

DOI: 10.11779/CJGE20230456

粉煤灰堆积体大断面连拱隧道失稳破坏模式及施工力学研究

余涛¹, 廖杭¹, 朱宁波¹, 姚志刚¹, 方勇^{*1}, 李希文², 田青峰³

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610093;
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 国内目前并无在粉煤灰堆积体中采用暗挖法修建大断面连拱隧道的先例, 给隧道的设计和施工带来了巨大挑战。依托盐坪坝隧道工程, 开展了室内相似模型试验, 探讨了该地层下大断面连拱隧道塌落拱演化规律及开挖施工力学行为。研究表明: 连拱隧道在粉煤灰堆积体中开挖极易发生失稳, 将失稳过程划分为4个演化阶段, 破坏模式具有突发性、剧烈性、对称性、同步性特征; 塌落拱高度约为隧道开挖跨度的40%。采用单侧壁导坑法开挖时粉煤灰堆积体承载力严重不足, 根据相似换算关系左、右洞拱顶沉降分别为16.86, 14.91 cm, 需对地层实施注浆加固; 地层沉降呈对称“双峰状”, 先行洞相较于后行洞受开挖影响较大, 中隔墙的承载作用能够有效降低地层位移, 单洞压力拱向双洞压力拱转换过程中, 中隔墙受到偏压作用容易向先行洞侧偏转, 建议在先行洞开挖时中隔墙添加支撑物。

关键词: 连拱隧道; 粉煤灰堆积体; 模型试验; 塌落拱; 单侧壁导坑法

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)09-1909-10

作者简介: 余涛(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道工程及围岩稳定性方面研究。E-mail: ytao1015@126.com。

Instability failure modes and construction mechanics of large-section multi-arch tunnels in fly ash deposits

YU Tao¹, LIAO Hang¹, ZHU Ningbo¹, YAO Zhigang¹, FANG Yong¹, LI Xiwen², TIAN Qingfeng³

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Road and Bridge Highway Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610093, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: At present, there is no precedent of using the undermining method to construct large-section multi-arch tunnels in fly ash deposits in China, which brings great challenges to the design and construction of the tunnels. Based on the Yanpingba tunnel project, the laboratory similar model tests are carried out to explore the evolution laws of collapse arch and mechanical behaviors of excavation of the double-arch tunnel in fly ash stratum. The results show that the excavation of the multi-arch arch tunnels in the fly ash deposits is highly susceptible to instability, and the failure process is characterized by suddenness, intensity, symmetry and synchronicity. The height of the collapsed arch is about 0.4 times the excavation span of the tunnels. The bearing capacity of the fly ash deposits is seriously insufficient by using the single-side drift method, and the settlements of the left and right vaults are 16.86 cm and 14.91 cm according to the similarity relationship. It is necessary to implement grouting reinforcement for the stratum. The bearing effect of the partition wall can effectively reduce the displacement of the stratum, the shape of stratum settlement is 'bimodal', and the first-excavated tunnel is more affected by excavation than the following one. During the process of conversion from single-tunnel pressure arch to double-tunnel one, the partition wall is easily deflected to the side of the first-excavated tunnel under the action of bias pressure, so it is suggested to add supports to the partition wall in the first-excavated of the existing tunnel.

Key words: multi-arch tunnel; fly ash deposit; model test; collapse arch; single-side drift method

0 引言

随着中国交通建设的快速发展, 越来越多隧道不

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078428); 四川公路桥梁集团有限公司科技计划项目(YBYPB-QT-025); 四川省自然科学基金创新研究群体项目(2024NSFTD0013)

收稿日期: 2023-05-23

*通信作者(E-mail: fy980220@swjtu.cn)

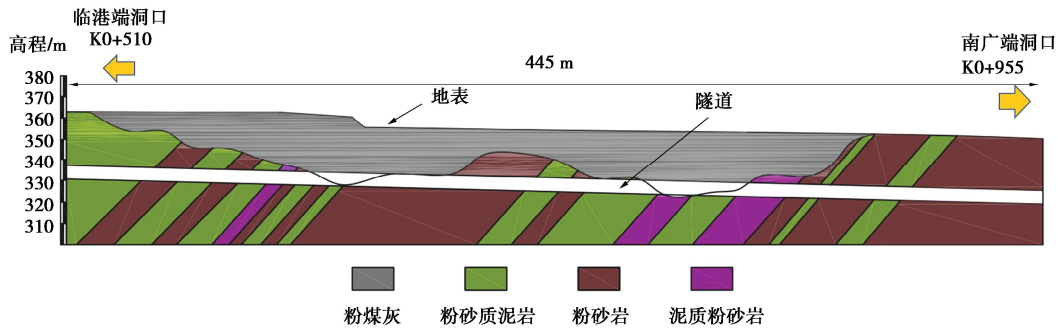


图1 隧道地质纵断面图

Fig. 1 Geological profile of tunnel

可避免的穿越复杂工程地质环境体^[1]。同时，由于受特殊地层、线路衔接、施工等因素影响，隧道采用传统的分离式或小净距形式无法满足建设要求，而双连拱隧道具有结构紧凑、线路连接简单、节约空间、地形适应性强等优点，因此被广泛用于干线公路、铁路隧道中^[2]。

隧道开挖稳定性是学者普遍关心的问题，其中拱顶土体坍塌破坏模式的不确定性制约着隧道设计与施工。针对浅埋软土隧道稳定性，国内外学者做了很多深入研究，Fraldi等^[3-4]根据Hoek-Brown破坏准则，利用变分法原理，通过塑性理论准确的描述了矩形隧道坍塌状态；朱合华等^[5]、房倩等^[6]、李英杰等^[7]利用室内试验，研究了隧道渐进式破坏特征，得到了围岩深部受力分区依次是松动区-压力拱-原岩应力状态。郑康成等^[8]揭示了特大断面隧道动态压力拱变化模式，得到了压力拱折减系数；宫全美等^[9]基于颗粒椭圆理论，推导出隧道松动土压力计算方法。隧道稳定性分析主要基于极限平衡法、滑移线法，极限分析法等理论，再通过数值模拟和试验方式进行验证^[10-11]。

关于连拱隧道荷载研究方面，李鸿博等^[12]、丁文其等^[13]基于塌落拱理论，给出了连拱隧道荷载的计算公式；Li等^[14]研究了富水地层双拱隧道压力拱演化过程及拱的偏斜效应，发现渗透系数对压力拱的形状和偏斜效应有显著的影响。在隧道穿越特殊地层研究中，咎文博等^[15]主要基于室内试验和数值模拟，探究了松散堆积体下隧道压力拱的形成与稳定机制；谢亦鹏等^[16]基于随机原理并结合数字图像处理技术，探讨了堆积体的变形失稳及破坏机制；朱正国等^[17]采用树根桩进行堆积体隧道基底加固；杨建周^[18]研发新型膏状注浆材料加固松散体地层。在上述研究中看出，目前对于单一隧道塌落拱及荷载的研究成果比较丰富，而隧道穿越类似堆积体软弱地层压力拱演化规律也得到了一定程度发展。但遗憾的是，粉煤灰堆积体中采用暗挖法的隧道工程在中国尚无先例，大断面连拱隧道的成拱效应及破坏模式也鲜有研究，由于粉煤灰堆积体

的物理力学性质的特殊性，对于粉煤灰堆积体中大断面连拱隧道的施工力学研究也尤为重要。

本文针对粉煤灰堆积体软弱易破碎、承载力不足工程地质特性，通过大型的室内隧道模型开挖试验，揭示了粉煤灰堆积体下连拱隧道失稳破坏模式及塌落拱演化规律，分析了单侧壁导坑法开挖方式下双连拱隧道地层沉降、围岩变形、结构受力的变化规律，探讨了大断面双连拱隧道穿越粉煤灰堆积体的施工力学行为。本文的研究成果填补了中国粉煤灰堆积体下修建大断面连拱隧道的空白，对类似隧道工程的设计及施工具有积极意义。

1 工程概况

盐坪坝隧道为宜宾市盐坪坝长江大桥和天元路的连接线工程，道路等级为双向6车道城市快速路，为了避免桥隧分幅，隧道采用双连拱设计结构。隧道采用钻爆法施工，设计总长度445 m，净宽13.75 m，净高5.0 m，左右主洞加中导洞开挖面积约350 m²，最大埋深约26.7 m。如图1所示，里程中段大片区域穿越原电厂粉煤灰弃渣场区，穿越地层主要以粉煤灰、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉质黏土为主，为V级围岩。

如表1所示，场地内粉煤灰物理指标离散性大，不均匀，含水率较高，孔隙比大，相对质量密度和重度小等特点。粉煤灰颗粒组成比较复杂，粒径范围广，其中角砾含量约1.8%，砂粒含量约为41.0%、粉粒含量约为52.9%、黏粒含量为7.3%，塑性指数23.5，这表明粉煤灰与粉土有一定相同点。但其较大的塑限、液限、孔隙比和较小的重度又与一般粉土有很大的不同，粉煤灰受挤压变形明显，遇水易散，工程性质较差。

表1 粉煤灰物理性质参数

Table 1 Physical properties and parameters of fly ash

天然重度/(kN·m ⁻³)	含水率/%	孔隙比	塑性指数	液性指数
13.6~14.9	20.9~92.6	1.58~2.52	13.0~32.9	0.14~2.38

2 试验准备及材料配置

2.1 模型相似关系

若两个系统是力学相似的, 则原型和模型都应满足弹性力学的基本方程(平衡方程、相容方程、物理方程和几何方程)和边界条件。试验中模型尺寸、弹性模量、材料重度、内聚力、摩擦角、泊松比等参数需满足以下相似关系。

$$\frac{C_\sigma}{C_\gamma C_L} = \frac{C_\sigma}{C_E C_\epsilon} = \frac{C_\delta}{C_\epsilon C_L} = 1 \quad (1)$$

$$C_\mu = C_\epsilon = C_\phi = 1 \quad (2)$$

式中: C_σ 为应力相似比; C_γ 为重度相似比; C_L 为几何相似比; C_E 为弹性模量相似比; C_δ 为位移相似比; C_μ 为泊松比相似比; C_ϵ 为应变相似比; C_ϕ 为内摩擦角相似比; C_c 为内聚力相似比。本次试验选择几何相似比 $C_L = 30$, 重度相似比 $C_\gamma = 1$, 代入式(1)中的相似条件, 可得到如式(3)其它物理量相似比。

$$C_E = C_\sigma = C_c = 30 \quad (3)$$

2.2 试验材料制备

(1) 地层相似材料

地勘资料显示隧道不同里程段受粉煤灰堆积体侵入程度不同, 本次试验主要考虑隧道在粉煤灰全侵条件下开展。模型材料不仅需要考虑到围岩的力学特性, 原材料也要尽量与实际工程中地层参数近似, 模型土以 III 级粉煤灰为主要材料, 添加一定比例的河砂和机油, 河砂粒径有 0.1~0.25, 0.25~0.5, 0.5~2, 2~5 mm, 分别占河砂总质量 24%, 24%, 47%, 5%。粉煤灰结构松散与河砂之间胶结较弱, 通过机油可以很好的调节相似材料力学参数。利用直剪试验和三轴试验获取相似材料力学参数, 根据结果调整材料配比, 最终获得模型土力学参数和材料配比如表 2, 3 所示。

表 2 原型土及模型材料参数

力学参数	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	内聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$
原型	14.9	10	0.35~0.45	20~32	21~25
模型	13.8	0.47	0.38	1.09	19.7

表 3 相似材料配比

材料成分	粉煤灰	河砂	机油
占比	53	39	8

(2) 初支及中隔墙相似材料

实际施工中初支及中隔墙主要采用 C25 混凝土, 因此选择石膏为主要相似材料, 由于石膏的重度离散性较大, 故密度不作为主要控制参数, 以弹性模量和

抗压强度作为控制指标, 选择水、石膏和重晶石粉进行配置, 最终确定的配比为水:石膏:重晶石粉=0.8:1:0.1, 具体材料参数如表 4 所示。

表 4 初支、中隔墙相似材料参数

材料	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
C25 混凝土	16.7	1.78	29.5	0.2	25
相似材料	0.557	0.059	0.983	0.2	25

(3) 钢架相似材料

钢拱架模拟采用刚度等效原则, 现场采用 I22b 拱架, 间距为 50 cm, 选择 0.5 mm (厚) × 5 mm (宽) 铁条作为钢架相似材料, 根据相似关系可知模型钢架间距为 1.59 cm, 为了与开挖进尺相结合, 便于试验开挖, 在试验实际取了 2 cm 的间距, 具体材料参数如表 5 所示。

表 5 钢架相似材料参数

型号	弹性模量/GPa	惯性矩/cm ⁴	间距/cm	
I22b 钢拱架	原型	210	3570	50
	模型	210	1.41×10^{-4}	1.56

2.3 试验设备及监测方案

试验模型箱采用模块化结构, 通过 M24 螺栓拼接而成, 由于盐坪坝隧道属于双连拱隧道, 加上中隔墙后总跨度达到 38 m, 最大开挖高度为 11.75 m, 按照 30:1 的相似关系, 模型隧道开挖跨度达到 1.27 m, 高度为 0.39 m, 模型箱内部尺寸为 4 m × 0.4 m × 2 m。

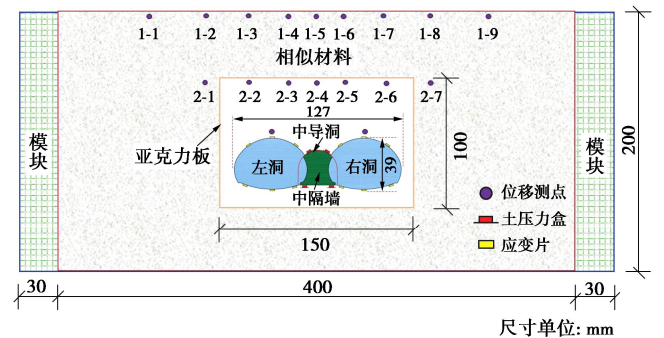


图 2 模型箱及测点布置示意图

Fig. 2 Model box and layout of measuring points

具体模型、监测仪器及测点布置如图 2 所示, 为了更好的观测模型隧道掌子面周边土体变化情况, 模型箱正面采用 119 cm × 180 cm, 厚度为 15 mm 的透明亚克力板, 将亚克力板切割出模型隧道的轮廓, 在模型箱内部四周张贴聚四氟乙烯薄膜, 减小围岩与模型箱之间的摩擦力, 试验中采用位移计、微型土压力盒、应变片监测仪器获取地表位移、地中位移、拱顶沉降、

围岩压力等参数，拱顶测点距离拱顶为 5 cm、地中和地表测点距拱顶分别为 40, 100 cm，以中导洞中心为对称轴，两侧测点距中心测点分别为 20, 50, 90, 140 cm。

3 塌落拱失稳破坏特征

3.1 隧道塌落拱演化过程

粉煤灰堆积体稳定性弱，通过对模型实验中土体塌落形态、裂纹扩展、围岩位移及压力的研究，探究大断面连拱隧道塌落拱发展演化规律及开挖扰动特征，具体试验过程如图 3。

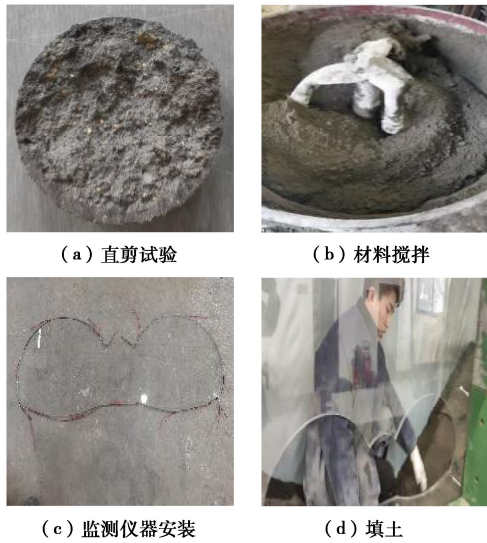


图 3 试验过程

Fig. 3 Process of tests

模型分层填筑完成稳定后打开开挖区域的挡板，释放挡板约束力，挡板打开后中隔墙所在的区域部分土体立即出现塌落，右侧隧道基底部分也发生较大的掉块现象。粉煤灰堆积体结构松散，自稳能力差，中导洞区域为应力集中区，开挖过程极易发生失稳，从开挖到整体失稳可分为 4 个阶段。

第一阶段局部塌落期，采用上下台阶法开挖中导洞，每次开挖 4 cm，下台阶滞后上台阶 4 个循环，开挖过程拱顶位置首先出现小规模塌方，随着围岩位移的增大和开挖继续，拱顶受扰动区逐渐形成拱状，左右洞掌子面受中导洞开挖扰动影响不断有零星的土体掉落。

第二阶段主拱成形期，左洞开挖时，应力调整过程中左右洞掌子面土体随即发生较大面积塌方，左洞拱腰处最先发生塌方，形成塌腔，并逐渐向拱顶处扩展，同时中导洞右上方土体失稳，右洞受左洞扰动影响也产生类似失稳的现象。掌子面塌方的同时伴随着左右洞上方出现明显的主裂缝，裂缝形状呈现扁平的

“牛角状”，初步形成塌落拱基本轮廓；左洞右拱肩靠近中导洞位置出现也较大的主裂缝向上延伸，左右洞及中导洞多处发生局部塌方情况，不断有小规模土体从拱腰及拱顶掉落，如图 4 所示。

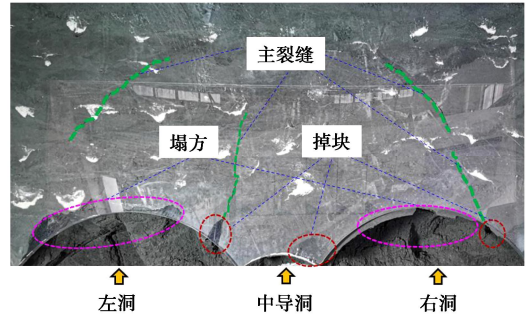
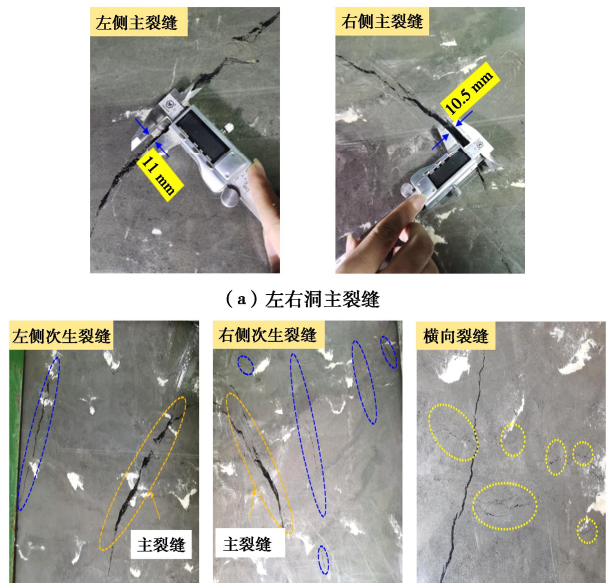


图 4 主拱成形期裂缝发展

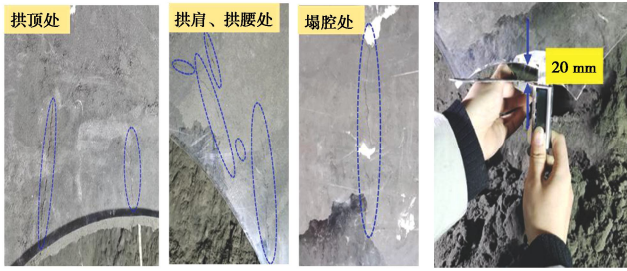
Fig. 4 Development of cracks during forming period of main arch

第三阶段失稳剧烈期，右洞开挖时，右洞右拱腰出现较大规模塌方并形成塌腔，并不断向拱顶扩展，使得左洞塌腔范围进一步扩大；左右两侧主裂缝宽度和长度继续扩展趋于相连，并与左右洞贯通，形成完整的塌落拱。左洞的主裂缝宽度略大于右洞的主裂缝宽度，宽度分别为 11 mm 和 10.5 mm，如图 5 (a) 所示，由于左洞先行开挖发生垮塌，造成掌子面土体处于极不稳定的状态，右洞开挖对左洞的扰动加剧。塌落拱内部的土体已基本进入塑性状态并整体弯曲下沉受拉，导致拱内出现许多细微的横向裂纹，塌落拱主裂缝最宽处次生裂缝呈“树状”向上发展，主拱附近出现有层次的平行裂纹，呈环形分布如图 5 (b) 所示。沿开挖及塌腔轮廓线附近出现多组纵向的裂纹，并且拱腰处的纵向裂缝与主拱外围次生裂缝呈现贯通趋势，中导洞区域上台阶可见到明显的变形，上台阶拱顶处沉降了 20 mm，如图 5 (c) 所示。



(a) 左右洞主裂缝

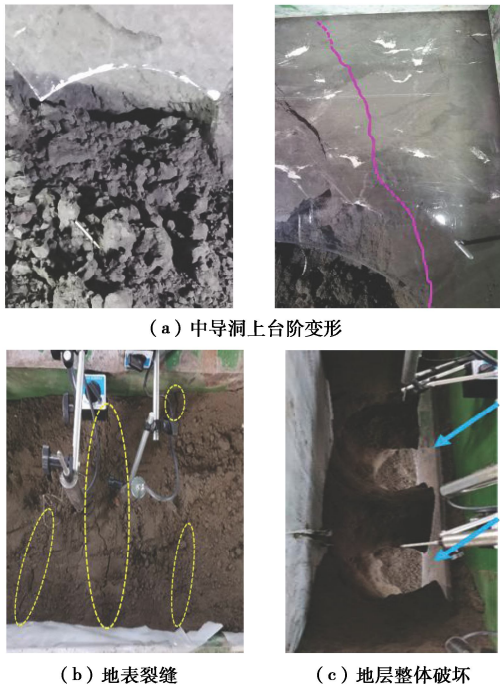
(b) 次生裂缝及横向裂纹分布



(c) 纵向裂缝分布及中导洞拱顶沉降

图 5 失稳剧烈期土体破坏特征

Fig. 5 Damage characteristics of soil during intense instability



(a) 中导洞上台阶变形

(b) 地表裂缝

(c) 地层整体破坏

图 6 地层贯穿破坏期地层破坏特征

Fig. 6 Damage characteristics of strata during stratigraphic penetration damage period

第四阶段地层贯穿破坏期, 随着主洞继续开挖两个循环, 中导洞上台阶已无法看出原有的形状, 变形后上台阶内净空量小于开挖前的 1/2, 塌落拱附近的环向裂缝与主洞纵向裂缝基本贯通, 主拱外部形成更大范围拱形破坏, 延伸至地表, 如图 6 (a) 所示。此时, 地表已出现裂缝, 裂缝主要分布在隧道轮廓正上方, 其中隧道轮廓两边的裂缝为贯通型, 如图 6 (b) 所示。地表出现贯穿裂缝后, 左侧隧道上半部分继续开挖一个循环, 随后左右洞上方发生大规模垮塌, 由于上方土体已基本失稳, 塌落土体直接贯穿地表, 如图 6 (c) 所示, 地层发生整体破坏。

3.2 拱顶位移分析

拱顶位移监测点设置在距离模型箱前端 20 cm 处, 由图 7 可以看出, 中导洞上台阶开挖第一个循环后, 左右洞分别发生了 2.59, 2.13 mm 的位移, 随着

中导洞开挖左右洞拱顶位移快速增长, 当中导洞拱顶出现塌落后, 左右洞拱顶位移增长速度变缓, 左洞开挖时发生较大的塌方, 位移达到 11.1 mm, 左洞的失稳导致右洞拱顶也产生较大位移并塌方; 当左洞开挖至第三个循环时, 左右洞拱顶位移分别为 17.49, 16.89 mm, 此时出现稍微的扰动, 就不断有土体从掌子面滑落。从上述拱顶位移变化可以看出, 左洞拱顶位移略大于右洞, 左、右洞拱顶位移基本同步变化, 说明连拱隧道在同一掌子面处, 中导洞、左右洞的开挖都是会造成相互影响的, 变形和失稳具有对称性, 即连拱隧道的一侧发生失稳, 会导致以中导洞为对称的另外一侧相同位置受到同样影响。因此, 在隧道开挖时应减少一次性开挖面积, 同时先行洞若发生失稳现象, 则后行洞在同一里程处, 应提前采取加固措施, 保证施工安全。

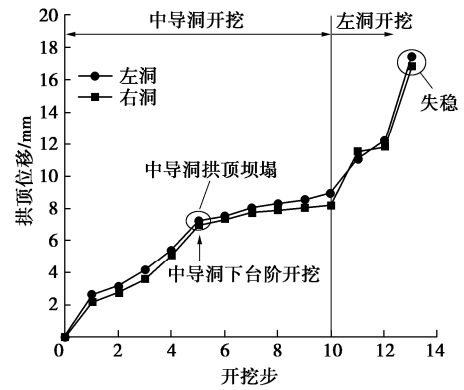


图 7 拱顶沉降曲线

Fig. 7 Curves of vault settlement

3.3 地层位移变化

通过位移计监测了隧道从开挖到失稳过程中地表和地中位移变化规律情况, 如图 8 所示。

地表沉降、地中沉降与拱顶位移三者变化规律基本类似, 测点 1-5 和测点 2-4 位于中导洞拱顶正上方, 受开挖影响最大, 中导洞坍塌和左洞开挖对地层沉降影响最大, 特别是左洞开挖后发生较大规模塌方, 地表和地中位移迅速增大, 地表位移测点 1-5 由 8.5 mm 迅速增长到 15.5 mm, 地中位移测点 2-4 由 11.6 mm 迅速增长到 18.2 mm, 分别增大了 82.4%, 56.7%, 地层沉降沿隧道中轴线呈对称性。测点 1-4, 1-6, 2-3 和 2-5 受主洞开挖影响最大, 最终位移量分别为 8.27, 8.16, 10.17, 9.89 mm, 虽然连拱隧道左、右洞开挖互相影响, 但是先行洞上方的地层沉降略大于后行洞。测点 1-1, 1-2, 1-8, 1-9, 2-1 和 2-7 在开挖过程位移变化较小, 且没有发生明显突变, 由于这些测点基本处于塌穿裂缝的外部, 受开挖扰动较小。粉煤灰堆积体中开挖隧道时, 地层受扰动会发生较大的变形, 施

工中应采用分部开挖并及时支护，减小掌子面的暴露面积，为了减少爆破对土体扰动的影响，建议在粉煤灰段采用机械开挖。

中导洞右拱肩突变达到 2.23 kPa，相比前一阶段，围岩压力分别增大了 14.74 倍和 15.92 倍。

3.5 大断面双连拱隧道塌落拱演化规律

塌落拱演化过程如图 10 所示，同一掌子面处，中导洞开挖会影响主洞的稳定性，造成主洞掌子面局部塌方，并在中导洞上方形成局部拱效应；主洞开挖时，拱腰处土体最先失稳并发生掉块，形成塌腔，随后塌腔不断扩大并向拱顶处延伸，同时出现拱形主裂缝，形成塌落拱，试验模型中隧道总跨度为 1.27 m，塌落拱高度为 0.51 m，塌落拱高度约为隧道开挖跨度的 0.4 倍，这对大断面隧道开挖荷载设计具有重要意义，左右洞开挖时会相互影响，破坏模式具有突发性、剧烈性、对称性、同步性特点；其中沿开挖轮廓线（包括塌腔的外沿），出现多组纵向裂缝并不断向上延伸致使土体发生剪切破坏，塌落拱内部土体整体弯曲下沉，导致拱内形成横向较小裂缝致使土体发生拉裂破坏，横向和纵向裂纹的发展使得拱内土体在拉-剪复合作用下进一步“切割”，土体更加破碎失稳加剧；此时，主裂缝外部与开挖中心点水平方向夹角 $34^{\circ} \sim 72^{\circ}$ 范围内出现新裂纹，呈环形分布，并与开挖轮廓线生成的纵向裂纹贯通直至地表形成更大范围的破裂区，最终致使整个地层发生破坏。

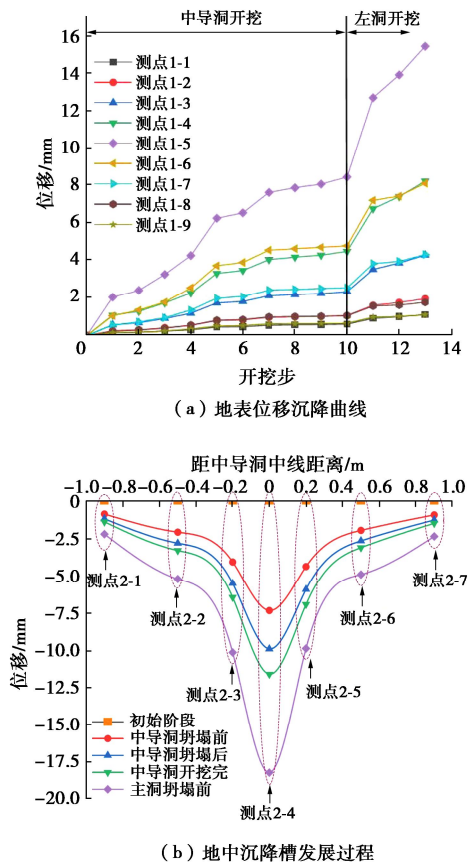


图 8 地层位移曲线

Fig. 8 Curves of ground settlement

3.4 围岩压力变化

试验中记录了中导洞左右拱肩的围岩压力情况，如图 9 所示。

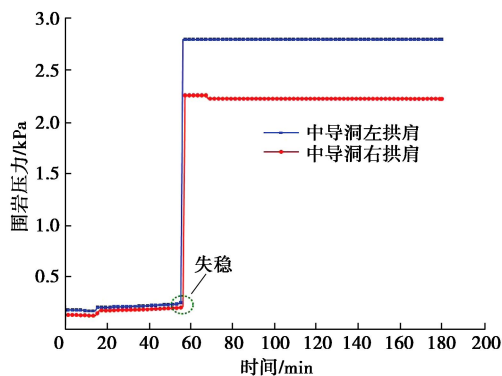


图 9 围岩压力变化

Fig.9 Variation of surrounding rock pressure

开挖过程中，初始阶段围岩压力左拱肩为 0.19 kPa，右拱肩为 0.14 kPa，随着中导洞上台阶的开挖，围岩压力有小幅度的增长，当隧道发生失稳时，围岩压力由原来的形变压力变为松动压力后，此时中导洞围岩压力剧烈增长，中导洞左拱肩突变达到 2.80 kPa，

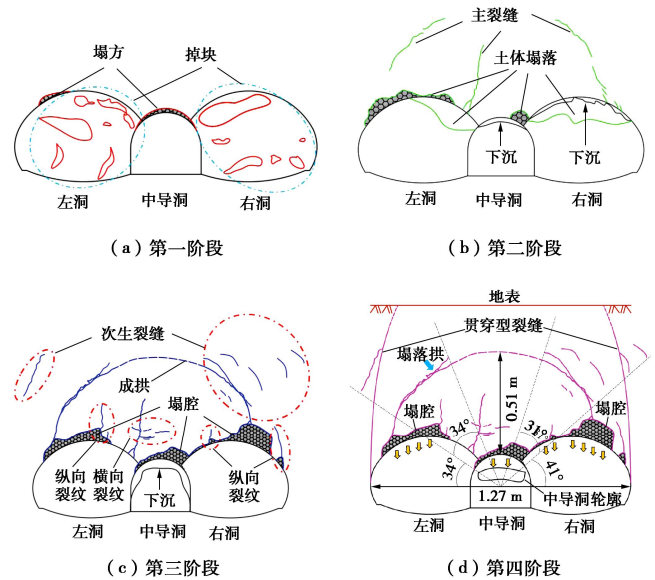


图 10 塌落拱演化过程

Fig. 10 Evolution process of collapse arch

4 开挖稳定性研究

4.1 单侧壁导坑法开挖

基于上一节中粉煤灰地层大断面连拱隧道塌落拱演化规律及开挖扰动特征，盐坪坝隧道采用单侧壁导坑法进行开挖，开挖工序 1~10，如图 11 所示。

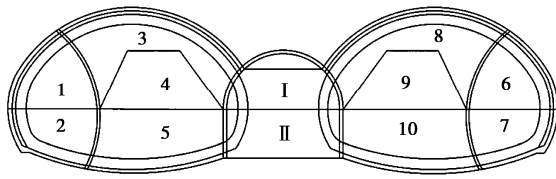


图 11 开挖工序

Fig. 11 Excavation sequence

试验中先开挖中导洞浇筑中隔墙, 然后进行主洞开挖, 中隔墙尺寸较大, 故开挖过程中中隔墙采用预埋方案, 模型试验土体本身比较脆弱, 加上试验设备和空间限制, 因此开挖工序不考虑空间效应和距离上的错开, 在同一断面处进行开挖, 如图 12 所示。

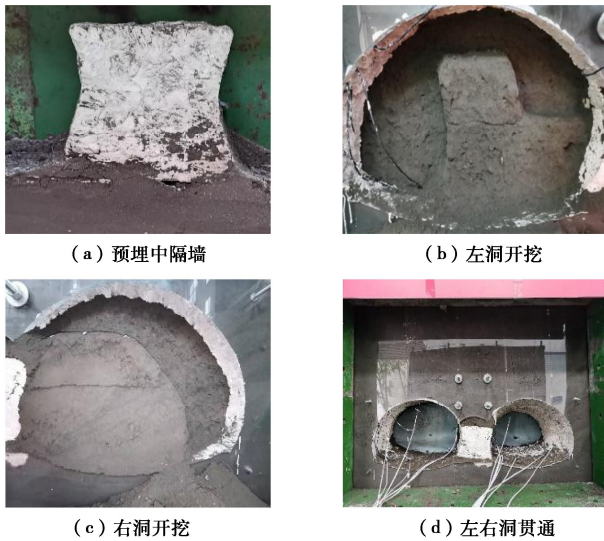


图 12 单侧壁导坑法开挖过程

Fig. 12 Excavation process of single-side drift method

试验具体步骤为: ①中隔墙预埋, 并进行填土压实; ②左上台阶开挖并施作初支; ③左下台阶开挖并施作初支; ④左上台阶环形开挖并施作初支; ⑤左上台阶核心土开挖; ⑥左下台阶开挖并施作初期支护; ⑦右上台阶开挖并施作初支; ⑧右下台阶开挖并施作初支; ⑨右上台阶开挖环形开挖; ⑩右上台阶核心土开挖; ⑪右下台阶开挖。上述开挖过程中初期支护及时施作。

4.2 试验结果分析

(1) 拱顶沉降规律

图 13 为单侧壁导坑法左右洞拱顶位移变化曲线, 左洞在开挖到监测断面前拱顶位移迅速增长并发生了 2.97 mm 的位移, 右洞在左洞扰动下拱顶位移略有增长, 仅发生 0.4 mm 的位移, 当通过监测断面后左洞位移量开始减小, 贯通后拱顶沉降达到 4.77 mm。右洞开挖到监测断面前, 拱顶位移变化与左洞类似, 下

沉量迅速增长, 开挖至监测断面时拱顶沉降达到 3.69 mm, 右洞贯通后拱顶沉降达到了 4.97 mm, 左洞在右洞的开挖扰动下最终位移达到 5.62 mm。其中先行洞受后行洞影响产生的拱顶沉降占总沉降量的 15%, 后行洞受先行洞影响产生拱顶沉降占总沉降量的 8%, 说明先行洞不仅受自身的开挖影响, 后行洞也会对其产生较大的影响。按照相似关系换算, 在实际施工过程中左右洞拱顶位移分别达到 16.86 cm 和 14.91 cm, 表明了粉煤灰这种松散堆积体进行大断面开挖时, 围岩极易发生较大变形, 造成失稳, 因此有必要对地层实施注浆加固, 提高地层整体强度, 同时加强掌子面的超前支护, 控制拱顶变形。

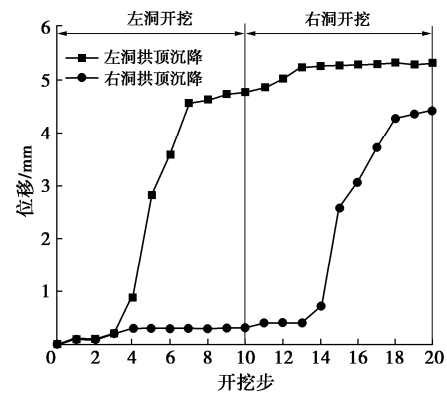


图 13 拱顶沉降曲线

Fig. 13 Curves of vault settlement

(2) 地表沉降规律

如图 14 所示, 单侧壁导坑法的地表沉降曲线基本关于中隔墙呈对称“双峰”状, 与上一节中无中隔墙时地层沉降呈“单峰”状明显不同, 中隔墙在双连拱隧道中具有重要的承载作用, 能够有效降低上方地层沉降量。

左、右洞一侧的地表位移增长主要发生在两洞各自开挖期间, 左洞开挖时, 右洞上方 1~6 测点下沉了 0.38 mm, 最终沉降量为 3.5 mm, 右洞开挖时, 左洞上方测点 1-4 又继续下沉了 0.57 mm, 最终沉降量为 4 mm, 按照相似关系, 测点 1-6 和 1-4 实际沉降量分别为 10.5 cm 和 12 cm, 先行洞上方的地层沉降量比后行洞上方的地层沉降量高约 14%, 左洞先行开挖对其上方的土体产生较强的扰动, 由于右洞未开挖其上方的土体扰动较弱, 右洞开挖时, 对左洞上方已扰动的土体又产生了 2 次扰动, 因此, 先行洞对后行洞的影响要弱于后行洞对先行洞的影响。中隔墙中间上方地层测点 1-5 最终产生位移 2.4 mm, 相较于左、右洞上方地层的位移量较小, 但是左右洞开挖期间位移都在呈现较大的增长, 故中隔墙上方的土体属于左右洞开挖过程中不断受到扰动的区域, 如果中隔墙上方回填不

密实，很容易造成中隔墙上方围岩变形过大。

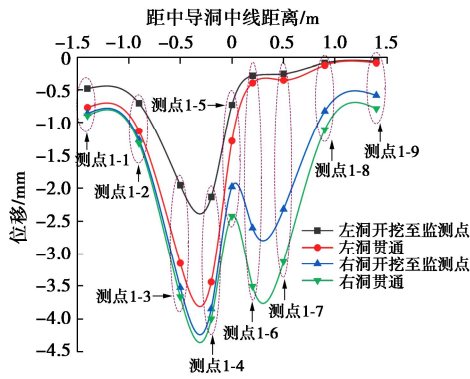


图 14 地表沉降规律

Fig. 14 Laws of ground surface settlement

(3) 初期支护受力

钢拱架采用预埋的方式，通过测点表面应变，按照下列换算公式获得钢架的轴力和弯矩^[19]，并根据相似关系换算成实际中的数值，隧道开挖完成后初期支护钢拱架的轴力和弯矩分布情况如图 15 (a)，(b) 所示。

$$N = \frac{1}{2} E(\epsilon_{内} + \epsilon_{外}) bh \quad (4)$$

$$M = \frac{1}{12} E(\epsilon_{外} - \epsilon_{内}) bh^2 \quad (5)$$

左洞初期钢架各位置轴力明显大于右洞，但其分布规律基本类似，呈现上边大，下边小的情况，左右洞轴力最大的点都位于左右拱肩处且靠近中隔墙一侧，分别为-533，-506 kN。左右洞最大弯矩均出现在拱顶处，分别为 156，149 kN·m，左洞拱顶周边弯矩明显大于右洞，轴力和弯矩分布图说明初期支护的荷载主要来自于隧道上方土体的松动压力，导致在拱顶钢架出现内弯，拱顶处容易发生初支受拉开裂的情况。

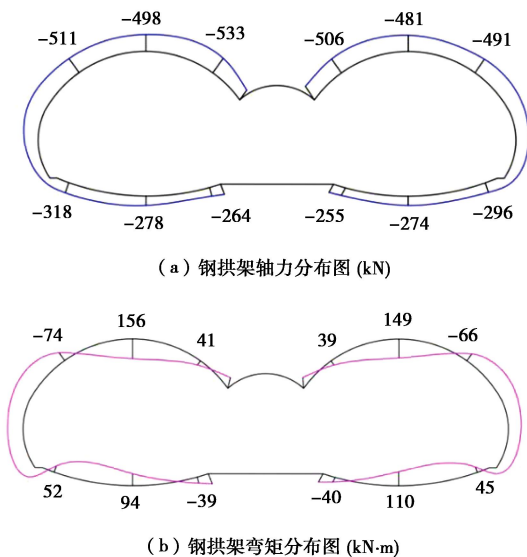


图 15 钢拱架受力分布图

Fig. 15 Distribution of steel arch stress

(4) 中隔墙结构受力分析

中隔墙是连拱隧道的重要组成部分，中隔墙的受力直接关系到连拱隧道的施工安全性，后期又关系到结构受力，故分析中隔墙受力十分重要，隧道开挖过程中中隔墙的受力变化如图 16 所示。

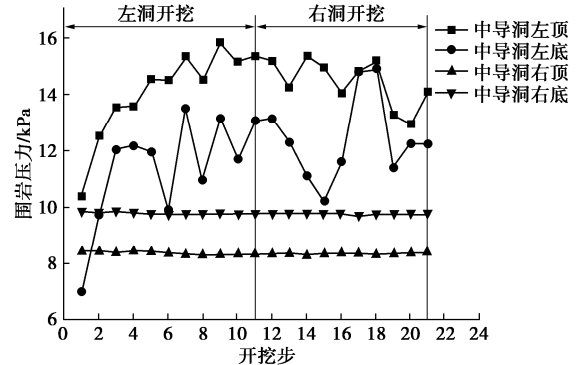


图 16 中隔墙压力分布

Fig. 16 Pressure distribution of middle partition wall

中隔墙一侧上下受力基本同步变化，左洞先行开挖时，中隔墙左侧受力显著增大，中隔墙左上、下侧受力最大值分别为 15.83，13.51 kPa，相较于初始值分别增加了 52%，93%，随着右洞开挖，中隔墙左侧受力出现了明显的减小，右洞挖通后中隔墙左上、下侧受力分别为 14.12，12.25 kPa，相较于最大值分别减少了 10.8%，9.3%。在整个开挖过程中，中隔墙右上、下侧受力基本不发生变化，波动的幅值不超过 0.5 kPa，中隔墙右下方受力大于右上方受力，可能由于中隔墙的自重导致这一结果。

开挖过程中中隔墙左侧受力较大，右侧受力较小或基本不发生变化，这是由于左洞先开挖时，单洞形成的压力拱拱脚作用在中隔墙左侧，引起中隔墙左侧应力集中，受开挖扰动和应力调整，导致受力处于波动状态且不断增加；而右洞开挖时，迅速调整为双连拱隧道的压力拱形式，如图 17 所示，所以中隔墙右侧始终处于受力较小的状态。随着开挖进行，中隔墙左侧上下处的压力有所降低，压力差值也逐渐减小，如果开挖步数足够长，中隔墙左右侧受力应该渐渐趋于平衡状态。

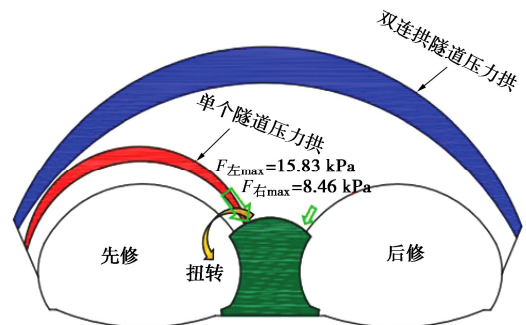


图 17 双连拱隧道压力拱形式

Fig. 17 Patterns of pressure arch of double-arch tunnel

因此在隧道实际开挖过程中中隔墙会受到偏压作用,向先修隧道侧偏转,故在实际施工中先行洞开挖后,应在中隔墙左侧及时添加支撑物,或在右侧用可压缩性较小的材料进行回填,以防止先行洞开挖过程中造成中隔墙偏转,引起初支开裂。

5 结 论

为探究双连拱隧道穿越粉煤灰堆积体塌落拱的演化规律及施工力学行为,开展了室内大型物理模型试验,主要得到以下4点结论。

(1) 类似粉煤灰这种软土地层大断面隧道开挖时,极易发生失稳。本文揭示了双连拱隧道塌落拱演化规律,大致可分为局部塌落期、主拱成形期、失稳剧烈期、地层贯穿破坏期四个阶段;中导洞开挖会导致主洞掌子面局部掉块,主洞开挖时拱腰及拱顶处最先发生土体塌落;塌落拱高度约为隧道开挖跨度的0.4倍;纵向裂缝沿开挖轮廓线向上发展,横向裂缝在拱内发育,纵向裂缝与环形裂缝贯通后,造成地层贯穿破坏。

(2) 主洞失稳前后,地表和地中位移分别增大了82.4%,56.7%,中导洞左、右拱肩处压力增大了14.74倍和15.92倍;双连拱隧道变形和失稳具有对称性、同步性、剧烈性和突发性的特点,在隧道开挖中应尽可能减弱对地层的扰动,建议在粉煤灰段采用机械开挖,若先行洞发生失稳,后行洞在同一里程处应提前采取加固措施。

(3) 单侧壁导坑法开挖时,左右洞拱顶实际沉降量分别为16.86,14.91 cm,实际最大弯矩分别为156,149 kN·m,地中沉降呈对称“双峰状”,先行洞侧最大沉降量12 cm,后行洞侧最大沉降量10.5 cm;先行洞相较于后行洞受开挖影响较大。地层需实施注浆加固,同时加强超前支护,控制拱顶位移。

(4) 中隔墙在双连拱隧道中具有重要的承载作用,能够有效的减缓上覆地层沉降;先行洞开挖时,单洞形成的压力拱拱脚作用在中隔墙左侧,导致中隔墙左侧受力显著增大;后行洞开挖时,单洞压力拱形式迅速调整为双洞压力拱形式,此时中隔墙左侧压力减小,中隔墙右侧受力始终较小,且变化波动不大。由于中隔墙会在隧道实际开挖中受到偏压作用,故在先行洞开挖时应在中隔墙左侧及时提供支撑,防止中隔墙向先修隧道侧偏转。

参考文献:

[1] 陈湘生,徐志豪,包小华,等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14.

(CHEN Xiangsheng, XU Zhihao, BAO Xiaohua, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 1-14. (in Chinese))

- [2] 李志厚,朱合华,丁文其. 公路连拱隧道设计与施工关键技术[M]. 北京:人民交通出版社,2010. (LI Zhihou, ZHU Hehua, DING Wenqi. Key Technology of Design and Construction for Highway Twin-Tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [3] FRALDI M, GUARRACINO F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(4): 665-673.
- [4] FRALDI M, GUARRACINO F. Analytical solutions for collapse mechanisms in tunnels with arbitrary cross sections-Science Direct[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 47(2): 216-223.
- [5] 朱合华,黄 锋,徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1113-1122. (ZHU Hehua, HUANG Feng, XU Qianwei. Model test and numerical simulation for progressive failure of weak and fractured tunnel surrounding rock under different overburden depths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1113-1122. (in Chinese))
- [6] 房 倩,张顶立,王毅远,等. 圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 564-571. (FANG Qian, ZHANG Dingli, WANG Yiyuan, et al. Model test study of failure modes of surrounding rock for circular Caverns[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 564-571. (in Chinese))
- [7] 李英杰,张顶立,宋义敏,等. 软弱破碎深埋隧道围岩渐进性破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1138-1147. (LI Yingjie, ZHANG Dingli, SONG Yimin, et al. Experimental research of progressive damage of surrounding rock for soft fractured deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1138-1147. (in Chinese))
- [8] 郑康成,丁文其,金 威,等. 特大断面隧道分步施工动态压力拱分析研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (增刊 1): 72-77. (ZHENG Kangcheng, DING Wenqi, JIN Wei, et al. Experimental and numerical study on staged construction pressure arch of super large section tunnel[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 72-77. (in Chinese))

- [9] 宫全美, 张润来, 周顺华, 等. 基于颗粒椭球体理论的隧道松动土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 99-105. (GONG Quanmei, ZHANG Runlai, ZHOU Shunhua, et al. Method for calculating loosening earth pressure around tunnels based on ellipsoid theory of particle flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 99-105. (in Chinese))
- [10] NOMIKOS P P, SOFIANOS A I, TSOUTRELIS C E. Symmetric wedge in the roof of a tunnel excavated in an inclined stress field[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, **39**(1): 59-67.
- [11] SUBRIN D, WONG H. Tunnel face stability in frictional material: a new 3D failure mechanism[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2002, **330**(7): 513-519.
- [12] 李鸿博, 郭小红. 公路连拱隧道土压力荷载的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(11): 3429-3434. (LI Hongbo, GUO Xiaohong. Research on calculation methods of earth pressure on Muti-arch tunnel for highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(11): 3429-3434. (in Chinese))
- [13] 丁文其, 王晓彤, 朱合华, 等. 连拱隧道设计荷载的确定方法[J]. 中国公路学报, 2007, **20**(5): 78-82. (DING Wenqi, WANG Xiaoxing, ZHU Hehua, et al. Defining method for designing load of multi-arch tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, **20**(5): 78-82. (in Chinese))
- [14] LI C L, WANG S R, ZOU Z S, et al. Evolution characteristic analysis of pressure-arch of a double-arch tunnel in water-rich strata[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2016, **9**(1): 44-51.
- [15] 咎文博, 赖金星, 邱军领, 等. 松散堆积体隧道压力拱效应试验与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(9): 1666-1674, 后插 2. (ZAN Wenbo, LAI Jinxing, QIU Junling, et al. Experiments and numerical simulations on pressure-arch effect for a tunnel in loose deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(9): 1666-1674, back insert No. 2. (in Chinese))
- [16] 谢亦朋, 杨秀竹, 阳军生, 等. 松散堆积体隧道围岩变形破坏细观特征研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(12): 4925-4934. (XIE Yipeng, YANG Xiuzhu, YANG Junsheng, et al. Mesoscopic characteristics of deformation and failure on surrounding rocks of tunnel through loose deposits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(12): 4925-4934. (in Chinese))
- [17] 朱正国, 朱永全, 吴广明, 等. 泥石流堆积体隧道基底加固方法及稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 617-621 (ZHU Zhengguo, ZHU Yongquan, WU Guangming, et al. Strengthening method and stability analysis for tunnel base in debris flow accumulation body[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 617-621. (in Chinese))
- [18] 杨建周. 穿越松散堆积体围岩加固与隧道施工技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, **16**(5): 1266-1273. (YANG Jianzhou. Mesoscopic characteristics of deformation and failure on surrounding rocks of tunnel through loose deposits[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, **16**(5): 1266-1273. (in Chinese))
- [19] 方勇, 符亚鹏, 杨志浩, 等. 公路隧道下穿煤层采空区开挖过程相似模型试验[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(2): 125-134. (FANG Yong, FU Yapeng, YANG Zhihao, et al. Similarity model test of highway tunnel excavation beneath mined-out area[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(2): 125-134. (in Chinese))