三峡地区资源环境生态研究

DOI:10.11721/cqnuj20180409

地下水降落诱发岩溶洞穴土质盖层塌陷的机制研究*
——以重庆歌乐山余家湾水库地面塌陷为例

陈洪凯[1,2]，王圣娟[2]，粟俊江[1]，胡　婷[2]
(1. 重庆工程职业技术学院 地质与测绘工程学院，重庆 402260；2. 重庆交通大学 岩土工程研究所，重庆 400074)

摘要:【目的】灰岩地区地下水降落诱发岩溶洞穴土质盖层塌陷机制是实施土质盖层地面塌陷灾害监测预警和工程治理的科学依据。【方法】以现场调查为基础,采用极限平衡原理和地貌学方法,分析了土质盖层型地面塌陷产生的力学机制和演化模式。【结果】构建了土质盖层型地面塌陷地质模型和力学模型,提出了土质盖层型地面塌陷判别方法;建立了土质盖层型地面塌陷演化模式,即地下水位快速降落→初始负压空腔形成→负压空腔扩大→地面坍塌。【结论】实例分析表明,构建的岩溶洞穴土质盖层型地面塌陷力学分析方法计算结果与实情吻合良好,地下水位快速降落产生的负压吸力是诱发土质盖层型地面塌陷灾害的关键环节。

关键词:地面塌陷;力学分析;演化模式;土质盖层;岩溶洞穴
中图分类号:TU478　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-6693(2018)04-0054-05

近些年来,灰岩地区浅埋隧道建设诱发岩溶洞穴土质盖层地面塌陷的事例频繁发生[1],由此导致地表水漏失、地面开裂变形的情况时有发生,严重威胁着当地居民的生命财产安全。如 2009 年 2 月 23 日重庆市歌乐山天池村青杠堡社,超过 20 m^2 的地面突然陷落 10 m 左右。地面塌陷是一种典型的地质灾害。截止至 2016 年,中国 24 个省(直辖市、自治区)都有地面塌陷发生,主要分布于重庆、四川、贵州、云南、广东、广西、辽宁、河北、江西、湖北、湖南等地。岩溶塌陷包括岩溶洞穴岩石顶板塌陷和土质盖层塌陷两类。国内外学者对岩溶洞穴岩石顶板的塌陷问题做了较多研究,提出了真空吸蚀论、潜蚀论、振动论、液化论、气爆论等岩溶塌陷预测理论[2]。Papadopoulou-Vrynioti 等人[3]使用多元统计方法和地理信息系统研究了岩溶塌陷产生的各种因素,提出了岩溶塌陷易感性分析法;Bai 等人[4]研究了地下水侵入岩溶地层顶板的破坏机制问题,发现地下水的渗流速度越大岩溶顶板稳定性越小;He 等人[5]提出了几种预防岩溶塌陷和保护岩溶水资源和环境的实用方法;Zhao 等人[6]分析了中国南部几百个岩溶塌陷实例,发现多变的降雨是引发或促进洞穴形成与塌陷的关键因素;Lei 等人[7]记录了在中国发生的典型塌陷实例,提出了基于地理信息系统的岩溶塌陷风险评估和数据管理方法;徐卫国等人[8]认为在相对密闭承压岩溶网络地质体中,抽(排)地下水可诱发洞穴顶板发生破坏;贺可强等人[9]根据普氏理论和极限平衡理论建立了内部塌陷阶段临界土洞的高度表达式及地表塌陷阶段的渗压效应致塌力学模型。而针对岩溶洞穴土质盖层在地下水诱发作用下的破坏问题,目前公开报道的研究成果不多,陈洪凯等人[10]初步探讨了岩溶洞穴土质盖层的稳定性问题。本文以重庆歌乐山余家湾水库地面塌陷为例,重点分析地下水降落诱发岩溶洞穴土质盖层塌陷机制问题,对于实施土质盖层塌陷的工程监测预警和工程治理有积极意义。

1 余家湾水库地面塌陷灾害及地质条件

余家湾水库地面塌陷位于重庆市歌乐山镇金刚村龙塘坎社,塌陷灾害发生前水库蓄水良好。2010 年 10 月 20 日至 2015 年 9 月 13 日,在水库东侧相继出现 6 处塌陷灾害(图 1 和图 2),分别用 T1,T2,…,T6 标注,均呈椭

* **收稿日期:**2017-09-16　**修回日期:**2018-01-22　**网络出版时间:**2018-07-26 16:50
资助项目:国家自然科学基金(No. 51678097;No. 51378521;No. 11272185);重庆市首席专家工作室专项经费(No. 201605);重庆市"两江学者"计划专项资金(No. 201309);2016 年重庆高校创新团队建设计划(No. CXTDG201602012);重庆市教育委员会重点实验室建设计划(No. ZDSYS201712)
第一作者简介:陈洪凯,男,教授,博士后,博士生导师,研究方向为地貌过程减灾与环境修复,E-mail:chk99@163.com
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180726.1650.018.html

圆形，几何参数如表 1 所示。塌陷区位于歌乐山背斜核部的嘉陵江槽谷内，嘉陵江组灰岩和雷口坡组泥灰岩过度区域，覆盖层下落水洞、溶蚀漏斗、溶蚀洼地、地下河、地下溶洞等溶蚀型喀斯特地貌发育（图 2）。喀斯特地貌顶部土体覆盖层厚度 5～8 m，由残积层、坡积物、冲积物等第四纪沉积物组成，地面以下 20～30 m 深的部位发育有北东-南西走向的地下河，山体内存在北西向含水带，倾角约 40°，属于背斜核部张裂隙，重庆市轻轨一号线中梁山隧道顶部进入含水带内。地面塌陷灾害发生前，地表土体覆盖层内地下水位较高，埋深 1.5～2 m。

图 1　余家湾水库地面塌陷灾害

Fig. 1　Ground collapse outline in Yujiawan reservoir

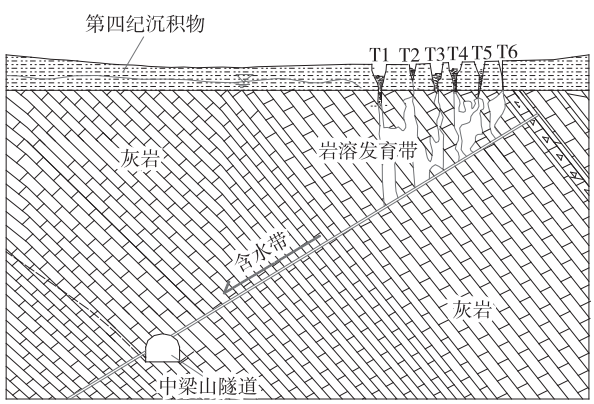

图 2　余家湾水库地面塌陷裂缝分布图

Fig. 2　Ground collapse fissures chart in Yujiawan reservoir

表 1　余家湾水库塌陷坑几何参数

Tab. 1　Geometry parameters of ground collapse pits in Yujiawan reservoir　m

编号	长半轴	短半轴	深度	顶板覆盖层厚度
T1	5.0	3.7	12.0	2.4
T2	3.0	1.5	4.0	1.1
T3	5.6	4.1	11.0	2.2
T4	3.2	2.1	12.0	1.8
T5	3.6	1.9	5.0	1.2
T6	2.8	1.6	3.7	0.9

2 土质盖层地面塌陷力学分析

针对余家湾水库地面塌陷 T1 塌陷坑的概化模型如图 3 所示。着眼于塌陷坑顶部盖层土柱构建力学模型（图 4），岩溶塌陷致塌力 $F_{下}$ 和抗塌力 $F_{上}$ 计算式分别为：

$$F_{下}=G+\Delta PS_{底}, \tag{1}$$

$$F_{上}=f+cS_{侧}。 \tag{2}$$

式中，$F_{下}$ 为岩溶塌陷致塌力（单位：kN）；$F_{上}$ 为盖层土体抗塌力（单位：kN）；G 为盖层土柱自重（单位：kN）；ΔP 为负压吸力（单位：kN）；f 为盖层土柱侧壁摩阻力（单位：kN）；c 为土体粘结力（单位：kPa）；$S_{底}$ 为盖层土柱底面积（单位：m^2）；$S_{侧}$ 为盖层土柱侧面积（单位：m^2）。

相关荷载计算方法如下：

$$G=S_{底}\ h\gamma。 \tag{3}$$

式中，γ 为盖层土体容重（单位：$kN\cdot m^{-3}$）；h 为盖层土柱高度（单位：m）；其余变量意义同前。

$$f=\frac{1}{2}\sigma_n\tan\varphi\times S_{侧}。 \tag{4}$$

式中，$\sigma_n=K_0\gamma h$，K_0 为土体侧压力系数；φ 为土体内摩擦角（单位：°）；其余变量意义同前。

根据陈国亮[11]的研究,密闭空间的负压吸力 ΔP 一般不超过 50 kPa,建议在 0～50 kPa 之间取值。

定义土质盖层型地面塌陷判别系数 K,有:

$$K=\frac{F_{上}}{F_{下}}=\frac{\left(\frac{1}{2}K_0\gamma h2\tan\varphi+c\right)S_{侧}}{(h\gamma+\Delta P)S_{底}}。\tag{5}$$

当 $K<1$ 时,易发生地面塌陷灾害;当 $K=1$ 时,处于发生地面塌陷灾害的临界状态;当 $K>1$ 时,不易发生地面塌陷灾害。

余家湾水库地面塌陷坑盖层土体为粉质粘土,容重 $\gamma=22.3\ \mathrm{kN\cdot m^{-3}}$,粘结力 $c=34$ kPa,内摩擦角 $\varphi=23°$,f_k 取 1.1,K_0 取 0.53,ΔP 暂取 25 kPa。依据表 1 给出的塌陷坑几何参数,根据(1)～(5)式计算得到 T1 至 T6 塌陷坑顶板塌陷判别系数分别为 0.910 4,0.897 5,0.848 1,0.942 8,1.099 3 和 0.861 9。可见,除 T5 塌陷坑计算结果显示基本处于临界状态外(可能现场量测存在一定误差或是负压吸力取值偏小),其余均小于 1,表明塌陷灾害判别结果与实情吻合良好。若不考虑负压吸力,即(5)式中 ΔP 取为 0,T1 至 T6 塌陷坑的地面塌陷稳定系数明显增加,如 T1 塌陷坑顶板塌陷判别系数增加为 1.32,即地面塌陷稳定系数降低 31.06%。

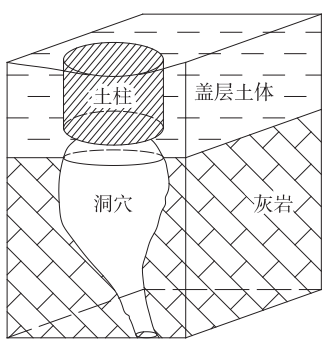

图 3 土质盖层塌陷坑概化模型

Fig. 3 General model of soil collapse pit

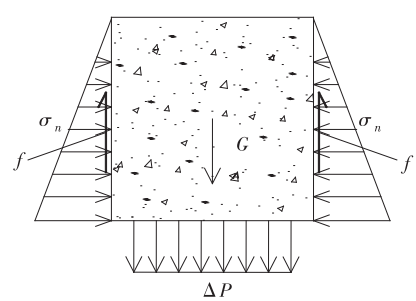

图 4 土质盖层塌陷坑力学模型

Fig. 4 Mechanical model of soil collapse pit

3 土质盖层型地面塌陷演化模式

初步研究表明[10],地下水快速降落是诱发岩溶洞穴顶部土质盖层塌陷的动力学机制,其中地下水降落产生的负压吸力是关键。通过对余家湾水库地面塌陷灾害地理环境的解剖,获得产生土质盖层型地面塌陷灾害的基本地质条件:灰岩地区基岩表面存在落水洞、溶蚀洼地、溶蚀漏斗等负地形,与深部岩体尤其是含水层之间存在明显的水力联系,负地形内充填第四纪松散土体,负地形顶部存在一定厚度且致密的第四纪松散土体盖层,并且土质盖层内富含地下水,地下水位以下的土体处于饱和状态。为进一步探讨地面塌陷灾害形成机制,从地貌演化角度将土质盖层型地面塌陷演化模式初步分成 4 个阶段(图 5)。

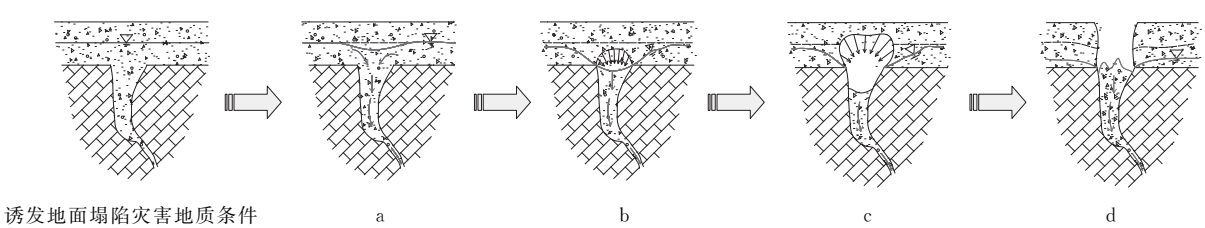

图 5 土质盖层型地面塌陷演化模式

Fig. 5 Ground collapse evolution model of soil cover over karst cave

阶段 a:地下水位快速降落。如 2010 年 10 月 20 日,重庆市轻轨一号线中梁山隧道掘进至 K26+845 位置时,切断歌乐山背斜南东翼的含水层,现场量测到的涌水量陡增约 2 倍,由之前的 549.89 $\mathrm{m^3\cdot d^{-1}}$ 突然提高到 1 591.64 $\mathrm{m^3\cdot d^{-1}}$。该阶段土质盖层内的地下水位明显降低,土质盖层内的地下水较明显地通过岩溶裂隙内向山体含水层流动,所产生的渗透力牵引着土质盖层底部土颗粒向裂隙深部运动。该阶段在原地下水位处出现湿润锋,即地下水降落区域的原地下水位线(如图 5 中虚线所示),湿润锋下部盖层土体处于非饱和状态,上部处于

天然状态。

阶段 b：初始负压空腔形成。地下水位进一步降低，土质盖层内湿润锋范围进一步扩大，岩溶裂隙内的土体颗粒在渗透力潜蚀作用下向含水层深部移动，岩溶洞穴/裂隙顶端土质盖层底部的土颗粒出现小规模塌落空腔，称为初始负压空腔。空腔内出现向下作用的负压吸力，属于均布荷载，对空腔内部表面土体颗粒产生向下拉拽作用，表现为地下水潜蚀作用加强。

阶段 c：负压空腔扩大。在土质盖层内产生初始负压空腔后，空腔内表层的土体颗粒在负压吸力和土体颗粒自重共同作用下逐渐发生崩落，空腔体积逐渐增大，空腔顶部与湿润锋基本一致。空腔顶部剩余土层厚度逐渐减小，盖层地表发生沉降变形，沉降区域边缘出现环形、弧形拉剪裂缝，沉降区域的土质盖层承载力显著降低。

阶段 d：地面坍塌。土质盖层内负压空腔扩大到某一临界状态时，即土质盖层顶板塌陷判别系数 K 小于 1 时，空腔顶部剩余土层在自重、负压吸力共同作用下发生坍塌，出现如图 1 所示的塌陷坑。如果处于临界状态的土质盖层位于地表道路及人群集中活动区，有可能在车辆荷载及人工振动作用下加剧地面塌陷灾害发育进程。

4 结束语

1）岩溶洞穴土质盖层地面塌陷灾害是一种具有重大潜在安全隐患的地质灾害，以重庆市歌乐山余家湾水库地面塌陷灾害为例，分析了该类地质灾害的基本特征，构建了土质盖层型地面塌陷灾害地质模型。

2）构建了土质盖层型地面塌陷力学模型，基于极限平衡原理建立了土质盖层型地面塌陷判别系数计算公式，并给出了地面塌陷灾害判别标准。实例分析表明，该方法计算结果与实情吻合良好，尤其是负压吸力可使土质盖层型地面塌陷判别系数明显降低。

3）构建了土质盖层型地面塌陷演化模式，即地下水位快速降落→初始负压空腔形成→负压空腔扩大→地面坍塌，并对每个阶段的基本特征进行了科学描述。

参考文献：

[1] 张成平，张顶立，王梦恕，等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学，2010，31(s1)：303-309
ZHANG C P，ZHANG D L，WANG M S，et al. Construction mechanism and control of city tunnel-induced ground collapse[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(s1)：303-309.

[2] 程星. 岩溶塌陷机理及其预测与评价研究[M]. 北京：地质出版社，2005.
CHENG X. Study on prediction and evaluation of karst collapse mechanism[M]. Beijing：Geological Publishing House，2005.

[3] PAPADOPOULOU-VRYNIOTI K，BATHRELLOSG D，SKILODIMOU H D，et al. Karst collapse susceptibility mapping considering peak ground acceleration in a rapidly growing urban area[J]. Engineering Geology，2013，158：77-88.

[4] BAI H B，MA D，CHEN Z Q. Mechanical behavior of groundwater seepage in Karst collapse pillars[J]. Engineering Geology，2013，3：103-124.

[5] HE K Q，JIA Y Y，ZHAO M，et al. Comprehensive analysis and quantitative evaluationof the influencing factors of karst collapse in groundwater exploitation area of Shiliquan of Zaozhuang，China[J]. Environmental Earth Sciences，2012，66：2531-2541.

[6] ZHAO H J，MA F S，GUO J. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010[J]. Nat Hazards，2012，60：1037-1054.

[7] LEI M T，JIANG X Z，YU L. New advances in karst collapse research in China[J]. Environmental Geology，2002，42：462-465.

[8] 贺可强，王滨，万继涛. 枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究[J]. 岩土力学，2002，23(5)：564-574.
HE K Q，WANG B，WAN J T. Research in forming mechanism and collapse model of Zaozhuang karst collapse[J]. Rock and Soil Mechanics，2002，23(5)：564-574.

[9] 徐卫国. 试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J]. 地质论评，1981，27(2)：174-180
XU W G. Discussion on the vacuum effect of ground collapse in karst mining area[J]. Geological Review，1981，27(2)：174-180.

[10] 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.
CHEN H K，LIANG D，DONG P. Thestability analysis methods and its application for soil cover of karst cave [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2016，12(2)：546-552.

[11] 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.

CHEN G L. Causes and prevention of karst ground collapse[M]. Beijing:China Railway Publishing House,1994.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Study on Mechanism of Ground Collapse in Soil Cover Over Karst Caves Triggered by Drop-down of Underground Water: Taking Ground Collapse at Yujiawan Reservoir in Mt. Gele of Chongqing City as an Example

CHEN Hongkai[1,2], WANG Shengjuan[2], SU Junjiang[1], HU Ting[2]

(1. College of Geology and Surveying and Mapping Engineering, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: [**Purposes**]Ground collapse mechanism of soil cover over karst cave triggered by falling of ground water is the scientific evidence to put into monitoring, pre-warning and governing for the disaster. [**Methods**]Based on investigation in field, mechanical mechanism and evolution model of soil cover over karst cave are discussed by limit equilibrium theory and Geomorphology method. [**Findings**]Geological model and mechanical model for soil cover ground collapse are established. One method to identify ground collapse of soil cover is produced, while potential criterion for the disaster is proposed. Further, the authors come up with the evolution model of ground collapse of soil cover over karst cave, i. e., rapid drop-down of underground water level → formation of initial cell with negative pressure → enlarge process of cavity with negative pressure → ground collapse process. [**Conclusions**]Case analysis identifies that results by the method established is consistent with the fact in field, which possesses popularization and application value on cholesterol levels. What needs to be stressed is that negative pressure triggered by rapid drop-down of underground water level plays the key role in the method.

Keywords: ground collapse; mechanical analysis; evolution model; soil cover; karst cave

(责任编辑 黄 颖)