

## 交通荷载对底部隐伏溶洞的动力响应分析\*

张军<sup>1</sup>, 蔡虎宇<sup>1</sup>, 廖鑫捷<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.深圳市综合交通设计研究院有限公司, 广东 深圳 518110)

**摘要:** 隧道底部存在隐伏溶洞对隧道施工和运营都有较大影响, 可能造成围岩失稳和路面塌陷。文中运用 MIDAS-NX 建立数值计算模型, 分析张桑(张家界—桑植)高速公路白龙庵隧道运营过程中受到交通荷载作用时底部隐伏溶洞的动力响应及对隧道结构稳定性的影响, 并与静力响应进行对比, 为岩溶隧道设计、施工提供借鉴。

**关键词:** 隧道; 隐伏溶洞; 交通荷载; 动力响应; 围岩稳定性

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0135-04

公路隧道修建过程中难免要穿越岩溶区域。针对隧道底部隐伏溶洞导致的安全隐患, 文献[2-3]对岩溶地区隧道由于溶洞的存在而引发的附近地表沉降进行了分析; 文献[4]指出防突层的整体性和岩溶水压大小是导致防突层破坏的主要原因; 文献[5]建立了岩溶地区隧道底板的最小安全厚度理论计算公式; 文献[6]通过隧道位移和结构内力来评定岩溶隧道的结构稳定性; 文献[7]运用 FLAC<sup>3D</sup> 软件分析了不同大小溶洞对隧道围岩应力及变形的影响; 文献[8]运用有限元软件 ABAQUS 对围岩受力和位移的变化进行了数值分析; 文献[9]通过现场监测、数值模拟对高水压下岩溶隧道支护结构的受力特征进行了分析。虽然近些年来诸多学者对岩溶隧道的位移展开了研究, 但关于岩溶隧道在交通荷载作用下的稳定性分析较少。该文结合湖南张桑(张家界—桑植)高速公路白龙庵隧道, 运用 MIDAS-NX 软件进行计算分析, 研究交通荷载作用下隧道围岩应力与位移的变化, 分析隐伏溶洞不同间距对隧道围岩稳定性的影响。

## 1 交通荷载的简化与确定

早期研究将交通荷载简化为静止土柱来考虑, 忽视了交通荷载的动态性对地基的影响; 后来逐渐关注到交通荷载对地面沉降的影响, 确定车轮与路面的接触面积, 通过轴载换算将交通荷载模拟成移动荷载进行计算; 再后来就是考虑车辆荷载在运动过程中造成的振动性, 将交通荷载等效为恒载作用、

移动恒载作用、半波正弦荷载作用等进行分析。但由于交通荷载本身速度与质量的多样性及地基参数的差异性等, 目前对交通荷载对路基受力、位移等的影响还没有具体界定。

采用 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中的标准轴载设计参数, 单轮传压面圆半径  $d = 21.30 \text{ cm}$ , 单个轮胎竖向荷载为  $25 \text{ kN}$ , 轮胎接地压强为  $0.7 \text{ MPa}$ 。标准轴载 Bzz—100 两轮中心距为  $1.5d$ , 轴距为  $2.0 \text{ m}$ , 荷载对称作用在道路两侧, 隧道内交通荷载作用位置见图 1。将交通荷载等效成一种简单正弦荷载, 在分析时段内的任意时刻  $t$ , 作用于某一点的交通荷载可换算为在该点正上方的半正弦荷载。假定整个分析时段为  $T_a$ , 半正弦荷载作用时间为  $T$ , 则车辆荷载与时间的关系为:

$$\begin{cases} q = q_{\max} = \sin \left| \frac{\pi t}{T} \right|, & 0 \leq t \leq T \\ q = 0, & T < t \leq T_a \end{cases}$$

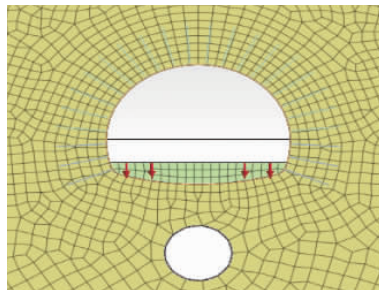


图 1 车辆荷载作用示意图

取荷载作用时间  $T = 0.057 \text{ s}$ , 分析时段  $T_a = 0.2 \text{ s}$ , 时间步长为  $0.025 \text{ s}$ , 车辆行驶速度  $v = 80$

\* 基金项目: 湖南省交通科技项目(201435)

km/h,分析时程内车辆荷载函数曲线见图2。

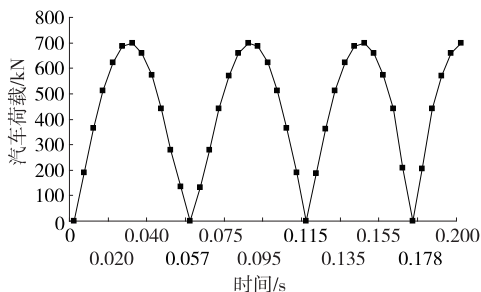


图2 车辆荷载函数曲线

## 2 有限元模型的建立

运用 MIDAS-NX 建立白龙庵隧道数值计算模型,模型设计参数依据 V 级围岩相关参数和隧道设计参数选取。由于隧道为双向两车道,采用对两车道路面施加集中力的方式模拟交通荷载对隧道的作用力,集中力通过软件运用正弦函数施加时程荷载函数来模拟。网格模型见图3。

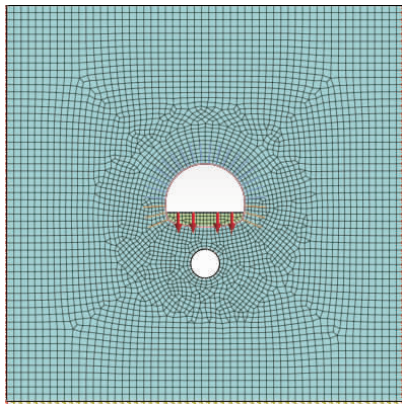


图3 隧道有限元模型网格图

白龙庵隧道仰拱采用 40 cm 厚 C25 砼,路面采用复合路基材料,主要为 20 cm 厚 C20 砼基层、24 cm 厚连续配筋砼层。钢筋砼的弹性模量按经验公式  $(E_s A_s + E_c A_c) / (A_s + A_c)$  计算 ( $E_s$ 、 $E_c$  分别为钢筋和砼的弹性模量;  $A_s$ 、 $A_c$  分别为钢筋和砼的截面积),其他参数依据表1选取。

表1 力学参数

材料或结构	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	厚度或直 径/mm
V 级围岩	1.0	0.45	20	—
初期支护(C25)	23.0	0.20	22	24
锚杆	210.0	0.30	77	25
二次衬砌(C25)	29.5	0.20	23	45
路面材料	28.0	0.20	25	50

## 3 数值模拟分析

取溶洞半径  $R=2\text{ m}$ ,分析溶洞顶部距隧道底部距离  $L$  为 1 m、3 m、5 m、7 m 时,在动载和恒载作用下溶洞顶部位移和隧道位移、应力分布。

### 3.1 隧道不同部位的位移与时间关系分析

溶洞位于隧道拱底不同位置时,交通荷载作用下隧道各部位的位移时程曲线见图4~7。

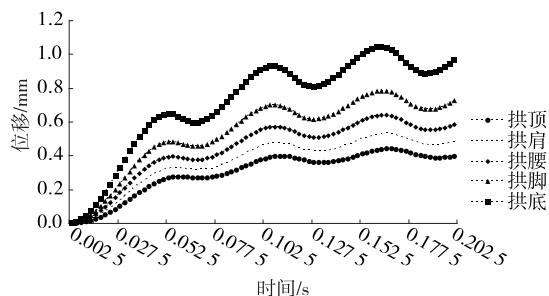


图4  $L=1\text{ m}$  时交通荷载作用下隧道各部位的位移时程曲线

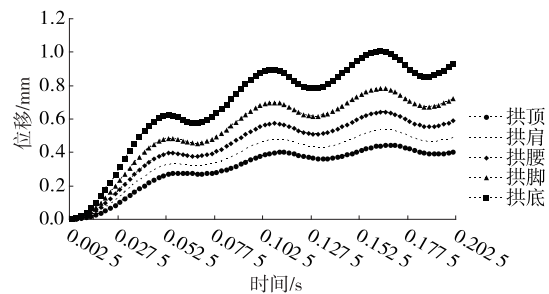


图5  $L=3\text{ m}$  时交通荷载作用下隧道各部位的位移时程曲线

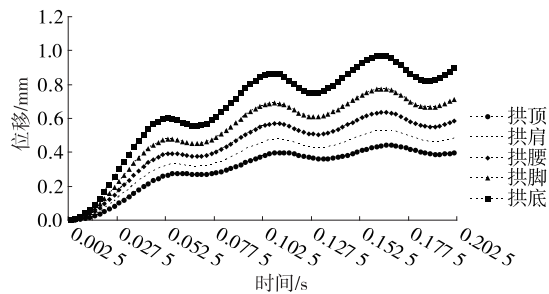


图6  $L=5\text{ m}$  时交通荷载作用下隧道各部位的位移时程曲线

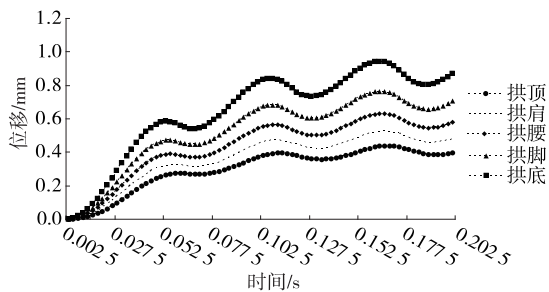


图7  $L=7\text{ m}$  时交通荷载作用下隧道各部位的位移时程曲线

由图4~7可知:在交通荷载作用下,隧道各部位发生不同程度的变形,随溶洞距隧道拱底距离的增大,隧道位移减小; $L=1\text{ m}$ , $t=0.162\text{ s}$ 时,拱底位移出现峰值,最大位移为 $1.043\text{ mm}$ ,此时交通荷载对拱顶的影响最小。

### 3.2 不同荷载作用下隧道竖向位移分析

溶洞位于隧道拱底不同位置时,隧道拱顶、拱肩、拱腰、拱脚、拱底在不同荷载作用下的竖向位移见图8、图9。

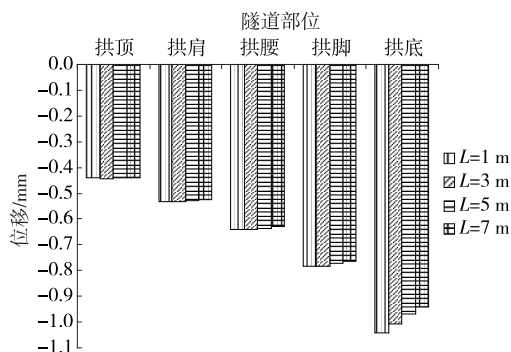


图8 动载作用下隧道各部位的最大竖向位移

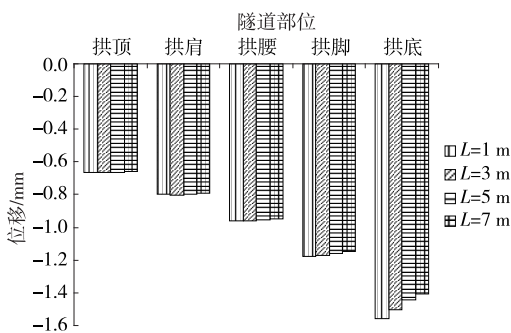


图9 恒载作用下隧道各部位的最大竖向位移

由图8、图9可知:在交通荷载作用下,隧道拱顶、拱肩、拱腰部位产生微小位移,并随溶洞与隧道底部距离的增大而逐渐减小;交通荷载对隧道拱底位移的影响最大,且随溶洞距离的增大逐渐减小。动载作用下, $L=1\text{ m}$ 时拱底位移为 $-1.043\text{ mm}$ , $L=7\text{ m}$ 时拱底位移为 $-0.941\text{ mm}$ ,比 $L=1\text{ m}$ 时减小 $9.7\%$ ;恒载作用下, $L=1\text{ m}$ 时拱底位移为 $-1.558\text{ mm}$ , $L=7\text{ m}$ 时拱底位移为 $-1.407\text{ mm}$ ,比 $L=1\text{ m}$ 时减小 $9.7\%$ 。

### 3.3 不同荷载作用下溶洞顶部竖向位移分析

溶洞位于隧道拱底不同位置时,溶洞顶部在不同荷载作用下的竖向位移见图10。

由图10可知:车辆荷载向下传递,溶洞顶部的位移较大,但随着与隧道底部距离的增大,荷载往下

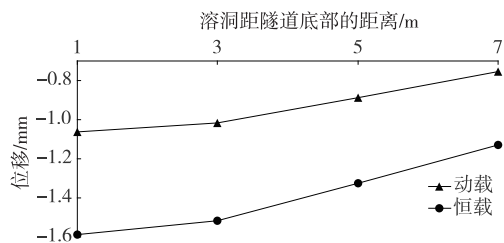


图10 不同荷载作用下溶洞顶部竖向位移

传递的力衰减,对溶洞的影响逐渐减小。溶洞的存在是影响隧道稳定性的不良隐患。

### 3.4 不同荷载作用下隧道最大主应力分析

溶洞位于隧道拱底不同位置时,隧道拱顶、右拱腰、右边墙、拱脚及拱底部位的最大主应力见图11~15。

由图11~15可知:相较于隧道其他部位,隧道拱脚部位的最大主应力更大,说明该部位受交通荷

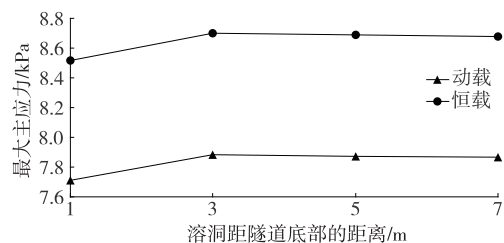


图11 不同荷载作用下隧道拱顶的最大主应力曲线

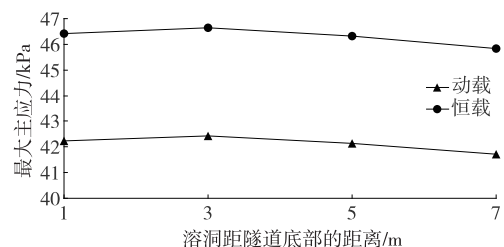


图12 不同荷载作用下隧道右拱腰的最大主应力曲线

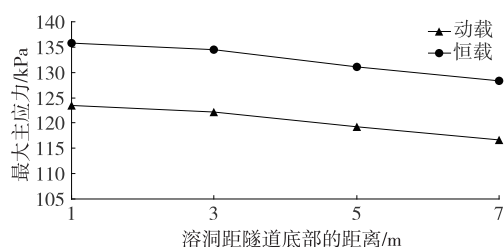


图13 不同荷载作用下隧道右边墙的最大主应力曲线

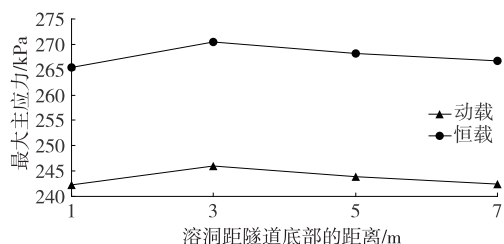


图14 不同荷载作用下隧道拱脚的最大主应力曲线

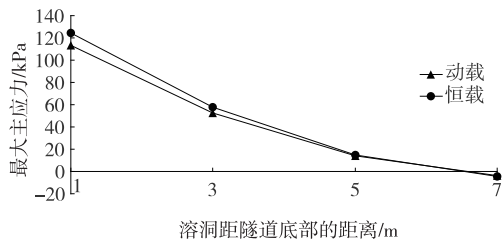


图 15 不同荷载作用下隧道拱底的最大主应力曲线

载的影响较大,容易产生应力集中而破坏。根据曲线斜率,隧道底部的变化率最大。动载作用下, $L=1\text{ m}$ 时底部最大主应力为 $113.17\text{ kPa}$ , $L=7\text{ m}$ 时底部应力为 $-3.67\text{ kPa}$ ;恒载作用下, $L=1\text{ m}$ 时底部最大主应力为 $124.08\text{ kPa}$ , $L=7\text{ m}$ 时底部应力为 $-4.53\text{ kPa}$ 。随着溶洞与隧道底部距离的增大,隧道底部应力变化明显。

### 3.5 振动速度分析

下伏溶洞距隧道底部距离为 $1\text{ m}$ 时,交通荷载作用下隧道拱顶、拱腰、边墙、拱脚、拱底的最大振动速度见表2。

表 2 交通荷载作用下隧道各部位的最大振动速度

特征点	振动速度/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	出现的时间/s
拱顶	0.365	0.177 5
拱腰	0.646	0.175 0
边墙	0.494	0.175 0
拱脚	0.835	0.175 0
拱底	1.203	0.172 5

由表2可知:交通荷载对隧道的影响主要集中在拱底位置,振动速度最大值为 $1.203\text{ cm/s}$ ,对其他位置的影响较小,且随着与溶洞距离的增大而逐渐减小;不同部位最大振动速度出现的时间不同,拱底最大振动速度出现在 $0.1725\text{ s}$ ,随时间递增,其他部位相继出现最大振动速度,体现了振动随时间传递的过程。

## 4 结论

(1) 在隧道路面两侧施加半波正弦动荷载,溶洞与隧道底部的距离不同时,交通荷载作用下隧道拱底的位移最大,且各部位的位移随溶洞距离的增大而减小。

(2) 动载和恒载作用下,溶洞与隧道的距离是影响隧道稳定性的主要因素之一,溶洞距隧道底部 $1\text{ m}$ 时,隧道各部位的位移和主应力最大,随距离增大位移和主应力逐渐减小。

(3) 恒载和动载对隧道稳定性都有一定影响,恒载对隧道各部位的影响大于动载。动载的模拟更能反映汽车所产生的冲击力随时间的变化,能更真实地反映交通荷载对隧道的影响。

### 参考文献:

- [1] 赵世科.溶洞对隧道施工的影响研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [2] YANG J S, LIU B C, WANG M C. Modeling of tunneling-induced ground surface movements using stochastic medium theory [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(2): 113–123.
- [3] SEDAT Türkmen, NURI Özgüzel. Grouting a tunnel cave-in from the surface: A case study on Kurtkulağ1 irrigation tunnel, Turkey [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(4): 365–375.
- [4] 储汉东.岩溶隧道突水机理及防突层安全厚度研究[D].北京:中国地质大学,2017.
- [5] 减守杰,纂彦波,程建铝.喀斯特地区隧道施工中隧底岩层稳定性评价研究[J].水利与建筑工程学报,2007, 5(3): 43–45.
- [6] 赵国祝.岩溶隧道施工期结构稳定性评价的位移法探讨[J].科技创新导报,2008(18): 51+53.
- [7] 宋战平,党宏斌,李宁.既有溶洞对隧道围岩位移特征影响的数值试验[J].长江科学院院报,2008, 25(5): 79–83.
- [8] 达勇,李佶,姚磊.底部岩溶小净距隧道施工力学特性研究[J].湖南交通科技,2016, 42(4): 158–162+168.
- [9] 郭伟.侧部水压充填型岩溶隧道施工力学特性研究[J].湖南交通科技,2008, 34(2): 131–135.
- [10] 李治. Midas/GTS在岩土工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2013: 18–29.
- [11] 潘昌实,谢正光.地铁区间隧道列车振动测试与分析[J].土木工程学报,1990, 23(2): 21–28.
- [12] 王逢朝,夏禾,张鸿儒.地铁列车振动对邻近建筑物的影响[J].北方交通大学学报,1999, 23(5): 45–48.
- [13] 汪伟松,周晓军.列车荷载作用下立体交叉隧道的响应分析[J].路基工程,2010(4): 212–214.
- [14] 偶昌宝.沥青路面结构动力响应分析[D].杭州:浙江大学,2005.
- [15] 林骋.交通荷载作用下沥青路面数值模拟分析[D].杭州:浙江大学,2015.
- [16] 单景松,黄晓明,廖公云.移动荷载下路面结构应力响应分析[J].公路交通科技,2007, 24(1): 10–13.
- [17] 罗红星,但路昭,秦雨樵.车辆荷载对浅埋大断面隧道

(下转第143页)



式衬砌荷载承担比分布见图 12。由图 12 可知:辅洞内侧由于受开挖扰动影响较大,初期支护和二次衬砌

的荷载承担比约为 6 : 4;辅洞外侧受开挖扰动影响较小,初期支护和二次衬砌的荷载承担比约为 7 : 3。

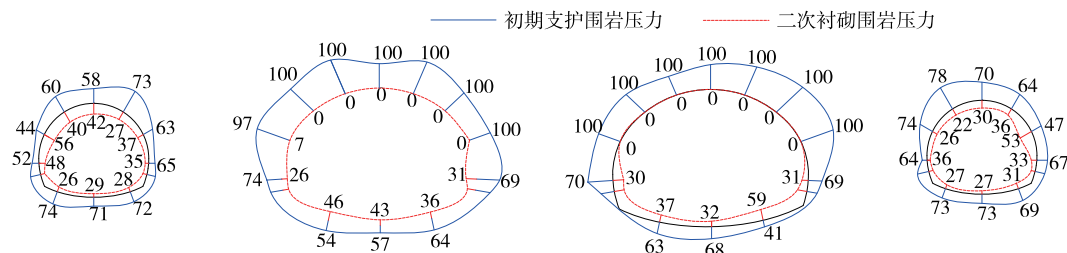


图 12 初期支护与二次衬砌的荷载承担比分布(单位: %)

## 4 结论

以珠海兴业快线隧道群为工程背景,对大断面小净距隧道群浅埋段开挖与支护全过程进行精细化数值模拟,结合实测数据,分析隧道开挖时拱顶沉降规律及复合式衬砌围岩压力分布规律,得到以下主要结论:

(1) 带临时竖撑的上下台阶开挖法引起的拱顶沉降呈“急剧沉降—缓慢变化—稳定收敛”的变化趋势;数值模拟与现场实测沉降终值基本一致,均小于规范要求的预留变形量,该开挖方法可用于类似条件下隧道工程施工。

(2) 隧道群初期支护围岩压力近似呈对称分布,单洞围岩压力呈外侧大内侧小、上部大下部小的分布形态,初期支护围岩压力最大值出现在拱肩位置(临时竖撑处)。

(3) 后行主洞开挖导致先行辅洞初期支护上围岩压力明显减小,二次衬砌承担部分围岩压力;辅洞内侧初期支护和二次衬砌的荷载承担比约为 6 : 4,辅洞外侧约为 7 : 3。

## 参考文献:

[1] ELWOOD D, MARTIN C. Ground response of closely spaced twin tunnels constructed in heavily over-consoli-

dated soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 226—237.

[2] 钟祖良, 涂义亮, 刘新荣, 等. 浅埋双侧偏压小净距隧道衬砌荷载及其参数敏感性分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 119—125.

[3] LUO Yanbin, CHEN Jianxun. Calculation method of horizontal surrounding rock pressure of tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 10—17.

[4] 李磊, 谭忠盛, 郭小龙, 等. 挤压陡倾千枚岩地层小净距隧道大变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 276—286.

[5] 孙振宇, 张顶立, 房倩, 等. 浅埋小净距公路隧道围岩压力分布规律[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 84—94.

[6] 王春国. 偏压大跨小净距公路隧道施工力学行为[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(4): 85—89.

[7] 舒志乐, 刘保县, 黄山, 等. 大跨偏压小净距隧道分部导坑法施工力学效应[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1623—1630.

[8] 刘明才. 大断面小净距公路隧道施工影响分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(4): 78—85.

[9] 吴德兴, 李伟平, 谢宝超, 等. 陡坡偏压小净距隧道施工扰动空间效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(5): 906—913.

收稿日期: 2021—08—06

\*\*\*\*\*  
(上接第 138 页)

围岩的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 100—104.

[18] 中交公路规划设计院. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.

[19] 王卫华, 李夕兵. 离散元法及其在岩土工程中的应用综述[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(4): 177—181.

[20] 李达铭. 岩土力学数值分析方法研究[J]. 地球, 2016

(6): 291.

[21] 蒋颖. 溶洞分布部位对隧道稳定性影响的数值分析[J]. 铁道标准设计, 2009(9): 67—70.

[22] BOLTON S H, LYSMER J. Soil-structure interaction analyses by finite elements: State of the art[J]. Nuclear Engineering and Design, 1978, 46(2): 349—365.

收稿日期: 2021—01—21