

基于 ABAQUS 的土工格栅和水泥搅拌桩 复合地基加固研究

曾 帅

(湖南大学设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要: 在城市道路建设过程中通常会遇到各种不同的地质情况,软土地基是常见的地质问题之一,城市道路的路基是路面的基础应满足强度、变形和稳定性的要求;由于软土具有天然含水量大、压缩性高、承载力低和抗剪强度很低等特点,当采用软土作为路基基础时,应采取各类地基加固处理措施来对软土地基进行处理使得城市道路满足设计的要求。以长沙经开区党校路(东六路—福祥路)为案例,针对采用土工格栅和水泥搅拌桩加固软土形成复合地基的工况,运用 ABAQUS 建立了相应的数值模型模拟未施加加固措施和施加土工格栅结合水泥搅拌桩复合加固措施的情况,并以竖向沉降、水平位移、竖向应力三个指标进行了复合地基加固性能的规律对比分析,研究结论对城市道路软土地基处理起到很好的指导作用。

关键词: ABAQUS;土工格栅;水泥搅拌桩;复合地基加固

中图分类号: TU44,TV223

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0048-06

0 引 言

在城市道路建设过程中,常遇到软土地基的问题;由于软土具有强度天然含水量大、压缩性高、承载力低和抗剪强度很低等特点^[1-2],导致软土路基具有强度低、沉降大、稳定性差等突出问题,在车辆荷载作用下,软土地基将产生较大的变形,导致相应道路无法正常完成通车行驶的功能,当软土地基导致较大路面存在较大的不均匀沉降时,将导致如路面开裂、软土地基路面与桥梁路面高差较大等现象,进而导致路面沉降裂缝漏水、桥头跳车等一系列问题^[3-5]。为了城市道路使用过程中具有较好的安全性和舒适性,在城市道路的设计、施工、监理等环节要严格遵守相关规范,达到严格控制地基沉降的目的^[6]。我国在软土地基加固和沉降控制领域开展了大量的研究工程,何玉琼^[7]为比较抗滑桩与 CFG 桩的加固效果,以某高速公路软土地基路桥过渡段为例,基于 FLAC3D 模拟计算抗滑桩和 CFG 桩加固路基填筑后的地表沉降。王连俊^[8]针对高速公路河谷区复杂沉积环境多层软土地基采用强夯垫层法处理的加固效果与沉降变形进行了研究,在地基处理及路基填筑期间,分析了不同类型软土地基土体的变形、

应力和孔隙水压力随时间的变化规律,揭示了强夯垫层法处理不同类型软土地基的加固效果、有效加固深度和范围。针对低净空条件下的临近既有线路路基地基加固问题,富志根^[9]针对低净空条件下的临近既有线路路基地基加固问题,提出了接杆搅拌桩处理方案,并进行了现场试验;对接杆桩施工全过程的各环节进行了工效分析,并提出了改进措施。为研究水泥搅拌桩联合堆载固结法对海相软土路基的加固效果,陈盛原^[10]在现场试验进行“先堆载后成桩(DZ)”及“先成桩后堆载(ZD)”两种工艺的处理效果对比。试验过程中通过地表沉降、孔隙水压力、侧向位移、桩的承载力等监测及检测手段,探究了两种工艺条件下的工程特性,分析了各自优异性及其适用的工况条件。

软土是道路建设中十分常见的地质类型,尽管我国在软土地基加固方面展开了大量研究,也取得巨大成就,但是软土城市道路的工程质量问题依旧存在;因此,为保障城市道路的正常使用的正常使用,针对不同的地质情况,软土路基城市道路在建设时需要进行不同方式的地基加固处理^[11-13]:(1)将基础下一定范围内的土层挖去,然后回填以强度较大的砂、砂石或灰土的换填垫层法;(2)用于增加地基抗拉强度的土工合成材料加筋法;(3)加强地基的排水固结的塑料排水带、真空预压法和砂井预压法;(4)提升地基的承载力的碎石桩法、水泥土搅拌桩法、高压旋喷注浆桩法;(5)增

收稿日期:2022-05-03

作者简介:曾帅(1980—),女,本科,高级工程师,从事道路工程设计与研究工作。

大地基的密实度的振动水冲法和强夯法。(6)组合加固的方法(土工格栅结合水泥搅拌桩、砂垫层结合预压固结等)。随着我国城市建设的迅猛发展,修建了大量城市道路,地基处理技术在城市道路工程中得到了广泛的应用。

本文以长沙经开区党校路(东六路—福祥路)为案例简述其软土的分布,基于有限元 ABAQUS 软件,对土工格栅和水泥搅拌桩复合地基加固进行研究,通过对路基的沉降、水平位移和竖向应力分布进行分析,得到复合加固方法对路基的沉降和侧向位移的影响,达到了较好地指导城市道路软土地基处理方案的目的。

1 工程概况

梨江东六路—福祥路项目的地理位置分布见图1。党校路位于长沙经济技术开发区西南部的梨江—榔梨片区,为东西走向城市次干路,西起东六路,东至福祥路,道路全长 1.3 km,采用设计速度为 40 km/h,路基设计宽度为 26 m。项目北侧为长沙经开区已开发区域,项目的建设能够将两个区域相连成为一个重要通道,促进园区间的合作与交流,为长沙经开区的发展提供交通保证。

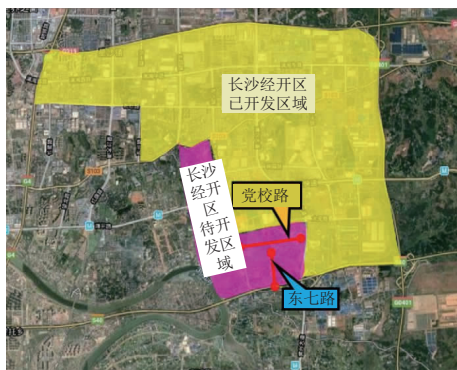


图1 梨江东六路—福祥路项目位置图

梨江东六路—福祥路项目施工现场见图2。该路基底下存在大量软土,地形相对平坦,地质勘察结果表明:地层岩性主要由素填土、交替的粉质黏土以及大量的淤泥质粉质黏土等构成,在未经过地基处理的情况下不能满足城市道路路基和桥梁对地基土的要求^[14]。此外,该地段基岩埋深较大,地下水水量中等丰富,水位埋深小,未见褶皱构造和断裂构造明显发育,无不良地质情况。该区总体工程地质条件较差,该软土地基加固方法主要为土工格栅结合水泥搅拌桩。K0+770 断面场地典型加固设计路段平面图和剖面图分布见图3、图4。



图2 梨江东六路—福祥路项目施工现场

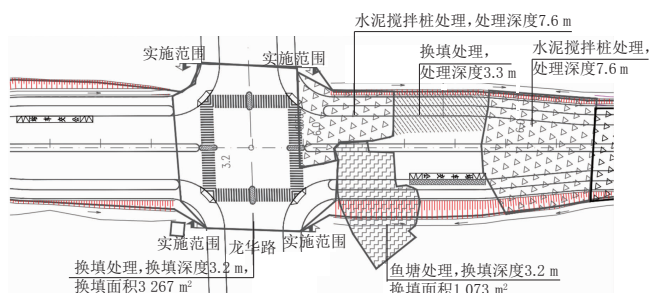


图3 K0+770 断面路段平面图

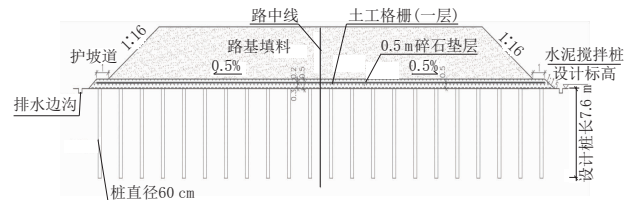


图4 K0+770 断面路段土工格栅结合水泥搅拌桩加固剖面图

2 有限元软件 ABAQUS 介绍

城市道路建设中,软土地基上路面的沉降问题严重影响着道路的正常使用寿命^[15]。ABAQUS 为有限单元法,具有功能强大、使用简单、计算准确等优点,对岩土工程问题具有强大的适应性和准确性,在计算中使用 ABAQUS 可以真实的模拟材料的本构关系和复杂的边界条件,在岩土工程中被广泛的采用,是十分有效的分析方法^[16-18]。

3 有限元模型的建立

3.1 几何模型的建立及材料属性的定义

(1)模型尺寸

本文用 ABAQUS 对梨江东六路—福祥路快速通道 K0+770 断面进行有限元数值分析计算。K0+770 断面的土层较复杂,依据现场实际工程将软土地基划分为4层:分别为 0.8 m 厚的素填土、2.6 m 厚的 1 号粉质黏土、4.2 m 厚的淤泥质粉质黏土、12.4 m 厚的 2 号粉质黏土。K0+770 断面场地典型地层分布断面见图5。

设计道路坡度为 1:1.6,路基宽度为 26 m,路堤

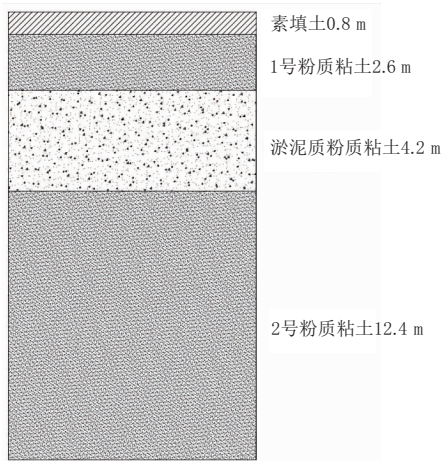


图5 K0+770断面场地典型地层分布断面图

高度为5 m,分4次每层填筑1.25 m分层施工填筑完成。路面结构构造为0.05 m上面层、0.06 m中面层、0.09 m下面层、0.20 m基层、0.22 m底基层。为了避免地基边界条件对模型计算结果的影响,在建立数值模型时将地基深度取20 m、地基宽度取地基深度的5倍,即为100 m。

(2)基本假定

对于绝大部分岩土在进行数值分析时,需要对土体采用弹塑性模型进行模拟。为计算方便,建模过程中将道路转化为二维平面应变问题研究。

(3)模型参数

梨江东六路—福祥路路基主要由素填土、交替的粉质黏土以及大量的淤泥质粉质黏土,道路路面的参数、路堤填土的参数、地基土的参数分别见表1~表3,在地基和路堤连接处铺设厚度为0.4 m垫层,垫层的容重、弹性模量、泊松比、渗透系数分别为20 kN/m³、46 MPa、0.3、1.2 m/d。土工格栅直接设置在路堤底部,土工格栅的张拉模量为4.65×10⁴ MPa/m,泊松比为0.24。在垫层下的软土层中打入桩体直径为0.6 m,长度为7.6 m,桩间距为1.5 m的水泥搅拌桩,桩体的弹性模量为130 MPa,泊松比为0.23。

表1 路面材料参数

结构层	材料名称	弹性模量 E/kPa	泊松比	容重 / (kN·m ⁻³)
上面层	AC14	1.45 × 10 ⁶	0.31	23.6
中面层	AC22	1.24 × 10 ⁶	0.32	23.4
下面层	AC 27	1.04 × 10 ⁶	0.30	23.1
上基层	水泥稳定碎石基层	1.55 × 10 ⁶	0.32	23.8
下基层	低剂量水泥稳定碎石底基层	7.23 × 10 ⁵	0.29	23.9

(4)材料属性的定义

在ABAQUS中通过属性模块对创建好的地基土

表2 路堤填土参数

材料类型	弹性模量 E/kPa	泊松比	容重 γ _a / (kN·m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	摩擦角 / (°)	渗透系数 / (m·d ⁻¹)
路堤填土	2.65 × 10 ⁴	0.36	18.8	28.5	26.8	0.014

表3 地基土层参数

材料类型	弹性模量 E/kPa	泊松比	容重 / (kN·m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	摩擦角 / (°)	渗透系数 / (m·d ⁻¹)
素填土	6.45 × 10 ³	0.32	18.3	11.2	13.4	0.065
1号粉质黏土	2.76 × 10 ⁴	0.33	20.2	24.6	17.8	8.7 × 10 ⁻⁴
淤泥质粉质黏土	1.41 × 10 ⁴	0.31	19.3	12.7	17.6	1.8 × 10 ⁻³
2号粉质黏土	2.44 × 10 ⁴	0.34	19.5	17.8	26.3	8.5 × 10 ⁻⁴

层、路堤填土和路面材料部件分别进行材料的定义,土工格栅结合水泥搅拌桩的软土路基加固数值模型材料定义的分区见图6。

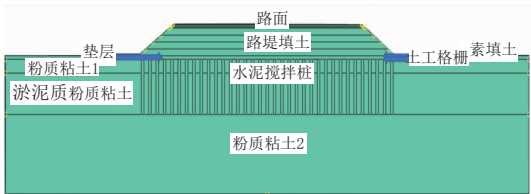


图6 路基加固数值模型材料示意图

3.2 设置分析步

GEOSTATIC 分析步的设置十分重要,对整个数值分析结果的精确度有着显著影响,通常而言,对于软土路基分析中,当竖直位移的最大值小于1.0e⁻⁶时,地应力可视为达到了较好的平衡状态^[19],从图7未铺筑路堤和路面前的地应力平衡模型中可以看出:当模型达到地应力平衡状态时,竖直位移的最大值2.223e⁻¹³,远小于1.0e⁻⁶,可以认为地应力平衡较好,初始地应力达到平衡状态。

为较好地体现路堤、路面的分层施工和分层施工之间的时间间歇,对于每一层都设置两个固结分析步。第1分析步用体力模拟荷载的添加,模拟每层施工固结;第2分析步用来模拟施工间隙期时间内的软土地基固结过程。可以看出:本数值模拟过程建立1个地应力平衡分析步和16个固结分析步,能真实有效地模拟了整个软土路基的加固施工过程。

3.3 网格划分

在数值分析过程中,网格划分的大小直接影响到计算的精度^[20];将尺寸设置为0.4 m。设置单元的形状为为四边形,网格划分方式为结构划法,接着指派单元类型,最后划分网格,节点总数为12 040,单元总数为9 835,通过图7可以网格划分较均匀,沉

降云图分布较规则,网格划分的质量较好。

4 ABAQUS 数值模拟计算过程及结果分析

4.1 ABAQUS 数值模拟计算过程

路堤采用分层施工,分为4层每层1.25 m,总高度为5 m;路面分别为上面层、中面层、下面层、上基层、下基层。为了运用ABAQUS真实模拟实际施工,通过移除和激活命令可较好地体现分层施工过程,此外,对每层施工均设置2个分析步,分别用于模拟施工固结和施工间歇期固结。为了达到准确模拟的目的,建立数值模型后需要对模型进行地应力平衡,模拟铺筑前软土地基地应力的初始状态,地应力平衡后的未铺筑路堤和路面前的竖直位移云图见图7。

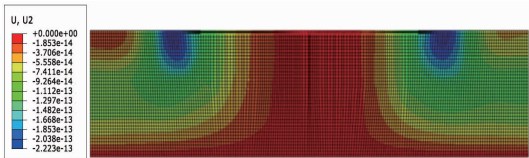


图7 地应力平衡后的未铺筑路堤和路面前的竖直位移云图

路堤第1、2、3、4层铺筑完成并经历施工间隙后下一层铺筑前的竖直位移云图见图8~图11。

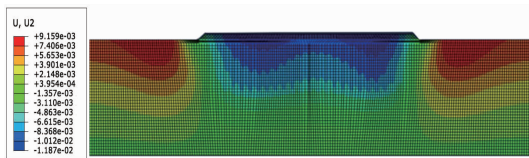


图8 铺筑第1层路堤并经历间隙后的竖直位移云图

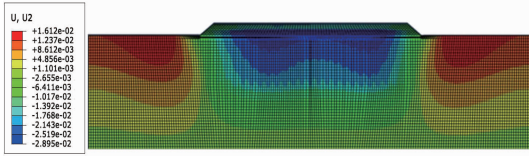


图9 铺筑第2层路堤并经历间隙后的竖直位移云图

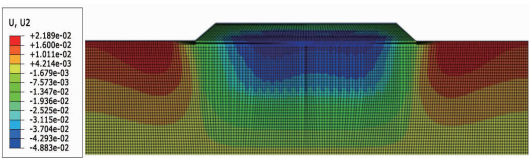


图10 铺筑第3层路堤并经历间隙后的竖直位移云图

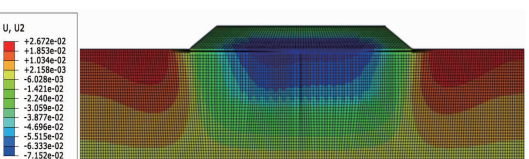


图11 铺筑第4层路堤并经历间隙后的竖直位移云图

路面上面层AC-14铺筑完成后竖直位移云图见图12,路面中面层、下面层、上基层、下基层的铺筑完成后竖向位移云图类似图12。

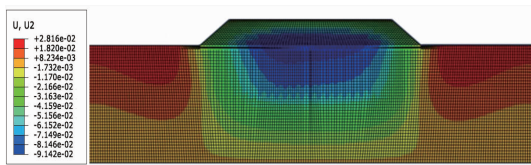


图12 路面上面层铺筑后的竖直位移云图

4.2 土工格栅水泥搅拌桩复合地基加固结果分析

(1)路基沉降分析

针对梨江东六路—福祥路路基使用土工格栅和水泥搅拌桩复合地基加固,为研究加固方式对路基沉降的影响,分别建立天然状态未作处理和采用土工格栅结合水泥搅拌桩复合加固两种情况的计算模型^[21],未做处理竖直位移云图和土工格栅水泥搅拌桩复合处理后竖直位移云图分别见图13和图14。

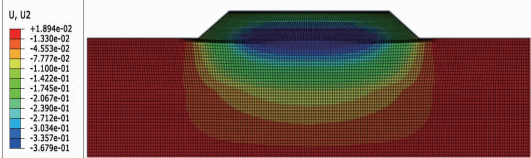


图13 天然状态未做处理竖直位移云图

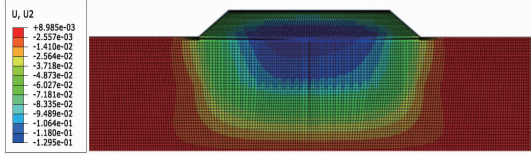


图14 土工格栅结合水泥搅拌桩复合处理后竖直位移云图

以软土路基顶面沉降为提取指标,为复合地基加固效果进行研究,由于城市道路左右两边以路基中线完全对称,选取左边半边路基沉降数值计算结果见表4和图15。

表4 复合地基处理前后路基沉降

计算点离路基中心线 的距离/m	未做处理的路基 顶面沉降/cm	处理后的路基顶面 沉降/cm
0	24.4	6.9
1.3	22.6	6.7
2.6	22.2	6.6
3.9	21.9	6.4
5.2	21.1	6.2
6.5	20.1	5.9
7.8	18.8	5.5
9.1	16.9	5.0
10.4	16.3	4.6
11.7	15.1	4.0
13	14.2	3.9

从表4可以看出,未做土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固处理前路基沉降最大值为24.4 cm,处理后路基沉降最大值为6.9 cm,沉降量减小17.5 cm。从图15中可以看出当采用土工格栅结合水泥搅拌

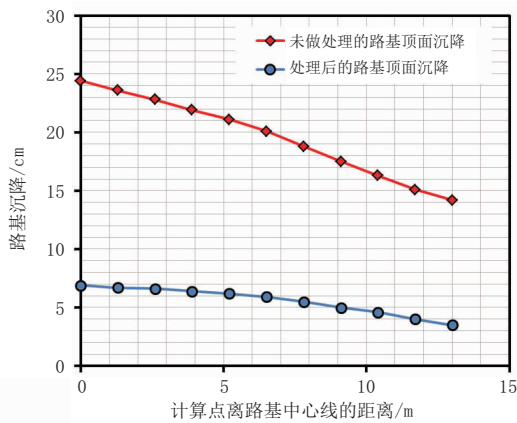


图 15 土工格栅和水泥搅拌桩复合地基处理前后路基沉降对比

桩复合地基加固后,软土路基将产生明显的路基沉降下降,由于城市道路左右两边以路基中线完全对称,竖向沉降在路基中心线处取得最大值,并向左右两侧逐渐变小。根据公路路基设计规范(JTG-D30—2015)规定,路基加固设计对路面沉降量控制标准取为 10 cm,可以看出未做处理的路基顶面沉降均大于控制值,土工格栅和水泥搅拌桩加固处理后路基的最大沉降量为 6.9 cm,小于路面沉降量控制标准,复合地基加固能较好的达到控制路面沉降的目的。

(2)路基水平位移分析

天然状态未作处理和采用土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固的水平位移云图分别见图 16、图 17。

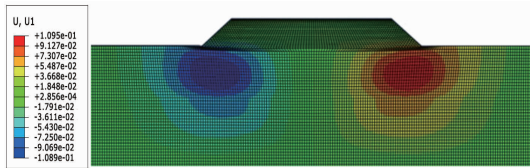


图 16 天然状态未做处理水平位移云图

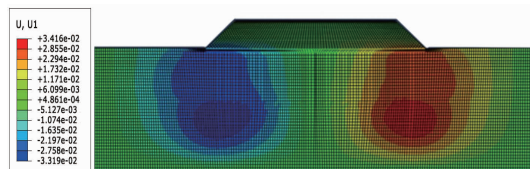


图 17 土工格栅水泥搅拌桩复合地基处理后水平位移云图

从图 16、图 17 可以看出:在复合地基加固处理前后的路基,水平位移均在靠近路堤坡趾处最大,为了研究复合地基加固处理前后路基水平位移的变化规律,以路堤底部为研究对象,由于城市道路左右两边以路基中线完全对称,选取左边路基数值计算结果见表 5 和图 18。

从表 5 可以看出未做复合地基加固处理前路堤坡趾处的水平位移为 6.3 cm,复合地基加固处理后路堤坡趾处水平位移为 2.0 cm,水平位移减小了 4.3 cm。从图 18 中可以看出,在复合地基加固处理前后的路

表 5 复合地基处理前后路堤底部水平位移

离路基中心线的 距离 /m	未做处理的路堤底部 水平位移 /cm	处理后的路堤底部 水平位移 /cm
0	0	0
2.1	0.9	0.3
4.2	1.8	0.5
6.3	2.8	0.8
8.4	3.8	1.1
10.5	4.6	1.2
12.6	5.4	1.5
14.7	5.8	1.7
16.8	6.1	1.8
18.9	6.2	1.9
21.0	6.3	2.0

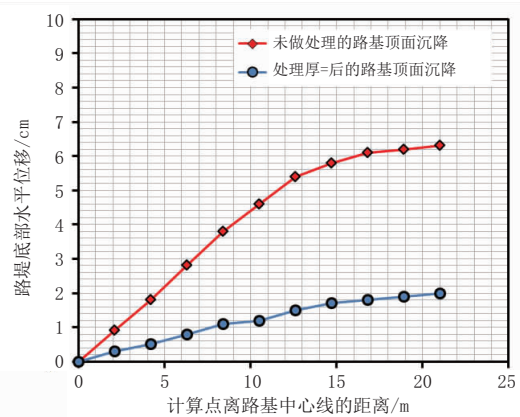


图 18 土工格栅和水泥搅拌桩复合地基处理前后路堤水平位移

基,水平位移均在靠近路堤坡趾处最大,并逐渐向路基中心线减小,在路基中心线处为 0;土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固后能够有效的减小路堤底部的水平位移。从而,土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固能够有效的减小路基的水平位移,达到提高路基稳定性的目的。

(3)竖向应力分布

软土地基在天然状态未处理和土工格栅水泥搅拌桩复合地基处理后路基竖向位移分别见图 19、图 20;可以看出,未做处理和处理后路基竖向应力分布明显不同,当未做处理措施时,竖向应力主要集中在路基土体中,当采取复合地基加固后,竖向应力主要集中在水泥搅拌桩处,达到了使路基土体应力重新分布。土工格栅和水泥搅拌桩复合地基加固处理能显著降低路基土体的竖向应力水平,软土路基的沉降主要是因为路基受力易压缩,由于加固后竖向应力重新分布减少了地基土体的竖向应力水平,从而达到了有效的减小沉降的目的。

5 结 语

本文利用基于 ABAQUS 对长沙经开区梨江东六

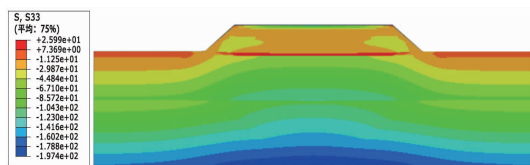


图 19 天然状态未做处理竖向应力云图

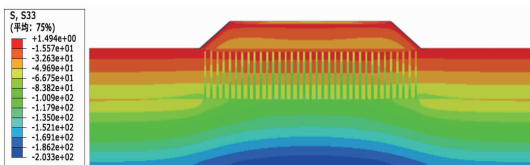


图 20 土工格栅水泥搅拌桩复合地基处理后竖向应力云图

路—福祥路快速通道软土地基进行了分析与研究,通过路基的沉降、水平位移和竖向应力分布规律研究分析了土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固对软土路基的沉降和水平位移的影响,结果表明:

采用土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固后,软土路基将产生明显的路基沉降下降,由于城市道路左右两边以路基中线完全对称,竖向沉降在路基中心线处取得最大值,并向左右两侧逐渐变小,土工格栅和水泥搅拌桩加固处理后路基的最大沉降量为 6.9 cm,小于路面沉降量控制标准 10 cm,复合地基加固能较好的达到控制路面沉降的目的。

在复合地基加固处理前后的路基,水平位移均在靠近路堤坡趾处最大,并逐渐向路基中心线减小;土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固后能够有效的减小路堤底部的水平位移。从而,土工格栅结合水泥搅拌桩复合地基加固能够有效的减小路基的水平位移。

基于 ABAQUS 对水泥搅拌桩结合土工格栅复合地基加固进行分析,经土工格栅和水泥搅拌桩复合地基加固后,路基的竖向沉降和水平位移、竖向应力均表现出显著减小的趋势。可知土工格栅和水泥搅拌桩复合地基加固能有效的降低路基沉降和水平位移,降低路基土体中竖向应力,达到有效提高路基的整体稳定性的目的。

参考文献:

- [1] 丹其彬.路桥施工中软土地基的处理方法[J].房地产导刊,2015(10):322.
- [2] 陈勇.交通荷载对低路堤高速公路路基影响的数值模拟研究[D].南京:河海大学,2006.
- [3] 张龙龙.沿海公路加筋地基动力特性研究[D].青岛:青岛理工大学,2016.
- [4] 于鸿熙,胡卉.软土路基处理技术在公路施工中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(7):128-131.
- [5] 程宏生.CFG 桩复合地基设计理论与应用[D].长沙:中南大学,2010.
- [6] 陈海山.探讨市政道路工程软土路基施工技术[J].四川水泥,2019(8):46.
- [7] 何玉琼,王寿武,肖建宇,等.路桥过渡段软土地基加固沉降对比分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(1):313-321.
- [8] 王连俊,杨天琪,帅宇轩,等.强夯垫层法对河谷区软土地基加固效果研究[J].公路,2022,67(1):46-52.
- [9] 富志根,时洪斌,毛忠良.接杆搅拌桩在低净空条件下铁路软土地基加固中的应用研究[J].路基工程,2020(2):114-118.
- [10] 陈盛原,叶华洋,张伟锋,等.水泥搅拌桩联合堆载固结法对海相软土不同处理方式的试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(30):12533-12539.
- [11] 龚晓南.地基处理技术及其发展[J].土木工程学报,1997(6):3-11.
- [12] 刘建清.地基处理技术及其发展研究[J].四川水泥,2017(10):136.
- [13] 高永恒.采用不同排水固结方法处理软弱土基的比较分析[J].现代商贸工业,2012,24(4):269.
- [14] 舒晓武.高速公路加宽工程技术及应用研究[D].天津:天津大学,2006.
- [15] 谢治华.基于 ABAQUS 软件的挡土结构土压力分析[J].湖南水利水电,2017(4):31-34.
- [16] 段建飞.城市道路路基防护存在的问题及加固措施[J].交通世界,2018(9):46-47.
- [17] 曹磊.高速城市道路工程建设中软土路基的施工技术[J].中国高新技术,2019(16):59-61.
- [18] 李灵,张爱芳.城市道路软土地基加固处理浅析[J].工程抗震与加固改造,2019,41(6):174.
- [19] 李洁.准池重载铁路黄土路基冲击碾压有效影响深度的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [20] 陈俊豪.CFG 桩在道路软土地基处理中的应用研究[D].福州:福建农林大学,2018.
- [21] 王建勋.基于连霍高速加宽工程的水泥搅拌桩复合地基处理工后沉降方法[J].中国科技纵横,2018(5):111-112.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com