

引用格式: 穆青翼, 陈俊锋, 段译斐, 张珩, 孙清. 黄土-古土互层边坡稳定性分析[J]. 山地学报, 2022, 40(6): 943-952.

MU Qingyi, CHEN Junfeng, DUAN Yifei, ZHANG heng, SUN Qing. Stability analysis of loess-paleosol interlayer slope [J]. Mountain Research, 2022, 40(6): 943-952.

黄土-古土互层边坡稳定性分析

穆青翼¹, 陈俊锋¹, 段译斐², 张珩², 孙清^{1*}

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049; 2. 国家电网陕西省电力公司西安供电公司, 西安 710005)

摘要: 中国西北地区常见黄土-古土互层边坡发生失稳。黄土-古土互层边坡中因黄土和古土水-力学特性的差异, 其失稳机理和单一黄土边坡不同。以往黄土地区滑坡研究多聚焦于单一黄土边坡, 对于降雨诱发黄土-古土互层边坡失稳机理的研究较少, 已有定量研究成果仍不全面。本文通过室内单元体试验对比研究了原状古土与原状黄土的水-力学特性, 建立了黄土-古土互层边坡以及单一黄土边坡数值模型, 利用室内单元体试验所测水-力学特性参数, 对比研究了降雨条件下黄土-古土互层边坡以及单一黄土边坡的失稳机理。室内单元体试验结果表明: (1) 饱和古土的内摩擦角比黄土小 3% 且两种土的黏聚力均为零, 这是由于古土较黄土黏粒含量大 5.3% 且两种土均缺乏碳酸钙等胶结矿物; (2) 由于孔隙结构的差异, 非饱和黄土相比于古土具有较差的持水能力和较好的渗透性。数值模拟结果表明: (1) 在降雨条件下黄土-古土互层边坡在古土层附近形成滞水并逐渐连通, 显著降低边坡安全系数, 上述滞水现象的产生主要归因于黄土与古土水力学特性的差异(持水和渗透特性); (2) 相同降雨条件下黄土-古土互层边坡比单一黄土边坡更易发生失稳。研究成果揭示了降雨引起黄土-古土互层边坡失稳的机理, 可为同类研究及西北黄土-古土互层边坡治理提供参考。

关键词: 黄土-古土互层边坡; 持水特性; 强度特性; 稳定性分析; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标志码: A

中国西北地区具有世界上最厚、最完整的风成沉积土^[1]。其中, 黄土是在干冷环境下形成, 具有多孔、结构疏松、强水敏性等特点; 古土则形成于暖湿气候, 具有低孔隙率、高黏粒含量等特点^[2]。在过去数万年间, 由于古气候的交替变化, 西北地区形成了诸多黄土-古土互层边坡^[3-4]。近年来, 由于降雨、灌溉等因素的影响, 黄土-古土互层边坡发生失稳的工程案例较为普遍^[5]。针对降雨诱发失稳的黄土-古土互层边坡现场勘察中发现, 这类边坡的滑坡模式与单一黄土边坡不同。单一黄土边坡滑裂面

通常为圆弧状, 剪出口位置高低不定; 黄土-古土互层边坡滑裂面多沿顺坡向的古土层发育, 剪出口位于古土与黄土交界面^[6]。上述原位勘察说明黄土-古土互层边坡与单一黄土边坡的失稳机理可能存在差异。然而, 以往关于黄土滑坡的研究多针对单一黄土边坡, 对黄土-古土互层边坡关注较少。因此, 为进一步优化黄土地区的边坡稳定性设计, 需深入探究黄土-古土互层边坡在降雨条件下的失稳机理。

国内黄土-古土互层边坡滑坡的原位调查成果常见报道。例如, 甘肃西峰长庆桥滑坡的滑动面位

收稿日期(Received date): 2022-09-30; 改回日期(Accepted date): 2022-12-23

基金项目(Foundation item): 国网陕西省电力公司西安供电公司科技项目(SGT-YHT/20-JS-224); 国家自然科学基金(51978570)。[Science and Technology Project of Xi'an Power Supply Company of State Grid Shaanxi Electric Power Company (SGTYHT/20-JS-224); National Natural Science Foundation of China(51978570)]

作者简介(Biography): 穆青翼(1988-), 男, 河南人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 非饱和土力学。[MU Qingyi(1988-), male, born in Henan province, associate professor, Ph.D., research on unsaturated soil mechanics.] E-mail: qingyimu@mail.xjtu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 孙清(1970-), 男, 山东人, 教授, 博士, 主要研究方向: 力学相关方向。[SUN Qing(1970-), male, born in Shandong province, professor, Ph.D., research on mechanical correlation direction.] E-mail: sunq@mail.xjtu.edu.cn

于古土层上方,且发现降雨在古土层上方形成了滞水^[5];宝鸡地区古土与黄土交界面对滑坡具有明显的边界效应^[7];陕西泾阳地区,在黄土层和古土层之间以及沿古土层顶部发育了诸多滑裂面^[8]。赵志强^[9]等人研究了黄土和古土的物理特性以及雨水入渗过程,发现古土的黏粒含量、液塑限均大于黄土,入渗过程中古土层下部有滞水。上述研究大多针对古土-黄土互层边坡的原位调查和滑坡机理的定性揭示,尚未有对古土层滞水产生过程和该滞水对古土-黄土互层边坡稳定性影响的定量研究。

研究古土和黄土层间滞水的形成机理和对边坡稳定性的定量影响,揭示黄土-古土互层边坡在降雨条件下的滑坡机理,对西北黄土-古土互层边坡治理具有实践意义。本文采集西安市蓝田县白鹿塬土源,采取室内测试、数值模拟与理论分析的研究方法,对比黄土与古土的水-力学特性,基于室内试验所测水-力学特性参数,数值模拟对比分析降雨条件下黄土-古土互层边坡和单一黄土边坡的入渗规律和稳定性。研究成果揭示降雨引起黄土-古土互层边坡失稳的机理,可为同类研究及西北黄土-古土互层边坡治理提供参考。

1 试验概况

试验土样取自西安市蓝田县白鹿塬,通过原位开挖深度为 20 m 的探井,沿深度间隔 1 m 取样。土样运回实验室后,依据规范(GB/T50123-2019^[10])分别采用烘干法、环刀法、液塑限联合测定仪法、比重瓶法、密度计法对黄土和古土的含水率、密度、液塑限、比重、颗粒级配进行测定。依据基本特性测试结果,划分场地土层特性如图 1 所示。地表层以下 9 m 内为 Q2 黄土,液限、塑限变化范围分别为:33.6%~37.2%、20.1%~22.5%,比重变化范围为 2.64~2.66。距地表 9~19 m 为仍为 Q2 黄土,液限、塑限变化范围分别为 34.1%~34.4%、20.3%~20.4%,比重范围为 2.64~2.66。距地表 19 m 以下为古土,该层液限、塑限变化范围分别为 33.4%~35.0%、19.9%~20.7%,比重范围为 2.59~2.61。对比发现,古土与黄土的基本特性参数差别不大。不同的是,古土较黄土更为坚硬且呈棕褐色,古土的干密度大于黄土。根据《土的工程分类标准》(GB/T50123-2019)^[10],试验场地内土质为粉质

黏土。试验所采用黄土和古土分别取自距地表 10 m 和 19 m 处,其具体的基本土性参数如表 1 所示。

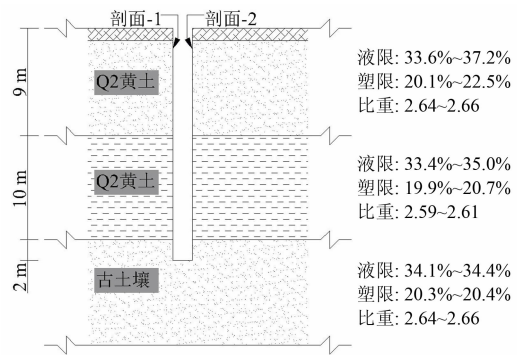


图 1 场地土层分布

Fig. 1 Profile of soil properties of the site

表 1 试样基本物理性质指标

Tab. 1 Physical properties of the samples

土样 类型	天然含 水率/%	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	黏粒含 量/%
黄土	22.31 ~ 24.36	1.36	33.40	19.90	23.10
古土	17.08 ~ 20.01	1.64	34.10	20.30	28.40

2 试验设备、测试步骤及试验方案

2.1 试验设备及测试步骤

剪切试验采用南京宁曦土壤仪器有限公司的四联应变控制式直剪仪。首先,对原状黄土和古土试样进行饱和。其次,根据固结度 $C_u \geq 95\%$ 推算出剪切速率 0.005 mm/min,保证在完全排水条件下进行剪切^[11]。根据《土工试验方法标准》,中止剪切位移取 7~10 mm。

压缩试验采用南京宁曦土壤仪器有限公司的王 G 型单杠杆三联高压固结仪。首先,将原状黄土与古土试样进行逐级加压,在每级应力下固结 24 h 或试样变形小于 0.01 mm/h^[10],记录变形数据并计算相应荷载下的孔隙比,得到压缩曲线。试验结束后,取出试样测定含水率。

持水特性测试采用美国 Soil Moisture Equipment 公司的 1500F1 型压力板仪。试验过程中分级增大/减小压力室内的气压以控制吸力,土样中的孔隙水通过下部陶土板排出/吸入土体,并记录每级吸力下的排出/吸入水量。待吸力稳定后,将试样从压力室

内取出并称重,计算试样含水率。

2.2 试验方案

本研究共开展三个系列试验,系列1研究黄土与古土的剪切特性,该试验分别对饱和黄土与古土试样进行竖向应力为100 kPa、200 kPa、400 kPa下的排水剪切试验,得到不同竖向应力下的水平位移-剪应力曲线以及水平位移-竖直位移曲线,计算饱和黄土与古土的抗剪强度指标。系列2试验目的是研究不同含水状态下黄土与古土的压缩特性。该试验包括古土和黄土两组土样,分别测试天然含水率和饱和状态下的压缩特性。将制备好的土样进行逐级压缩(1 kPa-3 kPa-6 kPa-12.5 kPa-50 kPa-100 kPa-200 kPa-400 kPa-800 kPa-1600 kPa),绘制孔隙比-竖向应力曲线,得到饱和黄土与原状黄土的压缩曲线。系列3试验目的是研究黄土与古土的持水特性。该组试验包括原状黄土和原状古土两组试样,将制备好的试样通过轴平移技术对试样进行吸湿-脱湿(吸力路径:0.1 kPa-2 kPa-4 kPa-8 kPa-16 kPa-25 kPa-50 kPa-100 kPa-200 kPa-400 kPa)。得到干湿循环条件下原状古

土与黄土的持水特征曲线。

3 结果分析

3.1 剪切特性结果及分析

图2a显示饱和原状黄土在不同竖向应力下的应力-应变曲线。在100 kPa竖向应力作用下,随着水平位移增大,剪应力先增大到峰值后逐渐平缓,达到残余状态,表现为软化型。在水平位移为1.5 mm时,剪应力达到峰值强度,在水平位移为5 mm时,剪应力逐渐稳定,达到残余强度。在200 kPa、400 kPa竖向应力作用下,剪应力随水平位移的增大不断增大,表现为硬化型。图2b显示了剪切过程中竖向位移变化曲线。原状黄土在100 kPa、200 kPa、400 kPa竖向应力下,在水平位移较小时,土体竖向未发生变形。随着水平位移增大,竖直位移逐渐增大,土体发生剪缩。在100 kPa竖向应力作用下,剪缩变形较200 kPa和400 kPa竖向应力下小。图3a显示了饱和古土在不同竖向应力下的应力-应变曲线。原状古土随着水平位移的增大,剪应

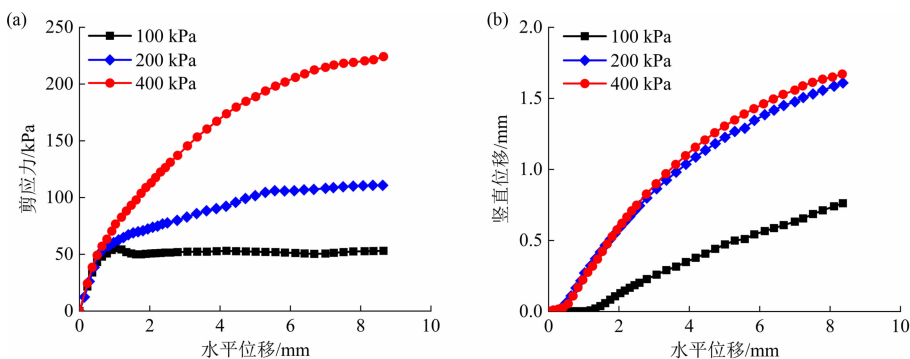


图2 黄土剪切特性:(a) 应力-应变曲线;(b) 剪切变形曲线

Fig. 2 Shear characteristics of loess:(a) stress-strain curve;(b) shear deformation curve

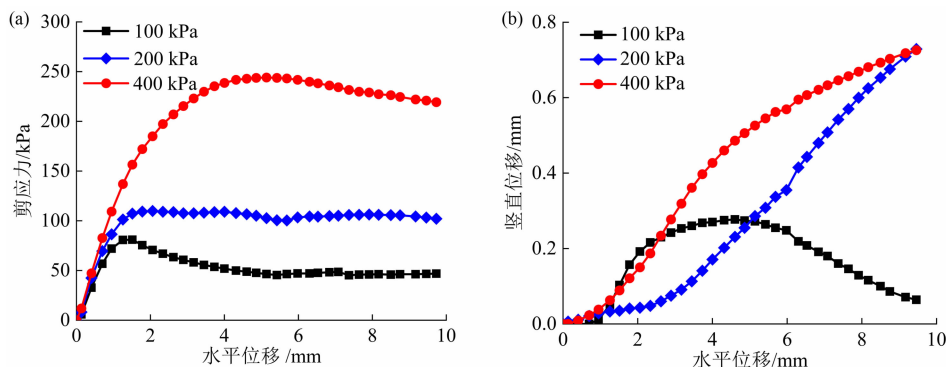


图3 古土剪切特性:(a) 应力-应变曲线;(b) 剪切变形曲线

Fig. 3 Shear characteristics of paleosol:(a) stress-strain curve;(b) shear deformation curve

力先增大到峰值后逐渐减小,最后达到残余状态,表现为软化型。随着竖向应力的增大,原状古土达到峰值剪应力所需的剪切位移也逐渐增大。图 3b 显示古土剪切过程中竖向位移变化曲线。在 100 kPa 竖向应力下,竖向位移随水平位移先增大后减小,表现出先剪缩后剪胀。在 200 kPa 和 400 kPa 竖向应力下,竖向位移随着水平位移的增大而增大,表现出减缩,并且随着竖向应力的增加,剪缩变形越大。

对比图 2 和图 3,黄土与古土的应力-应变特性和变形特性有明显差异,且在剪切过程中,古土相较于黄土竖向变形小,最大变形仅有黄土的 50%。这是由于古土较黄土孔隙率低,同时古土中更高的黏粒含量易形成黏粒聚合物,使古土较黄土结构更稳定。

通过上述剪切试验,饱和黄土和古土的强度包络线如图 4 所示。黄土与古土的有效内摩擦角 φ' 分别为 33.5° 和 32.2° 。TAN^[12] 与 YUAN^[13] 等人研究发现黏粒含量与土体内摩擦角呈负相关,古土较黄土黏粒含量大 5.3%,导致内摩擦角小于黄土。此外,黄土与古土的有效黏聚力均为 0 kPa,这主要是由于所取土样缺乏碳酸钙等矿物的胶结作用^[14]。

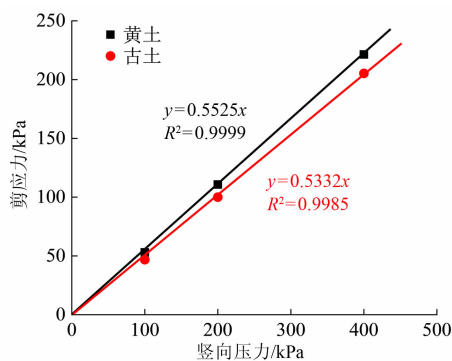


图 4 黄土与古土抗剪强度包线

Fig. 4 Loess-paleosol shear strength envelope

3.2 压缩试验结果及分析

图 5 显示原状黄土与古土在饱和与天然含水率下的压缩曲线。从结果可以看出,土体孔隙比随着竖向应力的增大而减小。每条压缩曲线可明显的区分弹性段和塑性段,弹性段和塑性段的交点为屈服应力。原状黄土在饱和以及天然含水率下,其屈服应力分别为 171 kPa 和 212 kPa。饱和与天然含水率状态下原状古土的孔隙比随竖向应力的变化趋势与原状黄土相同。从图中可以看出,古土的压缩曲

线弹塑性阶段并没有明显的边界。本文根据 SRIDHARAN^[15] 提出的方法,确定原状古土在饱和以及天然含水率情况下的屈服应力分别为 195 kPa 和 281 kPa,比黄土在天然以及饱和状态下屈服应力大 24% 和 12.3%。这与两种土沉积环境导致的物理特性差异有关。暖湿环境下沉积的古土具有更低的孔隙率,结构也更加致密。根据相关学者^[14] 的研究,较多的黏粒可提供黏粒聚合物填充,提高土体结构的稳定性;冷干环境下沉积的黄土具有更高的孔隙率,结构较为疏松,因此黄土具有较差的结构稳定性。

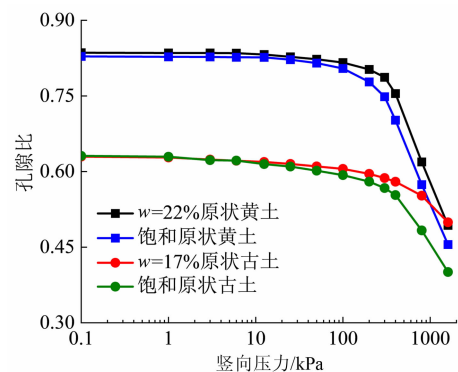


图 5 黄土与古土压缩曲线

Fig. 5 Compression curves of loess and paleosol

此外,原状黄土与古土的屈服应力随着含水率的增加而减小,这是由于以下两个方面的原因:

- (1) 原状土样中存在毛细弯液面,毛细弯液面产生的张拉应力随着含水率的增加而逐渐减小^[16]。
- (2) 原状土颗粒间存在黏土颗粒,黏土颗粒产生的胶结作用随着含水率的增加逐渐减弱^[17],导致土骨架强度降低。

3.3 持水特性试验结果及分析

图 6 为原状黄土与古土在吸湿-脱湿路径下的持水特征曲线。脱湿路径中,黄土含水率随着吸力的增大逐渐降低,且呈现明显的非线性。吸力范围在 0.1 ~ 2 kPa 时,黄土的含水率变化较小,当吸力大于 2 kPa 后,脱湿速率迅速增大,可以得到黄土的进气值为 2 kPa。吸湿路径中,随着吸力的减小黄土含水率逐渐增加,在吸力达到 0.1 kPa 时,其含水率比初始脱湿时含水量小,表现出典型的滞回特性。针对古土,脱湿路径中,随着吸力的增大含水率逐渐降低,在吸力范围 0.1 ~ 5 kPa 时,古土的

脱湿相对平缓,吸力大于 5 kPa 后,脱湿速率增大,可以得到古土的进气值为 5 kPa。吸湿路径中,古土含水率随吸力变化与黄土相似,且同样表现出滞回特性。

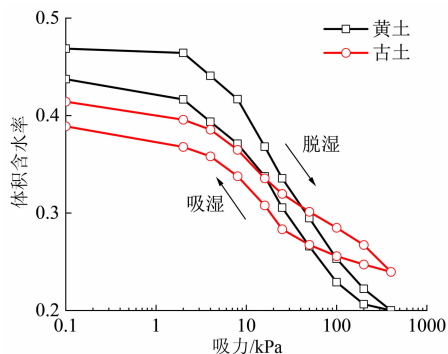


图6 黄土与古土持水特征曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curve of the loess and paleosol

根据黄土和古土的持水特征曲线,黄土的脱湿速率和吸湿速率均大于古土。这是因为黄土具有更小的干密度和更少的黏粒含量。根据 NG^[18] 等人研究,干密度越大,非饱和土的脱湿速率和吸湿速率越小。此外,黏土矿物具有较强的吸水性,在脱湿和吸湿过程中吸附于黏粒周围的水分不易散失。此外,黄土与古土的进气值分别为 2 kPa 和 5 kPa,相差近 150%。这是由于黄土具有较大的孔隙比且黄土的粗粒径含量较古土多(表 1),根据 Yang-Laplace 公式:

$$u_a - u_w = 2\sigma_{iw}/r \quad (1)$$

式中, σ_{iw} 和 r 分别为表面张力和孔隙半径。脱湿过程中,在低吸力作用下,原状黄土的粗颗粒孔隙相较于古土更大,进而导致黄土的进气值较低。

4 数值模拟

数值分析是在 GeoStudio 软件平台上开展,涉及软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 两个模块,分别计算雨水入渗和稳定性分析。涉及的理论包括非饱和土土体渗流和非饱和土土体强度理论。

4.1 渗流控制方程

基本的控制方程为二维非饱和土渗流方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2)$$

式中, H 为总水头; k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 方向的渗透系

数; Q 为边界流量(m^3/s); θ 为单位体积含水率; t 为时间(s)。

4.2 强度准则

随着非饱和土力学理论的不完善,许多学者都推导了由于水分入渗引起土体强度变化的非饱和土体强度理论。1996 年,VANAPALLI^[19] 等在前人研究的基础上,提出了非饱和土强度表达式:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \left[(\tan \varphi') \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (3)$$

式中, τ 非饱和土体抗剪强度(kPa); c' 为土的有效黏聚力(kPa); σ 为土体正应力(kPa); u_a 为孔隙水压力(kPa); φ' 为有效内摩擦角($^\circ$); u_w 为孔隙水压力(kPa); θ 为单位体积含水率; θ_s 为饱和体积含水量; θ_r 为残余体积含水量。

4.3 有限元计算模型

根据庄建琦^[20] 等人文章中的白鹿塬某滑坡的剖面图,建立高 110 m,宽 170 m,地下水位左侧 50 m、右侧 20 m,中间夹层有若干古土层的简化模型(图 7)。

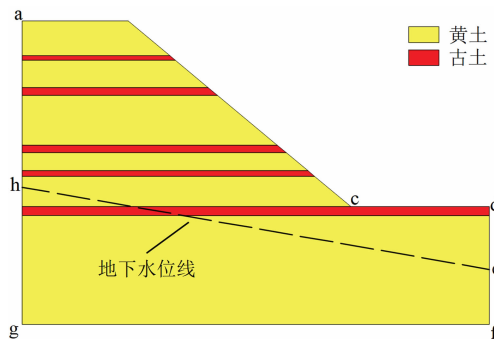


图7 边坡数值计算模型示意图

Fig. 7 Numerical model of the slope

在非饱和土渗流分析中所采用的各土层吸湿持水特征曲线根据上文试验结果拟合得到(图 8a);针对渗透系数曲线,根据赵景波^[21] 等人关于白鹿塬古土与黄土入渗研究结果,取黄土与古土的饱和渗透系数分别为 $2.48 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 和 $1.51 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,Geo-Studio 中可采用 FREDLUND 和 XING^[22] 的方法通过持水特性曲线和饱和渗透系数估算(图 8b)。从上述结果可看出,随吸力增大,土体含水率降低,渗透系数不断减小。由于孔隙结构的差异,非饱和黄土相较于古土具有较差的持水能力和较好的渗透

性。

利用该模型进行渗流分析时边界条件如下：(1) ab、bc、cd 为入渗边界，当降雨强度小于土体的入渗能力时，按流量边界处理，流量大小等于降雨强度；当降雨强度大于土体的入渗能力时，此时按照定水头边界处理，水头值等于地面高程；(2) ah、de、gf 为不透水边界；hg、ef 为水头边界，总水头分别等于 h 和 e 点的高程。

本文使用瞬态法进行降雨入渗计算，为了真实的反映土体含水状况，采用长时期小强度降雨为边界条件作用于边坡表面，求得边坡孔隙水压力分布作为初始条件^[23]。根据相关资料^[20]，白鹿塬滑坡发生前 15 d 总降水量为 196.8 mm，滑坡发生时，最大降雨强度达到 386 mm/d。因此本文采用前期平均降雨强度为 13.12 mm/d，持续时间 15 d 作为初始条件，采用降雨强度为 350 mm/d，持续 2 d 作为降雨边界条件。

4.4 结果分析

进行前期小雨（降雨强度 13.12 mm/d）15 d 后所得的孔压分布如图 9a 所示。从图中可以看出，由于前期降雨，土体处于湿润状态。边坡内孔压在古土层表面附近较大，下层古土层处孔压大小接近 0 kPa，达到饱和状态；在强降雨（降雨强度 350 mm/d）2 d 后，在古土层位置孔隙水压力升高至 0 kPa，甚至出现正孔压，表明在古土层附近出现滞水现象，这主要是由于黄土持水性能较古土差，同时古土的非饱和渗透系数相较于黄土小，因此水分将会古土层附近形成聚集，产生滞水；当降雨 2 d 后，古土层周围仍处于饱和状态，最终影响范围大约为 3.5 m 左右。随着降雨的增加，古土层的滞水逐渐联通，在该位置处积聚了显著水头压力。根据式（2），孔隙水压力增加导致非饱和土抗剪强度降低。另一方面，降雨过程中导致土体容重增大，土体的下滑力变大。因此导致边坡最有可能沿古土表面浅

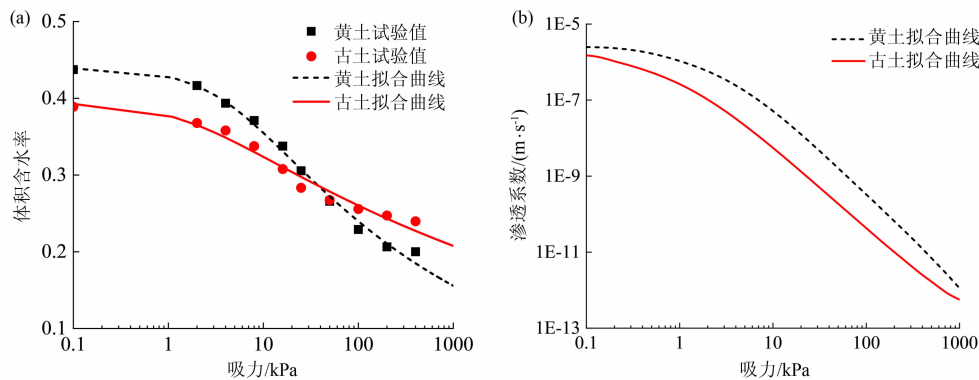


图 8 水力学特性参数拟合：(a) 持水特征曲线；(b) 渗透系数曲线

Fig. 8 Fitting parameters of hydro-mechanical properties: (a) soil-water characteristic curve; (b) permeability coefficient curve

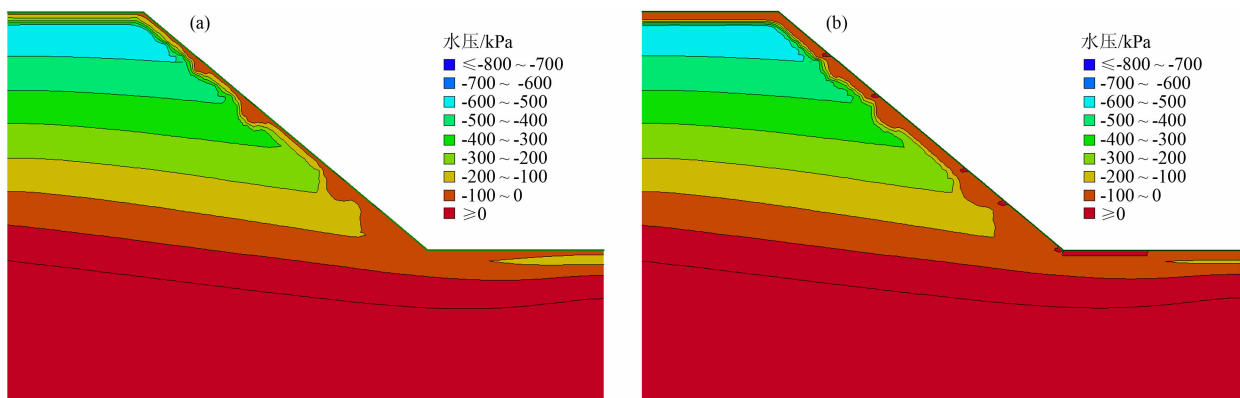


图 9 黄土-古土互层边坡孔压分布：(a) 前期小雨 15 d 孔压分布；(b) 后期强降雨 2 d 孔压分布

Fig. 9 Pore water pressure distribution of loess-paleosol interlayer slope:

(a) pore pressure distribution in the first 15 days of light rain; (b) pore pressure distribution of heavy rainfall in late period

层发生滑动。

图 10 为发生前期小雨 15 d 和强降雨 2 d 时边坡的稳定性变化,在前期小雨作用下,边坡的潜在滑动面较深,滑动面后缘在坡顶平面处,前缘位于下层古土层与坡脚交界处。此时滑坡的安全系数为 1.16,滑坡整体还较稳定。在强降雨 2 d 后,由于古土层滞水越来越明显,各土层的饱和区域逐渐连通,形成图 10b 所示浅层潜在滑动面,此时安全系数为 1.037,此时滑坡已经较危险。其主要原因是雨水入渗使土体自重增加导致土体下滑力增大,且基质吸力的降低减弱了土体抗剪强度。

同时建立了单一黄土边坡数值模型,采用与上述模型相同的边界条件,分析黄土边坡渗透特性及稳定性并对比黄土边坡与黄土-古土互层边坡之间的差异。从图 11 中可以看出,在进行前期小雨 15 d 后,黄土边坡中未出现滞水,负孔隙水压力还处于较大值,此时土体处于较稳定状态。在进行强降雨 2 d

后,沿滑坡面处土体变为饱和状态,最终影响深度为 2.01 m 左右,而含古土层边坡影响深度为 3.5 m,可见古土层的存在使得滑坡处于更不利状态。

图 12 显示了黄土边坡在发生前期小雨 15 d 和强降雨 2 d 时边坡的稳定性变化,黄土边坡在经过前期小雨以及强降雨后,其稳定性安全系数下降不明显,仅从 1.417 下降到 1.378。并且其潜在滑动面还处于较深层,表明此时边坡还处于稳定阶段。而黄土-古土互层滑坡在经历强降雨后,潜在滑动面从深层移至边坡表面。与古土-黄土互层边坡相比,单一黄土边坡在相同降雨边界条件下具有更大的安全系数。

5 结论

本文对比研究了黄土与古土物理性质、力学特性、水力学特性的差异,并对黄土-古土互层滑坡在

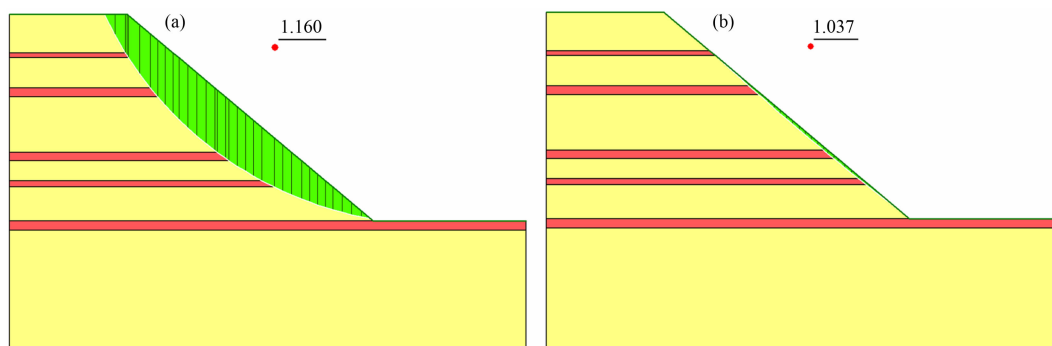


图 10 黄土-古土互层边坡稳定性:(a)前期小雨 15 d 稳定性;(b)后期强降雨 2 d 稳定性

Fig. 10 Stability of loess-paleosol interlayer slope;

(a) stability of light rain for 15 days; (b) the stability of heavy rainfall in late stage for 2 days

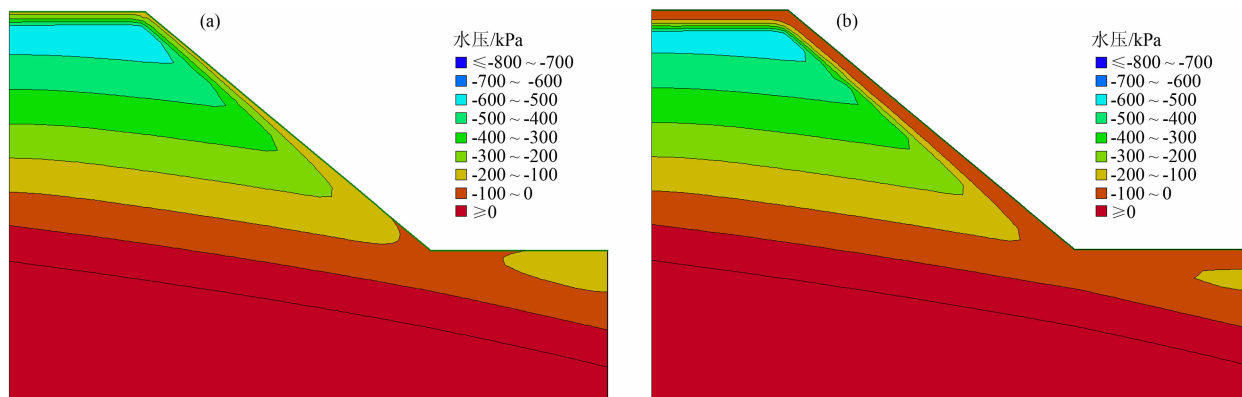


图 11 黄土边坡孔压分布:(a)前期小雨 15 d 孔压分布;(b)后期强降雨 2 d 孔压分布

Fig. 11 Distribution of pore pressure in loess slope;

(a) pore pressure distribution in the first 15 days of light rain; (b) pore pressure distribution of heavy rainfall in late period

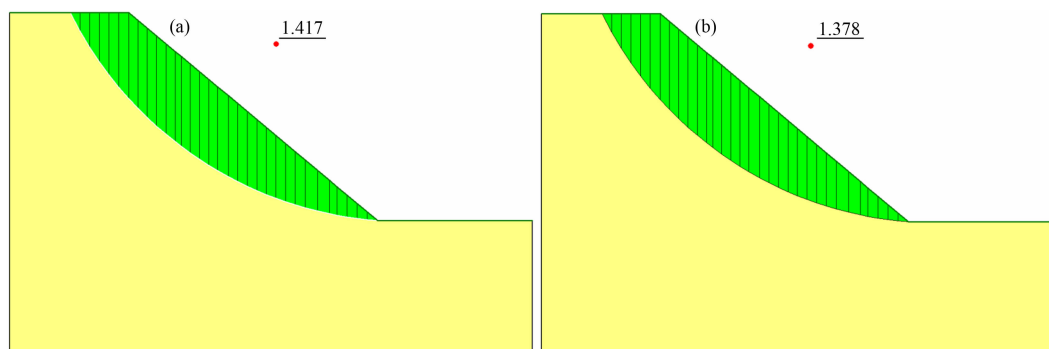


图 12 黄土边坡稳定性:(a)前期小雨 15 d 稳定性;(b)后期强降雨 2 d 稳定性

Fig. 12 Stability of loess slope:(a) stability of light rain for 15 days;(b) the stability of heavy rainfall in late stage for 2 days

降雨条件下的渗流及稳定性分析,揭示了黄土-古土互层滑坡中的滞水效应及其对滑坡的影响机理。主要获得以下结论:

白鹿塬古土壤与黄土的物理特性有所差异,古土壤的干密度、液限塑限及黏粒含量都大于黄土。在水-力学特性方面,黄土与古土的剪切变形特性差异明显;在强度方面,古土与黄土的黏聚力均为 0,饱和古土的内摩擦角比黄土小 3%;由于孔隙结构的差异,非饱和黄土相较于古土具有较差的持水能力和较好的渗透性。

由于黄土与古土水-力学特性的差异,在降雨条件下,在古土层附近易形成滞水现象并逐渐连通,坡体抗剪强度下降而容重不断增加,导致滑坡发生。相较于单一黄土滑坡,黄土-古土互层滑坡的稳定性更差。

参考文献 (References)

- [1] PYE K. The nature, origin and accumulation of loess [J]. Quaternary Science Reviews, 1995, **14**(7-8): 653-667.
- [2] HOU Kai, QIAN Hui, ZHANG Qiying, et al. Influence of Quaternary paleoclimate change on the permeability of the loess-paleosol sequence in the Loess Plateau, northern China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, **45**(4): 862-876. DOI: 10.1002/esp.4779
- [3] 孙萍萍, 张茂省, 程秀娟, 等. 黄土高原地质灾害发生规律 [J]. 山地学报, 2019, **37**(5): 737-746. [SUN Pingping, ZHANG Maosheng, CHENG Xiujuan, et al. On the regularity of geological hazards on the Loess Plateau in China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(5): 737-746] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000464
- [4] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(3): 433-454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(3): 433-454]
- [5] 王念秦, 张倬元. 黄土滑坡灾害研究 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2005. [WANG Nianqin, ZHANG Zhuoyuan. Study on loess landslide disasters [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005]
- [6] 雷祥义. 黄土地质灾害的形成机理与防治对策 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014. [LEI Xiangyi. The cause of formation, prevention and cure of geological disasters of loess [M]. Beijing: Peking University Press, 2014]
- [7] 曹春山, 吴树仁, 潘懋, 等. 古土壤力学特性及其对黄土滑坡的意义 [J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(5): 127-132. [CAO Chunshan, WU Shuren, PAN Mao, et al. Mechanics characteristics of paleosol and its implication to loess landslide [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, **43**(5): 127-132] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.05.19
- [8] WANG Wei, WANG Yu, SUN Qiming, et al. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity of a loess slope in the south Jingyang plateau, China [J]. Engineering Geology, 2018, **236**: 70-78. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.002
- [9] 赵志强, 戴福初, 闵弘, 等. 原状黄土-古土壤中水分入渗过程研究 [J]. 岩土力学, 2021, **42**(9): 2611-2621. [ZHAO Zhiqiang, DAI Fuchu, MIN Hong, et al. Research on infiltration process in undisturbed loess-paleosol sequence [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(9): 2611-2621] DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0358
- [10] GB/T50123-2019. 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [GB/T50123-2019. Standard for geotechnical testing method [S]. Beijing: China Planning Press, 2019]
- [11] GIBSON R E, HENKEL D J. Influence of duration of tests at constant rate of strain on measured "drained" strength [J]. Géotechnique, 1954, **4**(1): 6-15.
- [12] TAN Chengxuan, SUN Weifeng, MENG Jing, et al. Research on loess-paleosol engineering geology features from the borehole cores

- of a typical section in Baoji area, Shaanxi province, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(5): 4469–4491. DOI: 10.1007/s12665-015-4468-6
- [13] YUAN Weina, FAN Wen, JIANG Chengcheng, et al. Experimental study on the shear behavior of loess and paleosol based on ring shear tests [J]. Engineering Geology, 2019, **250**: 11–20. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.01.007
- [14] NG C W W, MU Q Y, ZHOU C. Effects of soil structure on the shear behavior of an unsaturated loess at different suctions and temperatures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, **54**: 270–279. DOI: 10.1139/cgj-2016-0272
- [15] SRIDHARAN A, ABRAHAM B M, JOSE B T. Improved technique for estimation of preconsolidation pressure [J]. Géotechnique, 1991, **41**(2): 263–268.
- [16] WHEELER S J, SHARMA R S, BUISSON M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behavior in unsaturated soils [J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 41–54.
- [17] MUNOZ-CASTELBLANCO J, DELAGE P, PEREIRA J M, et al. Some aspects of the compression and collapse behaviour of an unsaturated natural loess [J]. Géotechnique Letters, 2011, **1**(2): 17–22. DOI: 10.1680/geolett.11.00003
- [18] NG C W W, PANG Y W. Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(6): 1252–1264.
- [19] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(3): 379–392.
- [20] 庄建琦, 彭建兵, 李同录, 等. “9·17”灞桥灾难性黄土滑坡形成因素与运动模拟[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(4): 747–754. [ZHUANG Jianqi, PENG Jianbing, LI Tonglu, et al. Triggered factors and motion simulation of “9·17” Baqiao catastrophic landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(4): 747–754] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2015.04.024
- [21] 赵景波, 邵天杰, 牛俊杰. 西安白鹿塬黄土渗透性与含水条件[J]. 地理研究, 2009, **28**(5): 1188–1196. [ZHAO Jingbo, SHAO Tianjie, NIU Junjie. Permeability and water-bearing conditions of loess in Bailu tableland in the eastern suburbs of Xi'an [J]. Geographical Research, 2009, **28**(5): 1188–1196]
- [22] FREDLUND D G, XING A Q, HUANG S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 533–546.
- [23] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强—历时曲线的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(3): 872–886. [ZHAN Liangtong, LI He, CHEN Yunmin, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rain-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(3): 872–886] DOI: 10.16285/j.rsm.2012.03.016

Stability Analysis of Loess-Paleosol Interlayer Slope

MU Qingyi¹, CHEN Junfeng¹, DUAN Yifei², ZHANG heng², SUN Qing^{1*}

(1. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710005, China)

Abstract: The instability mechanism of loess-paleosol interbed slope is different from that of single loess slope due to the huge difference in hydro-mechanical properties between loess and paleosol. Previous studies on landslides in loess region mostly addressed a problem of loess slope, but few attention was paid to the mechanism of rainfall-induced instability of loess-paleosol interlayer slope. In this paper, the hydro-mechanical properties of intact paleosol and loess samples were tested in laboratory; then it entered the obtained hydro-mechanical parameters into numerical models of both loess-paleosol interlayer slope and loess slope for comparison of their failure mechanisms. Laboratory tests found that the friction angle of saturated paleosol was 3%, smaller than that of loess, with the cohesions of the two soils at zero. This is quite a fact that the clay content of paleosol was 5.3%, larger than that of loess, and the two soils lacked cementing minerals such as calcium carbonate. Unsaturated loess had lower water retention capacity and higher permeability than unsaturated paleosol as a result of differentiation in pore structure.

Numerical results suggested that perched water accumulated near paleosol layer, and it gradually connected under rainfall infiltration, which could significantly reduce the safety factor of the slopes. The mentioned water retention in interbed could be attributed to the differences in hydraulic parameters (water retention and permeability properties) between loess and paleosol. In addition, under the same rainfall condition, loess-paleosol interlayer slope was more prone to failure than loess slope. This research provides a new insight into the failure mechanism of loess-paleosol interbed slope, and it make a reliable reference to research peers or landslide control.

Key words: Loess-Paleosol Interlayer Slope; water retention characteristic; strength characteristics; stability analysis; numerical simulation