

文章编号: 1674—8247(2024)02—0113—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.02.021

超大断面异型隧道台阶法施工工法优选研究

车东坡

(中铁十四局集团第五工程有限公司, 山东 济宁 272117)

摘要:为保证超大断面异型隧道的施工安全,依托某超大断面异型隧道建设工程,利用FLAC3D软件对超大断面异型隧道采用四台阶九步法、三台阶七步法、三台阶五步法的位移、应力、安全系数进行了研究。研究表明:(1)四台阶九步法所引起的拱顶沉降与收敛值均最小,分别为3.563 mm、0.765 mm、1.715 mm、2.785 mm、2.060 mm,位移控制效果最佳且满足工程规定值;三台阶七步法次之,而三台阶五步法各项收敛值均最大;(2)四台阶九步法最大主应力和最小主应力均小于其他两种工况应力值,且应力分布较为均匀;(3)四台阶九步法最小安全系数最大,为3.98,满足规范要求;推荐该工程使用四台阶九步法进行施工。研究成果可为类似异型隧道施工工法选取提供参考。

关键词:超大断面;异型隧道;工法优选;台阶法;数值模拟

中图分类号:U455 文献标志码:A

Optimal Selection Study of Construction Methodology for Super-large Cross-section Irregular-shaped Tunnel Using Bench Method

CHE Dongpo

(The Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway Fourteenth Bureau Group Co., Ltd., Jining 272117, China)

Abstract: To ensure the construction safety of super-large cross-section irregular-shaped tunnels, this study, anchored in a specific engineering project involving such a tunnel, employed the FLAC3D software to investigate the displacements, stresses, and safety factors associated with the application of Four-bench Nine-step Method, Three-bench Seven-step Method, and Three-bench Five-step Method. The findings demonstrate that: (1) Among the methods, the Four-bench Nine-step Method yields the smallest crown settlement and convergence values, respectively, being 3.563 mm, 0.765 mm, 1.715 mm, 2.785 mm, and 2.060 mm, providing the best displacement control and complying with the project's specified limits. The Three-bench Seven-step Method follows suit, while the Three-bench Five-step Method exhibits the largest convergence values for each parameter. (2) The maximum and minimum principal stresses for the Four-bench Nine-step Method are less than those for the other two construction scenarios, with a more uniform stress distribution. (3) The Four-bench Nine-step Method also provides the highest minimum safety factor, reaching 3.98, satisfying the regulatory requirements. Therefore, this study recommends the use of the Four-bench Nine-step Method for this particular project. The conclusions can serve as a reference for the selection of construction methodologies in similar irregular-shaped tunnel projects.

Key words: super-large cross-section; irregular-shaped tunnel; methodology optimization; bench method; numerical simulation

收稿日期:2024-01-08

作者简介:车东坡(1987-),男,工程师。

引文格式:车东坡.超大断面异型隧道台阶法施工工法优选研究[J].高速铁路技术,2024,15(2):113-118.

CHE Dongpo. Optimal Selection Study of Construction Methodology for Super-large Cross-section Irregular-shaped Tunnel Using Bench Method [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2):113-118.

我国隧道施工技术进步显著,如何在复杂的地质和施工条件下,选择最适合工程的施工方法是国内隧道的研究热点。

国际隧道协会(ITA)将净空断面面积在 $50 \sim 100 \text{ m}^2$ 范围的隧道划分为大断面隧道,大于 100 m^2 的隧道划分为超大断面隧道。以大断面隧道为研究对象,孙永超^[1-4]等利用数值模拟探究了CRD法和台阶法工法在大断面隧道的适用性;罗贞焱^[5]等通过围岩力学响应特征,确定右RC左CD为施工优选方案。与大断面隧道相比,超大断面隧道在施工时开挖步序更多,单次开挖面积更大,围岩稳定性较差,因此良好的支护结构和合理的施工方法是该类隧道施工安全性的控制要点。杨文涛^[6-8]等基于围岩变形、地表沉降、支护结构受力对复合双侧壁导坑法、复合三台阶法、双侧壁导坑法和三台阶法的应用效果进行研究;黄小明^[9]等将三台阶法与CD法进行对比,发现CD法的围岩变形控制效果优于三台阶法。张放乐^[10]等采用数值模拟,对异型盾构隧道地铁振动问题进行了研究;曾小刚^[11-12]等对异型箱涵的结构布置及受力分析进行了探讨;朱志祥^[13-15]等对洞内异型结构段的支撑体系进行了论述。综上所述,目前对超大断面异型隧道的施工方法比选研究较少。

因此,本文依托某隧道工程中盾构拆卸洞部分,利用数值模拟对超大断面异型隧道采用不同工法时的围岩变形规律以及支护结构的安全系数进行研究,以此进行工法优选。

1 工程概况

1.1 地质条件

该洞为盾构机拆卸洞,开挖断面为 192.84 m^2 ,底宽 10.80 m ,顶宽 12.80 m ,高 15.95 m ,长 80 m 。该区段结构断面较多,穿越多条断层破碎带,破碎带围岩主要以IV级围岩为主。围岩岩性主要为石炭系凝灰质砂岩,节理密集带发育且岩面潮湿,围岩整体较破碎,裂面多起伏粗糙、易坍塌,局部拱脚有少量渗漏水,掌子面及拱顶无明显出水。

1.2 衬砌结构设计

此段隧道断面结构型式为锚钉型,隧道初期支护中拱顶和边墙厚 20 cm ,均采用喷射C30混凝土,底板厚 35 cm ,采用C30混凝土;二次衬砌厚 50 cm ,采用C35钢筋混凝土。

2 计算模型及计算工况

2.1 计算模型

根据地质勘察资料建立有限元模型,围岩本构模

型为弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库伦准则。隧道左右围岩宽度取3倍洞径,模型宽度为 138.80 m ,隧道拱顶距模型顶部 70 m ,纵向开挖深度 10 m ,底部厚 42.30 m 。模型两侧施加水平约束,底面施加垂直约束,顶面则为自由面,如图1所示。

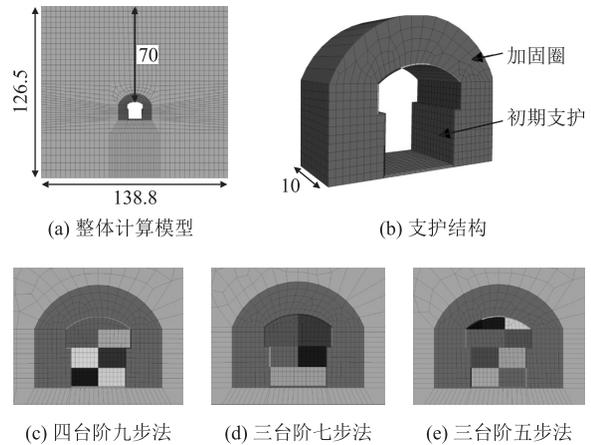


图1 计算模型图(m)

2.2 计算参数

计算模型的材料物理学参数如表1所示。

表1 材料物理学参数表

类别	重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 ($^\circ$)
IV级围岩	2000	3.0	0.3	0.5	30
注浆加固圈	2000	3.0	0.3	0.6	36
初期支护	2410	28.0	0.2	-	-
底板	2410	30.0	0.2	-	-

2.3 计算工况

为研究不同施工工法对超大断面异型隧道施工安全的影响,拟定以下3种工况进行计算。

2.3.1 四台阶九步法

在①部开挖后安装两侧临时拱架,拱架间通过纵向连接钢筋连成整体,支护完成后进行②部开挖及支护,③部开挖时先将①部对应位置拱架牢固支撑,④部开挖时将①部、③部间临时支撑接长到④部底部,④部、⑤部开挖时在底部加临时横向支撑。依次进行①部~⑨部开挖及支护,如图2所示。

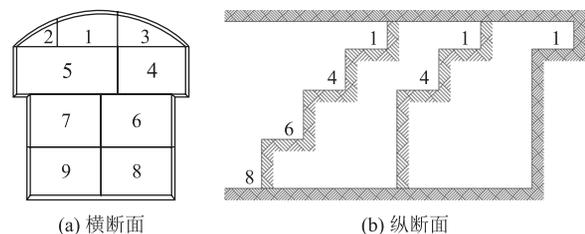


图2 四台阶九步法图

2.3.2 三台阶七步法

对拱顶进行超前支护后,进行①部、②部开挖与初期支护,③部开挖前完成临时拱架的安装,开挖完成后及时在底部加临时拱架,再依次进行④部~⑦部的开挖和支护,如图 3 所示。

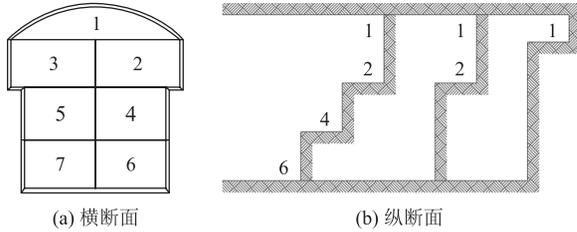


图 3 三台阶七步法图

2.3.3 三台阶五步法

对①部、②部开挖时,及时施作上部弧形的初期支护,同时将两岩体间安装临时拱架以稳定隧道支撑,③部、④部开挖时在纵向和顶部开挖位置进行支撑,隧道施工完成后及时对边墙进行支护,如图 4 所示。

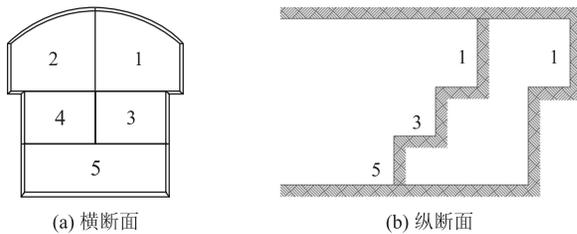


图 4 三台阶五步法图

2.4 测点布置

在初期支护的拱顶、左拱肩、左上边墙、左下边墙、底板等 10 个位置布置监测点,如图 5 所示。

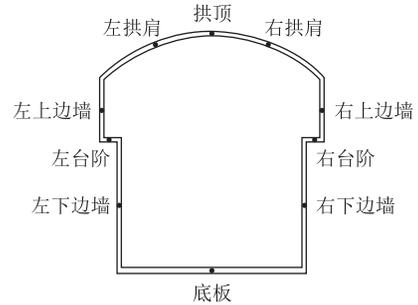


图 5 测点布置图

3 计算结果与分析

3.1 结构位移

提取各工况隧道及隧道围岩位移云图,如图 6 所示。

根据位移云图计算拱顶沉降、拱肩收敛、台阶收敛和边墙收敛,如表 2 所示。

表 2 测点位移值表(mm)

工况	拱顶沉降	拱肩收敛	上边墙收敛	台阶收敛	下边墙收敛
1	3.563	0.765	1.715	2.785	2.060
2	4.109	1.211	4.308	10.569	5.826
3	18.328	1.746	9.894	26.197	15.338

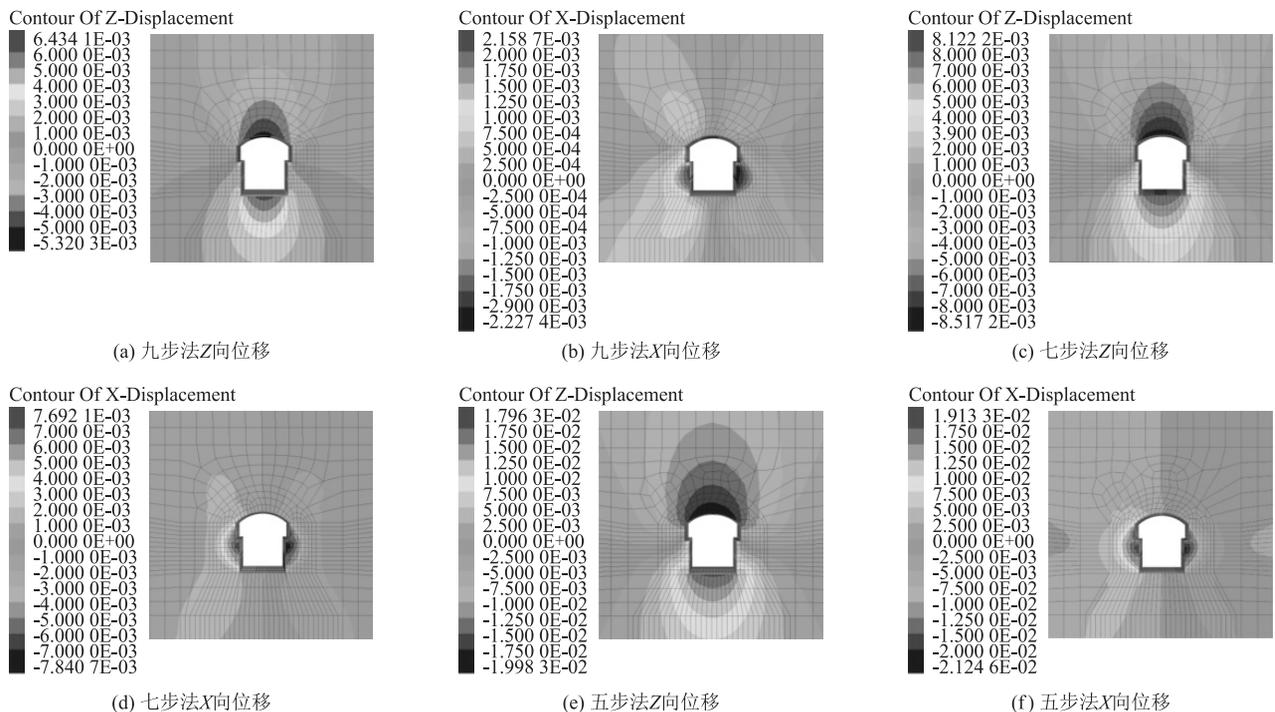


图 6 各工况位移分布图

由图 6、表 2 可知,工况 1 的拱顶沉降、拱肩收敛、台阶收敛、上下边墙收敛均为最小,分别为 3.563 mm、0.765 m、2.785 mm、1.715 mm、2.060 mm,位移控制效果最好。

3.2 结构应力

3.2.1 最大主应力

各工况隧道初期支护最大主应力如图 7 所示,图中正值为受拉,负值为受压。

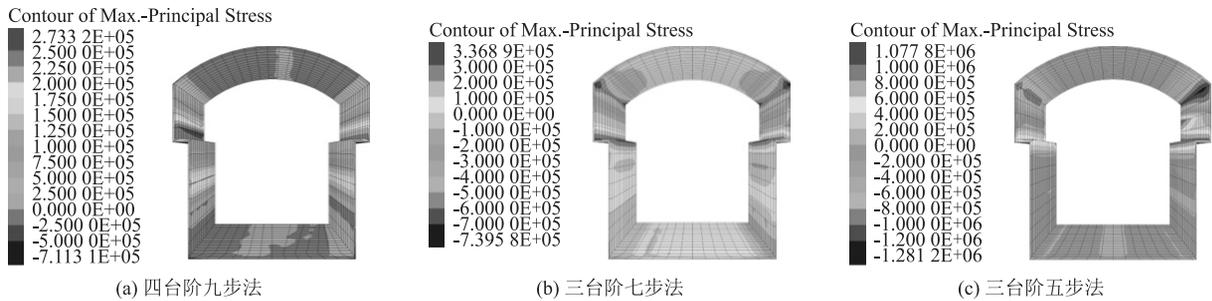


图 7 结构最大主应力图

由图 7 可知,锚钉型隧道初期支护应力分布极为不均匀。四台阶九步法的开挖步数更多,应力释放更好,隧道一次开挖面积更小,掌子面也比其他 2 种工法更加稳定,四台阶九步法最大主应力最小。四台阶九步法、三台阶七步法和三台阶五步法最大主应力受压部分中最大值分别为 0.711 GPa、0.740 GPa、1.077 GPa,3 种工法受拉部分最大值均在上边墙与台阶交界处,分别为 0.273 GPa、0.337 GPa、1.078 GPa。七步法和五步法应力分布较为相似,拱肩处所受最大主应力为自身工况的最大值,七步法为 0.740 GPa,五步法为 1.281 GPa。

3.2.2 最小主应力

不同施工方法初期支护最小主应力如图 8 所示。三台阶开挖时,拱顶和上边墙最小主应力均大于下边墙和底板,而四台阶开挖法除拱顶外,上下边墙和底板受力较为均匀。四台阶九步法、三台阶七步法、三台阶五步法最小主应力最大值分别为 5.071 GPa、5.371 GPa、10.556 GPa,九步开挖法其值最小,五步开挖法其值最大。

上述最大主应力和最小主应力的模拟结果满足工程要求,方案合理且风险可控。

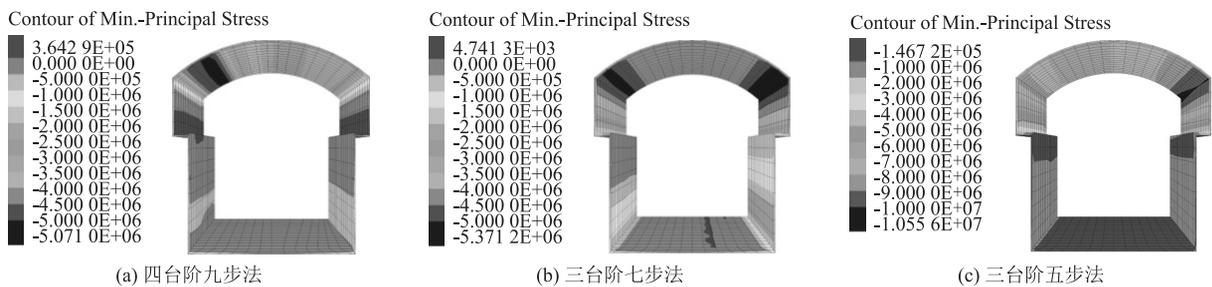


图 8 各工况结构最小主应力图

3.3 结构安全系数

按照 TB 10003 - 2016《铁路隧道设计规范》计算结构的安全系数,当结构为小偏心受压时使用式(1)计算,为大偏心受压时使用式(2)计算。

$$KN \leq \varphi \alpha R_a bh \quad (1)$$

$$KN \leq \varphi \frac{1.75 R_1 bh}{6e_0/h - 1} \quad (2)$$

式中:K——安全系数;
N——轴力(kN);

φ ——构件纵向弯曲系数;
 α ——轴向力偏心影响系数;
 R_a ——混凝土抗压极限强度(MPa);
 B ——截面宽度,取 1 m;
 H ——界面厚度(m);
 R_1 ——混凝土抗拉极限强度(MPa);
 e_0 ——偏心距(m)。

监测点安全系数分布如图 9 所示。初期支护的最小安全系数如表 3 所示。

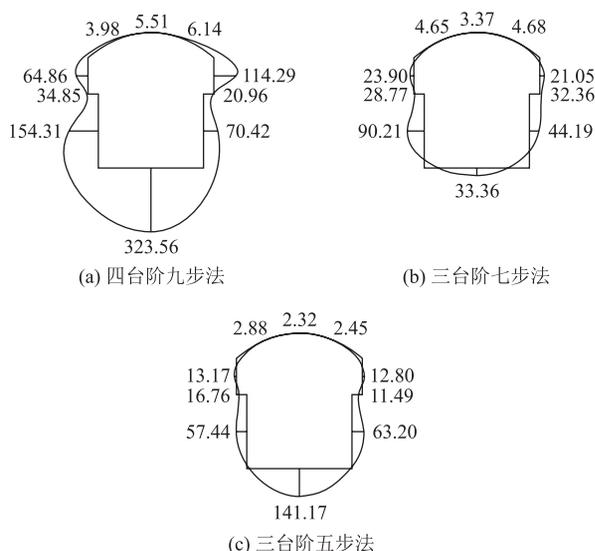


图 9 安全系数分布图

表 3 最小安全系数表

施工工法	最小安全系数
四台阶九步法	3.98
三台阶七步法	3.37
三台阶五步法	2.32

由图 9、表 3 可知,四台阶九步法隧道初期支护的安全系数最大(3.98),满足规范要求。

4 结论

(1) 四台阶九步法拱顶沉降、拱肩收敛、边墙收敛值均最小,控制效果最好,而三台阶五步法各项收敛值均最大,对围岩扰动较大,不利于隧道施工。

(2) 四台阶九步法最大主应力和最小主应力均小于其他 2 种工况应力值,且应力分布较为均匀,控制效果较好。

(3) 四台阶九步法最小安全系数满足规范要求,安全性最佳,最小值为 3.98。

(4) 综合结构位移、应力和安全系数结构,四台阶九步法为该工程最优施工工法,推荐超大大断面异型隧道可选择四台阶九步法进行施工。

参考文献:

[1] 孙永超,陈玮. 软岩浅埋大断面地铁隧道施工方法优选研究[J]. 施工技术, 2017, 46(24): 48-53.
SUN Yongchao, CHEN Wei. Construction Method Optimization Research of Large Cross-section Shallow Buried Subway Tunnel in Soft Rock [J]. Construction Technology, 2017, 46(24): 48-53.

[2] 崔光耀,王李斌,荆鸿飞. 上硬下软地层铁路大断面隧道施工工法优选[J]. 铁道建筑, 2019, 59(7): 73-76.

CUI Guangyao, WANG Libin, JING Hongfei. Optimization of Construction Method for Railway Tunnel with Large Section in Upper-hard and Lower-soft Strata [J]. Railway Engineering, 2019, 59(7): 73-76.

[3] 王春海. 中老铁路高地应力软岩隧道施工方法比选分析[J]. 工程勘察, 2023, 51(2): 1-7.

WANG Chunhai. Comparison and Analysis of Construction Methods for High Geo-stress Soft Rock Tunnels of China-Laos Railway [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2023, 51(2): 1-7.

[4] 任松,李玉,欧阳汛,等. 水平软硬互层隧道围岩动态模拟方法及施工方法优选[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(3): 317-323.

REN Song, LI Yu, OUYANG Xun, et al. Stability Analysis and Optimization of Construction Technology on Tunnel Excavation with Soft-hard Interbed Rock [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(3): 317-323.

[5] 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.

LUO Zhenyan, LUO Zhouquan, ZHENG Shufen, et al. Application of Mechanical Response Characteristics of Surrounding Rock in the Optimization of Construction Methods for Small Spacing Tunnel [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(1): 1-6.

[6] 杨文涛,刘夏冰,贺少辉,等. 浅埋超大跨四线高铁隧道施工方法及开挖响应:以杭台高铁下北山 1 号隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 381-388.

YANG Wentao, LIU Xiabing, HE Shaohui, et al. Construction Method and Excavation Response of Shallow-buried Super-long-span Four-line High-speed Railway Tunnel: Taking Xiabeishan No. 1 Tunnel of Hangzhou-Taizhou High-speed Railway as an Example [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S2): 381-388.

[7] 刘宪永. 基于数值分析的超大断面车站施工方案优选分析[J]. 市政技术, 2023, 41(1): 72-77.

LIU Xianyong. Optimization Analysis of Construction Scheme for Super Large Section Station Based on Numerical Analysis [J]. Journal of Municipal Technology, 2023, 41(1): 72-77.

[8] 张粒,杨文波,曾文浩,等. 特大断面城市道路隧道力学特性与变形规律研究[J]. 公路, 2023, 68(1): 416-425.

ZHANG Li, YANG Wenbo, ZENG Wenhao, et al. Study on Mechanical Characteristics and Deformation Law of Urban Road Tunnel with Extra-large Cross Section [J]. Highway, 2023, 68(1): 416-425.

[9] 黄小明,包世波,霍文星,等. 扁平特大断面隧道三台阶法、CD 法开挖对比分析[J]. 公路, 2023, 68(4): 401-409.

HUANG Xiaoming, BAO Shibo, HUO Wenxing, et al. Comparative Analysis of Excavation of Flat Extra-large Cross-section Tunnel by Three-step Method and CD Method [J]. Highway, 2023, 68(4): 401-409.

[10] 张啟乐,董连东,刘林芽,等. 基于传递函数标定法的异型盾构隧道地铁列车运行振动分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021,

- 24(12): 141 - 145.
ZHANG Qile, DONG Liandong, LIU Linya, et al. Vibration Analysis of Metro Train Operating in Special Shape Shield Tunnel Based on Transfer Function Calibration Method [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 141 - 145.
- [11] 曾小刚. 市政隧道开口段异型箱涵结构设计研究[J]. 工程建设与设计, 2020(19): 26 - 28.
ZENG Xiaogang. Study on the Structural Design of Special-shaped Box Culvert in the Opening Section of Municipal Tunnel [J]. Construction & Design for Engineering, 2020(19): 26 - 28.
- [12] 谭锡洪, 孙小兵, 马兆荣. 异型箱涵有限元分析及配筋简化计算导则[J]. 山西建筑, 2008, 34(23): 82 - 83.
TAN Xihong, SUN Xiaobing, MA Zhaorong. Finite Element Method Analysis of Special Shaped Box Culvert and Reinforcement Reduction Calculation Methods [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(23): 82 - 83.
- [13] 朱志祥. 隧道异型结构二次衬砌支撑体系快速施工技术研究[J]. 建筑与预算, 2021(5): 95 - 97.
ZHU Zhixiang. Study on Rapid Construction Technology of Secondary Lining Support System of Tunnel Special-shaped Structure [J]. Construction and Budget, 2021(5): 95 - 97.
- [14] 李凌云. 异型套拱在隧道洞口小净距浅埋偏压段的应用[J]. 山西建筑, 2009, 35(29): 312 - 313.
LI Lingyun. Application of the Heterotypic Shaped Sets of Arch in the Tunnel Entranced Hole with Small Spacing Shallow Section and Bias [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(29): 312 - 313.
- [15] 张万斌, 李海军, 王明年. 喷筑隐式异型中墙复合式连拱隧道的设计分析[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(6): 147 - 151.
ZHANG Wanbin, LI Haijun, WANG Mingnian. Design and Analysis of a Double-arch Tunnel with Concealed, Sprayed Irregular-composite Mid-wall [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(6): 147 - 151.

(上接第 107 页)

- [J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 112 - 117.
YAN Aiguo, XIA Zhengchun, ZHANG Jie, et al. Type Selection for Youshui River Bridge of Zhangjiajie-Jishou-Huaihua Railway in Furong Town [J]. Bridge Construction, 2021, 51(6): 112 - 117.
- [2] 张杰, 严爱国, 郭远航. 主跨 292 m 非对称上承式拱桥结构设计研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(S1): 142 - 146.
ZHANG Jie, YAN Aiguo, GUO Yuanhang. Study on Structural Design of Asymmetric Deck Arch Bridge with Main Span of 292 m [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(S1): 142 - 146.
- [3] 王睿. 高原山区大跨度铁路拱桥施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 105 - 110.
WANG Rui. Key Construction Techniques for Long-span Railway Arch Bridge in Mountainous Region of Plateau [J]. Bridge Construction, 2020, 50(1): 105 - 110.
- [4] 林祥. 贵州林织铁路纳界河特大桥修建关键技术[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S2): 118 - 121.
LIN Xiang. Key Technologies for the Construction of Najiehe Bridge on Guizhou Linzhi Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S2): 118 - 121.
- [5] 李艳哲. 成贵铁路鸭池河特大桥主桥施工技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(5): 16 - 21.
LI Yanzhe. Key Construction Techniques for Main Bridge of Yachi River Bridge on Chengdu-Guiyang Railway [J]. Bridge Construction, 2020, 50(5): 16 - 21.
- [6] 林鹏. 成贵铁路鸭池河特大桥拱肋架设二次横移技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 114 - 118.
LIN Peng. Techniques for Secondary Transverse Movement in Erecting Arch Rib of Main Bridge of Guizhou Yachi River Bridge on Chengdu-Guiyang Railway [J]. Bridge Construction, 2019, 49(2): 114 - 118.
- [7] 王亚维. 成贵铁路贵州鸭池河特大桥主桥拱肋架设施工技术[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 104 - 108.
WANG Yawei. Construction Techniques for Erection of Arch Rib of Main Bridge of Guizhou Yachi River Bridge on Chengdu-Guiyang Railway [J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 104 - 108.
- [8] 张春新. 西江特大桥钢箱提篮拱架施工技术[J]. 桥梁建设, 2015, 45(5): 7 - 12.
ZHANG Chunxin. Construction Techniques for Erection of Steel Box Basket Handle Arch of Xijiang River Bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(5): 7 - 12.
- [9] 赵剑发. 准朔铁路黄河特大桥主桥钢管拱架方案比选[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 108 - 113.
ZHAO Jianfa. Comparison of Erection Schemes for Steel Tube Arch of Main Bridge of Huanghe River Bridge on Zhungeer-Shuozhou Railway [J]. Bridge Construction, 2015, 45(1): 108 - 113.