

姜伏伟,李亮,陈航. 贵阳永温中学岩溶塌陷发育临界条件研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 294-299.
DOI:10. 11932/karst20180217

贵阳永温中学岩溶塌陷发育临界条件研究

姜伏伟,李亮,陈航

(贵州理工学院,贵阳 550003)

摘 要:通过现场调查,永温中学校区内及周围存在 7 处塌陷点,1 处塌陷隐患点,严重地威胁着该校师生生命财产安全。研究区基岩可溶性成分多,覆盖粘土层较薄,且地下水溶蚀性强,属于岩溶塌陷的高危险区。为了预防岩溶塌陷灾害,文章总结分析了研究区岩溶塌陷发育的裂隙—渗流—崩解模式,并通过室内模拟试验验证。模拟试验结果表明,土体含水量是崩解作用形成塌陷的关键参数。进一步开展 8 组不同含水量原状样的崩解试验,结果表明,研究区岩溶塌陷发育的土体含临界水量为 26.8%,发育条件为 0~26.8%。

关键词:岩溶塌陷;崩解试验;临界含水量;塌陷模拟试验

中图分类号:P642.26

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)02-0294-06

0 引 言

岩溶塌陷的发育需要具备“岩(可溶岩)—土(覆盖层)—水(地下水)”三个基本条件,其中岩溶发育、土层性质、地质构造、水文地质条件是土洞发育的主要地质影响因素^[1-5]。具备基本的地质条件时,水土的相互作用是土洞发育的根本原因。当地下水对土体的作用力,大于土体的抗拉强度时,土体流失导致土洞发育^[6-7],并从基岩面逐渐往上扩展^[8]。其主要经历四个基本发育过程:地下水作用→颗粒流失→土洞扩展→失稳塌陷^[9-13]。

地下水动力条件触发土洞发育需要具备一定的条件,尤其是地下水位的波动变化对土洞发育影响较大^[14-19]。姜伏伟^[20-22]通过抗渗强度试验及管道流试验分析了土洞发育的临界水压、临界水流。张鑫^[23]依据室内模拟试验,分析土洞发育的临界水位降幅。当土洞发育扩展到一定程度后,产生地面塌陷。王滨^[24-25]通过力学分析计算,得出岩溶塌陷顶板临界高度。肖武权^[26]采用有限元方法得出路基土

洞稳定临界深度。刘晓明^[27]按轴对称模式进行数值建模,分析塌陷土洞内壁临界稳定坡角和地表安全警戒距离。

已有研究成果主要集中在对岩溶塌陷发育条件及水动力条件研究,且以定性分析为主,定量研究为辅。现有的岩溶塌陷研究的定量成果,主要是通过室内模拟试验及理论分析得出。但在实际应用中,存在一定的局限性,因为试验模型及计算理论与实际情况吻合度不够理想。本文在已有研究的基础上,以贵阳市开阳县永温中学岩溶塌陷灾害点为例,通过模拟试验,分析研究区岩溶塌陷发育过程及其影响因素,并得出土体临界含水量参数。

1 地质概况

永温中学位于贵阳市开阳县境内,距开阳县城 10 km。目前,由于地下隐伏溶洞的存在,该中学教学楼楼道出现严重的下沉,墙柱钢筋被拉断,墙体开裂缝宽度 10~25 mm。该楼是永温中学主要的教学

基金项目:贵州省科技厅科技支撑计划社发公关领域项目(黔科合[2016]支撑 2846);贵州理工学院高层次人才科研启动经费项目
第一作者简介:姜伏伟(1987—),男,博士,主要从事岩溶工程灾害研究。E-mail:jfwei_666@126.com。
收稿日期:2017-07-30

和办公场所,严重地威胁着全校 600 多位学生和 56 位教师员工的安全。因此,永温中学被贵州省国土资源厅列为地质灾害威胁 500 人以上的岩溶塌陷灾害点。

研究区地势南东高、西北低缓,形成高山横向沟谷相切地形。地形切割强烈,为侵蚀切割中高山类型,相对高差 400~600 m。地表岩溶作用较强,横向冲沟发育。出露的地层主要为灯影组白云岩及第四系粘土。地层为单倾斜地层,地层倾向 110°~165°,倾角一般为 20°~35°。构造较发育,存在 2 条逆冲断层和 1 条正断层。地下水的补给主要来源于大气降水,运动方向由南东向北西径流,实测渗透系数为 0.010 5~1.028 m·d⁻¹。地下水运动受岩性、构造与地貌的严格控制。

2 岩溶塌陷发育现状及地质条件

2.1 发育现状

根据现场的实际调查,在永温中学周围 1 km 范围内,调查发现 7 处岩溶塌陷,1 处岩溶塌陷隐患点。2 处塌陷和 1 处塌陷隐患点分布在永温中学校园内,其余 5 处塌陷分布在永温中学 SE 方向两条沟谷内(图 1)。研究区塌陷基本特征见表 1。塌陷坑 5 处呈圆柱状,2 处呈漏斗状。塌陷坑最大直径 30 m,最小直径 1 m,深度在 2~4 m 范围内。

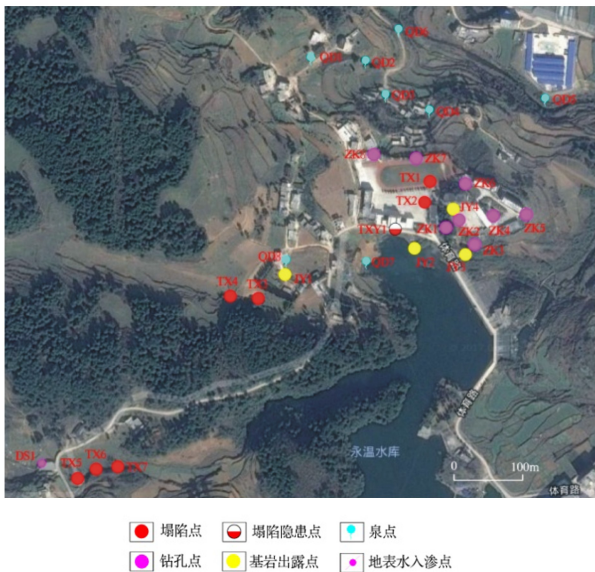


图 1 地质调查点分布图

Fig. 1 Distribution map of geological survey points

表 1 岩溶塌陷发育特征

Table 1 Characteristics of karst collapses		
编号	类型	特征
TX1	土洞塌陷	发生于 2005 年 6 月,坡面形态圆柱状,直径 1.0 m,深度 2 m,未见基岩,坑底积水。
TX2	土洞塌陷	发生于 2011 年 4 月,坡面形态圆柱状,直径 1.5 m,深度 4 m,见基岩,土层厚度 3~4 m,坑底积水。
TX3	土洞塌陷	古塌陷,坡面形态漏斗状,直径 30 m,深度 3~4 m,未见基岩,土层厚度 3~5 m,坑底无积水。
TX4	土洞塌陷	古塌陷,坡面形态漏斗状,直径 3 m,深度 2 m,坑底未见基岩,无积水。
TX5	基岩塌陷	古塌陷,坡面形态近圆柱形,直径 4 m,可见深度 5 m,两侧见基岩。
TX6	基岩塌陷	古塌陷,坡面形态近圆柱形,直径 3 m,可见深度 7 m,两侧见基岩。
TX7	基岩塌陷	古塌陷,坡面形态,近圆柱形,直径 6 m,可见深度 5 m,两侧见基岩。
TXY1	塌陷隐患点	位于永温中学教学楼内,墙壁明显开裂,最大拉裂宽度 1~1.5 cm,桩基钢筋已拉断。墙角出现小洞,20 L 水倒入小洞内,无积水。可判断隐伏土洞已和地面联通。

2.2 地质条件

2.2.1 可溶岩

研究区基岩为可溶的白云岩,薄层状,层厚 20~30 cm,层面倾向 238°,倾角 11°。矿物成分中 CaCO₃ 含量占总量 36.8%,MgCO₃ 含量 44.4%,可溶成分达 81.2%。由于可溶成分较多,雨水很容易沿着裸露的节理、层面裂隙入渗,并溶蚀基岩中的可溶成分。在地下水长期的溶蚀作用下,基岩内容易形成溶洞裂隙。

根据现场调查,研究区存在 4 处基岩出露点(图 1),并存在 4 条走向 300°的近平行节理裂隙,其中出露的裂隙宽 0.2~0.3 m。据永温中学的场地勘察资料,场地内共布置钻孔 18 个,其中 8 个钻孔遇溶洞 11 个,平均线岩溶率为 10.6%,最大溶洞洞高 1.5 m。塌陷隐患点位置钻探揭示,底下存在 3 个溶洞,洞高 0.3~0.6 m。

这表明研究区场地溶洞裂隙强发育,具有覆盖土层流失运移的通道。因此,研究区具备岩溶塌陷发育的岩层条件。

2.2.2 土层

2017 年 3 月在校区内布置了 8 个简易钻孔(人工取土钻),见图 1。8 个钻孔揭示,校区内土层从上至下为粘土和风化砂。粘土为硬塑性,在校园西南角厚度小于 0.5 m,东北角厚度大于 2 m,最大 2.62 m。风化砂主要存在于岩土界面上,厚度 1~2 cm。

随着气候的变化,土体性质也将发生变化,如雨后土体不同深度的天然含水量为 29.2%~35.6%,而多日晴天为 20.5%~28.6%之间。在下雨情况下,土体吸水,天然含水量增大,体积膨胀;晴天时,土层在地表温度较高,引起土层失水,体积缩小。

在长期持续的雨胀晴缩的作用下,土体内将形成从地表往下发展的网格状裂隙。由于土层较薄,受环境气候变化的影响较大,这些网格状的裂隙逐渐向深部发育,并延伸至基岩面上。这些裂隙可能和基岩中溶洞、节理、裂隙联通,构成完整的土体流失运移通道,而发育土洞。因此,研究区具备岩溶塌陷的土层条件。

在塌陷隐患点墙角处,可见延伸至土体内部宽 1.0~3.0 cm 裂缝。在 10 min 内,向裂缝内注入 150 L 的自来水,未见水冒出裂缝,表明土体裂缝连通至基岩溶洞裂隙内。进一步在隐患点位置插钢钎,在插入深度 65~78 cm 处,阻力明显减小,说明土层内存在土洞。

2.2.3 地下水

据调查,研究区地下水类型主要为基岩裂隙水及第四系粘土层孔隙水。降雨是该区地下水的主要补给来源,主要通过泉排泄。永温中学周围 200 m 范围内,分布有 8 处间歇性下降泉(图 1),流量均小于 50 mL/s。泉水 pH 值为 6.90~7.56,呈现弱酸性,对该区白云岩具有较强的溶蚀性。

8 处泉水均为基岩裂隙水出露地表而形成,水位高程为 1 067~1 101 m,相差 34 m。可推测,该区水力坡降为 6.8%。这表明,地下水径流较强,流动性较好,可加速地下水对白云岩的溶蚀作用。

利用永温中学内废弃的取水钻井(直径 12 cm,深 52 m),并对井口进行保护,防止地表水及雨水渗入。在枯水期 2016 年 12 月、2017 年 2 月测得水位标高 1 075.6 m 和 1 076.2 m,丰水期 2017 年 6、8 月水位标高 1 079.1 m 和 1 081.5 m。而场地内基岩面标高为 1 082~1 088 m,这说明地下水位在基岩面以下运动。

综上所述,研究区基岩可溶成分含量高,节理裂隙发育,渗透性良好,地下水具有较强的溶蚀性及流动性,且具有网格状薄层的粘性土,具备岩溶塌陷发育条件,属于岩溶塌陷灾害的高危险区。

3 岩溶塌陷发育机理

3.1 裂隙—渗流—崩解模式

姜伏伟^[1,28]基于大量的野外调查及室内模拟试验室内模拟试验,总结出土洞发育的三种基本模式为:包气带崩解作用、潜土层潜蚀作用和承压水层水力裂隙作用。由于研究区土层为硬塑性粘土,土层内地下水径流作用较弱,因此潜蚀作用引起土体流失发育土洞的可能性较小。另外,土层厚度较薄,网格状裂隙较发育,较难形成承压水压,或在局部形成承压水,但其水压较小,不足以形成水力裂隙造成粘土局部结构失稳而发育土洞。

场地内,地下水位在基岩面以下运动。由于粘土层厚度为 0~2.62 m,很容易因气温升高蒸发失水,导致粘土含水量较低。土体含水量越低,崩解作用越强。当降雨沿着土体裂隙渗流时,含水量较低的土体遇水会出现局部崩解现象。若崩解土体沿着强发育的溶洞裂隙流失,这些流失土体的空间则形成土洞。因此,依据已有研究成果及现场调查情况判断,研究区土洞发育的模式主要为裂隙—渗流—崩解作用(图 2)。

由于土层较薄,当随着地表气温升高,土体失水含水量逐渐降低。当遇到降雨后,雨水沿着雨胀晴缩形成的网格状裂隙渗入。雨水渗入后,裂隙两侧含水量较低的土体表面吸水后,土粒间的结构联结和强度受到水的浸入影响导致削弱或丧失,使土体崩散解体。这些崩解的土体沿着土中裂隙或直接流入基岩溶洞裂隙中形成土洞。随着土体的不断流失,土洞逐渐发育扩大。当扩大到一定程度后,土洞顶板失去稳定而发生塌陷,造成上覆建筑物变形或倒塌而形成灾害(图 2)。

3.2 模拟试验

为了验证研究区岩溶塌陷发育的裂隙—渗流—崩解模式,开展室内模拟试验(图 3)。使用 18×12×6 cm³ 尺寸的塑料盒,将研究区含水量较低粘土在盒内压密,并在塑料盒的底部中心位置,开一个直径 1.5 cm 的圆形孔,模拟土体流失基岩裂隙通道。土上放置一个 2.5×2.5×1.5 cm³ 的小盒(重量 4.7 g),

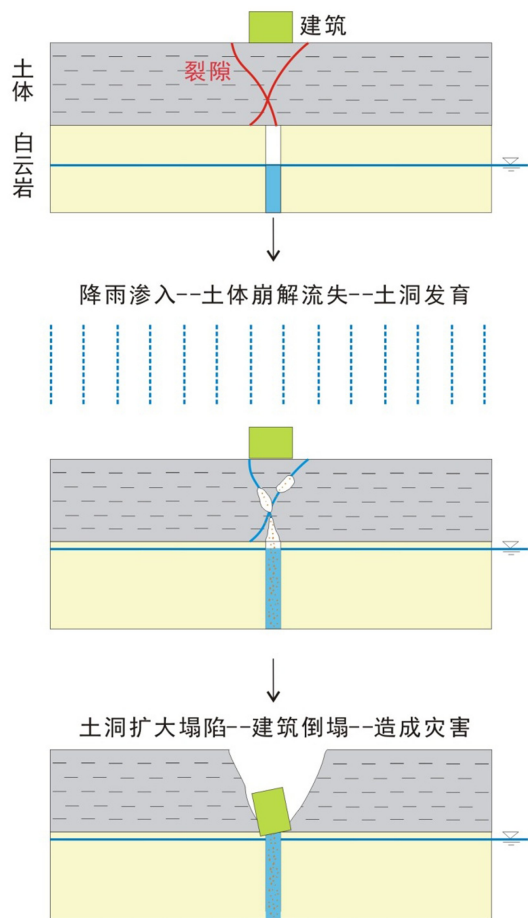
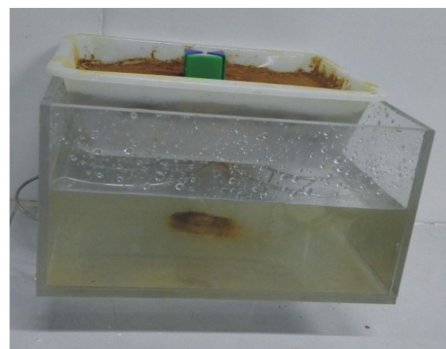


图 2 岩溶塌陷崩解作用模式图

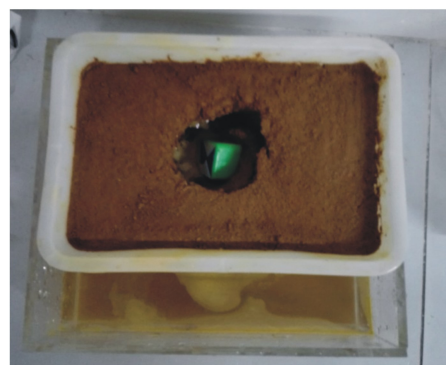
Fig. 2 Disintegration model of karst collapse

模拟建筑物。将塑料盒整体放在空的透明塑料盛水容器中,往容器内缓慢注水,模拟裂隙渗流水和土接触的过程(不表示地下水位上升引起的土体崩解)。当注水高度略高于塑料盒底部后停止注水,此时水和土已接触,同时观察到土体崩解流入水中(图 3a)。经历一段时间后,土体吸水含水量逐渐增大,崩解作用逐渐消失。试验过程中,土体由于逐渐变湿,这表明土体逐渐吸水导致含水量增大。然后,将塑料盒放入烘箱内,控制恒定温度为 35°C ,经历若干小时烘干后。再次将塑料盒放在盛水容器中,加水至水位略高于第一次水位位置。观察到土体再次崩解,且经历一段时间后停止崩解。依次重复上述步骤,经历 6 次循环后,发生岩溶塌陷,小盒掉入塌陷坑中(图 3b)。

从整个试验过程分析,土体的崩解及其崩解速度和土体的含水量有密切关系。土体烘干时间越长,土体含水量越低,崩解的土量及持续的时间越长。因此,土体含水量是崩解作用发育土洞的关键参数。



a. 土体崩解流失



b. 岩溶塌陷

图 3 岩溶塌陷模拟试验

Fig. 3 Simulation test of karst collapse

4 发育临界条件

4.1 崩解试验

研究区土洞的发育和土体的含水量密切相关,为了获得土体崩解的临界含水量,开展原状土的崩解试验。依据水利部颁布的《土工试验规程》(SL237 1999)中介绍的湿化崩解试验流程,对 8 组不同含水量的原状样进行崩解试验(图 4),试验结果见表 2。结果表明,含水量低于 17.6% ,土体 100% 崩解,含水量高于 26.8% ,土体无崩解。含水量在 $17.6\% \sim 26.8\%$ 之间,土体部分崩解,且随着含水量增大,崩解量逐渐减小。

根据表 2 含水量、崩解量及干密度的关系,可判断,土体崩解和无崩解的拐点处土体干密度最大。这亦表明,土体崩解的临界含水量和最优含水量一致。

室内模拟崩解试验验证了土体崩解经历一段时间后不在崩解的现象,其本质原因是土体吸水导致含水量增大到临界值以上,土体不在崩解。因此,崩解试验和岩溶塌陷模拟试验相互吻合。

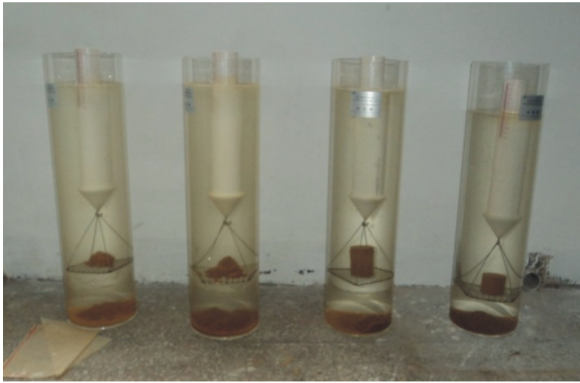


图 4 崩解试验

Fig. 4 Disintegration test

表 2 崩解试验结果

Table 2 Results of disintegration test

编号	含水量/%	崩解量/%	干密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
YW1	15.9	100	1.48
YW2	17.6	100	1.54
YW3	21.4	80	1.58
YW4	23.6	45	1.6
YW5	25.3	16	1.61
YW6	26.8	0	1.66
YW7	31.2	0	1.52
YW8	33.7	0	1.47

4.2 临界含水量

根据崩解试验的结果,土体临界崩解含水量介于 25.3%~26.8%之间。从工程安全的角度考虑,取 26.8%为研究区土体崩解的临界含水量。当土体含水量小于临界含水量时(即 0%~26.8%),土体会发生崩解发育土洞而形成塌陷。

5 结 论

根据现场调查,研究区存在岩溶塌陷 7 处,1 处岩溶塌陷隐患点,且具备岩溶塌陷继续发育的“岩—土—水”条件。该区岩溶塌陷发育遵循裂隙—渗流—崩解模式,为岩溶塌陷灾害高危险区。通过岩溶塌陷室内模拟试验,试验表明土体含水量是该区崩解作用形成塌陷的关键参数。为了获得土体崩解的临界含水量,开展 8 组不同含水量的崩解试验。试验结果表明,研究区岩溶塌陷发育临界土体含水量为 26.8%。

参考文献

- [1] 姜伏伟. 大藤峡水利枢纽工程防护区岩溶塌陷灾害防治综合研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2015.
- [2] 石树静,张勤军,康志强. 南宁市坛洛镇岩溶塌陷群成因机制分析[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 507-514.
- [3] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等. 山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 495-506.
- [4] 魏永耀,孙树林,黄敬军,等. 徐州岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 52-57.
- [5] 王飞,柴波,徐贵来,等. 武汉市岩溶塌陷的演化机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 824-832.
- [6] 万志清,秦四清,李志刚,等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1377-1382.
- [7] 谢忠球,万志清,钱海涛. 人工抽水引起土洞扩展条件的分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(4): 778-782.
- [8] 蒋小珍,雷明堂,管振德. 单层土体结构岩溶土洞的形成机理[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 426-432.
- [9] Waltham T, Bell F, Culshaw. Sinkholes and subsidence [M]. Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, Chichester, 2005.
- [10] White W B. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains [M]. Oxford University Press: New York, 1988: 464.
- [11] Ford D C, Williams P F. Karst Geomorphology and Hydrology [M]. Unwin Hyman: London, 1989: 601.
- [12] Sowers G F. Building on sinkholes[M]. ASCE, New York, 1996: 202.
- [13] Beck B F. Environmental and engineering effects of sinkholes: The processes behind the problems[J]. Environmental Geology Water Science, 1988, 12(2):71-78.
- [14] 余业雄,欧阳振华. 地下水位下降引起地表塌陷的作用机理研究[J]. 露天采矿技术, 2005(3):20-22.
- [15] 蒙彦,殷坤龙,雷明堂. 水位波动诱发岩溶塌陷的概率分析[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 239-241, 245.
- [16] 袁杰,高宗军,马海会. 论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用—以山东枣庄市岩溶地面塌陷区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 95-98.
- [17] 冯克印,郑庭明,董强,等. 基于水动力场控制的岩溶塌陷预警预报研究[J]. 工程勘察, 2006(10):29-31, 37.
- [18] 蒋小珍,雷明堂,管振德. 岩溶塌陷灾害的水动力条件危险性评价指标:以广西贵港青云村为例[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1316-1321.
- [19] 陈冬琴,唐仲华. 岩溶塌陷水动力-力学耦合过程数值模拟—以武汉市青菱乡为例[J]. 中国农村水利水电, 2016(2):139-144.
- [20] Fuwei Jiang. Experimental study on the critical triggering condition of soil failure in subsidence sinkholes. Environmental earth science. 2015,74(1): 693-701.
- [21] Fuwei Jiang. A new method to test the anti-permeability strength of clay failure under high water pressure. Acta geotechnica slovenica, 2015, 12(2):37-43.
- [22] 姜伏伟. 广西武宣土洞发育水动力条件评价[J]. 水文地质工程

- 地质, 2017, 45(2): 90-95.
- [23] 张鑫, 崔可锐, 查甫生. 覆盖型岩溶塌陷临界水位降幅模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(12): 195-199.
- [24] 王滨, 贺可强, 孙建敏. 岩溶塌陷临界土洞高度的确定: 以唐山市体育场岩溶塌陷为例[J]. 工程地质学报, 2005, 13(3): 320-324.
- [25] 王滨, 贺可强. 岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 458-462.
- [26] 肖武权. 岩溶土洞稳定临界深度的初步研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 197-201.
- [27] 刘晓明, 张旺林, 吴从义. 塌陷土洞的地面安全警戒距离研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 158-163.
- [28] 姜伏伟. 岩溶塌陷发育机理模式研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(6): 759-763.

Critical conditions for karst collapses in the Yongwen Middle School, Guiyang, China

JIANG Fuwei, LI Liang, CHEN Hang

(Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract There are 7 karst collapses happened and 1 potential collapse site in the Yongwen Middle School of Guiyang city, which pose a serious threat on the safety of teachers and students and property there. This site is characterized by highly soluble bedrock, thin covering clay layer and strong groundwater erosion; these have caused the site to be a high-risk karst collapse in this area. Through laboratory simulation test, it is realized that the karst collapse hazard followed a fissure-seepage-disintegration model. The results also show that the soil water content is critical in the disintegration and the formation of karst collapses. Furthermore, 8 sets of undisturbed samples with different water content are used to conduct disintegration tests. They demonstrate that the water content of 26.8% is the critical value to trigger karst collapse, while 0~26.8% is the condition for generation of such a risk at the site.

Key words karst collapse, disintegration test, critical water content, simulation test of collapse

(编辑 张玲)