

文章编号: 1008-2786-(2020)1-073-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000492

灌溉诱发突发性黄土滑坡机理研究

周 飞^{1,2}, 许 强^{2*}, 元 星², 巨袁臻², 严 越¹

(1. 四川省地质工程勘察院, 成都 610072; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘 要: 系统揭示黑方台突发性黄土滑坡物理力学机理, 对滑坡防治具有重要的作用。自上世纪六十年代年黑方台常年的农业灌溉诱发了大量 20 ~ 40 m 厚的饱和突发性黄土滑坡。本研究在野外调查的基础上, 通过分析滑坡的变形破坏特征, 针对分布范围广、危害性较大的突发性黄土滑坡, 利用室内 GDS 三轴试验和模型试验, 分析研究了饱和黄土的应力应变特性及突发性黄土滑坡的力学机制。三轴试验结果表明, 当围压小于 300 kPa 时, 饱和黄土可产生完全液化, 并处于流塑状态; 当围压大于 300 kPa 时, 饱和黄土仅产生部分液化, 仍具有一定的抗剪强度。饱和黄土的应力—应变模式均表现为强烈的应变软化—剪缩型, 并具有一定的稳态特性。模型试验表明突发性黄土滑坡的变形破坏过程可大致分为底部浸水饱和—毛细水上升—持续蠕动变形—突发性破坏 4 个阶段。斜坡发生突发性破坏时, 孔隙水压力激增, 但总应力仍大于孔隙水压力, 黄土滑坡发生部分液化, 饱和黄土仍具有一定的强度, 为突发性黄土滑坡发生提供了应力和能量积累的力学条件。研究从有效应力原理的角度阐述了突发性黄土滑坡的力学机理, 可以为滑坡的防治治理提供一定的理论依据。

关键词: 突发性黄土滑坡; 三轴试验; 模型试验; 滑坡机理

中图分类号: P694

文献标志码: A

甘肃省永靖县黑方台自上世纪 60 年代以来新建和扩建了大量的农业灌溉工程。大量的灌溉水沿着黄土的垂直节理、大孔隙和黄土洞穴下渗^[1]。台塬特殊的多层坡体结构(图 1), 使得下渗的农业灌溉水, 在相对隔水的粉质粘土层上部形成一定厚度的饱和黄土层, 台塬周边临空条件较好, 造成台塬四周诱发了大量的滑坡^[2]。黑方台滑坡群, 根据其滑动面位置可分为黄土—基岩滑坡和黄土滑坡^[3](图 2), 其中黄土滑坡根据其发生变形速度可分为缓慢塑流变形的黄土泥流和突发性高速远程黄土滑坡^[4]。突发性高速远程滑坡具有持续时间短、滑动速度快、滑动后运动距离长等特点给当地居民的生

命财产安全造成较大的威胁, 因此对该类滑坡的形成机理和破坏模式开展相关理论研究, 具有重要的社会意义和经济意义。

台塬上农业灌溉水下渗, 导致地下水位升降变动, 饱和黄土层厚度和坡体浸润比例也随地下水位的升降而变化。通过对多期 Google Earth 影像、DEM 数字高程模型、IKONOS 影像的对比分析, 揭示了地下水位与滑坡具有明显的相关性^[5-7], 从宏观上分析研究了地下水位与滑坡变形破坏的规律。同时, 也有学者认为塬坡稳定性与“坡体浸润比”具有一定的关系, 地下水位上升, 浸润带变厚, 孔隙水压力重分布, 基质吸力减小, 抗剪强度降低^[8], 导致台

收稿日期 (Received date): (Received date): 2019-03-08; 改回日期 (Accepted date): 2020-01-14

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41630640); 国家重点基础研究发展计划 (2014CB744703)。[National Natural Science Foundation of China (41630640); National Key Basic Research Program of China (2014CB744703)]

作者简介 (Biography): 周飞 (1988-), 男, 四川达州人, 工程师, 主要研究方向: 地质灾害预测评价及防治处理。[ZHOU Fei (1988-), male, born in Dazhou, Sichuan province, M. SC. candidate, research on geological hazard evaluation and prevention] E-mail: 363845842@qq.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 许强 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 滑坡灾害评价、预测及防治处理。[XU Qiang (1968-), male, Ph. D., professor, research on evaluation, prediction, prevention and treatment of landslide hazard] E-mail: xq@cdu.edu.cn

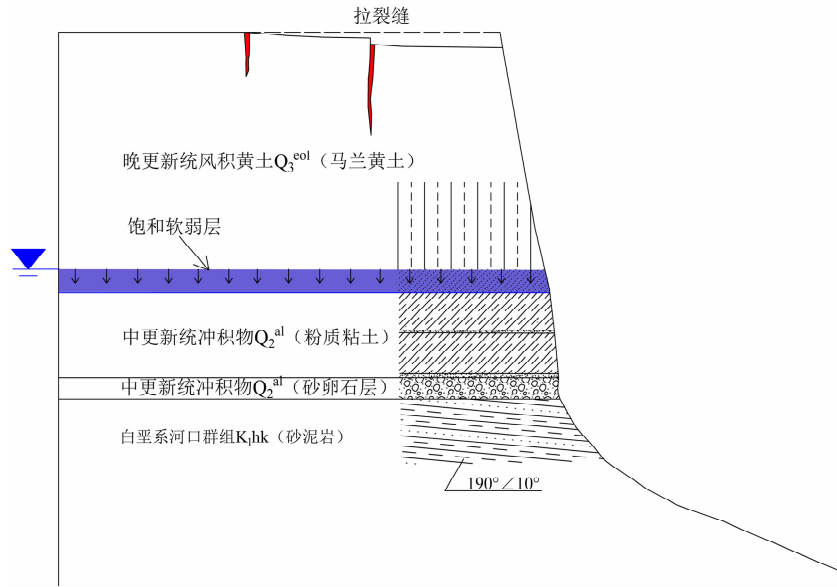


图 1 坡体结构

Fig. 1 Structure of slop

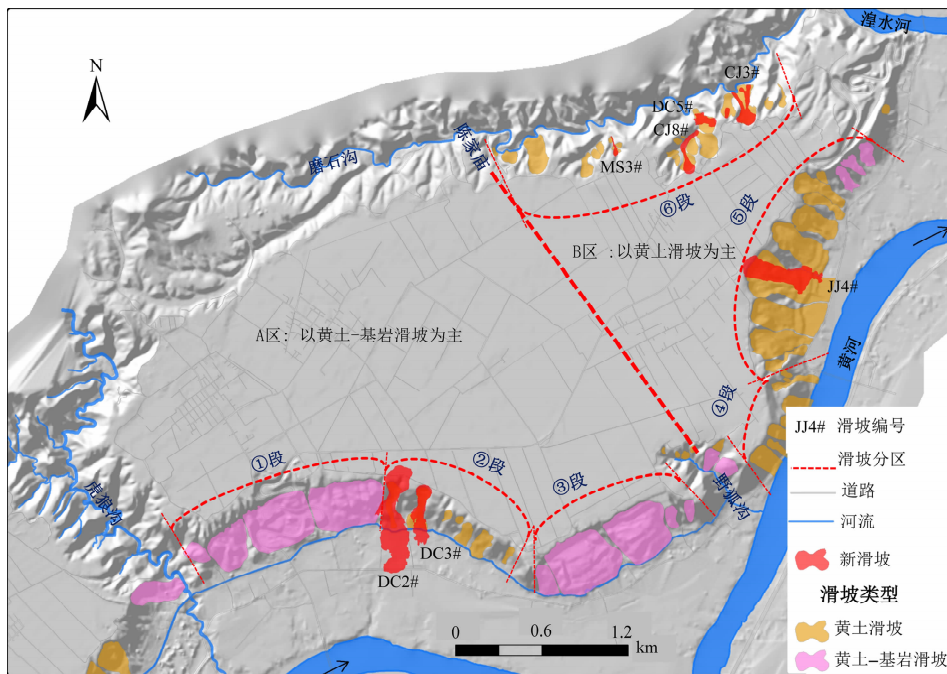


图 2 黑方台滑坡分布

Fig. 2 The landslide distribution area in Heifangtai terrace

源斜坡产生大量的黄土滑坡。“基质吸力减小、抗剪强度降低”这一理论力学观点,也被其他学者从室内试验获得的土水特征曲线和 SEM 扫描图像的非饱和微观结构特征方面得到了验证^[9-12]。以上研究可以看出,饱和黄土层的物理力学特征对黑方台滑坡群具有控制性的作用。为了进一步的研究黑方台饱和黄土变形过程的应力—应变特征,揭示滑坡的启动和变形破坏过程。周跃峰^[13]、金艳丽^[14]

等通过室内三轴试验提出了黑方台饱和黄土具有典型的应变软化和静态液化特征,并根据其应力—路径建立了状态分界线和稳态分区。滑坡的运动全过程特征^[15],一直以来是学者们研究的重点和难点,黑方台滑坡也不例外。有学者利用回弹试验和室内模拟试验,提出了基岩表层软弱带对黄土—基岩滑坡的控制作用^[16],同时还有学者利用离心机试验、室内模型和数值模型试验对黄土滑坡的变形、滑动

破坏全过程,以及结合滑坡产生过程中的含水率、孔压等的变化特征对滑坡进行相关的研究,揭示并模拟了黄土滑坡运动特征^[17-21]。

尽管已有学者从宏观变形、力学特征、室内试验和物理模拟对黑方台滑坡和饱和黄土特征进行过相关的研究,但并未针对性的阐述和提出黑方台突发性远程黄土滑坡的机理,同时大多研究也集中在某个方向或手段,未曾从野外调查、室内试验、物理模拟等几个方面系统的针对突发性黄土进行分析研究。因此,本文在野外调查的基础上,利用三轴饱和GDS试验结合室内模型试验,从有效应力原理出发,揭示突发性黄土滑坡发生的力学机制和应力积累的前提条件,并对其变形破坏过程和成因机理进行深入的分析和阐述。

1 室内三轴试验

1.1 试样仪器、试样及试验过程

本次试验所采用的试验设备为英国进口的GDS饱和一非饱和三轴试验系统,该套系统可采用GDSLAB软件系统自动量测,控制精度高,并能自动记录数据,操作简单。试验黄土采自于黑方台焦家崖头的 Q_3^{col} 马兰黄土。本次试验采用现场取回的原状马兰黄土通过控制其级配、含水量和干密度等重塑,并分层填实制备而成,试样尺寸为 $10\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (高 \times 直径),均采用五层湿夯法进行制样,每层填筑 2 cm ,且下层土层的接触面应采用制样刀刮毛后,填筑上层土样至指定高度,夯击完最后一层后,利用小刀将试样两端多余土样切掉、削平,并记录试样的高度和直径(测量3次后求平均值),同样称量3次试样质量求平均值后,记录试样质量(图3),制备试样的力学参数见表1。

表1 黄土主要物理力学参数

Tab.1 The main physical and mechanical parameters of loess

试样 类型	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{m}^3)$	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	比重 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$
原状样	1.38	1.46	1.04	2.69	26.89	16.78
重塑样	1.46	7.72	1.04	2.69	28.12	17.45

黑方台黄土由于台塬上的灌溉水下渗,在粉质粘土相对隔水层形成一层饱和层,因此室内试



图3 三轴试验试样

Fig.3 The sample of GDS triaxial tests

验前应对试样进行饱和处理。由于黄土本身具有较强的结构性和水敏性,其饱和方法不同于一般的粉土和砂土。参考已有研究结果和前人试验^[7,14],本次试验采用通 CO_2 —水头饱和一反压饱和。在无气蒸馏水饱和前,先匀速通4个小时的 CO_2 ,以排除试样中的空气,并保证试样结构不遭到破坏。然后利用在恒定水头压力下,无气蒸馏水渗流12个小时以上,测其 B 值(B 值为孔隙水压力增量与围压增量之比),一般情况,通 CO_2 再无气蒸馏水自然渗流后,其试样 B 值能够达到0.9左右,此时试样未完全饱和,往往需要通过逐级施加围压与反压,使试样完全饱和(B 值达到0.98以上),试验采用每级增加 30 kPa ,并在每级压力下保持 30 min ,为保证反压不把试样结构破坏,施压过程中,始终保持围压与反压有 15 kPa 的压差,并逐级测定 B 值,至最终试样的 B 值达到0.99左右,表示试样饱和完成,随后打开排水阀门在预先设定的围压下进行排水固结,固结完成后关闭排水阀门进行不排水剪切试验。试验中的剪切速率按应变速率 0.1 mm/min 控制,直至试样破坏(当试样轴向应变达到25%或者试样完全破坏后停止试验)。

1.2 试验结果分析

根据有效应力原理,饱和黄土主要由固体颗粒构成的土骨架和充满其间的水组成,而引起土体体积的压缩和抗剪强度分别取决于固体颗粒间充填的水和由土颗粒承受的有效应力 $\sigma' = \sigma_{\text{总}} - \sigma_{\mu}$ 。本文主要对黑方台黄土的孔隙水压力和有效应力随围压的变化规律进行分析和阐述。

(1) 孔压—应变的关系曲线

通过自动采集不同围压下孔隙水压力随应变增加的变化曲线(图4)。总体上,各个围压下孔压随轴向应变的增加而逐渐增大,应变在3%范围内孔压急剧增加,达到总应变的80%后,表现出强烈的剪缩性,而当轴向应变达到5%左右后孔压逐渐趋于稳定,直至总应变达到15%左右后,应变基本完全稳定,表现出一定的饱和稳态特性。

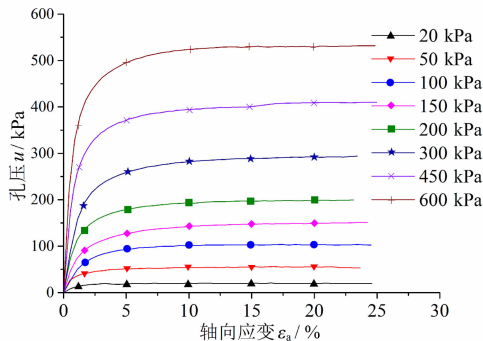


图4 孔压—应变曲线

Fig. 4 The curve of pore pressure – strain

(2) 有效应力—应变的关系曲线

通过试验过程中土样的有效应力变化(图5),可以看出有效轴压和围压在各个围压下均随应变的增加而逐渐减小。围压在300 kPa以上时,试样的有效应力(有效围压和有效轴压)均大于0,说明饱和土体能够保持一定的物理形态,而当围压小于300 kPa后试样有效应力小于0,说明饱和试样处于近似无压力状态,此时土体呈塑流状态^[22]。

(3) 应力路径

饱和黄土试样的应力路径试验,有助于分析研

究其在持续蠕变状态下的应力特征,进而分析黑方台黄土在浸水后变形特征。在有效应力的莫尔应力圆中,顶点的移动轨迹代表土体中最大主应力和最小主应力的变化过程,而偏应力 $(p - q)/2$ 的大小决定了土体的抗剪强度(图6)。由图中可以看出,偏应力在应变约为2%时,即可达到峰值,由此表现出强烈的应变强化特性,而后偏应力急剧减小,土体抗剪强度减小。同样可以看出围压在300 kPa以下时,土样最终偏应力可减小到0,试样完全失去强度,而当围压大于300 kPa时,尽管土样存在一定的应变软化特征,但偏应力仍大于0,说明土体仍具有一定的抗剪强度。从试样过程中的应力路径(图7)也可同样看出,饱和黄土具有一条稳定的强度包络线,并且可以看出围压在300 kPa以下,饱和黄土试样的最终稳态强度小于0,而300 kPa以上其稳态强度大于0。

由上述应力路径试验可以看出,黑方台饱和黄土在围压小于300 kPa时,其稳态强度小于0,土体处于塑性流动状态,而当围压大于300 kPa时,尽管试样也同样表现出一定的饱和软化特性,但其稳态强度仍大于0,由此表明高围压下的饱和黄土仍能抵抗一定的变形,从而为突发性黄土滑坡提供了力学条件^[2]。

2 室内模型试验

前述三轴试验结果已经表明,黑方台饱和黄土破坏时的有效应力大于0是突发性滑坡发生的必要条件之一。为此采用室内模型试验,以探索突发性

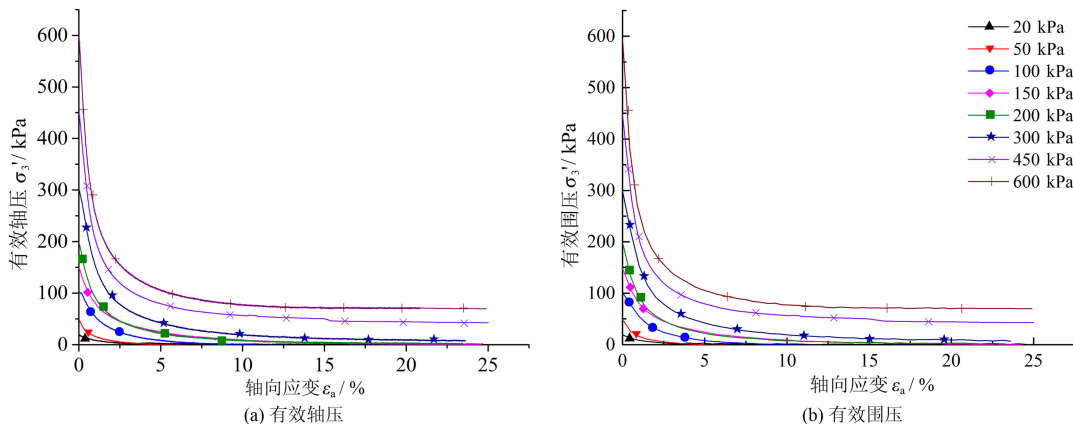


图5 有效应力—应变曲线

Fig. 5 The curve of effective stress – strain

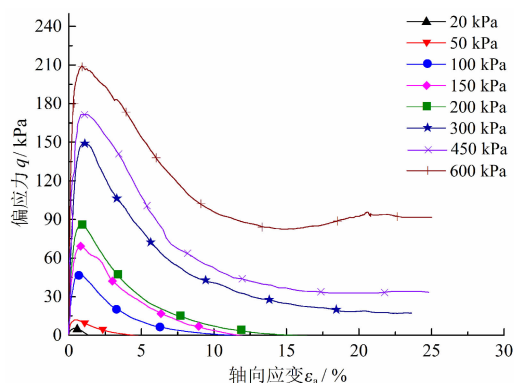


图6 偏应力—应变曲线

Fig. 6 The curve of deviatoric stress - strain

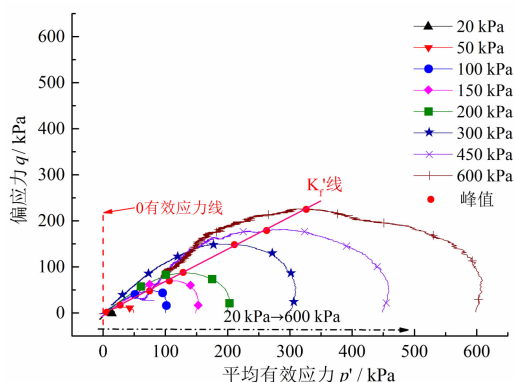


图7 应力路径曲线

Fig. 7 The curve of stress path

黄土滑坡发生的机理。

2.1 模型的制作与试样

试验模型箱为自主设计并定做,模型尺寸为80 cm × 50 cm × 80 cm(长 × 宽 × 高),模型斜坡顶部长30 cm,底部长约64 cm,其临空面坡度55°,模

型和斜坡尺寸详见图8a。模型四周采用1 cm厚高透有机玻璃板(利用玻璃胶和螺丝固定在角钢上),作为可视窗口,以观察、记录斜坡变形破坏的全过程,其底部采用钢板,四角采用角钢和底部钢板焊接固定。模型后侧制作30 cm × 10 cm × 80 cm(长 × 宽 × 高)的蓄水池,内侧有机玻璃板上均匀分布直径5 mm泄水孔,外侧钢板每隔5 cm,均匀布置水位控制孔3个,以保证饱和黄土中存在稳定的地下水,同时在靠摄像机侧用油性笔均匀的画正方形方格网,便于宏观上观察斜坡整体运动情况(图8)^[23]。

制作模型选用的黄土,同三轴试验采用的重塑黄土。斜坡模型的制作采用湿法分层夯实,通过控制每层土体干密度为1.35 g/cm³,从而计算出相应每层共需的黄土试样质量,然后采用夯锤均匀击实。为了减小模型箱壁和黄土之间的边界效应,在模型箱内壁均匀涂抹凡士林进润滑处理。根据野外现场调查,台塬斜坡底部饱和黄土具有3~4 m的毛细浸润带。为了模拟野外的饱水带、毛细带及干燥黄土带,试验时利用模型箱后部的水位控制孔,控制斜坡底部10 cm为饱水带,再在斜坡顶上放置木板以隔离毛细带,并在木板上放置8块19.4 kg的铸铁以模拟干燥黄土。为监测斜坡的变形破坏、含水率及孔压状态,在斜坡模型底部埋置孔隙水压力计、土壤水分传感器以及配置相应的数据采集系统。为了记录分析斜坡变形破坏特征以及破坏后的运动过程,试验时斜坡正前方还采用多点位移计和数码摄像机进行全程采集三维位移数据和录像。

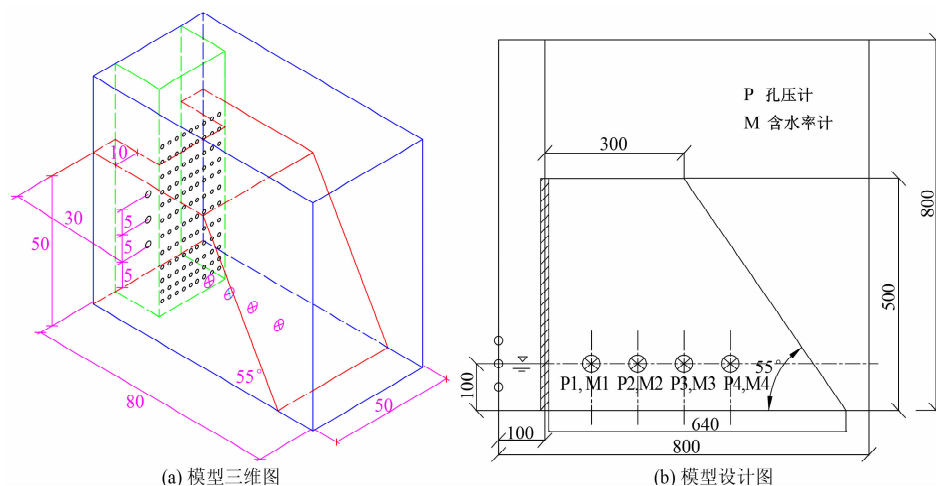


图8 物理模型试验(单位:cm)

Fig. 8 The physical model test

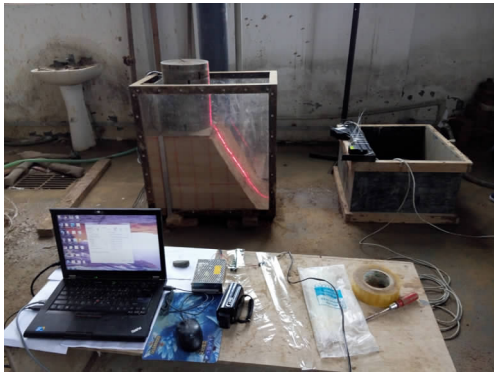


图9 模型斜坡

Fig. 9 Physical simulation model

2.2 试验结果分析

(1) 变形破坏特征

通过斜坡模型的全程摄像和现场观察可知,黄土斜坡的变形破坏过程大体可分为底部浸水饱和—毛细水上升—持续蠕变变形—突发性破坏。

①底部饱水软化:随着试验的进行,水通过斜坡后壁有机玻璃板上的泄水孔逐渐浸润斜坡,并在斜坡底部形成一定厚度饱水带。

②毛细水上升:整个斜坡在毛细水的作用下,逐

渐被完全浸润。模型斜坡在黄土遇水软化后,强度降低,产生一定的沉降,并伴随斜坡体内开始产生裂缝。

③持续蠕变变形:斜坡整个被浸润后,在其自身重力和上覆铁块的加载作用下,产生向前缘的持续蠕变变形,这一过程伴随着斜坡局部掉块、裂缝持续发展和沉降加大。

④变形破坏:随着斜坡变形的持续增大,超过其临界抗剪强度后,斜坡产生突发性整体滑动破坏。

(2) 位移、含水率和孔压特征

①位移特征

通过斜坡底部(相对高程 25 cm)、中部(相对高程 35 cm)和顶部(相对高程 45 cm)三处的多点位移计监测数据可以看出,斜坡在第一阶段的浸水饱和过程中,产生了少量的水平和竖直向变形。在随着毛细水上升的第二阶段中,斜坡水平和竖直变形位移基本维持不变。斜坡第三阶段完全浸水后,产生持续水平和竖直方向的位移,直到最终斜坡产生突发性破坏,相应的水平和竖直位移突变。

②含水率特征

通过记录试验过程中的土体含水率变化曲线

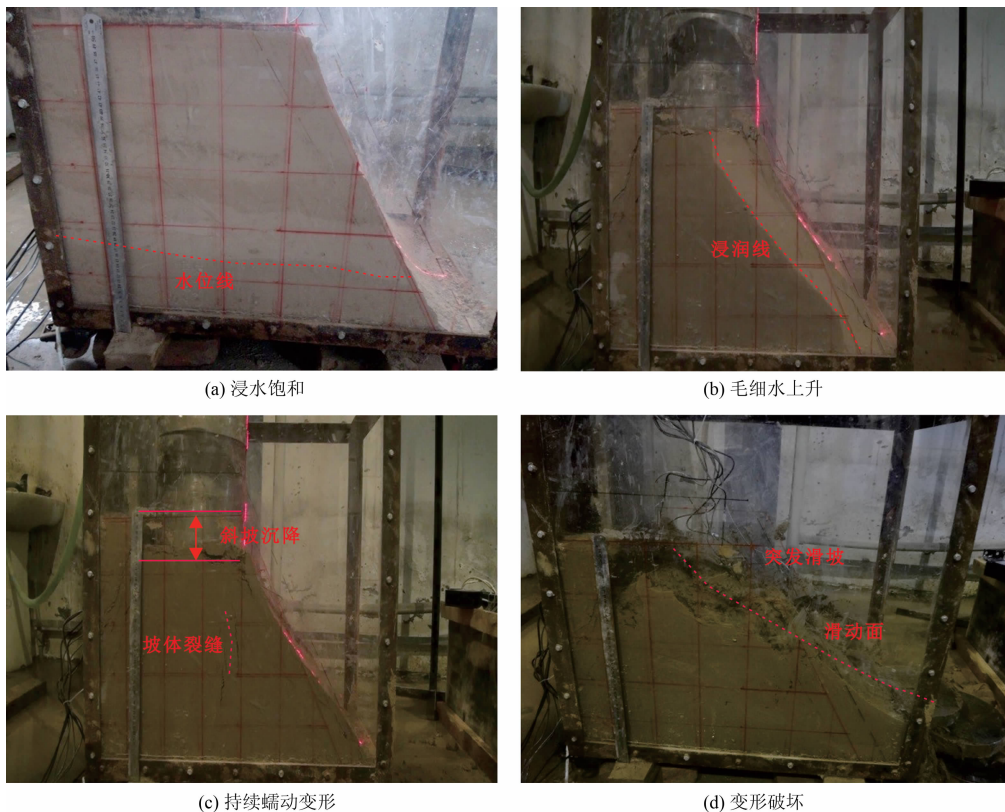


图10 斜坡变形破坏特征

Fig. 10 The deformation and failure of the simulation model

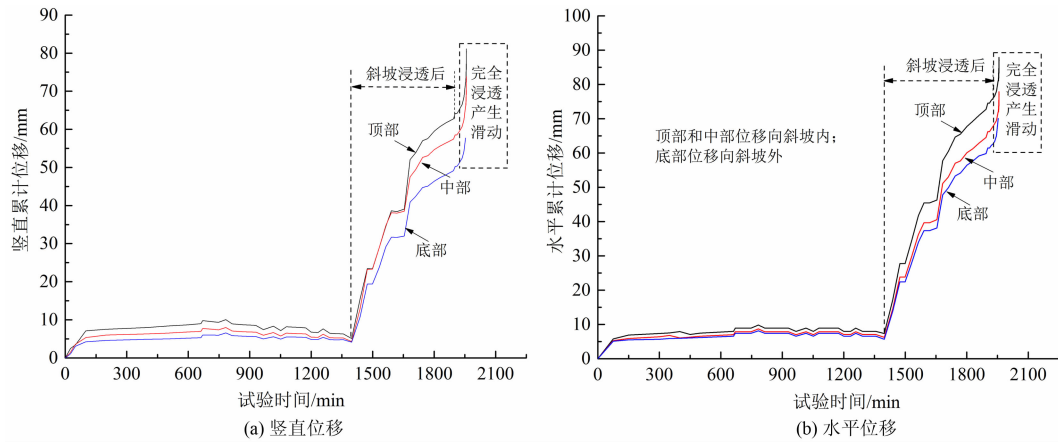


图 11 斜坡变形位移特征

Fig. 11 The characteristics of deformation and displacement

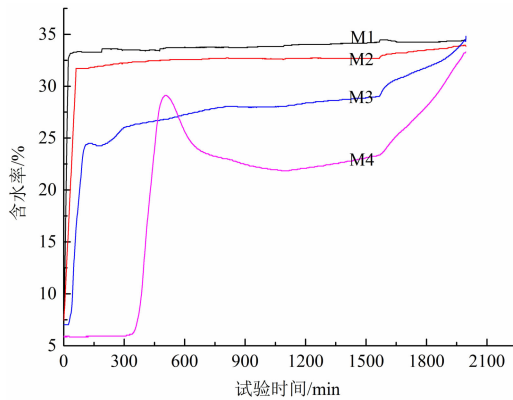


图 12 含水率变化曲线

Fig. 12 The characteristics of moisture content

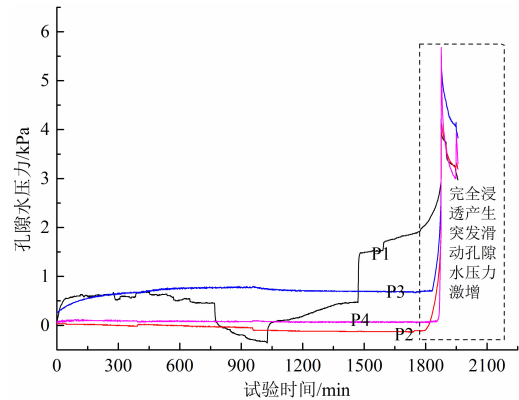


图 13 孔压变化曲线

Fig. 13 The characteristics of pore water pressure

(图 12) 可知, 试验开始后斜坡底部含水率急剧增加, 直至底部完全饱和后便趋于稳定, 同时可以看出斜坡在变形破坏时含水率也未出现突变现象。

③孔压特征

通过埋置在斜坡底部的孔压传感器监测数据 (图 13) 可以看出, 斜坡产生滑动破坏前的时间里其孔压曲线并没有表现出很强的突变性。尽管随着斜坡产生的蠕动变形, 孔压产生了一定的局部波动变化, 但仍保持总体稳定状态, 直到最后斜坡在产生突发性滑动时, 所有传感器处的孔压均出现急剧上升的现象。因此, 坡体内孔隙水压力的激增, 有效应力的减小是滑坡产生的原因之一。

根据加载的铸铁重量、饱和黄土自重以及斜坡截面面积可计算出底部滑动面处的上覆总重为 10.97 kPa (饱和黄土自重 + 上覆铁块重)。室内三轴试验得出的饱和黄土内摩擦角, 大致计算出斜坡

侧压力系数取 $0.79(1 - \sin\varphi)^{[2,24]}$, 从而得出传感器处的围压约为 8.67 kPa。根据斜坡破坏时监测到的最大孔压为 5.7 kPa, 再利用有效应力原理, 计算出有效围压为 2.97 kPa > 0 , 满足斜坡产生突发性滑动的力学条件。由此可以看出浸水后的饱和黄土并未产生完全液化, 仍存在一定的稳态强度, 能够产生斜坡变形过程的应力积累, 当应力积累到一定程度后, 应力释放, 斜坡产生突发性破坏。因此模型斜坡较好的模拟和解释了突发性黄土滑坡的变形破坏过程和力学机制, 同时这一模型试验得到的结论与前述三轴试验结论一致^[18]。

3 结论

试验利用 GDS 三轴仪 (CU 试验) 和室内模型试验, 主要分析研究了饱和黄土应力—应变特征及应力路径, 并通过物理模型试验模拟研究了黄土滑坡

的变形破坏过程以及含水率和孔压变化特征,主要得到以下结论:

(1)CU 试验中,饱和黄土孔隙水压力在应变小于 3% 时急剧增加,而在应变达到 15% 后逐渐趋于稳定。有效应力(有效轴压和有效围压)均表现出先急剧减小后趋于稳定,揭示了饱和黄土具有强烈的应变软化和一定的稳态特征。

(2)饱和黄土的强度(偏应力)表现出较小应变下的急剧增大后迅速减小的应变软化特征。同时其强度和应力路径显示围压在 300 kPa 以上,饱和黄土具有一定的强度,而围压小于 300 kPa 时饱和黄土完全液化,土体处于塑性流动状态。

(3)通过室内模型试验,可以将黑方台突发性黄土滑坡变形的破坏过程大致可分为:底部浸水饱和—毛细水上升—持续蠕动变形—突发性破坏 4 个阶段。

(4)突发性滑坡发生时,斜坡位移和孔隙水压力急剧增加,土体产生部分静态液化,但饱和黄土仍具有一定强度,能够产生变形过程中的能量积累,从而为突发性滑坡发生提供了力学和能量条件。

参考文献 (References)

- [1] NIEMIEC D, MARSCHALKO M, YILMAZ I, et al. Surface runoff on loess: an example of a commonly overlooked hazardous process from northeast Czech Republic [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(8):5841–5851
- [2] 周飞, 许强, 袁袁臻, 等. 黑方台黄土斜坡变形破坏机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, **44**(1):157–163. [ZHOU Fei, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. Study on the deformation and failure mechanism of loess slope in Hei Fangtai [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, **44**(1):157–163]
- [3] 李骅锦, 许强, 何雨森, 等. 甘肃黑方台滑坡滑距参数的 BP 神经网络模型 [J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(4):141–146 + 152. [LI Huajin, XU Qiang, HE Yusen, et al. BP neural network model for analyzing the impact factors of the travel distance of the Heifangtai landslide in Gansu [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, **43**(4):141–146 + 152]
- [4] 许领, 戴福初, 闵弘. 黄土滑坡研究现状与设想 [J]. 地球科学进展, 2008, (3):236–242. [XU Ling, DAI Fuchu, MIN Hong, Research Progress and Some Thoughts on LoessLandslide [J]. Advances in Earth Science, 2008, (3):236–242]
- [5] 亓星, 许强, 彭大雷, 等. 地下水诱发渐进后退式黄土滑坡成因机理研究——以甘肃黑方台灌溉型黄土滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2017, **25**(1):147–153. [QI Xing, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Mechanism of gradual retreat loess landslide caused by groundwater: a case study of the irrigation loess landslide in Heifangtai, Gansu Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(1):147–153]
- [6] 董英, 贾俊, 张茂省, 等. 甘肃永靖黑方台地区灌溉诱发作用与黄土滑坡响应 [J]. 地质通报, 2013, **32**(6):893–898. [DONG Ying, JIA Jun, ZHANG Maosheng, et al. An analysis of the inducing effects of irrigation and the responses of loess landslides in Heifangtai area [J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(6):893–898]
- [7] 武彩霞, 许领, 戴福初, 等. 黑方台黄土泥石流滑坡及发生机制研究 [J]. 岩土力学, 2011, **32**(6):1767–1773. [WU Caixia, XU Ling, DAI Fuchu, et al. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6):1767–1773]
- [8] 王念秦, 杨盼盼, 王得楷, 等. 盐锅峡黑方台黄土塬坡地下水浸润带研究 [J]. 西安科技大学学报, 2017, **37**(1):51–56. [WANG Nianqin, YANG Panpan, WANG Dekai, et al. Underground water infiltration area of slope at the edge of loess "yuan", Heifangtai, Yanguoxia [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, **37**(1):51–56]
- [9] 朱立峰, 谷天峰, 胡炜, 等. 灌溉诱发黄土滑坡的发育机制研究 [J]. 工程地质学报, 2016, **24**(4):485–491. [ZHU Lifeng, GU Tianfeng, HU Wei, et al. Developmental Mechanism of Irrigation-Induced Loess Landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(4):485–491]
- [10] 张茂省, 胡炜, 朱立峰, 等. 饱和土体原位大型剪切试验方法与实践 [J]. 地质通报, 2013, **32**(6):919–924. [ZHANG Maosheng, HU Wei, ZHU Lifeng, et al. The method for large scale in-situ shear test of saturated soils and its application [J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(6):919–924]
- [11] 唐东旗, 彭建兵, 黄强兵. 非饱和黄土微观结构与黄土滑坡 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, **32**(4):509–513. [TANG Dongqi, PENG-Jianbing, HUANG Qiangbing, Microstructure of Unsaturated Loess and Loess Landslide [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, **32**(4):509–513]
- [12] GU Tianfeng, WANG Jiading, WANG Chenxing, et al. Experimental study of the shear strength of soil from the Heifangtai Platform of the Loess Plateau of China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(10):3463–3475.
- [13] 周跃峰, 谭国焕, 甄伟文, 等. 入渗诱发黄土滑坡的力学机制 [J]. 岩土力学, 2013, **34**(11):3173–3179 + 3186. [ZHOU Yuefeng, TAN Guohuan, ZHEN Weiwen, et al. Mechanism of infiltration-induced loess landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(11):3173–3179 + 3186]
- [14] 金艳丽, 戴福初. 饱和黄土的静态液化特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, **29**(12):3293–3298. [JIN Yanli, DAI Fuchu. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12):3293–3298]
- [15] 蒲济林, 周建基. 黑方台古风化红层砂泥岩物理性质试验研

- 究[J]. 人民黄河, 2016, **38**(5):100-103+120. [PU Jilin, ZHOU Jianji. Experimental study on physical properties of Palaeo-Weathering red sandy mudstone in Heifangtai area [J]. Yellow River, 2016, **38**(5):100-103+120]
- [16] 许强, 彭大雷, 李为乐, 等. 溃散性滑坡成因机理初探[J]. 西南交通大学学报, 2016, **51**(5):995-1004. [XU Qiang, PENG Dalei, LI Weile, et al. Study on formation mechanism of diffuse failure landslide [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, **51**(5):995-1004]
- [17] 曹从伍, 许强, 彭大雷, 等. 基于物理模拟实验的黑方台黄土滑坡破坏机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(4):72-77. [CAO Congwu, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Research on the failure mechanism of the Heifangtai loess landslides based on the physical simulation experiments [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, **43**(4):72-77]
- [18] 慕焕东, 宋登艳, 张茂省, 等. 灌溉诱发黄土滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(S2):172-177. [MU Huandong, SONG Dengyan, ZHANG Maosheng, et al. Centrifuge modelling tests on loess landslides induced by irrigation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2):172-177]
- [19] 周琪, 许强, 周书, 等. 基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究—以黑方台陈家8#滑坡为例[J]. 山地学报, 2019, **37**(4):528-537. [ZHOU Qi, XU Qiang, ZHOU Shu, et al. Movement Process of Abrupt Loess Flowslide Based on Numerical Simulation—A Case Study of Chenjia 8# on the Heifangtai Terrace [J]. Mountain Research, 2019, **37**(4):528-537]
- [20] 杨志全, 丁攀, 雨德聪, 等. 基于孔隙率的延安黄土抗剪强度模型[J]. 山地学报, 2019, **37**(3):392-399. [YANG Zhiquan, DING Pan, YU Decong, et al. Shear Strength of Yan'an Loess Interpreted by Porosity [J]. Mountain Research, 2019, **37**(3):392-399]
- [21] 赵纪飞, 黄嘉悦, 侯晓坤, 等. 灌溉诱发的黑方台黄土滑坡泥流机理分析[J]. 灾害学, 2017, **32**(4):60-66. [ZHAO Jifei, HUANG Jiayue, HOU Xiaokun, et al. Analysis of a flow-slide in Heifangtai induced by irrigation [J]. Journal of catastrophology, 2017, **32**(4):60-66]
- [22] XU Ling, YAN Dongdong. The groundwater responses to loess flowslides in the Heifangtai platform [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(7):4931-4944.
- [23] 周飞. 甘肃省黑方台黄土斜坡变形特征与滑坡机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015:93-96. [ZHOU Fei, Study on the deformation characteristics of loess slope and mechanism of landslide in Hei Fangtai, Gansu Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015]
- [24] SADEGHI H, KIANI M, SADEGHI M, et al. Geotechnical characterization and collapsibility of a natural dispersive loess [J]. Engineering Geology, 2019, **250**:89-100.

The Mechanism Study of the Irrigation-Induced Sudden Loess Landslides

ZHOU Fei¹, XU Qiang^{2*}, QI Xing², JU Yuanzhen², YAN Yue¹

(1. Sichuan institute of geological engineering investigating, Chengdu 610072, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The physical and mechanical mechanism of sudden loess slopes plays an important role in the prevention and control of landslides. Due to long-term excessive flood irrigation, the saturated zone with a thickness of 20 ~ 40 m has been formed at the bottom of loess slopes on the Heifangtai terrace since 1960 s. A large number of sudden loess landslides have been induced by the groundwater table rising since 1960 s. On the basis of field investigation and UAVs images, the inventory of sudden loess landslides were carried out and the deformation and distribution characteristics of loess landslides were analyzed. These landslides are widely distributed along the margin of terrace and have caused great loss of lives and properties. Then, GDS triaxial tests and model tests were designed and performed to analyze the stress-strain characteristics of saturated loess and the failure mechanism of loess landslides. The results of the triaxial tests revealed that when confining pressure was less than 300 kPa, the saturated loess at low strain could totally be liquefied and be in flow plastic state. However, when confining

pressure was more than 300 kPa, the samples were partial liquefaction and still had a certain shear strength. The stress-strain mode of saturated loess was strong strain-softening way and behaved steady characteristic. From the model tests, it was found that the the deformation process of sudden loess landslide could be divided into four phases, i. e. , soakings and saturation, capillary rising, creep deformation, sudden destruction. When the loss slope was a sudden destruction, the pore water pressure increased rapidly in a period of time, but the total stress was greater than pore water pressure and was partial liquefaction, it had a certain strength. The result provided the mechanical condition for stress and energy accumulation of sudden loess landslides. From the point of principle of effective, the research expounded the mechanical mechanism of sudden loess landslide and provided a theoretical basis for prevention engineering of loess landslide.

Key words: sudden loess landslide; triaxial test; model test; mechanism analysis