

文章编号: 1002-0268 (2000) 06-0041-04

# 泰州大桥系杆拱预应力刚性吊杆 一次张拉模型试验研究

虞建成<sup>1</sup>, 叶政权<sup>2</sup>

(1. 东南大学, 江苏 南京 210096; 2 扬州市勘测设计院, 江苏 扬州 225005)

**摘要:** 泰州大桥主孔是一座下承式系杆拱桥, 为满足引江河工程进度的需要, 对吊杆进行了设计研究, 采用了预应力刚性吊杆一次张拉完成的施工工艺。为确保施工安全和质量, 达到设计要求, 进行了室内吊杆张拉模型试验, 得出的技术结论用于指导实桥施工。

**关键词:** 系杆拱桥; 刚性吊杆; 一次张拉; 模型试验

**中图分类号:** U445.4                      **文献标识码:** A

## Study on One-time full Tension Model Test of Tied Arch Prestressed Concrete Rigid Suspension Cable of Taizhou Bridge

YU Jian-cheng<sup>1</sup>, YE Zheng-quan<sup>2</sup>

(1. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China; 2 Survey & Design Institute of Yangzhou, Jiangsu Yangzhou 225005, China)

**Abstract:** The main span of Taizhou Bridge is a through tied arch. Study on the design of the suspension cable and one-time full tension construction technology of prestressed concrete rigid suspension cable are carried out to meet the need of Yinjiang River Project. In order to ensure the construction safety & quality and to meet the requirement of the design, a model test on the suspension cable tension is undertaken first, and the technical result is used to guide the on-site construction of the bridge.

**Key words:** Tied arch bridge; Rigid suspension cable; One-time full tension; Model test

### 1 泰州大桥设计概况

泰州大桥是引江河上连接扬泰公路的一座大桥, 是引江河第一期工程项目之一。

泰州大桥全长 212m, 引桥为跨径 30m 的预应力混凝土组合 I 形梁。主孔采用预应力混凝土系杆拱结构, 计算跨径为 73.92m, 矢高 12.58m, 矢跨比约为 1/5.88, 拱轴线采用二次抛物线, 由两幅净宽为 13m 的系杆拱桥组成。

设计技术标准为: 设计荷载汽-20 级, 挂-100, 人群 3.5kN/m<sup>2</sup>; 桥面净宽 2×13m; 通航标准为引江河最高通航水位 3.0m (废黄河高程), 通航净高 H=7.0m, 净宽 B≥50m; 抗震按 7°设防。

结构设计中, 主孔拱肋采用 φ1000mm 壁厚 20mm

的钢管, 内部浇筑 40 号混凝土; 系杆为预应力混凝土结构, 采用 200×90cm I 形截面型式, 50 号混凝土, 设置 24φ15.24-8 束高强钢绞线; 吊杆间距为 5.28m, 每片拱架内共计 13 根吊杆, 采用 φ299mm 壁厚 10mm 无缝钢管, 内部填筑 40 号细石混凝土, 内置 54φ<sup>s</sup>7 高强钢丝束; 横梁为预应力混凝土结构。主桥墩身为双柱式圆形截面, 钻孔灌注桩基础。拱肋上设置 4 道风撑。

大桥主孔施工时利用先建桥后挖河的条件, 先整体浇筑系杆及桥面系横梁, 再分段拼装钢管拱肋, 同时安装吊杆、拱肋上风撑, 进行拱肋钢管内混凝土填筑, 接着安装桥面板, 浇桥面。在以上各个施工阶段, 预应力构件的预加力必须根据实际的荷载施加情况逐步分阶段分次分批完成, 确保结构的安全。

收稿日期: 1999-11-30  
作者简介: 虞建成 (1965—), 男, 江苏宜兴人, 东南大学副教授, 现从事桥梁工程研究。

2 吊杆设计施工研究

由于引江河工程工期的紧迫性，泰州大桥必须保质保量按期完成，确保引江河泰州段引水工程。因此，大桥的各个阶段必须精心设计和施工。

目前，系杆拱桥在国内得到较多的应用。系杆拱桥中，吊杆的设计与施工是至关重要的环节。吊杆在使用荷载作用下是一根轴心受拉构件，故可用预应力高强钢丝束或钢绞线作为吊杆，这种吊杆不能受压，只承受拉力，一般称之为柔性吊杆，在已修建的系杆拱桥中有许多这样的构造形式。由于系杆拱是一种外部静定而内部超静定的结构，吊杆张拉施工程序是较为麻烦的，其施工控制也是比较困难的，因为柔性吊杆的预应力施工对于由拱肋、系杆及吊杆组装而成的组合结构的内力及变形有着很大的影响，所以吊杆的预加力施工通常采取分次分批的方法，即随着结构荷载的不断增加，多次分阶段张拉吊杆钢束，最后达到设计张拉力，同时不同的张拉次序也对结构产生显著的影响。这样势必加大施工难度及周期，给内力及变形控制带来一定难度，甚至会影响施工质量，而且由于吊杆钢束反复多次张拉，对锚具及最终吊杆内预加力大小控制有更高的要求。

鉴于以上分析及大桥工期，专门对吊杆的设计施工进行了研究。如果吊杆预加力能在一个施工阶段内一次张拉完成，那么可以节省大量人力物力，简化施工，确保大桥按期或提前完工。在具体设计中，把吊杆设计成预应力钢管混凝土构件，吊杆上下端分别与拱肋及系杆焊接固定，给吊杆施加预压应力，克服由于吊杆在荷载作用下产生的拉应力，避免吊杆产生开裂，这样的吊杆称之为刚性吊杆。

3 模型试验目的

系杆拱桥的施工，一般在系杆和拱肋浇筑完成后，为承受后期荷载及建立系杆拱组合结构受力体系，必须进行吊杆施工。进行刚性吊杆的试验研究即是解决能否在施工中一次性张拉吊杆预应力钢束而达到预期的预加力效应，在以后的施工过程中不必再重新张拉而又必须确保整个结构的安全问题，尤其是吊杆截面尺寸相对拱肋与系杆来说较小，吊杆钢束张拉力达 120t，在一次张拉到位的过程中，现设计断面能否避免屈曲失稳现象及对拱肋系杆截面内力变形的影响等问题。对于这种新设计、新工艺，应进行系杆拱刚性吊杆预应力一次张拉完成的模型试验研究，方可确保工程安全 and 质量要求。

4 模型制作

模型外型几何尺寸为实桥的 1/15.086，模型骨架均采用材质为 A3 钢的不同直径的无缝钢管。拱肋钢管为  $\phi 89 \times 4\text{mm}$ ，系杆为  $\phi 159 \times 6\text{mm}$ ，吊杆为  $\phi 45 \times 2.5$ 。

拱肋、吊杆及系杆内部及各结点处均连通，吊杆预应力采用一束  $\phi 15.24$  低松弛无粘结钢绞线， $R_y^b = 1860\text{MPa}$ ，锚具采用特制的 OVM 单束锚，并在拱肋上单端张拉并采取特殊措施，以减小锚固钢束时的锚具压缩与钢束回缩损失。通过压浆设备对模型钢管内压注普通 425 号硅酸盐水泥，水灰比为 1:0.45。在压注过程中采取必要措施，确保各管内泥浆密实，不脱空。

5 模型吊杆张拉测试及分析

在系杆拱模型所有吊杆及拱肋与系杆关键断面上均设置了测点。

5.1 张拉次序及吨位

根据试件测试及理论分析拟定的张拉次序及吨位见图 1 及表 1 所示。

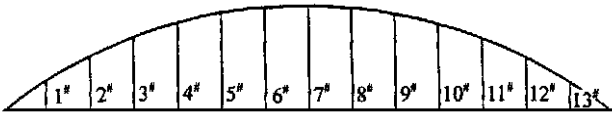


图 1 吊杆编号

张拉次序及吨位表 表 1

| 批 号 | 吊杆号       | 分级张拉吨位 (t)   | 锚固吨位 (t) |
|-----|-----------|--------------|----------|
| (1) | 4 #, 10 # | 6, 9, 12, 15 | 15       |
| (2) | 7 #       | 6, 12, 15    | 15       |
| (3) | 2 #, 12 # | 6, 12, 15    | 15       |
| (4) | 6 #, 8 #  | 6, 12, 15    | 15       |
| (5) | 3 #, 11 # | 6, 12        | 12       |
| (6) | 5 #, 9 #  | 6, 12        | 12       |
| (7) | 1 #, 13 # | 6, 12        | 12       |

5.2 吊杆张拉锚具变形及钢束回缩应力损失  $\sigma_{s2}$

由表 2 可算得本次张拉实际发生的锚具变形及钢束回缩应力损失  $\sigma_{s2}$  平均为  $0.057\sigma_k$ 。

5.3 吊杆最终应力的比较

全部吊杆张拉结束时的应力值与理论计算值见表 3。

预应力损失  $\sigma_{s2}$  值计算 表 2

| 张拉批号<br>吊杆号                               | (1)            |                 | (2)            | (3)            |                 | (4)            |                | (5)            |                 | (6)            |                | 平均值   |
|-------------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------|
|                                           | 4 <sup>#</sup> | 10 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 12 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> | 8 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 11 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 9 <sup>#</sup> |       |
| 锚固前应力 $\sigma_k$ (MPa)                    | 77.8           | 83.7            | 66.7           | 89.1           | 80.8            | 87.6           | 100.0          | 91.9           | 89.9            | 97.1           | 94.5           |       |
| 锚固后应力 $\sigma_Y$ (MPa)                    | 71.1           | 82.3            | 58.0           | 87.8           | 66.4            | 86.0           | 98.6           | 91.8           | 91.0            | 92.9           | 93.3           |       |
| $\sigma_{s2} = \sigma_k - \sigma_Y$ (MPa) | 6.7            | 1.4             | 8.7            | 1.3            | 14.4            | 1.6            | 1.4            |                |                 | 4.2            | 1.2            |       |
| $\sigma_{s2}/\sigma_k$                    | 0.086          | 0.017           | 0.130          | 0.015          | 0.178           | 0.018          | 0.014          | (不计)           | (不计)            | 0.043          | 0.013          | 0.057 |

全部吊杆张拉结束时的应力 (MPa) 比较 表 3

| 编号 | 理论值 $\sigma_1$ | $\sigma'_1 = 0.955\sigma_1$ | $\sigma''_1 = 0.943\sigma'_1$ | 实测应力 $\sigma_2$<br>(MPa) |
|----|----------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1  | 91.5           | 87.4                        | 82.4                          | 74.7                     |
| 2  | 112.2          | 107.2                       | 101.1                         | 99.3                     |
| 3  | 101.1          | 96.6                        | 91.1                          | 96.1                     |
| 4  | 109.4          | 104.5                       | 98.5                          | 97.6                     |
| 5  | 101.3          | 96.7                        | 91.2                          | 96.8                     |
| 6  | 113.6          | 108.5                       | 102.3                         | 88.8                     |
| 7  | 118.8          | 113.5                       | 107.0                         | 77.5                     |
| 8  | 113.6          | 108.5                       | 102.3                         | 98.0                     |
| 9  | 101.3          | 96.7                        | 91.2                          | 94.9                     |
| 10 | 109.4          | 104.5                       | 98.5                          | 87.3                     |
| 11 | 101.1          | 96.6                        | 91.1                          | 96.0                     |
| 12 | 112.2          | 107.2                       | 101.1                         | 81.2                     |
| 13 | 91.5           | 87.4                        | 82.4                          | 82.5                     |

注:  $\sigma'_1$  为钢束松弛后的有效应力值,  $\sigma''_1$  为锚具变形及钢束回缩后的有效应力值。  $\bar{x} = 1.068$ ,  $\sigma_n = 0.1267$

从表 3 分析得知:

(a) 采用应力比较的方法, 理论与实测应力的平均值相差约 6.8%, 实测应力值小于或等于理论计算应力值, 且应力比值的偏差值  $\sigma_n$  亦较小。

(b) 实测最终应力小于或等于理论计算的最终应力, 应属是合理的。因为全部吊杆张拉完成之后, 吊杆均处于弹塑性工作阶段, 其变形较大, 而此时的拱肋和系杆的变形却很小, 仍处于弹性工作阶段, 这样

使得吊杆处于一种相对卸载趋势中, 即应力增值在减小, 但应力总趋势仍在增加, 按弹性结构体系计算其中部分本应由吊杆承担的荷载, 就可能转由拱肋与系杆承担, 造成吊杆该受力阶段的相对卸载, 而使其最终应力值较理论计算的应力值普遍偏小。

(c) 从应力比 ( $\sigma''_1/\sigma_2$ ) 值的分布状况可看出, 凡是拱肋竖向变形相对较小的截面 (如拱顶及靠近拱脚处), 其比值就较大 (即吊杆相对卸载较明显), 而在拱肋竖向变形相对较大的截面 (如  $L/4$ 、 $3L/4$  附近截面), 吊杆不仅卸载较少, 有的不卸载, 有的甚至反而比理论应力值大。

5.4 吊杆 4<sup>#</sup>、10<sup>#</sup> (第一批张拉) 张拉过程中的应力分析

分析表 4 数据, 可以看出:

(a) 初始几批张拉时, 吊杆的实测应力与理论计算应力值吻合较好。越往后 (张拉批数愈多), 由于进入弹塑性工作阶段的吊杆数目增加, 逐渐形成了已张拉吊杆 (包括 4<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>) 相对卸载的可能条件, 因而至 (6)、(7) 两批张拉完后, 吊杆的实测应力要较理论值小, 尤其是 10<sup>#</sup> 吊杆。

(b) 在整个张拉过程中, 实测应力和理论计算的应力值虽有差别, 但其变化规律基本上是相同的。

4<sup>#</sup>、10<sup>#</sup> 吊杆应力 (MPa) 对比 表 4

| 被测吊杆            | (1) 批                           | (2) 批          | (3) 批                           | (4) 批                          | (5) 批                           | (6) 批                          | (7) 批                           | 备注    |
|-----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------|
|                 | 4 <sup>#</sup> 、10 <sup>#</sup> | 7 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> 、12 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> 、8 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> 、11 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> 、9 <sup>#</sup> | 1 <sup>#</sup> 、13 <sup>#</sup> |       |
| 4 <sup>#</sup>  | $\sigma_1$ (理论)                 | 85.4           | 84.1                            | 81.1                           | 77.5                            | 92.0                           | 109.7                           | 109.4 |
|                 | $\sigma''_1 = K_1 K_2 \sigma_1$ | 76.9           | 75.7                            | 73.0                           | 69.8                            | 82.9                           | 98.38                           | 98.5  |
|                 | $\sigma_2$ (实测)                 | 77.8           | 75.1                            | 72.9                           | 70.3                            | 79.1                           | 94.2                            | 97.6  |
|                 | $\sigma''_1/\sigma_2$           | 0.989          | 1.008                           | 1.002                          | 0.993                           | 1.047                          | 1.049                           | 1.009 |
| 10 <sup>#</sup> | $\sigma_1$ (理论)                 | 85.4           | 84.1                            | 81.1                           | 77.5                            | 92.0                           | 109.7                           | 109.4 |
|                 | $\sigma''_1 = K_1 K_2 \sigma_1$ | 76.9           | 75.7                            | 73.0                           | 69.8                            | 82.9                           | 98.8                            | 98.5  |
|                 | $\sigma_2$ (实测)                 | 83.7           | 80.7                            | 78.9                           | 75.7                            | 83.7                           | 87.8                            | 87.3  |
|                 | $\sigma''_1/\sigma_2$           | 0.919          | 0.939                           | 0.926                          | 0.922                           | 0.990                          | 1.125                           | 1.130 |

注:  $K_1$  为钢束松弛应力损失系数,  $K_2$  为锚具变形及钢束回缩应力损失系数。

(c) 4<sup>#</sup>、10<sup>#</sup> 吊杆位置对称, 张拉力大小相同, 但产生的应力有差异 (相差 5%~8%), 可能与各批吊杆张拉

后的锚固不对称(每批张拉 2 根都是先锚一根,再锚另一根)有关系。另外尽管模型骨架都由钢管成型,但在制作精度上会有一定差异。因为各钢管接头处轴线较难准确安装;同时各管内均填充水泥浆,形成组合受力截面,变异性大,都可造成测试精度的误差。

5.5 每批张拉对结构的影响

根据每批吊杆张拉的实测数据分析,每批吊杆钢束张拉后,被张拉的吊杆压应变值最大,而相邻吊杆相应压应变较小,仅仅为其 1/3 ~ 1/10,说明张拉力主要由被张拉的吊杆承受,相邻吊杆分配较少。吊杆张拉过程中,拱肋始终受压,系杆受拉,但拱肋与系杆的应变值均较小,说明吊杆张拉对拱肋及系杆影响不大。

6 结论

(1) 对于刚性吊杆系杆拱,吊杆张拉采用一次性

张拉到位的工艺是可行的,并且是安全可靠的。

(2) 刚性吊杆张拉受压后,只要吊杆内钢束的预留孔道内径不比钢束的外径大很多,张拉时吊杆是不容易失稳的,即使张拉力接近甚或超过刚性吊杆的临界轴压力,试验表明也仍然保持相对稳定。

(3) 吊杆全部张拉完毕后,各吊杆的实测应力基本上与理论计算值相一致。说明模型试验是成功的,泰州大桥系杆拱设计是合理安全的。

(4) 在实桥施工中应严格遵守均衡、对称,并密切注意拱肋变形最小的张拉、锚固原则。

通过本文研究及得出的指导性意见,在泰州大桥吊杆具体施工中已采用这一施工工艺,吊杆一次张拉即达设计吨位值 120t,未出现任何异常现象,施工时间很短,操作方便,取得了很好的效果。吊杆这一构造设计及施工工艺值得推广应用。

通 知

应广大读者和作者的要求,从 2001 年起,《公路交通科技》杂志可办理邮发,邮发代号为 2-480。欢迎广大读者积极订阅。