

浅埋大断面小净距隧道支护受力特性实测与模拟研究

李晓军¹, 杨正旭², 黄 锋², 王程平¹, 刘星辰²

(1. 重庆中环建设有限公司, 重庆 401120; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要:浅埋大断面小净距隧道围岩稳定性差,加上相邻隧道间相互扰动频繁,支护结构受力复杂,极易引发隧道塌方与地表变形等问题,严重威胁隧道施工安全。以重庆海天堡隧道为背景,采用现场监测与数值模拟相结合的方法,对浅埋大断面小净距隧道围岩压力与复合式衬砌内力的施工响应规律进行研究。结果表明:相邻隧道施工相互扰动明显,后行隧道核心土开挖对先行隧道围岩压力释放影响最为显著;先行隧道支护可通过加固围岩实现小净距隧道压力拱水平减跨,进而提高后行隧道围岩承载力;针对浅埋大断面小净距隧道开挖,双侧壁导坑法可有效控制围岩变形及压力释放。基于该隧道开挖方法的围岩压力及支护受力施工响应规律可为施工方案的优化提供借鉴与参考。

关键词:浅埋大断面;小净距隧道;现场监测;数值模拟;施工响应

中图分类号:U456 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)08-0309-06

随着中国交通建设行业快速发展与建造水平的不断提高,公路隧道建设规模也随之骤增,而小净距隧道凭借其施工简易、缩短工期、节约用地等优点,近年来在中短隧道工程中广泛运用^[1-5],但隧道间施工扰动程度也随中夹岩厚度的减小而增大。此外,隧道断面尺寸及埋设深度通常与规划、设计、需求有关,倘若相邻隧道同时具备埋深浅、中夹岩薄弱、大断面等影响隧道稳定性的关键因素,隧道施工过程中极易诱发地表塌陷、隧道垮塌、管线变形等灾害^[6-9]。因此,隧道开挖工法的选取与支护施工响应规律的研究可有效保证施工安全。

围绕着浅埋、小净距、大断面隧道的施工难点,众多学者利用现场监测、数值模拟等手段做了大量研究。腾俊洋等^[10]通过数值模拟与现场监测手段对小净距隧道围岩压力状态及分布规律进行了分析,并进行了相关理论推导。文云波等^[11]则以南湾隧道为背景,对穿越断层破碎带的小净距大断面隧道台阶法施工过程进行了数值模拟,并与实测结果进行了对比。闫虎等^[12]对小净距隧道开挖过程进行了模拟,研究先后行洞各工序施工错开距离对先后行洞的围岩稳定性和衬砌的受力与变形规律的影响。李磊等^[13]、Song 等^[14]、Jin 等^[15]、Wu 等^[16]采用理论分析、数值计算、现场监测等手段对多类小净距隧道围岩变形规律、支护受力特征等进行了

研究。李军^[17]、罗贞焱等^[18]、贾锋^[19]、卫鹏华^[20]针对小净距隧道的开挖方式进行了数值优化分析,指出了小净距隧道合理的支护结构及开挖方式。以往现场监测与数值模拟研究多单独考虑隧道埋深、隧道净距、隧道断面对隧道围岩稳定性的影响,而综合考虑三者共同影响下,隧道围岩及支护的施工响应规律研究较为少见,但其结论更具有代表性。

本文以重庆海天堡隧道为工程背景,针对砂质泥岩地质条件下浅埋大断面小净距隧道双侧壁导坑法开挖过程中衬砌背后围岩压力及支护结构内力进行了监测,并且利用 ABAQUS 有限元模拟软件对应进行了数值计算,通过监测结果与模拟结论的相互复核与补充,对浅埋大断面小净距隧道施工期间的围岩压力及支护受力响应进行了研究,其结论与建议可为相似隧道施工及工艺优化提供参考与借鉴。

1 工程概况与现场实测

1.1 工程概况

海天堡隧道位于重庆市北碚区,属于 Z4 路北延伸段二期道路工程关键控制性工程。隧道右线全长 352 m(YK3+773-YK4+125),左线全长 377 m(ZK3+773-ZK4+150),双向八车道,建筑限界净宽 16.75 m,净高 5 m,开挖面积约 213.7 m²,隧道埋深 4.5~22.87 m,为典型的浅埋大断面小净

收稿日期:2022-03-22

作者简介:李晓军(1982—),男,重庆人,重庆中环建设有限公司,项目经理,工程师,研究方向为隧道与地下工程。

距隧道。图 1 为隧道纵向地质剖面图,可见隧道所处地层以砂质泥岩为主,围岩等级为Ⅳ~Ⅴ级,考虑到 Z/YK3+840 断面埋深浅且上覆松散破碎岩

土层较厚,地层稳定性差,隧道支护结构承担较大的地层松弛荷载,施工风险较大。故择取断面 1—1 作为研究对象,如图 2 所示。

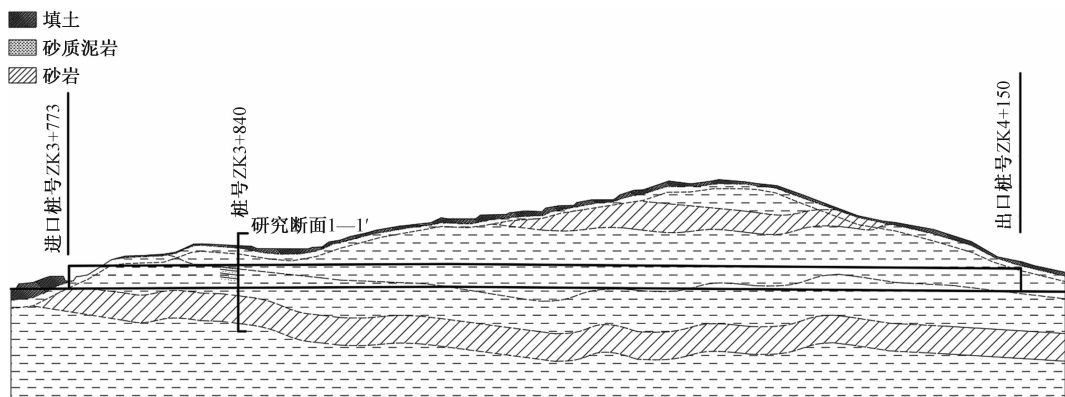
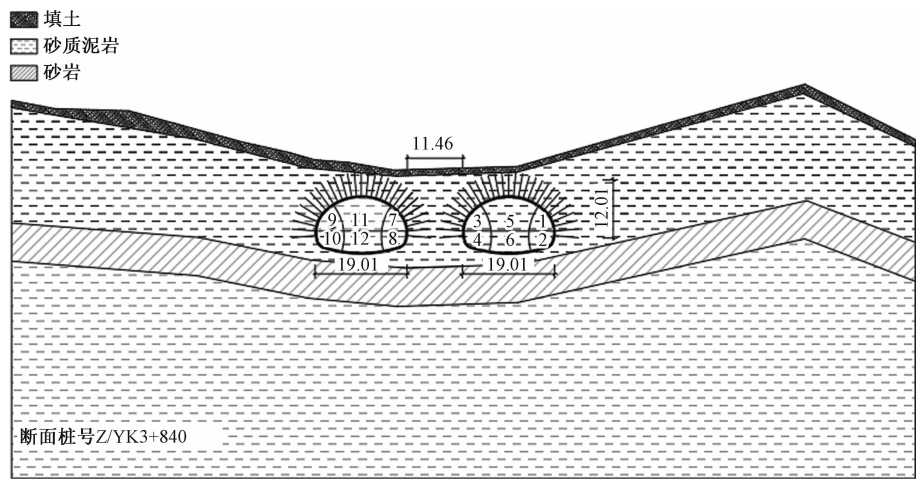


图 1 隧道纵向地质剖面图



单位: m
数字1~12代表开挖顺序。

图 2 研究断面 1—1

1.2 现场实测

分别采用钢筋计(型号:GR-GJ22B)、压力盒(型号:GR-TY10B)、应变计(型号:GR-MRD)对研究断面 1—1(ZK3+840)环向关键位置处的锚杆轴力、初支背后围岩压力、二衬结构内力进行监测,以全面获取隧道围岩与支护结构真实的施工响应。现场左/右洞监测点传感器布置如图 3 所示。

2 数值模拟

结合海天堡隧道详勘资料及施工流程,利用有限元软件 ABAQUS 针对研究断面 1—1(Z/YK3+840),建立了图 4 所示二维数值计算模型,考虑到边界效应的影响,模型尺寸设定为 180 m×80 m,共划分 11 618 个单元,并在模型两侧及底部施加法向位移约束,上侧保持自由。

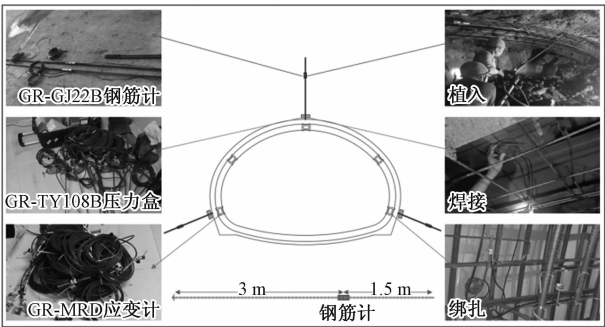


图 3 左(右)监测点传感器布置

为了近似模拟工程实体,计算模型中隧道围岩与初期支护选用实体单元,而系统锚杆、临时钢支撑及二次衬砌结构均选用梁单元,以获取其内力状态。此外,分别选用线弹性本构、Mohr-Coulomb 本

构创建支护结构与隧道围岩材料。其中,锚杆采用 EMBEDDED 功能进行围岩嵌入接触,而围岩与支护结构之间均采用 TIE 接触(绑定),具体模型材料参数见表 1。

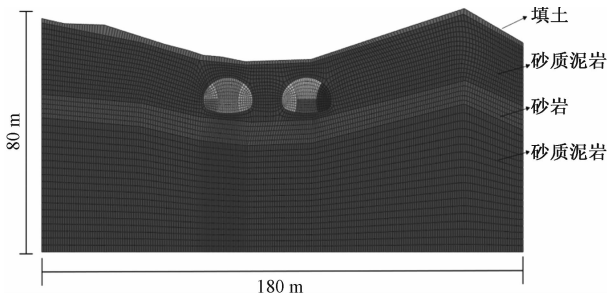


图 4 模拟断面计算模型

表 1 模型材料参数

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/(°)
砂质泥岩	0.5	0.38	23.5	0.5	32
砂岩	10	0.2	25	1.3	36
填土	0.012	0.38	20	0.05	28
初期支护	21	0.2	25		
锚杆	210	0.2	78.5		
临时支撑	210	0.2			
二次衬砌	30	0.2	25		

浅埋大断面小净距隧道双侧壁导坑开挖模拟步骤大致可分 3 部分:①对土体地应力平衡;②对隧道开挖部分围岩强度折减 40%^[21],模拟地应力释放,并按双侧壁导坑施工顺序删除开挖单元且对应激活初期支护、临时支撑结构,全部开挖总共分为 12 部分,如图 2 所示;③删除开挖部分围岩单元释放剩余部分地应力,隧道全断面开挖完成后,除去临时支撑并激活二衬结构单元。

3 结果与分析

3.1 锚杆轴力

小净距隧道拱顶及墙脚位置处系统锚杆锚固端实测轴力状态及变化趋势如图 5 所示(注:监测锚杆的植入日期及顺序与相邻隧道双侧壁导坑开挖步序有关,故开始监测日期不同)。右侧隧道作为先行洞,研究断面(YK3+840)处监测锚杆植入围岩后的 18 天内,锚杆轴力皆呈下降趋势,说明隧道上覆地层仍处于施工扰动后的应力调整阶段,因隧道埋深较浅,地层条件较差。当左侧隧道作为后行洞开挖至研究断面(ZK3+840)时,拱顶位置锚杆轴力逐渐增大,直至后行洞中上部核心土开挖完成,拱顶位置锚杆轴力达到峰值,与左洞未开挖至研究断面时相比增加了近 1 倍,随着右侧先行洞二衬的

施作,拱顶锚杆轴力趋于稳定。这表明浅埋隧道支护结构在维持地层及结构稳定性方面发挥着关键性作用。相比之下,左侧后行隧道拱顶位置锚杆埋设初期并未出现轴力下降趋势,说明右侧先行隧道系统锚杆加固围岩的同时起到了地层压力拱减跨的效果,提高了地层的承载力。此外,隧道墙脚处锚杆出现轴向受压现象,这主要是因为隧道断面大且近似椭圆形状,在墙脚位置极易出现应力集中现象。与外侧墙脚处锚杆轴力相比,中夹岩处锚杆轴力较小,说明薄弱中夹岩对锚杆的约束效果差,施工过程中应配合使用对拉锚杆对中夹岩进行加固。

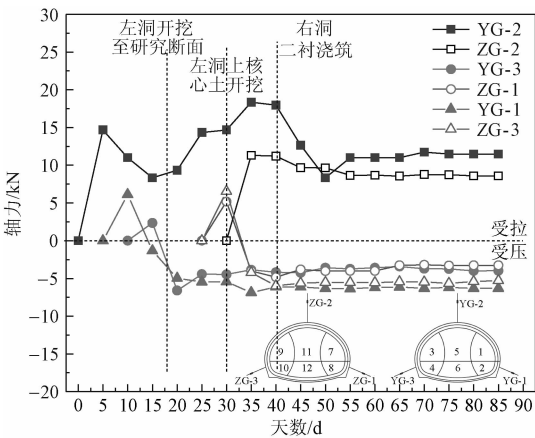


图 5 锚杆轴力实测结果

浅埋小净距大断面隧道开挖完成后,研究断面(Z/YK3+840)处系统锚杆的应力数值计算结果,如图 6 所示。通过计算得到锚杆轴力,其分布情况同现场监测结果基本一致,除外侧墙脚及中夹岩锚杆轴向受压以外,其余位置锚杆均轴向受拉,锚杆最大轴力值出现在右侧隧道拱顶处锚杆锚固端。考虑到篇幅有限,仅提取右侧隧道拱顶处锚杆轴力计算值与现场实测值随计算步/施工过程的响应规律对比,如图 7 所示,可见相同测点锚杆轴力的现场实测值较数值计算值小且有所波动,这可能是因为现场施工环境复杂且扰动频繁,而数值模型中难以完全符合真实情况,但是两者随分析步/施工过程的趋势基本一致,可以说明模拟结果是准确的且基本与实际工程相符。根据现场监测锚杆轴力最大值与 $\phi 25$ 锚杆的最大抗拉力 153 kN 计算得出安全系数为 8.36,说明锚杆结构受力处于安全范围内。

3.2 围岩压力

隧道衬砌背后围岩压力现场实测结果如图 8 所示。伴随隧道施工,衬砌背后围岩压力在埋设之后均呈现增大-减小-平稳的变化趋势。此外,右侧隧

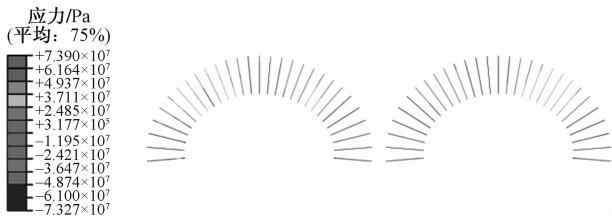


图 6 锚杆应力云图

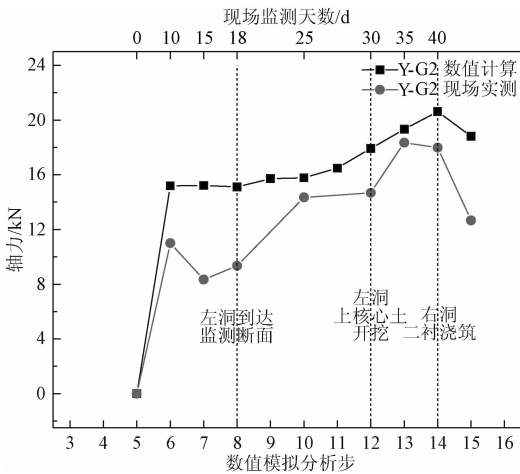


图 7 系统锚杆实测及模拟轴力对比

道作为先行洞,其衬砌背后围岩压力明显小于左洞相同测点位置的围岩压力,可以说明后行隧道上覆地层的自主承载力较先行洞好。受左侧后行隧道中上核心土开挖的影响,右侧先行隧道拱顶处衬砌背后围岩压力减小,而墙脚处围岩压力有所增大,该现象的出现主要是中间核心土的开挖导致围岩应力重新分布造成的。伴随右侧及左侧隧道二次衬砌闭合成环,衬砌背后围岩压力也逐渐趋于稳定,左洞整体围岩压力明显小于右洞围岩压力,中夹岩处压力相差最明显,这表明浅埋大断面小净距的围岩压力在先行洞支护完成后加固了上覆围岩,从而降低了围岩压力。

现场实测结果显示,右侧隧道靠近中夹岩墙脚位置(YT-1)衬砌背后围岩压力最大,右洞拱顶位置(YT-2)受施工扰动产生明显的波动,与现场实测对应,从数值计算结果中提取右侧隧道靠近中夹岩的墙脚位置(YT-1)及拱顶(YT-2)衬砌背后围岩压力值,同时根据《公路隧道设计规范 第一册土建工程》(JTG 3370.1—2018)对该位置的最终围岩压力进行计算,三者对比如图 9 所示。可见,三者大小关系为:规范计算值>数值模拟值>现场监测值,其原因主要是现场传感器布置存在滞后性造成应力损失,数值计算存在模型简化引起的结果差异。虽然三者结果间存在差异,但在允许误差范围内,而且

数值计算结果曲线与现场实测结果曲线走势也基本一致,说明数值计算的准确性,可基本反映隧道开挖过程中围岩压力真实的变化情况。

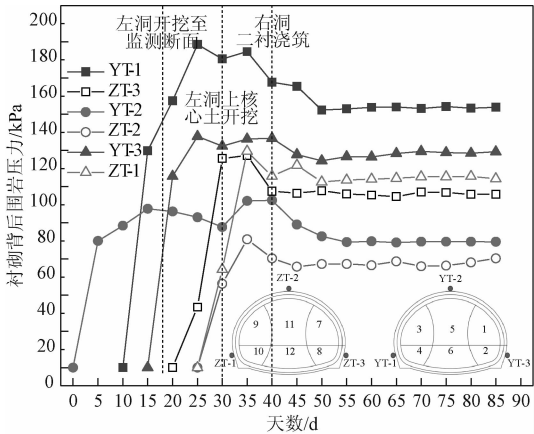


图 8 衬砌背后围岩压力监测结果

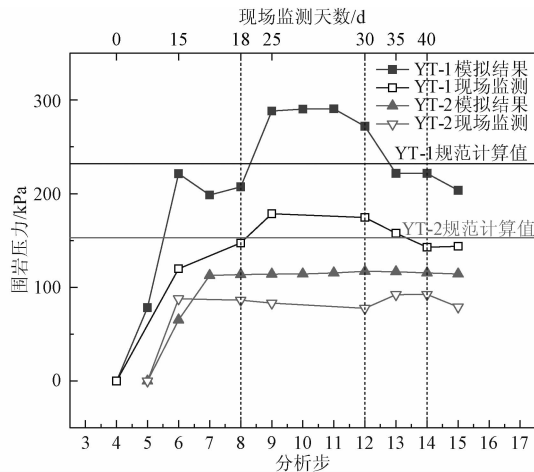


图 9 衬砌背后围岩压力结果对比

3.3 围岩应力

对不同分析步围岩最大主应力云图进行提取,如图 10 所示。从图中可以看出隧道的开挖使隧道拱腰及仰拱处围岩最大主应力变为拉应力,隧道周边围岩应力随开挖明显增大,且先行隧道附近的围岩最大应力更大,最大值为 155 kPa,当两洞施作二衬之后,最大值主要分布在隧道仰拱附近,但最大主应力最大值减小至 60.75 kPa,均远小于围岩单轴抗压强度。

3.4 二衬内力

通过埋入式应变计测量衬砌内侧与外侧的应力,基于平截面假定原理计算出二衬弯矩与轴力,得到现场二衬结构的弯矩与轴力情况。现场监测二衬弯矩与轴力最终值与模拟结果对比如图 11、图 12 所示。

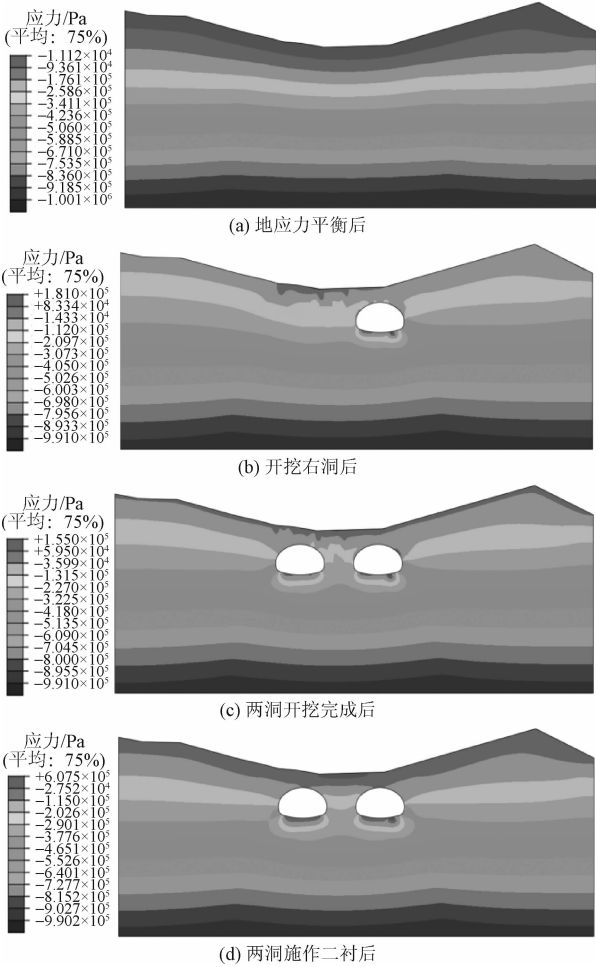


图 10 围岩应力分布云图

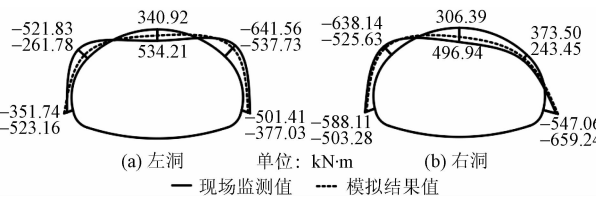


图 11 二衬弯矩分布对比

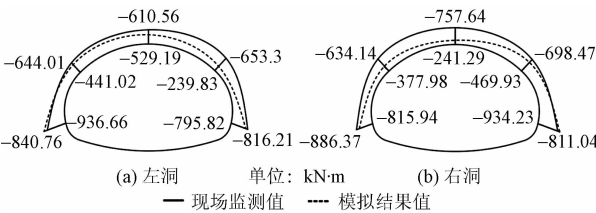


图 12 二衬轴力分布对比

为了便于描述规定二衬弯矩内侧受拉为正,二衬轴力受拉为正。由图 11、图 12 可见:左右洞弯矩与轴力整体分布情况相似,需要注意的是右洞的右拱腰承受的是正弯矩,这表明此位置是外侧受压,

这是由于地形导致隧道受到偏压影响。但弯矩大小仍处于安全范围内,不会出现支护结构破坏的问题。根据公路隧道设计规范^[21]计算现场监测的二衬安全系数,结果如图 13 所示,计算得最小安全系数出现在右洞墙脚处为 5.51,大于规范规定安全系数 2.4,其他位置也远大于 2.4,满足衬砌结构安全的要求。

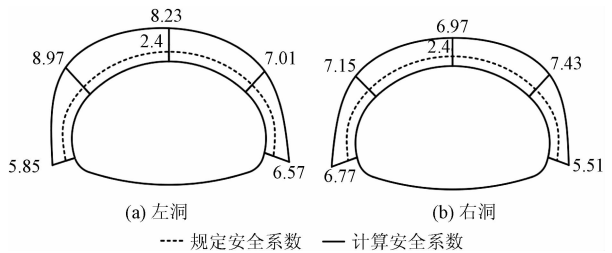


图 13 二衬现场监测计算安全系数

从现场检测及模拟结果对比情况可以看出,二衬弯矩与轴力模拟最终值小于现场监测最终值。这是由于实际工程环境较为复杂,模拟难以完全体现实际情况,但弯矩与轴力的分布规律大致是相同的,说明模型建立基本正确,能够体现隧道二衬弯矩的分布情况。

4 结论

本文对海天堡浅埋大断面小净距隧道锚杆、围岩压力、二衬结构进行了现场监测分析,并结合数值模拟相互对比验证研究此隧道支护的施工响应规律,得到以下主要结论:

1)浅埋大断面小净距隧道中先行隧道支护可加固上覆围岩,实现地层压力拱减跨效果,利用后行隧道地层承载力,进而减轻支护结构负载。整体来看,相对于先行隧道,后行隧道锚杆轴力平均减少 20.93%,围岩压力平均减少 19.71%。且此效应对后行隧道中夹岩处围岩压力减轻最为明显。在施工中应当保证先行隧道支护效果与质量,有助于减轻后行隧道的支护荷载。

2)小净距隧道中夹岩薄弱破碎且经历多次隧道开挖扰动,围岩压力场分布复杂且多变,而此处锚杆则起到了加固与联结中夹岩的重要作用。本工程锚杆受力处于安全范围内,但在设计及施工中应当充分考虑此位置的支护措施并且加强监控量测,根据具体情况进行优化施工,保证中夹岩的安全稳定。

3)针对浅埋大断面小净距隧道开挖,双侧壁导坑法可有效控制围岩变形及压力释放程度,围岩压力大约 45 d 后稳定,二衬结构安全性也可以保证,

整体施工安全稳定,基于该开挖方法的隧道围岩压力及支护受力施工响应规律可为优化施工方案及组织方面的研究提供借鉴与参考。

参考文献

[1] 刘春杰,郭玮卿,欧飞奇.大断面矿山法隧道开挖对小净距盾构隧道的的影响分析[J].城市轨道交通研究,2020,23(5):49-53.

[2] 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.

[3] 贺鹏,李术才,李利平,等.裂隙岩体小净距超大断面隧道围岩非连续变形分析[J].岩土工程学报,2018,40(10):1889-1896.

[4] 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.

[5] 蒋庆,范宏运,李涛,等.超大断面小净距隧道应力场演化研究[J].中外公路,2021,41(1):197-202.

[6] 王鹏,杜文涛,汤明,等.复杂岩溶区特大断面小净距隧道洞口塌方处治技术[J].中外公路,2019,39(2):215-217.

[7] 谭鹏,王福聪,肖昌,等.基于衬砌结构受力的四洞并行公路隧道群施工相互影响分析[J].科学技术与工程,2021,21(16):6869-6875.

[8] 田志宇,林国进,郑金龙,等.小净距隧道破坏模式研究[J].现代隧道技术,2019,56(S2):202-208.

[9] 武松,汤华,罗红星,等.浅埋大断面公路隧道渐进破坏规律与安全控制[J].中国公路学报,2019,32(12):205-216.

[10] 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.

[11] 文云波,黄锋,高啸也,等.小净距大断面偏压隧道围岩稳定性分析[J].铁道建筑,2017(7):77-80.

[12] 闫虎,侯月琴.软弱围岩非爆破开挖小净距隧道施工步距合理性分析[J].工程建设与设计,2020(5):145-147.

[13] 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.

[14] SONG Z,TIAN X,LIU Q,et al. Numerical analysis and application of the construction method for the s-small interval tunnel in the turn line of metro[J]. Science Progress,2020,103(3):1-25.

[15] JIN D,YUAN D,LIU S,et al. Performance of existing subway tunnels undercrossed by four closely s-paced shield tunnels[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2019,33(1):1-11.

[16] WU L,ZHANG X,ZHANG Z,et al. 3D discrete element method modelling of tunnel construction impact on an adjacent tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020,24(2):657-669.

[17] 李军. 软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术研究[J]. 中外公路,2020,40(2):174-179.

[18] 罗贞焱,罗周全,郑淑芬,等. 围岩力学响应特征在小净距隧道施工方法优选中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(1):1-6.

[19] 贾锋. 浅埋偏压小净距隧道荷载特征试验研究[J]. 公路, 2018,63(9):310-316.

[20] 卫鹏华. 高地应力软岩大变形小净距隧道支护形式及施工顺序探讨[J]. 现代隧道技术,2018,55(3):167-175.

[21] 公路隧道设计规范 第一册土建工程:JTG 3370.1—2018 [S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

The Measurement and Simulation on Stress Characteristics of Shallow Buried Tunnel with Large Section and Small Clear Distance

LI Xiaojun¹, YANG Zhengxu², HUANG Feng², WANG Chengping¹, LIU Xingchen²

(1. Chongqing Zhonghuan Construction Co., Ltd., Chongqing 401120, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The surrounding rock stability of shallow buried tunnel with large section and small clear distance is poor, and the mutual disturbance between tunnels is frequent, which is very easy to cause disasters such as chamber collapse and surface collapse. Therefore, the stress state of tunnel surrounding rock and the stress characteristics of support are very important for tunnel stability control. Taking the tunnel under construction as the background, the construction response law of surrounding rock pressure and internal force of composite lining of shallow buried tunnel with large section and small clear distance is analyzed by using the method of field monitoring and numerical simulation. The results show that the former tunnel support can reduce the horizontal span of the soil arch of the tunnel with small clear distance by strengthening the surrounding rock, so as to improve the bearing capacity of the surrounding rock of the later tunnel. The construction of adjacent tunnels disturbs each other obviously, and the excavation of the core soil of the later tunnel has the most significant impact on the pressure release of the surrounding rock of the former tunnel. In addition, for the excavation of shallow buried large section and small clear distance tunnel, the double sides heading method can effectively control the surrounding rock deformation and pressure release, and the surrounding rock pressure and support stress construction response law based on the tunnel excavation method can provide reference for the optimization of construction scheme.

Keywords: shallow large section; tunnel with small clear distance; field measurement; numerical simulation; construction response