

基于强度折减法的转角边坡三维稳定性分析

薛 韬¹, 郭 炜¹, 管维亚¹, 黎 冰²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210008; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 采用有限元软件 ABAQUS 建立三维土质边坡模型, 基于强度折减法研究了边坡稳定性与坡转角的关系, 以及坡转角对边坡稳定性与坡高、坡角和边坡长度关系的影响。结果表明, 边坡安全系数随着坡转角的增大会逐渐降低; 坡转角对边坡安全系数与坡高、坡角关系的影响较小, 但对于边坡安全系数与边坡长度关系的影响较大, 且当坡角较大时, 坡转角对安全系数与边坡长度的关系的影响就较小; 当坡角较小时, 坡转角对安全系数与边坡长度的关系的影响就较大。

关键词: 边坡; 安全系数; 三维模型; 强度折减法; 坡转角

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0154-05

Three Dimensional Stability Analysis of Slopes with Rotation Angles Based on Strength Reduction Method

XUE Tao¹, GUO Wei¹, GUAN Weiya¹, LI Bing²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210008, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: In this paper, the finite element software is used to establish three-dimensional soil slope models. The strength reduction method is used to analyze the relationship between the slope safety factor and the slope rotation angles. The influence of the slope rotation angles on the slope safety factors and the relationship between slope heights, slope angles and slope lengths are investigated. The results show that the slope safety factor gradually decrease with the increase of the rotation angles; the slope rotation angles have little effects on the relationship between slope safety factors and slope heights and slope angles, but the slope rotation angles have an obvious effect on the relationship between the slope safety factors and the slope lengths. When the slope angle is large, the slope rotation angles have little effects on the relationship between the safety factors and slope lengths. When the slope angles are small, the slope rotation angles have an obvious influence on the relationship between the safety factors and slope lengths.

Keywords: slope; safety factor; three-dimensional model; strength reduction method; slope rotation angles

我国幅员辽阔, 其中山地、丘陵和高原的总面积占全国陆地面积的 69%。在山区等地形复杂地区, 由于地质条件较差, 容易发生滑坡和边坡垮塌等灾害。因此, 关于边坡稳定性的研究受到了国内学者广泛的重视。

关于边坡稳定性的研究大致可分为理论推导和数值模拟两类。理论推导方面, 主要是针对临界滑动面应力分析的极限平衡法及其衍生方法的运用, 郑宏^[1]和朱大勇等^[2]在这一方面做了许多研究。数

值模拟方面, 大多数研究^[3-4]主要是讨论强度折减法在各类工程实践中的应用, 李永亮等^[5]和李红等^[6]还针对使用强度折减法时的边坡失稳判据做了相应研究, 还有部分学者将强度折减法进一步拓展, 提出了动态强度折减法^[7-8]以及具有双折减系数^[9]的强度折减法等新方法。在设计数值模型时需要考虑许多影响边坡稳定性的因素, Ryma 等^[10]利用 PLAXIS 2D 研究了几何形状、组成材料、水位和荷载对水边土坝边坡稳定性的影响, 认为不同条件下的

边坡安全系数随水位升高而降低。关于土体本构模型的选择, Lim 等^[11]认为一般土质边坡可以采用 Mohr-Coulomb 准则。在数值模拟的准确性方面,也有部分学者做了一定工作。Wang 等^[12]将随机场应用到地层模拟中,提出了带有不确定地层的边坡稳定性分析方法。Xu 等^[13]认为边坡土体不是干燥或饱和的,继而提出了非饱和土中的边坡的稳定性研究方法。

由于地形限制,自然界中常有带转角的边坡。2018 年 5 月 29 日,镇江句容宝华就发生了一起滑坡位置位于坡转角处的滑坡事故(见图 1)。坡转角的存在对于土坡稳定性而言是不是一个薄弱处,值得深入研究。目前关于带转角的土坡的研究成果较少。田双珠等^[14]研究了天津港多个突堤转角区域异常的码头结构变形和横向错位。王凯等^[15]通过数值模拟研究了某大型露天矿转角边坡,并改变其坡角,计算出不同坡角下的边坡安全系数。文献[14-15]都只研究了某一特定坡转角下土坡的稳定性,未考虑坡转角的变化对土坡稳定性的影响。



图 1 句容宝华滑坡破坏位置

本文针对现有关于带转角土质边坡稳定性研究的不足,通过 ABAQUS 软件建立三维有限元模型来研究坡转角对边坡稳定性的影响,以及坡转角对边坡稳定性与坡高、坡角以及边坡长度关系的影响。

1 数值模拟方案

1.1 数值模拟方案

采用 ABAQUS 软件建立三维模型进行边坡稳定性分析,模型主体如图 2 所示。边坡土体设为黏性土,假定地基土为黏土,土体密度 $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$,弹性模量 $E = 25 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.35$,黏聚力 $c = 20 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 。土体采用 Mohr - Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型,约束模型侧面的法向位移和模型底面的法向及切向位移。本文采用强度折减法进行有限元计算,其原理是用一个折减系数 F_s ,并按公式(1)分别对黏聚力 c 和内摩擦角 φ 进

行折减,则边坡的抗剪强度会逐渐降低,直到边坡发生失稳,此时的折减系数,即为土坡的安全系数。

$$c_F = c/F_s$$
$$\varphi_F = \tan^{-1}(\tan\varphi/F_s)$$

(1)

ABAQUS 中通常在定义内摩擦角和黏聚力时设置一个场变量用来折减上述抗剪强度指标,初始场变量为 1,按 0.25 的梯度均匀增加到 4。

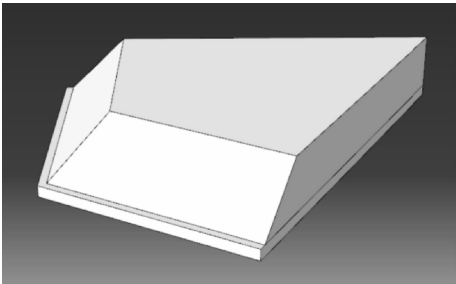


图 2 素土边坡模型

1.2 模拟工况设置

本文所采用的模型为类棱台形状,设置的变量包括坡转角、坡高、坡角和边坡长度。坡转角分别为 60° 、 90° 、 120° 和 150° ,坡高分别为 5 m 和 15 m,坡角分别为 30° 、 45° 和 60° ,边坡长度分别为 10 m、20 m、50 m 和 100 m。将这四个因素进行组合,则共有 $4 \times 2 \times 3 \times 4 = 96$ 种工况。

2 结果与分析

2.1 坡转角对三维边坡稳定性的影响分析

分析所有工况下边坡的破坏位移云图可以发现,破坏位置分为两种,一是在坡转角处,二是在坡边上。这里以坡高 5 m、坡角 30° 和边坡长度 100 m 的工况为例进行详细说明。将该系列工况的安全系数与坡转角的关系绘制成曲线,如图 3 所示,可以发现随着坡转角的增大,边坡的安全系数逐渐降低,稳定性逐渐变差。

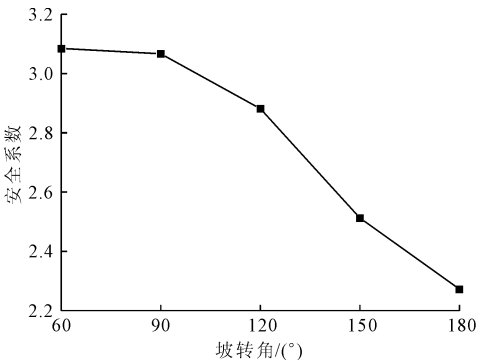


图 3 某工况下边坡安全系数与坡转角关系

根据研究该系列工况下边坡的破坏位移,当坡转角由 60°变化至 150°时,边坡破坏位置由坡边处逐渐转移到坡转角处,坡转角处的竖向位移逐渐变大。破坏位置的转移意味着边坡最薄弱位置的转移,事实上,坡边到模型边界的距离总是小于坡转角处,这意味着坡边处的稳定性应当好于坡转角处。此外,坡边可以看作是 180°的坡转角,如果坡转角越大,边坡稳定性就越好,那么坡边在任何情况下都不应当是最薄弱位置。但是根据上述系列工况的结果,破坏位置依然会出现在坡边上。因此,边坡稳定性与坡转角应当呈负相关的关系,即随着坡转角的增大,边坡坡转角处的稳定性会减弱。

2.2 坡转角对安全系数与坡高关系的影响

考虑在不同坡转角条件下,边坡稳定性对坡高的敏感性是否存在差异。选取坡角为 45°,边坡长度为 100 m 的一系列边坡模型来进行比较,整理后的各工况下的安全系数值变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着坡转角的增大,坡高 5 m 和坡高 15 m 的安全系数差值呈现出先增大再减小的趋势,但是变化较为平稳,这表明坡转角对边坡稳定性与坡高关系的影响较小。

2.3 坡转角对安全系数与坡角关系的影响

考虑在不同坡转角条件下,边坡稳定性与坡角的关系是否会有变化,分别保持坡高和边坡长度为常量,绘制不同坡转角下安全系数与坡角的关系曲线,如图 5 所示。从图 5(a)、图 5(b)中可以看出,不同坡转角下,土坡的安全系数与坡角的关系几乎没有变化,这说明坡转角对边坡稳定性与坡角关系的影响较小。但图 5(c)、图 5(d)显示,不同坡转角下,土坡的安全系数与坡角的关系存在一定差异,这是因为图 5(c)、图 5(d)中的边坡长度较长,边界约束对于坡转角处影响较小,此时若坡转角发生变化,边坡薄弱位置也会发生变化,土坡的稳定性也就发生变化。

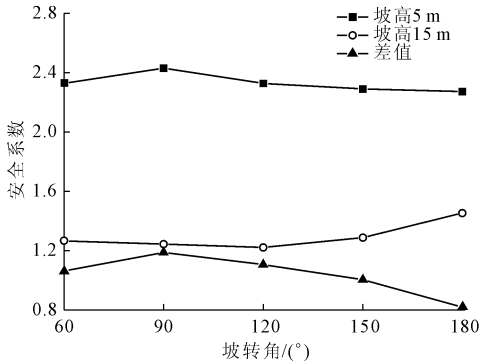
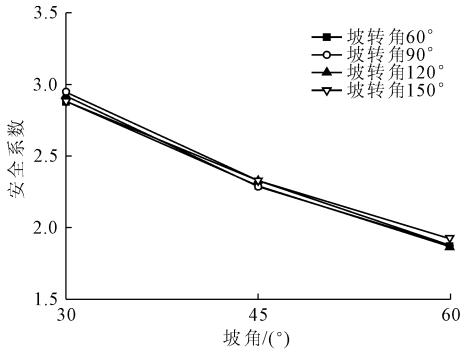
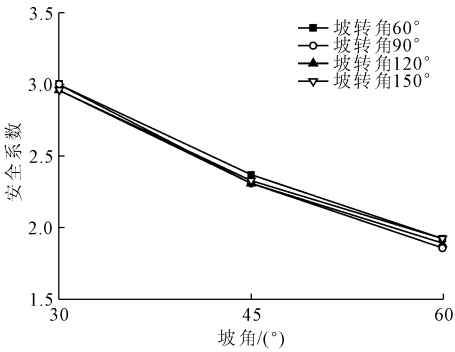


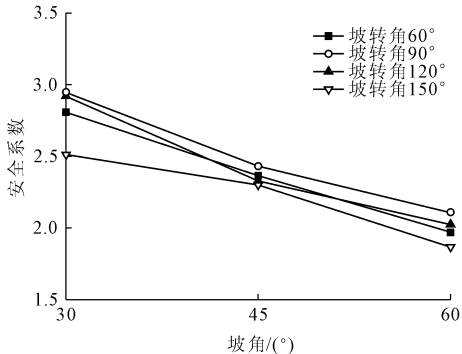
图 4 坡高与坡转角耦合下边坡安全系数变化曲线



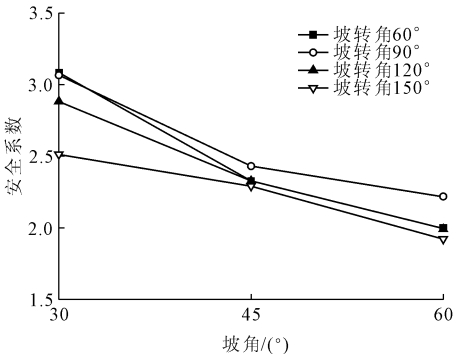
(a) $H=5\text{ m}$ 且 $L=10\text{ m}$



(b) $H=5\text{ m}$ 且 $L=20\text{ m}$



(c) $H=5\text{ m}$ 且 $L=50\text{ m}$



(d) $H=5\text{ m}$ 且 $L=100\text{ m}$

图 5 不同坡转角下边坡稳定性与坡角的关系曲线

2.4 坡转角对安全系数与边坡长度关系的影响

考虑在不同坡转角条件下,边坡稳定性与边坡的关系是否会有变化,分别保持坡高和坡角为常量,绘制不同坡转角下安全系数与边坡长度的关系曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,当坡角较大时,不同

坡转角下安全系数与边坡长度的关系变化较小;当坡角较小时,不同坡转角下安全系数与边坡长度的关系变化较大。

根据不同边坡长度的边坡破坏位移云图可知(见图 7),只有当边坡长度足够长时,破坏位置才可

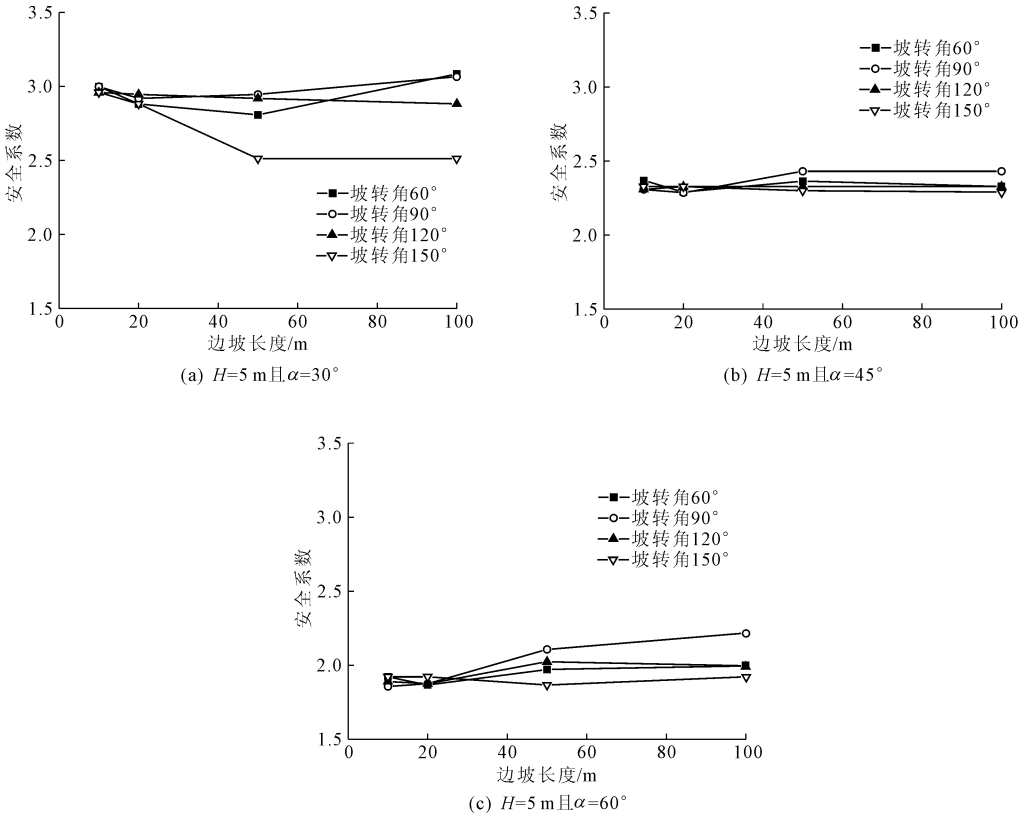


图 6 不同坡转角下安全系数与边坡长度关系曲线

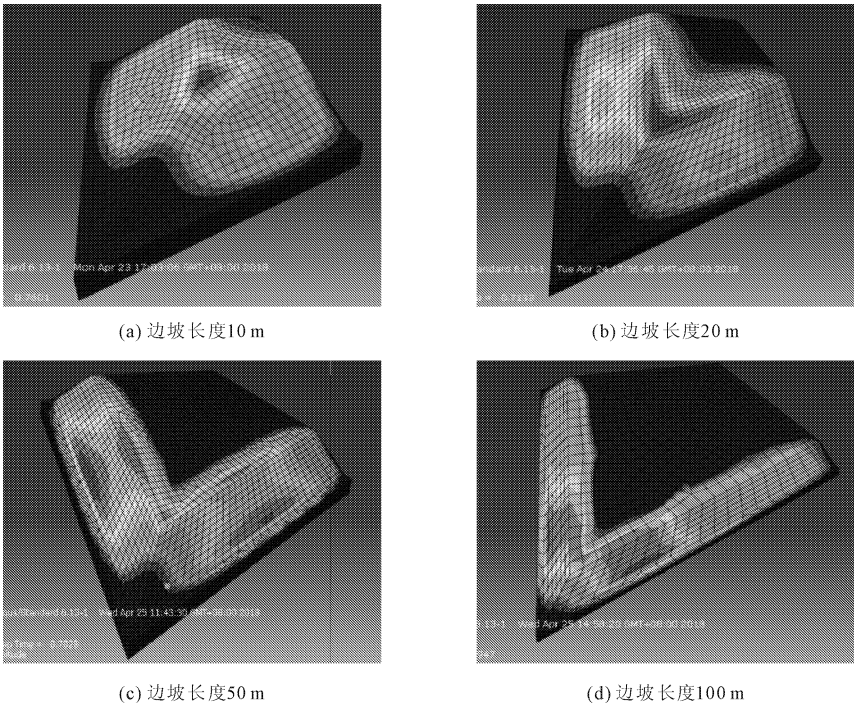


图 7 不同边坡长度的边坡破坏位移云图

能出现在坡边上,具体表现为,边坡长度只有 10 m 和 20 m 时,破坏位置集中在坡转角处,边坡长度为 50 m 和 100 m 时,破坏位置逐渐向坡边转移。这是因为边坡长度较长时,边界约束的影响效果较弱,不足以抵消坡转角差异的影响,此时以坡转角差异的影响为主,因而坡转角处的稳定性强于坡边(视为 180°的坡转角),破坏位置会出现在坡边上。而边坡长度较短时,边界约束的影响效果较强,则以边界条件的约束影响为主,所以破坏位置会出现在离模型边界较远的坡转角处。

3 结 论

本文应用有限元软件 ABAQUS 建立三维边坡模型,以坡高、坡角、边坡长度、坡转角为变量,设置了 96 组边坡工况,采用强度折减法计算土坡的安全系数,得到了如下主要结论:

(1) 随着坡转角的增大,边坡的稳定性逐渐变差。坡高和坡角对坡转角与边坡安全系数关系的影响较小,而边坡长度影响较大,具体表现为:当边坡长度较小时,边坡破坏位置始终保持在坡转角处;当边坡长度较大时,边坡破坏位置随着坡转角的增大呈现由坡边向坡转角处转移的趋势。

(2) 坡转角对坡高、坡角与边坡安全系数关系的影响较小,但对边坡长度与边坡安全系数关系的影响较大。且当坡角较大时,坡转角对于安全系数与边坡长度的关系的影响就较小;当坡角较小时,坡转角对于安全系数与边坡长度的关系的影响就较大。

参考文献:

- [1] 郑 宏. 严格三维极限平衡法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1529-1537.
- [2] 朱大勇, 钱七虎. 三维边坡严格与准严格极限平衡法解答及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1513-1528.
- [3] 陈雪珍, 简文彬. 基于强度折减法的分步施工边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 207-210.
- [4] 李大茂, 张国辉, 袁从华. 基于数值仿真的全强风化岩质边坡失稳机制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 205-209.
- [5] 李永亮, 周国胜, 李永鹏. 有限元强度折减法边坡失稳判据的适用性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(5): 125-129.
- [6] 李 红, 宫必宁, 陈 琰. 有限元强度折减法边坡失稳判据[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(1): 79-82.
- [7] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 243-256.
- [8] 陈国庆, 黄润秋, 周 辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1140-1146.
- [9] 白 冰, 袁 维, 石 露, 等. 一种双折减法与经典强度折减法的关系[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1275-1281.
- [10] Ryma Afiri, Smail Gabi. Finite element slope stability analysis of Souk Tleta dam by shear strength reduction technique [J]. Current Landscape Ecology Reports, 2018, 3(1): 1-10.
- [11] Lim K, Li A J, Schmid A, et al. Slope-stability assessments using finite-element limit-analysis methods[J]. International journal of geomechanics, 2017, 17(2): 6016017.
- [12] Wang Xiang Rong, Wang Hui, Liang Robert Y. A method for slope stability analysis considering subsurface stratigraphic uncertainty[J]. Landslides, 2018, 15(5): 925-936.
- [13] Xu J S, Yang X L. Three-dimensional stability analysis of slope in unsaturated soils considering strength nonlinearity under water drawdown[J]. Engineering Geology, 2018, 237: 102-115.
- [14] 田双珠, 李越松, 黄敬东, 等. 天津港二突堤转角区域码头结构与土体三维有限元分析[J]. 水道港口, 2007, 28(4): 270-273.
- [15] 王 凯, 闫永富, 吕国慧. 某露天矿斜坡路转角处路堑稳定性分析及治理措施[J]. 现代矿业, 2015(8): 176-177.