

文章编号: 1674-599X(2020)04-0069-07

大断面小净距隧道围岩压力的数值模拟研究

唐勇三

(平潭综合实验区交通投资集团有限公司, 福建 福州 350400)

摘 要: 以龙兴岭隧道为工程背景, 采用 FLAC^{3D} 软件对四洞小净距隧道的分步开挖进行了数值模拟, 分析了初期支护上的围岩压力分布。研究结果表明: 主洞或辅洞开挖时, 其围岩压力分布受开挖方式的影响很大。开挖辅洞采用单侧壁导坑法, 临时支撑使作用在初支上的竖向围岩压力和水平围岩压力均呈“单峰折线型”分布; 开挖主洞采用双侧壁导坑法, 临时支撑使作用在初支上的竖向围岩压力和水平围岩压力均呈“双峰折线型”分布。同时, 与常规分离式隧道相比, 左、右主洞开挖使得临近隧洞初支的围岩压力显著增长, 尤其是邻洞小净距侧的增幅最高可达 50%。研究成果可为多孔大断面小净距隧道的设计和施工提供借鉴和参考。

关键词: 隧道工程; 大断面隧道; 小净距隧道; 围岩压力; 数值模拟

中图分类号: U452.1⁺2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.010

The ground pressure of neighbor tunnel with large section based on numerical simulations

TANG Yong-san

(Pingtan Comprehensive Experimental Area Transport Investment Group Co., Ltd., Fuzhou 350400, China)

Abstract: Based on the Longxinling tunnel project, the sequenced excavation of quadruple neighbor tunnel is carefully simulated on the FLAC^{3D} platform, and the distribution of ground pressure carried by the first lining is well focused. The numerical simulation results show that: The distribution of ground pressure is influenced by the excavation sequence significantly when the main and auxiliary tunnels are excavated. The vertical and horizontal pressures carried by the first lining take the form of "single peak", due to the existence of vertical and horizontal supports in the unilateral pilot tunneling method. On the scenario of main tunnel excavation, the vertical and horizontal pressures carried by the first lining take the form of "double peaks", due to the existence of two vertical supports and one horizontal support in the bilateral pilot tunneling method. Comparing to the regular separated tunnels, the excavation of two main tunnels leads to the increasing of ground pressure upon its neighbor tunnels. Especially, the increment of maximum ground pressure may reach 50% upon its neighbor side. These researches could provide some reference for the design and the construction of large section neighbor tunnels.

Key words: tunnel engineering; large section tunnel; neighbor tunnel; ground pressure; numerical simulation

小净距隧道是介于分离式与连拱式之间的一种隧道型式。交通基础设施建设的迅速发展, 小净距隧道因其节约建设用地、利于线路展线等优点,

已在各类公路、铁路隧道中广泛运用。因双洞之间净距较小, 其隧道支护结构所承受的围岩压力与传统分离式隧道不同。许多学者采用理论解析、现场

收稿日期: 2020-06-01

作者简介: 唐勇三(1976-), 男, 平潭综合实验区交通投资集团有限公司高级工程师。

实测和数值模拟等方法对小净距隧道的围岩压力分布进行了研究。龚建伍^[1]等人结合小净距隧道的特点,提出了考虑隧道双洞先、后施工过程的围岩压力分析模型和计算方法,并将工程监测值与计算结果进行对比和验证。钟祖良^[2]等人建立了浅埋双侧偏压小净距围岩压力荷载计算的力学模型,研究了该类型小净距隧道围岩压力的大小及分布规律。Lei^[3]等人基于相似理论,建立了典型非对称荷载条件下的隧道开挖模拟试验系统,并据此分析了小净距浅埋偏压隧道围岩的破坏机理和荷载特性。彭从文^[4]等人针对Ⅲ级围岩,利用弹塑性三维有限元模型,分析了小净距隧道在不同净距下,隧道围岩、中隔墙、锚杆及初支的受力性状。腾俊洋^[5]等人根据浅埋偏压小净距隧道受力特点,推导了考虑施工工序和地形坡度的浅埋偏压小净距隧道围岩压力公式,并与数值模拟结果进行了验证。Wang^[6]等人采用 D-FEM 模拟小净距隧道开挖过程,并将该结果同 FLAC^{3D} 的计算结果相比较,得到开挖过程中围岩结构的稳定性和力学特性。吴才轩^[7]推导出浅埋小净距隧道围岩压力的计算公式,并在实际工程中进行验算,得到了衬砌安全系数。夏才初^[8]等人基于现场监测数据,分析了大断面小净距隧道围岩与支护系统变形和受力特点。蒋坤^[9]等人通过监测数据的分析,探讨了大断面小净距隧道的拱顶下

沉、洞周收敛、锚杆轴力和围岩压力的分布特征,以及其变化规律。孙振宇^[10]等人通过多座小净距隧道围岩压力的实测数据,对其围岩压力的计算方法进行改进,并验证其合理性与适用性。王茜^[11]等人采用了 FLAC^{3D} 软件,建立了隧道穿越断层破碎带的数值模型,分析了不同施工方案对小净距隧道围岩稳定性的影响。苏宝^[12]结合工程实例,分析了净距、埋深和地形偏压对围岩压力的影响,得出了隧道水平侧压力与竖向压力表现出的不同变化特征。随着市政交通需求激增和城市建设用地紧张,隧道横断面的布置形式多采用多孔大断面小净距,而针对该类型隧道的研究鲜见。因此,作者以福建省平潭综合实验区龙兴岭隧道为依托,拟采用数值模拟方法,研究浅埋条件下多孔大断面小净距隧道的围岩压力分布模式,以期为此类隧道的设计和施工提供借鉴和参考。

1 浅埋大断面小净距隧道的数值模拟

1.1 工程概况

龙兴岭隧道位于福建省平潭综合实验区,为市政一级公路隧道。隧道总长约为 500 m,由 2 个机动车主洞、2 个非机动车人行辅洞和 1 个电力隧道构成,其横断面布置图如图 1 所示。

主洞采用曲墙三心圆内轮廓,其净空尺寸为

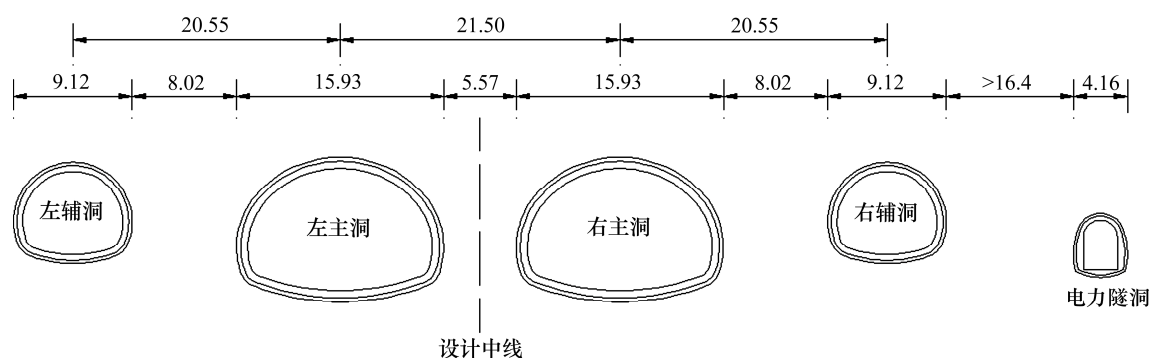


图1 龙兴岭隧道横断面布置(单位: m)

Fig. 1 The cross-section layout of Longxingling tunnel (unit:m)

14.20 m×9.46 m(宽×高),左、右主洞内轮廓间的最小距离为 7.31 m。辅洞采用曲墙单心圆内轮廓,其净空尺寸为 7.69 m×6.40 m(宽×高),左、右侧主辅洞内轮廓间的最小距离为 9.66 m。其中,一处电力隧道因其开挖面积较小,距离主、辅洞相对较远(大于 16.40 m),不做考虑。

根据相关勘察设计文件^[13],龙兴岭隧道进口段为 V 级围岩,地层由上到下依次分布为:坡积粉质黏土(约 3~5 m)、砂土状全风化凝灰熔岩(约 3~5 m)、碎块状强风化凝灰熔岩(约 5~25 m)、微风化凝灰熔岩。以 K0+800 断面为例,其主洞埋深为 10.03 m,采用双侧壁导坑法开挖;其辅洞埋深为 10.24 m,

采用单侧壁导坑法开挖。

主洞初期支护采用 C25 喷射混凝土+I22b 钢拱架，厚 32 cm，并辅以系统锚杆和 4 道锁脚锚杆。二次衬砌为 C35 模筑钢筋混凝土，厚 55 cm。临时支撑采用 C25 喷射混凝土+I14 钢支撑，厚 20 cm。

辅洞初期支护采用 C25 喷射混凝土+I18 钢拱架，厚 26 cm，并辅以系统锚杆。二次衬砌为 C35 模筑钢筋混凝土，厚 45 cm。临时支撑采用 C25 混凝土+I14 钢支撑，厚 20 cm。

1.2 数值模型

以 K0+800 断面为原型，在 FLAC^{3D} 数值平台上建立数值模型，如图 2 所示。数值模型整体尺寸为 169 m×87 m×3 m(宽度×高度×进深)，地层由上到下依次为：坡积粉质黏土(3 m)、砂土状全风化凝灰熔岩(3 m)、碎块状强风化凝灰熔岩(18 m)、中

风化凝灰熔岩。各层岩土体均采用 6 节点实体单元模拟，共计 34 082 个实体单元，45 611 节点。隧道初支(包括临时竖向支撑和临时水平支撑)采用 Liner 单元模拟，共计 1 054 个节点和 2 160 个单元。根据陈培煌^[14]等人的研究成果，通过提高 20%洞身围岩参数的方法，近似等效模拟周边系统锚杆和中夹岩加固。模型顶面(即地表面)取自由边界，其侧面为法向位移约束边界，底面为全约束边界。

1.3 本构参数

各层岩土体均采用摩尔-库伦本构模型，其主要物性参数根据相关设计文件选取，见表 1。隧道初期支护(临时竖撑和临时横撑)采用线弹性本构模型，其重度、泊松比、弹性模量、主洞初支厚度、辅洞初支厚度和临时支撑厚度分别为：25 kN/m³、0.2、28 MPa、0.32 m、0.26 m、0.22 m。

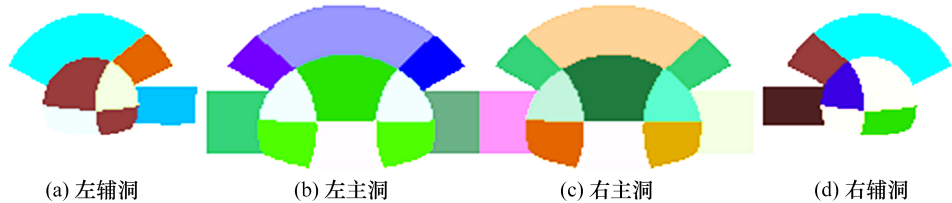


图 2 浅埋大断面小净距隧道的数值模型

Fig. 2 Numerical model of large section neighbor tunnel with shallow cover depth

表 1 各层岩土体的物性参数

Table 1 Properties of different rock (soil) mass

名称	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/MPa	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
坡积粉质黏土	18.0	0.35	13.5	15	5.0	11.7	25
砂土状全风化凝灰熔岩	19.0	0.30	90.0	75	34.6	30.0	20
碎块状强风化凝灰熔岩	20.0	0.30	150.0	125	57.7	35.0	80
微风化凝灰熔岩	22.0	0.20	240.0	160	92.3	40.0	250

1.4 开挖工况

按照设计文件中预定的开挖过程与施工工序，分四步骤进行数值模拟：(1)完成开挖前，计算初始地应力；(2)开挖左、右辅洞，完成相应的初期支护；(3)开挖右主洞，完成相应初期支护；(4)开挖左主洞，完成相应初期支护。

以右辅洞为例，采用单侧壁导坑法开挖如图 3 所示。具体工序为：(1)完成主辅洞间中夹岩加固；(2)开挖左导坑上台阶 I，施作左拱腰初支、上部临时竖撑和左侧临时横撑①；(3)开挖左导坑下台阶 II，施作左边墙初支、下部临时竖撑和左侧仰拱②；(4)开挖右导坑上台阶 III，施作拱顶、右拱腰初支、

右侧临时横撑③；(5)开挖右导坑下台阶 IV，施作右边墙初支和右侧仰拱④；(6)拆除所有临时支护，施作二次仰拱和二次衬砌。

以右主洞为例，采用双侧壁导坑法开挖如图 4 所示。具体工序为：(1)完成主洞间中夹岩加固；(2)开挖左导坑上台阶 I，施作左拱腰初支、左上部临时竖撑和左侧临时横撑①；(3)开挖左导坑下台阶 II，施作左边墙初支、左下部临时竖撑和左侧仰拱②；(4)开挖右导坑上台阶 III，施作右拱腰初支、右上部临时竖撑和右侧临时横撑③；(5)开挖右导坑下台阶 IV，施作右边墙初支、右下部临时竖撑和右侧仰拱④；(6)开挖隧道中部上台阶 V，施作拱顶初支

和中部临时横撑⑤；(7)开挖隧道中部下台阶Ⅵ，施作中部仰拱⑥；(8)拆除所有临时支护，施作二次仰拱和二次衬砌。

通过二维模型模拟分部开挖的三维过程，应注意荷载释放率。根据文献[15]的研究成果，每个分

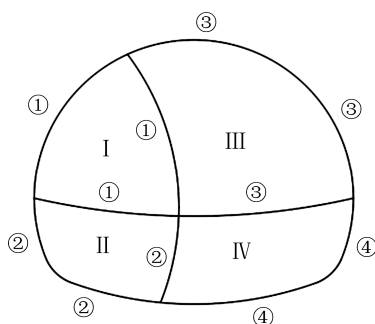


图 3 单侧壁导坑法开挖工况及围岩压力监测

Fig. 3 The excavation sequence of unilateral pilot tunneling method and the pressure monitoring points

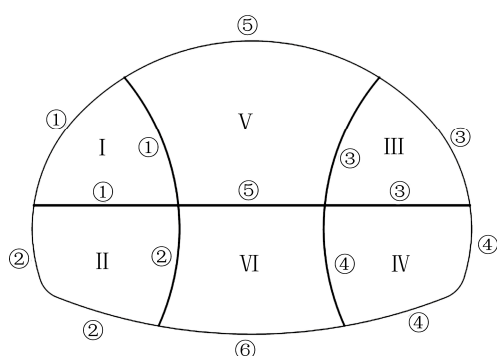


图 4 双侧壁导坑法开挖工况及围岩压力监测

Fig. 4 The excavation sequence of bilateral pilot tunneling method and the pressure monitoring points

部开挖时的荷载释放率取 30%。每个分部开挖后，在开挖内轮廓面上反向施加虚拟支护力，为初始地应力的 70%，计算至平衡。再施作初支 Liner 单元，撤销虚拟支护力后计算至平衡。则初始地应力的

30%由围岩自身承担，70%由初支承担。

1.5 围岩压力测点的布置

为研究作用在隧道初支上的围岩压力分布，沿隧道初支 Liner 单元，每隔约 1 m，布置围岩压力监测点。数值模拟中，可直接读取作用在初支 Liner 单元上的法向压力和切向压力。但为了与常规隧道设计中围岩压力的概念相一致，可将法向压力和切向压力分别沿竖直方向(z 方向)和水平方向(x 方向)进行分解。

2 浅埋常规断面隧道的围岩压力分布

2.1 左、右辅洞开挖和围岩压力分布

左、右辅洞先行施工，中轴线之间相距 62.6 m，因此，可将左、右辅洞作为常规分离式隧道进行分析。右辅洞二衬施工完毕后，读取作用在初期支护上的法向压力和切向压力，并转化为竖直方向和水平方向的围岩压力，如图 5 所示。常规隧道设计中(假定全断面一次性开挖)，通常认为竖向围岩压力呈矩形分布，水平向围岩压力呈梯形分布。实际上，作用在初期支护的围岩压力，其分布受开挖方式的影响很大。

从图 5 可以看出，左、右辅洞的竖向围岩压力呈“单峰折线型”分布，其最大值约为 0.139 MPa，发生在临时竖撑附近。单侧壁导坑法开挖过程中，临时竖撑承担竖向围岩压力；临时竖撑拆除后，该部分围岩压力由支撑点附近(拱顶附近)的初期支护承担。左、右辅洞的水平向围岩压力也呈“单峰折线型”分布，其最大值约为 0.258 MPa(先行侧)和 0.204 MPa(后行侧)，也发生在临时横撑附近。

先行开挖的单侧壁导坑位于左、右辅洞的内侧，导致其内侧水平压力峰值略大于外侧。

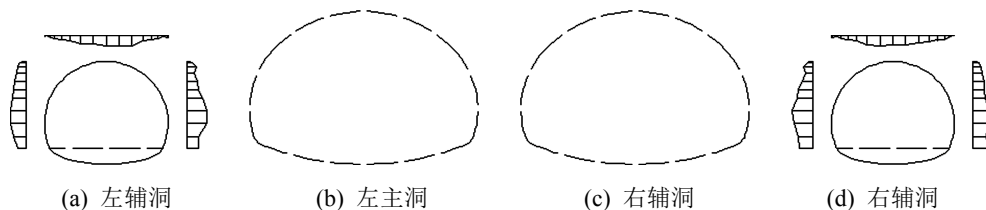


图 5 常规分离式隧道的围岩压力分布

Fig. 5 The pressure distribution of regular separated tunnel

2.2 与规范法计算围岩的压力比较

对于埋深介于 1.0~2.5 倍等效荷载高度 h_q 之间

的浅埋无偏压单洞隧道，根据《公路隧道设计规范 (JTG D70—2004)》^[16]规定的竖向围岩压力和水平

向围岩压力的计算公式, 将龙兴岭隧道左、右辅洞的相关数据带入其计算公式, 得到规范法围岩压力的分布, 如图 6(a)所示。其竖向围岩压力 $q=0.213$ MPa, 最小和最大水平围岩压力分别为 $e_{\min}=0.028$ MPa 和 $e_{\max}=0.035$ MPa, 平均水平围岩压力为 $e_m=0.030$ MPa。

将数值模拟所得的围岩压力, 按单峰形态拟合

成双折线如图 6(b)所示。围岩压力的最大值为规范方法的 0.65 倍, 内侧水平围岩压力的最大值为规范方法(平均水平围岩压力)的 8.60 倍, 外侧水平围岩压力的最大值为规范方法的 6.80 倍。相对于规范方法, 数值模拟方法考虑了开挖顺序与临时支撑的影响和围岩与衬砌之间协调变形的相互作用, 其计算所得围岩压力分布模式, 更接近真实值。

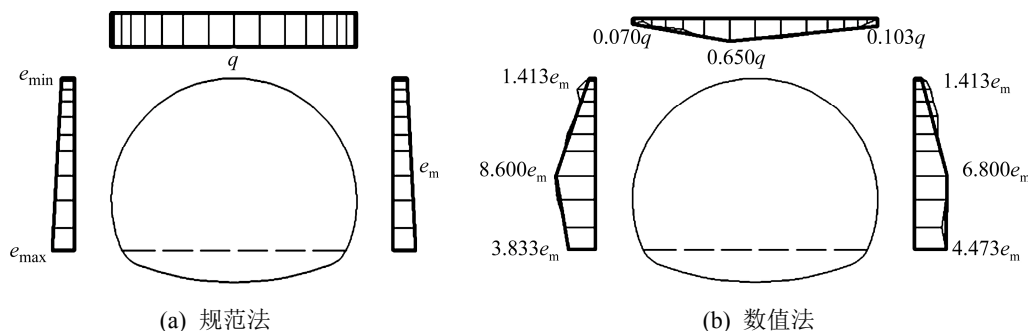


图 6 规范法与数值模拟法围岩压力

Fig. 6 The comparison of ground pressure calculated by code's method and numerical simulation

3 浅埋大断面小净距隧道的围岩压力分布

3.1 右主洞围岩压力分布

左、右辅洞开挖及支护完成后, 继续施作右主洞。右主洞与右辅洞之间, 中夹岩厚度约为 9.75 m。右主洞与左辅洞之间, 中夹岩厚度约为 31.2 m, 均小于 3.5 倍自身开挖洞径, 可视作小净距隧道进行研究。将三洞开挖及支护完成后的围岩压力, 沿垂直方向(y 方向)和水平方向(x 方向)进行分解, 绘制其围岩压力分布如图 7 所示。

右主洞竖向围岩压力受双侧壁导坑法两道临时竖撑的影响, 近似呈“双峰折线型”分布: 拱顶范围内压力较大, 在临时竖撑附近, 其竖向围岩压力达到最大值 0.146 MPa; 左、右两端的竖向围岩压力骤减, 接近于矩形均匀分布, 其平均值为 0.038 MPa。右主洞水平向围岩压力受双侧壁导坑法的两

道临时竖撑和一道临时横撑的影响, 也近似呈“双峰折线型”分布, 其最大值约为 0.309 MPa(先行侧)和 0.299 MPa(后行侧), 发生在临时横撑附近。

受右主洞开挖的影响, 右辅洞的竖向围岩压力有所增长, 临近右主洞侧(即小净距侧)的增幅约为 50%; 远离右主洞侧的增幅为 10%~20%。右辅洞的水平围岩压力亦有所增长, 如: 小净距侧的拱脚处, 其增幅约为 50%。

3.2 左主洞围岩压力分布

右主洞开挖及支护完成后, 继续施作左主洞。四洞开挖和支护完成后, 对围岩压力沿垂直方向(y 方向)和水平方向(x 方向)进行分解, 绘制其围岩压力分布, 如图 8 所示。

左主洞与右主洞类似, 其竖向围岩压力亦呈“双峰折线型”分布, 临时竖撑附近其竖向围岩压力达到最大值 0.142 MPa, 左、右两端竖向围岩压力骤减, 其平均值为 0.041 MPa。左主洞的水平向围岩压力也呈“双峰折线型”分布, 其最大值约为

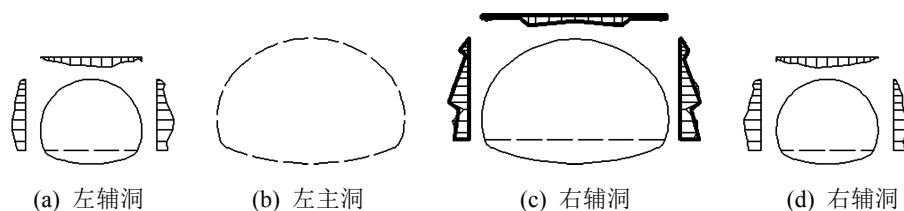


图 7 小净距隧道(三洞)的围岩压力分布

Fig. 7 The pressure distribution for neighborhood tunnels (triple)

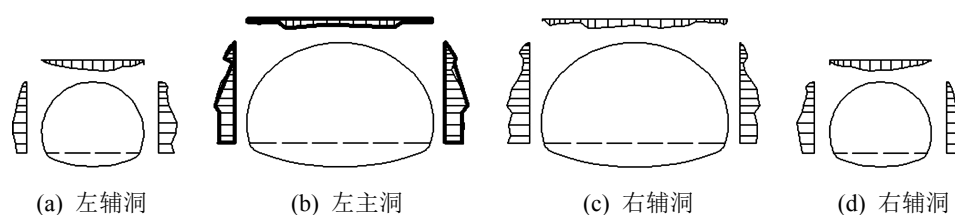


图8 小净距隧道(四洞)的围岩压力分布

Fig. 8 The pressure distribution of neighborhood tunnels (quadruple)

0.339 MPa(先行侧)和 0.304 MPa(后行侧),发生在临时横撑附近。

受左主洞开挖的影响,右主洞的竖向围岩压力有所增长(平均增幅为 20%~40%),水平围岩压力亦有所增长(平均增幅为 10%~20%)。受左主洞开挖的影响,左辅洞的水平围岩压力出现较大增长,尤其是小净距侧的拱脚处,其增幅约为 50%。

4 结论

以平潭综合实验区龙兴岭隧道为工程背景,采用 FLAC^{3D} 软件,对四洞小净距隧道的分步开挖进行了数值模拟,分析了初期支护上的围岩压力分布规律,得出的结论为:

1) 开挖左、右辅洞时,可将其视为常规分离式隧道,其围岩压力分布受开挖方式的影响较大。单侧壁导坑法开挖过程中,因临时竖撑与临时横撑的存在,作用在初期支护上的竖向围岩压力和水平围岩压力均呈“单峰折线型”分布。本数值模拟方法考虑了开挖顺序与临时支撑的影响和围岩与衬砌之间协调变形的相互作用,其计算所得围岩压力分布与实际情况较为契合。

2) 开挖左、右主洞时,可将其视为多孔小净距隧道,其围岩压力分布同样受开挖方式影响。双侧壁导坑法中的两道临时竖撑与一道临时横撑,使得主洞初期支护上的竖向围岩压力与水平围岩压力均呈“双峰折线型”分布。同时,左、右主洞开挖,使得临近小净距隧道初支上的围岩压力有所增长,尤其是小净距侧的最大围岩压力增幅可高达 50%。

参考文献(References):

[1] 龚建伍,夏才初,雷学文.浅埋小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2): 4139-4145.(GONG Jian-wu,XIA Cai-chu,LEI Xue-wen. Analysis of field measurement and theoretical calculation on rock pressure in shallow-buried twin tunnels with

small spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(S2):4139-4145.(in Chinese))

- [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. (ZHONG Zu-liang, TU Yi-liang, LIU Xin-rong. Calculation of lining loading of shallow-buried bilateral bias twin tunnel and its parameter sensitivity analysis[J]. China Civil Engineering Journal,2013,46(1): 119-125.(in Chinese))
- [3] Lei M, Lin D, Yang W, et al. Model test to investigate failure mechanism and loading characteristics of shallow-bias tunnels with small clear distance[J]. Journal of Central South University,2016,23(12):3312-3321.
- [4] 彭从文,朱向荣,王金昌.基于三维有限元模型的小净距隧道施工力学分析[J].公路交通科技,2008,25(12): 138-145. (PENG Cong-wen, ZHU Xiang-rong, WANG Jin-chang. Mechanical analysis of small interval tunnel based on three-dimensional FEM model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008,25(12):138-145.(in Chinese))
- [5] 腾俊洋,唐建新,张闯,等.浅埋偏压小净距隧道围岩压力分布与围岩控制[J].地下空间与工程学报,2018,14(3): 761-769. (TENG Jun-yang, TANG Jian-xin, ZHANG Chuang, et al. Distribution and control of surrounding rock pressure of shallow buried tunnel under the condition of terrain bias[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(3):761-769.(in Chinese))
- [6] Wang H, Li Y, Li S, et al. An elasto-plastic damage constitutive model for jointed rock mass with an application[J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(1): 77-94.
- [7] 吴才轩.大断面浅埋小净距隧道衬砌计算研究[J].公路工程,2014,39(5):185-188. (WU Cai-xuan. The research about calculation of lining in large section with shallow small spacing tunnel[J]. Highway Engineering, 2014, 39(5):185-188.(in Chinese))
- [8] 夏才初,龚建伍,唐颖,等.大断面小净距公路隧道现场监

- 测分析研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):44-50.
(XIA Cai-chu, GONG Jian-wu, TANG Ying, et al. Study on site monitoring of large-section highway tunnels with small clear spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 44-50. (in Chinese))
- [9] 蒋坤,夏才初.双向八车道小净距公路隧道监控量测分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3755-3761.
(JIANG Kun, XIA Cai-chu. Analysis of monitoring and measurement of small clear spacing highway tunnel with eight lanes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(S2):3755-3761.(in Chinese))
- [10] 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.(SUN Zhen-yu,ZHANG Ding-li,FANG Qian,et al.Distribution of surrounding rock pressure of shallow highway tunnels with small spacing[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(9):84-94.(in Chinese))
- [11] 王茜,凌同华,刘唐利,等.穿越断层破碎带隧道入口段施工数值模拟[J].交通科学与工程,2019,35(4):78-84.
(WANG Qian, LING Tong-hua, LIU Tang-li, et al. Numerical simulation of construction method of tunnel entrance section throughing fractured fault zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4):78-84.(in Chinese))
- [12] 苏宝.小净距浅埋偏压隧道围岩压力计算及影响因素分析[J].施工技术,2018,47(S4):1343-1347.(SU Bao.Small spacing shallow bias tunnel surrounding rock pressure calculation and influence factor analysis[J].Construction Technology,2018,47(S4):1343-1347.(in Chinese))
- [13] 福建省交通规划设计院.平潭综合实验区麒麟大道东段工程龙兴岭隧道设计文件[R].福州:福建省交通规划设计院,2017.(Fujian Provincial Transportation Planning and Design Institute. Longxingling tunnel design document for the eastern section of Qilin avenue in Pingtan Comprehensive Experimental Area[R]. Fuzhou: Fujian Provincial Transportation Planning and Design Institute, 2017.(in Chinese))
- [14] 陈培煌.上下交叠隧道近接施工力学特性的监控量测与数值模拟分析[J].铁道建筑技术,2019(2):97-101.
(CHEN Pei-huang. Construction mechanics of over-crossing tunnels based on field monitoring and numerical simulation[J]. Railway Construction Technology, 2019(2): 97-101.(in Chinese))
- [15] 刘乃飞,李宁,郭晓刚,等.软弱围岩隧洞位移和应力释放规律研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):643-650.(LIU Nai-fei,LI Ning,GUO Xiao-gang,et al. Release law of the displacement and stress for the soft-rock tunnels[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017,13(3):643-650.(in Chinese))
- [16] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.(Chongqing Traffic Research Institute. JTG D70—2004,Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))