

平推式滑坡承压水模型研究

涂 园

(浙江大学 建筑与工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 传统的平推式滑坡渗流模型无法计算透水层中的渗透流量和潜水渗出高度, 而常假设两者并不随后缘裂隙水头而改变, 这影响到承压水范围求解的准确性。为此构建新的承压水模型, 基于地下河槽一维渗透理论, 给出透水层中承压水作用范围、渗透流量和潜水渗出高度的计算方法; 基于新昌县下山滑坡水文地质资料, 采用极限平衡法计算边坡稳定安全系数, 并对比分析新、旧模型计算结果的差异; 最后分析相关参数的内在关系, 讨论地质参数、尺寸参数以及初始水力条件参数对透水层流量、承压水范围及渗出面高度的影响。结果表明: (1) 后缘裂隙水头对承压水作用范围、渗透流量和潜水渗出高度的影响较大, 不能忽视这一影响; (2) 新模型下的平推式滑坡稳定安全系数更为合理可靠; (3) 地质参数、尺寸参数和初始条件参数中任意参数改变, 承压水作用范围、透水层渗透流量及渗出面高度均可能受到影响。

关键词: 边坡工程; 平推式滑坡; 承压水; 渗流; 边坡稳定

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)09 - 2110 - 10

Study on the artesian water model of translational landslide

TU Yuan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Seepage discharge and exit water level in permeable layer cannot be computed with traditional seepage model in translational landslides, and both are assumed invariable as the water level in the slope cracks changes, which influences the accuracy of computation results in the range of artesian water. A new seepage model of translational landslide was thus established. Based on one-dimensional seepage theory of underground river channel, a new method was proposed to compute the action range of artesian water, seepage discharge and water level in seepage exit. Based on the geological data of Xiashan landslide, the safety factor was computed with different models and the outputs were discussed. Finally, the intrinsic relations and sensibility analysis of relative parameters including geological parameters, dimensional parameters and initial parameters of hydraulic condition were studied. Results showed that the range of artesian water, the seepage discharge and the water level in seepage exit were influenced significantly by the water level in the cracks of slope. The safety factor of slopes based on the new model is more reasonable and accurate. Any change in the model's parameters made a difference in the range of artesian water, unit discharge and water level in seepage exit.

Key words: slope engineering; translational landslide; artesian water; seepage; slope stability

1 引 言

平推式滑坡, 是一种典型的降雨诱发型滑坡,

多发育于近水平(岩层倾角 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$)的砂、泥岩互层状地层中, 在我国西南地区、三峡库区等地普遍存在, 如三峡库区万州和平广场滑坡群、重庆巴南麻柳嘴滑坡群、四川省冯店垮梁子滑坡以及成南、成

收稿日期: 2018 - 04 - 19; **修回日期:** 2018 - 05 - 15

作者简介: 涂 园(1994 -), 男, 2017 年毕业于四川大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事软土地基处理和渗流分析方面的研究工作。
E-mail: 1040942089@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0378

绵高速沿路的多处滑坡等^[1]。此类滑坡的滑带土内摩擦角往往远大于滑面倾角，按传统极限平衡理论此类滑坡很难发生^[2]，因此其失稳机制一直受到众多学者的关注。

张倬元等^[3]最早提出平推式滑坡的概念，指出承压水的存在是滑坡形成的关键因素之一，并推导了边坡失稳的后缘裂隙临界水头，可看作此类滑坡最早的承压水模型(见图 1)。该模型首次将承压水引入平推式滑坡的稳定分析上来，推导出的滑坡启动判据具有一定的工程应用价值，如应用到 1981 年暴雨引发的四川盆地平推式滑坡的稳定分析中，取得了很好的效果。但该模型对承压水的分布情况未做出说明，或者说假设作用在滑面上的地下水均为承压水并不十分合理。在此基础上，赵权利^[4]对新昌县下山滑坡的地下水位进行了监测，发现承压含水层中的确存在潜水水位，得出承压水并非沿整个滑面分布的结论，并构建了承压水模型(见图 2)。该模型利用裘布依微分方程^[5]对潜水浸润线进行描述，由此反推出承压水的作用范围。但为减少未知参数数量而假设潜水渗出高度为 0，并假定渗透流量保持不变，实际上在渗流出口附近已非渐变流，也导致敏感性分析时各参数因果关系的不明确；此外，该模型未考虑滑面倾角，也无法说明后缘裂隙水头这一重要启动力的影响。李 伟等^[6]基于赵权利^[4]模型研究了滑面倾角的影响，提出边坡稳定性存在敏感倾角的概念，但对传统模型及求解方法并未做出

实质上的改善，关于潜水渗出高度的假设、渗透流量的求法、后缘裂隙水头的影响和相关参数的内在关系，及其对渗流过程的影响等仍未做出说明。

除渗流模型分析外，也有学者采取其他方法对平推式滑坡的形成机制进行研究，典型的研究方法有地质调查、数值模拟和物理模型等，如殷坤龙等^[7]通过地质调查研究了万州区软弱夹层的膨胀性；伍四明和李日国^[8]采用数值模拟研究万县滑坡群的形成机制；范宣梅等^[9]通过物理模型试验，研究多级平推式滑坡的变形破坏过程；李 江等^[10]结合现场观察和室内试验，提出川东红层地区平推式滑坡的 2 类失稳模式等。这些研究均提及地下水对滑坡形成破坏的重要性，但都未区分地下水类型或过于简化，主要是对滑坡形成破坏过程进行定性分析，未定量分析相关地质参数对边坡稳定性的影响，这难以为实际工程边坡的稳定性分析评价提供准确的指导。

鉴于承压水模型对于平推式滑坡的稳定性、地质参数敏感性和地下水作用模式研究中的价值，本文结合平推式滑坡的基本特征，针对传统渗流模型的不足，建立了新的承压水模型。在考虑滑面倾角的条件下，基于地下河槽一维稳定渗流理论，探讨了透水层中承压水作用范围、潜水渗出高度以及渗透流量的计算方法。结合新昌县下山滑坡地质工程资料，对比分析新、旧模型对边坡稳定安全系数计算结果的差异；最后分析了滑坡相关参数的内在关系，分别讨论了滑坡地质参数、尺寸参数以及初始条件参数对透水层流量、承压水作用范围及潜水渗出高度的影响，对实际工程边坡预防和治理有一定的参考价值。

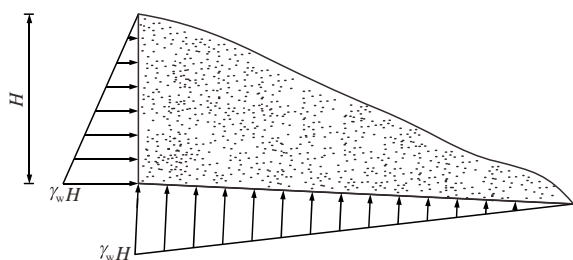


图 1 启动机制分析模型

Fig.1 Calculation model for start-up criterion

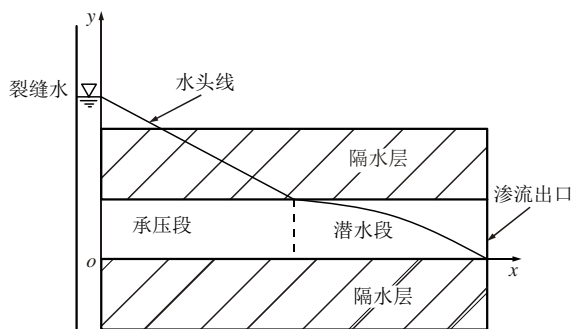


图 2 传统平推式滑坡承压水模型

Fig.2 Traditional artesian water model of translational landslide

2 新模型的建立

2.1 滑坡基本特征

平推式滑坡的基本特征是构建模型的基础，基于众多滑坡实例^[11-14]的调查研究，平推式滑坡具备的基本特征如下：(1) 地质结构特征。岩层缓倾，软硬相间，其中软弱岩层构成隔水层，硬岩层节理发育而构成透水层，滑坡前端一般具有较好的临空条件。(2) 水力特征。滑坡后缘形成一级或多级拉裂缝，裂缝因降雨等原因而存在一定的水头。(3) 触发条件。在连续降雨、大暴雨或地震条件下常常诱发滑坡灾难的发生。平推式滑坡典型纵剖面如图 3 所示。

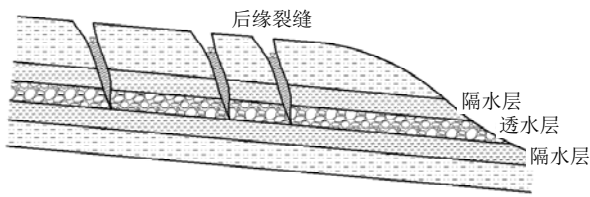


图3 平推式滑坡典型纵剖面示意图

Fig.3 Typical profile of translational landslide

2.2 模型建立

对于典型的多级平推式滑坡^[9], 前端滑块的稳定性决定了整个边坡的稳定性, 因此仅研究前端滑块的稳定性。为此构建承压水模型时也仅考虑前端滑块的渗流过程, 而不考虑坡体多级拉陷槽(后缘裂缝)之间的水力联系, 这样所构建的模型对于单级平推式滑坡同样适用。

结合平推式滑坡的基本特征, 并对渗流过程进行适当简化, 构建出新的承压水模型, 如图4所示。在一定强度降雨条件下, 假设坡体后缘裂隙中的水位保持不变, 裂隙水一方面对前端滑块产生侧向静水压力, 另一方面, 通过底部透水层向下渗透形成承压水。结合一维稳定渗流的特点, 将透水层按地下水类型进行分区, 分别为承压区、潜水和渗流出口(分界线1表示承压区和潜水的分界, 分界线2表示潜水和渗流出口的分界)。其中, 承压区渗流为透水层中厚度不变的一维稳定承压水流, 潜水区渗流为透水层中稳定的一维渐变渗流, 且渗流出口处存在渗出面。此外, 假设透水层为均质各向同性, 隔水层完全不透水, 渗流满足达西定律。

2.3 模型求解

(1) 承压区 OA 的水头线与流量

由承压含水层中地下水一维稳定渗流理论^[15], 得渗流基本微分方程及边界条件:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 H}{ds^2} &= 0 \\ H|_{s=0} &= H_1 \\ H|_{s=L_1/\cos\alpha} &= H_2 \\ x &= s \cos\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: H_1 和 H_2 分别为点 O , A 所对应的透水层过水断面的总水头; L_1 为承压段 OA 的水平长度; s 为渗流路径; H 为承压区任意一点的总水头; α 为透水层的倾角。

直接对式(1)进行求解, 得到承压段的水头分布为一段直线:

$$H = -\frac{H_1 - H_2}{L_1} x + H_1 \quad (2)$$

结合达西定律可得

$$q = kM \frac{H_1 - H_2}{L_1} \cos\alpha \quad (3)$$

式中: M 为透水层的厚度, k 为透水层的渗透系数, q 为透水层中的单宽流量。

由几何关系有

$$H_2 = L_2 \tan\alpha + M \quad (4)$$

式中: L_2 为潜水区 AB 的水平长度。

将式(4)代入式(3)得到

$$q = kM \frac{H_1 \cos\alpha - L_2 \sin\alpha - M \cos\alpha}{L_1} \quad (5)$$

(2) 潜水区 AB 的浸润线与流量

地下无压渗流一般流速较小, 可采用地下河槽非均匀渐变渗流基本微分方程^[15]进行浸润线及流量的计算, 即

$$q = kh \left(i - \frac{dh}{ds} \right) \quad (6)$$

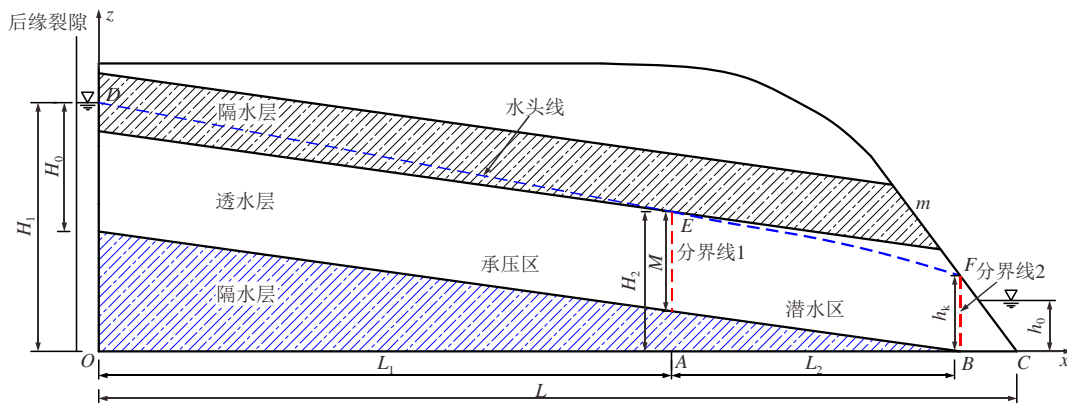


图4 平推式滑坡新承压水模型

Fig.4 New artesian water model of translational landslide

式中： h 为渐变渗流段的水深； i 为底坡坡度，即 $\tan \alpha$ 。

下面进行浸润曲线的求解。设正坡地下河槽均匀流正常水深为 h_N ，则由达西定律有

$$q = kh_N \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)，得到

$$\frac{dh}{ds} = i \left(1 - \frac{h_N}{h} \right) \quad (8)$$

令 $\eta = h / h_N$ ，则 $dh = h_N d\eta$ ，将其代入式(8)得到

$$ds = \frac{h_N}{i} \left(1 + \frac{1}{\eta - 1} \right) d\eta \quad (9)$$

对式(9)进行积分即可得到

$$s = \frac{h_N}{i} \left(\eta_1 - \eta_2 + \ln \frac{\eta_2 - 1}{\eta_1 - 1} \right) \quad (10)$$

式中： $\eta_1 = M / h_N$ ， $\eta_2 = h_k / h_N$ ， M 为透水层的厚度， h_k 为渗流溢出面高度。利用式(10)即可描述潜水区 AB 的浸润线和渗透流量。

(3) 渗流出口 BC 的水面高度与流量

潜水出口通常存在渗出面^[15]，潜水井中稳定渗流的渗出面也称水跃，即井壁水位高于井中水位。一般认为，渗流出口流量由两部分组成，即水流由含水层溢出，再由渗出面流出的下游水面以上部分 q_1 ，以及水流直接渗出的下游水面以下部分 q_2 。水流在出口处的渗流过程见图 5。渗流出口处的水流不直接汇入下游而存在一个高差，从而能够解释当下游水深 h_0 为 0 时渗透流量为 0 和渐变流假设不成立的矛盾(传统模型)。事实上，当下游水深为 0 时，渗出面仍存在一定的渗水高度。下面进行潜水出口渗水高度和流量的求解。

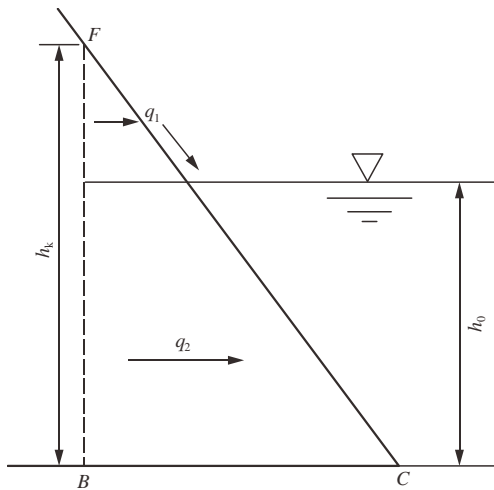


图 5 潜水出口处的渗流示意图

Fig.5 Seepage process of underground water at the exit

首先研究渗流的下游水面以上部分 q_1 。设距离透水层底部高度为 z 处的水平微小流束为 dz ，该流束自起始断面至末端断面的水头差为 $(h_k - z)$ ，微小流束的长度为 $(h_k - z)m$ ，其中， m 为下游临空面的坡率，故微小流束的水力坡降为 $1/m$ ，通过微小流束的单宽流量即为

$$dq_1 = \frac{k}{m} dz \quad (11)$$

整个下游水面以上部分的单宽流量 q_1 经积分可得到

$$q_1 = \int_{h_0}^{h_k} dq_1 = \frac{k(h_k - h_0)}{m} \quad (12)$$

再考虑下游水面以下部分 q_2 。同样地，取水平微小流束 dz ，该流束自起始断面至末端断面的水头差为 $(h_k - h_0)$ ，微小流束的长度为 $(h_k - z)m$ ，则其水力坡降为 $\frac{h_k - h_0}{m(h_k - z)}$ ，整个水面以下单宽流量 q_2 为

$$q_2 = \int_0^{h_0} \frac{h_k - h_0}{m(h_k - z)} k dz = \frac{k(h_k - h_0)}{m} \ln \frac{h_k}{h_k - h_0} \quad (13)$$

因此渗流出口的总流量为

$$q = q_1 + q_2 = \frac{k(h_k - h_0)}{m} \left(1 + \ln \frac{h_k}{h_k - h_0} \right) \quad (14)$$

(4) 补充方程

设透水层沿水平方向的总长度为 L ，则有

$$L_1 + L_2 + mh_k = L \quad (15)$$

(5) 方程求解

首先将模型所涉及到的参数分为 3 类：第一类为地质参数，仅包括透水层的渗透系数 k ；第二类为尺寸参数，包括透水层厚度 M ，滑面倾角 α ，滑坡总长 L 和下游临空面坡率 m ；第三类为初始水力参数，包括后缘裂隙水深 H_0 ，下游水深 h_0 。模型求解的实际含义是：在地质参数和模型尺寸给定的条件下，给予一定的触发条件(初始水力条件参数)，系统发生一维稳定渗流，在透水层中产生一定流量，并形成承压区和潜水区，最后在潜水出口处以一定高度渗出。由此可见，模型各参数的内在关系为：地质参数、尺寸参数和初始条件参数中任意一个参数改变，都将可能使透水层的渗透单宽流量 q 、承压区的作用范围 L_1 以及渗出面高度 h_k 发生改变。在进行承压水作用范围相关参数的敏感性分析时，不能混淆参数间的这种因果关系，否则分析结果将不可靠。例如分析透水层厚度 M 的变化对承压水作用范围 L_1 的影响时，由于 M 的变化也将引起流量 q 和

渗出面高度 h_k 的变化, 因此不能在假定 q 或 h_k 不变的情况下进行(传统模型)。

联立式(5), (10), (14)和(15)四个方程式, 在给定地质参数、尺寸参数和初始水力参数的条件下, 只存在承压水作用范围 L_1 、潜水作用范围 L_2 、单宽渗透流量 q 和渗出面高度 h_k 四个未知参数, 故可定解求出这 4 个未知数。由于方程组中存在对数函数, 各未知参数的显性表达式无法写出, 但较易通过迭代法求解出指定误差范围内的结果。

3 算例分析和对比

以新昌县下山滑坡为例, 分别采用张强^[3]、赵权利等^[16-17]、李伟等^[6]模型与新承压水模型计算得到的承压水作用范围, 并比较这一差异对边坡稳定安全系数计算结果的影响。

下山滑坡总体呈腰形, 沿南北方向展布, 最长达 1 120 m, 最宽达 290 m, 平均厚度为 33.92 m, 滑坡主滑面中前缘倾角为 $2^\circ \sim 10^\circ$ 。滑坡总面积约 $2.52 \times 10^5 \text{ m}^2$, 总体积约 $8.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。滑坡体呈 3~4 级台阶, 中部台阶最宽, 单个台阶最宽达 100 m。滑坡体后缘呈圈椅状, 前缘临空, 下方为石门水库, 属大型滑坡。相关地质参数和物理力学参数参考已有文献资料, 分别列于表 1^[4, 16]和 2^[6, 18]。

表 1 下山滑坡地质和尺寸参数^[4, 16]

Table 1 Geological parameters and dimensional parameters of Xiashan landslide^[4, 16]

$k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	L/m	M/m	H_0	$\alpha / (^\circ)$	h_0/m	m
7.5×10^{-5}	255	3	70	4	0	1

表 2 下山滑坡物理力学参数^[6, 18]

Table 2 Physico-mechanical parameters of Xiashan landslide^[6, 18]

滑体密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	滑体体积 V/m^3	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
2 150	8 670	20	12

下山滑坡稳定分析计算模型见图 6, 图中 G 为滑坡体自重, F 为承压水作用在滑面上的扬压力总和, P 为滑坡后缘裂隙侧向静水压力总和。这里将滑坡假设为各向同性且均匀的单一滑块, 目的是简化计算, 以定量反映不同渗流模型下的承压区对边坡稳定安全系数可能产生的影响。

采用极限平衡法得到边坡稳定安全系数计算公式:

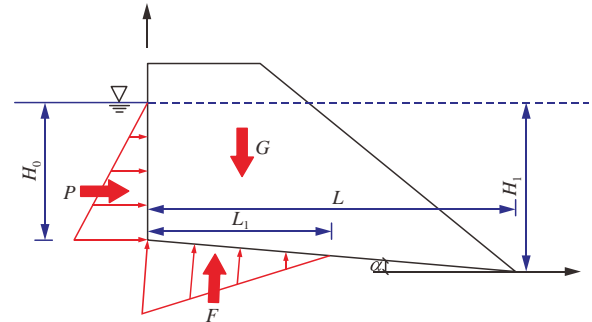


图 6 下山滑坡稳定分析计算模型

Fig.6 Calculation model for stability analysis of Xiashan slope

$$F_s = \frac{(G \cos \alpha - F - P \sin \alpha) \tan \varphi + cL}{G \sin \alpha + P \cos \alpha} \quad (16)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{2}(H_1 - L \sin \alpha)^2 \gamma_w \\ F &= \frac{1}{2}(H_1 - L \sin \alpha) \gamma_w \frac{L_1}{\cos \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: F_s 为边坡稳定安全系数, α 为滑面倾角, γ_w 为水的重度, L_1 为承压段的水平长度。

假设上隔水层与透水层间的界面为滑面, 各模型计算得到的承压水作用范围和边坡稳定安全系数的结果列于表 3。需要说明的是, 为了直观对比不同渗流模型下承压区范围对边坡稳定安全系数的影响, 选择透水层中任意界面作为滑面都是可行的。滑动面位置实际上仅仅对起始压力水头大小有影响, 并不影响承压区范围和直线分布的特征, 为了方便写出扬压力的计算公式, 故在代入数据时选择了上隔水层界面作为滑面, 而所得到的结果是具有一般性的。

表 3 不同模型边坡的稳定系数计算结果

Table 3 Calculated results for safety factor with different models

模型类型	L_1/m	F_s
MOD1	255.0	0.61
MOD2	221.3	0.68
MOD3	76.7	1.02
MOD4	249.5	0.63

注: MOD1, MOD2, MOD3, MOD4 分别代表张俤元等^[3]模型、赵权利^[4]模型、李伟等^[6]模型和本文新模型。

各模型的差异主要体现在承压区范围的计算结果上。除需要表 1 和 2 所列参数外, 传统模型还需对含水层中的单宽渗透流量 q 和潜水渗出面高度 h_k 进行假设。对此, MOD1 未涉及 q 但假设 h_k 为 3 m; MOD2 假设 q 取 $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, h_k 取 0; MOD3 假设 q 取 $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, h_k 取 0.1 m。传统模型仅对两者进行

假设，无法说明后缘裂隙水头 H_0 这一重要启动动力对两者的影响，这显然是不合理的；新模型能够计算 q 和 h_k 随 H_0 而变化的结果，在本算例中计算得到的 q 为 $7.87 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ， h_k 为 1.05 m，表明了传统模型的假设与理论计算值差异较大，关于 q 和 h_k 随 H_0 的变化规律将在敏感性分析中进行研究。在实际工程中，单宽渗透流量 q 和渗出面高度 h_k 也难以直接测量，在一定程度上制约了传统模型的应用。

在下山滑坡特定的参数条件下，由表 3 可知，各模型下的承压水作用范围大小关系表现为：(1) $L_1^{\text{MOD1}} > L_1^{\text{MOD4}} > L_1^{\text{MOD2}} > L_1^{\text{MOD3}}$ ，其中 L_1^{MOD1} ， L_1^{MOD4} ， L_1^{MOD2} 均远大于 L_1^{MOD3} ，这是因为 MOD3^[6] 在描述潜水浸润线方程时采用了中值定理近似求解，在考虑了滑面倾角的条件下，对潜水渗出面高度和渗透流量的估计不合理将引起承压区范围更大的误差，这在敏感性分析中也得到体现；(2) L_1^{MOD4} 稍大于 L_1^{MOD2} ，也主要是由于 q 和 h_k 的选取差异引起的，而 MOD1 认为边坡沿滑面全长分布着承压水，因此 L_1^{MOD1} 最为保守。相应地，边坡稳定安全系数的计算结果表现为：(1) $F_s^{\text{MOD3}} > F_s^{\text{MOD2}} > F_s^{\text{MOD4}} > F_s^{\text{MOD1}}$ ，可以看出承压区计算范围越小，边坡稳定安全系数越大，承压区范围的求解精度对安全系数有一定的影响；(2) MOD3 计算结果偏安全，对实际工程边坡预防和治理是不安全的；MOD1，MOD2 和 MOD4 稳定系数稍有差异，但差异不大，这主要是由于在下山滑坡特定的参数条件下进行计算得到的结果，稳定系数的差异只反映安全系数相对大小变化趋势，不能直接比较 4 种模型对不同边坡稳定安全系数的影响程度，在不同的参数条件下 4 种模型的安全系数可能相差更大。由于新模型考虑到渗透流量和潜水渗出高度随相关参数的变化情况，理论上得到的边坡稳定性计算结果更为合理。

4 敏感性分析与讨论

本节仍以下山滑坡基本参数资料(见表 1)为基础，分别研究后缘裂隙水头 H_0 、滑坡总长度 L 、岩层倾角 α 、透水层厚度 M 、渗透系数 k 及下游水深 h_0 对含水层中渗流单宽流量 q 、承压区范围 L_1 以及潜水渗出面高度 h_k 的影响。

4.1 后缘裂隙水头 H_0

表 1 中其他参数保持不变，仅改变后缘裂隙水头 H_0 的大小，承压区范围 L_1 、渗流单宽流量 q 、以及潜水渗出面高度 h_k 的变化规律如图 7 所示。可以看出，随 H_0 的增大 L_1 逐渐增加，但变化速率逐渐

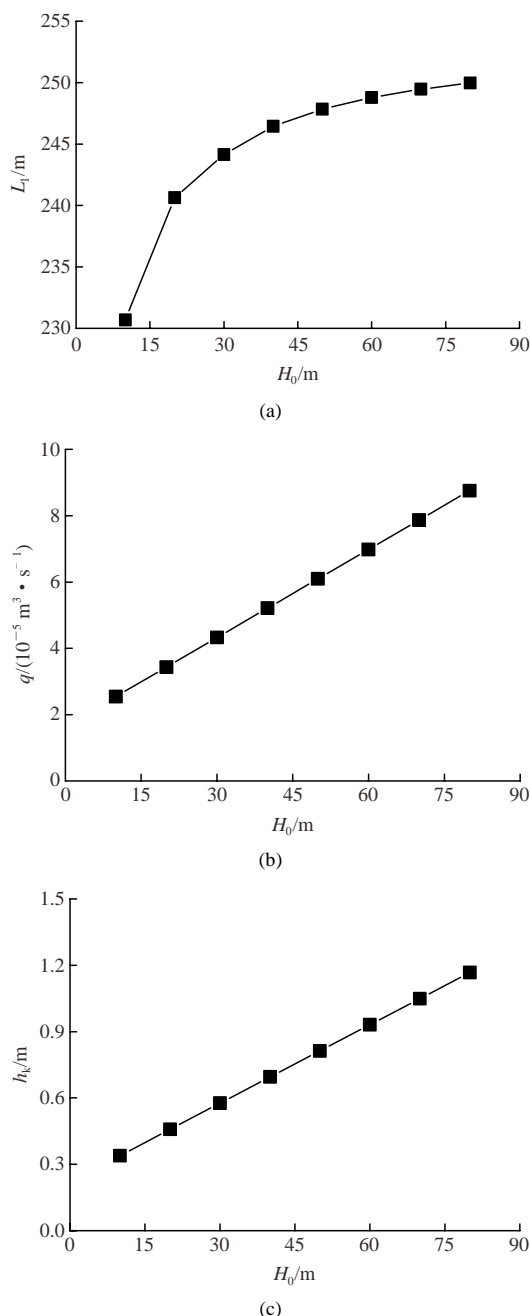


图 7 H_0 变化对 L_1 ， q 和 h_k 的影响
Fig.7 Influences of H_0 on L_1 ， q and h_k

减小，当后缘裂隙水位足够高时，透水层中几乎完全是承压水，这与张倬元等^[3]模型的假设一致。发生这一现象的机制可表述为，后缘裂隙水头 H_0 越大，即起始水头越大，假设渗流经过相同路径的水头损失(流速很小)相同，则透水层中任意断面的总水头增加，表现为承压区范围的增加，当 H_0 大到某个临界值时(可以认为是 90 m)，透水层中几乎全部是承压水，仅仅出口附近与大气接触的一小段是潜水。另外，随 H_0 的增大， q 和 h_k 均呈线性增加，且变化较为明显，因此传统模型忽视 H_0 对 q 和 h_k 的影响也是不合理的。

4.2 滑坡总长度 L

表 1 中其他参数保持不变，仅改变滑坡总长度 L 的大小，承压区的占比 L_1/L 、渗流单宽流量 q 、以及潜水渗出面高度 h_k 的变化规律如图 8 所示。可以看出，随 L 的增大，承压区占比 L_1/L 略有增加，这表明滑坡总长度对承压区占比的影响不大；另外，随 L 的增大， q 和 h_k 均减小，且变化速率也逐渐减小。

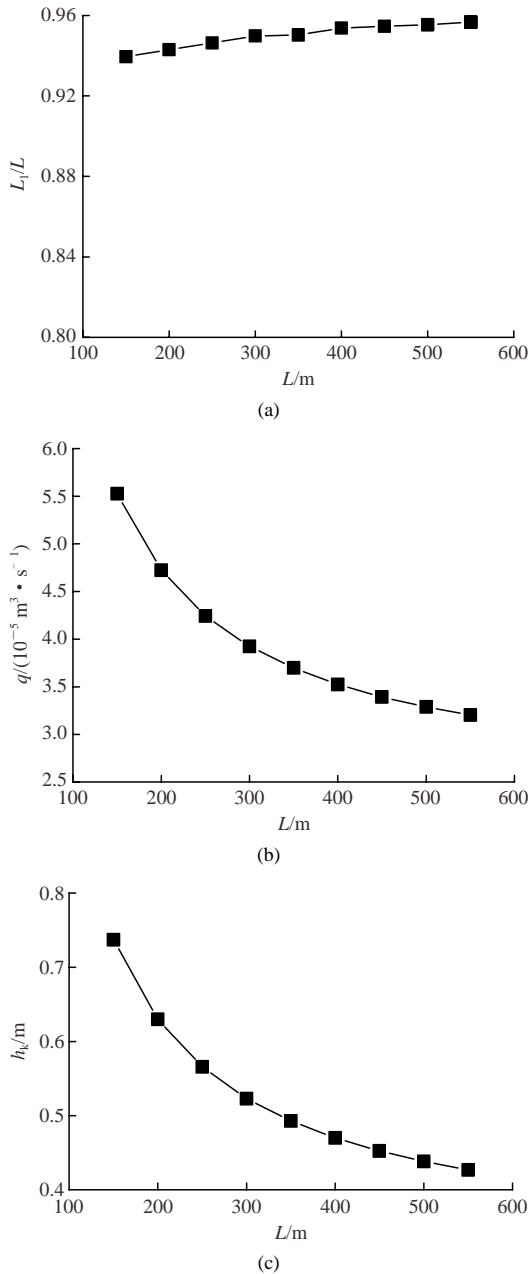


图 8 L 变化对 L_1 , q 和 h_k 的影响
Fig.8 Influences of L on L_1 , q and h_k

在实际边坡工程的稳定性分析中，选取滑坡总长 L 这一参数时如果有所误差，对承压水区和潜水区的分布比例影响也不大。那么就可以按某一确定的承压区占比 L_1/L ，选择不同滑坡长度进行稳定性试算，以获得最危险的情况。

4.3 滑坡倾角 α

表 1 中其他参数保持不变，仅改变滑坡岩层倾角 α 的大小，承压区范围 L_1 、渗流单宽流量 q 、以及潜水渗出面高度 h_k 的变化规律如图 9 所示。可以看出，岩层倾角 α 对 L_1 几乎不产生影响，但对 q 和 h_k 影响显著，随 α 的增加均呈近似线性增加，这也解释了李伟等^[6]模型所提出的敏感倾角概念的产生，是在假设 q 和 h_k 不随 α 变化的前提下进行的，因此也解释了该模型的承压水范围与其他模型计算结果差异较大的原因。

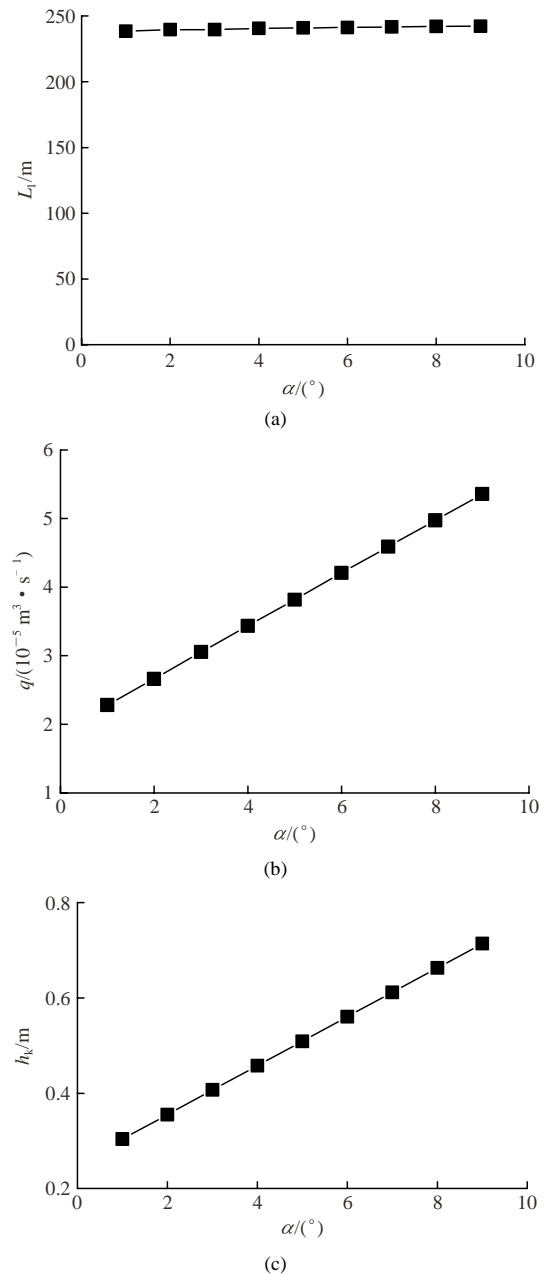


图 9 α 变化对 L_1 , q 和 h_k 的影响
Fig.9 Influences of α on L_1 , q and h_k

需要说明的是，上述结论在岩层倾角 α 不太大 ($\alpha \leq 10^\circ$) 的前提下是适用的，当 α 过大时，即渗流

底坡过大时，潜水水面线的变化剧烈(竖向流速无法忽略)，已不满足渐变渗流的条件，文中的求解方法已不适用，于是才出现随着 α 的增大， q 和 h_k 线性无限增加的情况。

4.4 透水层厚度 M

表 1 中其他参数保持不变，仅改变透水层厚度 M 的大小，承压区范围 L_1 、渗流单宽流量 q 、以及潜水渗出面高度 h_k 的变化规律如图 10 所示。可以看出， L_1 、 q 和 h_k 对 M 的变化均较敏感，随 M 的增大， L_1 呈近似线性减小的趋势， q 和 h_k 呈近似减小的趋势。因此，在实际边坡工程的稳定计算中，对透水层厚度的选取应当更为谨慎。

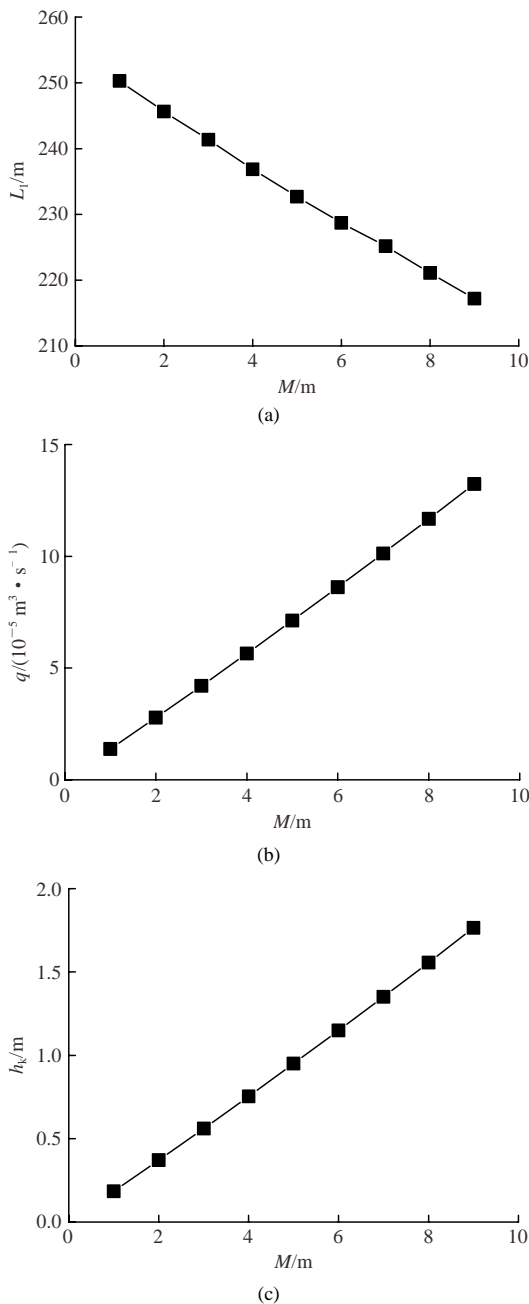


图 10 M 变化对 L_1 、 q 和 h_k 的影响
Fig.10 Influences of M on L_1 , q and h_k

4.5 渗透系数 k

表 1 中其他参数保持不变，仅改变透水层渗透系数 k 的大小，承压区范围 L_1 、渗流单宽流量 q 、以及潜水渗出面高度 h_k 的变化规律如图 11 所示。可以看出， k 变化对 L_1 和 h_k 不产生影响，仅对 q 产生影响，在对数坐标下 q 随 k 的增加呈线性增加。这表示渗透系数的变化不改变地下水的分布和浸润线的形状，仅影响到渗透流量，这在地下水渗流中已被证实。

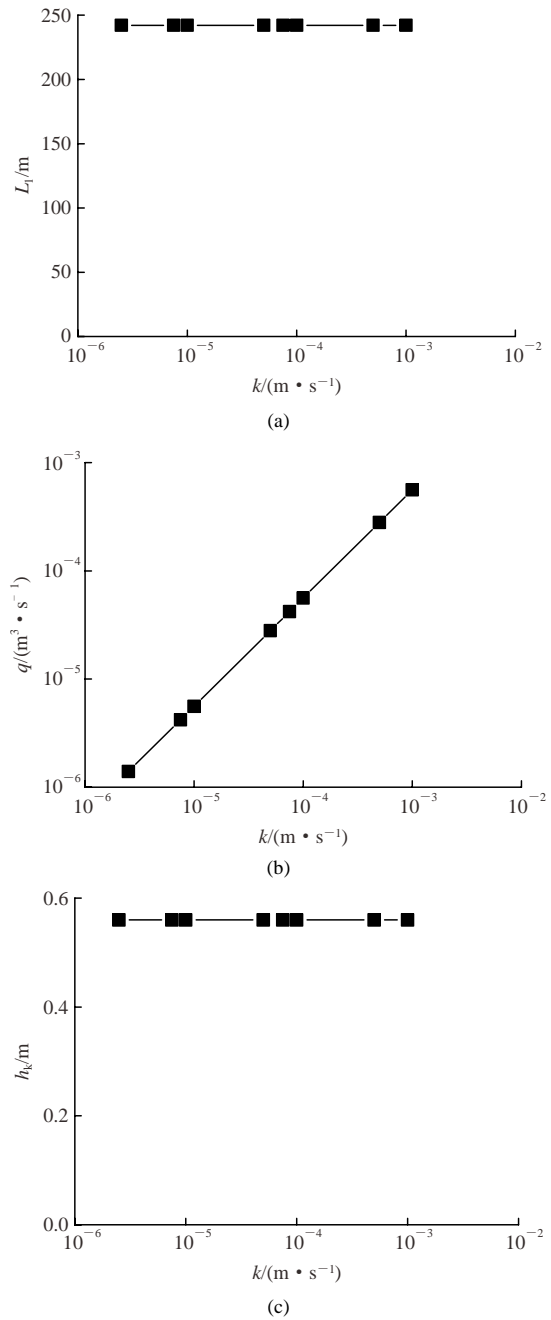


图 11 k 变化对 L_1 、 q 和 h_k 的影响
Fig.11 Influences of k on L_1 , q and h_k

4.6 下游水深 h_0

表 1 中其他参数保持不变，仅改变滑坡下游水

深 h_0 的大小, 承压区范围 L_1 、渗流单宽流量 q 、以及潜水渗出面高度 h_k 的变化规律如图 12 所示。可以看出, 随 h_0 的增加, L_1 和 q 基本保持不变, h_k 呈线性增加且变化较明显。这表示下游水深对承压区范围和渗透流量影响不大, 仅对渗出面高度影响显著。

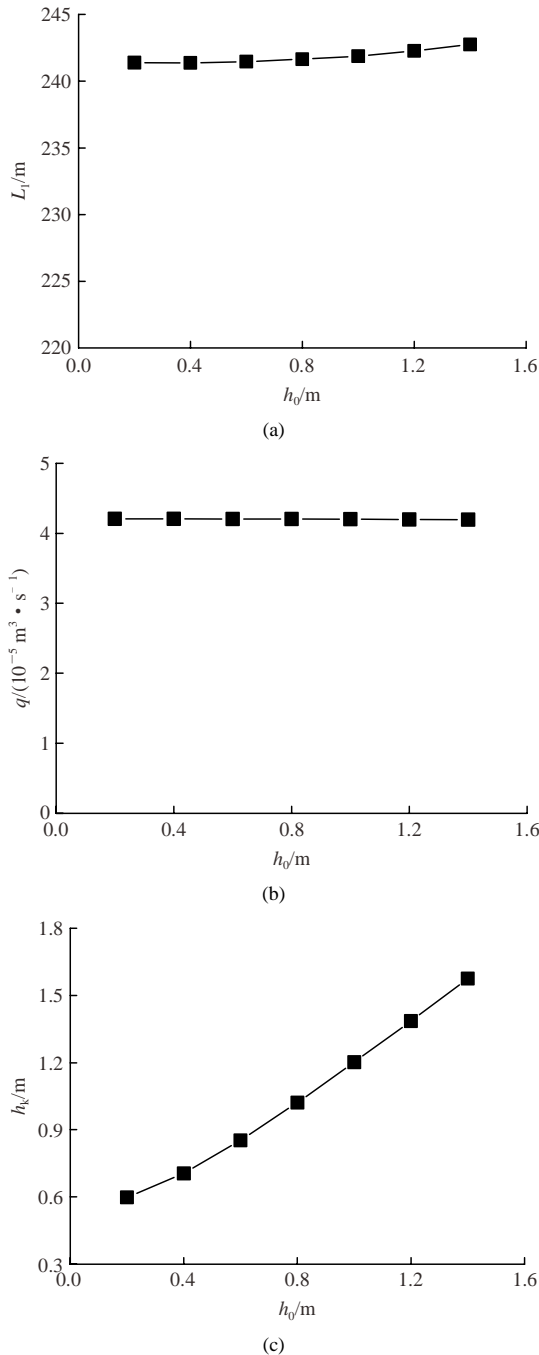


图 12 h_0 变化对 L_1 , q 和 h_k 的影响

Fig.12 Influences of h_0 on L_1 , q and h_k

5 结论

(1) 建立了新的平推式滑坡承压水模型, 在给

能够同时求解透水层中承压水作用范围、单宽渗透流量和潜水渗出面高度。

(2) 新模型下的下山滑坡透水层中的单宽渗透流量和潜水渗出面高度计算结果与传统模型的假设差异较为明显, 因而导致了承压区范围计算结果的差异, 最终影响到边坡稳定安全系数的准确性, 新模型在理论上计算结果更为合理、可靠。

(3) 地质参数、尺寸参数以及初始水力条件参数中任意参数发生改变, 导致承压水作用范围、单宽渗透流量和潜水渗出面高度的变化规律均不相同, 因此, 在分析承压区范围对相关参数的敏感性时, 不能忽视这些变化规律。

参考文献(References):

- [1] 范宣梅. 平推式滑坡成因机制与防治对策研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2007.(FAN Xuanmei. Study on genetic mechanism and control methods of translational gliding landslide[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [2] 方贻立, 马明, 李聪, 等. 平推式滑坡致灾机制与减灾方法研究进展[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(12): 20 - 27.(FANG Yili, MA Ming, LI Cong, et al. Research advances in translational landslide's mechanism and risk mitigation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(12): 20 - 27.(in Chinese))
- [3] 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 Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. The analytical principle of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 377 - 380.(in Chinese))
- [4] 赵权利. 缓倾滑坡中承压水作用机制研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2013.(ZHAO Quanli. Research on mechanism of confined groundwater in the gently inclined landslide[Ph. D. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.(in Chinese))
- [5] 张强. 金沙江观音岩电站红层钙质砂岩类岩溶发育特征及渗透稳定性研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2010. (ZHANG Qiang. Semi-karst development characteristics and seepage stability of the calcareous sandstone red beds of Guanyinyan hydropower station, Jinsha River[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.(in Chinese))
- [6] 李伟, 吴礼舟, 肖蓉. 平推式滑坡中承压水的敏感性研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 480 - 487.(LI Wei, WU Lizhou, XIAO Rong. Sensitivity of confined ground water in translational landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 480 - 487.(in Chinese))
- [7] 殷坤龙, 简文星, 周春梅, 等. 万州区近水平地层滑坡和堆积体成

- 因机制与防治工程研究[R]. 武汉: 中国地质大学, 2005.(YIN Kunlong, JIAN Wenxing, ZHOU Chunmei, et al. Study on the mechanism of the translational landslide in Wanzhou district and its prevention project[R]. Wuhan: China University of Geosciences, 2005.(in Chinese))
- [8] 伍四明, 李日国. 万县滑坡群形成机制的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 1994, 21(6): 14 - 17.(WU Siming, LI Riguo. Study on the formation mechanism of batches of landslides in Wanxian by numerical simulation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994, 21(6): 14 - 17.(in Chinese))
- [9] 范宣梅, 许强, 张俅元, 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2): 3 753 - 3 759.(FAN Xuanmei, XU Qiang, ZHANG Zhuoyuan, et al. Study of genetic mechanism of translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3 753 - 3 759.(in Chinese))
- [10] 李江, 许强, 王森, 等. 川东红层地区降雨入渗模式与岩质滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 4 053 - 4 062.(LI Jiang, XU Qiang, WANG Sen, et al. Research on rainfall infiltration models of slopes and formation mechanism of rock landslides in red stratum in the east of sichuan province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 4 053 - 4 062.(in Chinese))
- [11] 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 Hongmei. Discussion on starting water head in trailing edge of translational landslide[J]. Yangtze River, 2011, 42(17): 32 - 36.(in Chinese))
- [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 Xiaoguang, HUANG Runqiu, DENG Hui, et al. Fomation and mechanism analysis of multi-level rift trough in traslational sliding landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 770 - 778.(in Chinese))
- [13] 成国文, 李善涛, 李晓, 等. 万州近水平地层区堆积层滑坡成因与变形破坏特征[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 17 - 23.(CHENG Guowen, LI Shantao, LI Xiao, et al. Forming cause and deformation-destuction characters of accumulative stratum landslide in horizontal stratum in Wanzhou[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 17 - 23.(in Chinese))
- [14] 王治华, 杜明亮, 郭兆成, 等. 缓倾滑坡地质力学模型研究——以冯店滑坡为例[J]. 地质力学学报, 2012, 18(2): 97 - 109.(WANG Zhihua, DU Mingliang, GUO Zhaocheng, et al. Study on the geomechanical model of landslide with low dip angle strata structure: taking Fengdian Landslide as an example[J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(2): 97 - 109.(in Chinese))
- [15] 薛禹群, 李同斌, 朱学愚, 等. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 47 - 53.(XUE Yuqun, LI Tongbin, ZHU Xueyu, et al. Groundwater Hydraulics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 47 - 53.(in Chinese))
- [16] 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 Quanli, SUN Hongyue, WANG Zhilei, et al. Influence of confined water on translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 762 - 769.(in Chinese))
- [17] 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 Quanli, SHANG Yuequan, ZHI Momo. Modification of the start-up criterion of translational gliding landslide[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2014, 44(2): 596 - 602.(in Chinese))
- [18] 俞伯汀, 孙红月, 尚岳全, 等. 浙江下山滑坡特征及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2 875 - 2 881.(YU Boting, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Characteristics and stability analysis of Xiashan Landslide in zhejiang province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 875 - 2 881.(in Chinese))