

海南东线高速公路扩建工程 路基沉降观测和数据分析

蒙国裕

(海南海通公路工程咨询监理有限公司, 海南 海口 570203)

摘 要:结合海南东线高速公路路基沉降观测,对观测设施的布设、观测技术要求,采用统计方法对观测成果进行分析以确定点位的稳定性,运用傅立叶变换方法分析测量数据时间序列在频率域上的变化特性,在此基础上对可能存在的沉降规律作出分析,旨在为工程管理部门提供决策依据,也用于指导类似工程。

关键词:沉降观测;稳定性;统计分析

文章编号:1009-6477(2005)03-0026-05

中图分类号:U416.1

文献标识码:B

Subgrade Settlement Observation and Data Analysis of Extension Project of Hainan East Expressway

MENG Guo-yu

海南东线高速公路左幅扩建工程是右幅工程建成通车 4 年后才开始扩建的整体式高速公路工程,因此扩建工程路基的沉降就成了工程设计者和管理者极为关注的问题。本文结合扩建工程路基沉降观测,对观测设施的布设,技术要求,观测成果的稳定性分析等方面进行探讨,运用傅立叶变换方法对观测数据时间序列在频率域上的变化特性进行了分析,了解观测数据受各种因素周期性干扰的影响程度,掌握该工程软基处理段及高填方路段路基沉降过程,判断各处理段变形是否稳定,处理措施是否有效,在此基础上分析可能存在的沉降规律和沉降趋势,为工程管理部门的决策提供依据。

路基沉降一定程度的影响,因此工作基点定期与水准基点联测,并与首级水准点精度相同,最大限度地减少对沉降点的观测成果产生影响,方便沉降点观测各期成果的对比。

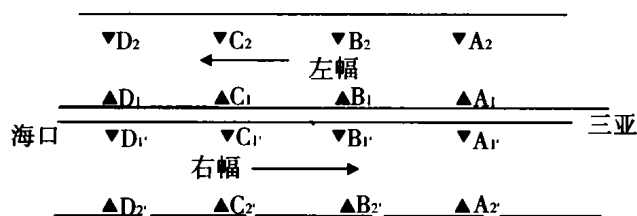


图 1 沉降变形观测点点位示意

1 观测设施的布设及技术要求

水准基点是沉降观测的基本控制点,一般布设在附近的桥墩承台上,以保证其稳固性,并与各首级施工控制网联测,以建立起统一的高程基准。

工作基点在水准基点的控制下布设在每一观测段变形区域外的基岩上或原状土层上埋设混凝土桩。采用顶面为 10×10 cm,底面为 20×20 cm,高为 50 cm,顶面埋有球面大帽钉的水泥混凝土预制桩,埋设在坚实的原状土层上,埋深 46 cm,基坑底部用混凝土作垫底,既便于路基的沉降观测,又具有很强的稳固性。因基点离公路相对较近,稳定性会受到

路基沉降观测点 100 m 左右设 1 个观测断面,各断面间距大致相等,遇桥涵时在两侧加设观测断面,每个观测断面线上左、右幅各布置 2 个观测点,分别在路基的两端和中间,沉降观测点距路缘石约 30 cm。同时确定两断面之间的置镜点位置,统一编号,以保证每次观测时按相同路线、位置和顺序进行。在本工程中,一共设置了 33 个观测段 128 个观测断面。各观测断面的水准基点和工作基点组成附合水准网(图 1)控制观测断面沉降点的观测。在每个观测段中均采用 2 个独立的闭合路线环进行复核和工作,即水准点→工作基点→水准点和工作基点→观测点→工作基点。在路基沉降点的分析计算

表 1 观测技术要求

水准点	观测 周期	观测 等级	观测方法	相邻点高 差中误差 (mm)	往返较差、附 合或环形闭 合差(mm)	备 注
水准基点 工作基点 路基沉降点	1 个月	三等	单一附和路线, 双向观测	± 0.5	$1.0\sqrt{n}$	1. n 为测站数; 2. 水准基点和工作基点的 点位发生变动时, 应与 首级控制网重新联测; 3. 路基沉降量明显变大 时, 应缩短观测周期

表 2 工作基点高程变化

周 期	名 称	桩 号	高 程 (m)	沉 降 值 (mm)	周 期	名 称	桩 号	高 程 (m)	沉 降 值 (mm)
0	SBM1-28	K87+732	19.241	1	0	BM2-25-1	K114+760	8.4205	0.5
2			19.240		2			8.420	
0	BM1-28-1	K87+120	19.092	1.5	0	BM2-27-1	K116+730	9.052	-0.3
2			19.0905		2			9.0523	
0	BM1-28-2	K88+600	14.160	-1.5	0	SBM2-30	K120+050	15.4595	0
2			4.1615		2			15.4595	
0	BM2-2-1	K90+030	13.228	-2	0	BM2-38-1	K127+645	9.6345	-0.5
2			13.230		2			9.635	
0	BM2-15-1	K103+820	9.9285	1	0	SBM2-39	K128+375	16.946	-0.5
2			9.9275		2			16.9465	
0	BM2-16-1	K105+200	10.7025	-1	0	BM2-47-1	K135+752	13.3435	-1
2			10.7035		2			13.3445	
0	SBM2-20	K109+180	6.524	-0.5	0	BM42-1-1	K162+510	6.7855	-1
2			6.5245		2			6.7865	
0	SBM2-21	K110+208	7.2265	0	0	BM183-1-	K167+400	13.6745	0
2					2			13.6745	

选择的是固定基准, 应保证水准基点和工作基点有较高的精度。根据海南东线高速公路左幅扩建工程实际情况, 并结合实际地质条件、点位位置等综合因素。各级水准测量的观测技术标准和要求见表 1。

2 观测成果

经过 3 个周期的观测表明, 所埋设的工作基点是稳固可靠的, 没有发生明显沉降现象, 观测成果见表 2。

路基沉降观测总共进行了 10 个周期, 收集到了一组关于该段工程软弱地基加固处理路段路基沉降的最原始数据, 见表 3(摘其一个测区双月份的实测沉降值)。

3 路基观测点的稳定性分析

路基沉降观测从 2000 年 3 月到 2001 年 1 月已

经进行了 10 期。每期均认为有固定的工作基点作为起算点, 则每期观测单独平差求得各水准点的高程。各期水准点高程变化所引起的原则采用统计分析的方法来判断, 分析步骤如下:

(1) 第 j 次观测求得的第 i 点的高程为 H_j^i , 首次观测求得该点的高程为 H_1^i , 则第 j 期中各个点(共 i 个点)的高程相对第一期变化值可表示为: $d = H_j^i - H_1^i$ 。

(2) 由高程变化值 d 计算单位权中误差

$$\theta^2 = \frac{d^T P_d d}{f_d}$$

式中 f_d ——独立的 d 的个数;

p_d ——权阵 $P_d = Q_d^{-1}$ 。

(3) 2 次观测采用同样的仪器和观测方法且网形不变, 根据观测值的改正数计算单位权方差:

$$\mu^2 = \frac{(V^T P V)^1 + (V^T P V)^j}{2(m-t)}$$

表 3 海南东线高速路(左幅)扩建工程琼海至陵水段沉降观测成果表

日期	名称	桩号 (填土高)	高程 (m)	沉降值 (mm)	日期	名称	桩号 (填土高)	高程 (m)	沉降值 (mm)
测区:四标 - - 6									
4 月	A1	K112 + 027	9.0756	1.1	4 月	C1	K112 + 309	9.9708	- 4.2
6 月		(+ 5.10m)	9.0745	2.2	6 月		(+ 4.70m)	9.9668	- 0.2
8 月			9.0737	3.0	8 月			9.9683	- 1.7
10 月			9.0727	4.0	10 月			9.9696	- 3
12 月			9.0747	2.0	12 月			9.9628	3.8
4 月	A2	K112 + 027	9.3382	1.7	4 月	C2	K112 + 309	10.1632	- 2.7
6 月		(+ 5.10m)	9.3370	2.9	6 月		(+ 4.70m)	10.1605	0
8 月			9.3366	3.3	8 月			10.1610	- 0.5
10 月			9.3341	3.8	10 月			10.1634	- 2.9
12 月			9.3378	2.1	12 月			10.1557	4.8
4 月	B1	K112 + 168	9.5411	1.8	4 月	D1	K112 + 450	10.3593	- 2.2
6 月		(+ 6.00m)	9.5401	2.8	6 月		(+ 0.00m)	10.3563	0.8
8 月			9.5397	3.2	8 月			10.3588	- 1.7
10 月			9.5388	4.1	10 月			10.3611	- 4
12 月			9.5405	2.4	12 月			10.3547	2.4
4 月	B2	K112 + 168	9.7670	1.2	4 月	D2	K112 + 450	10.539	- 2.7
6 月		(6.00m)	9.7661	2.1	6 月		(+ 0.00m)	10.5364	- 0.1
8 月			9.7653	2.9	8 月			10.5389	- 2.6
10 月			9.7643	3.9	10 月			10.5389	- 2.6
12 月			9.7661	2.1	12 月			10.5338	2.5

式中 V ——观测值改正数的列矩阵;

P ——观测值改正数的权矩阵;

m ——观测值的个数;

t ——未知数的个数。

(4) 假设各个水准点是稳定的,没有升降现象,则高程变化值 d 与观测值改正数 V 均为正态变量,而 θ^2 与 μ^2 是 T 同一正态母体的无偏估计量,作统计量:

$$F = \frac{\frac{d^T P_d d}{\sigma^2} / f_d}{\frac{(V^T P V)^i + (V^T P V)^j}{\sigma^2} / 2(m-t)}$$

$$= \frac{\frac{d^T P_d d}{f_d}}{\frac{(V^T P V)^i + (V^T P V)^j}{2(m-t)}} = \frac{\theta^2}{\mu^2}$$

根据 θ^2 与 μ^2 的值代入上式计算的统计量应服从 F 分布。

(5) 选取置信水平 α ,由第一自由度 f_d 与第二自由度 $2(m-t)$ 从 F 分布表中查取分位值 $F_{\alpha, f_d, 2(m-t)}$ 将

计算的 F 值与查表的 $F_{\alpha, f_d, 2(m-t)}$ 值进行比较,即可判断水准点的稳定性;若 $F < F_{\alpha, f_d, 2(m-t)}$,则接受原假设,即水准点是稳定的,其高程变化是观测误差引起的,若 $F > F_{\alpha, f_d, 2(m-t)}$ 则拒绝原假设,即水准点有变动。

如果模型计算得出水准网中有沉降点,先通过高程限差方法判定哪些点是有可能沉降的。在平差时,设每一期观测点的高程平差值的精度为 m (各期观测网形相同且是等精度观测,可以认为两期的精度相同),则两期的高程平差值之差的中误差就应为 $\sqrt{2} m$,以 2 倍的中误差为限差的话,若观测点位没有发生沉降,则两期观测的高程平差值之差就应不超过 $2\sqrt{2} m$ (对水准路线的最弱点即中间位置点高程平差值之差可略微放宽,但不应超过 $3\sqrt{2}$ 倍的中误差)。先找出一个明显超过这个限差的点剔除后重复上面的检查过程,若最后接受原假设,说明这个剔除的点是变动的,若仍拒绝原假设,表明还有变动点,采用同样的方法再检验,再剔除,直到接受原假设为止。

4 沉降规律的分析

点位的稳定性实际上受多种因素的影响,但各种因素的影响程度是不一样的,采用傅立叶变换分析方法,绘制出相应的频谱图,能很好地反映测量数据时间序列在其频率域上的特性,即观测数据受到各种因素的周期性干扰,这样便于查明干扰的主要周期成份,并估计其影响大小。在此基础上根据每个点在各期观测中的高程值和每个点的沉降量在各期观测中的变化值,绘制沉降曲率和沉降速率的过程曲线图,以发现可能存在的沉降规律,做出合理的推测。

傅立叶变换实质就是将周期函数表达成正弦和余弦谐波分量之和的形式,它的物理意义就是把一个比较复杂周期运动看成是许多不同频率的简谐振动的叠加。对于非周期函数而言,只要它满足一定条件,就可以看作是周期趋向无穷大的周期函数的极限情况,所以,这种变换方法可以对时间上的变化量进行分析。收敛定理(狄利克雷 Dirichlet 充分条件)告诉我们,只要周期函数在 $[-\pi, \pi]$ 上至多有有限个间断点,并且不作无限次振动,那么函数的傅立叶级数收敛。在实际问题中,在计算时采用离散观测序列,即用求和代替积分运算,因此傅立叶分析变换实际上采用的是离散观测数据的级数化形式。

将时间长度 T 分为 N 等分,其步长为 Δt ,即 $T = N\Delta t$,则其离散化的观测数据时间序列为 $X_k = k\Delta t, k = 0, 1, \dots, N-1$,相应的函数值则为 $f(k\Delta t)$,简记为 $f(k)$,即 $f(0), f(1), \dots, f(N-1)$ 。同理对傅立叶变换 $F(f)$ 取频率间隔 $\Delta f = 1/T$,令 $j = 0, 1, \dots, N-1$,则离散值 $F(j\Delta f)$ 也简记为 $F(j)$ 。根据离散傅立叶变换公式,可得:

$$F(j) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(k) e^{-2\pi i j k} dk = \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-2\pi i j k / N}$$

傅立叶变换实际上是频率的一个复函数,然后

根据傅立叶变换的振幅谱可作出频谱图。

设 $F(j) = R(j) + iI(j) = |F(j)|e^{i\theta(j)}$,则振幅谱为 $|F(j)| = \sqrt{R^2(j) + I^2(j)}$ 。

限于篇幅,本文以测区四-6 水准路线的最弱点(即水准路线的中点)B1 点处从 10 期中取出间隔的 5 期不同时间沉降值,对其进行傅立叶变换及计算结果见表 4,绘制出位移图和频谱图(见图 2 和图 3)

傅立叶变换公式具有很强的规律性,这项工作应在计算机程序中进行。可以根据实际工作的需要,或者是对所有的观测点,或者只对一些具有代表性的特殊点(如水准线路的中点,特殊的地质条件点,水准网中可能有沉降的点)进行分析,或者对网中所有观测点进行分析,有利于寻找影响观测结果的周期性因素,以了解观测数据随时间的变化特性。

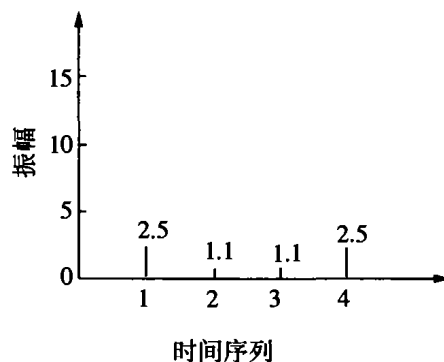


图 2 水准路线最弱点位移

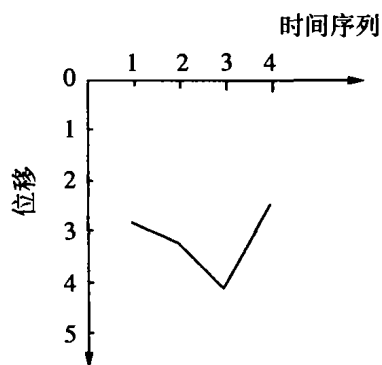


图 3 水准路线最弱点频谱

表 4 观测数据及计算结果

实际观测时间	2000.4	2000.6	2000.8	2000.10	2000.12
观测时间序列 k	0	1	2	3	4
位移 $f(k)(mm)$	1.8	2.8	3.2	4.1	2.4
频率序列 j	0	1	2	3	4
傅立叶变换 $F(j)$	14.3	$-2.5 + i0.1$	$-0.2 - i1.1$	$-0.2 + i1.1$	$-2.5 - i0.1$
振幅谱 $ F(j) $	14.3	2.5	1.1	1.1	2.5

注:利用公式: $\cos X - i \sin X = e^{-iX}$

从上例的频谱图和位移图的对比,可以看出该点的频谱变化的周期性,原因在于该点位于高填路基的中央部位,其沉降变化会受到车辆荷载的影响,这种影响随频率变化,宏观上可以认为呈现周期性,再者,路基高填方采用的是山批土,其早期影响根据物理分析,也呈现一定的周期性,先是沉降较快,后趋于稳定性变化。需要指出的是,在观测周期相对较短的情况下,由于观测误差部分影响和观测资料较少,频谱图纵坐标上的值会有偏差,但这种偏差是客观存在的,而且随着观测期数的增加,这种偏差会更加明显。

5 结论

以上结合海南东线高速公路扩建工程路基沉降观测实践,对具体的观测方法、技术要求和数据分析

作了一个比较系统的探讨,运用这些方法完成的资料分析经实际检验具有一定的合理性。用以上所述的分析方法对全部的沉降观测点进行傅立叶变换分析,便于查明干扰观测数据的周期性成分,发现可能存在的沉降规律,对观测路基的沉降做出合理推测,为工程管理部门的决策提供可靠依据。

参考文献

- [1] 工程测量[M].北京:水利电力出版社,1994.
- [2] 高等数学[M].北京:高等教育出版社,1993.
- [3] 实用测量数据处理方法[M].北京:测绘出版社,2000.
- [4] JTJ 017-96,公路软土地基路堤设计施工技术规范[S].
- [5] JGJ/T 8-97,建筑变形测量规程[S].
- [6] 高速公路软基处理[M].北京:中国建筑工业出版社.

(上接第 16 页)

组成,锚头设于桩顶,拉杆埋置横穿小浦公路路面,锚墩埋设于小浦公路山侧;K85+490~+550 维持原施工窗式浆砌片石护面墙处理。

本边坡工点的长期加固整治方案已于 2004 年初完成,经过近 1 年来的观测发现,该边坡工点稳定安全。

3 结论与建议

通过本工点过坡的加固整治实践,获得了以下认识:

(1) 边坡失稳破坏原因的分析非常重要,它直接决定了边坡加固整治方案的合理性和可行性。在边坡失稳破坏原因的分析过程中,定性分析是基础,而定性分析应特别关注边坡体自身的环境工程地质条件。

(2) 边坡工程的处治应加强施工地质工作。本工点地层并不复杂,但花岗岩与凝灰岩类岩石差异

风化作用异常强烈,详勘过程中有限的地质勘察工作往往很难查清各路段的工程地质情况,本工点就是典型的事例。只有在路基开挖以后才能揭示最直观、真实、准确的自然地质条件,在此基础上做出的设计才是最适宜、可靠的。因此应加强施工地质工作,在本路段的施工图设计文件中我们就强调了这一点,铁路及水利部门均有施工地质阶段;对山区高速公路来说,加强施工地质工作,根据开挖后的实际情况,补充完善施工图设计,对消除工程隐患、降低工程造价、保证工期等都有非常重要的作用。

(3) 应特别加强预应力锚索的施工管理。由于预应力锚索工程属高速公路边坡加固新技术,并系该工程项目之主体工程措施,其施工质量优劣将直接影响该边坡加固工程的成败,建议选择具有丰富特殊工程施工经验和专业技术能力的专业施工队伍承担,以确保其工程效果,保障坡体稳定和结构安全。