

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

覆盖型岩溶土洞形成的临界水流速度数值模拟研究

陈小茜,黄荷,朱燕,曾斌

Numerical simulation of critical flow velocity in the covered karst soil cave formation CHEN Xiaoxi, HUANG He, ZHU Yan, and ZENG Bin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302063

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil 蔡沛辰, 阙云, 李显 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 54-63

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow 张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59

二维条件下颗粒柱体崩塌入水堆积过程

A study of the process of particle column collapsing into water under 2D condition 冯万里, 黄波林, 张全, 王健, 郑嘉豪 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 90-96

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet 马剑飞,李向全,张春潮,付昌昌,白占学,王振兴 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 23-33

基于砂槽模型研究不同水流密度下盆地地下水流系统

A study of the characteristics of groundwater flow system of a basin under variable density condition based on a physical sand box model 易磊, 漆继红, 许模, 吴明亮, 李潇, 岑鑫雨 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 40-40

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation 侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143-151



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302063

陈小茜,黄荷,朱燕,等.覆盖型岩溶土洞形成的临界水流速度数值模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 189-196. CHEN Xiaoxi, HUANG He, ZHU Yan, et al. Numerical simulation of critical flow velocity in the covered karst soil cave formation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 189-196.

覆盖型岩溶土洞形成的临界水流速度数值模拟研究

陈小茜1,黄 荷2,朱 燕1,曾 斌3

 (1. 湖北省生态环境科学研究院,湖北武汉 430074;2. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114;3. 中国地质大学(武汉)环境学院,湖北武汉 430074)

摘要:覆盖型岩溶塌陷灾害具有隐蔽性、突发性、不确定性、机理复杂性等特点,致使其预防、治理工作十分困难。覆盖型岩溶塌陷过程中,覆盖层土体形成土洞,土洞发育、扩展直至地表塌陷。现阶段土洞塌陷研究方法多为有限单元法等数 值模拟,但有限单元法无法解决颗粒迁移、土体崩落等岩体大变形问题。在浙江省江山市岩溶塌陷地质条件分析的基础 上,利用颗粒流数值模拟方法(PFC)对覆盖型岩溶土洞的形成过程进行了模拟,从微观角度揭示土洞形成过程中特殊土体 颗粒的位移、裂纹的发展趋势和系统不平衡力的变化情况等,再现外力作用下岩溶土洞形成的多场变化特征。结果表明: (1)岩溶土洞发育过程可概化为裂纹产生、连通面形成、颗粒剥落3个阶段;(2)岩溶土洞开始发育时,土体颗粒位移曲线、 裂纹的贯通程度、不平衡力三者之间具有良好的一致性,且垂直方向扩展速度大于水平速度;(3)覆盖层土体为黏土时初始 土洞形成的临界水流速度为0.104 cm/s。研究结果可为岩溶塌陷治理提供参考数据。 关键词:颗粒流;覆盖型;岩溶塌陷;土洞;临界水流速度

中图分类号: P642.25 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2024)04-0189-08

Numerical simulation of critical flow velocity in the covered karst soil cave formation

CHEN Xiaoxi¹, HUANG He², ZHU Yan¹, ZENG Bin³

 Hubei Academy of Ecological and Environmental Sciences, Wuhan, Hubei 430074, China;
 School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The covered karst collapse has the characteristics of concealment, suddenness, uncertainty, and mechanism complexity, which leads to its prevention and treatment more difficult. In the process of covered karst collapse, soil caves formed in the overlying soil, develop and expand until the surface collapse. Numerical simulation such as the finite element method is an effective method of soil cave collapse; however, the finite element method can not solve the problem of large deformation of rock mass such as particle migration and soil collapse. Based on the analysis of the geological conditions of karst collapse in Jiangshan city, Zhejiang province, this study used the particle flow code (PFC) to simulate the formation process of covered karst soil cave and then

第一作者: 陈小茜(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事环境地质、固体废物污染防治相关研究。E-mail: 1398947875@qq.com

收稿日期: 2023-02-26; 修订日期: 2024-03-19 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2023AFB293)

¹X 10 PT-2

通讯作者:朱燕(1982一),女,硕士,高级工程师,从事固体废物与化学品污染防治相关研究。E-mail: 379718082@qq.com

to reveal the displacement of special soil particles, the development trend of cracks, and the change of system imbalance force on a micro level. The multi-field variation characteristics of the formation of covered karst soil cave under external force conditions were reproduced. The results show that the development process of karst soil cave could be summarized into three stages including crack generation, connected surface formation, and particle peeling. As the karst soil cave began to develop, there was a good consistency among the displacement curve of soil particles, the penetration degree of cracks, and the unbalance force, and the vertical expansion speed was larger than the horizontal speed. The critical flow velocity of the initial soil cavity is 0.104 cm/s when the overburden soil is clay. This study can provide basic information for the treatment of karst collapse. **Keywords:** particle flow code; covered; karst collapse; soil caves; critical flow velocity

近年来,在公路建设中遇到了不少岩溶工程地质 问题,如地表塌陷、桥梁施工时的塌孔和漏浆等,其 中,塌陷灾害往往以覆盖型岩溶塌陷为主^[1-3]。覆盖 型岩溶塌陷因其具有空间隐蔽性、突发性和机理复杂 性,使得预防灾害发生十分困难^[4-6]。

为进一步预防岩溶塌陷灾害,国内外学者们对岩 溶塌陷形成机制进行了深入研究,研究方法多为物理 模型方法^[7-9]和数值模拟方法^[10-12]。现阶段多采用基 于连续介质的有限元法对塌陷过程进行模拟^[12-14],在 岩溶塌陷过程、岩溶塌陷形成机理^[14]、主控条件^[15]、 塌陷临界条件^[16]、覆盖层受力及位移变化方向取得了 一定进展。例如:不同岩溶裂隙条件下,计算土洞塌 陷的临界高度^[17];不同降雨强度下,得到不同直径土 洞致塌规律^[18];不同水位降幅下,模拟三元覆盖型岩 溶塌陷模式等^[19]。数值模拟能便捷高效地建立不同尺 寸、工况的塌陷模型,分析各种影响因素。

但有限单元法的应用前提为连续介质的变形问题,在土体颗粒的离散力学行为、流固耦合作用下的 渗透变形、剥落坍塌等方面具有较大的局限性,且难 以处理较为复杂的边界条件。实质上,覆盖层在逐渐 破坏的过程中,岩体存在大变形,且微观层面上土颗 粒会产生潜蚀效应、崩落效应、迁移效应等不连续颗 粒介质的力学行为。因此,利用基于离散元理论的颗 粒流软件(PFC)研究土体等散粒体的大变形更符合实 际,较为真实地反映覆盖型岩溶土洞的形成过程。

近年来,在人为活动影响下,浙西北碳酸盐岩区 域岩溶塌陷频繁,塌陷成为当地主要地质灾害之一^[20]。 如 2010 年 6 月 4 日,浙江省衢南高速公路 K1478+520 处左幅地段突然发生路基塌陷,塌陷坑深 6 m^[21]。江 山市是浙江省岩溶塌陷地质灾害的多发区,据调查, 江山市共发生地面塌陷 123 起,81 起是由于岩溶塌陷 引起的,占塌陷总数的 65.9%。

已有学者总结了江山市覆盖型岩溶塌陷特征、分

布规律,并建立江山市岩溶塌陷易发性预测模型,主要集中于岩溶塌陷易发性分区、地质灾害调查等,未 对典型土洞形成机制及临界条件开展研究^[20,22]。

本文以江山市典型覆盖型岩溶塌陷为例,在江山 市地质调查的基础上,总结江山市土洞特点,概化典 型地质结构,利用颗粒流软件(PFC)模拟抽水作用下 覆盖型岩溶土洞的发育机制,从微观角度上分析土洞 发育过程中土体颗粒的位移、裂纹的扩展等问题,同 时计算出土洞发育的临界水流速度,为江山市覆盖型 岩溶发育、塌陷及防治提供理论依据。

1 江山市覆盖型岩溶土洞发育概况

江山市位于浙、闽、赣三省交界处,是东部沿海地 区和浙、闽、赣边界地区交通干线的交汇点,杭长高 铁、京台(黄衢南)高速、浙赣铁路贯穿全境。根据钻 探,衢南高速多为二叠系下统栖霞组上段厚层灰岩, 灰岩纯度高,区内钻孔遇洞率高,溶洞规模较大且分 布极不均匀。江山市塌陷区覆盖层厚度多小于10m, 厚度小于5m的地段塌陷点密集,岩性多为黏土。

对江山市土洞的发育规律进行统计可知:

(1)土洞多分布于土体与浅层岩层交界面附近溶 蚀沟槽开口处,岩层溶蚀沟槽越发育,土洞个数越多;

(2)土洞多分布于残积成因的黏土中,土体液性高,遇水后强度明显变小,易形成土洞;

(3)土洞多分布于地下水位变动带。地下水水位 波动频率高、幅度大,土体在地下水潜蚀作用下,易生 成土洞。

2 PFC 模拟方案及计算

2.1 模型结构的设计

根据江山市地质资料,覆盖层厚度小于5m的地 段塌陷点密集。因此, PFC 建模过程中,塌陷模型的 大小为10m×6m,覆盖层厚度为5m,覆盖层以下为基 岩, 土洞以下是溶蚀裂隙或沟槽开口, 宽度为 1.2 m。 初始土洞高为 H、弦为 D 的圆弧(H、D 在模拟中随着 模拟工况不同而变化)。岩溶塌陷地质模型剖面如图 1 所示。



Fig. 1 Geological model of Y-Z profile of karst collapse

2.2 模型参数标定

通过 PFC 模拟双轴实验、劈裂实验、渗流实验,对 比土体土工试验和数值模型中的黏聚力、内摩擦角、 初始弹性模量、抗拉强度、泊松比、渗透系数等参数, 标定法向刚度(K_n)、切向刚度(K_s)、接触法向强度(σ_c)、 接触切向强度(τ_c)、摩擦系数(μ)等微观参数^[23-26]。

(1)土体常规参数

江山市覆盖层岩性为黏土,对覆盖层土体进行土 工试验,试验结果表明土体黏聚力为28kN,抗拉强度 为5kPa,内摩擦角为24°,初始弹性模量为10.4,渗透 系数为5.6×10⁻⁷ cm/s。

(2) 双轴试验标定变形模量和泊松比

运用 PFC 模拟土体双轴试验,试验模型如图 2 所 示,模型大小选定为 50 mm×100 mm,颗粒半径为 0.1~ 1.8 mm,颗粒密度为 1 960 kg/m³,对于颗粒间的法向刚 度(*K*_n)、切向刚度(*K*_s)和接触黏结模量的 *K*_n'、*K*_s'取值 相同。实验过程中,先赋予模型固定围压,后对墙体 加载法向压力。在标定过程中,多次调节 *K*_n、*K*_s的数 值确定泊松比(*v*)和初始弹性模量(*E*)。泊松比和初 始弹性模量由式(1)、式(2)确定:

$$E = \frac{\Delta \sigma_{\rm d}}{\Delta \varepsilon_{\rm a}} \tag{1}$$

$$v = 1 - \frac{\Delta \varepsilon_{\rm v}}{\Delta \varepsilon_{\rm a}} \tag{2}$$

式中:
$$\sigma_{d}$$
 — 轴向偏应力;
 ε_{v} — 体积应变;
 $\Delta \varepsilon_{a}$ — 轴向应变。



Fig. 2 Schematic diagram of biaxial experimental model

经 PFC 计算可得:

$$E = \frac{\Delta \sigma_{\rm d}}{\Delta \varepsilon_{\rm a}} = \frac{9.8 \times 10^4}{8.6 \times 10^{-3}} = 11.2 \text{ MPa}$$
$$v = 1 - \frac{\Delta \varepsilon_{\rm v}}{\Delta \varepsilon} = 1 - \frac{2 - 1}{2.45 - 1.2} = 0.2$$

此时颗粒 K_n=1×10⁷ N/m, K_s=5×10⁶ N/m_o

(3)巴西劈裂标定抗拉强度

巴西劈裂模型为直径 50 mm 的圆盘,墙体以一定 速度向模型施加荷载,如图 3 所示,红色短线为接触 断裂的裂纹,裂纹发展到一定地步时,模型破坏,墙体 停止加载。经 PFC 计算,模型破坏时,最大峰值强度 为 4.8 kPa,此时接触法向黏结强度为 80 kPa。



Fig. 3 Brazil split test

(4) 双轴实验标定黏聚力和内摩擦角

双轴压缩试验中,模型围压 (σ_t)分别为 30 kPa、 80 kPa、130 kPa 时,对式样施加法向压力直至加载强 度到达最大破坏强度,同时绘制 3 种围压下的 Mohr 圆,做出 3 个应力圆的包络线,同时根据摩尔-库伦理 论公式: $\tau=\sigma tan \theta+C$,求解出 θ 和 C。其中,围压 $\sigma_t=\sigma_3$ (最小主应力),最大主应力 $\sigma_1 = \sigma_a + \sigma_t$, σ 为双轴压缩实验获得最大峰值强度。根据图 4 可知, 式样的抗剪强度黏聚力为 30 kPa, 内摩擦角为 26°, 此时的微观参数摩擦系数为 0.3, 切向黏结强度为 20 kPa。



(5) 渗流模型标定渗透系数

达西渗流模型尺寸为 20 mm×20 mm, 颗粒之间采 用黏结接触, 对上、下边界的颗粒进行固定, 标记为不 排水边界(如图 5(a)中上、下侧的绿色颗粒)^[27]。

模型左侧水压固定为2kPa,右侧水压固定为0, 模型中水压从左向右逐渐蔓延。对文中所有模型的



左、右侧分别预留 1.5 mm 进行加压,则实际的渗流途 径为 17 mm。根据 $J=\frac{\Delta H}{\Delta L}$,计算可得: J=1 146.47。选取 模型 L=10 mm 的范围测量总流量,流体流经总面积 为 200 mm²。经计算: $Q=1.33\times10^{5}$ mm³,根据达西公式: $K=5.7\times10^{-7}$ cm/s。管道直径 a 为 0.8 mm,此时水力传 导系数 $K'=5\times10^{-11}$ cm/s。

(6)参数标定结果

土体标定结果见表 1, 可知: 其数值模拟结果和实际值的最大误差小于 10%, 说明模拟值和实际值拟合好。此时 PFC 软件中相对应的法向刚度 *K*_n、切向刚度 *K*_s、接触法向强度 σ_c、接触切向强度 τ_c、摩擦系数 μ等微观参数见表 2。

	表 1 土体力学参数标定结果
Table 1	calibration results of soil mechanical parameters

参数名称	黏聚力/ kN	内摩擦角	初始弹性模量	泊松比	抗拉强度/kPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
实际值	28	24	10.4	0.22	5	5.6×10 ⁻⁷
模拟值	30	26	11.2	0.2	4.8	5.7×10 ⁻⁷
误差	7.1%	8.3%	7.7%	9.1%	4%	1.7%

表 2 土体微观参数取值表

Table 2 soil microscopic parameter table

参数	法向刚度/(N·m ⁻¹)	切向刚度/(N·m ⁻¹)	摩擦系数	法向黏结强度/Pa	切向黏结强度/Pa	传导系数/(cm·s ⁻¹)
取值	1×10^{7}	5×10^{6}	0.3	8×10^4	2×10^{4}	5×10 ⁻¹¹

3 覆盖型土洞形成条件模拟

3.1 模型建立

基于 PFC 软件,模拟抽水条件下基岩裂隙溶蚀沟 槽开口处的土体形成土洞的过程,计算土洞形成的临 界水流速度。模型见图 6,说明如下:

(1)地质模型概化为 10 m×6 m,因模型过大,计算 量庞大,故对岩溶塌陷数值模型进行等比例缩尺,数 值模型尺寸为 100 mm×60 mm,颗粒半径大小为 0.1~ 1.8 mm,颗粒之间采用接触黏结;



Fig. 6 Schematic diagram of model boundary conditions

(2)覆盖层厚度为 50 mm, 岩性为黏土, 基岩 10 mm, 基岩裂隙统设为宽 12 mm, 高 10 mm, 覆盖层土体中发 育高为 2 mm 的裂隙;

(3) 土体颗粒施压范围: *X*的范围(-50, -35) 和 (35, 50), *Y*的范围(-20, 12), 水压大小为 2.25×10⁵ Pa;

(4)模型中水体最终排泄点为溶蚀沟槽,此处水
压大小设置为0,排泄点范围为X(-6,6),Y(-25,-18)。
3.2 模型渗流破坏过程分析

(1)模型不同位置颗粒位移

对在土岩交界面附近溶蚀沟槽开口处的土体颗 粒的位移进行监测,颗粒位置如图 7 所示,监测颗粒 分别为溶蚀沟槽中间位置的颗粒 1 和溶蚀沟槽两侧 的颗粒 2。模型中设定颗粒位移大于 0.5 mm 时自动 删除,代表颗粒已经剥落。颗粒位移变化图如图 8 所 示:在 240 000 时步之前(其中 1 时步为 0.1 s),颗粒 1、 2 的位移随着时间的增长而增长,且颗粒 1 的位移增 长速率较大;模型运行到 240 000 时步时,颗粒 1 的位 移急剧增加,位移值大于临界值,此颗粒已剥落,而由 于土体坍塌产生的水压扰动颗粒 2 位移小幅度下降; 240 000 时步之后,溶蚀沟槽开口两侧处的土体颗粒 2 的位移随着时间的增长而增长,而颗粒 1 已剥落无 位移曲线。









(2)裂纹扩展与贯通

模型塌陷过程中土体颗粒间的接触力链如图9所

示,蓝色线条代表接触力链且力链越粗说明接触力越 大、土体颗粒所受外力越大,红色短线为颗粒接触黏结 发生破坏所产生的裂纹。裂纹产生于覆盖层与溶蚀 沟槽交界面处的土体内,如图 10 所示。在 240 000 时 步之前,模型产生的裂纹个数为 1;模型运行到 240 000 时步时,裂纹数目急剧增长且快速发展为连通面,此 时土体颗粒发生剥落、坍塌,颗粒间的接触力消失。 在裂纹形成之后,裂纹附近的接触力链逐渐变粗说明 此时发生了应力集中、并形成明显的应力拱。



图 9 临界水流速度—颗粒力矩中裂纹发展趋势图 Fig. 9 Critical water flow velocity and crack development trend in particle moment



(3)模型系统不平衡力变化特征

在模拟初期,颗粒刚生成时,颗粒之间的重叠量 较大,导致系统不平衡力较大,运用"伺服机制"对模 型进行调整,调整后模型的不平衡力大小在 60 N 左右 小幅波动,说明在此条件下模型达到了自然平衡。在 较长一段时间内,系统不平衡力波动幅度较小,并保 持在某一范围值内;220 000 时步时,系统不平衡力小 幅增长;240 000 时步时,系统不平衡力急剧增长,不 平衡力的数值大小达到了 10⁶ N,随后在 10⁵ N 附近波 动,最后恢复到平衡状态。 综合对颗粒位移、裂纹贯通程度和系统不平衡力 进行分析,可得:在240000时步时,颗粒位移、裂纹贯 通程度、系统不平衡力皆有较大的变化,且三者之间 相呼应,可认为240000时步为模型发生渗流破坏的 时间点,此时,裂纹急剧增长发育成连通面、土体颗粒 顺着连通面剥落、不平衡力急剧增长,覆盖层土体部 分坍塌,土洞开始发育。

4 土洞形成的临界地下水流速及印证

(1)临界水流速度模拟结果

此模型模拟土洞的发育过程,并求取土洞初始形成的地下水临界水流速度。对模型出口处的流量进行监测,出口处的横断面积 A=48 mm,流体记录的时间步长为 0.1 s,综合对颗粒位移、裂纹贯通程度、系统不平衡力的分析可知: 240 000 时步时,土体颗粒剥落、覆盖层部分坍塌发育土洞。如图 11 所示, 240 000 时步流量先急剧减少后急剧增加,此时模型的流量大小为 5×10⁵ mm³,由达西定律可得:

$$v = \frac{Q}{A} \tag{3}$$

代入数值、单位换算可得模型破坏时的临界水流 速度为 v=0.104 cm/s。



(2)临界水流速度结果印证

大量研究表明土洞形成的最主要原因为地下水的变化,包括水位幅度变化和地下水流速变化。雷明 堂等^[28]等通过模型实验得出岩溶水位下降是发生破 坏的主要原因,发生破坏的时间主要在抽水的瞬间或 岩溶水下降至基岩面的瞬时。万志清等^[29]推导出土 洞形成的临界水位降幅和临界水流速度与土体力学 参数和水力学参数之间的关系,通过对比雷明堂等^[28] 塌陷模型的临界水流速度与计算速度,印证临界水流 速度公式的可靠性。 根据研究区域地质条件,覆盖层岩性为粉质黏 土,临界水位降幅的表达式为:

$$\Delta H_{\rm cr} = \frac{c}{3g\rho_{\rm w}} \tag{4}$$

式中: ΔH_{cr}——临界水位降幅;

$$\rho_{\rm w}$$
——水的密度。

黏性土的临界地下水流速为:

$$v_{\rm cr} = \frac{n_0 e_0 d_0}{16\mu} \left[\frac{2(\gamma_{\rm s} - \gamma_{\rm w}) d_0 \tan\varphi}{3\alpha} + \frac{A}{d_1^4} \right] \tag{5}$$

式中: n₀——土层的孔隙度;

γ,-----土的容重/(kN·m⁻³);

γ_w——水的容重/(kN·m⁻³);

*d*₀───土颗粒粒径/m;

 φ ——土颗粒表面之间的摩擦角/(°);

 α ——地下水作用于土颗粒上的有效摩擦面积与 最大截面积 $\left(\frac{\pi d_0^2}{4}\right)$ 之比。

根据土工实验,得到 $n_0=0.2$, $e_0=0.25$, $d_0=0.25$ mm(在 总模型中,颗粒粒径在 d<0.25 mm 的范围内的颗粒数目 较多), $\mu=1.01\times10^{-6}$ kPa/s, $\gamma_s=19.6$ kN/m³, $\gamma_w=9.86$ kN/m³, G=2.5, $\varphi=24^\circ$, $A=10^{-31}$ kN/m², $\alpha=0.5$,由式(3)计算理论 临界水流速度可得: $\nu_{cr}=0.113$ cm/s。

基于前文颗粒流数值模拟得到的临界水流速度为: v=0.104 cm/s,而由式(5)得到临界水流速度理论值为: v_{er}=0.113 cm/s,误差仅为 8%,验证了颗粒流数值模型的可靠性。

5 结论

(1)利用 PFC 模拟土洞形成过程中,特殊土体颗 粒的位移、裂纹的发展趋势、系统不平衡力的变化情况,再现外力作用下土洞形成的多场变化特征。

(2)在水流作用下,土岩交界面附近溶蚀沟槽开口处的土体颗粒发生应力集中,土体内部产生裂纹,裂纹急剧增长发育成连通面、土体颗粒顺着连通面剥落、不平衡力急剧增长,土覆盖层土体部分坍塌,土洞开始发育。

(3)模拟过程清晰反映出:抽水作用下,在土岩交 界面附近溶蚀沟槽开口处的土体颗粒位移逐渐增大, 垂直方向颗粒开始剥落,土洞开始发育并有向上部及 水平方向扩展,同时垂直方向扩展速度大于水平。 (4)江山市覆盖层土体为黏土时初始土洞形成的 临界水流速度为 0.104 cm/s, 此值可为江山市岩溶塌 陷治理提供参考数据。

(5)PFC软件模拟岩溶塌陷所呈现出来的微观过 程是合理可信的,与理论较为吻合,实现了其他方法(物 理模型、解析法)等无法实现的微观破坏过程的目的。

参考文献(References):

- [1] 金晓文,陈植华,曾斌,等.岩溶塌陷机理定量研究的 初步思考[J].中国岩溶,2013,32(4):437-446.[JIN Xiaowen, CHEN Zhihua, ZENG Bin, et al. Preliminary thinking of quantitative research on the mechanism of Karst collapse[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4):437-446. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 简文彬, 吴振祥. 地质灾害及其防治 [M]. 北京: 人 民交通出版社, 2015. [JIAN Wenbin, WU Zhenxiang. Geological hazard and control [M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)]
- [3] 周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 等. 广昆铁路复线秀宁隧道 大皮坡—中村段岩溶塌陷成因 [J]. 水文地质工程地 质, 2019, 46(3): 146 - 152. [ZHOU Changsong, ZOU Shengzhang, ZHU Danni, et al. An analysis of the cause of Karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 146 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 等. 岩溶塌陷机理研究进展
 [J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517 527. [JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, et al. A review of Karst collapse mechanisms[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 517 527. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 罗小杰,罗程. 岩溶地面塌陷三机理理论及其应用
 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 171 188. [LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory(TMT) of Karst ground collapse and its application[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 171 188. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 罗小杰.也论覆盖型岩溶地面塌陷机理[J].工程地质学报,2015,23(5):886-895. [LUO Xiaojie.Further discussion on mechanism of covered Karst ground collapse[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5):886-895. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 任新红,郭永春,王清海,等.覆盖型岩溶潜蚀塌陷临 界裂隙开度模型试验研究[J].水文地质工程地质,
 2012, 39(5): 84 - 87. [REN Xinhong, GUO Yongchun, WANG Qinghai, et al. Experiment research of

the critical fissure width of collapse of covered Karst during underground erosion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(5): 84 - 87. (in Chinese with English abstract)]

- [8] 唐灵明.强降雨作用下覆盖型岩溶塌陷模型试验研究[D].桂林:桂林理工大学,2021.[TANG Lingming. Experimental study on covering karst collapse model under heavy rainfall[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.(in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈余道,朱学愚,蒋亚萍.粘性土土洞形成的水化学侵 蚀实验[J].水文地质工程地质,1997,24(1):29-32.
 [CHEN Yudao, ZHU Xueyu, JIANG Yaping. Hydrochemical erosion test of formation of clayey soil hole[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1997, 24(1):29-32. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李慎奎.武汉地区沙漏型岩溶塌陷数值分析与模型 试验研究 [J].隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 981-987. [LI Shenkui. Numerical analysis and model test of hourglass-shaped Karst collapse in Wuhan Area[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 981 - 987. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陶小虎,叶明,龚建师,等.基于 LBM-DEM 细观数值 模拟的水力诱导覆盖型岩溶地面塌陷发育过程分析
 [J].中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 124 - 131. [TAO Xiaohu, YE Ming, GONG Jianshi, et al. Analysis of the formation process of the covered Karst ground collapse induced by groundwater changes based on the coupled LBM-DEM numerical simulation at micro scale[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 124 - 131. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张鑫.覆盖型岩溶塌陷模型试验与数值模拟研究
 [D].合肥:合肥工业大学,2017.[ZHANG Xin. Model test and numerical simulation of overlying Karst collapse[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李万有,陈立龙,李爽.覆盖层的抗剪强度与土洞型岩 溶塌陷高度关系的数值分析研究 [J]. 林业科技情 报,2010,42(1):102 - 104. [LI Wanyou, CHEN Lilong, LI Shuang. Study on numerical analysis of the relationship between shear strength of cover layer and the soil cave Karst collapse height[J]. Forestry Science and Technology Information, 2010, 42(1): 102 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 程星,彭世寿.岩溶区地下水位下降致塌的数值模拟 研究 [J].地球与环境,2005,33(增刊1):119-123.
 [CHENG Xing, PENG Shishou. The numerical

simulating study on the Karst collapse of the fall of groundwater table[J]. Earth and Environment, 2005, 33(Sup 1): 119 - 123. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 王文轩,夏源.真空吸蚀致岩溶塌陷的稳定性分析及 其数值模拟[J].地下水,2023,45(5):18-20.[WANG Wenxuan, XIA Yuan. Stability analysis and numerical simulation of Karst collapse caused by vacuum suction[J]. Ground Water, 2023, 45(5):18 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 于林弘,颜嘉良,于晓静,等.基于FLAC3D的岩溶土 洞演化及数值模拟分析[J].地下水,2020,42(4):55-57. [YU Linhong, YAN Jialiang, YU Xiaojing, et al. Evolution and numerical simulation of Karst caves based on FLAC3D[J]. Ground Water, 2020, 42(4):55 - 57. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 孙金辉.覆盖型岩溶塌陷临界参数模型试验与数值 模拟研究 [D].成都:西南交通大学,2011. [SUN Jinhui. Study on Critical Parameter in Cover Karst Collapse by Model Experiment and Numerical Simulation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 薛明明,陈学军,宋宇,等.基于 FLAC3D 不同降雨速率下土洞致塌规律研究 [J].中国岩溶, 2022, 41(6):905 914. [XUE Mingming, CHEN Xuejun, SONG Yu, et al. A study on collapse law of soil cave with different rainfall rates based on FLAC3D[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(6):905 914. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 苏添金,洪儒宝,简文彬.覆盖型岩溶土洞致灾过程的数值模拟与预测[J].自然灾害学报,2018,27(5): 179-187. [SU Tianjin, HONG Rubao, JIAN Wenbin. Numerical simulation and prediction of covered Karst collapse[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 179-187. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 苟颉龙, 楼谦谦, 杨小兰, 等. 浙江省江山市地质灾害成因分析与防治对策研究 [J]. 科技通报, 2018, 34(10):
 253 258. [GOU Jielong, LOU Qianqian, YANG Xiaolan, et al. Cause analysis and corresponding countermeasures of geological hazards in the Jiangshan city, Zhejiang Province[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018, 34(10): 253 258. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 曾斌,杨木易,邵长杰,等.基于层次分析法的杭长高速岩溶塌陷易发性评价[J].安全与环境工程,2018,25(1):29-38.[ZENG Bin, YANG Muyi, SHAO

Changjie, et al. Susceptibility assessment of Karst collapse of Hangchang expressway projects based on analytic hierarchy process [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(1): 29 – 38. (in Chinese with English abstract)]

- [22] 黄立勇. 江山市岩溶塌陷机理及易发性模拟预测研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. [HUANG Liyong. Research on the Simulation Prediction and Mechanism of Karst Collapse in Jiangshan [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 周健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟 [M]. 北京:科学出版社, 2008. [ZHOU Jian, JIA Mincai. Meso-model test and numerical simulation of geotechnical engineering [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [24] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D particle flow code in 2 dimensions-optional features [M]. Minneapolies : Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [25] Itasca Consulting Group Inc. Verification Problems and Example Applications[M] Minneapolies: Itasca Consulting Group Inc, 2005.
- [26] CUNDALL P A. PFC2D User's Manual (Version2. 0)[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 1999.
- [27] 陈小茜, 曾斌, 王春晖, 等. 基于颗粒流理论的层状非 均质介质等效渗透系数研究 [J]. 水文地质工程地 质, 2018, 45(2): 7 - 12. [CHEN Xiaoxi, ZENG Bin, WANG Chunhui, et al. A study of the equivalent hydraulic conductivity of layered heterogeneous media with the particle flow theory[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 7 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 岩溶塌陷模型试验——以武昌 为例 [J]. 地质灾害与环境保护, 1993, 4(2): 39 - 44.
 [LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LI Yu. Model test of Karst collapse: taking Wuchang as an example[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservtion, 1993, 4(2): 39 - 44. (in Chinese)]
- [29] 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. [WAN Zhiqing, QIN Siqing, LI Zhigang, et al. Formation mechanism and initial condition of soil cavity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8):1377-1382. (in Chinese with English abstract)]