

8-12 转体施工的两座大跨度钢管混凝土拱桥

段美贵 D

U 448.22

【摘要】 本文介绍了三峡工程对外交通专用公路上两座净跨160m、采用转体法施工的钢管混凝土拱桥转体工艺设计、转体结构构造特点、施工全过程监测监控、通车试验以及针对特别细长的拱上立柱所作的压杆稳定模型试验。文中叙述了参与两桥实践的体会并提出了建议。

【关键词】 拱桥 钢管混凝土 转体施工 施工监测 压杆稳定

一、前言

钢管混凝土是由混凝土填入薄壁圆形钢管内形成的组合结构材料,除具有一般套箍混凝土的强度高、重量轻、塑性好、耐疲劳、耐冲击外,还具有一些施工工艺方面的独特优点:

1. 钢管本身就是耐侧压的模板;
2. 钢管本身就是钢筋,它兼有纵向钢筋(受压或受拉)和横向钢筋的作用;
3. 钢管本身就是劲性承重骨架,在施工阶段可能起到轻性钢骨架的作用。

在结构受压杆件中它的承载能力超过钢管与混凝土承载能力的总和。采用钢管混凝土代替钢筋混凝土或结构钢可大幅度地节省钢、木、水泥和减轻自重,改善传统杆系结构的性能。尤其在大跨、重载、高层和抗震结构中能更好的满足设计和施工的要求。理论分析和工程实践都表明,钢管混凝土与结构钢相比,在保持自重和承载能力相同的情况下,可节省钢材50%,与普通钢筋混凝土结构相比,在保持钢材用量相近和承载能力相同的情况下,混凝土和水泥可节省50%。

在土木工程中采用钢管混凝土已有九十多年的历史。早在二十世纪初美国就采用钢管混凝土柱;三十年代末期苏联用钢管混凝土建造了跨度101m的公路拱桥和140m的铁路拱桥;六十年代前后,苏联、西欧、北美、日本等地曾在厂房、高层建筑、立交桥以及特种工程中加以应用,收到良好效果;近年来由于混凝土泵送工艺的发

展,在美国、日本、澳大利亚等国又掀起了采用钢管混凝土的热潮。

我国从六十年代初开始研究钢管混凝土。许多科研单位、高等院校和施工单位先后进行了试验研究和工程实践,取得了明显的成果。1963年成功地将钢管混凝土柱用于北京地铁车站工程,七十年代相继在冶金、造船、电力等部门得到应用,八十年代在多层建筑的框架结构中采用,目前又在向高层建筑和桥梁工程发展。1990年成功地修建了净跨115m的四川旺苍东河系杆拱公路桥。1989年国家建筑材料工业局发布了《钢管混凝土结构设计及施工规程(JCJ01-89)》,1990年中国工程建设标准化协会颁布了国家推荐性标准《钢管混凝土结构设计及施工规程(CECS90:28)》。由于规程的颁布和东河桥的成功,极大地鼓舞了桥梁工作者,最近几年中我国已建成或正在修建的钢管混凝土桥有数十座。

桥梁转体施工是先偏离设计桥位的地方浇注或拼装桥体,然后将其旋转就位。转弯法在起重工作中早有应用,但作为一种桥梁施工方法还只是近三、四十年才有的事。由于它具有一系列突出的优点:

1. 安全可靠,施工中高空作业少,体系内力容易调整控制;
2. 节省施工设备,能充分利用地形条件最大限度地减少以至取消施工支架;
3. 工序简洁,施工迅速;
4. 施工期间不影响桥下交通;

段美贵 铁道部科学研究院西南分院

转体技术

5. 适用范围宽, 拱桥、斜拉桥、刚桥, 甚至梁式桥都有成功的先例。

所以, 这种施工方法一出现就得到了蓬勃的发展。

最早是意大利1959年在修建多姆河桥时采用竖转法, 此后奥地利、德国、法国、日本、丹麦等国都先后采用过转体施工。

我国首次使用转体施工是1977年建成的四川省遂宁县建设桥(70m, 箱形拱), 此后有四川省小金县新桥(45.8m, 桁架拱), 四川省金川县曾达桥(37+68m, 斜拉桥), 贵州省瓮安县鲤鱼塘大桥(80m, 双曲拱), 湖南省洞口县洪溪桥(40m, 刚架拱), 江西省贵溪县跨线桥(38.6m, 斜腿刚构, 跨越铁路), 四川德阳立交桥(43m, T形刚构, 跨越铁路)等数十座桥梁采用了转体法施工。截止1995年底, 国内采用有平衡重转体施工重量最大的是广西省钦江大桥(100m, 钢筋混凝土箱形拱, 转体重量3003t), 采用无平衡重转体施工的最大桥梁是四川涪陵乌江桥(200m, 钢筋混凝土箱形拱)。

三峡工程为了给建筑大坝运输材料, 在已有坝区公路的基础上修建了由夜明珠至乐天溪的对外交通专用公路, 该路为低山丘陵区重载准一级公路, 黄柏河特大桥和下半溪特大桥都是这条专用公路上的重点工程, 并称“两桥”。

在兄弟单位的支持和帮助下, 我院参与了两桥的工作, 取得了一些经费。在此基础上我院向部申报了C类课题: 《大跨度钢管混凝土拱桥转体施工的试验研究》。在课题中我们进行了‘转体结构及工艺设计’, ‘钢管混凝土压杆稳定模型试验’, ‘施工过程监测监控’, ‘下半溪特大桥静动载试验’等工作。现将课题主要工作简述如下。

二、设计

两桥设计由铁道部第一勘测设计院主持。受铁一院委托铁道部科学研究院西南分院承担了转体施工的结构和工艺设计。1993年4月我院开始

介入两桥设计工作, 6月完成方案设计, 8月完成技术设计, 94年4月完成施工设计并在转体施工全过程中派员配合。

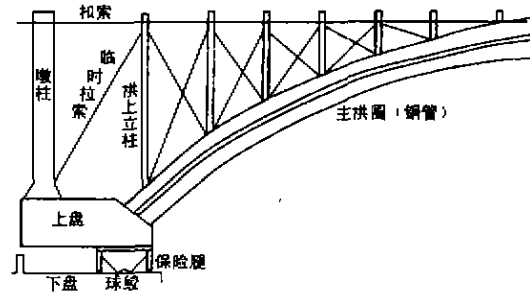


图1 转动体系示意图

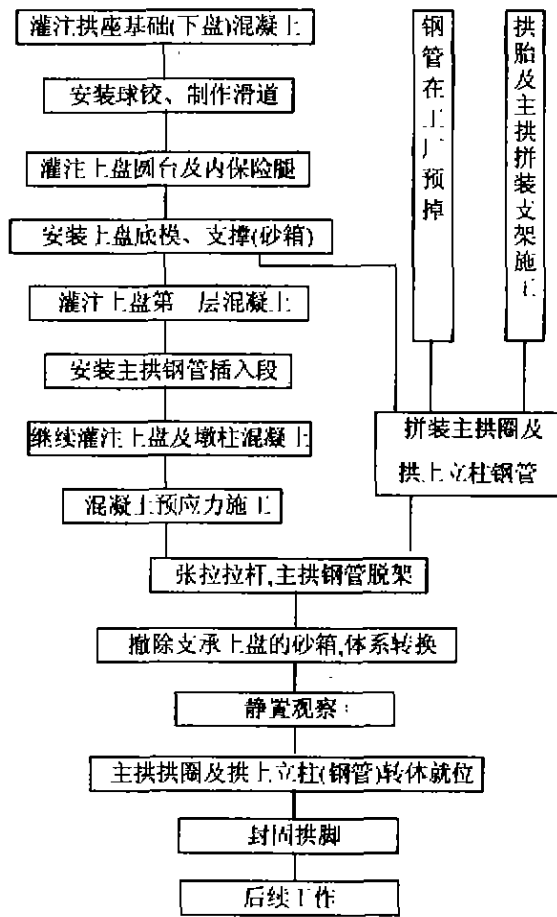


图2 施工工艺流程图

1、设计及施工概况

两桥主跨均为净跨160m的上承式钢管混凝土无铰拱, 矢跨比1/5, 桥宽18.5m, 设计荷载汽—36, 挂—250。

主拱圈采用钢管混凝土结构, 有4片哑铃形拱肋, 各肋中心间距4.5m。每片拱肋大部分由两

转体技术

个外径1.0m的钢管加上两块钢腹板焊成全高2.5m的哑铃形,从2号立柱处开始加高腹板,至拱脚处哑锥全高增加至2.9m,此即通常所说的大脚拱。各片拱肋之间设钢管混凝土横撑,拱上立柱采用15组四柱排架式钢管混凝土结构,柱顶现浇钢筋混凝土横梁,架设钢筋混凝土筒支大孔板梁。两桥的孔跨布置和结构形式基本相同,主要区别在于黄柏河桥有3.2%上坡,以正拱斜梁方式而置,下牢溪桥是平坡。

两桥地形亦有相似之处。一岸稍缓,设数孔20m筒支钢筋混凝土T梁作引桥,另一岸十分陡峻,坡面几近竖直。下牢溪为典型的U形峡谷,桥面至河底高差132m。黄柏河桥较低,拱脚接近水面,水面宽145m,水深15~18m,常年通航。这样的条件很难用常规的方法施工,经过比较决定两桥主跨均采用有平衡重的平转施工法。

主拱钢管在工厂作成长10m左右的节段用汽车运至工地,分成两个半拱,分别在两岸拼装成型。一岸利用引桥桥墩并搭设简单支架作拱架,另一岸利用地形开挖山石形成拱胎。拼装好的半个主拱连同球铰、上盘、墩柱、扣索一起组成平衡的转动体系,通过牵引系统将它们水平旋转至设计桥位。为了减少高空作业,拱上立柱钢管和柱顶横梁模板的支架也预先装好,连同主拱钢管一起转出。转体到位后的两个半拱在跨中焊上合拢段,此后封固上下盘,撤除扣索,即形成有很大承载能力的空钢管主拱圈。后续工作均在成拱的空钢管上进行。钢管安装完毕后,向钢管和钢腹板内部泵送混凝土,形成钢管混凝土结构。

本文不拟叙述两桥施工的全过程,仅将与转体施工有关的工艺流程列出如下:

由于一座桥在坡道上另一座桥在平坡上,两桥四个转动体系有三种不同的尺寸,以黄柏河桥右岸(三斗坪端)最重,最高。其转体总重3758t,山下盘全混凝土墩柱顶面高37.69m,至1号立柱顶面40.37m,体系重心高14.2m。

黄柏河桥主拱于1996年1月31日转体。左岸

转体 180° ,右岸转体 111.5° 。9:55左岸启动,12:24转体到位。10:30右岸启动,13:00转体到位,总历时3小时05分。转体时风速 1m/s ,转体到位后,尚未安装临时连接螺杆期间,有短时风速达 4m/s 。

下牢溪桥主拱于同年2月8日转体。左岸转体 125° ,右岸转体 180° 。9:48右岸启动,10:26左岸启动,至13:18两岸先后转体到位,总历时3小时30分。其间因撤除障碍物有一些间歇,转体时风速 1m/s 。

主拱转体到位后用螺栓将两个半拱临时连接起来,然后放入拱顶插入段,电焊连接。

2、转体结构构造特点

在有平衡重的平转施工中,转体结构大体可以分为球铰体系和环道体系两类。两桥采用球铰体系。本文仅叙述与通常的球铰体系的不同之处。

(1) 球铰

球铰山下盘的球凸和上盘的球盖组成,参照国外经验,设计时球凸平均应力控制在 10MPa 以内。两桥的球铰与通常的作法不同,球凸和球盖都设置了钢球壳。球壳用整块钢板在工厂精密镗压成型并加压磨合,专车运至工地,对号入座。球凸钢壳同预埋在下盘的大直径钢管焊接,混凝土从球凸中心附近两个直径 8cm 的孔灌入,灌入混凝土后敲击检查,对不密实处压浆充填。

球铰未设中心轴。设计的球铰从构造上已可以阻止体系平移,况且不能预期转体到位时拱顶标高恰好毫厘不差,不设中心轴便于转体到位对拱顶标高进行微调。事实上转体到位后正是用千斤顶顶动上盘作了这种微调。

(2) 上盘

上盘由倒锥体、园台和块体组成。上盘与球铰接触处设倒锥体以便分散球铰应力,倒锥体与上盘块体之间有一个不高的园柱以便缠绕牵引钢绞线,上盘块体是一个 $9.50 \times 16.00 \times 4.67\text{m}$ 的截角六面体。倒锥体和园台使上下盘之间形成了操

转体技术

作空间。上盘受力十分复杂,设计时进行了有限元分析。原来设想在上盘混凝土浇注时先留出缺口,然后将主拱钢管插入,但应力分析表明这种缺口集中且不便处理,故改为在浇注上盘混凝土时将一段拱肋钢管埋入,形成嵌固紧密的拱脚,并在拱脚钢管内填充混凝土使上盘形成整体。为减小上盘混凝土的拉应力,在顺桥向和横桥向都设置了临时的预应力钢绞线。

(3) 墩柱

块体上的混凝土柱既是永久结构的桥墩,也是转动体系中承受扣索拉力的背墙,称为墩柱。最高的墩柱是黄柏河桥右岸的5号墩,为适应扣索布置和张拉操作,在体系转动时5号墩并没有修到顶,但它的高度也有31.77m。在强大的扣索力作用下,其根部弯矩达 $1.2 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 。为此设计成两根独立的单箱双室预应力混凝土空心封闭结构。转体合拢放松扣索后撤消预应力,回收钢绞线。墩柱空箱内根据需要注水以调整体系的平衡。墩柱较粗,并倒圆角,使主跨和引桥形成分隔以利美观。

墩柱除考虑自重和扣索力按一般的预应力混凝土压弯构件计算外,其根部连同上盘块体一起进行了有限元分析。

(4) 扣索

扣索用16根直径32 mm的冷拉IV级精轧螺纹钢组成。每片拱肋4根。前端锚在主拱钢管拱顶附近特制的结构上,后端穿过墩柱顶部进行锚固。

扣索力的大小和位置按下列原则决定:扣索放松时在拱顶产生的推力和弯矩与同样结构搭架施工在拱顶产生的内力相同,拱轴线形符合设计要求。

(5) 抗倾保安措施

两桥的转动体系既重又高,悬臂又长,因此设计时对它的抗倾稳定性十分重视。尽管设计要求转体时的风力应在4级以下,还是按6级风进行了验算。并且在构造上采取了多重保安措施。首

先是从上盘的转动台下伸出6个保险腿,在下盘相应位置铺设一圈钢板,二者相距1cm。这种保险腿很坚固,万一转体时转过了头,还可以用千斤顶水平顶动保险腿使体系复位。第二,以球铰为中心,6.5m为半径埋设了多个钢管混凝土柱作为外圈保险腿,它保证转动体系绝对不会向侧面或后面倾作倒。第三,要求施工单位制作几个可移动的钢管混凝土柱作为临时保险腿,配备大吨位千斤顶以备需要。从实践来看,外圈保险腿似可取消,尽管两桥转体很平稳顺利,其它保安措施还是必要的,以便作到有备无患。

(6) 牵引体系

两桥的牵引体系没有采用通常的‘钢丝绳—滑车组—卷扬机’,采用了‘自动连续张拉千斤顶—钢绞线’,这种自动连续张拉千斤顶本来是为混凝土梁顶推施工设计的,把它用在转体施工中十分有效。它的牵引力大,动作连续,增加了转体过程的平衡性。特别是它占用场地很小,这次把它放在上下盘之间的空隙中,化解了本来十分困难的牵引绳布置问题。

3. 几个计算问题

转动体系的结构应力、变形、抗倾平衡、转体牵引力等计算按通常的方法进行,已为大家熟知,本文不拟赘述。这里只谈几个特殊的问题。

(1) 平稳性计算

在转体安全性验算中,往往只注意到支承在某点的抗倾平衡,而忽略了结构沿球铰面滑动的稳定性。我们把这种滑移稳定性称作转动体系的平衡性。

若要转动体系平稳,略去各影响因素的高阶微量后,必须下式成立:

$$P \cdot e \leq T \cdot R$$

式中: P ——转动体系重量

e ——各种力产生的总偏心

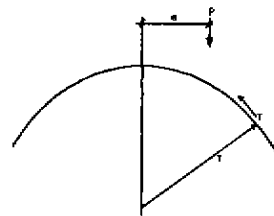


图3

转体技术

R——球铰弧面半径

T——摩擦阻力 $T \approx f \cdot P$

f——摩擦系数

由上式可得,体系平衡的条件是: $e \leq f \cdot R$

按照这个要求,摩擦系数越高越好,球铰半径越大越好,这同转动灵活、牵引力小的要求相矛盾,因此要综合考虑,合理设计。

按两桥选用的参数验算,重心偏移的允许值达分米级。实践中两桥四个转动体系在转动过程中十分平稳,未发生过保险腿触地的情况。

(2) 拱胎空隙

当体系转出时,靠山侧的拱肋有相对于拱胎的位移,需要一定的空隙,否则将妨碍体系转出。所需空隙的大小与桥宽、肋底线型和坐标位置有关,这次编了一个小程序进行计算,拱顶附近只需几毫米,在2号立柱附近就达到米级。

(3) 稳定及振动计算

在转动体系在拱肋悬出很长且受力较大,为确保施工安全,对其进行了稳定性分析。其控制阶段为扣索已经张拉到设计吨位、拱肋脱离拱胎或支架,至安好主拱合拢段。

半拱结构在体系施工中的稳定问题除按传统方法计算外,还采用了有限元法求解。尽量模拟实际结构对模型简化,拱肋钢管及横梁采用管单元,哑铃的腹板用板单元,扣索拉力,拱上立柱和主拱自重均化为等效节点力,并考虑了横桥向的风力,采用自动载荷增量法平衡迭代求解,得到非线性屈曲分析结果。计算结果 $K=4.5 > 4.0$,满足结构在转体施工阶段对稳定性的要求。

从现场情况看,扣索张拉到设计吨位后,拱肋脱空放置了近两个月,一直到安全转体就位,经历了时间、气候、风载等不利因素地考验,证明了计算结果的可靠性。

还用有限元法按空间结构进行了动力分析。实践也证明,在转体过程中几乎观测不到结构的振动。

三、施工过程监测监控

对两桥施工中的关键环节,从基础施工、主拱转体、直至泵送混凝土进行了全过程监测,并及时将监测结果反馈给施工单位,以采取针对性的措施。

1、转体合拢前的监测

(1) 上盘混凝土水化热及应力

上盘是一个大的块体,体积逾 600m^3 ,而且混凝土强度较高,水泥用量大,施工初期的混凝土水化热对结构有很大影响。第一个块体浇注时测得内部温度达 59.6°C ,与气温相差 45.2°C 。尽管采取了一些措施仍出现了表面裂缝。后进一步改进工艺措施,其余三个块体未再出现表面裂缝。

在扣索张拉,体系转动等过程中监测了上盘应力,未见异常。

(2) 球铰应力

在黄柏河桥右岸球凸内预先埋设了四个可作长期观测的钢弦式应变计,测得在扣索张拉前的应力为 $5.74\text{MPa} \sim 6.83\text{MPa}$,扣索张拉并将上盘支架卸除后为 $9.07\text{MPa} \sim 10.05\text{MPa}$,与计算值基本相符。

(3) 墩柱应力

在施加墩柱预应力、扣索张拉,转体前后监测了墩柱应力,施加预应力使混凝土产生的压应力比计算值稍大,其它工况未测到混凝土拉应力。

(4) 扣索应力

扣索拉力至关重要,是两桥各种应力监测中的重点,因此每一根扣索都设置了应力测点。当扣索张拉时除用千斤顶油表压力和扣索引伸量进行控制外,还用扣索应力作为控制措施。由于16根扣索需要分级分批张拉,后拉的扣索将使先拉的松弛,扣索引伸量不能反映这种变化,油表读数的变化很小,因此实际上扣索张拉力的调整主要是通过应力监测来控制的。

转动体系脱架静置期间和转体过程中都监测了扣索应力,变化甚微小。

(未完待续)