

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211112001

文章编号: 1674-599X(2023)01-0007-10

复合地基加固的半分离式路堤沉降特性研究

张军辉¹, 林晨¹, 杨毅²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 为分析软土地基上半分离式路堤的沉降特性, 本研究依托实际工程, 结合现场试验结果, 建立数值模型, 分析不同工程因素对半分离式路堤沉降特性的影响。研究表明: 半分离式路堤顶面沉降形状为不对称的“碗盆状”曲线, 最大沉降点偏向路堤边缘, 工后的差异沉降值较整体式路堤的小; 分幅距离、分幅高度及路面荷载大小是影响半分离式路堤沉降的主要因素, 土工格栅模量对工后最大沉降点的位置有明显影响, 合理的桩距设置对于高填方路基的地基沉降稳定有重要作用。

关键词: 分离式路堤; 沉降特性; 数值模拟

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Study on settlement characteristics of semi-separated embankment based on composite foundation reinforcement

ZHANG Junhui¹, LIN Chen¹, YANG Yi²

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Yunnan Research Institute of Highway Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: To analyze the settlement characteristics of semi-separated embankments on soft soil foundation, based on the actual project and combined with the field test results, a numerical model was established to study the settlement characteristics of semi-separated embankments and analyze the influence of different engineering factors on settlement characteristics. The results indicate that the settlement shape of the semi-isolated embankment's top surface is an asymmetric "bowl-shaped" curve, with the maximum settlement point offset towards the edge of the embankment, and the differential settlement value after construction is smaller than that of the integral embankment. the width and height of the partition as well as the pavement load are the main factors affecting the settlement pattern of the semi-separated embankment. The geogrid modulus has an obvious influence on the position of the maximum settlement point after construction, and reasonable pile spacing plays an important role in the settlement stability of high embankment roadbases.

Key words: separated embankment; settlement characteristics; numerical simulation

山区高速公路地形起伏大、桥梁及隧道等结构复杂, 为满足公路线形的较高标准要求, 分离式路基以其灵活、多变的特点, 在山区高速公路建设中得到了较为广泛的应用^[1]。研究表明, 高填方路基和软土路基竣工后容易发生较大的差异沉降^[2-3], 导致路面结构破坏^[4-5]。而在实际工程中, 不可避免地

需要在软土地基上填筑分离式路基, 而半分离式路基(整体路基填筑到一定高度后再进行分幅填筑的分离式路基, 简称为半分离式路基)作为分离式路基的一种, 其沉降特性会对公路安全运行造成不良影响。对软土地基上的半分离式高填方路基的沉降规律展开研究, 有利于设计人员及

收稿日期: 2021-11-12

作者简介: 张军辉(1978—), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

施工技术人员对工程质量进行控制,保证路基长期安全使用。

目前,针对分离式路堤的研究不多,少数学者对冻土区分离式路基的热稳定性及动力响应问题进行了研究。LIU等^[6]认为分离式路堤是未来青藏高原高速公路的一种重要路基结构,多年冻土路基之间存在一个最优分幅间距。樊凯等^[7]在对青藏公路已有调控措施应用效果进行分析的基础上提出了分离式路基消除两幅路基相互热干扰的工程措施。栗晓林等^[8]通过建立整体式和分离式路基计算模型,分析不同年平均地温和隔离带宽度下分离式路基对多年冻土的影响。赵涛等^[9]以标准断面的分离式路基为研究对象,研究了地震波作用下分离式路基的动力响应特性。

沉降特性是工程设计及施工技术人员关注的重点^[10-12]。复合地基能够有效改善路基不均匀沉降的问题。国内外许多学者采用室内试验、数值模拟、理论分析等手段对该问题进行了研究。黄绍铭等^[13]结合工程实例,提出了减沉路堤桩技术的方法和设计步骤。姜彦彬等^[14]基于加筋路堤下水泥粉煤灰碎石桩(cement fly-ash gravel, CFG)复合地基现场试验段,分别建立单桩、群桩及全断面的有限元模型,探讨了几何模型、桩土接触等对系统变形、应力分布及荷载传递的影响。WU等^[15]研究了软土蠕变效应对深层水泥搅拌桩加固效果的影响。杨涛等^[16]推导出瞬时加荷条件下多元不排

水长短桩复合地基桩间土的固结方程,研究了多元不排水桩长短桩复合地基的固结特性。现有研究表明:针对复合地基的研究已经较为深入,但针对复合地基上半分离式路堤沉降特性进行研究的报道鲜见。因此,本研究依托云南省某山区新建高速公路桩体加固的软土地基半分离式路堤工程,结合现场试验和有限元模型,研究半分离式路堤的沉降规律,揭示不同因素对其沉降规律的影响,以期类似工程的设计及施工提供参考。

1 现场试验

1.1 工程概况

依托云南某高速公路工程进行研究。试验路段地表下2.00 m范围内为黏土,褐红色,以粉粒和黏粒为主,地表下2.00~12.00 m范围内分布大量淤泥质软土,其成分以黏粒为主,夹杂少许砂粒,该软土富含有机质,呈灰黑色,天然含水率高,底层为含砾黏土,呈灰黄色,日晒易裂。

测试断面路床宽15.36 m,高17.13 m,路基分幅高度与宽度分别为1.20和8.00 m。经研究确定,在路堤基底部分区域采用长为12.00 m、桩径为0.50 m、桩间距为1.60 m的水泥搅拌桩,采用正三角形布置,同时在水泥搅拌桩桩顶设置0.30 m的碎石与0.30 m的碎石土的垫层,垫层内铺设土工格栅以加强路堤的稳定。具体结构如图1所示。

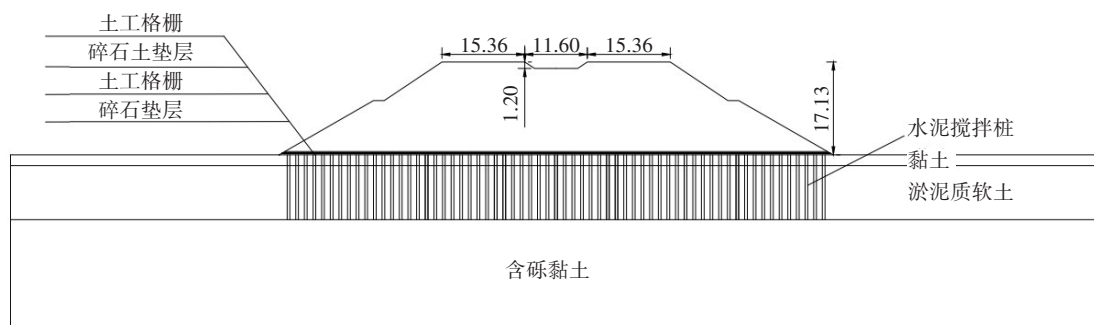


图1 路基处置设计(单位:m)

Fig. 1 Geometric design of subgrade(unit:m)

1.2 仪器布置及观测

为对水泥搅拌桩复合地基的处置效果及其横断面沉降规律进行研究,在工程段布置路基变形监测设备。设备主要包括剖面沉降管及单点沉降计,具体布置方式如图2所示(本研究以左幅路堤为研究对

象)。剖面沉降管布置在填高14.60 m处,单点沉降计通过钻孔埋设,深度以进入硬土层3.00~5.00 m为宜,在路基边坡坡脚设置观测站,通过采集模块收集传感器数据,无线收发模块将数据传输到平台,全程自动采集监测数据,保证数据的连续。

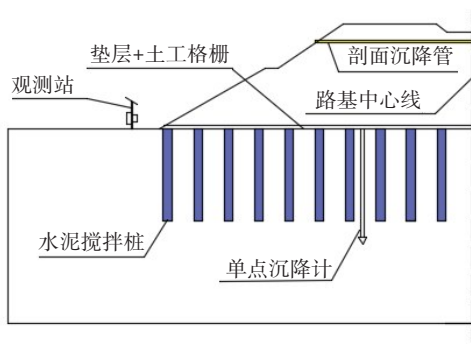
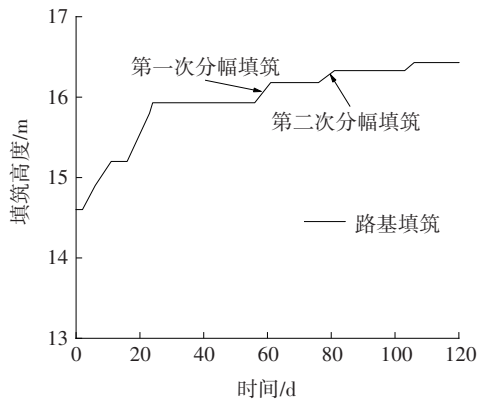


图2 路基监测

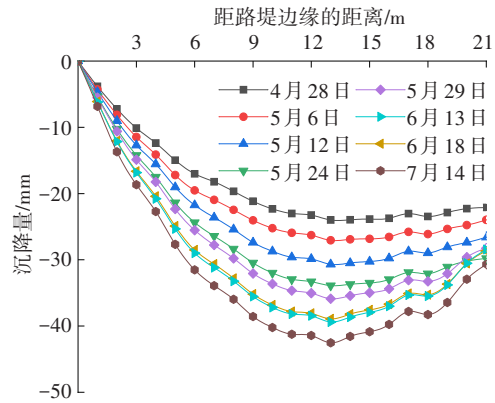
Fig. 2 Subgrade monitoring

1.3 分离式路堤实测沉降规律

基于剖面沉降管实测数据,研究分幅荷载作用下路基内部沉降变化规律。剖面沉降管埋设于2021年3月28日,图3(a)为填筑高度与时间的变化曲线图。为更清楚地展现分幅填筑前后曲线变化规律,本研究假设端口位移为零,此时路堤横断面不同点位的相对沉降随时间的变化规律如图3(b)所示。同时,在此特别指出,最大差异沉降是指在同一路堤高度上,最大沉降和最小沉降之间的差值。在未分幅填筑之前,沉降曲线呈轻微“勺状”。



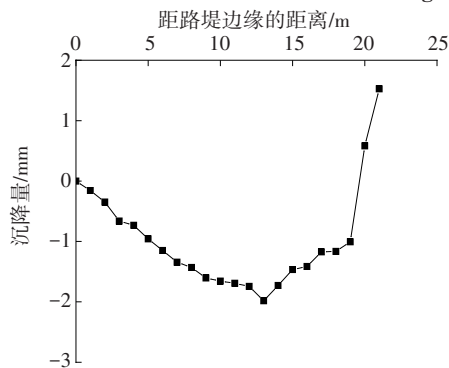
(a) 填筑高度与时间关系



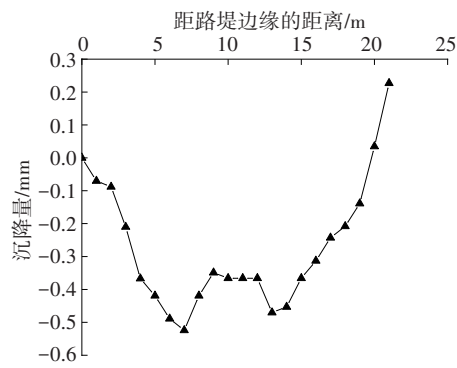
(b) 剖面沉降管实测数据

图3 现场实测数据

Fig. 3 Field test data



(a) 第一次分幅加载沉降变化



(b) 第二次分幅加载沉降变化

图4 加载期间实测数据变化

Fig. 4 Change of measured data during loading

在分幅填筑之后,由于分幅距离的存在及放坡的需要,半分离式路基的宽度一般大于整体式路基的,其路基横断面沉降曲线呈马鞍形^[17]。3月28日—5月24日期间无分离荷载作用,“勺状”曲线缓慢发展。其间最右侧测点与中部测点的最大沉降差值为4.10 mm。5月24日,进行第一次分幅填筑。之后,“勺状”曲线迅速发展,至7月14日,已呈现明显的“勺状”,最右侧测点与中部测点的最大沉降差值达到了11.82 mm。

分离界面以下路基的沉降曲线(剖面沉降管附近)是由下部土体内附加应力和上覆分离式荷载共同作用形成的^[18]。为进一步分析分离式荷载作用对路基沉降规律的影响,对分离式路堤分幅填筑时第一层(5月24日—5月29日)及第二层(6月13日—6月18日)填筑期间的沉降规律展开分析,由于单层填筑时间较短且路基分幅填筑,在该时间段内沉降管受分幅荷载的影响较大。因此,可以近似地认为该填筑期间内沉降曲线变化是分离式荷载引起的,由于第一次加载及第二次加载的厚度不同,两次加载前后的沉降变化曲线形状并不完全相同,结果如图4所示,分幅荷载会使偏向边坡的一侧产生更大的沉降,加剧沉降曲线的弯曲程度。

2 有限元模型建立

2.1 计算模型

为便于实际工程应用,本研究采用均布荷载模拟路面结构自重,荷载大小均取为 22 kPa。由于公路工程轴向尺寸远大于横向尺寸,因此,采用平面应变模型模拟。

模型总高为 49.13 m,长为 202.71 m。左右边界水平方向位移被约束,底部边界两个方向位移均

被约束,地表为透水边界,路基顶部和左右边界均为自由面,水泥搅拌桩桩径为 0.50 m,桩长为 12.00 m,桩间距为 1.60 m,采用正三角形布置。下级边坡坡度比为 1:1.75,上级边坡坡度比为 1:1.50。在进行单元网格划分时,模型采用四边形结构网格划分属性,加密桩体部分的网格。路堤结构采用 CPE4R 实体单元模拟,地基部分采用 CPE4P 实体单元模拟,共有 7 135 个单元模拟,7 378 个节点。路基和路面施工过程模拟利用 ABAQUS 提供的单元“生死”功能实现,路堤填筑一层时间为 10 d,填筑完成后固结 15 d。

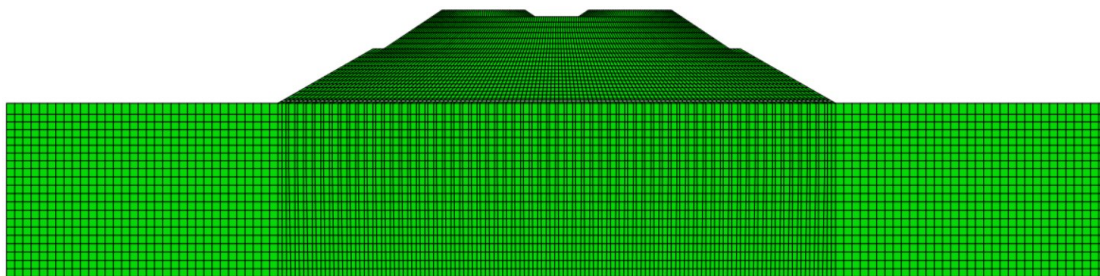


图5 有限元计算模型网格划分

Fig. 5 Grid division of finite calculation model

2.2 本构模型及材料参数

计算模型中路堤填料、垫层及地基土体均采用 D-P 模型,水泥搅拌桩采用弹性假定,土工

格栅采用 ABAQUS 中的 TRUSS 单元进行模拟,土体、桩体的参数根据室内及现场试验得出,见表 1。

表1 土体模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil model

材料类型	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	孔隙比	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
路堤填料	2 000	19.5		0.20	18.00	18.00
碎石垫层	2 360	80.0	1.000	0.20		35.00
碎石土垫层	1 800	50.0	0.630	0.20		23.00
黏土	1 800	12.0	0.910	0.30	38.30	13.50
淤泥质土	1 420	1.4	1.367	0.30	2.25	10.13
含砾黏土	1 800	14.0	0.500	0.35	45.70	14.40
水泥搅拌桩	2 100	100.0		0.20		
土工格栅		26 000.0		0.25		

2.3 数值模拟验证

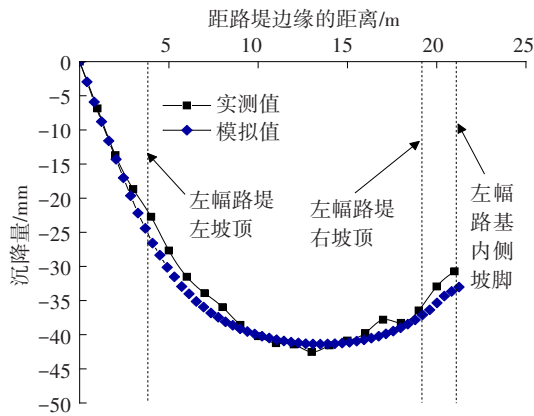
为验证数值模型的精度,便于后续对分离式路基的沉降特性进行分析,通过现场埋设的监测设备,得到试验断面的沉降监测数据,将其与模型计算结果进行对比。

首先,将剖面沉降管监测数据与数值模型结果进行对比,结果如图 6(a)所示。图 6(a)中实测值与数值计算结果基本一致,最大沉降位置均发生在距

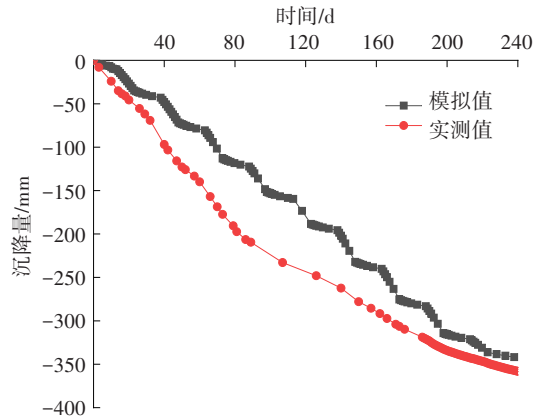
离路堤边缘 12.00~13.00 m 范围内,实测曲线的弯曲程度略大于模拟曲线的。

图 6(b)为地基表面沉降实测数据与数值模拟数据的对比图。从图 6(b)可以看出,实测沉降量略大于模拟结果,在 75~175 d 的填筑期间内,实测值与模拟值存在较大误差,这主要是由于有限元模拟的填筑进程与实际填筑进程不一致,不同填筑高度会在地基土体中产生大小不同的附加应力,影响地

基的剪切及固结变形程度,进而产生不同的沉降。且地基土体的材料参数实际上会随着填筑过程发生变化,主要表现为随着填筑荷载变大、作用时间加长,土体逐渐被压实,压缩模量变大,固结系数变小。但在路基填筑后期,随着实际填筑高度和有限元模拟填筑高度逐渐统一,两者误差逐渐减小,最终相对误差约为4.0%。这表明尽管土体参数随着沉降发展会发生变化,但其对后期沉降影响较小,误差在可接受范围内,该模型有效。



(a) 填高 14.60 m 处沉降数据对比



(b) 地基表面沉降数据对比

图6 沉降数据对比

Fig. 6 Settlement data comparison

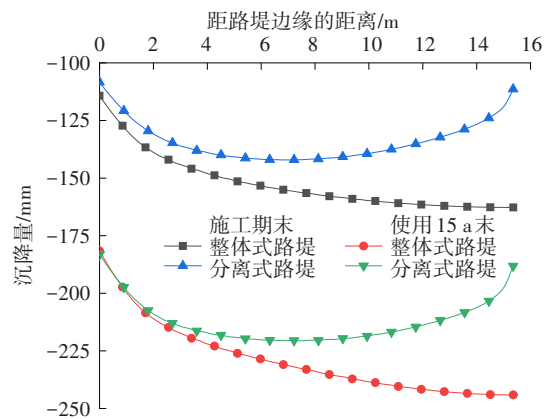
3 数值计算结果与分析

3.1 桩网复合地基上半分离式路堤沉降规律

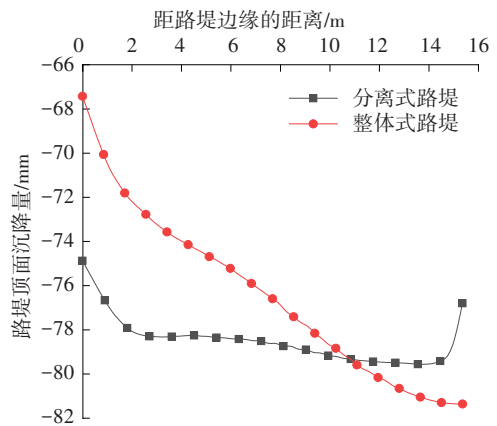
采用均布荷载的形式模拟路面结构荷载^[19],并假设施工期为5个月。在路面施工完成后,由于地基固结尚未完成,随着时间的推移,路基的沉降不断增大。

取路面施工结束和路面设计使用年限末

(15 a)两个时间点,将整体式路堤与分离式路堤的单幅路堤沉降曲线进行对比,如图7所示。从图7(a)中可以看出,整体式路堤的半幅路堤沉降曲线形状呈“勺状”(抛物线的半边),分离式路堤的单幅路堤沉降曲线呈不对称的“碗盆状”,从施工结束到使用年限15 a末,沉降曲线形状变化不大,但无论是施工结束还是使用年限15 a末,整体式路堤顶面的沉降均大于分离式路堤的。且在整体式路堤中线处,两种路堤的沉降差值最大。从图7(b)的工后沉降曲线来看,分离式路堤的最大工后差异沉降及最大工后沉降分别是整体式路堤的33.6%和97.8%。



(a) 路堤沉降曲线



(b) 工后沉降曲线

图7 整体式与分离式路堤沉降曲线对比

Fig. 7 Comparison of top settlement curves between integral and separated embankment

由于两种路基的沉降存在差异,因此不宜以整体式路基的工后容许沉降的要求(表2)去判断分离式路基的沉降是否符合实际工程要求。《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31—02—2013)规定以工后沉降作为软土路基的变形控制标准,整

体式路堤一般以路基中心点(最大沉降点)作为监测点位,但分离式路堤的最大沉降点或工后沉降点并不一定位于单幅路基的中心处,故不宜再以路基中心作为最大沉降量的监测点位;其次,在分离式路堤与整体式路堤的最大工后沉降仅相差2.2%的情况下,分离式路堤的差异沉降仅为整体式路堤的33.6%。

表2 工后容许沉降值

Table 2 Upper limit of post-construction settlement value m

公路等级	工程位置		
	桥台与路堤相邻处	涵洞、箱涵、通道处	一般路段
高速公路	≤0.1	≤0.2	≤0.3

3.2 路面荷载的影响

为便于实际工程设计应用,假定路面荷载为简化的均布形式^[19],施工期为5个月。模型为对称结构,取分离式路堤的左幅路堤研究,为分析不同荷载作用下路堤顶面沉降分布规律,取路堤顶面荷载分别为10、20、30和40 kPa,路堤顶面15 a末总沉降及工后沉降的模拟结果如图8所示。其中,距路堤边缘距离为距路堤顶面左侧边缘的水平距离。图8(c)所示为路堤顶面最大总沉降位置距路堤顶面左侧边缘的水平距离与不同均布荷载的关系。

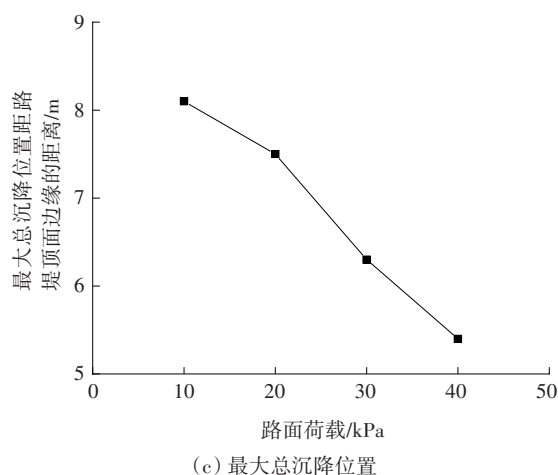


图8 不同均布荷载作用下路堤顶面沉降分布

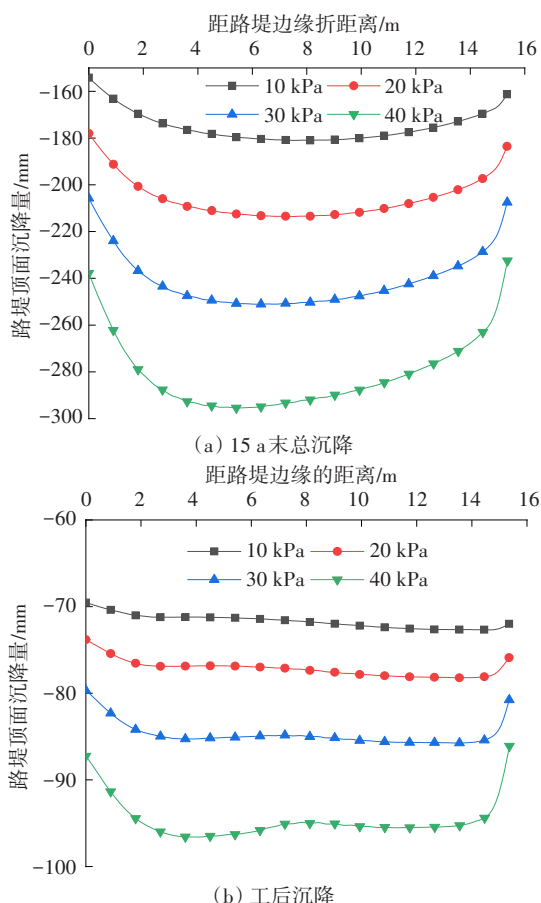
Fig. 8 Settlement distributions of embankment surface under different uniformly distributed loads

从图8可以看出,随着路面荷载的增大,路堤顶面的总沉降量逐渐增大,从10 kPa开始,路面结构荷载每增大10 kPa,路堤顶面的总沉降较初始沉降(10 kPa作用下的情况)分别增加18.0%、38.7%、63.3%,工后沉降平均值分别为-71.70、-77.10、-84.70和-94.60 mm,其增加速率逐渐加快。同时,最大总沉降位置逐渐向路堤外侧移动,这是因为随着分幅荷载的增大,应力在单幅路堤中心偏左侧的集中现象逐渐加剧。因此,靠近路堤边缘左侧的沉降逐渐变大。在进行设计时,应当合理考虑路面结构荷载大小,避免因路面结构荷载过大而造成较大的工后沉降。同时,由于最大总沉降位置随着路面结构荷载的变化移动,因此在开展相应的路基监测工作时,应当考虑其变化规律,合理设置监测点位及制定路基监控方案。

3.3 桩距的影响

为研究桩间距对路堤沉降特性的影响,分别模拟桩间距为1.20、1.60、2.00和2.40 m这4种情况下的路堤沉降,其余参数不变,模拟结果如图9所示。

图9(a)为不同位置的路堤顶面总沉降变化曲线图,图9(b)为最终固结时路堤顶面的最大总沉降随桩间距变化的关系曲线图;图9(c)为最终固结时地基表面最大沉降随桩间距变化的关系曲线图。从图9可以看出,随着桩间距的增大,路堤的最大总沉降与工后沉降均有显著变化,路堤顶面的总沉降较桩距为1.20 m时分别增大了13.9%、21.7%、26.2%,最大工后沉降量分别增加了17.2%、27.2%、34.2%,地基表面沉降分别增加了33.00、62.90和91.50 mm。因此,桩间距会对路基的稳定产生巨大



影响,在设计时,应在规范允许范围内,结合工程具体情况,以经济、安全为原则选取适宜的桩间距。

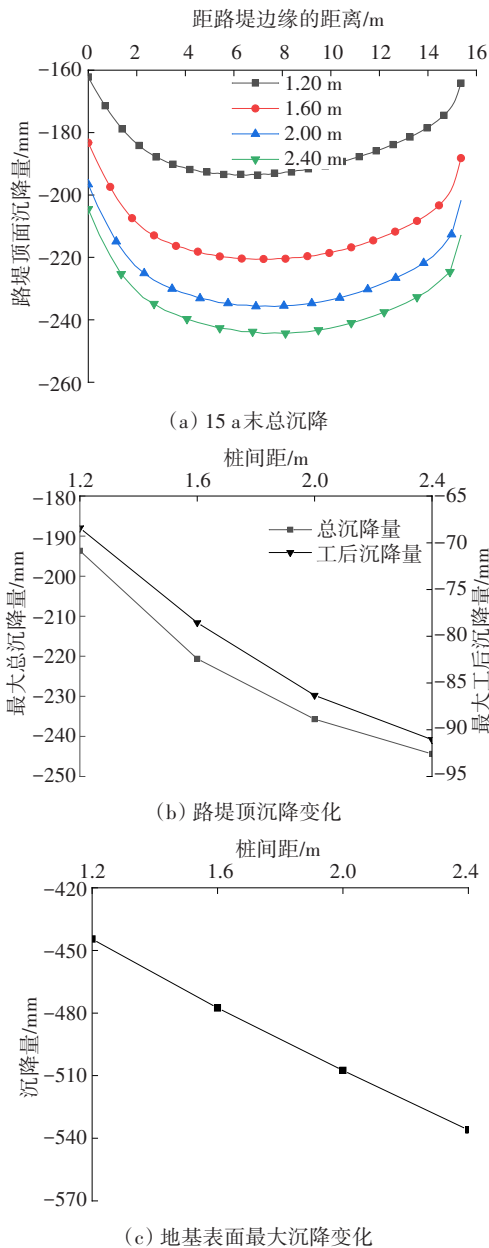


图9 不同桩距下路堤沉降规律

Fig. 9 Settlement patterns of embankment with different pile spacing

3.4 土工格栅模量的影响

土工格栅是桩网复合地基的重要组成部分,取土工格栅模量分别为10、20、30、40、50和60 GPa,其余参数保持不变,建立半分离式路堤沉降特性数值模型,模拟结果如图10所示。

从图10可以看出,随着土工格栅模量的增大,路堤的总沉降呈减少趋势,当土工格栅模量为20、30、40、50和60 GPa时,最大总沉降量较10 GPa时分别下降4.7%、8.3%、11.1%、13.4%和15.3%,工后

差异沉降量分别下降12.5%、24.2%、34.9%、44.6%和53.0%,这表明土工格栅模量对减小路堤总沉降作用不明显,但对减小差异沉降具有明显作用。分离式路堤与整体式路堤沉降规律的最大差别是分离式路堤的最大沉降点往往随着路基形状、力学参数等发生变化,由图10可知,土工格栅模量对最终沉降时最大沉降位置的影响较小,但对最大工后沉降的位置具有一定影响,随着模量的增大,最大沉降位置逐渐向路堤内侧移动。

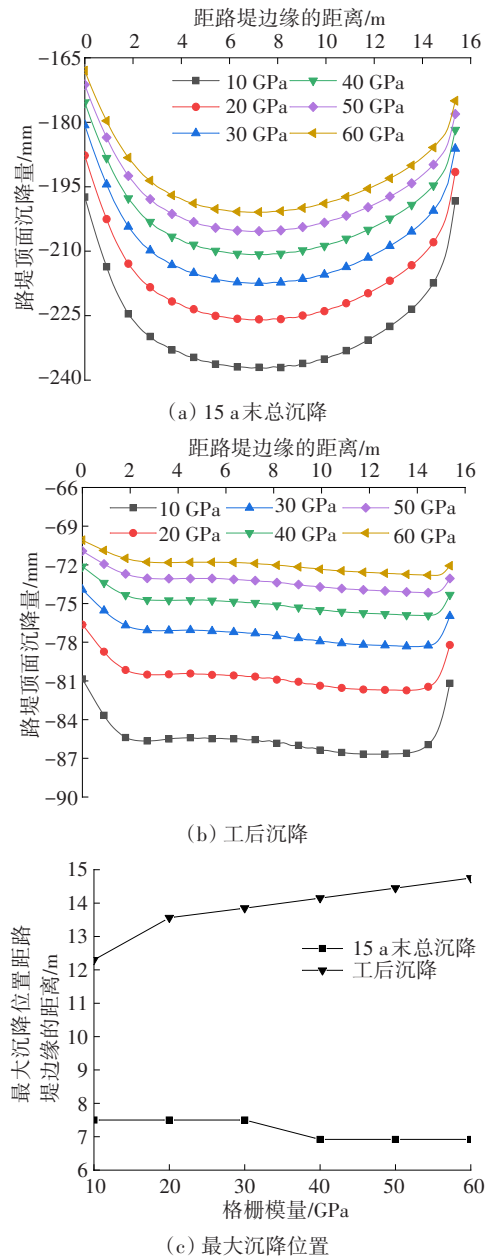


图10 不同土工格栅模量下路堤顶面沉降分布

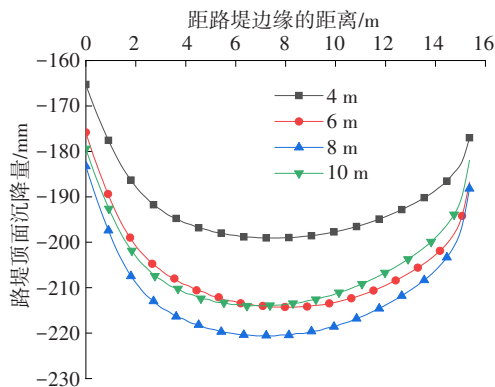
Fig. 10 Settlement distributions of embankment surface with different geogrid modulus values

3.5 分幅距离的影响

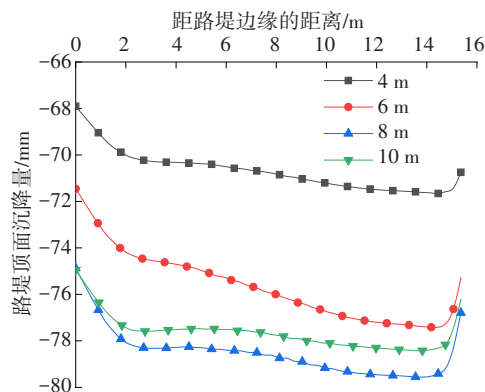
整体式路基与半分离式路基在结构形式上最

大的不同在于原本一个梯形的结构被分成了三个梯形结构,而上部的两个分离梯形之间的距离必然会对该路基的沉降规律产生一定的影响。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)提出,分离式路基应保持一定的间距,以满足必要的排水和安全防护设施等的需要。高速公路、一级公路采用分离式路基时,两相邻路基边缘之间的距离在人烟稀少、土地荒漠地区宜采用大于宽度4.50 m的中间带,一般为6.00~15.00 m。结合工程要求,对分离式路基里侧坡脚间距分别为4、6、8和10 m情况下的沉降进行数值模拟,结果如图11所示。

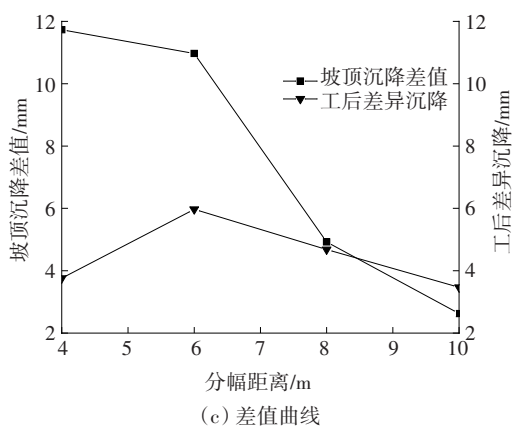
从图11可以看出,随着分幅距离的增大,路基的沉降量先变大,后变小。当分幅距离为4 m时,半分离式路堤顶面沉降量受底部整体式路基盆状弯沉的影响较大,故可看到左边沉降明显小于右边沉降。随着分幅距离的增大,路基沉降受其影响越小,从图11(c)的坡顶沉降差值(单幅路堤顶面两侧边缘的沉降差)可以看出,其值分别为11.73、10.97、4.92和2.63 mm。从工后差异沉降来看,差异沉降值并未随着分幅距离的增大而增大。因此,从沉降控制的角度上看,在进行分幅路堤设计,尤其是软土地基上分离式路堤设计时,应根据具体情况,合理选择分幅距离,以免造成资源浪费。



(a) 15 a末总沉降



(b) 工后沉降



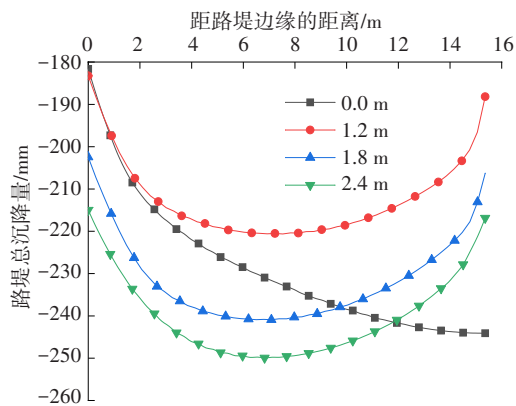
(c) 差值曲线

图11 不同分幅距离下路堤顶面沉降分布

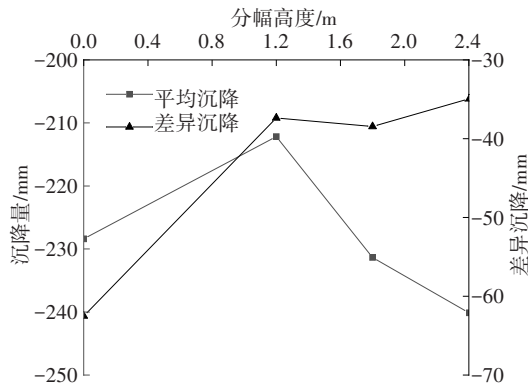
Fig. 11 Settlement distributions of embankment surface under different partition widths

3.6 分幅高度的影响

分幅高度显然是引起分离式路堤沉降规律变化的重要原因。在整体式路堤上进行分幅填筑,填筑高度越高,代表分幅的荷载越大,与整体式路堤的沉降规律差别越大。为研究分离式路堤在不同分幅高度下的沉降规律,本文对分幅高度分别为0.0、1.2、1.8、2.4 m这4种不同情况的路堤进行数值模拟,结果如图12所示。



(a) 路堤顶面15 a末总沉降



(b) 沉降及差异沉降

图12 不同分幅高度下路堤顶面沉降分布

Fig. 12 Settlement distributions of embankment surface under different partition heights

从图12可以看出,从整体式路堤到半分离式路堤,路堤的平均沉降(不同点位沉降量之和除以选取的沉降个数)及差异沉降均减小,但随着分幅高度的增加,路堤的平均沉降增大,而差异沉降量变化不大,分别为37.37、38.46和34.94 mm。由于分幅高度的增加必然带来整体路基宽度的增大,因此从沉降控制及经济效益的角度考虑,应根据具体情况,选取较小的分幅高度。

4 结论

1) 半分离式路堤的沉降规律与整体式路堤的不同。整体式路堤的沉降曲线大多为盆状弯沉,而分离式路堤的总沉降曲线形状为不对称的“碗盆状”,其工后沉降则呈现不对称的马鞍形。整体式路堤差异沉降量大于分离式路堤的。在软基路段,采用下部整体填筑,上部一定高度路堤分离的复合结构形式,路堤的差异沉降进一步减小。

2) 路面荷载、桩距、土工格栅模量、分幅距离及高度都会对复合地基上分离式路基的沉降规律产生影响。其中,随着路面结构荷载的增大,最大沉降点的位置逐渐向边坡方向移动;随着土工格栅模量的增大,差异沉降量显著减小;随着分幅高度的增加,路堤顶面沉降量增大;随着分幅距离增大,路基下部盆状弯沉对路堤顶面沉降规律的影响减小。

3) 受路堤结构形式、筋材、土体性质等复杂因素影响,本研究是基于路面均布荷载简化假定及忽略路基边坡防护的基础上展开的,后续应在考虑上述因素的基础上进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 王昕.山区高速公路分离式路基段最大长度研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
WANG Xin. Research on maximum length limits of mountains freeway separated subgrade segment [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [2] 刘维正,石志国,章定文,等.交通荷载作用下结构性软土地基长期沉降计算[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(4):726-735.
LIU Weizheng, SHI Zhiguo, ZHANG Dingwen, et al. Long-term settlement calculation of structured soft clay foundation under traffic loading [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 726-

735.

- [3] 徐明,宋二祥.高填方长期工后沉降研究的综述[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(6):786-789.
XU Ming, SONG Erxiang. Review of long-term settling of high fills [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 786-789.
- [4] 张军辉.软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D].南京:东南大学,2006.
ZHANG Junhui. Research on deformation behavior and differential settlement limitation of expressway widening on soft soil foundation [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [5] 张宏,凌建明,袁捷,等.基于板底脱空的水泥混凝土道面结构理论分析[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(11):1677-1679,1729.
ZHANG Hong, LING Jianming, YUAN Jie, et al. Theory analysis of cement concrete pavement structure based on existence of disengaging under slab [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(11): 1677-1679, 1729.
- [6] LIU Z Y, CUI F Q, CHEN J B, et al. Study on the permafrost heat transfer mechanism and reasonable interval of separate embankment for the Qinghai-Tibet expressway [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 170: 102952.
- [7] 樊凯,俞祁浩,袁堃,等.多年冻土区高等级公路新型调控路基技术研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(S1):1681-1687.
FAN Kai, YU Qihao, YUAN Kun, et al. Study on new temperature-controlling embankment for high-grade highway in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S1): 1681-1687.
- [8] 栗晓林,马巍,穆彦虎,等.边界条件对多年冻土区高速公路整体式和分离式路基热稳定性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(2):420-432.
LI Xiaolin, MA Wei, MU Yanhu, et al. Influence of boundary conditions on the thermal stability of expressway constructed with an integral and two separated embankments in permafrost zones [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(2): 420-432.
- [9] 赵涛,梁庆国,王育红,等.分幅距离对青藏高速公路分离式路基动力响应的影响[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):48-56.
ZHAO Tao, LIANG Qingguo, WANG Yuhong, et al.

- Influence of distance between two lines on seismic dynamic response of separated embankment along the Qinghai-Tibet Expressway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 48-56.
- [10] 张军辉, 吴厚铭, 周平. 拓宽路基差异沉降监测及数值分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 14-19.
ZHANG Junhui, WU Houming, ZHOU Ping. Widening subgrade differential settlement monitoring and numerical analysis [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 14-19.
- [11] 赵利平, 龙骁鹏, 黄筱云. 水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 30-36, 70.
ZHAO Liping, LONG Xiaopeng, HUANG Xiaoyun. Settlement analysis of composite foundation of soil-cement mixing pile [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 30-36, 70.
- [12] 张军辉, 黄湘宁, 郑健龙, 等. 河池机场填石高填方土工后沉降离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 773-778.
ZHANG Junhui, HUANG Xiangning, ZHENG Jianlong, et al. Centrifugal model tests on post-construction settlement of high embankment of Hechi Airport [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 773-778.
- [13] 黄绍铭, 岳建勇, 黄昱挺. 采用减沉路堤桩处理大面积地面堆载下软土地基的设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1228-1238.
HUANG Shaoming, YUE Jianyong, HUANG Yuting. Design and practice of settlement-reducing embankment piles for soft ground treatment under large-area surface heaped load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1228-1238.
- [14] 姜彦彬, 何宁, 汪璋淳, 等. 加筋路堤下刚性桩复合地基若干有限元建模类型分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2106-2114.
JIANG Yanbin, HE Ning, WANG Zhangchun, et al. Finite element modelling types for rigid pile composite foundation under geosynthetic-reinforced embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2106-2114.
- [15] WU P C, FENG W Q, YIN J H. Numerical study of creep effects on settlements and load transfer mechanisms of soft soil improved by deep cement mixed soil columns under embankment load [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(3): 331-348.
- [16] 杨涛, 李超, 阮一舟. 多元不排水长短桩复合地基固结解析解[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2195-2202.
YANG Tao, LI Chao, RUAN Yizhou. Analytical solution for consolidation of a composite ground with impervious multi-long-short piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2195-2202.
- [17] 何俊. 填石高填方超宽土基的沉降变形特性及计算研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
HE Jun. Research on the settlement deformation characteristics and calculation method of high ultra wide rock fill embankment [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [18] 张卫兵. 黄土高填方路堤沉降变形规律与计算方法的研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
ZHANG Weibing. Study on settlement-deformation laws and calculation method of high loess-filled embankment [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [19] 杨果林, 段君义, 胡敏, 等. 加筋护坡路堤沉降特性及其控制指标研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 931-938.
YANG Guolin, DUAN Junyi, HU Min, et al. Research on settlement characteristics of embankment enclosed by reinforced soil and its control index [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(4): 931-938.

(责任编辑: 刘国奇; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 李岳林)