

平推式滑坡运动距离计算模型

唐 然^{1,2}, 许 强¹, 吴 斌³, 范宣梅¹

(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, 四川 成都 610059; 2. 四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610072;
3. 深圳市水务规划设计院, 广东 深圳 518000)

摘 要: 平推式滑坡是四川盆地红层地区和三峡库区普遍存在的一类十分特殊的滑坡。多发育于近水平砂、泥岩互层的斜坡中, 岩层倾角一般仅 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$, 最陡者也不超过 10° 。基于平推式滑坡的地质力学模型及运动过程分析, 利用能量守恒的原理推导了平推式滑坡运动距离的理论计算公式。进行了 3 组物理模型模拟试验, 第 I 组试验模拟滑坡后部裂缝在不同宽度及水头高度作用下滑坡体的运动距离, 对推导的理论公式进行校验。通过对比分析认为, 平推式滑坡前缘剪出口地下水排泄状态呈少量点状排泄时, 滑坡基底扬压力分布形态整体上与矩形更加接近。为了进一步校验理论公式, 进行了第 II 组、第 III 组试验, 每组分别固定初始水头高度和初始裂缝宽度, 模型设置了前缘整体渗水和完全堵塞两种情况。物理模拟试验验证了理论公式的可靠性和适用性。将理论公式应用于狮子山滑坡运动距离的计算, 应用结果表明计算公式适用性良好。研究成果对平推式滑坡防治具有一定的指导意义。

关 键 词: 平推式滑坡; 运动距离; 计算模型; 物理模拟; 扬压力分布特征

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 03-1009-12

Method of sliding distance calculation for translational landslides

TANG Ran^{1,2}, XU Qiang¹, WU Bing³, FAN Xuan-mei¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (SKLGP), Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Institute of Geology Engineering Investigation, Chengdu, Sichuan 610072, China;
3. Shenzhen Water Planning and Design Institute, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Translational landslides are widely spread in red layers area in Sichuan Basin. This type of landslide develops in sub-horizontal bedrock composed of sandstone and mudstone, normally with the dip angle of 3 to 5 degrees, 10 degrees at most. Based on geo-mechanical model and sliding process analysis, with the application of the principle of energy conservation, we derived the theoretical sliding distance calculation formula of translational landslide. Three groups of physical simulation tests were established. Group test I simulated the sliding distance under the water pressure generated under different conditions of widths and different water heads. Then the theoretical formula was tested by comparing the calculated results and group I physical simulation test results. By comparison, the overall distribution shape of uplift pressure under the bottom of sliding body was close to rectangle with very few groundwater penetration points along the shear outlet. To verify the theoretical formula, group tests II and III were established thereafter. Each group of tests fixed the width and water head respectively. Meanwhile the shear outlet of physical model was set to two types totally blocked and totally seeping water. The results of three groups of physical simulation tests verified the reliability and applicability of theoretical formula. Applying the theoretical formula to Shizishan landslide to calculate the sliding distance, and the calculation results showed the good applicability of the method. The research has some guidance and practical value to prevention and mitigation of translational landslides.

Keywords: translational landslide; sliding distance; calculation model; physical simulation; distribution shape of uplift pressure

1 引 言

平推式滑坡是四川盆地红层地区和三峡库区

普遍存在的一类十分特殊的滑坡, 多发育于近水平砂、泥岩互层的斜坡中, 岩层倾角一般仅 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$, 最陡者也不超过 10° 。该类滑坡具有形成条件特殊、

收稿日期: 2017-05-01

基金项目: 国家创新研究群体科学基金 (No.41521002); 国家自然科学基金重点项目 (No.41630640)。

This work was supported by the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (41521002) and the Key Program of National Natural Science Foundation of China (41630640).

第一作者简介: 唐然, 男, 1983 年生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治与监测预警方面的研究工作。E-mail: 546488149@qq.com

通讯作者: 许强, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究工作。E-mail: xuqiang_68@126.com

识别难度高、隐蔽性强、危害大、成因机制和变形模式复杂等特点,受到了国内外学者的广泛关注。张倬元等^[1]首先提出了平推式滑坡的概念模型,认为滑坡受岩体裂缝中充水的静水压力和沿滑移面扬压力的联合作用而被水平推出,并提出了滑坡的计算模型和启动判据。此后,有学者对平推式滑坡的计算模型、临界水头高度及基底扬压力分布特征进行了验证和探讨。范宣梅等^[2]首次对平推式滑坡开展了物理模拟,对概念模型和启动判据进行了验证。吕美君等^[3]研究了临界水柱高度 h_{cr} 的大小与滑体的平均厚度和滑面长度的关系。赵勇等^[4]对统计模型与力学模型进行综合对比,验证了力学模型的合理性。赵权利等^[5]根据承压水一维稳定渗流理论分析了承压水作用范围与渗透系数、透水层厚度的关系。李文辉^[6]通过模型试验研究得出扬压力沿滑面呈三角形分布且逐渐向前缘发展。赵权利等^[7]考虑承压水作用范围和静水推力沿滑面向上的分力,对平推式滑坡启动判据进行了修正。岳建军等^[8]考虑滑坡剪出口堵水的情况,采用物理模拟的手段研究了滑面扬压力的分布特征。还有大量学者对垮梁子滑坡、天台乡滑坡及重庆万州滑坡群等平推式滑坡典型案例的变形机制及失稳模式从不同角度开展了研究^[9-18],取得了大量有益的成果。以上研究从不同的方面验证了平推式滑坡概念模型的正确性,也证实了平推式滑坡启动的关键因素是储水裂缝内的水头高度,这是平推式滑坡稳定性状态评价必不可少的参数。对于滑坡的危害性评价和防治而言,除了稳定性状态,运动距离也是最重要的依据之一,尤其是平推式滑坡这类突发性强、隐蔽性高、危害大的滑坡,运动距离的计算与预测对防灾避险有更为重要的意义。

在滑坡运动距离计算与预测方面,多年来众多学者做了许多探索,现有的滑动距离模型主要包括统计模型、物理模型和信息模型^[19]。统计模型利用统计分析原理计算滑动距离^[20-22];信息模型采用数值手段模拟滑坡破坏全过程,如离散元法、非连续变形分析(DDA)等方法;物理模型通过力学、运动学理论计算滑动距离,如 Heim^[23]提出的雪橇模型、Scheidegger^[24]提出的摩擦模型、潘家铮法^[25]等。平推式滑坡的运动距离究竟受到哪些因素的控制,目前还存在一定的争议。现有的相关研究成果也难以清楚解释大量平推式滑坡案例产生长距离滑

动的现象,如天台乡滑坡运动距离超过 80 m、垮梁子滑坡运动距离超过 40 m。以上计算和预测方法都没有考虑平推式滑坡特殊的变形机制和运动特征,对于平推式滑坡不具备适用性。因此,平推式滑坡运动距离的计算和预测方法还值得深入研究。

基于此,本文在平推式滑坡的地质力学模型及运动过程分析的基础上,推导了平推式滑坡运动距离的理论计算公式,并通过物理模拟对理论公式进行校验,最后选取平推式滑坡实例计算验证了公式的准确性。本文研究成果对平推式滑坡防治具有一定的指导意义。

2 平推式滑坡基本特征及受力分析

典型的平推式滑坡工程地质剖面如图 1 所示。图中, h_0 为滑坡启动时水头高度, θ 为后部裂缝与水平面的夹角, L 为滑体底面沿滑动方向上的长度, α 为滑动面沿滑移方向的倾角。平推式滑坡一般发育在近水平砂、泥岩互层斜坡体中,平推式滑动的产生一般要具备 2 个必要条件,其一为软弱带的存在,多发于泥岩中,演化形成滑坡的滑带;其二为后部陡倾裂缝的存在,具备储水功能,多由构造节理或卸荷裂隙演化形成。

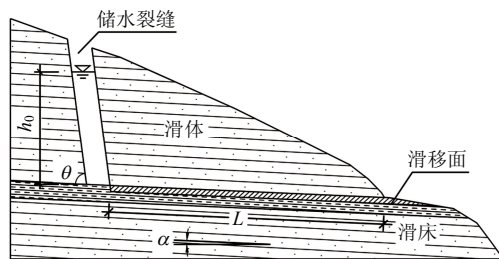


图 1 平推式滑坡典型工程地质剖面

Fig.1 Typical geological profile of translational landslide

在强降雨期间,雨水通过汇集后渗入陡倾裂缝,裂缝内大量充水形成静水推力。同时,地下水沿滑体底部向前渗透形成扬压力,滑体受力图见图 2。滑体主要受到 4 个力的作用,重力 W 、滑面抗滑力 S_f 、裂缝内静水推力 P_{pu} 、基底扬压力 P_{up} 。根据前人对平推式滑坡基底扬压力分布特征的研究^[5-8],对传统模型^[1]进行了适当修正,当前缘剪出口存在渗水点时,扬压力分布形态为三角形(见图 2(a)),当前缘剪出口堵塞时,扬压力分布形态为矩形(见图 2(b))。基于受力分析,滑坡启动前,稳定性系数可采用下式计算:

$$K_f = \frac{S_r}{S_m} = \frac{[W \cos \alpha - P_{up} - P_{pu} \cos(\theta - \alpha)] \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + P_{pu} \sin(\theta - \alpha)} = \frac{\left[W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w hL - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \sin(\theta - \alpha)} \quad (1)$$

$$K_f = \frac{S_r}{S_m} = \frac{[W \cos \alpha - P_{up} - P_{pu} \cos(\theta - \alpha)] \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + P_{pu} \sin(\theta - \alpha)} = \frac{\left[W \cos \alpha - \gamma_w hL - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \sin(\theta - \alpha)} \quad (2)$$

式中: K_f 为稳定性系数; S_m 为下滑力; W 为滑块单宽重力; φ 为滑带内摩擦角; γ_w 为水的重度; c 为滑带黏聚力; h 为裂缝水头高度。其中, 式 (1) 对应图 2(a), 式 (2) 对应图 2(b)。

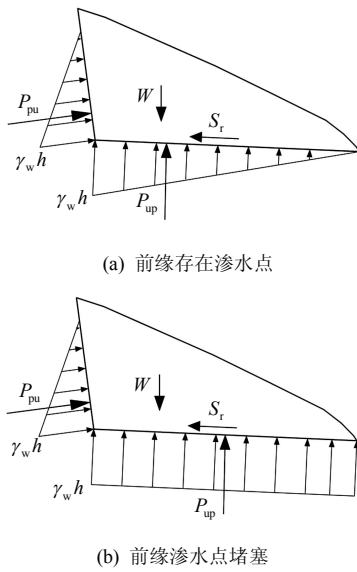


图2 平推式滑坡受力图

Fig.2 Free body diagram of translational landslide

滑坡的稳定性随着裂缝内水头高度的增加而降低, 当 $K_f = 1$ 时, 滑坡处于极限平衡状态, 此时, 计算出的 h 值为临界水头高度 h_{cr} 。当滑面贯通的时刻, 滑带强度降低至残余强度导致滑带抗滑力 S_r 陡降, 而下滑力 S_m 基本保持不变, 因此, 在滑动过程中, 式 (1) 及式 (2) 的滑带强度参数应为残余强度参数。

3 理论公式推导

3.1 模型建立

平推式滑动过程如图 3 所示, 假设条件及理由如下:

(1) 假设滑坡后部裂缝中水的体积不变。现实中平推式滑坡滑动期间地下水排泄引起的裂缝内水的总体积变化量非常小, 可以忽略不计;

(2) 两侧及前缘无侧阻力。现实中平推式滑坡

边界临空条件良好, 对滑体的整体约束较小;

(3) 滑动过程由于滑带黏聚力 c 接近 0, 因此, 模型中不予考虑, 同时假设滑动过程中滑带强度参数保持不变。

图 3(a) 中 b_0 为滑坡启动时初始裂缝宽度。图 3(b) 中 S 为滑动距离, h_s 为滑坡制动后的水头高度。设 x 为裂缝宽度变量, $x \in [b_0, b_0 + S]$, h 为水头高度变量, 在滑坡运动过程中, 随着 x 增大 h 逐渐降低, 通过假设条件 (1) 可以得下式第 1 式,

$$\left. \begin{aligned} h &= b_0 h_0 / x \\ S_r(h) &= \left[W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w hL - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \varphi \\ S_m(h) &= W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

结合式 (3) 第 2 式及 (3) 第 3 式可到下滑力 S_m 及抗滑力 S_r 与裂缝宽度 x 的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} S_r(x) &= \left[W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w \frac{b_0 h_0}{x} L - \frac{1}{2} \gamma_w \left(\frac{b_0 h_0}{x} \right)^2 \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \varphi \\ S_m(x) &= W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w \left(\frac{b_0 h_0}{x} \right)^2 \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

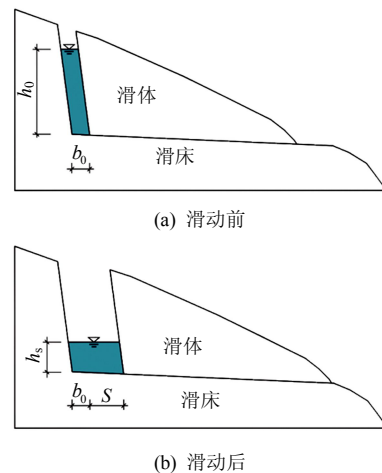


图3 平推式滑坡运动过程示意

Fig.3 Schematic of translational landslide sliding process

计算模型及推导过程首先考虑基底扬压力的分布形态为三角形 (见图 2(a))。

3.2 公式推导过程

通过式 (4) 可绘制下滑力 $S_m(x)$ 及抗滑力 $S_r(x)$ 与裂缝宽度 x 的变化关系示意图 (见图 4), 分别将 $S_m(x)$ 及 $S_r(x)$ 在区间 $[b_0, b_0+S]$ 上积分可得各自在滑动过程中做的功, 分别设为 W_r 及 W_m :

$$\left. \begin{aligned} W_r &= \int_{b_0}^{b_0+S} S_r(x) dx \\ W_m &= \int_{b_0}^{b_0+S} S_m(x) dx \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

图 4 中, 随着 x 增加, $S_m(x)$ 减小而 $S_r(x)$ 增加, 设在 $x=b_{re}$ 处, $S_m(b_{re})=S_r(b_{re})$ 。 $[b_0, b_{re}]$ 区间内, 滑坡处于加速运动状态, 在 $[b_{re}, b_0+S]$ 区间, 滑坡处于

分别计算 W_r 及 W_m :

$$\begin{aligned} W_r &= \int_{b_0}^{b_0+S} \left[W \cos \alpha - \frac{1}{2} \gamma_w \frac{b_0 h_0}{x} L - \frac{1}{2} \gamma_w \left(\frac{b_0 h_0}{x} \right)^2 \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \phi dx = \\ &= \left[W \cos \alpha \left| x \right|_{b_0}^{b_0+S} - \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0 L \ln x \Big|_{b_0}^{b_0+S} - \frac{1}{2} \gamma_w (b_0 h_0)^2 \left| \frac{1}{x} \right|_{b_0}^{b_0+S} \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \phi = \\ &= \left[W \cos \alpha S - \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0 L \ln \left(\frac{b_0+S}{b_0} \right) - \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0^2 \frac{S}{b_0+S} \cos(\theta - \alpha) \right] \tan \phi \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} W_m &= \int_{b_0}^{b_0+S} \left[W \sin \alpha + \frac{1}{2} \gamma_w \left(\frac{b_0 h_0}{x} \right)^2 \sin(\theta - \alpha) \right] dx = W \sin \alpha \left| x \right|_{b_0}^{b_0+S} + \frac{1}{2} \gamma_w (b_0 h_0)^2 \left| \frac{1}{x} \right|_{b_0}^{b_0+S} \sin(\theta - \alpha) = \\ &= W \sin \alpha S + \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0^2 \frac{S}{b_0+S} \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (8)$$

联立式 (5)~(8) 可得

$$(W \cos \alpha \tan \phi - W \sin \alpha) S - \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0 L \tan \phi \ln \left(\frac{b_0+S}{b_0} \right) - \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0^2 [\cos(\theta - \alpha) \tan \phi + \sin(\theta - \alpha)] \frac{S}{b_0+S} = 0 \quad (9)$$

整理式 (9) 得

$$\left. \begin{aligned} AS - C \ln \left(\frac{b_0+S}{b_0} \right) - B \frac{S}{b_0+S} &= 0 \\ A &= W \cos \alpha \tan \phi - W \sin \alpha \\ B &= \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0^2 [\cos(\theta - \alpha) \tan \phi + \sin(\theta - \alpha)] \\ C &= \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0 L \tan \phi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式 (10) 为基底扬压力分布形态为三角形时运动距离计算公式, 当分布形态为矩形时计算公式为

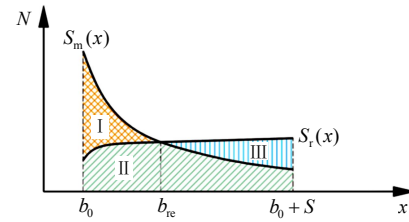


图 4 下滑力 S_m 及抗滑力 S_r 与裂缝宽度 x 变化关系示意
Fig.4 Relationship between S_m and S_r with width of joint storing water

减速运动状态。根据能量守恒原理, 从滑坡启动到滑坡制动, $W_m=W_r$, 即图 4 中阴影面积 $I+II=II+III$, 可得

$$\int_{b_0}^{b_0+S} S_r(x) dx = \int_{b_0}^{b_0+S} S_m(x) dx \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} AS - C \ln \left(\frac{b_0+S}{b_0} \right) - B \frac{S}{b_0+S} &= 0 \\ A &= W \cos \alpha \tan \phi - W \sin \alpha \\ B &= \frac{1}{2} \gamma_w b_0 h_0^2 [\cos(\theta - \alpha) \tan \phi + \sin(\theta - \alpha)] \\ C &= \gamma_w b_0 h_0 L \tan \phi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

求解式 (10)、(11) 中的 S 可得到平推式滑坡的滑动距离, b_0+S 为裂缝张开后形成的拉陷槽宽度。

4 物理模拟试验

进行物理模拟的主要目的是对理论公式进行校

验。物理模拟的方案是建立平推式滑坡物理模型模拟储水裂缝在不同宽度及水头高度作用的运动过程。

4.1 物理模拟基本原理

物理模拟以相似原理为基础, 建立研究对象和模型试验之间的相似关系, 从而保证模型试验中出现的物理现象与原型相似。模型与研究对象相似, 需要在几何条件、受力条件和摩擦系数方面满足一定的关系。具体如下:

$$R_L = L_p / L_m \quad (12)$$

$$R_\gamma = \gamma_p / \gamma_m \text{ 或 } R_\sigma = \sigma_p / \sigma_m \quad (13)$$

$$R_f = f_p / f_m \quad (14)$$

式中: R 为相似系数, L 、 γ 、 σ 、 f 分别为几何尺寸、重度、应力、摩擦系数; 下标 p 和 m 分别代表原型和模型。

本次模拟采用的是相似材料的机制模拟法, 满足如下条件:

$$R_\delta = R_\sigma = R_\gamma R_L \quad (15)$$

$$R_f = 1 \quad (16)$$

式中: δ 为位移。

式 (15) 和 (16) 中:

$$R_\delta = \frac{\delta_p}{\delta_m}, R_\sigma = \frac{\sigma_p}{\sigma_m}, R_\gamma = \frac{\gamma_p}{\gamma_m}, R_L = \frac{L_p}{L_m}, R_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (17)$$

根据试验条件确定模型几何相似系数为 280。设模型长为 25.0 cm, 高为 15.0 cm, 宽为 39.4 cm。取重度相似系数 $R_\gamma = 1$ (包括滑坡岩土体和水的重度)。根据相似理论得到模型试验的相似条件为

$$R_\delta = R_\sigma = R_L = R_\gamma R_L = 280 \quad (18)$$

$$R_\phi = R_f = 1 \quad (19)$$

4.2 动摩擦系数的确定

动摩擦系数采用如下方法测试, 用 PVC 板制作一斜坡和一水平滑道, 表面均用膨润土敷设, 并使其饱水, 将土块于斜坡上释放, 土块由斜坡滑下后滑至水平滑道上停止, 量测出滑块的释放位置高度 H 及其到停止位置时的水平距离 D , 由

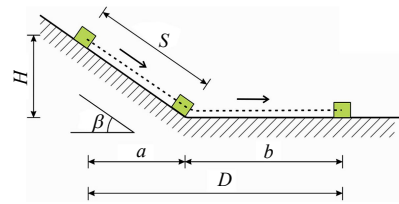
$$\begin{aligned} mgH &= \mu mg \cos \beta S + \mu mgb = \\ &\mu mga + \mu mgb = \\ \mu mg(a+b) &= \mu mgD \end{aligned} \quad (20)$$

式中: mg 为土块重力; H 为土块到水平滑道之间的垂直距离; μ 为动摩擦系数; β 为斜坡滑道倾角。 a 为土块在斜坡滑道上运动的水平距离; b 为土块在水平滑道上运动的距离; D 为土块在斜坡和水平滑道上运动的水平距离。

推导得

$$\mu = H/D \quad (21)$$

将 H 、 D 代入式 (21), 即可求得滑动摩擦系数 μ 。测试原理图如图 5(a)所示, 测试装置如图 5(b)所示。经过反复测试后得出滑带动摩擦系数为 0.1。



(a) 动摩擦系数测试原理示意



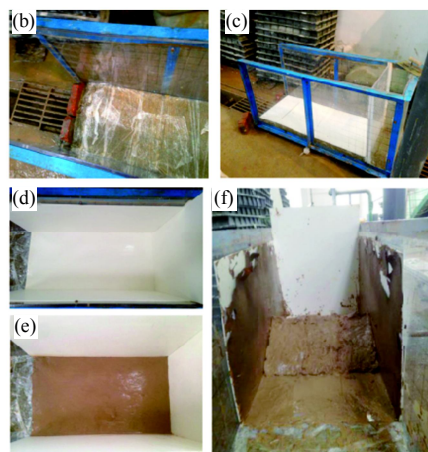
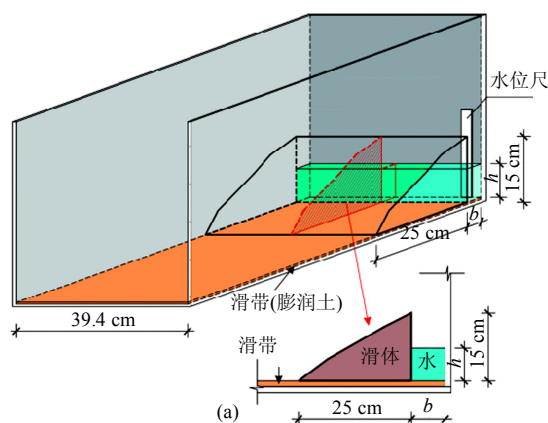
(b) 动摩擦系数测试装置

图5 动摩擦系数测试原理与装置

Fig.5 Dynamic friction coefficient testing principle and device

4.3 物理模型的建立

物理模型如图 6(a)所示。物理模型是在水槽中建立, 为了保证底面平整, 首先在水槽底部铺设细砂层 (见图 6(b)), 然后在其上铺设 PVC 板 (见图 6(c))。为了保证模型后部的密封性, 水槽四周采用 PVC 板铺设并黏连在一起 (见图 6(d)), 水槽底部敷设一层膨润土模拟滑带, 厚为 2 cm (见图 6(e))。在两侧壁板上敷设一层膨润土降低模型两侧边界的摩阻力 (见图 6(f))。为满足相似原理, $R_\gamma = 1$, 滑体模型由膨润土与砾石按 65:35 的比例配合而成, 重度为 20.8 kN/m^3 , 单位宽度重量为 0.39 kN/m 。模型断面大致呈三角形, 后壁设水位尺测量水位高度, 滑面倾角设为 0° 。



(a) 物理模拟试验模型示意图; (b) 水槽底部铺砂; (c) 细砂层上铺 PVC 板; (d) 后部及两侧粘连 PVC 板;
(e) 敷设膨润土; (f) 两侧壁敷设膨润土建立滑块模型

图 6 物理模拟试验模型示意及其建立过程

Fig.6 Schematic of physical simulation test model and the photos of physical model establishment

4.4 物理模拟过程及结果

物理模拟步骤主要为：设置好滑体模型后部裂缝宽度 b_0 ，向后部裂缝缓慢注水至 8 cm 左右，静置至水从滑坡模型剪出口处渗出时，表明此时的基底扬压力正在生效，再缓慢升高水位至 10~13 cm 之间，记录每次启动水位 h_0 。滑坡产生滑动到制动后，记录裂缝宽度 b_0+S ，计算运动距离 S 。为了初步校验理论公式，首先完成了第 I 组试验，考虑 b_0 和 h_0 同时产生变化的情况。第 I 组物理模拟获得的试验数据见表 1。

表 1 第 I 组物理模拟试验结果汇总

Table 1 Results of group I physical simulation tests

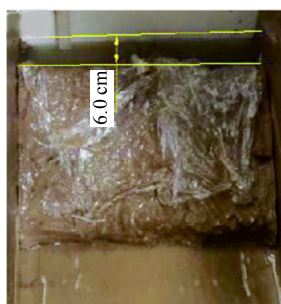
试验 编号	试验参数/cm				S 计算结果/cm	
	h_0	b_0	b_0+S	S	式 (10)	式 (11)
I-1	12.0	5	13.0	8.0	7.1	10.7
I-2	12.6	6	21.5	15.5	10.0	14.7
I-3	12.6	7	24.8	17.8	11.7	17.1
I-4	12.5	8	27.8	19.8	13.0	19.3
I-5	11.5	9	25.0	16.0	11.1	17.0
I-6	12.8	10	32.0	22.0	17.5	25.5
I-7	11.5	11	30.0	19.0	13.5	20.9
I-8	11.0	12	29.0	17.0	12.5	19.9



(a) I-1 试验滑动前照片



(b) I-1 试验滑动后照片



(c) I-2 试验滑动前照片



(d) I-2 试验滑动后照片

图 7 试验过程照片

Fig.7 Pictures of physical model testing procedure

物理模型变形过程可大致分为 3 个阶段：①初期缓慢蠕滑。当后部水头高度达到 h_0 后 2~3 min 内，滑坡的变形非常缓慢，这期间滑带逐渐被地下水软化，也是滑带土从初始蠕变到加速蠕变的过程。②平推式滑动。滑面贯通，滑坡出现短暂的加速过程，在静水压力作用下，运动速度快速上升。③减速制动。随着滑距的增加，滑坡后缘裂隙逐渐变宽，水位降低，静水压力减小，滑坡从加速状态进入减速状态，最终制动。物理模型滑动过程照片如图 7 所示。

4.5 理论公式校验

采用理论公式 (10) 及式 (11) 对第 I 组物理模拟试验的运动距离进行验算，计算值与实测值对比如表 1、图 8 及图 9 所示。从中可见，采用式 (11) 得到的计算值与实测值的误差远低于式 (10)。两者的主要区别在于基底扬压力的分布形态，从试验过程来看，第 I 物理模拟前缘仅有小股水呈点状渗出，而未出现整体渗水的情况。由此可以判断，当地下

水排泄口沿前缘呈少量点状排泄时, 基底扬压力分布形态整体上与矩形更加接近, 运动距离应按式(11)计算, 稳定性计算应按式(2)计算。当地下水排泄口沿前缘呈线状分布时, 基底扬压力分布形态整体上才与三角形更加接近, 运动距离应按式(10)计算, 稳定性分析应按式(1)计算。

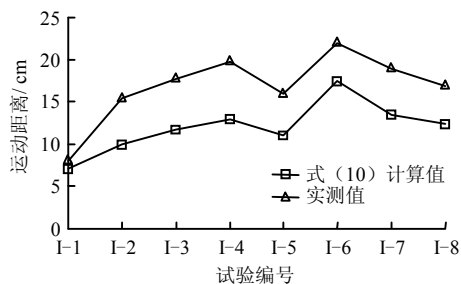


图8 式(10)计算值与第I组实测值对比
Fig.8 Comparison between calculation data by formula (10) and group I physical simulation data

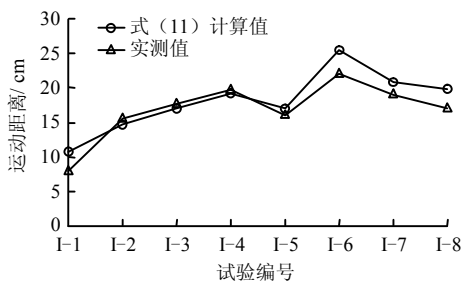


图9 式(11)计算值与第I组实测值对比
Fig.9 Comparison between calculation data by formula (11) and group I physical simulation data

为了进一步校验理论公式, 进行了第II、III组试验。第II组试验固定 h_0 , 设置不同的 b_0 , 其中编号II-1、II-2试验堵塞前缘, 理论公式采用式(11), 其他编号设置前缘整体渗水, 理论公式采用式(10)。第III组试验固定 b_0 , 设置不同的 h_0 , 第III组试验设置前缘整体渗水, 理论公式采用式(10)。

物理模拟试验数据及理论计算值见表2、3、图10及图11。从中可见, 第II、III组试验实测运

表2 第II组物理模拟试验结果汇总
Table 2 Results of group II physical simulation tests

试验编号	h_0 / cm	b_0 / cm	S / cm	理论计算值 / cm	扬压力分布形式
II-1	11.5	9.0	16.0	17.0	矩形分布
II-2	11.5	11.0	19.0	20.9	矩形分布
II-3	11.5	13.0	17.0	17.6	三角形分布
II-4	11.5	14.0	13.5	17.7	三角形分布
II-5	11.5	15.0	18.3	18.5	三角形分布
II-6	11.5	19.6	23.9	24.1	三角形分布

表3 第III组物理模拟试验结果汇总

Table 3 Results of group III physical simulation tests

试验编号	h_0 / cm	b_0 / cm	S / cm	理论计算值 / cm	扬压力分布形式
III-1	10.0	16	9.6	11.1	三角形分布
III-2	10.5	16	15.1	14.5	三角形分布
III-3	11.5	16	18.1	19.8	三角形分布
III-4	12.5	16	26.9	26.1	三角形分布
III-5	13.5	16	29.9	33.3	三角形分布

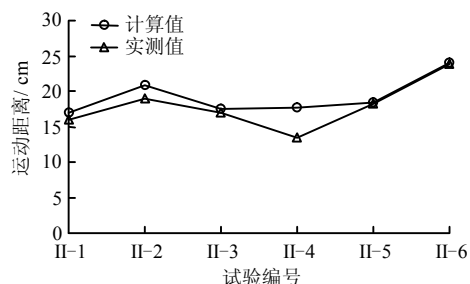


图10 第II组试验计算值与实测值对比
Fig.10 Comparison between calculation data and group II physical simulation data

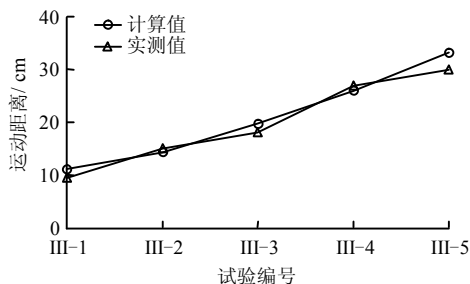


图11 第III组试验计算值与第III组实测值对比
Fig.11 Comparison between calculation data and group III physical simulation data

动距离 S 与理论公式计算值之间误差较小, 进一步论证了理论公式的可靠性, 同时主要验证了扬压力为三角形分布形态时理论公式(10)的适用性。其中编号II-4试验运动距离实测值 S 与计算值差距相对较大, 是由于滑体与侧板密封未做好, 滑动过程中后部裂隙内的储水从侧边界渗出了一部分所致。

从第II组试验数据可见, 平推式滑坡是否启动与 b_0 大小无关, 而与 h_0 是否达到临界水头高度相关。在启动水头 h_0 和其他条件相同的情况下, 滑坡的滑动距离与裂缝初始宽度 b_0 呈正向相关关系。这是由于当 h_0 一定时, 若 b_0 越大, 则运动过程中水位下降的速度越慢, 加速过程越长, 运动距离也越大。

从第III组试验数据可见, 在初始裂缝宽度 b_0 和其他条件相同的情况下, 滑坡的滑动距离与启动水头高度 h_0 呈正向相关关系。这是由于当 b_0 一定时, 若 h_0 越大, 则滑坡启动时获得的加速度越大, 能达到的最大速度越大, 运动距离也越大。

5 滑坡实例验算

为了验证理论公式的可行性，以狮子山滑坡作为案例进行运动距离计算分析。狮子山滑坡位于成都市新津县邓双镇，于 2013 年 8 月 8 日凌晨 6 时左右发生剧烈运动。滑坡纵向长为 121 m，横向宽为 145 m，滑体厚度为 3~15 m，滑坡体积约为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，主滑方向约 30° 。滑坡区基岩地层为白垩系上统夹关群 (K_2j) 厚层状砂岩与紫红色薄层状泥

岩互层，地层产状 $25^\circ \sim 40^\circ \angle 5^\circ$ 。滑坡工程地质平面图及剖面图如图 12 及图 13 所示。滑坡前缘及左侧边界完全临空，右侧不具备临空条件。滑坡滑动后形成拉陷槽平面上呈右窄左宽的形态。滑动后拉陷槽及滑坡体内地下水大量从左侧边界缓慢排泄，形成了两处溜滑体（见图 12）。经过钻探及槽探揭露可以确定前缘滑体覆盖了原有耕地，并伴有 0.5~1.0 m 的少量隆起（见图 12、13）。

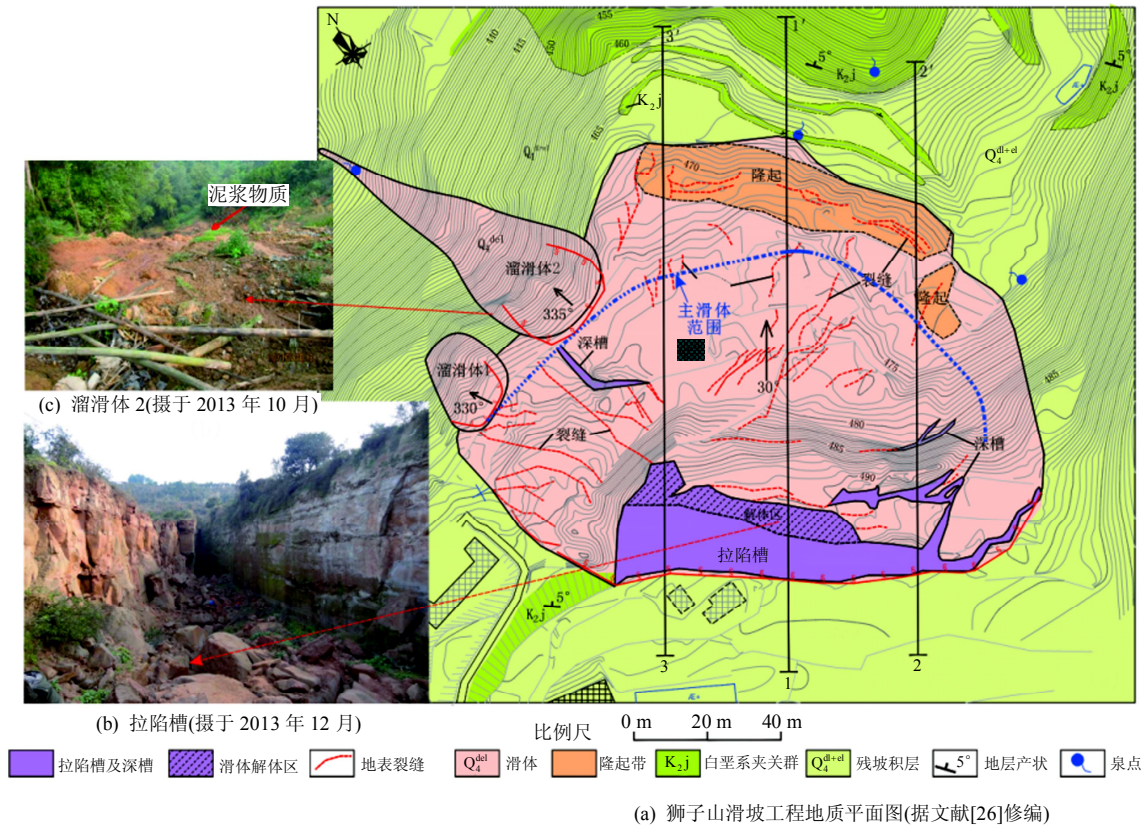


图 12 狮子山滑坡基本特征
Fig.12 Geological features of Shizishan landslide

主滑体基本保持了基岩产状与结构，只有在 1-1' 剖面及 3-3' 剖面范围内滑体后部完全解体呈大块石（见图 12(b)）。基于拉陷槽后侧陡壁平面形态及走向，对滑体后部边界进行恢复，如图 12、13 所示。经过测算后得到了各个剖面拉陷槽的实际宽度。通过裂缝初始宽度（据滑坡监测员记录），得到滑坡各剖面运动距离如表 4 所示。

狮子山滑坡运动距离计算参数如表 5 所示。充水高度 h_0 根据当地村民对拉陷槽旁水并地下水位高度的描述取 9.5 m。滑带的残余强度来自该滑坡的勘察报告^[26]对滑带土的土工试验结果，单宽重度、裂缝倾角及滑面长度根据工程地质平、剖面

表 4 狮子山滑坡各剖面实际运动距离
Table 4 Actual sliding distance of each profile of Shizishan landslide

剖面编号	拉陷槽宽度 (b_0+S)/m	裂缝初始宽度 b_0 /m	运动距离 S /m
1-1'	11.61	1.5	10.11
2-2'	6.48	1.5	4.98
3-3'	17.91	2.0	15.91

图量测及实地调查得到。狮子山滑坡滑动前前缘无地下水渗出，滑动后在前缘出现了 1 处渗水点，因此，选择式 (11) 计算滑坡的运动距离。将表 5 中参数代入式 (11) 得到各剖面滑坡运动距离计算式为

$$\left. \begin{aligned} 340.842\,2S - 1\,428.832\,2\ln\left(\frac{1.5+S}{1.5}\right) - 680.820\,1\frac{S}{1.5+S} &= 0 && 1-1' \text{剖面} \\ 303.12S - 840.215\,5\ln\left(\frac{1.5+S}{1.5}\right) - 680.820\,1\frac{S}{1.5+S} &= 0 && 2-2' \text{剖面} \\ 245.397\,3S - 1\,401.912\,2\ln\left(\frac{2.0+S}{2.0}\right) - 907.760\,2\frac{S}{2.0+S} &= 0 && 3-3' \text{剖面} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

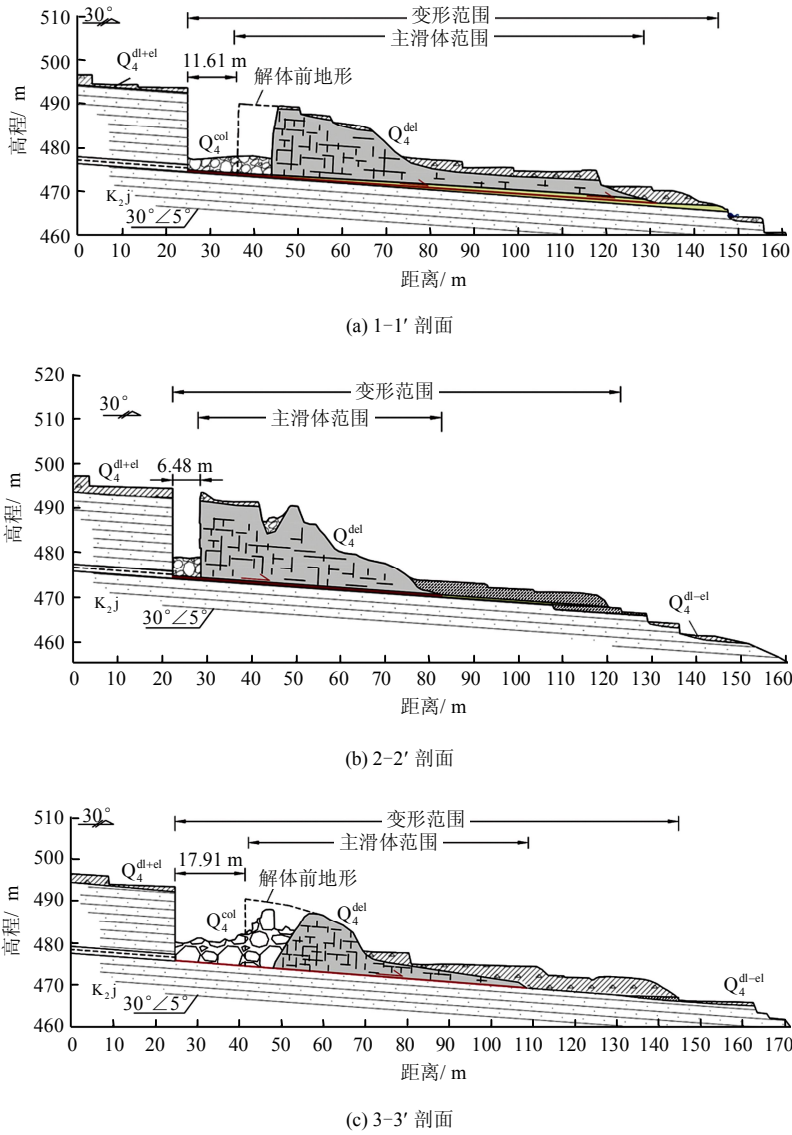


图 13 狮子山滑坡工程地质剖面图（据文献[26]修编）
Fig.13 Engineering geological profile of Shizishan landslide (according to reference [26])

表 5 狮子山滑坡运动距离计算参数
Table 5 Sliding distance calculation parameters of Shizishan landslide

剖面 编号	滑体重度 /(kN/m ³)	充水高度 h ₀ /m	水的重度 γ _w /(kN/m ³)	滑体单宽重 W/(kN/m)	滑面长度 L/m	裂缝倾角 θ/(°)	滑面倾角 α/(°)	初始宽度 b ₀ /m	残余内摩擦角 φ/(°)
1-1'	23.6	9.5	10	15 914.20	92.0	88	5	1.5	6.22
2-2'	23.6	9.5	10	14 152.92	54.1	88	5	1.5	6.22
3-3'	23.6	9.5	10	11 457.80	67.7	88	5	2.0	6.22

各剖面计算结果与实际运动距离对比如表 6 所示，从中可见 1-1' 剖面及 3-3' 剖面计算误差较小，分别为 3.31%、0.96%。2-2' 剖面误差较大，为 29.36%，计算值大于实际值。究其原因可归结为：

1-1' 剖面与 3-3' 剖面与计算模型的假设条件 (2) 较为接近, 而 2-2' 剖面靠近右侧边界, 该侧不具备临空面, 滑动过程中受到阻力较大, 致使实际滑动距离小于理论公式计算结果。实际应用中需根据滑坡的实际临空条件选取计算剖面获取参数进行计算。

表 6 计算结果与实际运动距离对比

Fig.6 Comparison between theoretical calculation results and actual sliding distance

剖面 编号	实际运动距离 / m	理论公式计算结果 / m	绝对误差 / m	相对误差 / %
1-1'	10.11	10.44	0.33	3.31
2-2'	4.98	6.44	1.46	29.36
3-3'	15.91	15.76	0.15	0.96

综上所述, 本文推导的平推式滑坡运动距离计算公式计算结果误差较小, 具有良好的适用性。

需要进一步说明的是, 计算模型假设条件 (1) 与狮子山滑坡是基本相符的。主要基于以下 2 点:

①据当地居民描述, 滑坡滑动当天上午 8 时左右至现场查看时拉陷槽总体已形成, 沿拉陷槽后壁底部可见一定量积水, 状若小河, 几天以后完全露出槽底。这说明拉陷槽内部积水未能迅速排出。②在 2013 年 10 月 10 日第 1 次对狮子山滑坡的踏勘发现, 溜滑体 2 从变形部位持续滑塌到斜坡底部, 在斜坡表面形成一道长约 60 m 的沟槽。并且在当时滑坡滑动 2 个月后, 还能发现地下水从溜滑体后缘缓慢溢出, 产生大量泥浆 (见图 12(c))。而溜滑体 1 主要表现为下坐、弧形裂缝和整体含水率较高, 并无地下水溢出地表的迹象。因此, 拉陷槽内积水和主滑体地下水主要是从溜滑体 2 处缓慢渗出, 该处地下水的渗透方式决定了其缓慢的排泄速度。

6 讨 论

需要指出的是, 本文推导的理论公式的应用范围有两类, 一类是潜在平推式滑坡的斜坡区, 即在近水平岩层斜坡体上已经出现了从地表贯通到深部, 且发育在岩体内的陡倾裂缝。另一类是已经产生了平推式滑动, 但后部拉陷槽内仍然具备储水条件, 在一定条件下还有再次启动的可能性的平推式滑坡。

这两类情况使用公式的前提条件都是需要通过一定的手段获取 3 类基本参数, ①力学参数 (岩土体的重度 γ_0 , 滑面残余内摩擦角 φ); ②几何参数 (滑体底面的长度 L 、沿运动方向上滑面倾角 α 、储水裂缝与水平面的夹角 θ 、滑体单宽重度 W); ③启动参数 (启动水头 h_0 , 裂缝初始宽度 b_0)。

7 结 论

(1) 本文基于平推式滑坡的地质力学模型受力分析及运动过程分析, 利用能量守恒的原理推导了平推式滑坡运动距离的理论计算公式。通过公式的推导得到认识, 对于既定平推式滑坡, 储水裂缝水头高度是平推式滑坡能否启动的关键因素, 滑坡启动后初始裂缝宽度 b_0 和水头高度 h_0 , 也即储水量, 是影响滑坡运动距离大小的主要因素。

(2) 通过物理模拟对理论公式进行校验发现, 平推式滑坡基底扬压力分布形态对滑坡的稳定性和运动距离有较大影响, 当地下水排泄口沿前缘呈少量点状排泄时, 基底扬压力分布形态整体上与矩形更加接近。当整个剪出口都为地下水渗水带时, 基底扬压力的整体分布形态与三角形更加接近。

(3) 将理论公式应用于狮子山滑坡, 理论计算结果与实际运动距离比较, 误差较小, 证明了计算公式适用性良好。

(4) 本文研究成果对平推式滑坡的防治具有一定的指导意义, 可作为该类滑坡危险区、影响区划定的理论依据指导防灾减灾。

参 考 文 献

- [1] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 377-380.
ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. The analytical principle on engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 377-380.
- [2] 范宣梅, 许强, 张倬元, 等. 平推式滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3753-3759.
FAN Xuan-mei, XU Qiang, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Study of genetic mechanism of translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3753-3759.
- [3] 吕美君, 晏鄂川, 程江涛. 近水平岩层滑坡启动的临界水柱高度分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 207-211.
LÜ Mei-jun, YAN E-chuan, CHENG Jiang-tao. Study on critical depth of fracture water for nearly horizontal strata landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 207-211.
- [4] 赵勇, 许模, 赵红梅. 平推式滑坡后缘启动水头探讨[J]. 人民长江, 2011, 42(17): 32-36.
ZHAO Yong, XU Mo, ZHAO Hong-mei. Discussion on starting water head in trailing edge of translational landslide[J]. Yangtze River, 2011, 42(17): 32-36.
- [5] 赵权利, 孙红月, 王智磊, 等. 承压水对平推式滑坡的

- 作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 762—769.
- ZHAO Quan-li, SUN Hong-yue, WANG Zhi-lei, et al. Influence of confined water on translational landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 762—769.
- [6] 李文辉. 岩质滑坡地下水动态演化规律及对滑坡稳定性影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- LI Wen-hui. Study on groundwater dynamic development regularity of rock slope and its effect on landslide stability[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [7] 赵权利, 尚岳全, 支墨墨. 平推式滑坡启动判据的修正[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 596—602.
- ZHAO Quan-li, SHANG Yue-quan, ZHI Mo-mo. Modification of starting criterion of horizontal-push landslide[J]. **Journal of Jilin University (the Earth Sciences)**, 2014, 44(2): 596—602.
- [8] 岳建军, 林峰, 吉世祖, 等. 缓倾外软硬互层型斜坡启滑前地下水压力分布特征物理模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(33): 132—136.
- YUE Jian-jun, LIN Feng, JI Shi-zu, et al. Study on physical simulation of groundwater pressure distribution on critical-sliding landslide with interbedded soft and hard rock beddings of low dip angles[J]. **Science Technology and Engineering**, 2015, 15(33): 132—136.
- [9] 黄润秋, 赵松江, 颂肖冰, 等. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机制分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 13—15.
- HUANG Run-qiu, ZHAO Song-jiang, SONG Xiao-bing, et al. The formation and mechanism analysis of Tiantai landslide, Xuanhan County, Sichuan province[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2005, 2(1): 13—15.
- [10] 许强, 范宣梅, 李园, 等. 板梁状滑坡形成条件、成因机制与防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 242—250.
- XU Qiang, FAN Xuan-mei, LI Yuan, et al. Formation condition, genetic mechanism and treatment measures of plate-shaped landslide[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 242—250.
- [11] 陈思娇. 四川中江垮梁子滑坡滑带土强度特性及滑坡变形机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- CHEN Si-jiao. Study on shear strength properties of slip soils and deformation mechanism of Kualiangzi landslide in Zhongjiang of Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [12] 郭晓光, 黄润秋, 邓辉, 等. 平推式滑坡多级拉陷槽形成过程及成因机制分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 770—778.
- GUO Xiao-guang, HUANG Run-qiu, DENG Hui, et al. Formation and mechanism analysis of multi-level rift trough in translational sliding landslide[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(5): 770—778.
- [13] 赵勇, 许模, 郭健, 等. 大渡河双家坪古平推式滑坡堆积特征及形成机制[J]. 山地学报, 2015, 33(1): 58—64.
- ZHAO Yong, XU Mo, GUO Jian, et al. Characteristics of Accumulation and mechanism of Shuangjiaping ancient translational landslide in the Dadu river, China[J]. **Mountain Research**, 2015, 33(1): 58—64.
- [14] 张玲玲. 中江垮梁子滑坡地下水作用研究[D]. 成都: 成都理工大学硕士学位论文, 2015.
- ZHANG Ling-ling. Study on groundwater in function of Kualiangzi landslide in Zhongjiang[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [15] 周新. 基于蠕变和软化特性分析的平推式红层滑坡机制研究——以新津县狮子山滑坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- ZHOU Xin. Study on the mechanism of the flat push red bed landslide based on the analysis of creep and softening characteristics—a case study of the Shizishan mountain landslide in Xinjin county[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [16] 束骞. 环剪试验条件下近水平岩层滑坡滑带土的力学行为特性试验研究——以中江垮梁子滑坡为例[D]. 成都理工大学, 2015.
- SHU Qian. Ring shear test condition of slide zone experimental study the mechanical behavior characteristics—Taking an example of Kualiangzi landslide in Zhongjiang of Sichuan[D]. Chengdu University of Technology, 2015.
- [17] 李有明. 重庆万州大梁滑坡变形破坏机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- LI You-ming. Study on deformation and failure mechanism of Dabaoliang landslide in Wanzhou district of Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [18] 朱亮. 巴中黑山坡平推式滑坡成因机制及变形破坏演化过程分析[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- ZHU Liang. Genetic mechanism analysis and deformation failure evolution process of Heishanpo translational gliding landslide in Bazhong[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.