

甘肃黑方台地区灌溉型黄土滑坡形成机理 与运动学特征 ——以焦家崖头13号滑坡为例

贾 俊, 朱立峰, 胡 炜

JIA Jun, ZHU Li-feng, HU Wei

国土资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR/Xi'an Center of Geological Survey, China Geology Survey,
Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:甘肃黑方台地区常年农业灌溉导致塬边产生大量的黄土滑坡,灌溉水长期入渗引起灌区地下水位上升,因地下水作用造成水敏性黄土遇水乃至饱水后强度劣化,进而产生斜坡失稳,因黄土滑坡剪出口高悬于上缓下陡的坡体中部,其成灾模式呈现出高位剪出后高速滑动,并产生远程运移,波及范围大,致灾后果严重。以甘肃省永靖县黑方台焦家崖头滑坡为例,在现场调查和地下水动态监测的基础上,对灌溉型黄土滑坡塑流-拉裂形成机理进行分析,并运用离散元模拟方法,对地下水位上升过程中模型底部饱水黄土软弱层的形成、演化过程和滑坡运动学特征进行模拟研究。结果表明,随地下水位的上升,模型底部软弱层范围不断增大;孔隙水压力主要作用于滑坡底部软弱层饱水黄土;地下水位高程上升至标高 1682m 时,滑坡产生整体破坏。

关键词:黄土滑坡;灌溉;塑流-拉裂;形成机理;运动学特征

中图分类号:P642.22

文献标志码:A

文章编号:1671-2252(2013)12-1968-08

Jia J, Zhu L F, Hu W. The formation mechanism and disaster mode of loess landslides induced by irrigation in Heifangtai, Gansu Province: A case study of the 13th landslide in Jiaojiaayatou. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12):1968-1975

Abstract: Due to long-term irrigation, dozens of loess landslides were triggered along the edges of Heifangtai plateau, Gansu Province. Long-term infiltration of irrigation water not only leads to the elevation of groundwater table but also results in the reduction of strength of water-sensitive loess after soaking, and thus loess landslides occur. As the shearing mouths of the loess landslides are usually situated in the middle of the slopes which are gentle on the top and steep at the bottom, the disaster modes show features of high elevation shearing failure and later high-speed sliding. The landslides usually have long run-out, which affect large areas and cause severe consequences. A landslide case in Jiaojiaayatou of Heifangtai in Gansu Province was studied in this paper. Based on field investigation and groundwater in-situ monitoring, the authors analyzed the formation mechanism of the plastic flow-tension crack mode of irrigation-induced loess landslide. Discrete element method was used to investigate the formation and evolution process of weak saturated loess layer in the process of the rising of groundwater table. The results show that, with the rise of the groundwater table, areas of the weak layer at the bottom of the model continuously increase. The pore water pressures mainly act on the weak saturated loess at the bottom of the landslide. When the groundwater table rises to an elevation of 1682m, overall failure of landslide occurs.

Key words: loess landslide; irrigation; plastic flow-tension crack; formation mechanism; kinematic features

收稿日期:2013-09-06;修订日期:2013-10-28

资助项目:国家科技支撑计划项目课题(编号:2012BAK10B02)和中国地质调查局项目(编号:1212011014024)

作者简介:贾俊(1985-),男,硕士,实习研究员,从事地质灾害调查与研究。E-mail: geoj@qq.com

西北黄土高原引水灌区因长期沿袭大水漫灌的粗放灌溉方式,改变了受水区原生水文地质条件,造成地下水位不断上升,在塬边斜坡地带引发了大量的崩滑灾害,造成了重大的生命财产损失,在一定程度上还阻滞了区域经济的发展,最为典型的是甘肃省永靖县黑方台灌区。甘肃黑方台地区特定的地质结构决定了区内黄土塬边斜坡具有风积黄土+黄河四级阶地冲洪积层粉质粘土与砂砾石+白垩系河口群砂泥岩多层坡体结构,长期灌溉渗透导致在相对隔水的粉质粘土层上部形成具有一定厚度且随着地下水位上升仍在不断增厚的流塑—软塑状饱和黄土软弱层。饱和黄土软弱层在上覆岩土体自重作用下,产生塑性压缩并向临空方向挤出,形成塑流—拉裂式的黄土滑坡。水是诱发该类型黄土滑坡的最主要因素,水动力条件的改变通常是由地下水补给量的激增或排泄水位异常突变所引起的^[1],其对滑坡的作用机制主要表现为 2 个方面:一是孔隙水压力和渗透压力的作用;二是岩土体容重的增加及力学强度的降低^[2]。国内外众多学者对塑流—拉裂滑坡成因机制和灌溉触发滑坡机制进行了研究,水动力触发黄土滑坡的失稳机制主要为塑流—拉裂破坏模式,软弱层的形成和塑性形变是该类灾害产生的关键^[3-4];灌溉导致的地下水上升、黄土强度降低是黑方台地区高密度、高频率滑坡发生的主要因素^[5-8];金艳丽等^[9]、吴树仁等^[10]认为饱水土体中孔隙水压力上升与动水压力作用对黄土滑坡有直接影响;王家鼎等^[11-12]认为黑方台黄土滑坡形成机理为蠕动液化;此外,还有部分学者^[13-15]认为,滑体高速剪切滑动导致滑带处产生的超孔隙水压力对高速黄土滑坡的形成起着至关重要的作用。前人虽对塑流—拉裂式黄土滑坡

形成机理和滑坡水动力触发作用进行了研究,但对灌溉型黄土滑坡的形成机理与运动学特征研究不足。

本文以甘肃省永靖县黑方台焦家崖头 13 号滑坡为例,在现场调查、地下水动态监测的基础上,定性分析了该类型滑坡形成机理,并运用二维离散元数值模拟方法进行流固耦合模拟,研究地下水对滑坡作用机制和灌溉型黄土滑坡高位剪出后高速远程运动学的特征。

1 黑方台焦家崖头 13 号滑坡概况

甘肃省永靖县黑方台原为四周被沟谷深切的孤岛状旱台,天然状况下大气降水是区内地下水唯一的补给来源。自 1968 年农业灌溉以来,长期沿袭大水漫灌的方式进行农业灌溉,因相对隔水的粉质粘土层阻隔,沿其顶面之上的黄土含水层地下水位不断上升,平均升幅达 0.27m/a。由图 1 可知,截止 2011 年 5 月,地下水位标高为 1685.6m,2010 年 7 月至 2011 年 5 月间水位上升达 0.45m,7 月下旬至 12 月初升幅较大,12 月初至 5 月相对平稳,系 7 月份下旬随着秋种开始灌溉量相对增加所致。

焦家崖头滑坡位于黑台东南侧,自 20 世纪 80 年代以来曾多次发生滑动,主滑方向 105°,为典型的高速黄土滑坡(图 2)。滑坡所处斜坡坡高约 130m,坡度整体呈上缓下陡,上部黄土段坡度约为 32°,下部基岩段坡度约为 43°。滑坡主要发育在斜坡上部黄土层内,剪出口位于粉质粘土顶面,滑坡前缘高程 1648m,后缘高程 1702m。

斜坡为黄土、粉质粘土、砂砾石与基岩组成的多层结构斜坡,地层由上至下分别为:①上更新统风成

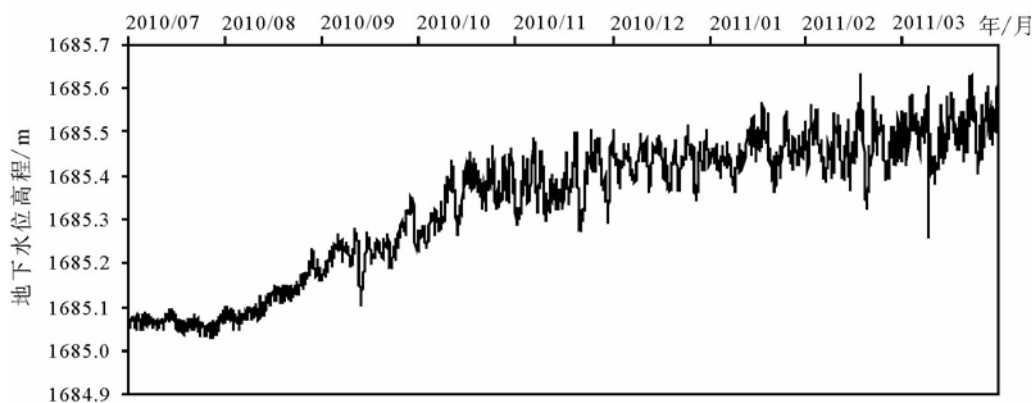


图 1 黑台塬面地下水位动态监测曲线

Fig. 1 Monitoring data of groundwater level at Heitai loess platform

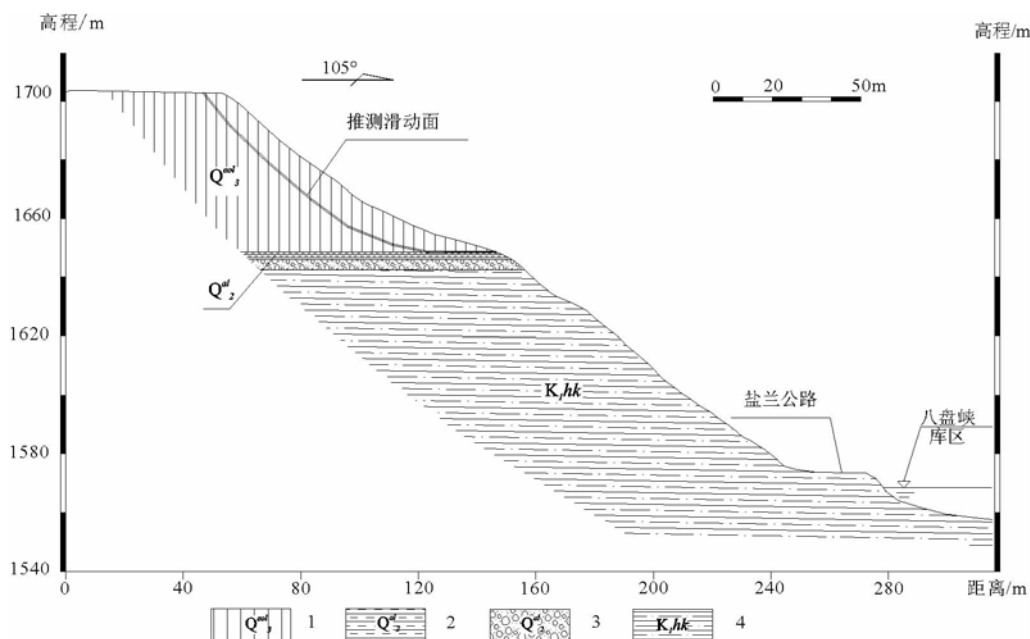


图2 黑方台焦家崖头滑坡剖面

Fig. 2 Profile of the Jiaojiaayatou landslide

1—第四系晚更新统风积黄土;2—第四系中更新统粉质粘土;
3—第四系中更新统砂砾石;4—下白垩统河口群砂泥岩

黄土层(Q_3^{eol})厚约 49m,呈淡黄色,砂粒含量高,土质疏松,垂直节理发育;②中更新统冲积粉质粘土层(Q_2^{al})厚约 2.2m,棕褐色,硬塑,可见明显波状层理,沿其顶面地下水呈线状渗出,流量约 0.5L/s;③中更新统冲积砂砾石层(Q_2^{al})厚约 3.4m,颗粒最大粒径约 25cm,泥质含量占 10%左右,分选性和磨圆度均较好,处于密实状态;④下白垩统河口群(K,hk)为棕褐色、棕红色砂泥岩互层,岩层产状为 $295^\circ \angle 8^\circ$ 。

黑方台焦家崖头滑坡近期于 2011 年 4 月 27 日和 2012 年 2 月 7 日先后发生 2 次滑动:2011 年 4 月 27 日 15 时滑动规模约 $0.9 \times 10^4 \text{m}^3$ (图 3),在斜坡坡脚可见堆积体宽约 60m,厚 2~3m,最厚处约 4m,堆积量约 3000m^3 ,掩埋盐兰公路部分路段,其余滑体冲入黄河八盘峡库区内,滑床上残存少量滑体,滑体多解体为散体粉状,幸未造成人员伤亡;2012 年 2 月 7 日 16 时,再次发生高速滑动,滑动规模约 $12 \times 10^4 \text{m}^3$ (图 4),滑坡将正在行驶的 2 辆车推入黄河八盘峡库区,造成 1 人死亡、3 人失踪的惨剧,并阻断盐兰公路,大部分滑体高速冲入八盘峡库区,激起高约 6m 的涌浪,涌浪最远波及至黄河南岸 250m 处。

2 灌溉型黄土滑坡形成机理

甘肃黑方台地区由于长期沿袭大水漫灌的农业灌溉方式,台塬黄土层内地下水位逐年上升,受地下水作用塬边产生数十处黄土滑坡,自 20 世纪 80 年代以来塬边发生 120 余起滑坡事件,造成大量的人员伤亡和财产损失。其中,多数黄土滑坡失稳破坏具有塑流-拉裂的形成机制,本节以焦家崖头 13 号滑坡为例,对该类型黄土滑坡塑流-拉裂机理进行定性分析,滑坡塑流-拉裂形成机理如图 5 所示。

(1)长期引水灌溉改变了黄土台塬原有的水文地质条件,黄土层内地下水位逐年上升,同时,塬边斜坡坡体内地下水位也逐步升高。黄土具有强烈的水敏性,饱水后强度降低。在地下水的作用下,塬边黄土斜坡下部饱水黄土原生结构遭到破坏,骨架排列状态改变,可溶盐溶解,土粒之间的粘结力减小、连接强度降低。地下水作用导致斜坡下部形成低强度饱水黄土软弱层,流塑-软塑状饱水黄土软弱层的形成是该类黄土滑坡产生的先决条件。

(2)随地下水位不断抬升及水岩作用对黄土强度劣化作用的逐步加深,塬边斜坡下部饱水黄土的



图 3 滑坡失稳后全景

Fig. 3 Plan view of the Jiaojiayatou landslide, April 27, 2011

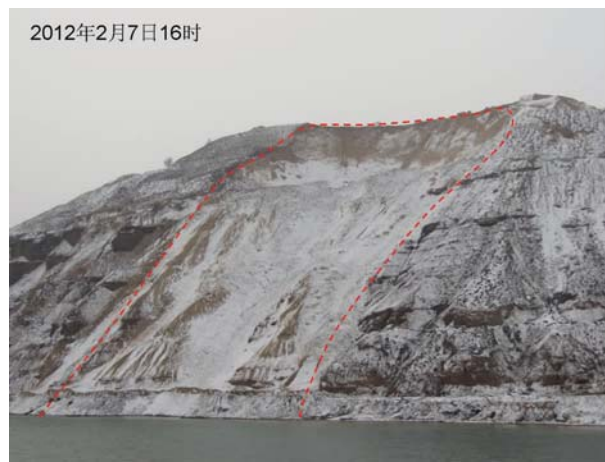


图 4 滑坡失稳后全景

Fig. 4 Plan view of the Jiaojiayatou landslide, February 7, 2012

强度显著降低,斜坡下伏饱水黄土软弱层在上覆土体压力作用下,不断压缩、挤出变形并向临空方向塑性流动(图 6),此间滑坡前缘伴随有局部变形破坏。同时,由于斜坡下部饱水黄土压缩、挤出,上覆土体产生拉裂、不均匀沉降等变形,并在后缘形成拉裂缝和陷落带(图 7)。斜坡后缘裂缝与下部饱水黄土组合形成一条潜在的滑动面,斜坡整体向临空方向发生蠕变变形。下伏饱水黄土软弱层向临空方向发生流塑态破坏是该类滑坡产生的重要条件,也是该类型滑坡塑流-拉裂机制的重要表现。

(3)随着饱和黄土软弱层塑流的持续发展,已形

成的拉裂缝在坡体内部自上而下进一步扩张延伸,与斜坡下部软塑状饱和黄土形成一贯通的滑动面。滑坡整体产生触发性失稳破坏,上覆滑体冲击下伏饱水黄土,强大的冲击力导致下伏饱水黄土内产生超孔隙水压力并伴有液化,上覆滑体冲击挤压几乎完全丧失抗剪强度的饱和黄土,随之产生高速滑动。由于滑坡剪出口位置高、临空条件好,滑体从剪出口位置高速滑出,局部伴随有抛射过程。滑坡破坏过程中滑体具有能量大、速度快、运动距离远等特性,为典型的高速远程黄土滑坡。

滑坡失稳破坏后,滑体彻底滑入八盘峡库区,并

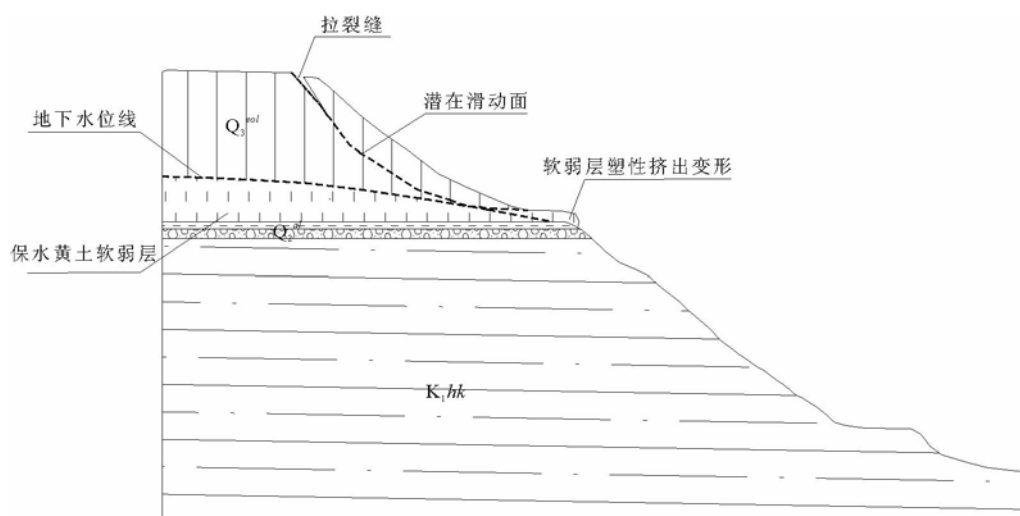


图 5 JH13 号滑坡塑流-拉裂形成机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the plastic flow-tension crack formation mechanism of the JH13# landslide



图6 滑坡前缘饱水黄土塑性流动

Fig. 6 Plastic flow image of the saturated loess in the front of the landslide



图7 滑坡后缘拉裂变形

Fig. 7 Pull-cracking deformation at the rear edge of the landslide

未在滑坡坡脚处堆积压脚,良好的临空条件和陡立的滑坡后壁为滑坡再次发生奠定了良好的基础,滑坡进入新一轮的滑动周期。随着地下水作用的逐步加强,斜坡基底软弱层继续发生塑性挤出变形,在上覆土体作用下滑坡周而复始再次发生变形,形成黑方台地区灌溉型滑坡特有的逐级后退式高速远程滑动。

3 灌溉型黄土滑坡运动学特征离散元模拟研究

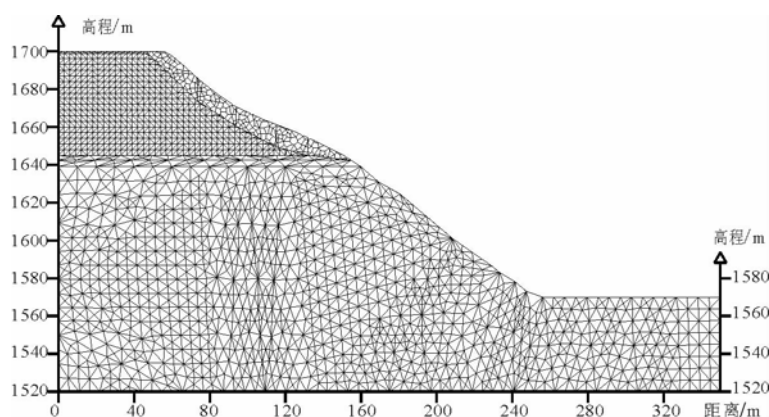
灌溉水入渗过程中因相对隔水的粉质粘土层隔阻而形成厚度不断增大的饱和黄土软弱层,沿粉质粘土层顶面成为黑方台黄土滑坡的区域性控滑结构面。黄土饱水后原生结构发生破坏,骨架排列状态改变,可溶盐溶解流失,土粒之间的粘结力减小、连接强度降低,导致黄土强度锐减。同时,地下水位以下饱水黄土在正孔隙水压力作用下,由摩尔-库伦强度理论有效应力表达式: $\tau = (\sigma - \mu_w) \tan \varphi + c$ 可知,正孔隙水压力作用导致土体有效应力降低,进而造成土体抗剪强度降低。饱水段黄土持续遭受地下水软化、溶蚀及孔隙水压力的作用,其强度不断损失,在上覆土体的强大压力之下,向临空方向产生塑流挤出。滑坡前缘阻滑段饱水黄土强度降低,对滑坡的稳定性产生直接的影响。本节采用二维离散元数值模拟软

件,以焦家崖头滑坡为地质原型,研究地下水位上升造成斜坡底部饱水黄土软弱层分布范围、正孔隙水压力分布状况、灌溉型黄土滑坡破坏过程及运动学特征。

3.1 模型建立

离散元模型选取黑方台焦家崖头滑坡为地质原型,依据前述滑坡基本特征及工程地质条件,选取主滑方向剖面(图2)为计算剖面,并简化为概化模型(图8)。概化模型地层结构与地质原型保持一致,模型底部边界长350m,左侧边界高180m,右侧边界高50m。模型以垂直向上为Y轴正方向,以滑坡的主滑方向(105°)为X轴正方向,斜坡整体高度为130m。

在离散元模型中,由于滑坡破坏体单元自身变形相对于滑坡高速远程运动距离可以忽略不计。因



8 黑方台焦家崖头滑坡离散元概化模型

Fig. 8 Discrete element model of the Jiaojiaayatou landslide

此,在本次模拟时将节理裂隙化的滑坡破坏体考虑为刚体,采用刚体模型。其余模型单元产生了相对自身尺寸较小的弹塑性变形,故采用服从莫尔-库仑屈服条件的弹塑性本构模型。

3.2 边界条件及模拟工况

计算模型应力场边界条件:模型左右两侧边界条件为水平向固定、竖直向自由;模型底部边界条件为水平向自由、竖直向固定。计算模型渗流场边界条件:模型粉质粘土层(相对隔水层)顶面边界设置为不透水边界,粘土层以上左侧边界为动水头边界,受边界水头函数控制,右侧坡面设置为排水边界。模型以粉质粘土层顶面为地下水位基准面,高程为 1652m,本次模拟未考虑滑坡造成的涌浪灾害。数值模拟计算所采用的黄土及裂隙物理力学参数见表 1。

3.3 模拟结果分析

3.3.1 饱水黄土软弱层形成与演化

长期引水灌溉导致黄土层地下水位上升,地下水位以下(孔隙水压力作用区域)饱水黄土为斜坡基底软弱层。模型旨在对地下水位上升过程中斜坡基底软弱层形成与演化进行模拟分析,地下水位上升过程中模型底部软弱层范围如图 9 所示。

模拟结果显示,模型斜坡基底饱水黄土软弱层范围与黄土层地下水位上升趋势保持一致,随着地下水位的上升,斜坡基底软弱层范围不断扩大,相应地孔隙水压力不断增长,且孔隙水压力作用与影响范围不断扩大,地下水位标高在 1662m、1670m、1677m、1682m 时,最大孔隙水压力分别为 99.5kPa、179.0kPa、248.7kPa、298.2kPa。滑坡区范围内饱水黄土软弱层主要集中在滑坡坡脚剪出口处,地下水位上升致使剪出口部位饱水黄土软弱层的范围不断扩大。地下水位高程上升至 1682m 时,剪出口一带饱水黄土软弱层厚度达 12m,地下水的软化作用与正孔隙水压力作用导致剪出口饱和黄土强度显著降低,滑坡位移矢量图(图 10)显示,地下水位高程上

升至 1682m 时,滑坡整体产生较大的位移,基底饱水黄土软弱层区域土体向临空方向变形的位移量明显大于滑体其它位置处的变形。

3.3.2 灌溉型黄土滑坡运动学特征

地下水位逐步抬升使得斜坡底部饱水黄土软弱层范围不断增大,地下水软化作用与孔隙水压力作用导致滑坡前缘剪出口部位饱水黄土强度显著降低,在上覆土体压力作用下产生压缩变形并向临空方向挤出,加之焦家崖头一带剪出口位置较高,最终产生高位滑动,借助滑动过程中所产生的气垫效应形成高速远程运移,滑体常在重心脱离剪出口时产生抛射飞行,滑体高速坠入黄河八盘峡库区激起涌浪。本节通过离散元模拟对焦家崖头高速黄土滑坡的破坏过程和运动学特征进行研究,不同迭代时步对应的块体运动状态见图 11。

黑方台焦家崖头高速远程黄土滑坡变形破坏过程的模拟是一个全过程的动态数值模拟,滑坡从变形演化到破坏不仅是动态力学过程,也是变形量从量变积累到质变的过程。据数值模拟结果,将灌溉诱发型高速远程黄土滑坡的破坏过程和运动学特征详细描述如下。

(1)斜坡下部饱水黄土软弱层形成,产生压缩变形并向临空方向塑性挤出。灌溉导致斜坡底部黄土饱水形成软弱层,饱水黄土承受正孔隙水压力作用及地下水软化作用,土体的抗剪强度降低;地下水位以上非饱和带土体含水量增高,基质吸力下降,抗剪强度同样明显降低。滑坡下伏软弱层饱水黄土强度显著降低,在上覆土体强大的自重压力作用下发生压缩变形,进而向临空方向塑性挤出变形。随着地下水位的不断抬升,滑坡下部软弱层饱水黄土范围不断扩大,软弱层塑性挤出变形加剧,形成拉张破坏区段(图 11-a,红色区段)。同时,由于滑坡下部软弱层压缩和塑性挤出变形,上部滑体在自重作用下发生蠕滑变形,滑坡自上而下形成一条潜在的滑动面。随着滑坡变形的逐步加剧,滑动带范围内土体由静

表 1 黄土及裂隙主要物理力学参数

Table 1 Physical mechanical parameters of the losse and loess fissures

黄土 及裂隙	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 /MPa	泊松比	内聚力 /kPa	内摩擦角/°	法向刚度 /MPa·m ⁻¹	切向刚度 /MPa·m ⁻¹
黄土	18	8	0.35	30	25	/	/
垂直裂隙	/	/	/	0	0	1000	100
斜向裂隙	/	/	/	22	18	1000	100

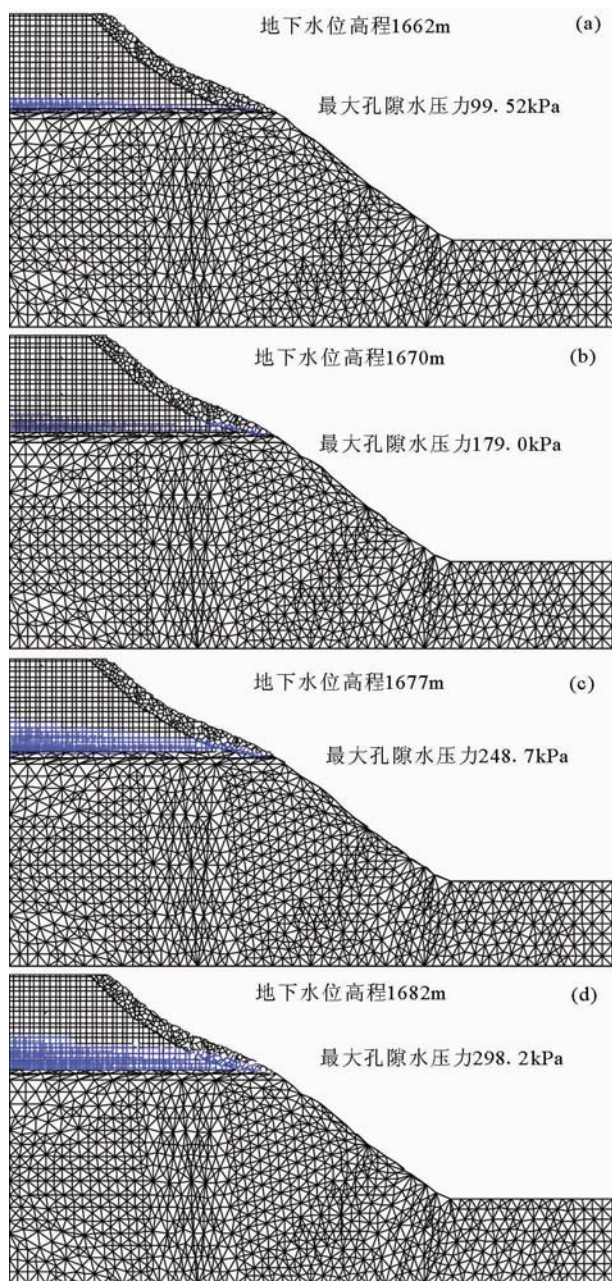


图9 不同地下水位高程模型软弱层范围
(孔隙水压力作用区域)

Fig. 9 Weak layer areas of the model at
different ground water levels

摩擦状态逐步转变为动摩擦,滑坡积聚了大量能量,处于临滑状态。

(2)斜坡基底软弱层塑性挤出继续发展,滑动面贯通,高位剪出形成高速黄土滑坡。滑坡底部软弱基座饱水黄土强烈压缩、塑性挤出继续发展,上覆滑体

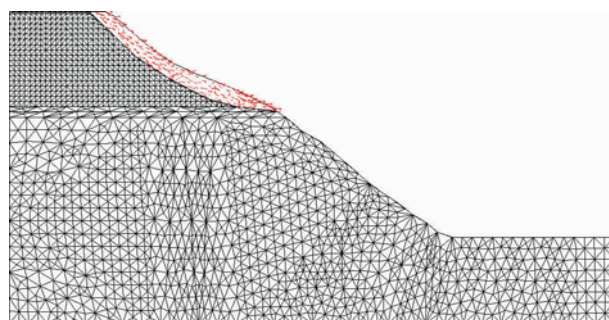


图10 地下水位高程1682m滑坡位移矢量图
Fig. 10 Displacement vector diagram
at groundwater level of 1682m

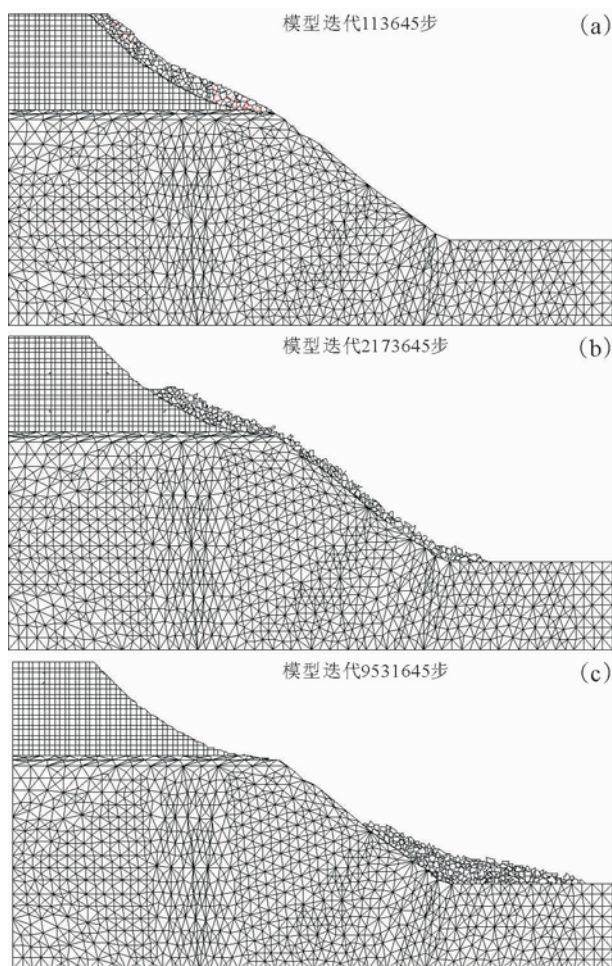


图11 数值模型不同迭代时步对应的块体运动状态
Fig. 11 Unit motion state corresponding to different
iterative steps of numerical model

逐渐丧失支撑,向临空方向发生明显变形,滑坡后缘形成长大的拉裂缝,裂缝与下伏软弱层组合形成的滑动面最终完全贯通。滑动带附近土体受到剪切力

的作用,土体颗粒产生滑移,改变排列状态,饱水段滑带在原有静水压力的基础上产生超孔隙水压力,有效应力显著降低,产生轻微液化,滑坡沿滑带产生突发性高速滑动(图11-b)。由于滑坡剪出口具有高位特征,滑坡滑动后,滑体的重力势能完全转化为动能,绝大多数滑体沿原有斜坡产生高速滑动,少量滑体以凌空飞行的方式运动,滑坡解体后以黄土泥流的形式高速俯冲至斜坡坡脚处,滑动过程中滑体的运动状态极为复杂,表现出紊乱的特征。

(3)高速运动滑体稳定堆积。黑方台焦家崖头滑坡实际失稳破坏过程中,绝大多数滑体高速八盘峡库区产生巨大涌浪,冲击距离远至黄河南岸逾250m,产生巨大危害,少量滑体堆积于坡脚盐兰公路平台上,极少量的滑体披覆于原斜坡坡面上。由于软件本身限制,本次模拟未对滑体冲入黄河库区产生涌浪灾害进行模拟研究。如图11-c所示,模拟结果显示,高速运动的滑体经过长距离的滑动,稳定堆积于斜坡坡脚处,少量滑体残留在滑床及下部基岩段斜坡坡面上。

4 结 论

(1)灌溉导致地下水位上升是黑方台塬边黄土滑坡的主要诱发因素,滑坡具有典型的塑流-拉裂形成机制。

(2)斜坡基底形成饱水黄土软弱层,在上覆岩土体自重作用下,软弱层土体压缩变形并向临空方向塑性挤出对该类型滑坡的稳定性有直接影响。

(3)黑方台焦家崖头黄土滑坡为逐级后退式高速远程黄土滑坡,其形成过程可概括为:地下水位上升→饱水黄土软弱层形成→软弱层压缩、塑性挤出变形→拉裂缝产生→变形加剧→滑坡产生,并周期性循环滑动。

致谢:成文过程中得到项目组其他成员的帮助,审稿专家对论文的修订提出了宝贵的意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,2009.
- [2]刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学,2005,26(5):769-773.
- [3]陈广波. 塑流-拉裂型滑坡地质特征及形成机制[J]. 铁道工程学报,1996,49(1):93-102.
- [4]王根龙,伍法权,祁生文,等. 塑流-拉裂式崩塌机制及评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增1):2863-2869.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]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.
- [8]张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术[J]. 地质通报,2013,32(6):833-839.
- [9]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.
- [10]吴树仁,石菊松,张永双,等. 滑坡宏观机理研究——以长江三峡库区为例[J]. 地质通报,2006,25(7):874-879.
- [11]王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化[J]. 地质论评,1992,38(6):532-539.
- [12]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.
- [13]Th W J Van Asch, J Buam L P H. A view on some hydrological triggering systems in landslides[J]. Geomorphology,1999,30: 25-32.
- [14]朱立峰,胡炜,贾俊,等. 甘肃永靖黑方台地区灌溉诱发型滑坡发育特征及力学机制[J]. 地质通报,2013, 32(6):840-846.
- [15]邢爱国,高广运,陈龙珠,等. 大型高速滑坡启程流体动力学机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):607-613.
- [16]ITASCA Consulting Group Inc. Universal Distinct Element Code, Version 3.1 User's Manual[Z]. Minnesota USA: ITASCA Consulting Group, Minneapolis, 1999.