

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.04.054

基于土体刚度和蒙特卡洛法的基坑开挖对既有市政道路沉降影响分析

酒子同,王金昌

(浙江大学,浙江 杭州 310015)

摘要:随着城市建设工程的持续增加,城市地下空间开发和市政设施建设产生的交叉也越来越多,许多基坑工程会在周边市政道路已经建成的条件下进行施工,基坑施工对既有市政道路产生一定的沉降影响,市政道路产生附加变形和附加应力降低了沥青路面的疲劳寿命。针对宁波市某基坑工程施工对近接市政道路的影响为工程背景,基于 Plaxis 数值模拟平台采用考虑小刚度的土体硬化本构模型,分析基坑的施工和简化的交通荷载对市政道路的受力变形的影响。在此基础上,采用蒙特卡洛法和数值模拟结果对道路结构层厚度进行随机选取,以沉降量为控制指标计算出疲劳寿命对该市政道路结构层给出了优化结果。

关键词:地下空间开发;基坑开挖;市政道路;变形分析;数值模拟;蒙特卡洛模拟

中图分类号:U416.02

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)04-0228-06

0 引言

随着我国“十四五”规划的不断推进以及新型城镇化战略的实施,地下空间开发和市政设施建设都在紧锣密鼓地进行。在地下空间开发和市政设施建设的过程当中,必然会产生许多交集,例如地铁的建设与市政道路、桥梁、管线的交集,基坑开挖与既有市政道路的交集等等,如何让这些交集处于稳定、利于建设的状态就成为了当前城镇化发展的研究重点。针对基坑工程而言,往往是先建设市政道路,再经由市政道路运输工程建设所需的材料,然而这样的建设时序就会让基坑工程在施工过程中对道路的路基产生扰动和附加变形,基坑围护结构发生侧向变形引起道路结构发生不均匀沉降,对道路稳定性和寿命产生不利影响。控制基坑开挖对市政道路的沉降影响不仅有助于提升道路服务水平,也能够保护市政管线。

针对基坑开挖对周边产生的影响,国内外学者都进行了大量的研究:Attwell^[1]通过分析坑外土体沉降和基坑开挖的关系得出了基坑开挖对周边建筑和管线的影响;Finno^[2]等通过有限元分析得出

了基坑开挖对周边建筑桩基的影响;刘维宁^[3]等从基坑开挖过程中的应力变化推导出了基坑开挖时周边区域的土体受力状态和相应的四种应力路径(卸载、压缩、剪切、压缩剪切);俞建霖^[4]等通过对土体有限元公式进行分析以及工程案例的验证发现基坑开挖深度、宽度、下卧层土体性质和支护结构刚度等因素是基坑开挖对坑外土体沉降量影响最大的因素;郑刚^[5]等通过 Plaxis 软件的有限元分析得出了基坑开挖时周边建筑的最不利层数;刘鑫菊^[6]等通过 Plaxis 软件计算得出数据集并应用反向传播神经网络法得出了较为准确的周边基坑开挖影响下的隧道变形预测方法。

基坑开挖对市政道路的影响与所在区域的岩土层分布及土性参数相关,为此本文以宁波市某基坑工程对周边市政道路的影响展开研究,重点分析基坑开挖对道路沉降影响,并对考虑基坑开挖影响下的市政道路的优化进行研究。

1 影响市政道路沉降的因素分析

影响市政道路工后沉降的主要因素是交通荷载、管线渗漏、周边地块基坑施工等等。

(1)交通荷载因素

交通荷载产生的动效应是引起工后沉降的主要因素之一,交通荷载的传递深度与车辆轴载呈强相关关系,重载车辆对场地应力的影响很大,且行车速度

收稿日期:2023-04-10

基金项目:浙江省科技厅项目(2022C03180)、浙江省建设厅项目(2022K169、2022K073)

作者简介:酒子同(1994—),男,学士,工程师,从事市政道路设计工作。

越快,路面变形越小^[7]。

(2) 管线渗漏因素

市政道路下敷设的雨污水管线一般覆土约 1~2 m,在道路结构发生不均匀沉降的时候也会使管线受到影响,当管道发生渗漏或破坏时,路基下方土体含水率不断增大,强度降低进而造成深层传递的反射裂缝等道路病害。

(3) 基坑施工因素

基坑施工一般采用清表—施工围护结构—开挖至支撑结构底标高—施工支撑—降水—开挖至设计底标高的步骤。在开挖的过程当中必然会改变土体的应力状态,基坑底部的土体由于突然卸载,与坑外土体形成不平衡的应力状态,极易使坑外土体绕过围护结构产生隆起现象,同时基坑外的土体由于其向坑内移动的趋势也会产生不均匀沉降,形成道路起伏等病害。

综合以上分析,在道路及其他市政设施正常运营的条件下对道路沉降影响最大的因素是交通荷载和周边基坑施工这两个因素,可以采用建立对照模型的方式对各个因素进行分析,在实际工程的基础上建立一个仅受基坑开挖影响的道路模型、一个既有交通荷载又有基坑开挖影响的道路模型,形成对比,进而剥离交通荷载影响的因素,针对基坑开挖的因素进行分析。

2 宁波某基坑工程与市政道路模型

为准确反映实际工程状况,收集了宁波市百骏中心的基坑施工图、基坑监测资料以及该工程西侧的人民路设计资料等,为建模提供工程支撑。

2.1 工程概况

宁波市百骏中心项目位于宁波市江北区,西侧为已建人民路,北侧为已建人民路 658 弄,东南两侧均为现状建筑。

百骏中心基坑开挖面积约 11 900 m²,开挖深度为 5.7~7.4 m,支护延长米约 528 m,支护结构采用排桩加支撑的形式,排桩桩长 16 m,排桩位置外侧采用高压旋喷桩嵌缝止水兼挡土。基坑施工过程中在距离已建人民路边线约 1.5、6、10 m 处分别布置了道路沉降监测点,记录了自 2020 年 8 月开始施工至 2021 年 3 月基坑施工完成共约 7 个月的道路沉降数据。

基坑总平面见图 1,拟针对基坑西南侧与人民路平行的部分,选取典型截面进行 Plaxis 2D 建模。

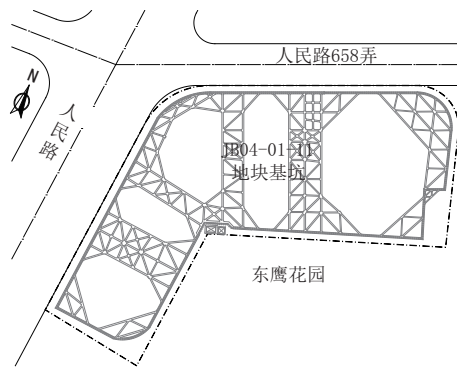


图 1 基坑总平面示意图

2.2 土体本构模型及参数选取

自上世纪 60 年代的剑桥模型以来,各国的土木工程专家、学者已经发展了数百个用于描述土体力学性质和实际行为的本构模型。为体现土体出现小应变时刚度的非线性变化,本次建模采用小应变土体硬化模型(以下简称 HSS 模型)。HSS 模型是相对发展较晚的一种土体本构模型,由于考虑了土体硬化以及小应变相关参数,针对土体变形的计算相比于其他本构模型更加精确,但该模型也因需要的参数众多且实际工程中基本没有条件做相关的试验而难以正确取值。

根据上海市的基坑工程规范^[8],HSS 模型参数可以按照 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 取勘察报告中的 E_{s1-2} 的 0.9 倍、 $E_{50}^{\text{ref}} : E_{\text{ur}}^{\text{ref}} : G_0^{\text{ref}}$ 则按 5 : 6 : 30 : 105 的比例进行取值,小应变参数 $\gamma_{0.7}$ 取 2.8×10^{-4} , m 取 0.8;王卫东等^[9]根据三轴固结排水试验的结果得出了与上海市基坑工程规范几乎一致的 HSS 模型取值结论;叶俊能等^[10]通过对宁波海曙区土样的试验进一步得出了适合宁波地区的 HSS 模型取值参数,结果表明 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 约为 E_{s1-2} 的 0.83 倍,在 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 小于 4 MPa 时 E_{50}^{ref} 约为 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 的 1.87 倍,②、③、④层土的 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 试验值约为 E_{50}^{ref} 的 4~5 倍, G_0^{ref} 的取值则与上海市规范相近;针对粘性差、透水性强,与其他土层力学性质具有较大差异的粉砂层可按 $E_{s1-2} : E_{\text{sed}}^{\text{ref}} : E_{50}^{\text{ref}} : E_{\text{ur}}^{\text{ref}} : G_0^{\text{ref}} = 1 : 1 : 1 : 5 : 5$ 的原则进行取值^[11]。综上所述,本次建模按照 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}} = 0.83E_{s1-2}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}} = 1.87E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $G_0^{\text{ref}} = 3.5E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的原则进行取值,其余 HSS 参数参照上海市基坑工程规范进行取值。HSS 模型具体参数取值见表 1,勘察报告中的相关参数见表 2。

其中位于①₁层的杂填土以及模拟的道路各结构层由于材质均匀,变形具有一定规律,因此采用线弹性模型进行模拟,其主要参数均取自路面相关规范^[12]及设计施工资料等。

表 1 HSS 模型参数取值表

材料名称	E_{50}^{def}/kPa	E_{swd}^{def}/kPa	E_{ur}^{def}/kPa	G_0^{def}/kPa
① ₂ 黏土	6 113	3 269	24 452	85 583
② ₁ 淤泥质黏土	3 613	1 932	14 454	50 589
② ₂ 黏土	3 768	2 015	15 072	52 751
② ₃ 淤泥质粉质黏土	3 943	2 109	15 773	55 204
③ 粉砂	12 000	12 000	60 000	60 000
④ ₁ 粉质黏土	5 401	2 888	21 605	75 617
④ ₂ 黏土	4 008	2 143	16 030	56 106

表 2 勘察报告提供的部分参数

材料名称	$\gamma_{sat}/(kN \cdot m^{-3})$	e	$c'/(kN \cdot m^{-2})$	$\varphi_i/(^\circ)$
① ₂ 黏土	18.15	1.045	21.57	13.0
② ₁ 淤泥质黏土	16.91	1.366	12.56	10.0
② ₂ 黏土	17.16	1.327	18.18	12.6
② ₃ 淤泥质粉质黏土	17.16	1.281	12.62	10.4
③ 粉砂	20.00	0.500	0.00	0.0
④ ₁ 粉质黏土	18.11	0.999	19.57	12.8
④ ₂ 黏土	17.35	1.236	17.86	12.3

2.3 基于 Plaxis 平台的数值模拟分析

首先要确定土体钻孔,再根据实际工程确定结构,生成网格后定义施工步骤,最后进行计算。

该段人民路宽度为 47.5 m,基坑宽度约为 43.2 m,基坑边线距离道路边线约 4.3 m,在道路和基坑两侧均预留一定距离,模型宽度取 110 m,同时根据勘察报告中的钻孔剖面图确定了模型的各个土层及其厚度。通常基坑竖向边界宜取开挖深度的 2 倍以上^[13],本模型由于支护桩底标高约 -23 m,因此模型底采用 -25 m 标高,顶面综合考虑道路标高和基坑施工场地清表后的标高取 2.5 m,最终确定的土层设置见表 3。

表 3 土层分布情况

土层编号	材质	顶标高 /m	底标高 /m
① ₁	杂填土	2.5	1.7
① ₂	黏土	1.7	0.0
② ₁	淤泥质黏土	0.0	-0.8
② ₂	黏土	-0.8	-3.2
② ₃	淤泥质粉质黏土	-3.2	-11.2
③	粉砂	-11.2	-16.8
④ ₁	粉质黏土	-16.8	-22.9
④ ₂	黏土	-22.9	-25.0

结构阶段主要设置道路结构、基坑周边的排桩、基坑内的支护桩以及位于 0.7 m 高程上的混凝土支

撑,其中道路结构简化为仅有机动车道结构的 17 cm 沥青面层(4 cm SMA-13 + 6 cm AC-20C + 7 cm AC-25C)、40 cm 水泥稳定碎石基层(20 cm+20 cm)、70 cm 塘渣处治层;排桩由于高压旋喷桩的嵌挤作用形成了受力整体,故采用板单元进行模拟;支护桩采用嵌入式梁单元进行模拟;混凝土支撑采用锚杆单元进行模拟。

在结构定义阶段也需要设置交通荷载。交通荷载与道路之间的相互作用相对复杂,为方便计算,本次建模将交通荷载按拟静态均布荷载法简化为均布荷载施加在整幅道路上。采用分布角法假设交通荷载以 35° 扩散角向下传递^[14],采用 BZZ-100 标准轴的相关参数进行计算,得出单轮荷载约 2.23 kN/m,标准车为双轮组,即需要将结果乘以四倍,交通荷载即简化为 9 kN/m 的均布荷载形式对交通荷载最不利情况进行大致模拟,形成的模型见图 2。

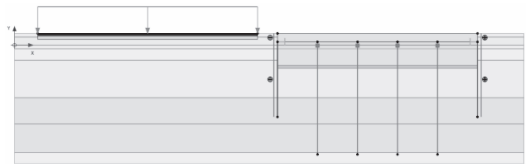


图 2 结构定义完成后的模型

网格生成步骤中的网格划分精细度采用 Plaxis 软件默认的中等单元分布,同时选中增强网格细化选项,土体及道路结构粗糙系数均采用 1.00,板单元、嵌入式梁单元等结构粗糙系数均为 0.25,总计生成了 3 918 个单元,8 315 个节点。

施工步骤定义阶段将基坑施工总结为 5 个阶段,分别为:初始阶段(已清表)、施工排桩及支护桩、开挖至支撑结构底标高(0.7 m)、支撑施工及降水、开挖至基坑设计底标高(-4.9 m),在 Plaxis 软件中分别按阶段激活相应的结构、停用开挖的土体,降水通过设置土体为干来实现,最终阶段见图 3。

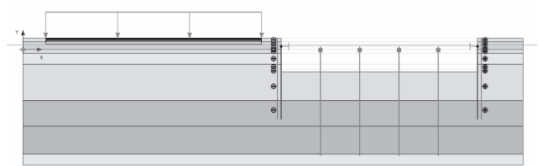


图 3 最终施工阶段的模型

3 模型计算结果分析

针对模型激活交通荷载、不激活交通荷载分别进行了计算,得出沉降云图见图 4、图 5。

根据两种情况下的监测点沉降计算结果,结合实际施工的步骤和时间,得出了与实测值的沉降对

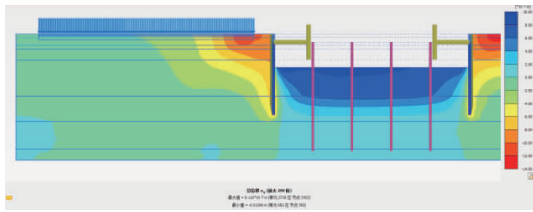


图4 考虑交通荷载的基坑开挖对道路沉降影响云图

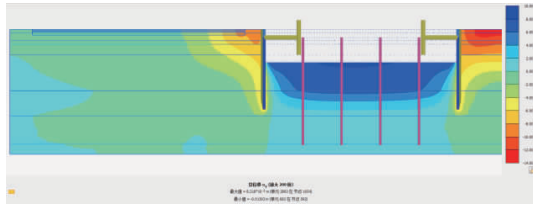


图5 仅考虑基坑开挖影响的道路沉降云图

比图。其中监测点1距离道路边线10 m;监测点2距离道路边线6 m;监测点3距离道路边线1.5 m,平面布置见图6,沉降对比见图7~图9。

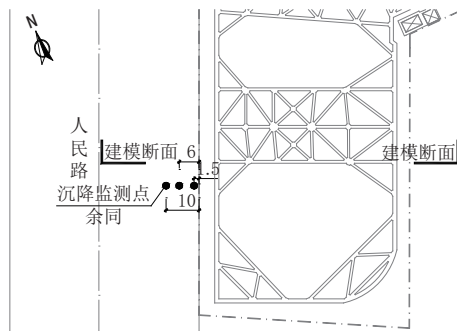


图6 沉降监测点平面布置图

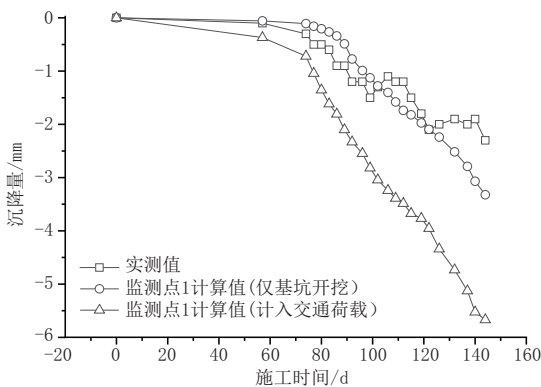


图7 距离道路边线10 m处的沉降对比

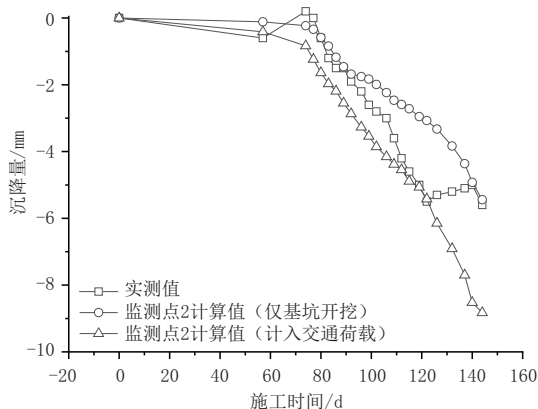


图8 距离道路边线6 m处的沉降对比

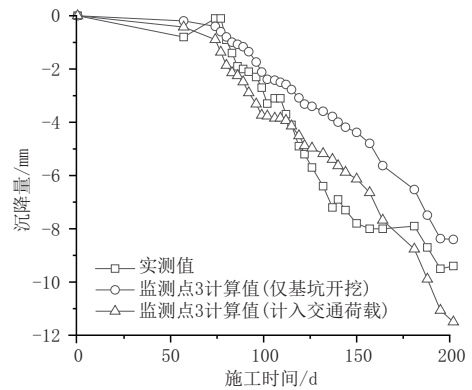


图9 距离道路边线1.5 m处的沉降对比

距离道路边线10、6、1.5 m处的实测值最终沉降约为2.3、5.6、9.4 mm;仅考虑基坑开挖时的对应计算值为3.3、5.4、8.4 mm;同时考虑基坑开挖和交通荷载的模型对应计算值则为5.7、8.8、11.5 mm。总体而言,本次模拟的准确度较高,可以认为该模型能够在一定程度上反映基坑开挖过程中土体的真实受力状态,土体HSS模型参数的取值也相对合理。

从图7至图9的结果中可知,两种模型的沉降变化趋势均与实测值类似。加入交通荷载后的模型最终沉降相比于仅考虑基坑开挖时的最终沉降量多出约37%,说明对于路基沉降已经趋于稳定的道路而言周边基坑开挖对道路沉降产生的影响约为交通荷载沉降量的3倍。基坑开挖引起的围护结构变形和坑底土体的隆起是基坑开挖引起周边土体沉降的主要原因^[15],因此基坑支护结构的优化和地基加固能够有效控制基坑对周边土体产生的影响。

同时考虑交通荷载和基坑开挖影响的模型计算得出的沉降量与实测值相比普遍偏大,其原因可能是:(1)交通荷载采用了整幅路面均布荷载的形式,实际交通荷载仅在机动车道上较大,非机动车道和人行道的交通荷载要远小于机动车道的荷载;(2)人民路于上世纪90年代就已经在正常运营,至今路基已经完全沉降稳定,其下各土层也经历了长期的交通荷载影响而使土层孔隙率更低,力学性质更好,建模采用的土体钻孔仅体现了基坑部分土体的状态,不能准确反映道路下方的土层状况。

从沉降云图中可以得知,做好排桩围护的前提下基坑开挖对坑外土体的影响范围约为18.8 m,针对本工程而言主要影响了距离道路边线14.5 m的范围,考虑交通荷载影响时在二者的复合作用下基坑开挖造成的路面沉降影响范围会相应扩大到坑外约29.8 m处,即距离道路边线25.5 m的范围。同时,可

以看到在做好围护时基坑开挖对既有市政道路的影响主要来自于排桩底传递的土体不均匀沉降,其影响范围可以近似成与排桩长度相同的三角形区域。

4 基于蒙特卡洛模拟的宁波周边地区道路结构层优化

道路结构层的传统取值方法较为依赖工程经验,先根据工程等级、预测交通量、待建场地土基情况以及相关工程经验等因素初步拟定道路各结构层厚度,再采用诸如 HPDS 等软件进行验算,验算通过后即按拟定的结构层或调整后的结构层进行设计、施工。然而道路的新建往往是在尚未完全开发的地区进行的,周边地块晚于道路施工的情况很多,采用传统道路结构层取值方法确定的道路结构主要考虑的是施工期间的道路沉降和运营期间的交通荷载等因素的影响,并未考虑周边地块施工对已建市政道路产生的影响。因此可以根据 Plaxis 计算结果对道路结构层的厚度取值进行优化,尽量减少施工时序造成的周边地块对既有市政道路产生的沉降影响。

4.1 蒙特卡洛模拟的算法思路及程序编写

在一些因素较为复杂、难以直接得出最优解的问题上,蒙特卡洛模拟具有显著的优势,该算法采用随机事件发生的频率来计算概率,初始的蒙特卡洛算法非常简单,仅统计生成的随机状态占全部状态的比例得出相应概率;改进后的算法则先通过随机生成一些状态来模拟物理过程,再对结果进行分析判断来更新随机数的生成策略,而后再次进行随机数生成过程,从而不断逼近正确解。相比于未改进的蒙特卡洛法,改进后的算法具有得出结果更快的特点,更适合进行本例的模拟计算。但也要注意蒙特卡洛法生成的状态数越多,得出的结果就越精确,改进的算法在一定程度上减少了计算次数,因而仅能得出局部最优解,并非全局的最优解。

具体应用在本次 Plaxis 建模中则可以将各个道路结构单元的厚度作为变量进行随机数生成,通过 Plaxis 自带的接口对模型的道路结构单元进行变更并计算,再根据计算结果和道路结构单元的厚度等参数对取值策略进行微调,不断循环以上过程,以期尽可能快的得到局部最优解。

Plaxis 软件提供了方便编程控制的 Python 接口,故本次模拟程序采用 Python 进行编写。

程序主要分为四个部分:排除重复数据生成随

机道路结构层厚度的部分;调用 Plaxis 接口根据随机厚度输入、计算并存储结果的部分;根据计算结果和当前取值状态对下次取值策略进行微调的部分;初始化基准值和道路结构层厚度取值范围、统筹其他三个部分运行并使其形成循环、规定循环结束条件的部分。其中基准值以前述案例中的人民路为准,道路结构层厚度取值范围则根据宁波地区的工程经验确定:沥青面层取 16~18 cm,水稳碎石基层每层取 15~25 cm,塘渣垫层厚度取 60~100 cm;取值策略调整以每次计算得出的沉降值为基础,计算每次的新模型沉降量和原模型的基准沉降量的差,并采用单位面积道路结构造价(以宁波市建设工程数字造价平台提供的信息价为准)与该沉降变化量的比值作为方案优劣的评价标准,将取值范围向当前最佳的取值方案靠拢,进而加快计算过程。

采用上述不考虑交通荷载的 Plaxis 2D 模型作为基础,以距离道路边线 1.5 m 处的路面点作为沉降监测点,运行 Python 程序共 2 次,得出 171 条计算结果,其中沉降量最小的 20 条数据见表 4。

表 4 程序计算结果

编号	沥青面层厚度 /cm	水稳碎石上基层厚度 /cm	水稳碎石下基层厚度 /cm	塘渣垫层厚度 /cm	每平方米造价 /元	监测点沉降 /mm
1	16	21	24	68	691.1	7.997
2	17	16	24	72	698.9	8.012
3	16	17	24	72	685.9	8.022
4	16	16	24	73	684.6	8.030
5	17	16	23	73	697.6	8.033
6	16	19	23	99	757.2	8.074
7	16	19	24	97	756.0	8.087
8	16	21	24	95	758.6	8.098
9	16	20	25	93	753.6	8.102
10	16	16	23	75	685.8	8.104
11	17	24	20	96	774.1	8.108
12	17	20	19	100	765.1	8.119
13	16	23	24	92	758.7	8.119
14	16	17	23	100	752.1	8.122
15	17	16	23	74	700.1	8.125
16	16	17	22	99	745.8	8.132
17	16	20	18	100	744.5	8.138
18	17	19	19	99	758.8	8.142
19	16	20	21	97	748.4	8.146
20	16	23	22	91	748.6	8.147
平均值	16.3	19	22.5	88.3	733.3	8.093

4.2 结果分析

根据以上 20 条数据可知,软件计算得出的优化

解平均值为 16 cm 沥青面层(4 cm SMA-13 + 5 cm AC-20C + 7 cm AC-25C)、19 cm 水泥稳定碎石上基层、23 cm 水泥稳定碎石下基层、88 cm 塘渣垫层,说明本次计算得出的局部最优解集针对原结构层具有减小 1 cm 沥青面层厚度、增加 3 cm 水泥稳定碎石下基层厚度、增加 18 cm 塘渣垫层厚度的趋势。优化方案的道路结构层每平方米造价为 733.3 元,相比于原结构层的 693.9 元造价增加约 40 元,增幅约 5.7%,沉降量则下降了 0.31 mm,降幅约 3.7%。

评价设计方案的优劣要考虑许多因素,其中工程近远期造价是工程建设中最为重要的部分。针对市政道路而言,既要考虑施工期的造价,也要考虑到运营期的维护费用,因此对路面的疲劳开裂寿命进行计算是有必要的,根据文献[9]的路面结构验算方法,其计算公式如下:

$$N_{fi} = 6.32 \times 10^{(15.96-0.29\beta)} k_a k_b k_{T1}^{-1} \times \left(\frac{1}{\varepsilon_a}\right)^{3.97} \left(\frac{1}{\varepsilon_a'}\right)^{1.58} (\text{VFA})^{2.72} \quad (1)$$

式中: N_{fi} 为沥青混合料层疲劳开裂寿命(轴次); β 为目标可靠性指标; k_a 为季节性冻土地区调整系数; k_b 为疲劳加载模式系数; k_{T1} 为温度调整系数; ε_a 为沥青混合料层层底拉应变, 10^{-6} ; E_a 为沥青混合料 20 °C 时的动态压缩模量, MPa; VFA 为沥青饱和度, %。

根据以上公式对现状方案和优化方案进行比较,易知公式中大部分参数在同一地区、同一等级的道路中是一致的,因此仅计算与沥青面层厚度有关的疲劳加载模式系数 k_b 和与整体模型有关的沥青混合料层底拉应变 ε_a 即可:

$$\frac{N_{fi}'}{N_{fi}} = \frac{k_b'}{k_b} \left(\frac{\varepsilon_a'}{\varepsilon_a}\right)^{3.97} \quad (2)$$

根据规范中的相关公式计算得 k_b 为 3.665, k_b' 为 3.013, 从 Plaxis 模型中距离道路边线 1.5 m 处沥青层底的应力点得到 ε_a 为 15.57, ε_a' 为 13.21, 因此本例中式(2)的值为 1.578 6, 即优化方案的沥青疲劳开裂寿命比现状方案多出约 57.9%。综合考虑各项因素的影响,优化方案在周边基坑开挖的影响下的沉降量和疲劳寿命相比于现状方案具有一定优势。

5 结论

通过对宁波市实际案例的分析、建模和模拟优

化,得出了以下结论。

(1)对于运营多年路基沉降已经趋于稳定的道路,周边基坑开挖对道路沉降的影响约为交通荷载造成的沉降影响的 3 倍,因此在周边存在已建市政道路时基坑的围护结构设计应当适当提高设计标准以减轻对道路沉降的影响;

(2)百骏中心基坑开挖对现状人民路的影响主要集中在距离道路边线 14.5 m 的范围内,影响范围近似为基坑边线、排桩底、距道路边线 14.5 m 三个位置组成的三角形区域;

(3)蒙特卡洛模拟的结果显示,在宁波市现有的常用结构层基础上增加 18 cm 厚的塘渣垫层能够在增加 5.7% 工程前期造价的同时减少 3.7% 基坑施工对市政道路产生的沉降影响、增加沥青层 57.9% 疲劳寿命。

参考文献:

- [1] Attwell P B. Soil movement induced by tunneling and their effects on pipelines and structures[J]. Black Chapman and Hall. 1986:20-46.
- [2] Finno R.J., Bryson L.S. Response of building adjacent to stiff excavation Support system in soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2002, 16(1):10-20.
- [3] 刘维宁, 张弥, 华成. 开挖作用对基坑周围地层工程性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(1):60-64.
- [4] 俞建霖, 赵荣欣, 龚晓南. 软土地基基坑开挖地表沉降量的数值研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998(1):95-101.
- [5] 郑刚, 李志伟. 基坑开挖对邻近不同楼层建筑物影响的有限元分析[J]. 天津大学学报, 2012, 45(9):829-837.
- [6] 刘鑫菊, 郑刚, 周海祚, 等. 临近基坑开挖引起的隧道变形预测分析[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(7):37-44.
- [7] 梅英宝. 交通荷载作用下道路与软土复合地基共同作用性状研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- [8] DG/TJ 08-61—2018, 基坑工程技术标准[S].
- [9] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2283-2290.
- [10] 叶俊能, 刘干斌, 骆睿栋, 等. 宁波地区典型地层 HSS 模型参数试验研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(5):72-78.
- [11] 董学超, 王水林, 郭明伟, 等. 基于压缩试验曲线的 HSS 模型参数优化[J]. 岩土力学, 2020(增刊 2):1-9.
- [12] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范[S].
- [13] 刘志祥, 张海清. Plaxis 高级应用教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
- [14] 许继凯. 交通荷载作用下输气管道的结构完整性分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2022, 38(5):22-25, 50.
- [15] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.