

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.012

引用格式: 王俊. 高陡边坡轻质泡沫混凝土填方路基稳定性分析[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 58-61.

Citation: WANG Jun. Stability analysis of high and steep slope subgrade filled with lightweight foamed concrete[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 58-61.

# 高陡边坡轻质泡沫混凝土填方路基稳定性分析

王俊

(山西交通控股集团有限公司 晋城高速公路分公司, 山西 晋城 048000)

**摘要:** 为优化高陡边坡轻质泡沫混凝土填方路基施工方案, 利用有限元软件模拟分析自路基坡脚向路基顶部设置10根钢管桩(原设计方案)、将钢管桩数量减少至6根(取消路基顶部4根钢管桩, 优化方案)、不设置钢管桩3种施工方案下路基变形和稳定性。结果表明, 3种施工方案下路基外侧变形均高于内侧, 不设置钢管桩时变形量最大, 优化方案与原设计方案下路基变形接近, 且优化方案下路基抗滑安全系数适中, 采用优化方案可以控制路基变形, 施工后路基稳定性良好, 可选用优化方案作为最终施工方案。

**关键词:** 公路; 高陡边坡; 轻质泡沫混凝土; 填方路基; 路基稳定性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0058-04

在山区高速公路建设中, 高陡边坡填方路基的施工难度大, 施工后很容易产生较大变形, 造成道路结构破坏。陡坡路段通常采用架设桥梁或大面积填方和挖方的方式<sup>[1]</sup>, 但部分陡坡架设桥梁的施工难度大, 施工成本高, 而大面积填方或挖方对周边环境破坏大<sup>[2]</sup>。采用新型轻质材料作为路基填料, 可降低工程成本, 减少对周边环境的破坏。轻质泡沫混凝土是利用气泡机将水泥、水和发泡剂按一定比例混合发泡而成的具有一定强度的稳定结构<sup>[3]</sup>, 具有密度小、隔热保温性好、耐久性好、流动性好、施工工艺简单、固化效果好、强度可根据需要调节等技术优势<sup>[4-5]</sup>, 将其用作路基填料可有效解决上述问题。另外, 为提高路基的稳定性, 常采用钢管桩与轻质泡沫混凝土组成的复合结构<sup>[6-8]</sup>, 其中钢管桩数量直接影响施工成本。本文结合实际工程项目, 根据现场调查结果制定施工方案, 利用有限元软件对施工方案进行优化分析, 确定合理的高陡边坡填方路基施工方案。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

某高速公路主要分布在山岭重丘区, 地势起伏大, 高填深挖路基多, 其中 K12+120—K240+000 段为高陡边坡填方路段, K12+120 位置接大桥, 填

方路基长度为 120.0 m, 最大填方高度为 22.8 m, 最大坡度为 56°。该施工区域地基上覆第四系残坡积层, 主要为含碎石黏性土, 呈黄褐色、硬塑状, 碎石主要为强风化砂岩, 占 25% 左右, 厚度为 1.5~5.5 m。下伏岩石主要为砂岩, 上层为强风化砂岩, 呈灰褐色, 裂隙发育, 岩石破碎稳定性差, 主要呈碎块状, 厚度为 16.2~32.6 m; 下层为中风化砂岩, 呈深灰色, 岩体完整, 稳定性好, 最大揭露厚度为 15.8 m。高陡边坡填方路基稳定性差、施工难度大, 为提高路基的稳定性, 降低路堤填土自质量, 采用轻质泡沫混凝土作为路基填料。

### 1.2 轻质泡沫混凝土施工方案

K12+120—K240+000 段为高填方路基, 从高陡边坡中部穿过, 为保证路基的稳定性, 路基填筑前进行清表, 开挖台阶后进行路基填筑, 以强风化砂岩层作为持力层。为减少占地面积及对周边环境的影响, 采用轻质泡沫混凝土作为路基填料。为提高填方路基的稳定性, 开挖台阶后在原地基上增设钢管桩, 增强路基与地基的结合效果, 使轻质泡沫混凝土和下部地基持力层连接形成一个整体。轻质泡沫混凝土填筑设计方案见图 1。

通过施工放样确定施工范围, 清表开挖至持力层, 开挖内倾台阶, 内倾坡度为 2%, 台阶宽度不少于 2.0 m。钢管桩直径为 200.0 mm, 数量为 10 根,

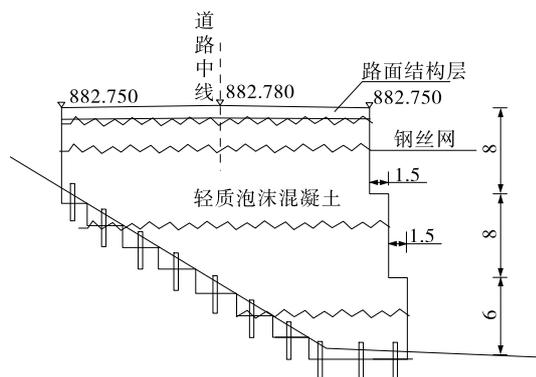


图 1 轻质泡沫混凝土填筑设计方案(单位:m)

内部填充 C30 混凝土,总长度为 3.5 m,其中 2.0 m 埋入地下,上部 1.5 m 外露,钢管桩距台阶外部 100.0 cm。钢管桩施工完成后进行轻质泡沫混凝土浇筑,轻质泡沫混凝土原材料为 P.O42.5 普通硅酸盐水泥、水和发泡剂,三者质量比为 340 : 210 : 0.75。

分段浇筑轻质泡沫混凝土,混凝土单层厚度不超过 10.0 cm。浇筑后将混凝土表面刮平,并覆盖土工布或草帘子,洒水养生不少于 14 d。养生期满,检验合格后进行路面施工。养生期间封闭交通,严禁行人或车辆通行。混凝土终凝后,对混凝土进行切缝处理,切缝尺寸为 6.0 m×6.0 m,缝内填充沥青,缝宽为 30.0 mm。

## 2 建立有限元模型

### 2.1 对比研究方案

原设计施工方案(方案一)为采用轻质泡沫混凝土作为路基填料,自路基坡脚向路基顶部设置 10 根钢管桩,钢管桩的技术参数如前所述。考虑到路基顶部相对稳定,设置钢管桩加固的作用不大,为节约施工成本,对原施工方案进行优化,取消路基顶部 4 根钢管桩,将钢管桩数量减少至 6 根,钢管桩的技术参数与原设计施工方案相同,路基填料仍采用轻质泡沫混凝土(方案二)。另外,设置不设置钢管桩的方案进行对比,填料采用轻质泡沫混凝土,路基尺寸与原设计相同(方案三)。利用有限元软件建立路基模型进行模拟分析,计算 3 种施工方案下路基位移,对比分析其加固效果。

### 2.2 基本假定

为简化计算,在高陡边坡轻质泡沫混凝土路基数值模拟分析中做以下假定:1) 各层地基土为弹塑性体,且均为各向同性;2) 各部分土体饱和、均匀,且数值模拟过程中渗透系数不变;3) 泡沫混凝土与

地基土之间无相对滑动,同步变形,二者完全接触。

### 2.3 模型的计算参数

根据设计资料,结合轻质泡沫混凝土室内试验结果确定模型各部分计算参数和界面参数,结果如表 1 所示。

表 1 模型的计算参数和界面参数

模型构件	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	剪切模 量/kPa	弹性模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
轻质泡沫混凝土	6.5	—	100	42	16.0
强风化砂岩	21.5	—	1 200	48	19.5
钢管桩	75.0	—	22 000	—	—
界面参数	—	500	—	42	16.0

### 2.4 建立模型

以 K12+180 断面为研究对象,轻质泡沫混凝土和强风化砂岩采用摩尔-库仑模型,钢管桩采用弹性模型,利用有限元软件建立数值模型,图 2 为施工方案二下路基模型。

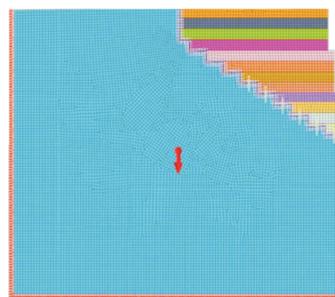


图 2 轻质泡沫混凝土路基施工方案二下路基模型

为模拟路基填筑施工过程,进行分层加载,单层填筑厚度为 2.0 m,共分 11 层填筑,在加载过程中计算路基变形。

### 2.5 模型边界条件

根据路基加载工况确定模型边界条件:模型左侧和右侧约束 X 方向;模型底面约束 X、Y 方向;模型顶面自由。

## 3 路基稳定性数值模拟计算结果分析

### 3.1 方案三下路基变形模拟计算结果分析

不设置钢管桩情况下路基变形见图 3,路基内侧和外侧位移见图 4,与原设计施工方案(方案一)下路基外侧变形对比见图 5。

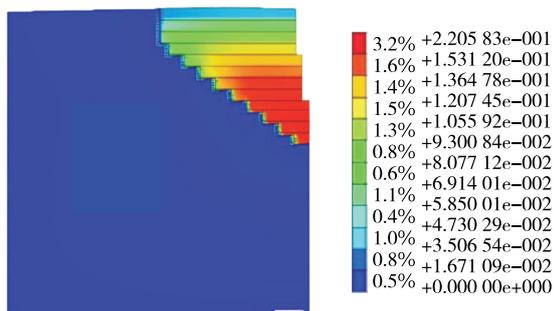


图 3 不设置钢管桩方案下路基变形云图(单位:m)

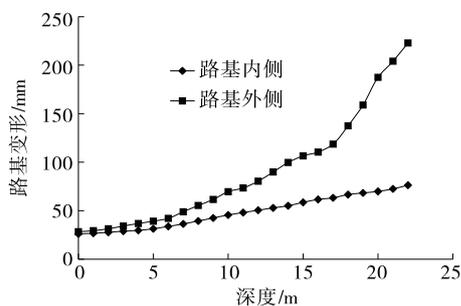


图 4 不设置钢管桩方案下路基变形

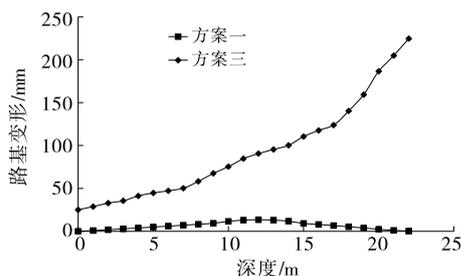


图 5 设置和不设置钢管桩时路基外侧变形对比

从图 3 可以看出:在不设置钢管桩的情况下,随深度增加,路基变形增大,最大值出现在坡脚,为 222.8 mm。不设置钢管桩时路基变形较大,其中路基底部变形最大,必须采取措施控制路基变形。

由图 4 可知:在不设置钢管桩的情况下,路基外侧变形较大,路基外侧变形明显高于内侧,出现向外侧滑移的现象;随深度增加,路基内侧和外侧变形均增加,两侧最大变形均出现在路基底部,路基内侧、外侧最大变形分别为 76.3 mm、222.8 mm。

由图 5 可知:在不设置钢管桩的情况下,路基变形明显高于原设计方案,说明设置钢管桩能有效控制路基变形。不设置钢管桩时路基底部变形最大,出现向外侧滑动的现象,存在失稳破坏风险。原设计方案由于设置了钢管桩,路基变形得到有效控制,最大变形不超过 10.0 mm,路基结构稳定。不设置钢管桩会使路基结构产生较大变形,进而产生失稳

破坏,该方案不可行。

### 3.2 方案二下路基变形模拟计算结果分析

优化施工方案下路基变形见图 6,路基内侧和外侧位移见图 7,与原设计方案下路基外侧变形对比见图 8。

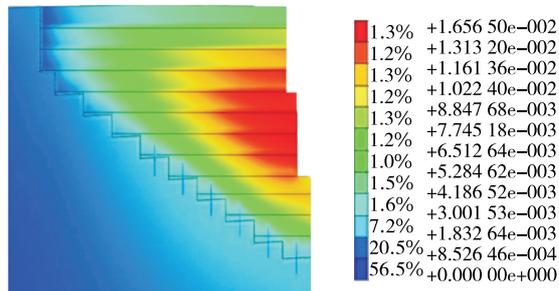


图 6 优化方案下路基变形云图(单位:m)

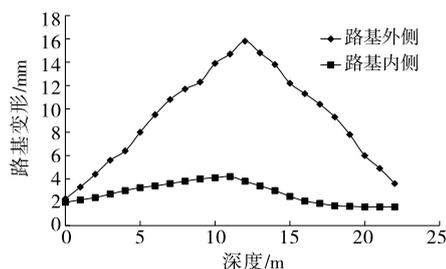


图 7 优化方案下路基变形

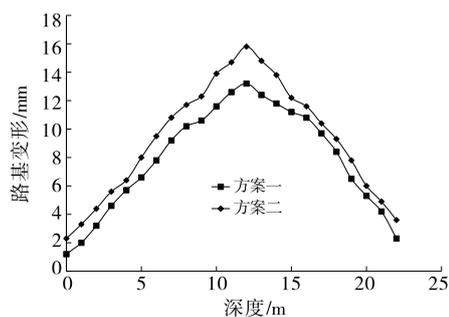


图 8 不同钢管桩数量下路基外侧变形对比

从图 6 可以看出:将钢管桩数量减少至 6 根时,路基外侧变形大于内侧,最大变形出现在路基外侧中部、深度 12.0 m 处,变形量较小,外侧最大变形为 15.8 mm。说明减少钢管桩设置数量可以有效控制路基变形。

由图 7 可知:采用优化方案,路基外侧变形明显高于内侧,路基顶部和底部变形较小,路基中部变形较大;路基外侧最大变形为 15.8 mm,出现在深度 12.0 m 处。与路基外侧相比,路基内侧变形较小。

由图 8 可知:优化方案下路基外侧变形变化趋势与原设计方案相近,变形量略高于原设计方案,优

化方案与原设计方案下路基外侧最大变形分别为 15.8 mm、12.9 mm,出现的位置相近。采用优化方案可有效控制路基变形,路基整体稳定性良好,且可节约施工成本,优化方案可行。

### 3.3 路基稳定性计算分析

陡坡路基滑动面安全系数  $K$  按下式计算:

$$K = \frac{\mu G \cos \alpha_0 + f_v A_n}{G \sin \alpha_0} \quad (1)$$

式中: $\mu$  为填方体与地基接触面之间的摩擦因数, $\mu=0.32$ ;  $G$  为路基自质量荷载与路基上部荷载的总和, $G=2\,980\text{ kN}$ ;  $\alpha_0$  为基底倾角, $\alpha_0=35^\circ$ ;  $f_v$  为钢管桩抗剪强度, $f_v=250\text{ N/mm}^2$ ;  $A_n$  为钢管桩截面积,按式(2)计算。

$$A_n = \frac{A_0 n}{\cos \alpha_0} \quad (2)$$

式中: $A_0$  为单根钢管桩截面积; $n$  为钢管桩数量。

优化方案下路基抗滑安全系数为:

$$K = \frac{0.32 \times 2\,980 \times 0.819 + 0.25 \times 6 \times 905 \div 0.819}{2\,980 \times 0.574} = 1.426 > 1.3$$

不设置钢管桩方案下路基抗滑安全系数为:

$$K = \frac{0.32 \times 2\,980 \times 0.819}{2\,980 \times 0.574} = 0.457 < 1.3$$

原设计方案下路基抗滑安全系数为:

$$K = \frac{0.32 \times 2\,980 \times 0.819 + 0.25 \times 10 \times 905 \div 0.819}{2\,980 \times 0.574} = 2.072 > 1.3$$

根据上述计算结果,不设置钢管桩路基的安全系数较低,不满足规范要求,路基稳定性较差,存在滑动风险;原设计方案下路基抗滑安全系数过高,经济性较差;优化方案下路基抗滑安全系数适中,经济性较好,优化方案可行。

## 4 结论

本文结合实际工程项目,利用有限元软件模拟计算 3 种轻质泡沫混凝土路基施工方案下路基变形,并计算其稳定性,结论如下:

(1) 不设置钢管桩时,路基外侧变形高于内侧,路基地部外侧变形最大,有滑动破坏风险,路基稳定性较差,且路基抗滑安全系数较低,该方案不可行。

(2) 将钢管桩数量由原设计的 10 根减少至 6 根时,路基外侧变形高于内侧,但变形量较小,与原设计方案下路基变形量较接近,减少路基上部钢管桩布置数量对路基稳定性的影响较小,且路基抗滑安全系数适中。而原设计方案下路基安全系数偏高,经济性欠佳,为节约施工成本,可优先选择优化方案。

### 参考文献:

- [1] 杨海泉.轻质泡沫混凝土在路桥工程中的应用[J].工程建设与设计,2023(15):103-106.
- [2] 朱月华.轻质泡沫混凝土在高速公路改扩建工程中的应用[J].交通科技与管理,2023,4(5):96-98.
- [3] 赵锡灿.公路高陡边坡施工稳定性动态监测研究[J].公路与汽运,2022(3):65-68.
- [4] 吴小流.轻质泡沫混凝土在高陡填方路基中的应用研究[J].西部交通科技,2022(10):91-92+153.
- [5] 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.
- [6] 李易,胡焕忠,褚胜群.轻质泡沫混凝土在桥台台背回填中的应用研究[J].交通科技,2019(1):19-20+73.
- [7] 郭强.轻质泡沫混凝土在南浦大桥 W3 匝道大修工程中的应用[J].上海公路,2018(3):5-7+4.
- [8] 杨为品.泡沫轻质土+钢管桩在高陡斜坡路基拼宽中的应用[J].福建交通科技,2019(4):7-11+88.

收稿日期:2023-08-25

(上接第 57 页)

- [6] 陈钦,陈海源,王晓辉,等.山区公路回头曲线车辆横向加速度特性研究[J].科学技术与工程,2022,22(34):15372-15381.
- [7] 罗金标,林超伟.公路平面设计中圆曲线最小半径运用研究[J].公路与汽运,2023(2):53-56.

- [8] 王振,朱星光.基于灰色关联的山区公路线形设计影响因素分析[J].公路与汽运,2022(6):79-81+87.
- [9] 刘北胜.基于云渲染的三维 BIM 模型可视化技术研究[J].北京交通大学学报,2017,41(6):107-113.

收稿日期:2023-04-21