

福建漳州某高速公路滑坡数值分析及加固治理研究

张帮鑫, 彭东明, 谭玲*, 黄子洋, 龙春宇, 李红卫

(招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘要:为治理某滑坡,基于现场勘察资料构建了边坡数值分析模型,以边坡特征点位移出现拐点为判据,采用强度折减法确定边坡天然工况稳定性系数为1.05,该边坡稳定性水平不满足工程规范要求,处于欠稳定状态。结合数值分析结果、专家现场分析意见及边坡加固措施的作用机理,确定了3种加固治理方案,方案1为“圆形抗滑桩+锚杆+截排水”,方案2为“方形抗滑桩+圆形抗滑桩+锚杆+截排水”,方案3为“方形抗滑桩+圆形抗滑桩+截排水”。基于有限元数值模型分析边坡岩土体、抗滑桩和锚杆的应力场、位移场及坡体稳定性系数变化,计算得到3种加固方案对应的边坡天然工况稳定性系数分别为1.39、1.28、1.18,分别较加固前提升了32.4%、21.9%、12.4%。经综合对比3种加固方案的加固措施和坡体应力、位移变化及其加固效果和经济性水平,综合确定方案1为最终加固方案。

关键词:边坡稳定性;抗滑桩;锚杆;截排水;滑坡加固

中图分类号:U417 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)04-0117-08

Numerical analysis and reinforcement management of a highway landslide in Fujian Zhangzhou

ZHANG Bangxin, PENG Dongming, TAN Ling*, HUANG Ziyang, LONG Chunyu, LI Hongwei
(China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd.,
Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to manage a landslide, a numerical analysis model of the slope was constructed based on the on-site investigation data, taking the inflection point of the displacement of the characteristic point of the slope as the criterion, and adopting the strength discount method to determine the stability coefficient of the natural working condition of the slope to be 1.05, it was determined that the stability level of the slope did not meet the requirements of the engineering specification, and it was in the state of under stability. Combined with the numerical analysis results, experts' on-site analysis opinions and the mechanism of slope reinforcement measures, three kinds of reinforcement and management programs are determined, Program 1 is "Circular anti-slip piles + anchors + intercepting and draining", Program 2 is "Square anti-slip piles + Circular anti-slip piles + Anchors + intercepting and draining", and Program 3 is "Square anti-slip piles + Circular anti-slip piles + Intercepting and draining". Based on the finite element numerical model to analyze the stress field, displacement field and slope stability coefficient changes of the rock and soil body, anti-slip piles and anchors, the stability coefficients of natural working conditions of the slope corresponding to the three reinforcement schemes were calculated to be 1.39, 1.28, and 1.18, which were 32.4% higher than those before

收稿日期:2024-04-10; 修回日期:2024-05-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.04.015

基金项目:国家重点研发计划项目“进藏通道突发地质灾害应急抢险监测救援技术及智能组件”(编号:2022YFC3002603);重庆市自然科学基金面上项目“基于土体强度分区各向异性及渗流耦合的边坡稳定性研究”(编号:CSTB2023NSCQ-MSX0878);新疆维吾尔自治区重大科技专项/重点研发任务专项项目“新疆公路边坡地质灾害空-天-地识别、监测与防控技术研究”(编号:2022B03033-2)

第一作者:张帮鑫,男,汉族,1997年生,工程师,交通运输规划与管理专业,硕士,主要从事边坡工程研究工作,重庆市南岸区学府大道33号山区道路工程与防灾减灾国家地方联合工程实验室,1071035068@qq.com。

通信作者:谭玲,女,汉族,1986年生,正高级工程师,道路工程专业,硕士,从事岩土工程研究工作,重庆市南岸区学府大道33号山区道路工程与防灾减灾国家地方联合工程实验室,381804359@qq.com。

引用格式:张帮鑫,彭东明,谭玲,等.福建漳州某高速公路滑坡数值分析及加固治理研究[J].钻探工程,2024,51(4):117-124.

ZHANG Bangxin, PENG Dongming, TAN Ling, et al. Numerical analysis and reinforcement management of a highway landslide in Fujian Zhangzhou[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 117-124.

reinforcement, and the stability coefficients of the natural working conditions were calculated to be 1.39, 1.28, and 1.18, which were 32.4% higher than those before reinforcement. Before the reinforcement, the stability coefficients of the natural working condition of the slope were 1.39, 1.28 and 1.18, respectively, which were 32.4%, 21.9% and 12.4% higher than those before the reinforcement; after comprehensively comparing the reinforcement measures of the three kinds of reinforcement schemes and the changes in the stress and displacement of the slope, as well as their reinforcement effects and economic levels, Scheme 1 was comprehensively determined as the final reinforcement scheme.

Key words: slope stability; anti-slip piles; anchors; intercepting and draining; landslide reinforcement

0 引言

边坡稳定性分析和加固治理是土木工程领域中的重要研究方向之一^[1-4],旨在确保边坡的安全稳定,降低地质灾害发生率。常用的边坡稳定性分析方法包括:工程地质分析法、类比法、数值分析法和不确定分析法等。而边坡加固治理是采取一系列工程措施提高边坡稳定性和防止边坡失稳破坏。常见的边坡加固治理措施包括:削坡减载、排水与截水、锚固措施、混凝土抗剪结构、支挡措施、压坡措施、植物框格护坡等。

国内外专家学者对于边坡稳定性分析和加固治理做了大量研究。在边坡稳定性分析方面,张文莲等^[5]提出了一种基于岩体抗压强度的广义Hoek-Brown准则强度折减法,并通过边坡稳定性分析验证了方法的可行性;CHEN Yifan等^[6]基于线性软化模型和加权平均假设,建立了一种新的边坡稳定性强度双折减计算方法;章瑞环等^[7]针对多级均质黄土边坡稳定性分析问题,提出了一种系统分析法,并通过工程实例验证了方法的可行性;苗朝等^[8]结合工程实例,分析了缓倾顺向斜坡的变形破坏机制;艾国栋等^[9]结合工程实例,利用物质点法模拟分析了天然和暴雨两种工况下边坡开挖后的变形破坏机制。在加固治理方面,陈冲等^[10]提出了一种复合单元抗滑桩模型,并结合工程实例验证了模型的可行性;张帮鑫等^[11]针对某滑坡分析了岩土体强度参数与边坡稳定性的敏感性关系及不同抗滑桩桩间距、桩长和桩位的边坡加固效果;刘中帅等^[12]对某滑坡进行了边坡稳定性分析,并对比了不同加固方案的加固效果;朱泳等^[13]采用强度折减有限元法,研究了桩位、桩长等因素对抗滑桩加固效果的影响;DENG Dongping等^[14]基于滑动面应力假设,推导了微型抗滑桩侧压力计算公式,分析了微型抗滑桩对边坡的加固效果;李乾坤等^[15]对抗滑短桩的受力特性进行了模拟研究,揭示了抗滑短桩加固滑坡的受力特性。

现有研究构建了许多边坡稳定性理论分析模型和技术方法体系,并结合实际工程得到了很好的验证,对边坡稳定性分析的技术发展具有重要的推动作用。但在现场资料与实验、模拟等手段的结合度方面存在不足,易导致分析结果与实际情况存在偏差,且缺乏多种加固方案比选分析,进而导致加固效果欠佳,形成潜在风险。

基于此,本文以现有资料为基础,针对福建省龙海市一边坡工程构建数值模型,分析边坡整体稳定性,提出和对比分析了3种加固方案,在验证方案可行性基础上确定了边坡的最优加固方案,该研究过程不仅克服了传统分析方法的局限性,并充分利用了现场资料和数值分析技术的优势,为边坡稳定性分析及加固治理提供了重要的参考思路。

1 工程概况

边坡位于福建省漳州市龙海市沿海大通道镇海至关头段,场地原始地貌属丘陵缓坡,地势平缓,坡度 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$,标高50~109 m,年降雨量1050~1300 mm。场地岩土层主要为杂填土、粉质粘土和玄武岩残积砂质粘性土及全、强风化岩,地下水主要为孔隙-网状裂隙潜水和基岩裂隙潜水。滑坡长约140 m、宽约125 m、平均厚度约4 m、总体积约70000 m³。勘察期间发现,裂缝逐渐扩大,暴雨天扩张加快,且持续处于活动状态,边坡全貌见图1。

2 边坡稳定性分析

2.1 参数确定及模型构建

以滑坡主滑面为研究对象,通过现场勘察得到主滑面地质构造如图2所示。室内外试验测取各岩土层物理力学参数如表1所示。

对主滑面构建有限元数值分析模型,由于边坡坡形不规则,采用三角形单元(Tri)进行划分时,网格出现畸形,导致计算不收敛,故采用四边形单元



图 1 边坡全貌

Fig.1 Overall view of the slope

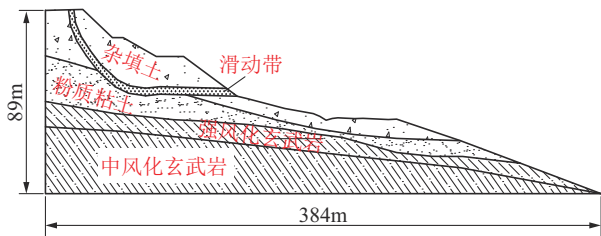


图 2 边坡地质构造

Fig.2 Geological structure of the slope

表 1 边坡物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the slope

类别	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	弹性模 量/MPa	泊松比
滑带土	18.2	6.5	26.7	19	0.3
粉质粘土	20	23	16.4	15	0.35
杂填土	18.2	8	28	20	0.17
强风化玄武岩	22	24	25	300	0.37
中风化玄武岩	24	40	72	1500	0.3
桩体	24	—	—	30000	0.2
锚杆	—	—	—	200000	0.35

(Quad)进行网格划分(如图 3 所示)。经 Mesh Verification 版块进行检查,网格不存在错误、重叠、未连接的边界或其他潜在问题,表明满足网格质量要求。对模型底面施加水平和竖向位移约束、左侧施加水平位移约束,其余边均为自由边界,边坡土体采用 CPE4 单元类型进行网格划分。

2.2 稳定性评价

通过计算得到边坡主滑面的竖向应力云图和位移云图如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出:边坡的正值竖向应力

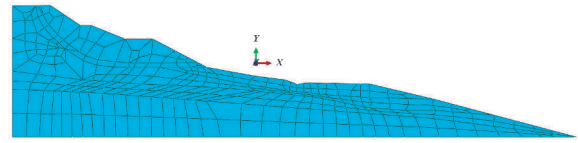


图 3 边坡数值模型

Fig.3 Numerical model of the slope

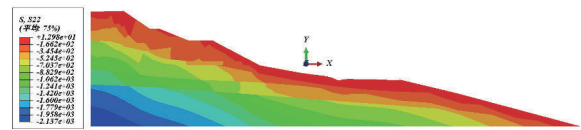


图 4 主滑面竖向应力云图

Fig.4 Vertical stress cloud of the main landslide surface

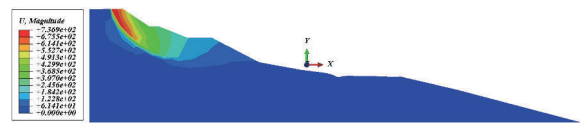


图 5 主滑面位移云图

Fig.5 Displacement cloud of the main landslide surface

主要集中在边坡表层的杂填土区域,而边坡的负值竖向应力主要集中在边坡内部,且大小由坡表向内部逐渐增大,层次明显。边坡的位移变形主要集中在滑带土及其上方的杂填土区域,整体分布于边坡上缘,最大位移变形量达 736.9 mm,表明边坡的整体稳定性较差,而其他区域的位移变形量较小。以边坡的台阶拐点为追踪点,利用数值软件后处理模块对追踪点创建 ODB 场变量输出,单元/节点选择台阶拐点,位置选择唯一节点,输出变量 x 轴选择预定义场变量(FV1), y 轴选择水平位移(U1),通过 xy 数据操作里面的 combine 函数绘制预定义场变量随水平位移的变化曲线,并以追踪点位移出现拐点作为边坡稳定性评价标准^[16-17],得到边坡的稳定性系数变化曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看出:边坡主滑面稳定性系数为 1.05,而工程勘察规范^[18]要求此类边坡在天然状况下稳定性系数为 1.2~1.3,显然不满足规范要求,需对边坡进行加固治理(图中对位移取负值仅为了将曲线以 x 轴为对称轴进行对称翻转展示)。

3 加固治理方案

3.1 治理方案布设

滑坡的常用加固措施包括挡土墙、锚杆(索)挡土墙、岩石锚喷支护、抗滑桩、锚固法、土质改良法

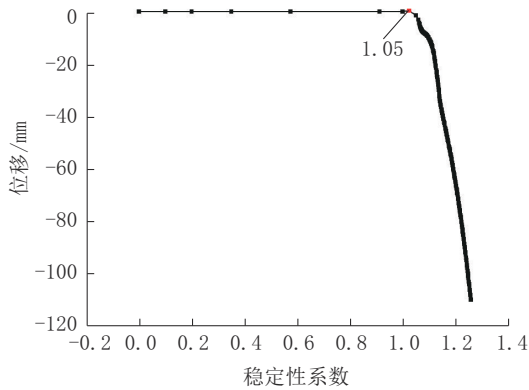


图6 边坡稳定性系数变化曲线

Fig.6 Stability coefficient variation curve of the slope

等,考虑该滑坡主滑面为坡体上部浅层杂填土和粉质粘土的局部滑动破坏,适宜采用抗滑桩进行坡体加固,其相对挡土墙、锚固法、土质改良法等更经济和布设便捷。考虑加固措施的长期有效性,抗滑桩加固法相对喷射混凝土更有效。将抗滑桩嵌固段布设于强风化、中风化玄武岩内可有效防止上部土层的滑动。

由于圆形抗滑桩相对方形抗滑桩的受力作用面积更小,在滑动区域布设圆形抗滑桩+锚索可有

效防止土层滑动,其作用效果为:布设于中部的圆形抗滑桩可对上部土体进行阻滑,且下部锚索对圆形抗滑桩下缘土体可进行固定并加固抗滑桩;在滑动区域布设方形抗滑桩+锚索也可有效防止土层滑动,其作用效果为:布设于上部的锚索对滑动土体进行初步稳固,配合下部受力作用面积更大的方形抗滑桩对滑动土体进行整体加固;在滑动区域的上中下部分别布设方形抗滑桩可实现滑动区域的分段阻滑,其作用效果为:利用上部抗滑桩进行第一阶段的阻滑和卸力,中部和下部抗滑桩分别进行第二阶段、第三阶段的阻滑和卸力。同时,为防止坡体下部区域滑动及雨水入渗降低岩土体抗剪强度,考虑经济成本和整体加固效果,在坡体下部布设圆形抗滑桩进行加固,并在坡顶增设截水沟,以实现边坡的综合加固。综合现场勘察、专家评审和加固前边坡的稳定性情况,最终确定了3种加固方案,方案1:圆形抗滑桩+锚杆+截排水;方案2:方形抗滑桩+圆形抗滑桩+锚杆+截排水;方案3:方形抗滑桩+圆形抗滑桩+截排水,在坡顶外2 m处设置矩形截水沟,采用C20素砼浇筑,具体方案布设如图7所示。

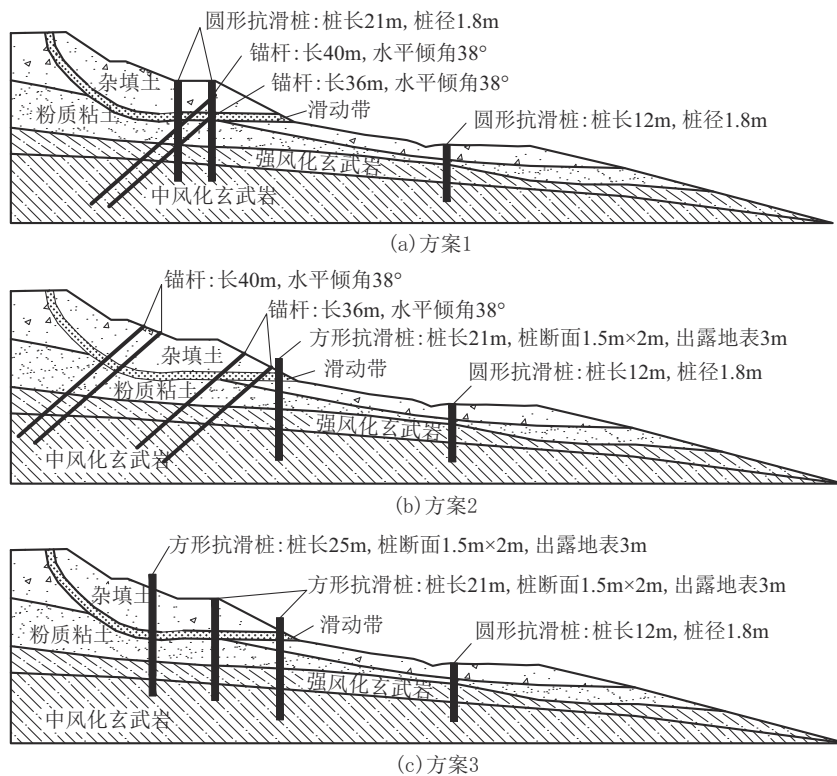


图7 边坡加固方案

Fig.7 Reinforcement Program of the slope

3.2 治理方案分析

构建加固后边坡有限元模型并进行数值分析,加固方案中所使用抗滑桩和锚杆的物理力学参数参见表 1。锚杆以桁架部件类型进行构建、抗滑桩以梁部件类型进行构建,均以内置的形式嵌入坡体进行分析。锚杆采用 T2D2 单元类型进行网格划分,抗滑桩采用 B21 单元类型进行网格划分。数值计算得到各加固方案对应的边坡竖向应力云图、位移云图如图 8 和图 9 所示。

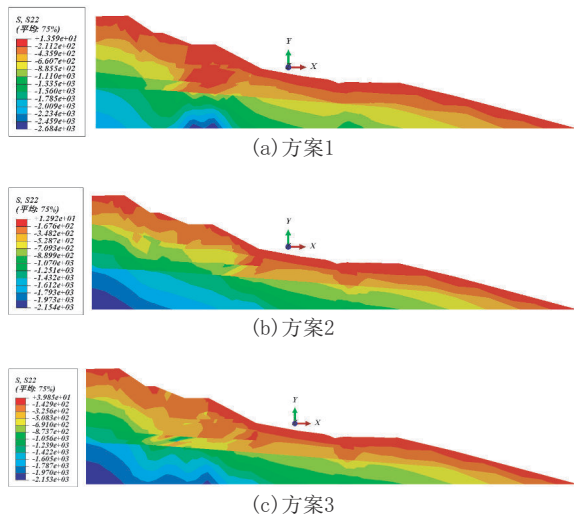


图 8 不同加固方案的边坡竖向应力云图
Fig.8 Slope vertical stress cloud of different reinforcement program

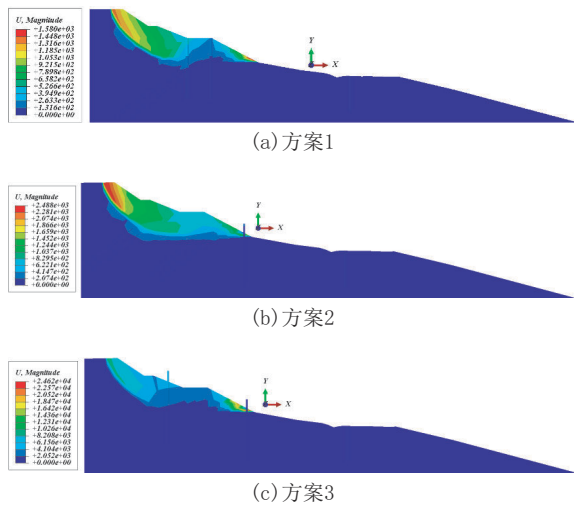


图 9 不同加固方案的边坡位移云图
Fig.9 Slope displacement cloud of different reinforcement program

从图 8 和图 9 可以看出:3 种加固方案中仅边坡表层杂填土的竖向应力为正值,其余土层均为负值,且最底部土层的竖向应力值最大,表明边坡表层土有向上的滑动挤压作用,边坡内部土层有向下的沉积作用,且沉积作用明显;3 种加固方案中方案 1 滑动区域最大应力为 13.59 Pa,方案 2 为 12.92 Pa,方案 3 为 39.85 Pa,表明方案 1 和方案 2 中表层土的向上滑动挤压作用较小且相近,方案 3 中表层土的向上滑动挤压作用较大;3 种方案的边坡滑动变形均集中在表层杂填土中,方案 1 整体位移最小,方案 2 整体位移最大,方案 3 整体位移居中,且各方案中所有加固措施周围均有明显的位移变形集中现象,表明 3 种加固方案均对边坡的滑动破坏产生了有效的阻挡作用,且方案 1 的加固效果最好,方案 2 次之,方案 3 最差。

锚杆变形前后的应力、位移云图如图 10、11 所示。从图 10 和图 11 可以看出:方案 1 中锚杆最大应力变形为 1.108×10^3 kPa,方案 2 中锚杆最大应力变形为 3.344×10^3 kPa,即方案 1 中锚杆所承受应力小于方案 2;方案 1 中锚杆整体位移变形小于方案 2,表明方案 1 中锚杆周围边坡土体破坏小于方案 2。

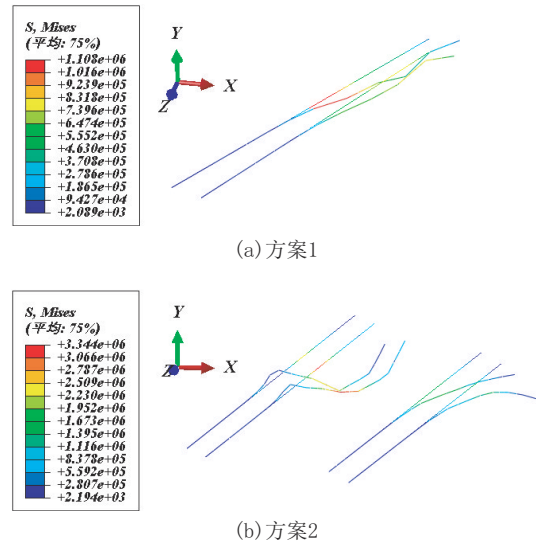


图 10 锚杆变形前后应力云图
Fig.10 Stress cloud before and after anchor deformation

抗滑桩变形前后的应力、位移云图如图 12、13 所示。从图 12 和图 13 可以看出:方案 1 中抗滑桩最大应力变形为 31.06 kPa,方案 2 中抗滑桩最大应力变形为 16 kPa,方案 3 中抗滑桩最大应力变形为

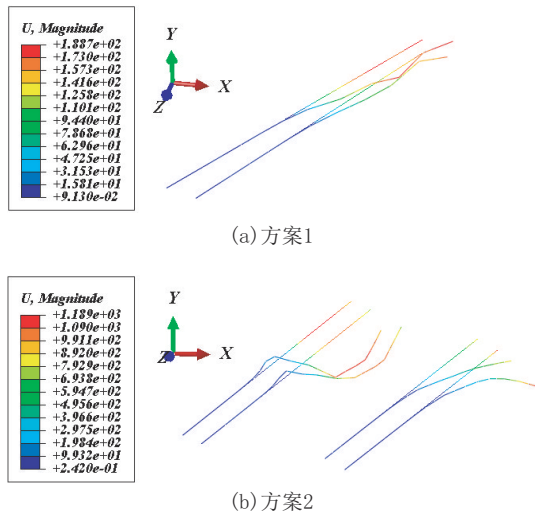


图 11 锚杆变形前后位移云图

Fig.11 Displacement cloud before and after anchor deformation

130.1 kPa,即方案3抗滑桩承受应力最大,方案1次之,方案2最小;方案1中抗滑桩最大位移为471.3 mm,方案2中抗滑桩最大位移为152.9 mm,方案3中抗滑桩最大位移为4809 mm。即方案3抗滑桩位移破坏最大,方案1次之,方案2最小。表明方案3中抗滑桩周围边坡土体破坏最大,方案1次之,方案2最小。

以边坡台阶拐点为追踪研究点,得到各加固方案下的边坡稳定性系数变化曲线如图14所示。从图14可以看出:加固后方案1对应的边坡稳定性系数为1.39,方案2对应的边坡稳定性系数为1.28,方案3对应的边坡稳定性系数为1.18,即方案1、方案2均满足规范中的加固要求,而方案3不满足。3种加固方案较加固前的1.05分别提高了32.4%、21.9%、12.4%,表明3种加固方案均有效提升了边坡稳定性。

3.3 治理方案评价

加固效果评价:应力云图显示,方案1滑动区域的最大竖向应力为13.59 Pa,相比方案2增加了5.19%,相比方案3减少了65.9%,表明加固后滑动区域的错动挤压程度为方案3>方案1>方案2,即方案1与方案2的抗滑效果相近,方案3的抗滑效果最差。位移云图显示,方案1滑动区域的整体位移最小,方案2最大,方案3居中,表明方案1的抗滑作用最有效。方案1锚杆的整体变形小于方案2,表明方案1中抗滑桩的承载受力大于方案2。方案1抗

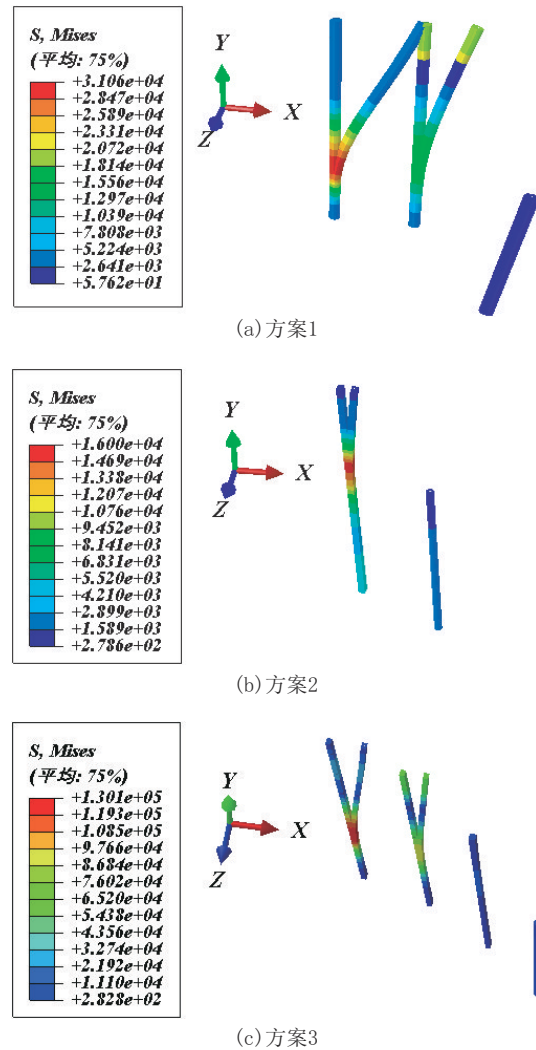


图 12 抗滑桩变形前后应力云图

Fig.12 Stress cloud before and after deformation of anti-slip pile

滑桩的最大应力变形为31.06 kPa,相比方案2增加了94.1%,相比方案3减少了76.1%,且抗滑桩最大位移为方案3>方案1>方案2,表明方案1抗滑桩产生的抗滑作用最有效,且桩体抗剪强度高。方案1整体稳定性系数为1.39,大于方案2和方案3。即整体加固效果为方案1最优。

经济性评价:由于3种方案均在坡体下部布设了等长和等桩径的圆形抗滑桩,其成本一致,即仅分析坡体上部方案的布设差异。方案1上部布设了2根21 m长的圆形抗滑桩和40、30 m长的锚杆,方案2上部布设了40 m长的2根锚杆、36 m长的2根锚杆及1根21 m长的方形抗滑桩,方案3上部布设了1根长25 m的方形抗滑桩和2根21 m长的方形

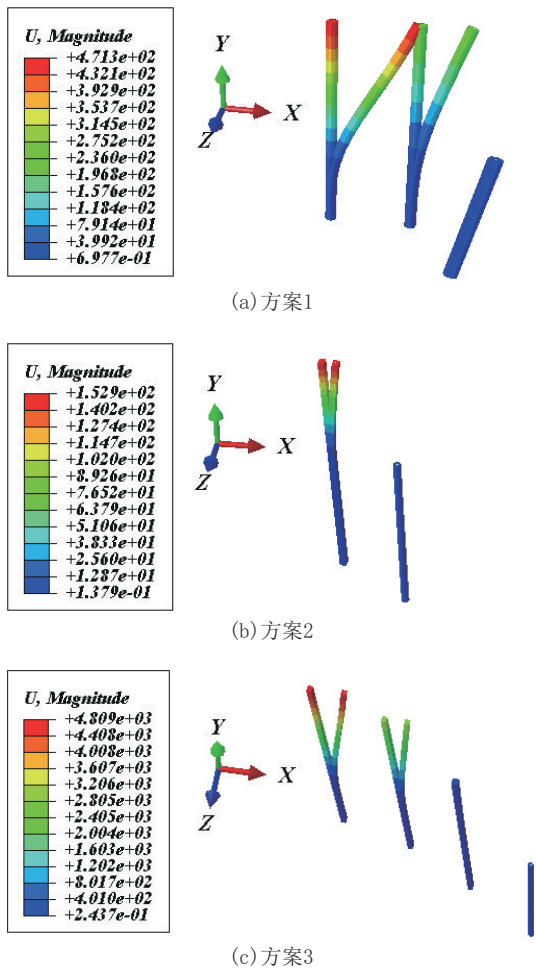


图 13 抗滑桩变形前后位移云图

Fig.13 Displacement cloud before and after deformation of anti-slip pile

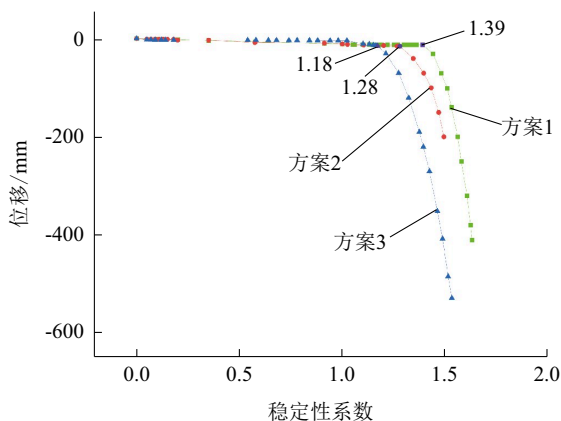


图 14 各加固方案下边坡稳定性系数变化曲线

Fig.14 Variation curve of slope stability coefficient under each reinforcement scheme

抗滑桩。材料成本方面,方桩>圆桩>锚杆,即方案 3 材料成本最高,方案 1 和方案 2 材料成本相近。

施工成本方面:方桩>圆桩>锚杆,即方案 3 施工成本最高,方案 1 次之,方案 2 最小。施工技术难度方面:锚杆>方桩>圆桩,即方案 2 施工技术难度最高,方案 3 次之,方案 1 最小,表明方案 1 的施工周期相对更短。整体经济性评价为方案 1 最优。

综合考虑 3 种加固方案的加固效果和性价比评价结果,推荐采用方案 1 进行边坡加固。

4 结论

(1)加固前边坡稳定性系数为 1.05,不满足规范要求,表明边坡处于欠稳定状态。

(2)3 种加固方案对应的边坡稳定性系数分别为 1.39、1.28、1.18,较加固前边坡稳定性系数分别提高了 32.4%、21.9%、12.4%,表明 3 种加固方案均有效提升了边坡稳定性。

(3)加固方案 1 和加固方案 2 对应的边坡稳定性系数均满足规范加固要求,而加固方案 3 不满足,综合考虑各方案中抗滑桩和锚杆的应力场、位移场变化及边坡加固效果和性价比评价结果,确定采用方案 1 为边坡的最终加固方案。

(4)本文以现场资料为基础构建数值分析模型,针对滑坡特点制定加固方案,综合现场资料和数值分析计算手段进行方案比选,以加固效果和性价比为评价指标确定最适宜加固方案,构建了一套完整的边坡稳定性分析及加固治理技术体系,对于类似浅层混合质实际边坡工程的滑动破坏可提供重要参考,技术体系可进行直接沿用。

参考文献 (References):

[1] 张勇,温智,程英建.四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J].水文地质工程地质,2020,47(2):178-182.
ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan [J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2020,47(2):178-182.

[2] 姜程,霍艾迪,朱兴华,等.黄土水力侵蚀-滑坡-泥石流灾害链的研究现状[J].自然灾害学报,2019,28(1):38-43.
JIANG Cheng, HUO Aidi, ZHU Xinghua, et al. Research status of loess hydraulic erosion-landslide-mudflow chain [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(1):38-43.

[3] 王东,李广贺,曹兰柱,等.含顺倾弱层边坡三维稳定性计算方法研究[J].中国安全科学学报,2019,29(3):95-101.
WANG Dong, LI Guanghe, CAO Lanzhu, et al. Research on method for calculating three-dimensional stability of slope with inclined weak-layers [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3):95-101.

- [4] 李乾坤, 苗朝, 程英建, 等. 川东巴中市恩阳区近水平土质滑坡破坏模式及专业监测预警[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 43-51.
LI Qiankun, MIAO Zhao, CHENG Yingjian, et al. Damage patterns of near-horizontal soil landslides and professional monitoring and warning in Enyang District, Bazhong City, East Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 43-51.
- [5] 张文莲, 孙晓云, 陈勇, 等. 基于岩体抗压强度折减的边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 607-615.
ZHANG Wenlian, SUN Xiaoyun, CHEN Yong, et al. Slope stability analysis method based on compressive strength reduction of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 607-615.
- [6] CHEN Yifan, LIN Han, WANG Yixian, et al. Modified Double-reduction method considering strain softening and equivalent influence angle [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(11): 3257-3266.
- [7] 章瑞环, 叶帅华, 陶晖. 基于改进极限平衡法的多级均质黄土边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 813-825.
ZHANG Ruihuan, YE Shuaihua, TAO Hui. Stability analysis of multistage homogeneous loess slopes by improved limit equilibrium method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 813-825.
- [8] 苗朝, 张勇, 李乾坤, 等. 基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型岩质滑坡破坏机制分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 11-17.
MIAO Zhao, ZHANG Yong, LI Qiankun, et al. The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 11-17.
- [9] 艾国栋, 李云青, 资丽君, 等. 天然和暴雨条件下的物质点滑坡变形机制分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 23-28.
AI Guodong, LI Yunqing, ZI Lijun, et al. Analysis of deformation mechanism of landslide under natural and rainstorm conditions based on material point method [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 23-28.
- [10] 陈冲, 王卫, 吕华永. 基于复合抗滑桩模型加固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3207-3217.
CHEN Chong, WANG Wei, LÜ Huayong. Stability analysis of slope reinforced with composite anti-slide pile model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3207-3217.
- [11] 张帮鑫, 贾剑青, 刘中帅, 等. 夏分边坡稳定性分析及其治理措施研究[J]. 兰州交通大学学报, 2023, 42(1): 9-15.
ZHANG Bangxin, JIA Jianqing, LIU Zhongshuai, et al. Research on the Stability Analysis of Xiafen Slope and Its Management Measures [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2023, 42(1): 9-15.
- [12] 刘中帅, 张帮鑫, 阎宗岭, 等. 井冈山G220滑坡实时监测与加固方案优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(S1): 42-47.
LIU Zhongshuai, ZHANG Bangxin, YAN Zongling, et al. Optimization study on real-time monitoring and reinforcement plan of G220 landslide in Jinggang Mountain [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(S1): 42-47.
- [13] 朱泳, 朱鸿鹄, 张巍, 等. 抗滑桩加固边坡稳定性影响因素的参数分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 833-840.
ZHU Yong, ZHU Honghu, ZHANG Wei, et al. Parametric analysis on factors influencing stability of slopes reinforced by anti-slide piles [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 833-840.
- [14] DENG Dongping, LI Liang, ZHAO Lianheng. Limit-equilibrium method for reinforced slope stability and optimum design of antislid micropile parameters [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(5): 1-5.
- [15] 李乾坤, 蔡强, 梁炯, 等. 滑坡抗滑短桩的受力特性模拟研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(5): 29-35.
LI Qiankun, CAI Qiang, LIANG Jiong, et al. Numerical simulation for mechanical characteristics of short anti-sliding pile [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 29-35.
- [16] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判断探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.
ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, ZHANG Yufang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332-336.
- [17] SUN Weijian, WANG Guoxin, ZHANG Leilei. Slope stability analysis by strength reduction method based on average residual displacement increment criterion [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4367-4378.
- [18] DB 50/143—2018, 地质灾害防治工程勘察规范[S].
DB 50/143—2018, Geological disaster prevention and control engineering survey specification[S].

(编辑 王文)