

DOI: 10.11779/CJGE201410013

# 牵引式滑坡演化模式研究

周跃峰<sup>1, 2</sup>, 龚壁卫<sup>1</sup>, 胡波<sup>1</sup>, 徐锴<sup>3, 2</sup>

(1. 长江科学院岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430006; 2. 香港大学土木工程系, 香港; 3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 该研究以甘肃黑方台为区域背景, 通过离心模型试验与应力路径试验相结合的手段, 研究地下水位抬升引发牵引式黄土滑坡的演化模式和力学机理。离心模型试验中, 模型边坡的尺寸为  $0.8\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ (长  $\times$  宽  $\times$  高), 离心加速度为  $100\text{g}$ 。在试验中, 通过水位控制系统实现地下水位的不断抬升, 利用数码摄像、孔隙水压力及激光位移传感器、侧面示踪点等仪器设备详细记录地下水位抬升过程中边坡内的孔隙水压力、边坡变形、滑动面形态及坡面裂缝的形成和发展过程。应力路径试验中, 通过恒载增孔压�试验和偏压固结不排水试验, 模拟了滑坡酝酿启动过程和局部破坏向整体滑移的发展过程。基于以上成果, 提出饱水黄土在上覆荷载下因孔隙水压力增大而失稳, 在卸荷条件下使应力重分布, 导致局部剪切带发展并逐渐形成贯通的破坏面, 边坡表现为牵引式的破坏模式。该研究结果有助于深入认识水位抬升引发牵引式滑坡的演化模式和力学机理, 为治理此类滑坡提供科学依据。

**关键词:** 黄土; 水位抬升; 滑坡; 离心模型试验; 应力路径

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)10-1855-08

**作者简介:** 周跃峰(1982-), 男, 博士, 工程师, 主要从事滑坡灾害研究, 非饱和土、黄土试验研究。E-mail: zhouyuefengku@gmail.com。

## Evolution mode of retrogressive landslide

ZHOU Yue-feng<sup>1, 2</sup>, GONG Bi-wei<sup>1</sup>, HU Bo<sup>1</sup>, XU Kai<sup>3, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430000, China;

2. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China; 3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** For the region of Heifangtai Plateau, in Gansu Province of China, centrifugal model tests and two sets of stress-path tests are conducted to investigate the evolution mode and the mechanism of retrogressive landslides. In the centrifugal model tests, the rising of groundwater level is controlled by a designed facility. Digital cameras, pore-water pressure transducers, laser sensors and tracking points are adopted to record the variations in the pore-water pressure, deformation, slipping surfaces and cracks during the rising of groundwater level. In the stress-path tests, the dead-load tests with increasing pore-water pressure are performed to simulate the initiation of a landslide during the rising of groundwater level. Anisotropically consolidated and undrained tests are conducted to simulate the transferring process from local failure to global one in a landslide. Based on the above results, the findings are summarized as follows: the saturated loess fails under overburden pressure due to the rising of pore-water pressure. Under unloading conditions, the re-distribution of stresses leads to the development of local shearing band into the connected global failure surface gradually, while the slope appears in a retrogressive mode. The results are helpful in understanding the evolution mode and clarifying the mechanism of retrogressive landslides, and they may provide scientific support to the landslide treatment.

**Key words:** loess; rising of groundwater level; landslide; centrifugal model test; stress path

## 0 引言

牵引式滑坡是指边坡下部土体率先滑动, 使上覆土体失去支撑, 造成向边坡上部延伸的牵引状滑动。牵引式滑坡作为一种普遍的滑坡形态, 在中国黄土地区广泛存在。中国黄土呈东西向带状分布, 主要包括

甘肃、陕西、宁夏、山西、河南与青海等省区, 面积达  $54\text{ 万 km}^2$ , 占全国土地面积的 6%。在黄土台塬地

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279015); 香港研究资助局资助项目(HKU7140/08E)

收稿日期: 2013-12-18

区, 由于塬上长期提水灌溉, 导致塬边滑坡、崩塌、泥流灾害频繁发生, 造成严重的经济损失和人员伤亡。在陕西省的泾阳、白鹿原、华县, 以及甘肃省的黑方台、临夏、会宁、高兰、河西等多个地区都有广泛报道<sup>[1-3]</sup>。选取甘肃黑方台为研究区域。黑方台总面积 13.7 km<sup>2</sup>, 灌溉面积约 9 km<sup>2</sup>, 属黄土高原西部丘陵沟壑区, 以黄土台塬地貌为主。黑方台台塬上大面积分布着上更新统风积黄土, 其厚度约为 40 m, 为结构疏松的柱状粉质土。黄土层下伏 4~17 m 的上更新统冲积成因的粉质黏土, 结构致密, 弱透水性。粉质黏土层下部为卵石层, 基岩为砂质泥岩。由于黏土层的滞水作用, 自 1965 年大面积提水灌溉以来, 黑方台发生了至少 70 次滑坡。

李绍军等<sup>[4]</sup>、贾官伟等<sup>[5]</sup>、陈晓平等<sup>[6]</sup>采用离心模型试验或 1g 模型试验的方法研究了库水位变化引发的滑坡, 结果均为多重滑面的牵引式滑坡。丁秀丽等<sup>[7]</sup>、唐晓松等<sup>[8]</sup>采用数值模拟手段研究了库水位变化对库岸边坡稳定性的影响。Xu 等<sup>[9]</sup>、Zhou 等<sup>[10]</sup>先后基于现场灌溉试验分别研究了裂缝、塌陷等黄土边坡失稳要素, 而地下水位抬升引发滑坡作为一个长期过程, 难以通过现场试验开展研究。当前黄土滑坡的研究主要通过现场调查、现象描述和规律统计的角度开展。仍有待从岩土力学的角度开展研究并进一步阐述滑坡机制, 尤其是介绍上覆荷载条件下黄土增湿过程的变形破坏规律的成果仍很有限(谢定义<sup>[11]</sup>)。虽然文献[4~6]报道了通过模型试验研究了库水位变化引发滑坡的机理, 但是模拟地下水位变化引发滑坡并探讨其破坏机理的研究成果尚不多见。本研究采用离心模型试验和应力路径试验相结合的手段, 研究地下水位抬升条件下牵引式黄土滑坡的演化模式。在离心模型试验中, 控制地下水位的逐级抬升, 考虑边坡内土体孔隙水压力和变形的相互关系。针对离心模型试验中发生的牵引式滑坡, 通过应力路径试验分析边坡的变形破坏规律及滑坡的演化模式, 揭示滑坡发生的力学机理。试验所用黄土取自黑方台典型滑坡后壁。

## 1 离心模型试验设计

### 1.1 试验装置

本试验在长江科学院的 CKY-200 多功能土工离心机上开展, 该土工离心机由中国工程物理研究院总体工程研究所承担研制, 2010 年交付使用。离心机参数如下: 容量 200 g·t; 有效半径 3.7 m; 最大加速度 200g。本次试验所用模型箱尺寸为 1.0 m(长)×0.4 m(宽)×0.8 m(高), 试验数据通过离心机数据采集系统进行采集。

### 1.2 试验设计

本试验在黑方台地质地貌调查的基础上设计, 取

40 m 黄土层厚度, 下覆 5 m 粉质黏土层, 边坡平均坡度 40°。综合考虑实验室离心机模型实现条件, 选用 1:100 的模型比尺, 在 100g 条件下开展离心模型试验。

模型试验土层包括两层, 其中黄土在黑方台取样; 因在深厚黄土覆盖层下粉质黏土较难取样, 故采用渗透系数相近的红黏土代替(表 1)。该黄土砂粒含量 8%, 粉粒含量 73%, 黏粒含量 19%, 液限 26.5%, 塑限为 18.3%; 该黄土饱和强度参数, 临界状态有效黏聚力 0 kPa, 有效内摩擦角 32°<sup>[12]</sup>。依照表 1 参数, 按黏土 1 层, 黄土 5 层分别均匀压实, 然后削坡制备边坡模型。相当于离心加速度, 模型内黄土层厚 400 mm, 黏土层厚 50 mm, 边坡坡度 40°(见图 1)。

表 1 模型土料基本参数表

Table 1 Basic properties of model soils

土层	层厚 /mm	比重	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	含水率 /%
黄土	400	2.69	1.35	1.0	8.4
红黏土	50	2.70	1.55	0.75	20

黑方台地下水位抬升为塬内长期大面积灌溉导致, 为模拟地下水由塬边斜坡后方补给, 设计供水箱(图 1)。供水箱位于模型左侧, 在供水箱的右侧竖直方向每隔 50 mm 打一排小孔(孔中心距亦为 50 mm), 利用离心机供水通道向水箱内供水; 利用箱底孔隙水压力传感器监测箱内水位; 利用供水箱上固定高度的多排小孔, 控制每级水位抬升量为 50 mm, 并维持水头总体稳定。每级水位条件下渗流近似稳定后提升至下一级水位, 直至模型边坡变形失稳。

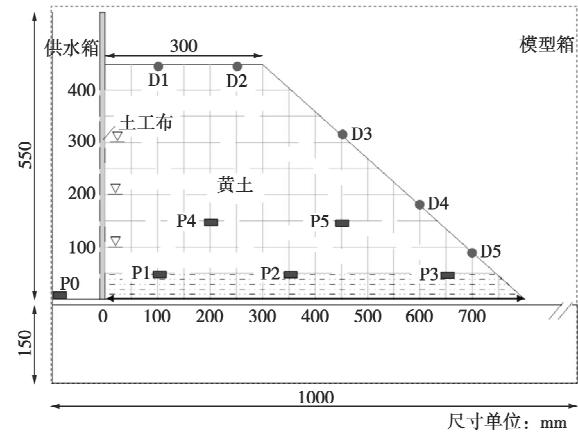


图 1 控制水位抬升的模型装置示意图

Fig. 1 Scheme of designed model with controlled water level

### 1.3 监测方案

安装完成的离心模型及传感器参见图 2。离心机模型试验中, 在边坡内分两层埋设 5 支微型孔隙压力传感器, 以监测边坡内部孔隙水压力变化; 在边坡表

面安装了5支激光位移传感器, 以监测边坡表面的垂直变形; 此外, 同时采用数码影像、侧面示踪点(22个)等仪器设备详细记录边坡变形。

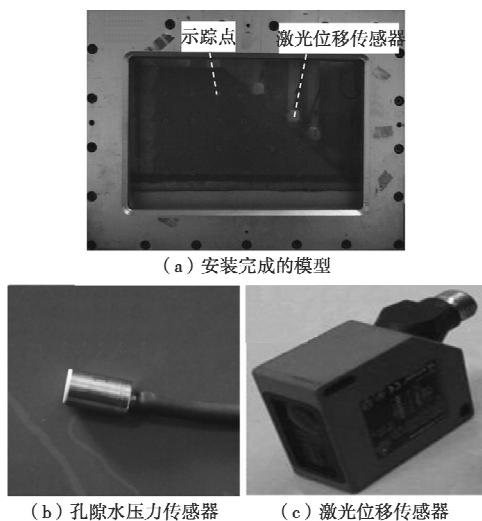


图2 离心模型和监测仪器

Fig. 2 The centrifugal model and monitoring instruments

## 2 离心模型试验结果

### 2.1 离心机加速过程的固结变形

本试验中, 采用离心加速度增量20g/级, 分5级逐级提高加速度, 加速过程参见图3(a)。在离心加速过程中, 通过激光位移传感器监测边坡表面变形沉降, 在每级加速度下边坡变形达到稳定后提升加速度至下一级, 直至达到设计加速度100g。如图3(b), 由竖向变形的监测结果可知, D1、D2、D3均表现出不同程度的沉降, 而在靠近坡脚处, D4、D5处有少量隆起。在100g条件下, 各监测点变形稳定后即认为固结完成。此时边坡处于稳定状态, 以此为时间起点, 开始模拟地下水位抬升的离心模型试验。

### 2.2 边坡浸润分析

模拟地下水位抬升过程中, 孔隙水压力随时间的变化规律如图4所示。在模型左侧的孔压传感器P1最先响应, 随着水位上升而不断增大。受埋设位置与埋设深度的影响, 较靠近供水箱与埋设较深的传感器响应较早, 相对应的响应时间顺序先后为P1、P2、P4、P3、P5。除P5在靠近坡脚处远离左侧控制水位因而无明显读数变化, 其它孔压传感器与P1表现出类似规律, 均随水位上升而不断增大。

参照离心机运行时的高速影像照片, 可得到边坡模型中浸润带随时间的发展规律, 见图5。在第40 min时, 浸润带向右侧扩展至约200 mm处, 浸润锋最高处约100 mm; 在第55 min时, 浸润带向右侧扩展至约300 mm处, 浸润锋最高处约150 mm; 在第83 min

时, 浸润带向右侧扩展至约500 mm处, 浸润锋最高处约200 mm; 在第114 min时, 浸润带向右侧扩展至约700 mm处; 在第120 min时, 浸润带在坡面溢出, 溢出处高程约为55 mm, 浸润带最高处约250 mm。根据以上现象, 可知随着地下水位的抬升, 浸润带不断向上抬升与向前推移, 水逐渐从坡面渗出。当地下水位在抬升至250 mm时, 边坡失稳。由于图5中各传感器读数仍未上升至稳定, 故推测导致滑坡的临界地下水位高度为200 mm至250 mm。

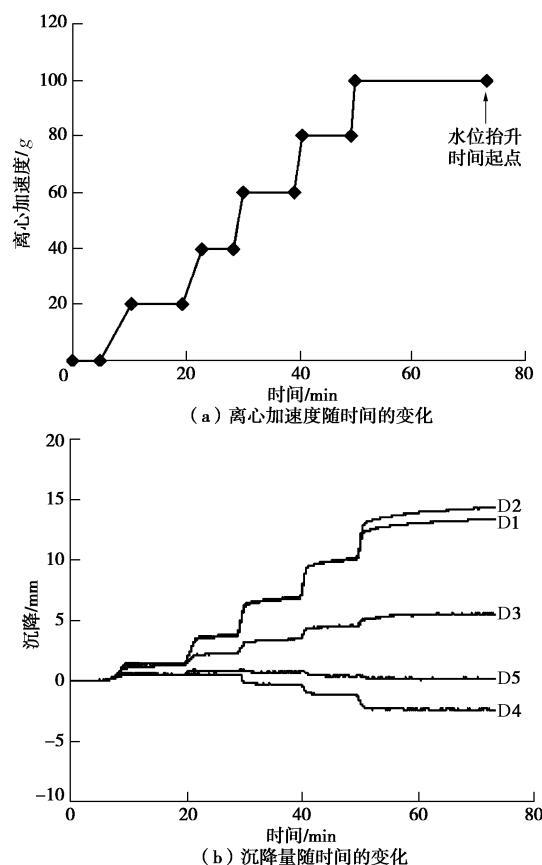


图3 离心加速过程的监测结果

Fig. 3 Monitoring results of centrifugal acceleration process

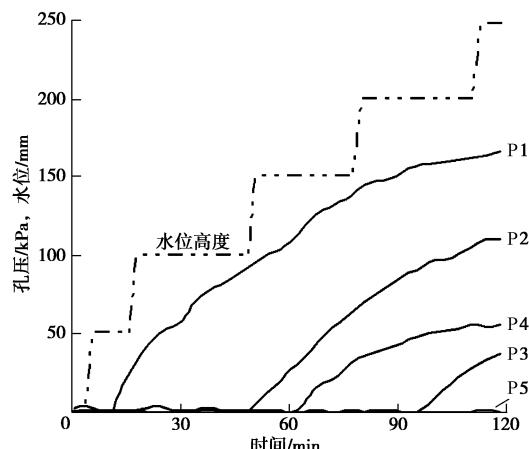


图4 孔隙水压力与水位高度随时间的变化

Fig. 4 Variations in pore pressure and water level with time

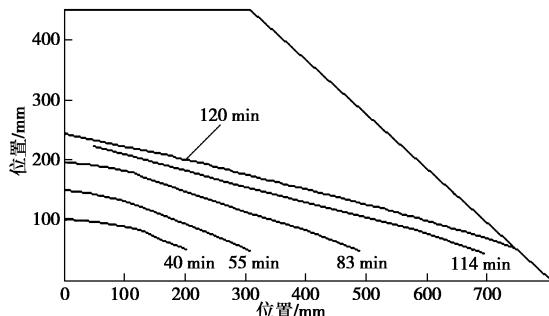


图 5 边坡内浸润线随时间发展规律

Fig. 5 Development of wetting front with time

试验结束停机后,立刻用环刀在边坡模型中分五层取样,测定不同位置与埋深处的含水率,所得结果参见图6。初始配土制样时的含水率约为8.4%,在坡顶以下20 mm测定土样含水率为8.29%与8.64%,接近初始含水率。而在地表以下第二个取样层的测试含水率约为10%,土体在基质吸力/毛细张力作用下表现出不同程度的增湿,含水率有所提高。第三、四、五层在最终浸润线以下的取样位置,含水率在24%~26%;而在浸润线以上的取样位置,土体在基质吸力/毛细张力作用下含水率亦有所提高。

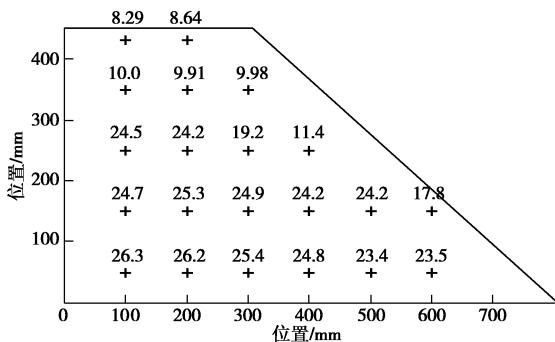


图 6 试验结束时边坡内土体含水率分布规律

Fig. 6 Distribution of water content for soils in slope at the end of tests

### 2.3 边坡变形破坏分析

在离心加速至100g各监测点已达到变形稳定的条件下,随着地下水位的初始抬升,位于坡顶的传感器D1、D2均监测到沉降变形,表明黄土层底部由于浸水而软化湿陷。此时D3亦记录到下移变形,而D4、D5则监测到坡脚处发生微小隆起。

在约90 min时,由靠近坡脚的传感器D5监测结果可知,该位置首先监测到位移的加速发展,表示在坡脚处由于坡体滑移而隆起。随后,传感器D4亦监测到相似的发展规律,两者随时间的变形发展近似平行,说明D4位置由于坡体滑移也发生隆起。接着,传感器D3监测到沉降加速发展,表示该处土体达到塑性破坏状态而向下滑动。位移监测点D3临近滑动

面,D4、D5位于贯通的滑动面上,由图7可知,三点的变形启动次序先后为D5、D4、D3,可知该滑坡土体变形破坏为自下向上发展。在坡肩位置,由传感器D1、D2的监测结果可知,土体持续沉降,直至试验结束。其中,D2位置由于靠近塬边,位移加速发展,逐渐变形失稳。由侧面示踪点得到整个试验过程边坡的累积位移矢量,见图8所示,上部沉降明显大于下部,且在坡面上较浅层深度土体明显滑移。

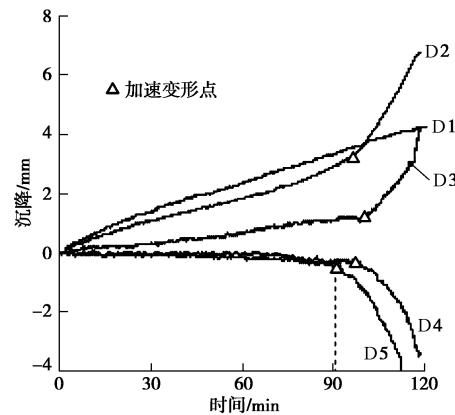


图 7 边坡竖向变形的监测结果

Fig. 7 Monitoring results of vertical deformation in slope

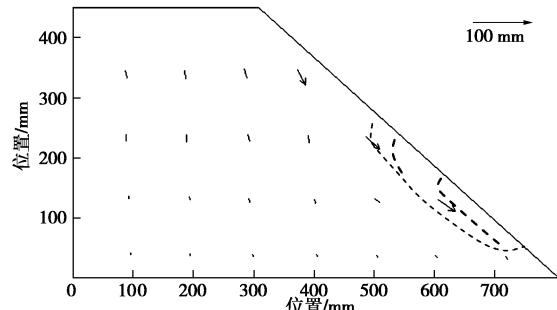


图 8 试验结束后边坡变形累计矢量图

Fig. 8 Accumulated slope deformation at the end of tests

结合试验结束后的照片(图9),坡面上土体明显达到破坏状态,边坡发生了浅层滑坡。边坡失稳的滑动面由3个滑面组成,且滑面总体上呈弧形,滑坡形态为有多重滑面的牵引破坏模式。滑坡剖面上总体呈圆弧形,滑弧深度40 mm,滑坡前缘剪出口高程55 mm,后缘高程270 mm,按平面最大滑弧估算滑坡体积11000 mm<sup>3</sup>/mm。坡面上,裂缝2,3,4,5亦呈弧形,但并未贯通,为局部破坏。在坡肩位置,由于滑坡卸荷作用张拉而形成裂缝6,7,8。裂缝走向与坡面滑动具有较好的二维形状,表明模型箱内壁较为光滑,模型试验有效模拟了滑坡的二维平面应变问题。本文中的边坡破坏模式与李绍军等<sup>[4]</sup>的离心模型试验结果,贾官伟等<sup>[5]</sup>的1g模型试验结果一致。

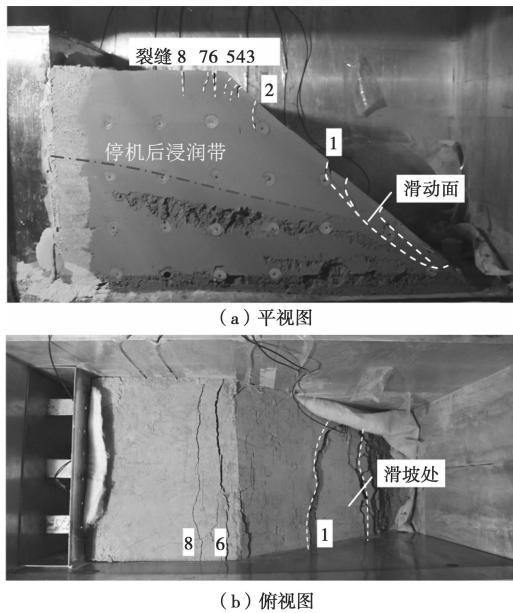


图 9 滑坡与裂缝发育形态

Fig. 9 Developed forms of landslide and cracks on slope

### 3 应力路径试验

#### 3.1 试验目的与试验方案

本研究采用三轴仪开展应力路径试验, 模拟土体的变形破坏过程, 揭示水位抬升条件下黄土滑坡的力学机理, 并阐述牵引式滑坡的以下问题: ①通过开展恒载增孔压试验, 研究地下水位抬升过程中, 滑坡酝酿启动过程的变形破坏规律; ②通过开展偏压固结不排水试验, 研究边坡从初始的局部破坏向流滑运动转化的变形破坏规律。这里按照应变控制与荷载控制三轴试验的次序, 分别介绍两组试验的结果, 包括偏压固结不排水试验(ACU, 3个), 恒载增孔压试验(SDL, 3个), 试验方案见表2。

表2 应力路径试验方案和主要结果

Table 2 Scheme and major results of stress-path tests

试验方案	等压固结 $p'/\text{kPa}$	偏压固结		
		$p'/\text{kPa}$	$(q/p')$	$(\sigma'_1/\sigma'_3)$
ACU1	50	65	0.75	2.00
ACU2	100	132	0.75	2.00
ACU3	200	261	0.75	2.00
SDL1	50	65	0.75	2.00
SDL2	100	134	0.75	2.00
SDL3	200	269	0.75	2.00

注:  $p'$ 为平均有效应力;  $q$ 为偏应力;  $\sigma'_1$  ( $\sigma'_3$ )为有效最大(小)主应力。

#### 3.2 试验步骤

对于ACU和SDL试验, 采用两步饱和法进行饱和。首先在15 kPa的固结压力下先后充CO<sub>2</sub>和排气水, 然后进行反压饱和, 直至B值上升至0.98。接着, 按表2中的方案进行等压固结, 直至孔隙水压力消散达

到95%。然后, 根据现场 $K_0$ 应力状态, 偏压固结至目标应力比。在ACU试验中, 偏压固结采用排水剪切的方式偏压加载, 剪切速率为0.05 mm/min。该过程测定试样顶部和底部的孔隙水压力, 确定二者压差小于1 kPa。接下来关闭排水阀门, 在同一速率下开展不排水剪切。在SDL试验中, 偏压固结是在排水条件下, 在试样上逐级增加砝码提供恒定荷载, 固结至目标应力比。维持试样的压力条件, 以4 kPa/h的速度线性增加反压直至试样变形破坏。

#### 3.3 试验结果

##### (1) 偏压固结不排水试验

偏压固结不排水试验模拟不排水条件下, 土体从局部失稳到流滑过程的转化过程。如图10所示, 在偏压固结条件下, 试样偏应力在初始变形阶段迅速增加, 并达到强度峰值。当偏应力超出峰值强度后, 试样表现为应变软化的特征, 偏应力快速降低, 其降低速度逐渐减小, 并最终趋于稳定。试样内孔隙水压力的变化规律也较为一致: 在剪切过程中, 超孔隙水压力亦随应变逐渐增加, 并趋于一个稳定的最大值不再增加。荷载由土骨架承担逐渐转移为由孔隙水承担。在ACU试验中, 试样峰值强度与超孔隙水压力均随初始固结压力增大。1985年, Poulos等<sup>[13]</sup>提出土体可发生静态液化的3个指标: 临界状态强度与峰值强度之比; 不排水峰值强度的轴向应变; 以及峰后强度的降低速率。尽管当前对土体是否能“液化”的问题存在广泛争议, 但是可以借鉴作为边坡流滑的判据。ACU试验中, 3个试样的临界状态强度与峰值强度的比率均在20%左右, 达到峰值状态的轴向应变均在1%以内, 峰后强度曲线为上凹形态反映较快的强度降低速率。根据试验结果, 结合Poulos的液化理论分析<sup>[13]</sup>, 该黄土较易发生流动滑坡。

##### (2) 恒载增孔压试验

SDL试验模拟了地下水位上升过程中, 滑坡酝酿启动过程的变形破坏规律。从图11可知, 轴向应变随平均有效应力的减小而逐渐发展, 但在开始相当长一段时间增加非常缓慢。直到控制的孔隙水压力达到一定水平, 轴向变形开始迅速增加。在SDL1中, 试样发生突然失稳, 轴向变形2秒内陡增至30%。这个过程中, 土体的结构被破坏从而表现为体缩趋势。当孔隙水不能及时排出时, 超孔隙水压力将迅速增大, 伴随着平均有效应力的迅速下降, 土体发生破坏。在SDL2和SDL3中, 土体均处于较高应力水平, 变形速率比SDL1中低得多。孔隙水压力的持续增加使土体的变形渐进的加速发展, 说明地下水位缓慢上升可

导致边坡滑动。

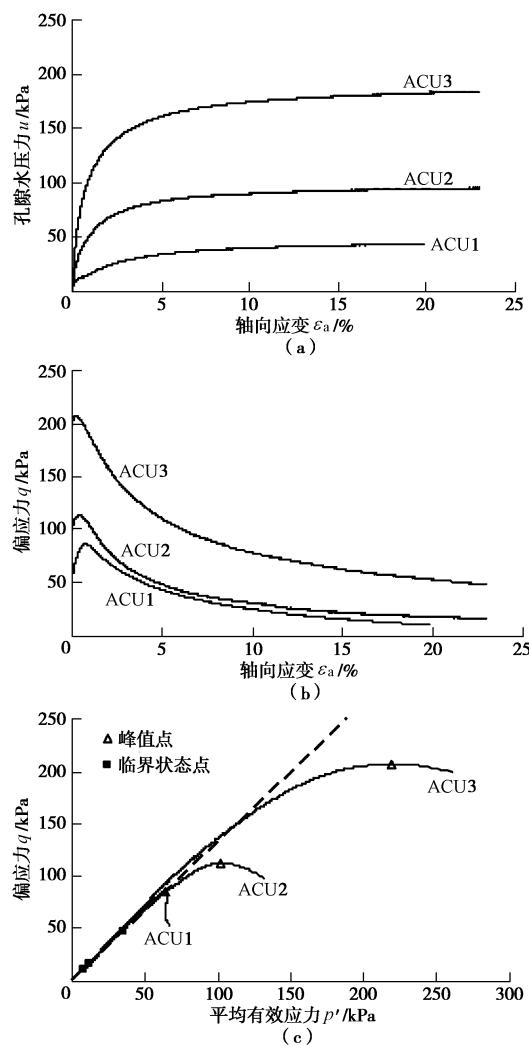


图 10 偏压固结不排水试验结果

Fig. 10 Results of ACU tests

相对于轴向应变的延迟响应, 体积应变从孔隙水压力的初始增加阶段即开始发展。在屈服以前, 平均有效应力随着孔隙水压力的增加而不断减小, 可认为是弹性卸荷过程而导致试样体积的弹性膨胀。因而, 在各试验的初始阶段, 试样的体变均为负且逐渐减小。在屈服点以后, 随着平均有效应力的减小(亦即孔隙水压力的增大), 3个试样均表现为体缩, 说明了孔压增大过程黄土的微观胶结结构不断坍塌破坏。

SDL 试验的应力路径中, 试样屈服后应力状态处于不稳定区(通过试验得到临界状态线 CSL 与等压固结不排水试验的峰值线 IL, 共同确定不稳定区<sup>[12]</sup>)。该范围内, 微小的扰动即可能导致土体失稳。试验 SDL1 中, 孔压的微小增大导致微观结构坍塌和变形大幅增加, 进一步导致超孔隙水压力迅速增大, 当其无法及时消散时, 有效应力迅速下降, 土体失稳。

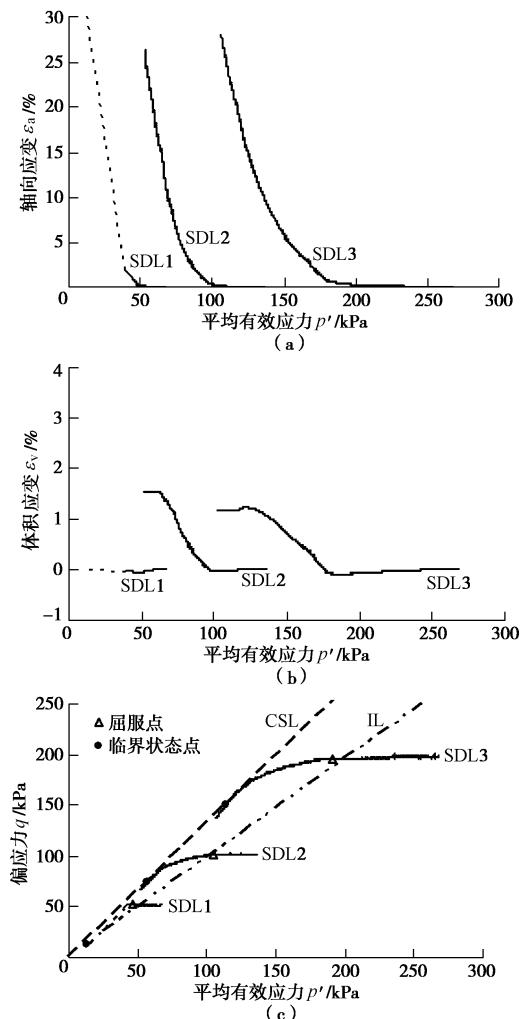


图 11 恒载增孔压试验结果

Fig. 11 Results of SDL tests

## 4 讨 论

徐峻龄<sup>[14]</sup>提出了高速远程黄土滑坡的“闸门效应说”, 其过程可简述为: 滑体中部饱水蠕滑, 滑体后缘开裂, 前缘土体突然被剪断, 滑坡发生。该观点是一种概念模型, 尚需大量现场及室内试验加以验证、完善。李媛等<sup>[15]</sup>通过模型试验对甘肃天水孟家山黄土—红层接触面滑坡进行了研究, 提出其破坏机制为“坡体蠕动—后缘拉裂—滑带由中部向两侧发展—剪出口形成—坡体突滑”的过程。张永双等<sup>[16]</sup>对西南三江流域冲江河滑坡进行了现场调查, 提出其内部存在多级滑坡且呈现级序越低、稳定性越差的特点; 并认为饱和滑带土因剪切产生超孔隙水压力而发生液化作用, 促进了坡体大变形的发生。本研究的离心模型试验中, 边坡变形过程总体上为自下而上, 直至破坏面贯通, 且坡肩上受张拉作用而形成多条裂缝。滑坡裂缝是滑坡形成过程中的伴生现象之一, 随着滑坡的继续发展,

裂缝会由少变多、由短变长。试验结束后, 坡肩裂缝明显张开, 沿边坡的走向近似平行方向分布, 并较为平直。在滑坡酝酿过程中, 饱和土体在增湿过程中剪切变形, 使得黄土结构破坏。孔隙周围的颗粒填充进入孔隙之中, 一方面表征为土体的剪缩/体缩变形, 导致超孔隙水压力产生, 另一方面降低了局部土体的孔隙比, 减小了渗透系数。因而具有导致超孔压产生和阻止超孔压消散的双重作用。当孔隙水压力无法及时消散时, 即发生不排水剪切。结合 ACU 试验结果, 土体在很小的应变下达到峰值强度, 然后应力显著降低, 孔隙水代替土骨架承担了绝大部分压力, 这是流滑发生的必要条件, 边坡从酝酿启动发展为流滑运动。地下水位不断抬升并在坡面上溢出时, 对土坡起到两方面的作用: 一方面土体浸泡软化, 强度降低; 另一方面, 坡内土体中总水头高于坡面溢出位置总水头, 产生指向坡外的渗流, 导致滑坡发生, 从坡脚剪出。

结合离心模型试验与两组应力路径试验结果, 可知: 地下水位不断抬升条件下, 饱水黄土局部失稳, 在卸荷条件下使应力重分布, 临近土体迅速加载变形而破坏, 从而导致剪切带不断发展。边坡首先在前缘发生变形(隆起和剪出), 接着逐渐向后缘牵引发展, 在坡肩和坡面上逐渐形成多条张拉裂缝, 滑面逐渐贯通, 发展为有多重滑面的牵引破坏模式。

## 5 结论与展望

本研究通过离心模型试验与应力路径试验相结合的手段, 分析了地下水位抬升条件下牵引式滑坡的变形破坏过程, 得出以下结论:

(1) 地下水位抬升过程中, 一方面浸润线以下黄土浸水软化, 强度降低; 另一方面, 坡内土体中总水头高于坡面溢出位置总水头, 产生指向坡外的渗流。在以上两方面作用下, 坡脚土体较早达到破坏状态, 隆起并剪出, 坡肩附近形成了多条裂缝, 滑面逐渐贯通并总体上呈弧形, 滑坡形态为有多重滑面的牵引破坏模式。

(2) 随着地下水位的抬升, 在较低的应力水平下, 土体变形导致孔隙水压力升高且不能及时消散, 可导致突发性破坏; 在较高的应力水平下, 则为渐进性破坏。饱水黄土局部失稳, 在卸荷条件下使应力重分布, 接近失稳的临近土体迅速加载变形而破坏, 从而导致剪切带发展并逐渐形成贯通的破坏面。结合 Polous“液化”理论和黄土的微观结构特征, 该黄土边坡在饱水范围内容易发生流滑失稳。

进一步的研究可利用本文的试验成果, 采用模型

试验或数值分析的手段, 研究塬边斜坡凹地形地下水出溢条件下滑坡的演化模式。

为治理台塬地下水位抬升引发的滑坡灾害问题, 可设置排水系统(如设置贯穿黏土层至下伏卵石层的排水竖井), 降低地下水位, 使恒定上覆荷载条件下的应力路径向右发展, 提高边坡的稳定性。

**致 谢:** 本文中应力路径试验部分为第一作者博士论文中内容, 在香港大学谭国焕教授指导下完成, 在此谨致以诚挚谢意。

## 参考文献:

- [1] DERBYSHIRE E, MENG X, DIJKSTRA A D. Landslides in the thick loess terrain of North-west China[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2000.
- [2] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. (WU Wei-jiang, WANG Nian-qin. Landslide hazards in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 许 领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 364 - 371. (XU Ling, DAI Fu-chu, KWONG A K L, et al. Types and characteristics of loess landslides at Heifangtai loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 364 - 371. (in Chinese))
- [4] 李邵军, KNAPPETT J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1586 - 1593. (LI Shao-jun, KNAPPETT J A, FENG Xia-ting. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1586 - 1593. (in Chinese))
- [5] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1798 - 1803. (JIA Guan-wei, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Model test study of slope instability induced by rapid drawdown of water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1798 - 1803. (in Chinese))
- [6] 陈晓平, 黄井武, 吴宏伟, 等. 库岸古滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1496 - 1503. (CHEN Xiao-ping, HUANG Jing-wu, NG C W W, et al. Centrifugal model tests on ancient bank landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1496 - 1503. (in Chinese))
- [7] 丁秀丽, 付 敬, 张奇华. 三峡水库涨落条件下奉节南桥

- 头滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(17): 2913 – 2919. (DING Xiu-li, FU Jing, ZHANG Qi-hua. Stability analysis of landslide in the south end of Fengjie highway bridge with fluctuation of water level of Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(17): 2913 – 2919. (in Chinese))
- [8] 唐晓松, 郑颖人, 唐辉明, 等. 水库滑坡变形特征和预测预报的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 940 – 947. (TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, TANG Hui-ming, et al. Numerical researches on deformation characteristics and prediction of reservoir landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **35**(5): 940 – 947. (in Chinese))
- [9] XU L, DAI F C, THAM L G et al. Investigating landslide-related cracks on the edge of two loess platforms in NW China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, **37**(10): 1575 – 1592.
- [10] ZHOU Y F, THAM L G, YAN R W W, et al. The mechanism of soil failures along cracks subjected to water infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **55**(1): 330 – 341.
- [11] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去, 现在与未来[J]. 地下空间, 1999, **19**(4): 273 – 284. (XIE Ding-yi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess [J]. Underground Space, 1999, **19**(4): 273 – 284. (in Chinese))
- [12] ZHOU Y F. Study on landslides in loess slope due to infiltration[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2012.
- [13] POULOS S, CASTRO G, FRANCE J. Liquefaction evaluation procedure[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(6): 772 – 792.
- [14] 徐峻龄. 再论高速滑坡的“闸门效应”及其运动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, **28**(4): 23 – 26. (XU Jun-ling. Recent study on the presumption of sluice2valve and movement character of rapid landslides[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 1997, **28**(4): 23 – 26. (in Chinese))
- [15] 李媛, 吴奇. 孟家山黄土一红层接触面滑坡破坏机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2001(1): 52 – 54. (LI Yuan, WU Qi. The study of deformation mechanism on loess-red mudstone sliding surface in Mengjiashan landslide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001(1): 52 – 54. (in Chinese))
- [16] 张永双, 郭长宝, 周能娟. 金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 445 – 453. (ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao, ZHOU Neng-juan. Characteristics of Chongjianghe landslide at a branch of Jinsha River and its local reactivation mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **35**(3): 445 – 453. (in Chinese))