

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.04

重庆丰都县城区红层边坡变形破坏模式与稳定性评价

蒋正^{1,2},倪化勇³,宋志³

(1. 中国地质科学院,北京 100037;2. 中国地质大学(北京),北京 100083;
3. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081)

摘要:红层边坡稳定性是我国工程建设经常面临的地质问题。本文以丰都县城区建设开挖形成的缓倾红层边坡为研究对象,在调查测绘基础上研究了斜坡结构类型和变形破坏模式,采用 Sarma 法、赤平投影法-楔体分析法分别对顺向坡和斜向坡在不同坡度下的稳定性进行了评价,采用强度理论-极限平衡法对反向坡危岩体在不同裂隙贯通率-岩腔深度组合下的稳定性进行了评价。评价结果表明丰都县城区缓倾红层顺向坡、斜向坡在天然工况下的稳定坡角分别为 60°、45°;反向坡的危岩体演化过程中,后缘拉裂隙贯通率 γ 与岩腔深度 D 之间存在经验关系 $D = -19.12\gamma + 20.82$ 。当裂隙贯通率为 60%、70%、80%,岩腔深度分别为 9.3 m、7.4 m、5.5 m 时,危岩体处于极限稳定状态。

关键词:红层边坡;变形破坏;稳定性评价;丰都县城

中图分类号:U213.1+3

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2018)06-0023-10

Deformation and failure modes and stability assessment of red bed slope in the urban area of Fengdu, Chongqing

JIANG Zheng^{1,2}, NI Huayong³, SONG Zhi³

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract:In China, red-bed slopes are widely distributed and often form severe failure during engineering construction. In this paper, the red-bed slopes with gentle dip angle in the urban area of Fengdu County are taken as the research objects. Based on field investigation, the slopes are classified as three types. The diagonal slope and reversal slope, and corresponding failure mechanism is analyzed. Then the slope stabilities are evaluated by different method. For the dip slope and the diagonal slope, the Sarma method and the stereographic projection-wedge method are adopted respectively with regard to the rockmass stability of the reversal slope, the combination of different fracture penetration rates and depths of rock cavities was evaluated by using the strength theory-limit equilibrium method. The study results show that the stable slope angle of dip slope and diagonal slope under natural conditions are 60° and 45°, respectively; As for the rockmass on the reversal slope, there is a relationship between the penetration rate γ of the trailing edge and the depth D of the rock cavity, namely $D = -19.12\gamma + 20.82$. When the penetration rates are 60%, 70%, 80% and the corresponding cavity depths are 9.3 m, 7.4 m, 5.5 m, the rockmass is usually at the state of instability.

Keywords:red-red slope; deformation and failure; evaluation on stability; Fengdu County

收稿日期:2018-02-05; 修订日期:2018-03-30

基金项目:中国地质调查局成渝经济区宜宾-万州沿江发展带1:5万环境地质调查(DD20160249)

第一作者:蒋正(1994-),男,四川彭州人,硕士研究生,主要从事地质灾害形成机理研究。E-mail: maybejiangzheng@163.com

通讯作者:倪化勇(1979-),男,山东临朐人,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事地质灾害形成机理和风险评价研究。E-mail: nihuyong@126.com

0 引言

红层是指以红色陆相沉积为主的碎屑沉积岩层,以砂岩、泥岩、粉砂岩以及泥质岩、砂质岩为主,岩性组合特征以互层为主^[1-3]。红层具有岩体强度低,工程地质性质差,透水性差,亲水性强,浸湿后岩体强度降低,失水后容易产生崩解等特征,因此红层边坡稳定性问题较显著。

前人对红层边坡已经进行了广泛而深入的研究,主要包括以下几方面,在红层边坡分类方面,胡厚田等^[4]选取了4个对红层岩体及边坡稳定性影响最大的因素将中国红层边坡进行了系统的分类,形成了详细的分类表,为中国红层边坡的进一步研究打下了坚实的基础;周应华^[5]将堆积体边坡进一步分类,按堆积体和坡顶形状主要分为M形堆积土和层状边坡岩体二元结构和双M形堆积土和层状边坡岩体二元结构两类。魏瑞等^[6]按不同的堆积地区,进一步细化了红层堆积体边坡分类,为进一步研究红层堆积体高边坡的破坏机理和致灾模式提供了初步依据;在影响红层边坡稳定性的因素方面,邱恩喜等^[7]通过对四川地区80个红层软岩边坡的几何形状、结构面产状、边坡岩体强度等特征研究提出了回弹比,并指出回弹比是对边坡稳定性影响的一个重要因素,确定了各因素对坡度的影响的重要性依次是块度、回弹值、回弹比、JRC和坡高;杨旭等^[8]通过构建红层边坡相似模型,研究了不同降雨条件下红层边坡的灾变过程及规律;向章波等^[9]采用数值模拟法研究了西南地区降雨强度、降雨历时等因素对红层路堑边坡稳定性的影响,为边坡的支护位置与支护参数提供了参考;在红层边坡的变形失稳过程及机制方面,骆银辉等^[10]通过对云南红层岩土工程特性的研究以及工程建设实践,分析和介绍了红层岩土体的物理力学特性,认为红层边坡变形破坏过程分为蠕变、剪切、滑移3个阶段并且三个阶段呈周期性扩展;陈从新等^[11]通过室内三轴压缩试验、现场承压板压缩试验及流变试验研究了红层软岩的变形特性并进行了系统分析,对反倾边坡的防治具有重要意义;王唤龙等^[12]通过野外调查结合有限元分析研究了4种类型的红层堆积体边坡的开挖变形特征,为进一步研究红层堆积体高边坡打下了基础,为红层堆积体高边坡治理提供了理论依据;肖尚德等^[13]通过对恩施盆地红层边坡的野外工程地质调查并结合室内及现场试验,将红层边坡变形破坏划分

为:顺层岩质滑坡、坠落式崩塌、倾倒式崩塌3种,对恩施盆地及同类型地区的红层边坡变形破坏的防治具有指导意义及参考价值;胡斌等^[14]采用强度理论方法研究了西南地区软硬互层红层反向坡的稳定性系数,采用数值模拟研究了边坡最小主应力与竖向位移的分布特征;在红层边坡的防治与生态防护方面,张俊云等^[15]研究了红层边坡的生态防护机制,总结出生态防护主要通过消除红层泥岩风化碎屑的冲蚀、改变红层泥岩坡体浅层的温度场和含水量三方面的功能来控制红层泥岩边坡的快速风化;曹兴松等^[16]通过对西南红层边坡特征进行充分分析及在红层地区野生植被群落结构调查的基础之上,结合现有国内研究资料,因地制宜地提出了西南红层边坡的植物选择和配置模式,以指导西南红层边坡生态防护中科学、合理地选配适生植物。

重庆丰都县位于四川盆地东部,属于西南红层地区,主要为古川滇湖区的河湖相沉积形成,城市建设大多位于红层地层上。由于西南地区雨季长,年降雨量大,雨季为地质灾害多发期,降雨对边坡稳定性具有显著影响。本文基于丰都县城典型红层边坡工程地质调查和剖面测量,对丰都县城区红层边坡类型进行了划分,分别分析了不同结构类型红层边坡的变形破坏机制,并在此基础上进行了稳定性评价和安全开挖利用研究,以期对丰都县城区红层边坡开挖利用、城市与工程规划建设提供地质依据。

1 地质环境条件

丰都县位于长江上游(图1),地处三峡库区腹心,为三峡库区八个重点移民县之一,也是一个跨江整体搬迁的县城,长江左岸和右岸分别为丰都老县城和新县城。

丰都县位于四川盆地东部,构造上属于川东褶皱带(即川东平行岭谷带)。川东褶皱带主要发育华蓥山扫状褶皱;以近于平行的窄背斜和宽向斜组合而成所谓的隔挡式右行雁列褶皱带,其中的单个褶曲的轴线常呈“S”型弯曲,该带中的次级褶皱及压性断裂均显右行雁列。区内发育有众多隐伏构造。

研究区自西北-东南分别为珍溪场向斜-忠县背斜-丰都-忠县向斜-方斗山背斜,呈北东向近于平行的雁列展布,背斜窄并且高陡。呈平行隔挡式,向斜宽而地层产状平缓,背斜窄而地层产状陡倾。方斗山背斜核部出露二叠系上统长兴组碳酸盐,两翼发育三叠系砂泥岩互层及少量灰岩,忠县背斜核部为侏罗系

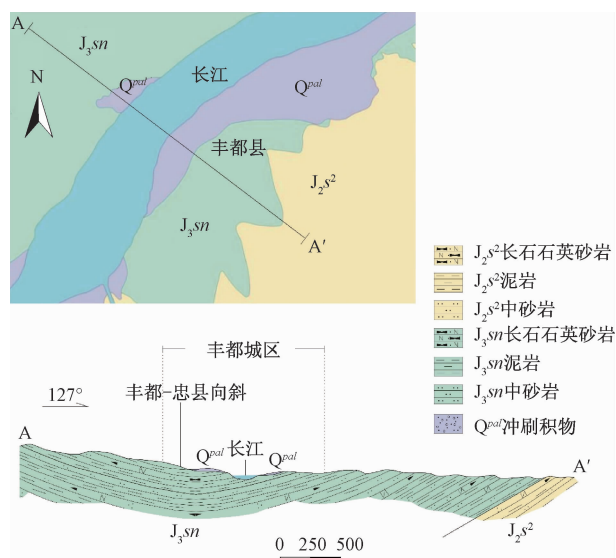


图1 研究区地质简图

Fig.1 Geological map of the study area

下统珍珠冲组砂泥岩互层。丰都-忠县向斜与珍珠场向斜均由侏罗系红色砂泥岩组成。丰都县城位于丰都-忠县向斜核部及两侧,向斜向西南倾伏,长江穿过其核部,长江两侧地层倾向均朝向江心,长江沿岸的工程建设开挖易形成顺向坡与顺层斜向坡。

研究区发育侏罗系及三叠系全套地层,最老地层为二叠系上统长兴组,最年轻地层为第四系全新统。丰都县城位于侏罗系砂泥岩互层上,主要出露三组侏罗系地层,由新到老为 J_3p 、 J_2sn 、 J_2s^2 ,区内地层多为近水平-缓倾状,倾角 $4^\circ \sim 20^\circ$ 。倾向具有显著差异,大致以长江为界,右岸岩层倾向约 300° ,左岸岩层倾向约 120° 。岩性以砂岩、泥岩、粉砂岩为主。

丰都县位于著名的川东多雨区,属于亚热带季风性湿润气候,年降雨量在 1 000 mm 以上,区内水系主要为长江及其支流龙河、大沙溪等。

研究区内主要为低山丘陵地貌类型,其中双桂山出露较新地层蓬莱镇组 J_3p 新近剥蚀,为低山地貌,其次为缓、低丘,仅在河谷、山谷间有狭小的平坝,地势由两岸向长江逐渐变缓。

研究区内地形起伏较大,最大高差相差 700 多米,红层地层在构造及人类活动作用下,易形成大量的倾斜岩层边坡,且川东地区雨季长,年降雨量大,因此川东地区属于典型的地质灾害多发区,以及红层属于易滑地层且工程性质特殊,雨季经常发生大量的红层坡体塌滑灾害,红层滑坡中顺层滑坡占有较大的比例。三峡库区水位的升降对长江及其支流两岸斜坡稳定性

也有显著影响。

2 红层边坡分类及其变形破坏模式

2.1 红层边坡分类

根据冯君等^[17]对不同倾向与坡向夹角红层边坡的研究,随岩层倾向与坡向之间的夹角增大,对缓倾边坡稳定性影响减小(图2),并且在夹角为 30° 附近出现了拐点, 60° 以后夹角对稳定性的变化基本无影响。

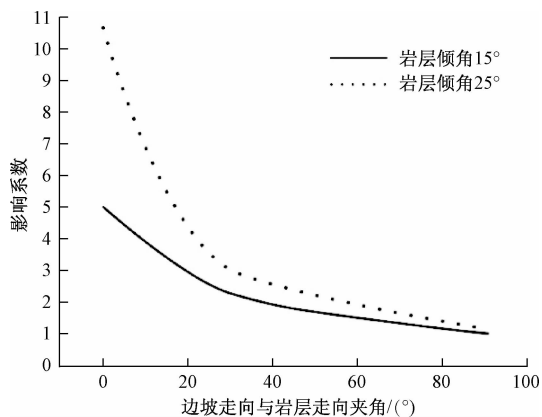


图2 边坡走向与岩层走向夹角对边坡稳定性的影响 (据冯君,略有修改)

Fig.2 Influence of intersection angle between slope aspect and stratum trend on slope stability

根据上述认识,结合丰都地区边坡实际特征,将研究区内缓倾红层边坡按岩层倾向与坡向之间的夹角大小将缓倾红层边坡分为三类,代表性剖面如图3所示。第一类是顺向坡(图3a),岩层倾向与坡向相同且夹角 $< 30^\circ$;第二类是顺层斜向坡(图3b),岩层倾向与坡向相同且夹角 $30^\circ \sim 90^\circ$;第三类是反向坡(图3c),岩层倾向与坡向相反。

研究区内不同类型红层边坡的分布具有一定的特征,由于丰都县老县城与新县城分布在长江两岸,并且位于丰都-忠县向斜两翼,所以在沿江道路、房屋建设开挖形成的边坡往往为顺向坡或顺层斜向坡,即顺向坡与顺层斜层坡多沿江分布。反向坡多发育在规划区内挖填方形成的开挖边坡,由于挖填方体积大,形成的边坡多发育卸荷裂隙,坡面多破碎,形成大量且体积大小不等的危岩体。

2.2 红层边坡变形机制

顺向坡变形机制。边坡开挖后,切断岩层面,坡面凌空,岩层倾向与坡向一致且夹角 $< 30^\circ$,岩层倾角小于坡角,岩层面剪出坡面。由于研究区缓倾红层边坡主要为砂岩、泥岩以及粉砂岩等软岩的互层结构,开挖

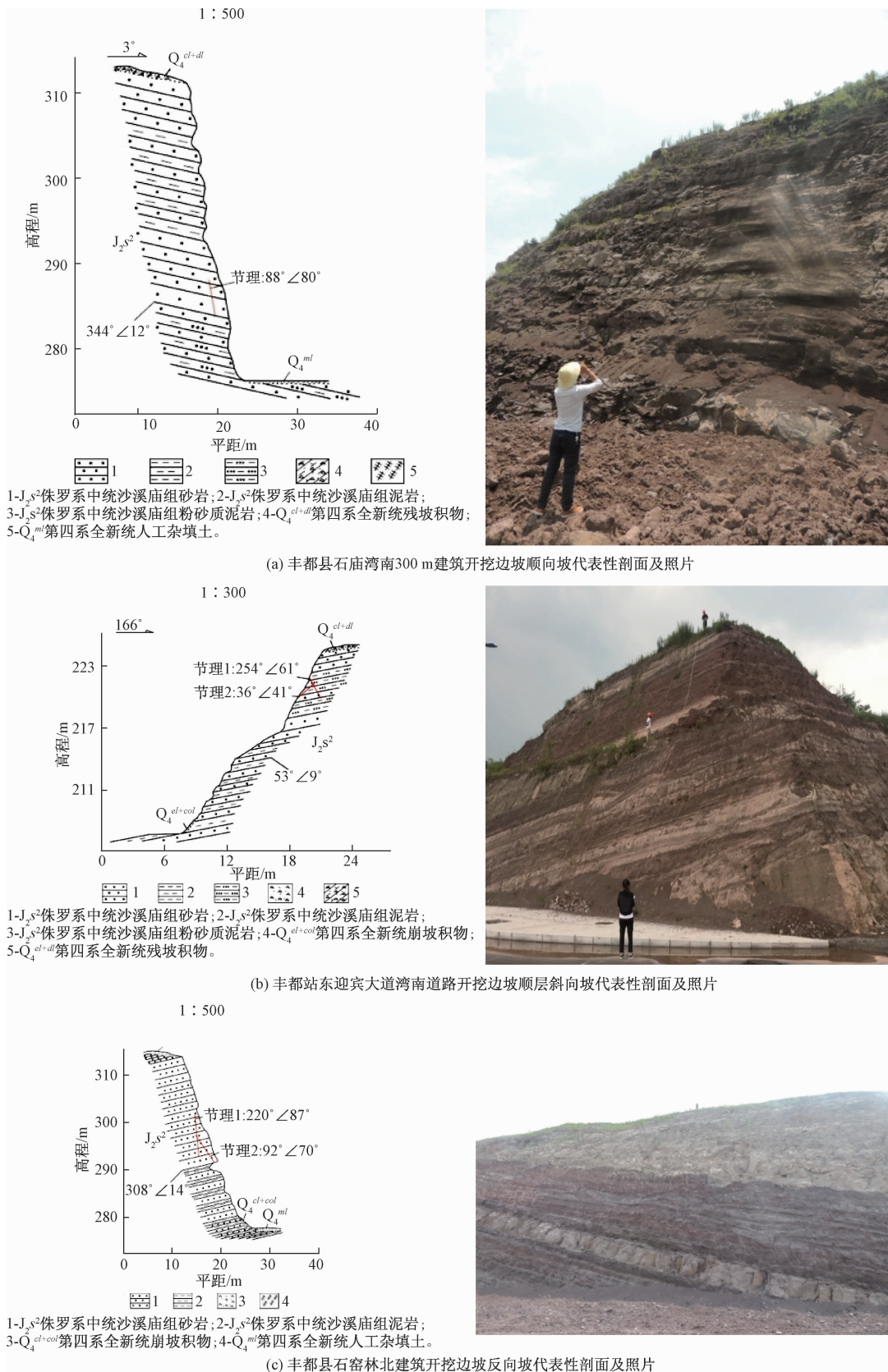


图 3 丰都代表性斜坡剖面示意图

Fig. 3 Typical slope sections in the study area

后在卸荷与重力作用下,坡体后缘产生拉张裂隙,坡体沿软弱面发生蠕滑,并且在坡体内常发育两组节理,在降雨作用下,雨水沿着节理面下渗至下部泥岩层,导致泥岩层发生软化、泥化作用,强度降

低,蠕滑作用加强,发生累进性破坏,在强降雨作用下,后缘拉裂隙内可能产生静水压力,由此,坡体中的软弱岩层转化为软弱结构面,成为潜在的滑动面,可能产生滑塌(图 4)。

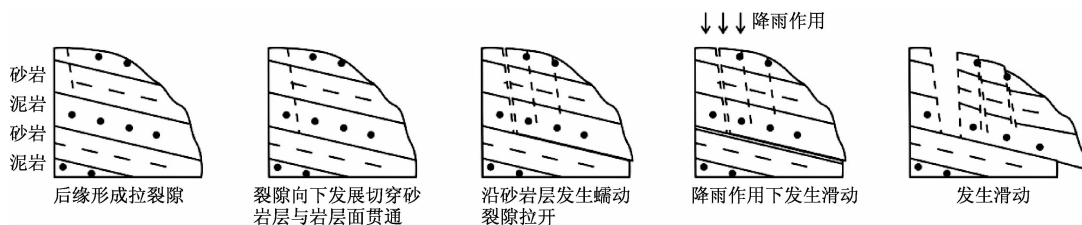


图 4 顺向坡失稳模式图

Fig. 4 Sketch map of failure mode of the dip slope

顺层斜向坡变形机制。在边坡开挖后,切断岩层面,坡面临空,岩层倾向与坡向一致且夹角 $> 30^\circ$ 。此时边坡稳定性主要受节理裂隙相互组合的影响,主要以节理裂隙切割形成的楔形自由块体发生滑动为主,滑面为多个平面,楔形块体的下滑力主要由自重及其他外力提供,两个滑面上的内摩擦力等提供抗滑力,当下滑力大于抗滑力时,块体发生滑动(图 5)。

部形成岩腔,砂岩体突出悬于坡面,局部拉应力集中,可能使突出岩体发生拉裂-崩塌破坏,以坠落式崩塌为主(图 6)。

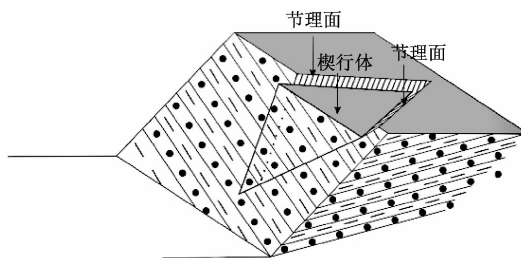


图 5 楔形体滑动示意图

Fig. 5 Sketch map of sliding of the wedge-shaped rockmass on the diagonal slope

反向坡变形机制。反向坡的稳定性主要受风化作用及节理裂隙控制。在节理裂隙作用下,坡体内结构面相互交叉组合,切割坡体产生楔状、板柱状块体,发生滑动-崩塌或倾倒-崩塌;由于红层边坡易风化、强度低等特征,随着时间风化逐渐加强,风化深度逐渐加深,由于砂岩、泥岩抗风化能力的差异,导致砂岩体下

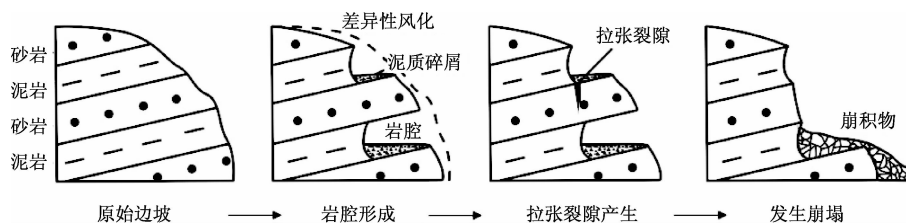


图 6 反向坡崩塌失稳过程图

Fig. 6 Sketch map of failure mode of the reversal slope

3 边坡稳定性评价

3.1 评价方法

研究边坡稳定性的方法主要分为定性分析和定量分析两种,定性分析主要有地质历史分析法、工程地质类比法和图解法^[18]。定量分析主要包括极限平衡法、数值模拟、滑移线场法和极限分析法等,目前世界范围内应用比较广泛的方法有 Janbu 法^[19]、Bishop 法^[20]、Lowe-Karafiath 法^[21]、Morgenstem-Priece 法^[22]、Spenner 法^[23]和 Sarma 法^[24]。国内越来越多学者关注极限平

衡法确定边坡稳定性问题,并已做较深入的研究^[25-28]。本文根据丰都县城斜坡结构特征,分别采用极限平衡法(Sarma 法)、赤平投影法(楔体分析法)^[29]和极限平衡理论(岩石强度理论)^[30]对顺向、顺斜和反向斜坡进行稳定性评价。

3.1.1 极限平衡法-Sarma 法^[16]

Sarma 法的核心思想是假定岩土体是理想的塑性材料,按极限平衡原则进行力和力矩的分析,认为边坡滑动体必须破裂成可以相对滑动的块体才能发生整体移动,也就是滑体滑动时不仅要克服主滑面的抗剪强

度,而且还要克服滑体本身的强度。

红层顺向坡砂岩层内常发育节理裂隙,并且常含有多组软弱夹层,Sarma 法相较于 Janbu 法、Bishop 法等定量评价方法在分析节理岩体边坡稳定方面更有优势,因为该法考虑了滑体本身的强度,可以处理具有复杂结构面的边坡,可以根据坡体内的各类结构面来划分条块并且不要求各条块保持垂直,因此本文选择 Sarma 法对顺向坡进行稳定性评价。

3.1.2 赤平投影法 - 楔体分析法^[21]

赤平投影法主要对三种典型岩质边坡失稳模式(平面破坏、楔形体破坏和倾倒破坏)进行评价,其中平面和楔形体两种破坏模式,失稳的判定原则是: $\beta_p > \beta > \varphi$,其中 β_p 为放坡坡角视倾角, β 为结构面交线的倾角, φ 为结构面内摩擦角,对边坡稳定性做出快速、定性的判断。楔体分析法一般针对楔形滑面,各滑面均为平面,以各滑面总抗滑力和楔形体总下滑力确定稳定系数。

红层顺向斜向坡稳定性主要受节理裂隙相互组合的影响,以节理裂隙切割形成的楔形自由块体发生滑动为主。针对这种红层边坡内的楔形体滑动破坏,用赤平投影法判定其是否形成楔形体,具有简单,便捷,准确的优势,再利用楔形体分析法对形成的楔形体进行进一步评价,以定性 + 定量的方式对顺向斜向坡进行评价。

3.1.3 极限平衡理论 - 岩石强度理论^[22]

岩石强度理论是研究岩石在各种应力状态下的强度准则或破坏判据,其中包括最大主应力强度理论、库伦强度理论、莫尔强度理论、莫尔 - 库伦强度理论及格里菲斯强度理论等,各种理论各有优缺点,其中莫尔 - 库伦强度理论适用于塑性、脆性岩石的剪切破坏,同时考虑了岩石的拉、压、剪,并可以判断破坏方向,具有简单、方便的优点。

以极限平衡理论与岩石强度理论建立危岩稳定性计算方法,通过分析危岩体的应力状态,计算在滑移破坏面上的抗滑力矩与滑动力矩之比即稳定系数来判断危岩体的稳定性,这种方法简单可行,结果明确,在三峡库区危岩稳定性评分析中得到应用,已经成为目前工程实践中最常用的危岩体稳定性分析方法。红层反向坡以砂岩的危岩体崩塌破坏为主,危岩体的稳定性主要受差异性风化作用形成的岩腔及拉张裂隙的贯通率控制,因此,本文采取极限平衡理论与岩石强度理论对红层反向坡危岩稳定性进行分析。

3.2 顺向坡稳定性评价

缓倾顺向坡主要失稳机制为滑移 - 拉裂,以岩层面为潜在滑面,滑面的抗剪强度参数由岩层面决定,认为后缘拉裂隙与滑面相互贯通时,表明滑动面形成。通过统计野外调查数据可知,研究区内顺向坡体内存在一组优势结构面产状 $300^\circ \angle 75^\circ$,节理裂隙间距约为 1 ~ 5 m,坡高约 25 ~ 35 m,滑体后缘拉裂隙倾角为 $45^\circ \sim 55^\circ$,与岩体的破裂角接近。

根据以上统计出的丰都县城区及周边顺层边坡的几何参数特征以及坡体内节理裂隙发育特征,建立概化模型(图 7),模型高 30m,裂隙间距采用平均间距为 3m,后缘拉裂隙倾角采用 50° ,研究区岩土体物理力学参数见表 1。

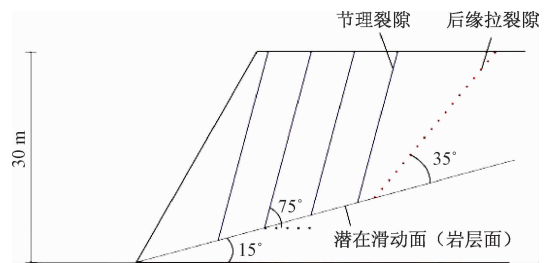


图 7 顺向坡计算模型

Fig. 7 Calculation model of the stability of dip slope

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rocks and soils

类型	弹性模量/GPa	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
岩体	1.3	26.5	0.24	1 000	30
结构面	/	/	/	90	20

根据以上参数,分别研究边坡在降雨和天然两种工况下,坡角对边坡稳定系数的影响,采用 Sarma 法计算不同坡角条件下边坡的稳定系数,得出稳定系数随坡角的变化趋势(图 8)。

由图 8 可知,降雨条件下的边坡的稳定系数较无降雨天然工况条件下边坡的稳定系数下降约 10%,但天然工况和降雨条件下红层边坡的稳定系数随坡角的变化总趋势基本一致,均表现为边坡稳定系数随坡角增大而减小,以坡角 50° 为转折点,在 $[30^\circ, 50^\circ]$ 稳定系数下降较快,天然工况下下降了约 23.29%,降雨工况下下降了约 21.24%;在 $[50^\circ, 75^\circ]$ 稳定系数下降较慢,天然工况和降雨条件下均下降了约 8.23% 左右。

按照曲线的下降趋势与稳定系数计算结果对照,丰都县城红层边坡在天然工况下坡角约为 60° 左右达

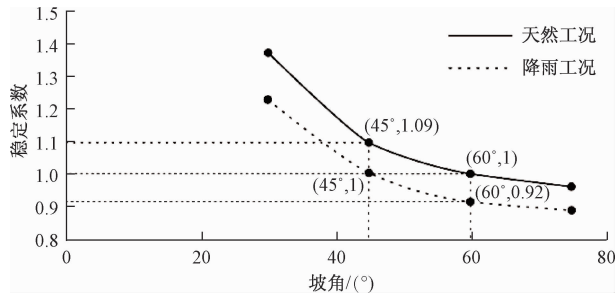


图 8 天然工况与降雨工况下稳定系数变化趋势图

Fig. 8 Trend diagram of stability coefficients change under natural and rainfall conditions

到极限平衡状态。通过多组计算研究对比发现,转折点处对应坡角与后缘拉张裂隙倾角相近,即与岩体的破裂角近似。因此,缓倾红层顺向坡在天然工况下的极限稳定坡角为 60°。在降雨工况下,丰都县城红层顺向坡的极限稳定坡角为 45°。

3.3 顺层斜向坡稳定性评价

通常情况下认为坡向与岩层倾向夹角大于 30°时即为顺层斜向坡,据图 3 可知,坡向与岩层倾向夹角大于 30°时,边坡受坡向与岩层走向夹角变化影响变小,此时主要受节理裂隙结构面控制,通过统计优势结构面可知,丰都县城地区缓倾红层顺向斜向边坡坡体内主要受四组结构面控制,分别为 36°∠41°,254°∠61°,229°∠81°,254°∠82°,通过调查发现,主要开挖边坡坡向为 275°,坡高约为 30 m,岩层产状为 320°∠15°,坡向与岩层倾向夹角为 45°。

首先采用赤平投影法判断节理能否切割坡体形成楔形体滑块,并初步判定楔形体的稳定性,判定的基本标准为: $\beta_p > \beta > \varphi$, 其中 β_p 为放坡坡角视倾角, β 为结构面交线的倾角, φ 为结构面内摩擦角,结果如图 9 所示,红色线条代表节理,大圆内略小的圆代表结构面的内摩擦角,齿状线为坡面线,图 9 中节理在 275°方向共形成 4 个交点,其中 4 号点位于结构面内摩擦角圆外,倾角小于内摩擦角,不满足上述条件,所以楔形体不会发生滑动,其余 1、2、3 号点满足 $\beta_p > \beta > \varphi$,有发生滑动的可能性,需进一步定量评价。采用理正岩土岩质边坡稳定分析软件计算上述 3 个三维楔形体在不同坡角条件下的稳定系数,作出楔形体坡角 - 稳定系数趋势图(图 10),图中 a、b、c 分别对应 1、2、3 号点对应的楔形体的稳定系数曲线图。

由图 10 可知,楔形体的稳定系数随坡角的变化呈先增大,再降低,1 号和 2 号楔形体在 75°时,稳定系数达到峰值,3 号楔形体在稳定系数约为 65°时达到峰值。

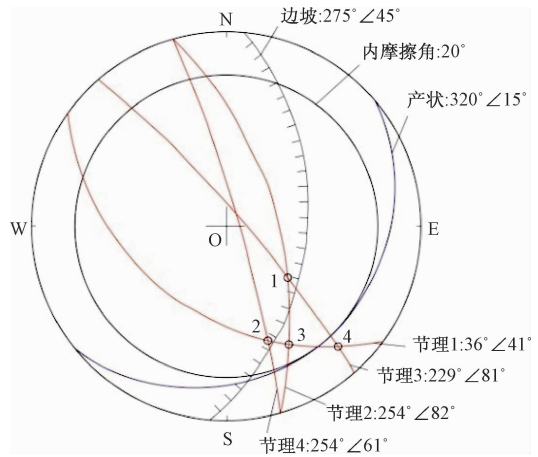


图 9 顺向斜向坡赤平投影图

Fig. 9 Stereographic projection diagram of the diagonal slope

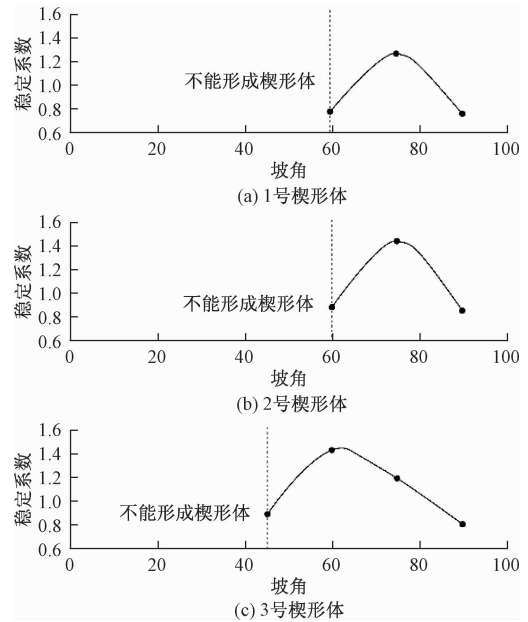


图 10 顺层斜向坡楔形体坡角 - 稳定系数关系图

Fig. 10 Relationship between the slope of the wedge-shaped rockmass and stability coefficient

通过对比发现 1 号楔形体稳定系数 > 1 的坡角区间为 [65°, 85°], 峰值对应坡角为 75°, 2 号楔形体稳定系数 > 1 的坡角区间为 [65°, 87°], 峰值对应坡角为 75°, 3 号楔形体稳定系数 > 1 的坡角区间为 [48°, 85°], 峰值对应坡角为 62°, 在坡角小于 48°时,并不会形成楔形体,此时边坡为安全状态。

3.4 反向坡稳定性评价

由前述可知,缓倾红层反向坡主要的破坏模式为滑动 - 崩塌、倾倒 - 崩塌和拉裂 - 崩塌。结合丰都地区野外地质调查结果发现,反向坡岩层缓倾,主要为砂泥岩互层,受差异性风化作用影响明显,易产生危岩

体,发生拉裂-崩塌(图 11)。



图 11 反向坡差异性风化

Fig. 11 Differential weathering of the reversal slope

根据丰都县城地区缓倾红层反向边坡调查结果建立反向坡的计算模型(图 12),图中 H 为危岩体厚度,

h 为拉张裂隙深度, L 为拉张裂隙贯通时长度,裂隙贯通率 $\gamma = h/L$, β 为拉张裂隙倾角, D 为岩腔深度,边坡岩体及结构面物理力学参数见表 1,采用极限平衡法与强度理论结合,计算危岩体的稳定性系数,并绘出裂隙贯通率-稳定性系数关系曲线图,岩腔深度-稳定性系数关系曲线图,危岩体在不稳定,基本稳定和稳定条件下的岩腔深度-后缘裂隙贯通率的关系曲线(图 13)。

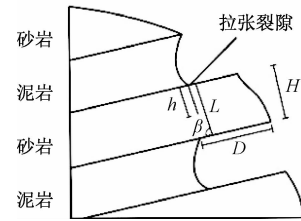
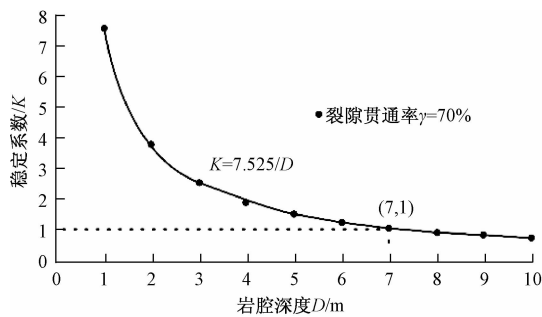
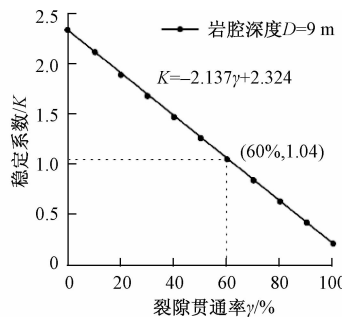


图 12 反向坡计算模型

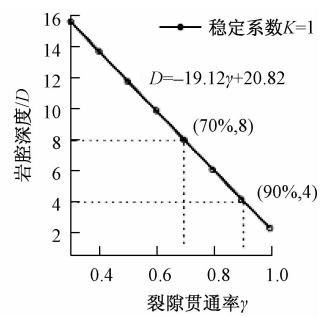
Fig. 12 Calculation model of the stability of reversal slope



(a) 岩腔深度-稳定性系数关系曲线



(b) 裂隙贯通率-稳定性系数关系曲线



(c) 裂隙贯通率-岩腔深度关系曲线

图 13 危岩体岩腔深度、裂隙贯通率、稳定性系数关系图

Fig. 13 Relationship between cavity depth, penetration rate and stability coefficients

由图 13a 可知,在后缘裂隙贯通率为 70% 条件下,危岩稳定性系数与岩腔深度具有近似反比例函数的关系 $K = 7.525/D$,稳定性系数随岩腔深度的增大而减小,减小的速率快速降低,在岩腔深度 > 4 m 后,降低速率减小,此时稳定性系数约为 1.85,当岩腔深度约为 7 m 时,危岩体达到极限稳定状态,岩腔深度的变化主要是增大了危岩体的体积及力矩大小,以此来影响危岩体的稳定性。

图 13b 表明,在岩腔深度为 $D = 9$ 的条件下,危岩体稳定性系数随后缘裂隙贯通率增大而降低,并在贯通率约为 60% 时达到极限稳定状态,近似存在线性关系 $K = -2.137\gamma + 2.324$,图中实线所示为胡斌、黄润秋等研究红层软硬岩崩塌体稳定性所得的危岩稳定性系数与裂隙贯通率关系^[8],本文结论与其有较高的一致性。

图 13c 中虚线代表在天然工况条件下,危岩体处于极限稳定状态时,岩腔深度 D 与裂隙贯通率 γ 之间近似存在线性负相关关系 $D = -19.12\gamma + 20.82$,该

直线及其两侧分别代表危岩体三种状态:①当 $D > -19.12\gamma + 20.82$ 时,此时危岩体发生崩塌破坏;②当 $D = -19.12\gamma + 20.82$ 时,危岩体处于极限稳定状态;③当 $D < -19.12\gamma + 20.82$ 时,危岩体处于稳定状态。计算得出,当裂隙贯通率为 60%、70%、80% 时,岩腔深度分别为 9.3 m、7.4 m、5.5 m,当二者同时满足时,此时危岩体处于极限稳定状态。

4 结论与建议

(1) 随边坡坡度增大,红层边坡稳定性系数逐渐减小。在天然工况和降雨工况下,丰都县城地区红层顺向边坡开挖极限稳定坡角分别为 60° 和 45° ,建议红层顺向边坡开挖坡角小于 45° ,并加强坡体的排水能力。

(2) 丰都县城地区红层顺向斜向坡主要分布在丰都县城区道路沿线,坡度小于 48° 时,并不会形成楔形体,边坡为安全状态。红层顺向斜向坡开挖利用过程中,建议开挖坡度小于 48° ,针对高边坡应逐级开挖,

降低风险。

(3) 丰都县城地区反向坡在演化过程中岩腔深度、裂隙贯通率与稳定系数存在线性关系,当裂隙贯通率为60%、70%、80%,岩腔深度分别为9.3 m、7.4 m、5.5 m时,此时危岩体处于极限稳定状态。建议加强危岩识别与稳定性预测评价,及时采取清危和工程措施。

致谢:中国地质调查局成都地质调查中心李丹、陈绪钰、田凯以及成都理工大学陈千洪共同参加野外调查,西南交通大学冯伟在数值模拟中给予指导和帮助,一并致谢。

参考文献:

- [1] 彭华, 吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(5): 109 - 113.
PENG Hua, WU Zhicai. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(5): 109 - 113.
- [2] 李廷勇, 王建力. 中国的红层及发育的地貌类型[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 427 - 431.
LI Tingyong, WANG Jianli. Chinese red beds and developing landforms [J]. Journal of Sichuan Normal University (Social Sciences Edition), 2002, 25(4): 427 - 431.
- [3] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34 - 40.
CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distribute sand geologic environment characteristics of red beds in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34 - 40.
- [4] 胡厚田, 赵晓彦. 中国红层边坡岩体结构类型的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 689 - 694.
HU Houtian, ZHAO Xiaoyan. Studies on rockmass structure in slope of red bed in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 689 - 694.
- [5] 周应华. 红层路堑边坡失稳机理及加固防护技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
ZHOU Yinghua. Study on deformation mechanism and support of road cut Slope in red beds [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [6] 魏瑞, 王唤龙, 周德培, 等. 红层堆积体地区坡体结构分类[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1178 - 1183.
WEI Rui, WANG Huanlong, ZHOU Depei, et al. Classification of slope structure in red bed accumulation body area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1178 - 1183.
- [7] 邱恩喜, 谢强, 赵文, 等. 红层软岩边坡岩体工程特性研究[J]. 地质与勘探, 2007, 43(5): 96 - 100.
QIU Enxi, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Research on engineering characteristics of soft rock slope mass in red beds [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(5): 96 - 100.
- [8] 杨旭, 周翠英, 刘镇, 等. 华南典型巨厚层红层软岩边坡降雨失稳的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 549 - 557.
YANG Xu, ZHOU Cuiying, LIU Zhen, et al. Model tests for failure mechanism of typical soft rock slopes of red beds under rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 549 - 557.
- [9] 向章波, 张家铭, 周晓宇, 等. 基于Slide的某红层路堑边坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 90 - 95.
XIANG Zhangbo, ZHANG Jiaming, ZHOU Xiaoyu, et al. The slope stability analysis of red bed based on Slide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 90 - 95.
- [10] 骆银辉, 朱春林, 李俊东. 云南红层边坡变形破坏机制及其危害防治研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 836 - 839.
LUO Yinhui, ZHU Chunlin, LI Jundong. Research for distortion-destruction mechanism of slopes of red strata in Yunnan Province and their hazard control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 836 - 839.
- [11] 陈从新, 卢海峰, 袁从华, 等. 红层软岩变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 261 - 270.
CHEN Congxin, LU Haifeng, YUAN Conghua, et al. Experimental research on deformation properties of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 261 - 270.
- [12] 王唤龙, 孙毅, 周德培, 等. 红层堆积体高边坡坡体结构及变形规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2887 - 2894.
WANG Huanlong, SUN Yi, ZHOU Depei, et al. Slope structure and excavation deformation regularity of high slope composed with red bed accumulation

- body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S1): 2887 - 2894.
- [13] 肖尚德, 唐辉明, 唐睿旋, 等. 恩施盆地红层边坡变形破坏模式研究 [J]. 工程地质学报, 2016, 24 (6): 1080 - 1087.
- XIAO Shangde, TANG Huiming, TANG Ruixuan, et al. Study on deformation and failure modes of red layer slope in Enshi Basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24 (6): 1080 - 1087.
- [14] 胡斌, 黄润秋. 软硬岩互层边坡崩塌机理及治理对策研究 [J]. 工程地质学报, 2009, 17 (2): 200 - 205.
- HU Bin, HUANG Runqiu. Collapse mechanism and treatment measures of slopes with interbedding of soft and hard rocks [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17 (2): 200 - 205.
- [15] 张俊云, 周德培. 红层泥岩边坡生态防护机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (2): 250 - 256.
- ZHANG Junyun, ZHOU Depei. Study on ecological protection mechanism of red bed mudstone slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (2): 250 - 256.
- [16] 曹兴松, 刘世雄, 章梦涛, 等. 西南红层软岩公路边坡生态防护中的植物选择和配置研究 [J]. 公路, 2013 (3): 191 - 195.
- CAO Xingsong, LIU Shixiong, ZHANG Mengtao, et al. Research on the plant selection and configuration in the ecological protection of slope in the soft rock highway in Southwest China [J]. Highway, 2013 (3): 191 - 195.
- [17] 冯君, 江南, 周德培. 顺层边坡岩层走向与边坡走向夹角对其稳定性的影响 [J]. 工业建筑, 2008, 38 (10): 76 - 79.
- FENG Jun, JIANG Nan, ZHOU Depei. Influence of angle between strike of slope and strata on slope stability [J]. Industrial Construction, 2008, 38 (10): 76 - 79.
- [18] 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: 317 - 324.
- ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng, et al. The principle of engineering geology analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 317 - 324.
- [19] JANBU, N. Slope stability computation [J]. Embankment Dam Engineering, New York, 1975, 12 (4): 67.
- [20] BISHOP A W. The stability of earth dams [M]. PhD Thesis, University of London, 1952.
- [21] LOWE J, Karafath L. Stability of earth dams upon drawdown. Proc. 1st Panamer. Conf [J]. Soil Mech. Mexico City, 1960, 22 (6): 537 - 552.
- [22] Spencer, E. A method of analysis of embankments assuming parallel interslice forces [J]. Geotechnique, 1963, 85 (17): 11 - 26.
- [23] STATION W E. Soil mechanics design: stability of slopes and foundations [J]. Technical Report Archive & Image Library, 1967, 14 (5): 317 - 325.
- [24] SARMA S K. Stability analysis of embankments and slopes [J]. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 1979, 105 (12): 1511 - 1524.
- [25] 戴自航, 沈蒲生. 土坡稳定分析普遍极限平衡法的数值解研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (3): 327 - 331.
- DAI Zihang, SHEN Pusheng. Study on numerical solution of general limit equilibrium method for stability analysis of soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (3): 327 - 331.
- [26] 张鲁渝. 一个用于边坡稳定分析的通用条分法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (3): 496 - 501.
- ZHANG Luyu. Generalized limit equilibrium method for slope stability analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (3): 496 - 501.
- [27] 邹广电, 魏汝龙. 土坡稳定分析普遍极限平衡法数值解的理论及方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (2): 363 - 370.
- ZOU Guangdian, WEI Rulong. Study of theory and method for numerical solution of general limit equilibrium method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (2): 363 - 370.
- [28] 方玉树. 边坡稳定性分析条分法条间力合理性研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19 (2): 80 - 86.
- FANG Yushu. Rationality of inter-slice forces of slices method for slope stability analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19 (2): 80 - 86.
- [29] HOEK E, BRAY J W. Rock Slope Engineering [M]. Lu Shizong translation. Beijing: Metallurgical Technology Press, 1983: 20 - 32.
- [30] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 155 - 162.
- LIU Yourong, TANG Huiming. Rockmass Mechanics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 155 - 162.