

文章编号: 1674—8247(2020)03—0079—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.017

## 渝利铁路高填方深基础明洞结构力学特性研究

黎 康

(中国铁路成都局集团有限公司, 成都 610081)

**摘 要:**受城市规划影响,渝利铁路以桥改隧跨越丰都斜南溪沟谷,为典型的高填方深基础明洞案例。本文研究制定了沟谷中先建造大体积混凝土隧道坝基,再在坝基上修建明洞,最后在明洞上方超厚回填土至规划标高的技术方案。并采用理论计算和数值分析,系统分析了混凝土坝基、双层明洞衬砌、填土在不同施工步骤中的变形和内力。分析结果表明,混凝土坝基、明洞、填土在施工和运营阶段均整体稳定,明洞内衬的施作时机对内、外衬砌内力的影响较大,应结合工期综合考虑。研究结论可为类似明洞隧道施工提供参考。

**关键词:**明洞;坝型基础;高填方;双层衬砌;施工步骤

中图分类号:U451

文献标志码:A

## Study on Mechanical Characteristics of Open Cut Tunnel Structure with High Fill and Deep Foundation in Chongqing-Lichuan Railway

LI Kang

(China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Under the influence of urban planning, Chongqing-Lichuan Railway is a typical case of open cut tunnel with high fill and deep foundation, in which the tunnel scheme instead of the bridge scheme is used to cross the Fengdu Xie'naxi Valley. This paper develops a technical scheme that firstly the mass concrete tunnel dam foundation is built in valley, then the open cut tunnel is built on the dam foundation and finally the super thick soil is backfilled to the planned elevation on the open cut tunnel. The theoretical calculation and numerical analysis is used to analyze systematically the deformation and internal force of concrete dam foundation, double-layer open tunnel lining and filling in different construction steps. The analysis results show that the concrete dam foundation, open cut tunnel and fill are all stable in the construction and operation stages, and the construction timing of the open cut tunnel lining has a greater impact on the internal and external lining forces, which should be considered in combination with the construction period. The research conclusion can provide reference for similar open tunnel construction.

**Key words:** open cut tunnel; dam foundation; high fill; double-layer lining; construction step

随着高速铁路网向西南山区延伸,受地形、地质条件及曲线半径、环保要求的影响,位于城区的隧道不断增多,而山区城市发展受地形限制,土地稀缺问题日益严重,于是铁路与城区规划、市政结合建设的案例日渐

增多,出现了回填土厚达30 m以上的高填明挖隧道结构,个别案例还面临底部悬空或深基础的情况。高填方明洞填土荷载大,对衬砌结构设计施工提出了更高的要求。受力更加复杂,特别是衬砌厚度增大后,衬砌

收稿日期:2020-03-06

作者简介:黎康(1966-),男,教授级高级工程师。

引文格式:黎康.渝利铁路高填方深基础明洞结构力学特性研究[J].高速铁路技术,2020,11(2):79-84.

LI Kang. Study on Mechanical Characteristics of Open Cut Tunnel Structure with High Fill and Deep Foundation in Chongqing-Lichuan Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 79-84.

混凝土浇筑时产生的水化热和温度裂缝会严重影响结构的安全性和耐久性,底部悬空或软弱深基础也会给高速铁路带来沉降、变形不易控制、结构稳定性差等难题<sup>[1]</sup>。本文结合渝利铁路丰都造地桥改隧明洞工程案例,研究制定了沟谷中先建造大体积混凝土隧道坝基,再在坝基上修建明洞,最后在明洞上方超厚回填土至规划标高的技术方案,并通过现场试验对该设计方案进行了验证。该方案具有工艺简单、技术先进、应用前景广阔的特点,尤其对进一步推进我国复杂山区高填深基明洞技术的发展,具有很好的指导作用。

1 丰都桥改隧明洞工程概况

重庆至利川铁路为“四纵四横”中沪汉蓉大通道的重要组成部分,丰都桥改隧明洞位于重庆市丰都县,为典型大跨单洞超厚回填土高坝基础明洞衬砌结构。渝利铁路通过丰都县斜南溪沟谷,原设计采用桥梁方式跨越,由于城市规划需对沟谷进行回填造地,铁路被迫改为隧道形式通过。明洞结构修建于市区 2 000 余亩深沟回填造地弃渣填土体内。丰都造地工程,上游为人造堰塘,下游连接长江,沿沟回填纵向总长 2 100 m,填方总量达 1 600 万 m<sup>3</sup>。回填造地工程分为一期回填和二期回填,隧道上方先回填出纵向 500 m 长,横向 80 m 宽(一期回填),再于明洞两侧沿沟形纵向回填直至填满整个沟谷(二期回填)。明洞拱顶最大回填土厚度 33 m,结构最大净跨 20 m(含衬砌厚度),隧道轨面以下至沟底 32 m,填土总高度 62 m。为控制明洞衬砌大体积混凝土浇筑时产生的

水化热和温度裂缝,采用双层明洞衬砌型式,隧道基底采用坝型大体积混凝土基础型式,解决了弃渣体内高速铁路沉降变形、稳定、轨道平顺性等难题<sup>[2]</sup>。

2 高填深基明洞结构整体稳定性分析

2.1 计算原理

本工点结构高度达 65.4 m,设计分别采用结构力学法和数值计算法分析结构的整体稳定性、结构的变形和内力、内衬砌施做顺序等。其中,按连续介质设计时,地层、回填、坝、明洞外衬砌、填充采用平面应变单元,明洞内衬砌采用梁单元,坝底和隧底采用接触单元。一期工程典型断面如图 1 所示。

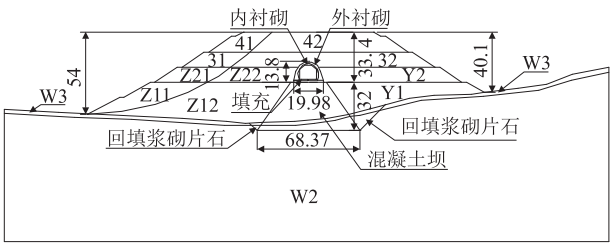


图 1 一期工程典型断面(m)

施工步骤为:(1)开挖坝基坑;(2)施作混凝土坝基础;(3)浆砌片石回填左侧基坑;(4)浆砌片石回填右侧基坑;(5)填筑第一层土至坝的顶面;(6)施作明洞外衬砌;(7)施作明洞填充;(8)填筑第二层土;(9)填筑第三层土;(10)填筑第四层土;(11)施作明洞内衬砌;(12)钝化 Z11、Z21、31、41 土层。主要计算参数如表 1 所示。

表 1 材料参数表

材料号	材料名称	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	凝聚力 (kN/m <sup>2</sup> )	内摩擦角 (°)	弹性模量 /MPa	泊松比	K <sub>0</sub>
1	<9-1> W <sub>2</sub> 砂泥岩	25	20	45	11 000	0.23	0.30
2	<9-1> W <sub>3</sub> 砂泥岩	21	25	35	900	0.25	0.33
3	<3-2> 松软土	18	—	—	2.8	0.30	0.40
4	<1> 人工填土	20	—	35	7	0.28	0.43
5	C30 混凝土基础	23	—	—	28 000	0.2	0.25
6	C35 明洞外衬砌	25	—	—	32 250	0.2	0.25
7	C20 隧道填充	23	—	—	28 000	0.2	0.25
8	C35 隧道内衬砌	25	—	—	32 250	0.2	0.25
9	保护层填土区	21	—	—	9	0.28	0.43
10	普通填土区	20	—	—	7	0.28	0.43

2.2 回填工程及明洞基础整体稳定性

坝基础位于侏罗系中统沙溪庙组(J2s)泥岩夹砂岩的弱风化层上,弱风化泥岩的天然饱和单轴抗压强

度 9.8~26.5 MPa,纵波波速在 2 707~4 302 m/s;弱风化砂岩的天然饱和单轴抗压强度 13.2~44.6 MPa,纵波波速在 3 287~4 826 m/s,建筑场地类别属Ⅱ类。

结构的整体稳定分析包括一期和二期工程。

2.2.1 一期回填工程的稳定性评价

施工到第 10 步时,坝底地层的最大主应力为 1.743 MPa,最大剪应力为 0.273 MPa,砂泥岩弱风化泥岩的天然饱和单轴抗压强度为 9.8 MPa,抗剪强度为 0.59 MPa,由此可知,坝底地层不会发生整体或局部剪切破坏,此时大坝沉降为 1.5 cm,沉降等值面如图 2 所示。

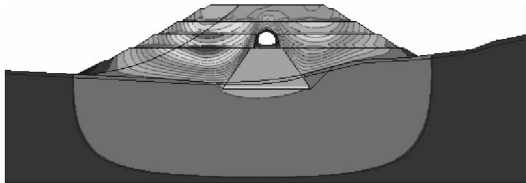


图 2 沉降等值面图

当填土到坝顶高度时,取坝底摩擦系数 0.4,假定坝只承受单侧土压力,此时坝的抗滑动稳定系数  $K_c = 3.32$ 。当填土到最大高度时(即一期回填完成后),按瑞典条分法找出最不利边坡滑面的安全系数为  $K = 1.179 > 1.10$ ,回填土体能保持稳定。

假定Ⅱ期不及时回填,连续降雨引起填土  $c$ 、 $\varphi$  值下降,致使一期回填发生局部溜坍,研究此不利工况下回填体的稳定性。计算时,假定左侧土体 Z11、Z21、31、41 沿最不利滑面滑走,此时坝底平均应力 1.19 MPa,水平推力 532 kN,坝底抗滑动稳定系数 61.5。取隧底摩擦系数为 0.65,隧底平均应力 0.49 MPa,水平推力 635 kN,隧底抗滑动稳定系数 10.1,说明回填土体能保持稳定。

由以上分析可知,一期回填发生局部溜坍时,在偏载作用下,明洞衬砌将承受 532 kN 水平推力。为保证工程安全可靠,设计考虑在衬砌底部设置与坝基混凝土同时浇筑的钢筋混凝土抗剪桩,使明洞与坝基共同受力,共同抵抗填土水平推力。同时通过对一期回填稳定性的分析,得到一期回填体的最佳坡率。

2.2.2 二期回填工程的稳定性评价

二期回填工程总长 2.1 km,总填方 1 700 万  $m^3$ ,最大填高 62 m,延伸至长江边。根据 GB 50330-2002《建筑边坡工程技术规范》,附加荷载为公路荷载,按城市 A 级荷载考虑。根据地勘资料,取饱水状态下土石界面的  $c$ 、 $\varphi$  值对二期回填工程进行稳定性分析,计算参数如表 2 所示。稳定性计算采用折线滑动法,并考虑了长江洪水位的渗流作用,经验算, $K_c = 2.72 > 1.35$ ,满足规范稳定要求。

表 2 土石界面  $c$ 、 $\varphi$  值

名称	采用值			
	天然状态		饱水状态	
	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$
粉质粘土(硬塑)	15	18	10	8
碎石土	5	22	5	22
块石土	4	25	4	25

2.2.3 混凝土坝基础的变形和内力

在各施工步骤中,坝体底部会出现拉应力,施工到第 11 步时(即回填、内衬施做完毕)拉应力达到最大,最大值为 0.31 MPa,小于 C30 混凝土容许拉应力值 0.55 MPa;坝体最大剪应力出现在坝底右侧,最大值为 0.73 MPa,小于 C30 混凝土容许剪应力值 1.10 MPa。有限元计算表明,混凝土基础结构内力均未超过容许应力值,混凝土结构满足隧道和填土承载力的要求。

由以上分析可知,坝体形状和采用的材料满足工程要求,但坝底两侧三角区有剪应力集中,可将三角区优化为直角区。该坝每延米体积为 1 478  $m^3$ ,混凝土的温控设计是保证大坝质量的关键,需合理分块,控制混凝土浇筑温度,降低混凝土的水化热,防止温度裂缝的产生<sup>[3]</sup>。

2.2.4 地基承载力有限元计算结果

施工到第 10 步,即Ⅰ期回填完成时,坝底地层的最大主应力为 1.743 MPa,最大剪应力为 0.27 MPa,弱风化砂泥岩的天然饱和单轴抗压强度为 9.8 MPa,抗剪强度为 0.59 MPa,如此可知,地基处于弹性受力,坝底地层不会发生整体或局部剪切破坏。填筑完毕时基底塑性区分布(局部)如图 3 所示。

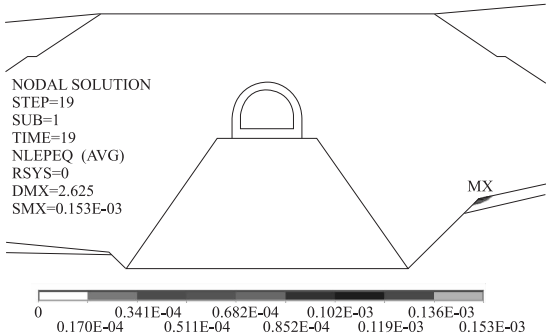


图 3 填筑完毕时基底塑性区分布(局部)图

2.2.5 混凝土坝基础沉降计算结果

按隧道衬砌修筑完毕即铺轨的情况计算,基底工后沉降为 3.564 mm,整个回填工程填筑完毕时,基底总沉降为 6.425 mm。基底总沉降较小,混凝土基础结构满足上部隧道沉降的要求。

### 2.3 明洞衬砌结构稳定性分析

明洞外衬砌按承受 100% 荷载考虑,分别可按结构力学法和数值分析法计算内力。内衬砌可在外衬砌和填充施工完成后施作(即内衬砌先施作),也可在 I 期填土完成后施作(即内衬砌后施作)。内衬砌的施作时机直接影响到工期和内、外衬砌的内力分担<sup>[4]</sup>。明洞内、外衬砌断面如图 4 所示。当内衬砌后施作时,外衬砌在第 11 步时的整体沉降为 8 mm,因荷载作用引起的拱顶变形下沉为 2 mm。

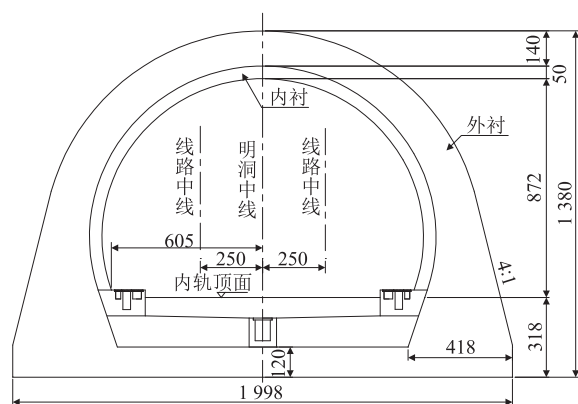


图 4 明洞内、外衬断面图 (cm)

82

#### 2.3.1 内衬砌内力计算结果

当内衬砌在第 11 步施作时,衬砌承受弯矩为  $-0.5 \sim 1.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,轴力为  $-58.2 \sim 11.5 \text{ kN}$ ,均较小,内衬砌弯矩和轴力分别如图 5 和图 6 所示;考虑最不利工况,即隧道左侧填方产生局部溜坍(第 12 步工况),衬砌弯矩为  $-6.3 \sim 8.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,轴力为  $-178.4 \sim 225.2 \text{ kN}$ 。两者相比,最不利工况下的内力增长显著,且存在偏压内衬砌弯矩和轴力分别如图 7 和图 8 所示。当内衬砌先施作时,衬砌承受弯矩为  $-25.2 \sim 24.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,轴力为  $-1542.3 \sim -83.3 \text{ kN}$ ,时弯矩和轴力分别如图 9 和图 10 所示。

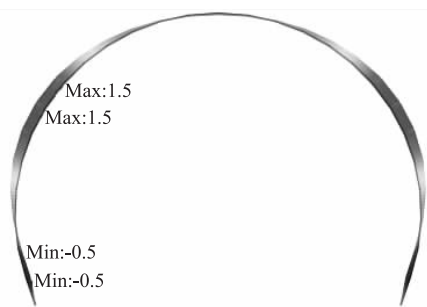


图 5 第 11 步内衬砌弯矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

由以上分析可知,内衬砌后施作,将基本不承受土体荷载,轴力弯矩都较小,内衬砌可作为明洞填方产生

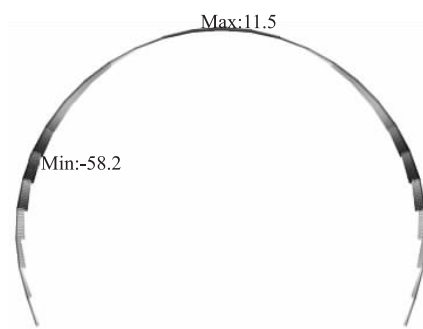


图 6 第 11 步内衬砌轴力 (kN)

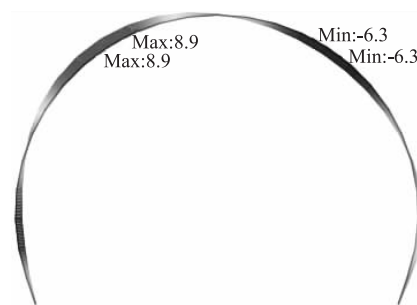


图 7 第 12 步内衬砌弯矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

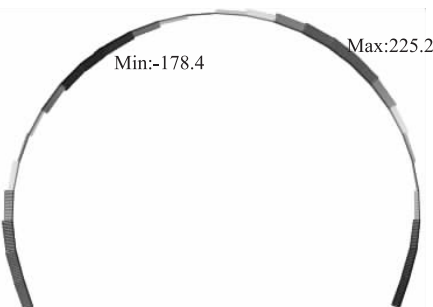


图 8 第 12 步内衬砌轴力 (kN)

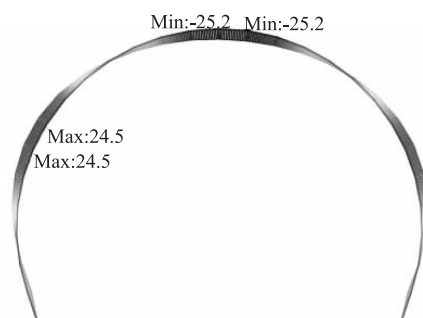


图 9 内衬砌先施作时弯矩 ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

局部溜坍时的安全储备;内衬砌先施作,内、外衬砌共同承担土体荷载,轴力、弯矩值均发生数量级的提高。从工期方面考虑,内衬砌后施作,填土工期 4 个月和内衬砌工期 3 个月将成为关键工序,若内衬砌紧跟外衬砌施作,工期可节省 7 个月。



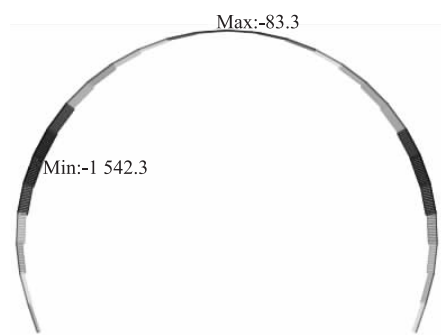
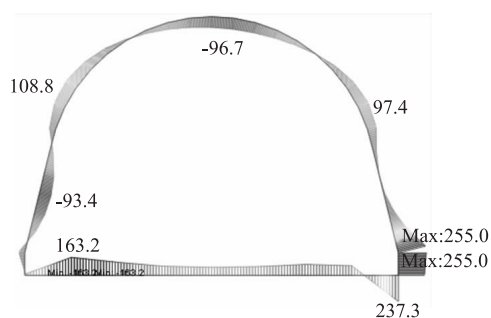
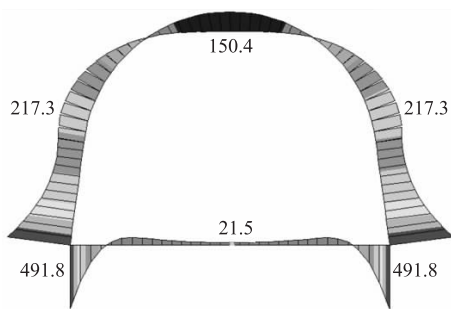
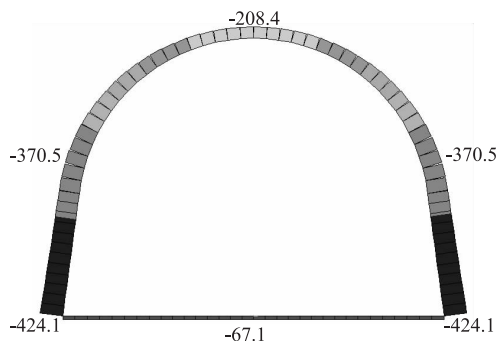
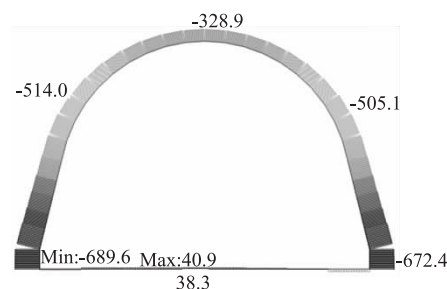


图10 内衬砌先施作时轴力(kN)

图13 连续介质模型弯矩  $M_b$  (t·m)

### 2.3.2 外衬砌内力计算结果

外衬砌分别采用荷载-结构模型(其弯矩为  $M_a$ , 轴力为  $F_a$ )和连续介质模型设计。其中,在连续介质模型中,外衬砌采用梁单元(其弯矩为  $M_b$ , 轴力为  $F_b$ )和平面应变单元(其弯矩为  $M_c$ , 轴力为  $F_c$ )。三种情况下,外衬砌内力情况大致为  $M_a > M_b > M_c$ ,  $F_a < F_b \approx F_c$ 。荷载结构模型弯矩  $M_a$  和轴力  $F_a$  如图11、图2所示;连续介质模型弯矩  $M_b$  和轴力  $F_b$  如图13、图14所示。

图11 荷载结构模型弯矩  $M_a$  (t·m)图12 荷载结构模型轴力  $F_a$  (t)图14 连续介质模型轴力  $F_b$  (t)

结果与物理力学参数、本构模型、施工步骤、边界条件密切相关,其数值不一定与实际一致,但仍对设计具有重要的指导作用。施工中应加强沉降、填土内力、衬砌内力的监测,修正数值计算的输入参数,更好地指导施工。

(2)在偏载作用下,衬砌将承受 532 kN 水平推力,为保证工程可靠,在衬砌底部增设了直径 0.8 m 的抗剪桩,间距 4 m,长度 3~4 m。

(3)结构力学方法是假定在填土过程中,衬砌上方填土水平且存在 5 m 高差的情况计算衬砌内力的;数值计算方法是按坝左侧填土总高度 54 m,右侧填土总高度 40.1 m,并考虑施工步骤(内衬砌后作)计算衬砌内力的。由于填土内摩擦角、凝聚力的数值是按天然含水量选取的,当二期填土不及时或连续降雨引起  $c$ 、 $\varphi$  值降低时,可能发生局部溜坍,引起衬砌内力变化。数值计算更能反映真实的施工情况,其在正常工况和最不利工况下,内力均不是对称的,故设计除按结构力学方法内力和配筋外,还应采用数值计算的结果进行校核。

(4)为解决高填方深基础明洞结构存在的问题,应根据工程实际,开展超厚填土明洞竖向有效土压力荷载<sup>[5-6]</sup>,超厚填土双层明洞衬砌优化施工工序,混凝土级配、外加剂、温控防裂等施工技术的研究工作。

### 参考文献:

[1] 中铁二院工程集团有限责任公司. 大跨超厚回填土高坝基础明

## 3 结论

(1)通过数值计算方法分析了坝、衬砌、填土之间内力和变形的相关性,结构及回填的整体和局部稳定性、内衬施作时机对内、外衬砌内力的影响等,其计算

洞修建关键技术研究[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司,2016.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Research on Key Technology for Construction of Long-span Open Cut Tunnel with Super Thick Backfill Soil and High Dam Foundation [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2016.

[2] 匡亮,陈赤坤,谭永杰,等. 沟谷山区城市超厚填土铁路明洞设计[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(12): 51-56.

KUANG Liang, CHEN Chikun, TAN Yongjie, et al. Design of Extra-high Filling Urban Railway Open Cut Tunnel in Valley Mountain Area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(12): 51-56.

[3] GB 50496-2009 大体积混凝土施工规范[S].

GB 50496-2009 Code for Construction of Mass Concrete [S].

[4] 谭永杰,匡亮. 大跨超厚回填土明洞衬砌结构选型及设计优化研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(3): 32-36.

TAN Yongjie, KUANG Liang. Study on Lining Structure Selection and Design Optimization for Large-span Super High Fill Open Cut Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3): 32-36.

[5] 杨锡武,张永兴. 公路高填方涵洞土压力变化规律及计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(9): 119-124.

YANG Xiwu, ZHANG Yongxing. A Study on the Earth Pressure Theory for High Fill Culverts [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 119-124.

[6] 顾安全,王晓谋,折学森. 上埋式管道及洞室垂直土压力的研究[C]//海峡两岸土力学及基础工程地工技术学术研讨会论文集. 北京:中国土木工程学会,1994: 481-486.

Gu Anquan, WANG Xiaomou, SHE Xuesen. Study on the Vertical Earth Pressure of Buried Pipeline and Cavern [C]// Proceedings of Cross-strait Symposium on Soil Mechanics and Geotechnics. Beijing: China Civil Engineering Society, 1994: 481-486.

(编辑:白雪 张红英)

(上接第70页)

将进一步应研究如何将此系统运用于现场实际,为铁路牵引供电系统谐波抑制做出贡献。

参考文献:

[1] 袁博. 牵引变电所配电系统高次谐波抑制技术及装置研制[D]. 北京:北京交通大学, 2019.

YUAN Bo. High-order Harmonic Suppression Technology and Development of Device for Distribution System of Traction Substation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[2] 李子晗. 电气化铁路高次谐波谐振与对策研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.

LI Zihan. Study on High-order Harmonic Resonance and Countermeasures of Electrified Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[3] 刘朝晖. 包神铁路神华号电力机车谐波特性研究[J]. 电气铁道, 2018, 29(4): 19-24.

LIU Zhaohui. Researches of Harmonic Characteristics of Shenhua Electric Locomotives for Baotou-Shenmu Railway [J]. Electric Railway, 2018, 29(4): 19-24.

[4] 李晋. 牵引供电系统高次谐波过电压抑制技术[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(3): 52-57.

LI Jin. Inhibition Technique of High Order Harmonic Over-voltage in Electrified Railway Traction Power Supply System [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019, 38(3): 52-57.

[5] 张文仁. 高速铁路牵引供电系统谐波谐振抑制方案研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(5): 106-113.

ZHANG Wenren. Research on Harmonic Resonance Suppression Scheme of Traction Power Supply System for High Speed Railway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(5): 106-113.

[6] 赵元哲,李群湛,周福林. 基于阻波高通滤波器的高速铁路谐振抑制方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 139-144.

ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin. Resonance Suppression Based on Wave-trap High-pass Filter for High-speed Railway [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 139-144.

[7] 刘宗华. 混沌动力学基础及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

LIU Zonghua. Fundamentals and Applications of Chaotic Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[8] 衣文索. 混沌系统奇异性分岔过程分析[J]. 长春大学学报, 2008, 18(6): 4-6.

YI Wensuo. Analysis of Singular Bifurcation Process of Chaotic System [J]. Journal of Changchun University, 2008, 18(6): 4-6.

(编辑:车晓娟 白雪)