

赵纪飞, 侯晓坤, 李同录, 等. 甘肃黑方台焦家滑坡泥流运动过程的模拟[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 96–100. [ZHAO Jifei, HOU Xiaokun, LI Tonglu, et al. Simulation of Motion Process for the Landslide flow Located in Heifangtai Jiaojia, Gansu Province[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 96–100. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.017.]

甘肃黑方台焦家滑坡泥流运动过程的模拟^{*}

赵纪飞^{1,2}, 侯晓坤¹, 李同录¹, 蔺晓燕³

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安, 710065)

摘 要: 以黑方台焦家滑坡泥流为例, 在野外测量和室内试验的基础上, 运用 Sassa 运动学模型进行该滑坡泥流的运动过程模拟。结果表明, 该滑坡在运动初期滑体即脱离滑坡后壁, 最大运动速度为 22.3 m/s, 且速度在 17~22.3 m/s 持续时间达 10 s, 具有高速运动的特点。根据滑体运动速度-时间曲线, 滑坡运动可分为 3 个阶段: 加速阶段、波动阶段和稳定阶段。该地区高陡的坡型、天然含水状态下土体的高强度、饱和状态下土体强度显著降低以及前缘广阔的斜坡地形为滑坡泥流的高速运动创造了条件。

关键词: 滑坡泥流; 野外测量; 室内试验; 运动模拟; 黑方台; 甘肃

中图分类号: X43; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)03-0096-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.017

李同录等^[1]根据运动特征和触发机理将黄土滑坡分为快速错落式滑坡、高速远程滑坡、滑坡泥流和低速蠕动滑坡。其中滑坡泥流具有滑速快、滑距远, 土体含水量高等特点, 滑体在下滑过程中转化为泥流。

甘肃黑方台是灌溉导致的黄土滑坡、滑坡-泥流最典型最集中的区域之一^[2]。自 1968 年灌溉到 1980 年代初期方台村塬边开始出现滑坡以来, 黑方台地区发生了许多大规模的滑坡和滑坡-泥流。累积造成 38 人死亡, 100 多人受 450 户群众迁移, 近 200 hm² 耕地弃耕, 33.3 hm² 农田被毁, 多次淹没通往盐锅峡化工厂和电厂的公路, 直接造成经济损失超过 4 亿元。滑坡泥流滑距远滑速快, 致灾范围大, 为此对滑坡泥流的运动学特征分析对有效预测滑坡的致灾范围具有重要意义。

滑坡运动过程的模拟可追溯到 1932 年 Heim 提出的雪橇模型^[3], 其将滑体概化为一整个块体, 并根据运动过程中能量守恒原理进行滑体运动学分析。这一模型简单, 应用性强, 但是对于复杂的地质条件和远程滑坡, 其假设过于简单。Sassa^[3-4]根据滑坡的流动特点, 以流体运动方程和连续介质方程为基础, 建立了流动性滑坡的运动学模型。国内已有学者利用其模型模拟分析高速远程黄土滑坡和滑坡泥流的运动过程, 并取得了很好的效果^[5-7]。其认为流动性滑坡发生是由于滑面上的孔隙水压力突然升高, 饱和带土液化所致, 且发生液化的饱和带土, 仅能发挥较低的抗剪强

度, 滑体能流动很远。为了反映滑动面液化对抗剪强度的影响, Sassa 引入了视摩擦角 φ_a 的概念, 其正切值和有效内摩擦角 Φ' 的正切值的比值等于滑面土体总应力和孔隙水压力的差值与总应力的比值, 见公式(1)。此外 Okada 等^[8]通过环剪试验发现, 液化的滑带土强度不会消失而是降到一个稳定值, 即稳态强度 τ_{ss} , 该值同初始空隙比 e_0 有关。值得注意的是, 视摩擦角 φ_a 和稳态强度 τ_{ss} 是土体饱和时提出的。对于滑带土非饱和的情况, Wang 等^[9]提出孔隙水压力累积系数 B_{ss} 来反映滑带土的含水情况和排水情况, 并给出了不同土性选取不同 B_{ss} 经验值, 见表 1。此外 Wang 等^[9]将 B_{ss} 引入到视摩擦角和稳态强度的计算中, 修正后的稳态强度和视摩擦角 φ_a , 见公式(2)、(3)。而修正后的 Sassa 模型能够适用于饱和或非饱和和流动性滑坡的运动模拟。

$$\tan \varphi_a = \frac{\sigma - u_w}{\sigma}; \quad (1)$$

$$\tau(h, B_{ss}) = \tau_{ss} + (\sigma(h) \tan \Phi' - \tau_{ss})(1 - B_{ss}); \quad (2)$$

$$\tan \varphi_a = \frac{\tau(h, B_{ss})}{\sigma(h)}. \quad (3)$$

式中: h 为滑体厚度, $\sigma(h)$ 为滑面土体的自重应力, Φ' 为有效内摩擦角, φ_a 为视摩擦角, τ_{ss} 为稳态强度, B_{ss} 为孔隙水压力累积系数。

^{*} 收稿日期: 2016-11-27 修回日期: 2017-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772181, 41372329); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2014CB744701)

第一作者简介: 赵纪飞(1987-), 男, 山东日照人, 博士研究生, 工程师, 主要从事边坡工程方面的研究。

E-mail: 523327087@qq.com

表 1 B_{ss} 取值范围

类型	B_{ss}	滑带特征
A	0.0 ~ 0.1	不饱和滑带
B	0.9 ~ 1.0	完全饱和和滑面上的滑带或不透水滑面上的饱和滑带
C	0.1 ~ 0.9	干燥滑面或透水滑面上的饱和滑带

本文通过利用修正后的 Sassa 模型进行甘肃黑方台一典型滑坡泥流进行运动模拟, 旨在通过对已发生滑坡的运动过程分析进行参数取值和模型适用性探讨, 为该区域潜在滑坡的致灾范围预测提供参考。所用软件为 Sassa 团队根据其运动模型开发的 LS-RAPID 软件。

1 滑坡概况

黑方台塬四周被沟谷深切成孤岛状, 天然条件下大气降水是该区唯一的地下水补给来源。自 1968 年以来为了农业及生产发展的需要修建了大量的引水灌溉工程, 大规模的漫灌方式使得地下水位显著抬升^[10]。黑方台地势西高东低, 台面向东南倾斜, 如图 1 所示, 相应基岩面也向东南倾斜, 因此地下水的流场是自西北向东南流。黄土层之下的冲击粉质黏土层为隔水层, 在灌溉条件下使得上部形成丰富的上层滞水, 滞水自东南缘的焦家一带溢出, 从而使该出滑坡泥流集中发育, 见图 2。

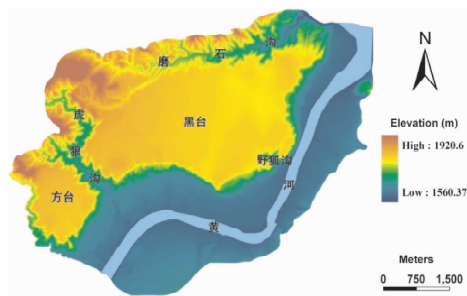


图 1 黑方台的数字高程地形



图 2 黑方台东南缘的滑坡群

本文所选案例为黑方台焦家一典型滑坡泥流, 实测地质剖面如图 3 所示。由剖面可知该剖面土层

厚度共 52 m, 其中 0 ~ 24 m 为 Q_3 黄土, 呈淡黄色, 结构疏松多孔, 具有垂直节理, 即马兰黄土; 24 ~ 44 m 为 Q_2 黄土, 呈淡黄色, 较致密, 具有垂直节理; 44 ~ 52 m 为冲积粉质粘土, 具有水平层理, 呈棕红色, 粘粒含量高, 致密坚硬; 该层之下为厚 5 m 的卵石层, 磨圆度好, 为黄河四级阶地堆积; 卵石层之下为缓倾的白垩系紫红色砂泥岩, 基岩产状为 $172^\circ \angle 27^\circ$ 。地下水位埋深约 34 m, 位于 Q_2 黄土层。而滑坡发生在 Q_2 的黄土层中, 剪出口距坡顶约 45 m, 为纯黄土滑坡。滑坡发生后, 随即转化为泥流, 顺开阔的坡面流下, 形成坡面泥流, 至坡脚处才停留堆积下来, 水平滑距约 280 m。

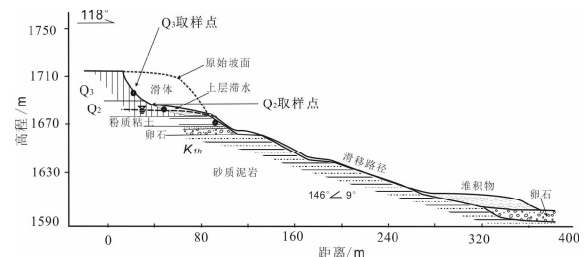


图 3 黑方台焦家滑坡典型工程地质剖面

2 滑坡区土体的物理力学性质

在滑坡壁上, 分别在 Q_2 黄土、 Q_3 黄土层中取样进行基本物理力学性质的测试和颗粒分析, 取样点的位置距地表的深度分别为 40 m 和 18 m, 见图 3, 其基本物理性质指标见表 2。颗粒分析采用 Battersize 激光粒度仪进行测定, 颗粒分析结果见图 4。

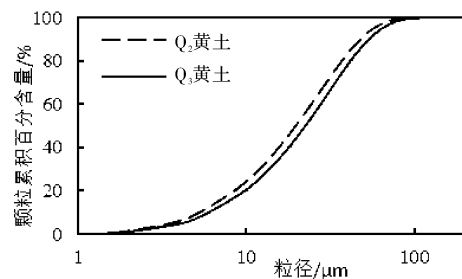


图 4 颗粒累积配曲线

从基本物理力学指标和颗粒分析结果可知, Q_3 黄土结构疏松, 孔隙比大, 粘粒含量低, 塑性指数为 9.1, 可为粉土; Q_2 黄土较 Q_3 稍致密, 粘粒含量稍多, 但塑性指数为 9.8, 也可定为粉土。

另外对两组土样进行三轴固结不排水试验来获得土体的应力应变和强度特性。考虑到 Q_3 黄土处于非饱和区, 所以对 Q_3 黄土进行天然含水状态的三轴剪切试验; 而大部分 Q_2 黄土处于饱和区,

表 2 土样基本物理指标

试样	G_s	$\rho_d / (g/cm^3)$	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	饱和含水率/ $\%$	液限/ $\%$	塑限/ $\%$	塑性指数 I_p	粘粒含量/ $\%$
Q_2 黄土	2.70	1.40	18.5	0.921	34.1	25.6	15.8	9.8	7.5
Q_3 黄土	2.70	1.27	7.5	1.118	41.4	24.3	15.2	9.1	5.8

且饱和强度控制着坡体稳定性, 因此对 Q_2 黄土进行饱和状态下的三轴剪切试验。所用试验仪器为南京土壤仪器厂生产的 SLB-1 型应力应变控制式三轴仪。试样直径为 6.18 cm, 高 12.5 cm。按《土工试验方法标准》^[11] 操作步骤将试样安装在仪器的压力室后, 对于 Q_2 黄土试样先采用水头饱和法将土体内的绝大部分气体排出, 此过程需要 1~2 d, 然后采用反压饱和的方法将土体饱和, 反压为 200 kPa, 待孔压系数 $B > 95\%$ 时饱和结束。之后打开排水阀门, 分别将试样在 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 和 500 kPa 的围压下固结, 待超孔隙水压力完全消散或消散 95% 时, 固结结束。关闭排水阀门, 开始剪切, 剪切速率按规范要求设置为 0.1 mm/min。对于 Q_3 黄土, 其天然含水率为 7.5%, 所进行的三轴试验的土样含水率即为 7.5%。野外取样后, 用保鲜膜密封包好放在保湿器中待用。为了保证试验试样含水率的一致性, 三轴试验进行前称量土样质量, 计算其含水率, 若不足 7.5%, 则用滴管将试样滴水后重新用保鲜膜包好放在保湿器中, 取另一个含水率满足要求的土样进行试验。按《土工试验方法标准》操作步骤将土样安装在 SLB-1 型三轴试验仪的压力室后, 直接加围压固结, 其围压级仍为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 和 500 kPa, 固结 36 h 后, 进行剪切, 剪切速率仍为 0.1 mm/min。因为非饱和土样在固结过程中产生的孔隙水压力很小, 很难用孔隙水压力来判断固结是否完成, 为此根据 Q_2 饱和黄土样的固结时间, 多为 24~32 h, 为此选取 36 h 作为 Q_3 黄土的固结时间。

图 5 为 Q_3 黄土三轴试验结果, 图 5a 为应力应变关系曲线; 图 5b 为总应力路径或有效应力路径, 其中 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 。从图 5a 土体应力应变关系曲线中可知, 在低围压下 (100 kPa) 土体出现明显应变软化现象, 应力随应变迅速增大, 当应变为 3% 时, 应力达到最大值, 迅速下降后应力再缓慢减小。这种应变软化是土体的结构强度引起。在 200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa 围压下土体应力应变特征为弱应变硬化。 Q_3 黄土试样的初始含水率为 7.5%, 三轴剪切过程中并未产生超孔隙水压力, 故土体的总应力路径和有效应力路径重合, 见图 5b。根据《土工试验方法标准》选取应变为 20% 时的强度值作为土体的有效残余强度值, 并据此在图 5b 中得到土体的破坏主应力迹线 K_f 线。根据 K_f 线的斜率 a (0.55) 和截距 b (81.3), 利用公式 (4), 可求得土体的抗剪强度参数粘聚力 $c = 97.3$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 33.3^\circ$ 。

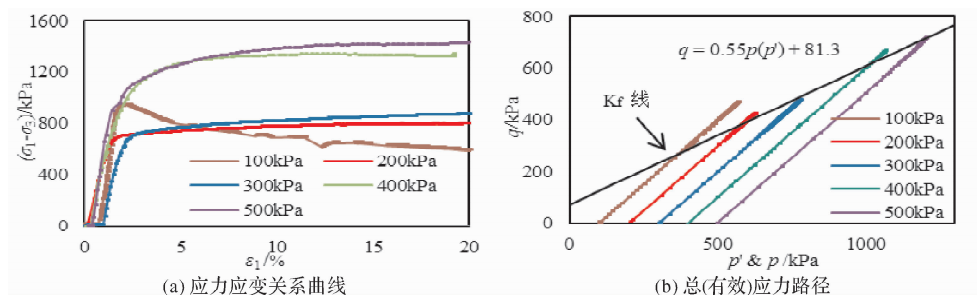
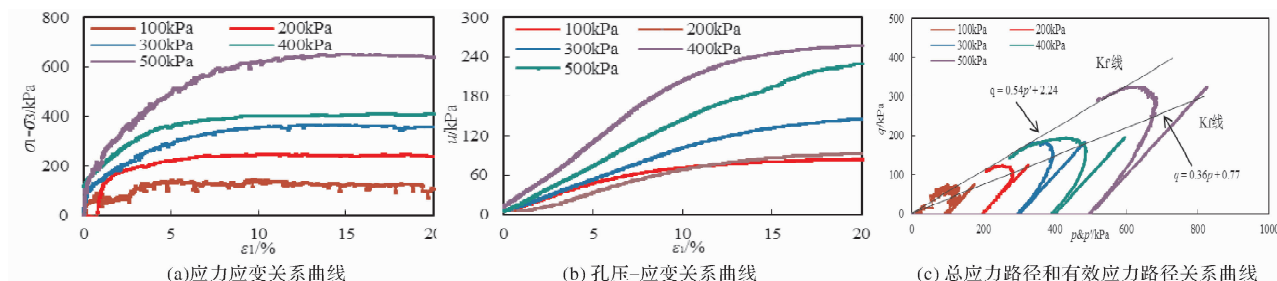
可知天然含水状态下土体的抗剪强度较高。

$$\left. \begin{aligned} c &= b(\cos \varphi)^{-1}; \\ \varphi &= \sin^{-1}(\tan \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

图 6 为饱和 Q_2 黄土的三轴试验结果, 图 6a 为应力应变关系曲线; 图 6b 为孔隙水压力变化曲线; 图 6c 为总应力路径或有效应力路径曲线。从图 6a 应力应变关系曲线中可知, 饱和 Q_2 黄土在各围压下均表现出应变硬化或理想塑性特点, 应力先随应变较快增大到某一值后再缓慢增大, 或保持不变。试样的在剪切过程中会产生较大的孔隙水压力 (图 6b), 孔压随着变形的发展逐渐增大, 轴向应变变为 5~10% 时达到最大值, 并维持在较高水平, 这也导致平均有效应力明显降低 (图 6c)。在 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 和 500 kPa 的围压下, 孔压分别占到对应总应力值的 50%, 65%, 83%, 75% 和 72%, 很容易液化。图 6c 为土体的总应力路径和有效应力路径曲线。仍然取应变为 20% 时的应力状态作为土体的破坏点, 在总应力路径或有效应力路径图中做出土体的破坏主应力迹线 K_f 线和有效破坏主应力迹线 K'_f 。同 Q_3 黄土样, 根据破坏主应力迹线的斜率和截距, 利用公式 (3) 可求得土体的有效强度参数 $c' = 2.7$ kPa, $\varphi' = 32.7^\circ$; 总强度参数 $c = 0.83$ kPa, $\varphi = 21.1^\circ$ 。总强度参数远远小于有效强度参数, 结合孔压特点可知, 即使滑动面很缓, 滑体仍能获得很高的加速度。

3 滑坡运动过程模拟

在实测地形数据基础上, 通过比较破坏后的实测地形图和破坏前的遥感图像恢复原始地形图 (图 7a)。将初始地形图范围横向等距离划分 70 个网格, 纵向等距离划分 76 个网格, 共 70×76 个节点, 网格纵、横宽度均为 5 m, 所以横向范围 350 m, 纵向范围 380 m。破坏前滑体的厚度是通过对滑坡破坏前后发生区地形图的差异估算得到的。模拟所需参数包括滑体重度、土体的残余有效抗剪强度、侧向土压力系数、滑带土孔隙水压力累积系数及稳态强度。滑体重度为 Q_2 和 Q_3 的重度, 见表 2; 有效残余抗剪强度参数通过上述 Q_2 和 Q_3 黄土的三轴试验获得; 侧向土压力系数取经验值; 滑带土的孔隙水压力累积系数根据表 1 取值; 土体的稳态强度需要进行高速环剪试验获得, 但由于试验条件的限制, 采用反分析法来得到, 即通过试算土体的稳态强度使得模型模拟的滑体的堆积形态 (图 7d) 和实际情况吻合。根据汪发武^[10,12] 对不同滑带土试验的结果, 如冲积黏土为 6

图5 Q₃ 黄土三轴试验结果图6 Q₂ 黄土三轴试验结果

kPa、破击碎屑土为 10 kPa、冲击砂砾石为 17 kPa、崩积碎屑土为 23 kPa, 稳态强度取值范围较小, 且细粒土较粗粒土小。黄土颗粒较细, 取较小值进行试算。各土层参数见表 3。

表3 滑坡运动模拟参数

土层	φ'	c'	τ_{ss}/kPa	k	B_{ss}	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
Q ₃ 黄土	33.3°	97.3	6	0.41	0.50	12.7
Q ₂ 黄土	32.7°	2.7	5	0.43	0.95	14.0

图 7 为滑坡运动过程中不同时间段的滑坡形态, 滑坡发生前 ($t = 0$ s), 坡体较两侧地形外凸 (图 7a); 滑坡运动初期, 滑坡整体破坏, 滑体脱

离滑坡后壁, 并在坡脚积聚 (图 7b); 随着时间推移, 积聚在坡脚的坡体向前运动 (图 7c), 直至在坡体前缘河流阶地较缓处堆积 (图 7d)。对比图 8c 和图 8d 可知, 滑坡堆积形态接近, 后者坡形较缓, 滑距最大为 275 m, 同实际情况的 280 m (图 2) 较为一致, 并且模拟得到的滑坡发生后滑坡泥流的厚度和现场勘察的结果也基本一致。

此外黄土滑坡-泥流的运动和破坏与滑坡型泥石流极其相似, 要研究其运动推力即破坏强度的大小, 需先计算其运动速度。利用上述模拟可直接得到每个节点上每个时刻的运动速度, 为滑

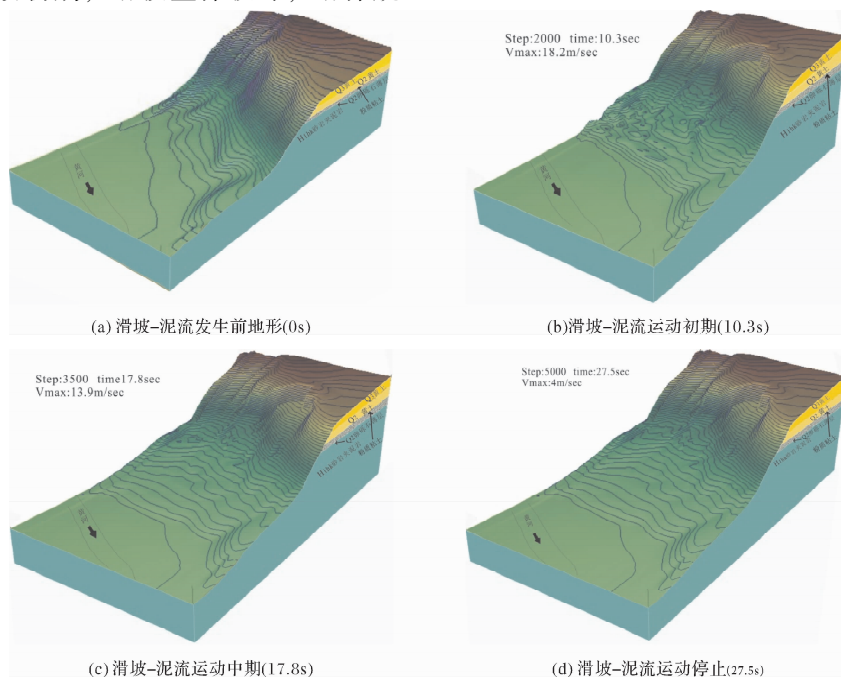


图7 滑坡-泥流运动模拟结果

坡-泥流的运动特性和力学特征的深入研究提供速度依据。图8是运动过程中的滑体最大速度变化曲线图,其中最大速度软件自动给出。从图8中可以看出,滑坡-泥流运动速度呈波动状态。在前6 s内,速度持续增加,增大到17 m/s后开始波动,这是滑坡-泥流运动的加速阶段;在6~11 s内,速度不断波动,这是滑坡-泥流的波动跳跃阶段,9.6 s时达到最大速度22.2 m/s,并快速下降;11 s后速度先平缓下降再稍快俗下降,到27.5 s时停止下来,这是滑坡-泥流的稳定阶段。由此反映了滑体的流动过程。

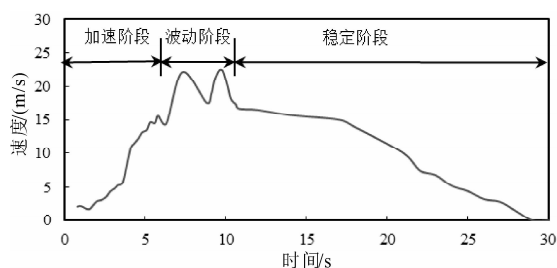


图8 运动过程中的最大速度变化曲线图

4 结论

基于 Sassa 的运动模型,本文从野外调查测量、室内试验和数值模拟三个方面对甘肃黑方台一典型滑坡泥流进行了运动学模拟,动态反映了滑坡运动过程。通过参数取值和模拟结果同实际情况的探讨,为该区域潜在滑坡泥流的致灾范围预测提供参考。

三轴试验结果表明,天然含水率下 Q_3 黄土具有很高的强度,低围压下结构强度发挥作用,应力达到峰值强度后会有很大的应力降。饱和 Q_2 黄土的总应力强度参数小于有效应力强度参数,且在

不排水剪切过程中能够产生很高的孔隙水压力,这使得滑面在饱和 Q_2 黄土层中的滑坡破坏后容易产生很高的加速度。

模拟结果表明,黑方台焦家滑坡泥流运动过程可分为三个阶段:加速阶段、波动阶段和稳定阶段。滑坡运动前期为加速阶段,运动中期速度波动大,反映滑体内部强烈的相互作用;滑坡运动后期,滑体处于减速阶段,并逐渐稳定。

参考文献:

- [1] 李同录,龙建辉,李新生. 黄土滑坡发育类型及其空间预测方法[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 500-505.
- [2] XU L, DAI F C, GONG M Q, et al. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai platform, North-West China[J]. Environ Earth Sci, 2012, 66: 1707-1713.
- [3] Sassa K. The geotechnical classification of landslides[C]//Proc of the 4th International conference and field workshop on landslides. Yokyo: Tokyo University Press, 1985: 31-40.
- [4] Sassa K. Geotechnical model for the motion of landslides[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on landslides. 1988, 1: 37-56.
- [5] 杨藩,常维,汪发武,等. 陕西泾阳东凤高速远程黄土滑坡运动过程模拟[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 890-895.
- [6] 庄建琦,彭建兵,李同录,等. “9·17”灞桥灾难性黄土滑坡形成因素与运动模拟[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 747-754.
- [7] 邢鲜丽. 灌溉诱发的黄土滑坡-泥流形成机理及运动学模拟-以陕西华县高楼村滑坡为例[D]. 西安: 长安大学, 2015 年.
- [8] Okada Y, Sassa K, Fukuoka H. Liquefaction and the steady state of weathered granitic sands obtained by Undrained Ring Shear Tests: A fundamental study of the mechanism of liquidized Landslides[J]. Journal of Natural Disaster Science, 2000, 22(2): 75-85.
- [9] WANG F W, Sassa K. A modified geotechnical simulation model for landslide motion[C]//Proc. 1st European Conf. on Landslides. Prague, 2002: 709-714.
- [10] 汪发武. 地震和降雨诱发的两个流动性滑坡的流动化机制及运动模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1654-1661.
- [11] GB50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 99-113.
- [12] WANG F W, Sassa K. Landslide simulation by a geotechnical model combined with a model for apparent friction change[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts, 2010, 35(3): 149-161.

Simulation of Motion Process for the Landslide Flow Located in Heifangtai Jiaojia, Gansu Province

ZHAO Jifei^{1,2}, HOU Xiaokun¹, LI Tonglu¹ and LIN Xiaoyan³

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710054, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: A landslide flow in Jiaojia, Heifangtai platform, Gansu is taken as an example, after the field measurement and laboratory test, the motion model put forward by Sassa is utilized to analyze the motion process of the landslide in Heifangtai. Results show that the sliding body detaches the slope at the beginning of motion. The maximum motion speed is 22.3 m/s and the duration time of the speed between 17 m/s and 22.3 m/s is 10 s, implying the landslide flow has high velocity. The whole motion process can be divided into three stages: accelerating stage, vibration stage and stabilizing stage. The high-steep terrain, high strength of natural soil and low strength of saturated soil, as well as the broad slope topography in front of the slope contributes to the high speed if the landslide-flow.

Key words: landslide-flow; field measurement; laboratory tests; motion simulation; Heifangtai, Gansu