

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.12

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响 ——以湖南安化春风滑坡群为例

贺小黑^{1,2,3,4}, 彭鑫^{3,4}, 谭建民⁵, 裴来政⁵

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 2. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 北京 100101; 3. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 4. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013; 5. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: 为了研究地下水渗流对崩坡积滑坡变形的影响, 通过分析现场调查勘察资料, 在研究该滑坡所处的地质环境条件、滑坡的形态特征和变形特征的基础上, 探讨了该滑坡的形成机制, 对比了地下水渗流对崩坡积滑坡和老滑坡的影响, 并开展了数值模拟。取得的认识有: (1) 地形地貌、地层岩性、大气降水、人类工程活动是该滑坡形成的主要原因。在这些因素共同作用下, 滑坡最终失稳变形, 过程中可能发生多次滑动, 形成现今的堆积形态。(2) 降雨引起的地下水渗流对该崩坡积滑坡稳定性和变形的影响是十分显著的。对于局部架空现象较严重的崩坡积组成的Ⅲ号滑坡体, 雨水更易渗入坡体, 地下水渗流对其稳定性和变形的作用十分明显; 而对于优势通道较少的Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体, 局部架空现象相对较差, 地下水渗流对其稳定性和变形的作用不显著。(3) 降雨时间和降雨强度与滑坡稳定性负相关。降雨强度较小时、一定时间内降水对滑坡稳定性影响不大, 但降雨较大时, 滑坡稳定性将快速降低。

关键词: 滑坡; 渗流; 崩坡积; 变形; 降雨

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)06-0096-08

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

HE Xiaohai^{1,2,3,4}, PENG Xin^{3,4}, TAN Jianmin⁵, PEI Laizheng⁵

(1. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co. Ltd., Beijing 100101, China; 2. Beijing Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Deep Excavation of Urban Rail Transit, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 4. School of Water Resources & Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 5. Wuhan Centre of China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: In order to analyze the influence of groundwater seepage on the deformation of colluvial deposit landslide, the formation mechanism of Chunfeng Landslide was discussed, and the influence of groundwater seepage on the stability and deformation of colluvial deposit landslide and old landslide was compared on the base of analyzing geological environmental conditions, morphological characteristics and deformation characteristics of the landslide after field investigation, and numerical simulation was carried out. Some conclusions can be gotten. Firstly, topography, formation lithology, atmospheric precipitation and human

收稿日期: 2020-08-09; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 东华理工大学博士启动基金项目(DHBK2017139); 东华理工大学 2019 年实验技术开放项目(DHSYKF-2019-007); 中国地质调查局工作项目(DD20160252; 12120115045101); 国家国防科技工业局项目(科工二司[2014]1587号)

第一作者: 贺小黑(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事边坡稳定性评价和失稳预报方面的研究。E-mail: 307986245@qq.com

engineering activities are the main reasons of Chunfeng Landslide formation. Under the common action of the four factors, the slopes became instable and the deformation or sliding happened in the end. Multiple sliding might happen, and the current accumulation form was formed. Secondly, the influence of groundwater seepage produced by rainfall on stability and deformation of colluvial deposit landslide was very significant. As for the Ⅲ landslide body constituted by colluvial deposit where local overhead was more common, it is easier for the rain to penetrate into the slope, and it is very obvious that groundwater seepage affects the landslide stability and deformation. As for the Ⅰ and Ⅱ old landslide where local overhead was not common, it is not obvious that groundwater seepage affects landslide stability and deformation. Thirdly, the time and intensity of rainfall were negatively correlated with the landslide stability. When the rainfall intensity is small, the precipitation has little influence on the stability of landslide within a certain period of time, but when the rainfall intensity is large, the stability of landslide will decrease rapidly.

Keywords: landslide; seepage; colluvial deposit; deformation; rainfall

0 引言

地下水渗流作用是诱发碎石土斜坡失稳的主要因素,对地下水渗流作用下碎石土斜坡变形破坏机理研究不仅具有理论意义,也为暴雨诱发滑坡预报研究提供基础,具有重要的现实意义。一些学者在地下水渗流作用对碎石土斜坡变形破坏机理方面进行了研究,如韩培锋^[1]利用室内地下水渗流模型试验,重现地下水渗流过程中碎石土斜坡体内含水率、饱和度、孔隙水压力、坡体位移、应力和应变等的变化规律。计算斜坡体的稳定系数,建立稳定系数与含水率、孔隙水压力、湿陷沉降及坡体位移的经验公式。分析地下水渗流对斜坡破坏的机理,考虑地下水渗水应力对斜坡稳定性的影响,修正计算模型^[1]。

曾磊^[2]以陕北黄土高原靖边县滑坡为研究对象,通过 DEM 数据和野外调查,重现滑坡发生前的斜坡形态、优势渗流通道数量及特征,分析其分布及汇水范围;通过建立地下水渗流和斜坡稳定性分析耦合模型,模拟不同优势通道和不同降水条件下的地表径流汇集、优势入渗和局部饱和带的扩展趋势,最终分析局部地下水形成和扩散对斜坡稳定性的影响。

唐朝晖等^[3]对不同降雨条件下碎石土堆积层滑坡的变形规律进行了研究,应用 Modflow 软件建立了滑坡地下水渗流场数值模型,在不同降雨强度和降雨历时条件下,模拟降雨入渗补给地下水场景。最后,运用 FLAC^{3D} 软件对不同降雨工况条件下,渗流场变化引起的滑坡变形规律进行了模拟。

朱向东等^[4]以官家滑坡为例,通过对滑坡稳定性计算中与地下水有关的各因素敏感性分析,发现孔隙压力比、水头高度和水力梯度极大的影响了碎石土边坡的稳定性。碎石土边坡的变形破坏往往是在局部脆

弱部位,首先通过长期蠕变积累首先展开,逐渐扩展至整个滑面。因此在滑坡稳定性计算中,强度参数按照饱水面积比影响下经衰减的数值进行计算,得到的稳定性系数更符合工程实际情况。

董辉等^[5]进行了强降雨作用下碎石土斜坡室内模型试验研究。初始含水率与降雨时间相同时,雨强为 1.6 mm/min 不同坡度边坡模型的变形特征和雨水入渗特征。结果表明:随降雨时间增加,坡体沉降值及坡体内部水平位移不断增加。不同坡度边坡模型降雨过程中,坡体入渗过程是自上而下发展变化的。降雨结束时,坡脚雨水入渗深度最大,坡顶次之,坡腰最小。坡度越小在坡顶和坡腰处雨水入渗深度越大,沉降值越大,且在坡脚处沉降值最大。

滑坡滑体的碎石土类型有崩坡积、残坡积、冲洪积、老滑坡体等。当滑体碎石土类型不同时,降雨入渗产生的地下水渗流对滑坡变形和稳定性的影响程度不同。

由于崩坡积形成的碎石土堆积层中,往往存在大量的级配不良的松散土体,土体中粗粒比较集中部位容易形成细粒充填不足的架空结构,这种部位既是可能的集中渗流通道,又是形变的薄弱环节,所以降雨入渗诱发崩坡积层滑坡的模式和机理必有特定的规律,且比降雨入渗诱发一般非饱和土坡滑动的情况复杂。国内外土石坝工程失事调查资料统计,中国 241 座大型水库发生的 1 000 个事故中,由渗流破坏造成者占 32%;美国 206 座土坝失事中,由渗流破坏造成者占 39%^[6]。

相对崩坡积而言,残坡积和老滑坡体组成内部细颗粒较多,架空结构较少,故集中渗流通道较少,地下水渗流对滑坡变形的影响较不严重。

前人的研究多集中在降雨渗流对碎石土边坡破坏的机理方面,还没有学者针对渗流对崩坡积、残坡积、

老滑坡体的变形影响程度进行对比分析,本次研究将通过安化县春风滑坡的实例来对比分析降雨引发的地下水渗流对崩坡积、老滑坡体变形的影响,并进行不同降雨强度和时间的数值模拟。这对我们更加清楚地认识渗流对碎石土滑坡变形破坏和稳定性的影响具有重要意义。

1 滑坡区自然条件及地质环境条件

1.1 自然条件

春风滑坡位于湖南益阳安化县柘溪镇辰溪村内,资江支流辰溪右岸;地处湘中山区,气候温和湿润,四季分明,属湖南省暴雨中心和低温中心区之一,降雨具有连续、集中、强度大等特点。所在斜坡冲沟发育,出露大量泉点,最大流量 2 L/s。地下水埋深浅,滑坡变形前坡体种植大量水田;滑动后,泉水流量明显减少,泉点减少,多松散土体,向下方排泄。

1.2 地质环境条件

1.2.1 地形地貌

滑坡区属构造侵蚀剥蚀中低山区,地势总体北高南低,中部为辰溪冲沟,溪水由东向西流,辰溪溪沟处高程最低,高程 330~400 m,北部为近东西向延伸山脊,山顶高程 1 092 m,春风滑坡位于辰溪北侧的斜坡上,北侧斜坡高程 330~1 092 m,坡高约 762 m,整体坡向约 210°,陡缓相间,陡坡地带坡度 30°~70°,缓坡地带坡度 10°~15°。坡体上平行发育与坡向一致的冲沟,冲沟下切深度 5~20 m。辰溪南部为阶状斜坡,上陡下缓,沟脊相间,斜坡坡顶高程 850 m,平均坡度 31°。

1.2.2 地层岩性

滑坡区及其附近出露地层有青白口系板溪群五强溪组(Pt_w^1)灰白色变质砂岩、石英砂岩、马底驿组(Pt_m^3)紫红色粉砂质板岩及第四系滑坡堆积层、崩坡积层、冲洪积层、残坡积层。

(1) 滑坡堆积层(Q^{del})

由从高处崩滑下来的崩坡积碎块石和残坡积粉质黏土夹碎块石组成,厚 8~33 m,碎块石直径大小悬殊,一般直径 0.1~0.5 m,大者 1~15 m;土为粉质黏土,土石比 1:9~2:8,结构松散,局部架空,孔隙率高,透水性强。

(2) 残坡积层(Q^{el+dl})

由碎石土夹少量块石组成,厚 1~8 m,碎块石直径一般 1~20 cm,大者 0.3~1.0 m。土为粉质黏土,土石比 3:7~7:3,结构较密实。残坡积物主要分布于滑坡两侧及后缘斜坡表层和基岩小山脊表层,分布范围不大。

(3) 崩坡积层(Q^{col+dl})

崩坡积物以碎块石为主,地表零星可见巨石、大块石,碎块石直径一般 0.1~0.5 m,大者 2.0~8.0 m。土为粉质黏土,土石比 1:9~3:7。崩坡积物厚 2~3 m,零乱堆积,结构松散,局部架空,透水性强。崩坡积层在滑坡区及附近大面积分布。

(4) 冲洪积层(Q^{al+pl})

冲洪积物多分布于冲沟或冲洪积平台中,斜坡中上部冲洪积物以碎块石夹土为主,碎块石直径一般 0.1~3.0 m;土为粉质黏土,土石比约 1:9,杂乱堆积,局部架空。

坡脚处的辰溪溪沟附近,冲洪积层由卵砾石夹黏性土、漂石、块石组成,卵砾石、漂石、块石的物质成分以浅变质砂岩、砂质板岩为主,直径 1~50 cm,并可见直径 2.0~15.0 m 的大块石和大漂石;土为灰褐色粉质黏土,土石比 1:9~2:8。

1.2.3 地质构造

附近断层较多,最近的断层距春风滑坡 2 km 左右(图 1),断层对春风滑坡的形成影响不大。

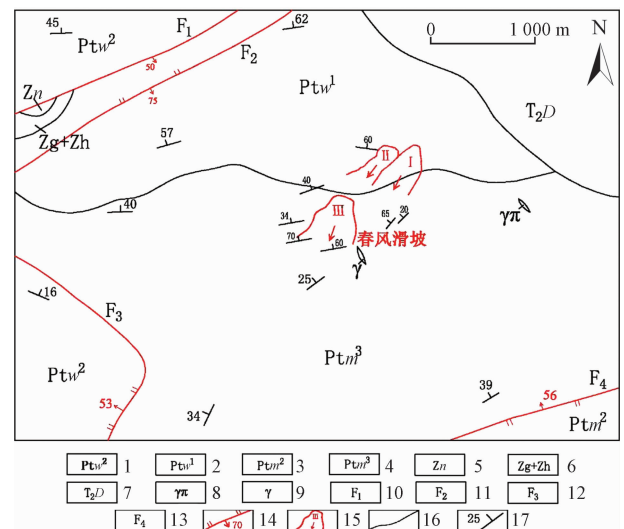


图 1 春风滑坡区构造纲要图

Fig. 1 Structural outline map of Chunfeng Landslide area

1—板溪群五强溪组二段;2—五强溪组一段;3—马底驿组二段;4—马底驿组三段;5—震旦系南沱组;6—震旦系观音田组+鹤岭组;7—三叠纪大辰山单元;8—花岗斑岩;9—花岗岩;10—辰溪口断层;11—苗梓冲—大辰山断层;12—纱帽尖正断层;13—南金—黄金荒断层;14—逆断层及其产状;15—滑坡边界及其编号;16—地层界线;17—岩层产状

1.2.4 水文地质条件

根据滑坡区出露的地层岩性及地下水在含水介质中的赋存特征,地下水可分为第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。以第四系松散岩类孔隙水为主,未见明显的基岩裂隙泉水出露。

松散岩类孔隙水主要赋存于第四系松散土层中。土

体含水层的透水性好,主要接受大气降水的补给。顺坡向沿土体中相对隔水层(黏土层)或岩土接触面顺坡径流,径流途径一般较短,多以散流形式排泄,部分在坡体中以侵蚀下降泉或接触下降泉的方式排出地表,或在缓坡低洼处形成上层滞水。滑坡体中地下水较丰富,滑体接近饱水状态。孔隙水水位、水量受季节变化较明显。

1.2.5 人类工程活动

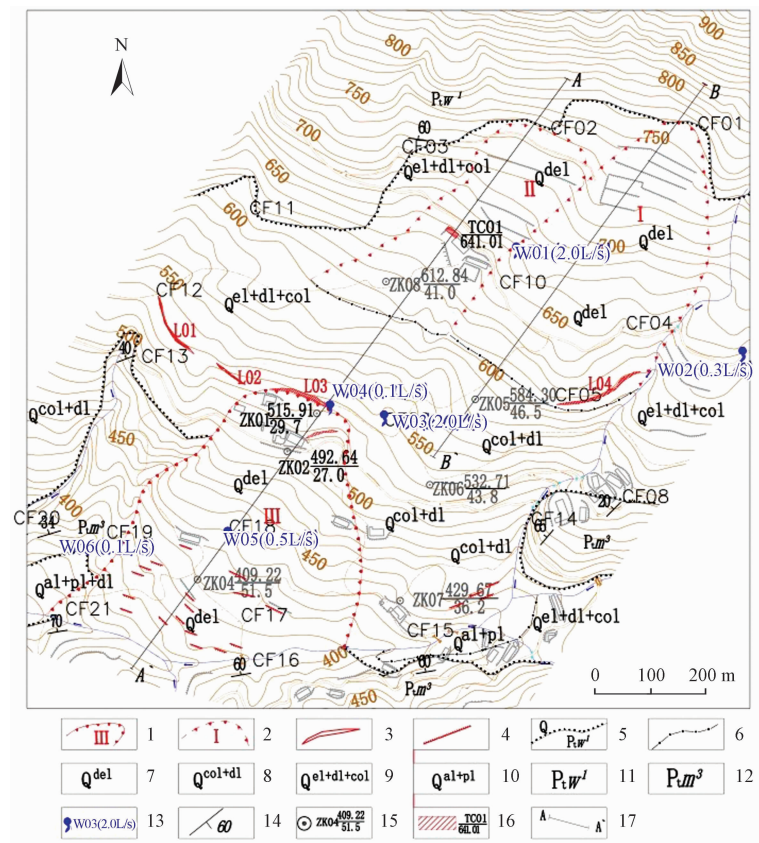
乡村公路穿滑体而过,滑坡体上及其周围仍然有约40户居民居住,修建公路和居住建房是区内的重要工程活动,其它以种植活动为主,斜坡地表陡坡区多为

林地及灌木,缓坡区多经人工改造为梯田旱地,北部分布有茶场,总体人类工程活动较强烈。

2 春风滑坡基本特征

2.1 滑坡形态特征

该滑坡为一老滑坡群,按照滑坡形成时间及变形特征,将该滑坡划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个滑坡,这三个滑坡均发育于崩塌堆积体中。Ⅰ号滑坡和Ⅱ号滑坡是老滑坡,位于斜坡中上部,Ⅲ号滑坡体位于滑坡中下部,目前变形的为Ⅲ号滑坡(图2)。



2.2 滑坡物质组成及结构特征

2.2.1 滑体

据地质测绘,整个滑坡区均被第四系松散堆积物覆盖。

(1) I号滑坡:滑体物质为碎块石夹土、碎石土,厚度 3.0~32.0 m,其中滑坡后部及前部较薄、中部滑体相对较厚,植被覆盖率达 90% 以上。

(2) II号滑坡:滑体物质由碎块石夹土组成,滑体厚 2.0~23.0 m,滑坡后部及前部较薄、中部滑体相对较厚,滑体结构松散,杂乱堆积。

(3) III号滑坡:滑坡体由从高处崩滑下来的崩坡积碎块石和残坡积粉质黏土夹碎块石组成,主要分布在滑坡区域内,厚度 8~33 m,平均 16 m,后缘厚 8~11 m,前缘厚 2~33 m,碎块石成分为变质砂岩与砂质板岩,强-中等风化,强度一般较高,直径大小悬殊,一般直径 0.1~0.5 m,大者 1~15 m,棱角状为主;土为粉质黏土,可塑为主,土石比 1:9~2:8,结构松散,局部架空,孔隙率高,透水性强。

2.2.2 滑床

春风滑坡群北部滑床岩性为板溪群五强溪组一段(Pt_w^1)浅变质砂岩夹砂质板岩,南部滑床岩性为马底驿组三段(Pt_m^3)粉砂质板岩夹浅变质砂岩。滑床处地层为单斜地层,地层产状 $300^\circ \sim 350^\circ \angle 40^\circ \sim 60^\circ$,为逆斜坡。

2.3 变形特征

据现场调查访问,I、II号滑坡形成时间较早,为老滑坡,具体滑动时间未知,目前这两处滑坡整体较稳定,未见明显变形迹象,但极端降雨可能使其再次复活。

目前,III号滑坡体活动变形剧烈,迹象明显。前期变形强烈,于 1975 年 7 月暴雨后再度复活,后缘出现拉张裂缝,产生了缓慢滑移。其后于 1985 年 5 月、1990 年、1995 年持续活动,现今尚处于滑动变形之中,是一个极不稳定的大型滑坡。

1985 年 III 号滑坡发生的主要变形为:①产生后缘下挫裂缝,裂缝长 115 m,宽 2~7 m,延伸方向约 290° ;②挤压前缘平台,使前缘平台倾斜、隆起或向侧面移动,前缘平台发生反倾后,倾斜的平台前部逐级下挫,形成多级小陡坎,泉水流量变小,并使坡体透水,地表水干涸,前缘平台处的水田遭到破坏变成了旱地;③形成局部小范围坍塌。

3 滑坡形成机制分析

春风滑坡形成是一个复杂的地质演化过程,先是斜坡高处岩体风化崩塌,崩坡积固体物质堆积在下方

斜坡上,在降雨风化、人类工程活动等作用,后期崩坡积层内多次发生滑动变形,加上地表水冲刷,从而形成现今堆积形态,I、II号老滑坡正是后期降雨风化等作用下形成的滑坡,而 III 号滑坡则是最近几十年一直处于持续变形阶段的滑坡,尤以 1985 年的变形最为剧烈,整体滑移,造成 200 余人搬迁。

根据现场调查访问及地质测绘分析,春风滑坡的形成主要有以下几个方面的原因:

(1) 地形地貌:虽然滑坡体地势平缓,上陡下缓,坡度 $15^\circ \sim 25^\circ$,但由于该地区挽近期以来地壳运动为间歇性抬升,河谷不断下切,使得原始斜坡前缘形成高陡临空面,为滑坡发生提供了充分的运动空间和势能储备。

(2) 地层岩性:该滑坡物质为第四系崩坡积(Q^{col+dl})碎块石、碎块石(夹)土,下伏基岩岩性主要为马底驿组三段(Pt_m^3)粉砂质板岩, Pt_m^3 粉砂质板岩具有易风化、强度低的特性,为软弱地层,另外,该地层相对隔水,故地下水易在岩土接触带汇集迳流排泄,经长期地下水的渗透作用,岩土接触带慢慢泥化,在斜坡中形成软弱结构带,从而给滑坡的产生提供了条件。

(3) 大气降水:地下水的存在是春风滑坡形成的决定性因素之一。据钻孔资料分析,勘探孔初见水位一般 2.30~7.67 m,终孔稳定水位一般 6.1~10.5 m,大者 24.26~27.11 m,表明大部分滑体物质长期处于饱水状态,测量水位时,勘察区斜坡都处于天然状态,降雨条件下,地下水位进一步抬升,坡体将处于饱水状态。滑坡区位于湖南暴雨区,降雨多集中在 5—9 月,尤其是 7—8 月的大暴雨,具有连续、集中、强度大的特征。降雨过程中,崩坡积物透水性好,有利于地表水入渗土体,加上后缘弧形山脊利于地表水汇集,降雨入渗增大了滑坡体重量,同时降低了滑动面的抗剪强度,增大了下滑力,有利于滑坡产生失稳破坏。滑坡区在连续降雨期间变形则说明降雨的影响是其主要的诱发因素。

(4) 人类活动:滑坡区人类工程活动主要为切坡修路、路基填筑、开挖建房以及当地居民在斜坡地带开荒种地、修建生活水利设施等。

20 世纪 60 年代,库区移民迁建,人们在坡体上修建数房屋、开荒种田,以及种植水稻活动,不合理开垦种植破坏了坡体结构,这些不仅造成堰塘水、灌溉水渗漏到滑坡体中,加剧斜坡变形,而且造成降雨和地表水大量渗入岩土体,致使软弱地层软化和泥化,促进了滑坡局部失稳,影响整个滑坡体的稳定。人类工程活动造成堰塘水、灌溉水渗漏到滑坡体中是滑坡形成一个不容忽视的因素。

在以上 4 种因素共同的作用下,斜坡最终失稳变

形,过程中可能发生多次滑动,形成现今的堆积形态。

4 渗流对崩坡积、老滑坡体变形的影响对比

春风滑坡Ⅲ号滑坡位于Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡下方,Ⅲ号滑坡体由直径较大的崩坡积碎块石夹土组成,颗粒较大,局部架空现象严重;而Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体距今时间较长,大部分碎块石都已经风化分解成更小的碎块,且Ⅰ号和Ⅱ号滑坡形成时,由于位于崩塌源区直接下方,直径较大的碎块石不易在此堆积,故目前Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体内局部架空现象不严重。

因此,当考虑地下水的作用时,由于Ⅲ号滑坡覆盖层的特性,地下水沿坡体优势通道流经Ⅲ号滑坡体。相对于静水压力,地下水对坡体第四系松散颗粒施加的动水压力将大大提升。同时,由于动水压力与水力方向一致,使得坡体细小颗粒更容易被地下水流冲刷从而危害坡体安全。在降雨工况下,Ⅰ号和Ⅱ号滑体内由于坡体较致密,有利于入渗的优势通道较少,大部分雨水以坡面流的形式向下排出进入Ⅲ号边坡覆盖层,Ⅲ号滑坡体岩土体颗粒受到的动水压力以及水流冲刷进一步加强,边坡失稳的概率也进一步增大。

通过调查,发现春风滑坡Ⅲ号滑坡体中出露孔隙水泉点1个(W05),泉流量一般为0.5 L/s,泉点出露于Ⅲ号滑坡体中部小冲沟中,为前缘缓坡平台与中部缓坡地带交接的部位,为侵蚀下降泉。

春风滑坡Ⅲ号滑坡体后缘出露孔隙水泉点2个(W03、W04),W03泉流量一般为2.0 L/s,W04泉流量一般为0.1 L/s。W03位于小冲沟内,1985年Ⅲ号滑坡体未发生变形之前,该冲沟处为平地,1985年5月在暴雨洪水作用下,该处形成了冲沟和泉水,该泉水类型为侵蚀下降泉,无色无味。

春风滑坡Ⅲ号滑坡体右侧下部出露孔隙水泉点1个(W06),W06泉点位于冲沟底部,泉流量一般为0.1 L/s,为接触下降泉。

春风滑坡Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体交界处出露孔隙水泉点1个(W01),W01泉流量一般为2.0 L/s。

春风滑坡Ⅰ号老滑坡体左侧出露孔隙水泉点1个(W02),W02泉流量为0.3 L/s,为侵蚀下降泉。泉点在平面上的分布情况见图2。

以上实际调查泉水结果表明:Ⅲ号滑坡体处泉点较多,这说明Ⅲ号滑坡体大部分处于饱水状态,地下水在Ⅲ号滑坡体内的渗流更严重,而Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体处发现的泉点较少,说明地下水在Ⅰ、Ⅱ号老滑坡体内的渗流作用相对较弱。而目前春风滑坡的主要变形集中在Ⅲ号滑坡体处,特别是在暴雨条件下,曾发生过多次较

大变形,无降雨时,Ⅲ号滑坡体的变形不明显。因此,降雨引发的地下水渗流是春风滑坡发生变形的主要原因,特别是对于优势通道较多的崩坡积组成的Ⅲ号滑坡体,地下水渗流对其变形的作用十分明显;而对于优势通道较少的Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体,地下水渗流对其变形的作用则不显著。说明降雨引起的地下水渗流对由崩坡积物构成的斜坡体的稳定性的影响更加显著。

5 数值模拟

5.1 模型建立与参数选取

结合现场调查及走访,Ⅰ、Ⅱ号老滑坡整体较稳定,但Ⅲ号滑坡滑坡体结构较松散,地下水渗流作用强烈,故只对Ⅲ号滑坡进行数值分析。据斜坡的工程地质剖面 and 物质特征,由于基岩的强度特征与滑体相差较大,其潜在滑移面为滑坡体与基岩之间的接触面。基岩具有明显的渗透各项异性,渗透性能相对于覆盖层差而在岩土交界面形成相对隔水层。故在SEEP模块以及SLOPE模块都不考虑基岩的作用。网格采用三角形结合四边形网格模式,共建立1462个单元、1673个节点的两组材料数值计算模型(图3)。

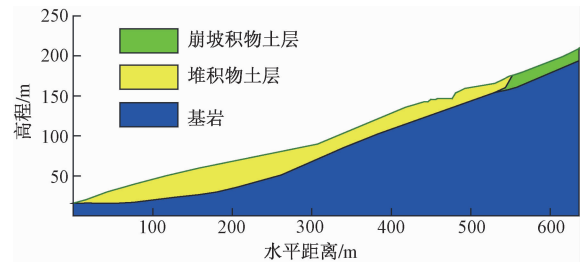


图3 边坡数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model of slope

依据勘察报告以及前人研究成果^[7-10],选取斜坡岩土体的土性参数(表1)。在土体渗透场中,达西定律仍然适用与饱和-非饱和理论。在有限元SEEP模块中,土水特征曲线和渗透系数曲线分别根据岩土体的种类以及渗透特性参数,运用VG模型分别估计其非饱和土水特征曲线和渗透系数曲线(图4、图5)。

表1 土性参数

Table 1 Soil parameters

参数	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	饱和渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
堆积物土层	20.85	15	19	2×10^{-5}
崩坡积物土层	20.9	14	24	1.5×10^{-5}

5.2 定解条件及计算工况

5.2.1 定解条件

定解条件包括边界条件和初始条件,在实际仿真

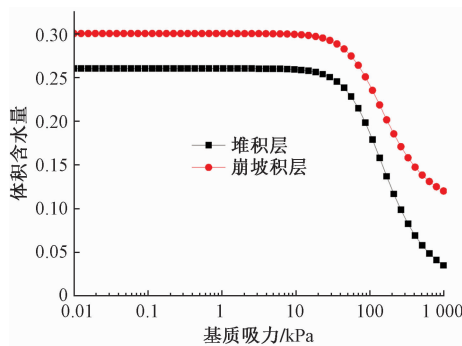


图4 土体材料土水特征曲线

Fig. 4 Characteristic curve of soil material and water

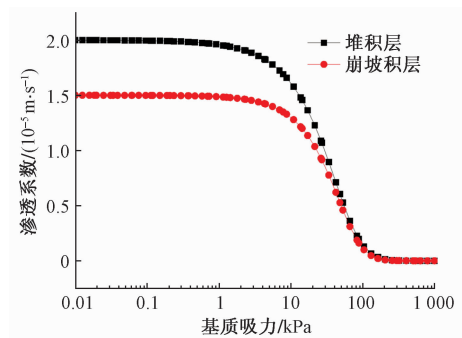


图5 土体材料渗透系数曲线

Fig. 5 Permeability coefficient curve of soil material

问题中,必须明确规定。在分析降雨过程中边坡渗流场的变化情况时,假定以下边界条件与初始条件。

(1)边界条件:坡面底面为不透水边界,坡面两侧地下水位下为水头边界,地下水位以上为零流量边界。整个坡面为降雨入渗边界,潜水面溢出点以下边界应设置为零压力水头边界。当降雨强度小于土体入渗能

力时取为流量边界,大于入渗能力时变成水头边界。同时,停雨时,坡面作为溢出边界。

(2)初始条件:降雨作用下的边坡入渗是一个随时间动态变化的过程,在进行边坡的降雨入渗分析之前,必须要有必要的初始条件作为降雨入渗分析前的初始状态。本文采用给定水头来进行渗流稳态分析作为边坡渗流场的初始条件。

5.2.2 计算工况

(1)不考虑渗流作用

当不考虑地下水的渗流作用时,滑坡体受到地下水的作用主要有静水压力、浮托力以及对岩土体的软化作用。但软化作用涉及到岩土体的化学性质,研究所涉及的实验以及数据的获取复杂,故本次研究不予考虑,分析时只需采用 slope/w 模块,分析方法采用 morgenstern-Price 极限平衡法,该方法综合考虑了力平衡以及力矩平衡,并且适用于任意滑移面。边坡只受重力作用以及地下水的静水压力、浮托力作用。

(2)考虑地下水渗流作用

由于降雨期间影响边坡渗流场变化的因素复杂多样,边坡受影响因素较多(排水状态、土体状态等)。为了突出研究重点和简化计算,分析时降雨类型采用均布型;模型采用均质材料,各向同性,且为理想弹塑性材料;未能入渗的雨水默认其以径流形式排出等假定。

因此,综合考虑渗流因素对边坡的影响性,依据中国气象局对降雨等级的划分标准,本文数值模拟工况无渗流、稳态渗流、小雨、大雨、暴雨、大暴雨以及特大暴雨 7 种情况,降雨历时 2 d,以探讨降雨对边坡稳定性变化的影响(表 2)。

表2 滑坡计算工况

Table 2 Calculation conditions of landslide

	无渗流	稳态渗流	小雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
等级划分/(mm·24 h ⁻¹)	/	/	0.1~9.9	25~49.9	50~99.9	100~249.9	≥250
强度取值/(m·s ⁻¹)	/	/	1.0×10 ⁻⁷	5.0×10 ⁻⁷	1.1×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶	3.5×10 ⁻⁶

5.3 不同降雨强度下边坡稳定性分析

由图 6 可知,当边坡不考虑地下水的渗流作用,边坡的安全系数偏于激进,不利于对边坡稳定性的正确认识,不利于边坡工程的安全施工。降雨入渗更是加强了渗流作用这一因素的影响性:降雨历时一定时,滑坡安全系数与降雨强度呈负相关;降雨强度一定时,滑坡稳定系数随降雨持续时间增加而降低。当降雨强度较低时,降雨历时时间对滑坡稳定性影响不大;当降雨强度较大时,滑坡可能在很短的时间内稳定系数较快下降,达到失稳状态。如在特大暴雨条件下,约 4.5 h 后,滑坡的稳定性系数达到 1,达到失稳状态。

同时,数值分析时也暴露出该软件的一些不足,它只是基于非饱和抗剪强度理论来对边坡的稳定性进行分析评判,未考虑降水对滑坡坡体的冲刷作用以及对滑体尤其是潜在滑移面的软化作用。

6 结论

(1)地形地貌、地层岩性、大气降水、人类活动是春风滑坡形成的主要原因。在这四种因素共同的作用下,斜坡最终失稳变形,过程中可能发生多次滑动,形成现今的堆积形态。

(2)降雨引起的地下水渗流对崩坡积滑坡的稳定

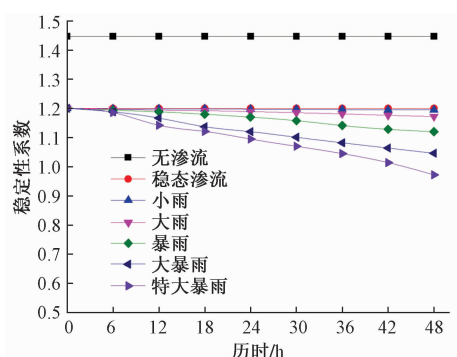


图6 不同降雨强度和持续时间的边坡稳定系数

Fig.6 Slope stability coefficients of different rainfall intensity and duration

性和变形的影响是十分显著的。对于局部架空现象较多的崩坡积组成的Ⅲ号滑坡体,降雨更易入渗进入坡体,地下水渗流对其稳定性和变形的作用十分明显;而对于优势通道较少的Ⅰ号和Ⅱ号老滑坡体,局部架空现象相对少,地下水渗流对其稳定性和变形的作用不明显。

(3)数值模拟结果表明,地下水的渗流作用(动水压力)对边坡有着显著的影响,考虑渗流作用比不考虑更有利于工程的安全。降雨时间和降雨强度与滑坡稳定性负相关,降雨强度较小时,一定时间内降水对滑坡稳定性影响不大,但降雨较大时,滑坡将稳定性将快速降低。对于持续降雨,无论强度大小,大量的降水累积入渗,滑坡非饱和土体基质吸力不断降低,滑坡稳定性都呈下降趋势直至失稳。

(4)本次数值模拟的不足之处是未考虑前期降雨、雨停后暂态饱和区域以及坡面积水的入渗对边坡的影响,也忽略了泉水点排泄状况。因此,需要更多这方面的研究来补充。

参考文献:

- [1] 韩培锋. 地下水渗流作用下碎石土斜坡变形破坏机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. [HAN P F. Study on the deformation and failure mechanism of gravel soil slope under groundwater seepage[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)]
- [2] 曾磊. 优势渗流通道对黄土斜坡稳定性影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. [ZENG L. Study on the influence of dominant seepage channel on the stability of loess slope [D]. Xi'an: Changan University, 2011. (in Chinese)]
- [3] 唐朝晖, 孔涛, 柴波. 降雨作用碎石土堆积层滑坡变

形规律[J]. 地质科技情报, 2012, 31(6): 168-173. [TANG Z H, KONG T, CHAI B. Effect of rainfall on deformation regularity of debris landslide[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(6): 168-173. (in Chinese)]

- [4] 朱向东, 尚岳全. 地下水对碎石土类边坡稳定性影响分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(3): 42-46. [ZHU X D, SHANG Y Q. Analysis of groundwater's effect on stability of debris slope[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, 19(3): 42-46. (in Chinese)]
- [5] 董辉, 李智飞, 蒋秀姿, 等. 强降雨作用下碎石土斜坡室内模型试验研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 236-241. [DONG H, LI Z F, JIANG X Z, et al. Model test research on the gravel-cluttered soil slope under the heavy artificial rainfall condition [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(4): 236-241. (in Chinese)]
- [6] 刘波. 降雨诱发碎石土斜坡变形破坏机理模型试验研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2007. [LIU B. Model experimental study on deformation and failure mechanism of rainfall-induced gravel soil slope[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2007. (in Chinese)]
- [7] 邵恒新. 降雨入渗条件下坡积土边坡稳定性分析及防护加固措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [SHAO H X. Study on stability analysis and protection and reinforcement measures of soil slope under rainfall infiltration condition [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)]
- [8] 蒋中明, 曾铃, 付宏渊, 等. 极端久雨条件下软岩边坡动态稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 27-34. [JIANG Z M, ZENG L, FU H Y, et al. Dynamic stability analysis of soft rock slope due to extremely prolonged rainfall [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 27-34. (in Chinese)]
- [9] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册-5版[M]. 中国建筑工业出版社, 2017. [Preparation Committee of Engineering Geology Handbook. Handbook of engineering geology-5th edition [M]. China Building Industry Press, 2017. (in Chinese)]
- [10] 麻超超. 大型滑移式堆积体降雨渗流及稳定性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2018. [MA C C. Analysis of rainfall seepage and stability of large sliding accumulation body [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)]