

Analysis of Differential Settlement of Widening Subgrade Treated by Foamed Lightweight Soil

Pengfei Zhou¹, Liqi Wang^{2,3}, Chuanyi Ma¹, Zhimin An⁴, Hongguang Jiang^{2,3*}, Zhanyong Yao^{2,3}, Junyan Yu²

¹Qilu Transportation Development Group Co. Ltd., Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

³Research Center of Intelligent Perception and Construction of Road and Bridge Engineering in Shandong University, Jinan Shandong

⁴Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan Shandong

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

Received: May 25th, 2020; accepted: Jun. 17th, 2020; published: Jun. 24th, 2020

Abstract

Aiming at the problem of differential settlement control of highway subgrade widening, this paper establishes the finite element analysis model of widening subgrade based on the practical widening project. First, the differential settlement of widening subgrade using conventional density filler is evaluated, and the results show that the differential settlement and cross slope of the new and old subgrades cannot meet the requirements. Then, the widening subgrade of foamed lightweight soil is analyzed, and based on the cross slope and differential settlement control index, the optimal wet density of foamed lightweight soil is 0.8 g/cm³, the optimal elastic modulus is 470 MPa and the allowable height of widening subgrade of foamed lightweight soil is 6 m. Finally, the subgrade post-construction settlements of foamed lightweight soil and conventional filled soil are compared and analyzed. It is found that foamed lightweight soil can effectively reduce the settlement, horizontal displacement and cross slope of subgrade and foundation.

Keywords

Subgrade Widening, Cross Slope, Differential Settlement, Numerical Simulation, Foamed Lightweight Soil

泡沫轻质土处治拓宽路基差异沉降分析

周鹏飞¹, 王立旗^{2,3}, 马川义¹, 安智敏⁴, 蒋红光^{2,3*}, 姚占勇^{2,3}, 于君彦²

*通讯作者。

¹齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

³山东大学道路和桥梁工程智能感知与智慧建造研究中心, 山东 济南

⁴山东省交通规划设计院, 山东 济南

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年5月25日; 录用日期: 2020年6月17日; 发布日期: 2020年6月24日

摘要

针对高速公路路基拓宽差异沉降控制问题, 本文依托于某实体拓宽工程, 建立了拓宽路基有限元分析模型。首先, 评价了常规密度填料下的拓宽路基差异沉降, 结果表明新老路基的差异沉降量和横坡度均不能满足要求。然后, 开展了轻质化泡沫轻质土拓宽路基分析, 并基于横坡度和差异沉降控制指标, 确定了泡沫轻质土浇筑的最佳湿密度为 0.8 g/cm^3 , 最佳弹性模量为 470 MPa , 以及泡沫轻质土处治拓宽路基时容许高度为 6 m 。最后, 对比分析了泡沫轻质土和常规填土下的路基工后沉降, 发现泡沫轻质土可有效降低路基和地基的沉降、水平位移及路基横坡度。

关键词

路基拓宽, 横坡度, 差异沉降, 数值模拟, 泡沫轻质土

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速公路在拓宽改建过程中新老路基会产生差异沉降, 从而造成新老路基结合部出现纵向裂缝, 路面剪切破坏等道路病害, 影响拓宽道路的舒适性和质量安全。由于近年来高速公路改扩建项目不断增加, 新老路基差异沉降问题开始得到重视。目前, 拓宽路基差异沉降处治方法主要分为: 台阶开挖设计、土工合成材料、地基加固处理[1]-[6]。李群[7]对我国高速公路改扩建过程中的台阶开挖和土工材料应用情况进行了统计分析发现, 这些道路在运营之后仍面临着路面纵向裂缝等问题。近些年, 泡沫轻质土作为一种轻质材料被广泛的应用于路基改扩建工程中, 李群[7]将目前泡沫轻质土工程应用区域分为珠江三角洲、长江三角洲、环渤海和其它区域, 并对工程实际应用效果分析, 得出泡沫轻质土处治拓宽路基差异沉降效果显著。

泡沫轻质土是一种将水泥、水、泡沫以及其它集料混合后通过物理搅拌而制成的混合料, 因其具有轻质、密度可调节、强度高、流动性强等优点而被广泛应用[8]。新老路基差异沉降是高速公路改扩建中要解决的关键问题, 而泡沫轻质土作为拓宽路基填料可通过减轻路基自重有效控制新老路基差异沉降。目前, 很多工程使用泡沫轻质土处治拓宽路基时, 往往取最低的轻质土密度, 同时又要保持较高的强度, 这种做法会使成本偏高, 造成资源浪费。针对这些问题, 本文首先根据工程经验提出的沉降控制标准[9][10][11]和相关的规范[12][13][14][15], 提出差异沉降量小于 5 cm 和横坡度改变小于 0.5% 的双控标准;

然后建立拓宽路基模型，通过理论分析确定了泡沫轻质土材料的最优密度和模量，并对泡沫轻质土处治拓宽路基的效果进行了对比分析，为实际工程提供相关参考。

2. 拓宽路基有限元分析模型

山东省某高速公路路基拓宽工程，由现阶段的四车道改扩建成八车道，全幅路基宽度由 28 m 拓宽为 42 m。基于实体工程断面结构，建立半幅路基结构有限元分析模型。其中，拓宽后路基半幅宽度为 21 m，路基高度为 4 m，边坡坡度取 1:1.5，地基计算深度取 40 m，包括 12 m 厚的粉质粘土层和 28 m 厚的粉土层。为了简化计算，数值模拟时将路面自重和车辆荷载等效为 34 kPa 均布荷载施加于路床表面，模型横断面如图 1 所示。地基和路基土体参数来自工程地勘报告，如表 1 所示，且各材料均采用摩尔 - 库伦理想弹塑性模型。

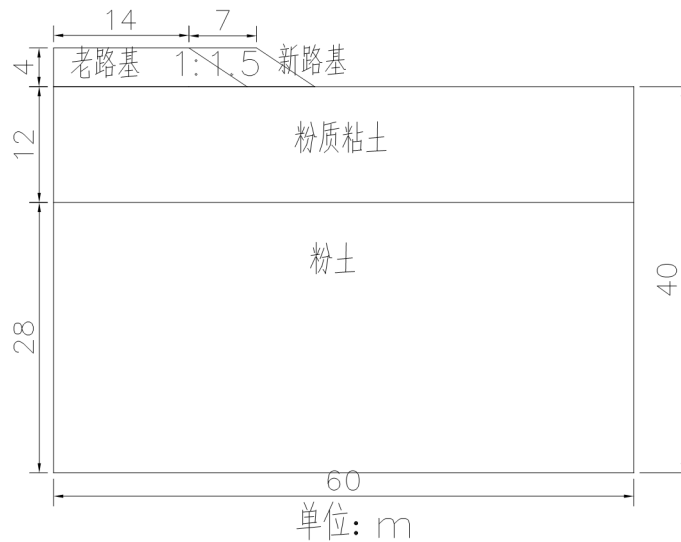


Figure 1. Cross section of model

图 1. 模型横断面图

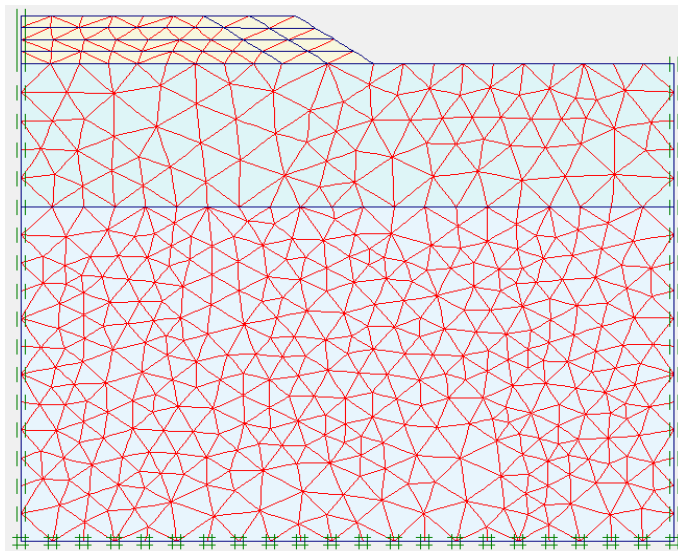


Figure 2. Meshing and boundary conditions

图 2. 网格划分及边界条件

Table 1. Soil parameters of foundation and subgrade
表 1. 地基和路基土体参数

土体	老路基土	新路基土	粉质粘土	粉土
层厚(m)	4	4	12	12
容重(kN/m ³)	20	20	18.7	19.4
液限(%)	26	27	28.1	25.7
塑限(%)	17	18	18.0	17.6
粘聚力(kPa)	30	20	52	37
内摩擦角(°)	28	22	7.6	14.4
泊松比	0.35	0.35	0.35	0.33
弹性模量 E(MPa)	35	30	4.19	5.83

模型网格划分采取非结构型式，以三角形为单元。模型的边界条件如下：左侧边界设置为轴对称分布，并限定水平方向位移，右侧限定水平位移；底部限制垂直和水平方向位移，上边界不限制位移，并设定为排水边界。按照上述方法其网格的划分和边界条件如图 2 所示。

拓宽路基数值模拟的加载顺序如图 3 所示。在车辆等荷载的长期作用下，老路路基和地基固结沉降已经趋于稳定状态，故在对拓宽路基进行填筑前，设定地基的超静孔隙水压力为零，并将改扩建前老路路基和路基的应力状态作为初始应力状态。为模拟路基的实际施工情况，新老路基均采用分层填筑法，每层设置厚度为 1 m。计算新旧路基差异沉降时，以 t3 为起点，以 t4 为终点。

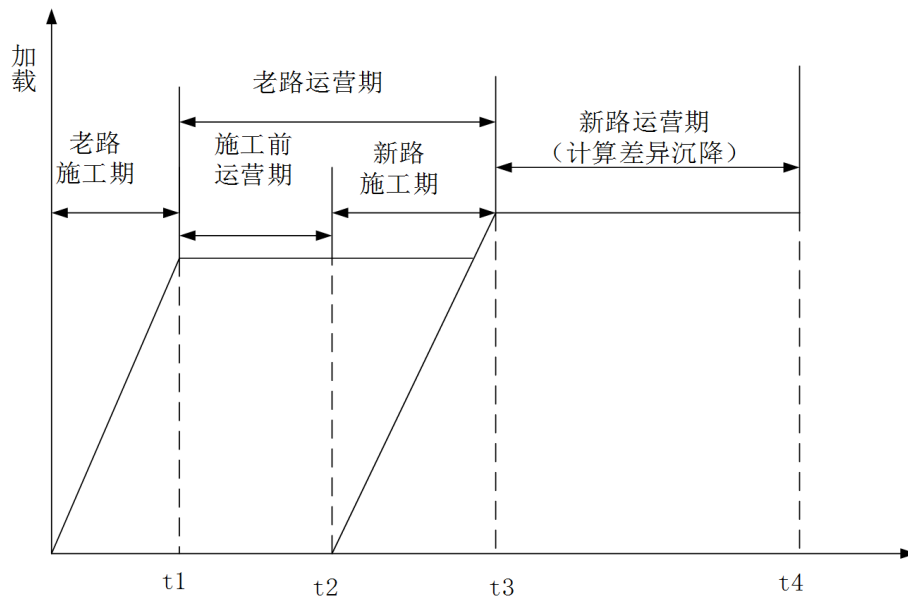


Figure 3. Subgrade loading order
图 3. 路基加载顺序

3. 常规填料下的拓宽路基差异沉降分析

3.1. 竖向沉降分析

输出拓宽路基加载时不同填筑高度下路基表面沉降值如图 4 所示。路基表面沉降随着填筑高度的增加而增大。且拓宽路基表面沉降分布规律如下：老路基中心位置沉降值最小，随着距老路中心距离的增

大, 沉降值也逐渐增大, 至拓宽路基路肩处沉降最大。

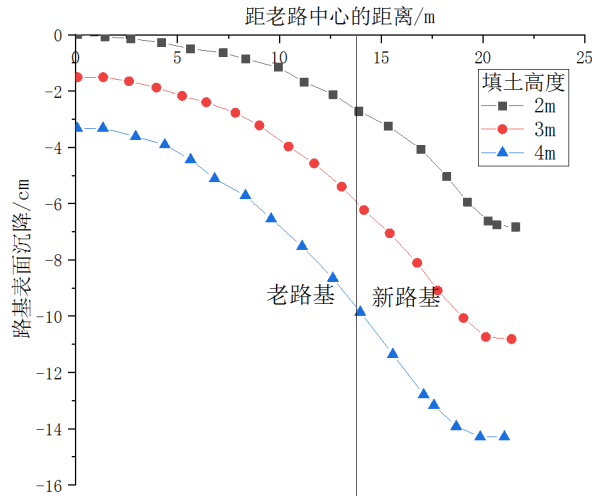


Figure 4. Distributions of subgrade settlement along the cross section under different filling heights
图 4. 不同填土高度下路基表面沉降沿横断面分布

不同填筑高度下路基表面沉降值和横坡度大小如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知, 当填筑高度为 2 m 时, 老路基中心处沉降值为 0.30 cm, 拓宽路基路肩处最大沉降值为 7.18 cm, 差异沉降值为 6.89 cm。当填筑高度为 3 m 时, 老路基中心处沉降值为 1.35 cm, 拓宽路基路肩处最大沉降值为 10.983 cm, 差异沉降值为 9.63 cm, 差异沉降增加值 2.75 cm, 差异沉降增加率为 40%。当填筑高度为 4 m 时, 老路基中心处沉降值为 3.35 cm, 拓宽路基路肩处最大沉降值为 14.88 cm, 差异沉降值为 11.52 cm, 差异沉降增加值 1.89cm, 差异沉降增加率为 19.6%。可以看出随着填筑高度的逐渐增大, 路基表面的差异沉降值增加率逐渐减少。由图 6 可知, 当填土高度分别为 2 m、3 m 和 4 m 时, 对应的横坡度为 0.33%、0.46% 和 0.55%, 故随着拓宽路基填筑高度的增加, 拓宽路基的横坡度逐渐增大。结果表明, 当填筑完成后, 新老路基差异沉降为 11.52 cm, 横坡度改变率为 0.55%, 不满足要求。

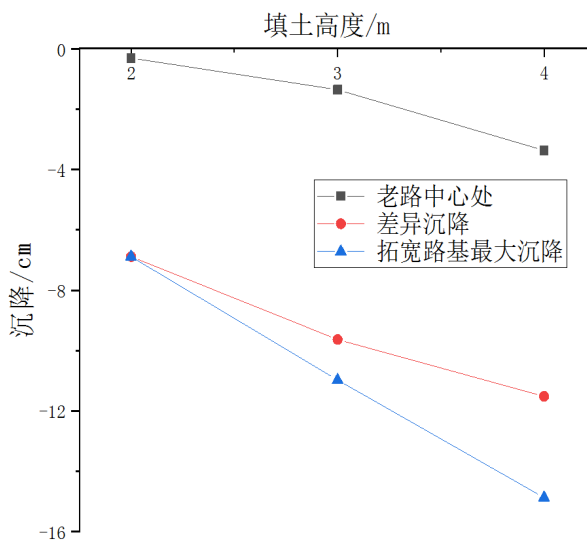


Figure 5. Subgrade settlement at typical locations under different filling heights
图 5. 典型位置处路基表面沉降随填土高度变化

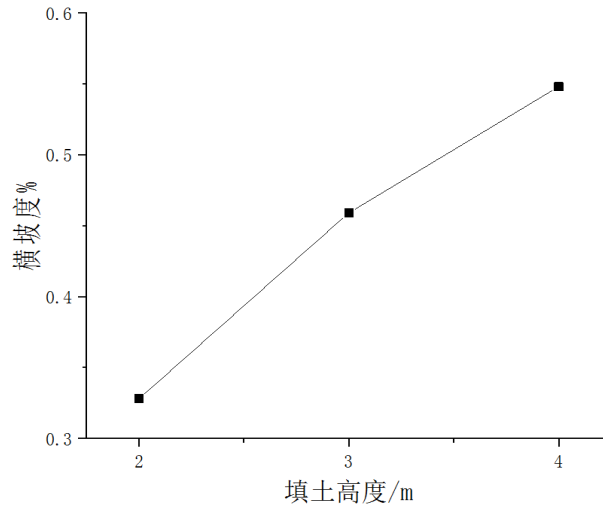


Figure 6. Cross slope of different filling heights
图 6. 不同填筑高度横坡度

不同填筑高度下地基表面的沉降曲线如图 7 所示。随着填筑高度的增加，地基表面沉降值逐渐增大，整体变化趋势为“勺形”，且随着填筑高度的增加，最大沉降点逐渐向老路基的中心处移动。当填筑高度为 2 m 时，地基表面的最大沉降值为 7.01 cm。当填筑高度上升至 3 m 时，地基表面的最大沉降值为 10.76 cm，增加了 3.75 cm，增加率为 53%。当填筑高度上升至 4 m 时，地基表面的最大沉降值为 14.42 cm，增加了 3.66 cm，增加率为 34%。随着填筑高度的逐渐增大，地基表面的沉降值增加率逐渐减少。

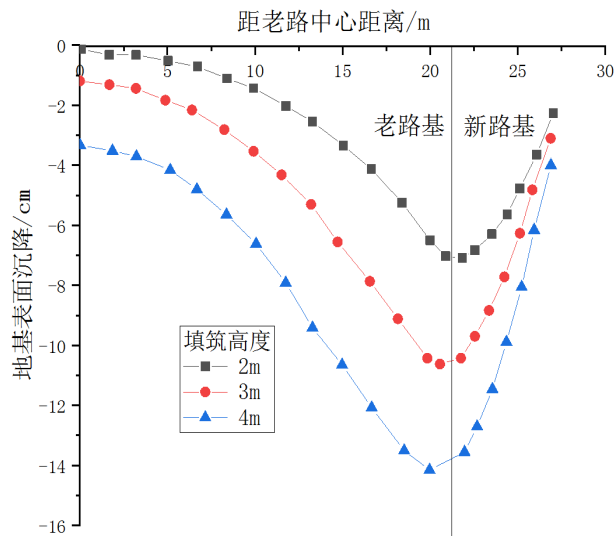


Figure 7. Foundation surface settlement of different filling heights
图 7. 不同填筑高度地基表面沉降值

3.2. 水平位移分析

拓宽路基加载时不同填筑高度下路基表面的水平位移如图 8 所示。随着填筑高度的增加，路基表面的水平位移逐渐增大，且路基表面水平位移最大值有往老路基中心处移动的趋势。路基表面水平位移分布规律如下：随着距老路中心距离的增加，水平位移有先增大后减小的趋势。当填筑高度为 2 m 时，路

基表面的最大水平位移为 0.57 cm。当填筑高度上升至 3 m 时，路基表面的最大水平位移为 1.06 cm，增加了 0.49 cm，增加率为 86%。当填筑高度上升至 4 m 时，路基表面的最大水平位移为 1.78 cm，增加了 0.72 cm，增加率为 68%。随着填筑高度的逐渐增大，路基表面的水平位移增加率逐渐减少。

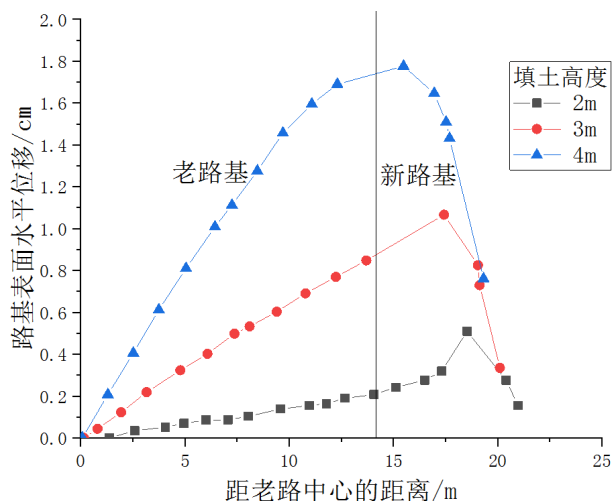


Figure 8. Horizontal displacement of subgrade surface

图 8. 路基表面的水平位移

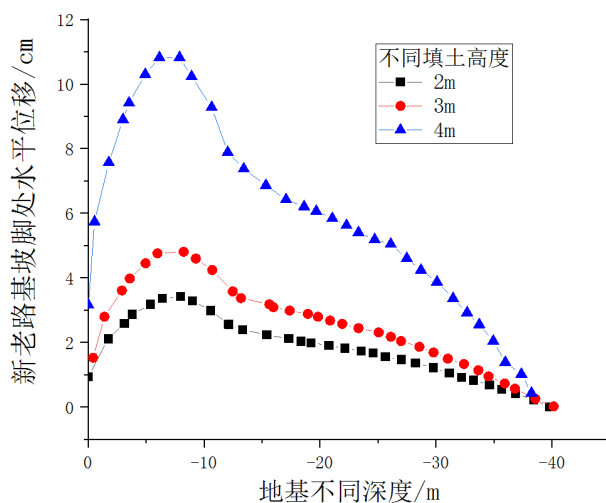


Figure 9. Horizontal displacement of new and old subgrade slope

图 9. 新老路基坡脚处的水平位移

不同填筑高度下地基不同深度新老路基坡脚处的水平位移如图 9 所示。随着填筑高度的增加，地基不同深度新老路基坡脚处的水平位移逐渐增大。该曲线整体呈现“鼓肚型”的变化趋势，随着深度的增加，水平位移先增大后减小，且在地基下 7 m 处水平位移出现最大值。当填筑高度为 2 m 时，坡脚处的最大水平位移为 2.16 cm。当填筑高度上升至 3 m 时，坡脚处的最大水平位移为 3.40 cm，增加了 1.24 cm，增加率为 57%。当填筑高度上升至 4 m 时，坡脚处的最大水平位移为 4.75 cm，增加了 1.35 cm，增加率为 40%。随着填筑高度的逐渐增大，新老路基坡脚处的水平位移增加率逐渐减少。

不同填筑高度下地基表面的水平位移如图 10 所示。地基表面的水平位移大小随着路基高度的增加而增大，且随着填筑高度的增加，地基表面水平位移最大值有往老路基中心处移动的趋势。此外，在新老

路基结合处有如下规律：老路基有往路基中心移动的趋势，拓宽路基有往新路基坡脚处移动的趋势。当填筑高度为 2 m 时，老路基最大水平位移为 -0.74 cm，新路基最大水平位移为 0.69 cm；当填筑高度为 3 m 时，老路基最大水平位移为 -1.06 cm，增加了 -0.32 cm，增加率为 43%，新路基最大水平位移为 1.10 cm，增加了 0.41 cm，增加率为 59%；当填筑高度为 4 m 时，老路基最大水平位移为 -1.2 cm，增加了 -0.14 cm，增加率为 13%，新路基最大水平位移为 1.74 cm，增加了 0.64 cm，增加率为 58%。

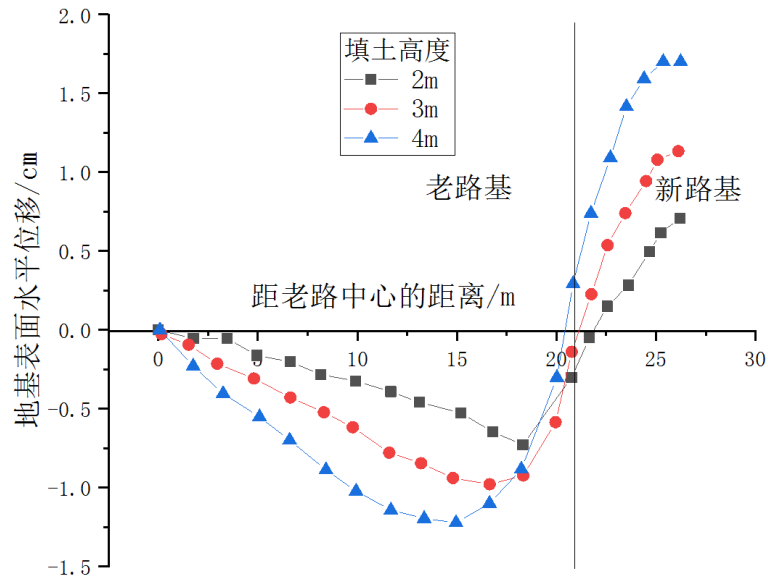


Figure 10. Horizontal displacement of foundation surface
图 10. 地基表面的水平位移

4. 泡沫轻质土处治拓宽路基差异沉降分析

4.1. 材料密度和模量影响分析

为研究泡沫轻质土材料密度和模量的影响，以及泡沫轻质土处治拓宽路基的容许高度，泡沫轻质土湿密度取 $0.6\sim 1.0\text{ g/cm}^3$ ，参照孙文[16]提出的泡沫轻质土密度和弹性模量数据曲线作为计算参数，可得不同湿密度下泡沫轻质土的弹性模量如表 2 所示，路基高度取 4 m、6 m、8 m。

Table 2. Elastic modulus of foamed lightweight soil at different wet densities
表 2. 不同湿密度下泡沫轻质土的弹性模量

编号	湿密度(g/cm ³)	弹性模量(MPa)
1	0.6	348
2	0.7	575
3	0.8	1187
4	0.9	1291
5	1.0	1359

在不同路基高度下，泡沫轻质土湿密度为 $0.6\sim 1\text{ g/cm}^3$ 时，新老路基的差异沉降和横坡度如图 11 所示。由图可知，随着湿密度的增加，横坡率和差异沉降呈现先减小后增大的趋势，且湿密度为 0.8 g/cm^3 时，差异沉降和横坡度最小，因此湿密度 0.8 g/cm^3 可作为泡沫轻质土拓宽路基的最优密度。当路基高度

为 4 m 和 6 m, 采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料时, 新旧路基差异沉降和横坡度均满足要求; 当路基高度为 8 m, 采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料时, 新旧路基差异沉降已经不满足要求, 有必要进行地基处理和加强新老路基结合部等措施, 保证拓宽道路的正常运营。

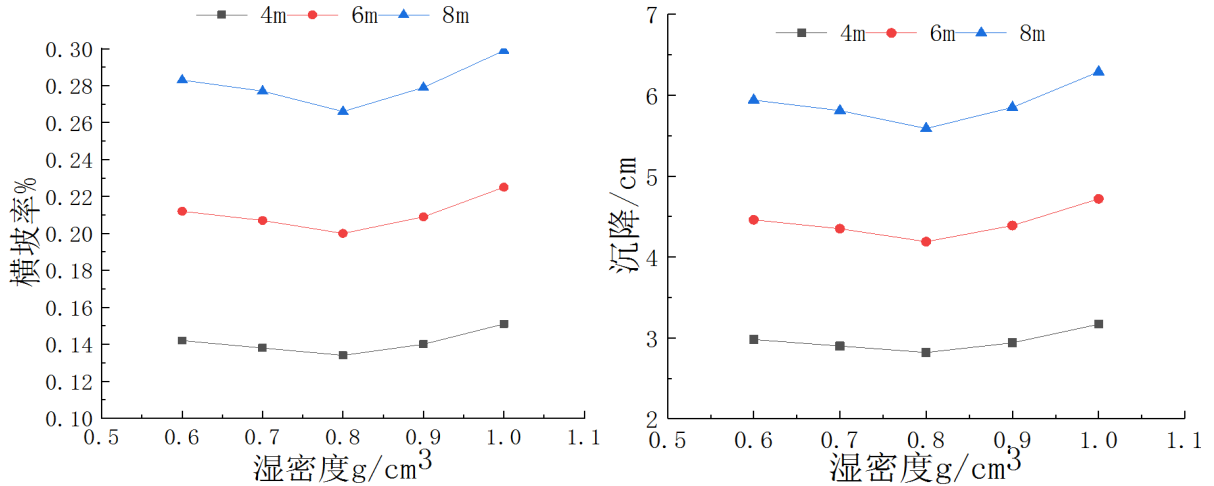


Figure 11. Settlement and cross slope of new and old subgrade at different wet densities

图 11. 不同湿密度下新老路基的沉降和横坡度

抗压强度是泡沫轻质土制备的重要指标, 在数值模拟中用弹性模量来反映抗压强度。为确定泡沫轻质土湿密度为 0.8 g/cm^3 时最优弹性模量, 取弹性模量为 200~1200 MPa 进行研究, 计算出在不同路基高度下新老路基的差异沉降和横坡度如图 12 所示。当湿密度为 0.8 g/cm^3 时, 随着泡沫轻质土弹性模量的增加, 新老路基差异沉降值和横坡度逐渐下降。当弹性模量大于 470 MPa 后, 新老路基差异沉降值和横坡度基本不发生变化, 因此将弹性模量为 470 MPa 作为泡沫轻质土湿密度为 0.8 g/cm^3 时的最优弹性模量, 并且在后续数值模拟中泡沫轻质土材料均采用该密度和模量。

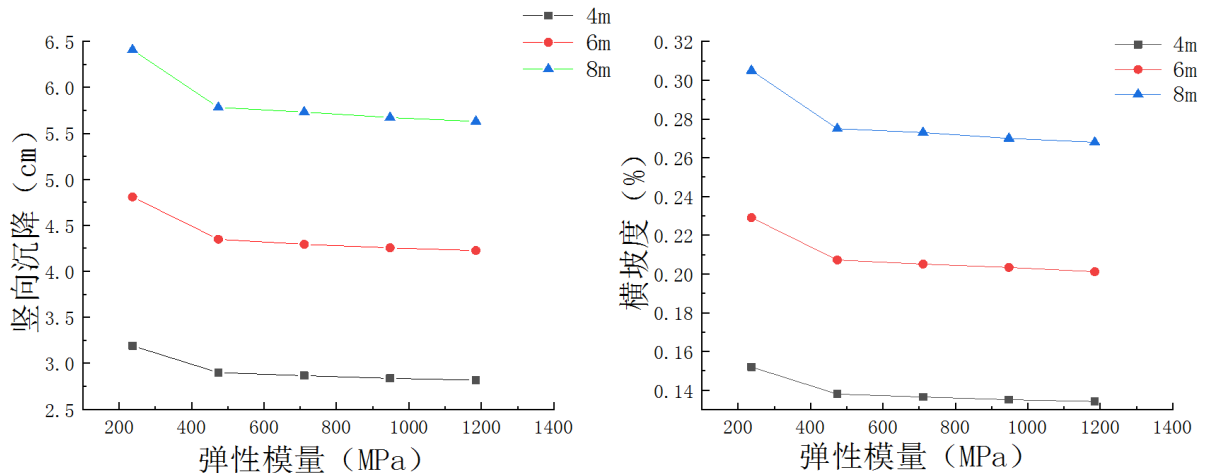


Figure 12. Settlement and cross slope of new and old subgrade at different elastic modulus

图 12. 不同弹性模量下新老路基的沉降和横坡度

4.2. 泡沫轻质土路基差异沉降控制效果

为研究泡沫轻质土用于拓宽路基的处治效果, 将泡沫轻质土材料和常规填土进行对比, 输出路基高

度为 4 m 时路基表面的沉降曲线和地基表面沉降曲线，并将路基表面各指标汇总如表 3 所示。

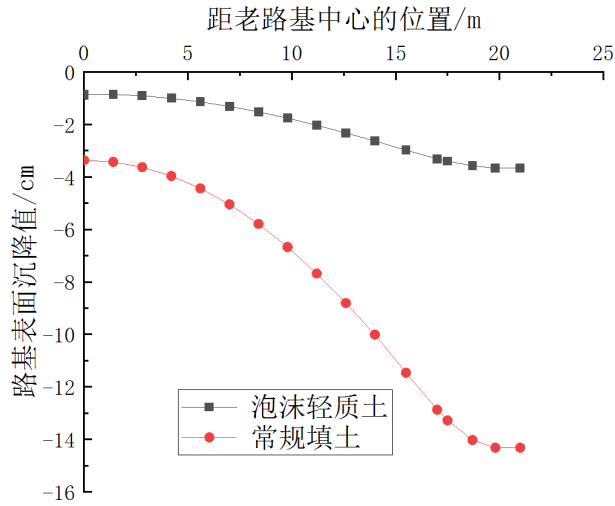


Figure 13. Distributions of subgrade settlement along the cross section under different backfill materials

图 13. 不同回填材料下路基表面沉降沿横断面分布

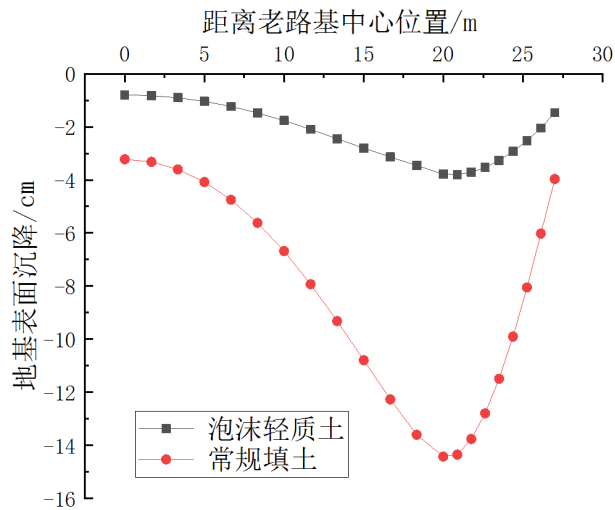


Figure 14. Comparison of foundation surface settlement

图 14. 地基表面沉降量对比

Table 3. Comparisons of subgrade settlement under different backfill materials

表 3. 不同回填材料下路基沉降对比

土体类型	泡沫轻质土	常规填土
老路基中心沉降值(cm)	0.83	3.36
拓宽路基路肩处沉降值(cm)	3.67	14.32
差异沉降(cm)	2.84	10.96
横坡度(%)	0.14	0.548

由图 13 可知，当采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料时，拓宽后路基表面的沉降量有显著降低，但整

体变化规律相似。由表 3 可知,采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料与常规填土相比,老路基中心沉降值降低 2.53 cm,降低 75.3%;拓宽路基路肩处沉降值降低 10.65 cm,降低 74.4%;差异沉降降低 8.12 cm,降低 74.1%;横坡度为 0.14%,降低了 0.408%。结果表明,采用泡沫轻质土时,新老路基差异沉降 2.84 cm 和横坡度 0.14%均满足控制标准要求。

由图 14 可知,当采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料与常规填土相比,整体变化规律相似,但拓宽后地基表面的沉降量有显著降低,地基表面最大沉降值降低 10.62 cm,降低 74%,这说明将泡沫轻质土材料用于拓宽路基可大幅度缓解新老路基不均匀沉降的问题。综上,泡沫轻质土由于强度高、密度小,不仅可以降低拓宽路段的沉降,还可减小拓宽路基给老路基带来的附加应力,从而降低老路段的沉降,能够有效降低新老路基的差异沉降。

水平位移分析

为更好分析泡沫轻质拓宽路基减载效果,仍分别采用常规填土和泡沫轻质土作为拓宽路基填料进行对比。输出路基高度为 4 m 时,地基不同深度下新老路基坡脚处的水平位移。由图 15 可知,两者整体都呈现出“鼓肚型”的变化趋势,且在地基下 7 m 处水平位移出现最大值。但采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料时,地基不同深度下新老路基坡脚处的水平位移量显著降低,最大水平位移降低了 3.36 cm,降低了 73%。

输出路基高度为 4 m 时地基表面的水平位移曲线,如图 16 所示,两者整体变化规律相似,当采用泡沫轻质土作为拓宽路基填料时,地基表面的水平位移显著降低,最大水平位移降低了 0.9 cm,降低了 78%。通过分析地基不同深度下新老路基坡脚处的水平位移和地基表面水平位移可知,泡沫轻质土由于密度较小可以减轻路基自重,从而有着较好的路基减荷效果,能明显降低地基的水平位移。

5. 结论

1) 通过对常规填土拓宽路基进行差异沉降分析,表明新老路基差异沉降为 11.52 cm,横坡度改变率位 0.55%,均不满足要求;

2) 当泡沫轻质土湿密度取 $0.6\sim 1.0\text{g/cm}^3$ 时,随着湿密度的增加,新老路基差异沉降呈现先减小后增大的趋势;当泡沫轻质土弹性模量取 $200\sim 1200\text{MPa}$ 时,随着弹性模量的增加,新老路基差异沉降值逐渐下降,且当弹性模量大于 470MPa 时沉降值趋于稳定;使用泡沫轻质土处治拓宽路基,当路基高度为 4 m、

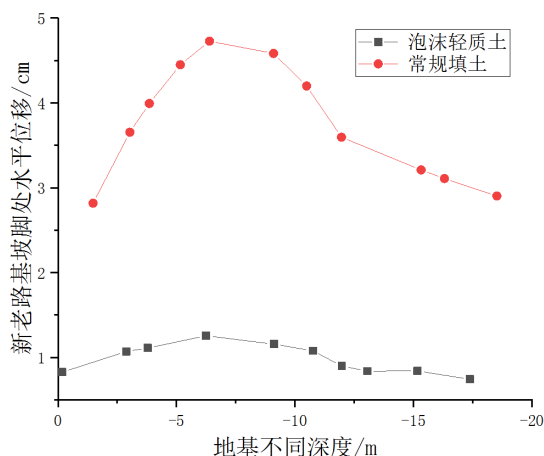


Figure 15. Comparison of Horizontal displacement of new and old subgrade slope

图 15. 新老路基坡脚处的水平位移对比

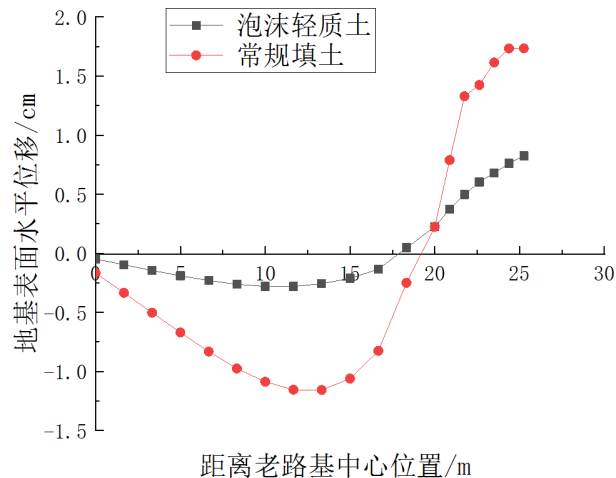


Figure 16. Comparison of horizontal displacement of foundation surface

图 16. 地基表面的水平位移对比

6 m 时, 新老路基差异沉降值均能满足要求, 当路基高度为 8 m, 差异沉降值不满足要求。由此可知, 泡沫轻质土作为拓宽路基填料, 湿密度、弹性模量和路基高度三个影响因素的敏感程度由大到小排序为: 路基高度、湿密度、弹性模量。

3) 提出泡沫轻质土拓宽路基的最优密度为 0.8 g/cm^3 、最优弹性模量为 470 MPa 以及泡沫轻质土处治拓宽路基容许高度为 6 m。

4) 泡沫轻质土由于强度高、密度小的优点, 新老路基差异沉降比常规土减少 74.1%, 横坡度减少 0.41%, 新老路基坡脚处水平位移降低 73%, 地基表面水平位移减小 78%。采用泡沫轻质材料, 新老路基差异沉降为 2.84 cm、横坡度为 0.14%, 均满足控制标准要求。

参考文献

- [1] 陈亮, 唐承耀, 刘军勇. 道路拓宽改建常见病害与路基拼接技术研究[J]. 土工基础, 2015, 29(3): 62-65.
- [2] 徐伟. 浅析旧路拓宽存在的问题及处理措施[J]. 城市道桥与防洪, 2017(12): 34-36.
- [3] 张香菊. 旧路拓宽工程路基病害调研与处治技术[J]. 山西交通科技, 2013(6): 54-56.
- [4] 侯宇翔. 路基拓宽工程病害治理技术[J]. 国防交通工程与技术, 2016(a1): 136-137.
- [5] 李聪. 高速公路拓宽路基病害机理及防治方法分析[J]. 交通世界, 2016(1): 34-35.
- [6] 邹新特. 公路改扩建路基拓宽关键处治技术研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(5): 120-122.
- [7] 李群. 泡沫轻质土在既有软基道路扩建中的应用及沉降预测研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [8] 陈忠平, 孙仲均, 钱争晖. 泡沫轻质土充填技术及应用[J]. 施工技术, 2011, 40(10): 74-76.
- [9] 张军辉. 软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006.
- [10] 何兆益, 周虎鑫. 高等级公路软土地基容许工后不均匀沉降指标研究[J]. 重庆交通学院学报, 1996, 15(1): 48-54.
- [11] 凌建明, 钱劲松, 黄琴龙. 路基拓宽工程的损坏模式和设计指标[C]//2004 年道路工程学术交流会议论文集. 中国公路学会道路工程分会, 2004: 89-95.
- [12] CECS249-2008. 现浇泡沫轻质土技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会.
- [13] 陈忠平, 王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 117-120.
- [14] CJJT177-2012. 气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部.
- [15] JTGD30-2015. 公路路基设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部.
- [16] 孙文. 高速公路路基拓宽泡沫轻质混凝土离心模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.