

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 12 - 3587 - 07

牵引式滑坡的破坏机制及其加固措施探讨 ——以某高速公路牵引式滑坡为例

宋东日¹, 任伟中¹, 沈波², 徐志忠², 周英博¹, 张思渊¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.恩施州公路管理局, 湖北 恩施 445000)

摘 要: 牵引式滑坡在山区公路滑坡中占有相当的比重, 其治理工程往往耗资巨大、环境破坏严重。针对某高速公路牵引式滑坡, 通过地质调查、变形迹象分析、岩土体应力-应变分析及数值模拟等方法, 指出具体破坏机制为: (1) 坡脚开挖致使阻滑关键块体缺失, 应力集中导致剪切应变软化; (2) 地表降水与地下水对岩土体物理力学性能的改造; (3) 滑体变形不协调, 导致拉裂缝产生, 滑坡后缘得以继续向后扩展。目前监测表明, 已施工的组合加固措施效果良好。最后讨论挖方引起的牵引式滑坡的工程地质特征, 对牵引式滑坡进行评价应坚持安全系数分区原则, 滑坡总体加固应按安全系数控制, 同时对后缘加固按位移控制。

关 键 词: 牵引式滑坡; 滑坡范围; 加固措施; 位移控制

中图分类号: U 416; TU 42

文献标识码: A

Discussion on failure mechanism of retrogressive landslide and its reinforcement measures: taking a certain expressway retrogressive landslide for example

SONG Dong-ri¹, REN Wei-zhong¹, SHEN Bo², XU Zhi-zhong², ZHOU Ying-bo¹, ZHANG Si-yuan¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Highway Authority of Enshi Autonomous Prefecture, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: The retrogressive landslide occupies a considerable proportion among expressway landslides in the mountain area. The reinforcement projects often cost enormously and the environment around is usually damaged severely. Taking a certain expressway retrogressive landslide for example, through approaches of geological survey, deformation investigation, stress-strain behavior analysis and numerical modeling, the failure mechanism is confirmed as follows: (1) the loss of resisting key block is caused by slope foot excavation, shear strain softening is induced by stress concentration; (2) physico-mechanical properties alternation of the rock and soil mass are remolded by the surface rainfall and groundwater; (3) tensile cracks are formed from deformation incompatibility and its expanding backward. The monitoring results show that the applied combined reinforcement measures work well. The geological characteristics of excavation-induced retrogressive landslides are discussed. A principle that "the safety factor should be calculated by section should use to evaluate retrogressive landslide; the reinforcement of the whole landslide should be controlled by the predetermined safety factor; while the reinforcement of landslide rear should be controlled by displacement.

Key words: retrogressive landslide; landslide boundary; reinforcement measures; displacement control

1 引 言

牵引式滑坡一般经历坡脚冲蚀^[1-2]或开挖^[3]等导致前缘失稳并逐渐向后扩展, 后缘由于支撑减弱或临空而随之变形失稳, 往往由拉裂缝分为数级滑

体, 最终贯通成为大规模滑体。特大规模的牵引式滑坡主要见于海岸滑坡^[4-5], 由于山区公路建设过程中存在大量的坡脚挖方, 使得牵引式滑坡在山区公路滑坡中也占有相当的比例^[6]。受勘察分析深度和加固成本的限制, 牵引式滑坡在前缘失稳阶段往

收稿日期: 2012-09-21

基金项目: 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室重点项目 (No. SKL208064); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KZCXZ-YW-151)

第一作者简介: 宋东日, 男, 1987年生, 硕士研究生, 主要从事岩土力学与边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: songdongri@126.com

往不能得到正确的认识，待向后延伸引起大范围破坏后才引起足够的重视，此时治理往往耗资巨大，并且涉及征地补偿以及植被破坏等问题。目前我国的公路大多已进入后期维护阶段，普遍存在着前期主动加固不确定性造成的浪费与后期被动加固经费不足的矛盾。

目前有关牵引式滑坡机制分析、加固措施分析和工程实例的文献较少，数值模拟滑面向后延伸过程困难，人为性大。牵引式滑坡的安全性评价与加固治理，主要存在以下问题：牵引式滑坡的早期识别问题，即对牵引式滑坡地层条件与时空特征的认识；牵引式滑坡演化过程及与次生各级滑体之间的相互依存关系，对演化机制的认识直接影响到分析方法和加固措施的选取；合理加固措施的确定与组合应用。

针对以上问题，本文以某高速公路牵引式滑坡为例，调查滑坡的地质条件和变形迹象、查明岩土体的应力-应变特性并通过数值模拟方法验证，对该滑坡时空演化过程进行阐释，并分析搭配可行的加固方案和验证加固效果，最后讨论山区公路挖方引起牵引式滑坡的工程地质特征和加固原则，对山区公路的选线、牵引式滑坡的加固设计和安全监测有很大的参考作用。

2 滑坡地质条件与开挖影响

某高速公路牵引式滑坡（见图 1、2）发育在变质辉绿岩侵入体与变粒岩接触带附近的变质辉绿岩体中，滑坡体西侧边界位于变粒岩与变质辉绿岩的岩性分界线一带，滑坡主滑方向为 NE5°左右。

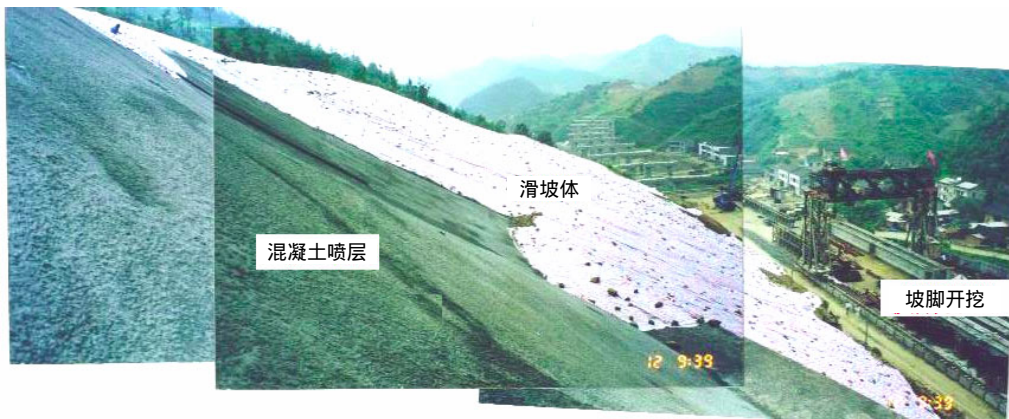


图 1 滑坡全景图

Fig.1 Photographs showing panoramic view of the landslide

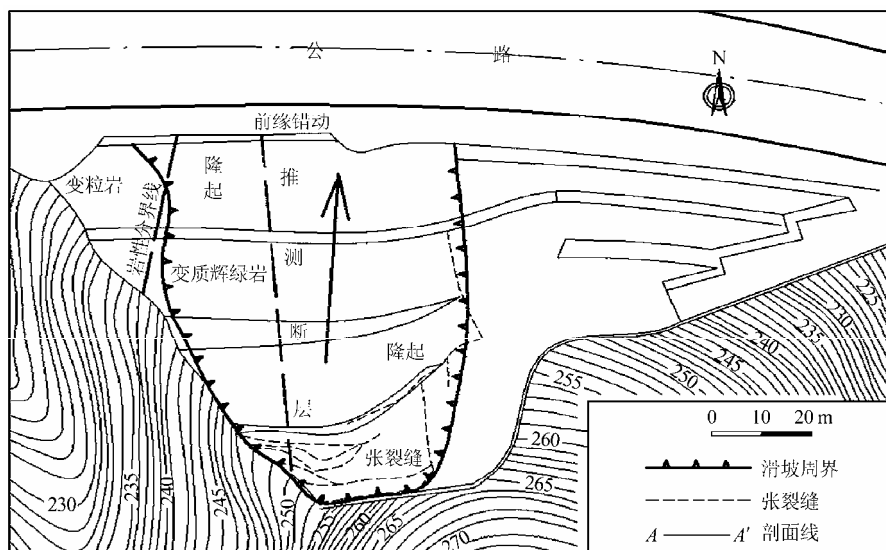


图 2 滑坡平面图

Fig.2 Plan of the landslide

从横向上来看, 滑坡体以西为强风化变粒岩, 十分破碎, 强度也很低, 但其坡高较低, 边坡基本稳定; 滑坡西部为强风化变质辉绿岩, 岩体十分破碎, 块度很小, 一般小于 30 cm; 滑体向东逐渐过渡为弱风化变质辉绿岩, 但岩体仍十分破碎, 岩块块度却明显比西部大, 一般为 30~100 cm, 被其中发育的片理、节理、破劈理所切割, 推测坡体中部含纵向断层。滑坡岩体中主要发育东西向、北西向节理, 产状为 $350^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 、 $306^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 、 $240^{\circ} \sim 260^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 片理产状为 $45^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$, 破劈理产状为 $355^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 少数破劈理面上附着一层厚约为 0.5~1.0 cm 的黏土质薄膜; 滑体以东为弱风化、微风化变质辉绿岩, 节理裂隙明显比滑体少, 岩块块度也较大, 岩体相对较完整。

从纵向上来看, 滑体后缘第 4 级坡以上为第四系残坡积地层和全风化变质辉绿岩, 滑体中部第 3 级坡一带为强风化变质辉绿岩, 滑体前缘第 1、2 级坡一带为开挖出露的弱风化变质辉绿岩。滑体厚度比较均匀, 后缘有一较深的后缘张拉裂缝。

从垂向上来看, 滑动面埋深在 14~15 m 左右, 滑动面倾角与边坡坡面倾角相接近, 约 20° 左右; 滑坡岩体主要是弱风化变质辉绿岩, 滑床岩体东部少部分为微风化变质辉绿岩, 岩体较完整, 潜孔钻进时较难, 且其岩粉呈浅灰绿色; 滑床西部岩体为弱风化变质辉绿岩, 岩体十分破碎, 潜孔钻进较容易, 其岩粉呈深褐色。

该处山坡在高速公路未施工前处于相对稳定状态; 路堑边坡原设计采用台阶式边坡, 2000 年 10 月份形成小范围的滑坡, 后进行清理并放缓坡度; 2001 年 5 月出现更大规模的滑坡, 滑面深约 14 m, 长约 80 m, 宽约 60 m, 最大下滑位移达 150 cm, 水平位移速率大于 1 cm/d, 每次较大的降雨过后, 滑体都有约 10~40 cm 的下滑位移, 滑体已从滑坡剪出口处向前错动达 4~40 cm (见图 3)。



图 3 滑坡开挖坡面前缘剪出口

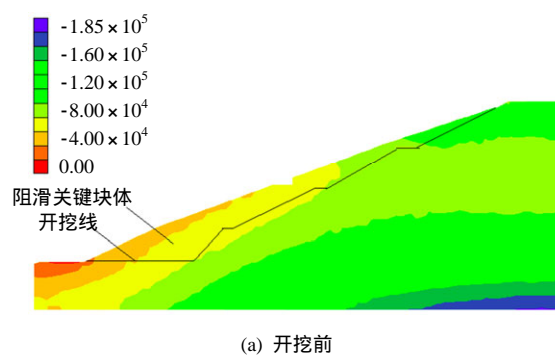
Fig.3 Shear opening at excavation surface of the landslide

由图可看出, 滑体后缘环形张拉裂缝十分发育, 张开位移为 10~50 cm, 下错位移为 10~40 cm。滑体东侧边界原有的混凝土喷层被错断, 多处混凝土喷层发生隆起(见图 2)。由于该滑体不断向前滑移, 后缘张拉裂缝有向南山坡上逐渐发展之势, 若不及时加固现有滑体, 则整个边坡的失稳破坏范围将不断扩大, 威胁高速公路建设和下方工厂村庄安全。

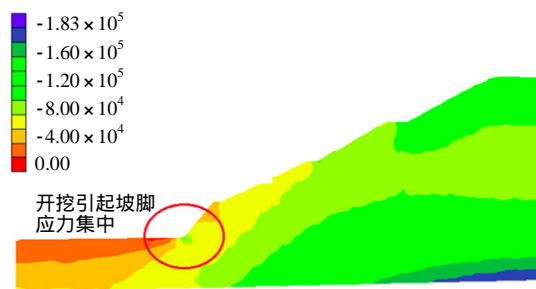
3 滑坡形成演化过程分析

该滑坡发育在变质辉绿岩侵入体与变粒岩接触带附近的变质辉绿岩岩体中, 抗风化能力很差, 遇水极易软化, 其中变质辉绿岩在浸泡 6 个月后单轴抗压强度下降 24.8%。岩体十分破碎, 主要发育几组节理、片理以及破劈理, 少数破劈理面上附着一层厚约 0.5~1.0 cm 的黏土质薄膜, 在水的软化作用下其抗剪强度很低, 其中变质辉绿岩软弱夹层在浸泡 6 个月后内摩擦角下降 8.7%, 黏聚力下降 16.3%~38.6%。这些构成了滑坡的物质基础, 是滑坡产生的内因。

路堑边坡开挖形成的人工边坡坡角约 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$, 坡高达 40 m, 形成高陡临空面, 为滑坡的产生提供了有利的地形条件。图 4 为路堑边坡开挖前、后坡体水平应力状态数值模拟结果对比。



(a) 开挖前



(b) 开挖后

图 4 开挖前、后水平应力分布图

Fig.4 Horizontal stresses before and after excavation

这里采用 Itasca 研发的 FLAC^{3D} 软件^[7]对坡脚开挖的作用进行定性模拟,材料物理力学参数(见表1)依据室内试验选取,并参考与其地质条件相似的邻近工点。

表1 材料初始物理力学参数

Table 1 Initial physico-mechanical parameters of materials

岩土类型	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	密度 /(g/cm ³)
变质辉绿岩滑体	30	100	30	30	2.4
滑床基岩	110	119	300	50	2.4

模拟过程中,利用 null 模型模拟边坡的开挖过程。通过模拟结果可以看出,坡脚开挖部分在整个坡体稳定过程中起到阻滑关键块体的作用(见图4(a)),主要通过2种方式对后部滑体进行阻挡:(1)岩体自重沿下部滑面形成的抗滑力和岩体黏聚力;(2)保护坡脚不受风化和扰动影响,维护原有应力状态。室内试验结果表明,坡体岩块及节理本身强度均较高,如果不考虑风化、扰动和应力集中,完全能够保持开挖后稳定,所以作用(2)显得尤为重要。开挖后坡体内应力重分布,沿开挖面形成一个应力释放面,路堑坡脚开挖引起卸荷回弹,水平路基与重力作用下的坡脚产生相互挤压,造成边坡坡脚一带出现应力集中(见图4(b)),加之开挖过程中对坡脚的强烈扰动,这使得坡脚首先出现追踪边坡岩体原有的一些软弱结构面的不利组合,发生剪切应变软化,然后逐渐往边坡上部扩展,这种扩展作用主要是使原有的少数结构面扩展其长度和开度,对周围应力场起到卸载作用,从而阻止大多数结构面扩展,进一步促使应力集中向后发展。最后形成主要沿破劈理、节理、片理等的软弱结构面、部分切断岩桥的渐进破坏^[8]面,从而形成了一个牵引式滑坡。可以推断,假若滑体前缘路基进一步向下开挖,则滑坡将可能往更深更后部发展,形成规模更大的滑坡。

除了受到坡脚挖方和扰动致使应力集中效应导致结构面剪切应变软化,地表降水与地下水对滑体的向后扩展影响也很大。坡面排水系统不完善,降雨极易大量渗入坡体,产生以下4种作用^[6]:(1)提高地下水位,大量的地表水灌入使得滑体的地下水位明显升高,且水位线变得陡峭,渗流力增大;(2)增加滑体重度;(3)“软化”滑带强度参数,岩土体由于雨水的渗入趋于饱和,基质吸力消失,有效应力降低;(4)动水力和静水力作用。下滑力增大和抗滑力减小,导致滑坡启动。

由于滑体前缘的推挤鼓胀,滑体产生变形不协调,导致拉裂缝产生(见图2),已滑动部分滑体与后缘尚处于稳定状态的山体逐渐脱开,支持力减弱,为次生滑体的形成预留出了空间并创造了力学条件,直至尚处于稳定状态的山体逐步弱化,最终与已滑动部分滑体合并成一个大的滑体,同时也开启了下一级滑体的演化进程。可见牵引式滑坡存在参数分段弱化的演化过程,而每一周期的弱化便预示着目标加固力的周期性增大。

4 加固措施与监测结果

4.1 加固措施选取与组合

牵引式滑坡加固的直接目的在于补偿由于前缘开挖缺失的阻滑关键块体,同时控制后缘的位移,防止次生滑体的产生。在确定了滑动面及有关地层的重度、力学参数取值范围的基础上,按照反分析得到黏聚力和内摩擦角;对于暂处于稳定状态的后缘潜在滑体,需要分析其对已滑动部分是否存在下滑推力,其参数根据室内试验并结合临近工点综合选取。计算表明,未滑动部分滑体强度参数已能够维持自身的稳定,但考虑到参数的弱化效应和变形不协调现象,所以未滑动山体的整体稳定性取决于已滑动部分与未滑动部分的位移关系。如果不及及时加固,任由滑坡后缘逐级向后扩展,滑坡前缘所需加固力将急剧增长,此时加固需要大量被动加固措施,对坡体前缘扰动强烈,且工程造价不菲,为加固工程带来极大的困难。

根据极限平衡法的加固力计算结果并综合滑坡本身地质条件,确定采用综合加固措施(见图5),另外应加强施工期间和后期的监测工作。

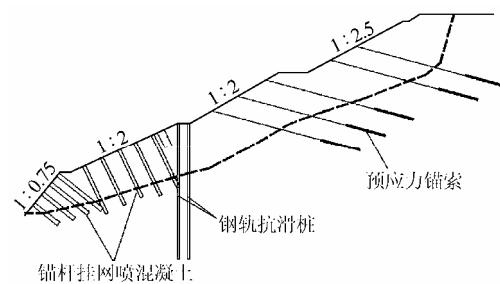


图5 滑坡前、后缘加固措施

Fig.5 Reinforcement measures at front and rear of the landslide

(1)在二级平台上分两排布置钢轨抗滑桩,孔深30m,要求干钻,吊装完成后灌注混凝土浆液。

(2)在滑坡后缘设置预应力锚索地梁,孔深30m,要求干钻,预应力500kN;措施(2)可补

充措施(1)的抗滑力不足,共同完成对滑坡总体安全系数的要求,措施(2)更重要地在于能够控制位移,确保后缘稳定,干钻能够尽量减少水对坡体的扰动。

(3)在一、二级坡体采用锚喷支护,确保钢轨抗滑桩前局部坡体的稳定。

(4)设置滑坡周界截水沟和坡体排水沟,对裂缝采用黏土夯实并埋设防水土工布以阻断雨水流入。

4.2 现场监测结果验证分析

据监测结果所判定的滑面位置与勘查中物探和施工中桩孔钻设所判定的基本吻合,滑动面深约为 14 m。从钢轨抗滑桩位移监测结果计算得到的桩的受力情况由图 6 可见,滑动面上、下 1 m 段受力较大,最大实际抗滑力约为设计荷载的 63%,表明支挡结构的安全储备度较高,滑体的剩余下滑力在雨季明显增大,旱季又逐渐减小,具有明显的周期性,可见降雨入渗是影响滑体下滑力的重要因素。

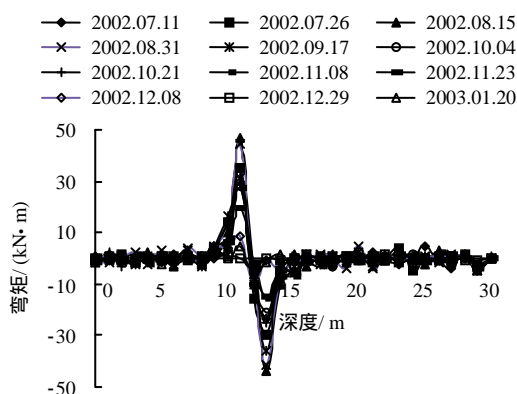


图 6 深度-弯矩监测曲线

Fig.6 Monitoring curves of bending moments along depth

加固措施的施工效率、措施间的组合效果和措施的可靠性也是需要考虑的重要方面。该滑坡下滑的位移速率较大,必须应用快速高效的滑坡加固技术。钢轨抗滑桩施工迅速,施工后即发挥刚度,可作为应急与永久加固相结合的方法,且钻孔灌注浆液有利于改造破碎岩体,加强整体性。从施工期间监测结果来看,当钢轨抗滑桩施工至 20 根左右时,就基本遏制住了滑坡的下滑,说明该方法用于滑坡的应急加固抢险是十分有效的。滑坡后缘分布式的加固方式,有效地控制了后缘与未滑动部分山体的脱开,遏制了滑坡的进一步向后扩展。施工期间要求所有钻孔干钻,严格控制水的使用,并加强坡体整体的排水措施,虽然现阶段排水措施对岩质边坡稳定的作用缺乏有效的评价方法,但可以肯定的是

排水措施对滑坡稳定起到了相当大的作用^[9-10]。

5 讨论

5.1 牵引式滑坡的工程地质特征

要做到对山区公路牵引式滑坡的早期识别和滑坡范围预测,并建立合理的物理和数学力学模型,首先需要对牵引式滑坡的工程地质特征,特别是地层条件与时空特征有深入的了解。结合本文中及其他牵引式滑坡的特点,其突出的工程地质特征可以概括为以下 4 个方面:

(1) 牵引式滑坡一般为公路上方边坡由坡脚开挖所诱发,破坏自前缘开始,后缘持续扩展,这是牵引式滑坡形成的工程因素。与之相比,山区公路中推动式滑坡一般为公路下方边坡,主要由于公路荷载和降雨引起整体滑动,后缘破坏早于前缘剪出破坏。

(2) 牵引式滑坡的破坏区域通常仅限于土坡浅表层^[11]或受切割破碎风化严重的岩体边坡,滑体主要是松散层^[12]、古滑坡体、蠕变体^[13]或破碎带,与下伏岩土体有明显的界限,这是牵引式滑坡形成的地层条件。

(3) 滑体厚度与纵向长度比值一般较小,即滑体在地形地貌上较推动式滑坡更细长,这是牵引式滑坡形成的空间条件。

(4) 牵引式滑坡从工程因素诱发至大规模滑体的形成,一般历时较短。山区公路坡脚挖方是引发牵引式滑动的直接原因,造成坡脚关键块缺失,短时间内造成坡脚失稳并逐级向上延伸;相比之下,推动式滑坡一般受公路荷载、地下水等因素的综合影响,经历岩土体参数逐步弱化导致滑面蠕变贯通,安全系数降低至极限状态一般是长期的过程。

以上 4 点特征需要以充分的地质调查和勘察资料为依据,可以对牵引式滑坡的识别和滑坡范围预测起到很强的指示性作用;如果地层条件稳定,空间外形规则,则可以大致确定牵引式滑坡的滑坡范围;当遇到地层条件改变,如基岩面起伏或地层岩性发生变化,空间外形改变,如已到达山顶或坡体两侧受限,牵引式滑坡后缘向上扩展便有可能终止。牵引式滑坡的时间特性也表明工程治理的紧迫性。

5.2 加固力计算与加固措施

如果滑坡后缘未滑动山体强度参数过低,不能维持自身的稳定,即对已滑动部分存在推力,则需要将未滑动部分纳入加固力计算范围。通常只针对已发生滑动的部分滑体,而忽视了地质条件相近、稳定性依赖于前一级滑体支持的潜在滑体的稳定性

状态(见图7),可能使得加固设计方案偏于危险,此时通过地质条件(地层条件与空间外形)确定牵引式滑坡的计算周界便显得尤为重要。而大多数情况下,未滑动部分山体在未弱化条件下是能够保持自身稳定的,失稳是由于弱化造成,此时只需要计算已滑动部分的加固力,使加固后的滑动部分满足相应的安全系数要求。

如果岩土体的压缩模量较低,即使前缘已加固,滑体岩土体依然存在向下的蠕变和压缩,或者向下滑动位移较大,为后缘未滑动山体创造出下滑的空间(见图7),弱化使得拉裂缝继续向后扩展,滑体规模进一步扩大,导致原本已满足要求的加固措施安全系数降低甚至加固失效。造成这一现象的原因在于仅对已滑动的滑体按安全系数控制是不够的,未滑动部分坡体的稳定性由前一级滑体的位移决定,应对滑坡后缘潜在滑体进行位移控制,防止进一步扩展。

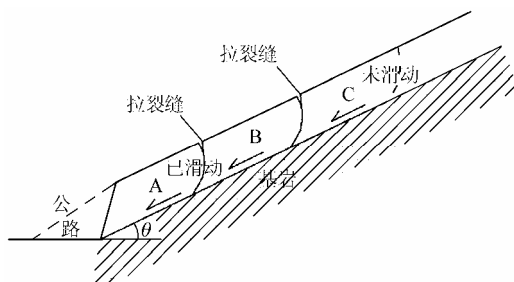


图7 典型牵引式滑坡断面图

Fig.7 Typical cross-section of a retrogressive landslide

由于牵引式滑坡的演化过程与推动式滑坡的整体滑动截然不同,且仅在滑坡后缘扩展结束后才贯通为整体滑动,所以对于牵引式滑坡进行潜在滑体整体稳定性评价是不可取的。对于可能的牵引式滑坡,应该通过地层条件分析确定滑体的范围和稳定性状态,采取及早发现及早治理的原则;对于已经部分滑动的牵引式滑坡,应该确定下一级滑体的范围和稳定性状态,防止滑坡的继续扩大,造成资金、人力浪费甚至公路的损毁和人员伤亡。

在滑坡前缘,加固效果主要受目标安全系数控制,同时要求施工周期短且对坡体扰动小,一般选取抗滑桩或抗滑挡墙,在牵引式滑坡加固中往往能够取得较好的效果。但支挡结构与岩土体在变形模量上的不匹配表明,抗滑桩和岩土体很难共同发挥作用。在工程实践中抗滑桩设计遵循这一原则,即抗滑桩承担的荷载主要是用于补充岩土体自身抗滑力不足的部分,桩的允许变形远远低于岩土体的允许变形。因此,在前期变形的过程中,支挡结构的

应力已经达到破坏的强度^[14],这是抗滑支挡结构所面临的问题。在滑坡后缘,加固措施除了分担滑体的部分下滑力外,更重要的作用在于控制位移,应着重考虑分布式主动加固措施,如注浆、预应力锚索和锚杆地梁,以改善岩土体的受力状态,使加固措施与岩土体结合成为一个整体,提高整体刚度,达到控制位移的效果;同时分布式加固措施也有利于避免抗滑桩等集中加固措施出现施工缺陷所导致的可靠性降低。排水措施工程造价低,而往往能够有效避免土体的弱化,因而排水措施必不可少,常见的排水措施有截排水沟、裂缝封堵、排水孔等。

加固力的计算方式与加固措施密切相关,加固措施的选择与组合对加固效果影响显著。综上所述,对于牵引式滑坡的评价和治理工作,应采取安全系数分区评价,滑坡总体加固按安全系数控制,同时对后缘加固按位移控制。

6 结 论

(1) 调查研究表明,该牵引式滑坡主要由阻滑关键块体缺失引起应力集中导致剪切应变软化、地表降水与地下水对岩土体物理力学性能的改造、滑体变形不协调3方面因素引起。

(2) 通过监测结果对滑坡的地质特征和加固效果进行了验证,结果表明,综合加固措施可行,钢轨抗滑桩作为应急与永久加固相结合的方法加固效果良好。

(3) 牵引式滑坡一般有着独特的工程与坡体的位置组合关系、地层条件、空间和时间特征,这4个因素对牵引式滑坡的早期识别和规模预测可以起到很好的指示性作用。

(4) 牵引式滑坡与推动式滑坡在形成机制上不同,加固原则也有所不同。对于牵引式滑坡应坚持安全系数分区评价,滑坡总体加固按安全系数控制,同时对后缘加固按位移控制,确保加固措施的及时性和可靠性。

(5) 随着滑坡后缘的持续向后扩展,治理牵引式滑坡所需加固力将随之持续增大,给治理工程造成困难,所以对于牵引式滑坡应吸取同类工程的经验和教训,及早加固,确保下方公路的安全运营。

参 考 文 献

- [1] MARKO KOHV, TIIT HANG, PEETER TALVISTE, et al. Analysis of a retrogressive landslide in glaciolacustrine varved clay[J]. *Engineering Geology*, 2010, 116: 109 - 116.

- [2] MARKO KOHV, PEETER TALVISTE, TIIT HANG, et al. Retrogressive slope failure in glaciolacustrine clays: Sauga landslide, western Estonia[J]. **Geomorphology**, 2010, 124(3 - 4): 229 - 237.
- [3] 张俊瑞. 某典型牵引式滑坡形成机制分析及稳定性评价[J]. **土工基础**, 2010, 24(2): 45 - 52.
ZHANG Jun-rui. Formation mechanism and stability analysis of a typical retrogressive landslide[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2010, 24(2): 45 - 52.
- [4] GAUER PETER, KVALSTAD TORE J, FORSBERG CARL F, et al. The last phase of the Storegga Slide: simulation of retrogressive slide dynamics and comparison with slide-scar morphology[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2005, 22(1 - 2): 171 - 178.
- [5] GARDNER JAMES V, PRIOR DAVID B, FIELD MICHAEL E. Humboldt slide—a large shear-dominated retrogressive slope failure[J]. **Marine Geology**, 1999, 154(1 - 4): 323 - 338.
- [6] 袁从华, 童志怡, 卢海峰. 牵引式滑坡特征及主被动加固比较分析[J]. **岩土力学**, 2008, 29(10): 2853 - 2858.
YUAN Cong-hua, TONG Zhi-yi, LU Hai-feng. Analysis of characteristics of retrogressive landslide and comparison between active and passive reinforcements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2853 - 2858.
- [7] Itasca Consulting Group. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2002.
- [8] 王庚荪. 边坡的渐进破坏及稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2000, 19(1): 29 - 33.
WANG Geng-sun. The progressive failure of slope and the stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(1): 29 - 33.
- [9] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. **岩土力学**, 1999, 20(1): 1 - 14.
NG Wang-wai Chales, CHEN Shou-yi, PANG Yu-wei. Parametric study of effect of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(1): 1 - 14.
- [10] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. **岩土力学**, 2012, 33(3): 872 - 880.
ZHAN Liang-tong, LI He, CHEN Yun-min, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 872 - 880.
- [11] 蔡文, 曹洪, 罗彦, 等. 强度折减有限元法模拟边坡牵引式破坏过程[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(增刊 2): 3529 - 3533.
CAI Wen, CAO Hong, LUO Yan, et al. Simulation of retrogressive landslide failure process by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30 (Supp.2): 3529 - 3533.
- [12] 白榕. 三峡库区丰都名山滑坡稳定分析与防治[J]. **兰州铁道学院学报(自然科学版)**, 2002, 21(4): 26 - 30.
BAI Rong. Stability analysis and control to Mingshan landslide of Fengdu in the Three Gorges reservoir area[J]. **Journal of Lanzhou Railway University(Natural Sciences)**, 2002, 21(4): 26 - 30.
- [13] 张红军, 叶义成. 个旧市贾沙乡滑坡成因分析与研究[J]. **地质灾害与环境保护**, 2005, 16(4): 350 - 353.
ZHANG Hong-jun, YE Yi-cheng. Genesis of Jiasha landslide and its control, Gejiu City[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 2005, 16(4): 350 - 353.
- [14] 李世海, 李晓, 魏作安. 滑坡灾害防治的新技术路线及分析[J]. **中国地质灾害与防治学报**, 2006, 17(4): 1 - 5.
LI Shi-hai, LI Xiao, WEI Zuo-an. New technologic strategies and analysis about landslide disaster prevention and control[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2006, 17(4): 1 - 5.