

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211203001

文章编号: 1674-599X(2023)02-0001-07

引用格式: 付宏渊, 刘忠伟, 邱祥, 等. 红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 1-7, 15.

Citation: FU Hongyuan, LIU Zhongwei, QIU Xiang, et al. Study on post construction settlement deformation of filling and excavation junction section of red clay embankment[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 1-7, 15.

红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形研究

付宏渊¹, 刘忠伟¹, 邱祥¹, 罗震宇²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙市公路桥梁建设有限责任公司, 湖南 长沙 410017)

摘 要: 为探究多种因素作用下红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形规律, 对红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形进行数值模拟, 分析不同分层台阶厚度、分层台阶宽度、含水率等因素对红黏土路堤填挖交界段顶面工后沉降变形的影响规律。研究表明: 各因素对路堤填挖交界段顶面工后沉降变形的影响程度为: 分层台阶厚度 > 含水率 > 分层台阶宽度。分层台阶厚度与顶面工后沉降变形峰值呈正相关; 含水率越大, 路堤顶面工后沉降变形峰值越大; 随着分层台阶宽度的增加, 路堤顶面工后沉降变形峰值基本一致; 路堤工后整体变形峰值出现在填方段的中部, 工后整体变形峰值与分层台阶厚度呈正相关。该结论可为红黏土路堤施工与变形控制提供参考。

关键词: 填挖交界段; 数值模拟; 红黏土路堤; 工后沉降变形

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Study on post construction settlement deformation of filling and excavation junction section of red clay embankment

FU Hongyuan¹, LIU Zhongwei¹, QIU Xiang¹, LUO Zhenyu²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Changsha Road and Bridge Construction Co., Ltd., Changsha 410017, China)

Abstract: To investigate the deformation law of post-construction settlement of red clay embankment fill-excavation junction section under the action of various factors, numerical simulation of post-construction settlement deformation of red clay embankment fill-excavation junction section was carried out. The effect of various factors such as thickness of stratified step, width of stratified step and moisture content on the post-construction settlement deformation of the top surface of the red clay embankment fill-excavation junction section was studied. The results show that the influence of post-construction settlement deformation on the top surface of the embankment fill-excavation junction section is in descending order of thickness of stratified step, water content, and width of stratified step. The thickness of the stratified steps is positively correlated with the peak value of post-work settlement deformation of the top surface. The peak value of post-construction settlement deformation of the top surface of the embankment remains consistent with the increase of the width of the layered steps. The higher the water content, the higher the peak of post-construction settlement deformation at the top surface of the embankment. The peak of the overall post-construction deformation of the embankment appears in the middle of the fill section, and the peak of the overall post-construction deformation is positively correlated with the thickness of the stratified steps. The research results can provide reference for construction and deformation control of red clay embankment.

收稿日期: 2021-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51838001, 52078066, 51908073); 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升”项目(SJCX202018)

作者简介: 付宏渊(1965—), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

Key words: the filling and excavation junction section; numerical simulation; red clay embankment; post-construction settlement deformation

红黏土在中国湿热的南方广泛分布,具有高液限、高孔隙比、低压缩性等特点。红黏土作为路堤填料,理论上符合中国公路路基设计规范,但在气候复杂的环境中,这类路堤在道路运营期内常出现不均匀沉降、变形破坏等现象,导致路面开裂,严重影响交通安全,降低行车舒适感^[1]。因此,研究红黏土路堤沉降变形具有重要的工程实践意义。

针对路堤沉降变形在施工期和运营期的不同规律和监测方法,国内外学者进行了大量的研究。数值模拟法和现场监测是在施工期阶段研究路堤沉降变形的�主要方法^[2-3],两者的监测部位一般仅考虑施工填筑区域。叶至韬等^[4]以自密实水泥土作为路堤填料,分析路堤坡率、土工格栅等因素对路堤沉降的影响。李敬德^[5]基于室内土工试验,建立有限元数值模型,分析路堤横纵断面不均匀沉降控制效果。刘汉龙等^[6]通过模型试验探索了平行隧道间距、土体损失率、埋深等要素对地表沉降的影响规律。MUHAMMED等^[7]通过数值模拟方法研究铁路路基沉降规律,发现初始孔隙比、渗透系数和固结度对改性后软土的沉降量均有较大影响。ZHENG等^[8]建立了超固结土的弹黏塑性本构模型,并利用有限元软件对超固结土三轴蠕变试验进行模拟分析,发现高填方路堤的最大沉降层可能不会出现在路堤顶部或底部。施工期的路堤沉降观测时间长,而运营期内的沉降变形易受外界干扰且耗资较大,难以进行。目前,研究路堤沉降变形的�主要方法有动态预测法和静态预测法。姚仰平等^[9]根据有限沉降数据论证蠕变沉降,用算法来预测高速铁路基长期变形的规律。谢宇航等^[10]采用GM(1,1)和Verhulst两种灰色系统模型对沉降数据进行建模分析,确定两种模型的适用预测时间。灰色模型能有效地确定变形预测时间,但模型的精度有待提高。曹文贵等^[11]在现有沉降组合模型预测方法的基础上,提出了关于度量实测沉降数据新旧程度的新鲜度函数分析模型,通过工程实例验证该模型的合理性与优越性。还有学者利用数学方法^[12-14]、统计学原理^[15-17]和组合预测法^[18]对路堤沉降变形进行分析与预测。这些研究成果主要根据

不同因素对路堤变形的影响进行了分析,对路堤变形监测也取得突破性进展,但有关红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形等方面的研究鲜见。因此,本研究拟采用数值模拟方法,分析分层台阶厚度、分层台阶宽度和含水率等因素对红黏土路堤填挖交界段顶面沉降变形与工后整体变形的影响,得到红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形规律,为红黏土路堤施工与变形控制措施的制定提供参考。

1 路堤填筑方法及模型建立

1.1 工程概况及计算工况

为研究分层台阶厚度、分层台阶宽度、含水率等因素对红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形的影响,本研究以湖南省浏阳市集里-蕉溪公路工程为实例,该地属于亚热带季风湿润气候区域。该路线起于浏阳市集里街道,止于蕉溪乡G319,与浏阳蕉溪至黄花机场公路起点对接。该工程项目的K2+390—K2+550填方路堤,全长为160 m,路基宽度为2×30 m,采用I级公路标准设计。

该路堤总长度为40 m,采用分层填筑方法进行填筑,填筑层数为5,填挖交界处呈阶梯状,路堤纵断面如图1所示。图1中, L 、 H 分别为路堤填挖交界段长度、深度。采用ABAQUS软件对该路堤填挖交界段进行数值模拟。

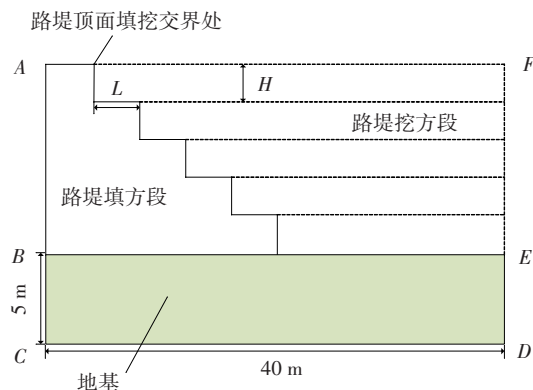


图1 路堤几何模型

Fig. 1 Geometric model of the embankment

本研究分别考虑分层台阶厚度、分层台阶宽度和土体含水率这3种因素,采用只允许某一个因素

变化,而控制其他因素不变的方法,共设置了3种计算工况,见表1,分析这些因素对红黏土路堤填挖交界段工后沉降变形的影响,

1.2 计算参数确定

根据文献[19-20],在现场取具有代表性的天然状态下的土样进行击实试验、液塑限试验,测量该红黏土物理参数,结果见表2。红黏土填料含水率与弹性模量之间的关系通过不同含水率条件下的排水固结三轴压缩试验得到。路基土、路堤填土均采用完全排水方式,采用 Mohr-Coulomb 模型进行数值模拟,土体相关计算参数见表3。

1.3 模型的建立

根据表3、各影响因素和路堤各部位的土体荷载值,建立各工况下的分析模型,如图2所示。由于只考虑了路堤填土竖向沉降变形的影响,约束模型底部CD沿x、y方向位移和两侧AC、FD沿x方向位移。利用ABAQUS软件中的Standard模块对其进行分析,并对模型进行后处理。路堤模型划分为4 422个结点与4 256个单元,数值模型的网格划分如图2所示。

Table 1 Calculated working conditions				
工况	分层台阶厚度/m	总厚度/m	分层台阶宽度/m	土体含水率变化情况/%
工况一	0.2	1	3.6	15.5~33.1
	0.4	2	3.6	15.5~33.1
	0.6	3	3.6	15.5~33.1
	0.8	4	3.6	15.5~33.1
	1.0	5	3.6	15.5~33.1
工况二	0.6	3	1.2	15.5~33.1
	0.6	3	2.4	15.5~33.1
	0.6	3	3.6	15.5~33.1
	0.6	3	4.8	15.5~33.1
	0.6	3	6.0	15.5~33.1
工况三	0.6	3	3.6	15.5~19.4
	0.6	3	3.6	15.5~24.3
	0.6	3	3.6	15.5~28.7
	0.6	3	3.6	15.5~33.1

注:“15.5%~33.1%”是指土体含水率从15.5%升高至33.1%。

Table 2 The physical parameters of red clay filler							
天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	孔隙率	饱和含水率/%
20.51	33.10	19.30	13.80	1.78	15.50	0.80	48.30

Table 3 The calculation parameters of soil mass				
属性	含水率/%	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
填方段土体	33.10	12	0.33	25.15
	28.70	18	0.30	23.30
	24.30	24	0.26	21.40
	19.40	30	0.24	19.60
	15.50	36	0.22	17.50
挖方段土体	18.21	32	0.23	20.73
地基土体	15.50	36	0.22	18.00

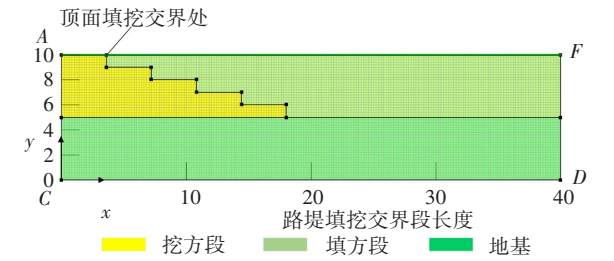


图2 网格划分(单位:m)
Fig. 2 Divided grid(unit:m)

2 模拟结果与分析

2.1 分层台阶厚度对沉降变形的影响

路堤土体含水率为15.50%,在不同分层台阶厚度下,路堤顶面沉降量随路堤长度的变化规律如图3所示。从图3可以看出,当路堤分层台阶厚度大于0.4 m时,在路堤长度为左侧0.0~3.6 m的范围内,路堤沉降量出现正值。在路堤长度为3.6~20.0 m的范围内,路堤沉降量随路堤长度增加逐渐增大;在路堤长度20.0 m处,路堤沉降量达到峰值;在路堤长度为20.0~40.0 m内,路堤沉降量基本保持稳定。当路堤分层台阶厚度分别为0.2、0.4 m时,路堤沉降量随路堤长度的增加无明显变化。出现这种变化的原因主要是:①随着分层台阶厚度的增加,

填方路段土体自重增大,侧向应力增大,而路堤挖方段土体自身重力不变,填方路段土体与挖方段土体相互挤压,导致路堤挖方段沉降量在路堤长度为0.0~3.6 m处出现正值。② 填方段每层土体厚度均增加,路堤总厚度增加,其每层土体自身重力增大,路堤顶面沉降量增大。③ 路堤长度为20.0~40.0 m处于填方段,在同一分层台阶厚度下,填方路段土体自重不变,导致路堤顶面沉降量不发生变化。因此,路堤长度为20~40 m的沉降量基本保持稳定。

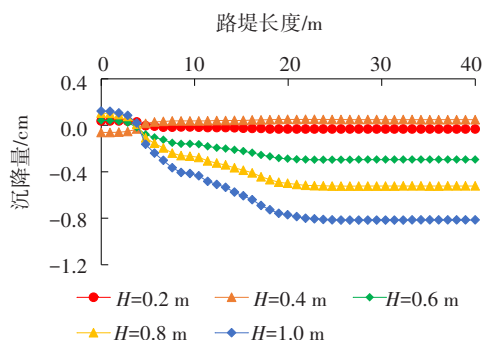


图3 各分层台阶厚度的路堤顶面沉降量随路堤长度分布
Fig. 3 The relationship between the top surface settlement of embankment and the length of embankment under different the thickness of stratified steps

分层台阶厚度与沉降峰值之间的关系如图4所示。其中, y 是沉降变形峰值, R^2 代表拟合相关性系数。从图4可以看出,沉降峰值随着分层台阶厚度增加而逐渐增大,分层台阶厚度与沉降变形峰值的关系可以用一次函数来表示,该拟合曲线的相关系数为0.948 5,拟合效果良好。当分层台阶厚度为0.2 m时,顶面的工后沉降变形峰值为-0.03 cm。当分层台阶厚度为1.0 m时,顶面的工后沉降变形峰值为-0.82 cm,沉降变形量增大了约96.00%。这表明:分层台阶厚度对路堤沉降变形影响较大。

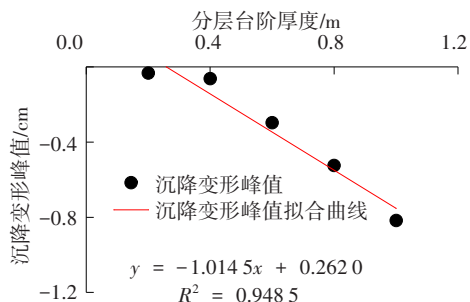


图4 分层台阶厚度与沉降变形峰值之间的关系
Fig. 4 The relationship between the thickness of stratified steps and the peak value of settlement deformation

2.2 分层台阶宽度对沉降变形的影响

路堤土体含水率为15.50%,不同分层台阶宽度时,路堤顶面沉降量随路堤长度的变化规律如图5

所示。从图5可以看出,在路堤长度 $x=0$ m处,其沉降量正值随着分层台阶宽度增大而逐渐减小,从路堤左侧至顶面填挖交界处,沉降量正值逐渐减小,最终在填挖交界处减小至零。在填方路段,路堤顶面沉降量的绝对值沿填方路段先增大,后分别在距离路堤顶面填挖交界面4.8、9.6、14.4、19.2、24.0 m处趋于稳定,达到工后沉降变形峰值。分层台阶宽度与沉降峰值关系如图6所示。

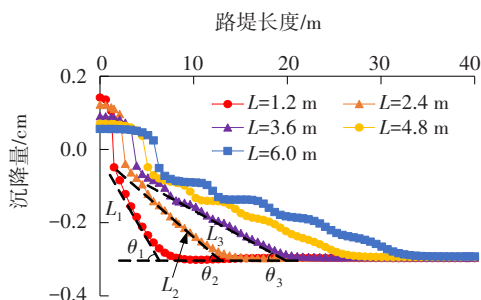


图5 各分层台阶宽度的路堤顶面沉降量随路堤长度的分布
Fig. 5 The relationship between the top surface settlement of embankment and the length of embankment under different the width of stratified steps

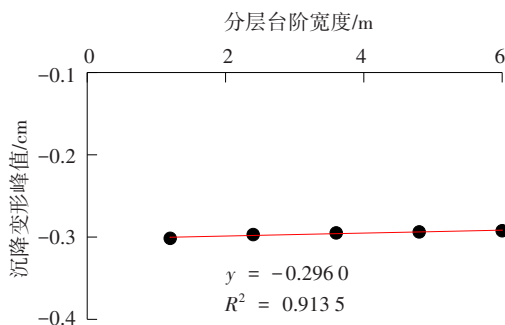


图6 分层台阶宽度与沉降变形峰值之间的关系
Fig. 6 The relationship between the width of stratified steps and the peak value of settlement deformation

在不同分层台阶宽度下,路堤工后变形峰值基本一致。这表明:分层台阶宽度对路堤顶面沉降变形峰值的影响不大。这可能是:① 在路堤挖方段的 $x=0$ m处,土体自身重力不变,土体产生的侧向应力沿 X 正方向扩散,分层台阶宽度越小,传递给挖方段的侧向应力越大。② 当分层台阶宽度分别为1.2、2.4、3.6 m时,沉降量曲线峰值点的切线分别记为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,切线 L_1 、 L_2 、 L_3 与水平方向的夹角分别记为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。从图6可以看出, $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$,根据路堤顶面应变 $\Delta\varepsilon$ 计算公式 $\Delta\varepsilon = 1/\cos\theta$ 可知,分层台阶宽度分别为1.2、2.4、3.6 m相对应土体路堤顶面的应变关系为 $\Delta\varepsilon_1 > \Delta\varepsilon_2 > \Delta\varepsilon_3$ 。③ 当分层台阶宽度分别为4.8和6.0 m时,沉降量曲线出现一定长度的平台,路

堤顶面应变峰值与分层台阶宽度为3.6 m时的路堤顶面应变峰值一致,路堤工后整体变形峰值变化不大,即当分层台阶宽度大于3.6 m时,其路堤顶面应变峰值与分层台阶宽度为3.6 m时路堤顶面应变峰值一致,存在一个临界分层台阶宽度3.6 m,使得路堤顶面应变不再发生变化,防止路面产生裂缝的意义不大。因此,分层台阶宽度大于3.6 m,路堤产生沉降效应不明显,路堤沉降变形峰值基本一致。

2.3 含水率对沉降变形的影响

同一分层台阶厚度与宽度,在不同含水率条件下,路堤顶面沉降量随路堤长度的变化规律如图7所示。从图7可以看出,当土体从最佳含水率15.50%分别升高至19.40%、24.3%、28.7%、33.1%时,在路堤3.6~20.0 m范围内路堤顶面工后沉降量沿填方段方向逐渐增大;在路堤20.0~40.0 m范围内路堤顶面沉降量趋于稳定;在路堤长度20.0 m处,路堤顶面沉降量达到工后整体变形峰值;当土体含水率从最佳含水率15.50%升高至19.40%时,在整个路堤长度范围内,路堤顶面工后沉降量变化不明显。

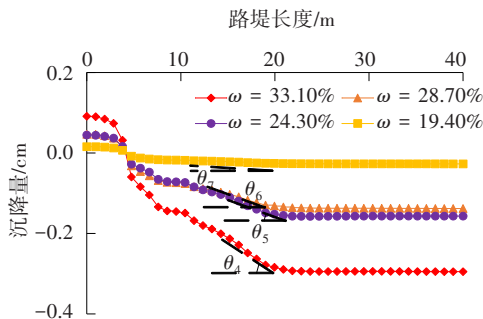


图7 不同含水率下路堤顶面沉降量随路堤长度的分布

Fig. 7 The relationship between the top surface settlement of embankment and the length of embankment under different water content

含水率与沉降变形峰值之间的关系如图8所示。从图8可以看出,路堤沉降变形峰值随着含水率增大而逐渐增大,两者之间的关系可用一次函数来表示,该拟合曲线的相关系数为0.960 1,拟合效果良好。当路堤土体含水率从最佳含水率15.50%升高至33.10%时,路堤顶面工后整体变形峰值为-0.29 cm;当路堤土体含水率从最佳含水率15.50%升高至19.40%时,路堤顶面工后整体变形峰值为-0.03 cm,两者含水率相差13.70%,路堤顶面工后整体变形峰值降低89.70%。这表明:含水

率对路堤顶面沉降变形影响较为明显。这可能是因为:①路堤土体含水率升高,土体弹性模量降低,土体抵抗变形的能力减弱,在相同自身重力作用下,路堤产生沉降变形。②当土体从最佳含水率15.50%分别升高至19.4%、24.3%、28.7%和33.1%时,沉降量峰值处切线与水平方向的夹角分别为 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 、 θ_7 ,其大小关系为: $\theta_4 > \theta_5 > \theta_6 > \theta_7$,路堤顶面应变峰值大小关系为: $\Delta \varepsilon_4 > \Delta \varepsilon_5 > \Delta \varepsilon_6 > \Delta \varepsilon_7$,即当土体从最佳含水率升高至33.10%时,路堤顶面的应变峰值也达到了最大值。

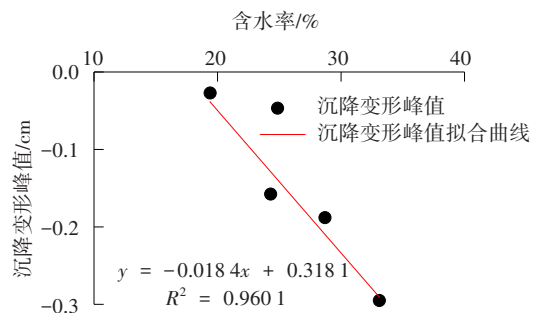


图8 含水率与沉降变形峰值之间的关系

Fig. 8 The relationship between the water content and the peak value of settlement deformation

2.4 路堤整体沉降变形量分析

为研究分层台阶厚度、含水率等因素对路堤整体沉降变形规律的影响,将沉降变形的数据导入软件中,得到等值线图。本研究只分析土体含水率从最佳含水率15.50%升高至含水率33.10%的情况,不同分层台阶厚度下的路堤沉降量等值线如图9所示。从图9可以看出,随着分层台阶厚度的增加,挖方段出现沉降变形区域向下扩展现象。路堤工后整体变形峰值出现在路堤填方段的中部,路堤沉降量沿填方段垂直方向逐渐减小。当路堤分层台阶厚度为1.0 m,其沉降峰值为-1.50 cm;当路堤分层台阶厚度为0.2 m,其沉降峰值为-0.06 cm。分层台阶厚度降低80%,工后的整体变形峰值降低96%。

填方段沉降变形面积与分层台阶厚度之间的关系如图10所示。从图10可以看出,随着分层台阶厚度增加,路堤发生沉降变形的区域逐渐向下扩展,沉降变形面积增大。这是因为:①随着分层台阶厚度增加,挖方段总厚度增加,土体自重应力增大,挖方段土体沿Y轴负向发生变形,导致挖方段出现沉降变形区域向下扩展的现象。②路堤分层台

阶厚度增加,其总厚度增加,每层土体自身重力增大,导致路堤填方段沉降变形面积增大。

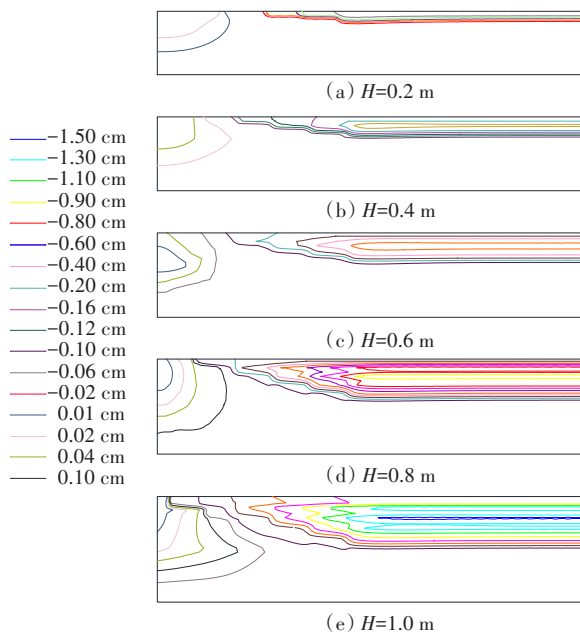


图9 路堤沉降量等值线

Fig. 9 The contour of embankment settlement

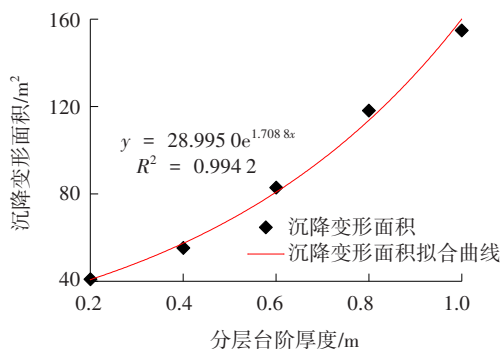


图10 填方段沉降变形面积与分层台阶厚度之间的关系

Fig. 10 The relationship between the settlement deformation area of the fill section and the thickness of stratified steps

3 结论

将红黏土路堤作为研究对象,采用数值模拟方法研究分层台阶厚度、分层台阶宽度和含水率等因素对红黏土路堤填挖交界段顶面沉降变形与工后整体变形的影响,得出结论:

1) 各因素对路堤填挖交界段顶面沉降变形的影响程度为:分层台阶厚度>含水率>分层台阶宽度。分层台阶厚度越厚,路堤顶面发生沉降变形的现象越明显,分层台阶厚度与顶面工后沉降变形峰值呈正相关;分层台阶厚度1.0 m处的顶面工后沉

降变形峰值比分层台阶厚度0.2 m处的顶面工后沉降变形峰值增大大约96.00%。

2) 随着分层台阶宽度的增加,路堤顶面工后沉降变形峰值基本一致;当分层台阶宽度分别为1.2、2.4、3.6 m时,随路堤长度的增加,路堤顶面工后沉降变形呈先增大后趋于稳定,路堤顶面应变峰值与分层台阶宽度呈负相关;当分层台阶宽度分别为4.8、6.0 m时,路堤顶面应变峰值与分层台阶宽度3.6 m土体所产生的应变峰值一致,即当分层台阶宽度大于3.6 m时,用来防止路面产生裂缝的意义不大。

3) 红黏土从最佳含水率15.50%分别升高至19.40%、24.30%、28.70%、33.10%,路堤工后沉降峰值增大,当土体含水率从19.40%变化至33.10%,路堤顶面工后整体变形峰值增大89.70%。

4) 土体工后整体变形峰值出现在路堤填方段的中部,分层台阶厚度增加,路堤总厚度增加,工后整体变形峰值与分层台阶厚度呈正相关。

参考文献(References):

- [1] 蒋浩, 陈开圣. 干湿循环下红黏土路堤边坡稳定性分析方法研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2019, 36(6):104-108.
JIANG Hao, CHEN Kaisheng. Study on stability evaluation method of red clay slope [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2019, 36(6): 104-108.
- [2] 周游. 公路改扩建中新老路基差异沉降控制技术研究[J]. 公路与汽运, 2021(4): 101-104.
ZHOU You. Study on differential settlement control technology of new and old subgrade in highway reconstruction and expansion [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(4): 101-104.
- [3] 潘易鑫, 罗洁, 龚维亮, 等. 海相区深厚软基轻质路堤变形数值分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1):20-25.
PAN Yixin, LUO Jie, GONG Weiliang, et al. Numerical analysis of the deformation of deep soft foundation light embankment in marine area [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1):20-25.
- [4] 叶至韬, 高玉峰, 王昕远, 等. 自密实水泥土拼宽路堤沉降与稳定性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(4):52-56, 93.

- YE Zhitao, GAO Yufeng, WANG Xinyuan, et al. Settlement and stability analysis of embankment widening using self-compacting cement soil[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 37(4):52-56, 93.
- [5] 李敬德. 复杂条件下湿陷性黄土路基不均匀沉降控制技术[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- LI Jingde. Study on control technology of uneven settlement of collapsible loess subgrade under complex conditions [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [6] 刘汉龙, 钟海怡, 顾鑫, 等. 平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1):1-10.
- LIU Hanlong, ZHONG Haiyi, GU Xin, et al. Transparent soil model testing on ground settlement induced by parallel tunnels excavation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1):1-10.
- [7] MUHAMMED J J, JAYAWICKRAMA P W, TEFERRA A, et al. Settlement of a railway embankment on PVD-improved Karakore soft alluvial soil [J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020, 23(5): 1015-1027.
- [8] ZHENG Y H, FAN Z Q, TAN Q W, et al. Construction of elastic viscoplastic constitutive model and settlement control of over-consolidated soil using finite element software ABAQUS[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(4): 257.
- [9] 姚仰平, 王坤, 王乃东, 等. 临线堆载影响下高速铁路基长期沉降预测方法[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 625-630.
- YAO Yangping, WANG Shen, WANG Naidong, et al. Prediction method for long-term settlements of high-speed railway subgrade under influences of nearby loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 625-630.
- [10] 谢宇航, 赵健, 郭昕, 等. 组合预测模型在路基沉降中的应用研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 28-33.
- XIE Yuhang, ZHAO Jian, GUO Xin, et al. Research on combination forecasting model in subgrade settlement [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4):28-33.
- [11] 曹文贵, 谭涛. 考虑数据异常及新旧程度影响有界性的地基沉降预测方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 37-43.
- CAO Wengui, TAN Tao. Foundation settlement prediction method considering data anomaly and the influence of old and new degree on boundedness [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 37-43.
- [12] 刘新喜, 邓子君, 李盛南, 等. 炭质泥岩路堑边坡湿化变形模拟分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1):1-6.
- LIU Xinxi, DENG Zijun, LI Shengnan, et al. Simulation analysis of wetting deformation of carbonaceous mudstone cutting slope [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1):1-6.
- [13] LEE J, JIN H, AN J, et al. A study on the suitability of the mohr-coulomb model for numerical analysis of ground excavation[J]. The Journal of Engineering, 2020, 30(1):1-15.
- [14] 王述红, 朱宝强. 山岭隧道洞口段地表沉降时序预测研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 813-821.
- WANG Shuhong, ZHU Baoqiang. Time series prediction for ground settlement in portal section of mountain tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(5): 813-821.
- [15] 谢杰辉, 牛富俊, 彭智育, 等. 滨海高速公路软基变形规律及沉降预测应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(4):97-107.
- XIE Jiehui, NIU Fujun, PENG Zhiyu, et al. Deformation law and settlement prediction application of soft soil subgrade in coastal expressway [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(4):97-107.
- [16] 沈卓恒, 阮世强. 软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4):17-21.
- SHEN Zhuoheng, RUAN Shiqiang. Study on prediction and control of post-construction settlement of subgrade in the soft soil layer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4):17-21.
- [17] 张航. 怀芷高速高填方路基K21+620断面沉降规律及预测研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- ZHANG Hang. Study on settlement law and prediction of K21+620 section of Huaizhi expressway high fill subgrade[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [18] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141-161.
- KONG Lingwei, CHEN Zhenghan. Summary of development of special soil and slope technology [J].

- MA Feng, FU Zhen. Application of hard asphalt and high modulus asphalt concrete in France[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 221-223.
- [3] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土路面疲劳研究[J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30(1): 30-40.
- ZHOU Qinghua, SHA Aimin. Research on fatigue performance for high modulus asphalt concrete pavement [J], 2013, 30 (1): 30-40.
- [4] LEE H J, LEE J H, PARK H M. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5): 1079-1087.
- [5] 王朝辉, 舒诚, 韩冰, 等. 高模量沥青混凝土研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 1-15. WANG Chaohui, SHU Cheng, HAN Bing, et al. Research progress of high modulus asphalt concrete [J] Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40 (1): 1-15.
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.
- Editorial Department of China Journal of highway. Review on China's subgrade engineering research, 2021 [J] China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (3): 1-49.
- [7] 任非. TB复合高模量剂改性沥青的黏弹特性及混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(1): 98-102. REN Fei. Research on viscoelastic properties and mixture performance of TB composite high modulus agent modified asphalt [J] New building materials, 2021, 48 (1): 98-102.
- [8] 郭寅川, 张争明, 邵东野, 等. 高模量天然沥青混凝土设计及路用性能对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2811-2821.
- GUO Yinchuan, ZHANG Zhengming, SHAO Dongye, et al. Comparative study on design and road performance of high modulus natural asphalt mixture [J] Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (8): 2811-2821.
- [9] 查旭东, 李洲, 王宏祥, 等. 阿尔巴尼亚岩沥青改性混合料设计及性能试验[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 1-7.
- CHA Xudong, LI Zhou, WANG Hongxiang, et al. Experiments of the design and the performance for the modified mixture with Albania rock asphalt[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 1-7.
- [10] 耿韩, 李立寒, 张磊, 等. 高模量沥青低温抗裂性能的评价指标[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1): 98-103. GENG Han, LI Lihan, ZHANG Lei, et al. Indicators for low temperature cracking resistance of high modulus asphalt binders [J] Journal of building materials, 2018, 21 (1): 98-103.
- [11] RYS D, JUDYCKI J, PSZCZOLA M, et al. Comparison of low-temperature cracks intensity on pavements with high modulus asphalt concrete and conventional asphalt concrete bases [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 478-487.
- [12] GENG H, CLOPOTEL C S, BAHIA H U. Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical asphalt pavement structures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 207-213.
- [13] 崔华杰, 李立寒, 刘栋. 高模量沥青混凝土低温抗裂性能研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 37-41.
- CUI Huajie, LI Lihan, LIU Dong. Research on low-temperature anti-crack performance of high modulus asphalt mixture [J] Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 37-41, 53.
- [14] WANG X S, QIU Y J, XUE S Y, et al. Study on durability of high-modulus asphalt mixture based on TLA and fibre composite modification technology [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19 (10): 930-936, 53.
- [15] 宁毅, 李文凯, 刘向杰. 水-温耦合作用对高模量沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 17-25.
- NING Yi, LI Wenkai, LIU Xiangjie. Influence of water-temperature coupling on performance of high modulus asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (2): 17-25.

(责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容; 英文编辑: 陈璐)

(上接第7页)

- China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161.
- [19] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [20] 张国栋, 巫锡勇, 凌祥祥, 等. 初始含水率对膨胀性红黏土胀缩及崩解特性的影响[J]. 工程地质学报, 2023, 31 (1): 32-42.
- ZHANG Guodong, WU Xiyong, LING Sixiang, et al. Influence of initial moisture content on swelling-shrinkage and slaking features of expansive red clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 32-42.

(责任编辑: 欧兆虎; 校对: 刘国奇; 英文编辑: 陈璐)