

沪杭高铁

超大吨位转体施工拱桥建造技术

钱桂枫 程 飞 王景全 张琪峰 等 编著

HUHANG GAOTIE

CHAODA DUNWEI ZHUANTI SHIGONG GONGQIAO JIANZAO JISHU

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

图书在版编目(CIP)数据

沪杭高铁超大吨位转体施工拱桥建造技术/钱桂枫
等编著. —北京:中国铁道出版社,2012. 1
ISBN 978-7-113-14070-0

I. ①沪… II. ①钱… III. ①高速铁路—拱桥—转体
施工—中国 IV. ①U448. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 273331 号

书 名:沪杭高铁超大吨位转体施工拱桥建造技术
作 者:钱桂枫 程 飞 王景全 张琪峰 等

策划编辑:熊安春
责任编辑:陈小刚
封面设计:郑春鹏
责任校对:张玉华
责任印制:陆 宁

电话:010-63549495

电子邮箱:cxgsuccess@163.com

出版发行:中国铁道出版社 (100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京铭成印刷有限公司

版 次:2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷

开 本:889 mm × 1 194 mm 1/16 印张:15.5 彩插:2 字数:465 千

书 号:ISBN 978-7-113-14070-0

定 价:80.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

序

转体施工技术是一种较为快捷的桥梁工程施工技术,在特定的条件下具有很大的优越性,甚至会选为必选的施工方案。近几年随着我国高速铁路和高速公路路网逐渐完善,在很多跨越既有交通线的桥梁工程建设中采用了转体施工技术,并且其应用将越来越广泛,转体吨位也越来越大。然而,目前转体施工技术的理论体系与施工规程尚不完善,给设计施工带来了不便和一定的盲目性。

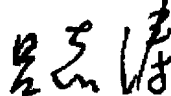
沪杭高速铁路连接上海和杭州两大城市,全线运营长度 202 km,其中 90% 为桥梁工程。在沪杭高速铁路跨沪杭高速公路和跨石大路两座 160 m 大跨拱桥施工中,工程师们坚持科技创新,采用转体施工方式,不仅减少了对高速公路车辆通行的干扰,降低了安全风险,而且大大优化了施工组织设计。该项目的建成创造了拱桥转体跨度、转体吨位的世界第一,在软土地基上建造超大吨位转体施工拱桥也尚属首例,并实现了我国乃至世界高速铁路施工技术的突破,也为我国铁路实施走出去战略提供了新的技术支撑。迫切需要对这一成功技术进行总结提炼,为转体施工技术在桥梁建设中的推广应用提供示范和参考。

我高兴地看到钱桂枫、程飞、王景全等几位同志编著的《沪杭高铁超大吨位转体施工拱桥建造技术》已经完稿,并即将出版。几位作者都是高速铁路桥梁建设的科技工作者,或是在高校从事桥梁工程研究的教师,体现了理论与实践的结合。这是一本优秀的科技书,在这本书中,不仅对高速铁路桥梁转体施工技术进行了全面的阐述和分析,探讨了关键的设计理论问题,而且对沪杭高速铁路 16 800 t 转体施工桥梁进行了技术总结,使转体施工技术



在理论与实践上均得到较大的提升和发展。这本书可使广大工程技术人员对转体施工桥梁的技术问题的认识更为清晰,并从理论高度指导设计施工;在工程技术上,对指导转体施工桥梁的设计和建造很有借鉴和帮助。此外,该书还简介了作者们的若干创新成果,并对高铁桥梁的转体施工技术作了展望。

谨向广大工程技术人员推荐这本书。

中国工程院院士 
2012年元旦

前 言

历经 18 个月的紧张施工和调试,沪杭高铁于 2010 年 10 月 26 日正式通车。沪杭高铁连接上海、杭州两大城市,运营里程 202 km,运营时速 350 km。它是在我国城市群最密集、生产力最发达、经济增长最强劲的长三角核心区域建设的又一条高铁。

沪杭高速铁路具有如下鲜明的特点:(1)设计速度 350 km/h,技术新,系统集成度高。采用的是当前世界最先进的高速铁路技术,牵引供电、自动化控制、系统集成度高。(2)沿线经济发达,城镇规划完善,环境敏感点多,环保、水保要求高。(3)广泛分布深厚软土层,工程地质条件差。(4)桥梁比重高,特殊桥跨类型多。沿线河渠密集,通航河道及高等级公路星罗密布,与高速公路相交有 18 处,跨等级航道 36 处。沪杭高铁桥梁占线路长度比重高达 90%,特殊孔跨有 155 联,有连续梁、道岔梁、刚构、刚架、特殊墩台等多种形式。

针对桥梁的技术特点,沪杭高速铁路因地制宜,采取了技术创新:在沪杭高铁跨沪杭高速公路和跨石大公路两座 160 m 大跨连续自锚上承式拱桥施工中,采用转体施工方式;首次设计并建成了高速铁路跨度最大且孔数最多的 2×135 m 混凝土连续梁。两转体拱桥,在设计、重量、跨度上创出三个世界第一:高速铁路 160 m 自锚上承式钢筋混凝土拱桥跨度为世界第一,软土地基上首次建造 160 m 自锚上承式钢筋混凝土拱桥,单边转体自重为世界同类转体桥梁之最。克服了精度高、技术新,地质复杂等难题,实现了我国乃至世界高速铁路施工技术的突破。

转体施工技术不仅减少了对高速公路车辆通行的干扰,降低了安全风险,而且大大缩短了施工工期,比同类跨度桥梁约节省 6 个月以上的工期,实现了我国乃至世界高速铁路施工技术的突破,为我国铁路实施走出去战略提供了新的技术支撑。



本书系统地总结了沪杭高速铁路两座转体施工自锚上承式系杆拱桥的技术成果。全书共分7章:第1章系统总结了国内外转体施工桥梁技术现状,重点针对高速铁路的技术现状作了评述。第2章介绍了沪杭高速铁路及其转体施工桥梁的工程背景和特色。第3章从工程设计角度介绍了项目的设计要点。第4章介绍了施工过程及技术难点。第5章介绍了转体施工过程中的施工监控技术。第6章介绍沪杭高铁的相关科研项目及成果。最后一章对本工程进行了总结和展望。本书由沪杭客运专线股份有限公司钱桂枫、程飞和东南大学王景全、张琪峰等编著。

中国工程院院士、东南大学吕志涛教授、上海铁路局王峰常务副局长一直热情鼓励编写本书,并在百忙之中给予具体指导。本书成稿阶段得到了中铁第四勘察设计院集团有限公司、中铁十二局集团公司、中铁一局集团公司的领导和工程师们的帮助,本书研究内容是集体智慧的结晶,研究成果离不开各位工程师们的灵感和智慧,笔者表示衷心的感谢!

本书图文并茂,内容丰富,可供从事铁路桥梁科研、设计、施工、建设管理、教育等相关人员参考,也可为国内外同类高速铁路工程借鉴。

目 录

第 1 章 桥梁转体施工发展与关键技术要点	1
1.1 转体施工及其关键技术	1
1.2 国内外桥梁转体施工技术发展现状	8
1.3 转体施工在我国的应用前景及面临的挑战	15
1.4 沪杭高铁超大吨位、超长悬臂桥梁转体施工技术概述	16
第 2 章 工程概况	20
2.1 工程的前期筹划	20
2.2 工程技术标准	21
2.3 工程设计方案的选定	21
2.4 工程管理	22
2.5 主要工程数量	28
第 3 章 工程设计	29
3.1 设计采用及参考规范	29
3.2 软基条件下超大吨位转体施工桥梁设计计算	29
3.3 下部结构设计	33
3.4 转体结构设计	39
3.5 上部结构设计	44
3.6 线形设计	50
3.7 结构抗震、抗风设计	51
第 4 章 工程施工	52
4.1 工程概况	52
4.2 钻孔桩、钢围堰施工	53
4.3 承台与球铰施工	68
4.4 拱圈现浇支架搭设及地基处理	74
4.5 拱、梁、立柱施工	84
4.6 边跨现浇段施工	98
4.7 转体施工	102
4.8 合龙段施工	110
4.9 系杆施工方案	116
4.10 桥面系施工	121
第 5 章 工程监控	122
5.1 概 述	122



5.2	转体前的施工监控	122
5.3	转体过程中的施工监控	125
5.4	施工期常规项目监控	126
5.5	运营期沉降监测	129
5.6	施工监测结果	131
5.7	结 论	132
第 6 章	工程科研	137
6.1	转体施工桥梁下承台计算的新方法	137
6.2	软基地区转体施工桥梁群桩承载机理与沉降控制	149
6.3	转体施工桥梁下承台的设计方法研究	169
6.4	大吨位球铰的设计与计算研究	171
6.5	转体过程中桥梁抗倾覆设计方法研究	190
6.6	拱肋屈曲稳定性研究	197
6.7	转体施工自锚上承式拱桥的顶推力与系杆力计算	202
6.8	基于后期性能的收缩徐变效应、预应力张拉顺序研究	215
第 7 章	工程总结与展望	231
7.1	概 述	231
7.2	软基地区万吨级转体施工高速铁路桥梁施工技术总结	231
7.3	软基地区万吨级转体施工高速铁路桥梁创新设计理论	234
7.4	展 望	236
参考文献	237

第1章 桥梁转体施工发展与关键技术要点

桥梁转体施工是一种无支架的施工方法,在上跨山谷、大河、既有线等桥梁建设中应用具有显著的优越性。转体施工的本质是将桥梁在非原位处进行制造,然后通过转动体系将其旋转到设计位置的一种施工方法。根据旋转的方向不同,转体施工方法主要可分为平转、竖转、平竖转结合三种类型。所谓平转即指桥梁结构仅在水平面内进行旋转,到达设计位置;竖转指结构只在竖面内进行旋转的施工方法,平竖转结合即为上述两种旋转方法的混合。

早期转体施工技术主要用于山区跨越河流或山谷的桥梁,多为拱桥。后经推广及进一步发展,在适用桥型、转体技术、应用范围等方面均有长足进步。我国的转体施工技术起步落后于西方,但发展迅速。据统计,截至目前我国采用转体施工的桥梁总数已位居世界第一。

1.1 转体施工及其关键技术

1.1.1 转体施工概述

转体施工法最早出现的是竖转法,从20世纪40年代就开始在国外使用。如1947年法国修建的一座主跨为110 m的拱桥;20世纪50年代意大利修建了跨径70 m的多姆朗斯河桥。这种竖转法主要运用于中小钢筋混凝土肋拱桥中,而当桥梁跨径增大以后,拱肋过长,竖向搭架过高,转动难以控制。

在竖转法产生大约30余年后,平转工艺开始得到尝试。此后,转体施工技术逐步应用于斜拉桥、梁桥,进一步发展了平转法施工技术。平转法于1976年首次在奥地利维也纳的多瑙河运河桥上运用,该桥为跨度(55.7+119+55.7) m的双塔斜拉桥采用了平转施工,转体重量3 000 t。该桥的成功转体,惊动了世界桥梁界。

我国早期的转体施工桥梁多建于山谷或河流等地。在山区典型“V”形河套上,谷深流急,建桥十分困难。采用常用的施工方法,施工设备与用钢量剧增,费用昂贵,施工安装难度大。而一旦采用转体施工,施工就会方便很多。

为适应山区建桥,1975年我国进行了“拱桥转体施工工艺”的研究,并于1977年完成第一座跨径为70 m的钢筋混凝土箱形肋拱转体施工试验桥——四川遂宁建设桥。其后,转体施工工艺在全国范围内得到推广应用,桥型包括箱形拱、双曲拱、桁架拱、刚架拱、斜腿刚架、斜拉桥、T形刚构、板拉桥、连续梁桥及中承式拱桥等。分别用于跨越河流、铁路、公路以及大型馆堂建筑物。这一工艺对地形的适应也由山区进入了平原,取得了较好的技术经济效益,且施工时不影响通航,不中断通车。

统计表明,截至目前我国采用转体施工的桥梁总数已居世界第一。

当前,我国正进行着大规模的基础设施建设,并且在未来很长一段时间仍将持续,在这大背景下,大量跨线桥适宜采用转体施工技术,但是目前我国对转体施工技术的研究较工程实践相对落后,对一些关键技术的掌握不够,比如球铰制作技术、转体安全监控技术等,同时,工程界尚未形成有关转体施工的设计施工指南,这些理论与技术上的不足制约了转体施工技术的进一步发展。

1.1.2 转体施工基本概念

转体施工概念清晰、施工简便,逐渐受到工程界的认可。下面简要介绍转体施工的几项基本



概念。

1. 转体施工方法分类

转体施工方法分类如图 1-1-1 所示。转体法施工,根据桥梁结构的转动方向,可分为竖向转体法、水平转体法以及竖转和平转相结合的方法,其中以平转法应用最广泛,而近年来更大跨径的桥梁转体则更多的考虑竖转和平转相结合的方法。竖向转体法按其转动方向分为向上和向下两种。水平转体施工可分为平衡转动体系转体施工和无平衡重转体施工方法,其中平衡转动体系施工又可分为结构自平衡体系与需专门配重的转体施工。

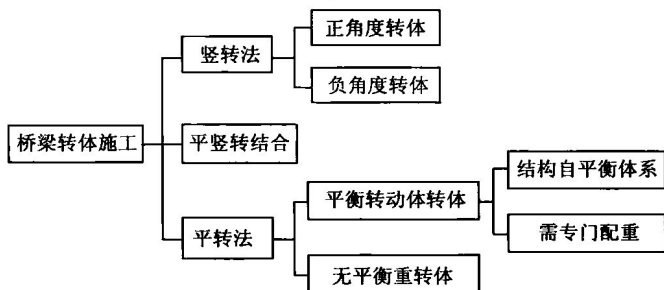


图 1-1-1 转体施工方法分类

(1) 竖转施工方法

竖向转体施工是将桥梁从跨中分为两半,在轴线上利用地形搭设简单支架,在其上组装或现浇拱架也可工厂预制,用浮船运至桥轴线下,在拱脚安装转动铰,铰的摩阻力应尽量减少。同时在岸边搭设索塔利用扣索的牵引力将结构竖向旋转至设计高程,跨中合龙完成结构安装。半跨结构的重力对转铰的力矩是半拱的重量和重力臂的乘积,而扣索力和扣索力臂乘积来抵消重力矩。设法增大扣索力臂就可减小拉索的拉力,竖向转体就是利用这个原理在岸边搭设塔架,来增大扣索力臂,减小扣索力,用较小的动力设备就可以达到转动较重结构的目的。竖向转体的体系布置及转动球面铰构造如图 1-1-2 所示。

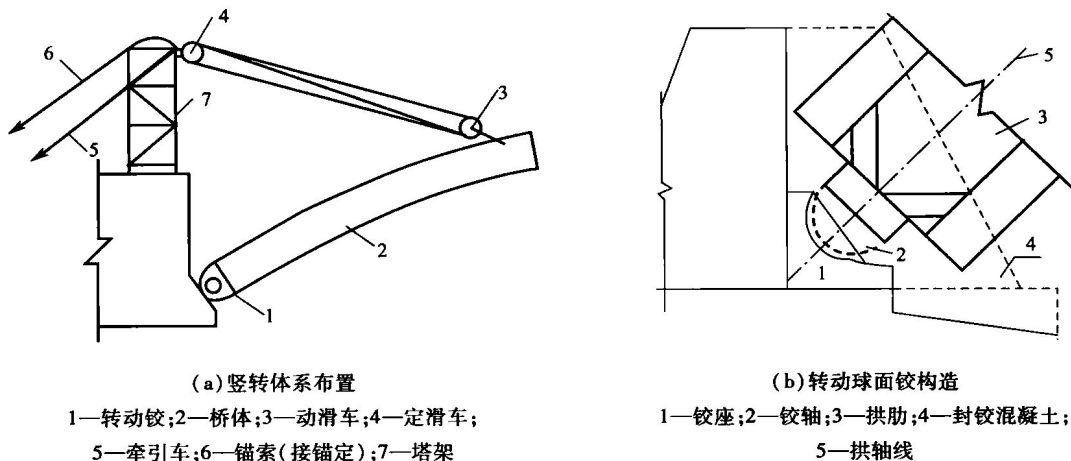


图 1-1-2 竖转施工结构体系布置示意图

除此之外,国外采用了滑模施工,竖直浇筑主体结构,安装机锚系统,将结构向下竖转至设计高程,完成主体结构施工,亦可取得较好的技术经济效益。

图 1-1-3 所示的是贵州珍珠大桥采用竖转法施工。

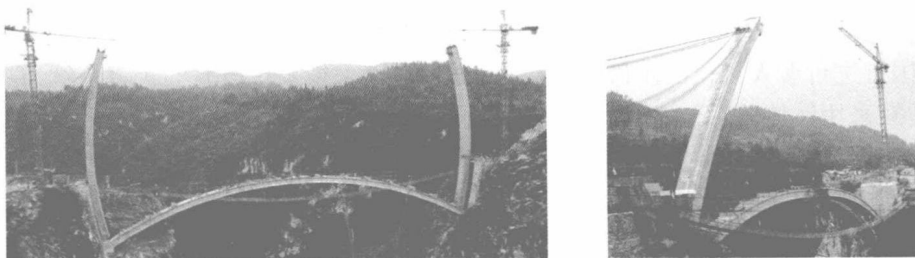


图 1-1-3 贵州珍珠大桥



(2)平衡转动体系转体施工方法

将主体结构分为两个半跨,分别在两岸利用地形做简单支架预制(拼装)主梁结构,利用结构本身及结构用钢组成扣锚体系,张拉扣索使主梁结构脱架。由主梁结构、平衡重、上转盘及扣索组成转动体系(其重心通过转轴中心),借助于预先设置的具有较小摩擦系数的环形滑道,用卷扬机或千斤顶牵引(需要时可增加助推设施),将桥梁结构转至桥轴线就位合龙。

①结构自平衡转体施工

斜拉桥、板拉桥、T形刚构、连续刚构、桁式拱桥、拱梁体系组合梁桥、中承式系杆拱等桥型依靠结构自身就能实现平衡,且结构自身强度完全满足转体施工阶段的受力要求,转动体系较为简单,采用转体施工更为经济合理。采用这种类型进行转体施工的桥梁有山东大里营斜拉桥(图1-1-4)、江西德兴太白桥(图1-1-5)等。

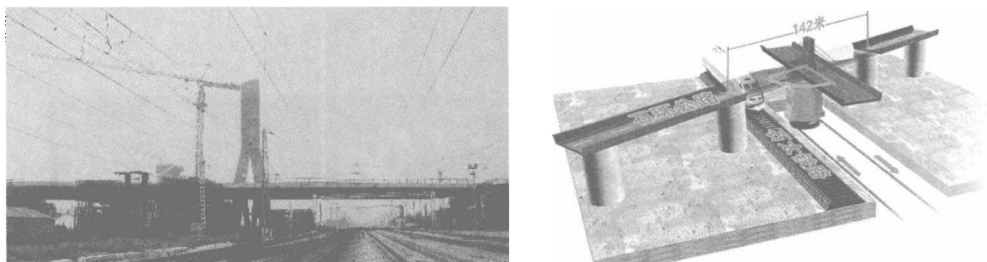


图1-1-4 山东大里营斜拉桥

②需专门配重的转体施工

这种转动体系设计的基本思路是通过调整背墙尺寸或配重把转动体系的重心设计在中心上,利用桥梁两岸的地形,选择合适的角度制作土牛拱胎,搭设简易支架,在支架上组装或浇筑桥梁上部构造。这种类型的转体桥可以做成钢筋混凝土桁架拱、刚架拱、斜腿刚架、双曲拱、箱肋拱或是钢管混凝土桁架拱、钢管混凝土上承式肋拱等桥型。采用这种转体方式施工的桥梁有河东大桥、江西高安樟树岭水库大桥。

(3)无平衡重转动施工方法

无平衡重转体施工利用锚固体系形成平衡体系,节省了平衡转动体系的庞大平衡圪工,再通过转动体系及位控体系的作用,实现结构转动就位合龙。

无平衡重转体施工有锚固体系、转动体系和位控体系组成,如图1-1-6所示。

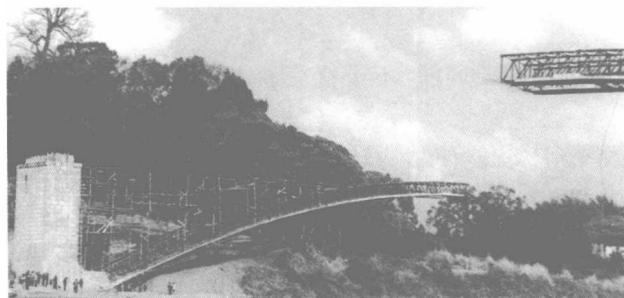


图1-1-5 江西德兴太白桥

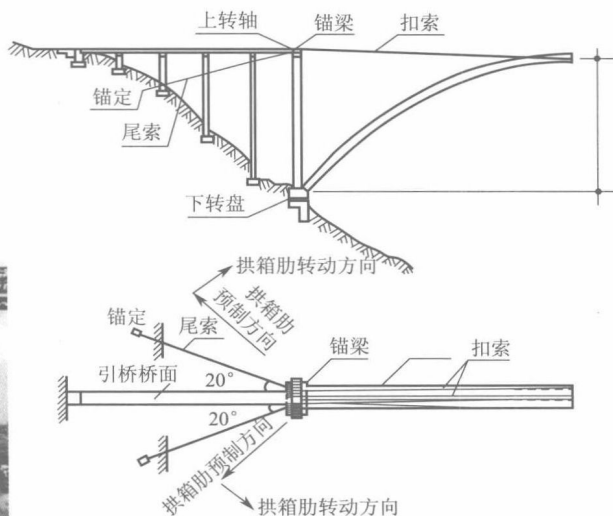


图1-1-6 无平衡重转体示意图



①锚固体系有锚定、尾索、平撑和立柱组成。锚定设与引道与边坡岩层中,锚梁支撑于立柱上,两个方向的平撑和尾索组成三角形稳定机构,使上转轴为一确定的固定点。拱箱转至任一角度,锚固体系平衡拱箱扣索力,从而可省去平衡转动体系的庞大平衡污工。

②转动体系由上下转轴、拱箱和扣索组成。上转轴有埋于锚梁中的轴套、转轴和环套组成。扣索一端与环套相连,另一端与拱箱顶端相连,转轴、环套与轴套间均可转动。

③位控体系。上转盘与下转盘之间设有一偏心值,扣索张拉到设计吨位后,拱箱离架,扣索力产生一个向外的分力,即形成向外自转的力矩。因此,必须在拱箱顶端用缆风索将拱顶拉住。用卷扬机放缆风索,拱箱即可自动向外转体就位。缆风索控制了拱箱转动速度和位置,这就是位控体系。无平衡重转体施工就是利用上下转盘之间的偏心,使得拱架对转铰有一个偏心力矩,这样拱架自动地向河心转动(不考虑摩擦力),节省了吊装设备,简化了施工。1984年,我国进行了“拱桥无平衡重转体施工工艺”研究,结合巫山县龙门桥地形特点,完成了巫山龙门桥 $L=122\text{ m}$ 箱形拱无平衡重转体施工试验桥,如图1-1-7所示。

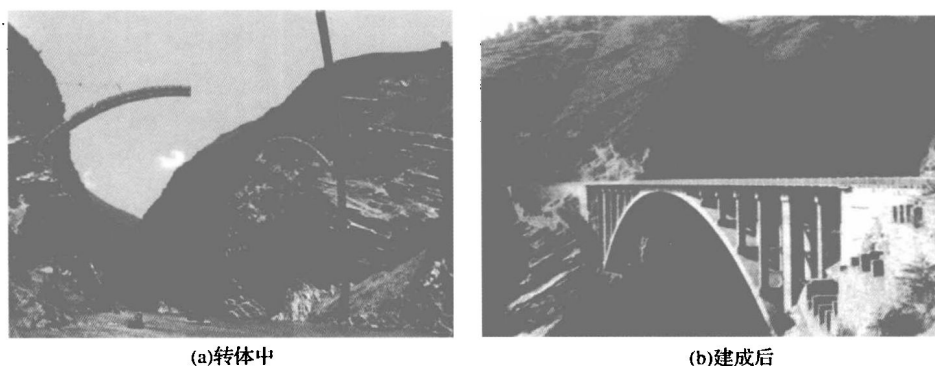


图 1-1-7 巫山县龙门试验桥

(4)平转与竖转相结合

顾名思义,平转与竖转结合综合了平转方法与竖转方法的特点。采用平竖转结合转体施工的桥梁有广东佛山东平大桥(图1-1-8)、广州丫髻沙大桥等。

2. 转体施工特点

(1)转体施工法用桥梁结构本身做成转动体系,充分利用结构本身及结构用钢作施工设施,完全避免了在河道上搭设大量支撑管架,大大减少了钢管等周转性材料的投入,降低了成本。



图 1-1-8 广东佛山东平大桥

(2)改高处作业或水上作业为岸边陆地作业,扩大了施工场地,改变了施工环境和施工条件,施工安全得到了提高。

(3)在航道或车辆频繁的跨线立交桥的施工中可不间断通航、不干扰交通,且当主要构件先期合龙后,能给以后的施工带来方便。

(4)用简单的机械(如手拉葫芦、千斤顶、手摇绞车等)就能使结构转体合龙,且能很好地控制桥梁成型后的线型和外观质量。

(5)转体施工法施工简单快速,有利于加快工程进度,缩短施工周期,直接经济效益十分明显。

例如:兴贤桥(挂篮施工)与北津桥(转体施工)是同期在浒关镇建造的横跨苏南运河的桥梁,其桥型结构、荷载等级、桥宽、桥长等与北津桥基本一致,且由同一个施工队伍中标承建。北津桥主桥与兴贤桥主桥相比,混凝土指标:上部是兴贤桥的78%,下部是兴贤桥的36.8%;钢材指标:上部是兴贤



桥的85.3%,下部是兴贤桥的74.2%;钢绞线指标是兴贤桥的72.3%。北津桥的总造价为676.74万元,兴贤桥的总造价为893.56万元,北津桥总造价是兴贤桥的75.7%。

目前转体施工法已经得到广泛的应用,但是,它还不是最完善的体系。和其他施工方法一样,也存在一些缺点,简述如下。

(1) 施工中钢筋混凝土球缺铰(上、下转盘)的加工制作、磨合等工艺都很繁琐复杂,控制精度对于土建施工而言也很难达到。

(2) 合龙过程中连续千斤顶沿着钢绞线只能上升不能自动下降,当顶升超位,需要把结构高程下调时,必须手工放松夹片,这是非常困难的。一旦控制夹片的小螺钉拉断,要取出夹片就更困难了。

(3) 转体施工结构为了减轻重量、增大跨度,尽量采用轻型结构或劲性骨架,这样很容易使得结构的稳定性降低,所以转体阶段容易出现结构失稳的现象,必须予以关注。

(4) 转体阶段结构容易出现裂缝,尤其是在背墙和拱架等部位,为结构埋下了安全隐患。

3. 转体施工适用条件

(1) 平转法:对于山区的深谷高桥、两岸陡峻及预制场地狭窄的桥位,利用两岸地形搭设简单支架,采用平转施工法具有较大的优越性;对于平原地区的跨线桥施工,特别是桁架桥、刚构桥、斜拉桥等结构自平衡体系,采用转体施工可以将对交通的影响降到最低。

(2) 竖转法:对于季节性河流或河流水深较浅搭设支架不困难的河流,常采用搭设简单支架组拼和现浇拱肋(大田口渡槽、南昌体育馆、三滩沟桥);对于通航河流,也可采用工厂制造,浮船浮运至桥位,拱肋由下向上竖转至设计高程。国外竖转施工常用桥台结构竖向搭设组拼或现浇拱肋的脚手架,拱肋由上向下竖转至设计高程。

(3) 平竖结合法:主要用于平原区。当跨越宽阔河流及桥位地形较平坦时,采用平转法施工难以有效利用地形,宜采用竖转与平转相结合的方法。

4. 转体体系基本组成

(1) 平转法

平转体系主要由转动支承系统、转动牵引系统和平衡系统组成。其中,转动支承系统是平转法的核心。

① 转动支承系统

转动支承是平转法施工的关键部件,由上转盘、下转盘构成。上转盘支承转动结构,下转盘与基础相连。通过上转盘相对于下转盘转动,达到转体目的。转动支承往往必须兼顾转体、承重及平衡等多种功能。按转动支承时的平衡条件,转动支承可分为中心支承、撑脚支承和中心与撑脚共同支承3种。

中心支承,即由中心承压面承受全部转动重量,有时在中心插有定位转轴。为了保证安全,通常在支承转盘周围设有支重轮或承重柱块。正常转动时,支重轮或承重柱块不与滑道面接触,只在有倾覆倾向时才起支承作用。在已转体施工桥梁中,一般要求此间隙为2~20mm,间隙越小对滑道面的平整度要求也越严格。中心支承有钢制体系与混凝土体系之分,其中钢制体系又可分为钢制球铰转盘和钢制平面转盘,如图1-1-9、图1-1-10所示。

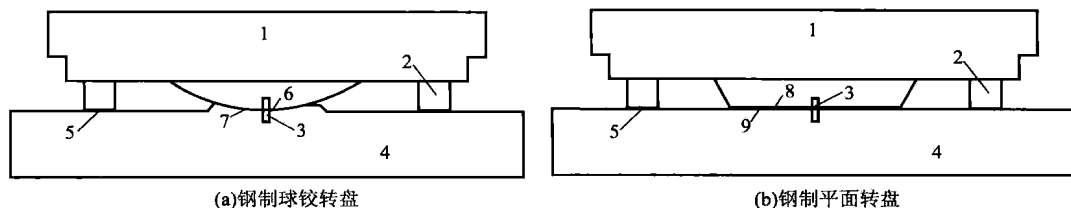


图1-1-9 中心支承的钢制转盘示意图

1—上承台;2—撑脚;3—销轴;4—下承台;5—环道;6—上球铰;7—下球铰;8—上钢板;9—下钢板



第二种转动支承为撑脚支承形式。撑脚支撑形式下转盘为一环道,上转盘的撑脚有4个或4个以上,以保持平转时的稳定。这种形式,转动过程支撑范围大,抗倾稳定性能好,但阻力力矩也随之增大,而且环道与撑脚的施工精度要求较高。撑脚形式有采用滚轮,也有采用柱脚的。滚轮平转时为滚动摩擦,摩阻力小,但加工困难,而且常因加工精度不够或变形使滚轮不滚。采用柱脚平转时为滑动摩擦,通常用不锈钢板加四氟板再涂黄油等润滑剂,其加工精度比滚轮容易保证,通过精心施工,已有较多成功的例子。当转体结构悬臂较大,抗倾覆稳定要求突出时,往往采用此种结构。

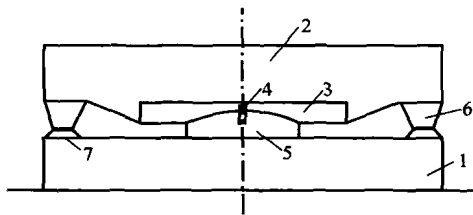


图 1-1-10 中心支承的混凝土转盘示意图
1—下转盘;2—上转盘;3—球铰盘;4—钢制定位;
5—球面铰柱;6—支腿;7—环道

第三类支承为中心与撑脚共同支承。如果撑脚多于一个,则支承点多于2个,上转盘类似于超静定结构,在施工工艺上保证各支撑点受力基本符合设计要求比较困难。广州丫髻沙大桥原采用多撑脚与中心共同受力体系,后考虑到这种困难,减小了中心受压的比例,使其蜕化为撑脚体系。水平转体施工中,转得动转不动是一个很关键的技术问题。一般情况下可设启动摩擦系数为0.06~0.08之间,有时为保证有足够的启动力,按0.1配置启动力。因此,减小摩阻力,提高转动力矩是保证平转顺利实施的两个关键。转动动力通常安排在上转盘的外侧,以获得较大的力臂。转动动力可以是推力,也可以是拉力。推力由千斤顶施加,但千斤顶行程短,转动过程中千斤顶安装的工作量又很大,为保证平转过程的连续性,所以单独采用千斤顶推平转的较少。转动动力通常为拉力,转动重量小时,采用卷扬机,转体重量大时采用牵引千斤顶,有时还辅以助推千斤顶,用于克服启动时静摩阻力与动摩阻力之比的增量。

②转动牵引系统

桥梁转体施工的牵引系统主要有两种。一种是锚定加电动或手动卷扬机滑轮组系统。由于该牵引系统需修筑锚定并灌注相当数量的混凝土,一次性使用后便废弃不用,材料浪费多,且需要较大的施工场地和较大的专用设备投资等。此牵引系统控制精度不高、效率低下,在现代大跨桥梁转体中很少采用。另一种是液压千斤顶牵引系统,随时间发展为间断牵引方法和连续牵引方法。连续牵引避免了因频繁启动、停止而发生的颤动,是牵引转体施工技术的进步。连续牵引系统由连续自动伸缩两台千斤顶和钢铰线索柔性拉杆、自动工具锚以及拉锚器等系统组成。目前桥梁转体的重量和跨径都有增大的趋势,这也为液压千斤顶牵引系统的发展创造了机遇。佛山东平大桥更是成功的应用此技术完成了3000t竖提转体和14800t的平面转体。

③平衡系统

平衡系统是转体施工成败的关键。对于斜拉桥、T形刚构桥以及带悬臂的中承式拱等上部恒载在墩轴线方向基本对称的结构,一般以桥墩轴心为转动中心,为使重心降低,通常将转盘设于墩底。对于单跨的拱桥、斜腿刚构等,可分为有平衡重与无平衡重转体两种。有平衡重时,上部结构与桥台一起作为转体结构,上部结构悬臂长,重量轻,桥台则相反,在设置转轴中心时,尽可能远离上部结构方向,以求得平衡,如果还不平衡,则需在台后加平衡重。无平衡重转体,只转动上部结构部分,利用背索平衡,使结构转体过程中被转体部分始终为索和转铰处两点支承的简支结构。对于双肋拱,双肋分于两侧,然后向中间转。

(2)竖转法

竖转法主要用于肋拱桥。我国在应用竖转法时,拱肋是在低位浇筑或拼装,然后向上拉升达到设计位置。

竖转体系通常由牵引系统、索塔、拉索组成。竖转的拉索索力存脱架时最大,因为此时拉索的水平角最小产生的水平分力也最小,而且拱肋要实现从多跨支承于拱架的连续曲梁转化为铰支承和节点处索支承的曲梁,脱架时要完成结构自身的变形和受力转化。

为使竖转脱架顺利,有时需在提升索点安置助升千斤顶。竖转施工方案设计时,要合理安排竖转



体系。索塔高、支架高(拼装位置高),则水平交角也大,脱架提升力也相对小,但索塔、拼装支架受力(特别是受压稳定问题)也大,材料用量也多;反之亦然。在竖转过程中,主要要考虑索塔的受力和拱肋的受力,尤其是风力的作用。

在施工工艺上,竖转铰的构造与安装精度,索鞍与牵转动力装置,索塔和锚固系统是保证竖转质量、转动顺利和安全的关键所在。国内的拱桥基本上为无铰拱,竖转铰是施工临时构造,所以,竖转铰的结构与精度应综合考虑满足施工要求和降低造价。跨径较小时,可采用插销式,跨径较大时可采用滚轴。拉索的牵引系统当跨径较小时,可采用卷扬机牵引;跨径较大,要求牵引力较大,牵引索也较多时,则应采用千斤顶液压同步系统。

1.1.3 转体施工关键技术

桥梁转体施工与其他施工工艺的最大区别在于,要实现桥梁转体“转得动、转得稳、转得准”的目标。为此,桥梁转体施工存在以下几项关键技术:①球铰的设计与施工;②转动体系的布置;③转体施工准备;④转体稳定性控制。

1. 球铰的设计与施工

(1) 球铰材料的开发

转动支承体系中最重要部件就是球铰。目前,最常用的两种球铰类型是混凝土球铰和钢制球铰。一般来说,混凝土球铰适用于小吨位转体,大吨位转体一般都采用钢制球铰。一些高性能混凝土球铰还处于研究阶段,距离实际应用还有很长的路要走。

(2) 转盘结构

我国转体施工所采用的转盘结构,基本上只有两种,即环道与中心相结合的转盘和中心支承转盘结构。

(3) 球铰施工技术

钢制球铰需要加工制作,并现场安装。目前,国内能生产钢制球铰的厂家较少,而且价格昂贵。

混凝土球铰的施工则较繁琐。施工过程中,除了加强现场管理、严格控制质量外,还参照转体工艺流程对重要部位和关键工序的施工制定了技术对策。混凝土球铰施工要点主要有以下两点:

①研制母线板,准确浇筑球铰转动轴。

②涂油细磨,提高球铰表面圆顺光滑度。

2. 转动体系布置

转动系统由牵引及助推系统、防过转及微调系统、测量系统等构成。转体施工设备采用全液压、自动、连续运行系统。

采用电动分离式油压千斤顶作为转体动力装置,除了可以直接在压力表上读取转体作用力值外,还能克服采用卷扬机、普通千斤顶作转体动力装置,转体过程中作用力大小无法准确测量控制、作用力不易保持平衡、加载难以保持同步进行,桥梁转体到位后中心及顶部高程容易出现偏差,接正合龙前尚须用。大吨位千斤顶、卷扬机、导链等机具体进行纠偏的缺陷,对桥梁尤其是高重心桥平稳转体具有明显功效。

3. 转体施工准备

转体施工的关键构件就是承载整个转动体重量的转动球铰,而转动球铰摩擦系数的大小直接影响着转体时所需牵引力矩的大小。在施工支架完全拆除后以及在转体过程中,转动体的自平衡或配重平衡又对施工过程的安全性起着至关重要的作用。

转体桥梁在沿梁轴线的竖平面内,由于球铰体系的制作安装误差和梁体质量分布差异以及预应力张拉的程度差异,可能导致桥墩两侧悬臂梁段质量分布不同以及刚度不同,从而产生不平衡力矩。为了保证桥梁转体的顺利进行,及时为大桥转体阶段的指挥和决策提供依据,有必要在转体前进行转动体称重试验,测试转动体部分的不平衡力矩、偏心距、摩阻力矩及摩擦系数。

4. 转体稳定性控制

转体桥梁的稳定性控制包括两方面:一是转动体的倾覆稳定性控制;一是拱肋屈曲稳定性控制。



(1) 转动体倾覆稳定性控制

在施工支架完全拆除后及在转体过程中,转动体的自平衡或配重平衡对施工过程的安全性起着至关重要的作用。施工支架拆除后,转动体的平衡体系将出现下列两种情况中的一种:转动体球铰摩阻力矩小于转动体不平衡力矩;转动体球铰摩阻力矩大于转动体不平衡力矩。当转动体球铰摩阻力矩小于转动体不平衡力矩时,意味着支架拆除后,转动体部分在自身的不平衡力矩作用下发生转动;当转动体球铰摩阻力矩大于转动体不平衡力矩时,意味着支架拆除后,转动体部分在自身的不平衡力矩作用下不能发生转动。为了保证桥梁转动体形成整体后拆架过程中的安全和转体过程的顺利进行,及时为大桥转体阶段的指挥和决策提供依据,有必要在转体前进行转动体称重试验,测试转动体部分的不平衡力矩、偏心距、摩阻力矩及静摩擦系数。

所以,在桥梁转体施工中,尤其是在转体重达万吨以上的桥梁施工中,为了确保转体过程的安全性,及时为大桥转体阶段的指挥和决策提供依据,有必要在转体前对转动体部分的不平衡力矩进行测试。

(2) 拱肋屈曲稳定性控制

拱肋的屈曲稳定性一向都是拱桥施工中的关键技术问题,而当采用转体施工,这个问题又进一步被强调。长期以来,对拱的稳定性研究都只限于光滑的理想拱轴线(圆弧拱、抛物线拱或悬链线拱)的状态,而实际上理想拱轴线在拱桥的施工过程中几乎不可能实现。转体桥为了实现自重轻,施工方便,往往采用薄壁结构,从而使得桥梁整体在转动过程中和二期荷载施加过程中的稳定安全问题显得突出。

特别是对钢箱薄壁截面拱肋,主拱在合龙前后容易发生加劲肋板及侧板的局部屈曲,合龙后的二期混凝土浇筑时,由于刚浇筑的混凝土没有任何承载力,纯粹以自重荷载的形式施加在薄壁箱形拱圈上,加之转体桥施工应用范围主要在高山深涧之中,无法做有效支架。这些不利因素导致二期混凝土加载过程中,桥梁可能发生平面外屈曲。

实际施工中,拱肋稳定性可以通过计算和施工监控来保证。首先,要通过有限元程序进行施工全过程的受力分析,确保在计算上拱肋稳定性满足要求。然后在施工过程中进行施工监控,当出现变形异常或明显屈曲,则应当立即停止施工,商讨解决办法,采取适当的处理措施保证拱肋稳定性后再进行施工。

1.2 国内外桥梁转体施工技术发展现状

1.2.1 国外转体施工桥梁调研

转体施工法最早出现的是竖转法,从20世纪40年代就开始在国外使用。如1947年法国修建的一座主跨为110 m的拱桥;20世纪50年代意大利修建了跨径70 m的多姆朗斯河桥。这种竖转法主要运用于中小钢筋混凝土拱桥中,因为当桥梁跨径增大以后,拱肋过长,竖向搭架过高,转动很难控制。

在竖转法产生大约30多年后,才在竖转法的启迪下开始了平转工艺的尝试。后来又将在转体施工技术应用于斜拉桥、梁桥,进一步发展了平转法施工技术。平转法于1976年首次在奥地利维也纳的多瑙河运河桥上运用,对跨度为(55.7+119+55.7) m的双塔斜拉桥采用了平转施工,转体重量3 000 t。该桥的成功转体,惊动了世界桥梁界。

此后,法国、德国、日本、比利时等国家开始采用此法,并相继修建了斜拉桥、T构桥、钢桁架桥、预应力连续梁桥和拱桥等桥型的桥梁,迄今为止,转体重量最大的是1991年在比利时修建的本·艾因桥(图1-2-1),该桥为斜拉桥,跨径布置(3×42+168) m,转体重量达1.95万t。表1-2-1所示的是国外部分采用转体施工的桥梁。

1.2.2 国内转体施工桥梁调研

1. 国内转体施工桥梁发展现状综述

为适应山区建桥,1975年我国进行了“拱桥转体施工工艺”的研究,并于1977年完成第一座跨径



为70 m的钢筋混凝土箱形肋拱转体施工试验桥——四川遂宁建设桥。其后,转体施工工艺在全国范围内得到推广应用,桥型包括箱形拱、双曲拱、桁架拱、刚架拱、斜腿刚架、斜拉桥、T形刚构、板拉桥、连续梁桥及中承式拱桥等。分别用于跨越河流、铁路、公路以及大型馆堂建筑物。这一工艺对地形的适应也由山区进入了平原,取得了较好的技术经济效益,且施工时不影响通航,不中断通车。

转体施工技术在斜拉桥和刚构桥中的应用,使其从山区推广至平原,尤其是跨线桥的施工。例如,1980年四川金川县的曾达桥(图1-2-2),独塔斜拉桥,转体重量1 344 t;1985年江西贵溪跨线桥(斜脚刚构桥,转体重量1 100 t);1990年四川绵阳桥(T构桥,转体重量2 350 t);1997年山东大里营立交桥(刚性索斜拉桥,转体重量3 040 t);1998年贵州都拉营桥(T构桥,转体重量7 100 t)。

20世纪70年代末80年代初我国平转法施工的拱桥,跨径均在100 m以下,且均为有平衡重转体施工。为解决大跨径拱桥转体重量大的问题,四川省交通厅公路规划设计院从1979年开始了“拱桥双箱对称同步转体施工工艺”研究(又称为无平衡重转体施工),并于1987年成功地进行了跨径为122 m的四川巫山龙门桥试验桥(图1-2-3)施工。1993年德兴太白桥采用该法转体成功,使我国拱桥的跨径首次跃上200 m大关。

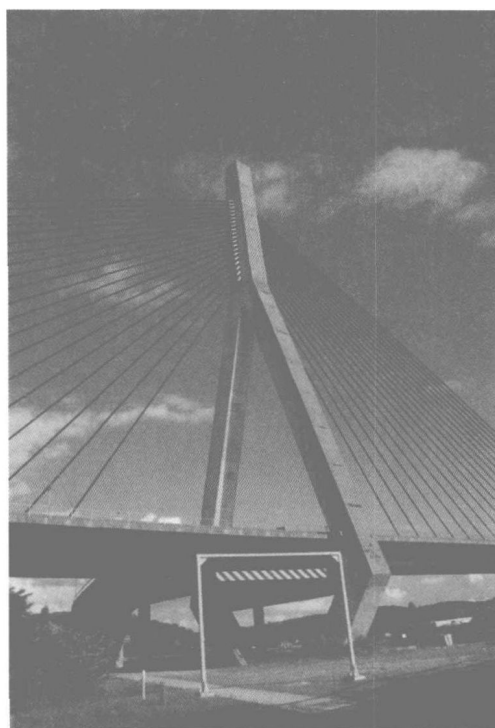


图1-2-1 瑞士 Ben-Ahin 桥

表1-2-1 国外部分转体施工桥梁

修建年份	桥址	桥型	桥跨(m)	转体方式	吨位(t)
20世纪40年代	法国某桥	拱桥	110	竖转法	
20世纪50年代	意大利多姆朗斯河桥		70	竖转法	
1976年	奥地利多瑙河运河桥	双塔斜拉桥	119	平转法	4 000
1981年	法国 Gilly 桥	斜塔斜拉桥	67 + 103	平竖转结合	
1982年	法国 Melan 人行桥	双塔斜拉桥	79		
1982年	法国 hof 桥	双塔斜拉桥	79		
1986年	德国 Argentobel 桥	拱桥	150	竖转法	
1991年	比利时 Ben-Ahin 桥	双塔斜拉桥	128 + 168	平转法	19 500

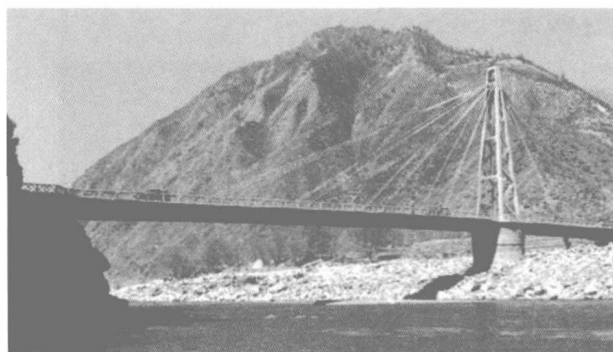


图1-2-2 四川金川县曾达桥



图1-2-3 巫山龙门试验桥