

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.01.026

# 花马湖连通工程边坡失稳模式及应对措施研究

罗飞, 贺金明, 杨火平, 李会中

(长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了解决花马湖上湖与中湖水系连通工程的沿线边坡失稳问题,以开挖施工过程中发生的边坡失稳情况为基础,对边坡失稳机理、变形破坏特征及产生地质条件进行系统分析,提出四类边坡失稳模式,即均质蠕滑-拉裂型(I型)、缓-中倾顺向坡滑移-拉裂型(II型)、块体结构楔形块体剪切-滑移型(III型)和复合型(IV型)四类,并根据每种类型的失稳主控因素提出相应的应对措施。结果表明:对于I型边坡不宜太陡,全强风化基岩开挖坡比1:1~1:0.75较适宜,及时对边坡进行喷护;对于II型边坡主要采用锚杆(索)进行系统加固和锁口处理;对于III型是对不稳定块体及时进行加固或清除处理,加固手段主要根据块体大小可采取不同长度锚杆(索);对于IV型应结合地质地形条件找出关键边坡失稳模式,采取相应的应对措施。针对不同地质条件所采取的不同开挖坡比和锚杆支护措施,取得了较好的效果,可为类似边坡工程提供参考。

**关键词:** 边坡失稳模式;蠕滑-拉裂型;顺向坡滑移-拉裂型;楔形体剪切-滑移型;复合型

中图分类号: TV221.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)01-0192-06

## Analysis on Slope Instability Mode and Countermeasures of Huama-Lake Connectivity Project

LUO Fei, HE Jinming, YANG Huoping, LI Huizhong

(Three Gorges Geotechnical Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** The strata along the upper-middle lake water system connectivity project of Huama-Lake are mainly composed of Yanshanian monzonite and Triassic sedimentary rock. The rock mass is strongly weathered and the fractures are developed. The height of the excavation slope of the connecting channel is from 7 m to 75 m, and the slope stability problem is prominent. In this paper, based on the slope instability occurred in the excavation construction process, the slope instability mechanism, deformation and failure characteristics and geological conditions are systematically analyzed, the slope instability mode is divided into four types by using the principle of engineering geological analysis: homogeneous or quasi-homogeneous creep slip-tensile cracking type(I), sliding-tensile cracking type of gentle-middle dip slope(II), shear-sliding type of the block structure wedge block(III) and composite type(IV). and the countermeasures are put forward according to the main control factors of each type of instability. The slope ratio of the all-strength weathered bedrock is 1:1~1:0.75, and the I slope should not be too steep, so spray protection should be carried out in time. For type II slope, the anchor (cable) system is used to strengthen and the locking treatment. For type III slope, the unstable block is mainly supported in time. For type IV slope, the key instability modes should be found out and corresponding measures should be taken according to geological conditions. According to different geological conditions, different excavation slope ratio and bolt support measures are adopted to ensure the safety of excavation slope and achieve good results. It can provide reference for similar slope engineering investigation, design and construction.

**Keywords:** the slope instability mode; creep slip-tensile cracking type; sliding-tensile cracking type of the dip slope; shear-sliding type of the wedge block; composite type; countermeasures

收稿日期:2023-10-20

修稿日期:2023-11-20

基金项目:国家自然科学基金“砂泥岩互层顺倾岸坡地质环境水动力致灾演化机制及预警研究”(U2340226)

作者简介:罗飞(1983—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程勘察设计工作。E-mail:fehnluo@163.com

边坡稳定是水利、电力、交通、矿山等诸多工程建设中常见的工程地质和岩土工程问题,边坡失稳滑塌将直接威胁到工程安全,造成不同程度的人员伤亡和财产损失,其稳定性和失稳模式历来是岩土工程领域一项重要的研究课题<sup>[1]</sup>。

许多学者对大型边坡的成因机制、变形破坏特征及其稳定性进行了大量的研究,结果表明边坡失稳破坏模式往往受地质条件、空间形态控制<sup>[2]</sup>。由于岩体结构的复杂性,岩质边坡的稳定性主要取决于岩体结构面及其组合,岩体的主要力学性质随结构面的起伏形态、粗糙程度、张开度及其充填物性状的差异而不同<sup>[3]</sup>,从而导致岩质边坡变形破坏类型和失稳模式也多种多样,产生变形破坏后的形态和作用也不一致<sup>[4]</sup>,边坡失稳模式不同,其稳定性计算方法、评价方法、支护方案也不一样<sup>[5]</sup>,因此根据地质条件对其失稳模式以及其稳定性进行详细研究具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。

花马湖上湖-中湖水系连通工程边坡开挖过程中出现局部垮塌变形失稳,基于边坡地质结构、边坡高度以及失稳过程,分析研究边坡失稳的条件、变形破坏特征,以期为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

鄂州花湖机场建设阻断了花马湖上湖(走马湖)和中湖(黄山湖)的水系连通,为保证上湖片区及机场防洪安全,需要新建花马湖上湖-中湖水系连通工程。

上湖-中湖水系连通工程为一梯形渠道,渠底宽 40 m,渠道总长 5.80 km,按 50 年一遇防洪标准设计,渠底板高程 13.47 m~13.70 m,设计水位 17.74 m~18.04 m,设计流量 80 m<sup>3</sup>/s。渠道开挖坡高度一般 7 m~75 m,覆盖层开挖坡比 1:2,全强风化岩体开挖坡比 1:0.75,中风化岩体开挖坡比一般 1:0.5,每高 10 m 设置一级宽 2 m 马道<sup>[7]</sup>。

按岩性、边坡高度总体可分为上中下三段。

上段(桩号 LTK0+000—LTK2+260)为低缓剥蚀残丘,地面高程 20 m~30 m,残丘顶高程 45 m,边坡开挖高度 7 m~32 m,地层岩性主要为残坡积土层、全强风化二长岩。

中段为(桩号 LTK2+260—LTK4+900)为山岭地形,地面高程 30 m~88 m,山顶高程 100 m,边坡开挖高度一般 17 m~75 m,地层岩性主要为燕山期二长岩( $\eta_2$ ),主要发育 T1:150°~165°∠30°~35°及 T2:330°~350°∠25°~30°和 T3:20°~40°∠60°~75°三组裂隙。

下段(桩号 LTK4+900—LTK5+800),为山岭地形,地面高程 32 m~68 m,边坡开挖高度 20 m~55 m,地层岩性为三叠系中上统蒲圻组(T<sub>2-3</sub>pq)紫红色泥质粉砂岩、长石砂岩等,中厚层—厚层状构造,产状倾向 NNE 转向 NNW,倾角一般 30°~40°,左边坡为逆向坡,右边坡为视顺向坡。

## 2 边坡失稳模式分析

上-中湖连通渠道边坡开挖以来,虽未发生大规模失稳现象,但在开挖过程局部垮塌变形时有发生,其中规模最大的为 LTK3+150 处垮塌,估算方量为 4 000 m<sup>3</sup>,其他均为十几方或数十方的小规模垮塌。基于上-中湖水系连通工程边坡地层岩性、地质结构及边坡变形特征,将上-中湖连通工程边坡失稳模式归纳为四类:均质或似均质岸坡蠕滑-拉裂型(I型)、层状结构缓-中倾顺向坡滑移-拉裂型(II型)、块体结构楔形块体剪切-滑移型(III型)和复合型(IV型)。

### 2.1 均质或似均质边坡蠕滑-拉裂型(I型)

蠕滑-拉裂变形主要发生在均质或似均质体边坡中,连通渠道边坡上部的全强风化二长岩呈砂状,岩质疏松,岩体质量差,可看作均质或似均质岩土体,具备发生类似变形破坏的条件。

桩号 LTK2+650 处左岸地面高程 25 m~35 m,开挖边坡高 12 m~22 m,上部为覆盖层,下部为强风化和中风化燕山期二长岩,边坡结构如图 1 所示。

2018 年 12 月 7 日雨后多处发生小规模垮塌变形见图 2,垮塌开始后时后缘先出现裂缝,边坡发生“撒豆子”似滚落,随着裂缝增大,产生垮塌失稳,垮塌堆积的岩石多呈碎石和碎屑。垮塌位置顺坡长 4 m~6 m,高 5 m~8 m,面积 30 m<sup>2</sup>,水平深度 1 m~3 m,垮塌方量 50 m<sup>3</sup>。

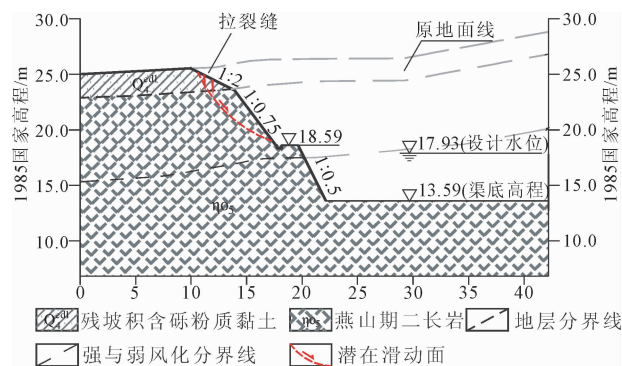


图 1 LTK2+650 处边坡失稳典型剖面图



图 2 LTK2 + 650 处边坡失稳

根据边坡结构和失稳形态,该处边坡失稳模式为均质或似均质边坡蠕滑-拉裂型,变形过程主要为三个阶段<sup>[8]</sup>,见图 3。第一阶段如图 3(a)所示,为表层蠕滑阶段,边坡开挖后,在自重应力作用下,沿岩土体中最大应力面发生弧形蠕变,岩层向下蠕滑,后缘产生拉应力;第二阶段如图 3(b)所示,为后缘拉裂阶段,此阶段边坡后缘产生拉裂缝,结构面被拉裂张开,并逐渐向坡体内部扩展,当坡体后缘发育有陡倾角的结构面时,拉裂更易发生,后缘产生拉裂后,造成蠕滑面上剪应力集中,促进了潜在滑动面的形成发展;第三阶段如图 3(c)所示,为潜在滑动面剪切扰动阶段,随着蠕滑变形进一步发展,斜坡中间剪应力集中部位被扰动,范围逐渐扩大,边坡下半部分逐渐隆起。随着变形体开始发生翻转,后缘产生明显下沉,后缘拉裂面由张开状态转为渐趋闭合。此时变形进入累进性破坏阶段,一旦潜在滑动面被剪断贯通,则发展为边坡失稳<sup>[9]</sup>。

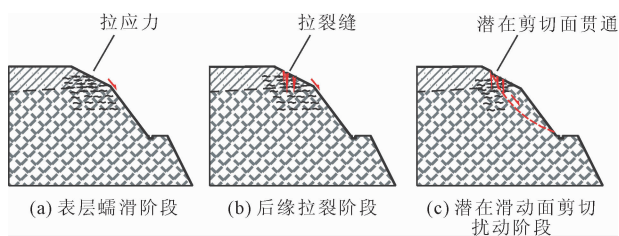


图 3 蠕滑-拉裂失稳成因变形机制模式

该边坡失稳模式主控因素为地层呈散体结构,自稳差,主要诱发因素为降雨,在强降雨作用下,地表水入渗使岩土体抗剪强度降低,同时降雨使得潜在滑面上部土体增重,导致边坡沿潜在滑动面抗滑力减弱,下滑力增大,抗滑力与下滑力达到临界值后边坡沿滑面发生圆弧形滑动,失稳边坡从坡顶后缘裂缝剪入,从边坡脚剪出<sup>[9]</sup>。

## 2.2 缓-中倾顺向坡滑移-拉裂型(II型)

滑移-拉裂变形主要发育在中缓倾外层状体边

坡和块状结构边坡中,边坡岩体沿下伏倾向坡外的结构面向临空方向滑移,在其重力作用下使其上部岩体拉裂解体。

桩号 LTK2 + 835 处右岸边坡倾向  $76^\circ$ ,地面高程 32 m,开挖边坡高约 18 m,地层结构为表部覆盖层,下部为燕山期二长岩,边坡结构如图 4 所示。

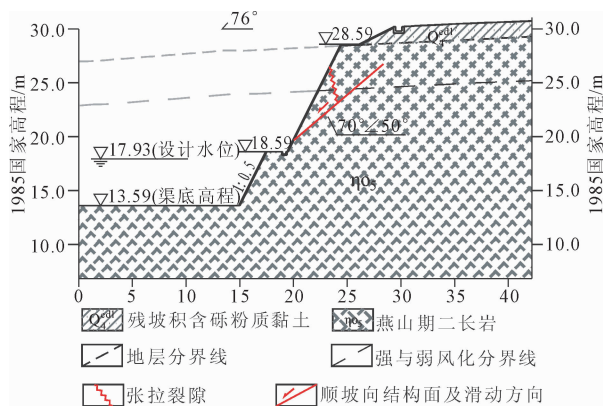


图 4 LTK2 + 835 右岸边坡失稳典型剖面图

2018 年 11 月 4 日发生沿顺坡向结构面垮塌变形见图 5,失稳变形范围顺坡长 5 m,高 5 m,面积  $20 \text{ m}^2$ ,水平深度 1 m ~ 2 m,垮塌方量  $30 \text{ m}^3$ ,下伏结构面产状  $70^\circ \angle 50^\circ$ ,结构面光滑,充填厚 1 cm ~ 2 cm 不等高岭土。



图 5 LTK2 + 835 处边坡失稳照片

根据边坡结构和失稳形态,该处边坡失稳模式为沿顺坡向结构面滑移-拉裂型,变形过程主要分为三个阶段<sup>[10]</sup>,见图 6。第一阶段如图 6(a)所示,边坡开挖后变形首先出现在浅表部或边坡顶部<sup>[11]</sup>,边坡岩体在重力作用下沿下伏外倾结构面向开挖临空方向发生变形;第二阶段如图 6(b)所示,边坡岩体向开挖临空面方向产生的变形进一步加剧,坡体中的拉裂缝从坡体表面向坡体内部扩展,坡体逐渐被拉开;第三阶段如图 6(c)所示,随着变形的进一步加剧,坡体中的拉裂缝进一步加大,斜坡体前缘部分与坡体发生脱离,并在重力作用下沿下伏外倾的结构面产生滑动,边坡失稳。

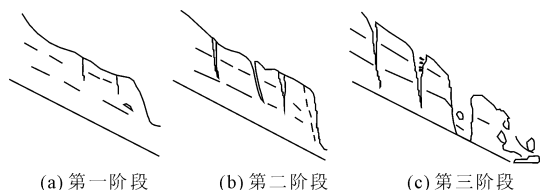


图 6 滑移-拉裂失稳成因变形机制模式

该边坡失稳模式主控因素为下伏顺坡向结构面的抗剪强度,结构面光滑平直且充填有高岭土,对边坡稳定不利。

### 2.3 楔形块体剪切-滑移型(Ⅲ型)

楔形块体剪切-滑移变形主要发生在块状结构边坡中,岩石边坡中发育有两组及以上结构面,彼此相交切割出楔形块体,楔体在发生滑动时,将沿着这两个平面的交线进行<sup>[12]</sup>。

桩号 LTK2 + 720 处左岸边坡走向 40°,左岸地面高程 28 m,开挖边坡高 15 m,表部为薄层覆盖层,下部为燕山期二长岩。2018 年 12 月 7 日雨后多处发生小规模垮塌变形见图 7,每处顺坡长 4 m,高 8 m,面积 20 m<sup>2</sup>,水平深度 1 m~3 m,垮塌方量 40 m<sup>3</sup>。



图 7 LTK2 + 720 处边坡失稳照片

该处发育两组裂隙,T1 产状:340°∠50°,平直光滑,间距 30 cm,T2 产状:240°∠75°,粗糙,间距 50 cm~100 cm。根据赤平投影成果,两组结构面交点与开挖面同侧,切割交线倾向坡外,且但倾角小于开挖坡角,在坡面和地面均有出露,属于不稳定楔形块体,赤平投影及失稳示意图见图 8。

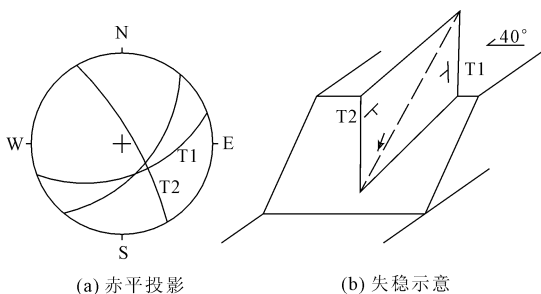


图 8 楔形块体赤平投影及失稳示意图

根据边坡结构和失稳形态,该处边坡失稳模式楔形块体剪切-滑移型,变形过程主要分为三个阶段,见图 9。第一阶段如图 9(a)所示,块体临空后在自身重力的作用下沿软弱结构面向临空方向发生变形,虽然沿软弱面产生多组破裂面,对于起伏状的结构面,此时一些陡度较大而形体窄小的凸起体被剪断,但剪切滑动仍主要沿接触面发生;第二阶段如图 9(b)所示,块体向临空面方向产生的变形加剧,剪应力达到结构面的残余强度,剪切过程中将凸起体剪断,沿结构面产生剪切破坏,形成楔形块体;第三阶段如图 9(c)所示,随着剪切变形的进一步加剧,块体的切割面一旦被剪断贯通,剪切滑动发生,块体在重力作用下沿着两组结构面的交线进行产生滑动,即发展为边坡失稳。

### 2.4 复合型(Ⅳ型)

边坡变形虽然大部分以某一种模式为主,由于边坡岩体结构、性状及开挖形态的复杂性,局部边坡也会同时发生两种及以上的变形模式,并以一定方式组合在一起<sup>[8]</sup>。

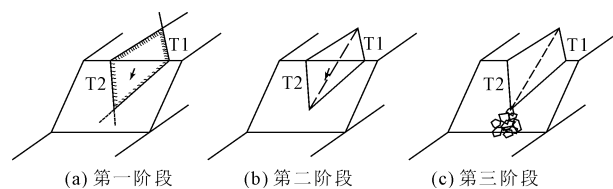


图 9 楔形块体剪切-滑移失稳成因变形机制模式

桩号 LTK3 + 150 处的左岸地面高程 46 m,边坡高 33 m,地层主要为燕山期二长岩,边坡结构如图 10 所示。

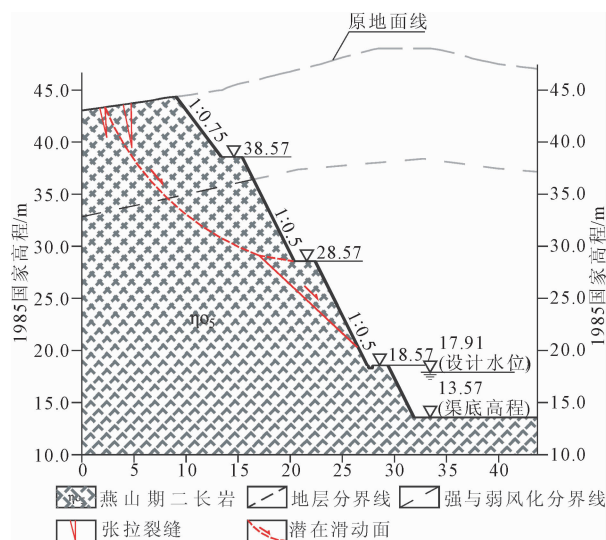


图 10 LTK3 + 150 左岸边坡失稳典型剖面图

2018 年 6 月 14 开挖以来,发生了两次垮塌,第

一次为 2018 年 9 月 20 日在开挖三级边坡时,上部两级边坡发生垮塌变形,后缘出现大量张拉裂缝,顺坡长 15 m,高度 5 m~8 m,变形宽度 2 m~3 m,塌方方量约 200 m<sup>3</sup>。第二次为 2018 年 12 月 24 日,开挖至第四级边坡时,前缘发生垮塌,后缘产生大面积变形,见图 11,主要涉及第一级至第三级边坡,高度约 25 m,后缘变形宽度 40 m,产生大量张拉裂缝,变形深度约 3 m~8 m,上部深、下部浅,呈喇叭形,塌方方量约 4 000 m<sup>3</sup>。



图 11 LTK3 + 150 处边坡失稳照片

根据边坡结构和失稳形态,该处垮塌为下部楔形块体剪切-滑移型与后缘均质或似均质边坡蠕滑-拉裂型组合的复合型,下部基岩沿两组结构面向坡外发生变形,典型的楔形块体剪切-滑移变形,后缘全强风化岩体表现为张拉裂缝,变形表现为弧形滑动,属于典型的蠕滑-拉裂变形。变形过程主要分为三个阶段,见图 12。第一阶段如图 12(a)所示,下部第三级边坡岩体裂隙发育,呈碎裂结构,其中发育有两组裂隙,T1:150°~165°∠30°~35°,裂面平直、泥质充填;T2:330°~350°∠25°~30°,裂面平直、泥质充填,两组裂隙的切割下,形成不稳定块体;第二阶段如图 12(b)所示,随着边坡开挖,三级边坡上的块体沿上述两组结构面产生楔形块体剪切-滑移变形,三级边坡上的块体发生后,上部二三级边坡下部临空,上部岩体主要为全强风化基岩,岩层向坡下弯曲,后缘产生拉裂缝;第三阶段如图 12(c)所示,上部一二级全强风化岩体结构疏松,变形进一步加剧,后缘拉裂缝逐渐向坡体内部扩展,后缘被拉裂张开后,造成潜在滑动面上剪应力集中,进一步加剧了最大剪应力带的剪切变形,随着变形的持续,在重力作用下发生均质或似均质边坡蠕滑-拉裂变形,最终发生从下之上的垮塌变形。

对岩质边坡而言,其稳定性一般由岩体结构及其组合形态所控制,即岩质边坡失稳滑移面一般沿岩体内的结构面追踪发展。当边坡地层岩性、地质

构造复杂,特别是存在诸如层面、断层、节理裂隙、软弱夹层等时,则有可能在边坡下部先形成潜在滑面及不稳定块体,当底部不稳定块体失稳后,进一步引起上部潜在滑体的失稳,整个边坡工程的失稳往往由最先失稳的关键块体所引起,并产生连锁反应<sup>[13]</sup>。

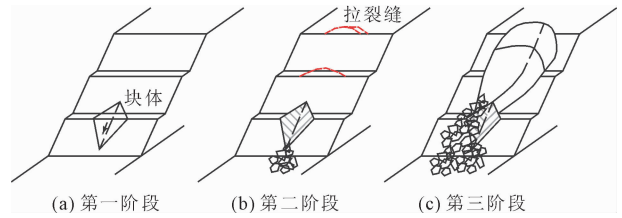


图 12 复合型失稳成因变形机制模式

### 3 应对措施

根据中-下湖连通渠道边坡地层结构、边坡失稳情况,工程类比相似地层结构的边坡工程,按控制岩体稳定性的主导因素进行处理。

#### (1) 均质或似均质边坡蠕滑-拉裂型(I型)

均质或似均质边坡蠕滑-拉裂型主控因素是边坡体呈散体或碎裂结构,边坡不宜太陡是关键,全强风化基岩开挖坡比 1:1~1:0.75 较为合适,当边坡高度大于 5 m 时,宜取缓值。及时对坡面进行喷护,一是岩体变形破坏过程随时间而发展蠕变,其二是在变形恒定的情况下,岩体内应力随时间逐渐降低,即发生松弛现象,时间效应对边坡稳定不利。另外应及时修建截排水设施,防止降雨入渗,边坡中地下水主要表现为潜蚀、渗透变形、软化、泥化及增重效应等<sup>[10]</sup>。若无边坡放缓的条件,则需采取专门的开挖措施如边挖边支,同时加强支护措施如采取混凝土加锚杆(索)方案等。

#### (2) 层状结构缓-中倾顺向坡滑移-拉裂型(II型)

这类潜在不稳定岩体可分布在所有层状岩质边坡,顺向坡尤为发育,其稳定性主要由结构面的抗剪强度所控制<sup>[14]</sup>,如结构面起伏形态、粗糙程度、充填物的类型和性状等,因此主要采取锚杆(索)进行系统加固和锁口处理<sup>[15]</sup>。同时对坡面进行挂网喷护,一方面减少结构变形时间效应,另一方面减少雨水入渗对结构的软化、泥化作用。

#### (3) 楔形块体剪切-滑移型(III型)

楔形块体剪切-滑移型失稳模式在此类型边坡工程中最普遍。岩体的稳定条件主要受制于结构面发育特征,如结构面特征、组合形态、与临空面的

空间关系等。失稳规模也大小不一,由结构面长度控制,结构面延伸越长,规模越大,对施工安全威胁越大。因此主要应对措施是对不稳定块体及时进行加固或清除处理,加固手段主要根据块体大小可采取不同长度的锚杆(索),同时在边坡工程施工期间加强地质预测预报,判断结构面组合方式,是否可能向临空面产生滑动、崩塌等失稳情况。

#### (4) 复合型(IV型)

复合型失稳边坡应结合地质地形条件找出关键边坡失稳模式,根据关键失稳模式采取相应的应对措施。如桩号 LTK3 + 200 m 处的垮塌变形为下部楔形块体剪切-滑移型与后缘均质或似均质边坡蠕滑-拉裂型,针对下部楔形不稳定块体主要采取锚固措施,上部蠕滑-拉裂不稳定部位主要采取放缓坡比的处理措施。

### 4 工程边坡支护实施效果

花马湖上-中湖连通渠上部一级、二级边坡主要为全强风化岩体,主要会发生蠕滑-拉裂型失稳,由于红线范围受控,开挖坡比为 1:0.75,采用  $\Phi 20$  系统锚杆,根据坡高  $L = 9 \sim 12 \text{ m} @ 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ,梅花形布置,喷 20 cm 厚 C20 混凝土。中下部中风化岩体裂缝发育,主要会发生滑移-拉裂型、楔形块体剪切-滑移型失稳,下部块体失稳引发上部拉裂复合型失稳,边坡以控制块体稳定为目的,开挖坡比 1:0.5,采用  $\Phi 25$  系统锚杆,根据坡高  $L = 3 \sim 6 \text{ m} @ 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,梅花形布置,喷 15 cm 厚 C20 混凝土,裂隙发育或顺向坡地段根据结构面发育情况和块体分布情况随机布置锚杆加固。同时,开挖范围线外 5 m 设截水沟,坡面设  $\Phi 50$  排水孔。连通渠通过三年多的运行,目前整体处于稳定状态,表明采取的支护方案合理。

### 5 结 语

岩质边坡变形破坏是个复杂的过程,失稳模式多种多样,边坡防治应结合地形地貌、岩土体性质、边坡结构等地质条件,分析其对边坡稳定性的影响程度,并根据其产生条件、变形特征和失稳模式针对性地采取应对处理措施。本文以工程地质分析原理为基础,结合开挖过程中边坡失稳情况,系统研究了花马湖上湖-中湖水系连通工程边坡失稳过程和失稳模式,并根据边坡失稳模式,结合地质条件,采取不同开挖坡比、锚杆支护措施,确保开挖边坡稳定,经过渠道三年多的运行观测,目前渠道沿线边坡整

体处于稳定状态,进一步验证了本文提出的边坡失稳模式划分以及应对不同失稳模式处理措施的合理性,确保了水系连通工程的安全,取得了较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] 余诗刚,林 鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(3):433-457.
- [2] 周德培,钟 卫,杨 涛. 基于坡体结构的岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(4):687-695.
- [3] 马 力,李克民,韩 流,等. 平直与水平凹形边坡力学结构及稳定性对比研究[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(4):728-733.
- [4] 刘大显,孙云志,冉隆田,等. 大奔流沟料场高边坡变形破坏模式与稳定性分析[J]. 人民长江,2013,44(14):8-12,21.
- [5] 董晓红,梁桂兰,许忠厚. 边坡稳定分析方法综述及发展趋势研究[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(5):100-102,106.
- [6] 栾约生,刘红星. 三峡库区巴东县新县城高边坡破坏模式研究[J]. 人民长江,2005,36(3):50-51.
- [7] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 湖北国际物流核心枢纽花马湖水系综合治理近期工程地质勘察报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2018.
- [8] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,2009.
- [9] 谭玉强. 层状岩质边坡稳定性评价理论与支护设计方法研究[D]. 贵阳:贵州大学,2009.
- [10] 邬爱清. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报,2019,36(2):1-7.
- [11] 刘汉东,陈钧龙,牛林峰,等. 层状岩质边坡动力变形破坏特征的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):90-94,120.
- [12] 程 岩,张文栋,刘艳领,等. 白龙江某水电站枢纽区顺向河谷岸坡变形特征及其形成机理研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(4):135-141.
- [13] 邵光钦,李绍红,吴礼舟. 考虑降雨作用的含张拉裂隙顺层岩坡稳定性分析[J]. 人民长江,2017,48(20):52-57.
- [14] 王吉亮,杨 静,陈又华,等. 复杂层状高陡岩质边坡变形与稳定性研究[J]. 水利学报,2015,46(12):1414-1422.
- [15] 薛一峰,毛拥政,王 健,等. 考虑倾斜侧滑面的高陡岩质边坡块体稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(4):104-110.