

客运专线 32 m 箱梁徐变效应研究

李 军¹, 范超远¹, 杨基好², 徐志胜¹, 罗俊礼¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中铁十局集团有限公司 第四工程公司, 江苏 徐州 221003)

摘要:针对已建成通车的武广、沪杭客运专线两种 32 m 跨预应力混凝土箱梁, 对比分析施工阶段梁体跨中上拱变形实测数据, 探讨箱梁在施工阶段的徐变特性。在此基础上, 应用 MIDAS/Civil 分析软件, 采用 ACI 209R 收缩徐变计算模式, 根据设计图纸和施工控制要求, 建立梁体有限元模型, 对比两种箱梁的徐变变形, 与实测结果互为验证, 预测二恒铺装对梁体变形影响和铺装后期徐变变形。结果表明, 沪杭客专 32 m 梁徐变变形较武广客专 32 m 梁小, 变形控制措施更为完善。

关键词:客运专线; 32 m 箱梁; 上拱变形; 徐变; 弹性变形

中图分类号: U238; U448.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)03-0042-06

高速列车的快速运行对轨道的平顺性提出了更高的要求, 以保障行车安全和舒适性。作为影响桥上轨道平顺性的主要因素, 预应力混凝土的徐变会在长期荷载作用下对梁体产生比弹性变形更大的徐变变形。此外, 徐变还将导致梁体应力重分布、造成预应力损失, 成为桥梁结构必须研究解决的问题^[1-2]。特别是在我国大力兴建无砟轨道高速铁路的背景下, 研究并控制结构徐变影响显得更为重要^[3]。

从应用情况来看, 目前我国预应力混凝土箱梁结构中约 90% 均采用双线整孔简支箱梁结构, 跨度以 32 m 为主^[4]。针对已建成通车的武广、沪杭客运专线的 32 m 跨预应力混凝土箱梁, 通过现场实测值比较, 分析实际工程施工中梁体跨中截面变形规律及徐变特性, 讨论实测数据的稳定性。同时, 利用 MIDAS/Civil 有限元分析软件, 选用 ACI 209R 规范中的收缩徐变计算模式^[5-6], 对梁体进行模拟分析, 对比两种箱梁的徐变变形, 与实测结果互为验证, 并预测二恒铺装对梁体变形影响和铺装后期徐变变形。为今后的客运专线 32 m 梁的设计、施工提供参考。

1 结构概况

沪杭客专和武广客专均采用了 32 m 单箱单室预应力混凝土简支梁, 结构形式基本相同, 沪杭客专 32 m 梁在武广客专 32 m 梁基础上将桥面宽度缩减为 12 m, 参见图 1。混凝土强度等级 C50, 后张预应力筋为标准型高强度预应力钢绞线: 1×7-15.2-1860-GB/T5224—2003。

武广客专 32 m 梁设置 27 束预应力钢筋, 参见图 1, 锚外张拉控制应力及张拉顺序见表 1。

表 1 武广客专 32 m 梁预应力钢束张拉顺序及控制应力

张拉阶段	张拉顺序	钢束编号	控制应力/MPa
预 张 拉	1	2N6	930.00
	2	2N2a	930.00
	3	2N1b	930.00
初 张 拉	4	2N2c	930.00
	5	2N3	930.00
	6	2N7	930.00
	7	2N10	930.00
	8	2N2d	930.00

收稿日期: 2012-03-28

作者简介: 李军 男 1973 年出生 副教授

基金项目: 中铁十局科技专项基金项目(2009-10)

续表			
张拉阶段	张拉顺序	钢束编号	控制应力/MPa
终 张 拉	1	2N8	1 389.42
	2	N1a	1 339.20
	3	2N2d	1 339.20
	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

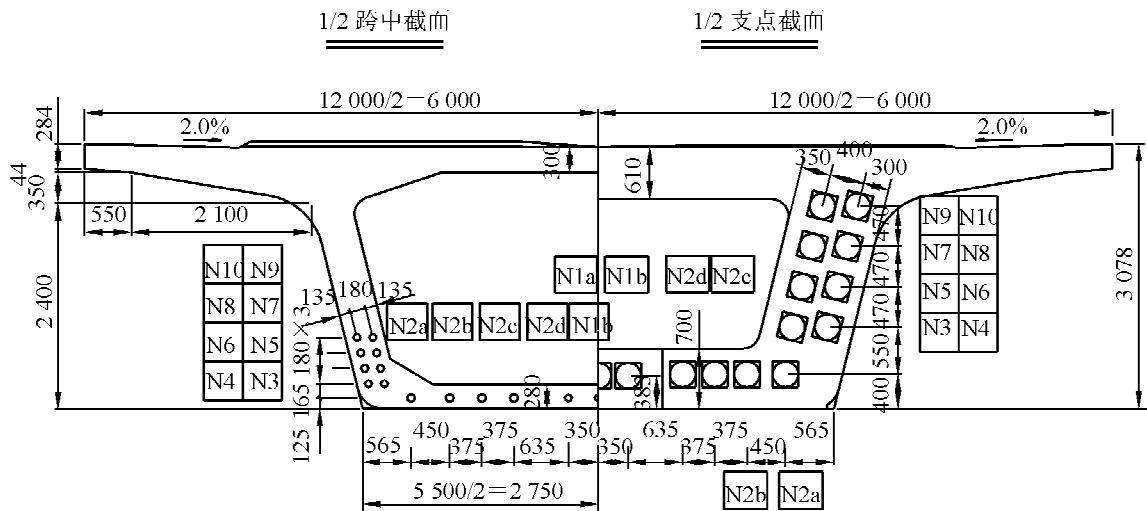


图 1 32 m 梁截面预应力筋布置图(单位:mm)

沪杭客专 32 m 梁在其基础上改变部分钢束张拉顺序及控制应力:将终张拉阶段 2N9 钢束最先张拉,其他顺序不变;将 N8、N4、N10 和 N6 的锚外控制应力减小为 1 342.95 MPa,N9、N5、N7 和 N3 的锚外控制应力减小至 1 372.43 MPa。

2 实测结果分析

针对沪杭客运专线 32 m 预制箱梁,每生产 30 片抽取 1 片(共 12 片梁,按二期恒载铺设时梁体混凝土的龄期,将观测的 12 片箱梁分为 120 d、90 d 和 60 d 龄期铺装梁体)。进行为期 5 个月的上拱度观测。在箱梁两端支座和 1/2 跨中位置截面顶部,沿线路中心线(距中心 4 m)对称布置 6 个观测标,用精密水准仪进行竖向变形观测。

根据沪杭客专 32 m 梁实测结果绘制箱梁跨中截面上拱变形及徐变变形平均值的时程曲线,如图 2、图 3 所示。

将沪杭客专 32 m 梁跨中截面上拱变形曲线与文献[1]所绘制的武广客专典型梁体变形上拱曲线比较,可知两者跨中截面在二恒铺装前的变形曲线基本一致,包含弹性变形和徐变变形。梁体在突加外荷载(如终张拉)作用下完成弹性变形,徐变变形则由于混凝土的徐变特性贯穿于梁体建造及使用的整个阶段。

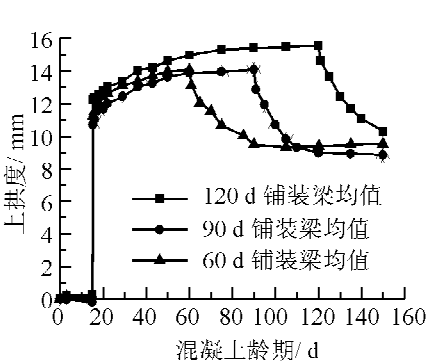


图 2 实测跨中变形均值时程曲线图

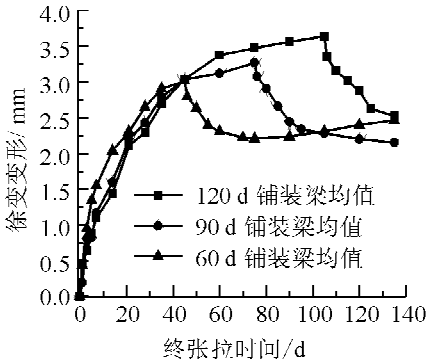


图 3 实测跨中徐变变形均值时程曲线图

为便于和文献[1]的中实测数据进行对比,提取沪杭客专观测梁终张拉时弹性变形值及 90 d 铺装梁与 120 d 铺装梁在终张拉后 60 d 内的变形数据,如表 2 所示。

表 2 梁体实测变形数据 mm

武广客专 32 m 梁				沪杭客专 32 m 梁			
梁号	弹性变形	总变形	徐变变形	梁号	弹性变形	总变形	徐变变形
040 号	11.25	17.75	6.50	TQ31.5-58	12.350	15.196	2.846
041 号	12.50	20.00	7.50	TQ31.5-59	12.201	16.011	3.810
042 号	12.00	19.25	7.25	TQ31.5-86	11.273	14.521	3.248
043 号	13.00	20.00	7.00	TQ31.5-127	11.930	15.524	3.594
044 号	10.25	17.75	7.50	TQ31.5-149	11.393	14.077	2.684
045 号	9.75	20.00	10.25	TQ31.5-176	9.739	13.061	3.322
046 号	10.75	19.25	8.50	TQ31.5-199	11.971	15.231	3.260
047 号	9.50	17.75	8.25	TQ31.5-222	10.470	13.466	2.996
048 号	14.00	19.00	5.00	TQ31.5-239	10.725	—	—
049 号	8.50	20.00	11.50	TQ31.5-269	10.667	—	—
062 号	10.25	17.00	6.75	TQ31.5-297	11.827	—	—
082 号	8.75	18.50	9.75	TQ31.5-323	11.107	—	—
102 号	10.75	18.50	7.75				
109 号	12.00	18.00	6.00				

注:总变形为终张拉后 60 d 梁体变形,徐变变形为终张拉后 60 d 内梁体的徐变变形值。

由于影响梁体变形因素众多及测量误差的存在,各片梁的实测跨中变形及徐变变形具有不同程度的离散性,取每组梁的平均值进行分析计算也能削弱数据离散的不利影响。为了更为直观地比较武广客运专线与沪杭客运专线 32 m 简支箱梁实测变形结果,见表 3。

表 3 梁体实测变形关键数据对比

项目	变形范围/mm	平均值/mm	标准差	变异系数
武广客专弹性变形	8.50~12.50	10.95	1.61	0.15
沪杭客专弹性变形	9.739~12.350	11.304	0.761	0.067
武广客专徐变变形	5.0~11.50	7.82	1.74	0.22
沪杭客专徐变变形	2.846~3.810	3.220	0.350	0.110

由表 3 分析可知,武广客专 32 m 梁终张拉阶段弹性上拱值 8.50~12.50 mm,平均值 10.946 mm,标准差 1.61 mm,变异系数 0.15;沪杭客专 32 m 梁终张拉阶段弹性上拱值 9.739~12.350 mm,平均值 11.304 mm,标准差 0.761 mm,变异系数 0.067。沪杭客专较武广客专在终张拉阶段的梁体平均弹性变形大 0.034 mm(3.23%),两者相当。但是沪杭客专监测的弹性变形值较为稳定,离散性小,变形控制措施更为可靠。

终张完成后 60 d 内,早期徐变变形增长较快,随持荷时间增长,速度明显减缓。武广客专 32 m 梁终张拉阶段徐变变形 5.0~11.50 mm,平均值 7.82 mm,标准差 1.74 mm,变异系数 0.22;沪杭客专 32 m 梁终张拉阶段弹性上拱值 2.846~3.810 mm,平均值 3.220 mm,标准差 0.350 mm,变异系数 0.11。对比可

知,沪杭客专32 m梁终张拉后60 d内的梁体平均徐变变形仅为武广客专的41.18%,数值较为稳定,离散性小,徐变控制措施更为可靠。

3 理论计算

3.1 模型建立

运用结构分析软件 MIDAS/Civil 建立沪杭客专及武广客专32 m预应力箱梁的整体模型,对桥梁不同施工阶段进行模拟。整个梁体划分为34个单元,35个节点。沪杭客专32 m箱梁有限元模型如图4所示。

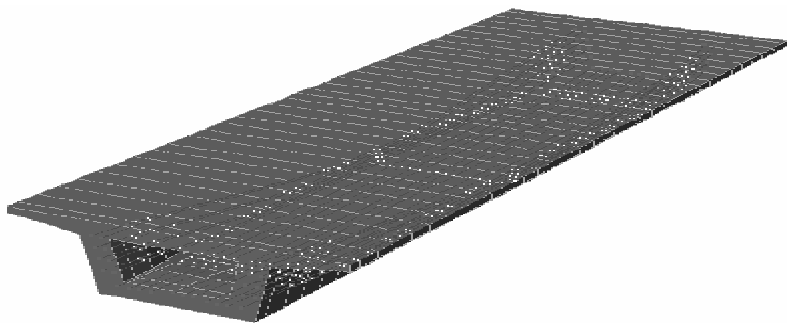


图4 沪杭客专32 m箱梁有限元模型

根据梁体施工顺序及控制要求,按照混凝土龄期划分施工阶段如下:预应力初张拉(3 d),终张拉(15 d),二期恒载(90 d)和使用阶段(1 095 d)。收缩徐变系数按 ACI 209R 规范计算,考虑影响混凝土徐变的各项因素^[5,7]。

3.2 计算参数

结合现场实验结果,选取计算参数如下:

混凝土等级 C50,弹性模量 35.5 GPa,取沪杭客专实测 28 d 龄龄抗压强度 62.9 MPa。

预应力钢筋弹性模量 1.95×10^5 MPa;抗拉强度标准值 1 860 MPa;线膨胀系数 1.2×10^{-5} ;预应力钢筋束松弛系数 3.5%;预应力钢筋与管道壁的摩擦系数 0.3,管道每米局部偏差对摩擦的影响系数 0.006 6;锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值:开始点 6 mm,结束点 6 mm。

环境温度及湿度:取平均温度 20 ℃,平均相对湿度 70%。

钢筋混凝土容重 25 kN/m³,二期恒载均取 140 kN/m。

3.3 对比分析

为便于有限元计算结果与实测值的比较,如图5~图6所示。图中武广实测值仅为文献[1]中徐变变形最大的049号梁实测值,沪杭实测值为混凝土龄期90 d铺装梁变形平均值。

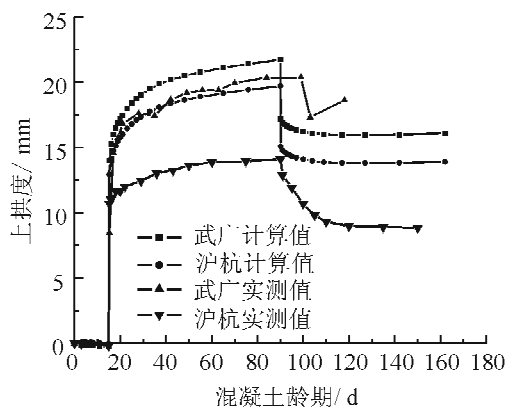


图5 跨中变形时程曲线图

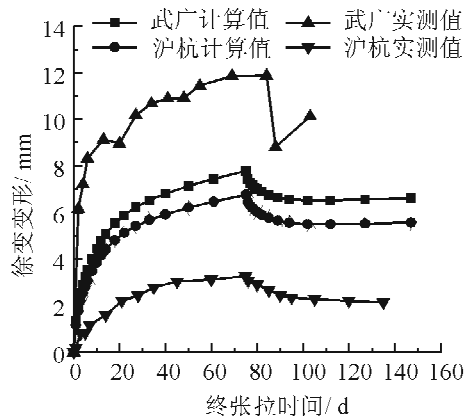


图6 跨中徐变变形时程曲线图

将计算结果与实测值对比,得知:两种客专 32 m 箱梁跨中总变形、徐变变形的变化规律一致。终张拉弹性变形实测值均小于计算值,梁体总变形计算值大于实测值。差距的原因主要在于计算采用的弹性模量小于工程实际值。以沪杭客专为例,实测梁体混凝土 28 d 弹性模量为 40.1 GPa,达到设计值的 113%。计算结果与文献[8]内数据也相对吻合,再次验证计算模型的可靠性。

武广客专 32 m 梁实测终张后 60 d 内徐变变形平均值略大于计算值(偏差 5.12%),沪杭客专梁体实测值远小于计算值(偏差 50.15%)。武广客专实测梁体在 10 d 龄期进行终张拉,早于计算中的 15 d 终张拉取值,致使混凝土实际强度和弹性模量小于计算取值,从而导致数值偏大。而针对沪杭客专,有限元计算中虽考虑了混凝土的徐变和收缩因素,却未能全面考虑实际工程中温度、湿度等环境条件、普通钢筋及施工荷载作用等对梁体上拱影响,关于这些因素对梁体徐变变形的影响还有待进一步探索^[9-10]。此外,针对客运专线的长期变形监测相对较少,在条件允许的条件下,应加强梁体后期变形监测,加深对梁体徐变的探索。

通过对梁体进行龄期 3 a 的计算,列取梁体变形关键数据见表 4。

表 4 梁体计算变形关键数据对比

项目	终张拉	终张后 60 d	终张后 75 d	二恒降低	铺装后期
	弹性变形	徐变变形	徐变变形	徐变变形	徐变变形
沪杭客专	13.00	6.46	6.75	1.27	0.70
武广客专	14.25	7.44	7.78	1.26	0.79

通过计算结果的比较可知:沪杭客专与武广客专 32 m 梁的跨中总变形和徐变变形规律一致,前者数值均小于后者,沪杭客专 32 m 梁的设计相对降低了徐变对梁体变形的影响。

此外,二期恒载的施加使梁体变形急剧回落,与实测结果所显示的逐步回落有所不同,在于实际工程中桥面铺装是一个分阶段持续进行的过程。计算结果显示,桥面铺装后梁体变形虽有反弹,但变形发展趋势缓慢,后期累计变形量在 1 mm 内,为后期无砟轨道的铺设和运营安全提供了保障。

4 徐变变形控制

通过对沪杭客专 32 m 梁变形监控,结合武广客专梁体预制施工控制,总结徐变变形控制措施如下:

(1)合理设置预留反拱度,控制制梁台座底模板曲线按二次抛物线设置,每生产一孔梁后核对一次台座预设反拱值,偏差不得大于 2 mm。这是控制过大上拱最直接、有效的方法。

(2)严格按照设计和规范要求模板作业、钢绞线作业和混凝土作业,规范梁体混凝土养护工艺流程。还可根据施工进度适当延长预应力施加时的混凝土龄期,尤其避免在强度和弹性模量未达到设计要求就提前张拉预应力。

(3)预应力施加前严格监测混凝土强度和弹性模量,两者均满足设计要求后方可施加预应力。现场进行管道摩阻实测和张拉应力修正。

(4)终张拉后存梁时间控制在 30 ~ 60 d 之间,及时架梁和进行桥面铺装。避免因为存梁时间过长,梁体在没有施加二期恒载的情况下,出现过上拱。

(5)按规范规定持续进行梁体徐变上拱观测工作,对上拱情况进行监测,一旦发现上拱值有异常或超限情况,及时处理。

5 结论

通过沪杭客专和武广客专 32 m 箱梁现场实测对比和有限元分析对比两种方式,得到如下结论:

(1)沪杭客专与武广客专 32 m 梁的跨中总变形和徐变变形规律基本一致,两者的实测结果与计算值吻合较好。前者跨中徐变变形值及徐变速率均小于后者,监测数值更为稳定,结构设计更为完善,变形控制更为可靠。从梁体变形控制考虑,铁路客运专线 32 m 梁设计趋于成熟。

(2)沪杭客专 32 m 梁实测徐变变形与有限元计算值存在一定偏差,有限元计算中虽考虑了混凝土的徐变和收缩因素,却未能全面考虑实际工程中温度、湿度等环境条件、普通钢筋及施工荷载作用等对梁体

上拱影响,关于这几方面因素对梁体徐变变形的影响还有待进一步探索。

(3)二期恒载的施加使梁体变形明显回落,随后虽有反弹,但变形发展趋势缓慢,后期预测累计变形量在1 mm内,为后期无砟轨道的铺设和运营安全提供了保障。

参 考 文 献

- [1] 许锡昌,周伟,陈善雄. 武广铁路客运专线32 m单跨简支梁的徐变上拱特征分析[J]. 铁道标准设计,2010(2):78-80.
- [2] 王巍,薛伟辰. 高速客运专线轨道梁徐变变形研究进展[J]. 铁道科学与工程学报,2005(4):39-44.
- [3] 石现峰,王澜,万家. 无砟轨道混凝土桥梁的徐变变形研究[J]. 石家庄铁道学院学报,2007,20(1):61-63.
- [4] 牛斌,胡所亭,魏峰,等. 我国高速铁路预应力混凝土箱梁研究与应用[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(上册). 北京:人民交通出版社,2010:85-93.
- [5] 梁志广,李建中,王军文. 几种常用混凝土收缩徐变模式中徐变系数计算的比较分析[C]//第八届全国结构工程学术会议论文集. 北京:清华大学出版社,1999:175-179.
- [6] 石现峰,梁志广,李建中. 几种常用混凝土收缩徐变模式的比较分析[J]. 石家庄铁道学院学报,1998,11(1):8-13.
- [7] 李生勇,李凤芹,陈宝春,等. 钢管混凝土拱桥徐变影响分析[J]. 铁道学报,2011(3):100-107.
- [8] 宋津喜. 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[J]. 中国工程科学,2009(1):60-66.
- [9] 胡狄,陈政清. 预应力混凝土桥梁收缩与徐变变形试验研究[J]. 土木工程学报,2003(8):79-85.
- [10] 薛伟辰,王巍,任廷柱,等. 准高速客运专线轨道梁的徐变性能[J]. 西南交通大学学报,2008(4):434-440.

Study on Creep Effect of 32-span Box Girder in Passenger Dedicated Line

Li Jun¹, Fan Chaoyuan¹, Yang Jihao², Xu Zhisheng¹, Luo Junli¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410004, China;

2. The Fourth Engineering Co., China Railway 10th Engineering Bureau Group Co., Ltd., Xuzhou 221003, China)

Abstract: According to 32-metres prestressed concrete box girders applied in passenger dedicated lines of Wuhan-Guangzhou and Shanghai-Hangzhou, a comparative study on measured data of the deformation in upper middle arch during the construction stage is conducted, and the creep properties of the box girder at the construction stage is also discussed. By using MIDAS/Civil analysis software, a finite element model based on the design drawings and shrinkage and creep model of ACI209R is established. The theoretical data are compared with the measured data, and proved to be consistent. The impact on girder deformation and long-term creep deformation caused by the second-permanent pavement is predicted. The results show that, with more adequate deformation control, the creep deformation of the 32-metres girder of Shanghai-Hangzhou passenger dedicated line is smaller than that of Wuhan-Guangzhou.

Key words: passenger dedicated lines; 32 m box girder; deformation of arch; creep; elastic deformation

(责任编辑 刘宪福)