

钢管混凝土系杆拱桥施工分析与施工控制

李 杰, 陈 淮, 冯冠杰

(郑州大学 土木工程学院 河南 郑州 450001)

摘要: 为了保障钢管混凝土系杆拱桥施工安全和质量,以南水北调中线工程某钢管混凝土系杆拱桥为例,采用有限元软件 MIDAS/Civil 建立该桥有限元计算模型,按照施工过程详细分析各施工阶段的变形、吊杆力和应力,对吊杆成桥张拉力进行探讨,并选用自适应控制方法进行现场施工控制.由数值分析和现场监控结果可以得出,大桥在施工过程中结构的变形较小,受力满足设计规范要求;考虑到钢管混凝土系杆拱桥拱肋、系梁的刚度相对较柔,可采用恒载索力作为成桥张拉索力控制值,并以成桥后系梁和拱肋线形作为吊杆索力调整的施工依据;施工控制表明成桥线形和受力满足设计要求,成桥索力与恒载索力基本吻合.

关键词: 钢管混凝土; 系杆拱; 施工分析; 施工控制

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-6841(2016)01-0110-06

DOI: 10.3969/j.issn.1671-6841.201503002

0 引言

钢管混凝土系杆拱桥属于无推力的梁拱组合体系桥梁,受力明确,具有强度高、造型美观等优点,充分发挥被组合体系的特点和组合作用.一般为外部静定、内部超静定结构,避免了在软弱地基上建造混凝土拱桥所承担的风险,进而达到节约材料和降低对地基要求的设计思想^[1],因此该类桥梁结构在我国得到了广泛的应用^[2-3].但是该桥型内部高次超静定,技术含量高,施工难度大,施工过程中温度和施工荷载变化等因素,使得结构的应力、应变和吊杆索力不可能与设计计算值保持一致,而拱肋线形一旦形成,很难调整.为了确保主桥在施工过程中结构内力和变形始终处于安全范围内,且成桥后的线形满足设计要求,结构恒载受力状态接近设计期望,在桥梁施工过程中必须进行实时数值仿真分析和严格的施工控制,以保证成桥内力和线形符合要求.目前,桥梁施工控制方法主要有三类^[4]:开环控制、反馈控制和自适应控制.预先控制和反馈控制相结合的自适应控制方法为施工前控制,该方法通过施工过程的反馈测量数据不断更正用于施工控制的跟踪分析程序的相关参数,全面考虑影响桥梁结构状态的各种因素和设计目标,在施工过程中不断地对结构计算模型中所用的计算参数(如弹性模量、容重等)进行识别修正,使结构计算模型和实际结构磨合一段时间后,自动适应结构的物理力学规律和实际施工过程,减小理论值与实测值的偏差,当计算分析程序能够较准确地反映桥梁实际施工过程后,就可以用分析结果指导后续的施工过程^[5-11].

本文以南水北调中线工程某钢管混凝土系杆拱桥为例,采用桥梁专用数值分析软件建立该桥有限元计算模型,考虑施工中的影响因素进行施工全过程数值分析,详细计算各施工阶段的变形、吊杆力和应力,并对吊杆的成桥张拉力调索进行优化,以此作为现场自适应控制的理论数据,最后与施工控制实测数据进行了对比校核.

1 钢管混凝土系杆拱桥施工分析

1.1 工程概况

依托工程为横跨南水北调中线总干渠的生产桥(如图 1 所示,有上角标的为对应上游侧编号),按照工

收稿日期: 2015-08-15

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(162300410264).

作者简介: 李杰(1974—),男,陕西宝鸡人,副教授,博士,主要从事桥梁结构理论及力学行为研究, E-mail: lijie2007@zzu.edu.cn.

引用本文: 李杰,陈淮,冯冠杰.钢管混凝土系杆拱桥施工分析与施工控制[J].郑州大学学报(理学版),2016,48(1):110—115.

程要求和渠道止水影响要求,考虑景观需求及审查意见,大桥采用跨径 93 m 的梁拱体系下承式钢管混凝土无推力系杆拱桥.主拱拱肋采用等截面哑铃形钢管混凝土结构,拱轴线为二次抛物线,计算跨径 90 m,计算矢跨比为 1/5;桥梁全宽 7.7 m;主拱肋外轮廓为等截面哑铃形,弦杆钢管直径 820 mm,板厚 16 mm,拱肋受力构件均采用 Q345C 钢材;拱肋上下弦钢管中灌注 C50 微膨胀混凝土,两拱肋间

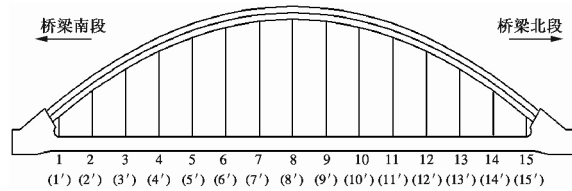


图 1 钢管混凝土系杆拱桥立面
Fig. 1 Elevation of concrete filled steel tubular tied arch bridge

设置 3 道“一”字平面桁式横撑和 2 道“K”字桁式横撑;每道拱肋拱脚间设置 1 道刚性系梁,系梁采用 C50 预应力混凝土箱形梁,截面为 1.5 m × 2.0 m 的单箱单室,每侧系梁配置 16 束(2 束备用) φ19 × 15.24 的预应力束平衡拱肋水平推力;全桥共设 15 对吊杆,其纵向间距 5.5 m,吊杆采用 PES7-73 镀锌高强平行钢丝;横梁分为中横梁和端横梁;桥面板采用先简支后结构连续的混凝土 T 梁;下部为钻孔灌注桩群桩基础.大桥上部结构采用满堂支架施工桥面系,在桥面系上搭设拱肋支架,拱肋节段工厂预制,陆路运输,工地焊接、吊装,最后单拱肋合龙.

1.2 有限元模型及施工分析工况

采用桥梁有限元专用软件 MIDAS/Civil,建立南水北调中线干渠跨渠钢管混凝土系杆拱桥的有限元计算模型.拱脚采用实体单元;系梁、横梁、钢管及其灌注的混凝土、横撑、哑铃钢板及加劲缀板等采用空间梁单元模拟,吊杆采用索单元模拟;哑铃钢管及其灌注的混凝土、吊杆与系梁间、系梁与拱脚间均采用节点弹性连接(刚性)模拟;系梁和横梁的满堂支架采用只受压弹性支承模拟,考虑混凝土收缩徐变效应、水泥强度随时间变化等因素;T 梁采用梁单元模拟,与吊杆横梁连接处释放部分约束模拟为简支,二期铺装桥面、防撞护栏以线荷载模拟.系杆拱外部为简支静定体系,故一侧拱脚约束 3 个平动,另一侧拱脚约束竖向平动和 X、Z 两个方向的转动.全桥计算模型共计划分 4 010 个节点,3 820 个单元.根据施工组织设计和大桥施工过程,共分析了 11 个工况,如表 1 所示.

表 1 施工分析工况

Tab. 1 Load case of construction analysis

工况序号	内容
CS1	支架预压完成后,浇筑系梁、拱脚、横梁的混凝土,并张拉系梁和横梁的第一批预应力束,搭设拱架,拼装第一段拱肋钢管
CS2	搭设跨中拱架
CS3	拼装第二段拱肋钢管,并拼装横撑
CS4	拼装第三段拱肋钢管,并拼装横撑,钢管拱肋合龙,拆除拱架
CS5	灌注钢管下弦微膨混凝土
CS6	灌注钢管上弦微膨混凝土,张拉第二批系梁预应力束
CS7	安装吊杆并第一次张拉吊杆,张拉第三批系梁预应力束
CS8	拆除系梁、横梁支架
CS9	装配 T 形纵梁(作为二期恒载一部分),张拉第二批横向预应力束
CS10	第二次张拉吊杆
CS11	二期铺装,调索

1.3 施工分析结果

有限元数值分析充分考虑施工现场的变化因素影响,通过对模型中的一些结构参数、边界约束、龄期等的修正调整,尽可能使模型与现场施工的实际状态相一致.限于篇幅,表 2 给出了 CS4、CS7、CS9、CS10 四个关键阶段的部分分析结果.

从表 2 中可以看出,拱肋跨中的最大竖向变形为 -9.3 mm,系梁支撑在支架上时没有竖向变形,落架后由于吊杆张拉最大竖向变形为 7.4 mm,成桥后系梁跨中上挠 1.7 mm,拱肋和系梁变形较小,且系梁和拱肋的变形较平顺;在施工过程中,由于系梁预应力张拉使得梁全截面受压,压应力最大为 -14.0 MPa,小于系

梁混凝土抗压设计强度,满足规范要求;钢管拱肋应力水平较低,成桥后最大组合应力为 -105.5 MPa ,远小于Q345C钢材的限值;成桥后吊杆最大力为 650.1 kN ,最小力为 511.9 kN ,所有吊杆力分布较均匀,且吊杆力安全储备较充足.通过以上分析表明,南水北调中线钢管混凝土系杆拱桥的施工过程安全可靠.

表2 施工分析部分计算结果

Tab. 2 Part analytical results of construction analysis

工况序号	最大竖向变形/mm		系梁最大组合应力/MPa		钢管拱肋最大组合应力/MPa	吊杆力/kN	
	拱肋跨中	系梁跨中	顶板	底板		最大	最小
CS4	-6.0	0.0	-7.4	-7.1	-18.9	—	—
CS7	-2.8	0.0	-13.6	-13.3	-74.5	436.2	306.3
CS9	-6.3	7.4	-14.0	-12.8	-95.6	580.3	507.3
CS10	-9.3	1.7	-12.7	-12.0	-105.5	650.1	511.9

2 成桥吊杆张拉力讨论

吊杆张拉是钢管混凝土系杆拱桥施工的关键步骤,吊杆张拉是按照设计文件提供的成桥张拉力进行实施.张拉完成后,由于吊杆、拱肋、系梁的内力重分配、弹性变形等,结构最终稳定后吊杆中永存的吊杆力与此前的张拉力不同,而且拱肋和系梁的变形也会由于吊杆张拉力的不同而有所差异.表3分析了不同吊杆张拉控制力下拱肋、系梁的变形以及吊杆中索力大小,其中吊杆编号如图1所示,考虑到结构基本对称仅给出1~8号吊杆力及对应吊杆处拱肋、系梁的竖向变形.

表3 不同吊杆张拉控制力下的变形和永存吊杆力

Tab. 3 Displacement and final tension of different hanger rod control tension

张拉方案	吊杆编号	吊杆力/kN		吊杆对应位置竖向变形/mm	
		张拉控制力	成桥后永存力	拱肋	系梁
设计方案	1	500	511.9	-1.1	-0.7
	2	600	616.5	-2.9	-1.4
	3	650	611.0	-4.8	-1.6
	4	700	604.3	-6.4	-1.2
	5	750	610.9	-7.6	-0.5
	6	800	614.4	-8.1	0.3
	7	900	612.1	-8.6	1.0
	8	1 150	746.9	-9.5	1.3
优化方案(一)	1	500	511.9	-1.1	-0.7
	2	600	616.3	-2.9	-1.4
	3	650	609.2	-4.8	-1.5
	4	700	598.3	-6.4	-1.1
	5	750	598.9	-7.7	-0.2
	6	850	648.5	-8.2	0.8
	7	950	650.1	-8.5	1.5
	8	1 050	640.8	-9.3	1.7
优化方案(二)	1	550	560.0	-1.1	-0.7
	2	600	606.9	-2.9	-1.2
	3	650	634.1	-4.8	-0.9
	4	750	643.8	-6.6	0.0
	5	850	642.0	-7.9	1.3
	6	900	640.5	-8.3	2.5
	7	1 000	644.3	-8.6	3.3
	8	1 100	635.9	-9.3	3.6

由表3可以看出,吊杆张拉力的差异对成桥后各吊杆力的均匀、系梁和拱肋的线形有一定的影响。根据分析,成桥稳定后吊杆中永存力和系杆拱桥的恒载作用产生的张拉力相近,除最短吊杆外,各吊杆力为610~650 kN,这也就是说施工中按照成桥后结构恒载产生的吊杆力作为成桥索力控制目标即可,这在文献[12]中有相关论述。同时,考虑到拱肋和系杆刚度比对吊杆张拉产生的影响,特别是跨中长吊杆在张拉过程中,在已张拉恒载对应索力的情况下,后期调索施工会由于系梁和拱肋的弹性变形而损失这部分张拉力,从3个吊杆张拉方案分析可以直观看出长吊杆反映结构的变形,而短吊杆的索力对张拉较敏感。因此,吊杆张拉施工以成桥恒载力为控制目标值,成桥后吊杆的调索施工以结构线形为主是合理可行的。按照吊杆力均匀、系梁线形微拱及拱肋变形小的原则,吊杆张拉方案(二)相对较优,最终现场施工按照优化方案(二)进行吊杆张拉。

3 施工控制措施及效果

3.1 施工控制措施

依托工程采用支架法安装施工,桥面系和拱肋形成后,受后续工序(如吊杆张力)和结构变形(如混凝土收缩徐变)影响很大,而且钢管拱肋合龙成形后,桥梁施工控制的可调因素很少,因此采用预先控制和反馈控制相结合的自适应控制方法进行控制,重点在施工前控制。对于本文依托的钢管混凝土系杆拱桥的施工控制,首先应注意支架的标高及不均匀沉降、系梁立模标高误差,其次应注意拱肋拼装尺寸误差及施工、测量时的环境温度影响,这几项为钢管混凝土系杆拱桥施工误差产生的主要原因。当然,在施工过程中误差的产生是不可避免的,当各节段的结构线形误差能控制在精度范围之内时,则不必调整;当这种误差超出控制精度范围或各工况的累积误差已不允许时,则必须进行调整。调整时,以控制截面的标高为主要调整手段。此外,由于钢管混凝土系杆拱桥与梁桥、斜拉桥等桥梁的施工控制不同,拱肋合龙后,主拱线形较难调整,只能通过调整吊杆锚具螺母的丝扣调整桥面线形,而吊杆的调整是有限的,否则有可能改变结构受力,影响结构安全。因此,要确保钢管混凝土系杆拱桥成桥线形和设计线形一致,需要对主要设计参数根据现场实测和计算识别进行调整,以保证每一梁段的理论计算标高尽可能精确且符合实际。

3.2 施工控制效果

3.2.1 吊杆索力控制 系杆拱桥在吊杆实际张拉过程中,吊杆是分批张拉的。这期间伴随着桥梁结构的变形、系梁支承体系的转换及内力的重分布,且前期张拉的吊杆索力会影响后期吊杆张拉的索力,而后期张拉吊杆亦对先期施工的吊杆索力有着直接影响,从而最终影响全部吊杆张拉完毕后的桥梁力学性能,并有可能使桥梁内力状态与设计要求不符。针对本桥的吊杆索力监控,从现场张拉和数值分析结果都表明,拱肋和系梁刚度对吊杆张拉产生较大的影响,特别是跨中长吊杆在张拉过程中,会由于系梁和拱肋的弹性变形而损失后期调整的这部分张拉力;拱脚附近刚度相对较强,吊杆力随着千斤顶的张拉而增大;也就是说对于调索而言,长吊杆张拉会由于拱和系梁的变形而损失,短吊杆的索力对张拉较敏感^[12]。因此吊杆主动张拉力以成桥恒载力为控制目标值,吊杆力的调整以结构线形是否平顺、索力是否均匀为原则。图2为终调后吊杆索力,可以看出各吊杆索力基本均匀,除端部4根短吊杆索力较大外(但受力安全,短吊杆索力受测量计算方法影响大)其余吊杆索力与成桥恒载索力相当,和理论值基本吻合。

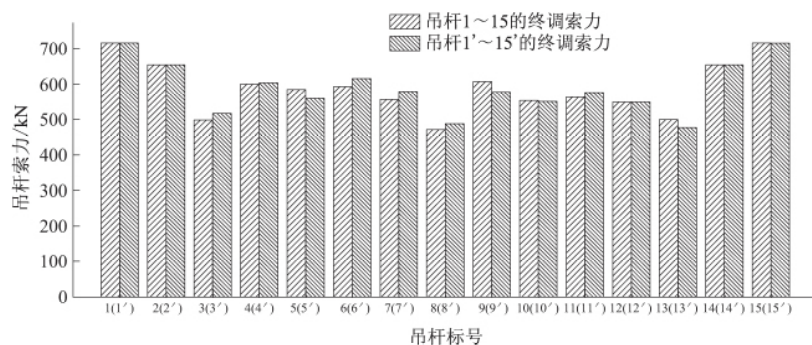


图2 终调后吊杆索力

Fig. 2 Ultimate hanger rod control tension

3.2.2 吊杆索力终调完成后成桥线形 由于该桥的高程水准控制点遗失,故成桥后线形测量以吊杆1处的桥面中线作为竖向变形参考零点,测量吊杆1~15的相对竖向变形,图3为桥面中线的相对竖向变形实测值。

设计图纸要求成桥后桥面无相对竖向变形,实测的成桥线形为行车道轴线位置处铺装层上表面的竖向高程,并取1号索处的竖向挠度为零,从图3测量数据可以看出,桥梁相对变形实测值较小,竖向相对变形最低处位于3、14号吊杆桥面位置,比1号吊杆桥面位置低3 mm,最高点位于跨中桥面附近,较1号吊杆桥面位置高3 mm,其他位置的竖向挠度较为接近,考虑到铺装层表面的不平整和测量误差,可以认为成桥后桥面线形基本平顺,即成桥后线形和理论计算值吻合,当前线形是合理的。

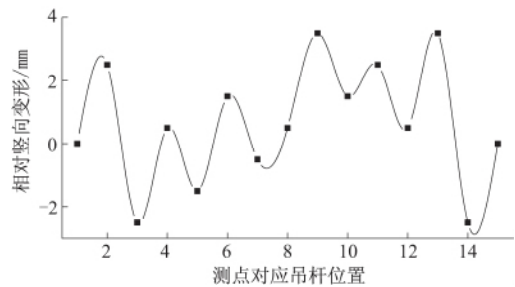


图3 成桥后竖向相对挠度
Fig.3 Relative vertical deflection after the completed-bridge

4 结论

1) 按照设计文件提供的施工步骤,南水北调中线钢管混凝土系杆拱桥施工过程中安全可靠,整个施工过程中,拱肋和系梁的变形较小,钢管拱肋的应力水平较低,系梁全截面受压,压应力储备充裕,成桥后吊杆安全储备充足;采用自适应法进行大桥施工控制可行,成桥后吊杆索力基本均匀,线形平顺,与设计要求基本吻合。

2) 吊杆张拉力的差异对成桥后各吊杆力的均匀、系梁和拱肋的线形有影响,根据分析,成桥稳定后吊杆中永存力和系杆拱桥的恒载作用产生的张拉力相近,这也就是说施工中按照成桥后结构恒载产生的吊杆力作为成桥吊杆索力控制目标即可。

3) 拱肋和系杆刚度比对吊杆张拉后吊杆力的分布会产生影响,长吊杆在张拉过程中,超过恒载索力的这部分张拉力,会由于系梁和拱肋的弹性变形而损失,拱脚附近系梁刚度相对较强,吊杆力随着千斤顶的张拉而增大,因此吊杆张拉施工以成桥恒载力为控制目标值,成桥后吊杆的调索施工以结构线形是否平顺、索力是否均匀为原则是合理可行的。

参考文献:

- [1] 金成棣. 预应力混凝土梁拱组合桥梁: 设计研究与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥施工问题研究[J]. 桥梁建设, 2002(3): 55—59.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [4] 管品武, 张智乐, 邵景干. 钢管混凝土系杆拱桥施工监控研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014(8): 158—161.
- [5] 范伟霞. 钢管混凝土拱桥施工过程力学特性分析与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [6] 杜思义, 陈淮, 王宝聚. 某下承式钢管混凝土拱桥抗震分析[J]. 郑州大学学报(理学版), 2007, 39(3): 158—162.
- [7] 陈淮, 胡峰, 李静斌. 吊杆破断情况下湛河斜靠式拱桥静力性能分析[J]. 郑州大学学报(理学版), 2012, 44(1): 116—120.
- [8] 黄英军, 徐立强. 某钢管混凝土系杆拱桥的吊杆张拉施工监控分析研究[J]. 城市道桥与防洪, 2014(6): 205—207.
- [9] 邱文亮, 张哲, 范金军. 大跨度钢管混凝土系杆拱桥施工方案研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 230—233.
- [10] 曾彦, 潘丽云, 赵顺波. 钢管混凝土叠合柱式桥墩弹塑性抗震分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2011, 24(3): 347—350.
- [11] 焦焯烽, 易建龙, 陈水福. 钢管混凝土拱桥非线性有限元分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 75—78.
- [12] 李杰, 陈淮, 江莹莹, 等. 钢管混凝土系杆拱桥吊杆力计算及调索方法研究[J]. 铁道建筑, 2014(1): 7—10.

Construction Analysis and Construction Control of Concrete Filled Steel Tubular Tied Arch Bridges

LI Jie , CHEN Huai , FENG Guanjie

(School of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China)

Abstract: The concrete filled steel tubular tied arch bridges of south-to-north water diversion middle route project was taken as an example. MIDAS/Civil software was used to build finite element model of the bridge. The displacement , stress and hanger rod tension of the bridge were analyzed respectively in detail in order to ensure construction safety and quality of the bridge in different stages of bridge construction. And the hanger rod tension of the completed-bridge was also discussed. Adaptive control method was selected to control bridge construction. The results of numerical analysis and the field monitoring showed that the structural displacement was small during construction , and the structural force satisfied the design specification. The stiffness and flexibility of the arch rib and tie beam was reasonable. The hanger rod dead-load's tension was regarded as control force. At the same time , the tie beam and arch rib's shape were selected to be the hanger rod tension adjustment foundation. From construction control , completed-bridge's shape and stress satisfied design requirements. The completed-bridge's hanger rod tension was basically coincided with the dead-load's.

Key words: concrete filled steel tubular; tied arch; construction analysis; construction control

(责任编辑: 孔 薇)

(上接第 109 页)

Manifold Learning Algorithms of Orthogonal Discriminant Based on Random Projection

MA Li , DONG Weiguang , LIANG Jinping , ZHANG Xiaodong

(Department of Automation and Electrical Engineering , Lanzhou Jiaotong University , Lanzhou 730070 , China)

Abstract: A kind of locally linear embedding algorithms based on manifold distance , MDLLE was proposed. The similarity between data can be could measured based on the manifold distance and the neighbor domain of the sample points can be selected. This could solve the neighborhood parameter sensitivity of the Euclidean distance in similarity measure. The maximum margin criterion(MMC) is introduced in the MDLLE algorithm for constructing the optimal translation and scaling model. Thus , the algorithm both can both maintain local geometric structure of LLE and have discriminant ability of Maximum margin criterion. The low-dimensional feature vector of orthogonalization can eliminate noise effects in the process of dimension reduction , and improve the supervision and discriminant ability of the algorithm. The experimental result showed that this method had good dimension reduction effect and can effectively avoid sensitivity. Random projection is independent of the original high-dimensional data , which mapped the high-dimensional data to a low-dimensional space of the random transformation matrix of line normalized. The theoretical analysis proved that the manifold learning algorithm of taking random projection could maintain high-dimensional data in low-dimensional space in high probability.

Key words: manifold learning; neighborhood selection; manifold distance; similarity measure; locally linear embedding; random projection

(责任编辑: 王浩毅)