

文章编号: 1000-7598-(2001) 12-2624-05

基于影响因素分布模型的滑坡稳定性敏感分析

柴 波, 殷坤龙, 汪 洋, 李远耀

(中国地质大学 工程学院、武汉 430074)

摘 要: 提出了基于影响因素分布模型的滑坡稳定性敏感分析方法, 该法用于分析影响因素在整个定义域内对滑坡稳定性的敏感程度, 以滑坡影响因素为子序列, 以其稳定性系数为目标序列, 根据子序列的累积分布函数求影响因素区间概率函数, 与目标序列差值乘积加和得到敏感性综合决策值。以三峡库区奉节县太山庙滑坡为例, 经类比统计得到滑带土抗剪强度参数的分布函数, 通过经验分析得到地震水平加速度和库水位变化的分布函数, 应用该法计算得到影响因素中对滑坡稳定性最敏感的因素。以内摩擦角为例, 分析了影响因素方差与滑坡稳定性敏感分析结果的关系。

关 键 词: 滑坡; 分布函数; 敏感性分析; 方差

中图分类号: O 242

文献标识码: A

Sensitivity analysis of landslide stability based on distribution models of influencing factors

CHAI Bo, YIN Kun-long, WANG Yang, LI Yuan-yao

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074 China)

Abstract: The sensitivity analysis method of landslide stability based on models of influencing factors is conducted to analyze sensitivities of influencing factors in their definition domains. This method regards influencing factors as sub-sequences, the corresponding safety factors as target-sequences. The area probability functions of influencing factors, which are calculated by cumulative distribution functions of sub-sequences, product with difference values of target-sequences respectively; then, results that are produced by those two values are summed to get decision values of sensitivity. With this method, taking Taishanmiao landslide for example, which is located at Fengjie county in the Three-Gorges reservoir. Based on the distribution functions of shear strength factors by analogy and statistics and the ones of maximum horizontal acceleration of earthquake and water level fluctuations by empirical analysis, the most sensitive factor among all influencing factors is obtained. Finally, the relation between the sensitivity of landslide stability and variances of influencing factors is analyzed on basis of internal friction angle.

Key words: landslide; distribution function; sensitivity analysis; variance

1 影响因素分布模型

滑坡稳定性受多种内外因素的综合影响, 诸如滑坡的形态、滑坡岩土体的物理力学特性、地震力的作用、地下水和地表水的变化等。然而, 这些因素对滑坡的影响程度各异, 大小不一。在评价滑坡稳定性时, 可通过确定影响滑坡稳定的较敏感或最敏感的因素, 使滑坡防治和监测更有针对性, 使治理设计更安全、可靠和经济。

目前用于分析滑坡稳定性敏感因素的方法很多, 按考虑影响因素个数多少可分为单因素分析法

和多因素分析法。单因素分析法多采用绘制指标与影响因素变化的关系曲线来评价敏感性。用于滑坡敏感性分析的多因素分析法有正交设计法^[1]、灰色关联模型法^[2]以及人工神经网络分析法^[3], 这些方法认为影响因素的数值在所选范围内出现的概率相同, 而这一假设并不符合实际情况; 文献 4 通过对影响因素的模糊统计进行敏感性分析, 影响因素的变动概率依靠专家打分来确定, 具有很强的主观性。考虑到上述方法的局限性, 本文基于影响因素分布模型进行敏感性分析, 能更好地反映各因素在整个定义域内对滑坡稳定性的影响程度。

收稿日期: 2006-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40072084) 三峡工程地质灾害防治重点项目。

作者简介: 柴 波, 男, 1981 年生, 博士生, 主要研究方向为工程岩土体稳定及地质灾害分析、防治。E-mail: chai1998@126.com

敏感性分析中所选影响因素通常服从某一的分布函数，例如：抗剪强度参数通常服从正态分布或对数正态分布，而地震加速度通常服从极值分布。诸多文献^{[5]-[8]}通过概率统计、随机分析方法得出各影响因素的分布函数。因此，在进行敏感性分析时，有必要基于影响因素的分布模型，对整个定义域内影响因素对目标函数的影响程度进行分析。

2 基于分布函数的敏感性分析方法

(1) 设有 m 个影响因素，考虑它们在某范围内变动的概率。首先建立影响因素在某范围的子序列 A ，在已知各影响因素的分布函数的情况下，通过序列 A 得到影响因素的累积分布概率序列 A' 。选取各子序列 A 对应条件下滑坡稳定性系数作为目标函数序列 B 。计算稳定系数时，采用相应的计算方法（Bishop 法、Sarma 法、剩余推力法）进行计算：

影响因素序列 A ：

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： a_{ij} 为第 i 个影响因素的第 j 个取值（取值时应尽量使所选的 n 个值遍布影响因素的定义域）。

已知各影响因素的累积分布函数： $F_1(x)$, $F_2(x), \dots, F_m(x)$ ，令 $A'_1 = F_1(A_1)$ ，建立累积分布概率序列 A' ：

$$A' = \begin{bmatrix} A'_1 \\ A'_2 \\ \vdots \\ A'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \cdots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \cdots & a'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{m1} & a'_{m2} & \cdots & a'_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： a'_{ij} 为 i 个影响因素在 a_{ij} 点的累计分布概率。

对应影响因素序列 A 的目标序列 B ：

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： b_{ij} 为 a_{ij} 所对应的滑坡稳定性系数。

(2) 计算影响因素区间概率函数及目标函数差值

采用去尾的分布区间函数求解影响因素的区间概率函数值，每个影响因素的 n 个试验值将整个自变量函数域分为 $n+1$ 个区间，去除头尾区间，则剩下的区间为 $n-1$ 个，各区间的概率函数值的影响程度为：

$$\xi_{ij} = \left| \frac{a'_{ij+1} - a'_{ij}}{a'_{in} - a'_{i1}} \right| \quad (i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n-1) \quad (4)$$

对目标函数做差值，可以得到影响因素在各自区间稳定性变化的绝对值，定义差值如下：

$$\eta_{ij} = |b_{ij+1} - b_{ij}| \quad (i=1,2,\dots,m \quad j=1,2,\dots,n-1) \quad (5)$$

(3) 影响因素的综合决策

通过对影响因素的区间概率函数和目标函数的差值进行乘积并求和，可以得到目标函数在整个影响因素的定义域上的敏感性决策序列数 S 。

$$S_i = \sum_{j=1}^{n-1} \xi_{ij} \cdot \eta_{ij} \quad (6)$$

对敏感性决策数值进行从大到小排序，敏感性决策数值越大，说明该因子对滑坡稳定性的影响越大，即为敏感因子。

3 实例分析

太山庙滑坡位于奉节县鹤峰乡柳池村大溪河右岸，该滑坡属于三峡库区三期专业监测崩塌滑坡灾害点。滑坡无详细的勘察资料，仅在监测设计阶段做了地面调查。

滑坡主滑方向为 320° ，前、后缘高程分别为 140 m、247 m，滑体总变形规模约 $417.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑床基岩为巴东组第三段 (T_2b^3) 的泥灰岩，岩层产状为 $310^\circ \angle 25^\circ$ ，为顺向坡，图 1 是滑坡的工程地质剖面图。历史上滑坡区经过剧烈滑动，在改变了当时的地形地貌后形成了现今的老滑坡体地形。现场的调查踏勘发现，滑坡体现仍有滑移变形产生，每逢雨季在滑坡体的前缘有蠕动滑移。

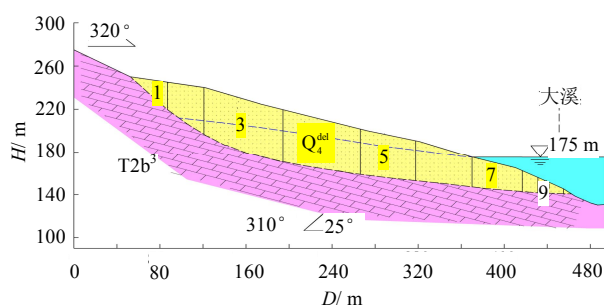


图 1 太山庙滑坡工程地质剖面图

Fig.1 The engineering geological profile of Taishanmiao landslide

由于缺乏勘察资料，对三峡库区二期崩塌滑坡治理工程和三期规前勘（调）察中的崩塌滑坡点的勘察试验资料进行分类统计，应用工程类比法得到计算中所需抗剪强度参数。经统计得到适合该滑坡

滑带土的抗剪强度参数分布函数如表 1, 统计直方图如图 2。

文献 9 指出, 地震时最大地面水平加速度 ($\tau_{\max}$) 是随机变量, 并符合极大值型分布, 则其累积分布函数和概率密度函数分别为:

$$F(\tau_{\max}) = \exp\left[-\left(\frac{\tau_{\max}}{\eta}\right)^2\right] \quad (7)$$

$$f(\tau_{\max}) = -\frac{2\tau_{\max}}{\eta^2} \exp\left[-\left(\frac{\tau_{\max}}{\eta}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中: η 为尺度参数, $\eta = 0.38\tau_0$ (m/s^2); τ_0 为最大地面水平加速度峰值, (m/s^2)。根据文献[10]可知, 地震时最大地面水平加速度峰值与设防烈度 I 的关系为:

表 1 T_2b^1 和 T_2b^3 地层滑带土的抗剪强度参数统计表

Table 1 The shear strength parameters statistics table of sliding zone of T_2b^1 and T_2b^3 strata

工况	参数指标	分布区间	样本个数	分布形式	分布函数
天然	c/kPa	(10.0, 43.1)	65	正态分布	$f(x) = \frac{1}{8.87\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-28.13)^2}{2 \cdot 78.76}\right)$
	$\varphi/(\circ)$	(6.0, 23.0)	92	正态分布	$f(x) = \frac{1}{3.76\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-16.67)^2}{2 \cdot 14.13}\right)$
饱和	c/kPa	(8.7, 31.4)	70	对数正态分布	$f(x) = \frac{1}{0.31x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - 2.84)^2}{2 \cdot 0.098}\right)$
	$\varphi/(\circ)$	(5.3, 19.8)	89	正态分布	$f(x) = \frac{1}{3.09\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-13.35)^2}{2 \cdot 9.57}\right)$

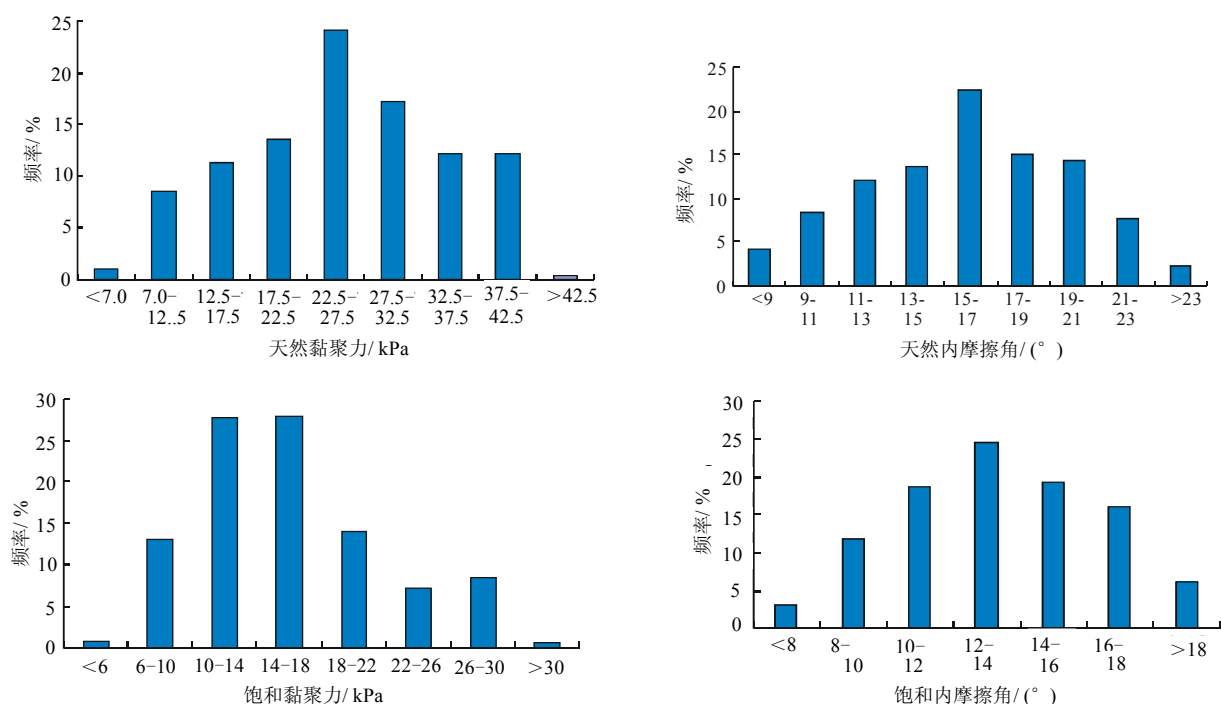


图 2 T_2b^1 和 T_2b^3 地层滑带土抗剪强度参数统计直方图

Fig.2 The statistic histograms of shear strength parameters of sliding zone of T_2b^1 and T_2b^3 strata

$$\lg 100\tau_0 = I \lg 2 - 0.01 \quad (9)$$

奉节县设防烈度为 VI 度, 则最大地面水平加速度峰值为 0.625 m/s^2 , 故尺度参数为 0.238 m/s^2 。最大地面水平加速度分布函数为:

$$f(\tau_{\max}) = -\frac{2\tau_{\max}}{0.056} \exp\left[-\left(\frac{\tau_{\max}}{0.238}\right)^2\right] \quad (10)$$

选择库水作用最不利的工况条件, 即 175m 降至 145 m 水位, 分析库水变动条件下滑坡稳定性的

变化。在库水下降过程中, 认为库水作用在区间 175~145 服从均匀分布。

首先确定一套基准参数, 水库水位 175 m, 天然凝聚力为 28.12~17.98 Kpa, 饱和黏聚力 $\varphi = 16.67^\circ / 13.35^\circ$ (天然 / 饱和), 地震水平动峰值加速度 $0.05 g$, 采用剩余推力法计算滑坡稳定性系数。

选取各参数的变化值作为子序列; 选取在某一参量变化时, 其他参数固定不变的条件下的滑坡稳定性系数值作为目标函数序列矩阵。参数取值及计

算结果见表 2~5。

表 2 C 值变化时稳定性系数计算结果及累积分布概率
Table 2 The results of safety factor with changing C and their cumulative distribution probabilities

C / kPa (饱和)	9	11	14	17	20	23	28
累积分布概率	0.0197	0.0778	0.2611	0.492	0.6915	0.8289	0.9406
稳定系数 K	0.77	0.782	0.801	0.82	0.839	0.858	0.89

表 3 φ 值变化时稳定性系数计算结果及累积分布概率
Table 3 The results of safety factor with changing φ and their cumulative distribution probabilities

$\varphi / (^{\circ})$ (饱和)	5	8	11	13	15	17	20
累积分布概率	0.0035	0.0418	0.2235	0.4562	0.7019	0.8810	0.9842
稳定系数 K	0.372	0.531	0.695	0.807	0.921	1.038	1.219

表 4 地震加速度变化时稳定性系数计算结果及累积分布概率

Table 4 The results of safety factor with changing acceleration of earthquake and their cumulative distribution probabilities

地震加速度 系数 / g	0	0.01	0.015	0.02	0.025	0.05	0.10
累积分布概率	1	0.8406	0.6766	0.4994	0.3379	0.0130	0.0000
稳定系数 K	0.984	0.948	0.931	0.915	0.899	0.826	0.709

表 5 库水位变化时稳定性系数计算结果及累积分布概率
Table 5 The results of safety factor with changing water level and their cumulative distribution probabilities

库水位 / m	145	150	155	160	165	170	175
累积分布概率	0	0.1667	0.3333	0.5000	0.6667	0.8333	1
稳定系数 K	0.941	0.917	0.897	0.857	0.837	0.831	0.826

则影响因素累积分布函数矩阵为:

$$A' = \begin{bmatrix} 0.0197 & 0.0778 & 0.2611 & 0.492 & 0.6915 & 0.8289 & 0.9406; \\ 0.0035 & 0.0418 & 0.2235 & 0.4562 & 0.7019 & 0.8810 & 0.9842; \\ 1 & 0.8406 & 0.6766 & 0.4994 & 0.3379 & 0.0130 & 0; \\ 0 & 0.1667 & 0.3333 & 0.5 & 0.6667 & 0.8333 & 1 \end{bmatrix}$$

稳定性目标函数矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} 0.770 & 0.782 & 0.801 & 0.820 & 0.839 & 0.858 & 0.890 \\ 0.372 & 0.531 & 0.695 & 0.807 & 0.921 & 1.038 & 1.219 \\ 0.984 & 0.948 & 0.931 & 0.915 & 0.899 & 0.826 & 0.709 \\ 0.941 & 0.917 & 0.897 & 0.857 & 0.837 & 0.831 & 0.826 \end{bmatrix}$$

计算影响因素区间概率函数并与目标函数 0 在相应的区间的差值进行乘积求和, 得到敏感性决策函数的序列:

$$S = [0.0201 \quad 0.1321 \quad 0.0392 \quad 0.0191]^T$$

应用上述敏感性分析, 得到影响因素在整个分布区间内对稳定性系数的影响程度, 其敏感性排序如下: 内摩擦角、地震加速度、黏聚力、库水位变化。

下面以内摩擦角为例, 分析当影响因素分布范围固定时, 改变分布函数的方差其敏感性决策函数值的变化情况, 图 3 表明内摩擦角方差变大时滑坡稳定性敏感分析的决策函数值有增大的趋势。

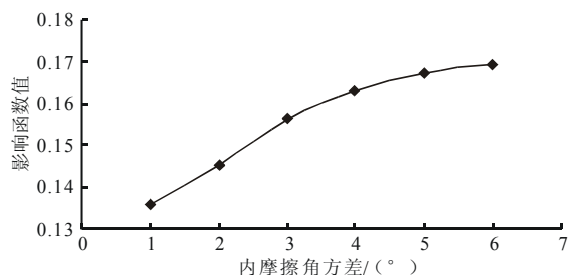


图 3 内摩擦角方差与敏感性决策值的关系曲线
Fig.3 The relation curve of sensitivity decision parameters and variance of internal friction angle

4 结 论

(1) 通过基于滑坡影响因素概率分布模型的滑坡稳定性敏感分析, 可以定量的评价影响因素在整个定义域内对滑坡稳定性的影响程度, 为定量的评价滑坡的主要影响因素和次要影响因素提供了依据。

(2) 在选择影响因素范围时, 为更好的反映定义域内影响因素对滑坡稳定性的影响程度, 应尽量使所选值的范围遍布整个定义域区间。

(3) 从太山庙滑坡的计算结果可知, 滑带土的内摩擦角和地震最大水平加速度是影响滑坡敏感性的主要因素; 随着影响因素方差的增加, 滑坡稳定性敏感分析的决策函数值有增大的趋势。

参 考 文 献

- [1] 倪恒, 刘佑荣, 龙治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 989—992.
NI Heng, LIU You-rong, LONG Zhi-guo. Applications of orthogonal design to sensitivity analysis of landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 989—992.
- [2] 汪洋, 殷坤龙, 安关峰. 滑坡敏感因子的灰色关联分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 91—93.
WANG Yang, YIN Kon-long, AN Guan-feng. Grey correlation analysis of sensitive factors of landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 91—93.

- [3] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 703—2 707.
- XIA Yuan-you, XIONG Hai-feng. Sensibility Analysis of slope stability based on artificial neural network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2 703—2 707.
- [4] 杨和雄, 王良元. 敏感性分析及其模糊方法[J]. 南京邮电学院学报, 1998, 18(1): 99—108.
- YANG He-xiong, WANG Liang-Yuan. Sensitivity analysis and its fuzzy method[J]. **Journal of Nanjing Institute of Posts and Telecommunications**, 1998, 18(1): 99—108.
- [5] 徐建平, 胡厚田, 张安松, 等. 边坡岩体物理力学参数的统计特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 382—386.
- XU Jian-ping, HU Hou-tian, Zhang An-song, et al. On statistical characteristics of physical and mechanical parameters in slope rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(4): 382—386.
- [6] 周春梅, 殷坤龙, 罗冲. 锚拉桩应用于水库库岸滑坡治理的关键问题探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 450—460.
- ZHOU Chun-mei, YIN Kun-long, LUO Chong. A study on some key questions of cable-anchored piles of landslides in reservoir shore lines [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 450—460.
- [7] 张社荣, 贾世军, 郭怀志. 岩石边坡稳定的可靠度分析[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 57—66.
- ZHANG She-rong, JIA Shi-jun, GUO Huai-zhi. The susceptibility analysis of reliability for the probability distribution types of parameters in strength criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 57—66.
- [8] 罗冲, 殷坤龙, 陈丽霞, 等. 万州区滑坡滑带土抗剪强度参数概率分布拟合及其优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 588—1 593.
- LUO Chong, YIN Kun-long, CHEN Li-xia, et al. Probability distribution fitting and optimization of shear strength parameters in sliding zone along horizontal-stratum landslides in Wanzhou city[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(9): 1 588—1 593.
- [9] 蔡克霞, 张莉娟. 地震时最大地面水平加速度分布参数的确定方法[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(1): 73—75.
- CAI Ke-xia, ZHANG Li-juan. A approach to determine distribution parameters of maximum horizontal acceleration of ground surface during earthquakes[J]. **Journal of Lanzhou University of Technology**, 2004, 30(1): 73—75.
- [10] 国家地震局震害防御司. 地震工作手册[M]. 北京: 地震出版社, 1999, 392—400.

上接第 2623 页

- 2005, 22(4): 15—19.
- [4] 郑宏. 岩土力学中的几类非线性问题 [博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.
- [5] Belytschko Ted, Liu Wing Kam, Moran Brian. Nonlinear Finite Element for Continua and Structures[M]. 庄茁译, 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] Yin J H, Wang Y J, A P S Selvadurai. Influence of nonassociativity on the bearing capacity of a strip footing [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2001, 127(11): 985—989.
- [8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996, 347—351.