

拱桥 PC 三角刚架受力分析及设计要点

骆炜然

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 以一座边跨为三角刚架结构形式的三跨中承式系杆拱桥为背景,通过建立全桥杆系模型及三角刚架实体模型对其进行受力分析,系统地研究该桥三角刚架结构的受力性能与特点。数值分析结果表明:三角刚架对预应力产生较为明显的约束效应,且该结构 V 形立柱受温度、基础沉降以及系杆荷载影响较为明显。为了使三角刚架受力更为合理,针对其受力性能与特点,提出一套运用施工措施调整结构内力的设计方法,并对结构设计要点进行总结。

关键词: 三角刚架; 中承式系杆拱桥; 受力分析; 施工措施

1 引言

广西玉林市容县站前大桥,为三跨中承式系杆拱桥,跨径布置为 $(37.5+150+37.5)$ m,桥面宽 42 m,桥型如图 1 所示。该桥主跨 150 m,拱圈矢高 40 m,矢跨比 1:3.75,拱轴线为二次抛物线。拱脚至拱顶截面高 4~2.5 m,线性变化。该桥为突出景观效果,边跨取消了拱上立柱,采用三角刚架的结构形式。其受力构件由三角刚架、主拱圈、桥面系以及吊杆、系杆组成。该桥与飞鸟式拱桥有着截然不同的结构体系。其中,三角刚架是该桥最为重要、也是受力最为复杂的构件。该文针对三角刚架进行数值模拟分析,研究其受力性能与特点及关键设计技术。

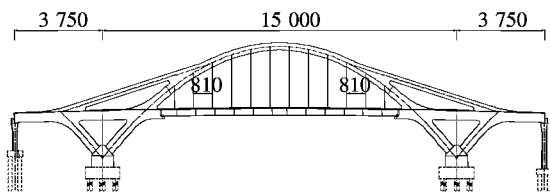


图 1 桥型布置图(单位:cm)

2 三角刚架结构布置及数值模拟

三角刚架作为该桥重要受力构件,综合了主拱圈基座、系杆锚固点以及边跨桥面系的功能。该结构在顺桥向由 V 形立柱及主纵梁构成三角形刚架;在横桥

向则由 V 形立柱、横梁、小纵梁以及桥面板组成“门”形框架,横梁间距为 3~4 m,各部件在节点处均采用固结。此外,拱桥系杆分别锚固于 V 形立柱顶部。三角刚架采用 C60 混凝土。利用 Midas Civil 软件,建立全桥空间杆系模型,其中三角刚架采用梁格法模拟。

系杆锚固点、V 形立柱与主纵梁结合部为应力扰动区,利用 Midas FEA 软件,建立三角刚架实体模型,并从全桥杆系模型中提取相关荷载进行计算。

表 1 为两个模型在相同荷载工况(恒载+预应力+降温+系杆)的分析结果。应力计算点如图 2 所示。

表 1 三角刚架扰动区应力计算结果 MPa

位置	主梁顶应力		主梁底应力	
	实体模型	杆系模型	实体模型	杆系模型
P1	4.0	3.8	11.9	14.1
P2	2.2	3.3	15.3	14.2
P3	1.6	3.0	13.6	14.5
P4	1.6	2.3	11.6	14.2
P5	2.2	2.2	9.3	13.6
P6	2.8	2.1	7.3	12.8
P7	1.5	2.4	11.9	12.4
P8	5.8	4.8	3.3	6.8
P9	5.4	3.6	9.6	7.9
P10	5.8	4.0	10.7	8.9
P11	8.2	5.6	7.5	9.6
P12	8.3	5.7	5.9	9.6

注:表中压应力为正;杆系模型与实体模型顶底板处应力均为该处平均值。

收稿日期:2019-05-12

作者简介:骆炜然,男,硕士,工程师.E-mail:1459076607@qq.com

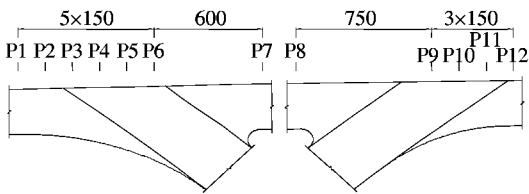


图 2 三角刚架扰动区应力计算点(单位:cm)

由表 1 可知:两种模型的结果虽然不尽相同,但应力变化趋势相吻合。除应力扰动区外,两类模型在横梁处的计算结果较为接近,表 2 为同一根横梁在相同荷载工况下应力计算结果(恒载+预应力+降温+车载+人群),且杆系单元计算结果偏保守。

表 2 横梁应力计算结果 MPa

位置	横梁顶应力		横梁底应力	
	实体模型	杆系模型	实体模型	杆系模型
跨中	7.2	8.7	0.7	1.4
L/4	6.2	6.8	3.2	4.2
端部	0.9	1.4	5.4	6.3

三角刚架是一个受力较为复杂的结构,通过不同计算手段相互校核,表明采用梁格法模拟刚架结构仍具有较好的精度,但应力扰动区需采用更精确的实体模型进行分析,以确保结构安全。

3 三角刚架受力特点

杆系模型分析结果表明:三角刚架 V 形立柱根部区域是其控制性部位。表 3、4 分别为 A、B 两侧立柱根部,在各类荷载作用下的结构内力(同号)及所占比例。

表 3 A 立柱根部结构内力及占比

荷载	$M_y/$ (kN·m)	占比/ %	$M_z/$ (kN·m)	占比/ %
降温	24 401.1	29.6	14 682.0	53.2
车载	10 795.0	13.1	1 767.7	6.4
人群	6 217.1	7.5	2 532.2	9.2
沉降	6 382.5	7.7	8 618.0	31.2
系杆	34 664.8	42.0	1.9	0.0

注: M_y 为顺桥向弯矩, M_z 为横桥向弯矩;A、B 立柱位置见图 3;基础沉降按 1 cm 考虑;整体温变按 22℃考虑;系杆荷载按 6 000 kN 考虑,下同。

表 4 B 立柱根部结构内力及占比

荷载	$M_y/$ (kN·m)	占比/ %	$M_z/$ (kN·m)	占比/ %
降温	-3 641.9	6.7	14 013.5	59.7
车载	-6 453.7	11.8	1 411.2	6.0
人群	-3 922.4	7.2	2 469.5	10.5
沉降	-12 273.6	22.4	5 570.8	23.7
系杆	-28 401.1	51.9	24.9	0.1

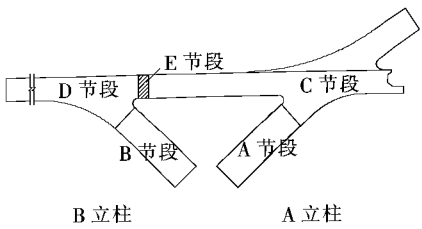


图 3 三角刚架施工分段示意

综上所述,该桥三角刚架结构有以下特点:① 结构在顺桥向对系杆荷载、温度荷载及基础沉降敏感,且系杆荷载占主导地位;② 结构在横桥向对温度荷载及基础沉降敏感;③ 在上述敏感荷载中,除温度荷载与基础沉降不可避免外,系杆荷载则可依据设计目标进行调整,在三角刚架的承载能力之内,应尽可能地增加系杆拉力;④ 刚架在横桥向上框架效应明显,横桥向内力不可忽略;⑤ 刚架结构对预应力效应有约束作用,即刚架结构存在削弱预应力效应的情况。针对上述力学特点,在结构设计阶段,应采取相应措施,减少其不利影响。

4 三角刚架设计要点

针对三角刚架的力学特性,提出相应的施工措施来减少其不利因素,具体方案如下。

(1) 针对刚架对预应力的约束问题,三角刚架应采取分段施工的措施。图 3 为三角刚架 A~E 共 5 个施工节段,采用支架+预应力拉杆施工方案。即先施工 V 形立柱 A、B 立柱,再施工 C、D 节段,最后施工 E 合龙段。预应力钢束按照施工节段分段布置,在交界面上采用连接器接长。

三角刚架建成时,较一次落架而言,采用分段浇筑施工方法,主纵梁压应力储备较大(表 5),可有效地增强预应力效应。

(2) 由于合龙温度对三角刚架的内力影响显著。因此 C、D 节段中设置一段 1.5 m 的合龙段(E 节段),

表 5 主纵梁应力计算结果

部位	应力点	应力/MPa	
		分段浇筑	一次落架
主纵梁跨中	梁顶	-7.3	-5.2
	梁底	-8.4	-5.5
主纵梁与 A 立柱节点	梁顶	-11.1	-10.2
	梁底	-1.7	-2.7
主纵梁与 B 立柱节点	梁顶	-9.8	-8.3
	梁底	-3.3	-4.0

以便在气温较低的夜间锁定合龙机构并快速完成混凝土浇筑。此外 C、D 节段同时施工,有利于缩短工期。

(3) 对于基础不均匀沉降,可采用桩底注浆工艺减少沉降量。

(4) 该桥系杆荷载的取值主要决定于三角刚架的承载能力。在系杆荷载作用下,V 形立柱产生向桥跨中一侧的弯曲变形。经计算,对 A 立柱而言,根部底板混凝土首先达到抗压承载力极限;同理,对 B 立柱而言,根部底板混凝土首先达到抗拉承载力极限。且随着系杆荷载增加,B 立柱根部底板混凝土开裂先于 A 立柱根部底板混凝土压溃,此时,A 立柱根部最大压应力为 17.2 MPa。故系杆张拉基准荷载由 B 立柱根部抗裂承载能力决定。

为达到增加系杆拉力的目标,该文提出一种调整刚架立柱内力的方法,即通过交界墩处支座回落,迫使立柱产生向交界墩一侧的弯曲变形。经计算,在支座回落过程中,对 A 立柱而言,根部底板混凝土拉应力首先达到抗拉承载力极限;同理,对 B 立柱而言,根部顶板混凝土首先达到抗拉承载力极限。且随着支座回落高度的增加,B 立柱根部顶板混凝土开裂率先发生。由此可见 B 立柱短期应力限值决定了系杆张拉荷载。

经计算,B 立柱根部顶板混凝土在施工阶段拉应力不超限的情况下,交界墩处可最大设置 5 cm 强制位移,此时单侧系杆荷载增加约 7 550 kN,该措施有效降低了基础的水平推力。对于未能通过系杆平衡的水平推力,仍需要通过桥梁基础承担。

三角刚架内力调整实施方案:施工 D 节段时,预

先在交界墩支座处设置砂箱,并调整 D 节段预拱度,使整个结构产生预抬。在三角刚架施工完成后,逐步拆除支架,并释放交界墩处砂箱,使三角刚架逐步回落至支座处,从而完成刚架内力调整。

5 结论

以一座三跨中承式系杆拱桥为背景,运用不同的有限元模型对三角刚架的力学性能与特点进行分析研究。为充分发掘结构潜力,针对该桥三角刚架力学特点,提出了减少刚架约束效应以及增加系杆张拉力的措施,可得如下结论:

(1) 三角刚架结构对温度、支座沉降以及系杆荷载较为敏感,其影响远超过汽车与人群荷载。

(2) 三角刚架立柱在横桥向受力不可忽略。

(3) 三角刚架 B 立柱承载能力对全桥系杆荷载起决定性作用。

(4) 刚架结构对预应力有较为明显的约束作用。

(5) 对于三角刚架应力扰动区,实体单元分析结果较为可靠。

(6) 通过分段施工,分段张拉钢束,有效地增强了预应力效应。

(7) 通过设置合龙段,以便在有利温度下实现快速合龙。

(8) 通过采用支座回落的方法调整三角刚架立柱内力,使 V 形立柱产生预压效应,使得系杆张拉力得以增加,有效降低了基础水平推力,节约了工程投资。

参考文献:

- [1] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].3 版.北京:人民交通出版社,2016.
- [2] 陈宝春,郑怀颖.钢管混凝土飞鸟式拱桥桥型分析[J].中外公路,2006(6).
- [3] 刘来君,杨雨厚,陈永瑞,等.三角刚架斜腿约束作用及影响系数实用计算方法[J].中国公路学报,2015(4).
- [4] 刘智.V 形预应力混凝土斜腿结构无支架施工技术[J].低碳世界,2017(20).
- [5] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].