

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.006

基于路基与框架结构协同变形的 软弱地基处置方案

刘继忠,陈凯,杨丰宇

(中冶赛迪城市建设(重庆)有限公司,重庆市 400010)

摘要:针对路基与结构协同变形考虑不足的情况,以填方路基中有框架结构的软弱地基为研究对象,利用Midas GTS NX有限元分析软件模拟钻孔灌注桩处置软弱地基的路面沉降和塑性区分布。考虑路基与框架结构的刚度差异容易导致路面开裂,提出了“外强内弱”的变刚度复合地基处置优化方案。优化方案协调了路堤与框架结构的协同沉降变形,有效地阻止了框架结构两侧土体的塑性区开展,降低了沥青路面结构层的开裂风险,减轻了后期的运营维护成本。

关键词:填方路基;地下结构;软弱地基;变刚度理论;路面沉降

中图分类号:U417.1+1

文献标志码:A

0 引言

随着丘陵地带城市的迅猛发展,涵洞结构被广泛应用于填方路基中。由于涵洞结构与填方路基的刚度差异较大,当填方路基下存在承载能力低、后期沉降大的软土地层时,其地基处理往往成为工程的难点^[1]。

目前地基处理加固方案较多,但总体分为以下几类:①以水平向增强体为主的加固方案。该类方案主要以土工格栅为主,多用于开挖后的换填处理;②以竖向增强体为主的加固方案。竖向增强体主要是以砂桩、灌注桩等桩基处理方案为主。上部荷载主要由竖向增强体承担,并通过竖向增强体传递到下部的坚硬地层上,从而减小作用在软弱地基上的荷载,达到减小地层承担荷载的目的;③复合地基。该处理方案综合了前面两种方案的优点,复合地基中的竖向桩体承担主要的上部荷载,结合垫层、土工格栅等加强地基的横向联系,同时考虑桩间土的共同作用,共同承担上部荷载^[2]。

目前针对软弱地基的处置方式也主要基于上述几类方法。经过长期的工程实践和研究得到了一些有益的成果。肖燕^[3]从地质情况、造价及工期控制等方面对软基处理方案进行了比选;杜立群等^[4-6]研究

了CFG桩和碎石桩处理软弱地基的工后沉降;黄剑等^[7]分析了华东地区深厚软土地基下的管廊沉降问题,指出应采用有效的减沉措施降低管廊的工后沉降。差异沉降也是软弱路基处理关注的重点问题。袁启旺等^[8]通过理论分析和PLAXIS软件分析提出了地基处理过程段的差异沉降标准建议值;成超^[9]在分析填土高度对涵洞差异性沉降的影响中,指出填方高度一致的情况下,未采用预应力管桩处理涵洞基础时,涵顶沉降与涵洞两侧的沉降差值明显小于预应力管桩加固的情况。同时指出预应力管桩使管涵顶的应力集中系数更大;建鑫龙^[10]利用离心模型试验和数值模拟研究了涵洞底管桩和涵侧管桩的桩长对沉降差的影响,指出涵侧长桩与涵底短桩的搭配可以降低涵顶的垂直土压力,减小路面的差异沉降;冯忠居等^[11]研究了沟谷宽度和坡度与涵顶土体内外两侧沉降差的变化规律,提出了涵洞的设计和施工建议;谷世平等^[12]利用渐变刚度的方法,提出了路桥过渡段的复合地基处置方式;齐永正等^[13]利用室内离心模型试验研究了软基底路堤涵洞的沉降,提出了在软基底路堤涵洞设计时应以控制不均匀沉降为主,以控制绝对沉降为辅的设计理念。

综上所述,目前对软弱路基的加固方案研究较多,但对填方路基中有框架结构的软弱地基处理的

收稿日期:2022-05-07

作者简介:刘继忠,男,硕士,高级工程师.E-mail:690594481@qq.com

研究还有待进一步完善。为了解决这类软基处理工程的差异沉降问题,本文以填方路基中有框架结构的软弱地层的加固处理为研究对象,考虑框架结构的影响,分析路面沉降及填土的塑性状态等相关问题,可为类似工程应用提供一定的参考。

1 工程概况

1.1 原设计方案

根据某片区的整体规划设计,拟建道路为城市主干道,地面为双向六车道,红线宽度58 m。填方路基下为双向四车道的双箱矩形框架结构,框架结构走向与道路相同。外轮廓尺寸为22.1 m×8.5 m。该项目其中一段处于水田区,地层较差,填方高度约10 m。框架结构底基本与现状地面线齐平。地基承载

力要求不小于300 kPa。

1.2 地质条件

勘察报告显示,该区域为深厚的黏土层,未经处理不能作为道路的路基持力层。钻孔揭示的地质情况如下:① 0~2.5 m为软塑粉质黏土,软塑状,成分主要以黏粒矿物为主,呈似层状分布。工程性能差,力学强度低;② 2.5~12.3 m为稍湿的可塑粉质黏土,部分呈流塑状,成分主要以黏粒矿物为主,工程性能差,力学强度低;③ 12.3~15.3 m为强风化泥岩,岩石坚硬程度为极软岩,岩体质量等级为V级,具有遇水软化现象;④ 最下层为中风化泥岩,风化裂隙较发育,岩石坚硬程度为软岩,岩体质量等级为IV级,勘察尚未揭穿此地层。

各地层详细参数如表1所示。

表1 土层参数

土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模量/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	地基承载力/ kPa
软塑粉质黏土	19.0	3.0	9.0	0.30	9	8	2.9×10^{-7}	80
可塑粉质黏土	19.7	6.4	19.2	0.30	27	15	1.3×10^{-7}	140
强风化泥岩	22.3	21.0	63.0	0.27	30	18	3.0×10^{-4}	300
中风化泥岩	23.9	50.0	150.0	0.30	50	50	1.0×10^{-4}	600

1.3 路基处置及地基承载力问题

为解决框架结构下地基承载力的问题,设计在框架结构底设置直径 $\phi 1\ 000$ mm、纵横间距为4.8 m×4 m的钻孔灌注桩加固方案,在两侧路堤则采用

直径 $\phi 500$ mm、纵横间距为1.5 m的水泥搅拌桩,并在桩顶铺设50 cm厚的碎石垫层,垫层内铺设一层土工格栅,具体加固方案如图1所示。

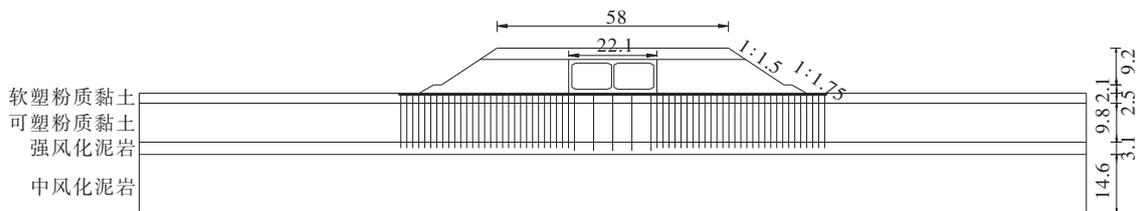


图1 软弱地基处置断面图(单位:m)

2 原方案分析

2.1 模型建立

为了分析该设计方案的合理性,利用MIDAS GTS NX有限元软件建立该工程的有限元模型。计算模型中选用的本构模型及材料参数如表2所示。

模型边界过小会影响计算的结果,过大则会造

成计算性能的浪费,根据相关研究结果模型宽度不宜小于边坡高度的2倍,模型高度不宜小于桩长的1.5倍。因此本次计算土层宽高分别为240 m、30 m。

由于深厚黏土层的排水固结沉降时间长,为反映施工结束及路面结构层通车后的工后沉降情况,采用MIDAS GTS NX的渗流固结分析模块分析该路段的路堤沉降。填土及顶部的路面结构层为非固结条件,排水条件设置在原状地面线的软塑黏土表

表2 有限元模型计算参数

土层及材料	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	本构模型
软塑粉质黏土	19.0	9.0	0.30	9	8	2.9×10^{-7}	摩尔-库仑
可塑粉质黏土	19.7	19.2	0.30	27	15	1.3×10^{-7}	摩尔-库仑
强风化泥岩	22.3	63.0	0.27	30	18	3.0×10^{-6}	摩尔-库仑
中风化泥岩	23.9	150.0	0.30	50	50	1.0×10^{-6}	摩尔-库仑
回填合格土石	20.0	30.0	0.33	8	36	—	摩尔-库仑
管廊结构	23.0	3.4×10^4	0.20	—	—	—	弹性
褥垫层	21.0	120.0	0.25	2	41	0.1	摩尔-库仑
土工格栅	22.0	2.6×10^4	0.30	—	—	—	弹性
水泥搅拌桩	22.0	600.0	0.20	—	—	2.0×10^{-7}	弹性
钻孔灌注桩(C30)	23.0	3.1×10^4	0.20	—	—	2.0×10^{-7}	弹性
级配碎石	22.5	250.0	0.35	2	36	—	摩尔-库仑
水泥碎石基层	23.0	1 200.0	0.25	220	40	—	摩尔-库仑
沥青混合料(SMA-13)	24.3	1 200.0	0.35	207	33	—	摩尔-库仑

面。根据实际情况分成以下几个主要的分析阶段：初始地应力自平衡→桩和垫层施工→框架结构施工→第一次回填(回填至结构顶标高)→第二次回填→施工路面结构层→通车15年。车辆荷载按15 kPa考虑。模型如图2所示。

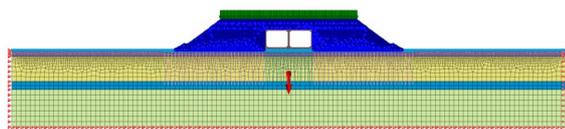


图2 有限元分析模型图

2.2 结果分析

(1) 沉降

沉降是道路工程最关心的问题之一。按《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013)规定的主干路路基工后容许变形不大于300 mm^[14]。沉降或沉降差过大都会造成路基破坏。鉴于本项目路基与地下框架结构同步实施的情况,考虑两者之间的刚度差异大,不均匀沉降明显,故着重研究路面的不均匀沉降。提取路面的最终沉降有限元分析结果如图3所示。

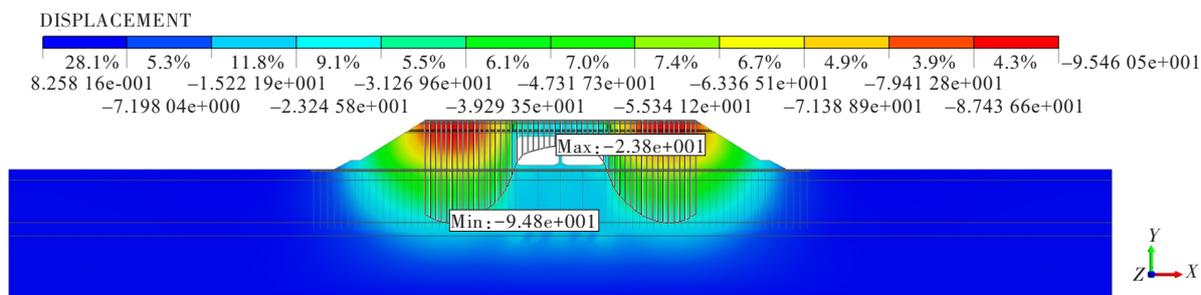


图3 通车15年路面最终沉降有限元分析结果(单位:mm)

从图3可以看出:路面的最大沉降为9.48 cm,最大沉降点位于地面道路左右幅行车道中心线位置附近。而最小沉降出现在框架中心线对应的路面位置,沉降值为2.38 cm,与最大沉降差值达到7.10 cm,表示路堤发生了较大的不均匀沉降。由计算结果的等值线可以看出,框架结构两侧的填土沉降相对较大,框架结构及其上部土体沉降较小,结构两侧填土

与结构顶填土之间没有形成连续的等值沉降曲线。从路面的沉降曲线可以看出,路面的沉降曲线由纯填方路堤典型的“U”形沉降盆变成了“W”形。原因是框架结构及其下部的钻孔灌注桩刚度很大,结构两侧的填土及其下部的水泥搅拌桩刚度相对较小,两者之间的巨大刚度差异改变了路面的沉降变形规律,致使结构宽度范围内的路面沉降明显小于两侧

填土体。这也是路面最小沉降值出现在道路中央的原因。

为了进一步分析框架结构及下部钻孔灌注桩对路面沉降的影响,以100 cm为间距提取道路路面的沉降值,以 $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ 为指标,分析道路相邻两点之间的沉降差值,得到其沉降差值曲线如图4所示。

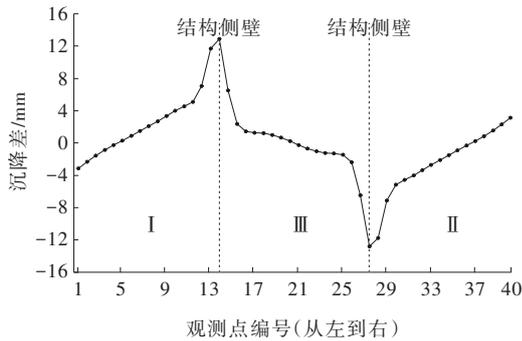


图4 路面沉降差值曲线图

从图4可以看出:结构两侧的路面区域I和区域II,其相邻两点的沉降差相对较小,最大沉降差约为4 mm,沉降差异率(两点之间的沉降差与两点之间距离的比值)为0.4%;两个沉降差尖峰之间的区域III即为结构宽度范围内的路面区域,区域III的中部对应的是管廊结构,其刚度一致,观测点之间的沉降差及曲线斜率(即差异沉降率)均较小,说明框架结构对应的区域整体刚度比较一致,沉降比较均匀。而在区域III的边缘位置即为结构的侧壁对应的路面位置,出现了明显的两个尖峰,其最大沉降差为±13

mm,沉降差异率达到1.3%,比道路两侧的沉降差异率提高了2.25倍。说明大刚度的框架结构及下部灌注桩的存在,会导致结构与两侧填土的刚度差异较大,难以达到协同沉降变形的目的。根据有限元模型分析结果,沥青混合料路面的最大剪应力为127 kPa,出现在结构侧壁对应的位置,这说明由于框架结构及灌注桩的刚度影响,导致结构侧壁处的沥青路面存在最大的开裂风险。

目前对框架结构的沉降还没有针对性的规范明确说明。《公路涵洞设计细则》(JTG/T D65-04—2007)^[15]中规定,涵洞基础的工后沉降不大于200 mm。而《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10093—2017)^[16]指出一般路段的涵洞工后沉降不大于100 mm。文献[17]提出高压压缩性土下的管廊沉降允许值为100 mm,差异沉降极限值不超过50 mm比较合理。在该模型的结果中,原设计方案的框架结构沉降最大值和最小值为26.3 mm和19.7 mm,满足沉降要求。

(2) 塑性区开展

由前文分析可知,由于刚度的差异,导致框架结构与两侧的路面沉降差较大。较大的差异沉降会导致下方填土承担较大的拉应力,由于土体的抗拉强度基本可以忽略,因此在这些区域会发生较大的位移变形,形成塑性区。分析路面铺设完毕和通车15年之后填土路基的塑性状态如图5所示。

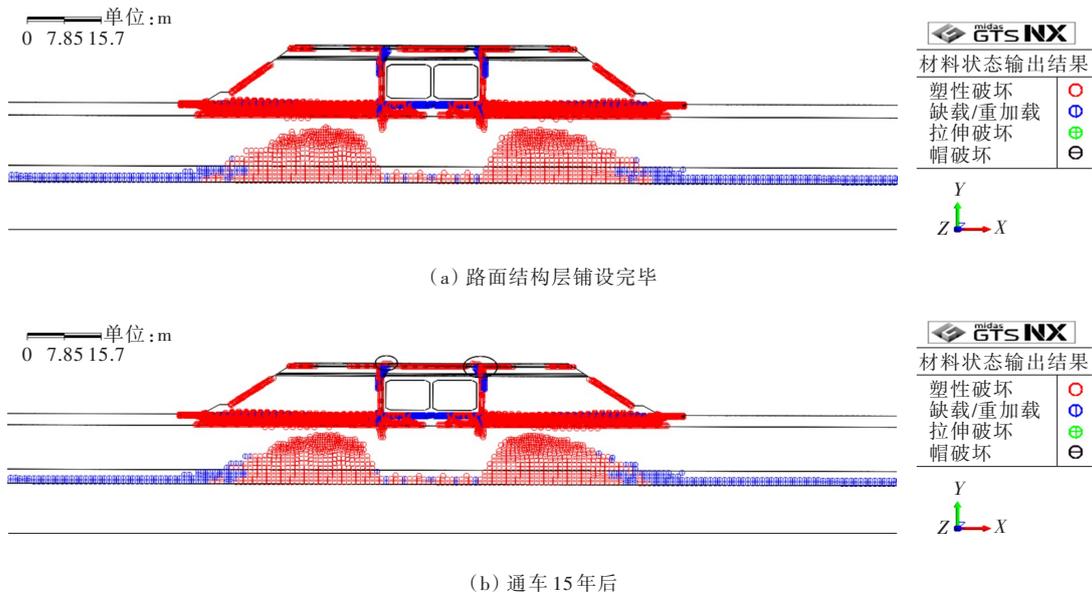


图5 填土路基塑性状态分布云图

由图5可以看出:由于结构两侧的填土难以压实,结构与两侧填土之间摩擦系数较小,紧邻的两侧土体沉降较大,产生了塑性变形,塑性区从结构底一直延伸到路面结构层的底基层附近。而在通车15年后,塑性区的范围进一步扩大,并且在沥青路面处也出现了新的塑性变形,形成路面拉裂缝。究其原因:主要是框架结构及结构底的灌注桩刚度较大,结构及上部土体沉降较小,两侧土体沉降较大,较大的沉降差导致路面结构层下的路基填土形成一定的脱空区。路面结构层在上部车辆荷载的作用下向脱空区剪切变形,最终结构顶及两侧的路面结构层差异变形逐步增大,超过沥青的极限应变值,从而在结构侧壁对应的沥青路面附近位置形成贯通的拉裂缝,引起路面开裂。

综上所述,由于框架结构的存在,原方案为了减小结构的沉降,采用桩基托梁的强支护方案。但通过分析可以看出,此方案虽然达到了减小结构沉降的目的,但由此带来了极大的路面不均匀沉降,后期存在潜在的路面运营病害。因此需要对方案进行优化。

3 优化方案分析

3.1 优化方案概述

通过前文分析可以看出原方案存在不均匀沉降大、后期道路路面有拉裂的风险。因此,在高填方路

堤的深厚软土处理过程中,不能只考虑结构的绝对沉降,还应考虑结构与填土之间的刚度差异,协调两者之间的沉降和变形情况。从而保证工程质量,减少后期的运营费用。

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[18]中指出可根据不同建筑类型适当采用变刚度调平设计以减小差异沉降。郑冰等、刘冬林等^[19-20]提出了“外强内弱”等多种变刚度的桩基设计理念。这与本文优化方案采用的改进思路一致。由于上部框架结构与两侧填土存在数百倍的刚度差异,若结构底采用比两侧更高强度的灌注桩,则会进一步加剧两者之间的刚度差异,造成更大的差异沉降。因此适当降低结构底部的刚度,或者提高两侧路堤填土下的地基刚度,有利于协调路面的沉降差异。

基于此观点,本文提出以下优化方案:结构底采用桩径0.5 m、横纵间距为1.5 m×2.0 m的水泥搅拌桩,梅花形布置;结构两侧采用桩径0.5 m的水泥搅拌桩,横纵间距均为1.5 m,形成“外强内弱”的处置方案。在搅拌桩顶铺设0.5 m的碎石垫层+1层土工格栅。优化方案如图6所示,相关参数与表2一致。

3.2 结果分析

(1) 沉降分析

根据优化方案的有限元计算结果,得到路面的沉降如图7所示。

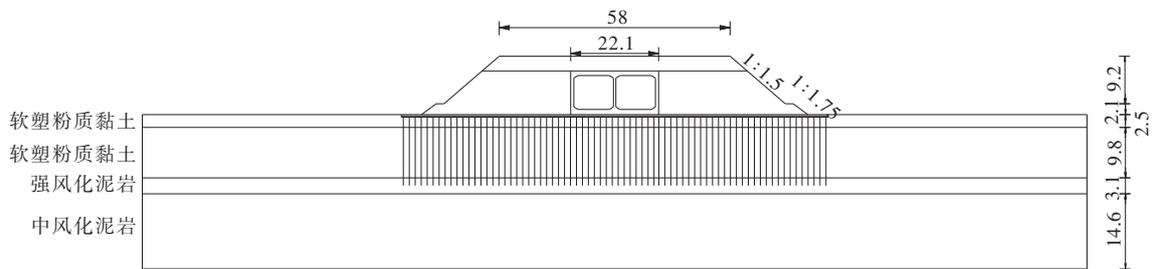


图6 优化设计方案示意图(单位:m)

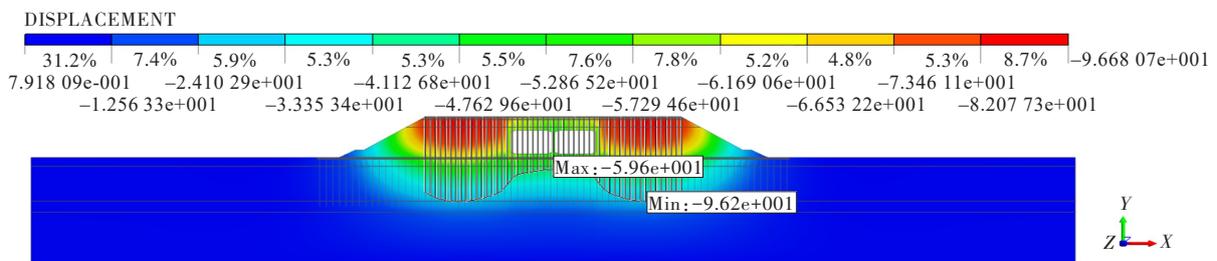


图7 通车15年路面最终沉降有限元分析结果(单位:mm)

从图7可以看出:在框架结构底改为水泥搅拌桩复合地基、通车15年后,道路路面的最大沉降值为9.62 cm,最小沉降值为5.96 cm。其最值出现的位置与原设计方案一致,分别位于道路左右幅行车道中心线和结构中心线对应的路面位置附近。路面的沉降差为3.66 cm,路面沉降差比原方案减小了48.4%。

提取路面相邻两点的沉降差值,绘制其差值变化如图8所示。

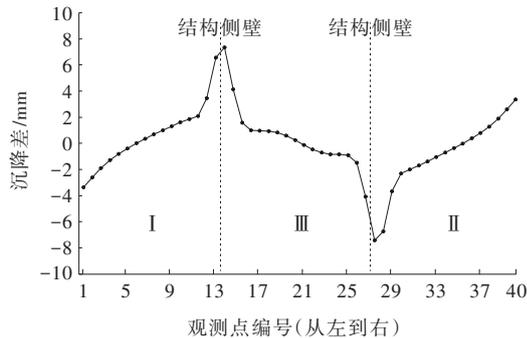


图8 路面沉降差值曲线图

从图8可以看出:路面相邻两点的沉降差变化趋势与原设计方案一致,均在框架结构侧壁对应的路面位置,最大沉降差为 ± 7 mm,比原设计方案减小了46.2%。说明在采用复合地基之后有效提高了结构

内外两侧的刚度协调性,减小了路面的差异沉降,对降低差异沉降造成的沥青路面开裂起到了重要的作用。

采用水泥搅拌桩代替钻孔灌注桩之后,结构底部基础刚度减小,结构底的沉降最大值和最小值分别为6.08 cm和5.55 cm,满足设计要求。横断面上的较小差异沉降也降低了结构因差异沉降造成拉裂缝的风险。虽然结构底的总体沉降比原方案大,但只要做好结构纵向上的沉降过渡,就能同时保证结构和路面的良好运营。

对比分析原方案和优化方案的沉降结果可以看出:原方案中框架结构本身刚度大,又在结构底设置了大刚度的钻孔灌注桩,进一步加剧了结构及两侧填土的刚度差异,使结构顶路面与两侧产生较大的差异沉降,从而带来了后期沥青路面拉裂的风险。同时采用刚度相对较小的水泥搅拌桩有利于发挥桩间土的作用,减小框架结构底的应力集中和弯矩,有利于结构的受力。

(2) 塑性区分布

提取路面结构层铺设完毕和通车15年之后的路基塑性变形云图如图9所示。

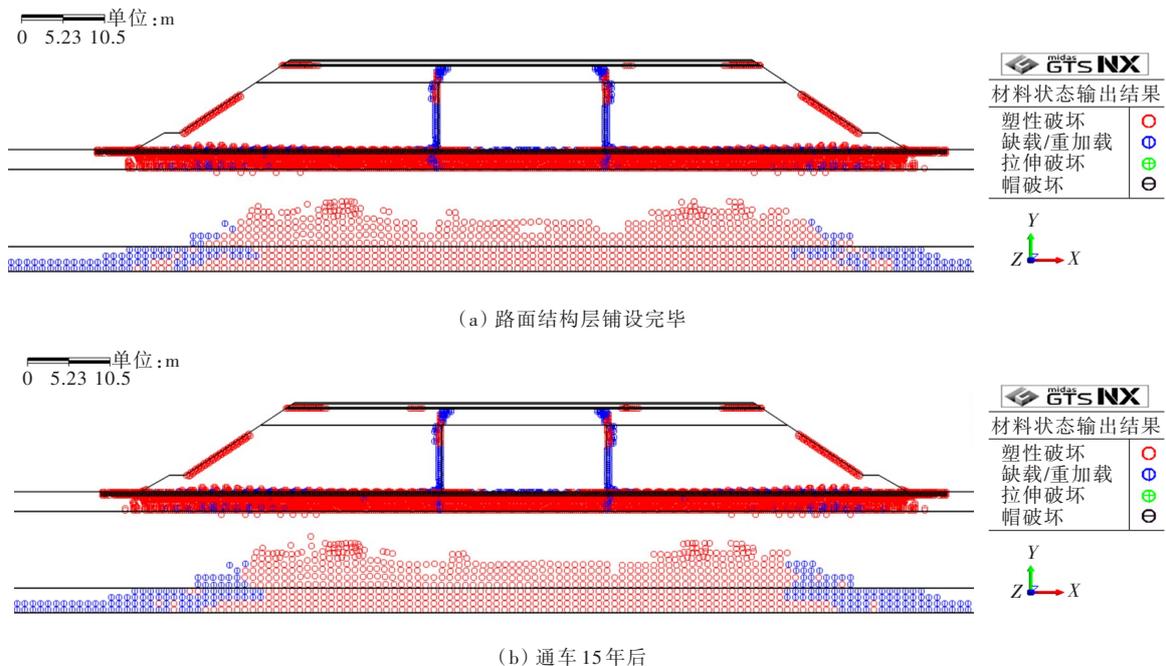


图9 采用优化方案后填土路基塑性区分布图

从图9可以看出:采用优化方案后,有效地限制了结构两侧的填土塑性区的扩展,通过对比图9(a)、

(b)可以看出:通车15年后路基填土的塑性区扩展很小,同时还改善了两侧填土的受力状态,保证了后期

公路和框架结构的正常运营,避免了额外的维护费用。

4 结 论

研究了填方路基中有框架结构的软弱地基的处理方案,得到以下主要结论:

(1) 采用变刚度理论的优化方案更好地协调了路堤与框架结构的差异沉降,有利于降低路面产生裂缝的风险。

(2) 灌注桩加固软弱地层方案的路面沉降最大值为 9.48 cm,位于道路行车道中心线位置附近;最小沉降值为 2.38 cm,位于结构中心线位置附近;道路路面沉降差达到 7.10 cm,相邻两监测点之间的沉降差最大为 13 mm 左右,位于结构侧壁对应的路面位置附近。

(3) 框架结构与两侧回填土刚度差异大,在上部车辆荷载作用下,路面结构层向由差异沉降造成的路基脱空区剪切变形,最后在路面上形成贯通的拉裂缝。

(4) 采用优化方案运营 15 年后路面的最大沉降为 9.62 cm,最小沉降为 5.96 cm,沉降差减小了 48.4%。相邻两监测点的差异沉降减小了 46.2%。

(5) 复合地基协调了框架结构与两侧填土的刚度差异,阻碍了结构两侧土体塑性区的扩展,有效降低了路面结构层拉裂的风险。

参考文献:

- [1] 郭院成,周同和.高速公路高填方软基后处理机理与实践研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2002(6):116-119.
- [2] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [3] 肖燕.广州东沙至新联高速公路试验路段软基处治方案研究[J].公路工程,2011,36(1):8-11.
- [4] 杜立群.高速铁路软土地路基沉降稳定分析及工后沉降预测[D].成都:西南交通大学,2006.
- [5] 占鑫杰.软黏土中碎石桩成桩过程模拟及成桩后固结分析[D].长沙:湖南大学,2011.
- [6] 唐小富.山区高速公路软基处理 CFG 桩复合地基的固结分析[J].公路工程,2016,41(2):19-22,27.
- [7] 黄剑,王恒栋,王建.软土地基综合管廊沉降控制、监测与分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(S2):845-859.
- [8] 袁启旺,金才勇.基于 PLAXIS 的高速公路地基处理过渡段沉降分析[J].中外公路,2009,29(3):40-44.
- [9] 成超.上埋式涵洞加宽地基处治技术研究[D].西安:长安大学,2010.
- [10] 建鑫龙.南方山区管桩处理软基的高填方盖板涵受力特性模型试验研究[D].西安:长安大学,2016.
- [11] 冯忠居,董芸秀,潘放,等.沟谷地形对高填方盖板涵受力及填土沉降特性的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(3):53-64.
- [12] 谷世平,程玉泉,王铁法.路桥过渡段复合软基处理技术[J].公路,2018,63(11):164-167.
- [13] 齐永正,刘向东,吕嘉,等.土工离心机试验涵洞模型设计与分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(3):406-410.
- [14] 同济大学.城市道路路基设计规范:CJJ 194—2013[S].北京:建筑工业出版社,2013.
- [15] 河北省交通规划设计院.公路涵洞设计细则:JTG/T D65-04—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [16] 中国铁路设计集团有限公司.铁路桥涵地基和基础设计规范:TB 10093—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [17] 陈伟,毛天野,方敏辉.软土地基综合管廊不均匀沉降计算与处理[J].特种结构,2019,36(1):31-35.
- [18] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [19] 郑冰,邓安福,曾祥勇,等.刚柔组合二元复合地基布桩对结构的影响分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(5):1082-1087.
- [20] 刘冬林,郑刚,刘金砺,等.刚性桩复合地基与复合桩基工作性状对比试验研究[J].建筑结构学报,2006,27(4):121-128.