

文章编号:1673-9469(2020)01-0035-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.007

桩承式加筋路堤中土工格栅加筋效应的室内试验研究

朱学敏^{1,2}, 崔晓艳^{1,2*}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于室内模型槽试验, 开展了考虑土工格栅的桩承式路堤变形和填土应力分布规律研究, 重点研究了土工格栅抗拉强度和土工格栅层数对软土竖向位移、填土竖向应力分布和桩土应力比的影响。研究表明: 软土竖向位移随土工格栅抗拉强度和土工格栅层数增加而减小; 不同层数土工格栅作用下填土竖向应力随路堤高度的分布规律差异较大。综合考虑桩承式路堤软土变形和填土荷载向桩顶转移程度, 了解研究工况下土工格栅的作用效果, 可为现场路堤工程中如何选用合适土工格栅抗拉强度和层数提供依据。

关键词: 土工格栅; 桩承式路堤; 室内试验

中图分类号: TU751.4

文献标识码: A

Experimental Study on the Effect of Geogrid Reinforcement in Pile-supported Embankment

ZHU Xuemin^{1,2}, CUI Xiaoyan^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of civil engineering and transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the laboratory model test, the deformation of pile-supported embankment and the stress distribution of soil filling under the action of geogrid are studied. The effects of geogrid tensile strength and the number of layers of geogrid on the vertical displacement of soft soil, vertical stress distribution of soil filling and pile-soil stress ratio are emphatically studied. The results show that the vertical displacement of soft soil decreases with the increase of geogrid tensile strength and the number of geogrid layers. Under the action of different layers of geogrid, the vertical stress of fill soil varies greatly with the height of fill soil. Considering the soft soil deformation of pile-supported embankment and the transfer degree of filling load to the pile top comprehensively, the effect of geogrid under the study condition is understood, which can provide a basis for selecting suitable geogrid tensile strength and layers in embankment engineering.

Key words: geogrid; pile-supported embankment; laboratory test

在我国经济稳步发展的背景下, 高速公路和铁路等交通建设得到了空前的发展。新建的高速公路主要分布在中东部地区及经济发展较快的沿海地区, 一般处于软弱土地基上, 这会出现承载力不满足要求、沉降量太大、发生失稳等问题, 这就需要在地基进行加固处理。

桩承式加筋路堤是利用桩和加筋材料共同作用来解决软弱土地基问题的一种常用地基处理方

法^[1-2]。桩承式加筋路堤的成功应用为实际工程项目提供了理论支撑, 但另一方面工程实际的需要已经超前于桩承式加筋路堤的研究, 对于加筋体的相关研究还需进一步深化。加上加筋路堤工作机理非常复杂, 相关的研究很多^[3-10]但缺少统一的认识, 特别是关于加筋体的受力和变形研究方法比较保守, 对软土的材料选取也存在争议。本实验采用松散泡沫颗粒来模拟桩间软土, 材料简

收稿日期: 2019-11-28

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(51922029)

作者简介: 朱学敏(1994-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为软土地基处理。

* 通讯作者: 崔晓艳(1989-), 女, 河南郑州人, 博士研究生, 研究方向为软土地基处理。

易,试验操作更加便捷,并且软土表面的相对位移也能很好体现出来。本文主要分析土工格栅的抗拉强度和层数对土拱效应和拉膜效应的作用,通过三维室内模型试验模拟了在不同填土高度下路堤中竖向应力分布、桩土应力比变化和软土变形情况,以期更进一步了解土工格栅的工作原理。

1 试验概况

1.1 室内模型试验装置简介

试验在长 90 cm、宽 90 cm、高 130 cm 的三面钢制一面带有钢化玻璃的模型槽内进行,如图 1 所示。基于 1:10 的缩尺比例,试验中设置了 9 根桩,桩长为 40 cm,桩的截面尺寸为 5 cm×5 cm,桩间距为 30 cm。其中,路堤填土为砂土,加筋体为土工格栅,桩间软土采用压缩性较高的泡沫颗粒,泡沫颗粒弹性性能好,变形可恢复,可以重复使用,并且具有良好的抗疲劳性能。试验中为方便土工格栅的布置,在模型槽内部安放土工格栅的部位焊接钢框架以方便绑接土工格栅;将桩置于模型槽底端,并在一端焊接 20 cm×20 cm 的钢块以起到稳固作用。

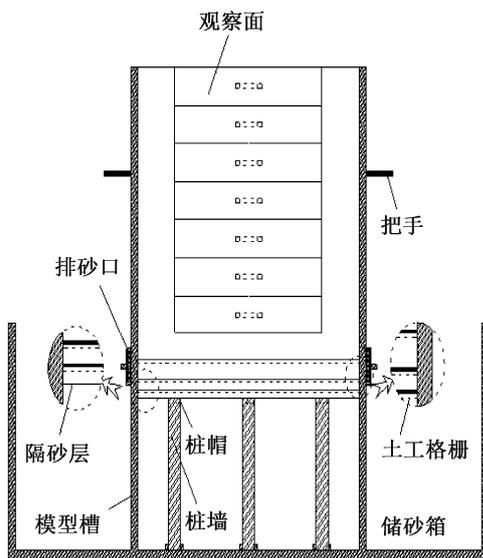


图1 模型槽示意图

Fig.1 The Schematic diagram of model slot

本实验中的加筋体采用双向土工格栅,其抗拉强度有 5、10、30 kN/m 三种。在桩顶和桩顶上方 5 cm 高度处焊接钢固定架,条形钢框架固定嘘固定架上,土工格栅四周边界通过细钢丝固定在钢框架上。

1.2 试验材料选择及其物理力学特性试验

颗粒分析试验:试验中路堤填土采用黄沙,通

过颗粒分析试验确定砂土颗粒级配,并在实验室内利用筛分法进行颗粒分析试验。取 1 000 g 土样,按照土工试验规范操作。通过每层筛上残留的试样质量,计算出小于某粒径的颗粒含量百分数,并在坐标系中绘出粒径级配曲线图,如图 2。

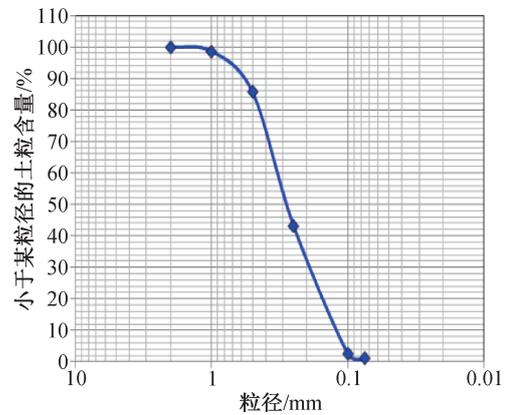


图2 砂土级配曲线

Fig.2 The diagram of sand grading

根据图 2 取得该试样的有效粒径 d_{10} , 平均粒径 d_{30} , 限制粒径 d_{60} , 根据不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 计算公式:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2)$$

得到 $C_u = 2.3, C_c = 0.81$ 。

最大干密度试验:最大干密度的测定采用轻型击实试验,测得天然土样的含水率,将土样风干或加水制备至少 5 种含水率的试样。首先称量击实桶重量,再取一定量试样,试样质量约为 2 kg,分 3 层击实,每层 25 击,击实过程严格按照最大干密度试验的要求进行。最终计算得到最大干密度为 1.7 g/cm^3 。

直剪试验:由于试验用的材料为砂土,因此试验方法选择砂类土的直剪试验,严格按照《土工试验方法标准》规定的方法进行操作,取过 2 mm 筛的风干土样 1 200 g,在 1.7 g/cm^3 的干密度下制备砂样;将插销插入剪切容器盒,再在底部放置透水板和滤纸,然后把试样放入容器内整平表面使其与容器盒平齐,最后在面上放上干滤纸、透水板和传压板;安装竖向框架,施加竖向荷载,剪切速率 0.8 mm/min ;测得该砂样的粘结力 c 约为 8.0 kPa ,内摩擦角约为 30.6° 。经过上面的一系列室内试验测得的路堤填料基本材料参数见表 1。

表 1 填土基本物理指标

Tab.1 Properties of the sand

最大干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	重度 γ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	不均匀 系数 C_u	曲率系 数 ν
1.70	15	8.0	30.6	30	0.35

1.3 试验元件介绍及布置

本试验中,数据采集系统由数据采集仪、数据存储计算机和测量元件构成。数据采集仪通过导线与测量元件连接,通过网线将测量元件测得的数据传导到计算机上。数据采集仪为型号 3816N 的静态应变测试分析系统。该系统一共有 60 个接口,在试验过程中可以对试验数据连续采集,并可在计算机显示端实现对数据全程观测,及时发现数据采集异常,以便进行调整。

该室内模型试验路堤填土内部设置了土压力盒和带有刻度的轻质沉降杆,其空间布置情况如图 3 所示,其中土压力盒用来测量每层填土的水平与竖向应力大小,轻质沉降杆测量软土的沉降。通过 16 个土压力盒和若干轻质沉降杆实现填土内部应力位移的变化监控。

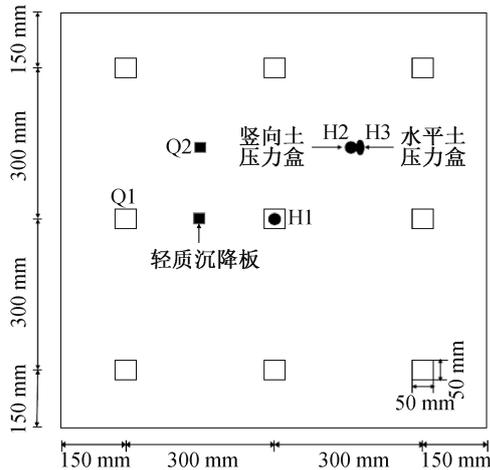


图 3 测量仪器空间布置图

Fig.3 Space layout of measuring instrument

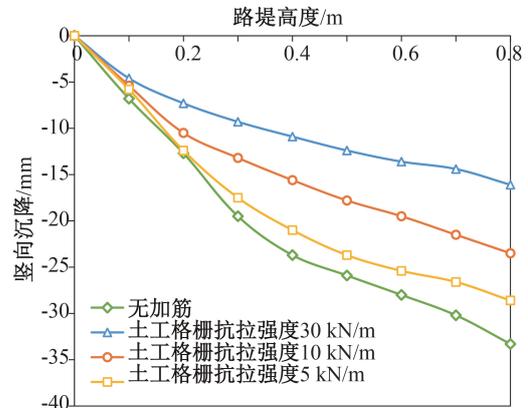
土压力盒光滑面朝上,其中水平设置的土压力盒用来测量填土竖向应力值,侧立放置的土压力盒用来测量填土水平土压力值。沉降板的构成为上部是一根 PVC 管,端部通过强力胶水与一块方形轻质平板连接,PVC 管表面刻有刻度用以监测沉降。

2 试验软土沉降分析

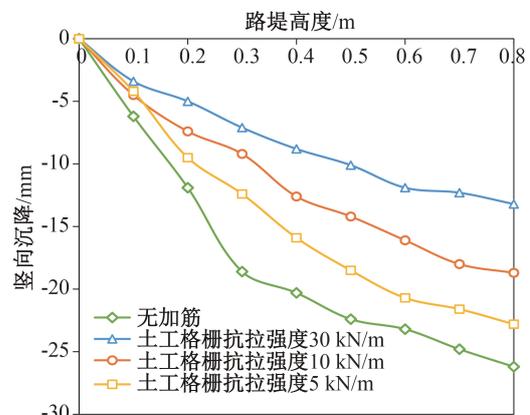
2.1 土工格栅抗拉强度对沉降的影响

图 4 为不同抗拉强度土工格栅作用下,软土表

面四桩中心处与两桩中心处的竖向位移随路堤填土高度的变化规律。从两幅图中可以看出四桩中心处的沉降值要大于两桩中心处的沉降值,这是由于两桩之间软土发生变形的范围较四桩中心要更狭窄,并且钢桩对两桩之间沉降的限制作用要强于四桩之间,在有土工格栅时这种作用更加明显,表明离钢桩的距离越近软土变形越小。



(a) 四桩中心软土沉降图



(b) 两桩中心软土沉降图

图 4 不同抗拉强度土工格栅的软土沉降图

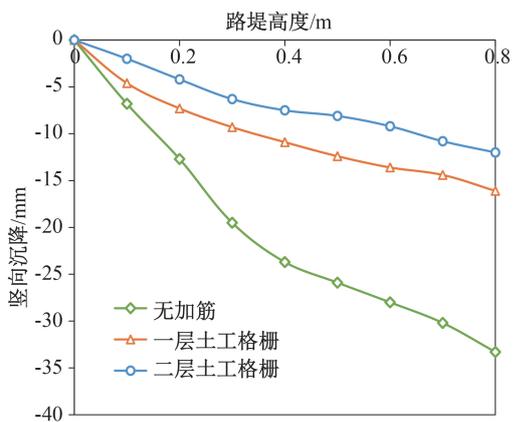
Fig.4 Settlement diagram of soft soil under different tensile strength geogrid

没有土工格栅时,软土沉降随着路堤高度的增加而不断增大,由图 4 可知在路堤高度在 0.4 m 之前,随着填土高度增加沉降近似线性增加,路堤高度大于 0.4 m 之后随着填土高度增加沉降值增加幅度变小。这是由于随着路堤的高度变大,路堤下部砂土被压实,土体颗粒之间接触更加紧密,对下部区域起到加固作用,这也就使得下部软土产生更小变形。在设置土工格栅之后,沉降发展的总体规律并没有变化,但是相比于无加筋时,软土沉降随路堤高度增加的速率有显著的减小,并且填土高度越大、土工格栅抗拉强度越高时对沉降的减小作用越明显。这是由于土工格栅对上部土体有一个兜提作用,土工格栅能起到分担竖向

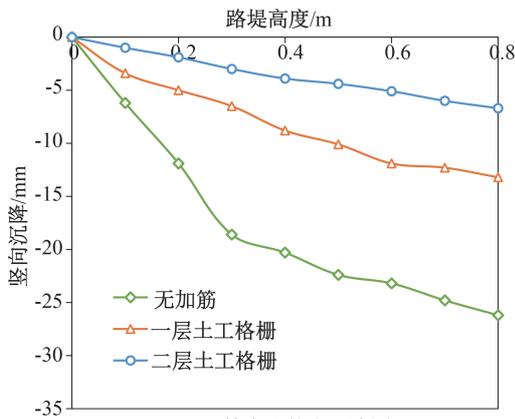
荷载的作用,并将其传递到桩顶,从而减小了软土沉降和沉降增加速率。当土工格栅的抗拉强度越大时,土工格栅抵抗变形的能力越强,即土工格栅的抗拉刚度增大,抗拉刚度越大,抵抗上部荷载的能力越强。因此土工格栅抗拉强度越大对减小软土沉降的效果越好。

2.2 土工格栅层数对沉降的影响

图5为不同层数土工格栅作用下,软土表面四桩中心处与两桩中心处的沉降随路堤高度的变化规律。可以看出不同层数加筋情况下四桩中心处与两桩中心处沉降随路堤高度的变化规律相似,并且沉降都是随着路堤高度的增加而增大,但是两层土工格栅对沉降的减小作用比一层时更显著,无加筋时的沉降量约是两层加筋时的三倍,并且相比于其他两种情况两层土工格栅时软土沉降随填土高度增加的速率最小。这是由于两层土工格栅进一步提高了作用范围内的整体刚度,形成一个刚度较大的平台,使得软土沉降值极大减小,沉降的分布也比较均匀。



(a) 四桩中心软土沉降图



(b) 两桩中心软土沉降图

图5 不同层数土工格栅下的软土沉降图
Fig.5 Settlement map of soft soil under different layers of geogrid

3 路堤填土中竖向应力分析

3.1 土工格栅抗拉强度对竖向应力的影响

图6表示的是一层层加筋情况下四桩中心上方填土竖向应力的分布规律。无加筋时,竖向应力分布曲线沿着填土表面向下与填土自重应力线基本重叠,然后达到一定深度时竖向应力减小,竖向应力曲线向内弯曲,在填土底部附近竖向应力有所增加,这是路堤内部土拱形成引起的;有加筋时,竖向应力曲线也存在与自重应力曲线近似重合段和向内弯曲段,但是相比无土工格栅时有土工格栅情况下竖向应力曲线存在三个反弯点,主要区别在于填土底部200 mm内,由于土工格栅的布置竖向应力先有较小增加然后再减小,这体现

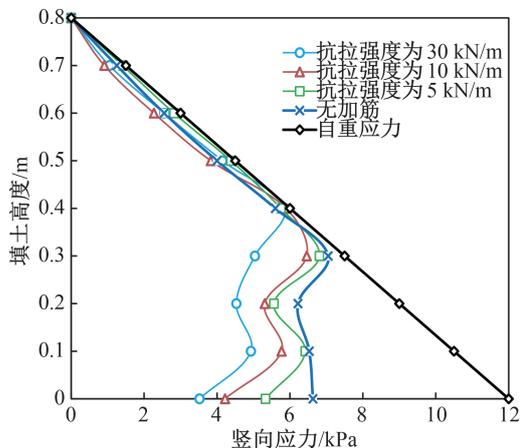


图6 不同抗拉强度土工格栅下填土内部竖向应力图
Fig.6 Vertical stress diagram of soil filling under different tensile strength geogrid

了土工格栅拉膜效应的作用。从图6中还可以看出不同抗拉强度的土工格栅作用下竖向应力的曲线图走势相似,但是抗拉强度越大竖向应力的减小幅度越大,路堤填土四桩中心的竖向应力越小,也即说明四桩中心荷载向桩顶转移程度越大。这是由于土工格栅抗拉强度越大产生的拉应力也越大,土工格栅承担的上部荷载传递到桩顶的部分越大,路堤底部的竖向应力也就越小。以上分析可以得出,增加土工格栅的抗拉强度能够促进路堤填土荷载向桩顶传递,使得土拱效应更加显著。

3.2 土工格栅层数对竖向应力的影响

图7表示的是不同层数土工格栅情况下四桩中心上方填土竖向应力的分布规律,图中反映出来的整体趋势是随着土工格栅层数增加竖向应力持续减小。两层土工格栅作用时,竖向应力的分

布曲线与填土自重应力分布线有很大一段接近重合的区域,比起无加筋和单层加筋情况,两层土工格栅作用时接近重合的部分更大,这表明两层土工格栅时竖向应力和路堤填土自重应力在路堤很大高度范围内的分布情况的差异很小,这也就体现了设置两层土工格栅时土拱效应的作用效果没有其他两种情况显著,也就是说设置土工格栅会对土拱效应有一定的促进作用,但是并不是层数越多越好,因为土拱效应的产生是由桩土间的差异沉降导致的,由上一节的分析可以知道土工格栅的层数越多桩土间的差异沉降会减小,差异沉降的减小对土拱效应的形成不利,设置两层土工格栅会限制土拱效应的发挥。

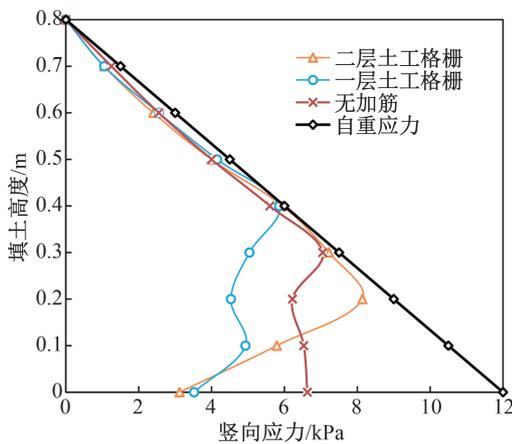


图 7 不同层数土工格栅下填土内部竖向应力图
Fig.7 Vertical stress diagram of soil filling under different layers of geogrid

4 桩土应力比分析

4.1 土工格栅抗拉强度的影响

图 8 描述的是不同抗拉强度的土工格栅作用下,桩土应力比随路堤填土高度的变化规律。从图中可以得出,随着填土高度的增加桩土应力比也逐渐增加,无加筋时当填土高度增加到 0.3 m 以后桩土应力比的增加速率就有所减缓,最后桩土应力比近乎稳定。这表明桩顶和四桩软土中心在填土高度大于 0.3 m 后承担的土压力等比例增加,此时高度再增加对桩土应力比的影响甚小,但是在设置了土工格栅时桩土应力比明显比无加筋时有了明显提高,并且土工格栅抗拉强度越大桩土应力比增大幅度越大。在土工格栅抗拉强度比较小并且填土高度不大时,有无土工格栅作用对桩土应力比的影响较小。这是由于填土高度不大时土工格栅产生的变形有限,再加上土工格栅抗拉

强度很小,此时产生的拉应力很小,这也就导致土工格栅竖向分量很小,此时土工格栅的作用就不能很好发挥出来,因此桩土应力比的差异也不大。在土工格栅抗拉强度为 30 kN/m 时,桩土应力比的值达到最大,这是由于土工格栅的抗拉强度越大路堤底部形成的加固区域刚度越大,填土自重会更多向桩顶转移,因此桩土应力比也相应较大。

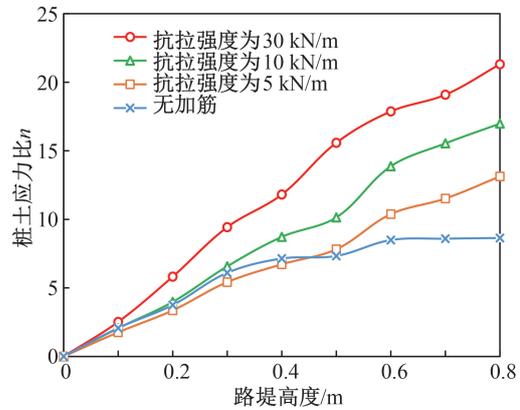


图 8 不同抗拉强度土工格栅下的桩土应力比
Fig.8 Pile soil stress ratio under different tensile strength geogrid

4.2 土工格栅层数的影响

图 9 描述的是不同层数的土工格栅作用下,桩土应力比随路堤填土高度的变化规律。从图中可以看出,无加筋、单层土工格栅和两层土工格栅作用时,桩土应力比随路堤高度的变化趋势相似。但是相比无加筋情况下,设置两层土工格栅比只设置一层土工格栅桩土应力比的增加幅度更大,并且桩土应力比的增加速率也更快。

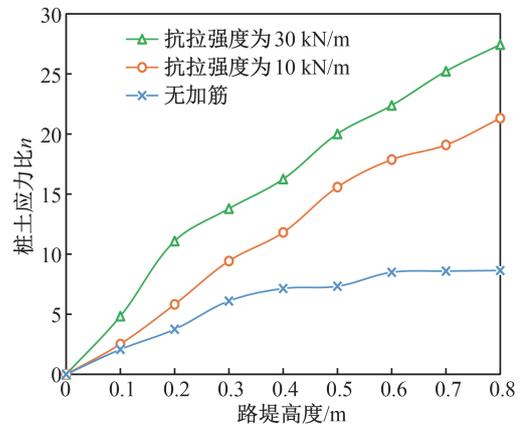


图 9 不同层数土工格栅下的桩土应力比
Fig.9 Pile soil stress ratio under different layers of geogrid

从图 9 中还可以得出,在无加筋、单层土工格栅和两层土工格栅作用下对应的桩土应力比最终分别为 9.4、21.1 和 27.7,单层土工格栅的作用使

桩土应力比增大了约2倍,两层土工格栅的作用使桩土应力比增大了约3倍。对于两层土工格栅,桩土应力比在填土高度增加的过程中始终要大于其他两种情况,这说明了土工格栅作用下荷载向桩顶的转移程度要明显大于另外两种情况,这是因为两层土工格栅共同作用时的刚度要大于单层土工格栅和无加筋情况,使得路堤底部形成一个刚度较大的平台,也就导致荷载更多地向桩顶转移。

5 结论

1)从软土沉降方面来分析,增大土工格栅的抗拉强度和土工格栅的层数会有效地减小软土沉降,增加土工格栅的层数对减小沉降的作用更明显,但是这是由于多层土工格栅增加了作用范围内的整体刚度,从而限制了软土的沉降。

2)从路堤填土竖向应力的分布规律来分析,无土工格栅和有土工格栅情况下的竖向应力曲线都有一段与填土自重应力线保持一致,不同的是设置两层土工格栅时保持一致的部分较长,其次无土工格栅时的竖向应力曲线在应力值减小一段后在路堤底部附近又稍微增加,而单层土工格栅时的竖向应力值会在稍微增加后又有减小,双层土工格栅只会出现一个反弯点,这种不同是由三种情况下的整体刚度差异引起的。

3)从桩土应力比的分析来看,有无土工格栅情况下桩土应力比的差别非常大,抗拉强度大的土工格栅对应的桩土应力比也越大,这是由于土

工格栅抗拉强度大产生的拉膜效应更明显,两层土工格栅与周围砂土形成一个刚度较大的平台,使得桩土应力比大于一层土工格栅作用时。

参考文献:

- [1]潘锋,吴涛.桩承式加筋路堤在深层软土处理中的应用[J].工程与建设,2016,30(4):526-529.
- [2]张崇磊.中等压缩性土地区短桩桩网复合地基路基荷载传递规律及沉降机理研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [3]李波,黄茂松,叶观宝.加筋桩承式路堤的三维土拱效应分析与试验验证[J].中国公路学报,2012,24(1):13-20.
- [4]陈仁朋,汪焱卫,陈金苗,等.桩承式加筋路堤土拱及格栅受力模型试验研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1275-1280.
- [5]杨昆.桩承式加筋路堤中加筋垫层的工作特性研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [6]徐超,宋世彤.桩承式加筋路堤土拱效应的缩尺模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):4343-4350.
- [7]费康,陈毅,王军军.桩承式路堤土拱效应发挥过程研究[J].岩土力学,2013,34(5):1367-1374.
- [8]郑俊杰,曹文昭,董同新,等.中低压缩性土地区桩承式加筋路堤现场试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1549-1555.
- [9]陈庚,陈永辉,徐锴,等.桩承式加筋路堤土拱效应现场试验[J].长安大学学报,2016,36(4):42-47.
- [10]朱小军,龚维明,赵学亮,等.垫层土拱效应试验与计算方法[J].东南大学学报,2013,43(5):958-961.

(责任编辑 周雪梅)