

基于主应力迹线分层的挡墙被动土压力分析方法

张慧姐, 曹文贵, 刘 涛

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 为了探讨墙背倾斜与粗糙程度对挡墙被动土压力的影响, 首先, 结合被动状态下受挡墙墙背和滑动面摩擦影响的滑动土楔内主应力传递特点, 采用圆弧形主应力迹线描述滑动土楔中最大主应力传递规律, 并提出了最大主应力迹线几何参数的确定方法; 然后, 采用沿最大主应力迹线的分层方法将挡墙后滑动土楔划分为若干圆弧形曲线薄层单元, 并通过该薄层单元受力分析, 依据其静力平衡条件建立了挡墙被动土压力分析新方法。该方法不仅可反映墙土摩擦和墙背倾斜程度对被动土压力的影响, 而且有效避免了目前土压力分析方法研究中普遍采用的直线薄层单元难以准确考虑复杂的单元实际受力情况的问题, 从理论上确保了新提出的挡墙被动土压力分析方法更具合理性; 最后, 通过试验、现有同类方法及所提方法分析曲线的对比, 表明了新方法的合理性与优越性。就墙背倾斜与粗糙程度对挡墙被动土压力分布及合力作用点高度的影响规律也进行了探讨。

关 键 词: 被动土压力; 墙土摩擦; 倾斜挡墙; 圆弧形曲线薄层单元; 大主应力迹线

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 09-3022-09

Analysis method of passive earth pressure for retaining wall layered based on principal stress trajectory

ZHANG Hui-jie, CAO Wen-gui, LIU Tao

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: This study focused on the influence of wall inclination and roughness on passive earth pressure for the retaining wall. Firstly, considering the friction between retaining wall and sliding wedge surface under passive state, the principal stress transfer law of a sliding soil wedge is described by the circular major principal stress trajectory. Subsequently, the method for determining the geometric parameters of the major principal stress trajectory is proposed. Then, the sliding soil wedge behind the retaining wall is divided into several circular thin-layer along the major principal stress trajectory. The new method of passive earth pressure is established by force analysis of the thin-layer element according to the static equilibrium condition. The method reflects the influence of wall-soil friction and wall inclination on the distribution of passive earth pressure. The problem that the complex stress of the element cannot be accurately considered by the linear thin-layer element method, commonly used in the current earth pressure analysis, can be avoided in the proposed method with more reasonable passive earth pressure calculations. Finally, comparison and analysis of distribution of passive earth pressure among the existing similar methods and the experimental results indicate the proposed method is reasonable and superior. Also, the influence of wall inclination and roughness on the distribution of passive earth pressure and the height of application of resultant force is discussed.

Keywords: passive earth pressure; wall-soil friction; inclined retaining wall; circular curved thin-layer element; major principal stress trajectory

1 引 言

挡土墙墙背粗糙和倾斜客观存在于工程实际

中。如何考虑它们对挡墙土压力的影响已成为目前挡墙土压力分析方法研究极其重要的问题, 这正是本文研究的出发点。

收稿日期: 2019-11-25

修回日期: 2020-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51879104)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51879104).

第一作者简介: 张慧姐, 女, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事挡土墙土压力方面的研究。E-mail: huijie@hnu.edu.cn

通讯作者: 曹文贵, 男, 1963 年生, 博士 (后), 教授, 主要从事岩土工程教学与研究工作。E-mail: cwglyp@hnu.edu.cn

挡土墙土压力分析方法研究主要包括朗金和库仑土压力理论两种研究思路^[1]。前者假定墙背光滑竖直且填土面水平，故无法考虑墙背粗糙与倾斜对土压力的影响；后者是将挡墙与墙后土体中潜在滑动面围成的滑动土楔视为作用共点力系的刚体，依据刚体静力极限平衡条件建立起来的，它可以反映墙背粗糙与倾斜对土压力的影响，克服了朗金土压力理论的明显缺陷，但无法获得挡墙土压力的非线性分布^[2-7]。因此，国内外众多学者^[8-22]将挡墙后滑动土楔划分为由若干直线薄层单元组成，通过直线薄层单元的受力分析，建立了反映非线性分布特点的挡墙土压力分析方法，使挡墙土压力理论研究取得了长足的进步。

目前，挡墙土压力理论研究主要采用水平直线分层法^[8-20]。由于墙土接触面和滑动面的摩擦使墙后滑动土楔应力分布极其复杂，此时，由水平直线分层方法形成的水平薄层单元受力情况极其复杂，导致单元受力分析困难，往往须对单元受力情况进行各种假设。例如，假定单元上下界面不存在剪应力、上下界面压力均匀分布和上下界面压力等于自重应力等，这显然与工程实际存在较大差距。正因为如此，Li^[21]、Cao^[22]等提出了沿墙土接触面土体主应力方向的倾斜直线分层方法，其动机是试图让倾斜薄层单元上下界面不存在剪应力，从而简化单元受力分析，也使其更趋合理化，因此，倾斜直线分层方法较水平直线分层方法更具优越性。但是，仍然存在不足，因为滑动土楔主应力传递同时受墙土接触面和滑动面的摩擦影响，主应力迹线不可能是直线形式，换句话说，倾斜分层上下界面仍然存在剪应力，目前研究中的倾斜直线薄层单元受力分析只能说是一种近似处理方法，但无论如何，它为土压力分析方法开辟了新的研究途径。

综上所述，现有土压力分析方法研究均存在明显的理论缺陷，究其原因在于现有两种直线分层方法没有严格沿主应力迹线方向对滑动土楔进行分层。如果能严格地沿主应力迹线对墙后滑动土楔进行曲线分层，必能使挡墙土压力分析方法取得较大进展，这正是本文研究的核心思路。为此，本文将在探讨被动状态下挡土墙墙后主应力传递特点与规律的基础上，采用沿最大主应力迹线的分层方法形成曲线形薄层单元，对挡墙被动土压力分析方法进行深入研究，以期完善土压力理论及其研究方法。

2 基本假定

鉴于挡土墙工程的复杂性，也为了本文研究的

方便，对本文研究问题作如下假设（如图1所示）：

(1) 挡土墙高为 H ，墙背粗糙，其外摩擦角为 δ ；墙背倾斜，其与竖直方向的夹角为 β ；填土面水平且无地面超载作用。

(2) 墙后填土为无黏性土或忽略填土的黏聚力，其内摩擦角为 φ 。

(3) 仅考虑被动土压力问题，而且假定墙后土体滑动面为库仑滑动面，其倾角 α_s 可表示为

$$\cot \alpha_s = A + \sqrt{(\cot \varphi + A)(A + \tan \beta)} \quad (1)$$

$$A = \tan(\varphi + \delta - \beta) \quad (2)$$

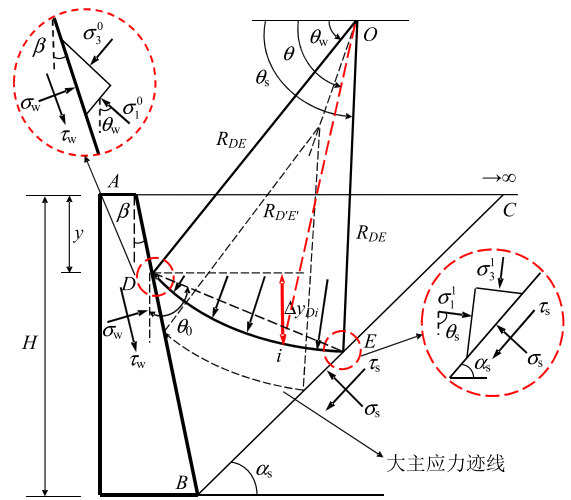


图1 最大主应力迹线
Fig.1 Major principal stress trajectory behind retaining wall

3 墙后土体主应力传递与主应力迹线

如图1所示，如果设墙土接触处土体法向正应力和剪应力分别为 σ_w 和 τ_w （实际上，它们为挡墙被动土压力），设墙后滑动面正应力和剪应力分别为 σ_s 和 τ_s ，则可得

$$\tau_w = \sigma_w \tan \delta \quad (3)$$

$$\tau_s = \sigma_s \tan \varphi \quad (4)$$

由于墙土接触面和墙后土体滑动面的影响必然使滑动土楔体内主应力方向发生偏转，致使滑动土楔体内主应力传递规律极其复杂。如果设墙土接触处土体最大和最小主应力分别为 σ_1^0 和 σ_3^0 ，滑动面上土体最大和最小主应力分别为 σ_1^1 和 σ_3^1 ，如图1所示，分别在墙土接触面处和滑动面处取三角形单元进行受力分析可得

$$\sigma_w = \sigma_1^0 \sin^2(\theta_w - \beta) + \sigma_3^0 \cos^2(\theta_w - \beta) \quad (5)$$

$$\tau_w = (\sigma_1^0 - \sigma_3^0) \sin(\theta_w - \beta) \cos(\theta_w - \beta) \quad (6)$$

$$\sigma_s = \sigma_1^1 \cos^2(\theta_s - \alpha_s) + \sigma_3^1 \sin^2(\theta_s - \alpha_s) \quad (7)$$

$$\tau_s = (\sigma_1^1 - \sigma_3^1) \sin(\theta_s - \alpha_s) \cos(\theta_s - \alpha_s) \quad (8)$$

式中: θ_w 为墙土接触面处土体最大主应力方向与竖直方向的夹角; θ_s 为滑动面处土体最大主应力方向与竖直方向的夹角。 θ_w 和 θ_s 即为描述墙土接触处和滑动面处土体主应力方向偏转程度的角度。

当挡土墙发生破坏时, 墙土接触面和滑动面上应力均服从摩尔-库仑准则, 可表示为

$$N = \sigma_1^0 / \sigma_3^0 = \sigma_1^1 / \sigma_3^1 = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (9)$$

式中: N 为墙土接触处或滑动面处最大与最小主应力之比。

于是, 依据墙土接触处和滑动面处三角形单元的静力平衡条件可得

$$\theta_w = \beta + \arctan \left[\frac{(N-1) + \sqrt{(N-1)^2 - 4N \tan^2 \delta}}{2N \tan \delta} \right] \quad (10)$$

$$\theta_s = \alpha_s + \arctan \left[\frac{(N-1) + \sqrt{(N-1)^2 - 4N \tan^2 \varphi}}{2 \tan \varphi} \right] \quad (11)$$

由式(10)、(11)可以看出, θ_w 和 θ_s 与埋深没有关系, 因此, 墙土接触面和滑动面上埋深不同的各点土体主应力方向偏转程度均不发生变化。可是, 从墙土接触一侧变化到滑动面一侧, 滑动土楔中主应力方向偏转程度不断发生变化, 可采用一条曲线(其上任一点切线方向可代表该点最大主应力方向)描述主应力传递规律, 这条曲线实际上就是最大主应力迹线。很明显, 沿着大主应力迹线方向, 主应力的方向和大小均不断发生变化。

由于本文拟采用沿最大主应力迹线的分层方法, 主应力迹线几何参数的确定是本文研究的关键之一。为了简化本文研究过程, 依据现有研究成果^[8-10], 假定该最大主应力迹线为圆弧形曲线。于是, 分别沿墙土接触处和滑动面处土体最大主应力方向作垂线, 其交点必然是该最大主应力迹线圆弧的圆心, 圆心到两侧土体的距离即为最大主应力迹线的半径。如图1所示, 设其最大主应力迹线圆弧为 $\widehat{DE}$, O 为圆心, D 点埋深为 y , 直线 OD 和 OE 的长度分别 R_{DE} 和 $R_{DE'}$, θ_w 和 θ_s 分别为直线 OD 和 OE 与水平方向的夹角, 虚线 DE 与竖直方向的夹角为 θ_0 。根据三角形之间的角度关系可得

$$\theta_0 = \frac{\theta_s + \theta_w}{2} \quad (12)$$

再由 $\triangle BDE$ 和 $\triangle ODE$ 中角度与线段的关系, 可获得直线 OD 的长度 l_{OD} , 即大主应力迹线的半径 R_{DE} , 可表示为

$$R_{DE} = \frac{\cos(\beta - \alpha_s)(H - y)}{2 \cos \beta \cos(\theta_0 - \alpha_s) \sin\left(\frac{\theta_s - \theta_w}{2}\right)} \quad (13)$$

上述即为最大主应力迹线几何参数确定方法, 依据此方法可获得一系列大主应力迹线, 它们可充分反映滑动土楔中主应力传递的规律。

4 被动土压力分析方法的建立

为了建立出被动土压力分析方法, 首先沿上述最大主应力迹线进行分层以获得曲线薄层单元 $DED'E'$, 如图2所示。然后依据其静力平衡条件, 可建立出控制方程, 从而获得被动土压力 σ_w 的分析方法。其关键在于薄层单元所受作用力, 即墙土作用面 DD' 、滑动面 EE' 和上下界面圆弧 DE 与 $D'E'$ 上所受作用力以及单元重力的确定方法, 为此下面将分别进行介绍。

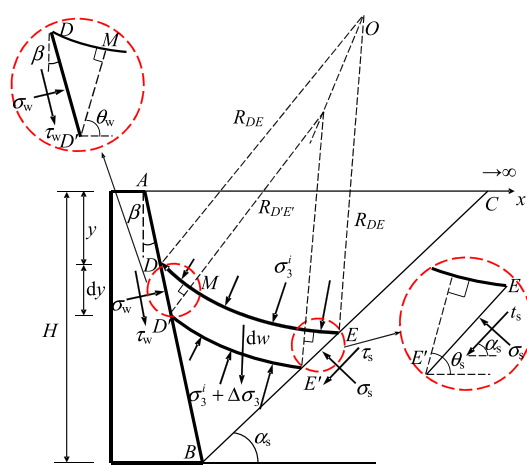


图2 圆弧形曲线薄层单元受力分析
Fig.2 Force analysis of circular thin-layer element behind retaining wall

4.1 单元上下界面作用力分析

由于曲线薄层单元分层沿最大主应力迹线进行, 故单元上下界面上任一点仅存在与相应最小主应力大小相等的压力作用, 其方向与该点界面法向方向相同, 不存在剪应力或摩擦应力。很显然, 从墙土接触一侧变化到滑动面一侧, 分层界面上最小主应力的方向和大小均发生改变。设墙土接触处土体 D 点小主应力的方向为 σ_3^0 , 单元体上界面任意位置处 i 点的最小主应力 σ_3^i , 如图1所示。考

考虑到墙后土体主要表现为重力场的特点，假定分层界面上最小主应力的的大小随深度呈线性变化，则 σ_3^i 可表示为

$$\sigma_3^i = \sigma_3^0 + \gamma \cdot \Delta y_{Di} \quad (14)$$

式中： γ 为土体重度； Δy_{Di} 为同一主应力迹线分层界面上任一点 i 与墙土接触面处 D 点的高差，如图 1 所示。通过几何关系可得

$$\Delta y_{Di} = R_{DE} (\sin \theta - \sin \theta_w) \quad (15)$$

式中： θ 为 i 点与其圆弧圆心的连线与水平线的夹角。如图 1 所示，从墙土接触处到滑动面处， θ 由 θ_w 变化到 θ_s ，则作用在上界面 DE 上的水平力 F_x^{DE} 和竖向力 F_y^{DE} 可分别表示为

$$F_x^{DE} = \int_{\theta_w}^{\theta_s} \cos \theta \cdot \sigma_3^i R_{DE} d\theta \quad (16)$$

$$F_y^{DE} = \int_{\theta_w}^{\theta_s} \sin \theta \cdot \sigma_3^i R_{DE} d\theta \quad (17)$$

将式 (14)、(15) 分别代入式 (16)、(17) 可得

$$F_x^{DE} = \sigma_3^0 R_{DE} t_1 + \frac{1}{2} \gamma R_{DE}^2 t_1^2 \quad (18)$$

$$F_y^{DE} = \sigma_3^0 R_{DE} t_2 + \gamma R_{DE}^2 t_3 \quad (19)$$

式中： R_{DE} 由式 (13) 确定；其他参数可表示为

$$t_1 = \sin \theta_s - \sin \theta_w \quad (20)$$

$$t_2 = \cos \theta_w - \cos \theta_s \quad (21)$$

$$t_3 = \frac{\theta_s - \theta_w}{2} - \frac{\sin 2\theta_s - \sin 2\theta_w}{4} - t_2 \sin \theta_w \quad (22)$$

式 (18)、(19) 即为单元上界面 $\widehat{DE}$ 作用力确定方法。相应的作用在单元下界面的应力可表示为 $\sigma_3^0 + \Delta \sigma_3$ ，如图 2 所示，按此相似方法可获得单元下界面 $\widehat{D'E'}$ 上水平和竖直方向作用力 $F_x^{D'E'}$ 和 $F_y^{D'E'}$ ，可表示为

$$F_x^{D'E'} = (\sigma_3^0 + \Delta \sigma_3) R_{D'E'} t_1 + \frac{1}{2} \gamma R_{D'E'}^2 t_1^2 \quad (23)$$

$$F_y^{D'E'} = (\sigma_3^0 + \Delta \sigma_3) R_{D'E'} t_2 + \gamma R_{D'E'}^2 t_3 \quad (24)$$

$R_{D'E'}$ 依据式 (13) 类似法确定，可表示为

$$R_{D'E'} = \frac{\cos(\beta - \alpha_s)(H - y - dy)}{2 \cos \beta \cos(\theta_0 - \alpha_s) \sin\left(\frac{\theta_s - \theta_w}{2}\right)} \quad (25)$$

4.2 墙土接触处和滑动面处单元界面作用力分析

分别在墙土接触和滑动面处取三角形单元，如图 2 所示。在墙土接触面上，单元体受沿墙背从上向下方向的摩擦应力或剪应力 τ_w 和沿墙背法向的正应力或压应力 σ_w 作用；在滑动面上，单元体受沿滑动面从上向下的剪应力 τ_s 和沿滑动面法向的正应力 σ_s 作用，则薄层单元分别在墙土接触面 DD' 和滑动面 EE' 上受到的水平与竖直方向作用力，可表示为

$$F_x^{DD'} = l_{DD'} (\sigma_w \cos \beta + \tau_w \sin \beta) \quad (26)$$

$$F_y^{DD'} = l_{DD'} (\sigma_w \sin \beta - \tau_w \cos \beta) \quad (27)$$

$$F_x^{EE'} = l_{EE'} (-\sigma_s \sin \alpha_s - \tau_s \cos \alpha_s) \quad (28)$$

$$F_y^{EE'} = l_{EE'} (\sigma_s \cos \alpha_s - \tau_s \sin \alpha_s) \quad (29)$$

式中： $F_x^{DD'}$ 和 $F_y^{DD'}$ 分别为墙土接触面 DD' 上水平与竖直方向作用力； $F_x^{EE'}$ 和 $F_y^{EE'}$ 分别为滑动面 EE' 水平与竖直方向作用力； $l_{DD'}$ 和 $l_{EE'}$ 分别为单元体在墙土接触面 DD' 和滑动面界面 EE' 的长度，依据几何关系，可表示为

$$l_{DD'} = \frac{dy}{\cos \beta} \quad (30)$$

$$l_{EE'} = \frac{\sin(\theta_w - \beta)}{\cos \beta \cos(\theta_s - \alpha_s)} dy \quad (31)$$

4.3 薄层单元重力分析

薄层单元重力可利用其面积与土体重度的乘积进行计算，故确定薄层单元重力的关键在于薄层单元面积的确定。由图 2 可知，薄层单元上下界面均为沿最大主应力迹线的圆弧曲线，它们的圆心和半径都不相同，致使薄层单元面积的精确确定极其困难。因此，本文只能采用近似方法计算单元面积，其近似算法的具体思路是将曲边薄层单元展平，将单元面积视为其展平后的梯形单元面积，据此可得薄层单元重力 dw ，可表示为

$$dw = \frac{\gamma(l_{\widehat{DE}} + l_{\widehat{D'E'}})t}{2} \quad (32)$$

式中： t 为薄层单元的高； $l_{\widehat{DE}}$ 和 $l_{\widehat{D'E'}}$ 分别为单元上和下圆弧边界的弧长，可表示为

$$l_{\widehat{DE}} = \frac{\cos(\beta - \alpha_s)(\theta_s - \theta_w)(H - y)}{2 \cos \beta \cos(\theta_0 - \alpha_s) \sin\left(\frac{\theta_s - \theta_w}{2}\right)} \quad (33)$$

$$l_{D'E} = \frac{\cos(\beta - \alpha_s)(\theta_s - \theta_w)(H - y - dy)}{2 \cos \beta \cos(\theta_0 - \alpha_s) \sin\left(\frac{\theta_s - \theta_w}{2}\right)} \quad (34)$$

如图 2 所示, t 近似等于 $D'M$ 的长度 $l_{D'M}$, 依据几何关系可表示为

$$l_{D'M} = \frac{\sin(\theta_w - \beta)}{\cos \beta} dy \quad (35)$$

至此已建立出薄层单元所受作用力的分析方法。在此基础上, 依据薄层单元静力平衡条件即可得到其平衡控制方程, 可表示为

$$F_x^{DD'} - F_x^{DE} + F_x^{D'E'} + F_x^{EE'} = 0 \quad (36)$$

$$F_y^{DD'} - F_y^{DE} + F_y^{D'E'} + F_y^{EE'} - dw = 0 \quad (37)$$

于是, 将前述单元所受各作用力分别代入式 (36)、(37), 化简得到圆弧形曲线薄层单元体的控制方程为

$$a_1 \sigma_w dy - \frac{a_2 a_3}{2} \sigma_3^0 dy + \frac{a_2 a_3}{2} d\sigma_3^0 (H - y - dy) - \frac{a_2^2 a_4}{2} \gamma dy (H - y) - \frac{a_5}{2} \gamma dy \left(H - y - \frac{dy}{2} \right) = 0 \quad (38)$$

其中:

$$a_1 = (1 + \tan \delta \tan \beta)(1 - \tan \alpha_s \tan \varphi) + (\tan \beta - \tan \delta)(\tan \alpha_s + \tan \varphi) \quad (39)$$

$$a_2 = \frac{\cos(\beta - \alpha_s)}{\cos \beta \cos(\theta_0 - \alpha_s) \sin\left(\frac{\theta_s - \theta_w}{2}\right)} \quad (40)$$

$$a_3 = t_1 (1 - \tan \alpha_s \tan \varphi) + t_2 (\tan \alpha_s + \tan \varphi) \quad (41)$$

$$a_4 = t_1^2 (1 - \tan \alpha_s \tan \varphi) + t_3 (\tan \alpha_s + \tan \varphi) \quad (42)$$

$$a_5 = a_2 \frac{\sin(\theta_w - \beta)(\tan \alpha_s + \tan \varphi)(\theta_s - \theta_w)}{\cos \beta} \quad (43)$$

式 (38) 为包括 σ_w 和 σ_3^0 两个未知函数的方程。根据墙土接触处三角形单元的静力平衡条件即式 (5) 可知, 被动土压力强度 σ_w 和最小主应力 σ_3^0 满足如下关系:

$$\sigma_w = a_6 \sigma_3^0 \quad (44)$$

$$a_6 = N \sin^2(\theta_w - \beta) + \cos^2(\theta_w - \beta) \quad (45)$$

将式 (44) 代入式 (38) 中, 可获得墙土接触

面处最小主应力 σ_3^0 的微分方程, 表示为

$$\frac{d\sigma_3^0}{dy} - \frac{\lambda_1}{H - y} \sigma_3^0 - \frac{\gamma}{\lambda_2} = 0 \quad (46)$$

其中:

$$\lambda_1 = 1 - \frac{2a_1 a_6}{a_2 a_3} \quad (47)$$

$$\lambda_2 = \frac{a_2 a_3}{a_2^2 a_4 + a_5} \quad (48)$$

求解上述微分方程 (46) 可得

$$\sigma_3^0 = C(y - H)^{-\lambda_1} + \frac{\gamma(y - H)}{(1 + \lambda_1)\lambda_2} \quad (49)$$

$$\sigma_w = a_6 C(y - H)^{-\lambda_1} + \frac{a_6 \gamma(y - H)}{(1 + \lambda_1)\lambda_2} \quad (50)$$

式中: C 为待定常数。根据边界条件, 当 $y = 0$ 时, $\sigma_w = 0$, 解得

$$C = -\frac{\gamma(-H)^{\lambda_1+1}}{(1 + \lambda_1)\lambda_2} \quad (51)$$

将式 (51) 代入式 (50) 中, 获得被动土压力强度 σ_w , 可表示为

$$\sigma_w = K \gamma \left[H \left(1 - \frac{y}{H} \right)^{-\lambda_1} + (y - H) \right] \quad (52)$$

$$K = \frac{a_6}{(1 + \lambda_1)\lambda_2} \quad (53)$$

式 (52) 即为本文得到的法向被动土压力的计算公式。

因此, 挡土墙被动土压力合力 E_p 可表示为

$$E_p = \int_0^H \sigma_w dy = \frac{1 + \lambda_1}{2(1 - \lambda_1)} K \gamma H^2 \quad (54)$$

被动土压力对墙角的弯矩 M 可表示为

$$M = \int_0^H \sigma_w (H - y) dy = \frac{1 + \lambda_1}{3(2 - \lambda_1)} K \gamma H^3 \quad (55)$$

被动土压力合力作用点距墙角的距离 h_p 可表示为

$$h_p = \frac{M}{E_p} = \frac{2(1 - \lambda_1)}{3(2 - \lambda_1)} H \quad (56)$$

5 对比验证

前述已建立考虑墙背倾斜与墙土摩擦影响的挡

墙被动土压力分析方法,其合理性与优越性仍需进行验证,墙背倾斜与粗糙程度对土压力影响规律也值得分析与讨论。为此,现就相关内容作进一步介绍。

5.1 实测验证

采用文献[3]中 3 组室内试验(编号 1~3)、文献[4]中一组室内试验(编号 4)和文献[5]中一组室内试验(编号 5),共 5 组试验对本文方法的合理性进行讨论,各试验的试验参数如表 1 所示。基于上述试验资料,分别采用文献[11]和文献[17]、库仑方法和本文方法获得相应的被动土压力分布曲线,并与实测曲线进行比较,如图 3 所示。同时为了更深入探讨本文方法的合理性与优越性,基于上述各土

压力分布曲线,选择原试验点作为依据,计算得到 5 组试验下不同分析方法获得的预测值与实测值的相对误差,对上述方法进行比较与讨论,各分析方法比较结果如表 2 所示。

表 1 试验参数
Table 1 Experiment parameters

试验编号	墙高 H/m	土体重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	外摩擦角 $\delta/(^{\circ})$	数据来源
1	0.500	15.7	33.0	9.80	Fang 等 ^[3]
2	0.500	16.3	38.3	12.60	Fang 等 ^[3]
3	0.500	16.8	42.1	14.00	Fang 等 ^[3]
4	0.500	15.5	30.9	19.20	Fang 等 ^[4]
5	0.525	14.6	35.0	16.57	应宏伟等 ^[5]

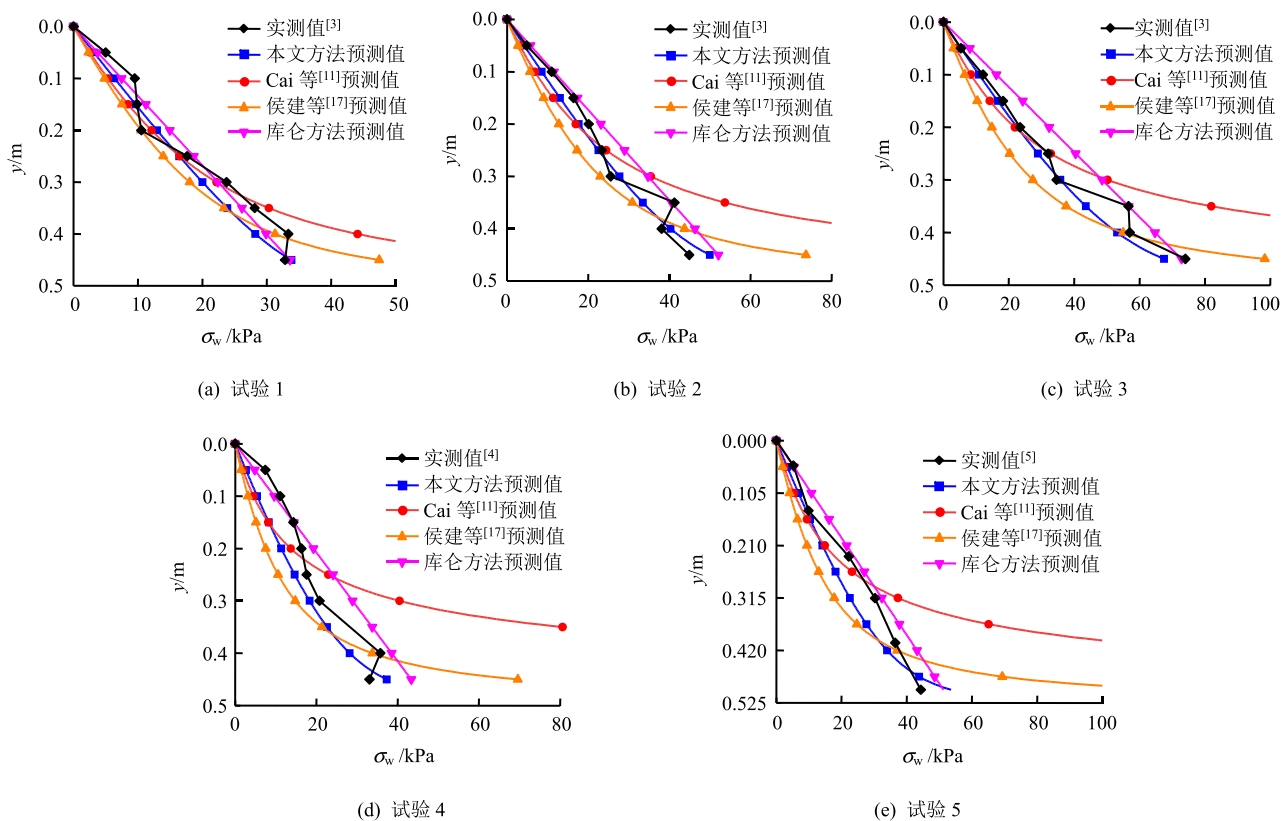


图 3 被动土压力分布曲线对比

Fig.3 Comparisons among different methods of calculation of passive earth pressure curves

表 2 不同被动土压力分析方法计算结果的比较

Table 2 Comparisons of calculated results by different methods of passive earth pressure analysis

被动土压力 分析方法	相对误差/%					平均相对误差/%	
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 1~3	试验 1~5
本文方法	16.81	12.83	8.31	30.79	21.83	12.65	18.11
Cai 等 ^[11] 方法	34.67	79.05	96.00	469.64	650.68	69.91	266.01
侯建等 ^[17] 方法	26.57	34.90	32.94	56.77	65.89	31.47	43.41
库仑方法	14.81	15.96	26.40	22.75	15.49	19.06	19.08

由图 3(a)~3(e)可以看出,文献[11]的理论计算

结果在挡墙中下部较实测值明显偏大;文献[17]的

理论计算结果在上部较实测值偏小,在下部较实测值偏大;采用本文方法获得的理论分析结果较库仑方法偏小,同时较其他理论分析方法与实测值吻合较好,与实测值较为接近。

表 2 中,由不同分析方法计算出来的 5 组试验的预测值与实测值之间的相对误差,其计算公式可用下式表示:

$$\text{相对误差} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\text{预测值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \right) \times 100\% \quad (57)$$

式中: n 为每组试验下试验点的个数。

由表 2 可以看出,根据文献[11]计算得到相对误差及其偏大,这是因为其在挡墙下部的土压力计算结果远远大于实测值;在前 3 组试验中,本文理论分析方法较实测值的平均相对误差仅为 12.65%;综合 5 组试验结果可以看出,本文理论分析方法较实测值的平均相对误差为 18.11%,较其他同类非线性土压力的理论分析方法即文献[11]、文献[17] (平均相对误差分别为 266.01%、43.41%) 误差较小,这在一定程度上说明本文方法更具合理性与优越性。

5.2 分析与讨论

鉴于墙背倾斜和粗糙程度对挡土墙土压力的影响是本文研究的核心内容,为此本文选用文献[3]中试验 3 的参数获得了不同 β 和 δ 的无量纲化被动土压力 $\sigma_w/(\gamma H)$ 和合力作用点高度 h_p/H 分布曲线,分别如图 4~7 所示。

图 4 和 5 分别为无量纲被动土压力分布和合力作用点高度随墙背倾角 β 的变化规律;图 6 和 7 分别为无量纲被动土压力分布和合力作用点高度随墙土摩擦角 δ 的变化规律。其分析结果如下:

(1) 由图 4 可以看出,随着 β 的增大,被动土压力 $\sigma_w/(\gamma H)$ 逐渐减小,土压力分布的非线性减弱。

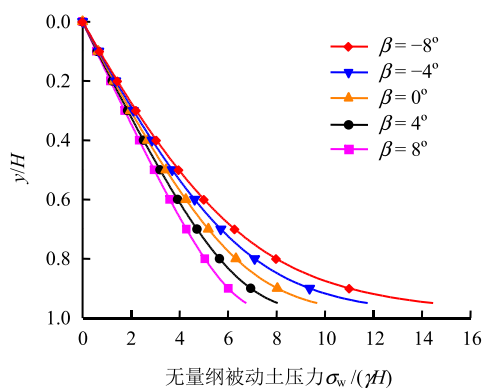


图 4 墙背倾角 β 对被动土压力分布的影响

Fig.4 Effect of β on passive earth pressure distribution

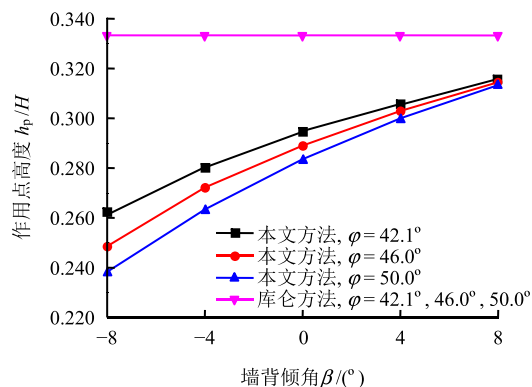


图 5 墙背倾角 β 对合力作用点高度的影响

Fig.5 Effect of β on normalized height of application of resultant force

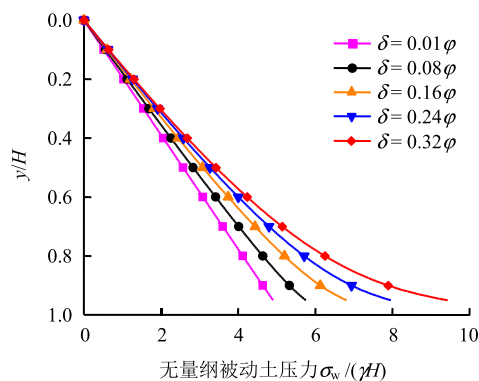


图 6 墙土摩擦角 δ 对被动土压力分布的影响

Fig.6 Effect of δ on passive earth pressure distribution

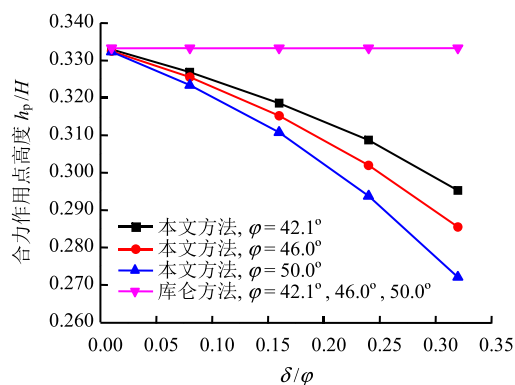


图 7 墙土摩擦角 δ 对合力作用点高度的影响

Fig.7 Effect of δ on normalized height of application of resultant force

(2) 由图 5 可以看出,随着 β 的增大,合力作用点高度 h_p/H 逐渐增大;当 β 相同时, ϕ 越小,合力作用点距墙角的距离越远。

(3) 由图 6 可以看出,随着 δ 的增大,被动土压力 $\sigma_w/(\gamma H)$ 逐渐增大,土压力分布的非线性增强;当 δ 接近于 0 时,被动土压力接近于线性分布。

(4) 由图7可以看出, 随着 δ 的增大, 合力作用点高度 h_p/H 逐渐降低, h_p 小于 $H/3$ 。当外摩擦角接近于0时, 合力作用点的高度接近于 $H/3$; 当 δ/φ 相同时, φ 越小, 合力作用点距墙角的距离越远。

上述规律显然符合工程实际, 从定性角度表明了本文分析方法的合理性。

6 结 论

本文基于沿最大主应力迹线分层的方法, 将墙后滑动土楔划分为若干曲线薄层单元, 并考虑分层界面主应力大小和方向的变化, 对反映墙背倾斜与粗糙程度影响的挡墙被动土压力分析的理论与方法进行了深入研究。由此可得如下结论:

(1) 基于沿最大主应力迹线分层的方法, 提出了考虑墙背倾斜与摩擦影响的挡墙被动土压力分析新方法。它可较合理反映挡墙被动土压力分布的非线性特征, 而且其研究方法不仅简化了薄层单元受力分析, 避免了直线分层方法不能准确反映单元实际受力情况的问题, 还确保了其分析理论的严密性与合理性。

(2) 通过实测和本文与其他同类方法理论分析结果的对比分析, 表明了本文理论与方法的合理性与优越性。

(3) 参数分析表明, 墙背粗糙与倾斜程度对挡墙土压力分布和合力作用点存在一定影响。在一定倾角范围内, 随墙背倾角 β 的增大, 被动土压力逐渐减小, 合力作用点上移; 随墙土摩擦角 δ 的增大, 被动土压力逐渐增大, 合力作用点下移。

参 考 文 献

- [1] 龚晓南, 谢康和. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
GONG Xiao-nan, XIE Kang-he. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [2] KHOSRAVI M H, PIPATPONGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. *Géotechnique*, 2013, 63(12): 1020-1028.
- [3] FANG Y S, HO Y C, CHEN T J. Passive earth pressure with critical state concept[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(8): 651-659.
- [4] FANG Y S, CHEN T J, WU B F. Passive earth pressures with various wall movements[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(8): 1307-1323.
- [5] 应宏伟, 张金红, 王小刚, 等. 有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 978-986.
- YING Hong-wei, ZHANG Jin-hong, WANG Xiao-gang, et al. Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(6): 978-986.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 643-645.
- [9] 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 Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(5): 717-722.
- [10] 俞缙, 周亦涛, 蔡燕燕, 等. 基于土拱效应的刚性挡墙墙后主动土压力[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2306-2310.
YU Jin, ZHOU Yi-tao, CAI Yan-yan, et al. Active earth pressure against rigid retaining wall considering soil-arching effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2306-2310.
- [11] CAI Y Y, CHEN Q S, ZHOU Y T, et al. Estimation of passive earth pressure against rigid retaining wall considering arching effect in cohesive-frictional backfill under translation mode[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(4): 04016093.
- [12] 陈建旭, 宋文武. 平动模式下挡土墙非极限主动土压力[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2284-2292.
CHEN Jian-xu, SONG Wen-wu. Non-limit active earth pressure for retaining wall under translational motion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2284-2292.
- [13] WANG Y Z. Distribution of earth pressure on a retaining wall[J]. *Géotechnique*, 2000, 50(1): 83-88.
- [14] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302-318.
- [15] 章瑞文, 徐日庆. 土拱效应原理求解挡土墙土压力方法的改进[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1057-1060.
ZHANG Rui-wen, XU Ri-qing. Solution of problem of earth pressure on retaining wall calculated by method of soil arching effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1057-1060.

- [16] 朱建明, 赵琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力与被动土压力统一解[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2501-2506.
- ZHU Jian-ming, ZHAO Qi. Unified solution to active earth pressure and passive earth pressure on retaining wall considering soil arching effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(9): 2501-2506.
- [17] 侯键, 夏唐代, 孔祥冰, 等. 基于土拱效应原理求解挡土墙被动土压力[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2996-3000.
- HOU Jian, XIA Tang-dai, KONG Xiang-bing, et al. Passive earth pressure on retaining walls calculated by principle of soil arching effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(10): 2996-3000.
- [18] ZHOU Y T, CHEN Q S, CHEN F Q, et al. Active earth pressure on translating rigid retaining structures considering soil arching effect[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2018, 22(8): 910-926.
- [19] GOEL S, PATRA N R. Effect of arching on active earth pressure for rigid retaining walls considering translation mode[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2008, 8(2): 123-133.
- [20] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1064-1070.
- TU Bing-xiong, JIA Jin-qing. Research on active earth pressure behind rigid retaining wall from clayey backfill considering soil arching effects[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(5): 1064-1070.
- [21] LI J P, WANG M. Simplified method for calculating active earth pressure on rigid retaining walls considering the arching effect under translational mode[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2014, 14(2): 282-290.
- [22] CAO W G, LIU T, XU Z. Calculation of passive earth pressure using the simplified principal stress trajectory method on rigid retaining walls[J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 109: 108-116.

《岩土力学》2019 年第 6 期被 EI 收录论文 (44 篇, 收录率 100 %) (1)

序号	论文题名	作者	页码
1	基于非牛顿指数渗流和分数阶 Merchant 模型的一维流变固结分析	刘忠玉, 崔鹏陆, 郑占垒, 等	2029—2038
2	低强度高脆岩爆模型材料配比试验研究	周 辉, 陈 珺, 张传庆, 等	2039—2049
3	非饱和土中热-湿-盐耦合作用的稳态分析	周凤玺, 高国耀	2050—2058
4	应力路径和干湿状态对堆石料颗粒破碎的影响研究	孔宪京, 宁凡伟, 刘京茂, 等	2059—2065
5	主要造岩矿物微波敏感性试验研究	田 军, 卢高明, 冯夏庭, 等	2066—2074
6	饱和黏土平均粒间应力的确定方法	杨德欢, 颜荣涛, 韦昌富, 等	2075—2084
7	深部硬岩矩形隧洞围岩板裂破坏的试验模拟研究	宫凤强, 伍武星, 李天斌, 等	2085—2098
8	饱和软土大应变自重固结非线性分析	龚文惠, 赵旭东, 邱金伟, 等	2099—2107
9	铁路台阶式加筋土挡墙潜在破裂面特征模型试验	赵晓彦, 范宇飞, 刘 亮, 等	2108—2118
10	高应力卸荷条件下砂岩扩容特征及其剪胀角函数	李建朋, 高 岭, 母焕胜	2119—2126
11	多点非一致激励下埋地管道多台阵振动台试验方案研究	韩俊艳, 侯本伟, 钟紫蓝, 等	2127—2139
12	循环加卸载作用下预制裂隙煤样渗透性试验研究	王辰霖, 张小东, 杜志刚	2140—2153
13	超前支护下隧道掌子面稳定性极限上限分析	陈 峥, 何 平, 颜杜民, 等	2154—2162
14	地基与密肋复合墙结构相互作用系统频域地震响应试验研究	卢俊龙, 张 荫	2163—2171
15	软岩流变相似材料的研制及物理模型试验应用	储昭飞, 刘保国, 任大瑞, 等	2172—2182
16	生石灰为掺料的土遗址锚固浆液选型和性能研究	崔 凯, 黄井镜, 谌文武, 等	2183—2191
17	含卸压孔硬岩应力松弛特性试验研究	赵振华, 张晓君, 李晓程	2192—2199
18	基于 3D-ILC 含内裂纹孔口脆性固体断裂特性试验	王海军, 郁舒阳, 任 然, 等	2200—2212
19	地表均布超载作用下盾构隧道上覆土层竖向土压力转移分析	黄大维, 周顺华, 冯青松, 等	2213—2220
20	水与微观结构对片岩波速各向异性特征的影响及其机制研究	尹晓萌, 晏鄂川, 王鲁男, 等	2221—2230
21	有明黏土各向异性固结特性的试验研究	加 瑞, 雷华阳	2231—2238
22	基于应变软化指标的岩石非线性蠕变模型	金俊超, 余成学, 尚朋阳	2239—2246
23	利用动电模型分析黏土渗流的耦合动力学性状	程冠初, 凌道盛, 孙祖峰	2247—2256
24	粉砂地层中浓泥土压盾构泥膜效应引起的孔压变化规律试验研究	莫振泽, 王梦翹, 李海波, 等	2257—2263
25	柔性侧限条件下软土的变形特性及固结模型	罗庆姿, 陈晓平, 袁炳祥, 等	2264—2274

(未完, 见第 3158 页)