

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND
MANAGEMENT OF HIGHWAY ENGINEERING



公路工程 施工技术与管埋

——中交三公局第一工程有限公司交流论文集

赵 斌 ◎ 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

公路工程施工技术与管埋

——中交三公局第一工程有限公司交流论文集

赵 斌 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书共收录论文 34 篇,汇集了中交三公局第一工程有限公司广大工程技术人员、管理人员从事公路工程施工的心得体会,涵盖了施工技术、安全生产、经营管理等方面的内容。

本书可供从事公路工程施工的技术人员、管理人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

公路工程施工技术与管理:中交三公局第一工程有限公司交流论文集/赵斌主编.——北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.8

ISBN 978-7-114-12440-2

I. ①公… II. ①赵… III. ①道路施工—工程技术—文集②道路施工—施工管理—文集 IV. ①U415.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 184529 号

书 名:公路工程施工技术与管理——中交三公局第一工程有限公司交流论文集

著 者:赵 斌

责任编辑:李 农 张 鑫 李 沛 肖 鹏

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:11

字 数:274 千

版 次:2015 年 8 月 第 1 版

印 次:2015 年 8 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12440-2

定 价:50.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

《公路工程施工技术与管理》 编委会

主 编:赵 斌

副主编:王书涛 崔登云

编 委:陈建平 李晓宾 陈风新 杨 帅

程 锦 张爱民 杨 然 何 韬

王太宁 黎治国 赵常青 李春盛

李鹏华

前 言

技术论文是科技创新成果的具体体现,也是技术人员对施工技术和工程管理经验的科学总结。加强公路工程新技术、新工艺、新材料和新设备的推广应用,能够使广大工程技术人员及时学习和掌握行业内先进的技术知识,实现工程技术的再创新和再实践,进而带动企业提升项目技术管理水平。

本次技术交流工作经编委会审阅共推举 34 篇论文,分别从施工技术、安全生产、经营管理等不同角度,从实践出发,对如何进一步提升当前公路工程建设管理水平进行了有益的研究和探索,技术含量高、内容翔实、图文并茂,文字表达准确,能够指导公路工程施工与管理。

文以载道、汇则兴邦,衷心希望广大员工做好基础性科技工作,不断开拓创新,取得更多的科研成果,进一步提高技术水平,为企业的发展壮大做出更大的贡献。

董事长兼总经理:



二〇一五年七月

目 录

自行式仰拱栈桥设计及施工技术研究·····	赵 斌(1)
大跨径连续梁桥施工监控技术研究·····	王书涛(9)
路基工程岩溶注浆施工技术研究 ·····	李童奋 茅水英(13)
石灰石取代矿粉在路面基层水泥中的应用研究 ·····	陆科奇 王彩萍(19)
植物纤维毯在粉砂性土路基边坡防护中的应用 ·····	罗 浩(24)
浅谈冷再生机在路床水泥土处治中的应用 ·····	谭文田 王彬彬(30)
内蒙古准兴运煤高速重载水泥混凝土路面施工 关键技术研究 ·····	王书涛 于 博 郑鹏武 李春盛(38)
PC 连续箱梁体外束无损张拉施工技术 ·····	赵常青(45)
波形钢腹板 PC 组合箱梁桥施工质量控制 ·····	李春盛(49)
大跨度悬索桥主缆索股双线往复式门架牵引技术研究 ·····	曾魏兰 王书涛(54)
旋挖钻机在不良地质条件下深孔桩基施工 ·····	夏 灿(58)
后张法预应力混凝土 T 梁预制工艺技术分析 ·····	王彬彬(65)
浅谈箱梁后张法预应力施工工艺 ·····	罗 浩(68)
浅谈现浇箱梁的施工工艺 ·····	撒元强(73)
高寒地区钢波纹管涵洞施工关键技术研究 ·····	郭 鹏 梁养辉(76)
宽幅悬浇箱梁挂篮施工改为支架施工方案比选 ·····	夏 灿 祝 林(82)
高墩施工工艺的应用 ·····	王彬彬 郭书强(86)
桥梁挂篮悬臂施工技术分析 ·····	齐晓峰(92)
混凝土桥梁裂缝的成因及处理办法 ·····	郭 鹏 王 启(95)
如何在施工中提高盐类结晶破坏环境下隧道衬砌混凝土的抗侵蚀能力 ·····	李鹏华(98)
浅谈隧道三台阶临时横撑法开挖技术·····	刘占杰(105)
大断面隧道围岩破碎带处治措施·····	赵常青 谭文田(109)
软弱围岩隧道施工技术·····	于春宇(115)
严寒地区隧道中软弱围岩段深埋中心水沟施工技术·····	刘占杰(119)
高速铁路隧道监控量测·····	海占伟(122)
聚乙烯(PE)给排水管道施工技术 ·····	刘翔雁(127)
纤维对 SMA 路用性能的影响研究 ·····	孙亚龙(133)

申嘉湖杭高速公路上跨杭州绕城高速现浇箱梁交通疏导及安全组织设计·····	王书涛(138)
施工企业项目成本管理探讨·····	陈风新(144)
试述开展经济活动分析对项目成本管控的重要性·····	侯德东(150)
浅谈工程项目实施阶段的造价成本控制·····	祝 林 宁耀强(153)
浅谈试验检测对保证公路及隧道工程质量的重要性·····	刘志超(157)
安全生产需要通过监督管理实现·····	赵永君(161)
关于公路工程工法的探讨·····	王 启(164)

自行式仰拱栈桥设计及施工技术研究

赵 斌

(中交三公局第一工程有限公司 北京市 100012)

摘 要:结合工程实例,对自行式仰拱栈桥的设计与应用进行了详细介绍,通过全面分析,对自行式仰拱栈桥与传统的钢结构便桥进行了综合对比,提出了推广自行式仰拱栈桥施工的意义。

关键词:自行式仰拱栈桥 仰拱施工 经济对比

隧道施工作业面集中,施工空间较小。由于受空间限制,各道工序间相互影响很大,如仰拱施工与掌子面开挖出渣进料间的干扰,使得隧道施工效率和安全受到很大的影响,特别是单洞长大隧道,干扰问题尤其突出。传统做法为利用型钢焊接简易钢便桥或轨行式栈桥,利用机械进行就位、移动,效率较低。京沈客专三棱山特长隧道采用了自行式仰拱栈桥施工,有效地解决了仰拱施工与掌子面开挖出渣进料之间的干扰问题,加快了施工进度,保证了安全,节省了大量机械台班,取得了良好的社会效益。

1 工程概述

京沈客专三棱山隧道位于辽宁省朝阳市、阜新市境内,进口里程 DK493+415,出口里程 DK502+303,全长 8 888m。隧道设计为单洞双线隧道,两线线间距 5.00m。隧道地处内蒙古高原和辽河平原的中间过渡带,地貌属辽西剥蚀丘陵区。区段内山体多基岩裸露,植被稀疏,仅黄土覆盖地区有人工林发育。隧道范围内地势总体东北高,西南低,隧道顶部山势雄伟,地形崎岖复杂,多悬崖陡坎。隧道所经山脉海拔高程一般在 280~490m 之间,隧道最大埋深 217.56m。隧道范围穿越地层较复杂,进口为第四系上更新统坡洪积(Q_3^{dl+pl})粉质黏土夹粗角砾土;洞身范围多为侏罗系上统吐呼噜组(J_3)凝灰岩夹凝灰质砂页岩,其中 DK496+717~DK496+867 为凝灰质角砾岩和断层泥,DK498+529~DK499+300 为凝灰质角砾岩,DK499+610~DK501+475 为白垩系侵入体(α_5^{2-3})安山岩。出口为第四系上更新统坡洪积(Q_5^{dl+pl})粉质黏土、细角砾土。山涧沟谷局部分布第四系全新统坡洪积(Q_4^{dl+pl})堆积层。Ⅱ级围岩采用全断面法施工,Ⅲ级、Ⅳ级围岩采用台阶法施工,Ⅴ级围岩深埋段采用三台阶法施工,Ⅴ级围岩浅埋、偏压、断层破碎带段采用三台阶临时横撑法施工,其中Ⅲ、Ⅳ级围岩占大部分。

2 自行式栈桥的设计

(1)为了克服简易钢便桥和传统轨行式栈桥移动不便的缺点,自行式栈桥考虑利用已浇筑的仰拱填充混凝土作为行走基础及支撑基础,利用混凝土早期强度为栈桥自重及通行载荷提

供支撑。

(2)据中国台湾“建国科技大学”《混凝土设计龄期前受力对强度成长损伤之研究》所述,“当荷载应力小于龄期强度 0.3 倍时,在短期荷载下,混凝土中浆体与骨料间的过渡区微裂缝不受扰动”,当底板混凝土强度达到 5MPa(脱模强度)时,控制自动栈桥自重及栈桥传递车辆自重产生的传递到混凝土上的荷载应力小于 1.5MPa 时就不会对混凝土设计强度造成影响。考虑到浇筑混凝土并不完全平整,有受力不均现象,再考虑 3 倍安全系数,拟定混凝土承重压强 0.5MPa。

(3)为达到该技术指标,栈桥设计了设置有万向铰的柔性底座和具有高弹性胶垫的自动行走轨道,以适应不完全平整的混凝土,控制接地压强为 0.45MPa。通过现场试验也证明了在隧道内混凝土养护 12h 后架设自动栈桥并从桥上通行总质量 50t 以下的车辆未对混凝土终凝强度造成影响,达到了设计要求。

① 柔性底座

底座与栈桥采用万向铰连接,栈桥重量与通过荷载均匀传递到 8 个底座上;每块底座再将荷载通过 30 个高弹性橡胶垫及 15 个垫板传递到混凝土上,这样即使浇筑混凝土不够平整也能保证受力均匀(图 1)。

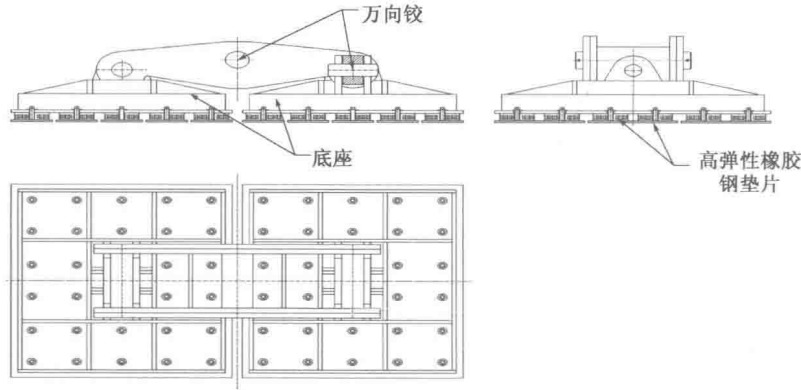


图 1 柔性底座

② 轨道

轨道通过承重轮、勾轮与行走架相连,轨道上设有驱动装置,驱动装置通过连接在行走架上的牵引链条带动栈桥移动。

通过每条轨道设置的 66 个高弹性橡胶垫及垫板将栈桥重量传递到混凝土上,以保证混凝土受力均匀(图 2)。

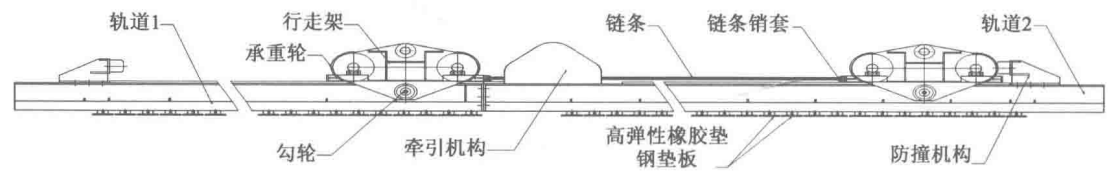


图 2 轨道

(4)栈桥采用了液压控制,具备上、下、左、右调整功能,行走采用具有自动铺轨装置的行走机构,整个栈桥无须人工铺轨,在过弯道时可调整过弯,方便快捷,1 人即可操控。自动化程度及安全性得到了极大提高。

栈桥移动如图 3、图 4 所示。

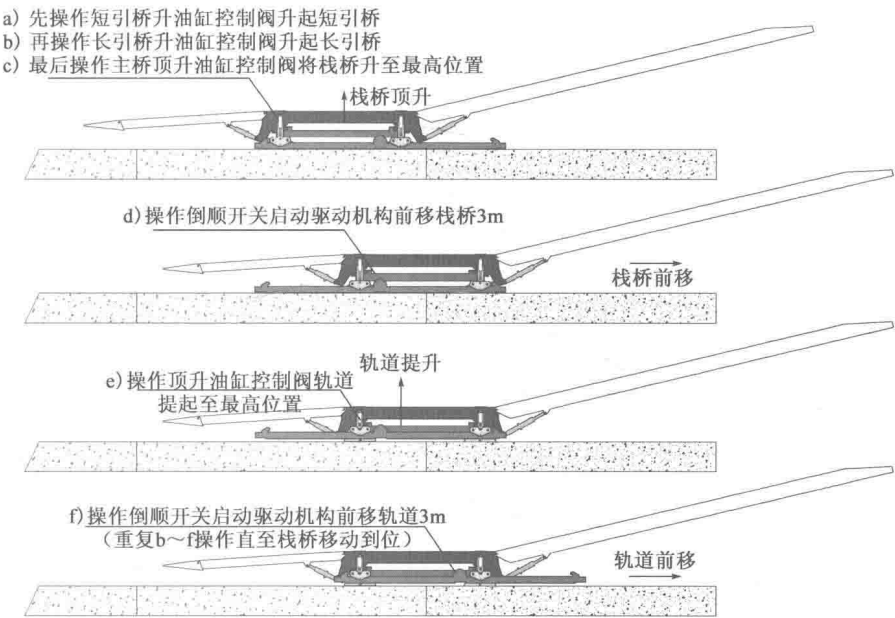


图3 栈桥移动(一)

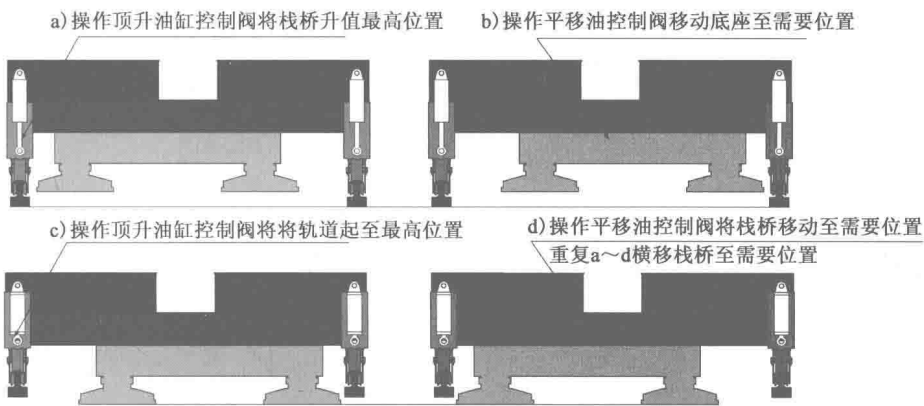


图4 栈桥移动(二)

(5) 自动栈桥自重: 39t, 限制过车质量: 小于 60t。全长约 29m, 分为搭接区 1.65m, 前过渡区 3.2m、施工区 15.2m、养护区 12.28m, 如图 5 所示。

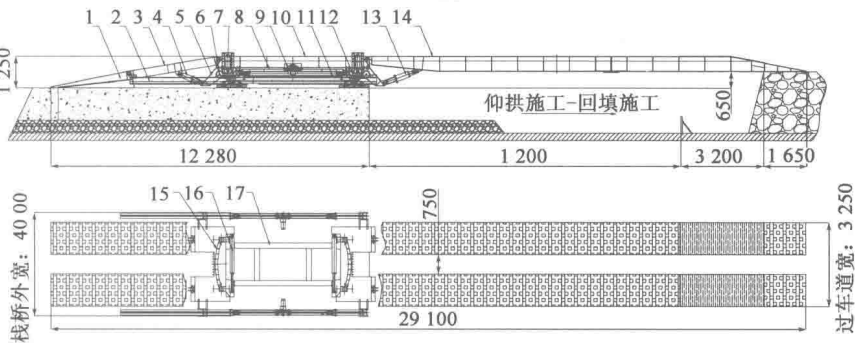


图5 栈桥结构示意图(尺寸单位:mm)

1-过渡引桥;2-轨道;3-短引桥;4-短引桥举升油缸;5-牛腿梁;6-行走机构;7-主桥举升油缸;8-驱动架;9-驱动机构;10-主桥;11-牵引链条;12-底座;13-长引桥举升油缸;14-长引桥;15-滑座梁;16-平移油缸;17-底座

(6)根据设计施工工序时间,安排每施工一循环计划用时 65h。当混凝土出养护区时应该养护 $65+12(\text{养护})=77\text{h}$ 以上,混凝土强度应在终凝强度的 40% 以上。根据现场经验,此时在混凝土上通行车辆不会对混凝土终凝强度有不利影响。

栈桥施工如图 6 所示。

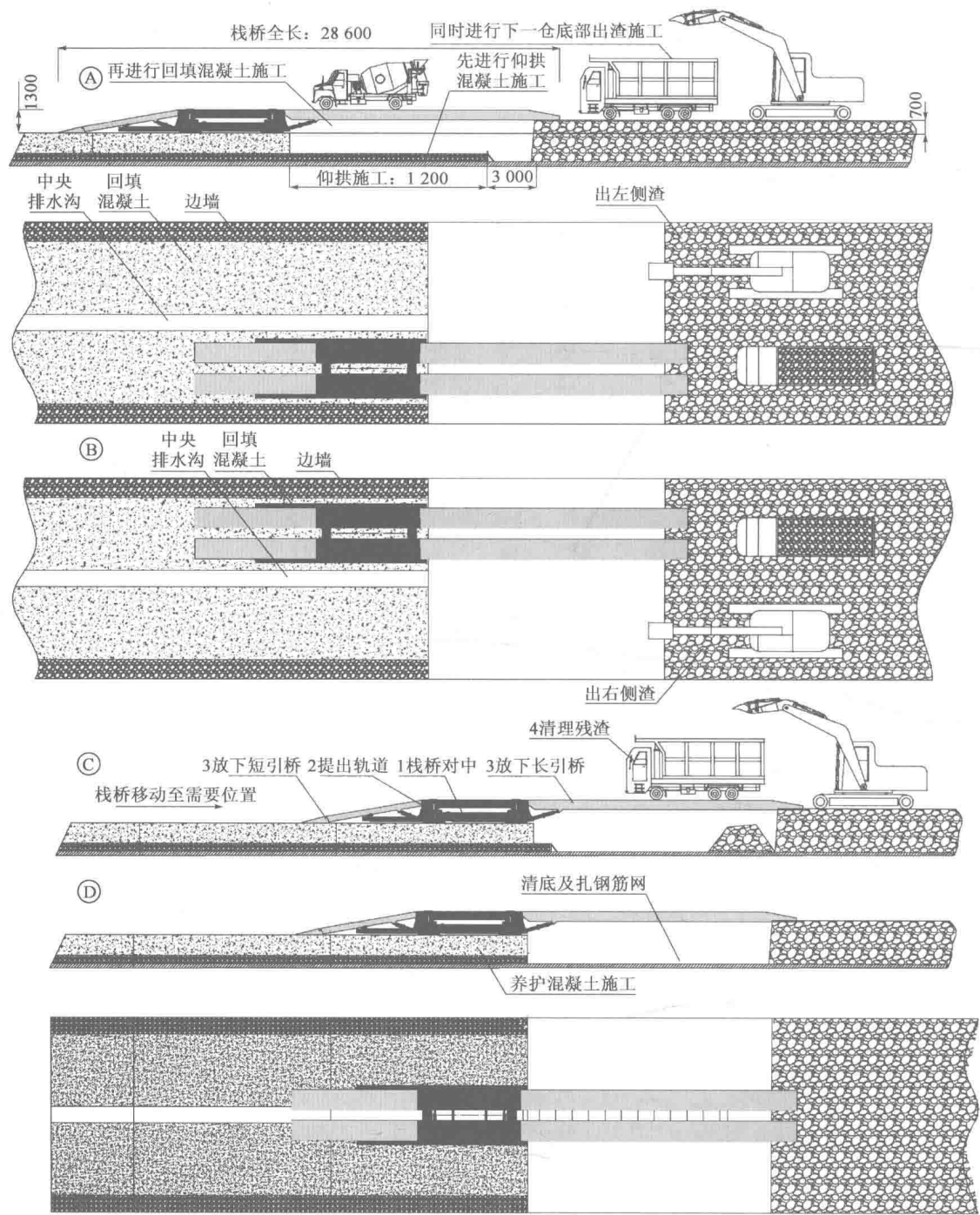


图 6 栈桥施工示意图(尺寸单位:mm)

3 自行式仰拱栈桥施工工艺及操作要点

3.1 仰拱栈桥施工工艺流程(图 7)

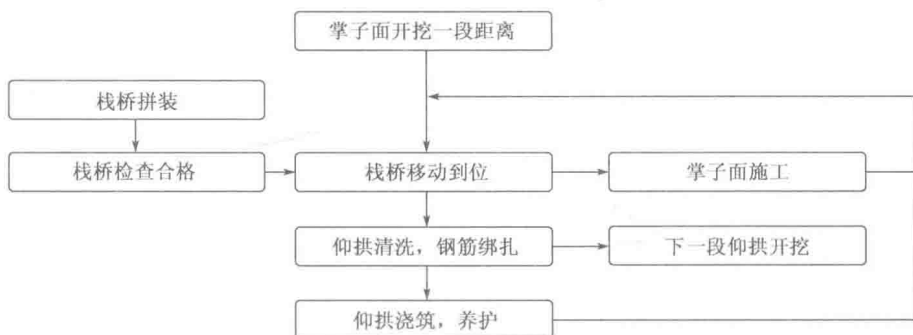


图 7 仰拱栈桥施工工艺流程

3.2 施工工序具体安排

(1)栈桥安装:隧道开挖到一定长度后可安排进行仰拱施工,先在隧道外进行栈桥安装。因栈桥采用模块化的设计,安装方便,现场安装时需 4 人配合一台吊车 48h 即完成构件拼装,并将栈桥开到隧道内。

(2)仰拱开挖及清底:爆破完成(不需爆破的直接挖)后用挖掘机进行仰拱开挖。每次开挖的长度根据设计要求进行,Ⅳ级围岩采用 3m,配合 6 人进行仔细清底,需 4h。

(3)绑扎仰拱钢筋及安装模板:需 6 人,10h。

(4)浇筑混凝土:需 6 人,2h。

(5)养护:1 人需 12h。

(6)移动就位:需 2 人,0.5h。

工人在施工区(长引桥下)进行清底、绑扎钢筋,此时车辆通过引桥通行。工人有足够空间进行施工,可大大提高工作效率,上述工序均在配合隧道开挖施工情况下进行。每浇筑 12m 长仰拱进行一次栈桥移动,共需约 65h,每月可施工约 130m,而隧道每月开挖约 100m。仰拱施工进度不但可跟上隧道开挖进度,还有富余。

采用台阶法开挖时,台阶的开挖一般可以按照左右两幅分别进行,栈桥须在隧洞内进行侧向移动,这样可以实现栈桥施工紧跟台阶开挖。

4 简易仰拱栈桥与自行式仰拱栈桥成本分析

4.1 简易仰拱栈桥结构

隧道仰拱及仰拱填充混凝土分开浇筑。为不干扰和影响掌子面的开挖和支护作业,采用仰拱栈桥辅助施工作业。根据每循环仰拱及仰拱填充混凝土浇筑长度不同,选用不同长度的栈桥。一般情况下,长度以 12m 为宜,配置 1 组(2 片),每循环施工 9m。栈桥采用 32a 工字钢制作,必须保证足够的刚度和稳定性。栈桥制作材料及尺寸如图 8 所示。

4.2 简易栈桥施工成本分析(表 1)

两片为 1 组,总质量:7 128kg,每次施工长度:9m。

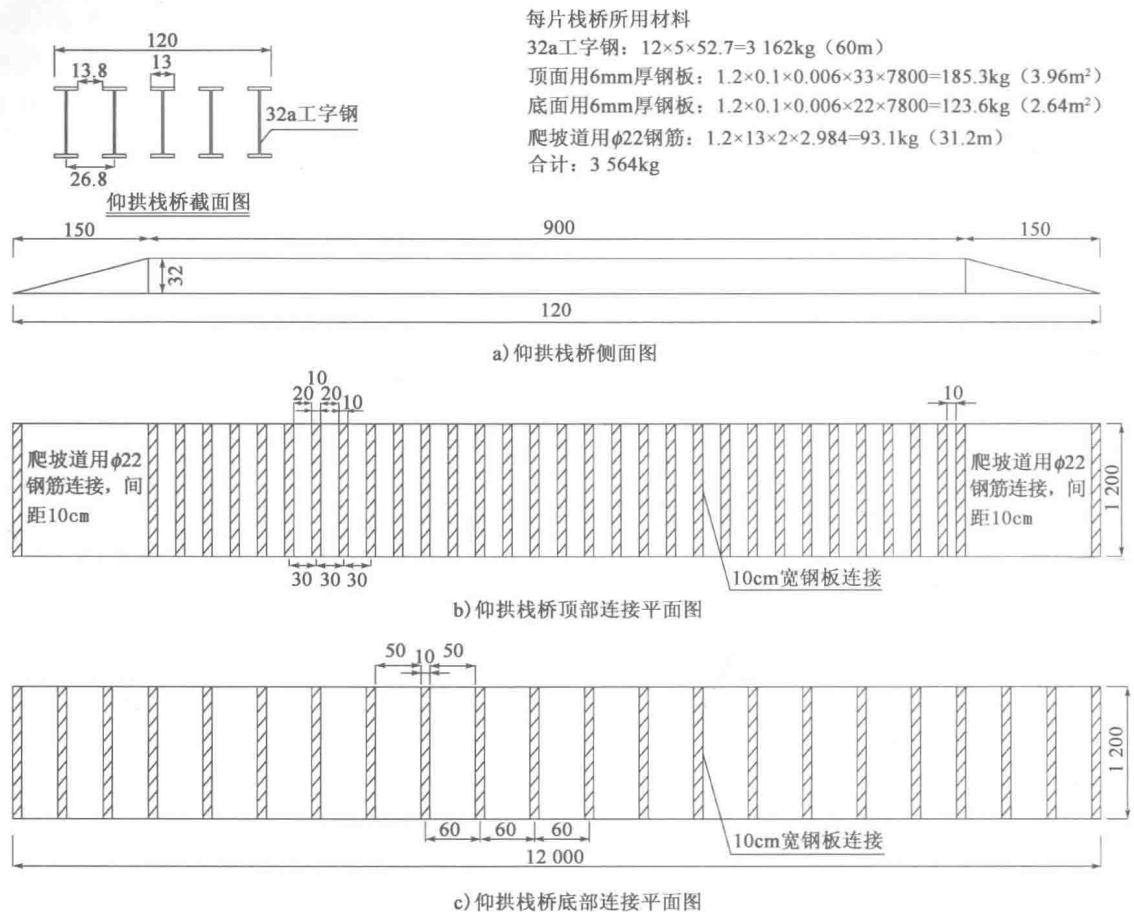


图 8 简易仰拱栈桥示意图(尺寸单位:cm)

简易栈桥施工成本分析表 表 1

项目	简易栈桥(9m)自重 7.2t,限过 50t					
	时间 (h)	人员	机械	人工费(元) (单价 18 元/h)	机械费(元) (单价 190 元/h)	机械油费、材料费(元) (单价 10L/h、8 元/L)
安放	0.5	2 人	挖掘机 1 台	18	95	40
浇混凝土	6	6	挖掘机 1 台	648	1 140	480
止水带						250
浪费混凝土	采用挖机倾倒两侧仰拱边墙混凝土会产生浪费混凝土现象,每循环约浪费混凝土 1m ³					250
小计				666	1 235	1 020
合计 费用				合计:2 921 元 324.55 元/m		

注:1. 采用两种栈桥施工时,浇筑混凝土时需要的人工相同,为比较方便均不作统计。
2. 简易栈桥安放因基础松软,栈桥跑位导致的车辆颠覆等安全事故产生的经济损失未计。

现场制作成本约为:6 万元;隧道施工完毕即报废,残值约 1.5 万元。
现场施工时,安放栈桥需挖机 1 台,2 名人员配合安放,耗时约 30min。
浇筑混凝土时需挖机 1 台配合浇筑仰拱,耗时约 120min。

4.3 自行式仰拱栈桥施工成本分析(表 2)

自行式仰拱栈桥售价:49 万元/台;
栈桥施工时每循环施工长度:12m;
栈桥 1 人即可操作,耗时 30min;
设计使用寿命 10 年,每次施工更换配件费约 1.5 万,残值约 8 万元。

自行式仰拱栈桥施工成本分析表 表 2

项目	自动栈桥(12m),自重 40t,限过 60t					
	时间(h)	人员	机械	人工费(元) (18 元/h)	机械费(元) (190 元/h)	电费 (1 度/次,1 元/度)
安放	0.5	1 人	无	9	0	1
浇混凝土	8	6	无	864	0	8
止水带						250
浪费混凝土	采用栈桥分别移动到两侧边墙处,采用罐车直接放料,无混凝土浪费现象					0
小计				873	0	259
合计费用	合计:1 132 元 94.33 元/m					

注:1. 采用两种栈桥施工时,浇筑混凝土时需要的人工相同,为比较方便均不作统计。
2. 自行式仰拱栈桥自重大,稳定性好,不会有因基础松软,栈桥跑位导致的车辆颠覆等安全事故。
3. 自行式仰拱无须机械配合进行施工,不会产生因等挖掘机造成的误工现象。
4. 自动栈桥容许下台阶高于填充层 2m 的情况下通车,开挖方式更灵活。

4.4 综合使用成本比较(按每次施工隧道长 1 500m 计算,见表 3)

综合使用成本比较表 表 3

项目(元)	简易栈桥	备注	自行式仰拱栈桥	备 注
采购成本(元)	60 000		141 250	栈桥寿命期内用于 4 条隧道施工,更换 3 次配件共:45 000 元;3 次转场费用:30 000 元,加采购成本 490 000 元,计:565 000 元;每次折算采购成本 565 000/4=141 250 元
施工成本(元)	324.55×1 500 =486 825		94.33×1 500 =142 995	
维护费用(元)	0		20 000	液压油,密封圈,轴承等
减残值(元)	-15 000		-20 000	总残值 80 000 元分摊 4 次,每次 20 000 元
合计	531 825 元		284 245 元	

综上所述:自行式仰拱栈桥与简易栈桥相比具有如下优点:

- (1)虽然一次性采购费用高但综合使用成本大幅降低;
- (2)每循环施工 12m,下台阶开挖更灵活,有利于缩短工程工期;
- (3)安全性高;
- (4)提升隧道施工的机械化水平。

5 结论

(1)通过该栈桥在隧道施工中的应用,掌子面所需要的工装料具可以从栈桥上部通过,减少了开挖施工和仰拱施工之间的干扰;同时,栈桥跨度大,为仰拱施工提供了流水作业工作面;栈桥本身安装方便快捷,行走较为灵活,机械化水平较高,这些都有利于加快隧道施工速度,特别是在隧道较长,工期较紧张的情况下,对于保证进度的作用更加明显。

(2)自行式仰拱栈桥与传统栈桥相比,虽然采购价格高,但施工速度快,操作人员少,无须机械配合,综合成本仅为传统栈桥的 25%。

(3)传统栈桥每月可衬砌 100m 底板,自动栈桥每月可衬砌 150m 底板,施工进度上具有巨大的优势。

6 结语

采用自行式栈桥进行隧道仰拱施工,能有效解决隧道施工中开挖、仰拱施工、边顶拱二次衬砌施工各工序之间施工干扰的问题,使隧道施工协调有序进行,充分体现了栈桥法施工工艺优点,大为缩短隧道施工建设工期,因此,该施工工法在隧道施工中具有推广意义。

参考文献

- [1] 陈明源,陈建忠,陈伟清.混凝土设计龄期前受力对强度成长损伤之研究[J].中国台湾“建国科技大学”学报,23(2).
- [2] 胡小弟,孙立军.重型货车轮胎接地压力分布实测[J].同济大学学报(自然科学版),2005,32(11).

大跨径连续梁桥施工监控技术研究

王书涛

(中交三公局第一工程有限公司 北京市 100012)

摘要:介绍了大跨度桥梁监控技术、原理和方法,对各种监控方法的优缺点进行了比较,提出了大跨径连续梁桥施工监控技术的发展方向。对于以后桥梁施工线形控制以及误差估计和参数调整理论的研究有一定的参考意义。

关键词:连续梁 刚构 监控技术 理论

1 前言^[1-3]

随着我国桥梁技术的发展,大跨连续梁和连续刚构以其线形美观、跨越能力强、顺桥向抗弯刚度大、横桥向抗扭刚度大、造价低等优点,被广泛地应用在大跨径桥梁建设中。大跨度连续梁和连续刚构一般采用挂篮悬臂现浇对称施工法,它的基本施工步骤是:当桥梁墩柱结构施工完成后,在主墩顶部浇筑0号块(有时也包括1号块);在0号块上拼装挂篮;浇筑1号块段、张拉、压浆;挂篮前移,立模悬臂浇筑下一梁段、分节段张拉预应力钢索、压浆,依次类推完成其他悬臂浇筑块段;挂篮拆除,浇筑合龙段。合龙段长度一般是2m,合龙顺序是先合龙边跨合龙段,再合龙次边跨合龙段,最后合龙中跨合龙段。

由于受结构设计参数的误差、施工误差、测量误差等的影响,以及施工工艺的复杂性,其成桥目标与设计目标常有较大的出入,因此,必须对大跨径连续梁和连续刚构桥施工进行监控。通过对施工各状态控制数据实测值与理论值进行误差分析、对计算参数进行识别与调整、对成桥状态进行预测及控制分析,以保证结构建成时达到设计所希望的几何状态及合理的内力状态,并保证施工过程中的结构安全。

2 施工监控的内容

大跨预应力连续梁桥施工主要监控项目有:线形控制、应力控制、温度监测,其主要工作内容包括阶段施工前的预测计算、阶段施工过程中的控制测量、实测结果与计算预测结果的偏差分析及优化分析三个方面的内容。

2.1 线形控制

由于连续梁桥和连续刚构桥采用悬臂施工法,每个施工节段的高程,即每个节点坐标位置的变化与偏离,都会造成合龙困难,影响最终成桥线形。为保证桥梁线形符合设计要求,必须在主梁施工过程中进行线形控制。建模时以当前实测数据与理论预拱度值的比值作为原始数据列来预测下个节段的施工预拱度调整比例,提供下个节段梁段的优化后立模高程,以确保成

桥线形与设计相吻合,并通过对线形的控制实现对应力的控制。

2.2 应力控制

应力监测可直接反映桥梁在各种施工状态下的应力水平,是保证结构安全的重要预警措施。在混凝土应力监测中,目前采用钢弦式应变计。但由于各种因素的影响,实测应力值不可能与理论分析值完全一致,两者之间存在着误差。对误差进行合理分析和及时处理,是现场应力监控工作的重要环节。

2.3 温度监测

在大跨连续梁桥和连续刚构桥施工过程中,环境温度的大小和日照温差会影响到结构体系的内力分布,而结构的温度变形还影响到施工中构件的测量精度。温差影响包括季节温差(或年温差)和日照温差,前者使箱梁发生整体的均匀温度变化,一般只对超静定结构起作用而产生附加温度应力;后者由于温度骤然升降,截面各部位温度变化剧烈,形成较大的温度梯度,各纤维层相互约束共同变形,从而在截面上产生温差应力。

在悬臂施工中,桥梁结构是静定结构,理论上温度不会产生应力,而实际测量时有虚应变。为了减小温度的影响,应在温度变化小的早晨测量,但这仍然不能消去温度对测量结果的影响。研究表明,主梁在早晨7点处于最高状态,下午5点处于最低状态,其最大高差40mm;下午5点后,主梁高程逐渐回升,0点与早晨7点最大高差为21mm^[3]。所以,根据温度时间进行线形、高程测量,对其精度影响至关重要。

3 监控原理和方法

对于大跨连续梁桥和连续刚构桥来说,由于先前悬浇的块段具有不可调整性,连续梁桥的结构形式和悬臂浇筑施工特点决定了只能通过对待浇梁段进行状态预测加以调整,梁段一旦浇筑完成,对主梁的挠度不可能再进行任何有效的调整,因此不能像斜拉桥和悬索桥那样可以在全桥浇筑完成后通过调整索力来调整各梁段的高程。

目前大跨连续梁桥和连续刚构桥常用的参数识别和误差调整方面主要采用的方法有:灰色系统理论、卡尔曼(Kalman)滤波法、人工神经网络法、最优施工控制的理论和方法。采用的测试手段主要是用预埋钢弦应变计测定主梁的控制应力,用激光水准仪或电子速测仪等光学仪器测定主梁变形,用热电偶或半导体测量结构温度等。

3.1 灰色系统理论

灰色系统理论于20世纪80年代由我国邓聚龙教授提出,它建立在灰模型与灰因果等原理之上,使数据不断采集、模型不断建立、模型参数不断更新,用模型更新来适应环境变化,以达到所需的控制精度^[4]。

灰色系统模型的主要模型为GM(1,N)。GM(1,N)表示1阶、N变量的微分议程模型。GM(1,N)模型适合于各变量动态关联分析,适合于为高阶系统建模提供基础,但不适合预测用,所以适合预测的模型只能是单变量模型即GM(1,1)^[5]。采用等维灰数递补数据处理技术建立等维灰数递补GM(1,1)模型对灰色GM(1,1)模型进行改进,采用预拱度计算值与对应的有预拱度实测值的差值为处理数据,建立灰色模型。

利用灰色理论建立的模型: