

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.015

引用格式: 吴琪, 房海元. 有限空间下加筋土陡坡加固路基设计[J]. 公路与汽运, 2024, 40(6): 81-84.

Citation: WU Qi, FANG Haiyuan. Design of reinforced roadbed on steep slope reinforced soil under limited space[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 81-84.

# 有限空间下加筋土陡坡加固路基设计

吴琪, 房海元

(马克菲尔(长沙)新型支档科技开发有限公司, 湖南长沙 410600)

**摘要:** 加筋挡墙或加筋陡坡在公路工程中属于路基加固或支挡工程, 是近些年来快速发展的一种柔性生态支护方式。文中以甘肃省某市政道路工程加筋格宾陡坡设计为例, 研究在可利用空间距离短于 0.5 倍填方边坡高度的有限空间内如何应用加筋土陡坡加固路基, 通过采用 MacStars 软件对天然工况、暴雨工况时不同加筋土陡坡设计方案下边坡稳定性的数值模拟, 对设计方案进行调整、优化, 得到安全系数满足规范要求的加筋土陡坡方案。结果表明, 对于有限空间下加筋土结构, 柔性加筋陡坡结合刚性锚杆加固的组合方案优势明显。

**关键词:** 公路; 路基加固; 加筋格宾陡坡; 刚性锚杆; 有限空间

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)06-0081-04

加筋土工程由于其加固填方高度大, 在整体性、生态性与经济性方面具有优势, 被越来越多地应用于高填方支挡加固工程。利用土工合成材料加筋作为加筋土结构是一种新型边坡支护与加固方式, 在许多工程中得到应用。Tatsuoka F. 提出了刚/柔组合墙面的加筋土形式<sup>[1]</sup>。Portelinha F. H. M. 等建立全尺寸加筋土挡墙, 分析了填土中水对结构位移和应变的影响<sup>[2]</sup>。牛笑笛等研究了不同结构形式加筋土挡墙的力学特性<sup>[3]</sup>。曾亚林等分析了以抗滑桩-加筋土组合加固高填边坡的稳定性<sup>[4]</sup>。蔡晓光、顾婕等进行了土工格栅加筋边坡研究与设计<sup>[5-6]</sup>。唐韬、杨灿宇等通过工程实例分析了加筋土结构设计理论及在公路工程中的应用技术<sup>[7-8]</sup>。周志刚等对用铁丝窗纱和纤维窗纱加筋的反裹式加筋砂挡墙进行土工离心模型试验, 对比分析了墙顶沉降与墙面水平位移、墙内土压力和筋材应变随离心加速度增加的变化规律<sup>[9]</sup>。王成皿等从规范验算的角度, 采用极限平衡法对加筋土挡土墙处理滑坡的稳定性进行研究, 认为加筋土挡土墙能有效治理滑坡, 可结合现场情况从加筋材料、坡脚矮墙角、边坡排水等方面进行设计<sup>[10]</sup>。本文以甘肃省某市政道路工程加筋格宾陡坡为研究对象, 根据该路基边坡的地质条件及可利用空间距离短于 0.5 倍填方边坡高度的有限空间条件, 以聚酯纤维土工格栅作为主筋, 采用垂

直面墙加筋土单元作为加筋系统面墙进行加筋格宾陡坡设计, 并通过 MacStars 软件对加筋土陡坡进行稳定性验算, 对筋带明显短于规范推荐最小值的部分结合刚性锚杆加固进行组合处理, 得到安全系数满足规范要求的加筋土陡坡加固路基设计方案。

## 1 工程概况

甘肃某拟建市政道路为旧路改造项目, 盘山展布, 道路红线宽 17 m。其中 K0+080—300 段右幅路堤边坡脚现状为已建城市主干道环线工程辅道, 拟建市政道路与已建城市主干道环线红线间水平距离为 0.0~10.3 m, 自然放坡条件有限, 需进行边坡加固支挡, 路堤边坡支挡高度为 3~20 m。

需治理的边坡位于拟建市政道路与已建城市主干道环线之间, 现状边坡区域车流量较大, 附近人类活动频繁。该段边坡为黄土地貌, 属土岩二元边坡, 为早期形成的自然边坡, 后经改造、挖方形成现状坡体。根据勘探结果, 将场地地层划分为全新统填土层、全新统坡积残积物层、泥质砂岩层、砂岩层 4 个工程地质层。

## 2 稳定性分析方法及参数

### 2.1 稳定性分析方法

MacStars 软件采用具有完整理论的极限平衡

法,包括条分法、毕肖普法和简布法,能灵活加载荷载,建立相对复杂地层及地下水的二维模型。利用该软件研究岩土边坡工程的稳定性、验算加筋边坡设计方案,能直观地看出边坡的最危险滑动面及对应安全系数,并能通过内部不同计算方法进行对比分析,复核边坡稳定性分析结果的准确性。

## 2.2 几何特征与参数

该项目各土层的岩土参数见表 1。考虑后续施工需求及运行期间各种不利因素的影响,选取具有代表性的断面 K0+273.107 进行有限空间下加筋格宾陡坡设计及稳定性分析,图 1 为其典型断面。加筋陡坡最大高度为 13.000 m,坡底长度仅为 8.399 m,坡中间最大宽度为 6.000 m,坡顶部空间长度可根据实际需要进行布置。除回填土层外,现场还有既有浆砌石挡墙、原地基坡积粉质黏土和泥质砂岩。根据顶部为支路的实际情况,取顶部道路车辆荷载为 20 kPa 均布进行考虑,暂不考虑地震作用的影响。

表 1 各土层岩土参数

土层	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	
	天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨
	工况	工况	工况	工况	工况	工况
填筑土	15.0	13.0	25	20	19.0	20.0
坡积粉质黏土	25.6	19.0	26	20	19.0	20.0
泥质砂岩	65.0	45.0	30	21	21.9	22.9
砂岩	55.0	40.0	33	28	23.0	24.0
格宾面墙	17.0	17.0	40	40	17.5	20.5
原挡墙/混凝土	50.0	50.0	30	30	25.0	25.0

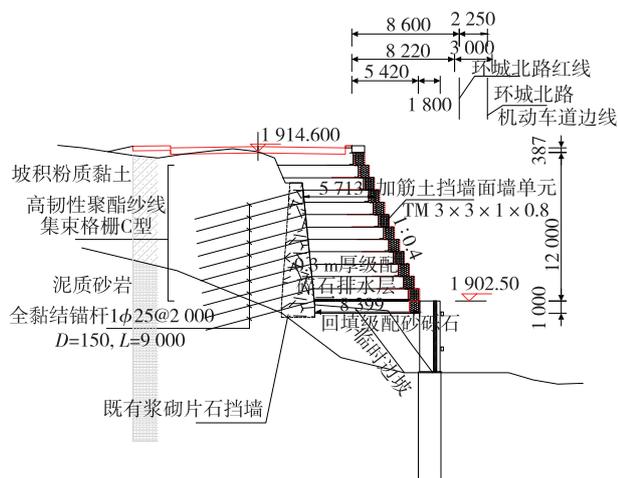


图 1 路基边坡 K0+273.107 处断面图(单位:mm)

## 3 加筋格宾陡坡方案设计与稳定性分析

该项目 K0+210—300 段右幅路基处有一浆砌石挡墙,经过现场勘察分析,该挡墙目前处于稳定,建议不拆除。对该段路基顶部道路进行加宽改造,需将该挡墙覆盖在新路基下部,形成路基边坡高差 9~13 m,水平用地空间不足,有必要增设加筋格宾陡坡。K0+260—300 段右幅路基外侧因该挡墙阻断了加筋材料的铺设,加筋格宾陡坡的筋材铺设长度仅 6~8 m,不能满足 JTJG/T D30—2015《公路路基设计规范》中加筋筋材长度为 0.8 倍加筋体高度的要求,该加筋土结构面临有限空间的不利情况,在设计中需特别考虑这部分的筋材设置。设计采用在有限空间下增设全长黏结型钢筋锚杆的方法,将加筋主筋材聚酯纤塑土工格栅连接钢筋锚杆,使柔性加筋筋材锚固在刚性锚杆上,解决有限空间下过短加筋筋带锚固段长度不够和筋材抗拔稳定性不足的问题。

### 3.1 初步设计方案与稳定性分析

根据实际地形条件、土体性质进行加筋格宾陡坡设计。陡坡面墙边坡坡率为 1:0.4,采用极限抗拉强度为 200 kN/m 的聚酯纤塑土工格栅进行加筋。为与加筋格宾单元高度匹配,加筋间距采用 1 m,面墙单元采用加筋格宾单元,内部填充石料。按 GB/T 50290—2014《土工合成材料应用技术规范》要求进行长期允许设计抗拉强度计算,影响允许设计抗拉强度的蠕变折减系数取 1.5,施工损伤折减系数取 1.1,老化折减系数取 1.1,荷载方向为平行于坐标轴。

根据 JTJG/T D30—2015,陡坡的稳定性考虑天然工况和暴雨工况。该项目地下水位埋深较深,施工及运行过程中不会对道路加宽部分产生影响,仅考虑长时间暴雨对加筋格宾陡坡稳定性的影响。利用 MacStars 软件中简化瑞典条分法、毕肖普法和简布法对不同工况时初步设计方案下加筋格宾陡坡的稳定性进行分析,毕肖普法的计算结果见图 2。

根据 JTJG/T D30—2015,加筋格宾陡坡在天然工况下的安全系数  $K_s$  为 1.35,暴雨工况下为 1.25。从图 2 可以看出:初步设计方案下加筋格宾陡坡在天然工况、暴雨工况时的安全系数分别为 1.292、1.060,均不满足规范要求,加筋格宾陡坡不够安全;暴雨工况下安全系数小于天然工况下安全系数,与李丞、吴加红等的研究结果一致<sup>[11-12]</sup>。

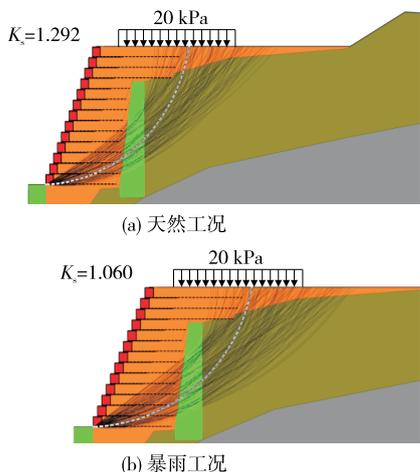


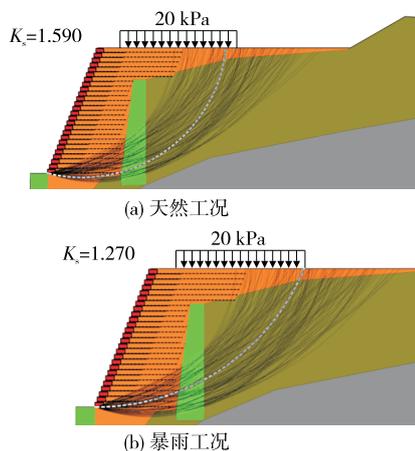
图 2 初步设计方案下加筋格宾陡坡的稳定性分析

### 3.2 调整设计

根据上述分析结果,采用常规加筋格宾陡坡方案无法满足稳定性要求,需对其进行调整。根据工程经验,可采用更好的回填材料来提高填筑土体的物理力学参数、采取减小加筋间距和结合刚性锚杆加固的方法来提高加筋陡坡的稳定性。但更换回填材料会造成大量土体废弃和新换填料来源困难的问题,一般很难实施。因此,不考虑更换回填材料的方法,采用加筋间距更小的加筋土陡坡和结合刚性锚杆的组合加固方案进行调整设计和方案比选。

(1) 减小加筋间距的调整设计。保持初步设计方案中加筋格宾陡坡面墙边坡坡率为  $1:0.4$  不变,采用极限抗拉强度为  $200 \text{ kN/m}$  的聚酯纤塑土工格栅进行加筋,将加筋间距减小至  $0.5 \text{ m}$ ,面墙单元仍采用加筋格宾单元,内部填充石料。利用 MacStars 软件中简化瑞典条分法、毕肖普法和简布法对不同工况下加筋间距减小至  $0.5 \text{ m}$  时加筋格宾陡坡的稳定性进行分析,其中毕肖普法的计算结果见图 3。从图 3 可以看出:加筋间距更小的加筋土陡坡在天然工况和暴雨工况下的稳定性明显增强,安全系数明显提升,分别为  $1.590$ 、 $1.270$ ,均满足规范要求,说明减小加筋间距方案可行。

(2) 组合设计。采用加筋结构结合刚性锚杆加固的组合设计方案,保持加筋格宾加筋间距为  $1 \text{ m}$ 、加筋格宾陡坡面墙边坡坡率为  $1:0.4$  不变,采用极限抗拉强度为  $200 \text{ kN/m}$  的聚酯纤塑土工格栅进行加筋,面墙单元依然采用加筋格宾单元,内部填充石料。利用 MacStars 软件中简化瑞典条分法、毕肖普法和简布法对不同工况下采用组合设计方案时加筋格宾陡坡的稳定性进行分析,其中毕肖普法的计算

图 3 主筋间距加密至  $0.5 \text{ m}$  时加筋格宾陡坡的稳定性分析

结果见图 4。从图 4 可以看出:采用加筋结构结合刚性锚杆加固的组合方案,天然工况和暴雨工况下加筋陡坡的稳定性明显增强,安全系数明显提升,分别为  $1.768$ 、 $1.408$ ,均满足规范要求,说明组合设计方案可行。

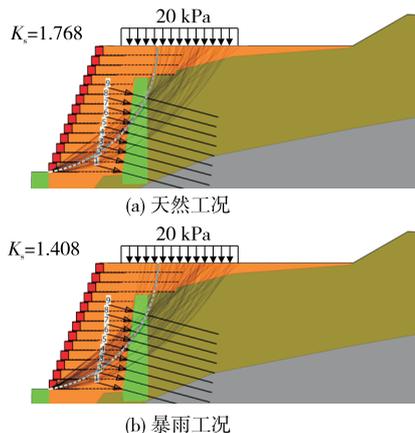


图 4 采用刚性锚杆组合的加筋格宾陡坡的稳定性分析

(3) 方案比选。综上,初步设计方案基本不可行。从理论上分析,加筋间距调整设计方案和组合设计方案均可行,相对而言,组合设计方案的安全系数更高、更安全。从技术方面分析,相比于加筋间距调整设计方案,加筋结构结合刚性锚杆加固的组合设计方案采用的土工格栅更少,施工工序更少,能减少填筑体施工与加筋土筋材铺设的交叉施工,更有利于施工组织;组合设计方案采用的加筋筋材更少,通过增加刚性锚杆延长了筋材的加筋能力,能节省大量工程材料,造价更低。因此,该项目最终采用加筋结构结合刚性锚杆加固的组合方案。

毕肖普法、简布法计算所得初步设计、调整设计、组合设计方案下加筋格宾陡坡的安全系数见表 2。从表 2 可以看出:天然工况下毕肖普法计算所

得初步设计、调整设计下加筋格宾陡坡的安全系数均比简布法计算的安全系数大,但刚性锚杆结合加筋格宾陡坡方案中,简布法计算的安全系数比毕肖普法计算的安全系数大。总体而言,两种方法计算的安全系数相差较小,方案设计中可采用这两种方法共同复核。

表 2 各设计方案下加筋格宾陡坡的稳定安全系数

设计方案	工况	毕肖普法	简布法
初步设计	天然工况	1.292	1.202
	暴雨工况	1.060	0.980
调整设计	天然工况	1.590	1.419
	暴雨工况	1.270	1.142
组合设计	天然工况	1.768	1.784
	暴雨工况	1.408	1.427

#### 4 结论

本文结合甘肃省某市政道路加筋格宾陡坡设计,探讨有限空间下加筋土陡坡加固路基设计方案,并利用 MacStars 计算软件对设计方案进行数值模拟分析,确定合理的技术方案。主要结论如下:

(1) 在有限空间条件下,采用合理的加筋方案,结合锚杆加固路基边坡,路基结构在天然工况、暴雨工况下的稳定性均满足要求。

(2) 有限空间下,常规加筋格宾陡坡方案在天然工况下的安全系数为 1.292,不满足规范要求。通过加筋间距调整并结合全长黏结型锚杆加固,安全系数达到 1.768,满足规范要求,加筋格宾陡坡处于稳定状态。在有限空间下采用组合式的土工格栅加筋陡坡方案可提高路基边坡的稳定性。

(3) 对于加筋土结构,在土工格栅长度固定不变的情况下,加密土工格栅间距、增设锚杆均可大幅度提高边坡的安全系数。

#### 参考文献:

[1] TATSUOKA F.Geosynthetic-reinforced soil structures for railways and roads:development from walls to bridges[J]. Innovative Infrastructure Solutions,2019,4(1):49-67.

[2] PORTELINHA F H M,ZORNBERG J G.Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile-reinforced soil wall[J]. Geotextiles & Geomembranes,2017,45(3):211-226.

[3] 牛笑笛,杨广庆,王贺,等.不同面板形式加筋土挡墙结构特性现场试验研究[J].岩土力学,2021,42(1):245-254.

[4] 曾亚林,金波,王祺顺,等.基于极限理论的抗滑桩-加筋土组合加固高填筑边坡稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2023,20(9):3362-3372.

[5] 蔡晓光,王学鹏,吴琪,等.凤庆机场场区土工格栅加筋高边坡设计[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2662-2666.

[6] 顾婕,张孟喜.基于强度折减理论的加筋土边坡稳定性分析[J].上海大学学报(自然科学版),2019,25(6):990-1002.

[7] 唐韬.加筋挡土墙在上浦高速公路中的应用及相关问题探讨[J].公路与汽运,2021(3):87-89+101.

[8] 杨灿宇,王武生,张作刚,等.加筋格宾挡墙在怀化至通道(湘桂界)高速公路避险车道中的应用[J].公路工程,2013,38(6):169-172.

[9] 周志刚,韩健,杨志峰,等.反裹式加筋砂挡墙离心模型试验研究[J].交通科学与工程,2017,33(2):1-7.

[10] 王成皿,王中文.基于规范法的加筋土挡土墙边坡加固稳定性计算研究[J].中外公路,2017,37(2):24-26.

[11] 李丞,蔡立明,张伟锋,等.初始渗流场对渣土场边坡降雨入渗特征及其稳定性的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(2):1-9.

[12] 吴加红,赵强,等.开挖与降雨作用下公路边坡的稳定性分析[J].公路与汽运,2021(6):83-87.

收稿日期:2023-12-18

\*\*\*\*\*  
(上接第 50 页)

[4] 交通运输部公路科学研究院.公路交通安全设施设计规范:JTG D81—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[5] 交通运输部公路科学研究院.公路交通安全设施设计细则:JTG/T D81—2017 [S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[6] 李振华,朱欢,黄志勇,等.山区高速公路路肩挡墙混凝土

土护栏改造设计[J].公路与汽运,2023(6):48-51.

[7] 赵庆云,吴军鹏,刘康,等.桥梁混凝土护栏直立式接高改造设计与碰撞分析[J].公路与汽运,2020(1):46-51.

[8] 张茜.高速公路旧桥防撞护栏提升设计方案[J].公路交通技术,2020,36(6):120-126.

收稿日期:2023-11-16