

安平隧道衬砌水压力分析*

肖文贵¹, 傅鹤林²

(1. 龙琅高速公路建设开发有限公司, 湖南 娄底 417000; 2. 中南大学, 湖南 长沙 410075)

摘要: 湖南龙琅(涟源市龙塘镇—新化县琅塘镇)高速公路安平隧道地质构造复杂, 施工中屡次出现岩溶突水。为保障隧道的安全, 文中对该隧道衬砌水压力分布进行分析。结果表明, 隧道衬砌结构承受的水荷载和静水压力荷载的作用机制不同; 隧道渗流场与围岩和衬砌材料的渗透系数相关, 同时受围岩加固圈及加固体渗透系数的影响; 荷载大小因渗透系数的改变而改变, 渗流场的分布与水压头有关。

关键词: 隧道; 衬砌; 水压力; 静水压力; 加固圈

中图分类号: U458.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)01-0129-05

影响隧道衬砌水压力的因素主要有外部因素和内部因素两类, 外部因素有大气降雨、周边复杂水系环境和水流通道等, 内部因素主要有地下水来源、围岩的渗透系数、衬砌外加固圈和衬砌的渗透系数、地下水头大小等。湖南龙琅(涟源市龙塘镇—新化县琅塘镇)高速公路安平隧道地质构造复杂, 施工中屡次出现岩溶突水。该文以该隧道为例, 研究隧道衬砌水压力的分布。

1 隧道岩溶突水情况

1.1 工程地质

安平隧道起讫里程为 K13+198—K16+750, 全长 3 552 m, 最大埋深 342.69 m。进口右洞掌子面开挖至 K13+803.5, 无地下水, 该处埋深 305 m。原设计地质情况: 微风化灰岩, 偶夹泥质灰岩, 层间具错动和轻微溶蚀现象; 发育有溶蚀裂隙或溶洞, 地下水分布不均, 基本较贫乏, 但可能分布竖直型岩溶裂隙, 地表连接岩溶洼地、漏斗等, 为Ⅲ级围岩(见图 1)。

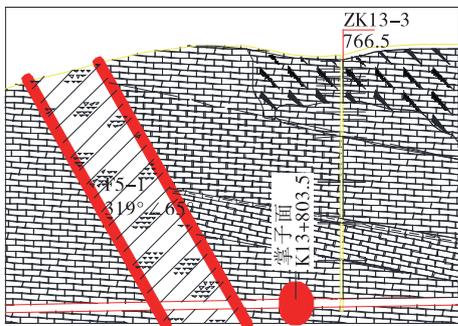


图 1 安平隧道剖面图(单位: m)

1.2 水文地质

隧道区地下水主要为孔隙潜水、基岩裂隙水和岩溶水, 地下水补给主要来源于大气降水、沿南北向断层和岩溶带的纵向远距离补给。

设计阶段的地质调查和钻孔水位测量结果表明, 洞内地下水位从进口往出口持续降低, 出口段已低于隧道标高。进口段地下水基本从月光岩的溶蚀管道流出, 水量约 2 000 t/d, 暴雨季节约 2 万 t/d, 出水高程 475.90 m。钻孔钻探结果显示: 洞身 ZK13-3(K13+838) 钻孔水位离孔口 79.50~81.20 m, 水位高程 684.95~686.65 m; CZK13-1(K14+440) 钻孔水位离孔口 71.20 m, 水位高程 679.10 m; ZK15-3(K15+648) 钻孔水位离孔口 80.00 m, 水位高程 525.00 m; CZK15-2(K16+731) 钻孔水位离孔口 39.50 m, 水位高程 489.80 m。

1.3 岩溶发育情况

隧道区的灰岩地层岩溶较发育, 分布于岩层上部, 其次为沿地层倾向较发育, 下部白云质灰岩及泥质灰岩地层岩溶发育一般或不甚发育, 以裂隙为主。区内地层分布较复杂, 岩性差异较大, 地质构造复杂, 断裂发育。但由于线路展布方向与地层走向、断裂延伸方向大角度相交或近于直交, 构造对隧道的影响有限, 区域地质较稳定。

K13+600—K14+800 段洞身段多分布竖直型岩溶裂隙, 深度较大, 地表连接岩溶洼地、漏斗等, 地下发育深度几十米至几百米不等, 向下延伸至洞室, 部分溶蚀裂隙影响到隧道区甚至以下, 贯通的岩溶

* 基金项目: 湖南省交通运输计划科技项目(201715)

裂隙对隧道影响较大。根据 ZK13-3、CZK13-1 钻孔钻探结果,岩溶主要发育于地表以下 50.0 m 范围,下部岩溶发育一般或不甚发育。

K13+750—K14+000 段岩溶在地表表现为岩溶漏斗、落水洞等,根据 ZK13-3 钻孔钻探结果,上部 50 m 范围内岩溶发育,局部岩溶裂隙向下延伸至洞室,贯通的溶蚀裂隙对隧道影响大。该段施工会有突水可能。

K14+000—800 段岩溶地表为溶沟溶槽,根据 CZK13-1 钻孔钻探结果,该段岩溶总体发育一般,局部岩溶较发育,受构造挤压影响,岩体较破碎,构造裂隙与岩溶裂隙相连并向下延伸至洞室,会对隧道造成较大影响。该段施工会有淋雨现象,局部会有突水可能。

从 2018 年 12 月下雪以来,一直持续阴雨天气,其中 2 月有 22 天降雨。掌子面出水后,掌子面上方地表虽未见外露的水塘、水库、集水坑等,但有大面积汇水区(见图 2)。



图 2 地表汇水情况

1.4 岩溶突水情况

右洞进洞之后,已施工的 605 m 中,前 400 m (K13+640 以前)主要为钙质页岩或夹灰岩,微风化为主,局部节理发育。K13+640 以后,逐渐由钙质页岩变为微风化灰岩和岩溶化灰岩,围岩完整性较好,多为中~厚层状,岩质较硬,岩体完整性较好,局部裂隙稍发育,围岩稳定性较好。施工中,地下水贫乏,仅局部(K13+793 左侧边墙、K13+780 拱顶、K13+730 左侧拱腰等)有滴水现象。

洞身 K13+680—760 段发育一道 F5-1 断层带,与路线约呈 80°相交,走向北东,倾向北西,倾角约 65°,岩层挤压带和破碎带宽约 80 m,是一条高压富水带。为地表水转入地下水的入口地带,地下水丰富,活动强烈,形成规模不等的溶蚀裂隙、溶洞甚至地下暗河,且为南北方向地下水的通道。但实际施工中发现该段围岩完整性较好,未见地下水,按三

级施工。

截至 2019 年 3 月 9 日,K13+803.5 掌子面共施工出水孔和超前探孔 16 个(见图 3)。3 月 2 日,掌子面右侧拱腰附近在施作加深炮眼时出现地下水。最开始为清水,3 月 3 日下午开始变为浑浊水。该阶段隧道水流量为 130 m³/h,总出水量为 130 m³/h×8.5 h=1 105 m³,累计出水 1 555 m³。

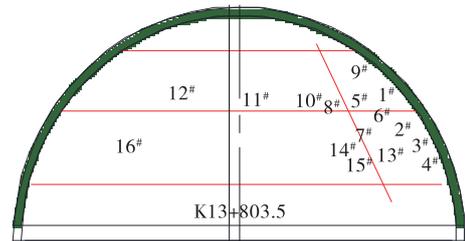


图 3 掌子面钻孔布置

3 月 3 日 21:30,1#~5# 孔内水量减少,但仍为浑浊泥浆水,其中 5# 孔内水流水平喷射距离为 4 m。这种涌水情况一直持续至 4 日 2:30 第二批超前钻孔施工完毕。该阶段水流量为 90 m³/h,总出水量为 90 m³/h×5 h=450 m³,累计出水 2 005 m³。

3 月 4 日 2:30,在 5# 孔四周施工 6#~9# 孔径 600 mm 的钻孔。其中:6#、8# 孔深 4.5 m,有水滴出;7#、9# 孔深 4.5 m,均未见水。1# 孔内冒水量剧烈增加,孔高 4 m,水平喷射距离 8 m。5# 孔内水流水平喷射距离为 2 m。2#、3#、4# 孔内仍持续向外流淌少量浑浊水。该冒水情况一直持续至 3 月 4 日 16:10 仍未变化。洞内掌子面后方地面有泥质沉淀物堆积,厚度 3~7 cm。该阶段水流量为 140 m³/h,总出水量为 140 m³/h×14 h=1 960 m³,累计出水 3 965 m³。

3 月 4 日 16:10,在 8# 孔左侧 40 cm 位置施工 10# 超前钻孔,孔径 800 mm。10# 孔钻至 9 m 深时开始冒水,孔高 4 m,水平喷射因台车影响无法确定,为浑浊水。该阶段水流量为 140 m³/h,总出水量为 160 m³/h×5 h=800 m³,累计出水 4 765 m³。

3 月 4 日 21:30,在掌子面中间距地面 4 m 高的位置施工 11# 超前钻孔,孔径 800 mm。11# 孔钻至 10 m 深时开始冒水,水平喷射距离因台车影响无法确定,为浑浊水。1#、5#、10# 孔内水量减少,水平喷射距离因台车影响无法确定。该阶段水流量为 140 m³/h,总出水量为 150 m³/h×48 h=7 200 m³,累计出水 11 965 m³。

3 月 6 日 21:30,在 11# 孔左侧距地面 4 m 高的

位置施工 12[#] 超前钻孔,孔径 800 mm。12[#] 孔钻至 9.5 m 深时开始出水,为浑浊水,继续钻进 3.5~4 m 后遇到岩石。1[#]、5[#]、10[#]、11[#] 孔内水量减少,总出水量变化不大,水平喷射距离因台车影响无法确定。该阶段水流量为 140 m³/h,总出水量为 150 m³/h × 5 h = 750 m³,累计出水 12 715 m³。

3月9日,在 13[#] 和 14[#] 孔之间、12[#] 孔下方分别施工 15[#]、16[#] 超前钻孔,孔径 80 mm。15[#] 孔钻进 5 m 后卡钻,孔内有浑浊水流出。16[#] 孔共钻进 13 m,在 11 m 处有浑浊水流出,有 2 m 空腔,且在推进钻杆过程中,11[#] 和 12[#] 孔内有喷水现象。到 3月9日 23:00,出水量约为 70 m³/h × 48 h = 3 360 m³,累计出水 17 755 m³。水流情况见图 4。

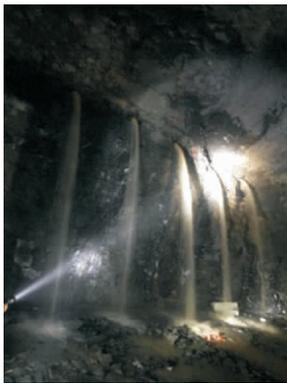


图 4 隧道突水情况

K13+793 左侧边墙有一爆破遗留孔,3月1日有轻微滴水。3月3日 13:30,2[#] 超前探孔施工完毕后,该孔的水流开始增大;17:30 超前地质预报 TSP 完成,掌子面水变浑浊,该孔内水也变浑浊。3月4日凌晨,5[#] 孔施工完毕且开始涌水后,该孔内水仍为浑浊水,但水量开始减少。

1.5 超前地质预报情况

2018年12月2日进行长度为 125 m 的 TSP 探测,该段内围岩为微~弱风化灰岩夹硅质岩,多呈中~厚层状,局部薄层状,岩体较破碎,节理裂隙较发育,局部有地下水发育。

2019年1月20日,在 YK13+753 处进行超前地质钻探,探明 YK13+753—833 段为微风化灰岩夹硅质岩,未发现前方有泥质、地下水、空腔体等异常情况。

2月28日,在 YK13+790—820 段进行地质雷达扫描探测,该段围岩主要为微~弱风化隐晶质灰岩夹硅质岩,多呈中~厚层状,岩体大部较完整,局部破碎,节理裂隙发育一般,岩质较硬,局部围岩间

有硅质和角砾胶结,围岩稳定性较好。

3月3日 9:00,对右洞掌子面进行地质雷达扫描,水平方向沿拱顶、拱腰、拱底布置 3 条测线,并在 1[#] 孔左侧沿竖直方向布置 1 条测线,对掌子面前方情况进行探测。下午在掌子面进行 TSP 探测。综合这两次探测结果,结合现场实际情况和钻孔情况,得出:1) YK13+803—840 段面向掌子面左侧和中部区域的围岩为微~弱风化灰岩夹硅质岩,多呈中~厚层状,局部薄层状,岩体大部较完整,局部较破碎,节理裂隙稍发育,岩质较硬。YK13+806—809 段右侧区域有强裂隙水发育,YK13+810—818 段右侧及右侧轮廓线外有溶蚀沟槽或溶洞发育,溶蚀沟槽或溶洞中有大量承压水和泥质充填,YK13+810—818 段可能发生突泥突水。2) YK13+840—880 段围岩为微~弱风化灰岩,多呈中~厚层状,局部薄层状,岩体破碎~较破碎,裂隙或溶蚀裂隙较发育。该段可能会断续出现溶蚀沟槽或溶洞,溶蚀沟槽或溶洞中有水和泥质物充填。3) YK13+880—900 段围岩为微~弱风化灰岩,多呈中~厚层状,局部薄层状,岩体大部较完整,局部较破碎,节理裂隙稍发育,岩质较硬,地下水较发育。4) YK13+900—920 段围岩为微~弱风化灰岩,多呈中~厚层状,局部薄层状,岩体较破碎,局部裂隙或溶蚀裂隙较发育,岩质较硬。

3月7—8日,对隧道洞顶地表进行地质调查,在掌子面中部偏左补充进行地质雷达扫描。结合前期地质雷达扫描结果和超前探孔结果,得出:YK13+803—825 段围岩为微~弱风化灰岩夹硅质岩,多呈中~厚层状,局部薄层状,岩体大部完整,局部较破碎,节理裂隙较发育,岩质硬;YK13+806—809 段有溶蚀裂隙和溶蚀沟槽发育,溶蚀裂隙和沟槽中含水;YK13+810—818 段隧道中线往左 2 m 至右侧有溶蚀沟槽和溶洞发育,推测该溶洞向隧道右侧轮廓线外发育,溶蚀沟槽和溶洞中有水和少量泥质充填。

2 隧道衬砌水压力

2.1 突水处理方案

(1) 根据地层揭露情况,施工风险基本可控,可进行短进尺、弱爆破开挖施工,但应制订突水涌泥安全预警方案。

(2) 加强超前超长钻孔探测,查明岩溶发育特征,根据岩溶形态采取合适的处治措施。若揭露岩

溶为管道流,隧道施工后应恢复原有管道的连通,维持原有水系;如揭露岩溶为裂隙流,则采取以堵为主、限量排放的措施,并采用抗水压衬砌结构。

(3) 加强隧道内监控量测及超前地质预报、地表水和地下水环境监测与调查。

2.2 衬砌水压力计算

加固圈的渗透系数 $k_1 = 3.51 \times 10^{-6}$ cm/s, 衬砌的渗透系数 $k_c = 1.23 \times 10^{-7}$ cm/s, 围岩平均渗透系数 $k_2 = 4.12 \times 10^{-4}$ cm/s。半径 $R = 32$ m 以外, 原始渗流场水压力与地下水水压力相等, 即 $P_i = 50$ kPa, 相当于 5 m 高的水柱头。基于流固耦合计算, 得到围岩、衬砌和加固圈中地下水渗透压力分布(见图 5~7)。

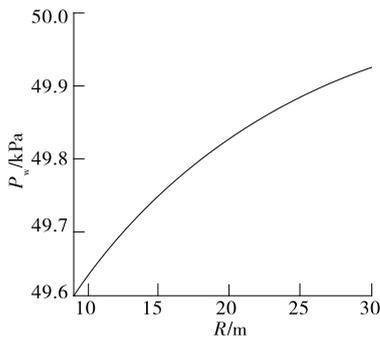


图 5 围岩中渗透水压力分布

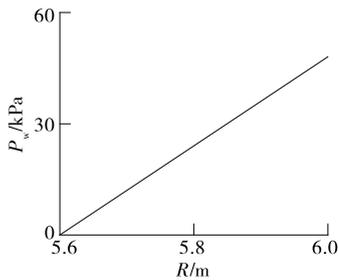


图 6 衬砌中渗透水压力分布

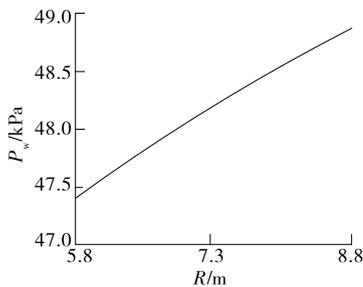


图 7 加固圈中渗透水压力分布

2.3 基于周边位移计算作用在衬砌上的压力

根据设计,隧道按照IV级加强围岩支护,设有仰拱结构。因此,隧道拱脚约束为铰接,假设隧道拱脚

处位移忽略不计。隧道上半断面内轮廓见图 8。通过监控量测,得到隧道拱顶竖向位移,根据竖向位移求出作用在隧道衬砌上的压力,并将计算出的压力简化为径向均布荷载(荷载沿隧道洞周范围均匀分布)。如果考虑渗透水压力,则该力为水压力和围岩压力的总和;如果不考虑渗透水压力,则该力为围岩压力。

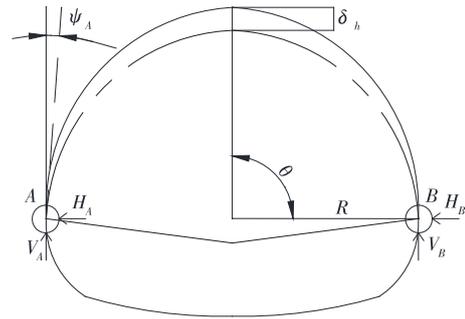


图 8 隧道断面总体示意图
 R 为拱圈半径; δ_h 为拱顶累积下沉量; ψ_A 为拱脚处切线的转角(以逆时针为正); V_A, V_B, H_A, H_B 为拱脚支承反力; $\theta (0 \leq \theta \leq \pi)$ 为拱跨结构对应的圆心角的一半; 实线部分为变形前的轮廓, 虚线部分为变形后的轮廓。

图 8 隧道断面总体示意图

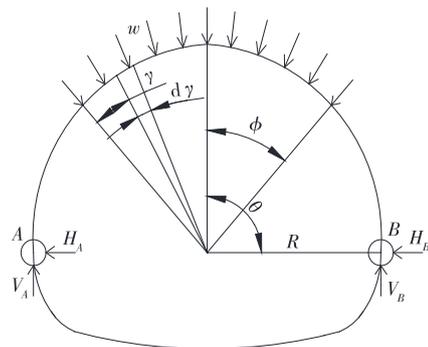


图 9 隧道断面受力示意图

通过分析,得 ψ_A 与 δ_h 的关系近似为:

$$\psi_A = -\arccos \frac{2R(R - \delta_h)}{2R^2 - 2R\delta_h + \delta_h^2} \quad (1)$$

假定在 $2\phi (0 < \phi < \theta)$ 范围内两侧对称分布径向压力 w (隧道断面受力见图 9), 则垂直方向的分力(分布荷载的合力在水平方向的分力为零)为:

$$V_w = \int_0^{2\phi} wR \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi + \gamma\right) d\gamma = 2wR \sin\phi \quad (2)$$

分布荷载对 A 点的力矩为:

$$M_{Aw} = 2R^2 w \sin\phi \sin\theta \quad (3)$$

由结构力平衡及对 A 点的力矩平衡,有:

$$H_B + H_A = 0 \quad (4)$$

$$V_A + V_B - V_w = 0 \quad (5)$$

$$M_{Aw} - 2RV_B \sin\theta = 0 \quad (6)$$

A点的水平位移和转角在隧道结构在荷载 w 作用下的关系为:

$$\begin{cases} \delta_{HA} = \frac{R^3}{EI} \left(A_{HH} H_A + A_{HM} \frac{M_A}{R} - LP_H \right) \\ \psi_A = \frac{R^2}{EI} \left(A_{HH} H_A + A_{MM} \frac{M_A}{R} - LP_M \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: EI 为衬砌结构抗弯刚度; $A_{HH} = 2\theta c^2 + k_1(\theta - sc) - 2k_2sc$; $c = \cos\theta$; $k_1 = 1 - \alpha - \beta$; $\alpha = I/(AR^2)$; $\beta = FEI/(GAR^2)$; F 为形状系数,取1.21; G 为衬砌结构剪切弹性模型; A 为衬砌断面面积; $s = \sin\theta$; $k_2 = 1 - \alpha$; $A_{MH} = A_{HM} = k_2s - \theta c$; $LP_H = \omega Rc[\theta(1 - cm + sn) + k_1/(2c)(scm + c^2n - \theta m - \phi m) + k_2(sm + cn - \theta - \phi)]$; $m = \cos\phi$; $n = \sin\phi$; $A_{MM} = 1/(4s^2)[2\theta s^2 + k_1(\theta + sc) - 2k_2sc]$; $LP_M = \omega R/2[\theta(1 - cm + sn) + k_1/(2s^2)(\theta - \theta cm - \phi sn + sc - sm) + k_2(\theta + \phi - sm - cn)]$ 。

将 $\delta_{HA} = 0, M_A = 0$ 代入式(7),得:

$$\omega = \frac{A_1}{B_1 C_1 - D_1} \quad (8)$$

$$H_A = L_1 N_1 \quad (9)$$

式中: $A_1 = -\{EI \arccos\{[2R(R - \delta_h)]/(2R^2 - 2R\delta_h + \delta_h^2)\}\}/R^3$; $B_1 = (k_2s - \theta c)/(2\theta c + k_1\theta/c - 2k_2s)$; $C_1 = \theta(1 - cm + sn) + k_1/(2c)(scm + c^2n - \theta m - \phi m) + k_2(sm + cn - \theta - \phi)$; $D_1 = 1/2[\theta(cm - 1 - sn) + k_2(\theta + \phi - sm - cn) + k_1/(2s^2)(\theta - \theta cm - \phi sn + sc - sm)]$; $L_1 = \omega Rc/[2\theta c^2 + k_1(\theta - sc) - 2k_2sc]$; $N_1 = \theta(1 - cm + sn) + k_2(sm + cn - \theta - \phi) + k_1/(2c)(scm + c^2n - \theta m - \phi m)$ 。

将式(8)、式(9)代入式(2)~(6),得:

$$H_B = -H_A, V_B = R\omega \sin\phi, V_A = R\omega \sin\phi$$

该隧道 $\theta = 90^\circ$,二次衬砌结构为45 cm C25 砼,初期支护为C20喷射砼、I20工字钢(见图10),工字钢间距 $d = 50$ cm。沿隧道纵向取0.5 m长支护结构为研究对象,衬砌拱顶累计沉降 $\mu_h = 0.018$ m。工字钢弹性模型 $E_s = 212$ GPa,泊松比 $\mu_s = 0.3$ 。砼的泊松比 $\mu_c = 0.2$,C20和C25砼的弹性模量分别为 $E_{c1} = 27.8$ GPa、 $E_{c2} = 30.2$ GPa。

按面积加权平均得出衬砌结构的弹性模量为:

$$E =$$

$$\frac{E_s \times 34.6 + E_{c1} \times (18 \times 50 - 34.6) + E_{c2} \times 45 \times 50}{64 \times 50}$$

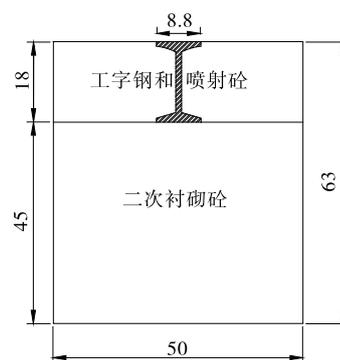


图10 衬砌结构截面图(单位:cm)

33.623 GPa

取 $\phi = 60^\circ$,代入式(8),得 $\omega = 90.11$ kN/m。

隧道衬砌应力是地下水渗透压力和围岩压力之和。前文计算出的衬砌水压力 $P'_{r1} = 48.771$ kPa,同样沿隧道纵向取 $d = 0.5$ m的衬砌来研究,求得该段衬砌上的径向均布水压力为:

$$q_{r1} = dP'_{r1} = 0.5 \times 48.77 \approx 24.39 \text{ kN/m}$$

衬砌上的围岩压力为:

$$q_d = \omega - q_{r1} = 65.72 \text{ kN/m}$$

水压力 q_{r1} 在总压力 ω 中所占比例为27.07%。

为保障隧道的安全,在岩溶发育地段进行衬砌结构设计时要重视地下水压力。

3 结论

(1) 隧道渗流场与围岩和衬砌材料的渗透系数相关,同时受围岩加固圈及加固体的渗透系数大小的影响。

(2) 荷载大小因渗透系数的改变而改变,渗流场的分布与水压头有关,岩溶处理方案制订中应充分考虑这一点。

参考文献:

- [1] Jane C S Long, Peggy Gilmour, Paul A Witherspoon. A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of discshaped fractures[J]. Water Resour Research, 1985, 21(8).
- [2] 易顺民,朱珍德.裂隙岩体损伤力学导论[M].北京:科学出版社,2005.
- [3] 王成绩.研究底板突水的结构力学方法[J].煤炭地质与勘探, 1997(12).
- [4] 闫凯旋,刘辉,潘岳,等.岩溶与采空区隧道涌水突泥区间概率风险响应研究[J].公路与汽运, 2017(3).