

师海, 贾智磊, 白明洲, 等. 列车振动环境场覆盖型岩溶土洞塌陷的动力响应特性研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 328-339.

DOI: 10.11932/karst20250210

列车振动环境场覆盖型岩溶土洞塌陷的动力响应特性研究

师海^{1,2}, 贾智磊¹, 白明洲^{1,2}, 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)

摘要: 为揭示列车振动荷载作用下铁路周边覆盖型岩溶土洞动力响应特性, 以京沪高铁(江西段)某潜在岩溶塌陷点为研究对象, 通过离散元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, 建立列车振动环境场覆盖型下伏岩溶土洞的地面流固耦合模型, 从细观角度分析了不同振动荷载频率下塌陷区土体变形特征, 研究了列车振动环境场土体的动力响应过程。研究表明: 塌陷区土体颗粒的竖向速度、竖向位移、土体孔隙率与振动荷载频率之间的关系不明显, 土体应变率随振动频率增加而增大; 受列车振动环境场的影响, 塌陷区土体颗粒的竖向速度、竖向位移变化量相对更大, 动力特征更明显; 确定了残坡积层粉质黏土覆盖层区域列车运行引起的振动在土层中的影响范围, 当土洞距路基3 m时, 列车动荷载影响深度在5.25 m范围内。研究成果对揭示列车环境振动扰动下浅层地表岩溶塌陷的动力学机制有重要意义, 可为岩溶区铁路的运营安全和岩溶塌陷的防灾减灾提供科学依据。

关键词: 岩溶塌陷; 地质灾害; 列车振动; 数值模拟; 动态响应

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: P642.25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2025)02-0328-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国岩溶面积约占国土面积的1/3, 以滇、黔、桂等西南地区分布为典型, 其中岩溶塌陷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, 已经成为影响和制约岩溶地区社会和经济发展的主要地质问题之一^[1-4], 岩溶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, 因此岩溶塌陷防治工作具有复杂性和艰巨性。随着工程活动的增加, 岩溶

塌陷频现, 给人类的生产、生活造成严重威胁^[5-6]。高速铁路是我国经济建设的主要交通命脉, 铁路线路设计中因受坡度、曲线半径等限制, 不可避免地会通过岩溶溶隙、漏斗、溶孔、地下暗河等岩溶发育区, 我国仅西南岩溶区的高速铁路就达3 000 km以上。铁路沿线岩溶塌陷灾害为高铁安全建设、健康运营带来潜在威胁^[7-8]。据统计, 已建高速铁路位于岩溶塌陷高易发区达2 000多km, 尽管在岩溶区铁路工程建设期对基础工程一定范围内隐伏溶洞进行了一定程度的注浆处理, 但随着列车提速及牵引质量的

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: 2024-03-30

增大,列车对周围环境的振动势必增强,在列车振动和岩溶地下水等因素长期影响下岩溶区铁路沿线环境岩土体的力学性质和变形特性势必也会发生改变,逐渐形成新的隐伏土洞,甚至塌陷,影响铁路运营的安全。铁路沿线岩溶塌陷的问题日益增多,已成为亟待解决的科学问题。

迄今,国内外对岩溶塌陷机理的认识主要以潜蚀论、真空吸蚀论、气爆论、共振论、液化论等为主^[6,9]。地下水是岩溶塌陷主要致塌因素,地下水活动造成塌陷的类型各异,如地下水位频繁波动易导致地下洞穴产生和演变^[10],采矿活动引起岩溶管道堵塞致使岩溶水环境改变也会引发塌陷^[11],地下水动力的溶蚀作用可引起石膏采石场等发生塌陷^[12],工程活动抽排地下水同样可引发岩溶塌陷^[13]。针对地下水导致的塌陷,既有研究构建了诸多塌陷模型,如弱透水盖层岩溶塌陷物理模型,研究水—气压力致塌机理,分析不同盖层厚度、密度和水动力条件下的岩溶腔变形规律^[14];根据盖层性质、土体结构、力学性质的不同,构建“土洞型”、“沙漏型”和“泥流型”塌陷模型^[15]。随着工程活动的增加,振动荷载逐渐成为岩溶塌陷的主要诱发因素之一,振动荷载致塌的类型主要包括:列车振动与其他因素的耦合作用导致塌陷^[16],采矿爆破产生的振动波对岩溶地面塌陷的影响^[17];矿井区地下开采产生振动和地下水的共同作用^[18],冲孔桩等施工振动诱发覆盖层塌陷^[19],机械振动和地下水动力作用引起的岩溶塌陷^[20]。目前,对于动荷载致塌机理主要以爆破、地震、桩基施工、勘察钻探施工等诱发因素为主,不同于爆破、桩基施工、钻探施工等诱因的瞬态性,列车振动具有低频低幅、历时持久、双向振动等特点,随着我国高铁提速和重载铁路发展,列车振动强度势必增大,目前针对铁路工程环境振动作用下的塌陷动力学机制尚不清楚,列车环境振动和地下水等耦合作用下浅表岩溶塌陷的动力过程尚未全面量化深入研究,且对于塌陷全过程的土颗粒的迁移规律研究较少。

由于岩溶塌陷具有隐蔽性和突发性,目前主要通过解析法^[21-22]、物理模型试验法^[22-23]、和数值模拟法^[24-26]等研究动荷载对岩溶塌陷的影响。由于影响因素众多,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,不仅可考虑多因素耦合作用对岩溶塌陷的影响,

还可模拟塌陷演化全过程。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,但是土体是非连续介质,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、破坏全过程等,且忽视了塌陷过程岩土体的变化,塌陷过程岩土体的时间效应和细观特性缺乏足够的重视。

因此,本文以沪昆高铁(江西段)沿线某潜在塌陷区为研究对象,采用离散元方法(PFC)构建了岩溶地面塌陷区的地质模型,引入接触黏结模型,建立列车振动环境场下的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,构建列车振动环境场岩溶塌陷流固耦合模型,分析不同工况下列车运行引起的振动对塌陷的影响,从细观角度探究不同频率荷载作用对塌陷区土体变形特征的影响,分析列车振动环境场中土颗粒速度、迁移距离及应力变化规律。研究成果对铁路建设、运营期周围环境岩溶塌陷灾害的防治有重要理论价值和实际意义。

1 工程概况

本研究以沪昆高铁(江西段)沿线某潜在塌陷区段为研究对象(地貌形态如图1),构建了岩溶地面塌陷区的地质模型,开展了铁路沿线岩溶塌陷动态响应和变形特征研究。



图1 研究区岩溶地貌

Fig. 1 Karst landforms in the study area

1.1 工程地质概况

研究区位于江西省新余市分宜县,地处江西中部偏西,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^{el+dl} 粉质黏土、细角砾土、坡洪积层 Q^{dl+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,该地带基本处于第四系残坡积层 Q^{el+dl} 粉质黏土覆盖地区,地层岩土体的物理力学参数如表 1 所示,因此该区域岩溶地面塌陷多为土洞型塌陷,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,某塌陷坑与线路的位置关系如图 2。

表 1 地层岩土体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of stratum

名称	黏聚力/ kPa	弹性模量/ GPa	内摩擦角/ °	干密度/ $g \cdot cm^{-3}$
残坡积层粉质黏土	12		24	1.75
坡洪积层粉质黏土	10		25	1.82
灰岩		52	35	2.52

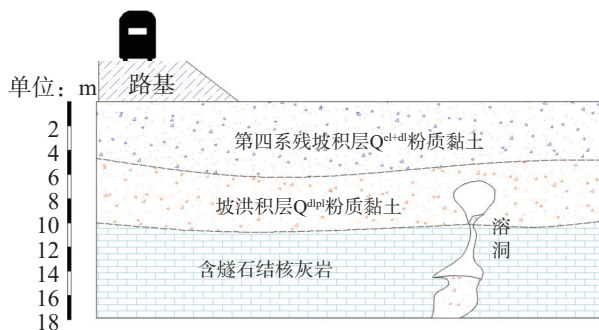


图 2 塌陷坑的剖面结构

Fig. 2 Profile structure of collapse pit

1.2 水文地质概况

研究区多年平均降水量为 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 300 m 处为一小水库,南北走向,长约 50 m,宽约 50 m,为山区冲沟水汇聚而成,据调查,水库易漏水,水量随季节变化影响较大。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 $0.13 m \cdot s^{-1}$,估算流量为 $2.15 \times 10^4 m^3 \cdot d^{-1}$ 。

2 数值模拟模型

2.1 接触模型

采用离散元方法对塌陷岩土体的变形模拟中,岩土体是由一系列的离散单元堆积而成,单元的运动按照牛顿运动方程,单元之间通过法向和切向的弹簧力相互作用。本文模拟岩土体塌陷过程,所采

用的单元接触关系如下^[27-28]:

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (1)$$

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad (2)$$

$$F_i^s = F_{i-1}^s - K^s \Delta U_i^s = F_{i-1}^s - K^s V_i^s \Delta t \quad (3)$$

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (4)$$

$$M_i = H_i \quad (5)$$

式中: F_i 表示总接触力; F_i^n 表示总接触力法向分量; F_i^s 表示总接触力切向分量; K^n 表示颗粒法向刚度; K^s 表示接触点切向刚度; U^n 表示接触的重叠量; n_i 表示接触面单位法向量; u_i 表示法向相对位移量; V_i^s 表示接触点速度切向分量; Δt 表示计算时步; m 表示颗粒质量; $\ddot{x}_i$ 表示颗粒中心位置; g_i 表示重力加速度; M_i 表示合力矩; H_i 表示颗粒角动量。

2.2 材料属性确定

离散元(PFC)软件中材料特性无法直接采用宏观力学参数描述,常需进行细观参数标定使得细观参数与宏观力学参数关联,本文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,采用不同粒径的颗粒进行参数标定,为表征塌陷区土体的各向异性,颗粒半径服从 Gauss 分布^[27,29],通过对颗粒不同参数的反复调试,确定颗粒粒径为 0.06 m 左右。为避免尺寸效应,确定双轴模型试样尺寸为 $8 m \times 16 m$,颗粒总数 5349 个。双轴压缩颗粒流模型如图 3。

通过 PFC 二维颗粒流模拟双轴压缩模型的剪切试验,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,多次试算后,确定如表 2 中的细观参数。模拟了 100 kPa、200 kPa 和 500 kPa 围压下的应力-应变,确定出塌陷土体的黏聚力 $c=12 kPa$,内摩擦角 $\varphi=24^\circ$ (图 4),结果与室内试验结果相近,数值模拟结果与室内试验在低围压时,应力-应变曲线变化趋势一致,随着围压的增加,数值模拟结果呈现软化特性,但室内试验结果与数值模拟相反,这是由于数值模拟采用的颗粒形状都为刚性的圆球,颗粒的排列方式单一,颗粒间相互的咬合力较弱,与实际土颗粒有一定的差异,这一规律与文献中的一致^[29],数值模拟应力-应变曲线整体变化趋势基本一致。

2.3 模型建立

考虑计算机计算性能、模型精度和尺寸效应,

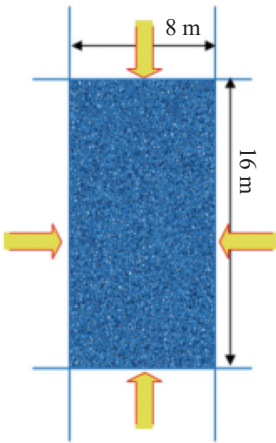


图 3 双轴试验模型
Fig. 3 Biaxial test model

表 2 平行粘结模型细观参数标定
Table 2 Microscopic parameters of parallel bond model

平行粘结模型 细观参数	符号	单位	数值
颗粒密度	density	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 800
颗粒最小半径	rdmin	m	0.06
最大最小半径比	Kratio		3.0
湿度	damp		0.7
孔隙率	porosity		0.28
有效模量	emod	Pa	1e8
刚度比	Kratio		1.25
凝聚力	pb_coh	Pa	1e4
抗拉强度	pb_ten	Pa	1e5
内摩擦角	pb_fa	$^{\circ}$	25
粘结间隙	bond gap	m	0.001 2
摩擦系数	fric		0.5

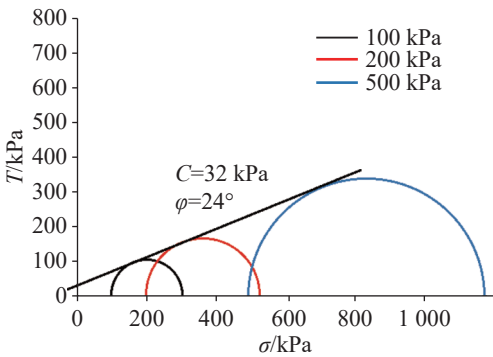


图 4 不同围压下应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves under different confining pressures

PFC^{2D} 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, 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^[30-32]。墙体采用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, 依次循环执行分层直到指定高度, 使颗粒的最大不平衡接触力接近 0, 最后施加重力平衡, 数值模拟示意如图 5。

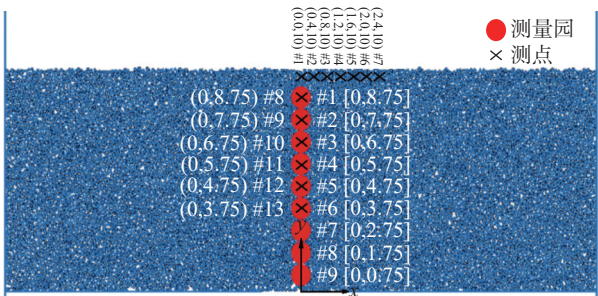


图 5 数值模型及测点布置图
Fig. 5 Numerical model and measuring points

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, 其基本思想为假定颗粒间接触处分布有供流体流动的细观管道(即 pipe, 管道), 管道构成了流体流动网络。同样假定流体存在储存位置“域”, 域的体积与周围管道尺寸相关, 域中流体压力随迭代计算而变化, 每步计算均将压力作为等效作用力作用在环绕域的颗粒上。管域模型耦合机制如图 6。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 7, 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^[33]。

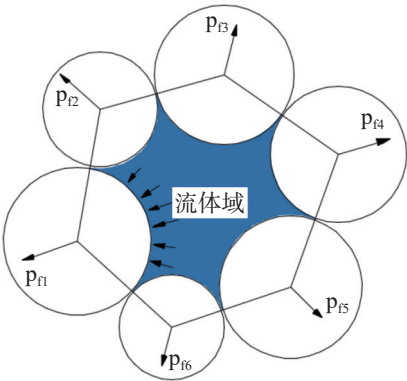


图 6 管域模型耦合机制
Fig. 6 Pipe domain model coupling mechanism

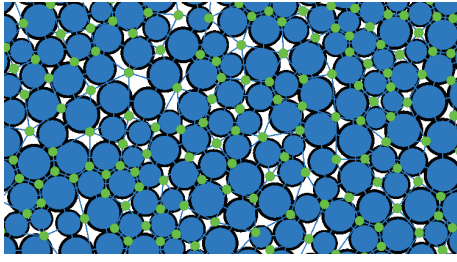


图7 流固耦合管域模型

Fig. 7 Fluid-Structure Interaction (FSI) pipe domain model

为研究列车动荷载对岩溶土洞塌陷的动力响应,基于已建立的覆盖型岩溶塌陷流固耦合模型,在黏性土颗粒顶部定义的 clump(即内部球体无相对运动的刚性体)上施加相应的力,来实现振动荷载的添加。动荷载施加示意图如图 8。借助 PFC 软件中的 Fish 语句,向 clump 输入相应加速度函数,通过 clump 与 ball 之间接触力的传递来模拟列车动荷载对岩溶场地的振动影响。

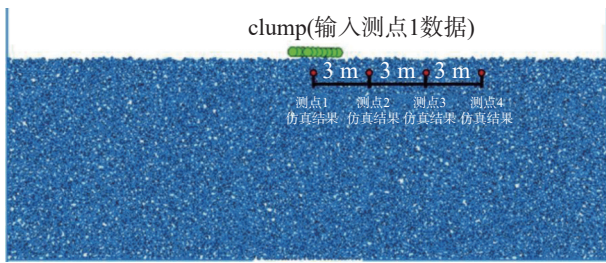


图8 振动荷载施加示意图

Fig. 8 Schematic diagram of vibration load application

通过对定义的 clump 荷载施加随时间变化的不同振动频率建立正交试验。

列车荷载的确定根据常用的简化列车荷载的表达式^[34]来确定:

通过对定义的 clump 荷载施加随时间变化的不同振动频率建立正交试验。

列车荷载的确定根据常用的简化列车荷载的表达式^[34]来确定:

$$F(t) = k_1 k_2 (P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t) \quad (6)$$

式中: k_1 为列车相邻轮轨间的叠加系数,一般为 1.2~1.7, 本文取 1.54; k_2 为钢轨、轨枕对列车荷载的分散系数,一般为 0.6~0.9, 本文取 0.65。轴重取 15 t, 单边静轮 $P_0=75$ kN。 $P_i (i=1,2,3)$ 为列车运行过程对应的低、中、高三频率下的振动荷载幅值,一般为:

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2 \quad (7)$$

弹簧下质量 $M_0=750$ kg, 对于低、中、高频 3 种条件下轨道不平顺振动波长和相应的失高值, $L_1=10$ m, $a_1=0.35$ mm, $L_2=2$ m, $a_2=0.4$ mm, $L_3=0.5$ m, $a_3=0.05$ mm; $\omega_i (i=1,2,3)$ 为列车运行时,振动的圆频率,根据公式(3)可知:

$$\omega_i = 2\pi \frac{v}{L_i} \quad (8)$$

根据依托工程的设计速度,当列车速度为 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,采用列车荷载模拟方法模拟出的击振力函数如图 9。

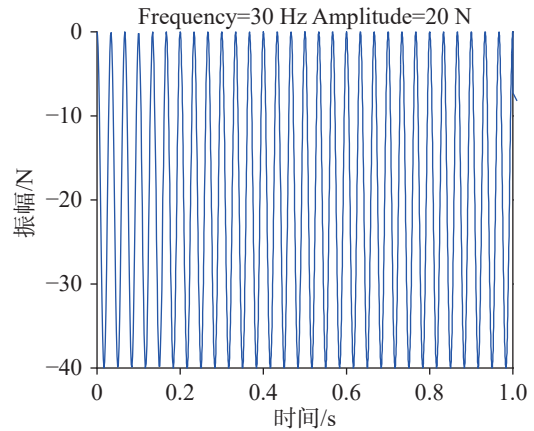


图9 列车振动荷载-时间曲线

Fig. 9 Train vibration load-time curve

根据列车振动波现场的频域分析,列车振动优势频率为 10~50 Hz。因此,选取 10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz 四种振动频率,通过对定义的 clump 施加随时间变化的频率的列车荷载建立正交试验,分析振动频率对塌陷变形特征的影响。

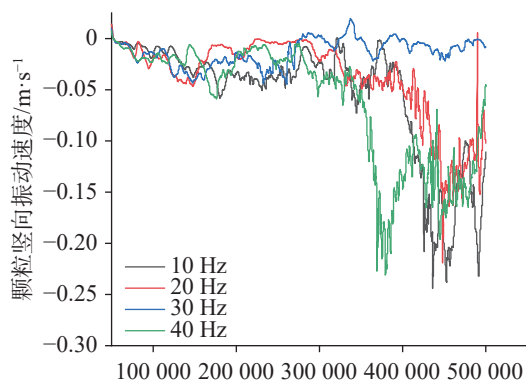
3 数值模拟结果分析

为探究列车动荷载作用产生的振动波对塌陷区土体的动力特性,采用离散元方法分析不同振动频率对塌陷土体变形特征的影响。

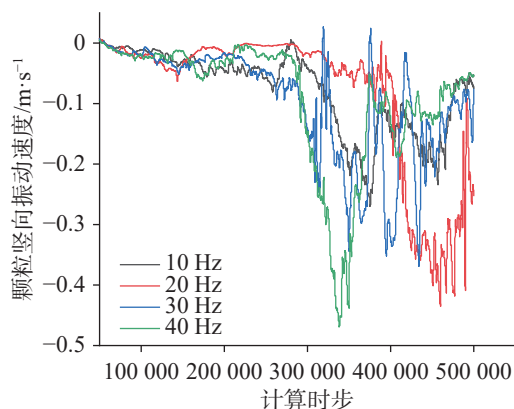
3.1 塌陷过程土洞位置土体特征分析

3.1.1 土颗粒竖向速度的变化

不同频率动荷载作用下测点竖向速度时程曲线(图 10)(因篇幅仅列测点 7 和 9)。由图 10 可知,振动荷载初始阶段,振动频率对测点竖向速度影响不大,随着土洞的发展,测点竖向速度随振动频率变化显著。以测点 11 为例,10~40 Hz 对应的最大竖



(a) 测点 7



(b) 测点 10

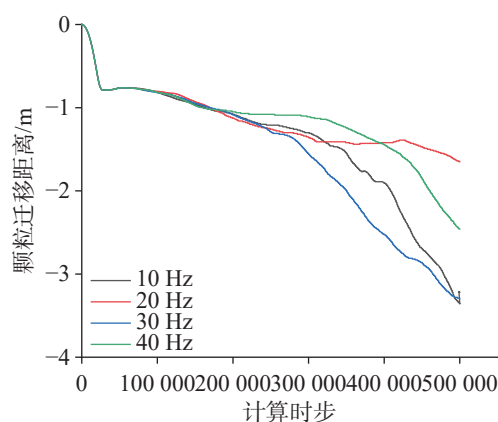
图 10 不同加载频率下土颗粒竖向速度变化

Fig. 10 Vertical velocity variation of soil particles under different loading frequency

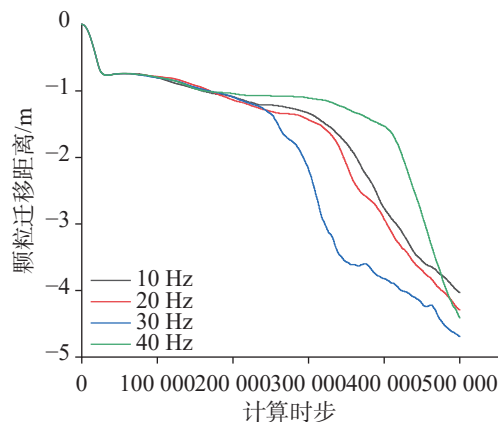
向速度分别为 $0.432 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.435 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.439 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.469 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同一由于土颗粒的速度与其位置、颗粒间相互作用力、力链分布等有关。不同频率的振动会导致一定范围内塌陷土体土颗粒速度的变化,造成塌陷土体间应力、结构等变化,长期振动干扰将加快土洞扩展。

3.1.2 土颗粒水平迁移规律

不同振动频率下测点处土颗粒的迁移距离时程曲线(图 11)。由图 11 可知塌陷初始阶段,振动频率对测点土颗粒迁移距离变化不大,随着塌陷的发展,测点土颗粒迁移距离随振动频率变化显著。以图 11-b 为例,10~40 Hz 分别对应的测点最大迁移距离分别为 4.21 m、4.35 m、5.52 m、4.81 m。不同振动频率下一定范围内塌陷土体土颗粒迁移距离发生变化,造成塌陷土体间应力、结构等变化,长时间持续干扰则会加快土洞扩展。



(a) 测点 7



(b) 测点 9

图 11 不同加载频率下颗粒迁移距离变化

Fig. 11 Variation of migration distance of soil particles under different loading frequency

3.1.3 孔隙率的变化规律

不同振动频率下测量圆内部土体孔隙率变化时程曲线(图 12)(以测量圆 4 和测量圆 6 为例)。由图 12 可知,在塌陷初始阶段,不同测点处土体孔隙率波动微小,由于振动能量较小,未造成土体发生明显扰动。到塌陷后期,由于土洞向上扩展,造成上部土体扰动,孔隙率变化明显,由于孔隙率变化受到土层性质、土层的埋深、距离溶洞开口的位置、振动时间及振动在土层中的衰减特征等影响,测量圆 4 和测量圆 6 呈现明显的孔隙率趋势和幅度变化差异。测量圆 4 位置,埋深距离孔口为 5.75 m 位置,正好位于残坡积层粉质黏土和坡洪积层粉质黏土的土层分界面处,由于土颗粒的振动和环境的振动发生共振,在振动频率为 30 Hz 计算步达到 23 000 次时,孔隙率发生陡增,此时易促进塌陷。测量圆 6 位于距离孔口为 3.75 m 位置,正好位于探测到土洞的顶部,在振动频率为 10~30 Hz 时,分别在不同的计算步时达

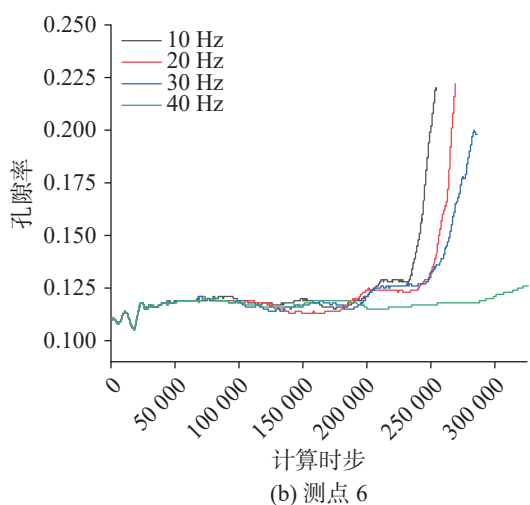
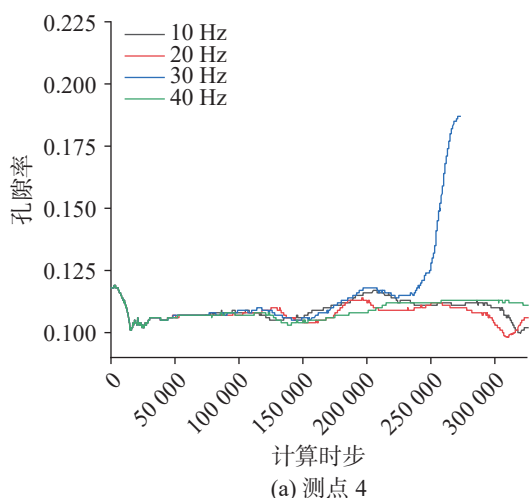


图 12 不同加载频率下孔隙率变化

Fig. 12 Variation of porosity under different loading frequency

到土颗粒的振动和环境的振动发生共振,使得孔隙率发生陡增,易促进塌陷。因此,孔隙率一定程度上反映了土体间的结构、应力状态与力链分布等,振动波传到土层中能量虽小,但在长期作用下会破坏土体结构,加剧塌陷。

3.2 覆盖层土体动力响应特性

3.2.1 土洞距铁路路基水平距离

距离路基不同位置处土洞在列车振动荷载作用下的动力响应应具有十分重要的意义。研究土洞距铁路路基 3 m、6 m、9 m、12 m 工况下土洞塌陷过程中的变形特征与动力响应等(模型溶洞开口大小均为 4 m、覆盖层厚度均为 10 m,地下水位高度均为 10 m),如图 13 所示(由于文章篇幅原因仅显示 3 m 和 9 m 时动力响应曲线)。

由图 13 可知,在初始阶段,测点竖向速度幅值

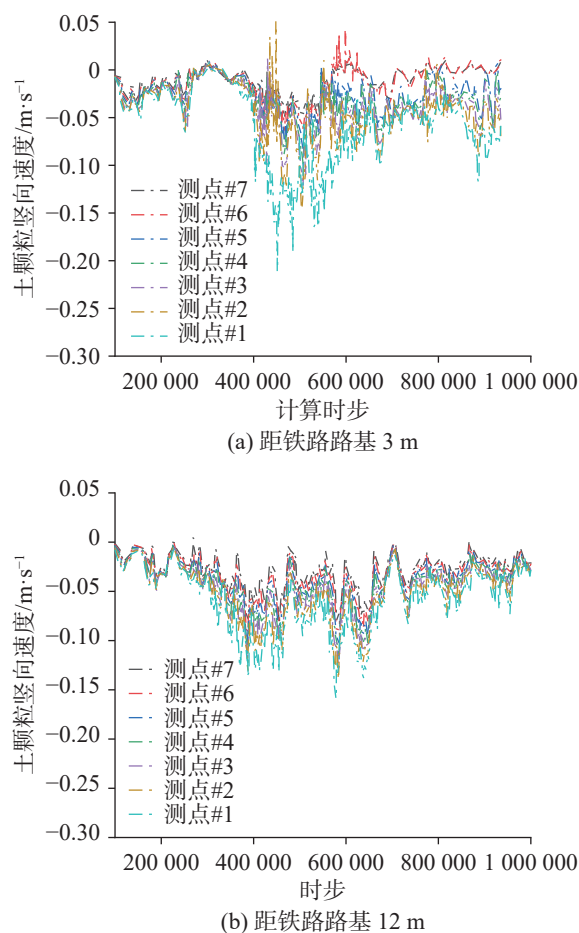


图 13 振动作用下测点土颗粒竖向速度变化

Fig. 13 Vertical velocity variation of soil particles at measurement points under vibration

在 $0.0\sim 0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 内波动。随着塌陷进程的发展,各工况下测点竖向速度逐渐增大,距溶洞开口水平距离越近的测点速度变化越明显。但随着塌陷进程的发展,土洞不断剥蚀扩展造成上方土体扰动,加上列车振动荷载对扰动土体结构的破坏,表层土颗粒发生明显沉降且沉降速率越来越快。

图 13 对比分析可知,各工况下测点竖向速度幅值随土洞距铁路路基的距离增加而逐渐减小,测点竖向速度幅值空间变化曲线如下图 14 所示。由图 14 可知,当土洞距铁路线距离由 3 m 增加到 9 m 时,测点竖向速度幅值逐级发生衰减,由 $0.221\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $0.178\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 衰减了 19.5%,由 $0.178\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $0.152\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 衰减了 14.6%。可以发现土洞距铁路路基距离越近,列车振动荷载对土洞不利影响越大。当距铁路路基距离在 9 m 以上时,地表各测点监测结果保持一致,反映出列车振动荷载有效作用长度在距铁路路基 9 m 内。

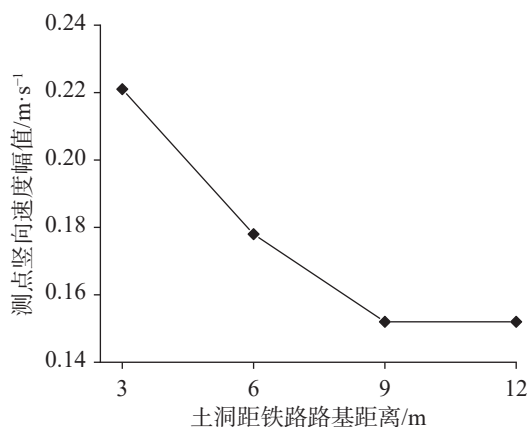


图14 测点竖向速度幅值空间变化曲线

Fig. 14 Spatial variation curve of measure points vertical velocity amplitude

3.2.2 覆盖层土体颗粒速度

为研究列车振动荷载对铁路沿线岩溶塌陷区覆盖层土体颗粒速度的影响,以土洞距铁路路基3 m为例,分析了振动荷载作用下地表测点竖向速度变化规律,由图13a可知,列车振动环境场下测点竖向速度大小与距溶洞开口中心水平距离大小表现出负相关关系,距离越远,测点竖向速度越小。振动环境场下对应测点最大竖向速度为 $0.204 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。列车振动荷载对塌陷前期的土体影响很小,随着土洞的向上扩展,列车振动荷载下土颗粒速度增大,加剧塌陷发生。

3.2.3 覆盖层土体颗粒迁移

为研究列车动荷载对铁路沿线岩溶塌陷区覆盖层土体颗粒迁移的影响,分析了振动荷载作用下地表测点迁移距离变化规律,由图15可知,列车振动环境场测点迁移距离大小与距溶洞开口中心水平距离大小表现出负相关关系,距离越远,测点迁移距离越小。振动环境场下对应测点迁移距离可达5.68 m。列车振动荷载对塌陷前期的土体影响很小,随着土洞的不断向上扩展,列车振动荷载在土体传播过程中不断影响改变土颗粒位移而加剧破坏过程。

3.2.4 覆盖层土体动应力

为研究列车动荷载对铁路沿线岩溶塌陷区覆盖层土体动应力的影响,分析了振动荷载作用下测量圆内土体竖向应变的变化规律,由图16可知,列车振动会加快土体变形速率,加快土体结构破坏,更易发生岩溶地面塌陷。列车振动环境场下土体应变率

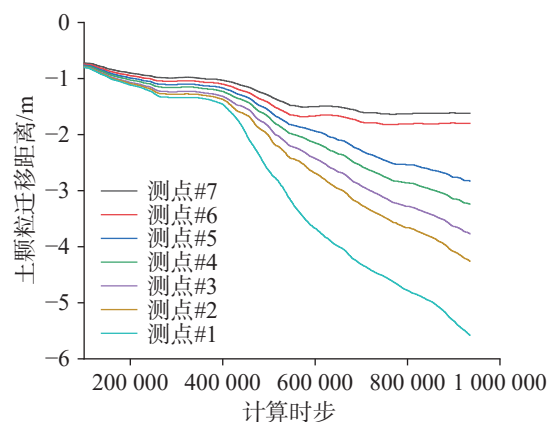


图15 振动荷载作用下土颗粒迁移距离

Fig. 15 Migration distance of soil particles under vibration loading

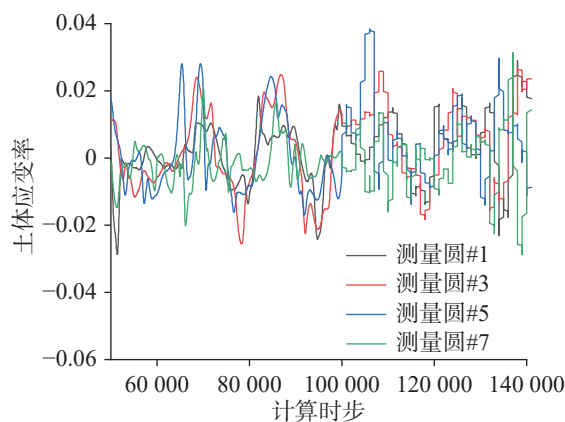


图16 振动荷载作用下土体竖向应变率

Fig. 16 Vertical strain rate of soil under vibration loading

曲线趋于一致,列车运行引起的环境振动在土中有效作用深度在5.25 m以内(测量圆#5坐标[0, 4.75]),这也与相关文献^[35]的规律一致:地下2 m深处振动加速度量值仅为地表的20%~50%,4 m深处振动加速度量值仅为地表的10%~30%。

由图13-图16可知,塌陷区土体颗粒的竖向速度、竖向位移、土体孔隙率与振动荷载的频率之间的关系不明显,但从图17中可知,以测量圆#3为例,土体应变率随振幅的增大而增大。

4 结论

以沪昆高铁(江西段)沿线某塌陷点为依托,采用颗粒流 PFC^{2D} 计算软件,选取 Ball-Wall 方法建模,采用接触黏结模型,基于管域模型流体理论构建了列车振动环境场覆盖型下伏岩溶土洞地面的流固耦合模型,从细观角度分析了不同振动荷载频率对塌

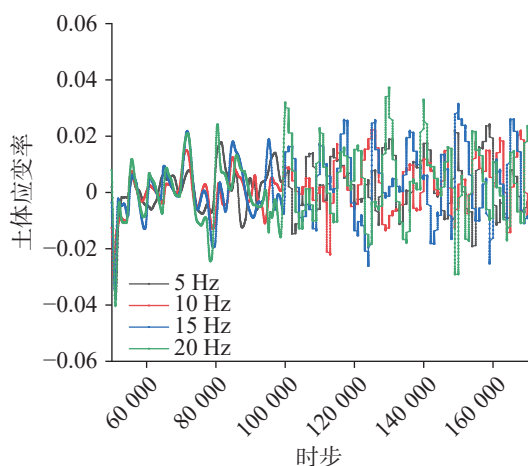


图 17 不同振动频率下土体竖向应变率变化

Fig. 17 Vertical strain rate under different vibration frequencies

陷区土体变形特征的影响,研究了列车振动环境场土体的动力响应过程。主要结论如下:

(1)列车运行引起的环境振动会改变土体的结构、应力等,在长期作用下会加剧塌陷的发生。

(2)塌陷区土体颗粒的竖向速度、竖向位移、土体孔隙率与振动荷载的频率之间的关系不明显,土体应变率随频率的增大而增大。

(3)确定了残坡积层粉质黏土覆盖层区域列车运行引起的环境振动在土层中的影响范围,当距铁路路基 3 m 时,列车动荷载影响深度在 5.25 m 范围内。

参考文献

- [1] Bai Haibo, Ma Dan, Chen Zhanqing. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars[J]. *Engineering Geology*, 2013, 3: 103-124.
- [2] 李海涛,陈邦松,杨雪,胡伏生,房浩.岩溶塌陷监测内容及方法概述[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(1): 126-134.
LI Haitao, CHEN Bangsong, YANG Xue, HU Fusheng. Review on monitoring contents and methods for karst collapse[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(1): 126-134.
- [3] 张严,朱武,赵超英,韩炳权.佛山地铁塌陷 InSAR 时序监测及机理分析[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1167-1177.
ZHANG Yan, ZHU Wu, ZHAO Chaoying, HAN Bingquan. Monitoring and inversion of Foshan metro collapse with multi temporal InSAR and field investigation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1167-1177.
- [4] 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.
- [5] 唐万春,许模,于贺艳.武广客运专线英德段岩溶塌陷发育规律研究[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(4): 699-704.
TANG Wancun, 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.
- [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,王宇斌,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] 王涛,施斌,马龙祥,张超,邓永锋.粉细砂地层对地铁列车荷载的动力响应及长期变形研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1411-1418.
WANG Tao, SHI Bin, MA Longxiang, ZHANG Chao, DENG Yongfeng. Dynamic response and long term cumulative deformation of silty sand stratum induced by metro train vibration loads[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1411-1418.
- [9] 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.
- [10] F Gutiérrez, M Parise, J D Waele, H Jourde. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 138: 61-88.
- [11] Anchuela Ó P, Miguel G S, Bádenas B, et al. Evaluation of pinnacle reef distribution at shallow subsurface using integrated geophysical methods: A case study from the upper Kimmeridgian (Spain)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 329-334.
- [12] Kaufmann G, Romanov D. Structure and evolution of collapse sinkholes: combined interpretation from physico-chemical modelling and geophysical field work[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 9: 688-698.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 程星, 黄润秋. 铁路振动及其在岩溶塌陷中的致塌力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 12: 2062-2066.
- CHENG Xing, HUANG Runqiu. Study on train-induced vibration and its influence on karst collapse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 12: 2062-2066.
- [17] 陈学军, 余思喆, 宋宇, 李佳明, 陈议城, 陈李洁, 赵志永, 杨越. 采矿爆破振动波在岩溶区的传播影响因素分析[J]. 地质力学学报, 2018, 24(5): 692-698.
- CHEN Xuejun, YU Sizhe, SONG Yu, LI Jiaming, CHEN Yicheng, CHEN Lijie, ZHAO Zhiyong, YANG Yue. Analysis of factors influencing the propagation of mining blasting vibration wave in karst area[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(5): 692-698.
- [18] Xia K Z, Chen C X, et al. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 129-147.
- [19] 熊志涛, 刘鹏瑞, 杨涛, 邵勇. 江夏法泗岩溶塌陷区冲孔桩施工引发岩溶塌陷的成因机理[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 120-129.
- XIONG Zhitao, LIU Pengrui, YANG Tao, SHAO Yong. Mechanism of karst collapse caused of punching pile construction in Jiangxia fasi karst collapse area[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 120-129.
- [20] 贾继成, 孟宪洲, 白平. 滕州荆泉水源地岩溶塌陷特征与成因分析[J]. 山东国土资源, 2018, 34: 41-46.
- JIA Jicheng, MENG Xianzhou, BAI Ping. Analysis and characteristics and orings of karst collapse in Jingquan water source in Tengzhou[J]. Shangdong Land and Resources, 2018, 34(6): 41-46.
- [21] 余政兴, 金福喜, 段选亮. 河床透-阻型岩溶塌陷形成机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 57-66.
- YU Zhengxing, JIN Xuxi, DUAN Xuanliang. Formation mechanism of karst collapse with unconfined aquifer-aquited system in riverbed[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 57-66.
- [22] 李卓俊, 蒙彦, 董志明, 贾龙, 潘宗源, 管振德, 周富彪. 土洞型岩溶塌陷发育过程气体示踪试验研究: 以广州金沙洲为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 238-245.
- LI Zhuojun, MENG Yan, DONG Zhiming, JIA Long, PAN Zongyuan, GUAN Zhende, ZHOU Fubiao. Experimental study of gas tracer simulation of karst collapse development process: An example of Jinshazhou, Guangzhou[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 238-245.
- [23] 李才华, 窦鹏冲. 岩溶地面塌陷致塌机理的物理模型试验分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(增2): 239-242.
- LI Chaihua, DOU Pengchong. Physical model test analysis of the collapse mechanism of karst ground[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(Sup.2): 239-242.
- [24] 王飞, 柴波, 徐贵来, 陈龙, 熊志涛. 武汉市岩溶塌陷的演化机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 824-832.
- WANG Fei, CHAI Bo, XU Guilai, CHEN Long, XIONG Zhitao. Evolution mechanism of karst sinkholes in Wuhan city[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 824-832.
- [25] 魏子钧. 动静荷载作用下岩溶塌陷易发区高速铁路路基稳定性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- WEI Zijun. Stability analysis of high-speed railway subgrade in karst collapse prone area under dynamic and static load[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [26] 陈凯, 葛颖, 张全, 陈砺锋, 刘智奇. 基于离散元模拟的巨厚煤层分层开采覆岩裂隙演化分形特征[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1113-1120.
- CHEN Kai, GE Ying, ZHANG Quan, CHEN Lifeng, LIU Zhiqi. Discrete element simulation for crack fractal evolution laws associated with slicing mining in super thick coal stratum[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 1113-1120.
- [27] 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 Shuijiang. Calibration method and sensitivity analysis of micromechanic parameters for limestone based on particle flow[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [28] 周剑, 王彦兵, 张路青, 金永军, 涂新斌. 基于离散颗粒模型的岩体结构面动-静态刚度系数对比的数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 25-33.
- ZHOU Jian, WANG Yanbing, ZHANG Luqing, JIN Yongjun, TU Xinbin. Numerical study on dynamic static stiffness coefficient of rock fractures based on discrete particle model[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 25-33.
- [29] 许江波, 曹宝花, 余洋林, 骆永震. 基于 PFC^{3D} 的黄土三轴试验细观参数敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1342-1353.
- XU Jiangbo, CAO Baohua, YU Yanglin, LUO Yongzhen. Sensitivity analysis of meso parameters in loess triaxial test based on PFC^{3D}[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1342-1353.
- [30] 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[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 218-222.
- [31] 朱遥, 刘春, 刘辉, 黄福欢, 秦岩, 邓尚. 颗粒形态对砂土抗剪强度影响的试验和离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 490-499.
- ZHU Yao, LIU Chun, LIU Hui, HUANG Yehuan, QIN Yan,

- DENG Shang. Experiment and discrete element numerical simulation for influence of particle morphology on shear strength of sand[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 490-499.
- [32] 雷晓丹, 杨忠平, 翟航, 胡元鑫. 土石混合体块石破碎影响因素的颗粒流数值研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1193-1204.
- LEI Xiaodan, YANG Zhongping, ZHAI Hang, HU Yuanxin. Particle flow numerical research on factors influencing rock block breakage characteristics of soil rock mixtures[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1193-1204.
- [33] 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 srching for unloading structure of high-filled cut-and-cover tunnel based on DEM[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [34] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 铁路隧道提速列车振动测试与荷载模拟[J]. *振动与冲击*, 2005, 24(3): 99-102, 107, 10.
- WANG Xiangqiu, YANG Linde, GAO Wenhua. In site vibration measurement and load simulation of the raising speed train in railway tunnel[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2005, 24(3): 99-102, 107, 10.
- [35] 白明洲, 宋雷鸣. 高速铁路环境保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
- BAI Mingzhou, SONG Leiming. Environmental protection of high-speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021

Study on the dynamics response characterstics of covered soil-cave type karst collapse under train vibration environment

SHI Hai^{1,2}, JIA Zhilei¹, BAI Mingzhou^{1,2}, 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)

Abstract Karst collapse represents a significant geological hazard, predominantly occurring in regions characterised by the presence of soluble rock formations, including carbonate rocks, calcareous clastic rocks and salt rocks, among others. Karst collapse are characterised by three key features, a hidden spatial distribution, a sudden onset and periodic recurrence over time. These attributes collectively pose a considerable challenge for the construction of major infrastructure projects in karst areas. The karst collapse disaster along the railway has the potential to pose a significant threat to the safe construction and sustained operation of the high-speed railway project. The extraction and discharge of groundwater, along with the alteration of hydrodynamic conditions during both the construction and operational phases of the railway in the karst area, have been identified as key factors contributing to the karst collapse. The most prevalent numerical simulation method is the Finite Element Method (FEM), which is predicated on the assumption of a continuous medium. The FEM involves replacing a complex problem with a simpler one and then solving it. It views the solution domain as consisting of a number of small interconnected sub-domains called finite elements, assumes a suitable (simpler) approximate solution for each element, and then deduces the conditions that are satisfied for solving the domain in general. However, soil is not a continuous medium, and a model based on the FEM is unable to simulate the local instability of a collapsed soil body, the mesoscopic-scale damage process, 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 cavities 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 (PFC2D) compression test, which also introduced a contact bonding model. This model assumed that the filler in the cavern is entirely washed away due to the erosive effect of groundwater seepage. Additionally, the vacuum suction and erosion effect inside the cavern were not considered during the simulation period. The effect of groundwater on soil strength is 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 elucidates the dynamic evolution process and deformation characteristics of karst collapse from a mesoscopic view. Furthermore, the influence of varying cavern opening sizes,

overburden layer thickness and water table height on the deformation characteristics of the overlying karst collapse has been investigated, as well as the migration law of soil particles under the influence of different factors.

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, 'stress equilibrium–stress arch formation–stress arch destruction–stress equilibrium again–···–stress arch fracture'. The internal stress of the soil body demonstrates a pattern of '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 cavern, the greater the depth and range of ground subsidence, which in turn increases the likelihood of collapse. A reduction in the thickness of the cover layer results in a more pronounced surface subsidence, thereby increasing the likelihood of collapse. Similarly, an elevated water table leads to a more rapid expansion of the soil hole, which in turn causes a more pronounced surface subsidence and an increased propensity for collapse. The relationship between surface settlement and cover layer thickness is not significant when the latter is of greater thickness. The study provides a comprehensive account of the karst collapse evolution process from a mesoscopic perspective, offering insights that can inform disaster prevention and the mitigation of surrounding karst collapse risks during the construction and operation of high-speed railway projects.

Key words karst collapse, geological hazard, train vibration, numerical simulation, dynamics response

(编辑 张玲)

(上接第 299 页)

allowing it to dissolve in geothermal water. Consequently, radon migrates and accumulates along the fracture zone. Regional seismic activities and the release of tectonic stress help to intensify the damage and fracturing of rocks, enhancing the radon exhalation ability. The relationship between hydrogen and oxygen isotopes shows that geothermal water is mainly recharged by atmospheric precipitation and is formed following the deep circulation and heating of groundwater through the karst-fault system. Its heat source exhibits the characteristics of a four-element heat accumulation: deep-circulating hydrothermal convection in the fracture zone serves as the main heat source, supplemented by the conduction of terrestrial heat flow, heat generated by seismic friction, and heat generated by the decay of radioactive elements.

In conclusion, the formation of the Anjiazhuang geothermal radon spring is the result of the synergistic effect of multiple factors including structure, hydrology and geochemistry, the structure system of the Anjiazhuang fault is not only the channel for radon migration and enrichment, but also provides the dynamic conditions for the exhalation of radon in rocks; the underlying uranium-rich granite and the uranium mineralization zone distributed along the fracture lay the material foundation, and deep-circulating hydrothermal convection and multi-source thermal effects jointly drive the evolution of geothermal water. This study systematically elucidates the multi-source synergistic genetic mechanism of radon enrichment in karst geothermal radon spring, providing a scientific basis for the exploration, development and utilization of similar geothermal resources.

Key words geothermal radon spring, compound hot ore water, four-element heat accumulation, fault structure, S-type granite

(编辑 黄晨晖)