

DOI: 10.19951/jcnki.1672-9331.20231028001

文章编号: 1672-9331(2024)02-0024-08

引用格式: 赵尚毅, 谢亚琼, 陈丹, 等. 边坡破裂角分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(2): 24-31, 55.

Citation: ZHAO Shangyi, XIE Yaqiong, CHEN Dan, et al. Analysis of rupture angle of slope [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(2): 24-31, 55.

边坡破裂角分析

赵尚毅¹, 谢亚琼², 陈丹³, 花传亮³

(1. 重庆工程学院 建筑工程学院, 重庆 400056; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

3. 中铁五局集团成都工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要:【目的】边坡破裂角是边坡稳定性分析和加固设计的重要参数。关于确定边坡破裂角的方法目前尚存在一些争议。【方法】运用摩尔-库伦强度理论、边坡稳定性评价和挡土墙土压力三种计算方法对边坡破裂角进行计算与分析。【结果】推导出直立边坡稳定安全系数所对应的破裂角计算公式。通过边坡稳定性计算得到边坡稳定安全系数所对应的破裂角, 当边坡稳定安全系数大于 1.00 时, 该破裂角为潜在破裂角; 当边坡稳定安全系数等于 1.00 时, 该破裂角为临界破裂角。【结论】运用挡土墙土压力计算方法得到的破裂角是土压力最大时所对应的破裂角, 并不是边坡临界破裂角。《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013) 基于挡土墙土压力计算思路确定的边坡破裂角是不合理的, 建议修改。

关键词: 边坡; 潜在破裂角; 临界破裂角; 稳定系数; 土压力

中图分类号: U418.5+2

文献标志码: A

Analysis of rupture angle of slope

ZHAO Shangyi¹, XIE Yaqiong², CHEN Dan³, HUA Chuangliang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056, China;

2. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. China Railway Fifth Bureau Group Chengdu Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: [Purposes] The angle of rupture of slope is an important parameter for slope stability analysis and reinforcement design. At present, there are some controversies about the method of determining the rupture angle of slope. [Methods] In this paper, the rupture angle of slope is analyzed by three methods, namely, Moore's Coulomb strength theory, slope stability and retaining wall earth pressure calculation. [Findings] It is pointed out that the rupture angle of slope is related to the stability of the slope, and the formula for calculating the angle rupture corresponding to the minimum stability coefficient of an upright slope is deduced. It is shown that the rupture angle obtained by stability calculation is the rupture angle corresponding to the safety factor of the slope, and when the stability factor of the slope is greater than 1.00, it is the potential rupture angle, and when the stability factor of the slope is just equal to 1.00, the rupture angle at this time is the critical angle of rupture. [Conclusions] The rupture angle obtained by using the

收稿日期: 2023-10-28; 修回日期: 2023-12-30; 接受日期: 2024-01-01

基金项目: 重庆工程学院科研基金资助项目(2023gcky01); 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJZD-K202301902)

通信作者: 赵尚毅(1969—)(ORCID: 0000-0001-9130-0508), 男, 副教授, 主要从事岩土数值极限分析及其应用研究。

E-mail: 36283162@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

soil pressure calculation method of the retaining wall is the rupture angle corresponding to the maximum soil pressure, and is not the critical rupture angle of the slope. *Technical code for building slope engineering* (GB 50330—2013) based on the idea of calculating soil pressure of retaining wall to determine the rupture angle of slope is unreasonable, and it is recommended to modify it.

Key words: slope stability; potential rupture angle; critical rupture angle; stability coefficient; soil pressure

Foundation item: Project (2023gcky01) supported by Chongqing Institute of Technology Research Fund Project; Project (KJZD-K202301902) supported by Chongqing Municipal Education Commission Science and Technology Research

Corresponding author: ZHAO Shangyi (1969—) (ORCID: 0000-0001-9130-0508), male, associate professor, research interesting: geotechnical numerical limit analysis and its application. E-mail: 36283162@qq.com

0 引言

边坡的破裂角是边坡平面滑动时滑面与水平面的夹角,是边坡稳定性分析和加固设计的重要参数之一。破裂角的大小与岩土体的物理性质、边坡倾角、坡体结构等因素有关。对于受岩土体强度控制的边坡,不同类型的岩石与土体有不同的破裂角。目前,如何确定破裂角尚未形成统一的认识。

《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[1](以下简称《规范》)第3.2.3条规定:直立土质边坡($\beta=90^\circ$)的破裂角按 $45^\circ+\varphi/2$ (φ 为土体的内摩擦角)计算,斜面土质边坡的破裂角按 $(\beta+\varphi)/2$ (β 为坡面与水平面的夹角)计算。杜太亮等^[2]采用极限平衡法得到的倾斜坡面边坡破裂角为 $(\beta+\varphi)/2$ 。然而,《规范》第6.2.10条基于挡土墙土压力计算的思路,给出了边坡临界破裂角的计算公式,但按照该公式计算得到的边坡临界破裂角与实际工程中的边坡临界破裂角不是同一个概念。按《规范》第6.2.10条中的公式计算的并不是边坡临界破裂角,而是土压力最大时对应的边坡破裂角。边坡的临界破裂角应是滑体下滑力等于抗滑力时对应的破裂角,此时的稳定安全系数为1.00。《规范》第6.2.10条推荐的破裂角计算公式与《规范》第3.2.3条的计算公式相互矛盾且第6.2.10条的计算公式存在错误。

2018年注册岩土工程师执业资格考试的一道考题(第15题)要求计算一倾斜坡面的边坡平面破

裂角。方玉树^[3]与李广信^[4]均发文指出该考题存在问题。对于该考题,考生感到困惑的是究竟应该采用《规范》中第3.2.3条的计算公式,还是《规范》第6.2.10条的计算公式。方玉树^[5]讨论了破裂角的取值及其公式适用范围中存在的问题,指出破裂角的取值随坡形、坡高及其他因素而变化。如果所有破裂角都采用 $45^\circ+\varphi/2$ 公式计算或者认为破裂角只受岩土体强度影响,那么这两种边坡破裂角的确定方法都未能将破裂角与岩土压力公式相联系。雷用等^[6]对高边坡设计中的理论破裂角给出了不同计算方法。其研究表明,滑动面为圆弧形的土质边坡的理论破裂角为计算划分条块的圆弧面与水平面间的夹角,滑动面为折线形的土质边坡的理论破裂角角度为计算划分条块所处岩土界面倾角的平均值,塌滑区的理论破裂角和无外倾结构面的岩质边坡的破裂角均为 $45^\circ+\varphi/2$,有外倾结构面的破裂角角度取结构面倾角角度与 $45^\circ+\varphi/2$ 两者中的较小值。

破裂角的确定在《规范》中分为两种情况:①假定其值是 $45^\circ+\varphi/2$;②依具体情况而定。但在如何定义与计算边坡破裂角的问题上,《规范》与现有研究都未能阐释清楚,且《规范》的不同条款之间存在矛盾。这给使用破裂角这一概念去解决实际问题带来了困难^[7-18]。

本文采用摩尔-库伦强度理论、边坡稳定性分析和挡土墙土压力三种不同的方法对破裂角进行了分析,推导出了安全系数所对应破裂角的计算式,并用算例对其进行了验证,指出了《规范》第6.2.10条对临界破裂角的定义的不足与第6.2.10

条计算公式中的错误。研究表明,通过稳定性计算得到的破裂角为稳定安全系数所对应的破裂角,但该破裂角不一定是边坡滑动开始时的临界破裂角。挡土墙土压力模型计算的破裂角和边坡破裂角也不是同一个概念,主动土压力对应的破裂角也不是临界破裂角,而是土压力值最大时的破裂角。

1 基于摩尔-库伦强度理论确定的破裂角

摩尔-库伦理论指出,当土体中任意平面上的剪应力与抗剪强度相等时,土体就会发生剪切破坏,该过程如图1所示。破坏面上的剪应力函数可拟合为极限摩尔圆包络线。为简化计算,该包络线可简化成直线。对岩土材料而言,发生剪切破坏的剪切面并不在最大剪应力面上,而是与其形成了大小为 $\varphi/2$ 的夹角。取空间中一土体单元,忽略主应力 σ_2 对土体单元的影响,由最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 表示的应力圆决定发生破坏时的截面位置,用 θ 表示剪破面(B-B)与水平面的夹角,如图1(a)所示。破裂点为一条斜直线与应力圆切线的交线,该切线与 σ 轴夹角为 φ ,其与 τ 轴的截距为 c 。这就是摩尔库伦强度准则,其表达式如下:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; τ 和 σ 分别为剪切面上的剪应力和正应力。当黏聚力 $c \neq 0$ 且强度直线与摩尔应力圆相切时, $\angle ACB = 90^\circ$, $2\theta = 90^\circ + \varphi$, 即 $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ 。

对边坡而言,岩土体受竖向重力作用。当不考虑水平应力(即 $\sigma_3 = 0$)时,摩尔应力圆左侧将移动到坐标原点,与竖向 τ 轴相切,如图2所示。在

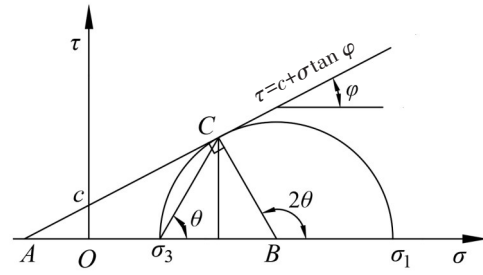
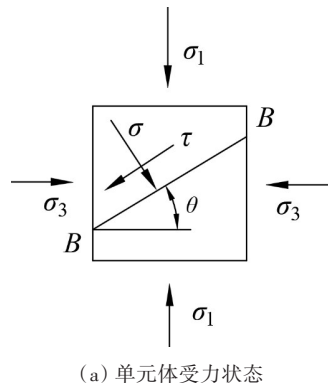


图1 摩尔-库伦破坏准则及破坏面

Fig. 1 Mohr Coulomb failure criterion and failure surface

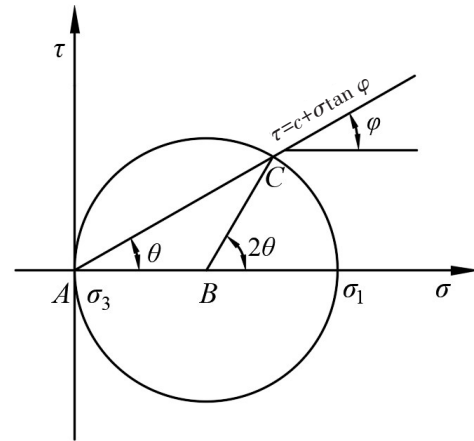


Fig. 2 Molar stress diagram under vertical stress

在某些特殊情况下(如在砂土中),当 $c = 0$ 时,摩尔库伦强度线会经过坐标原点,且其与摩尔应力圆相割, $\triangle ABC$ 将成为等腰三角形。根据几何关系,有 $2\theta = 2\varphi$,即破裂角 $\theta = \varphi$ 。此时,破裂角不满足关系式: $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ 。

2 基于边坡稳定性分析确定的破裂角

假设有一均质的直立边坡,边坡示意图如图3所示。在图3中, H 为坡高, θ 为破裂角, γ 为岩体重度, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角, W 为滑体自重。根据平衡条件,可得到下滑力和抗滑力的表达式,即:

$$T = W \sin \theta \quad (2)$$

$$R = W \cos \theta \tan \varphi + cL \quad (3)$$

式中: T 为下滑力; R 为抗滑力;滑体自重 $W = \frac{\gamma H^2}{2 \tan \theta}$; L 为边坡坡顶塌滑区外缘至坡底边缘的滑面长, $L = \frac{H}{\sin \theta}$ 。

设边坡稳定安全系数为 K 。 K 可表示为

$$K = \frac{W \cos \theta \tan \varphi + cL}{W \sin \theta} \quad (4)$$

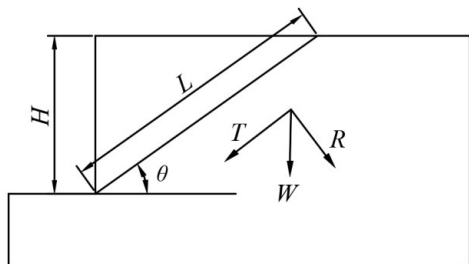


图3 边坡破裂角计算模型图

Fig. 3 Model diagram for calculating slope rupture angle

对式(4)的变量破裂角 θ 求导,并令导数值为0,可求得安全系数 K 所对应的破裂角,推导过程如下:

首先,为推导方便,将安全系数 K 写为

$$K = \frac{b}{a} = \frac{W \cos \theta \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \theta}}{W \sin \theta} \quad (5)$$

式中: $a = W \sin \theta$, $b = W \cos \theta \tan \varphi + c \frac{H}{\sin \theta}$ 。对 K 求导,有 $\frac{dK}{d\theta} = \frac{ab' - a'b}{a^2}$ 。滑体自重对 θ 求导后为 $W' = -\frac{\gamma H^2}{2 \sin^2 \theta}$ 。 b 对 θ 求导为 b' , a 对 θ 求导为 a' 。

$$b' = -\frac{\gamma H^2 \sin \theta \tan \varphi}{2 \tan \theta} - \frac{\gamma H^2 \cos \theta \tan \varphi}{2 \sin^2 \theta} - \frac{cH \cos \theta}{\sin^2 \theta} \quad (6)$$

$$ab' = -\frac{\gamma^2 H^4 \sin^2 \theta \tan \varphi}{4 \tan^2 \theta} - \frac{\gamma^2 H^4 \tan \varphi}{4 \tan^2 \theta} - \frac{\gamma H^3 c}{2 \tan^2 \theta} \quad (7)$$

$$a' = \frac{\gamma H^2 \cos \theta}{2 \tan \theta} - \frac{\gamma H^2}{2 \sin \theta} \quad (8)$$

$$a'b = \frac{\gamma^2 H^4 \cos^2 \theta \tan \varphi}{4 \tan^2 \theta} - \frac{\gamma^2 H^4 \tan \varphi}{4 \tan^2 \theta} + \frac{\gamma H^3 c}{2 \tan^2 \theta} - \frac{\gamma H^3 c}{2 \sin^2 \theta} \quad (9)$$

令 $\frac{dK}{d\theta} = 0$,可得 $ab' - a'b = 0$,即:

$$ab' - a'b = \frac{\gamma H^2}{2} \left(-\frac{\gamma H^2 \tan \varphi}{2 \tan^2 \theta} - \frac{2cH}{\tan^2 \theta} + \frac{cH}{\sin^2 \theta} \right) = 0 \quad (10)$$

整理得:

$$2cH \tan^2 \theta - 2cH - \gamma H^2 \tan \varphi = 0 \quad (11)$$

于是有:

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{\gamma H \tan \varphi}{2c} + 1} \quad (12)$$

破裂角的计算式可表示为

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{\gamma H \tan \varphi}{2c} + 1} \quad (13)$$

式(13)即为直立边坡稳定安全系数对应的破裂角解析式。

【算例1】假设一均质边坡高为6 m,土体重度为20 kN/m³,采用稳定性分析方法计算该边坡的破裂角,利用理正岩土工程计算分析软件V6.5(以下简称理正软件)建立边坡计算模型,如图4所示。

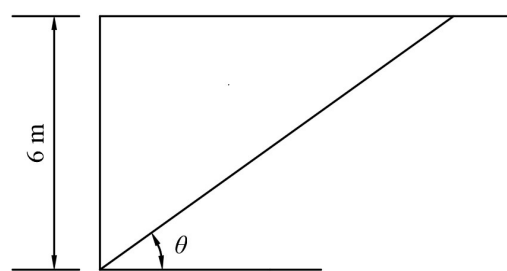


图4 直立边坡计算模型

Fig. 4 Calculation model of vertical slope

在理正软件中,选择边坡稳定分析系统,在基本模块中采用《规范》选用通用方法计算安全系数,滑裂面形状选择直线滑动面,岩土体参数选择输入 c 、 φ 值,搜索通过坡脚点的最危险滑裂面,滑裂面倾角为图4中的 θ ,计算结果见表1~2。其中,内摩擦角为30°,黏聚力在0~200 kPa变化的计算结果见表1;黏聚力10 kPa,内摩擦角在10°~40°变化的计算结果见表2。

由表1~2可知,利用理正软件计算的直立边坡的安全系数、破裂角与本文推导的理论公式的计算结果十分接近,但是该破裂角并不等于45° + $\varphi/2$ 。破裂角不但受内摩擦角的影响,也受黏聚力的影响。

边坡稳定性计算确定的破裂角并不是边坡开始滑动时的临界破裂角,而是稳定安全系数所对应的破裂角。当边坡的稳定安全系数大于1.00时,边坡稳定性计算得到的破裂角称为潜在破裂角;当稳定安全系数等于1.00时,称之为临界破裂角;当稳定安全系数小于1.00时,由于在计算时将黏聚力和内摩擦角放大了一定倍数(即除以一个小于1.00稳定安全系数),此时得到的破裂角不是真实的破裂角,计算结果在工程上没有实际意义。

表1 不同黏聚力取值下的安全系数及其对应的破裂角

Table 1 Safety factor and corresponding rupture angle under different cohesion

力学参数		理正软件计算结果		本文计算结果	
黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	安全 系数	破裂角/ (°)	安全 系数	破裂角/ (°)
0	30	0.05	85	0.03	45
2	30	0.29	77	0.29	77
5	30	0.47	70	0.47	70
20	30	1.10	59	1.10	59
50	30	2.17	52	2.17	52
100	30	3.87	49	3.87	49
200	30	7.22	47	7.22	47

表2 不同内摩擦角取值下的安全系数及对应的破裂角

Table 2 Safety factor and corresponding rupture angle under different internal friction angle

力学参数		理正软件计算结果		本文计算结果	
黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	安全 系数	破裂角/ (°)	安全 系数	破裂角/ (°)
10	10	0.48	55	0.48	55
10	14	0.53	58	0.53	58
10	18	0.57	60	0.57	60
10	22	0.62	62	0.62	62
10	26	0.66	63	0.66	63
10	30	0.70	65	0.70	65
10	34	0.75	66	0.75	66
10	38	0.80	67	0.79	67
10	40	0.82	68	0.82	68

3 根据挡土墙土压力计算公式确定的破裂角

按《规范》第6.2.10条的规定,土压力的合力为

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (14)$$

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta - \varphi - \delta)} \times$$

$$\left\{ K_q [\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)] + 2\eta \sin \alpha \cos \varphi \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta) - \right. \\ \left. 2\sqrt{K_q \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \times \sqrt{K_q \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \right\} \quad (19)$$

$$K_q = 1 + \frac{2q \sin \alpha \cos \beta}{\gamma H \sin(\alpha + \beta)} \quad (20)$$

$$K_a = (\cot \theta - \cot \alpha') \tan(\theta - \varphi) - \frac{\eta \cos \varphi}{\sin \theta \cos(\theta - \varphi)} \quad (15)$$

按《规范》第6.2.10条的规定,边坡破坏时的平面破裂角为

$$\theta = \arctan \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{\cot \alpha'}{\eta + \tan \varphi}} - \sin \varphi} \quad (16)$$

式中: E_a 为水平土压力合力; K_a 为水平土压力系数; H 为边坡的垂直高度; γ 为支护结构后的土体重度,地下水位以下的土体采用有效重度; α' 为边坡坡面与水平面的夹角; c 为土体的黏聚力; φ 为土体的内摩擦角; θ 为土体的临界滑动面与水平面的夹角; $\eta = \frac{2c}{\gamma H}$ 。

图5为边坡坡面倾斜时的计算简图,其中 N 为作用在滑面上的正压力。

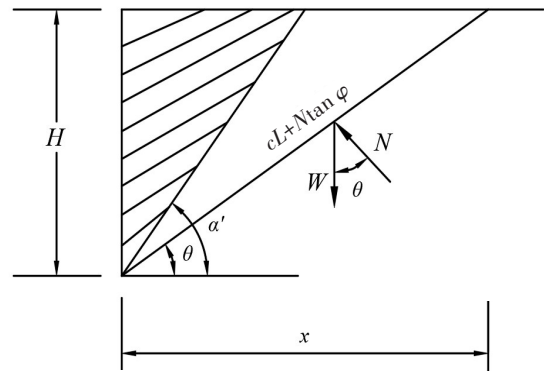


图5 边坡坡面倾斜时的计算简图

Fig. 5 Calculation sketch for slope inclination

《规范》第6.2.3条根据平面滑裂面假定,规定主动土压力合力可按该条公式来计算,即:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (18)$$

式中: E_a 为相应于荷载标准组合的主动土压力合力; K_a 为水平土压力系数; H 为挡土墙高度; γ 为土体重度; c 为土的黏聚力; φ 为土的内摩擦角; q 为地表均布荷载标准值; δ 为土对挡土墙墙背的摩擦角; β 为填土表面与水平面的夹角; α 为支撑结构墙背与水平面的夹角。

本文通过两个算例对不同计算方法得到的破裂角进行分析。其中,一个算例的边坡稳定系数大于1.00,一个小于1.00。

【算例2】某建筑边坡高10 m,开挖设计坡面与水平面夹角为 50° ,坡顶水平,无超载(如图6所示),坡体黏性土重度为 19 kN/m^3 ,内摩擦角为 12° ,黏聚力为 20 kPa ,坡体无地下水。计算该边坡的破裂角。(此算例为2018年注册岩土工程师考试题。)

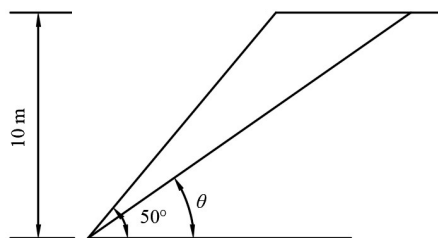


图6 边坡计算模型

Fig. 6 Slope calculation model

根据《规范》第6.2.10条的公式即式(16),该算例的破裂角计算如下:

$$\theta = \arctan \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{\cot \alpha'}{\eta + \tan \varphi}} - \sin \varphi} = 32.77^\circ$$

2018年注册岩土工程师考试题的答案为 33° 。

按照《规范》第3.2.3条规定边坡破裂角的公式 $\theta = (\beta + \varphi)/2$ 计算,该算例的答案如下:

$$\theta = (\beta + \varphi)/2 = (50^\circ + 12^\circ)/2 = 31^\circ$$

采用理正软件,利用边坡稳定性计算得到的破裂角为 30° ,稳定安全系数为1.31。可见,该边坡的稳定系数大于1.00,是稳定的,且由边坡稳定性计算得到的潜在破裂角为 30° 。由于该边坡是稳定的,所以按《规范》第6.2.10条公式计算得到的土压力为 0 kPa ,由此计算得到的破裂角 33° 。该角度是不合理的,这个角并不是《规范》所说的边坡临界破裂角。因此,2018年注册岩土工程师中的这道考试题是不严谨的。

【算例3】仰斜式挡土墙的墙高为5 m,砂土重度为 20 kN/m^3 ,内摩擦角为 30° ,黏聚力为 0 kPa ,墙后土体水平,坡面倾角为 75° 。根据《规范》第6.2.10条计算土压力合力,其计算模型如图7所示。

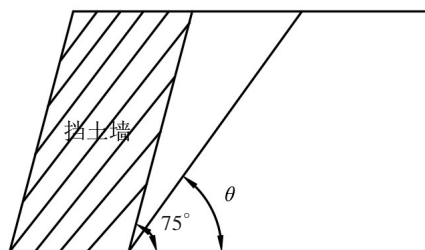


图7 计算简图(李广信对2018岩土注册题讨论)

Fig. 7 Calculation diagram(Li Guangxin 's discussion on 2018 geotechnical registration)

1) 破裂角计算。

根据《规范》第6.2.10条的公式计算算例3,得出的破裂角如下:

$$\theta = \arctan \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{\cot \alpha'}{\eta + \tan \varphi}} - \sin \varphi} = 50.60^\circ$$

采用《规范》第3.2.3条计算算例3,边坡的破裂角为 $\theta = (\beta + \varphi)/2 = (75^\circ + 30^\circ)/2 = 52.5^\circ$

采用理正软件,利用边坡稳定性计算算例3,得到的破裂角角度为 74° ,稳定系数为0.17。

可见,采用这三种方法对算例3进行计算,得到的破裂角都不相同。该边坡的黏聚力为 0 kPa ,内摩擦角为 30° ,如果没有挡墙支挡,该边坡的极限状态稳定休止角就是 30° ,即该边坡的临界破裂角为 30° 。

2) 土压力计算。

按照《规范》第6.2.10条的公式对算例3进行土压力合力的计算,结果如下:

$$\text{根据式(16)中: } \eta = \frac{2c}{\gamma H} = \frac{2 \times 0}{20 \times 5} = 0$$

$$K_a = (\cot \theta - \cot \alpha') \tan(\theta - \varphi) - \frac{\eta \cos \varphi}{\sin \theta \cos(\theta - \varphi)} = (\cot 50.65^\circ - \cot 75.00^\circ) \tan(50.65^\circ - 30.00^\circ) - \frac{0 \times \cos 30.00^\circ}{\sin 50.65^\circ \cos(50.65^\circ - 30.00^\circ)} = 0.21 \text{ KN/m}$$

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a = 0.5 \times 20 \times 5 \times 5 \times 0.21 = 52.01 \text{ KN/m}$$

按照《规范》第6.2.3条的公式对算例3进行土压力合力的计算,结果如下:

$$\text{令 } K_q = 1, \delta = 15^\circ,$$

$$K_a = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta - \varphi - \delta)} \times \left\{ K_q [\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)] + 2\eta \sin \alpha \cos \varphi \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta) - 2\sqrt{K_q \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \times \sqrt{K_q \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta) + \eta \sin \alpha \cos \varphi} \right\}$$

$$= 0.208 \text{ KN/m}$$

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a = 0.5 \times 20 \times 5 \times 5 \times 0.208 = 52 \text{ KN/m}$$

通过对算例3采用不同的方法计算土压力合力并对结果进行对比分析,发现按照《规范》第6.2.3条的公式计算时,当挡土墙后的土体对墙背摩擦角为 15° 时,其土压力合力的计算结果和《规范》第6.2.10条的计算结果相等。但是《规范》第6.2.10条的公式未提到墙后土体对挡土墙墙背的摩擦角 δ 的取值。若无该的条件则默认为 $\delta = 0^\circ$ 。如果加上 $\delta = \varphi/2$ 这个条件,《规范》第6.2.10条公式的计算结果与其6.2.3条公式的计算结果一致。

4 结论

边坡的平面滑动破裂角是边坡稳定分析和加固设计的一个重要参数。目前,对于边坡破裂角的确定方法尚未达成共识。针对《规范》中不同条文之间存在矛盾的问题,本文运用摩尔-库伦强度理论、边坡稳定性分析和挡土墙土压力三种计算方法,对边坡破裂角进行计算和对比分析,得出以下结论:

1) 边坡的平面滑动破裂角与边坡的稳定度有关。通过边坡稳定性分析得到的边坡破裂角是稳定系数所对应破裂角。当边坡稳定系数大于1.0时,即为潜在破裂角,当边坡稳定系数刚好等于1.0时,此时的破裂角为临界破裂角。当边坡稳定系数小于1.0时,稳定性计算将黏聚力和内摩擦角放大了一定倍数(除以一个小于1的系数,即稳定安全系数),此时得到的破裂角不是真实的破裂角,无工程意义。

2) 《规范》第3.2.3条规定的破裂角确定方法和6.2.10条规定的破裂角确定方法自相矛盾。按《规范》第3.2.3条计算的破裂角是边坡处于极限状态时的破裂角,而按《规范》6.2.10条规定的计算公

式得到的破裂角是挡土墙土压力最大时对应的破裂角,并不是《规范》条文所说的边坡临界破裂角,而且该公式存在错误。

3) 边坡的破裂角和挡土墙土压力计算中的破裂角不是一个概念,文献[4]指出两者“本是风马牛不相及的两种课题”。《规范》在确定支挡结构承担的侧向岩土作用荷载时,引入了库伦土压力计算思路,根据极限平衡确定侧向岩土荷载。力学分析方法本身没有问题,但是将挡土墙土压力计算的方法运用到边坡破裂角的计算时,有时会导致一些错误的结论。比如采用等效内摩擦角进行岩质边坡锚杆挡墙设计时,运用《规范》6.2.10条计算会得到的错误的结论,建议建筑边坡放弃《规范》6.2.10条破裂角的计算公式或者对其进行修正。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [2] 杜太亮, 王桂林, 张永兴. 岩质边坡破裂角确定方法的探讨[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(3): 24-27, 32.
DU Tailiang, WANG Guilin, ZHANG Yongxing. Discussion on methods for determining cracking angle of rock slope [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(3): 24-27, 32.
- [3] 方玉树. 2018年注册岩土工程师执业资格考试中一道平面破裂角计算考题的分析[J]. 重庆建筑, 2020, 19(4): 57-60. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-9107.2020.04.57.
FANG Yushu. Analysis of an examination question for plane rupture angle calculation in 2018 certified

- geotechnical engineer qualification examination [J]. Chongqing Architecture, 2020, 19(4): 57-60. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2020.04.57.
- [4] 李广信.【特约评论】对2018年上午注册岩土考试15考题的再讨论:李广信[N/OL].(2020-05-20)[2023-4-27].https://www.sohu.com/a/396497972_661995.
LI Guangxin. [Guest Comment] Re-discussion of the 15 questions of the 2018 morning registration geotechnical examination; Li Guangxin [N/OL]. (2020-05-20) [2023-4-27]. https://www.sohu.com/a/396497972_661995.
- [5] 方玉树. 边坡工程中破裂角和岩体等效内摩擦角取值及应用若干问题探讨[J]. 重庆建筑, 2014, 13(8): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2014.08.034.
FANG Yushu. Discussion on value selection and application of rupture angle and rock mass equivalent internal friction angle in slope engineering [J]. Chongqing Architecture, 2014, 13(8): 34-38. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9107.2014.08.034.
- [6] 雷用, 郝江南, 肖强. 高边坡设计中的几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 598-602.
LEI Yong, HAO Jiangnan, XIAO Qiang. Inquiring some problem in high slope design [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(sup 2): 598-602.
- [7] 何思明, 张晓曦, 吴永. 基于上限定理的边坡潜在破裂面确定方法与稳定性判识研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 162-166. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.01.017.
HE Siming, ZHANG Xiaoxi, WU Yong. Study of stability discriminant of slope and position determination of potential sliding surface based on upper bound theorem [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 162-166. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.01.017.
- [8] 王闫超, 晏鄂川, 陆文博, 等. 无黏性有限土体主动土压力解析解[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2513-2520. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.09.011.
WANG Yanchao, YAN Echuan, LU Wenbo, et al. Analytical solution of active earth pressure for limited cohesionless soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2513-2520. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.09.011.
- [9] 刘德峰, 刘长武, 郭兵兵, 等. 不同围压下灰岩力学特性及破坏力学模型研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(增刊2): 8-12. DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.s2.002.
LIU Defeng, LIU Changwu, GUO Bingbing, et al. Study on mechanical characteristics and failure mechanical model for the limestone under different confining pressures [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(sup 2): 8-12. DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.s2.002.
- [10] 李钊, 李耀南. 破裂角的确定及其对土压力计算的适用性分析[J]. 城市地质, 2019, 14(1): 84-89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2019.01.014.
LI Fang, LI Yaonan. Determination of the rupture angle and its applicability to the calculation of earth pressure [J]. Urban Geology, 2019, 14(1): 84-89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1903.2019.01.014.
- [11] 关成尧, 漆家福, 邱楠生, 等. 应力比影响下的破裂角、闭锁角、摩擦系数及其耦合关系[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3570-3576. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.12.001.
GUAN Chengyao, QI Jiafu, QIU Nansheng, et al. Crack angle, lock angle, friction coefficient under stress ratio affection and their coupling relationship in a compression-shear crack [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3570-3576. DOI: 10.16285/j.rsm.2012.12.001.
- [12] 罗强, 熊诗杰, 王腾飞, 等. 平动位移下衡重式挡墙背土体破裂面特征及土压力分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 547-556. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2022.03.016.
LUO Qiang, XIONG Shijie, WANG Tengfei, et al. Analysis on slip surface characteristics of backfill and earth pressure of balance weight retaining wall under translation movement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 53(3): 547-556. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2022.03.016.
- [13] 于丽, 吕城, 段儒禹, 等. 浅埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(4): 69-76. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2019.04.09.
YU Li, LYU Cheng, DUAN Ruyu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow buried loess tunnel [J]. China Railway Science, 2019, 40(4): 69-76. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2019.04.09.
- [14] 宫伟力, 高霞, 孙雅星, 等. 基于动态莫尔圆的岩爆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3321-3329. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0613.
GONG Weili, GAO Xia, SUN Yaxing, et al. Study on rockburst mechanism based on dynamic Mohr circle [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(sup 2): 3321-3329. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0613.
- [15] 张国祥, 王敏. 新建筑边坡规范地震主动土压力计算公式的推导及完善[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1097-1102, 1113. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.022.
ZHANG Guoxiang, WANG Min. Derivation and improvement of formula for calculating seismic active earth pressure in new 'Technical code for building slope engineering' [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1097-1102, 1113. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.04.022.

(下转第55页)

- energy storage in aquifers [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44 (7): 1107–1112. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.07.020.
- [24] SÁNCHEZ M, SHASTRI A, LE T M H. Coupled hydromechanical analysis of an underground compressed air energy storage facility in sandstone [J]. *Géotechnique Letters*, 2014, 4 (2): 157–164. DOI: 10.1680/geolett.13.00068.
- [25] OLDENBURG C M, PAN L H. Porous media compressed-air energy storage (PM-CAES): theory and simulation of the coupled wellbore-reservoir system [J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 97 (2): 201–221. DOI: 10.1007/s11242-012-0118-6.
- [26] GUO C B, PAN L H, ZHANG K N, et al. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and Caverns based on the Huntorf CAES plant [J]. *Applied Energy*, 2016, 181: 342–356. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.105.
- [27] GUO C B, ZHANG K N, PAN L H, et al. Numerical investigation of a joint approach to thermal energy storage and compressed air energy storage in aquifers [J]. *Applied Energy*, 2017, 203: 948–958. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.06.030.
- [28] STRANDLI C W, BENSON S M. Identifying diagnostics for reservoir structure and CO₂ plume migration from multilevel pressure measurements [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49 (6): 3462–3475. DOI: 10.1002/wrcr.20285.
- [29] ZHAO C B, HOBBS B E, ORD A. Effects of medium permeability anisotropy on chemical-dissolution front instability in fluid-saturated porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 99 (1): 119–143. DOI: 10.1007/s11242-013-0177-3.
- [30] LAI K H, CHEN J S, LIU C W, et al. Effect of medium permeability anisotropy on the morphological evolution of two non-uniformities in a geochemical dissolution system [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 224–233. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.039.
- [31] VENKATARAMANI G, PARANKUSAM P, RAMALINGAM V, et al. A review on compressed air energy storage-A pathway for smart grid and polygeneration [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 895–907. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.002.
- [32] KUSHNIR R, ULLMANN A, DAYAN A. Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: a review [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2012, 28 (2–3): 123–148. DOI: 10.1515/revce-2012-0006.

(责任编辑:刘平;校对:赵冰 彭三军;英文编辑:栗淼)

(上接第31页)

- 2017.04.022.
- [16] 郑铁华, 李金刚. 不同破裂角岩石的力学特性和裂缝演化规律研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49 (增刊 2): 93–97.
- ZHENG Tiehua, LI Jingang. Study on mechanical properties and fracture evolution law of rocks with different fracture angles [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49 (sup 2): 93–97.
- [17] 许年春. 边坡稳定性分析与滑裂面的确定 [J]. *地下空间*, 2002 (4): 329–331, 372. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2002.04.011.
- XU Nianchun. Analysis of slope stability and determination of sliding plane [J]. *Underground Space*, 2002 (4): 329–331, 372. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2002.04.011.
- [18] 贺建清, 曾治国, 梅松华, 等. 陡坡岩石地基抗滑桩有效嵌固深度的确定 [J]. *应用力学学报*, 2020, 37 (6): 2489–2495. DOI: 10.11776.cjam.37.06.B131.
- HE Jianqing, ZENG Zhiguo, MEI Songhua, et al. Determination of effective embedding depth of anti-slide pile in rock foundation of steep slope [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37 (6): 2489–2495. DOI: 10.11776.cjam.37.06.B131.
- [19] 赵尚毅, 郑颖人, 何平, 等. 边坡侧向荷载计算方法讨论 [J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13 (2): 434–441.
- ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, HE Ping, et al. Discussion on calculation methods of slope lateral load [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13 (2): 434–441.

(责任编辑:李脉;校对:彭三军 赵冰;英文编辑:栗淼)