

考虑坡顶超载情况下的边坡剪胀效应分析

蒋青青¹, 陈占锋¹, 赖伟明², 林杭¹

1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075)

摘要: 为了研究剪胀角 ψ 对边坡稳定性的影响, 利用 FLAC^{3D} 软件建立均质边坡模型, 分析不同工况下 ψ 与安全系数 F 和滑动面之间的关系。研究表明: 无坡顶超载 p 时, 随着 ψ 的增大, F 表现出先增大后减小的二次抛物线样式, 滑动面上缘与坡顶的距离越来越小; 随着内摩擦角 ϕ 的增大, 由关联与非关联流动法则得到的安全系数的差值 ΔF_{ψ}^{c-n} 同样符合二次抛物线规律; 有坡顶超载 p 时, 随着 p 的增大, 由非关联流动法则得到的 F 逐渐减小; 内摩擦角 ϕ 增大引起 ψ 对 F 的影响不断滞后; p 越大, 滑动面越陡, 上缘越靠近坡顶。

关键词: 边坡; 超载; 强度折减; 剪胀角; 稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)02-0498-06

Dilation effect of slope under over-loading on top of its surface

JIANG Qing-qing¹, CHEN Zhan-feng¹, LAI Wei-ming², LIN Hang¹

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In order to study the effect of dilation angle ψ to the stability of slope, a numerical model was founded in plane strain mode by FLAC^{3D} software for homogeneous soil slope. The safety factor and slip plane were obtained for different dilation angles, and the relationships among dilation angle, safety factor and slip plane were analyzed in different situations. The results show that in the situation with over-load p on the upper surface of slope, with the increase of dilation angle, relationship between safety factor and dilation angle presents the discipline like parabola curve, first increases and then decreases, and the distance between upper vertex and top of slope becomes smaller; difference ΔF_{ψ}^{c-n} between the safety factor of associated flow and non-associated flow presents the discipline like parabola curve with the increase of friction angle. In the situation with over-load p on the upper surface of slope, with the increase of p , F from non-associated flow reduces gradually, and the effect of dilation angle on the safety factor is lagged with the increase of friction angle ϕ . Slip plane becomes steeper with the upper vertex coming closer to the top of slope.

Key words: slope; over-loading; strength reduction; dilation angle; stability

对边坡的稳定性进行分析时, 最常用的极限平衡法完全不考虑岩土材料的流动法则, 无法反映其剪胀性^[1]。以滑移线法和极限分析法为基础的经典稳定性计算程序将岩土体当作相关联的材料, 即假定剪胀角 ψ 等于内摩擦角 ϕ , 但是, 大量试验结果表明, 在一

般情况下, 岩土材料实际表现出来的剪胀角低于内摩擦角^[2]。为了真实反映岩土体的剪胀特征, 需寻找其他方法进行分析。近年来, 随着计算机技术的不断发展, 采用数值计算方法进行相应研究^[3-5], 借助计算机数值计算的强大功能, 模拟各种复杂岩土材料的特性,

收稿日期: 2008-08-22; 修回日期: 2008-11-02

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490270)

通信作者: 蒋青青(1956-), 女, 湖南邵阳人, 副教授, 硕士生导师, 从事结构、岩土力学研究; 电话: 0731-8879612; E-mail: jqj1956@yahoo.cn

如: 张培文等^[3]修正了剪胀性的传统处理方法, 认为安全系数随剪胀角的增大而增大, 在考虑剪胀性时, 采用不同屈服准则对边坡安全系数的影响较显著; 吴春秋^[4]认为边界荷载将加大土体剪胀效应, 讨论了关联和非关联流动法则下边坡的稳定性; 张鲁渝等^[5]基于有限元分析, 推导了平面应变条件下的 Drucker-Prager 屈服准则, 使其能够考虑剪胀角的影响。以上这些研究主要是针对边坡安全系数进行分析, 而对相应滑动面的变化情况、剪胀角与粘结力和内摩擦角之间的交互作用研究得较少, 在此, 本文作者利用 FLAC^{3D} 强度折减法, 对比分析无坡顶超载和有坡顶超载情况下边坡的剪胀效应, 以便为进一步了解岩土材料特性提供参考。

1 计算模型与方法

1.1 计算模型

选取文献[6-7]中的均质边坡作为分析对象。该边坡高 20 m, 坡角为 45°。按照平面应变建立计算模型, 模型共 816 个单元, 1 176 个节点, 如图 1 所示。整个模型分 3 部分: 第 I 部分的水平、竖直方向网格为 12×8, 第 II 部分水平、竖直方向网格为 40×8, 第 III 部分水平、竖直方向网格为 40×10。岩土体参数为: 重度 $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$, 弹性模量 $E=10 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu=0.3$, 粘结力 $c=42 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi=17^\circ$, 抗拉强度 $\sigma_t=10 \text{ kPa}$ 。边界条件为: 下部固定, 左右两侧水平约束, 上部为自由边界。采用同时考虑拉伸和剪切破坏的 Mohr-Coulomb 准则, 初始应力场按自重应力场考虑; 计算收敛准则为不平衡比率(节点平均内力与最大不平衡力的比)^[8]满足 10^{-5} 的求解要求, 计算时步上限为 30 000 步, 采用强度折减法^[9-15]计算整体安全系数, 以计算是否收敛作为边坡是否失稳的判据。

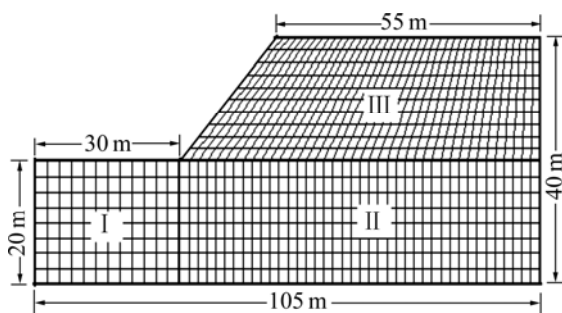


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

1.2 滑动面确定方法

当边坡达到临界失稳状态时, 必然是一部分土体相对于另一部分土体发生无限制滑移^[12], 于是, 系统被明显地分为 2 部分: 滑体和稳定体。在滑移面附近, 等值线最密集, 且越靠近临空面, 位移越大, 说明该处发生滑动; 而滑体以外的稳定体上, 位移均相同, 且无其他等值线分布, 从而表征该部分相对于滑体部分处于稳定状态。因此, 可将这 2 部分之间的分界线定义为滑动面。本文利用自编 FISH 程序量化滑动面位置。

2 分析与讨论

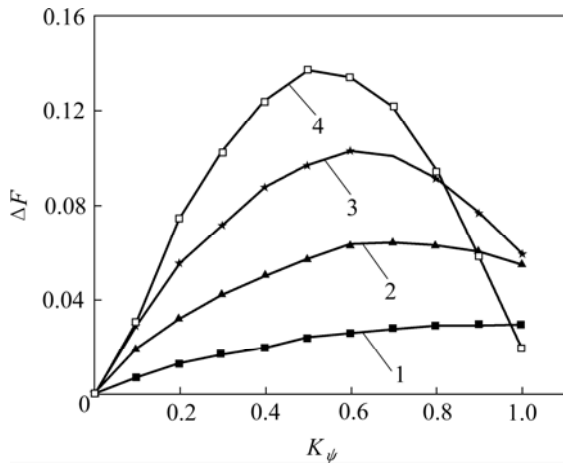
2.1 无坡顶超载情况下剪胀角的影响

为了研究无坡顶超载时, 剪胀角对不同边坡的安全系数和滑动面的影响(粘结力和内摩擦角对边坡的稳定性影响最大, 通过改变这 2 个参数来表征不同的边坡, 但本文试算得到粘结力与 ψ 之间的交互作用不大, 因此, 主要改变内摩擦角, 以反映 ϕ 和 ψ 之间的交互作用), 首先计算 ϕ 为 17° , 27° , 37° 和 47° 时, 对应非关联流动法则($\psi=0$)边坡的安全系数分别为: 1.098 5, 1.403 9, 1.745 2, 2.181 8。根据式(1), 讨论边坡的剪胀效应。

$$\psi^i = K_\psi \psi^{i-1}. \quad (1)$$

其中: K_ψ 为剪胀角的变化因子, 其值位于区间[0, 1], 变化梯度为 0.1; ψ^i 和 ψ^{i-1} 分别为第 i 步变化对应的剪胀角和第 $i-1$ 步变化对应的剪胀角。

K_ψ 与 ΔF (不同 ψ 对应的安全系数与 $\psi=0$ 时的安全系数之差)之间的关系如图 2 所示。可以看出, 剪胀角对安全系数的影响并不呈递增趋势, 而是表现出先增大后减小的抛物线样式; 随着内摩擦角 ϕ 的增大, 抛物线曲率不断增大, 说明剪胀角对安全系数的影响范围扩大, 而曲线顶点对应的横坐标位置(剪胀角)逐渐减小, 分别为 23.5° , 22.2° , 18.9° 和 17.0° 。可见, 当内摩擦角 ϕ 较小时, 剪胀角对安全系数的影响才呈现递增的规律。另外, 对应各个内摩擦角 ϕ , 关联流动法则($\psi=\phi$)得到的安全系数 F_ψ^c 与非关联流动法则($\psi=0$)得到的安全系数 F_ψ^u 之差 ΔF_ψ^{c-n} 分别为 0.028 6, 0.055 0, 0.059 4 和 0.019 7, $\Delta F_\psi^{c-n} / F_\psi^u$ 分别为 2.604%, 3.918%, 3.404% 和 0.903%, 呈现先增大后减小的规律。



内摩擦角/(°): 1—17.0; 2—27.0; 3—37.0; 4—47.0

图 2 内摩擦角不同时 K_ψ 与 ΔF 的关系

Fig.2 Relationship between K_ψ and ΔF under different ϕ

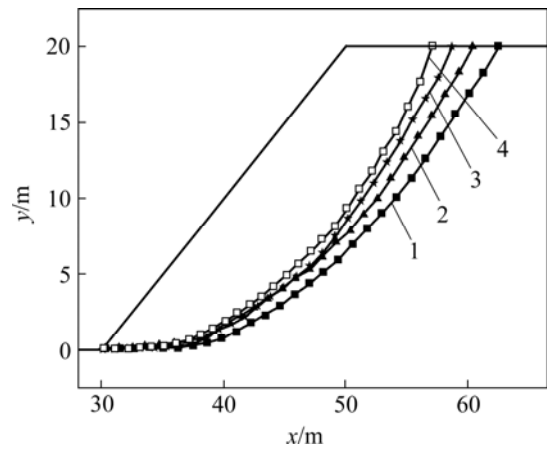
为了进一步研究 ΔF_ψ^{c-n} 的变化规律, 将内摩擦角 ϕ 在区间 $[17^\circ, 45^\circ]$ 内变化, 得到 2 种法则对应的安全系数以及 ΔF_ψ^{c-n} , 如表 1 所示。可以看出, 当 $\phi=35^\circ$ 时, ΔF_ψ^{c-n} 达到最大值, 为 0.062 2。

表 1 F_ψ^c 和 F_ψ^u 的变化规律

Table 1 Discipline of F_ψ^c and F_ψ^u

$\phi/(^\circ)$	F_ψ^u	F_ψ^c	ΔF_ψ^{c-n}	$\Delta F_\psi^{c-n} / F_\psi^u / \%$
17	1.098 5	1.127 1	0.028 6	2.604
19	1.157 8	1.193 7	0.035 9	3.101
21	1.219 4	1.259 6	0.040 2	3.297
23	1.280 2	1.325 6	0.045 4	3.546
25	1.341 7	1.392 2	0.050 5	3.764
27	1.403 9	1.458 9	0.055 0	3.918
29	1.469 1	1.524 8	0.055 7	3.791
31	1.536 5	1.594 4	0.057 9	3.768
33	1.603 1	1.663 2	0.060 1	3.749
35	1.671 3	1.733 5	0.062 2	3.722
37	1.745 2	1.804 6	0.059 4	3.404
39	1.825 8	1.880 0	0.054 2	2.969
41	1.910 8	1.951 8	0.041 0	2.146
43	1.995 7	2.028 0	0.032 3	1.618
45	2.083 6	2.110 7	0.027 1	1.301

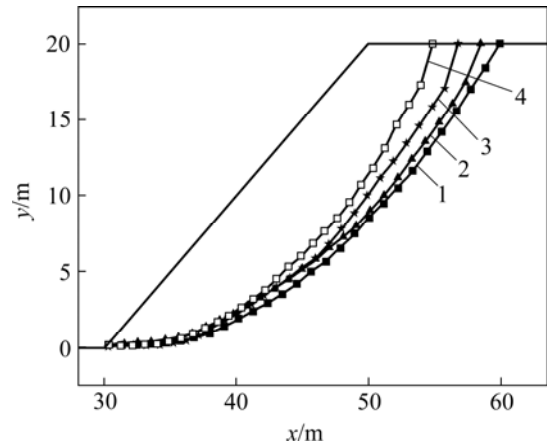
图 3~5 所示为在不同内摩擦角下, 剪胀角对滑动面的影响。可以看出, 随着剪胀角的增大, 滑动面上缘与边坡顶点的距离越来越小; 当 ϕ 较小时, 不同 ψ



剪胀角/(°): 1—2.7; 2—10.8; 3—18.9; 4—27.0

图 3 内摩擦角为 27° 时剪胀角对滑动面的影响

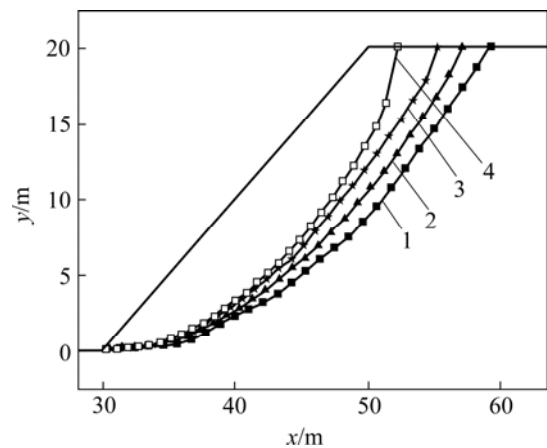
Fig.3 Effect of ψ on slip plane under friction angle of 27°



剪胀角/(°): 1—3.7; 2—14.8; 3—25.9; 4—37.0

图 4 内摩擦角为 37° 时剪胀角对滑动面的影响

Fig.4 Effect of ψ on slip plane under friction angle of 37°



剪胀角/(°): 1—4.7; 2—18.8; 3—32.9; 4—47.0

图 5 内摩擦角为 47° 时剪胀角对滑动面的影响

Fig.5 Effect of ψ on slip plane under friction angle of 47°

对应的滑动面之间的差别不大; 随着 ϕ 增大, 它们之间的差别逐渐增大。如图 5 所示, 尽管此时 $K_\psi=1.0$ 和 $K_\psi=0.1$ 对应的安全系数差别较小, 但其滑动面位置明显不同。另外, 安全系数虽然随着 K_ψ 的变化呈现先增大后减小的规律, 但滑动面位置并无此起伏规律, 其形状随 K_ψ 的增大变得越来越陡。

2.2 有坡顶超载情况下剪胀角的影响

在坡顶 10 m 之内, 分别布置 2, 20 和 200 kPa 的坡顶超载。首先计算不同内摩擦角和超载, 且 $\psi=0$ 时的安全系数如表 2 所示。

表 2 $\psi=0$ 时不同内摩擦角和超载对应的安全系数

Table 2 Safety factor of slope when $\psi=0$

$\phi/(^\circ)$	p/kPa			
	0	2	20	200
17	1.105 2	1.093 3	1.051 3	0.758 3
27	1.423 0	1.398 9	1.345 2	1.011 2
37	1.774 5	1.739 7	1.689 0	1.309 1
47	2.181 8	2.182 3	2.114 6	1.664 7

然后, 改变 K_ψ , 得到当内摩擦角一定时不同超载情况下 ΔF 与 K_ψ 的变化趋势, 如图 6~9 所示。可以看出, 当 K_ψ 达到一定值时, 各曲线均达到峰值。为了便于对比分析, 记录不同情况下的最大 ΔF 及其对应的 K_ψ , 如表 3 所示。最后, 绘制 $\phi=17^\circ$ 时在不同 p 作用下边坡的滑动面, 如图 10 所示。从图 6~9 及表 2~3 可知, 随着坡顶超载的增大, 由非关联法则得到的安全系数逐渐减小, 其中, $p=2\sim 20$ kPa 时引起的安全系数变化较小; $p=200$ kPa 时, 安全系数发生较大变化(见表 2)。 $\phi=17^\circ$ 时, 最大 ΔF 随 p 的增加而逐渐减小(见图 6), 说明剪胀角对安全系数的影响程度逐渐减小; 当 $\phi=27^\circ$ 时, 剪胀角对安全系数的影响程度呈现先增大后减小的趋势(见图 7), 最大值发生在 $p=20$ kPa 处; 当 $\phi=37^\circ$ 时, 剪胀角对安全系数的影响程度先增大后减小(见图 8), 最大值发生在 $p=2$ kPa 处; 当 $\phi=47^\circ$ 时, 剪胀角对安全系数的影响程度不断减小(见图 9)。从而可以判断, 内摩擦角增大引起的最大 ΔF 随 p 的增大呈现先增大后减小的规律(见表 3)。 K_ψ 随 p 增大而逐渐增大的现象说明剪胀角变化引起最大安全系数的效应不断滞后(对于 $\phi=17^\circ\sim 47^\circ$ 的情况, 均出现此规律)。

图 10 所示为内摩擦角为 17° 时坡顶超载对滑动面的影响(由于剪胀角对边坡滑动面的影响与无超载情况下的变化规律相同, 故未将其列出)。从图 10 可以

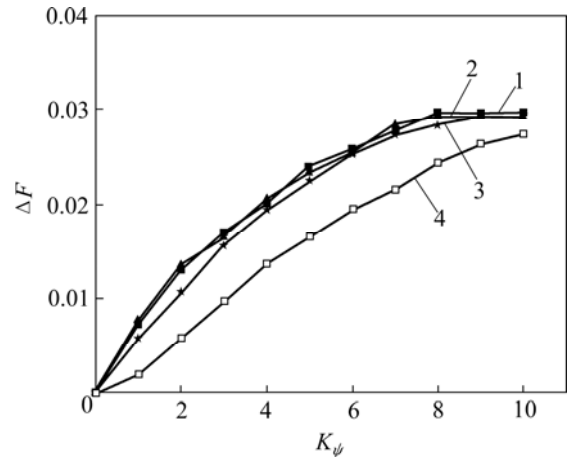


图 6 内摩擦角为 17° 且坡顶超载不同时 K_ψ 与 ΔF 的关系
Fig.6 Relationship between K_ψ and ΔF under friction angle of 17° with different p

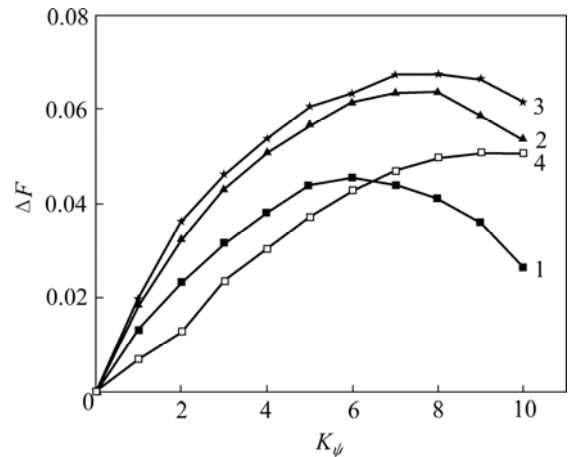


图 7 内摩擦角为 27° 且坡顶超载不同时 K_ψ 与 ΔF 的关系
Fig.7 Relationship between K_ψ and ΔF under friction angle of 27° with different p

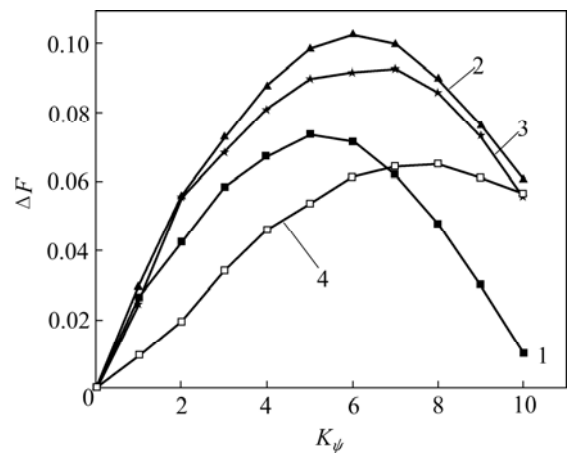
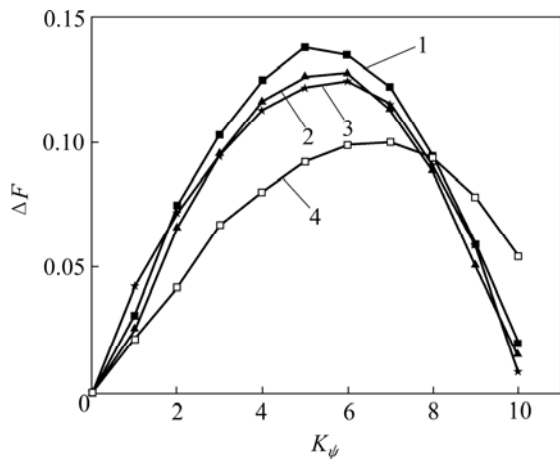


图 8 内摩擦角为 37° 且坡顶超载不同时 K_ψ 与 ΔF 的关系
Fig.8 Relationship between K_ψ and ΔF under friction angle of 37° with different p



坡顶超载/kPa: 1—0; 2—2; 3—20; 4—200

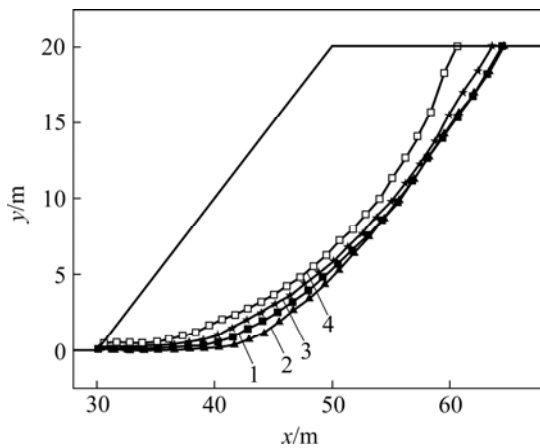
图 9 内摩擦角为 47° 且坡顶超载不同时 K_ψ 与 ΔF 的关系
Fig.9 Relationship between K_ψ and ΔF under friction angle of 47° with different p

表 3 不同情况下最大 ΔF 及其对应的 K_ψ

Table 3 Maximum of ΔF and corresponding K_ψ

$\phi / (^\circ)$	p / kPa			
	0	2	20	200
17	0.029 6 (0.8)	0.029 3 (0.8)	0.029 3 (0.9)	0.027 3 (1.0)
27	0.045 4 (0.6)	0.063 5 (0.7)	0.067 4 (0.7)	0.050 8 (0.9)
37	0.071 8 (0.6)	0.099 7 (0.7)	0.092 7 (0.7)	0.065 4 (0.8)
47	0.137 7 (0.5)	0.127 6 (0.6)	0.124 5 (0.6)	0.100 1 (0.7)

注：表格中数值表示 ΔF ，括号中数值表示其对应的 K_ψ



坡顶超载/kPa: 1—0; 2—2; 3—20; 4—200

图 10 内摩擦角为 17° 且坡顶超载不同对滑动面的影响
Fig.10 Effect of p on slip plane under friction angle of 17°

看出，坡顶超载越大，边坡滑动面越陡，并且滑动面上缘越靠近坡顶。当 p 为 0, 2 和 20 kPa 时，滑动面比较接近，只在滑动面下部存在一些不同；而当 $p=200$ kPa 时，滑动面与其他超载情况下有明显不同，其位于另外 3 种超载形式滑动面的内部，滑动体的体积最小，滑动面的安全系数也最小。

3 结 论

a. 在无坡顶超载时，剪胀角对安全系数的影响并不随剪胀角的增加而增大，而是呈现出先增大再减小的抛物线样式；随着内摩擦角的增大，抛物线的曲率逐渐增大。增加内摩擦角，关联流动和非关联流动的安全系数之差也呈现先增大后减小的规律。

b. 坡顶超载时，随着坡顶超载 p 的增大，由非关联法则计算得到的安全系数逐渐减小，内摩擦角增大引起的最大 ΔF 随 p 的增大呈现先增大后减小的规律，剪胀角对安全系数的影响不断滞后；随着坡顶超载越大，边坡滑动面越陡，滑动面上缘越靠近坡顶。

参考文献:

[1] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
CHEN Zu-yu. Analysis of soil slope stability[M]. Beijing: Chinese Water Conservation and Electricity Press, 2003.

[2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
HUANG Wen-xi. Engineering characteristic of soil[M]. Beijing: Water Resources and Power Press, 1983.

[3] 张培文, 陈祖煜. 剪胀角对求解边坡稳定的安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1457-1460.
ZHANG Pei-wen, CHEN Zu-yu. Finite element method for solving safety factor of slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1457-1460.

[4] 吴春秋. 非线性有限单元法在土体稳定分析中的理论及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学土木建筑工程学院, 2004.
WU Chun-qiu. Theory and application study on the non-linear FEM for soil stability analysis[D]. Wuhan: School of Architecture and Civil Engineering, Wuhan University, 2004.

[5] 张鲁渝, 刘东升, 时卫民. 扩展广义 Drucker-Prager 屈服准则在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 216-219.
ZHANG Lu-yu, LIU Dong-sheng, SHI Wei-min. Application of the extended general Drucker-Prager yield criterion to slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2003, 25(2): 216-219.
- [6] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21-27.
ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Shui Li Xue Bao, 2003(1): 21-27.
- [7] LIN Hang, CAO Ping, GONG Feng-qiang, et al. The directly searching method for slip plane and its influential factors based on the critical state of slope[J]. Journal of Central South University, 2009, 16(1): 131-135.
- [8] Itasca Consulting Group. Theory and background[Z]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.
- [9] 林 杭, 曹 平, 赵延林, 等. 强度折减法在 Hoek-Brown 准则中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1219-1224.
LIN Hang, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. The application of strength reduction method in Hoek-Brown criterion[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(6): 1219-1224.
- [10] 郑 宏, 李春光, 李焯芬, 等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626-628.
ZHENG Hong, LI Chun-guang, Lee C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 626-628.
- [11] 迟世春, 关立军. 基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 42-46.
CHI Shi-chun, GUAN Li-jun. Slope stability analysis by lagrangian difference method based on shear strength reduction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 42-46.
- [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 Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 1-7.
- [13] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 92-104.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 92-104.
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 邓卫东. 用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 254-260.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, DENG Wei-dong. Stability analysis on jointed rock slope by strength reduction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 254-260.
- [15] 彭文祥, 赵明华, 袁海平, 等. 基于拉格朗日差分法的全长注浆锚杆支护参数优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(5): 1002-1007.
PENG Wen-xiang, ZHAO Ming-hua, YUAN Hai-ping, et al. Parameters analysis of grouted bolts by Lagrangian difference method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(5): 1002-1007.