

山区土石混填高填方路基沉降监测数据分析及 工后沉降预测

陈士忠¹, 孙卓河², 陈学政³

(1. 枣庄市交通运输事业服务中心, 山东 枣庄 277800; 2. 山东路达工程设计咨询有限公司, 山东 枣庄 277800;

3. 山东远通公路工程集团有限公司, 山东 枣庄 277800)

摘要: 为有效控制高填方路基沉降稳定时间及合理的路面施工时间, 结合工程实例, 开展了土石混填高填方路基沉降监测, 通过山岭重丘区土石混填高填方路基工程沉降监测数据分析, 总结土石混填高填方路基沉降变形规律, 采用三点修正指数曲线法预测工后沉降, 发现汛期工后沉降监测数据明显增大, 认为沉降稳定期至少经过一个雨季是必要的。采取每 2 m 进行冲击碾压并分层振动压实的补强措施, 有效加快路基的沉降固结, 减少路基自身的工后沉降, 提高了路基施工质量, 为类似工程早期沉降控制提供参考。

关键词: 山区; 土石混填高填方路基; 沉降监测; 数据分析; 工后沉降预测; 三点修正指数曲线法

中图分类号: U416.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0201-04

Analysis of Settlement Monitoring Data and Prediction of Post-construction Settlement of High-fill Roadbed with Earth-rock Mixed Fill in Mountainous Areas

CHEN Shizhong¹, SUN Zhuohe², CHEN Xuezheng³

(1. Zaozhuang Transportation Service Center, Zaozhuang 277800, China; 2. Shandong Luda Engineering Design Consulting Co., Ltd.,

Zaozhuang 277800, China; 3. Shandong Yuanotong Highway Engineering Group Co., Ltd., Zaozhuang 277800, China)

Abstract: In order to effectively control the settlement stability time of the high-fill roadbed and the reasonable pavement construction time, combined with the engineering examples, the settlement monitoring of the earth-rock mixed-fill high-fill roadbed has been carried out. Through the data analysis of the settlement monitoring of the earth-rock mixed-fill high-fill roadbed project in the mountain hill area, the settlement and deformation law of the earth-rock mixed-fill high-fill roadbed is summarized. The three-point modified exponential curve method is used to predict the post-construction settlement. It is found that the monitoring data of post-construction settlement during the flood season have increased significantly. It is considered necessary that the settlement stabilization period lasts for at least one rainy season. The strengthening measures of impact rolling and layered vibration compaction every 2 m are taken to effectively accelerate the settlement and consolidation of the roadbed, reduce the post-construction settlement of the roadbed itself, and improve the construction quality of the roadbed, which provides a reference for the early settlement control of similar projects.

Keywords: mountainous area; soil-rock mixed-fill high-fill roadbed; settlement monitoring; data analysis; post-construction settlement prediction; three-point modified exponential curve method

0 引言

在高填方路基施工中, 路基沉降控制至关重要, 成为影响路基质量和进度计划的重要因素, 采用科学的方法对路基沉降进行预测和监测, 并指导施工, 无疑是一项值得深入探究的课题。为节约土地资源, 当前山岭重丘区高填方路基常采用土石混填, 本

文结合枣庄机场连接线工程实例, 开展了土石混填高填方路基沉降监测, 分析总结土石混填高填方路基沉降变形规律, 预测工后沉降; 基于实际数据及分析成果, 通过采取相应路堤补强措施, 加快路基沉降固结, 减少工后沉降, 有效控制路基沉降稳定时间及路面施工时间, 为类似工程早期沉降控制提供参考。

1 高填方路基沉降变形机理

路基沉降按其产生沉降的部位可分为地基沉降和路堤填筑体沉降。地基沉降按其产生的原因和次

收稿日期: 2024-11-26

作者简介: 陈士忠(1968—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路桥梁工程建设管理工作。

序分为瞬时沉降 S_{d} 、固结沉降 S_{e} 、次固结沉降 S_{cd} ;其中次固结沉降在总沉降中所占比例小于10%,且历时较长,因此在路基设计中,次固结沉降通常不予考虑,只计算瞬时沉降和主固结沉降。路堤填筑体沉降主要受路堤填料压实、边坡侧向变形、汽车动荷载作用范围内的填料受荷载重复作用三个因素影响而产生累积残余变形。本文对高填方路基工后沉降数据进行分析并探讨其控制措施。

2 高填方路基沉降预测

2.1 工程概况

枣庄机场连接线工程全长约3 km,位于山岭重丘区,采用一级公路技术标准,路基宽47 m,K2+350至K2+835段为高填方段,最大路基高度36.40 m,原地基覆盖约2.3 m厚粉质黏土层。

2.2 地基工后沉降推算

目前地基沉降计算方法主要采用分层总和法。结合工程实际中沉降量观测的统计分析,以经验系数 m_s 进行修正,求得地基的最终变形量。

(1)地基工后沉降 S_p 计算公式采用

依据《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》工后沉降 S_p 按照式(1)计算:

$$S_p = S_o - S_{cp} \quad (1)$$

式中: S_o 为路面设计使用年限内地基发生的总沉降, m ; S_{cp} 为路基路面施工期沉降, m 。

(2)地基主固结沉降 S_e 及总沉降 S_o 计算

依据《公路路基设计规范》地基总沉降 S_o 采用式(2)计算:

$$S_o = m_s \times S_e \quad (2)$$

$$m_s = 0.123\gamma^{0.7}(\theta \times h^{0.2} + \nu \times H) + Y$$

按照式(3)计算 S_e :

$$S_e = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E_{si}} \Delta h_i \quad (3)$$

式中: E_{si} 为地基中各分层的压缩模量,kPa; ΔP_i 为地基中各分层中点的附加应力,kPa。

(3)地基工后沉降推算

本项目以高填方段K2+440路堤中心处为例对原地基总沉降及地基工后沉降进行推算,并与路基顶层沉降观测数据,共同作为沥青混凝土路面铺筑时间控制的评判数据。

主固结沉降 S_e 采用分层总和法计算,计算参数可采用由压缩试验得到的 $e-p$ 曲线或压缩模量。地质勘察报告K2+440处路堤中心处8#钻孔柱状图分层情况为:2.3 m厚粉质黏土+17.7 m厚中风化石灰

岩,地基沉降压缩层只考虑2.3 m厚粉质黏土层。考虑去除路堤填前清表的30 cm厚度,地基沉降压缩层分为两层,由上至下厚度各为1 m,8#孔土工试验进行了两次取样,起始深度分别为1 m和2 m,压缩模量分别为4.27 MPa和6.27 MPa。

a. 地基各分层中点的附加应力 ΔP

第一层:K2+440地基第一层以上路堤中心高度约为32.93 m,路堤填料重度取18 kN/m³, $\Delta P_1=32.93 \times 18=592.74$ kPa;

第二层:K2+440地基第二层以上路堤中心高度约为32.93+1 m,路堤填料重度取18 kN/m³, $\Delta P_2=33.93 \times 18=610.74$ kPa;

b. 地基主固结沉降

$$S_e = [(592.7/4.27) \times 1] + [(610.7/6.27) \times 1] = 236.2 \text{ mm};$$

c. 地基总沉降

由 $S=m_s \times S_e$ 计算地基总沉降:

$$\text{沉降系数: } m_s = 0.123\gamma^{0.7}(\theta H^{0.2} + \nu H) + Y = 0.123 \times 18^{0.7} \times (0.9 \times 16.465^{0.2} + 0.005 \times 16.465) + (-0.1) = 1.44;$$

$$S = 1.44 \times 236.2 = 340 \text{ mm} = 0.34 \text{ m}$$

d. 地基工后沉降 S_p 计算

按照 $S_p=S_o-S_{cp}$ 公式,通过沉降观测数据得到地基施工期沉降 S_{cp} 后,即可推算地基工后沉降值 S_p 。2022年10月19日陆续进行高填方路基施工,在回填前共设置了7处原地表沉降监测点,原地表沉降监测频率为每填筑一层或者不大于3 d,2024年1月3日原地表沉降趋于稳定,原地表沉降观测数据汇总于表1。其中K2+450左侧累计沉降量为106 mm,K2+450右侧累计沉降量为126 mm。推算K2+440中心处施工期地基沉降 $S_{cp}=(106+126)/2=116$ mm,推算地基工后沉降 $S_p=S_o-S_{cp}=340-116=224$ mm。

表1 原地表沉降观测数据汇总表

沉降观测点位置	原地表高程/m	填方高度/m	沉降观测开始时间	累计沉降/mm
K2+350左侧	138.562	26.621	2023/2/19	86
K2+450左侧	132.44	36.397	2022/10/19	106
K2+450右侧	135.526	35.882	2022/11/10	126
K2+550左侧	140.082	32.898	2022/10/28	109
K2+550右侧	138.922	32.597	2022/11/21	109
K2+650左侧	149.712	26.908	2022/11/7	86
K2+650右侧	152.431	22.732	2023/1/3	74

2.3 路基工后沉降预测

(1)路基工后沉降预测方法

常用路基沉降预测方法有双曲线法、传统三点法、指数曲线法、三点修正指数曲线法等。本工程利

用工后沉降监测数据,在指数曲线法基础上拓展,采用三点修正指数曲线法进行预测。

指数曲线法的基本方程为

$$S_t = S_{\infty} - (S_{\infty} - S_0)e^{\frac{(t-t_0)}{\eta}} \quad (4)$$

式中: S_0 为 t_0 时刻的沉降量; S_t 为 t 时刻的沉降量; S_{∞} 为最终沉降量; η 为待定常数。

在三点修正指数曲线模型图上取 (t_1, S_1) , (t_2, S_2) , (t_3, S_3) 三点,要求 $S_1 < S_2 < S_3$, $S_2 - S_1 > S_3 - S_2$, $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$,假定 $t_1 = t_0$,然后把这三点代入式(4)可得

$$\begin{aligned} S_2 &= S_{\infty} - (S_{\infty} - S_1)e^{\frac{t_2 - t_1}{\eta}} \\ S_3 &= S_{\infty} - (S_{\infty} - S_1)e^{\frac{t_3 - t_1}{\eta}} \end{aligned} \quad (5)$$

进而可以求得

$$S_{\infty} = \frac{S_2^2 - S_1 S_3}{2S_2 - S_1 - S_3} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\Delta t}{\ln \frac{S_{\infty} - S_1}{S_{\infty} - S_2}} \quad (7)$$

将求得的 S_{∞} 和 η 的值代入式(4)可以求得任意时刻的沉降量。

(2) 路基工后沉降预测

路堤填筑体表面沉降监测位置设置原则为与原地基监测断面基本保持一致,以得到填筑体和对应原地基的总沉降量,进而厘清填筑体的压缩量;同时兼顾结构物相邻段、填挖交界段处的监测。本项目工后沉降监测点设置在原地基断面4处桩号处和增设填挖交界K2+270、K2+835两处,沉降观测点横断面设置在两侧路肩及路堤中心处附近。路基顶层沉降观测在路基填筑完成第一个月内每3 d观测一次,第二个月至第三个月每7 d观测一次,第四个月起至路面铺筑前,每半月观测一次。

路面铺筑时间应在沉降稳定后进行,采用双标准控制:一是要求推算的工后沉降量小于容许值;二是要求预留1个雨季或6个月以上的沉降期,并且连续两个月观测的沉降量每月不超过5 mm。

a. 工后沉降容许值判定

按照《公路路基设计规范》要求,一级公路工后沉降量容许值应满足涵洞处不大于0.20 m,一般路段不大于0.30 m。从表2数据看,预测工后沉降最大点为K2+451处为161 mm<200 mm。

b. 月度沉降容许值判定

施工完成后设置的18处工后沉降观测点在7、8月份雨季期间,沉降值较大,其他月份测量沉降值较

表2 路基顶层沉降数据汇总及工后沉降预测表

位置	月度累计沉降数据/mm					累计沉降/mm	预测工后沉降值/mm
	6月	7月	8月	9月	10月		
K2+270	10	16	17	17	17	17	37
K2+351	10	16	16	17	19	19	76
K2+451	14	21	23	25	29	29	161
K2+551	11	17	22	22	24	24	50
K2+651	12	16	22	23	25	25	64
K2+835	12	16	16	16	16	16	57

小,9、10月连续两个月沉降值均小于5 mm。

3 高填方路基沉降监测数据分析

3.1 施工期原地表沉降监测数据分析

2022年10月19日陆续进行高填方路基施工,在回填前共设置了7处原地表沉降监测点,分别位于K2+350、K2+450、K2+550、K2+650左侧、右侧路肩,并根据要求进行沉降观测,原地表沉降监测频率为每填筑一层或者不大于3 d。

从原地表沉降观测数据分析得出,原地表沉降值与原地表土层覆盖厚度、填筑体高度线性相关,施工初期随路基填筑附加荷载增加,原地基沉降值较大,经过一个雨季后,沉降基本趋于稳定,沉降稳定时间趋于一致,沉降稳定周期非线性相关。施工期原地基最大沉降值为126 mm,根据分层总和法推算的原地基总沉降值为340 mm,推算原地基工后沉降为224 mm,推算地基总沉降值明显偏大。

3.2 施工期分层沉降监测数据分析

为控制高填路基沉降,保证路基稳定性,施工时对填土高度大于20 m路段设置分层沉降观测点。观测频率:每填筑一层填料进行一次观测。如果两次填筑间隔时间较长,每3 d观测一次。路堤填土速率:路堤中心沉降量每昼夜不得大于5 mm,边桩位移量每昼夜不得大于5 mm,并以水平控制为主。

根据路基施工进度分3次共设置了9处分层沉降观测点,沉降板分别设置在已填筑路基高度11.51~29.14 m处,后期相应新增回填路基高度4.31~22.13 m,分层沉降数据汇于表3。

通过观测沉降数据及K2+490右侧分层沉降曲线见图1,可以看出,受回填路基自身重力及上部回填料的荷载压力,以及原地基沉降的叠加效应,导致前期路基分层沉降较大,同一时期设置在不同路基填筑高度的沉降值与路基高度非线性相关。2023年7月中旬至9月上旬雨季期间沉降数值较大,个别观测点出现每月10 mm以上的沉降值,沉降速率2.68 mm/d,但小于预警值5 mm/d。10月中旬以后路

表3 分层沉降数据汇总表

序号	位置	分层沉降 路基填高/ m	后期回填 路基高度/ m	沉降稳定 时间/d	累计沉 降值/mm
FC1	K2+390左	11.76	12.14	370	172
FC2	K2+420右	11.51	11.46	392	252
FC3	K2+450左	15.31	13.32	316	187
FC4	K2+490右	12.67	22.13	330	341
FC5	K2+430左	24.37	11.25	323	164
FC6	K2+430右	23.12	9.41	336	197
FC7	K2+560左	19.24	12.14	270	168
FC8	K2+560右	18.35	11.22	338	190
FC9	K2+440中	29.14	4.54	170	22

基沉降速率出现降低趋势,随着路基填筑完成,在2024年5月至7月分层沉降值基本趋于稳定,至2024年10月底沉降值基本无变化。

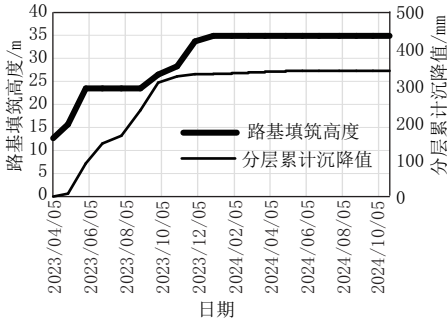


图1 K2+490右侧分层沉降曲线图

3.3 顶层工后沉降监测数据分析

本项目路基顶层沉降监测点在原地基断面和增设填挖交界 K2+270、K2+835 共设置 18 处,沉降观测点横断面设置在两侧路肩及路堤中心处附近。工后差异沉降汇总见表 4。

表4 工后差异沉降汇总表

位置	填高/ m	累计沉 降/mm	预测工 后沉降/ mm	预测工后 沉降差值/ mm	距离/ m	差异沉 降/‰
K2+270中	1.2	17	3	39	81	0.48
K2+351中	24.22	19	76	85	100	0.85
K2+351中	24.22	19	76	111	100	1.11
K2+451中	33.13	29	161	14	100	0.14
K2+551中	31.53	24	50	37	184	0.20
K2+551中	31.53	24	50			
K2+651中	25.47	25	64			
K2+651中	25.47	25	64			
K2+835中	1.2	13	57			

通过路基顶层工后沉降数据表2可以看出,在7、8月份雨季期间,沉降值较大,其他月份测量沉降值较小,9、10月连续两个月沉降值均小于5mm,预

测工后沉降最大值161mm<200mm(规范要求),观测点工后沉降值基本收敛。从预测工后差异沉降分析,沿路线纵向差异沉降最大值在高填方路基之间为1.11‰<1.5‰(规范要求),填挖交接处差异沉降分别为0.48‰、0.2‰均小于1.5‰。因此,综合判定本工程高填方区基本进入沉降稳定阶段。

4 结 语

(1)未经特殊处理的原地基覆盖土层沉降值较大,土层较薄(不大于3m)时建议挖除,土层较厚(大于3m)时应采取冲击压实、强夯等加固处理措施,最大限度减少原地表沉降。

(2)原地表沉降、土石混填料路基沉降,在汛期因土体固结沉降值显著增大,工后沉降稳定期至少经过一个雨季很有必要。

(3)高填方底部路基一般较宽,横向不能同时施工时,若施工搭界处理不当,造成横向差异沉降较大,容易产生纵向裂缝,应尽量避免。不可避免时建议延长自重沉降稳定期1a以上,待沉降稳定后再进行路面施工。同时高填方段在路床顶增设土工格栅及级配碎石柔性结构层能够较好的防止反射裂缝的发生。

(4)土石混填料高填方路基采取分层振动压实,每2m进行冲击压实的施工技术,有助于加快路基的沉降固结,能够有效减少路基自身的工后沉降。

参考文献:

[1] JTG D30—2015,公路路基设计规范[S].
[2] JTG/T D31-02—2013,公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S].
[3] JTG/T 3610—2019,公路路基施工技术规范[S].
[4] MH/T 5027—2013,民用机场岩土工程设计规范[S].
[5] 王春梅.土石混填高填方路基工后沉降变形规律分析[C]//北京:全国公路科技创新高层论坛,2008.
[6] 孙学姿.山区公路高填方路基设计要点分析[C]//北京:2024工程技术与施工管理论坛,2024.
[7] 杨壮.山区高填方土石混填路基变形及稳定性研究[D].西安:长安大学,2021.
[8] 范玉俊.高填方路基沉降分析与控制研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
[9] 胡艳琼,康惠,李鸿洁.山区高填方路基稳定性监测分析与预测[J].福建交通科技,2023(9):6-9.
[10] 吴永妍.公路高填方路基沉降分析与预测[J].西部交通科技,2023(12):93-94;137.
[11] 常洲,程小强,张留俊,等.基于三点修正曲线模型的软岩高填路堤沉降预测[J].公路交通科技,2022,39(5):33-40.
[12] 袁定辉,尹利华,张超,等.基于曲线拟合的路基沉降预测方法的稳定性分析[J].路基工程,2020(5):74-78.
[13] 刘刚.高填方路基工后沉降预测与控制措施[J].工程技术研究,2021,6(23):163-166.

(下转第216页)