

切坡影响下缓倾顺层红层边坡变形的演化过程

邵银龙^{1,2}, 杨皓然³, 王俊杰³, 杨 洋^{2,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;
3. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 4. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福建 福州 350003)

摘要:以德遂高速公路沿线典型缓倾顺层红层边坡为工程依托,依据地质分析及相似理论建立缓倾顺层红层边坡室内物理模型,采用开挖试验模拟实际工程切坡,研究坡体的变形演化过程。结果表明:缓倾角20°的顺层红层边坡随切坡呈现典型的拉裂-滑移式破坏,坡体位移均随分级切坡不断增大,水平位移均高于竖直位移,同时切坡面附近产生的位移相对于坡体其他部位较大;坡体变形主要由切坡阶段卸荷变形及静置阶段蠕滑变形两部分组成,且切坡卸荷为蠕滑变形发展创造了基础条件;切坡至软弱泥岩夹层前卸荷变形大小及速率均高于蠕滑变形,切坡至软弱泥岩夹层后坡体卸荷变形低于蠕滑变形;切坡面附近部位应力受切坡扰动较为明显,而坡体中部及后缘应力受切坡扰动较小,但坡内应力总体呈现下降趋势,即应力随切坡逐步释放。

关键词:缓倾顺层红层;切坡;边坡变形;物理模型试验

中图分类号:U416.1⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0095-06

Deformation evolution process of a gently inclined red-bed slope influenced by cutting//SHAO Yinlong^{1,2}, YANG Haoran³, WANG Junjie³, YANG Yang^{2,4} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 3. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Huadong Engineering (Fujian) Corporation Limited, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on a typical gently inclined red-bed slope along the Desui expressway, an indoor slope model was established according to the geological analysis and similarity theory. The excavation test was used to simulate the actual engineering slope cutting, and the deformation evolution process of the slope was studied. The results show that the longitudinal red-bed slope with a gentle dip angle of 20° presents a typical tensile-slip failure under the condition of slope cutting. The displacement of the slope increases with the cutting grades, and the horizontal displacement is higher than the vertical displacement. The displacement near the slope surface is larger than the other parts of the slope. The slope deformation is mainly composed of unloading deformation in the cutting slope stage and creep deformation in the stationary stage, and the unloading creates the basic condition for the development of creep deformation. From the uncut slope to the weak mudstone stage, the magnitude and rate of unloading deformation are higher than the creep deformation stage. After the cut slope to the weak mudstone interlayer, the unloading deformation of the slope is lower than the creep deformation. The stress near the cutting slope surface is obviously disturbed while the stress in the middle and trailing edge of the slope is less disturbed by cutting. The overall stress decreases inside the slope, indicating gradual stress release with the slope cutting process.

Key words: gently inclined red-bed; slope cutting; slope deformation; physical model test

红层是经红色陆相沉积而成的白垩纪、侏罗纪地层,广泛分布于我国西南地区,以砂泥岩为主,多为软硬互层结构。由于红层岩体强度较低,风化程度高,且含有大量蒙脱石、伊利石等矿物成分,因此吸水易软化,失水易崩解^[1-2],这种特殊岩性往往导致红层边坡对外界因素的敏感性较高,稳定性易受

扰动。随着道路及水利工程建设项目的与日俱增,山区及库岸红层边坡切坡失稳案例屡见不鲜^[3-4]。

目前对于红层边坡切坡失稳机制的研究多以定性分析及数值模拟为主。胡厚田等^[5-6]根据岩体结构特征,划分了红层岩坡典型类型并分析了其变形破坏模式,同时指出降雨入渗及切坡开挖为红层坡

体主要致灾成因;蒋正等^[7]基于西南地区红层边坡特征统计,采用 Sarma 法、赤平投影法对坡体稳定性作出了评价,研究表明顺层红层坡体以层面为潜在滑移面,主要失稳机制为拉裂-滑移破坏模式,而反向坡受差异性风化作用影响明显,易产生危岩体,发生拉裂-崩塌破坏;武鑫等^[8]采用数学回归模型,对坡体变形演化作出了预测;侯李杰等^[9-11]采用数值模拟手段对红层坡体切坡后的变形规律及应力特征进行了研究。然而定性分析无法定量反映外界条件影响下的坡体形态及位移和应力变化特征,数值模拟由于模型边界尺寸、网格划分标准及参数选取存在一定差异而导致结果需要进一步验证,因此需要引入物理模型试验结合定性分析与数值模拟进行直观系统的研究。Fumagalli^[12]基于意大利瓦意昂拱坝溃坝事件,首次建构了大比例尺(几何比尺 $C_L=35$)下的三维物理模型试验,较形象地模拟了拱坝坝基岩体滑动失稳过程;Mohammed 等^[13]建立了三维可变形粒状滑坡模型,模拟了颗粒料坡体动态滑动过程;Braathen 等^[14]研究了挪威境内岩石边坡破坏模式,并提出了边坡破坏的地质力学模型;何刘等^[15]采用单向振动试验台模拟了动荷载下顺层岩质边坡物理模型变形破坏过程和加速度分布情况;李祥龙等^[16]用离心机分析了小比尺层状节理岩体边坡物理模型的动力响应情况;宋娅芬等^[17]依据地质分析及相似理论建立红层软硬岩互层边坡室内框架物理模型,模拟了工程切坡和雨水入渗情况下边坡变形破坏机制,结果表明软硬岩互层边坡的变形模式都是前期的滑移拉裂变形和后期的整体蠕滑变形,破坏模式是以深部软层为滑动面的整体滑移。

上述研究对象多为岩层倾角大于 30°的陡倾顺层边坡,而对于岩层倾角处于 12°~25°的缓倾顺层红层边坡研究还比较少。一般认为缓倾顺层坡体稳定性较好,然而由于红层坡体内常含有软弱泥岩夹层,软弱结构面经切坡外露于临空处,上部岩层易沿其发生滑动失稳。2005 年 6 月,在建沪蓉西高速公路三叠系红层区域受切坡施工扰动,多处缓倾顺层边坡发生滑动失稳,其中朝阳坡服务区更是产生了约 800 万 m³的滑坡体,迫使 18 户约 62 人居住的村庄整体搬迁。2014 年 7 月,四川省阿坝藏族羌族自治州茂县国道 213 线路段山体由于切坡而发生滑坡,塌方体冲垮了超过 100 m 的国道线路,修复费用高达数亿元;同时近年来发生的四川省达州市达川区青宁乡滑坡、宣汉县天台乡滑坡以及重庆鸡尾山滑坡等,都是属于缓倾顺层红层滑坡,给当地人民的生命财产安全造成了极大的威胁。因此弄清缓倾顺层红层切坡失稳致灾机理,对减小红层滑坡带来的

经济损失和人员伤亡具有重要意义。本文依托德遂高速公路沿线典型缓倾顺层红层边坡,采用物理模型试验方法研究该类边坡在工程切坡下的变形演化过程,探讨缓倾顺层红层边坡切坡后的坡体形态变化特征、位移变形及应力调整规律,以期为同类边坡的研究提供参考。

1 研究区地质概况

以德阳中江至遂宁高速公路 K80+680~K81+280 为研究区域,该路段设计长度 600 m,剖面左侧沿 196°方向开挖。研究区属低山丘陵地貌区,山体坡向约 200°,坡度一般 25°~30°,地形起伏较大,坡面植被较发育,排水条件较好,经调查,斜坡未发现开裂变形迹象,现状稳定,区域内未发现滑坡、崩塌、泥石流等不良地质现象,自然斜坡整体稳定性较好,工程现场如图 1 所示。

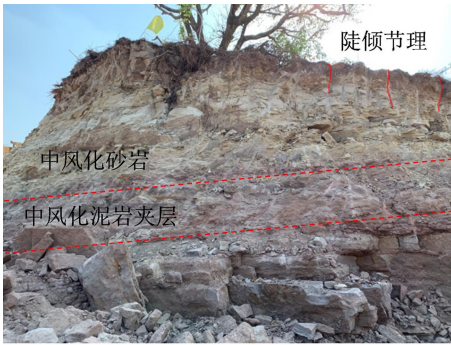


图 1 研究区工程现场

研究区地层岩性主要为白垩系下统白龙组(K_1b)砂质泥岩、泥岩及砂岩,由以下几部分构成:①6-3-2(K_1b)强风化砂岩。棕红色,砂质结构,层状构造,矿物成分以石英、长石为主,节理裂隙发育,岩芯破碎,多呈短柱状、块状,锤击易碎,层厚 1.30~6.60 m。②6-3-3(K_1b)中风化砂岩。棕红色、灰黄色,砂质结构,层状构造,矿物成分以石英、长石为主,节理裂隙较发育,岩芯呈短柱状、柱状,岩质较硬,锤击不易碎,RQD 为 65%,层厚 1.60~25.40 m。③6-1-6(K_1b)中风化砂质泥岩。紫红色,泥质结构,层状构造,矿物成分以黏土矿物为主,泥质胶结,砂质含量较高,节理裂隙稍发育,岩芯完整,多呈柱状,岩质软,锤击易碎,岩芯遇水软化,失水干裂,RQD 为 90%,层厚 1.40~3.30 m。岩层产状 $248^\circ\angle 20^\circ$,坡体上部中风化砂岩层发育多条陡倾裂隙,裂隙面光滑平直,擦痕清晰可见。裂隙倾角处于 $55^\circ\sim 75^\circ$ 之间,相邻裂隙间距 10~15 m,坡体内含有 1.5 m 厚的中风化砂质泥岩层,破碎程度较高,遇水易软化,失水易干裂,是主要控制该坡体稳定性的软弱泥岩夹层,且开挖后将形成 20~30 m 缓倾顺层边坡,如

图 2 所示(图中水平距离以坡顶处为起点)。

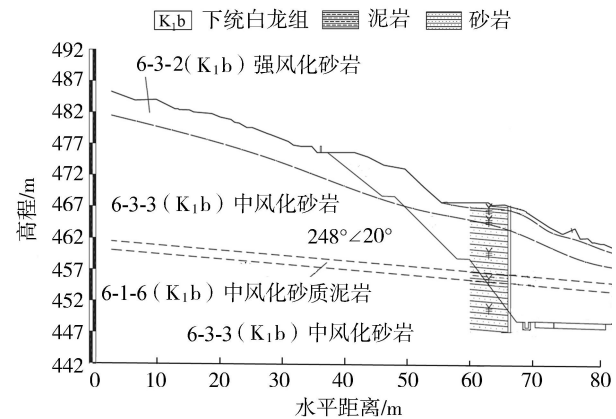


图 2 研究区工程地质剖面

2 模型试验设计

2.1 相似比设计

原型边坡范围:左侧坡顶高度约 80 m,右侧高度约 50 m,开挖高度约 28 m,层面倾角 20°。因此该边坡物理模型拟设计为二维框架式模型,依据边坡原型尺寸及室内框架大小,确定试验中模型与原型几何相似比为 1 : 100,即模型边坡左侧高度约 80 cm,右侧高度约 50 cm,开挖高度约 28 cm,其中软弱泥岩夹层厚度约 1.5 cm。基于相似原理,选取几何相似比尺 $C_L=100$,容重相似比尺 $C_\gamma=1.3$,由相似判据求得边坡模型试验中的应力相似比尺、抗剪强度相似比尺、弹性模量相似比尺、黏聚力相似比尺均为几何比尺和容重比尺的乘积,即 $C_L C_\gamma=130$,泊松比相似比尺、应变相似比尺、摩擦因数相似比尺和内摩擦角相似比尺均为 1。

2.2 相似材料设计

基于现场工程地质勘察资料,并结合《工程地质手册》^[18]可综合得出该路段边坡主要物理力学参数值如表 1 表示。

表 1 原型边坡岩体物理力学参数值

岩体类型	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	变形模量/ kPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
中风化砂岩	26.1	0.26	1.5×10^7	800	35
软弱泥岩夹层	18.8	0.35	1.3×10^4	18	20

模型试验中岩体相似材料通常采用分层浇筑和预制块体两种方式进行砌筑,由于原型坡体内中风化砂岩体存在多条陡倾裂隙,因此岩体相似材料采用预制长方体块。模型试块以铁精粉、重晶石粉为细骨料,石英砂为粗骨料,石膏、水为胶结材料,其中铁精粉粒径为 74 μm ,重晶石粉粒径为 44 μm ,石英砂粒径为 420 ~ 840 μm 。参考刘晓敏等^[19]对岩体相似材料的配比试验成果,将上述材料按照铁精粉、重晶石粉、石英砂、石膏、水为 0.17 : 0.57 : 0.11 :

0.05 : 0.04 的比例均匀拌和。将所拌和的相似材料倒入预制的长方体模具并养护晾晒,最后脱模为尺寸 15 cm×10 cm×3 cm 的岩体模块,如图 3 所示。岩体相似材料容重为 21.2 kN/m³,泊松比为 0.28,变形模量为 120.2 MPa。

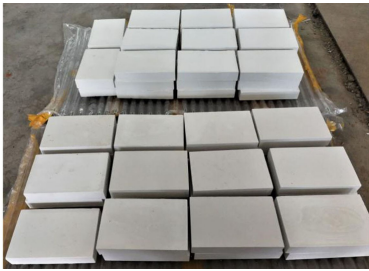


图 3 岩体相似材料模块

基于前人的研究成果^[20-21],选用黏土、混合砂和滑石粉并加入少量水来模拟软弱泥岩夹层。所选材料应满足:①黏土粒径不大于 0.1 mm;②混合砂筛选 0.25 ~ 0.5 mm、0.5 ~ 1 mm 两类粒径砂混合而成;③滑石粉具有微细无砂特性。黏土、混合砂和滑石粉配比为 0.52 : 0.37 : 0.15,并保持试样的含水率为 19%,得到的软弱泥岩夹层相似材料黏聚力为 0.85 kPa,内摩擦角为 16.25°。

2.3 试验方法及过程

根据原型边坡地质剖面、缓倾顺层结构面特征,在模型框内将预制好的岩体相似模块砌筑成 20°缓倾角的顺层边坡模型,左右相邻岩体模块间接触面可视为坡体内潜在的陡倾裂隙,裂隙倾角约 70°。模块间无黏结,模型坡体内一定深度埋设软弱泥岩夹层相似材料,然后进行切坡开挖模拟,研究坡体变形特征及应力调整规律。

用百分表监测位移,根据边坡位移来揭示切坡开挖下坡体内的变形规律;在模型体的开挖线附近、坡体中部及后缘共布置 5 个百分表监测点,每个监测点放置两个百分表用于测量水平和竖直位移。本文模型试验是模拟边坡开挖后不加支护情况下的工况,切坡分 3 级进行,每级切坡完成后静置一段时间,在切坡完成后 1 h、2 h、3 h、6 h 和 12 h 读取百分表读数,然后进行下一级切坡。位移监测点布置和切坡开挖情况如图 4 所示。布置位移监测点时,首先在模型体上绘出监测点的位置,将 1 cm×1 cm×1 cm 的立方体小木块用 502 强力胶水粘贴在模型块位移监测点位置。试验所用百分表安装于独立于模型体外的钢架上,其布置及安装如图 5 所示。

在软弱泥岩夹层内埋设应变式微型土压力盒来监测分级切坡卸荷下坡体应力变化,以此探讨切坡后缓倾顺层边坡应力调整规律。应变式微型土压力盒采用专门定制的南京丹陌电子科技有限公司生产

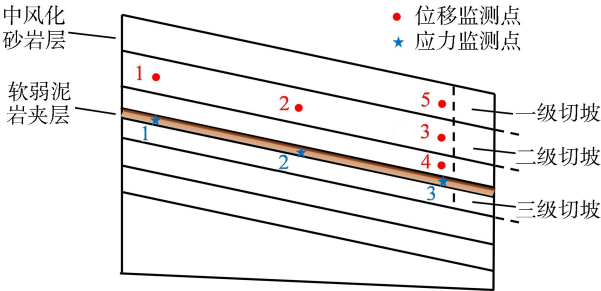


图4 测点布置和切坡开挖示意图



图5 百分表布置安装

的DMTY系列,直径为12 mm,厚度为4 mm。应变式微型土压力盒埋设位置见图4。

使用江苏东华测试仪器公司生产的DH-3821静态应变测试仪采集数据,该静态应变测试仪与DMTY应变式微型土压力盒均采用全桥方式连接,在计算机上安装DH动态信号采集分析系统,自动记录DH-3821静态应变测试仪采集的数据。缓倾顺层红层边坡模型砌筑完成后,安装位移测试百分表和DMTY应变式微型土压力盒,并将土压力盒数据线采用全桥方式连接至DH-3821静态应变测试仪。物理模型如图6所示。



图6 缓倾顺层红层边坡物理模型

3 试验结果与分析

3.1 坡体形态特征

试验过程中在采集坡体位移和应力数据的同时,也对切坡过程中坡体形态特征进行观察。一级切坡完成静置一段时间后,在距离开挖面10~15 cm处观察到裂隙逐渐向深部发育,其走向与开挖面平行,倾角为70°左右,但延展深度较浅,如图7(a)所示;二级切坡完成后,该裂隙不断向坡体内部延伸,同时坡体后缘多条张拉裂隙缓慢发育,百分表位移读数变化趋势较前级切坡更为明显,如图7(b)所示;三级切坡后,开挖面附近裂隙逐渐贯通,软弱泥岩夹层外露,坡体位移增大。一段时间后,上部坡体沿软弱泥岩夹层面呈现整体滑动特征,如图7(c)所示。

上述坡体形态特征演化过程可归纳为典型的拉裂-滑移式破坏,即切坡卸荷后,坡体内应力重新调整分布,大小主应力在切坡面附近发生偏转从而因应力差而在坡脚产生剪应力集中带,同时坡体顶部及后缘由于拉应力集中而形成张拉应力带,致使坡内潜在裂隙逐渐发育扩张。随着切坡卸荷量增大,张拉裂隙向深部延展度增加,当坡体内部软弱结构面因切坡而外露于临空面后,张拉裂隙前缘岩体在自重作用下沿下伏软弱层面出现剪切滑移,且软弱结构面强度愈低,滑移趋势愈明显。

3.2 坡体变形规律

图8为各位移监测点水平和竖直位移-时间曲线(图中水平位移向临空面方向为正,竖直位移向上为正),可以明显观察到缓倾顺层软岩边坡各监测点位移随分级切坡而不断增大,且监测点处水平位移高于竖直位移,这区别于陡倾顺层边坡滑动过程竖直位移高于水平位移的规律,因此缓倾顺层边坡失稳往往规模大、破坏强,且波及范围更广。切坡至软弱泥岩夹层前,位移监测点5的水平 and 竖直位移分别为0.172 mm和0.069 mm,换算为实际坡体位移为17.2 mm和6.9 mm;三级切坡至软弱泥岩夹层后,坡体变形速率明显增大,静置24 h后,位移监测点5处的水平和竖直位移就增长至4.935 mm和1.893 mm,换



(a) 一级切坡



(b) 二级切坡



(c) 三级切坡

图7 切坡后坡体形态特征

算为实际坡体位移为 493.5 mm 和 189.3 mm。

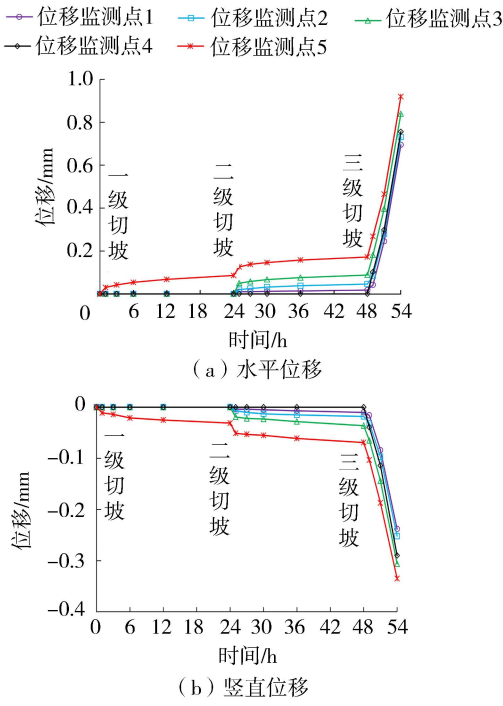


图8 切坡过程位移-时间曲线

同时在切坡各阶段,发现坡体位移监测点 5 即切坡临空面顶部变形最大,而位移监测点 1 即坡体后缘中部变形最小,这也与切坡过程中观测到的坡体形态特征变化规律相符。其原因在于缓倾顺层边坡的变形破坏是一个渐进式过程,尤其在坡体内陡倾裂隙分布较广的情况下,一级切坡后靠近卸荷面附近的裂隙扩张并向深部延展,裂隙前缘岩体就已经具备向临空面滑移的趋势,而此时后缘岩体裂隙并未扩张,裂隙两侧岩块结合仍较紧密,因此产生的位移较小。随着下一级切坡进行,卸荷量增加,前缘岩体向临空面滑动,恰好作为后缘岩体的临空面,引发后缘岩体中应力改变,导致拉裂变形破坏依次向后缘坡体发展,从而出现渐进式整体滑移。

此外从各阶段位移-时间曲线可以发现不管是竖直位移还是水平位移,切坡完成后坡体变形速率会在短时间内突然增大,而后随静置时间变长而趋于稳定。因此可将试验过程中坡体的变形分为两个部分,即切坡阶段所产生的卸荷变形及静置阶段所产生的蠕滑变形。对于卸荷变形而言,其属于浅表生改造的结果,虽然产生时间短但卸荷变形值甚至超过了长时间静置的蠕滑变形值。正因为卸荷改造降低了结构面的强度特性,使一定范围内结构面的强度从峰值降低到残余值,从而为边坡后续蠕滑变形创造了条件。而蠕滑变形值在前两级切坡后增长缓慢,原因在于砂岩虽已中风化但结构面残余强度仍较高,同时结构面倾角处于缓倾状态,因此蠕滑速率较低。但三级切坡至软弱泥岩夹层后,坡体蠕滑

变形速率迅速增大而接近于卸荷变形速率,从而使坡体呈现整体蠕滑变形特征,图 7(c) 也可以观察到这种整体滑移现象。

上述边坡变形规律表明含软弱泥岩夹层的缓倾顺层红层边坡切坡后若不及时采取相应的支护措施,就很容易引发滑坡工程地质灾害。因此缓倾顺层红层切坡之前应对边坡地质环境进行详细勘察,尤其要探查清楚坡体内是否存在软弱夹层及破碎带,如有软弱夹层及破碎带应采用抗滑桩或预应力锚索等措施提前支护,并在坡面设置截排水系统,同时切坡后应在坡脚及坡顶等易发生大变形部位设置监测点对位移进行监测。

3.3 坡体应力调整分析

基于 DH-3821 静态应变测试仪对坡体内部应力采集结果,绘制应力监测点沿层面方向的应力-时间曲线如图 9 所示。图 9 表明模型坡体内部监测点应力随切坡进程总体呈现下降趋势,即坡内应力受切坡扰动而出现应力释放现象。同时可以看出切坡面附近应力监测点 3 处应力释放量最大,而坡体中部应力监测点 2 及坡体后缘应力监测点 1 处应力释放量较小,说明坡体前缘受切坡扰动较为明显而坡体后缘扰动较小,这也从侧面证明了缓倾顺层边坡失稳是由卸荷牵引后缘岩体逐渐向临空面滑移的渐进性过程。但从持续量测过程可以发现坡体内各监测点处应力并不是单调降低,而是增减交互出现的。究其原因在于切坡过程中内部大小主应力发生偏转使监测点附近的应力出现暂时增大的现象,但坡体应力随时间推移还是呈现整体降低的趋势,即应力随切坡逐步释放。

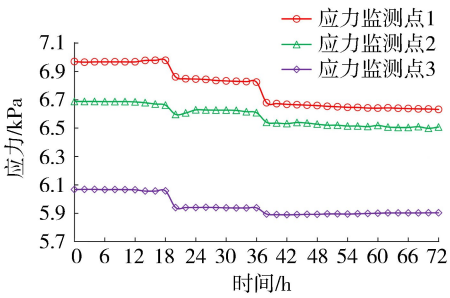


图9 切坡过程应力-时间曲线

4 结 论

a. 缓倾角 20°的顺层红层边坡的破坏模式为典型的拉裂-滑移式,即切坡后,坡体前缘阻滑段临空,岩层结构面外倾于临空面,因卸荷松弛导致坡体后缘出现拉应力集中而产生张拉裂隙,随着进一步切坡,张拉裂隙不断发育并向坡体深部延展,且愈靠近切坡面张拉裂隙发育程度愈高。当张拉裂隙贯通至

潜在滑移面后,滑移面上部岩体在重力作用下沿滑移面发生滑动。

b. 缓倾顺层红层边坡坡体位移均随分级切坡而不断增大,且水平位移均高于竖直位移,同时切坡面附近产生的位移相对于坡体其他部位较大。

c. 缓倾顺层红层边坡的总体变形主要由切坡阶段卸荷变形及静置阶段蠕滑变形两部分组成,切坡卸荷降低了结构面的强度特性,使一定范围内结构面的强度从峰值降低到残余值,从而为边坡后续蠕滑变形创造了条件。切坡至软弱泥岩夹层前卸荷变形大小及速率均高于蠕滑变形,切坡至软弱泥岩夹层后坡体卸荷变形低于蠕滑变形,且蠕滑变形速率远高于切坡至软弱泥岩夹层前。

d. 切坡面附近部位应力受切坡扰动较为明显,而坡体中部及后缘应力受切坡扰动较小。同时切坡过程坡内应力有增有减,但总体呈现下降趋势,即应力随切坡逐步释放。

e. 缓倾顺层红层边坡切坡之前应对边坡地质环境进行详细勘察,若遇不良工程隐患,应提前采取相关措施进行处理,以防止坡体切坡后产生较大变形。

参考文献:

[1] 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(5):836-839. (LUO Yinhui, ZHU Chunlin, LI Jundong. Study on the deformation failure mechanism of Yunnan red bed slope and its damage prevention[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(5):836-839. (in Chinese))

[2] 王子忠. 四川盆地红层岩体主要水利水电工程地质问题系统研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.

[3] 田超. 滇西南红层地区公路挖方边坡破坏机制与防治对策[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.

[4] 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 bed slopes in Enshi Basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6):1080-1087. (in Chinese))

[5] 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. (in Chinese))

[6] 程强. 红层软岩开挖边坡致灾机理及防治技术研究[D]. 重庆:西南交通大学,2008.

[7] 蒋正,倪化勇,宋志. 重庆丰都县城区红层边坡变形破

坏模式与稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6):23-32. (JIANG Zheng, NI Huayong, SONG Zhi. Deformation failure mode and stability evaluation of red bed slope in Fengdu County, Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6):23-32. (in Chinese))

[8] 王鑫,郑东健,刘永涛,等. 滑坡失稳时间预测方法研究综述[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):89-94. (WU Xin, ZHENG Dongjian, LIU Yongtao, et al. A review of temporal prediction methods for landslide failure [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4):89-94. (in Chinese))

[9] 侯李杰,张玉芳,刘洪瑜,等. 西南地区红层滑坡致灾成因及致灾模式研究[J]. 铁道建筑,2021,61(2):71-74. (HOU Lijie, ZHANG Yufang, LIU Hongyu, et al. Study on the causes and disaster models of red bed landslides in Southwest China[J]. Railway Construction, 2021, 61(2):71-74. (in Chinese))

[10] 郑成成,龙小刚,胡广柱,等. 基于离散元的高陡堆石边坡失稳过程模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):92-98. (ZHENG Chengcheng, LONG Xiaogang, HU Guangzhu, et al. Failure process simulation of a high and steep rockfill slope based on discrete element method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):92-98. (in Chinese))

[11] 纪宇,梁庆国,郭俊彦,等. 红层软岩地区高速铁路深路堑基底变形规律研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(3):572-580. (JI Yu, LIANG Qingguo, GUO Junyan, et al. Research on the deformation law of the basement of high-speed railway deep cut in red bed soft rock area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3):572-580. (in Chinese))

[12] FUMAGALLI E. 静力学模型与地力学模型[M]. 北京:水利电力出版社,1979.

[13] MOHAMMED F, FRITZ H M. Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117: C11015. DOI:10.1029/2011JC007850

[14] BRAATHEN A, BLIKRA L H, BERG S S, et al. Rock-slope failures in Norway; type, geometry, deformation mechanisms and stability [J]. Norwegian Journal of Geology, 2004, 84(1):67-88.

[15] 何刘,吴光,赵志明. 层状工程边坡振动失稳的物理模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2016,36(4):200-206. (HE Liu, WU Guang, ZHAO Zhiming. Physical model test study on vibration instability of layered engineering slopes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(4):200-206. (in Chinese))

(下转第106页)