

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.005

岩溶管道的折算渗透系数取值探讨

邹昌喜,黄 勇

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:为完善岩溶管道的折算渗透系数计算方法,基于 Izbash 指数方程,在考虑了局部水头损失和沿程水头损失的条件下推导了岩溶管道的折算渗透系数公式,并通过建立弯折岩溶管道模型验证该方法的合理性。基于此弯折岩溶管道模型,采用单因素分析法,讨论了 4 种流态分区(层流区、水力光滑区、第二过渡区和水力粗糙区)下折算渗透系数对水流的雷诺系数、岩溶管道直径和弯折角度以及岩溶管道计算长度的响应。结果表明:(a)岩溶管道较短时,大雷诺系数和水流边界条件的急剧变化会产生较大的局部水头损失,此时推导的考虑局部水头损失的折算渗透系数可以较好地反映实际情况。(b)岩溶管道直径对折算渗透系数的影响最大;雷诺系数只在层流区影响较大,其他 3 个流态区雷诺系数、弯折角度和岩溶管道计算长度的影响与管道直径相比较小。

关键词:岩溶管道;折算渗透系数;局部水头损失;沿程水头损失;弯折岩溶管道模型;敏感性分析

中图分类号:P641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)02-0123-05

Discussion on value of converted permeability coefficient in karst conduit

ZOU Changxi, HUANG Yong

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to improve the calculation method of converted permeability coefficient in karst conduit flow, based on the Izbash's exponential equation, the formula of converted permeability coefficient for the karst conduit was derived under the condition of considering the local and frictional water-head loss. The rationality of this method was validated by establishing a bent karst-conduit model. Based on this model, the sensitivity analyzing method of single factor was used to discuss the response of converted permeability coefficient to the Reynolds coefficient of current, the diameter and bending angle of karst conduit, and the calculated length of karst conduit, under four flow patterns including the laminar flow regime, hydraulic smooth regime, hydraulic second transition regime and hydraulic rough regime. Two results can be obtained: (a) When the karst conduit is short, the sharp changes of large Reynolds coefficient and flow boundary conditions will produce large local-head loss. Under the condition of considering the local-head loss, the derived converted permeability coefficient is more consistent with the actual situation. (b) The influence of the diameter of karst conduit on the converted permeability coefficient is the largest, while the Reynolds coefficient only has a great influence on the laminar flow regime. The influence of the Reynolds coefficient, bending angle and the calculated length of the karst conduit in other three flow regimes is smaller than that of the conduit diameter.

Key words: karst conduit; converted permeability coefficient; local head loss; frictional head loss; bent karst conduit model; sensitivity analysis

基金项目: 国家自然科学基金(41572209)

作者简介: 邹昌喜(1995—),男,硕士研究生,主要从事水文地质研究。E-mail:newroot_zcx@163.com

引用本文: 邹昌喜,黄勇.岩溶管道的折算渗透系数取值探讨[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):123-127.

ZOU Changxi, HUANG Yong. Discussion on value of converted permeability coefficient in karst conduit [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 123-127.

中国作为岩溶最为发育的国家之一,常常需要正确处理岩溶地区的管道流问题^[1-2]。岩溶管道流问题的难点在于岩溶管道的强透水性和形态变化的多样性^[3-4],主要表现为管道中层流与紊流并存^[5],导致常规的达西定律不适用。针对这种情况,有学者从流体力学的水头损失方程出发,提出了岩溶管道的折算渗透系数法,并建立了三重介质模型模拟岩溶管道的水流运动^[6]。该方法的合理性和优越性在多次实际应用中得以验证^[7],有着广阔的运用前景。但是,此法在折算渗透系数公式的推导中未将局部水头损失纳入总水头损失的范围,而岩溶管道常常形态多变,如出现汇流、分岔、弯折等情况,这种情况下会产生局部水头损失,这种局部水头损失不可忽略^[8-10]。尽管对于长直岩溶管道而言这种局部水头损失很小,但有3种情形必须获得考虑局部水头损失的岩溶管道折算渗透系数:(a)岩溶管道较短且出现形态突变的情形;(b)整条岩溶管道弯曲多折或多汇流、分岔等局部水头损失的情形;(c)小尺度岩溶管道流研究中出现水流边界条件发生突变的情形。本文从 Izbash 指数方程出发,推求考虑局部水头损失的岩溶管道折算渗透系数公式,将其应用于弯折岩溶管道模型的分析计算,并讨论了影响岩溶管道折算渗透系数的主要因素。

1 考虑局部水头损失的岩溶管道折算渗透系数

局部水头损失是水流边界的形状、大小和方向发生急剧变化时引起的水头损失^[11],在实际的岩溶管道中,常常由于管道的形态变化引起水流形态改变,产生的水头损失发生在水流边界改变的前后一段局部流程范围之内。管道内流的总水头损失为局部水头损失与沿程水头损失之和^[12]:

$$\Delta H = h_j + h_f = \xi \frac{v^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

式中: ΔH ——总水头损失; h_j 、 h_f ——局部、沿程水头损失; ξ 、 λ ——局部、沿程水头损失系数; l ——岩溶管道长度; d ——岩溶管道直径; v ——地下水渗流速度(管道内由于孔隙度为1,渗流速度 v 等于实际流速 u); g ——重力加速度。

1.1 Izbash 方程中系数 α 的确定

Izbash 指数方程是苏联学者于 1931 年提出的描述达西流和非达西流运动规律的经验公式,可用于描述岩溶管道流的运动规律^[13]:

$$J = \alpha v^m \tag{2}$$

式中: J ——水力梯度; α ——经验系数; m ——非达西指数。

m 随流态变化而变化,当水流为层流时, $m=1$;当水流为紊流时, $m=2$;当水流为层流和紊流的第一过渡区时, m 的值介于 1~2 之间。水力梯度 $J=\Delta H/l$,由式(1)(2)可得

$$\alpha = \frac{(\lambda l + \xi d) v^{2-m}}{2gdl} \tag{3}$$

1.2 折算渗透系数的确定

Izbash 方程(式(2))可以改写为

$$v = \frac{1}{\alpha v^{m-1}} J \tag{4}$$

式(4)与 Darcy 公式具有相同的形式,将 $1/(\alpha v^{m-1})$ 认为是考虑了局部水头损失(h_j)和沿程水头损失(h_f)的岩溶管道折算渗透系数($K_{L(f+j)}$),再代入式(3)得

$$K_{L(f+j)} = \frac{2gd}{(\lambda l + \xi d) v} \tag{5}$$

式(5)中,若 $\xi=0$,即不考虑局部水头损失,则

$$K_{L(f)} = \frac{2gd}{\lambda v} \tag{6}$$

式(6)与文献[6]中获得的折算渗透系数结果一致,即在研究短岩溶管道和水流边界条件发生强烈改变的区域时,未考虑局部水头损失得出的折算渗透系数会比实际的折算渗透系数偏大。式(5)只考虑了单个位置处的局部水头损失,若考虑多个位置的局部水头损失,则将方程中的 ξ 替换为多个位置的局部水头损失系数之和 $\sum \xi_i$ 。实际应用中应根据具体的水流边界条件选用合适的局部水头损失系数值,而 λ 的取值可参考文献[6,14]的研究成果。

2 弯折岩溶管道模型的折算渗透系数计算

为验证上文推导的折算渗透系数公式的合理性,设计了一个长度较短的弯折岩溶管道模型(图 1),该模型将实际弯转的岩溶管道进行了概化。图 1 中管道总长度 $l=10\text{ m}$ 、 $d=0.5\text{ m}$,粗糙度 $\Delta=0.001\text{ m}$,水流的运动黏滞性系数 $\nu_w=1.306\times10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$,岩溶管道的弯折角度为 θ 。假定在转弯处产生了局部水头损失,分别计算未考虑局部水头损失和考虑局部水头损失情况下的折算渗透系数。

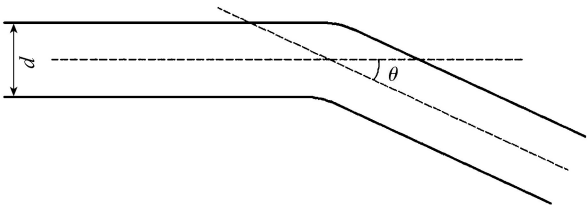


图 1 弯折岩溶管道概念模型
Fig.1 Conceptual model of the bent karst conduit

由式(5)(6)可知,要获得折算渗透系数,需要确定管道内的水流速度。将雷诺系数 Re 设定为 1×10^3 、 1×10^4 、 1×10^5 和 1×10^6 ,根据 Re 和相对光滑度 d/Δ 可确定管道流分别处于层流区、水力光滑区、第二过渡区和水力粗糙区^[11]。管道内的水流速度:

$$v = \frac{Re\nu_w}{d} \tag{7}$$

λ 、 ξ 的取值可参考文献[6,11,14]获得,即

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re} & Re < 2320 \\ \left[1.14 - 2\lg\left(\frac{\Delta}{d} + \frac{21.25}{Re^{0.9}}\right)\right]^{-2} & Re \geq 2320 \end{cases} \tag{8}$$

$$\xi = 0.946\sin^2\frac{\theta}{2} + 2.05\sin^4\frac{\theta}{2} \tag{9}$$

将式(7)~(9)分别代入式(5)(6)得

$$K_{L(f+j)} = \frac{2gd^2l}{\left[\lambda l + \left(0.946\sin^2\frac{\theta}{2} + 2.05\sin^4\frac{\theta}{2}\right)d\right]Re\nu_w} \tag{10}$$

$$K_{L(f)} = \frac{2gd^2}{\lambda Re\nu_w} \tag{11}$$

由式(10)(11)可知折算渗透系数与弯折角度的关系:
(a)当 Re 一定时,随着 θ 增加, $K_{L(f+j)}$ 逐渐减小; $K_{L(f)}$ 不变,比 $K_{L(f+j)}$ 偏大。
(b)采用增幅函数 $R_i = (K_{L(f)} - K_{L(f+j)})/K_{L(f+j)} \times 100\%$ 反映 $K_{L(f)}$ 比 $K_{L(f+j)}$ 增大的幅度。由图 2 可知,同一 Re 下, θ 越大,局部水头损失和 R_i 越大; θ 一定时, Re 越大, R_i 越大。

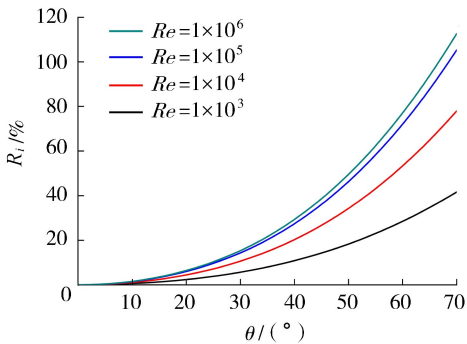


图 2 各雷诺系数下增幅随弯折角度变化关系
Fig.2 Relationship between R_i and θ under different Re condition

3 折算渗透系数的敏感性分析

敏感性也称敏感度,它能反映模型参数的改变对地下水流模拟计算结果的影响程度^[15-16],若模型计算结果对某个参数的细小改变响应明显,则说明该参数敏感性大,此模型受该参数的影响大。本文模型参数主要有 4 个: Re 、 d 、 l 和 θ 。

目前常用的敏感性分析方法有单因素分析法和正交试验法^[17-18]。本文采用单因素分析法进行敏感性分析。4 个流态分区中均选取 R_i 为 10% 时模型各参数的值为初始值(表 1),用于计算初始折算渗透系数。分别对各参数初始值作上下 10% 和 20% 的变化水平,计算此 4 种水平下折算渗透系数的大小。采用敏感性指数 L 作为判断参数敏感性大小的指标^[19],即

$$L = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{\sqrt{(K_{Li} - K_{Ls})^2}}{K_{Ls}}}{4}$$

(12)

式中: K_{Li} ——各水平参数变化下计算的折算渗透系数; K_{Ls} ——初始折算渗透系数。式(12)表明, L 值越大,岩溶管道折算渗透系数对此参数的响应越明显,敏感指数 L 计算结果如图3所示。

表1 各参数初始值

Table 1 Initial value of each parameter

流态分区	Re	d/m	l/m	$\theta/(^{\circ})$
层流区	1×10^3	0.5	10	39
水力光滑区	1×10^4	0.5	10	29
第二过渡区	1×10^5	0.5	10	26
水力粗糙区	1×10^6	0.5	10	24

敏感性分析结果表明,影响折算渗透系数最大的参数是 d ,不论管道水流处于何种流态, d 的敏感性指数最大。在层流区,模型的折算渗透系数对雷诺系数的响应程度很大,与 d 相当, θ 和 l 的敏感性指数次之;在其他3个流态分区内, θ 的影响起着次要的影响作用, Re 和 l 影响相对较小。

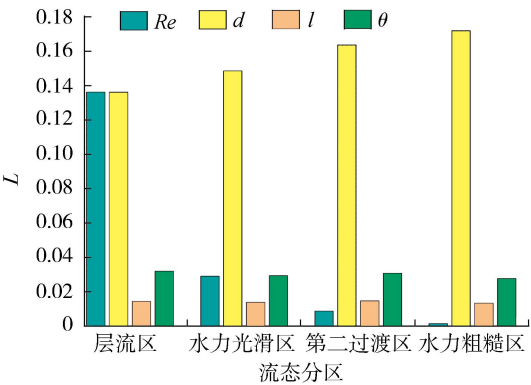


图3 各参数的敏感性分析结果

Fig.3 Sensitivity analysis results of each parameter

4 结 论

- a. 在长度较短的岩溶管道出现水流边界条件突变,产生的局部水头损失较大的情况下,计算岩溶管道的折算渗透系数要考虑局部水头损失。
- b. 在弯折岩溶管道模型中,弯折角度越大,产生的局部水头损失越大,未考虑局部水头损失的折算渗透系数偏大。
- c. 本文弯折岩溶管道模型中,影响折算渗透系数最大的参数是岩溶管道的直径,雷诺系数只在层流区影响较大,其他3个流态区雷诺系数、弯折角度和岩溶管道计算长度影响与管道直径相比较小。

参考文献:

[1] ZHU Junfeng,CURRENS C J,DINGER J S. Challenges of using electrical resistivity method to locate karst conduits;a field case in the Inner Bluegrass Region, Kentucky[J]. Journal of Applied Geophysics,2011,3:522-530.

[2] 田娟,董贵明,束龙仓. 空隙-管道型西南岩溶地下河系统参数与流量衰减系数关系的数值试验研究[J]. 水文地质工程地质,2013,40(2):13-18. (TIAN Juan, DONG Guiming, SU Longcang. Research on relationship between parameters and attenuation coefficients of pore-pipe underground river system, southwest China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013,40(2):13-18. (in Chinese))

[3] MCCORMACK T, O'CONNELL Y,DALY E. Characterisation of karst hydrogeology in Western Ireland using geophysical and hydraulic modelling techniques[J]. Journal of Hydrology,2017,10:1-17.

[4] JOUVES J, VISEUR S, ARFIB B, et al. Speleogenesis, geometry, and topology of caves: a quantitative study of 3D karst conduits [J]. Geomorphology,2017,298:86-106.

[5] 陶小虎,赵坚,陈孝兵,等. 岩溶含水层水流模型研究进展[J]. 水利水电科技进展,2014,34(2):76-84. (TAO Xiaohu, ZHAO Jian, CHEN Xiaobing, et al. Research progress in numerical models for water flow in karstaquifer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(2):76-84. (in Chinese))

[6] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1995,20(4):361-366. (CHEN Chongxi. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences,1995,20(4):361-366. (in Chinese))

[7] 陈崇希,胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质,2008,35(3):70-75. (CHEN Chongxi, HU Litang. A review of the seepage-pipe coupling model and its application[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2008,35(3):70-75. (in Chinese))

- [8] 陈朝. 常见管道局部水头损失的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [9] 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. (SITU Fei, CHEN Caigao, LI Jinyin, et al. Research on friction coefficient and loss coefficient of local water head of long distance large-diameter pipeline[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(8): 108-111. (in Chinese))
- [10] 白兆亮, 李琳. 有压输水管道孔板局部阻力相邻影响试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 28-31. (BAI Zhaoliang, LI Lin. Test on local resistance adjacent influence of pressure water pipe[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 28-31. (in Chinese))
- [11] 于布. 水力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [12] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [13] 文章, 刘凯, 陈晓恋. 承压含水层中非完整井附近“非达西-达西”两区渗流模型近似解析解[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2015, 40(5): 918-924. (WEN Zhang, LIU Kai, CHEN Xiaolian. Approximate analytical solutions for two-region non-Darcian flow to a partially penetrating well[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(5): 918-924. (in Chinese))
- [14] 赵坚, 赖苗, 沈振中. 适于岩溶地区渗流场计算的改进折算渗透系数法和变渗透系数法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1341-1347. (ZHAO Jian, LAI Miao, SHEN Zhenzhong. Improved converting permeability coefficient method and variable permeability Coefficient method for seepage calculation in Karst region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1341-1347. (in Chinese))
- [15] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [16] 孙前, 陈方, 刘金涛, 等. 基于影响因子数据年际分类的太湖典型口门流量估算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 218-223. (SUN Qian, CHEN Fang, LIU Jintao, et al. Method for estimation of discharge at typical entrance of Taihu Lake based on annual classification of impact factor data[J]. Journal of Hohai University(Nature Sciences), 2017, 45(3): 218-223. (in Chinese))
- [17] 陈辉, 刘东海, 戚蓝. 改进的堆石坝变形计算参数敏感性分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 406-412. (CHEN Hui, LIU Donghai, QI Lan. Improved sensitivity analysis method for calculating the deformation parameters of the rock-fill dam[J]. Journal of Hohai University(Nature Sciences), 2017, 45(5): 406-412. (in Chinese))
- [18] 张永生, 陈喜, 高满, 等. 不同气候区潜在蒸散发全局敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 137-144. (ZHANG Yongsheng, CHEN Xi, GAO Man, et al. Global sensitivity analysis of potential evapotranspiration indifferent climatic regions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2): 137-144. (in Chinese))
- [19] 李木子, 翟远征, 左锐, 等. 地下水溶质迁移数值模型中的参数敏感性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014(3): 133-137. (LI Muzi, ZHAI Yuanzheng, ZUO Rui, et al. Sensitivity analysis of parameters in numerical simulation of solute transport in groundwater[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(3): 133-137. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-02-18 编辑: 刘晓艳)