

上承式钢管混凝土拱桥设计

刘世忠¹, 武维宏², 徐亮¹, 陈权¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃揽依设计咨询有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要:介绍了甘肃境内祁家渡黄河大桥的设计特点, 该桥为一座主跨 18 m, 宽跨比 1/25.7 的上承式钢管混凝土拱桥, 给出了施工过程全三维仿真分析及运营阶段的主要结果, 表明如何保证在施工过程的稳定性是桥梁设计和施工的核心问题, 运营中桥梁各项指标均满足规范要求。

关键词:拱桥; 钢管混凝土; 结构设计; 施工; 稳定性; 黄河大桥

中图分类号: U448.222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)02-0041-03

0 引言

祁家渡黄河大桥位于风景秀美的刘家峡水库库区, 南连东乡县, 北接永靖县, 是国道 213 线的“咽喉”工程。历史上, 东乡县和永靖县之间的交通主要依靠桥址上游 1 km 处的祁家黄河渡口的轮渡来维持。随着国道 213 线运能的不断提高, 祁家黄河渡口已成为制约当地经济发展的“瓶颈”, 迫切需要修建一座桥梁, 使“天堑变通途”, 加速当地经济的发展。

1 桥址地形、地貌、工程地质

桥址处河流深切基岩约 180 m, 两岸岸坡陡峭, 为典型的“V”形沟谷, 岸高约 90 m, 水库淤积约 70 m, 岸坡自然坡角约 55°~70°, 部分地段近于直立。桥梁两端引线位于残留的黄河高阶地前缘区, 地表植被稀少, 地貌单元为黄河上游峡谷区。地质勘探揭露, 桥位处两岸多为第四系上更新统风积新黄土覆盖, 厚度 15~25 m, 南岸残留高阶地上更新统冲击卵石厚约 1~3 m。沿公路局部出露第三系上新统红色含砾砂岩。黄河岸坡上出露前震旦系马衔山群变质岩系, 岩性为石英片岩, 其中见有花岗闪长岩侵入体。桥址处岩石强度较高, 但节理、裂隙发育。

2 主要技术标准

公路等级: 二级; 设计车速: 40 km/h; 设计车道: 二车道; 设计荷载: 公路—I 级;

桥面总宽: 12 m, 行车道净宽 11.0 m, 两侧各设

0.5 m 防撞墙。地震动峰值加速度系数 0.15 g。

3 桥式方案比选

3.1 上承式钢管混凝土桁肋拱

采用净跨 180 m 的上承式钢管混凝土无铰推力拱, 矢高 36 m, 矢跨比 1/5, 拱卷采用等截面悬链线拱, 拱轴系数 $m = 1.543$ 。拱轴方程: $y = f \cdot \text{ch}[\ln(m + \sqrt{m^2 - 1})2x/l - 1]/(m - 1)$ 。拱上结构采用简支梁柱体系。桥梁跨径组合为: 20 m 简支梁 + 净跨 180 m 拱 + 20 m 简支梁, 桥梁全长 240.06 m, 桥梁立面布置如图 1 所示。采用缆索吊装千斤顶斜拉扣挂法施工。

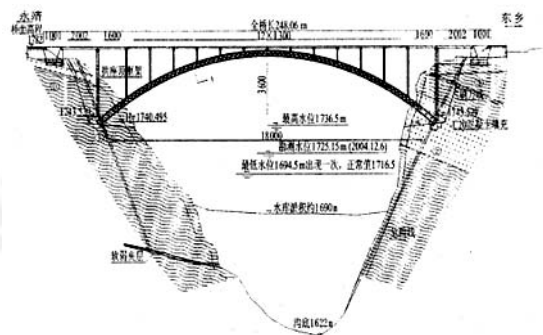


图 1 全桥布置图

3.2 预应力混凝土加劲梁悬索桥

主桥采用 1-200 m 简支预应力混凝土加劲梁悬索桥, 主缆矢跨比 1/9, 主缆采用 46 束 61Φ5 mm 的高强预制镀锌平行钢丝束, 平行钢丝标准强度 $R_p^0 = 1570 \text{ MPa}$, 上、下游两根承重主缆间距 13.0 m, 通过预埋在混凝土锚锭中的 PC 钢绞线锚固系统锚固。边吊索采用 PES 5-109 的平行镀锌钢丝, 间距 10 m, 中吊索采用 PES 5-85 的平行镀锌钢丝, 间距 6 m, 外裹热聚乙烯防护套筒, 平行竖直布置。采用扁平板式预应力混凝土加劲梁, 梁高 0.4~0.6 m,

收稿日期: 2005-07-11

基金项目: 兰州交通大学“青蓝”基金, 国家自然科学基金(503780436)

作者简介: 刘世忠(1962-), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 工学博士, 从事土木工程教学与科研工作。

底宽 12.4 m, 顶宽 12.0 m, 在吊索处局部加厚加宽, 以减少工程量和桥面自重。索塔采用矩形框架结构, 挖井基础, 重力式锚锭。引桥采用 13 m 简支空心板梁与路基相连。全桥跨径组合为 13 m 简支梁 + 200 m 悬索桥 + 13 m 简支梁, 桥梁全长 238.26 m。主缆采用预制索股法架设, 再以主缆索为悬吊支架, 安装吊索, 拼装加劲梁。

两方案经技术经济比较, 钢管混凝土拱桥方案具有施工难度较小, 工程造价较低, 养护维修费用适宜, 桥型美观, 行车舒适, 综合指标占优等优势而成为施工图设计采用方案。

4 结构设计

4.1 基础

桥址处岩石强度较高, 但节理、裂隙发育。历史上, 该处曾为刘家峡比选坝址—马六沟坝址, 考虑岩面与节理面分割的岩体在重力作用下的稳定性, 地质工作者运用地质力学原理推算出了岸坡稳定线(图 1 中的危险线)。因刘家峡水库的建成和运营, 目前水库淤积达 70 m, 这对岸坡的稳定性是一个有利的因素。但考虑到为保证水库正常使用, 而进行清淤的因素, 为保证安全, 拱座采用重力式, 仍然埋置在不计淤积影响的塌岸线以外的可靠的基岩上。

4.2 拱肋

钢管混凝土拱卷截面由横哑铃形桁式双肋组成。每个桁肋高 3.5 m, 宽 1.7 m (图 2), 由 4 根直径 $\Phi 700$ mm, 壁厚 12 mm 的 16 Mnq 钢管组成, 内灌 C50 微膨胀混凝土作为弦杆。上弦和下弦横向两根钢管之间分别用缀板连接, 内灌 C50 微膨胀混凝土形成横向哑铃形(图 3); 上、下弦之间用直径 $\Phi 299 \times 8$ mm 空钢管作为腹杆, 以避免上、下弦杆出现局部失稳的问题。其中直腹杆采用与拱轴线垂直的方式布置, 直腹杆间距 2.5 m, 直腹杆与斜腹杆夹角约为 38.2° , 直腹杆与斜腹杆规格基本一致, 易于加工。在靠近拱脚 12.74 m 的范围内, 将腹杆改为缀板, 内填充混凝土形成拱脚实腹段, 以增强拱肋的竖向刚度和横向刚度(图 4)。为了防止缀板在内灌混凝土的压力下外鼓, 沿拱肋中线, 上下弦缀板上分别按 0.5 m 间隔设加劲螺栓, 并且在拱脚实腹段沿拱轴线设加劲螺栓。为了减少拱肋制作运输、安装及混凝土灌注阶段的变形、焊接变形, 在弦杆内均匀加设钢箍和加劲角钢。

4.3 横向联系的布置

横向联系的布置形式、位置以及横向联系的刚度, 对肋式拱桥的横向稳定性有着举足轻重的作用。在两拱脚实体段分别设两根横撑, 采用 $\Phi 800 \times 12$ mm, 设 4 根斜撑, 采用 $\Phi 600 \times 10$ mm, 形成两相对的“K”字撑, 横撑和斜撑钢管内均灌 C50 微膨胀混凝土, 其中有两根斜撑直接与拱座固接(图 5)。在每个拱肋立柱对应位置和相邻两立柱中心设一字式横撑, 沿垂直于拱轴线方向均匀布置。一字式横撑是由直径 $\Phi 600 \times 10$ mm 内灌混凝土的两根横撑和两根直径 $\Phi 299 \times 8$ mm 的空钢管组成的一个平面桁架(图 2), 有效地增大了拱肋的抗扭能力。

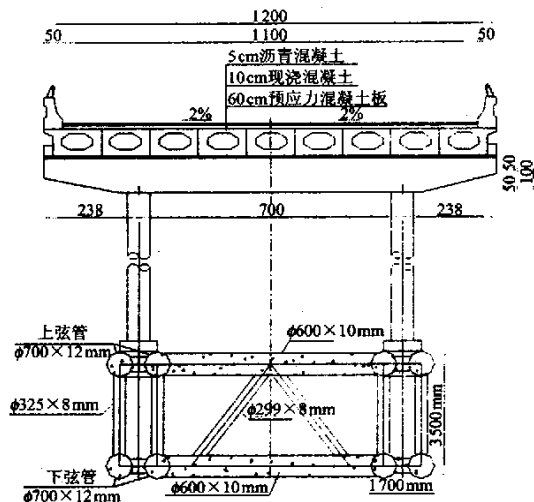


图2 横断面布置图

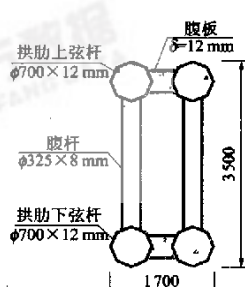


图3 拱肋断面图

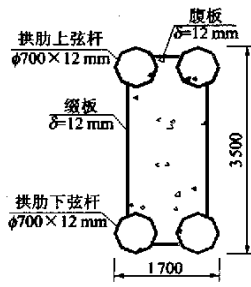


图4 拱肋实体段断面图

4.4 拱上结构

拱上结构采用梁柱体系, 在布置拱上结构跨径组合时兼顾拱肋受力的合理性和建筑美观两方面的需求, 最终选定孔跨组合为 1-16 m + 12-13 m + 1-16 m 简支梁(图 1)。桥面板采用标准 13 m 和 16 m 后张预应力混凝土空心板。立柱采用钢管混凝土, 靠近拱脚处的两排立柱采用 $\Phi 800$ mm 管径, 由于最高立柱高达 25.2 m, 为了提高其自身稳定屈曲安全

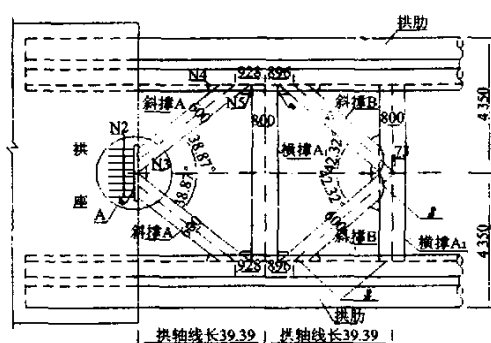


图5 拱脚横向联系构造图

系数,并保证在主体结构(拱肋)发生失稳之前,结构不会因为构件的局部失稳而丧失承载能力,对第一排立柱采用两个平面桁架进行加强,对第二排立柱采用一个平面桁架进行加强,每个平面桁架由直径 $\Phi 600 \times 10$ mm内灌混凝土的两根横撑和两根直径 $\Phi 299 \times 8$ mm的空钢管组成,其余立柱管径采用 $\Phi 600$ mm,并对第三排立柱采用一根 $\Phi 600$ mm的横撑进行加强。立柱顶端采用钢筋混凝土盖梁进行连接,形成平面框架(图2)。

5 施工方法

由于两侧岸壁陡峭,转体施工挖方太大,故该桥拟采用缆索吊装千斤顶斜拉扣挂法施工。每个拱肋共分9段预制加工,在工地拼装。在水库高水位蓄水时,将预制拼装好的钢管拱肋段船运到桥位处,利用缆索吊吊起、就位,与前一安装段固结,安装扣索、抗风缆索,调整线型。逐段安装,直到拱肋最后合拢。设计最大吊重为45 t。拱肋设计为单肋合拢。两拱肋合拢后,安装拱肋横撑,形成整个拱架,随后灌注拱脚实腹段混凝土,待拱脚混凝土强度达到设计强度的80%后,分步、对称灌注桁肋各钢管混凝土。待拱混凝土强度达到设计强度的80%后,施工拱上结构。

6 防腐

暴露在野外环境中的钢结构,其表面极易与周围环境发生化学及电化学反应,当其涂层性能较差时,便会破坏涂层使钢铁产生锈蚀。钢桥属于大型的永久性建筑,服务年限长,维修困难,必须进行有效的长效防腐,确保桥梁的使用寿命。祁家渡黄河大桥位于刘家峡库区,空气湿度相对较大,这种大气条件下的腐蚀中有电化学腐蚀作用,腐蚀速度较快,易成锈,对钢材的破坏性较大。采用了电弧喷铝长

效防腐方案,主要材料及施工工艺为:表面净化处理、喷砂除锈(Sa3级)、二次雾化高速电弧喷铝(180 μm)、高压无气喷涂环氧云铁封闭底漆一道(30 μm)、高压无气喷涂氯化橡胶封闭面漆2道(70 μm)。经有机封闭处理的电弧喷铝复合涂层,腐蚀速率比无封闭喷铝更低,封闭涂层隔绝了外部腐蚀性介质侵蚀底材电弧喷铝涂层,并能起到对腐蚀的抑制作用,延缓了电弧喷铝涂层的电化腐蚀时间。同时,机械化的电弧喷涂技术,具有工艺稳定,施工涂层质量均匀,喷涂效率高的特点,可以满足钢结构大面积的长效防腐的施工。

7 结构计算及结果

将全桥结构离散为一个空间框架体系。全桥共剖分为1468个结点,2144个单元。钢管混凝土构件在正常使用极限状态下的刚度按《钢管混凝土结构设计及施工规程》(CECS 28:90)规定取值。活载采用车道荷载 $q_k=10.5$ kN, $p_k=360$ kN。

主要计算结果:拱肋在使用荷载下全截面受压,未出现拉应力。拱脚轴力31966.0 kN,剪力161.9 kN,弯矩2791.8 kN·m。拱顶上弦轴力7401.9 kN,剪力252.4 kN,弯矩69.9 kN·m。拱顶换算弯矩为3653.4 kN·m钢管最大压应力为99960 kPa,最大拉应力为55619 kPa。活载引起的最大挠度为4.5 cm。成桥状态满跨布载工况下的稳定系数 $\lambda=4.398$,失稳模态为面外半波失稳。第一阶自振频率(基频) $\omega_1=0.234$ Hz,振型为横桥向面外对称挠曲振动。失稳模态与基频振型均为面外横桥向,反映出桥宽跨比小的特点。

8 结语

随着钢管混凝土这种组合材料研究的深入,应用钢管混凝土建成的拱桥越来越多,但其结构形式多为中承式和下承式拱桥,大跨度的上承式钢管混凝土拱桥尚不多见,且多采用劲性骨架法施工,最终截面形式多为箱型。祁家渡黄河大桥采用桁式拱,在桥梁跨度和宽跨比方面有所突破,经稳定性计算,全桥满跨布载工况下的稳定系数 λ 仍达到4.398,满足规范要求。该桥失稳最不利工况在空钢管骨架合拢工况,应引入监控机制,防止在施工阶段发生危险。

祁家渡黄河大桥的建成将有力地推动当地经济的快速发展,同时也将为刘家峡库区旅游增添一道靓丽的风景,成为当地标志性的建筑。