

# 海南某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)

**摘要** 本文结合海南某高速公路路基沉降观测,对观测设施的布设、观测的技术要求等各项工作作了必要的介绍,然后采用统计方法对观测成果进行分析以确定点位的稳定性,最后运用傅里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,并在此基础上对可能存在的沉降规律进行了分析,目的在于为工程管理部门提供决策依据,以便指导类似工程。

**关键词** 沉降观测 稳定性 统计分析

由于海南某扩建工程是右幅工程建成通车4年后才开始建设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各方面工作作了系统的阐述,并运用傅里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,以了解观测数据受各种因素周期性干扰的影响大小,了解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,是否需要采取其他处理措施,并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。

## 一、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,以保证稳固性。它们与各首级施工控制网联测,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在原状土层上埋设混凝土桩。它一般采用顶面为10cm×10cm,底面为20cm×20cm,高为50cm,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46cm,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。由于它们离公路相对较近,稳定性总会受到路基沉降一定的影响,因此工作基点需定期与水准基点联测,并要求与水准点精度相同,以最大限度地减少对沉降点观测成果的影响,方便沉降点观测各期成果的对比。

在布设路基沉降观测点时,通常100m左右设一个观测断面,力求使各断面间距大致相等,遇桥、涵则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30cm。沉降观测点采用 $\phi 12\text{mm}$ ,长80mm经过加工的球面大帽钉直接钉入路面结构层中,保证观测点与路面保持一体,以使测量成果准确反映出路基路面变化。同时确定两断面之间的置镜点位置,进行统一编号,以保证每次观测按相同路线、位置和顺序进行。在本工程中,我们一共设置了33个观测段128个观测断面。通过各观测断面的水准基点和工作基点组成的附合水准网(图1)控制观

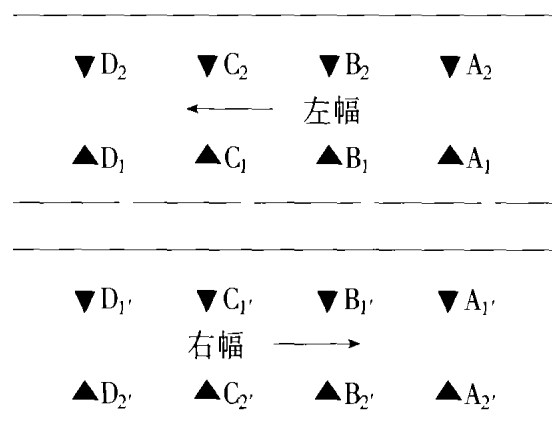


图1 沉降变形观测点点位示意图

测断面沉降点的观测,并且在每个观测段中均采用两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。由于在路基沉降点的分析计算中,选择的是固定基准,因此各期观测

过程中,应保证水准基点和工作基点要有较高的精度。我们根据工程实际情况,确定了各级水准测量的观测技术标准和要求(表1)。

观测技术要求

表 1

水准点	观测案 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	二等	单一附合路 线,双向观测	$\pm 0.5$	$1.0\sqrt{n}$	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。

## 二、观测成果

经过三个周期的观测,其结果(表2)表明

我们所埋设的工作基点是稳固可靠的,没有发生明显沉降现象。

工作基点高程变化

表 2

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			14.1615		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	BM183-1-1	K167+400	13.6745	0
2			7.2265		2			13.6745	

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,详见表3(摘其一个测区双月份的实测沉降值)。

海南东线高速公路(左幅)扩建工程琼海至陵水段沉降观测成果表

表 3

日期	点号	桩号(填土高)	高程(m)	沉降值(mm)	日期	点号	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

表 3(续)

日期	点号	桩号(填土高)	高程(m)	沉降值(mm)	日期	点号	桩号(填土高)	高程(m)	沉降值(mm)
测区:四标-6									
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			9.3361	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

### 三、路基观测点的稳定性分析

从2000年3月到2001年1月共进行了10期路基沉降观测。每期观测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 $H_i^j$ ,首次观测求得该点的高程为 $H_i^1$ ,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: $d = H_i^j - H_i^1$ 。

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: $f_d$ —独立的个数,

$P_d$ — $d$ 权阵  $p_d = Q_d^{-1}$ 。

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

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

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 $d$ 与观测改正数 $V$ 均为正态变量,而 $\theta^2$ 与 $\mu^2$ 是 $T$ 同一正态母体的无偏估计量,作统计量:

$$F = \frac{\frac{d^T P_d d}{\sigma^2} / f_d}{\frac{(V^T P V)^1 + (V^T P V)^j}{\sigma^2 / 2(m-t)}} = \frac{\frac{d^T P_d d}{f_d}}{\frac{(V^T P V)^1 + (V^T P V)^j}{2(m-t)}} = \frac{\theta^2}{\mu^2}$$

根据 $\theta^2$ 与 $\mu^2$ 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 $\alpha$ ,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,即水准点都是稳定的,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)。剔除一个明显超过这个限差的点后,重复上面的检查过程,若最后接受原假设,则说明这个剔除的点是变动的,若仍拒绝原假设,则认为验点中依然还有动点,采用同样的方法再检验,再剔除,直到接受原假设为止,最终确定哪些点是不稳定的。

#### 四、沉降规律的分析

点位的稳定性实际上受多种因素影响,但各种因素的影响程度是不一样的,采用傅里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。

傅里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,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。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,因此傅里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  $\Delta t$ ,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  $f(0), f(1), \dots, f(N-1)$ 。同理对傅里叶变换  $F(f)$  取频率间隔  $\Delta f = 1/T$ ,令  $j = 0, 1, \dots, N-1$ ,则离散值  $F(j\Delta f)$  可简记为  $F(j)$ 。根据离散傅里叶变换公式,可得:

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

傅里叶变换实际上是频率的一个复函数,然后根据傅里叶变换的振幅谱可作出频谱图。

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

在海南某扩建工程沉降观测中,现以测区四-6 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,对其进行傅里叶变换,观测数据及计算结果见表 4,绘制出的位移图和频谱图见图 2 和图 3。

观测数据及计算结果

表 4

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
傅里叶变换 $F(j)$	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:  $\cos X - i \sin X = e^{-iX}$

傅里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,对一些具有代表意义的特殊点(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,在实际中了解观测数据随时间变化的特性。

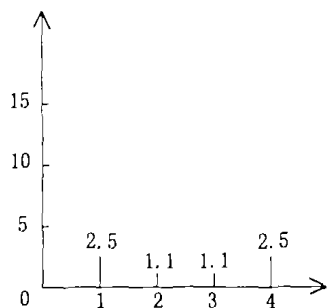


图2 水准路线最弱点位移

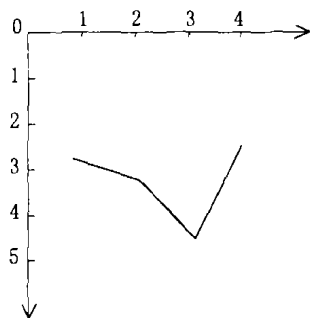


图3 水准路线最弱点频谱

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分,其沉降变化会受

到车辆压力的影响,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皮土,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。同时要指出的是,在观测周期相对较短的情况下,由于观测误差和观测资料较少,频谱图纵坐标上的值会有偏差,但这种趋势是客观存在的,而且随着观测期数的增加,这种趋势会更加明显。由此可见频谱图在数据分析上具有很高的应用价值。

## 五、结论

以上结合海南某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里叶变换分析,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。

(上接第14页)

源的上风向。公路构造物及沿线设施的风格、色彩、造型应考虑景观效果,对乡村地区而言在满足使用功能的条件下,宜简洁、明快,城镇附近、风景游览区附近的公路构造物及沿线设施应与周围环境一致,做到美观大方,并应注意与地域内民族特征及生活习俗协调统一。

### 4. 景观设计应防止造成视觉污染。

公路用地范围内,除收费站、服务区外,一般不宜设置广告牌、宣传栏等设施。除标线、标志、护栏等按规定涂覆色彩外,一般不宜涂特别刺眼的色彩。公路雕塑小品的设置应注意色彩、造型,并不得妨碍视线。沿线一般不宜设置雕塑小品,需要时应以单体为宜。公路沿线纳污设施、工业废物堆弃点等影响

视觉景观的位置,在景观设计时应通过公路绿化或工程措施予以遮蔽。

## 三、结语

在公路景观设计中,要将公路自身的平纵线形、路基断面、构造物与沿线地形、地貌、生态特征以及其它自然和人文景观作为一个整体考虑。考虑到公路景观环境要素包罗万象,设计不应将精力集中在“人造景观”上,重点应在对原有景观资源的保护、利用和开发,以及公路主体与原有自然、社会环境的有机融合上。通过公路景观设计,使得公路建设既能满足国民经济发展的需要,又能够做到对自然环境破坏小,达到公路景观与自然景观的高度和谐,是我们公路建设者永远追求的目标之一。