

京津城际铁路桥梁沉降观测与评估技术

丁愿文

(中铁十七局集团有限公司,太原 030006)

[摘要] 以京津城际铁路工程为例,系统地介绍了无碴轨道客运专线(高速铁路)桥梁沉降观测的具体要求、方法,并提出了沉降评估的数学模型和判定条件。

[关键词] 京津城际铁路;桥梁;沉降观测;评估

[中图分类号] U443 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)01-0043-05

1 前言

京津城际铁路是国内第一条运营时速达到 350 km、全线采用无碴轨道的铁路客运专线,具有高标准设计、高起点建设、高速度运行、高信息化管理及高乘坐舒适度的特点,是我国铁路客运专线建设的发展方向,更是京沪高速铁路建设的先行段。无碴轨道系统对线下工程的沉降要求非常严格,对桥梁墩台沉降变形提出了很高的要求。中铁十七局集团有限公司承担的京津城际轨道交通线下工程以杨村特大桥和永定新河特大桥为主,线路经过地段区域性沉降比较严重。国外无碴轨道施工周期较长,一般等到自然沉降后再铺设无碴轨道,京津城际铁路建设因工期紧,没有自然沉降的过程,因此总结京津城际铁路沉降观测与评估技术非常重要。

2 桥梁沉降观测的技术要求

2.1 水准基点设置要求

沉降观测工作独立建网,精度按二等精度控制,宜按国家一等水准测量的技术要求施测。沉降观测水准基点从精密控制网最近的水准基点引测,引测前应对引用的水准基点进行检核。为了检查水准基点本身的高程是否有变动,可将其成组埋设,通常每组 3 点,并形成边长约为 100 m 的等边三角形。

在三角形的中心,与 3 点等距的地方设置固定测站,由此测站可以经常观测 3 点间高差,这样便可判断出水准基点的高程有无变动。

京津城际铁路水准基点采用钢管桩设置在稳固和观测方便的位置,其打入深度大于 6 m,桩顶部 50 cm 深度采用混凝土加固,并在地面上浇筑 1.0 m × 1.0 m × 0.2 m 的混凝土观测平台,桩顶露出平台 15 cm。由施工控制网的水准点引测至沉降观测水准点并进行联测,达到二等水准测量精度要求。沉降观测属于精密水准测量,对测量精度要求极高。水准基点的稳定是测量工作的基础,所以要进行不定期的复测,尤其在施工过程中、雨季,随时发现问题随时复测。

2.2 沉降观测各项限差规定及精度要求

水准视线长度、视距差及视线高度要求见表 1。观测的各项精度要求^[1]为:

- 1) 每测站高差中误差 $\leq \pm 0.5$ mm;
- 2) 沉降观测点相对于水准基点高差中误差 $\leq \pm 1.0$ mm。

表 1 沉降观测各项限差要求

Table 1 Requirements on various limited errors of settlement monitoring

视线长度/m	每站前后视距差/m	视距累积差/m	视线高度/m	基辅分划读数之差/mm	基辅分划所测高差之差/mm
≤ 50	≤ 1.0	≤ 2.0	≥ 0.3	≤ 0.4	≤ 0.6

[收稿日期] 2008-11-10; 修回日期 2008-11-24

[作者简介] 丁愿文(1974-),男,甘肃天水市人,中铁十七局集团有限公司京沪项目二驻地经理部总工程师,长期从事高速铁路无碴轨道铺设评估技术研究;E-mail: dingyuanwen@126.com

2.3 仪器设备要求

使用精度不低于 DSZ1 的自动安平水准仪或 DS1 的气泡式水准仪,水准标尺应采用与之配套的带有两排分划的线条式钢瓦合金标尺,水准仪和水准标尺各项技术指标应符合《国家一、二等水准测量规范》(GB 12897-91)有关规定,在沉降观测前和沉降观测过程中的规定时间段应对仪器和标尺进行检定。

2.4 沉降观测标志的设置要求

每个桥墩均设置承台观测标、墩身观测标,承台观测标分为观测标-1、观测标-2;观测标-1 设置于底层承台左侧小里程角上;观测标-2 设置于底层承台右侧大里程角上。桥墩观测标埋设,当墩全高 >14 m 时(指承台顶至墩台垫石顶),需要埋设两个观测标;当墩全高 ≤14 m 时,埋设一个桥墩观测标;桥墩标一般设置在墩底高出地面或常水位 0.5 m 左右;当墩身较矮梁底距离地面净空较低不足 4.0 m 时,桥墩观测标可在对应墩身埋标位置的顶帽上埋设。

3 桥梁沉降观测的方法

3.1 建立固定的观测路线

依据沉降观测点的埋设要求或图纸设计的沉降观测点布点图,确定沉降观测点的位置。在水准基点与沉降观测点之间建立固定的观测路线,并在架设仪器站点与转点处作好标记桩,保证各次观测均沿统一路线。

3.2 观测方法及要求

1) 支路线法:当沉降观测点距引测的水准基点较近,且高差也相近时,应尽可能一次置镜测得沉降观测点与水准基点之间的高差。为避免单次测量可能产生的误差,应变换仪器高双次置镜观测,当双次置镜测得的高差值 ≤0.7 mm 时,取两次测量高差值的平均值作为最终值;当双次置镜测得的高差值 >0.7 mm 时,应重测,直至满足要求。

当沉降观测点距引测的水准基点较远、高差较大,无法一次置镜测得沉降点与水准基点之间的高差时,可两次置镜测得沉降点与水准基点的高差,但最多允许置镜两次。为避免单路线测量可能产生的错误,应采取往返测的方式测量沉降观测点与水准基点之间的高差。当往返测的高差值 ≤1.0 mm 时,取其平均值作为最终高差值;当往返测的高差值 >1.0 mm 时,应重测,直至满足要求。

2) 附和水准路线法:附和水准路线法往返测的高差之差及附和路线闭合差均应 ≤ ± 4 \sqrt{l} mm (l 为两相邻水准基点间的水准路线长度, km), 当高差之差或闭合差超限时,应分析原因,进行补测,直至满足要求^[2]。

3) 沉降观测每测站观测程序及具体要求参照《国家一、二等水准测量规范》(GB12897-91)有关规定执行^[3]。

4) 沉降观测时,置镜点、观测路线、观测人员、观测设备一般应固定,在成像清晰稳定的条件下进行观测,不得在日出后及日出前约 30 min 及其他不宜观测的天气情况下作业;作业中应经常对水准仪及水准尺的水准器和 i 角进行检查;在同一测站观测时,不得两次调焦,以确保观测成果的质量。

5) 沉降观测记录:沉降观测数据和有关记事项目,应在现场直接记录在观测手簿(纸质)中或由仪器自动记录在自备的电子文件中。

3.3 首次测量

根据施测方案及确定的观测周期,首次观测应在观测点安装稳固后及时进行。首次观测的沉降观测点高程值是以后各次观测用以比较的基础,要求每个观测点首次高程应在同期观测两次后决定。

3.4 观测时间和周期要求

观测时间及周期具体要求见表 2。

表 2 沉降观测周期表

Table 2 Periodic time of settlement monitoring

测量间隔表	
观测次数	观测周期
	桥墩(台)
初始测量	承台施工完后 24 h 内
承台测量	以上各级承台施工完后 24 h 内
第 1 次测量	桥墩施工完后第 1 天
第 2 次测量	桥墩施工完后第 7 天
第 3 次测量	桥墩施工完后第 14 天
后续周期性测量	桥墩施工完后 1~3 个月,每 14 天为一测量周期
	桥墩施工完后 4~6 个月,每 28 天为一测量周期
	架梁以后
第 1 次测量	架梁后第 1 天
第 2 次测量	架梁后第 3 天
第 3 次测量	架梁后第 7 天
第 4 次测量	架梁后第 14 天
第 5 次测量	架梁后第 21 天
第 6 次测量	架梁后第 28 天
后续周期性测量	第 2~3 个月,每 14 天为一测量周期
	第 4~6 个月,每 28 天为一测量周期
	第 7~24 个月,每 56 天为一测量周期

3.5 沉降观测数据处理

沉降观测数据处理和计算主要包括:沉降观测手簿的计算;沉降观测成果的质量评定(计算每千米或每测站水准测量偶然中误差);沉降观测点每期沉降量、累计沉降量的计算和绘制 $p-T-S$ (荷

载、时间、沉降量), $U-T-S$ (沉降速度、时间、沉降量) 曲线;沉降趋势分析和预测;桥梁铺设时机的评估。表3、图1为京津城际轨道交通工程沉降观测数据处理实例。

表3 京津城际铁路杨村特大桥 991 号墩沉降观测记录
Table 3 Record of settlement monitoring at No. 991 bridge pier in Yangcun super large bridge in Beijing - Tianjin inter - city railway

观测点号	观测日期	累积 时间/d	期次/次	观测点 高程/m	本次沉 降量/mm	累计沉 降量/mm	备注
991# - S3	2006 - 09 - 10	0	1	5.392 56	0.00	0.00	
991# - S3	2006 - 09 - 26	16	2	5.392 10	0.46	-0.46	
991# - S3	2006 - 10 - 20	40	3	5.391 16	0.94	-1.40	
991# - S3	2007 - 01 - 28	140	4	5.389 88	1.28	-2.68	
991# - S3	2007 - 02 - 27	170	5	5.388 91	0.97	-3.65	
991# - S3	2007 - 03 - 20	191	6	5.386 46	2.45	-6.10	
991# - S3	2007 - 05 - 08	240	7	5.386 38	0.08	-6.18	
991# - S3	2007 - 05 - 17	249	8	5.386 06	0.32	-6.50	
991# - S3	2007 - 06 - 02	265	9	5.385 94	0.12	-6.62	
991# - S3	2007 - 06 - 06	269	10	5.383 95	1.99	-8.61	架梁第 2 天
991# - S3	2007 - 06 - 10	273	11	5.383 45	0.50	-9.11	架梁第 7 天
991# - S3	2007 - 06 - 19	282	12	5.383 41	0.04	-9.15	架梁第 15 天
991# - S3	2007 - 07 - 11	304	13	5.383 40	0.01	-9.16	架梁第 37 天
991# - S3	2007 - 07 - 22	315	14	5.383 21	0.19	-9.35	
991# - S3	2007 - 07 - 22	315	15	5.372 75	0.00	-9.35	
991# - S3	2007 - 07 - 25	318	16	5.372 72	0.03	-9.38	
991# - S3	2007 - 08 - 03	327	17	5.372 76	-0.04	-9.34	
991# - S3	2007 - 08 - 11	335	18	5.373 20	-0.44	-8.90	
991# - S3	2007 - 08 - 23	347	19	5.373 11	0.09	-8.99	
991# - S3	2007 - 09 - 06	361	20	5.372 87	0.24	-9.23	2007 年 9 月 11 日底座板施工日期
991# - S3	2007 - 09 - 13	368	21	5.372 39	0.48	-9.71	
991# - S3	2007 - 09 - 30	385	22	5.372 33	0.06	-9.77	
991# - S3	2007 - 10 - 11	396	23	5.372 27	0.06	-9.83	
991# - S3	2007 - 10 - 21	406	24	5.372 23	0.04	-9.87	2007 年 10 月 29 日博格板铺设日期
991# - S3	2007 - 11 - 03	419	25	5.372 21	0.02	-9.89	
991# - S3	2007 - 11 - 12	428	26	5.372 27	-0.06	-9.83	2007 年 11 月 23 日轨道铺设日期
991# - S3	2007 - 11 - 24	440	27	5.372 18	0.09	-9.92	

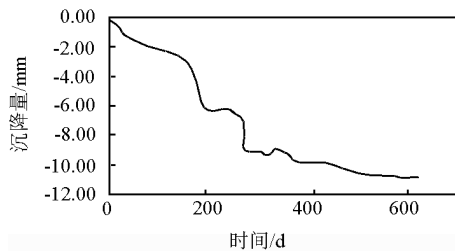


图1 京津城际铁路杨村特大桥 991 号墩 $p-T-S$ 图
Fig. 1 Sketch of $p-T-S$ at No. 991 bridge pier in Yangcun super large bridge in Beijing - Tianjin inter - city railway

4 沉降评估技术

4.1 沉降评估数学模型的建立

目前,在沉降过程回归分析中使用双曲线函数等一元非线性函数作为沉降过程回归分析的基本数学模型。

在算法上,一元非线性函数回归分析比较复杂,但可以经过变量代换转换为简单的一元线性回归函数解算回归系数。通用一元线性回归函数模型:

$$y_i = a + bx_i - v_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中, y 为与沉降量有关的因变量, x 为与

时间有关的自变量, v 为随机因素对 y 的影响的总和(改正数), a, b 为系数。

根据各次观测值, 在 $[vv]$ 最小条件下, 由间接平差计算系数 a, b 的最佳值, 建立回归方程。同时计算中误差(回归标准差) m 为

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-2}} \quad (2)$$

相关系数:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

F 检验法回归显著性检验:

$$\tilde{F}(1, n-2) \quad (4)$$

相关系数和回归显著性 F 检验都是关于沉降量—时间关系密切程度的检验, 二者不能完全相互代替, 只能互为补充。

建立回归方程并经显著性检验后, 采用外推法预测未来某天的沉降量(差)。

4.2 评估资料和判定标准

4.2.1 评估资料

桥涵沉降及变形观测资料; 桥涵地段线路纵断面图, 工程地质纵横断面图, 桥涵设计图纸和说明书, 沉降计算报告(包括不同阶段的设计沉降值与时间的关系曲线)^[4]。

4.2.2 判定标准及要求

1) 对于预制梁桥, 基础沉降按墩台混凝土施工后、架梁前及架梁后 3 个阶段进行; 对于原位施工的桥梁, 基础沉降应根据实际时光状态及荷载变化情况分多个阶段。

2) 根据桥梁实际荷载情况及观测数据, 应作多个阶段的回归分析及预测, 综合确定沉降变形趋势, 曲线回归的相关系数应不低于 0.92。首次回归分析时, 观测期应不少于桥涵主体工程完工后 3 个月。

3) 利用两次回归结果预测的最终沉降差值应不大于 8 mm。两次预测时间间隔一般不少于 3 个月; 对于岩石地基良好地质的桥涵, 应不少于一个月。

4) 桥梁主体结构完工至无碴轨道铺设前, 沉降观测的时间应满足以下条件:

$$S(t)/S(t = \infty) \geq 75\% \quad (5)$$

式中, $S(t)$ 为预测时的沉降观测值; $S(t = \infty)$ 为预测时的最终沉降值。

5) 设计预测总沉降量与通过实测资料预测的总沉降量之差不宜大于 10 mm。

6) 处于岩石地基良好地质的桥梁, 当墩台沉降值趋于稳定且设计及实测沉降总量 ≤ 5 mm 时, 可判定沉降满足无碴轨道铺设条件。

4.3 评估方法——双曲线法

双曲线方程为

$$S_t = S_0 + t/a + bt \quad (6)$$

$$S_f = S_0 + 1/b$$

式中, S_t 为时刻 t 的沉降量; S_f 为最终沉降量 ($t = \infty$); S_0 为初期沉降量 ($t = 0$); a, b 为将荷载不再改变以后的实测数据经过回归求得的系数。沉降计算的具体顺序如下:

- 1) 确定起点时间 ($t = 0$), 可取填方施工结束日为 $t = 0$;
- 2) 就各实测值计算 $t/(S_t - S_0)$, 如图 2 所示;
- 3) 绘制 t 与 $t/(S_t - S_0)$ 的关系图, 并确定系数 a 和 b , 如图 3 所示;
- 4) 计算 S_t ;
- 5) 由双曲线关系推算出沉降—时间 ($S-t$) 曲线。

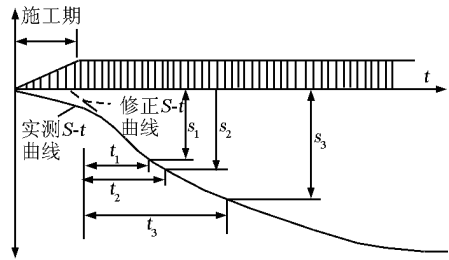


图 2 $t/(S_t - S_0)$ 计算图

Fig. 2 Calculation drawing of $t/(S_t - S_0)$

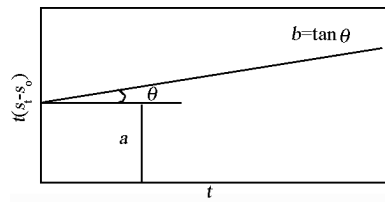


图 3 a, b 参数计算图

Fig. 3 Calculation drawing of parameters of a and b

图 4 为京津城际轨道交通工程杨村特大桥 1077 号墩计算实例。

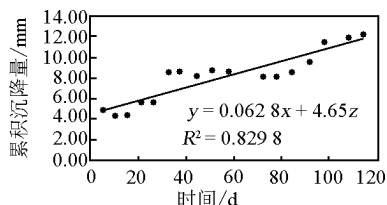


图4 京津城际铁路杨村特大桥1077号墩计算图

Fig. 4 Calculation drawing of No. 1077 bridge pier in Yangcun super large bridge in Beijing-Tianjin inter-city railway

5 结语

1) 沉降观测工作中坚持“五定”原则,“五定”即沉降观测依据的基准点、工作基点和被观测物的沉降观测点,点位要稳定;所用仪器、设备要稳定;观测人员要稳定;观测时的环境条件基本一致;观测路线、镜位、程序和方法要固定^[5]。

2) 水准基点的稳定是测量工作的基础,所以要进行不定期的复测,尤其在施工过程中、雨季,随时发现问题随时复测。

3) 在沉降观测过程中,沉降量与时间关系曲线不是单边下行光滑曲线,而是起伏状现象,要分析原因,及时进行补测并对数据进行修正。a. 第二次观

测出现回升,而以后各次观测又逐渐下降,可能是首次观测精度过低,若回升超过2 mm时,第一次观测作废,若回升2 mm内,第二次与第一次调整标高一致;b. 曲线在某点突然回升原因可能是水准点或观测点被碰动所致,且水准点碰动后标高低于碰前标高(水准点下沉),观测点被破坏,要及时补测,若观测周期间隔太长才发现,补测后把本次沉降量当零处理;c. 曲线自某点起渐渐回升的原因一般是水准点下沉所致,应确定水准点下沉值,与高一级水准点联测,再确定下沉值;d. 如果出现曲线起伏大时,原因是水准点可能有起伏,所以水准点的埋设深度和质量至关重要,施工过程中保护水准点不被破坏。

4) 现在建设的客运专线主要以桥梁为主,墩位多,观测周期长,根据京津城际铁路的观测经验,现场观测必须得组建一支专门的测量队。

参考文献

- [1] GB50026-93. 工程测量规范[S]. 北京:中国计划出版社,2001
- [2] GB12897-91. 国家一、二等水准测量规范[S]. 北京:中国标准出版社,1992
- [3] [2006]189. 客运专线无砟轨道铁路工程测量暂行规定[S]. 北京:中国铁道工业出版社,2006
- [4] [2006]158. 客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S]. 北京:中国铁道工业出版社,2006
- [5] 李青岳. 工程测量学[M]. 北京:测绘出版社,1993

Technology on settlement monitoring and evaluation in bridge pier in Beijing-Tianjin inter-city railway

Ding Yuanwen

(China Railway 17th Bureau Group Co. Ltd, Taiyuan 030006, China)

[Abstract] Specific requirements and methods of settlement monitoring which are used in bridge of unbalanced track passenger dedicated line or high-speed railway are introduced systematically, and mathematical model and determinant conditions of settlement are proposed simultaneously, taking Beijing-Tianjin inter-city railway as an example.

[Key words] Beijing-Tianjin inter-city railway; bridge; settlement monitoring; evaluation