

某机场飞行区土工格栅加筋高边坡优化设计

廖 鸿, 徐 超, 杨 阳

Optimal design of the high geogrid-reinforced slope at the airfield of an airport

LIAO Hong, XU Chao, and YANG Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

国家天文台500米口径球面射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

陈德茂, 沈志平, 姜鹏, 付君宜, 刘慧 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 116-123

土工格栅加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway

周洪福, 冯治国, 石胜伟, 王保弟, 徐如阁, 冉涛 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 112-119

无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用

Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope

黄海宁, 黄健, 周春宏, 潘勇杰 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 149-155

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

穆成林, 裴向军, 裴钻, 张引, 习朝辉 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150-158



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012015

某机场飞行区土工格栅加筋高边坡优化设计

廖 鸿¹, 徐 超^{1,2}, 杨 阳^{1,3}

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 土工格栅加筋土边坡是一种新型的边坡支护结构, 对于提高边坡稳定性、节约工程用地、保护生态环境意义重大。为了对机场加筋高填方边坡加固方案进行优化设计, 本文以某机场跑道西北角的6#高填方边坡为例, 首先基于边坡的地质条件和高填方边坡的实际情况, 提出3种不同边坡坡率的加筋土边坡设计方案; 其次采用简化 Bishop 法、Spencer 楔形体法以及 Morgenstern-Price 法分别计算在天然、暴雨以及地震工况下的边坡稳定系数; 最后利用有限元法分析3种加固方案下的加筋土边坡在天然工况下的变形特征以及筋材轴力分布规律。结果表明: 3种设计方案在天然、暴雨以及地震工况下均能满足边坡稳定性要求, 贴坡填筑的多级加筋土边坡的筋材轴力分布规律沿着竖向呈现锯齿状分布, 最大筋材轴力在每级边坡的坡脚处突变增大。与加筋土缓坡(坡率1:1.5)设计方案相比, 加筋土挡墙(坡率1:0.25)在坡高、筋材使用量、护坡面积以及挖填方量等方面均有明显减小。综合考虑稳定性、工程造价以及施工周期, 采用加筋土挡墙的设计方案更合理。

关键词: 高填方边坡; 加筋土; 优化设计; 边坡稳定性; 有限元

中图分类号: TU432; TU472.3⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0113-09

Optimal design of the high geogrid-reinforced slope at the airfield of an airport

LIAO Hong¹, XU Chao^{1,2}, YANG Yang^{1,3}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Geogrid reinforced soil slope is a new type of slope supporting structure, which is of great significance for improving the slope stability, saving construction land and preserving the ecological environment. In order to provide the optimal design solution of the reinforced soil slope for high fill slopes, a case study is conducted on the No.6 slope at the northwest corner of the airport runway. Three design schemes with different slope ratios are carried out firstly based on the geological conditions of the slope and the field situation of the high fill slope. Secondly, the simplified Bishop method, Spencer wedge method and Morgenstern price method are used to calculate the stability factors of the reinforced slopes under the natural, rainstorm and earthquake conditions. Finally, the deformation characteristics of the slope and tensile force in reinforcements are investigated based on the finite element method under the natural conditions. The results show that all the proposed design schemes can

收稿日期: 2020-12-03; 修订日期: 2021-01-19

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2019492311)

第一作者: 廖鸿(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土工合成材料、岩土加固技术。E-mail: 1830162@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨阳(1988-), 女, 博士, 工程师, 研究方向为加筋土结构、岩土体测试技术。E-mail: 2011yang@tongji.edu.cn

meet the requirements of slope stability under different working conditions. A zigzag distribution of the tensile force in reinforcements in the multi-stage reinforced soil slope is observed along the slope height, and the maximum axial force of reinforcement increases abruptly at the toe of each slope. Compared with the design scheme of the gentle reinforced soil slope with the slope ratio of 1 : 1.5, the reinforced retaining wall with the slope ratio of 1 : 0.25 shows obvious advantages in reducing the slope height, consumption of geosynthetics, filling and excavation amount as well as slope protection area. The key issues including the slope stability, construction cost and duration are comprehensively considered, and the design scheme of the reinforced earth wall is reasonable.

Keywords: high fill slope; reinforced soil; optimization design; slope stability; finite element method

近年来,随着西部大开发战略的实施以及“一带一路”的建设,西部地区的各类交通设施如机场、高铁、高速公路等基础设施建设兴起,西部地区海拔高,地势陡峭,势必存在大量的高填方边坡工程^[1-3]。此外,山区复杂的地质条件以及地形的限制,许多高填方边坡无法进行自然放坡。在这种情况下,土工合成材料加筋土边坡可以发挥其因地制宜、减小坡率、提高边坡整体稳定性等特点,满足复杂地形地质条件下的工程要求,对于提高机场道面质量、节约工程用地、保护生态环境意义重大^[4]。若高填方边坡设计不合理会存在边坡失稳问题,边坡的失稳将严重影响机场、道路等基础设施的正常运营,造成极大的经济损失^[5]。如成昆铁路昔格达高填方路基工程^[6]、贵州茅台机场高填方边坡^[7]、四川攀枝花机场高填方边坡^[8]等均不同程度地出现了高填方边坡滑动失稳,严重影响交通安全。

目前,加筋土技术的相关研究还主要集中于稳定性分析、筋土界面特性、抗震性能等方面。张玮鹏等^[9]采用极限分析上限法和非线性莫尔-库仑屈服准则,研究了破裂面为对数螺旋线的加筋土边坡稳定性问题。徐超等^[10]通过振动台缩尺模型试验研究,证明土工合成材料加筋土柔性桥台复合结构具有良好的抗震性能。介玉新等^[11]利用离心模型试验和有限元强度折减法对加筋土边坡进行分析,研究加筋边坡平台分级的影响,结果表明合适的边坡分级能够充分发挥筋材的加筋效果。何江飞等^[12]利用有限元数值计算和现场监测数据分析了多级有限填土加筋土-框锚组合体系的抗滑作用效果。吴红刚等^[13]对高填方边坡桩-锚-加筋土组合结构协同工作性能进行研究,对比分析垫层对控制填土内部塑性协同变形发展及综合支护体系的影响。胡卫东等^[14]考虑了岩土材料破坏的非线性特性,采用非线性破坏准则和外切直线法,

引入极限分析上限理论,建立了更合理的加筋土坡临界高度的计算方法。Sunkavalli 等^[15]介绍了印度坎努尔国际机场跑道末端安全区-87 m 高的多级加筋土高边坡,并通过有限元分析了加筋边坡的稳定性问题。然而,对于加筋高填方边坡优化设计方面的研究还十分缺乏。对加筋高填方边坡进行优化设计,既要考虑复杂的地形条件、工程地质条件和水文地质条件,又要兼顾施工工期、填方量以及挖方量等因素,设计难度巨大。影响加筋土边坡工程造价和稳定性的因素很多,如何在保证工程安全的前提下考虑不同因素的作用,开展加筋土边坡的优化设计,成为高填方工程建设中的关键性技术问题。

本文以某机场合同标段的 6#加筋土高边坡为研究对象,根据研究区边坡的地质条件和填方边坡的实际情况,选择典型的边坡剖面,考虑地形、填方、挖方等多种因素,制定不同的设计方案,采用稳定性分析程序对 6#边坡典型剖面的不同设计方案在正常、暴雨以及地震等工况下进行稳定性验算,最后利用有限元法分析 6#边坡典型剖面的不同设计方案在不同工况下的变形特征及筋材轴力分布规律,并对加筋土高边坡的优化设计作出对比分析。研究成果将对机场高填方边坡建设具有一定的指导意义,为我国山区加筋土高边坡的建设提供借鉴。

1 工程概况

1.1 机场概况

该机场位于某市西南部、水阁工业园区南侧的区域,北接新建的工业园区,紧邻省道公路和高速公路,距市中心直线距离约 15 km(图 1)。机场飞行区等级为 4C,跑道长 2 800 m,机场设计标高为 159 m。研究区位于跑道西侧的高填方边坡处,填方体最大填方高度约为 80 m。



图1 研究点卫星地图示意图
Fig.1 Satellite map of the research site

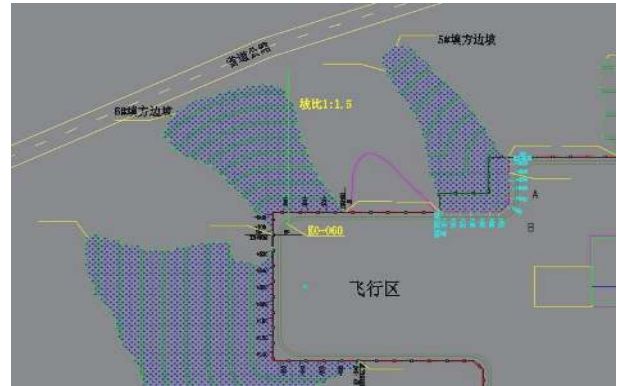


图2 6#填方边坡示意图
Fig.2 Satellite map of the NO.6 filled slope

1.2 研究区地形地质条件

机场场址区位于白垩纪断陷盆地边缘,地貌为低山丘陵与山麓沟谷,地形起伏变化较大,总体地势呈南高北低、西高东低状。根据机场详细勘察报告,高填方边坡区域的主要地层从上至下依次为:①强风化粉砂岩层,厚0.8~2m,碎石土状,遇水易软化,岩体节理裂隙发育,呈碎裂结构,结构面呈不规则状,岩石强度普遍较低;②中风化粉砂岩层,粉砂状结构,钙质、泥灰质胶结,局部含角砾,中厚—厚层状构造,节理较发育,属较完整—较破碎岩体,岩质较硬,工程性能好。

2 高填方边坡加固方案分析

2.1 高填方边坡典型剖面

选取研究区的6#高填方边坡作为研究对象(图2)。填方边坡坡脚紧邻省道公路,坡顶到坡脚水平距离160~210m,坡顶到坡脚最大高度约80m,该段边坡原始坡面较陡,地形坡度30°~45°,如边坡按坡率1:2.5自然放坡,坡脚线将跨过省道公路,故需对该边坡进行收坡处理,将坡率调整为1:1.5后可以满足地形红线要求。选取该6#边坡的K0+060典型断面作为计算剖面(图3)。坡率为1:1.5的填方边坡经稳定性分析验算发现稳定系数只有0.90,不满足民用机场设计规范的要求,必须对边坡进行加固以提高其稳定性。

2.2 岩土体及加筋材料物理力学性质

根据机场详细勘察资料,该填方边坡的基岩有强风化粉砂岩层和微风化粉砂岩层,其中强风化层厚小,强度低,微风化层埋深厚度大,岩体稳定性好,建议在填方边坡施工建设时将强风化层挖除,保证填方边坡的稳定性。因此模型计算时将基岩简化为微风化粉砂岩,填筑体为碎石土,根据详勘报告得到各土

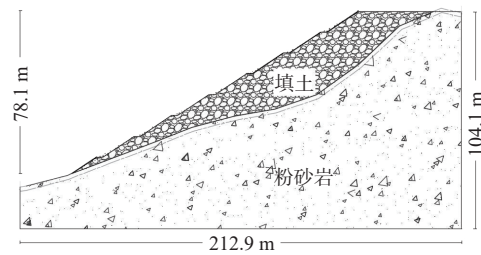


图3 高填方边坡 K0+060 断面图
Fig.3 K0+060 section of the high filled slope

层的岩土参数取值见表1。加筋材料选用2种单向土工格栅,极限抗拉强度分别不小于137kN/m(下文称“C型格栅”)和200kN/m(下文称“D型格栅”)。

表1 岩土体物理力学参数取值
Table 1 Calculation parameters of the slope soil layer

岩土体	重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
填土(天然)	21	0	34	50	0.25
中风化粉砂岩	26	600	37	37 000	0.20
填土(暴雨)	22	0	27	40	0.24

2.3 加筋土边坡加固方案

为了充分研究该机场加筋土高边坡的优化设计,根据边坡地形情况设计了3种不同坡率的加筋土边坡加固方案(图4)。方案一为加筋土缓坡,边坡高度78m,每级坡率为1:1.5,上方50m的边坡采用C型格栅,其余各级边坡采用D型格栅,主筋的加筋间距为2m,加筋长度20~50m,在主筋之间布置长度为10m的次筋进一步保护边坡坡面。坡顶为机场巡场道路,故坡顶5层筋材长度设计为30m,减小坡顶的不均匀沉降。方案二为加筋土陡坡,每级坡率为1:1.0,可以利用原地形地势条件,减小放坡距离,这样边坡最大坡高减小为50m,填方量减少,加筋边坡的筋材选用D型格栅,加筋间距1m,筋材长度30m。

方案三为加筋土挡墙,每级坡率为 1:0.25,该方案可以将边坡坡高减小为 40 m,填方量极大地减少,但是由于筋材铺设长度受限,需要对原边坡进行部分开挖处理。加筋土挡墙的筋材选用 D 型格栅,加筋间距 0.5 m,筋材长度 10~20 m。

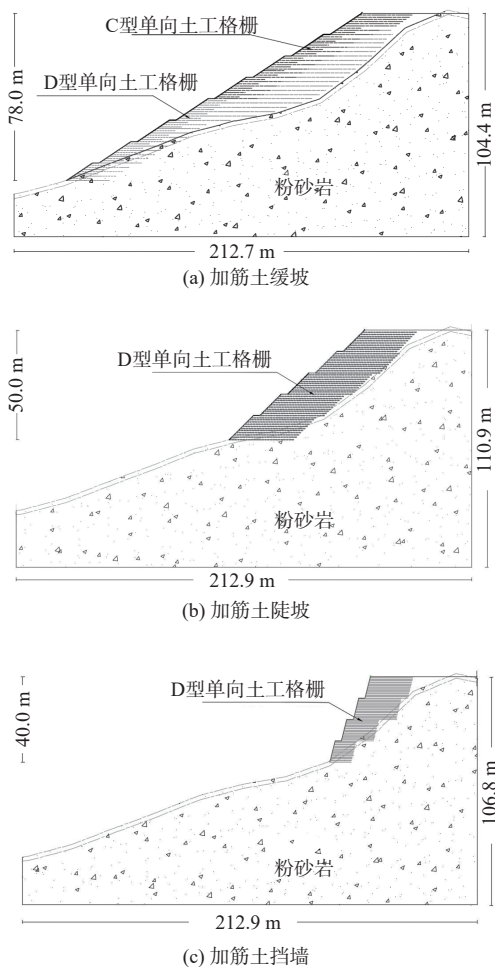


图 4 设计方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the design schemes

3 计算工况及稳定性分析

3.1 计算工况

根据《民用机场岩土工程设计规范》^[16],边坡稳定性分析需验算在天然工况、暴雨工况和地震工况下的稳定系数。根据该地区气象站测得数据推算,研究区域年平均降水量 1 432.6 mm,月平均雨日高于 15 d 的为 3—6 月,3—6 月平均总雨量占全年平均降水量的 49.7%。由于降水量大,需要考虑边坡的地表水入渗问题。根据刘杰等^[17]的研究成果,在暴雨工况下边坡的降雨入渗深度为 3 m。在地震工况下,抗震设防烈度为 VI 度,考虑机场工程的重要性,宜提高 1 度设计,

按 VII 度考虑。设计基本地震加速度值为 0.10 g,地震特征周期为 0.35 s。此外,研究区内地下水埋深较大,地下水补给来源为大气降水。由于边坡区填方料为碎石土,透水性较好,降水对地下水的影响较小,故暂不考虑地下水抬升对加筋土边坡稳定性的影响。由于本文所涉分析区域基岩为中风化粉砂岩,岩体工程性能好,且填方体与基岩的刚度差别较大,参考已有相近工况的研究^[3,5,13],不考虑基岩的层理与节理构造对填方边坡的影响。

3.2 稳定性计算结果

利用 ReSSA3.0 和 Geo-Studio 软件,分别采用简化 Bishop 法、Spencer 楔形体法和 Morgenstern-Price 法对加筋土边坡进行稳定性分析。简化 Bishop 法是目前工程中应用最广泛的一种非严格条分法,简化 Bishop 法没有考虑条块间竖向剪力的作用,且忽略了每一条块的力矩平衡条件,因此大大简化了求解计算量,Spencer 楔形体法和 Morgenstern-Price 法(简称 M-P 法)均需严格满足力和力矩的平衡条件,这两种方法可搜索出更加符合实际情况的边坡非圆弧最危险滑动面,计算结果更具合理性^[18]。加筋土高边坡稳定性计算结果参考值见表 2。

表 2 稳定性系数计算结果值
Table 2 Calculation results of the stability factor

设计方案	计算工况	稳定性系数		
		简化 Bishop 法	Spencer 楔形体法	Morgenstern-Price 法
加筋土缓坡	天然	1.38	1.35	1.53
	暴雨	1.35	1.33	1.37
	地震	1.23	1.22	1.27
加筋土陡坡	天然	1.43	1.37	1.59
	暴雨	1.40	1.35	1.53
	地震	1.27	1.23	1.38
加筋土挡墙	天然	1.30	1.31	1.38
	暴雨	1.28	1.27	1.31
	地震	1.19	1.15	1.20

根据《民用机场岩土工程设计规范》^[16],边坡安全系数在天然工况下取 1.30、暴雨工况下取 1.20 和地震工况下取 1.10。由表 2 的稳定性系数计算结果可知,3 种设计方案均符合安全系数要求。其中加筋土陡坡的稳定系数计算值略大于加筋土缓坡的稳定系数,加筋土挡墙的稳定系数计算值最小,而且地震对边坡稳定性的影响远大于暴雨的影响。另外,采用 M-P 法计算的稳定系数均大于简化 Bishop 法和 Spencer 楔形体法。

4 变形特征及轴力分布有限元分析

4.1 模型概况

采用 PLAXIS^{2D} 软件对边坡进行变形特征分析,各滑体及基岩材料均视为弹塑性材料,服从莫尔-库仑屈服准则,岩土体采用莫尔-库仑本构模型,岩土体物理力学参数如表 1 所示。土工格栅采用软件内置的土工格栅单元进行模拟,筋土界面采用接触面进行模拟,强度折减系数 R_{inter} 取 0.8,挡墙柔性面板采用板结构单元进行模拟。坡顶离临空面 5 m 处有 1 条机场巡场道路,路面宽 3.5 m,模型中采用板单元模拟沥青路面,施加 20 kPa 均布荷载等效为交通荷载。各结构单元材料具体参数见表 3。

表 3 各结构单元材料的模型参数表

Table 3 Structural parameters of each element

材料	轴向刚度 $EA/(kN \cdot m^{-1})$	最大轴向拉力 $N_p/(kN \cdot m^{-1})$	泊松比 μ	抗弯刚度 $EI/(kN \cdot m^2 \cdot m^{-1})$
C型土工格栅	2 120	137	/	/
D型土工格栅	3 300	200	/	/
挡墙柔性面板	1 100	200	0.3	0.015

模型示意图如图 5,为了减小边界条件对土体内部应力的影响,取边坡两侧伸展各 50 m 作为横向边界,下方基岩中风化粉砂岩强度较填筑体大,潜在滑面不会出现在基岩内部,且变形较小,故取向向下伸展 20 m 作为底边界。对该模型的底部设置完全固定边界条件,左边界和右边界施加水平约束。采用自由网

络划分法进行划分,其中网格类型为四边形或三角形,对边坡中易出现应力集中的坡脚进行局部细化,剖面共划分 2 436 个单元及 19 923 个节点。

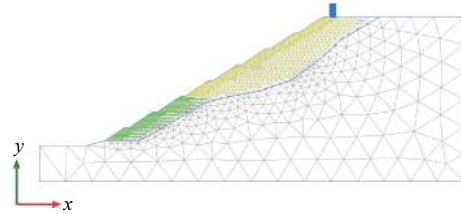


图 5 K0+060 断面有限元分析模型

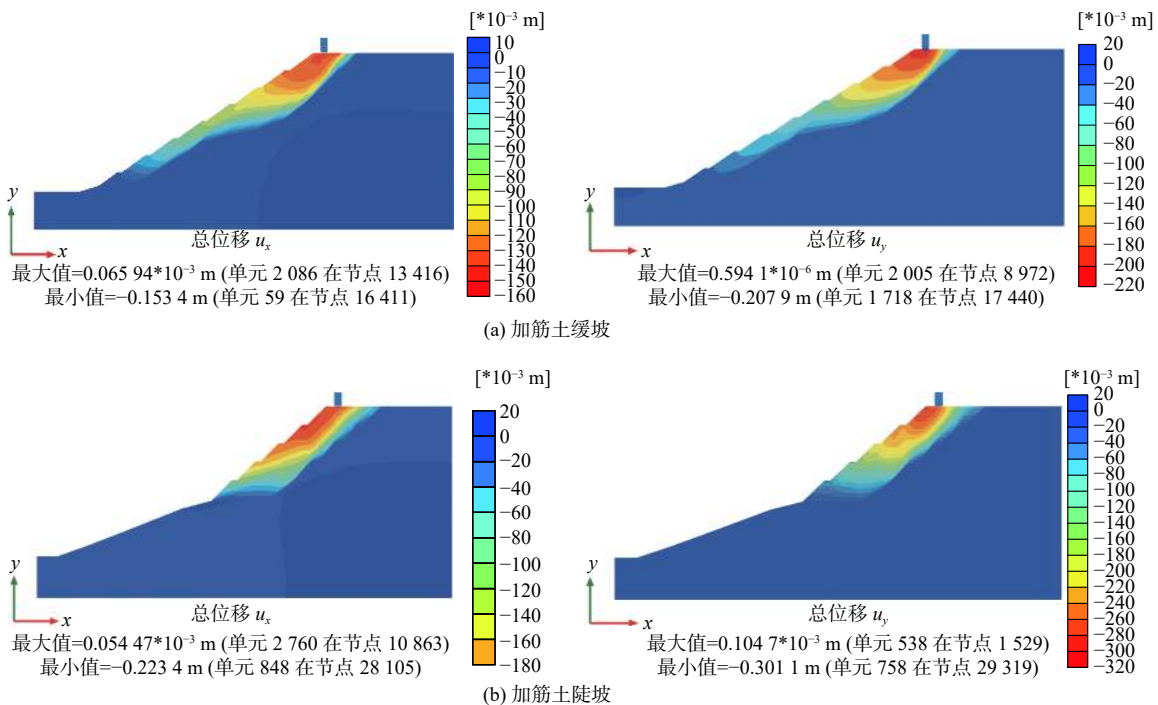
Fig. 5 Graphical representation of the finite element analysis model for K0+060 section

4.2 计算结果分析

基于有限元分析,通过对 K0+060 断面 3 种不同坡率的加固设计方案进行了工作性能研究,进而对 3 种方案的边坡体位移变形、稳定性、筋材轴力以及工程量等方面分别做出分析和评价。

4.2.1 不同加固设计方案的边坡变形情况

通过有限元计算得到的边坡位移情况如图 6 所示,通过对比 3 种加固设计方案的 X 方向和 Y 方向的总位移图发现,加筋土缓坡、加筋土陡坡和加筋土挡墙的最大水平位移和最大竖向沉降均发生在坡顶的临空面位置,最大水平位移分别为 153, 223, 192 mm,最大竖向沉降分别为 208, 301, 257 mm。加筋能够对填方体起到加固作用,控制了填土的侧向变形和竖向沉降。



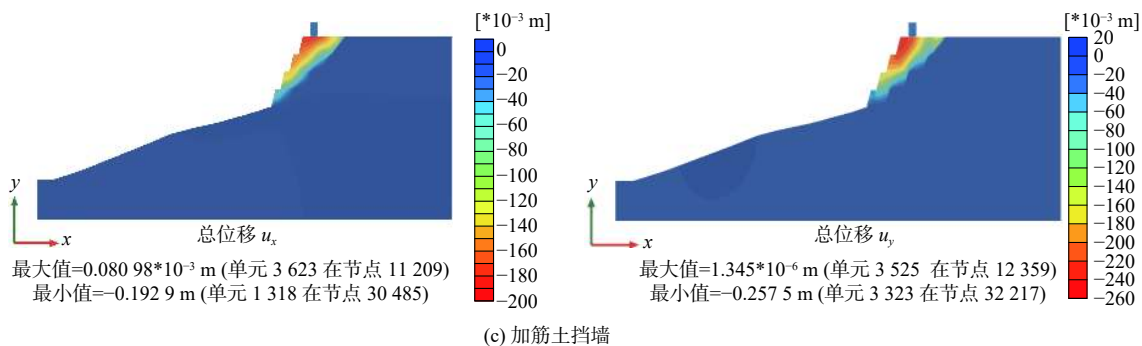


图 6 不同加固设计方案的边坡变形情况

Fig. 6 Deformation of slope in different design schemes

4.2.2 不同加固设计方案的边坡稳定性分析

图 7 为不同加固设计方案的边坡偏应变增量云图,从图 7 可知,加筋土缓坡和加筋土陡坡的剪切带大致位于填土区与原地形的界面处,可能发生软弱界

面滑移的风险;而加筋土挡墙在原坡面开挖台阶,没有明显的剪切带,说明在原坡面开挖台阶能降低填方体和基岩潜在软弱面的影响,有效地控制边坡剪切带的发展。图 8 为不同加固方案的坡顶道面沉降情况,加筋土缓坡的道面沉降最小,平均为 210 mm,加筋土挡墙的道面沉降量为 225 mm,加筋土陡坡的道面沉降最大,达到 275 mm,采用加筋土缓坡和挡墙的方案均能有效减小运营过程中道面的沉降。

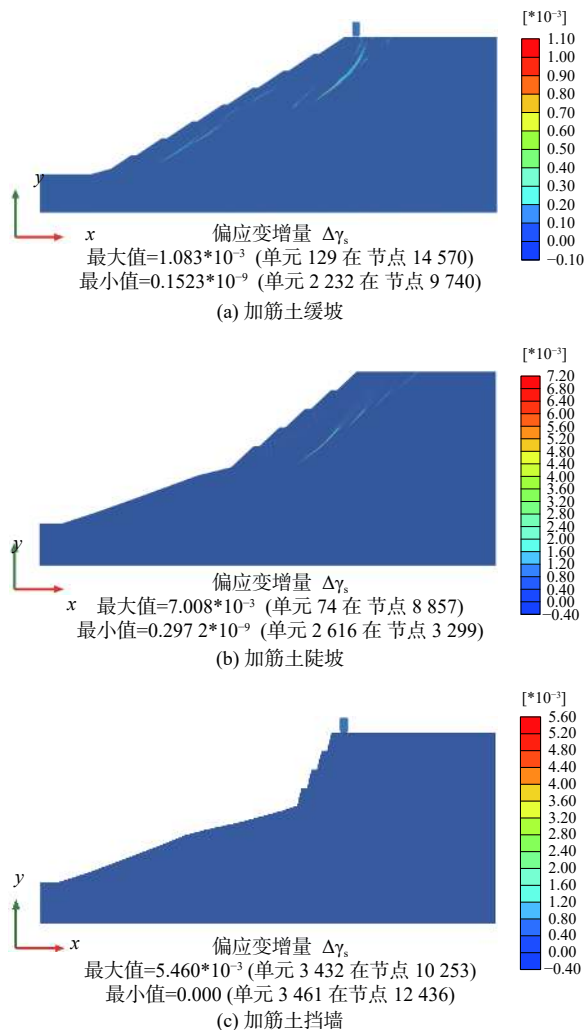


图 7 不同加固设计方案的偏应变增量分布情况
Fig. 7 Distribution of the strain deviation increment in different design schemes

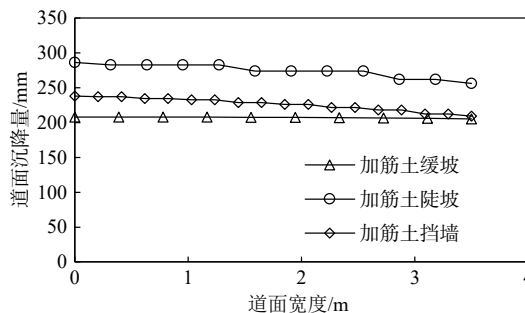


图 8 不同加固设计方案的道路路面沉降情况
Fig. 8 Road surface settlement of different design schemes

4.2.3 不同加固设计方案的筋材轴力分布情况

不同加固设计方案中各层筋材轴力的分布规律如图 9 所示。从筋材轴力的空间分布图发现,加筋土缓坡的最大筋材轴力基本分布在靠近填土-基岩界面一侧,和图 7(a)中的潜在剪切带相一致,进一步说明加筋土缓坡的设计方案存在填方体沿着填土-基岩交界面滑移的安全风险;加筋土陡坡的最大筋材轴力在边坡坡脚附近分布在靠近临空面一侧,而在边坡中上部分布在填土-基岩交界面一侧,两者近似于圆弧滑动面的形态;加筋土挡墙的最大筋材轴力空间上分布近似为圆弧形滑动面形态,经过坡脚和台阶的转角处。

将各层最大筋材轴力沿垂直方向上建立最大筋材轴力垂直分布图。可以看出,贴坡填筑的多级加筋土边坡的各层最大筋材轴力沿着垂直方向呈现先增

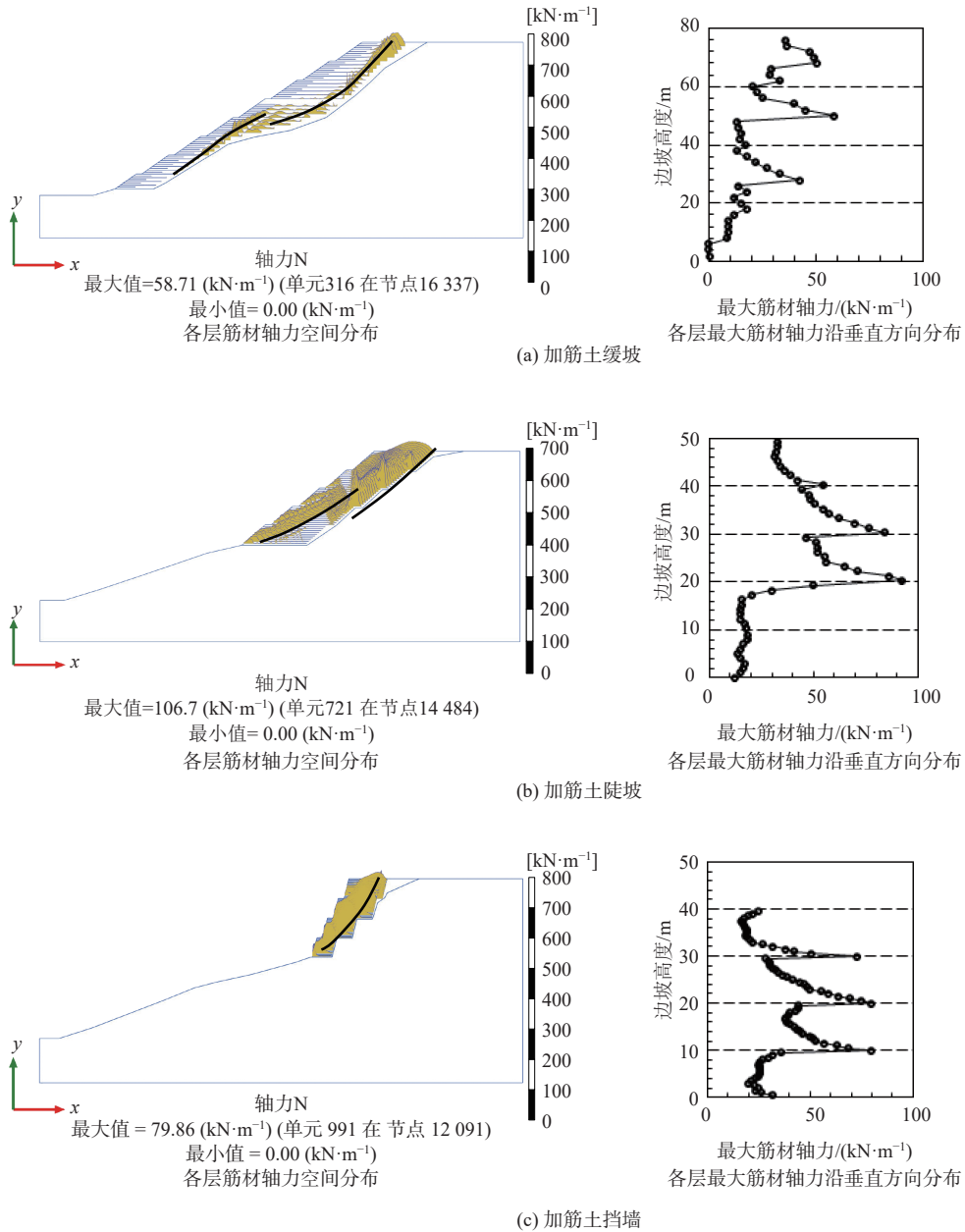


图 9 不同加固设计方案中各层筋材轴力分布情况

Fig. 9 Distribution of the axial force of reinforcement in different design schemes

大再减小的锯齿形变化趋势, 最大轴力主要分布在 1/3 坡高附近, 且最大筋材轴力在两级边坡相邻的位置发生突变增大。但加筋土缓坡的原坡面地形复杂, 该边坡上部分近似于一个多级加筋土边坡, 从最大筋材轴力的垂直方向分布上看, 基本满足先增大再减小的锯齿形变化趋势。

4.2.4 不同加固设计方案的工程量对比

通过 CAD 软件统计 3 种加固方案的填方量、挖方量、筋材使用量以及坡面防护面积等数据, 结果如表 4 所示。与加筋土缓坡的设计方案相比, 采用加筋

表 4 不同加固方案的工程量清单

Table 4 Engineering inventory of different design schemes

设计方案	坡高/m	填方量/ (m ³ ·m ⁻¹)	挖方量/ (m ³ ·m ⁻¹)	筋材用量/ (m ² ·m ⁻¹)	坡面防护面积/ (m ² ·m ⁻¹)
加筋土缓坡	78	2 714	268	1 570	162
加筋土陡坡	50	1 613	160	995	83
加筋土挡墙	40	718	100	1 300	50

土挡墙设计方案, 坡高可以减少 48.7%, 边坡体填方量减少 73.7%, 原始边坡的挖方量减少 62.7%, 坡面防护面积减少 69.1%, 筋材使用量减少 20.7%。结合实际工程经验可知, 采用加筋土挡墙设计方案, 工程的总造

价是最少的,而且工程量小,施工周期短,也能进一步降低劳动力成本。

5 结论

(1)采用土工格栅加筋土技术,根据地形条件设计的加筋土缓坡、加筋土陡坡和加筋土挡墙的设计方案在天然、暴雨以及地震工况下均能满足边坡稳定性要求。

(2)3种设计方案均呈现向临空面滑移的变形模式,其中加筋土挡墙的设计方案对原地形进行开挖台阶,利用良好的基岩持力层分担上部填土荷载,能够较好地控制填方体的变形。

(3)贴坡填筑的分级加筋土高边坡的筋材受力特点与传统的单级边坡不同。分级加筋土高边坡的最大筋材轴力沿着竖向分布呈现先增大再减小的锯齿形变化趋势,最大筋材轴力在边坡分级处发生突变,因此在山区复杂地形下贴坡填筑分级加筋土高边坡的设计方法需要进一步改善优化。

(4)综合考虑多种因素,采用加筋土挡墙设计方案能够极大减小填筑体高度、填方量、挖方量以及坡面防护面积,并缩短施工工期,降低工程造价,因此在该机场6#高填方边坡类似工况下,采用加筋土挡墙设计方案比贴坡分级加筋土高边坡更合理。

参考文献 (References) :

- [1] YAO Y P, QI S J, CHE L W, et al. Postconstruction settlement prediction of high embankment of silty clay at Chengde airport based on one-dimensional creep analytical method: case study[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(7): 1 - 8.
- [2] 李天斌,田晓丽,韩文喜,等. 预加固高填方边坡滑动破坏的离心模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(11): 3061 - 3070. [LI Tianbin, TIAN Xiaoli, HAN Wenxi, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of a pile-stabilized high fill slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3061 - 3070. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 吴志轩,张大峰,孔郁斐,等. 基-填界面开挖台阶对顺坡填筑高边坡稳定性影响研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(12): 90 - 97. [WU Zhixuan, ZHANG Dafeng, KONG Yufei, et al. Study on stability influence of high slope foundation-fill interfacial excavation steps[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(12): 90 - 97. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 何必伍,徐国元,黄文通,等. 碎石土混合料在加筋高边坡中的应用[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 52 - 60. [HE Biwu, XU Guoyuan, HUANG Wentong, et al. Application of gravel soil mixture to reinforced high slope[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 41(4): 52 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杨校辉,朱彦鹏,周勇,等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊2): 3977 - 3990. [YANG Xiaohui, ZHU Yanpeng, ZHOU Yong, et al. Time-space monitoring and stability analysis of high fill slope slip process at a airport in mountain region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup2): 3977 - 3990. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 丁文富,张广泽,宋章. 成昆铁路昔格达地层工程地质特性及对策研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(4): 1 - 5. [DING Wenfu, ZHANG Guangze, SONG Zhang. Research on the engineering geological characteristics and engineering countermeasures of xigeda strata of Chengdu-Kunming railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(4): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘小瑞. 贵州省茅台机场中部李家沟高填方边坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013. [LIU Xiaorui. Study on Lijia ditch high fill slope stability of the Guizhou Moutai airport central[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李江,张继,袁野,等. 高填方边坡多期次滑动机制研究——以攀枝花机场12#滑坡为例[C]// 2019年全国工程地质学术年会论文集. 北京:《工程地质学报》编辑部, 2019: 305-314. [LI Jiang, ZHANG Ji, YUAN Ye, et al. Research on multi-stage sliding mechanism of high fill slope taking the example of 12# landing in Panzhihua airport[C]// Proceedings of the 2019 national annual meeting of engineering geology. Beijing: Editorial Department of Journal of engineering geology, 2019: 305-314. (in Chinese)]
- [9] 张玮鹏,李冬冬,曾光辉,等. 非线性条件下加筋土边坡上限法的研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(6): 108 - 114. [ZHANG Weipeng, LI Dongdong, ZENG Guanghui, et al. Upper bound method for reinforced soil slopes under nonlinear Mohr-coulomb yield condition[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(6): 108 - 114. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [10] 徐超, 罗敏敏, 任非凡, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊1): 179 - 186. [XU Chao, LUO Minmin, REN Feifan, et al. Experimental study on seismic behaviour of reinforced soil flexible abutment composite structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(Sup1): 179 - 186. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 介玉新, 周诗博, 郭政豪, 等. 平台分级对加筋土边坡稳定性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1178 - 1187. [JIE Yuxin, ZHOU Shibo, GUO Zhenghao, et al. Centrifuge model tests and strength reduction method for influence of bench arrangement on stability of reinforced slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1178 - 1187. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 何江飞, 姚磊华, 马程昊, 等. 高陡黄土边坡多级有限填土加筋土-框锚组合体系抗滑分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 235 - 242. [HE Jiangfei, YAO Leihua, MA Chenghao, et al. Anti-slide analysis on composite system of multi-stage reinforced soil with limited backfill and frame foundation beam with anchor cable on high-steep loess slope[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(13): 235 - 242. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吴红刚, 牌立芳, 赖天文, 等. 山区机场高填方边坡桩-锚-加筋土组合结构协同工作性能优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1498 - 1511. [WU Honggang, PAI Lifang, LAI Tianwen, et al. Study on cooperative performance of pile-anchor-reinforced soil combined retaining structure of high fill slopes in mountainous airports[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1498 - 1511. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 胡卫东, 谭建辉, 曾律弦, 等. 变形协调条件下非线性破坏准则的加筋土坡临界高度上限解[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 45 - 51. [HU Weidong, TAN Jianhui, ZENG Lyuxian, et al. Upper bound solution of critical heights of reinforced soil slope based on the nonlinear failure criterion and compatibility of deformation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 45 - 51. (in Chinese with English abstract)]
- [15] SUNKAVALLI S K, JAIN B, TIPNIS M. Case study—A state of the art, reinforced soil slope system for runway end safety area at kannur international airport, India[C]// International Airfield and Highway Pavements Conference 2019. July 21-24, 2019, Chicago, Illinois. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2019: 382-393.
- [16] 中国民用航空局. 民用机场岩土工程设计规范: MH/T 5027—2013[S]. 北京: 中国民航出版社, 2013. [Civil Aviation Administration of China. Code for Geotechnical Engineering Design of Airport: MH/T 5027—2013[S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2013. (in Chinese)]
- [17] 刘杰, 曾铃, 付宏渊, 等. 土质边坡降雨入渗深度及饱和区变化规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 452 - 459. [LIU Jie, ZENG Ling, FU Hongyuan, et al. Variation law of rainfall infiltration depth and saturation zone of soil slope[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 452 - 459. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵婷, 王畅. 边坡稳定性分析方法及工程应用研究进展[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 196 - 203. [ZHAO Ting, WANG Chang. Slope stability analysis method and its engineering application[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5): 196 - 203. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞