

李鹏,苏生瑞,马驰,等.堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理:以祖师庙滑坡为例.吉林大学学报(地球科学版),2017,47(5):1471-1479. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201705201.

Li Peng, Su Shengrui, Ma Chi, et al. Formation Mechanism of Landslides with Accumulation Layer-Bedrock Contact Surface: Taking Zushimiao Landslide as an Example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(5): 1471-1479. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201705201.

堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理 ——以祖师庙滑坡为例

李 鹏^{1,2,3}, 苏生瑞¹, 马 驰^{1,4}, 黄 璜¹, 徐继维^{1,3}

1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 70054
2. 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 西安 710054
3. 国土资源部黄土地质灾害重点实验室, 西安 710054
4. 中煤西安设计工程有限责任公司, 西安 710054

摘要:为了研究堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理,以陕西省岚皋县广泛分布的堆积层-基岩接触面滑坡为研究对象,采用野外调查和数理统计的方法,总结了该类型滑坡的基本特征,并以祖师庙滑坡为例,借助室内试验和数值模拟手段,研究了堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理。结果表明:1)堆积层-基岩接触面滑坡主要发育在坡度为 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、下伏基岩为碎裂状结构的斜坡,多为浅表层滑坡;2)碎石土和堆积层-基岩接触面的内摩擦角随含水量增大而降低,堆积层-基岩接触面是斜坡变形破坏的软弱结构面;3)细颗粒物质的增加降低了堆积层-基岩接触面的内摩擦角,且细颗粒粒径越小,内摩擦角也越小,在饱和状态下下降幅度越大;4)因细颗粒物质在堆积层-基岩接触面处聚集造成的强度降低和因水文地质条件改变造成的滑带土饱和是祖师庙滑坡主要的诱发因素。研究结果对揭示堆积层-基岩接触面滑坡的形成机理和地质灾害防治具有一定的指导意义。

关键词:堆积层-基岩接触面;滑坡;碎石土;软弱结构面;岚皋县;形成机理

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201705201

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

Formation Mechanism of Landslides with Accumulation Layer-Bedrock Contact Surface: Taking Zushimiao Landslide as an Example

Li Peng^{1,2,3}, Su Shengrui¹, Ma Chi^{1,4}, Huang Huang¹, Xu Jiwei^{1,3}

1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, MLR, Xi'an 710054, China
3. Key Laboratory for Geo-Hazards in Loess Area, MLR, Xi'an 710054, China
4. China Coal Xi'an Design Engineering Co., LTD., Xi'an 710054, China

收稿日期: 2016-12-15

作者简介: 李鹏(1987—),男,博士研究生,主要从事地质工程方面的研究, E-mail: lipeng198782@163.com

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(310826151048); 国土资源部黄土地质灾害重点实验室开放基金项目(KLGLAMLR201506); 四川交通建设科技项目(2015A1-3)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(310826151048), Key Laboratory Program of the Key Laboratory for Geo-Hazards in Loess Area, MLR (KLGLAMLR201506) and Sichuan Transportation Construction Science and Technology Project(2015A1-3)

Abstract: In order to research the mechanism of the landslides with accumulation layer-bedrock contact surface, which are widely distributed in Langao County, Shaanxi Province, the authors summarized the basic characteristics of the landslides through field investigation, laboratory test and numerical simulation, and mathematical statistics by taking the Zushimiao landslide as an example. The formation mechanism of landslide with accumulation layer-bedrock contact surface is concluded as follows: 1) The landslides with accumulation layer-bedrock contact surface are mainly developed in the slopes with $20^{\circ} - 40^{\circ}$ gradient and their underlying bedrock fragmented, mostly the shallow surface landslides; 2) The internal friction angle of gravel soil and the accumulation layer-bedrock contact surface decreases with the increasing of the water content, and the contact surface is the weak structural plane of the slope deformation; 3) The increase of fine particles reduces the internal friction angle of the contact surface, and the smaller the particle diameter is, the smaller the internal friction angle, and the greater the decrease in the saturated state; 4) The strength decrease caused by the small particle soil at the interface between accumulation layer and bedrock and the saturation of slip zone soil caused by the change of hydro-geological conditions are the main predisposing factors of the Zushimiao landslide. The research results have certain guiding significance for revealing the formation mechanism of landslide and the prevention and control of geological hazards.

Key words: accumulation layer-bedrock contact surface; landslide; gravel soil; weak structural plane; Langao County; formation mechanism

0 引言

中国疆域辽阔,自然地质条件复杂,地质构造剧烈活动导致的地质灾害种类多、分布广、危害大、发生频率高,是遭受地质灾害影响最严重的国家之一。2005—2014 年这 10 年来,我国共发生地质灾害 270 305 起,造成 8 014 人遇难或失踪,3 805 人受伤,直接经济损失 467.61 亿元;其中滑坡 196 151 起,占地质灾害的 73%^[1]。滑坡的形成受坡体结构影响较大,特别是斜坡中广泛发育的结构面,往往会成为潜在滑移面^[2],其中堆积层-基岩接触面作为性质不连续和强度较低的界面,往往是造成堆积层斜坡失稳的关键部位^[3-5]。有关堆积层-基岩接触面能否成为坡体的潜在滑移面,前人已进行了大量研究,包括其结构特点^[6]、岩性特征^[7]和水文地质条件等^[8]。

堆积层-基岩接触面作为一种特殊的结构面,其力学特性的研究思路与常规结构面相似。国内外就结构面力学特性的研究具有较长的历史和较丰富的研究成果:Jeager^[9]、Barton 等^[10]以及孙广忠^[11]在大量试验和理论分析的基础上,已总结出多种类型的强度公式;夏才初等^[12]总结出影响结构面剪切强度特征的主要因素;冯大阔^[13]较为系统地研究了粗粒土与结构接触面的静力学特性;施建勇等^[14]通过

研究发现土工合成材料与土界面特性主要取决于土工合成材料的表面性质。

土岩接触面的强度特性不仅与结构面形态、规模和类型等有直接关系,而且与其两侧的岩土体性质也具有很强的相关性,特别是松散堆积层的性质对其强度影响较大。马伟^[15]通过大量的试验研究,总结了土与钢接触面的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 在粒度、成分和含水量不同时变化规律。熊炜^[16]借助自行设计的多功能岩土压剪流变仪进行了秦巴山区典型变质岩和土石混合体的力学试验。徐彬等^[17]研究了膨胀土强度随含水量、密度及裂隙等影响因素的变化规律。唐晓松等^[18]研究了碎石土的黏聚力和内摩擦角在天然及饱和状态下的变化规律。时卫民等^[19]根据碎石土的剪切试验,以细粒含水量及碎石含量为指标,提出了碎石土抗剪强度实用计算公式。高玮等^[20]利用应变控制式静力三轴剪切仪探讨了不同胶结程度土石混合体试样的差别及产生原因。

前人虽然对滑坡形成机理和影响因素的研究取得了较多成果,但针对堆积层-基岩接触面滑坡的揭示程度还不够深入和系统,造成了该类型滑坡防治的短板和缺陷。本文以祖师庙滑坡为例,研究了该类型滑坡的变形特征、影响因素和形成机理,以期对地质灾害防治提供一定的参考。

1 堆积层-基岩接触面滑坡基本特征

变形破坏及发育特征的总结对于滑坡的判别和防治具有重要的指导意义。通过对岚皋县 318 个堆积层-基岩接触面滑坡统计分析,总结了该类型滑坡的基本特点^[21]。

1) 滑坡发育坡度一般为 20°~40°,且滑动前后坡度变化较小。

2) 下伏基岩为碎裂状结构时该类型滑坡最为发育,这是由于碎裂状结构容易形成较厚的堆积层,下伏基岩节理裂隙发育,较易形成软弱结构面。

3) 滑体结构松散,透水性较好,降雨等外界条件的改变会造成坡体水文地质条件的变化,造成细颗粒物质在堆积层-基岩接触面处聚集,形成潜在软弱面,不利于坡体的稳定。

4) 滑体物质成分复杂,主要为碎石土及含碎石粉质黏土,碎石质量分数为 10%~25%,其中粒径小于 5 cm 的坡体质量分数为 68.55%。

5) 除部分滑坡的前缘和后缘发育在堆积层内,滑面多数为堆积层-基岩接触面,且以弧形为主;滑面埋深多集中在 2~4 m 及 4~6 m,为浅表层滑坡。

堆积层-基岩接触面滑坡的上述特点,造成其形成机理与堆积层滑坡既有相似之处,也具有自己的特点。下文以祖师庙滑坡为例,研究典型堆积层-基岩面滑坡的形成机理。

2 祖师庙滑坡概况

祖师庙滑坡位于陕西岚皋县县城西侧,岚河西岸二级阶地与方家堰之间的斜坡地带,为一典型的堆积层-基岩面滑坡。该滑坡后缘清晰,为一高约 1 m 的滑坡陡坎,剪出口位于前缘挡墙以上,主滑向约为 61°。滑坡平面形态上窄下宽,后部呈弧形,总体呈舌状,东西长约 62 m,南北宽度约 26 m(图 1);纵向形态呈阶梯状,坡度 20°~30°,滑坡厚度约 4 m,总方量约 0.59×10⁴ m³,属小型滑坡(图 2)。

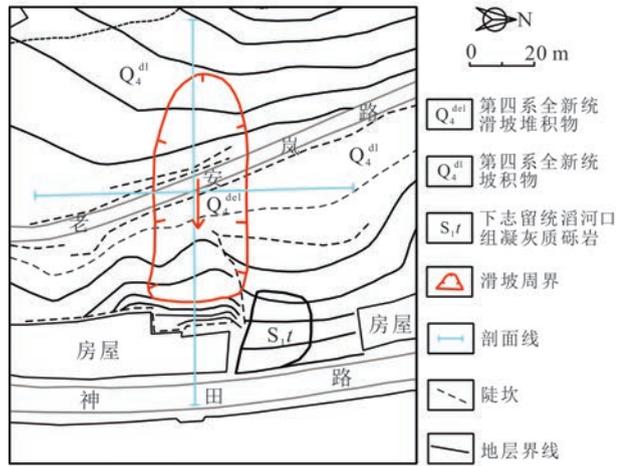


图 1 祖师庙滑坡工程地质平面图

Fig.1 Engineering geological plane

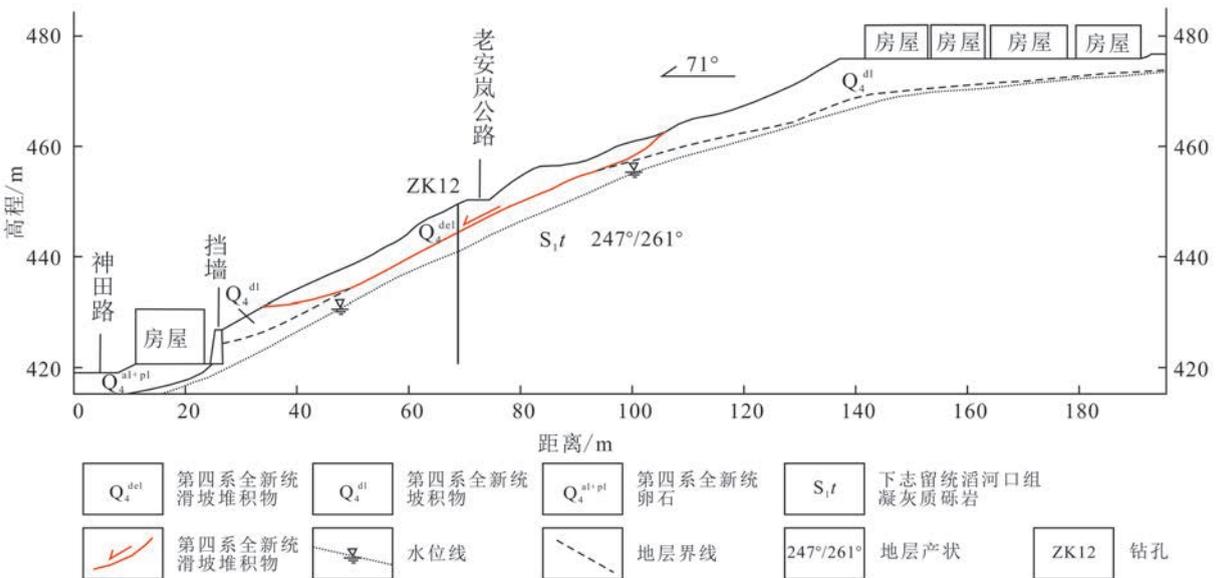


图 2 祖师庙滑坡工程地质剖面图

Fig.2 Engineering geological section of the Zushimiao landslide

根据钻探资料,滑体主要为碎石土,碎石粒径 3~8 cm,最大约 13 cm,母岩主要为砾岩、凝灰岩;滑床为全一强风化的凝灰质砾岩,碎裂状结构,岩心多呈短柱状,锤击声哑,节理裂隙较发育,强度较低;滑带位于堆积层-基岩接触面附近,含水量较高,较为松散,有明显挤压变形。

历史上,祖师庙滑坡发生过多次变形破坏。2003-08-08—2003-08-15,岚皋县降雨连续 7 d,累计降雨量达 154.7 mm,滑坡中部和前缘变形剧烈,中部公路内侧边坡发生局部垮塌,垮塌体堵塞边沟,导致雨水外溢渗入坡体,滑坡变形范围逐渐扩大,坡体后缘出现裂缝,坡体上居民房屋开裂变形,裂缝宽约 3~6 cm。2003-08-29—2013-09-01,岚皋县城区又遭受 4 d 的持续降雨,雨水顺着已有裂缝大量入渗,致使坡体在前缘挡墙上部剪出,造成坡面树木歪斜,长 9.3 m 的公路下错,下错幅度 8~12 cm。2010-07-18 强降雨,造成公路持续向坡体下方滑移,公路内侧的挡墙倾斜,发育局部滑塌现象。上述变形迹象表明,滑坡的形成不仅与其岩土体条件有关,还与降雨有紧密的联系。因此,有必要借助室内试验和数值模拟手段,研究不同性质岩土体和水影响下祖师庙滑坡的形成机理。

3 岩土体物理力学试验

滑坡致滑因素较多,其中,岩土体特性是影响斜坡稳定性的因素之一。对松散堆积层-基岩接触面滑坡,主要体现在松散堆积物和堆积层-基岩接触面的物理力学性质方面。

3.1 物理指标的测试

由于碎石土取原状样困难,因此,首先在野外进行密度、含水量的现场测试,然后在室内进行试样的重塑,得到的基本物理指标如表 1 所示。对祖师庙滑坡取得的碎石土进行颗分试验,得到了试样在原状、饱和剪切和干燥剪切后的粒径累计级配曲线(图 3)。原状碎石土中值粒径 $d_{50} = 2.7$ mm、限制粒径 $d_{60} = 6.8$ mm,有效粒径 $d_{10} = 0.8$ mm,不均匀系数 $C_u = 8.5$,曲率系数 $C_c = 1.34$,级配良好。

剪切后粒径大于 2 mm 的颗粒呈减少趋势,而小于 2 mm 的颗粒呈增加趋势,这种趋势在干燥剪切前后表现的尤为明显。这种现象可以说明,对于多期活动的滑坡,其滑带土体的粒度成分在发生着改变,细颗粒物质逐渐增多,直接改变了土体的力学性质,进而改变了斜坡的稳定。

表 1 碎石土物理指标

Table 1 Physical index of gravel soil

天然密度/ (g/cm ³)	干密度/ (g/cm ³)	饱和密度/ (g/cm ³)	天然含水量/ %	饱和含水量/ %	比重	液限/ %	塑限/ %
1.96	1.64	2.11	19.6	29.0	2.7	32.56	19.49

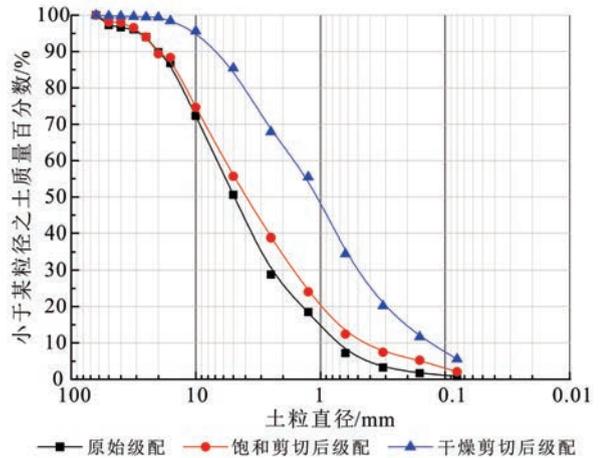


图 3 碎石土粒径累计级配曲线

Fig.3 Gradation curve of gravel soil

3.2 力学指标的测定

试验内容包括碎石土和堆积层-基岩接触面的力学试验,重点研究含水量变化对碎石土和堆积层-基岩接触面力学指标的影响;同时,为了有效地模拟细粒土在界面附近聚集时堆积层-基岩接触面力学性质的差异,改变碎石土细颗粒(< 2 mm)所占比例以测定天然和饱和状态下堆积层-基岩接触面的力学指标。

3.2.1 碎石土力学指标的测定

分别进行干燥、稍湿、湿润和饱和 4 种工况下的碎石土直剪试验。根据试验结果(表 2)可知,随着含水量的增加,土体的黏聚力呈先增大后减小的趋势。粗粒土的力学特性主要由内摩擦角决定,因此,重点应对比研究碎石土内摩擦角的变化。随着含水量的增大,内摩擦角逐渐减小(表 2)。造成内摩擦角逐渐减小的原因可归纳为:1)随着含水量的增加,细小颗粒物质遇水黏附在大颗粒的表面,形成了通常所说的“泥”,这样就对颗粒之间的摩擦起到了一定的润滑作用,造成内摩擦角的下降;2)随着含水量的增加,大颗粒物质自身软化,自身的抗剪强度降低,此外在颗粒表面也会形成软化的物质,同样也起到了润滑的作用。

表 2 不同含水量条件下碎石土的力学指标

Table 2 Mechanical properties of gravel soil in different moisture content

试样状态	含水量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
干燥	0.5	36.13	10.27
稍湿	10.9	26.84	83.77
湿润	20.3	20.01	99.53
饱和	29.0	15.11	62.69

通过试验发现含水量与内摩擦角近似呈线性关系(图 4)。对试验数据进行线性拟合,得到以下关系:

$$\varphi = -0.7407\omega + 35.7570$$

式中: φ 为内摩擦角, ω 为含水量。

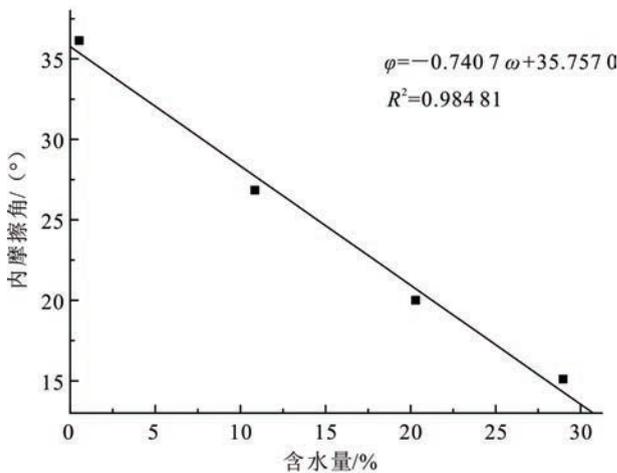


图 4 碎石土内摩擦角与含水量关系

Fig. 4 Relationship between internal friction angle of gravel soil and moisture content

在天然状态下,即 $\omega = 19.6\%$ 时,经过计算可得 $\varphi = 21.19^\circ$,而实测值 $\varphi = 19.80^\circ$,两者相差仅 1.39° ,说明拟合程度较好。

3.2.2 堆积层-基岩接触面力学指标的测定

同样采用干燥、稍湿、湿润、饱和 4 种工况进行试验,不同含水量条件下堆积层-基岩接触面的力学指标见表 3。

从统计结果可以看出,随着试样含水量的增加,堆积层-基岩接触面的黏聚力先增大后减小,内摩擦角逐渐减小。堆积层-基岩接触面的含水量与内摩擦角的线性关系如图 5 所示。对试验数据中的内摩擦角进行线性拟合,得到以下关系:

$$\varphi = -1.1239\omega + 38.2097$$

对 $\omega = 11.7\%$ 进行验证,经过计算可得 $\varphi = 25.06^\circ$,实测值 $\varphi = 24.27^\circ$,两者相差仅 0.79° ,说明拟合程度较好。

表 3 不同含水量条件下堆积层-基岩接触面的力学指标

Table 3 Mechanical properties of soil-rock interface in different moisture content

试样状态	含水量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
干燥	0.4	38.78	44.44
稍湿	11.7	24.27	71.78
湿润	18.7	15.54	30.72
饱和	28.6	7.45	26.83

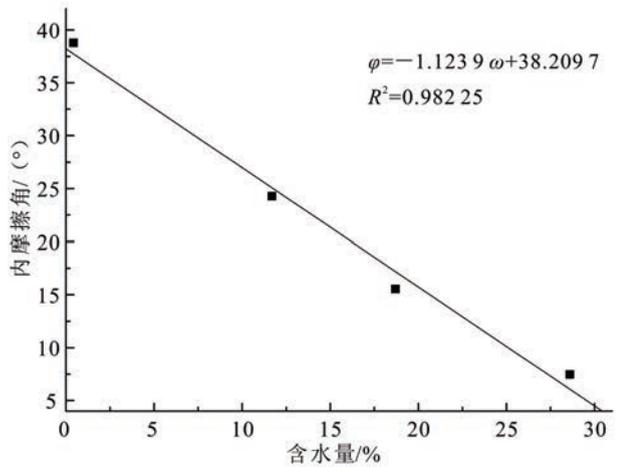


图 5 堆积层-基岩接触面内摩擦角与含水量关系

Fig.5 Relationship between internal friction angle of soil-rock interface and moisture content

通过对比发现,除了干燥情况下碎石土的内摩擦角小于堆积层-基岩接触面,其他工况下内摩擦角均较大。表明堆积层和基岩接触面是斜坡变形破坏的软弱结构面。上文中讲到,堆积层-基岩接触面是细粒物质聚集部位,随着细粒物质的变化,其力学特性也在发生着改变;因此,有必要深入研究随着粒径大小的改变,界面处的力学性质是如何变化的,这也是揭示堆积层-基岩接触面斜坡渐进破坏机理的关键点。

3.3 碎石土粒径不同时堆积层-基岩接触面力学指标的测定

为了模拟碎石土细粒增加时堆积层-基岩接触面天然和饱和抗剪强度的变化规律,在天然级配的基础上,分别增加了极细(≤ 0.075 mm)、细(0.50~0.25 mm)和稍细(2~1 mm)3种细颗粒组。改变后

的堆积层-基岩接触面在湿润和饱和状态下的力学指标如表 4 和 5 所示,与表 3 对比发现:细颗粒的增多均降低了堆积层-基岩接触面的内摩擦角,细颗粒粒径小得越多,其降低程度也越大;黏聚力表现为在天然状态下随着细颗粒物质增多而升高,在饱和状态下则表现为随细颗粒物质增多而降低。

表 4 湿润状态下堆积层-基岩接触面的力学指标

Table 4 Mechanical properties of soil-rock interface in native state

增加试样状态	含水量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
稍细	18.7	14.06	16.80
细	18.7	12.45	30.50
极细	18.7	10.07	51.02

表 5 饱和状态下堆积层-基岩接触面的力学指标

Table 5 Mechanical properties of soil-rock interface in saturated state

增加试样状态	含水量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
稍细	26.8	7.04	74.20
细	26.8	6.38	53.80
极细	26.8	5.63	26.83

4 滑坡形成机理数值模拟分析

为进一步揭示堆积层-基岩接触面滑坡的渐进破坏过程和形成机理,采用 MIDAS/NX 有限元分析软件,在野外调查及室内试验的基础上,进行祖师庙滑坡形成过程的数值模拟。

4.1 模型的建立

模型范围西到滑坡后缘水平距离 32 m 处,东到坡脚处居民楼房后挡墙前水平距离 28 m 处,整体模型的水平方向(x 方向)长度为 138 m,竖直方向(y 方向)高度为 61 m,坡脚地平面向下延伸 6 m。模型中的地质情况以野外勘察资料为主,网格划分如图 6 所示,共包含 4 355 个单元、4 481 个节点。模型中岩土体物理力学指标如表 6 所示。

4.2 边界条件的确定

模型的边界条件如下:1)坡面设置为自由面;2)不考虑构造应力场及温度场等作用,重力场方向为 y 方向;3)根据实际情况,模型除坡面一侧岩土体可能发生变形和位移,其余两侧均不可能发生位移和转动,对模型底面和靠山侧进行固定约束。

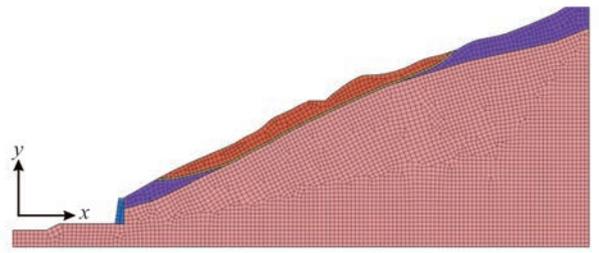


图 6 模型网格划分图

Fig.6 Model meshing figure

表 6 模型材料物理力学指标

Table 6 physical and mechanics index of model materials

名称	E / MPa	ν	γ / (kN/m ³)	γ_{sat} / (kN/m ³)	c / kPa	φ / (°)
挡墙	4 000	0.28	26	27	60	40
基岩	5 000	0.25	30	31	100	45
滑体	30	0.30	19.6	21	表 2—5 中数据	
滑带	18	0.35	20	22	表 2—5 中数据	

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; γ 为天然容重; γ_{sat} 为饱和容重。

4.3 模拟思路

降雨是诱发祖师庙滑坡的主要因素,在模拟过程中首先考虑含水量变化对坡体稳定性的影响;另外,根据前面的分析,堆积层-基岩接触面处细颗粒物质的运移和聚集是造成斜坡逐渐破坏的又一重要因素,因此,模拟中也考虑界面处碎石土粒径的改变。

4.4 结果分析

4.4.1 原始状态

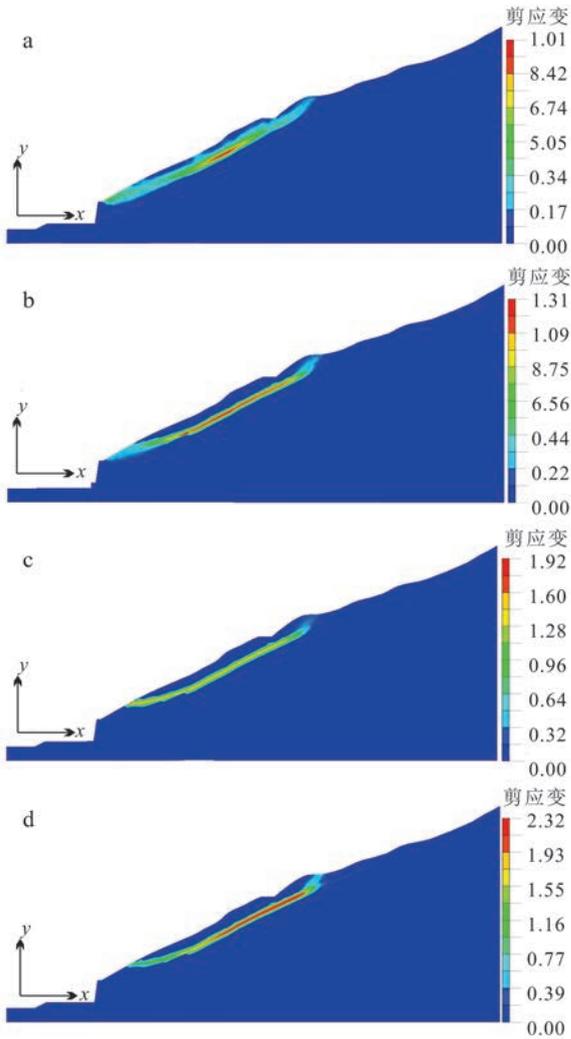
原始状态主要是指碎石土粒度成分和野外相同。试验中,分干燥、稍湿、湿润、饱和 4 种情况模拟含水量的变化对坡体稳定性的影响,稳定性系数计算结果如表 7 所示。可以看出,随着坡体含水量的增加,坡体稳定性逐渐降低。其中,干燥及稍湿状态时坡体处于稳定状态,湿润状态时坡体欠稳定,饱和时则不稳定。

碎石土含水量不同时坡体的剪应变云图如图 7 所示。在干燥情况下,最大剪应变集中区主要位于坡脚挡墙附近以及中部的堆积层-基岩接触面附近,但应变值较小,最大剪应变 $\epsilon = 1.01$,坡体整体上稳定;在稍湿的情况下,坡体内的剪应变范围扩展到整个堆积层-基岩接触面,最大的剪应变 $\epsilon = 1.31$;在湿润情况下,坡体内剪应变范围与稍湿情况下相似,但其应变值明显增大,最大的剪应变 $\epsilon = 1.92$,说明堆积层-基岩接触面是坡体中最容易破坏的部分,此时

表 7 原始状态下坡体稳定状态

Table 7 Slope stable state in initial state

滑体状态	稳定系数	坡体稳定状态
干燥	2.037 5	稳定
稍湿	1.425 0	稳定
湿润	1.037 5	欠稳定
饱和	0.678 0	不稳定



a.干燥;b.稍湿;c.湿润;d.饱和。

图 7 不同含水状态下坡体剪应变云图

Fig.7 Shear strain diagram in different moisture content

斜坡处于欠稳定状态;在饱和情况下,坡体内剪切应变逐渐贯通成为较完整的剪应变带,且应变值较高,最大的剪应变 $\epsilon = 2.32$,说明坡体沿该软弱结构面发生破坏,斜坡失稳。

4.4.2 改变碎石土粒径

随着细颗粒物质的增多,堆积层-基岩接触面强

度明显降低,因此进行滑带土粒径改变时滑坡的数值模拟分析;由于历次滑坡都是在降雨饱和情况下发生的,因此,只考虑滑带饱和这一种情形。通过计算得出稳定系数如表 8 所示,该工况下坡体稳定系数明显小于未改变粒径时的稳定系数,且均处于不稳定状态,另外,随着滑带处细粒物质粒径变小,坡体稳定系数也逐渐降低。

碎石土细粒物质改变时坡体的剪应变如图 8 所示,随着界面处细颗粒物质的增加,剪应变逐渐增加。原始状态及粒径稍细、细和极细状态下,最大剪应变分别为 2.73、3.08、3.27 和 3.35。斜坡均沿堆积层-基岩接触面发生了滑动。

表 8 粒径改变时坡体稳定状态

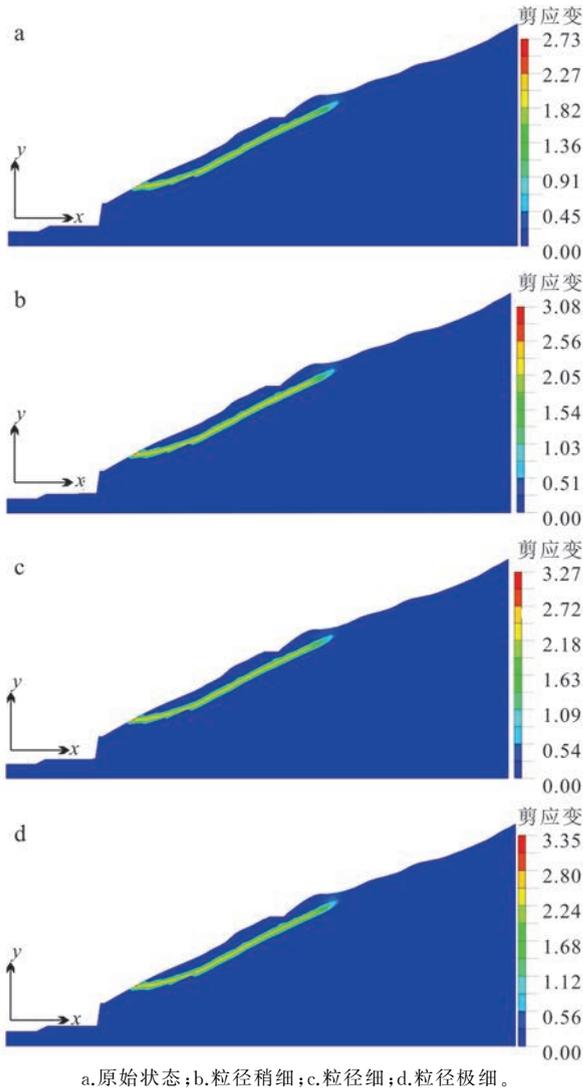
Table 8 Slope stable state with grain size changing

粒径级配	稳定系数	坡体稳定状态
初始	0.678	不稳定
稍细	0.668	不稳定
细	0.650	不稳定
极细	0.613	不稳定

5 祖师庙滑坡形成机理

在漫长的地质时期,祖师庙滑坡遭受了不同类型、不同期次的内外营力作用,其中降雨是诱发滑坡的主要因素之一,岩土体条件是滑坡失稳的决定性因素。由于祖师庙滑坡坡度 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,滑坡厚度约 4 m,滑体主要为碎石土,滑床为全-强风化的凝灰质砾岩、碎裂状结构,每遇强降雨或地下水位升高,均会造成坡体内部的淋滤和渗透作用增强;再加上堆积层-基岩接触面为一优势渗流面和不透水分界面,因此在该界面附近细颗粒物质易于聚集、土体易饱和,如坡体上有裂缝时,这种作用更加强烈。松散碎石土和堆积层-基岩接触面的物理力学参数的变化时刻影响坡体的稳定。

室内试验表明:无论是碎石土还是堆积层-基岩接触面,随着含水量的增加,其抗剪强度指标均在下降,且堆积层-基岩接触面为一相对软弱带;细颗粒物质的增加降低了堆积层-基岩接触面的内摩擦角,细颗粒越小,内摩擦角也越小,在饱和状态下降低幅度更大。数值模拟结果表明:当滑带土粒度成分和实际相同时,随着坡体含水量的增加,坡体稳定性逐渐降低,剪应变逐渐增大;随着滑带土细颗粒物质的



a.原始状态;b.粒径稍细;c.粒径细;d.粒径极细。

图 8 不同粒径状态下坡体最大剪应变云图

Fig.8 Shear strain diagram of slope with different grain size

增多,坡体稳定性系数明显小于原始情况,且均处于不稳定状态。

正是由于祖师庙滑坡特殊的地质结构,再加上岚皋县降雨量较多,特别是每年的7—10月份的集中降雨,易改变坡体的水文地质条件;同时会造成堆积层-基岩接触面附近细颗粒物质的运移和聚集,加之该滑坡已发生了多次变形破坏,细颗粒物质在堆积层-基岩接触面附近聚集更多;而且坡体中部公路边沟排水不畅、坡体上发育多条裂缝、碎石土结构松散,会造成雨水大量入渗斜坡。以上原因导致堆积层-基岩接触面附近形成了饱和带,大幅度降低了抗剪强度,造成坡体的多次复活。

6 结论

1)堆积层-基岩接触面滑坡主要发育在坡度 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、下伏基岩为碎裂状结构、松散堆积物为碎石土或含碎石粉质黏土的斜坡,多为浅表层滑坡。

2)随着含水量的逐渐增大,碎石土和堆积层-基岩接触面的内摩擦角均降低,近似呈线性关系,且碎石土的内摩擦角大于堆积层-基岩接触面的内摩擦角,进而说明堆积层和基岩接触面是斜坡变形破坏的软弱结构面。

3)细颗粒物质的增加降低了堆积层-基岩接触面的内摩擦角,且细颗粒粒径越小,内摩擦角也越小,在饱和状态时下降幅度更大。

4)数值模拟结果表明:当滑带土粒度成分和实际相同时,随着含水量的增加,坡体稳定性逐渐降低,剪应变逐渐增大;改变滑带土细颗粒物质所占的比例,随着滑带土细颗粒物质的增多,坡体稳定性系数明显减小,均处于不稳定状态。

5)祖师庙滑坡的形成受多种因素控制,其中因细颗粒物质在堆积层-基岩接触面处聚集造成强度降低和因水文地质条件改变造成的滑带土饱和是主要的诱发因素。

参考文献(References):

- [1] 刘传正,王恭先,崔鹏.地质灾害防治研究现状与展望[C]//中国科学技术学会.2008—2009地质学学科发展报告.北京:中国科学技术出版社,2008:17.
Liu Chuazheng, Wang Gongxian, Cui Peng. Status and Outlook on Geohazards Mitigation [C]//China Association for Science and Technology. Report on Advances in Geological Science. Beijing: China Science and Technology Press, 2008:17.
- [2] 成永刚.近二十年来国内滑坡研究的现状及动态[J].地质灾害与环境保护,2003,14(4):1-5.
Cheng Yonggang. Current Situation and Developments of Landslide Study in China in Recent Twenty Years [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003, 14(4):1-5.
- [3] 刘广润,晏鄂川,练操.论滑坡分类[J].工程地质学报,2002,10(4):339-342.
Liu Guangrun, Yan Echuan, Lian Cao. Discuss on Classical of Landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(4):339-342.
- [4] 贺可强,阳吉宝,李显忠,等.堆积层滑坡预测预报及其防治[M].北京:地震出版社,1996.

- He Keqiang, Yang Jibao, Li Xianzhong, et al. Prediction and Mitigation of Accumulation Landslide [M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [5] 蒋建平, 罗国煜. 土坡中的优势结构面分析[J]. 工程地质学报, 2000, 8(4): 438 - 441.
- Jiang Jianping, Luo Guoyu. Analysis of Preferred Plane in the Soil Slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(4): 438 - 441.
- [6] 罗国煜, 王培清, 吴浩, 等. 敷溪口松动变形边坡稳定性和破坏机制浅析[J]. 湖南水利, 1981, 1(1): 12 - 16.
- Luo Guoyu, Wang Peiqing, Wu Hao, et al. Analysis on Stability and Failure Mechanism of Loose and Deformed Slope in Fuxikou[J]. Hunan Hydro, 1981, 1(1): 12 - 16.
- [7] 朱大鹏. 三峡库区典型堆积层滑坡复活机理及变形预测研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.
- Zhu Dapeng. Revival Mechanism and Deformation Prediction of Typical Accumulative Landslide in the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: China University of Geoscience, 2010.
- [8] 蒋建平, 李晓昭, 罗国煜. 岩土优势结构面的储运水效应[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 34 - 38.
- Jiang Jianping, Li Xiaozhao, Luo Guoyu. Storage and Movement Effect of Water on Rock-Soil Preferred Structural Plane[J]. Advance in Water Science, 2007, 18(1): 34 - 38.
- [9] Jaeger J C. Friction of Rocks and Stability of Rock Slopes[J]. Geotechnique, 1971, 21: 91 - 134.
- [10] Barton N R, Choubey V. The Shear Strength of Rock Joint in Theory and Practice [J]. Rock Mechanics, 1977, 10: 1 - 54.
- [11] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- Sun Guangzhong. Rock Mass Structure Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [12] 夏才初, 孙宗硕. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- Xia Caichu, Sun Zongqi. Engineering Mechanics of Rock Joints[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.
- [13] 冯大阔. 粗粒土与结构接触面三维本构规律、机理与模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- Feng Dakuo. Three-Dimensional Constitutive Laws, Mechanism and Model of Gravel-Structure Interfaces [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [14] 施建勇, 钱学德, 朱月兵. 垃圾填埋场土工合成材料的界面特性试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 688 - 692.
- Shi Jianyong, Qian Xuede, Zhu Yuebing. Experimental Methods for Interface Behaviors of Geosynthetics in Landfills [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 688 - 692.
- [15] 马伟. 钢-土界面特性及钢护筒嵌岩桩承载性状研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- Ma Wei. Mechanism Properties of Steel-Soil Interface and Bearing Behaviors of Rock-Socketed Piles with Steel Tube [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [16] 熊炜. 秦巴山区软弱变质岩浅表层滑坡成因机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- Xiong Wei. Study on the Cause Mechanism of Shallow Landslide of Weak Metamorphic in the Qin-Ba Mountain Region [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [17] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44 - 50.
- Xu Bin, Yin Zongze, Liu Shuli. Experimental Study of Factors Influencing Expansive Soil Strength [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 44 - 50.
- [18] 唐晓松, 邓楚健, 郑颖人. 三峡库区碎石土地基浸水试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 225 - 229.
- Tang Xiaosong, Deng Chujian, Zheng Yingren. Study on the Test of Immersed Gravelly Soil Foundation in the Three-Gorges Zone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 225 - 229.
- [19] 时卫民, 郑宏录, 刘文平, 等. 三峡库区碎石土抗剪强度指标的试验研究[J]. 重庆建筑, 2005(2): 30 - 35.
- Shi Weimin, Zheng Honglu, Liu Wenping, et al. Experiment Research on Shear Strength Index of Gravel-Soil in Three Gorge Reservoir Area [J]. Chongqing Architecture, 2005(2): 30 - 35.
- [20] 高玮, 胡瑞林. 基质胶结对土石混合物强度变形特性影[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 1164 - 1172.
- Gao Wei, Hu Ruilin. Experimental Research on Strength Characteristics of Soil-Rock Mixture with Different Matrix Bonding [J]. Journal of Jilin Universtiy (Earth Science Edition), 2015, 45(4): 1164 - 1172.
- [21] 马驰. 堆积层-基岩接触面滑坡的变形特征及形成机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- Ma Chi. Study on Features and Cause Mechanism of Debris-Bedrock Interface Landslide [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.