

# 广州市岩溶上覆砂土层塌陷特征及其内在机制\*

廖景<sup>1</sup>, 田嘉逸<sup>2</sup>, 高燕<sup>2,3</sup>, 王一兆<sup>1</sup>, 袁泉<sup>1</sup>, 江雨潮<sup>2</sup>

1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010
2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

**摘要:** 本文以广州实际工程地质资料和工况为基础, 建立了钻探等工程洞穿岩溶顶板后溶洞上覆砂土层塌陷的有限元数值模型。采用欧拉-拉格朗日耦合法(CEL)模拟岩溶上覆砂土层塌陷过程, 借鉴正交实验法进行了多组数值模拟, 研究了不同覆盖层厚度、溶洞空腔大小和砂土内摩擦角对岩溶上覆砂土层塌陷发展模式的影响, 阐释了砂土覆盖层坍塌的机理。研究表明, 随砂土覆盖层厚度增大, 砂土层的地表最大位移和塌陷速率均呈减小趋势, 中心塌陷区域明显较小。随溶洞空腔尺寸的增大, 塌陷范围和地表最大位移增大。钻探等工程洞穿岩溶顶板后, 靠近岩溶空腔的竖向范围土体先失稳破坏, 其影响范围主要受砂土覆盖层厚度影响, 且塌陷速率主要受失稳的土体范围影响。在塌陷中心土体失稳后, 周围土体才受到剪切应力的影响破坏而向溶洞空腔中心产生位移, 周围土体向溶洞空腔运移量主要受溶洞空腔尺寸影响, 且此部分砂土呈现出近似塌陷休止角的塌陷形态。

**关键词:** 岩溶塌陷; 砂土覆盖层; 破坏机理; 影响因素

**中图分类号:** P642.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)05-0038-10

## Destruction mechanism of sand-covered karst collapse in Guangzhou

LIAO Jing<sup>1</sup>, TIAN Jiayi<sup>2</sup>, GAO Yan<sup>2,3</sup>, WANG Yizhao<sup>1</sup>, YUAN Quan<sup>1</sup>, JIANG Yuchao<sup>2</sup>

1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co.Ltd., Guangzhou 510010, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519082, China

**Abstract:** Based on realistic engineering geological data in Guangzhou, this study establishes a finite element model for simulating the collapse of the overlying sand stratum after drilling through karst caves roofs. The coupled Euler-Lagrange method(CEL) is employed to simulate the collapse process of the sand stratum. Multiple sets of numerical simulations are conducted using orthogonal experimental design to investigate the influences of different sand stratum thicknesses, cave sizes, and friction angles on the development pattern and to elucidate the mechanism of collapse in the overlying sand stratum. The results indicate that as the thickness of the sandy soil cover layer increases, both the maximum surface displacement and collapse rate of the sand stratum decrease, and the central collapse area becomes noticeably smaller. With an increase in cave size, the collapse range and maximum surface displacement increase. After drilling through karst cave roofs in engineering projects, the vertically adjacent

\* 收稿日期: 2024-03-22 录用日期: 2024-04-16 网络首发日期: 2024-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3005203); 广东省创新创业团队项目(2017ZT07Z066)

作者简介: 廖景(1972年生), 男; 研究方向: 隧道与地下工程; E-mail: liaojing@gmddi.cn

田嘉逸(1999年生), 男; 研究方向: 地面塌陷; E-mail: tianjy25@mail2.sysu.edu.cn

(廖景、田嘉逸并列第一作者)

通信作者: 高燕(1984年生), 女; 研究方向: 地质灾害; E-mail: gaoyan25@mail.sysu.edu.cn



ZR20240078

sand near the karst caves undergoes initial instability and failure, with its influence range primarily affected by the thickness of the sand stratum, and the collapse rate mainly influenced by the range of unstable soil. Once the soil in the central collapse area becomes unstable, the surrounding soil is subjected to shear stress and fails, causing displacement towards the center of the karst cave. The amount of soil migration towards the karst cave is mainly influenced by the size of the karst cave, and this portion of the sand exhibits a collapse morphology similar to the angle of repose.

**Key words:** karst collapse; sand stratum; destruction mechanism; influence factors

在碳酸盐岩地区, 覆盖土层失稳导致的地面塌陷事故往往是主要的地质灾害之一(Jia et al., 2021), 而中国也是岩溶地面塌陷问题最严重的国家之一(Cui et al., 2015; Wang et al., 2020a)。上覆土层为砂土层的地区, 往往因为桩基或钻探工程施工过程中对地质条件不了解而破坏了岩溶空腔的顶板(贾龙, 2021), 致使松散砂土短时间大量涌入下部空腔, 从而引发地表的地面塌陷事故(Wang et al., 2020a), 进而可能造成钻机倾覆、人员伤亡、路面开裂和周围建筑物地基的破坏(Zhou et al., 2022)。2000年至今, 中国919起地面塌陷事故中至少有26起是由桩基或钻探工程作业造成的(Meng et al., 2012), 26起事故中由钻探直接造成的顶板洞穿导致塌陷有19起, 且多数发生在广东省。据统计2008—2014年广州市发生多起因桩基和钻孔施工造成的地面塌陷事故(郑小战等, 2014), 并造成多所房屋在事故区域被摧毁, 造成严重经济损失。

由桩基和钻孔施工引起地面塌陷的原因包括机械载荷洞穿岩溶空腔顶板(Alonso et al., 1990)、水锤效应(Meng et al., 2020)、吸力和振动(Xiong et al., 2018)。潘启钊等(2022)研究了由钻探施工引起黏性土、砂土二元覆盖土层塌陷的机理, 钻探施工破坏岩溶顶板并造成不同的水头差使得砂土沿着钻孔往下流动, 黏土层底出现板底脱空, 上方土体失稳, 地表塌陷, 塌陷坑垂直侧壁遭受剪切滑动破坏并形成漏斗状塌陷坑。Wang et al. (2020b)研究了砂土一元覆盖层的“沙漏型坍塌”机理, 并提出了一种等效的岩溶坍塌数值模拟方法。其先通过物理模型试验测得塌陷范围, 并在有限元软件中进行建模并降低塌陷区域内漏斗形松散砂土的力学参数(密度、弹性模量、泊松比和内摩擦角)。最后通过模拟隧道开挖过程, 分析隧道开挖和其引发的沙漏型坍塌对于地面变形和隧道结构的影响。

对于砂土层地面塌陷的研究, 目前多数基于

现场试验或实验室模型试验进行宏观研究, 尚缺少采用数值分析方法对整个坍塌过程进行系统研究, 因此难以针对砂土层破坏过程研究破坏机理并量化评价灾害发生的可能性。传统的有限元多用拉格朗日描述, 其缺点是在模型发生较大变形时网格会发生畸变从而导致计算结果不收敛。通过耦合欧拉-拉格朗日法(CEL)可以模拟研究桩基或钻探工程贯穿地层后导致地面塌陷事故的全过程, 并且在耦合欧拉-拉格朗日法中, 对于发生较大变形的材料, 在本文工况中即为砂土, 可定义其为欧拉体并用欧拉域对其进行约束, 发生大变形时欧拉体的网格不变形, 可保证计算结果的收敛。

地面塌陷的根本原因是土体强度不足以维持稳定时覆盖土层失稳(张丽芬等, 2007), 对于黏性土覆盖层而言, 由于其强度较高可在黏性土层与岩溶层交界处形成土洞, 但对于无黏聚力的砂土, 一旦其下部存在运移空间砂土即受到重力影响迅速运移至岩溶空腔从而造成地面塌陷事故。本文模拟施工洞穿岩溶空腔顶板后上覆砂土的运移过程, 即模拟地面塌陷事故的发展, 并通过计算对比不同覆盖层厚度对于砂土覆盖层塌陷的塌陷形态和塌陷范围大小的影响, 从而进一步阐释砂土地层地面塌陷的发生机理。

## 1 砂土覆盖层数值模拟方案设计

### 1.1 模型概况

地铁隧道、桩基工程等工程经常会遇到碳酸盐岩和砂土覆盖层(Standing et al., 2013; Tóth et al., 2013), 砂土地层在广州市常见分布区域有广花盆地(蒙彦, 2020)、大坦沙岛(荔湾区)(卢薇等, 2021)、花都区(黎秉林, 2018)等, 广州市砂土覆盖层厚度一般为2~12 m。对应本文的数值概化模型为: 下层为5 m厚岩溶地质层, 其上为基本厚度3~8 m的砂土覆盖层, 最上层为0.5 m厚的人工填土层, 人工填土层重力荷载大小约10 kPa; 基于广州市岩溶塌陷多发区溶洞尺寸大小, 将溶洞基本

尺寸设为直径和高度均为 4 m 的圆柱形空腔;为防止边界效应土层宽度设为 40 m,并于模型四周设置 1 m 的刚性边界。由于岩溶地质层对砂土层塌陷影响较小,故将其设为刚体从而大幅减少模型计算量。

为实现大变形,本文采用耦合欧拉-拉格朗日法(CEL),将发生大变形的材料即砂土定义为欧拉材料,欧拉材料在欧拉域模型中自由流动,并在网格点记录材料的速度、应力等信息,欧拉域模型网格不变形,解决了大变形问题中网格畸变导致计算结果不收敛的问题。以砂土覆盖层厚度 5 m 欧拉域模型为例,其三维网格单元共 148 176 个,其余计算模型网格数与其近似,有限元模型见图 1。

### 1.2 模拟流程与参数

本文采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟,具体流程为:①建立欧拉体模型与实体模型;②设置岩土力学参数、岩土体强度屈服准则;③设置显示动力学分析步;④定义欧拉体与实体模型的接触;⑤定义边界条件与荷载;⑥划分网

格;⑦进行地应力平衡;⑧进行地面塌陷模拟分析。土的参数均取自广州地铁九号线某区段线路工程实例,模型参数取值见表 1。模拟中岩土体强度屈服准则采用 Mohr-coulomb 准则。本文主要探讨溶洞上覆砂土层厚度、内摩擦角和溶洞尺寸对地面塌陷的影响,对应的取值范围分别为 3~8 m、 $32^{\circ}\sim 37^{\circ}$ 与 2~7 m。

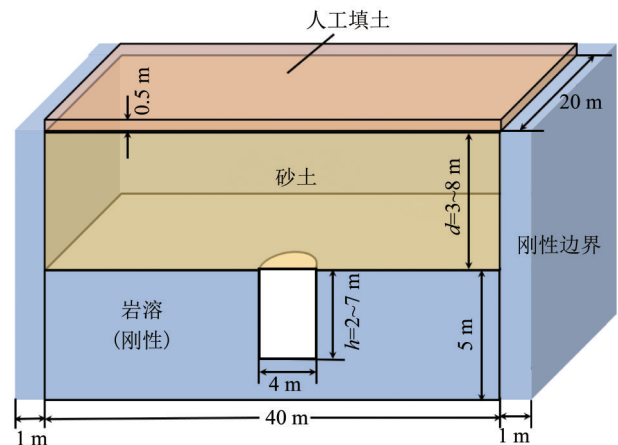


图 1 三维有限元模型示意图

Fig. 1 Sketch map of the 3D finite element model

表 1 有限元计算模型中土的相关参数

Table 1 Related parameters of soil in finite element computational models

土类型	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$
人工填土	1.96	26.6	0.3	16	20
砂土	1.60	28.0	0.25	36	4

## 2 溶洞上覆砂土层厚度对地面塌陷的影响

### 2.1 三维塌陷形态变化趋势

三维土体塌陷形态及应力场分布随砂土覆盖层厚度增加的变化如图 2 所示,塌陷形态取自各计算模型塌陷后的稳定状态。可知,随着砂土覆盖层厚度增大,砂土层塌陷的规模和最大位移均呈减小趋势,其对应自然条件下覆盖层厚度较低发生地面塌陷事故的可能性更高(Gu et al., 2016)。由应力场分布图变化可看出,砂土层厚度较小时( $< 4 \text{ m}$ ),砂土层应力主要由溶洞空腔竖向范围土体承担,体现在砂土应力场竖向贯穿土体且周围砂土应力较小;随着砂土层厚度增加,砂土层更为稳定,砂土层应力由溶洞空腔周围砂土骨架分担一部分,体现在砂土层厚度较大时( $> 5 \text{ m}$ ),溶洞空腔周围砂土的应力较大。

### 2.2 塌陷范围变化趋势

随着砂土覆盖层厚度增加,地面沉降云图和塌陷范围变化如图 3 所示,沉降云图上方分别为距离塌陷中心点 0、1、2、3 和 4 m 的地表位移曲线,沉降云图标记出了不同覆盖层厚度地面沉降分别为 0.1、0.2、0.5 和 1.0 m 的塌陷范围。可见,由距塌陷中心 0 m 的地表位移曲线可知,靠近溶洞空腔中心的砂土的竖向位移相差较大,随着砂土覆盖层厚度增大,位于塌陷中心即溶洞空腔垂直方向的土体位移呈减小趋势。取自溶洞圆柱形空腔的中心点的地表最大位移,其随时间  $t$  的变化如图 4 所示。明显看出,随着砂土覆盖层厚度增大,砂土层的最大位移呈减小趋势,由约 5 m 的塌陷降低至 1 m 以下,且塌陷速率减小。

当离中心有一定距离时( $x > 1 \text{ m}, y > 1 \text{ m}$ ),随着砂土覆盖层厚度增大,砂土竖向位移相差较小,相应的 0.5、0.2 和 0.1 m 塌陷区整体呈现出先稍许

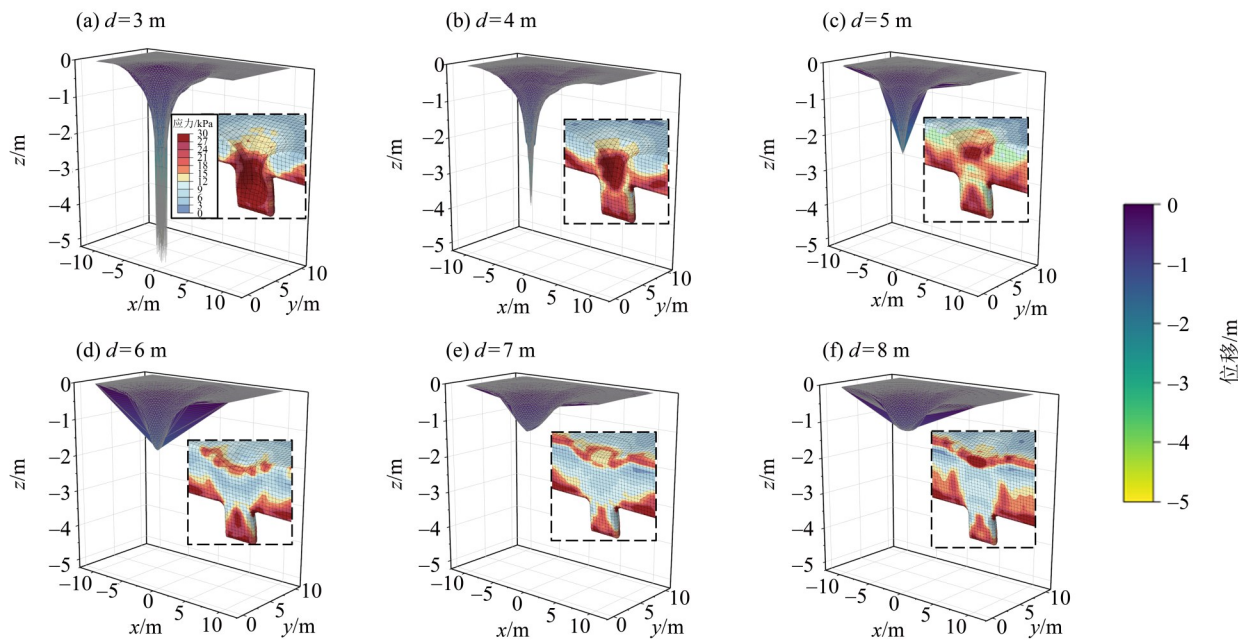


图 2 随覆盖层厚度增加地表塌陷三维示意图及相应应力场分布

Fig. 2 Ground collapse and corresponding stress field distribution with increasing thickness of sand stratum in three dimensions

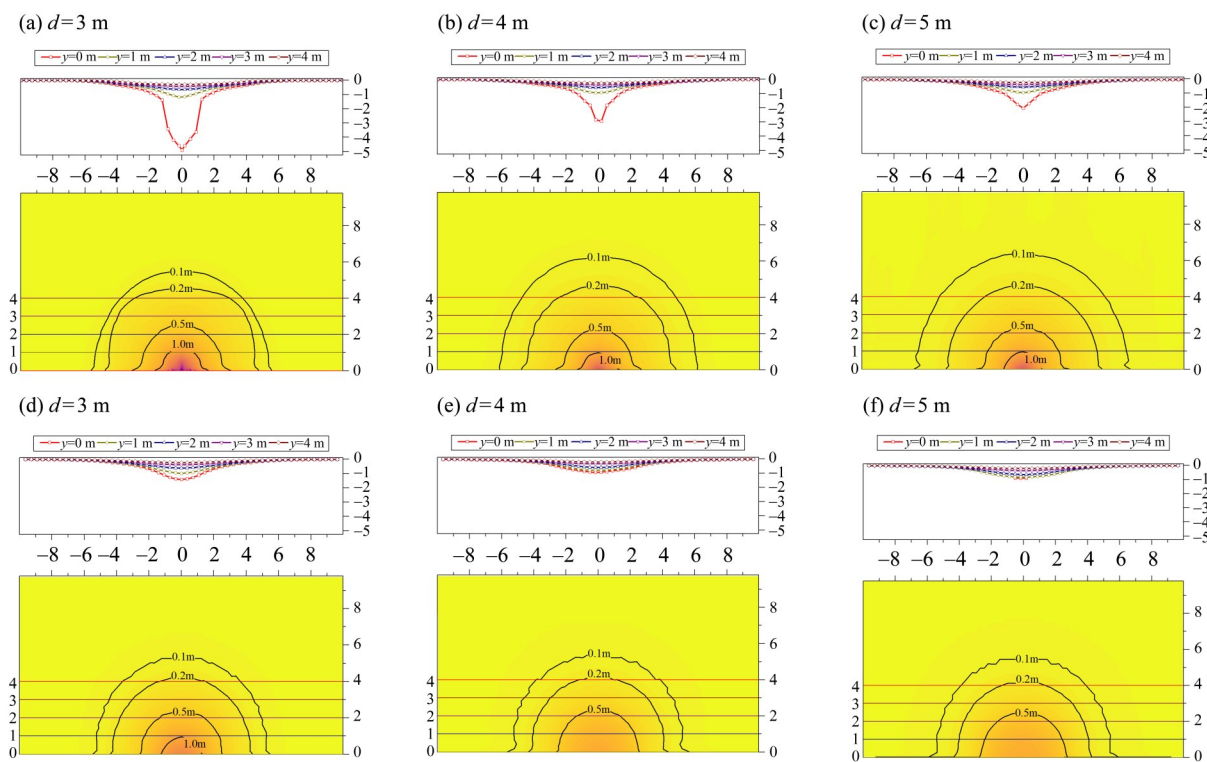


图 3 随着砂土覆盖层厚度增加地面沉降云图和塌陷范围演化

Fig. 3 Contour map of ground collapse and variation of collapse area with increasing thickness of sand stratum

增加再减小的趋势, 但变化不明显。这是因为空腔顶板被洞穿后, 位于塌陷中心的土体先失稳破坏, 而覆盖层厚度增大砂土层更为稳定, 最先失稳破坏的土体范围减小, 塌陷中心的土体位移即地表最大位移减小, 而位于塌陷中心外的土体随

后才因剪切应力的影响而破坏从而向空腔运移, 因其发展相对较缓慢, 体现出近似常见的砂土塌陷休止角形态, 故使得塌陷中心外的塌陷范围变化不明显。前人研究表明(罗小杰等, 2017; 张鑫等, 2016; Meng et al., 2012), 砂土在发生塌陷时,

会与水平面产生一定的塌陷角,此种塌陷被称为“沙漏型”塌陷,其形态与本文数值模拟结果一致。

对周围构筑物基础有较大影响的沉降值为 200 mm(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012),取砂土层塌陷后周围沉降量超过 200 mm 的范围,近圆形的塌陷范围直径变化如表 2 所示。结果对比显示,砂土层厚度对超过 200 mm 塌陷量的塌陷范围影响整体较小(4.32~4.82 m),但略有差别。在砂土覆盖层厚度较小时( $<5$  m),随着砂土覆盖层厚度增大,超过 200 mm 的塌陷范围呈增大趋势,这是由于当砂土覆盖层厚度较小时,当钻孔破坏岩溶顶板后砂土层无法形成稳定结构,破坏较为剧烈,主要为溶洞垂直方向的土体遭到破坏从而运移进入岩溶空腔,空腔周围土体参与塌陷较少故塌陷范围小;在砂土覆盖层厚度较大时( $>5$  m),随着砂土覆盖层厚度增大,超过 200 mm 的塌陷范围呈减小趋势且变化幅度较小,这是由于砂土覆盖层厚度较大,发生塌陷后土体失稳破坏区域主要先集中在岩溶空腔周围的垂直

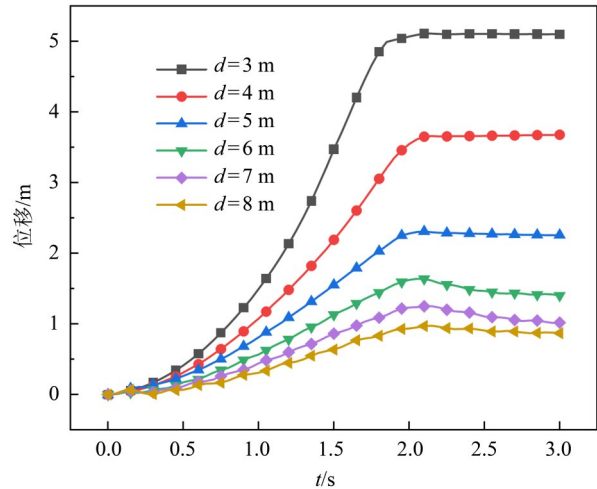


图 4 随覆盖层厚度增加地表最大位移演化趋势

Fig. 4 Influence of the thickness of sand stratum on ground collapse

方向和侧向,空腔周围的土体先向空腔内部运移,随后上部砂土由于重力的影响向下运移,即砂土覆盖层厚度较大时,土层较为稳定,固定空腔大小所造成的 200 mm 塌陷范围也趋于稳定值。

表 2 随覆盖层厚度增加塌陷区范围(直径)变化

Table 2 Variation in collapse range(diameter) with increasing thickness of sand stratum

覆盖层厚度	3	4	5	6	7	8
200 mm 塌陷区范围	4.46	4.67	4.82	4.37	4.36	4.32

### 3 溶洞上覆砂土层内摩擦角对地面塌陷的影响

#### 3.1 三维塌陷形态变化趋势

三维土体塌陷形态随砂土覆盖层厚度增加的变化如图 5,塌陷形态取自各计算模型塌陷后的稳定状态。可见,随着砂土层内摩擦角增大,砂土层塌陷的规模呈减小趋势,但其影响较小。由应力场分布图也可看出,仅砂土层内摩擦角变化对应力大小和应力场分布影响较小。

#### 3.2 地表最大位移与塌陷范围变化趋势

地表最大位移取自三维模型溶洞圆柱形空腔的中心点,不同内摩擦角的砂土层最大位移随时间的变化如图 6 所示。可见,随着砂土层内摩擦角增大,土的最大位移和塌陷速率均无明显变化,即,砂土的内摩擦角大小对地面塌陷影响不大。

地面沉降量超过 200 mm 的近圆形塌陷范围直径变化见表 3。通过结果对比显示,随着砂土层内摩擦角的增大,超过 200 mm 的塌陷范围呈先减小后

表 3 随砂土层内摩擦角增大塌陷区范围(直径)变化表

Table 3 Variation in collapse range(diameter) with increasing friction angle of sand

砂土层内摩擦角/(°)	32	33	34	35	36	37
200 mm 塌陷区范围/m	4.93	4.88	4.85	4.84	4.82	4.75

基本稳定的趋势,但塌陷范围整体变化不大。可见,砂土层内摩擦角对地面塌陷的影响远小于砂土层的厚度。

### 4 溶洞尺寸对地面塌陷的影响

本节考虑了桩基钻探等工程洞穿岩溶顶板后,岩溶空腔大小对地面塌陷的影响,因模拟工程洞穿顶板故岩溶空腔直径不变化,而通过改变岩溶空腔的高度来表征溶洞尺寸。

#### 4.1 三维塌陷形态变化趋势

三维土体塌陷形态随溶洞高度增加的变化如图 7 所示,塌陷形态取自各计算模型塌陷后的稳定状态。可见,溶洞高度较小时( $<5$  m),砂土的应

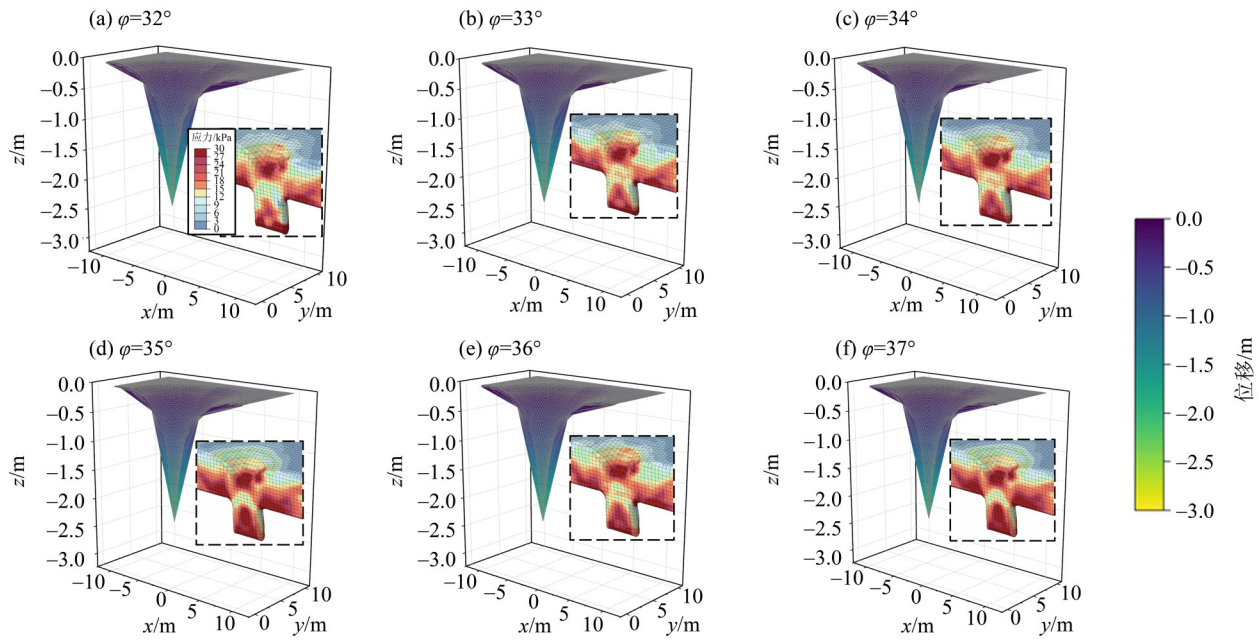


图5 随砂土内摩擦角( $\varphi$ )增大地表塌陷三维示意图及相应应力场分布

Fig. 5 Ground collapse and corresponding stress field distribution with increasing friction angle of sand in three dimensions

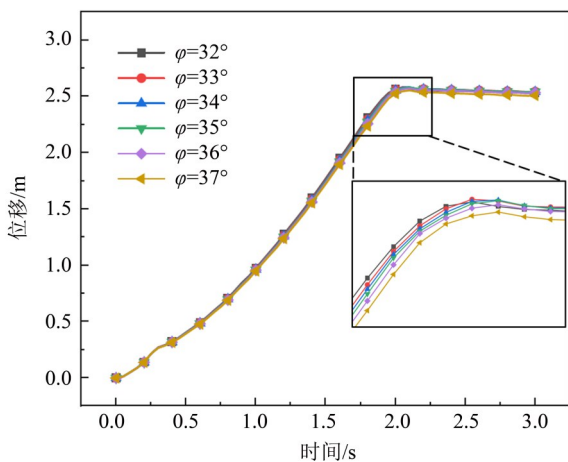


图6 随砂土内摩擦角增大地表最大位移演化趋势

Fig. 6 Influence of the friction angle of sand on ground collapse

力由溶洞空腔竖向范围的土体与周围土体共同分担, 地面塌陷规模较小; 随着溶洞高度的增大, 其为土颗粒提供了更多的运移空间, 砂土层应力主要集中在溶洞空腔竖向范围内, 周围土体的应力较小, 土的塌陷规模呈增大趋势。

#### 4.2 塌陷范围变化趋势

随着溶洞空腔尺寸增大, 地面沉降云图和塌陷范围变化如图8所示, 沉降云图上侧分别为距离塌陷中心点0、1、2、3和4 m的地表位移曲线, 沉降云图标识出了各算例0.1、0.2、0.5和1.0 m的塌陷范围。可见, 随着溶洞空腔的尺寸增大, 位于塌陷中心即溶洞空腔垂直方向的土体位移呈增

大趋势, 0.5、0.2和0.1 m塌陷范围也呈增大趋势, 以对周围施工或地下地上构筑物有较大影响的沉降值超过200 mm的范围为例, 随着岩溶空腔高度增大, 近圆形的塌陷范围直径由3.45 m增大到6.79 m。这是因为当溶洞空腔的尺寸增大, 土体的运移空间变大, 砂土总的位移增大。当顶板被洞穿后, 塌陷中心的土体先失稳破坏, 而溶洞尺寸越大造成最先失稳破坏的土体范围越大, 塌陷中心的土体位移即地表最大位移增大, 而位于塌陷中心外的土体随后因剪切应力的影响而破坏从而向空腔运移, 但由于砂土总运移量增大, 塌陷中心外砂土的运移量也相对增大, 对应各塌陷范围增大。取自溶洞圆柱形空腔的中心点的地表最大位移, 其随时间的变化如图9所示。可见, 随着岩溶空腔高度增大, 土的最大位移呈增大趋势, 塌陷速率无明显变化。

地面沉降量超过200 mm的近圆形的塌陷范围直径变化如表4所示。通过结果对比显示, 随着岩溶空腔高度增大, 超过200 mm的塌陷范围呈增大趋势, 塌陷范围变化较大。可见, 岩溶空腔高度增大使得砂土运移空间增大, 其对地面塌陷的影响远大于砂土力学参数的影响。

### 5 砂土覆盖层塌陷机理

#### 5.1 塌陷机理

为进一步验证上文所总结的砂土覆盖层塌陷

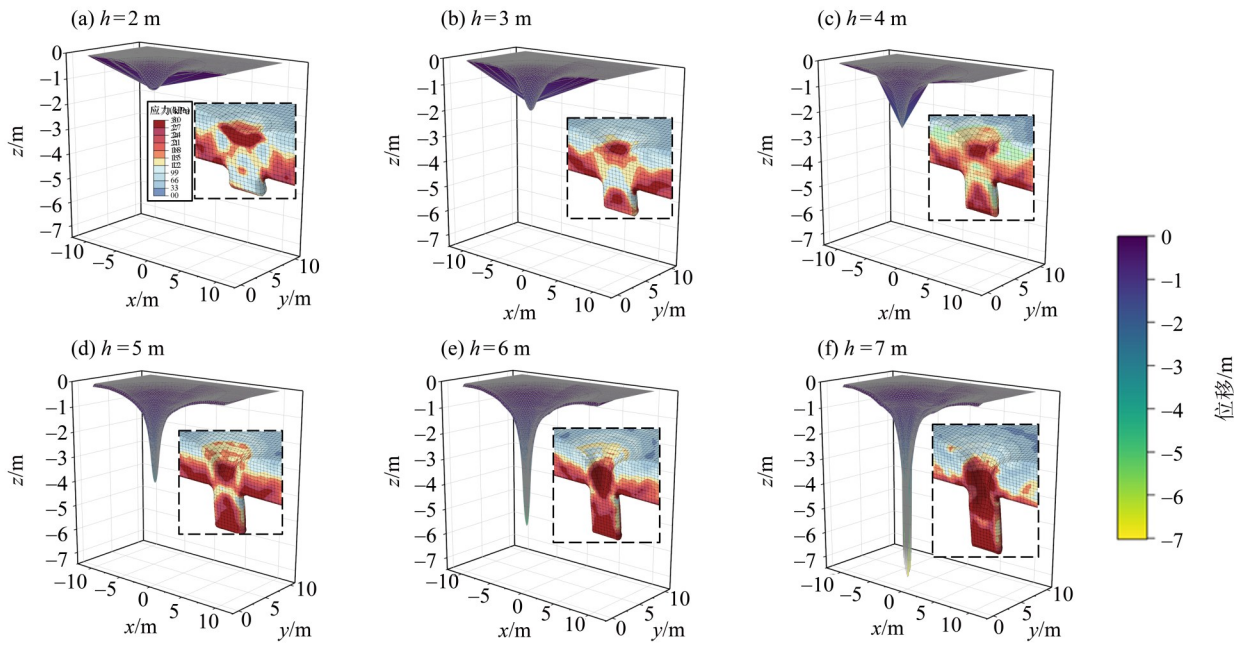


图 7 随溶洞高度增大地表塌陷三维示意图及相应应力场分布

Fig. 7 Ground collapse and corresponding stress field distribution with increasing height of karst caves in three dimensions

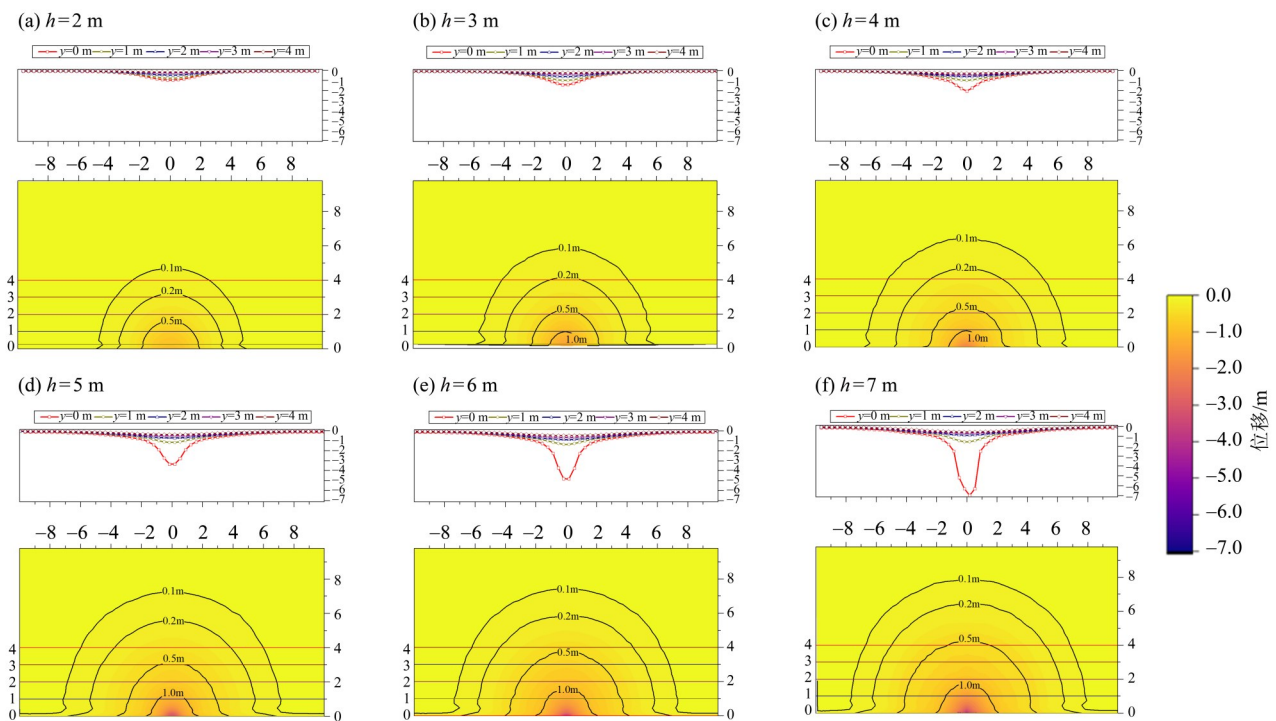


图 8 随着溶洞空腔尺寸增大, 地面沉降云图和塌陷范围变化

Fig. 8 Contour map of ground collapse and variation of collapse area with increasing height of karst caves

发育模式, 通过将贾龙(2021)一元砂土覆盖层模型试验的坍塌发展过程与上文 CEL 模拟的砂土位移场结果进行对比, 如图 10 所示。在模型试验中, 模型箱为单一砂土层且砂土不断通过模型下部漏失, 随后砂土层发生塌陷, 图 10a 为模型实验随时间增加的砂土层塌陷形态, 而图 10b 为数值模拟随

时间增加的砂土层速度场分布图。对比表明, 随着砂土覆盖层塌陷的发展, 模型试验的塌陷范围和数值模拟的速度场范围均呈扩大趋势, 对应砂土的塌陷模式为先于塌陷中心发展, 随后再扩散至两边。

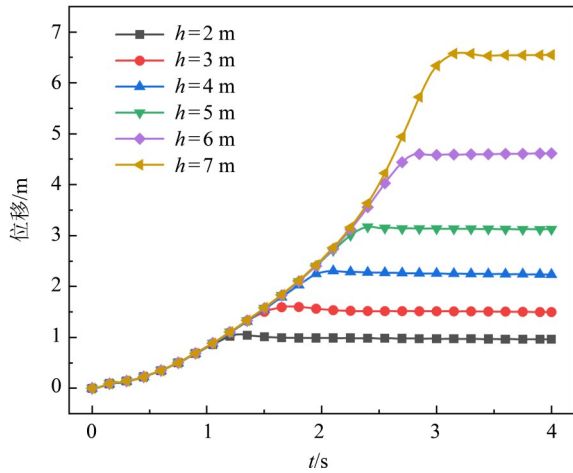


图 9 随岩溶空腔高度增大地表最大位移演化趋势

Fig. 9 Influence of the height of karst caves on ground collapse

为探究砂土发生运移的原因即砂土层破坏的机理, 取同一工况不同时刻的砂土层应力场分布见图 11。由图 11 可得, 砂土层在发生塌陷时, 靠近溶洞空腔的砂土先失稳破坏, 使得靠近岩溶空腔的砂土应力较小; 其余砂土颗粒会倾向形成拱

形结构维持土体稳定, 但由于砂土内聚力较低, 土拱会随即破坏, 砂土颗粒随后运移至岩溶空腔, 随后砂土层中又倾向于形成新的拱形结构, 随后继续破坏此结构从而使砂土颗粒发生运移, 砂土层不断往复此过程逐层剥落, 最终使砂土颗粒全部运移进岩溶空腔内, 在地面造成地面塌陷事故。此现象与砂土层下方存在较小开口时的行为体现出相似性, 根据 Song et al.(2021)、Ismail et al.(2021)的研究, 砂土层的砂土颗粒会在下方存在开口时, 会于开口周围形成双颗粒或多颗粒的砂土拱, 在外界条件变化后, 砂土拱会不断被破坏和形成新的砂土拱。与小开口的工况相比, 钻孔或桩基施工造成的砂土运移空间较大, 砂土的内聚力较低无法支撑如此大跨度的砂土拱。但由应力场变化可看出, 砂土颗粒仍然会倾向于在空洞周围不断形成砂土拱并被破坏, 若砂土中存在砂砾或其他土增大土层的稳定性且开口足够小, 则可能会在开口处形成稳定的土拱(Wang et al., 2022)。

表 4 随岩溶空腔高度增大塌陷区范围(直径)变化

Table 4 Variation in collapse range(diameter) with increasing height of karst caves

岩溶空腔高度	2	3	4	5	6	7
200 mm 塌陷区范围	3.31	4.18	4.82	5.59	6.03	6.42

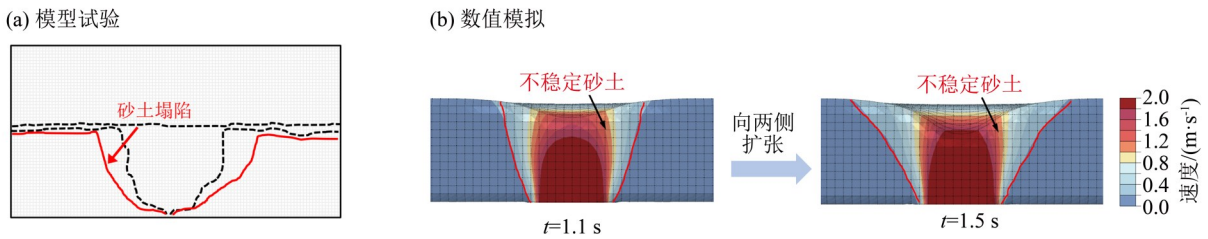


图 10 砂土塌陷模型试验结果(贾龙,2021)与耦合欧拉-拉格朗日法数值模拟结果

Fig. 10 Comparison of collapse results between model test and numerical simulation:(a) model test;(b) numerical simulation

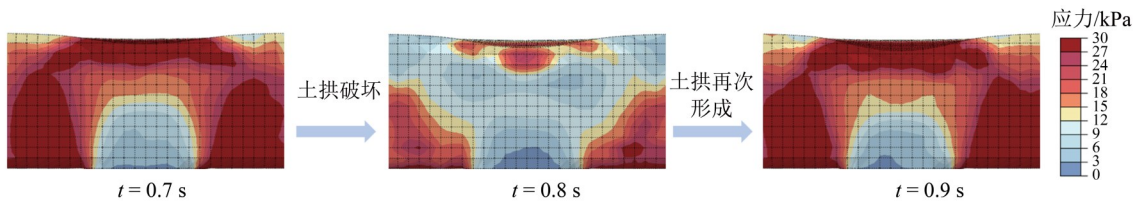


图 11 随时间 t 增加砂土层应力场变化图

Fig. 11 Variation of stress field in sand stratum

## 5.2 不同影响因子贡献率

为量化不同影响参数对地表最大位移的影响,需要消除不同参数量纲的影响,即对数据进行标准化处理,本文采用最大最小归一化对各因素影响权重进行标准化处理,即将影响因素取值范围内的最大值和最小值进行标准化处理,归一化后的数据处于[0,1]之间,计算方式为数据与取值范围最小值之差除以极差

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

式中  $x'$  表示单个数据的取值,  $x_{\min}$ 、 $x_{\max}$  分别为影响

参数取值范围的最小、最大值。

为使不同量纲的数据具有可比性,其经归一化处理后砂土层厚度每变化 1 m 砂土内摩擦角每变化  $1^\circ$ 、溶洞高度每变化 0.5 m 归一化处理后在 [0, 1] 之间其大小是相等的。由于每个影响因素在不同数值范围对于塌陷事故的影响不同,如覆盖层厚度偏大时其变化对于地面塌陷的影响会偏小,所以在定量风险评估时仅考虑对地面塌陷影响程度大的变化范围(即,考虑较危险的情况),不同影响因素下的地表最大位移变化范围如表 5 所示。

表 5 不同影响因素对地表最大位移影响

Table 5 Influences of different factors on maximum surface displacement

砂土层最大位移	砂土层厚度	砂土内摩擦角	溶洞高度
变化范围	0.28~1.46 m	0.01°~0.04°	0.27~0.97 m
变化程度	22.4%~36.8%	0.1%~1.7%	14.1%~17.9%

结合表 5 得出不同因素对于砂土覆盖地层岩溶塌陷事故塌陷程度大小  $S$  的影响公式

$$S = 0.63A + 0.03B + 0.34C$$

式中  $A$  代表砂土层厚度、 $B$  代表砂土内摩擦角大小、 $C$  代表溶洞高度大小。

与黏性土覆盖层不同的是,在岩溶发育程度相当时,在砂土的常规强度范围内,其并不会很大程度地影响塌陷规模大小,其主要受砂土层厚度和溶洞空腔大小的影响。

## 6 结 论

本文通过有限元数值模拟研究了砂土覆盖层因桩基或钻孔施工引起的地面塌陷过程,得出如下主要结论:

1) 在岩溶空腔的顶板被破坏后,靠近溶洞空腔中心点的土体在钻孔施工破坏岩溶顶板后最先失稳破坏,随即运移至岩溶空腔内部。最先失稳破坏土体的范围主要受砂土覆盖层厚度和溶洞空腔大小影响,在常规范围内砂土的内摩擦角对其

影响较小。

2) 砂土覆盖层厚度越大土层越稳定,砂土层的地表最大位移和塌陷速率均呈减小趋势。随砂土覆盖层厚度增加,土体所受应力不仅由竖向范围土体承担,而是由侧向的土体骨架分担部分应力,造成先受到失稳破坏影响的土体范围较小,同时造成较大量级的塌陷范围( $>1$  m)减小。当溶洞空腔大小一定,则周围土体的运移量无较大差别,体现在小量级的塌陷范围( $<0.5$  m)变化较小。

3) 随溶洞空腔尺寸的增大,砂土的总运移量增大,较大量级的塌陷范围( $>1$  m)亦增大,但先受到失稳破坏影响的土体范围无明显变化,体现在砂土覆盖层厚度一定时,塌陷速率无明显变化。在竖向范围土体先失稳破坏后,随后周围土体才受到剪切应力的影响破坏而向溶洞空腔中心产生位移,并体现出近似塌陷角的塌陷形态。由于溶洞空腔增大,周围土体的运移量才会因砂土总运移量的增大而增大,造成小量级的塌陷范围( $<0.5$  m)增大。

## 参考文献:

贾龙,2021.城市岩溶地面塌陷隐患识别与评价研究[D].武汉:中国地质大学.  
黎秉林,2018.广州岩溶地区盾构地铁线路勘察研究[D].广州:华南理工大学.  
卢薇,易顺民,2021.广州市大坦沙岛岩溶塌陷成因分析及防

治对策[J].安全与环境工程,28(4): 121-130.

罗小杰,罗程,2017.沙漏型岩溶地面塌陷物理模型[J].中国岩溶,36(1): 88-93.

蒙彦,2020.广花盆地岩溶塌陷多参数监测预警与风险防控[D].武汉:中国地质大学.

- 潘启钊, 刘锡儒, 赵家福, 等, 2022. 岩溶区钻探引起地面塌陷机理分析[J]. 广东土木与建筑, 29(8): 5-8+12.
- 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等, 2007. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, (3): 126-130.
- 张鑫, 崔可锐, 查甫生, 2016. 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, 16(12): 195-199.
- 郑小战, 郭宇, 戴建玲, 等, 2014. 岩溶塌陷区岩溶发育及影响因素[J]. 热带地理, 34(6): 794-803.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社.
- ALONSO E E, GENS A, JOSA A, 1990. A constitutive model for partially saturated soils [J]. *Géotechnique*, 40 (3) : 405-430.
- CUI Q L, WU H N, SHEN S L, et al., 2015. Chinese karst geology and measures to prevent geohazards during shield tunnelling in karst region with caves [J]. *Nat Hazards*, 77(1): 129-152.
- GU Z F, LIU Q, LU Y R, et al., 2016. Analysis and prevention of sinkhole collapses during the reconstruction and extension of Guang-Qing freeway, China [J]. *Environ Earth Sci*, 75(9): 788.
- ISMAIL N I, KUANG S B, YU A B, 2021. CFD-DEM study of particle-fluid flow and retention performance of sand screen[J]. *Powder Technol*, 378: 410-420.
- JIA L, MENG Y, LI L, et al., 2021. A multidisciplinary approach in cover-collapse sinkhole analyses in the mantle karst from Guangzhou City (SE China) [J]. *Nat Hazards*, 108: 1389-1410.
- MENG Y, JIA L, HUANG J M, 2020. Hydraulic fracturing effect on punching-induced cover-collapse sinkholes: A case study in Guangzhou, China [J]. *Arab J Geosci*, 13(1):28.
- MENG Y, LEI M T, LIN Y S, et al., 2012. Models and mechanisms of drilling-induced sinkhole in China [J]. *Environ Earth Sci*, 67: 1961-1969.
- SONG Y Q, RANJITH P G, WU B L, 2021. A microscopic study of sand arches and sand skeletons under hydrodynamic force based on the CFD-DEM model[J]. *J Nat Gas Sci Eng*, 2021, 92: 104017.
- STANDING J R, SELEMETAS D, SHIRLAW J N, 2013. Greenfield ground response to EPBM tunnelling in London Clay[J]. *Géotechnique*, 63(12): 989-1007.
- TÓTH Á, GONG Q, ZHAO J, 2013. Case studies of TBM tunnelling performance in rock-soil interface mixed ground[J]. *Tunn Undergr Space Technol*, 38:140-150.
- WANG X L, LAI J X, HE S Y, et al., 2020a. Karst geology and mitigation measures for hazards during metro system construction in Wuhan, China [J]. *Nat Hazards*, 103: 2905-2927.
- WANG X L, LAI J X, QIU J L, et al., 2020b. Geohazards, reflection and challenges in Mountain tunnel construction of China: a data collection from 2002 to 2018[J]. *Geomat Nat Hazards Risk*, 11(1): 766-785.
- WANG X M, WANG S M, PENG X Y, et al., 2022. Equivalent numerical simulation method and application in karst-induced collapse of overlying sandy stratum [J]. *Eng Fail Anal*, 137: 106280.
- WANG Z C, HOU S L, YE Y, et al., 2022. Numerical simulation study on sand gravel layer collapse induced by tunnel lining damage [J]. *Comput Part Mech*, 10: 757-768.
- XIONG Z T, LIU P R, YANG T, et al., 2018. Mechanism of karst collapse caused by punching pile construction in Jiangxia Fasi karst collapse area [J]. *Carsol Sin*, 37(1) : 120-129.
- ZHOU H T, LIU C Q, WANG G H, et al., 2022. Study on Drilling Ground Collapse Induced by Groundwater Flow and Prevention Based on a Coupled CFD-DEM Method [J]. *KSCE J Civ Eng*, 26: 2112-2125.

(责任编辑 秦社彩)