

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.113

引用格式: 罗本全, 王珀, 李顺成, 等. 中缅油气管道(国外段)G132滑坡成因机理及综合治理对策[J]. 中国地质调查, 2024, 11(4): 124-131. (Luo B Q, Wang P, Li S C, et al. The formation mechanism of G132 landslide in China - Myanmar oil and gas pipeline (Myanmar section) and its integrated control countermeasures[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(4): 124-131.)

中缅油气管道(国外段)G132滑坡成因机理及综合治理对策

罗本全¹, 王珀^{2*}, 李顺成², 徐江¹, 卢文晓², 黄锐²

(1. 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都 610072; 2. 中油国际管道公司, 北京 100029)

摘要: 为有效提高油气管道地质灾害综合治理水平, 结合中缅管道(国外段)G132滑坡的地质环境条件及近年来的滑坡持续变形特征, 采用工程地质分析方法, 详细分析研究沟道溯源引起的牵引式滑坡的成因机理, 制定适宜的综合治理对策。通过滑坡演化模式分析, 划分出沟道溯源牵引式滑坡演化的3个变形阶段, 即冲沟下切和斜坡变形阶段、牵引滑动变形阶段及整体滑动变形阶段。基于滑坡的变形特征、成因机理和演化模式, 针对性提出“分区分级支挡、拦源固床及截排结合”的工程综合治理对策, 并分步分级地逐一实施, 已经过多个汛期的考验, 取得了良好工程效果。研究对控制和减少油气管道地质灾害、保护中缅管道安全运营具有一定意义, 也可为将来类似沟道溯源引起的牵引式滑坡治理提供一定的参考和借鉴。

关键词: 中缅管道; 若开山山地; 沟道溯源; 成因机理; 治理对策; 树根桩排导槽

中图分类号: P694; TV211.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2024)04-0124-08

0 引言

中缅油气管道是继中亚油气管道、中俄原油管道、海上通道之后的第四大能源进口通道, 西南起自缅甸西海岸的皎漂海岸带, 途经缅甸的若开邦、马圭省、曼德勒省、掸邦, 从云南瑞丽进入中国。由于复杂的地质环境条件、气象水文条件, 受汛期强降雨及洪水的影响, 中缅油气管道沿线出现了大量的地质灾害, 尤其以滑坡居多。其中, 位于缅甸若开山地的G132滑坡为中缅油气管道国外段规模最大的滑坡。中缅油气管道横坡敷设于半挖半填形成的作业带斜坡, 作业带附近冲沟连年扩大、下切, 沟道溯源现象明显, 沟道岸坡深切形成高陡临空面, 坡体前缘发生滑裂变形破坏, 从而牵引斜坡滑动变形, 最终形成牵引式滑坡。对于滑坡问题, 业

内专家学者从成因机理、破坏模式及阶段演变等方面进行了大量的深入分析和研究^[1], 例如: 卿三惠等^[2]在滑坡形成机理及防治对策中提出了切实贯彻“预防为主、防治结合、综合治理”的防治方针; 刘传正^[3]在南昆铁路八渡滑坡的成因机理分析中, 认为八渡滑坡具有“前缘卸荷牵引”和“后缘加载推移”复合式滑坡特征。还有一些学者和研究机构对牵引式滑坡的机理和治理措施进行了研究, 例如: 王忠禹等^[4]对牵引式滑坡的特征和形成机理进行了综合研究; 陈文胜等^[5]采用条分法对牵引式滑坡破坏机理进行了研究; 孙立娟^[6]对牵引式滑坡的失稳机理和演化过程进行了系统分析; 李效萌等^[7]对积土质牵引式滑坡的稳定性和破坏模式进行了分析; 李晓龙^[8]对牵引式滑坡的稳定性和加固措施进行了分析研究; 苏冬九^[9]对牵引式滑坡数值模拟和治理措施进行了研究。由此可知,

收稿日期: 2024-01-12; 修订日期: 2024-04-07。

基金项目: 四川省地质工程勘察院集团有限公司“中缅油气管道(国外段)G132滑坡治理工程项目(编号: G13220200707)”资助。

第一作者简介: 罗本全(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质、灾害地质、岩土工程及水利水电建筑等勘察设计工作。Email: 754133642@qq.com。

通信作者简介: 王珀(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事长输油气管道完整性管理工作。Email: po.wang@cnpc.com.cn。

牵引式滑坡情况复杂多变,有关沟道溯源引起的牵引式滑坡研究较少,具有较好的研究价值。本文结合中缅管道(国外段)G132 滑坡的地质环境条件及近年来滑坡持续变形特征,采用工程地质分析方法,详细分析研究沟道溯源引起的牵引式滑坡的成因机理,并制定适宜的综合治理对策。研究对控制和减少管道地质灾害,保护中缅管道安全运营具有一定意义,也可为将来类似沟道溯源引起的牵引式滑坡成因机理分析及治理提供一定的参考和借鉴。

1 地质背景

G132 滑坡位于缅甸马圭省和若开邦交界处若开山区中部山脊带,属于构造侵蚀中低山地貌区,下蚀作用强烈,山高谷深,地形起伏变化很大。滑坡区西邻孟加拉海,受潮湿的印度洋季风调节,属热带季风气候带。就降雨量而言,除5—10月雨季大量降雨外,其余时间降雨量极少。滑坡区年降雨量一般在2 000 mm以上,其中80%以上集中于5—10月。

滑坡区总体地势南高北低,斜坡顶部高程约1 060 m,底部切割较深,沟底距离顶部高差大于100 m。滑坡区东、南、西三侧均高于北侧,三面高一面低,利于水流汇聚。滑坡体左右两侧均发育季节性冲沟,冲沟延伸至斜坡坡脚。斜坡坡体上部发育数条小型冲沟。中缅管道横坡敷设,从西侧山脊顶部通过斜坡中上部缓坡平台处,由东侧回到另一侧山脊近顶部。

滑坡区地层主要有第四系全新统人工填土层(Q_4^{ml})、滑坡堆积层(Q_4^{del})、残坡积层(Q_4^{el+dl})和三叠系(T)。滑坡区位于若开山西麓断褶带,该断裂带属于全新世地震活动性较弱的构造带。根据野外调查和钻探揭露,区内地下水主要为第四系松散堆积层孔隙水及基岩裂隙水。滑坡区内地下水埋深6.7~15.2 m,埋深相对较大,沿冲沟边侧有渗出排泄现象,多呈滴状。

2 滑坡发育特征

G132 滑坡于2016年以前就陆续发生轻微地表变形,左侧沟道下段出现冲刷、下切,岸坡垮塌。滑坡区边界明显,大致以冲沟为界。由于受地形控制,滑坡前缘山脊形成阻滑带,导致滑坡前缘沿主

滑方向以拉链式分别沿山脊向两侧扩散,形成两个分区,即I和II区(图1)。滑坡范围在平面上大致呈不规则扇形,上窄下宽,其中:I区滑坡面积约 $1.413 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体体积为 $26.14 \times 10^4 \text{ m}^3$;II区滑坡面积约 $1.31 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体体积为 $12.445 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。G132 滑坡属中型滑坡。



图1 滑坡区地形地貌及变形分区

Fig.1 Landform and deformation zoning of the landslide areas

为保护中缅管道安全运营,2016年在滑坡I区后缘管道外侧,平行于管道修建了一排抗滑桩,并沿管道作业带修建了一条截排水沟,将斜坡地表汇水导入天然冲沟内。2017年汛期,既有抗滑桩桩前地面发生下滑变形,左侧沟道下切加剧,沟道溯源明显,对既有抗滑桩桩间增设了桩间挡板,防止了作业带水土流失,在左侧沟道内修建了树根桩排导槽,极大减轻了左侧沟道溯源问题。同时,在滑坡II区,中缅管道仍从该滑坡后缘通过,为保护管道安全运营,2017年底在滑坡II区后缘修建一排抗滑桩及一条截排水沟。

近年来,滑坡I区、II区既有抗滑桩未见明显变形,但桩前滑坡仍在继续变形,尤其是在汛期相对强烈,主要表现在两个方面:其一,滑坡I区抗滑桩桩前出现明显错落,错落高度达6~7 m,导致绝大部分抗滑桩上部裸露(图2,图3),但桩后无明显变形迹象。经过近年来连续监测,滑坡I区、II区既有抗滑桩整体稳定性均较好,未发现明显变形迹象,保证了桩后中缅管道安全运营;其二,在滑坡中前部新近形成两条深大拉槽,最大槽深达7 m,从而在滑坡体内形成新的沟道侵蚀。虽然近年来陆续在拉槽内采取了修建数道淤土坝固床压脚等水工保护措施,起到了减缓拉槽发展速度的作用,但均未对桩前滑坡采取针对性治理措施。



图2 滑坡后缘错落坎

Fig. 2 Staggered ridge at landslide trailing edge



图3 滑坡前缘已建树根桩排导槽

Fig. 3 Root pile drainage canal at the landslide front edge

据钻探揭露,滑坡区上部松散堆积体厚度较大,且厚度变化也较大,基覆界面处的碎石土受坡面水流的侵蚀而软化,含水量较高,土质软弱、松散,局部细颗粒富集,为潜在滑动面(带),形态呈近似弧线的折线形,具有上陡下缓的特征。纵向上,滑体中部较厚,一般为18.0~28.5 m,前缘与后部较薄,厚度为1.0~12.5 m;横向上,滑体中间厚,右侧次之,左侧较薄。

主滑体物质以角砾土、碎石土、块石土为主,粗颗粒母岩主要为强风化板岩。基覆界面部分泥质富集,为滑带土,表现为含碎石、角砾粉质黏土特征,含水量较高,呈可-软塑状。滑床为三叠系板岩,节理裂隙极发育,岩体破碎。

3 滑坡影响因素及形成机理

3.1 滑坡影响因素

影响滑坡稳定性的因素包括内在因素和外在

因素。其中内在因素包括滑坡区地质构造、地形地貌、地层岩性,外在因素包括降雨、地表水活动、地震及人类工程活动的作用。内在因素是影响滑坡稳定性的主控因素,而外在因素则为促成滑坡的诱发条件。

(1)地质构造。滑坡区属于若开山褶皱带,为印度板块与缅甸板块在中新世碰撞后逐步形成的增长楔。受构造影响,区域内岩体构造节理裂隙与风化裂隙发育,风化壳厚度大,岩体多破碎。

(2)地形地貌。其一,滑坡区属于构造侵蚀中低山区斜坡近顶部,滑坡两侧均发育较大季节性冲沟,呈“V”字型,上宽下窄,顶宽10~30 m,深5~20 m,两条冲沟向滑坡北侧延伸并汇合,斜坡空间上呈凹面状,为地表水汇集、入渗提供了地形条件;其二,滑坡两侧冲沟由上而下,切割深度随之增大,沟底距离顶部高差大于100 m,冲沟受水流冲刷、侵蚀及下切,为滑坡提供了临空条件;其三,滑坡区地形起伏较大,坡度一般为20°~40°,局部可达60°,在前缘临空的情况下导致斜坡下滑力增大,为滑坡的产生提供了势能条件。

(3)地层岩性。滑坡区上覆土层为角砾土、碎石土及块石土,粗颗粒母岩主要以强风化板岩为主,厚度变化大。滑体与下伏基岩的接触带为厚度不一的含碎石、角砾粉质黏土,含水量较高,呈可-软塑状,为相对软弱层。下伏的强风化板岩,由于受构造影响,节理裂隙极发育,岩体破碎,有利于地下水沿基覆界面及裂隙渗透,软化基覆界面处土层,不利于上覆土层的稳定。

(4)降雨。滑坡区年平均降雨量2 000 mm以上,雨量充沛,80%降雨量集中在5—10月的汛期。降水渗入土体,一方面使土体饱和,增加了滑体的容重,使其下滑力增大,另一方面,地下水软化基覆界面处土体,使其抗剪强度降低,抗滑力减弱,继而形成滑动带(面),使坡体产生变形滑动。

(5)地表水活动。滑坡区雨季漫长,降雨量大,降雨后汇集形成的地表水顺沟道而下,对滑坡区前缘季节性冲沟进行冲刷、侵蚀,致使冲沟进一步侵蚀溯源,冲沟两侧形成高陡的斜坡,导致滑坡前缘进一步临空,为滑坡提供了临空条件。

(6)地震。在地震力的反复振动冲击下,斜坡岩土体结构遭受破坏,斜坡坡体的原有结构面出现张裂、松弛,从而使斜坡岩土体强度降低,并易沿结

构面发生位移变形,直至破坏。此外,在地震中形成的地震裂缝,又成为降雨和地表水入渗的有利通道。

(7)人类工程活动。滑坡区主要的人类工程活动为敷设管道,管沟回填很难使土体完全夯实,为地表水注入滑坡体提供了十分有利的条件。

综上所述,斜坡区的松散堆积体为滑坡提供了物质基础,较陡的地形为滑坡提供了临空条件和势能条件,降雨入渗导致土体饱和、容重增加、抗剪强度降低,这些是滑坡形成的主要诱发因素。地震会破坏斜坡坡体结构,降低岩土体强度,人类工程活动也为地表水注入滑坡体提供了条件,地表水活动进一步侵蚀沟道,导致滑坡前缘进一步临空,为滑坡提供了临空条件。以上多个因素的综合作用导致该滑坡的形成及发展。

3.2 滑坡成因机理

牵引式滑坡一般经历坡脚冲蚀^[10],导致前缘失稳并逐渐向后扩展。该滑坡左右两侧均有季节性冲沟,汛期降雨,冲沟冲刷岸坡,沟道下切,引起沟道溯源,岸坡形成高陡斜坡。高陡斜坡形成较高临空面,有利于斜坡上松散滑体的滑动变形,是牵引式滑坡的先天条件^[11]。受水流冲刷淘蚀,斜坡逐级牵引后退,滑坡Ⅰ区后缘形成高约6 m的错落坎,滑坡中部可见少横向量裂缝,大致平行于等高线,裂缝延长1~3 m,裂缝宽为10~30 cm,深一般为0.2~0.5 m。滑坡Ⅱ区后缘形成高约1.5 m的多级错落坎,滑坡中部横向裂缝发育,裂缝延长3~8 m,裂缝宽10~50 cm,深0.3~0.5 m,局部纵向裂缝发育,延长约20 m,形成高1~3 m多级错落坎,前缘滑动后受水流冲刷,部分滑坡堆积体已经被水流带走。该滑坡处于蠕动变形阶段,还未整体滑动,综合判定该滑坡为沟道溯源引起的牵引式滑

坡,其成因机理具体分析如下。

首先,滑坡区位于缅甸若开山地区,大气降水极丰富,年降雨量在2 000 mm以上。滑坡区地形起伏大,降雨后汇集形成的地表水受地形控制,水流顺沟道而下,流速大,对滑坡区前缘季节性冲沟进行冲刷、侵蚀,导致滑坡前缘进一步临空,并对滑坡后缘造成牵引卸荷。

其次,滑坡区的第四系松散堆积层结构松散、厚度较大,有利于地下水径流、赋存。加之在斜坡后部横坡敷设管道,管沟开挖回填未完全夯实,降雨后管沟起到了汇集地表水的作用,使得地表水很好地渗入斜坡土体中,不断软化基覆界面处的含碎石、角砾粉质黏土,降低其抗剪强度和抗滑力。继而在暴雨作用下,斜坡土体进一步饱和,使得斜坡土体的容重进一步增加,增加了下滑力,以致下滑力大于抗滑力,从而产生滑坡。

该滑坡演化过程大致可分为3个阶段,分别为冲沟下切和斜坡变形阶段、牵引滑动变形阶段及整体滑动变形阶段。滑坡区原为若开山山地,坡体的原始应力状态未发生大的改变。随着中缅管道的建设,坡体受到扰动,加上冲沟下切,前缘斜坡临空,坡体原始应力发生分异现象,即冲沟下切和斜坡变形阶段(图4(a))。宏观上出现前缘坡体滑裂变形破坏,并逐渐牵引后退,导致后缘相继沿软弱带向临空面形成“塔状”滑动,地面位移变形和破坏程度逐渐加剧,地面呈阶梯状,此时滑面断续形成,未完全贯通,即牵引滑动变形阶段(图4(b))。坡体前缘滑裂破坏加剧,前缘坡体线后退严重,后缘常形成多级阶坎或平台,滑裂面基本扩展贯通,即整体滑动变形阶段(图4(c))。该滑坡成因机理为由沟道溯源引发斜坡前缘滑裂变形破坏,继而牵引斜坡中后部滑动变形,最后贯通滑面,形成整体牵引式滑动。

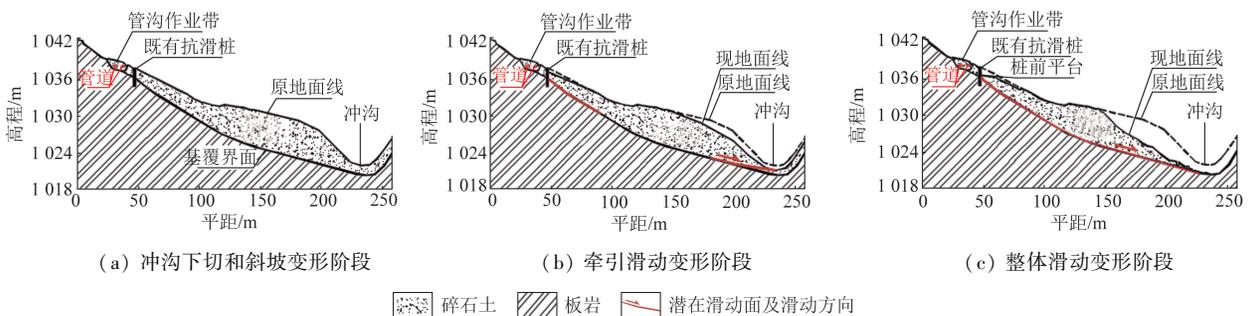


图4 牵引式滑坡成因机理演化阶段

Fig.4 Evolution stage of the formation mechanism of retrogressive landslides

4 滑坡稳定性评价及防治对策

4.1 滑坡稳定性评价

根据滑坡形态特征、力学条件、稳定性评价、潜在危害及保护对象等进行综合治理工程布置,确保滑坡在工程运行年限内,在天然和正常外界因素如暴雨等的作用下,不发生整体变形破坏,避免其对滑坡后缘中缅油气管道的安全运营造成威胁。

目前 G132 滑坡区域已实施多种永久性工程和临时性工程,其中:永久性工程包括管道外侧已建抗滑桩、抗滑桩桩后已建截排水沟及下游沟道内淤土坝;临时性工程包括滑坡后缘已建抗滑桩桩前平台 PE 膜、滑坡左侧前缘草袋木桩回填、滑坡左侧已建抗滑桩桩前钢管桩等。

对管道外侧已建抗滑桩建立模型进行稳定性复核计算(图 5),考虑桩前滑坡后期会继续下滑变形,桩结构未考虑桩前土体的作用,通过计算得知,已建抗滑桩现状稳定性为:在天然工况下,稳定系数为 1.27;在暴雨工况下,稳定系数为 1.15;在地震工况下,稳定系数为 1.10。说明已建抗滑桩在天然及暴雨工况下稳定性均较好,在地震工况下处于基本稳定状态,抗滑桩安全性有一定保证。从现阶段看,桩前平台下滑尚未达到抗滑桩嵌固深度处,因此认为该抗滑桩目前对管道保护仍有效。但桩前滑坡继续下滑变形及降雨渗水会进一步软化抗滑桩嵌固段,从而逐步降低抗滑桩的稳定性,对桩后中缅管道的安全运营造成威胁。

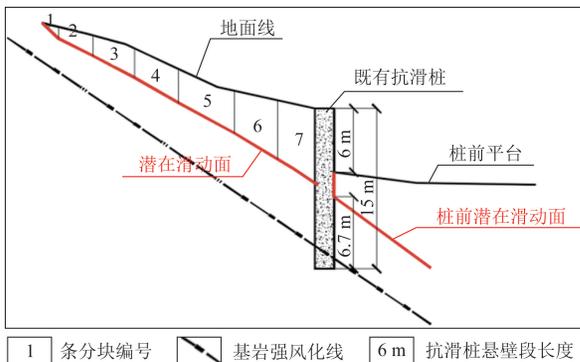


图 5 滑坡后缘既有抗滑桩稳定性计算剖面
Fig. 5 Stability calculation profile of the existing anti slip piles at the rear edge of landslides

4.2 防治对策

根据滑坡基本特征及成因机理、保护对象及稳定状态等,同时结合当地施工环境、经济合理性与环境适应性,对灾害体有针对性布置综合治理工程。

(1) 分区分级支挡。为防止既有抗滑桩桩前斜坡继续下滑变形进而影响既有抗滑桩桩后中缅管道的安全运营,在滑坡 I 区既有抗滑桩桩前平台前部布置一排工程支挡措施。为防止滑坡 I 区前缘继续牵引滑动破坏,在滑坡 I 区前缘坡脚布置一排工程支挡措施。

对滑坡体分区分级设置抗滑桩支挡,共设置抗滑桩 3 排(图 6,图 7)。抗滑桩桩截面有 4 种,分别为 2.0 m × 3.0 m、2.2 m × 3.3 m、1.8 m × 2.4 m、1.5 m × 1.8 m,桩长 16 ~ 41 m,锚固段长 13.2 ~ 19.5 m,部分桩顶伸出地面,桩间设置挡板,桩间距为 5 m。

滑坡综合治理工程结构设计采用“理正岩土计算 6.5”软件计算,岩土设计参数取值见表 1,计算模型采用复杂土层土坡稳定性计算模型,支护措施主要为抗滑桩结构形式,之后根据计算所得的工程线处剩余下滑力设计抗滑桩。抗滑桩结构设计成果要素见表 2。

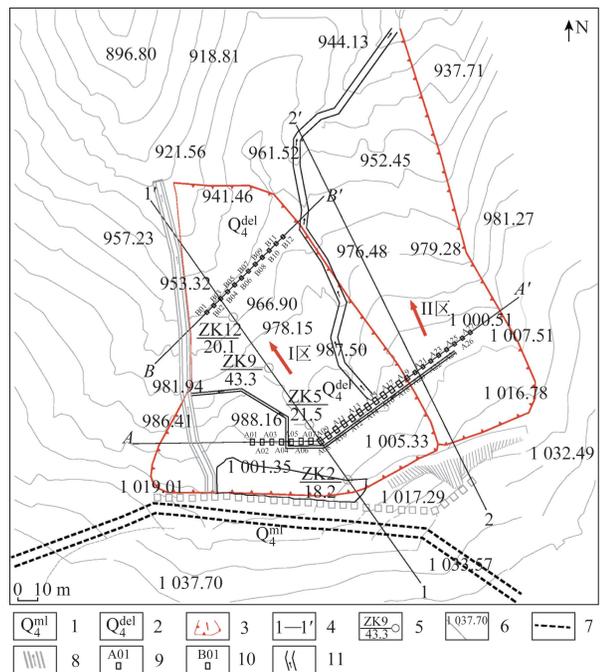


图 6 滑坡综合治理平面布置图
Fig. 6 Layout plan of comprehensive landslide treatment

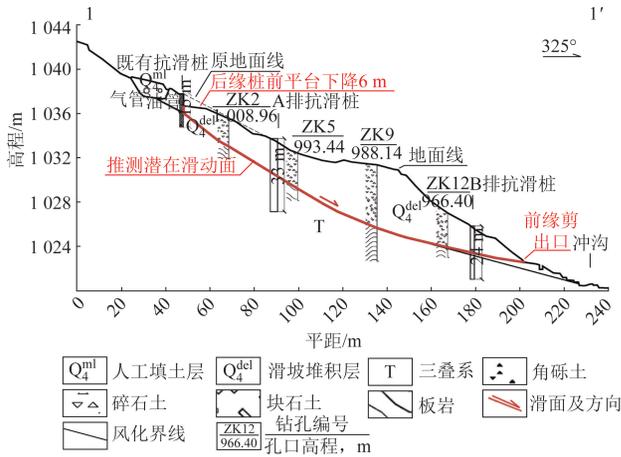


图7 滑坡综合治理剖面1-1'布置图

Fig.7 Layout of the main section for comprehensive landslide control

表1 岩土设计参数取值

Tab.1 Values for geotechnical design parameters

滑面特征	天然工况		暴雨工况	
	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
滑坡Ⅰ区滑带土综合取值	16.0	24.0°	12.0	19.5°
滑坡Ⅱ区滑带土综合取值	14.0	24.5°	12.5	20.5°

(2) 拦源固床。滑坡右侧冲沟沟道溯源严重, 沟道纵坡较陡, 沟内松散物源较多, 为防止排水构筑物基础失效, 在沟道内设置树根桩排导槽, 将沟水排导致下游稳固沟段内。

排导槽侧墙高3.5 m, 基础埋深为1.5 m, 长179 m, 槽底呈V型, 采用C25 钢筋砼浇筑。侧墙底部设置树根桩, 采用Φ219 mm 跟管成孔, 桩长7 m, 采用M30 砂浆灌浆, 桩头钢筋伸入侧墙内(图8)。

表2 结构设计成果要素

Tab.2 Elements for the structural design result

序号	桩编号	设计推力/ (kN·m ⁻¹)	桩截面/m		桩总长/m	锚固段长/m	桩间距/m	布桩数量/根	总桩量/根
			长	宽					
1	A01 ~ A05	1 230.8	3.0	2.0	29 ~ 31	13.2 ~ 14.9	5	5	39
2	A06 ~ A09	1 946.7	3.3	2.2	31 ~ 33	15.0 ~ 16.5	5	4	
3	A10 ~ A13	1 627.3	3.3	2.2	33 ~ 35	16.2 ~ 17.2	5	4	
4	A14 ~ A18	1 108.4	3.3	2.2	37 ~ 41	18.3 ~ 19.5	5	5	
5	A19	358.6	2.4	1.8	31	14.8	5	1	
	A20 ~ A22	358.6	1.8	1.5	22 ~ 24	10.6 ~ 11.6	5	3	
6	A23 ~ A27	430.6	1.8	1.5	16 ~ 21	7.8 ~ 10.2	5	5	
7	B01 ~ B04	424.5	1.8	1.5	16 ~ 24	7.8 ~ 11.8	5	4	
8	B05 ~ B09	416.3	1.8	1.5	19 ~ 22	9.1 ~ 10.5	5	5	
9	B10 ~ B12	430.9	1.8	1.5	21 ~ 24	9.6 ~ 11.1	5	3	

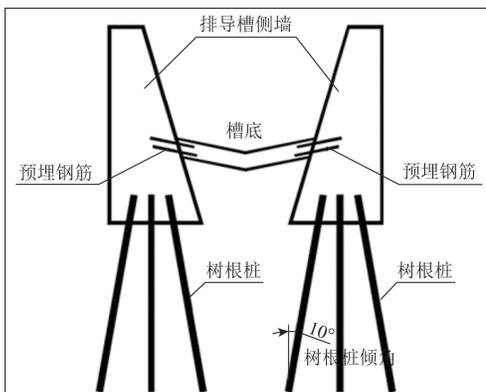


图8 树根桩排导槽结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of root pile drainage canal structure

一横一纵的截排水沟, 将滑坡体内地表水排导至天然冲沟内, 与滑坡区现有的截排水沟及排导槽形成完善的截排水系统。

共设置两道截排水沟, 随坡就势, 均采用C20 钢筋砼浇筑。对于自然斜坡大于5% 的地段设置跌水。对滑坡体上季节性冲沟采取草袋木桩加固回填夯实, 确保坡面汇水排导出坡体外。在既有抗滑桩前平台铺设防渗土工布, 施工前先采用黏土换填、夯实, 平台面人工整理、找平后, 满铺防渗土工布(HDPE 防渗土工布, 规格为400 g/m²), 上覆黏土, 分层夯实。在冲沟下游排导槽末端设置淤土坝及钢筋砼护底。淤土坝高为4.5 m, 基础埋深为1.5 m, 两侧坝肩嵌入冲沟侧壁稳定地层。钢筋砼护底, 配10个钢筋网片, 下设M10 砂浆垫层找平。为防止排导槽翼墙墙后填土掏空, 在排导槽末端翼墙两侧对称新建防冲墙, 高为3.5 m, 基础埋深为1.5 m, 基础横向沿斜坡呈台阶状设置。

(3) 截排结合。针对滑坡体中部已形成深切的冲沟, 若对冲沟进行大面积坡体整形, 不符合当地相关政策。因此, 在滑坡中后部及冲沟内分别设置

5 结论

(1) 斜坡区的松散堆积体、较陡的地形、降雨、地震、人类工程活动等多个因素综合作用,导致了中缅管道(国外段)G132 滑坡的形成、发展及滑动。沟道溯源牵引式滑坡演化具有 3 个变形阶段,即冲沟下切和斜坡变形阶段、牵引滑动变形阶段及整体滑动变形阶段。该滑坡成因机理为,由沟道溯源引发斜坡前缘滑裂变形破坏,继而牵引斜坡中后部滑动变形,最后贯通滑面,形成整体牵引式滑动。

(2) 沟道溯源牵引式滑坡宜采用“分区分级支挡、拦源固床及截排结合”综合治理对策,可取得良好的工程效果。因地制宜地设置树根桩结构排水槽,既能有效解决高陡、松散溯源冲沟的截排水构筑物基础稳定性问题,又可降低工程造价。

参考文献 (References):

[1] 杨光华,钟志辉,张玉成,等. 滑坡灾害的机制与力学特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4009-4017.
Yang G H,Zhong Z H,Zhang Y C,et al. Analysis of mechanism and mechanical characteristics of landslide disaster[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(S2):4009-4017.

[2] 卿三惠,黄润秋. 工程滑坡形成机理及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(3):1-4.
Qing S H,Huang R Q. Formation mechanism of engineering landslide and control counter measures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2005,16(3):1-4.

[3] 刘传正. 南昆铁路八渡滑坡成因机理新认识[J]. 水文地质工程地质,2007,34(5):1-5.
LIU C Z. A new discussion about genesis and failure mechanism of Badu landslides in Nanning-Kunming railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2007,34(5):1-5.

[4] 王忠禹,佟智强,杨洪祥,等. 牡丹江市青梅东山牵引式滑坡

特征与成因机制分析[J]. 城市地质,2021,16(3):287-293.
Wang Z Y,Tong Z Q,Yang H X. Traction landslide at east slope of Qingmei mountain in Mudanjiang city[J]. Urban Geology, 2021,16(3):287-293.

[5] 陈文胜,尹哲彬,罗迎迎. 基于条分法原理的牵引式滑坡分析方法研究[J]. 交通科学与工程,2019,35(3):1-5.
Chen W S,Yin Z B,Luo Y Y. Research on tractive landslide analysis method based on slice method[J]. Transportation Science and Engineering,2019,35(3):1-5.

[6] 孙立娟. 基于滑带软化的牵引式滑坡渐进失稳机理及其演化试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
Sun L J. Experimental Study on the Progressive Instability Mechanism and Evolution of Traction Landslides Based on Sliding Belt Softening[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.

[7] 李效萌,李甜,刘金辉,等. 赣东地区小型牵引式残坡积土质滑坡稳定性及破坏模式分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9236-9242.
Li X M,Li T,Liu J H,et al. Stability and failure mode analysis of small traction residual slope soil landslide in eastern Jiangxi province[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(22):9236-9242.

[8] 李晓龙. 国道 212 线南充猫儿山段牵引式滑坡稳定性分析及加固措施研究[J]. 甘肃水利水电技术,2021,57(4):47-51.
Li X L. Stability analysis and reinforcement measures of traction type landslides in the Maoershan section of National Highway 212 in Nanchong[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology,2021,57(4):47-51.

[9] 苏冬九. 典型牵引式滑坡数值模拟及治理措施研究[J]. 西部交通科技,2023(3):31-33,119.
Su D J. Research on numerical simulation and treatment measures of typical traction landslides[J]. Western Transportation Technology,2023(3):31-33,119.

[10] Marko K,Tiit H,Peeter T,et al. Analysis of a retrogressive landslide in glaciolacustrine varved clay[J]. Engineering Geology, 2010,116(1-2):109-116.

[11] 苏泽志. 贵州岩脚滑坡稳定性评价及应急防治措施研究[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2017,34(5):120-125,140.
SU Z Z. Research on stability evaluation and emergency prevention measures of Yanjiao landslide in Guizhou[J]. Journal of Guizhou University:Natural Science,2017,34(5):120-125,140.

The formation mechanism of G132 landslide in China – Myanmar oil and gas pipeline (Myanmar Section) and its integrated control countermeasures

LUO Benquan¹, WANG Po², LI Shuncheng², XU Jiang¹, LU Wenxiao², HUANG Rui²
(1. Sichuan Prospecting Institute of Geological Engineering Co., Ltd., Sichuan Chengdu 610072, China;
2. Sino-Pipeline International, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to effectively improve the comprehensive management level of geological disasters in oil and gas pipelines, the authors in this research adopted engineering geological analysis principles and methods to conduct a detailed analysis of the retrogressive landslide caused by gully source tracing, and formulate appropriate comprehensive management countermeasures, combined with the geological environmental conditions of G132

landslide in China – Myanmar Pipeline (Myanmar Section) and the continuous deformation characteristics of the landslide in recent years. Three deformation stages of the retrogressive landslide caused by gully source tracing were basically divided through the analysis of the landslide evolution model, including gully incision and slope deformation stage, the retrogressive sliding deformation stage and the overall sliding deformation stage. The practical and feasible integrated control counter measures of “zoning and graded retaining, source blocking and bed consolidation, and combination of interception and drainage” were put forward, based on the deformation characteristics, formation mechanism and evolution model of the landslide. This strategy has been implemented step by step, and it has passed through many flood seasons with good engineering results. This research could provide certain references for similar projects related to retrogressive landslides caused by gully source tracing in the future and has great significance in controlling and reducing geological disasters of oil and gas pipelines and protecting the safe operation of China Myanmar Pipelines.

Keywords: Myanmar – China pipeline; rakhine mountain; gully source tracing; genetic mechanism; control countermeasures; root pile drainage canal

(责任编辑: 刘丹)

更正说明

本刊2024年第11卷第3期第76页刊登的论文《珠江口南部海域表层沉积物中微塑料的空间分布及运移机制》(作者: 王国槐、梁昊、赵卫、张晓阳)中,“基金项目”添加中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心)“珠海城市地质调查(含信息化)(编号: MZCD-2201-008)”和天津市地质研究和海洋地质中心“珠江口地层特征指示的沉积环境研究(编号: ZX2023-C2)”两个项目,特此更正。