

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.02.008

碎裂松动岩体高边坡稳定分析及防治

郭丽娜¹, 曹学兴², 贾贺³

(1. 云南工商学院, 云南 昆明 651701; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650051;

3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 高陡峡谷地区, 碎裂松动岩石的存在对边坡稳定性起到重要影响。针对碎裂松动岩体的定量化指标获取尚无成熟方法、碎裂松动岩体稳定分析困难、防护效果不佳等问题提出一套碎裂松动岩体高边坡稳定分析及防治的解决方案。对碎裂松动岩体特性进行研究, 分析其存在的破坏模式; 根据碎裂松动岩体的分布范围及主滑动方向进行计算剖分, 基于有限元应力的虚功率法对碎裂松动岩体边坡稳定进行分析; 最后基于边坡稳定分析结果对碎裂松动岩体边坡不稳定位置采用削坡开挖、喷锚支护、柔性防护网防护以及坡面截排水相结合的处理措施进行防护。

关键词: 碎裂松动岩体; 柔性防护网防护; 削坡开挖; 喷锚支护; 虚功率法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)02-0042-06

Stability Analysis and Prevention of High Slope with Broken Loose Rock Mass

GUO Lina¹, CAO Xuexing², JIA He³

(1. Yunnan Technology and Business University, Kunming, Yunnan 651701, China;

2. Huaneng Lancang River Hydropower INC., Kunming, Yunnan 650051, China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In high and steep gorge area, the existence of broken loose rock plays an important role in slope stability. Focusing on the problems such as the lack of mature method for obtaining quantitative index of broken loose rock mass, the difficulty in stability analysis of broken loose rock mass and poor protection effects, a set of solutions for stability analysis and prevention of high slope of broken loose rock mass are proposed. The characteristics of broken loose rock mass are analyzed, and the existing failure mode is concluded. According to the distribution range and main sliding direction of broken loose rock mass, the slope stability of broken loose rock mass is analyzed based on virtual power method of finite element stress. Finally, based on the results of slope stability analysis, slope cutting excavation, shotcrete anchor support, flexible protection net protection and slope interception and drainage are adopted to protect the unstable position of broken loose rock slope.

Keywords: broken loose rock mass; flexible protection net; slope cutting and excavation; shotcrete bolt support; virtual power method

青藏高原地区, 地质结构复杂多样, 碎裂松动岩体分布广、强卸荷岩体较为发育、边坡陡峭、岩体受风化作用严重。使得边坡稳定分析困难。目前, 针

对碎裂松动岩体的定量化指标取值尚无成熟方法; 对滑坡的变形机制和模式也在探讨中; 对高原岩体滑坡的稳定性分析及治理技术无系统研究, 尚不足

为高原峡谷地区滑坡风险提供强有力的技术支撑。

黄润秋等^[1]通过研究深切高陡峡谷地区河谷岸坡浅表破坏模式发现边坡开挖后强卸荷特点。祁潇等^[2]对传统预应力锚索及锚筋桩的数值模拟方法进行改进。郑宗利^[3]对以往预应力锚索加固高边坡遇到的问题及解决方法进行分析,给高边坡稳定分析及治理提供了参考。白桃等^[4]通过对边坡安全系数的研究,发现安全系数和破坏概率 2 个指标能够量化地表述边坡稳定性。张典典等^[5]提出 MATLAB 与瑞典条分法相结合的方法,简化了大量的计算。黄盛铨等^[6]提出以边坡滑移位移与强度折减系数曲线的最大曲率所对应的折减系数为边坡安全系数的判别标准,克服了“位移突变准则”不准确的缺点。文献[7-9]提出了高边坡安全措施,为高边坡安全防护提供了参考经验。文献[10-12]对不同工况下对岩质高边坡安全稳定进行细致的研究。以上文献对高边坡的稳定分析和防护措施进行了大量的研究,但针对碎裂松动岩体高边坡的稳定性分析和防护措施的研究缺少实际的指导经验。

本文以高原地区某水电工程为依托,对碎裂松动岩体边坡基本地质条件和滑动破坏模式进行研究,针对碎裂松动岩体边坡采用基于有限元虚功率法和考虑卸荷条件的有限元法进行稳定分析,定量评价了边坡的稳定安全系数。在掌握了碎裂松动岩体边坡稳定性前提下针对本工程提出了可行的防治技术。可为碎裂松动岩体高边坡稳定研究提供指导作用。

1 碎裂松动岩体变形破坏模式

1.1 碎裂松动岩体的结构特征及变形特征

松动岩体指在全强风化岩体基础上,裂隙面和岩体内部的岩石矿物也发生了风化蚀变,岩石、岩块强度有较大幅度的降低,但岩块之间较为紧密。

碎裂松动岩体包含两层意义,一是岩体呈碎裂结构,裂隙间距一般在 30 cm 左右及以下;二是岩体呈松动状态,即岩体整体有明显的松动、扩容现象,岩块之间各个方向嵌合松弛,从实际应用看,明显松弛分离的块体一般小于 1 m,部分为 1 m~2 m。碎裂松动岩体包括散体结构、碎裂结构(裂隙间距 < 10 cm)及块裂结构(裂隙间距 10 cm~30 cm)的松动岩体,同时由于地质结构的不均一性,在碎裂松动岩体中局部存在其它结构岩体也是很普遍的。根据某水电工程的平硐勘探,发现正常条件下碎裂松动

岩体由表及里呈散体结构-碎裂结构-块裂结构变化,下渐变为卸荷岩体。

通过对某水电工程的平硐和地表调查,选取 22 处碎裂松动岩体进行变形特征分析,得出碎裂松动岩体分为强变形区和弱变形区:

(1) 强变形区。主要分布于规模较大的碎裂松动岩体浅表部,对应于岩体结构的散体结构区,该区典型特征是碎裂状岩体变形破坏后产生了一定的位移,堆积于碎裂松动岩体表面较缓的斜坡一带或坡脚一带。

(2) 弱变形区。对应于岩体结构的碎裂结构区,岩体被多组裂隙切割,沿大部分结构面产生明显的张裂、扩容或倾倒变形,以形成 10 cm~80 cm 不等的块体,块体之间基本相互分离,类似于“干砌石”结构。

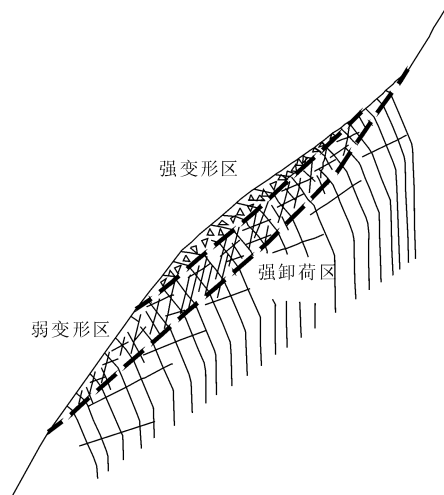


图 1 典型碎裂岩体的变形特征

1.2 碎裂松动岩体边坡破坏模式

根据碎裂松动岩体的机制分析^[13],碎裂松动岩体主要分为倾倒变形为主的碎裂松动岩体、冻融风化为主的碎裂松动岩体两大类,两者具有不同的边坡破坏模式^[14-15]。

(1) 倾倒变形为主的碎裂松动岩体边坡破坏模式。剖面由上而下分为二层,各层物质成分和岩体结构不同,具有不同的破坏模式。

① 表层强变形区(坠覆堆积和倾覆堆积区)。岩块完全分离,物质成分以块碎石夹砂土为主,岩块块径为 20 cm~40 cm,类似于崩坡积物。该层属散体结构,边坡破坏模式以圆弧形滑移为主,稳定性由圆弧滑动和底界面滑动控制。值得注意的是因碎裂松动岩体大多沿山梁部位分布,现场调查发现向冲沟内滑动现象也时有发生,需注意其向冲沟内的滑

动变形。

② 弱变形区。倾倒变形、沿折断面滑移,结合坝址区碎裂松动岩体现状调查,这类强倾倒区破坏也近似呈圆弧形,但稳定性大多受到折断面滑移控制。

(2) 冻融风化为主的碎裂松动岩体边坡破坏模式。

① 强变形区(表层堆积区)。圆弧形滑移或局部的松动掉块。

② 弱变形区(松动区)。进一步松动变形,局部塌滑。

2 基于有限元应力的虚功率法

2.1 边坡稳定安全系数的定义

求地基的承载力时,采用极限分析法。极限分析法是对于设定的刚体或变形体组合机制,通过计算静力许可的应力场或运动许可的速度场,根据虚功原理(外力所做的虚功,等于物体内部的需应变能)来计算极限荷载的。极限状态下的应变能可以作为表征物体承载力的单一指标。对于边坡滑动,边坡极限状态下的应变能与边坡当前状态下的应变能之比值,或极限状态下刚体相对滑动之功率(能量耗散率)与当前状态之下功率之比,可以定义为边坡稳定安全系数。

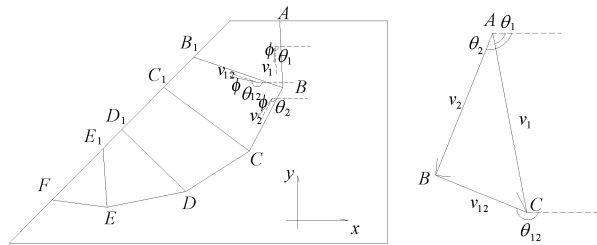
对于单一圆弧和直线以外的滑动面,包括单一的非圆弧曲线滑动面和折线、滑弧、非圆弧曲线的组合,统称为组合式滑动面。由于不存在单一刚体沿着组合式滑动面的运动许可的速度场,因此,组合式滑动面上的边坡体只能是刚体的组合或刚体与变形体的组合。刚体与刚体之间存在速度间断,即存在相对速度。组合式滑动面的滑动,除了滑动面上有功率以外,刚体之间和变形体内部也存在功率。

2.2 基于有限元应力的虚功率法计算公式

以图 2 所示的折线组合滑动面为例, $ABCDEF$ 滑动面上部的滑动体总的功率可以表示为式(1):

$$P = \int_{\Gamma} v\tau \cos\phi d\Gamma + \int_{\Gamma} v\sigma_n \sin\phi d\Gamma \quad (1)$$

其中: τ 为滑动面上的剪应力; σ_n 为滑动面上的法向正应力; v 为速度间断面上的速度; ϕ 为速度与间断面之间的夹角,由于剪胀而引起,因而又称之为剪胀角,不同部位的剪胀角可以不相同; Γ 为所有速度间断面的集合。设边坡的滑动安全系数为 F , 则:



(a) 折线组合式滑动面

(b) 速度三角形

图 2 折线组合式滑动面与速度三角形

$$\int_{\Gamma} v\tau \cos\phi d\Gamma + \int_{\Gamma} v\sigma_n \sin\phi d\Gamma = \int_{\Gamma} v(\tau_f/F) \cos\phi d\Gamma + \int_{\Gamma} v\sigma_n \sin\phi d\Gamma \quad (2)$$

由此,可以得到给定滑动刚体组合的边坡安全系数的显式表达式:

$$F = \frac{\int_{\Gamma} v\tau_f \cos\phi d\Gamma}{\int_{\Gamma} v\tau \cos\phi d\Gamma} \quad (3)$$

安全系数定义为总的滑动刚体速度间断面(刚体之间接触面和底滑面)上的抗剪强度功率与总的剪应力功率之比。

依据静力平衡的应力场和运动许可的刚体速度场,可以计算得到安全系数的一个上限值。

3 碎裂松动岩体高边坡防治技术

3.1 工程处理常用措施

根据碎裂松动岩体边坡的地质特性、破坏模式,目前针对碎裂松动岩体边坡专门的处理技术研究不多,碎裂松动岩体边坡的处理技术较多的参考岩质边坡和土质边坡的处理技术。表 1 列出了常用的针对较为破碎的岩质边坡以及土质边坡的防治措施,这些措施都可以应用于碎裂松动岩体高边坡防治工程。

表 1 碎裂岩体边坡常用防治措施

| 开挖措施 | 加固措施 | 防护措施 | 截、排水措施 |
|---|---|--|---|
| 1. 采用较缓的开挖坡比。 2. 选择合适的马道宽度,相邻马道的高差,推荐马道宽度 3 m,马道高差 15 m,每 60 m 设一级 5 m ~ 6 m 宽马道。 3. 清除表层较破碎岩体。 | 1. 挡墙。 2. 锚杆挡墙。 3. 土钉墙。 4. 钢筋混凝土土框架锚索(锚杆)。 5. 预应力锚索地梁。 6. 抗滑桩。 7. 预应力锚索抗滑桩。 | 1. 浆砌片石护坡。 2. 拱形(菱形)混凝土骨架护坡。 3. 柔性防护网: (1) 主动防护网; (2) 被动防护网; (3) 防护帘。 | 1. 边坡表层排水孔。 2. 坡顶截水沟。 3. 坡内排水: (1) 截水盲沟; (2) 排水隧洞; (3) 边坡渗沟。 |

3.2 治理措施研究

综合考虑碎裂松动岩体边坡地形地质特点、碎

裂松动岩体物理力学特性和稳定分析成果,边坡治理主要包括:

(1) 边坡整体稳定处理。边坡整体稳定性采用开挖或加固措施处理至稳定性满足设计要求。

(2) 表层防护。防止表层破碎岩体掉块、局部垮塌等,坡面表层进行系统喷锚支护。

(3) 边坡表层排泄水。

① 防止降雨过程中坡面径流水流入碎裂松动岩体范围以内,进而渗入坡内,对边坡稳定不利,在边坡范围以外设置截水沟,将水引至坡外;针对开挖后的人工边坡采用挂网喷混凝土的方式防止后续风化,同时防止外水入渗;针对外开挖的边坡,采用混凝土将地表外露的较大裂隙封闭。

② 针对人工开挖的边坡表层布置排水孔,加强边坡排水,降低坡内孔隙水压力,提高边坡稳定性。

4 工程应用分析

以某水电工程为依托,对碎裂松动高边坡进行边坡稳定分析,并对边坡进行防护处理。

4.1 工程基本概况

边坡开挖边坡总高度约 415 m,建基面高程 2 592 m 至坝顶 2 907 m 高程为临时开挖边坡,水平挖深 15 m ~ 60 m,高 315 m;坝顶 2 907 m ~ 3 005 m 高程为永久人工边坡,最高约 100 m,3 005 m 高程以上为自然边坡。其中防渗心墙部位开挖边坡顺河向宽度在 200 m 左右。

4.1.1 左岸边坡基本地质条件

本区地形为斜坡地形,坡度在 $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间,出露地层岩性主要为三叠系中统竹卡组(T_2z)英安岩和花岗岩,强风化带基本上零星分布在 2 860 m 高程以上的斜坡地带,弱风化上带水平深 45 m ~ 90 m 居多,少数达 140 m ~ 188 m,弱风化下带多 60 m ~ 100 m 以上,少数达到 150 m 以上。强卸荷 2 650 m 以下不明显,2 650 m 以上水平深 20 m ~ 150 m,弱卸荷深 30 m ~ 160 m 不等。卸荷形式以陡倾张裂为主,但局部存在中缓倾角破裂现象,陡倾张裂普遍分布于左岸岸坡,而中缓倾角破裂目前仅在 PDZ07 平硐一带有所揭露。

4.1.2 左岸边坡现状破坏模式调查

现状调查显示,控制边坡稳定的主要是产状 $N25^{\circ} \sim 50^{\circ} W/SW \angle 24^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的缓倾角错动带,共 5 条,长度在 100 m ~ 300 m 之间,未张开,结构面充填物主要是岩块、岩屑,结构面厚度多在 10 cm 以下,其与陡倾角结构面易构成滑移拉裂变形,如图 3 所示。



图 3 结构面产生滑移、拉裂破坏后的形态

4.2 碎裂岩体边坡稳定分析

文中对四处碎裂松动岩体边坡进行安全系数计算,分别为:碎裂松动岩体边坡 SL19、碎裂松动岩体边坡 SL26、碎裂松动岩体边坡 SL22、碎裂松动岩体边坡 SL20。四处碎裂松动岩体边坡平面布置图见图 4。

4.2.1 四处碎裂松动岩体边坡基本概况

(1) 碎裂松动岩体边坡 SL19。碎裂松动岩体边坡 SL19 位于左岸坝肩边坡,分布在 2 920 m ~ 3 095 m 高程,分布面积约 2 万 m^2 ,分布区自然坡角 35° ,顶部可见缓坡平台分布,推测厚度 3 m,碎裂松动岩体方量 6 万 m^3 。表层风化碎裂为块石或巨石,岩块块径多 0.3 m ~ 1.5 m,呈散体装,厚约 3 m,表现为松动变形,及向两侧的局部滑塌,碎裂松动岩体目前整体基本处于稳定状态。

(2) 碎裂松动岩体边坡 SL26。碎裂松动岩体边坡 SL26 位于右岸上游坝脚上部,分布在 2 760 m ~ 3 100 m 高程,分布面积约 5.5 万 m^2 ,分布区自然坡角 $40^{\circ} \sim 65^{\circ}$,顶部可见缓坡平台分布,推测厚度 5 m ~ 25 m,碎裂松动岩体方量 74.3 万 m^3 。整体表现为沿山脊风化碎裂状态,普遍为松散碎块石,夹少量粉砂土,陡坎及局部突出部位为大块石(1 m ~ 2 m),少量为巨石,推测总体厚度 5 m ~ 15 m。碎裂松动岩体目前整体基本稳定。

(3) 碎裂松动岩体边坡 SL22。SL22 位于右岸坝肩边坡,分布在 2 835 m ~ 3 150 m 高程,分布面积约 1.82 万 m^2 ,分布区自然坡角 40° ,呈长条形分布,推测厚度 10 m ~ 15 m 不等,碎裂松动岩体方量 19.2 万 m^3 。整体表现为沿山脊风化碎裂,上部及下部表层风化碎裂严重,岩体已呈现散体状,块径以 0.1 m ~ 1.0 m 为主,其下部及中间部位岩体松动卸荷明显,低高程见有轻微倾倒变形。碎裂松动岩体目前整体基本稳定。

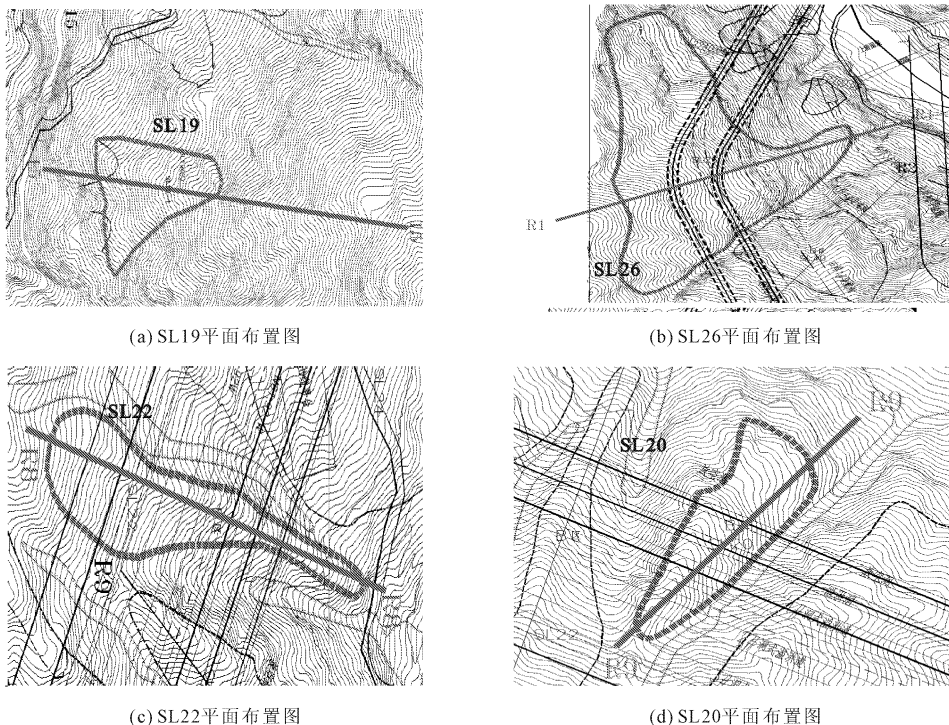


图 4 平面布置图

(4) 碎裂松动岩体边坡 SL20。SL20 位于右岸坝肩边坡,分布在 2 895 m ~ 3 035 m 高程,分布面积约 1.32 万 m^2 ,分布区自然坡角 $30^\circ \sim 45^\circ$,推测厚度 5 m ~ 10 m 不等,碎裂松动岩体方量 6.6 万 m^3 。整体表现为上部 5 m ~ 10 m 松动碎裂,略有变形,表层局部风化碎裂成散体结构,岩块块径以 10 cm ~ 50 cm 为主,局部分布大块石,块径 1 m ~ 2 m,推测散体状堆积 10 m 左右。下部为松动变形,发育缓倾裂

隙,易与松动卸荷岩体形成不稳定块体。碎裂松动岩体目前整体基本稳定。

4.2.2 天然状态边坡稳定分析

在持久工况、短暂工况、偶然工况三种工况下,本文分别采用刚体极限平衡法^[16]和基于有限元应力的虚功率法对四处岩体边坡进行边坡稳定安全系数计算,计算结果见表 2。

表 2 稳定计算结果

| 碎裂区域 | 计算剖面 | 边坡等级 | 计算工况 | 安全系数 | | | 安全系数控制标准 |
|------|------|------|------|---------|-------|------------------------|----------|
| | | | | 刚体极限平衡法 | | 基于有限元应力的虚功率法 (内部圆弧) | |
| | | | | 内部圆弧 | 底界面 | | |
| SL19 | L5 | I 级 | 持久工况 | 1.498 | 1.478 | 1.282 | 1.25 |
| | | | 短暂工况 | 1.481 | 1.471 | — | 1.15 |
| | | | 偶然工况 | 1.372 | 1.348 | 1.090 | 1.05 |
| SL26 | R1 | I 级 | 持久工况 | 1.090 | 1.062 | 1.068 | 1.25 |
| | | | 短暂工况 | 1.080 | 1.059 | — | 1.15 |
| | | | 偶然工况 | 0.991 | 0.962 | 0.842 | 1.05 |
| SL22 | R8 | I 级 | 持久工况 | 1.622 | 1.691 | 1.381 | 1.25 |
| | | | 短暂工况 | 1.602 | 1.649 | — | 1.15 |
| | | | 偶然工况 | 1.494 | 1.544 | 1.129 | 1.05 |
| SL20 | R9 | I 级 | 持久工况 | 1.454 | 1.646 | 1.222 | 1.25 |
| | | | 短暂工况 | 1.449 | 1.638 | — | 1.15 |
| | | | 偶然工况 | 1.367 | 1.534 | 1.051 | 1.05 |

由表2可知,计算SL19碎裂区域剖面L5在三种工况下,两种滑动模式皆满足设计标准要求。

计算SL26碎裂区域剖面R1由于坡度较陡,且碎裂松动岩体厚度较大,在三种工况下,两种滑动模式皆不满足设计标准要求。内部圆弧滑动滑弧深度约20 m,沿底界滑动时,单宽体积约6 364 m³。

计算SL22碎裂区域剖面R8时,采用基于有限元应力的虚功率法计算所得天然状态时稳定安全系数1.381,偶然状况时1.129,均大于设计标准,无需加固处理。

计算SL20碎裂区域剖面R9时,采用基于有限元应力的虚功率法计算所得天然状态时稳定安全系数1.222,偶然状况时1.051,持久工况仅比设计标准1.25小了2.2%;采用常规刚体极限平衡法计算所得持久工况1.454,短暂工况1.449,偶然工况1.367,远大于设计标准的1.25、1.15和1.05;综合两种计算方法计算结果,该碎裂松动岩体边坡稳定性满足设计标准,无需加固处理。

4.3 碎裂松动岩体边坡整体稳定处理措施

稳定分析表明,碎裂松动岩体边坡仅强变形区(A区)稳定性不满足要求,如图5所示,故仅针对强变形区进行治理研究。

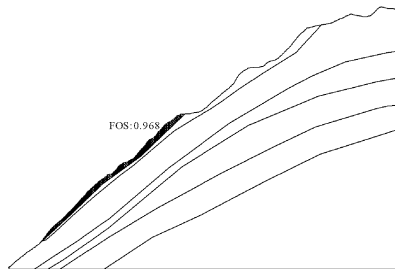


图5 典型碎裂松动岩体边坡最危险滑面示意图

综合安全可靠、施工技术可行、经济合理和环境友好四个方面,针对碎裂松动岩体边坡特性推荐采用削坡开挖、喷锚支护、柔性防护网防护^[17]以及坡面截排水相结合的处理措施,稳定分析及治理流程如图6所示。该方法使用在西部高原地区某水电工程中进行应用,有效的解决了边坡失稳问题。

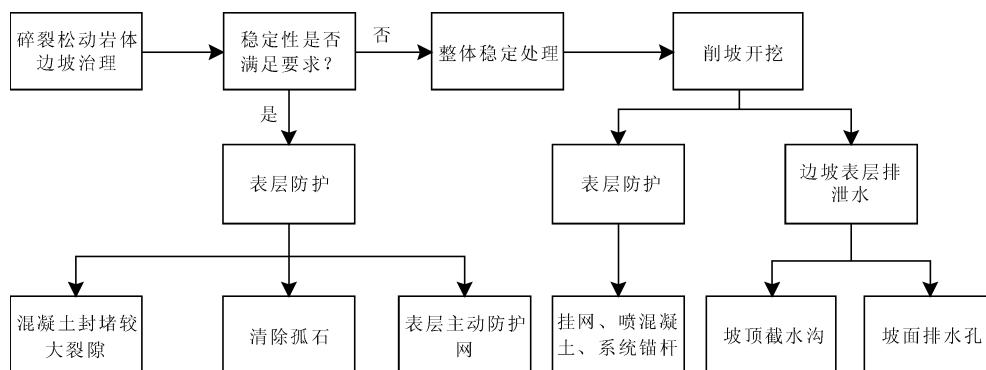


图6 碎裂松动岩体边坡治理路线图

5 结论

(1) 采用本文分析方法解决了有限元计算中复杂组合滑动模式情况下的不良地质体稳定分析问题,发展了有限元应力用于滑动稳定安全系数计算的理论,丰富了边坡工程安全评价手段,定量评价了边坡的稳定安全系数及应力变形状态。

(2) 以典型碎裂松动岩体边坡为例,提出了“分区处理,多种措施相结合”的治理思路。在西部高原地区某水电工程中应用效果显著,具有施工难度小,成本低后期不存在预应力松弛损失的风险等优点。

(3) 以典型碎裂松动岩体边坡为例,研究了碎裂松动岩体边坡处理措施,提出了“分区处理,多种措施相结合”的治理思路。其中多种处理措施为削坡开挖、表层主动防护网防护、开挖边坡喷锚支护和

截排水相结合的治理措施。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
- [2] 祁潇, 赵海涛. 边坡稳定中预应力锚索及锚筋桩有限单元法分析研究[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(1): 176-180.
- [3] 郑宗利. 高边坡加固工程中预应力锚索的运用研究[J]. 建材与装饰, 2019(18): 243-244.
- [4] 白桃, 黄晓明. 考虑土体参数空间变异性的边坡极限平衡法求解[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 662-667.
- [5] 张典典, 雷浩, 吴月勇. MATLAB在瑞典条分法中的应用[J]. 科技世界, 2014, 138(7): 138.

(下转第88页)

4 结 论

(1) 调查了张家口市张北县 4 100 户危房,并根据房屋危险状况与评定标准与农村危险房屋鉴定技术导则评定了危房损坏等级,其中土房类 D 级危房占土房危房总数 72.1%,砖木类 D 级危房占砖木类危房总数 69.8%,危房病害情况较为严重,大部分危房都需要进行维修加固或拆除重建。

(2) 张北县白庙滩乡土房、单晶河乡和二泉井乡砖木类危房主要病害原因是湿陷性黄土地基基础的破坏,且地基基础的破坏对于 D 级危房的影响最大。砖木类危房的承重墙和木梁、檩条对于房屋的影响也较大,而黄土地基对于土房的影响比砖木类房屋的影响更大。

(3) 产生张北县危房病害因素有砌筑工艺较差、未设圈梁构造柱、受压不均匀、承重墙裸露、基础埋深过浅,每种因素给出了相关的处理措施。

(4) 张北县年平均气温较低,为预防地基冻胀,应将基础底面埋置在土壤冰冻线以下;当地基不能埋置到冰冻线以下时,可以采取换土的方法,将冻胀土换成非冻胀土。

参考文献:

[1] 信息专栏[J]. 现代城市研究,2019(9):132.
 [2] 孟 扬,马 捷,张乐群. 基于检验机构能力验证浅析危险房屋鉴定的若干技术问题[J]. 建筑科学,2019,35(9):142-146.
 [3] 岳欢欢. 关于砌体结构房屋安全鉴定的思考[J]. 黑龙江科技信息,2016(4):199.

[4] 张学超,陈书文,朱维娜,等. 甘肃陇中地区黄土工程地质特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):74-77.
 [5] Nouaouria M S, Guenfoud M, Lafifi B. Engineering properties of loess in Algeria[J]. Engineering Geology, 2008,99(1):85-90.
 [6] 刘 洋,刘 润,程 辉,等. 黄土高陡边坡稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(3):92-95,122.
 [7] Yang Zhang, Alex E. Johnson, David J. White. Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess[J]. Transportation Geotechnics, 2019,21:100279.
 [8] Arash Hosseini, S. Mohsen Haeri, Siavash Mahvelati, et al. Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019,11(5):1055-1065.
 [9] 翟帅男,冷 丹,罗元伟,等. 关山村村镇农房现状调查及危险性鉴定[J]. 建筑结构,2016,46(S1):958-962.
 [10] 郭光玲. 陕西汉中农村危房调查与鉴定分析[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版),2015,31(4):23-29.
 [11] 农村住房危险性鉴定标准:JGJ/T 363—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
 [12] 李双好,李元勋,高欣亚,等. 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2020,42(1):48-55.
 [13] 宋宏芳,岳祖润,李佰林,等. 季节冻土区高速铁路防冻胀路基保温强化特性研究[J]. 岩土力学,2019,40(10):4041-4048.

(上接第 47 页)

[6] 黄盛铨,刘 君,孔宪京. 强度折减 DDA 法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学与工程学报,2008,27(S1):1799-2806.
 [7] 朱虹宇. 垫邻高速公路岩质高边坡稳定性与生态防护技术研究[D]. 西安:长安大学,2008.
 [8] 罗 强. 岩质边坡稳定性分析理论与锚固设计优化研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
 [9] 李必良. 锦屏一级水电站卸荷(松弛)岩体加固处理研究[D]. 成都:成都理工大学,2010.
 [10] 史绪鑫. 降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性的影响[D]. 大连:大连理工大学,2014.
 [11] 王乐华,李建林,李映霞,等. 茨哈峡水电站右岸泄洪雾化影响区岩质高边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(S2):603-606.

[12] 秦国强. 阿尔塔什水利枢纽大坝右岸高边坡 W19 危岩体稳定分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):59-64.
 [13] 黄 鹏,张 咪,乔 鹏. 高原寒区碎裂松动岩体成因机制研究[J]. 人民珠江,2018,39(12):44-53.
 [14] 王海江. 边坡失稳的影响因素及破坏模式综述[J]. 山西建筑,2018,44(27):72-73.
 [15] 汪儒鸿,周海清,刘琪颖. 上缓下陡土质高边坡关键块体的破坏模式研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):165-169.
 [16] 陈革强. 刚体极限平衡法浅析[J]. 海河水利,1999(2):18-20.
 [17] 张 胜,赵华宏,蒋家龙. SNS 柔性防护技术在边坡危岩防护中的应用[J]. 交通标准化,2006(10):103-106.