

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.008

公路隧道装配式仰拱结构形式优化设计

刘泾堂¹,王迎超²,邱成虎¹,曲 龙³,袁文广³,杜耀辉⁴,郝 英²

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 甘肃公航旅天庄高速公路管理有限公司, 甘肃 天水 741000; 4. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为研究公路隧道装配式仰拱结构形式及其受力变形特征,基于收集的国内外不同装配式隧道结构应用案例,对钻爆法公路隧道预制仰拱结构形式进行优化设计,并分析了其受力特征;针对钻爆法公路隧道断面特点,以甘肃省某高速公路隧道工程为例,从施工难度、施工速度、防排水能力、造价成本等方面对弧形、箱型预制仰拱结构形式进行综合比选,并分析了仰拱分块数量、仰拱厚度以及幅宽对箱型预制仰拱结构的最大位移、混凝土损伤破坏、钢筋应力的影响。结果表明:箱型预制仰拱为较为合适的仰拱形式,7 分块、上部厚度 20 cm、下部厚度 40 cm、幅宽 1.2 m 的箱型预制仰拱结构形式最为合适;装配式仰拱和二衬结构调整,改善了隧道受力,对保证整体支护结构稳定作用明显。

关键词: 公路隧道; 钻爆法; 装配式仰拱; 结构形式; 数值模拟

中图分类号: U459.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)04-0055-10

Optimal design of prefabricated inverted arch structure for highway tunnels

LIU Jingtang¹, WANG Yingchao², QIU Chenghu¹, QU Long³, YUAN Wenguang³, DU Yaohui⁴, HAO Ying²

(1. Gansu Province Transportation Planning Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Gansu Gonghang Tianzhuang Expressway Management Co., Ltd., Tianshui 741000, China;

4. Department of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the structure types and deformation characteristics of prefabricated invert arch structure in highway tunnels, firstly, by collecting application cases of different prefabricated tunnel structures at home and abroad. Then, the precast inverted arch structure of the drilling-blasting highway tunnel is optimized and its stress characteristics are studied. According to the section characteristics of the drilling-blasting highway tunnel, taking a highway tunnel project in Gansu Province as an example, the prefabricated invert type of arc-shape and box-shape was designed from the aspects of construction difficulty, construction speed, anti-drainage ability and cost. The influence of the number of invert arch blocks, invert arch thickness and width on the maximum displacement, concrete damage and reinforcement stress of prefabricated box invert structures are analyzed. The results show that the box-type precast invert is a more suitable structure. The box prefabricated invert structure with 7 blocks, upper thickness of 20 cm, lower thickness of 40 cm and width of 1.2 m is the most suitable. The assembled invert structure and the secondary lining structure adjust and improve the tunnel load, and play a significant role in ensuring the stability of the overall supporting structure.

Key words: highway tunnels; drilling and blasting method; prefabricated inverted arch; structure type; numerical simulation

随着我国公路建设高速发展,一大批公路隧道正在或即将修建,且很多隧道都面临着高应力、富水、突泥、软岩大变形等不良地质,从而导致衬砌开裂、漏水和路面隆起、破损、断裂、翻浆、冒泥等隧道病害^[1]日趋严重。仰拱是隧道衬砌结构的重要组成部分,可以大大提高隧道的整体稳定性^[2],而装配式结构已逐渐成为其发展的方向^[3]。隧道装配式施工可以克服现浇混凝土施工诸多缺点,混凝土构件通过预制施工,标准化程度高,成品质量能得到保障;预制结构可以大大缩短施工和养护周期,提高施工效率、降低施工成本。因此,衬砌结构预制化是未来隧道施工的发展趋势。但是隧道装配式衬砌结构与地上装配式结构完全不

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(21YF1GA381);甘肃省交通运输厅科技项目(2021-09)

作者简介: 刘泾堂(1978—),男,正高级工程师,硕士,主要从事公路隧道设计与施工工作。E-mail:35750937@qq.com

通信作者: 王迎超(1982—),男,教授,博士,主要从事岩土工程灾害与防治研究。E-mail:wych12345678@126.com

引用本文: 刘泾堂,王迎超,邱成虎,等.公路隧道装配式仰拱结构形式优化设计[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):55-64.

LIU Jingtang, WANG Yingchao, QIU Chenghu, et al. Optimal design of prefabricated inverted arch structure for highway tunnels[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 55-64.

同^[4-5],在受力、耐久性、防水等方面都面临很多挑战。

在隧道装配式衬砌结构设计方面,众多学者进行了深入研究,取得了一系列研究成果。唐伟^[6]针对高铁单线盾构隧道,提出了底部仰拱分块预制、全块预制以及全块预制+两侧增加纵梁3种方案,综合对比结果表明,仰拱全块预制+两侧增加纵梁结构效果最好。陈敬军^[7]针对传统的圆形衬砌使开挖断面加大,工程量大的问题,提出了一种对现行铁路隧道断面优化的衬砌形式,不仅比原衬砌形式安全系数高,而且减小了衬砌的变形量。张鹏^[8]通过对比板型预制管片和箱型预制管片,发现管片厚度相同的条件下,板型管片的强度、刚度、稳定性优于箱型管片,但是箱型管片具有用料少、防水性能更佳等优点,因此可以根据断面形式和施工需求选用不同形状的管片结构。计中彦等^[9]提出了一种弧形预制块+后浇混凝土结合的方法,认为相比于螺栓连接,后浇带连接更适用于隧底平整性较差的公路隧道,同时后浇带是装配式仰拱结构的受力薄弱部位。赵晓勇^[10]针对装配式仰拱选型,从结构受力、隧道防排水和施工工序三方面进行了比较,结果表明箱型装配式仰拱结构比板式结构更优,可以降低结衬砌内力,减少仰拱现浇作业量,减小对围岩的影响。此外,周佳媚等^[11-19]针对隧道排水、渗流以及衬砌力学特性等进行了大量试验与数值研究,得出了有益的结论。

目前对于公路隧道装配式仰拱选型及优化设计研究较少,本文在收集整理国内外关于装配式衬砌、预制仰拱施工案例的基础上,以甘肃省某钻爆法公路隧道预制仰拱结构形式为例进行研究,通过设计对比提出较为合适的预制仰拱结构形式,并通过数值模拟对其进行参数优化设计及受力变形特性研究。

1 隧道装配式衬砌案例统计分析

隧道装配式衬砌结构形式的选择需要考虑隧道类型、隧道内轮廓形状、施工方法、预制仰拱形式等因素。表1为国内外部分关于隧道装配式结构应用案例^[9, 20-33]。

表1 国内外隧道装配式结构衬砌应用案例

Table 1 Application cases of prefabricated tunnel lining at home and abroad					
隧道名称	预制仰拱形式	隧道类型	施工方法	隧道内轮廓形状	数据来源
秦岭1号隧道	弧形部分预制	铁路	TBM法	圆形	杨书江 ^[20]
京张高铁清华园隧道	箱涵部分预制(分块)	铁路	盾构法	圆形	吕刚等 ^[21]
川藏铁路色季拉山隧道	弧形部分预制	铁路	TBM法	圆形	李国良等 ^[22]
厦门高速铁路东孚隧道	全构件预制	铁路	明挖法	矩形	田川江等 ^[23]
瑞士费尔艾那隧道	弧形部分预制	铁路	TBM法	圆形	王彬 ^[24]
蒙华铁路白城隧道	弧形全构件预制	铁路	盾构法	马蹄形	韩贺庚等 ^[25]
苏联明斯克地铁站	弧形全构件预制(分块)	地铁	明挖法	矩形	李太惠 ^[26]
青岛地铁6号线	弧形全构件预制(分块)	地铁	明挖法	矩形	杨秀仁 ^[27]
长春地铁2号线	弧形全预制仰拱(分块)	地铁	明挖法	矩形	杨秀仁等 ^[28]
东京7号线白金台站	弧形全预制仰拱(分块)	地铁	盾构法	圆形	杨秀仁 ^[27]
日本JR京叶县京桥站	弧形全预制仰拱(分块)	地铁	盾构法	圆形	杨秀仁 ^[27]
俄罗斯地铁奥林匹克站	弧形全预制仰拱(分块)	地铁	钻爆法	马蹄形	杨秀仁等 ^[28]
日本仙台市地铁隧道	全构件预制(分块)	地铁	明挖法	矩形	刘培硕 ^[29]
加拿大多伦多地铁隧道	弧形全构件预制(分块)	地铁	盾构法	圆形	刘培硕 ^[29]
上海上中路隧道	弧形全构件预制(分块)	公路	盾构法	圆形	王子洪 ^[30]
成都火车北站北延线公路隧道	弧形全构件预制(分块)	公路	盾构法	圆形	李国等 ^[31]
上海诸光路工程	弧形全构件预制(分块)	公路	盾构法	圆形	姬杨蓓蓓 ^[32]
日本奈良县隧道	弧形全构件预制(分块)	公路	明挖法	马蹄形	郝理 ^[33]
四川毛栗坪隧道	弧形部分预制(分块)	公路	钻爆法	马蹄形	计中彦等 ^[9]
意大利Nazzano高速公路扩容工程	弧形全构件预制(分块)	公路	暗挖法	马蹄形	郝理 ^[33]
上海世博综合管廊	全构件预制(分块)	管廊	明挖法	矩形	郝理 ^[33]

1.1 隧道类型

目前应用装配式结构的隧道类型众多,从表1统计数据可以看出装配式结构主要应用于地铁、铁路隧道中,公路隧道应用相对较少。

1.2 隧道内轮廓形状与施工方法

隧道内轮廓形状主要分为圆形、矩形、马蹄形,隧道各内轮廓形状应用案例数量以圆形最多、矩形次之、马蹄形最少。内轮廓形状与施工方法、空间利用率有关。圆形断面形式具有结构受力合理、对内净空利用影响小等特点,矩形断面形式具有空间利用率高等特点。故根据相应的内轮廓特点和常用隧道施工方法,地铁

和铁路隧道内轮廓形状多为圆形和矩形。

隧道开挖方法主要有盾构法、明挖法、TBM 法、钻爆法以及暗挖法。表 1 中隧道施工方法主要为盾构机开挖和明挖法。盾构机主要以圆形为主;明挖法多采用矩形单跨和多跨结构。由于山区公路隧道岩石坚硬,对沉降要求不高,隧道相对较短,以及公路隧道净空断面呈马蹄形,且盾构机价格昂贵等原因,盾构机在公路隧道中使用较少,多采用钻爆法开挖。

1.3 装配式衬砌形式

隧道装配式衬砌可以分为全预制和部分预制,部分预制技术多为仰拱预制化,隧道上部衬砌采用现浇形式。对于预制仰拱,其结构形式多为弧形,在统计案例中仅有 1 个铁路隧道采用了箱型预制仰拱结构。

2 公路隧道预制仰拱结构形式设计

公路隧道多采用马蹄形轮廓,其中根据 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范》,甘肃某高速公路设计时速为 80 km/h,隧道内轮廓如图 1 所示,其最大跨处内净空跨度 11.1 m,路面至拱顶高度 7.27 m,拱底至拱顶 8.80 m。针对该隧道断面形状,选择两种公路隧道预制仰拱结构形式——弧形和箱型进行设计并比选。

2.1 弧形预制仰拱结构

弧形预制仰拱结构,底部为弧形预制构件,上部为现浇混凝土填充层,之后为施作找平层和路面。实行预制仰拱块和上部衬砌分离的形式,不仅符合钻爆法的施工特点,且能够实现初支完成后,仰拱先行从而达到快速承载的目的,再向施工难度。综合考虑结构的受力、构件的质量、构件的制作、和形式分为3块,如图2所示。

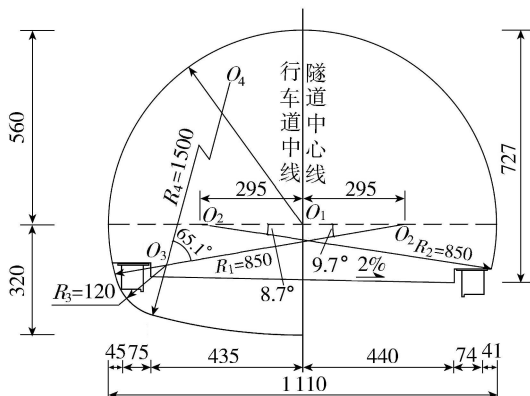


图 1 某高速公路隧道内轮廓图(单位:cm)

Fig. 1 Outline map of a highway tunnel (unit: cm)

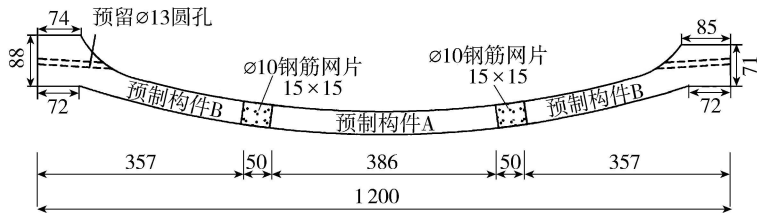


图 2 弧形预制仰拱结构(单位:cm)

Fig.2 Structure diagram of prefabricated inverted arch (unit: cm)

边墙位置构件 B 预制过程中,应做好预埋连接钢筋的预留,二衬施工中,预制仰拱构件与现浇混凝土边墙通过焊接预埋钢筋,并浇筑混凝土形成整体结构。该预制仰拱施工时,先进行预制构件现场吊运、安装,前后、左右两块构件均采用现浇 40 cm 厚 C40 混凝土现场湿接。用直径为 219 mm、壁厚为 8 mm 的套管连接前后两环构件间的直径为 194 mm、壁厚为 8 mm 的钢管,确保了前后、左右两片构件连接的质量。施工中,仰拱部位开挖完成后即进行 10 cm 厚 C15 现浇混凝土调平层施工,过程中确保调平层标高准确,表面光滑平整。

2.2 箱型预制仰拱结构

箱型预制仰拱结构设计如图 3 所示。此箱型预制仰拱结构,由若干相同的预制块和现浇段组成,构件之间采用螺栓连接。仰拱支撑结构包括 7 个预制块和 2 个现浇段,仰拱块依次拼接形成隧道仰拱衬砌。预制块的上、下表面分别为平面与弧面。仰拱左右预制块都预埋有与边墙搭接的钢筋,与现浇混凝土形成整体结构,从而提高了仰拱和上部衬砌结构的强度。

预制块之间放置可压缩性止水条,螺栓拧紧后可对预制块之间缝隙起到密封止水作用。预制块结构外侧缝隙用环氧树脂砂浆填缝进一步密封。左右两侧现浇块各设有横向排水管,与两侧纵向排水管相连接,将两侧纵向排水管中的水引入预制块空洞内的排水管内,纵向排出。

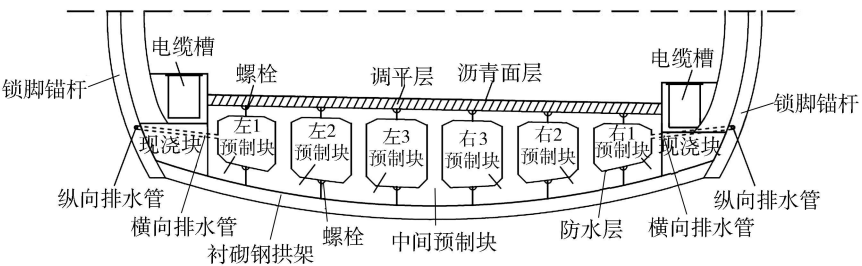


图3 箱型预制仰拱结构

Fig.3 Prefabricated inverted arch structure of box type

2.3 结构形式比选

- a. 施工难度。从整体结构来看,弧形预制仰拱结构制作简单,吊运方便,但弧形预制仰拱块铺设完毕后需进行仰拱回填、基层、面板施工,工序较多,从而影响了施作空间和效率。箱型预制仰拱结构是基于弧形预制仰拱结构优化而来,箱型预制仰拱结构通过螺栓连接后,作业面已基本平整,衬砌受力较为稳定,施工难度较小,并且可缩短步距,二衬能够及时跟进。
- b. 施工速度。弧形预制仰拱构件之间连接采用钢管焊接,然后在连接处现浇混凝土从而形成整体,钢管焊接以及现浇混凝土从浇筑至养护均需要大量时间,未真正实现仰拱的全套装配式施工。箱型预制仰拱结构较弧形预制仰拱结构省去了现浇混凝土连接处和回填层的施作工序,构件吊运至合适位置后,通过拧紧螺栓实现构件紧固,之后只需施作调平层和沥青面层即可达到通车条件,有效减少了施工流程,从而大大加快了施工速度。
- c. 防排水能力。为实现有效防水,弧形预制构件在接头处设置一层止水带,而箱型装配式仰拱结构防水性能更全面,在其四周均设置可压缩性止水条。弧形预制仰拱结构上部通过现浇混凝土回填层,虽然可以增加整体承载力和稳定性。但是存在防排水能力差的缺点,弧形预制仰拱只能通过预埋排水管道实现排水功能,而箱型预制仰拱是由多榀空心预制构件组成,这样结构的空腔形式有效增大了过水断面,保障隧道排水能力。
- d. 造价成本。按照相同幅宽、相同标号混凝土计算,每环弧形预制仰拱结构制作时需要 16.23 m³混凝土,其中预制仰拱构件需要 5.29 m³混凝土,填充层需要 5.91 m³钢纤维混凝土,基层 2.1 m³,混凝土面板 2.73 m³;每环箱型预制仰拱结构制作时至少需要 10.51 m³混凝土,其中预制仰拱构件需要 7.71 m³混凝土,两侧连接处需要 1.75 m³现浇混凝土,调平层需要 1.05 m³混凝土。同时弧形预制仰拱结构构架之间采用钢管焊接连接,也增加了制作成本,所以箱型预制仰拱结构的造价比弧形预制仰拱结构低很多。
- 综上,箱型预制仰拱结构比弧形预制仰拱更为高效经济,施工可行性更强,所以本文将主要针对箱型预制仰拱结构进行参数优化设计和受力变形特性研究。

3 箱型预制仰拱结构优化设计

3.1 计算模型建立

本文结构设计模型为荷载-结构模型,荷载按深埋计算,数值模拟采用 Abaqus 软件。围岩等级为 V级,变形模量为 300 MPa,泊松比为 0.3,黏聚力为 2 MPa,摩擦角为 27°,计算容重为 20 kN/m³。仰拱混凝土采用 C40 钢筋混凝土,弹性模量取 32.5 GPa,容重取 25 kN/m³。根据深埋公路隧道拱部围岩压力计算,得到隧道所受围岩荷载如图 4 所示。

为简化计算,仅建立仰拱精细化模型且不考虑螺栓连接形式、螺栓和螺栓孔之间间隙,也不考虑套管、止水橡胶垫、密封垫的模拟。根据本文研究重点和实际情况,预制块之间、螺栓表面和预制块

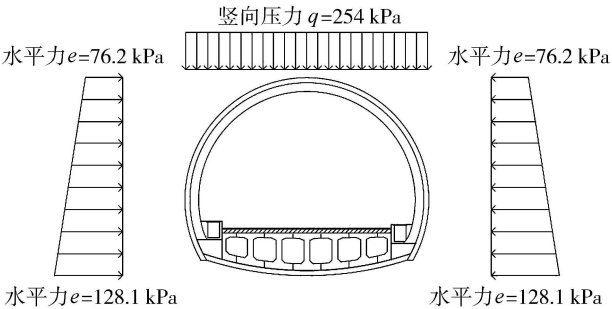


图4 隧道所受荷载示意图

Fig.4 Diagram of loading on tunnel

之间接触采用面-面接触单元,其中为了避免实体单元之间的侵入导致的计算误差和突出预制块之间的错动现象,将螺栓表面和预制块之间接触切向摩擦系数设为0.6,预制块之间接触切向摩擦系数设为0.3,法向均设为硬接触。钢筋网和混凝土之间通过将钢筋网全部嵌入混凝土实体模型中模拟二者之间连接。

3.2 优化方案

对不同仰拱分块、不同厚度、不同幅宽情况下箱型预制仰拱结构的力学特性进行模拟研究,以找出钻爆法公路隧道箱型预制仰拱结构最优选型。

箱型预制仰拱设计分为1、3、5、7分块(图5)。模拟计算中厚度参数取上部20 cm、下部35 cm,螺栓强度取8.8级高强螺栓,取半幅宽0.6 m。

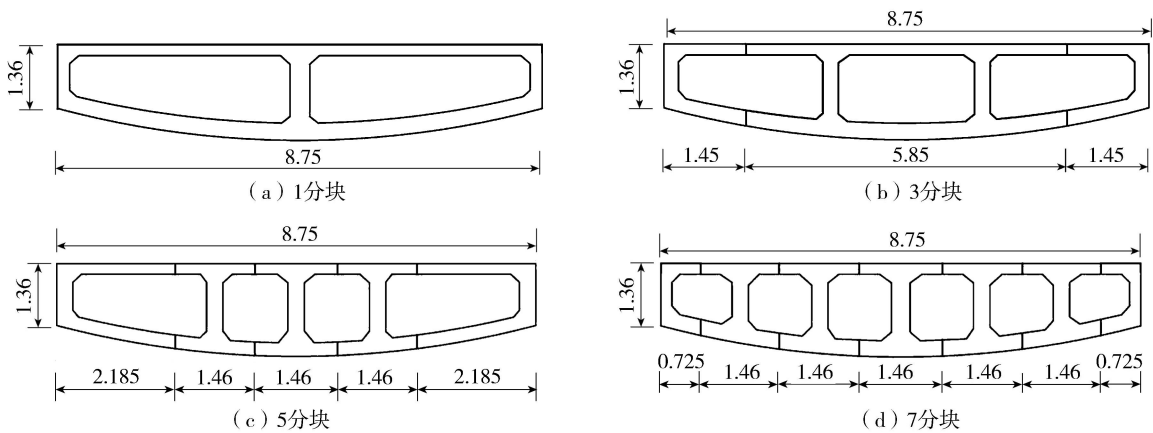


图5 仰拱结构分块方案(单位:m)
Fig.5 Block scheme of inverted arch structure (unit: m)

根据箱型预制仰拱结构特点,通过改变上、下混凝土厚度进行分析。基于 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范》建议的衬砌厚度取值范围(350~650 mm),给出优化方案见表2。

参考盾构隧道设计,国内常用的管片幅宽在0.3~20 m之间^[34],箱型仰拱有限元模型采用7分块设计,仰拱厚度采用方案2,预制仰拱参数见图5(d),预制仰拱管片幅宽分别选取0.8、1.0、1.2、1.5、2.0 m这5种工况进行对比分析。

3.3 模拟结果与分析

3.3.1 不同分块下仰拱力学特性分析

由图6可知,预制仰拱位移基本呈轴对称分布,并以中轴为对称轴向两边递减。1、3、5、7分块的竖向最大位移分别为694、89.6、84、76.9 mm,水平最大位移分别为119、26.5、25.6、24.1 mm。仰拱分块对结构位移影响较大,1分块预制仰拱最大位移明显高于其他分块,且1分块竖向最大位移远大于规范规定的141 mm,故1分块结构不符合条件。7分块虽然接缝最多,但是整体位移为所有分块中最小。故从预制仰拱的变形角度来看,7分块的箱型预制仰拱结构为较优分块。

图7、图8分别为仰拱混凝土拉、压损伤破坏云图,其中损伤因子大于0.9可以视为混凝土趋于破坏。平衡后1、3、5、7分块的拉坏损伤体积分别为1.18、0.75、0.79、0.73 m³,压坏损伤体积分别为0、0.022、0.029、0.073 m³。结合图7、图8可知,仰拱结构主要为受拉破坏,预制仰拱拱端底部、各中柱转角处与接缝部位薄弱易破坏。随着分块增加,7分块拉坏区域最少,故7分块最为稳定,继而是3、5分块,1分块最易破坏。

HRB400钢筋的屈服应力为400 MPa,极限强度为450 MPa。由图9可知,1分块预制仰拱结构钢筋应力最大为434.3 MPa,大于400 MPa或接近400 MPa的区域远远大于其他分块。3分块和5分块预制仰拱结构钢筋已屈服或接近屈服的区域主要集中于仰拱两端及端部上方,且屈服面积十分接近。7分块预制仰拱结构钢筋达到屈服的面积最少,且只出现于仰拱两端底部。故说明1分块结构最为脆弱,3、5分块混凝土拉坏后大部分区域钢筋仍能正常工作,7分块几乎所有钢筋都可正常工作。

表2 仰拱混凝土厚度方案
Table 2 Concrete thickness scheme of inverted arch

方案编号	上部混凝土厚度/cm	下部混凝土厚度/cm
1	20	30
2	20	35
3	20	40
4	30	35
5	40	35

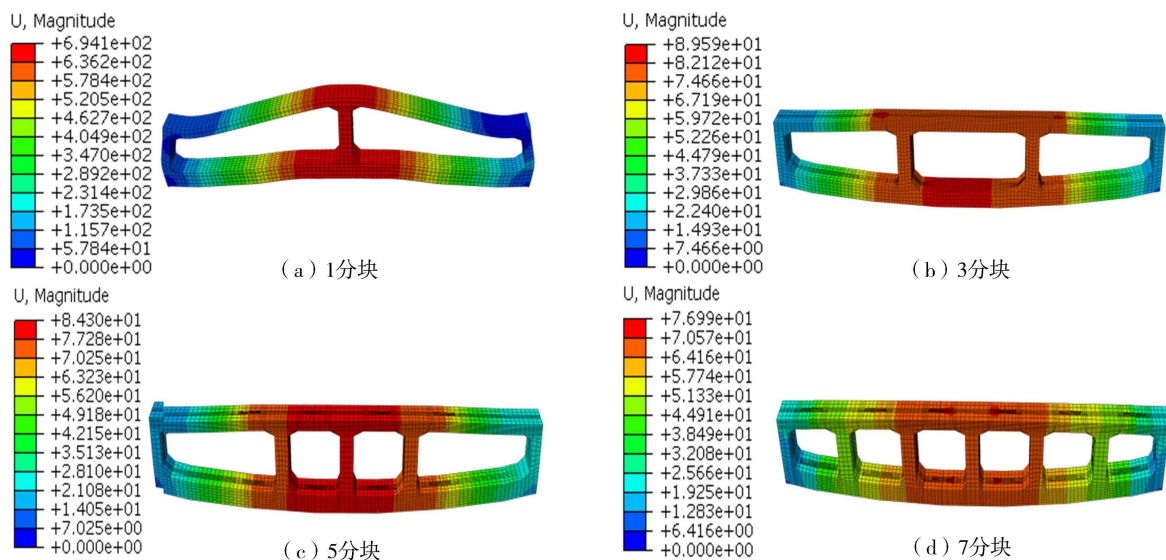


图 6 不同分块仰拱位移云图 (单位:mm)

Fig.6 Displacement contour of inverted arch with different blocks (unit: mm)

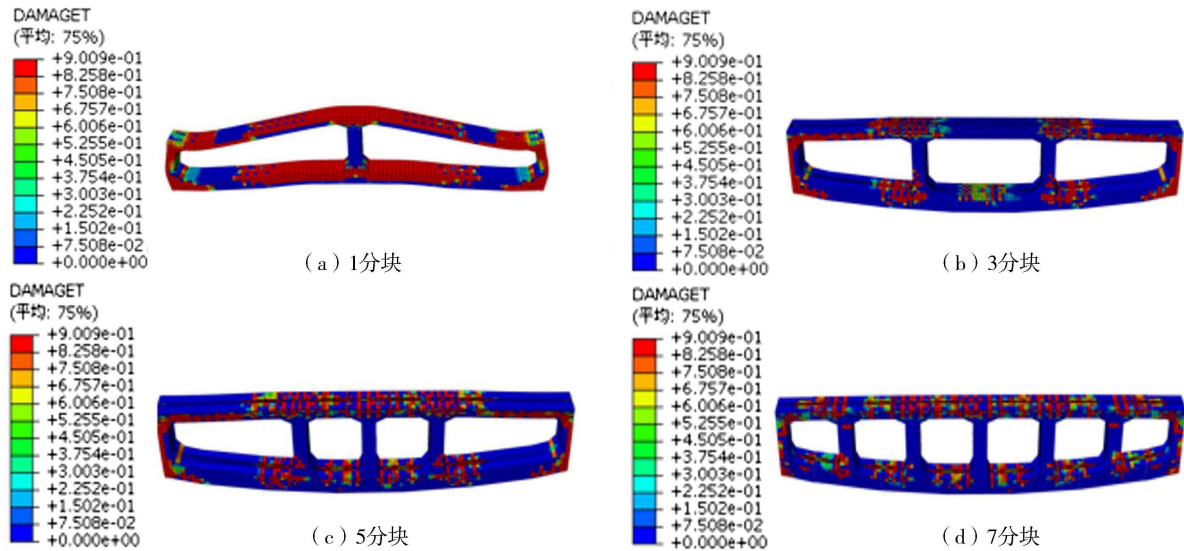


图 7 仰拱混凝土拉损伤破坏云图

Fig.7 Tensile damage contour of inverted arch concrete

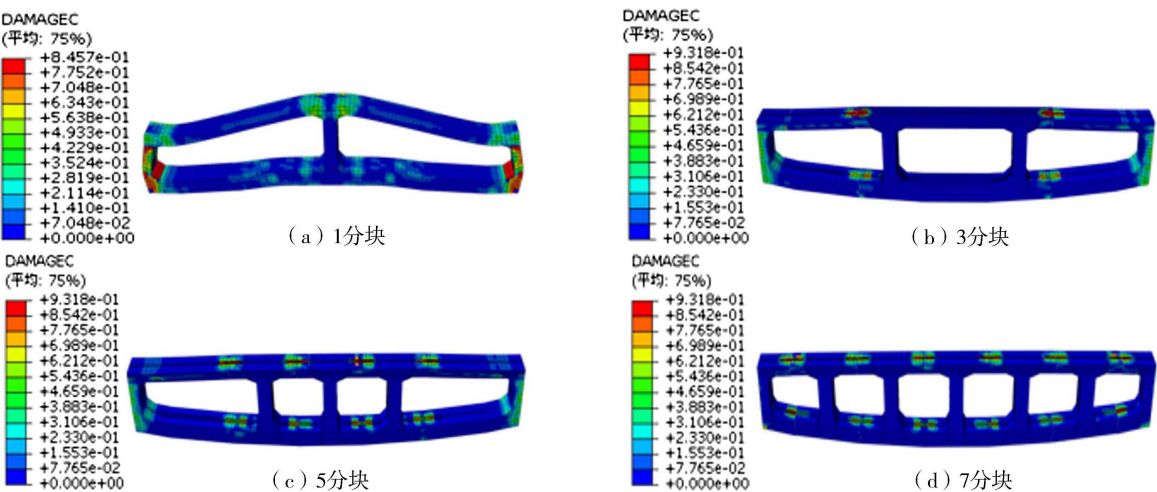


图 8 仰拱混凝土压损伤破坏云图

Fig.8 Compressive damage contour of inverted arch concrete

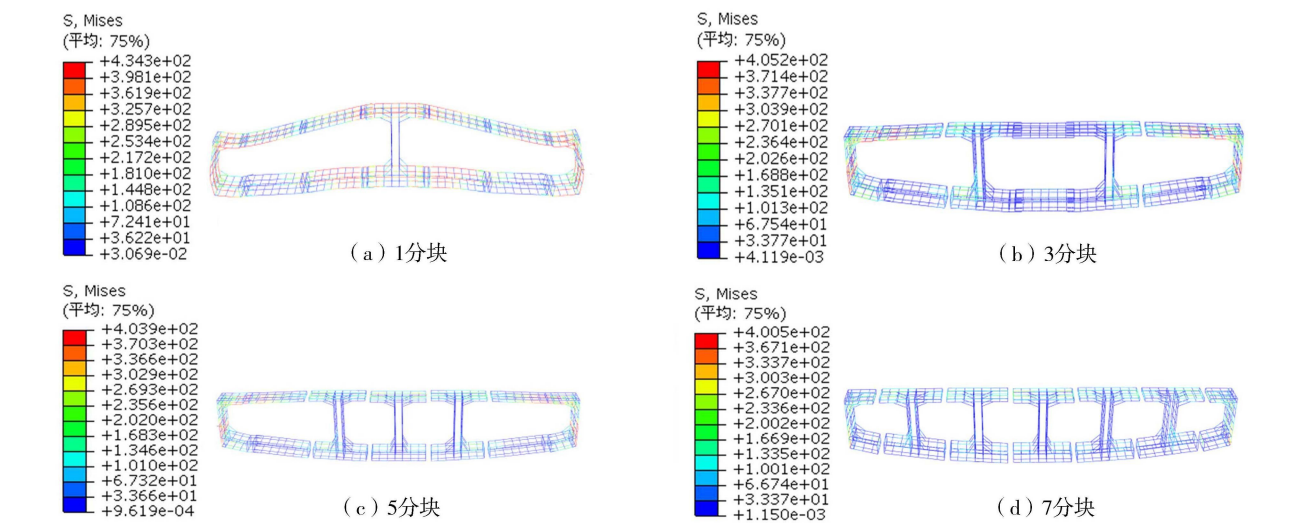


图9 预制仰拱钢筋应力云图(单位:MPa)

Fig. 9 Stress contour of reinforcement in precast inverted arch (unit: MPa)

3.3.2 不同厚度下仰拱力学特性分析

根据方案1、2、3的最大位移(表3)可知,下部厚度增加,预制仰拱竖向和水平位移都明显减小,但是减小趋势变缓。根据方案2、4、5的最大位移得到仰拱上部厚度增加,仰拱结构竖向位移仅略微减小,方案4、5较方案2水平最大位移都有所增加。故可以得出箱型预制仰拱结构下部厚度的变化对于结构位移影响较大,上部厚度的增加对位移影响较小。故从预制仰拱的变形角度来看,当预制构件质量满足机械承重要求,应当适当增加预制构件下部混凝土厚度。

不同仰拱厚度混凝土损伤破坏云图与图7(d)和图8(d)相似,故仅提取平衡后拉、压坏损伤体积列于表3。根据方案1、2、3破坏体积可以得出随着上部厚度增加拉坏损伤体积呈增长趋势,压坏损伤体积减小;根据方案2、4、5破坏体积可以得出随着下部厚度增加拉坏损伤体积减小,压坏损伤体积增大。故仰拱结构以受拉破坏为主,下部混凝土的增加能明显减小拉坏损伤体积,故在此类箱型预制仰拱结构设计时应适当增加下部混凝土厚度。

不同仰拱厚度钢筋应力云图与图9(d)相似,故仅提取平衡后不同厚度条件下预制仰拱内钢筋最大应力与达到屈服应力钢筋体积列于表3。内置钢筋最大应力变化不大,方案3预制仰拱结构钢筋应力最大为402.9 MPa,仍未达到钢筋极限强度;预制仰拱厚度增加能有效减小内置钢筋整体受力,随着预制仰拱厚度增加,达到屈服应力的内置钢筋体积呈减小趋势。

3.3.3 不同幅宽下仰拱力学特性

由表4可知,幅宽0.8 m时预制仰拱竖向最大位移为168.8 mm,大于规范规定的141 mm,其他幅宽方案均未达到规定值,故0.8 m幅宽不符合要求。随着预制仰拱幅宽的增加,仰拱竖向、水平最大位移都随之减小,但是减幅度降低,尤其是从1.2 m幅宽之后位移仅有略微减小。可以得出预制仰拱的幅宽对整体位移影响较大,但是随着幅宽不断增加影响越来越小,对于此

表3 不同厚度方案仰拱的力学特性参数

Table 3 Mechanical characteristic parameters of inverted arch with different thickness schemes

方案 编号	竖向最大 位移/mm	水平最大 位移/mm	拉坏损伤 体积/m ³	压坏损伤 体积/m ³	内置钢筋 最大应力/ MPa	达到屈服应 力钢筋体积/ 10 ⁵ mm ³
1	100.6	35.6	0.700	0.090	400.1	2.03
2	76.9	24.2	0.710	0.073	401.1	1.44
3	64.1	23.5	0.790	0.076	402.9	1.20
4	72.2	26.3	0.668	0.083	400.6	1.00
5	68.1	25.5	0.614	0.087	400.7	0.72

表4 不同幅宽仰拱的力学特性参数

Table 4 Mechanical characteristic parameters of inverted arch with different width

仰拱 幅宽/m	竖向最大 位移/mm	水平最大 位移/mm	拉坏损伤 体积/m ³	压坏损伤 体积/m ³	内置钢筋 最大应力/ MPa	达到屈服应 力钢筋体积/ 10 ⁵ mm ³
0.8	168.8	52.2	0.92	0.112	406.6	6.30
1.0	112.4	40.1	0.82	0.098	400.6	3.90
1.2	76.9	24.1	0.71	0.073	401.1	1.44
1.5	59.9	21.2	0.63	0.075	312.5	0.00
2.0	59.2	20.1	0.57	0.074	295.8	0.00

箱型预制仰拱结构,幅宽 1.2 m 为最优选择。

随着幅宽的不断增大,混凝土压坏损伤体积呈减小趋势,但是从仰拱幅宽 1.2 m 增加至 2.0 m 时混凝土压坏损伤体积几乎保持不变;混凝土拉坏损伤体积则是不断减小,但是损伤体积减小幅度从幅宽 1.2 m 后有所减小。因此,仰拱结构主要为受拉破坏,仰拱幅宽的增加能有效减小混凝土拉坏损伤体积,但是随着仰拱幅宽的不断增大对于混凝土受拉体积的影响逐渐减小。仰拱幅宽增加对于混凝土压坏损伤体积也存在明显影响,但是超过一定幅宽后幅宽增加对于混凝土压坏损伤体积的变化几乎没有作用。

幅宽 0.8 m 时预制仰拱结构钢筋应力最大为 406.6 MPa,未达到钢筋极限强度。随着幅宽增加,预制仰拱达到幅宽 1.5 m 后内置钢筋最大应力出现大幅度减小,但是继续增大钢筋最大应力仅略微减小;幅宽达到 1.2 m 之前随着幅宽增加达到屈服应力的内置钢筋体积不断减小,但是幅宽到达 1.5 m 后达到屈服应力的内置钢筋体积即为 0。因此,预制仰拱幅宽对于内置钢筋应力影响很大,预制仰拱适当增加幅宽能有效减少内置钢筋受力,但是不应过大设计从而浪费材料。

3.4 隧道围岩-衬砌结构变形特征

将研究对象由装配式仰拱扩大至围岩-衬砌整体结构,采用数值模拟方法建立整体模型,以竖向位移为指标,研究隧道开挖支护过程中围岩-衬砌结构共同作用形式。由图 10(a)(b)可知,上部围岩开挖和支护过程中,位移主要集中在拱底以及拱顶位置,整体位移不大,支护结构抑制拱顶位移发展。由图 10(c)可知,围岩下部分进行初期支护后围岩仰拱底部位移较大,达到 40.8 mm,隧道底部处于危险状态。由图 10(d)可知,在进行二衬及仰拱施作后其拱底位移减小,且底部隆起范围明显缩小,这说明装配式仰拱和二衬结构调整,改善了隧道受力,对保证整体支护结构稳定作用明显。

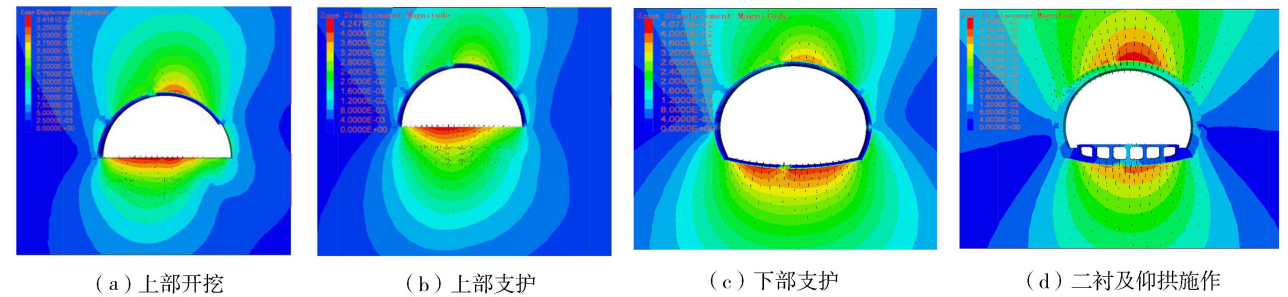


图 10 开挖支护过程位移变化云图(单位:m)

Fig. 10 Displacement change contour of excavation support process (unit: m)

3.5 不同箱型预制仰拱对比分析

以各参数最好为 2 分、次之为 1 分、最差为 0 分进行比选,结果见表 5,由表 5 可知,7 分块、上部厚度 20 cm,下部厚度 40 cm、幅宽 1.2 m 的箱型预制仰拱结构形式最为合适。

表 5 箱型预制仰拱结构方案比选汇总

Table 5 Comparison summary of precast inverted arch structure scheme of box type					
参数	方案	位移与应变得分	损伤破坏体积得分	钢筋应力与承载能力得分	总得分
分块	1 分块	0	0	0	0
	3 分块	2	1	1	5
	5 分块	1	1	1	4
	7 分块	2	2	2	8
厚度	方案 1	0	1	0	3
	方案 2	1	1	1	4
	方案 3	2	2	1	6
	方案 4	1	1	1	4
	方案 5	1	0	2	3
幅宽	0.8 m	0	0	0	0
	1.0 m	1	1	1	4
	1.2 m	2	2	2	8
	1.5 m	1	2	0	4
	2.0 m	0	1	0	2

4 结 论

- a. 通过整理收集国内外不同类型隧道预制仰拱结构的应用案例,发现目前装配式结构主要应用于地铁、铁路隧道中;因公路隧道开挖方法主要为钻爆法,且面临复杂的工程地质和水文地质环境,预制仰拱应用相对较少,尚处于初步研究阶段。
- b. 设计出弧形和箱型两种预制仰拱结构形式,其中弧形预制仰拱结构为目前较为常见的预制仰拱结构形式,箱型预制仰拱结构形式是在弧形预制仰拱基础上设计的精进形式。通过结构形式特点、施工速度、造价成本等方面综合比选,得出箱型预制仰拱为较为合适的预制仰拱结构形式。
- c. 箱型预制仰拱结构主要为受拉破坏,预制仰拱两端底部、各个预制块中柱转角处与接缝部位为薄弱易破坏位置。通过将不同参数对仰拱结构的影响进行比选,认为 7 分块、上部厚度 20 cm、下部厚度 40 cm、幅宽 1.2 m 的箱型预制仰拱结构形式最为合适。

参考文献:

[1] 韦章兴.隧道运营期常见病害及防治技术分析[J].西部交通科技,2018(9):118-120. (WEI Zhangxing. Analysis of common diseases and prevention technology during tunnel operation[J]. Western Transportation Science and Technology,2018(9):118-120. (in Chinese))

[2] FANG Y D, DING K W. Mechanical effects analysis of inverted arch [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2019,490(3):20-26.

[3] KARIMI M,CHAKERI H S N F. Numerical investigation into the effect of stepping on the circumferential joint in the precast tunnel segments under TBM thrust jacks[J]. Arabian Journal of Geosciences,2020,13(15):754-763.

[4] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):112-113. (QIAN Qihu. Meet the climax of urban underground space development in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (1): 112-113. (in Chinese))

[5] 钱七虎. 现代城市地下空间开发利用技术及其发展趋势[J]. 铁道建筑技术,2000(5):1-6. (QIAN Qihu. Development and utilization technology of modern urban underground space and its development trend[J]. Railway Construction Technology,2000(5):1-6. (in Chinese))

[6] 唐伟. 高速铁路单线盾构隧道装配式隧底回填结构设计研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(11):99-103. (TANG Wei. Research on fabricated bottom backfill structure design of single line shield tunnel in high-speed railway [J]. Railway Standard Design,2020,64(11):99-103. (in Chinese))

[7] 陈敬军. 矿山法施工的铁路隧道装配式衬砌力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2005.

[8] 张鹏. 隧道盾构管片衬砌参数的设计[J]. 山西建筑,2017,43(31):163-164. (ZHANG Peng. The design of shield tunnel segment lining parameters[J]. Shanxi Architecture,2017,43(31):163-164. (in Chinese))

[9] 计中彦,张学民,陈进,等. 高速公路隧道装配式仰拱结构施工技术研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(4):983-990. (JI Zhongyan,ZHANG Xuemin,CHEN Jin,et al. Research on construction technology of prefabricated inverted arch structure of expressway tunnel[J]. Railway Science and Engineering Journal,2021,18(4):983-990. (in Chinese))

[10] 赵晓勇. 单线铁路隧道预制装配式仰拱方案探讨[J]. 铁道标准设计,2021,65(9):127-132. (ZHAO Xiaoyong. Discussion on the prefabricated invert-arch scheme of single-track railway tunnel[J]. Railway Standard Design,2021,65(9):127-132. (in Chinese))

[11] 周佳媚,高波,李志业. TBM 施工隧道仰拱预制块的力学特性研究[J]. 岩土力学,2004,25(12):1973-1976. (ZHOU Jiamei,GAO Bo,LI Zhiye. Study of mechanical characteristics of precast block of inverted arch for TBM construction tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(12):1973-1976. (in Chinese))

[12] 周佳媚,李志业,高波. TBM 施工隧道仰拱预制块的受力分析[J]. 中国铁道科学,2004,25(3):32-35. (ZHOU Jiamei,LI Zhiye,GAO Bo. Mechanic analysis of invert prefabricate in TBM construction tunnel [J]. China Railway Science,2004,25(3):32-35. (in Chinese))

[13] 符亚鹏. 敞开式 TBM 施工铁路隧道仰拱预制块关键设计参数研究[J]. 铁道标准设计,2016,60(8):79-83. (FU Yapeng. Study on key design parameters of prefabricated invert segment for open type TBM railway tunnel construction [J]. Railway Standard Design,2016,60(8):79-83. (in Chinese))

[14] 王明年,李志业,魏龙海. 隧道及地下铁道预制化技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.

[15] 郇星超. 公路隧道装配式衬砌结构研究[D]. 西安:长安大学,2013.

[16] 严义招. 高速铁路大跨度双线隧道矿山法施工的装配式衬砌力学特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[17] 叶治,付岸然,刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287. (YE Zhi,FU Anran,LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):279-287. (in Chinese))

[18] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (GAN Lei,WU Jian,DAI Shouye,et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):85-90. (in Chinese))

[19] 邓传贵,甘磊,邓家铮,等. 隧道穿越江堤段防渗体消险加固处理技术[J]. 水利水电科技进步,2022,42(1):80-84. (DENG Chuangui,GAN Lei,DENG Jiazheng,et al. Risk elimination and reinforcement technology of anti-seepage for river embankment in tunnel crossing section[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):80-84. (in Chinese))

[20] 杨书江. 秦岭 I 线隧道仰拱预制块施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2003(5):65-66. (YANG Shujiang. Construction technology of inverted arch of Qinling I Line Tunnel[J]. Prospecting Engineering(Rock and Soil Drilling Engineering),2003(5):65-66. (in Chinese))

[21] 吕刚,刘建友,赵勇,等. 京张高铁清华园隧道轨下结构预制拼装技术[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(8):1357-1364. (LYU Gang,LIU Jianyou,ZHAO Yong,et al. Fully prefabricated assembling technology of tsinghuayuan tunnel in Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Tunnel Construction,2019,39(8):1357-1364. (in Chinese))

[22] 李国良,向亮,陈敬军,等. 川藏铁路色季拉山隧道设计方案研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(9):1451-1460. (LI Guoliang,XIANG Liang,CHEN Jingjun,et al. Study on the design scheme of Sejila Mountain Tunnel on Sichuan-Tibet Railway[J]. Tunnel Construction,2021,41(9):1451-1460. (in Chinese))

[23] 田川江,裴宗文. 明挖暗埋隧道施工方案优化分析[J]. 工程建设与设计,2017(5):158-160. (TIAN Chuanjiang,PEI Zongwen. Optimization analysis of construction scheme of open cut tunnel[J]. Construction and Design for Project,2017(5):158-160. (in Chinese))

[24] 王彬. 费尔艾那隧道工程情况[J]. 现代隧道技术,1994(7):22-26. (WANG Bin. Engineering situation of Vereina Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology,1994(7):22-26. (in Chinese))

[25] 韩贺庚,申志军,皮圣. 蒙华铁路隧道工程施工技术要点及机械化配套[J]. 隧道建设(中英文),2017,37(12):1564-1570. (HAN Hegeng,SHEN Zhijun,PI Sheng. Technical key points and mechanization matching of Menghua railway tunnel construction[J]. Tunnel Construction,2017,37(12):1564-1570. (in Chinese))

[26] 李太惠. 明斯克地铁单拱车站设计施工经验[J]. 地铁与轻轨,1995(2):44-48. (LI Taihui. Design and construction experience of Minsk metro single arch station[J]. Metro and Light Rail,1995(2):44-48. (in Chinese))

[27] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1849-1870. (YANG Xiuren. The development status and prospect of prefabricated subway station construction technology in China[J]. Tunnel construction,2021,41(11):1849-1870. (in Chinese))

[28] 杨秀仁,黄美群. 地铁车站预制装配新技术研究策略[J]. 都市快轨交通,2018,31(1):78-85. (YANG Xiuren,HUANG Meiqun. Research strategies on new prefabricated technology of underground subway station[J]. Urban Rapid Rail Transit,2018,31(1):78-85. (in Chinese))

[29] 刘培硕. 秦岭特长铁路隧道 TBM 施工条件下仰拱预制技术的研究[D]. 成都:西南交通大学,2002.

[30] 王子洪. 城区高铁盾构隧道装配式轨下结构设计选型及施工关键技术[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2019.

[31] 李围,何川. 9 块等分管片设计及其工程应用研究[J]. 现代隧道技术,2005,42(3):31-36. (LI Wei,HE Chuan. Study on the design and engineering application of 9 segments of equal length[J]. Modern Tunnelling Technology,2005,42(3):31-36. (in Chinese))

[32] 姬杨蓓蓓. 上海诸光路地下通道预制拼装施工方案设计和工程难点分析[J]. 建筑施工,2019,41(4):672-675. (JIYANG Beibei. Shanghai Zhuguang Road underground channel prefabricated assembly construction scheme design and engineering difficulty analysis [J]. Building Construction,2019,41(4):672-675. (in Chinese))

[33] 郝理. 钻爆法山岭公路隧道装配式衬砌结构研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020.

[34] 王志伟,马伟斌,郑青,等. 城区高速铁路盾构隧道轨下预制装配式箱涵结构受力分析[J]. 铁道建筑,2019,59(9):61-64. (WANG Zhiwei,MA Weibin,ZHENG Qing,et al. Mechanical analysis of prefabricated assembled box culvert under-rail structure for shield tunnel of urban high speed railway[J]. Railway Engineering,2019,59(9):61-64. (in Chinese))