

DOI: 10.11779/CJGE2016S2028

灌溉诱发黄土滑坡离心模型试验研究

慕焕东¹, 宋登艳², 张茂省³, 邓亚虹⁴

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学地质工程系, 陕西 西安 710054)

摘要: 滑坡是一种常见的地质灾害, 灌溉诱发黄土滑坡失稳是常见地质灾害之一。灌溉作用不仅改变了地下水平衡, 而且降低了土体的抗滑强度, 从而导致黄土滑坡的发生。针对黑方台焦家崖头13号黄土滑坡, 开展了灌溉作用下滑坡失稳机理的离心模型试验研究, 揭示了黄土滑坡的变形特性、应力水平及破坏模式。离心模型的制作考虑了“粒径效应”、“尺寸效应”。离心试验结果表明: 随着加载时间和离心加速度的增大, 模型坡体沉降量、坡体土压力、坡体孔隙水压力均逐渐增大; 坡体沉降量由坡顶至坡脚逐渐减小, 最大垂直位移为33.38 mm, 坡体土压力由坡顶至坡脚逐渐增大, 最大土压力为320 kPa, 坡体孔隙水压力表现为坡顶>坡脚>坡体中部, 最大孔隙水压力为157.08 kPa; 坡体呈现出两级破坏模式, 即第一阶段的坡脚蠕动变形, 坡顶压制拉裂, 第二阶段的坡体剪切滑移。

关键词: 离心模型试验; 灌溉; 黑方台; 黄土; 滑坡

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0172-06

作者简介: 慕焕东(1989-), 男, 助理工程师, 主要从事岩土工程试验测试分析及模型试验。E-mail: mhdhxx@xaut.edu.cn。

Centrifuge modelling tests on loess landslides induced by irrigation

MU Huan-dong¹, SONG Deng-yan², ZHANG Mao-sheng³, DENG Ya-hong⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 4. Department of Geology

Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The landslide is a common geological disaster, and the loess landslide instability induced by irrigation is one of the common geological disasters. Irrigation function changes the balance of ground water and reduces the resistance strength of soil mass, resulting in the occurrence of loess landslides. For the loess landslide No.13 of Jiaojiaayatou, centrifugal model tests on landslide instability mechanism under irrigation effect are carried out. The deformation characteristics, stress levels and failure modes are revealed. The preparation of centrifugal model considers the influences caused by "particle size effect" and "size effect". The results show: (1) With the increase of loading time and centrifugal acceleration, the settlement, earth pressure, pore water pressure of model slope all gradually increase. (2) The slope settlement gradually decreases from the slope top to the toe. The maximum vertical displacement is 33.38 mm. The soil pressure of slope gradually increases from the slope top to the toe. The largest earth pressure is 320 kPa, the pore water pressure is the largest at the slope top, that at the toe is followed, and that in the middle is the smallest, and the maximum pore water pressure is 157.08 kPa. (3) The slope emerges two failure modes: one is creep deformation of the toe and pressure-induced crack of the top, the other is shear slip of the slope.

Key words: centrifugal model test; irrigation; Heifangtai; loess; landslide

0 引言

近年来,随着黄土地区工程建设的迅速发展,黄土滑坡失稳发生的频率越来越高,黄土滑坡失稳机制研究已成为岩土工程中关注的热点^[1-6]。据不完全统计,80%~90%的黄土滑坡失稳均与水的作用有关。水致滑坡可以分为降雨型滑坡、灌溉型滑坡和水库蓄水型滑坡等3类,其中灌溉诱发型滑坡灾害最为严重。对于灌溉型滑坡,是由于大面积引水灌溉改变了灌区

的原生地质环境,打破了灌区地下水平衡,引发了黄土滑坡、土壤盐渍化等一系列环境地质问题,因此对于该类型滑坡的变形破坏模式研究具有重要意义。

不同于自重应力作用下的常规缩尺模型试验,离心模型实验能够真实反应原型的岩土工程特性(应力水平及变形特性)。因此,离心模型试验是迄今为止

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372327)

收稿日期: 2016-05-19

相似性最好的力学模型试验方法。国内外学者针对黄土滑坡变形失稳机理已经从不同的角度进行了研究。王玉峰等^[7]运用离心模型试验, 对不同支护模式下黄土高边坡的开挖变形特征和支护结构性进行了分析; 陈晓平等^[8]运用离心模型试验, 研究了库岸古滑坡水位骤降条件下的失稳机制; 杨春宝等^[9]运用离心模型试验, 对水位变化诱发粉土边坡失稳机理进行了研究; 潘皇宋等^[10]运用离心模型试验, 研究了开挖和降雨条件下折线型滑坡变形破坏的特征及失稳模式; 李邵军等^[11]运用离心模型试验, 详细分析了边坡在这种外部水环境影响下的变形演化、失稳和破坏模式; 张茂省等^[12]通过长期研究认为黑方台黄土滑坡地质灾害的发生是由于长期灌溉条件下, 水的入渗引起地下水动力场改变并导致黄土的工程地质性质响应, 并依此提出了黄土水敏性的概念。然而, 当前运用离心模拟手段分析黄土滑坡变形特性及失稳机理的研究成果仍十分有限, 尤其是对灌溉作用下黄土滑坡的变形失稳规律的研究更显不足。

本文以甘肃黑方台焦家崖头13号黄土滑坡灌溉型黄土滑坡为例, 选取原状土进行离心模型试验。试验采用土工离心机研究灌溉条件下黄土滑坡成灾模式、运动过程和失稳机理, 以期为该地区居住区规划、塄塄区土地合理利用、灌溉方式选择提供技术支撑, 同时为该类型滑坡的防灾减灾提供理论依据。

1 离心模型试验设计

1.1 地质背景

黑方台焦家崖头 13 号黄土滑坡坡高约为 130 m, 坡长约为 75 m, 宽度约为 50 m, 厚约 2~4 m, 主滑方向为 105°, 体积约 0.9×10⁴ m³, 上部黄土段坡度约为 40°, 下部基岩段坡度约 63°, 坡体形状总体呈上凹下陡。

该滑坡地层由上至下分别为(图 1): ①上更新统风成黄土层(Q₃^{col}), 厚约 49 m, 淡黄色, 砂粒含量高, 裂隙和垂直节理较为发育, 结构疏松多孔, 湿陷性较强; ②中更新统冲积粉质黏土层(Q₂^{al}), 厚约 2.2 m, 硬塑, 可见明显波状层理; ③中更新统冲积砂砾石层(Q₂^{al}), 厚约 3.4 m, 泥质含量较高, 颗粒的最大粒径约为 25 cm, 磨圆度较高, 分选性较好, 密实性较好; ④白垩系下统河口群(K₁hk₃²) 砂泥互层, 棕红色、紫红色, 岩层稳定性较好, 节理裂隙及层理较发育, 岩层的表面风化严重。

根据滑坡现场工程地质测绘, 该黄土滑坡的岩土体结构上部为上更新统风成黄土, 下部为砂泥岩互层, 中部为薄层的中更新统粉质黏土和砂卵石夹层。黄土

和粉质黏土的接触带容易形成软弱滑动带。

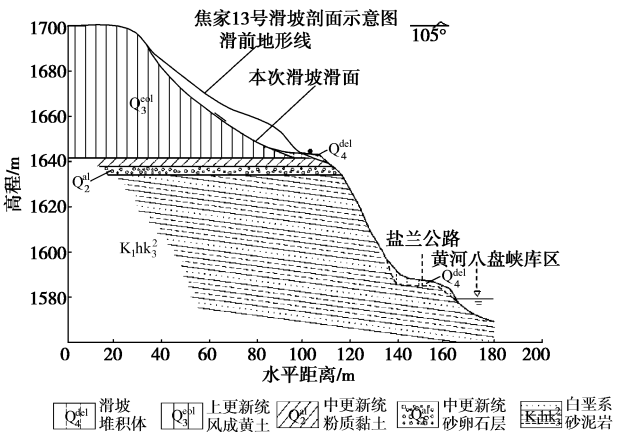


图 1 焦家崖头滑坡剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Jiaojiaayatou landslide

1.2 试验设备及模型设计

试验采用成都理工大学 TLJ-500 型土工离心试验机, 该机主要技术性能指标见表 1。

表 1 离心机主要技术指标

Table 1 Main technical indexes of geotechnical centrifuge

离心机容 量/(g·t)	有效 半径/m	离心 加速度/g	加速度稳 定精度/%	启动历时 /min	模型向 外部尺寸 /m
500	4.0	10~250	±0.5 F.S./ 12 h	≤15(0~ 200g)	1.0×0.6 ×1.0

注: ±0.5 F.S./(12h)指每 12 h 内离心机在某一加速度值下运行的实际加速度精度和相应量程之比。

土工离心模型试验模型和地质原型的相似关系非常重要, 模型比例尺缩小时, 模型各层相似材料的选择应当符合相似原理。本次模型试验采用几何相似常数 $C_l = n = 200$, 为实现等应力模拟, 模型与原型不但应保持几何相似, 其对应点的应力、应变还应满足相似要求, 故取 $C_\sigma = 1$ 。按 π 定理, 本试验中其他物理量的相似比见表 2。

表 2 离心模型实验相似关系

Table 2 Similar relations used in centrifugal model tests

物理量	相似 比尺	物理量	相似 比尺	物理量	相似 比尺	物理量	相似 比尺
加速度	1/n	密度	1	应力	1	弹性 模量	1
长度	n	重度	1/n	应变	1	剪切模量	1
面积	n ²	含水量	1	时间	1	内摩擦角	1
体积	n ³	孔隙比	1	位移	n	黏聚力	1
质量	n ³	泊松比	1	颗粒尺寸	1	抗弯矩	n ³

依据几何相似关系 $C_l = n = 200$, 选定斜坡的原型长×宽×高=100 m×120 m×100 m, 可得模型结构尺

寸为长×宽×高=0.5 m×0.6 m×0.5 m。依据相似关系确定的离心模型断面如图 2 所示。

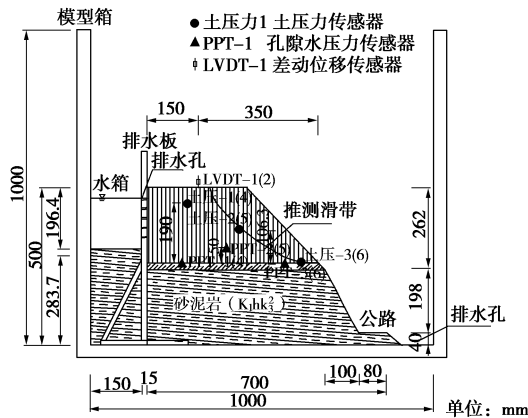


图 2 离心模型断面

Fig. 2 Section of centrifuge model

黑方台焦家崖头黄土滑坡是典型的高速远程黄土滑坡，其最主要的诱发因素为灌溉水作用，因此控制地下水位对于该地区黄土滑坡的减灾防灾具有重要的意义。在离心实验过程中，为了较好的模拟灌溉水作用效果，在坡体模型的后部设置了一个临时水箱和挡水板，挡水板的上部设置了 5 排直径为 2.5 mm 的排水孔（图 3）。实验之前在水箱里加一定的水位来模拟地下水位，在离心实验过程中水由此通道渗流到土体中，保证离心模型试验的持续供水作用，即用来模拟灌溉水作用的效果。

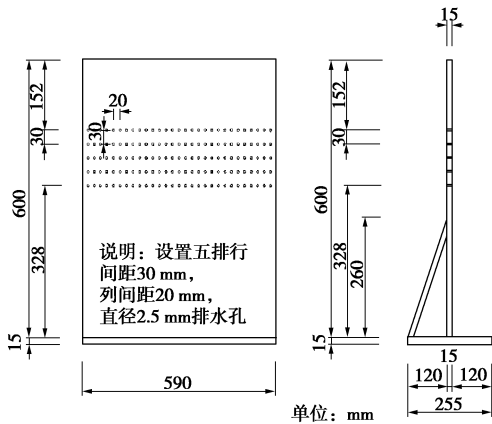


图 3 挡水板示意图

Fig. 3 Schematic diagram of eliminator

模型土体材料为黑方台焦家崖头地区原状试样，通过现场实验测得土体物理力学参数如表 3 所示。

表 3 原型地层物理力学性质

Table 3 Physico-mechanical properties of prototype layers							
土类	含水率/%	孔隙比e	干密度ρ _d /(g·cm ⁻³)	液限w _L /%	塑限w _p /%	抗剪强度	
						c /kPa	φ /(°)
马兰黄土	2.01	0.91	1.44	28.10	17.40	26.90	24.29

1.3 传感器布置

本次离心模型试验共埋设 6 个土压力传感器（土压#1、土压#2、土压#3、土压#4、土压#5、土压#6），传感器分两排分别埋设于预测滑面的上、中、下位置。6 个孔隙水压力传感器（孔压#1、孔压#2、孔压#3、孔压#4、孔压#5、孔压#6），分两排分别埋设于模型坡体的上、中、下段。设置了两个差动位移传感器（位移#1、位移#2），分别埋设于模型坡体顶部两侧。传感器及土压力计的埋设位置以现场测绘软弱带为基础，传感器布置图如图 4 所示。采用数值模拟计算的精确滑带位置研究工作有待继续深入。

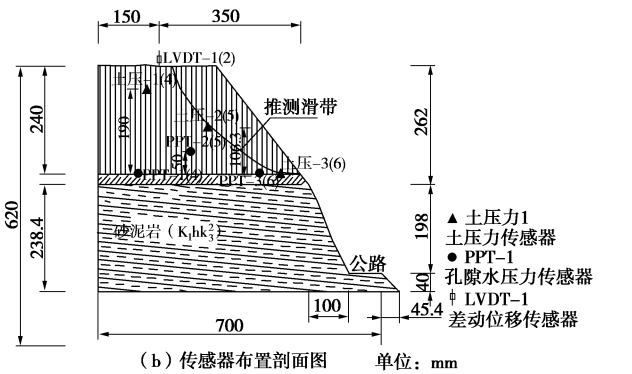
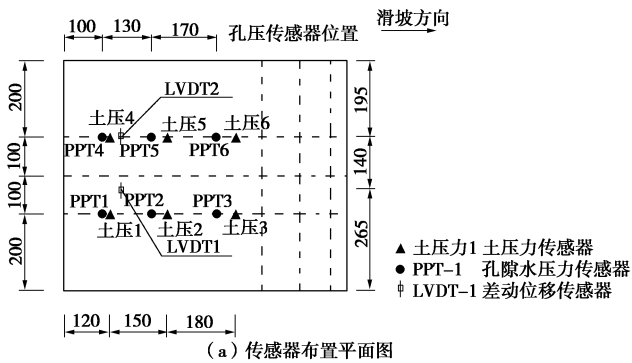


图 4 传感器布置图

Fig. 4 Layout of sensors

1.4 模型制作与试验过程

试验采用刚性模型箱，模型箱内径长为 1.0 m，宽 0.6 m，高 1.0 m，左侧边界为可透视的硬质玻璃材料。原状黄土试样由现场采取的非扰动黄土样制成，在试样的制作过程中，为保证试样满足实际情况，在模型的制作削坡时，应考虑尽可能的减少或降低所得原状试样的状态（应力状态、结构状态等）。因此在模型制作时，模型的削坡与实际剖面结构存在微小差异制作好的原状黄土试样模型如图 5 所示。

本次离心模型试验加载过程如下：①离心加速度由 0g 增加至 150g，历时 16 min；②以 150g 加速度匀速转动 5 min，实现试样固结；③加速至 200g，历时 2.5 min，以此加速度匀速转动至试样破坏，此过程历时 10 min；④逐渐减小加速度至静止，历时 20 min。加载历时曲线如图 6 所示。

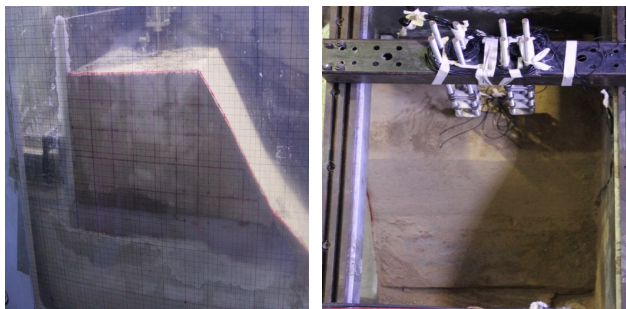


图 5 离心模型试验边坡模型

Fig. 5 Slope model used in centrifuge tests

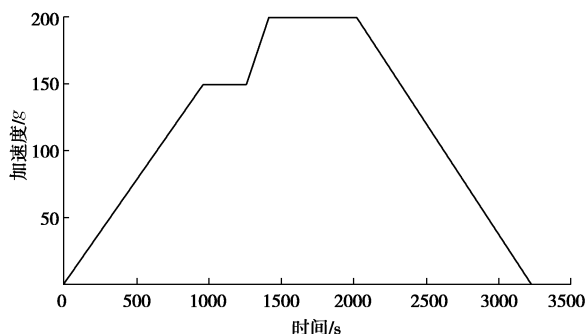


图 6 离心模型试验加载及历时曲线

Fig. 6 Loading and duration curve of centrifuge model

2 离心试验结果

2.1 坡顶沉降

黄土滑坡坡顶垂直位移随时间的变化情况如图 7 所示, 由图可见:

(1) 坡顶沉降量随着加载时间和离心加速度的增大而逐渐增大, 沉降变形主要发生在加速度值变化时。

(2) 在离心加速度在 150g 匀速转动 5 min 时, 坡体最大垂直位移为 28.55 mm; 当离心加速度增加至 200g 时, 坡体最大垂直位移为 31.74 mm; 当模型在离心加速度为 200g 匀速运转 2.5 min 时, 坡体最大垂直位移达到 33.38 mm。

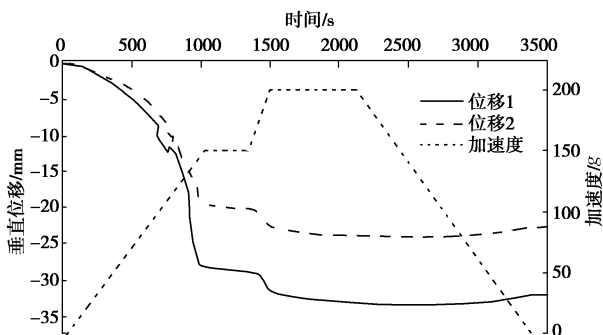


图 7 垂直位移随时间和加速度的变化曲线

Fig. 7 Variation of vertical displacement with time and acceleration

(3) 随着离心加速度的逐渐减小, 坡顶垂直位移产生少量的增加, 这是由于随着加速度的减小, 土体所受应力逐渐减小, 土体具有弹塑性性质, 产生了少

量的回弹。

2.2 坡体应力

通过模型中土压力传感器动态监测数据, 可知滑坡土体土压力随离心加速度和运行时间的变化曲线如图 8 所示。

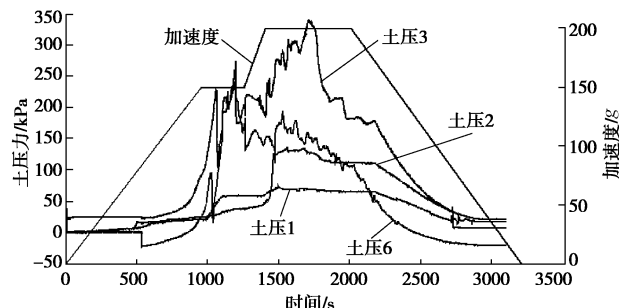


图 8 土压力随时间和加速度的变化曲线

Fig. 8 Variation of earth pressure with time and acceleration

由于#4, #5 土压力传感器由于故障原因, 一直没变化, 故采集数据不予采用。由图 8 可知:

(1) #1, #2, #3(#6)3 个位置土压力变化趋势基本相同, 即随着离心加速度和时间的增加, 土压力逐渐增大, 在 200g 离心加速度时达到最大, 之后随着离心加速度的减小而逐渐减小直至为 0。

(2) 土压力的变化由坡顶至坡脚呈现增大趋势。

(3) 土压力在加载时间为 700~1500 s 之前增长缓慢, 之后增长迅速, 这是由于随着加载时间和离心加速度增加, 坡体相应的孔隙水压力迅速上升。

(4) #1 在 150g 离心加速度匀速转动 5 min 时, 土压力基本保持不变, 随后增长较快; 在 200g 离心加速度时, 达到峰值, 最大峰值土压力为 59.5 kPa; 随着加载时间的增加逐渐降低, 说明此时坡体顶部已经产生了拉裂缝。

(5) #2 在 150g 离心加速度匀速转动 5 min 时, 在 1500 s 之前, 土压力基本保持不变, 随后增长较快; 在 200g 离心加速度时, 达到峰值, 最大峰值土压力为 117 kPa; 随着加载时间的增加逐渐降低, 说明此时滑坡中部已经产生滑动变形。

(6) #3 在 150g 离心加速度匀速转动 5 min 时, 土压力都出现两侧骤降随后又增加, 150~200g 离心加速度时, 多次短暂骤降但整体上呈增加趋势, 在 200g 离心加速度时, 达到峰值, 最大峰值土压力为 320 kPa; #3 土压力在加载时间为 1750 s, 离心机以 200g 离心加速度匀速运转时, 其土压力骤降到 160 kPa, 说明此时边坡土体已发生破坏, 随着离心加速度增大至 200g 时, 土压力进一步降低, 说明此时坡脚处发生部分破坏且产生了土体走滑。

(7) #6 在 150g 离心加速度匀速转动 5 min 时, 土压力都出现两侧骤降随后又增加, 在 150g 离心加速

度时,坡脚最大峰值土压力达 237 kPa。

2.3 坡体孔隙水压力

通过模型中孔隙水压力传感器动态监测数据,可知滑坡土体土压力随离心加速度和运行时间的变化曲线如图 9 所示。

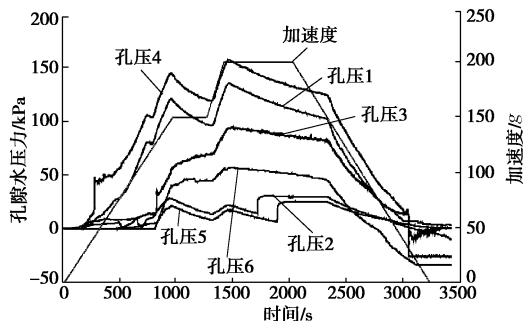


图 9 孔隙水压力随时间和加速度的变化曲线

Fig. 9 Variation of pore water pressure with time and acceleration

由图 9 可知:

(1) 相同埋深的两孔隙水压了变化规律基本相同,即随着加速度和时间的增加孔隙水压力而逐渐增大,在 200g 加速度时达到峰值,由于传感器的埋深不同,所以变化幅度也不尽相同。

(2) #1 和 #4 传感器埋设于坡顶粉质黏土层之上,在 200g 离心加速度时其孔压达到最大峰值,分别为 157.08 kPa 和 135.6 kPa;在 150g 匀速转动 5 min 时,孔压出现了下降趋势,在 1300 s 左右又开始上升,说明此时坡体已经出现裂隙,但裂隙又被逐渐压实,土压持续增加,所以孔压继续上升;在 200g 匀速运转时,孔压有峰值但逐渐降低,说明此时坡顶处已经产生拉裂缝。

(3) #2 和 #5 传感器埋设于坡体中部,同样在 200g 离心加速度时其孔压达到最大峰值,分别为 30.09 kPa 和 25.22 kPa;在 200g 匀速运转时,孔压有峰值但逐渐降低,说明此时坡顶至坡体中部处已经发生剪切变形。

(4) #3 和 #6 传感器埋设于坡脚处,在 200g 离心加速度时其孔压达到最大峰值,分别为 94.36 kPa 和 56.88 kPa;在 200g 匀速运转时,孔压有峰值但逐渐降低,说明坡体已整体破坏。

2.4 坡体变形破坏特征

坡体变形破坏过程如图 10 (a) ~ (f) 所示。由图 10 可以看出:

(1) 在离心加速度为 0~100g 增加时图 10 (a)、(d),斜坡坡顶位置出现拉张裂隙,随着裂隙增大,出现崩落现象;这一阶段的变形破坏可以认为是黄土斜坡在天然状态饱和度情况下的压致拉裂塌落阶段。

(2) 在离心加速度为增加至 200g 时(图 10 (e))时,模型坡体应力达到滑坡原型应力状态,斜坡坡顶

压致拉裂,坡体中部产生剪切屈服,坡脚产生压剪屈服,滑坡变形由中部向坡脚处延伸,随着坡体渐进式塑性变形由两端发展到贯通状态,最后滑坡失稳发生破坏(图 10 (f)),这一阶段的变形破坏可认为剪切滑动机制。

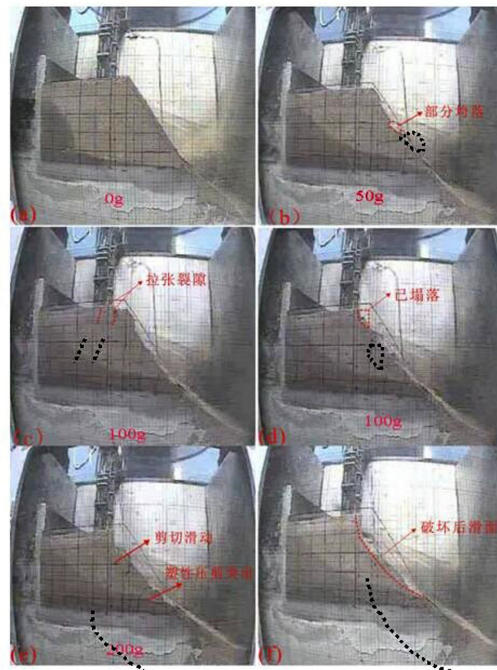


图 10 离心模型坡体变形过程图

Fig. 10 Deformation process of centrifugal model slope

3 结论与建议

以黑方台焦家崖头 13 号黄土滑坡为实例,进行了离心模型试验,对灌溉作用下黄土滑坡变形破坏特性进行了详细研究。试验表明:

(1) 坡顶沉降量随着加载时间和离心加速度的增大而逐渐增大,沉降变形主要发生在加速度值变化时,坡体最大垂直位移达到 33.38 mm。

(2) 随着离心加速度和时间的增加,坡体土压力逐渐增大,且坡脚>坡体中部>坡顶,在 200g 离心加速度时达到最大,随后随着离心加速度的减小而逐渐减小直至为 0;其中坡脚最大土压力为 320 kPa,坡体中部最大土压力为 117 kPa,坡顶最大土压力为 59.5 kPa。

(3) 随着离心加速度和时间的增加,坡体孔隙水压力逐渐增大,在 200g 离心加速度时达到最大,随后随着离心加速度的减小而逐渐减小直至为 0;其中坡脚最大孔隙水压力为 94.36 kPa,坡体中部最大孔隙水压力为 30.09 kPa,坡顶最大孔隙水压力为 157.08 kPa。

(4) 坡体变形破坏过程分为两个阶段:第一阶段为坡脚蠕动变形,坡顶压制拉裂,第二阶段为坡体

受地下水及土体自重作用产生的剪切滑移。

(5) 滑坡变性破坏机制: 随着加速度的增加, 坡脚出现蠕动变形, 坡体后部出现刚性拉裂, 裂隙随加速度增加出现交替张开与闭合现象, 裂隙导致地下水的入渗和运移加快, 进而地下水浸润线逐渐升高, 坡体中的土体由非饱和变为饱和状态, 坡顶沉降速率加快, 坡体从坡脚和坡顶处发生破坏, 最终发展为贯穿整个坡体。

参考文献:

- [1] 王家鼎, 等. 黑方台塬灌溉水诱发黄土滑坡群的系统分析[J]. 水土保持学报, 2001, **2**(3): 10 - 13. (WANG Jia-ding, et al. Systems analysis on Heifangtai loess landslide in crows induced by irrigated water[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, **2**(3): 10 - 13. (in Chinese))
- [2] 王家鼎, 肖树芳, 张倬元. 灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J]. 工程地质学报, 2001, **9**(3): 241 - 246. (WANG Jia-ding, XIAO Shu-fang, ZHANG Zhuo-yuan. The mechanism for movement of irrigation-induced high-speed loess landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, **9**(3): 241 - 246. (in Chinese))
- [3] 金艳丽, 戴福初. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1493 - 1499. (JIN Yan-li, DAI Fu-chu. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1493 - 1499. (in Chinese))
- [4] 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 and slides at Heifangtai loess plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2008, **26**(3): 364 - 371. (in Chinese))
- [5] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(4): 530 - 540. (ZHANG Mao-sheng, LI Tong-lu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(4): 530 - 540. (in Chinese))
- [6] 张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术—以黄河三峡库区黑方台移民灌区为例[J]. 地质通报, 2013, **32**(6): 833 - 839. (ZHANG Mao-sheng. Formation mechanism as well as prevention and controlling techniques of loess geo-hazards in irrigated areas: a case study of Heifangtai immigration area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River[J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(6): 833 - 839. (in Chinese))
- [7] 王玉峰, 程谦恭, 黄英儒. 不同支护模式下黄土高边坡开挖变形离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(5): 1032 - 1046. (WANG Yu-feng, CHENG Qian-gong, HUANG Ying-ru. Centrifuge tests on excavation of high loess slope with different reinforcement modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(5): 1032 - 1046. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 杨春宝, 朱 斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(7): 1261 - 1271. (YANG Chun-bao, ZHU Bin, KONG Ling-gang, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(7): 1261 - 1271. (in Chinese))
- [10] 潘皇宋, 李天斌, 仵拔云, 等. 降雨条件下折线型滑面的大型滑坡稳定性离心模型试验[J/OL]. 岩土工程学报, <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20150916.1817.020.html>. (PAN Huang-song, LI Tian-bin, WU Bo-yun, et al. Centrifugal model test on large-scale landslide with broken-line slip surface under rainfall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20150916.1817.020.html>. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 张茂省, 程秀娟, 董 英, 等. 冻结滞水效应及其促滑机理—以甘肃黑方台地区为例[J]. 地质通报, 2013, **32**(6): 852 - 860. (ZHANG Mao-sheng, CHENG Xiu-juan, DONG Ying, et al. The effect of frozen stagnant water and its impact on slope stability: a case study of Heifangtai, Gansu Province[J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(6): 852 - 860. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)