

# 郑武客专线粉质土地基沉降观测数据 异常值判别及沉降预测研究

汪莹鹤, 赵新益, 陈 占, 陈远洪

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430002)

**摘要:**郑武客专沿线广泛分布有深厚的粉质土, 客运专线对工后沉降控制非常严格, 根据沉降监测数据控制填土速率, 保证路堤在施工中的安全与稳定, 预测工后沉降确定无渣轨道的施工期, 控制工后沉降在设计允许范围之内是路堤填筑的关键。对路基沉降观测数据的可靠性、沉降数据的预处理以及沉降观测异常数据判别方法进行了系统的叙述, 尝试用最小二乘支持向量机对沉降数据进行预处理; 讨论了各种预测模型的特点及适用性。基于沉降资料可靠性和沉降预测方法两方面的研究, 形成了粉质土地基沉降系统预测方法, 并通过实例详细介绍了预测过程。预测结果显示郑武粉质土地基沉降已基本趋于稳定, 运行期不会发生较大的工后沉降, 郑武客专地基处理及施工方法是成功的。

**关键词:**粉质土; 沉降预测; 去噪; 最小二乘支持向量机

**中图分类号:** TU433

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5485(2013)04-0079-06

## 1 工程概述

石武客运专线郑州至武汉段起自郑州枢纽黄河大桥南岸(DK700+800), 止于武汉枢纽天兴洲大桥北端(DK1178+600), 线路全长562.463 km, 其中郑武正线长471.925 km, 郑西贯通正线长39.389 km, 郑州枢纽各种联络线长51.150 km。线路由北向南经过河南省郑州、许昌、漯河、驻马店、信阳等市及湖北省武汉市, 穿越华北平原、大别山及江汉平原3个地貌单元, 跨越黄河、淮河及长江3大水系。

信阳以北郑武客运专线约300 km穿越黄淮冲积平原, 第四系地层厚达50~200 m, 并广泛分布粉质类松软土, 包括粉土、黏质粉土、粉质黏土。这种土介于无粘性土与粘性土之间, 粘粒含量少, 塑性指数小, 毛细现象严重, 干时易被风蚀, 浸水后很快湿透, 易发生冻胀和翻浆, 水饱和时有振动液化现象。此种土受成因的影响, 不同地区力学性质相差极大。

客运专线的安全可靠是建设的重中之重。路基是轨道的基础, 其稳定和变形控制是确保列车高速、安全、舒适、平顺运行的前提条件。在粉质类松软土地基上修筑高速铁路, 不仅要确保施工中安全可靠和竣工运营后的稳定性, 而且对路堤的沉降变形控制有极严格的标准, 需要严格控制工后沉降和工后

差异沉降量。路基工程变形控制不同于民用及工业建筑, 它允许有很大的工期沉降, 因为工期沉降不会造成大的不良影响。而工后沉降或残余沉降直接关系到列车的运行安全, 应予重点关注。

由于岩土材料比较复杂, 且存在很多不确定因素, 要准确地测定计算所需要的参数非常困难, 因此计算的沉降量不能反映路基真实的沉降量。为了获得准确的沉降数据, 就必须对路基沉降进行监测, 根据实际情况控制填土速率, 并根据实测沉降曲线预测工后沉降, 确定无渣轨道的施工期, 以控制工后沉降在设计允许范围之内。

本文尝试用最小二乘支持向量机对沉降数据进行预处理, 分析了各种沉降预测曲线的特征以及适用条件, 建立了郑武粉质土路基沉降预测方法, 并通过实例说明了此预测方法的合理性。

## 2 沉降观测数据可靠性分析

### 2.1 沉降观测异常数据判别

在沉降观测中, 不可避免地会产生一些异常数据。其来源在于: 一是监测作业错误所致的粗差; 另一种是被监测部位的工作状态发生变化或者土体结构发生破坏而引起的异常值。粗差会影响沉降预测的精度, 因此在建立预测模型前必须剔除; 异常值则

往往反映了被监测部位的异常变形,应予保留并重点分析,以便根据具体情况及时调整施工进度,确保路堤在施工中的安全与稳定。

对测量值异常数据的判别方法有很多种,学者对大坝观测异常数据的判别方法研究得比较透彻<sup>[1-2]</sup>。相比较而言,对路基沉降观测异常数据的判别分析研究还不是很充分,仅有少数文献涉及这方面的工作<sup>[3-4]</sup>。本文根据铁路路基的施工特点和沉降观测数据的特点,综合应用监控指标判定准则和模型预报评判准则作为异常值的评判准则。

2.1.1 监控指标判别准则

在高速铁路建设中,一般选用沉降速率作为监控指标。为了确保路基的稳定与安全,减小路基的工后沉降,必须控制施工期的填筑速率。将沉降速率作为沉降的控制标准,是目前国内松软土地区填筑路基的普遍做法,实践证明是有效的。监控指标要根据工程的实际情况拟定,并且便于有效、快速地判断路堤、路基的稳定与安全状况。

郑武客专沉降控制设计标准如表 1 所示。针对郑武客专地质特点,本文对施工期沉降速率控制标准为:一般路堤中心沉降速率小于 10 mm/d,坡脚水平位移速率小于 5 mm/d。若观测值满足指标要求则正常,若不满足指标要求则观测值异常。

表 1 郑武客专路基工后沉降控制值

Table 1 Control standard of post-construction settlement of the subgrade of Zhengzhou-Wuhan Passenger Line

轨道类型	设计时速/ (km · h <sup>-1</sup> )	工后沉降标准		沉降速率/ (mm · a <sup>-1</sup> )	过渡段差异沉降折角
无砟轨道	350	设计允许工后沉降≤15 mm		≤5(过渡段差异沉降错台)	<1/1 000
	350	一般地段 ≤50 mm	桥尾过渡段 ≤30 mm	20	—
	200	一般地段 ≤150 mm	桥尾过渡段 ≤80 mm	40	—
有砟轨道	160 及以下(I级铁路)	一般地段 ≤200 mm	桥尾过渡段 ≤10 mm	50	—
	120 以下(II级铁路)	一般地段 ≤300 mm	—	—	—

2.1.2 模型预报评判准则

此种方法是运用统计学理论检查沉降监测数据,一般认为随机样本监测值误差遵从正态分布和小概率原理。在正常情况下根据小概率事件原理,认为当测值较少时,大偏差的监测值是不会出现的,一旦出现则表明有异常值存在。对于一个服从正态分布的随机变量,其值偏离均值超过 3 倍标准偏差的概率不大于 0.13%,所以把标准差的 2 倍或者 3

倍作为统计上合理的误差限。用此种方法确定沉降异常数据时,首先要确定沉降的数学模型,然后用预处理过的监测资料与沉降预测模型的预报值进行比较,凡是偏差超过统计上所允许的合理误差限的离群值,则判为异常值。

沉降预测模型的选择是模型预报评判准则的关键,目前有很多种预测模型,但由于沉降过程比较复杂,没有一种模型能够准确估计各个时刻的沉降值,利用不可靠的估值来构造统计量并进行统计检验很难保证检验结果的可靠性。所以迫切需要寻找一种相对精确的预测模型。本文首先基于已经观测到的沉降数据,运用最小二乘支持向量机初步构建沉降预测模型,假设模型预测值为真值,采用模型预报评判准则检验实测数据的异常性。

2.2 异常数据的原因

当某一沉降数据确定为异常数据后,就要分析其产生的原因,是测量粗差还是路基发生真实变形而引起的异常值。

从数据外观上来看,粗差和异常值均表现为在数值上与正常监测数据有较大的差异。但是粗差和异常值有本质的区别:粗差在数值上具有突发性,一般不连续出现,在相邻监测数据中通常是以单个的形式出现,含有粗差的数据序列在数理统计上表现为污染正态分布;而异常值则具有多个数值上接近的测值连续出现的特点,在均值位置摆幅增大,并且形成一定的趋势性。

根据沉降监测数据的时空性,即监测点间存在的空间性关联关系和单一测点前后测次监测值时间上的关联关系,可从时间和空间两方面分析异常数据成因。

路基的监测路段一般布置了很多监测点,当岩土体发生变形或破坏时,通常不可能只发生在孤立的一个点,而应该有一定的范围,如果路段岩土体状态正常,则监测数据都应该处于正常的状态;而当岩土体的结构发生变化时,相关测点的监测数据都应发生相应的变化,一般称这多个异常值为一个“异常群体”。

当发现监测数据异常时,首先分析此测点的沉降序列,若异常值为—“孤立值”,则测量值的异常原因可能是由于监测作业错误所致,应通过重测等措施进行补救。在确认异常值是人为因素引起之后,将此测量值作为粗差剔除。

若同一测点在某一观测时段内连续出现异常值,称这一异常序列为一个“异常过程”,此时监测部位岩土体结构性态有可能发生了变化。判定“异

常过程”存在后,要增加监测频次,对异常点进行重点监测,同时对监测设备进行检验,以排除由于监测仪器原因引起的系统误差。

若通过相关测点的监测数据认定测值为“异常群体”,说明岩土体的变形超过了允许的幅度或速率,应及时进行通报,并查明原因,同时采取相应的措施。

3 沉降观测数据去噪分析

路基沉降观测数据中除了异常数据外,还包括测量噪声。为了恢复真实信号,确保用可靠的数据进行软基沉降分析,沉降监测数据经过异常数据分析后,还要进行降噪处理。

由于小波分析有良好的去噪效果,学者已经将其用于监测数据的去噪分析。徐洪波<sup>[5]</sup>和李智录<sup>[6]</sup>将小波分析成功用于大坝观测数据的处理;田胜利<sup>[7]</sup>基于小波分解对建筑物变形监测数据进行了处理。但其只适用于前后观测时间间隔相差不大的沉降观测数据;路基沉降观测由于受到各种条件的影响,观测时间也不是很规则,此时小波降噪就不是很合适,本文尝试用最小二乘支持向量机的函数拟合功能预处理沉降观测数据。

影响路基沉降的主要因素有软土的工程性质和荷载性质,由于地基土的性质对于某一典型断面可以看作是基本固定的,所以本文选取的输入变量为当前路堤填土荷载  $P$  和当前时刻  $t$ ,输出变量为当前时刻  $t$  的沉降值。

在训练前,必须首先选择核函数,由于径向基核函数具有较好的性能,本文选择径向基核函数。另一个重要工作是确定 LSSVM 的 2 个参数,即惩罚系数  $r$  和形状参数  $\delta$ ,它们对预测结果影响很大,直接关系到模型的精度和推广能力,所以选择参数时要根据实际加载情况,通过多次试算才能得到比较好的结果。当支持向量机模型建立以后,就可以采用预测沉降代替实测沉降,然后采用其他方法对未来沉降进行预测(LSSVM 模型预测未来长时间沉降效果不好),如果计算需要还可以利用 LSSVM 模型对监测数据进行必要的插值<sup>[8]</sup>。

4 沉降预测模型

将沉降观测数据进行预处理以及去噪处理后,就可以进行沉降预测研究。目前存在的预测方法主要有经验公式法、Asaoka 法、神经网络法以及灰色

理论法等几类。对于经验曲线模型,一般要求曲线一阶导数连续、初始一阶导数可变、单调递增、有上界且曲线外凸等几个条件。

4.1 指数曲线和双曲线模型

双曲线模型只是基于模型曲线与实测沉降形状相似的基础上提出的,没有理论依据,其表达式为

$$S_t = \frac{t}{a + t} S_{\infty} \quad (1)$$

指数曲线沉降模型是基于太沙基一维固结理论提出,依据土层平均固结度为时间的指数函数,得到模型的表达式

$$S_t = (1 - a \cdot e^{-bt}) \cdot S_{\infty} \quad (2)$$

一般路基的工后沉降基本呈双曲线或指数曲线形状,但指数模型和双曲线模型无法利用施工期的沉降观测样本,只有沉降曲线反弯点以后的样本才有效,需要有较长的工后沉降观测数据<sup>[9]</sup>。

使用效果表明:双曲线模型拟合的结果沉降偏大,指数模型拟合的结果偏小。

4.2 S 型曲线模型

预测全过程沉降的模型有 Gompertz 模型、Logistic 模型以及 Weibull 模型。它们都具有沉降-时间曲线所具有的特点,且反映了实际观测的软基全过程沉降曲线的发生、发展、成熟、稳定 4 个阶段,在直角坐标系内呈“S”形状<sup>[10-11]</sup>。

Gompertz 模型又称复指数模型,表达式为

$$S_t = C \cdot \exp[-A \cdot \exp(-Bt)] \quad (3)$$

Logistic 模型又称逻辑曲线模型、增长曲线模型、泊松曲线模型等,表达式为

$$S_t = C \cdot [1 + A \cdot \exp(-Bt)]^{-1} \quad (4)$$

Weibull 模型的表达式为

$$S_t = C - (C - A) \cdot \exp[-(Bt)^r] \quad (5)$$

式中, $A, B, C, r$  为待定参数。对于“S”形曲线模型,曲线的反弯点是一个重要的参数,按一维固结理论,加载完毕后的沉降值即为反弯点沉降值,但在实际工程中反弯点的位置基本上发生在竣工后一段时间。笔者通过多个实例计算发现,Weibull 模型确实比另外两个模型的适用性强一些,其各个参数也有明确的物理含义: $C$  为最终沉降; $A$  为初始沉降; $B$  为软基加荷因子,加荷速度越快,沉降发展速度越快, $B$  的取值也越大; $r$  与软基的性质和治疗方法有关,为一综合影响因子。

笔者在曲线拟合的过程中发现,在实际工程中,一种曲线往往很难适用于所有情况,应根据实际沉降情况选择预测模型。

4.3 多级加载沉降模型

若加载过程是一级加载或者前后两级之间相差

不大的多级加载,前面的各种预测模型都能够适用,但若前后两级填土荷载之间相差较大,沉降就会有一定的突变,沉降曲线会出现明显的台阶状。为了预测分级加载情况下路堤的沉降,必须对预测模型进行必要的修改。

王志亮<sup>[12]</sup>针对多级填土路堤,基于 Logistic 模型提出多级荷载沉降预测模型

$$S_t = \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 + A_k \cdot \exp(-B_k t'_k)} \cdot C_k \quad (6)$$

式中: $m$  为加荷的总级数; $t'_k$  为沉降预测时刻  $t_i$  到第  $k$  级荷载施加时刻  $t_k$  的时间间隔。笔者经过计算发现,对多级加载这种叠加模型和实际情况比较符合。对于 Gompertz 模型和 Weibull 模型,可类似构造出多级填土预测模型:

$$S_t = \sum_{k=1}^m C_k \cdot \exp[-A_k \exp(-B_k t'_k)]; \quad (7)$$

$$S_t = \sum_{k=1}^m \{ C_k - (C_k - A_k) \exp[-(B_k t'_k)^{r_k}] \} \quad (8)$$

一般情况下,简化荷载级数不超过 3 级。在实际计算的时候,可以采用数学规划中的 0.618 法对这几个参数进行优化。

5 粉质土地基沉降预测系统

本文在前人的研究基础上,对沉降路基沉降预测问题进行了系统的研究,本文预测系统包括沉降数据预处理、沉降数据降噪处理以及沉降预测 3 部分。

(1) 沉降数据预处理:预估前期沉降量;根据实际加载情况简化路基加载曲线;由监控指标判别准则以及模型预测判别准则检查观测数据是否有异常数据;判别异常数据的原因;对原始数据进行插补。

(2) 数据去噪处理:如果沉降观测数据前后观测时间间隔相差不大,可以采用小波去噪处理,否则采用最小二乘支持向量机进行处理。鉴于实际工程中沉降观测数据的特殊性,本文建议采用最小二乘支持向量机预处理沉降观测数据。

(3) 沉降预测模型:通过对各种方法进行对比,笔者倾向于用多种曲线综合预测方法,以确保预测的准确性。如果是一次线性加载,则采用工后沉降模型(指数曲线模型和双曲线模型)和全过程模型(Gompertz 模型、Logistic 模型以及 Weibull 模型)进行联合预测;如果是多级加载,采用全过程叠加模型进行预测;当加载方式与线性加载条件相差较远或

观测的数据不足致使沉降观测曲线形状与“S”形相差较远时,其沉降曲线往往是发散的,无法得到合理的预测曲线,此时只能采用工后沉降模型进行预测。

6 工程应用

对 ZWDK703 + 235 断面的沉降进行分析,该工点铺设无渣轨道,工后沉降控制严格,要求不大于 15 mm。该点地基采用 CFG 桩加固,2009 年 5 月 24 日对该地基进行分级填筑,2009 年 8 月 22 日路堤填筑完成,2010 年 1 月 6 日堆载预压开始施工,2010 年 1 月 13 日堆载预压完工,2010 年 10 月 2 日堆载卸载,等待铺轨,2011 年 1 月 13 日铺轨完成,沉降观测数据观测至 2011 年 5 月 26 日。路堤填筑过程线和沉降过程线如图 1 和图 2 所示。由图可见,加载过程可简化为两级线性加载,一级瞬时卸载,因此用多级加载模型进行预测。

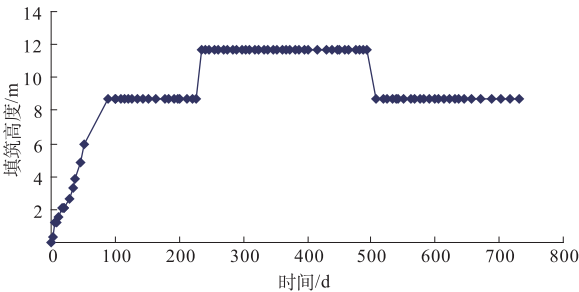


图1 路堤填筑高度过程线

Fig. 1 Time-history curve of embankment filling height

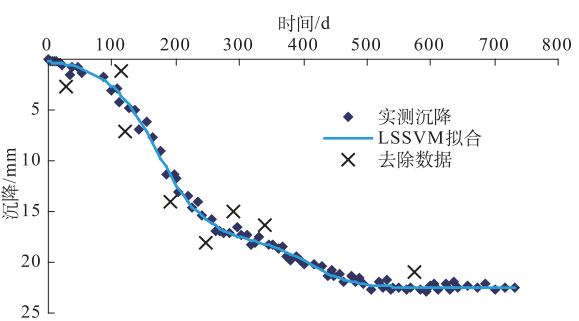


图2 路基沉降观测曲线

Fig. 2 Refined curve of subgrade settlement

首先用监控指标判别准则监测数据是否包含异常数据,此断面竖向位移速率最大为 0.085 mm/d,其余的沉降速率均小于 0.05 mm/d,均远小于填筑期沉降速率控制值 10 mm/d,所以填筑过程中路基处于稳定状态。

然后用模型预报准则判别监测数据是否包含异常数据。经过多次测试选择 LSSVM 的 2 个参数数值,然后建立初步预测模型,本文建立 LSSVM 的核心软件为 LS - SVMlab 1.5 (感谢 Pelekmans K. ,

Suykens J. A. K. 等提供了如此便捷的 MATLAB 工具箱)。模型拟合结果如图 2 所示。将计算模型值与现场实测值之间进行比较,最大偏差为 3.2 mm,计算的偏差的标准差为 0.5 mm,本文把标准差的 3 倍作为统计上合理的误差限,将误差大于 3 倍标准差的数据作为异常数据剔除掉,参见图 2。

分别采用指数模型、双曲线模型、Gompertz 叠加模型、Logistic 叠加模型进行计算,各预测曲线如图 3 所示。以铺轨完成开始计算工后沉降, Logistic、Gompertz 及指数曲线模型预测的工后沉降相近,分别为 0.5、0.5、0.7 mm,双曲线模型预测的工后沉降为 1.3 mm。

其他典型断面沉降预测结果最大工后沉降为 7.2 mm,证明路基处理方法以及施工控制非常成功。

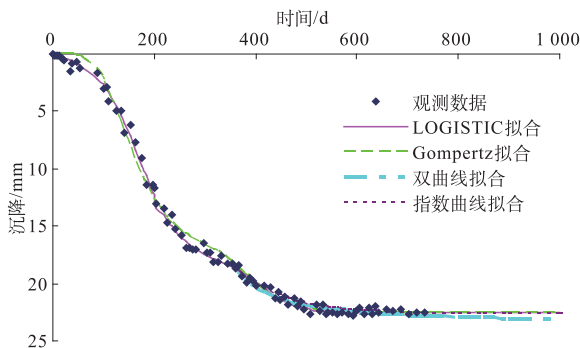


图3 路基沉降预测曲线

Fig.3 Curves of subgrade settlement by different prediction methods

## 7 结 论

(1) 沉降资料的可靠性是沉降预测准确性的前提条件,在前人的研究基础上,笔者对路基沉降观测数据的可靠性、沉降数据的预处理以及沉降观测异常数据判别方法进行了系统的叙述;尝试用最小二乘支持向量机对沉降数据进行预处理。

(2) 基于沉降资料可靠性和沉降预测方法两方面的研究,提出了粉质土地基沉降预测方法,并通过实际工程实例,详细介绍了预测过程。

(3) 根据已有沉降观测成果表明,沿线粉质土地路基沉降曲线已基本趋于稳定,运行期不会发生大的工后沉降,说明郑武客专地基处理方法是成功的。

## 参考文献:

[1] 黄红女,华锡生,宋小刚. 土石坝监测数据的未确知滤波[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(3): 32-35. (HUANG Hong-nv, HUA Xi-sheng, SONG Xiao-gang. Unascertained Filtering Method for Monitoring Data of Earth Rock-fill Dams[J]. Journal of Yangtze River Sci-

entific Research Institute, 2006, 23(3): 32-35. (in Chinese))

- [2] 黄红女. 土石坝安全测控理论与技术的研究及应用[D]. 南京: 河海大学, 2005. (HUANG Hong-nv. Safety Monitoring Theories and Technologies for Earth Rockfill Dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [3] 田其煌. 基于小波技术的软土路基沉降数据分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (TIAN Qi-huang. Method of Analyzing Soft Subgrade Settlement Data Using Wavelet Technique[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [4] 成小峰. 高速公路路基沉降观测数据的可靠性分析及应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (CHENG Xiao-feng. Dependability of Settlement Data of Highway Subgrade[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [5] 徐洪钟, 吴中如, 李雪红, 等. 基于小波分析的大坝变形观测数据的趋势分量提取[J]. 武汉大学学报, 2003, 36(6): 5-8. (XU Hong-zhong, WU Zhong-ru, LI Xue-hong, et al. Abstracting Trend Component of Dam Observation Data Based on Wavelet Analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(6): 5-8. (in Chinese))
- [6] 李智录, 卢瑞章, 沈冰, 等. 小波滤波在大坝观测数据处理中的应用[J]. 西北农林科技大学学报, 2005, 33(7): 103-107. (LI Zhi-lu, LU Rui-zhang, SHEN Bing, et al. Application of Wavelet Denoising in Dam Measured Data[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2005, 33(7): 103-107. (in Chinese))
- [7] 田胜利, 周拥军, 葛修润, 等. 基于小波分解的建筑物变形监测数据处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2639-2642. (TIAN Sheng-li, ZHOU Yong-jun, GE Xiu-run, et al. Processing of Monitoring Data of Building Deformation Based on Wavelet Transform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2639-2642. (in Chinese))
- [8] 汪莹鹤, 王保田. 基于小波降噪与最小二乘支持向量机的公路软基沉降预测模型[J]. 公路交通科技, 2008, 25(6): 40-43. (WANG Ying-he, WANG Bao-tian. A Settlement Prediction Model for Soft Foundations Based on Wavelet De-noising and LSSVM[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(6): 40-43. (in Chinese))
- [9] 王伟, 卢廷浩. 基于 Weibull 曲线的软基沉降预测模型分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 803-806. (WANG Wei, LU Ting-hao. Study on Prediction Model of Soft Foundation Settlement Based on Weibull Curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 803-806. (in Chinese))
- [10] 梅国雄, 宰金珉, 殷宗泽, 等. 沉降-时间曲线呈“S”型的证明-从一维固结理论角度[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 20-22. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, et al. Proof of s-t Curve Appearing “S” Shape Based on One-Dimensional Consolidation Theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 20-22. (in Chinese))
- [11] 梅国雄, 宰金珉, 殷宗泽, 等. 沉降-时间曲线呈“S”型



- 的证明及其应用-从土体本构关系[J]. 岩土力学, 2005,26(增1):21-24. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, *et al.* Proof of Settlement-Time Curve Appearing “S” Shape with Ramp Load and Its Application Base on Stress-strain Relationship [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(Sup. 1):21-24.. (in Chinese))
- [12] 王志亮. 软基路堤沉降预测和计算[D]. 南京:河海大学, 2004. (WANG Zhi-liang. Prediction and Calculation of Embankment Settlement on Soft Ground[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- (编辑:王 慰)

## Discrimination of Abnormal Observation Data and Settlement Prediction for the Silty Soil Subgrade of Zhengzhou-Wuhan Passenger Dedicated Line

WANG Ying-he, ZHAO Xin-yi, CHEN Zhan, CHEN Yuan-hong  
(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430002, China)

**Abstract:** Since thick silty soil distributes widely along the Zhengzhou-Wuhan Passenger Railway, the post-construction settlements should be controlled strictly. The key to embankment filling are regarded as: the control over filling speed based on the settlement observation data to ensure the embankment stability; the prediction of post-construction settlements to determine the period of ballastless track construction; and the control over settlements after construction to the allowable limit. The reliability and pre-processing of settlement data, and the method of discriminating abnormal settlement data are presented in this paper. The characteristics and applicability of settlement prediction models are discussed. The LSSVM (least squares support vector machine) is used in the pre-processing of settlement data. Hence a systematic prediction model for silty soil is established. The detailed prediction process is expounded by giving examples, and the prediction results show that the settlement tends to be stable; no large post-construction settlement would occur during the operation period, which suggest that the foundation treatment and construction method is successful.

**Key words:** silty soil; settlement prediction; de-noise; LSSVM

=====

(上接第 61 页)

## Three-Dimensional Limit Equilibrium Method for Slope Stability Analysis and Its Engineering Application

YUAN Wen<sup>1</sup>, XU Qing<sup>1</sup>, CHEN Sheng-hong<sup>1</sup>, WU Ai-qing<sup>2</sup>  
(1 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Three-dimensional method is needed in the stability analysis for slope projects with complex spatial geometric features and geological structures. A computer program CORE-lam3D for 3-D slope stability analysis was improved and developed. The program can simulate complex space surface such as real slope, geologic boundary, groundwater level and slip surface. Potential slip surfaces and sliding directions can be calculated with three kinds of 3-D limit equilibrium analysis methods, and the impacts of water load, seismic load and anchoring forces were analyzed. The analysis results of a tension-distorted body on the right bank of the reservoir at Pubugou hydropower station verified the efficiency and applicability of the improved CORE-lam3D program.

**Key words:** slope stability analysis; 3-D limit equilibrium method; the most dangerous sliding direction; simulation of slope surface