

文章编号: 1005-0523(2015)02-0013-05

基于恒载零弯矩的大跨曲线连续刚构桥线形分析

陆之光¹, 王飞¹, 任亮²

(1.上饶市交通运输局, 江西 上饶 334100; 2.华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对大跨曲线连续刚构桥弯扭耦合导致结构线形施工控制异常复杂的问题,在总结曲线刚构桥线形影响因素的基础上,提出了施工恒载零弯矩的大跨曲线连续刚构桥线形控制系统和具体实现措施。为验证所提措施的有效性,以曲率半径1 200 m、主跨80 m的江西会昌九岭高架桥为例,采用有限元法对不同曲率半径下增加预应力束或临时斜拉塔辅助合龙实现恒载零弯矩的措施与传统设计进行了分析对比。结果表明:增加预应力束,或者临时斜拉塔辅助合龙可大大减少结构的竖向位移、横向位移和扭转位移,可以简化大跨曲线连续刚构桥施工线形控制的难度。

关键词:大跨曲线连续刚构桥;恒载零弯矩;有限元法;线形分析

中图分类号:U448.23;TU352.11

文献标志码:A

大跨曲线连续刚构桥能很好地适应地形、地貌的限制,大大减少连接线的长度,降低工程造价,因而具有非常广阔的应用前景^[1]。目前世界上最大的曲线连续刚构桥为主跨298 m、曲率半径为3 000 m的挪威拉夫特通道(RaftSunde)桥,国内最大跨度曲线连续刚构桥为1997年建成的主跨270 m、曲率半径为7 000 m的广东虎门大桥辅航道桥。与直线连续刚构桥相比,曲线连续刚构桥由于弯扭耦合的作用,在自重作用下除产生竖向位移以外,还将产生向平曲线内侧的横向弯曲,进而带动主梁产生径向偏位,大大增加主梁施工线形控制的难度。虽然目前已有不少学者借助大型有限元软件对大跨曲线连续刚构桥进行了较好的仿真分析^[2-7],但实际施工过程线形控制的复杂性和反复性并未得到根本解决。

针对上述问题,在总结曲线刚构桥线形影响因素的基础上,提出了施工恒载零弯矩的大跨曲线连续刚构桥线形控制系统和具体实现措施,以曲率半径1 200 m、主跨80 m的江西会昌九岭高架桥为例,采用有限元法对不同曲率半径下增加预应力束或临时斜拉塔辅助合龙实现恒载零弯矩的有效性进行了探讨。

1 曲线连续刚构桥受力特点

曲线连续刚构桥作为曲线桥和连续刚构的组合,既保留了连续刚构梁体连续和墩梁固结的特点,又能适应地形、地貌的需要,大大减少接线长度,具有伸缩缝少、易养护、行车平顺舒适等优点。特别是在山区高等级公路上为适应跨越深谷的需要,曲线连续刚构桥一般采用较高的柔性墩,更能有效的减小温度和混凝土收缩、徐变的影响。当然,曲线连续刚构桥作为曲线桥梁,空间受力也十分明显,具有以下特征^[8]。

1) 弯扭耦合作用。曲线桥的一个主要受力特性就是弯扭耦合,即在竖向荷载作用下同时产生弯矩和扭矩,且两者之间相互影响。这一特点不仅使曲线桥的分析比直线桥复杂,而且增加了施工线形控制的难度。

2) 圆心角与变形之间相互耦合。由于圆心角与主梁变形之间呈线性关系,因此曲率半径越小、跨度越大,弯扭效应更明显。

收稿日期: 2014-12-17

基金项目: 江西省教育厅基金资助项目(GJJ14358)

作者简介: 陆之光(1973—),男,研究方向为高速公路桥梁养护与管理。

通讯作者: 任亮(1980—),男,副教授,博士,研究方向为桥梁工程。

3) 内、外梁受力不均。在曲线连续刚构桥中,由于存在较大的旋转扭矩,通常会导致外梁超载,内梁卸载,且桥越宽内、外梁受力差异越大。

4) 作为多次超静定结构,曲线连续刚构桥对预应力、温度变化、混凝土收缩、徐变等荷载敏感性高,引起的附加内力较大。

2 基于恒载零弯矩的曲线连续刚构桥线形控制系统

传统的施工线形综合考虑多方面的因素,采用设置“预拱度”的方法确保成桥线形满足设计要求,但预拱度法仅是改变模板的标高来控制桥面高程,并没有改变梁内不平衡弯矩的存在,因此对于大跨度梁桥,在运营若干年后可能产生跨中持续下挠和腹板开裂等病害,且理论计算预拱度越大意味着将来可能持续下挠也就越多,开裂的可能性也就越大^[9-10]。同时,曲线连续刚构桥由于弯扭耦合的存在,将产生竖向位移、横向位移和扭转位移,导致施工线形控制难度大,为此,从设计和施工出发,提出了基于恒载零弯矩的曲线连续刚构桥线形控制系统和具体实现措施,如图1所示,其中 L 为跨度。

2.1 恒载零弯矩

连续刚构桥一般采用悬臂浇筑法进行施工,为了减少悬臂梁端的初始挠度,根据荷载平衡概念,可在设计中使悬臂状态各节段上缘预应力正弯矩与自重负弯矩相平衡,这种观点称恒载零弯矩理念。从理论上说,运用恒载零弯矩理念可保证连续刚构各节段在预应力和自重作用下各截面弯矩为零,因此施工过程中可不设置预抛高,从而有利于施工控制。但实际施工中由于各节段混凝土龄期存在差异、混凝土弹性模量和预应力损失难以精确计算,因此很难保证每个截面弯矩都为零。为此,广义的恒载零弯矩理念是通过配束使每个截面自重和预应力产生的弯矩差相对较小,从而减少施工中各节段挠度,而对于曲线连续刚构桥,初始挠度的减少意味着由弯扭耦合造成竖向位移、横向位移和扭转位移的减少,因此可大大简化施工过程中线形控制的难度。

2.2 增加预应力束

对于跨度小于160 m的曲线连续刚构桥,由于悬臂长度不大,箱梁自重悬臂梁弯矩绝对值增长不明显,因此为实现施工过程中的恒载零弯矩,可通过增加顶板预应力的方法来减少恒载弯矩。该方法保持结构尺寸不变,对于按传统包络图设计的曲线连续刚构桥仅通过增加顶板预应力来满足弯矩的平衡,进而减少弯扭耦合导致的施工位移值,易于被设计单位接受,是一种非常行之有效的方法。

2.3 临时斜拉索辅助施工

对于跨度大于或等于160 m的曲线连续刚构桥,由于结构尺寸保持不变,因此很难在设计上通过增加顶板预应力的方法来减少恒载弯矩的目的。为此,从施工工艺上提出采用临时斜拉塔辅助合龙实现恒载零弯矩的方案,如图2所示。该方法首先在桥墩顶部采用万能杆件拼装临时钢塔,然后当主梁悬浇到一定长度后张拉斜拉索,通过斜拉索辅助施工实现曲线连

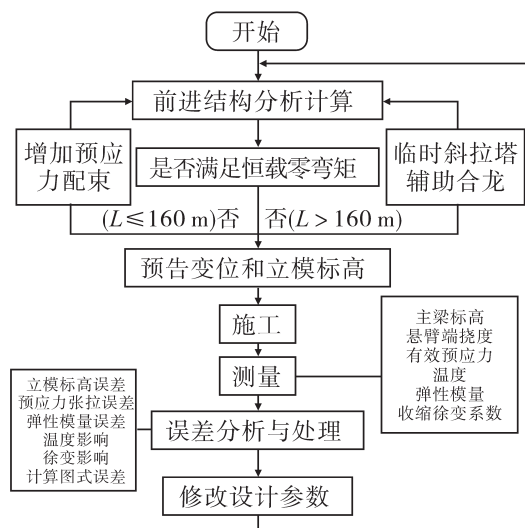


图1 基于恒载零弯矩线形控制系统

Fig.1 Linear control system based on zero moment under the dead load

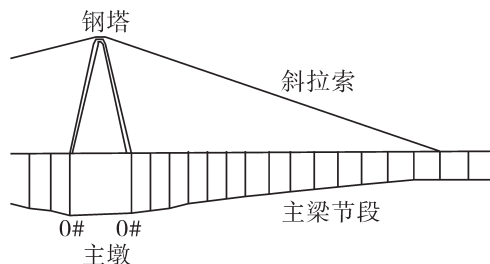


图2 临时斜拉索辅助施工图

Fig.2 Temporary aided stayed-cable tower

续刚构桥的无预抛高合龙。最后,待中跨合龙束张拉完毕,结构形成连续体系之后,再将临时钢塔和斜拉索拆除,其中斜拉索根数、张拉位置和索力大小通过计算优化求得。

3 实例分析

为验证所提基于恒载零弯矩的曲线连续刚构桥线形控制系统的有效性,以瑞赣高速会昌九岭高架桥为例,进行了线形分析。九岭高架桥为一座4跨曲线连续刚构桥,跨径布置为46 m+2×80 m+46 m,墩高为48 m,其中桥跨结构采用C50混凝土,桥墩结构采用C30混凝土。全桥位于曲率半径为 $R=1\,200\text{ m}$ 的平曲线上,桥型布置如图3所示,主梁截面如图4所示。

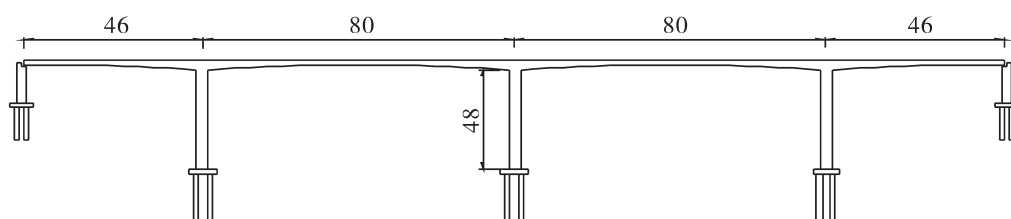


图3 桥型布置图(单位:m)

Fig.3 Bridge arrangement (unit: m)

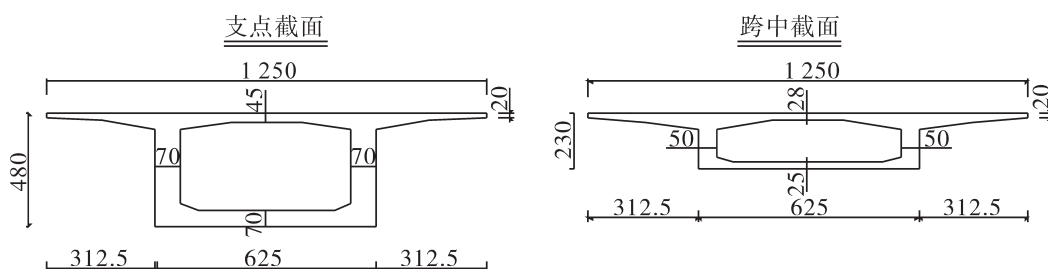


图4 箱梁截面尺寸图(单位:cm)

Fig.4 Section size of the box girder (unit: cm)

采用大型有限元空间程序Midas/Civil建立了会昌九岭高架桥的空间有限元分析模型,模型中共计115个节点,111个单元,计算时考虑恒载、活载、预应力、混凝土收缩、徐变和温度等影响,其中收缩、徐变按1 500 d计算,整体温度变化按升、降温各按20℃考虑,日照温差按《JTGD60-2004公路桥涵设计通用规范》第4.3.10所规定取值。分析时考虑曲率半径变化对全桥变形的影响,相应曲率半径按无限大(直桥)、半径1 200 m、半径1 000 m、半径800 m、半径600 m和半径400 m考虑。为方便分析对比,分别按以下3种方案实际施工过程对本桥进行成桥线形分析。

方案1:传统包络图设计。传统包络图设计对曲线连续刚构桥进行配束设计时选用的基本结构是桥梁最终状态—运营状态的连续梁图式。设计的原则是主梁截面均不出现拉应力,并保留一定的压应力储备。由于按最终成桥的连续体系配束,未考虑最大悬臂状态下弯矩平衡,因此施工过程中变形较大,需通过设置预抛高来满足成桥线形的要求。

方案2:增加预应力束设计。为满足恒载零弯矩的要求,在传统包络图设计的基础上,通过增加顶板预应力束来平衡自重弯矩,从而尽量减少施工过程中的下挠值。

方案3:临时斜拉塔辅助合龙设计。为尽量减少最大悬臂施工阶段主梁的下挠值,在传统包络图设计主梁纵向预应力的基础上,采用斜拉索辅助悬臂施工直至结构形成连续体系。

通过对以上3种设计方案进行计算分析,得到了各方案在不同曲率半径下结构的位移值,表1—表3分别列出3种方案在不同曲率半径时竖向位移、横向位移和扭转位移的最大值。

表1 主梁最大竖向位移

Tab.1 The maximum vertical displacement of the main girder

竖向位移	半径/m					
	0	1 200	1 000	800	600	400
方案 1/cm	-1.79	-1.9	-2.12	-2.45	-2.78	-3.22
方案 2/cm	1.65	1.61	1.54	1.41	1.29	1.13
方案 3/cm	1.53	1.49	1.42	1.27	1.14	1.01

注:负值表示下挠,正值表示上翘。

表2 主梁最大横向位移

Tab.2 The maximum lateral displacement of the main girder

横向位移	半径/m					
	0	1 200	1 000	800	600	400
方案 1/cm	0	-0.67	-2.67	-5.47	-8.37	-12.2
方案 2/cm	0	-0.29	-0.91	-1.53	-2.31	-3.14
方案 3/cm	0	-0.85	-1.91	-3.14	-4.46	-6.07

注:负值表示位移向外侧,正值表示位移向内侧。

表3 主梁最大扭转位移

Tab.3 The maximum torsional displacement of the main girder

扭转位移	半径/m					
	0	1 200	1 000	800	600	400
方案 1/(°)	0	-0.029 1	-0.040 1	-0.055 1	-0.075 1	-0.095 1
方案 2/(°)	0	-0.012 9	-0.016 5	-0.021 5	-0.026 7	-0.031 6
方案 3/(°)	0	-0.006 2	-0.014 1	-0.022 8	-0.032 9	-0.044 8

注:扭转角以主梁截面外侧向下内侧向上为正,反之为负。

从表1—表3中可以看出:

1) 传统的包络图设计由于综合考虑了恒载、活载以及其它可变荷载的影响,在进行预应力设计时,恒载和可变荷载是同等对待,未能完全针对起主导作用的恒载,因此在不同的曲率半径下产生较大的后期下挠是必然的,且曲率半径越小下挠值越大。同时,由于弯扭耦合作用,在不同的曲线半径下横向位移、扭转位移和竖向位移变化趋势相同。

2) 方案2通过增加预应力束来平衡施工过程中节段自重,实现了初始挠度的减少,因此,相对于与包络图设计,方案2竖向位移、横向位移和扭转位移都有明显减少,且曲率半径越小,这种减少趋势越明显,如曲率半径为400 m时,相应的梁体变形减少了70%左右,说明增加预应力束对简化曲线连续刚构桥的线形控制是非常行之有效的方法。

3) 方案3采用斜拉塔辅助施工,实现无预抛高的合龙,该措施相对于传统包络图设计,竖向位移、横向位移和扭转位移均有明显降低,尤其是竖向位移表现为上翘,虽然与增加预应力束相比效果有所下降,但该方法不需要修改设计增加预应力,仅通过施工措施减少主梁挠度,因此更具应用价值。

4 结论

针对目前大跨曲线连续刚构桥弯扭耦合导致结构线形施工控制异常复杂的问题,在总结曲线刚构桥线形影响因素的基础上,提出了施工恒载零弯矩的大跨曲线连续刚构桥线形控制系统和具体实现措施,以曲率半径1 200 m、主跨80 m的江西会昌九岭高架桥为例,采用有限元法对不同曲率半径下增加预应力束或临时斜拉塔辅助合龙实现恒载零弯矩的有效性进行了探讨,得到如下结论。

1) 传统包络图设计由于预应力的设计不能完全针对起主导作用的恒载,因此在不同的曲率半径下产生较大的后期位移是必然的,且曲率半径越小位移值越大。

2) 增加预应力束,或者临时斜拉塔辅助合龙可大大减少结构的竖向位移、横向位移和扭转位移,从而简化大跨曲线连续刚构桥施工控制的难度,尤其是临时斜拉塔辅助合龙不需要修改设计增加预应力,仅通过施工措施减少主梁挠度,因此更具应用价值。

参考文献:

- [1] 王磊. 高墩大跨连续刚构直弯对比研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- [2] 杨孟刚, 陈庚. 大跨度曲线刚构桥预应力设置对扭矩的影响[J]. 桥梁建设, 2010, 22(3): 15-18.
- [3] 郭凡, 杨永清, 贾舒阳. 高墩大跨预应力混凝土曲线连续刚构桥位移分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(1): 15-17.
- [4] 程进, 沈旭东, 孙斌, 等. 基于 ANSYS 的预应力混凝土曲线梁桥三维施工仿真分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4): 108-112.
- [5] 陈淮, 颜浩杰, 李杰, 等. 曲率半径变化对高墩大跨连续刚构桥静力性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(1): 6-10.
- [6] 张柳春. 曲线连续刚构桥施工阶段横向位移分析[J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(1): 119-123.
- [7] 杨永贤. 小半径预应力混凝土曲线梁桥抗扭设计方法探讨[J]. 公路交通技术, 2010(5): 45-48.
- [8] 姚玲森. 曲线梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [9] 王钧利. 曲线箱梁桥的病害分析及设计对策[J]. 中外公路, 2005, 25(4): 102-105.
- [10] 任亮, 张璟, 上官兴. 控制大跨 PC 梁桥长期下挠的综合举措研究[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(3): 33-37.

Girder Geometry Analysis of Long Span Curved Prestressed Concrete Rigid Frame Bridge Based on Zero Moment under the Dead Load

Lu Zhiguang¹, Wang Fei¹, Ren Liang²

(1. Transport Bureau of Shangrao, Shangrao 334100, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In view of the complicated problem of the girder geometry construction control caused by coupled bending-torsional effect of long span curved prestressed concrete rigid frame bridge, this paper establishes the girder geometry construction control system and puts forward corresponding measures based on zero moment under the dead load by summarizing influencing factors of girder geometry of curved rigid frame bridge. In order to verify the effectiveness, taking Jiuling viaduct bridge in Huichang county of Jiangxi province as an example, which has mid-span of 80m and curvature radius of 1200 m, it analyzes new measures including increasing prestressed steel and temporary aided construction by use of stayed-cable tower and traditional design method with the changed curvature radiuses, and then compares with the methods of finite element. Results show that vertical displacement, the lateral displacement and torsional displacement of the bridge under new measures are much lower than the values of traditional design method, and the problem of the girder geometry construction control of long span curved prestressed concrete rigid frame bridge can be solved well.

Key words: long span curved prestressed concrete rigid frame bridge; zero moment under the dead load; methods of finite element; analysis of girder geometry

(责任编辑 姜红贵)