

# 开挖及降雨作用下土质边坡变形破坏机理

吴江鹏<sup>1</sup>, 章广成<sup>1</sup>, 侯赠<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北省水利部长江勘测技术研究所, 湖北 武汉 430011)

**摘要:** 本文基于现场变形调查和数值模拟分析, 研究了华安县大坑村滑坡在人工开挖以及降雨条件下的变形特征, 计算了不同开挖时步以及不同工况下的边坡稳定性系数, 并探讨了该滑坡的变形破坏机理. 结果表明: 开挖过程中, 边坡前缘抗滑阻力减小, 前缘部位最先产生变形, 牵引中后缘坡体表面产生张拉裂缝, 降雨期间雨水沿裂缝渗入坡体, 岩土体容重增加, 岩土体抗剪强度降低, 最终诱发深层滑移破坏. 分析表明, 人工开挖及降雨入渗是大坑村土质边坡产生深层滑移破坏的主要影响因素. 深层滑移破坏后, 边坡岩土体结构松散, 在暴雨作用下, 再次诱发滑坡前缘浅表层松散体产生圆弧面滑移破坏.

**关键词:** 土质边坡; 人工开挖; 降雨入渗; 数值模拟

**中图分类号:** TU45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2015)02-0073-07

## Analysis on soil slope deformation failure mechanism under slope excavation and rainfall infiltration

Wu Jiangpeng<sup>1</sup>, Zhang Guangcheng<sup>1</sup>, Hou Zeng<sup>2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430011, China)

**Abstract:** Based on deformation survey and numerical analysis, the process of slope deformation was studied during the slope cutting and under rainfall conditions. The slope stability factor of each excavation step also was calculated, and then the landslide deformation mechanism was investigated. The result shows that the leading edge of the slope occur deformation firstly because of resistance against sliding decreased, which entice develop tension cracks at the trailing edge of the slope. Rainwater infiltrate into the slope body along the cracks under the condition of rain, which makes bulk density of rock and soil increased, and its shear strength reduced, so that the deep sliding failure is emerged. The analysis shows that, as to soil slope of Dakeng village, excavation and artificial rainfall is the main factors of deep sliding. The structural of rock and soil become loose after deep sliding that induce shallow landslides easily at the leading edge of the slope under rainfall conditions.

**Keywords:** soil slope; artificial excavation; rainfall infiltration; numerical simulation

目前因人工开挖及降雨入渗等因素引起的土质边坡失稳破坏正逐年增多. 土质边坡由于结构松散, 渗透性能强, 力学性能差等原因, 在开挖以及降雨等因素影响下, 坡体内局部易产生应力集中, 出现局部暂态饱和区, 导致基质吸力减小, 抗剪强度降低, 进而导致岩土体发生变形破坏<sup>[1]</sup>. 边坡的变形与破坏演变过

程十分复杂,属于一个渐进破坏过程<sup>[2-4]</sup>.不同的影响因素下的边坡变形破坏机理已被大量研究.Morgenstern<sup>[5]</sup>,Ter - Sterpanian<sup>[6]</sup>等研究滑坡体上岩土体的抗剪强度参数受岩土体内孔隙水压力变化的影响,从而揭示滑坡的变形破坏机理.汤明高等<sup>[7]</sup>采用 ANSYS 对塌滑前后的坡体进行二维弹塑性有限元分析,并追踪塌滑前后坡体的应力、应变、变形和计算应力集中程度,通过前后比较确定塌滑后边坡的潜在不稳定范围.黄润秋等<sup>[8]</sup>通过非饱和土强度随基质吸力变化的规律,对基质吸力影响边坡稳定性的机制进行探讨.赵晓彦等<sup>[9]</sup>分析了类土质边坡开挖过程中卸荷裂隙的产生机理,认为工程开挖改变了边坡岩土体的应力状态,使边坡岩土体受到一个指向坡外的侧向附加应力,从而导致了原有裂隙的张开和新裂隙的产生.许建聪等<sup>[10]</sup>建立了强降雨作用下浅层滑坡稳定性系数与滑面带抗剪强度指标及饱水面积比三者之间的数理统计相关式,揭示了强降雨对浅层滑坡变形解体和破坏的作用机理.徐全等<sup>[11]</sup>研究了饱和渗透系数及降雨强度对边坡安全系数及滑面位置的影响,并分析了安全系数及滑面位置与时间的关系.肖超等<sup>[12]</sup>,提出根据坡体监测的位移时间变化曲线以及数值分析研究了开挖与降雨条件下边坡失稳机理.吴长福及王培清等<sup>[13-14]</sup>研究了水分在坡体内的运移对边坡稳定性的时间空间影响效应,在强降雨条件下,边坡最危险滑动面及其对应的安全系数随水分在坡体内渗透运移而变化.肖克强等<sup>[15]</sup>研究软岩高边坡在开挖及降雨时坡体的稳定性及变形变化规律,并分析支挡结构对边坡变形的影响机理.连颖营等<sup>[16]</sup>运用有限元强度折减法对边坡开挖的稳定性进行研究,李滨锷等<sup>[17]</sup>综合考虑降雨强度、初始条件以及饱和渗透系数为变量等因素深入探讨了降雨诱发土体变形与渗流耦合效应等问题.本文以华安县大坑村滑坡为研究对象,基于现场变形调查和数值模拟分析,对开挖及强降雨条件下的土质边坡的变形特征及破坏机理进行了研究,这对土质边坡的整体稳定、施工安全要求以及前期防治具有积极意义.

## 1 边坡工程地质条件

华安县大坑村滑坡位于华安县沙建镇大洲建材工业园内,省道 208 线公路从园区东侧通过,大洲建材工业园属低山丘陵台地和九龙江支流冲洪积一级地貌单元交接部位.根据地质调查和现场开挖剖面揭露的地质情况,拟建大洲建材工业园场地地层结构较简单,场地表层为第四系坡积成因的粉质粘土,粉质粘土层厚度较小,边坡滑移后受扰动,土体性质较松散,经雨水冲刷,已基本被剥蚀.场地下伏岩层主要是闪长玢岩和凝灰岩风化带,浅层主要以闪长玢岩为主,深层为凝灰岩,见图 1.

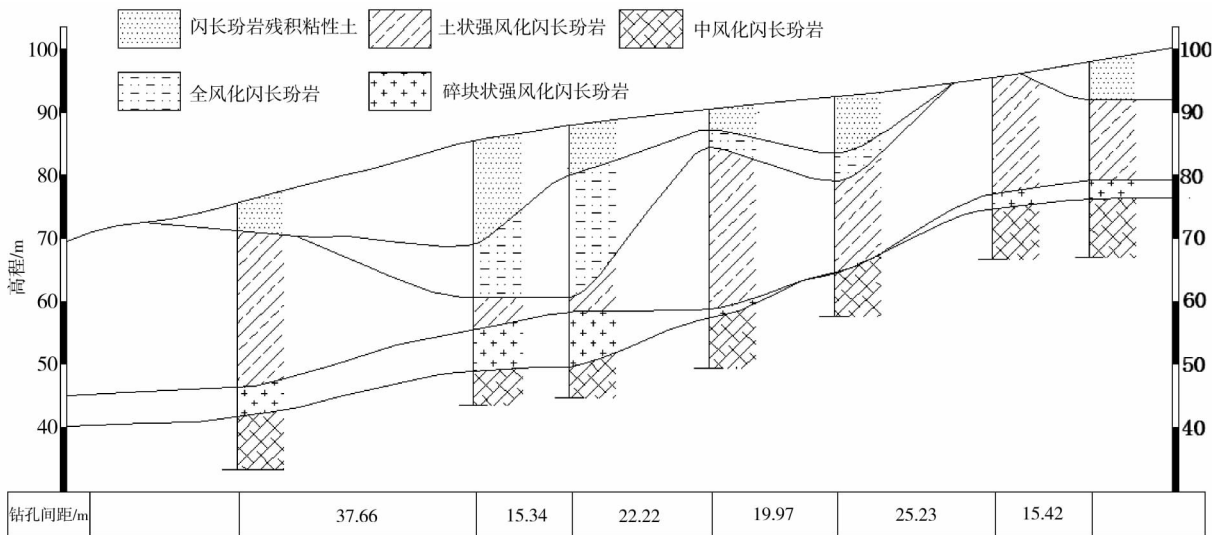


图 1 工程地质剖面图

滑体地层(见表 1)主要由闪长玢岩残积土、全风化闪长玢岩以及土状强风化闪长玢岩组成,滑床主要由碎块状强风化闪长玢岩及中风闪长玢岩组成.

表1 滑坡各地层特征

序号	地层名称	地层特征
1	闪长玢岩残积粘性土	该层为闪长玢岩经强烈风化形成的残积物,呈褐红色、灰白色、灰黄色等,稍湿,可~硬塑为主,厚度1~16 m.原岩结构特征清晰,属特殊性土,浸水后易崩解、强度降低.
2	全风化闪长玢岩	呈灰黄、褐红、褐黄色,局部为灰白色,层面埋深1.8~16 m,厚度1.8~23.3 m.岩石风化剧烈,岩体极破碎,泡水易软化、崩解,强度降低,属极软岩,基本质量等级属V类.该层与上覆残积粘性土、下伏土状强风化岩接触呈渐变关系,天然状态下工程性能较好,泡水后强度急剧降低.
3	土状强风化闪长玢岩	呈灰黄、灰白等色,层面埋深2.5~27.2 m,厚度0.8~27.4 m.岩石风化强烈,多风化成粘粒、粉粒,风化强烈,岩体极破碎,力学强度较高,天然状态下工程性能较好.泡水易软化、崩解,强度降低,属软岩,基本质量等级属V级.

大坑村滑坡所处地貌主要为构造剥蚀丘陵地貌类型,按地下水的赋存条件、水理性质及水力特征分2种类型:

1) 风化带孔隙—裂隙水,主要分布于残积土及全、强风化带中,主要接受大气降水的补给,受季节影响,水量及水位埋深变化较大,地下水的富水性弱,局部属微承压水.

2) 基岩构造裂隙水,主要赋存于中、微风化岩的裂隙和构造破碎带中,主要接受大气降水的补给,向区内最低侵蚀基准面排泄,其动态特征受季节影响变化不大.

地下水水位受降水影响,根据勘察期间在边坡上所打钻孔内实测水位,滑坡后缘水位埋深约14 m,中部水位埋深约10 m,前缘水位埋深5 m.

## 2 滑坡形态特征与变形迹象

大坑村滑坡位于闽南地区剥蚀丘陵地貌山坡坡脚处,现场调查表明,滑坡前缘为大洲建材工业园道路A线,滑坡后缘位于南侧山体北坡上(见图2).原始地形边坡坡度约为 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ,滑坡段的自然地形标高一般62~95 m之间,自然坡度为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ .大坑村滑坡主滑方向为 $\text{NNE}10^{\circ}$ ,近南北向,滑坡方量约27.3万 $\text{m}^3$ ,纵向长约120 m,宽度为30~130 m,后缘窄,前缘宽,呈“ $\cap$ ”型,滑坡体厚度为10~25 m.滑坡前缘高程在55~60 m之间,呈舌状延伸至在建道路路基上;后缘高程95 m左右,处于崩坡积堆积物形成的陡坎下,前后缘高差近40 m.斜坡上部为多级平台,坎高8 m,坡角 $45^{\circ}$ 左右.



(a) 滑坡东侧壁



(b) 滑坡西侧壁

图2 滑坡区域地貌特征

按照开挖设计要求,原边坡计划分五级放坡(见图3),开挖过程中分五级自上而下逐级放坡,形成五级马道.放坡过程中,第一级边坡高度为6.77 m,其他各级边坡坡高为8 m,坡比为1:1,马道宽度为2 m,开挖高度差为42 m.边坡开挖期间一直未采取相应的支护措施,当开挖至四级马道时,边坡产生整体深层滑坡破坏.受后期降雨作用影响,滑坡体前缘表层残积土内产生新的滑坡.

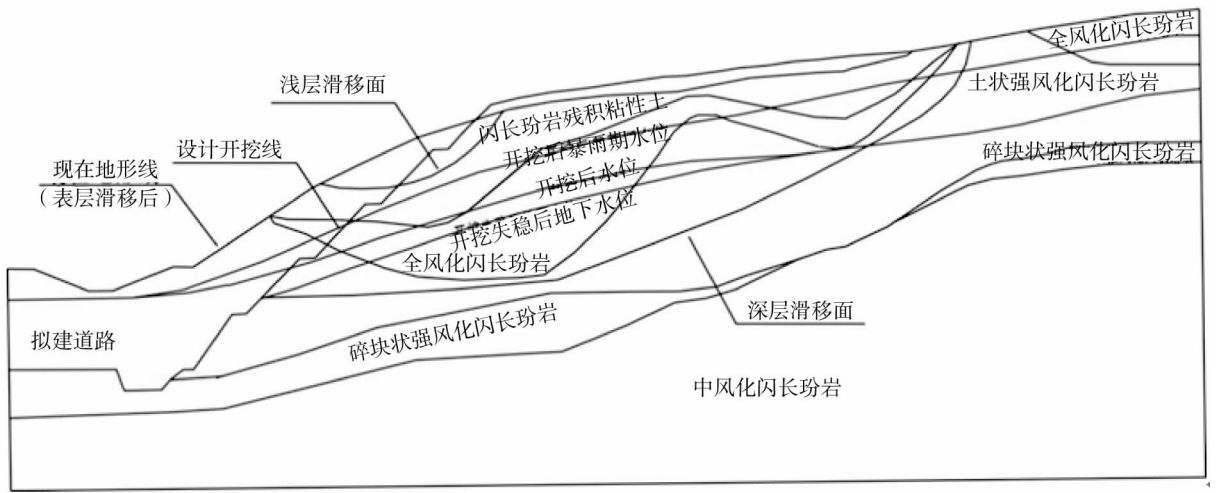


图3 滑移后主滑剖面概化模型

整个滑坡体横向深、大裂隙较发育,垂直错动现象明显,且基本处于张开状态,见图4. 滑坡体以东西向裂隙为主,靠近两侧发育有沿东西转向北的弧形裂隙,裂缝宽0.3~0.8 m、深1~3 m不等,多有错动,错距0.6~4.0 m左右. 受人工开挖以及降雨入渗影响,边坡首先产生整体深层滑动,而后滑坡体前缘表层残积土内产生新的小型滑坡. 根据现场勘察可知,滑坡前缘水平位移大于后缘,且在滑坡体后缘、中部及两侧发育有多组与坡体方向垂直的张裂缝,据此可确定深层滑坡为土质牵引式滑坡,其滑动面位于土状强风化闪长玢岩内,滑移面深度为27 m左右. 滑坡体前缘浅表层圆弧面滑裂面后缘存在垂直错距但裂隙处于闭合状态,可见浅层滑坡是剪切破坏为主,为局部推移式滑动破坏,浅层滑移面位于闪长玢岩残积粘性土内,滑移面深度为6 m左右. 目前该滑坡仍处于蠕滑状态,极易再次发生大规模滑动.



图4 滑坡后缘张裂缝

### 3 数值模拟分析

选取该滑坡最为典型剖面建立了开挖前及开挖至四级马道的地质模型(网格剖分模型见图5),并分析在开挖及降雨条件下滑坡的变形特征以及各个阶段的稳定性. 各土层天然工况以及暴雨工况的物理力学性质根据室内试验以及参数反演确定,见表2.

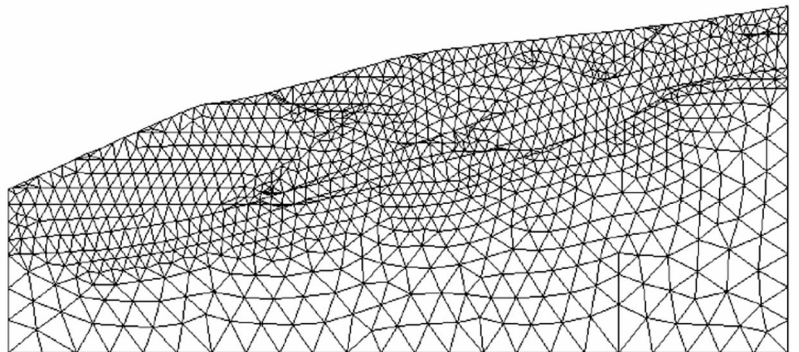


图5 网格剖分图

表 2 岩土体物理力学性质指标

编号	岩土 土层	容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		弹性模量 $E_s / (\text{kPa})$		粘聚力 $C / (\text{kPa})$		内摩擦角 $\Phi / (^\circ)$		泊松比 $\mu$	
		天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨	天然	暴雨
		工况	工况	工况	工况	工况	工况	工况	工况	工况	工况
1	闪长玢岩残 积粘性土	18.4	18.8	$1.75e^4$	$1.60e^4$	25	20	12	9	0.34	0.36
2	土状强风化 闪长玢岩	20.0	20.4	$3.20e^6$	$2.80e^4$	39	34	19	16	0.33	0.28
3	全风化闪 长玢岩	19.0	19.5	$2.10e^5$	$1.89e^5$	28	23	14	11	0.31	0.33
4	碎块状强风 化闪长玢岩	21.0	21.3	$7e^6$		60		27		0.26	
5	中风化闪 长玢岩	23.0	23.3	$2.6e^7$		75		32		0.22	

### 1) 位移分析

限于篇幅,仅给出暴雨工况下数值模拟结果(下同).由图 6 分析表明:第一步开挖后 X 方向位移较开挖前的位移变形趋势有所减小,在削坡减载的作用下,边坡整体稳定性可能坡 X 方向的位移变化量普遍增加,主要变形区由原来的近坡脚处改为开挖处,较大的变形区域逐渐顺着开挖形成的边坡向下扩展,开挖第四步后,圆弧区域剪出破面位于残积土和全风化闪长玢岩分界线上,最大位移变形区的位移等值线呈圆弧形分布.

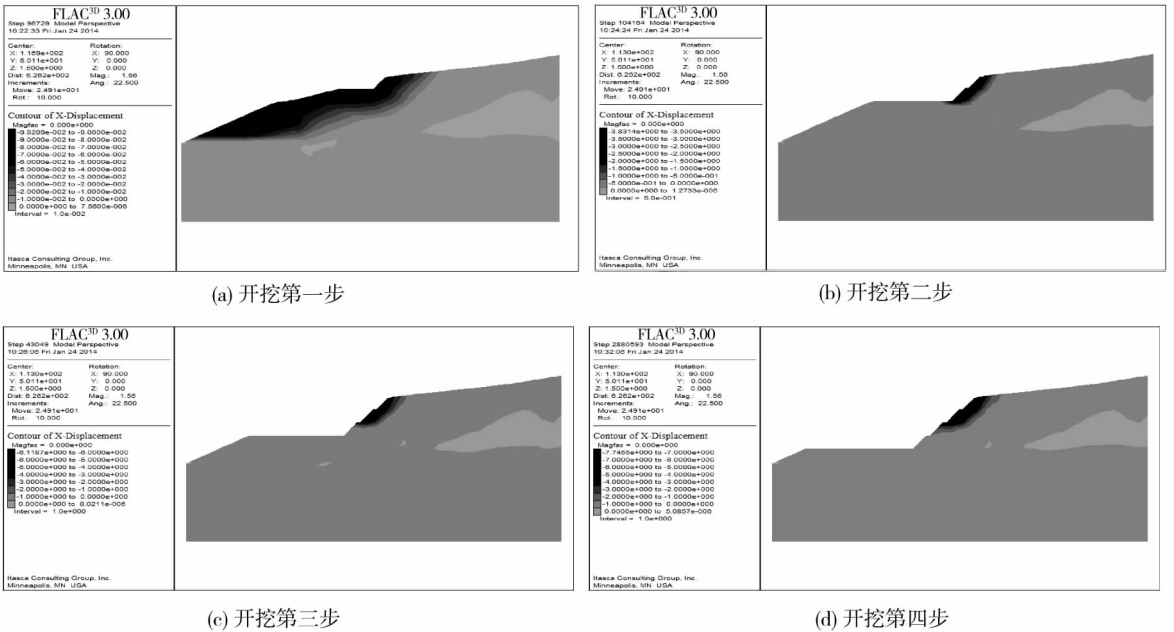


图 6 开挖过程 X 方向位移等值线图(暴雨工况)

### 2) 剪切应变增量分析

剪切应变增量变化最大的区域,通常为变形最有可能发生的部位,可判断潜在滑动面的位置.由图 7 分析可知,开挖第一步后剪切应变增量较开挖前有所减小,后续开挖工程的剪切应变增量逐渐增加,其最大区域主要集中于第二级马道底部与第三级马道顶部.开挖第四步后,边坡的最大剪切应变增量区域位于残积土和全风化闪长玢岩分界线处,与浅层滑移面所处位置一致.

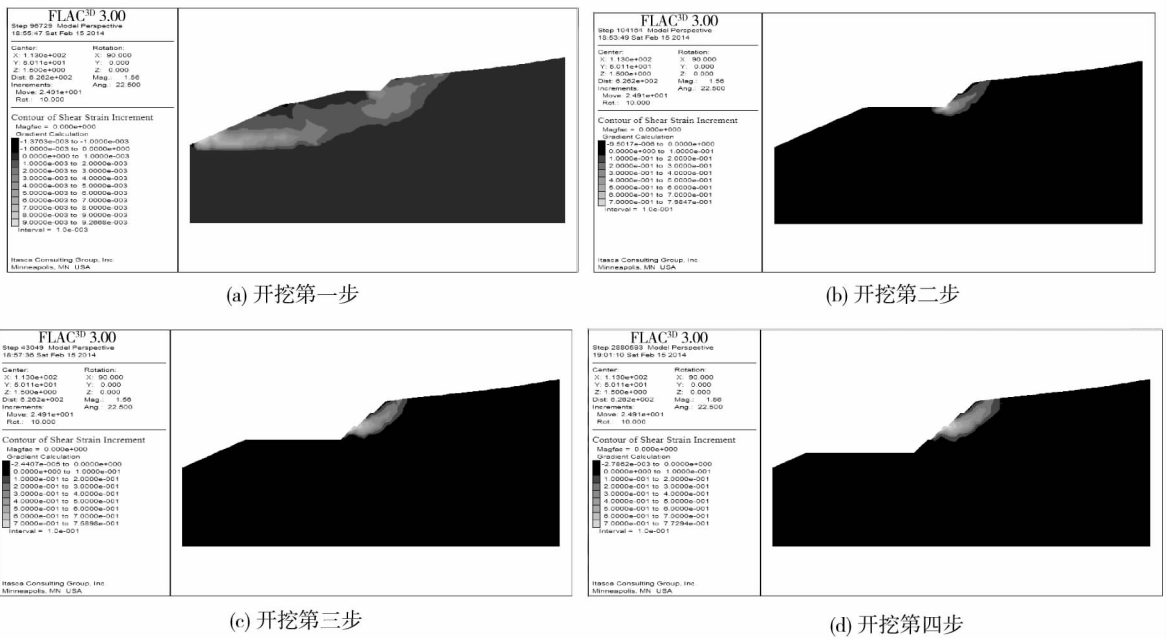


图7 开挖过程剪切应变增量等值线图(暴雨工况)

### 3) 稳定性系数分析

采用FLAC<sup>3D</sup>软件强度折减法计算边坡不同开挖时步以及不同工况下稳定性系数,其值如表3所示。根据《建筑边坡工程技术规范(GB50332-2002)》,该边坡在暴雨工况下,边坡的安全系数为1.1。由表3可知,第一步开挖后暴雨工况下的稳定系数 $K$ 较开挖前的稳定性系数稍大,说明开挖后边坡的整体稳定性有所提高。后续开挖过程中稳定系数 $K$ 值(暴雨工况)依次减小。当开挖至第四步时,天然

表3 各开挖时步边坡的稳定性系数

开挖过程	稳定性系数 $K$	
	天然工况	暴雨工况
开挖前	2.10	1.94
第一步	2.14	1.99
第二步	1.34	1.28
第三步	1.19	1.12
第四步	1.10	1.01

工况下的稳定性系数 $K$ 值为1.1,此时该边坡已经处于极限平衡状态,降雨工况下边坡的稳定系数 $K$ 为1.01,此时边坡的稳定系数 $K$ 值已经小于暴雨工况下的安全系数1.1,表明此时边坡已经处于欠稳定状态,随时有产生滑移破坏的可能,这与边坡在该阶段遇暴雨后产生变形破坏这一情况吻合。

## 4 变形破坏机理分析

滑坡体地层要由闪长玢岩残积土、全风化闪长玢岩以及土状强风化闪长玢岩等软岩组成,土体结构松散,渗透性能较强,力学性能较差,抗剪强度较低,这为边坡的滑移破坏提供了物质基础。

边坡在未开挖前没有出现较大的整体变形和滑移破坏现象,表明即使在暴雨工况下原边坡的稳定性较好。因修建大洲建材工业园区道路,对边坡前缘进行人工开挖。开挖工程中,边坡前缘抗滑阻力减小,前缘部位最先产生变形,变形区域由近坡脚处转向开挖处,较大的变形区域逐渐顺着开挖形成的边坡向下扩展,牵引边坡后缘和中后缘产生张拉裂缝。2011年夏季滑坡区域的雨量较集中,并多次出现强降雨天气,坡体地形较平缓,降雨期间雨水沿形成的张拉裂缝渗入坡体,增加坡体自重以及孔隙水压力。滑体地层均属于软岩,遇水易软化、崩解,抗剪强度急剧降低,坡体抵抗变形及破坏的能力被削弱,土体变形迅速加大,从而诱发土质边坡深层滑移破坏,人工开挖及降雨入渗是该边坡产生深层滑移破坏的主要影响因素。深层滑移破坏使得坡体岩土体结构松散,力学性能变差,抗剪强度降低,在暴雨作用下,表层残积土变形进一步加剧,再次诱发滑坡前缘浅表层松散体产生圆弧面滑移破坏。

土质边坡的变形与破坏演变过程十分复杂,属于一个渐进破坏过程。坡体前缘开挖使坡体产生局部变

形,诱使坡体后缘、中后缘部产生大量的张拉裂缝,这为雨水入渗创造有利条件.雨水入渗使边坡由局部变形逐渐扩展到坡体产生大变形以致整体发生滑坡破坏.整体发生滑坡破坏后边坡岩土体的抗剪强度进一步降低,在暴雨作用下,前缘开挖处的浅表层松散体产生滑坡破坏.

## 5 结论

1) 土质边坡的变形与破坏属于一个复杂渐进破坏过程.该边坡在开挖第一步后由于削坡减载作用,边坡的变形量有所减小,边坡稳定性有所提高.后续开挖过程中,边坡中岩土体的变形特征主要集中于开挖处,较大的变形区域逐渐顺着开挖形成的边坡向下扩展.在降雨作用下,坡体变形不断加剧.

2) 开挖和降雨入渗是该土质边坡发生深层滑坡破坏的主要影响因素.开挖过程中,边坡前缘抗滑阻力减小,前缘部位首先产生局部变形,牵引边坡后缘和中后缘产生张拉裂缝,雨水沿裂缝入渗坡体内,边坡岩土体的抗剪强度降低,从而诱发深层滑坡破坏.整体发生深层滑坡后,在暴雨作用下,浅表层松散体的抗剪强度降低,再次诱发浅层滑坡破坏.

3) 边坡开挖过程中未采取任何支护措施,也未对开挖中的边坡进行位移监测.开挖前需对边坡开挖过程进行数值模拟分析,预测其危险滑动面以及分析各个开挖过程中坡体的变形特征,采取相应的预防措施,降低边坡滑坡风险以及保证施工过程安全.

## 参考文献:

- [1] 娄一青,曹良珍,王志军,等.降雨入渗对边坡稳定性影响分析[J].水力发电,2008,34(5):19-22.
- [2] 王庚荪.边坡的渐进破坏及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):29-33.
- [3] 唐芬,郑颖人.边坡渐进破坏双折减系数法的机理分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(3):436-441.
- [4] 张世华,孙红月,熊晓亮,等.基于 matlab 的边坡虹吸排水渗流场分析[J].公路工程,2014,39(5):25-30.
- [5] Morgenstern N R, Price V E. The analysis of stability of general surface[J]. Geotechnique, 1965, 15(1): 79-93.
- [6] Ter-Stepanian G P. Depth creep of slopes[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology Bulletin De L'association Internationale De Géologie De L'ingénieur, 1974, 9(1):97-102.
- [7] 汤明高,黄润秋,许强,等.开挖边坡潜在不稳定范围的预测分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1190-1197.
- [8] 黄润秋,戚国庆.非饱和渗流基质吸力对边坡稳定性的影响[J].工程地质学报,2002,10(4):343-348.
- [9] 赵晓彦,胡厚田,庞烈鑫,等.类土质边坡开挖的卸荷作用及卸荷带宽度的确定[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):708-712.
- [10] 许建聪,尚岳全,陈侃福,等.强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(18):3246-3251.
- [11] 徐全,谭晓慧,沈梦芬.降雨入渗条件下土质边坡的稳定性分析[J].岩土工程学报,2012,34(S1):254-259.
- [12] 肖超,金福喜,刘海鸿,等.开挖与降雨作用下边坡失稳机理及模拟分析[J].工程地质学报,2012,20(1):37-43.
- [13] 吴长富,朱向荣,尹小涛,等.强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析[J].岩土力学,2008,29(2):386-391.
- [14] 王培清,付强.降雨入渗对裂隙性红粘土边坡的稳定性影响分析[J].公路工程,2013,38(5):166-170+192.
- [15] 肖克强,周德培,李海波.软岩高边坡开挖变形规律的物理模拟研究[J].岩土力学,2007,28(1):111-115.
- [16] 连镇营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):407-411.
- [17] 李滨铎,吴礼舟,许强,等.降雨诱发非饱和土地下水位上涨的耦合效应[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2014,29(3):53-58.