

刘永莉,管振德,肖衡林. 基于 BOTDR 技术的深埋岩溶土洞监测分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 427-432.
DOI:10. 11932/karst20180314

基于 BOTDR 技术的深埋岩溶土洞监测分析

刘永莉^{1,2}, 管振德^{3,4}, 肖衡林¹

(1. 湖北工业大学生态道路湖北省工程技术研究中心, 武汉 430068;

2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074;

4. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要:岩溶洞穴发育成地表塌陷影响因素复杂。为了获得岩溶土洞监测标识区域的应力特征,在大沙基松动土压力理论基础上,对岩溶土洞发育历程中松动区竖向土压力进行了分析。松动区的空间位置由洞穴特征及其上方岩土介质的物理、力学性质决定;平面应变和非平面应变条件下,松动区竖向土压力的分布特征差异明显。根据岩溶土洞上方松动区竖向土压力的分布特征,结合 BOTDR 技术优点,提出应用 BOTDR 技术监测岩溶土洞的发育,针对光纤监测系统设计中光纤布线型式进行了分析。岩溶土洞应力场变化特征的定量研究对光纤传感技术应用于岩溶土洞监测设计提供理论依据和指导。

关键词:岩溶土洞;岩溶塌陷;松动区;监测;BOTDR

中图分类号:P642.26; U412.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)03-0427-06

0 引 言

岩溶洞穴可分为基岩洞穴和第四系松散层洞穴,洞穴的坍塌常由上覆岩土介质失稳所致。由于岩溶洞穴发育在空间上具有隐蔽性,时间上具有突发性,因此,其监测及发展趋势预测预报是工程界及学术界的一个难题,相关部门对其进行了大量研究^[1-3]。

国外对岩溶塌陷的监测研究始于上世纪 80 年代,首先将地质雷达应用于潜在塌陷的监测。国内于 21 世纪初开始了有规模的监测研究实践。雷明堂等^[4]在模型试验研究基础上,提出了以岩溶管道裂隙水压力监测为主,固定测线的地质雷达定期探测为辅的岩溶塌陷监测方法,并建立了岩溶塌陷监测预警示范站。蒋小珍等^[5]提出将时域反射技术(Time-Domain Reflectometry,简称:TDR)应用于岩溶土洞塌陷监测,通过室内试验与野外试验对同轴电缆的选型

及埋设技术进行了验证;同时,蒋小珍^[6]提出将分布式光纤传感技术应用于岩溶塌陷监测,并通过物理模型试验进行验证。张桂香等^[7]是国内首次将光纤传感技术投入到岩溶塌陷监测中,并对深圳龙岗区的岩溶塌陷发展过程进行了实时连续监测。蒙彦,管振德^[8]对光纤传感技术应用于岩溶塌陷预报的关键问题进行了探讨和模型试验。另外,王俊茹等^[9]、雷旭友等^[10],分别尝试将浅层地震、电磁波 CT 应用于岩溶塌陷监测,但后期研究较少。岩溶塌陷监测是判断塌陷最直观的方法,目前针对岩溶监测的研究关注比较多的是浅层发育的洞穴,多偏重于工程实践和应用,对监测设计理论及后续监测数据分析应用研究不足,尚不能完全满足岩溶洞穴监测的需求,此方面的问题亟待关注和解决。

分布式光纤传感技术可以监测光纤植入环境中光纤沿线受力变化及温度变化信息,通过应变变化反

基金项目:广西岩土力学与工程重点实验室开放基金(14-KF-06);国家自然科学基金(51608181,51678223)

第一作者简介:刘永莉(1984-),女,博士,主要从事光纤传感及桩基工程的研究,E-mail:maryroseli@126.com。

通信作者:管振德(1983-),男,副研究员,从事岩溶工程与地质灾害研究,E-mail:guanzd@karst.ac.cn。

收稿日期:2017-05-17

映所监测环境的物性特征,具有精度高、定位准确、长距离、在线实时监测等优点,近些年来在地质工程及土木工程中得到了较为广泛的应用。

本文在现有研究基础之上,根据太沙基松动土压力理论,研究了岩溶土洞发育引起洞周松动区竖向土压力变化特征,探讨了深埋岩溶土洞应用布里渊光时域反射计(Brillouin Optical Fiber Time Domain Reflectometry,简称:BOTDR)的监测方案设计,以期光纤传感技术应用于岩溶塌陷监测设计提供理论依据和指导。

1 岩溶洞穴坍塌机制

1.1 岩溶洞穴的发育特点

土洞根据埋深可分为浅层和深层土洞。浅层土洞一旦发生坍塌,不能形成平衡拱,一般都会形成陷穴而反映到地面,具有突发性。深层土洞因洞穴大

小、土质密实程度不同,有的洞穴可能经过较长时间或引起多次坍塌才出露地面成为陷穴。

溶洞一般岩体强度较高,主要是考虑对选择持力层的影响。地表塌陷一般是土洞塌陷,宏观变形较大,本文以土洞为研究对象进行力学分析。

1.2 岩溶土洞稳定性力学分析

岩溶土洞稳定性分析主要是采用静力学模型,无论是否考虑土拱效应,都是计算临界土洞的高度,据此判断其稳定性。应用太沙基松动土压力理论对岩溶土洞的发育进行分析^[11-13]。

如图1所示,根据太沙基理论,简化地质模型,土洞周围滑移面从洞底面以 $45^\circ - \frac{\phi}{2}$ 的角度倾斜,假设以曲线AF',BE'到达某一深度,则ABC'E'F'D'为松动区,E'F'剖面线以上不受岩溶发育影响,即岩溶发育至某一阶段,相应的变形增量为零。分平面应变和非平面应变条件两种情况进行计算论。

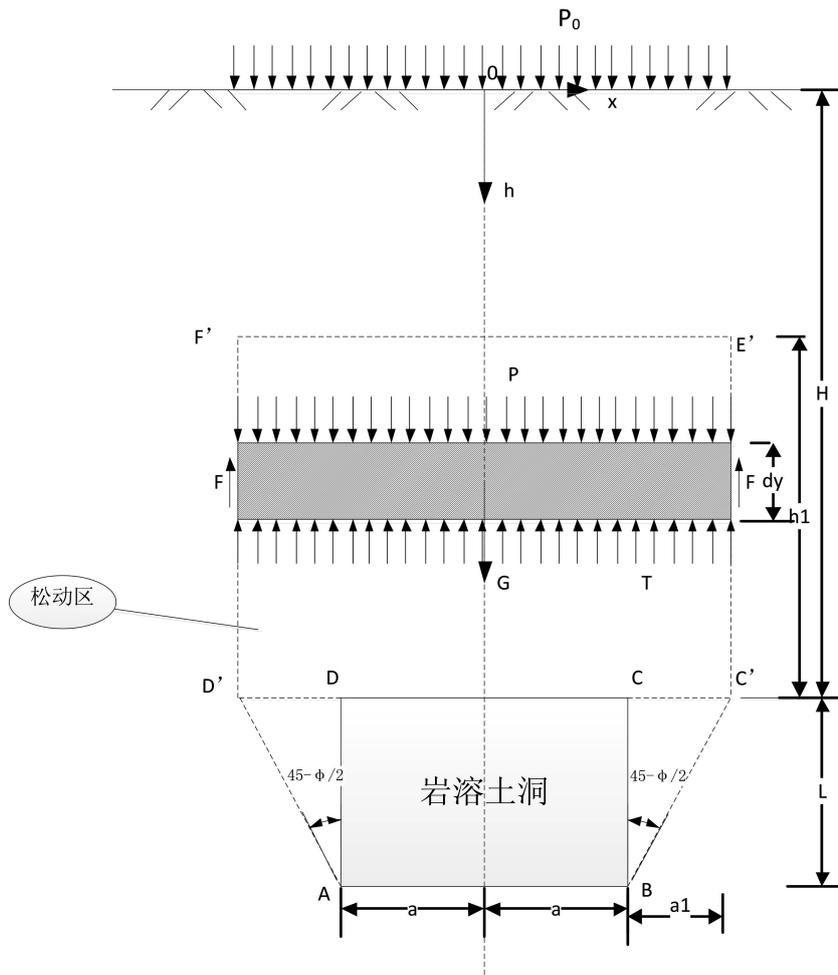


图1 土洞发育中松动土压力示意图

Fig. 1 Sketch of loose earth pressure during the development of soil caves

1.2.1 平面应变条件

滑块的宽度可表示为:

$$B_1 = 2(a + a_1) = 2(a + L \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})) \quad (1)$$

假设松动区以上未受影响的土层以外荷载的形式作用在松动区上,在松动区内取厚度为 dh 的薄层单元进行受力分析,规定力的方向向下为正,所受竖向力如下:

$$\text{单元体自重 } G = 2(a + a_1)\gamma dh \quad (2)$$

作用于单元体上表面竖直向下的上覆土层的压力

$$P = 2(a + a_1)\sigma_v \quad (3)$$

作用于单元体下表面的竖直向上的下伏土体托力

$$T = -2(a + a_1)(\sigma_v + d\sigma_v) \quad (4)$$

作用于单元体侧面的竖直向上的总侧向摩擦力

$$F = -2\tau_f dh \quad (5)$$

式中: a 是土洞半宽; (a + a₁) 土洞周围松动带的半宽; L 是土洞高度; γ 是土体容重; σ_v 是竖向土压力; τ_f 是土体抗剪强度; p₀ 地面荷载集度。

$$\text{根据库伦准则, } \tau_f = K_0 \sigma_v \tan \varphi + c \quad (6)$$

式中: c 土的黏聚力; φ 是土体内摩擦角; K₀ 是侧压力系数。

根据薄层单元体的竖向平衡条件 G + P + T + F = 0, 综合式(1)–(7)可简化为:

$$\frac{d\sigma_v}{dh} = \gamma - \frac{K_0 \sigma_v \tan \varphi + c}{a + a_1} \quad (7)$$

边界条件: 当 y = H - h₁ 时, σ_v = r(H - h₁) + p₀, 其中, (H - h₁) 是松动带上边界埋深, H 是土洞埋深。

根据边界条件, 解方程(7)得到地面以下埋深 h 处, 竖向土压力 σ_v 表达式为:

$$\sigma_v = \frac{(a + a_1)\gamma - c}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{\frac{K_0 \tan \varphi}{a + a_1}(H - h_1)} e^{-\frac{K_0 \tan \varphi}{a + a_1} h}) + [(H - h_1)r + p_0] e^{\frac{K_0 \tan \varphi}{a + a_1}(H - h_1)} e^{-\frac{K_0 \tan \varphi}{a + a_1} h} \quad (8)$$

$$H - h_1 \leq h \leq H$$

1.2.2 非平面应变条件

非平面应变条件下, 滑动土柱的横截面为正方形, 边长可根据公式(1)确定, 受力分析如下

单元体自重:

$$G = 4(a + a_1)^2 \gamma dh \quad (10)$$

作用于单元体上表面竖直向下的上覆土层的压力

$$P = 4(a + a_1)^2 \sigma_v \quad (11)$$

作用于单元体下表面的竖直向上的下伏土体托力

$$T = -4(a + a_1)^2 (\sigma_v + d\sigma_v) \quad (12)$$

作用于单元体侧面的竖直向上的总侧向摩擦力

$$F = -8(a + a_1)\tau_f dh \quad (13)$$

则:

$$\frac{d\sigma_v}{dh} = \gamma - \frac{2(K_0 \sigma_v \tan \varphi + c)}{a + a_1} \quad (14)$$

边界条件: 当 y = H - h₁ 时, σ_v = r(H - h₁) + p₀, 其中, (H - h₁) 是松动带上边界埋深。

根据边界条件, 解方程(14)得到地面以下埋深 h 处, 竖向应力表达式为:

$$\sigma_v = \frac{(a + a_1)\gamma - 2c}{2K_0 \tan \varphi} (1 - e^{\frac{2K_0 \tan \varphi}{a + a_1}(H - h_1)} e^{-\frac{2K_0 \tan \varphi}{a + a_1} h}) + [(H - h_1)r + p_0] e^{\frac{2K_0 \tan \varphi}{a + a_1}(H - h_1)} e^{-\frac{2K_0 \tan \varphi}{a + a_1} h} \quad (15)$$

$$H - h_1 \leq h \leq H$$

式中物理意义同上。

2 监测原理

岩溶土洞的发展在覆盖层内部是一个缓慢渐进的过程, 在临近地面时, 会突发大幅度的破坏变形。陈国亮^[14]通过岩溶塌陷的土工模型试验对此进行了验证。因此, 针对岩溶土洞塌陷的监测, 在土洞缓慢变形阶段开展比较有意义, 在开展岩溶塌陷监测设计初期, 首选应当分析岩溶土洞变形发展阶段。土洞的变形发展过程会经历变形阶段、坍塌阶段和暂时稳定阶段, 受外界因素激发后, 重复这个过程, 直至完全坍塌。土洞变形破坏历时较长, 通过长期的深部变形观测, 可以获得岩溶土洞发育过程中变形特征, 作为判断、预测岩溶土洞塌陷的主要依据。

BOTDR 技术是根据布里渊频移与光纤温度和应变的关系实现的^[15], 其定量关系可表示为:

$$\nu(e, T) = \nu(0, T_r) (1 + C_e e + C_T (T - T_r)) \quad (16)$$

式中: ν 是布里渊频移; e 是应变; T 是温度; T_r 是参考温度; C_e、C_T 是布里渊频移系数。

BOTDR 测试显示的结果是应变, 公式(16)表明测试结果是受温度变化影响的, 温度变化和应变变化不能从单一的布里渊频移中区分开来, 即是该技术在应用中通常需要做温度补偿。

当岩溶土洞周围的地质环境处于相对稳定状态时, 土洞停止发育, 而地温的变化是周期性的, 可以通过当地年地温变化记录值来修正应变监测值; 当地质环境发生动态变化时, 岩溶土洞发育, 同时也引起地温的异常。岩溶土洞发育与周围地质环境的变化是

相辅相成,互为因果。BOTDR 监测结果反映的是力与温度的综合作用,也就是岩溶土洞发育中地质作用的结果,因此,该技术应用于岩溶土洞变形监测可不进行温度补偿修正。

3 光纤传感系统的设计

岩溶土洞发育历程中,松动区的厚度及竖向土压力发生变化,松动区逐渐向地表移动,通过监测松动区的竖向土压力分布变化来反映岩溶土洞的发育及稳定性。

根据太沙基经验, h_1 的大小约等于 3 倍的洞宽。下文以算例进行分析。

某岩溶土洞,洞半宽 $a = 0.5 \text{ m}$,洞高 $L = 1 \text{ m}$,土的重度 $\gamma = 18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,内聚力 $c = 10 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 22^\circ$,按照规范 K_0 取 0.2,不考虑上部荷载。根据太沙基经验, h_1 的大小约等于 3 倍的洞宽,取 $h_1 = 3 \text{ m}$ 。根据式(8)和式(15),松动区竖向土压力计算式为:

平面应变条件下,

$$\sigma_v = 136 + (18H - 190) e^{0.069(H-3-h)} \quad (H-3) \leq h \leq H$$

非平面应变条件下,

$$\sigma_v = 6.2 + (18H - 60.2) e^{0.14(H-3-h)} \quad (H-3) \leq h \leq H$$

松动区外,

$$\sigma_v = rh = 18h \quad 0 \leq h \leq (H-3)$$

分别取埋深 H 等于 8 m、10 m、12 m、14 m 计算,计算结果如图 2 所示。竖向土压力表达式及算例表明:溶洞特征不同,松动区竖向土压力分布特征不同,非平面应变情况下,松动区以上的土层厚度对松动区竖向土压力的分布影响要小一些;平面应变条件下,随着岩溶土洞埋深的变小,松动区竖向土压力趋势发生了明显改变。

土洞发育过程中上覆岩土层的竖向土压力的演变将引起应变场发生改变,尤其是松动区以内的岩土层,竖向应变场演变,可以作为监测和识别岩溶土洞发育的一个信号。根据岩溶土洞发育中应变场的变化特征,设计分布式光纤应变监测系统,见图 3。

图 3 是岩溶发育光纤监测系统剖面示意图,依次在轴线两侧间隔一定距离布置 Fiber(1),Fiber(2),

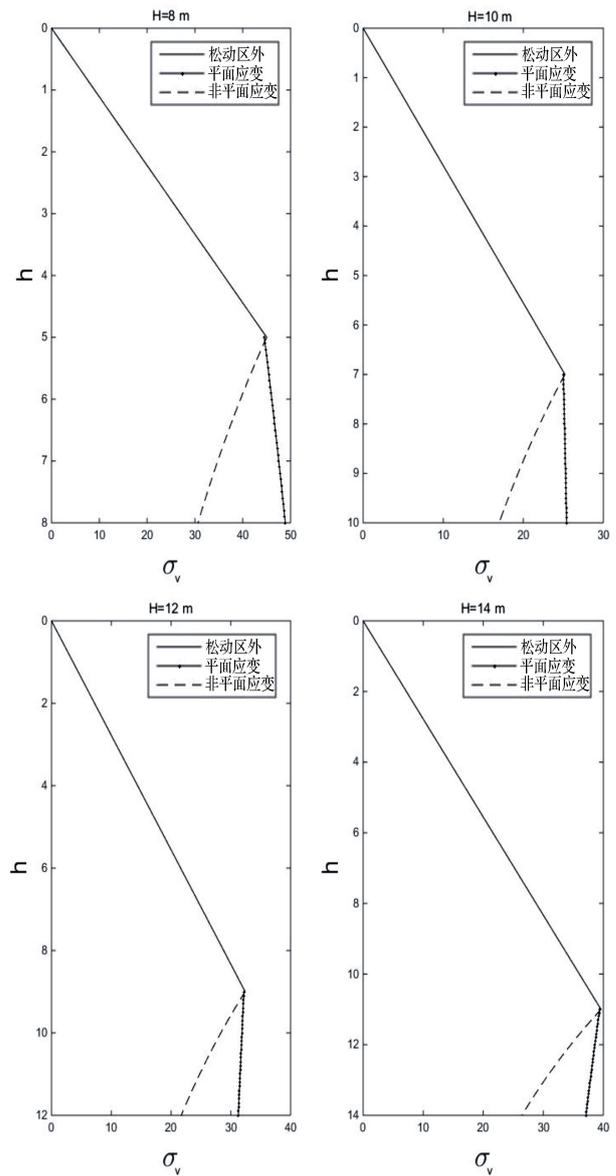


图 2 地面至土洞顶部竖向应力分布
Fig. 2 Vertical stress distribution from bottom to top of a soil cave

Fiber(3) ..., Fiber(n), 共 n 条光纤,同时,在垂直溶洞截面方向以同样的方式布置光纤,所有传感光纤通过传输光缆接入观测站。针对监测系统设计作如下说明:

(1) 光纤布线方向。岩溶土洞的发育所引起的主要是竖向土压力的变化,通过监测竖向应变场可以评价竖向土压力的变化,进而评价岩溶洞穴的发育历程;结合分布式光纤传感技术原理,传感器在轴向上受力感应更加灵敏,能够更加有效地对松动区向上发展的过程进行监测,因此,对于松动区的边界线未延伸至地表的,采用竖向布置更加有效。

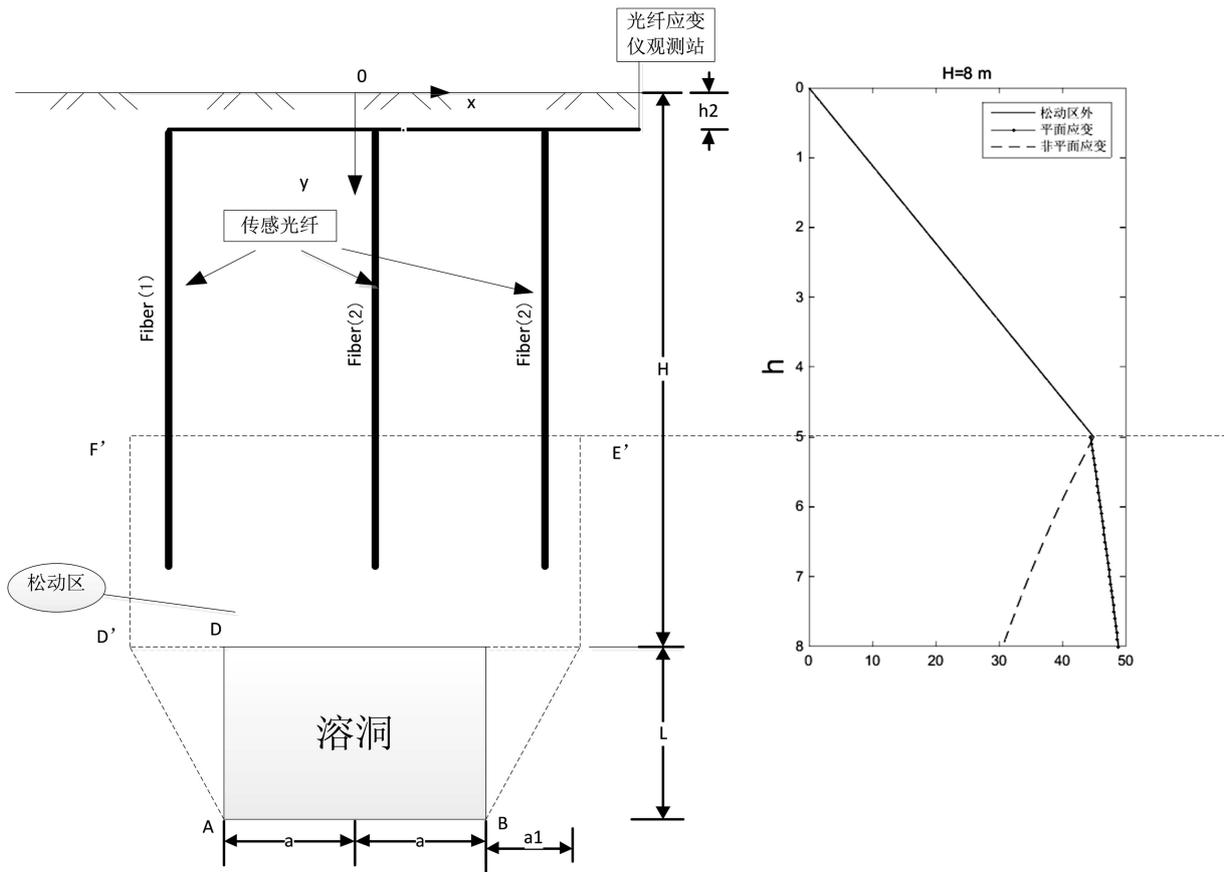


图 3 岩溶土洞光纤监测系统剖面示意图

Fig. 3 Schematic cross-section of optical fiber monitoring system in a karst cave

(2) 传感光纤长度及水平间距确定。针对已经勘察到的地下溶洞,可根据溶洞的水平面积确定光纤数量,分别沿溶洞中轴线位置及两侧各布置一条。光纤长度根据岩溶埋深确定,对地下土洞可能存在的隐患区或者是处理过后的监测区,可对历史数据进行统计,根据统计数据确定土洞的规模及深度,确定传感光纤的水平间距及埋设深度。

(3) 光纤埋设。采用钻孔埋设,对原始地应力场的扰动较小,钻孔资料可以对岩溶发育情况进行勘察,同时可作为光纤铺设施工钻孔。

(4) 光纤监测数据采集及分析。将传感光纤接入通讯电缆,接入到监测站以实现数据采集,这样也可以对光纤监测系统进行很好的保护,防止地面干扰和破坏。根据光纤沿线土体应变分布规律,可分析监测区竖向土压力的分布及随时间的变化,进而判断岩溶土洞的发育情况及发展趋势,还可以对勘察资料不完善的岩溶土洞特征进行反演分析,提出相应对策。

4 结 论

本文对岩溶土洞的竖向土压力分布进行了理论分析,在此基础上对分布式光纤应变传感技术监测土洞发育的系统设计进行了探讨,主要结论如下:

(1) 岩溶洞穴发育历程中存在松动区,不同的溶洞特征,其松动区竖向土压力分布差异较大,通过监测松动区的演变可以判断、预测岩溶洞穴的发展趋势。

(2) BOTDR 技术应用于岩溶洞穴的监测,可不需要进行温度补偿。

(3) BOTDR 技术应用中,光纤布线方式优先采用竖向布置,可以实现岩溶洞穴发育历程的连续、远程观测。

(4) 结合相应的松动土压力理论,根据应变场与应力场的定量关系,可综合分析岩溶塌陷机制,定量预测岩溶发育趋势及稳定性。

从岩溶洞穴演变为地表塌陷,其历程较长,影响

因素复杂,本文只是从理论方面进行了探讨和分析,还需要结合具体工程,对光纤传感器的埋设施工及数据分析方面做大量的研究工作。

参考文献

- [1] 林丹,游省易,唐小明. 矿坑排水与岩溶地面塌陷的关系[J]. 中国岩溶,2016,35(2):202-210.
- [2] 陈洪凯,梁丹,董平. 岩溶洞穴土质盖层稳定性分析方法及应用[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2):546-552.
- [3] 常宏,章昱,李景富,等. 鄂西清江岩溶与地质灾害的关系[J]. 中国岩溶,2014,33(3):288-293.
- [4] 雷明堂,李瑜,蒋小珍,等. 岩塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(S):142-146.
- [5] 蒋小珍,雷明堂,戴建玲,等. 岩溶(土洞)塌陷 TDR 监测试验研究[J]. 水文地质工程地质,2011,38(1):188-122.
- [6] 蒋小珍,雷明堂,陈渊,等. 岩溶塌陷的光纤传感监测试验研究[J]. 水文地质与工程地质,2006(6):75-79.
- [7] 张桂香,蒋方媛,余成华,等. 深圳市龙岗中心城岩溶塌陷光纤传感监测研究[J]. 地质灾害与环境保护,2009,20(4):117-121.
- [8] 蒙彦,管振德. 应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键问题探讨[J]. 中国岩溶,2011,30(2):187-192.
- [9] 王俊茹,张龙起,宋雪琳. 浅层地震勘探在采空区勘测中的应用[J]. 物探与化探,2002,26(1):75-78.
- [10] 雷旭友,程凯. 电磁波 CT 在重庆至怀化铁路岩溶塌陷病害抢险勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报,2009,6(5):561-565.
- [11] Terzaghi K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]// Proceedings of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, Massachusetts, 1936: 307-311.
- [12] 黎春林. 盾构隧道施工松动土压力计算方法研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1714-1720.
- [13] Tien H J. A literature study of the arching effect[D]. Taiwan: Taiwan University, 1996.
- [14] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [15] 刘永莉,尚岳全,于洋. BOTDR 技术在边坡表面变形监测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2011,41(3):777-783.

Monitoring and analysis of deep buried karst soil caves based on BOTDR technology

LIU Yongli^{1,2}, GUAN Zhende^{3,4}, XIAO Henglin¹

(1. Hubei Provincial Ecological Road Engineering Technology Research Center, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

4. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Surface collapse of karst soil caves can be attributed to many complex factors. The aim of this work is to reveal the stress characteristics of soil caves in the marked areas being monitored. Based on the Terzaghi theory of loose earth pressure, the vertical earth pressure in the loose zone is analyzed. The results show that the location of the loose zone is decided by cave's characteristics and physical and chemical properties of overlying media. Under plane and non-plane strain conditions, the distribution characteristics of vertical earth pressure in the loose zone are obviously different. According to the distribution characteristics of vertical soil pressure in the loose zone, combined with the advantages of Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR), the application of BOTDR technology to monitor the development of the karst soil cave is proposed. The layout of optical fibers in the monitoring system is analyzed. The quantitative study on the stress field of the soil cave provides a theoretical basis and guidance for the application of BOTDR to monitoring karst soil caves.

Key words karst soil cave, karst collapse, loose zone, monitoring, BOTDR

(编辑 吴华英)