

# 承压水对平推式滑坡的作用分析

赵权利<sup>1</sup>, 孙红月<sup>2</sup>, 王智磊<sup>1</sup>, 尚岳全<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 海洋科学与工程学系, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 基于地质调查分析, 探讨承压水对平推式滑坡稳定性的影响方式。结合下山滑坡的地质环境条件, 构建典型平推式滑坡地下水渗流分析模型, 提出通过计算承压水作用范围, 使边坡稳定计算结果更合理。根据承压水一维稳定渗流理论, 推导出承压水作用范围的计算公式; 同时计算分析承压水作用范围各影响因素的敏感性。计算结果表明, 在一定范围内各影响因素有如下规律: (1) 承压水作用范围随着渗透系数增大而线性减小; (2) 承压水作用范围随渗流量增大而线性增大; (3) 承压水作用范围和透水层厚度呈抛物线关系, 且随着透水层厚度的增加呈加速趋势减小。最后分析了承压水作用范围大小对滑坡稳定系数的影响规律, 结果表明滑坡稳定性系数随着承压水作用范围增大而线性减小。

**关键词:** 边坡工程; 平推式滑坡; 承压水; 渗流; 敏感性分析; 边坡稳定性

**中图分类号:** P 642.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)04 - 0762 - 08

## INFLUENCE OF CONFINED WATER ON TRANSLATIONAL LANDSLIDE

ZHAO Quanli<sup>1</sup>, SUN Hongyue<sup>2</sup>, WANG Zhilei<sup>1</sup>, SHANG Yuequan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China; 2. Department of Ocean Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** Based on geological survey, influence of confined water on stability of translational landslide is discussed. Combining with geological environmental condition of Xiashan landslide, the typical groundwater seepage model of translational landslide is established; and the result of slope stability calculation becomes more reasonable considering action range of confined water. Based on one-dimensional steady seepage theory, calculation formula of action range caused by confined water is deduced; and then parameter sensitivity of this formula is analyzed. The calculation results show that action range of confined water follows established law within a certain range of each parameter: (1) Action range of confined water decreases linearly with the increase of permeability coefficient. (2) Action range of confined water increases linearly with seepage discharge. (3) Action range of confined water takes on parabola shape with thickness of permeable layer, and it is accelerated decreasing trend with the increase of permeable layer thickness. Calculation results also show that the stability coefficients of landslide decreases linearly with the increase of action range of confined water.

**Key words:** slope engineering; translational landslide; confined water; seepage; sensitivity analysis; slope stability

## 1 引言

随着经济的快速发展, 滑坡灾害的重视程度逐

步提高。针对各种类型滑坡的相关研究都在广泛开展, 并取得了显著的进展。在众多的滑坡案例<sup>[1-4]</sup>中, 平推式滑坡<sup>[4]</sup>是一种特殊的滑坡类型, 其特征为: 滑坡体主要沿层面滑动, 岩层和滑动面倾角都很小、

**收稿日期:** 2011 - 10 - 31; **修回日期:** 2011 - 12 - 21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40972187); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20100101110026); 浙江省重点创新团队支持计划(2009R50050)

**作者简介:** 赵权利(1985 - ), 男, 2007年毕业于吉林大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡监测及稳定性分析方面的研究工作。E-mail: zhaobabai@gmail.com。通讯作者: 孙红月(1970 - ), 女, 现任副教授。E-mail: shy@zju.edu.cn

近水平，一般小于 10°，目前对这类滑坡机制还缺乏深入的研究。按照以往的工程经验和计算方法，滑面接近水平的滑坡稳定性计算结果应该是安全的，很难发生滑动破坏。但工程案例<sup>[5]</sup>表明，在暴雨作用下，部分滑面平缓的滑坡容易产生滑动。

平推式滑坡的概念最先由张倬元等<sup>[6]</sup>提出，并推导出了该类滑坡启动的临界水头高度计算公式。该理论被应用于 1981 年四川盆地暴雨引发的平推式滑坡的分析。殷坤龙等<sup>[7]</sup>通过研究万州区近水平滑坡，指出诱发平推式滑坡的主因是静水压力。范宣梅<sup>[8]</sup>对四川省宣汉天台乡滑坡分析后提出了多级平推式滑坡的概念及其成因机制，并通过平推式滑坡变形破坏机制的物理模拟，验证了滑坡启动临界水头高度计算公式，归纳总结了该类滑坡在地质结构和变形破坏方面的共同特征。

孙军杰等<sup>[9-12]</sup>进行地下水对平推式滑坡作用的研究时，并未详细区分潜水和承压水的区别，考虑地下水在滑面上的作用力分布过于简化<sup>[13]</sup>，仅单纯地考虑为潜水作用，或者沿滑面全程单一的承压水作用。潜水和承压水对边坡的作用是有区别的，潜水以浮重度的作用来体现，即滑面上的正应力计算时潜水面以下部分滑体按浮重度考虑。承压水则是以垂直于滑面向上的扬压力作用来体现的，其力学作用方式更为复杂，对前缘渗透条件变化更加敏感，由此对坡体稳定性的影响也更为显著。并且，不同的渗透层特性及前缘渗透条件也决定了不同的承压

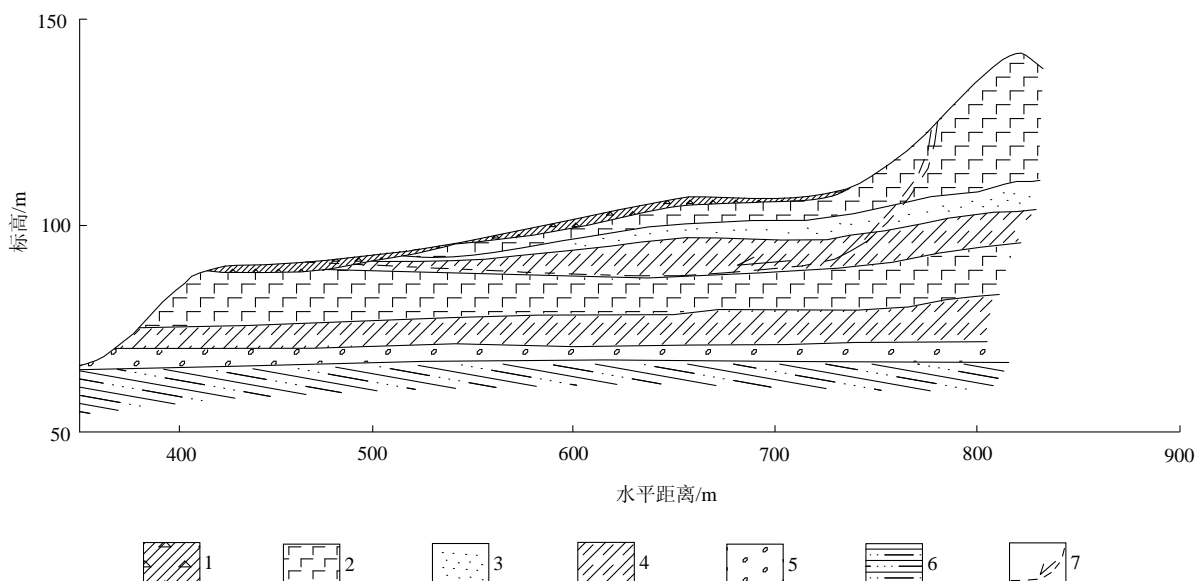
水作用范围。确定了承压水的具体作用范围，才能更准确地分析其对边坡稳定性的影响，避免不必要的经济损失。因此，确定地下水的作用类型和作用范围，对平推式滑坡研究有着重要的理论意义和实用价值。本文以平推式滑坡实例分析为基础，详细探讨承压水对平推式滑坡的作用方式以及相关影响因素的敏感性。

## 2 承压水对平推式滑坡稳定性影响的地质调查分析

### 2.1 青子峰滑坡

青子峰滑坡自 1976 年开始滑动以来，至今已经有多次蠕动，最为明显的一次是 1999 年，主要表现为后部出现张拉裂缝，居民房屋出现裂缝，前缘局部隆起，滑坡特征较明显。该滑坡位于玄武岩的顶部和缓坡地带(见图 1)，坡度 5°~26°，滑坡区呈陡缓相间的“台阶状”。其变形特征主要为滑坡体后缘出现张拉裂缝，并形成 1.7 m 的陡壁，裂缝宽约 0.5 m，延伸约 100 m，拉张裂缝分布区域岩性为强风化玄武岩。滑坡纵向长度约 240 m，横向宽度平均 120 m，按滑坡体平均厚度 12 m 计算，其滑坡规模达 3.46×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>，属于中型滑坡。

青子峰一带主要为多次喷溢形成的覆盖于白垩系红层之上的峨边组玄武岩夹沉积岩夹层，其表层由第四系松散堆积层组成。基岩为第三系上新统峨



1—含碎(砾)石黏性土；2—玄武岩；3—中粗砂；4—粉质黏土；5—砂砾石；6—泥质粉砂岩；7—主滑面及滑动方向

图 1 青子峰滑坡工程地质剖面图

Fig.1 Engineering geological profile of Qingzifeng landslide

县组玄武岩间夹含黏土硅藻土等夹层和上白垩统金华组泥质粉砂岩，地层产状为  $80^{\circ} \angle 10^{\circ}$ 。青子峰滑坡滑动带为玄武岩中的硅藻土软弱夹层，滑体沿玄武岩与含硅藻土粉质黏土接触界面附近滑动，除后缘切层滑动段滑面倾角较大，主滑段滑面倾角近水平。

青子峰滑坡体后缘玄武岩出露，该层玄武岩垂直柱状节理发育，强降雨沿其节理和后缘张拉裂隙下渗到滑坡体内部。由于坡体后缘的拉裂变形，形成系列拉张裂隙，有利于地下水入渗到下层玄武岩，并沿玄武岩层向坡外渗流，但临近坡面附近因风化作用，分布有残积土，成为相对弱透水区。同时，斜坡前缘因玄武岩上部覆盖层薄，细粒土容易进入玄武岩裂隙，也使其渗透性大幅降低。

地下水一方面使滑面附近的软弱含黏土硅藻土层发生泥化和软化，降低滑面的力学性能；另一方面由于上部粉质黏土为相对隔水层而在滑面附近形成承压地下水，进而对坡体产生扬压力。地下水通过降低滑面物质力学参数和产生承压水从而对滑坡体的稳定性产生不利影响。

### 2.2 下山滑坡

下山滑坡总体呈腰子形，南北长度 1 120 m，东西最大宽度 290 m，滑坡总面积  $2.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，最大厚

度为 60 m，平均厚度为 34 m，滑坡体总体积  $8.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，属大型滑坡。该滑坡滑面的基本特征是后缘较陡峭，中部、前缘滑面相对平缓，主滑面中前缘倾角多为  $2^{\circ} \sim 10^{\circ}$  (见图 2)。下山滑坡在经过 1989 年的滑动之后，深层滑面已基本贯通，目前有进一步滑动的趋势。

滑坡区出露的地层主要有：上侏罗统西山头组凝灰岩、凝灰质砂岩等，岩体裂隙不发育，岩体较完整；上新统嵊县群铜岭祝组软质泥质沉积层和硬质玄武岩喷发层；第四系残坡积、坡积粉质黏土、含碎石粉质黏土、含粉质黏土碎块石等。滑坡区内隔水层主要为粉质黏土隔水层、黏土岩隔水层和基岩隔水层。

从图 2 中可以看出，该滑坡的主滑面是沿透水性较好的玄武岩顶面。滑坡体后缘为透水性较好的强风化玄武岩，有利于汇集雨水转化为地下水；同时，后缘人工水沟产生的裂缝也导致大量灌溉水渗入地下；加上后缘裂缝汇集雨水的作用，这 3 个方面原因导致滑坡体内入渗大量地下水。入渗坡体的地下水经后缘拉张裂隙带下渗，大部分到达底层滑面，沿滑面附近的砂岩向坡体前缘渗流。由于该层上部为具有隔水效果的黏土岩，所以该含水层转化为承压含水层。在较大的承压水作用下，坡体的稳

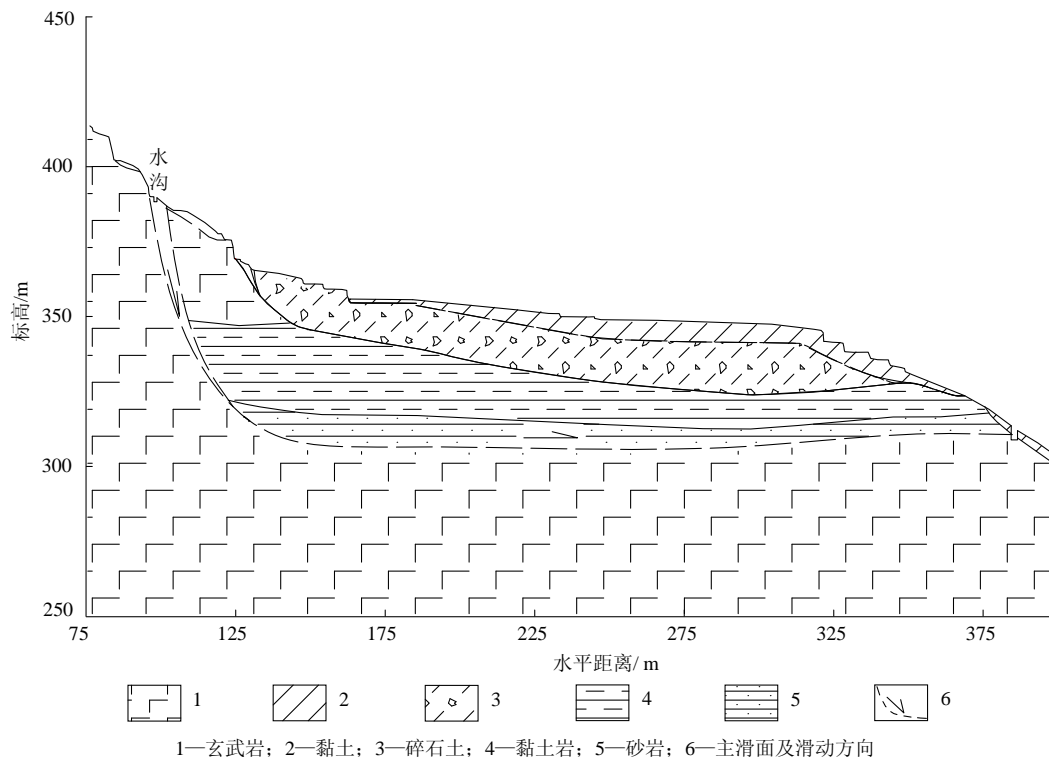


图 2 下山滑坡工程地质剖面图  
Fig.2 Engineering geological profile of Xiashan landslide

定性急剧降低。

### 3 数学模型分析

为了分析承压水对平推式滑坡的作用机制，以下山滑坡为例，选择该滑坡主要剖面简化模型如图 3 所示，分析承压水在滑面上的压力分布方式。取  $ABD$  为滑面位置。其中  $AB$  段为滑坡后缘拉张段，地表水可在此段快速入渗。滑面  $BD$  上部存在一隔水层，厚度为 3 m；此隔水层下部为一厚 3 m 的透水层；透水层下部为完整基岩。假定后缘裂缝中水位、透水层渗透系数和渗出水量已知。

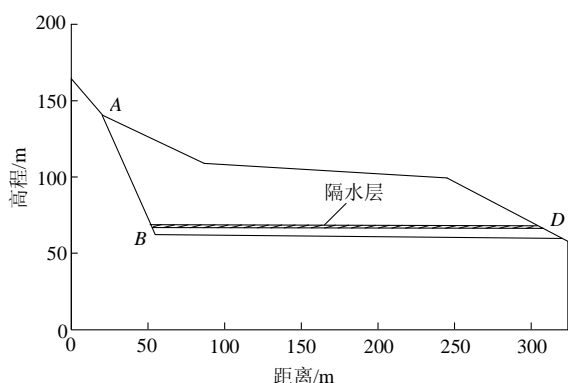


图 3 边坡计算模型

Fig.3 Calculation model of landslide

为了详细确定  $BD$  段地下水压力分布状态，需要确定地下水作用在该段上的类型及作用范围，确定地下水作用的水头线，才能精确分析地下水对滑坡稳定性的影响。

将  $BD$  段单独进行分析，如图 4 所示。

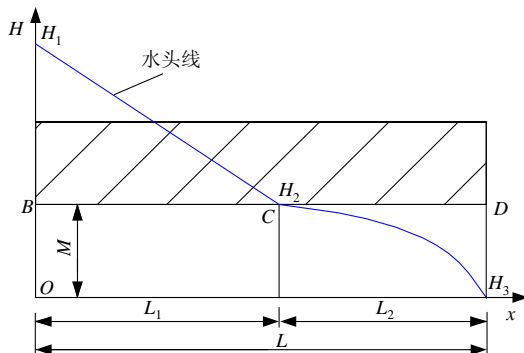


图 4  $BD$  段滑面详图

Fig.4 Detailed drawing of slip plane  $BD$

图 4 中， $BD$  面为滑动面，滑动面上部为隔水层，下部为透水层，厚度为  $M$ 。地下水从左侧流入，当坡体内渗流达到稳定以后，左侧点  $B$  处水头恒定，

右侧点  $D$  处地下水以恒定流量  $q$  渗出。以透水层底部为水头基准，点  $B$  处水头  $H_1$  为已知，点  $D$  处水头  $H_3$  由于是自由渗出位置，水头为 0。 $BC$  段为承压水作用范围  $L_1$ 。 $L_1$  和  $CD$  段长度  $L_2$  未知， $BD$  段总长  $L$  已知。

根据模型分析，滑动面上部存在隔水层，滑坡体后缘裂缝处充水，在点  $B$  处测压管水头大于该点位置水头，根据承压水概念可知，在这一点及开始一段，都有承压水的存在。模型右侧点  $D$ ，为渗出口位置；由于渗透层有一定厚度，点  $D$  处地下水渗出状态不是全断面渗出，而是靠近渗流层底部的一部分岩土层渗出；这种渗出状态就是潜水的渗出状态，每个点的测压水头即等于位置水头。在整个底部滑面长度上，起始段存在承压水，前缘段为潜水。那么中间必然有一个状态点是承压水向潜水的过渡点，在该点，位置水头等于测压水头等于  $M$ 。该点即为承压水压力水头为 0 的点，也是潜水位置水头为  $M$  的点。只有承压水对滑面以上的边坡有向上的扬压力作用，而右端的潜水则对边坡稳定性影响不大。经分析可知该段坡体共有 2 种地下水作用，即承压水和潜水。其分界点在  $BD$  段中间某一点  $C$ ，该点位置水头  $H_2$  等于  $M$ 。

#### 3.1 $BC$ 段地下水渗流

根据地下水向河渠渗流的相关理论<sup>[14-15]</sup>，地下水在  $BC$  段的渗流可以看做是承压含水层中地下水向河渠一维稳定流。

$BC$  段地下水渗流的基本微分方程为

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

式中： $H_1$  和  $H_2$  分别为点  $B$ ， $C$  两处的位置水头。

对式(1)的微分方程进行不定积分，得

$$H = c_1 x + c_2 \quad (2)$$

将式(1)的边界条件代入式(2)，得

$$H = H_1 - \frac{H_1 - H_2}{L_1} x \quad (3)$$

式(3)为承压水在  $BC$  段的水头线方程，其中  $H_1$ ， $H_2$  和  $L_1$  为常量，则  $H$  与  $x$  呈线性关系。可见，此条件下的水头线是直线。由于  $H_1$  和  $H_2$  已知，所以  $L_1$  决定了直线形状。 $BC$  段承压水对上部坡体存

在扬压力，故此其水头线的分布对边坡的稳定分析至关重要。

### 3.2 CD段地下水渗流

根据图4可以看出，CD段为潜水含水层，且隔水底板水平。此段可以用潜水含水层中地下水向河渠一维稳定渗流理论来进行分析。

此类潜水渗流遵循裘布依微分方程<sup>[16]</sup>：

$$q = -kH \frac{dH}{dx} \quad (4)$$

式中： $q$ 为单宽流量； $k$ 为渗透系数； $-\frac{dH}{dx}$ 为断面的水力坡度，沿流向为变量。对式(4)分离变量后进行积分，其中 $k$ 与 $q$ 为已知常量，得

$$\int_0^{L_2} \frac{q}{k} dx = \int_{H_2}^{H_3} -HdH \quad (5)$$

积分后得流量方程为

$$q = k \frac{H_2 + H_3}{2} \frac{H_2 - H_3}{L_2} \quad (6)$$

同样采用改变积分限的方法，对式(5)进行积分， $x$ 由 $0 \rightarrow x$ ， $H$ 由 $H_2 \rightarrow H$ ，即

$$\int_0^x \frac{q}{k} dx = \int_{H_2}^H -HdH \quad (7)$$

由式(7)得

$$\frac{q}{k} x = \frac{1}{2} (H_2^2 - H^2) \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)得到水头线方程为

$$H = \sqrt{H_2^2 - (H_2^2 - H_3^2) \frac{x}{L_2}} \quad (9)$$

由式(9)可知，CD段的潜水渗流水头线是以 $x$ 轴为对称轴的抛物线(上半支的一部分)。该段水位作用于滑面以下，对上部滑体没有影响。

### 3.3 承压地下水水头线的确定

根据式(6)可得

$$L_2 = \frac{k}{2q} (H_2^2 - H_3^2) \quad (10)$$

由于 $L_1 + L_2 = L$ ，则

$$L_1 = L - \frac{k}{2q} (H_2^2 - H_3^2) \quad (11)$$

由此得出结论：水平隔水层的潜水承压水一维稳定混合流对边坡上部滑动土体的作用，主要体现在长度为 $L_1$ 的承压含水层段，该段的水头线为由 $H_1$ 指向 $H_2$ 的一条直线(见图4)。

### 3.4 $L_1$ 的确定

以下山滑坡为例进行计算，将 $q$ ， $k$ ， $L$ ， $H_2$ 及 $H_3$ 等水文地质参数(见表1)代入式(11)，得 $L_1 = 221.25$  m。承压水水头线在该段上为从点B的 $H_1$ 水位处指向点C承压透水层顶部的一条直线。

表1 下山滑坡水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of Xiashan landslide					
$q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$k/(m \cdot s^{-1})$	$L/m$	$H_1/m$	$H_2/m$	$H_3/m$
$1 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^{-5}$	255	70	3	0

### 3.5 $L_1$ 的影响因素分析

潜水承压水一维混合流作用下，对边坡影响最大的是承压水的作用。影响承压水作用的重要因素是 $L_1$ 值。因此，需对 $L_1$ 的影响因素及其敏感性进行分析。

由式(11)可知， $L_1$ 的影响因素有 $L$ ， $k$ ， $q$ ， $H_2$ ， $H_3$ 。对特定的前缘可以自由渗水的边坡来说，假设 $L$ 和 $H_3$ 为已知条件，以下山滑坡为例， $L = 255$  m， $H_3 = 0$ ， $H_2 = M$ 。则 $L_1$ 主要由 $M$ ， $k$ 和 $q$ 三个参数决定。

为了分析这3个参数对 $L_1$ 的影响，对其中2个参数取固定值，使特定参数在一定范围内变化，分析该参数对 $L_1$ 的影响敏感度(见图5~7)。

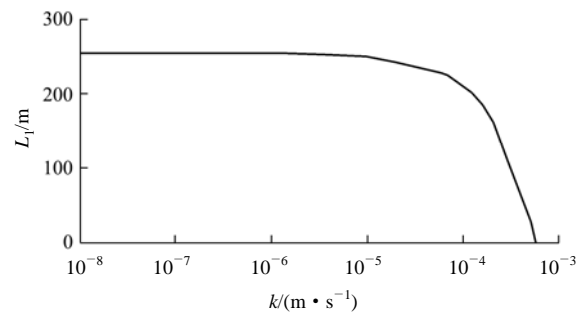


图5  $k$ 对 $L_1$ 的影响

Fig.5 Influence of  $k$  on  $L_1$

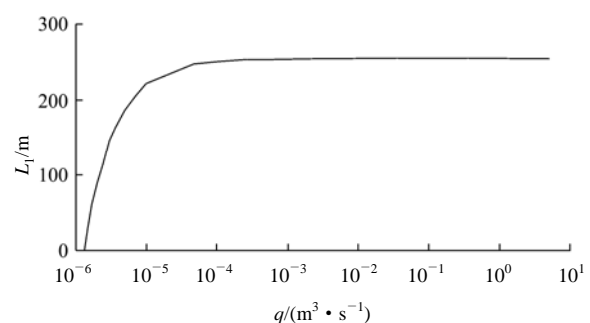


图6  $q$ 对 $L_1$ 的影响

Fig.6 Influence of  $q$  on  $L_1$

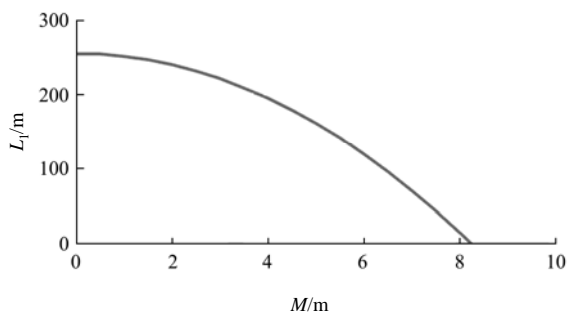


图 7 M 对  $L_1$  的影响

Fig.7 Influence of  $M$  on  $L_1$

由以上影响曲线可以看出各参数对  $L_1$  的主要影响有：

(1)  $k$  的影响：当  $k < 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  时， $L_1$  几乎不受影响，即承压水作用范围为整个边坡；当  $k > 6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  时， $L_1$  为 0，即承压水对滑面不产生作用；当  $k$  在  $1 \times 10^{-5}$ ， $6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  这 2 个界限值之间变化时， $L_1$  随着  $k$  值线性变化， $k$  越大， $L_1$  越小。

(2)  $q$  的影响：当  $q > 1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  时， $L_1$  几乎不受影响，即承压水作用范围为整个边坡；当  $q < 1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  时， $L_1$  变为 0，即承压水对滑面不产生作用；当  $q$  在  $1 \times 10^{-4}$ ， $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  这 2 个界限值之间变化时， $L_1$  随着  $q$  值线性变化， $q$  越大， $L_1$  越大。

(3)  $M$  的影响： $M$  和  $L_1$  呈抛物线关系，当  $M$  超过 8.3 m 时， $L_1$  减小到 0，即透水层厚度过大，承压水转化为潜水，不对边坡产生向上的承压水压力作用； $M$  在 0.0~8.3 m 范围内增大时， $L_1$  呈加速趋势减小。

### 4 $L_1$ 对边坡稳定性的影响

$L_1$  段承压水直接对上部滑体作用一个垂直于滑面指向滑动体的扬压力，起到浮托作用，减小滑面上的正应力，进而降低滑面的抗滑力和坡体的稳定性。

以下山滑坡为例进行计算分析  $L_1$  与坡体稳定性系数  $F_s$  的关系，从而明确平推式滑坡中承压水详细研究的重要性。由于该类型边坡存在承压水作用，渗透层在坡体前缘的渗出条件对  $F_s$  影响较大，故对坡体前缘渗透层有无堵塞的 2 种情况进行分析。

#### 4.1 坡体前缘渗透层无堵塞

坡体前缘渗透层若无堵塞，承压水可以沿该渗透层畅通渗出。所分析的边坡水文地质参数见表 1，

黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  及密度  $\rho$  等岩土物理力学参数见表 2。

表 2 下山滑坡物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of Xiashan landslide

结构名称	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
滑体	10.0	8	2 150
滑动面	4.4	3	2 150

根据该坡体变形和物理力学特性，采用不平衡推力传递系数法<sup>[17]</sup>，分析不同  $L_1$  所对应的  $F_s$ ，计算结果见表 3 和图 8。计算过程中， $L_1$  取值范围为 0~ $L$ ，步进值取 15 m。

表 3  $L_1$  和  $F_s$  相关性计算结果

Table 3 Calculated results of correlations between action range of confined water and stability coefficient

$L_1/\text{m}$	$F_s$	$L_1/\text{m}$	$F_s$	$L_1/\text{m}$	$F_s$
0	1.349	90	1.181	180	1.010
15	1.321	105	1.151	195	0.983
30	1.293	120	1.119	210	0.958
45	1.268	135	1.089	225	0.929
60	1.238	150	1.067	240	0.885
75	1.211	165	1.039	255	0.867

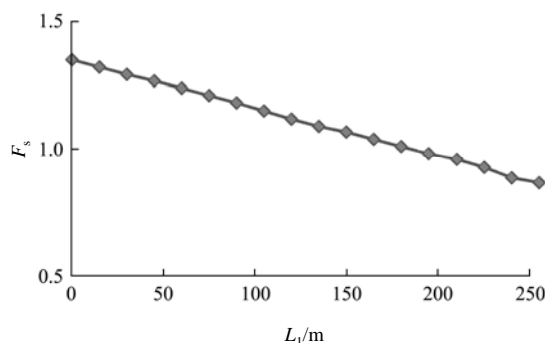


图 8  $L_1$  和  $F_s$  关系

Fig.8 Relationship between  $L_1$  and  $F_s$

由以上计算结果可知：

(1) 针对该边坡，当  $L_1 \leq 180 \text{ m}$  时， $F_s$  始终大于 1，坡体是稳定的。当  $L_1 > 180 \text{ m}$  时， $F_s < 1$ ，坡体处于不稳定状态；随着  $L_1$  的增大， $F_s$  进一步变小，坡体将发生变形破坏。

(2) 如果按照传统方法<sup>[18]</sup>计算，不考虑  $L_1$  变化产生的影响，承压水在滑面上的作用直接按照  $L_1 = 255 \text{ m}$  进行处理。计算结果  $F_s = 0.867$ ，计算结果偏

于保守。在工程中将增加边坡治理工作量，造成不必要的资源浪费。因此准确分析  $L_1$  对精确分析承压水作用下的平推式滑坡稳定性有重要意义。

#### 4.2 坡体前缘渗透层堵塞

下山滑坡前缘覆盖有大量黏性土，在暴雨影响下，前缘垮塌，将存在承压水作用的渗透层出口处掩埋覆盖。由于黏性土渗透性较差，渗透层前缘被堵塞，承压水不能顺利排出，沿滑动面的水头值急剧升高，对上部坡体产生更大的扬压力，从而导致坡体的稳定性加速降低。

考虑极端情况，沿整个边坡前缘，渗透层渗出部位都被黏性土覆盖、水流渗出通道被阻断，滑动面承压水水头线如图9所示。

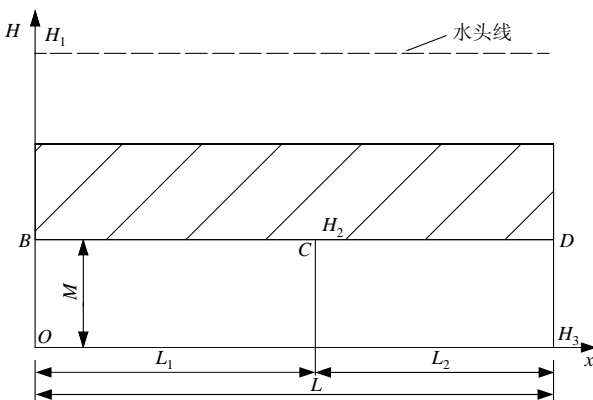


图9 坡体前缘渗透层堵塞工况水头线示意图

Fig.9 Sketch of tube water head line under the working condition of permeable layer blockage at slope bottom edge

根据该工况，得出坡体前缘渗透层堵塞情况下，得边坡  $F_s = 0.37$ 。正常承压水作用下， $L_1 = 221.25$  m，计算得  $F_s$  为 0.936。承压水渗透层堵塞对边坡的影响巨大，将导致稳定性急剧下降，比正常承压水作用下要下降 60.5%。如果强降雨条件下，承压水渗透层前缘被堵塞，则坡体短时间内稳定性急速下降，很容易产生滑动破坏。

实际情况中，渗透层虽不可能全部堵塞；但即使是局部坍塌堵塞，也能造成坡体稳定性降低，一旦整体稳定性系数小于 1，坡体处于临界状态，随着堵塞造成的地下水作用进一步增强，边坡失稳的可能性增大。

## 5 结 论

一些缓倾斜坡的破坏过程中，地下水尤其是承

压地下水对斜坡稳定性产生很大的作用。本文通过详细研究地下水的作用类型和范围，确定了地下水作用下边坡的稳定情况。得到主要结论如下：

(1) 通过承压水 - 潜水一维混合向河渠流动模型，推导了水平承压水透土层中，承压水作用段长度的计算公式。将边坡的各项已知参数代入该计算公式，可计算该类型滑坡中承压水作用的范围，进而可以分析边坡的稳定性。

(2) 针对有承压水存在的缓倾斜坡，不考虑地下水影响、简单考虑潜水和简单考虑承压水的分布这 3 种工况下，计算的边坡稳定性系数都会产生很大的误差，不能反映边坡的真实稳定状态。

(3) 承压水透土层前缘保持渗流通畅对边坡的稳定至关重要，如果边坡前缘堵塞，需及时疏通，降低滑坡产生滑动破坏的可能性。

(4) 如果滑坡体在滑动面附近存在承压水作用，通过测量滑动面附近渗流层厚度、渗透系数以及滑坡前缘渗流量，可通过推导出的公式得到承压水作用范围，将使计算得到的边坡稳定系数更接近真实值，降低边坡治理成本。

#### 参考文献(References):

- [1] 沈细中, 杨文丽, 兰 雁. 小浪底库岸 1# 滑坡体安全评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 589 - 595.(SHEN Xizhong, YANG Wenli, LAN Yan. Safety evaluation of landslide #1 at Xiaolangdi Reservoir bank[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 589 - 595.(in Chinese))
- [2] 孙红月, 吴红梅, 李焕强, 等. 松散堆积土中的隔水层对边坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(10): 2 016 - 2 020.(SUN Hongyue, WU Hongmei, LI Huanqiang, et al. Influence to slope stability caused by impermeable layer in loose deposited soil[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(10): 2 016 - 2 020.(in Chinese))
- [3] 宋胜武, 向柏宇, 杨静熙, 等. 锦屏一级水电站复杂地质条件下坝肩高陡边坡稳定性分析及其加固设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 442 - 458.(SONG Shengwu, XIANG Baiyu, YANG Jingxi, et al. Stability analysis and reinforcement design of high and steep slopes with complex geology in abutment of Jinping I hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 442 - 458.(in Chinese))
- [4] 范宣梅, 许 强, 张俾元, 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)
- [5] 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 Xuanmei, 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.(in Chinese))
- [6] 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, 2005: 314 - 355.(ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. The analytical principle of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 314 - 355.(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: 153 - 154.(YING 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: 153 - 154.(in Chinese))
- [8] 范宣梅. 平推式滑坡成因机制与防治对策研究[硕士学位论文文][D]. 成都: 成都理工大学, 2007.(FAN Xuanmei. Study of genetic mechanism and control countermeasures of translational landslide[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.(in Chinese))
- [9] 孙军杰, 王兰民, 龙鹏伟, 等. 地震与降雨耦合作用下区域滑坡灾害评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 752 - 760.(SUN Junjie, WANG Lanmin, LONG Pengwei, et al. An assessment method for regional susceptibility of landslides under coupling condition of earthquake and rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 752 - 760.(in Chinese))
- [10] WATTS A B, MASSON D G. A giant landslide on the north flank of Tenerife, Canary Islands[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B12): 24 487 - 24 498.
- [11] JIAO J J. A confined groundwater zone in weathered igneous rocks and its impact on slope stability[C]// Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and the Environment. Beijing: China Environment Science Press, 2000: 602 - 608.
- [12] JIAO J J, WANG X S, NANDY S. Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneous rocks in Hong Kong[J]. Engineering Geology, 2005, 80(1/2): 71 - 92.
- [13] FLORIS M, BOZZANO F. Evaluation of landslide reactivation: a modified rainfall threshold model based on historical records of rainfall and landslides[J]. Geomorphology, 2008, 94(1/2): 40 - 57.
- [14] CONTE E, TRONCONE A. Analytical method for predicting the mobility of slow-moving landslides owing to groundwater fluctuations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(8): 777 - 784.
- [15] CASCINI L, CALVELLO M, GRIMALDI G M. Groundwater modeling for the analysis of active slow-moving landslides[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(9): 1 220 - 1 230.
- [16] 张强. 金沙江观音岩水电站红层钙质砂岩类岩溶发育特征及渗透稳定性研究[博士学位论文][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[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.(in Chinese))
- [17] DU J, YIN K L. Study on risk assessment for an individual landslide[C]// Proceedings of Georisk 2011: Risk Assessment and Management(GSP 224). [S.l.]: [s.n.], 2011: 812 - 819.
- [18] 吴恒滨, 何泽平, 曹卫文. 基于不同水压分布的平面滑动边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2 493 - 2 499.(WU Hengbin, HE Zeping, CAO Weiwen. Stability study of slope with planar failure based on different water pressure distributions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2 493 - 2 499.(in Chinese))