

剪胀角对分层边坡稳定性的影响

曹 婷¹, 张光碧¹, 邱珍锋²

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065 2. 重庆交通大学 省部共建水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 利用有限元软件 ABAQUS, 采用强度折减法, 对不同层数、不同材料、不同高度的分层边坡剪胀角进行折减, 分析了剪胀角对分层边坡稳定性的影响。结果表明, 对分层边坡, 任意土层的剪胀角进行折减时, 安全系数 F_s 随着剪胀角的增加而增大, 增大的幅度逐渐减小, 其变化规律不受土层材料、高度、层数的影响。与边坡整体的剪胀性相比, 单层土的剪胀性对 F_s 的影响要小, 且边坡上层土层的剪胀性对边坡稳定性的影响较大。随着剪胀角的增大, 边坡位移趋势越加明显, 且塑性区的范围逐渐扩大, 滑弧半径增大, 安全系数随之增大。在实际工程中, 宜对分层边坡整体的剪胀角进行折减并慎重取值。

关键词: 剪胀系数; 分层土; 软弱土层; 强度折减; 安全系数

中图分类号: O 319 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0067-04

Effects of Soil Dilatancy Angle on the Stability of Stratified Slope

CAO Ting¹, ZHANG Guang bi¹, QIU Zhen feng²

(1. School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Chongqing Jiaotong University, Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing 400074, China)

Abstract: The soil dilatancy angles of the stratified slopes with different layers, different materials, and different heights were reduced to analyze the effects of soil dilatancy angle on the stability of stratified slope using the strength reduction method and finite element software ABAQUS. The results showed that when the soil dilatancy angle decreased for any soil layer, the safety factor F_s increased with the increasing of dilatancy angle while the increment decreased gradually and the safety factor was not affected by the soil material, height, number of layers. The dilatancy angle of a single soil layer had lower effects on the safety factor F_s compared with the overall slope, and the dilatancy angle of the upper soil layer of the slope had higher effects on the stability of the stratified slope. With the increasing of dilatancy angle, the displacement trend of the slope became obvious with an expanding range of plastic zone and an increasing sliding arc radius and safety factor. In practical engineering, it is better to reduce the soil dilatancy angle of the slope to a carefully selected value.

Key words: dilatancy coefficient; stratified soil; soft soil; strength reduction; safety factor

岩土在剪切过程中会产生体积变形, 正常固结的黏土和低密度的砂土一般会产生剪缩, 而超固结土及密实度较高的砂土则产生剪胀^[1]。由于对岩土剪胀性的认识还不充分, 大多数岩土工程分析中选择了两种极端情况: 关联流动法则(剪胀角 $\psi = \varphi$)和非关联流动法则(剪胀角 $\psi = 0$)。关联流动法则意味着土体在剪切的过程中可以产生无限制的体积膨胀现象^[2], 非关联流动法则 $\psi = 0$ 则认为土体是不可膨胀的, 由此获取极限荷载。

关于剪胀角对岩土工程稳定性的影响问题, 不少学者进行过探讨: 康亚明^[3]等通过剪胀角对边坡潜在滑动面影响的研究, 得出的结论认为, 随着剪胀角的减小, 边坡的塑性区从

坡顶向坡脚有贯通的趋势; 蒋青青等^[4]研究了坡顶超载情况下的边坡剪胀效应; 吴春秋^[5]提出边界荷载会使剪胀性更显著。至于工程实践中剪胀角的取值问题, 赵星光^[7]研究了岩石峰值内摩擦角和剪胀角的关系, 认为岩石在零围压时的峰值剪胀角小于并近似等于峰值内摩擦角; 张培文^[7]提出剪胀角对地基极限承载力的影响是不可忽略的, 并认为只有考虑了材料的剪胀性、正确选用材料的屈服准则, 才能得到符合理论与实际的边坡稳定安全系数^[8]; 孔位学等^[9]通过对速度矢量和破坏面的夹角分析, 得出剪胀角取 0.5 倍的摩擦角的结论, 但却不一定适应具有软弱层的分层边坡。

收稿日期: 2012-09-18 修回日期: 2013-04-22 网络出版时间: 2013-05-18
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1744.033.html>

作者简介: 曹婷(1988), 女, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程方面的研究。E-mail: 1214433724@qq.com

通讯作者: 张光碧(1958), 女, 四川渠县人, 教授, 博士, 从事水工结构和水利工程材料方面的研究。E-mail: 1037306075@qq.com

因此,本文在前人的研究成果基础上,利用有限元软件 ABAQUS 分析剪胀角对分层边坡以及有软弱层的边坡稳定性的影响,以期工程实践提供指导。

1 有限元强度折减法失稳破坏判据

目前,判断边坡失稳破坏的标准通常包括:有限元数值计算的不收敛、塑性区的贯通、广义剪应变的贯通等^[9]。吕庆^[11]认为当采用小应变模式假设时,应用数值计算不收敛作为判据。然而,计算不收敛的原因比较多,如荷载过大或者计算单元奇异等,因此以不收敛为判据有一定的局限性。栾茂田^[12]建议采用塑性应变贯通作为判据。不过尽管塑性应变在一定程度上可以描述塑性区的发展过程,但作为评判依据时因为受主观因素影响大,并且未排除弹性塑性应变的影响,所以破坏界限比较模糊。

分析边坡失稳破坏的主要特征,可以发现不管岩土内部变形机理是广义的剪应变还是塑性应变,最终结果都是边坡产生位移,所以位移是边坡内部作用的外在表现,而滑动主要是由剪应变和位移造成的。有研究发现^[13],随着强度参数的不断折减,边坡上的位移矢量和剪应变不断向坡脚增大,因此以典型的坡顶特征点位移突变为失稳判据,意义明确、界限清晰。由此,笔者选择了边坡特征点的位移矢量与强度折减系数关系曲线中的突变点作为边坡的破坏判据。因为在该点,边坡处于极限平衡状态,塑性区刚刚贯通但不是非常明显,若以塑性区贯通为判据,在感官上判别并不准确。该点过后特征点的位移矢量会突然增大,意味着进入了破坏阶段。

2 Mohr-Coulomb 模型的剪胀性及屈服准则

2.1 Mohr-Coulomb 模型的屈服面

ABAQUS 提供了许多岩土体材料的本构模型,大多数的模型参数都可以与温度场变量结合,从而实现强度折减。Mohr-Coulomb 模型在单调加载条件下的适用性、收敛性较好,本文拟采用该模型,其屈服面函数为:

$$F(p, q, \Theta) = R_m q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (1)$$

其中: c 为粘聚力; φ 为摩擦角; q 为广义剪应力; p 为球应力; Θ 是极偏角; R_m 控制了屈服面在 π 平面的形状,按下式计算:

$$R_m = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin(\Theta + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{3} \cos(\Theta + \frac{\pi}{3}) \tan \varphi \quad (2)$$

其中, $\cos(3\Theta) = \frac{r_3}{q^3}$, r_3 是第三偏应力不变量 J_3 ; Θ 是极偏角。

2.2 Mohr-Coulomb 模型的剪胀性

Mohr-Coulomb 屈服面存在尖角,如采用相关流动法则,即塑性势面与屈服面相同,将会在尖角处出现塑性流动方向不是唯一的现象,为了避免这一问题,采用如下形式的连续光滑的椭圆函数作为塑性势面:

$$G = \sqrt{\varepsilon c_0 \tan \varphi)^2 + (R_m q)^2} - p \tan \varphi \quad (3)$$

式中: φ 为剪胀角; c_0 初始粘聚力,即没有塑性应变时的粘聚力; ε 为子午面的上的偏心率,取 $\varepsilon = 0.1$ 。

在有限元分析时,剪胀角的取值必须慎重,当剪胀角与摩擦角相同时,意味着土体在剪切过程中可以产生无限制的位移,这与土体的真实性不相符^[2]。

3 剪胀角对分层边坡的影响

3.1 计算模型及力学参数

本算例取用景卫华^[14]等在变形参数对土坡稳定安全系数的影响的研究模型,并调整边坡高度和土层数,以此来分析剪胀角对分层边坡的影响。根据陈锦瑞^[15]模型网格划分及边界条件对安全系数的影响分析来划分网格。模型从常见的分层边坡中简化出三种边坡,其有限元计算模型为:坡比 1:2,坡肩、坡脚到左右两端的距离各取 15 m,取 5 m、7.5 m、10 m 三种不同坡高,坡高内不同土层等高水平分布。其中边坡 1 假定地基和堤身为两种不同土层,边坡 2 则假定堤身有两种土层,边坡 3 堤身有三种土层。边坡几何模型见图 1,计算中各土层取用的参数见表 1。

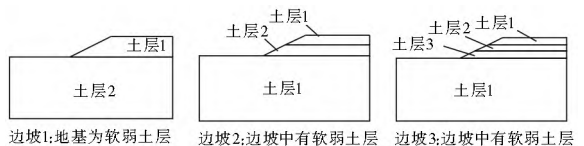


图 1 边坡几何模型

Fig. 1 Geometric model of the slope

表 1 土层材料参数

Table 1 The material parameters of the soil layers

土层	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦角 φ /($^\circ$)	粘聚力 c /kPa	弹性模量 E /MPa	泊松比 ν
1	1 900	26	10	12	0.4
2	1 800	24	15	8	0.4
3	2 000	20	10	100	0.4

3.2 计算结果分析

3.2.1 剪胀角对安全系数的影响

算例采用 ABAQUS 有限元分析软件,强度折减法,地基及边坡采用 Mohr-Coulomb 模型进行稳定性计算。剪胀系数采用张培文等^[8]提出的 $\eta = \varphi/\varphi = 0 \sim 1$,考虑了剪胀角的影响并对剪胀角进行折减。算例分 2 种工况:(1)针对边坡 1 和边坡 2,设计了三种方案(见表 2(a))进行分析计算,研究单层土和整体土层剪胀角对边坡稳定性的影响;(2)针对边坡 2 和边坡 3,互换边坡 2 中两种土层的材料,分别研究在分层边坡中,不同土层数、不同高度、不同材料的土层的剪胀角对边坡稳定性的影响(见表 2(b))。

不同剪胀系数 η 下强度折减曲线见图 2(因本文涉及到的强度折减曲线较多,在这里只以边坡 1、方案 C 为例)。计算结果比较见图 3(对工况(2),计算结果比较图较多,这里只以边坡 3 为例);其中对边坡 2,互换土层前后比较如图 3(d)所示(这里只以坡高 5 m 为例)。

由表 2(a)、图 3(a)、(b)可知,折减边坡任意土层的剪胀角,安全系数 F_s 随着剪胀角的增加而增大,增幅逐渐减小,最大增幅为 7%。对比边坡 1 三方案可以发现,地基土层的剪胀角对安全系数变化的影响不大,而边坡上层土层的剪胀性对边坡安全系数影响较大。对比边坡 1 三方案、边坡 2 三方案,相对于考虑单层土的剪胀角来说,考虑边坡整体土层剪胀角得出的安全系数要大。因此,有必要研究边坡整体的剪胀性对边坡稳定性的作用。

表 2(a) 剪胀角折减方案及相应安全系数

Table 2(a) The dilatancy angle reduction schemes and corresponding safety factors

折减方案			剪胀系数 η						
			0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
边坡 1	方案 A	土层 1 剪胀角折减	2.28	2.37	2.4	2.41	2.41	2.42	2.42
	方案 B	土层 2 剪胀角折减	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28
	方案 C	土层 1、2 同时折减	2.28	2.37	2.41	2.44	2.45	2.46	2.46
边坡 2	方案 A	土层 1 剪胀角折减	2.34	2.38	2.42	2.43	2.44	2.45	2.45
	方案 B	土层 2 剪胀角折减	2.34	2.37	2.39	2.4	2.4	2.4	2.4
	方案 C	土层 1、2 同时折减	2.34	2.39	2.44	2.48	2.5	2.5	2.5

表 2(b) 剪胀角折减方案及相应安全系数

Table 2(b) The dilatancy angle reduction schemes and corresponding safety factors

折减方案			剪胀系数 η						
			0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1
边坡 2	保持原土层(土层 1、2 同时折减)	5 m	2.34	2.39	2.44	2.48	2.50	2.50	2.50
		7.5 m	1.97	2.03	2.08	2.10	2.11	2.12	2.12
		10 m	1.75	1.81	1.84	1.87	1.88	1.90	1.90
边坡 2	互换土层(土层 1、2 同时折减)	5 m	2.45	2.54	2.60	2.63	2.65	2.66	2.66
		7.5 m	2.02	2.10	2.13	2.16	2.18	2.19	2.19
		10 m	1.80	1.86	1.90	1.92	1.93	1.94	1.94
边坡 3	(土层 1、2、3 同时折减)	5 m	2.21	2.30	2.34	2.36	2.37	2.38	2.38
		7.5 m	1.80	1.87	1.89	1.92	1.93	1.93	1.93
		10 m	1.59	1.65	1.67	1.69	1.69	1.69	1.69

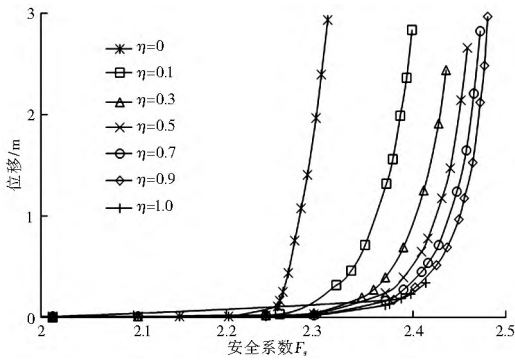


图 2 安全系数随剪胀角的变化曲线(边坡 1, 方案 C)

Fig. 2 Variation curve of the safety coefficient with the dilatancy angle (the first slope and the scheme C)

由表 2(b)、图 3(c) 可知,对于具有两种土层和三种土层的边坡,不同坡高下的安全系数 F_s 均随着剪胀角的增加而增大,但增幅逐渐减小,同时安全系数 F_s 随着坡高的增加而减小。由图 3(d) 可知,对于边坡 2 来说,互换土层材料前后,安全系数 F_s 都是随着剪胀角的增加而增大,增幅逐渐减小。

由此可见,分层边坡的安全系数 F_s 随着剪胀角的增加而增大,增大的趋势逐渐减小,变化规律不受土层层数、边坡高度、土层材料的影响。由于考虑边坡整体的剪胀性比考虑单层土的剪胀性得出的安全系数大许多,因此在实际工程中,宜考虑边坡整体土层的剪胀性并慎重取值。

3.2.2 剪胀角对位移的影响

现选取边坡 2 中方案 C 的位移图和塑性区图来分析在不同剪胀系数 η 下位移及塑性区的变化情况。从图 4 可见,随着剪胀系数的增加,边坡失稳,位移矢量增大,位移趋势越

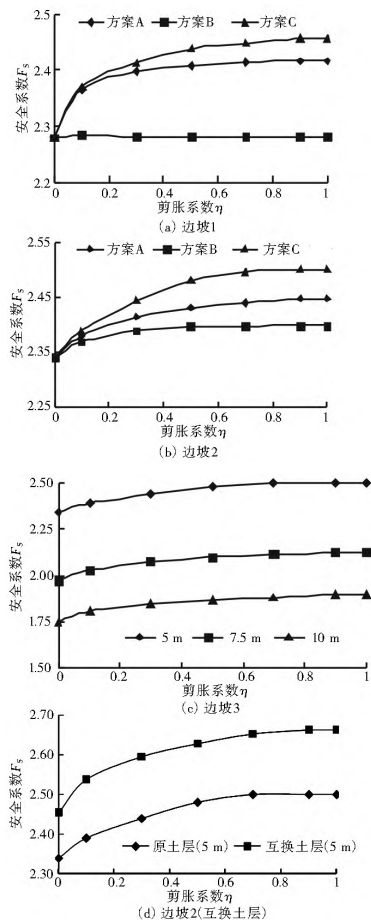


图 3 分层边坡剪胀系数与安全系数关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between the dilatancy coefficient and safety factor of the stratified slope

来越明显。从图 5 可见,随着剪胀系数的增加,塑性区的范围逐渐扩大,滑动面深入到了地基面某一深度,有沿着地基某一个软弱的滑面滑出趋势,形成一段较长的反弧段;考虑剪胀角的作用可加大滑动面的滑弧半径,扩大塑性区的范围,增加边坡的安全稳定性。

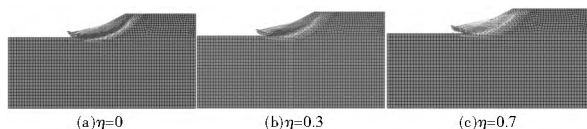


图 4 失稳时位移矢量图(边坡 2 方案 C)

Fig. 4 Displacement vector under the instable condition (the second slope and the scheme C)

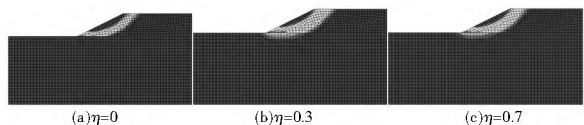


图 5 失稳时塑性区分布(边坡 2、方案 C)

Fig. 5 Distribution of plastic zone under the instable condition (the second slope and the scheme C)

5 结论与展望

(1) 分层边坡中,随着剪胀角的增加,边坡安全系数逐渐增大,位移趋势逐渐明显,塑性区范围逐渐扩大。边坡上层土层的剪胀性对边坡的安全系数影响较大,是剪胀角影响边坡稳定的主要因素。因此在分层边坡中,需考虑剪胀角对边坡稳定的影响。

(2) 根据边坡整体土层的剪胀性得出的安全系数,要比考虑单层土剪胀性得出的安全系数大许多,因此实际工程中,宜对边坡整体土层的剪胀角折减。

针对有软弱夹层的边坡,本文只分析了剪胀性对具有一定厚度软弱夹层边坡的影响,至于不同厚度软弱夹层对边坡稳定性的影响机理及变化规律的还有待进一步深入探讨。

参考文献(References):

[1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

[2] 费康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of Abaqus in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2010. (in Chinese))

[3] 康亚明, 刘长武, 贾延, 等. 剪胀性对边坡潜在滑动面的影响[J]. 中国矿业, 2008, 17(4): 89-91. (KANG Ya ming, LIU Changwu, JIA Yan, et al. The Influences of the Dilatancy Character on the Potential Sliding Surface of Soil Slopes[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(4): 89-91. (in Chinese))

[4] 蒋青青, 陈占锋, 赖伟明, 等. 考虑边坡超载情况下的边坡剪胀效应分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(2): 498-503. (JIANG Qingqing, CHEN Zhanfeng, LAI Weiming, et al. Dilation Effect of Slope under Overloading on Top of Its Surface[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(2): 498-503. (in Chinese))

[5] 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 Chur

qiu. Theory and Application Study on the Nonlinear FEM for Soil Stability Analysis[D]. Wuhan: School of Architecture and Civil Engineering, Wuhan University, 2004. (in Chinese))

[6] 赵星光, 蔡明, 蔡美峰. 剪胀对地下工程岩体位移的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2186-2195. (ZHAO Xingguang, CAI Ming, CAI Meifeng. Influence of Dilation on Rock Mass Displacement around Underground Excavations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2186-2195. (in Chinese))

[7] 张培文, 陈祖煜. 剪胀角对地基承载力的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 463-465. (ZHANG Peiwen, CHEN Zuyu. Significance of Soil Dilation in Bearing Capacity of Ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 463-465. (in Chinese))

[8] 张培文, 陈祖煜. 剪胀角对求解边坡稳定性的安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1757-1760. (ZHANG Peiwen, CHEN Zuyu. Finite Element Method for Solving Safety Factor of Slope Stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1757-1760. (in Chinese))

[9] 孔位学, 芮勇勤, 董宝弟. 岩土材料在非关联流动法则下剪胀角选取探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3278-3282. (KONG Weixue, RU Yongqin, DONG Baodi. Determination of Dilatancy Angle for Geomaterials under Non-associated Flow Rule[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3278-3282. (in Chinese))

[10] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336. (ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, ZHANG Yufang. Study on Slope Failure Criterion in Strength Reduction Finite Element Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332-336. (in Chinese))

[11] 吕庆, 孙红月, 尚岳全. 有限元强度折减法中边坡失稳判据的研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 42(1): 83-87. (LV Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan. Slope Failure Criteria of Shear Strength Reduction Finite Element Method[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 42(1): 83-87. (in Chinese))

[12] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 有限元强度折减法中边坡失稳的塑性区判据及应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 1(3): 1-8. (LUAN Maotian, WU Yajun, NIAN Tingkai. A Criterion for Evaluating Slope Stability Based on Development of Plastic Zone by Shear Strength Reduction FEM[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 1(3): 1-8. (in Chinese))

[13] 张鹏, 郭海庆. 基于强度折减的岩质边坡失稳判据的探讨[J]. 水电能源科学, 2012, 30(2): 99-102. (ZHANG Peng, GUO Haqing. Study of Failure Criterion of Rock Slope Stability Analysis Based on Strength Reduction Method[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(2): 99-102. (in Chinese))

[14] 景卫华, 王克东, 朱俊高, 等. 变形参数对土坡稳定安全系数的影响[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 17-20. (JING Weihua, WANG Kedong, ZHU Junaogao, et al. Effect of Deformation Parameters on Safety Factor of Slope Stability[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 17-20. (in Chinese))

[15] 陈锦璐, 王俊杰, 唐胜传. 有限元网格和边界条件对土坡稳定性计算的影响[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 135-138. (CHEN Jinlu, WANG Junjie, TANG Shengchuan. Influence of Mesh Density and Boundary Condition of Finite Element Model on Soil Slope Stability[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 135-138. (in Chinese))