

文章编号:1005-0523(2020)06-0034-10

降雨入渗作用下溶洞区域隧道变形规律研究

李 杨^{1,2}, 杨新安^{1,2}

(同济大学 1. 道路与交通工程教育部重点实验室; 2. 交通运输工程学院 上海 201800)

摘要:基于FLAC3D开发考虑降雨入渗条件的非饱和渗流模块,设计考虑充填介质、溶洞位置、降雨强度3种因素的正交数值试验,结合现场实测变形与压力数据,研究了降雨条件下隧道穿越溶洞时的力学特性。结论表明:不同充填介质的溶洞对隧道变形存在影响,主要是因为介质的重力、渗透能力和持水能力的差异带来的孔隙水压力变化所致;溶洞的空间位置导致了隧道力学特性变化存在空间上的差异,拱部附近溶洞对隧道拱部变形与受力均有减小,而边墙附近的溶洞却增加了隧道下断面的变形与受力;从位移释放系数来看,溶洞的存在增大了围岩开挖的空间效应;强降雨补充了地下水,短时间内会增加地应力的量值,给隧道结构带来了额外的承载;当降雨进入溶洞内渗透性较好的土体时,也会改变溶洞对隧道的影响程度。

关键词:公路隧道;溶洞;降雨入渗;数值计算;二次开发

中图分类号:U455

文献标志码:A

本文引用格式:李杨,杨新安.降雨入渗作用下溶洞区域隧道变形规律研究[J].华东交通大学学报,2020,37(6):34-43.

Citation format:LI Y, YANG X A. Research on deformation of tunnel in karst cave area under rainfall infiltration[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(6): 34-43.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.06.005

在我国西南地区修建山岭隧道时常会遭遇喀斯特地貌,喀斯特作用所形成的溶洞给隧道施工和运营带来严重威胁。同时西南地区雨季降雨充沛,在强降雨入渗条件下,隧道围岩与支护结构的稳定变得极为脆弱,施工安全受到巨大挑战。

目前,国内外学者针对降雨入渗和隧道穿越溶洞的稳定问题已开展一些研究工作。例如,蒋中明等^[1]基于非饱和土力学的渗透理论,在FLAC3D平台上开发了降雨入渗的边坡分析模块;陈继华^[2]以渗流理论为基础,比较分析了降雨前后隧道围岩在开挖过程中应力场和位移场的演变规律;乔俊^[3]研究了降雨造成的土体软化与基质吸力的减小给隧道结构稳定性带来的影响;王康等^[4]通过直剪试验分析了含水率对充填红黏土物理力学性质的影响,结合数值计算分析了红黏土充填型溶洞对隧道坍塌冒顶的影响程度;周雪铭等^[5]采用数值模拟,研究了开挖时溶洞与隧道之间的相互作用,得出了采用桩-承台-单边支撑墙-联系梁的处治方式是安全可靠的结论。但目前鲜有将降雨入渗问题和隧道穿越溶洞共同作用的研究,本文针对海德隧道修建中遇到的溶洞及降雨两种效应共同作用的问题,在非饱和降雨入渗分析方法的基础上,设计正交数值试验,结合现场实测数据,探究降雨入渗条件下溶洞在隧道周边不同部位对其围岩稳定与施工力学效应的影响。

1 工程概况

海德隧道为分离式隧道,隧道起止里程为K118+665~K120+900,全长2 138.1 m,隧道净宽11.40 m、高8.85 m,最大埋深约为134 m。根据地质勘查资料,隧道围岩分级为Ⅲ~Ⅴ级。两端洞口段有较厚的红黏土地层,松散,稳定性极差,进洞施工十分困难;洞身大部分位于浅层岩溶中,溶洞极为发育,溶洞大小与发育部位多变,充填类型多样。修建过程中主要遇到以下工程问题。

收稿日期:2020-09-01

作者简介:李杨(1996—),男,硕士研究生,研究方向为地下结构。E-mail:18221799262@163.com。

通信作者:杨新安(1964—),男,教授,博士,研究方向为隧道支护理论、城市隧道工程。E-mail:xyang@tongjieducn.

1) 充填介质多样的溶洞。根据地质勘探资料的统计结果,海德隧道穿越溶洞的主要充填类型见表1。

表1 海德隧道溶洞类型
Tab.1 Types of caves in Haide Tunnel

溶洞类型	充填介质	特点
泥土充填型	红黏土 淤泥、粉砂土	稳定性与其含水状态有关,含水率较大时溶腔内可转变为流态
碎石、块石型	块石或空腔	多出现在节理发育的岩体中、失稳后的形态与突泥口有关

2) 溶洞位置分布复杂。海德隧道的岩溶在隧道各部位附近均有出露案例。经调查统计探明了隧道附近的溶洞分布情况以及数量比例,其中左线93.1%溶洞出露在拱腰位置,5.2%出露于边墙与底板位置处,1.7%位于隧道内。右线97.8%的溶洞出现在拱腰位置处,1.1%出现在边墙与底板中,1.1%出现在隧道内。分布于隧道附近的溶洞主要出露在隧道的拱腰及以上的部位,比例均超过了90%以上。

3) 强降雨。海德隧道地处低纬度高原季风气候区,年平均降雨量约为997.7 mm,降水多集中于5~10月,约占全年降水量的89.7%。修建过程中遇到两个以上的雨季,且多为强降雨,导致该隧道多次出现渗水、变形超限以及坍塌等现象。

降雨入渗至隧道周边,给围岩和支护结构稳定产生极大的不利影响,尤其是泥土充填型的溶腔含水状态会随季节、降雨发生显著变化,与地表连通性较好的溶腔在降雨后,含水率可以达到50%以上,甚至形成黏土颗粒的悬浮液。所以,降雨入参与溶洞的共同作用成为影响隧道围岩和支护结构稳定的决定性因素。

2 考虑降雨影响的非饱和入渗理论

非饱和土由固、液、气等多相介质所构成,其孔隙中既有水也有空气。孔隙气压力 u_a 与孔隙水压力 u_w 二者之差即为非饱和土的基质吸力,计算中当围岩饱和程度较高时,二者量值相差较大,常用 u_w 的绝对值近似代替基质吸力。基质吸力的存在影响着岩土体中的渗流运动、抗剪强度、变形等特性,这是非饱和土与饱和土的区别的根本原因。

2.1 非饱和渗流原理

非饱和土中水的渗流运动受到含水量、饱和度、颗粒大小、温度等因素的影响而变得复杂。为简便起见,在忽略流体压缩性、温度等条件下,基于广义达西定律的土中渗流的运动方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z}) \quad (1)$$

式中: θ 为土体的体积含水率; ψ 为总水头; k_x, k_y, k_z 为 x, y, z 方向的渗透系数。

2.2 土水特征曲线

非饱和渗流问题中,由于土体孔隙中水与空气的含量随着土体饱和度时刻在发生改变,导致不同饱和度状态下土体的渗透性能存在差异,所以非饱和渗流问题的关键就是如何考虑非饱和土中渗透系数 k_w 的变化。Buckingham 等人的研究表明,渗透系数 k_w 与岩土体体积含水率 θ 存在一定的数学关系,而体积含水率则可以描述为基质吸力的函数,这种函数关系常用土水特征曲线(soil-water-characteristic-curve, SWCC)来描述。该曲线横轴表示基质吸力,纵轴表示土体含水量或饱和度,曲线形态大致呈反“S”型,曲线的两个拐点分别代表进气值与残余饱和度,将曲线分为边界效应段、过渡段以及非饱和残余段。

常见的土水特征曲线模型有 Fredlund 等^[9]基于统计分析理论提出的全吸力范围的对数函数的幂函数形

式模型;Van Genuchten 提出的 VG 模型;基于土体质量分布的分形模型;詹良通等^[7]基于进气值与残余含水量两个特征点之间为直线的观点提出的对数函数形式模型等。VG 模型是目前广泛应用的土水特征曲线模型,该模型认为土体介质基质吸力与含水量之间呈幂函数关系。VG 模型的表达式为^[8]

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = F(h) = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2)$$

式中: θ_s 为饱和含水率; θ_r 为残余含水率; α, m, n 为模型拟合参数,其中 $m=1-1/n$; h 为压力水头,一般为负值,其绝对值即基质吸力。基于 VG 模型可以得到非饱和渗透系数与饱和渗透系数之间的关系如下

$$k = k_s \cdot \frac{[1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m^2}} \quad (3)$$

式中: k 为非饱和土的渗透系数, m/d; k_s 为饱和渗透系数, m/d。

根据式(2)与式(3)可以构建非饱和土渗透系数与体积含水率之间的函数关系如下

$$k(\theta) = k_s \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{-1-m})^{1-1/n}]^2 \quad (4)$$

式中: $\Theta = F(h)$ 。

2.3 基于 FLAC3D 中的非饱和渗流模块开发

FLAC3D 在处理饱和和非饱和渗流问题时,认为流体体积变化量与孔隙水压的关系满足下式(忽略温度影响)^[9]

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (5)$$

式中: M 为比奥模量, N/m²; p 为孔隙水压力; n 为孔隙率; t 为时间; s 为饱和度; ζ 为流体体积变化量。当饱和度 s 小于 1 时,土体中出现的负孔隙水压会被 FLAC3D 视作 0,从而忽略基质吸力带来的影响,并且认为土体的相对渗透能力满足以下关系

$$k(s) = s^2(3-2s) \quad (6)$$

因此,不饱和土体单元中的流体流动仅由重力驱动,而非基质吸力。FLAC3D 在处理非饱和渗流问题时存在明显的缺陷,但其提供的 fish 编程语言给予了二次开发修正渗流模块的机会。结合 VG 模型对其渗流模块进行修改的算法思路如下:

- 1) 施加降雨量、地下水位等初始边界条件,进行初始地应力计算,同时确定各类岩土体的 VG 数学模型;
- 2) 遍历岩土体的每个单元,对于孔隙水压力为负,即出现基质吸力的单元,判断该土体单元所属的介质种类,带入相应的 VG 数学模型,推算该单元的体积含水率;
- 3) 根据 2) 中计算的体积含水率代入式(4)中计算该单元的非饱和渗透系数,并更新该单元的渗透系数;
- 4) 进行开挖之后的流固耦合计算,在未开挖完成之前,每一步开挖重复 2), 3) 步。

3 数值计算正交试验设计

3.1 数值模型及材料参数

1) 模型构建。选取溶洞数量较多的左洞进口段 ZK118+995~ZK119+080 进行数值模拟。该段隧道埋深约 70 m,由上自下地层分别为 30 m 红黏土、40 m 灰岩,模型中隧道跨度 12.9 m、高 10.35 m。为减小模型边界效应,模型尺寸为 $x=120$ m, $y=120$ m, $z=85$ m,水位根据勘探资料取地表以下 40.0 m。开挖工法采用三台阶法,上台阶长度取 9.0 m,循环进尺 0.6 m。根据统计分析,溶洞体积平均值为 80.05 m³。在数值模型中,将溶洞简化为长短轴及高度分别为 11, 7 m 以及 9 m 的椭球柱,位于隧道纵向 18~27 m,实际中溶洞处于拱腰处,充填介质为红黏土。采用 FLAC3D 的 INTERFACE 处理溶洞与围岩之间的接触面。

2) 材料参数。地层以及支护结构建模参数见表 2。

表 2 地层及支护结构材料参数
Tab.2 Material parameters of stratum and supporting structure

参数	红黏土	灰岩	砂土	锚杆	喷射混凝土
密度 $d/(kg/m^3)$	1 830.0	1 900.0	1 600.0	7 800.0	2 500.0
弹性模量 E/MPa	8.78	1 000	15.2	200 000	28 000
黏聚力 c/MPa	0.04	0.15	0.01	-	-
内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	11.8	24.0	21.1	-	-
泊松比 μ	0.42	0.44	0.33	-	-
水泥浆剪切刚度 K/GPa	-	-	-	15.0	-
水泥浆黏聚力 c_s/MPa	-	-	-	0.8	0.2

3) 红黏土及砂土的 VG 模型。由于充填介质以及地层主要是红黏土与砂土,考虑到灰岩的渗透性能与土体相比差别较大,且基本位于地下水位以下,故将灰岩考虑为饱和状态。根据杨宏宇等^[9]、谭龙等^[1]的研究成果,选取典型红黏土以及砂土的土水特征曲线 VG 模型,如图 1,模型分别为式(7)、式(8)。

$$\text{红黏土: } \frac{\theta-0.129}{0.215-0.129} = \frac{1}{[1+(0.089h)^{1.442}]^{0.306}} \quad (7)$$

$$\text{砂土: } \frac{\theta-0.024}{0.407-0.024} = \frac{1}{[1+(0.080h)^{1.940}]^{0.49}} \quad (8)$$

饱和渗透系数根据经验取值^[12]:红黏土为 5.79×10^{-4} mm/s,砂土为 4.64×10^{-2} mm/s。除块石、空腔型溶洞模拟为未填充外,红黏土、砂土填充程度考虑为全填充满。

3.2 试验方案

溶洞充填介质 3 个水平分别为:红黏土、块石空腔以及砂土。降雨量的 3 个水平分别为:100,400,800 mm/d,均模拟降雨 20 d。溶洞空间位置的 3 个水平分别为:拱顶、拱腰以及边墙。

3.3 正交试验表设计

设计 3 因素 3 水平的正交数值计算试验,正交试验见表 3。

表 3 数值计算试验正交表
Tab.3 Orthogonal table of numerical calculation test

试验编号	因素 1(充填介质)	因素 2(降雨量)	因素 3(溶洞位置)
1	水平 1	水平 1	水平 1
2	水平 1	水平 2	水平 2
3	水平 1	水平 3	水平 3
4	水平 2	水平 1	水平 2
5	水平 2	水平 2	水平 3
6	水平 2	水平 3	水平 1
7	水平 3	水平 1	水平 3
8	水平 3	水平 2	水平 1
9	水平 3	水平 3	水平 2

注:因素 1 水平 1,2,3 分别对应红黏土、块石空腔以及砂土;因素 2 水平 1,2,3 分别对应 100,400 mm/d 以及 800 mm/d;因素 3 水平 1,2,3 分别代表拱顶、拱腰以及边墙。

4 计算结果与实测对比分析

图 2 是拱顶及拱腰变形与 ZK118+995 断面现场实测值随进尺距离变化的曲线。从图 2(a)中可以看出,实

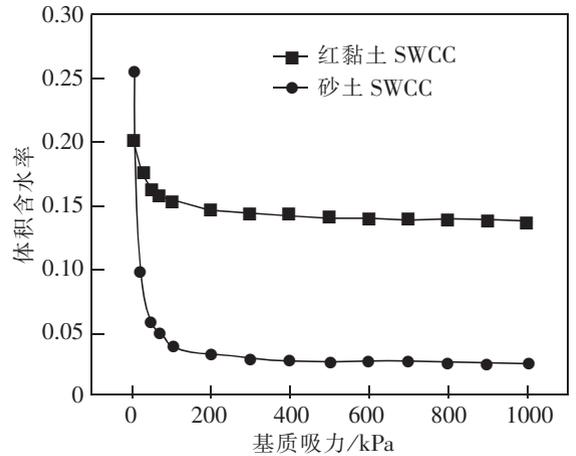


图 1 典型红黏土与砂土的土水特征曲线
Fig.1 Soil-water characteristic curves of typical red clay and sand

测拱顶下沉在进尺达到 55 m 后稳定为 14.4 mm, 试验结果稳定在 14~16 mm。试验结果还显示进尺达到 20~30 m 时变形出现减小, 这表明进尺到达了溶洞区域。图 2(b) 同样显示进尺达到 20~30 m 时, 拱腰处变形幅度较大。

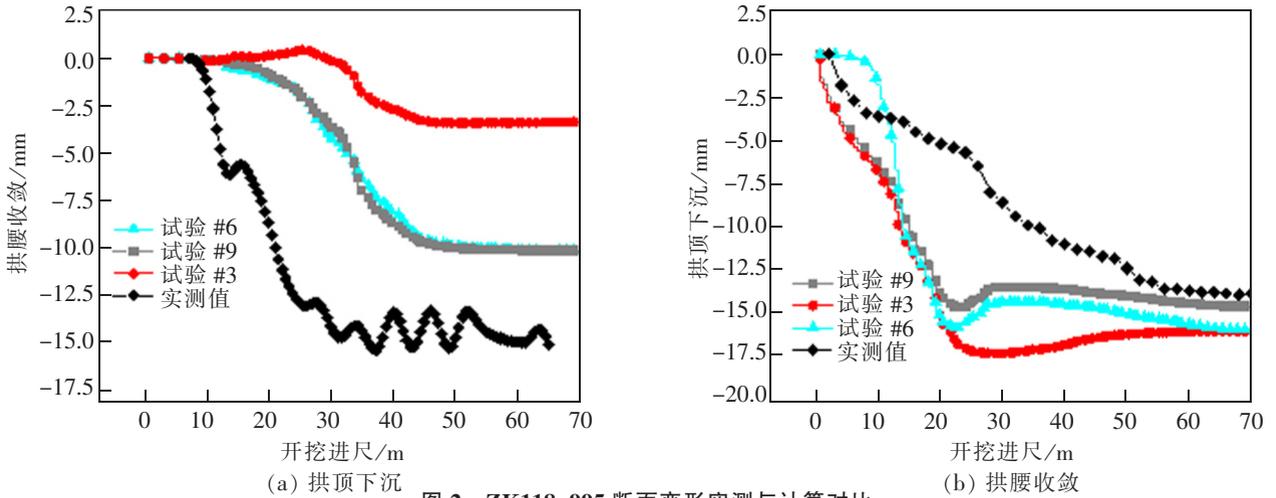


图 2 ZK118+995 断面变形实测与计算对比

Fig.2 Comparison of actual measurement and calculation of ZK118+995 section deformation

4.1 溶洞充填介质对隧道的影响

图 3 为 3 种溶洞分布状态下不同纵深处的拱顶下沉试验值, 其中图 3(d) 为实测值及其 3 次样条插值平

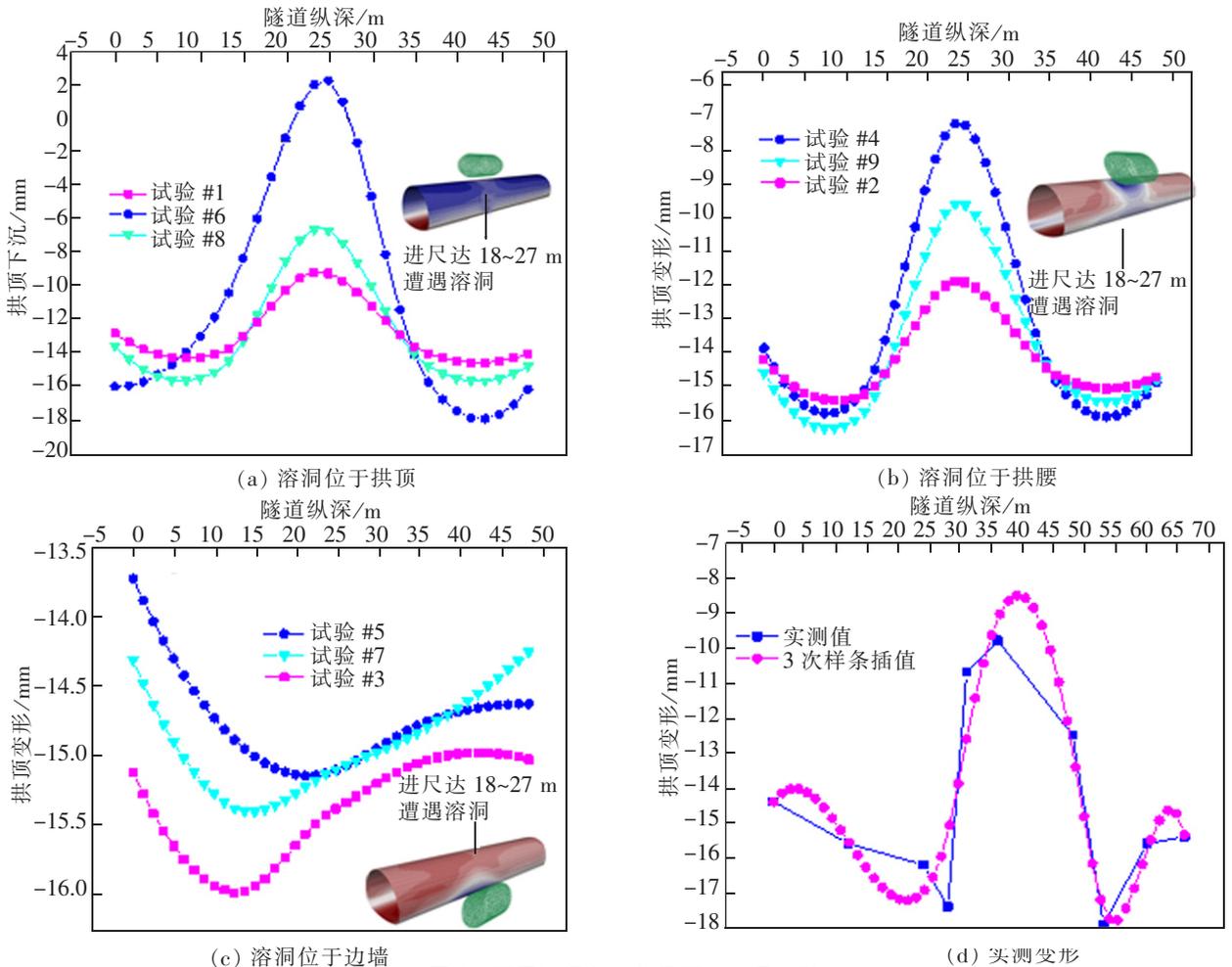


图 3 不同溶洞分布位置下的拱顶变形

Fig.3 Vault deformation at different karst cave distribution locations

滑后的结果。比较图 3(a),图 3(b)可以看出,在纵深 17.5~27.0 m,即溶洞出现的区域,拱顶变形有所减小。之所以会出现溶洞附近拱顶变形变小,是因为充填介质密度小于围岩灰岩密度,导致开挖到此区域时拱部压力减小。故这种变形减小的程度与充填介质种类有关。图 3(a),图 3(b)中不同进尺的拱顶变形极差大小排序分别为 #6>#8>#1, #4>#9>#2。对应的充填介质块石空腔>砂土>红黏土。其中试验 #6、#4 的极差分别达到 18.0,8.0 mm。这是因为空腔型溶洞带来了较大的重力损失,从而大幅度减小了作用在隧道上的围岩压力,甚至出现试验 #6 中拱部岩土体陷入空腔内导致拱顶变形为正的异常现象。砂土型溶洞产生的变形减小作用大于红黏土的现象则需要考虑两种介质的持水能力来解释。3.1 中土水特征曲线表明,同一体积含水率下,砂土产生的基质吸力小于红黏土,即砂土的持水能力弱于红黏土。开挖至溶洞附近时,在基质吸力作用下,红黏土吸收的水分多于砂土,导致红黏土溶洞施加给拱部围岩的压力大于砂土充填溶洞。所以红黏土溶洞对于隧道拱部变形的影响强于持水能力较弱的砂土充填型溶洞。图 3(d)中实测的不同纵深处拱顶下沉极差为 9.5 mm,变形最小值出现在 22.5~52.5 m,说明实际条件下的溶洞影响更复杂。图 3(c)中溶洞处于边墙附近,与图 3(a),图 3(b)相反,此时在溶洞附近的拱顶下沉反而较大,且最大值出现在 12.0~18.0 m,即溶洞前方的区域。推测是溶洞位置导致地应力场及孔隙水压力场不对称分布的原因。

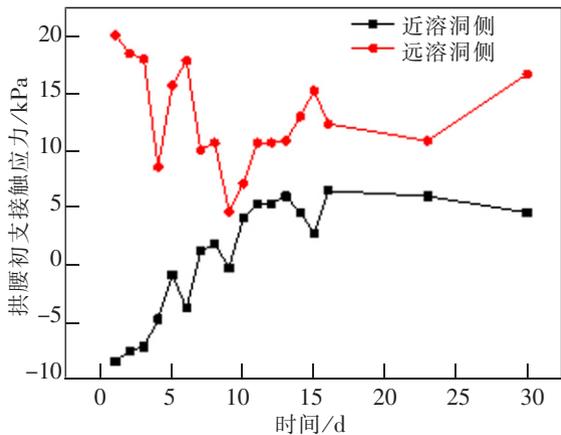
4.2 溶洞空间位置对隧道的影响

上文中溶洞位于边墙导致拱部变形增大说明了溶洞空间位置确实会带来隧道变形的改变。表 4 为溶洞位于拱腰及边墙处时隧道左右侧变形差距。由表 4 可知,当溶洞位于右拱腰附近时,右拱腰的变形比左拱腰小约 2.5 mm;当溶洞位于右边墙附近时,右边墙的变形比左边墙稍大约 0.5 mm。结合现场实测的拱腰处初支接触应力于钢架内力左右侧差异来验证试验得到的变形差异,见图 4。图 4(a)中近溶洞侧实测得到的初支接触应力小于远溶洞侧,甚至开始时出现了方向相反的负应力值,随着应力逐渐稳定后,远近溶洞两侧应力值差异达到 10 kPa 左右。图 4(b)中不管是钢架内侧还是外侧,靠近溶洞处监测到的钢架内力均小于远离溶洞处监测到的数据。无论溶洞位于右拱腰还是右边墙附近,不同试验中隧道左侧结构的变形曲线均基本一致,据此可推断位于隧道右侧溶洞的影响范围并未到达隧道左侧。而由于溶洞靠近右侧,导致不同试验中右侧变形随开挖步距的曲线形态及最终稳定值存在一定差异。

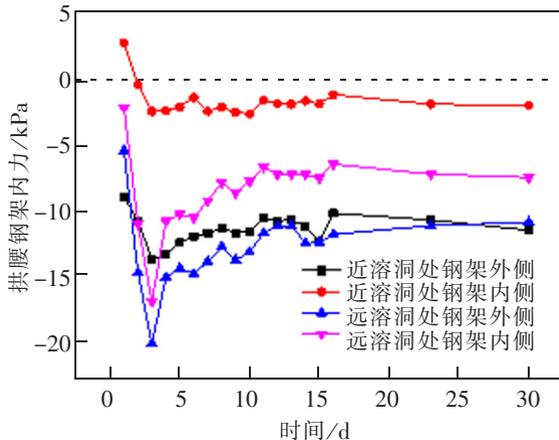
表 4 溶洞位于不同位置处时隧道变形差异

Tab.4 Tunnel deformation difference when the cave is located at different locations

溶洞外露位置	溶洞位于右拱腰附近	溶洞位于右边墙附近
隧道左右拱腰变形绝对值之差	2.5 mm(右拱腰变形较小)	1.2 mm(右边墙变形较小)
隧道左右边墙变形绝对值之差	1.1 mm(右拱腰变形较大)	0.5 mm(右边墙变形较大)



(a) 实测拱腰初支接触应力



(b) 实测拱腰钢架内力

图 4 实测溶洞附近隧道结构受力

Fig.4 The measured force of the tunnel structure near the karst cave

4.3 溶洞附近的隧道开挖空间效应的变化

通过对比实测数据与试验结果还可以发现溶洞会增加隧洞开挖的空间效应。研究中常用位移释放系数随开挖面变化的曲线来描述隧洞开挖的空间效应^[12],位移释放系数计算公式为: $U=u(x)/u_{\infty}$,其中 U 为位移释放系数, $u(x)$ 为研究断面围岩上某点此时的位移, u_{∞} 为该点最终稳定位移。在位移释放系数纵向分布曲线上,曲线斜率越大的地方表示该处空间效应越大。图5是试验#1开挖至溶洞断面及实测ZK119+103断面(在溶洞前方8m)位移释放系数达到0.7左右时的位移释放系数纵向分布曲线,采用 Boltzmann 模型进行拟合。#1中-15~0 m处,曲线斜率较大,存在明显的空间效应,实测显示在-12~5 m也有明显的空间效应。空间效应增大的区域与溶洞位置重合,表明溶洞的存在改变了围岩介质的连续性,进而影响了围岩应力场分布的连续性,从而增大了开挖的空间效应。

4.4 溶洞对孔隙水压力分布的影响

溶洞的存在导致了围岩空间分布的不连续,由于充填介质的渗透性能、持水能力等与周边围岩存在差异,所以溶洞的存在对孔隙水压力的分布有显著影响,从而作用在隧道上的水压力也会改变。图6是红黏土充填溶洞出现在不同位置时(即试验#1、试验#2与试验#3),隧道附近的孔隙水压力场的分布情况。由图6可知,隧道在溶洞附近的位置都出现了孔隙水压力降低的情况,其中试验#1降低至60 kPa左右,试验#2降低至20 kPa左右,试验#3降低至30 kPa左右。由于孔隙水压力的降低,势必会导致地下水从高压区流向低压区。由压力差带来的流矢量方向均指向溶洞,地下水流动的拖曳力与溶洞中充填物重力的合力才是最终作用在围岩上的压力,从而导致靠近溶洞处的隧道结构变形存在明显不同,具体是增大还是减小,还与溶洞与隧道的相对位置有关。

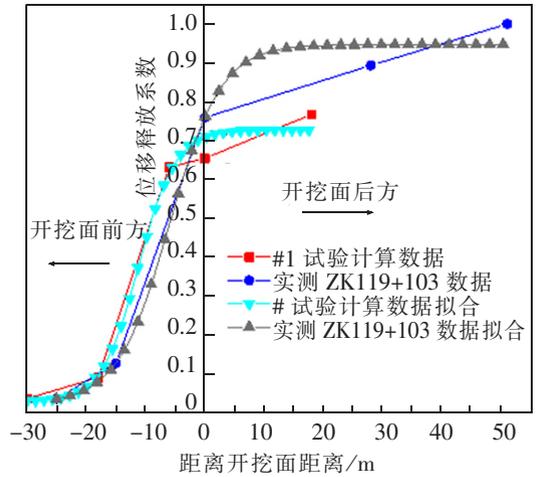
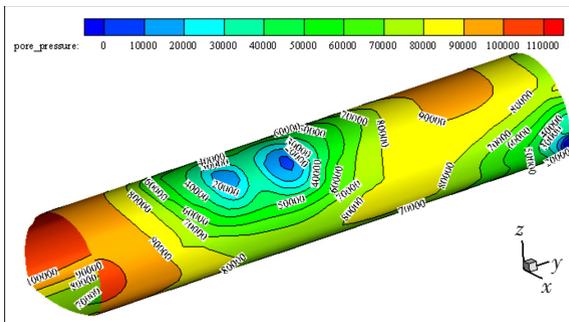
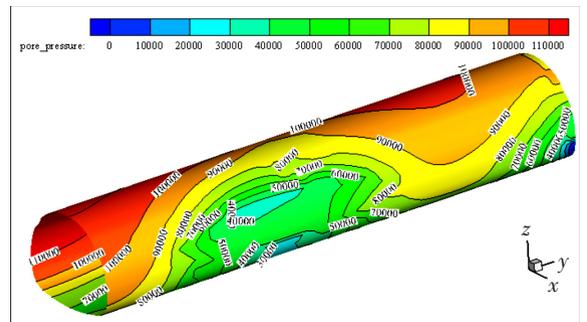


图5 位移释放系数纵向分布曲线
Fig.6 Longitudinal distribution curve of displacement release coefficient



(a) 试验 #1



(b) 试验 #2

(c) 试验 #3

图6 隧道附近孔隙水压力场(单位:Pa)

Fig.6 Pore water pressure field near the tunnel(Unit:Pa)

图 7 是降雨入渗后溶洞附近的宏观受力简图。在图 7(a),图 7(b)中,当溶洞位于拱部时,由于孔隙水压力减小,产生指向溶洞附近的流动矢量。深度越深,水压力越大,产生向上的流动矢量的压力差大于产生向下的流动矢量的压力差(箭头越深表示流动矢量越大),即两个方向的流动矢量合矢量向上。在溶洞重力抵消流动矢量拖曳力的合力作用后,隧道拱部实际承受的压力小于溶洞充填物的重力,这进一步解释了 4.1 所述的变形减小作用,也解释了表 4 中右拱腰变形小于左拱腰变形的现象。当溶洞出现在隧道边墙附近时,由于较靠近隧道下方,地下水流动矢量带来的合力方向向上,导致隧道右下方承受额外的压力,出现了表 4 中右边墙变形稍大于左边墙的情况。当然这仅是从孔隙水压力的角度做出的宏观受力分析,实际上当溶洞中的充填介质由于降雨影响而饱水后,还会产生膨胀力,吸收的水分产生的重力也会作用到隧道及周边围岩上。但结合现场实测的初支接触应力与钢拱架内力的左右差异(即图 4),可以推断孔隙水压力差带来的渗流力大于岩土体吸收水分而增加的重力,从而导致最终合力小于无溶洞时的围岩重力。

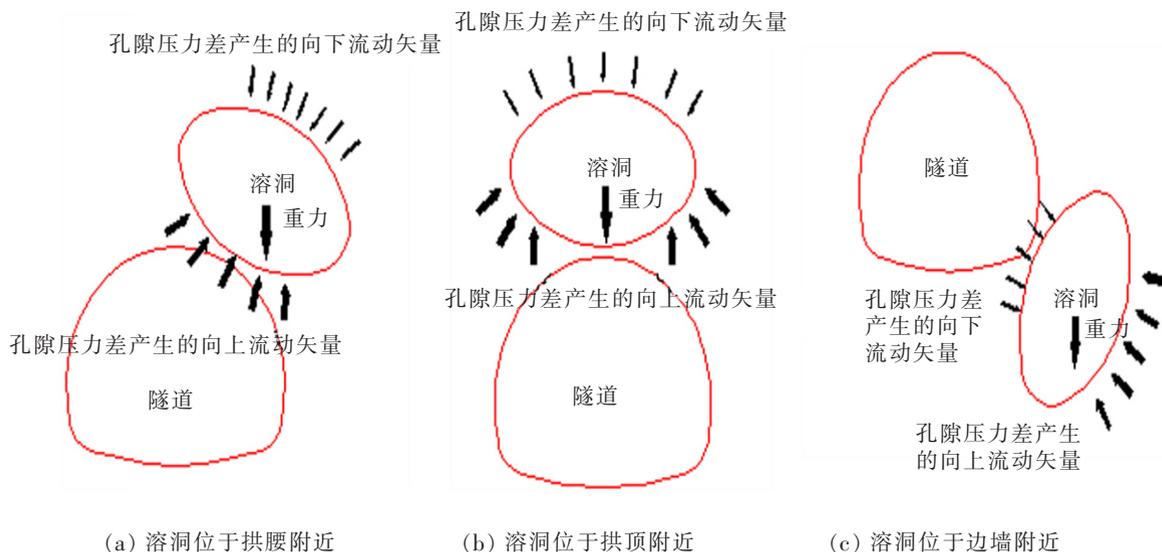


图 7 溶洞位于不同位置时的受力简图

Fig.7 Sketch map of the force with the karst cave located at different positions

4.5 不同降雨量下的地应力分布

根据试验 #1、#8 的计算结果可知,降雨量越大,同等深度下的地应力越大,例如深度达到 80 m 时,100 mm/d 下的地应力在 150~175 kPa,而 400 mm/d 为 175~200 kPa。所以在降雨量增大的情况下,隧洞受到的地应力荷载随之也会增大,这就是隧道施工中雨季经常发生大变形甚至拱部塌方冒顶现象的原因。3 组试验隧洞各部位的最大主应力见表 5。可以看出随着降雨量的增大,隧洞各关键部位的最大主应力也随之上

表 5 不同降雨量下隧道各部位最大主应力(ZK118+995)

Tab.5 Maximum principal stress of each part of tunnel under different rainfall (zk118 + 995)

部位	试验 #1	试验 #8
拱顶	-855.6	-862.9
拱腰	-668.9	-716.4
边墙	-1 165.4	-1 214.5

升,尤其拱腰处增加幅度较大。从地应力云图形态上看,隧道边墙角出现了较大的地应力值。降雨带来的地应力增大,不但增加隧道围岩压力,还对边墙角等部位的稳定性产生不利影响。

5 结论

1) 不同充填介质的溶洞对隧道变形的影响不同,主要是因为介质的重力、渗透能力和持水能力的差异带来的孔隙水压力变化导致。红黏土类型的溶洞渗透及持水能力略差于砂土充填型溶洞,故带来的变形影响也小于砂土充填型溶洞;而空腔块石型溶洞,由于重力缺失,导致的影响类似于围岩开挖的突然卸载,对隧道力学特性影响最大。

2) 溶洞的空间位置导致了隧道力学特性变化的差异。当溶洞位于拱部附近时,隧道拱部变形与受力均有减小;当溶洞位于边墙附近时,靠近溶洞的隧道边墙一侧的受力和变形反而增大。

3) 溶洞的存在破坏了隧道围岩介质的连续性,在改变围岩变形的基础上,还进一步增加了隧道开挖时的空间效应,具体表现为溶洞区域内的围岩位移释放速度加快。

4) 强降雨补充了地下水,短时间内改变了地应力场,增大了围岩压力;当降雨进入溶洞内渗透性较好的充填介质时,使介质达到近饱和甚至饱和状态,从而改变溶洞对隧道的影响程度。

参考文献:

- [1] 蒋中明,熊小虎,曾铃. 基于 FLAC~(3D)平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学,2014,35(3):855-861.
- [2] 陈继华. 降雨对山岭隧道围岩受力变形影响研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2013.
- [3] 乔俊. 降雨入渗对隧道的影响数值分析[J]. 山西交通科技,2016(2):83-85.
- [4] 王康,孙熔正,杨新安. 充填型浅层岩溶隧道溶洞处理技术研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(3):23-28.
- [5] 周雪铭,刘辉,彭川,等. 岩溶隧道开挖对溶洞处治结构影响的数值模拟分析[J]. 岩土力学,2011,32(1):269-275.
- [6] FREDLUND D C,RAHARDJO. 非饱和土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:92-95.
- [7] 詹良通,包承钢. 土水特征曲线及其在非饱和土力学中的应用[C]//南水北调膨胀土渠坡稳定和滑动早期预报研究论文集,武汉:长江科学院,1998:79-90.
- [8] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of American Journal,1980,44:892-898.
- [9] ITASCA CONSULTING GROUP INC. Online Manual of FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions[M]. Version 5.01. Mineapois:Itasca Inc,2013:1-24.
- [10] 杨宏宇,刘艳敏,白伟明,等. 红黏土土水特征曲线试验及其数学模型研究[J]. 四川建筑科学研究,2015,41(1):126-129.
- [11] 谭龙,韦昌富,田慧会,等. 土体持水特性及孔隙水分布特性的试验研究[J]. 工程地质学报,2017,25(1):73-79.
- [12] 张延森. 考虑空间效应的深埋富水围岩隧道开挖变形研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

Research on Deformation of Tunnel in Karst Cave Area Under Rainfall Infiltration

Li Yang^{1,2}, Yang Xin'an^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The Haide tunnel needed to pass through a large number of caves in the construction, and encountered the problems of over limit deformation and collapse caused by heavy rainfall. Based on FLAC3D, an unsaturated seepage module considering rainfall infiltration was developed in this paper. Orthogonal numerical experiments considering three factors of filling medium, karst caves' location and rainfall intensity were designed. Combined with measured deformation and pressure data, the tunnel's mechanical characteristics were studied. The conclusions show that the karst caves with different filling medium have an effect on the tunnel deformation, which is mainly caused by the change of pore pressure due to the difference of medium's gravity, permeability and water holding capacity. The spatial position of the karst cave causes the spatial difference of the mechanical properties of the tunnel. The caves near the arch have a restraining effect on the deformation and stress of the tunnel's arch, while the caves near the side wall increase the deformation and stress of the lower section of the tunnel. According to the displacement release coefficient, the existence of these caves increases the spatial effect of tunnel construction. Heavy rainfall supplies the groundwater, which then increases the magnitude of the ground stress in a short period of time, finally brings additional bearing capacity to the tunnel structure. When the rainfall enters the well-permeable soil in the cave, the influence of the cave on the tunnel will also be changed.

Key words: highway tunnel; karst cave; rainfall infiltration; numerical calculation; secondary development