

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.

DOI: 10.11932/karst20220605

基于FLAC3D不同降雨速率下土洞致塌规律研究

薛明明¹, 陈学军¹, 宋宇¹, 高晓彤¹, 李辉¹,
甘小卉¹, 张铭致¹, 潘宗源^{1,2}, 唐灵明^{1,3}

(1. 桂林理工大学/广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/
自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室,
广西 桂林 541004; 3. 广西师范大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对桂林市临桂区岩溶塌陷易发区域, 采用FLAC3D模拟不同降雨速率下的强降雨入渗过程, 探究不同直径土洞在强降雨作用下的致塌规律, 结果表明: (1) 强降雨条件下, 不同直径土洞最大位移均出现在洞顶部。降雨速率相同, 洞顶竖向位移增长速率随土洞直径的增加呈整体加快的特点; 加快降雨速率, 竖向位移增长明显, 竖向位移与土洞大小呈正相关。(2) 相同降雨速率下, 土洞直径增大会引起土洞底部剪切破坏区域进一步扩展。上覆土层在强降雨初期主要受到潜蚀作用, 加快降雨速率, 土洞底部水位剧烈波动对上覆土体产生的水击气爆成为主导作用, 剪切破坏速率加快, 洞趾剪切应变明显增加, 当土洞直径达到3 m时, 水位波动愈加剧烈, 加速上覆土层破坏。(3) 降雨速率的变化对土洞塑性区拓展范围具有不同程度的影响, 较大直径的土洞在加快降雨速率时塑性区拓展范围明显扩大, 即土洞大小、降雨速率对上覆土层稳定性具有较大的影响。研究结果为定量研究强降雨与上覆土层塌陷的关系提供了依据, 对有效、合理地预警岩溶塌陷具有一定的意义。

关键词: 强降雨; 岩溶塌陷; FLAC3D; 数值模拟; 土洞

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2022)06-0905-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

近年来, 桂林市强降雨频发引起覆盖层中渗流场、气压场、应力场发生变化, 增强了潜蚀效应和地下水位波动作用, 加速了岩溶土洞塌陷的发生, 对城市基建及人民安全造成了巨大影响^[1-3]。

雷明堂等^[4]从塌陷的原型研究入手, 通过大比例尺物理模型试验, 再现岩溶塌陷全过程, 分析了不同结构土层在岩溶水位变化、降雨条件下的塌陷发育机理, 建立了岩溶塌陷与各主要影响因素的关系; 戴

建玲等^[5]通过分析典型极端气候诱发岩溶塌陷的实例, 阐述了岩溶塌陷动力条件对极端气候响应迅速, 水气压力变化是岩溶塌陷的重要触发因素; Jiang等^[6]通过对强降雨频发的岩溶地区进行地下水—气压力长期监测, 并将监测数据转化为地下水位高程进行分析, 阐明了强降雨引起地下水位急剧上升对土洞的水击气爆作用是岩溶塌陷的主要因素; 靳红华等^[7]探究了降雨前后各阶段对岩溶塌陷的影响, 归纳出降雨过程中各个阶段对覆盖层土体的相对影响程度; Xiao等^[8-10]通过设定不同水位降幅、水位下降速率

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC507502); 国家自然科学基金项目(41967037)

第一作者简介: 薛明明(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程、岩溶塌陷、数值分析应用。E-mail: 320386123@qq.com。

通信作者: 宋宇(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事特殊性土的工程特性及致灾机理方面的研究工作。E-mail: songyu119@126.com。

收稿日期: 2021-09-27

模拟阻—透二元结构覆盖层塌陷过程,表明水位降幅、下降速率与岩溶塌陷快慢呈正相关,并归纳了塌陷时长与水位波动的表达式,明确了水气交互过程中潜蚀、负压吸蚀作用的相对强弱关系;贾龙等^[11]采用 FLAC3D 模拟土洞的演化过程,归纳出水位降幅对不同覆盖层塑性区开展、沉降、剪切应力的影响;苏添金等^[12]建立了考虑了负压作用、地下水浮托力、降雨入渗作用的力学模型,并采用 FLAC3D 模拟了地下水位变化条件下岩溶土洞的发育过程及致塌力学机制。

众多学者从定性、定量角度揭示了降雨致塌机理及潜蚀效应、水位波动作用在岩溶塌陷过程中的作用规律,从数值模拟的角度阐述了水位变化对土洞致塌的力学机制,是强降雨入渗致塌研究的重要理论支撑,但其在定量化研究强降雨条件下降雨速率的变化对土洞塌陷的致塌机理、力学破坏机制存在不足,需要进一步研究。本文以桂林市临桂区岩溶塌陷易发区域一元结构覆盖层为研究对象,采用 FLAC3D 模拟相同降雨等级不同降雨速率下土洞的演化过程,分析土洞演化过程中塑性区开展、应力、形变的变化,阐述降雨速率变化对不同大小土洞塌陷的力学破坏机制。

1 研究区地质背景

研究区位于桂林市临桂区,地处湘桂走廊南端,平均海拔 150 m。气象观测数据显示,研究区年平均气温 17.0~20.0℃,冬季偏冷,1—2 月日平均气温维持在 5~7℃,年极端最低气温-5~0℃,夏秋季节气温明显偏高,年极端最高温度为 37.0~39.0℃。年降水量合计为 1 266.0~1 986.0 mm,降雨的时空分布不均匀,春夏季节降水偏多,秋冬干旱十分严重;前汛期(4—6 月)雨量为 627.0~1 253.0 mm,后汛期(7—9 月)雨量为 128.0~305.0 mm,暴雨主要集中在 5—6 月。研究区场地中部有一北西南东向小溪通过,小溪内水位标高约为 154.60 m,其水位受季节影响较大,主要由降雨及周边生活废水补给,水量较小。研究场地地下水位基本位于基岩面,受季节性变化影响,水位变幅范围在 2~3 m。

1.1 地质地貌特征

研究区整体呈“∞”型的岩溶盆地,走向为 NE-SW,分别向 NE 及 SW 呈开放性开口。由冲洪积、残坡积两种成因的第四系覆盖物覆盖于盆地东西部

的平原。区内地貌可以分为三种地貌单元类型,分别是峰林平原、一级阶地、峰丛。研究区位于桂林弧形构造带之北段,区内构造主要为褶皱和断裂两种构造类型,为多期构造的运动产物,叠加复合现象比较明显,构造形迹多呈 NEE 向和 NWW 向。

通过对研究区场地已有地质钻探资料表明研究区第四纪地层分布广泛,主要由上更新统冲洪积层(Q_3^{al-pl})、上更新统残坡积层(Q_3^{dl-el})、泥盆系上统融县组(D_3r)3 种地层组成。上更新统冲洪积层(Q_3^{al-pl})为黄色、褐黄色卵砾石砂土、粉质黏土,由砾石、黏土和少量细沙及卵石组成,厚 2~14 m;上更新统残坡层(Q_3^{dl-el})为砖红、浅黄色黏土、砂质黏土、砂石黏土碎石层,含少量石英颗粒,厚 0.1~10 m;泥盆系上统融县组(D_3r)为灰白色,微风化,隐晶质结构,中—厚层状,主要矿物为方解石,方解石脉发育,紧密胶结,岩体较完整,岩芯呈柱状,场地内基岩面起伏变化大,岩溶裂隙较发育(图 1)。

1.2 水文地质特征及岩溶发育特征

根据勘察期间对地下水位进行观测的结果及地下水赋存条件、岩层水理性质、水动力特征,研究区内地下水类型可分为孔隙水、岩溶水,其中孔隙水主要分布于冲洪积层 Q_3^{al-pl} 及坡残积层 Q_3^{dl-el} 中含砾粉质黏土层中;岩溶水可分为纯碳酸盐类裂隙溶洞水和不纯碳酸盐类溶洞水两个含水岩组,纯碳酸盐类裂隙溶洞水最为发育,富水性最好。各含水层之间的连通性较好,地下水互为联系。

根据其充填程度,主要分为空洞、半充填及全充填溶洞,收集研究区场地内勘察资料,总共收集到 498 个钻孔,其中遇到溶洞钻孔达 160 个,溶洞总长度达 226.60 m。遇洞隙率=160/498=32.13%,在遇洞隙率 60%~30% 范围内,岩溶发育等级可划定为岩溶中等发育;线岩溶率=226.60/4 531.80=5%,在线岩溶率 10%~3% 范围内,岩溶发育等级可划定为岩溶中等发育。综合遇洞隙率及线岩溶率评定,最终判定该研究区岩溶发育等级为岩溶中等发育。

2 FLAC3D 数值模拟

FLAC3D 数值模拟^[13-14]可显示出强降雨入渗过程中不同直径土洞的应力、应变、塑性区的变化,这对于分析强降雨致塌机理具有很好的应用价值。

地质条件是进行数值模拟的基础,然而研究区

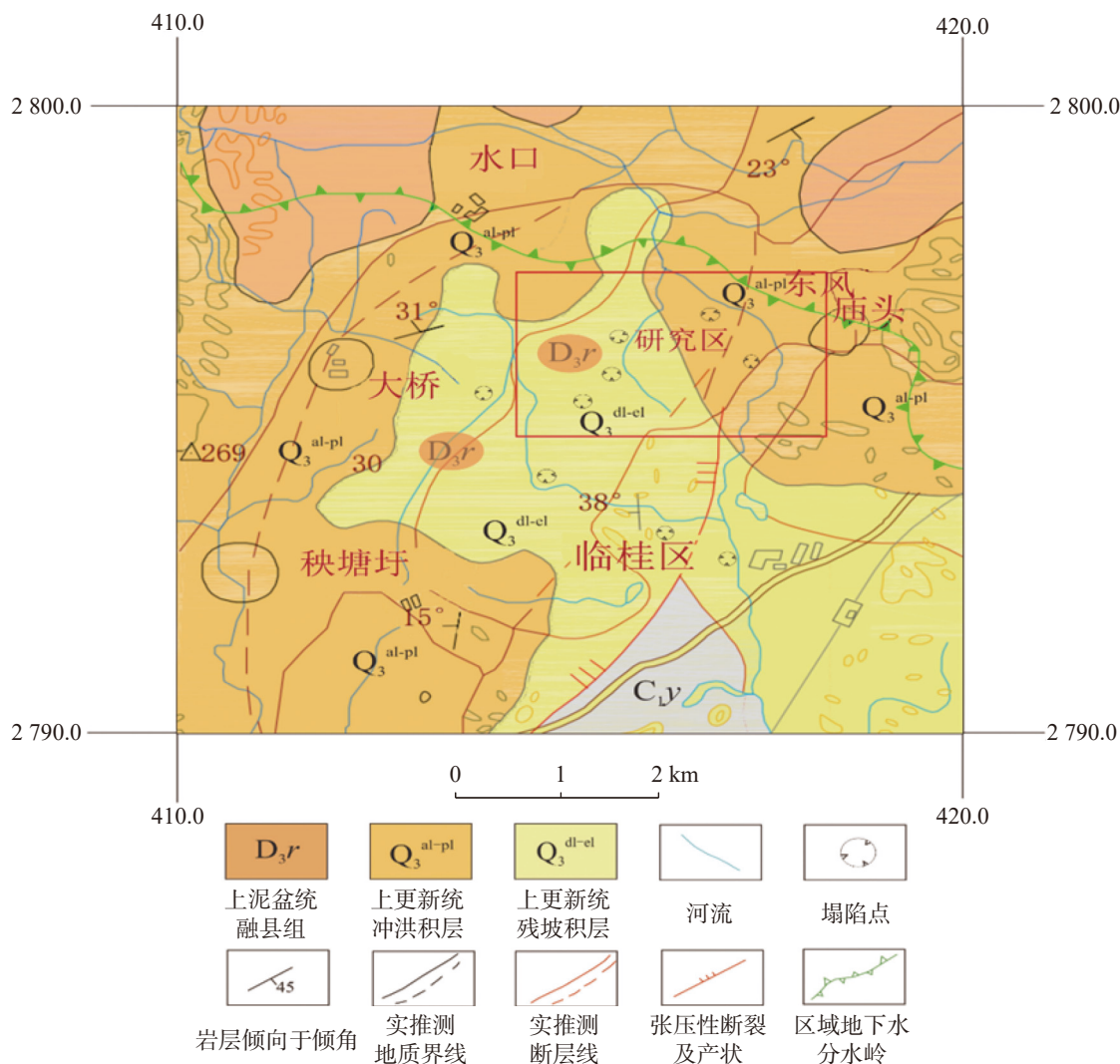


图1 工程地质图

Fig. 1 Engineering geology map

地质条件较为复杂,需要对研究区地质条件进行地质模型概化,建立岩溶覆盖层计算模型。经收集桂林市临桂区地质钻探资料可知,研究区上覆土层主要可分为单层结构或双层结构,其中单层结构中,上覆土层为黏性土;双层结构主要有两种类型,一类为上细下粗型,上层为黏性土,下层为残坡积碎石类土;另一类为上粗下细型,上层为冲洪积卵砾石土,下层为黏性土^[15]。详见图2上覆土层结构类型。

根据相关地质钻探资料可知, Q_3^{al-pl} 冲洪积层形成的粉质黏土,其黏粒含量较低,固结程度及抗剪强度相应较低,抗塌能力差,土层区域塌陷个数达到128个,塌陷密度 $14.57 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$,塌陷面积 8.18 km^2 ,占整个研究区塌陷总面积的58.9%。因此本文主要以一元结构覆盖层进行模拟,通过室内土工试验获取其基本物理、力学性质参数。研究区土体物理、

力学参数见表1。

强降雨具有短时、高强度的特征,降雨引起的潜蚀作用与水位波动产生的水击气爆作用在岩溶土洞致塌过程中的相对影响程度主要取决于降雨时长和降雨强度,这从定性角度上说明了强降雨引起水位波动作用是岩溶土洞致塌的主要影响因素,但量化揭示强降雨致塌机理还需进一步研究。因此,本文通过FLAC3D模拟相同降雨等级不同降雨速率条件下岩溶土洞的演化过程,量化探究降雨速率快慢引起的水位波动、潜蚀作用导致岩溶土洞塌陷过程中塑性区开展、应力、位移变化,并通过对比分析得出岩溶土洞的致塌规律和力学破坏机制。

2.1 模型建模及生成初始应力场

根据研究区地质报告,粉质黏土覆盖层厚度范

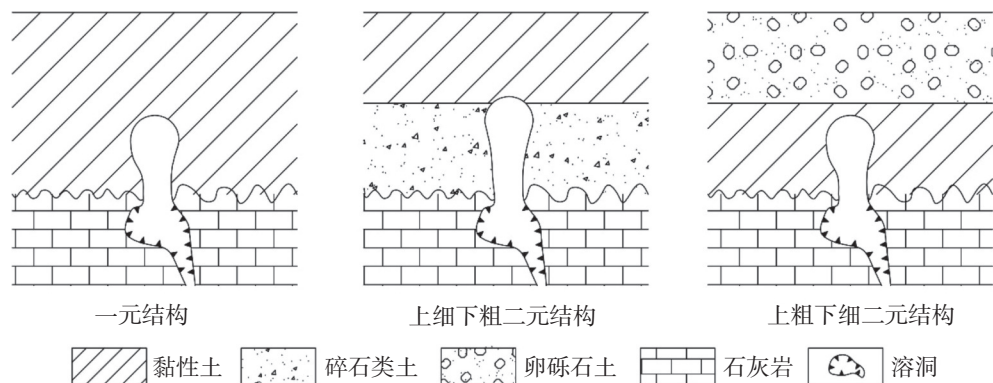


图2 上覆土层结构类型
Fig. 2 Structure type of overlying soil layer

表1 土体基本物理、力学参数
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil

覆盖层类型	密度/g·cm ⁻³	孔隙率	剪切模量/kpa	体积模量/kpa	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	渗透系数/cm·s ⁻¹
粉质黏土	1.72	0.47	1.354×10 ⁶	4.22×10 ⁶	8.8	25.3	3.22×10 ⁻⁴

围为 0.5~4.5 m, 岩溶开口直径大概为 1.0 m。结合研究区地质、水文、构造等条件, 确定土层几何尺寸为 10 m×5 m×4 m, 经前期研究区岩溶土洞规模调查, 分别设定土洞直径为 0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m, 在建模软件犀牛中按照该几何尺寸进行建模, 并在 Griddle 中进行网格优化, 检查网格直至完全无误, 最后将生成的网格文件导入 FLAC3D 中, 上覆土层网格模型详见图 3。赋予土体本构为 Mohr-Coulomb, 并把土体物理、力学性质参数赋予 Mohr-Coulomb 本构中; 模型力学边界条件设置为左右边界约束水平位移, 底边界同时约束水平和垂直位移, 上边界为自由边界; 设置重力场及初始应力比, 生成初始应力场。初始应力分布见图 4。

从图 4 可以看出, 竖向应力在模型底部最大, 达到 6.95×10⁴ Pa, 符合自重应力分布规律。在自重作

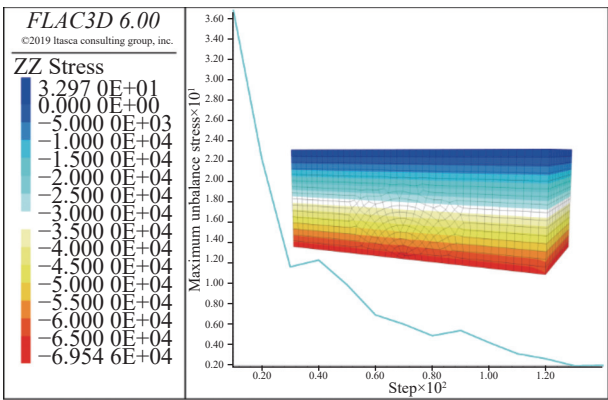


图4 初始应力分布图
Fig. 4 Initial stress distribution

用下, 模型最大不平衡力逐渐趋于平衡, 整个上覆土层逐渐趋于稳定, 初始应力场生成。

2.2 强降雨模拟工况

研究区降雨量分布在 5-6 月中单日降雨量可达到 200 mm, 根据气象、水文部门降雨量级别划分标准, 属于大暴雨级别。经过地质概化后的上覆土层模型顶面为一个规则的长方形平面, 根据该平面几何尺寸便可计算得到模型集雨面积为 50 m²。研究区强降雨发生时长调查报告中显示, 强降雨平均历时 2.5 h, 通过集雨面积、降雨强度、平均历时可得到集雨面积上的平均降雨速率, 根据平均降雨速率, 设定了三种降雨速率, 共 18 组降雨工况, 模拟相同降雨等级不同降雨速率下的岩溶土洞塌陷过程。模拟方案详见表 2。

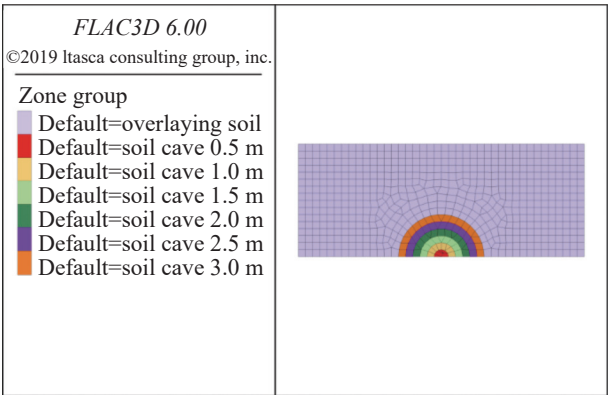


图3 上覆土层模型
Fig. 3 Overlying soil layer model

表 2 模拟方案设计
Table 2 Simulation scheme design

方案	土洞直径/m	降雨强度/mm·d ⁻¹	集雨面积/m ²	降雨历时/h	降雨速率/m ³ ·s ⁻¹
1	0.5	200	50	2	1.39×10 ⁻³
	1.0				
	1.5				
	2.0				
	2.5				
	3.0				
2	0.5	200	50	2.5	1.11×10 ⁻³
	1.0				
	1.5				
	2.0				
	2.5				
	3.0				
3	0.5	200	50	4	6.94×10 ⁻⁴
	1.0				
	1.5				
	2.0				
	2.5				
	3.0				

根据流固耦合理论^[16], 通过对比力学时标与渗流时间的相对大小与外界扰动因素, 选择合适的渗流模式。一方面, 力学扰动往往是瞬间加载完成的, 而强降雨入渗过程属于稳定渗流范畴, 其渗流流体特征时间远远大于力学特征时间; 另一方面, 研究区主要是强降雨入渗引起的渗流场、应力场、孔压场重分布, 上覆土层的应力、位移随着多场分布的变化而改变。综合考虑到特征时间与扰动因素, 最终选择单渗流模式。在进行单渗流分析时, 首先打开流体模式, 赋予流体 Isotropy 本构模型, 并对本构模型设置流体参数 (流体模量、比奥模量、渗透系数、流体密度); 设定流体边界条件, 前后左右底部设置为 0 流量边界, 顶面为自由面, 用来模拟强降雨作用; 选用主从进程法 (流体计算为主进程, 力学计算为从进程), 设定计算屈服准则, 获取结果云图, 最后进行结果分析。

3 数值模拟结果分析

3.1 竖向位移结果及分析

强降雨入渗过程中, 渗流力、水击气爆冲击力共同作用于土体, 引起渗流场、力场不断发生变化, 整

个上覆土层应力进行重分布, 洞顶处产生应力集中, 竖向位移最大。根据太沙基极限平衡理论^[17], 当致塌力超过其整个上覆土层的抗剪强度时, 土体开始塌落; 随着土洞规模扩大, 其位移开展范围越大。

降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 从图 5 中可知, 随着土洞直径的增大, 土洞洞顶竖向位移整体呈陡增—慢减—快增的特点, 横向位移扩展范围逐渐变大。土洞直径从 0.5 m 逐渐扩展至 2 m, 土洞上方土体在强降雨入渗作用下塌落加快, 位移增量依次为 $0.91 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $2.17 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $3.16 \times 10^{-2} \text{ m}$, 增加速率逐渐加快; 当土洞直径为 2.5 m 时, 最大竖向位移出现小幅下降, 分析原因可能是土体在强降雨入渗作用下, 逐渐趋于饱和, 单位时间内对土体产生的渗流力减弱, 土洞上方土体塌落减少, 位移量下降。土洞直径达到 3 m, 土洞上方位移达到 $6.78 \times 10^{-2} \text{ m}$, 此时位移最大增量为 $6.4 \times 10^{-2} \text{ m}$, 洞顶上方形成较大范围的张拉破坏区域; 相同降雨速率, 土洞直径越大, 竖向位移及开展范围越大, 越易出现张拉破坏形成塌陷。

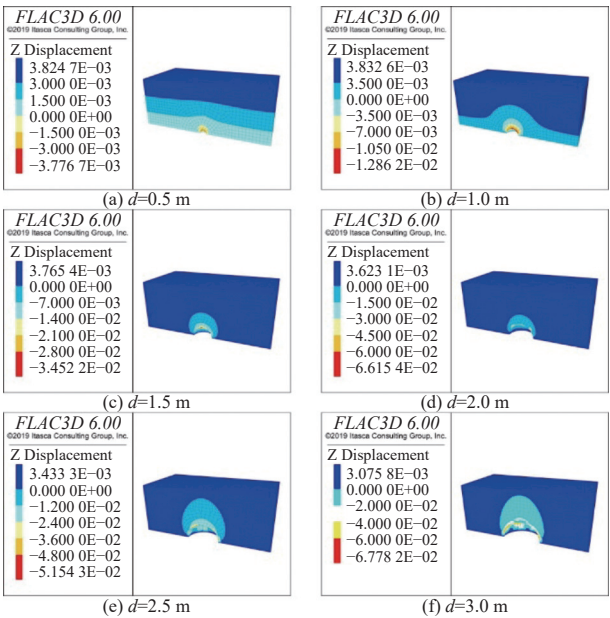


图 5 降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时土洞竖直方向位移图
Fig. 5 Vertical displacement of soil cave when the rainfall rate is $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

土洞直径较小时, 降雨速率的变化对土洞塌陷过程中力学机制的影响较小, 作用规律基本一致, 本文只展示土洞直径为 2.0 m、2.5 m、3.0 m 在降雨速率变化时力学机制的变化规律。图 6 反映的是不同降雨速率下土洞竖向位移分布 ((a)(b)(c) 降雨速率为 $1.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, (d)(e)(f) 降雨速率为 1.39×10^{-3}

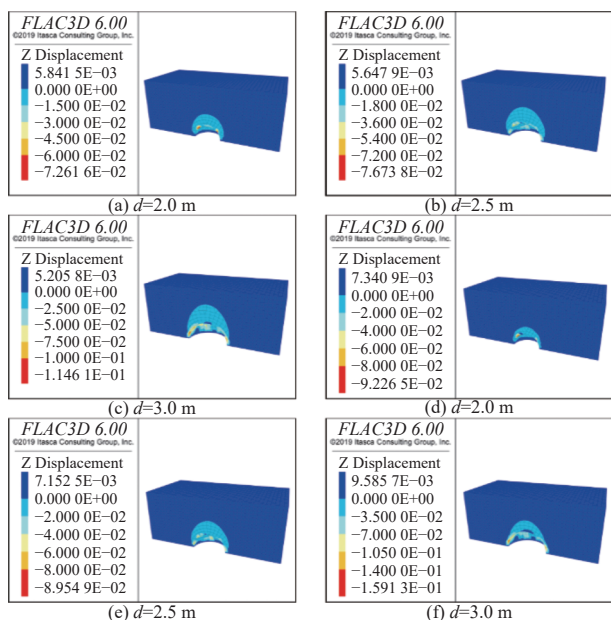


图 6 不同降雨速率下土洞竖直方向位移图

Fig. 6 Vertical displacement of soil cave with different rainfall rates

$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。当降雨速率为 $1.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,土洞洞顶竖向位移随着土洞直径的增大出现不同程度的增加,洞顶位移增量与土洞直径大小成呈正相关。土洞直径达到 3 m,相较于降雨速率为 $1.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时位移的变化,位移增量达到 $3.78 \times 10^{-2} \text{ m}$,单位时间内上覆土体塌落量更多;从位移开展范围上来看,降雨速率的加快,单位时间内对上覆土层产生的渗流力越大,土洞底部的水位波动越剧烈,对土体的剥落作用越强,土颗粒流失越快,易快速形成较大规模塌陷。

3.2 剪应力及剪切应变增量结果分析

强降雨入渗对覆盖层下伏土洞致塌过程中,土洞内部剪应力、剪切应变增量不断发生改变,降雨速率的变化对土洞演化过程中力学机制的改变具有重要影响。

图 7 反映的是三种不同降雨速率下,土洞直径分别为 2.5 m、3 m 时的最大剪应力分布,不同直径土洞均在洞趾处出现最大剪应力。强降雨初期,土洞上方出现“降落漏斗”,产生较大的水力梯度差,在土洞顶处水力梯度差值达到最大,渗流对土体的潜蚀效应较强;随着降雨速率的加快,强降雨入渗引起土洞底部水位波动剧烈对土洞产生了较大水击气爆冲击力导致整个土洞底部均达到抗剪强度极限,在土洞底部形成区域性破坏^[18-20];洞顶发生“土拱效应”,出现剪应力低值区^[11],洞顶上方出现了明显的

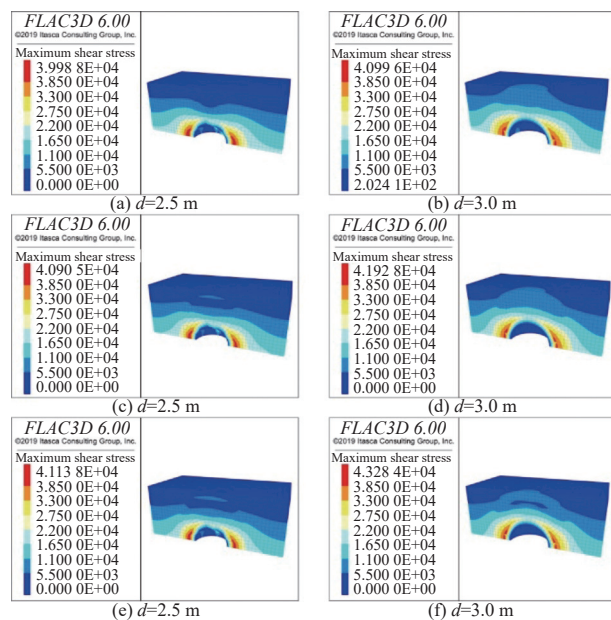


图 7 不同降雨速率下土洞最大剪应力图

Fig. 7 Maximum shear stress of soil caves with different rainfall rates

应力曲线下凹现象;图 7(b)中,降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,当土洞直径达到 3 m 时,土洞洞趾处最大剪应力达到 $4.10 \times 10^4 \text{ Pa}$,加快土体剪切破坏,最大剪应力逐渐从洞趾向周边土体扩展;图 7(f)中,降雨速率为 $1.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,降雨入渗引起的水位波动作用更强烈,相较于较低降雨速率土体发生剪切破坏更快,当土洞直径达到 3 m 时,土洞底部的最大剪应力区扩展范围明显扩大,洞顶上方土体“土拱效应”已开始消失,整个上覆土层处于不稳定状态,易发生塌陷。

分析图 8 可知,降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同直径土洞最大剪切应变均出现在土洞洞趾处。随着土洞直径的增大,洞趾处的最大剪切应变整体上呈增加的规律,增幅呈急增—波动—快增—慢减的特点。当土洞直径达到 3 m 时,最大剪切应变增量出现小幅下降,其原因可能是强降雨引起土洞底部水位波动剧烈延缓了洞顶上方土体土拱效应的发生,洞趾达到最大剪应力时间滞后所导致;上覆土层侧向渗流的潜蚀作用愈加强烈,致使土洞底部及洞顶上方剪切、张拉破坏区域进一步扩大。

随着降雨速率的加快,相较于降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,降雨入渗对上覆土体产生的剥落作用更大。从图 9 可知,加快降雨速率,相同大小土洞最大剪切应变增量依次为 $16.4 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $27.06 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $26.49 \times 10^{-2} \text{ m}$,最大剪切应变增幅呈先减少再增加的特点,原因是渗流开始时,最大剪切应变快速增加,

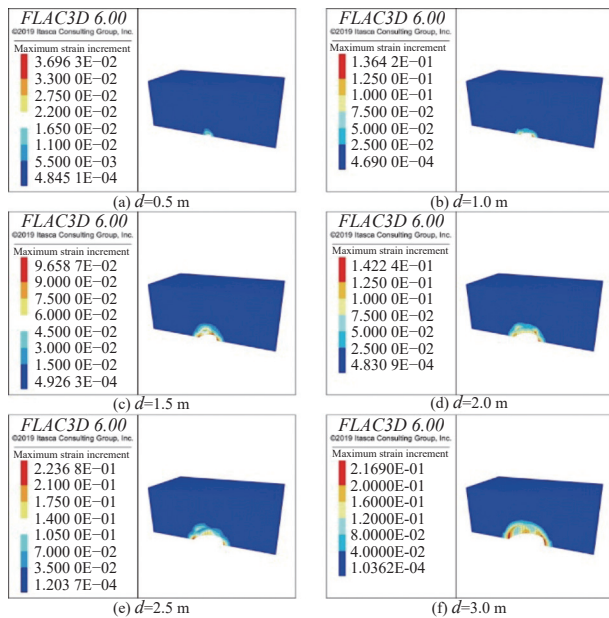


图8 降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时土洞最大剪切应变增量图
Fig. 8 Maximum shear strain increment of soil cave when the rainfall rate is $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

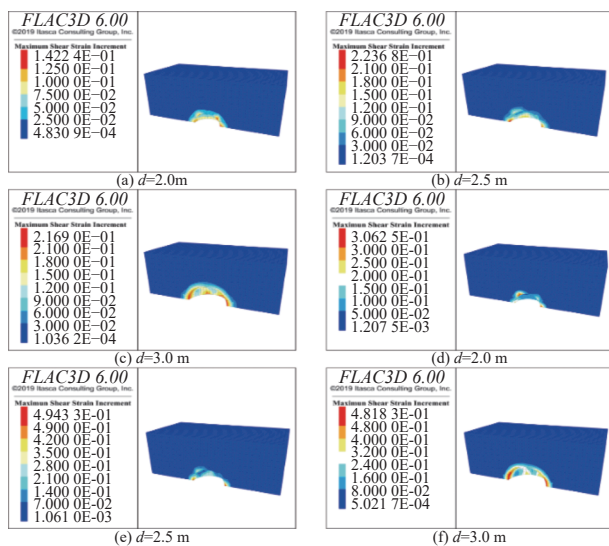


图9 不同降雨速率下土洞最大剪切应变增量图
Fig. 9 Maximum shear strain increment of soil caves with different rainfall rates

随着土洞直径的增大,排水速率增加,上覆土体来不及排水,土洞洞趾处剪应力增加速率减小,最大剪切应变增量降低;降雨速率的加快会引起土洞底部水位波动剧烈,加速土洞发生剪切、张拉破坏。

3.3 塑性区分析

岩溶土洞在强降雨入渗过程中会受到多种致塌力的共同作用,当达到土层的极限抗剪强度时,土体进入塑性屈服状态,发生破坏。通过模拟强降雨工

况,观察不同直径土洞在降雨速率变化下塑性区的开展情况,判断上覆土层的稳定状况。

降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,从图10可知,土洞直径为0.5 m,土洞洞趾处最先达到塑性屈服,出现塑性区,但未贯穿到地面,整个上覆土层处于稳定状态。土洞自身规模相对于整个上覆土层较小,上覆土层的临界安全厚度较大^[21-22],不易产生塌陷;土洞直径达到2 m,土洞底部剪切破坏区逐渐扩展,地表开始出现张拉破坏。随着土洞扩展,塑性区逐渐向地表扩展,洞顶土体发生张拉破坏并逐渐贯通至地表;当土洞直径扩展至3 m时,土洞底部剪切塑性区进一步扩展,洞顶上方张拉、剪切塑性区已扩展至整个地面,发生塌陷。

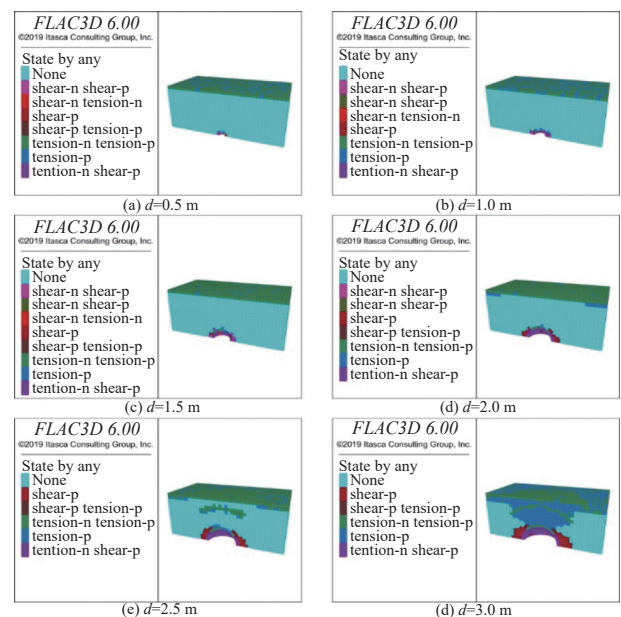


图10 降雨速率为 $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时土洞塑性区分布
Fig. 10 Plastic distribution of soil cave when the rainfall rate is $6.94 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

分析图11可知,土洞大小影响土洞稳定性对降雨速率的响应。土洞直径较小时,降雨速率的增大对上覆土层塑性区的开展影响较小,土洞底部及上覆土体剪切、张拉塑性区未贯通至地表,整个上覆土层仍然处于稳定状态。当土洞扩展至一定规模时,增大降雨速率才会引起土体中渗流场发生急剧变化,在土洞底部产生剧烈水位波动,加快塑性区贯通至地表。当土洞直径达到3 m时,塑性区开展更快,土洞底部剪切破坏塑性区扩展至整个土洞底部,洞顶上部张拉破坏塑性区更快贯通至整个地表,加速上覆土层塌陷。

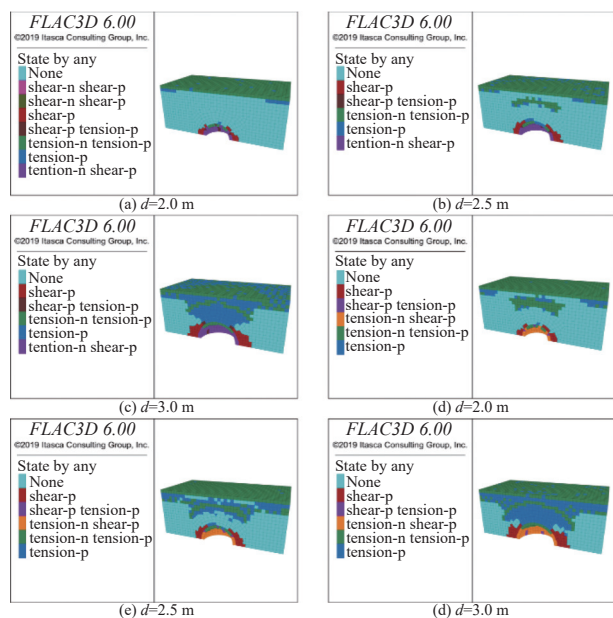


图 11 不同降雨速率下土洞塑性区分布

Fig. 11 Plastic distribution of soil cave with different rainfall rates

4 结 论

本文以桂林市临桂区岩溶塌陷易发区域为研究区,针对一元结构粉质黏土覆盖层,采用 FLAC3D 模拟不同降雨速率下岩溶土洞致塌的过程,阐明不同直径土洞在相同降雨等级不同降雨速率下致塌过程中力学破坏机制及塌陷机理。

(1)强降雨条件下不同直径土洞最大位移均出现在洞顶处;降雨速率相同,洞顶竖向位移增长速率随土洞直径的增加呈整体加快的特点;加快降雨速率,洞顶竖向位移与土洞大小呈正相关,当土洞直径达到 3 m 时,侧向渗流潜蚀作用增强,土洞底部水位波动剧烈,洞顶位移明显增加,加速上覆土层塌陷;

(2)相同降雨速率,土洞直径扩大会引起土洞底部剪切破坏区域进一步扩展;上覆土层在强降雨初期主要受到潜蚀作用,加快降雨速率,土洞底部水位剧烈波动对上覆土体产生的水击气爆成为主导作用,剪切破坏速率加快,洞趾剪切应变明显增加,当土洞直径达到 3 m 时,水位波动愈加强烈,加速上覆土层破坏;

(3)降雨速率的变化对不同直径土洞塑性区开展范围具有不同程度的影响,较大直径的土洞在加快降雨速率时塑性区开展范围明显扩大,即土洞大小,降雨速率的快慢对上覆土层稳定性具有较大的影响。

参考文献

- [1] CHEN Xuejun. GIS-based evaluation of danger in karst collapse[J]. Journal of China University of Geosciences, 2001(2): 132-136.
- [2] 陈学军, 杨越, 白汉营, 宋宇, 陈李洁. 基于 ANP-模糊聚类分析法的岩溶塌陷研究[J]. 工程地质学报, 2017, 27(5): 1213-1219.
CHEN Xuejun, YANG Yue, BAI Hanying, SONG Yu, CHEN Lijie. Use of analytic network process and fuzzy clustering analysis method in karst collapse[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 27(5): 1213-1219.
- [3] 陈学军, 陈植华, 贾晓青. 桂林市西城区岩溶塌陷灾害危险性评价[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004: 69-71.
CHEN Xuejun, CHEN Zhihua, JIA Xiaoqing. Risk assessment of karst collapse disaster in Xicheng district, Guilin City[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004: 69-71.
- [4] 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. Karst collapse model test: Taking Wuchang as an example[J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 1993, 4(2): 39-44.
- [5] 戴建玲, 雷明堂, 蒋小珍, 罗伟权. 极端气候与岩溶塌陷[J]. 中国矿业, 2020, 29(S2): 402-404.
DAI Jianling, LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, LUO Weiquan. Extreme climate and sinkhole[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 402-404.
- [6] Jiang Xiaozhen, Lei Mingtang, Gao Yongli. Formation mechanism of large sinkhole collapses in Laibin, Guangxi, China[J]. Environment Earth Sciences, 2017, 76(24): 810-823.
- [7] 靳红华, 王林峰, 杨培丰, 宋男男. 降雨与岩溶渗漏联合作用下岩溶塌陷稳定性分析[J]. 人民长江, 2019, 50(9): 105-112.
JIN Honghua, WANG Linfeng, YANG Peifeng, SONG Nannan. Stability analysis of karst collapse considering joint effect of rainfall infiltration and groundwater leakage[J]. Yangtze River, 2019, 50(9): 105-112.
- [8] Xiao Xiaoxuan, Li Zhaofeng, Cai Guoqing, Yang He. Effects of declining water levels on water-air interactions in cover collapse sinkhole[J]. Bulletin of Engineering Geology Environment, 2021, 80(3): 2545-2556.
- [9] XIAO Xiaoxuan, XU Mo, DING Qingzhong, KANG Xiaobing, XIA Qiang, DU Feng. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes[J]. Environment Earth Sciences, 2018, 77(3): 64-77.
- [10] Xiao Xiaoxuan, Gutiérrez Francisco, Guerrero Jesús. The impact of groundwater drawdown and vacuum pressure on sinkhole development. Physical laboratory models[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 1-10.
- [11] 贾龙, 蒙彦, 管振德. 岩溶土洞演化及其数值模拟分析[J]. 中

- 国岩溶, 2014, 33(3): 294-298.
- JIA Long, MENG Yan, GUAN Zhende. Evolution and numerical simulation of a karst soil cave[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(3): 294-298.
- [12] 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.
- [13] 陈育民, 许鼎平. FLAC3D基础工程与实例[M]. 中国水利水电出版社, 2013.
- CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC3D foundation engineering and examples[M]. China Water Resources and Hydropower Press, 2013.
- [14] 彭文斌. FLAC3D实用教程[M]. 机械工业出版社, 2020.
- PENG Wenbin. FLAC3D practical tutorial[M]. China Machine Press, 2020.
- [15] 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.
- [16] 王文全, 张立翔. 计算流固耦合动力学及其应用[M]. 中国水利水电出版社, 2015: 58-67.
- WANG Wenquan, ZHANG Lixiang. Computational fluid structure coupling dynamics and its application[M]. China Water Resources and Hydropower Press, 2015: 58-67.
- [17] 高江平, 胡海波, 孙世界, 王泽普. 太沙地基极限承载力的三剪应力统一强度理论[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(2): 186-191.
- GAO Jiangping, HU Haibo, SUN Shijie, WANG Zepu. Three-shear stress unified strength theoretical solution of Terzaghi ultimate bearing capacity of foundation[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition)*, 2019, 51(2): 186-191.
- [18] 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 overburden karst collapse [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [19] 邢宇健. 岩溶区地下水位动态变化诱发地表塌陷的机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- XING Yujian. Study on the mechanism of overburden collapse induced by groundwater fluctuation in karst area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 肖先焯. 覆盖型岩溶区水气相互驱动盖层变形演化及塌陷机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- XIAO Xianxuan. Deformation behavior evolution and collapse mechanism of karst covers under water-air interaction in karst area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [21] 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.
- WANG Bin, HE Keqiang, SUN Jianmin. Determination of critical height of soil holes of karst collapse: Karst collapse case from Tangshan palaestra[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(3): 320-324.
- [22] 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.
- WANG Bin, HE Keqiang. Study on limit equilibrium height expression of critical soil cave of karst collapse[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(3): 458-462.

A study on collapse law of soil cave with different rainfall rates based on FLAC3D

XUE Mingming¹, CHEN Xuejun¹, SONG Yu¹, GAO Xiaotong¹, LI Hui¹,
GAN Xiaohui¹, ZHANG Mingzhi¹, PAN Zongyuan^{1,2}, TANG Lingming^{1,3}

(1. Guangxi Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Frequent heavy rainfall can lead to large-scale collapse of karst soil caves. Quaternary strata are widely distributed in the karst area of Lingui district, Guilin City, among which the subsidence area of the silty clay overlay with a one-dimensional structure formed by the Upper Pleistocene alluvial-pluvial layer Q_3^{al-pl} under the action of heavy rainfall is the largest in the collapse area of the entire study area. This subsidence area accounts for the largest

proportion, posing a huge risk on security to the people. Heavy rainfall has aroused extensive attention and research on the collapse law of karst soil caves. Many scholars have revealed the mechanism of rainfall collapse, the effect laws of erosion, and water level fluctuations in the process of karst collapse from qualitative and quantitative perspectives. In order to better explore the collapse law of soil caves of different sizes with different rainfall rates, a generalized geological model was constructed for the study area, and the calculation models of karst soil caves of different sizes were established in the modeling software Rhino. Besides, the FLAC3D finite difference software was used to simulate the infiltration process of heavy rainfall with different rainfall rates. In this study, a karst calculation model—Mohr-Coulomb constitution and the parameters of physical and mechanical properties of the overlying soil layer were firstly assigned. Then, the boundary conditions, the rainfall rate, the superimposed force field and the flow field were set to reproduce the cloud map of changes in stress, displacement and plastic zone during the evolution of karst soil caves in the process of heavy rainfall infiltration.

The numerical simulation results show that, (1) Under the condition of heavy rainfall, the maximum displacements of soil caves with different diameters all appear at the top of the cave. With the same rainfall rate, the larger the diameter of the soil cave is, the faster the growth rate of vertical displacement becomes. The increase of rainfall rate may result in obvious increase of vertical displacement, and the vertical displacement of the cave top is positively proportional to the size of the soil cave. (2) Given the same rainfall rate, the expansion of the soil cave diameter has caused the further expansion of the shear failure area at the bottom of the soil cave. The overlying soil layer is mainly subjected to subsurface erosion in the early stage of heavy rainfall. When the rainfall rate is accelerated, the water-hammer gas explosion of the overlying soil caused by the violent fluctuation of the water level at the bottom of the soil cave becomes the dominant effect. The shear failure rate is accelerated, and the shear strain at the toe of the cave increases significantly. When the diameter of the soil cave reaches 3 m, the water level fluctuates more and more violently, which accelerates the destruction of the overlying soil layer. (3) The change of rainfall rate poses, in different degrees, the influence on the development range of plastic zone in the soil cave. In the soil cave with a larger diameter, the development range of plastic zone is significantly expanded with the accelerated rainfall rate. The size of the soil cave and the speed of rainfall have a great influence on the stability of the overlying soil layer. These results provide a basis for the quantitative study of the relationship between heavy rainfall and collapse of the overlying soil, which is crucial to effective and reasonable warning to karst collapse.

Key words heavy rainfall, karst collapse, FLAC3D, numerical simulation, soil cave

(编辑 张玲 杨杨)