

# 转体施工的两座大跨度钢管混凝土拱桥(续)

段美贵

U 447.22

**【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

(续上期第12页)

## (6) 结构变位

结构变位测量是施工中的常规工作, 不必赘言。两桥还在扣索张拉和上盘支架卸除时用仪器监测了上盘块体和拱肋前端的变位, 以策安全。

在转体过程中追踪测量了拱肋前端的变位, 无振动现象。

拱肋脱架后静置期间观测了由于日照使拱肋前端产生的位移。在室外阳光强烈, 室内温度 $10.0^{\circ}\text{C}\sim 19.4^{\circ}\text{C}$ 时, 测得拱肋前端竖向位移、横向位移均有数厘米。

## 2. 泵送混凝土过程中的监测

### (1) 拱肋变形

拱肋变形在每片拱肋的左 $L/4$ 、拱顶、右 $L/4$ 三个位置设控制点, 全桥12个测点, 两桥共24个测点。

首先, 我们对拱肋在各个施工工况下的变形用有限元法进行了分析计算。计算控制截面如下: 左拱脚(宜昌)、 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 、 $L/2$ 、 $5L/8$ 、 $3L/4$ 、 $7L/8$ 、右拱脚(三斗坪侧)。

计算时, 对成拱并达到70%强度的混凝土, 考虑其与钢管一起共同起作用; 其余(未达到70%强度和达到强度但不成拱)的混凝土, 考虑其为作用在拱肋上的均布荷载处理。

随着拱上的加载, 拱肋各控制点的变形值都有不同程度地增加, 且表现为负变形。从实测结果与理论计算结果的对比来看, 实测的最终变形

值比理论计算值偏大, 特别是拱顶变形, 但中间几个工况的变形值却比理论计算值偏小。从现场和理论分析的情况来看, 我们认为主要有以下几点原因:

- 实际的施工工况与计算工况略有差异;
- 拱上实际施工荷载与计算时采用的施工荷载不一样;

- 计算按理想模型简化, 与实际结构有差异。分段泵送管内混凝土时, 早期泵送的混凝土虽未成拱但达到了一定的强度, 在计算时只把它处理为加在拱肋上的均布荷载, 认为其不起承载作用, 而实际上这部分混凝土是发挥了作用的, 有一些抵抗变形的能力。

- 混凝土计算时采用的重量与实际的差异, 从而影响最终变形值。

尽管实测的最终变形值与计算得到的最终变形值的差异不大, 但为安全考虑, 我们仍利用变形后的拱肋轴线拱肋受力进行了分析计算, 结果是其对拱肋应力分配的影响很小, 故同意按计划继续施工。

### (2) 拱肋应力

对拱肋在各工况下的应力分配也进行了理论分析计算和跟踪监测, 以作为监控施工的依据。同计算变形一样, 也选取了九个控制截面来计算拱肋在各工况下的应力分配。

各工况下实测的拱肋应力变化趋势与计算的拱肋应力变化趋势总体基本一致。但在泵送前(空钢管)时拱肋的应力水平与计算的拱肋应力

## 转体提升

有差异,这种差异影响也反映到拱肋的最终应力水平上。同时由于在计算时结构所作的理想简化模型与实际结构的差异:如对泵送混凝土的作用,成拱前作为荷载处理;以及作的其它简化和假设。计算工况与实际工况的有所差异和对拱上荷载作计算预计与实际上的差异,都造成在各个工况下计算应力增量与实测应力增量的差异。

### 四、局部模型试验

两桥拱上I号立柱长细比都已接近钢管混凝土设计与施工规程中允许的最大限度,为保障桥梁安全、做到设计合理,进行了压杆稳定模型试验以检验其受压承载能力。

按与原桥I号立柱的长细比及套箍系数相似制作了三根钢管混凝土模型进行长柱中心受压试验。作了6个短柱中心受压模型进行试验,以确定钢管混凝土基本性能。并预先进行了钢材和混凝土材料的力学性能预备性试验。这些试验都利用了铁科院西南分院大型结构试验室的设备和MTS试验系统进行全过程实时采样,采集数据三万余组,将采集到的数据通过计算机分析得出结果。

通过对模型试验的分析和对原型承载力的分析,最后得出结论:

1. 模型承载力与CECS28:90的规定值基本相符;
2. 按CECS28:90计算原型的中心受压承载力是合理的;
3. 原型在设计荷载作用下按CECS28:90计算是安全的;
4. 考虑到原型长细比已接近规范允许的极限及施工中的诸多不定因素,原型截面不宜再削减。

### 五、静动载试验

两桥建成后,根据三峡工程开发总公司交通工程部的要求,选择一座桥做通车后的静动载试验,并决定在下牢溪桥进行。我院承担了试验工作。试验分静载试验和动载试验两部分进行。

#### (一) 静载试验

##### 1. 试验项目

##### 1) 主拱拱肋应力(应变)测定

(1) 拱顶截面应力测定;

(2) L/4截面应力测定;

(3) 3L/4截面应力测定;

(4) 拱脚截面(三斗坪侧和宜昌侧)应力测定;

(5) 横撑应力测定

##### 2) 部分拱上立柱应力测定

##### 3) 主拱静载挠度和拱脚水平位移测定。

本桥静载应变测点共80个。

##### 2. 静载试验主要仪器

VCAM-70A静载数据采集系统4台

BQJN-4型桥梁光电挠度仪2台

##### 3. 试验荷载布置

试验荷载分为九种加载工况,各工况针对的结构效应如下:

I. 主拱产生最大水平推力;

II. 主拱三斗坪拱脚截面产生最大负弯矩;

III. 主拱三斗坪侧拱脚截面产生最大正弯矩;

IV. 主拱拱顶截面产生最大负弯矩;

V. 主拱拱顶截面产生最大正弯矩;

VI. 主拱L/4截面(三斗坪侧)产生最大负弯矩;

VII. 主拱L/4截面(三斗坪侧)产生最大正弯矩;

VIII. 主拱三斗坪侧I'号立柱产生最大轴向力;

IX. 主拱三斗坪侧I'号和IV'号立柱产生较大轴力和拱脚弯矩。

#### (二) 动载试验

##### 1. 测点布置

动应变测点共8点,分别布置在主拱2号肋的拱顶、L/4、拱脚(三斗坪)截面的上下缘,及I'—(2)立柱的h/2截面。

## 转体提升

振动测点共4点,将加速度传感器安置在主拱2号肋的L/4(竖向)、拱顶(一竖一横)、3L/4处(竖向)。

### 2. 动载试验主要仪器

MCC—8A动态应仪一台

DAA—110B动态信号分析仪一台

VAQN—500A加速度放大调节器4台

### 3. 试验情况

为测量下半溪大桥动力特性的行车试验共作了12次。由于未能按计划组织试验车辆而拦截过路车辆进行,仅有7次单车通过,一次制动,4次跳车。实际行车速度仅10.3~24.7km/h。跳车试验是在拱顶和L/4处放置三角形垫木让汽车以一定速度越过,实际上只以极低速度越过,致使跳车信号不明显。

#### (三) 试验结果

1. 在试验过程中拱座无位移。

2. 静载试验实测主拱肋各截面钢管应力与计算值相比,绝大多数实测值小于计算值,即多数应力校验系数 $\xi \leq 1.0$ 。有的工况部分测点应力校验系数较大,但计入恒载应力后,结构应力仍在设计强度内。

3. 本桥实测最大挠度发生在I类工况, L/4截面下挠63.8mm,为主拱跨度的1/2508, V类工况拱顶下挠32.3mm,为主拱跨度的1/4954。其余工况下,大多数静载挠度测点实测值都比计算值小。

4. 测得本桥最大冲击系数 $1+\mu=1.249$ ,相应车速24.7km/h。

按JTJ021-89第2.3.2条,钢筋混凝土拱桥 $1+\mu=1.0$ , 160m的钢拱桥 $1+\mu=1.08$ ,本桥为钢管混凝土拱桥,规范无明确规定,实测结果本桥最大冲击系数较上列二种桥型大。

5. 行车试验测得拱顶竖向最大振幅 $\pm 1.8\text{mm}$ (峰—峰值),竖向频率1.34Hz,拱顶横向最大振幅 $\pm 1.2\text{mm}$ (峰—峰值),竖向频率0.34Hz,相应车速20.6km/h。制动试验测得拱顶竖向最大

振幅 $\pm 1.25\text{mm}$ (峰—峰值),竖向频率1.13Hz,拱顶横向最大振幅 $\pm 1.2\text{mm}$ (峰—峰值),频率0.275Hz。横向自振频率0.349Hz。

从试验结果来看,本桥结构应力在安全范围内,竖向刚度较好,横向自振频率偏低,但振幅不大。目前公路规范对于桥梁的自振频率尚无明确规定,综合考虑各种因素,试验结果认为本桥能正常使用。

## 六、体会与建议

### 1、体会

#### (1) 施工方法

根据两桥的实际情况,主拱搭架施工几无可能,悬臂拼装亦有许多困难,因此采用了转体施工法,它使厂制构件的工地拼装焊接工作绝大部分在岸上进行,不仅大幅度减少了高空作业,且易于保证焊接质量。结构转体只需数小时,速度很快。主拱圈形成后用泵送法灌注混凝土,易于保证管内混凝土的密实度,又能进一步缩短工期。二者的结合是大跨度钢管混凝土拱桥较好的施工方法之一,在一定的地形条件或有特定的施工要求时,这种方法有很强的竞争力。

#### (2) 转体速度

公路桥涵施工技术规范(JTJ041-89)第14.8.9条根据以往施工的经验数据规定:悬臂端的线速度不宜大于5cm/min。从两桥四个转动体系的实践来看,悬臂端线速度的平均值最小为100cm/min,最大的170cm/min,是规范规定值的数十倍,仍能作到平稳安全。由此看来,只要构造合理,设备恰当,保安措施得力,此规范值是可以突破的。

#### (3) 钢球壳及牵引设备

精密镗压成型的钢球壳,把最难制造的球铰由工地制造变成了工厂机械加工,精度易于控制,施工方便,安装快捷。

自动连续张拉千斤顶本来是为顶推设计的,用在了转体施工中,它的牵引力大,动作连续,特别是它占用场地很小,这次把它放在上下盘之

## 转体提升

回的空隙中,化解了本来十分困难的牵引绳布置问题。

这两项技术值得在大型桥梁转体施工中推广应用。

### (4) 扣索背墙设置

利用桥墩作为扣索背墙,并作为平衡重,通过墩柱空箱内注水调节平衡是一个可行的方法。但采用临时预应力结构和给箱内注水对墩柱混凝土施工提出了较高的要求。主拱转体到位后还有许多工作要做,若采用临时钢结构作为背墙,用重物调节平衡,转体到位后撤除临时钢结构再来修建墩柱,对工期不会有太大影响,这或许是一个更好的方法。

### (5) 合理的减摩剂

若上下球壳之间的摩擦力太大,转体时将需要很大的转动牵引力,但正如前面分析,如果这种摩擦力太小,又影响转动体系的平稳性,因此需要根据结构尺寸和牵引设备的能力,合理地选用减摩剂。两桥用聚四氟乙烯粉与黄油的混合物作为减摩剂。实践证明是恰当的。

### (6) 转体重量

转动体系的重量应根据实际需要决定,越轻越好,不宜盲目追求转体重量。如确有需要,按目前国内的设备、工艺水平估计,6000t重的体系转体是有可能的。

### (7) 施工监测监控

大桥转体施工的技术含量高,有一定的风险。两桥在关键工序利用自动化程度高的先进仪器进行了实时监测,按监测结果控制施工,及时调整工作力度,改善工艺措施,对保证施工安全起到了很好的作用。把施工检测监控作为专门工作立项进行是正确的,很有必要。

### (8) 主拱合拢

空钢管本身受温度影响产生的变形很大,拱肋脱架后仅由于日照就能使拱肋前端产生很大的变形。为了控制安装应力,除须选择适当的合拢时间外,还需要有良好的接头构造和合拢工艺。

### (9) 转前的准备工作

转体前的准备工作,包括钢结构制造、安装和混凝土结构施工,对转体工作的顺利进展至关重要,这些工作尽管都是在岸上进行的,但由于桥高、跨大、结构复杂,必须仔细进行。

### (10) 计算模型

分段泵送管内混凝土时,早期泵送的混凝土虽未成拱但达到了一定的强度,实际上有一些抵抗变形的能力,如果在计算时只把它处理为施加在拱肋上的均布荷载,认为其不起承载作用,这样的计算模型与实际结构有差异,有必要作进一步改进。

(11) 钢管混凝土结构和转体施工方法可以用在铁路桥梁中

铁路与公路相比,其最大的特点在于活荷载大,而“两桥”的活荷载已超过单线铁路,跨度亦已具有相当规模,“两桥”的实践证明,钢管混凝土结构和转体施工方法可以用在铁路桥梁中。当然,若要在铁路桥梁中推广,还需在改善结构振动特性,改进结构细节等方面做一些工作。

## 2、建议

(1) 修改公路桥涵施工技术规范(JTJ041-89)第14.8.9条,根据实际情况放宽对转体速度的限制;

(2) 收集施工经验,确定控制转体平稳性的指标;

(3) 研究钢管混凝土早期(0~28d)的应力—应变关系,以助于设计和有效地进行施工控制;

(4) 选择适当工点,在铁路桥梁工程中试用和推广钢管混凝土结构和各种转体施工方法。

(全文完)

注:本文原载于铁道部科学研究院西南分院建院四十周年《学术论文集》(第二集),1999年。