浸水被害を最小化させる手法の概念を図-16に示す。また、マンホール損失のコントロールによる浸水被害最小化に向けた検討手法の例を図-17に示す。評価対象区域の地域特性等を考慮して許容浸水深を設定した上で、全ての地区で許容浸水深となるように流域内での最適化を図る。

このように、マンホール損失を積極的にコントロールすることで、流域全体の浸水被害最小化に向けた検討が可能となり、既存ストックを最大限活用した浸水対策の実現に寄与できる。

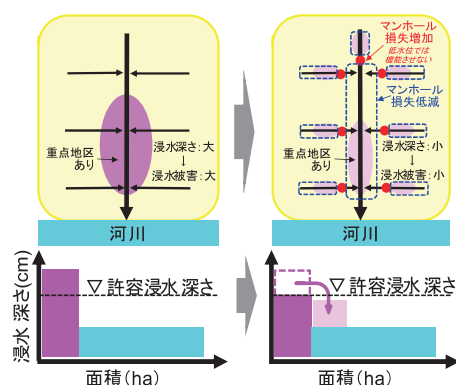
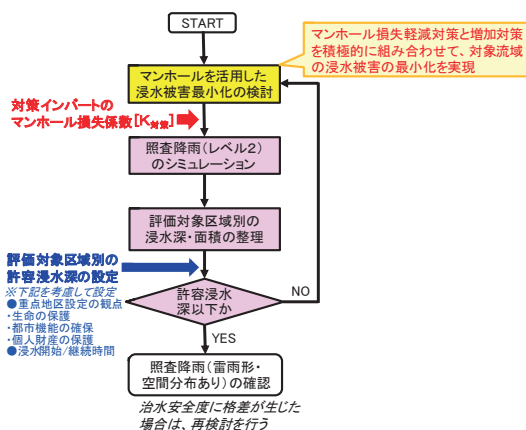


図-16 マンホール損失のコントロールによる浸水被害最小化の考え方



* 照査降雨の定義は雨水管理総合計画策定ガイドライン(案)⁷⁾による

図-17 マンホール損失のコントロールによる浸水被害最小化の検討手法の例

7. おわりに

本研究では、マンホール（内径 90cm）と流入管と流出管の一部を再現した水理模型実験により、マンホール損失の定量化を試みた。その結果、マンホール損失は、中間マンホール（直線、落差なし）では、75mm/hr-80% 相当とした流量規模で、約 10cm、中間マンホール（直線、落差あり）では、70cm 以上となった。一方、会合マンホールでは、40cm 程

度となった。

次に、マンホール損失の低減に向けた対策工の検討・評価を行った。その結果、マンホール損失の低減対策としては、流出管口の上部ベルマウス単独でも効果があるが、インバート嵩上げを併用した方がより効果的であり、また嵩上げするインバートの幅は、ベルマウスの口径ではなく流出管の内径に合わせるのが望ましいこと、また、流量規模が増加すると損失低減に対するベルマウスの寄与率が増加することがわかった。

さらに、マンホール損失を考慮したシミュレーション結果から、マンホール損失を考慮したケースは、マンホール損失を考慮しないケースよりも、浸水発生箇所数、溢水量ともに増加することがわかった。また標準インバートよりも対策インバートの方が、浸水発生箇所数、溢水量ともに減少した。これにより、実際の浸水発生現象は、マンホール損失の影響を考慮する必要があること、また、マンホール損失の低減を図ることで、浸水対策に寄与しうることが示唆された。

最後に、マンホール損失の低減対策を活用した浸水対策の検討フローを提案した。マンホール損失を積極的にコントロールすることで、流域全体の浸水被害最小化に向けた検討が可能となり、既存ストックを最大限活用した浸水対策の実現に寄与できる。

謝辞：本研究は、東京都下水道サービス株式会社からの調査業務の成果を活用しました。ご支援・ご指導いただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説 前編、2009 年版、公益社団法人日本下水道協会
- 2) 土木学会：水理公式集、pp.373-385、1999
- 3) 荒尾慎司、楠田哲也：エネルギー損失の軽減を目的としたマンホール構造の改善に関する実験的研究、環境工学研究論文集、第 34 巻、pp.259-266、1997
- 4) 荻原廣、井藤元暢、高部一彦：超過降雨対策を目的としたマンホール損失に関する実験的研究、第 53 回下水道研究発表会講演集、pp.449-451、2016
- 5) 管きよ再構築設計の手引き、平成 26 年 9 月、東京都下水道サービス株式会社
- 6) 荻原廣、井藤元暢、高部一彦：圧力管流れにおけるマンホール損失の低減に向けた実験的研究、第 54 回下水道研究発表会講演集、pp.369-371、2017
- 7) 雨水管理総合計画策定ガイドライン（案）、平成 28 年 4 月、国土交通省水管理・国土保全局下水道部
- 8) 河合宏之、菊池栄、井藤元暢、中村茂：管路勾配の変更（浅層埋設）とバイパス管の貯留利用、月刊下水道、Vol.23/No.2、pp.18-23、2000