



典型降雨诱发型堆积层滑坡机理研究

叶旭光¹, 王新刚¹, 刘 凯¹, 王友林², 罗 力¹, 薛 晨¹

(1. 西北大学 地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;

2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要 以柞水县小岭镇罗庄三组滑坡为研究对象,在野外地质调查的基础上开展室内土工试验,利用大型直剪试验和数值模拟手段,研究不同含水率条件下滑带土的剪切力学特性,进而在此基础上揭示降雨诱发堆积层滑坡的形成机理和变形过程。大型直剪试验表明:在试验前期,剪切应力与剪切位移呈线性关系,随剪切位移增大曲线呈现出非线性特征;在其他试验工况相同时,剪切应力与含水率呈负相关规律;当含水率相同时,剪切应力随法向荷载的增大而增大。数值模拟结果表明:堆积层坡体在降雨因素的作用下,容易发生失稳;随着降雨强度和时长的不断增大,土体含水量增加或饱和后易产生破坏,坡体稳定性系数不断减小。降雨条件下,堆积层滑坡滑体变形较强烈,其变形过程一般经历蠕动变形→加速变形→滑动破坏3个阶段,破坏运动形式以推移式为主,通过推挤作用对威胁对象产生破坏效应,从而造成人员和财产损失。该研究成果对秦巴山区堆积层滑坡的机理研究与防灾减灾具有一定的参考意义。

关键词 堆积层滑坡;降雨;大型直剪;数值模拟;滑坡机理

中图分类号: P642.22 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbr.2024-01-012

Study on the mechanism of typical rainfall induced accumulation layer landslide

YE Xuguang¹, WANG Xingang¹, LIU Kai¹,
WANG Youlin², LUO Li¹, XUE Chen¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Shaanxi Hydrological Engineering Geology and Environmental Geological Survey Center, Xi'an 710068, China)

Abstract The Luozhuang Group 3 landslide in Xiaoling Town, Zhashui County, is the focus of the present study. Geotechnical tests are performed indoors based on the geological survey in the field. By means of large-scale direct shear test and numerical simulation, the shear mechanical properties of sliding zone soil under different water content conditions are analyzed and studied. On this basis, the formation mechanism and deformation process of rainfall-induced accumulation landslide are revealed. The large-scale direct shear test shows: in the early stage of the test, the shear stress and shear displacement are linear, and the curve shows nonlinear characteristics with the increase of shear displacement. When the other test conditions are the same, the shear

收稿日期:2023-10-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3008401);中国博士后基金特别资助项目(2019T120871)。

第一作者:叶旭光,男,从事地质灾害防治研究,1521127692@qq.com。

通信作者:王新刚,男,博士生导师,教授,从事地质灾害机理与防控研究,xgwang@nww.edu.cn。

stress is negatively correlated with the water content. When the water content is the same, the shear stress increases with the increase of the normal load. The numerical simulation results show that the accumulation layer slope is prone to instability under the action of rainfall factors, with the continuous increase of rainfall intensity and duration, the soil moisture content increases or is prone to damage after saturation, and the slope stability coefficient decreases continuously. Under the condition of rainfall, the deformation of the landslide body of the accumulation layer is relatively strong, and its deformation process generally undergoes three stages, creep deformation - accelerating deformation - sliding failure. The form of failure movement is mainly push-type, which has a destructive effect on the threat object through the pushing effect, resulting in personnel and property losses. The research results have certain reference significance for the mechanism research and disaster prevention and mitigation of colluvial landslides in Qinba Mountain area.

Keywords accumulation layer landslide; rainfall; large direct shear; numerical simulation; landslide mechanism

秦巴山区,受板块运动影响,地质构造运动强烈,岩性复杂多样,加之气候条件的特殊性,滑坡灾害多发^[1]。秦巴山区大部分的滑坡主要发生在 5 月至 9 月的雨季^[2-4],且以堆积层滑坡居多。秦巴山区堆积层滑坡的频繁发生对人民群众的生命财产安全带来了严重威胁,因此,研究降雨诱发型堆积层滑坡机理对于该类滑坡的防治具有重要的意义。

秦巴山区堆积层滑坡滑体物质主要为碎石土,其结构疏松,在降雨作用下,其力学性质容易被大幅度削弱^[5]。前人学者对堆积层滑坡的成因模式进行了大量研究,王承辉归结新滩滑坡的诱因为降雨作用^[6];许建聪等总结了碎石土滑坡的一般发育规律,阐述了碎石土滑坡的破坏机理,认为碎石土滑坡稳定性与孔隙水压力及土体自重应力有关,且明确指出强降雨是浅层碎石土滑坡体发生失稳的主要诱发因素^[7-9];孙红月提出含碎石黏性土滑坡的首要治理原则就是治水,强调了降雨的影响^[10];徐兴华等从实地调研出发,通过对官家滑坡变形破坏的研究,强调了降雨和地下水在碎石土滑坡发生破坏时的重要作用^[11];胡显明针对碎石土滑坡,研究了其残余强度特性,并基于宾汉模型结合自身研究对滑坡的破坏机理进行了研究^[12]。此外,还有学者研究了碎石土的物质组成,指出了细颗粒成分对其特性的影响^[13-15]。

综上所述,降雨因素对于堆积层滑坡有着显著影响,特别容易导致其变形加剧^[16-17]。梳理过前人研究成果后认为,针对堆积层滑坡滑带土的剪切力学特性和堆积层滑坡的机理揭示仍需进一步的深入研究^[18-19]。本研究以秦巴山区一典型降雨诱发型堆积层滑坡作为研究对象,通过前期

野外勘察总结了滑坡的发育特征,结合室内试验研究了滑带土在大型直剪试验下的剪切力学特性,并在此基础上结合 GeoStudio 软件综合室内试验成果,揭示了典型降雨诱发型堆积层的滑坡机理。

1 滑坡概况

研究滑坡体位于陕西省商洛市柞水县的小岭镇罗庄三组[见图 1(a)],其地理位置为 109°16'15.75" E,33°34'35.04" N。该滑坡是典型的降雨诱发型堆积层滑坡,曾于 2021 年 9 月 29 日下午 2 时发生滑动。滑坡周界如图 1(b)所示。

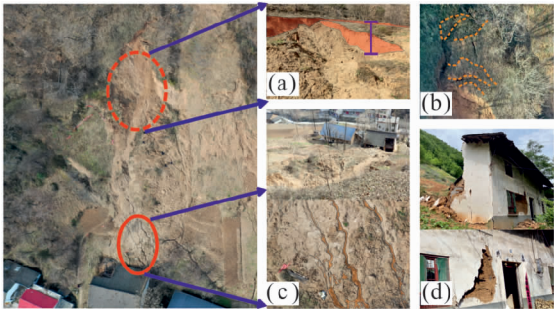


注:(a)滑坡的位置;(b)航拍照片

图 1 罗庄三组滑坡概况

Fig. 1 Overview of the Luo Zhuang Group 3 Landslide

该滑坡位于坡体中下部,滑坡后缘呈圈椅状,发育多级陡坎〔见图 2(a)〕,高约 1.9 m,侧边界高约 1.6 m,剪出口被滑体掩盖。后缘陡坎发育数条拉张裂缝〔见图 2(b)〕,长度分布在 5 ~ 20 m,宽度分布在 8 ~ 20 cm,中下部发育多条剪切裂缝,宽度约 3 cm,长约 3 m,并有明显冲沟发育〔见图 2(c)〕。滑体主要为残坡积层,主要岩性为第四系堆积碎石土,直径大小约 2 mm,厚度 8 ~ 10 m。滑坡前缘切坡建房,故滑坡造成房屋受损严重〔见图 2(d)〕,坡体上陡下缓;可见贯穿性凹型滑面,长约 47 m,宽约 16 m,滑坡区未见基岩出露。



(a) 陡坎;(b) 滑体剪切裂缝;(c) 冲沟;(d) 房屋受损
图 2 罗庄三组滑坡工程地质特征
Fig. 2 Engineering geological characteristics of the Luozhuang Group 3 Landslide

通过野外实地勘察,绘制了滑坡的主剖面图(见图 3),滑坡区地层主要为碎石土、千枚岩和板岩,坡脚处为滑坡堆积物,坡高 50 m,主滑方向为 159°。该滑坡呈现出长期蠕动变形的特征,处于欠稳定状态。据当地居民介绍,2021 年,该滑坡曾发生过一次大规模滑动,近期当降雨较大时坡体也会产生溜滑,这是长期蠕动变形的结果。从滑面形态上来看,该滑坡抗滑力主要来源于滑体与滑床碎石土之间的黏聚力、摩擦力与建筑物的阻力。

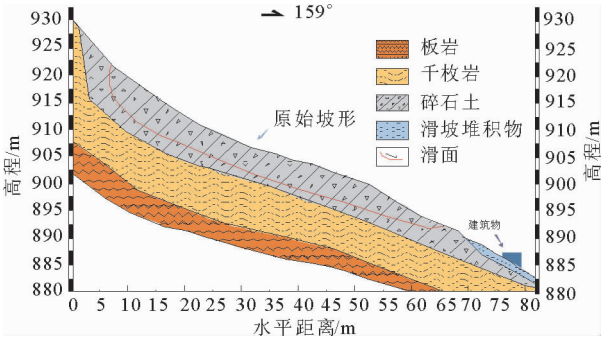


图 3 罗庄三组滑坡主剖面图
Fig. 3 Cross-section of the Luozhuang Group 3 landslide

2 试验研究

为获取滑坡区滑带土的力学强度参数,取堆积层滑坡滑带土进行室内力学试验(见图 4)。由于碎石土的不均一特性,采用大型直剪试验研究其物理力学性质。



图 4 取样位置
Fig. 4 Sampling location

通过室内试验可知(试样的试验参数如表 1 所示),其干密度为 1.52 g/cm³,天然含水率在 8% ~ 13%,因研究降雨作用下土的力学性质,所以本次直剪试验的样品含水率设为 5%,10%,15% 和 20%(此时已近于饱和状态)。

表 1 滑带土基本物理性质参数
Tab. 1 Basic physical property parameters of loess

相对密度	干密度 $\rho_d /$ (g · cm ⁻³)	密度 $\rho /$ (g · cm ⁻³)	含水率 ω /%	孔隙比
2.70	1.52	1.65	9	0.78

2.1 试验设备

本试验所采用的仪器设备为 TT-ADS 型全自动单联直剪仪(见图 5),该设备经过一系列的改良优化,性能优越,具有精确度高、试验误差小等特点。该设备主要由加载系统、剪切系统、伺服系统、数据收集系统与控制设备组成,其中,剪切盒设计为下盒固定、上盒受剪切装置按一定速率推动剪切的方式。本次试验选用的剪切盒尺寸为 150 mm × 150 mm × 100 mm。

2.2 试验方案

对于滑带土,试验设置了 5%,10%,15% 和 20% 四种不同含水率及不同法向应力。在试验阶段,将这 4 组样本分三到四层填装在仪器盒内,分层按压,在不同法向应力 σ 作用下进行剪切。

鉴于样品中 40% 左右的碎石成分,为了确保

试验准确,试验开展前先对碎石的吸水量做了初步探索,发现碎石的吸水量较小,约 5% 含水率时已达到饱和,故在配置含水率时将碎石独立进行配置^[20]。



图 5 TT-ADS 型全自动单联直剪仪

Fig. 5 TT-ADS type automatic single direct shear

3 试验结果分析

3.1 法向荷载对剪切力学特性的影响

通过不同含水率下,剪应力与剪切位移的关系曲线(见图 6)可以发现,在不同法向荷载下,试

样剪应力-位移曲线一般都具有峰值;有的没有较明显的峰值,是因为在较低法向荷载作用下,试样中颗粒,较大部分由于受力不够未能相互紧密咬合,与颗粒较小部分还没有紧密接触,形成了点面接触或者点点接触[见图 7(a)]的现象,此时试样还存在体积膨胀的趋势;高法向荷载作用时,试样间结合紧密[见图 7(b)],所以一般都具有较明显的峰值。

3.2 剪切强度与剪切位移的关系分析

图 6 为研究区堆积层碎石土在不同含水率条件下的剪应力与位移关系曲线图,图 6(c)、(d)中出现曲线点瞬时下移的特征,并在试验进行中发出石子碰撞声,这是由于试样在试验剪切过程中遇到光滑的石子,导致剪切应力迅速减小,或是试样内部某一部分发生石子错动引起的。图 6(a)、(b)、(d)中的曲线呈现出高低起伏的 V 字形小型波动现象,是因为碎石土在剪切试验中,堆积层碎石块会发生相互作用,直接碰撞或者摩擦,当发生错位或者损伤时,就会导致剪应力快速增大,当碎石块完成错位或者被影响消失的时候,其他部分的土石混体会迅速充填并重组结构,其中携带着碎石块损伤被剥离掉的部分,又恢复到之前的大小(见图 8)。

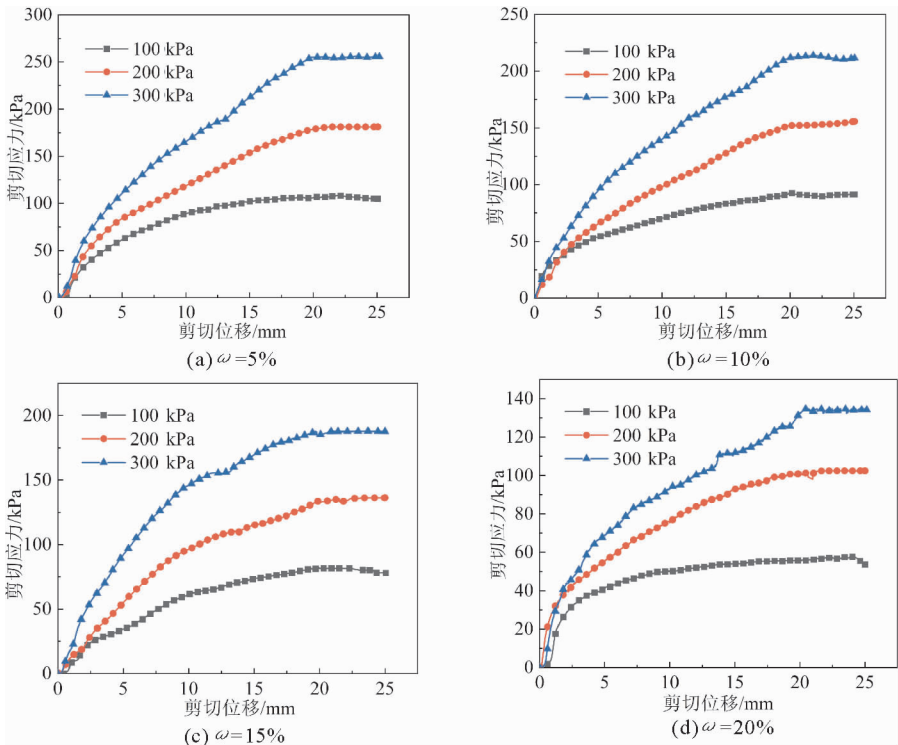


图 6 不同含水率条件下剪切应力与位移关系曲线图

Fig. 6 Shear stress displacement relationship curve under different water content conditions

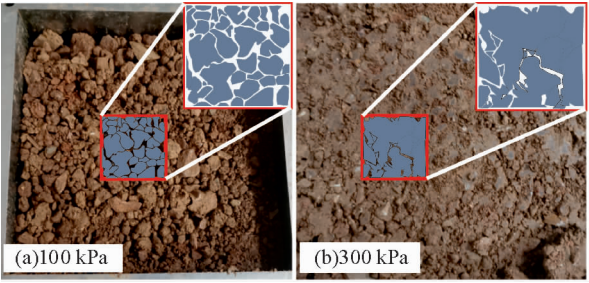


图 7 含水率 10% 试样剪切面

Fig. 7 Shear plane of sample with a moisture content of 10%

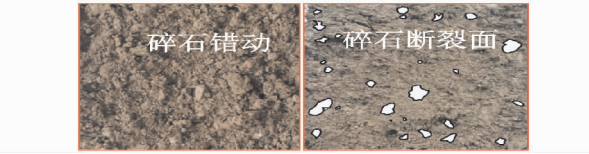


图 8 试验后剪切面照片

Fig. 8 Photos of shear surface after test

综合对比分析图 6 可以看出,试验样品在试验前期被剪切时,剪切应力随剪切位移的增加而增大,近似呈线性关系;当试样剪切位移达到一定程度时,剪切应力与剪切位移关系呈现出非线性关系,随剪切位移的增大而缓慢增加,最终剪切应力可能会出现峰值,然后会维持定值,或出现剪切应力减小的现象。

在相同压实程度、相同含水率的同一工况下,当法向荷载不断增大时,剪切应力也相应随之增大;在上述同一工况下,含水率与抗剪强度在数值变化上呈现负相关关系。

3.3 抗剪强度分析

根据不同工况下剪切试验得出的抗剪强度值如表 2 所示。

表 2 大型直剪试验结果

Tab. 2 Large Direct Shear Test Protocol

法向应力 /kPa	剪应力/kPa			
	DJ-1	DJ-2	DJ-3	DJ-4
100	104. 51	92. 41	81. 79	57. 84
200	181. 12	150. 42	134. 18	102. 48
300	255. 38	213. 69	187. 57	134. 12

从表 2 中可以分析出:①比较 DJ-1、DJ-2、DJ-3 和 DJ-4 可以得出,当法向应力相同的情况下,抗剪强度随含水率的增大而减小(见图 9),水分对碎石土的抗剪强度影响较大,这是因为水分大大降低了堆积层碎石土颗粒之间的摩擦力,同时也将颗粒相互之间的咬合力大大减弱。②经过一系列试验,结果证实了碎石土抗剪强度随着法向应力的增大而增大。③DJ-1、DJ-2、DJ-3 和 DJ-4

各组试验进行组内比较可以看出,随法向应力增大,其抗剪强度也会增大,且在未达到试样饱和含水率时,抗剪强度会随法向应力的增大呈相同比例增大,但当含水率过大时,抗剪强度会大幅度下降,该结果表明了强降雨条件下易发生地质灾害。

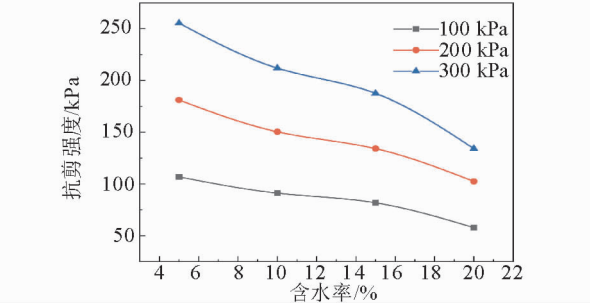


图 9 抗剪强度随含水率变化曲线图

Fig. 9 Curve chart of shear strength changing with moisture content

3.4 强度指标与含水率关系特征

通过库仑公式得出碎石土的强度特性既受细粒土的黏聚力影响,又受到大颗粒的咬合作用影响,还会因为摩擦强度而改变。

图 10 为研究区小岭镇罗庄三组滑坡碎石土的内摩擦角及黏聚力与含水率的关系柱状图。从图 10 中可以看出,随含水率增加,黏聚力和内摩擦角整体上都呈现出下降的趋势,黏聚力存在短暂上升的缓冲区段,而内摩擦角则呈现持续下降的趋势。

1) 当含水率在 5% ~ 20% (近饱和) 变化时,其黏聚力在 30.9 ~ 21.8 kPa 变化,总降幅为 29.4%,且在含水率为 5% ~ 10% 时,碎石土的黏聚力随含水率先小幅增大,然后随含水率增加先缓慢减小,然后急剧减小;特别是在含水率为 15% ~ 20% 时,黏聚力从 28.7 kPa 下降到 21.8 kPa,黏聚力的降幅为 24%。由此可知,含水率为 15% ~ 20% 时,黏聚力降幅占总降幅的 75.8% 左右,说明水对于碎石土黏聚力的影响在这个含水率区间表现的尤为明显。

2) 对于内摩擦角而言,整体来看,其随含水率的增大而持续减小,整体的下降幅度大于黏聚力的下降幅度,从上限 36.3 kPa 下降到下限 20.8 kPa,降幅约为 42.7%,且与黏聚力相同的是,其降幅也在含水率为 15% ~ 20% 时下降幅度最大,从 27.8 kPa 下降到 20.8 kPa,占总降幅的 45.1%。

产生上述现象的原因为:碎石土的黏聚力主要受碎石土中细粒成分所影响,具体表现为颗粒之间的相互引力、水膜结合力等^[21]。当含水率从

5% 增加至 10% 时,由于颗粒之间的强结合水增多,使得土体颗粒愈加稳定,从而导致黏聚力的小幅增大;当含水率继续增大时,土体颗粒之间的强结合水逐渐转变为颗粒之间的自由水,所以会导致黏聚力的持续减小。

内摩擦角主要源于土体颗粒之间的相互作用,可分为滑动与滚动两种模式。随着含水率增大,颗粒之间的强结合水溢出,转变为颗粒间起润滑作用的自由水,产生剪切软化的现象,所以内摩擦角会随着含水率的增大而减小。

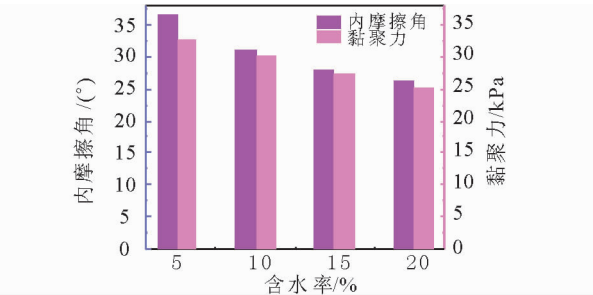


图 10 不同含水率条件下碎石土内摩擦角及黏聚力变化特征
Fig. 10 Variation characteristics of friction angle and cohesion in gravel soil under different moisture contents

4 数值模拟与滑坡机理分析

本研究选用 GeoStudio 有限元数值模拟软件,以柞水县小岭镇罗庄三组滑坡为研究对象,将斜坡工程地质主剖面图概化后,再建立数值模型,设定不同降雨工况,通过计算分析各工况下模拟的变化情况,从而揭示滑坡的变形机理。

4.1 几何模型及工况的建立

根据工程地质剖面图,采用 GeoStudio 软件进行数值模拟,模型高 50 m,长 82 m,共 2 154 个节点,2 054 个单元,具体位置及几何模型如图 11 所示,模型中材料分别为板岩、千枚岩、碎石土滑体及滑坡堆积物。模型底部边界条件设置为限制其 XY 方向的移动,模型左侧限制其 X 方向的运动。根据柞水县 9.23 特大暴雨的降水量设置模型的水力边界,同时综合原位、室内试验及前人对研究区岩土参数的研究成果确定了各模型的相关参数(见表 3),以此获得降雨过程中坡体孔隙水压力、变形、应力及应变等特征的发展和变化过程。本研究根据研究区的降雨情况,选择了 4 种降雨强度:0.02 m/d(小雨),0.08 m/d(大雨),0.12 m/d(暴雨),0.16 m/d(大暴雨),降

雨历时设定为 1~5 d。

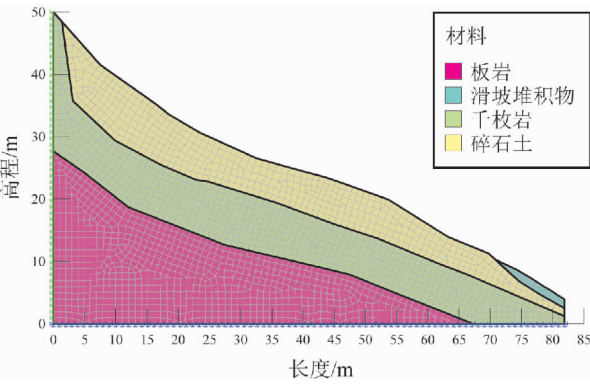


图 11 GeoStudio 有限元模型
Fig. 11 GeoStudio finite element model

表 3 GeoStudio 数值模型参数
Tab. 3 GeoStudio model parameters

模型材料	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa
板岩	25.0	0.27	1100	45	1100
千枚岩	21.8	0.32	60	28	435
碎石土	18.5	0.2	30	20	20
滑坡堆积物	14.1	0.2	15	22	15

4.2 滑坡渗流场分析

在降雨条件下,坡体浅层碎石土层由于渗透性好,雨水下渗较快,当下渗到与千枚岩岩层的交界面时,会因为二者渗透性差异而形成饱和区域;随降雨时间的增长,孔隙水压力不断增大,饱和区域面积随之增大[见图 12(a),(b)];而下部基岩渗透性较差,雨水较难渗透,当降雨达到一定时间时,孔隙水压力才开始缓慢变化。经过模拟发现,当分别以 0.02 m/d 的强度降雨 4 d 和以 0.08 m/d 的强度降雨 1 d 时,二者降雨量总量相等,但后者饱和区域面积、孔隙水压力略小[见图 12(b),(c)]。分析可得,对于等时降雨而言,当降雨强度小于坡体的入渗强度时,降雨强度越大,入渗水量越多;当降雨强度足够大时,会形成大量坡面径流与小部分地下径流,坡体上部较容易达到饱和状态,而低强长时降雨所形成的坡面径流很小,水分入渗较为充分,可以从图 12(d)中观察到,千枚岩岩层与板岩交界面有明显的孔隙水压力变化,产生了少量饱和和红色区域。

4.3 滑坡位移场分析

罗庄三组滑坡的变形主要集中在滑带的中上部碎石土层,推测其与滑坡后缘发育的裂缝有关。滑坡在坡体中上部位移最为明显,随着降雨时长

的增加,其位移明显增大,当降雨时长从 1 d 增加到 3 d 时,坡体的最大位移从 1.6 m 增加到 3.4 m [见图 13(a,b)]。

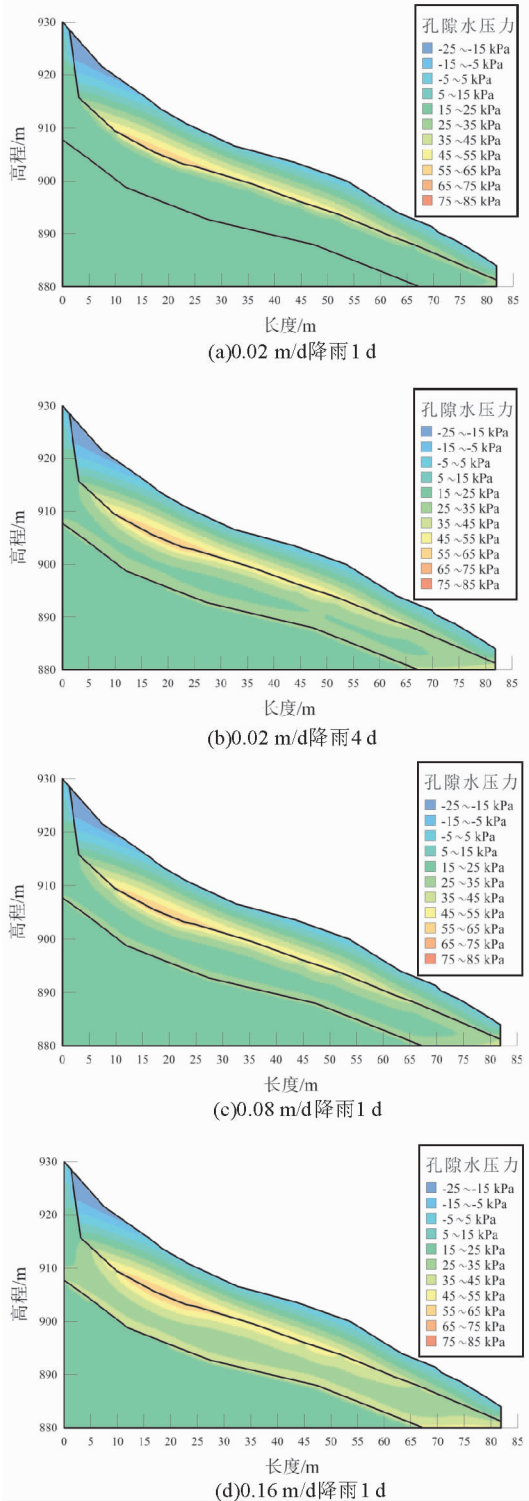


图 12 孔隙水压力分布云图

Fig. 12 Cloud map of pore water pressure distribution

从图 13 中可以看出,随着降雨时间和降雨强度的增加,坡体位移显著增大。从图 13(b),(c) 可以看出,当降雨总量相同时,降雨强度影响更为

显著,变形更加明显。

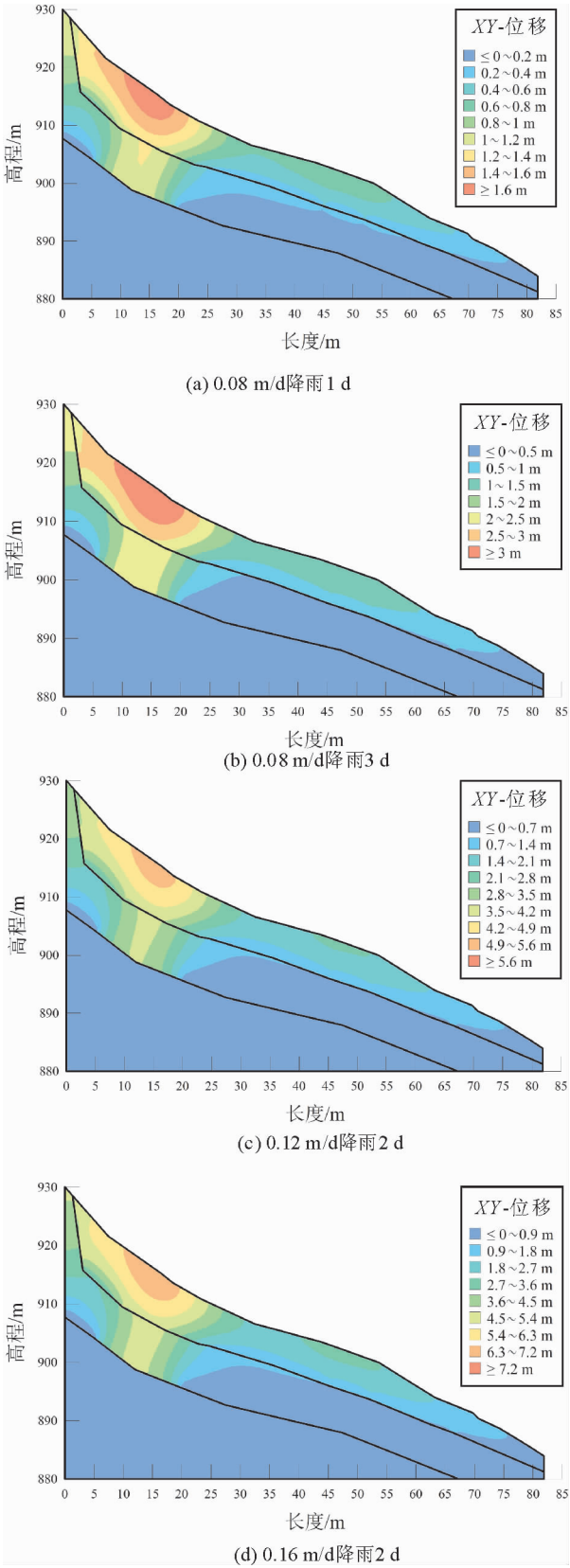


图 13 XY 方向位移量随时间持续的变化情况

Fig. 13 The continuous variation of displacement in the XY direction over time

4.4 不同降雨时长下滑坡稳定性分析

图 14 所示为不同工况下滑坡稳定性系数的变化情况。由图 14 可以看出,天然状态下,滑坡较稳定,系数均大于 1;降雨时坡体逐渐失稳,滑坡的稳定性状态会受到雨强与时长的影响,稳定性系数会在前一阶段快速减小,而后渐渐趋于定值。滑坡以 0.02 m/d 降雨 5 d,0.08 m/d 降雨 4 d,0.12 m/d 降雨 3 d,0.08 m/d 降雨 2 d 时,滑坡稳定性系数减小到 1 以下,滑坡应力状态改变,发生失稳破坏。

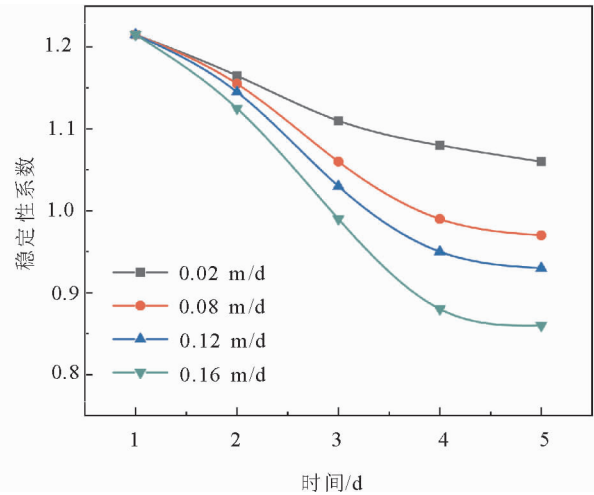


图 14 滑坡稳定性系数随降雨的变化

Fig. 14 The variation of landslide stability coefficient with rainfall

滑坡机理分析:原始坡形如图 15(a)所示,由于上部堆积层结构松散,渗透性较好,而下部基岩一般渗透性较差,当发生降雨时,上部岩层含水率快速增加,滑体重度增加,下滑分力相应增加;同时地下水对滑体形成渗透压力,在滑面附近形成潜水土弱带(滑带),当滑带的总下滑力大于抗滑力时,滑体产生变形,产生应力释放和重分布。在土体含水量增加或饱和后易产生破坏,滑体变形较强烈,变形过程一般经历蠕动变形→加速变形→滑动破坏 3 个阶段;当发生蠕动变形时,滑体局部发育小型冲沟,中上部有裂缝产生〔见图 15(b)〕;随着降雨持续,出现次级台坎,最终使上覆土体沿软弱结构面产生整体滑动〔见图 15(c)〕,形成蠕滑-推移式破坏,坡体失稳〔图 15(d)〕;再次降雨的情况下坡体还会继续滑动。

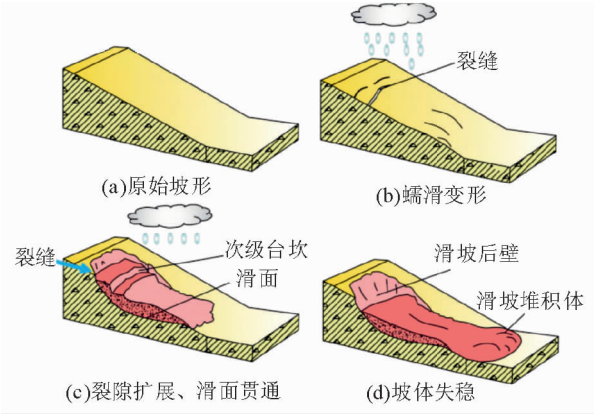


图 15 典型降雨诱发型堆积层滑坡形成机理

Fig. 15 Comparison of stress state at one point in the slope before and after excavation

5 结论

1)在大型直剪试验前期,剪切应力与剪切位移呈线性增长关系,后期剪切应力随剪切位移的增大而缓慢增加,最终剪切应力大部分出现峰值,峰值过后曲线呈现上下小幅波动,部分曲线呈现剪切应力减小的现象。

2)当含水率相同时,随着法向荷载不断增大,剪切应力也相应随之增大;当法向应力相同时,剪切应力随着含水率的加大而减小,剪切应力与含水率在数值变化上呈现负相关关系。样品中的水分大大降低了堆积层碎石土颗粒之间的摩擦力,同时也将颗粒相互之间的咬合力大大减弱,可见含水率对碎石土的抗剪强度影响较大。

3)降雨诱发型堆积层滑坡机理可以被归纳为:大气降水渗入坡体之后,坡体重度增加,抗滑能力减弱;随着降雨的持续,大量地下水在堆积层下部基岩顶面汇集并形成附加渗透压力,加快了软弱结构面裂隙的扩展和滑动面的贯通,最终使上覆土体沿软弱结构面产生整体滑动,发生滑坡破坏。

4)强降雨是诱发研究区滑坡的主要因素,建议对滑坡进行实时监测,并对滑坡进行反压抗滑、削方减重等工程治理措施,以确保下方居民的生命财产安全。

参考文献

[1] 范立民,何进军,李存购. 秦巴山区滑坡发育规律研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004(1):47-51.

- FAN L M, HE J J, LI C G. Study on development patterns of landslide in Qinling-Bashan Mountains[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004(1): 47-51.
- [2] CHEN H X, ZHANG L M. A physically-based distributed cell model for predicting regional rainfall-induced shallow slope failures [J]. Engineering Geology, 2014, 176(13): 79-92.
- [3] 张龙飞,杨宏伟,李曜男,等. 库水与降雨对凉水井滑坡变形及稳定性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2019, 41(2): 16-24.
- ZHANG L F, YANG H W, LI Y N, et al. Influence of reservoir water and rainfall on the Liangshuijing landslide deformation and stability[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019, 41(2): 16-24.
- [4] 陈善雄,许锡昌,徐海滨. 降雨型堆积层滑坡特征及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(S2): 6-10.
- CHEN S X, XU X C, XU H B. Features and stability analysis of rainfall-induced colluvial landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S2): 6-10.
- [5] HE K Q, SUN L N, WANG S J. Displacement fractal parameter hurst index and its application to prediction of debris landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1107-1115.
- [6] 王承辉. 新滩滑坡变形与机理探讨[J]. 地壳形变与地震, 1990, 10(4): 25-33.
- WANG C H. Approach to deformation and mechanism of Xitan landslide[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1990, 10(4): 25-33.
- [7] 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.
- XU J C, SHANG Y Q, CHEN K F, et al. Analysis of shallow landslide stability under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3246-3251.
- [8] 许建聪,尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264-2271.
- XU J C, SHANG Y Q. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264-2271.
- [9] 许建聪,尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 106-112.
- XU J C, SHANG Y Q. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 106-112.
- [10] 孙红月, 含碎石黏性土滑坡的成因机理与防治对策[D]. 杭州:浙江大学, 2000.
- [11] 徐兴华,尚岳全,王迎超. 碎石土滑坡综合治理及评价决策办法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(2): 484-492.
- XU X H, SHANG Y Q, WANG Y C. Comprehensive treatment and evaluation decision method of gravel soil landslide[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(2): 484-492.
- [12] 胡显明. 不同剪切速率下碎石土滑坡滑带土残余强度特性研究[D]. 北京:中国地质大学, 2012.
- [13] 陈志超,罗旋,柳侃,等. 碎石土滑坡渗流系统特征及防治措施研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 813-818.
- CHEN Z C, LUO X, LIU K, et al. Seepage characteristics and mitigation measures of a gravel soil landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 813-818.
- [14] 胡瑞林,李晓,王宇,等. 土石混合体工程地质力学特性及其结构效应研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 255-281.
- HU R L, LI X, WANG Y, et al. Research on engineering geomechanical and structural effect of soil-rock mixture [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 255-281.
- [15] 杨忠平,田鑫,雷晓丹,等. 土石混合料剪切特性影响因素的离散元数值研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 39-50.
- YANG Z P, TIAN X, LEI X D, et al. Particle discrete element numerical study on factors of shear strength characteristics for soil-rock mixture [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 39-50.
- [16] 王高峰,李浩,田运涛,等. 甘肃省白龙江流域典型高位堆积层滑坡成因机制研究及其危险性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 1003-1018.
- WANG G F, LI H, TIAN Y T, et al. Study on the formation mechanism and risk prediction of high-level accumulation landslides in Bailongjiang River Basin, Gansu Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 1003-1018.
- [17] 汪磊,尚岳全. 外部降雨条件和内部瞬态承压水作用对堆积层滑坡的影响分析和数值模拟[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 141-145, 151.
- WANG L, SHANG Y Q. Analysis and numerical simulation on influence of external rainfall conditions and

internal transient confined water on accumulation landslide[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 141-145,151.

[18] 王海芝,王颂,周剑,等. 樟木堆积体斜坡动力稳定性与极限承载力评价[J]. 西北地质,2022,55(1): 262-273.

WANG H Z, WANG S, ZHOU J, et al. Dynamic stability analysis and ultimate bearing capacity evaluation of Zhangmu Landslide Depite[J]. Northwest Geology, 2022, 55(1): 262-273.

[19] 王佳运,石小亚,武立,等. “8. 12”山阳滑坡视向滑动成因机理[J]. 西北地质,2018,51(3):232-239.

WANG J Y, SHI X Y, WU L, et al. Formation mechanism of apparent dip slide in the Shanyang "8. 12"

[J]. Northwest Geology, 2018, 51(3): 232-239

[20] 胡峰,李志清,胡瑞林,等. 基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(3):766-778.

HU F, LI Z Q, HU R L, et al. Research on the deformation characteristics of shear band of soil-rock mixture based on large scale direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 766-778.

[21] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

(编 辑 雷雁林)