

飞云江特大桥施工阶段抗扭稳定性分析

陈立峰

(中南大学, 湖南 长沙 410075)

摘要: 采用通用有限元程序 MIDASCIVIL 建立飞云江特大桥空间模型, 分析了施工阶段主梁在恒载、预应力、收缩徐变、温度效应等因素作用下产生的弯扭耦合效应, 同时比较了各因素对主梁扭矩的贡献。结果表明, 对于空间曲梁而言, 张拉预应力将会产生较大的扭矩效应, 同时弯梁桥的抗扭稳定性主要体现在弯梁自身的扭转变形以及支座反力上, 因此必须设置合理的支承形式, 保证主梁的抗扭稳定性。

关键词: 曲线梁; 弯扭耦合; 预应力扭矩效应; 支承方式; 抗扭稳定性

中图分类号: U448.21+5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)03-0010-05

Feiyunjiang Bridge Torsional Stability Analysis in Construction Phase

Chen Lifeng

(Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Sets up Feiyunjiang bridge spatial model through the current finite MIDASCIVIL program, analyzes the main beam generating the coupling effect of bending and torsion in construction phase under the factors of constant load, shrinkage and creep, prestressing and temperature effects, meanwhile compares the various factors contributed to the main beam torque. The results show that in terms of space curved beam, tensioned prestress has a greater torque effect and the torsional stability of curved girder bridges is mainly reflected in the curved beam deformation and the reaction force on bearings, so it needs to set a reasonable form of support to ensure the torsional stability of the main beam.

Keywords: curved beam; bending and torsion coupling effect; prestressed torque effect; method of support; torsional stability

对于直桥而言, 结构在自重及其预应力作用下只会产生“弯”、“剪”效应; 而对于曲梁桥而言, 由于曲率半径的影响, 其梁体的变形、内力会表现出横桥向的特征。主梁在承受竖向荷载时, 结构除产生“弯”、“剪”效应, 由于曲率的影响, 还必然伴生扭转, 而这种扭转作用又导致扭曲变形。当这种扭转效应足够大, 同时在横向又缺乏足够约束时, 将造成结构侧向整体失稳而发生倾覆^[1-2]。因此, 在进行桥梁设计时, 应充分考虑曲梁的扭转效应, 同时根据实际情况采取必要的控制措施, 保证施工过程的安全。本文采用空间有限元, 建立桥的空间仿真模型, 选取飞云江特大桥作为工程背景, 定量地分析大桥施工阶段抗扭稳定

性问题。

1 工程概况

国内高速铁路建设中第 1 个使用曲线设计的温福铁路飞云江特大桥全长 2 622.43 m, 主桥长度 700 m 共 72 跨, 大桥主跨 (主跨为 48 m + 7 × 80 m + 48 m) 结构采用曲线路段上的长大跨预应力混凝土双线连续梁, 一联全长 657.3 m。主梁平面位于直线、缓和曲线及圆曲线上, 曲线半径为 4 500 m。主梁箱梁横截面为单箱单室直腹板, 顶板宽 13 m, 底板宽 6.6 m, 梁高按圆曲线变化, 圆曲线半径为 $R = 252.516$ m。箱梁各控制截

收稿日期: 2009-02-24

作者简介: 陈立峰 (1979-), 男, 湖南郴州人, 中南大学硕士研究生, 主要研究方向为桥梁工程, E-mail: sql_406@163.com

面梁高为：端支座处及边跨直线段和跨中处为3.8 m（边跨直线段总长9.65 m），见图1，中支点处梁高为6.6 m（平段长3 m），见图2，在设置支座处梁体局部加宽，中支点两侧各加700 mm，边支点两侧各加宽300 mm，端支座中心纵向距梁端650 mm，主梁支座布置如图3所示。

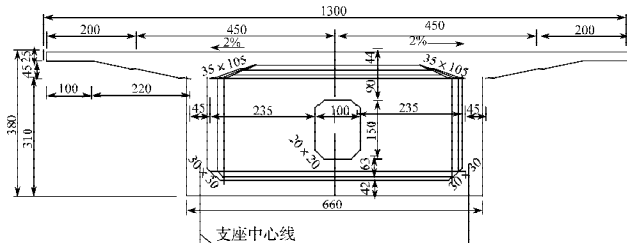


图1 主梁跨中截面

Fig. 1 Cross-section of girder

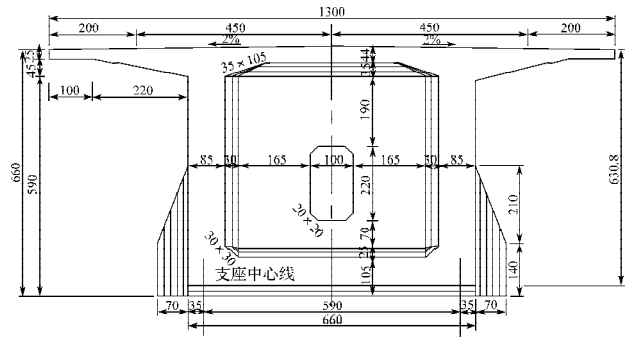


图2 主梁中支点截面

Fig. 2 Fulcrum section of girder

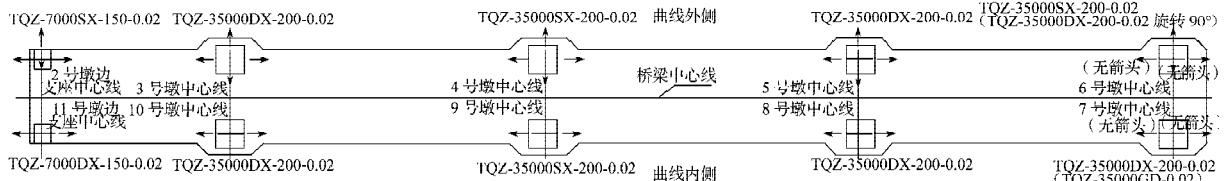


图3 主梁支座布置图

Fig. 3 The layout of beam's bearings

2 弯扭耦合效应分析

曲梁桥在自重、预应力等荷载作用下会产生弯扭耦合效应。在大曲率、较大跨径的曲梁桥中，最大扭矩效应有时可达纵向最大弯矩值的50%以上^[3]。根据飞云江特大桥实际施工工序，本文建立了主桥空间有限元模型，模型将主桥划分为266个单元，267个节点。

梁体采用纵向、横向、竖向三向预应力体系，预应力钢束共1022类，根据其空间实际位置输入。根据实际施工情况，全桥分为87个施工阶段，同时，将长期徐变1500d也作为1个施工阶段输入。模型中考虑的计算荷载主要包括自重、预应力、收缩徐变及升温等。鉴于按顶板升温5℃考虑升温荷载偏于不安全^[4]，因此，升温荷载按顶板升温10℃考虑。其中3跨悬臂计算模型如图4。

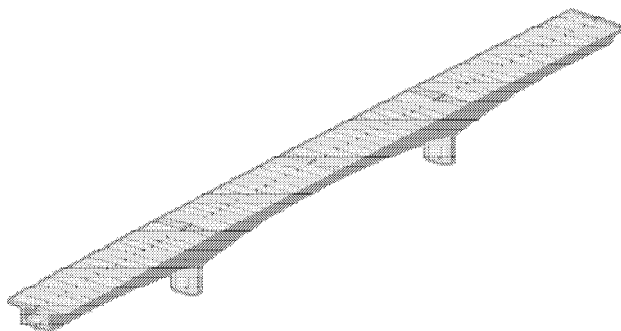


图4 计算模型

Fig. 4 The analysis model

根据模型计算结果，对各主要施工阶段的最大扭矩效应进行了比较分析。各主要施工阶段对应的施工内容见表1所示，主要施工阶段最大扭矩效应见表2。

表1 各主要施工阶段对应的施工内容

Table 1 The contents of all major construction phase

施工阶段	施工内容
35	张拉9、10号墩11#块预应力
38	张拉第8跨第一阶段合拢预应力
77	张拉第2、4、6跨第一阶段合拢预应力
80	张拉第5跨全部合拢预应力， 张拉第4、6跨剩余预应力
83	张拉第3、7跨全部合拢预应力， 第2、8跨剩余预应力
85	张拉边跨预应力，中跨顶板预应力

表2中所示恒载、预应力、收缩徐变及升温荷载扭矩效应为本阶段扭矩最大值对应节点的扭矩效应，是本阶段的变化值，并非累计效应值；纵向弯矩为对应施工阶段的最大值。从表2中可以看出，扭矩最大值与纵向弯矩最大值相比甚小，这是因为：一方面，由于主梁平面同时位于直线、缓和曲线及圆曲线上，在直线和缓和曲线上引起的扭矩效应较圆曲线上要小；同时，由于该桥曲线半径很大，因而在圆曲线上产生的扭矩效应也比较小，最大仅为纵向弯矩效应的4.44%。从表2可以看出，飞云江特大桥在施工阶段产生的扭矩效应较小。

表2 主要施工阶段扭矩值

Table 2 The torque values of the main construction phase

施工阶段	扭矩 /kN·m				阶段累计最大值	纵向弯矩 /kN·m	扭矩 弯矩 /%
	本阶段恒载	本阶段预应力	本阶段收缩徐变	本阶段温升			
35	0	-307.7	4.279	110.2	1 940	94 690	2.05
38	0	4 555	55.74	0	4 974	112 000	4.44
77	0	-1.221	-3.117	0	4 245	128 000	3.32
80	0	-1.008	-3.605	0	4 234	128 000	3.31
83	-13.52	1 243	-34.32	3.379	3 153	214 200	1.47
85	-11.92	3 106	30.23	2.979	2 785	190 700	1.46

3 主要施工阶段预应力扭矩效应分析

对于曲线梁而言, 预应力钢束不仅存在沿梁高方向的竖向弯曲, 同时还存在平面弯曲, 其与曲线梁的相互作用, 形成了一个比较复杂的空间受力体系。在预应力张拉之后, 会产生一个径向分布力, 该径向力与张拉力及平曲线半径有关, 曲线半径越小, 径向分布力就越大。而对于曲线半径较小但预应力钢束数量较多时, 产生的径向分布力也将是非常可观的。当径向分布力位于主梁截面剪切中心以上或以下时, 钢束的径向力就会对主梁产生扭矩效应。

从表2中可以看出, 预应力引起的扭矩效应对于该桥的扭矩贡献很大, 是引起该桥扭矩效应的主要因素。注意到在9、10号墩合拢之后, 张拉中跨底板钢束时, 由于底板钢束数量大, 且均集中在梁底, 产生的最大扭矩值达4 555 kN·m, 也即表1、2中的第38施工阶段。第38施工阶段扭矩产生的变形最大为-0.43 mm (负号说明主梁发生背离圆心方向的扭转), 分析其产生的原因主要是由于预应力钢束重心位于主梁底部的长度远大于位于主梁顶部的长度, 径向力产生的扭矩主要集中在下部所致。

对于第35施工阶段, 由于此时结构为最大单“T”状态, 张拉预应力钢束在悬臂自由端不会引起扭矩, 而只会产生扭曲变形, 扭矩只在临时支承内部超静定结构中产生, 最大变形发生在最外侧端部, 为 -7.55×10^{-6} m。由于该阶段仅张拉位于顶板的4根预应力钢束, 因此产生的最大扭矩和变形都较小。

对于第77、80施工阶段最大扭矩对应节点而言, 张拉预应力钢束对其产生的影响较小, 而对于张拉预应力所在跨而言, 由于第2跨所在平面为直线, 因此, 张拉预应力并不会产生扭矩效应; 第4跨与第6跨均位于缓和曲线内, 张拉预应力在各自跨内引起的扭矩分别如图5、6所示。图中仅示第77施工阶段扭矩, 其中第4跨预应力扭矩最大值为276 kN·m, 最小值为-579 kN·m, 第6跨预应力扭矩最大值为-1 390 kN·m, 最小值为-1 540 N·m。

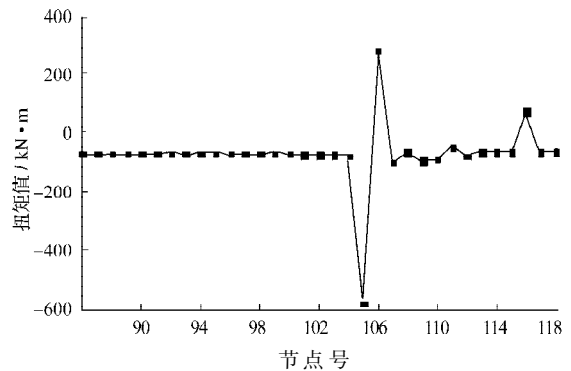


图5 张拉第4跨预应力引起的扭矩

Fig. 5 The torque caused by tensioned prestressed of 4 span

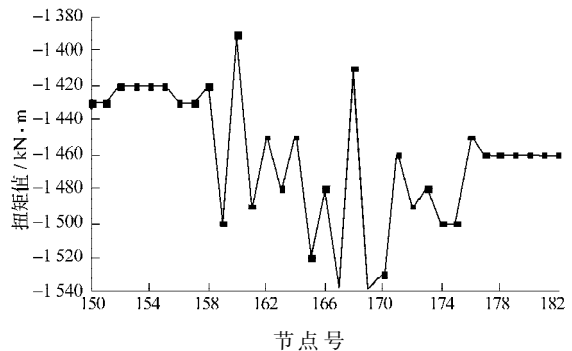


图6 张拉第6跨预应力引起的扭矩

Fig. 6 The torque caused by tensioned prestressed of 6 span

对于第83施工阶段, 由于第2、3跨所在平面位于直线上, 因此, 在跨内不会引起扭矩, 而第7、8跨分别位于缓和曲线和圆曲线上, 张拉预应力在第7、8跨内产生的扭矩如图7所示。其中扭矩最大值为1 243 kN·m, 最小值为-1 439 kN·m。

对于第85施工阶段, 张拉两边跨合拢预应力仅会在第9跨产生较大的扭矩效应, 其扭矩在跨内的分布如图8所示。其中扭矩最大值为-3 080 kN·m, 最小值为-3 210 kN·m。

由对各施工阶段扭矩效应的分析可知, 预应力钢束径向力引起的扭矩效应是比较大的, 尤其对小半径

曲线梁桥作用更大。设计时必须考虑其对主梁腹板曲线内侧混凝土的压力,这种压力可引起腹板崩裂和钢束崩出主梁,必须在腹板内设置足够数量的防崩钢筋。

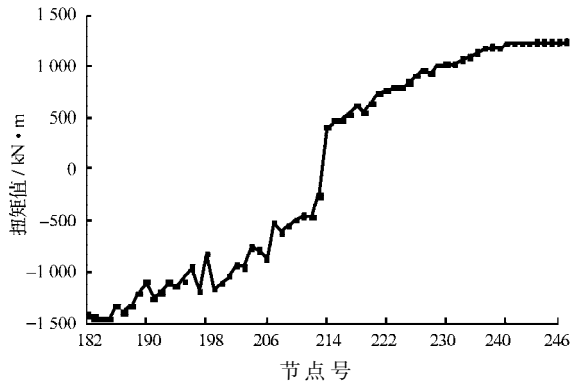


图7 张拉第7、8跨预应力引起的扭矩
Fig. 7 The torque caused by tensioned prestressed of 7, 8 span

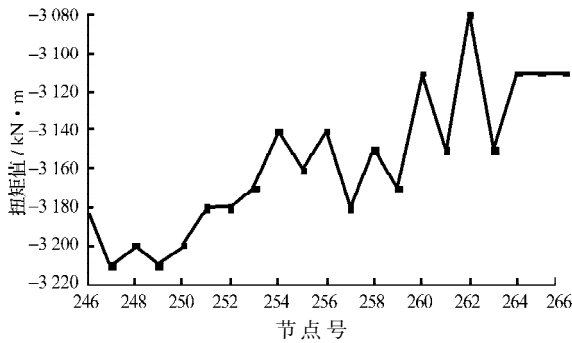


图8 张拉边跨合拢预应力引起的扭矩
Fig. 8 The torque caused by tensioned prestressed of side span

4 支承方式对曲线梁桥稳定的影响

曲线梁桥的支承方式对上、下部结构内力影响较大^[5-6],不同的支承方式主要影响主梁的扭矩值和扭矩沿主梁纵向的分布规律,同时,也影响主梁的扭曲变形以及墩柱的受力状态。飞云江特大桥在各墩处均采用2点支承的支座形式,主梁支座采用TQZ(NS)球型支座,中支座承载力设计值为35 000 kN级,端支座承载力设计值为7 000 kN级,固定支座设于主梁150号节点对应的7号桥墩上,其余各墩均设活动支座(边支座活动量 $e = \pm 150$ mm,中支座活动量 $e = \pm 200$ mm,常温型,设计转角 $\theta = 0.02$ rad)。这种支承形式可提高主梁的横向抗扭性能,在施工及运营过程中,保证主梁的横向稳定性。表1中主要施工阶段各支座对应的支座反力见表3所示。

由表3可以看出,支座反力均为正值,不产生负反力,主梁支座不会发生脱空现象。

表3 主要施工阶段支座竖向反力
Table 3 The vertical force of bearings in major construction phase

施工阶段号	支座节点竖向反力/kN				
	2	22	54	86	118
35					
38					
77		33 460	33 460	33 460	33 460
80		32 860	32 860	33 950	32 210
83		33 980	31 850	33 840	32 470
85	2 879	33 270	31 910	32 780	32 750

施工阶段号	支座节点竖向反力/kN				
	150	182	214	246	266
35			34 290	34 290	
38			33 480	33 500	
77	33 460	33 460	32 280	32 300	
80	32 210	33 950	32 280	32 300	
83	32 480	33 790	31 350	33 390	
85	32 580	33 110	31 800	32 830	3 288

5 结语

通过对主梁施工阶段扭矩效应的计算,对飞云江特大桥主梁抗扭稳定性进行了具体的分析,比较了主要施工阶段扭矩最大效应与纵向弯矩最大效应的大小,同时重点分析了预应力钢束张拉引起的扭矩效应,最后讨论了支承方式对于主梁抗扭稳定性的影响。对弯梁桥而言,主要通过箱梁自身良好的抗扭性能以及支座的约束作用来抵抗扭矩的作用。对本文中所述的桥而言,由于其曲线半径较大,同时跨径较小,施工阶段产生的扭矩效应远小于纵向最大弯矩效应,而扭矩效应主要由张拉预应力引起。因此,在分析过程中主要讨论了张拉预应力的各个施工阶段产生的扭矩。结果表明,飞云江特大桥主梁施工期间抗扭效应远小于纵向弯矩效应,其抗扭稳定性满足要求。

参考文献:

[1] 吴文明. 斜弯桥空间结构分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
Wu Wenming. Spatial Structure Analysis of Crooked Bridge [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2004.

[2] 秦清波. 预应力混凝土曲线梁桥荷载效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
Qin Qingbo. Load Effect Research of Curved Prestressed Concrete Girder Bridges[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.

[3] 何维利. 独柱支承的曲线梁桥设计[J]. 北京建筑工程学院学报, 2001, 17(校友专辑): 23-28.
He Weili. Design of Single-Column Supported Curved Beam

Bridge[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2001, 17(Special of Schoolfollow): 23-28.

[4] 丁汉山, 刘 华, 胡丰玲, 等. 高架桥弯梁抗扭稳定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2004(9): 4-3.
Ding Hanshan, Liu Hua, Hu Fengling, et al. Overturning Stability Analysis of Curved Box Girder Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004(9): 4-3.

[5] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
Fan Lichu. Bridge Engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.

[6] 邵容光. 混凝土弯梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
Shao Rongguang. Concrete Curved Girder Bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.

[7] 王钧利, 贺拴海. 高墩大跨径弯桥在悬臂施工阶段刚构的非线性稳定分析[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 30-34.
Wang Junli, He Shuanhai. Nonlinear Stability Analysis of Long-Span Curve Bridge with High Piers During Cantilever Construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 30-34.

[8] 唐承平. 大跨连续刚构桥高墩稳定问题研究现状[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(6): 68-70.
Tang Chengping. The Review on the Stability of the Present Research of Long-Span Rigid Frame Bridge with High Piers [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(6): 68-70.

[9] 王钧利, 贺拴海. 高墩大跨径曲线刚构桥设计参数与稳定分析[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2005, 29(5): 717-720.
Wang Junli, He Shuanhai. Design Parameters and Stability Analysis of Long-Span Curve Rigid Frame Bridges with High Piers[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2005, 29(5): 717-720.

[10] 孙向东, 陈湘华. 弯梁桥建模分析[J]. 东北公路, 2001, 24(3): 58-59.
Sun Xiangdong, Chen Xianghua. Formwork Analysis of Bend Bridge[J]. Northeast Highway, 2001, 24(3): 58-59.

(责任编辑: 张亦静)



(上接第 4 页)

参考文献:

[1] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431-435.
Hu Liming, Pu Jialiu. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Soil-Structure Interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435.

[2] 殷宗泽, 朱 泓, 许国华. 土与结构物材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14-22.
Yin Zongzhe, Zhu Hong, Xu Guohua. Numerical Simulation of the Deformation in the Interface between Soil and Structural Material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 14-22.

[3] 张冬霖, 卢廷浩. 一种土与结构接触面模型的建立及其应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 62-66.
Zhang Dongqi, Lu Tinghao. Establishment and Application of a Interface Model between Soil and Structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 62-66.

[4] 卢廷浩, 王 伟, 王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(1): 82-86.
Lu Tinghao, Wang Wei, Wang Xiaoni. Experimental Study on Soil-Structure Contact Surface Behavior by Improved Direct Shear Test[J]. Journal of Shenyang Jian Zhu University: Natural Science Edition, 2006, 22(1): 82-86.

[5] 范臻辉, 肖宏彬, 王永和. 膨胀土与结构物接触面的力学特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 22(5): 13-16.
Fan Zhenhui, Xiao Hongbin, Wang Yonghe. Experimental Study on the Mechanical Characteristics of the Interface between Expansive Soil and Structure[J]. China Railway Science, 2006, 22(5): 13-16.

[6] 苗 鹏, 肖宏彬. 不同初始条件对膨胀土剪切特性的影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(6): 19-22.
Miao Peng, Xiao Hongbin. Impact Research on Shear Performance of Expansive Soils under Different Initial Conditions[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, 21(6): 19-22.

[7] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123-1999, Geotechnical Engineering Test Method and Criterion[S].

(责任编辑: 张亦静)