

3 方向接合円形落差マンホールにおけるエネルギー損失係数の算定式の検討

松江工業高等専門学校 正会員 ○荒尾慎司, 長岡技術科学大学 非会員 金村 昂
J-POWER 電源開発(株) 正会員 平塚俊祐, 九州大学 名誉会員 楠田哲也

1. はじめに

マンホールを介して接続される雨水管の流下能力の評価には雨水管での摩擦損失とマンホールでの形状損失を組み合わせる計算しなければならない。これまで国内外で検討されてきたマンホールでのエネルギー損失や圧力損失の算定式においてはマンホールと管路に関する構造要素の適用範囲に制限があった¹⁾。そこで著者らは、道路のT字路交差点下に設置される3方向接合円形落差マンホールを対象に、管内径、管内流量、流入・流出管の接合角度および流入・流出管の落差を種々変化させた実験を行うことで、3方向接合円形落差マンホールのエネルギー損失特性を明らかにしてきた²⁾。さらに、実験結果を基に水理学的要因と種々の構造要素を考慮したエネルギー損失係数の算定式を開発してきた³⁾。対向する2本の流入管が接続するマンホールにおいては、流出管と管頂接合で接続する場合、著者らの算定式で計算値は実測値をほぼ再現できるが、流入管と流出管との間に落差を有する場合、管内径等の条件によっては計算値が実測値を必ずしも再現できていなかった。

そこで、本報告では著者らが既に開発している計算式における落差に関する無次元数に着目し、これを改良することにより改良式の適合性向上を実験により検証する。

2. 既往研究成果と課題

3方向接合円形落差マンホールにおけるエネルギー損失係数 K_{ei} の算定式(従来の式と呼ぶ)を式(1)~式(14)に示す。算定式中の D_i , D_j は流入管の管径, D_3 は流出管の管径, θ_i , θ_j は流入・流出管の水平面接合角度, S_i , S_j は流入・流出管の落差を示している。 C_p は突入流に関する係数(すべての管が管水路流れの場合, $C_p=1$), C_B はマンホールの底面形状に関する係数(管径の1/2のインバートが設置されている場合, $C_B=0.95$)である。 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は流入・流出管の接合角度及び落差に関する補正係数である。

本式では、流入・流出管の間の落差がない場合(管頂接合)においては2本の流入管の接合角度が $90^\circ \leq \theta_i, \theta_2 \leq 180^\circ$ の範囲で、2本の流入管のいずれも流出管との間に落差がある場合は、一方の流入管の接合角度が 180° (固定), もう一方の接合角度が $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ の範囲で計算可能である。しかし、2本の流入管が対向する場合、流出管との間の落差を変化させたときに式(1)による計算値が実測値を再現できないことがあるため、式の改良が必要

となった。

$$K_{ei} = K_0 C_d C_Q C_P C_B + C_{Di} + C_{Dj} + C_{Si} + C_{Sj} \quad (1)$$

$$[(i, j) = (1, 2) \text{ or } (2, 1), \quad C_d = 1 (\text{管水路流れ})]$$

$$K_0 = 0.702 \left(\frac{b}{D_3} \right)^{0.63} \quad (2)$$

$$C_Q = \alpha_1 \left(\frac{Q_i}{Q_3} - 0.5 \right) + 0.4 \quad [0.5 \leq Q_i/Q_3 \leq 1] \quad (3)$$

$$C_Q = \alpha_2 \left(0.5 - \frac{Q_i}{Q_3} \right) + 0.4 \quad [0 \leq Q_i/Q_3 < 0.5] \quad (4)$$

$$C_{Di} = \alpha_3 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_i} \right)^4 - 1 \right\}^{1.45} \left(\frac{Q_i}{Q_3} \right)^{1.75} + \alpha_4 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_i} \right)^4 - 1 \right\}^{0.89} \left(\frac{Q_i}{Q_3} \right)^{2.5} \quad (5)$$

$$C_{Dj} = \alpha_5 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_j} \right)^4 - 1 \right\}^{0.3} \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^{0.28} + \alpha_6 \left\{ \left(\frac{D_3}{D_j} \right)^4 - 1 \right\}^{0.95} \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^{3.5} \quad (6)$$

$$C_{Si} = 0.35 \left(\frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} - 0.2 \right) \left(\frac{Q_i}{Q_3} \right)^3 \quad [0.2 \leq \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} < 1.2] \quad (7)$$

$$C_{Sj} = 0.20 \left(\frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} - 0.2 \right) \left(1 - \frac{Q_i}{Q_3} \right)^3 \quad [0.2 \leq \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} < 1.2] \quad (8)$$

$$\alpha_1 = 1.1032 - 1.494(1 - \sin \theta_i) \left(1.2 - \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} \right) \quad (9)$$

$$\alpha_2 = -0.2232 - 1.6(1 - \sin \theta_j) \left(1.2 - \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_3 = 0.17(1 - \sin^2 \theta_i) \left(1.2 - \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} \right) \quad (11)$$

$$\alpha_4 = 1.408 \left\{ 1 - \cos^2 \theta_i \left(1.2 - \frac{S_i + D_i - D_3}{D_i} \right) \right\} \quad (12)$$

$$\alpha_5 = 0.35(1 - \sin \theta_i) \sin \theta_j \left(1.2 - \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} \right) + 0.35 \left(\frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} - 0.2 \right) \quad (13)$$

$$\alpha_6 = \left\{ -0.6 + 0.6(1 + 1.5 \sin \theta_i) \sin \theta_j \right\} \times \left(1.2 - \frac{S_j + D_j - D_3}{D_j} \right) \quad (14)$$

3. 解析方法

本研究では、式(3)～式(14)に含まれる $\frac{S_i+D_i-D_3}{D_i}$ 及び

$\frac{S_j+D_j-D_3}{D_j}$ の項がそれぞれ片側の落差と管径しか考慮してい

ないことに着目し、両側の段差と管径を考慮するため $\frac{S_i+D_i-D_3}{D_i}$ を $|\frac{S_i+D_i-S_j-D_j}{D_i}|$ (絶対値)、 $\frac{S_j+D_j-D_3}{D_j}$ を

$|\frac{S_i+D_i-S_j-D_j}{D_j}|$ (絶対値) とした。

2本の流入管が対向する $\theta_1=\theta_2=90^\circ$ の条件下で上記の改良を行った場合、式(9)～式(12)における $\alpha_1\sim\alpha_4$ は管径や落差が変化しても下記のように常に一定値をとる。

$$\alpha_1 = 1.1302, \alpha_2 = -0.2232, \alpha_3 = 0.0, \alpha_4 = 1.408$$

改良式では α_5 と α_6 が変化することになる。

4. 改良式の評価方法と考察

表-1は検討を行う33タイプの構造上の変数をまとめたものである。これら33タイプのエネルギー損失係数 K_{e1}

表-1 構造上の変数

	D1(cm)	D2(cm)	D3(cm)	S1(cm)	S2(cm)		D1(cm)	D2(cm)	D3(cm)	S1(cm)	S2(cm)	
Type A1	5	5	6	1	1	Type C1	4	5	6	2	8	
Type A2				3.5		Type C2				4		
Type A3				6		Type C3				8		
Type A4				11		Type C4				2		4
Type A5				3.5		Type C5				2		8
Type A6				6		Type C6				9		8
Type A7				6		Type C7				6		8
Type B1	3	3	6	3	3	Type D1	3	5	6	3	7	
Type B2				4.5		Type D2				4		
Type B3				6		Type D3				5		
Type B4				10		Type D4				9		
Type B5				4.5		Type D5				3		4
Type B6				6		Type D6				3		5
Type B7				6		Type D7				3		8
Type B8				10		Type D8				9		8
					Type D9	6	7					
					Type D10	5	5					
					Type D11	8	5					

及び K_{e2} の66タイプについて実測値、従来の式及び改良式による計算値との比較を行い、改良式を評価する。

(1) 改良式の評価方法

改良式と従来の式により計算したエネルギー損失係数の結果を基に、両者の一致度を確認するため、横軸をエネルギー損失係数の実測値、縦軸を計算値として得られた決定係数 R^2 と原点を通る一次関数の傾き a を表-2に整理した。なお、Type D1～D11については紙面の都合上割愛した。表-2の改良式に対する評価を下記の7種に分類した。なお、改良式の評価は降雨時に生起する可能性が高い $Q_2/Q_3=0.2\sim0.8$ の範囲で行った。

表-3は表-2を基に従来の式及び改良式による計算値と実測値の一致状態とそのタイプ数をまとめたものである。

- ・改良後よくなった (ほぼ一致した) $\Rightarrow \bigcirc\bigcirc$
- ・改良後よくなったがもう少し $\Rightarrow \bigcirc$
- ・改良前, 改良後どちらもほぼ合っている $\Rightarrow \odot$
- ・改良後変化はしたがずれの程度が同じ $\Rightarrow \triangle$
- ・改良前, 改良後どちらもややずれている $\Rightarrow \triangle\triangle$
- ・改良前, 改良後どちらも合っていない $\Rightarrow \times$
- ・改良前合っていたが, 改良後ややずれた $\Rightarrow \times\times$

表-3 実測値との一致度とタイプ数

従来の式	改良式	K_{e1}	K_{e2}
一致した	一致した	23	10
一致した	一致していない	3	0
一致していない	一致した	2	4
一致していない	一致していない	5	19
合計		33	33

表-2 改良式の評価

D1(cm)	D2(cm)	D3(cm)	S1(cm)	S2(cm)	改良式の評価	従来の式			改良式			従来の式			改良式		
						Ke1(Q2/Q3=0.2~0.8)			Ke1(Q2/Q3=0.2~0.8)			Ke2(Q2/Q3=0.2~0.8)			Ke2(Q2/Q3=0.2~0.8)		
						Ke1	Ke2	R^2	R	$y=ax$	R^2	R	$y=ax$	R^2	R	$y=ax$	R^2
5	5	6	1	1	Type A1	$\triangle\triangle$	$\triangle\triangle$	0.934	0.966	$y = 1.239x$	0.934	0.966	$y = 1.239x$	0.934	0.966	$y = 1.239x$	Type A1
			3.5		Type A2	\odot	\odot	0.987	0.994	$y = 1.094x$	0.990	0.995	$y = 1.146x$	0.986	0.993	$y = 1.088x$	Type A2
			6		Type A3	\odot	\odot	0.882	0.939	$y = 1.010x$	0.934	0.966	$y = 1.139x$	0.906	0.952	$y = 1.047x$	Type A3
			11		Type A4	$\times\times$	\times	0.939	0.969	$y = 1.017x$	0.980	0.990	$y = 1.177x$	0.769	0.877	$y = 0.972x$	Type A4
			3.5		Type A5	\odot	\odot	0.935	0.967	$y = 1.100x$	0.954	0.977	$y = 1.030x$	0.986	0.993	$y = 1.123x$	Type A5
			6		Type A6	\odot	\circ	0.922	0.960	$y = 1.106x$	0.921	0.960	$y = 1.127x$	0.928	0.963	$y = 1.243x$	Type A6
			6		Type A7	\odot	$\circ\circ$	0.841	0.917	$y = 1.073x$	0.898	0.948	$y = 0.909x$	0.875	0.936	$y = 1.135x$	Type A7
3	3	6	3	3	Type B1	\odot	\odot	0.855	0.925	$y = 0.908x$	0.855	0.925	$y = 0.908x$	0.855	0.925	$y = 0.908x$	Type B1
			4.5		Type B2	$\times\times$	\odot	0.909	0.953	$y = 0.927x$	0.753	0.868	$y = 0.883x$	0.994	0.997	$y = 0.907x$	Type B2
			6		Type B3	$\times\times$	\odot	0.877	0.937	$y = 1.020x$	0.868	0.932	$y = 0.933x$	0.981	0.991	$y = 0.914x$	Type B3
			10		Type B4	$\circ\circ$	\odot	0.140	0.374	$y = 1.066x$	0.987	0.993	$y = 1.018x$	0.980	0.990	$y = 0.913x$	Type B4
			4.5		Type B5	\odot	$\circ\circ$	0.968	0.984	$y = 1.001x$	0.949	0.974	$y = 1.034x$	0.921	0.960	$y = 0.890x$	Type B5
			6		Type B6	\odot	$\circ\circ$	0.956	0.978	$y = 1.035x$	0.953	0.976	$y = 1.028x$	0.921	0.959	$y = 0.941x$	Type B6
			6		Type B7	\circ	\circ	0.899	0.948	$y = 0.944x$	0.877	0.936	$y = 1.018x$	0.850	0.922	$y = 0.924x$	Type B7
			10		Type B8	$\circ\circ$	$\circ\circ$	0.630	0.794	$y = 0.810x$	0.974	0.987	$y = 0.921x$	0.630	0.794	$y = 0.810x$	Type B8
4	5	6	2	1	Type C1	\odot	\odot	0.973	0.987	$y = 1.011x$	0.973	0.987	$y = 1.011x$	0.903	0.950	$y = 0.953x$	Type C1
			4		Type C2	\odot	$\triangle\triangle$	0.982	0.991	$y = 0.990x$	0.986	0.993	$y = 1.013x$	0.725	0.851	$y = 0.936x$	Type C2
			8		Type C3	\odot	$\triangle\triangle$	0.959	0.979	$y = 0.910x$	0.971	0.985	$y = 0.986x$	0.198	0.445	$y = 0.861x$	Type C3
			2		Type C4	\odot	\times	0.948	0.974	$y = 0.984x$	0.944	0.971	$y = 1.005x$	0.784	0.885	$y = 0.862x$	Type C4
			8		Type C5	$\triangle\triangle$	\circ	0.901	0.949	$y = 0.942x$	0.891	0.944	$y = 0.976x$	-0.088	-	$y = 0.933x$	Type C5
			9		Type C6	$\triangle\triangle$	\circ	0.819	0.905	$y = 0.932x$	0.846	0.920	$y = 0.835x$	-1.762	-	$y = 0.597x$	Type C6
			6		Type C7	$\triangle\triangle$	\circ	0.828	0.910	$y = 0.978x$	0.833	0.912	$y = 0.927x$	-0.198	-	$y = 0.768x$	Type C7

(2) 従来の式、改良式いずれも実測値に一致する場合

表-3 に示す通り、従来の式及び改良式ともに実測値を再現できたタイプは 33 タイプあった。図-1 はそのタイプの一例である Type C2 の K_{e1} における従来の式及び改良式から得られた計算値と実測値を重ね合わせたものである。Type C2 においては、改良式では α_5 と α_6 が少しだけ変化しているが、損失係数の値はほとんど変わらない。

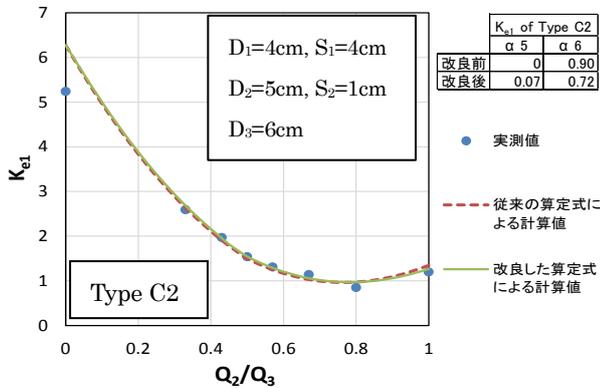


図-1 Type C2 における計算値と実測値の比較

(3) 改良式にすると実測値に一致する場合

従来の式では実測値を再現できなかったが、改良式では実測値を再現できたものは 6 タイプあった。図-2 はそのタイプの一例であり、Type B8 の K_{e2} における従来の式及び改良式から得られた計算値と実測値を重ね合わせたものである。Type B8 の K_{e2} においては、改良式では α_5 が 0.35 から 0 へ、 α_6 が 0 から 0.9 へ変化した。 α_5 が小さくなると Q_2/Q_3 が 0.5 より大きい範囲で、ごくわずかではあるが損失係数が減少する。一方 α_6 が大きくなると Q_2/Q_3 が 0.5 より小さい範囲で損失係数が増加する。このように改良式では、実測値をほぼ再現できることがわかる。

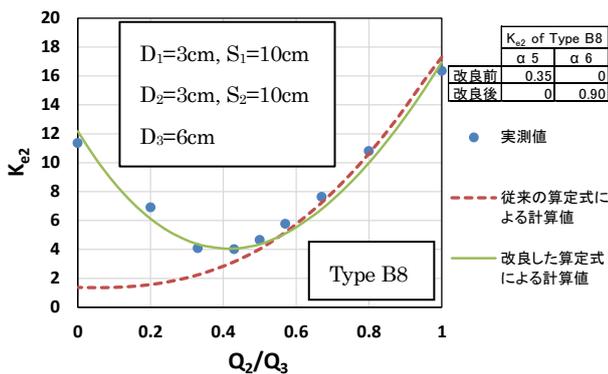


図-2 Type B8 における計算値と実測値の比較

(4) 改良式にすると実測値に近づく場合

図-3 は Type C6 における従来の式及び改良式による計算値と実測値を重ね合わせたものである。図-3 より Type C6 の K_{e2} において従来の式と改良式のいずれも実測値を再現できていない。このようなタイプは 24 タイプ存在

し、またその中でも Type C6 のように改良後実測値に近づいたタイプは 9 タイプ存在した。Type C6 においては α_6 が 0.9 よりも大きくなるような式に再度改良できれば、さらに実測値に近づけることはできるであろう。

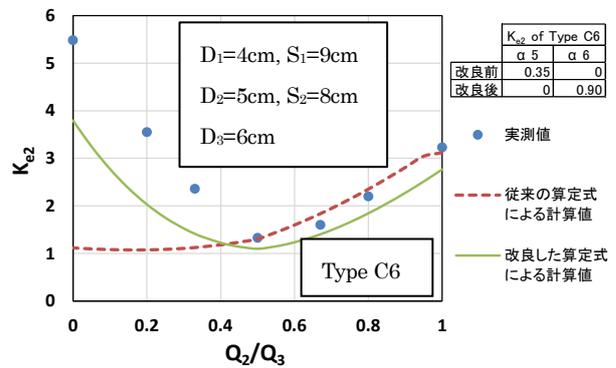


図-3 Type C6 における計算値と実測値の比較

(5) 改良式にすると逆に実測値からずれる場合

従来の式では一致していたが、改良式では実測値からずれるタイプが 3 タイプ存在した。図-4 はこのようなタイプの一例であり、Type A4 の K_{e1} における従来の式及び改良式による計算値と実測値を重ね合わせたものである。

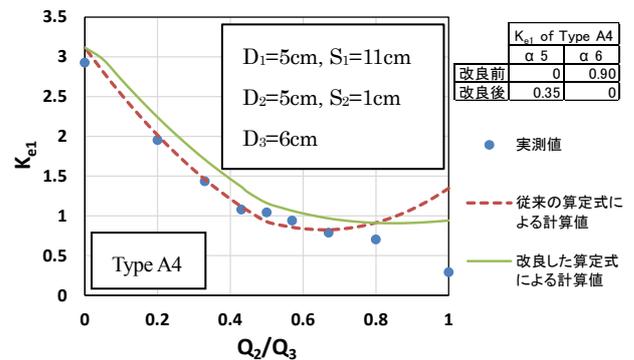


図-4 Type A4 における計算値と実測値の比較

5. 結語

3 方向接合円形落差マンホールにおけるエネルギー損失係数を求めるために開発された算定式を、対向する 2 本の流入管と流出管との間に落差がある場合でも適用できるように改良したところ、従来の式よりも実測値を再現できるケースが増加した。しかし、改良式でも実測値すべてを再現しうるまでには至らなかった。今後の検討課題である。

参考文献

1) 荒尾慎司, 平塚俊祐, 楠田哲也: 管路流れにおける 3 方向接合円形落差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(水工学), Vol.69, No.2, pp.105-122, 2013.