

文章编号: 1674—8247(2018)02—0067—05

高速铁路大跨径混凝土系杆拱桥设计研究

胡步毛 鲁 昭 王江浩 李伟东

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘 要:向莆铁路引入南昌枢纽跨九龙大道时,由于桥梁梁部建筑高度受限,以及桥梁景观等设计制约因素,经方案比选后采用 108 m 大跨径混凝土系杆拱桥。本文主要介绍桥梁结构形式、构造细节和施工方案,并对结构受力、动力特性、竖向刚度、拱肋稳定性和施工控制方法等进行了全面研究,重点研究了吊杆施工控制方法。通过研究和计算,将国内外新的科研成果和理论运用在本桥的设计中,进一步扩大了混凝土系杆拱结构在铁路桥梁建设上的应用,为以后类似桥梁的设计提供了借鉴。

关键词:高速铁路;系杆拱桥;吊杆张拉

中图分类号:U448.22⁺5 文献标志码:A

Research of Long-Span Concrete Tied Arch Bridge on High Speed Railway

HU Bumao LU Zhao WANG Jianghao LI Weidong

(China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: Xiangpu Railway is controlled by the height of bridge beam and bridge landscape design when passes across Jiulong Road in Nanchang Hub. A tied-arch bridge with a large span of 108 m is used after the scheme comparison. The structural form of the bridge, structural details and construction scheme are mainly introduced in this paper. The structural stress, dynamic characteristics, vertical stiffness, stability of arch rib and construction control methods are comprehensively studied. The construction control method of suspender is studied emphatically. The new research achievements and theories at home and abroad are applied to the design of the bridge based on research and calculation, which has further expanded the application of the concrete tied arch structure in the railway bridge construction and provides a reference for the design of similar bridges in the future.

Key words: high-speed railway; tied arch bridge; suspender tension

系杆拱桥是由拱肋、系梁(系杆)、吊杆和桥面系等组成的梁拱组合体系,具有跨越能力大、梁部结构高度小、轻盈美观等优点。随着我国高速铁路的大量修建,在线路小角度斜交跨越城市干道、高速公路、通航河流等需要桥梁跨度大且线路以下净空高度受限时,采用系杆拱桥能更好地满足设计要求。近年来,系杆拱桥应用越来越多、跨度逐步增大,给设计和施工带来了新的技术问题,须进行全面、细致的研究,以提高我

国高速铁路桥梁的技术水平^[1-3]。

1 工程概况

南昌向塘到福建莆田铁路引入南昌枢纽时于南昌西站前与市政道路九龙大道相交,该道路总宽约 96 m,受道路净空和立交条件所限,采用 1—108 m 混凝土系杆拱桥跨越该道路,如图 1 所示。本桥为国内高速铁路最大跨度的混凝土系杆拱桥。

收稿日期:2017-12-27

作者简介:胡步毛(1983-),男,高级工程师。

引文格式:胡步毛,鲁昭,王江浩,等. 高速铁路大跨径混凝土系杆拱桥设计研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):67-71.

HU Bumao, LU Zhao, WANG Jianghao, et al. Research of Long-Span Concrete Tied Arch Bridge on High Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 67-71.

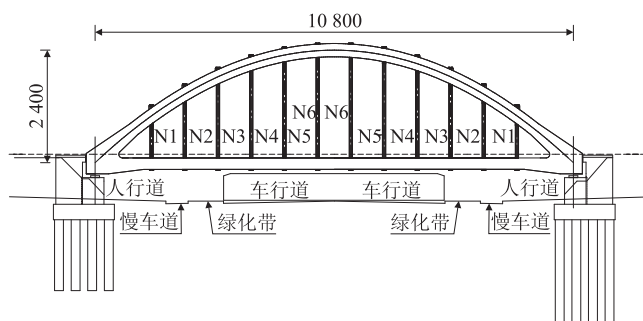


图1 九龙大道1-108 m系杆拱桥立面布置(cm)

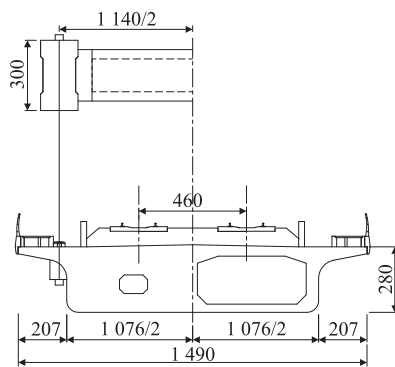


图2 梁体及拱肋构造(cm)

2 主要技术标准

- (1) 铁路等级: I 级。
- (2) 桥上线路: 双线, 线间距 4.6 m。
- (3) 设计行车速度: 250 km/h。
- (4) 设计活载: ZK 活载。
- (5) 轨道结构: 60 kg/m 钢轨, 无缝线路, 有砟轨道。
- (6) 地震动峰值加速度: 本桥桥址处位于地震动峰值加速度 0.05 g 的地区。
- (7) 施工方法: 采用满堂支架施工, 先施工梁部, 再施工拱部及其它。

3 结构设计

(1) 主梁及拱肋

系杆拱桥全长 112 m, 理论矢高 24 m, 矢跨比为 1/4.5, 拱轴线为二次抛物线 ($y = x^2/121.5$), 拱肋中心距为 11.4 m。拱肋为钢筋混凝土构件, 空心截面, 高 3.0 m, 宽 1.6 m。两拱肋之间设 5 道钢筋混凝土横撑与拱肋连接, 横撑为矩形空心截面, 高 2.2 m, 宽 1.0 m, 在与拱肋交接处设倒角, 以避免角隅处应力集中。

主梁为单箱双室截面, 跨中梁高 2.8 m, 端部加高至 3.8 m, 跨中桥面宽 14.9 m, 端部加宽至 15.5 m, 跨中箱宽 10.76 m, 端部加宽至 13.4 m。梁体顶板厚 40 cm, 底板厚 35 cm, 中腹板厚 40 cm, 边腹板厚 53 cm, 在梁体端部均局部加厚。在各吊杆位置设 60 cm 厚横隔板, 在箱梁端部设 5 m 端横梁, 横隔板与端横梁中部设有供检查人员通过的孔洞。梁体及拱肋构造如图 2 所示。

(2) 吊杆

吊杆采用柔性双索吊杆, 每根吊杆由 2 根 GJ15-17 新型环氧喷涂整体挤压成束钢绞线组成, 吊杆采用在拱肋顶单端张拉, 吊杆下端设置 CLY250-145H 型液压传感器, 以监控索力变化情况。全桥共设 12 对吊杆,

梁上间距均为 7.5 m。

(3) 纵向、横向及竖向预应力

梁部纵向预应力束采用 15 ~ 15.2 mm 钢绞线, 其中顶板通长束 30 束, 顶板短束 20 束, 底板、腹板通长束分别为 31 束、18 束。

顶板沿桥梁纵向每隔 50 cm 布置一道 3 ~ 15.2 mm 横向预应力钢绞线, 每道横隔板靠近底板处布置两道 3 ~ 15.2 mm 横向预应力钢绞线, 间距 40 cm, 端横梁靠近底板处各布置两道 3 ~ 15.2 mm 横向预应力钢绞线, 间距 70 cm。横向预应力均采用单端张拉。

拱趾处设竖向预应力筋, 采用 $\Phi 32$ 高强精轧螺纹粗钢筋。

4 施工方案

系杆拱桥施工采用先梁后拱的方法, 梁体在支架上现浇, 张拉部分纵向预应力束后, 在梁体上搭设支架浇筑拱肋。拱肋成形后, 张拉梁体剩余预应力钢束, 然后拆除拱肋支架, 对吊杆进行初张拉。之后拆除梁体支架, 进行桥面铺装和附属施工, 采用无应力状态控制法对吊杆进行终张拉, 完成全桥施工。

施工时应注意拱脚部分混凝土应于梁体一同浇筑, 保证拱脚的整体性。拱脚处布置有支座锚固螺栓、锚垫板、纵横向预应力等大量构件, 应仔细振捣确保其灌注质量, 由于钢筋布置较密, 灌注的骨料不能大于其灌注部位钢筋最小净距的一半。系杆拱施工时搭设的支架必须具有足够的强度与刚度, 且必须设在牢固的地基上, 施工时应应对支架进行预压, 消除支架的非弹性变形以防梁体在恒载作用下产生沉降而引起梁体变形和开裂。

5 结构计算与分析

5.1 计算模型

本文采用 MIDAS/Civil 软件建立了全桥整体计算

模型,主梁和拱肋采用梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,全桥共计 206 个梁单元、26 个桁架单元,模型如图 3 所示。

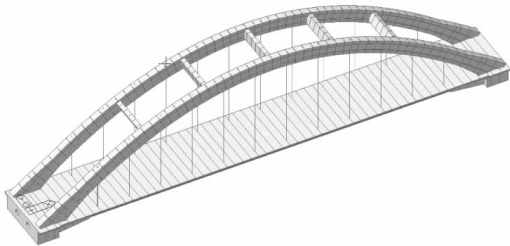


图3 全桥计算模型

5.2 主要计算结果

(1) 梁体和拱肋应力检算

运营阶段梁体和拱肋应力如表 1 所示。

表 1 运营阶段梁体和拱肋应力表 (MPa)

项目	上缘最大	上缘最小	下缘最大	下缘最小
主力组合系梁	-12.8	-5.2	-11.8	-4.8
主力组合拱肋	-12.5	-5.1	-10.8	-2.2
主+附组合系梁	-13.7	-4.8	-12.3	-0.5
主+附组合拱肋	-13.5	-3.9	-12.8	-0.2

注:受拉为正,受压为负

由表 1 可知,梁体和拱肋在主力和主+附荷载作用下,均处于受压状态,最大压应力小于规范限值,满足规范要求。

(2) 吊杆检算

运营阶段吊杆内力和应力计算结果如表 2 所示。

表 2 运营阶段吊杆检算表

工况	吊杆编号	最大轴力/kN	最小轴力/kN	最大应力/MPa	最小应力/MPa	应力幅/MPa	安全系数
主力组合	N1	2 331.8	2 031.5	489.9	426.8	-	3.8
	N2	2 468.1	1 987.6	518.5	417.6	-	3.6
	N3	2 641.5	2 049.1	554.9	430.5	-	3.4
	N4	2 750.7	2 096.5	577.9	440.4	-	3.2
	N5	2 907.6	2 223.9	610.8	467.2	-	3.0
	N6	2 927.7	2 235.0	615.1	469.5	-	3.0
主+附组合	N1	2 496.2	1 859.2	524.4	390.6	-	3.5
	N2	2 597.5	1 844.5	545.7	387.5	-	3.4
	N3	2 752.7	1 925.9	578.3	404.6	-	3.2
	N4	2 853.3	1 986.5	599.4	417.3	-	3.1
	N5	3 006.8	2 121.7	631.7	445.7	-	2.9
	N6	3 028.7	2 133.6	636.3	448.2	-	2.9
活载作用	N1	332.9	-0.8	69.9	-0.2	70.1	-
	N2	532.5	-1.3	111.9	-0.3	112.2	-
	N3	656.7	-1.5	138.0	-0.3	138.3	-
	N4	725.3	-1.6	152.4	-0.3	152.7	-
	N5	758.2	-1.6	159.3	-0.3	159.6	-
	N6	768.2	-1.5	161.4	-0.3	161.7	-

注:受拉为正,受压为负

由表 5 可知,吊杆最小安全系数均大于 2.5,吊杆内力活载占比 25% 左右,恒载占比较大。

(3) 结构动力特性计算

结构自振频率如表 3 所示,一阶振型模态如图 4 所示。

表 3 结构自振特性计算表

模态阶次	频率/Hz	振型特征
1	0.614	拱肋横向对称弯曲
2	1.398	拱、梁竖向弯曲
3	1.420	拱肋横向反对称弯曲
4	1.891	梁竖向弯曲
5	2.451	拱、梁反向横弯,整体结构扭转

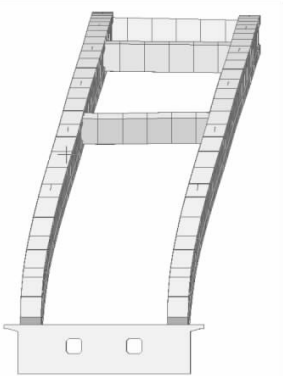


图4 结构一阶振型

由自振振型和频率分析可知,第一阶振动为拱平面外的侧向振动,第二阶为拱及主梁在面内的竖向振动,说明桥跨结构面外侧向振动影响强于面内竖向振动影响,面外稳定性弱于面内稳定性。

(4) 结构竖向刚度

运营阶段,在活载的作用下,结构竖向刚度如表 4 所示。

表 4 结构竖向刚度

项目内容	数值	容许值
跨中挠度/mm	27	108
挠跨比	1/4 000	1/1 000
梁端转角/‰	1.1	2.0

由表 4 可知,结构整体竖向刚度较大,在活载作用下,挠跨比仅为 1/4 000,梁端竖向转角仅为 1.1‰,均远小于规范限值,说明结构有足够的刚度,满足高速列车的安全性和旅客乘坐的舒适性要求。

(5) 结构稳定性验算

将自重、二期恒载、活载等作为参考荷载,对结构进行屈曲分析,结构前五阶屈曲分析结果及失稳模态如表 5 所示。

表 5 结构失稳计算结果

阶次	特征值
1	10.768
2	13.325
3	15.683
4	20.831
5	30.187

拱肋一阶失稳模态为拱肋横向反对称弯曲如图 5 所示。结构前 5 阶失稳模态均为拱肋横向失稳,说明结构竖向刚度远大于横向刚度,拱肋一阶弹性稳定系数为 10.768,大于规范要求 4.0,满足规范要求。

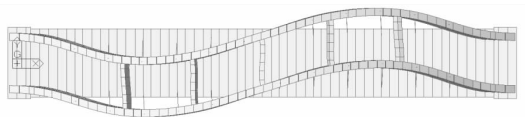


图 5 拱肋一阶失稳模态

(6)施工控制计算

本桥跨度较大,吊杆对数较多,吊杆力的确定和实施直接影响到成桥结构的受力状态和线型,是设计的关键所在^[4-5]。在以往系杆拱桥设计和施工中,吊杆张拉大多采用张拉力进行控制,但施工过程中,需多次张拉,每次张拉对全桥吊杆力均有影响,并直接影响到结构受力和线型^[6-7]。如何让索力调整简便易行,并以此指导设计和施工,是系杆拱桥设计的关键技术之一。本桥吊杆张拉采用斜拉桥设计和施工控制中普遍采用的无应力状态控制法,以系杆拱桥吊杆在成桥状态索力对应的无应力长度为控制目标,简化施工阶段

分析,仅在最后一次张拉时,将吊杆由当前长度通过张拉调整到预定的无应力长度,使成桥状态与设计相符^[8-10]。

设计时吊杆张拉分为两个阶段,采用满堂支架施工完成主梁和拱肋后,初张拉吊杆,每单根吊索施加初张力 500 kN,每根吊杆两根吊索初张力合计为 1 000 kN,张拉顺序为 N3→N6→N5→N2→N4→N1。吊杆初张拉完成 30 d 后进行桥面系施工,桥面系施工完成后清除施工临时荷载,进行吊杆终张拉。吊杆终张拉采用无应力索长法,操作方法为将固定端和张拉端的球形垫板卡至吊杆无应力长度的起点及终点处,成桥后吊杆索力自然与设计索力吻合。

由于采用无应力索长控制吊杆张拉,所以在模型里利用 MIDAS/Civil 软件施工分析控制中的体外力施加吊杆初张力,可简化吊杆张拉流程,调索阶段所有吊杆一次性张拉完成。吊杆无应力长度计算如表 6 所示。

施工调索时,应用无应力状态控制方法,对吊杆进行一次调整张拉到位,调索完成后,实测索力与设计索力对比如表 7 所示。

表 6 吊杆无应力长度计算表

吊杆编号	梁受荷载后 竖向变形 Δ_i1 /m	梁预拱度 Δ_i2 /m	梁竖向变 形和 Δ_i /m	拱受荷载后 竖向变形 Δ_j1 /m	拱预拱度 Δ_j2 /m	拱竖向变 形和 Δ_j /m	成桥后理论 长度 l_2 /m	无应力长度 l_3 /m	伸长量 Δl /mm
N1	-0.014	0.020	0.006	-0.017	0.022	0.005	12.378	12.348	29.3
N2	-0.020	0.028	0.009	-0.019	0.025	0.006	16.837	16.798	39.0
N3	-0.024	0.035	0.010	-0.019	0.025	0.006	20.386	20.337	48.7
N4	-0.029	0.040	0.011	-0.018	0.023	0.006	23.026	22.970	56.2
N5	-0.033	0.044	0.011	-0.017	0.022	0.004	24.761	24.697	64.1
N6	-0.035	0.046	0.011	-0.017	0.020	0.003	25.592	25.526	66.6

由表 7 可知,按无应力索长控制终张拉调索后,实测索力与设计索力目标值差别均在 3% 以内,实测索力与设计索力基本吻合,符合设计要求。

6 结束语

系杆拱桥采用系杆承受拱的推力,在桥梁建筑高度受限或桥址地质不良地区,而又需要较大跨度时,是较为合理的桥式之一。向莆铁路引入南昌枢纽跨九龙大道时,桥下受道路净空控制,桥上线路标高受引入南昌枢纽标高控制,且对桥梁景观要求较高,故采用了系杆拱桥方案。本桥建成后景观效果良好,已成为南昌城区九龙大道上的一个标志性景点。

本桥设计行车速度 250 km/h,拱肋采用混凝土结构,跨度 108 m,为国内同类桥梁中最大跨度。设计中

对结构受力、动力特性、竖向刚度、拱肋稳定性和施工控制方法等进行了全面研究。通过研究和计算,得到以下结论:

- (1)混凝土系杆拱桥竖向刚度较大,挠跨比和梁段竖向转角均远小于规范限值,能较好地满足高速列车的安全性和旅客乘坐舒适性的要求。
- (2)拱肋面外稳定性较差,设计中应加强拱肋横向连接,保证整体稳定系数满足规范要求。
- (3)应用无应力状态控制方法,施工过程中,可根据结构受力状态的要求,张拉和调整吊杆索力,保证施工安全即可。吊杆最终张拉调整时,只需按无应力长度进行控制,调索顺序可灵活掌握,降低了施工控制的难度。

表7 索力对比表

[illegible]

参考文献:

- [1] 陈列,郭建勋,李小珍.高速铁路钢系杆拱桥[M].北京:中国铁道出版社,2010.
CHEN Lie, GUO Jianxun, LI Xiaozhen. High Speed Railway Steel Tied Arch Bridge[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [2] 王敏,王玉珏,杨咏漪,等.高速铁路系杆拱桥设计研究[J].高速铁路技术,2010,1(3):21-26.
ZHU Min, WANG Yujue, YANG Yongyi, et al. Design of Tie-arch Bridge for High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(3): 21-26.
- [3] 沙培洲.高速铁路大跨度简支系杆拱桥设计研究[J].铁道标准设计,2012,56(7):60-64.
SHA Peizhou. Design Research on Simply Supported Tied-Arch Bridge with Long-Span in High Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2012, 56(7): 60-64.
- [4] 邵旭东.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2005.
SHAO Xudong. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [5] 裘伯永,盛兴旺.桥梁工程[M].北京:中国铁道出版社,2005.
QIU Boyong, SHENG Xingwang. Bridge Engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [6] 盛兴旺,张同飞.系杆拱桥吊杆千斤顶张拉力确定方法及其应用[J].铁道科学与工程学报,2010,7(3):11-15.

- SHENG Xingwang, ZHANG Tongfei. Method to Determine the Jack Tensile Force of Rod of Tied Arch Bridge and the Application [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(3): 11 - 15.
- [7] 张同飞. 先梁后拱施工的系杆拱吊杆张拉方案研究[J]. 铁道标准设计, 2011, 55(7): 65 - 68.
- ZHANG Tongfei. Scheme on How to Stretch Suspenders of Tied Arch Bridge with Beam-First-and-Arch Construction Craft [J]. Railway Standard Design, 2011, 55(7): 65 - 68.
- [8] 秦顺全. 斜拉桥安装无应力状态控制法[J]. 桥梁建设, 2003, 33(2): 31 - 34.
- QIN Shunquan. Control Method of Stress-Free Status for Erection of Cable-Stayed Bridges [J]. Bridge Construction, 2003, 33(2): 31 - 34.
- [9] 秦顺全. 桥梁施工控制—无应力状态法理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- QIN Shunquan. Bridge construction control—Theory and Practice of Stress-free State Method [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [10] 黄晓航, 高宗余. 无应力状态控制法综述[J]. 桥梁建设, 2010, 40(1): 71 - 74.
- HUANG Xiaohang, GAO Zongyu. A Summarized Account of Unstressed State Control Method [J]. Bridge Construction, 2010, 40(1): 71 - 74.

(编辑:苏玲梅)