

## 基于主应力旋转的黏性填土挡墙土压力

王恒利, 邹正盛, 刘京敏, 王新宇

### The earth pressure of retaining wall with cohesive fill based on principal stress rotation

WANG Hengli, ZOU Zhengsheng, LIU Jingmin, and WANG Xinyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011011>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 考虑竖向附加应力作用的一维垂直土柱仪研制与应用

Research and application of stress-controllable soil column instrument

张林, 张登飞, 陈存礼, 庞腾腾, 孙佩娜 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 112-119

#### 无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123-130

#### 无黏性土的压缩特性及模型

Compression characteristics and models of cohesionless soil

马露 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 72-77

#### 初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99

#### 土石混合体的剪应力波动和跌落行为机制

Mechanism of shear stress fluctuation and dropping of the soil-rock mixture

胡峰, 李志清, 刘琪, 胡瑞林 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 90-101

#### 干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110-118



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202011011

# 基于主应力旋转的黏性填土挡墙土压力

王恒利<sup>1,2,3</sup>, 邹正盛<sup>1,2,3</sup>, 刘京敏<sup>4</sup>, 王新宇<sup>1,2,3</sup>

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省地下空间开发及诱发灾变防治国际联合实验室, 河南 焦作 454003; 3. 河南省地下工程与灾变防控重点实验室; 河南 焦作 454003; 4. 中国地质工程集团有限公司, 北京 100093)

**摘要:** 填土水平墙背光滑的挡墙, 墙后土体处于以自重应力和水平应力为主应力的应力状态。实际工程中, 挡墙背面与土体存在一定的摩擦及黏结力作用致使挡墙附近土体中的主应力发生偏转, 此时, 经典朗肯土压力理论不再适用。本文对挡墙附近土中的主应力状态进行旋转处理, 通过分析墙后填土中应力状态摩尔圆, 得到了考虑墙土摩擦和黏结力作用的黏性填土挡墙主被动土压力计算公式, 分析了填土内摩擦角与墙土摩擦角对土压力的影响, 使用算例将本文方法所得结果与现有黏性土土压力计算方法所得结果进行了对比分析。结果表明, 朗肯土压力公式是本文所得计算公式的特例; 随着墙土摩擦角和内摩擦角的增加, 被动土压力逐渐加快增大; 主动土压力随着内摩擦角的增加而减小; 当内摩擦角较小时, 主动土压力随着墙土摩擦角的增大不断减小, 当内摩擦角较大时, 主动土压力随着墙土摩擦角的增大先减小后增大; 土内摩擦角的影响大于墙土摩擦角的影响; 相对于现有方法计算结果, 本文方法所得主动土压力较大, 被动土压力较小, 墙土摩擦越大, 2 种方法所得结果的差值越大, 土黏聚力还会加大这一差值。本文方法考虑了墙背土体主应力方向偏转的客观事实, 所得计算结果将更符合实际情况。

**关键词:** 主动土压力; 被动土压力; 墙土摩擦作用; 主应力偏转; 主应力旋转; 黏性土

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0064-08

## The earth pressure of retaining wall with cohesive fill based on principal stress rotation

WANG Hengli<sup>1,2,3</sup>, ZOU Zhengsheng<sup>1,2,3</sup>, LIU Jingmin<sup>4</sup>, WANG Xinyu<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2. International Joint Research Laboratory of Henan Province for Underground Space Development and Disaster Prevention, Jiaozuo, Henan 454003, China; 3. Henan Key Laboratory of Underground Engineering and Disaster Prevention, Jiaozuo, Henan 454003, China; 4. China Geo-Engineering Corporation, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The soil behind a wall is in a stress state with self-weight stress and horizontal stress as the main stress for the Rankine retaining wall with horizontal fill. However, there is a certain wall-soil friction and bonding force in practice. The friction and bonding force may cause the principal stress deflection in the fill near the retaining wall, and the classical Rankine earth pressure theory is not applicable for this case. In the current study, the principal stress deflection of the fill near the retaining wall is processed both by the rotation and by the analysis of the stress from the Mohr circle in the fill behind the wall. The active and passive earth pressures of the retaining wall filled with the cohesive soil is derived, considering the wall-soil friction and bonding force. The influences of the fill friction angle and the wall-soil friction angle on the earth pressures are analyzed. The examples are further

收稿日期: 2020-11-06; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1810203); 河南理工大学博士基金项目(648198)

第一作者: 王恒利(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: 929520161@qq.com

used to compare the results from this study with those with the improved Coulomb method. The results show that the Rankine earth pressure is a special case of the formula presented in this study. With the increase of the wall-soil friction angle and internal friction angle, the passive earth pressures gradually increase. The active earth pressures decrease with the increase of the internal friction angle, and the decreasing rate gradually decreases. When the internal friction angle is small, the active earth pressures decrease continuously with the increase of the wall-soil friction angle, and the decreasing speed gradually decreases. When the internal friction angle is large, the active earth pressures first decrease and then increase with the increase of the wall-soil friction angle. The effect of the fill friction angle is more obvious than that of the wall-soil friction angle. Compared with the results from other methods, the active earth pressures obtained with this method are larger, but the passive earth pressure is smaller, and their differences increase with the increase in the wall-soil friction, especially when the cohesion is considered. Because the deflection of the principal stress in the soil on the back of the wall is more consistent with the actual situations, the results from this study will be more suitable to compute the earth pressure in practice.

**Keywords:** active earth pressure; passive earth pressure; wall-soil friction; principal stress deflection; principal stress rotation; cohesive soil

众所周知,挡墙墙背粗糙,黏性土挡墙土界面存在一定的摩擦。对于这种情况,经典朗肯土压力理论不再适用。为了使理论计算结果更接近于实际,众多学者探索考虑墙土摩擦作用的土压力计算。

考虑墙土摩擦进行黏性土土压力计算时,大多为基于经典理论的修正方法。早期的方法有:等值内摩擦角法、楔体试算法、内压力法、图解法等<sup>[1-3]</sup>。后来,一些学者在库伦土压力理论的基础上进行了改进,取得了一系列进展。朱桐浩等<sup>[4]</sup>在库伦理论平面滑裂面假设条件下,从土体的极限平衡条件出发,由滑动楔体的极限平衡状态,导出考虑墙土摩擦的黏性土主动土压力计算式。赵恒惠<sup>[5]</sup>基于库伦土压力理论,将墙土之间摩擦角和墙土之间的黏结力用折减土体内摩擦角和黏结力表示,推导了重力式挡墙土压力计算式。顾慰慈<sup>[6]</sup>假定滑裂面为平面,导出考虑墙土摩擦的黏性土主动土压力的库仑解。罗绍军<sup>[7]</sup>基于库伦平面滑裂面假定,考虑滑裂面黏聚力作用,通过力矢多边形,建立了黏性土主动和被动土压力计算式。卢廷浩<sup>[8]</sup>应用平面滑裂面假定,考虑墙土摩擦及黏结力以及填土表面裂缝和超载的影响,推导了挡墙的主动土压力计算式。李巨文等<sup>[9]</sup>在文献[5]的基础上,给出了距墙顶一定距离均布荷载作用下的主动土压力计算式。胡晓军<sup>[10-11]</sup>基于库伦理论的平面滑裂面假设,先后建立了考虑墙土接触面上黏结力与摩擦力作用的主被动土压力计算式。彭明祥<sup>[12-13]</sup>认为极限土压力是由墙后塑性土体产生,假定塑性区平面滑裂面,建立了考虑墙土摩擦及墙土界面黏结力作用的挡

墙土主动土压力计算式。杨敏等<sup>[14]</sup>基于平面滑裂面假定,结合微分层解析法和图解法,推导了考虑墙土摩擦及黏结力作用的土压力计算公式。曹雄等<sup>[15]</sup>在文献[8]的基础上,应用力的矢量多边形法推导了考虑墙土摩擦及黏结力作用的主被动土压力计算式。柯才桐等<sup>[16]</sup>基于库仑土压力理论假设,从滑动楔体极限平衡状态时力的静力平衡条件出发,推导出不同分布模式条形荷载作用下考虑墙土摩擦和墙土之间黏结力的主动土压力计算式;后来,又采用斜向条分法,推导了一般条件下挡墙土压力强度的表达式<sup>[17]</sup>。胡卫东等<sup>[18]</sup>基于平面滑裂面假定,对极限平衡状态的墙后土楔体进行静力平衡分析,考虑墙土界面摩擦与黏结力、填土的黏聚力影响,建立了有限土体主动土压力计算方法。陈建功等<sup>[19]</sup>从墙后滑楔体整体静力平衡方程出发,采用整体极限变分法对土压力进行求解,建立了考虑墙土摩擦的黏性土挡墙土压力计算方法。

事实上,对于朗肯挡墙,当墙背与其后土体之间存在摩擦时,墙后土体会产生非均匀应力场,墙背附近土体由于墙土摩擦产生的剪切力而使土体单元主应力方向发生偏转,而墙背稍远处土中应力场仍符合朗肯土压力条件。针对墙背面土体主应力偏转这一事实,Lancellotta<sup>[20]</sup>基于塑性下限定理,采用主应力旋转办法,建立了考虑墙土摩擦的土体极限状态下无黏性土挡墙的主被动土压力计算方法;后来,又进一步给出了地震条件下的无黏性土的主被动土压力计算公式<sup>[21]</sup>。

然而,目前针对黏性土条件下的土压力计算研究

较少。本文拟采用主应力旋转处理方法,考虑黏性土中的黏聚力作用,推导考虑墙土摩擦和黏聚力作用的黏性土主动土压力和被动土压力的计算公式;同时,将计算结果和现有相关方法进行对比,分析墙土摩擦角和土体内摩擦角对黏性土挡墙土土压力的影响。

### 1 被动土压力计算解析

对于被动状态的朗肯挡墙,由于墙土摩擦作用,墙后土体将分别处于两种应力状态区域:墙后相对远处土体的大小主应力分别为水平应力和竖向自重应力;近墙土体由于墙土摩擦和黏聚力作用,水平应力和竖向自重应力不再是大小主应力,主应力轴向墙外发生一定程度的偏移。无疑,这两种应力状态间存在 1 条公共线(即界线),如图 1 所示。

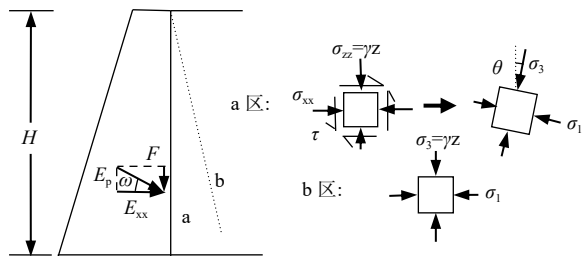


图 1 被动极限状态土体单元应力图

Fig. 1 Stress of soil element under the passive limit state

取墙背和墙后土体单元进行应力分析。对墙后土中两种应力状态进行推算,则在分界线上应力不一致(图 2)。图 2 中,未发生偏转的莫尔圆与包线在 T 处相切,偏转后的莫尔圆与偏转前的莫尔圆交点为 X。对于黏性土,由于黏聚力不为零,可将  $\tau$  轴左移  $l$  ( $l = c \cot \varphi$ ),得到坐标原点为  $(0, 0)$  的新坐标系,  $s' = s + l$ ,  $\sigma'_{xx} = \sigma_{xx} + l$ 。通过对三角形 ABX 应用正弦定理,可以得到:

$$\frac{BX}{\cos \varphi} = \frac{ds'}{\sin 2d\theta} \quad (1)$$

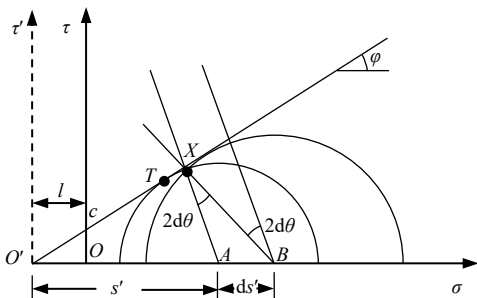


图 2 应力圆心偏移图

Fig. 2 Diagram showing the stress center deviation

假设应力圆产生 1 个小转动  $2d\theta$ 。当  $ds' \rightarrow 0$  时,  $\sin \theta \cong \theta$ , 公共点  $X \rightarrow T$ , 则  $BX \cong AX$ 。此时式(1)变为:

$$\frac{s' \sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{ds'}{2d\theta} \quad (2)$$

则:

$$\frac{ds'}{s'} = 2d\theta \tan \varphi \quad (3)$$

式中:  $\theta$ ——主应力方向的旋转角;

$\varphi$ ——填土内摩擦角;

$s'$ ——调整后的莫尔圆圆心横坐标。

绘制被动挡墙墙背及墙后土体摩尔应力圆(图 3), 其中墙后土体应力圆 2 主应力方向未发生偏转, 圆心横坐标为  $s'_2$ 。假定主应力方向的偏转为有限值  $\theta$ , 得到墙背土体应力圆 1, 圆 1 的圆心横坐标为  $s'_1$ 。显然, 圆 2 的偏转角为 0, 圆 1 的偏转角为  $\theta$ 。对式(3)积分:

$$\int_{s'_2}^{s'_1} \frac{ds'}{s'} = \int_0^\theta 2 \tan \varphi d\theta$$

得:

$$\frac{s'_1}{s'_2} = e^{2\theta \tan \varphi} \quad (4)$$

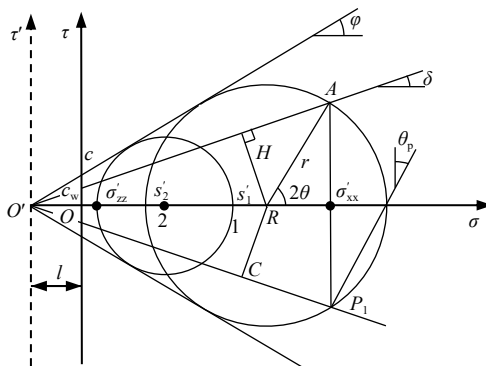


图 3 被动土压力应力圆

Fig. 3 Passive earth pressure stress circle

在主应力方向偏转后的应力圆 1 中(图 3):

$$O'C = s'_1 \cos \delta$$

$$CP_1 = HA = \sqrt{r^2 - RH^2} = s'_1 \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta}$$

$$\begin{aligned} O'P_1 &= O'C + CP_1 \\ &= s'_1 \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\delta$ ——墙背与填土间的摩擦角。

又由于

$$s'_2 = \frac{\sigma'_{zz}}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

且圆2之中主应力方向未发生偏转,即:

$$\sigma'_{zz} = \gamma z + c \cot \varphi \quad (7)$$

故:

$$\begin{aligned} \sigma'_{xx} &= O' P_1 \cos \delta \\ &= \left[ \frac{\cos \delta}{1 - \sin \varphi} \frac{s'_1}{s'_2} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot \\ &\quad (\gamma z + c \cot \varphi) \\ &= \left[ \frac{\cos \delta}{1 - \sin \varphi} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot \\ &\quad e^{2\theta \tan \varphi} (\gamma z + c \cot \varphi) \end{aligned}$$

墙背土体单元水平应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma'_{xx} - l \\ &= \left[ \frac{\cos \delta}{1 - \sin \varphi} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot \\ &\quad e^{2\theta_p \tan \varphi} \cdot (\gamma z + c \cot \varphi) - c \cot \varphi \\ &= K_{px} \cdot (\gamma z + c \cot \varphi) - c \cot \varphi \quad (8) \end{aligned}$$

式中:

$$K_{px} = \left[ \frac{\cos \delta}{1 - \sin \varphi} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] e^{2\theta_p \tan \varphi}$$

墙背土体单元剪应力:

$$\begin{aligned} \tau &= O' P_1 \sin \delta \\ &= \left[ \frac{\sin \delta}{1 - \sin \varphi} \frac{s'_1}{s'_2} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot \\ &\quad (\gamma z + c \cot \varphi) \\ &= \left[ \frac{\sin \delta}{1 - \sin \varphi} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot \\ &\quad e^{2\theta_p \tan \varphi} (\gamma z + c \cot \varphi) \\ &= K_{py} (\gamma z + c \cot \varphi) \quad (9) \end{aligned}$$

式中:

$$K_{py} = \left[ \frac{\sin \delta}{1 - \sin \varphi} \left( \cos \delta + \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{2\theta_p \tan \varphi}$$

则作用在挡土墙上的被动土压力强度为:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \tau^2} \quad (10)$$

墙背切向力:

$$F = \int_0^H \tau dz = K_{py} \left( \frac{1}{2} \gamma H^2 + cH \cot \varphi \right) \quad (11)$$

墙背水平力:

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \int_0^H \sigma_{xx} dz \\ &= K_{px} \left( \frac{1}{2} \gamma H^2 + cH \cot \varphi \right) - cH \cot \varphi \quad (12) \end{aligned}$$

则黏性土挡土墙被动土压力为:

$$E_p = \sqrt{E_{xx}^2 + F^2} \quad (13)$$

被动土压力与墙背法线之间夹角:

$$\omega_p = \arctan \frac{F}{E_{xx}} \quad (14)$$

由图3中的圆1,有:

$$HR = r \sin(2\theta_p - \delta) = O'R \sin \delta = \frac{r}{\sin \varphi} \sin \delta$$

则墙后土体主应力偏转角  $\theta_p$  为:

$$2\theta_p = 2\theta = \arcsin \left( \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} \right) + \delta \quad (15)$$

由图3可知,墙土界面黏结力  $c_w$  与墙土界面摩擦角  $\delta$ 、填土黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  存在如下关系:

$$c_w = c \cdot \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \quad (16)$$

若墙背光滑( $\delta=0$ ),则  $\theta_p=0$ ,  $c_w=0$ ,式(13)退化为:

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p + 2cH \sqrt{K_p}$$

其中:  $K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$

这意味着,若不考虑墙土摩擦角,被动土压力计算式与朗肯被动土压力公式相等。

## 2 主动土压力计算解析

对于主动土压力情形,墙后土体应力状态如图4所示。同样,取墙背和墙后土体单元进行分析,则主动挡墙墙背及墙后土体摩尔应力圆如图5所示。其中,主动土压力应力圆1为墙后土体单元应力圆,圆心横坐标为  $s'_1$ ,主应力方向未发生偏转。墙背土体应力圆2,主应力方向偏转角为  $\theta$ 。同理有:

$$\frac{s'_1}{s'_2} = e^{2\theta \tan \varphi} \quad (17)$$

由图5可得:

$$O'H = s'_2 \cos \delta$$

$$AH = \sqrt{AR^2 - RH^2} = s'_2 \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta}$$

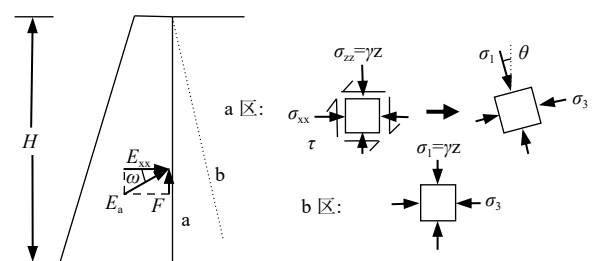


图4 主动极限状态土体单元应力图

Fig. 4 Stress of soil element under the active limit state

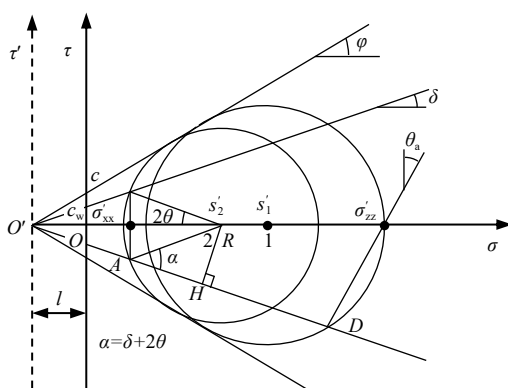


图 5 主动土压力应力圆

Fig. 5 Active earth pressure stress circle

$$O'A = O'H - AH$$

$$= s'_2 \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right)$$

$$s'_1 = \frac{\sigma'_{zz}}{1 + \sin \varphi}$$

由于圆 1 之中主应力方向未发生偏转, 则:

$$\sigma'_{zz} = \gamma z + c \cot \varphi$$

可得:

$$\sigma'_{xx} = O'A \cos \delta$$

$$= \left[ \frac{\cos \delta}{1 + \sin \varphi} \frac{s'_2}{s'_1} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot (\gamma z + c \cot \varphi)$$

$$= \left[ \frac{\cos \delta}{1 + \sin \varphi} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{-2\theta \tan \varphi} \cdot (\gamma z + c \cot \varphi)$$

墙背土体单元水平应力:

$$\sigma_{xx} = \sigma'_{xx} - l$$

$$= \left[ \frac{\cos \delta}{1 + \sin \varphi} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{-2\theta_a \tan \varphi} \cdot (\gamma z + c \cot \varphi) - c \cot \varphi$$

$$= K_{ax} (\gamma z + c \cot \varphi) - c \cot \varphi \quad (18)$$

其中:

$$K_{ax} = \left[ \frac{\cos \delta}{1 + \sin \varphi} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{-2\theta_a \tan \varphi}$$

墙背土体单元剪应力:

$$\tau = O'A \sin \delta$$

$$= \left[ \frac{\sin \delta}{1 + \sin \varphi} \frac{s'_2}{s'_1} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot (\gamma z + c \cot \varphi)$$

$$= \left[ \frac{\sin \delta}{1 + \sin \varphi} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{-2\theta_a \tan \varphi} \cdot (\gamma z + c \cot \varphi)$$

$$= K_{ay} \cdot (\gamma z + c \cot \varphi) \quad (19)$$

式中:

$$K_{ay} = \left[ \frac{\sin \delta}{1 + \sin \varphi} \left( \cos \delta - \sqrt{\sin^2 \varphi - \sin^2 \delta} \right) \right] \cdot e^{-2\theta_a \tan \varphi}$$

从而, 作用在挡土墙上的主动土压力强度为:

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \tau^2} \quad (20)$$

拉应力区临界深度为:

$$z_0 = \frac{c \cot \varphi - K_{ax} c \cot \varphi}{K_{ax} \gamma} \quad (21)$$

则:

$$h = H - z_0 \quad (22)$$

将开裂土层深度范围内的土等效成均布荷载作用:

$$q = \gamma z_0$$

墙背切向力:

$$F = \int_0^h \tau dz = K_{ay} \left( \frac{1}{2} \gamma h^2 + qh + ch \cot \varphi \right) \quad (23)$$

墙背水平力:

$$E_{xx} = \int_0^h \sigma_{xx} dz$$

$$= K_{ax} \left( \frac{1}{2} \gamma h^2 + qh + ch \cot \varphi \right) - ch \cot \varphi \quad (24)$$

作用在墙背的主动土压力为:

$$E_a = \sqrt{E_{xx}^2 + F^2} \quad (25)$$

主动土压力与墙背法线之间夹角:

$$\omega_a = \arctan \frac{F}{E_{xx}} \quad (26)$$

同理可得墙背土体主应力偏转角  $\theta_a$  为:

$$2\theta_a = 2\theta = \arcsin \left( \frac{\sin \delta}{\sin \varphi} \right) - \delta \quad (27)$$

由图(5)可得墙土界面黏结力  $c_w$  为:

$$c_w = c \cdot \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$$

若墙背光滑 ( $\delta=0$ ), 则有  $\theta_a=0, c_w=0$ , 式(25)退化为:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2cH \sqrt{K_a} + \frac{2c^2}{\gamma}$$

其中:  $K_a = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$

显然, 若不考虑墙土摩擦角, 主动土压力与朗肯主动土压力相同。

### 3 基于算例的对比分析

#### 3.1 黏性填土挡土墙土压力计算的代表方法

(1) 朗肯土压力理论。朗肯土压力理论是经典的



黏性土土压力计算理论,是根据半空间的应力状态和土的极限平衡条件而得到的土压力计算方法。但朗肯理论假定挡土墙背光滑,忽略了挡土墙背与土体之间的摩擦和黏结力作用。

(2)卢廷浩法<sup>[8]</sup>。该法基于库伦理论平面滑裂面假定,考虑挡土墙背与黏性填土的摩擦及黏结力、填土表面的裂缝及荷载以及滑裂面黏聚力的影响,由滑动楔体力矢图推导出主动土压力公式。以编程试算法得到滑裂面倾角的精确值求得主动土压力精确解。

(3)胡晓军法<sup>[11]</sup>。该法基于库伦理论平面滑裂面假定,考虑填土的黏聚力、墙土界面的摩擦力和黏结力,通过力矢多边形建立均布荷载作用下一般形式的黏性土挡土墙被动土压力计算公式。

(4)柯才桐法<sup>[17]</sup>。该法同样基于库伦理论平面滑裂面假定,但采用斜向条分法,考虑墙后黏性填土、墙土界面的摩擦力和黏结力以及均布荷载作用,通过土条静力分析,给出了一般形式的黏性土挡墙主动和被动土压力计算公式,并基于公式的特殊处理给出了滑裂角计算式。

### 3.2 对比分析

运用朗肯理论、卢廷浩法、胡晓军法、柯才桐法以及本文方法对以下 2 个算例进行计算并对比。

算例 1:某挡土墙高  $H=10\text{ m}$ ,墙背竖直,墙后填土水平,墙后填土表面无超载。填土参数为  $\gamma=18.6\text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi=24^\circ$ ,其它有关参数及计算结果见表 1,其中取  $c_w=c \cdot \tan\delta/\tan\varphi$ 。

表 1 主动土压力算例

Table 1 Example for the active earth pressure

$\delta/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$E_a/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$				$\theta_a/(\circ)$	$\omega_a/(\circ)$
		柯才桐法	卢廷浩法	朗肯理论解	本文解		
0	0	392.21	392.21	392.21	392.21	0	0
0	10	273.08	273.08	273.08	273.08	0	0
5	10	250.02	250.02		252.87	3.69	8.64
5	15	197.58	197.58		201.64	3.69	11.09
10	15	178.11	178.11		193.87	7.64	22.35
10	20	131.16	131.16		151.77	7.64	28.33

算例 2:某挡土墙墙高  $H=8\text{ m}$ ,填土参数为  $\gamma=18.6\text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi=20^\circ$ ,墙背竖直,墙后填土水平,无超载作用,其它有关参数及计算结果列于表 2,其中取  $c_w=c \cdot \tan\delta/\tan\varphi$ 。

由表 1 和表 2 可以看出,对于符合朗肯假设条件的情况,本文方法所得主被动土压力与朗肯理论的结果相同。对于考虑墙土摩擦和黏结力的黏性土挡墙

表 2 被动土压力算例

Table 2 Example for the passive earth pressure

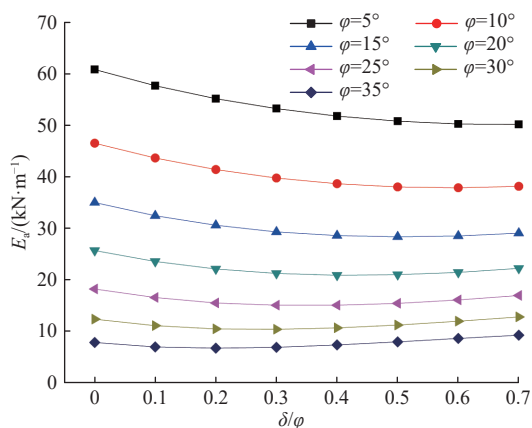
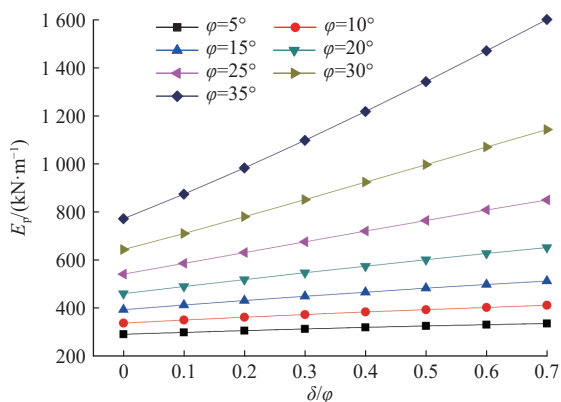
$\delta/(\circ)$	$c/\text{kPa}$	$E_p/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$			$\theta_p/(\circ)$	$\omega_p/(\circ)$
		胡晓军法	朗肯理论解	本文方法		
0	0	1 213.97	1 213.97	1 213.97	0	0
0	10	1 442.48	1 442.48	1 442.48	0	0
5	5	1 520.39		1 502.71	9.88	5.37
5	10	1 664.24		1 644.58	9.88	5.67
5	15	1 808.09		1 786.50	9.88	5.92
5	20	1 951.94		1 928.44	9.88	6.14
10	5	1 746.65		1 665.38	20.26	10.66
10	10	1 924.69		1 833.87	20.26	11.19
10	15	2 102.73		2 002.48	20.26	11.64
10	20	2 280.76		2 171.20	20.26	12.01

主动土压力,本文方法所得结果大于其他学者的结果。对于考虑墙土摩擦和黏结力的黏性土挡墙被动土压力,本文方法所得结果小于其他学者的计算结果。本文方法主动和被动土压力计算结果与其他学者主动和被动土压力计算结果的差值变化规律一致,均随着  $\delta$ 、 $c$  的增大而增大。

表 1 和表 2 还表明,由于本文方法考虑了墙土界面黏结力作用,墙土界面的黏结力包含在土压力切向分量  $F$  中,使得土压力与墙背法线夹角  $\omega$  大于摩擦角  $\delta$ ,且随着摩擦角  $\delta$ 、黏聚力  $c$  的增大而增大。墙土摩擦角越大,墙背土体主应力偏转越大,本文方法所得结果与他人结果相差也越大。然而当主应力旋转角  $\theta=20^\circ$  时  $\sin\theta\approx\theta$  仍成立,两者的误差只有 0.007。显然,因考虑了墙后土体主应力偏转的事实,本文方法所得结果更客观、计算式更为简明易用。

### 4 参数敏感性分析

设挡土墙高  $H=4\text{ m}$ ,墙背竖直,墙后土体表面水平且无超载,填土  $\gamma=20\text{ kN/m}^3$ ,  $c=12\text{ kPa}$ 。取  $\varphi=5^\circ\sim 35^\circ$ ,  $\delta=(0\sim 0.7)\varphi$ ,分析  $\delta$ 、 $\varphi$  对土压力的影响(图 6、图 7)。图 6 和图 7 分别反映作用在挡土墙背的主被动土压力随  $\delta$  和  $\varphi$  的变化情况。对于主动土压力,当  $\varphi<10^\circ$  时,主动土压力随  $\delta$ 、 $\delta/\varphi$  增大不断减小,且减小的速度在逐渐减缓;当  $\varphi\geq 10^\circ$  时,主动土压力随  $\delta$ 、 $\delta/\varphi$  增大先减小后增大,但总体变化不大;当  $\delta$  不变时,主动土压力随  $\varphi$  增大不断减小,且减小的速度在逐渐减缓。被动土压力则随  $\delta$ 、 $\varphi$ 、 $\delta/\varphi$  的增大不断增大,且增大的速度在逐渐加快。主动土压力随  $\delta$  值增大不断减小,但总体变化不大。 $\varphi$  值对主被动土压力影响均较  $\delta$  显著。

图 6 主动土压力随  $\delta/\varphi$  的变化Fig. 6 Change of the active earth pressure with  $\delta/\varphi$ 图 7 被动土压力随  $\delta/\varphi$  的变化Fig. 7 Change of the passive earth pressure with  $\delta/\varphi$ 

## 5 结论

(1) 采用主应力旋转处理墙后土体主应力偏转现象, 推导出考虑墙土摩擦和黏结力作用的黏性土挡墙土压力计算式, 朗肯土压力公式只是新方法公式的特例。由于墙土界面黏结力作用, 土压力与墙背法线的夹角  $\omega$  大于摩擦角  $\delta$ 。

(2) 当黏性土内摩擦角  $\varphi$  较小时, 墙土界面黏结力影响较小, 随着墙土摩擦角  $\delta$  的增大, 主动土压力不断减小, 且减小的速度逐渐减缓; 当  $\varphi$  值较大时, 随着墙土摩擦角  $\delta$  的增大, 墙土界面黏结力加强, 主动土压力先减小后增大。被动土压力随着墙土摩擦角  $\delta$  的增大不断增大, 且增大的速度在逐渐加快。随  $\varphi$  值增大, 主动土压力减小且减小的速率在逐渐减缓, 被动土压力增大且增大的速率在逐渐加大。 $\varphi$  值的影响比  $\delta$  值更明显。

(3) 对于主动土压力, 本文方法所得结果大于其他学者的结果。对于被动土压力, 本文方法所得结果

小于其他学者的计算结果。本文方法主被动土压力计算结果与其他学者主被动土压力计算结果的差值变化规律一致, 均随着  $\delta$ 、 $c$  的增大而增大。本文方法考虑了墙后土体主应力偏转的事实, 计算结果更客观。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005. [ GU Weici. Handbook of Earth Pressure Calculation for Retaining Wall[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2005. (in Chinese) ]
- [ 2 ] 王世柱. 粘性土的等值内摩擦角及主动土压力的计算[J]. 地基基础工程, 1997, 7(3): 19 - 23. [ WANG Shizhu. On the equivalent internal angle of soil and active earth pressure[J]. Foundation Engineering, 1997, 7(3): 19 - 23. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 吴能森. 粘性土挡墙主动土压力计算研究[J]. 森林工程, 2002, 18(2): 33 - 35. [ WU Nengsen. Calculating method of active earth pressure of cohesive soil[J]. Forest Engineering, 2002, 18(2): 33 - 35. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 朱桐浩, 刘清瑞. 粘性土主动土压力计算[J]. 四川建筑科学研究, 1979, 5(5): 46 - 54. [ ZHU Tonghao, LIU Qingrui. Calculation of active earth pressure on cohesive soil[J]. Building Science Research of Sichuan, 1979, 5(5): 46 - 54. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 赵恒惠. 挡土墙后粘性填土的土压力计算[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 134 - 146. [ ZHAO Henghui. The computation of earth pressure of cohesive backfill on retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(1): 134 - 146. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 顾慰慈. 粘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 in cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22(1): 55 - 64. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 罗绍军. 挡土墙土压力计算公式及其运算程序[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 42 - 43. [ LUO Shaojun. Soil pressure calculation formula and computing program of retaining wall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992, 19(1): 42 - 43. (in Chinese) ]
- [ 8 ] 卢廷浩. 考虑粘聚力及墙背粘着力的主动土压力公式[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 470 - 473. [ LU Tinghao. A formula of active earth pressure including cohesion and adhesion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 470 - 473. (in Chinese with English abstract) ]



- abstract) ]
- [ 9 ] 李巨文, 王翀, 梁永朵, 等. 挡土墙后粘性填土的主动土压力计算 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(5): 650 - 652. [ LI Juwen, WANG Chong, LIANG Yongduo, et al. Computation of earth pressure of cohesive backfill on retaining wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(5): 650 - 652. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 10 ] 胡晓军. 粘性土主动土压力库仑精确解的改进 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(8): 1049 - 1052. [ HU Xiaojun. Improvement on Coulumb accurate solution of active earth pressure to cohesive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 1049 - 1052. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 11 ] 胡晓军, 谭晓慧. 黏性土被动土压力计算的库仑数值解 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(3): 304 - 307. [ HU Xiaojun, TAN Xiaohui. Coulomb numerical solution of passive earth pressure on cohesive soil[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2009, 37(3): 304 - 307. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 12 ] 彭明祥. 挡土墙主动土压力的库仑统一解 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(2): 379 - 386. [ PENG Mingxiang. Coulumb's unified solution of active earth pressure on retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 379 - 386. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 13 ] 彭明祥. 挡土墙主动土压力塑性临界深度的解析解 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3179 - 3183. [ PENG Mingxiang. Analytical solution of plastic critical depth for active earth pressure on retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3179 - 3183. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 14 ] 杨敏, 刘斌, 周建武. 挡土墙主动和被动土压力的统一解 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 187 - 193. [ YANG Min, LIU Bin, ZHOU Jianwu. Unified solution of active and passive earth pressure on retaining wall[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(2): 187 - 193. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 15 ] 曹雄, 陈奕柏, 柯才桐. 刚性挡土墙后粘性土土压力研究 [J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(2): 155 - 161. [ CAO Xiong, CHEN Yibai, KE Caitong. Earth pressure of cohesive soil acting on rigid retaining wall[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2013, 31(2): 155 - 161. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 16 ] 柯才桐, 陈奕柏, 高洪波, 等. 条形荷载不同分布模式下挡墙主动土压力研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1922 - 1927. [ KE Caitong, CHEN Yibo, GAO Hongbo, et al. Active earth pressure on retaining wall under different distribution patterns of strip surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1922 - 1927. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 17 ] 柯才桐, 陈奕柏, 朱嘉. 挡土墙土压力线性分布解 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增刊1): 3312 - 3317. [ KE Caitong, CHEN Yibo, ZHU Jia. A linear distribution solution of earth pressure on retaining wall[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(Sup1): 3312 - 3317. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 18 ] 陈建功, 胡日成, 许明. 考虑合力作用点位置的主动土压力计算 [J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 132 - 139. [ CHEN Jianguo, HU Richeng, XU Ming. Active earth pressure calculation considering force point location[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 132 - 139. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 19 ] 陈建功, 周廷强, 胡日成. 柔性支护结构主动土压力的变分计算方法研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(12): 3365 - 3370. [ CHEN Jianguo, ZHOU Tingqiang, HU Richeng. A variational method for calculating the active earth pressure on a flexible retaining wall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3365 - 3370. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 20 ] LANCELLOTTA R. Analytical solution of passive earth pressure[J]. *Géotechnique*, 2002, 52(8): 617 - 619.
- [ 21 ] LANCELLOTTA R. Lower-bound approach for seismic passive earth resistance[J]. *Géotechnique*, 2007, 57(3): 319 - 321.

编辑: 张明霞