

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.033

# 多孔小净距隧道施工力学特性数值模拟与现场实测研究

诸岩

(上海隧道工程质量检测有限公司, 上海 201111)

**摘要:**以珠海市兴业快线东段隧道为工程背景,在 FLAC<sup>3D</sup> 平台上对其开挖支护全过程展开数值模拟,重点关注隧道拱顶沉降及复合式衬砌围岩压力分布,并与现场监测结果相互验证。结果表明,带临时竖撑的上下台阶开挖方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,带临时支撑的上下台阶开挖方法可用于类似条件下隧道工程施工;主洞初期支护围岩压力呈外侧大内侧小、上部大下部小的分布形态,最大值出现在隧道拱肩位置(临时竖撑处);受后行主洞隧道开挖的影响,先行辅洞隧道初期支护上的围岩压力减小,二次衬砌承担了部分围岩压力,初期支护和二次衬砌的荷载承担比约为 6:4(内侧)、7:3(外侧)。

**关键词:**隧道;多孔小净距隧道;复合式衬砌;围岩压力;施工力学特性

**中图分类号:**U451

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2022)03-0139-05

小净距隧道以其占地面积小且易满足线形优化的特点被广泛应用。但其开挖支护方法复杂,先行、后行隧道之间相互影响强烈,施工力学特性与常规分离式隧道存在较大差异。许多学者采用现场实测、数值模拟等手段对小净距隧道施工力学特性展开了研究,如 Luo Yanbin 等通过分析施工期间中夹岩墙的变形,获得了中夹岩墙变形与水平围岩压力之间的关系及水平围岩压力计算方法;李磊等通过杨家坪隧道现场监测,发现先行洞二次衬砌端头处于后行洞开挖作业面之外可有效减小后行洞对先行洞的扰动;孙振宇等通过统计 41 座小净距隧道的围岩压力,基于隧道实际滑裂面,提出了小净距隧道围岩压力计算方法;王春国在 FLAC<sup>3D</sup> 平台上模拟偏压大断面小净距隧道的施工过程,结果表明后行洞开挖导致先行洞内侧拱腰处弯矩显著增大;舒志乐等分析了小净距隧道先行、后行洞施工间距对围岩扰动的影响,得出 V 级围岩中施工间距应大于 1.5 倍洞径;刘明才通过数值模拟研究隧道开挖过程中地表沉降、围岩压力与二次衬砌结构受力,认为后行洞开挖会导致中夹岩柱应力发生显著集中;吴德兴等研究陡坡偏压小净距隧道的围岩塑性区分布,发现先行洞外侧及后行洞内侧受开挖影响较大,围岩扰动范围较大。但对多孔小净距隧道的研究较少。该文以广东省珠海市兴业快线东段隧道为背景,在

FLAC<sup>3D</sup> 数值平台上对多孔小净距隧道开挖支护全过程展开精细化数值模拟,结合现场监测数据对其施工力学特性进行分析。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

兴业快线是珠海市综合交通运输体系中“九纵五横”高快速路网中的重要组成部分,连接香洲中心城区与高新区,是中心城区之间的交通要道。兴业快线东段隧道由 2 个机动车主洞和 2 个非机动车人行辅洞构成,全长 550 m,其典型横断面(K10+150)布置见图 1。主洞轮廓采用曲墙三心圆,开挖净空尺寸为 15.3 m×10.68 m(宽×高);辅洞轮廓采

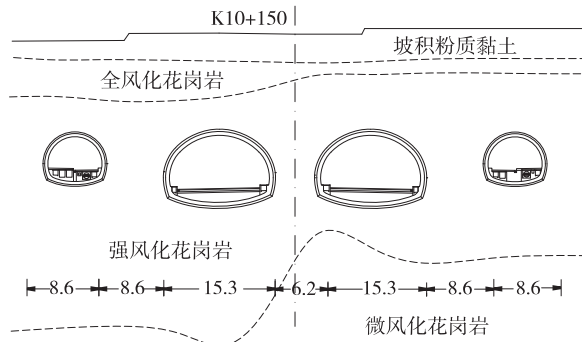


图 1 珠海兴业快线东段隧道地质横断面图  
(K10+150, 单位: m)

用曲墙单心圆,开挖净空尺寸为  $8.6\text{ m} \times 7.3\text{ m}$  (宽 $\times$ 高)。两主洞开挖轮廓间距  $6.2\text{ m}$ ,主辅洞开挖轮廓间距  $8.6\text{ m}$ ,均小于分离式独立双洞间的最小净距(Ⅳ级围岩条件下为2倍开挖断面宽度),属小净距隧道。

洞身所穿越地层主要为全~弱风化花岗岩,围岩级别以Ⅲ~Ⅳ级为主;地下水主要为基岩裂隙水,水量一般,对隧道开挖影响较小。以里程  $K10+150$  为例(浅埋段Ⅳ级围岩),其地质横断面见图1,主洞埋深  $10\text{ m}$ ,辅洞埋深  $11\text{ m}$ ,地层自上而下依次为坡积粉质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩、微风化花岗岩。

主洞初期支护采用 I18 钢拱架(间距  $0.5\text{ m}$ ) + C25 喷射砼(厚  $0.26\text{ m}$ ),辅洞初期支护采用 C35 模筑钢筋砼,厚  $0.55\text{ m}$ 。辅洞初期支护采用钢格栅(间距  $0.7\text{ m}$ ) + C25 喷射砼(厚  $0.26\text{ m}$ ),辅洞初期支护采用 C35 模筑钢筋砼(厚  $0.45\text{ m}$ )。

## 1.2 带临时竖撑的上下台阶法开挖

东段隧道  $K10+050-K10+200$  段为浅埋段Ⅳ级围岩,辅洞、主洞分别采用带单侧和双侧临时竖撑的上下台阶法开挖。

以右辅洞为例,其横断面开挖法及监测点布置见图2,纵向施工工序(见图3)如下:1) 开挖上台阶左导坑(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作相应初期支护及临时竖撑;2) 开挖上台阶右导坑(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作相应初期支护,右导坑滞后左导坑  $10\text{ m}$ ;3) 拆除临时竖撑,开挖下台阶(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作下台阶初期支护及锁脚锚杆,下台阶滞后右导坑  $10\text{ m}$ ;4) 开挖仰拱并施作相应初期支护;5) 围岩收敛稳定后,择机施作二次衬砌。

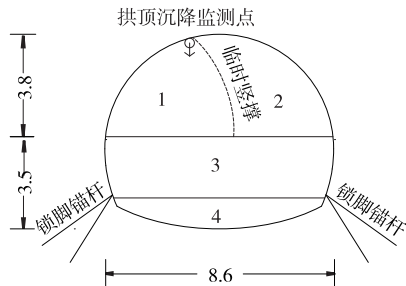


图2 右辅洞开挖方法及监测点布置(单位:m)

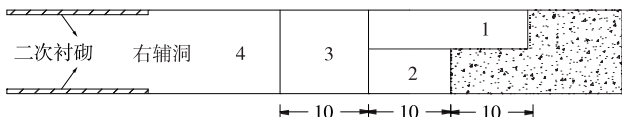


图3 右辅洞纵向施工工序示意图(单位:m)

左右辅洞同时开挖,左辅洞施工工序与右辅洞类似,不再赘述。辅洞隧道开挖过程中,对拱顶沉降及水平收敛进行监测(见图3)。

辅洞贯通后开挖右主洞,其横断面开挖方法及监测点布置见图4,纵向施工工序(见图5)如下:1) 开挖上台阶左导坑(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作相应初期支护及临时竖撑;2) 开挖上台阶右导坑(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作相应初期支护及临时竖撑,右导坑滞后左导坑  $10\text{ m}$ ;3) 开挖上台阶中导坑(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作相应初期支护,中导坑滞后右导坑  $10\text{ m}$ ;4) 拆除临时竖撑,开挖下台阶(单循环进尺  $2\text{ m}$ ),施作相应初期支护及锁脚锚杆,下台阶滞后中导坑  $10\text{ m}$ ;5) 开挖仰拱并施作相应初期支护;6) 围岩收敛稳定后,择机施作二次衬砌。

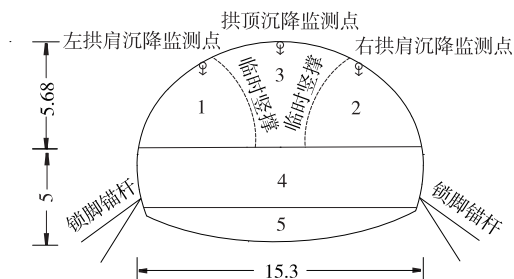


图4 主洞开挖方法及监测点布置(单位:m)

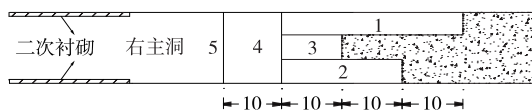


图5 右主洞纵向施工工序示意图(单位:m)

左主洞滞后右主洞  $20\text{ m}$ ,其开挖支护方法与右主洞类似,不再赘述。主洞隧道开挖过程中,对拱顶沉降及水平收敛进行监测(见图4)。

## 2 浅埋段小净距隧道群数值模拟

### 2.1 数值模型

以  $K10+150$  为目标断面,在  $FLAC^{3D}$  数值平台上对其前后  $25\text{ m}$  范围( $K10+125-175$ )的开挖支护全过程展开数值模拟分析。数值模型整体尺寸为  $289\text{ m} \times 107\text{ m} \times 50\text{ m}$  (宽度 $\times$ 高度 $\times$ 深度,见图6)。围岩及二次衬砌均采用四节点实体单元模拟,共计  $403\,055$  个实体单元、 $126\,360$  个节点;初期支护及临时钢支撑采用双面 Liner 单元模拟,共计  $10\,357$  个节点、 $21\,588$  个单元。模型顶面(地表面)为自由边界,侧面为法向位移约束边界,底面为全约束边界。

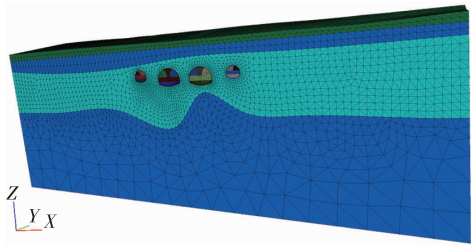


图 6 多孔小净距隧道数值模型

根据上述施工工序模拟开挖支护全过程,共计 626 个施工步,其中关键施工步见表 1。

表 1 数值模拟中的关键施工步

施工步	对应工况
1	辅洞 1 部开始开挖
23	辅洞 4 部开始开挖
64	辅洞 1 部开挖至目标断面
140	辅洞 4 部开挖至目标断面
235	辅洞 1 部结束开挖
348	辅洞 4 部结束开挖
45	右主洞 1 部开始开挖
149	右主洞 5 部开始开挖
189	右主洞 1 部开挖至目标断面
357	右主洞 5 部开挖至目标断面
404	右主洞 1 部结束开挖
539	右主洞 5 部结束开挖
198	左主洞 1 部开始开挖
366	左主洞 5 部开始开挖
413	左主洞 1 部开挖至目标断面
548	左主洞 5 部开挖至目标断面
569	左主洞 1 部结束开挖
625	左主洞 5 部结束开挖

2.2 本构与参数

围岩选用 Mohr-Coulomb 本构模型,二次衬砌采用线弹性本构模型,其物性参数见表 2、表 3。

表 2 岩土体的物性参数

岩土体	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松 比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
坡积粉质黏土	1 800	13.5	0.350	0.025	12
全风化花岗岩	1 800	52.9	0.324	0.020	25
强风化花岗岩	1 900	90.0	0.300	0.020	30
微风化花岗岩	2 000	160.0	0.258	0.080	35

表 3 衬砌的物性参数

衬砌类型	厚度/ m	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/Pa	泊松 比
初期支护(辅/主洞)	0.26	2 500	$2.80 \times 10^{10}$	0.20
二次衬砌(辅洞)	0.45	2 500	$4.82 \times 10^{10}$	0.34
二次衬砌(主洞)	0.55	2 500	$4.82 \times 10^{10}$	0.34
仰拱回填	2.30	2 500	$2.57 \times 10^{10}$	0.28

围岩—初期支护—二次衬砌的相互作用见图 7。隧道的初期支护采用双面 Liner 单元模拟,初期支护—围岩通过 Liner 单元 Side1 的第一法向弹簧(Side1 normal link)与第一切向弹簧(Side1 shear link)实现相互作用;初期支护—二次衬砌通过 Liner 单元 Side2 的第二法向弹簧(Side2 normal link)与第二切向弹簧(Side2 shear link)实现相互作用。Liner 单元的接触参数取值见表 4。

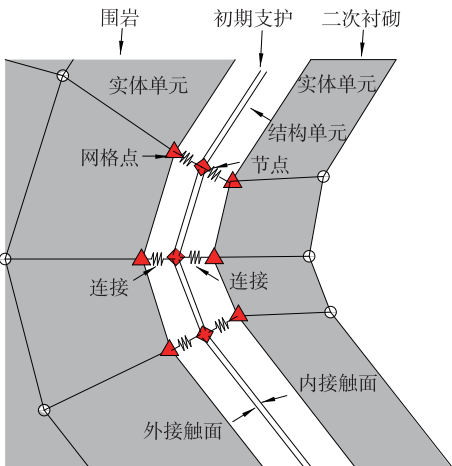


图 7 围岩—初期支护—二次衬砌相互作用示意图

表 4 Liner 单元的接触参数

单元号	法向连 接刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	切向连 接刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )	切向连 接黏聚 力/Pa	切向连 接摩擦 角/( $^{\circ}$ )
Side1	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{11}$	$1.5 \times 10^4$	15
Side2	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^5$	$1.5 \times 10^4$	15

3 施工力学特性分析

3.1 拱顶沉降分析

随着掌子面的推进,辅洞拱顶沉降呈“急剧沉降—缓慢变化—稳定收敛”变化趋势。如图 8 所示,左辅洞拱顶沉降数值计算终值为 16 mm。右辅洞变形趋势与左辅洞类似,拱顶沉降数值计算终值为 20 mm。

主洞拱顶沉降呈“先期隆起—急剧沉降—缓慢变化—稳定收敛”的变化趋势。如图 9 所示,右主洞左拱肩、拱顶和右拱肩沉降稳定值分别为 57 mm、67 mm、47 mm。左主洞拱顶沉降变化规律与右主洞类似,左拱肩、拱顶和右拱肩沉降稳定值分别为 44 mm、57 mm、54 mm。

拱顶沉降现场实测值(见图 8、图 9)的变化规律与数值模拟结果基本一致。需说明的是,由于现场

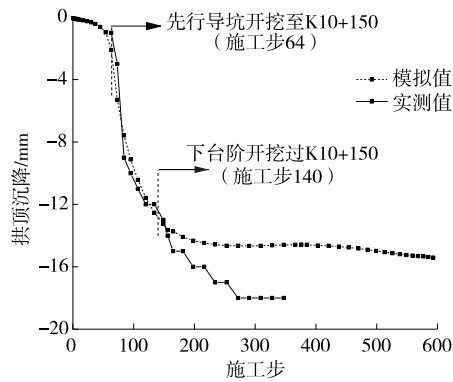


图8 右辅洞拱顶沉降变化

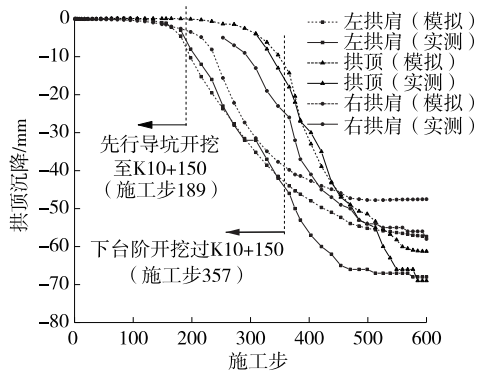


图9 右主洞拱顶沉降变化

实测无法获得隧道开挖至目标断面的拱顶沉降,将数值模拟的先期沉降值视为隧道的实际先期沉降值,与后续拱顶沉降监测结果叠加,得到隧道拱顶沉降最终值。受围岩蠕变的影响,辅洞拱顶沉降监测结果均比数值模拟结果大 3 mm 左右,主洞拱顶沉降监测结果均比数值模拟结果大 10 mm 左右,但均小于 JTG 3370.1—2018 规定的预留变形量(Ⅳ级围岩三车道隧道的预留变形量为 60~120 mm,双车道隧道为 50~80 mm)。可见,带临时支撑的上下台阶开挖方法可用于类似条件下隧道工程施工。

### 3.2 衬砌围岩压力分布

辅洞开挖及支护完成后,读取作用在 Liner 单元 Side1 和 Side2 的法向弹簧应力,得到图 10 所示初期支护和二次衬砌上围岩压力分布。由图 10 可知:辅洞初期支护围岩压力关于设计中线大致呈对称分布,上台阶围岩压力(150~231 kPa)大于下台阶围岩压力(50~150 kPa)。由于辅洞临时竖撑的存在抑制了外侧拱肩位置的围岩变形,拱肩位置的初期支护围岩压力(右辅洞 231 kPa)明显大于其他位置。二次衬砌围岩压力基本为零,仅仰拱附近存在较小的由仰拱自重引起的围岩压力。

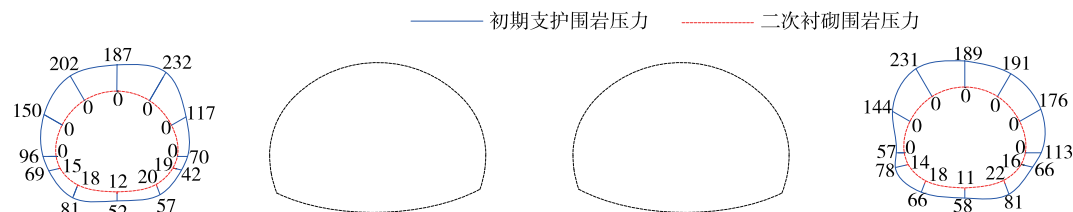


图10 初期支护与二次衬砌围岩压力分布(辅洞,单位:kPa)

主洞开挖及支护完成后初期支护与二次衬砌围岩压力分布见图 11。由图 11 可知:主洞初期支护围岩压力的分布形态与辅洞基本相同,最大值(283 kPa)出现在外侧拱肩附近。二次衬砌围岩压力(除仰拱附近外)基本为零。由于辅洞先行开挖,辅洞与主洞之间的中夹岩应力状态发生改变,中夹岩积蓄的围岩变形能在主洞开挖过程中部分释放,主洞内

侧围岩压力(150~200 kPa)小于外侧(200~280 kPa)。此外,受主洞开挖的影响,辅洞初期支护围岩压力明显减小,二次衬砌围岩压力增大,但总围岩压力(初期支护围岩压力+二次衬砌围岩压力)基本不变。

定义初期支护和二次衬砌承受的围岩压力与总围岩压力的比值为复合式衬砌的荷载承担比,复合

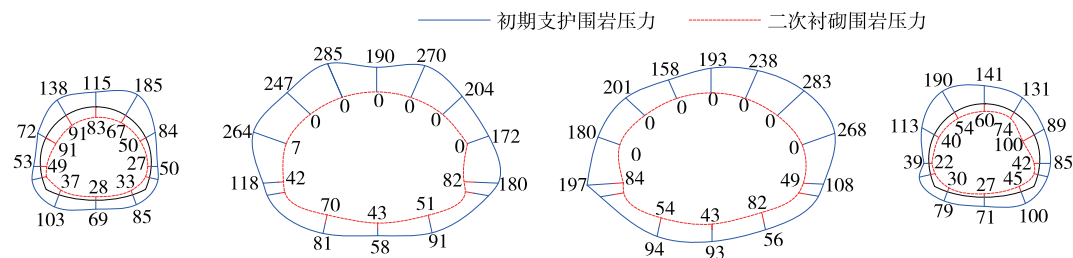


图11 初期支护与二次衬砌围岩压力分布(辅洞与主洞,单位:kPa)

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。

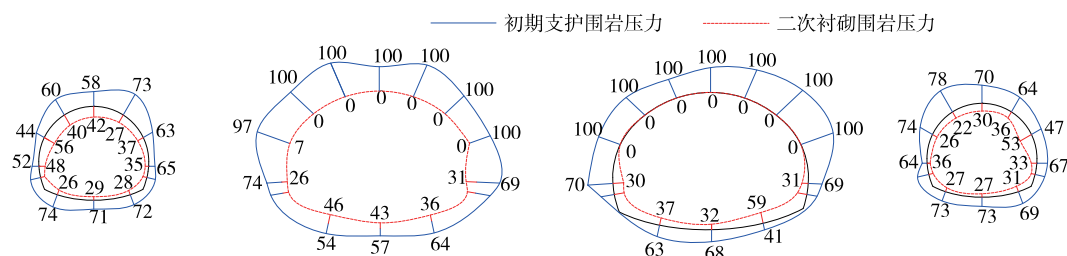


图 12 初期支护与二次衬砌的荷载承担比分布(单位: %)

## 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