浸润线缓慢上升对滑坡剩余推力的影响规律*

汪 洋[1,2]，刘艺梁[1]

（1. 中国地质大学(武汉）工程学院，湖北 武汉 430074；2. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心，湖北 武汉 430074）

摘 要：地下水浸润线变化对滑坡下滑力、抗滑力和剩余推力的影响甚大。基于传力系数法，建立了浸润线缓慢上升时剩余推力改变量的计算模型，探讨了滑面倾角、浸润线角度和滑面内摩擦角与倾角正切比对浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力改变量的影响规律；将浸润线缓慢上升时剩余推力由增大到减小的分界点称为剩余推力变化临界点，分析了剩余推力变化达到临界点时的浸润线倾角分布规律；提出了剩余推力变化的临界线，确定了浸润线缓慢上升时剩余推力的增大区域和减小区域。

关键词：浸润线；滑坡；剩余推力；临界线

中图分类号：P642.22 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－811X(2012)04－0021－04

0 引言

地下水对滑坡的影响体现在物理、化学及力学作用等三个方面[1]，对力学作用而言，重力、浮力、水压力、渗透力会随地下水浸润线变化而改变，滑坡剩余推力和稳定性也会变化。刘才华等认为静止库水位产生的浮托力在某种程度上有利于边坡的稳定[2]，在库水位逐渐上升过程中，孔隙水压力作用使边坡的稳定性先降低后增加[3]。殷跃平在分析关塘口滑坡地下水渗透压力时指出：库水位为 175 m 状态下的滑坡推力，要比库水位由 175 m 下降到 145 m 水位的滑坡推力大[4]。丁秀丽等通过奉节南桥头滑坡的数值模拟认为滑坡整体稳定性随着水位的抬升逐渐恶化[5]。张卫民等分析了地下水位线的位置对边坡稳定性的影响[6]。邓东平等认为浸润线最高点相对坡脚的高度是边坡稳定性的重要影响参数，地下水位的升高导致边坡的稳定性急剧下降[7]。

滑坡剩余推力涉及到多个力及其分量的叠加，滑坡剩余推力大小随浸润线位置、角度及滑面倾角等因素的变化而变化。本文建立了浸润线缓慢上升时剩余推力改变量的计算模型，探讨了滑面内摩擦角与倾角正切比、滑面倾角和浸润线角度对浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力改变量的影响规律，提出了剩余推力变化的临界线，确定了浸润线缓慢上升时剩余推力的增大区域和减小区域。

1 浸润线缓慢上升前后的剩余推力

采用传力系数法计算滑坡剩余推力，选取滑动土体中的土骨架作为研究对象，浸润线条件下条块的受力见图 1。分析滑动条块中土骨架的力的平衡时考虑渗透力，浸润线以下的条块重力采用浮重度计算，浸润线以上的条块重力采用天然重度计算。

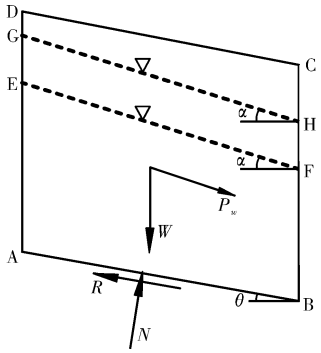


图 1 浸润线条件下土条的受力图

条块的下滑力和抗滑力分别表示如下：

$$T = W\sin\theta + P_w\cos(\alpha-\theta), \tag{1}$$

$$R = W\cos\theta\,\mathrm{tg}\varphi + P_w\sin(\alpha-\theta)\,\mathrm{tg}\varphi + cl。 \tag{2}$$

其中：

$$W = V_u\gamma + V_d\gamma', \tag{3}$$

$$P_w = \gamma_w V_d\sin\alpha。 \tag{4}$$

式中：T 为条块下滑力，R 为抗滑力，W 为重力，P_w 为渗透力，c 为滑面内聚力，l 为底面长度，V_u

* 收稿日期：2012－02－19 修回日期：2012－03－22
基金项目：国家自然科学基金项目(41002103，40872176)
作者简介：汪洋(1979－)，男，湖北天门人，博士，副教授，主要从事滑坡稳定性及库岸灾害的研究.
E-mail：wangyangcug@126.com

为浸润线以上体积，V_d 为浸润线以下体积，θ 为滑面倾角，α 为浸润线倾角，φ 为滑面内摩擦角，γ 为天然重度，γ'为浮重度，γ_w 为水的重度。

浸润线缓慢上升可认为浸润线平行上升，浸润线由 *EF* 位置平行变化到 *GH* 位置(*GH* 位置条块的受力用增加下脚标 1 来表示，*EFGH* 的面积用 *S* 表示)时，条块重力的变化表示为：

$$(W_1 - W) = (\gamma S_{GHCD} + \gamma' S_{ABHG}) - (\gamma S_{EFCD} + \gamma' S_{ABFE}) = (\gamma' - \gamma)S。 \tag{5}$$

渗透力的变化表示为：

$$P_{w1} - P_w = \gamma_w S\sin\theta。 \tag{6}$$

由式(5)和式(6)可见，浸润线缓慢上升，根据浸润线下浮重度和浸润线上天然重度计算的重力减小，但渗透力增加，浸润线缓慢上升前后条块剩余推力的变化量表示如下：

$$\Delta E = (W_1 - W)(\sin\theta - \cos\theta\mathrm{tg}\varphi) + (P_{w1} - P_w)[\cos(\alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta)\mathrm{tg}\varphi]。 \tag{7}$$

将式(5)和式(6) 代入式(7)得：

$$\Delta E = (\gamma' - \gamma)S(\sin\theta - \cos\theta\mathrm{tg}\varphi) + \gamma_w S\sin\theta[\cos(\alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta)\mathrm{tg}\varphi]。 \tag{8}$$

为了方便考虑浸润线缓慢上升对剩余推力的影响，令 $\gamma = 1.9\gamma_w$，$\gamma' = 1.1\gamma_w$，$\mathrm{tg}\varphi = b\mathrm{tg}\theta$，则滑坡剩余推力的变化可表示为：

$$\Delta E = \gamma_w \cdot S \cdot f(\theta, \alpha, b), \tag{9}$$

$$f(\theta, \varphi, \alpha) = \sin\theta[0.8(b-1) + \cos(\alpha - \theta) - b\sin(\alpha - \theta)\mathrm{tg}\theta]。 \tag{10}$$

b 值为滑面内摩擦角与倾角正切比，*f* 值为浸润线缓慢上升滑坡剩余推力的相对改变量，由此可见，在滑块天然重度、浮重度与水的重度设置成一定比例条件下，浸润线缓慢上升时滑坡剩余推力的变化不仅与重度、水下岩土体体积的改变量成正比，还与浸润线的倾角、滑面倾角和内聚力密切相关。

2 剩余推力变化的规律

2.1 滑面内摩擦角与倾角正切比对剩余推力变化量的影响

滑面内摩擦角与倾角正切比 *b* 值在一定程度上反映滑体的稳定性状态。探讨了浸润线缓慢上升时 *b* 值对剩余推力变化量的影响，图 2 中显示的是浸润线缓慢上升时 *b* 值对滑坡剩余推力变化的影响，图 2 中 *b* 值取 1.1，浸润线角度取 10°。

在滑面倾角和浸润线角度值一定的条件下，浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的改变量随 *b* 值的增大而呈现出一定幅度的增大。当 *b* 值从 0.7 增加到 1.3 时，浸润线上升相同的高度，*f* 值从 0.200 增加到 0.328。

2.2 浸润线角度对剩余推力变化量的影响

探讨了浸润线缓慢上升时不同浸润线角度对剩余推力变化量的影响，图 3 显示的是浸润线缓慢上升时浸润线角度对滑坡剩余推力变化的影响，图 3 中 *b* 值取 1.1，滑面倾角取 15°。

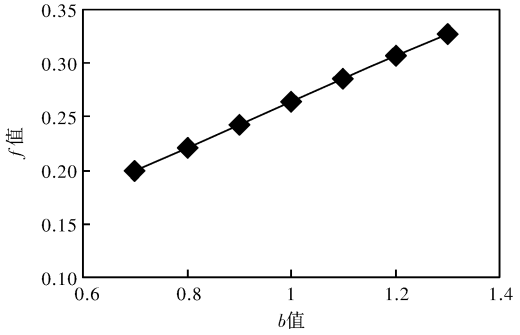


图 2 浸润线缓慢上升时 *b* 值对剩余推力的影响

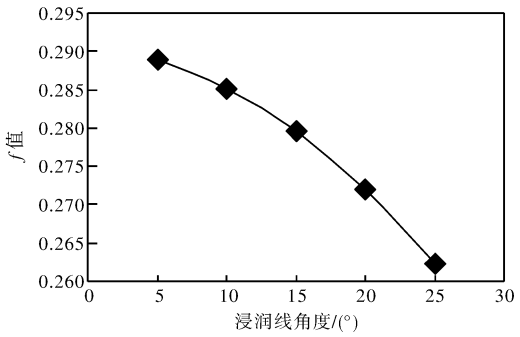


图 3 浸润线缓慢上升时浸润线角度对剩余推力的影响

在滑面倾角和 *b* 值一定的条件下，浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的改变量随浸润线角度的增大而缓慢减小。当浸润线角度从 5°增加到 25°时，浸润线上升相同的高度，*f* 值从 0.289 减小到 0.262。

2.3 滑面倾角对剩余推力变化量的影响

探讨了浸润线缓慢上升时滑面倾角对剩余推力变化量的影响，图 4 中显示的是浸润线缓慢上升时浸润线角度对滑坡剩余推力变化的影响，图 4 中 *b* 值取 1.1，浸润线角度取 10°。

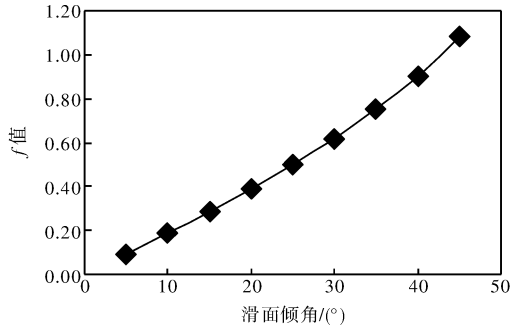


图 4 浸润线缓慢上升时滑面倾角对剩余推力的影响

在浸润线角度和 *b* 值一定的条件下，浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的改变量随滑面倾角的增大而呈现出较大幅度的增大。当滑面倾角从 5°增加到 45°时，浸润线上升相同的高度，*f* 值从 0.093 增加到 1.082。

3　剩余推力变化量的临界点

3.1　特殊条件下的剩余推力

若浸润线倾角与滑面倾角相等，式(10)可变为：

$$f=\sin\theta(0.8b+0.2)。\tag{11}$$

式中，f 大于 0，说明在该条件下浸润线上升会使剩余推力增大。

另一方面，若滑面倾角与滑面内摩擦角相等，即 $b=1$，式(10)可变为：

$$f=\sin\theta\cos(\alpha-\theta)[1-\mathrm{tg}(\alpha-\theta)\mathrm{tg}\theta]。\tag{12}$$

因 $1-\mathrm{tg}(\alpha-\theta)\mathrm{tg}\theta=\mathrm{tg}\theta[\mathrm{tg}(90-\theta)-\mathrm{tg}(\alpha-\theta)]$，故式(12)也大于 0，也说明在该条件下浸润线上升会使剩余推力增大。

3.2　剩余推力变化量的临界点

式(11)、式(12)、图 2、图 3、图 4 结果均表示浸润线缓慢上升，剩余推力的改变量均大于零，即在上述条件下，滑坡剩余推力随浸润线缓慢升高均变大。

根据式(5)和式(6)，随着浸润线缓慢上升，渗透力增大，利用浮重度和天然重度计算的条块重力减小，重力贡献的下滑力和抗滑力均减小，渗透力贡献的下滑力和抗滑力均增加，故浸润线缓慢上升前后剩余推力既可能增加，又可能减小。

浸润线缓慢上升时剩余推力由增大到减小的分界点称为剩余推力变化临界点。表 1 中分析了

表 1　浸润线缓慢上升时剩余推力变化临界点

b	θ/(°)	α/(°)	b	θ/(°)	α/(°)
	5	48.4		5	73.4
	15	57.4		15	77.4
0.1	25	66.3	0.6	25	81.4
	35	75.1		35	85.1
	45	83.5		45	88.1
	5	54.3		5	77.6
	15	62.2		15	80.7
0.2	25	70.1	0.7	25	83.7
	35	77.7		35	86.4
	45	84.9		45	88.7
	5	59.5		5	81.8
	15	66.5		15	83.9
0.3	25	73.4	0.8	25	85.9
	35	79.9		35	87.7
	45	85.9		45	89.2
	5	64.3		5	85.9
	15	70.4		15	87.0
0.4	25	76.3	0.9	25	88.0
	35	81.8		35	88.9
	45	86.7		45	89.6
	5	68.9			
	15	74.0			
0.5	25	78.9			
	35	83.5			
	45	87.5			

b 值从 0.1 到 0.9、滑面倾角从 5°增加到 45°之间取值时，剩余推力变化达到临界点时的浸润线倾角。当 b 值一定时，滑面倾角越大，浸润线缓慢上升剩余推力变化达到临界点时浸润线倾角越大；当滑面倾角一定时，b 值越大，浸润线缓慢上升剩余推力变化达到临界点时浸润线倾角也越大；当 b 值超过 0.9 后，浸润线缓慢上升剩余推力只增大，不减小。

根据剩余推力变化临界点计算，把一定滑面倾角条件下的临界点随 b 值变化连成曲线，得到了浸润线上升时剩余推力变化临界线(图 5)。临界线以下区域，浸润线缓慢上升前后剩余推力变化是增大的，临界线以上区域，浸润线缓慢上升前后剩余推力变化是减小的。

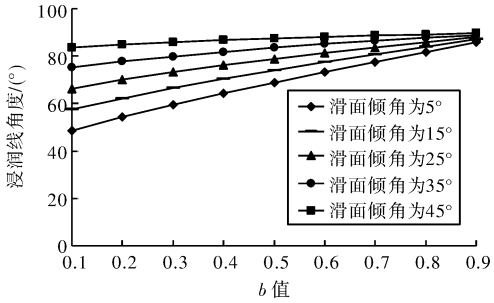


图 5　浸润线缓慢上升时剩余推力变化临界线

4　结论

(1)浸润线缓慢上升时滑坡剩余推力的改变量不仅与重度、水下岩土体体积的改变量成正比，还与浸润线的倾角、滑面倾角和内聚力密切相关。

(2)分析了滑面内摩擦角与倾角正切比、浸润线角度、滑面倾角对浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力改变量的影响。在滑面倾角和浸润线角度值一定的条件下，浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的改变量随 b 的增大而呈现出一定幅度的增大。在滑面倾角和 b 值一定的条件下，浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的改变量随浸润线角度的增大而缓慢减小。在浸润线角度和 b 值一定的条件下，浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的改变量随滑面倾角的增大而呈现出较大幅度的增大。

(3)探讨了 b 值从 0.1 变化到 0.9 时浸润线缓慢上升前后剩余推力变化临界点，绘制了剩余推力变化临界线，得到了浸润线上升时剩余推力增大区域和减小区域。在浸润线角度较小条件下，滑坡剩余推力随浸润线缓慢升高而变大，只有在浸润线角度较大条件下才可能出现滑坡剩余推力随浸润线缓慢升高而减小的特征。

本文在是在滑块天然重度、浮重度与水的重度设置成一定比例的条件下分析了浸润线缓慢上升前后滑坡剩余推力的变化规律，计算分析中没有考虑到土体的土体性质与重度之间的关系，今

后将针对这方面作进一步的探索。

参考文献:

[1] 莫伟伟, 徐平, 丁秀丽. 库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 997 - 1002.
[2] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭 等. 地下水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 419 - 422.
[3] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 769 - 773.
[4] 殷跃平. 三峡库区地下水渗透压力对滑坡稳定性影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 1 - 8.
[5] 丁秀丽, 付敬, 张奇华. 三峡水库水位涨落条件下奉节南桥头滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2913 - 2919.
[6] 张卫民, 陈兰云. 地下水位线对土坡稳定的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5319 - 5322.
[7] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 稳定渗流条件下土坡稳定性分析的一种新方法[J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 29 - 35.

Influence Law of Slowly Rising of Phreatic Line on Residual Sliding Force of Landslides

Wang Yang[1, 2] and Liu Yiliang[1]

(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430074, *China*; 2. *Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: Changes of phreatic line of groundwater have great impact on sliding force, anti-sliding force and residual sliding force of a landslide. Based on Transmission Coefficient Method, a calculation model for the varibles of residual sliding force with slow rise of the phreatic line is established, which is used to discuss influence rule on residual sliding force of sliding surface angle, phreatic line angle and tangent ratio of internal friction angle to sliding surface angle. The dividing point, where the varibles of residual sliding force with slow rise of the phreatic line vary from increasing to decreasing, is called the critical point of residual sliding force, and the distribution of phreatic line angle is analyzed as residual sliding force arrives at the critical point. The critical line, increasing area and decreasing area of residual sliding force during the slow rise of the phreatic line, are put forward.

Key words: phreatic line; landslide; residual sliding force; critical line

(上接第 5 页)

Evolution Mechanism of Earthquake-induced Urban Disasters Based on Bayesian Networks

Ma Zujun and Xie Zili

(*Southwest Jiaotong University, School of Economics and Management, Institute for Logistics and Emergency Management, Chengdu* 610031, *China*)

Abstract: In order to understand the evolution routes and diffusion mechanism of earthquake-induced urban disasters and provide reference for seismic surveillance and prediction, node variables and their value ranges of the Bayesian network for evolution system of earthquake-induced urban disasters are determined based on analysis on relative data and literatures, and a Bayesian network structure diagram is established according to the causality of node variables. Conditional probability of each variable in the network is acquired by data statistics of 16 cities affected by representative earthquakes at home and abroad. Finally, posterity probabilities of secondary disasters under the condition of the same input variables and different environment variables are obtained by using Bayesian network toolbox based on Bayesian network reasoning. The results of an illustrated example show that the level of emergency management has an important impact on the occurrence probability of different earthquake-induced urban disasters.

Key words: earthquake; secondary disasters; evolution mechanism; Bayesian networks; city