

# 铁路客运专线路基工后沉降预测方法研究

姜领发, 陈善雄

(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:** 利用路基填筑完成后相对较长静置期内的实测沉降值及轨道结构层施工完成后的较短时间内的有限次沉降数据, 提出一种实用的铁路客运专线路基工后沉降预测方法。首先, 利用较长静置期中的路基沉降实测数据进行曲线拟合并判定其拟合参数是否满足要求, 其次, 在满足预测曲线的参数条件后, 根据结构层的荷载情况及施工完成后有限次实测沉降值, 确定与路基土体固结性质有关的结构层施工完成后的沉降发展曲线拟合方程参数, 并给出相应的工后沉降计算式; 最后, 通过工程实例对所建议的预测评估方法进行验证与分析。

**关键词:** 武广铁路客运专线; 路基; 工后沉降; 结构层; 预测  
中图分类号: U238 U213.1+57 文献标识码: A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0019-03

铁路客运专线对路基等线下工程的工后沉降要求十分严格, 而现有的沉降设计计算受到多种因素的影响, 计算精度不足以控制无砟轨道工后沉降。因此, 工后沉降的控制应以施工期间系统的沉降观测与综合分析评估为主, 应通过对沉降观测数据系统综合分析评估、验证或调整设计措施, 使路基等工程达到规定的变形控制要求, 分析推算出最终沉降量和工后沉降, 合理确定无砟轨道开始铺设时间, 确保客运专线无砟轨道结构铺设质量。

按《客运专线铁路无砟轨道铺设条件评估技术指南》<sup>[1]</sup>要求, 路基上铺设无砟轨道前, 应对路基变形系统的评估, 要求沉降预测采用曲线回归方法, 并满足一定的观测时间及相关参数要求。

按评估指南规定, 路基结构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, 不能通过路基工程本身加以克服的沉降, 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。不少学者与工程技术人员对铁路客运专线沉降变形观测评估方法及路基工后沉降满足条件进行了研究探讨。赵俊岭<sup>[2]</sup>介绍客运专线路基沉降观测内容和一般规定, 分析评估方法和判定标准; 李明领<sup>[3]</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。

这些研究虽然都认为客运专线工后沉降是由路基在自重条件下产生的铺轨后的剩余沉降与轨道结构层产生的铺轨后附加沉降组成, 但对轨道结构层产生的路基附加沉降采用的是与前期路堤荷载引起的沉降总值的平均值对比换算, 并且没有去除结构层引起的瞬时沉降值, 这就使该分析方法所推算的结构层引起的工后沉降偏大。在轨道调整量一定的情况下, 导致预测的路基自重产生的剩余沉降偏小, 为了满足这个条件, 需要延长观测期或增强路基填料质量等方案, 有可能造成较大的经济浪费。

本文利用路基填筑完成后相对较长静置期内的实测沉降值及结构层铺设完成后的较短时间内的沉降数据, 提出一种实用的铁路客运专线路基工后沉降预测方法, 通过工程实例验证并分析该方法的适用性。

## 1 沉降曲线拟合方程

由于双曲线法能够在一定程度上反映次固结的影

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (kzcx2-yw-150), 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (SKL08032)。

作者简介: 姜领发 (1972-), 男, 副研究员。

填高具有相近的工后沉降值, 这即可保证列车高速、安全、舒适运行, 并尽可能减少维修。

(5) 路基填筑完成后, 路基和地基沉降趋势近似一致, 其沉降值和沉降速率在其最初的一段时间内都要远小于路基的相应值。

(6) 武广铁路客运专线现有地基和路基填料和施工工艺下, 路基的大部分 (70% ~ 90%) 沉降量在路基填筑过程中已基本完成, 路基填筑完成后 6 个月的路基沉降值只占路基总沉降量的 1.4% ~ 4.2%, 亦即放置期达到 6 个月后, 路基的沉降量基本已经完成。因

此, 建议在保证施工质量的前提下, 可适当缩短路基填筑完成后的观测期 (4 ~ 6 个月)。这样就可大大提前铺轨时间和提高经济效益。

## 参考文献:

- [1] 铁建设函 [2004] 157 号, 京沪高速铁路设计暂行规定 [S].
- [2] 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].
- [3] 铁建设 [2007] 47 号, 新建时速 300 ~ 350 km 客运专线铁路设计暂行规定 [S].
- [4] 陈善雄, 余飞, 刘绍波, 等. 铁路客运专线沉降监测数据管理与分析预测集成系统研发 [J]. 铁道标准设计, 2010(2).

## · 线路 路基 ·

响,在实际工程中应用非常广泛,本文拟用双曲线作为曲线拟合方法来讨论客运专线路基工后沉降的预测情况。亦即假定由路基静置期的实测沉降数据拟合的发展曲线符合双曲线模型。

假定沉降量  $s$  随时间  $t$  的发展过程符合双曲线形式,如图 1 所示,沉降量  $s$  随时间  $t$  的变化可用下式表示

$$s = s_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} \quad (1)$$

式中:  $s_0$  为初期沉降量,即  $t = t_0$  时刻的沉降量;  $s$  为  $t$  时刻沉降量;  $t_0$  为起点时间,一般可取填方施工结束日;  $\alpha$ 、 $\beta$  为实测数据经过曲线回归求得的系数。

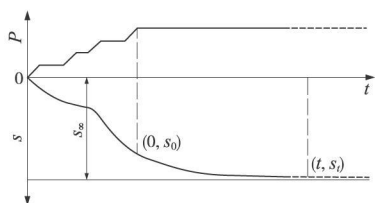


图 1 双曲线法推算沉降示意

由实测数据绘制  $(t - t_0)/(s - s_0)$  与  $t - t_0$  的关系图(图 2),拟合直线可求得直线的截距  $\alpha$  和斜率  $\beta$  即可求得任意时间的沉降量  $s$  和最终沉降量  $s_\infty$

$$\frac{t - t_0}{s - s_0} = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (2)$$

$$s_\infty = s_0 + \frac{1}{\beta} \quad (3)$$

令  $c = \alpha/\beta$  则式(1)变为

$$s = s_0 + \frac{t - t_0}{c + (t - t_0)} (s_\infty - s_0) \quad (4)$$

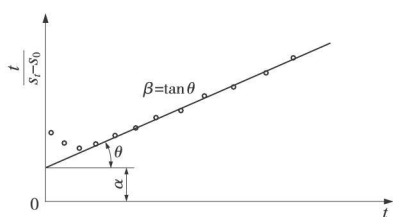


图 2  $\alpha$ 、 $\beta$  求法

## 2 自重下路基沉降曲线拟合方程

假定路基填筑完成后的实测沉降量  $s$  随时间  $t$  的发展过程符合双曲线形式,则由式(4)可得沉降量  $s$  随时间  $t$  的变化曲线拟合方程

$$s = s_0 + \frac{t - t_0}{\alpha_i + \beta_i(t - t_0)} \quad (5)$$

式中,  $s_0$  为预测起点时沉降量,即  $t = t_0$  时刻的沉降量;  $s$  为  $t$  时刻沉降量;  $t_0$  为起点时间,填筑完成时间;  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  为静置期实测数据经过曲线回归求得的系数。

令  $c_i = \alpha_i/\beta_i$ , 则式(5)变为

$$s_t = s_0 + \frac{t - t_0}{c_i + (t - t_0)} (s_\infty - s_0) \quad (6)$$

根据评估指南要求,采用曲线回归法来预测沉降趋势必须满足以下条件。

(1)路基填筑完成或堆载预压后不少于 3 个月的实际观测数据才可作曲线回归分析,且回归的相关系数不应低于 0.92

(2)间隔不少于 3 个月的两次预测最终沉降的差值不应大于 8 mm。

(3)路基填筑完成或堆载预压后,最终的沉降预测时间应满足下列条件

$$s(t)/s(t = \infty) \geq 75\% \quad (7)$$

式中,  $s(t)$  为预测时的沉降观测值;  $s(t = \infty)$  为预测的最终沉降值。

## 3 结构层施工后沉降曲线拟合方程

轨道结构层可看作路基填筑完成后附加的一个荷载增量,其引起的路基附加沉降可按多级荷载下与前一级具有不同参数的同一种预测曲线进行预测。即轨道结构层施工完成后的沉降预测曲线满足下列双曲线形式

$$s_t = s_0 + \frac{t - t_0}{\alpha_j + \beta_j(t - t_0)} \quad (8)$$

式中,  $s_0$  为结构层施工完成后的沉降量,即  $t = t_0$  时刻的沉降量;  $s_t$  为  $t$  时刻沉降量;  $t_0$  为结构层施工完成后时间;  $\alpha_j$ 、 $\beta_j$  为结构层施工完成后拟合曲线回归系数。

令  $c_j = \alpha_j/\beta_j$ , 则式(8)变为

$$s_t = s_0 + \frac{t - t_0}{c_j + (t - t_0)} (s_\infty - s_0) \quad (9)$$

## 4 $c$ 和 $s_\infty$ 的确定

按评估指南相关要求,沉降实测值不能少于 3 个月的观测期及一定的观测频次,否则曲线拟合出的数据即使满足其他相关要求,其结果也是不可信的。由于轨道结构层施工完后,大多数情况下达不到三个月的静置期就要进行铺轨并锁定,故不能用轨道结构层施工完成后的实测数据进行拟合预测。

按多级加载理论,轨道结构层施工完成后路基沉降发展趋势应与前一级沉降发展趋势相同。由式(9)对比分析可知,在轨道结构层施工完成后至少观测一期沉降数据的条件下,若想预测后期沉降发展趋势,则必须确定  $c$  和  $s_\infty$  的具体值。

(1)  $c$  的确定

根据太沙基一维固结理论,由文献[4~5]分析可知,由两级加载双曲线拟合方程中的  $c$  和路基土固结系数成反比,进而可得

$$\zeta = \left[ \frac{1 - \epsilon_i}{1 - \epsilon_j} \right]^\lambda \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \quad (10)$$

式中,  $\sigma_i$  和  $\sigma_j$  为路基总的竖向有效应力;  $\epsilon_i$  和  $\epsilon_j$  为两级荷载阶段对应的竖向应变;  $\lambda$  为反映土体渗透性随其竖向变形变化的参数, 可通过室内试验测定。

由于实际工程沉降预测时常常无土性参数, 且铁路客运专线路基沉降属于小变形, 总体沉降量很小, 结合文献 [5] 中的简化公式可将式 (10) 进一步简化为

$$\zeta = \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \quad (11)$$

## (2) $\zeta_0$ 的确定

假定轨道结构层施工完成后至少进行了两期的沉降实测  $s_k$ , 由于其发展趋势满足式 (9) 的双曲线形式, 则由式 (9) 及结构层施工完成后的实测值可得  $s_0$

$$s_0 = s_k + (s_k - s_0) \left[ \frac{\zeta}{t_k - t_0} + 1 \right] \quad (12)$$

式中,  $s_k$  为轨道结构层施工完成后在  $t_k$  时刻的实测沉降, 当结构层施工后实测数据观测期大于 2 期时, 式 (12) 中的  $s_0$  值可用各自计算结果的平均值代替。

## 5 工后沉降计算

按铁路客运专线评估指南规定, 路基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, 可用下列公式表示

$$s_k = s_0 - s_k \quad (13)$$

式中,  $s_k$  为路基工后沉降;  $s_0$  为轨道结构层施工完成后预测的路基最终沉降;  $s_k$  为铺轨完成时的实测沉降。

## 6 工程实例

以某一客运专线 DK1 255+549.48 ~ DK1 261+305.00 一段路基为例, 该区段属第四系全新统广泛分布于垄岗间谷地、丘陵谷地和低山谷地, 岩性主要为坡洪积、冲洪积的黏土、粉质黏土、砂砾层等, 厚度一般为 8~20 m, 局部谷地发育松软黏性土, 其中积水低洼地带具淤泥、淤泥质黏土等, 厚度 3~15 m。第四系中更新统广泛分布于垄岗丘、丘陵、低山坡区, 岩性主要为冲洪积黏土、粉质黏土及砂砾层, 灰岩地区黏性土多为网状红黏土。局部黏性土具弱膨胀性, 厚度一般 5~20 m。

本区段路基长 5.755 km, 以挖方换填为主, 最大挖方深度约 12.5 m, 最大填方高度约 4.8 m。一般路基使用 A 组料填筑。

地基处理方式主要有换填、CFG 桩、钻孔灌注桩、管桩、冲击压实; 其中 CFG 桩、钻孔灌注桩、管桩均到达强风化层。

对该区段进行了沉降监测, 其典型沉降断面 DK1 258+630 的表面监测桩实测  $P-t$  曲线见图 3。该断面路堤累计填筑高度为 2.7 m, 土体容重  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 。轨道结构层的荷载为 15 kPa。

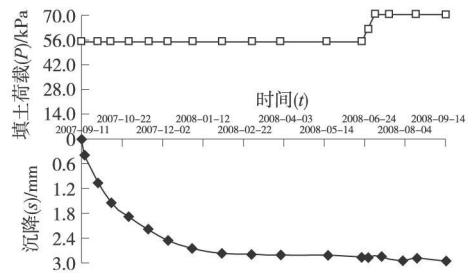


图 3 DK1 258+630 的表面监测桩实测  $P-t$  曲线

### (1) 自重情况下曲线回归

该段路基从 2007 年 9 月 11 日填筑完成 (填高为 2.7 m) 后一直观测到 2008 年 5 月 18 日, 共进行了 250 d 22 期观测, 借助该组实测沉降数据进行双曲线回归, 具体参数及相关系数可通过图 4 得到。

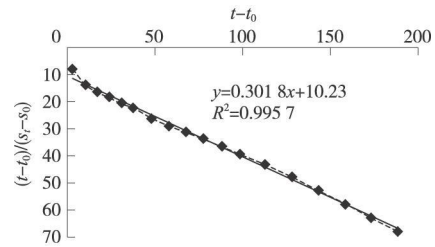


图 4 沉降发展趋势回归曲线

从图 4 可知, 相关系数  $R^2 = 0.9957 > 0.92$  满足曲线回归对相关系数的要求, 亦即该曲线回归是可信的。

由  $\alpha_i = 10.23$   $\beta_i = 0.3018$

则  $\zeta = \alpha_i / \beta_i = 10.23 / 0.3018 = 33.897$ 。

### (2) 轨道结构层施工后回归曲线

由图 3 可知,  $\sigma_i = 54 \text{ kPa}$   $\sigma_j = 69 \text{ kPa}$  将  $\zeta$ 、 $\sigma_i$  和  $\sigma_j$  代入式 (11) 可得

$$\zeta = \frac{\sigma_i}{\sigma_j} = 33.897 \times 54 / 69 = 26.528$$

按前面的分析, 借助轨道结构层施工完成后的前两期观测数据、间隔时间及  $\zeta$  可求得  $s_0$  值。即将  $s_k = 2.78 \text{ mm}$   $s_0 = 2.81 \text{ mm}$   $t_k - t_0 = 7 \text{ d}$  及  $\zeta$  代入式 (12) 中可得

$$s_0 = 2.924 \text{ mm}$$

将  $s_0$ 、 $s_k$  和  $\zeta$  具体数值代入式 (9) 中, 即可得轨道结构层施工完成后路基沉降变形与时间曲线拟合方程为

$$s_t = 2.78 + \frac{0.162(t - t_0)}{26.528 + (t - t_0)} \quad (14)$$

从式 (14) 可知, 轨道结构层施工完成后的沉降发

# 铁路客运专线超载预压路基变形特征与卸载时间确定方法

余 飞, 乐 红, 韩 卓, 陈善雄

(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:**以我国在建的铁路客运专线实测数据为基础, 总结分析了铁路客运专线超载预压路基沉降变形特征和规律, 在此基础上, 结合相关设计规范和标准, 推导并建立了基于实测数据回归拟合的卸载时机控制方程, 以及基于有效应力面积比法的卸载时机控制条件, 并针对不同沉降变形类型, 给出了相应的卸载时间计算公式, 为铁路客运专线路基超载预压区段卸载时间点的计算提供了具体的方法, 最后采用武广铁路客运专线超载预压路基实测数据验证了其有效性和可靠性。

**关键词:**武广铁路客运专线; 超载预压路基; 卸载时间; 计算方法

收稿日期: 2009-12-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (kzcx2-YW-150); 岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (SKL408032)。

作者简介: 余 飞 (1978-), 男, 副研究员。

展与时间是一一对应的关系, 下面通过具体实测数据来验证该拟合曲线的正确性。

从 2008 年 7 月 5 日轨道结构层施工完成至 2008 年 9 月 15 日铺轨完成共 62 d 其在 2008 年 9 月 15 日实测沉降值是 2.89 mm。将  $t = 62$  代入式 (14) 可得预测值  $s_2 = 2.88$  mm。由此可得

$$\text{绝对误差 } \Delta_{\text{绝}} = 2.89 - 2.88 = 0.01 \text{ mm}$$

$$\text{相对误差 } \Delta_{\text{相}} = \frac{2.89 - 2.88}{2.88} = 0.35\%$$

对比分析表明, 用本文所建议的方法进行轨道结构层施工后的沉降预测是可行的, 并且从典型断面的预测值和实测沉降值的分析可知, 在轨道结构层施工完成后路基沉降的发展规律趋于稳定, 即使进行后期轨道铺设但对其沉降的影响甚微, 可近似忽略。

### (3) 路基工后沉降计算

借助前面的拟合分析和推导, 路基工后沉降可用式 (12) 的拟合双曲线方程来预测, 具体到 DK1 258+630 断面, 铺轨完成的时间为 2008 年 8 月 16 日, 实测沉降值为 2.84 mm, 故该断面路基工后沉降值为

$$s = s_0 - s_2 = 2.924 - 2.84 = 0.084 \text{ mm}$$

满足铁路客运专线路基工后沉降允许值要求。

## 7 结论及建议

利用路基填筑完成后相对较长静置期内的实测沉降值进行双曲线拟合回归, 当各项回归指标满足评估指南要求后, 借助轨道结构层施工完成后的较短时间

方法

中图分类号: U238 U213.1<sup>+</sup>57 文献标识码: A

文章编号: 1004-2954(2010)02-0022-06

## 1 概述

铁路客运专线线路长, 不可避免地要穿越大量的湖、江、河相沉积的软土分布区域, 而无砟轨道的铺设对路基工后沉降提出了严格的控制要求 (一般小于 15 mm), 基底沉降和稳定控制问题十分突出。为解决这一问题, 设计上多采用 CFG 桩、注浆、旋喷桩等措施对原软土地基进行加固处理, 然后再通过超载预压来加

内的有限实测沉降数据, 提出一种实用的铁路客运专线路路基工后沉降预测方法。该方法克服了估算轨道结构层没有剔除瞬时沉降而产生的工后沉降预测偏大的缺点, 使路基工后沉降的预测更接近真实值, 通过工程实例验证了该方法的适用性准确性。

由于本文中所提出的预测工后沉降的方法是借助轨道结构层施工后的有限实测数据求得沉降发展拟合曲线。这就要求不但前一级路基填筑完成静置期内实测沉降数据要满足曲线回归要求, 而且更要保证结构层施工期间及施工后的实测数据的准确度和精度。为了保证实测数据的准确度和精度, 笔者建议在轨道结构层施工前要对相应观测桩进行正确移点, 保证测点在施工前后观测数据的连续性; 结构层施工完成后, 要立即进行沉降测量, 适当增加观测频次, 取各次计算结果的算术平均值作为最终沉降值; 在条件允许的情况下, 尽量延长铺轨前的沉降观测时间。

### 参考文献:

- [1] 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].
- [2] 赵俊岭. 客运专线路基工程沉降观测实施技术 [J]. 铁路建筑, 2008(7): 67-69.
- [3] 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.
- [4] 林 鹏, 许镇红, 徐 鹏, 等. 软土压缩过程中固结系数的研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 106-108.
- [5] 杨 涛, 李国维, 杨伟清. 基于双曲线法的分级填筑路堤沉降预测 [J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1551-1554.