

大直径管材结构化路堤在深厚软基中的应用研究

王永疆¹, 聂丁洁¹, 张留军¹, 刘洋², 刘韩冰², 王振梁^{2*}

(1. 中国电建路桥集团有限公司, 北京市 100048; 2. 北京科技大学)

摘要:以广东省中开高速公路某桥头深厚软基段为例,采用大直径管材结构化路堤来减少高速公路的工后沉降。通过实测结构化路堤的水平位移、剖面沉降和分层沉降等,对大直径管材结构化路堤在荷载作用下的变形特征进行了研究,同时采用快速拉格朗日有限差分数值方法对大直径管材结构化路堤进行了数值模拟。结果表明:荷载作用下大直径管材的最大水平位移集中在管底两侧,竖向位移集中于管顶,路基土体水平位移在中上部较大,但整体沉降量小,在深厚软基中的控沉效果理想。最后结合工程实践和数值分析结果,提出了大直径管材结构化路堤的一些设计建议。

关键词:大直径管材;结构化路堤;软土;数值分析

中国沿海地区的高速公路有相当一部分建在深厚软土地基上,其土质以海陆相互的冲淤泥、淤泥质土为主,这类土一般含水量高、孔隙比大、渗透性小、压缩性高、抗剪强度低,且土层厚度大。软土层在外荷载作用下会产生较大的沉降以及不均匀沉降。因此,控制工后沉降成为公路建设中重点关注的问题之一。

控制工后沉降的方法之一就是対软土路基进行处理。国内外对软土地基处理进行了很多研究,目前公路软基处理方法的主要原理有:① 挖除不符合工程要求的软弱土层,换填物理力学性能好的土;② 利用重锤落下的强大冲击打击土体,从而强制土体密实的夯实方法;③ 通过在土体中构造排水通道,再配合适当的外力进行预压,迫使土体中的水通过排水通道排出而达到排水固结的效果;④ 在土体中加入构造物,使土体和构造物共同提供承载力的复合地基法。

除了通过地基处理加固地基外,还可以通过降低路堤荷载减少工后沉降,该文采用的大直径管材结构化路堤,就是这一控沉方式。装配式大直径管材被大量应用于涵洞工程,但应用于高速公路深厚软土路基的沉降控制较少。该文提出应用大直径波纹管修建结构化路堤,是将通常用于快速抢修工程中的大直径管材用来进行路堤填筑,在常规软土路基处理的基础上,再通过这种结构化路堤进一步减轻路堤荷载,从而实

现工后沉降的大幅降低,避免运营过程中病害的发生,提高行车舒适性,减少后期养护和维修成本,实现全寿命周期成本最优。

1 工程概况

广东省中(山)一开(平)高速公路全线长 133 km,双向六车道,主线路基设计宽度为 34 m,匝道路基设计宽度为 9 m,设计速度为 120 km/h。全线特殊路基处理主要分布在新会区,工程量大且多为深淤泥质软基,试验段的软土天然含水量为 90.7%,天然孔隙比为 2.37,压缩系数为 0.832 MPa^{-1} ,具有含水量高、孔隙比大、强度指标低、可压缩性高等特点。在双水互通 E 匝道先进行真空预压地基处理,然后采用大直径管材结构化路堤的联合加固减载措施,大直径管材的直径为 4 m,控制桥头段的工后沉降。试验段桩号为 EK0+156~EK0+206,试验段路基纵剖面图如图 1 所示。

试验段场地内土层从上往下分别为:① 素填土:灰褐~灰色,黏性土为主,顶部可塑、底部流塑~软塑,湿,层底埋深 2.0 m 左右;② 淤泥:灰色,流塑~软塑,饱和,高压缩性,渗透性差,含少许碎贝壳,局部夹粉质黏土薄层,层底埋深 17.0 m 左右;③ 黏土:浅黄色,

收稿日期:2020-08-14

基金项目:中电建路桥集团有限公司科技项目(编号:ZKGS-QT-0020)

作者简介:王永疆,男,大学本科,高级工程师。

* 通信作者:王振梁,男,硕士研究生, E-mail:1788841063@163.com

湿,可塑,黏性较好,局部分布,层底埋深 20.0 m 左右;④ 粉质黏土:黄褐色,可塑,零星分布,层底埋深 25.0 m 左右。

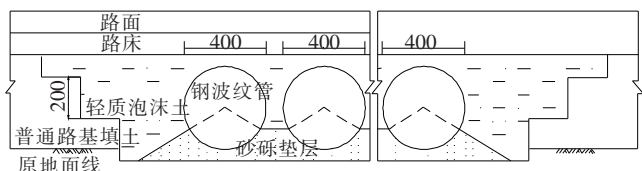


图 1 大直径管材装配式路基纵剖面图(单位:cm)

路堤总高度为 5 m,底部砂砾垫层厚度为 0.5 m,大直径管材的直径为 4 m,泡沫轻质土厚度为 4.5 m,泡沫轻质土的密度为 600 kg/m^3 。路基从 2019 年 4 月开始填筑,于 2019 年 5 月填筑完成。

2 现场监测及结果分析

试验段埋设了测斜导管、多点位移计、横剖管等仪器监测路堤的水平位移、分层沉降、剖面沉降等。现场仪器平面及剖面布置图如图 2、3 所示。

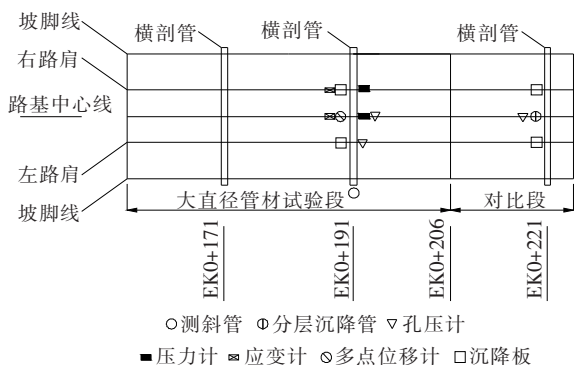


图 2 路基监测仪器布置图

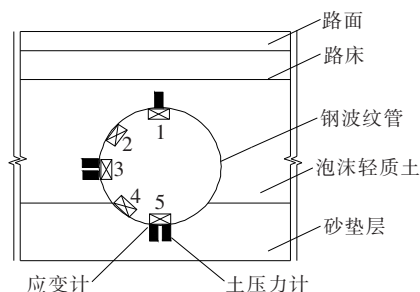


图 3 大直径管材监测仪器布置图

监测时间为 2019 年 5 月至 2020 年 5 月,共 12 个月。下面选择有代表性的监测数据,对采用大直径管材结构化路堤的变形特性进行分析。

2.1 水平位移分析

图 4 为 EK0+191 断面的路基土体水平位移曲线。

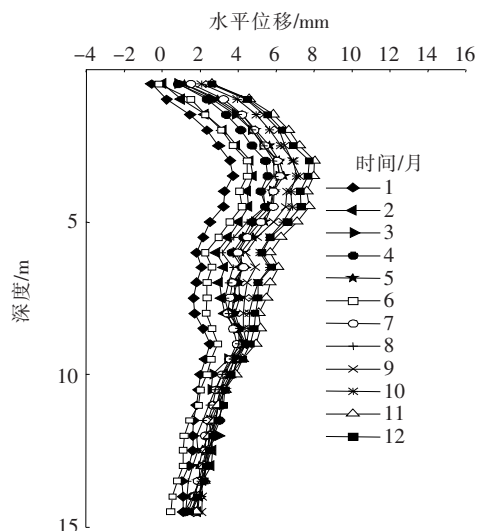


图 4 水平位移监测结果

由图 4 可看出:随着时间的推移,上覆荷载不断增加,土体的水平位移逐渐增加,在深度为 2~6 m 处水平位移增加量尤为明显。8 m 以下水平位移变化量较小,这种变化趋势与上覆荷载对土体的影响深度以及土层性质有关。

2.2 剖面沉降分析

图 5 为 EK0+180 断面的剖面沉降曲线,图中所选数据为试验段路堤填筑后 1 年的剖面沉降量。

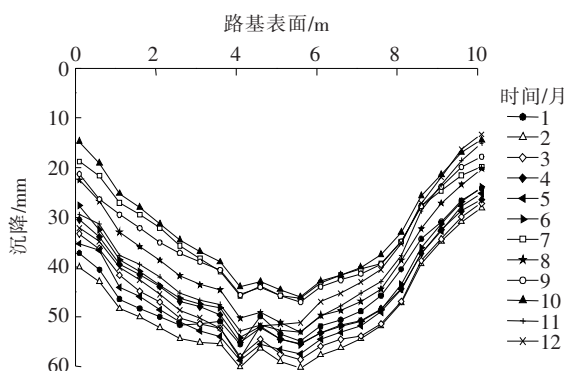


图 5 剖面沉降监测结果

从图 5 可以看出:随着时间和上覆荷载的不断增加,路基的剖面沉降逐渐增大,并呈现出中间沉降量大于两边沉降量的趋势。

2.3 分层沉降分析

图 6 为 EK0+191 断面的分层沉降曲线。

从图 6 可以看出:随着时间和上覆荷载的不断增加,路基分层沉降随着土层位置的深度增加不断减小,

距离路面越近沉降值越大,沉降主要发生在地表以及距地表4 m处,最大沉降出现在地表位置。

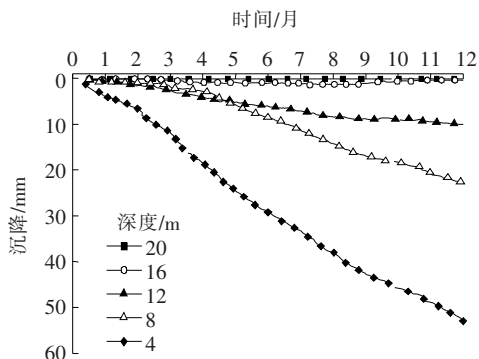


图6 分层沉降监测结果

3 数值模拟及结果分析

3.1 计算模型

为了进一步分析采用结构化路堤对工后沉降的影响,采用FLAC^{3D}对试验段具体工况进行了数值模拟。根据实际地质条件和路堤宽度建立的几何模型和数值模型分别如图7、8所示。模型计算深度为20 m,其中素填土3 m,淤泥层厚15 m,黏土层厚2 m。路堤计算宽度12.5 m,路面宽9 m。

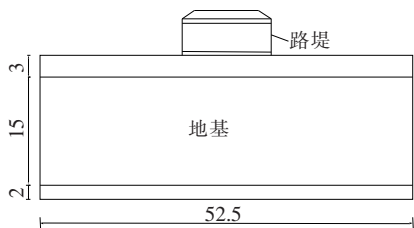


图7 几何计算模型(单位:m)

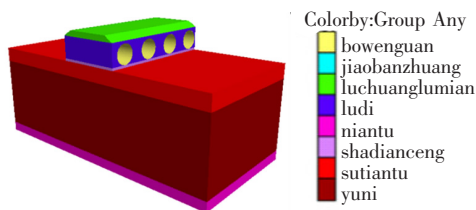


图8 数值计算模型

3.2 计算参数

模拟主要分析对象为路堤,模型中的地基为已完成真空预压加固处理后的状态。路堤的填筑施工开始后,地基必定会开始新一阶段的沉降,模拟过程中设置素填土层、黏土层和粉质黏土层采用摩尔-库仑本构模型,淤泥层设置为修正剑桥本构模型。根据现场勘

察资料和经验,试验段各土层的计算参数如表1所示。

表1 路堤与地基参数

土层及材料	层厚/ m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa
路面	1.17	20.0	480	0.27	120
泡沫土	4.50	6.0	400	0.25	120
砂垫层	0.50	18.0	20	0.30	5
素填土	3.00	18.0	15	0.35	21
黏土	15.00	21.0	18	0.40	29
粉质黏土	2.00	19.0	14	0.35	24
钢波纹管	4.00	78.5	2.1×10^5	0.30	

3.3 边界条件及初始条件

在建立地基土数值模型时,将路堤部分先设置为空网格,计算在重力作用下真空预压施工完成后的地基应力,并将模型的位移在计算结束之后归零,以使得路堤施工前整个地基处于正常固结状态。

网格模型的前后边界在X方向上受到水平速度约束;模型底部在X、Y、Z3个方向上受到相当于固定支座效应的速度约束;在Y方向上该模型各个节点也受到速度约束。

3.4 模拟结果分析

3.4.1 结构化路堤水平位移分析

结构化路堤施工完成后的水平位移如图9所示。

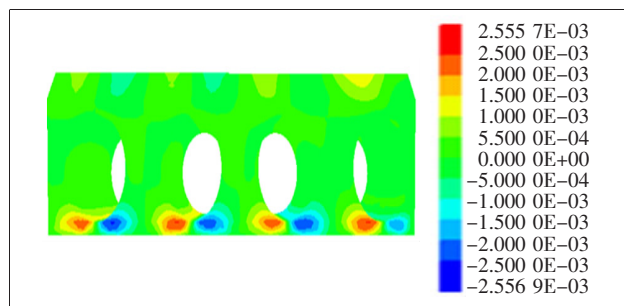


图9 竣工后的结构化路堤水平位移云图(单位:m)

由图9可看出:水平位移主要发生在坡脚以及大直径管材与地基接触处,由于上覆荷载挤压,路堤填筑物产生压缩,土体向两侧挤压,在坡脚的位置大直径管材底部向坡脚端产生形变,整体结构式路堤其余位置并无明显水平位移。

3.4.2 大直径管材变形分析

结构化路堤施工完成的水平位移以及竖直位移云图,如图10、11所示。

由图10、11可以看出:大直径管材的水平位移主要发生在管底部分,上部基本不产生水平位移,这是由

于地基土与周围泡沫轻质土共同挤压大直径管材,使其底部产生向两侧的水平位移。同时管材的上部由于受压产生较大的竖向位移。

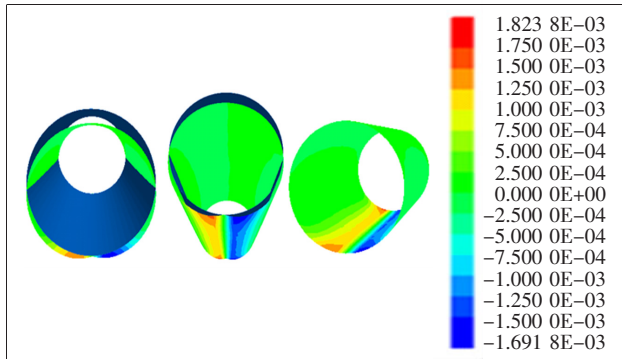


图 10 竣工后大直径管材水平位移云图(单位:m)

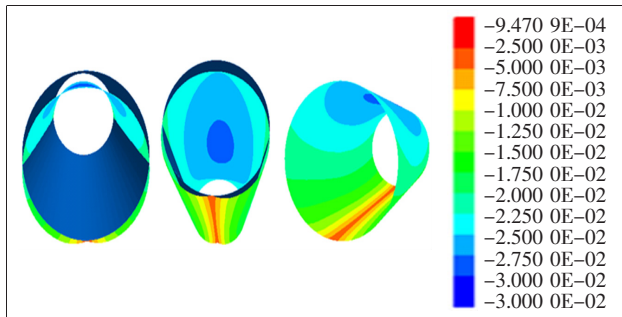


图 11 竣工后大直径管材竖向位移云图(单位:m)

在管顶位置设置变形监测点,监测数据表明:结构化路堤竣工后大直径管材的最大竖向位移出现在管顶部中心处,为 30.3 mm,在结构化路堤上施加车辆荷载后,大直径管材的最大竖向位移出现在管顶部中心处,为 51.2 mm,与路堤表面的沉降基本一致。

随着泡沫轻质土的填筑、路面结构的施工和车辆荷载的施加,上覆荷载不断增大,路堤产生沉降,路堤填筑层发生压缩。下部大直径管材受挤压产生向下的变形,同时受地基土和泡沫轻质土的挤压发生水平侧向变形,导致大直径管材底部中心位置产生向上隆起的趋势(向上变形很小)。

3.4.3 土体水平位移分析

为了解试验段地表以下土体水平位移的情况,在试验段 EK0+191 设置了监测点,监测点竖向间距为 0.5 m。不同深度地基水平位移模拟结果见图 12。

由图 12 可以看出:上覆荷载使得路基土体产生向外的侧向水平位移。随着时间的推移,上覆荷载不断增加,水平位移也呈逐渐增大的趋势。水平位移随着土体深度的增加先增加后逐渐减小,在坡脚处和深度

较深的位置水平位移量较小,在路基土中上部水平位移最大。

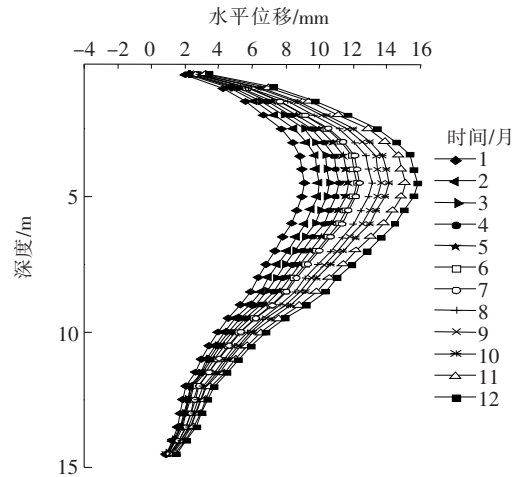


图 12 水平位移模拟曲线图

监测结果与计算结果在位移变化趋势上基本一致,但监测结果在数值上较小,主要是由于模拟计算时将标准车辆荷载简化为均布荷载,地基土受力均匀,而实际运行中车流量大小的变化以及工程周围存在的大型工厂等均会影响深层土体的水平位移。

3.4.4 路基剖面沉降分析

在 EK0+180 计算模型中设置监测点进行剖面沉降监测,监测点竖向间距为 0.5 m,模拟得到的路基剖面沉降变化情况如图 13 所示。

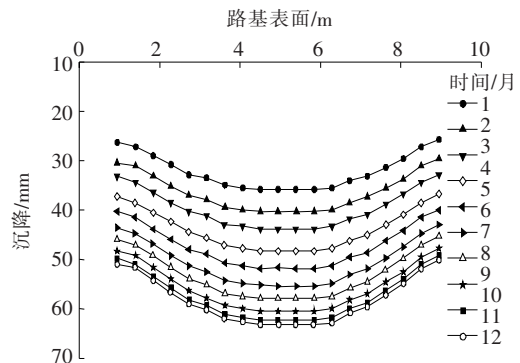


图 13 剖面沉降模拟曲线图

从图 13 可以看出:计算结果和监测结果在变化趋势上基本一致,随着时间和上覆荷载的增加路基剖面沉降逐渐增大。但计算结果在数值上较监测结果偏大,这与土体水平位移的计算结果偏大的原因一致。

3.4.5 分层沉降分析

为了分析不同土层的沉降变形差异,在模型中设置监测点,监测距地基表层、4、8、12、16、20 m 处的竖向沉降值,模拟结果如图 14 所示。

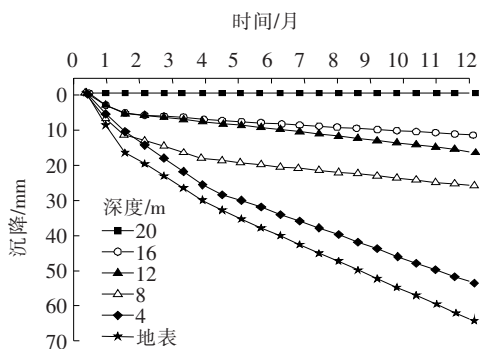


图 14 分层沉降数值模拟曲线图

对比监测结果与模拟计算结果,路基分层沉降的总体变化趋势基本一致,但计算结果在数值上较监测结果大,考虑到试验段断面位置与地质勘察取样的位置不在同一个地质横断面上,同时,实际工程的土层并非均质,而在模拟时,整个土体均按均质材料进行模拟计算,在对模型参数进行取值时也较保守,这些原因均可能导致监测数据与模拟数据存在一定的差异性。

4 大直径管材结构化路堤设计建议

目前大直径管材结构化路堤在公路建设中应用广泛,但在软土路基上用于减沉作用的应用较少,从该工程的应用效果看,采用大直径管材结构化路堤对于减少软基沉降效果明显,实际应用中联合其他软基处理措施,可以很好地解决深厚软土路基沉降过大的问题。

基于该工程试验段的试验结果以及数值模拟得到的沉降规律,该文给出大直径管材结构化路堤的推荐设计建议,如表 2 所示。

表 2 大直径管材结构化路堤推荐设计标准

大直径 管材	管材位置	管材直径	管材长度	管材间 隔/m
Q235A 为主 要材料的 钢波纹管	垂直于 公路走向	不大于路 堤高度的 2/3	不低于路 堤上表面 宽度的 5/6	1.5~1.8

5 结论

通过大直径管材结构化路堤的现场试验研究与数值模拟,分析了大直径管材结构化路堤在减少路基沉降方面的效果以及大直径管材的受力与变形特性,得出主要结论如下:

(1) 大直径管材的最大竖向位移出现在管顶部中

心处,为 51.2 mm,与路堤表面的沉降基本一致。其水平位移主要发生在管底部分,上部基本不发生水平位移,由于上部受压产生竖向位移,同时地基土与周围泡沫轻质土共同挤压使得大直径管材底部产生向两侧的水平位移变形。

(2) 随着时间和上覆荷载的不断增加,地基土体水平位移和剖面沉降呈逐渐增大的趋势。水平位移随着土体深度的增加逐渐减小,在坡脚处和深度较深位置水平位移量较小,在路基土中上部水平位移最大。

(3) 现场试验和模拟结果均表明:采用大直径管材结构化路堤对于减少软基沉降效果明显,实际应用中联合其他软基处理措施,可以很好地解决深厚软土路基沉降过大的问题。同时基于现场试验监测和数值模拟得到的沉降规律,给出了大直径管材结构化路堤的设计建议。

参考文献:

- [1] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [2] 戴雪. 小虎岛地区软基特性与处理技术研究[D]. 河北工程大学硕士学位论文, 2013.
- [3] 刘光明. 软土地基市政道路加宽工程路基差异沉降特性及处治措施综述[J]. 中外公路, 2018(2).
- [4] 邱伟, 易善昌, 龚维亮, 等. 基于 EPS 的海相深厚软基区路基不均匀沉降处治研究[J]. 中外公路, 2018(4).
- [5] 邹洽宇. 桥背发泡轻质土填筑工程沉降计算研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2015.
- [6] 孙筠. 已建软基桥梁桥头跳车的处治方法机理分析及试验研究[D]. 浙江大学博士学位论文, 2010.
- [7] 张少文, 程康, 郝郁清. 苏州软土地区地铁基坑墙顶竖向位移变形特性分析[J]. 中外公路, 2018(6).
- [8] 张儒雅. 短工期条件下高速公路桥头引道沉降控制技术研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 2008.
- [9] 张清峰, 王东权. 煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(5).
- [10] 吴雪婷. 温州浅滩软土工程特性及固结沉降规律研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2010.
- [11] 何开胜, 戴济群. 超深排水板堆土预压法[J]. 水利学报, 2000(6).
- [12] 钱劲松, 凌建明, 黄琴龙. 土工格栅加筋路堤的三维有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003(12).
- [13] 刘海鹏, 陈冠一, 杨和平. 酶石灰技术加快稳定软土路基试验研究[J]. 中外公路, 2019(6).
- [14] 王会永, 袁昂. 沿海软土路基 CFG 桩加固挤密作用模拟研究[J]. 中外公路, 2017(3).