DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.012

引用格式:植家斌.软土路基过渡段轻质土回填的应用及变形研究[J].公路与汽运,2024,40(6):66-70.

Citation:ZHI Jiabin.Application and deformation research of light soil backfill in the transition section of soft soil subgrade[J].Highways & Automotive Applications,2024,40(6):66-70.

软土路基过渡段轻质土回填的应用及变形研究*

植家斌

(佛山路桥养护有限公司,广东 佛山 528000)

摘要:为研究轻质泡沫土用于软土路基过渡段台背回填的特性和可行性,依托广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路桥头路基处理项目,阐述轻质泡沫土台背回填施工工艺流程和技术要点,结合应用实例和数值模拟,分析以轻质泡沫土作为回填材料对路桥过渡段施工期、运营期沉降及结构物变形的影响。结果表明,与采用常规回填土相比,采用轻质泡沫土填筑路基,路基沉降和结构物变形显著降低;采用轻质泡沫土取代传统软基处理工艺,社会、经济效益十分显著。

关键词:公路;轻质泡沫土;软土路基;台背回填;沉降;路桥过渡段

中图分类号:U418.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2668(2024)06-0066-05

道路(特别是软土路基)施工中,一般路基与结构物过渡段的处治十分重要,不恰当的过渡段设计或施工会导致不均匀沉降,进而引起道路表面不平、损坏和“跳车”现象。如何使路基平稳过渡,保证路桥过渡段的长期稳定性,已成为软土路基设计中亟待解决的问题。茹幸、刘明华、高军等从施工角度分析一般路基与桥台结构物之间过渡区产生不均匀沉降的原因,认为主要影响因素为回填区域压实度、施工技术等,并提出了相应解决措施[1-3]。赵全满等对比分析多种台背回填材料在降低沉降和保证路基稳定性方面的效果,结果表明再生水稳铣刨料相比其他材料在降低沉降和沉降达到稳定阶段所需时间方面具有优势[4]。王永涛等通过室内和现场试验,研究以熟石灰激发矿渣加固粉土作为桥梁台背回填材料时的承载性能,确定了最佳熟石灰掺量[5]。随着轻质泡沫土等新型材料的出现,工程师们开始探索更有效的解决方案来减少路基沉降、提高台背的长期性能[6-14]。魏功槐通过分析采用气泡轻质土进行台背回填时路基受力及变形,分析了气泡轻质土在解决地基承载力不足方面的优势[15]。刘元炜等研究公路桥梁台背回填泡沫轻质土的施工工艺,结果表明,控制回填参数指标、优化回填技术可有效缩短施工周期,避免出现路基沉降、桥头“跳车”等病害[16]。现有研究大多限于现场施工和监测,很少采用数值模拟方法对采用轻质泡沫土作为台背回填材料时施工期和运营期路基沉降和结构物变化特性进行动态分析[17]。鉴于此,本文依托广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路桥头路基处理项目,阐述采用轻质泡沫土进行软土路基过渡段台背回填的施工工艺,结合应用实例和数值模拟,分析以轻质泡沫土作为回填材料对路桥过渡段路基沉降和结构物变形的影响。

1 广佛肇高速公路路桥过渡段工程概况

广佛肇高速公路佛山段建设工程位于广东省佛山市一环北线,线路贯穿佛山一环北线全部。该项目是在既有公路两侧新建、改建,与多条地方道路交叉,跨线桥多,需多次临时过渡与交通疏导,施工干扰大,施工期间要保证既有公路畅通,安全风险高,众多地方无法按正常方法施工。全线软基处理工程量大,软土层主要为淤泥质土,深度为 5 m 左右,施工周期(每段 3 月)+预压周期(6 个月)较长,施工控制难度大,质量监控要求高。另外,路基填筑对软土地基上结构物和路基沉降的影响显著,容易产生不均匀沉降,导致“跳车”现象。考虑到轻质泡沫土具有轻质性和高强性等特点,广佛肇高速公路佛山段 S1 标改造段采用轻质泡沫土回填路桥过渡段,沿既有佛山一环共有 23 个泡沫轻质土施工段,分布在桩号 K5+030—K21+275,共计 75 640 m^3。

* **基金项目**:湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201707)

2　路桥过渡段轻质泡沫土施工及沉降监测

2.1　轻质泡沫土施工配合比

轻质泡沫土是一种现场制备的材料,由水泥、发泡剂、水混合而成。制作 10 cm×10 cm×10 cm 立方体试块,每组 6 块,进行 2 组配合比试验,分别测试 7 d、28 d 龄期时试块不同部位的无侧限抗压强度。根据 CJJ T 177—2012《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》,在保证抗压强度大于等于设计强度的基础上确定轻质泡沫土的施工参考配合比[18]。根据试验结果和规范要求确定的轻质泡沫土施工参考配合比见表 1。

表 1　轻质泡沫土施工参考配合比

料浆配合比		料浆密度/($kg \cdot m^{-3}$)	轻质泡沫土强度/MPa	轻质泡沫土配合比			轻质泡沫土密度/($kg \cdot m^{-3}$)
水泥/($kg \cdot m^{-3}$)	水/($kg \cdot m^{-3}$)			水泥/($kg \cdot m^{-3}$)	水/($kg \cdot m^{-3}$)	气泡率/%	
1078	647	1 724.4	1.0	382	229	64.6	630
1 078	647	1 724.4	0.6	356	214	66.9	590

2.2　轻质泡沫土施工

轻质泡沫土是具有良好流动性的多孔轻质材料,受本身流动性的影响,无法自定成型,需安装面板及挡板为其定型。轻质泡沫土整体浇筑体积不宜过大,通过分层分段进行划片施工。浇筑过程中需覆盖土工布进行养护,避免收缩造成裂缝不规则或破坏。轻质泡沫土底层和顶层是直接受力面,通过铺设金属网防止开裂,增大底层和顶层的强度和刚度。轻质泡沫土施工工艺流程见图 1。

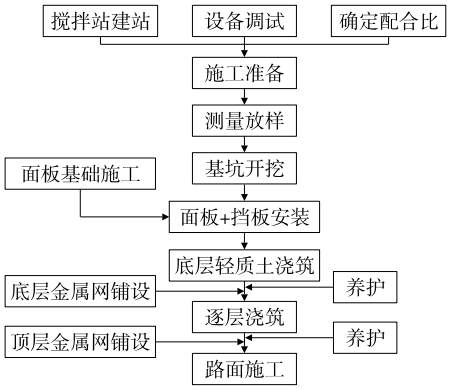

图 1　轻质泡沫土的施工工艺流程

在进行台背回填施工前,按照施工配合比配制泡沫轻质土,重度为 6 kN/m^3。施工注意事项如下:1) 使用配管泵送进行浇筑,保持浇筑管出料口与浇筑面水平,高差不超过 1 m;2) 控制单层浇筑厚度为 0.3～0.8 m,确保在轻质泡沫土初凝前完成浇筑,上层浇筑在下层终凝后进行;3) 设置纵向 2 cm 横向沉降缝与台阶连接,使用夹板或聚苯乙烯板填充横向缝;4) 做好台阶位置和高度设计,浇筑时设置两层金属网,搭接宽度不小于 5 cm;5) 对坡度较大的路段分区进行浇筑,防止轻质泡沫土流失;6) 浇筑至设计高程后,及时铺设土工膜。图 2 为轻质泡沫土浇筑施工现场。

(a) 分区分层浇筑轻质泡沫土　　(b) 轻质泡沫土浇筑效果

图 2　轻质泡沫土浇筑施工现场

2.3　路桥过渡段沉降监测

对桥头路基工后沉降进行持续观测,对比轻质泡沫土填筑段和邻近常规土填筑段路基的沉降变化,结果见图 3。由图 3 可知:轻质泡沫土填筑路基的沉降变形在施工后 3 个月内迅速发展并逐渐稳定,最大沉降量约 11.81 cm,仅为普通土填筑路基的 38%。采用轻质泡沫土填筑可显著提高桥头路段行车平稳性。

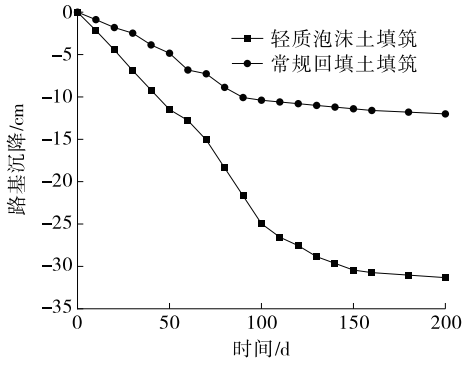

图 3　路桥过渡段路基沉降监测结果

3 轻质泡沫土台背回填有限元分析

为进一步分析以轻质泡沫土作为回填材料对路桥过渡段和桥台结构物的影响，采用 ABAQUS 软件，选取西江引水保护桥与路基过渡工程中 K6＋300 断面进行有限元数值模拟。该路桥过渡段采用倒梯形结构，台后填土与一般路堤填土采用台阶拼接，轻质泡沫土回填高度为 3 m，路面层厚度为 0.7 m。模拟现场分层填筑过程，分 3 次进行填筑，每层填筑 1 m 后，预留足够时间固结。

为使模拟更贴合实际，根据过渡段受力和约束情况对模型进行边界条件设置：过渡段模型底部设置完全固定，分别限制 3 个方向的位移；模型顶部定义为自由面，不设置约束；模型其他部位设置对应轴的水平位移约束，应力、应变及位移均由上部填筑荷载引起。模拟固结排水时，为模拟地基土的流固耦合作用，同时考虑实际路基的固结排水作用，假定地基顶部为排水面，孔隙压力设置为零，其余边界均不排水。

模型建立过程中定义合适的接触对，主-从面之间的相互作用定义为摩擦约束，切向定义为“罚作用”，法向定义为“硬”接触。

3.1 本构模型及计算参数选取

在软土地基研究方面，修正剑桥模型应用广泛[19-22]。修正剑桥模型是根据正常固结土与弱固结土的三轴压缩试验提出的一种本构模型，考虑了土体的应力、应变和孔隙比之间的关系及土体的塑性变形。修正剑桥模型的参数有固结参数 λ、回弹参数 κ、破坏常数 M、流动应力之比 k、屈服面参数 β，其中 β 和 k 通常取为 1.0。通过三轴固结不排水剪切试验获得内摩擦角 φ'，利用式(1)计算土体在临界破坏状态时剪应力与应力之比 M。

$$M=\frac{6\sin\varphi'}{3\pm\sin\varphi'} \tag{1}$$

侧限固结压缩曲线在 e-ln p（e 为孔隙比，p 为压力）上的斜率 λ（塑性体积模量对数）、等向回弹曲线在 e-ln p 上的斜率 κ（多孔介质弹性对数体积模量）通过侧向固结压缩试验获得，土体压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s 按下式计算：

$$C_c=\frac{e_a-e_b}{\lg p_b-\lg p_a},C_s=\frac{e_c-e_b}{\lg p_b-\lg p_c} \tag{2}$$

式中：a、b、c 为 e-lg p 曲线中的点。

斜率 λ、κ 按下式计算：

$$\lambda=\frac{C_c}{\ln 10},\kappa=\frac{C_s}{\ln 10} \tag{3}$$

通过模拟三轴压缩试验得到试件在不同围压下的应力-应变曲线，通过绘制莫尔圆和抗剪强度包络线确定内摩擦角 φ，从而通过式(1)计算得到破坏常数 M。通过模拟侧限固结压缩试验数据得到软土的压缩指数 C_c 和回弹指数 C_s，再通过式(3)得到各软土层剑桥参数 λ 和 κ 的平均值。桩长为 10.0 m、桩距为 1.5 m、桩径为 50.0 cm 的水泥搅拌桩复合地基修正剑桥模型参数见表 2，其他参数见表 3。

表 2 复合地基(等效)修正剑桥模型参数

模型参数	修正值	模型参数	修正值
λ	0.026 15	M	1.301 6
κ	0.000 725	μ	0.250 5

注：μ 为泊松比。

表 3 其他材料参数

材料名称	E/kPa	μ	c/kPa	φ/(°)	本构关系
砂垫层	50 000	0.25	—	—	弹性
C30 混凝土	30×10^6	0.30	—	—	弹性
搭板	30×10^6	0.30	—	—	弹性
93 区填土	8 550	0.32	21.2	22.2	M-C
94 区填土	11 180	0.32	26.3	26.2	M-C
96 区填土	17 540	0.32	31.5	28.6	M-C
常规土	17 540	0.30	31.5	28.6	M-C
轻质泡沫土	300 000	0.28	6.0	200.0	M-C

注：E 为弹性模量；c 为黏聚力；φ 为内摩擦角。

3.2 模型计算结果分析

在进行有限元模拟之前，进行初始应力状态分析，以保证变形不会过大，使地基在加荷之前处于稳定状态。由于软土性质较差，填筑过程中会发生较大、较快竖向沉降位移，如未加控制会发生沉陷、开裂等。下面对以常规土和轻质泡沫土作为台背回填材料时过渡段地基、路基沉降和结构物侧向位移进行对比分析。

3.2.1 过渡段地基、路基沉降分析

某项目桥尾加密段和渐变段软基采用同规格水泥搅拌桩进行处治。选择距桥台 10 m 处断面进行分析，地基和路基顶面不同时刻沉降变化分别见图 4、图 5。

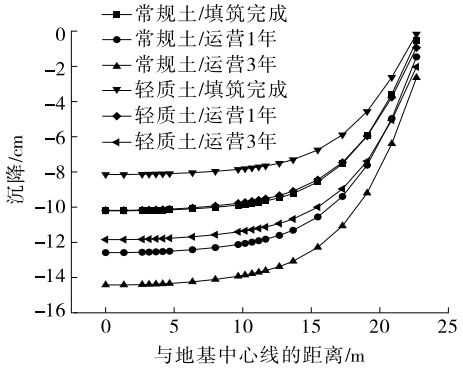

图 4　距桥台 10 m 处断面地基顶面不同时刻沉降曲线

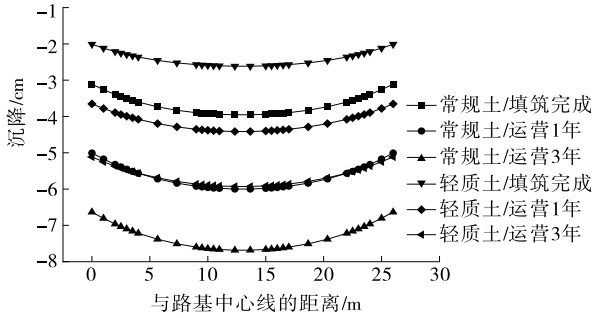

图 5　距桥台 10 m 处断面路基顶面不同时刻沉降曲线

由图 4 可知:填筑完成时填筑荷载使地基产生较大沉降,运营期间地基沉降变化较缓慢;随着距地基中心线距离的增大,沉降逐渐减小,路肩两侧地基沉降最小,整体表现为"盆形"趋势。常规土填筑完成、运营 1 年、运营 3 年时的最大沉降分别为 −10.21 cm、−12.58 cm、−14.42 cm,阶段增长值分别为 2.37 cm、1.84 cm;轻质泡沫土填筑完成、运营 1 年、运营 3 年时的最大沉降分别为 −8.14 cm、−10.18 cm、−11.85 cm,阶段增长值分别为 2.04 cm、1.67 cm。以轻质泡沫土作为回填材料,在减小地基横断面方向总沉降量和工后沉降变化方面明显优于常规土。

由图 5 可知:填筑完成时轻质泡沫土台背回填路基顶面横断面方向沉降变化相对于常规土较缓慢,横向差异沉降最大值分别为 −2.61 cm、−3.91 cm;运营 3 年时,横向差异沉降最大值分别为 −5.93 cm、−7.69 cm;工后沉降差异变化值分别为 3.32 cm、3.78 cm。轻质泡沫土用于台背回填,工后沉降差异较小,道路平顺性较好。

3.2.2　对结构物的影响分析

在台背填筑过程中,桥台和桩基础不仅承受来自上部的填土荷载,还受到填土荷载所引起地基土变形的挤压作用,较大的挤压会使桩基础产生变形甚至破坏,桩基础的分析十分必要。选取靠近路基的桩基础进行分析,其侧向位移见图 6、图 7。

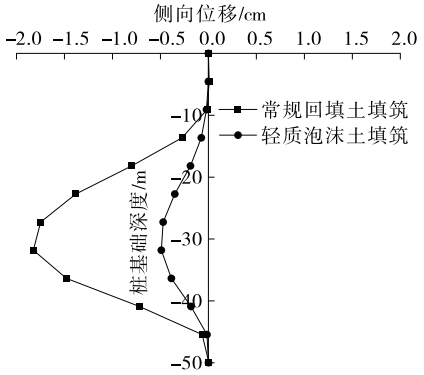

图 6　桩基础左幅侧向位移变化曲线

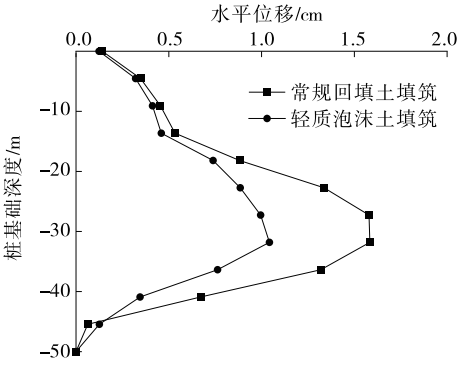

图 7　桩基础左幅水平位移变化曲线

由图 7、图 8 可知:在台背填筑过程中,左幅桩基础受上部填土荷载影响,地基土产生附加应力,土体出现向两侧流动的趋势,侧向位移沿深度方向先增大后减小为零,填土荷载产生的附加应力传至桩底持力层后逐渐消散。采用轻质泡沫土回填台背,桩基础左幅最大侧向位移约为 0.49 cm,仅为常规回填土填筑的 27%;最大水平位移约为 1.04 cm,仅为常规回填土填筑的 65%。采用轻质泡沫土回填台背对桩基础的影响明显小于常规回填土,原因是轻质泡沫土的重度较小,因而上部填筑荷载较小,同时轻质泡沫土具有较高的强度。

3.2.3　实测数据与数值模拟结果对比

为验证使用 ABAQUS 有限元软件模拟实际工程的有效性,将现场轻质泡沫土回填实测结果与有限元软件模拟计算结果进行对比。填筑完成时沉降监测结果与有限元模拟结果的比较见表 4。

由表 4 可知:有限元模拟沉降误差最大为 17.2%,侧向位移最大误差为 18.8%。这是因为有限元模拟工况较理想,未考虑现场环境的复杂性,而天气、施工质量、测量误差等都会在一定程度上影响

表 4 填筑完成时沉降监测结果与有限元模拟计算结果对比

桩号	沉降			侧向位移		
	实测值/mm	模拟值/mm	模拟值的误差/%	实测值/mm	模拟值/mm	模拟值的误差/%
K6+280	102	92	9.8	41	36	12.2
K6+300	120	106	11.7	48	39	18.8
K6+320	163	135	17.2	49	41	16.3

沉降和位移，导致模拟结果与实测结果出现偏差。但两者误差在可接受范围内。

4 结论

本文基于广佛肇高速公路软土路基过渡段处治项目，将轻质泡沫土用于软土路基过渡段填筑，结合路桥过渡段台背回填实例进行有限元数值模拟，对比分析以常规土和轻质泡沫土作为台背填筑材料对路基沉降和结构物的影响。主要结论如下：

（1）轻质泡沫土施工比软基处理+路基填土节约工期，采用轻质土取代传统软基处理，社会经济效益十分显著。

（2）以轻质泡沫土作为回填材料，在减小路基总沉降量和工后沉降变化方面明显优于常规土，路基和结构物的沉降减小，路基沉降达到稳定的时间显著减少。

（3）有限元数值模拟可用于软土路基变形分析，其分析结果也表明路基填筑过程中轻质泡沫土对桩基础的影响比常规回填土小。

本文建立的数值分析模型较理想，未考虑现场施工器械及行车荷载扰动对填筑的影响，后续数值模拟中可进一步考虑这些因素。

参考文献：

[1] 茹幸，郑铭隆，姬永铁，等.考虑行驶安全的高速路桥过渡段路基防沉降处理措施[J].建筑安全，2024，39(3)：30-33.

[2] 刘明华，王吉庆.高速液压夯实机补强台背路基的施工工艺及工程应用[J].公路与汽运，2016(4)：217-219.

[3] 高军.高速公路桥涵台背回填施工工艺质量控制[J].运输经理世界，2020(16)：103-104.

[4] 赵全满，刘建树，李皓，等.台背回填段再生水稳铣刨料沉降特性及力学响应[J].山东科技大学学报(自然科学版)，2022，41(5)：102-109.

[5] 王永涛，姜鲁宁，孙勇，等.高速公路路-桥过渡段台背回填区受力与变形特性[J].科学技术与工程，2023，23(14)：6223-6229.

[6] 梁志鹏，肖得.泡沫轻质土在台背回填施工中的应用[J].工程建设与设计，2023(2)：218-220.

[7] 覃业淼.台背回填矿粉气泡混合轻质土性能试验研究[J].路基工程，2021(5)：120-123.

[8] 邱雨生.路基台背回填施工中气泡混合轻质土的应用研究[J].北方交通，2021(9)：32-36.

[9] 李国华.泡沫轻质土在桥头路基治理中应用研究[J].公路与汽运，2021(2)：56-57+60.

[10] 盛斌.泡沫轻质土在高等级公路特殊路段的应用[J].公路与汽运，2014(4)：115-118.

[11] 刘勇，孙赛炜，马路，等.不同掺合料的气泡混合轻质土性能试验研究[J].中外公路，2018，38(3)：279-283.

[12] 裘友强，李永良，刘耀富，等.泡沫轻质土的微观结构及其强度特性研究[J].中外公路，2019，39(1)：215-217.

[13] 支守根，卢志刚，马旭，等.气泡混合轻质土发泡剂优选及性能试验研究[J].中外公路，2017，37(5)：233-237.

[14] 赵慧清.泡沫轻质土在桥台背回填中的应用分析[J].低温建筑技术，2023，45(5)：49-52.

[15] 魏功槐.气泡轻质土在路基台背回填中的应用效果分析[J].城市道桥与防洪，2024(3)：248-250+261.

[16] 刘元炜，梁小光，孙贵新，等.公路桥梁台背回填泡沫轻质土施工工艺[J].公路，2013，58(9)：123-126.

[17] 王鸿颖.浅谈泡沫轻质土在结构物台背回填中的应用[J].黑龙江科技信息，2014(22)：234.

[18] 广东冠生土木工程技术有限公司，深圳市市政工程总公司.气泡混合轻质土填筑工程技术规程：CJJ T 177—2012[S].北京：中国建筑工业出版社，2012.

[19] 郑俊杰.复合地基承载特性分析及设计方法研究[D].杭州：浙江大学，2001.

[20] 何赛.水泥搅拌桩复合地基承载力分析研究[J].粉煤灰综合利用，2021，35(4)：30-34+82.

[21] 赵春风，李永刚，钱涛.水泥土搅拌桩复合地基桩土应力比的解析算法[J].中南大学学报(自然科学版)，2012，43(6)：2390-2395.

[22] 曹支才，王光辉.不同因素对水泥搅拌桩强度影响的试验研究[J].中外公路，2020，40(3)：283-287.

收稿日期：2024-06-10