

路基浸水对透水路面沉陷量的影响研究

段叔瑜¹, 苏艳芹²

(1.济宁市鸿翔公路勘察设计院有限公司, 山东 济宁 272000; 2.山东英才学院, 山东 济南 250104)

摘要:为探究透水路面路基浸水软化后所造成路面和基层的沉陷行为,采用 EDEM 软件分析各层的沉陷量。模拟结果表明,浸水后的路基土,会在车辆荷载的作用下,造成上方的透水砾石嵌入路基土当中,使路面发生较大沉陷,且沉陷量几乎由砾石基层及路基土层所产生。

关键词:路基工程;透水路面;路基浸水;EDEM 模拟;沉陷

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)03-0209-06

0 引言

为解决路面积水和海绵城市的建设,透水路面日益成为研究热点。根据日本道路路面雨水处理手册(2005)定义透水性路面为“使雨水渗透到路面以下,将雨水暂时储存在面层、基层或路基内部以控制雨水径流量而进行排水的铺面类型”。刘东美等研制出了可用于透水路面的高黏沥青,采用高黏沥青可以保证沥青混合料的黏结力和抗水损害能力^[1-3]。透水性路面的主要功能为雨水透过沥青路面渗入地下储存,晴天时储存在面层下的水会蒸发,而产生蒸发作用时会吸收地表的热能,可以有效减缓城市的热岛效应;而水分入渗至路基土,可以改善植物、生物等的生长环境,有助于生态平衡发展;下雨时可以排除地面积水,提高路面抗滑性能,降低路面积水的可能^[4-6]。

但传统透水路面在设计时往往仅考虑透水并未考虑保水,因路基土经过夯实渗透性极低,雨水长期储存在路基土上方,造成路基土因长期浸水而软化,加上车辆荷载的反复作用,经常造成透水砾石嵌入浸水土壤当中,造成路面沉陷的问题。对此,本文将利用 EDEM 软件,模拟城市道路路基土在浸水前后造成的差异及针对各承载层的沉陷行为进行探讨。

1 透水路基路面 EDEM 模拟

1.1 路基土参数

采用击实试验求得最大干密度与最佳含水量,

作为路基设计及施工质量的参考。试验过程参考《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)^[7],路基土采用山东济南地区的黏土,该黏土的相对密度为 2.75,液限为 34.7%,塑限为 15.3%,土样的筛分曲线如图 1 所示,其限制粒径 $d_{60}=0.60$ mm,有效粒径 $d_{10}=0.074$ mm,不均匀系数 $C_u=8.1$,曲率系数 $C_c=2.8$ 。通过击实试验可绘制出干密度与含水率的关系曲线,如图 2 所示,可以根据击实曲线求得土样的最大干密度约为 18.4 kN/m^3 及最佳含水量约为 15.5%。

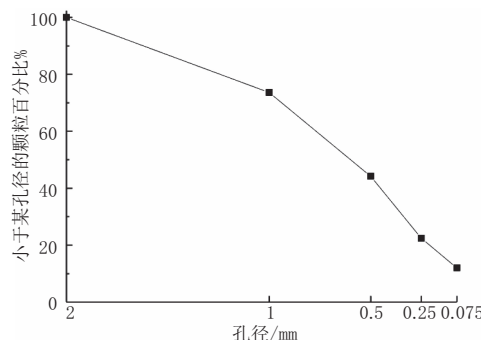


图 1 土样筛分曲线图

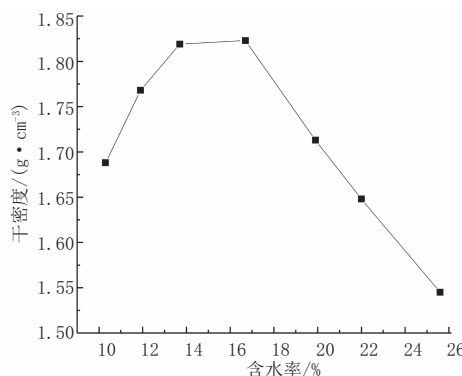


图 2 含水率与干密度的关系曲线图

现选择最佳含水量 $\pm 2\%$ 当作土的承载比 (CBR) 试验的击实含水率,击实含水率分别为 17.5% 及

收稿日期: 2023-04-01

作者简介: 段叔瑜(1995—), 男, 工程硕士, 助理工程师, 从事路基路面结构方面的研究工作。

13.5%。该项试验共有四组试验对照,分别为夯实含水量为 17.5%的浸水路基土、17.5%的未浸水路基土、13.5%的浸水路基土、13.5%的未浸水路基土。

由于 EDEM 中需要输入土的弹性模量和泊松比,故将土的回弹模量当作弹性模量,坚硬黏土的泊松比取 0.25,软弱黏土的泊松比取 0.35。采用《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[8]中的公式计算土的回弹模量值:

$$M_R = 17.6 CBR^{0.64} \quad (2 < CBR \leq 12) \quad (1)$$

$$M_R = 22.1 CBR^{0.55} \quad (12 < CBR \leq 80) \quad (2)$$

式中: M_R 为土的回弹模量,MPa。

现将本文使用于路基土分析的参数整理成表 1。

表 1 路基土的分析参数表

路基土状态	含水率 / %	泊松比	比重 / (kg·m ⁻³)	CBR / %	E ₀ / MPa
浸水	17.50	0.35	2 010	2.33	30
浸水	13.50	0.35	2 070	3.25	37
未浸水	17.50	0.25	1 890	47.58	185
未浸水	13.50	0.25	2 040	35.07	156

由于在 EDEM 软件中采用 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 颗粒模型模拟路基土,通过颗粒表面间的黏结力(Surface Energy),来模拟土颗粒间的键结,在经过多次模拟土的承载比(CBR)试验之后,大略找出四组适合的表面黏结力,将结果整理成表 2。

表 2 表面黏结力参数表

路基土状态	含水率 / %	表面黏结力 / (J·m ⁻²)
浸水	11.5	250
浸水	13.5	515
未浸水	11.5	2 500
未浸水	13.5	2 250

在标定的过程中发现,Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 颗粒模型所需要的分析参数表面黏结力(Surface Energy),假设数值超过表 2 所列的数值太多,颗粒间表面会因为太大的黏结力而结成团状,如图 3 所示;反之,若假设数值低于表 2 所列之数值太多,则因颗粒间表面黏结力太小,无法模拟出如黏性土的颗粒堆积。因此需要经过多次尝试,取得适合的表面黏结力分析参数。

由于采用软件模拟路基土的承载比(CBR)试验和实验室实测数据进行比较来确定表面黏结力,未浸水路基土的 CBR 值比浸水路基土的 CBR 值高 10 倍左右,其表面黏结力也相差 10 倍左右。

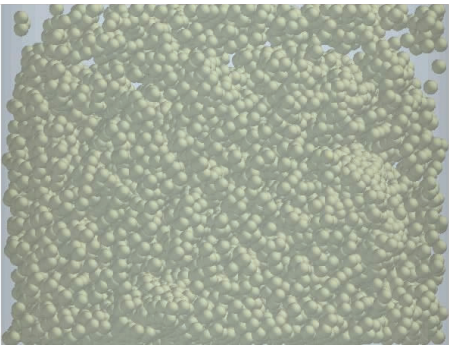


图 3 分析颗粒表面黏结力过高示意图

1.2 透水砾石基层参数标定

在 EDEM 软件模拟当中使用基本的颗粒模型 Hertz-Mindlin (No Slip)模拟砾石基层,砾石基层的参数见表 3 所列。

表 3 砾石基层的分析参数表

泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)	弹性模量 / MPa	颗粒直径 / cm
0.4	2 660	2 200	1.6

1.3 沥青混凝土面层

沥青混凝土面层在 EDEM 中使用 Hertz-Mindlin with Bonding 颗粒模型进行模拟,而为了取得 Bonding 颗粒模型分析所需参数,需在 EDEM 软件中模拟实验室实测的单轴贯入试验的结果,如图 4 所示。通过控制 Hertz-Mindlin with Bonding 颗粒模型需要输入的参数,法向刚度(Normal Stiffness)、抗剪刚度(Shear Stiffness)、临界法向应力(Critical Normal Stress)、临界剪应力(Critical Shear Stress)、黏结半径(Bonded Disk Radius)来得到与实验室实测的极限荷载相近的模拟极限荷载。沥青混凝土面层的参数见表 4 所列。

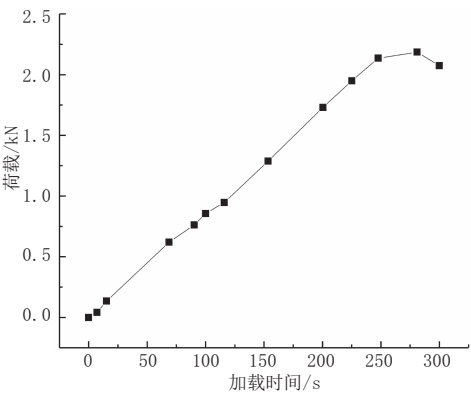


图 4 单轴贯入强度试验结果曲线图

表 4 沥青混凝土层分析参数一览表

法向刚度 / (N·m ⁻³)	抗剪刚度 / (N·m ⁻³)	临界法向应力 / Pa	临界剪应力 / Pa	黏结半径 / mm
8 × 10 ⁸	8 × 10 ⁹	5 × 10 ¹³	5 × 10 ¹³	6.6

1.4 车载计算

大量资料显示,轮胎荷重对路面产生的接触面近似为矩形^[9-10],矩形的宽为 L_1 ,长为 L_2 ,计算公式如下。其中,根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[11],标准轴重 $P=100\text{ kN}$,轮载 $P_1=25\text{ kN}$,单位压力 $p=0.7\text{ MPa}$,代入公式可得矩形的宽为 21.3 cm ,长为 30.2 cm 。

$$L_1=\sqrt{\frac{4P_1}{\pi p}}\tag{3}$$

$$L_2=\sqrt{\frac{8P_1}{\pi p}}\tag{4}$$

式中: P_1 为轮载,kN; p 为单位压力,MPa。

1.5 模型的建立

为简化计算,取沥青混凝土面层为 15 cm ,透水砾石基层为 50 cm ,路基土层为 50 cm 。几何模型的 X 方向为长度方向,Y 方向为宽度方向,XY 方向均采用周期性边界 (Periodic Boundary Conditions, PBCs) 条件,来补足离散元素因分析计算时间的限制,无法有效模拟大范围的问题。模型如图 5 所示。

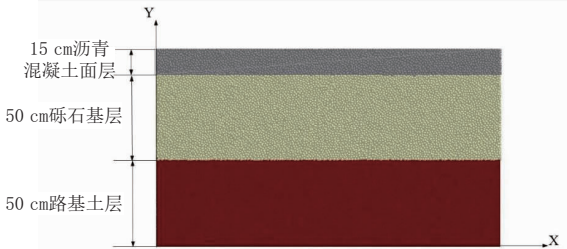


图 5 模拟示意图

1.6 加载分析步骤

本文的计算分析步骤如下,先采用 Hertz–Mindlin with JKR Cohesion 模型建立底层的路基土的计算颗粒模型,接着采用 Hertz–Mindlin(No Slip)模型在路基土层上建立透水砾石基层的计算颗粒模型,最后在顶部采用 Hertz–Mindlin with Bonding 模型建立沥青混凝土的计算颗粒模型。由于各层均指定了计算颗粒模型,故各层之间无需定义层间接触。完成透水路面模型后,分别加上车辆荷载,进行循环加载分析,由于分析时间取决于颗粒数,本文取 10 次循环加载进行沉陷分析。

2 模拟计算结果及分析

2.1 路基土浸水对沥青混凝土面层顶面沉陷量的影响

几何模型建好之后,接着于模型上方施加车辆荷载,加载时利用 EDEM 分析软件内的测量工具测量其沥青混凝土面层顶面沉陷量即为总沉陷,解除车载后再测其沥青混凝土面层顶面沉陷量即为塑性

沉陷量,总沉陷量减去塑性沉陷量即为弹性沉陷量。模拟结果如表 5~表 8 所列。

表 5 含水率为 17.5%的浸水路经 10 次加载后的沉陷量一览表 单位:cm

加载次数	总沉陷量	弹性沉陷量	塑性沉陷量
1	0.56	0.12	0.45
2	0.75	0.19	0.56
3	0.88	0.21	0.67
4	1.00	0.25	0.76
5	1.12	0.28	0.85
6	1.24	0.31	0.93
7	1.34	0.33	1.01
8	1.44	0.36	1.08
9	1.53	0.39	1.15
10	1.61	0.40	1.21

表 6 含水率为 13.5%的浸水路经 10 次加载后的沉陷量一览表 单位:cm

加载次数	总沉陷量	弹性沉陷量	塑性沉陷量
1	0.64	0.20	0.44
2	0.79	0.24	0.55
3	0.94	0.27	0.67
4	1.06	0.30	0.76
5	1.18	0.33	0.85
6	1.31	0.35	0.96
7	1.40	0.37	1.03
8	1.48	0.39	1.09
9	1.58	0.42	1.16
10	1.71	0.44	1.27

表 7 含水率为 17.5%的非浸水路经 10 次加载后的沉陷量一览表 单位:cm

加载次数	总沉陷量	弹性沉陷量	塑性沉陷量
1	0.09	0.07	0.02
2	0.13	0.10	0.03
3	0.14	0.11	0.03
4	0.15	0.12	0.03
5	0.18	0.13	0.05
6	0.19	0.14	0.05
7	0.20	0.15	0.05
8	0.21	0.16	0.05
9	0.21	0.16	0.05
10	0.22	0.17	0.05

表 8 含水率为 13.5%的非浸水路基经 10 次加载后的沉陷量一览表
单位: cm

加载次数	总沉陷量	弹性沉陷量	塑性沉陷量
1	0.14	0.10	0.04
2	0.20	0.14	0.06
3	0.22	0.16	0.06
4	0.25	0.18	0.07
5	0.28	0.20	0.08
6	0.31	0.23	0.08
7	0.35	0.25	0.10
8	0.37	0.26	0.11
9	0.38	0.27	0.11
10	0.40	0.28	0.12

由表 5 可以看出含水量为 17.5%的浸水路基土,其沥青混凝土面层顶面总沉陷量由第 1 次加载的 0.56 cm 增至第 10 次加载的 1.61 cm,由表 6 可以看出含水量为 13.5%的浸水路基土,总沉陷量由第 1 次加载的 0.64 cm 增至第 10 次加载的 1.71 cm,由表 7 可以看出含水量为 17.5%未浸水路基土,其总沉陷量由第 1 次加载的 0.09 cm 增至第 10 次加载的 0.22 cm,由表 8 可以看出含水量为 13.5%未浸水路基土,总沉陷量由第 1 次加载的 0.14 cm 增至第 10 次加载的 0.40 cm。由此可以发现由于浸水路基土承载力下降,会导致路面发生沉陷,且沉陷量会随着加载次数的增加而提升,浸水路基土的最大沉陷量比非浸水路基土的沉陷量高 7 倍左右。

2.2 路面、路基各层沉陷量计算结果及分析

2.2.1 路面、路基各层顶部总沉陷量

将模型进行 10 次循环加载,在进行加载时分别测量沥青面层顶部、砾石基层顶部及浸水路基土层顶部如图 6 所示,可得各承载层总沉陷量,而解除车轮加载时也分别测量各层顶部的沉陷量可得各承载层塑性沉陷量,之后将各承载层总沉陷量减去塑性沉陷量可得各承载层弹性沉陷量,将测量得到的路基、路面各层随加载次数变化的总沉陷量绘制成图 7 和图 8,将未浸水路基、路面各层随加载次数变化的总沉陷量整理成表 9 和表 10。

由图 7 和图 8 可以看出,砾石基层的沉陷量大于路基土层的沉陷量,由表 9 和表 10 可以看出,未浸水路基土各层的沉陷量均远小于浸水路基土各层的沉陷量。其中,沥青混凝土面层几乎没有沉陷,原因为沥青混凝土面层是通过 Hertz-Mindlin with Bonding 颗粒模型所建立的,该模型的参数是通过试

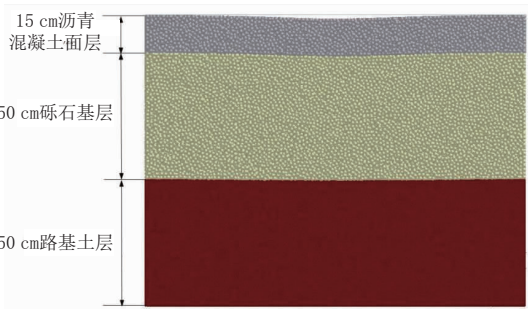


图 6 路面、路基各承载层的沉陷示意图

表 9 加载 10 次时含水率为 17.5%的未浸水路基各承载层的总沉陷量一览表

加载次数	沥青混凝土面层	砾石基层	路基土层
1	0	0.01	0.08
2	0.01	0.02	0.1
3	0.01	0.02	0.11
4	0.01	0.02	0.12
5	0.01	0.03	0.14
6	0.01	0.03	0.15
7	0.01	0.03	0.16
8	0.01	0.03	0.17
9	0.01	0.03	0.17
10	0.01	0.03	0.18

表 10 加载 10 次时含水率为 13.5%的未浸水路基各承载层的总沉陷量一览表

加载次数	沥青混凝土面层	砾石基层	路基土层
1	0	0.02	0.12
2	0.01	0.03	0.16
3	0.01	0.03	0.18
4	0.01	0.04	0.2
5	0.01	0.04	0.23
6	0.01	0.04	0.26
7	0.01	0.05	0.29
8	0.01	0.05	0.31
9	0.01	0.05	0.32
10	0.01	0.05	0.34

验室单轴贯入试验所确定的,设定的临界法向应力和临界剪应力均为 5×10^7 MPa,由于加载次数仅为 10 次,不足以使沥青混凝土面层产生较大的沉陷量。

2.2.2 路基、路面各层顶部塑性沉陷量

加载 10 次时不同含水率浸水路基、路面各层塑性沉陷量,见图 9、图 10 所示;加载 10 次时不同含水率未浸水路基、路面各层塑性沉陷量,见表 11 和表 12 所列。由图 9 可知,含水量为 17.5%的浸水路基土塑性沉陷当中,基层的沉陷量为 0.77 cm,路基土

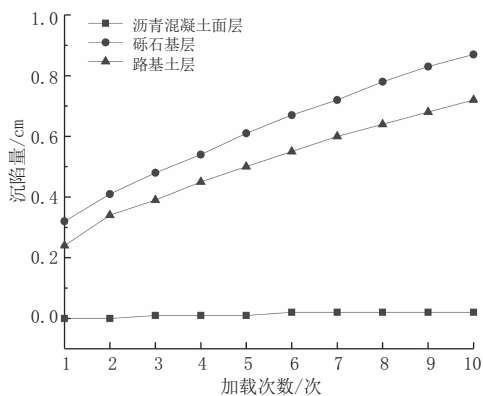


图7 加载10次时含水率为17.5%的浸水路基各承载层的总沉陷量曲线图

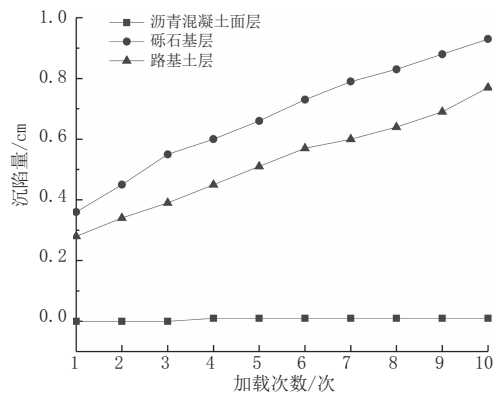


图8 加载10次时含水率为13.5%的浸水路基各承载层的总沉陷量曲线图

层的沉陷量为0.43 cm，沥青面层的沉陷量仅为0.01 cm。由图10可知含水量为13.5%的浸水路基土塑性沉陷当中，基层的沉陷量为0.80 cm，路基土层的沉陷量为0.46 cm，沥青面层的沉陷量仅为0.01 cm，而由表11和表12可知，未浸水的路基土各层塑性沉陷皆十分微小。由此可知，透水路面受车载后所造成的沉陷主要是受砾石基层及路基土的沉陷所影响，而造成路面所产生的塑性沉陷量当中，砾石基层沉陷量大于路基土层的原因，是因为在车载的作用下，砾石会嵌入浸水路基土当中，上方砾石发生挤压滑动的现象，而造成额外的沉陷所致。

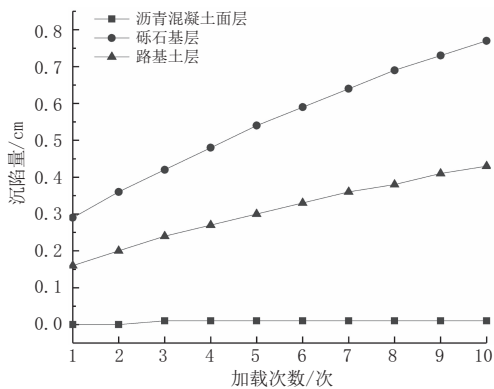


图9 加载10次时含水率为17.5%的浸水路基各承载层的塑性沉陷量曲线图

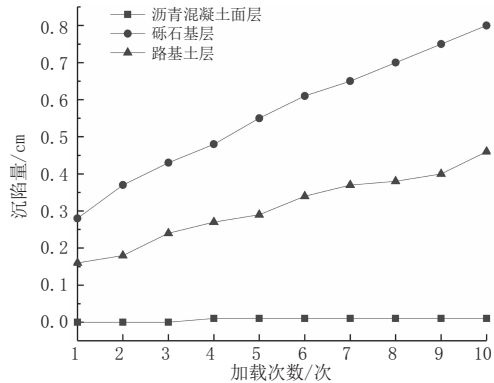


图10 加载10次时含水率为13.5%的浸水路基各承载层的塑性沉陷量曲线图

表11 加载10次时含水率为17.5%的未浸水路基各承载层的塑性沉陷量一览表

加载次数	沥青混凝土面层	砾石基层	路基土层
1	0	0.01	0.01
2	0.01	0.01	0.01
3	0.01	0.01	0.01
4	0.01	0.01	0.01
5	0.01	0.02	0.02
6	0.01	0.02	0.02
7	0.01	0.02	0.02
8	0.01	0.02	0.02
9	0.01	0.02	0.02
10	0.01	0.02	0.02

表12 加载10次时含水率为13.5%的未浸水路基各承载层的塑性沉陷量一览表

加载次数	沥青混凝土面层	砾石基层	路基土层
1	0	0.02	0.02
2	0.01	0.02	0.03
3	0.01	0.02	0.03
4	0.01	0.03	0.03
5	0.01	0.03	0.04
6	0.01	0.03	0.04
7	0.01	0.04	0.05
8	0.01	0.04	0.06
9	0.01	0.04	0.06
10	0.01	0.04	0.07

2.2.3 路基、路面各层顶面塑性沉陷量

加载10次时不同含水率浸水路基、路面各层塑性沉陷量，见图11和图12所示；加载10次时不同含水率未浸水路基、路面各层塑性沉陷量，见表13和表14所列。由图11和图12可知，经10次循环加载的浸水路基土路面所造成的弹性沉陷中，路基土层回弹量约为0.29 cm，砾石基层回弹量约为0.1 cm，相

差三倍之多,而由表 13 和表 14 可知在非浸水路基土路面所造成的弹性沉陷中,路基土层回弹量最大可达 0.27 cm,砾石基层回弹量几乎为零,差距更大。由此可以发现基层受车载作用后所发生的沉陷回弹量较少,因为在模拟分析时砾石基层使用一般的 Hertz-Mindlin 碰撞模型,颗粒彼此间不具有键结,仅有摩擦力存在,而路基土因为使用颗粒具有表面黏结的 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 接触模型,所以加载时会因为黏结力而有较大的回弹量发生。

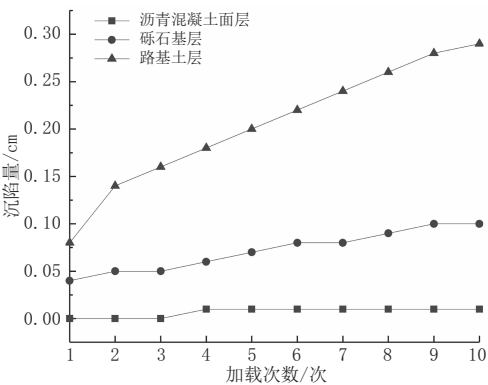


图 11 加载 10 次时含水率为 17.5% 的浸水路基各承载层的弹性沉陷量曲线图

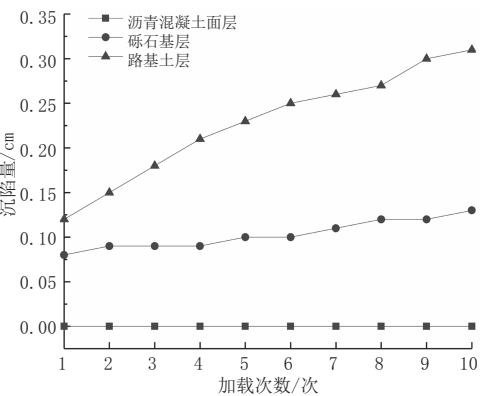


图 12 加载 10 次时含水率为 13.5% 的浸水路基各承载层的弹性沉陷量曲线图

表 13 加载 10 次时含水率为 17.5% 的未浸水路基各承载层的弹性沉陷量一览表

加载次数	沥青混凝土面层	砾石基层	路基土层
1	0.00	0.00	0.07
2	0.00	0.01	0.09
3	0.00	0.01	0.1
4	0.00	0.01	0.11
5	0.00	0.01	0.12
6	0.00	0.01	0.13
7	0.00	0.01	0.14
8	0.00	0.01	0.15
9	0.00	0.01	0.15
10	0.00	0.01	0.16

表 14 加载 10 次时含水率为 13.5% 的未浸水路基各承载层的弹性沉陷量一览表

加载次数	沥青混凝土面层	砾石基层	路基土层
1	0.00	0.00	0.1
2	0.00	0.01	0.13
3	0.00	0.01	0.15
4	0.00	0.01	0.17
5	0.00	0.01	0.19
6	0.00	0.01	0.22
7	0.00	0.01	0.24
8	0.00	0.01	0.25
9	0.00	0.01	0.26
10	0.00	0.01	0.27

3 结 语

本文通过对透水路面浸水路基土沉陷量的分析,得出以下结论:

(1)从土的承载比(CBR)试验可知,未浸水的路基土强度比浸水的路基土强度差异可达 30 倍之多。而在经 EDEM 循环加载模拟后发现,经浸水路基土会有较大的砾石嵌入现象,因而造成较大的塑性沉陷,最大可达 1.27 cm,浸水与未浸水的透水沥青路面塑性沉陷差异可达 10 倍以上之多。

(2)经 EDEM 循环加载模拟后发现,透水路面受车载作用后所造成的沉陷,主要是受砾石基层和路基土的沉陷影响,而沥青混凝土面层几乎没有沉陷,砾石基层的沉陷影响又稍大于路基土。同时,也发现砾石基层的弹性沉陷比路基土小,只要发生沉陷就较难恢复原本的位置。

(3)在进行透水路面路基的设计时,应注意路基的排水措施,减少在雨天降水量大时路基土处于浸水状态的时间。避免路基长时间浸水而导致承载力下降,进而造成路面的沉陷。

参考文献:

[1] 刘东美,叶庆凡,于晓霞,等.排水路面高黏沥青及其混合料性能试验研究[J].山东建筑大学学报,2019,34(2):17-21.

[2] 卢杰.透水沥青路面专用高粘度改性沥青性能研究[D].天津:河北工业大学,2018.

[3] 吴渝玲.橡胶沥青透水路面沥青膜厚度研究[J].公路工程,2015,40(4):266-269.

[4] 孙华.沥青透水性路面与排水性路面之异同性研究[J].山西科技,2019,34(5):36-40.

[5] 杨利珍,原俊兵.透水路面在海绵城市建设中的作用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(3):43-45.

别紧邻龙尾河、西盐河,部分沿河管道与河道连通,导致河水进入污水管道降低 COD 浓度。经计算,区域污水管网河水入侵量 3.26 万 t,河水入侵占比 25.3%。

(4)山泉水入侵

现状城区存在多处雨污水通过水利沟渠排放。连云港市近些年虽然建设了部分截污工程,但是截流不彻底,将混有上游山泉水的水利沟渠截至污水主干管网系统,造成大量清水入侵^[6]。以锦屏山北侧片区为例,该区为海州老城区,城中村生活污水与山涧水汇入西门涧沟、甲子河、地质六队东侧涧沟、易居公馆北侧涧沟共 4 条沟渠。前两条排洪沟污水由海州泵站、甲子河泵站排至市政污水管道,影响污水水质浓度;后两条排洪沟污水直接进入玉带河,影响河水水质。最终计算出区域污水管网山泉水入侵量 0.26 万 t,山泉水入侵占比 0.2%。

3.6 排水户现状分析

方案对居住小区、公共建筑、“小散乱”、工业企业等排水户的现状进行分析,主要包括排水户内部雨污分流情况、排水出路及接管情况、水质水量、排水许可、预处理设施情况等。

3.6.1 地块雨污分流情况分析

服务范围内排水户总面积约 48.94 km²,合流制排水户面积 5.91 km²,占达标区总面积的 12.1%。目前,片区正在实施推进居民小区雨污分流改造工作,但尚未完全实现地块分流,仍存在雨污分流不彻底的情况。分流制区域以阳台和车库污水问题为主,也有部分小区存在污水管道私接,雨污水管混接错接等问题。

3.6.2 低效能排水户分析

本次对低浓度区域内的典型小区进行排查及水质检测。通过分析得知,影响污水浓度的主要原因包括:(1)排水户内仅有一套合流管道;(2)老旧小区管网出现破裂、渗漏等缺陷;(3)排水户内部部分雨污水管道混接;(4)化粪池等简易污水处理设施的初步处理影响了排出的污水浓度。

除此之外,大浦污水处理厂服务范围内现有 5 座垃圾中转站,废水排放量总计 16 t/d;施工降水和

基坑排水会通过错接混接点进入污水管网,或其本身含有的泥沙叠加源头错接混接和沿线商铺排污,也会影响片区污水收集处理系统的正常运行^[7]。

4 治理目标及工程措施

(1)治理目标

到 2025 年,连云港市(主城区)污水处理能力基本满足本地经济社会发展需要;进水 BOD 浓度高于 100 mg/L 的城市生活污水处理厂规模占比达 90%以上;建成“污水处理提质增效达标区”比例达到 60%。

(2)工程措施

包括管网混错接改造工程、管道清淤及修复工程、污水管网过河方案优化工程、精准截流工程、山涧水整治工程、智慧水务工程等,工程总投资约 37 亿元。

5 结 语

连云港市全面提升城市污水集中收集处理率,以污水处理厂进水浓度提升为导向,通过管网排查及重要节点水质水量分析,可知污水厂进厂浓度低的原因主要包括污水应收未收和外水侵入,分析外水侵入种类及原因,并结合物料平衡核算分析结果,定位重点问题区域。通过改造混错接管段、管道清淤修复、优化系统布局调整、精准节流等多项措施,提升污水收集率,实现污水厂进厂 COD 浓度达标的目标要求。

参考文献:

- [1] 刘文强,郁达伟,郑利兵,等.南昌某城市污水处理厂进水浓度低成因分析研究[J].环境科学学报,2022,42(9): 141-150.
- [2] 黄志心.福州市排水系统提质增效对策与思考[J].给水排水,2021,57(10): 45-51.
- [3] 陈小龙,李心梅,余黎,等.城镇排水管网分区监测诊断方法与应用[J].中国给水排水,2022,38(10): 40-45.
- [4] 杨浩铭,唐颖栋,魏俊,等.基于长历时监测的外水入侵诊断分析研究[J].给水排水,2021,57(S1): 218-221.
- [5] 张伟,潘芳,张海行,等.污水处理提质增效“一厂一策”方案的编制思考[J].中国给水排水,2023,39(2): 32-37.
- [6] 胡小凤,袁芳,石鹏远,等.福鼎市污水系统问题识别及提质增效策略[J].中国给水排水,2022,38(12): 61-67.
- [7] 孙永利.城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J].中国给水排水,2020,36(2): 1-6.

(上接第 214 页)

- [6] 王庆祝.透水沥青路面在我国湿热多雨地区城市道路应用的可行性研究[J].中外公路,2005(6):27-29.
- [7] JTG E40—2007,公路土工试验规程[S].
- [8] JTG D30—2015,公路路基设计规范[S].

- [9] 刘文利.透水沥青路面设计研究[D].开封:河南大学,2018.
- [10] 李新贺,高明明.基于有限元法的透水沥青路面结构分析[J].华东公路,2014(2):59-61.
- [11] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].