

师海, 贾智磊, 白明洲, 等. 基于颗粒流的覆盖型岩溶地面塌陷动态演化特征研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1110-1120.

DOI: 10.11932/karst20240509

基于颗粒流的覆盖型岩溶地面塌陷 动态演化特征研究

师海^{1,2}, 贾智磊¹, 白明洲^{1,3}, 张晔¹, 孙子冰¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 轨道工程北京市重点实验室, 北京 100044;
3. 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要: 为揭示铁路周边覆盖型岩溶土洞扩展的动态演化规律和细观致塌机理, 以京沪高铁(江西段)某典型岩溶塌陷点为依托, 通过颗粒流(PFC^{2D})压缩试验对塌陷土体的强度参数进行标定, 引入接触黏结模型, 建立覆盖型岩溶地面塌陷流固耦合模型, 从细观角度揭示了岩溶地面塌陷的动态演化过程与变形特征, 探究不同溶洞开口大小、覆盖层厚度、地下水位高度对覆盖型岩溶地面塌陷变形特征的影响。研究表明: 地表沉降、土体孔隙率等随塌陷演化发展而逐渐增大; 地下水位高度越高, 土洞扩展越快, 地表沉降越明显, 塌陷也越易发生; 溶洞开口越大, 地面沉降深度和范围随之增大, 塌陷越易发生; 覆盖层厚度越小, 地表沉降变化越明显; 从细观角度可知, 塌陷过程中颗粒间接触力变化过程近似为“应力平衡—应力拱形成—应力拱破坏—应力再次平衡—…—应力拱断裂”的规律。研究从细观角度揭示了岩溶地面塌陷演化的全过程, 可为高速铁路建设、运营期周围环境覆盖型岩溶地面塌陷的防灾减灾提供参考。

关键词: 覆盖型岩溶; 土洞扩展; 颗粒流; 数值模拟; 动态演化

创新点: (1) 基于颗粒流离散元法构建了岩溶地面塌陷地质模型, 引入黏结接触, 建立了覆盖型岩溶地面塌陷流固耦合模型; (2) 模拟了多因素耦合下岩溶塌陷演化全过程, 从细观角度揭示了覆盖型岩溶地面塌陷的演化过程、变形特征。

中图分类号: P642.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1110-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

作为岩溶区特有的地质灾害, 具有隐蔽性、周期性和突发性等特点, 是岩溶区重大工程建设面临的主要地质问题^[1-2], 遍及全国各省、区, 尤其以滇、黔、桂等省岩溶分布为最, 其中岩溶地面塌陷高易发区面积达 28.5 万 km²^[3]。岩溶地面塌陷的形成受到地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件、气象、时间、空间等多因素的影响, 因此, 岩溶地面塌陷防

治具有高度复杂性和艰巨性。随着人类工程活动的增加, 岩溶地面塌陷灾害频发, 严重威胁着人类的生活安全^[4-6]。高速铁路是我国经济建设的交通命脉和重要的战略资源, 仅西南岩溶区高速铁路达 3 000 km 以上, 铁路沿线岩溶地面塌陷灾害为高铁工程安全建设、健康运营带来潜在威胁^[7]。随着我国岩溶区铁路工程建设的快速发展, 铁路沿线岩溶地面塌陷灾害频发, 对塌陷区一定范围内人员和社会生活的安全造成影响, 已成为亟待解决的问题。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907260、42172311); 中央引导地方科技发展资金项目(216Z3802G)

第一作者简介: 师海(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩溶灾害防治和地面塌陷领域的教学科研工作。E-mail: shihai@bjtu.edu.cn。

收稿日期: 2022-10-07

岩溶区铁路建设期及运营期地下水的抽取、排放、水动力条件变化等是诱发岩溶塌陷的重要因素^[8-9]。关于岩溶地面塌陷灾害的诱因和形成机理,国内外已有长期的研究,其中对岩溶地面塌陷的基本特征和形成机理有一些认识^[10-12],目前得到广泛认可的岩溶塌陷致塌机理主要有潜蚀论、真空吸蚀论、振动论、液化论、气爆论等^[13]。水位的波动是产生岩溶塌陷的主导因素,岩溶地面塌陷易发生在地下水位变幅大、变化速率快及水位长期在基岩面上下波动区域,水位波动过程,水对细小颗粒不断搬运,在盖层底部形成土洞,土洞的不断扩大及向上扩展,使洞顶土体失去平衡,最终产生地面开裂、下沉、塌陷等^[14]。由于岩溶地面塌陷目前主要通过解析法^[15]、物理模型试验^[16-17]和数值模拟法^[18-19]等研究塌陷诱因、致塌机制和判识模式等。由于影响岩溶塌陷的因素众多,解析法采用近似或假设条件分析,物理模型试验易受到边界和尺寸效应的限制,因此现阶段大量学者采用数值模拟方法研究岩溶塌陷的致塌机理。数值模拟方法不仅可以考虑多因素耦合作用对岩溶塌陷的影响,还可以模拟塌陷演化全过程,如贾龙等^[20]采用FLAC^{3D}软件,对地下水位变化引起的岩溶土洞演化而造成的覆盖层土体不均匀位移及应力重分布进行了数值模拟。于林弘等^[21]采用FLAC^{3D}软件,对地下水位下降过程中土洞扩展演化过程及岩溶塌陷过程进行了数值模拟。目前常用的数值模拟多采用基于连续介质假设提出的有限元法,然而土体是非连续介质,基于有限元法建立的模型难以模拟塌陷土体的局部不稳定性、细观破坏过程等,忽视了塌陷过程岩土体细观变化;且孔隙结构和颗粒接触关系更能反应塌陷细观机理,但是目前对塌陷过程岩土体的时间效应和细观机理缺乏足够的重视。

本文以此为契机,采用颗粒流离散元方法(PFC)构建岩溶地面塌陷的地质模型,引入接触黏结模型,建立覆盖型岩溶地面塌陷流固耦合模型,模拟多因素耦合作用下岩溶塌陷演化的全过程,从细观角度揭示了覆盖型岩溶地面塌陷的演化过程、变形特征,探究不同溶洞开口大小、覆盖层厚度、地下水位高度对覆盖型岩溶地面塌陷变形特征的影响,分析不同因素影响下土颗粒的迁移规律,以期对铁路建设、运营期周围环境岩溶地面塌陷灾害的防治提供理论依据。

1 研究区概况

江西省岩溶发育广泛,岩溶地面塌陷灾害多发,穿越省域的沪昆高铁是我国铁路网规划中“八纵八横”中的重要组成部分,本研究选取沪昆高铁(江西段)沿线某潜在塌陷点为试验段(地貌形态如图1所示),开展了铁路沿线岩溶地面塌陷动态演化和变形特征的研究。



图1 研究区岩溶地貌

Fig. 1 Karst landform of the study area

研究区内多年的平均降水量可达1594.8 mm,最大年降水量为2170.6 mm,年平均蒸发量为1497.8 mm。铁路右侧425 m处发育一岩溶泉,出露于坡脚下,水流方向为15°,其流向与线路成小角度相交,目测流速为 $0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,估算流量为 $2.15 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

沿线所经过的地层岩性按其成因和时代分类主要有:第四系残坡积层 Q^{cl+dl} 粉质黏土、细角砾土、坡洪积层 Q^{d+pl} 粉质黏土,下伏基岩为二叠系下统茅口组 P^1m 含燧石结核灰岩,局部夹薄层灰质页岩。

研究区地面塌陷基本位于低山区,该地带基本处于细角砾土和粉质黏土覆盖地区,根据土洞的成因类型^[13],该岩溶土洞通过潜蚀作用形成,大部分塌陷坑近似圆形、椭圆形,塌陷坑直径一般在3~7 m之间,深度在1~5 m之间,某潜在塌陷区与线路的位置关系如图2。

2 数值模拟模型建立

2.1 塌陷细观参数的标定

相比于有限元软件,PFC颗粒流软件中材料特性无法直接采用宏观力学参数来描述,常需赋予细观参数使模型与实际岩土体具备相同的物理力学性质,也

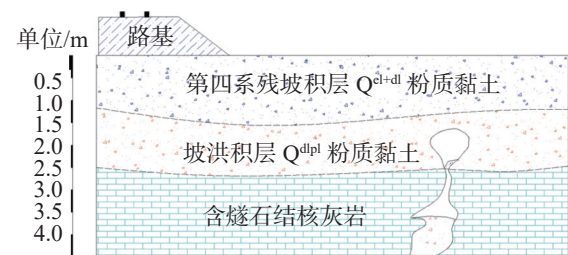


图 2 潜在塌陷区地层结构剖面图

Fig. 2 Profile of the stratigraphic structure of potential collapse area

即细观参数标定^[22],使细观参数与宏观力学参数关联。本文以 0.5~1.5 m 土层的细角砾土建立模型,选用双轴压缩试验方法进行参数标定。建立双轴压缩颗粒流模拟试验时,在考虑精度和计算机能力的同时将计算颗粒适当放大,参数标定时采用不同粒径的颗粒,由于塌陷区土体的各向异性和土颗粒大小具有不均一性,模型中颗粒半径和接触粘结强度按照 Gauss 分布的规律随机选取^[23],通过对颗粒不同参数的反复调试和提取,确定随机生成颗粒半径为 1.5~3.5 mm 左右。为避免尺寸效应,最终确定双轴模型试样尺寸为 8 m×16 m,颗粒总数 5349 个。双轴压缩颗粒流模型如图 3 所示。

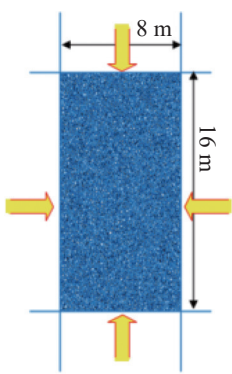


图 3 双轴试验模型

Fig. 3 Biaxial test model

通过建立的颗粒流二维双轴压缩模型来模拟粉质黏土的剪切力学特性,采用圆形颗粒来模拟土颗粒,加载过程边界采用刚性体,引入接触黏结模型,采用伺服控制程序控制围压,不断试算后,确定如表 1 中的细观参数。提取出了所模拟的围压为 100 kPa、200 kPa 和 500 kPa 的应力-应变曲线,如图 4 所示,确定出塌陷土体的模拟黏聚力 $c=22.14$ kPa,模拟内摩擦角 $\varphi=24.86^\circ$,而室内试验所得的粘聚力为 22.28 kPa,内摩擦角为 25.06° ,两者结果相近,因此本文中细观参数标定结果是合理且可靠的。

表 1 颗粒流固耦合主要模型参数

Table 1 Main model parameters of particle fluid-solid coupling

岩土层类型	埋深	法向刚度/ MPa·m ⁻³	法向-切线 刚度比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ °	摩擦 系数	容重/ g·cm ⁻³	孔隙率/ %
回填土(残坡积粉质黏土)	0~0.5 m	38	1.5	20.5	28.7	0.3	1.68	33
残坡积层粉质黏土	0.5~1.5 m	34	1.5	22.28	25.06	0.3	1.68	32
坡洪积层粉质黏土	1.5~2.5 m	34	1.5	32.54	38.71	0.3	1.69	32
灰岩	>2.5 m	38	1.5	25.47	20	0.3	1.88	28

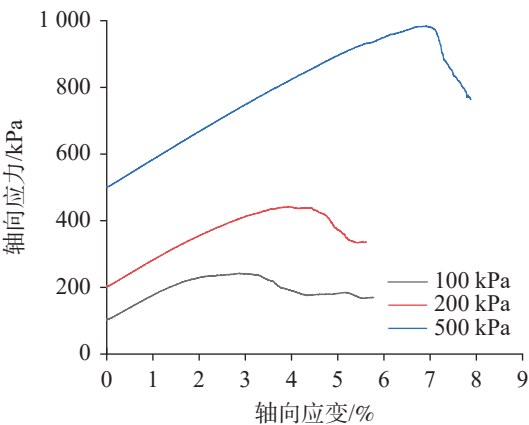


图 4 模拟的不同围压下应力-应变曲线

Fig. 4 Simulated stress-strain curves under different confining pressures

2.2 塌陷数值模型建立

考虑计算机性能需求、试验模型精度和尺寸效应, PFC^{2D} 颗粒流建立塌陷模型采用 Ball-Wall 法建模,根据地质剖面图绘制相同尺寸的几何模型,模型边界假设为墙体(Wall)组成的 30 m×15 m 的箱体模型,溶洞开口宽为 4 m,上覆土层采用球形颗粒单元(Ball)填充^[24-25]。不同地层分层在模型中选用的参数表 1 所示。

墙体采用生成分层压缩法生成相应孔隙率的初始颗粒,对生成的土颗粒采用表 1 参数赋值,然后赋予上部墙体向下运动的速度,通过墙体压缩区域内颗粒直至该层孔隙率达到指定数值,随后删除墙体

使上下层颗粒接触融合,依次循环执行分层操作直至达到指定高度,使颗粒的最大不平衡接触力接近0,最后施加重力平衡。结合得出的模型细观参数,赋予颗粒相关参数和重力加速度,并进行平衡计算,平衡后得到的力链分布如图5-b所示。为方便辨识土洞塌陷的全过程和显示平衡后的力链分布情况,调整覆盖层是多元结构颗粒的颜色一致。模型中,每隔1 m设置测量圆和监测点,提取塌陷点变形数据,数值模拟示意如图5所示。

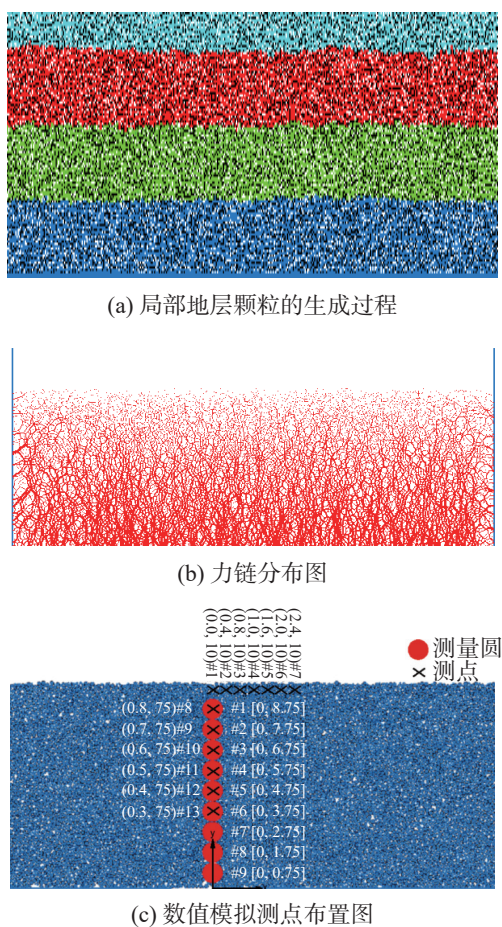


图5 数值计算模型

Fig. 5 Numerical model

为模拟地下水对土体的渗透侵蚀作用,本文借助管域模型来施加流体因素,假定颗粒间接触处分布有供流体流动的细观管道,管道构成了流体流动网络^[25]。模拟中流场进口采用压力进口边界,其余边界设置为墙边界,水在重力作用下流动,流体计算模型如图6所示,相邻颗粒中心连线(蓝色线段)构成的区域即为“域”,“域”贮存着孔隙水压力(绿色圆点),颗粒间的接触视作流体流动的管道。

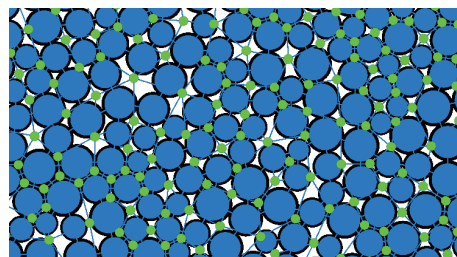


图6 流固耦合管域模型

Fig. 6 Model of pipes and domains for fluid-solid coupling

3 数值模拟结果分析

模拟过程假设:(1)溶洞内填充物在地下水渗流侵蚀作用下全部冲走,模拟期间不考虑溶腔内的真空吸蚀效应;(2)采用降低模型水位以下颗粒间的接触强度来模拟地下水对土体强度的削弱作用。

3.1 塌陷全过程动态演化

塌陷过程如图7所示,塌陷过程包括:阶段1(计算8万时步)在重力和地下水渗透侵蚀的作用下,塌陷土体的破坏最先在溶洞开口,颗粒沿着岩溶管道发生流失,如图7-a;阶段2(计算11万时步)随着初始裂缝的形成,颗粒间平行粘结产生破裂,颗粒块脱落并在地下水冲刷下沿溶洞开口流失,逐渐形成初始土洞;阶段3(计算13万时步)在地下水位频繁波动作用下,开口溶洞洞壁颗粒发生逐层剥落,土洞不断扩展变大;阶段4(计算15万时步)随着土洞的扩展演化,顶板变薄,在两侧产生竖直的张拉裂缝,当达到临界状态,发生土洞塌陷,如图7-d所示。在塌陷过程中,颗粒间接触力变化过程近似为“应力平衡—应力拱形成—应力拱破坏—应力再次平衡—…—应力拱断裂”的过程。土体内部应力近似表现为:“压应力逐渐减小—拉应力逐渐增大—拉应力消失”的过程。

3.2 塌陷过程特征分析

3.2.1 地表沉降变化

地表沉降变化规律如图8,不同时步分别对应塌陷的各阶段。由图8可知:阶段1,塌陷初期在溶洞开口附近,变形不明显;随着时步的增加,阶段2开始,初始土洞在外部荷载作用下,土洞洞壁颗粒开始发生逐层剥落,土洞不断扩展,失稳区逐渐向上扩展,地表沉降量逐渐变大。溶洞开口中心距离越近的测点处地表竖向位移越大。

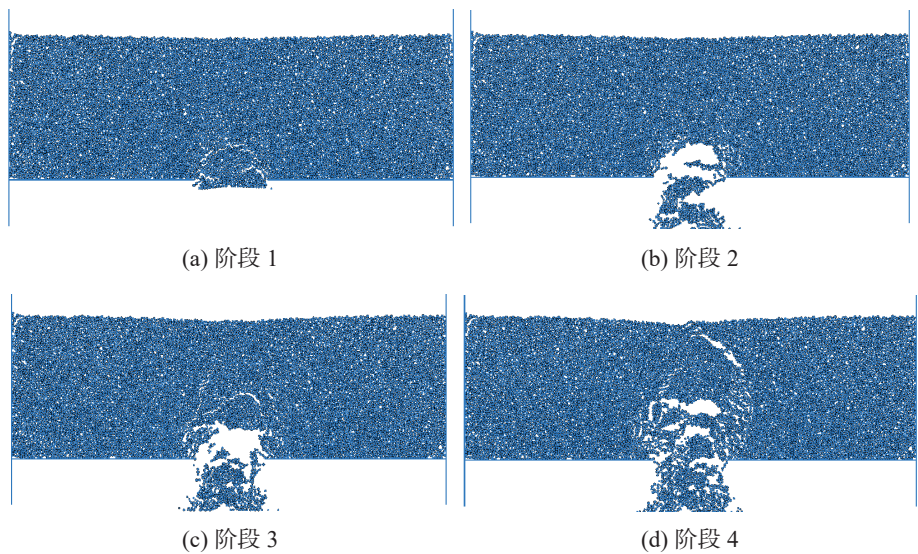


图 7 塌陷全过程模拟

Fig. 7 Simulated collapse process

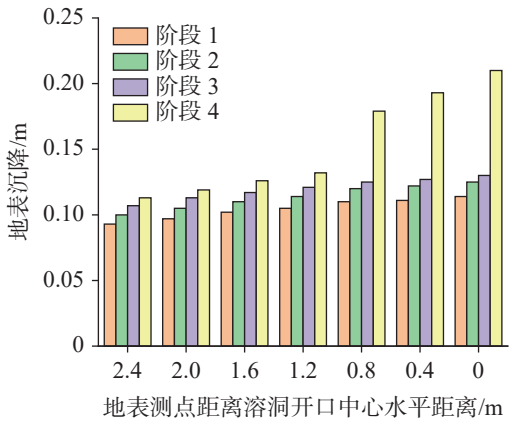


图 8 地表竖向位移变化

Fig. 8 Vertical displacement of the surface

3.2.2 土体孔隙率变化

沿溶洞开口中心处纵向等间距布置测量圆, 选取部分测量圆的孔隙率变化如下图 9 所示。由图 9 可知: 土洞正上方土体孔隙率总体呈现逐渐变大的发展规律, 且越靠近溶洞开口处, 孔隙率增长速率越快。且覆盖层一定范围内土体的孔隙率呈现先减小再增大的变化规律。

3.2.3 竖向应力变化

塌陷土体内部竖向应力变化曲线如图 10 所示, 应力值为负表示土体受到拉力作用。由图可知, 在初始阶段, 土体应力表现为拉应力, 且随埋深的增加而增大。随着土洞的发展, 溶洞开口处一定范围内土体竖向拉应力逐渐减小并转变为压应力, 土体强

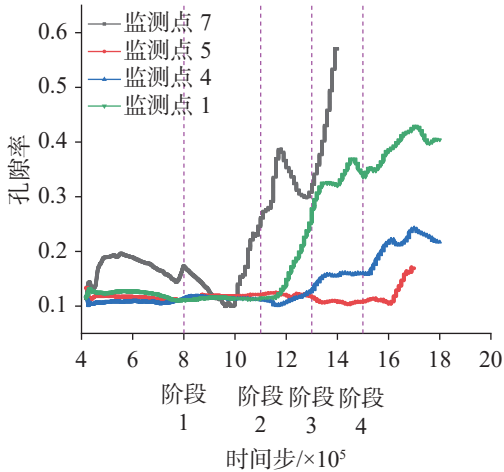


图 9 不同测点处孔隙率随塌陷进程变化规律

Fig. 9 Variation of porosity at different monitoring points with collapse process

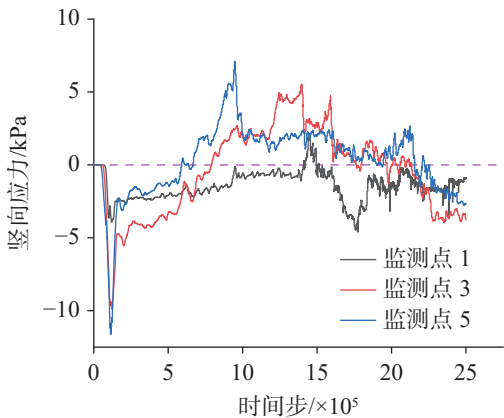


图 10 不同测点塌陷土体内部竖向应力变化曲线

Fig. 10 Curve of variation in internal vertical stress of collapsing soil at different monitoring points

度减弱,当达到临界抗拉强度时土体失稳掉落,引起土洞扩展。在土洞扩展阶段,覆盖层土体自下而上依次表现出压应力逐渐减小、拉应力逐渐增大的规律。

3.3 不同因素影响下塌陷变形分析

为探究溶洞开口、覆盖层厚度、地下水位高度等对塌陷变形的影响,模拟设计了2.0 m、2.5 m、3.0 m、3.5 m、4.0 m 溶洞开口,10 m、11 m、12 m、13 m、14 m 覆盖层厚度和2.0 m、4.0 m、6.0 m、8.0 m、10.0 m

地下水位高度采用颗粒流模拟塌陷的全过程,探究不同因素对岩溶塌陷的影响。

3.3.1 溶洞开口大小

为研究不同溶洞开口大小对塌陷影响的规律,设计2.0 m、2.5 m、3.0 m、3.5 m、4.0 m 开口大小的溶洞,模型覆盖层厚度均为10 m、地下水位高度均为10 m,分析了不同溶洞开口条件下地表沉降变化规律(图11)。由模拟结果可知:地表沉降值大小与

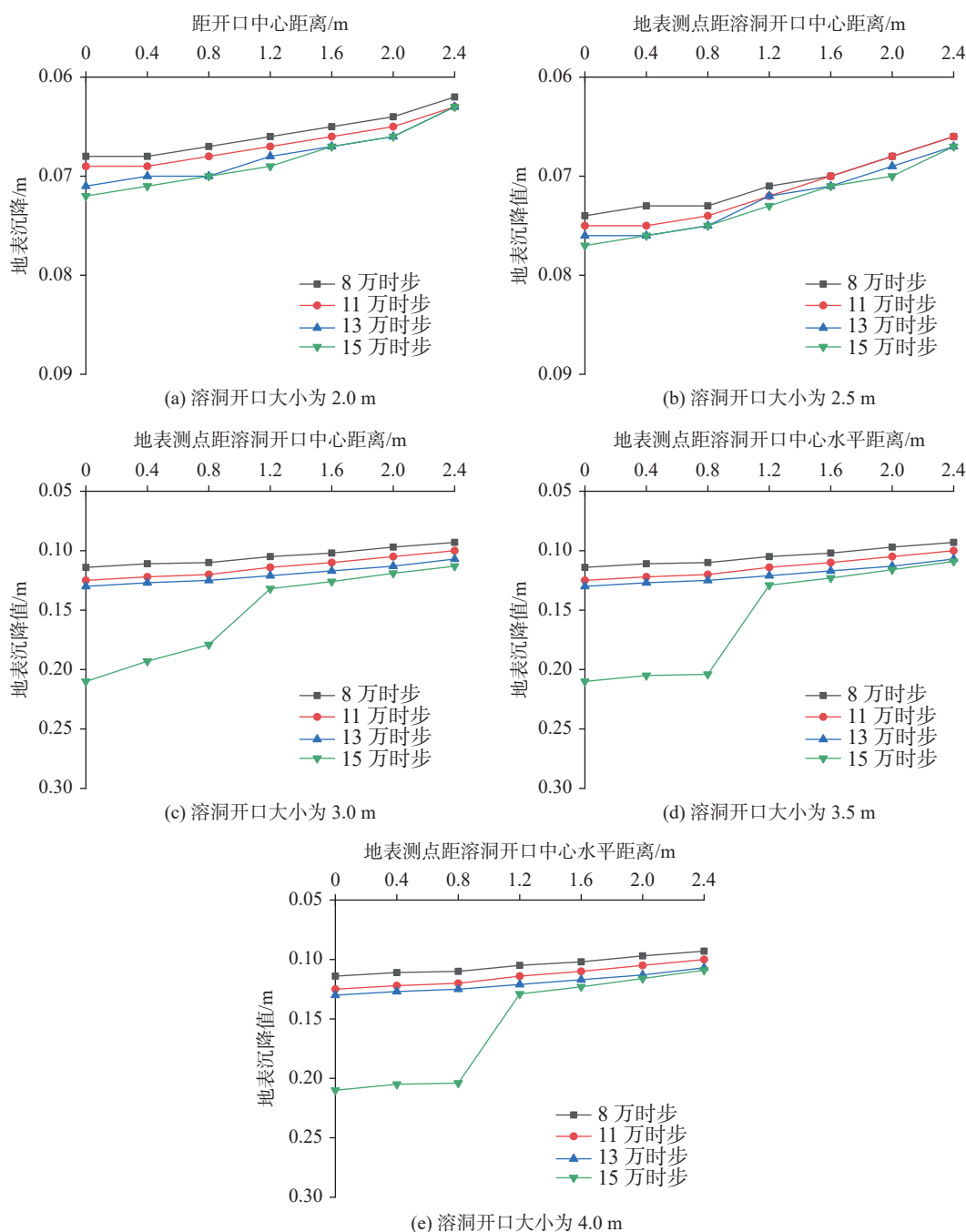


图11 不同溶洞开口大小条件下地表沉降变化

Fig. 11 Variation of vertical surface displacement under different opening sizes of caves

距溶洞开口中心距离呈负相关关系,距离越远,地表沉降越小;当溶洞开口大小分别为 2.0 m、2.5 m 时,地表沉降变化不明显;随着溶洞开口的增大,当开口大小在 3~4 m 范围时,地表沉降变化明显,当土洞达到临界土洞高度,正上方土体位移量突增,地面失稳塌陷,开口大小为 3.0 m、3.5 m、4.0 m 的模型最大沉降量分别达到 0.210 m、0.215 m 和 0.245 m。以 8 万步和 13 万步为例,提取相同步数下、不同溶洞开口

口径与沉降的关系曲线如图 12 所示。提取各工况的临界土洞高度,当溶洞开口大小越大,地表沉降越大,发生地面塌陷的风险越高。

3.3.2 覆盖层厚度

为研究不同覆盖层厚度对塌陷影响的规律,设置覆盖层厚度为 10 m、11 m、12 m、13 m、14 m 进行模拟计算,模型溶洞开口大小为 4 m,地下水位高度

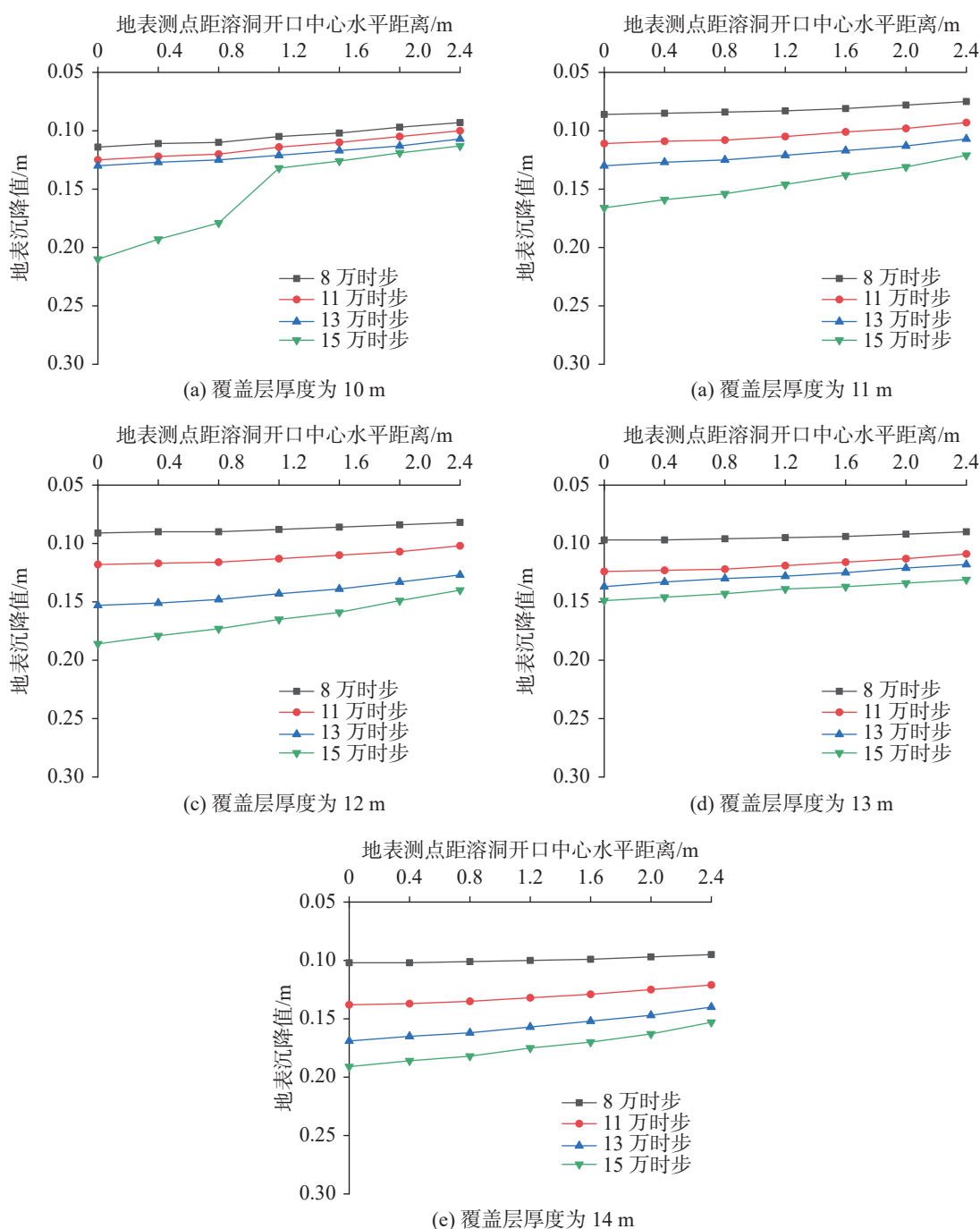


图 12 不同覆盖层厚度条件下地表沉降变化

Fig. 12 Variation of vertical surface displacement under different overburden thicknesses

为 10 m。分析了不同覆盖层厚度地表沉降变化规律(图 12)。由模拟结果可知: 以覆盖层厚度为 10 m 为例, 模型计算到 15 万时步地表沉降发生突变, 地表测点距离溶洞开口中心水平距离 1.2 m 处测点竖向位移值由 0.132 m 突变为 2 m 处测点的 0.179 m, 且覆盖层厚度越小, 越易发生岩溶地面塌陷。相同时步内, 当覆盖层厚度越来越大, 其地表竖向位移沉降变化速率逐渐减小。土层较厚时, 土洞扩展过程中

对地表沉降影响较小。

3.3.3 不同高度地下水位突变

为研究不同高度的地下水位突变对塌陷影响的规律, 设置地下水位高度为 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m 进行模拟, 模型溶洞开口大小为 4 m、覆盖层厚度为 10 m, 分析了不同高度地下水位突变情况下地表沉降变化(图 13)。由模拟结果可知: 地下水位越

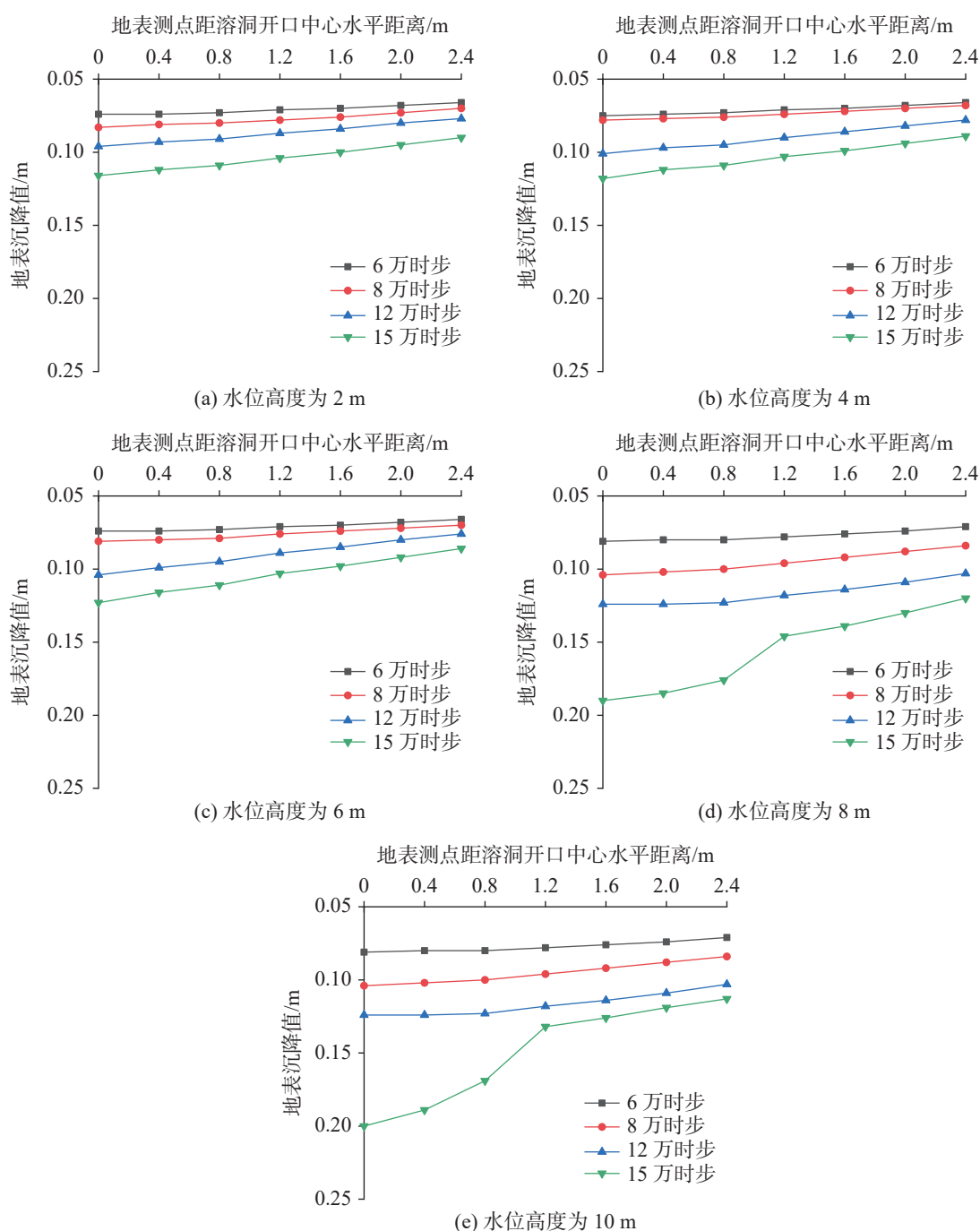


图 13 不同水位高度条件下地表沉降变化

Fig. 13 Variation of vertical surface displacement under different water levels

高,对应的地表沉降值越大,土洞发育越快,这是由于地下水位升高,水对土体的软化、潜蚀作用逐渐增大,土洞规模随之扩展,而造成地表沉降越来越明显。提取不同水位高度突变条件下土洞塌陷临界高度,如图 14 所示,当地下水位越高,土洞塌陷临界高度越小。

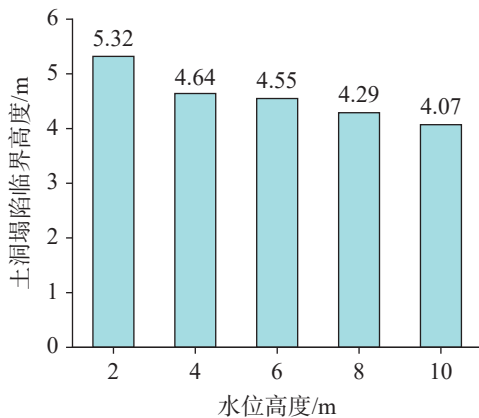


图 14 不同水位高度突变条件下土洞塌陷临界高度

Fig. 14 Critical heights of collapsing soil caves under different water levels

4 结 论

以沪昆高铁(江西段)沿线某塌陷点为靶区,采用颗粒流 PFC^{2D} 计算软件,选取 Ball-Wall 方法建模,并引入接触黏结模型,基于管域模型流体理论构建了覆盖型岩溶塌陷流固耦合模型,从细观角度揭示了塌陷的演化过程,探索了溶洞开口大小、覆盖层厚度、地下水位高度对覆盖型岩溶塌陷变形特征的影响。主要结论如下:

(1)覆盖型岩溶塌陷演化过程,颗粒间接触力变化近似为“应力平衡—应力拱形成—应力拱破坏—应力再次平衡—…—应力拱断裂”。土体内部应力呈现“压应力逐渐减小—拉应力逐渐增大—拉应力消失”规律,地表沉降、土体孔隙率随塌陷演化过程逐渐增大。

(2)溶洞开口越大,地面沉降深度和范围增加,塌陷越易发生;覆盖层厚度越小,地表沉降越明显,塌陷越易发生。

(3)地下水位高度越高,土洞扩展越快,地表沉降越明显,塌陷也易发生。当覆盖层较厚时,地表沉降与覆盖层厚度关系不大。

参考文献

- [1] 宋章,王科,蒋良文,王茂靖. 岩溶区铁路勘察防治技术研究现状及发展趋势[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(5): 38-43.
SONG Zhang, WANG Ke, JIANG Liangwen, WANG Maojing. Research status and developing trends of reconnaissance and control technology of railway in karst area[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 38-43.
- [2] Bai Haibo, Ma Dan, Chen Zhanqing. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars[J]. Engineering Geology, 2013, 164: 101-106.
- [3] 高军. 高速铁路岩溶地质路基设计与整治技术[M]. 武汉: 中国地质出版社, 2014.
- [4] 唐万春,许模,于贺艳. 武广客运专线英德段岩溶塌发育规律研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 699-704.
TANG Wanchun, XU Mo, YU Heyan. Study on karst collapse developing regularity of the Yingde section on the Wuhan-Guangzhou passenger special line[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(4): 699-704.
- [5] 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.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GUAN Zhende. Formation mechanism of karst soil-void in single-layer soil structure condition[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(4): 426-432.
- [6] 蒙彦,雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411-417.
MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 411-417.
- [7] 时刚,王宇虢,武天仪,刘忠玉. 交通荷载下城市路面塌陷问题的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1202-1209.
SHI Gang, WANG Yuxiao, WU Tianyi, LIU Zhongyu. Model experiments on ground collapse under traffic roads[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1202-1209.
- [8] 罗小杰,沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 101-111.
LUO Xiaojie, SHEN Jian. Research progress and prospect of karst ground collapse in China[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 101-111.
- [9] Shi H, Bai M Z, Xing S C. Mechanics parameter optimization and evaluation of curtain grouting material in deep, water-rich karst tunnels[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017: 1853951.
- [10] Huang Zhen, Zhao Kui, Li Xiaozhao, Zhong Wen, Wu Yun. Numerical characterization of groundwater flow and fracture induced water inrush in tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 116(9): 104119.
- [11] Shi H, Li Q M, Zhang Q L, Yu Y Z, Xing Y J, Yu K. Mechanism of shallow soil cave-type karst collapse induced by water inrush in underground engineering construction[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019091.

- [12] 白明洲, 陈云, 师海. 山岭隧道施工诱发地下水位下降环境风险评价[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 5-10, 15.
BAI Mingzhou, CHEN Yun, SHI Hai. Environmental risk assessment of underground water level falling induced by construction in mountain tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 5-10, 15.
- [13] 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.
- [14] 吴亚楠. 泰安市城区—旧县水源地岩溶塌陷演化过程分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 94-100.
WU Ya'nan. Analysis of karst collapse development in Tai'an-Jiuxian water source area[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 94-100.
- [15] 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(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(3): 458-462.
- [16] 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.
- [17] 吴庆华, 张伟, 刘煜, 崔皓东. 基于物理模型试验的岩溶塌陷定量研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 52-58.
WU Qinghua, ZHANG Wei, LIU Yu, CUI Haodong. Quantifying the process of karst collapse by a physical model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(3): 52-58.
- [18] 马荣和, 许汉华, 赵毅然. 个旧市木登硐村岩溶场地稳定性数值模拟[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(10): 104-106.
- [19] 陈冬琴, 唐仲华, 陈锐. 基于水动力-力学耦合方法的岩溶塌陷预测[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(4): 26-32.
CHEN Dongqin, TANG Zhonghua, CHEN Rui. Prediction of karst collapse based on hydrodynamic-mechanical coupling method[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(4): 26-32.
- [20] 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.
- [21] 于林弘, 颜嘉良, 于晓静, 扈胜涛. 基于FLAC^{3D}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, HU Shengtao. Evolution and numerical simulation of karst caves based on FLAC^{3D}[J]. Ground Water, 2020, 42(4): 55-57.
- [22] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(Suppl.2): 36-39.
SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Particle flow (PFC5.0) numerical simulation technology and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Suppl.2): 36-39.
- [23] 何树江. 基于颗粒流的灰岩细观力学参数标定方法及其敏感性分析[D]. 济南: 山东大学, 2018.
HE Shujiang. Calibration method and sensitivity analysis of micromechanic parameters for limestone based on particle flow[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [24] 周建, 张映钱, 方亿刚, 刘宇. 水位变动及降雨入渗联合作用对岩溶地面塌陷的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 218-222.
ZHOU Jian, ZHANG Yingqian, FANG Yigang, LIU Yu. Analysis of joint action of water level fluctuation and rainfall on the influence of karst ground collapse[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 218-222.
- [25] 姚玉相. 基于离散单元法的高填黄土减载明洞土拱效应细观数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
YAO Yuxiang. Analysis on meso-mechanism of soil arching for unloading structure of high-filled cut-and-cover tunnel based on DEM[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.

Dynamic evolution characteristics of ground collapse of covered karst based on particle flow

SHI Hai^{1,2}, JIA Zhilei¹, BAI Mingzhou^{1,3}, ZHANG Ye¹, SUN Zibing¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Track Engineering, Beijing 100044, China; 3. Beijing Engineering and Technology Research Center of Rail Transit Line Safety and Disaster Prevention, Beijing 100044, China)

Abstract Karst collapse represents a significant geological hazard, predominantly occurring in regions characterized by the presence of soluble rock formations, including carbonate rocks, calcareous clastic rocks and salt rocks, among others. The characteristics of karst collapse fall into three key attributes: a hidden spatial distribution, a sudden occurrence and a periodic recurrence over time. These attributes can collectively challenge the construction of major infrastructure in karst areas. A karst collapse disaster along the railway will potentially pose a significant threat to the safe construction and continued operation of the high-speed railways. During both the construction and operational

phases of railways in karst areas, pumping and discharging groundwater, along with altering hydrodynamic conditions, have been identified as key factors contributing to karst collapse. The most widely used numerical simulation method is the finite element method (FEM), which is based on the assumption of a continuous medium. FEM simplifies a complex problem by breaking it down into more manageable components. It conceptualizes the solution domain as a collection of small interconnected sub-domains called finite elements. For each element, a suitable (simpler) approximate solution is assumed, and the conditions necessary for solving the overall domain are derived. However, soil is not a continuous medium; therefore, a model based on FEM is unable to simulate the local instability of a collapsed soil body, the damage process at a mesoscopic scale, and other phenomena. In light of the dearth of sufficient attention to the temporal effects and fine-scale mechanisms of the karst collapse process in current studies, this paper aims to elucidate the dynamic evolution laws and mesoscopic-scale collapse mechanisms of the expansion of overlying karst soil caves around the railway.

A typical karst collapse site, namely the Beijing–Shanghai high-speed railway (Jiangxi section), was selected as the basis for calibrating the strength parameters of the collapsed soil body. This was achieved through a particle flow (PFC^{2D}) compression test, in which a contact bonding model was also introduced. This model assumed that the filler in the cave was entirely washed away due to the erosive effect of groundwater seepage. Additionally, the vacuum suction and erosion effect inside the cave were not taken into consideration during the simulation period. The effect of groundwater on soil strength was simulated by reducing the contact strength between particles below the modelled water level. In conclusion, a coupled flow-solid model of overlying karst collapse has been established, which can elucidate the dynamic evolution process and deformation characteristics of karst collapse from a mesoscopic view. Furthermore, the influence of various sizes of cave openings, thicknesses of overburden layers and groundwater levels on the deformation of the overlying karst collapse has been investigated. The migration laws of soil particles under the influence of different factors have been analyzed.

The study demonstrates that during the evolution of overlying karst collapse, the contact force between particles undergoes a series of changes, which can be described approximately as follows: equilibrium of stress–formation of stress arch–destruction of stress arch–equilibrium of stress again–····– fracture of stress arch. The internal stress of the soil body demonstrates the following pattern: compressive stress gradually decreasing, tensile stress gradually increasing, and tensile stress disappearing. Additionally, the surface subsidence and porosity of the soil body tend to increase in conjunction with the collapse evolution process. It can be observed that the larger the opening of the cave is, the greater the depth and range of surface subsidence become, which in turn increases the likelihood of collapse. A reduction in the thickness of an overburden layer may cause a more pronounced surface subsidence, thereby increasing the likelihood of collapse. Similarly, an elevated water level may contribute to a more rapid expansion of the soil cave, which in turn will cause a more pronounced surface subsidence and an increased propensity for collapse. The relationship between surface subsidence and thickness of overburden layer is not significant when the thickness of the latter is large. The study provides a comprehensive account of the karst collapse evolution from a mesoscopic perspective, offering insights into prevention and mitigation of karst collapse during the construction and operation of high-speed railways.

Key words covered karst, expansion of soil cave, particle flow, numerical simulation, dynamic evolution

(编辑 张玲)