

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021082023101963

文章编号:1674-599X(2023)05-0037-08

引用格式:刘新喜,贺程,王玮玮,等.放坡状态有限土体刚性挡墙滑动稳定性分析[J].交通科学与工程,2023,39(5):37-44.

Citation: LIU Xinxi, HE Cheng, WANG Weiwei, et al. Stability of rigid retaining walls for finite soil under the grading condition[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 37-44.

## 放坡状态有限土体刚性挡墙滑动稳定性分析

刘新喜,贺程,王玮玮,李彬

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘 要:**为验证在放坡状态下有限土体刚性挡墙稳定性简化计算方法的合理性。该研究考虑了土体黏聚力、填土与挡墙墙背和墙底之间的摩擦作用,以及填土顶面荷载作用等多种影响因素,建立了挡墙稳定性理论模型。基于极限分析上限法,得到了放坡状态下有限土体刚性挡墙稳定性系数。研究表明:挡墙稳定性系数 $F_s$ 与土体黏聚力 $c$ 、墙土界面摩擦角 $\delta$ 、底面摩擦角 $\delta_a$ 、墙土界面黏聚力 $c_w$ 、底面黏聚力 $c_1$ 和土的内摩擦角 $\varphi$ 均成正比关系,并且随着宽高比 $B/H$ 的增大而减小,逐渐趋于稳定。此外,通过与库伦方法进行比较分析,验证了该简化计算方法的合理性。

**关键词:**放坡状态有限土体;刚性挡土墙;滑动稳定性;上限法

中图分类号:TU443

文献标志码:A

## Stability of rigid retaining walls for finite soil under the grading condition

LIU Xinxi, HE Cheng, WANG Weiwei, LI Bin

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to verify the rationality of the simplified calculation method for the stability of rigid retaining wall with finite soil body under the state of slope release. In this study, various influencing factors such as soil cohesion, friction between the fill and the back and bottom of the retaining wall, as well as the load effect on the top surface of the fill were considered, and a theoretical model of the retaining wall stability was established. Based on the upper limit method of limit analysis, the stability coefficients of the rigid retaining wall with a finite soil body under the state of slope release were obtained. The results show that the stability coefficient of the retaining wall  $F_s$  is proportional to the soil cohesion  $c$ , the wall-soil interface friction angle  $\delta$ , the bottom friction angle  $\delta_a$ , the wall-soil interface cohesion  $c_w$ , the bottom cohesion  $c_1$ , and the internal friction angle of the soil  $\varphi$ . It decreases with the increase of the width-to-height ratio  $B/H$ , and gradually tends to be stable. In addition, the rationality of this simplified calculation method is verified by comparative analysis with the Cullen method.

**Key words:** sloping limited soil; retaining wall; sliding stability; the upper bound analysis

近年来,随着基础设施建设的不断发展,高路堤挡墙和相邻基坑中的挡土结构后方出现了放坡状态下的有限宽度土体。对于这种类型的工程设

计来说,计算挡墙的稳定性是关键。关于挡墙滑动稳定性的研究,大部分学者先计算挡墙的滑动驱动力和抗滑力,然后计算挡墙稳定性。然而,这个计

收稿日期:2021-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674041);湖南省研究生科研创新项目(CX20200839)

作者简介:刘新喜(1963—),男,长沙理工大学教授,博士研究生导师。E-mail:849624096@qq.com

算过程相当复杂,且针对在放坡条件下对有限土体刚性挡土墙稳定性的计算研究鲜见。因此,对这类工程的挡墙稳定性进行深入研究是十分必要的。

目前,国内外有许多学者对半无限土体的挡土墙稳定性进行了研究。HANDY<sup>[1]</sup>研究了两个平行挡土墙,发现墙背粗糙竖直,并推导出了挡墙后土压力分布的计算公式。FRYDMAN等<sup>[2-3]</sup>在邻近基岩面处,研究了以砂砾土为填土的刚性挡土墙在主动土压力和静止土压力状态下的侧向土压力。应宏伟等<sup>[4]</sup>假定墙后填土产生了圆弧形土拱,通过计算推导出考虑了墙土摩擦角的主动土压力。卢坤林等<sup>[5]</sup>在挡土墙平动模式下,考虑了土拱效应与挡土墙位移的影响,建立了非极限主动土压力的计算公式。徐日庆等<sup>[6]</sup>考虑了墙土摩擦角和黏聚力的影响,得到了黏性土非极限主动土压力的计算公式。刘杰<sup>[7]</sup>研究了挡墙稳定性,在半无限土体的假设下,引入极限分析上限法理论,将挡墙与土体视作一个整体进行分析,通过求解矢量三角形,计算出外力做功功率以及能量耗散功率,建立了能量平衡方程,采用能量估算法在不求解土压力的情况下,使用MATLAB软件,得出挡墙稳定性系数的数值解,并分析了各参数对相应稳定性系数和破裂角的敏感性。刘洋等<sup>[8]</sup>考虑了土条上下界面之间切应力的影响,推导出了挡土墙上的主动土压力的理论计算式。石位哲<sup>[9]</sup>以砂土作为试验对象,通过平移模式试验,发现墙后填土最终会形成一个贯穿土体的滑裂面,土体的塑性区会形成一条从墙角到填土表面的塑性带。方鹏等<sup>[10]</sup>基于极限平衡理论,将圆弧形挡土墙视为整体,得到了土压力的计算方法。

对于有限土体刚性挡墙稳定性的研究,已经取得了丰硕的成果。应宏伟等<sup>[11]</sup>以无黏性填土为研究对象,通过数值模拟方法,推导出了土压力分布公式和合力作用点的理论计算式。杨明辉等<sup>[12]</sup>开展了无黏性土在刚性挡墙平动等位移模式下的主动土压力试验,分析了土体变形和土压力分布规律。王闫超等<sup>[13]</sup>考虑了无黏性土的有限土压力问题,运用薄层单元法,推导出极限破裂角及土压力的表达式。杨明辉等<sup>[14-16]</sup>在考虑土拱效应的条件下,对有限土体土压力进行了研究。方焘等<sup>[17]</sup>通过模型箱进行了在浸水条件下有限宽度无黏性土体的主动土压力试验,得出了不同宽度下的土体破坏模式和土压力分布规律。刘忠玉<sup>[18]</sup>针对墙后为有

限无黏性填土的刚性挡土墙,修正了水平层分析法,得出在平动模式下刚性挡土墙主动土压力的表达式。

虽然学者们已经将挡墙稳定性的研究推广到了有限土体,但是针对放坡状态下的土体研究较少。方焘等<sup>[19]</sup>使用极限平衡法,推导了在放坡条件下有限土体主动和被动土压力的计算公式,但忽略了墙背填土黏聚力。胡卫东等<sup>[20]</sup>引用刚体平衡理论,研究了相邻基坑、路堤与切坡挡土墙形成放坡状态下的有限土体,考虑了滑裂面通过斜坡面和坡顶面的两种情况,建立了放坡状态下的主动土压力计算模型,分析了各参数对极限破裂角和主动土压力的影响,并通过模型试验验证了公式的合理性。这些学者的研究对象为有限土体,当分析挡墙稳定性时都需要计算土压力,求解过程比较复杂。

综上所述,目前关于放坡状态下有限土体刚性挡土墙的稳定性的研究存在计算过程烦琐和参数考虑不全等问题,有待进一步地探讨与研究。因此,本研究以挡墙与墙后填土的整体为研究对象,基于极限分析上限法,得出放坡状态下有限土体刚性挡墙稳定性的简化计算方法,省略计算挡墙土压力的过程。同时,分析了墙后土体的宽高比、黏聚力、内摩擦角、墙土界面摩擦角和墙土界面黏聚力等参数对挡墙稳定性的影响,以期为此类工程设计提供参考。

## 1 放坡状态挡墙稳定性计算

### 1.1 挡墙的平移滑动理论模型

在挡墙平移滑动破坏模式中,其计算模型示意如图1所示。

基本假定如下:

- 1) 墙后填土为均质黏土;
- 2) 挡墙在土压力的作用下,没有发生转动,但产生了远离填土的平移运动。

在图1中,假设:墙背竖直,墙后放坡状填土为黏性土体,填土表面水平;刚性挡土墙高度为 $H$ ;临界深度为 $h$ ;墙后顶面有限宽度为 $l$ ;重度为 $\gamma$ ;挡土墙底面为速度间断面; $\delta_a$ 为挡土墙底面摩擦角; $V_a$ 为挡墙运动速度; $V_b$ 为填土与挡土墙的相对运动速度; $\delta$ 为挡土墙与填土的界面摩擦角; $V_c$ 为填土区运动速度; $\varphi$ 为土体内摩擦角;斜坡底角为 $\beta$ ;破裂角为 $\alpha$ 。

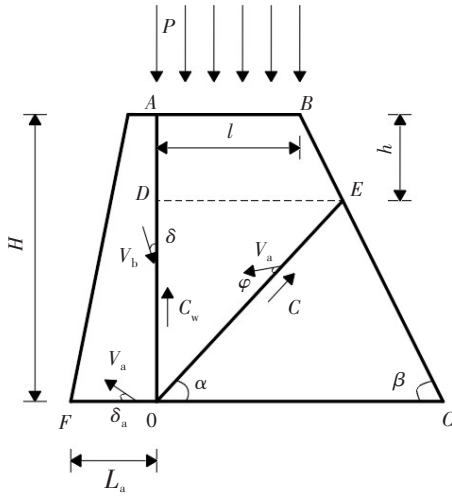


图1 挡墙稳定性理论模型

Fig. 1 Theoretical model of retaining wall stability

根据图1所示的几何关系,可以求出各边的长度:

$$\begin{cases} \overline{AB} = l \\ \overline{OC} = l + \frac{H}{\tan\beta} \\ \overline{OE} = (l + \frac{H}{\tan\beta}) \frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ \overline{OD} = (l + \frac{H}{\tan\beta}) \frac{\sin\beta \sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \\ \overline{DE} = (l + \frac{H}{\tan\beta}) \frac{\sin\beta \cos\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \\ h = H - (l + \frac{H}{\tan\beta}) \frac{\sin\beta \sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (1)$$

根据极限分析上限法,  $V_a$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  3个矢量必须满足速度相容关系,如图2所示,其表达式为

$$\vec{V}_a + \vec{V}_b = \vec{V}_c \quad (2)$$

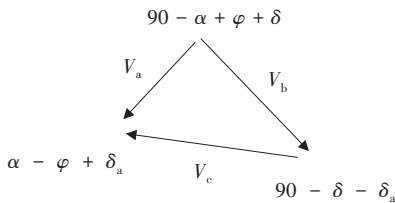


图2 速度矢量关系

Fig. 2 Relationship between velocity vectors

根据式(1)与图2的几何关系,以及三角形正弦定理,可得

$$V_a = \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta)}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c \quad (3)$$

$$V_b = \frac{\sin(\alpha + \delta_a - \varphi)}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c \quad (4)$$

## 1.2 做功功率与能量耗散

应用极限分析上限法,结合图1,研究墙后四边形ABEO区域的填土,计算外力做功功率及能量耗散功率。

1) 均布荷载P的做功功率  $W_p$ 。

均布荷载P在ABEO区域上做功,长度为 $\overline{AB}$ 。P沿竖直方向向下,与 $V_c$ 方向成 $90^\circ + \varphi - \alpha$ 的夹角。其表达式为

$$W_p = Pl \sin(\alpha - \varphi) V_c \quad (5)$$

2) ABEO区域填土重力做功的功率  $W_g$ 。

重力方向为竖直向下,且与 $V_c$ 方向夹角为 $90^\circ + \varphi - \alpha$ 。其表达式为

$$W_g = \frac{1}{2} \gamma \left[ lH - l \left( l + \frac{H}{\tan\beta} \right) \frac{\sin\beta \sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + H \left( l + \frac{H}{\tan\beta} \right) \frac{\sin\beta \cos\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right] \sin(\alpha - \varphi) V_c \quad (6)$$

式中: $\gamma$ 为填土重度。

3) 沿AO界面的能量耗散  $D_{AO}$ 。

四边形ABEO的AO为墙土界面,AO界面的总黏聚力,记为 $C_w$ ,如图1所示,其表达式为

$$C_w = c_w \overline{AO} = H c_w \quad (7)$$

式中: $c_w$ 为墙土界面黏聚力。

$C_w$ 与 $V_b$ 的夹角为 $\delta$ ,则能量耗散 $D_{AO}$ 可以表示为

$$D_{AO} = -c_w H \frac{\sin(\alpha + \delta_a - \varphi) \cos\delta}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c \quad (8)$$

4) 沿EO界面的能量耗散  $D_{EO}$ 。

四边形ABEO的EO为填土的滑裂面,EO界面的总黏聚力记为C,如图1所示,其表达式为

$$C = c \overline{EO} = c \left( l + \frac{H}{\tan\beta} \right) \frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (9)$$

式中: $c$ 为填土黏聚力。

C与 $V_c$ 方向成 $\varphi$ 夹角,则能量耗散 $D_{EO}$ 可以表示为

$$D_{EO} = -c \left( l + \frac{H}{\tan\beta} \right) \frac{\sin\beta \cos\varphi}{\sin(\alpha + \beta)} V_c \quad (10)$$

5) 沿挡墙底面FO的能量耗散  $D_{FO}$ 。

FO边为墙土界面,FO界面的总黏聚力记为 $C_L$ ,如图1所示,其表达式为

$$C_L = c_L L \quad (11)$$

式中: $c_L$ 为墙土界面黏聚力。

$C_L$ 与 $V_a$ 的夹角为 $\delta_a$ ,则能量耗散 $D_{FO}$ 可以表示为

$$D_{FO} = -c_L L \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \cos \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c \quad (12)$$

6) 挡土墙的重力做功功率  $W_{wg}$ 。

挡土墙重力方向竖直向下,与  $V_a$  的夹角为

$90^\circ - \delta_a$ 。其表达式

$$W_{wg} = -W_w \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \sin \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c \quad (13)$$

式中:  $W_w$  为挡土墙重力。

7) 建立能量平衡控制方程。

基于极限分析上限法,  $ABEO$  区域填土的所有外力做功功率与能量耗散之和为零:

$$W_p + W_g + W_{wg} + D_{AO} + D_{EO} + D_{FO} = 0 \quad (14)$$

即:

$$\begin{aligned} & Pl \sin(\alpha - \varphi) V_c + \\ & \frac{1}{2} \gamma \left[ lH - l \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + \right. \\ & \left. H \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right] \sin(\alpha - \varphi) V_c - \\ & W_w \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \sin \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c - \\ & c_w H \frac{\sin(\alpha + \delta_a - \varphi) \cos \delta}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c - \\ & c \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \cos \varphi}{\sin(\alpha + \beta)} V_c - \\ & c_L L \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \cos \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} V_c = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式(14)中,共含6项,外力做功功率为前三项,内能耗散功率为后三项,且每项都含有一个参数  $V_c$ ,而  $V_c$  为填土区  $ABEO$  的运动速度,将参数  $V_c$  消除,即:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \gamma \left[ lH - l \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + \right. \\ & \left. + H \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right] \sin(\alpha - \varphi) \\ & - W_w \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \sin \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} \\ & - c_w H \frac{\sin(\alpha + \delta_a - \varphi) \cos \delta}{\cos(\delta + \delta_a)} \\ & - c \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \cos \varphi}{\sin(\alpha + \beta)} \\ & - c_L L \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \cos \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} \\ & + Pl \sin(\alpha - \varphi) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

### 1.3 挡墙稳定性系数

应用能量法估算稳定性系数  $F_s$  的表达式为

$$F_s = \frac{\sum W_{negative} + \sum D}{\sum W_{positive}} \quad (17)$$

式中:

$\sum D$  表示总能量耗散功率;

$\sum W_{negative}$  表示外力做功为负功的总功率;

$\sum W_{positive}$  表示外力做功为正功的总功率。

当外力做负功时,该力利于墙土系统稳定性,因此,  $\sum W_{negative}$  只包含挡墙的重力做功功率。当外力做正功时,该力不利于墙土系统稳定性,因此  $\sum W_{positive}$  只包含塑性区  $ABEO$  区域填土的  $W_g$  与  $P$  的做功功率。

$$\sum W_{negative} = W_{wg} + D_{AO} + D_{EO} + D_{FO} \quad (18)$$

$$\sum W_{positive} = W_p + W_g \quad (19)$$

$$\sum D = D_{AO} + D_{EO} + D_{FO} \quad (20)$$

将式(18)~(20)带入式(17),则有

$$f_s = \frac{K_1}{K_2} \quad (21)$$

式中:

$$\begin{aligned} K_1 = & W_w \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \sin \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} + \\ & c_w H \frac{\sin(\alpha + \delta_a - \varphi) \cos \delta}{\cos(\delta + \delta_a)} + \\ & c \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \cos \varphi}{\sin(\alpha + \beta)} + \\ & c_L L \frac{\cos(\alpha - \varphi - \delta) \cos \delta_a}{\cos(\delta + \delta_a)} \end{aligned} \quad (22)$$

$$K_2 = Pl \sin(\alpha - \varphi) +$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \gamma \left[ lH - l \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} + \right. \\ & \left. H \left( l + \frac{H}{\tan \beta} \right) \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right] \sin(\alpha - \varphi) \end{aligned} \quad (23)$$

当式(21)满足条件

$$\frac{\partial f_s}{\partial \alpha} = 0 \quad (24)$$

此时,对应的  $\alpha$  为破裂角,计算得到挡墙的稳定性系数  $F_s$  最小值。当  $F_s = 1$  时,墙土系统处于能量平衡的极限状态。

## 2 公式验证

为验证该方法合理性,采用建筑边坡工程技术规范<sup>[20]</sup>计算文献<sup>[21]</sup>算例的稳定性系数,并与该方



法的结果进行对比,同时与库伦主动土压力计算的挡墙稳定性结果进行对比。设挡墙顶面宽度为0.5 m,底面宽度为4.0 m,挡墙高度为10.0 m,坡底角为 $40^\circ$ ,挡墙重度为 $25.0 \text{ kN/m}^3$ 。结果见表1。

表1  $F_s$  计算对比值Table 1 Calculate the logarithm ratio of  $F_s$ 

$H = 10 \text{ m}$	$c = 5 \text{ kPa}$		库伦方法	$H = 10 \text{ m}$	$c = 10 \text{ kPa}$		库伦方法
	本文 $F_s$	文献[20] $F_s$		$l/H$	本文 $F_s$	文献[20] $F_s$	
$l/H$							
0.1	0.66	0.72	0.51	0.1	0.94	1.12	0.74
0.2	0.60	0.64		0.2	0.86	0.96	
0.3	0.56	0.58		0.3	0.81	0.86	
0.4	0.54	0.55		0.4	0.78	0.80	
0.5	0.52	0.53		0.5	0.76	0.76	
0.6	0.51	0.52		0.6	0.74	0.74	
0.7	0.51	0.51		0.7	0.74	0.73	
0.8	0.51	0.51		0.8	0.74	0.73	
0.9	0.51	0.51		0.9	0.75	0.74	
1.0	0.51	0.51		1.0	0.76	0.75	

由表1可知,稳定性系数 $F_s$ 随着 $l/H$ 的增大而减小,并随着宽度 $l$ 的增加,逐渐接近半无限土体库伦方法所得到的稳定性系数。与文献[20]相比,该方法 $F_s$ 的变化规律基本一致,但简化了计算过程。

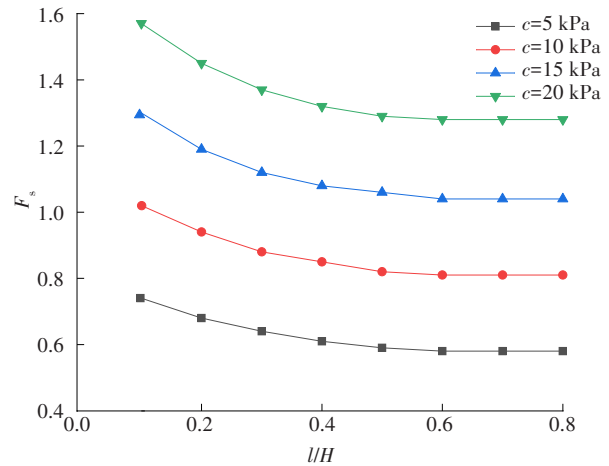
### 3 参数敏感性分析

为了分析各类参数对挡墙稳定性的影响,以放坡状态下的黏性土体为例,假设墙背竖直,挡墙重度 $\gamma_w = 25.0 \text{ kN/m}^3$ ,挡墙高度 $H = 10.0 \text{ m}$ ,挡墙底面长度 $L_a = 4.0 \text{ m}$ ,挡墙顶面宽度为0.5 m,填土顶宽 $l = 8.0 \text{ m}$ ,填土重度 $\gamma = 19.6 \text{ kN/m}^3$ ,填土内摩擦角 $\varphi = 20^\circ$ ,墙背面摩擦角 $\delta = \frac{2}{3}\varphi$ ,墙底面摩擦角 $\delta_a = \frac{2}{3}\varphi$ ,填土黏聚力 $c = 20 \text{ kPa}$ ,墙土界面黏聚力 $c_w = c \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$ ,墙底面黏聚力 $c_1 = c \frac{\tan \delta_a}{\tan \varphi}$ ,坡底角 $\beta = 40^\circ$ ,均布荷载 $P=0$ 。

#### 3.1 不同黏聚力下 $l/H$ 对稳定性系数 $F_s$ 影响

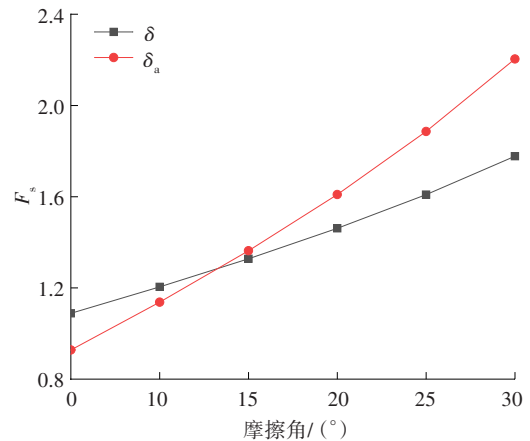
在保持其他条件不变的情况下,改变填土黏聚力 $c$ 和 $l/H$ 的取值。不同 $c$ 的情况下, $F_s$ 与 $l/H$ 关系如图3所示。从图3可以看出,随着土的黏聚力的增

大,稳定系数 $F_s$ 显著增加;在相同黏聚力的情况下,稳定系数随宽高比 $l/H$ 的增加呈先递减后稳定的趋势;不同黏聚力的变化趋势大致相同;当 $l/H$ 的值大于0.6后,稳定系数 $F_s$ 基本保持不变。

图3 不同黏聚力下 $F_s - (l/H)$ 的关系Fig. 3 Relationship between  $F_s$  and  $l/H$  under different  $c$ 

#### 3.2 摩擦角 $\delta$ 及 $\delta_a$ 对稳定性系数 $F_s$ 的影响

在保持其他条件不变的情况下,改变墙背面摩擦角 $\delta$ 或墙底面摩擦角 $\delta_a$ 的取值。 $\delta$ 、 $\delta_a$ 与 $F_s$ 的关系如图4所示。

图4  $F_s$ 与 $\delta$ 、 $\delta_a$ 关系Fig. 4 Relationship between  $F_s$  and  $\delta$ ,  $F_s$  and  $\delta_a$ 

从图4可以看出,稳定性系数 $F_s$ 随墙背面摩擦角 $\delta$ 的增大而增大,且二者近似呈线性关系;当其他参数均不改变时,稳定性系数 $F_s$ 随墙底面摩擦角 $\delta_a$ 增大而增大; $\delta$ 的增长趋势小于 $\delta_a$ 的。

#### 3.3 黏聚力 $c_w$ 及 $c_1$ 对稳定性系数 $F_s$ 的影响

通过两种情况,得到 $c_w$ 、 $c_1$ 与 $F_s$ 的关系。这两种情况的假设是:① 给定墙土界面黏聚力 $c_w$ 的取值,

其余条件不变;② 给定墙底面黏聚力 $c_1$ 的取值,其余条件不变。其结果如图5所示。从图5可以看出,稳定性系数 $F_s$ 随墙土界面黏聚力 $c_w$ 的增大而增大,且二者近似呈线性关系;挡墙稳定性系数 $F_s$ 随墙底黏聚力 $c_1$ 的增大而增大,其曲线近似平行; $c_w$ 的增加趋势大于 $c_1$ 的。

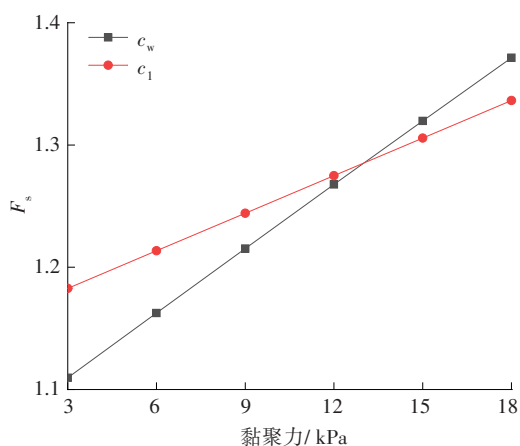


图5  $c_w, c_1$ 与 $F_s$ 关系

Fig. 5 Relationship between  $F_s$  and  $c_w$ ,  $F_s$  and  $c_1$

### 3.4 填土内摩擦角 $\varphi$ 对稳定性系数 $F_s$ 的影响

当改变填土内摩擦角 $\varphi$ 的取值,其余条件不变时, $F_s$ 与 $\varphi$ 的关系如图6所示。

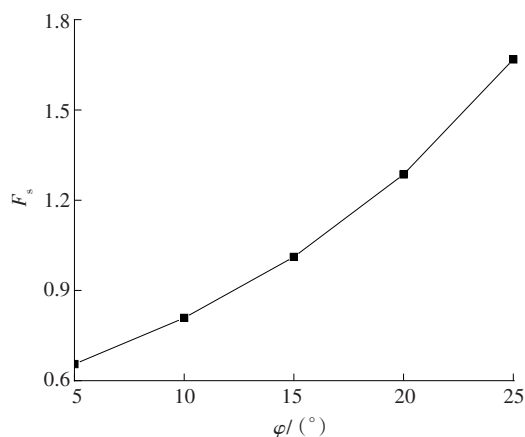


图6  $F_s$ 与 $\varphi$ 的关系

Fig. 6 Relationship between  $F_s$  and  $\varphi$

从图6可以看出,稳定性系数 $F_s$ 随填土内摩擦角 $\varphi$ 增大而增大,且随着 $\varphi$ 的增大,稳定性系数 $F_s$ 的增长速度越来越快。

## 4 结论

本研究对放坡状态下有限土体刚性挡墙的稳定性的分析,得出以下结论:

1) 本研究考虑了填土顶面荷载作用、墙土黏结作用、填土与挡墙墙背和墙底的摩擦作用以及土体黏聚力的影响,利用极限分析上限法,研究了挡墙在平移模式下的稳定性,省略了土压力的计算过程,建立了放坡状态下有限土体刚性挡墙稳定性的简化计算模型。

2) 通过使用本文提出的方法,当土体宽度趋近于半无限土体时,计算出的 $F_s$ 与库伦方法的计算结果接近,验证了本文方法的合理性与正确性。

3) 挡墙稳定性系数随土体黏聚力、墙土界面摩擦角、墙土界面黏聚力及土的内摩擦角增大而增大;与宽高比呈反比关系,随宽高比的增加呈先递减后逐渐趋于稳定。

### 参考文献(References):

- [1] HANDY R L. The arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302-318.
- [2] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressure on retaining walls near rock faces [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(6): 586-599.
- [3] TAKE W A, VALSANGKAR A J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1220-1230.
- [4] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 717-722. YING Hongwei, JIANG Bo, XIE Kanghe. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 717-722.
- [5] 卢坤林, 朱大勇, 杨扬. 考虑土拱效应的非极限主动土压力计算方法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 19-25. LU Kunlin, ZHU Dayong, YANG Yang. Calculation method of active earth pressure under non-limit state considering soil arching effects [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 19-25.
- [6] 徐日庆, 廖斌, 吴渐, 等. 黏性土的非极限主动土压力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 148-154. XU Riqing, LIAO Bin, WU Jian, et al. Computational method for active earth pressure of cohesive soil under nonlimit state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 148-154.
- [7] 刘杰. 不同位移模式下挡墙和抗滑桩稳定性上限分析

- [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- LIU Jie. Upper bound analysis of stability of retaining wall and anti slide pile with different displacement modes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [8] 刘洋, 于鹏强. 刚性挡土墙平移模式的土拱形状与主动土压力分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 506-516, 528.
- LIU Yang, YU Pengqiang. Analysis of soil arch and active earth pressure on translating rigid retaining walls [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 506-516, 528.
- [9] 石位哲. 刚性挡土墙主动土压力的模型试验与解析研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- SHI Weizhe. Model test and analytical research on the active earth pressure acting on a rigid retaining wall [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [10] 方鹏, 陈文胜, 蒋茂林, 等. 圆弧形挡土墙整体土压力计算[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 69-74.
- FANG Peng, CHEN Wensheng, JIANG Maolin, et al. Calculation of integral earth pressure of circular retaining wall [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 69-74.
- [11] 应宏伟, 黄东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2970-2978.
- YING Hongwei, HUANG Dong, XIE Xinyu. Study of active earth pressure on retaining wall subject to translation mode considering lateral pressure on adjacent existing basement exterior wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (sup 1): 2970-2978.
- [12] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 等. 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 131-137.
- YANG Minghui, DAI Xiabin, ZHAO Minghua, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 131-137.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 杨明辉, 吴志勇, 赵明华. 挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 19-27.
- YANG Minghui, WU Zhiyong, ZHAO Minghua. Soil arch effect analysis and earth pressure calculating method for finite width soil behind retaining wall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 19-27.
- [15] 徐日庆, 徐叶斌, 程康, 等. 有限土体下考虑土拱效应的非极限主动土压力解[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 362-371.
- XU Riqing, XU Yebin, CHENG Kang, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under nonlimit state of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 362-371.
- [16] JIAO Y Y, ZHANG Y, TAN F. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering soil arching effects and intermediate principal stress [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(11): 1-8.
- [17] 方焘, 杨思敏, 徐长节, 等. 浸水条件下有限土体土压力试验研究与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(6): 1699-1708.
- FANG Tao, YANG Simin, XU Changjie, et al. Experimental research and numerical analysis on active soil pressure of limited soil under water immersion [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(6): 1699-1708.
- [18] 刘忠玉. 有限无黏性填土刚性挡土墙主动土压力计算[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 154-164.
- LIU Zhongyu. Active earth pressure calculation of rigid retaining walls with limited granular backfill space [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 154-164.
- [19] 方焘, 王海龙, 杨锐锐, 等. 放坡条件下有限土体主动土压力计算[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 50-55.
- FANG Tao, WANG Hailong, YANG Ruirui, et al. Active earth pressure calculation of limited soil in grading conditions [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(4): 50-55.
- [20] 胡卫东, 曾律弦, 刘晓红, 等. 放坡状态有限土体刚性

- 挡土墙主动土压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 63-70.
- HU Weidong, ZENG Lyuxian, LIU Xiaohong, et al. Active earth pressures against rigid retaining walls for finite soil under the grading condition[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 63-70.
- [21] 重庆市城乡建设委员会. 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. Chongqing Urban Rural Construction Commission. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [22] 顾慰慈. 黏性土主动土压力的计算[J]. 水利学报, 1991, 22(1): 55-64. GU Weici. Calculation of active earth pressure of cohesive soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22(1): 55-64.
- [23] 张恒志, 徐长节, 梁禄钜, 等. RB模式下刚性挡墙有限土体主动土压力的离散元模拟与理论研究[J]. 岩土力学, 2021, 42 (10): 2895-2907. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0458.
- ZHANG Hengzhi, XU Changjie, LIANG Lujun, et al. Discrete element simulation and theoretical study of active earth pressure against rigid retaining walls under RB mode for finite soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42 (10): 2895-2907. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0458.
- [24] 杨明辉, 吴志勇, 赵明华. 挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47 (3): 19-27. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.03.003. YANG Minghui, WU Zhiyong, ZHAO Minghua. Soil arch effect analysis and earth pressure calculating method for finite width soil behind retaining wall[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 19-27. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.03.003.
- [25] 韦会强. 挡土墙土体渐进破坏试验研究与数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2007. WEI Huiqiang. The test research and numerical analysis for the progressive rupture of the soil behind the retaining wall[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:杜雪明)