

武广客运专线 32 m 箱梁预应力效果 监测及徐变上拱的控制措施

宋津喜

(中铁十二局集团有限公司, 太原 030024)

[摘要] 采用现场实测的方法对武广客运专线工程 32 m 预应力混凝土箱梁应力效果进行监测, 并采用 Midas/Civil 结构分析程序进行了弹性上拱的理论分析, 提出箱梁徐变上拱的控制措施, 为同类工程提供借鉴及经验。

[关键词] 武广客运专线; 32 m 箱梁; 预应力效果监测; 徐变上拱控制

[中图分类号] U445.47 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)01-0060-07

1 前言

武广客运专线铁路设计时速为 350 km, 全线采用无砟轨道, 桥梁普遍采用双线单箱单室整孔后张法预应力混凝土筒支箱梁(如图 1 所示)。由于混凝土的徐变效应, 预应力混凝土筒支箱梁桥

的梁体在预应力荷载作用下的上拱变形缓慢发展, 在运营阶段梁体徐变变形的发展将会引起桥面的立面线形不平顺, 严重影响行车安全和旅客舒适度, 甚至将造成梁体上拱度过大而无法使用, 在高速铁路上这种影响显得尤为突出, 应予以足够重视^[1]。

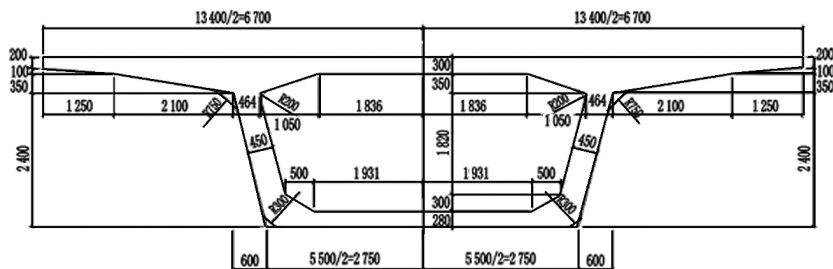


图 1 32m 箱梁跨中截面图(单位:mm)

Fig.1 Mid-span section of 32 m span box girder

保证无砟轨道轨道的平顺性, 就必须解决轨道铺设后预应力混凝土梁的后期徐变上拱问题, 即对预应力产生的徐变上拱需要有严格的限制^[2]。因此, 为了保证线路的高平顺性、旅客的高舒适度及高速行驶的安全, 必须严格控制预应力箱梁的徐变上

拱^[3]。影响箱梁后期徐变上拱的关键施工工序是预应力的施加, 因此有必要对其效果进行监测, 以保证箱梁设计预应力值的准确性。笔者结合武广客运专线工程, 对 32 m 箱梁预制施工过程中预应力效果及上拱量进行监测及理论分析, 并根据分析结果, 研

[收稿日期] 2008-11-03

[作者简介] 宋津喜(1962-), 男, 山西五台县人, 中铁十二局集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为铁路与道路工程的管理与施工技术; E-mail: zt12sjx@126.com

究实际工程中徐变上拱的控制措施。

2 箱梁预应力效果监测

2.1 监测方案

为了测试试验箱梁预施应力效果,在 32 m 试验箱梁的跨中、1/4 截面位置,预埋了 28 个内埋振弦式应变计(见图 2),采用自动化采集箱进行数据采集,以测试箱梁预施应力效果和预应力变化情况。应力测点布置图和截面预应力筋布置图见图 3、图 4。



图 2 32 m 箱梁某测点应变计

Fig. 2 Strain gauge of 32 m span box girder

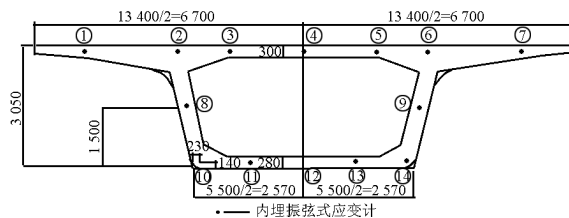


图 3 32 m 箱梁跨中、1/4 截面应力测点布置(单位:mm)

Fig. 3 Measuring point arrangement on the mid-span and 1/4 section of 32 m span box girder (unit:mm)

同时,对预应力张拉前后梁体纵向长度进行精确测量,测试梁体弹性压缩量情况。另外,在梁体顶面两端支点截面及跨中截面各布置两个位移测点,采用精密水准仪测试箱梁预应力终张拉后弹性上拱度以及梁体徐变上拱情况。由于试验箱梁的预张拉和初张拉在制梁台座上进行,此时梁体支承状态尚不明确,因此梁体预应力效果测试在终张拉阶段进行。

2.2 终张拉预应力效果

试验梁在 10 d 龄期时进行终张拉,混凝土强度为 54.5 MPa、弹性模量为 36.8 GPa,终张拉在存梁台座上进行,张拉的同时,进行应力监测数据采集。

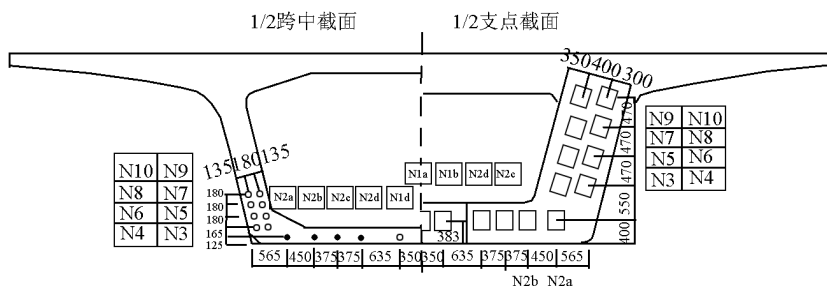


图 4 32 m 箱梁截面预应力筋布置图(单位:mm)

Fig. 4 Prestressing tendon arrangement on the section of 32 m span box girder (unit:mm)

终张拉后各预应力束箱梁截面高度方向应力值 测试结果见表 1、表 2。

表 1 终张拉后跨中截面应力测试结果

Table 1 Stress of mid-span section after the end tensioning stage

高度/m	应力值/MPa													
	N8	N1a	N2d	N5	N4	N2b	N9	N10	N7	N6	N3	N1b	N2c	N2a
3.05(顶板)	-0.09	-0.07	-0.04	-0.05	-0.01	0.10	0.10	0.12	0.13	0.13	0.13	0.22	0.39	0.49
1.5(腹板)	-0.54	-0.88	-1.27	-1.87	-2.55	-3.56	-3.82	-4.09	-4.35	-4.74	-5.01	-5.49	-5.96	-6.20
0(底板)	-1.04	-1.76	-2.57	-3.74	-5.09	-7.14	-7.59	-8.04	-8.51	-9.14	-10.02	-10.68	-11.42	-12.97

注:负号表示压应力(以下表同)

表2 终张拉后1/4截面应力测试结果

Table 2 Stress of mid-span section after the end tensioning stage

高度/m	应力值/MPa													
	N8	N1a	N2d	N5	N4	N2b	N9	N10	N7	N6	N3	N1b	N2c	N2a
3.05(顶板)	-0.16	-0.15	-0.12	-0.14	-0.10	0.01	0.09	0.16	0.20	0.26	0.24	0.30	0.38	0.44
1.5(腹板)	-0.49	-0.83	-1.22	-1.80	-2.49	-3.57	-3.76	-4.00	-4.27	-4.64	-4.75	-5.29	-5.46	-6.00
0(底板)	-0.85	-1.57	-2.36	-3.50	-4.80	-6.79	-7.11	-7.43	-7.85	-8.41	-9.34	-10.10	-11.21	-12.62

根据表2测试结果分析,在终张拉阶段预应力作用下,箱梁跨中及1/4截面应力沿截面高度呈线性变化。随着张拉阶段的进行,截面底板、腹板压力逐渐增大,而顶板应力变化幅度较小,如图5、图6所示。

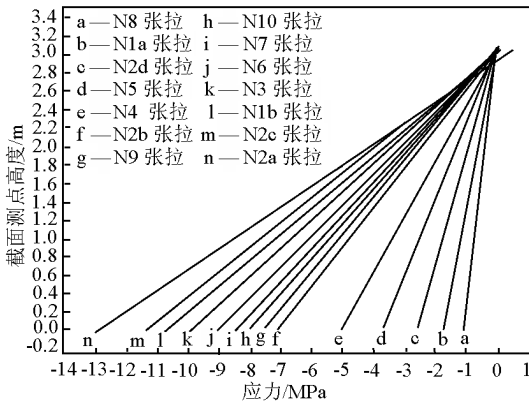


图5 跨中截面终张拉过程应力变化图

Fig. 5 Stress variation during the end tensioning stage on the mid-span section of 32 m span box girder

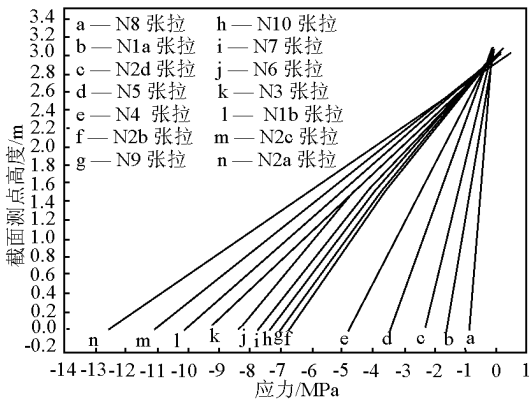


图6 1/4截面终张拉过程应力变化图

Fig. 6 Stress variation during the end tensioning stage on the 1/4-span section of 32 m span box girder

全部预应力束终张拉完毕后,由测试数据分析得知:试验梁跨中截面底板的平均预压应力为-12.97 MPa,1/4截面底板的平均预压应力为

-12.62 MPa。对梁体压缩量和全长的测试结果表明:在预应力作用下,试验梁实测上缘压缩量为6.5 mm,下缘压缩量为17.5 mm,梁体全长32 604 mm,符合《客运专线预应力混凝土预制梁暂行技术条件》(铁科技[2004]120号)要求。

2.3 弹性上拱度

在试验梁预应力终张拉阶段进行了箱梁的弹性上拱度的实际测量,其结果见表3。实测结果表明,在预应力作用下,试验梁的弹性上拱度值为13.5 mm。

表3 试验梁弹性上拱度测试数据

Table 3 Measuring data for elastic camber of the test girder

梁号	终张前上拱度/mm	终张后上拱度/mm	弹性上拱值/mm
079-32mQ	-15.0	-1.5	13.5

3 理论计算

针对32 m试验梁预应力终张拉阶段,采用有限元程序 Midas Civil 对该施工阶段进行理论计算。

3.1 模型简介

主梁梁体用空间有限元程序进行模拟,共划分为39个节点,38个梁单元。箱梁构造、纵向预应力布置均按《时速350公里客运专线铁路无砟轨道后张法预应力混凝土简支箱梁(双线)》(图号:通桥(2005)2322-II)模拟。梁体在终张拉、存梁的支承状态均按实际约束形式进行。主梁模型、主梁支撑条件如图7、图8所示。

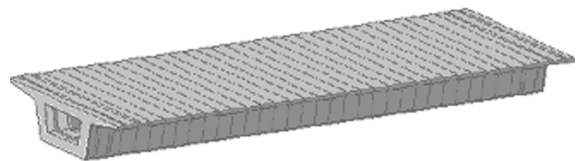


图7 主梁模型图

Fig. 7 Model of 32 m span box girder

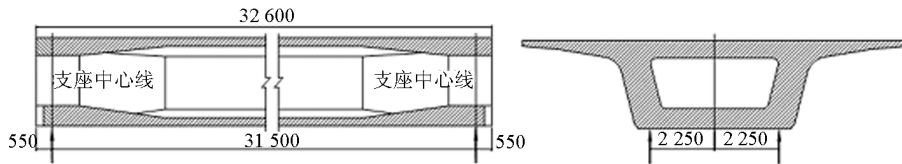


图8 主梁支撑条件(单位:mm)

Fig. 8 Boundary conditions of 32 m span box girder(unit:mm)

3.2 计算参数选取

混凝土:梁体混凝土强度等级为 C50,轴心抗压强度 33.5 MPa,轴心抗拉强度为 3.10 MPa,弹性模量 $E = 35\,500$ MPa,剪切模量 $G = 15\,265$ MPa。

钢绞线:预应力钢绞线符合现行国家标准《预应力混凝土用钢绞线》(GB5233)规定。直径:15.2 mm;弹性模量: 1.95×10^5 MPa;抗拉强度标准值:1 860 MPa;线膨胀系数: 1.2×10^{-5} ;松弛率:2.5%;锚口及喇叭口损失:控制应力的 6%。

预应力:预应力的施加共分为 3 个阶段进行。

a. 预张拉:2N6 → 2N2a → 2N1b,张拉控制应力 930 MPa;b. 初张拉:2N2c → 2N3 → 2N7 → 2N10 → 2N2d,张拉控制应力 930 MPa;c. 终张拉:钢束张拉顺序及张拉控制应力见表 4。

表 4 终张拉阶段钢束张拉顺序及张拉控制应力

Table 4 Tension sequence and tension control stress during the end tensioning stage

张拉顺序	钢束编号	张拉控制应力/MPa
1	2N8	1 389.42
2	N1a	1 339.20
3	2N2d	1 339.20

续表

张拉顺序	钢束编号	张拉控制应力/MPa
4	2N5	1 437.78
5	2N4	1 389.42
6	2N2b	1 339.20
7	2N9	1 437.78
8	2N10	1 389.42
9	2N7	1 437.78
10	2N6	1 389.42
11	2N3	1 437.78
12	2N1b	1 339.20
13	2N2c	1 339.20
14	2N2a	1 339.20

3.3 计算结果

3.3.1 跨中截面预应力

试验梁的预张拉和初张拉在制梁台座上进行,在终张拉时对预张拉和初张拉的预应力束进行了补张,因此预、初张拉之后至终张拉之前混凝土的收缩、徐变对梁体的有效预应力并无影响,混凝土的收缩、徐变应以终张拉后为起始点考虑。正值为拉应力,负值为压应力,应力值已经考虑梁体自重在内。

终张拉后梁体上下缘应力计算结果分别见图 9、图 10。终张拉后 1/4 截面与跨中截面应力理论与实测值见表 5。

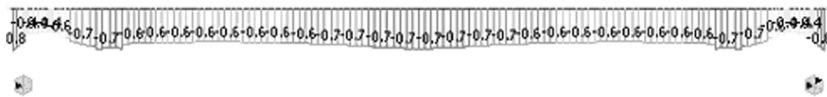


图 9 终张拉后梁体上缘应力图

Fig. 9 Stress distributions on the upper part of 32 m span box girder after the end tensioning stage

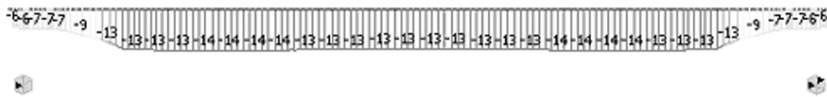


图 10 终张拉后梁体下缘应力图

Fig. 10 Stress distributions on the lower part of 32 m span box girder after the end tensioning stage

表5 终张拉后1/4截面与跨中截面应力值

Table 5 Stress of the mid-span and 1/4-span section after the end tensioning stage

施工阶段	应力位置	1/4 截面/MPa	跨中截面/MPa
理论值	上缘	-0.6	-0.7
	下缘	-13.6	-13.1
实测值	上缘	0.44	0.49
	下缘	-12.62	-12.97

计算结果表明,终张拉完成后主梁全截面处于受压状态,1/4截面、跨中截面下缘应力理论值比实测值大7.8%和1.0%。通过以上比较可看出,梁

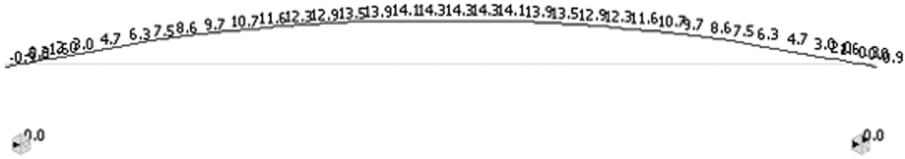


图11 终张拉后梁体理论上拱图

Fig. 11 Calculated camber of the 32 m span box girder after the end tensioning stage

实测梁体预应力作用下的上缘压缩量为6.5 mm,下缘压缩量为17.5 mm,比理论计算值(上缘为5.8 mm,下缘为14.5 mm)分别大12%和20.6%。

4 箱梁梁体徐变上拱度

试验梁徐变上拱度测试结果见表6,上拱度曲线图见图12。

表6 试验梁徐变上拱度实测结果

Table 6 Measuring data for creep camber of the test girder

梁号	各阶段徐变上拱度/mm					
	终张	终张	终张	终张	终张	终张
	后1 d	后3 d	后5 d	后30 d	后60 d	后90 d
079-32mQ	1.8	2.3	2.5	3.8	5.3	6.2

由表6和图12可知:试验梁在1 d,3 d,5 d,30 d,60 d,90 d时的徐变上拱值分别为1.8,2.3,2.5,3.8,5.3,6.2 mm,箱梁跨中上拱度在预应力作用后开始一段时间内发展较快,随后随时间逐渐趋于减缓。按二期恒载上桥时间,预加应力后60 d理论计算的残余徐变拱度值为5.9 mm。

实测结果表明,箱梁徐变上拱控制较好,满足设计要求。建议按设计要求停放30~60 d后尽快

体上下缘理论值比实测值略大,原因在于理论计算时未计入从终张拉结束到试验测试这段时间内混凝土的收缩、徐变对预应力损失的影响。

3.3.2 弹性上拱度及压缩量

全部钢绞线终张拉完成后,079-32mQ试验梁实测梁体的跨中上拱度为13.5 mm,比理论计算值14.3 mm偏小5.6%,其原因主要是理论计算选取参数与箱梁实际特性存在偏差,同时计算时未考虑混凝土的收缩、徐变对预应力损失的影响。梁体上拱理论计算结果见图11。

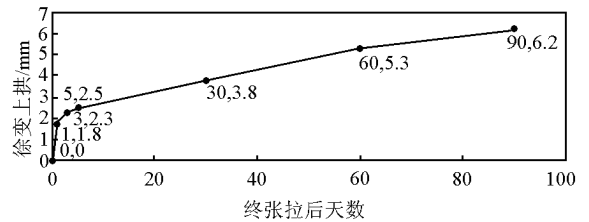


图12 徐变上拱曲线图

Fig. 12 Curve diagram of creep camber

架设,以尽量缩短存梁的时间,或施加部分二期恒载以利于控制后期的徐变上拱。监测结果分析表明,通过严格控制混凝土质量并准确施加预应力,箱梁终张拉后徐变变形满足无砟轨道铺设要求。

5 箱梁徐变上拱的控制措施

影响箱梁混凝土的收缩徐变因素较多,除使用期间的环境条件外,还有其他诸多因素,为确保铺设无砟轨道后箱梁残余徐变上拱小于10 mm,施工中应采取以下措施控制箱梁的徐变变形:

1) 弹性模量控制。混凝土弹性模量的大小是混凝土产生徐变大小的决定性因素,弹性模量愈高混凝土的徐变越小,反之混凝土的徐变就越大。施工中应以优化混凝土配合比设计,最大限度的提高混凝土的弹性模量为设计原则,以保证箱梁的收缩

徐变上拱量不超标。

2) 混凝土浇筑控制。梁体混凝土浇筑过程中可采用附着式和插入式振捣器共同相结合的方式,进行振捣,确保混凝土振捣密实,尤其是对张拉时的应力集中区要特别注意。

3) 预应力张拉控制。根据线性徐变理论,徐变上拱的大小取决于施加预应力时梁体的弹性上拱量,因此,在施加预应力前,除了检验混凝土强度外,还应同时检测其弹性模量,在两者均满足设计要求后,再施加预应力;现场对预应力筋的管道摩阻进行实测并对其张拉应力进行修正;施加预应力要严格按照设计规定的方式施加,严格实行“双控”,严禁超张拉,以确保满足预应力徐变上拱限值的要求;预应力张拉完毕后应及时压浆(48 h 以内),管道压浆要求密实。当水泥浆凝结硬化后即可传力,提高构件的抗弯刚度,减少梁体上拱。

4) 适当延长混凝土的加载龄期。加载龄期对徐变变形控制有两个阶段,一是预加应力时混凝土龄期,二是桥面附属工程和无砟轨道基础混凝土浇筑龄期。预加应力时混凝土龄期适当延长,一期预应力施工时满足设计中对混凝土的强度、弹模要求;在存梁区设置足够的存梁台座,充分提高混凝土的成熟度,终张拉预应力施工时保证混凝土龄期不低于 10 d,减少起始应变和极限应变。通过调整制、架梁时间安排,适当延长梁体架设后的置放时间,以延长二期恒载上桥时间,保证预应力终张后不低于 30 d。

5) 加强监控。箱梁预制施工时,在梁体顶面两端支点截面以及跨中截面的两侧电缆槽处预埋 M16 螺栓各一个,作为梁体收缩徐变上拱的观测点,观测采用精密水准仪。生产和存梁期间,终张拉前后各一次,张拉完后 1 d,3 d,5 d 观测一次,第 6~60 d

每周观测一次;架梁后每两周观测一次。根据观测曲线分析梁体收缩徐变上拱的发展规律,采取相应措施,确保铺设无砟轨道后箱梁收缩徐变上拱不大于 10 mm。

6 结语

综上所述,由于混凝土的徐变引起的变形随时间的延长逐渐加大,特别是对于预应力混凝土梁来说,预施应力对后期箱梁徐变上拱影响较大,需准确施加预应力,以控制后期箱梁徐变上拱。通过对 32 m 箱梁预应力效果和长期徐变上拱监测,以及理论计算分析结果表明:

1) 预应力箱梁施工过程中,应在混凝土的配制、孔道摩阻测试、预施应力调整、预施应力的时间、预施应力精确度及二期恒载施工时间等方面加强控制,以保证箱梁徐变上拱控制在合理范围内。

2) 监测箱梁的终张拉预应力效果、弹性上拱度、压缩量满足要求,施工过程采取的箱梁徐变上拱控制措施起到了良好的效果,可以供其他类似工程借鉴。

3) 制梁场箱梁徐变上拱控制较好,说明通过严格控制混凝土质量并准确施加预应力,箱梁的长期变形性能可以满足设计要求。

参考文献

- [1] 宁贵霞,孔德艳,蔺鹏臻,等. 双线铁路整体 PC 箱梁上拱度分析[J]. 铁道学报,2007,29(6):123-125
- [2] 刘建瑞,陈良江. 无砟轨道预应力混凝土梁设计研究[J]. 铁道标准设计,2001,21(9):10-12
- [3] 艾晓东. 客运专线箱梁预制与架设的关键技术探讨[J]. 交通科技,2006,(6):7-9

The 32 m span box girder prestressing effect monitoring and creep camber control for Wuhan–Guangzhou passenger express line

Song Jinxi

(China Railway 12 th Bureau Group Co. , Ltd. , Taiyuan 030024 , China)

[**Abstract**] As a case for study, the online monitoring and numerical analysis for 32 m concrete prestressed box girder prestressing and elastic camber effect in Wuhan–Guangzhou passenger express line was performed in the paper. The effect of monitoring and analysis, based on the engineering practice, the control measures of the box girder creep camber were put forward, which can be taken as a reference and experience guidance for the similar projects.

[**Key words**] Wuhan–Guangzhou passenger express line; 32 m box girder; prestressing effect monitoring; creep camber control

(上接 31 页)

Applied research on high performance concrete with high-volume supplementary cementitious materials in No. 4 Bid of the Beijing–Shanghai high speed railway

Gao Zhishuang, Zhao Nianquan, Zhao Changyu, Hu Mingwen, Gou Yunlong

(China Railway 12 th Bureau Group Co. , Ltd. , Taiyuan 030024 , China)

[**Abstract**] Based on engineering practice in Beijing–Shanghai high speed railway, effect to concrete workability, mechanical performance, and durability of mineral admixtures are studied, at the same time the preparing technology of high performance concrete with high-volume supplementary cementitious materials are studied. Combining with practice engineering, control technology of raw materials, design of mixing proportion and construction for high performance concrete with high-volume supplementary cementitious materials are introduced.

[**Key words**] mineral admixtures; high performance concrete with high-volume supplementary cementitious materials; preparation and construction; quality control