

太沙基一维固结理论在软土路基沉降变形初期阶段的开拓应用探讨

臧亚君¹, 石豫川¹, 刘汉超¹, 张义柱²

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 四川交通职业技术学院, 成都 611130)

摘要: 结合某高速公路 K98+028、K98+470 两处路堤完工一年后才开始的断续的前期沉降变形监测成果, 利用太沙基一维固结理论, 在缺少固结参数而又无法对多层软土路基固结参数分别反演的情况下, 通过对地基整体固结参数的反演及数理统计分析, 来达到沉降变形和沉降时间预测的目的; 并通过与不同方法最终沉降变形预测结果之对比, 及沉降预测结果与监测成果之拟合对比, 进一步论证了该方法的可行性。

关键词: 太沙基; 一维固结理论; 软土路基; 整体固结参数; 沉降变形; 可行性

中图分类号: TU471.8 **文献标识码:** A

1 前言

太沙基一维固结理论是我们经常用到的沉降变形及沉降时间预测计算的重要方法之一。按照常规, 在固结系数或渗透系数已知的情况下, 便可较理想地计算最终沉降量以及任意时间的沉降变形, 但如果路基软土多层而又缺乏上述已知条件, 单靠路堤完工一年多以后才开始的少量断续监测资料而又无法分层反演其固结参数的情况下, 怎样利用该方法并能达到较为理想的预测目的, 需要深入探讨。本文正是在这样的条件下, 结合某高速公路 K98+028、K98+470 两处路堤的类似情况, 通过对该方法的开拓应用, 并通过对比分析, 充分论证了该方法的有效性和可行性。

2 地质结构概况

该高速公路的两处路堤建于谷地冲洪积成因的粘性土、淤泥及砂土之上。据钻探揭露, 地质结构具有横向不均匀性且二者略有不同, 现按层位由上而下分述如下。

2.1 K98+028 处路基地质结构

(1) 填筑土: 以砂、泥岩碎块石为主, 粘性土含

量约 20%。块石大者 30~50 cm, 松散—稍密。层厚 5.8~12.8 m。在高速公路中隔带上, 层厚为 12.8 m。

(2) 粉质粘土: 灰棕色, 软塑, 很湿, 局部受挤压具扰动现象。层厚 1.5~2.5 m。

(3) 淤泥质粘土: 棕灰、黑灰色, 软塑, 局部流塑, 饱和, 含腐殖质及朽木, 局部夹薄层细砂及淤泥。层厚 2.4~3.8 m, 局部尖灭。

(4) 粉细砂土: 灰、灰绿色, 局部灰黑色, 松散—稍密, 饱水, 局部含泥和夹淤泥薄层。层厚 3.65~6.55 m, 局部尖灭。

(5) 泥岩、泥质粉砂岩: 紫、紫红色, 中厚层互层状, 层理发育。顶面最大埋深 21.35 m。

2.2 K98+470 处路基地质结构

(1) 填筑土: 以砂岩、泥岩碎块石为主, 充填有角砾和粘性土, 松散—稍密。层厚 3.6~11.2 m。在高速公路中隔带上, 层厚为 11.2 m。

(2) 粘土: 灰棕色, 软塑, 很湿, 局部下部含淤泥质, 呈透镜体或似层状。层厚 0.8~3.7 m。

(3) 淤泥质粘土: 灰棕、灰黑色, 软塑, 饱水, 局部含腐殖质及朽木。层厚 1.1~2.35 m, 局部尖灭。

(4) 淤泥:灰黑、黑色,软塑,局部呈流塑状,饱水,富含腐殖质,夹薄层细砂及淤泥质粘土透镜体。层厚 5.1~9.0 m,局部尖灭。

(5) 粉细砂土:灰、灰绿色,松散—稍密,饱水。层厚 0.65~3.2 m,局部尖灭。

(6) 泥岩、泥质粉砂岩:紫、紫红色,中厚层互层状,层理发育。顶面最大埋深 23.3 m。

3 研究路段沉降变形监测

研究区路基处于不良地质路段,在建设过程中及建成通车后,均发生了不同程度的沉降变形。据资料统计,该段路堤在 1998 年底修筑完工后,由于较大的沉降变形,为满足通车要求,路面于 1999 年 12 月 17 日通车前不得不进行了第一次重新加铺维修,并详细测量了加铺维修前后的路面标高。之后,从 2000 年 3 月 5 日开始,对该段路面变形进行了系统观测^[3]:以沿路基纵向每隔 20 m 为一个监测断面,每个断面 4 个监测点(图 1),监测路基沉降变形的发展。时至 2000 年 10 月初,由于路基变形量较大,对行车畅通和安全造成了不利,因此,对研究段路面进行了第二次重新加铺维修,但由于没有很好保护好前期观测点,从 2001 年 1 月份开始,又对研究区段重新进行布点,布置方法同前,并继续进行观测。而正是由于这种监测间断,致使路面维修期间的变形量缺失,从而使监测结果具有不连续性,也给监测成果的应用带来诸多不便。图 2 和图 3 分别是 K98+028 处路面 2000 年年底路面第二次加铺前后的沉降监测曲线;图 4 和图 5 分别是 K98+470 处路面 2000 年年底路面第二次加铺前后的沉降监测曲线,两处路面重新加铺过程中的变形量缺失。从路面

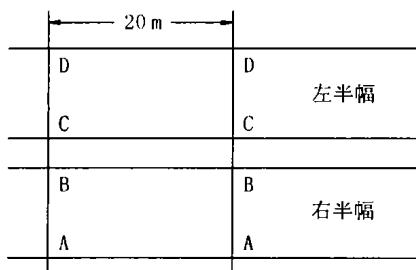


图 1 监测点布置示意图

Fig. 1 Layout sketch map of monitoring dot

第二次重新加铺前后的监测曲线对比来看,沉降变形总体上处于等速发展阶段(K98+028 处加铺前显示渐趋稳定,但加铺后的曲线总体仍为等速),同时,在横向还具有不均匀性。

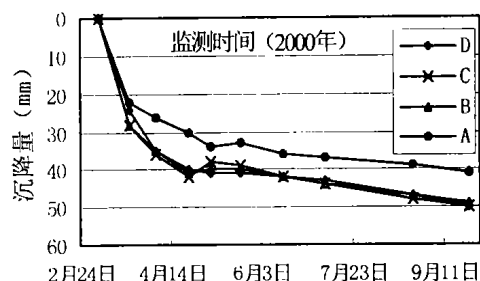


图 2 K98+028 沉降变形监测曲线
(第二次加铺前)

Fig. 2 Monitoring curve of subsidence deformation of K98+028 section(Before the second repaving)

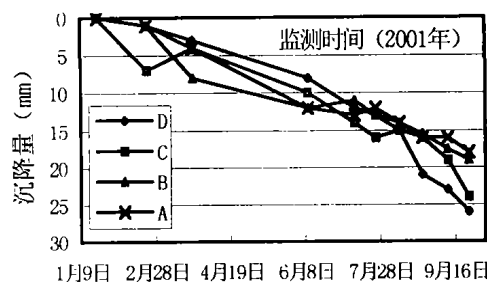


图 3 K98+028 沉降变形监测曲线
(第二次加铺后)

Fig. 3 Monitoring curve of subsidence deformation of K98+028 section(After the second repaving)

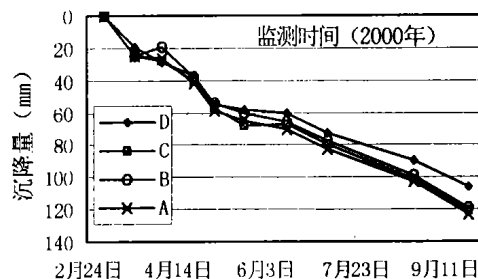


图 4 K98+470 沉降变形监测曲线
(第二次加铺前)

Fig. 4 Monitoring curve of subsidence deformation of K98+470 section(Before the second repaving)

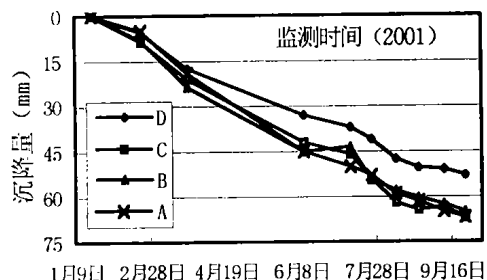


图 5 K98+470 沉降变形监测曲线
(第二次加铺后)

Fig. 5 Monitoring curve of subsidence deformation of K98+470 section(After the second repaving)

4 太沙基一维固结公式应用探讨

4.1 公式简介

为预测地面沉降的发展趋势,在水位升降已经稳定的情况下,规范^[1]中推荐利用太沙基一维固结

理论计算地基土的固结变形和相应固结时间,即土层变形量与时间变化关系,可用下列公式计算:

$$s_t = s_\infty \cdot U_t \quad (1)$$

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-N_t} + \frac{1}{9} e^{-9N_t} + \frac{1}{25} e^{-25N_t} + \dots \right) \quad (2)$$

$$N_t = \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} t \quad (3)$$

式中, s_∞ 为最终沉降量(mm); s_t 为预测某时刻 t 月以后的土层变形量(mm); U_t 为固结度(%); t 为时间(月); N_t 为时间因素; C_v 为固结系数; 压缩时为 C_{vc} , 回弹时为 C_{vs} ($\text{mm}^2/\text{月}$); H 为土层的计算厚度, 两面排水时取实际厚度的一半, 单面排水时取全部厚度(mm)。

4.2 太沙基一维固结公式开拓应用探讨

根据太沙基一维固结公式的应用条件,在水位升降已经稳定的情况下,为预测地面沉降的发展趋势及土层变形量与时间变化关系,可应用上面所提到的公式(1)、(2)和(3)来计算,但由于固结系数 C_v 或渗透系数 K 未知,加之地基土又为多层软弱土层组成,因此,不但不能直接利用这些公式进行沉降量和沉降时间预测计算,即使对固结系数进行反演也不可能仅利用少量的观测资料同时对多层地基土进行反演。因此,本文根据填筑体经过压实其变形量相对远小于下部厚层软弱土层、以及砂土的变形一般在短期内即可迅速完成(此处考虑为在施工期间业已完成)的前提条件,对一维固结计算公式进行大胆开拓,即将现今沉降观测值考虑为均为软土层所产生,这样可以将整个软土层考虑为一个整体,利用观测资料对固结系数进行反演,然后再反求固结沉降变形量和固结时间。也就是说,首先对一维固结公式进行推导变换,编制程序,并利用2000年3月5日至2000年9月25日的观测资料(路面第一次重新加铺维修后至第二次重新加铺维修前的监测成果),以及岩土工程勘测资料对整体固结系数进行反算,然后再利用反算的固结系数对最终沉降量和固结沉降时间进行初步预估,并对2001年以来的沉降变形进行预测,将预测结果与2001年来(路面第二次重新加铺维修后)的沉降变形监测结果进行对比,以验证该方法的可行性。具体如下:

(1) 选用时间起算点。计算时选取2000年3月5日第一次观测基准值作为相对起算点进行计算,但为了缩小观测值引起的误差,预测计算过程中应将每组观测值(三个)均相减(即取其差值)。也就是

说,在进行编程计算时对公式(1)进行如下变换:

$$s_{t1} = s_\infty \cdot U_{t1} \quad (4)$$

$$s_{t2} = s_\infty \cdot U_{t2} \quad (5)$$

$$s_{t3} = s_\infty \cdot U_{t3} \quad (6)$$

式(5)减去(4)、式(6)减去(4),然后两式相除,便可暂时消除最终沉降量 s_∞ ,从而得到下式:

$$\frac{s_{t2} - s_{t1}}{s_{t3} - s_{t1}} = \frac{U_{t2} - U_{t1}}{U_{t3} - U_{t1}} \quad (7)$$

(2) 假定 $t_1 \sim t_2$ 这段时间内固结系数 C_v 为定值,将固结度及时间因素计算公式(2)和(3)(它们最终都是固结系数 C_v 的函数)带入公式(7)当中,便可求得固结系数 C_v 的一个迭代公式:

$$C_v = \frac{-4H^2}{\pi^2 t_2} \log(f_1 - f_2) \quad (8)$$

式中:

$$\begin{aligned} f_1 &= e^{\frac{-\pi^2 t_1 C_v}{4H^2}} + \frac{1}{9} \left(e^{\frac{-9\pi^2 t_1 C_v}{4H^2}} - e^{\frac{-9\pi^2 t_2 C_v}{4H^2}} \right) \\ &\quad + \frac{1}{25} \left(e^{\frac{-25\pi^2 t_1 C_v}{4H^2}} - e^{\frac{-25\pi^2 t_2 C_v}{4H^2}} \right) \\ f_2 &= \frac{s_{t2} - s_{t1}}{s_{t3} - s_{t1}} \left[\left(e^{\frac{-\pi^2 t_1 C_v}{4H^2}} - e^{\frac{-\pi^2 t_3 C_v}{4H^2}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{9} \left(e^{\frac{-9\pi^2 t_1 C_v}{4H^2}} - e^{\frac{-9\pi^2 t_3 C_v}{4H^2}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{25} \left(e^{\frac{-25\pi^2 t_1 C_v}{4H^2}} - e^{\frac{-25\pi^2 t_3 C_v}{4H^2}} \right) \right] \end{aligned}$$

其余符号同前。

(3) 编程计算。将迭代公式(8)编程,利用观测数据(自由组合)便可计算得出的一系列的对对应固结系数 C_v 值,然后利用格拉布斯(Grubbs)法(适用小样本)或极限误差法(适用大样本)对异常数据进行舍弃判别,再根据规范^[2]对地基土物理力学性质指标统计的基本规定和要求,对固结系数 C_v 进行统计处理,求得平均值和标准值。

(4) 最终沉降量及沉降时间。根据上一步反算出的固结系数,利用2000年3月5日至2000年9月25日的沉降观测值,回代到公式(1)中,便可算出几组最终沉降量,仍对其进行统计处理,将平均值或统计标准值近似作为该计算点的相对最终沉降量;同时,根据固结系数,回代到固结度 U_t 计算公式(2),便可求得达到不同固结度时的固结时间。然后,利用预测的相对最终沉降量及固结系数对2001年以来的观测值进行预测对比。

该方法的最大特点:一是将地基土一体化,大大简化了计算过程,并减小了监测资料利用上的困难;

二是引进统计处理,统计程序自编,统计过程中对异常值的判断和舍弃均一次完成,既简便又增加了计算值的可信度。

5 变形预测结果

(1) 沉降变形量及沉降时间预测结果

为了更好地对比太沙基一维固结公式的沉降量预测结果,特将利用《建筑地基基础设计规范》所计算的最终沉降量同时列于表 1。

表 1 研究段特征点的沉降时间和最终沉降量预测结果

Table 1 Forecasting outcomes of eventual subsidence and deformed time about the characteristic dots of research section of one speedway

里程桩号	计算点	相对固结系数 (cm^2/s)	$U=50\%$ 时的时间 t (年)	$U=90\%$ 时的时间 t (年)	一维固结法		建筑规范法 S (cm)
					相对值 S (cm)	实际值 S (cm)	
K98+028	测点 A	2.00×10^{-4}	5.6	24.0	27.7	35.6	38.2
	测点 B	2.00×10^{-4}	7.6	32.7	37.2	45.1	53.9
	测点 C	2.70×10^{-4}	5.6	24.3	32.4	40.6	58.2
	测点 D	1.20×10^{-4}	5.4	23.1	45.5	53.7	47.4
K98+470	测点 A	8.20×10^{-4}	4.2	18.2	77.9	104.6	56.0
	测点 B	2.30×10^{-4}	5.6	24.1	86.8	113.5	96.7
	测点 C	2.20×10^{-4}	5.8	25.1	92.2	119.6	101.4
	测点 D	2.20×10^{-4}	8.1	34.9	90.4	117.8	117.9

注:表中一维固结法计算实际值=相对值+第一次加铺前的沉降量。

(2) 沉降变形结果拟合对比

根据对研究路段固结系数 C_v 的反演和最终沉降量及沉降时间的预测结果,可对 2000 年和

2001 年的沉降监测结果进行预测对比,具体结果见表 2。

6 结果分析与评价

(1) 对于最终沉降预测结果:从表 1 不难看出,除 K98+470 处的 A 测点《建筑地基基础设计规范》法与太沙基一维固结公式法预测值相差较大外,总体上两种方法预测结果很接近。另外,对于 K98+028 处,总体上一维固结法预测结果略小于建筑规范法,而 K98+470 处正好相反,这主要与两处地基土的差异有关;对于 K98+028 处,主要为粉质粘土和淤泥质粘土层,没有淤泥土层,而 K98+470 处却主要为较厚的淤泥土层,相对而言,前者超固结比较大的土层所占比例较大;另外, K98+028 处还含有厚度相对较大且层厚也相对稳定的粉细砂土层,更有利于粘性土的排水固结。而对建筑规范法来说,其自身缺陷之一便在于土层的不同超固结比上,即对超固结比较大的土来说,计算结果偏大,相反则偏小。因此,两种方法计算结果之间存在的少量差异,也符合该事实,这同时也证明太沙基一维固结法的开拓应用具有合理性。

(2) 对于沉降时间预测结果:根据搜集的资料显示,临近的建国初期所建设的铁路线,由于过量的沉降变形,已进行了多次加铺维修,而目前其变形虽然已经很小,但监测显示变形仍在继续。因此,说明太沙基一维固结方法对固结时间的预测结果应该比较可靠。

表 2 研究段特征点沉降量实测值与预测结果对比

Table 2 Comparison between the forecast subsidence deformation and motoring outcome about the characteristic dots of research section of speedway

里程桩号	计算点	2000 年 3 月 5 日至 2000 年 9 月 25 日			2000 年 9 月 25 日至 2001 年 1 月 20 日			2001 年 1 月 20 日至 2001 年 9 月 25 日		
		实测值 (cm)	预测值 (cm)	相对误差	实测值 (cm)	预测值 (cm)	相对误差	实测值 (cm)	预测值 (cm)	相对误差
K98+028	测点 A	4.1	4.4	7.3		1.1		1.8	1.8	0.0
	测点 B	4.9	5.2	6.1		1.2		1.9	2.0	5.3
	测点 C	5.0	5.2	4.0		1.2		2.4	2.2	8.3
	测点 D	5.0	5.2	4.0		1.3		2.6	2.2	15.4
K98+470	测点 A	14.2	14.2	0.0		3.5		6.7	6.1	9.0
	测点 B	13.9	14.0	0.7		3.4		6.5	5.7	12.3
	测点 C	14.5	14.4	0.7		3.5		6.7	6.1	9.0
	测点 D	12.1	12.2	0.8		2.8		5.3	5.0	5.7

注:相对误差 = $(| \text{实测值} - \text{预测值} | / \text{实测值}) \times 100\%$

(3) 对于沉降量预测结果拟合对比:从对 2000 年 3 月 22 日至同年 9 月 25 日的沉降变形预测结果与观测结果的拟合对比来看,相对误差 $<7.3\%$ (平均 2.95%),拟合程度相当高;而从对 2001 年 1 月 20 日至同年 9 月 25 日沉降变形预测结果与观测结果的对比来看,相对误差 $<15.4\%$ (平均 8.1%),误差虽然有所增加,但总体拟合程度也非常高。因此,可推断该方法的预测结果基本合乎要求,可供参考利用。

(4) 对于固结系数反演结果:由于固结情况即地基中初始超静孔隙水压力分布情况以及具体排水条件未知,因此,此处讨论的情况属于简单情况,即附加压力随深度为均匀分布的单面排水情况,从而导致固结系数略有偏低^[4]。另外,反演对压缩层厚度的处理使真正的压缩层厚度减小了,如果在最终沉降量一定的情况下,要达到现今某一观测值,压缩层的减小,也势必引起固结系数同时减小。而事实上,固结系数是一个相对的概念,反演的起点选取不同结果也就不同。因而,总体认为相对固结系数的反演结果也是合理的。

7 结论

根据上述分析,可得出如下几点认识:

(1) 太沙基一维固结方法是沉降计算中较常用的方法之一,在水位升降已经稳定的情况下,可预测

地面沉降的发展趋势及土层变形量与时间的变化关系,但如果固结系数 C_v 或渗透系数 K 未知,且地基土又为多层软弱土层组成,同时,沉降监测资料少又不连贯时,应用该方法则会受到限制。而本文对该方法的开拓应用则初步解决了这一问题。

(2) 参数反演及变形预测过程中,统计分析的引入,以及沉降变形和沉降时间预测结果评价分析均显示,太沙基一维固结方法的开拓应用是可靠的,具有重大实际意义。

(3) 由于地基土层实际固结情况未知,此处讨论的仅为简单的单面排水情况,同时,反演过程中对压缩层厚度的处理又使真正的压缩层厚度减小了,虽然最终预测情况比较理想,但由于该方法仅在本工程路段首次得以试用,其真正合理性,还需其他工程应用中的大量验证。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部.《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 常士骧,等.工程地质手册(第三版)[S].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [3] 林宗元,等.岩土工程试验监测手册[S].沈阳:辽宁科学技术出版社,1994.
- [4] 杨英华,等.土力学[M].北京:地质出版社,1987.

THE APPLICATION OF TERZAGHI'S ONE-DIMENSIONAL CONSOLIDATION THEORY TO PROPHASE SUBSIDENCE OF SOFT SOIL ROADBED

ZANG Ya-jun¹, SHI Yu-chuan¹, LIU Han-chao¹, ZHANG Yi-zhu²

(1. Environment and Civil Engineering Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Jiaotong Institute of Profession And Technology, Chengdu 611130, China)

Abstract: According to the discontinuous deformation monitoring of the prophase subsidence of K98+028 and K98+470 section of one speedway, which started after a year of the road bank completed, this paper, under the conditions of no consolidation parameters and being incapable of deducing the roadbed's consolidation parameters for each layer of multi-layer soft soil, utilizing Terzaghi's one-dimension consolidation theory and mathematical statistics, and through the deduction of whole consolidation parameters of groundsill, forecast the eventual subsidence deformation and time. At the same time, this paper, by means of the comparison among the calculation of final subsidence of different forecast methods, and the comparison between the forecast of the one-dimension consolidation method and motoring outcome, demonstrated the feasibility of the method ulteriorly.

Key words: Terzaghi; one-dimension consolidation theory; soft soil roadbed; whole consolidation parameters; subsidence deformation; feasibility

作者简介: 臧亚君(1976—),女,硕士研究生,地质工程专业。