

文章编号: 1674-599X(2020)03-0056-06

基于流固耦合作用的偏压连拱隧道稳定性分析

曹媛媛¹, 刘辉¹, 刘耀坤², 韩学礼³

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南理工学院湖南 岳阳 414000;
3. 中铁十五局集团第二工程有限公司, 上海 201713)

摘要: 针对地质条件差且多雨地段的连拱隧道, 施工中的不对称性及自然地形产生的偏压效应是对工程安全影响较大的问题。以湖南省的雷家台偏压连拱隧道为工程背景, 基于渗流-应力耦合分析理论, 应用 Midas/GTS 有限元软件, 模拟偏压连拱隧道开挖过程。结合工程施工监测数据, 分析了连拱隧道在偏压条件下, 围岩位移变形特性, 讨论了偏压对连拱隧道稳定性的影响, 对比分析了数值模拟值与隧道施工监测数据。研究结果表明: 偏压连拱隧道施工过程中, 左洞上台阶与中隔墙连接处及右洞拱腰处为相对薄弱位置, 得出了连拱隧道结构受力特征, 以为类似工程设计和施工提供参考。

关键词: 偏压连拱隧道; 工程监测; 流固耦合; 数值模拟

中图分类号: U452 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.009

Analysis on the stability of fluid-solid coupling in a bias double-arch tunnel

CAO Yuan-yuan¹, LIU Hui¹, LIU Yao-kun², HAN Xue-li³

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;
2. Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, China;
3. China Railway 15th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Shanghai 201713, China)

Abstract: To study effects of the asymmetry during construction and the bias effect caused by natural terrain on the safety of double-arch tunnels under adverse geological conditions and rainy sections, this paper takes Leijiatai biased double-arch tunnel in central-western of Hunan Province as engineering background. Based on the seepage-stress coupling analysis theory, the excavation process of bias multi-arch tunnel is simulated by using the finite element analysis software MIDAS/GTS. Combined with the monitoring data during construction, the deformation characteristics of surrounding rocks in the double-arch tunnel subjected to biased pressure are analyzed, the influence of biased pressure on the stability of double-arch tunnel is further discussed. The results of numerical simulation and of monitoring during construction are analyzed and compared, which indicate that the connection between the upper left step of the left tunnel and the middle partition wall and the arch of the right hole are relatively weak positions during the construction process of bias double-arch tunnel. The mechanical characteristics of the double-arch tunnel structure are also obtained to provide a reference for the design and construction of analogous projects.

Key words: double arch tunnel; engineering monitoring; fluid-solid coupling; numerical simulation

浅埋偏压连拱隧道工序繁杂, 双洞开挖及支护交错进行, 引起隧道位移变形严重, 不利于隧道的

稳定。持续强降雨时, 因大量地表水渗入, 易导致隧道塌方、冒顶等地质灾害。李地元^[1]等人使用

收稿日期: 2019-10-08

作者简介: 曹媛媛(1994-), 女, 长沙理工大学硕士生。

有限差分法, 探讨连拱隧道开挖渗流机制, 并分析了深埋连拱隧道开挖后的孔隙水压力场分布特征。于清杨^[2]等人采用数值模拟进行计算, 求出了地形偏压隧道对称位置的应力比值, 提出了将拱肩处应力比作为定量, 判别隧道是否偏压的特征值。朱正国^[3]等人比较了先开挖浅埋侧主洞与先开挖深埋侧主洞 2 种开挖施工顺序。采用 FLAC^{3D} 有限差分软件, 计算了浅埋偏压连拱隧道在不同开挖顺序的各阶段施工的隧道水平与竖向位移、中隔墙、锚杆及衬砌等支护结构的应力和变形情况。金美海^[4]等人采用 Ansys 软件进行了模拟验证, 得到了偏压坡度的变化和浅埋偏压黄土隧道变形的分布特征。但是由于不同地区围岩、地质情况差别较大, 取得的经验和成果尚不具指导意义。作者依托安乡至慈利高速公路的雷家台浅埋偏压连拱隧道, 拟利用 Midas/GTS 软件, 模拟偏压连拱隧道开挖施工过程, 并与施工实际监测数据进行对比, 分析隧道不同施工阶段对隧道的沉降及水平位移变化规律, 并指出渗流条件下偏压连拱隧道沉降及水平位移变化较大处的分布位置。

1 流固耦合计算原理

地下水流动过程中, 围岩中的渗透力来源于围岩与围岩裂隙中的水, 在外力作用下的摩擦挤压, 渗透力可以用孔隙水压的积分表示^[5]。Midas/GTS 的渗透力效果, 可利用渗流分析计算得到的孔隙水压力表示。

根据太沙基有效应力原理, 总应力 σ 可分为有效应力 σ' 和孔隙水压力 u_w 。高健^[6]等人综合考虑有效支护压力和渗透力的影响, 对隧道开挖面稳定性进行了分析, 得到作用在隧道开挖面的支护压力, 由有效支护压力和渗透力共同构成。孔隙水压力可区分为稳定状态孔隙水压 p_{steady} 和过孔隙水压 p_{excess} 。因为水不能承受剪切应力, 所以有效剪切应力与总的剪切应力相等。

$$u_w = p_{steady} + p_{excess} \quad (1)$$

2 偏压连拱隧道数值模拟

2.1 工程概况

雷家台隧道设计长度为 235 m, 最大埋深约 54 m, 隧道最高点与最低点的差值约为 54 m。隧道纵坡为 0.8%, 山脊线与水平向夹角为 20°~35°, 山坡处于稳定状态。隧道纵断面示意图如图 1 所示, 隧道出入口设置于山前斜坡位置。地表覆盖层为第四系更新统坡积碎石, 下伏基岩为强风化与中风化砂质页岩。隧道围岩为弱自稳性, 其岩性较差, 处于多雨的富水地区, 抗渗性差。隧道上部的承压水, 流经围岩裂隙, 渗入隧道内, 同时, 地下水压力增加, 围岩裂隙贯通性, 致使围岩位移增加。经初步计算, 按 V 级围岩进行设计支护。

根据凌同华^[7]等人的研究成果, 进行隧道支护时, 应强化喷射混凝土厚度的作用, 可适当的增强偏压侧连拱隧道的锚杆间距和长度。围岩及支护力学参数见表 1。

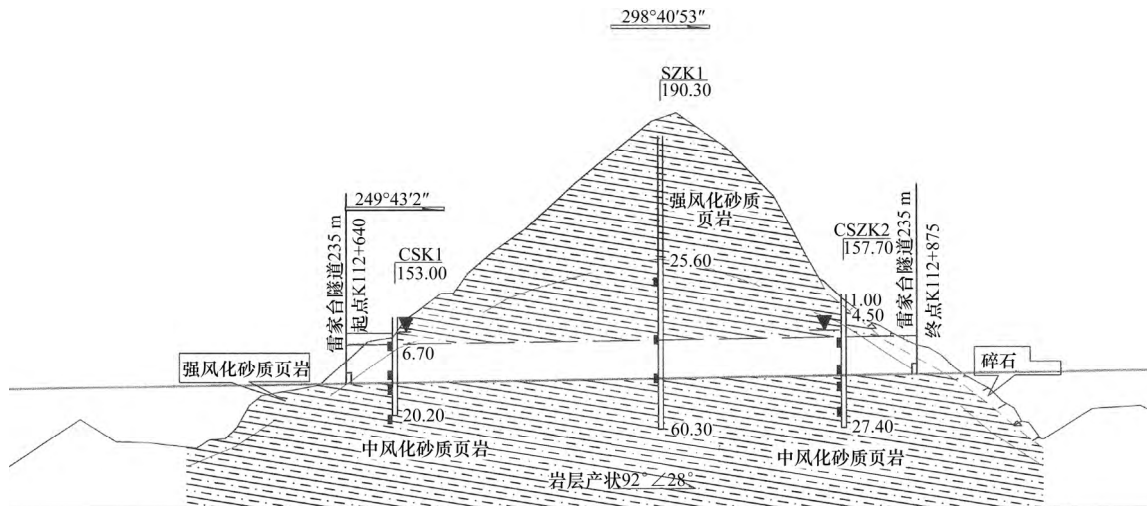


图 1 雷家台隧道纵断面

Fig. 1 Profile view of Leijiatai tunnel

表 1 隧道围岩及支护的基本参数指标

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock of

tunnel and support						
类别	容重/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦 角/(°)	内聚力/ GPa	渗透 系数
V 级围岩	19.6	2.0	0.34	30	0.31	4.5× 10 ⁻⁴
初期支护	23.0	27.2	0.25	—	—	—
锚杆	79.0	21.0	0.30	—	—	—
中隔墙及二衬	25.0	32.5	0.20	—	—	—

隧道开挖采用“中导洞-双侧导洞工法”的方式。首先开挖中导洞、施工初次衬砌、下部锚杆及中隔墙施工。再分别进行左(右)洞的侧导洞，分上、下台阶 2 次开挖，并完成初次支锚。然后施工左(右)洞主洞核心土，分上、中、下三台阶进行开挖。最后浇筑仰拱，隧道全断面二次衬砌，采用模板台车一次模筑。雷家台隧道施工顺序为：①→I→②→③→II→④→III₁→⑤→⑥→IV₁→⑦→III₂→⑧→⑨→IV₂，如图 2 所示。

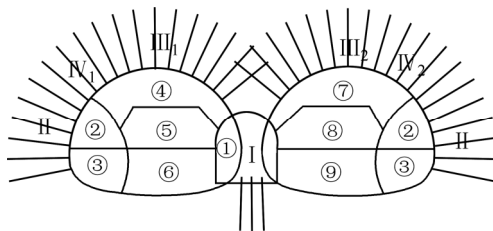


图 2 雷家台隧道施工顺序

Fig. 2 Construction sequence of Leijiatai tunnel

2.2 数值模型建立

根据实际监测断面布置与数据采集，选取雷家台隧道 K112+665 断面，建立模型，考虑流固耦合作用。隧道数值模拟网格划分如图 3 所示。

隧道围岩采用 Mohr-Coulomb 模型，其他支护

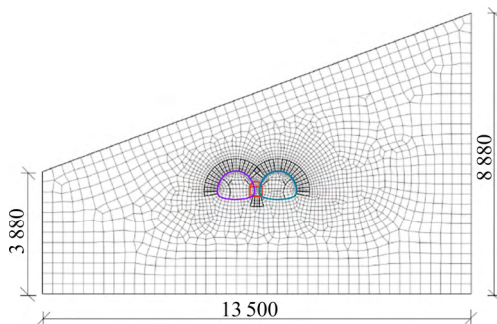


图 3 偏压连拱隧道网格划分图(单位: cm)

Fig. 3 Grid division diagram of bias multi-arch tunnel (unit: cm)

构件采用弹性模型。连拱隧道根据实际情况，每一步开挖，模拟初期锚杆支护、喷浆支护及二次衬砌的实际施作，以达到最大效果^[8-11]。

2.3 隧道 K112+665 断面监测

隧道现场监测量控对隧道施工极为重要。在现场监测量控下，可以实时掌握围岩和支护动态，并及时发布险情预报，确保施工安全。雷家台隧道围岩测点布置如图 4 所示。雷家台隧道支护结构受力观测点如图 5 所示。

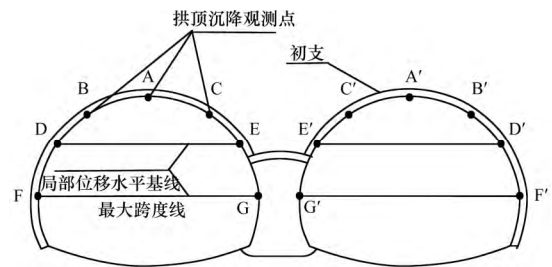


图 4 雷家台隧道围岩测点布置方法

Fig. 4 Arrangement of measurement points for

Leijiatai tunnel

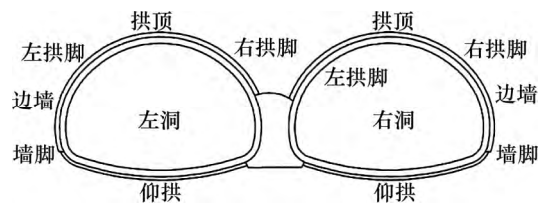


图 5 支护结构受力观测点示意

Fig. 5 Schematic diagram of stress observation points of support structure

3 隧道数值模拟与监测结果对比

3.1 连拱隧道实时监测结果

1) 连拱隧道左洞沉降监测

根据实际施工过程，双侧导洞开挖工法在左洞开挖中，对拱顶监测主要分为 6 个阶段：

第一阶段(1~12 d)，左、右上导洞开挖完成至下导洞开挖前，此阶段产生的左洞拱顶沉降变化值，占左洞总沉降值的 6.5%。

第二阶段(13~22 d)，左、右下导洞开挖完成至左洞上台阶开挖前，此阶段产生的左洞拱顶沉降变化值占左洞总沉降值的 10.8%。

第三阶段(23~40 d)左洞上台阶开挖至左洞核心土开挖之前，此阶段产生的左洞拱顶沉降变化值

占左洞总沉降值的24.7%。

第四阶段(41~55 d),左洞完成核心土和下台阶的开挖,并完成二次砌筑衬砌闭合,此阶段产生的左洞拱顶沉降变化值,占左洞总沉降值的10.8%。

第五阶段(56~75 d),开挖至右洞核心土开挖前,此阶段产生的左洞拱顶沉降变化值,占左洞总沉降值的43.5%。

第六阶段(76 d~),右洞核心土开挖,分三台阶由上至下依次开挖,随后完成右洞二次衬砌。此阶段产生的左洞拱顶沉降变化值,占左洞总沉降值的3.7%。

隧道拱顶沉降向下取正值,左洞断面沉降曲线如图6所示。

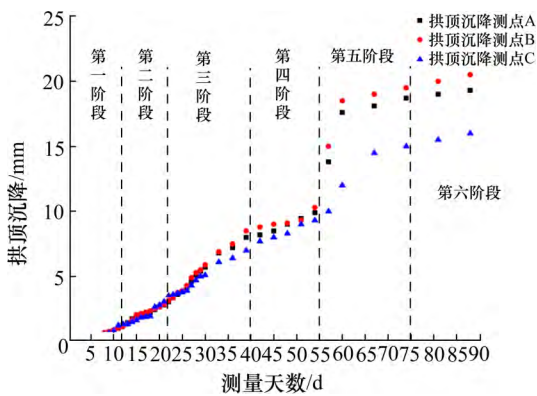


图6 ZK112+665断面拱顶沉降随时间变化

Fig. 6 Settlement curve of arch at the section ZK112+665

从图6中可以看出,23~40 d,由于上台阶开挖过程中,较严重的破坏了围岩稳定性,锚喷会逐步稳定拱顶位移沉降。41~55 d,开挖过程中引起沉降,但因二次衬砌闭合成环,抑制了拱顶位移,沉降时态曲线,已成收敛趋势。56~75 d,由于右洞上台阶的开挖,引起左洞“断崖式”沉降位移。在右洞开挖过程中,对左洞的位移场产生扰动,使左洞沉降收敛稳定状态遭受破坏,表明:连拱隧道位移场变化较为复杂。76 d以后,右洞核心土分三台阶,由上至下依次开挖,围岩随着右洞二次衬砌的完成,其变形会趋于稳定。

2) 连拱隧道右洞的沉降监测

右洞开挖拱顶沉降分为2个阶段:

第一阶段(1~20 d)为右洞开挖到核心土前,在刚开挖初期,拱顶沉降急剧增加,这是由于右洞受到左洞开挖干扰,围岩较为破碎,右洞拱顶沉降平均值为20.3 mm,占右洞总拱顶沉降的76.6%;

第二阶段(21~40 d)为右洞开挖完成,右洞拱顶沉降变化平均值为6.2 mm,占右洞总拱顶沉降的23.4%。右洞全部开挖完成后,及时闭合成拱,有利于隧道开挖稳定,整体支护结构抑制了拱顶沉降,收敛趋于稳定。右洞断面沉降曲线如图7所示。

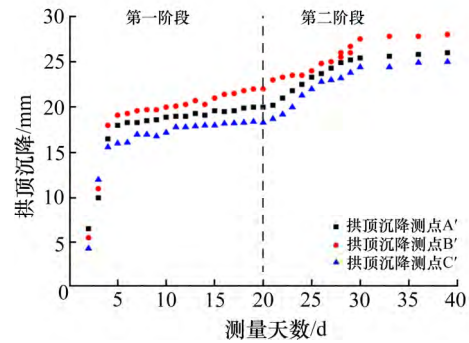


图7 YK112+665断面拱顶沉降随时间变化

Fig. 7 Settlement curve of arch at section YK112+665

3) 连拱隧道断面收敛监测

对于左洞开挖时,导洞开挖完成后,围岩收敛变化不明显,测线D-E收敛值为2 mm。从22 d开始开挖左洞上台阶,在40 d重新趋于收敛,范围在5~6 mm之间。从55 d开始,进行左洞完全开挖,收敛变化不明显,测线D-E收敛变化值约1 mm。表明:左洞下台阶开挖对隧道左洞的横向收敛有影响,具有局限性^[12]。右洞上台阶开挖完成前,左洞测线D'-E'收敛值急剧增加,之后趋于收敛。右洞开挖扰动左洞围岩稳定性。左洞测线D-E最终收敛值为12 mm;左洞测线F-G周边位移值的最终收敛值为6 mm。

右洞测线D'-E'在左洞开挖的第1~5施工阶段期间,由于右洞处于偏压隧道深埋侧,地质环境较差,围岩上部自重较大,断面收敛最终稳定在13 mm,右洞测线F'-G'最终收敛于8 mm。K112+665断面周边收敛曲线如图8所示。

3.2 数值计算结果

连拱隧道围岩在考虑流固耦合作用下,进行数值模拟的变形情况如图9,10所示。在流固耦合作用下,围岩受力更加复杂。在开挖过程中,隧道周边孔隙水压力的变化,产生孔隙水压力差,造成渗流场的改变。

从图9,10可以看出,围岩各处位移模拟分析的变形结果。从图9可以看出,拱顶沉降值最大处在右洞B'监测点处,其值为29.1 mm。从图10可以

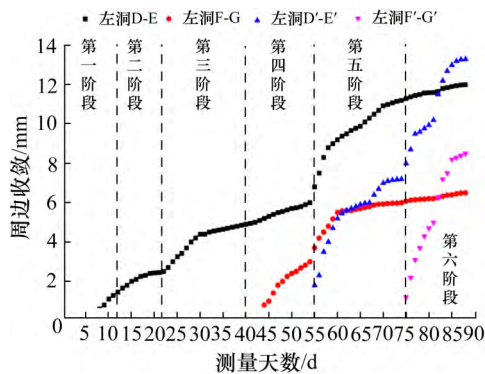


图8 K112+665断面周边收敛随时间变化

Fig. 8 Peripheral convergence curve of K112+665 section

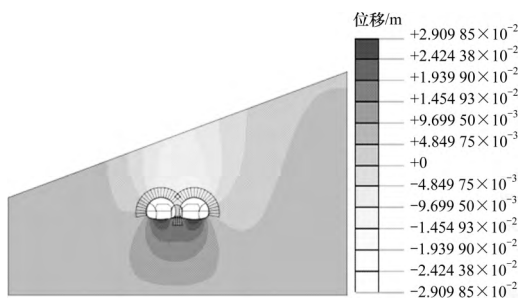


图9 考虑流固耦合作用下围岩Y方向位移

Fig. 9 Displacement of surrounding rock in Y-direction considering fluid-solid coupling

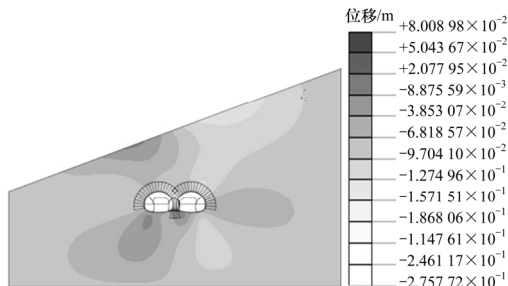


图10 考虑流固耦合作用下围岩X方向位移

Fig. 10 Displacement of surrounding rock in X direction considering fluid-solid coupling

看出,最大水平收敛值在右洞测线D'-E'位置处,其值为15.2 mm。

从图9,10还可以看出,在考虑流固耦合作用下,产生的竖向围岩位移值较大处在右洞拱顶处,隧道洞周收敛作用较大处为右洞右拱脚位置处。产生这些现象是由于左、右洞施工不对称性及自然地形产生的偏压效应作用的结果。

3.3 数值计算与监测结果的对比

拱顶沉降数值模拟结果与施工现场实时沉降监测数据对比,见表2。周边收敛模拟与施工现场实时收敛数据对比,见表3。

由表2,3可知,在考虑流固耦合作用时,现场监测内力数据和数值计算结果进行对比,隧道开挖关键位置的位移,有大致相同规律,即2种方法得出的拱顶沉降值最大处都在右洞B'监测点处,最大水平收敛值都在右洞测线D'-E'位置处^[13]。两者虽在量值上有差异,但规律一致,可以得到相同的结论,并在后续施工中2种方法可以互相补充合理应用。

表2 K112+665断面拱顶沉降模拟计算结果对比

Table 2 Simulation results of settlement of arch in section

K112+665					
左洞			右洞		
过程	监测点	位移/mm	过程	监测点	位移/mm
实测	A	19.3	实测	A'	26.0
实测	B	20.5	实测	B'	28.2
实测	C	16.0	实测	C'	25.2
模拟	A	20.3	模拟	A'	28.8
模拟	B	24.1	模拟	B'	29.1
模拟	C	18.9	模拟	C'	22.0

表3 K112+665断面周边收敛位移模拟计算结果对比

Table 3 Simulation results of convergence displacement

around K112+665 section					
左洞			右洞		
过程	监测测线	位移/mm	过程	监测测线	位移/mm
实测	D-E	11.1	实测	D'-E'	14.3
实测	F-G	4.8	实测	F'-G'	6.8
模拟	D-E	14.9	模拟	D'-E'	15.2
模拟	F-G	6.2	模拟	F'-G'	8.8

4 结论

通过对监测数据进行整理和采用数值模拟方法进行计算,在考虑流固耦合作用下,对偏压连拱隧道围岩及支护结构的稳定性进行了分析。将拱顶沉降和围岩收敛值的模拟值与实测值进行对比。得出的结论为:

1) 围岩受扰动后,所产生的拱顶沉降在左、右洞之间不对称,左洞的拱顶沉降小于右洞。中隔墙与左洞上台阶连接处、中隔墙与右洞拱腰连接部位2处竖向位移较大。2种方法得出的拱顶沉降值最大处都在右洞B'监测点,最大水平收敛值都在右洞测线D'-E'位置。施工要对这些位置采取强化措施,在深埋侧右洞需要采用更合理的超前支护措施,加强锚喷作用或改变连接方式,优化支护,以控制和

减小围岩位移,确保施工安全。

2) 右洞上台阶开挖时,引起左洞“断崖式”沉降位移。所以建议左洞施工开挖后,尽早完成闭合支护,加强围岩稳定性,防止右洞开挖对左洞干扰,而造成坍塌事故。

3) 数值模拟结果与实测结果进行了对比,分析得到的规律一致。因此,在项目后续其他相似水文地质条件下,开挖施工也应考虑流固耦合作用,并将数值模拟结果在设计变更中作为重要参考,改进施工方案。

参考文献(References):

- [1] 李地元,李夕兵,张伟,等.基于流固耦合理论的连拱隧道围岩稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):1056-1064. (LI Di-yuan, LI Xi-bing, ZHANG Wei, et al. Stability analysis of surrounding rock of multi-arch tunnel based on coupled fluid- solid theorem[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1056-1064. (in Chinese))
- [2] 于清杨,刘伟,佘磊,等.偏压隧道偏压应力比特征分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2018,48(6):1797-1803. (YU Qing-yang, LIU Wei, NIE Lei, et al. Characteristic analysis on stress ratio of unsymmetrical load tunnel[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2018, 48(6): 1797-1803. (in Chinese))
- [3] 朱正国,乔春生,高保彬.浅埋偏压连拱隧道的施工优化及支护受力特征分析[J].岩土力学,2008,29(10):2747-2752,2758. (ZHU Zheng-guo, QIAO Chun-sheng, GAO Bao-bin. Analysis of construction optimization and supporting structure under load of shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2747-2752, 2758. (in Chinese))
- [4] 金美海,李栋梁,刘新荣,等.不同坡度偏压黄土隧道预留变形量的研究[J].现代隧道技术,2017,54(1):130-137. (JIN Mei-hai, LI Dong-liang, LIU Xin-rong, et al. Study on the reserved deformation of loess tunnels with different slopes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(1): 130-137. (in Chinese))
- [5] 张睿,鲁四平.沉降与渗流联合作用下层状地层浅埋隧道运动分析[J].中南大学学报,2018,25(2):368-378. (ZHANG Rui, LU Si-ping. Kinematic analysis of shallow tunnel in layered strata considering joined effects of settlement and seepage[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 368-378. (in Chinese))
- [6] 高健,张义同,乔金丽.渗透力对隧道开挖面稳定性影响分析[J].岩土工程学报,2009,31(10):1547-1553. (GAO Jian, ZHANG Yi-tong, QIAO Jin-li. Face stability analysis of tunnels with consideration of seepage force[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1547-1553. (in Chinese))
- [7] 凌同华,谢伟华,周凯,等.基于敏感性分析的浅埋偏压隧道支护参数优化[J].交通科学与工程,2016,32(3):68-73. (LING Tong-hua, XIE Wei-hua, ZHOU Kai, et al. Tunnel supporting parameter optimization of shallow buried and unsymmetrically load based on the sensitivity analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2016, 32(3): 68-73. (in Chinese))
- [8] 陈发本,杨卓,黄德镛.考虑渗流场作用下的富水隧道稳定性影响因素分析[J].交通科学与工程,2013,29(3):34-39. (CHEN Fa-ben, YANG Zhuo, HUANG De-yong. Tunnel stability analysis of influence factors under the action of seepage field of rich water[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(3): 34-39. (in Chinese))
- [9] 凌同华,刘家谢,邓杰夫,等.不同开挖方案下浅埋分岔隧道施工数值模拟[J].交通科学与工程,2015,31(3):78-84. (LING Tong-hua, LIU Jia-xie, DENG Jie-fu, et al. Numerical simulation of shallow-forked tunnel under different excavation schemes[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(3): 78-84. (in Chinese))
- [10] 黄阜,张芝齐,王芬,等.基于 Hoek-Brown 准则的隧道开挖面安全系数模拟[J].交通科学与工程,2018,34(1):33-39. (HUANG Fu, ZHANG Zhi-qi, WANG Fen, et al. Numerical simulation study on safety factor for a tunnel face subjected to Hoek-Brown criterion[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(1): 33-39. (in Chinese))
- [11] 赵金鹏,王秀英,谭忠盛,等.软弱围岩偏压连拱隧道正洞合理施工布局研究[J].土木工程学报,2017,50(S2):66-74. (ZHAO Jin-peng, WANG Xiu-ying, TAN Zhong-sheng, et al. Study on the reasonable construction layout of main tunnel in unsymmetrical loading multi-arch tunnel with weak rock[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S2): 66-74. (in Chinese))
- [12] Kimura H, Itoh T, Iwata M. Application of new urban tunneling method in Baikoh tunnel excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005(2): 151-158.
- [13] 陈志良.城市地下铁道连拱隧道群施工技术研究[J].现代隧道技术,2006,43(3):42-46. (CHEN Zhi-liang. Construction techniques for a group of multi-arch tunnels of urban metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, 43(3): 42-46. (in Chinese))