

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211129001

文章编号:1674-599X(2023)02-0087-08

引用格式:李松,刘新喜,王玮玮,等.曲线滑裂面下RB模式的主动土压力计算方法[J].交通科学与工程,2023,39(2):87-94.

Citation:LI song, LIU Xinxi, WANG Weiwei, et al. Active earth pressure solution for RB displacement mode under curved slip crack surface[J].J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 87-94.

曲线滑裂面下RB模式的主动土压力计算方法

李松,刘新喜,王玮玮,李彬

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为研究在RB模式下挡土墙的主动土压力解的问题,假定滑裂面为曲线滑裂面,提出在RB模式下主动土压力的计算方法,采用水平分层的方法推导出主动土压力的微分方程,并用有限差分法对其进行求解,并将计算结果与相关试验结果进行对比,验证该方法的准确性。还讨论了主动土的压力分布、合力大小及合力作用点位置对墙顶位移的影响。研究表明:这三者均与墙顶位移之间存在负相关关系。

关键词:挡墙;主动土压力;RB模式;曲线滑裂面;水平微分法

中图分类号:TU 443

文献标志码:A

Active earth pressure solution for RB displacement mode under curved slip crack surface

LI Song, LIU Xinxi, WANG Weiwei, LI Bin

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

Abstract: In order to study the problem of solving the active earth pressure of retaining walls in RB mode, this study assumes that the slip crack surface is a curved slip crack surface, proposes the calculation method of active earth pressure in RB mode, derives the differential equation of active earth pressure by using the horizontal stratification method, and solves it by the finite difference method, and compares the calculation results with the relevant test results to verify the accuracy of the method. This study also discusses the effect of wall top displacement on the pressure distribution of the active soil, the magnitude of the combined force and the location of the point where the combined force acts. The results of the study show that there is a negative correlation between all three of these and the top of wall displacement.

Key words: retaining wall; active earth pressure; RB displacement mode; curved slip crack surface; horizontal differential method

挡土墙是公路边坡常见的支护结构之一。设计挡土墙必须考虑挡墙墙背土压力的影响。因此,挡墙墙后土压力的求解问题备受国内外学者^[1-2]的关注。目前,最经典的两种土压力计算方法分别由朗肯和库伦两位学者提出。这两种计算方法均假定土体是理想刚塑性土体,且挡墙充分平动至墙后直至土体达到极限状态才停止,并假定滑裂面为直

线型滑裂面。但挡墙抗倾覆试验表明,挡墙的墙体实际上在绕墙底进行转动(rotation outward about base, RB)。如果按照朗肯和库伦的假设(挡墙平动至土体达到极限状态)计算主动土压力,得到的结果会比实测数值小,按该计算方法得到的墙后土压力值所设计的挡土墙可能存在倾倒风险。此外,大量试验^[3-5]也表明当土体达到主动极限状态时,滑裂

收稿日期:2021-11-29

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

作者简介:李松(1998—),长沙理工大学硕士生。

面应为曲面,且滑裂面形状几乎不受位移模式的影响,故按直线型滑裂面计算,结果会有较大的偏差。

试验^[6-8]发现,当挡墙后土体尚未达到极限状态前,土压力的分布是变化的。这种状态下的土压力被称为非极限状态下的土压力。类似地,在RB模式下,当挡墙还未转动至极限状态前,挡墙后的填土也处于非极限状态。在RB模式的研究方面,王元战等^[9]采用了库伦土压力的假设,使用水平单元分析法,给出了RB模式下的土压力、土压力合力大小、土压力合力作用点位置的表达式。龚慈等^[10]依据土体渐进破坏原理,考虑土拱效应,采用改进的库伦土压力计算公式,得到了RB模式下非极限状态的主动土压力的解析解。张永兴等^[11]采用了库伦土压力的假设,通过研究RB模式的极限状态下土体内主应力拱的形状,推导出了挡土墙主动土压力的解析解。张恒志等^[12]基于离散元模拟结果,采用滑裂线分层的斜微分单元法,推导了RB模式下主动土压力的计算公式。这些关于RB模式下的非极限状态主动土压力的解析解,大都在经典的土压力直线型滑裂面的假设下推导得到。

在曲线型滑裂面的研究中,曹振民等^[13]假设挡墙后半无限土体的滑裂面为旋轮滑裂面,根据水平微分土层的平衡条件,用数值解析方法得到了挡墙后主动土压力的解析解。杨明辉等^[14]假设挡墙墙后有限土体的曲线型滑裂面为对数螺旋型滑裂面,采用薄层单元法推导了有限土体主动土压力的计算方法。杨和平等^[15]通过倾斜微分单元法,推导出了挡墙后土压力求解公式,并对其进行编程求解,建立了曲线型破裂面的主动土压力分析算法。这些研究都基于墙体平动模式的假设,并未给出在RB模式下的挡墙后主动土压力的计算方法。

目前,鲜有学者讨论在RB模式和假定滑裂面为曲线型的情况下求解挡墙后的主动土压力。本研究假设半无限滑裂面为旋轮型滑裂面,讨论在RB模式下非极限状态主动土压力的计算方法。本研究先采用水平微分法,推导挡墙主动土压力分布的微分方程;然后,用有限差分法对其进行求解,得到主动土压力分布、主动土压力合力以及合力作用点位置的表达式;最后,研究挡墙位移对这三者的影响,分析其变化规律,以期为类似工程实践提供借鉴。

1 计算模型假定

1.1 滑裂面假定

土压力的计算须考虑滑裂面形状的影响。目前,对于滑裂面,大部分研究都沿用经典土压力理论中对滑裂面的假设,即滑裂面曲线为一条通过墙踵的直线。但实际情况并非如此。有研究表明,挡墙后填土滑裂面应为曲面^[3-5]。本文基于旋轮滑裂面的假设计算主动土压力,该滑裂面如图1所示。

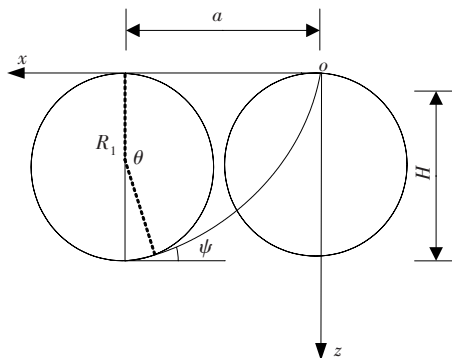


图1 旋轮滑裂面

Fig. 1 Cycloidal slip surface

在直角坐标平面 xoz 中,旋轮线的坐标表达式为:

$$\begin{cases} x = R_1(\theta - \sin \theta) \\ z = R_1(1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_1 为旋轮线轨迹半径; θ 为旋轮转角。当旋轮线经过墙踵时,假设对应旋轮转角为 θ_c ,此时,旋轮半径 R_1 为:

$$R_1 = \frac{a}{\theta_c - \sin \theta_c} \quad (2)$$

式中: a 为挡墙后土体产生滑裂面的宽度。将式(2)代入式(1),可求得旋轮线高 H :

$$H = R_1(1 - \cos \theta_c) \quad (3)$$

由式(1)可知,任意深度 z 对应的旋轮转角 θ 为:

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{z}{R_1}\right) \quad (4)$$

在旋轮线上任意深度 z 处的切线与水平方向的夹角 ψ (即破裂角),可表示为:

$$\psi = \arctan\left(\frac{dz}{dx}\right) = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

1.2 理论模型假定

在RB模式下,主动土压力简化模型如图2所示。在图2中,挡墙后填土高与图1的旋轮线高相

同,均为 H ,填土表面 A 、 B 两点间宽为 a ,当挡墙绕 O 点转动时,假设潜在滑裂面曲线为 OB ,破裂角为 ψ 。

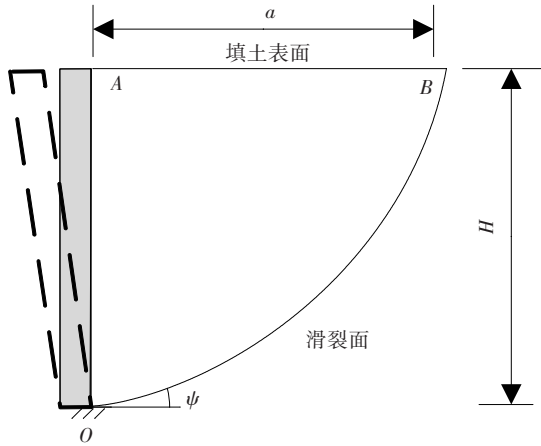


图2 简化计算模型

Fig. 2 The simplified calculation model

本研究的计算均假定:

- 1) 挡墙后填土为均质、各向同性的无黏性土;
- 2) 挡土墙为刚性,不会随位移的变化而产生变形,墙体位移模式为RB模式;
- 3) 土层间存在相对水平位移,故需考虑土层间的剪切力;
- 4) 在土层的非极限状态下,挡墙后填土的内外摩擦角与墙体位移量间存在非线性函数关系。

2 主动土压力的推导与求解

2.1 土体摩擦角发挥值

挡墙后填土的内外摩擦角会随着墙体的位移发生改变。随着位移逐渐增大,土压力从静止状态开始逐渐减小,在经历非极限状态后,变成主动极限状态。在RB模式下,挡墙后填土的内外摩擦角随着转角的增大逐渐发挥。且在相同转角下,越靠近顶部的土体的水平位移越大。因此,靠近顶部的挡墙后填土会先达到极限状态,远离顶部的挡墙后填土会处于非极限状态。静止状态、非极限状态、主动极限状态下挡墙后填土内摩擦角分别为 φ_0 、 φ_m 、 φ ,其所对应的墙土外摩擦角分别为 δ_0 、 δ_m 、 δ 。

在RB转动模式下,当挡墙后填土处于非极限状态时,不同深度 z 的水平位移 S_z 均不相同。此时,内外摩擦角发挥值也因各深度的水平位移的差异而不同。龚慈^[16]根据模型试验取得的内外摩擦角发挥值的特点,建立了内外摩擦角的发

挥值与土体位移的非线性函数关系,其表达式为:

$$\begin{cases} \tan \delta_m = \tan \delta_0 + K_d (\tan \delta - \tan \delta_0) \\ \tan \varphi_m = \tan \varphi_0 + K_d (\tan \varphi - \tan \varphi_0) \end{cases} \quad (6)$$

其中, δ_0 可保守地按 $\delta_0 = \varphi/2$ 得到,而根据文献[17], φ_0 取值表达式为:

$$\varphi_0 = \arcsin [(1 - K_0)/(1 + K_0)] \quad (7)$$

式中: K_0 为静止侧土压力系数, $K_0=1-\sin\varphi$ 。 K_z 为水平位移 S_z 对 δ_m 、 φ_m 发挥程度的影响系数,其表达式为:

$$K_z = \begin{cases} \frac{4}{\pi} \arctan \left(\frac{S_z}{S_c} \right), & S_z \leq S_c \\ 1, & S_z > S_c \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_c 为土体达到主动极限状态时所需的位移,其取值范围见表1^[18]; $S_z = S_{\max}(1 - z/H)$; S_{\max} 为墙体转动下土体最大水平移,在一般情况下,其与墙顶的水平位移相等。根据 S_{\max} 与 S_c 的大小关系,内外摩擦角的发挥值有两种情况,如图3所示。

表1 土体达到极限状态所需位移

Table 1 Displacement required for the soil to reach the limit state

土体类别	S_c	研究人员(年份)
密实砂	$0.1\%H$	TERZAGHI(1934年)
粉砂	$(0.6\% \sim 0.8\%)H$	MATSUO等(1978年)
矿渣	$(0.1\% \sim 0.3\%)H$	MATSUO等(1978年)
压实黏土	$(0.9\% \sim 1.0\%)H$	岳祖润(1992年)
密实砂	$0.4\%H$	ISHIHARA等(1995年)
砂土	$(0.1\% \sim 0.5\%)H$	彭胤宗等(1997年)
黏土	$0.4\%H$	WU(1976年)
粉质黏土	$0.4\%H$	杨斌等(1999年)
砂土	$0.3\%H$	杨斌等(1999年)
中密砂	$(0.14\% \sim 0.16\%)H$	陈页开等(2001年)
中密砂	$(0.14\% \sim 0.16\%)H$	陈页开等(2001年)

从图3可以看出,当 $S_{\max} \leq S_c$ 时,挡墙后的填土均处于非极限状态;当 $S_{\max} > S_c$ 时,对于水平位移 $S_z > S_c$ 的挡墙后填土,其位移已达到填土极限状态所需位移,故填土处于极限状态,而对于水平位移 $S_z \leq S_c$ 的这部分填土,其仍处于非极限状态。

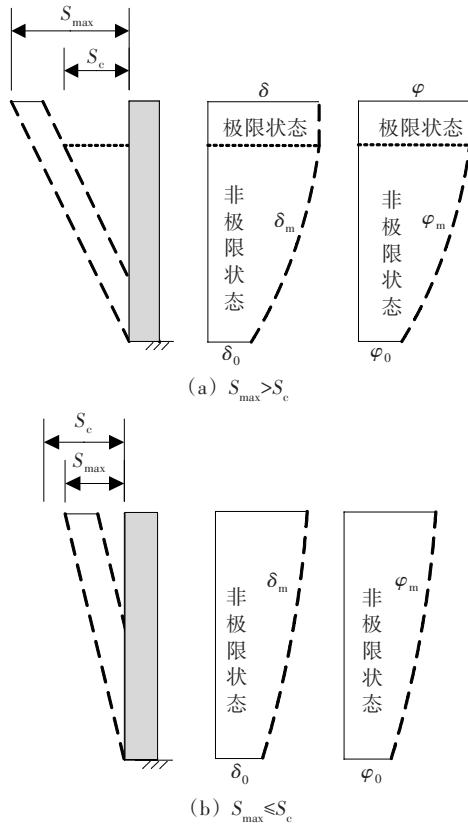


图3 两种情况下内外摩擦角发挥值

Fig. 3 Internal and external friction angle play value in two cases

2.2 建立微分单元平衡方程

在深度为 z 的滑动土处,取高度为 dz 的微分单元体,对其进行受力分析,过程如图4所示。

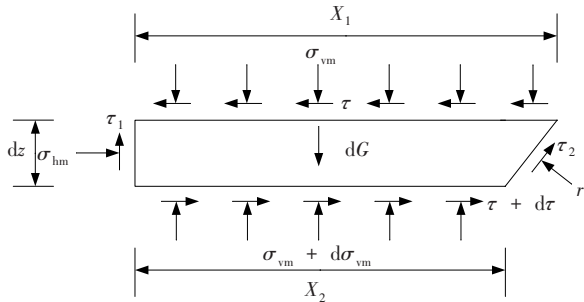


图4 微分单元体受力分析图

Fig. 4 Differential unit body force analysis diagram

图4中, σ_{hm} 为左侧挡墙传递给土体的反作用力; σ_{vm} 为上层微分单元传递给下层的反作用力; τ 为微分单元层间的剪切力; r 为土体滑动面对土体的反作用力。 X_1 、 X_2 分别为微分单元的顶面、底面的宽度,其表达式分别为:

$$X_1 = \frac{H[\theta_c - \sin(\theta_c)]}{1 - \cos(\theta_c)} - \frac{H[\theta - \sin(\theta)]}{1 - \cos(\theta_c)} \quad (9)$$

$$X_2 = X_1 - \cot\psi dz \quad (10)$$

将式(5)代入式(10),则有:

$$X_2 = X_1 - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) dz \quad (11)$$

微分土体的自重 G 的微分表达式为:

$$dG = \gamma \frac{X_1 + X_2}{2} dz = \gamma X_1 dz \quad (12)$$

挡墙对土体的剪切力 τ_1 和滑动面上的剪切力 τ_2 的表达式分别为:

$$\tau_1 = \sigma_{hm} \tan \delta_m \quad (13)$$

$$\tau_2 = r \tan \varphi_m \quad (14)$$

根据水平平衡条件 $\Sigma F_x = 0$,可得:

$$\sigma_{hm} dz - r dz + \tau_2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) dz + (\tau + d\tau) [X_1 - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) dz] - \tau X_1 = 0 \quad (15)$$

根据竖向平衡条件 $\Sigma F_y = 0$,可得:

$$\sigma_{vm} X_1 + \gamma X_1 dz - \tau_1 dz - \tau_2 dz - (\sigma_{vm} + d\sigma_{vm}) X_2 - r \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) dz = 0 \quad (16)$$

令 $\sigma_{hm} = K \sigma_{vm}$, K 是库伦理论计算的侧土压力系数,则 K 可表示为:

$$K = \frac{\cos^2 \varphi_m}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_m + \delta_m) \sin \varphi_m}{\cos \delta_m}}\right]^2 \cos \delta_m} \quad (17)$$

令 $\tau = \sigma_{vm} \tan \varphi'_m$,其中 φ'_m 为非极限状态下层间填土的等效内摩擦角,令 $\varphi'_m = \xi \varphi_m$; ξ 为折减系数^[19],一般 $\xi \in [0.8, 1.0]$,本文取 $\xi = 1.0$ 。化简式(16),可得:

$$r = \frac{\sigma_{hm} - \tau \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + X_1 \frac{d\tau}{dz}}{1 - \tan \varphi_m \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{K \sigma_{vm} - \sigma_{vm} \tan \varphi_m \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + X_1 \frac{d\sigma_{vm}}{dz} \tan \varphi_m}{1 - \tan \varphi_m \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (18)$$

将式(19)代入式(17),则有:

$$M \frac{d\sigma_{vm}}{dz} = \gamma - \frac{\sigma_{vm} N}{X_1} \quad (19)$$

其中,

$$M = 1 + \frac{\tan \varphi_m \left[\tan \varphi_m + \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]}{1 - \tan \varphi_m \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)};$$

$$N = K \tan \delta_m - \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

$$+ \frac{\left[K - \tan \varphi_m \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \left[\tan \varphi_m + \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]}{1 - \tan \varphi_m \tan \left(\frac{\theta}{2} \right)}.$$

2.3 有限差分法求解平衡方程

式(19)中含有参数 θ ,而 θ 会随着深度 z 的改变而变化,较难求解。本研究采用有限差分法对其进行求解,如图5所示。

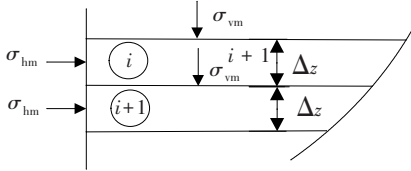


图5 有限差分法分层

Fig. 5 Finite difference method stratification

将式(19)转化为:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \sigma_{vm}^i}{\Delta z} = \frac{1}{M} \left(\gamma - \frac{N}{X_1} \sigma_{vm}^i \right) \\ \bar{\sigma}_{vm}^{i+1} = \bar{\sigma}_{vm}^i + \Delta \bar{\sigma}_{vm}^i \\ \bar{\sigma}_{hm}^{i+1} = K \bar{\sigma}_{vm}^{i+1} \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20)可求得每层微分单元的水平分力,利用Matlab软件对其进行编程,通过假定不同的 θ_c 求出对应的土压力合力 E_a ,计算流程如图6所示。当 E_a 出现第一次极值时,称此时的 θ_c 为滑裂面的破裂角。

主动土压力合力 E_a 的计算式为:

$$E_a = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{hm}^i}{\cos \delta_{am}} \Delta z \quad (21)$$

主动土压力抗倾覆力矩 M 为:

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_{hm}^i (Z - z) \Delta z \quad (22)$$

式中: z 为每层微分单元对应的深度。

根据式(21)~(22)可求得主动土压力合力作用点距墙底高度,其表达式为:

$$h_c = \frac{M}{E_a} \quad (23)$$

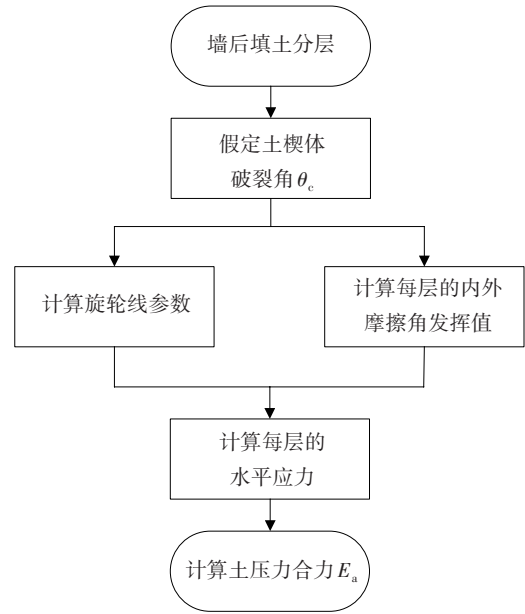


图6 计算流程

Fig. 6 Calculation flow chart

3 合理性验证及参数分析

3.1 对比验证

关于RB模式下的挡土墙压力的分布问题, FANG等^[7]通过模型试验得到了位移与土压力分布的关系。当填土采用风干砂土,墙背竖直,模型墙高为1.0 m,挡墙后的填土呈水平且无外荷载时,取 φ 为 33.4° , δ 为 $2\varphi/3$,重度 γ 为 15.34 kN/m^3 , S_c 为 $0.005 H$, φ_0 和 δ_0 分别按式(7)及 $\delta_0 = \varphi/2$ 计算得到,通过改变墙顶最大位移,得到不同位移比(S_{\max}/S_c)下的土压力分布情况。本研究将计算值与试验值进行了对比,结果如图7所示。

从图7可以看出,试验值与计算值大致相近,尤其是当 $S_{\max}/S_c=1.0$ 时,部分土体达到极限状态。此时,计算值与理论值几乎重合。从试验所测得土压力分布曲线可以看出,实际土体上部存在土拱效应。但本研究未考虑该效应,故试验值与计算值在土拱效应发挥段略有不同。当挡墙墙体绕墙底转动的转角逐渐增大时,挡墙后填土的内外摩擦角发挥值逐渐接近极限状态,主动土压力分布会逐渐减小,土压力分布曲线的曲率逐渐增大。实际试验中情况更为复杂,本研究仅为理想模型,所以难免出现误差。但本研究的结果与试验值拟合度总体上较好,该方法对实际工程具有

一定的指导意义。

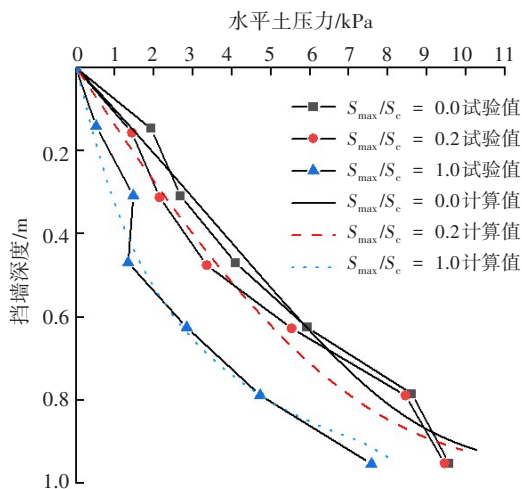


图7 计算值与试验值对比

Fig. 7 Comparison of calculation value and test value

3.2 参数分析

针对可能影响RB模式下的主动土压力的主要参数进行分析。填土仍采用砂土, $\gamma=15.34 \text{ kN/m}^3$, $\varphi=33.4^\circ$, $\delta=2\varphi/3$, $S_c=0.005 H$ 。

3.2.1 位移比 S_{\max}/S_c 对土压力分布的影响

分别取 $S_{\max}/S_c=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 进行计算。当 $S_{\max}/S_c > S_c$ 时, 采用图3(a)的计算模型; 当 $S_{\max}/S_c < S_c$ 时采用图3(b)的计算模型。不同位移比的土压力分布情况, 具体如图8所示。从图8可以看出, 随着位移比的增大, 主动土压力分布逐渐减小, 且减小的幅度也越来越小, 曲线的曲率越来越大。

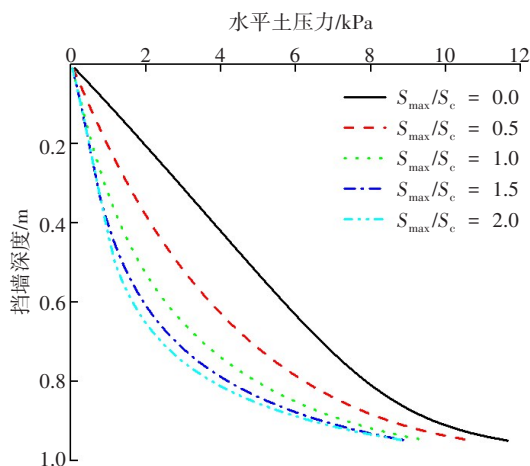
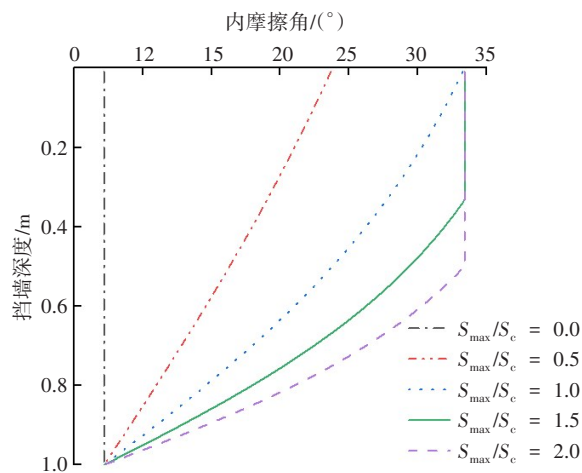
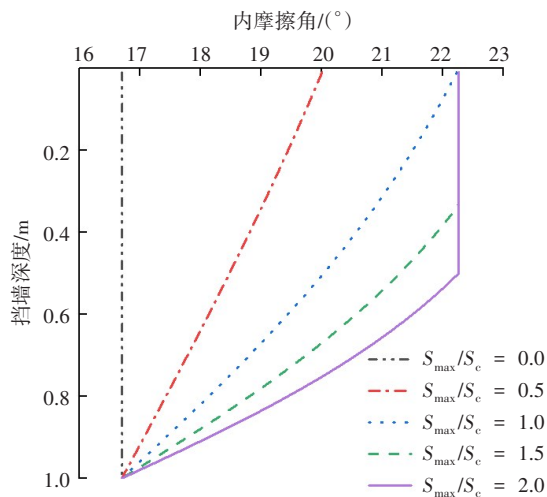


图8 位移比对土压力分布的影响

Fig. 8 Effect of displacement ratio on earth pressure distribution



(a) 内摩擦角发挥值



(b) 外摩擦角发挥值

图9 位移比对内外摩擦角发挥值的影响

Fig. 9 Effect of displacement ratio on the play value of internal and external friction angle

内外摩擦角发挥情况如图9所示。从图9可以看出, 当位移比 $S_{\max}/S_c=0.0$ 时, 此时墙体未发生位移, 挡墙后填土内外摩擦角均为初始值 φ_0, δ_0 ; 当位移比逐渐增大, 出现 $S_{\max}/S_c > S_c$ 时, 部分土体内摩擦角达到极限状态。当 S_{\max}/S_c 分别为1.5、2.0时, 在距离墙顶高2/5、1/2处的深度范围内填土均达到了极限状态。从图9还可以看出, 当 S_{\max}/S_c 分别为1.5、2.0时, 挡墙后的土的主动土压力分布曲线中的内外摩擦角都处于充分发挥的区域(约为2/5墙高处), 两者几乎重合; 该曲线下部则由于内外摩擦角发挥值的不同而略有不同。

3.2.2 位移比 S_{\max}/S_c 对土压力合力及合力作用点的影响

取 S_{\max}/S_c 分别为0.0、0.5、1.0、1.5、2.0进行计算,

分析在不同位移比时土压力合力大小情况以及土压力合力点分布位置情况,如图10~11所示。

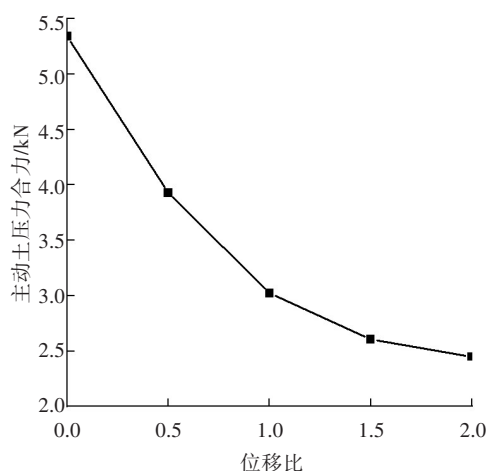


图10 位移比对土压力合力的影响

Fig. 10 Effect of displacement ratio on the combined force of earth pressure

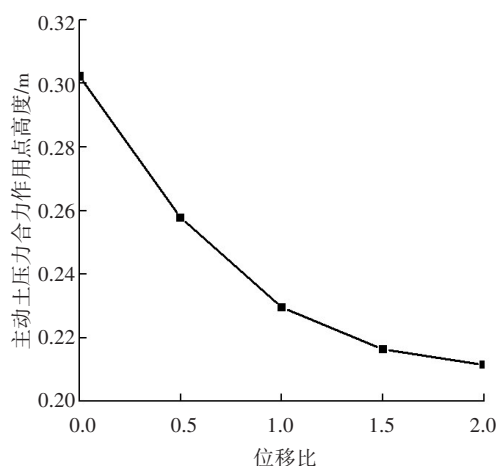


图11 位移比对合力作用点的影响

Fig. 11 Effect of displacement ratio on the point of action of the combined force

从图10~11可以看出,位移比对主动土压力合力大小及合力作用点位置的影响规律几乎一致。随着位移比的增大,土压力合力最终减小至初始值的一半左右;合力作用点从距墙底高约1/3处,降低至距墙底高约1/5处。随着土体内外摩擦角的发挥,这二者的减小幅度越来越小。同时,在图11的RB模式下合力作用点位置均低于平动模式下的作用点位置(墙高的1/3),这也与文献[9]的结果一致。

4 结论

1) 本研究讨论在RB模式下,滑裂面为旋轮滑裂面,且挡墙后填土的内外摩擦角发挥值随填土深

度变化的情况下主动土压力的计算方法。先采用水平微分法对其进行了推导,再通过模型试验验证该计算方法的可行性。

2) RB模式下的非极限主动土压力的分布沿墙高方向呈上凹型,且曲线斜率随高度逐渐增大,其极大值在靠近墙踵处取得。

3) 根据参数敏感性分析可以知,随着位移比 S_{\max}/S_c 逐渐增大,挡墙后填土的内外摩擦角发挥值也逐渐增大,土压力沿挡墙方向的分布则逐渐减小,但减小的幅度越来越小。当 $S_{\max} > S_c$ 时,部分填土的内外摩擦角充分发挥,进入了极限状态。此时,若继续增大位移比,该部分几乎不会发生改变。土压力合力与合力作用点位置均会随着位移比 S_{\max}/S_c 的增大而减小,且合力作用点位置均在距墙踵1/3墙高以下。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 潘峰,陈文胜,丁博,等. 竖向分层土主动土压力的分析与计算[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 1-5, 50.
PAN Feng, CHEN Wensheng, DING Bo, et al. Analysis and calculation of the active earth pressure of the vertical stratified soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 1-5, 50.
- [3] TSAGARELI Z V. Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965, 2(4): 197-200.
- [4] HE Z M, LIU Z F, LIU X H, et al. Improved method for determining active earth pressure considering arching effect and actual slip surface [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 2032-2042.
- [5] 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.
- [6] 卢坤林, 杨扬. 非极限主动土压力计算方法初探[J]. 岩土力学, 2010, 31(2):615-619.
LU Kunlin, YANG Yang. Preliminary study of active earth pressure under nonlimit state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2):615-619.
- [7] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressure with various wall movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(3):317 - 333.
- [8] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2):19-26.
ZHOU Yingying, REN Meilong. An experimental study on active earth pressure behind rigid retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2):19-26.
- [9] 王元战, 唐照评, 郑斌. 墙体绕墙顶转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(7):695-700.
WANG Yuanzhan, TANG Zhaoping, ZHENG Bin. Distribution of active earth pressure of retaining wall with wall movement of rotation about top [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(7):695-700.
- [10] 龚慈, 俞建霖, 徐日庆, 等. 绕墙底向外转动刚性挡土墙的土压力计算[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11):1690-1694.
GONG Ci, YU Jianlin, XU Riqing, et al. Calculation of earth pressure against rigid retaining wall rotating outward about base [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(11):1690-1694.
- [11] 张永兴, 陈林. 考虑土拱效应挡土墙绕墙底转动的主动土压力[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(3):46-52.
ZHANG Yongxing, CHEN Lin. Active earth pressure with wall rotation movement about base considering soil arching [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(3):46-52.
- [12] 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.
ZHANG Hengzhi, XU Changjie, LIANG Luju, 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.
- [13] 曹振民. 挡土墙填土曲线破裂面主动土压力分析[J]. 中国公路学报, 1995, 8(S1):7-14.
CAO Zhenmin. Analysis of active earth pressure of back fill on retaining wall with curved rupture surface [J]. China Journal of Highway and Transport, 1995, 8(S1):7-14.
- [14] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 等. 曲线滑裂面下有限宽度填土主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2017, 38(7):2029-2035.
YANG Minghui, DAI Xiabin, ZHAO Minghua, et al. Calculation of active earth pressure for limited soils with curved sliding surface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7):2029-2035.
- [15] 杨和平, 林琳. 黏性填土重力式路堤墙曲线破裂面主动土压力分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1):1-9, 57.
YANG Heping, LIN Lin. Analysis on active earth pressure of gravity embankment wall of cohesive backfill with curved failure surface [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16(1):1-9, 57.
- [16] 龚慈. 不同位移模式下刚性挡土墙土压力计算方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
GONG Ci. Study on calculation method of earth pressure of rigid retaining wall under different displacement modes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [17] CHANG M F. Lateral earth pressure behind rotating walls [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2):498-509.
- [18] 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.
- [19] 陈奕柏, 柯才桐, 高洪波, 等. 考虑变位影响的刚性挡墙非极限土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5):1060-1070.
CHEN Yibai, KE Caitong, GAO Hongbo, et al. Non-limit state earth pressure against retaining wall considering influence of deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5):1060-1070.

(责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:栗森)