

基于超固结状态的既有软基段路基轻质换填技术研究

黄宝涛^{1,2}, 张牡丹^{1,2*}, 黄湘铄^{1,2}, 方明山^{2,3}, 冯健雪⁴, 黄丽珍⁵

(1.浙江海洋大学 海洋工程装备学院, 浙江 舟山 316022; 2.浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022;
3.浙江交投交通建设管理有限公司, 浙江 宁波 310000; 4.贵州民族大学 建筑工程学院,
贵州 贵阳 550025; 5.湖北工程学院 土木工程学院, 湖北 孝感 432100)

摘要:为解决沿海地区公路软基段路基差异沉降病害, 该文基于超固结应力比的弹性变形理论, 从减轻车辆荷载和结构自重附加应力的角度, 开展人造超固结应力比计算分析及轻质化换填新技术的研究。结果表明: 适宜密度轻质材料的换填厚度可使路基底部附加应力小于原状软土的自重应力, 且附加应力小于软土初始流变应力值, 形成的超固结应力比, 可让软土地基处于弹性变形状态。试验路的沉降性能观测数据显示: 工后1年使用情况下, 轻质化换填路面结构的沉降稳定保持在1 mm左右, 常规路面结构的沉降量达到17 mm, 超过行车舒适的上限值15 mm, 且沉降还在持续发展中。该文提出基于人造超固结应力比理论的轻质化换填技术可有效解决软基段路基差异沉降, 具有显著的理论价值和工程实践推广前景。

关键词: 道路工程; 软基段路基; 轻质换填; 差异沉降

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Lightweight Replacement Technology for Existing Soft Subgrade Based on Over-Consolidated State

HUANG Baotao^{1,2}, ZHANG Mudan^{1,2*}, HUANG Xiangshuo^{1,2},
FANG Mingshan^{2,3}, FENG Jianxue⁴, HUANG Lizhen⁵

(1.School of Marine Engineering Equipment, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China; 2.School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China; 3.Zhejiang Investment Traffic Construction Management Limited Company, Ningbo, Zhejiang 310000, China; 4.College of Civil Engineering and Architecture, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 5. School of Civil Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan, Hubei 432100, China)

Abstract: In order to solve the differential settlement of soft subgrade in coastal areas, based on the elastic deformation theory of overconsolidation stress ratio, the calculation and analysis of artificial overconsolidation stress ratio and the new technology of lightweight replacement were carried out to reduce the additional stress of vehicle load and structure weigh. The results show that the replacement thickness of the lightweight material with suitable density can make the additional stress at the bottom of the subgrade less than the deadweight stress of the original soft soil, and the additional stress is less than the initial flow stress of the soft soil. The resulting overconsolidation stress ratio can put the soft soil in a state of elastic deformation. The observed data of settlement performance of the test road show that the settlement of the pavement structure remains with lightweight replacement is stable at about 1 mm one year after construction; the settlement of conventional pavement structure reaches 17 mm, which exceeds the upper limit of driving comfort of 15 mm, and the

收稿日期: 2022-09-16

基金项目: 宁波市交通科技项目(编号: 201902)

作者简介: 黄宝涛, 男, 博士, 教授. E-mail: 7247480@qq.com

*通信作者: 张牡丹, 女, 硕士研究生. E-mail: 7247480@qq.com

settlement is still intensifying. The proposed lightweight replacement technology based on the artificial overconsolidation stress ratio theory can effectively solve the differential settlement of soft subgrade, which has significant theoretical value and practical application prospects.

Keywords: road engineering; soft subgrade; lightweight replacement; differential settlement

0 引言

软基段路基不均匀沉降的核心问题就是软基与结构物之间受力变形状态整体协调的问题。工程技术人员通过采用粉喷桩、浆喷桩、真空联合堆载预压、塑料排水板超载预压、砂桩超载预压等对软土地基之间及不同结构物之间的差异沉降进行研究^[1-3]。Nakanishi等^[4]计算地基沉降提出了一种确定桩长的优化设计方法;王祥^[5]分析了超软土地基产生波浪状破坏的机理,常用处理措施对桩基的影响大等问题的处理方案也得到了深入研究^[6-9];徐林荣等^[10]、李海滨等^[11]、王灏等^[12]对新老路堤结合部进行了为期9个月的沉降动态监测,分析了过渡段长度和差异沉降的关系。公路工程差异沉降调查发现:软基段路基受力变形状态稳定性不足与软基段路基底部应力大于软土流变下限阈值是影响和解决公路软基段路基不均匀沉降的两个关键因素,也是多种工程措施治理不均匀沉降只有改善、少有根治效果的原因。该文基于人造超固结应力状态,从减小地基的固结沉降和压缩变形的角度,提出工程造价适宜的控制公路软基段路基工后差异沉降的轻质化换填技术。

1 软土初始流变应力值概念的提出

对差异沉降病害严重段的软土路段,通过钻孔对软土取样,取制样过程中尽量保证土体少受扰动,使室内土样力学性能与实际一致,如图1所示。



图1 病害路段钻孔软土芯样

Figure 1 Core sample of soft soil drilled in diseased section

对试验段软土芯样进行室内流变试验,每个试样最短加载时间144 h,最长加载时间172 h。根据土

质情况,分别采用25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa,或50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa两种加载方式。试验初期每1 h记录一次数据,试验中后期每4 h记录一次数据,试验结果如图2所示。

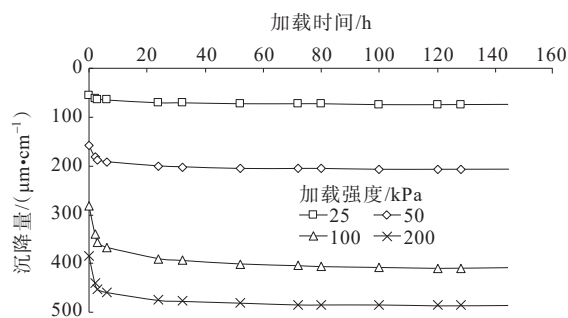


图2 软土流变曲线图(取土深度:2.8 m)

Figure 2 Rheological curve of soft soil (soil depth of 2.8 m)

由图2可知:软土在沉降初期随着时间的增长沉降迅速增大,随后增大趋势逐步变小,并趋于稳定状态。对比观察应力水平25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa时的流变数据可以发现,当应力水平为25 kPa或小于25 kPa时,流变对软土沉降的影响基本可以忽略。而当应力为50 kPa、100 kPa、200 kPa时,流变对软土沉降的影响极大。由此,本文定义出“初始流变应力值”的概念,即为材料在载荷长期作用下发生明显流变的最小应力值。

在力学上,初始流变应力值与强度值是两个完全不同的概念。强度值是指材料在加载过程直至破坏所能够承受的最大应力值,而初始流变应力值是指材料在载荷长期作用下发生明显流变的最小应力值。图3为软土的初始流变应力值与强度值的直观比较。从图3可以看到:软土初始流变应力值大约为软土强度值的20%。

经过试验分析,可知本次试验样品所属的软土类型,其初始流变应力值约为25 kPa。即当应力水平低于25 kPa时,流变的影响很小;当应力水平高于25 kPa时,忽略流变对软土沉降的影响将对试验结果产生不可忽视的影响。

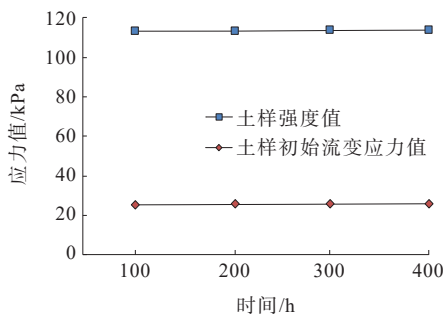


图3 淤泥质软土强度与初始流变应力值差别

Figure 3 Difference between strength and initial flow stress of muddy soft soil

2 软土人造超固结比状态的理论基础

传统土力学荷载加载—卸载变形理论如图4所示,可知:随着荷载的持续增大,加载—卸载循环作用下土体都产生了不可恢复的塑性变形积累,初始加载值的大小相当于土体曾经受过的应力历史。

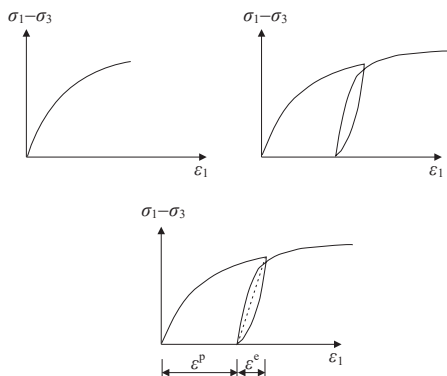


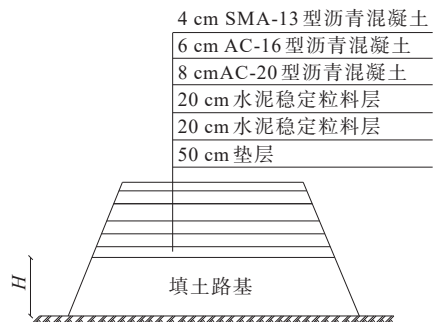
图4 软土的加载—卸载—再加载应力—应变关系曲线

Figure 4 Loading-unloading-reloading stress-strain curve of soft soil

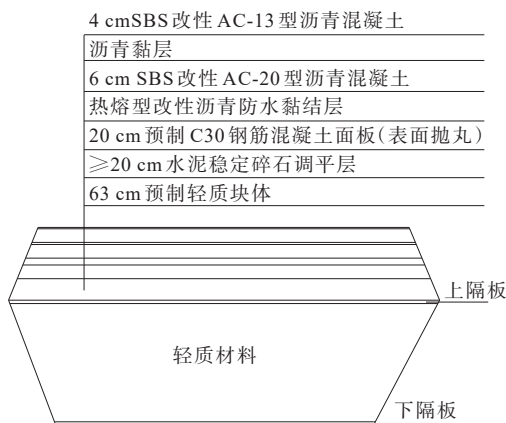
从图4可知:若保持初始加载荷载不变或通过碾压、堆载预压等措施使初始应力值比较大,后续通过轻质材料换填、铺设应力分散扩散下隔板、地基软土原位固化等措施提升整体性,让路面结构填料和车辆荷载组合产生的总荷载都小于这个初始加载荷载值,且附加应力小于软土初始流变应力值时,则软土地基土体就处于一种人造的弹性可恢复的超固结应力状态。

常规路面结构和轻质化换填路面结构的组成如图5所示,若能够让轻质化换填路面结构承受加载—卸载产生的应力都小于初始加载产生的应力,且附

加应力小于软土初始流变应力值时,则地基土就处于完全弹性范围(ϵ^e)内。



(a) 常规路面结构



(b) 轻质化换填路面结构

图5 人造超固结应力比路面结构示意图

Figure 5 Pavement structure with artificial overconsolidation stress ratio

如表1所示,即当轻质化换填路面结构承受加载—卸载产生的应变都小于初始加载产生的应变,且附加应力也小于软土初始流变应力值时,就能够保证轻质化换填路面结构和车辆荷载组合的总荷载产生的变形可以完全恢复,同时不会产生不可恢复的塑性变形积累,从而避免了不均匀差异沉降的产生。

3 基于荷载传递的轻质化换填密度上限值的确定步骤及方法

根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014),取典型汽车参数为车重 550 kN (约 55 t),中后轮各 4 个着地宽度及长度 0.6 m×0.2 m,前轮 2 个着地宽度及长度 0.3 m×0.2 m,车辆外形尺寸取 15 m×2.5 m。《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)中将汽车载

表1 单位面积常规路面结构和轻质化换填路面结构的应力指标

Table 1 Stress index of conventional pavement structure and pavement structure with lightweight replacement in unit area

项目	厚度	密度	应力	路面结构总应力指标
常规路面结构	沥青路面层	H_{c1}	ρ_{c1}	$\rho_{c1}H_{c1}g$
	水泥稳定粒料层	H_{c2}	ρ_{c2}	$\rho_{c2}H_{c2}g$
	垫层	H_{c3}	ρ_{c3}	$\rho_{c3}H_{c3}g$
	路基土层	H_{c4}	ρ_{c4}	$\rho_{c4}H_{c4}g$
轻质化换填路面结构	沥青路面层	h_{q1}	ρ_{q1}	$\rho_{q1}h_{q1}g$
	水泥稳定粒料调平层	h_{q2}	ρ_{q2}	$\rho_{q2}h_{q2}g$
	钢筋混凝土盖板	h_{q3}	ρ_{q3}	$\rho_{q3}h_{q3}g$
	轻质材料层	h_{q4}	ρ_{q4}	$\rho_{q4}h_{q4}g$

注: k 为变形稳定安全系数; 下标 c 代表常规路基路面材料的参数; 下标 q 代表轻质化路基路面材料参数。

荷等效成约 0.5 m 填土静载均布于软土地基之上, 折算成土重度引起的附加应力为 8.5 kPa, 为安全计取大值。基于超固结应力比的沿海地区路基差异沉降优化方法, 包括以下步骤: ① 通过钻孔对软土路段的路基土层进行取样, 获得试验土样; ② 对试验土样进行室内流变试验, 获得初始流变应力值 σ_1 ; ③ 计算该取样深度处的材料自重应力值, 将车辆荷载和该深度处的地基材料自重应力值取和, 记为该深度自重引起的总附加应力值 σ_2 ; ④ 比较总附加应力值与初始流变应力下限值, 若总附加应力值 σ_2 小于初始流变应力值 σ_1 , 表示该软土路段处于安全状态, 若总附加应力值 σ_2 大于初始流变应力值 σ_1 , 表示该软土路段处于隐患状态, 则进入下一步; ⑤ 计算 $\rho = \frac{\sigma_1}{Hg}$, 其中: σ_1 为某层位土样通过试验获得的初始流变下限值; H 为该路基土层的拟进行换填的厚度 (根据汽车荷载传递影响深度的计算分析可知, $2\text{ m} > H > 1.5\text{ m}$); g 为重力加速度; ρ 为该路基土层拟将轻质化换填材料的密度值; ⑥ 选用密度为 ρ_1 的轻质块体换填, 其中, ρ_1 小于 ρ 。

4 工程试验路轻质化换填方案研究

4.1 工程试验路段概况

试验路段位于浙江省舟山市金塘镇沥小线, 标准路基宽 24.5 m, 路幅布置为: 中间带 3 m + 行车道 $2 \times 7.5\text{ m}$ + 硬路肩 $2 \times 2.5\text{ m}$ + 土路肩 $2 \times 0.75\text{ m}$ 。试验路现状如图 6 所示。路基沉降较为明显, 纵断面线形呈现波浪趋势, 根据建设资料及软基路段施工图

设计资料, 该路段原为软基段路基, 建设期已采用预应力管桩进行处理, 初期路面起伏情况良好, 后又趋于波浪, 路基沉降及路面翘曲现象仍较为明显, 严重影响公路行驶质量、舒适度及安全性。分析其原因如下: ① 该软基路段路基未进行预压, 路基填筑后桩间自然沉降明显; ② 二期路面未待路基沉降相对稳定后就实施建设, 从而短时间又出现明显沉降; ③ 路段内频繁的重型荷载车辆作用, 导致沉降日益明显, 加快波浪形路面的形成。



图6 原软基段路基沉降病害图

Figure 6 Settlement of original soft subgrade

4.2 轻质化换填路面结构分析

设计方案首先采用分层总和法计算确定软土地基某点 A 处层位所受土体自重合外力 $G_{\text{填}}$ (自重和车辆荷载之和), 即 A 点层位将受到的附加荷载, 计算公式如下:

$$G_{\text{填}} = \sum_{i=1}^n \rho_{ci} h_{ci} g + G_D \quad (1)$$

式中: h_{ci} 为设计勘察资料提供的 A 点填土层的厚度 (m); ρ_{ci} 为设计勘察资料提供的 A 点填土层的密度; G_D 为车辆动荷载。

由路面结构实测数据可知: 软土地基上交通荷载一般应力水平较低, 主要作用范围在路面以下 2 m

内,因而试验路换填深度为 2 m。轻质化换填路面结构的设计方案如图 7 所示。

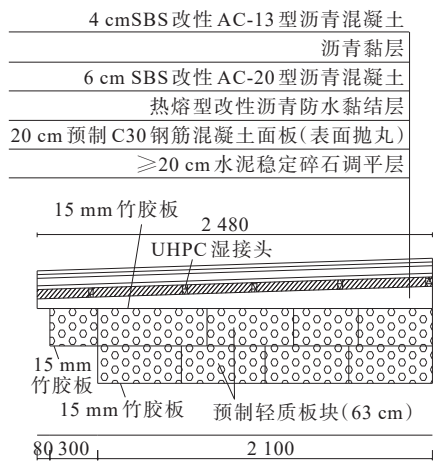


图 7 试验段轻质化换填路面结构纵剖面图(单位:cm)

Figure 7 Longitudinal profile of pavement structure with lightweight replacement in test section(unit:cm)

表 2 常规路面结构和轻质化换填路面结构的应力对比

Table 2 Stress comparison between conventional pavement structure and pavement structure with lightweight replacement

项目	厚度/ m	密度/ (10 ³ kg·m ⁻³)	应力/ kPa	应力总和/ kPa	初始流变应力值 比较情况	换填路面形成的 超固结应力比
常规路面结构	沥青路面层	$H_{c1}=0.18$	$\rho_{c1}=2.37$	4.266	$\sum_{i=1}^4 \rho_{ci} H_{ci} g + G_D = 44.106 + 8.5 = 52.606$ 流变会引起持续的 地基固结沉降	$k = \frac{\sum_{i=1}^4 \rho_{ci} H_{ci} g + G_D}{\sum_{i=1}^4 \rho_{qi} h_{qi} g + G_D} = \frac{52.606}{21.356} = 2.463$
	水泥稳定粒料层	$H_{c2}=0.20$	$\rho_{c2}=1.75$	3.500		
	垫层	$H_{c3}=0.20$	$\rho_{c3}=1.17$	2.340		
	路基土层	$H_{c4}=2.00$	$\rho_{c4}=1.70$	34.000		
	汽车荷载	—	—	8.500		
轻质化换填路面结构	沥青路面层	$h_{q1}=0.18$	$\rho_{q1}=2.37$	4.266	$\sum_{i=1}^4 \rho_{qi} h_{qi} g + G_D = 12.856 + 8.5 = 21.356$ 流变近乎不引起地 基固结沉降	
	水泥稳定粒料层	$h_{q2}=0.20$	$\rho_{q2}=1.75$	3.500		
	钢筋混凝土承重层	$h_{q3}=0.20$	$\rho_{q3}=2.50$	5.000		
	轻质材料层	$h_{q4}=2.00$	$\rho_{q4}=0.045$	0.090		
	汽车荷载	—	—	8.500		

注:表中汽车动荷载 G_D 为根据《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)将车辆动荷载等效成 0.5 m 填土静载均布于软土地基之上,折算成土重度引起的附加应力为 8.5 kPa。

表 3 换填轻质化材料的实测力学参数

Table 3 Measured mechanical parameters of materials for lightweight replacement

项目	干密度/(10 ³ kg·m ⁻³)			抗压强度/kPa		
	测试值	平均值	技术指标	测试值	平均值	技术指标
1	0.045			>200		
2	0.045	0.045	0.025~0.08	>200	>200	>200
3	0.046			>200		
判定结果	符合要求			符合要求		

常规路面结构和轻质化换填路面结构的参数对比分析计算结果如表 2 所示。

根据前文步骤⑤的分析,将表 2 中的材料参数数值代入 $\rho = \frac{\sigma_1}{Hg}$, 可得: $\rho = 0.475 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 即轻质化换填材料密度的上限值为 475 kg/m³, 一般而言, 工程设计推荐使用的轻质换填材料密度 ρ_1 控制为 30~400 kg/m³。

4.3 路面结构轻质化换填材料的物理力学性能

本试验段实际采用的轻质换填材料密度为 45 kg/m³, 其主要组成为水泥、加筋材料、高分子聚合物气泡群以及速凝剂, 通过流塑成型工艺预制成轻质块体。轻质化换填的路面结构首先要满足路基长期使用性能所需要的物理力学性能, 选取试件对轻质化换填的路基材料进行室内检测试验, 试验结果如表 3 所示。

由表 3 可知: 换填的路基轻质化材料符合《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019) 和《公路路基设计规范》(JTG D30—2015) 中的参数要求。

4.4 轻质化换填路面结构的施工流程

轻质化换填路面结构由于使用了轻质化的路基填料, 在很大程度上减小了地基的附加应力, 提高了路堤的变形稳定性。对于行车道, 其施工流程为: ① 挖除现状行车道下路面结构层; ② 根据交通荷载主

要作用范围在路面以下2 m内,确定需要下挖的路基深度为2 m;③ 基底压实并找平;④ 铺设荷载分散扩散作用的下承载板;⑤ 安装预制装配式轻质块体;⑥ 铺设荷载分散扩散作用的上承载板;⑦ 在上承载板浇筑连续配筋水泥混凝土承重板;⑧ 连续配筋水泥混凝土承重板养护到规定龄期;⑨ 连续配筋水泥混凝土承重板上摊铺水泥稳定碎石调平层;⑩ 碾压水泥稳定碎石调平层至规定的压实度;⑪ 摊铺沥青面层、碾压、开放交通。

4.5 路面结构轻质化换填方案的沉降观测分析

为掌握轻质化换填路面结构的工后沉降程度,也为后续改善沿海地区公路软基段路基差异沉降病害处置方案提供可靠的设计依据,首先对试验现场进行布点测量。共设置40个观测点,其中轻质化换填路面结构试验段与常规路面结构路段各设置20个观测点。经过为期1年的沉降数据采集,轻质化换填路面与常规路面沉降对比如图8所示。

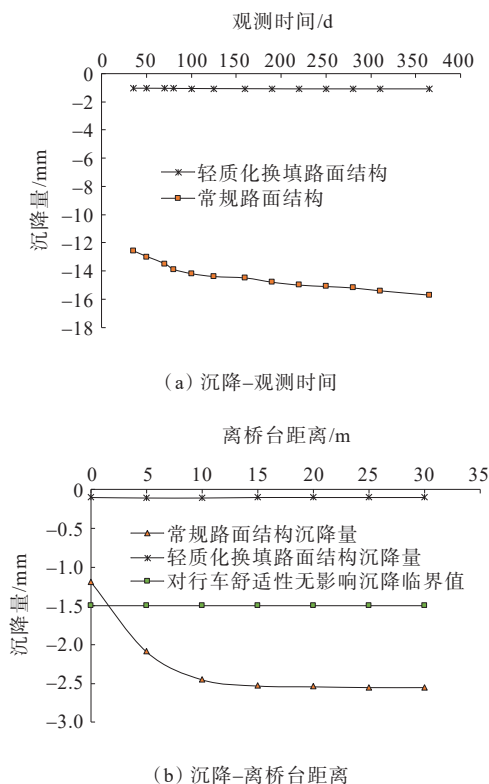


图8 轻质化换填路面结构与常规路面结构沉降

Figure 8 Settlement of pavement structure with lightweight replacement and conventional pavement structure

从图8可知:工后1年使用情况下,常规路面结构的沉降量已经发展到15 mm左右,而轻质化换填

路面结构沉降值始终保持在1 mm左右,虽然换填轻质材料只能减少沉降并不能完全解决沉降变形,但也基本不会对车辆行驶舒适性造成影响。研究结果^[11]显示:当不均匀沉降差在15 mm以内时,对车辆的行驶几乎无影响,而当不均匀沉降差达15~35 mm时,车辆行驶就会有非常不舒适的颠簸感。从纵断面沉降图的数据对比分析可知,在同一纵向线形上,轻质化换填路面结构差异沉降同常规路面相比已明显减小,沉降曲线平缓且已趋于稳定,无突变,纵坡极小,可很好地保证行车的安全性和舒适性,而常规路面结构的差异沉降无法达到稳定。

5 结论

本文基于超固结应力比的弹性变形理论,从减轻车辆荷载和结构自重附加应力的角度,开展了人造超固结应力比的计算分析及轻质化换填新技术的研究,得出以下结论:

(1) 采取合适的工程技术措施可使车辆荷载和路基自重产生的附加应力小于天然软土初始流变应力值,经过试验分析,可知本研究试验段软土样品的初始流变应力值为软土无侧限抗压强度的20%。

(2) 适宜密度轻质材料的换填厚度可使路基底部形成人造超固结应力状态,可让车辆荷载作用下的软土地基处于弹性变形状态,可解决软基段路基的差异沉降。

(3) 试验路工后1年,轻质化换填路面结构沉降保持在1 mm左右,差异沉降已趋于稳定,而常规路基填料的路面结构沉降达到17 mm,大于行车舒适的沉降上限值15 mm,且沉降数值还在持续增加中。试验路的差异沉降观测数据表明:基于人造超固结应力比理论的轻质化换填技术可有效解决软基段路基差异沉降,具有显著的理论价值和工程实践推广前景。

参考文献:

References:

- [1] 吴海刚,王宝军,郑永红,等.大规模采用泡沫轻质土处理软基设计方法探讨[J].铁道工程学报,2016,33(2):28-33.
WU Haigang, WANG Baojun, ZHENG Yonghong, et al. Research on the design method of the large-scale foam light soil for soft ground treatments[J]. Journal of Railway

- Engineering Society,2016,33(2):28-33.
- [2] 王欢,王选仓,高志伟.高速公路软基过渡段均衡沉降处治[J].武汉理工大学学报,2014,36(7):50-54.
WANG Huan, WANG Xuancang, GAO Zhiwei. Treatment of highway soft foundation transition section isostatic settlement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014,36(7):50-54.
- [3] 章海明.高速公路软土路基沉降及处治数值分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):211-215.
ZHANG Haiming. Numerical analysis of settlement and treatment of soft soil subgrade under highway[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017,15(6):211-215.
- [4] NAKANISHI K, TAKEWAKI I. Optimum pile arrangement in piled raft foundation by using simplified settlement analysis and adaptive step-length algorithm[J]. Geomechanics and Engineering, 2013,5(6):519-540.
- [5] 王祥.高速铁路软土地基的差异沉降试验研究[J].铁道工程学报,2015,32(3):11-15,45.
WANG Xiang. Experimental research on the differential settlement of soft soil ground in high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(3): 11-15,45.
- [6] 刘彬.立体改扩建道路桥墩与高填方拓宽路基交叉影响研究[J].公路,2022,67(5):112-118.
LIU Bin. Study on the influence of intersection between three-dimensional reconstruction and expansion of road pier and high fill widening subgrade[J]. Highway, 2022, 67(5):112-118.
- [7] 祝建华,吕茂丰,查旭东,等.钢丝网加筋新老路面结合部抗拓宽路基差异沉降的数值模拟[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):1-8.
ZHU Jianhua, LYU Maofeng, ZHA Xudong, et al. Numerical simulation on resisting widening subgrade differential settlement for joint between new and old pavement reinforced by steel wire mesh[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021,18(4):1-8.
- [8] 卢諒,马书文,李蓝星,等.预应力加筋垫层差异沉降控制性能试验研究[J].工程地质学报,2021,29(5):1577-1586.
LU Liang, MA Shuwen, LI Lanxing, et al. Experimental study on differential settlement control performance of prestressed reinforced cushion[J]. Journal of Engineering Geology, 2021,29(5):1577-1586.
- [9] 陈宗燕.滨海软基段公路管廊路基工后沉降特性研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(4):131-137.
CHEN Zongyan. Post-construction settlement characteristics of highway pipe gallery roadbed in coastal soft foundation section[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021,19(4):131-137.
- [10] 徐林荣,陈昀灏,曹德洪,等.变长桩-板结构应用在软土地区路-涵过渡段试验[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(3):1-11.
XU Linrong, CHEN Yunhao, CAO Dehong, et al. Experimental on application of variable length pile-plate structure in road-culvert transition section in soft soil area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021,41(3):1-11.
- [11] 李海滨,唐国茜,赵桂娟,等.三维激光扫描技术在路堤沉降观测中的应用[J].西安科技大学学报,2021,41(1):87-93.
LI Haibin, TANG Guoxi, ZHAO Guijuan, et al. Application of 3D laser scanning technology in the observation of embankment settlements[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021,41(1):87-93.
- [12] 王灏,刘珍,杨果林,等.高液限土半填半挖高边坡路基变形影响因素分析[J].水利与建筑工程学报,2020,18(6):190-195.
WANG Hao, LIU Zhen, YANG Guolin, et al. Influencing factors analysis of subgrade deformation of high liquid limit soil in semi-filled and semi-cut high slope[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020,18(6):190-195.