

引用本文:翁效林,陈禹勋,贾金昌,等.大跨度双连拱隧道下穿既有地铁近接施工的围岩力学特征模型试验研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):137-147.

WENG Xiaolin, CHEN Yuxun, JIA Jinchang, et al. Model test study on mechanical characteristics of surrounding rock of long-span double-arch tunnel underpassing existing subway close-spaced construction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 137-147.

DOI:10.19815/j.jace.2022.08064

大跨度双连拱隧道下穿既有地铁近接施工的围岩力学特征模型试验研究

翁效林¹, 陈禹勋¹, 贾金昌², 史少华², 秦成伟¹, 侯乐乐¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安沣东市政工程建设有限公司, 陕西 西安 710086)

摘要:以西安沣东路市政通道工程下穿地铁5号线区间既有地铁结构为工程背景,采用模型试验和有限元数值模拟相结合的方法研究大跨度双连拱隧道下穿既有地铁结构近接施工的力学特征响应过程。结果表明:随着大跨度双连拱隧道开挖,地表沉降呈现“缓慢增加—急剧增大—趋于稳定”3个阶段;中隔墙处对应地表沉降值最大,对此处的地表变形应加强监测,及时控制;拱顶竖向应力变化也呈现“应力聚集—应力释放—稳定状态”3个阶段,且会在一定范围形成压力拱来承担上部荷载;边墙所受开挖扰动比拱顶大,边墙竖向应力集中及水平应力释放主要在0.3倍~0.5倍单洞开挖跨度范围内,对此部分围岩应及时注浆加固处理;通过试验和数值计算得到U型槽轨道板上下表面应力曲线形状均呈“W形”和“倒W形”,且轨道板最大沉降和翘曲出现在 $-0.9D \sim 0.9D$ (D 为隧道单洞开挖跨度)处,此处会出现最大拉压应力;此研究成果为本隧道的设计和施工提供了理论依据,同时对今后类似工程的施工提供了良好的借鉴和参考价值。

关键词:隧道工程;大跨度双连拱隧道;下穿地铁隧道;模型试验;围岩;力学响应

中图分类号:U456

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)06-0137-11

Model test study on mechanical characteristics of surrounding rock of long-span double-arch tunnel underpassing existing subway close-spaced construction

WENG Xiaolin¹, CHEN Yuxun¹, JIA Jinchang², SHI Shaohua², QIN Chengwei¹, HOU Lele¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shannxi, China; 2. Xi'an Fengdong Municipal Engineering Construction Co. Ltd., Xi'an 710086, Shannxi, China)

Abstract: Based on the existing subway structure that underpassing the section of metro line 5 of Fenghe east road municipal passageway project in Xi'an as the engineering background. The model test and finite element numerical simulation were used to study the mechanical characteristic response process of underground double-arch tunnel. The results show that with the excavation of long-span double-arch tunnel, the surface settlement presents three stages of slow increase, sharp increase and tend to be stable, and the corresponding surface settlement

收稿日期:2023-02-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600601, 2021YFB2600600)

作者简介:翁效林(1980-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail:49768532@qq.com。

value is the largest at the middle partition wall, which should be strengthened monitoring and timely control of surface deformation. The change of vertical stress in vault can also present three stages of stress accumulation, stress release and stable state, and the pressure arch will be formed in a certain range to bear the upper load. The amplitude of excavation disturbance of the side wall is larger than that of the vault. The vertical stress concentration and horizontal stress release of the side wall are mainly in the range of 0.3 times to 0.5 times the span of single hole excavation. Therefore, some surrounding rocks should be reinforced by grouting in time. The test and numerical calculation results show that the stress curves of the upper and lower surfaces of the U-groove track plate are “W-shaped” and “inverted W-shaped”, and the maximum settlement and warping of the track plate appear at $-0.9D$ to $0.9D$ (D is the single tunnel excavation span), where the maximum tension and compression stress occurs. The research results provide a theoretical basis for the design and construction of the tunnel, and also provide a good reference value for the construction of similar projects in the future.

Key words: tunnel engineering; long-span double-arch tunnel; underpass subway; model test; surrounding rock; mechanical response

0 引言

近年来,连拱隧道在隧道施工建设中得到了越来越多的应用,而大跨度连拱隧道开挖施工难度必然受到隧道埋深、长度、断面尺寸、是否穿越建筑物及构筑物等因素的影响。因此,开展连拱隧道施工过程的力学研究有十分重要的意义。

目前,国内外众多学者围绕连拱隧道分别从现场试验、模型试验、理论解析以及数值模拟等方面开展了大量研究。在现场试验方面,周丁恒等^[1]对浅埋大断面大跨度连拱隧道在不同开挖工序下的支护体系受力特点进行了分析与研究,总结出了不同工序下开挖的支护体系受力特点;张春洪等^[2]利用压力盒、钢筋计等元件监测了南山路浅埋大跨双连拱隧道初期支护和二衬之间的应力,得到了应力变化规律;叶飞等^[3]对连拱隧道中隔墙现场监测进行研究,并给出了中隔墙的监测方法;申玉生等^[4]监测了偏压连拱隧道的施工过程,得出对隧道围岩变形影响最大的工序;杨果林等^[5]通过监测连拱隧道复合式曲中墙,得出了中墙最不稳定的状态出现在主洞非对称开挖阶段的结论。在模型试验方面,Li 等^[6]基于缩尺模型试验,研究了长城下浅埋双拱隧道支护结构的力学响应过程;李树忱等^[7]采用模型试验的方法对长城岭隧道进行研究,得到了中隔墙不同位置压力的变化趋势;白浪峰等^[8]利用模型试验对软弱破碎连拱隧道进行分析,确定了连拱隧道围岩的松动范围;文献[9]、[10]针对双连拱隧道开挖过程中围岩的稳定性进行了模型试验研究,并分

析了隧道的破坏过程;刘涛等^[11]按弹性阶段相似原则对云南元磨高速一座连拱隧道进行室内模型试验,得出施工过程中围岩位移、应力和塑性区分布规律。在理论解析以及数值模拟方面,Yang 等^[12]提出了一套浅埋双连拱隧道衬砌结构内力的解析解,并验证了所推导解析解的正确性;Yoshimura 等^[13]通过有限元模拟计算研究了新奥法连拱隧道施工全过程中围岩的变形规律;张浩等^[14]根据广佛环城际铁路工程地质概况,采用有限元软件数值模型,通过对比选得出四线大断面隧道暗挖下穿综合管廊段的最佳施工方案;胡志平等^[15]利用有限元分析方法对连拱隧道主洞开挖过程进行模拟,确定了对地表及隧道影响最小的开挖错距;Wang 等^[16]以埋深 80 m 的双连拱公路隧道为研究对象,利用 FLAC3D 软件建立了双连拱隧道的数值计算模型,分析了分步开挖引起的压力拱的形态演变;文献[17]、[18]对连拱隧道不同开挖方案及隧洞不同位置进行分析,给施工方案提出了优化建议。以上研究成果主要集中在隧道施工非穿越结构建筑物,且支护情况较为简单,但涉及到大跨度连拱隧道下穿地铁结构近接施工时,隧道结构更加复杂,围岩力学性质更加不稳定。

鉴于此,本文开展了暗挖隧道近接施工过程力学模型试验研究,利用 MIDAS 软件对砂质地层条件下双连拱隧道下穿地铁结构的近接施工全过程进行三维数值模拟,对比试验监测数据和数值计算结果,总结围岩应力变化和沉降的规律,系统分析 U 型槽轨道板的位移变形过程,为设计和施工提供理论依据,同时为今后类似工程的施工提供良好的借

鉴和参考价值。

1 工程概况

西安市沣河东路下穿通道工程南起昆明三路,北至西宝高速北辅道,项目全长约 1 868 m,本文所研究下穿通道工程下穿地铁 5 号线 U 型槽段位于沣河东路与昆明二路交叉口,下穿段为双连拱暗挖结构,隧道开挖总跨度 35.14 m,高度为 10.23 m,下穿长度为 30 m,U 型槽实际断面宽度 11.4 m,底板厚度 0.8 m,侧墙厚度 0.6 m,为钢筋混凝土结构。根据勘察报告,拟建线路沿线共划分为 7 个工程地质层,从上到下依次为第四系全新统人工填土、冲积黄土状土、冲积中砂、圆砾、粉质黏土和上更新统冲积粉质黏土、粗砂,下穿隧道范围土体主要为中砂层,骨架颗粒以石英、云母为主,砂质不纯,含有黏土质,颗粒均匀,颗粒粒径一般为 0.25~0.5 mm,局部夹有薄层粉质黏土层,拟建项目与地铁结构相对位置如图 1 所示。隧道开挖面与 U 型槽结构底板竖向净距约 2.5 m,从 U 型槽轨道底板穿越施工对 U 型槽底板及侧墙安全影响巨大。

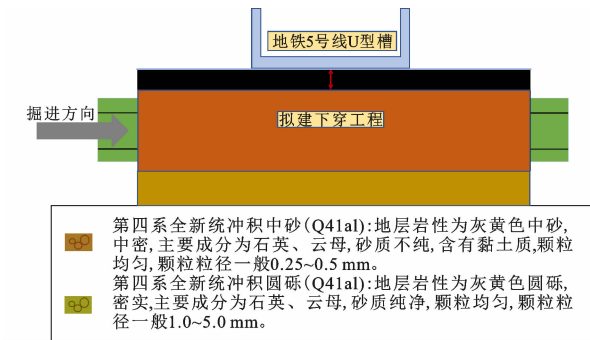


图 1 拟建项目与地铁结构相对位置

Fig. 1 Relative position of proposed project and subway structure

2 室内模型试验

2.1 相似关系及相似材料

试验以几何相似比 $C_L=50$ 和重度相似比 $C_\gamma=1$ 为基础相似比,其他物理量按照模型相似理论进行相似比导出^[19],结果确定如下:泊松比 ν 、应变 ϵ 、内摩擦角 φ 相似比满足 $C_\nu=C_\epsilon=C_\varphi=1$;抗压强度 R 、应力 σ 、黏聚力 c 、弹性模量 E 相似比满足 $C_R=C_\sigma=C_c=C_E=50$ 。根据该暗挖隧道区间的地质勘察资料,选取暗挖隧道段具有代表性的中砂和圆砾作为原岩材料;根据相关研究,试验拟采用重晶石粉、河砂作为主要材料,凡士林作为胶结材料,混合

配比进行试验,最终确定中砂相似围岩材料中凡士林、河砂、重晶石粉的配比为 0.75 : 4 : 11.5;圆砾相似围岩材料中凡士林、河砂、重晶石粉配比为 0.7 : 4.5 : 12.3。根据直剪、固结压缩等力学试验测定的材料参数如表 1 所示。

表 1 原型和模型材料参数

Table 1 Prototype and model material parameters

材料	类别	压缩模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
中砂	原型	20.0	0.29	20.0	33
	模型	0.4	0.29	0.4	33
圆砾	原型	50.0	0.25	20.0	35
	模型	1.0	0.25	0.4	35

2.2 模型试验装置

2.2.1 模型试验台架

采用长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室模型试验箱(尺寸为 3.2 m×0.6 m×2.0 m),为便于观察试验现象,模型箱前后使用透明钢化玻璃,中部位置预留可拆卸挡板。实际工程中暗挖隧道的影响范围确定为 100 m×55 m×30 m,为了满足本次试验要求,且尽可能消除边界效应的影响,调整后的模型地层范围为 2 m×1.1 m×0.6 m,如图 2 所示。

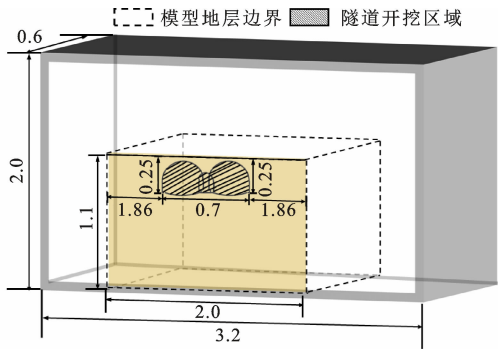


图 2 模型试验台架示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of model test bench (unit:m)

2.2.2 应力-应变测试系统

在试验模型地层内部埋设 BW 型电阻式微型土压力盒,用于实时量测开挖过程中的围岩应力数据,压力盒量程为 30 kPa,精度为 0.1%,外形尺寸为 12 mm×4 mm,具有精度高、对土体扰动小的特点。用 BF350 电阻式应变片对 U 型槽的变形进行量测,并通过 JM3813 静态应变仪采集所有的应力、应变数据,测试采集系统如图 3 所示。

2.2.3 位移监测系统

试验开挖过程中对地表位移沉降和 U 型槽轨道板位移变形进行实时监测,采用自主研发的单排

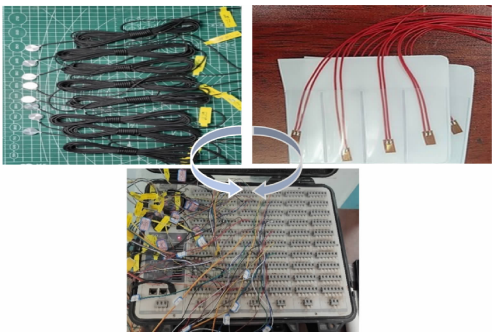


图3 测试采集系统
Fig. 3 Test acquisition system

激光位移计搭载拉线位移传感器的非接触式位移监测系统(图4)。该系统克服了传统千分表测量地表沉降需要与土体直接接触的不足,并且可通过数据处理系统直接绘制地表变形曲线。激光位移计沿开挖隧道纵向布置,在对地表沉降进行监测时,拉线位移传感器与电机连接,拉绳带动单排激光位移计沿隧道横向运动,激光位移传感器扫描地表,结合拉绳的长度变化,通过数字信号分析系统输出与地表横向坐标对应的沉降变化图。

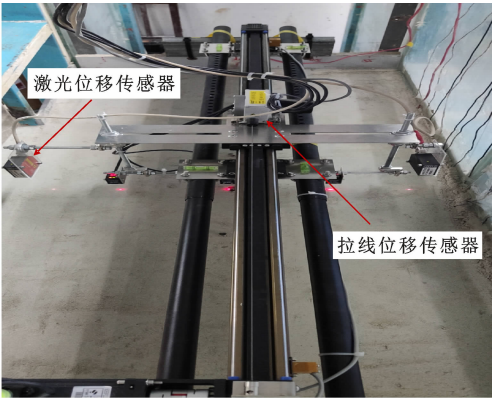


图4 位移监测系统
Fig. 4 Displacement monitoring system

2.2.4 支护结构与材料

为了模拟现场喷射 C25 混凝土作为初期支护结构的情况,模型试验采用轻质石膏砂浆作为模拟材料,根据相似比例换算,初期支护结构厚度为 6 mm,所有初支结构凝固成型后均养护 2 d 后再进行使用。管幕预加固结构采用直径 10 mm 的聚乙烯 PP 管模拟,使用之前在相邻塑料管之间涂抹水泥砂浆可模拟部分注浆液和锁扣的黏结效果,以增加管幕结构与围岩之间的相互作用能力。模拟支护结构如图 5 所示。

2.3 监测方案与测点布置

2.3.1 应力应变监测

试验选取隧道中部断面处布置应力监测元件,

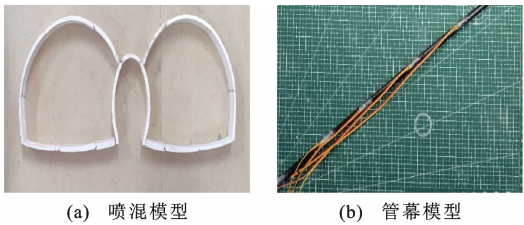


图5 模拟支护结构
Fig. 5 Simulation supporting structure

埋设电阻式微型土压力盒监测连拱隧道围岩拱顶处的径向应力和环向应力、边墙处的竖向和水平应力,并通过静态应变仪采集系统采集数据。监测断面土压力盒布置如图 6 所示。图 6 中 A1-1 和 B1-1 分别为左右拱顶环向应力测点,A1-2 和 B1-2 分别为左右拱顶径向应力测点,A2~5、B2~5 分别代表左洞边墙的竖向应力和右洞边墙的水平应力测点。地层模型材料分层填入模型箱,每次填筑 10 cm,并逐层夯实直至应力测点位置,埋设应力监测元件。埋设时必须保证土压力盒受力面始终与所监测应力的方向垂直,且元件附近土层应尽量保持密实。

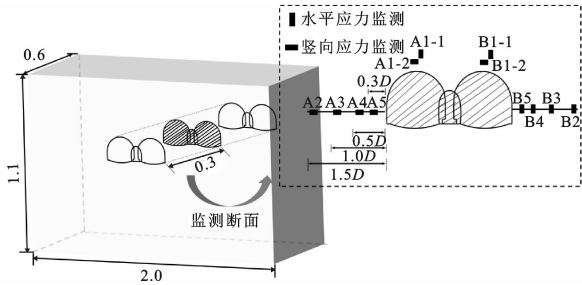


图6 监测断面土压力盒布置(单位:m)
Fig. 6 Earth pressure box layout at monitoring section (unit: m)

按照试验设计方案,采用电阻式应变片测量 U 型槽轨道板的弯曲、剪切变形。以轨道板中心线为对称中心线,在 U 型槽上下表面相同位置共布置 22 个应变片(J1~J11、K1~K11),相邻应变片的间隔均为 0.3D(D 为隧道单洞开挖跨度),应变片的布置如图 7 所示(轨道板底面布置未画出)。

2.3.2 地表沉降监测

试验采用激光位移计对地表沉降进行实时监测,考虑到隧道开挖范围内地表沉降变化较大,故地表沉降测点关于隧道开挖方向对称布置,具体测点如图 8 所示。

2.4 试验方案实施过程

试验在模拟材料填筑、夯实、监测元件埋设后,将 U 型槽嵌入土层一定深度,待完整地层模型静置 2 d 使其在自重作用下充分固结后开始进行隧道

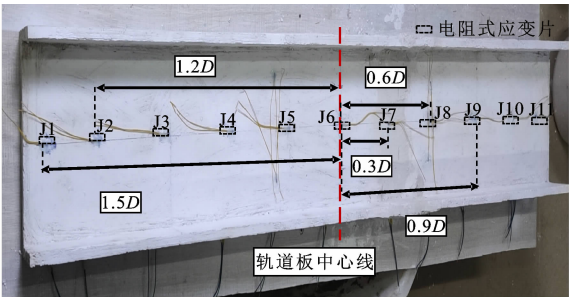


图 7 U 型槽轨道板测点布置

Fig. 7 Measuring point layout for U-groove track plate

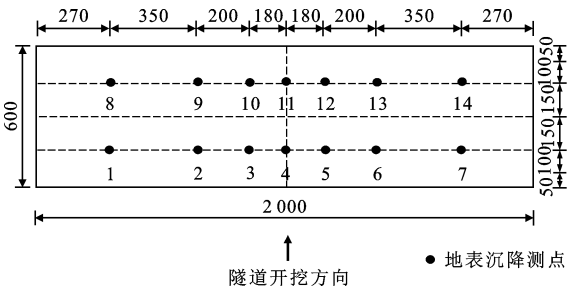


图 8 地表沉降测点布置(单位:mm)

Fig. 8 Measuring point layout of surface subsidence (unit:mm)

开挖。为了真实模拟依托工程实际开挖情况,采用三导洞法+双侧壁导坑法开挖 60 cm(模拟实际工况 30 m),以 4 cm 为一个进尺(模拟实际工况 2 m)。双侧壁导坑法施工工序较为复杂,且临时支撑在模型试验中会占据一部分的操作空间,因此,在本试验中通过涂抹石膏的方法对临时支撑及初支进行模拟,并忽略了二衬的施作。考虑到试验过程中的操作空间,本试验对开挖步骤进行了一定程度的简化:各开挖部分在隧道开挖方向上不再错开,隧道的支护过程与拆撑过程在同一断面进行,详细实施过程如图 9 所示。

3 试验结果分析

3.1 地表沉降变化规律

在隧道开挖过程中,对模型地表所布置的特殊测点进行了沉降实时监测,着重选取地表沉降测点 3、4、5(分别对应隧道左、右拱顶及中隔墙处顶部)分析,得到各测点地表沉降位移演化规律,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,在开挖初始阶段(开挖步数小于 30 步时),由于中导洞的开挖,测点 4 处的地表沉降急剧增大,原因可能是中导洞上方地表超出管幕加固范围,中导洞的开挖导致此处的地表沉降增大程度过高。反观左右拱顶上部围岩,由于管幕的

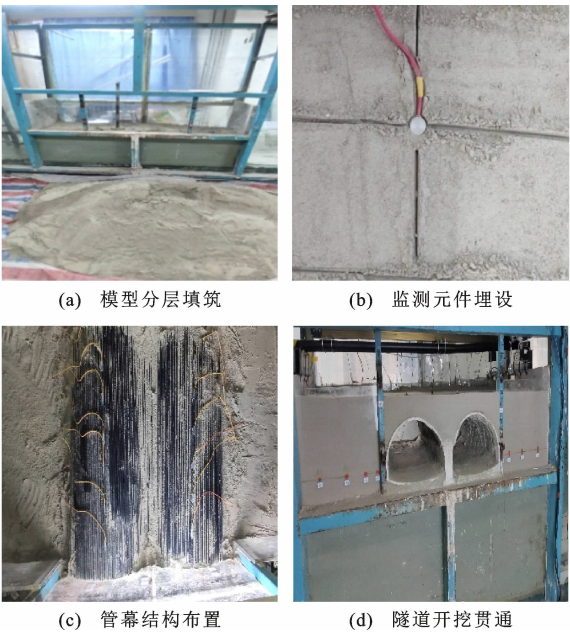


图 9 模型试验实施过程

Fig. 9 Model test implementation process

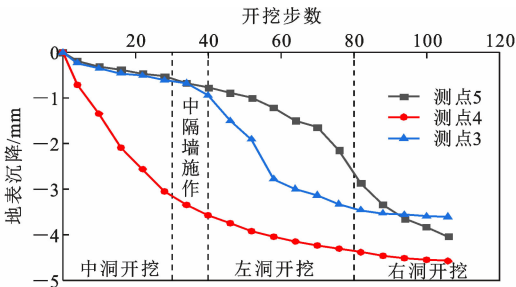


图 10 地表沉降变化曲线

Fig. 10 Variation curves of surface subsidence

超前支护作用,沉降速率较为缓慢;当开挖步数达到 40 步时,双侧壁导坑法左洞开挖,测点 3 地表沉降速率急剧增加,中隔墙和右洞处地表也产生轻微的沉降,直至开挖 70 步左右时沉降位移速率才逐渐减缓;开挖步数达到 80 步时,右洞开始开挖,导致测点 5 处地表沉降速率产生剧烈的改变,且沉降位移趋势呈线性增大直至开挖结束。

左右导洞开挖时对应测点处的地表沉降演化规律大致相似,都经历了“缓慢增加—急剧增大—趋于稳定”的过程。中隔墙处对应测点的地表沉降虽然趋势与左右拱顶大致相似,但其无论是初始或最终沉降值都较为显著。因此,在隧道施工过程中,中导洞开挖完成后应及时完成中隔墙的浇筑,并增大对中隔墙的监测和保护力度,提前控制围岩变形。

3.2 围岩应力特征及演化规律

选取监测断面内左右拱顶的径向和环向应力,以及边墙处的水平和竖向应力进行系统分析,研究

隧道围岩应力的特征和随施工步数的变化规律。试验所采集的数据均为围岩应力的相对变化值,暗挖连拱隧道开挖全过程中左洞拱顶围岩测点的应力变化曲线如图 11 所示,其中应力 σ 为正值代表相对于初始值增大, σ 为负值代表相对于初始值减小(下文均相同)。

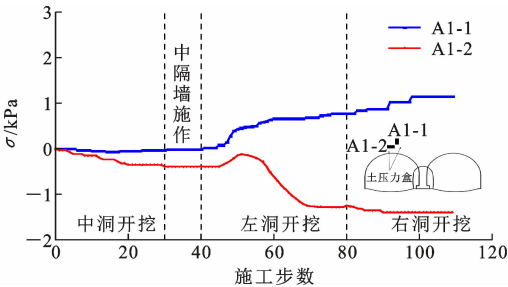


图 11 左洞拱顶测点应力变化曲线

Fig. 11 Stress change curve of measuring point on left cave vault

由图 11 可知,随着中导洞的开挖,左洞拱顶无论是环向应力还是径向应力都产生了一定的波动,说明尽管中导洞开挖断面小,还是会对围岩产生一定程度的影响。但是当中隔墙浇筑完成后,较好地阻止了拱顶围岩应力的变化,拱顶应力波动幅度较小。当左导洞开始开挖时,拱顶径向应力出现短暂的增加现象,这是因为开挖产生的扰动作用传递到所布置的监测断面,从而引起径向应力产生短暂的应力聚集现象,聚集现象过后径向应力和环向应力都发生剧烈的变化,径向应力开始急剧减小,应力释放率达到最大,反观环向应力却是增大的,说明在该应力监测范围内形成了压力拱^[20]。继续开挖,掌子面继续推进,径向应力再次急剧下降,这是由于开挖掌子面经过监测断面,围岩松动范围再次扩大所致。待掌子面超出监测断面时,由于支护的施作,拱顶径向应力逐渐恢复稳定状态。当右导洞开挖后,拱顶环向和径向应力都经历小幅度波动然后趋于稳定的过程,说明连拱隧道先行洞的开挖对后行洞围岩的稳定仍然会产生细微的影响。

右导洞拱顶应力总体变化过程(图 12)与左导洞相似。可以看出,中导洞开挖使拱顶环向和径向应力产生一定程度的减小。随后,由于支护结构的作用,拱顶应力逐渐回升并趋于稳定。左导洞的开挖对右洞拱顶应力的影响较小,其应力变化不显著。当右导洞开挖时,拱顶径向应力短暂聚集后开始释放,环向应力却是增大的,说明右洞拱顶此区域也形成了压力拱。随后径向应力呈“断崖式”下降,应力

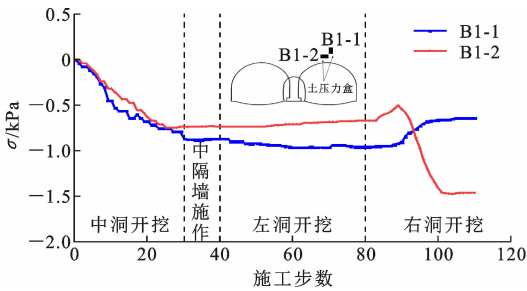


图 12 右洞拱顶测点应力变化曲线

Fig. 12 Stress change curve of measuring point on right cave vault

释放率达到最大,应力达到最小值,这是因为掌子面开挖至监测断面处。此后,由于支护的施作,拱顶环向和径向应力在一定幅度的回升后趋于稳定状态。总体而言,双连拱隧道施工开挖过程中拱顶径向应力都会经历“应力聚集—应力释放—稳定状态”这几个过程,且在一定范围都会形成压力拱。

再选取离隧道左右洞开挖轮廓线不同距离的竖向和水平应力进行分析,分别得到了距右洞边墙 0.3D~1.5D 的水平应力和距左洞边墙 0.3D~1.5D 的竖向应力随开挖步数的变化曲线,如图 13、14 所示。

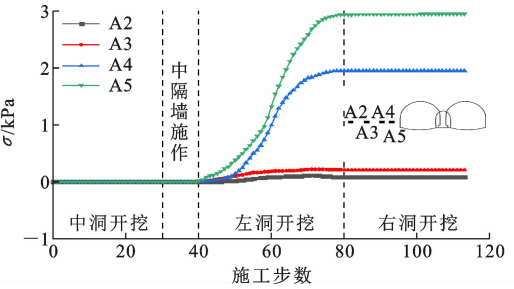


图 13 左洞边墙竖向应力随开挖步数变化

Fig. 13 Vertical stress changes of left hole side wall with excavation steps

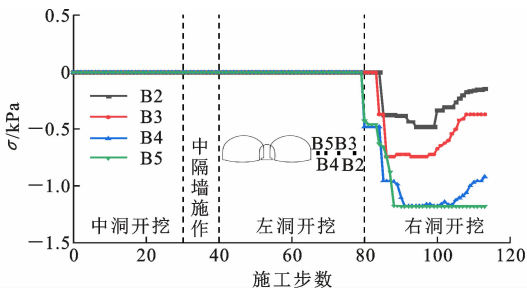


图 14 右洞边墙水平应力随开挖步数变化

Fig. 14 Horizontal stress changes of right hole side wall with excavation steps

由图 13 可以看出:在进行中导洞的开挖及中隔墙的浇筑时,左洞边墙竖向应力基本不变;开挖至监

测断面之前,A2~A3 的竖向应力只作小范围波动,而 A4~A5 的竖向应力显著增大;与拱顶围岩监测路径相比,边墙围岩受开挖扰动范围较大;当开挖经过监测断面后,离边墙较近的 A4~A5 竖向应力急剧增大,远离边墙的 A2~A3 竖向应力仍然基本不受影响,说明 A4~A5 之间的围岩属于土压力拱内部分,A2~A3 靠近压力拱外边界。随着后行洞的继续开挖,先行洞边墙竖向应力不再增大,表明隧道左洞边墙围岩应力升高区主要集中在离隧道开挖轮廓 $0.3D \sim 0.5D$ 的范围内。

由图 14 可以看出:隧道开挖使右洞边墙水平应力表现出比较明显的“应力释放—稳定状态—应力聚集”趋势。当中导洞开挖和中隔墙浇筑时,右洞边墙水平应力没有变化;当开挖到左导洞时,右洞边墙的水平应力仍然没有太多改变,这是由于中隔墙在两洞之间起到支撑作用,阻止了水平应力向右洞传递;当右导洞开挖时,可以看到边墙水平应力迅速释放,特别是靠近隧道开挖轮廓一侧($0.3D \sim 0.5D$)应力释放速率最大,随着开挖掌子面接近监测断面,水平应力又产生小幅度的波动;当开挖掌子面远离监测断面时,由于支护结构的施作,应力回升,最后趋于稳定状态。因此,针对双连拱隧道边墙靠近临空一侧的围岩,施工过程中应及时注浆或打入锁脚锚杆进行加固处理,防止边墙围岩松弛出现坍塌。

3.3 U 型槽轨道板稳定性分析

本试验采用电阻式应变片对 U 型槽的变形进行测量,在 U 型槽上下表面相同位置共设置 22 个测点,如图 7 所示。采集到的应变数据通过 $\sigma = E\epsilon$ (E 为材料的弹性模量, ϵ 为试验所测应变值)进行轴力的换算,最终得到 U 型槽上下表面因弯曲产生的拉、压应力,如图 15、16 所示。

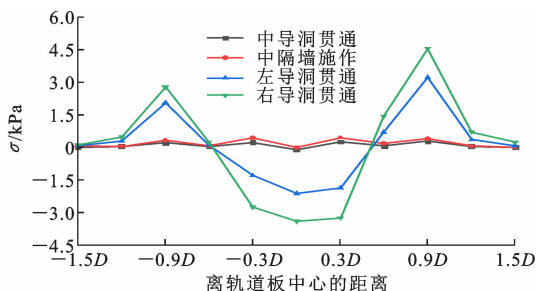


图 15 U 型槽轨道板上表面应力变化

Fig. 15 Stress changes on upper surface of U-groove track plate

对比 U 型槽轨道板上、下表面的应力,轨道板上、下表面应力大致关于轨道板中心线对称,曲线形状呈“W 型”和“倒 W 型”,中导洞的开挖和中隔墙

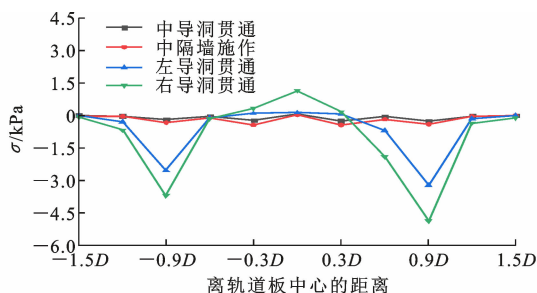


图 16 U 型槽轨道板下表面应力变化

Fig. 16 Stress changes on bottom surface of U-groove track plate

的浇筑对其表面应力影响较小,随着左导洞的开挖,轨道板上、下表面 $-0.6D \sim 0.6D$ 范围内受到明显的拉、压应力,其中轨道板中心线处最为显著,当右导洞开挖完成时拉压应力均达到最大,具体表现为:在下表面 $0.9D$ 处轨道板的压应力达到 -4.87 kPa,小于 $-0.9D$ 处的 -3.7 kPa;上表面 $0.9D$ 处最大拉应力达到 4.54 kPa,大于 $-0.9D$ 处的 2.78 kPa。此外,中导洞正上方中心线位置处上下表面应力的差值最大,说明此处的施工风险最高。

4 数值模拟对比分析

4.1 数值模型建立

由于模型试验监测条件限制,只针对地表所布置的特殊测点进行了沉降分析,缺少对隧道自身结构沉降的研究,且未对轨道板布置沉降测点,不能完整地反映出双连拱隧道开挖过程中围岩及既有地铁结构所受扰动的情况。因此,对大跨度双连拱隧道下穿 U 型槽进行了三维有限元分析。根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》并结合实际工程情况,模型计算区域取 $100\text{ m} \times 30\text{ m} \times 55\text{ m}$,土体的本构模型采用了摩尔-库仑弹塑性本构模型,其他结构体均采用线弹性本构模型,并在模型底面设置垂直位移约束,左右两侧设置水平位移约束;U 型槽与管幕结构均采用实体单元模拟,初支及二衬通过强度折算均采用板单元模拟;隧道的开挖和支护的施作通过“钝化、激活”操作来实现,开挖支护方案和模型试验完全一致,即:中导洞开挖(S1)→中隔墙浇筑(S2)→左导洞开挖和支护(S3)→右导洞开挖和支护(S4),相应的计算参数如表 2 所示。

在数值模型中布置了 3 条测线 L1~L3,其中 L1 与 L2 分别为左、右洞拱顶沉降测线,测线上分别等距布置了 11 个测点 A1~A11 和 B1~B11;L3 为 U 型槽轨道板沉降测线,测线上也等距布置了 11 个

表 2 数值计算参数

Table 2 Numeric calculation parameters

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	厚度/m
中砂	0.025	0.29	0.02	33	25
圆砾	0.050	0.25	0.02	35	30
初支	28.0	0.20			0.31
二衬	32.5	0.20			0.75
U 型槽	31.5	0.20			

测点 J1~J11,MIDAS 有限元模型测点提取如图 17 所示。

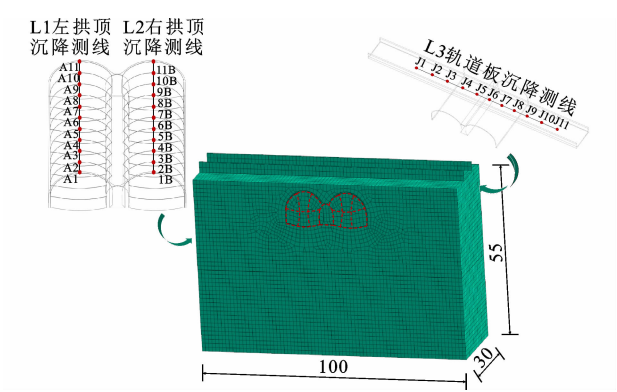


图 17 有限元模型测点提取(单位:m)

Fig. 17 Extraction of measuring points from finite element model (unit:m)

4.2 拱顶沉降分析

图 18 为隧道左右拱顶路径各测点沉降随掌子面开挖距离的变化曲线。由图 18 可以看出,双连拱隧道近接施工过程中左洞拱顶沉降峰值为 35.45 mm。其拱顶沉降特点为:在隧道开挖 0~12 m 时,各测点拱顶沉降均逐渐增大,其中 A1 测点增幅最大,在开挖至 12 m 后,掌子面后方的管幕发生明显的向上翘曲变形,而掌子面前方的管幕向下挠曲,这可能由于管幕的梁拱效应开始起作用。当开挖至 18 m 时管幕变形达到稳定,最终各测点沉降值沿测线依次递减,说明管幕作用下,掌子面推进对其前方土体产生的影响仅在隧道的前半程开挖中。对比左洞拱顶沉降,右洞拱顶沉降最大值为 42.5 mm,约为左洞沉降的 120%,其各测点沉降随开挖步变化曲线与左洞无显著差异。

4.3 轨道板沉降分析

路径 L3 各测点 in 关键开挖步时的轨道板沉降曲线如图 19 所示。可以看出,中导洞贯通后轨道板在中导洞上方小部分范围内(J5~J7 测点处)发生沉降,其他测点处表现为向上翘曲,且各测点沉降、翘曲值关于轨道板中心线对称分布。随着中隔墙的

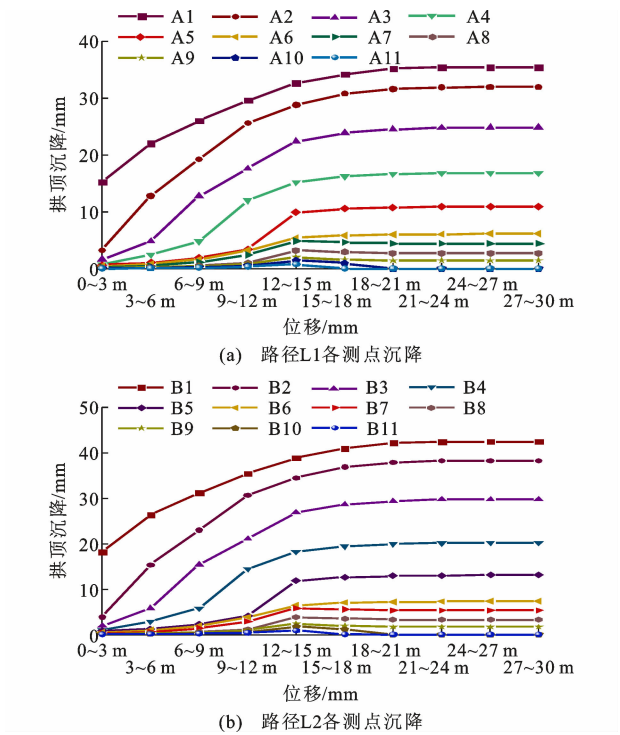


图 18 拱顶路径沉降变化

Fig. 18 Settlement change of vault path

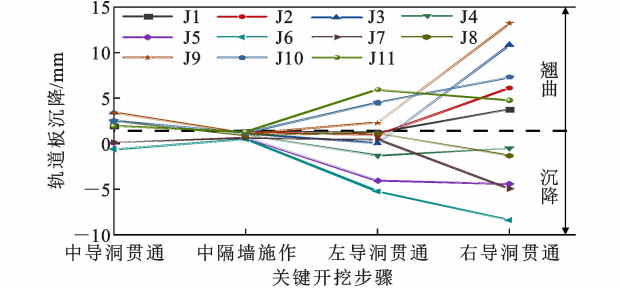


图 19 路径 L3 各测点沉降

Fig. 19 Settlement of each measurement point on path L3 施作,它对中导洞上方围岩所起的支撑作用使轨道板沉降趋于稳定。当左导洞贯通后,轨道板沉降分布发生了很大改变,沉降沿着轨道板中心线向左导洞方向扩散,最终只有 J9~J11(0.9D~1.5D)测点表现为翘曲,此时轨道板沉降峰值(7.3 mm)仍然出现在 J6 测点处。当右导洞贯通后,轨道板沉降重新关于轨道板中心线对称,最终 J3~J9(-0.9D~0.9D)表现为沉降,且右导洞方向各测点沉降、翘曲值均大于左导洞,沉降最大值达到 10.8 mm。

4.4 轨道板应力对比分析

图 20 为单独选取 U 型槽轨道板各关键开挖步对应的最大主应力云图。可以看出:轨道板最大压应力变化过程为 -0.25 MPa→-0.37 MPa→-1.75 MPa→-2.41 MPa,最大拉应力变化过程为 0.41 MPa→0.62 MPa→1.91 MPa→2.35 MPa,

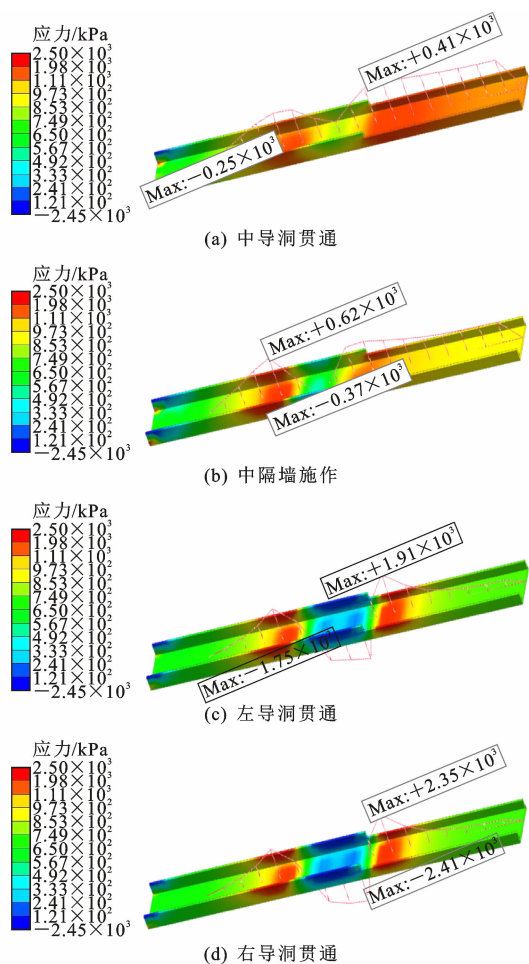


图 20 U型槽轨道板关键开挖步最大主应力云图

Fig. 20 Maximum principal stress cloud diagram in key excavation steps of U-groove track plate

最大拉应力由左导洞拱顶处($-0.9D$)转移到右导洞拱顶处($0.9D$),最大压应力出现在中导洞下方($0D$);隧道贯通后,轨道板应力曲线呈“W型”,与模型试验结果基本吻合,这主要是开挖分左右洞进行,U型槽结构沉降差异较大导致的。关于U型槽轨道板中心线对称位置处一定范围内也受较大的拉应力,说明此范围已经超出了隧道管幕的加固区域,隧道开挖导致此处轨道板翘起,进而引起结构处于受拉状态。

5 结 语

(1)大跨度双连拱隧道下穿地铁结构施工过程中,左右导洞开挖时对应的地表处沉降演化规律大致相似,都经历了“缓慢增加—急剧增加—趋于稳定”的过程,而中隔墙处对应地表沉降虽然趋势与左右拱顶大致相似,但无论是初始或最终沉降值都较为显著。因此,隧道在施工过程中中导洞开挖完成后应及时完成中隔墙的浇筑,并增大对中隔墙的监

测和保护力度,提前控制围岩变形。

(2)大跨度双连拱隧道下穿地铁结构在隧道开挖的过程中拱顶应力会经历“应力聚集—应力释放—稳定状态”这几个过程,在一定范围也会形成压力拱,但径向应力释放率始终大于环向应力,而且最终应力值大于环向应力。

(3)大跨度双连拱隧道下穿地铁结构施工过程中隧道边墙与拱顶围岩监测路径相比,边墙围岩受开挖扰动范围较大;距离边墙开挖轮廓线 $0.3D \sim 0.5D$ 范围内的围岩处在压力拱体内,且边墙竖向应力升高区主要集中在 $0.3D \sim 0.5D$ 范围内,边墙水平应力释放率最大处也在 $0.3D \sim 0.5D$ 范围内,施工中应及时对该松弛部位注浆加固处理。

(4)左右洞拱顶沉降监测路径L1、L2的沉降规律相似,在开挖至隧道中部时掌子面后方的管幕表现为向上翘曲变形,而掌子面前方的管幕表现为向下挠曲,但管幕的施作可在一定程度上使拱顶沉降更快地进入稳定状态,有效控制拱顶围岩坍塌。

(5)模型试验和数值计算结果得到的U型槽轨道板上、下表面应力曲线形状分别呈“W型”和“倒W型”,且轨道板最大沉降和翘曲出现在 $-0.9D \sim 0.9D$ 范围内,说明在该范围内会出现应力峰值,因此,在施工中必须加大对该范围的应力监测。

参考文献:

References:

- [1] 周丁恒,曹力桥,王晓彤,等.浅埋大断面大跨度连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(10):1573-1581.
ZHOU Dingheng, CAO Liqiao, WANG Xiaoxing, et al. In-situ tests on lining system of double-arch tunnel with shallow large section and span [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10):1573-1581.
- [2] 张春洪,李世鑫,王元森,等.软弱地层浅埋大跨双连拱隧道支护结构受力现场监测试验研究[J].土木工程学报,2017,50(增2):51-57.
ZHANG Chunhong, LI Shixin, WANG Yuansen, et al. Study on structure stress of large-span shallow-buried double-arch tunnel in weak stratum by in situ monitoring test [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2):51-57.
- [3] 叶飞,丁文其,朱合华,等.连拱隧道中隔墙现场监测及分析研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(3):470-474.
YE Fei, DING Wenqi, ZHU Hehua, et al. Site monito-

- ring and analysis of middle wall of multi-arch highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 470-474.
- [4] 申玉生, 赵玉光. 偏压连拱隧道围岩变形的现场监测与分析研究[J]. 公路, 2005, 50(4): 194-198.
SHEN Yusheng, ZHAO Yuguang. Site monitoring and analysis research on surrounding rock deformation of a biased double-arch tunnel[J]. Highway, 2005, 50(4): 194-198.
- [5] 杨果林, 葛云龙, 彭伟, 等. 连拱隧道复合式曲中墙受力现场监测分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 55-59.
YANG Guolin, GE Yunlong, PENG Wei, et al. In-situ testing analysis of compound curved middle wall of multi-arch tunnel[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 55-59.
- [6] LI S C, YUAN C, FENG X D, et al. Mechanical behaviour of a large-span double-arch tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(7): 2737-2745.
- [7] 李树忱, 袁超, 李术才, 等. 极浅埋连拱隧道施工过程中围岩力学行为的模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 713-718.
LI Shuchen, YUAN Chao, LI Shucan, et al. Model test study on mechanical behavior of extremely shallow double-arch tunnel during excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 713-718.
- [8] 白浪峰, 徐前卫, 田龙岗, 等. 软弱破碎连拱隧道松动区模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3610-3618.
BAI Langfeng, XU Qianwei, TIAN Longgang, et al. Model test and analysis of loose zone in soft and cracked surrounding rock of multi-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3610-3618.
- [9] 肖林萍, 赵玉光, 申玉生. 双连拱隧道结构内力样式及围岩稳定性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4346-4351.
XIAO Linping, ZHAO Yuguang, SHEN Yusheng. Model experimental study on style of structural internal force and stability of surrounding rock in double-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4346-4351.
- [10] 李新志. 超浅埋大跨度连拱隧道围岩受力分析及工程应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
LI Xinzhi. Study on surrounding rock and applying in engineering of super shallow large-span double-arch tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [11] 刘涛, 沈明荣, 陶履彬, 等. 连拱隧道动态施工模型试验与三维数值仿真模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1802-1808.
LIU Tao, SHEN Mingrong, TAO Lubin, et al. Model test and 3D numerical simulation study on excavation of double-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1802-1808.
- [12] YANG S, DAI R, AI Z B, et al. Analytical solutions for the mechanical responses of shallow double-arched tunnel subjected to symmetric loads[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(1): 1-33.
- [13] YOSHIMURA H, YUKI T, YAMADA Y, et al. Analysis and monitoring of the Miyana railway tunnel constructed using the new Austrian tunnelling method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1986, 23(1): 67-75.
- [14] 张浩, 施成华, 彭立敏, 等. 浅埋多连拱隧道下穿管廊施工方案比选研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增1): 147-154.
ZHANG Hao, SHI Chenghua, PENG Limin, et al. Study on comparison and selection of construction schemes of concealed digging down through the pipe gallery in the shallow buried multi-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 147-154.
- [15] 胡志平, 刘佳琪, 任翔, 等. 黄土地区浅埋暗挖地铁连拱隧道合理错距研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 60-65.
HU Zhiping, LIU Jiaqi, REN Xiang, et al. Research on the reasonable staggered distance of tunnel in shallow excavated metro arch tunnel in the loess area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 60-65.
- [16] WANG S R, LI C L, WANG Y G, et al. Evolution characteristics analysis of pressure-arch in a double-arch tunnel[J]. Tehnicki Vjesnik, 2016, 23(1): 181-189.
- [17] 季毛伟, 吴顺川, 高永涛, 等. 双连拱隧道施工监测及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3787-3795.
JI Maowei, WU Shunchuan, GAO Yongtao, et al. Construction monitoring and numerical simulation of multi-arch tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3787-3795.
- [18] 白家设, 赵绍鹏, 齐兵, 等. 软弱地层浅埋大跨双连拱隧道支护结构变形研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增2): 45-50.

BAI Jiashe,ZHAO Shaopeng,QI Bing,et al. Study on the structure deformation of large-span shallow-buried multi-arch tunnel in soft stratum[J]. China Civil Engineering Journal,2017,50(S2):45-50.

[19] ALTAEE A,FELLENIOUS B H. Physical modeling in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal,1994,31(3):420-431.

[20] 刘新荣,刘俊,黄伦海,等. 黄土连拱隧道开挖的模型试验与压力拱分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1140-1149.

LIU Xinrong,LIU Jun,HUANG Lunhai,et al. Model test and pressure arch analysis for excavation of loess double arch tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52(6):1140-1149.