

黄土沟谷区高填方路堤沉降规律试验研究

蒋再敏, 万紫艳

兰州交通大学, 土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年4月27日; 录用日期: 2022年5月12日; 发布日期: 2022年5月25日

摘要

依托通定高速ZK61 + 880~ZK61 + 960黄土沟谷区高填方段, 对修筑在该段的高填方路堤开展现场试验, 监测路堤的温湿度与沉降变化情况, 并对沉降规律与沉降影响因素进行了分析。监测结果表明: 强降雨天气能影响路堤浅层土体含水率而影响沉降; 路堤在长期低温状态下浅层土体会出现轻微隆起现象; 路堤的沉降主要来源于填筑体的沉降, 且沉降量受到地形与填土高度的影响; 填土层从下到上单位厚度的沉降量依次增加; 填方高度与填筑体沉降速率线性相关。

关键词

黄土高填路堤, 现场实验, 沉降规律

Experimental Study on Settlement Law of High Fill Embankment in Loess Gully Region

Zaimin Jiang, Ziyang Wan

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 27th, 2022; accepted: May 12th, 2022; published: May 25th, 2022

Abstract

Relying on the high fill section of the ZK61+880~ZK61+960 loess valley area of Tongding Expressway, field tests were carried out on the high fill embankment built in this section to monitor the temperature, humidity and settlement changes of the embankment, and factors to determine the settlement law and settlement effect were analyzed. The monitoring results show that: heavy rainfall weather can affect the water content of the shallow soil of the embankment and affect the settlement; the shallow soil of the embankment will slightly bulge under the long-term low tempera-

ture state; the settlement of the embankment mainly comes from the settlement of the filling body, and the settlement amount affected by topography and fill height; the settlement of the fill layer per unit thickness increases sequentially from bottom to top; the fill height is linearly related to the settlement rate of the fill.

Keywords

Loess High Fill Embankment, Field Experiment, Settlement Law

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

西北黄土地区的基础设施建设开展得如火如荼,在推进基础建设的过程中,“填沟筑路”的情况越来越普遍,因此出现了大量的高填方工程。这些高填方工程造价经济,可以就地取材,能有效的降低建设成本,缩短工期。以定西市通定高速为例,在通定高速的建设中,有些路段需要跨越较深的沟谷,路堤的填方高度可达到数十米。路堤填方高度较高时,往往会伴随着沉降量过大与不均匀沉降的问题[1]。目前关于高填路堤沉降的相关研究多以数值模拟[2] [3]、离心模型试验[4] [5]以及压缩蠕变试验[6] [7]为主,而通过现场实验探究黄土高填路堤沉降规律的相关研究较少。影响路堤沉降的因素很多,如填料性质[8]、填土高度、地形约束等。本文以通定高速某沟谷区修筑的高填路堤作为研究对象,在该路堤上开展现场实验,监测路堤填料温湿度、沉降量等随时间的变化情况,分析其沉降影响因素,以探究黄土沟谷区高填路堤沉降规律,从而为类似的工程提供有参考价值的试验数据。

2. 工程背景

通定高速起于通渭县平襄镇安堡村,止于安定区称钩驿镇,线路长度为 115 公里。线路主要处于黄土塬区,区段内风成黄土分布广泛,沟壑纵横,地形破碎,水系树枝状发育,地形地貌复杂。线路两边沟谷发育,在设计流量较小的情况下,部分黄土冲沟仍然出现较深的底部冲切。在工程建设过程中以桥梁为跨越沟谷的主要方式,但受限于路线纵坡的设计要求,ZK61+880~ZK61+960 段需要修建高填方路堤来跨越一个“U”形沟谷,该路堤最大填土高度为 27.7 m。路堤采用折线形边坡,边坡高度在 8 m 以内时,边坡比为 1:1.5,边坡高度超过 8 m 时,边坡比为 1:1.75。

3. 现场试验

3.1. 总体试验方案

依托通定高速 ZK61+880~ZK61+960 高填方段,选定两个试验断面,A#断面(ZK61+900 左侧)和 B#断面(ZK61+950 左侧),埋设相关的监测仪器,包括分层沉降管、单点位移沉降仪、温度传感器、水分传感器等,对该黄土沟谷区高填路堤的温度、湿度和沉降等数据进行实时监测。由于整个高填路堤是从最底部的挡土墙开始逐渐往上填筑,所以监测仪器埋设的顺序是先在 1 号位置(路堤边坡中部)埋设,接着在 2 号位置(路堤边坡顶部)埋设。在此选定 A#断面(ZK61+900 左侧),绘制仪器布置图如图 1、图 2,其中 1 号位置和 2 号位置埋设的仪器相同,故不重复标出。

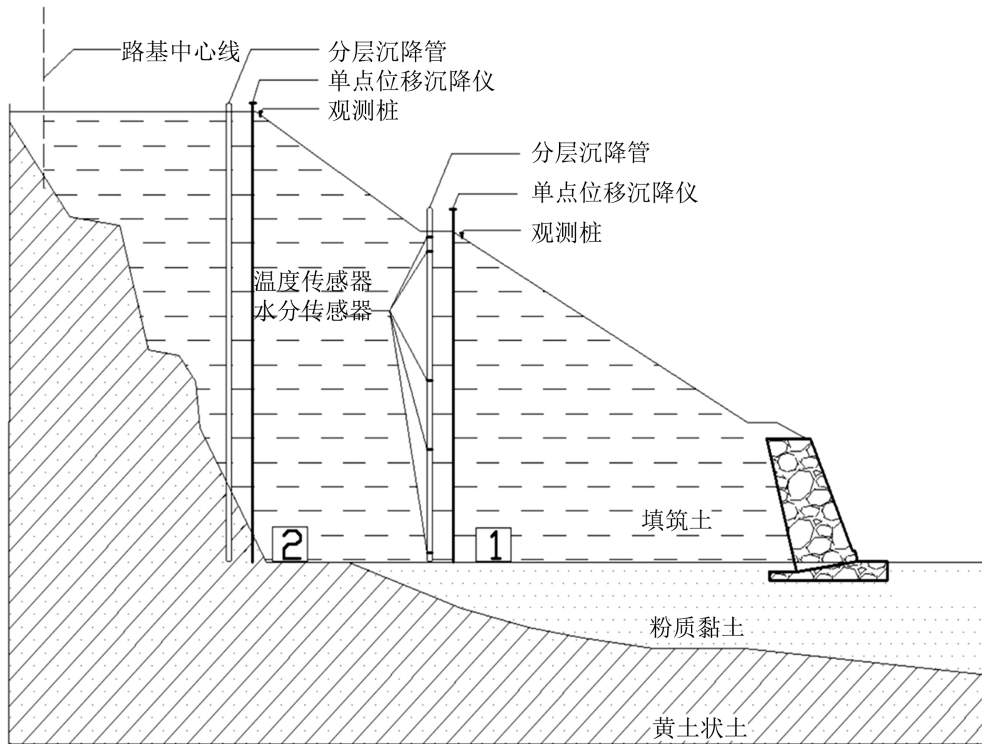


Figure 1. Elevation view of overall monitoring instrument layout of high-filled embankment
图 1. 高填路堤整体监测仪器布置立面图

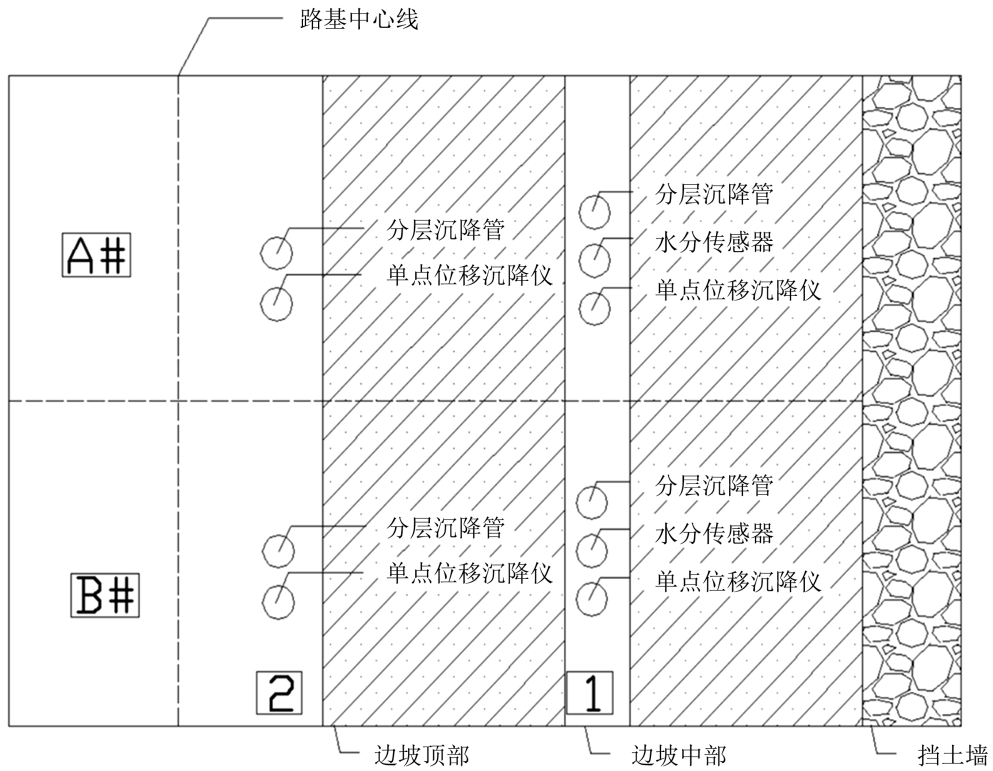


Figure 2. Layout plan of the overall monitoring instrument for the high-filled embankment
图 2. 高填路堤整体监测仪器布置平面图

3.2. 实验过程

为了探究高填路堤温度、含水率和沉降随时间变化的情况, 在路堤深度方向为 1 m、2 m、10 m、20 m 处埋设水分传感器, 深度方向为 5 m、10 m、15 m、20 m 处埋设温度传感器; 在分层沉降管上, 每 1 m 设置一组沉降磁环, 以探究路堤不同填土层的沉降变化情况。

4. 试验结果分析

4.1. 高填方路堤含水率监测

土体含水率升高会改变土体的基质吸力[9], 从而改变土体强度参数影响高填路堤沉降, 因此对路堤进行钻孔取样, 每 1 m 取一个土样进行含水率测定, 共测定 20 组, 绘制出图 3, 同时从 2021 年 1 月开始测量路堤内的含水率随时间的变化, 监测间隔为 2 个月。在 7 月 13、14、15 日, 出现连续强降雨天气, 在雨停后立即测量了一次含水率, 绘制出图 4。

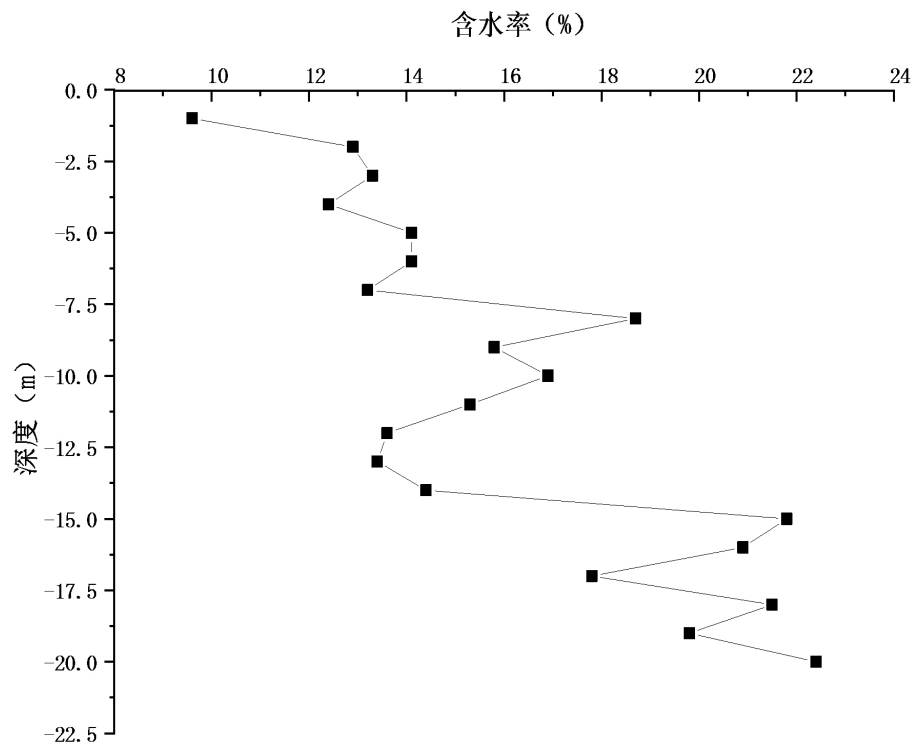


Figure 3. Curve of initial water content of embankment with depth
图 3. 路堤初始含水率随深度变化曲线

从图 3 可以看出, 在路堤深度方向, 含水率逐渐加大, 随深度呈增加趋势。因路堤顶面位置水分蒸发作用较强, 因此该处含水率较小。而路堤底部土层接近地下水含量丰富的位置, 含水量较高。观察图 4 可知, 路堤含水率随着时间变化而变化, 但在深度方向上仍符合初始含水率的分布规律, 即随深度呈整体增加趋势。持续强降雨天气对路基深处土体的含水率影响较小, 而由于路堤表面的雨水无法及时排走, 因此降雨对路堤表面以下 0~2 m 深度范围内土体的含水率影响较为明显, 土层含水率分别升高至 31.2%、25.1%, 尤其是 0~1 m 范围内, 土体含水率相较降雨前增加了 93%, 表明持续降雨仅对高填路堤浅层土体的沉降有影响。

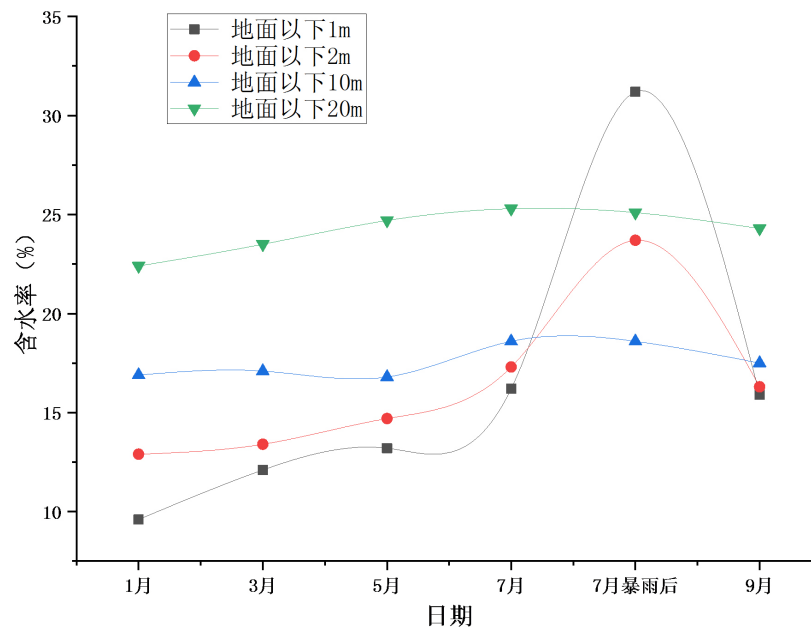


Figure 4. Time-dependent curve of water content of embankment
图 4. 路堤含水率随时间变化曲线

4.2. 高填方路堤温度监测

从 2021 年 1 月 4 号开始监测路堤温度, 绘制出路堤不同深度处的土体温度随时间变化的关系曲线。从图 5 中可以看到, 路堤土体的温度变化趋势与气温变化趋势一致, 但是具有滞后性, 即路堤土体当下的温度与上一段时间的气温高低相关。相较于气温曲线, 路堤土体温度曲线整体上较为平滑, 温度差较小, 在监测时间段内最高温度与最低温度差值不超过 6°C 。

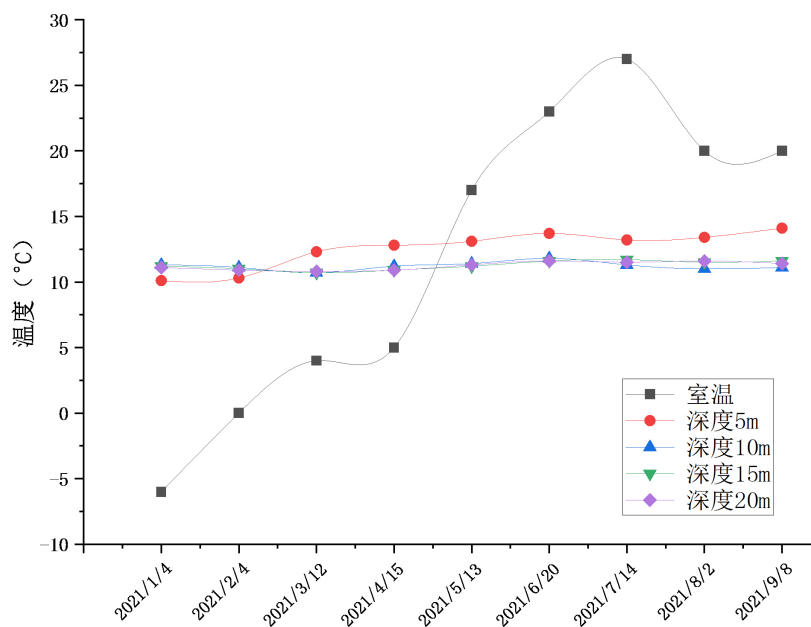


Figure 5. Time-dependent curve of soil temperature of embankment
图 5. 路堤土体温度随时间变化曲线

在路堤深度方向, 深度 5 m 处温度曲线变化幅度比其它深度更大, 10 m、15 m 以及 20 m 处的温度大小值接近, 且变化幅度都很小。同时对比路堤不同深度的温度曲线还可以发现, 在气温比较低的冬季, 越接近地表的土层温度越低, 随着深度的增加土体的温度反而逐渐增加, 超过一定深度范围后, 土体的温度不再增加, 稳定在 11℃ 附近, 可见极度寒冷天气对路堤土体温度的影响范围有限, 因此土中的水不会在较低气温下发生大范围发生冻结, 使得土颗粒移动从而造成路基发生隆起。

4.3. 高填方路堤沉降监测

分别对 A#断面和 B#断面进行时长为 180 d 的沉降监测, 沉降监测结果见表 1。

Table 1. Final settlement displacement value

表 1. 最终沉降位移值

监测位置	填筑高度 (m)	填方体沉降量 (mm)	原地基沉降量 (mm)	总体沉降量 (mm)	原地基沉降占总沉降量比例
A#断面	1 号位置	20.5	2.65	26.88	9.86%
	2 号位置	27	4.67	43.84	10.65%
B#断面	1 号位置	20	2.77	28.93	9.54%
	2 号位置	28	5.05	46.58	10.84%

4.3.1. 工后沉降组成

依据沉降发生的主体分类, 路堤沉降可以分为两部分, 即原地基沉降和填筑体沉降, 分别用 S_1 、 S_2 表示, 总沉降量 $S = S_1 + S_2$ 。以 B#断面为例, 用“-”表示土体向下沉降, 用“+”表示土体向上隆起, 分别作出路堤 1、2 号位置的沉降量随时间的变化曲线如图 6、图 7 所示。

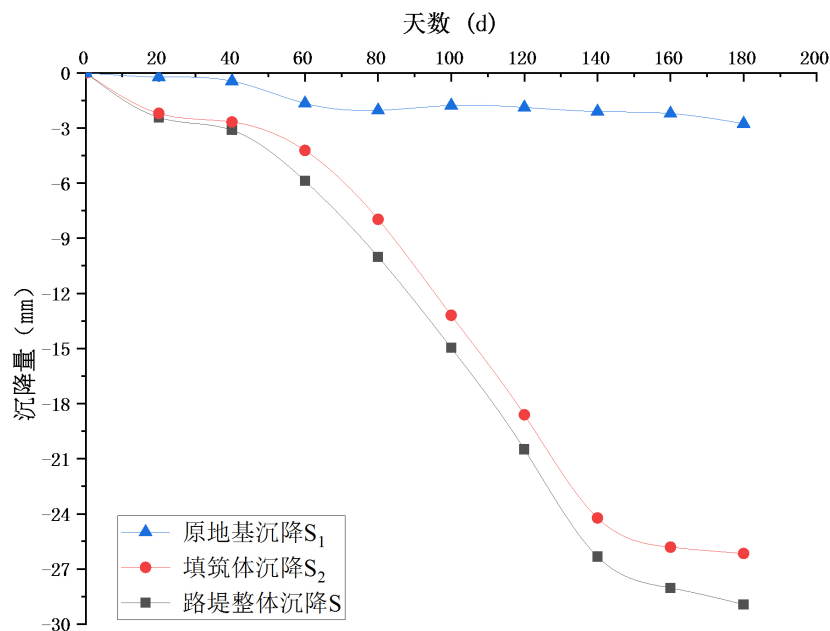


Figure 6. The curve of the settlement of No. 1 position with time

图 6. 1 号位置沉降随时间变化曲线

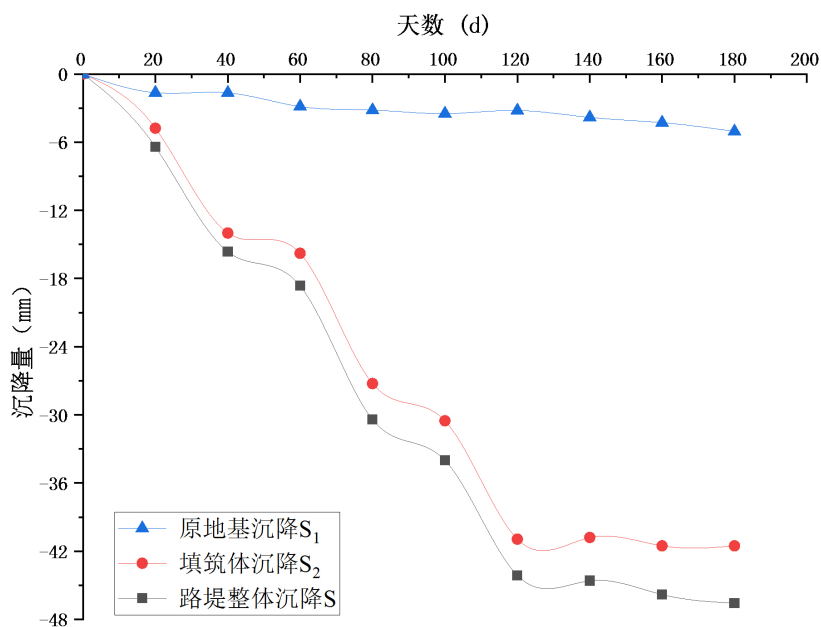


Figure 7. The curve of the settlement of No. 2 position with time

图 7. 2 号位置沉降随时间变化曲线

结合图 6、图 7 和表 1 分析, 填方体在自重作用下发生的压缩沉降是造成工后沉降的主要原因, 约占总沉降量的 90%, 而原始地基的沉降只占到总沉降的 10%左右。同时沉降量受填方高度影响较大, 当路堤的填方高度减小时, 无论是总体的沉降量, 还是原地基沉降占总沉降的比值都会相应减小。从沉降速率来看, 路堤沉降速率总体趋势都是随着时间的变化而由大变小。大约在 180 d 后, 随着高填路堤的土体被逐渐压密, 其沉降速率趋于一个稳定值。

4.3.2. 各土层沉降量规律

为了研究每层土体的沉降变形规律, 以 B#断面 2 号位置为例, 把填土高度为 28 m 的填筑体由下到上分为 4 层, 每层 7 m, 分层情况如图 8, 同时绘出不同土层的单位厚度沉降量与时间的关系图, 在宏观上比较每一层的沉降规律, 见图 9。从图中可以看出, 单位沉降量从土体第四、三、二、一层依次减小, 这与路堤不同土层压缩模量的变化有关。随着填方高度增加, 填筑体从上到下各土层受到的重力也会越来越大, 自重应力也逐渐增加, 使得各土层的固结程度与压缩模量也随之加大。因此第一层的固结压缩程度最高, 其压缩模量也最大, 单位沉降量最小。第二、三、四层的土体压缩模量依次减小, 其单位沉降量依次增大。对比第三、四层土和第一、二层土的最终沉降量, 发现仅三、四层土的沉降量就占到了总沉降量的 67%, 但是其填方高度只占总填方高度的 50%, 可见填方体的沉降, 主要发生在上部土体之中, 再一次证明了填方体上部土体的压缩模量小于下部土体。

在填方体各土层的沉降曲线中可以看出, 各土层单位厚度沉降曲线大体上可以分为两个阶段, 即加速下降阶段(0~100 d)和下降速率趋于平缓阶段(100 d~180 d), 这个特征在第三、四层土中尤为明显。这是因为在 0~100 d, 由于上覆土层在自重作用下, 随着时间增加而被进一步压密; 同时受到路堤表面频繁来往的工程车所带来的行车荷载影响, 而行车荷载对路堤的影响深度在 0~12 m 内, 刚好位于划分的第三、四层土内, 因此可以看到沉降曲线加速下降。在 100 d~180 d, 外部环境逐渐稳定后, 各层土的沉降曲线走向都趋于平稳, 填筑体的沉降也逐渐稳定。同时可以看到, 40 d~60 d 内第四层土单位沉降速率比较平缓, 究其原因, 该段时间恰逢定西项目冬休的时间, 没有施工荷载的作用, 且气温在 0℃以下。而填筑

体浅层土体温度受气温影响较大, 而冬季雨雪相对较多, 此时土体含水率增加, 因此第四层土中的水凝结膨胀, 土体颗粒发生相对移动, 沉降速度减慢, 在对土体进行分层沉降测量时发现 0~2 m 范围内的土层有轻微向上隆起的现象, 60 d 后冬休结束, 气温升高, 沉降继续发生。

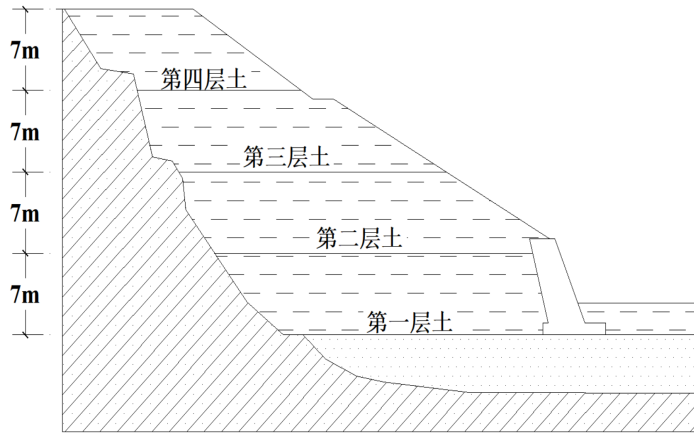


Figure 8. Schematic diagram of soil layer stratification
图 8. 土层分层示意图

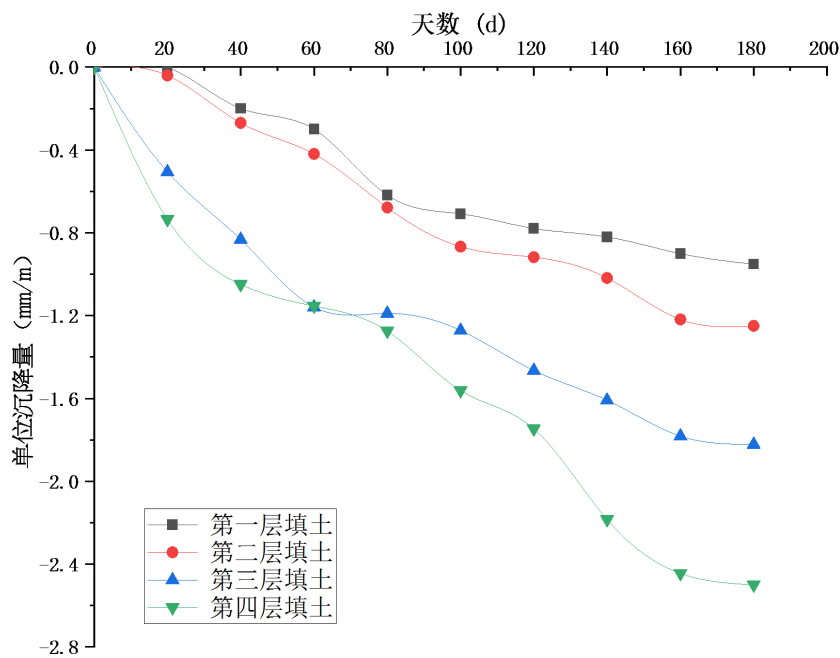


Figure 9. Settlement per unit thickness of each soil layer
图 9. 各土层单位厚度沉降量

4.3.3. 路堤沉降与填筑高度关系

从表 1 可知, 填土高度越大, 路基总沉降量、填筑体沉降量以及原地基沉降占总体沉降的比例也会越高。令 Y 为填方体的平均沉降速率, X 为填土高度, 对 Y 和 X 进行线性拟合, 结果如图 10。

从图中可知, 填方体的平均沉降速率 Y 与填土高度 X 可用关系式 $Y = 0.01319X - 0.11192$ 来描述, 两者呈高度线性相关, 得到拟合线性相关系数 $R^2 = 0.97389$ 。

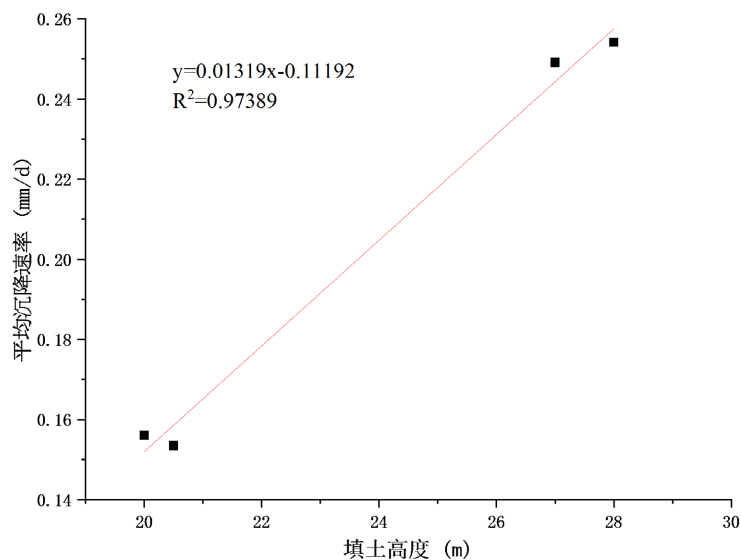


Figure 10. Y-X fitting function

图 10. Y-X 拟合函数

4.3.4. 路堤沉降与地形关系

本高填路堤修筑于一个“U型”沟谷区,对于A#、B#断面的1号位置,其有着相同的施工工艺与施工条件,由同一个施工队在同一时间施工,但其最终沉降量有所不同,如图11。在B#断面的填方高度比A#断面少0.5 m的情况下,B#断面的沉降量仍比A#断面多7.6%。依据勘测资料绘出地形与测孔布置位置如图12,发现两个断面所处的位置在地形上有所区别,B#断面填筑在有一定坡度的斜坡上,填筑的土体会在斜坡方向有一定量的侧向位移,使得沉降量加大。而A#断面处在一个类似于槽型的沟中,陡峭的侧壁限制了土体的侧向位移,因此沉降量较小。B#断面由于侧向位移较大,土体受剪应力影响向水平方向膨胀,从而产生了附加沉降,因此沉降量较大。对比两个断面的沉降量可知,地形因素可以对填筑体工后沉降量产生较大的影响。

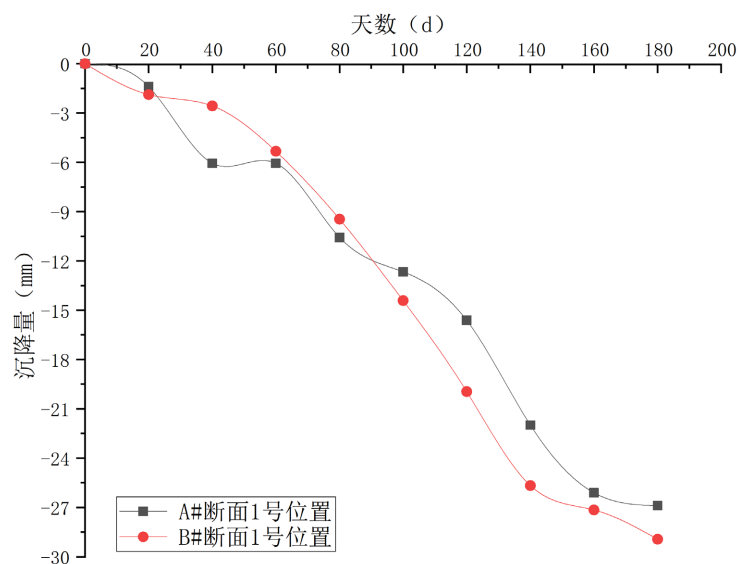


Figure 11. Comparison of settlement at No. 1 position of section A# and B#

图 11. A#、B#断面 1 号位置沉降量对比

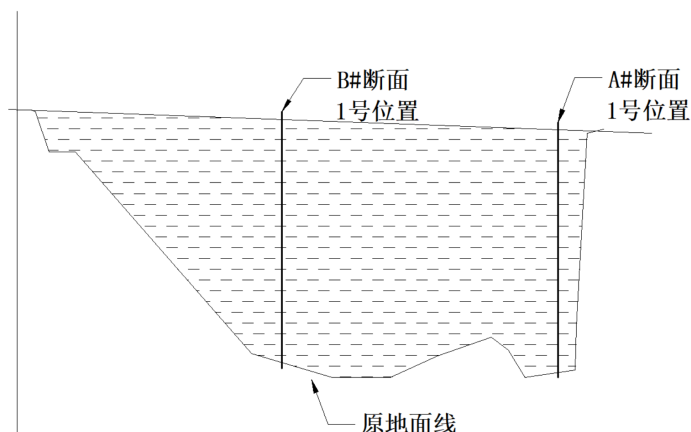


Figure 12. Cross-sectional view of topography and measuring point locations
图 12. 地形与测点位置横断面图

5. 结论

- 1) 当出现连续强降雨天气, 黄土高填路堤 0~2 m 深度范围内土体沉降受降雨影响明显。
- 2) 气温对路堤土层温度的影响程度沿路堤深度方向逐渐降低, 若路堤长期处于 0℃ 气温以下, 其浅层土体会出现轻微向上隆起的现象, 解冻后路堤继续发生沉降。
- 3) 路堤工后沉降主要来自于填筑体自身的压缩沉降, 原始地基沉降仅占总沉降的十分之一; 若把路堤的填筑体从下到上分为 4 层, 每层土的单位沉降速率从下到上依次增大, 沉降速率在 100 d 后逐渐趋于稳定。
- 4) 路堤的工后沉降量受填土高度影响较大, 当路堤填筑的高度减小时, 总体的沉降量以及原地基沉降量占总沉降量的比值都会相应减小; 填土高度和填方体的沉降速率呈高度线性相关关系。
- 5) 地形对沉降量有着明显的影响, 陡峭的侧壁会约束填筑体的侧向位移, 减小土体的剪切应力从而减小最终沉降量。

参考文献

- [1] 郑治, 曾忠. 西部地区高填方路堤沉降病害调查与分析[J]. 公路交通科技, 2005(S2): 111-114.
- [2] 赵丽芳, 邹恩杰, 罗烈日. 黄土地区高填方路堤稳定性数值模拟研究[J]. 公路, 2013, 58(12): 22-27.
- [3] 吴俊, 陈开圣, 龙万学. 高填方路基沉降变形有限元数值模拟[J]. 公路工程, 2009, 34(2): 27-29+33.
- [4] 梅源, 胡长明, 魏弋峰, 等. Q₂、Q₃ 黄土深壑中高填方地基变形规律离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3473-3481.
- [5] 张军辉, 黄湘宁, 郑健龙, 等. 河池机场填石高填方土基工后沉降离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 773-778.
- [6] 罗汀, 姚仰平, 蔡东艳. 黄土蠕变的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995(3): 304-308.
- [7] 刘宏, 李攀峰, 张倬元. 用压缩蠕变试验研究高填方体沉降变形[J]. 西南交通大学学报, 2004(6): 749-753.
- [8] 王金明, 陈昌彦, 张建坤, 等. 不同类型填方路基沉降监测及沉降分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(1): 61-64+73.
- [9] 海龙, 梁冰. 考虑降雨入渗条件的土体边坡稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 46-50.