

文章编号: 1008-2786-(2019)4-528-10
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000445

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

周 琪¹, 许 强^{1*}, 周 书², 彭大雷¹, 周小棚¹, 元 星³

(1. 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;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

3. 四川轻化工大学 土木工程学院, 四川 自贡 643000)

摘 要: 甘肃省黑方台地区农业灌溉诱发大量的静态液化型滑坡, 此类滑坡失稳前变形迹象小、启动速度快、运移距离远, 具有显著的突发特征并严重威胁到当地居民的生命财产安全。目前对突发型滑坡的运动过程, 主要集中在定性和半定量研究方面, 缺乏合理的定量研究。本文选取黑方台地区典型的陈家 8# 突发型滑坡, 采用 Massflow 数值模拟软件对该滑坡进行反演, 依据滑距及堆积范围吻合率定量判断反演结果的准确度, 利用最优的吻合结果来分析滑坡启动后不同时刻的堆积厚度和运动速度, 得出如下结论: (1) 对于陈家 8# 滑坡, 当内聚力为 1000 Pa、内摩擦角为 31°、基底液化系数为 0.63 时, 滑距与堆积范围吻合率分别为 0.94 和 0.89, 反演获得的滑坡堆积范围与真实堆积非常接近。(2) 数值模拟结果显示, 滑坡主滑方向的平均厚度约 1.20 m, 最大堆积厚度约 4.10 m, 反演结果与真实堆积厚度较为吻合, 后缘高差与滑距之比为 0.05, 体现此类滑坡较强的流态特征。(3) 滑坡的运动过程可分为启动加速、稳定加速、减速堆积三个阶段, 陈家 8# 滑坡从启动到最终静止整个过程仅用 42 s, 最大运动速度介于 15 m/s 至 20.30 m/s 之间, 启动加速阶段时间仅占滑坡运动总时间的 12.85%, 而减速堆积阶段占滑坡运动总时间的 77.38%, 进一步表明其流态特性, 体现该类滑坡较强的破坏性。

关键词: 突发性; Massflow; 参数反演; 数值模拟吻合率; 黑方台

中图分类号: P694

文献标志码: A

甘肃省黑方台地区隶属黄河中上游四级阶地, 有着典型的黄土台塬地貌特征。当地 20 世纪 60 年代修建水库致使移民搬迁到黑方台地区, 移民将原本荒芜的台塬改造为农业耕地, 每年数次大水漫灌致使台塬中心部位地下水抬升约 40 m^[1], 大面积黄土正在向完全饱和状态转化。黑方台地区历史记载发生的滑坡有 200 余次, 从目前已经发育的 75 处黄土滑坡来看, 具有渐进后退特征的突发型黄土滑坡多达 20 余处。黑方台已发生的突发型黄土滑坡, 发现多具有斜坡底部饱水、渐进后退、速度快、滑距远

等特点, 滑坡的运动过程与成因机理及监测预警等联系紧密, 准确的反演获得突发型滑坡启动后不同时刻的堆积范围、堆积厚度与运动速度, 可为潜在危险性滑坡数值模拟正演提供方法, 进而为工程选址、避险救灾提供参考依据。

黑方台地区的突发型滑坡与溃散性滑坡有很强的相似性, 表现为组成颗粒物松散、底部饱水等方面, 溃散性滑坡启动呈现突发性、整体性、彻底性^[2]。目前对于滑坡的运动情况, 主要研究集中于滑距和危险范围预测方面, 通过对黑方台地区滑坡

收稿日期 (Received date): 2019-05-06; 改回日期 (Accepted date): 2019-08-13

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41630640, 41790445) [National Natural Science Foundation of China (41630640, 41790445)]

作者简介 (Biography): 周琪 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究。[ZHOU Qi (1994-), male, M. Sc. candidate, research on geological disaster] E-mail: chow77@foxmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 许强 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害评价预测与防治处理研究。[XU Qiang (1968-), male, Ph. D., professor, specialized in geological disaster evaluation, prevention and treatment] E-mail: xq@cdu.edu.cn

体积、滑坡落差等参数建立的预测模型,可以获得滑距和滑坡的危险性范围^[3]。除此,大多数学者对突发型黄土滑坡的研究主要集中在成因机制、破坏机理等方面,目前对突发型滑坡的运动过程的研究相对不足,反映滑坡运动过程的直观性与整体性不够完善^[4-6]。

对滑坡运动过程的研究一般采用数值模拟法,不同的数值模拟方法具有相对的适用性。有学者以离散元为理论基础的 PFC 3D,探讨 1999 年台湾二山滑坡的运动行为和崩坍模式^[7],为获取滑坡堆积体内部质点的速度时程曲线,也有采用 PFC 2D 对争岗滑坡开展数值模拟^[8]。滑坡的动态运动过程同时也是物质堆积的过程,在弱化堆积厚度的问题的情况下,采用 DAN-3D 对重庆鸡尾山高速滑坡的成灾范围进行模拟^[9]。还有学者采用 DAN-W 对汶川牛圈沟高速远程滑坡一碎屑流进行模拟,获取其动力学特征^[10]。除此,有学者运用 Tsunami Squares 法对顺层岩质滑坡运动过程的动量、过程厚度、速度方面进行数值模拟^[11],获得不同参数下滑坡运动参数的基本规律。考虑运动过程与堆积范围的数值模拟研究相对不足,常见的研究手段对突发性黄土滑坡的适用性更有待探究。

目前,数值模拟方法在处理滑坡堆积范围和速度等问题方面尚不够完善,而且一般数值模拟软件普遍存在建模复杂、计算效率低等问题,导致数值模拟的可行性大大降低。本文运用 Massflow 数值模拟软件,以滑距吻合率 δ 和堆积范围吻合率 η 来定量判断反演结果的准确性,重现黑方台陈家 8#滑坡的

动态运动过程,得出适用于突发型滑坡的数值模拟研究方法及 Massflow 数值模拟参数,可为突发型黄土滑坡正演提供依据,进而为突发型滑坡频发的地区提出具有参考价值的危险范围划分方法,旨在减少突发型滑坡造成的人员伤亡及财产损失。

1 Massflow 数值模拟分析

1.1 Massflow 软件简介

Massflow 软件是在 MacCormack-TVD 有限差分法的基础上加以改进的,在运动过程中高差与距离之比远小于 1.00 的情况下,软件开发依据深度积分连续介质理论^[12](如图 1),将这种运动类型的物质视为连续介质,同时考虑地形地貌对运动过程的影响,对计算时长和精度做出平衡,在最大程度的还原物质流动过程的情况下,减少数值模拟计算的时间,其数值模拟计算时间步长可用公式(1)表示。如图 1 通过在深度方向对三维 Navier - Stokes 方程的各个物理量进行积分,将三维复杂的问题简化为二维问题,在保证计算精度的前提下对物质的质量、动量守恒方程进行计算。在数值模拟计算过程中,通过滑坡发生前后的地形数据构建滑体(高程数据精度可达 15 cm),进而将滑坡计算区域划分为 380×390 个边长 1 m 的正方形网格,同时固定计算边界。关于软件的基本力学方程,前人已经做出了比较详细的论证^[13-14],在此不做过多赘述。

$$\Delta t = \min\left(\frac{2\Delta x Cr}{|\bar{\mu}| + \sqrt{gh}}, \frac{2\Delta y Cr}{|\bar{\nu}| + \sqrt{gh}}\right) \quad (1)$$

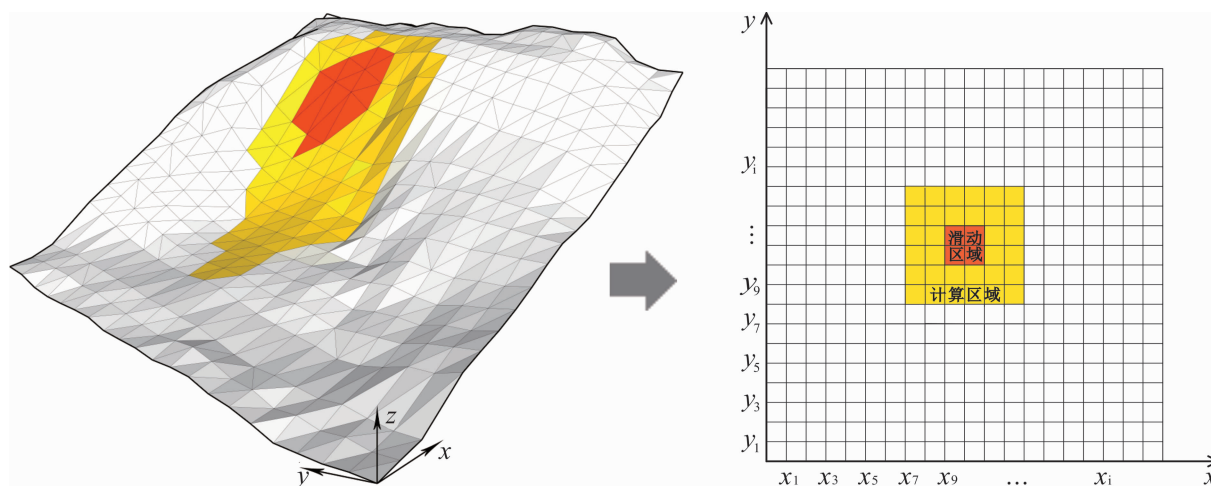


图 1 数值模拟网格建模示意图

Fig. 1 Numerical simulation grid modeling diagram

式中, Cr 是局部的 Courant 数; $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\nu}$ 分别为 x, y 方向的速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; h 为滑坡竖直方向的厚度 (m)。

除此之外, 该软件支持使用者根据自身需求进行二次开发, 建模效率高且具有较快的计算速率, 目前 Massflow 软件已经在 2015 年深圳光明新区滑坡^[15]、2017 年四川茂县新磨村滑坡得到应用^[16], 并取得很好的效果。

1.2 选取数值模拟模型

考虑到数值模拟参数获取的准确性与可行性, 本文在保证参数获取准确的前提下, 尽量选择所需参数较少且易于获取的模型。Massflow 数值模拟软件计算滑坡运动特征时, 可以采用基底摩擦型, 譬如 Coulomb 模型、Manning 模型、Voellmy 模型, 不同的数值模拟模型所需的参数不同。本文采用基于物理实验模型的 Coulomb 摩擦模型, 该模型所需的岩土体密度、内聚力、内摩擦角等参数, 可参考室内实验获得的数据。Coulomb 摩擦模型的主要计算方程如公式(1)所示, 详细求解过程见参考文献^[17-20]:

$$\tau_b = c + \bar{\rho}gh(1 - \lambda) \tan \varphi \quad (2)$$

式中, τ_b 为基底摩擦力 (kPa); c 为岩土体的内聚力 (kPa); φ 为岩土体的内摩擦角 ($^\circ$); $\bar{\rho}$ 为材料的平均密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; h 为滑坡竖直方向的厚度 (m); λ 为基底液化系数, 其取值范围在 0 到 1 之间。

在此尤其需要强调基底摩擦系数, 由于陈家 8# 滑坡为静态液化型突发型滑坡, 同时具有很强的流态运动特征, 实际运动过程中土体局部孔隙水压力是变化的, 基底液化系数在滑坡的运动过程中起着决定性作用。除此, 滑坡实际运动过程中, 将会对滑床的岩土体产生刮擦, 但复杂的力学计算方程将使数值模拟难以进行, 因此本文将整个运动过程中的基底液化系数简化为定值, 且不考虑滑坡运动过程的侵蚀作用。

2 滑坡基本特征与参数选取

2.1 滑坡特征

陈家 8# 滑坡位于甘肃省黑方台北东侧, 其位置如图 2 所示, 仅 2015 年期间就发生了两次较大的滑动及一次小规模的滑动, 三次滑动均有明显的渐进

后退式特征, 后缘坡高与滑移距离之比介于 0.05 ~ 0.14, 远小于 1.00, 滑坡发生前坡底位置饱水, 属于突发型静态液化滑坡。如表 1 所示为 2015 年陈家 8# 滑坡的三次滑动信息。

表 1 滑坡基本特征数据
Tab. 1 Landslide basic characteristic data

滑动时间	滑坡方量 / (10^4 m^3)	滑移距离 /m	坡高 /m	堆积面积 / (10^4 m^2)
2015-03-29	1.70	331	21	1.93
2015-09-20	1.10	319	17	1.92
2015-11-21	0.06	97	14	0.29

对于黑方台地区, 已有学者经采用现场试验、室内物理模拟实验等手段对黑方台的党川段、黄茨段、焦家段、陈家段等滑坡进行了一定的研究, 在滑坡的成因机理、破坏机理、地表水入渗机制等方面取得大量的成果^[17-18]。据黑方台地区居民拍摄于 2015 年 4 月 29 日的党川 2# 滑坡的视频资料显示, 滑坡运动过程从启动到静止不足一分钟, 具有很强的溃散性, 其诱发因素、工程地质条件与研究区的陈家 8# 滑坡类似, 推测陈家 8# 滑坡的运动特征与党川 2# 滑坡应大致相同。

黑方台地区粗犷的农业灌溉方式极易诱发静态液化型滑坡, 静态液化型滑坡失稳破坏前, 物源区一般有土体饱和的现象 (如图 3), 滑坡失稳破坏具有典型的突发型特征。据当地居民反映, 2015 年 3 月 29 日首次滑动前, 陈家 8# 滑坡上部台塬农田有过长时间的农业灌溉。现场踏勘发现 3 月 29 日滑坡发生后, 物源区仍呈现为饱水状态, 并且滑坡后壁有地下水出渗, 流通过程中有类似水流冲刷的波浪状起伏。从滑坡后缘陡壁至滑坡前缘边界约 320 m, 相比于一般性滑坡, 运动距离相对较远, 与溃散性滑坡流动性质类似。在 2015 年 9 月 20 日滑坡发生后, 由于未及时获取第二次滑动后的地形数据, 导致 2015 年 11 月 21 日滑坡的堆积物被第二次覆盖。考虑到采用数值模拟方法的相似性, 因此本文仅选择对第一次滑坡进行数值模拟分析。

2.2 数值模拟参数选取

根据实地调查及相关学者研究表明, 岩土力学参数整体上差异不大, 黑方台地区地层由新到老依

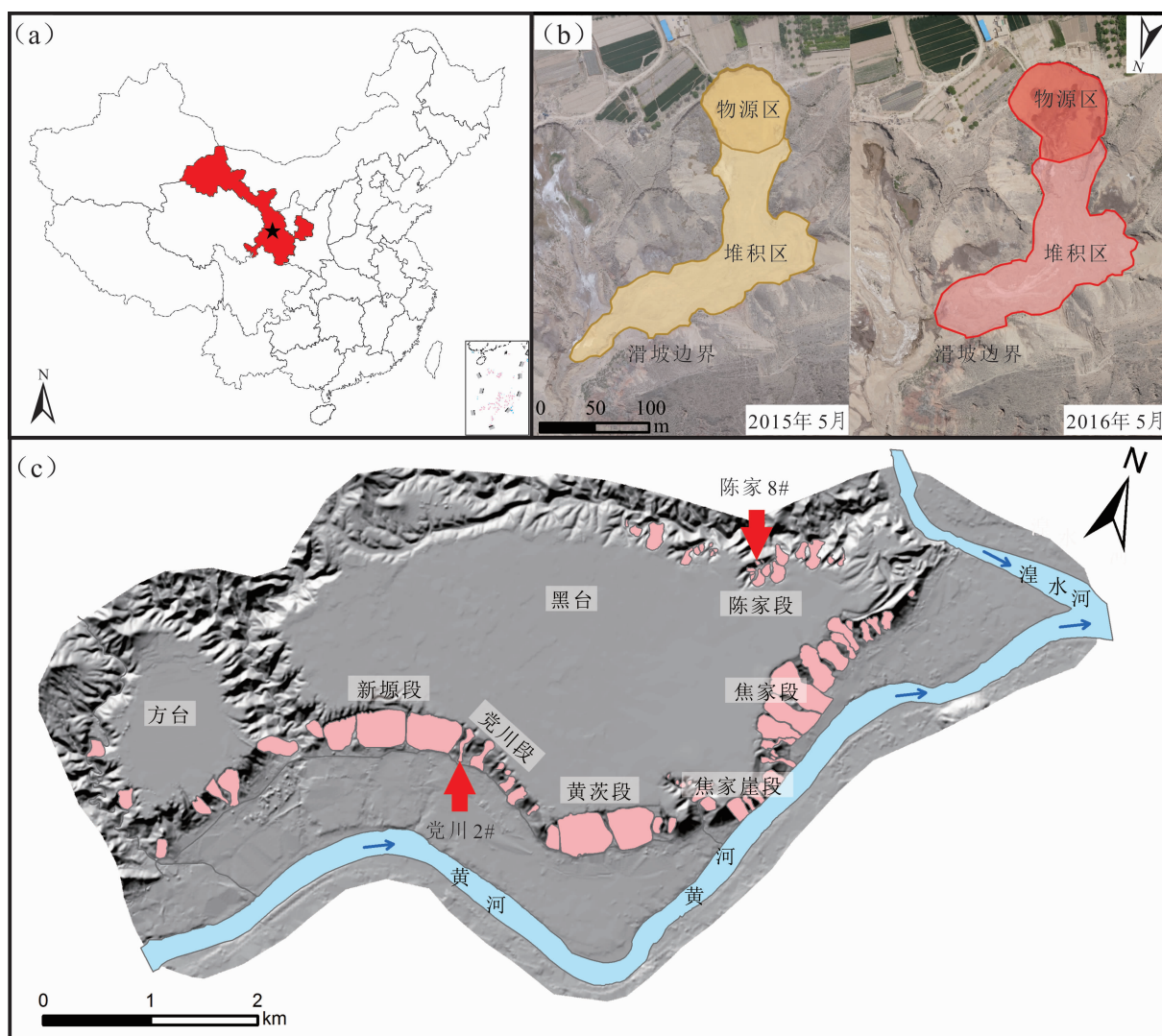


图2 研究区域位置及滑坡边界范围:(a)甘肃省及黑方台区域位置;(b)陈家8#两起滑坡边界;(c)黑方台滑坡分布范围

Fig. 2 Location of study area and distribution of loess landslides : (a) location of Heifangtai terrace, Gansu province, China; (b) Chenjia 8# landslide boundary; (c) landslide distribution area in Heifangtai terrace

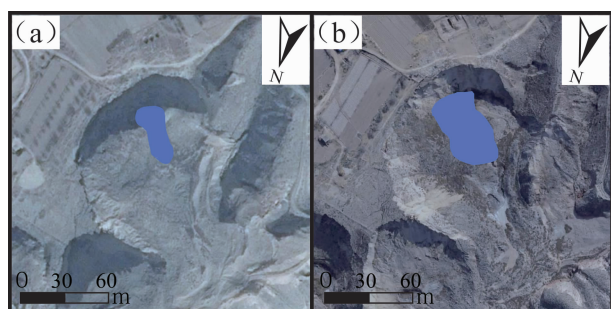


图3 滑前物源区饱水范围

(a) 2013年3月3日;(b) 2015年1月8日

Fig. 3 Saturated zone of source area before sliding

(a) March 3, 2013; (b) January 8, 2015

次出露有全新统滑坡堆积体(Q_4^{del}),厚度约47 m的上更新统黄土(Q_3^{col})、厚度约12 m的中更新统冲积

物(Q_2^{al})、下白垩系河口群(K_1kh)砂泥岩。目前有学者采用GDS饱和-非饱和三轴实验系统、环剪实验等,对黑方台焦家4号 Q_3^{col} 马兰黄土进行实验,获得原状土样密度 $\rho = 1380 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、有效内摩擦角 $\varphi = 30.66^\circ$ 、峰值摩擦角范围 $29.99^\circ \sim 33.15^\circ$ 、残余摩擦角 $30.53^\circ \sim 35.68^\circ$ 等黄土力学参数^[19-21]。综合考虑黑方台地区已有实验参数,在本文数值模拟过程中选取土密度为 $1400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,内聚力 c 为1000 Pa,内摩擦角 φ 范围为 $30^\circ \sim 32^\circ$,基底液化系数 λ 范围为 $0.10 \sim 0.80$ 。利用Massflow对陈家8#滑坡进行数值模拟时,首先采取单因素变量法确定滑坡的内摩擦角与基底液化系数,设置不同梯度的参数进行试算,进而缩小参数的范围。对于不同参

数的反演结果,为了量化反演结果与滑坡真实堆积特征的吻合度,引入 Massflow 数值模拟的主滑距吻合率 δ 与堆积范围吻合率 η ,可用如下公式(3)、(4)计算,显然当 δ 、 η 越趋近 1.00 时,表明数值模拟的结果准确;反之, δ 、 η 越接近 0 时,表明数值模拟结果较差。

$$\delta = \begin{cases} \frac{l}{l_0} & l \leq l_0 \\ \frac{2l_0 - l}{l_0} & l > l_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{S_i - S_b}{S_0} \quad (4)$$

式中, l 、 l_0 分别为数值模拟及现场实测的主滑动距离(m); S_i 为滑坡边界之内的数值模拟堆积面积(m^2); S_b 为滑坡边界之外的数值模拟堆积面积(m^2); S_0 为滑坡真实的堆积面积(m^2)。

如图 4 所示,经过正交实验发现,内摩擦角 φ 对数值模拟的影响较小,而基底液化系数 λ 对滑坡的运动距离、堆积形态均影响显著。当基底液化系数较大时,数值模拟反映出滑坡具有极强的流态化特征,与实际差别较大,吻合率则表现为 δ 、 η 增加缓慢,甚至降低的情况。通过分析大量的反演结果发现,当 $\lambda = 0.63$ 时数值模拟结果与 2015 年 3 月 29 日第一次发生的滑坡吻合最好,此时滑坡主滑距吻合率 δ 为 0.94,堆积范围吻合率 η 为 0.89。下文分析运动过程时,取黄土的内摩擦角为 31° 、基底液化系数为 0.63。

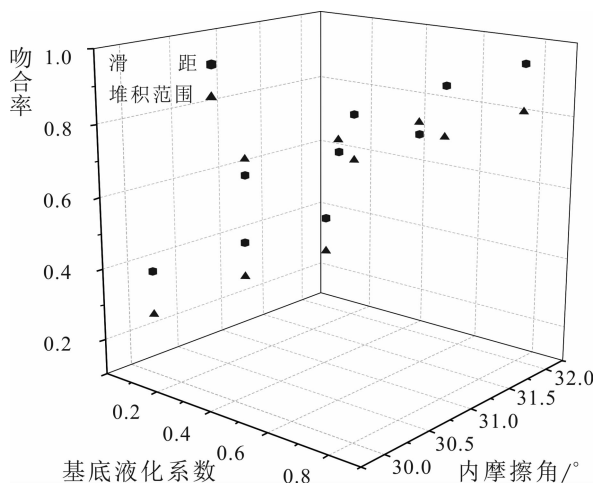


图 4 不同参数下的数值模拟结果吻合率

Fig. 4 Coincidence rate of numerical simulation results under different parameters

3 数值模拟结果分析

3.1 堆积范围分析

如陈家 8# 由静态液化导致的突发型滑坡,在失稳后运动过程与溃散性滑坡类似。坡体失稳破坏之后,在运动过程中逐渐破碎解体,以流态化的运动特征向沟口滑动,若滑坡两侧相对平缓无约束,则极易在地表无约束流动。陈家 8# 滑坡下方存在一条高差约 45 m 的沟谷,滑坡失稳后受重力的作用在沟谷内运动。根据数值模拟结果显示,在 $t = 42$ s 左右滑坡主体已经基本停止运动,堆积物主要存在于坡底转折端、沟口区域,如图 5 所示为不同时刻的滑坡堆积范围。

由于滑坡前缘地形较陡,北西侧地形明显高于北东侧,滑坡体到达沟口附近时运动方向改变,小部分扩散到北西侧,滑坡主体朝着北东方向继续运动。如图 5 所示滑坡启动后 10 s 左右主体部分到达坡底,进而继续朝着沟口运动,滑坡主体方量逐渐减少,经过 30 s 后到达沟口附近。

针对上述数值模拟结果,考虑到滑坡启动、运移、堆积、静止是一个动态的运动过程,为量化数值模拟在竖直方向的堆积厚度,如图 6 所示选择数值模拟 $t = 150$ s 的结果,在滑坡的主滑方向、物源区、运动转折端、滑坡堆积前缘四个位置剖切滑坡,将数值模拟结果与真实堆积情况进行比对分析。

利用 2015 年 3 月 29 日滑坡发生前后的地形数据,通过剖面线获得滑坡的真实堆积厚度。如图 6 所示,纵轴表示堆积厚度,横轴为物源区至滑坡前缘方向的水平距离。当曲线位于横轴下方时,表示滑坡发生后体积减小(物源区);反之,则表示体积增大(堆积区)。显然二者相互重叠的面积越大,表明数值模拟的结果也就越接近真实堆积厚度,横轴最远处由于未发生滑动,因此堆积厚度收敛趋于零。

对于两次数值模拟的结果,针对主滑方向的 1-1' 剖面,堆积厚度在距离为 330 m 左右达到收敛,同时主滑方向的堆积厚度基本一致,流动较差则会表现为堆积厚度差异较大,表明滑动过程物源有较强的流动性。数值模拟得到的滑距与现场量测的滑距基本一致,滑坡主体到达坡底后,运动速度发生改变过程中导致局部堆积厚度相对增加,结合剖面 1-1' 和 3-3' 可以看出,滑坡最大堆积厚度约

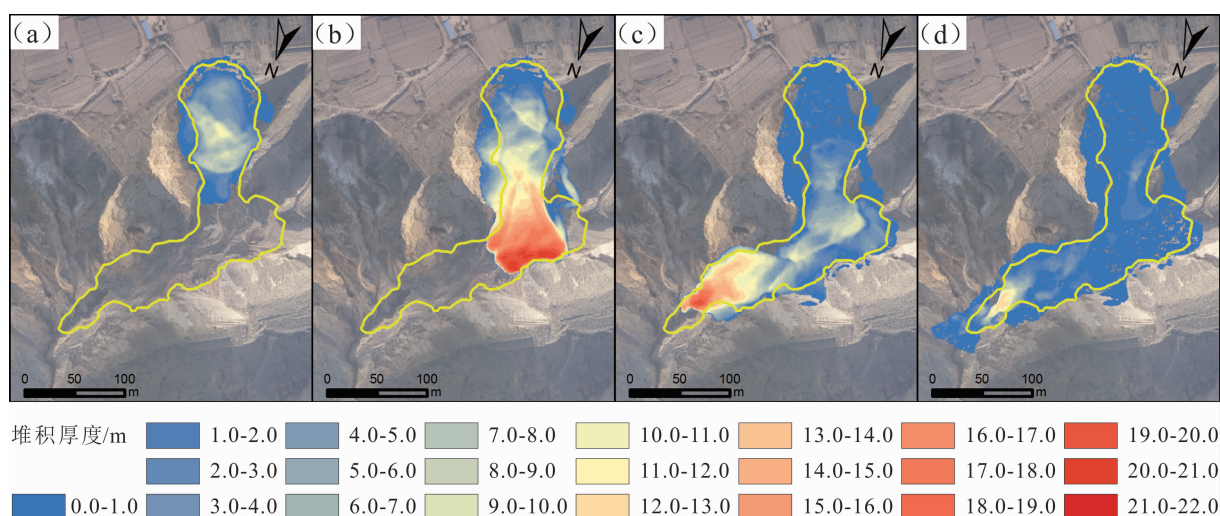
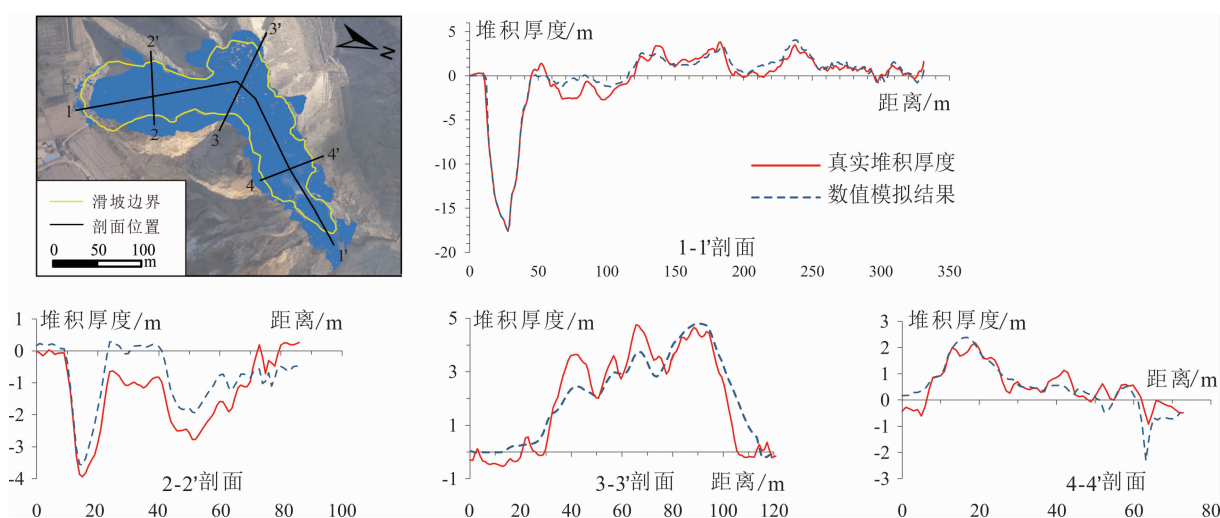
图5 不同时刻下数值模拟滑坡堆积范围 (a) $t=5$ s; (b) $t=10$ s; (c) $t=20$ s; (d) $t=30$ s

Fig. 5 Numerical simulation of landslide accumulation boundary at different times

图6 滑坡剖面位置及堆积厚度 ($t=150$ s)Fig. 6 Location of typical section and landslide accumulate thickness ($t=150$ s)

4 m,主要集中在坡底和沟口附近。由于滑坡流动性较强,滑坡体在侧向扩散程度较大,导致滑坡物源体积守恒的情况下,堆积厚度整体上表现为数值模拟结果小于真实堆积厚度。滑坡物源区附近,滑体的最大下蚀深度与真实深度一致,可认为 Massflow 数值模拟结果与真实堆积情况基本吻合。

3.2 运动速度分析

据2015年9月20日陈家8#滑坡滑动前获得的监测数据显示^[22],该滑坡仅用8分钟就完成加速变形阶段,同时经过咨询黑方台陈家8#滑坡附近的居民,了解到该滑坡的滑坡运动过程不超过1分钟。滑坡动态运动过程是运动与堆积同时相互作用的,

如上分析利用 Massflow 数值模拟软件,不仅可以获得运动过程中不同时刻陈家8#滑坡的堆积范围及厚度,还可以获得如图7所示的运动速度。但为了获取不同时刻,具体位置滑坡的运动速度量值,选取滑坡的后缘、坡底、沟道中部和沟口四个位置,布置网格速度监测点,利用 Tecplot 统计该点的速度。

在二维网格计算过程中,任意时刻网格具有 x 、 y 两个方向的分速度。为了表征不同时刻网格的速度大小,现以单个网格内计算获得的平均速度代表不同时间内网格的速度。数值模拟计算结果输出时,以尽可能短的间隔输出计算区域网格的和速度,对所标记网格的和速度进行统计,可以获得如图8

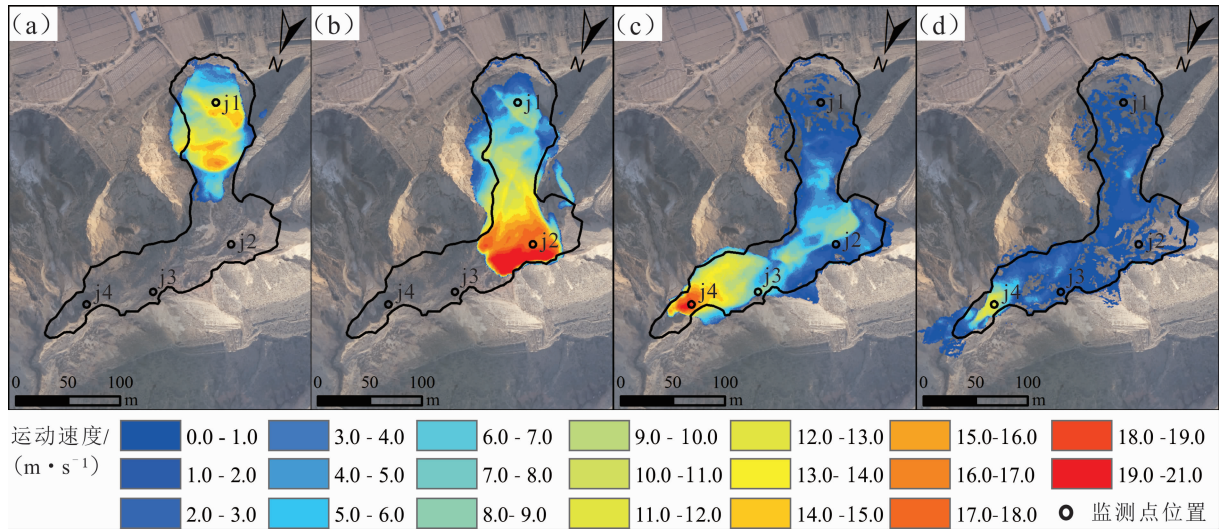


图7 不同时刻下数值模拟滑坡运动速度 (a) $t = 5 \text{ s}$; (b) $t = 10 \text{ s}$; (c) $t = 20 \text{ s}$; (d) $t = 30 \text{ s}$

Fig. 7 Numerical simulation of landslide movement speed at different times

所示的网格速度与时间关系曲线。

除此,为了体现堆积厚度和速度的综合作用效果,将滑坡整体速度与各监测点速度进行比较。对于计算范围内的网格,在滑动过程中滑坡体不仅具有速度,同时也有相应的堆积厚度。考虑网格体积与滑坡总体积的比值,某时刻计算网格对应的体积与运动速度乘积,除以滑坡的总体积,获得该网格速度对滑坡整体速度的贡献值,进而对各网格进行求和。可用如下公式计算滑坡的整体速度:

$$v_a = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{\mu_i} v'_i}{v} = \sum_{i=1}^n \frac{\overline{\mu_i} \iint s_i dh}{\iint s_i ds dh} \quad (5)$$

式中, $\overline{\mu_i}$ 为第 i 秒对应的网格的平均速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v'_i 分别为第 i 秒坡体对应的体积与滑坡总体积 (m^3); s_i 为第 i 秒对应的网格面积 (m^2); h 为坡体在网格上方的堆积厚度 (m)。

如图8所示,滑坡从启动到最终静止,该滑坡的运动过程可以分为明显的三个阶段,即从 $0 \sim 5.40 \text{ s}$ 内为启动加速阶段, $5.40 \sim 9.50 \text{ s}$ 内为稳定加速阶段, $9.50 \sim 42 \text{ s}$ 内为减速堆积阶段。启动加速时间仅占滑坡运动总时间的 12.85% ,表现陈家8#滑坡不仅在启动阶段表现出极强的突发性,而且在启动后迅速达到最大速度。减速堆积阶段占滑坡运动总时间的 77.38% ,数值模拟表现出较强的流动性。

从滑坡后缘至2号监测点的平面距离约为 82 m ,滑坡前端物质经过 9 s 左右以 18.95 m/s 到达

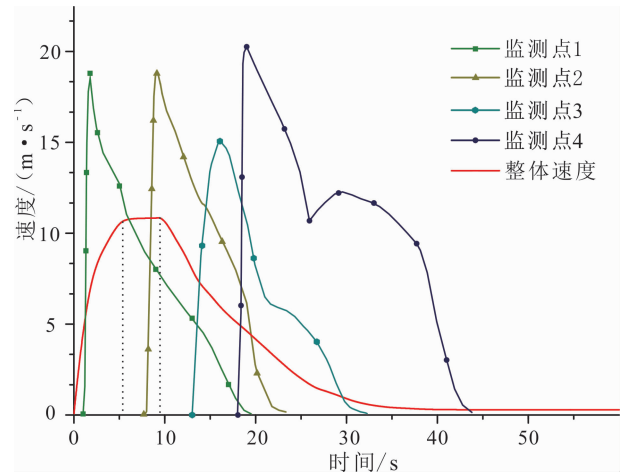


图8 滑坡运动速度

Fig. 8 Curve of Landslide movement speed

2号监测点,经过 42 s 后4号区域也基本停止运动。从各个监测点获取的数据来看,滑坡到达各点的最大速度差异不大,滑坡启动后随着时间的积累各监测点依次达到最大速度。对于正在滑动的滑坡,若局部运动速度较大,滑坡体积较小时也难以造成很大的危害。如图8所示的滑坡整体峰值速度,均小于各个监测点获得的最大速度,通过该方法获得的整体速度更能反映滑坡运动过程中的实际情况。

滑动过程中大部分物质堆积在2号监测点附近,滑坡启动 18 s 后以 20 m/s 的速度到达沟口附近的4号监测点,结合剖面图(如图6)可知该区域的堆积厚度平均不足 1 m ,体积占比很小。滑坡整体速度趋势是厚度与网格速度综合作用的结果,在

$t = 40$ s左右时,滑坡体部分区域已经出现静止,结合运动速度监测曲线可以得出在 $t = 42$ s左右滑坡整体处于静止状态,从滑坡后缘至滑坡前缘依次达到稳定状态,但不同区域停止运动的时间间隔较小,进一步表明该滑坡运动过程的迅速。

4 结论与讨论

本文利用 Massflow 数值模拟软件对甘肃省黑方台地区的突发性滑坡陈家8#进行了反演,依据滑距吻合率、堆积范围吻合率对数值模拟结果进行评价,探究了滑坡启动后不同时刻的运动速度、危害范围、堆积厚度等特征,并将陈家8#滑坡的运动过程分为三个典型的阶段,获得了适用于突发性黄土滑坡的数值模拟研究方法。主要结论如下:

(1)陈家8#滑坡发生前大量的农业灌溉导致土体饱和,当内聚力为1000 Pa、内摩擦角为 31° 、基底液化系数为0.63时,利用 Massflow 反演获得的滑坡堆积范围与真实堆积比较吻合,滑距吻合率及堆积范围吻合率分别可达0.94和0.89,表明数值模拟的准确性。

(2)类似于溃散性滑坡,静态液化导致的突发性黄土滑坡,在运动过程中堆积厚度差别较小。陈家8#滑坡整个堆积区内主滑方向的平均厚度约1.20 m,最大堆积厚度约4.10 m,数值模拟堆积厚度与真实堆积厚度较为吻合,进一步表明数值模拟的准确性与可行性。

(3)数值模拟结果显示,陈家8#滑坡从启动到最终静止整个过程仅42 s,不同监测点的最大运动速度为15~20.30 m/s,运动过程明显可分为:启动加速阶段、稳定加速阶段、减速堆积阶段。启动加速时间仅占滑坡运动总时间的12.85%,而减速堆积阶段占滑坡运动总时间的77.38%,后缘高差与滑距之比为0.05,表现出明显的流态特性,进一步体现该类滑坡较强的破坏性,人员及建筑物在其失稳破坏后将面临巨大的风险。

目前,研究的不足之处为缺乏突发性滑坡启动后的现场视频资料,导致数值模拟结果无法与真实堆积过程的滑移时间、运动速度进行对比,但本文对研究突发性黄土滑坡的运动过程仍具有一定参考意义。针对目前存在的问题,下一步可通过安装野外

视频监控设备,获取完整的滑坡运动过程后,对本文的研究方法进行优化。除此,对突发性黄土滑坡的研究,还可结合滑坡的滑动面、滑动体积,通过 Massflow 数值模拟对潜在失稳坡体的空间危险范围进行预测,进而为潜在影响范围内的建筑物、人员进行有效的保护。

参考文献 (References)

- [1] PENG Dalei, XU Qiang, QI Xing, et al. Hydrological response of loess slopes with reference to widespread landslide events in the Heifangtai terrace, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, **171**: 259–276.
- [2] 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]
- [3] XU Qiang, LI Huajin, HE Yusen, et al. Comparison of data-driven models of loess landslide runout distance estimation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(2): 1281–1294.
- [4] 许强,彭大雷,仝星,等.2015年4.29甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究[J].工程地质学报, 2016, **24**(2): 167–180. [XU Qiang, PENG Dalei, QI Xing, et al. Danchuan 2 # landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu province: characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(2): 167–180]
- [5] 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]
- [6] 裴向军,张硕,黄润秋,等.地下水雍高诱发黄土滑坡离心模型试验研究[J].工程科学与技术, 2018, **50**(5): 55–63. [PEI Xiangjun, ZHANG Shuo, HUANG Runqiu, et al. Study on centrifuge model test of loess landslide induced by enrichment of groundwater [J]. Advanced Engineering Science, 2018, **50**(5): 55–63]
- [7] 唐昭荣,袁仁茂,胡植庆,等.台湾集集地震九份二山滑坡发生机制的三维数值模拟分析[J].工程地质学报, 2012, **20**(6): 940–954. [TANG Zhaorong, YUAN Renmao, HU Zhiqing, et al. 3-d distinct element modeling of sliding process and depositing behavior in jiufengershan landslide induced by 1999 Taiwan chi-chi earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(6): 940–954]
- [8] 刘兴宁,石崇,李德杰,等.争岗滑坡堆积体滑坡灾害数值模拟预

- 测分析[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(1): 1-7. [LIU Xingning, DAN Chong, LI Dejie, et al. Numerical analysis and hazard prediction of zhenggang outwash landslide congeries [J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(1): 1-7]
- [9] 高杨, 李滨, 王国章. 鸡尾山高速远程滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(3): 425-434. [GAO Yang, LI Bin, WANG Guozhang. Motion feature and numerical simulation analysis of Jiweishan landslide with rapid and long run-out [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(3): 425-434]
- [10] 张远娇, 邢爱国, 朱继良. 汶川地震触发牛圈沟高速远程滑坡—碎屑流动力学特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, **46**(10): 1665-1670. [ZHANG Yuanjiao, XING Aiguo, ZHU Jiliang. Dynamics analysis of Niujuangou rockslide-debris avalanche triggered by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, **46**(10): 1665-1670]
- [11] 罗锋, 柴波, 方恒, 等. 顺层岩质滑坡运动过程数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(3): 124-130. [LUO Feng, CHAI Bo, FANG Heng, et al. Numerical simulation of the bedding rock landslide motion process [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2016, **43**(3): 124-130]
- [12] OUYANG C, HE Siming, XU Qiang, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain [J]. Computers & Geosciences, 2013, **52**: 1-10.
- [13] STEFFLER P M, JIN Y C. Depth averaged and moment equations for moderately shallow free-surface flow [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993, **31**(1): 5-17.
- [14] OUYANG C, HE Siming, TANG Chuan. Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in Wenchuan earthquake-induced area [J]. Engineering Geology, 2015, **194**: 62-72.
- [15] OUYANG Chaojun, ZHOU Kaiqi, XU Qiang, et al. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China [J]. Landslides, 2017, **14**(2): 705-718.
- [16] SCARINGI G, FAN Xuanmei, XU Qiang, et al. Some considerations on the use of numerical methods to simulate past landslides and possible new failures: the case of the recent Xinmo landslide (Sichuan, China) [J]. Landslides, 2018, **15**(7): 1359-1375.
- [17] 亓星, 许强, 李斌, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡地表水入渗机制初步研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(3): 418-424. [QI Xing, XU Qiang, LI Bin, et al. Preliminary study on mechanism of surface water infiltration at Heifangtai loess landslides in Gansu [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(3): 418-424]
- [18] 张先林, 许强, 彭大雷, 等. 高密度电法在黑方台地下水探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, **32**(4): 1862-1867. [ZHANG Xianlin, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Application of high-density resistivity method to groundwater exploration in Heifangtai [J]. Progress in Geophysics, 2017, **32**(4): 1862-1867]
- [19] 巨袁臻, 许强, 彭大雷, 等. 黑方台焦家4号黄土滑坡发育特征及滑动机理[J]. 人民长江, 2017, **48**(11): 62-67, 91. [JU Yuanzhen, XU Qiang, PENG Dalei, et al. Development characteristics and sliding mechanism of Jiaojia No. 4 loess landslide at Heifangtai table-land in Gansu Province [J]. Yangtze River, 2017, **48**(11): 62-67, 91]
- [20] 李姝, 许强, 张立展, 等. 黑方台地区黄土强度弱化的浸水时效特征与机制分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(7): 2043-2048, 2058. [LI Shu, XU Qiang, ZHANG Lizhan, et al. Time effect and mechanism of strength weakening of loess soaked in water in Heifangtai area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(7): 2043-2048, 2058]
- [21] 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: 73-80. [ZHOU Fei. Study on the deformation characteristics of loess slope and mechanism of landslide in Heifangtai, Gansu province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 73-80]
- [22] 亓星, 许强, 朱星, 等. 甘肃黑方台陈家8静态液化型黄土滑坡变形特征及成因机理[J]. 地质科技情报, 2018, **37**(5): 234-239. [QI Xing, XU Qiang, ZHU Xing, et al. Deformation characteristics and formation mechanism of static liquefaction No. 8 loess landslide in Chenjia, Heifangtai, Gansu province [J]. Geological Science and Technology Information, 2018, **37**(5): 234-239]

Movement Process of Abrupt Loess Flowslide Based on Numerical Simulation ——A Case Study of Chenjia 8# on the Heifangtai Terrace

ZHOU Qi¹, XU Qiang^{1*}, ZHOU Shu¹, PENG Dalei¹, ZHOU Xiaopeng¹, Qi Xing¹

(1. Chengdu University of Technology, State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chengdu 610041, China;

3. Sichuan University of Science & Engineering, College of Civil Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China)

Abstract: Agricultural irrigation induces a large number of loess flowslides on the Heifangtai terrace, Gansu province, China. Most of the failures exhibit fluidized movement with long runout, high speed and significant sudden characteristics, which seriously threaten the lives and properties of local residents. At present, the movement process of loess flowslides is mostly in qualitative and semi-quantitative research, lacking reasonable quantitative research. In this paper, Chenjia 8# loess flowslide on the Heifangtai terrace had been taken as a case study and the back-analyses of failure process was simulated by a numerical modelling software — Massflow. The accuracy of the back-analysis results was quantitatively determined by the coincidence rates of run-out distances and accumulation range between the field investigation and simulation results, and the optimal coincidence results were applied to analyze the failure process of the typical loess flowslide in terms of the accumulation thickness and movement velocity at different time. By this research, it found that: (1) for the Chenjia 8# loess flowslide, when cohesion, internal friction angle, and pore pressure ratio were 1000 Pa, 31° , and 0.63, respectively, the coincidence rates of run-out distances and accumulation range were 0.94 and 0.89, respectively. The landslide accumulation boundary obtained by the back-analysis approach was closest to the result of the field investigation. (2) According to the results of numerical simulation, the average thickness of the main sliding direction of the loess flowslide was approximately 1.20 m, the maximum cumulative thickness was approximately 4.10 m, and the ratio of height difference to slip distance was 0.05. The back-analysis results were in good agreement with the field accumulated thickness, which reflected the strong flow characteristics of loess flowslide. (3) The movement process of loess flowslide could be divided into three stages, such as initial acceleration, constant acceleration and decelerative accumulation. The whole process of Chenjia 8# landslide from initiation to final rest was only 42 s, and the maximum speed was between 15 m/s and 20.30 m/s. The initial acceleration phase only accounted for 12.85% of the total landslide movement time, while the decelerative accumulation phase accounted for 77.38% of the total landslide movement time, further indicating its fluidity characteristics and the strong destructive nature of the landslide.

Key words: sudden characteristics; massflow; parameter inversion; simulation accuracy; Heifangtai terrace