

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

九州共立大学 正会員 荒尾慎司

九州大学 フェロー 楠田哲也

1. はじめに

近年、下水道を含みうる海外の流出解析モデル (MOUSE、InfoWorks、SWMM 等) を適用した事例が数多く見られるようになってきている。洪水氾濫解析では地表面流の計算精度向上も重要であるが、豪雨下ではマンホール等から雨水が溢れ地表面に流出することになるため、より現実に近いモデルを構築するには雨水管網の流下能力を適正に評価する必要がある。それには、雨水管の摩擦損失とマンホール部の形状損失をより正確にモデルに組み込まなければならない。しかし、海外で開発された流出解析モデルでは、マンホール部の形状損失を計算する際にモデル毎に異なる式形を与えており、使用するモデルによって計算結果が異なっている。また、国内で開発されたモデルでも、雨水管はモデル化されているものの、マンホールでの形状損失までは考慮されてないといった問題点がある。そこで、本論文では、雨水管をモデル化する際にマンホール部の損失を容易に組み込めるように、流入・流出管がそれぞれ 1 本ずつ接続する 2 方向接合円形落差マンホールを対象として、管路とマンホールに関する種々の構造要素を考慮したエネルギー損失係数の推定式を提案する。

2. 2 方向接合円形落差マンホール部の形状損失を定式化する際に考慮すべき変数

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エネルギー損失係数 K_E (または圧力損失係数 K_P) を定式化するには、次式のように 5 個の無次元数とマンホールの底面形状を考慮しなければならない (図 - 1 参照)。

$$K_E = f\left(\frac{b}{D_o}, \frac{D_u}{D_o}, \frac{y}{D_o}, \frac{S}{D_o}, \frac{\theta}{180}, \text{benching形状}\right) \quad (1) \quad K_P = K_E + 1 - \left(\frac{D_o}{D_u}\right)^4 \quad (2)$$

3. 従来の研究

表 - 1 に示すように、マンホール部の損失係数の算定式は Sangster ら、Lindvall、Mills ら、Hare、Parsell、FHWA (Federal Highway Administration) 等により提案されている。表 - 1 中のマンホールと管路に関する変数の定義を図 - 1 に示す。Sangster らの式は、これ以後の研究での検証用となっているが、(1) 式の無次元数の中で y/D_o 、 S/D_o は考慮されていない。Mills らの式は非常に単純で、この式は実際利用できない。Hare の式では y/D_o 、 S/D_o は考慮されておらず、さらに 90 度曲げ接合では D/D_o (添字 l は横流入管に関するもの) も考慮されていない。Lindvall は、実験結果を基にスケールの大きな渦の発生による損失増大分を考慮した式を提案した。しか

表 - 1 マンホール部の圧力損失係数の比較 (O'Loughlin と著者らによる)

研究者	Missouri Charts Sangster ら 1961	Lindvall 1984	Mills ら 1998	Hare 1990	Parsell 1992	FHWA 1996	著者らの 提案式 2005
マンホール損失の算定式で 考慮されている変数等	2 方向, 3 方向 管底接合 $Q_u/Q_o, Q_l/Q_o,$ $b/D_o, D_u/D_o,$ D_l/D_o	2 方向 $b/D_o, y/D_o$	2 方向 $Q_m/Q_o,$ Q_g/Q_o	流入管の数に 制限無し 管頂接合 $Q_l/Q_o, D_l/D_o,$ θ	2 方向 管頂接合 $D_u/D_o,$ $y/D_o, \theta$	流入管の数に 制限無し $Q_l/Q_o, b/D_o,$ $D_l/D_o, y/D_o,$ $S/D_o, \theta$	2 方向 管底接合から 管頂接合まで 段差接合 $b/D_o, D_u/D_o,$ $y/D_o, S/D_o, \theta$
マンホールの底面形状	flat floor	half benching	flat floor	flat floor	flat floor	flat floor	half benching
計算条件 ($b/D_o=2.0$)	圧力損失係数 K_P の比較						
直管 流れ	$D_u/D_o=0.833(y/D_o=0.5)$	—	—	—	—	-0.96	—
	$D_u/D_o=0.833(y/D_o=1.5)$	-0.85	0.0	-0.58	-0.40	-0.85	-0.47(渦)
	$D_u/D_o=0.833(y/D_o=3.0)$	-0.85	0.0	-0.58	-0.58	-0.74	-0.75
	$D_u/D_o=1.0(y/D_o=0.5)$	—	—	—	—	0.07	—
	$D_u/D_o=1.0(y/D_o=1.5)$	0.12	0.21(渦)	0.5	0.3	0.13	0.35(渦)
	$D_u/D_o=1.0(y/D_o=3.0)$	0.12	0.09	0.5	0.3	0.19	0.18
90 度 曲 げ 接 合	$D_u/D_o=1.2(y/D_o=0.5)$	—	—	—	—	0.56	—
	$D_u/D_o=1.2(y/D_o=1.5)$	0.72	—	0.5	0.91	0.59	0.73(渦)
	$D_u/D_o=1.2(y/D_o=3.0)$	0.72	—	0.5	0.91	0.63	0.62
	$D_u/D_o=0.833(y/D_o=1.5)$	1.68	—	0.0	2.30	0.64	1.51
	$D_u/D_o=0.833(y/D_o=3.0)$	1.68	—	0.0	2.30	1.52	1.65(渦)
	$D_u/D_o=1.0(y/D_o=1.5)$	1.62	—	0.5	2.30	0.99	1.44
90 度 曲 げ 接 合	$D_u/D_o=1.0(y/D_o=3.0)$	1.62	—	0.5	2.30	1.50	1.53(渦)
	$D_u/D_o=1.2(y/D_o=1.5)$	1.55	—	0.5	2.30	2.07	1.32
	$D_u/D_o=1.2(y/D_o=3.0)$	1.55	—	0.5	2.30	1.90	1.38(渦)

し、本式は、直管流れて流入・流出管の管径が同一の場合にしか適用できない。FHWA は、Hydraulic Design Manual (1996 年) をインターネット上で公開している。(1) 式の変数の中で段差以外の変数は全て考慮されている。しかし、Lindvall が指摘したスケールの大きな渦による損失増加分は考慮されていない。O'Loughlin は、Parsell の式が他のいずれの式よりも Sangster らの計算値と比べて適切であるとしているが、必ずしもそのようになっていないように思われる。以上のように、従来の研究でも、(1) 式の変数を全て満足する式形は未だ見られない。

4. 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

ここではまず、日本に適用することを目的として、マンホール底面に管内径の 1/2 に相当するインバートを有していること (half benching) を前提とする。 b/D_o 、 θ 及び D_o/D_u については、FHWA が 1996 年に提案した式の一部を利用する。また、マンホール内のスケールの大きな渦の発生に伴う損失増加分として、Lindvall が提案した式の第 3 項目を採用し、流入・流出管の接続角度の違いに伴い損失係数が極大となる水深の変化も表現できるように工夫した。以上の 2 つの式の係数のいくつかは若干修正している。さらに、従来より問題となっている流入・流出管の段差比 S/D_o については、九州共立大学でこれまでに得られた実験結果に基づき定式化した。以上の考えた方に基づき定式化したものを次式に示す。

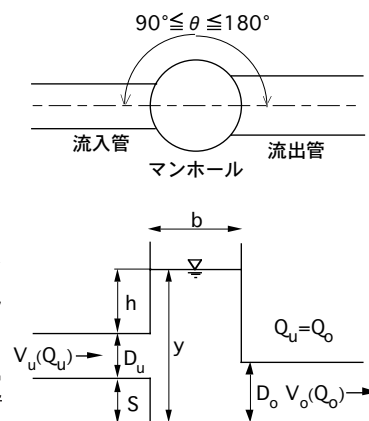


図 - 1 変数の定義

$$K_E = \left[0.09 \left(\frac{b}{D_o} \right) (1 - \sin \theta) + 1.3 \left(\frac{b}{D_o} \right)^{0.15} \sin \theta \right] \left(\frac{D_o}{D_u} \right)^{3.2} + 0.5 \left(1 - 0.5 \sin \theta \right) \left[1.1 + \tanh \left(\frac{b}{D_u} - 3.0 \right) \right] \exp \left[-15 \left\{ \ln \left(\frac{h + D_u}{1.5 D_u \left(3.0 - \frac{2\theta}{180} \right)} \right) \right\}^2 \right] \left(\frac{h + D_u}{D_u} \geq 1.0 \right) + 2.1 \left(\frac{S + D_u - D_o}{D_u} - 0.2 \right) \left(\frac{D_o}{D_u} \right)^3 (1 - \sin \theta) \left(0.2 \leq \frac{S + D_u - D_o}{D_u} \text{ and } \frac{S}{D_o} \leq 1.0 \right) \quad (3)$$

ここに、 h は上流管内壁頂部から水面までの距離である (図 - 1 参照)。なお、(3) 式で段差比 $((S + D_u - D_o) / D_u)$ が 0.2 より小さい場合は、段差がない場合との損失係数の差は小さいため、段差の影響を無視する。段差比 S/D_o が 1 より大きくなると、九州共立大学での実験の範囲内では損失係数はほぼ一定値になっているので、段差比 $S/D_o = 1$ の場合と同じ値とする。

5. (3) 式の計算値と実測値の比較

(3) 式による計算値 (実線) と九州共立大学での実測値との比較を図 - 2 から 4 に示す。これらの図やその他の計算例については、紙面上の都合もあり、講演時に説明する。提案式では、いくつかの流れと構造上の条件を除けば、30% 以内の誤差で 2 方向接合円形落差マンホール部の損失係数を推定できるものとする。

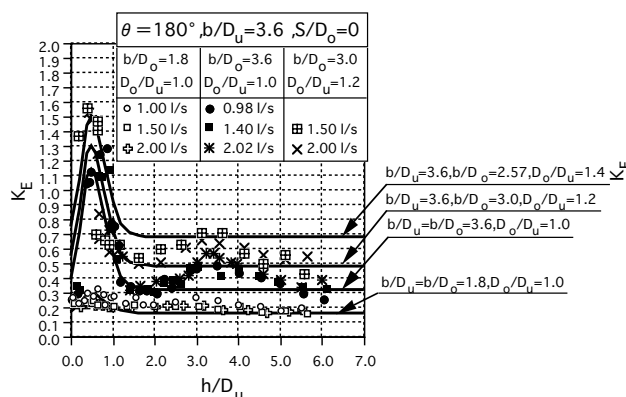


図 - 2 計算値と実測値
(180度、 $S/D_o = 0$)

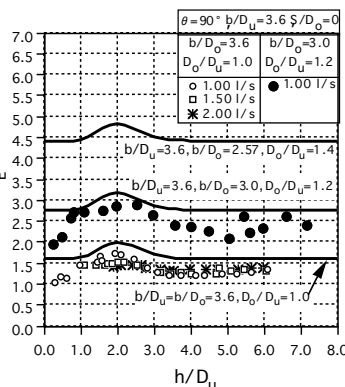


図 - 3 計算値と実測値
(90度、 $S/D_o = 0$)

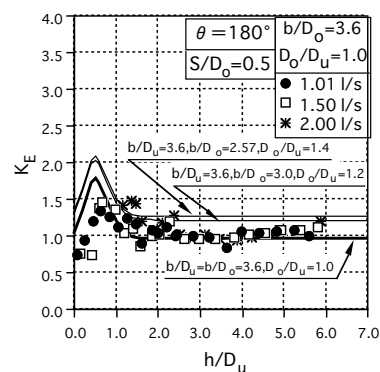


図 - 4 計算値と実測値
(180度、 $S/D_o = 0.5$)