

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.01.07

开挖条件下含陡倾结构面顺层岩质 边坡破坏模式与稳定性预测

王章琼¹, 江志红²

(1. 武汉工程大学资源与土木工程学院, 湖北 武汉 430073;
2. 中水顾问集团贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 顺层岩质边坡易发生失稳破坏, 当边坡中发育有顺坡向陡倾结构面时, 更不利于边坡稳定。以贵州某水电站大坝左岸含陡倾结构面顺层边坡为例, 在综合分析地质条件及开挖扰动的基础上, 结合离散元软件 UDEC, 分析了边坡的变形破坏模式和稳定性。研究表明, 边坡可能发生的变形破坏模式主要有滑移、拉裂—滑移两种; 自然状况下及开挖后, 边坡都有沿断层 f_0 、卸荷裂隙 L_1 及岩层面发生滑移的趋势, 且工程开挖导致边坡沿该结构面发生内部滑动; 对边坡采用预应力锚索加固后, 变形得到有效控制, 位移数值计算值与实际监测值基本吻合。

关键词: 顺层边坡; 岩体结构; 变形破坏模式; 离散元 UDEC; 支护方案

中图分类号: P642; U213.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)01-0040-06

Failure pattern and stability prediction of bedding rock slope with steep structural plane under excavated condition

WANG Zhangqiong¹, JIANG Zhihong²

(1. School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China;
2. Guiyang Hydropower Investigation Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Unstable failure occurred easily in bedding rock slope, especially in the slope with steep structural plane which along slope. Taking bedding rock slope with steep structure plane of left bank for a hydroelectric power station in Guizhou for example, based on comprehensive analyze of geological conditions and excavating disturbance, and combined with Universal Distinct Element Code in 2-dimension (UDEC), deformation failure mode and stability of the slope is analyzed. The results show that, deformation and failure mode of the slope may mainly includes sliding and tension crack-sliding. Under natural conditions and after excavation, the deformation trend of slope may along fault f_0 , unloading fracture L_1 and rock levels, and excavation lead to slope inner sliding along these structure plane. After reinforcement of prestressed anchor cable, deformation of slope is controlled effectively, and numerical calculating value of displacement is relatively anastomosed with the practical monitoring value.

Keywords: bedding rock slope; rock mass structure; deformation and failure mode; discrete element UDEC; supporting scheme

收稿日期: 2017-03-25; 修订日期: 2017-05-30

基金项目: 湖北省教育厅科技计划项目(B2017058)

第一作者: 王章琼(1984-), 男, 地质工程专业, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学与岩体稳定性评价方面的教学和科研工作。E-mail: wzqcug@163.com

0 引言

顺层边坡是指坡面走向、倾向与岩层走向、倾向一致或接近一致的层状结构岩体斜坡^[1]。随着工程建设规模的扩大,在交通、水利等大型工程中都遇到过顺层边坡稳定性问题,大量工程实践表明,顺层边坡是相对较易失稳的一类边坡^[2]。目前,国内外学者在顺层边坡稳定性方面开展了许多研究,主要集中在边坡变形机制、变形破坏模式、开挖稳定性及支护等方面。于飞^[3]、胡启军^[4]、邹宗兴^[5]等研究了顺层边坡渐进破坏机理,并建立了地质力学模型;李红卫^[6]、肖国峰^[7]等分别研究了陡倾和中倾顺层岩质边坡的失稳破坏机理,并分析了边坡变形破坏特征;冯君^[8]、唐红梅^[9]、徐廷甫^[10]、肖慧^[11]、江君^[12]等通过室内模型试验、数值模拟方法研究了顺层边坡开挖稳定性;冯振^[13]根据位移监测成果,研究了红砂岩顺层边坡在抗滑桩支护后蠕滑变形的影响因素;晏鄂川^[14]分析了地下水、时效特性和工程措施优化等对路堑边坡开挖坡稳定性的影响。

实际上,许多层状边坡除了岩层面外,还发育有其他控制性结构面,岩层面与其他结构面共同影响和控制着边坡的稳定性及变形破坏模式。当岩层面以外的结构面强度较低或倾角较陡时,对边坡稳定性的影响可能会大于岩层面。因此,这一类结构面的存在使得边坡稳定性问题更加复杂。而目前对顺层边坡稳定性的研究,大多仅考虑岩层面,对岩体结构复杂的顺层边坡稳定性研究较少。这样一来,可能会弱化甚至忽视主控结构面对边坡稳定性的影响,导致结果与实际情况出入较大。

本文以贵州某水电站左岸含陡倾结构面的顺层高边坡为研究对象,通过工程地质分析、数值模拟等方法,分析开挖过程中边坡变形破坏模式,评价边坡稳定性;在此基础上提出边坡支护方案,并通过实际位移监测成果验证方案的合理性。

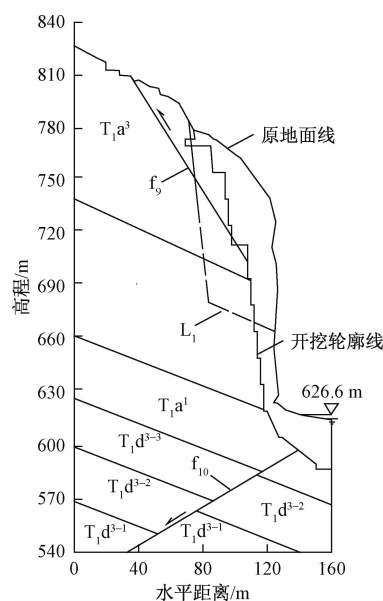
1 工程概况

1.1 工程地质条件

研究区位于云贵高原东北部,贵州境内中部,区域总体地势由西至东呈阶梯状递降,属岩溶中高山及侵蚀中低山混合地貌。河谷断面为“U”型,坡度为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。左岸最高陡壁顶高程800 m,坝址区河床纵向高程622~625 m(图1)。

该边坡主要由白云岩和灰岩组成,自上而下分别

为:安顺组第三段中厚层—厚层灰质白云岩、白云质灰岩,第二段厚层块状白云岩、灰质白云岩,第一段角砾状白云岩,大冶组第三段角砾状灰岩,第二段中厚层—厚层灰岩(顶部为1.5 m厚的极薄层灰岩夹泥页岩),630 m高程以下主要为微风化,630~724 m为弱风化下亚带。岩层产状: $N10^{\circ} \sim 20^{\circ}E, NW \angle 32^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。



$T_1 a^3$ —白云岩、灰质白云岩; $T_1 a^2$ —白云岩; $T_1 a^1$ —白云岩、角砾状白云岩;
 $T_1 d^{3-3}$ —角砾状白云岩、灰岩; $T_1 d^{3-2}$ —灰岩; $T_1 d^{3-1}$ —灰岩。

图1 边坡工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile of slope

坝址区地质构造复杂,受区域构造影响,NE向断层较为发育,坝基开挖揭露 f_9 、 f_{10} 断层。 f_9 断层自805 m高程斜向下延伸至705 m高程,为逆断层,产状: $N25^{\circ} \sim 35^{\circ}E, SE \angle 80^{\circ} \sim 85^{\circ}$,破碎带宽1~10 cm,断层带由岩屑、方解石及少量泥质组成,泥钙质胶结,胶结较好,断层面平直光滑; f_{10} 断层自615 m高程向坡内反倾向延伸,为正断层,产状: $N10^{\circ} \sim 20^{\circ}W, SW \angle 45^{\circ} \sim 60^{\circ}$,破碎带宽10~70 cm,断层带由岩屑、方解石及少量泥质组成,泥钙质胶结,胶结较好,断层面平直光滑。坝基揭露夹层1条,为原生层间岩性夹层,厚1.5 m,为大冶组第三段第二层顶部极薄层灰岩夹泥页岩。岩溶形态以溶洞、溶缝、溶隙为主,整体而言,岩溶不发育。

1.2 边坡开挖设计

根据设计,边坡分13级开挖,梯级高度15~17 m不等,最高开挖高程789 m,最低开挖高程597 m,最大坝高109 m。共设1级宽10 m、1级宽8 m、7级宽度2 m的马道,除600 m、615 m、765 m高程处为斜坡外,

其余梯级间为直坡。主要开挖 T_1a 、 T_1d^3 岩体(图 1)。

2 边坡控制性结构面及其特征

2.1 原生结构面

坝址区原生结构面主要为沉积结构面,即岩层面。岩层面主要是白云岩、灰质白云岩、灰岩之间的层里面。区内 T_1a^1 、 T_1a^2 、 T_1a^3 白云岩、 T_1d^{3-3} 灰岩多为中厚层、厚层,层面属沉积结构面,结构面较为平整,胶结较好,抗剪强度较高。在降雨、地震、风化等外因作用下,可能发生沿岩层面的滑动,进而导致边坡向河谷方向滑移。 T_1d^{3-2} 、 T_1d^{3-1} 的顶层为一层厚约 1 m 的薄层、极薄层灰岩、泥页岩,属于软弱夹层,且灰岩层间软弱夹层位于河流浸润线以下,抗剪强度较低。但在 f_{10} 断层切割下,原本贯通的上述灰岩岩层面发生错动,错动距离约 30 m。上述原生结构面的产状接近 $N20^\circ W$, $NE \angle 35^\circ$,倾角较缓,顺坡向,对边坡稳定性影响较大。

2.2 构造结构面

根据现场调查及工程地质勘探显示,左岸边坡的构造结构面主要为断层,规模较大的断层有 f_9 、 f_{10} 。

f_9 断层位于 T_1a^3 白云岩弱风化带上限以上,岩体完整性一般。断层顺坡向,对边坡稳定性影响较大,断层上盘易沿断层面发生滑移。断层下部剪出口位于边坡 705 m 高程附近,如该边坡发生沿该断层带的失稳破坏,将直接威胁到大坝的安全。

f_{10} 断层大部位于开挖面以下,在自然状况下对边坡稳定性影响不大。

2.3 浅表生结构面

左岸 793 m 高程处发育 L_1 卸荷裂隙,产状 $N60^\circ W$, $NE \angle 85^\circ$,裂隙张开,宽 30 ~ 50 cm,向上游延伸 30 m 就被覆盖,充填黏土及岩屑,但左岸坡肩顶部卸荷裂隙发育的深度亦有限。 L_1 裂隙为折线形,自 793 m 高程从地表向下延伸约 100 m 后,裂隙转而以缓倾角向临空面方向发展,产状与安顺组灰岩岩层面接近,充填岩屑。该裂隙 735 m 高程以上部分连通率达 90% 以上,735 m 高程以下连通率约 35%。

3 边坡变形破坏模式及稳定性预测

3.1 边坡变形破坏模式分析

(1) 滑移:主要以 f_9 断层上盘岩体为主,该变形体主要为 f_9 断层上盘岩体(图 2)。 f_9 断层为逆断层,顺坡向,结构面倾角大于坡面倾角;断层破碎带较薄,宽约 1 ~ 10 cm,可见泥质。该断层上下端口皆露出地表,断层破碎带易受大气降雨的侵蚀,抗风化能力弱。

该变形体可能发生的变形破坏模式是:在暴雨及震动荷载作用下,变形体以 f_9 断层为滑移面整体下滑。

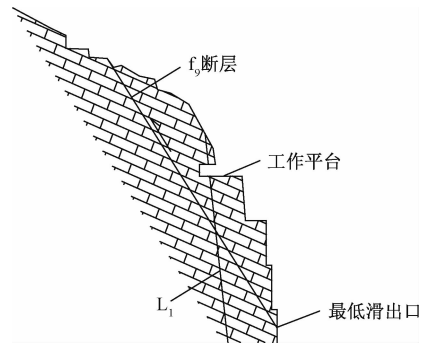


图 2 滑移破坏模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sliding failure mode

(2) 拉裂-滑移:主要以受 L_1 裂隙控制的变形体为代表,该变形体主要受呈折线状发育的 L_1 裂隙控制(图 3)。 L_1 裂隙由两段构成,第一段始于坡面,以陡倾角顺坡面向下延伸,至于 691.5 m 高程;第二段始于第一段末,以缓倾角(与岩层面产状接近)向河谷方向延伸至坡面。由于 L_1 裂隙顶部始于坡面,降雨情况下裂隙内会产生孔隙水压力与渗透压力,导致裂隙第一段张拉并拉裂。因此,该变形体可能发生的变形破坏模式是:以 L_1 裂隙第一段为拉裂面、第二段为滑移面的拉裂-滑移破坏。

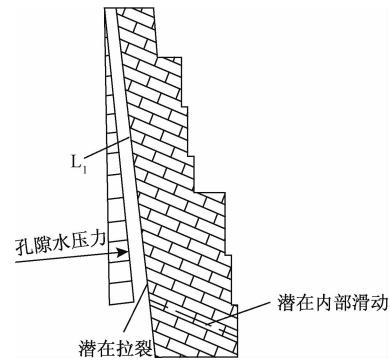


图 3 拉裂-滑移破坏模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tension crack-sliding failure mode

3.2 边坡稳定性数值模拟

(1) 数值模拟模型及材料参数

根据勘察剖面及设计开挖线建立了研究区边坡数值模拟模型,水平方向取 160 m,竖直方向取 286 m,网格最大边长 15 m(图 4)。建立模型时考虑了岩层面、构造结构面等软弱面。

根据岩石、结构面室内试验结果,并结合工程经验,对岩体及结构面的物理力学参数取值见表 1、表 2。

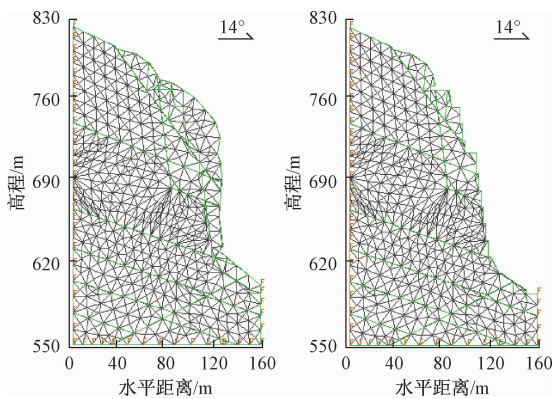


图 4 边坡 UDEC 模型 (左:开挖前;右:开挖后)

Fig. 4 UDEC model of slope (left: before excavation, right: after excavation)

表 1 岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	抗拉强 度/MPa	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa
灰质白云岩	2 700	4.8	23.4	4.2	2.5	1.9
白云岩	2 670	5.2	26.7	4.2	6.0	4.9
角砾状白云岩	2 660	6.0	29.5	4.2	7.4	6.0
灰岩	2 640	6.0	29.5	4.2	3.6	2.9

表 2 结构面物理力学参数

Table 2 Mechanical parameters of structure planes

结构面	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa	法向刚度/ ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)
构造结构面	200	10	0	2	2
岩层面	4 000	35	4.2	20	20
次生结构面	650	7	0	2	2

(2) 自然状况下边坡稳定性

自重应力作用下边坡位移及剪应力云图见图 5。可以看出:1) 边坡水平位移较大区域主要集中在断层 f_0 及卸荷裂隙 L_1 可能剪出口附近;2) 垂直位移具有明显的自上而下分层特点,但在断层 f_0 及卸荷裂隙 L_1 附近产生明显的错动;3) 结构面 f_0 、 L_1 附近剪应力明显大于周围区域,且在坡脚 630 m 高程附近,应力集中现象较为明显,主要是由于此处坡面形状由陡变缓,引起应力急剧偏转而致。

整体而言,位移、剪应力云图与结构面分布具有明显的相关性。边坡有沿断层 f_0 、卸荷裂隙 L_1 及岩层面发生内部滑动的趋势,降低了边坡的稳定性。边坡稳定性系数为 1.05,表明边坡在自然状况下基本稳定,但安全储备较小,在降雨、地震等外因作用下可能发生失稳。

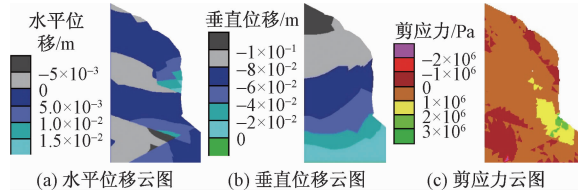


图 5 自然边坡数值模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results of natural slope

(3) 开挖后边坡稳定性

开挖后边坡位移及剪应力云图见图 6。可以看出:1) 边坡上部水平位移主要朝向坡内,主要原因是开挖扰动导致岩体变形;2) 边坡中下部水平位移主要朝向河谷方向,主要原因是对河谷岩体的开挖导致边坡中下部出现新的临空面,降低了水平方向压应力,边坡岩体发生朝向河谷的反弹;3) 水平位移云图在裂隙 L_1 附近发生明显的错动,其外侧岩体主要发生朝向河谷的变形;4) 竖向位移全部为正方向,是由于开挖卸荷引起反弹,位移云图呈现出明显的分带性,大体上呈以边坡外河谷上方某一点为圆心的同心圆环状;5) 从量值及分布情况来看,开挖前后边坡剪应力变化较小,但 630 m 高程与 700 m 高程附近的高剪应力区域逐渐贯通,可能是由于开挖卸荷导致裂隙 L_1 不断向下发展。

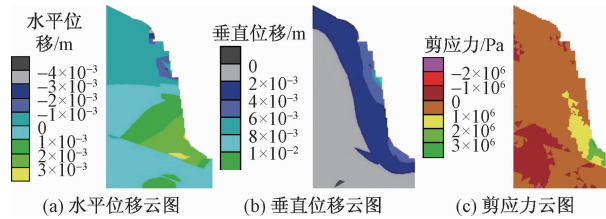


图 6 边坡开挖数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of excavated slope

整体而言,开挖后边坡水平位移分布与结构面之间存在明显相关性,高剪应力区域进一步增大,坡脚剪应力集中区与裂隙 L_1 转折处(700 m 高程)相贯通,表明工程开挖增大了边坡沿 L_1 裂隙发生剪切破坏的可能性,开挖活动导致边坡岩体产生了一定程度的内部滑动,与前文中边坡失稳破坏模式预测较为吻合。

经计算,边坡稳定性系数为 1.39,表明开挖后边坡整体稳定性系数有了较大提高,主要原因是开挖卸荷降低了边坡自重。但由于断层 f_0 、卸荷裂隙 L_1 的存在,导致边坡局部稳定性较差,须采取相应的支护措施。

4 防治方案及效果评价

4.1 边坡支护及监测方案

由工程地质分析及数值模拟结果可知,左岸边坡在开挖过程中主要的块体系由 L_1 裂隙切割而形成,须对该块体进行重点加固。具体的加固措施为:在 690 ~ 705 m 设置预应力锚索,将锚索设置在每级马道平面以上 1 m 处。锚索张拉力为 1 500 kN,长度 40 m,横向间距 6 m。为监测边坡在开挖过程中的变形情况,在 770 m 高程处开挖平台设置测斜孔,监测边坡水平方向位移。锚索及监测点布置情况见图 7。

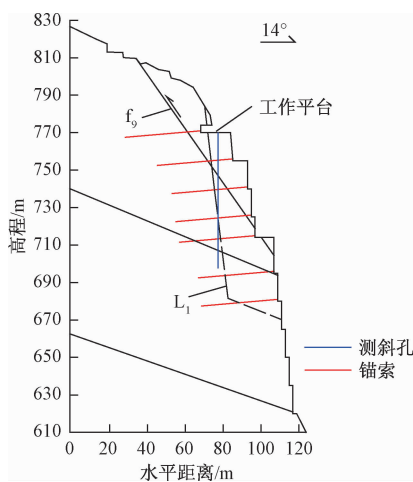


图 7 边坡位移监测点布置

Fig. 7 Arrangement of slope displacement monitoring points

4.2 边坡位移监测成果

由图 8 可知,边坡位移随深度的增大而减小,在埋孔端部位移为零,地表处监测的位移最大,这是因为测斜仪测得的位移在深度方向上具有累计效应。此外,监测曲线随时间变化而变化,与工程活动相关性明显:在开挖初期,边坡由于卸荷而发生朝向河谷方向的回弹(2010 年 12 月 14 日);施加预应力锚索后,边坡岩体处于受挤压状态,边坡位移朝向坡内,并逐渐达到最大(2010 年 12 月 18 日、2010 年 1 月 16 日),此时最大位移值为 4.7 mm;随着时间的增长,锚索预应力产生了一定损失,并逐渐趋于稳定,监测位移朝向坡内(2010 年 2 月 28 日),锚索支护效果良好。实际监测曲线(稳定状态)与数值模拟监测曲线基本吻合。

5 结论

本文结合贵州某水电站左岸边坡开挖稳定性及治理工程实际,研究了含陡倾结构面的顺层岩质边坡变形破坏模式、稳定性及治理方法,主要取得以下结论:

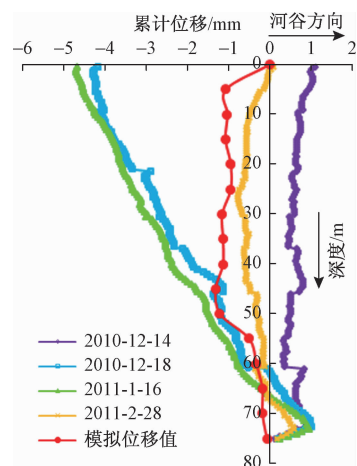


图 8 边坡水平位移监测曲线

Fig. 8 Monitored slope horizontal displacement curves

(1) 受顺坡向岩层面、断层 f_y 及裂隙 L_1 等控制性结构面的影响,边坡可能发生的变形破坏模式为:主要由断层 f_y 控制的滑移破坏及主要由裂隙 L_1 控制的拉裂-滑移破坏。

(2) 自然状况下,边坡有沿断层 f_y 、卸荷裂隙 L_1 及岩层面发生内部滑动的趋势。边坡稳定性系数为 1.05,安全储备较小。

(3) 开挖后边坡高剪应力区域逐渐贯通,表明工程开挖导致边坡岩体产生了一定程度的内部滑动。边坡稳定性系数为 1.39,表明开挖卸荷使得边坡整体稳定性系数有所提高。但断层 f_y 、卸荷裂隙 L_1 使得边坡局部稳定性较差,须采取相应的支护措施。

(4) 根据边坡稳定性分析结果,对边坡采取以预应力锚索加固为主的治理措施,位移监测结果表明,经锚索加固后,边坡变形得到了有效控制,且数值模拟结果与监测数据较为吻合,验证了数值模拟模型与参数的合理性。

参考文献:

- [1] 白云峰,周德培,王科,等. 顺层滑坡的发育环境及分布特征[J]. 自然灾害学报,2004,13(3): 39 - 43.
BAI Yunfeng, ZHOU Depei, WANG Ke, et al. Development environment and distribution characteristics of bedding plane landslides [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(3): 39 - 43.
- [2] 吕美君,晏鄂川. 顺层边坡岩体结构稳定性分析[J]. 地球与环境,2005,33(S): 285 - 289.
LYU Meijun, YAN Echuan. Structure stability analysis for rock mass consequent slope [J]. Earth and

- Environment, 2005, 33(S): 285 - 289.
- [3] 余飞, 陈善雄, 余和平. 顺层岩质边坡渐进破坏及失稳机制的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(S): 36 - 40.
- YU Fei, CHEN Shanxiong, YU Heping. Numerical simulation study on progressive destruction and failure mechanism of bedding rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S): 36 - 40.
- [4] 胡启军, 谢强, 郑立宁. 长大顺层边坡渐进滑移失稳演化机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 31 - 37.
- HU Qijun, XIE Qiang, ZHENG Lining. Research on evolvement of the progressive slide and failure mechanism of the long bedding slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(3): 31 - 37.
- [5] 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2222 - 2231.
- ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Geomechanical model of progresssive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2222 - 2231.
- [6] 李红卫. 陡倾顺层路堑高边坡变形破坏机制分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 31(S1): 146 - 151.
- LI Hongwei. Deformation and failure mechanism of steeply dipping bedding high slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 31(S1): 146 - 151.
- [7] 肖国峰, 冯光乐, 陈从新, 等. 硬岩中倾顺层边坡变形特征和破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4458 - 4464.
- XIAO Guofeng, FENG Guangle, CHEN Congxin, et al. Research on deformation and failure mechanism of Moderate-dip cataclinal hardrock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4458 - 4464.
- [8] 冯君, 周德培, 李安洪. 顺层岩质边坡开挖稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1474 - 1478.
- FENG Jun, ZHOU Depei, LI Anhong. Research on stability of rock bedded slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1474 - 1478.
- [9] 唐红梅, 陈洪凯, 曹卫文. 顺层岩体边坡开挖过程模型试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 435 - 440.
- TANG Hongmei, CHEN Hongkai, CAO Weiwen. Model experiment in excavation of rock bedding slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 435 - 440.
- [10] 徐廷甫, 尹志明, 邓月华. 地下采动条件下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1241 - 1246.
- XU Tingfu, YIN Zhiming, DENG Yuehua. Stability analysis of bedding rock slope at underground mining conditions [J]. Chinese Journal of Under-ground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1241 - 1246.
- [11] 肖慧, 侯克鹏, 陈冲, 等. 层状岩质边坡开挖过程相似模型试验[J]. 工程勘察, 2014, 42(6): 29 - 33.
- XIAO Hui, HOU Kepeng, CHEN Chong, et al. Similarity model experiment of excavation in bedding rock slope [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(6): 29 - 33.
- [12] 江君, 魏世玉. 基于模型试验和数值模拟的采高对顺层边坡稳定性影响分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 33 - 38.
- JIANG Jun, WEI Shiyu. Correlation between stability of bedding slope and mining height based on model experiment and numerical simulation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 33 - 38.
- [13] 冯振, 金福喜, 龚裔芳. 红砂岩顺层边坡监测及变形破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 4078 - 4086.
- FENG Zhen, JIN Fuxi, GONG Yifang. Monitoring and deformation failure analysis of red sandstone bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 4078 - 4086.
- [14] 晏鄂川, 唐辉明, 何森. 路堑边坡工程的动态仿真分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 247 - 254.
- YAN Echuan, TANG Huiming, HE Miao. Real-time simulation for slope engineering of highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 247 - 254.