

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0702-06

# 铁路客运专线路基面沉降特征与工程意义

陈善雄, 王小刚, 姜领发, 戴张俊

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 路基面沉降是铁路客运专线变形观测和沉降评估的基本内容, 但由于对路基面沉降的物理含义及其工程意义认识不足, 其观测成果的运用存在一些谬误之处。结合武广客运专线大量实测数据, 简要地分析了路基面沉降特征及表征意义, 探讨观测成果的合理应用方法。分析表明: 路基面沉降观测数据可用于考察路基沉降的稳定性、后期发展趋势和曲线回归的相关系数是否满足要求, 但无法直接用之进行工后沉降检算。建议了联合路基面沉降观测数据和地基沉降观测数据推算工后沉降的方法。

**关 键 词:** 沉降观测; 路基面; 铁路客运专线; 无砟轨道

**中图分类号:** TU 478

**文献标识码:** A

## Settlement characteristics and engineering significance of subgrade surface for railway passenger dedicated line

CHEN Shan-xiong, WANG Xiao-gang, JIANG Ling-fa, DAI Zhang-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Subgrade surface settlement is a basic content of deformation observation and settlement assessment for railway passenger dedicated line; but the application of observation accomplishment has some falsehood because of insufficient understanding of the physical meaning and engineering significance of subgrade surface settlements. With a large number of settlement observation data of subgrade in Wuhan-Guangzhou railway passenger dedicated line, the settlement characteristics and symbolical meanings of subgrade surface are analyzed; and the reasonable application method of the observation accomplishment is discussed. The analysis shows that the settlement observation data of subgrade surface may be used to investigate the stability and the developing tendency of subgrade settlement, and whether the correlation coefficient of curve regression meets the requirement, however, that it cannot be used to calculate post-construction settlement. A calculating method for post-construction settlement is suggested by combining the measured data of subgrade surface settlement and ground settlement.

**Key words:** settlement observation; subgrade surface; railway passenger dedicated line; ballastless track

### 1 前 言

无砟轨道对结构的刚度和基础的沉降十分敏感, 其永久变形只能通过调整扣件才能恢复轨道的几何形状, 但扣件的调整量非常有限, 只能靠严格限制线下工程的沉降量来解决。因此, 铁路客运专线对路基、桥涵、隧道等线下工程的工后沉降提出了十分严格的要求<sup>[1]</sup>。

由于目前岩土计算分析还无法准确预估线下构筑物的沉降变形, 因此, 为确保线下构筑物工后

沉降变形满足无砟轨道的铺设条件, 在铺设无砟轨道前, 应对线下结构沉降变形作系统的评估<sup>[2-3]</sup>。

不少学者与工程技术人员对铁路客运专线沉降变形观测与评估方法进行了探讨。尤昌龙<sup>[3]</sup>提出了无砟轨道工后沉降变形观测评估的集成理念, 李明领<sup>[4]</sup>结合武广铁路客运专线工程沉降变形评估工作, 系统地介绍了线下结构物沉降变形观测的相关技术、数据管理与分析预测系统, 探讨了工后沉降的预测方法及评估条件与标准。王登浩<sup>[5]</sup>结合武广铁路客运专线沉降变形评估实践, 论述了客运专线

收稿日期: 2009-10-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(No. kzcx2-yw-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目(No. SKLZ08032)。

第一作者简介: 陈善雄, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土工程特性与灾害防治技术研究。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

路基、桥涵和隧道沉降观测的技术方案。赵洪勇<sup>[6]</sup>介绍了高速铁路路基沉降监测常用的几种方法,并比较了其优缺点。付涛<sup>[7]</sup>对武广铁路客运专线沉降观测精度控制进行了探讨,总结出一种能提高客运专线沉降观测精度的方法。王星运等<sup>[8]</sup>探讨了曲线拟合法对路基小变形预测适用性。以上工作为无砟轨道沉降变形观测与评估的开展奠定了基础,但无砟轨道沉降变形观测与评估毕竟是近几年才开展的工作,还有很多技术问题需在工程实践中不断探索,加以完善,如何合理利用路基面沉降观测成果进行无砟轨道铺设条件评估就是其中一个未能得到很好解决的问题。

武广、京津、郑西等铁路客运专线均开展了大量的路基面沉降观测,但不少工程技术人员对路基面沉降的物理含义及其工程意义认识不足,致使观测成果的运用存在一些谬误之处。

本文将结合武广客运专线大量实测数据,简要分析路基面沉降的物理含义与规律,探讨观测成果的合理应用方法。

## 2 路基沉降特征

路基沉降由外荷载作用下路基本体的压密沉降和基底以下地层的压密沉降两部分组成。由于路基面沉降观测桩一般在路基填筑完成后埋设,路基面沉降观测桩所记录的是自观测桩埋设观测起路基面沉降随时间的发展历程,它只包括了地基沉降和路基本体压缩变形的一部分。

### 2.1 地基沉降特征

典型地基荷载  $P$ -时间  $t$ -沉降  $S$  曲线见图 1。从路基沉降时程曲线不难发现,真实合理的监测数据曲线呈“S”形的 4 个阶段:① 发生阶段;② 发展阶段;③ 成熟阶段;④ 到达极限<sup>[9-10]</sup>。

路基面沉降观测桩观测沉降量所包含的地基沉降只是第③阶段的变形,也就是自点  $B(T_1, S_1)$  之后的沉降量。

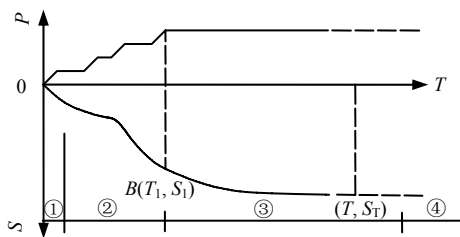


图 1 典型地基荷载  $P$ - $T$ - $S$  曲线  
Fig.1  $P$ - $T$ - $S$  curves of subgrade

以时刻  $T_1$  为 0 点,路基面沉降中因地基沉降而发生的量(时刻  $T_1$  后地基沉降增加量)为

$$S_{rd}(t) = S(T) - S_1 \quad (1)$$

式中:  $S(T)$  为地基沉降;  $T$  为地基沉降的观测时间;  $S_1$  为时刻  $T_1$  时地基沉降量;  $t$  为路基面沉降的观测时间,  $t = T - T_1$ 。

### 2.2 路基面沉降特征

路基系指以松散土体材料作填料,由人工或机械填筑,并压实到足够的密实度,以承托上部结构和列车动荷载的土工建筑物。

路堤填筑过程是一个逐级加荷的过程,随着填土逐渐增加,各填筑层既是荷载,又是受压层。路基土在填筑过程中在自重和外动力的作用下,土孔隙间的空气先是被压缩,然后是多余的气体 and 孔隙水被挤出。由于固体骨架压密和孔隙减小,孔隙中赋存的自由水和气体的排出受到阻碍,从而使变形延迟。土的应力变化与变形均是时间的函数,土所显示的特征既不是弹性体,也不是塑性体,而是具有弹性、塑性和黏滞性的黏弹塑性体<sup>[11]</sup>。依据变形发展过程,可以分为如下 3 个阶段:

(1) 初期压密阶段。扰动土在填筑过程中,经过摊铺、洒水、分层碾压而被压缩,塑性变形是主体。随着填土高度的增加,下层土受上层土的作用,开始发生压缩变形,由骨架、水、气共同分担上部荷载。这一阶段的压缩量变形与填土高度正相关;

(2) 后续固结阶段。随着路基填筑高度的不断增加,下层土受的上层土荷载越来越大,土体产生固结变形。

(3) 蠕变阶段。当路基填筑完成,地基荷载不再增加时,部分尚未完成的固结继续发展,以及由于颗粒之间的调整引起蠕变变形,沉降将随着时间的推移而缓慢发展,其沉降速率逐渐向 0 趋近。

## 3 路基面沉降表征意义

施工期间发生的土体压缩沉降将由随后的填土补偿,这部分变形对铁路的使用性能影响不大,而影响铁路使用性能的是路基填筑完成后的路基沉降。

从以上分析不难看出,路基面沉降观测桩所观测沉降量所包含的路基本体沉降只是蠕变阶段的变形,包含了路基本体的蠕变变形和地基剩余固结变形和流变变形。

下面结合武广客运专线沉降实测数据来讨论路基面沉降特征及表征意义。

武广客运专线某路基段地处丘谷区，场地自上而下分布有(1)杂填土；(2)软塑淤泥质黏土；(3)硬塑粉质黏土；(4)软塑粉质黏土；(5)硬塑黏土；(6)软塑黏土；(7)松散砾砂；(8)饱和松散圆砾土；(9)饱和松散角砾土；(10)饱和中密卵石土；(11)强风化白云质灰岩；(12)弱风化白云质灰岩。路基包括路堤与路堑，以路堑为主，路堤填土高度 2.3~5.5 m，路堑挖方深度为 2.3~8.03 m，换填深度为 2.3 m。基床底层及以下路堤均采用 B 组填料，基床表层采用级配碎石填筑。路基段地基处理方式注浆联合 CFG 桩。

路基段监测重点是路基面沉降和地基沉降。按《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术》<sup>[1]</sup>，每个路基观测断面布置 3 个观测桩和 1 个沉降板，观测桩布置在路基面上，设在线路中间及左右线路距中心 3.2 m 处，沉降板布置在地基表面上，设在线路中间，具体布置方式见图 2。

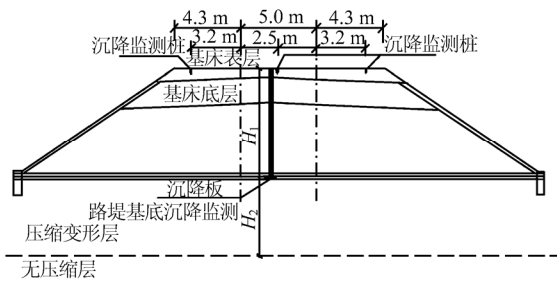


图 2 路基沉降监测剖面元件布设示意图  
Fig.2 Settlement monitoring section for subgrade

沉降观测桩采用  $\phi 20$  mm 底端带弯头的钢筋，钢筋原长不小于 40 cm，底部做成带弯钩状，挖坑埋置于设计位置，坑深 30 cm，直径  $\phi 150$  mm，采用砂浆浇筑固定。观测点钢筋头为半球形，高出埋设表面 5 mm，表面做好防锈处理。路基面沉降观测桩埋设规格见图 3。

由于路基已经形成，路基上有大量的施工车辆行走，极易破坏路基面沉降观测桩，从而影响路基面沉降的正常观测，因此对路基面沉降观测桩采取了严加保护措施。

沉降观测桩和沉降板的水准测量按国家一等精密水准测量方法施测，满足二等变形等级测量技术要求，测量精度： $\pm 1$  mm，读数取位至 0.1 mm。

以断面 DK1819+261 (断面换填高度为 4.372 m) 为例进行分析，路基面中间观测桩与基底沉降板  $P$ - $T$ - $S$  曲线如图 3、4 所示。

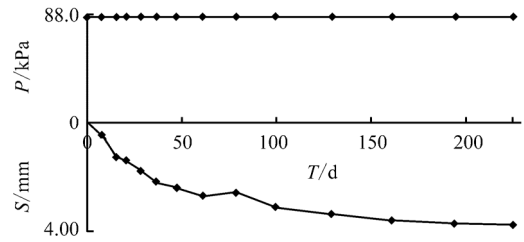


图 3 观测桩实测  $P$ - $T$ - $S$  曲线  
Fig.3 Measured  $P$ - $T$ - $S$  curves of subgrade surface

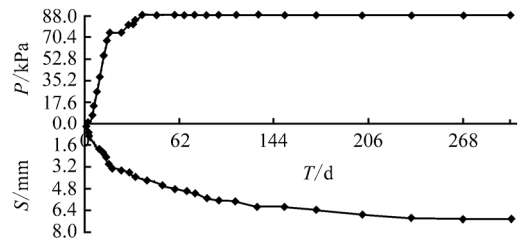


图 4 沉降板实测  $P$ - $T$ - $S$  曲线  
Fig.4 Measured  $P$ - $T$ - $S$  curves of ground settlement

从图 3 可以看出，沉降板实测  $P$ - $T$ - $S$  曲线符合地基沉降发展的一般规律，路基填筑完成后，沉降随着时间的延长而持续发展，但沉降速率递减，并逐步趋于稳定。从图 4 可以看出，路基面沉降随着时间的推移而缓慢发展，其总量和沉降速率均较小。

以观测桩监测开始时刻为时间 0 点，绘制路基面沉降  $S_g$ -时间  $t$  曲线和地基沉降  $S_{rd}$ -时间  $t$  曲线，见图 5。

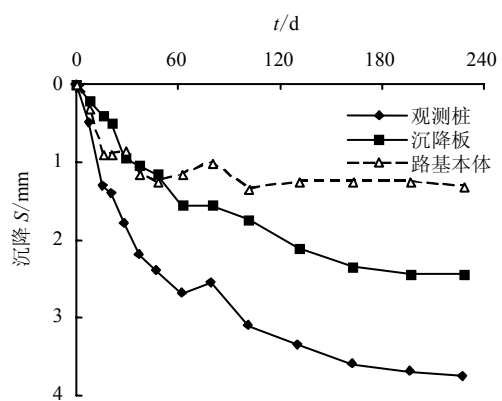


图 5 路基沉降-时间曲线  
Fig.5  $S$ - $t$  curves of subgrade

从图 5 可以看到，路基面沉降总是略大于地基沉降  $S_{rd}$ ，表明路基面沉降包含了地基沉降  $S_{rd}$  和路基本体沉降。

由图 5，可按式(2)计算得到路基本体沉降：

$$S_b = S_g - S_{rd} \quad (2)$$

式中:  $S_b$  为路基本体沉降;  $S_g$  为路基面沉降。

可以看出, 路基本体沉降将随着时间的推移而缓慢发展, 其总量较小, 相当于路基填土高度的 0.03%, 且沉降速率较小, 并逐步趋于稳定, 表现出明显的蠕变变形特征。

#### 4 路基面沉降观测的工程应用

从以上的分析可知, 路基面沉降观测桩所观测到的是自观测桩开始观测起路基面沉降随时间的变化历程, 它只包括了地基沉降和路基本体压缩变形的一部分, 路基面沉降观测桩观测沉降量所包含的地基沉降只是第③阶段及其后的变形, 所包含的路基本体沉降只是蠕变阶段的变形。因此, 在利用路基面沉降观测桩的观测数据进行路基沉降评估时, 要十分注意。

由于路基面沉降观测数据反映了路基沉降随时间发展的后期历程, 因此, 可利用路基面沉降观测数据考察路基沉降的稳定性和后期的发展趋势。

路基沉降稳定性是客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估中的核心指标, 要求严格满足, 一旦不满足要求, 不能通过评估, 因此, 稳定性检验至关重要。路基沉降的稳定性也就是后期沉降是否趋于稳定。当沉降观测量随着时间的推移而缓慢发展, 其沉降速率逐渐变小, 并向趋近 0, 可认为后期沉降趋于稳定。

利用路基面沉降观测桩的观测数据还可考察曲线回归的相关系数是否满足要求。由于路基面沉降观测桩所观测到的数据反映了路基沉降随时间发展的后期历程, 因此, 可以通过曲线回归外推的方法, 对观测数据进行分析, 可以预测不考虑结构层荷载的路基沉降发展趋势, 得到曲线回归相关系数。相关系数也是客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估中的核心指标, 要求严格满足, 一旦不满足要求, 不能通过评估。可见, 路基面沉降观测数据在沉降评估中的重要性。

路基面沉降观测数据仅包含了路基沉降的一部分, 虽可用之预测不考虑结构层荷载的路基沉降发展趋势, 但无法直接用之进行工后沉降的检算。这与中国铁路无砟轨道客运专线工后沉降的定义密切相关。无砟轨道客运专线工后沉降是指在铺轨工程全部结束后, 整个路基结构物产生的沉降量, 即为路基最终沉降量与铺轨完成时已有沉降量之差。由于工后沉降是指铺设无砟轨道后出现的, 因而是

不能通过路基工程本身加以克服的沉降, 它将会对后期的运营产生较大的影响, 是路基沉降的重点控制对象。

按上述定义, 路基工后沉降应包括路基自重引起的工后沉降和铺设无砟轨道结构层(包括道床、轨枕及钢轨)自重引起的工后沉降两部分。路基沉降观测获得的实测数据就是路基自重引起的沉降, 采用曲线回归预测得到路基自重引起的工后沉降。

无砟轨道结构层自重引起的沉降量与路基填土高度、填料类型以及地基处理方式有关, 要完全考虑这些影响因素对结构荷载沉降量的影响, 是一个相当复杂的过程。无砟轨道结构层自重引起的沉降量一般包括瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降等 3 部分。瞬时沉降是无砟轨道结构层加载瞬间发生的变形, 目前尚无成熟的计算方法。而固结沉降和次固结沉降则是随时间发展的, 应是无砟轨道结构自重引起的工后沉降的主要部分。

由于无砟轨道结构层自重相对较小(如武广客运专线设计单位提供的结构层荷载为 15 kPa), 且在铺轨前路基已经过了一个稳定的沉降变形期(要求铺轨前观测沉降量达到最终沉降量的 75%以上), 因此, 相对于路基填筑期的沉降量而言, 变形趋于稳定后所施加的结构荷载所引起的沉降量, 尤其是无砟轨道结构层自重引起的瞬时沉降是有限的。从偏安全的角度考虑, 无砟轨道结构层自重引起的沉降量统一作为工后沉降予以计算。

因此, 工后沉降  $S_R$  可按铺设无砟轨道结构层自重引起的沉降和铺轨后至运营完成所发生的沉降两部分之和计算, 其计算方法为

$$S_R = S(T_3 - T_0) + S_{st} \quad (3)$$

式中:  $T_0$  为预计铺设完无砟轨道时间点;  $T_3$  为预定运营完成的时间点( $T_3 = T_0 + 100$  年);  $S(T_3 - T_0)$  为路基在铺轨后至运营完成所发生的沉降;  $S_{st}$  为铺设无砟轨道结构层自重发生的沉降。

对于多级加载的情况, 在不考虑地基土的非线性特性条件下, 荷载增量引起的最终沉降量与荷载大小近似成正比, 即:

$$S_k = C\Delta P_k \quad (4)$$

式中:  $S_k$  为第  $k$  级荷载增量引起的最终沉降量;  $\Delta P_k$  为第  $k$  级荷载增量。

应用上述原理, 将轨道结构层看作为路基本体填筑完成后的一个荷载增量, 其引起的沉降量与结

构层荷载成正比, 而沉降量  $S_k$  与  $\Delta P_k$  的比例系数  $C$  可根据铺轨前沉降观测资料确定, 即:

$$C = S_{\infty} / \gamma h \quad (5)$$

$$S_{sk} = C \Delta P_k \quad (6)$$

式中:  $S_{\infty}$  为利用铺轨前观测资料预测的最终沉降量;  $\gamma$  为路基平均填土重度;  $h$  为路基填土总高度。则结构层引起的沉降量为

$$S_{sk} = C \Delta P_k = \Delta P_k S_{\infty} / \gamma h \quad (7)$$

式中:  $\Delta P_k$  为轨道结构层荷载。

不能直接利用路基面沉降观测数据进行工后沉降检算的原因就在于, 仅依据路基面沉降观测数

据, 无法得到一个真实的最终沉降量  $S_{\infty}$ , 因为, 路基面沉降观测数据缺失了路基填筑期的沉降, 且该部分沉降在总体沉降中占有相当大的比例, 由路基面沉降观测数据回归外推得到的最终沉降量  $S(\infty)$  将远小于最终沉降量实际值  $S_{\infty}$ , 这样就无法准确合理的计算结构层引起的沉降量了。

为解决该问题, 建议联合路基面沉降和地基沉降观测数据来推算工后沉降。其具体做法是: 利用路基面沉降观测数据回归外推得到的  $S(\infty)$ , 并计算  $S(T_3 - T_0)$ ; 取  $S_{\infty} = S(\infty) + S_1$ , 利用式(7)计算结构层引起的沉降量  $S_k$ , 由式(3)可得工后沉降  $S_R$ 。

下面利用前述断面 DK1819+261 的实测资料作一分析, 分析结果详见表 1。

表 1 断面 DK1819+261 沉降预测比较

Table 1 Comparison of settlement prediction results for section DK1819+261

部位	当前观测沉降量 /mm	预铺轨时沉降 /mm	相关系数 $R$	最终沉降预测值 /mm	运营 100 年沉降量 /mm	$S(T_3 - T_0)$ /mm	结构层引起沉降 /mm	工后沉降 /mm
路基面	3.75	3.82	0.99	5.12	3.86	0.04	0.66	0.70
地基	7.05	7.12	0.98	8.41	7.18	0.06	1.23	1.29
路基				9.72	8.46	0.04	1.45	1.49

注: 表中沉降预测采用三点法。

分析表 1 不难看出, 直接利用路基面沉降观测数据回归外推得到的最终沉降量  $S(\infty)$  将远小于按路基沉降板观测数据回归外推得到的最终沉降量  $S_{\infty}$ , 显然, 直接利用路基面沉降观测数据回归外推得到的最终沉降量  $S(\infty)$  与路基最终沉降的真实值相距甚远。由路基面沉降观测数据直接推算的工后沉降较按路基沉降板观测数据推算的工后沉降及本文建议方法推算的工后沉降小很多, 按路基沉降板观测数据推算的工后沉降与所建议方法推算的工后沉降接近, 但本文建议方法推算的工后沉降略偏大, 显然, 建议的方法更偏于安全。

## 5 结 语

路基面沉降是铁路客运专线沉降变形观测评估的基本内容, 但由于对路基面沉降的物理含义与规律及其工程意义认识不足, 观测成果的运用存在一些谬误之处。本文结合武广客运专线大量实测数据, 简要分析路基面沉降的物理含义与规律, 探讨观测成果的合理应用方法。

鉴于路基面沉降观测数据可用于考察路基沉降的稳定性、后期发展趋势和曲线回归的相关系数是否满足要求, 但无法直接用之进行工后沉降检算。

工后沉降可采用建议的联合路基面沉降观测

数据和地基沉降观测数据的方法来推算。

## 参 考 文 献

- [1] 中国铁道科学研究院. 铁建设[2006]158号客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [2] 吴民友. 客运专线无砟轨道铁路工程测量和铺设条件评估关键技术[J]. 中国铁路, 2006, (10): 28-32.  
WU Ming-you. PDL ballastless track engineering survey and key technology evaluation of laying condition[J]. Chinese Railways, 2006, (10): 28-32.
- [3] 尤昌龙. 无砟轨道工后沉降变形观测、评估的集成理念[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 102(3): 25-28.  
YOU Chang-long. The integration concept on observation and evaluation of ballastless track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007, 102(3): 25-28.
- [4] 李明领. 客运专线无砟轨道铁路线下结构沉降变形观测与评估技术[J]. 中国工程科学, 2009, (1): 48-59.  
LI Ming-ling. Deformation monitoring and assessment technology for substructure of unballasted track on railway passenger dedicated line[J]. Engineering Sciences, 2009, (1): 48-59.

下转第 726 页

- initial deviator stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2291—2302.
- [7] 周镜. 南京砂的工程性质——南京长江大桥加固技术总结[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [8] 陈文化, 孙谋, 刘明丽, 等. 南京砂的结构特性与地铁地基液化判别[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 755—758.  
CHEN Wen-hua, SUN Mou, LIU Ming-li, et al. Characters of schistose structure of Nanjing's sand and seismic liquefaction of subsoil of a metro section[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 755—758.
- [9] 陈国兴, 刘雪珠. 南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1403—1410.  
CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu. Testing study on ratio of dynamic shear moduli and ratio of damping for deposited soils in Nanjing and its neighboring areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1403—1410.
- [10] 程建军, 严三保, 蒋建平, 等. 南京地铁南北线主要工程地质问题认识与评价[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 46—51.  
CHENG Jian-jun, YAN San-bao, JIANG Jian-ping, et al. Assessment on the main engineering geological problems in the south-north line of Nanjing metro[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2004, 26(1): 46—51.
- [11] CHEN Y M, WANG C J, CHEN Y P, et al. Characteristics of stresses and settlement of ground induced by train[C]// Proceedings of Environmental Vibration Prediction, Monitoring and Evaluation. Okayama: [s. n.], 2005: 33—42.
- [12] 刘颖, 谢君斐. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- [13] 汪闻韶. 土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 1—10.  
WANG Wen-shao. Distinction and interrelation between liquefaction, state of limit equilibrium and failure of soil mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(1): 1—10.

#### 上接第 706 页

- [5] 王登浩. 武广铁路客运专线沉降观测与预测技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 3(5): 60—64.  
WANG Deng-hao. Technologies for Wuhan-Guangzhou railway passenger dedicated line settlement observation and prediction of settlement deformation[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2008, 3(5): 60—64.
- [6] 赵洪勇, 刘建坤, 崔江余. 高速铁路路基沉降监测方法的认识与评价[J]. 路基工程, 2001, (6): 15—17.  
ZHAO Hong-yong, LIU Jian-kun, CUI Jiang-yu. Perception and evaluation for settlement monitoring method of highspeed railway subgrade[J]. **Subgrade Engineering**, 2001, (6): 15—17.
- [7] 牟俊杰, 翁晓丽. 武广客运专线路基沉降变形观测及沉降估算[J]. 铁道建筑技术, 2008, (5): 31—37, 41.  
MU Jun-jie, WENG Xiao-li. Settlement and deformation observation & settlement estimation of the Wu-Guang passenger dedicated railway line subgrade[J]. **Railway Construction Technology**, 2008, (5): 31—37, 41.
- [8] 付涛. 武广客运专线沉降变形观测精度控制[J]. 铁路标准设计, 2009, (增刊 1): 23—25.  
FU Tao. Precision control for settlement and deformation observation of the Wu-Guang passenger dedicated railway line[J]. **Railway Standard Design**, 2009, (Supp.1): 23—25.
- [9] 王星运, 陈善雄, 余飞, 等. 曲线拟合法对路基小变形情形适用性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2763—2769.  
WANG Xing-yun, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Study of applicability of curve fitting methods in small settlement of subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2763—2769.
- [10] 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.
- [11] 赵明华, 刘煜, 曹文贵. 软土路基沉降发展规律及其预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(1): 157—161.  
ZHAO Ming-hua, LIU Yu, CAO Wen-gui. The developing regularity and forecasting of settlement in soft clay roadbed[J]. **Journal of Central South University (Nature Science)**, 2004, 35(1): 157—161.
- [12] 朱俊生, 聂欣. 路基沉降变形机理及发展过程的分析研究[J]. 山西建筑, 2008, 34(20): 271—272.  
ZHU Jun-sheng, NIE Xin. The analysis and research on the roadbed settlement deformation principle and the develop process[J]. **Shanxi Architecture**, 2008, 34(20): 271—272.