

无压流隧洞渐变段局部水头损失系数 计算的创新方法研究

李江峰¹, 李娟¹, 戚印鑫¹, 朱斌德¹, 惠强², 刘敏杰¹, 王豪杰^{1,3}

(1. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;

3. 新疆农业大学, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 在长距离无压输水隧洞设计计算过程中, 往往很难准确把握渐变段局部水头损失的大小, 这就为实现精准输水设计增大了难度。为了探寻一种无压输水隧洞不同尺寸渐变段的局部水头损失系数的计算方法: 过流面积比法, 根据渐变段两个断面之间的水流能量方程, 依托水工模型试验, 应用“四点法”分别对于渐变段4个测点的水位、流速进行测试, 利用局部水头损失的测算观测数据, 分别采用比拟法、面积比法、直接法计算得出隧洞渐变段局部水头损失系数, 与现行标准、文献进行相互对比, 分析得出实用性、相关性, 并得出结论认为, 过流面积比法作为一种创新方法, 具有一定的实用价值, 为解决类似流态的渐变段局部水头损失系数计算提供借鉴。

关键词: 无压流; 渐变段; 局部; 计算; 创新

中图分类号: TV674

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0051-09

An Innovative Method for Local Head Loss Coefficient Calculation in Gradual Section of Non-pressure Flow Tunnel

LI Jiangfeng¹, LI Juan¹, QI Yinxin¹, ZHU Binde¹, HUI Qiang², LIU Minjie¹, WANG Haojie^{1,3}

(1. Xinjiang Research Institute of Water Conservancy and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830049, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In the design and calculation process of long-distance unpressurized water transmission tunnel, it is often difficult to accurately determine the size of the local head loss in the gradual phase, which increases the difficulty to realize the accurate water transmission design. In order to explore a kind of non-pressure water conveyance tunnel of different size calculation method of local head loss coefficient of the gradual-flow area ratio method, based on the energy equation of flow between the two section of the gradual, relying on the hydraulic model test, the application of “four point”, respectively, for the gradual, the water level, velocity test in four points, based on the observation data of local head loss. The methods of analogy, gradual change section area ratio method, direct method calculated tunnel local head loss coefficient, compared with current standards and literature, practicality and correlation analysis, and concluded that the flow area ratio method is a innovation method for solving similar gradual change section of flow pattern which could provide reference for calculating local head loss coefficient.

Keywords: no pressure flow; gradient section; local; calculate; innovation

收稿日期: 2022-10-28

修稿日期: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目“鱼鳃式沉沙系统水沙运动特性与除沙机理的研究”(51969030); 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经费资助项目“新疆某长距离引水隧洞的水流特性研究”(KY2022131)

作者简介: 李江峰(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计和水工模型试验的研究工作。E-mail: sgs_ljf@163.com

通讯作者: 戚印鑫(1975—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水利工程规划设计和水工模型试验的研究工作。E-mail: 376112812@qq.com

实际液体因具有粘滞性,在流动过程中会产生水流阻力,克服阻力就要耗损一部分机械能,转化为热能,造成水头损失。水头损失区分为沿程损失与局部损失,某一流段沿程水头损失与局部水头损失的总和称为该流段的总水头损失。均匀流时无局部水头损失,非均匀渐变流时局部水头损失可忽略不计,非均匀急变流时两种水头损失都有。水流在流动过程中,流向或过水断面有所改变,则水流内部各质点的流速、压强也都要改变,所以当液体流经这些部位时都要产生局部水头损失^[1]。通过无压输水隧洞渐变段的水流就属于非均匀急变流。在无压输水隧洞纵坡较缓,渐变段长度不大情况下,渐变段的沿程水头损失可以忽略,此时可仅考虑局部水头损失。局部水头损失的大小对工程的规模与功能有着很大的影响,对于长距离引水工程存在的众多渐变段更是关键因素之一,影响显著时将决定工程的成败。

国内外对于隧(涵)洞(管道)渐变段水头损失的研究主要表现在 3 个方面:

(1) 仅研究了有压流状态下的系数值和相应规律。崔润等^[2]通过隧洞渐变段试验研究发现,在 $D_1 = 7.07 \text{ m}$, $D_1/D_2 = 1.2$, $\theta = 10^\circ \sim 90^\circ$ 时,局部水头损失系数相应为 0.018、0.038、0.078、0.118、0.178; 在 $D_1 = 7.07 \text{ m}$, 渐变段边壁夹角 $\theta = 20^\circ$, $D_1/D_2 = 1.1 \sim 1.5$ 时,局部水头损失系数相应为 0.0245、0.0380、0.0515、0.065、0.0785。Gardel A^[3] 试验测定了管道渐缩时的局部水头损失系数 ζ , 拟合得 $\zeta = 0.5(1 - \varphi)\delta/90^{1.83(1 - \varphi)^{0.4}}$, 其中 φ 是下游与上游断面面积比, δ 是收缩角, 并得到局部水头损失系数随收缩角增大而增大的结论。

(2) 仅对局部水头损失进行了定性研究。王广聚^[4]通过物理模型试验研究了引水隧洞不同粗糙度对进、出口段局部水头损失的影响规律。陈姣姣等^[5]采用数值模拟方法研究了水电站进水口渐变段水头损失与渐变段长度、隧洞长度和隧洞直径的关系,并通过量纲分析得到了其关系式。刘穆峰^[6]在研究中提出,特别是长距离大口径输水工程更应注重对局部水头的计算分析。王朋等^[7]在计算研究中发现,河渠水面曲线考虑了局部水头损失的计算,计算结果更符合工程实际。闫旭峰等^[8]在渐变河道局部水头损失特性研究中指出,扩大段损失系数的量级是缩小段的 10 倍。李栋浩等^[9]也认为计算局部阻力系数的传统方法是用管道过水断面的面

积的比值计算,比较可靠和实用。本文研究的无压输水隧洞渐变段局部水头损失系数与有压流尤其是抽水蓄能电站输水洞双向水头损失更有不同^[10]。

(3) 虽然对于无压向有压过渡或单纯的无压流态渐变段局部水头损失进行了研究,但是得到的系数数值相比业内公认的标准有较大偏差。Tullis B P^[11]在矩形明渠到半圆形无压涵洞过渡的模型中,测量了当涵洞进口形式为直角边缘、垂直横墙,水流流态为急流时,涵洞进口的局部水头损失系数 ζ , 得到 ζ 取值范围为 0.38 ~ 0.56, 且其大小随来流总水头增加而增加。Van 等^[12]试验测定了矩形明渠到矩形有压管道突缩过渡时的局部水头损失系数,发现水流对称收缩时,局部水头损失随流量增加而增加,局部水头损失系数 $\zeta = 0.63(1 - A_4/A_3)$, 其中 A_4 是下游断面面积, A_3 是上游断面面积, 且在该试验条件下 ζ 取值范围为 0.25 ~ 0.58。吴永妍等^[13]研究得出,进口渐变段局部水头损失系数与水面收缩角及雷诺数有关,改进后过渡段水面紊动减弱,局部损失减小,局部水头损失系数 ζ 试验值范围为 0.05 ~ 0.82。余扬等^[14]在中美水电规范分别采用谢才-曼宁公式、达西-依兹巴赫公式对某水电站引水系统(含无压、有压部分)水头损失计算结果进行分析得出:两种方法计算得出的水头损失值相差 0.13% ~ 6.26%, 基本一致,尤其是无压部分,数据完全相同。

有文献列示的明渠扩、缩连接段局部水头损失系数范围为 0.05 ~ 1.00, 可看出,该系数最大时能够把流速水头完全损失掉,可见局部水头损失的影响还是很大的。上述对于明渠无压流渐变段局部水头损失系数的研究显示,局部水头损失系数为 0.05 ~ 0.82, 更多的位于 0.20 ~ 0.60 这个区间。当然,隧洞渐变段局部水头损失系数的大小与过水流量、断面形式和尺寸、变径比、渐变角度也有着密切联系。本次研究提出的是圆形隧洞渐变段——锥台筒形渐扩段、渐缩段的局部水头损失系数新的计算方法,同时也采用了另外 2 种方法进行比选,通过分析其与现行标准、文献载明的系数值的关系,验证该创新方法的实用性、可靠性。

1 模型设计和试验

1.1 试验目的和内容

我们通过建立一个长距离无压输水隧洞的概化模型,建立三种洞段组合、施放三种不同流量、分别控制相应水位的试验,按照 3 个处理、6 种重复共 18

下游连接段由 60 m 长、洞径为 7.6 m 的隧洞和 15 m 长的矩形渠道组成,见图 1。

组次	原组合:(含渐变段总长 348 m) ($D7.6-30$) + ($D6.9-60$) + ($D7.5-60$) + ($D6.5-120$) + ($D7.6-60$)		组合一:(含渐变段总长 345 m) ($D7.6-30$) + ($D7.5-60$) + ($D6.5-120$) + ($D6.9-60$) + ($D7.6-60$)		组合二:(含渐变段总长 348 m) ($D7.6-30$) + ($D6.5-60$) + ($D6.9-60$) + ($D6.5-120$) + ($D7.6-60$)	
	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/m
1	65.0	5.40	65.0	5.40	65.0	5.40
2	65.0	5.75	65.0	5.75	65.0	5.75
3	65.0	5.90	65.0	5.90	65.0	5.90
4	64.5	5.71	64.5	5.71	64.5	5.71
5	63.0	5.60	63.0	5.60	63.0	5.60
6	63.0	5.75	63.0	5.75	63.0	5.75

Figure 1: Longitudinal section of the bridge deck. The diagram shows a 16m wide bridge deck with a central 8m wide section and two 4m wide side sections. The deck is supported by a central pier and two side piers. The elevation of the deck is 100.00m at the left end and 100.50m at the right end. The diagram includes various dimensions and labels for the bridge components.

力的较小流量 $64.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $63 \text{ m}^3/\text{s}$,共三种流量作为典型流量,有其代表性与合理性。

2 局部水头损失系数的计算方法

2.1 比拟法

局部水头损失产生的边界条件各种各样,相当复杂。隧洞不同洞径连接部位采用渐缩或者渐扩的变径连接形式,该部位将会产生明显的局部水头损失,直接影响水流性态和安全输水。根据《水力计

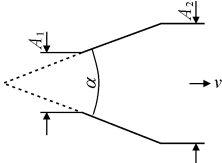
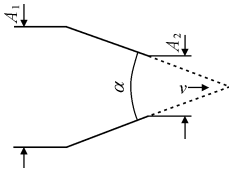
算手册》(第二版)^[16],管流局部水头损失的计算公式如下^[17]:

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

(1)

式中: h_j 为局部水头损失,m; ζ 为局部水头损失系数,其数值可由表2查得; v 为后断面平均流速,m/s; g 为重力加速度,9.81 m/s²。

表 2 变径连接部位局部水头损失系数相关参数列表

名称	简图	局部水头损失系数 ζ						
圆形渐扩管		$\zeta = k \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$						
		α	8°	10°	12°	15°	20°	25°
		k	0.14	0.16	0.22	0.30	0.42	0.62
圆形渐缩管		$\zeta = k_1 k_2$						
		α	10°	20°	40°	60°	80°	100°
		k_1	0.40	0.25	0.20	0.20	0.30	0.40
		A_2/A_1	0.10	0.20	0.20	0.30	0.40	0.50
		k_2	0.40	0.38	0.36	0.34	0.30	0.30
		A_2/A_1	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.00
		k_2	0.27	0.20	0.16	0.10	0.00	0.00

本试验属于隧洞无压流,不能够直接引用表2中的系数。但是,可以应用其原理,将表中涉及到的断面面积更换为过水面积,其他参数按表中计取,本次研究将此方法称为比拟法。本次研究仅对于原组合的6种工况进行了计算。

2.2 直接法

采用“四点法”能够直接测试得出各渐变段的水头损失,按照前述忽略渐变段的沿程水头损失,则试验测试得出的水头损失即可当作局部水头损失,再利用式(1)与2-2断面的平均流速,可求得局部水头损失系数,该方法称为直接法。

试验中对管道连接段位置采用“四点法”量测各断面水深,渐变段前后断面的水头差即两断面间的总水头损失,应该包含沿程水头损失和局部水头损失,由于变径接头部位长度较短,其局部水头损失应该大于沿程水头损失,初步按照达西公式和谢才公式计算出接头部位沿程水头损失为0.0008 m~0.0029 m,总水头损失为0.006 m~0.210 m,局部水头损失为0.004 m~0.210 m,沿程水头损失仅占总损失的13.3%~1.38%,而且占比大者绝对数很小,还不到1 mm,为了与后面的水流能量方程对应,此处忽略沿程水头损失,将总水头损失全部作为局

部水头损失,进一步求得局部水头损失系数值 ζ 。本次研究分别对于试验值与设计值(原组合1种工况)进行了计算。

2.3 过流面积比法

根据《水力学》^[18](第五版),均匀流时只有沿程水头损失,此时没有加速度,因断面1-1及断面2-2的流速水头相等(见图2),则1-1至2-2断面间水流的能量方程为:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_f$$

(2)

式中: h_f 为沿程水头损失,m; z_1 、 z_2 为1-1断面、2-2断面位置水头,m; p_1 、 p_2 为作用在1-1断面、2-2断面上的动水压强,也称压强水头,N/m²; ρ 为水的密度,10³ kg/m³;其余符号意义同前。

《水力学》(第五版)在研究局部水头损失时认为,对于图2中的渐变段形成的渐变流,有如下能量方程:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) = h_w$$

(3)

同理,式(3)可以导出下式:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) + \left(\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \right) = h_f + h_j = h_w$$

(4)

以上的叙述发现,长距离输水隧洞的水力学问题可近似当作均匀流进行设计计算,式(2) 相当于忽略了局部水头损失,将式(2) 与式(4) 联立得出:

$$\left(\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}\right) = h_j \tag{5}$$

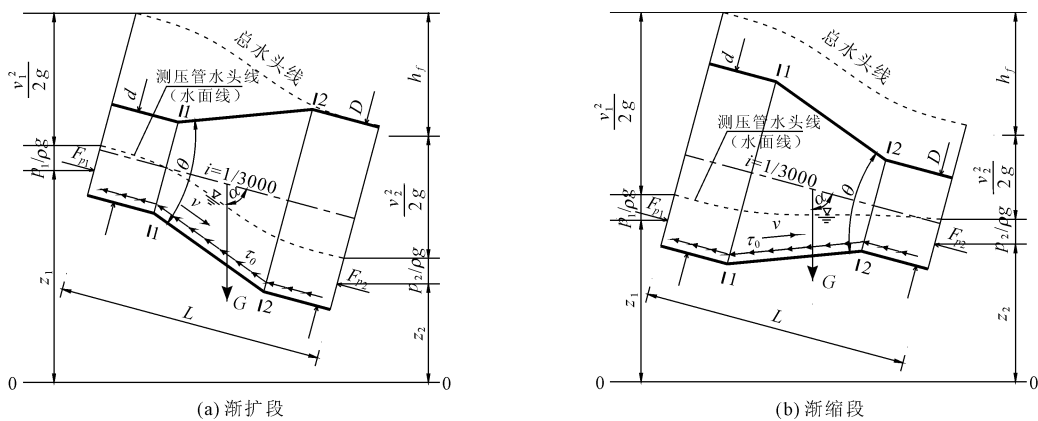


图 2 无压隧洞渐变段水头损失示意图

或者说,1-1 断面至 2-2 断面的距离不长,在纵坡很缓的情况下,可以忽略沿程水头损失,那么仍然可以得到式(5)。因 α_1 、 α_2 近似的等于 1,式(5) 又可以写为:

$$\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} = h_j \tag{6}$$

由于 1-1 断面至 2-2 断面,流量没有损失,则有:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{7}$$

另外,对于 1-1 断面,不论是开始渐扩还是渐缩,都可看作是从层流到紊流,有涡体产生,动水压强不易掌握;而对于 2-2 断面,紊流向层流过渡,其动水压强易于掌握和表述。因此,以 2-2 断面的流速表征局部水头损失的时候,联立式(1)、式(6) 与式(7) 可分别求得渐扩和渐缩形式下的局部水头损失系数如下:

渐扩段: $\zeta = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - 1$ (8)

渐缩段: $\zeta = 1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2$ (9)

上述式中: h_j 、 h_w 分别为局部水头损失、总水头损失, m ; α_1 、 α_2 为 1-1 断面、2-2 断面的动能修正系数; v_1 、 v_2 为 1-1 断面、2-2 断面的平均流速, m/s ; 其余符号意义同前。

因为相同流量下,渐变前后断面的流速存在着与前后断面面积的相关比例关系,所以前后断面的流速水头差可以转换为仅与面积比、某一(前或后)断面的流速有关的方程,即式(1),与流速水头差值

公式的表现形式不同而已,局部水头损失系数因此就可以表现为与渐变段前后断面面积比有关的经验公式。

此处要注意,对于渐缩段,2-2 断面流速增大,此时的 ζ 为负值,而其数值的大小才真实反映了实际状态,这方面的表述与《水力计算手册》(第二版) 在河渠断面扩大时,局部水头损失系数为负值的表述是一致的。

本文研究称此种局部水头损失系数的表达方法为过流面积比法,分别对于试验值与设计值(原组合 1 种工况) 进行了计算。

3 数据计算与统计分析

上述 3 种方法用于本研究中的局部水头损失系数的计算有什么不同,究竟哪种方法更符合实际,下面结合测试、计算列表说明。

3.1 局部水头损失系数测算与分析

3.1.1 试验数据采集

分别施放试验选取的典型流量,在各渐变段部位测算取得 4 个测点的水位差、水深与流速,因 3 种方法均与前后两个过水断面的面积比有关,此处仅将测试得出的断面面积列于表 3。

3.1.2 局部水头损失系数计算

对于各次试验、各渐变段的局部水头损失系数,分别采用 3 种方法进行计算,统计结果见表 4、表 5、表 6。

表 3 试验测试与设计计算过水断面面积

组合	变径型式	桩号	断面过 水面积	不同流量(m ³ /s)/水位(m)下的过水面积/m ²					
				65/5.40	65/5.75	65/5.90	64.5/5.71	63/5.60	63/5.75
原组合 (试验)	渐扩段	0+093—0+096	A1	29.424	31.679	32.414	31.127	30.486	31.121
			A2	34.348	36.816	37.587	36.096	36.058	36.019
		0+282—0+288	A1	25.856	30.949	29.086	28.038	27.813	28.017
			A2	34.335	37.057	37.718	36.430	36.377	36.331
	渐缩段	0+030—0+033	A1	34.549	37.090	37.718	35.952	35.839	36.337
			A2	29.788	33.526	32.316	31.167	31.104	31.081
		0+156—0+162	A1	34.562	36.128	37.257	35.968	35.587	35.607
			A2	26.606	28.359	29.246	27.915	28.239	28.139
组合一 (试验)	渐扩段	0+219—0+222	A1	25.261	26.931	28.265	26.594	27.673	26.981
			A2	29.339	30.756	31.583	29.595	31.190	30.913
		0+282—0+285	A1	28.053	29.975	31.903	29.081	30.350	30.154
			A2	34.823	37.161	37.680	35.536	37.527	36.555
	渐缩段	0+030—0+033	A1	34.473	36.928	38.247	35.354	36.673	36.535
			A2	34.113	36.179	37.306	35.071	35.949	36.121
		0+093—0+099	A1	33.217	36.332	36.672	34.455	36.026	35.833
			A2	26.763	28.453	29.452	27.181	28.249	28.624
组合二 (试验)	渐扩段	0+096—0+099	A1	27.098	28.946	29.423	28.484	29.016	28.870
			A2	29.137	31.293	31.836	29.192	30.651	30.580
		0+282—0+288	A1	26.012	28.547	28.991	27.641	28.234	28.609
			A2	32.580	36.986	37.412	34.803	36.337	36.179
	渐缩段	0+030—0+036	A1	34.016	37.200	37.737	35.354	36.869	37.219
			A2	26.645	28.391	29.452	27.164	28.139	28.059
		0+159—0+162	A1	28.636	31.430	31.190	29.722	30.896	30.791
			A2	25.752	27.743	28.218	26.679	27.770	27.280
原组合 (设计)	渐扩段	0+093—0+096	A1		30.937				
			A2		36.046				
		0+282—0+288	A1		27.522				
			A2		36.823				
	渐缩段	0+030—0+033	A1		36.908				
			A2		30.933				
		0+156—0+162	A1		36.040				
			A2		27.602				

表 4 比拟法所得局部水头损失系数

组合	变径型式	桩号	不同流量(m ³ /s)/水位(m)下的局部水头损失系数ζ						均值
			65/5.40	65/5.75	65/5.90	64.5/5.71	63/5.60	63/5.75	
原组合 (试验)	渐扩段	0+093—0+096	0.006	0.005	0.005	0.005	0.007	0.005	0.006
		0+282—0+288	0.019	0.007	0.015	0.016	0.017	0.015	0.015
	渐缩段	0+030—0+033	0.043	0.034	0.044	0.042	0.042	0.044	0.041
		0+156—0+162	0.069	0.066	0.066	0.068	0.065	0.066	0.067

3.2 对比分析

从表 4—表 6 可以看出,比拟法计算得出的系数数值偏小,直接法和过流面积比法计算得出的系数

值比较接近。3 种方法的不同之处主要在于:(1)比拟法参照于有压管流选取参数,仅将管道断面全面积改为了过流面积,不能真实反映无压流水头损失

情况,作为一种尝试,也证明了此种方法不可取;

(2)直接法是在已知试验水头损失条件下,根据 2-2 断面的平均流速反算得出系数值,在设计过程中,渐变段局部水头损失也是在预先设定损失系数的前提下才能计算得出,往往无法直接计算、获取,系数值也是根据经验选取,该方法只能用于检验系数值准确与否;(3)过流面积比法则可以运用水力学办法计算得出渐变段前后过流面积,局部水头损失系数值也就轻易获取。详见表 7。

表 5 过流面积比法所得局部水头损失系数

组合	变径型式	桩号	不同流量(m³/s)/水位(m)下的局部水头损失系数ζ						均值
			65/5.40	65/5.75	65/5.90	64.5/5.71	63/5.60	63/5.75	
原组合 (试验)	渐扩段	0+093—0+096	0.363	0.351	0.345	0.345	0.399	0.340	0.357
		0+282—0+288	0.763	0.434	0.682	0.688	0.711	0.682	0.660
	渐缩段	0+030—0+033	0.257	0.183	0.266	0.248	0.247	0.268	0.245
		0+156—0+162	0.407	0.384	0.384	0.398	0.370	0.375	0.386
组合一 (试验)	渐扩段	0+219—0+222	0.349	0.304	0.249	0.238	0.270	0.313	0.287
		0+282—0+285	0.541	0.537	0.395	0.493	0.529	0.470	0.494
	渐缩段	0+030—0+033	0.021	0.040	0.049	0.016	0.039	0.023	0.031
		0+093—0+099	0.351	0.387	0.355	0.378	0.385	0.362	0.370
组合二 (试验)	渐扩段	0+096—0+099	0.156	0.169	0.171	0.050	0.116	0.122	0.131
		0+282—0+288	0.569	0.679	0.665	0.585	0.656	0.599	0.626
	渐缩段	0+030—0+036	0.386	0.418	0.391	0.410	0.418	0.432	0.409
		0+159—0+162	0.191	0.221	0.182	0.194	0.192	0.215	0.199
原组合 (设计)	渐扩段	0+093—0+096		0.358					0.358
		0+282—0+288		0.790					0.790
	渐缩段	0+030—0+033		0.298					0.298
		0+156—0+162		0.413					0.413

表 6 直接法所得局部水头损失系数

组合	变径型式	桩号	不同流量(m³/s)/水位(m)下的局部水头损失系数ζ						均值
			65/5.40	65/5.75	65/5.90	64.5/5.71	63/5.60	63/5.75	
原组合 (试验)	渐扩段	0+093—0+096	0.559	0.057	0.276	0.166	0.122	0.327	0.251
		0+282—0+288	0.936	0.957	0.813	0.732	0.150	0.607	0.699
	渐缩段	0+030—0+033	0.643	0.501	0.204	0.220	0.100	0.301	0.328
		0+156—0+162	0.562	0.549	0.381	0.529	0.248	0.411	0.447
组合一 (试验)	渐扩段	0+219—0+222	0.480	0.633	0.250	0.130	0.245	0.541	0.380
		0+282—0+285	0.422	0.423	1.404	0.187	0.313	0.132	0.480
	渐缩段	0+030—0+033	0.146	0.565	0.776	0.547	0.038	0.425	0.416
		0+093—0+099	0.599	0.530	0.846	0.537	0.509	0.522	0.590
组合二 (试验)	渐扩段	0+096—0+099	0.248	0.477	0.282	0.619	0.139	0.397	0.361
		0+282—0+288	0.444	0.191	0.585	0.162	0.881	0.185	0.408
	渐缩段	0+030—0+036	0.148	0.101	0.483	0.219	0.117	0.334	0.234
		0+159—0+162	0.092	0.322	0.000	0.243	0.114	0.021	0.132
原组合 (设计)	渐扩段	0+093—0+096		0.266					0.266
		0+282—0+288		0.198					0.198
	渐缩段	0+030—0+033		0.119					0.119
		0+156—0+162		0.146					0.146

表 7 明渠无压流局部水头损失系数对比

序号	方法和依据	突扩	渐扩(楔形)		突缩	渐缩(楔形)	
			范围值	均值		范围值	均值
1	本试验(比拟法)		0.006~0.015	0.011		0.041~0.067	0.054
2	本试验(直接法)		0.330~0.529	0.430		0.326~0.390	0.358
3	本设计(直接法)		0.198~0.266	0.232		0.119~0.146	0.133
4	本试验(面积比法)		0.258~0.593	0.426		0.228~0.318	0.273
5	本设计(面积比法)		0.358~0.790	0.574		0.298~0.413	0.356
6	水力计算手册(第二版)	0.500~1.000	0.100~0.333	0.217	0.180~0.350	0.050~0.100	0.075
7	水工设计手册(第二版)	0.500~0.750	0.500	0.500	0.200~0.400	0.200	0.200
8	水力学(第五版)	0.300~1.000	0.020~0.850	0.475	0.070~0.500	0.000~0.050	0.025

综合分析认为,在本次试验流量 $63\text{ m}^3/\text{s} \sim 65\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,局部水头损失系数 ζ 以直接法与面积比法计算值较为接近,以试验值为基础计算出的 ζ 比之设计值总体规律性更好,虽然由于试验误差的产生使得试验计算值离散性较明显,终究其趋势线还是较平稳,也符合试验的客观规律;李协生^[19]、李栋浩等^[9]、司徒菲等^[20]研究提出的经验公式考虑的是断面面积比,不是过流面积比,有些还是针对的压力管流,压力管流的过流面积与断面面积相同,也不具有代表性,吴永妍等^[13]提出的经验公式中明确是水面面积,但表达不确切、不完整,况且还有附加、待定系数,公式复杂,得出的系数范围跨度也很大;对比现行标准^[21]、文献载明的 ζ 值,按照过流面积比法计算得出的 ζ 更符合标准的要求,而且与已有研究面积比的表达式不同,本次的计算公式简捷明了,虽然渐缩段 ζ 值超出了标准要求,是由于本次试验设定的渐缩段型式已经进入了突缩范围(限值 0.5),证明过流面积比法是一种合理、可行的新方法,予以推荐采用。见图 3、图 4。

4 结 论

- 通过前述的计算、分析、对比,在该试验条件下,得出以下初步结论:
- (1) 无压隧洞渐扩段局部水头损失系数介于 $0.258 \sim 0.593$ 之间,均值为 0.426;渐缩段局部水头损失系数介于 $0.228 \sim 0.318$ 之间,均值为 0.273。
 - (2) 渐扩段系数均值大于渐缩段系数均值,符合渐变段局部水头损失系数随型式变化的一般规律。
 - (3) 过流面积比法计算得出的无压流隧洞渐变段局部水头损失系数,与现行标准、文献载明的系数基本一致,并且更直观的体现出系数的计算过程,方法合理、可靠、实用。
 - (4) 过流面积比法的确是通俗易懂、简便易行、操作性强、实用性广的创新算法,该方法可以推广至明渠流各种断面形式渐变段的局部水头损失系数计算。

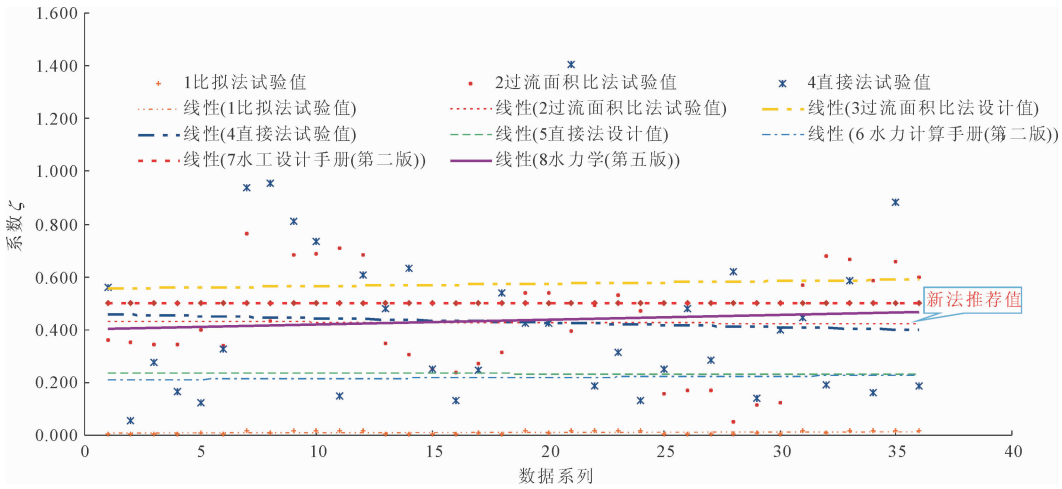


图 3 渐扩段局部水头损失系数对比图

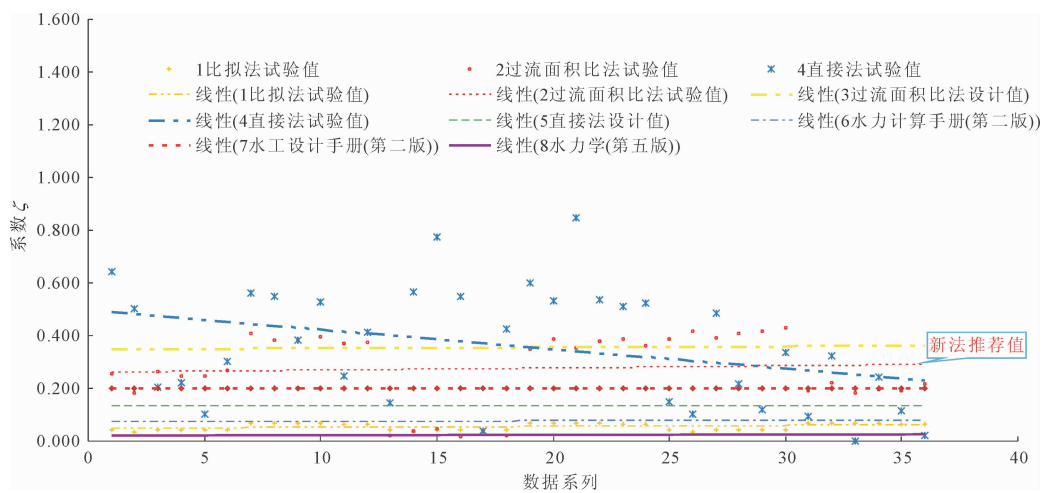


图 4 渐缩段局部水头损失系数对比图

参考文献:

[1] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社,2016:142-142.

[2] 崔润,焦景辉. TBM 隧洞衬砌渐变段局部水头损失研究[J]. 水利规划与设计,2018(9):95-98.

[3] Gardel A. Head loss in a conical contraction [J]. Bulletin Technique de la Suisse Romande, 1962,88(1):313-320.

[4] 王广聚. 台山核电厂引水隧洞进出水口阻力特性试验研究[J]. 水利水电技术,2020,51(12):111-116.

[5] 陈姣姣,蔡新林. 水电站进水口渐变段局部水头损失研究[J]. 水利水电技术,2016,47(4):63-67.

[6] 刘穆峰. 长距离供水工程管道接头局部水头损失系数取值分析[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(4):37-39,47.

[7] 王朋,王桂玉. 考虑局部水头损失的河渠水面曲线研究[J]. 河南科技,2018(3):85-87.

[8] 闫旭峰,易子靖,刘同宦,等. 渐变河道水流结构及局部水头损失特性研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(9):1-5.

[9] 李栋浩,王文娥,葛茂生,等. 突然缩小圆管局部水头损失系数试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(4):22-24.

[10] 吴阳. 抽水蓄能电站输水隧洞经济洞径优化[D]. 西安:西安理工大学,2020.

[11] Tullis B P, Anderson D S, Robinson S C. Entrance loss coefficients and inlet control head-discharge relationships for buried-invert culverts [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008,134(6):831-839.

[12] Van Nam N, Archambeau P, Dewals B, et al. Local head-loss coefficient at the rectangular transition from a free-surface channel to a conduit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,139(12):1318-1323.

[13] 吴永妍,刘昭伟,陈永灿,等. 梯形明渠-马蹄形隧洞过渡段流动形态与局部水头损失研究[J]. 水力发电学报,2016,35(1):46-55.

[14] 余扬,娄晓波. 中美水电规范引水系统水头损失计算成果分析[J]. 发展与创新,2018,30(14):245-246.

[15] 戚印鑫,李江峰,李娟,等. XE 工程 1#隧洞典型区段水工模型试验研究报告[R]. 乌鲁木齐:新疆水利水电科学研究院,2022:37-38.

[16] 李炜,等. 水力计算手册[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[17] 水工隧洞设计规范:SL 279—2016. [S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.

[18] 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室. 水力学[M]. 第5版. 北京:高等教育出版社,2016.

[19] 李协生. 引水隧洞中渐变段水头损失计算问题的探讨[J]. 四川水力发电,2001(1):55-61.

[20] 司徒菲,陈才高,李金印,等. 长距离大口径输水管线摩阻系数及局部水头损失系数研究[J]. 给水排水,2011,37(8):108-111.

[21] 索丽生,刘宁. 水工设计手册[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社,2014.