

基于潜在滑动面倾角离散的铁路路基重力式挡土墙 主动土压力计算方法

李斌¹, 袁锦全², 张联宇^{*3}, 曹子君^{4,5}, 姚洪锡⁶, 陈嵘^{3,5}

(1. 武汉理工大学, 交通与物流工程学院, 道路与桥梁工程系, 湖北省公路工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;

2. 中铁工程设计咨询集团有限公司郑州设计院, 河南 郑州 450001; 3. 西南交通大学, 土木工程学院, 四川 成都 610031

4. 西南交通大学, 智慧城市与交通学院/城市轨道交通学院, 四川 成都 611756; 5. 西南交通大学, 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 6. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要: 铁路路基重力式挡土墙墙后填土断面为梯形, 且填土承受列车荷载。这种复杂工程条件下, 危险滑动面位置和主动土压力无法通过库仑土压力公式确定, 导致挡土墙稳定性分析十分困难。本文首先基于滑动土体的极限平衡, 提出一种危险滑动面的搜索方法, 计算主动土压力合力; 根据合力等效与总力矩等效原则, 确定主动土压力水平和竖直分量的力臂, 在此基础上, 计算分析铁路路基重力式挡土墙考虑滑动和倾覆两种失效模式下的稳定性。结果表明该方法计算准确、简单且计算量小, 限制条件少, 能很好地适用于复杂工程条件; 当倾角变化步长为 0.01° 时可同时兼顾计算精度与计算效率。此外, 本文针对超载分布位置、超载宽度、墙背倾角及内边坡坡角等因素开展参数影响分析, 总结了主动土压力大小、主动土压力作用位置及各失效模式安全性受各参数的影响规律。

关键词: 重力式挡土墙; 危险滑动面; 主动土压力; 挡土墙稳定性

中图分类号: U213.1+52.2 文献标识码: A 文章编号: G24-0720

作者简介: 李斌(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下空间与岩土工程方向的研究工作。E-mail: phdlibin@whut.edu.cn。

Active earth pressure calculation method for gravity retaining wall of railway subgrade based on discretized potential sliding surface inclination angle

LI Bin¹, YUAN Jinquan², ZHANG Lianyu^{*3}, CAO Zijun^{4,5}, Yao Hongxi⁶, CHEN Rong^{3,5}

(1. Department of Road and Bridge Engineering, School of Transportation and Logistics Engineering, Hubei Technology Research

Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Zhengzhou Design Institute, China Railway Engineering Consulting

Group Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 4.

Institute of Smart City and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 5. MOE Key Laboratory of

High-speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 6. China Railway Siyuan Survey and Design

Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The cross-section of the backfill behind railway subgrade gravity retaining walls is trapezoidal, and the backfill is subjected to train loads. General formulas of Coulomb earth pressure theory are not applicable for the determination of the location of dangerous sliding surface and the magnitude of active earth pressure under such complex engineering conditions, making it difficult to perform stability analysis for gravity retaining walls. This paper firstly proposes a method for determining dangerous sliding surfaces based on the limit equilibrium of sliding soil, and calculates the active earth pressure resultant force. According to the principles of equivalent resultant force and equivalent total moment, the force arms of the horizontal and vertical components of active earth pressure are determined.

Subsequently, stability analysis of railway subgrade gravity retaining walls considering two failure modes of sliding and overturning is performed. Results show that the proposed method achieves high accuracy with simple calculation principle, less calculation demanding and fewer calculation constraints, and it is

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(52388102); 国家自然科学基金面上项目(52278368); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U23A20666); 四川省自然科学基金面上项目(24NSFSC2017)

收稿日期:

*通信作者 (E-mail: lyzhang@my.swjtu.edu.cn)

recommended to have a step size of 0.01° for the inclination angle change of the sliding surface to ensure high accuracy and efficiency simultaneously. Furthermore, this paper analyzes the impact of parameters e.g., the distribution of the over load, the width of the overload, the inclination angle of the wall back and the angle of the inner slope and summarizes the influence patterns of these parameters on the magnitude of active earth pressure, the position of active earth pressure, and the safety of different failure modes.

Keywords: gravity retaining wall; dangerous sliding surface; active earth pressure; stability of retaining walls

0 引言

重力式挡土墙稳定性分析需要确定墙后土体土压力大小、方向和作用位置。当墙背直立光滑、墙后填土水平时可采用朗肯土压力理论进行计算^[1],如图1(a);当墙背倾斜粗糙、墙后填土倾斜时,可采用库仑土压力理论进行计算^{[2][3]},该理论假设滑动面为一平面,根据墙后滑动土体的极限平衡得到土压力表达式,并令其对滑动面倾角的导数为零,从而确定土压力的极大值,其作用点在距墙底三分之一墙高的位置,如图1(b)。图1(c)为典型铁路路基重力式挡土墙,墙后填土断面为梯形,且承受列车荷载,土压力及其合力作用位置的计算较为复杂,无法采用传统库仑土压力公式计算。库尔曼图解法^{[4][5]}可解决地面不规则及填土表面有荷载情况的土压力计算,但该方法计算量大,绘图麻烦且精度低。

为对图1(c)所示挡土墙类型进行稳定性分析,于兆锋等^[6]和李炼等^[7]建立坐标系并假设危险滑动面的位置坐标,通过积分计算滑动土体重力和重心坐标,并利用库仑理论通用公式计算土压力和作用位置,该过程利用坐标积分求解,过程复杂且计算量较大。

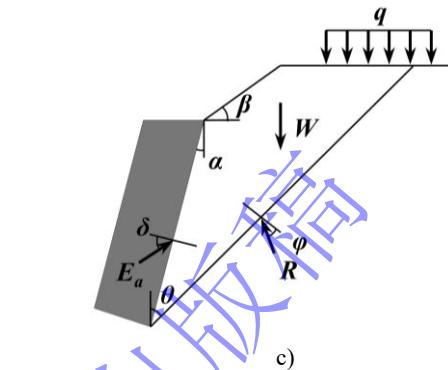
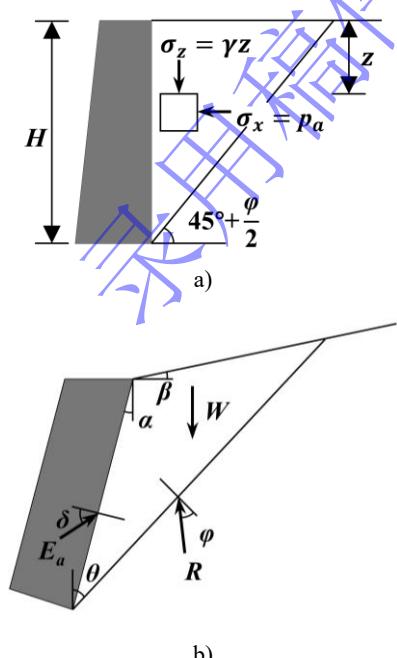


图1 重力式挡土墙: a)工况1; b)工况2; c)工况3

Fig. 1 Gravity retaining wall: a) Scenario 1; b) Scenario 2; c) Scenario 3

陈建功^[8]等采用变分极限法对一般情况下主动土压力进行了理论探索,但未考虑滑动体的力矩平衡。Rao 等^[9]根据试验数据验证了库仑理论和朗肯理论中主动土压力与填土黏聚力、墙背倾角呈正相关。竺明星等^[10]研究认为最大主动土压力受挡土墙高度影响最大,受其他因素影响较小。张东卿等^[11]对比了中、欧(法)挡土墙设计规范,发现其中关于挡土墙稳定性的验算内容基本一致,计算主动土压力时都可运用库仑理论。Xiao 等^[12]采用极限分析上限法求解挡土墙被动土压力的最优值。Zhou 等^[13]建立竖直挡土墙的有限元模型,研究了地震作用下的挡土墙稳定性。

在实际工程中,确定性分析过程的复杂性使得挡土墙的稳定性分析较为困难。针对现有研究的不足,本文基于库仑土压力理论,提出一种复杂工程条件下重力式挡土墙稳定性分析方法。该方法首先假定滑动面为经过墙踵的平面,暂不考虑圆弧或折线滑动,根据滑动土体的极限平衡,以最大土压力为目标,离散并搜索危险滑动面,确定主动土压力大小;然后根据面积等效原则,计算土压力系数,并确定土压力作用位置;在此基础上,考虑滑动失效和倾覆失效两种失效模式,对铁路路基重力式挡土墙进行稳定性分析。

1 基本原理

1.1 离散滑动面倾角分布范围

图2为铁路路基重力式挡土墙的典型断面,其中墙背倾角为 α ,路基坡角为 β ,填土的内摩擦角为 φ ,

墙背与土体的摩擦角为 δ ，墙后填土上方分布有长度为 L 的均布荷载 q ，荷载距路基面边线距离为 d ， b 为填土内边坡宽度， h 为填土内边坡高度，挡土墙顶部到墙踵的高度为 H_d ，挡土墙基底倾斜高度为 H_z ， α_0 为基底倾斜角度，墙身宽度为 b_1 。

根据库仑土压力理论，假定挡土墙后土体破坏的滑动面为经过墙踵的某个平面，滑动面倾角为与竖直方向之间的夹角 θ 。其最小值（下限）为墙背倾角，即 $\theta_{\min} = \alpha$ ；根据力的三角关系，主动破坏时需满足 $90^\circ - \theta - \varphi \geq 0$ ，即其最大值（上限）为 $\theta_{\max} = 90^\circ - \varphi$ （图 2 力的三角形为主动破坏时滑动土体受力情况，此时土体反力 R 在重力 W 左侧，认为两者夹角 $90^\circ - \theta - \varphi > 0$ ，墙背反力 E_a 向右向上，对应土压力向左向下，当 θ 足够大时使得两者夹角 $90^\circ - \theta - \varphi < 0$ ，此时土体反力 R 在重力 W 右侧，墙背反力 E_a 向左向下，对应土压力向右向上，不再是滑动土体下滑的主动破坏，因此主动破坏时需满足 $90^\circ - \theta - \varphi \geq 0$ ，即 θ 最大值（上限）为 $\theta_{\max} = 90^\circ - \varphi$ ）。因此，滑动面倾角的分布范围为 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}] = [\alpha, 90^\circ - \varphi]$ 。通过设置角度步长 $\Delta\theta$ ，可将此范围离散为一系列的滑动面倾角，即 $\theta_1 = \alpha + \Delta\theta, \theta_2 = \alpha + 2\Delta\theta, \dots, \theta_n = 90^\circ - \varphi$ 。

对任意一个滑动面，可根据极限平衡原理，建立重力 W 、墙背反力 E_a （主动土压力）和土体反力 R 的三角形关系，并根据角度关系和正弦定理确定主动土压力 E_a 。假定滑动面倾角向量 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 的主动土压力向量为 $\mathbf{E}_a = [E_{a1}, E_{a2}, \dots, E_{an}]$ ，其中最大值 E_{ai} 即为所求主动土压力，实际滑动面倾角为对应角度 θ_i 。需要说明的是，由于滑动面假定为经过墙踵的平面，因此在倾角分布范围内离散搜索得到的最大主动土压力，其对应的滑动面可认为是全域最危险滑动面。

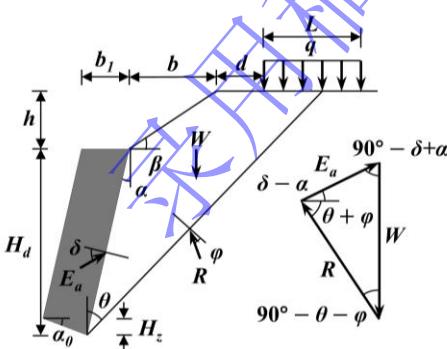


图 2 滑动土体受力与力的平衡关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the balance relationship between forces and forces on sliding soil

1.2 确定主动土压力合力大小

如图 2 所示，墙后土体达到主动极限状态时^[14]，根据正弦定理可以得到主动土压力合力表达式为：

$$E_a = W \frac{\sin(90^\circ - \theta - \varphi)}{\sin(\theta + \varphi + \delta - \alpha)} \quad (1)$$

其中，滑动土体的等效重力 W 等于滑动土体自重与土体上方超载 q 换算的等效土柱自重之和。

在其它参数确定的情况下，主动土压力合力大小取决于滑动土体的等效重力 W 。滑动面倾角不同，滑动土体断面形状可表现为三角形或四边形，此外，考虑到单线、双线铁路超载作用，滑动面与填土表面相交位置不同，超载换算宽度也不同。综上，为方便计算和编程，本文根据滑动面与填土表面相交位置，将倾角 θ 分为以下六种类型：

- ① 滑动面与填土表面交于路基边坡；
- ② 滑动面与填土表面交于超载左侧；
- ③ 滑动面与填土表面交于超载范围内；
- ④ 滑动面与填土表面交于超载右侧；
- ⑤ 滑动面与填土表面交于外侧超载范围内；
- ⑥ 滑动面与填土表面交于外侧超载右侧。

六种滑动面倾角类型示意图见图 3。记墙顶以下面积为 S_1 ，墙顶以上面积为 S_2 。在计算时，一般认为路基面超载沿着墙后填土滑动面的方向传递力到墙背上^[14]，将超载 q 换算为具有一定宽度和高度且与填土重度相同的等效土柱，等效土柱高度为 $h_0 = q / \gamma$ ，其中 γ 为填土的重度，记等效土柱面积为 S_3 ，不同倾角类型条件下面积 S_1 、 S_2 及 S_3 的计算公式汇总于表 1。

滑动土体的等效重力为：

$$W = \gamma(S_1 + S_2 + S_3) \quad (2)$$

计算得到四种类型滑动土体倾角 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 对应的等效面积向量 \mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2 和 \mathbf{S}_3 后，根据公式 2 得到等效重力向量 $\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_n]$ ，并根据公式 1 得到主动土压力向量 $\mathbf{E}_a = [E_{a1}, E_{a2}, \dots, E_{an}]$ ，取最大值作为主动土压力，即 $E_a^* = \max[E_{a1}, E_{a2}, \dots, E_{an}]$ ， E_a^* 对应的滑动面倾角 θ^* 即为危险滑动面的倾角。主动土压力的水平分量和竖直分量分别为 $E_x = E_a \cos(\delta - \alpha)$ 和 $E_y = E_a \sin(\delta - \alpha)$ 。

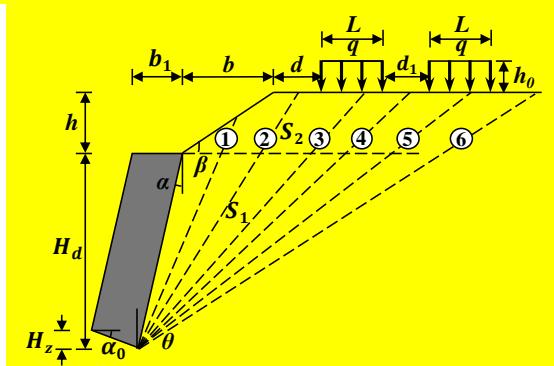


图 3 六种倾角类型示意图

Fig. 3 Diagram of mentioned six inclination types

表 1 不同倾角类型条件下 S_1 、 S_2 及 S_3 的计算公式

Table 1 Calculation formulas of S_1 , S_2 and S_3 of different inclination types

类型	S_1	S_2	S_3
①		$0.5[H_d \tan(\theta - \alpha)]^2 \sin \beta / \sin(90^\circ - \beta - \theta)$	
②			
③	$0.5H_d^2 \tan(\theta - \alpha)$		$h_0[(H_d + h) \tan \theta - H_d \tan \alpha - b - d]$
④		$0.5h[H_d \tan(\theta - \alpha) + (h + H_d) \tan \theta - H_d \tan \alpha - b]$	h_0L
⑤			$h_0[(H_d + h) \tan \theta - H_d \tan \alpha - b - d - d_1]$
⑥			$2h_0L$

1.3 确定主动土压力合力作用点 (力臂)

挡土墙进行抗倾覆验算时,除了确定主动土压力水平和竖直分量,还需确定主动土压力合力的作用点(对墙趾的力臂)。挡土墙水平土压应力分布图的特点是:横向代表应力大小,竖向代表分布范围,斜率代表水平土压力系数大小,面积代表土压力大小,形心代表土压力作用位置。

本文基于挡土墙水平土压应力分布图,通过合力等效与力矩等效原则确定主动土压力合力作用点,主要步骤包括:

- 1) 假定水平主动土压力系数为 k_x
- 2) 根据滑动面类型确定水平土压应力的竖向分

布,利用 k_x 表达应力

- 3) 计算应力图面积 P ,令其等于 E_x ,确定 k_x
- 4) 计算应力图对墙趾面积矩 M ,令其等于 $E_x Z_x$
- 5) 确定水平土压力合力力臂 $Z_x = M / E_x$
- 6) 确定竖直土压力合力力臂 $Z_y = Z_x \tan \alpha + b_1$

因此主要计算目标为应力图面积 P 和应力图对墙趾面积矩 M 。根据六种滑动面倾角类型,得到以下六种土压应力分布类型,其中,实线分布为从墙顶处算起的实际压应力,虚线分布为从滑动面与填土表面交点算起的理论压应力,如图 4 所示。限于篇幅,仅针对类型③进行公式推导,其余类型推导过程类似。

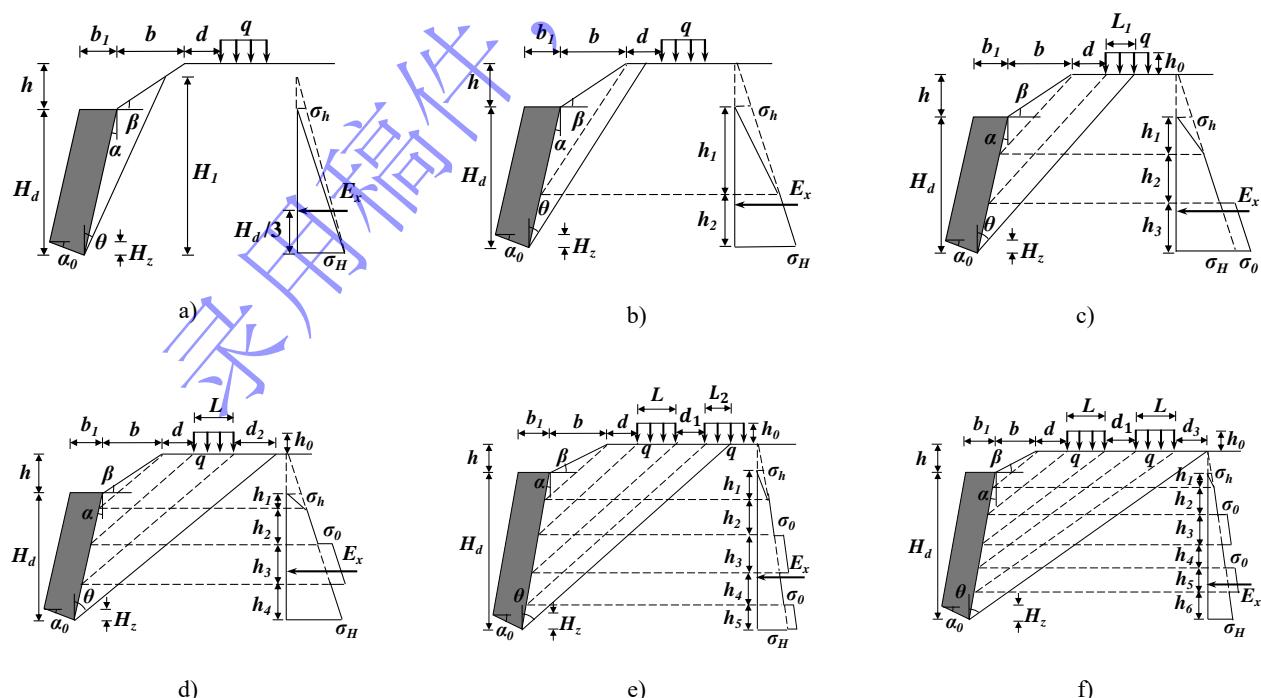


图 4 土压应力分布: a)类型①; b)类型②; c)类型③; d)类型④; e)类型⑤; f)类型⑥

Fig. 4 Distribution of earth pressure: a) Case ①; b) Case ②; c) Case ③; d) Case ④; e) Case ⑤; f) Case ⑥

对于类型③, 即当滑动面与填土表面交于超载范围内时, 土压力由滑动土体自重和部分超载共同产生, 水平土压应力分布图为梯形、三角形和平行四边形的组合图形, 如图 4(c)所示。墙顶和墙踵土压应力大小分别为 $\sigma_h = \gamma h k_x$ 和 $\sigma_H = \gamma (H_d + h) k_x$, 超载产生的水平土压应力大小为 $\sigma_0 = \gamma h_0 k_x$, 应力图面积为:

$$\begin{aligned} P &= 0.5(\sigma_h + \sigma_H)H_d - 0.5\sigma_h h_1 + \sigma_0 h_3 \\ h_3 &= L_1 / (\tan \theta - \tan \alpha) \\ L_1 &= (H_d + h) \tan \theta - H_d \tan \alpha - b - d \end{aligned} \quad (3)$$

根据合力等效 $E_x = P$ 确定主动土压力系数为:

$$k_x = \frac{E_x}{0.5[\gamma h + \gamma(H_d + h)]H_d - 0.5\gamma h h_1 + \gamma h_0 h_3} \quad (4)$$

应力图面积矩为:

$$\begin{aligned} M &= 0.5(\sigma_h + \sigma_H)H_d \left[\frac{H_d(2\sigma_h + \sigma_H)}{3(\sigma_h + \sigma_H)} - H_z \right] \\ &- 0.5\sigma_h h_1 \left(H_d - H_z - \frac{h_1}{3} \right) + \sigma_0 h_3 \left(\frac{h_3}{2} - H_z \right) \end{aligned} \quad (5)$$

根据上述步骤 5 和 6 即可分别求解主动土压力水平及竖直土压力合力力臂。

1.4 失效模式与功能函数

本文考虑重力式挡土墙滑动失效与倾覆失效两种失效模式^{[15][16]}。其安全与否可采用稳定性安全系数 FS 进行评判, 当功能函数 $G < 0$ 即安全系数 $FS < 1$ 时, 则认为该模式发生失效。

$$G = FS - 1 \quad (6)$$

抗滑安全系数 FS_h 为(不考虑地震荷载, 下同):

$$FS_h = [(W_d + E_y + E_x \tan \alpha_0) f' + (W_d + E_y) \tan \alpha_0] / E_x \quad (7)$$

式中, W_d 为挡土墙自重, f' 为基底摩擦系数, $f' = 1.5f$, f 为基底摩擦系数经验值。

抗倾覆安全系数 FS_q 为:

$$FS_q = (W_d Z_w + E_y Z_y) / (E_x Z_x) \quad (8)$$

式中, Z_w 为重心到墙趾的水平距离。

由此可见, 两种失效模式分析的关键在于求解主动土压力大小及其作用位置。假定上述失效模式满足本文方法的假定条件, 则可利用所提方法对重力式挡土墙进行确定性分析。

2 确定性分析

2.1 参数与结果

根据对滑动面倾角六种类型土压力合力和主动土压力合力作用点(力臂)的推导结果, 采用 Python 编

写计算程序, 以应对不同工况下重力式挡土墙土压力的计算。

以一般地区某单线铁路重力式路堤挡土墙为例, 其填土综合内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$, 填土重度 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, 挡土墙重度 $\gamma_d = 23 \text{ kN/m}^3$, 基底倾斜角度 $\alpha_0 = 0^\circ$, 墙背为仰斜式, 墙背倾角 $\alpha = 14^\circ$, 墙背摩擦角 $\delta = 17.5^\circ$, 墙高 $H = 10 \text{ m}$, 墙身宽度为 $b = 2.47 \text{ m}$, 超载分布宽度为 $L = 3.4 \text{ m}$, 等效高度 $h_0 = 2.7 \text{ m}$, 距离边坡顶部 $d = 2.6 \text{ m}$, 基底摩擦系数经验值 $f = 0.6$ 。

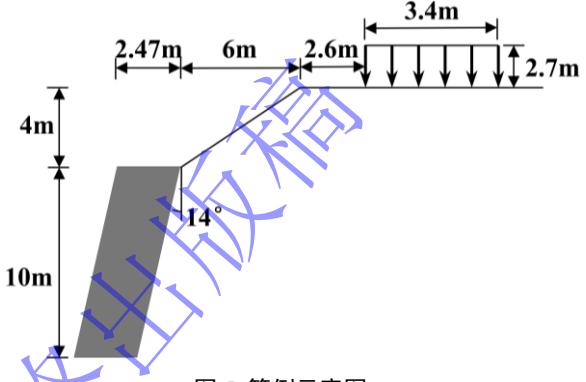
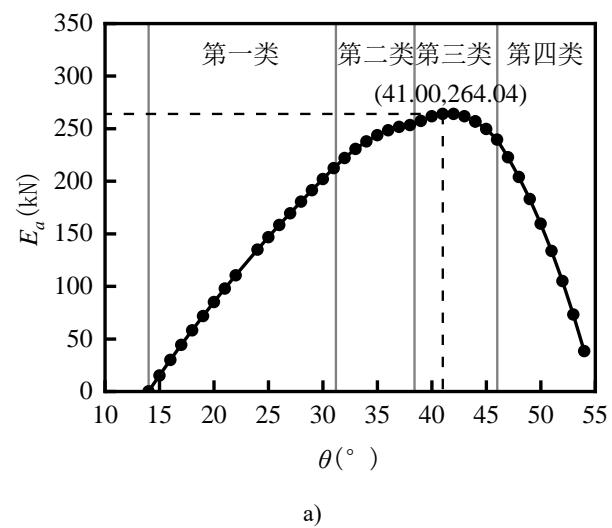


图 5 算例示意图

Fig. 5 Diagram of illustrative example

滑动面倾角的下限为 $\theta_{\min} = \alpha = 14^\circ$, 上限为 $\theta_{\max} = 90^\circ - \varphi = 55^\circ$, 取步长为 $\Delta\theta = 1^\circ$, 将滑动面分布范围离散为 41 个角度, 其中第一类滑动面倾角范围 $[14^\circ, 31.2^\circ]$, 第二类滑动面倾角范围 $[31.2^\circ, 38.4^\circ]$, 第三类滑动面倾角范围 $[38.4^\circ, 46^\circ]$, 第四类滑动面倾角范围 $[46^\circ, 55^\circ]$ 。按公式(1)计算每个角度的主动土压力, 得到两者关系如图 6(a)所示, 最大土压力为 $E_a^* = 264.04 \text{ kN}$, 对应滑动面倾角为 $\theta^* = 41^\circ$, 属于第三类倾角, 由式(3)-(5)计算得最大土压力的力臂为 $Z_x = 3.47 \text{ m}$ 、 $Z_y = 3.34 \text{ m}$, 确定主动土压力情况如图 6(b)所示。



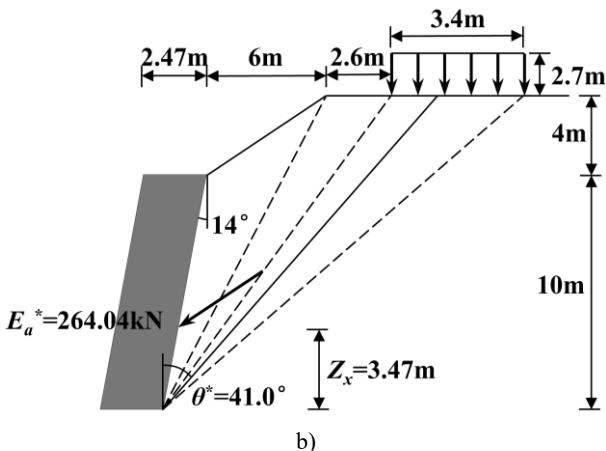


图 6 计算结果: a) 土压力与滑动面倾角关系; b) 滑动面位置与合力作用点

Fig. 6 Calculation results: a) Relationship between earth pressure and sliding surface inclination angle; b) The position of sliding surface and the point of action of earth pressure

2.2 角度离散步长影响分析与方法验证

选取角度离散数量为以上离散数量的 10 和 100 倍, 即角度离散步长为 0.1° 和 0.01° , 分别计算该算例的主动土压力水平分量 E_x 、竖直分量 E_y 、水平力臂 Z_x 和竖直力臂 Z_y 。对比不同倾角离散步长对计算结果的影响, 此外, 为验证所提方法的准确性, 将所提方法计算结果与扫描搜索法^[7]得到的计算结果进行对比, 详见表 2。

表 2 角度离散步长影响分析与方法验证

Table 2 Analysis of the influence of discrete step size on sliding surface inclination angle and method verification

计算变量	$E_a^*(\text{kN})$	$E_x(\text{kN})$	$Z_x(\text{m})$	$E_y(\text{kN})$	$Z_y(\text{m})$
$n=41$	264.04	263.83	3.47	16.14	3.34
$n=410$	264.33	263.83	3.47	16.14	3.34
$n=4100$	264.33	263.83	3.47	16.14	3.34
扫描搜索法	264.04	263.55	3.47	16.12	3.33

结果表明: 首先, 计算结果与文献实例结果均十分接近, 验证了本文方法的准确性, 其中存在的微小误差可能是由于计算过程中各项数值的精度标准不同

即保留有效位数不同; 其次, 滑动面倾角离散数量对计算结果的精度影响较小, 即使滑动面倾角离散数量较少时, 计算结果也能具有极高的精度。

2.3 计算过程对比

扫描搜索法^[7]同样适用于复杂坡面及荷载工况下墙背主动土压力的计算, 该方法以墙踵为起点, 假设该点到坡面线的连线为破裂面, 即滑动面为经过墙踵的直线, 与所提方法假设相同。然后按照一定间距变化地面上各点扫描墙后土体, 得到所有可能的破裂面, 并利用坐标求取破裂棱体的自重及形心, 通过库仑土压力计算通式求解土压力的大小及作用点的位置, 最终搜索出最大土压力。

对比所提方法与扫描搜索法的计算过程, 首先, 本文方法设定角度间隔, 扫描搜索法则设定水平距离间隔。其次, 扫描搜索法需要额外计算滑动土体的重心坐标, 且需通过积分对多个微三角形面积求和, 计算量远高于本文方法。以角度步长 0.01° 为例, 角度搜索次数为 4100 次, 该角度间隔对应最小水平间距近似为 0.002m , 当扫描搜索法按水平距离间隔为 0.002m 计算时需要计算 8747 次, 为本文方法的两倍以上, 主要对比数据如表 3 所示。综上, 本文所提方法相较于扫描搜索法, 避免了复杂的积分求解过程, 计算原理通俗易懂, 且在计算精度方面与扫描搜索法保持较高的一致性。

表 3 两种方法计算过程对比

Table 3 Comparison of calculation process of the two methods

方法	离散对象	离散数量	计算重心数	计算面积数
所提方法	角度	$n=4100$	—	n
扫描搜索法	水平距离	$n=8747$	n	$n(n+1)/2$

3 参数影响分析

为分析不同参数对重力式挡土墙计算的影响, 选用路基面超载分布位置(d)、宽度(L)、墙背倾角(α)及填土边坡高度(h)等因素进行分析, 计算结果如表 4-表 7 所示。

表 4 不同 d 对应的计算结果

Table 4 Calculation results corresponding to different d values

$d(\text{m})$	$E_a^*(\text{kN})$	$\theta^*(\text{°})$	$E_x(\text{kN})$	$Z_x(\text{m})$	$E_y(\text{kN})$	$Z_y(\text{m})$	FS_h	FS_q
0	299.02	40.34	298.46	3.47	18.25	3.34	1.768	1.418
1	285.34	40.81	284.81	3.43	17.42	3.32	1.850	1.503
2	272.08	41.25	271.57	3.44	16.61	3.33	1.938	1.568
3	259.24	41.67	258.76	3.51	15.83	3.34	2.031	1.612

表 5 不同 L 对应的计算结果Table 5 Calculation results corresponding to different L values

L (m)	E_a^* (kN)	θ^* (°)	E_x (kN)	Z_x (m)	E_y (kN)	Z_y (m)	FS_h	FS_q
0	253.70	38.71	253.23	3.54	15.49	3.35	2.074	1.632
2	264.33	41.50	263.83	3.47	16.14	3.34	1.993	1.597
4	264.33	41.50	263.83	3.47	16.14	3.34	1.993	1.597
6	264.33	41.50	263.83	3.47	16.14	3.34	1.993	1.597

表 6 不同 α 对应的计算结果Table 6 Calculation results corresponding to different α values

α (°)	E_a^* (kN)	θ^* (°)	E_x (kN)	Z_x (m)	E_y (kN)	Z_y (m)	FS_h	FS_q
12	283.56	40.90	282.26	3.47	27.18	3.21	1.898	1.422
16	245.67	42.11	245.58	3.48	6.43	3.47	2.105	1.800
20	209.88	43.34	209.68	3.49	-9.15	3.74	2.399	2.322
24	184.21	44.28	183.36	3.51	-17.66	3.96	2.702	2.855

表 7 不同 h 对应的计算结果Table 7 Calculation results corresponding to different h values

h (m)	E_a^* (kN)	θ^* (°)	E_x (kN)	Z_x (m)	E_y (kN)	Z_y (m)	FS_h	FS_q
0	161.23	36.08	160.93	3.33	9.84	3.30	2.232	2.689
2	197.25	38.08	196.88	3.35	12.04	3.30	1.652	2.199
4	264.33	41.50	263.83	3.47	16.14	3.34	0.993	1.597
6	361.48	40.77	360.81	3.85	22.07	3.43	0.472	1.068

结果表明：

1) 随着超载分布位置的远离，主动土压力减小，危险滑动倾角增大，主动土压力作用位置沿着墙背先下降后上升，滑动失效与倾覆失效模式的安全性逐步提高，但提升幅度逐渐减小，由此可以推断当超载分布位置远离到一定范围以外时，将不会对挡土墙计算结果产生显著影响。

2) 随着超载分布宽度的增加，主动土压力和危险滑动倾角先增大后逐步稳定，主动土压力作用位置沿着墙背先下降后稳定，滑动失效与倾覆失效模式的安全性先下降后稳定。当超载分布宽度超过某一界限，可认为超载分布宽度继续增加对挡土墙的影响可忽略不计。

3) 随着墙背倾角的增加，主动土压力逐步减小，危险滑动倾角逐步增大，主动土压力作用位置沿着墙背逐步上升，挡土墙抗滑动和抗倾覆能力逐步提高。

4) 随着填土高度的增加，内边坡坡角增大，主动土压力逐步增大，危险滑动倾角先增大，当内边坡坡角达到45°后，危险滑动倾角减小。为了验证这一结论，改变内边坡的宽度为4m和8m重新计算，结果同样符合这一规律。主动土压力随填土高度增加而逐步增大的同时，主动土压力作用位置沿着墙背逐步上升，因此，滑动失效和倾覆失效安全性逐步降低。

4 结 论

本文提出了基于潜在滑动面倾角离散的重力式挡土墙主动土压力计算方法，通过面积等效确定主动土压力系数和合力作用位置，考虑两种失效模式并建立功能函数，进行确定性分析并验证所提方法的准确性，最后对主要参数进行影响分析，主要结论如下：

1) 本文方法计算准确，计算过程简单，能较好适应复杂边界条件下主动土压力大小和作用位置的计算，不受地区类型、挡土墙位置、墙背倾斜形式和基底倾斜形式、填土坡面形式和超载分布的限制，弥补了复杂工程条件下朗肯土压力理论和库仑土压力理论通用计算公式难以适用的不足。所提方法假定滑动面为经过墙踵的平面，对于圆弧或折线滑动面并不适用。

2) 建议采用0.01°作为所提方法倾角变化步长。

3) 主动土压力大小、危险滑动倾角、主动土压力作用位置及两种失效模式安全性受超载分布位置、超载分布宽度、墙背倾角及内边坡坡角等因素影响较大。主动土压力随超载分布位置靠近、超载分布宽度增加、墙背倾角减小及内边坡坡角增大而增大。危险滑动倾角随超载分布位置远离、超载分布宽度增加及墙背倾角增大而增大，随内边坡坡角增大，危险滑动倾角先增大后减小。主动土压力作用位置随着超载分布位置

的远离先下降后上升，随超载分布宽度减小、墙背倾角增大及内边坡坡角增大而上升。两种失效模式安全性随超载分布位置的远离、超载分布宽度的减小、墙背倾角的增大、内边坡坡角的减小而提高。

参考文献：

- [1] 董强, 米峻, 景宏君, 高江平. 双剪统一强度理论在挡土墙朗肯主动土压力计算中的应用[J]. 公路, 2012(08): 32-35. (DONG Qiang, MI Jun, JING Hongjun, et al. Application of double shear unified strength theory in Rankine active earth pressure calculation of retaining walls[J]. Highway, 2012(08): 32-35. (in Chinese))
- [2] 杨振. 附加荷载作用下重力式挡土墙墙背土压力计算方法[D]. 西安科技大学, 2018. (YANG Zhen. Calculation method of earth pressure against gravity retaining wall-back subject to superimposed load[D]. Xi'an University of Science And Technology, 2018. (in Chinese))
- [3] 贾朋. 基于楔体单元法的主动土压力非线性分布分析[D]. 重庆大学, 2014. (Jia Peng. Analysis of active earth pressure nonlinear distribution based on wedge element method[D]. Chongqing University, 2014. (in Chinese))
- [4] 王奎华, 阙仁波. 改进的库尔曼图解法及其在土压力计算中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 167-169. (WANG Kuihua, QUE Renbo. Ameliorated Culmann's graphical construction and its application in earth pressure calculation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 167-169.)
- [5] 李大鹏, 张伟峰, 赵建魁, 等. 改进的库尔曼图解法在折线坡土压力计算中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 172-175. (LI Dapeng, ZHANG Weifeng, ZHAO Jiankui, et al. Applications of ameliorated Culmann's graphical construction in fold line slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 172-175.)
- [6] 丁兆峰, 吴沛沛, 刘会娟, 李宁. 库伦主动土压力的通用解法[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(08): 55-58. (DING Zhaofeng, WU Peipei, LIU Huijuan, et al. General solution for Coulomb active earth pressure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(08): 55-58. (in Chinese))
- [7] 李炼, 郭海强, 李安洪, 等. 库仑土压力计算新方法——扫描搜索法[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(03): 662-668. (LI Lian, GUO Haiqiang, LI Anhong, et al. A new calculation method of Coulumb's earth pressure—scan-search method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(03): 662-668. (in Chinese))
- [8] 陈建功, 徐晓核, 张海权. 一般条件下主动土压力的变分求解[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 310-314. (CHEN Jiagong, XU Xiaohua, ZHANG Haiquan. A variational method for computing of active earth pressure under general conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Suppl 2): 310—314. (in Chinese))
- [9] Rao P P, Chen Q S, Zhou Y T, et al. Determination of active earth pressure on rigid retaining wall considering arching effect in cohesive backfill soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(3): 1-9.
- [10] 竹明星, 姜开渝, 龚维明, 等. 考虑 c - ϕ 回填土坡面倾角影响的挡土墙非线性主动土压力研究[J]. 天津大学学报, 2019, 52(增刊 1): 70-75. (ZHU Mingxing, JIANG Kaiyu, GONG Weiming, et al. Contribution of inclined surface angel to nonlinear active earth pressure on a retaining wall with c - ϕ backfill soil[J]. Journal of Tianjin University, 2019, 52(supplement 1): 70-75. (in Chinese))
- [11] 张东卿, 薛元, 罗强, 等. 中欧(法)挡土墙设计规范对比研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 30-34, 39. (ZHANG Dongqing, XUE Yuan, LUO Qiang, et al. Comparative research on the specification of retaining wall between China and Europe(France)[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020 37(2): 30-34, 39. (in Chinese))
- [12] Xiao S, Xia P. Variational calculus method for passive earth pressure on rigid retaining walls with strip surcharge on backfills[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 83: 526-551.
- [13] Zhou Y, Xu B, Pang R, et al. Stochastic seismic response and stability reliability analysis of a vertical retaining wall in front of the pumping station of a nuclear power plant using the probability density evolution method[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 334: 110-120.
- [14] 魏永幸, 罗一农, 刘昌清. 支挡结构设计的可靠性[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017. (WEI Yongxing, LUO Yinong, LIU Changqing. Reliability of the design of retaining structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese))
- [15] 中国铁路总公司. Q/CR 9127-2018 铁路路基设计规范(极限状态法)[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019. (China Railway. Q/CR 9127-2018 Code for design on railway earthworks(limit state method)[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd, 2019. (in Chinese))
- [16] 国家铁路局. TB 10001-2016 铁路路基设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2017. (National railway administration of the People's Republic of China. TB 10001-2016 Code for design of railway earth structure[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd, 2017. (in Chinese))