

文章编号: 1006-4710(2013)03-0260-06

# 在边坡局部失稳中传递系数法 与强度折减法的计算比较

李荣建<sup>1</sup>, 刘军定<sup>1</sup>, 闫蕊<sup>1</sup>, 郑文<sup>1,2</sup>, 陈雅琴<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

(2. 榆林学院, 陕西 榆林 719000)

**摘要:** 在考虑非饱和基质吸力条件下, 基于传递系数法的计算原理, 开发了可考虑基质吸力的传递系数法相关计算程序, 并且针对下土地岭边坡进行了稳定性分析, 同时与强度折减有限元计算结果进行了比较研究。对于具有滑带、坡体狭长不规则等特点的下土地岭边坡, 可能存在局部滑动先于沿整体滑带滑动的失稳情况。研究表明, 考虑基质吸力逐步减弱直至丧失的过程中, 传递系数法与强度折减有限元法均可在一定程度上反映非饱和土边坡的安全系数降低的现象, 但传递系数法在分析边坡的局部滑动问题中具有明显的局限性, 而强度折减有限元法则可以通过计算的位移增量云图和等值线确定潜在的局部滑动面。

**关键词:** 边坡; 失稳机理; 局部失稳; 传递系数法; 强度折减有限元法

**中图分类号:** TU432

**文献标志码:** A

## The Calculation Comparison of Transfer Coefficient Method with Strength Reduction Finite Element Method in Slope Local Instability

LI Rongjian<sup>1</sup>, LIU Junding<sup>1</sup>, YAN Rui<sup>1</sup>, ZHENG Wen<sup>1,2</sup>, CHEN Yaqin<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2. Yulin University, Yulin 719000, China)

**Abstract:** In the condition of taking the unsaturated matric suction into consideration, based on the principle of the traditional transfer coefficient method, this paper develops a corresponding program on transfer coefficient method with considering matric suction, and analyzes the stability of Tudiling slope. At the same time, comparison of the results of the transfer coefficient method is made with that of the strength reduction finite element method. For the Tudiling slope being narrow in thickness and irregular in shape, there may exist a kind of instability that the sliding of local surface is earlier than that of whole slide belt. The results show that, with matric suction gradually decreasing, the transfer coefficient method and the strength reduction finite element method both can reflect the decrease of safety factor in the unsaturated soil slope, but the transfer coefficient method has obvious difficulty in analyzing the local sliding, while the strength reduction finite element method is advantageous to determine the potential local sliding surface through the isoclines of incremental displacement.

**Key words:** slope; instability mechanism; local instability; transfer coefficient method; the strength reduction finite element method

边坡稳定性评价是岩土工程的主要研究课题之一, 研究边坡稳定性的方法主要有极限平衡法、极限

分析法、滑移线法和强度折减法等, 这些方法在边坡工程稳定性评价中得到了大量的应用, 例如刘钊等

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072193); 中国博士后科学基金资助项目(20100481354); 陕西省教育厅科研计划资助项目(12JK0907)。

作者简介: 李荣建, 男, 副教授, 博士, 研究方向为黄土力学、土工抗震与边坡工程等。E-mail: lirongjian@xaut.edu.cn。

在渗流条件下采用极限平衡法研究了坝坡的稳定性变化<sup>[1]</sup>,石振峰等应用强度折减法研究了泄洪洞进口边坡的稳定性问题<sup>[2]</sup>。

虽然在自然界中边坡工程普遍存在,但绝大多数边坡属于非饱和土边坡,而非饱和土中基质吸力的丧失往往会威胁到非饱和土边坡的稳定性。因此,基于非饱和状态的基质吸力探讨合理的非饱和土坡稳定性的分析方法具有十分重要的理论意义和实际工程意义。

基质吸力是影响非饱和土力学特性的重要因素之一,正确把握非饱和土边坡基质吸力的变化规律及其抗剪强度之间的关系,对于非饱和土边坡的稳定性分析研究具有重要意义<sup>[3]</sup>。

可用于土质边坡稳定性分析的方法有很多,其中极限平衡法中条分法发展的较为成熟,目前工程实践中大都采用此方法。条分法是将边坡土体分成若干土条,在分析条块受力的基础上建立整个滑动土体的力或力矩平衡方程,并以此为基础确定边坡的稳定安全系数。尽管条分法在力学上作了一系列的简化假定,但由于它抓住了边坡稳定性分析问题的主要方面,大多数情况下可以取得与实际情况较为吻合的分析结果,因此,在工程实际中得到广泛应用。

在非饱和土的强度理论研究中,Bishop 单值有效应力非饱和土强度理论<sup>[4]</sup>和 Fredlund 双应力变量非饱和土强度理论<sup>[5]</sup>,为非饱和土边坡稳定性的分析奠定了理论基础。Fredlund 等研究了条分法分析非饱和土边坡的稳定性问题,并指出了三种不收敛的情况<sup>[6]</sup>;蒋刚等采用 Janbu 法分析了降雨条件下边坡安全系数的变化<sup>[7]</sup>。但值得注意的是,条分法只是在假定滑动面上考虑基质吸力,而不能考虑滑动面以外的非饱和土体的基质吸力,这部分基质吸力的影响应该得到合理的定量考虑<sup>[8]</sup>。

随着计算技术及非线性弹塑性有限元的发展,强度折减有限元法在由 Zienkiewicz 等提出<sup>[9]</sup>后由 Ugai<sup>[10]</sup>和 Griffiths 等<sup>[11]</sup>进一步发展及应用。该方法除了具有普通有限元法的优点外,它可以直接得出安全系数,还可以合理确定出潜在滑动面的形状和位置。因此,强度折减有限元法被引入我国后很快就得到了许多研究者的重视。宋二祥<sup>[12]</sup>分析了强度折减过程和有限元分析的实现思路;郑颖人等<sup>[13]</sup>提出了基于强度折减有限元法确定边坡多滑面的思路。上述成果有效地推进了强度折减有限元法的研究,但这些研究中还没有考虑基质吸力对边坡稳定性的影响。李荣建等<sup>[14-16]</sup>基于强度折减有限元法

建立了非饱和土边坡稳定性分析方法,并先后将强度折减有限元法推广到了二维和三维条件下非饱和土边坡的稳定性分析中。针对目前广泛应用的条分法,李荣建等<sup>[17]</sup>阐述了基于 Bishop 和 Fredlund 非饱和土强度表达式的强度折减有限元分析非饱和土边坡稳定性计算原理,并对比了 Bishop 条分法和强度折减有限元法的优缺点。大量的非饱和土边坡分析案例表明,采用强度折减有限元法分析非饱和边坡稳定性,可以合理考虑上部坡体的基质吸力以及更为复杂的基质吸力分布,计算结果较合理,有较大的发展前景,但这一趋势并不排斥各种传统的条分法在非饱和土质边坡稳定性评价的进一步发展<sup>[18]</sup>。

秭归县下土地岭边坡,自然条件和地质条件复杂,运用传统的传递系数法给出了初步的安全评价<sup>[19]</sup>。但由于传递系数法在假定整个滑带滑动的基础上进行了稳定性分析,并给出了相应的结果,但不能判断是否存在局部滑动的可能,该边坡仍可能出现局部滑动,因此,采用传递系数法对该边坡进行稳定性分析具有一定的局限性。

本文针对秭归县下土地岭边坡可能存在的局部失稳问题,讨论了传递系数法分析非饱和土边坡的实现思路和特点,并与强度折减有限元法进行比较研究,从基质吸力和局部失稳两方面对其失稳滑动机制进行分析。

## 1 基于传递系数法的非饱和功能计算的实现途径

### 1.1 两种非饱和强度理论

对于非饱和土的强度理论,目前得到广泛应用的有 Bishop(1963 年)的非饱和土有效应力抗剪强度公式(1)和 Fredlund(1978 年)的非饱和土抗剪强度表达式(2):

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\varphi' \quad (1)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\tan\varphi'' \quad (2)$$

式中: $\sigma$  为总应力; $u_a$  为孔隙气压力; $u_w$  为孔隙水压力; $\chi$  为吸力参数; $\tan\varphi'$  为有效摩擦角正切; $\tan\varphi''$  为吸力摩擦角正切; $c'$  为有效粘聚力。

公式(2)实际上将基质吸力  $s$  产生的吸力强度纳入到总粘聚力  $c''$  中:

$$c'' = c' + (u_a - u_w)\tan\varphi'' \quad (3)$$

式中: $c''$  表示总粘聚力。

### 1.2 基质吸力在传递系数法中的计算功能和实现

传递系数法作为条分法的一种典型方法,它的基本假定为条间力的合力与上一个土条的底面相平

行,根据力的平衡条件,逐条向下推求,直至最后一个土条的推力为零。由此可得到传递系数法中边坡滑坡推力计算公式:

$$P_i = W_i \sin \alpha_i - \left[ \frac{c'_i l_i}{F_s} + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i) \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \right] + P_{i-1} \psi_i$$

(4)

式中:  $p_i$ 、 $p_{i-1}$  为条间力;  $W_i$  为土条重力;  $\alpha_i$  为土条底面倾角;  $l_i$  为土条底面弧长;  $u_i$  为饱和土孔隙水压力;  $F_s$  为试算系数,式中传递系数  $\psi_i$  由下式计算:

$$\psi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

(5)

将 Bishop 非饱和土有效应力抗剪强度公式(1)中吸力项代入式(4)中,即得到可考虑基质吸力的传递系数法滑坡推力计算公式:

$$P_i = W_i \sin \alpha_i - \left\{ \frac{c'_i l_i}{F_s} + [W_i \cos \alpha_i + \chi(u_a - u_w)_i l_i] \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \right\} + P_{i-1} \psi_i$$

(6)

由公式(6)可以看出,基于 Bishop 非饱和土强度理论利用传递系数法进行非饱和土边坡稳定性分析时,实质上是将基质吸力贡献的吸附强度纳入到土体重力的有效法向分力中,从而在进行传递系数法分析时可考虑均匀分布或在一定程度上的非均匀基质吸力的分布。

将 Fredlund 的非饱和土有效应力抗剪强度式(2)中的总粘聚力中吸力分项代入式(4),即得到可考虑基质吸力的传递系数法的安全系数求解式:

$$P_i = W_i \sin \alpha_i - \left\{ \frac{[c'_i + (u_a - u_w)_i \tan \varphi''_i] l_i}{F_s} + W_i \cos \alpha_i \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \right\} + P_{i-1} \psi_i$$

(7)

由公式(7)可以看出,基于 Fredlund 非饱和土强度公式利用传递系数法进行非饱和土边坡稳定性分析时,是将基质吸力所贡献的吸附强度纳入土体的总粘聚力,从而可以考虑均匀分布或在一定程度上的非均匀基质吸力的分布。

## 2 基于整体滑带的边坡稳定性评价

### 2.1 工程概况

下土地岭滑坡区位于湖北秭归水田坝乡新址规划区北部袁水河的南岸。滑坡区属于河谷岸坡地貌,处在袁水河凹岸处,相对高差 68 m。滑坡前缘

宽度 210 m,往中后部滑坡变窄,宽度为 80 ~ 100 m,滑坡纵向长度平均长度为 170 m。滑坡体的厚度在纵向上也有一定的变化,中上部滑坡体平均厚度约为 14 m,沿江大道下部的滑坡体厚度逐渐变薄,平均厚度为 7 m。

根据地质勘探资料,下土地岭滑坡为一顺层面的古滑坡,滑坡后部滑动面较陡,前部滑动面较缓,滑带土体厚 20.0 cm。在历史上发生整体滑动之后,经历了局部解体和分级活动,近期滑坡体上部出现裂缝、后缘影响区的建筑物有明显的变形,中部沿江大道外侧挡土墙出现拉裂变形和下沉现象等,说明了该滑坡的近期活动特征。滑坡在三峡水库蓄水及降雨等因素的作用下,滑坡稳定性大为降低,滑坡体出现即将失稳的征兆。边坡剖面图见图 1,边坡上荷载  $q$  为 100 kPa,坡体的材料参数详见表 1 ~ 3。

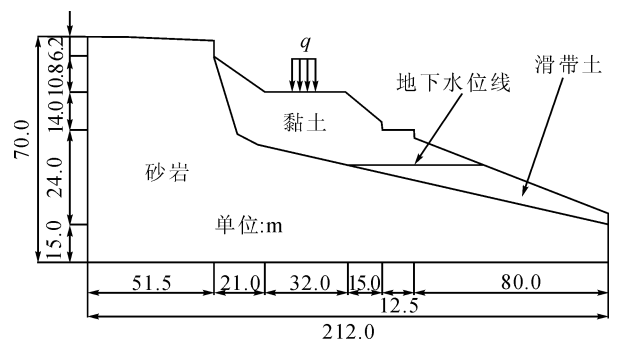


图 1 边坡示意图  
Fig. 1 Slope profile

表 1 边坡土体及砂岩的参数

Tab. 1 Parameters of slope soil and rock bed						
土层	$\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	$E$ /MPa	$\nu$	$\varphi'$ /(°)	$c'$ /kPa	$\varphi''$ /(°)
黏土(非饱和)	18.9	12	0.3	20.6	25	13.73
黏土(饱和)	18.9	2	0.3	20.6	25	20.6
砂岩	25.4	15 000	0.2	—	—	—

表 2 滑带土峰值强度参数

Tab. 2 Parameters of peak strength of sliding belt						
土层	$\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	$E$ /MPa	$\nu$	$\varphi'$ /(°)	$c'$ /kPa	$\varphi''$ /(°)
滑带土(非饱和)	18.5	10	0.3	18.9	17	12.6
滑带土(饱和)	10.3	10	0.35	14.9	9.9	14.9

表 3 滑带土残余强度参数

Tab. 3 Parameters of residual strength of sliding belt						
土层	$\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	$E$ /MPa	$\nu$	$\varphi'$ /(°)	$c'$ /kPa	$\varphi''$ /(°)
滑带土(非饱和)	18.5	10	0.3	14	10	9.33
滑带土(饱和)	10.3	10	0.35	12.5	9.2	12.5

2.2 计算分析及结果

为了探讨边坡失稳机理,在边坡有 100 kPa 局部外荷载条件下,针对整体滑动面,根据土体的峰值强度和残余强度各划分成 2 类工况,同时考虑到边坡基质吸力的影响,对每一类工况又根据不同的基质吸力情况划分为 4 种工况,具体计算工况详见表 4。在边坡自身重力和外荷载作用下,假定滑动面为整体滑动面,在考虑滑带土分别取峰值强度参数和残余强度参数条件下边坡在工况 1、工况 2 中的计算结果,如表 4 所示。

表 4 基于整体滑带的传递系数法各工况安全系数

Tab.4 The safety factors of transfer coefficient method based on overall sliding belt			
强度特性	工况	工况说明	传递系数法
峰值强度	工况 1-1	基质吸力 90 kPa	1.810
	工况 1-2	基质吸力 60 kPa	1.730
	工况 1-3	基质吸力 30 kPa	1.640
	工况 1-4	无基质吸力	1.560
残余强度	工况 2-1	基质吸力 90 kPa	1.340
	工况 2-2	基质吸力 60 kPa	1.280
	工况 2-3	基质吸力 30 kPa	1.210
	工况 2-4	无基质吸力	1.150

边坡在工况 1 中,经比较可知,随着基质吸力的降低,边坡的安全系数逐渐降低,但仍远大于 1.0。边坡在工况 2 中,随着基质吸力的降低,边坡的安全系数逐渐降低,基质吸力丧失后边坡的安全系数仍然大于 1.0,表明在考虑残余强度条件下边坡仍然是稳定的。

该滑坡是一个老滑坡,后期又有复活,滑动面抗剪强度应趋向于残余强度,所以采用残余强度的计算结果也更接近于实际。但基于整体滑带条件下采用传递系数法分析的结果并不能解释下土地岭边坡实际发生的滑动征兆。

3 边坡局部失稳机制分析与比较

经初步分析,本文认为对于具有滑带、坡体狭长不规则等特点的边坡,可能存在局部滑动先于沿滑带产生整体滑动的失稳情况。由于边坡坡体狭长,一方面,使得整个滑带产生的摩阻力较大,另一方面,边坡整体自重却并不太大,这两方面的原因可能使得边坡沿整个滑带滑动较为困难,从而使得该滑坡表现为局部失稳滑动的现象。

针对边坡可能存在的局部失稳现象,传递系数法作为条分法的一种,需要假定滑动面位置进行试算分析,因此在局部滑动面没有确定之前,传递系数

法并不能顺利地完 成局部失稳的分析问题,而强度折减有限元法可以通过对位移云图和位移增量等值线图的分析来确定边坡可能的潜在局部滑动面。

本文建立二维平面应变有限元分析模型,采用四边形四结点单元来划分有限元网格(图 2),单元数为 1 557,结点数为 1 651。边坡模型侧面均施加水平方向约束,边坡模型底部施加固定约束。根据上一节的分析结论,本节采用残余强度的参数指标来分析局部失稳机制。

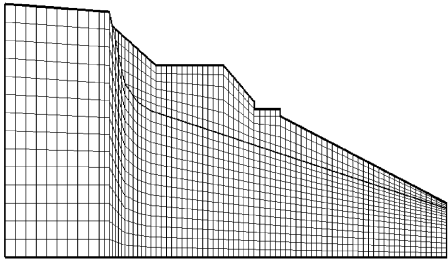


图 2 有限元网格  
Fig. 2 The finite element mesh

为了研究边坡局部失稳问题,首先应用强度折减有限元计算边坡的安全系数并确定相应的局部滑动面;然后,在此基础上再应用传递系数法进行边坡稳定性分析,通过二者对比分析下土地岭边坡的局部失稳机制和方法优缺点。具体计算工况 3 的计算条件,如表 5 所示。

表 5 局部滑动面的计算结果对比

Tab.5 Comparison of results in the local sliding surface			
工况	工况说明	强度折减法	传递系数法
工况 3-1	基质吸力 90 kPa	1.140	1.210
工况 3-2	基质吸力 60 kPa	1.080	1.150
工况 3-3	基质吸力 30 kPa	1.020	1.090
工况 3-4	基质吸力丧失	0.965	1.030

在边坡自身重力和外荷载作用下,将计算工况 3 中传递系数法与强度折减有限元法计算结果进行对比,如图 3 所示。

在可能的局部滑动分析中,对比传递系数法与强度折减有限元法两种计算的结果可知:1) 随着基质吸力的降低,两种方法计算的边坡安全系数相差并不大;2) 随着基质吸力的降低,边坡的安全系数逐渐降低,基质吸力丧失后边坡接近临界滑动状态,表明在考虑残余强度条件下边坡可能会产生局部滑动,证明了局部滑动面的存在;3) 该边坡局部滑动面在整体滑动面下部,下部局部滑动面先于整体滑带而产生滑动,可能会进一步诱发牵引式整体滑动。

因此,针对边坡局部失稳问题,传递系数法在假

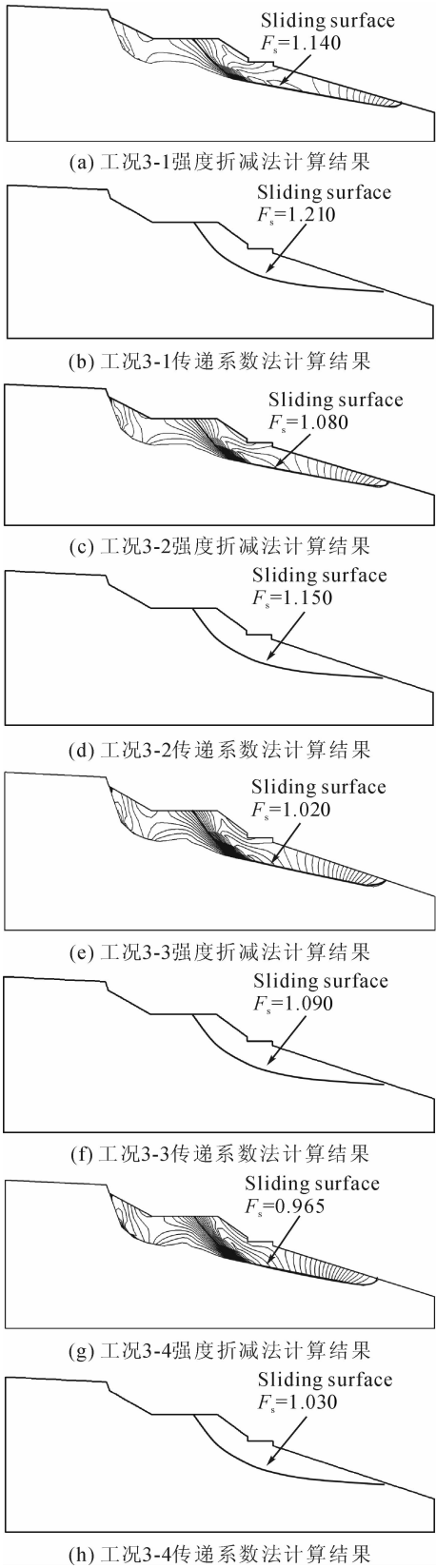


图 3 局部滑动面计算结果对比

Fig. 3 Comparison of results in the local sliding surface

定整个滑带滑动的基础上进行稳定性分析,可能并不能合理地判断边坡的失稳特征,但若确定了合理的局部滑动面后,则可以采用传递系数法进行相应

的稳定性分析。

4 结 论

本文利用传递系数法分析了三峡库区秭归下土地岭滑坡失稳特征,通过与强度折减有限元法的计算结果进行对比。取得研究结论如下:

1) 下土地岭边坡在整体滑动带上考虑基质吸力的存在时,都是趋于稳定的,但稳定性随着基质吸力的减小或丧失,边坡稳定安全系数  $F_s$  逐渐减小,边坡稳定性逐渐降低,但无论采用峰值强度还是采用残余强度进行计算,沿着整体滑带得出的安全系数仍大于 1.0,边坡并没有沿整体滑带产生滑动;

2) 采用传递系数法在假定整个滑带滑动的基础上进行稳定性计算不能分析局部失稳问题,而采用强度折减有限元计算可以确定出该滑坡具有一个局部滑动面;

3) 针对强度折减有限元法确定的局部滑动面,采用传递系数法的计算结果与强度折减有限元的计算结果取得了一致。因此,在确定了局部滑动面的条件下,对于下部先滑的局部滑动面可以用传递系数法进行稳定性评价。

参考文献:

[1] 刘钊,柴军瑞,陈兴周,等. 库水位骤降时坝体渗流场及坝坡稳定性分析[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 466-470.  
Liu Zhao, Chai Junrui, Chen Xingzhou, et al. An analysis of the seepage field and the stability of dam slope during rapid drawdown of reservoir water table[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 466-470.

[2] 石振峰,何钦象,田小红. 导流泄洪洞强度计算及边坡稳定分析[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(4): 454-458.  
Shi Zhenfeng, He Qinxiang, Tian Xiaohong. Strength calculation and slope stability analysis of diversion and spillway tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(4): 454-458.

[3] 郭璇,赵成刚,于威威. 非饱和土边坡稳定的安全分析及进展[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 14-18.  
Guo Xuan, Zhao Chenggang, Yu Weiwei. Stability analysis of unsaturated soil slope and its progress[J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(1): 14-18.

[4] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soil[J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177-197.

[5] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger A. Shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical

- Journal, 1978, 15: 313-321.
- [6] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Wiley, NewYork, 1993.
- [7] 蒋刚, 林鲁生, 刘祖德, 等. 考虑非饱和土强度的边坡稳定分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (增1): 1070-1074.
- Jiang Gang, Lin Lusheng, Liu Zude, et al. Analysis method for slope stability considering unsaturated soil strength and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (S1): 1070-1074.
- [8] 李荣建, 于玉贞, 李广信. 强度折减有限元法在非饱和土边坡稳定分析中的应用[J]. 水利水电技术, 2006, 37 (3): 42-45.
- Li Rongjian, YuYuzhen, Li Guangxin. Application of strength reduction FEM to analysis on stability of unsaturated soil slope[J]. Water Resources and Hydro power Engineering, 2006, 37(3): 42-45.
- [9] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and nonassociated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 691-689.
- [10] Ugai K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(2): 190-195.
- [11] Griffiths D V, Lane P A: slope stability analysis by finite element [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [12] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
- Song Erxiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 1-7.
- [13] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版, 2007: 240-243.
- [14] Li Rongjian, Yu Yuzhen, Deng Lijun, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope by 3-D strength reduction FEM [C]// Applied Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Engineering, ShangHai, 2006, 148: 62- 69.
- [15] 李荣建, 于玉贞, 邓丽军, 等. 非饱和土边坡稳定分析方法探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2060-2064.
- Li Rongjian, Yu Yuzhen, Deng Lijun, et al. Discussion on stability analysis of unsaturated soil slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2060-2064.
- [16] 李荣建, 郑文, 邵生俊, 等. 云阳龙洞抗滑桩加固边坡局部失稳机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31 (S2): 322-326.
- Li Rongjian, Zheng Wen, Shao Shengjun, et al. Analysis of local sliding mechanism of Longdong slope reinforced with stabilizing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 322-326.
- [17] 李荣建, 郑文, 邵生俊, 等. 非饱和土边坡稳定分析中强度折减法与条分法的比较[J]. 西北农林科技大学报: 自然科学版, 2010, 8(9): 207-214.
- Li Rongjian, Zheng Wen, Shao Shengjun, et al. Comparison analyses on stability of unsaturated soil slopes by strength reduction FEM and slice method [J]. Northwest Agriculture & Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 8(9): 207-214.
- [18] 李荣建, 郑文, 王莉平, 等. 非饱和土边坡稳定性分析方法研究进展[J]. 西北地震学报, 2011, 33 (S2): 322-326.
- Li Rongjian, Zheng Wen, Wang Liping, et al. Progress and developing trend on stability analyses of unsaturated soil slope [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S2): 322-326.
- [19] 王恭先. 滑坡防治 100 例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(责任编辑 杨小丽)