

含多个软弱夹层缓倾顺层边坡开挖卸荷变形特征

向波¹, 刘正威^{2*}, 张乐¹, 闵祥², 邬凯¹, 郭辉¹, 李涛²

(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610041; 2. 四川公路桥梁建设集团有限公司, 成都 610041)

摘要: 为探究含多个软弱夹层缓倾顺层边坡的开挖卸荷特征, 以有限元模拟为手段, 依托某在建高速公路顺层边坡, 分析分步开挖卸荷后其失稳机制和松弛区范围; 然后, 考虑软弱夹层的饱水软化效应, 研究了顺层边坡的松弛区范围和首次破裂长度特征。结果表明: 分步开挖下, 含多个软弱夹层缓倾顺层边坡浅表呈坡脚位置处的弧形滑面滑落破坏, 滑面由岩土界面剪出; 深部呈沿软弱夹层的多层平动式台阶状顺层失稳破坏; 松弛区范围随开挖深度的增大而增大, 且越靠近地表, 松弛区范围向坡体后缘延伸越长; 考虑软弱夹层饱水软化效应时, 饱水 1 d 后开挖揭露软弱夹层 I 坡体即失稳, 稳定性系数降低 42.07%, 松弛区范围增长 59.22%, 首次破裂长度增长 12.51 倍。可见, 对含多个软弱夹层的缓倾顺层边坡, 开挖前须施作截排水设施, 分步开挖时边开挖边支护具有必要性。

关键词: 缓倾顺层边坡; 软弱夹层; 有限元; 失稳机制; 松弛区范围; 首次破裂长度

中图分类号: P642; U415.6 **文献标识码:** A

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF GENTLY INCLINED BEDDING SLOPE WITH MULTIPLE WEAK INTERLAYERS UNDER EXCAVATION UNLOADING

XIANG Bo¹, LIU Zheng-wei^{2*}, ZHANG Le¹, MIN Xiang², WU Kai¹, GOU Hui¹, LI Tao²

(1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute LTD, Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Road and Bridge Group Co., Ltd. Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to explore the excavation unloading characteristics of gently inclined bedding slope with multiple weak interlayers, finite element (FEM) simulation was used to investigate the failure mechanism and relaxation region after step-by-step excavation of bedding slope, which from an expressway during construction. Meanwhile, considering the saturated softening effect of weak interlayers, this paper studied relaxation region and initial crack length of bedding slope. The results show that under the step-by-step excavation, the shallow surface of gently inclined bedding slope with multiple weak interlayers is slump slide at the foot of the slope, and the slip surface is cut from the rock-soil interface. However, the deep part of that is a multi-layer translational step-like bedding instability failure along weak interlayers. The relaxation region increases with the increase of excavation depth, and the closer to the surface, the longer the region extends to the trailing edge of the slope. Considering the saturated softening effect of weak interlayers, the slope is failure when the weak interlayer I is exposed after saturated softening 1 d, the stability coefficient decreases by 42.07%, the range of relaxation region increases by 59.22%, and the initial crack length

收稿日期: 2023-08-16 改回日期: 2023-09-30

基金项目: 交通运输部重点科技项目(2021-ZD1-019); 四川省交通运输科技项目(2021-A-02); 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司自立项目(2022-YL-02)

increases by 12.51 times at this point. It is concluded that drainage facilities should be constructed before excavation for gently inclined bedding slope which have multiple weak interlayers, and it is necessary to excavate and support at the same time when excavating step-by-step.

Key words: gently inclined bedding slope; weak interlayers; FEM; failure mechanism; relaxation region; initial crack length

四川盆地是我国典型的红层分布区,其东部以砂泥岩互层为主的缓倾地层广泛分布,理论上该地区顺层边坡倾角低于岩层内摩擦角,发生滑动的可能性较小^[1]。然而,四川盆周山区红层受坡脚开挖或降雨诱发的顺层滑坡频现,如宣汉县天台乡滑坡、南江县千秋垆滑坡、姜家梁滑坡、广元至巴中高速公路 K92+135~K92+350 段顺层滑坡等,对工程建设和人员生命安全造成极大威胁。

坡脚开挖是含软弱夹层顺层边坡失稳滑动的另一突出诱因。软硬相间顺层边坡中往往存在多个薄层状挤压破碎带,在地下水长期作用下逐渐形成软弱夹层^[2-3]。对于含软弱夹层的顺层边坡,在构造裂隙与软弱层面耦合作用下,常发生缓慢、持续、渐进的蠕变变形,且不同部位的变形程度存在差异^[4-5]。工程建设开挖揭露某一软弱夹层后,其上覆岩土体在重力作用下易于滑动,且进一步开挖后揭露下一层软弱夹层时往往会再次发生滑动,形成多层式顺层滑坡^[2]。胡斌等^[6]以某公路软硬互层边坡为例,基于开挖卸荷理论,采用 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟研究,结果表明最大不平衡力、最大水平位移值、剪应变最大值随开挖步数的增加累积增大。唐红梅等^[7]认为边坡位移对开挖过程反映比较敏感,量值突增现象显著。马洪生等^[8]研究了开挖面陡倾程度对松弛区范围的影响,认为开挖松弛范围随开挖角度的增大而增大。穆成林等^[9]认为陡坡度开挖下边坡变形破坏规模大,稳定较差,滑坡深层由层间泥化夹层剪切以及陡倾裂隙组合形成阶梯状滑面,整体以滑移-拉裂深层失稳为主。苏培东等^[10]考虑软弱夹层的应变软化特性,认为含软弱夹层顺层边坡的渐进破坏为自坡脚沿软弱夹层延伸至坡顶,并在坡顶产生拉张破坏。

除松弛区范围外,顺层边坡的首次破裂长度 L_c 是支挡加固设计中的另一关键参数,受坡脚开挖扰动影响显著^[11]。郑立宁^[12]考虑岩层倾角、切层厚度、滑面黏聚力、滑面内摩擦角对 L_c 的影响,建立了含软弱夹层顺层边坡的 L_c 计算式;何武等^[11]的数值试验结果也表明上述 4 个指标对 L_c 的影响权重

较坡体、滑面的变形指标更显著。

降雨对缓倾地层顺层边坡稳定性的影响主要体现在静水推力、扬压力和滑带土的饱水损伤 3 个方面^[13-14]。静水推力和扬压力对坡体的作用在近水平地层中作用更为突出,是滑坡起动的重要条件^[15-16]。滑带土的饱水软化直接影响着顺层滑坡底滑面的抗滑力大小,从而决定了坡体的稳定性状^[17-19]。李江等^[20]针对川东南江县红层滑带土开展了饱水软化试验,得到其强度参数与饱水时长间的关系,并进一步利用极限平衡法分析了顺层边坡的稳定性。

上述研究较一致地认为坡脚开挖和降雨是含软弱夹层顺层边坡失稳滑移的典型诱因,采用物理模型试验或数值试验是开展相关研究的有效手段,相关研究所提松弛区范围、首次破裂长度等是顺层边坡失稳防治的关键参数。随研究的不断深入,工程开挖和软弱夹层的饱水软化效应对含多个软弱夹层顺层边坡的影响有待进一步深入研究。

鉴于此,本文依托某深挖路堑形成的含多个软弱夹层顺层边坡工程,以有限元模拟为手段,研究天然工况下顺层边坡的分步开挖卸荷变形特征;然后,考虑降雨作用下软弱夹层的饱水软化效应,对开挖揭露软弱夹层后的失稳机制和松弛区范围等展开研究,期望获得此类典型顺层边坡的防治关键信息,以供支挡加固的设计实施进行参照。

1 工程背景

拟建工程位于为 G5 京昆高速广元至绵阳段扩容工程 K8+280~K8+660 段深挖路堑,其右侧形成最大开挖高度 40 m 的顺层高边坡,每级高度为 10 m,放坡坡率 1:0.75,地质剖面如图 1。

场区位于四川盆地边缘,属桌状低山缓坡宽谷地貌,地形上表现为桌状山形态。拟建工程位于一山脊前沿,斜坡整体坡向约 160°,自然坡度 10°~30°,局部稍陡。钻探揭露地层为第四系全新统残坡积层(Q_4^{dl+el})、崩坡积层(Q_4^{c+dl})和中生界侏罗系中统莲花口组(J_3l)。其中, Q_4^{dl+el} 、 Q_4^{c+dl} 主要为紫红、灰褐色粉质黏土,呈可塑状,厚度约 4.5~5.5 m; J_3l

中砂岩主要呈浅灰色,矿物成分以长石、石英为主,中厚层构造,钙质胶结,层间结合一般;J₃l中粉砂质泥岩呈紫红色,矿物成分主要以黏土矿物为主,含少量长石、石英等,薄至中厚层构造,泥质胶结为主,岩层呈中风化-强风化,遇水易崩解。此外,钻探揭示砂岩与粉砂质泥岩层间发育以黏土为主的厚约0.3~0.6 m 软弱夹层,如图1。

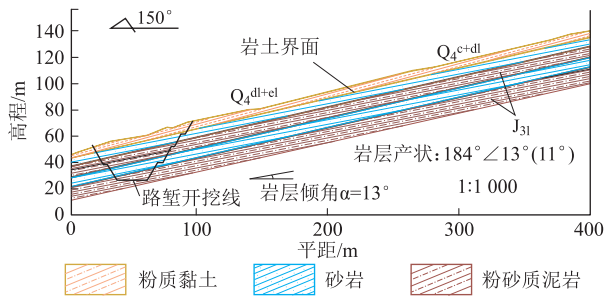


图1 边坡工程地质剖面

场区北西侧发育梓潼观鼻状构造,向南西倾伏,倾伏角度 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$,两翼缓,倾角 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。工程区岩层优势产状 $184^{\circ}\angle 13^{\circ}$,主要发育2组节理:J1产状 $25^{\circ}\angle 86^{\circ}$,节理间距0.5~1.6 m,延长3~4 m,切深1~3 m,光滑平直,闭合;J2产状 $300^{\circ}\angle 84^{\circ}$,节理间距为0.6~2.0 m,延长2~3 m,切深1.5~2.0 m,光滑平直,闭合。其中砂岩的岩体被结构面切割成块状,粉砂质泥岩于地表多发育网状状风化裂隙,表层暴露于空气时易风化剥落。

场区地下水类型主要有第四系松散层孔隙水和基岩裂隙水两种类型。松散层孔隙水赋存于 Q_4^{dl+el} 和 Q_4^{c+dl} 层中,主要接受降雨补给,其富水性差,透水性差,分布范围有限,该含水层无统一水位,动态变化受季节影响大,勘察期末测得该层稳定地下水位。基岩裂隙水赋存于J₃l的基岩裂隙,主要接受降水、地表水和上覆松散层地下水补给,顺地形就近向坡下及沟谷中排泄。工程区内因地表、地下水排泄距离短、较迅速,致使基岩裂隙水贫乏。

综上,拟建工程基岩缓倾顺层,且坡体内砂泥岩界面处均发育软弱夹层。如图2,利用节理和岩层的产状通过赤平投影法对挖方边坡进行稳定性分析,开挖边坡产状选取 $155^{\circ}\angle 53^{\circ}$,岩层倾向(184°)与边坡倾向(155°)小角度相交,属顺层坡体结构,岩层倾角(13°)小于边坡坡角(53°),开挖后易于发生顺层滑动,应具典型的卸荷变形效应。

2 有限元模拟

2.1 模型建立

数值模拟是解决岩土工程实践问题的常用研究

手段之一。以图1所示深挖路堑形成的含多个软弱夹层顺层边坡为例,建立含多个软弱夹层顺层边坡的平面应变有限元模型如图3。其中,底部边界设置固定约束,左右边界设置水平约束,顶部自由;模型尺寸为长400 m,高140 m,以消除边界效应;网格划分采取15节点三角形单元,软弱夹层及开挖临空面附近适当加密网格,共生成6 059个单元,48 691个节点。

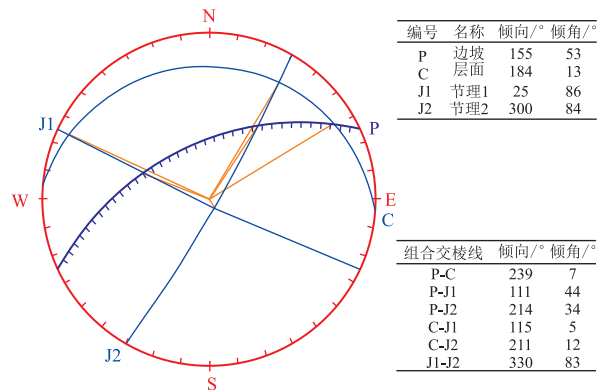


图2 赤平投影图(上半球)

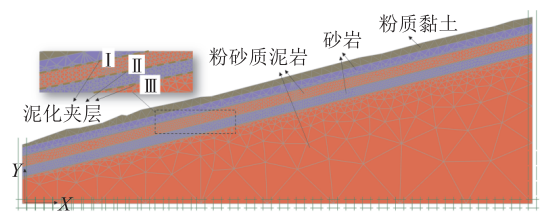


图3 有限元模型

2.2 材料参数及计算步

数值计算时,岩土体材料均赋予Mohr-Coulomb本构模型。依据地质勘查报告及室内试验结果,并参照文献^[2, 21],拟定岩土体物理力学参数如表1。

表1 岩土体物理力学参数

材料	重度 γ /kN·m ⁻³	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ / $^{\circ}$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν
粉质黏土	17.1	18	13.0	5	0.29
砂岩	26.0	1 840	42.3	5×10^3	0.21
粉砂质泥岩	24.8	430	35.2	900	0.25
软弱夹层	18.0	20	15.0	20	0.30

为有效获取软弱夹层对顺层边坡开挖卸荷效应的影响,数值试验中设置其分5步开挖,如表2。

表2 失稳机制试验开挖步

开挖步	地层	层底	切层厚度 D/m
开挖1	粉质黏土	砂岩	5
开挖2	砂岩	夹层I	11
开挖3	粉砂质泥岩	夹层II	19
开挖4	砂岩	夹层III	25.6
开挖5	粉砂质泥岩	粉砂质泥岩	29.6

通过数值试验,期望获取不同开挖步下含多个软弱夹层顺层边坡的开挖卸荷变形特征。

3 顺层边坡开挖卸荷效应分析

3.1 开挖失稳机制

不同开挖步骤下,含多个软弱夹层顺层边坡的增量位移如图 4。由图 4(a)可见,忽略边坡支护的最不利开挖条件下,顺层边坡开挖浅表土层至岩土界面时,边坡坡脚位置易于发生小规模的弧形滑面滑落破坏,并于坡脚粉质黏土与砂岩界面位置剪出,

此时根据强度折减法计算得坡体稳定性系数 $F_s = 1.17$,应采取清方等措施适当处治^[13]。

为避免浅表土层、路堑左侧边坡等对右侧深挖路堑顺层边坡开挖揭露软弱夹层后整体强度折减计算结果的干扰,后续计算中取消上述部分单元的长度折减。此时,由图 4(b)~图 4(e)可见,深挖路堑开挖揭露软弱夹层后,坡体呈平动式顺层滑移破坏,其滑移面为软弱夹层 I、II 所在平面。其中,开挖 2 的滑移面在坡脚位置处增量位移值明显较高,如图 4(b);图 4(c)~图 4(e)滑面在坡脚处则无该现象。

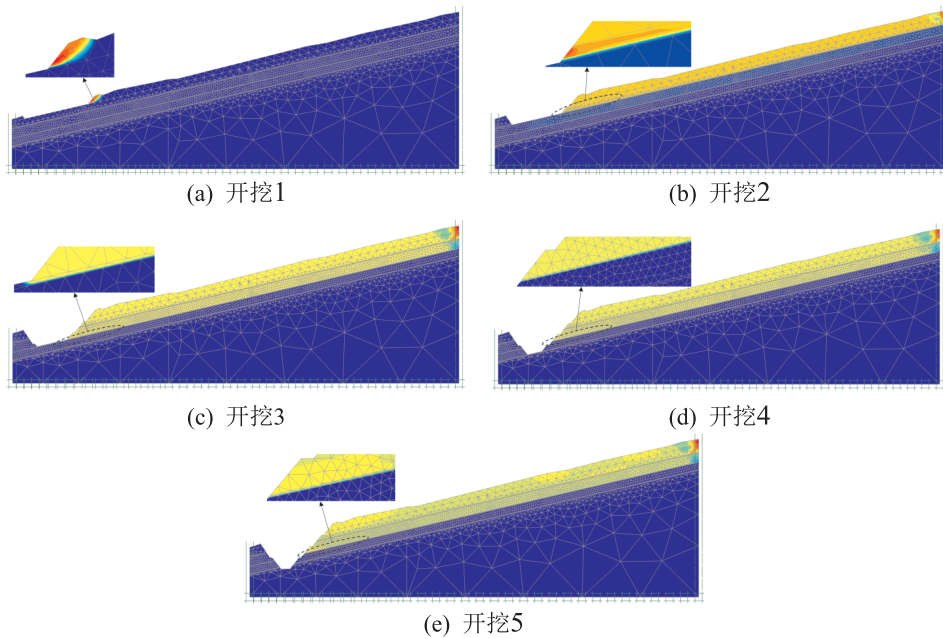


图 4 分步开挖下顺层边坡增量位移

由表 2 可知,开挖 2 的层底为软弱夹层 I,其下部土层为粉砂质泥岩,在上部土体滑移时坡脚位置易于挤出;开挖 3 的层底为软弱夹层 II,其下部土层为砂岩,强度较高,则无此现象。这表明,分步开挖过程中,软弱夹层 I 受岩层组合控制形成最不利滑移面。

此外,开挖 4 和开挖 5 虽揭露了软弱夹层 III,但增量位移云图中未出现明显的塑性滑动面,是因为这 2 步开挖工况下软弱夹层 I、II 处已发生明显破坏。因此,在该处深挖路堑施工时,建议采用边开挖边支护的模式进行。

3.2 开挖卸荷松弛区范围

参照文献[8],取 5 mm 为边坡开挖后松弛区的位移阈值,开挖 2~开挖 5 工况下的松弛区范围如图 5。可见,含多个软弱夹层顺层边坡的平动式滑移具多层阶梯状特征,松弛区范围随开挖深度的增大而增大,且具有累进效应。文献[9]通过物理模型

试验得到 50° 开挖坡脚时含多层软弱夹层顺层边坡的深部滑面呈由软弱夹层剪切和陡倾裂隙组合形成的阶梯状特征,且滑面基本呈直线状,与图 5 中所呈特征一致。

此外,图 5(c)~(d)中在软弱夹层 III 虽有明显的位移高于 5 mm 区域,但位移值相对于软弱夹层 I、II 处明显较小,即开挖后存在失稳变形,但在软弱夹层 II 上部土体破坏时,该部分未产生滑移,与 3.1 节所得结论相符。

根据图 5,绘制不同开挖步下各软弱夹层处松弛区范围变化关系如图 6。可见,同一开挖深度下,越靠近地表的软弱夹层松弛区范围越大,故最不利滑带为软弱夹层 I,与 3.1 节所得结论相一致。此外,同一软弱夹层的松弛区范围与切层厚度间近似呈线性关系,以软弱夹层 I 为例,自开挖 2 至开挖 5,切层厚度增长 169.09%,松弛区范围增长 71.26%。

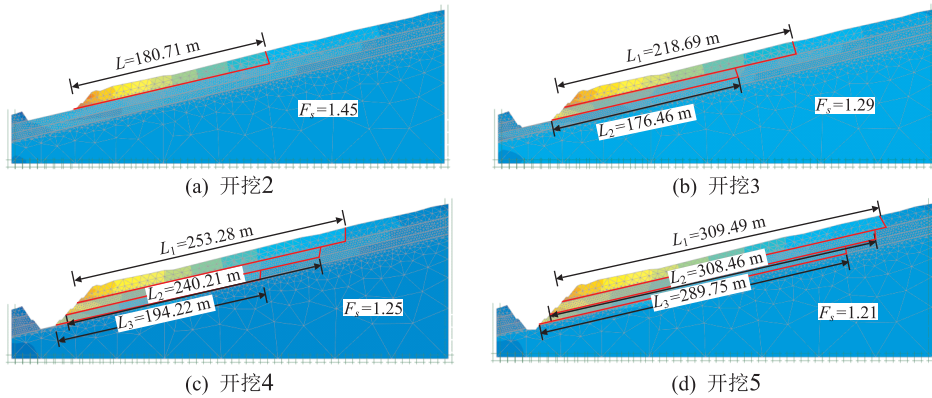


图5 分步开挖下顺层边坡松弛区范围

图5还给出了开挖2~开挖5的边坡稳定性系数 F_s ,可知随开挖深度的增大, F_s 逐步降低,开挖完成后 $F_s=1.21$,理论上处于稳定状态。需说明的是,本文在数值模拟中未考虑降雨对边坡稳定性的影响,事实上,川东缓倾地层中天台乡滑坡、垮梁子滑坡、青宁乡滑坡等均由强降雨诱发,因此需进一步讨论考虑降雨作用下软弱夹层饱水软化对顺层边坡稳定性的影响。

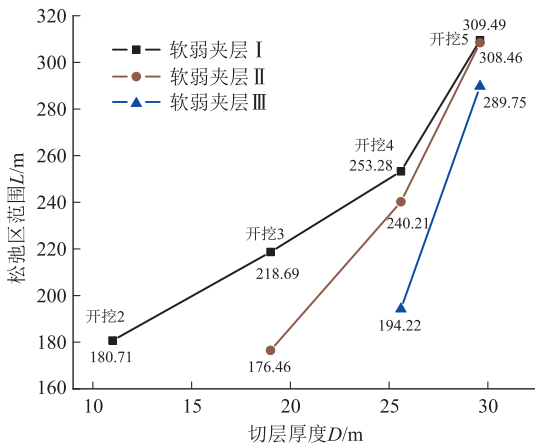


图6 分步开挖下不同软弱夹层松弛区范围

3.3 软弱夹层饱水软化对开挖卸荷效应的影响讨论

降雨对缓倾顺层边坡稳定性的影响更体现在软弱夹层等典型滑带受饱水作用后的强度损伤。值得注意的是,本文与文献[20]所依托顺层边坡案例距离较近,且均地处四川盆周,受龙门山断裂带、米仓山构造带影响,构造作用强烈,层间错动显著;地形上均为缓坡地貌,岩层倾角分别为 13° 和 12° ,坡体节理裂隙较发育,提供了优势渗水通道,层间错动带在地下水软化、泥化作用下形成软弱夹层甚至泥化夹层。因此,文献[20]通过室内饱水软化试验研究了四川南江县红层岩质滑坡原状滑带土的强度参数

衰减规律对本文有较强的适用性和参考价值。

以表1中未饱水软弱夹层强度参数对文献[20]中的软弱夹层强度参数劣化拟合式进行工点调整,即将 $c(t=0)=20$ kPa, $\varphi(t=0)=15^\circ$ 代入后,可得不同饱水时长下强度参数衰减规律如式(1):

$$\begin{cases} c(t) = 11.87 + 8.13e^{-0.38t} \\ \varphi(t) = 3.95 + 11.05e^{-1.15t} \end{cases} \quad (1)$$

值得注意的是,顺层边坡不同深度处软弱夹层受饱水损伤的影响程度显然是不同的,以本文所依托工程为例,图1揭示软弱夹层I上覆岩体为粉质黏土和砂岩,地表水易于沿砂岩裂隙等优势下渗通道侵入至软弱夹层处;软弱夹层II与软弱夹层I之间存在粉砂质泥岩地层,其透水性较差,与软弱夹层I共同形成相对隔水带,而软弱夹层III埋深更大,受饱水损伤影响更低。因此,考虑软弱夹层饱水损伤时,软弱夹层I为最不利滑面。

3.3.1 对失稳机制的影响

考虑饱水软化下软弱夹层I为最不利滑面,以开挖2为研究对象,通过数值试验计算不同饱水时长下顺层边坡的松弛区范围 L 及稳定性系数 F_s 。如表3。

表3 考虑软弱夹层饱水损伤的松弛区范围 L 及稳定性系数 F_s

饱水时长 t/d	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	松弛区范围 L/m	稳定性系数 F_s
0	20.00	15.00	180.71	1.45
1	17.43	7.45	287.72	0.84
2	15.67	5.06	348.42	0.64
3	14.47	4.30	348.42	0.56
4	13.65	4.06	—	0.53
5	13.09	3.99	—	0.52
6	12.70	3.96	—	0.51
7	12.44	3.95	—	0.50
8	12.26	3.95	—	0.50
9	12.14	3.95	—	0.50
10	12.05	3.95	—	0.49

不同饱水条件下的稳定性系数如图 7,可见 $t=1$ d 时 F_s 已降低至 0.84,下降 42.07%,抗滑力明显低于下滑力,不足以抵抗坡体沿软弱夹层的下滑,此时已然发生失稳滑动。从变化趋势来看, $t=0\sim 2$ d 时 F_s 陡降, $t=2\sim 4$ d 时 F_s 下降速率逐渐减小,当 $t\geq 4$ d 时 F_s 趋于稳定,结合表 3 可知,软弱夹层的强度参数饱水损伤至一定程度后,将稳定于较低水平,此后受饱水时长的影响基本可忽略。

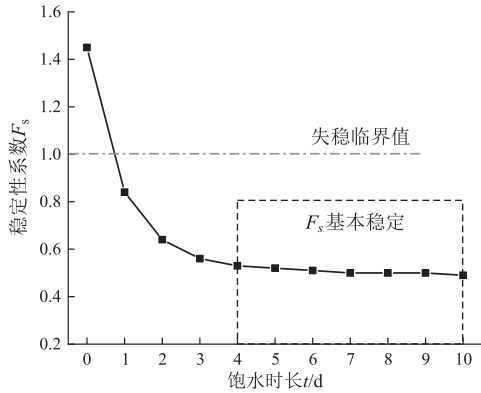


图 7 不同饱水时长下的顺层边坡稳定性系数

$t=0$ d 和 $t=1$ d 时顺层边坡安全性计算后的位移增量和坡脚位置处应变增量如图 8。可见,软弱

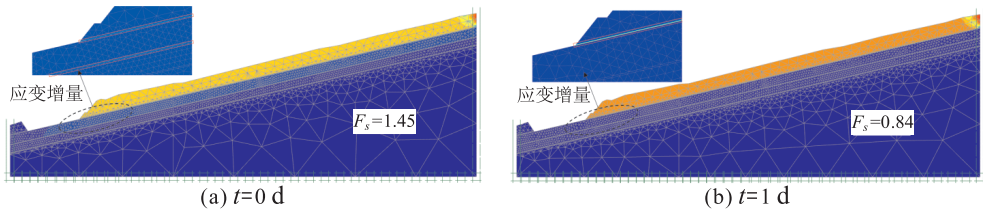


图 8 不同饱水时长下顺层边坡失稳机制

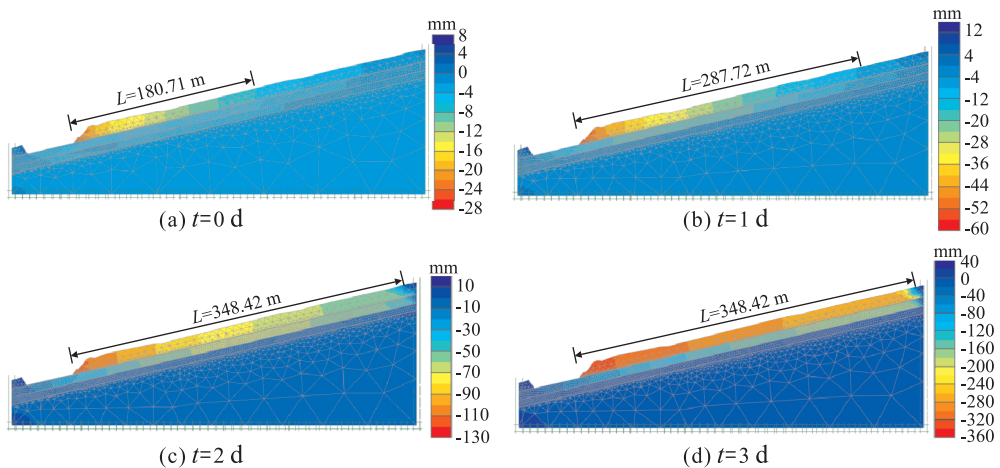


图 9 不同饱水时长下顺层边坡松弛区范围

3.3.3 对首次破裂长度的影响

文献[12]考虑软弱夹层的应变软化特征,建立了岩层倾角 $\alpha\leq 35^\circ$ 且切层厚度 $D\leq 30$ m 条件下, L_c

夹层饱水前,路堑开挖揭露软弱夹层 I 时,其上覆砂岩和粉质黏土具有下滑趋势,从应变增量来看,软弱夹层 II 也有较明显的变形特征;设置软弱夹层 I 和 II 同时饱水 1 d 后,坡体发生失稳滑动,其破坏机制以软弱夹层 I 为典型滑面,应变增量云图中软弱夹层 II 已无明显标志。这与前文考虑岩性组合及透水性差异影响的定性分析结论相一致,即该深挖路堑顺层边坡中软弱夹层 I 为最不利滑面。

3.3.2 对松弛区范围的影响

以 t 为 0 d、1 d、2 d、3 d 为例,不同饱水条件下开挖完成后顺层边坡的松弛区范围如图 9。可见,随 t 的增大,松弛区范围显著扩大,且在 $t=1$ d 时松弛区范围延伸至坡体后缘较远位置处,较 $t=0$ d 时增长 59.22%,且软弱夹层 I 上覆岩土体的水平位移显著增长; $t=2$ d 时松弛区范围已基本贯通至右边界,较 $t=1$ d 时增长 21.10%,软弱夹层 I~II 之间的粉砂质泥岩层亦有较大位移发生。由此可见,工程建设中软弱夹层的饱水软化程度对坡体潜在滑移位置及方量均有较大影响,须注重截排水设施的提前施作。

与 D 、 α 、 c 、 φ 间的经验公式,如式(2):

$$L_c = 5.75 \alpha + 3.86D - 3.81c - 9.06\varphi + 101.16 \quad (2)$$

显然, D 是表征坡脚开挖对 L_c 影响的关键指标。根据表 1、表 2、表 3 中参数, 将 $\alpha=13^\circ$ 、不同切层厚度 D 及软弱夹层饱水软化下的强度参数 $c(t)$ 、 $\varphi(t)$ 间代入式(2), 得考虑软弱夹层饱水软化的顺层边坡分步开挖下 L_c 如表 4。

表 4 不同开挖步下顺层边坡首次破裂长度 L_c/m

饱水时长 t/d	开挖 2	开挖 3	开挖 4	开挖 5
0	6.27	37.15	62.63	78.07
1	84.7	115.35	140.83	156.27
2	112.83	143.71	169.19	184.63
3	124.27	155.15	180.63	196.07
4	129.58	160.46	185.93	201.37
5	132.41	163.29	188.76	204.20
6	134.09	164.97	190.45	205.89
7	135.16	166.04	191.52	206.96
8	135.87	166.75	192.22	207.66
9	136.34	167.22	192.70	208.14
10	136.66	167.54	193.02	208.46

根据表 4, 绘制考虑软弱夹层饱水损伤的顺层边坡在不同开挖步下 L_c 分布如图 10。可见, 不同开挖步下 L_c 受 t 的变化影响规律具有一致性, 且与顺层边坡的稳定性系数变化规律相同, 即分别以 $t=2$ d 和 $t=4$ d 为界限, 由激增到过渡再趋于稳定。

从增长速率看, 以开挖 2 为例, L_c 在激增段增长 1699.52%, 在过渡段增长 10.14%, 在稳定段增长 5.46%, 差异十分明显。

需说明的是, 图 10 中随 t 的变化, 不同开挖步骤之间 L_c 的差值基本不变, 这是因为 L_c 计算时假定 3 处软弱夹层受饱水损伤的程度相同。考虑不同深度软弱夹层的饱水损伤差异时, 软弱夹层 I 应为最不利滑面, 图 10 揭示了饱水 4 d 后该顺层边坡开挖揭露软弱夹层 I 后首次破裂长度 L_c 约 136 m。

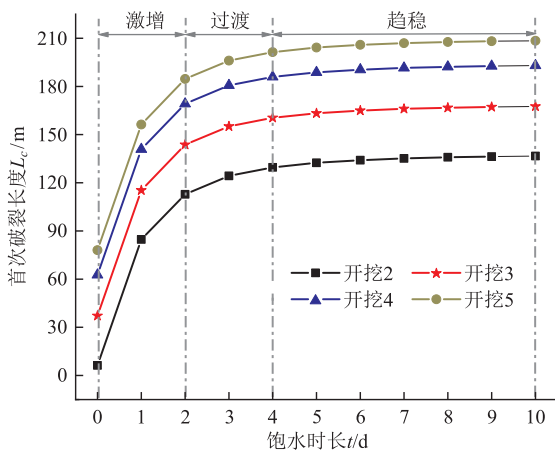


图 10 不同饱水时长下的顺层边坡首次破裂长度 L_c/m

4 结论

(1) 分步开挖卸荷后, 含多个软弱夹层顺层边

坡浅表土层呈小规模弧形滑面滑落破坏, 深部土层呈多层平动式顺层失稳破坏, 其滑面具阶梯状特征。受岩性组合及透水裂隙差异发育等影响, 依托工程的最不利滑面为软弱夹层 I。

(2) 含多个软弱夹层顺层边坡中, 越靠近地表, 开挖卸荷后的松弛区范围越大, 软弱夹层 I 为最不利滑面; 松弛区范围随开挖深度的增大而增大, 以软弱夹层 I 为例, 切层厚度增长 169.09% 时, 松弛区范围增长 71.26%。

(3) 考虑软弱夹层饱水损伤效应, 开挖揭露软弱夹层 I 时, 软弱夹层饱水 1 d 后, 坡体失稳滑动, 稳定性系数降低 42.07%; 饱水 2 d 后边坡稳定性系数降低 55.86%, 松弛区范围增长 92.81%, 首次破裂长度增长 1699.52%; 饱水 4 d 后 3 者均趋于稳定。

(4) 边坡开挖前, 建议施作地表截排水设施, 以避免软弱夹层的饱水损伤, 从而诱发顺层边坡的滑移失稳。边坡开挖中, 需严格落实边开挖边支护的理念, 建议对开挖面附近浅表粉质黏土进行适当清理; 开挖揭露软弱夹层前, 应施作预应力锚杆等支护措施, 以增强潜在滑面附近的抗滑力, 避免顺层滑移的发生。

参考文献

- [1] 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3783-3790.
- [2] 许强, 唐然. 红层及其地质灾害研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 28-50.
- [3] 赵海松, 张乐, 邹凯, 等. 考虑侧壁阻力的顺层边坡失稳机制及稳定性评价[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 1-10.
- [4] Zang M D, Yang G X, Dong J Y, et al. Experimental study on seismic response and progressive failure characteristics of bedding rock slopes[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1394-1405.
- [5] 唐辉明, 鲁莎. 三峡库区黄土坡滑带空间分布特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 129-136.
- [6] 胡斌, 姚文敏, 余海兵, 等. 分步开挖卸荷作用下软硬岩互层边坡的稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, (29): 281-286.
- [7] 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.
- [8] 马洪生, 庄卫林, 刘阳, 等. 顺层岩质边坡静力开挖物理模拟试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 37-43.
- [9] 穆成林, 裴向军, 王睿, 等. 基于物理模型试验的含多层软弱夹层顺层开挖高边坡变形破坏特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 61-67.
- [10] 苏培东, 唐雨生, 马云长, 等. 基于应变软化的软弱夹层顺层边坡渐进破坏[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 69-75, 81.
- [11] 何武, 张乐, 龚祖坤, 等. 顺层边坡首次破裂长度及影响因素分

- 析[J]. 路基工程, 2021, (3): 122-127.
- [12] 郑立宁. 基于应变软化理论的顺层边坡失稳机理及局部破坏范围研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [13] 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, 2016: 303-309.
- [14] 唐然, 刘宗祥, 邓韧, 等. 四川南充龙头山滑坡发育特征及形成演化[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(32): 7-13.
- [15] 杜岩, 谢谟文, 吴志祥, 等. 平推式滑坡成因机制及其稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2871-2880.
- [16] Du Y, Xie M W, Jia J L. Stepped settlement: A possible mechanism for translational landslide[J]. Catena, 2020, 187: 104365.
- [17] 张海泉, 何文秀, 赵波, 等. 四川丹巴县“6.17”梅龙沟泥石流-阿娘寨滑坡灾害链现场调查与监测分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12481-12489.
- [18] 梁宇, 严磊, 苏培东, 等. 溪洛渡库区河口滑坡变形特征和形成机制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14500-14507.
- [19] 钟政, 陈宁生, 倪华勇, 等. 金沙江白格滑坡工程地质与水文地质特征[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5262-5269.
- [20] 李江, 许强, 胡泽铭, 等. 川东红层原状滑带土饱水软化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4333-4342.
- [21] 张乐, 冯君, 武小菲, 等. 基于变形控制的含软弱夹层顺层边坡治理[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 94-101.

作者简介: 向波(1973—), 男, 汉族, 四川荣县人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事公路工程地质灾害防治和科研工作。

E-mail: xiangbo215@sina.co

通讯作者: 刘正威(1990—), 男, 汉族, 四川达州人, 本科, 主要从事公路路基边坡和地质灾害治理研究。E-mail: 251051017@qq.com