

徐州京杭运河特大桥竖转受力分析

孙 潮¹, 陈宝春¹, 谢云举², 薛光雄²

(1. 福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002; 2. 路桥集团第二公路工程局第二工程处, 广东 中山 528427)

摘要: 根据京杭运河特大桥的设计特点, 钢管提篮拱架采用了竖向转体施工方案. 采用 SAP 程序对该大桥转体施工进行计算, 分析了转体过程中的索力、静力强度及稳定性, 得到转体过程中各索索力的变化曲线, 为转体施工控制提供理论参考依据.

关键词: 钢管; 混凝土; 拱桥; 受力分析; 京杭运河; 徐州

中图分类号: TU997; U41; U44

文献标识码: A

Static analysis of erection by swing method of Jinghang river bridge in Xuzhou

SUN Chao¹, CHEN Bao - chun¹, XIE Yun - ju², XUE Guang - xiong²

(1. College of Civil Engineering and Architectures, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. The Second Engineering Department, Second Highway Engineering Group of Communications, Zhongshan, Guangdong 528427, China)

Abstract: According to the design feature erection of steel tubule arch by swing method is adopted. The paper uses program SAP to analyses the force of cable, static strength and stability in erection by swing method and gets relative curve between the force of cable and angle in erection to provide with theoretical reference for construction.

Key words: concrete; filled tube; arch bridge; static analysis; Jinghang river; Xuzhou

1 概述

徐州京杭运河特大桥为国家公路交通主干线连云港——霍尔果斯高速公路徐州境内跨越京杭大运河的一座特大型桥梁, 其主跨结构为带双悬臂半拱的中承式钢管混凝土刚架系杆提篮拱, 主跨 235 m, 两边跨各 57.5 m(见图 1).

大桥主拱肋采用轻质高强的钢管混凝土桁式结构, 主拱截面见图 1. 主拱肋和边拱肋均向桥轴中心线倾斜, 倾角分别为 $80^{\circ}03'57.6''$ 和 $79^{\circ}52'39.9''$, 从而形成空间曲线形式, 增强了结构本身的稳定性和抗震性, 从美观方面也取得了良好的效果.

钢管拱肋的架设安装是该桥的施工关键与难点所在. 施工单位提出了缆索吊装与竖向转体两种施工方案. 由于大桥体系为提篮拱, 线形复杂, 缆索吊装难度大. 转体施工从 70 年代末起就在我国应用发展; 钢管混凝土拱桥近十年来在我国的应用迅猛发展, 为拱桥的轻型化和向大跨度发展提供了可能, 转体施工方法也被广泛应用于这种桥型之中^[1,2]. 转体施工主拱桁架在工厂分段加工, 分段运输, 在河中较低的支架上组架形成全桥宽的整体结构. 该方案的特点为: 运输方便, 转动体系平衡稳定, 转体合拢安全, 高空作业少, 安装快速, 提高了施工过程中抵抗不良天气影响的能力, 保证了工程的顺利建成. 施工中, 主结构所组成的临时平衡体系, 较符合主拱设计体系, 因此体系转换时产生的内力变化较小, 次内力也较小. 转体施工工艺充分利用结构本身作施工设施, 施工用材省, 施工设备少, 不需用大型缆索吊装设备, 能有效控制施工安装费用.

综上所述, 根据该桥的结构型式和桥位处的自然条件, 经研究与专家论证, 京杭运河特大桥采用竖

转施工工艺是适宜的, 业主批准了采用竖向转体施工方案. 为了保证施工安全, 受施工单位委托对施工过程进行计算和分析.

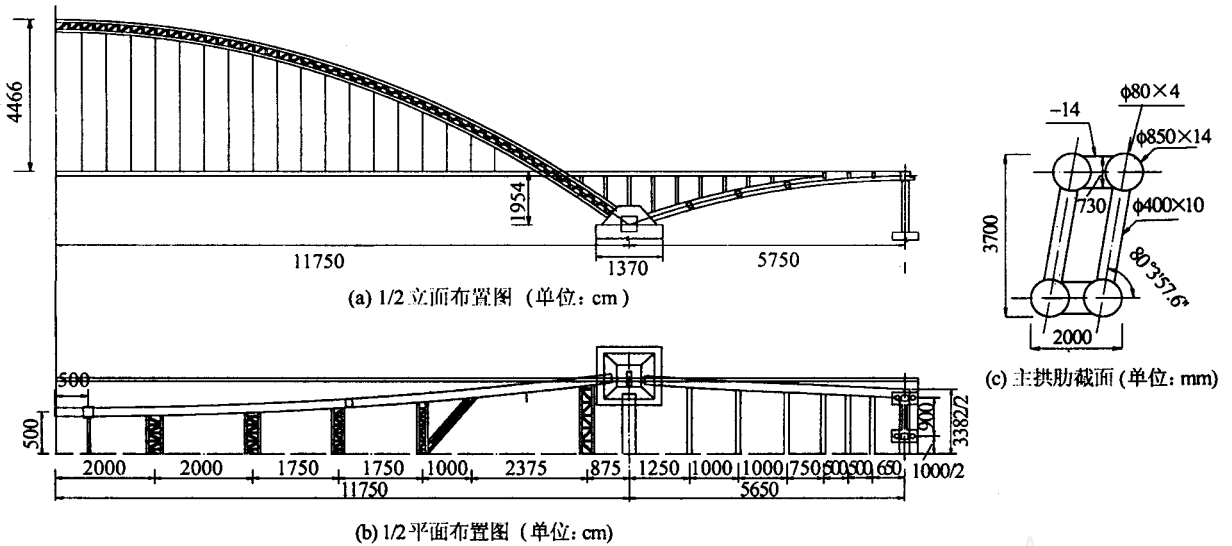


图 1 主桥总体布置简图

Fig. 1 Disposal of main bridge

2 计算模型及施工阶段

转体过程静力计算采用 Super SAP93 软件, 计算模型见图 2. 计算对象为主拱肋、边拱肋、塔架和扣索组成的转动体系. 计算中将主拱肋的弦杆、腹杆、横撑、K 撑及边拱肋、边拱支架和塔架用空间梁单元模拟, 主拱肋的平联板用板单元模拟. 根据文献[3], 用拉索的修正弹性模量 $E_t = \frac{E_e}{1 + [(\cdot l)^2 / 12^3] E_c}$ 来考虑拉索力学性能的非线性特性时, 结果表明非线性影响不大, 因此索也采用空间梁单元来建模, 将其 EA 置无穷大, EI 置无穷小, 这样梁单元轴线方向的变形很小, 弯矩也很小, 可忽略, 能够模拟索的受力状态. 在索鞍处, 用一个刚度很大的杆置于索的角平分线处(见图 3), 以连接索和塔架, 使得索鞍两边的计算索力相等, 以模拟实际受力情况. 1 号索与支撑架处的连接也采用索鞍处的处理方法. 边拱肋和边拱支架间的连接采用只受压的索元, 否则, 若边拱肋被抬起, 支撑边拱肋的支架将受拉, 不符合实际情况. 主拱拱脚采用铰接, 边拱拱脚及塔架底部采用固接.

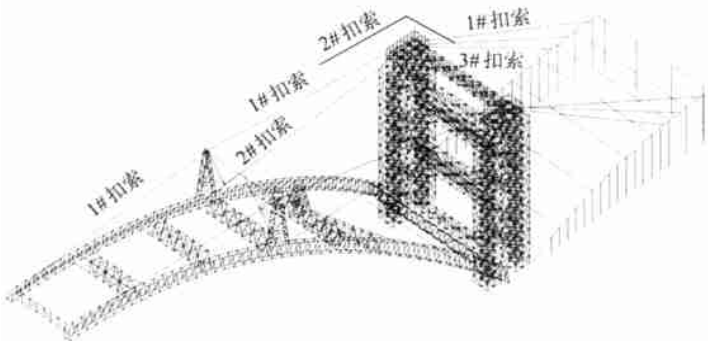


图 2 计算模型

Fig. 2 Model for calculation

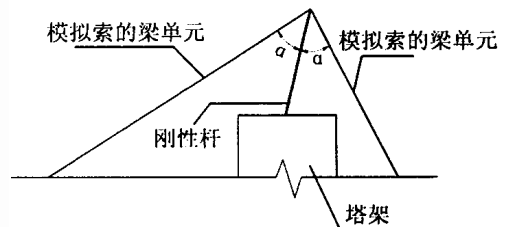


图 3 索鞍处有限元模拟简图

Fig. 3 Model in saddle for cable

竖转按竖转角度从 0 到 25.594 2° 分 10 个施工阶段, 第一个施工阶段为竖转角 0°(脱架), 第二施工阶段为 1.594 2°, 以后每一施工阶段增加 3°。

3 计算结果与分析

3.1 计算结果正负号规定

计算结果均未考虑构件间的摩阻力。各参数的正负号规定如下: 应力以压应力为负, 拉应力为正; 挠度以向上为正, 向下为负。

3.2 竖转过程拱肋应力分析

1) 主拱竖转开始时, 主拱肋弦杆最大压应力、最大拉应力均位于 $L/4$ 部位, 最大压应力为 -47.34 MPa, 最大拉应力为 20.34 MPa; 竖转到 7.594 2° 时弦杆最大压应力从 $L/4$ 下移至 $L/8$ 附近, 且逐渐增大至合拢时的 -52.37 MPa。最大拉应力也从 $L/4$ 处上移至拱顶部位, 随着竖转角的增大, 最大拉应力逐渐减小, 合拢时为 4.1 MPa。

竖转过程的腹杆的最大拉应力和最大压应力均位于 $L/4$ 附近, 竖转开始时分别为 72.65 MPa 和 -82.69 MPa, 随后逐渐减少至合拢时的 48.06 MPa 和 -58.62 MPa。

拱肋钢管采用 16Mn 钢, 容许应力为 210 MPa, 其它的采用 A3 钢, 容许应力为 145 MPa, 因此竖转过程中, 钢管拱肋的应力均未超过其容许应力。

2) 边拱竖转过程边拱的应力从开始时的最大逐渐减小, 竖转到位时应力最小。最大压应力由开始时的 -3.053 MPa 降到到位时的 -2.345 MPa, 最大拉应力由开始时的 1.747 MPa 降为到位时的 1.239 MPa。边拱肋为钢筋混凝土结构, 混凝土标号为 50 号, 设计标准抗拉强度为 1.45 MPa, 抗压强度为 28.5 MPa。竖转过程中最大拉应力略超过其容许应力。作为钢筋混凝土结构, 超过混凝土容许拉应力的应力由钢筋承受。

3.3 竖转过程变形分析

1) 主拱竖转过程中挠度最大的节点均位于 $3L/8$ 附近, 其挠度数值均为负数, 为向下的挠度。竖转到位合拢前的主跨最大挠度数值为 -0.080 2 m。主拱肋变形较大, 边拱肋和塔架变形较小。可见主拱肋较柔, 边拱肋和塔架刚度较大。因此, 主拱肋竖转过程产生的变形对合拢线形的影响应考虑进行预拱度修正和合拢阶段的调整。

2) 边拱在竖转角为 0° 时最大挠度为 0.004 35 m, 最小挠度为 -0.000 6 m, 竖转角为 25.594 2° 时最大挠度为 0.002 57 m, 最小挠度为 -0.000 7 m。因此, 边拱肋在竖转过程中有被拉起的趋势, 建议在边拱设临时受拉支座, 将边拱与支架联在一起, 以保证施工安全。

3.4 塔架弹性一类稳定分析

刚开始竖转时索力最大, 塔架所受的竖向力也最大, 此时塔架稳定系数最小, 但计算表明, 此时弹性一类稳定系数达 52.13。转体到位时, 塔架的弹性一类稳定系数达 112.4。整个竖转过程中弹性一类稳定系数均很大, 满足稳定验算要求。

3.5 竖转过程索力变化曲线

索力变化曲线是进行竖转液压同步提升系统最重要的设计参数, 其计算的准确率直接影响到竖转的顺利与否。计算所得各索的拉力—竖转角度关系曲线见图 4~图 6。1#、2# 索为牵引索。1# 索索力曲线类似抛物线的变化先增后减, 0° 时为 3 295 kN, 25.594 2° 时为 3 273 kN, 11.594 2° 时达到最大值为 3 348 kN。2# 扣索索力竖转开始时最大, 其后基本上呈直线下降, 竖转到位合拢前的索力从开始时的 3 286 kN, 降至 1 848 kN。3# 索为平衡索, 其索力随着竖转角变化的情况类似于 1# 索, 竖转开始时为 786 kN, 转到 13.594 2° 时达到最大值 992 kN, 竖转到位合拢前又降至 861 kN, 但该索索力相对来讲变化较小。

3.6 竖转合拢后拱肋变形(两铰拱)

计算结果表明, 从拱顶段, 转体合拢形成的两铰拱变形后的位置在标准两铰拱之上, 最大差值在拱

顶处为 0.022 8 m. 拱脚段, 转体形成两铰拱变形后的位置在标准两铰拱之下, 最大值为 0.014 5 m. 计算结果可供设置竖转法引起的附加预拱度参考.

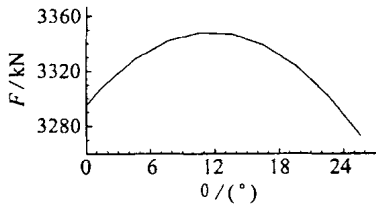


图4 1#扣索拉力—竖转角度关系曲线

Fig. 4 Relative curve between the force of cable no. 1 and angle in erection

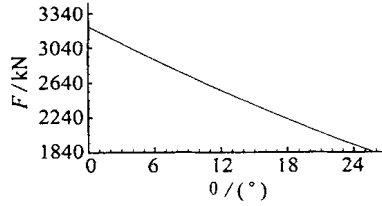


图5 2#扣索拉力—竖转角度关系曲线

Fig. 5 Relative curve between the force of cable no. 2 and angle in erection

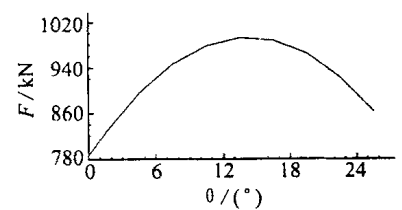


图6 3#扣索拉力—竖转角度关系曲线

Fig. 6 Relative curve between the force of cable no. 3 and angle in erection

3.7 风力计算

由于一个半跨的竖转过程时间较短, 可以选择小风甚至无风的天气进行, 所以风力计算仅考虑一半跨竖转到位, 等待另外半跨竖转到位, 直到合拢前这一状态. 风力计算仅进行静力计算. 风向考虑了水平和向上方向两个工况.

计算表明, 横向风力和自重作用下, 主拱肋中最大的应力为 173 MPa. 向上顶升风力总和为 47×10^3 kg, 仅为半跨自重 624.5×10^3 kg 的十三分之一. 所以, 静风力对竖转结构的受力影响较小.

4 结语

1) 竖转过程中, 主拱肋的受力与变形均较小, 索塔一类弹性稳定系数较大, 转体施工方案总体上是可行的.

2) 1#、2# 提升索在竖转过程中索力是变化的, 应根据计算结果并按索力和位移双控的原则进行液压同步千斤顶张拉系统的工艺设计, 同时制定相应的监测监控方案, 根据监测结果对竖转施工过程进行修正.

3) 边拱肋在竖转过程中为一钢筋混凝土悬臂曲梁, 拉应力偏大, 建议考虑以下一些措施予以改善: 边跨支架上设抗拉支座; 拉应力较大处加强局部配筋或施加临时预应力索; 调整 3# 平衡索位置或增加一根平衡索.

4) 竖转合拢形成的二铰拱与标准二铰拱的线型和应力存在差异. 主拱肋竖转过程产生的变形对合拢线形的影响建议通过预拱度修正和合拢阶段 1#、2# 扣索和拱顶处设置的千斤顶进行调整.

5) 由静风力计算可知, 基本风压为 1kPa 时对竖转结构受力的影响很小. 尽管如此, 为安全起见, 竖转施工仍应根据当地气象部门提供的资料与预报, 尽可能选择在小风最好是无风的天气进行.

6) 计算表明, 索塔整体的弹性一类稳定系数较大. 然而, 组成索塔的各杆件的受力并不均匀, 应注意集中力作用处的应力扩散和杆件的连接, 防止由个别杆件的局部屈曲带来的不利影响.

施工单位根据计算得出的结论和建议, 已于 2001 年 6 月 28 日连云港侧主拱脱架, 29 日竖转成功. 2001 年 7 月 2 日徐州侧主拱脱架, 3 日竖转成功, 7 月 6 日主拱合拢. 施工实测与计算结果吻合良好.

参考文献:

- [1] 陈宝春, 孙潮, 陈友杰. 桥梁转体施工方法在我国的应用与发展[J]. 公路交通科技, 2001(2): 24 - 28.
- [2] 孙潮, 陈宝春, 陈友杰. 钢管混凝土拱桥转体施工方法[A]. 第十届全国结构工程学术会议论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 515 - 519.
- [3] 宁德飏, 巫惠斌, 王孝国, 等. 广州丫髻沙大桥竖转施工阶段计算分析, 工程力学, 1999, (增刊): 351 - 355.